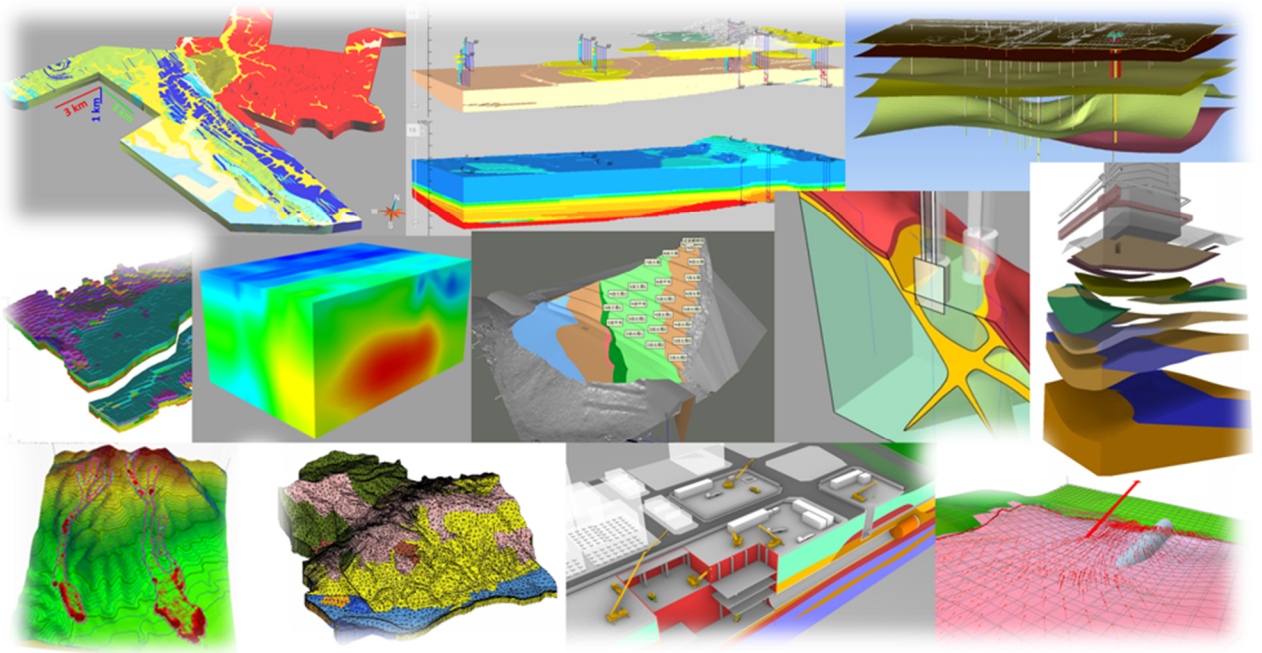


3次元地質解析マニュアル

Ver3.0



3D Geological
Analysis
Technology
Consortium



＜本書の構成＞

	Page
1章 はじめに	---- 7
2章 3次元地質解析技術とは	---- 17
3章 3次元地質・地盤モデルとは	---- 25
4章 品質管理の考え方	---- 53
5章 入力データの品質管理	---- 71
6章 3次元地質解析	---- 83
7章 成果品作成	---- 115
8章 おわりに	---- 127
＜参考資料＞	
【関連技術】	---- 131
【ユースケース】	---- 229
【地形地質事象毎のモデル化の留意点】	---- 293

1章 はじめに		6章 3次元地質解析	
1.1 用語定義	-- 8	6.1 データのクロスチェック	-- 84
1.2 本書の位置付けと対象者	-- 9	6.2 ドラフトモデリング	-- 87
1.3 技術の背景	-- 11	6.3 不適合の解消	-- 88
1.4 技術の適用範囲	-- 12	6.4 地質対比	-- 90
1.5 コンソーシアムの活動	-- 13	6.5 空間補間処理	-- 96
2章 3次元地質解析技術とは		6.6 補間パラメータ/ログの記録	-- 103
2.1 技術の位置付け	-- 18	6.7 補填データ作成	-- 105
2.2 技術の実行手段	-- 19	6.8 スケルトンモデル	-- 108
2.3 技術の課題	-- 21	6.9 モデルの妥当性	-- 110
3章 3次元地質・地盤モデルとは		6.10 モデルの仕上げ	-- 113
3.1 定義	-- 26	7章 成果品作成	
3.2 表現方法	-- 27	7.1 レンダリング	-- 116
3.3 利活用場面	-- 35	7.2 アノテーション	-- 118
3.4 成果品	-- 38	7.3 地質・地盤リスクの可視化	-- 120
3.5 モデル化の限界	-- 40	7.4 品質管理の記録	-- 122
3.6 モデル構築の難易度	-- 43	7.5 属性情報	-- 124
3.7 モデルの信頼性	-- 44	7.6 共有フォーマット	-- 125
3.8 積算の考え方	-- 49	7.7 オリジナルファイル	-- 126
4章 品質管理の考え方		8章 おわりに	
4.1 要求事項と成果品	-- 54	8.1 今後の課題	-- 128
4.2 ワークフロー	-- 57	8.2 今後の展望	-- 129
4.3 プロセスマップ	-- 59	<参考資料>	
4.4 モデリング計画	-- 61	【関連技術】	
4.5 解析領域	-- 62	R-T.1 3次元地質解析システム	-- 132
4.6 属性情報の継承	-- 64	R-T.2 レーザー測量	-- 198
4.7 地質・地盤リスクの継承	-- 67	R-T.3 UAV測量	-- 203
4.8 照査のタイミング	-- 68	R-T.4 地形解析図	-- 205
5章 入力データの品質管理		R-T.5 地表踏査	-- 209
5.1 品質管理の着目点	-- 72	R-T.6 物理探査	-- 211
5.2 地形データの品質	-- 74	R-T.7 地中レーダー	-- 212
5.3 ボーリングデータの品質	-- 76	R-T.8 数値解析	-- 215
5.4 図面データ等の品質	-- 78	R-T.9 機械学習の適用	-- 223
5.5 入力データの3次元化	-- 79	R-T.10 NURBS曲線法	-- 225
		R-T.11 岩相分布モデル構築	-- 227

【ユースケース】

U-B 事業対象別

U-B.1 土工	-- 232
U-B.2 トンネル	-- 235
U-B.3 ダム	-- 244
U-B.4 河川	-- 247
U-B.5 橋梁	-- 251
U-B.6 斜面防災	-- 255
U-B.7 地中熱利用	-- 261
U-B.8 土壌汚染	-- 264
U-B.9 地震基盤と工学的基盤	-- 269
U-B.10 データベース	-- 274

U-O 目的別

U-O.1 支持層	-- 280
U-O.2 岩盤分類	-- 285
U-O.3 アカウンタビリティ	-- 289
U-O.4 教育	-- 290

【地形地質事象毎のモデル化の留意点】

C-T 地形別

C-T.1 扇状地	-- 296
C-T.2 台地	-- 298
C-T.3 丘陵地	-- 300
C-T.4 山岳地	-- 302
C-T.5 急傾斜地	-- 303

C-G 地質別

C-G.1 軟弱地盤	-- 307
C-G.2 人工地盤	-- 314
C-G.3 沖積層	-- 315
C-G.4 活断層	-- 318
C-G.5 付加体	-- 325
C-G.6 地すべり	-- 327
C-G.7 表層崩壊	-- 333
C-G.8 岩盤崩壊	-- 335

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

1章 はじめに

[1.1 用語定義](#)

[1.2 本書の位置付けと対象者](#)

[1.3 技術の背景](#)

[1.4 技術の適用範囲](#)

[1.5 コンソーシアムの活動](#)

1.1 用語定義

3次元地質モデルと3次元地盤モデルの位置付け

本書では、3次元地質モデルと3次元地盤モデルを次のような位置付けで取り扱う(図1.1-1)。

【3次元地質モデル】

地質学的分類(層序学、堆積学、構造地質学、地史学、古生物学、岩石学、鉱物学、火山学など)により、その種類や分布を3次元空間に可視化したもの。

【3次元地盤モデル】

3次元地質モデルをベースに工学用途に応じた地質・土質調査結果により、地盤の物理・化学的特性を3次元空間に可視化したもの。

例えば、図1.1-1の上段は平野部の3次元地質・地盤モデルを、下段は岩盤斜面の3次元地質・地盤モデルを例示したものである。いずれも、左側の3次元地質モデルが作成されていないと、右側の3次元地盤モデルを合理的に説明できないことに留意が必要である。

本書において、3次元地質モデルと3次元地盤モデルを並列に扱う場合は、“3次元地質・地盤モデル”と記述する。“地質モデル”のように次元の表記が無い記述は、ボーリングデータの地質区分評価のような1次元モデル、地質平面図のような2次元モデルなどを含む広義のモデルを意味する。

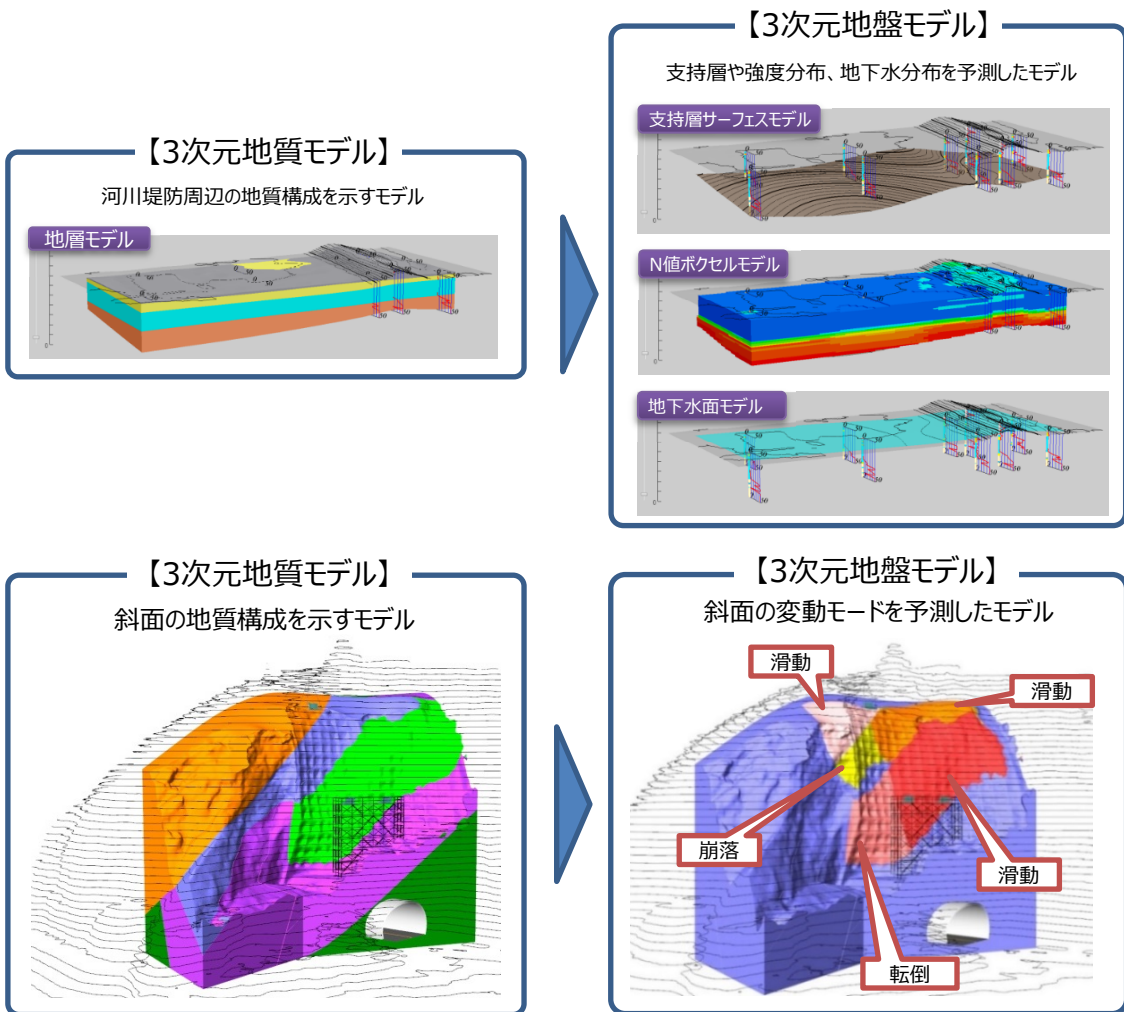


図1.1-1 3次元地質モデルと3次元地盤モデルのイメージ

1.2 本書の位置付けと対象者

本書の位置付け

本書のテーマである3次元地質解析技術は、3次元地質・地盤モデルを構築するための手段である。この技術を実現・支援するために様々なソフトウェアが存在している。

一方で、3次元地質・地盤モデルの品質基準や作成基準を定めたものは無く、モデルの品質と信頼性の確保は、地質技術者と事業者の判断に委ねられているのが現状である。

今後、BIM/CIMの普及・本格運用にて、品質の不確かな3次元地質・地盤モデルが流通してしまうと、地質解析技術のみならず、地質技術者、ひいては地質調査業界の信頼低下をも招く恐れがある。そしてこれは、当然ながらソフトウェアの機能・性能のみで解決できる問題ではない。

このような背景から、3次元地質解析技術を標準化する抜本的な枠組みの検討が急務であり、実務者による「3次元地質解析技術コンソーシアム」が設立された。本技術マニュアルはその活動成果の一つである。

本書では、土木地質調査により取得したデータの整理から3次元地質図(3次元地質・地盤モデル)の作成方法、その利活用方法やユースケースを紹介している。3次元地質・地盤モデルの方法論や品質評価には研究対象となる課題も多いため、本書では執筆時点でベターと考えられるものをとりまとめている。

この分野を取り巻く環境は日進月歩であり、本書で示した技術情報は、今後もユースケース分析や研究開発により更新されていくべきものとする。そのため、本書はバージョン管理にて発刊した。

なお、コンソーシアム設立前に「3次元地質解析技術の標準化コンソーシアム準備会」(以降、「準備会」)を立ち上げ、コンソーシアムにて取り組むべき内容を検討した。「準備会」において実施した実務者アンケートは、貴重な情報や意見が収集されており、その内容も本書では取りあげている。

本書の対象者

本書の対象者は3次元地質・地盤モデルに係る、次のような方々と考えている。

- ◆これから3次元地質・地盤モデルを扱う地質技術者
- ◆BIM/CIM対応等で3次元地質・地盤モデル作りを要求される地質技術者やICTオペレータ
- ◆3次元地質・地盤モデル構築に従事するプロフェッショナル
- ◆3次元地質・地盤モデルを利用するクライアント・設計・施工者

本書の構成

「1章」では、本マニュアルの位置付けや対象者、技術的背景、技術の適用範囲についてまとめ、コンソーシアムのスキームについて示した。

「2章」では、本書のテーマである3次元地質解析技術について、その目的・方法・適用範囲、必要な技術スキルや実行手段について述べた。

「3章」では、3次元地質・地盤モデルの定義と表現方法や種類、利用場面、成果品の種類を挙げ、一方で、3次元地質・地盤モデルを使用する上で注意すべきモデルの限界やモデル構築の難易度、信頼性の基準について示した。

「4章」では、品質管理の考え方について、地質調査に要求される事項と成果品を整理し、品質管理の一手法であるワークフローを提案した。また、3次元モデル構築に着手する前の計画や領域設定を十分に考えること、属性情報や地質・地盤リスク情報を継承する重要性、品質照査のタイミングを示した。

「5章」では、3次元地質・地盤モデル構築の材料である入力データについて、品質管理の着目点や地質モデルの基本となる地形・ボーリングデータ等の品質チェックを例示し、3次元地質解析に着手する直前までのデータ整理方法を示した。

「6章」では、3次元地質解析の具体的な方法や重要な視点について、ワークフローに沿って示した。

「7章」では、3次元地質・地盤モデルの成果品について、その表現方法を示し、品質管理の記録方法について提案した。

「8章」では、3次元地質・地盤モデル・3次元地質解析技術の今後の課題と展望についてまとめた。

「参考資料」には関連技術、ユースケース、地形地質事象毎のモデル化の留意点をまとめた。

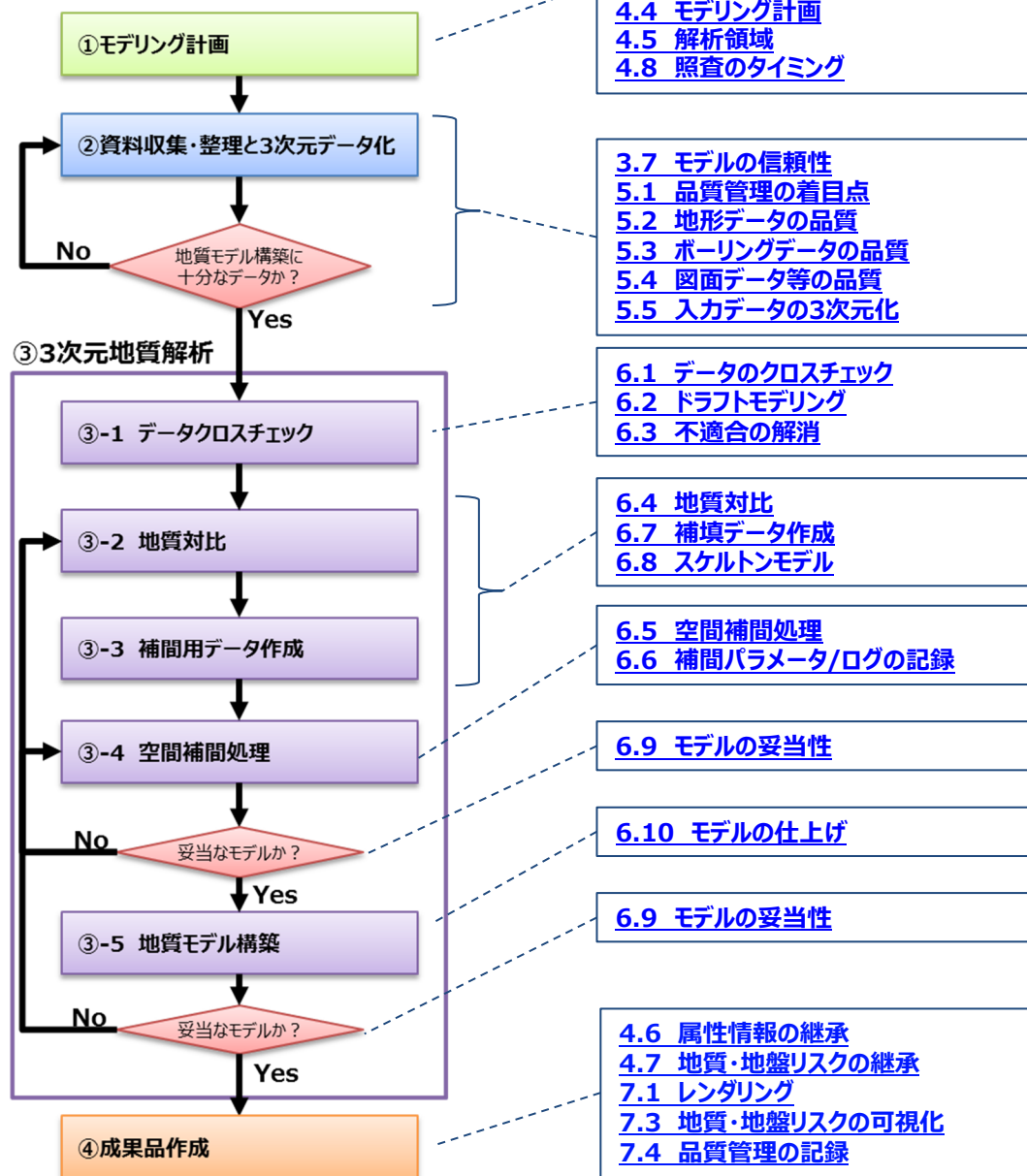
「関連技術」では、3次元地質・地盤モデルを作成する際に必要な技術ソフトの機能比較や機能紹介、関連する測量・調査技術を例示した。

「ユースケース」では、事業対象・目的毎に要求事項を整理し、3次元地質・地盤モデル構築の着目点を整理した。「地形地質事象毎のモデル化の留意点」では、地形・地質毎に、3次元地質・地盤モデル構築の留意点を整理した。

3次元地質モデル構築の基本ワークフローと本書の対応

3次元地盤モデルを構築するためには、3次元地質モデルが必要となる。そのため、本書では3次元地質モデルを構築する為の基本ワークフローを提案している(図1.1-1)。

ワークフローの考え方は「[4.2 ワークフロー](#)」に詳述する。各ステップの詳細については、下図に示す章・節を参照されたい。



※ワークフローの名要素の詳細は「[4.2 ワークフロー](#)」を参照

図1.2-1 3次元地質モデルワークフローと本書の構成

1.3 技術の背景

建設産業の動静と3次元技術の発達

建設産業は、少子高齢化に伴う労働力の減少、地域経済の活性化等、我が国が抱える様々な課題に直面している。業界を挙げて、BIM/CIM/i-Construction等の施策により、ICTを積極的に活用することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、より魅力的な産業へと変革する取り組みが進められている。

BIM/CIMにおいては、調査から設計、施工、維持管理、更新・解体まで属性情報を持つ3次元モデルを共有しながら改善を繰り返すことで、効率的な事業推進を可能にして費用対効果を最大化することを目標とする。我々を取り巻く環境は、従来のやり方から次のステップへと進み、新しい生産環境へと移行する変革期にあることを強く認識する必要がある。

事業分野における3次元地質・地盤モデルのニーズ

「準備会」では、3次元地質・地盤モデルを実際にどのように構築し活用されているかを把握するため、参加企業（18社）における利用実態のアンケートを実施した。

アンケートによると、3次元地質・地盤モデルを適用した事業実績は、トンネル・道路建設（124件）が一番多く、以下、資源・エネルギー関連（97件）、斜面防災（70件）となっている（図1.3-1）。

3次元地質・地盤モデルを構築した事業段階は「詳細設計」が最も多い（図1.3-2）。これは「詳細設計」の段階になると工費・工事に直接影響する地質・地盤リスクが顕在化し、検討すべき内容がクリティカルになるため、また、調査データが充実してモデル化に利用できる内容を持つデータが揃うためと考えられる。

ニーズの違い

ここで 事業分野上位となる「トンネル・道路建設」と「資源・エネルギー関連」の二つに着目する。

前者は、トンネルであれば坑口斜面問題、湧水・地下水問題、切羽の安定、自然由来重金属等、道路であれば切土法面、盛土の安定等の地質・地盤リスク解消・軽減等を目的に地質調査が実施される。しかし、一般にトンネルは長大な施工規模に対して十分な調査量を確保することが困難な事業である。事前の地質調査結果による「設計施工上の留意点」は参考に留められ、施工時によりややく詳細な地質情報（先進ボーリング、切羽前方探査、切羽地質観察等）が得られ、地質・地盤リスクに対する具体的な対応に遅れをとる場面が少なくない。

道路事業では詳細設計や施工が始まってから発現する地質・地盤リスク（斜面変動、基礎沈下等）に直面した際に、対策検討目的で地質調査を行う場面が多い。これらのトンネル・道路建設事業における3次元地質・地盤モデルの利活用は、地質・地盤リスクの顕在化に応じ利用せざるを得なくなる“対処療法型”といえる。

後者は、石油プラント、各種電力施設、エネルギー開発等が対象であり、シビアな設計を要求されて地質調査量も必然的に多くなる。そのため、事業者側は膨大な地質情報を有効に活用しようとする意識が高い。このような状況における3次元地質・地盤モデルの利活用は、事前に地質・地盤リスクの有無や規模・影響を想定し設計・施工に利活用する“先行投資型”といえる。

以上の「対処療法型」と「先行投資型」は対極的なニーズであり、建設事業の種類によって3次元地質・地盤モデルを利活用する動機、タイミングや目的等に違いがあることに留意すべきであろう。

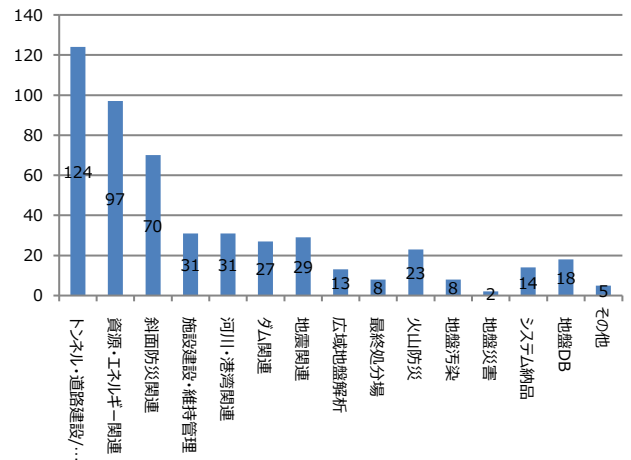


図1.3-1 3次元地質・地盤モデルを適用した事業（500件）の内訳¹⁾

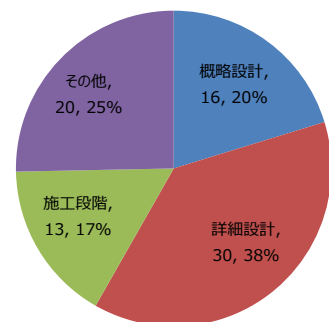


図1.3-2 3次元地質・地盤モデルを適用した事業段階（全79件）¹⁾

1.4 技術の適用範囲

土木地質図と3次元地質・地盤モデル

建設事業で利用される土木地質図は、土木事業に精通した地質技術者(土木地質技術者)が、3次元的思考で地質解析を行い作成した“2次元地質・地盤モデル図面”である。土木地質図の質は、地質情報の収集・整理・調査・分析・検討・評価する土木地質技術者の能力・経験的視点と、図化するための3次元的思考、および作図技術に依存する。

3次元地質解析はICTを活用して3次元土木地質図を作成する手段と捉えられるが、地質構造を考える本質は従来法と変わるものではない。3次元地質・地盤モデルを作成する際も、土木地質図と同様に地質の成り立ち・分布・強度等の性質変化を説明できるレベルの地質情報と、地質学的・土木工学的思考が必要となる。

技術の適用範囲

地質情報を扱ううえで、地質生成プロセスの不連続性と、限られた情報に基づく推定作業等がもたらす不確実性は避けられない。学術的評価が定まっていないものもあり、例えば、新たな研究成果により、地質のグルーピングや分布構造の根本的な考え方が変わることもあり得る。そのため、地質情報を工学的評価に用いる際は、不確実性がある前提で扱われる。

3次元地質解析技術は、これらの不確実性を理解したうえで慎重に適用されるべきである。

技術のニーズと発展への期待

地質調査は建設事業の流れにおいて、どの段階においても切り離せない要素である。事業の進展に合わせて地盤情報の量と質が増え、地盤の不確実性は解消されていく。これは、詳細な地質調査を実施して始めて、不確実性の程度と地質・地盤リスクが明らかになるためである(図1.4-1)。

一方で、公共事業予算の縮小やインフラの老朽化から、今後の建設事業は設計・施工から、維持管理や更新・解体に軸足を移していくことが予想される。このような変化は、事業予算配分も絡み、地質調査に要求される品質や、地質調査事業者の競争にも影響を与えると考えられる。

BIM/CIMの目指すものは建設生産プロセスにおける情報の共有・有効活用による費用対効果の最大化である。その障害になり得る地質・地盤リスクが存在する場合は、一定の品質で構築された3次元地質・地盤モデルをすべての関係者で共有することは、事業に与えるメリットが大きいと考えられる。地質調査成果を有効に反映する3次元地質・地盤モデルが構築できるとすれば、それは、すべての建設事業段階において貢献できる可能性がある。

BIM/CIM/i-Constructionによる建設事業の高度情報化も追い風に、今後、3次元地質解析技術のニーズが増えたと考えられる。3次元地質解析技術を建設事業のライフサイクル全体に貢献できる技術に成長させ、事業変化をも見据えて適用事業の拡大を図る必要がある。

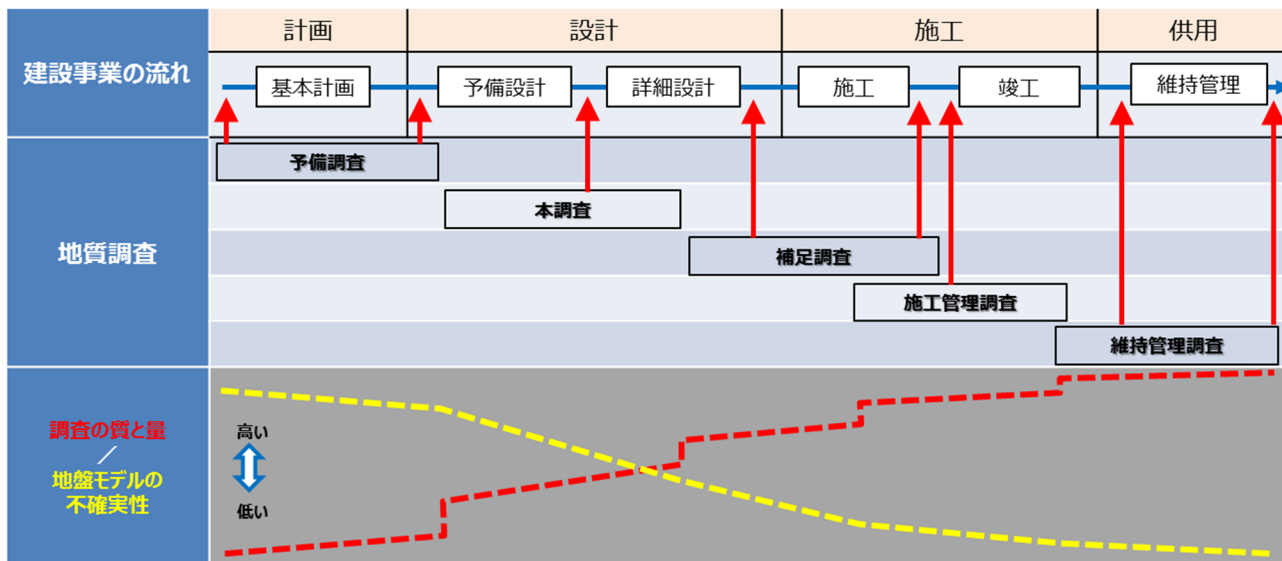


図1.4-1 建設事業の流れに対する地質調査²⁾の進記

1.5 コンソーシアムの活動

活動目的

本コンソーシアムは、3次元地質解析技術の品質向上に取り組むとともに、技術普及と事業拡大を図ることを目的として、全国地質調査業協会連合会が支援する「新マーケット創出提案型事業」の枠組みの中で2017年2月に設立された。

本コンソーシアムの設立は、国土交通省の提唱するBIM/CIM/i-Constructionが大きな契機であるが、これに留まらず、一般的な建設事業の効率化・高度化にも本技術を寄与させ、建設関連業を支援するとともに、ビジネス展開や適正な競争を生み出し、技術の裾野を広げることも目標とした。

下記に「準備会」で取りまとめた提言を示す。これらが本コンソーシアムの大きな枠組みである。

コンソーシアムの活動内容

本コンソーシアムではワーキングを設置し、下記の内容について検討した。

- ◆3次元地質解析技術の情報収集・整理/評価/検討/改善/開発
- ◆技術有用性検証/提案
- ◆品質評価指標検討/提案
- ◆技術認定制度検討/提案

また、本技術の適用範囲拡大により、3次元地質・地盤モデルのデータ交換をおこなう場面が増えることが想定される。技術的に閉じたものでは、データ交換や属性継承に支障が生じる恐れがあるため、データフォーマットをオープンにした3次元地質・地盤モデリング入門ツールや属性情報入力ツールの開発も試みた。

「準備会」による3次元地質解析技術の提言¹⁾

【提言 1：3次元地質解析技術の将来像を作る】

3次元地質解析技術は、CIM/i-Constructionによる建設事業の高度情報化によって、ニーズの増加が見込まれる。さらなる当該技術の利用拡大を目指すには、この技術を建設事業のライフサイクル全体に貢献できる技術に昇華させ、新たな視点で事業を創出する必要がある。そのためには、3次元地質モデルの有用性を証明し、安定した供給体制の構築や当該技術の将来像を見据えた取り組みが必要である。

【提言 2：3次元地質解析技術を普及させる】

3次元地質解析は、ICTの発達により地質技術者にとってリーズナブルな技術となりつつあり、地質の複雑な我が国において地質・地盤リスクの対応（排除・回避・低減・共有・保有等）を支援するために有用な技術になることが期待されている。当該技術の有効性・必要性を積極的に発信し普及させるためには、技術マニュアルや品質基準書の作成、技術教育、専用ソフトウェアの適用性評価が不可欠である。また、3次元地質解析を適切に実施できることを担保する資格が現時点では存在しないため、専用の技術資格制度の必要性について検討する必要がある。

【提言 3：3次元地質解析技術の信頼性を向上させる】

3次元地質モデルの具体的な作成方法や品質管理・妥当性評価は、用途・要求レベルも様々ななかで、現状では経験的手法や作成者・利用者の主観に依存している。さらに、3次元地質解析技術には多くの問題・課題が存在し、3次元地質モデルの品質が一定にならない要因となっている。このような不安定な状況は望ましいことではなく、問題・課題を可能な限り解決し、品質が確保され要求性能を満たす3次元地質モデルを安定して供給できる仕組み作りが必要である。

【提言 4：3次元地質解析技術を標準化する】

3次元地質解析技術を普及させ、品質の確保された3次元地質モデルを安定供給するためには、3次元地質モデルに係るデータの整理・分類方法から品質管理、ワークフロー、モデルの評価、表現、再利用方法等を検討し、これらを取りまとめた技術マニュアルや品質基準書の整備が必要である。これらを整備するためには、3次元地質モデル構築の基本となるフレームワークと従来の土木地質図作成法との共通点や相違点を整理・分析するとともに、地質事象個々を3次元モデル化する際の着目点や方法論等について検討し、3次元地質解析技術を標準化する必要がある。

技術普及活動

コンソーシアムの活動として、2018年から2020年に3次元地質解析技術のセミナーを3回開催した。第1回セミナーは次の第2回セミナーを一般公開するための予行演習的な位置付けとし、2018年10月にコンソーシアム参加企業のみで公開する形で開催した。

第2回セミナーは「3次元地盤モデリング技術セミナー2019」の名称で国土交通省の後援により、全地連とコンソーシアムの共催で2019年6月26日に一般公開で開催した(表1.5-1、写真1.5-1～1.5-3)。第1回セミナー後の意見より、講演テーマを3次元地質・地盤モデルの利活用と3次元地質・地盤モデルの技術的展望に絞った。また、第1回セミナーで発表したポスターについて投票をおこない、6編の口頭発表と23編のポスター発表、バンダー5社の技術紹介、および、技術展示を実施した。

第3回のセミナーはコロナ禍の影響で会場での開催は中止し、コンソーシアムのWEBサイト上でのWEBセミナーとして、国土交通省の後援により、全地連とコンソーシアムの共催で開催した。WEBセミナーでは、39編のポスターと3次元地盤モデリングガイドブック等を公開した。

表1.5-1 「3次元地盤モデリング技術セミナー2019」のプログラム

Time	プログラム	
12:30	開場	
13:00	ガイダンス (5分)	
13:30	講演 I : コンソーシアム活動報告 (20分) 質疑応答 (5分) 西山昭一 (応用地質(株)) : コンソーシアム事務局	
13:30	講演 II : 3次元地盤モデルの利活用 (各15分)	ポスター/バンダー 展示
14:30	II-1 : 地すべり地質調査におけるすべり面の3次元化と業務での活用例 片山 輝彦 ((株) アソノ大成基礎エンジニアリング)	
14:30	II-2 : シンガポールにおける広域3次元地質モデリング 安田鶴広 (基礎地盤コンサルタンツ (株))	
14:30	II-3 : 道路新設工事における3次元地質モデル作成事例 佐々木由希 (国際航業(株))	
14:30	II-4 : 孔井データと3次元物理探査データを用いた地質モデルの構築手順と岩相分布モデル構築事例の紹介 根本欣典 ((株)地球科学総合研究所)	
14:30		ポスター展示 (コアタイム1)
15:00	講演 III : 3次元地盤モデル構築技術 (50首題 各12分)	ポスター/バンダー 展示 (コアタイム2)
16:00	III-1 : アサヒ地水探査株式会社	
16:00	III-2 : 応用地質株式会社	
16:00	III-3 : 五大開発株式会社	
16:00	III-4 : ジーエスアイ株式会社	
16:00	III-5 : 地層科学研究所	
16:00		ポスター展示 (コアタイム3)
16:30	講演 IV : 3次元地盤モデルの技術的展望 (各15分)	ポスター/バンダー 展示
17:00	IV-1 : 最近の地層学の研究成果から明らかにされた地層境界面の形状 櫻井啓生 (ハイテック(株))	
17:00	IV-2 : 3次元地質解析は簡単にできます、か? 松本俊雄 ((株)九州地質コンサルタント)	
17:00	講演 V : クローズドセッション	
17:30	総合質疑応答	



写真1.5-1 講演状況

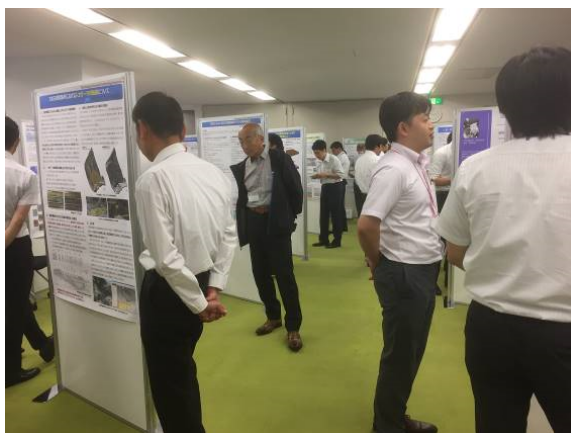


写真1.5-2 ポスターセッション状況



写真1.5-3 バンダー展示状況

コンソーシアムのメンバー

コンソーシアムの参加企業を表1.5-1に示す。現段階で40社がコンソーシアムの活動に参画した。各社1～6名の検討メンバーが情報共有クラウドサービスや全体会議の場を利用して前記の活動をおこなった。また、各社1～2名の執筆者が分担して本マニュアルを執筆した。

表1.5-1 コンソーシアム第3期※の参加企業と検討メンバー（2020年9月時点）

参加企業	執筆者	検討メンバー
アサヒ地水探査（株）	佐藤 瑞穂	佐藤 瑞穂, 鈴木 智広, 川上 俊介
（株）アサノ大成基礎エンジニアリング	片山 輝彦	片山 輝彦, 大森 将樹, 鎌田 佳苗
（株）アバンス		山下 隆之, 梅崎 基孝, 宮崎 康平
（株）荒谷建設コンサルタント	稲村 啓志,	稲村 啓志, 早水 真洋, 岸本 剛
（株）エイト日本技術開発	齋藤 晴紀	渡辺 俊一, 齋藤 晴紀
（株）愛媛建設コンサルタント	吉岡 崇	吉岡 崇, 田窪 裕一, 佐々木 誠
応用地質（株）	西山 昭一, 星野 耕一	井出 修, 西山 昭一, 佐々木 達哉, 和田 里絵, 星野 耕一
川崎地質（株）	原 晴彦	原 晴彦, 榊原 信夫, 古谷 充史
川田テクノシステム（株）	豊田 純教	豊田 純教
基礎地盤コンサルタンツ（株）	安田 智広	安田 智広, 大出 悟, 野口 ゆい
（株）九州地質コンサルタント	松本 俊雄	松本 俊雄, 肘井 敬明, 柏原 昇
興亜開発（株）	梅津 幸治, 阿部 裕寛	梅津 幸治, 阿部 裕寛
国際航業（株）	岸本 圭	岸本 圭, 中原 毅, 武田 開
五大開発（株）	山森 一彦, 関家 史郎	山森 一彦, 関家 史郎, 崔 伶準
サンコーコンサルタント（株）	向井 理史	向井 理史
（株）シアテック	眞鍋 泰徳	眞鍋 泰徳, 乗松 宏一
ジーエスアイ（株）	豊田 守	豊田 守, 浪久 信, 水野 将志
（株）相愛	岸 孝司	岸 孝司, 山内 健, 篠原 貴紀
（株）ソイル・プレーン	石黒 創	石黒 創, 浴坂 公博
（株）ソーゴーギケン	門河 良典	門河 良典, 水谷 功
（株）ダイヤコンサルタント	木村 仁	木村 仁, 小島 佑季彦
（株）地球科学総合研究所	原 彰男	原 彰男, 影島 充万, 根本 欣典
（株）地層科学研究所	富永 英治	富永 英治, 天野 大和, 森田 豊, 福田 泰志, 河原 文明
中央開発（株）	王寺 秀介	王寺 秀介, 大西 徹夫
（株）テクノ長谷	千葉 俊弥	千葉 俊弥
（株）東京ソイルリサーチ	水江 邦夫	水江 邦夫, 西村 祥
東邦地水（株）	寺地 啓人	寺地 啓人, 藤原 聡
（株）日さく	堀 信雄	堀 信雄, 鮑 沁
（株）日本地下探査	徳安 真吾	徳安 真吾, 菊池 竜之介, 高山 晃平, 安藤 大
日本物理探査（株）	都築 孝之	都築 孝之, 橋本 直幸
ハイテック（株）	櫻井 皆生	櫻井 皆生, 武田 伸二
（株）バスコ	小俣 雅志	小俣 雅志, 下村 博之, 渋谷 典幸
（株）復建技術コンサルタント	奈倉 弘	奈倉 弘
芙蓉地質（株）	菅野 智樹, 宮崎 基浩	宮崎 基浩, 菅野 智樹, 原澤 剛史, 畑中 孝明
八千代エンジニアリング（株）	江田 充志, 磯村 敬	江田 充志, 磯村 敬

事務局

応用地質（株） 井出 修, 西山 昭一, 佐々木 達哉, 和田 里絵, 星野 耕一
 第1期※協賛（株）東建ジオテック, 長崎テクノ（株）, （株）北社地質センター
 第2期※協賛 戸田建設（株）, （株）ワールド測量設計

※第1期活動期間：2017年2月～2018年2月、第2期活動期間：2018年7月～2019年6月
 第3期活動期間：2019年9月～2020年12月

参考文献

- 3次元地質解析技術の標準化コンソーシアム準備会 .報告書. 2016.
- 一般社団法人 全国地質調査業連合会. “改訂地質調査要領”. 2013.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

2章 3次元地質解析技術 とは

[2.1 技術の位置付け](#)

[2.2 技術の実行手段](#)

[2.3 技術の課題](#)

2.1 技術の位置付け

3次元地質解析技術の目的

3次元地質解析技術は、3次元空間の電子データとして3次元地質・地盤モデルを構築するための手段であり、一連の作業プロセスを伴うものである(図2.1-1)。土木建設事業の実務において、計画/調査/設計/施工/維持管理に利用する目的で適用される。従来は土木地質図がこの目的に利用される。

土木地質図作成法と3次元地質解析技術は、用いる手段がアナログからデジタルに変化したものとも言えるが、3次元地質解析技術の適用には本書で示す様々な注意やテクニックが必要である。

3次元地質解析技術の方法

3次元地質解析技術は、3次元地質解析システム等の専用ソフトウェアを駆使して実行される。生成過程の異なる多種多様な地質事象の性質を理解したうえで、地形を判読し地質情報を読み解き、事業目的や地質事象・現象等の着目点により、データを分類・構築する知識や解析技術が不可欠である。加えて、電子データの種類と構造への理解、専用ソフトウェアの仕組みや操作の習熟も必要になる。

3次元地質解析技術の適用範囲

土木地質図の作成過程からその利用までの流れを図2.1-2に示す。3次元地質解析技術が適用可能なのは、図に示す地質調査情報の整理、地質情報のモデル化・図化、地質図の解釈・工学的判断の流れにおいて、地質情報処理や3次元モデル化が必要な範囲である。

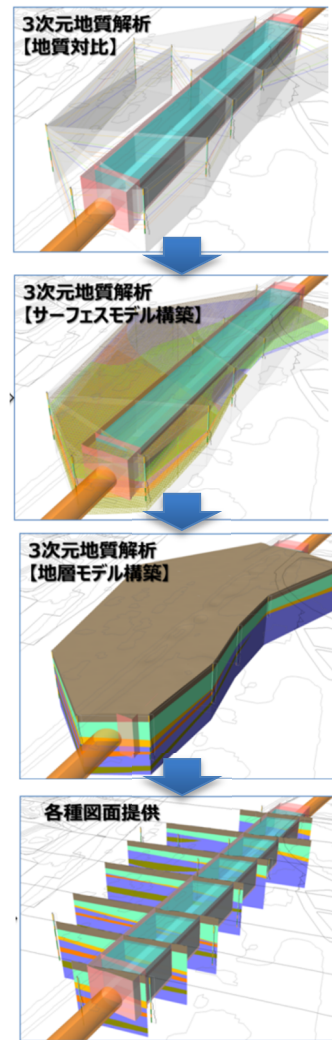


図2.1-1 3次元地質解析の作業イメージ

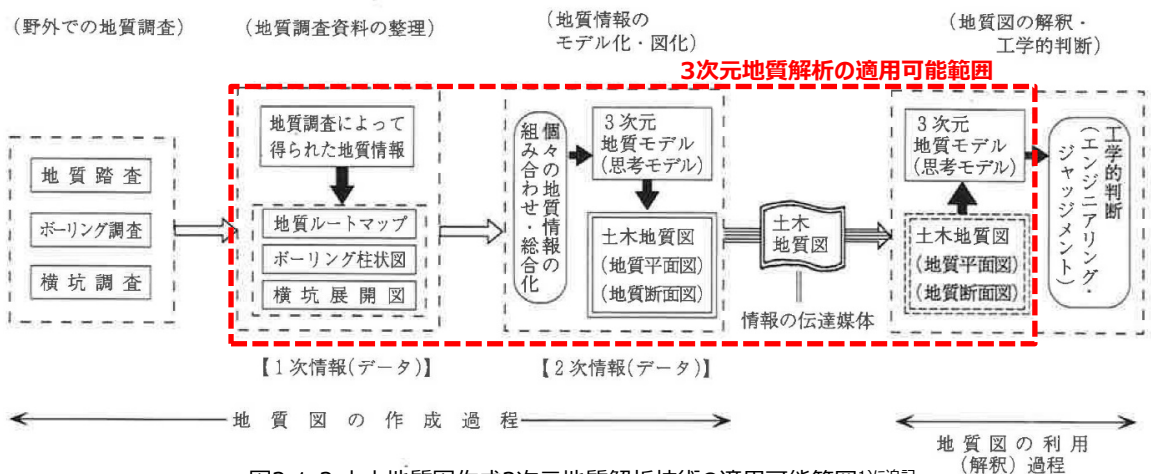


図2.1-2 土木地質図作成3次元地質解析技術の適用可能範囲¹⁾に追記

2.2 技術の実行手段

3次元地質解析技術のスキル

3次元地質解析技術を遂行するために必要なスキルは、土木地質図を作成できる地質技術と、ICTを用いる情報処理能力と考えられる(表2.2-1)。

準備会アンケートによると、3次元地質・地盤モデル構築作業は、地質関連の技術資格を持つ技術者自らが実施する場合が多く、次に、地質技術者の監督・監修により情報専門職員やCADオペレータが作業を担当することが多い(図2.2-1)。

表2.2-1 3次元地質解析技術に必要なスキル

種類	内容	
地質技術スキル	地質判定技術	・地質学的思考/知識 ・地形地質判読技術
	土木地質技術	・地質工学的思考/知識 ・地質・地盤リスクを判断・評価できる能力
	地質図化技術	・基本地質図学 ・土木地質図作図技術
情報処理スキル	基本情報処理知識	
	地質情報の理解	
	CADや関連ツールの機能/性能への理解	
	3次元空間把握能力	
	3次元の情報処理技術の理解/習得	

3次元地質解析技術の実行手段

3次元地質解析技術の実行にはPC環境(ソフトウェア/ハードウェア)が不可欠である。近年、ソフトウェアの進化やPCの性能向上に応じてモデル化規模の拡大や、表現できる地質事象が増えてきている。専用ソフトウェアも安価なものやフリーソフトが増え、技術者にとって利用環境が整い選択の幅も広がっている(図2.2-2)。

一方で、このような利用環境変化に伴い、スキル取得するための新たな教育・訓練の問題が生じる。専用ソフトウェアは、高機能であるがゆえに習熟に時間が必要なもの、個別機能は優れているが、対応できる地質事象への適正があるもの等一長一短がある。個々の性能不足をカバーするために複数のソフトウェアを使い分けている場合も少なくない。

選択の幅が拡大するがゆえに、専用ソフトウェアについては、モデル化の対象や利用目的を念頭に置いた適用性評価が必要と考えられる。主な専用ソフトウェアの具体的な機能・性能比較は「[R-T.1 3次元地質解析システム](#)」で詳述する。

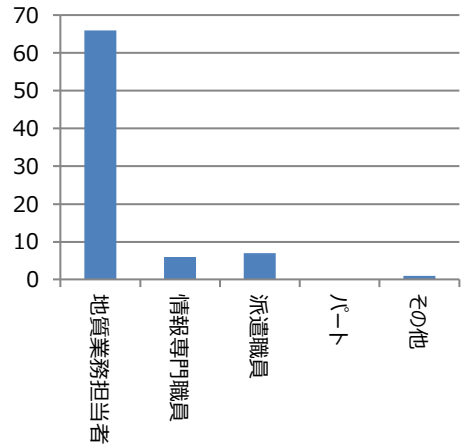


図2.2-1 3次元地質・地盤モデル構築担当者の役割²⁾ (全80件)

3次元地質解析技術に資格は必要か？

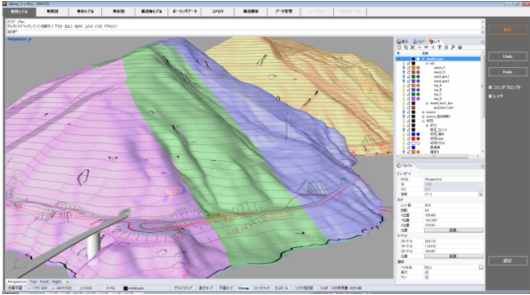
“製品”について一定の品質を確保するためには、安定供給するためのチェックシステムや、品質の責任を担保する仕組みが必要である。技術資格制度はその一つとなる。

現状、地質情報を扱う資格としては地質情報管理士がある。しかし、地質情報管理士は3次元地質・地盤モデリングの知識・経験は基礎的なものを要求するのみで、地質・地盤モデルをどのように考えて構築するかはスキルはまだ評価できない。

地質・地盤リスクに関わる既存資格としては、技術士、RCCM、地質調査技士、地質・地盤リスク・エンジニア(GRE)がある。しかし、これらの資格では3次元地質解析の情報処理スキルに対応することは困難である。

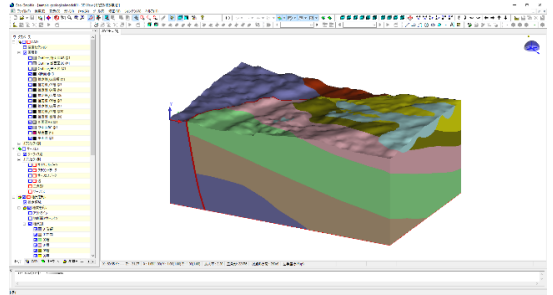
技術資格を3次元地質・地盤モデルの品質確保手段の一つとして捉えるならば、3次元地質解析の専門的な内容に対応できる技術認定制度や資格制度の創設が望まれる。さらに、技術認定や資格による保証と継続教育により、3次元地質・地盤モデルの品質を担保することが望ましいと考えられる。“3次元地質解析技術の資格・技術認定制度”については、今後検討を深めるべきである。

少なくとも、専門性が必要な技術であるので、相応の資格を持った技術者が扱うか監督するべきものと考えられる。



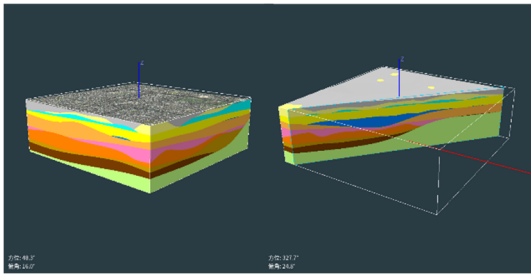
GEO-CRE

<https://www.ooyogeotools.com/>



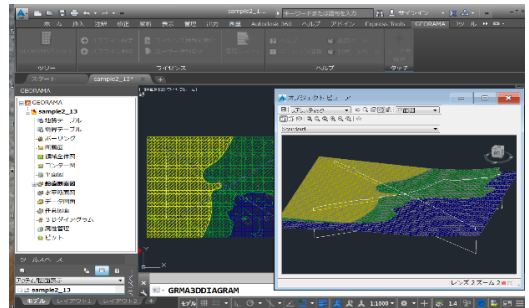
Geo-Graphia

<http://www.geolab.jp/geo-graphia/>



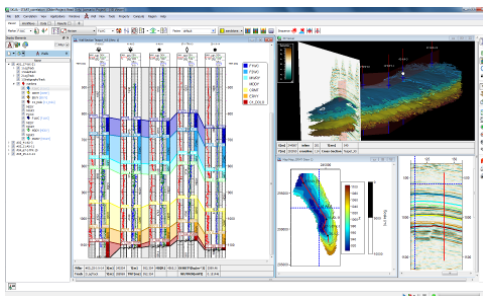
Geomap3D

<https://www.gsinet.co.jp/geomap3d/>



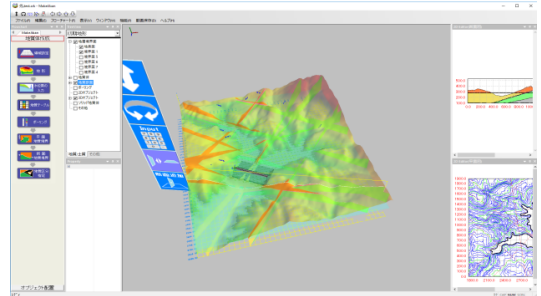
GEORAMA

http://www.engineering-eye.com/GEORAMA_CIVIL3D/index.html



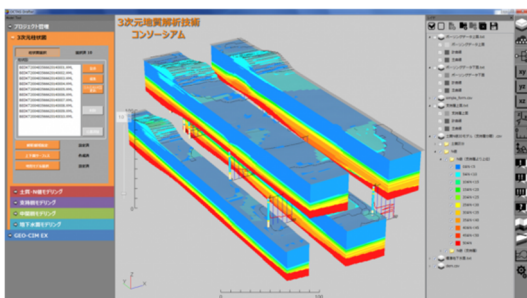
GoCAD

<http://www.pdgm.com/products/gocad/>



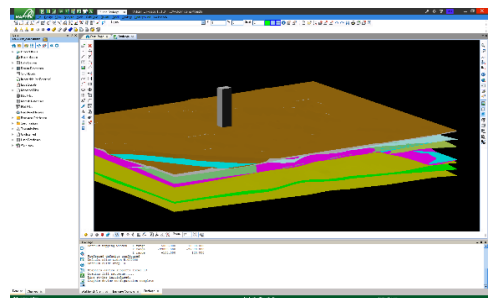
MakeJiban

<http://www.godai.co.jp/soft/product/products/MakeJiban/index.htm>



OCTAS Drafter

<https://www.3dgeoteccon.com/octas-drafter>



VULCAN

<http://www.maptek.com/products/vulcan/>

図2.2-2 3次元地質解析システムの事例
(URLは2020年9月時点)

2.3 技術の課題

3次元地質・地盤モデルと土木地質図

3次元地質解析技術と土木地質図作成法は、基本とする地質学・地質工学の規則・構造/思想に本質的な違いはない。

土木地質図の持つ課題を明らかにすることで、3次元地質解析技術の課題も明確になり、改善・改良すべき点が見つけやすくなると考えられる。本節では、土木地質図を作成する視点から、3次元地質・地盤モデルの課題について考察する。

土木地質図の要求性能

地質図は合理的な地質調査(地形判読、既存資料分析、露頭観察、各種物理・化学試験、現場計測等)に基づく統合的考察により、導き出されるものである。地質調査の性能基準は日本地質学会により「地質標準」として示されている(3章の表3.8-3~12に示す)。地質図の要求性能は、客観性/再現性/更新性/拡張性/適合性/柔軟性とされる(表2.3-1)。

土木建設事業では地質の工学的性質と分布情報、および地質・地盤リスク情報を要求する。地質分布性状を示す土木地質図には、地質図の要求性能に加えて、工学的判断に用いることができる正確性を持つことも重視される(表2.3-2)。

しかし、この要求性能自体が土木地質図に課せられた課題でもある。事業における地質調査は、事業にて定められた予算・事業期間・必要精度・安全率等が前提となるため、上記の全性能を満たさなくても十分である場合や、逆に、事業予算・期間に縛られ、調査自体が困難なこともある。

表2.3-1 地質図に求められる性能³⁾

客観性	どのようなデータを用いたかがわかり、データの密度や充足度等で地質図の信頼性を客観的に確認できる。また、どのような方法を用いて作成したか誰でもわかる
再現性	同じデータで同じ地史の解釈なら何度でも、また、誰でも同一の地質図が再現できる
更新性	データの追加や削除、および修正に対応し、それらを反映した新しい地質図に更新できる
拡張性	隣接する地域へ地質図を拡張できる。また、隣接する二つの地域の地質図を接続できる
適合性	基図となる地形図(モデルの場合はDEM等)の縮尺の変化に適合した地質図が作成できる
柔軟性	問題解決のために広範囲に利用できる

既存資料の整理と統合

土木構造物等の対象に対して統一的な見解の地質学的解釈と、地盤工学的に有意なデータをモデル化することが重要である。しかし、既存資料は、調査目的や調査年度、調査会社および個人の技術力の違いにより、その視点や記載内容が変わる。

土木地質図は、入力データである地質調査情報を解釈することにより推定したモデルであるため、不確実性を含むことは避けられない。不確実性を低減させるため、入力データは統一的解釈に基づく地質情報でなければならない。

これらを認識し、3次元地質解析に供する資料とするためには、十分な資料の整理(吟味)・統合をおこなう必要がある。

表2.3-2 地質学的図面と地質工学的図面の違い¹⁾

	土木地質図	一般の(研究過程における)地質図
地質図の作成目的	土木構造物等の設計・施工に際し、適正な工学的判断を下しうる基礎資料の提供	特定地域の地質現象理解のため、その一環としての地質基礎資料の提供
地質調査の主な手段	地表地質踏査 ボーリング調査 横坑調査 } 等を組み合わせる	主として地表地質踏査による
表現される地質図の縮尺	一般に大縮尺が多い (s=1/1,000~1/200)	一般に小縮尺が多い (s=1/50,000~1/25,000)
地質図の公表の有無	一般には公表されないことが多い	学術誌等で公表されることがある
情報を伝達するうえでの地質図の作成と表現のポイント	工学的特性で特徴づけられる個々の地質体の正確な分布、正確な内容の表現	地質体間における正確な相互関係(時間的・空間的関係)およびその解釈の表現
調査・作成・表現時の客観性と個人的主観の程度	調査・作成・表現のすべての段階でできるかぎり客観的な立場をとることが要求される。	調査・作成・表現のすべての段階でできるかぎり客観的な立場をとるべきであるが、解釈上、個人的主観(フィロソフィー)を多少含めて表現されることもある
地質図の作成者と利用者	地質図の作成者と利用(解釈)者は異なることが多い。ただし、利用者はかなり限定される。	地質図の作成者と利用者が異なることもあるが、作成者自身が再びそれを利用することも多い。ただし、利用者は一般に不特定多数である。

地形・地質プロセスの理解

地形や地質は長い年月をかけ、様々な力学・化学プロセスを経て現在の姿を形成している。適切な地質モデルを構築するためには、現地形・古地形や各地質の形成プロセスを十分理解しておく必要がある。

これらを十分理解した上で地質解析を行わないと、実態とはかけ離れた土木地質図となる。もちろん、3次元地質・地盤モデルの場合も同様で、非現実的なモデルとなる。

地形や地質の形成プロセスを適切に読み解くためには、地質技術者が日頃より、地形や露頭、ボーリングコア等のフィールドデータに対する観察力と記載力を高める努力が必要である。

“見える化”の問題

3次元地質・地盤モデルで“見える化”されたデータは、「対象構造物と地盤の相互関係が3次元で把握し易くなる」、「素人目にもわかりやすく、速やかな合意形成に役立てられる」等のメリットがある。

その反面、見た目のわかりやすさがゆえに、地質技術者の手を離れてしまった時点では、見えない問題は置き去りにされ、そのモデルが保有する信頼性や不確実性は“見えにくくなる”のが現状である。モデルの信頼性や不確実性も適切に“見える化”する必要がある。

モデル化によって「地質学・地質工学の本質を見失わない」、「第三者をミスリードしない」ように留意しながら、一次データの観察・取りまとめ技術の向上を基礎に、適切な3次元地質解析を行わなければならない。

3次元地質・地盤モデルの技術スキル

3次元地質・地盤モデルは従来図化されていなかった空間(断面図間)にもモデルを分布させることになる。そのため、従来の地質解析で2次元断面上だけでの補間で済ませていたような地質構造も、3次元空間において2次元断面図等の作成思想と矛盾の無い形であることが求められる。

一方で、単純に地質境界等の座標データがあれば地質モデルができるわけではなく、機械的な補間で対応しにくい形状になることが少なくない。これを補正するために、地質モデルの形状をコントロールする補填データの作成も必要になる。

3次元地質・地盤モデルを作るルールやテクニックの考え方は、従来の地質解析を踏襲するものであるが、ソフトウェアの機能を利用して実行するものであるため、より幅広く柔軟なスキルが必要になる(「[6章 3次元地質解析](#)」にて詳述する)。

3次元地質・地盤モデル利用のメリット・デメリット

3次元地質・地盤モデルのメリット・デメリットについては、表2.3-3にまとめられる。デメリットで示すように、土木地質図と同程度の情報(図2.3-1)を3次元地質・地盤モデルで伝えるには限界がある。3次元地質・地盤モデルは、伝えなければならない情報を取捨選択し、効果的に利用されるべきものと考えられる。なお、3次元地質・地盤モデルの限界は「[3.5 モデル化の限界](#)」にて詳述する。

表2.3-3 3次元地質・地盤モデルのメリット・デメリット

メリット	デメリット
<ul style="list-style-type: none"> ・3次元空間を2次元の図面を駆使して表現してきたものが、本来の姿(3次元)として表現することで、より直感的な理解を得ることができる ・対象構造物と問題になる地質構造等の関係が把握しやすくなる ・数値解析用モデル・設計用モデルの構築等が容易になる ・様々な見せ方ができる表現力を持つ ・データ管理が容易になる ・図面では扱いにくい情報(時間軸等)を効率的に扱える ・複数パターンのモデル(地質・地盤リスクの面でいう楽観的・悲観的地質図等)を短時間で作り得る可能性を持つ 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元地質・地盤モデルには、従来の土木地質図にみられる曖昧さ(指交関係、実データの分布範囲外のぼかし等)を表現することが難しい ・モデルは推定によるので既知点から離れるほど不確実が高くなる ・モデルの着目点によって切り捨てられるものが存在する ・要求事項や着目点により同一の対象から異なるモデルが得られる ・情報の受け手と発信者にモデルを解釈する基準が必要となる

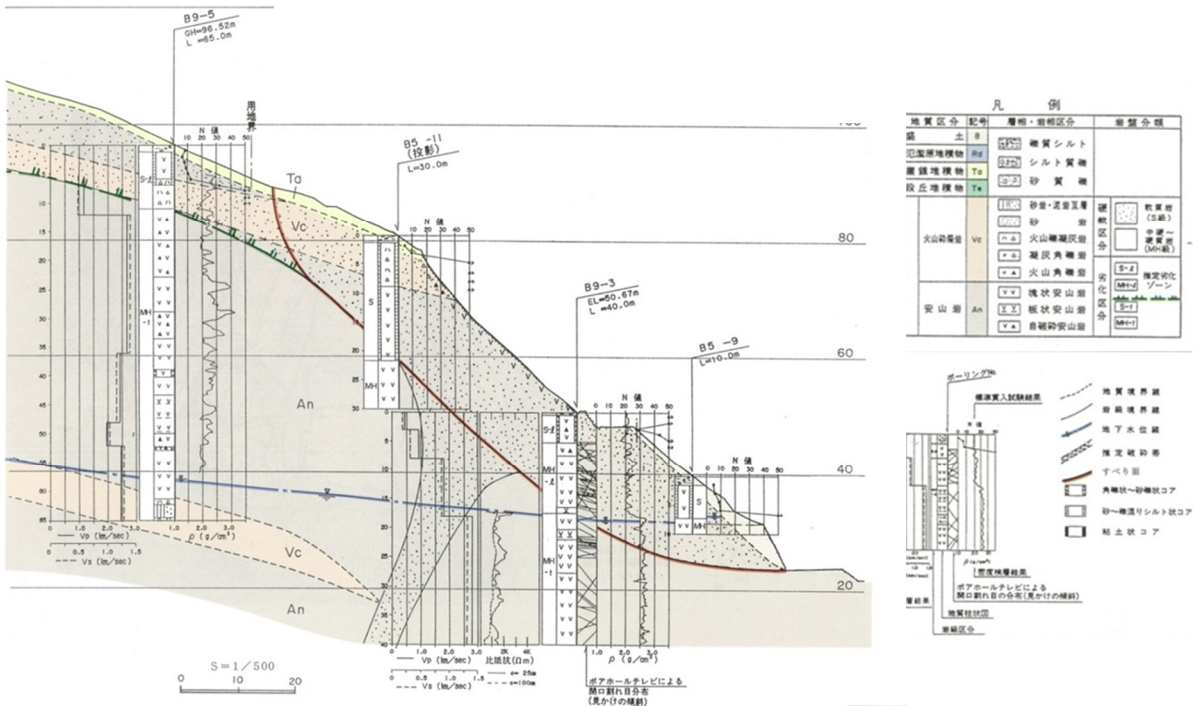


図2.3-1 土木地質図の事例⁴⁾

参考文献

- 1) 横田修一郎, 理学部学生と理学部出身者のための土木地質学. 斯文堂, 1995, pp.66-68.
- 2) 3次元地質解析技術の標準化コンソーシアム準備会, 報告書. 2016.
- 3) 升本ほか, 3次元地質・地盤モデルの基本要素と地質構造の論理モデル. 地質学雑誌. 2013, 第119巻, 第8号, pp.519-526.
- 4) 日本応用地質学会, 土木地質図作成マニュアル. 1999.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

3章 3次元地質・地盤 モデルとは

[3.1 定義](#)

[3.2 表現方法](#)

[3.3 利活用場面](#)

[3.4 成果品](#)

[3.5 モデル化の限界](#)

[3.6 モデル構築の難易度](#)

[3.7 モデルの信頼性](#)

[3.8 積算の考え方](#)

3.1 定義

データとモデル

情報学において「データ」とは、事実を表す文字や数字の羅列であり、人間の認識・解釈を伴わないものとして、“情報”と区別して扱われる¹⁾

「モデル」とは、「問題とする事象(対象や諸関係)を模倣し、類比・単純化したもの。また、事象の構造を抽象して論理的に形式化したもの²⁾」である。情報分野における「モデル」は、物体やシステム・プロセスに関して、計算・操作・予測の助けとするために単純化した記述や図形を指す。

「モデル化(モデリング)」とは、興味のある本質を残して対象を簡略化することにより、人が理解できるようにする作業である。モデル化により、モデルは対象そのものと異なるものに変化し、必然的に対象の持つ多くの性質を失ったものとなるので、その取扱いには注意が必要になる。

地質情報とは

本書で扱う用語の「地質情報」は、地質踏査/ボーリング調査/土質試験/物理探査等の地質調査により得られたデータ、および、それらからモデル化した情報と定義する。

本書では、地質調査により得られたデータを地質調査データ、地質調査データを元に利用目的に応じて推定・作成したモデルを地質モデルとして扱う(表3.1-1)。なお、情報は利用者を考えて客観的・主観的な性質のものを分け、表現だけでは見えにくい本質の違いを明示すべきである。地質情報においては、地質調査データが客観的に、地質モデルが概ね主観的な情報に該当する。

3次元地質・地盤モデルとは

本書における3次元地質・地盤モデルは、地形、地質境界、断層、分離面、風化・変質、岩級区分境界、物性分布、地下水等の分布・状態を、3次元空間において表現/可視化するための電子データと定義する。他の次元(1・2・4次元)でも3次元地質・地盤モデルを次のように表現可能である。

【1次元モデル】

露頭における地質判定結果等により分類した地質情報や、ボーリング・サウンディングにおける地質分類・岩盤分類等のコア判定区分が該当する。3次元地質・地盤モデルを作成するための基礎的なデータである。なお、高品質ボーリングやボアホール調査により得られる詳細な地質情報からは3次元情報の取得も可能である。

【2次元モデル】

地質等の分布予測を平面図や断面図上に表現した地質平面図や地質断面図である。2次元モデルも3次元地質・地盤モデルを作成するための基礎的なデータである。地質平面図で3次元的地質分布を表現するには、地形等高線と重ねて表示するが、ユーザーに対し等高線を判読し3次元空間をイメージさせなければならない。

【4次元モデル】

物性値等の属性情報により、物性分布そのものや値の変化、形状変化を表現したもの。例えば、応力分布、水圧分布、劣化等の予測範囲・変化量を、コンター、等値面、境界面、ソリッド、ボックスで表現する。

なお、以上の地質調査データ・地質モデルをCADや3次元地質解析システムで扱う際は、総称として「オブジェクト」と呼ぶ。

表3.1-1 本書で扱う地質情報の分類

地質情報 (地質調査情報)		備考
地質調査データ	露頭	自然露頭、切土のり面、トンネル切羽等(転石も含む)
	ボーリング サウンディング	コア情報、孔壁情報、室内試験・原位置試験結果、孔内検層等
	物理探査	弾性波探査、表面波探査、電気探査等
	動態観測	傾斜計、ひずみ計、伸縮計等
地質モデル	準3次元図面	地質調査成果の地質平面図・地質断面図を3次元空間に配置したもの
	地形面	測量データやCAD図面等より作成する(地質踏査等の情報を扱う際は不可欠)
	境界面	地質境界、断層、分離面、風化・変質、岩級区分等の境界
	地層	地層の上限・下限や分布範囲・信頼限界で閉じた領域を表現したもの
	物性モデル	モデルの構成要素に物性値を付加したもの
	パネルダイアグラム	3次元の地形・境界面・地層・物性モデルより切り出したもの

3.2 表現方法

3次元地質・地盤モデル・地質データの図形要素

3次元地質・地盤モデルや3次元空間に表現した地質調査データは、電子データである3次元図形要素により構成される。下記に、図形要素(表3.2-1)について解説する。

【点】

点は位置座標(x,y,z)で表現できる。点群は大量の点の集合である。点は大きさを持たないが、PC画面上で点の大きさや属性を表現する際に、球体、立方体等のオブジェクトを割り当てる場合がある。

【線】

線は点の位置座標と結線情報(点番号に対応する結線番号等の情報)で構成される。複数の単一線が連続的に接合したものはポリライン(折線)と呼ばれる。滑らかなカーブを描く曲線のうち、近年多くのCADで採用されているNURBS※曲線は、重みベクトルを持つ制御点で形状を正確にコントロールできる。線はその性質上太さを持たないが、PC画面上では太さ・線種等の表現を別途設定する。

【サーフェス(面)】

ポリゴンメッシュサーフェスは三角形・四角形に並んだ点(頂点)からなる。点の結線情報を持つ場合と持たない場合があり、結線情報を持つ場合は点・辺・面が定義される。


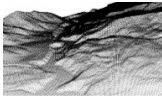
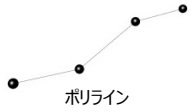

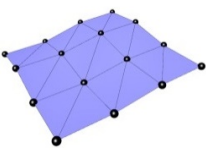
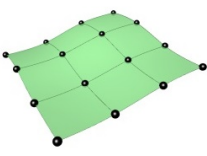
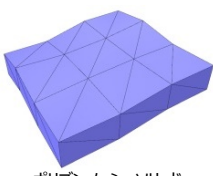

NURBSサーフェスは制御点の重みベクトル等により正確で滑らかな曲面形状を表現したものである。

【ソリッド】

地層の表現としては、B-Reps(Boundary Representation:境界表現)ソリッドが利用される。B-RepsソリッドはポリゴンメッシュソリッドとNURBSソリッドの2種類である。

ポリゴンメッシュソリッドはポリゴンメッシュサーフェスで塊りの表面を表現したものであり、中空であるため内容部は暗黙的な表現となる。NURBSソリッドはNURBSサーフェスで塊りの表面を表現したものであり、これも中空であるため内容部は暗黙的な表現となる。なお、B-Repsソリッドはそれ自体に演算情報(差・和・積)を持たない。サーフェスモデルと地質論理モデルで地層ソリッドモデルを表現する場合もある。

表3.2-1 3次元地質・地盤モデルの図形要素とデータ構造の例

図形要素	形状イメージと通称	データ構造
点	点  点群 	【点】 位置座標(x,y,z)のみで定義できるもの 【点群】 大量の点の集合
線	ポリライン  曲線 	【ライン(線分)】 点(ノード)の位置座標と結線情報からなる単一の線 【ポリライン(折線)】 複数のラインが連続して接合したもの 【曲線(NURBS※曲線等)】 重みベクトルを持つ制御点で滑らかな曲線形状を表現したもの ※NURBS: non-uniform rational B-spline (非一様有理Bスプライン)
サーフェス(面)	ポリゴンメッシュサーフェス  NURBSサーフェス 	【ポリゴンメッシュサーフェス】 三角形・四角形に並んだ点(頂点)からなる 点の結線情報を持つ場合と持たない場合があり、結線情報を持つ場合は点・辺・面が定義される 【NURBSサーフェス】 制御点の重みベクトル等により正確で滑らかな曲面形状を表現したもの
ソリッド	ポリゴンメッシュソリッド  NURBSソリッド 	地質の表現として使用されるB-Reps※ソリッドには次の2種類がある 【ポリゴンメッシュソリッド】 ポリゴンメッシュサーフェスで塊りの表面を表現したもの 中空であり内容部は暗黙的な表現となる 【NURBSソリッド】 NURBSサーフェスで塊りの表面を表現したもの 中空であり内容部は暗黙的な表現となる ※B-Reps: Boundary Representation (境界表現)

地盤情報の形状表現

3次元空間上で地質調査データおよび地質・地盤モデルを表現するための図形要素を表3.2-2に示す。表にはコンソーシアム会員による経験的な使用頻度を示した。

地盤情報は単一の図形要素で表現する場合と、複合的に用いる場合がある。例えば、ボーリングは、点：試験位置、線：試験結果グラフ、サーフェス：ボアホール調査による不連続面構造、ソリッド：柱状体等で表現するが、利用目的によってこれらの図形表現を組み合わせる。

次頁以降に、各地盤情報を例示する。

表3.2-2 地盤情報（地質調査情報）と図形要素の対応例

地盤情報（地質調査情報）		図形要素				備考	
		点	線	サーフェス	ソリッド		
地質調査データ	露頭	位置	○	○	△		点：マクロ的にみた露頭や転石の位置 線・サーフェス：露頭の範囲
		不連続面		○	○		線：露頭内の層理・断層・節理等 サーフェス：不連続面の走向・傾斜を円盤等で表現
		種類	○	△	○		露頭を構成する地質・岩級等の属性
		画像			○		露岩・試掘坑・切羽・法面等の写真やスケッチ
	ボーリング・サウンディング	孔口位置	○				調査位置を表現。
		ボアホール・試験区間	△	○	○		ボーリングやサウンディングの調査区間を表現 ボアホール孔壁の情報を表現
		境界点	○	△	○		点・線：地質境界や不連続面等の位置を表現 サーフェス：不連続面の走向・傾斜を円盤等で表現
		コア区分	○	○	○	○	地質・風化・岩級区分等の区分の区間情報を表現
		試験・検層	△	○	○	△	点：試験深度と値で表現 線・サーフェス：試験区間と値で表現
		物理探査		△	○	○	図形要素に物性値を割り当てて色や値等で表現
	動態観測	○	○	○		変位量やその方向等を表現 サーフェス：変位量をコンター等で表現	
地質モデル	準3次元図面		○	○		地質解釈による地質平面図・断面図等のベクタ・ラスタ形式の図面 (ラスタの場合はサーフェスモデル上にテクスチャマッピングで表現)	
	地形面		△	○		線：ワイヤーフレームで表現	
	境界面		△	○		線：ワイヤーフレームで表現	
	地層				○	地層の上限・下限や分布範囲・信頼限界で閉じた領域を表現	
	物性モデル			○	○	モデルの構成要素に物性値を付加した表現	
	パネルダイアグラム		○	○		3次元の地形・境界面・地層・物性モデルより切り出したもの	
○：使用頻度が高い △：使用頻度が低い							

露頭

露頭とは、自然地形において地質が露出するものと、トンネル・切土・掘削等で人工的に地質を露出させたものを指す。

露頭の表現としては、地質・土軟硬の分類や岩級等の評点を色や大きさ、記号(点に割り当て)にて示す(図3.2-1)。点で表せない露頭の亀裂や地質境界は線で表現する。

地質構造を示す走向傾斜の情報は、測定箇所の点と走向傾斜を示す線で表現する(図3.2-1)。露頭を領域として表現する場合は、線やサーフェスを使用する(図3.2-2, 3.2-3)。

なお、露頭が無い場合に、転石が有益な地質情報をもたらすこともある。転石の位置と種類は点で表現する。

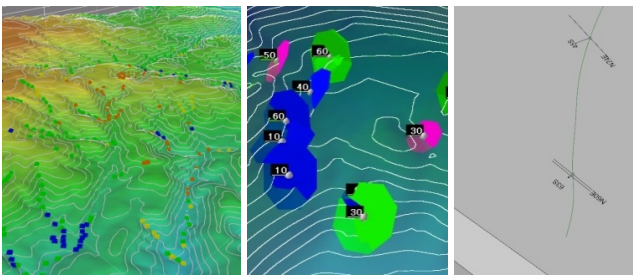


図3.2-1 露頭情報の例(露頭の位置と種類を表現)

ボーリング・サウンディング

ボーリング・サウンディングとは、ボーリング調査や各種サウンディング(標準貫入試験、コーン貫入試験、スウェーデン試験、ベーン試験等)の結果を指す。

表現としては、調査位置だけを示す場合は点を、調査深度を示す場合は線を用いることが多い。ボーリングコアの観察・判定により得られた、土質・岩質・風化変質・岩級等のコア区分は、簡易柱状図のような線・面だけで構成される複合オブジェクトで表現することが多い。

コア区分はサーフェスや円柱(シリンダー)の着色や大きさ(円柱の径)で表現する。各区分の境界を点で表現することもある。ボアホール調査が行われている場合は、亀裂等の3次元構造が得られるので、走向傾斜を亀裂等の種類や開口幅で着色したり、大きさを変えた円盤(サーフェス)で表現する。

孔内試験計測のデータは、その位置・区間・値等を点・線(グラフ状)、サーフェス、円柱で表現する。

サウンディングは、N値・換算N値等の深度毎の値を線(グラフ)や、線の間値のレンジで着色したサーフェスを貼って表現する。なお、計測値を表現する場合は、目盛やテキスト数値、凡例等も必要である。

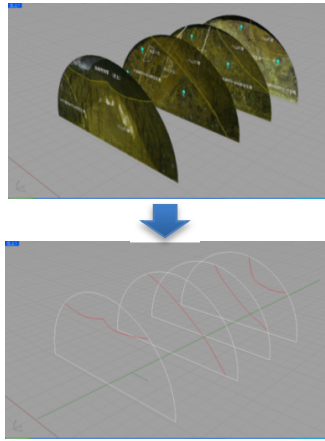


図3.2-2 露頭情報の例
(トンネル切羽画像より特定の地質情報を判読し表現
上段はテクスチャ、下段は線で切羽写真範囲(露頭範囲)と割れ目を表現した)

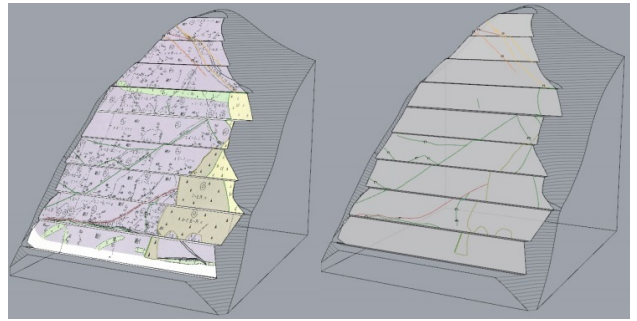


図3.2-3 切土のり面の露頭例
左：露頭観察スケッチ³⁾をテクスチャとして表示
右：主要な亀裂をトレースした線

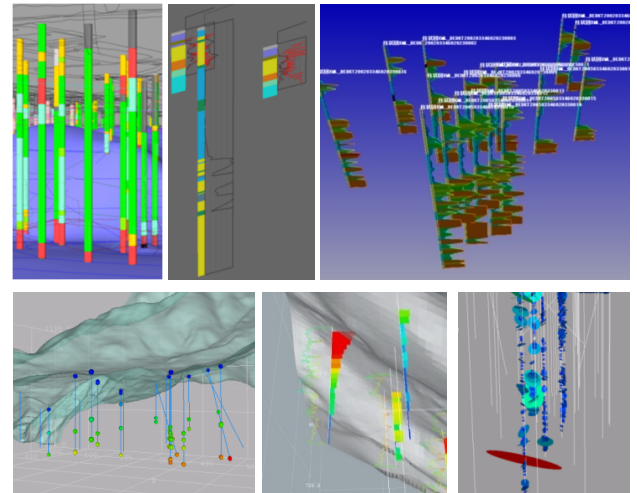


図3.2-4 ボーリング・サウンディング情報の例

準3次元図面（平面図）

準3次元図面のうち平面図は、地形等のサーフェスモデル上に地図や地質関連図等の情報を投影して表現したものである。

投影する図はラスターデータ(図3.2-5)とベクターデータ(図3.2-6)の2種類が用いられる。

ラスターデータは、主にサーフェスモデルのUVW座標(オブジェクト固有の座標)を参照し、サーフェスモデルのUV比率と同じ縦横比のラスター画像を用いる。また、投影したラスター画像は解像度が低下したり、曲率の大きい部分で劣化することがある。ソフトウェアやモデルの形状によって投影方法のルールが異なるので注意が必要である。

ベクターデータは、点や線オブジェクトを地形面等のサーフェスモデルに対し、鉛直方向やサーフェスの法線方向に投影し表現する。投影した点・線オブジェクトはサーフェスモデルの標高値を取得できるので、地質境界面等のサーフェスモデルを作成する際の入力データとして再利用可能である。なお、ベクターデータの投影に対応していないソフトもある。

準3次元図面（断面図）

準3次元図面のうち断面図は、ラスターデータやベクターデータの2次元断面図を、平面図に示される断面測線や起点・終点・折れ点の座標値に合わせて3次元空間に配置して表現したものである。

配置する際は、測線の長さや断面図の長さが正確に合致するか、折れ点が合っているかのチェックが必要である。また、断面図に記載されている地質情報が、ボーリング等の投影で推定されたものかの確認も重要である。これを確認しないと、後のモデル作成作業に重大な影響を与え兼ねない。

ラスターデータの断面図(図3.2-7)は、テクスチャマッピングを行ったサーフェスモデルを用いるが、余白部を透過できないソフトもあり、その場合は余白部のトリミングを行う。ラスターの解像度は低下することがある。ソフトウェアにより投影方法のルールが異なるので注意が必要である。

ベクターデータの断面図(図3.2-8)はCAD断面を用いることが多く、着色部はサーフェスあるいはハッチングを用いる。ソフトによっては3次元でのハッチングに対応しないものもある。

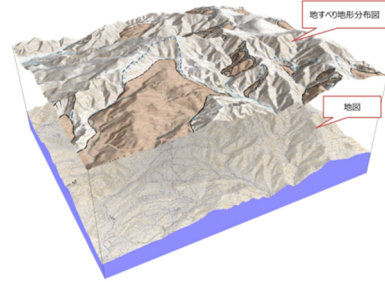


図3.2-5 準3次元地質平面図(ラスターデータ)の例
地すべり分布図³⁾のラスターデータを地形サーフェスモデル⁴⁾上に重ねた

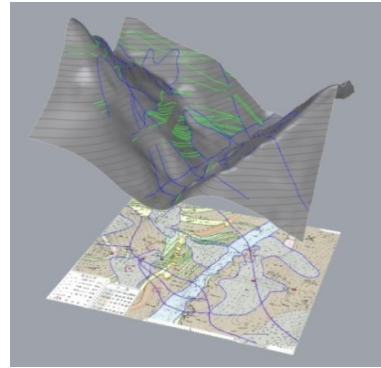


図3.2-6 準3次元地質平面図(ベクターデータ)の例
地質図⁵⁾の地質境界ポリラインを地形サーフェスモデル上に投影した

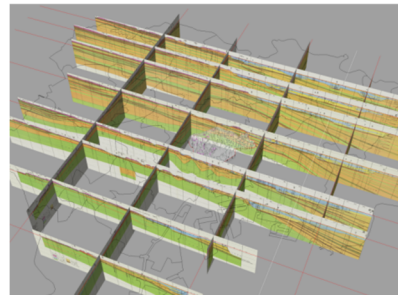


図3.2-7 準3次元地質断面図(ラスターデータ)の例⁶⁾
縦縮尺を10倍に強調

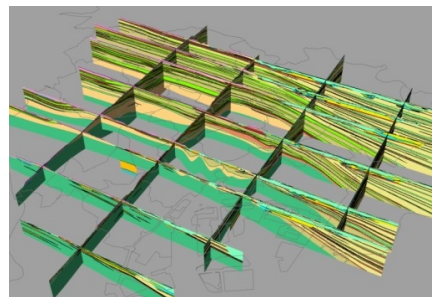


図3.2-8 準3次元地質断面図(ベクターデータ)の例⁶⁾
縦縮尺を10倍に強調
地質境界線の間にサーフェスを貼り着色している

物理探査

物理探査は主にサーフェスモデル上に物理探査で得られた物性値を表現する。ラスタデータによる表現も可能である。

サーフェスモデルは任意の間隔に分割したメッシュを用い、個々のメッシュ自体(セル)や格子点(ノード)に物性値を持つ。

物性値の表現は物性値のレンジに対応したカラーマップを用い、ノードデータの濃淡(値をダイレクトに表示するが、ノード間で補間された表現になる)や、セル自体の着色、ノード・セル値のコンター表示をおこなう。なお、物理探査データの解像度はメッシュサイズを超えるものではなく、データ間のコンターや濃淡は見かけ上の補間値ではないことに注意が必要である。

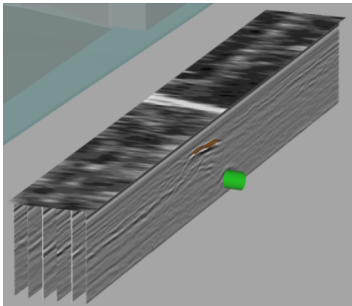


図3.2-9 表面波探査データの可視化例 (ラスタデータ)

動態観測

動態観測はボーリング孔の区間変位や地盤傾斜計、伸縮計、グラウト注入量等のモニタリングによる、計測データの値や変化を表現する。

計測データ自体は、各種センサで取得された信号のA/D変換されたデータそのものや、スプレッドシート、テキスト形式で整理されたものを用いる。

計測データの値は、点・線・サーフェスを用いたり、それらを組み合わせたもので表現する。計測値はオブジェクトへの着色やその大きさで示す。変位の移動方向は合成ベクトルを用い、線やサーフェスの矢印記号を用いることもある。

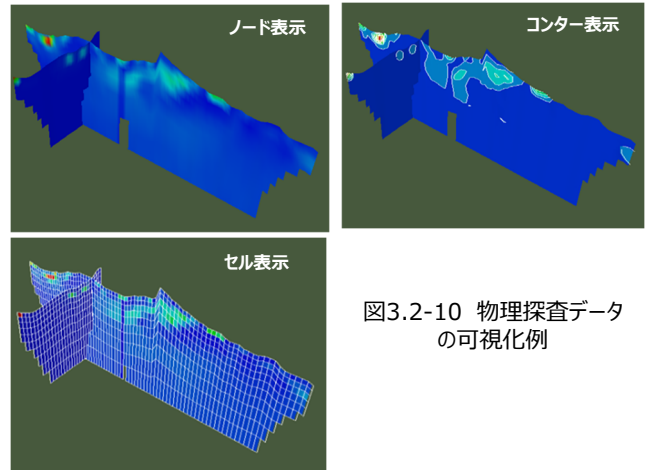


図3.2-10 物理探査データの可視化例

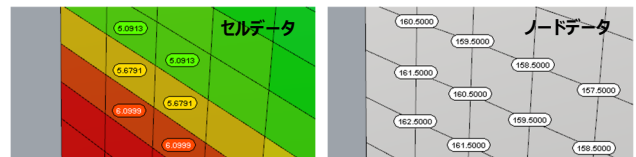


図3.2-11 物理探査データの物性値例

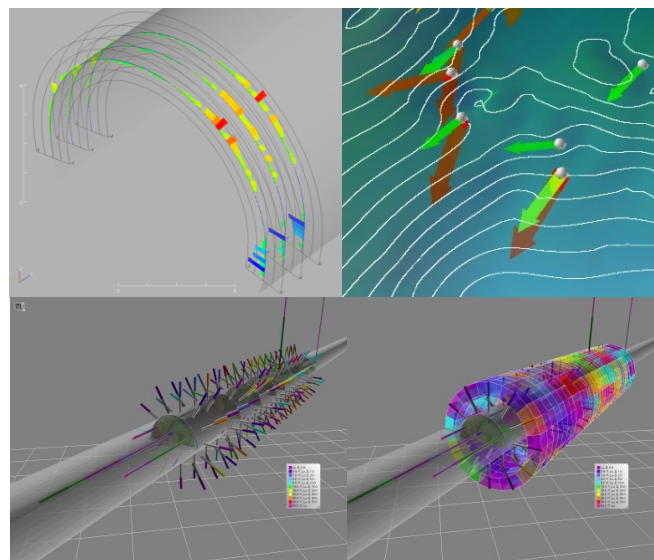


図3.2-12 モニタリングデータの可視化例
上段左) トンネル内空変位のイメージ
上段右) 地表面変位のイメージ
下段左) トンネルグラウチング孔のルジオン値⁷⁾
下段右) 同左のルジオンマップ表示⁷⁾

地形面・境界面

地形面・境界面はサーフェスモデルを用いて表現する。サーフェスモデルは性質の異なる「ポリゴンメッシュサーフェス」と「NURBSサーフェス」に分けて解説する。

【ポリゴンメッシュサーフェス（図3.2-13）】

三角形・四角形に並んだ点（頂点）からなる。点の結線情報を持つ場合と持たない場合があり、結線情報を持つ場合は点・辺・面が定義される。

【NURBSサーフェス（図3.2-16,17）】

制御点の重みベクトル等により、正確で滑らかな曲面形状を表現したものである。NURBSサーフェスはポリゴンメッシュよりも形状の自由度が高く、様々な地質境界面モデルの自由曲面を表現可能である。NURBSサーフェスの利用上のメリット・デメリットは次のようになる。

◆メリット

- ・複雑な自由曲面を表現できる
- ・作成・編集が容易
- ・元の幾何情報を保持する(図3.2-14)ので加工が容易

◆デメリット

- ・複雑なモデルでは構成要素サーフェス数が多くなり、データが重くなる
- ・ポリゴンメッシュモデルとはデータ変換の際に不可逆的な関係になる(図3.2-15)ので、変換前のNURBSサーフェスモデルは別途保持する必要がある

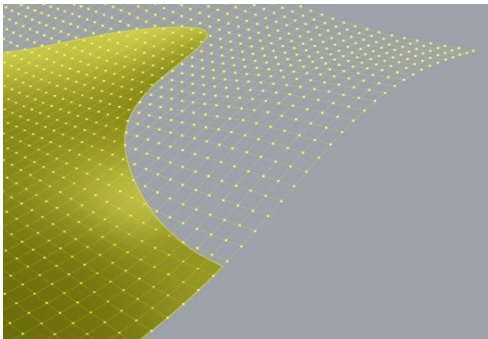


図3.2-14 NURBSサーフェスモデルに保持される幾何情報

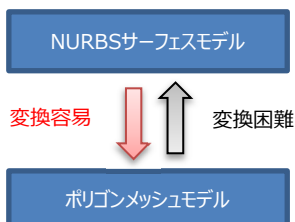


図3.2-15 NURBSモデルとメッシュモデルの関係

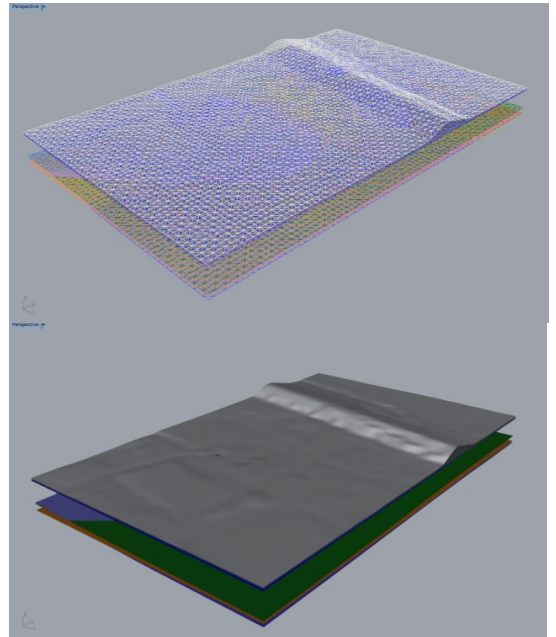


図3.2-13 サーフェスモデル（ポリゴンメッシュ）の例
上段：ワイヤフレーム表示
下段：シェーディング表示

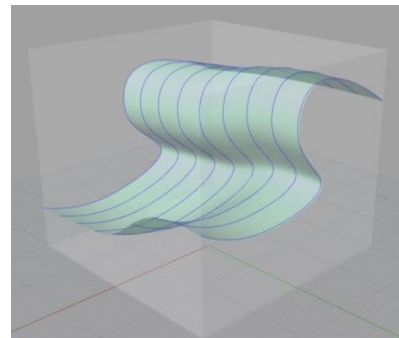


図3.2-16 サーフェスモデル（NURBS）の例

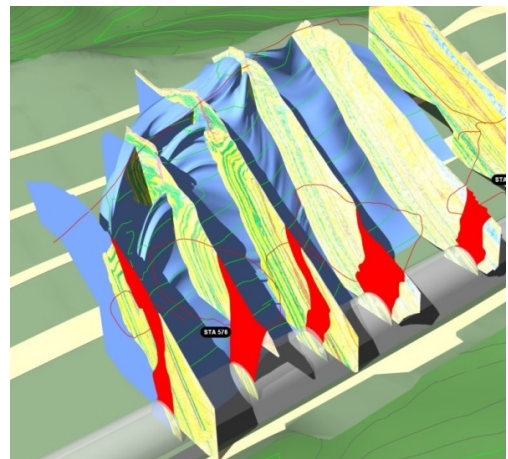


図3.2-17 サーフェスモデル（NURBS）の例⁸⁾

地層

地層を表現する3次元モデルとしてはソリッドモデルが適する。ソリッドモデルは、B-Reps (Boundary Representation)ソリッドが利用される。B-Repsソリッドは中空であるため、内容部は暗黙的な表現となる。B-RepsソリッドはポリゴンメッシュソリッドとNURBSソリッドの2種類である。

B-Repsソリッドはそれ自体に演算情報(差・和・積)を持たない、即ちモデル作成の記録が付いていないので取扱いに注意が必要である。そのため、ソフトウェアによってはサーフェスモデルと地質論理モデルで地層ソリッドモデルを表現する場合もある。NURBSソリッドの場合は、保持する幾何情報(図3.2-14)より、作成に用いたサーフェスモデルを再現することが可能である。

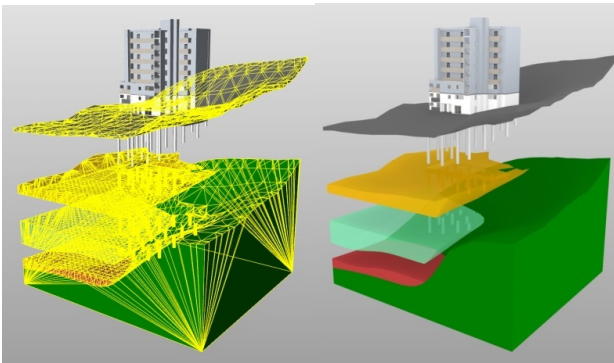


図3.2-18 ポリゴンメッシュソリッドモデルの例
左：ワイヤーフレーム表示
右：シェーディング表示

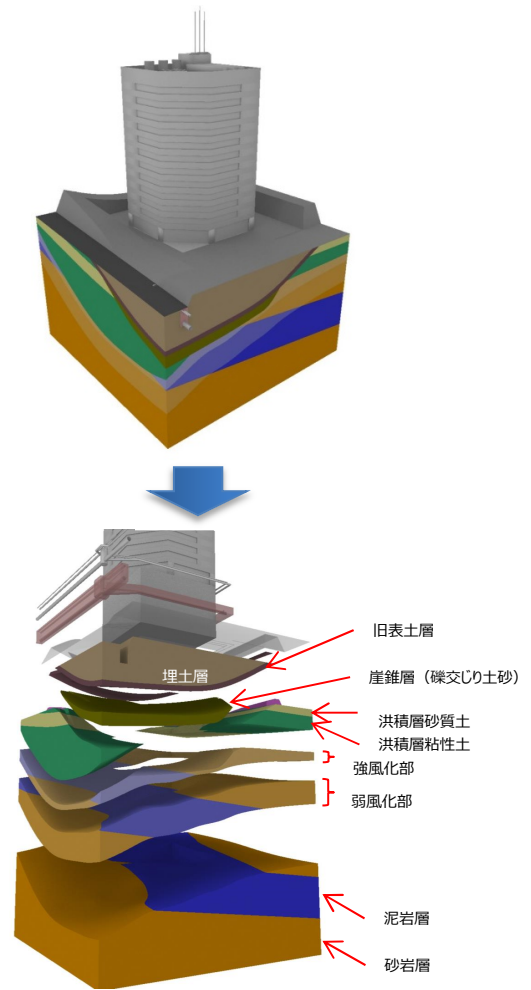


図3.2-19 NURBSソリッドモデル(地質区分)の例
地質を理解しやすい姿で表現可能

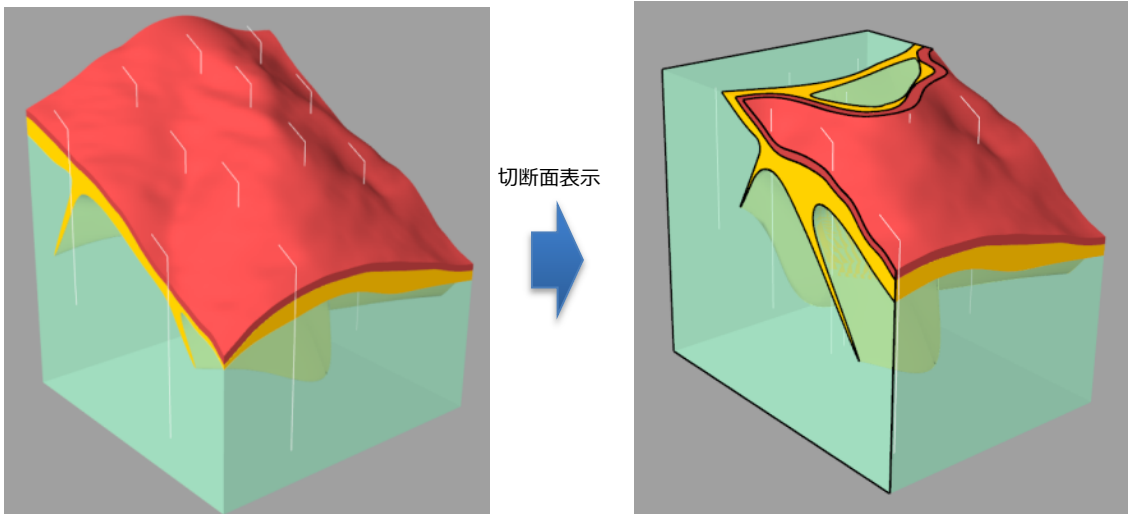
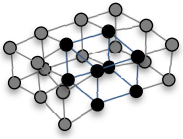


図3.2-20 NURBSソリッドモデル(岩盤分類)の例
任意の位置で切断面表示可能

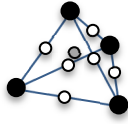
物性モデル

3次元物性モデルは、主にボーリング・サウンディングの試験値や物理探査データ等を用い3次元空間補間により、物性値の空間分布を推定したものである。推定値は3次元格子の頂点(点・ノード)や、格子中心に付与される(図3.2-21)。



【構造型】

立体的な格子状に並んだ点の位置座標からなる。結線情報は持たない。点に属性を持たせることができる。



【非構造型】

三角錐・立方体等の形状に配置する点の位置座標、結線情報からなる。点・結線中点・形状中心に属性を持たせることができる。

図3.2-21 物性モデルの3次元格子構造例⁹⁾

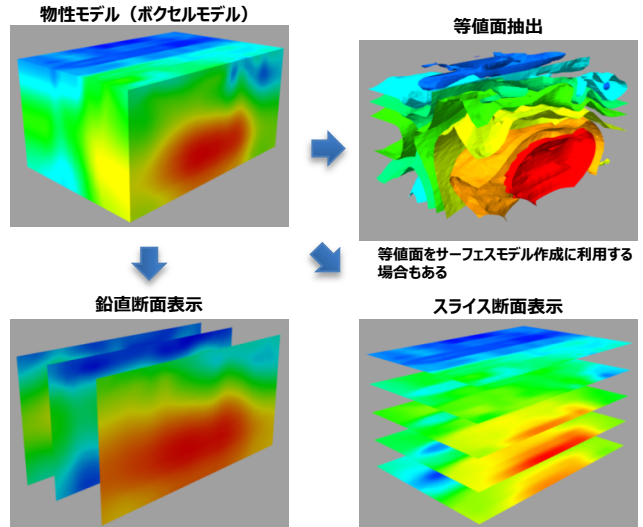


図3.2-22 物性モデルの利用例

ボクセルモデル

3次元空間を等方格子等に分割し、最小空間(セル)に属性情報(値や分類)を付与したものである。

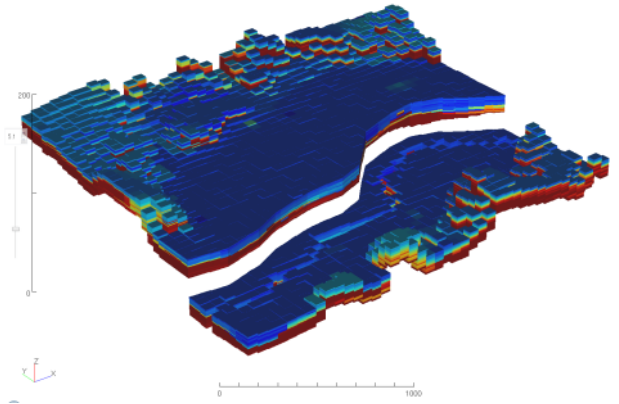
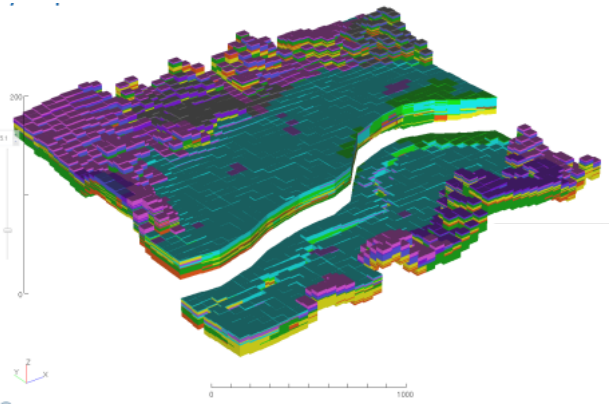


図3.2-23 ボクセルモデルの例
左：土質区分モデル 右：N値モデル

3.3 利活用場面

3次元地質・地盤モデルの具体的な利活用場面

BIM/CIMにおいて、3次元地質・地盤モデルの利活用は始まったばかりである。そのため、3次元地質・地盤モデル利活用場面に際しての課題は多く、国土交通省のCIM導入推進委員会では、H28年度、29年度にアンケート調査を実施し、BIM/CIMの導入における課題について以下の点を挙げている。

- ① 基準、ルールの未整備
- ② 費用増加(人件費・設備投資)
- ③ モデル作成人材不足
- ④ ソフトウェアの機能やデータ互換性等の機器の問題

国土交通省ではこの結果を元に、発注者から受注者に対する、より具体的な要求事項(リクワイヤメント)を設定し、その解決に取り組んでいる。リクワイヤメントの内容と対応状況については、下記のURL等を参考にされたい。

【国土交通省BIM/CIM推進委員会】

https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000037.html

【一般社団法人OCF】

<https://ocf.or.jp/>

地質・地盤リスクコミュニケーションツールとしての用途

欧米諸国の技術基準書には、既に地質・地盤リスクマネジメントが体系的に明示され、日常の業務プロセスに組み込まれている。事業プロセス全体のコストの増大を抑制するために、より上流への地質技術者の参画が必要であり、地質・地盤リスクマネジメントの普及に向けて、日本版地質・地盤リスクマネジメントの標準体系の確立が急務とされる。近年ようやく「地質・地盤リスク検討業務」が発注される等、地質・地盤リスクの概念や地質・地盤リスクマネジメントが日本国内でも浸透しつつある(図3.3-1)。

円滑な地質・地盤リスクコミュニケーションツールとして3次元地質・地盤モデルを建設プロセスで利用していくためには、地質技術者以外が、3次元地質・地盤モデルの妥当性を把握できることが必要である。例えば、3次元地質・地盤モデルの品質保証情報をモデルに付与する等して、モデルの精度や限界、尤もらしさ等を地質技術者以外が理解できる仕組みが必要と考えられる。

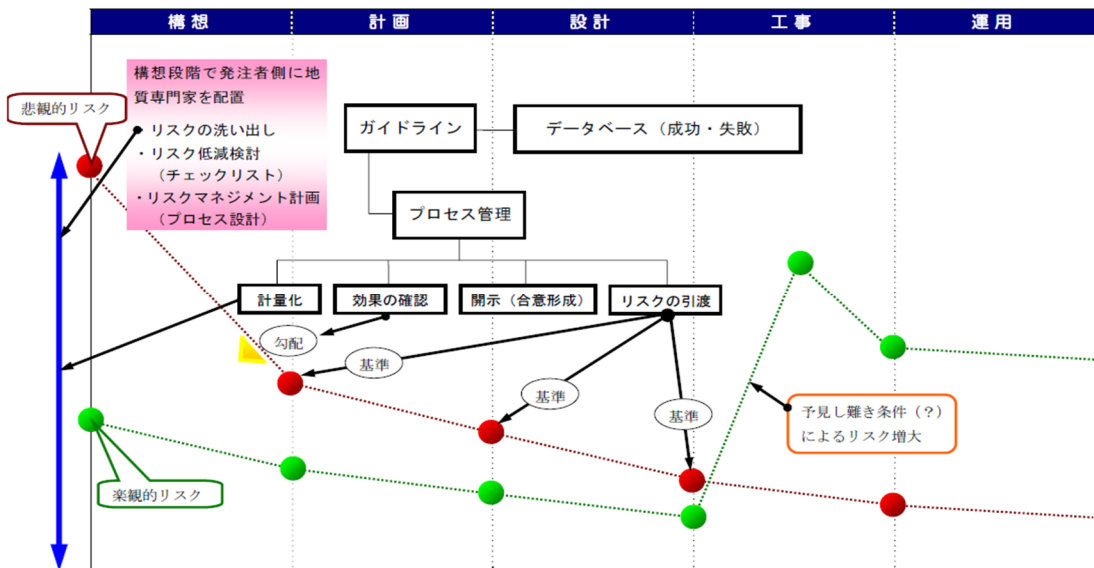


図3.3-1 事業の各段階における地質・地盤リスクマネジメントのイメージ¹⁰⁾

3次元地質・地盤モデルの用途とユーザー

3次元地質・地盤モデルの主な用途を表3.3-1に示す。この分類について、「準備会」アンケート集計の結果を図3.3-2に示す。

3次元地質・地盤モデルは、二次利用用途が概ね半数を占め、そのなかでも数値計算(シミュレーション)に利用する場面が多い。次に多いのは地質解析作業であり、技術者自身作業を効率化させるために用いるものと考えられる。合意形成や説明責任、説明性向上を図る目的の可視化用途はあまり多いとは言えない。これは、単に3次元で表現する事よりも、計算や設計等の厳密な用途に3次元地質・地盤モデルのニーズが多いことを示唆する。

「準備会」アンケートによると、3次元地質・地盤モデルの利用者は図3.3-3の割合になる。特に、民間事業者が半数近くを占め、次に国・自治体となる。

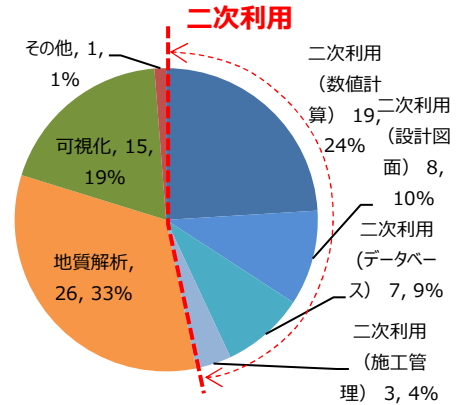


図3.3-2 3次元地質・地盤モデルの主な用途 (全79件)

表3.3-1 3次元地質・地盤モデルの用途

用途	内容
二次利用	<ul style="list-style-type: none"> ・数値計算 (シミュレーション) ・設計等図面の作成支援 ・地質データベース構築 ・施工管理
地質解析作業	<ul style="list-style-type: none"> ・データ整合性チェック ・考えるための道具
可視化	<ul style="list-style-type: none"> ・合意形成 ・説明責任 ・説明性向上

3次元地質・地盤モデルの対象

「準備会」のアンケートにより、3次元地質・地盤モデルを地質体と地質時代で分類した結果を図3.3-4、3.3-5に示す。なお、一つの対象地で複数の地質体を扱うため母数は多くなる。

最も数が多いのは未固結堆積物を対象としたもので、これは沖積層や洪積層に該当する。地質時代で見ると、必然的に第四紀完新世～更新世が多くなる。

これは、我が国のライフラインや施設が、人工が集中する低地・台地を基盤とすることが多いためと考えられる。

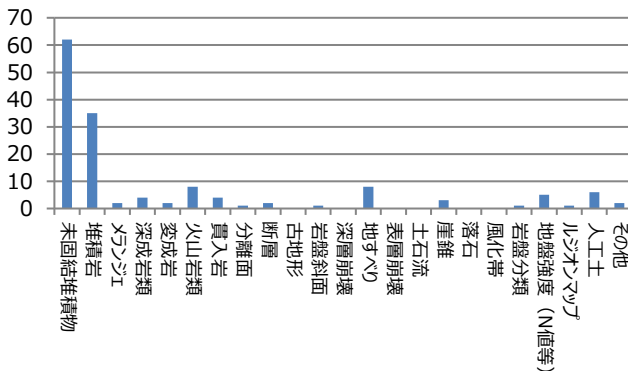


図3.3-4 3次元地質・地盤モデルの種類 (全147件)

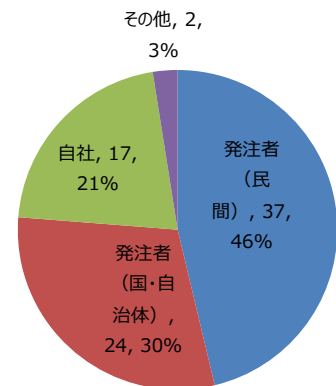


図3.3-3 3次元地質・地盤モデルの利用者の割合 (全80件)

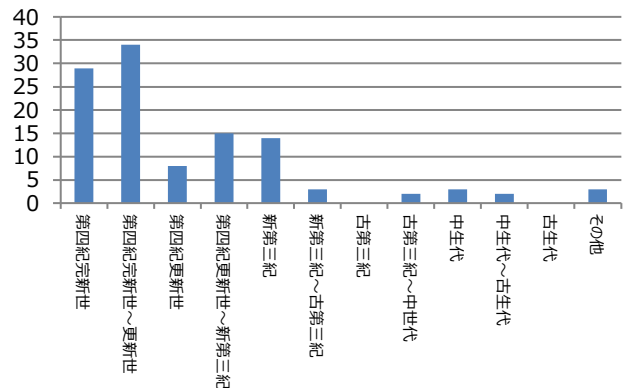


図3.3-5 3次元地質・地盤モデルの地質時代 (全123件)

3次元地質・地盤モデルの具体的な利用場面

参考資料のユースケースに基づき、3次元地質・地盤モデルを用いる事で可能になる、具体的な利用場面およびその利用者を表3.3-2にまとめた。

3次元地質・地盤モデルの利活用時の留意点

不均質で不確定要素の多い地盤情報のモデル化においては、設計・施工における利用目的や必要とする精度を十分見通した上で情報を取捨選択し、適切なモデルを構築する必要がある。

一方で、事業の過程で得られた全ての情報を3次元化するという考え方は不経済であり、かえって生産性の低下や情報を見づらくすることに繋がる恐れもある。なお、現段階の情報や各種基準を鵜呑みにするのではなく、適切なインフラの形成、インフラ・マネジメントの効率化、将来的なインフラの維持管理を見据えて、3次元地質・地盤モデルを利活用することが重要である。利用者には柔軟な運用が求められるといえる。

表3.3-2 3次元地質・地盤モデルの具体的な利用場面

用途	3次元地質・地盤モデルの利用場面	利用者
二次利用	データシート出力	発注者 施工者 コンサル
	地質図面（平面図、断面図）出力	
	地質図面（地質境界面標高・深度・地層厚等のコンター）出力	
	点検台帳やカルテに用いる基礎図面（正面図、パース図等）出力	
	土軟硬区分や地質境界面標高・深度の差分計算	
	工事範囲における対象地質（土軟硬区分等）土量算定	
	3次元地質・地盤モデルデータそのものの利用	
地質解析作業	数値解析用3次元地質・地盤モデルデータへの加工	コンサル
	地質情報の3次元的な整合性確認	
	地質調査データを用いて初期地質モデル構築 施工による実績地質データ取得とモデル更新	
可視化	地質調査位置や種類情報	発注者 施工者 コンサル
	地質モデルの根拠となる地質調査データ	
	予測地質分布・構造	
	施工範囲に係る詳細地質モデル	
	亀裂等不連続面の詳細地質モデル	
	土軟硬区分や岩盤分類の予測モデル	
	地質解析結果と安全率や影響範囲	
	対象地質モデルと構造物や対策工との干渉チェック	
	予測地質モデルと実績地質モデルの比較	
	モニタリング結果	
	地質パラメータ	
	地質モデル利用上の留意点	
	地質・地盤リスク情報（点検着目点、災害位置、素因、誘因、被害規模等）	
	設計・施工上の地質・地盤リスク留意点	
	維持管理上の地質・地盤リスク留意点	
地質・地盤モデルの属性や地質・地盤データ・モデル間のリンク		

3.4 成果品

3次元地質・地盤モデルの形式

「準備会」アンケート結果より、地形・地質境界面のサーフェスモデルを作成するために用いた入力データの種類と、作成したモデルの形式について整理した。なお、入力データは、複数の種類を使用することもあるので、該当する業務で最も多いもので集計した。

【入力データ】

地形モデルの場合は、ほぼ半数がDEMデータを使用しており、次に多いのがCADコンターである(図3.4-1)。地質モデルはボーリングデータと地質断面図がほぼ同じ割合となる(図3.4-2)。

【モデル形式】

モデル形式の「グリッド(等間隔格子)」は、一般に、曲面補間計算で出力される等間隔格子状の点群データを元にしたサーフェスモデルである。「グリッド(不等間隔格子)」は、xy方向の解像度を変えたり、道路線形等に沿って形状を変えたりするもの。「Tin(不整三角網)」はランダムな点群を用いて、三角面で構成されたサーフェスモデルである(図3.4-3)。

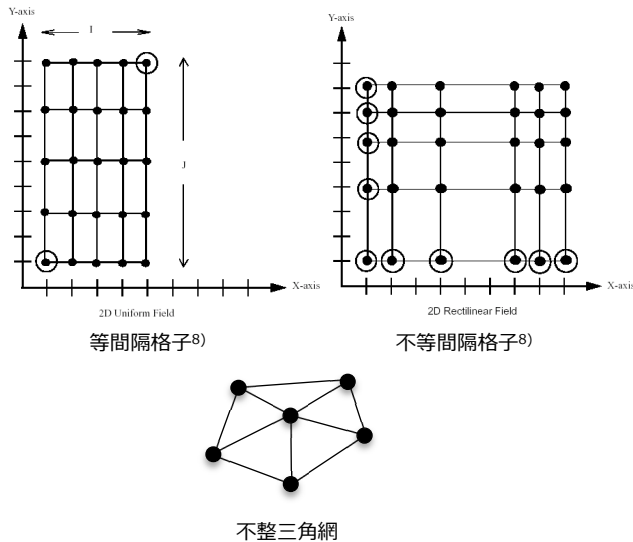


図3.4-3 サーフェスモデル形式の一例

地形モデルの場合は、グリッド(等間隔格子)・Tinほぼ同じ割合である(図3.4-4)。地質・地盤モデルの場合は、グリッド(等間隔格子)が多く、次にTin、グリッド(不等間隔格子)、NURBSの順となる(図3.4-5)。

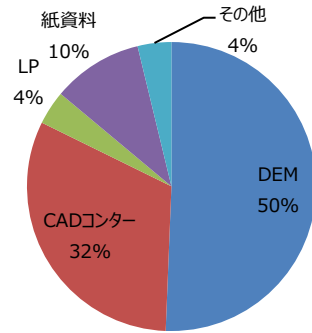


図3.4-1 地形モデルを作成するために主に用いたデータの種類 (全79件)

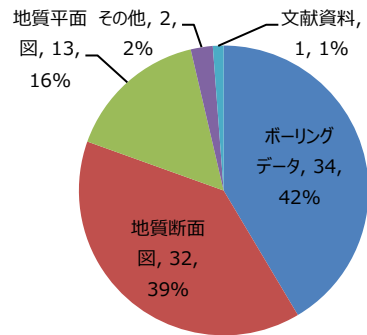


図3.4-2 地質・地盤モデルを作成するために主に用いたデータの種類 (全82件)

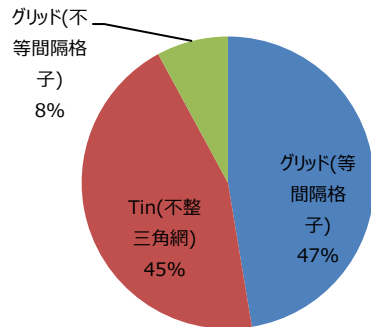


図3.4-4 地形モデルの形式 (全77件)

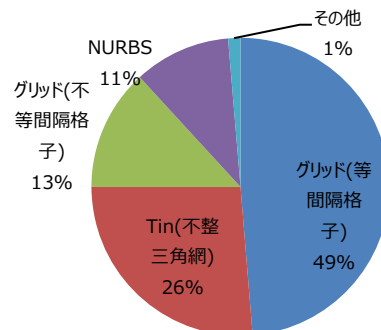


図3.4-5 地質・地盤モデルの形式 (全76件)

取り扱うモデルの数

一つの業務単位で作成された地質境界面モデルの数は、10枚未満の業務が多いが、数十枚以上のモデルを作成する場合もある(図3.4-6)。モデルの作成数は後の章で述べる積算に影響する。

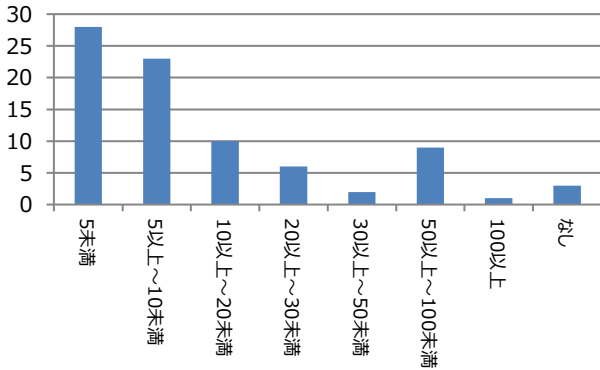


図3.4-6 一つの業務において作成した地質境界面モデル数 (全82件)

利用場面に対応可能な3次元地質・地盤モデル

3次元地質・地盤モデルの利用場面(表3.3-2)に対応可能な3次元オブジェクトを表3.4-1に示す。これらのオブジェクトを単体や複合的に使用して3次元地質・地盤モデルを表現する。

表3.4-1 利用場面に対応可能な3次元オブジェクト

用途	3次元地質・地盤モデルの利用場面	地質調査データ				地質・地盤モデル				備考
		露頭	ボーリング サウンディング	物理 探査	動態 観測	準3次元 図面	サーフェス	ソリッド	ボクセル	
二次 利用	データシート出力		●	●	●		●	●	●	
	地質図面(平面図、断面図)出力						●	●		
	地質図面(地質境界面標高・深度・地層厚等のコンター)出力						●	●	●	
	点検台帳やカルテに用いる基礎図面(正面図、パース図等)出力	●	●	●	●		●	●	●	
	土軟硬区分や地質境界面標高・深度の差分計算						●	●	●	
	工事範囲における対象地質(土軟硬区分等)土量算定						●	●	●	
	3次元地質・地盤モデルデータそのもの利用	●	●	●	●	●	●	●	●	
	数値解析用3次元地質・地盤モデルデータへの加工						●	●	●	
地質 解析 作業	地質情報の3次元的な整合性確認	●	●	●	●	●	▲※	▲※	▲※	
	地質調査データを用いて初期地質モデル構築	●	●	●	●	●	●	●	●	
	施工による実績地質データ取得とモデル更新	●	●	●	●	●	●	●	●	
可視 化	地質調査位置や種類情報	●	●	●	●					
	地質・地盤モデルの根拠となる地質調査データ	●	●	●	●	●				
	予測地質分布・構造					●	●	●		
	施工範囲に係る詳細地質・地盤モデル	●	●				●	●		
	亀裂等不連続面の詳細地質モデル	●	●				●			
	土軟硬区分や岩盤分類の予測モデル	●	●	●		●	●	●	●	
	地質解析結果と安全率や影響範囲	●	●	●	●	●	●	●	●	
	対象地質・地盤モデルと構造物や対策工との干渉チェック						●	●	●	
	予測地質・地盤モデルと実績地質・地盤モデルの比較					●	●	●	●	
	モニタリング結果	●	●	●	●	●	●	●	●	
	地質・地盤パラメータ	●	●	●	●	●	●	●	●	
	地質・地盤モデル利用上の留意点	●	●	●	●	●	●	●	●	
	地質・地盤リスク情報(点検着目点、災害位置、素因、誘因、被害規模等)	●	●	●	●	●	●	●	●	ア ン テ ン シ ョ ン 必 要
	設計・施工上の地質・地盤リスク留意点	●	●	●	●	●	●	●	●	
	維持管理上の地質・地盤リスク留意点	●	●	●	●	●	●	●	●	
地質・地盤モデル属性や地質・地盤データ・モデル間のリンク	●	●	●	●	●	●	●	●		

※ドラフトモデルで不陸や不連続性をチェックする

3.5 モデル化の限界

表現性能の限界

サーフェスモデルの表現性能はデータ構造(表3.2-1)に依存する。細部の曲面表現は、NURBSサーフェスのように正確な曲面として扱えるものや、レンダリング処理によりスムージングした見せかけだけの表現がある(図3.5-1)。

また、ソフトウェアの機能/性能、ハードウェアのスペックで3次元地質・地盤モデルの表現や分解能が制限される。これはシステムに依存する限界であり、ソフト・ハードの性能が向上すれば、ハードルは下げられるものである。

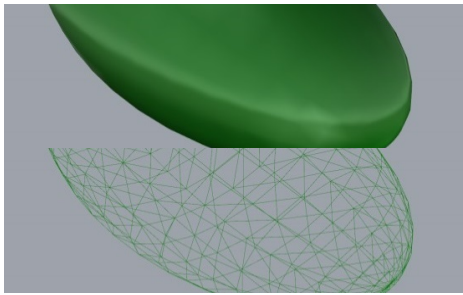


図3.5-1 見せかけのポリゴンメッシュの表現
(上段：シェーディング(レンダリング)、下段：真のデータ)

サーフェスモデルの限界

例えば、A・B・C3つの地層を想定し、これらの地層を境界面だけで定義することを想定する(図3.5-2)。

ソリッドモデルであれば、明確にA・B・C層と定義できるが、サーフェスモデルの場合、その定義(属性)が複数生じてしまう。ソリッドモデルであれば、属性を簡略化できるが、サーフェスモデルは正しい定義(属性)がないと取扱いやモデルの更新が難しくなる。サーフェスモデルで地層モデルを定義するには図3.5-3に示すような地質論理モデルを用いる。

そのため、サーフェスモデルは地質論理モデルとセットで取り扱うことが必要になる。

ソリッドモデルの限界

ソリッドモデルは、上述のように単一で一つの地質モデルを表現できる利点があり、直感的に地質体をわかり易く表現できる。欠点として、作成に手間がかかる、使用するサーフェスモデルの限界やミスを継承してしまうことにある。パラメトリック※に地質モデルが作成できる機能が専用ソフトウェアに望まれる。

※パラメトリックモデリングは、モデル同士の関係でその結果(形状)を得ることができる手法である。ヒストリとしてオブジェクトの条件を記録できるので、条件を変更するとモデルも動的に変更可能である。その対義語はノンパラメトリックモデリングである。

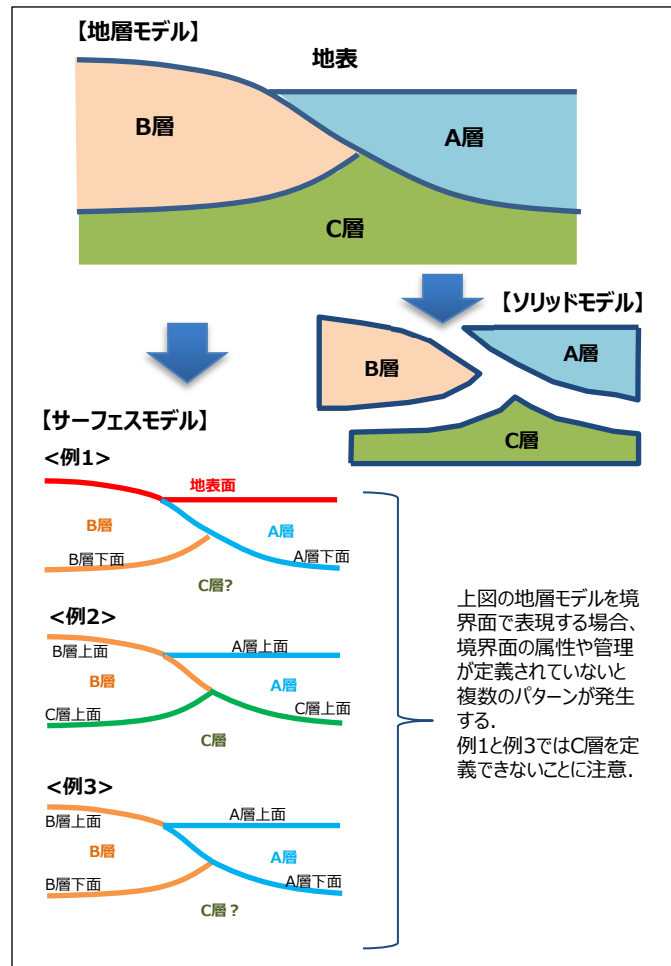


図3.5-2 境界面モデルによる地層モデルの表現

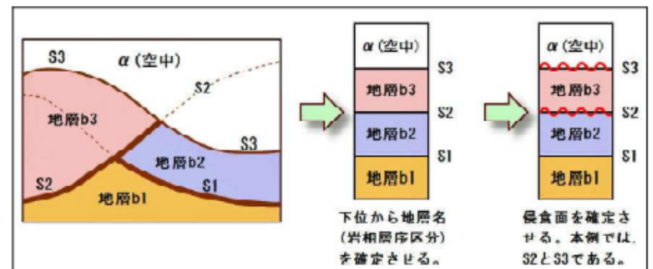


図3.5-3 地質論理モデルの例¹¹⁾

限界への対処法としてのLOD

3次元地質・地盤モデルは表現性能やモデル自体が持つ限界を理解したうえで利用しなければならない。地質・地盤モデルの利用限界を簡便に示す手段として、構造物モデルの詳細度を示すLOD (Level of Development/Detail) が参考になる。

LODは、実用面を考慮して必要以上の作業負荷を与えないように、最適なモデルのレベルを規定する仕組みである(図3.5-4)。しかし、構造物は規格を規定できるのでLODを設定し易いが、地質の場合は、見えない地下空間においてその存在自体を予測・推定するものであり、構造物とはモデル化へのアプローチが本質的に異なる。

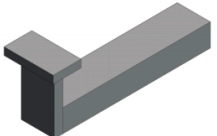
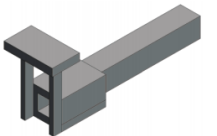
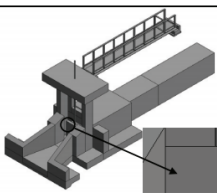
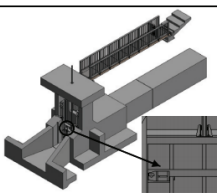
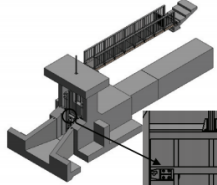
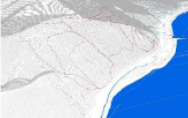
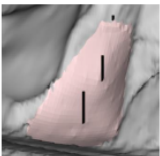

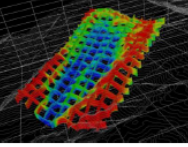
LOD100	LOD200												
													
LOD300	LOD350												
													
LOD400	<table border="1"> <thead> <tr> <th>詳細度</th> <th>定義</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LOD100</td> <td>単純な記号</td> </tr> <tr> <td>LOD200</td> <td>概略レベルのモデル (主要な部材のみ)</td> </tr> <tr> <td>LOD300</td> <td>外形は正確にモデル化されているが、接合部は位置表示のみのモデル化されている (主要な部材と接合される部材、連結板なし)</td> </tr> <tr> <td>LOD350</td> <td>外形とともに接合部材までモデル化されている詳細なモデル (連結板あり)</td> </tr> <tr> <td>LOD400</td> <td>接合部のボルトまでモデル化されている非常に詳細なモデル</td> </tr> </tbody> </table>	詳細度	定義	LOD100	単純な記号	LOD200	概略レベルのモデル (主要な部材のみ)	LOD300	外形は正確にモデル化されているが、接合部は位置表示のみのモデル化されている (主要な部材と接合される部材、連結板なし)	LOD350	外形とともに接合部材までモデル化されている詳細なモデル (連結板あり)	LOD400	接合部のボルトまでモデル化されている非常に詳細なモデル
詳細度	定義												
LOD100	単純な記号												
LOD200	概略レベルのモデル (主要な部材のみ)												
LOD300	外形は正確にモデル化されているが、接合部は位置表示のみのモデル化されている (主要な部材と接合される部材、連結板なし)												
LOD350	外形とともに接合部材までモデル化されている詳細なモデル (連結板あり)												
LOD400	接合部のボルトまでモデル化されている非常に詳細なモデル												
													

図3.5-4 土木構造物モデルのLOD設定例¹²⁾

地すべり機構解析の詳細度

CIM導入ガイドライン(案)「第9編 地すべり編」¹³⁾では、地すべり機構解析の視点で詳細度を定義している(表3.5-1)。この詳細度は、地すべり運動ブロック個別に与えられるものであり、さらに、地すべり運動ブロックの規模・範囲が見直される場合に変更される。すなわち、地すべり機構解析の詳細度は、地質調査の進展に伴い向上する性質を持つ。

表3.5-1 地すべり機構解析の詳細度¹³⁾

地すべり機構解析の CIM モデルの定義		
詳細度	地すべり機構解析のモデル化	イメージ図
100	地すべり機構解析に利用する調査で得られた結果(点・線・面情報)が、記号や一般的な表現で表現される。運動ブロックの範囲を判断するのに用いる程度のモデル。	<p><地形判読></p> 
200	地すべり機構解析に利用する調査で得られた主測線における結果(点・線・面情報)を基に表現される。地すべり機構解析に利用する主測線での調査結果より運動ブロックの範囲や深さ、運動ブロックに作用する地下水水位が概略確認でき、主測線での地すべり機構解析や対策計画(地すべり防止施設配置)検討に資する程度のモデル。	<p><主測線></p> 
300	地すべり機構解析に利用する調査で得られた複数測線の結果(点・線・面情報)に3次元的地すべり機構の解釈等を加え表現される。複数測線での調査結果に対して、解釈等を加えることで、実態に即した運動ブロックの範囲や深さ、運動ブロックに作用する地下水水位が把握できるとともに、地下の水みちや帯水層、地質の破砕部の分布等が把握でき、主測線での地すべり機構解析や対策計画(地すべり防止施設配置)検討、設計等の精度向上や照査に資する程度のモデル。	<p><複数測線></p>  <p><パネルダイアグラムでの表示></p> 

※地すべり機構解析の CIM モデルにおける詳細度は、個別の地すべり運動ブロック毎に一定の詳細度が設定される。そのため、原則として図3に示す地すべり機構解析の CIM モデルの更新により詳細度が変更されるものではない。

3次元地質・地盤モデルのLODとは？

3次元地質・地盤モデルのLODについては、BIM/CIMの事業段階を踏まえた詳細度と、モデルの予測程度を考えた予測度が提案されている(表3.5-2,3)。

不確実性を避けられない3次元地質・地盤モデルを利用する際に大切なのは、利用限界の明示や、薬と同様に用法を守っての利用、目的外利用の制限等に注意しての利活用と考えられる。さらに、全てのLODで正しい地質・地盤リスク(「4.7 地質・地盤リスクの継承」参照)を正確に伝えられるかが地質調査の本質である。

例えば、次のように事業に対する影響の大きい地質・地盤リスクは、リスク規模が不明だとしても、明示する必要があると考えられる。

【事業に大きな影響を与えるリスク】

- ◆その発現で人命保持に支障が生じること
- ◆その発現で施設が機能不全に陥ること
- ◆その発現で莫大な損害が生じること

このような地質・地盤リスクに配慮した3次元地質・地盤モデルのLODの開発が望まれる。

表3.5-2 3次元地質・地盤モデルの詳細度¹¹⁾

詳細度	CIMの段階	地盤モデルでの定義	地盤モデルの例
100程度	企画・計画 (事業計画)	・ 基盤地図情報や既存資料を利用して作成できる程度の形状情報 ・ 境界面のみの属性情報 ・ 形状情報と属性情報は分離しない	・ テクスチャモデル ・ ボーリングモデル ・ 準三次元断面図 ・ サーフエモデル(簡易版)
150程度	調査 (関係者協議)	・ 地質調査によって作成できる程度の形状情報 ・ 境界面のみの属性情報 ・ 形状情報と属性情報は分離しない	・ ボーリングモデル ・ 準三次元断面図 ・ サーフエモデル ・ パネルダイアグラム(サーフェス)
200程度	調査・解析 (設計・施工)	・ 地質調査によって作成できる程度の形状情報 ・ 地層や物性値等による属性情報 ・ 形状情報と属性情報はIDによる関連付けの上、個別に管理する	上記に加え ・ ソリッド・ボクセルモデル ・ パネルダイアグラム(ソリッド)
300程度	施工・ 維持管理	・ 掘削土工により判明した観察に基づく形状情報 ・ 地層や物性値等による属性情報 ・ 形状情報と属性情報はIDによる関連付けの上、個別に管理する	・ テクスチャモデル ・ 準三次元断面図 ・ サーフエモデル ・ ソリッド・ボクセルモデル ・ パネルダイアグラム

条件：いずれの詳細度でも「三次元地盤モデルの予測度レベル(PLOGM)」を明記する。

表3.5-3 3次元地質・地盤モデルの予測度¹¹⁾

レベル	地盤モデルでの定義	予測の程度	地盤モデルの例
1	・ 現地調査(観察・計測等)結果のみから作成される地盤モデル ・ 次元は問わない	少ない (実測図)	・ ボーリング柱状図 ・ 現地測定結果 ・ (トンネル)切羽観察図
2	・ 技術者が解析・考察等により予測した地盤モデル ・ 2D-CADで扱うことのできる二次元形状情報で構成される ・ 属性情報の有無は問わない	大きい (予測図)	・ 地質断面図 ・ 解析断面図
3	・ 技術者が解析・考察等により予測した地盤モデル ・ 3D-CADで扱うことのできる準三次元形状情報で構成される ・ 属性情報の有無は問わない	大きい (予測図)	・ 準三次元断面図 ・ 工学的地質図 ・ テクスチャモデル
4	・ ジオ・モデラーの支援を受けて技術者が解析・考察等により予測した地盤モデル ・ 3D-CADで扱うことのできる三次元形状情報で構成される ・ 境界面程度の属性情報を形状情報と同一で管理	極めて大きい (参考図)	・ サーフエモデル ・ ソリッドモデル ・ パネルダイアグラム
5	・ ジオ・モデラーの支援を受けて技術者が解析・考察等により予測した地盤モデル ・ 3D-CADで扱うことのできるオブジェクト型三次元形状情報で構成される ・ 属性情報は形状情報とは個別に管理するが、IDによって双方を関係づける	極めて大きい (参考図)	・ サーフエモデル ・ ソリッドモデル ・ パネルダイアグラム

3.6 モデル構築の難易度

3次元地質・地盤モデル構築の難しさ

3次元地質・地盤モデル構築の難しさに係る要因と難易度の目安を表3.6-1に示す。全般に、地質構造が複雑であるほど地質調査による解釈の難易度は上がり、3次元地質・地盤モデル構築の難易度も高くなる。

また、表3.6-2に示すように、事業の進捗段階に応じて、得られる地質調査データは増加するため、数量が多くなれば必然的に作業量が増えモデル構築の難易度は増すことになる。さらに、事業段階のステップアップに応じてモデル構築に関連するデータも増加するので、その管理も慎重に進めなければならない。

地質調査データの質が良ければ、信頼性の高い3次元地質・地盤モデルを構築できるが、モデル構築の難易度は低くなるわけではないことに注意が必要である。

表3.6-1 3次元地質・地盤モデル構築の難易度の目安

分類		3次元地質・地盤モデル構築の難易度		備考	
		低	高		
地質	自然 地盤	地質時代	新しい時代	古い時代	新：第四紀、新第三紀 古：中生代以前
		種類	堆積岩	火山岩 深成岩 変成岩	
		層相	整然層	非整然層	整然層：堆積性碎屑物 非整然層：混合・変形するメランジエ、タービダイト等
		層相変化	少ない	多い	
	地質構造	単純	複雑		
人工 地盤	成り立ち	明確	不明確		
地質調査 データ	質	良	不良※	※モデル化が不可能な場合もある	
	量	多い	少ない		
対象モデル数		少ない	多い		
解析領域		狭い	広い		
解像度・分解能		低い	高い		

表3.6-2 事業段階と3次元地質・地盤モデル構築の難易度の例

事業段階	3次元地質・地盤モデル構築に必要なデータの例	モデルの位置付け	モデル水平分解能	モデル垂直分解能	3次元地質・地盤モデル構築の難易度
維持管理 施工管理 詳細設計	地質調査報告書 物理探査、孔内試験、室内試験、計測・観測（モニタリング） 切羽観察、施工情報 土軟硬判定（岩盤分類）資料 地質図（縮尺1/500～1/1,000） 詳細測量地形（レーザー測量・写真測量） 電子地形図（CAD、DEM※1） 地質DB※2 既存文献・資料	詳細 ↑	0.5m ～ 5m	0.01m ～ 0.1m	高 ↑
詳細設計	地質調査報告書 物理探査、孔内試験、室内試験 土軟硬判定（岩盤分類）資料 地質図（縮尺1/1,000～1/2,000） 電子地形図（CAD、DEM） 地質DB 既存文献・資料		5m ～ 10m	0.1m ～ 0.5m	
概略設計	地質調査報告書 地質図（縮尺1/2,000～1/5,000） 電子地形図（CAD、DEM） 地質DB 既存文献・資料		5m ～ 10m	0.5m ～ 1.0m	
概略設計 計画	地質図（縮尺1/25,000～1/50,000） 電子地形図（CAD、DEM） 地質DB 既存文献・資料		5m ～ 50m	1.0m ～ 5.0m	
計画	地質図（縮尺1/50,000～1/200,000） 電子地形図（DEM） 地質DB 既存文献・資料	概略 ↓	5m ～ 250m	1.0m ～ 5.0m	低 ↓

※1：数値標高モデル（Digital Elevation Model）

※2：ボーリング、サウンディング、地質・地盤リスク評価等のデータベース

3.7 モデルの信頼性

モデルの信頼性向上には一次データの品質を確保する
地質・地盤モデルの信頼性を確保・向上するためには、モデルの入力データとなる地質調査データ(一次データ)の品質について担保する必要がある。そのための注意点を以下に示す。

- ①ボーリング等の地質調査データが、統一された区分基準等により客観的に整理されているか
- ②個人差(知識・経験等による差)が生じていない地質調査データとして揃っているか、また、バラツキが認められた場合はどの程度か
- ③地質調査の工法等に起因する地質調査データの質(例えば、通常工法と高品質ボーリングの違い)を加味しているか
- ④モデル作成上、地質調査データは使用目的や要求性能に対応した信頼性を有することができるか(許容できる範囲内のバラツキに収まるか等)
- ⑤モデル作成上、地質調査データに信頼性を有することができない(許容できる範囲内のバラツキに収まらない等)場合は、現存している地質調査データ自体の見直し、または追加の地質調査を検討する

3次元地質・地盤モデルの妥当性は専門技術者が判断する

地質は、地層そのものの成り立ちや後生的な断層・風化・変質、地下水等の作用により、分布・状態が複雑化し、限られた地点の地質調査データだけで正確なモデル化を行うことは困難である。盛土等の人工的に造成された地盤についても同様で、人工地盤のモデル化には造成履歴等の情報が不可欠である。

3次元地質・地盤モデルは、3次元図化技術がいかに進歩しようとも、地質調査手法の精度や限界、情報の粗密等に起因する不確実性を多分に含んでいる。そのため、地質技術の専門家が下記の点に留意して3次元地質・地盤モデルの妥当性を評価し、モデルの信頼性を向上させる必要がある(図3.7-1)。

- ①対象構造物及びその事業段階によって異なる使用目的や要求性能に応じた精度を有するために必要となる、地質調査データの「量」と「質」が確保されているか
- ②既存調査成果を用いる場合は、地質構造発達等の解釈が科学的に妥当であるか
- ③空間補間に際して、地質事象に合った適切なアルゴリズムを使用しているか
- ④作成したモデルに矛盾がないか(「[6.9 モデルの妥当性](#)」を参照)

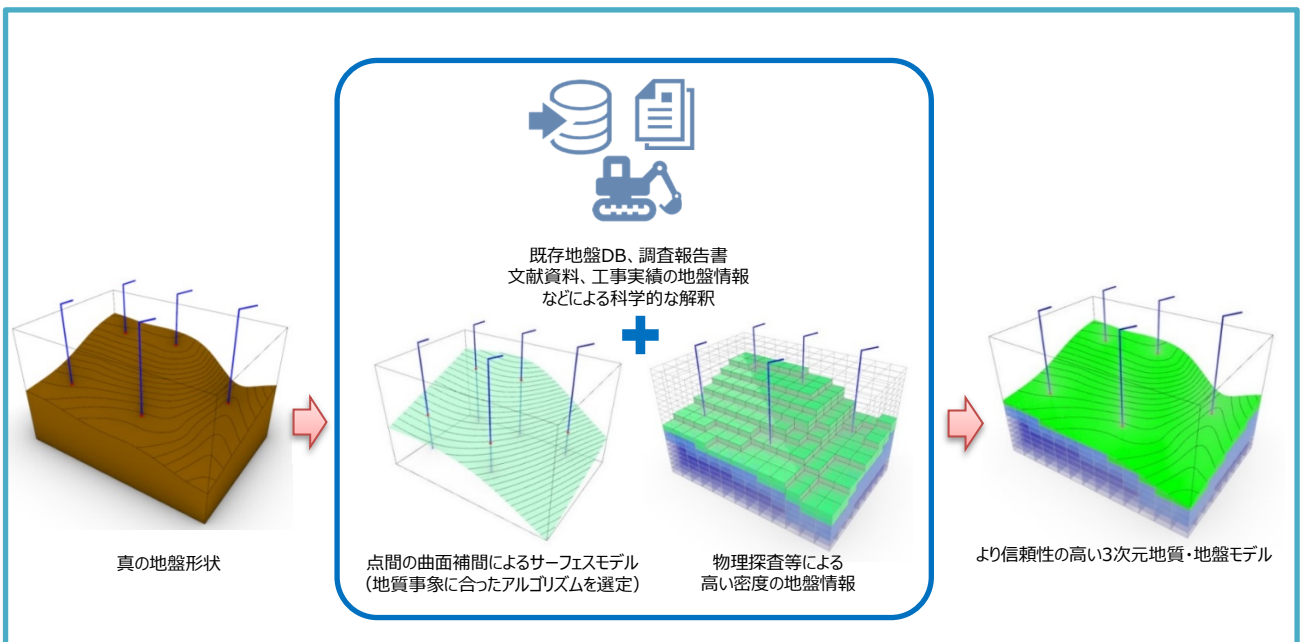


図3.7-1 3次元地質・地盤モデルの信頼性を向上させるイメージ

3次元地質・地盤モデルの独り歩きへの阻止

何の属性情報も付いていない3次元地質・地盤モデルは、その品質も信頼性もわからないので安心して利活用するのは困難である。モデルだけを独り歩きさせないためには次のような観点が重要と考えられる。

- ①データ品質に直結するような地質調査の性能基準が示されている
- ②正しい手順でモデルが構築された記録が残っている
- ③モデル化に必要な全データが揃い、②によりトレーサビリティが確保されている

3次元地質・地盤モデル構築に使用できる地質情報

3次元地質・地盤モデル構築に使用できる地質情報は、適切な基準・手順で品質が確保された地質調査結果であり、3次元配置しても地質図学的に矛盾が無く、かつ、幾何学的な整合性がとれている必要がある。

3次元地質・地盤モデル構築に用いる地質調査情報は、調査担当者や調査精度、技術者の思想により極端な差異が生じることは望ましくない。もし品質に不適合であれば、既存データの再評価による修正や、場合によってはデータの利用可否判断が必要となる。

地質調査の性能基準

日本地質学会では地質調査の質の基準として、「地質基準」を定めている¹⁴⁾。この基準は対象とする地質体に応じて、達成を推奨する内容を、到達目標でランク分けした“性能基準”を示したものである(表3.7-1)。

ランクDの調査は「この調査をしなければ調査したとは言えない」という、地質学的に最も基礎的な調査である。この段階の調査をおろそかにすると、上位ランクの調査を行ったとしても十分な成果を望むことができない。すなわち、上位ランクの調査は下位ランクを満足していることが前提となる¹⁴⁾。

地質体毎の基準を表3.7-2～11に示す。なお、本基準は地質学の発展や調査技術の進展を取り入れて見直しが行われるため、最新の基準については確認が必要となる。

この「地質基準」は、地質図と同様に、収集した地質情報の品質判定や、3次元地質・地盤モデルの品質を記録する指標になると考えられる。

表3.7-1 地質調査の品質（性能基準）ランク¹⁴⁾

ランク	品質の目安
A	最新の調査手法を駆使し、国際学会の招待講演とされるような最先端の調査博士論文に相当
B	博士論文～修士論文に相当
C	修士論文～卒業論文に相当
D	卒業論文に相当。地質工学の調査としては、この基準を達成しなければ調査したとは言えない必要最低限の調査。

※上位ランクの基準は、下位ランクを基準を満足していることが前提である

表3.7-2 正常堆積物の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	正常堆積物 ^{※1}			
	同定	分布	地質構造	堆積環境 ^{※2}
A	形成過程を考慮した正常堆積物の同定	堆積過程・テクトニクス過程に基づく堆積盆形成のモデル化	地質構造形成のモデル化	環境変動のモデル化と将来予測
B	堆積相（浅海成、深海成、網状河川、蛇行河川等）の同定と堆積年代の認定	地下を含めた3次元分布形態の解明	構造運動（断層活動、褶曲）時期および応力場変動の解明	環境変動の定量的解明
C	堆積域（陸成、海成）の認定	同時断層の側方追跡と形成年代の認定	地層の上下の層理面および断層の方位および褶曲形態の定量的解明	環境変動および変動時期の認定
D	構成粒子の起源・粒径による堆積物の分類とそれらの変動周期の認定	地表における分布と層序および他の地質体との境界の認定	層理面および断層面の走向・傾斜分布と岩相分布との関係の認定	堆積場と環境変動記録の認定
	資源 ^{※3} の起源と賦存量の評価			
	資源賦存状況の3次元分布の解明			
	資源の2次元分布の認定			
	資源の有無の確認			

※1 自然の堆積作用によって形成された地質体で、礫岩、砂岩、泥岩等の碎屑性堆積物のほかに、石灰岩、チャート、石灰、蒸発岩、氷床等も含まれる。これらに挟在するタービダイトや火山砕屑物も含める

※2 陸域や深海域等の堆積場、熱帯や寒帯等の気候、堆積水深、水温、気温、大気組成、海水組成、生物量、氷床量、海水準、後背地とそのテクトニクス等、堆積物に記録されているものをいう。

※3 地下水、石油、石炭、天然ガス、ヨードのほか鉄鉱、ウラン、漂砂、石材等が含まれる。

表3.7-3 沖積層の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	沖積層				
	岩相と分布	形成史	気候変動史	海水準変動史	地殻変動史
A	沖積層堆積過程のモデル化	1000年間隔での年代認定に基づく過去2万年間の形成史の確立	気候変動のモデル化と将来予測	海水準変動のモデル化	地殻変動のモデル化と将来予測
B	地表および地下試料に基づく3次元岩相分布の解明	500年間隔での年代認定に基づく形成史の解明	全球的気候変動と対比し、調査地域の気候変動史を解明	全球的海水準変動と対比し、調査地域の海水準変動史を解明	広域地殻変動と対比し、調査地域の地殻変動史を解明
C	地表および海上からの沖積層の地下分布の探査	堆積相認定と複数年の年代認定	気候変動量と変動年代の認定	海水準変動量と変動年代の認定	地殻変動量と変動年代の認定
D	現地における地質層序の認定及び地形資料・既存地質資料に基づく岩相分布の認定	層序の認定と既存の形成史への対比	気候変動記録の確認と既知の気候変動史との対比	海水準変動記録の確認と既知の海水準変動史との対比	地殻変動記録の確認と既知の地殻変動史との対比

表3.7-4 付加体堆積物の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	付加体堆積物						
	岩相の3次元分布	岩相の形成年代	岩相の付加年代	岩相の起源	付加機構の解明	付加過程以降の変形・変成作用	資源の起源と賦存量
A	付加過程と関係付けた岩相の3次元分布の解明	200万年精度	200万年精度	各岩相の形成環境変遷の解明	付加過程のモデル化	付加体の上昇・剥削過程のモデル化	資源の起源と賦存量の評価
B	1mオーダーの岩相分布および岩相の接合関係の解明	500万年精度	500万年精度	各岩相の形成過程の解明	付加過程が進行した地下深度・温度・応力状態の解明	各岩相における変形・変成の側方変化定量的解明	資源賦存状況の3次元分布の解明
C	地表および地下の10mオーダーの岩相分布認定	1000万年精度	1000万年精度	起源を同じくする岩相内の側方変化に基づく各岩相形成環境の解明	付加に伴う変形・破断・接合過程の解明	起源を異にする各岩相の変形・変成の相違の定量的解明	資源の2次元分布の認定
D	地表の100mオーダーの岩相分布認定	1000万年より悪い精度	1000万年より悪い精度	海溝充填堆積物、海洋底構成岩石、海洋底被覆堆積物、海溝陸側斜面被覆堆積物と起源を異にする岩相の区分	付加体形成周期への位置づけ	変形の定量的解析および変成の温度・圧力条件の解明	資源の有無の確認

表3.7-5 火山および火山岩の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	火山および火山岩									
	一般調査			活火山調査			地熱調査			
	火山岩の同定	火山岩分布調査	火山体構造調査	噴火活動履歴調査	火山災害予測	火山活動観測	貯留構造調査	熱構造調査	地熱流体調査	鉱物資源の起源と賦存量調査
A	成因を考慮した火山岩の同定	層厚10cmオーダーでの岩相変化の確認	火山体3次元構造のモデル化	将来の活動様式モデル化	加害因子毎の危険範囲の確率予測	マグマ供給系のモデル化と噴火予測	貯留構造のモデル化	熱構造のモデル化	地熱流体変動のモデル化	資源の起源と賦存量の評価
B	化学組成や粒度組成による火山岩の同定	層厚1mオーダーでの岩相変化の確認	地下試料による火山体構造の確認	各噴出量時間積算階段図の作成と噴火様式の同定	加害因子毎の危険範囲の数値予測	火山体地下の物理・化学変化の連続確認	原位置における貯留構造の確認	原位置における熱構造の確認	地熱流体の起源・流動方向・貯留場所の確認	資源賦存状況の3次元分布の解明
C	造岩鉱物組成・微細組織による火山岩の同定	層厚10mオーダーでの岩相変化の確認	物理特性による火山体構造の確認	各噴出物の空間分布の確認と噴火年代の認定	被災実績域の現地確認と危険範囲の経験的予測	震動源の位置確認	物理特性による貯留構造の確認	地表試料による熱源の種類・年代・温度・体積の確認	地熱流体の地球化学的的特性の確認	資源の2次元分布の認定
D	現地における火山岩の岩石名と産状の同定	層厚100mオーダーでの岩相変化の確認	地表試料による火山体構造と層序の確認と形成年代の認定	噴火層序の確立と噴火記録の抽出	既存資料による被災実績域の抽出と避難場所・経路の確認	地震発生頻度の確認と表面変化の目視確認	地表試料による貯留構造の確認	地表変質域の確認と地表での熱量確認	温泉・噴気の分布確認	資源の有無の確認

表3.7-6 深成岩の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	深成岩							
	一般調査				岩脈	節理	マサの土木地質的調査	資源の起源と賦存量調査
	深成岩の同定	深成岩体の分布と地質構造調査	捕獲岩・含有物	岩体形成史				
A	成因を考慮した深成岩の同定	成因を考慮した深成岩体の3次元分布解明	捕獲岩・含有物形成過程のモデル化	定置モデルを含む岩体形成史（地質構造発達史）の作成	形成場と成因を考慮した岩脈形成過程のモデル化	節理形成過程のモデル化と水理モデルの作成	マサ形成過程のモデル化	資源の起源と賦存量の評価
B	化学組成や鉱物組成等を総合的に用いた深成岩の同定と性状認定	深部情報を用いた深成岩体の3次元形状・内部構造の認定	化学組成や鉱物組成等を総合的に用いた捕獲岩・含有物の同定と性状解明	岩体冷却年代と岩体形成順序の解明	化学組成や鉱物組成等を総合的に用いた岩脈の同定と形成年代の認定	節理の3次元分布と透過性状の解明	マサの3次元分布の解明	資源賦存状況の3次元分布の解明
C	鉱物組み合わせによる深成岩の同定	物理的特性による深成岩体の分布認定	鉱物組み合わせによる捕獲岩・含有物の同定と性状の認定	地質学的・岩石学的調査による相対的岩体形成順序の認定	鉱物組み合わせによる岩脈の同定と性状の認定	地下深部における節理の分布や性状の認定	マサの地質・岩石学的性状と物理・化学的性状の認定	資源の2次元分布の認定
D	現地における深成岩の同定	現地試料による深成岩体の分布と内部構造認定	現地における捕獲岩・含有物の産状性状の認定	現地における深成岩と周辺岩石との相互関係の認定	現地における岩脈の分布・産状・内部構造等の認定	現地における節理の分布や性状の認定	現地におけるマサの分布・産状・性状認定	資源の有無の確認

表3.7-7 変成岩の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	変成岩						
	原岩の性質	変成岩の鉱物組成	変成岩の異方性	鉱物組成および異方性の3次元分布	変成作用の条件	変成年代	資源の起源と賦存量
A	原岩の形成過程のモデル化	鉱物形成過程のモデル化	異方性の形成モデル化	10cm精度	変成過程のモデル化と構造発達史への位置づけ	200万年精度	資源の起源と賦存量の評価
B	原岩形成の地質年代および形成環境の解明	鉱物組成の原岩依存性の定量的解析	異方性と構成鉱物類および鉱物配列との関係の認定	1m精度	最高変成条件への累進変成作用および後退変成作用の解析および鉱物種による変成年代の相違の認定	500万年精度	資源賦存状況の3次元分布の解明
C	原岩の残存構造の記載	鉱物組成の3次元分布	剥離・面構造・片理・線構造・節理および各種物理性の3次元分布の認定	10m精度	到達最高変成条件の解明および変成年代の認定	1000万年精度	資源の2次元分布の認定
D	原岩の起源が堆積岩類であるか火成岩類であるかの区別	構成鉱物の記載	縞状・片麻状・片状・千枚状・線状構造の記載	100m精度	変成作用の区分	1000万年以上	資源の有無の確認

表3.7-8 人工地質体の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	人工地質体					
	同定	分布	物理特性調査	汚染調査	地質環境の調査	最終処分場における人工地質体としての調査
A	構築過程の解明	層厚 cmオーダー、広がり 0.1mオーダーでの3次元分布の認定	沈下・液状化・斜面崩壊予測モデルの作成	汚染機構解明と浄化対策の策定	周辺の自然地質体におよぼす影響評価のモデル形成	処分場の閉鎖の評価と跡地利用計画の作成
B	構成物質の同定と詳細断面の作成	構成物質と地下水の流れの方向の認定	3次元物理・力学特性の認定	3次元汚染範囲と汚染速度の認定	自然地質体での汚染の拡がりや汚染速度の予測	周辺環境対策モデルの作成
C	地下試料等による人工地質体の同定と断面の作成	人工地質体と自然地質体の境界認定	各種試験等による物理・力学特性の確認と断面図の作成	表層における汚染の有無と汚染源（地下浸透箇所）の認定	自然地質体への汚染経路の確認	処分物質の特徴と処分時期の認定および自然地質体との相互作用の認定
D	地表試料による人工地質体の同定	履歴調査、文献調査等による埋立時期の確認、既存資料からの分布範囲の予測	原位置における物理・力学特性の確認	資料等調査による有害物質存在の有無の確認	現地における汚染物質の自然地質体への影響の予測	資料等による構造と処分物質の物理的・化学的的特性の確認

表3.7-9 重力移動体の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	重力移動体			
	分布と移動機構	物理特性	内部構造および物質移動	災害予測
A	重力移動機構の解明	物理特性の数値モデル作成	形成・移動モデルの作成	形成・移動モデルによる危険範囲の確率予測
B	重力移動地質体の3次元分布と移動様式の認定	重力移動地質体とその周辺の物理特性に基づく重力移動発生機構の解明	3次元構造と移動年代・移動量の認定	形成・移動モデルによる危険範囲の数値予測
C	重力移動地質体の3次元分布認定	重力移動地質体とその周辺の物理特性の定量的認定	3次元構造と移動状況の認定	被災実績域の抽出と危険範囲の経験的予測
D	重力移動地質体の2次元分布認定	現地における重力移動地質体とその周辺の地質体の物理特性の認定	現地における重力移動地質体の内部構造と移動機構の同定	危険範囲の抽出

表3.7-10 断裂（断層、裂か、節理）の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	断裂（断層、裂か、節理）								
	分布と種類	断裂およびその周辺の力学的性質	断裂およびその周辺の物質移動	断層位置の特定	断層の形状と変位量	断層面および断層間物質	活断層の活動履歴および形成環境	地質断層の活動履歴および形成環境	裂か・節理の形成環境
A	形成過程を考慮した3次元構造の解明	地下深部の断層主要変位位置における断層の性質の解明	物質移動のモデル化	2m以内	形成過程を考慮した3次元構造の解明	微細構造と物質の分布の解明	将来の活動予測（1回に活動する断層長を含む）	地質構造発達史との対応とその変遷の解明	地質構造発達史（応力場の変遷）との対応関係を解明
B	3次元分布の解明	地下深部の断層主要変位位置における母岩の性質の解明	流体と母岩との反応によって生成した物質の分布の解明	10m	3次元分布の解明	ずれの方向と鉱物分布の解明	各活動年代とその時の単位変位量、変位の向き、活動した断層長、地震の規模の認定	応力場との対応とその変遷の解明	裂か・節理周辺の応力場およびその変遷（人工改変を含む）の解明
C	地表における2次元分布と褶曲構造や構成地質体との関係の解明	地表付近における断層の性質の解明	流体と母岩との反応によって生成した物質の同定	数十m	平面的な分布と周囲の地質体の変形との関係の解明	断層間物質同定とスリッケンサイドおよび糸線の有無、方向の確認	最新活動時期およびその時の単位変位量、変位の向き、活動した断層の長さ、地震の規模の認定	変位の向き、変位量の認定	せん断性、伸張性等成因の解明
D	断層・裂か・節理の存在の確認	地表付近における母岩の性質の解明	流体の透過性（透水透気）の認定	数百m以内	存在の確認	面・ガウジ・断層間物質の確認	活断層の疑いのあるもの抽出	変位と褶曲等の地質構造と被覆堆積物の層厚変化との関係の確認	裂か・節理の存在の確認

表3.7-11 風化・変質の地質調査基準（性能基準）¹⁴⁾

ランク	風化・変質					
	風化・変質層の厚さ、側方変化等 3次元的な分布形態		風化・変質鉱物の同定	風化・変質年代	資源の起源と賦存量	風化変質の将来予測…構造物の保守計画にそなえて
	風化・変質相（色・粒度・硬さ・鉱物組成体構造）	風化帯・変質帯の力学的強度・化学的抵抗性の3次元分布				
A	風化相・変質相形成のモデル化（種類とその形成範囲の特定）	c m精度	風化変質鉱物形成環境変遷史のモデル化	風化年代・変質作用期を特定し気候変遷史、変質作用史、環境変遷史モデルの作成	資源の起源と賦存量の評価	構造物とその基礎の風化・変質の将来予測と保守計画の立案
B	風化相・変質相の定量的記載	1m精度	風化変質鉱物の種類と定量的認定と形成環境の解明	風化・変質生成物の3次元分布の認定と気候変遷史・変質作用史への位置付け	資源賦存状況の3次元分布の解明	構造物とその基礎の風化・変質変遷史の解明
C	風化相・変質相の定性的記載	10m精度	風化変質鉱物の種類の同定	原岩・構成鉱物の生成年代と風化・変質鉱物生成年代の認定	資源の2次元分布の認定	構造物とその基礎の風化・変質過程の認定
D	風化変動部と未風化・非変質部の鉱物組成等を同定し、原岩と風化変質帯を識別	100m精度	既存資料および現地における風化変質鉱物の同定	既往文献・資料および現地における風化・変質期の認定	資源の有無の確認	構造物とその基礎の構成鉱物組成・物質組成による風化・変質過程の推定

3.8 積算の考え方

3次元地質・地盤モデル作成の作業負荷

3次元地質・地盤モデル構築の積算をおこなうためには、地質技術者が実施してきた作業を細分化、共通化し、作業量を具体化し、積算の目安を考える必要がある。

事業の種類や規模、目的等により、3次元地質・地盤モデルの要求レベルは、単純な2層モデルから、褶曲・断層等を含む非常に複雑なモデルまで、多様なモデルを扱うことが想定される。一般に、地質モデルの定義の数だけ手間がかかるため、地層境界の枚数と作業負荷が比例すると言える。例えば、単純な2層モデル(仮に複雑度2とする)に対し、3層モデルでは“複雑度3”、これに断層が1つ加わると“複雑度7”となる(図3.8-1)。

しかし、3次元地質・地盤モデルを構築する際は、従来の2次元断面に比較し、多くの地盤情報(ボーリングデータ、ルートマップ、物理探査結果等)を統合的に取り扱う。扱う地盤情報の数量や、既存地盤情報の見直しの有無によっても作業量に直接影響することになる。対象範囲や、地層の数量、ボーリングの数だけで単純に割り切れるものではない。

後述する[標準的な3次元地質・地盤モデル構築のワークフロー](#)に基づき、解析の手順の流れと作業負荷のかかる段階を整理すると下記のように考えられる。

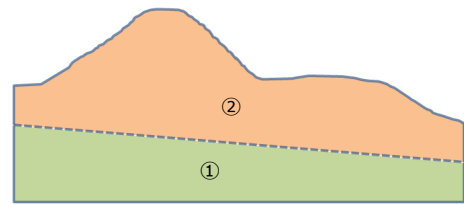
- ①モデリング計画
- ②資料収集・整理と3次元データ化
- ③3次元地質解析
 - ③-1 データクロスチェック
 - ③-2 モデリング
 - ③-3 地質モデル構築
- ④成果品作成の手順

作業リソースの考え方

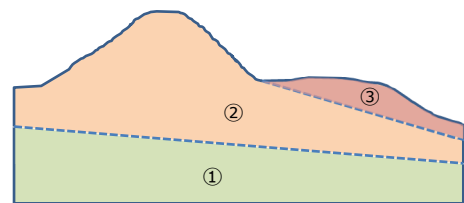
上記の構成をもとに作業項目を挙げ、作業量、その他経費を把握するための目安を表3.8-1に示す。作業項目には、予想される人員(責任)の割り当てを示している。

この担当割りに、具体的な情報量(1次データの数量)、モデルの複雑性を前提とした作業量(人工等)を加えることにより、作業負荷を把握することができる。作業に要求される能力および作業量の留意点を示す。

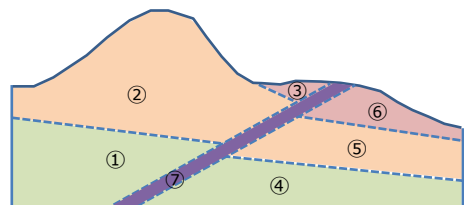
- ①モデリング計画
品質の定義、作業量を左右する全体計画のため個別業務上の管理技術者レベルの活躍が期待される



2層モデル【複雑度 2】



3層モデル【複雑度 3】



7層モデル【複雑度 7】

図3.8-1 地質モデルの複雑度の例

②資料収集・整理と3次元化

情報収集とそのデータの判断が必要、再検証すべき既存のデータが多い場合、モデル作成全体の時間から見た相対的な作業時間が多くなる

③3次元地質解析

複雑なモデルや、品質の高いモデルを作成する場合、作業者のスキル(熟練度)や、作業環境(ソフト、ハード)の性能が問題になる場合がある

④成果品

品質の定義が作成されること、リスク等の情報が引き継がれていること等、利活用されるものとなっているか確認する

表3.8-1 ワークフローに対する作業人員の例

段階	項目・作業	モデル				考えられるデータ・制約条件	人員					作業量に与える影響から考えられる 項目・数量・単位	
		ホーリングモデル	パネルダイアグラム	サーフェスモデル	ソリッドモデル他		その他	技術員	技師B～C	技師A	主任技師		
①	モデリング計画	要求事項からのモデルの品質定義	○	○	○	○	地質構造の再現性レベルの設定			○			1業務あたり
		解析領域の設定	○	○	○	○	互層、レンズ層等複雑な層境界の扱い		○	○			1業務あたり
		地質テーブル設定案作成	○	○	○	○	ソフト依存の作成モデル数・サイズの限界			○	○		サーフェス枚数
		データの引き継ぎ条件の設定	○	○	○	○	属性情報の項目設定			○	○		1業務あたり
		基本条件の照査	○	○	○	○				○	○	○	1業務あたり
②	資料収集・整理とデータ	データの棄却判断、品質チェック	○	○	○	○	柱状図、断面図、平面図			○	○		柱状図数・図面数
		XML化等の互換データの作成	○	○	○	○	紙・PDF・画像の柱状図からXML作成		○	○			柱状図数
		CAD化等の互換データの作成	○	○	○	○	紙・PDF・画像をもとに、CAD図面作成		○	○			図面数
		その他の互換データの作成	○	○	○	○			○				
		地表面データの作成	○	○	○	○			○				UAV等からの作成は、別途
		属性データの作成	○	○	○	○			○	○			1業務あたり
		細部条件の照査	○	○	○	○				○	○	○	1業務あたり
③-1	データクrosチェック	地質優先度の決定・地質テーブルの作成		○	○	○	3次元ドラフトモデルサーフェス			○	○		サーフェス枚数・既存データや、設計段階に影響される。1業務あたり
		基準となる2次元断面の配置		○	○	○	断面図測線が必要		○				断面数
		基準となる2次元断面の整合、および交点チェック		○	○	○			○	○	○		交点数
		データ修正方針の確認		○	○	○			○	○	○	○	1業務あたり、既存との整合により影響
③-2	モデリング	対比方法や基準の確認・不適合の解消、補完線、点の配置		○	○	○	パネルダイアグラム表示でのチェック			○	○		交点数・断面数
		補完断面検討～作成		○	○	○	パネルダイアグラム表示でのチェック			○	○		交点数・断面数
		確認メッシュ断面の確認		○	○	○	パネルダイアグラム表示でのチェック		○	○	○		交点数・断面数
		サーフェス形状の妥当性確認			○	○	コンター作成等のチェック		○	○	○		確認断面・サーフェス枚数
		不適合の解消			○	○				○	○		
③-3	地質モデル構築	サーフェスモデル完成、総合解析、境界面の照査				○	サーフェスモデルの完成			○	○	○	確認断面・サーフェス枚数
		モデル変換				○	他モデルへの変換		○	○			確認断面・サーフェス枚数・ソリッド個数
		属性リンク作成				○	各種モデル		○	○			確認断面・サーフェス枚数・ソリッド個数
		モデル照査				○	各種モデル			○	○	○	確認断面・サーフェス枚数・ソリッド個数
④	成果品作成	【成果品】 モデルの利活用のための汎用データへの変換	○	○	○	○	成果品仕様			○			汎用ソフトへの変換（3Dpdf等へ） 各設計ガイドラインとの整合や 協議資料作成業務との切り分け方が影響
		品質管理の記録作成	○	○	○	○	成果品仕様		○	○	○	○	1業務あたり
備考								技術補助/CADオペ 担当者		主任技師 照査		【課題】 補正係数の考え方をどうするか？ ・地質による？ ・対象構造物？ ・各ガイドラインとの整合	

凡例
 照査のタイミング
○ 該当

積算の基準

2019年5月に全国地質調査業協会連合会より3次元地盤モデル構築の積算基準(案)¹⁵⁾が示された。この基準案では、構造物を対象として、道路土工やダム、地すべり等に分類し、その構造物当りの歩掛を標準として示している(表3.8-2,-3)。

一方で、地質・地盤モデルは作成するモデルの数が増えると作業の手間は増加する。例えば、5枚と50枚の地層モデル作成は同じ作業負荷にはならない。作成するモデルによっては、難易度(「3.6 モデル構築の難易度」参照)が変わる。そのため、地質モデルの数や種類とそれに応じた難易度を考慮し、適切な人工で歩掛を調整する必要がある。

今後、このような積算基準を元に、実務への適用と検証が進められることが望ましい。

表3.8-2 3次元地盤モデルの構築歩掛表(1構造物当たり)¹⁵⁾

種別・細目	主任技術者	理事・技師長	主任技師	技師A	技師B	技師C	技術員	
(ソフトウェア業務)								
直接人件費								
計画準備			0.5	1.0	1.0			
モデリング計画			0.5	1.5	2.0	1.5	0.5	
資料収集整理と3次元化			0.5	1.0	2.0	2.0	2.0	
現地踏査			1.0	1.0	1.0			
3次元地質解析								
空間情報モデル構築			0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	
地質モデル構築			1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	
関連構造物モデル構築			0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	
3次元地盤モデル構築			1.0	1.0	1.5	1.5	1.0	
報告書作成			0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	
直接経費								
消耗品費			上記直接人件費の2%					

(注) 対象構造物と歩掛表(1構造物当たり)の考え方は、次を目安とする。

表3.8-3 1構造物の考え方¹⁵⁾

対象	細目	1構造物の考え方
構造物基礎(橋梁除く一般構造物)	直接基礎・杭基礎等	擁壁、シールド等の構造物を対象(1構造物当たりの延長500m以下) ※500mを超える場合は別途見積
構造物基礎(橋梁)	橋梁基礎	1橋梁当たり(橋台~橋台間) ※高架橋を含む、長大橋は別途見積
道路、河川	トンネル	トンネル本体・両坑口部分(影響範囲を含む)をそれぞれ対象 ※上記の場合、3構造物(補正値は*2.4)となる
道路土工	盛土、切土等	連続する土工区間で延長500m以下
河川土工	築堤、河道掘削等	連続する片岸の上構造物で、1断面当たりの延長500m以下 ※500mを超える場合は別途見積
ダム	堤体	ダムサイト1か所当り ※貯水池地すべりは含まない
ダム等貯水池	貯水池地すべり	貯水池地すべり1ブロック(複数の小ブロックを含む)当り
地すべり・斜面安定	地すべり	主体となる地すべりブロック(複数の小ブロックを含む)や単一の不安定斜面を対象
全般	地震動予測	100km ² (10km×10km)を基本単位とする ※構造物モデルとして建物等をモデル化する場合は別途見積

<構造物が複数となる場合の補正について>

・構造物が複数となる場合は、標準歩掛に下記補正式により算出される補正値を乗じるものとする。

補正式: $n+1(n-1) \times 0.7$ ※nは構造物数

例: n=2は×1.7、n=3は×2.4 n=4は×3.1 n=5は×3.8

参考文献

- 1) 土木情報学委員会 教育企画小委員会.土木情報学基礎編. 土木学会. 2017, 2p.
- 2) 大辞林.
- 3) NIED地すべり地形分布図デジタルアーカイブ 地すべり地形分布図 第46集「札幌・苫小牧」(http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/pdf-46.html).
- 4) 国土地理院地図3次元「手稲山」(<http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3次元/mountain/mountain.html>).
- 5) 日本応用地質学会.土木地質図作成マニュアル.1999.
- 6) 東京都土木技術研究所編.東京都地質図集 6(東京都(区部)大深度地下地盤図).1996.
- 7) http://www.kumagaigumi.co.jp/press/2017/pr_171108_1.html (2018年2月時点).
- 8) Hirok,H,Shoichi,N,Kazuo,K.Toshiro,O.Visualization of geologic model for a cut slope using 3D geological analysis system.2015,第15回国際地盤工学会アジア地域会議.
- 9) AVS/Express ユーザーズガイド. 2014,pp1-7.1-8.
- 10) 渡邊法美.地質・地盤リスク分析のためのデータ収集様式の研究 報告書.2008.
- 11) 久保知洋,矢吹信喜,河川施設の3次元モデルにおける詳細度に関する検討.土木学会論文集. 2014, Vol.70, No.2, pp.1_87-1_94.
- 12) 全国地質調査業協会連合会. CIMに対応するための地盤情報共有基盤ならびに3次元地盤データモデル標準の検討. 2016, pp.37-39.
- 13) 国土交通省.「CIM導入ガイドライン(案)第9編 地すべり編」.令和元年5月, pp10-11.
- 14) 日本地質学会地質基準委員会編著.地質基準. 共立出版. 2001, pp.2-20.
- 15) 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会 積算委員会. 3次元地盤モデルの構築 積算基準(案). 令和元年5月, <https://www.zenchiren.or.jp/sekisan/pdf/r01/3Dmodel.pdf> (2019年8月時点)

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

4章 品質管理の考え方

[4.1 要求事項と成果品](#)

[4.2 ワークフロー](#)

[4.3 プロセスマップ](#)

[4.4 モデリング計画](#)

[4.5 解析領域](#)

[4.6 属性情報の継承](#)

[4.7 地質・地盤リスクの継承](#)

[4.8 照査のタイミング](#)

4.1 要求事項と成果品

地質調査に対する要求事項と成果品

巻末に示すユースケースやCIM導入ガイドラインに基づき、建設事業等の目的における、地質調査に対する要求事項と必要な成果品の例を表4.1-1(1)(2)に示す。このように、事業やその段階によって要求事項や地質調査成果は様々である。

モデル化の対象となる地形地質事象や発生し得る現象によって、着眼点や必要な情報がある(表4.1-2)。適切なモデル構築方法を計画し、品質管理を見据えて、モデル作成に用いる入力データの品質、モデルの妥当性から成果品作成を網羅するプロセス管理が必要である。

表4.1-1(1) 建設事業等の目的における地質調査に対する要求事項と成果品の例

項目	地質調査に対する要求事項の例	対応する成果品の例
土工	切土 <ul style="list-style-type: none"> 切土範囲における地質分布・地質構造把握 地質分布状況に応じた切土のり面勾配の設定 地山の土軟硬区分に基づく掘削工法選定 土軟硬区分の掘削土量算定 旧造成地の切り盛り箇所把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図 地質断面図(土軟硬区分) 土軟硬区分コンター図 地下水位面コンター図
	盛土 <ul style="list-style-type: none"> 盛土範囲における軟弱層分布の把握 盛土材料の調達や材質・賦存量の把握 旧造成地の切り盛り箇所把握 	
トンネル	①坑口周辺部(坑口構造物、坑門工等) <ul style="list-style-type: none"> 坑口斜面の安定性評価 基礎地盤の支持力評価 偏圧区間の把握と安定解析に用いる地質情報の把握 低土被り状況の把握と安定解析に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質スライス平面図 地質縦横断面図(岩級区分、弾性波探査速度層分布、比抵抗分布図、地山等級分布図等) 斜面評価図(地すべり地形分布図、不安定土砂コンター図等)
	②トンネル区間(施工前) <ul style="list-style-type: none"> 施工管理、安全管理への留意事項 自然由来重金属の有無と分布の把握 低土被り区間のゆるみ範囲の把握 応力解析に用いる地質情報の把握 水文解析に用いる地質情報の把握 	
	③トンネル区間(施工時) <ul style="list-style-type: none"> 切羽前方予測による地質情報の把握 内空変位計測結果を用いた地山応力解析 変状時の原因特定と対策検討 水文解析に用いる地質情報の把握 対策効果の判定 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質スライス平面図 地質縦横断面図(岩級区分、弾性波探査速度層分布、比抵抗分布図、地山等級分布図等) 切羽観察台帳
	④維持管理 <ul style="list-style-type: none"> 変状や災害発生時の原因把握 対策検討に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質断面図、地質平面図 点検台帳
ダム	①事業計画 <ul style="list-style-type: none"> ダム軸の優劣判断に用いる地質情報の把握 ダム形式、規模、掘削量の検討に用いる地質情報の把握 止水処理範囲、地質上の課題等に必要な情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質断面図、コンター図
	②設計 <ul style="list-style-type: none"> ダムの座取り検討に用いる地質情報の把握 岩盤掘削線の検討に用いる地質情報の把握 止水処理工等の設計に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質断面図、岩級区分図、ルジオンマップ コンター図(地質区分、岩級区分、地下水位)
	③施工 <ul style="list-style-type: none"> 設計条件の妥当性確認に必要な地質情報の把握 施工時や完成後の維持管理に必要な地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削平面図(地質区分、岩級区分)
	④維持管理 <ul style="list-style-type: none"> ダムや貯水池地滑り等の安全性確認に用いる地質情報の把握 施設の維持管理や再開発に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質断面図、岩級区分図、ルジオンマップ コンター図(岩級区分、地下水位) 管理台帳(カルテ)
河川堤防/河川構造物	<ul style="list-style-type: none"> 旧河道等の要注意地形の分布 河川改修履歴や既設対策工 基礎地盤における透水層の分布範囲・層厚 基礎地盤における沈下特性 液状化層の分布範囲・層厚 砂質土のN値・粒度特性 堤体の土質構成 透水層および被覆土層の分布状況 樋門等構造物周辺や護岸背面空洞における緩みや空洞の有無・大きさ 遺物(木片、瓦礫等)の有無 河川周辺の斜面変動 被災履歴、被災原因 地下水分布 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図 推定土質縦横断面図 開削調査スケッチ 物理探査結果図(表面波探査、電気探査、クロスプロット図) 管理台帳(カルテ)
橋梁	①概略・予備設計 <ul style="list-style-type: none"> 路線選定に係る地質・地盤リスクの把握 	<ul style="list-style-type: none"> 空中写真判読図 地質平面図、地すべり分布図
	②予備調査 <ul style="list-style-type: none"> 地盤性状の把握 周辺地質・地盤リスクの把握 動的解析用地盤モデル作成 基礎形式の選定に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 空中写真判読図 物理探査結果図
	③施工 <ul style="list-style-type: none"> 基礎構造と支持層の関係把握 動的解析用地盤モデル作成 施工時の安全確保に用いる地質情報の把握 施工に伴い明らかになった地質情報によるモデル更新 	<ul style="list-style-type: none"> 地質平面図、地質断面図(縦断・横断面図)、コンター図 動的解析用モデル図

表4.1-1(2) 建設事業等の目的における地質調査に対する要求事項と成果品の例

項目		地質調査に対する要求事項の例	対応する成果品の例
斜面防災	①調査/設計	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面災害リスクの評価 ・安定解析 ・リスク監視基準の策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質断面（主断面、解析断面） ・すべり面コンター図：3次元安定解析や対策工設計に使用 ・平面図：斜面変動の規模や影響範囲 ・管理台帳（カルテ）
	②施工	<ul style="list-style-type: none"> ・安全確保するためのモニタリングや目視によるリスク監視 ・施工掘削面等で得られた地質情報によるリスク評価のチェック ・リスク評価基準や監視基準の見直し 	
	③維持管理	<ul style="list-style-type: none"> ・竣工後の日常安全管理（観測機器によるモニタリング、カルテ等による点検） ・地質情報の見直しや追加地質調査の実施による安全性評価 ・リスク評価基準や監視基準の見直し 	
	④緊急時	<ul style="list-style-type: none"> ・変調時の原因究明と危険予測 ・発災時の災害対応 ・応急工事におけるでき高/でき型管理 	
支持層	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層の分布形状 ・支持層の物理性状 ・支持層深度 ・中間層の分布と土質乗数 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層線断面図 ・支持杭位置におけるクロス断面 ・支持層分布コンター図（地質境界面コンター図） 	
岩盤分類（地山分類）	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤安定性評価（地震応答評価、切羽予測、斜面不安定化予測、等） ・設計/施工管理（支持力検討、基礎処理や根入れ範囲・深度計画、リッパビリティ、トラフィカビリティ、でき高管理、掘削土量計算 等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤分類断面図 ・岩盤分類境界面コンター図 ・岩盤分類層厚コンター図 ・工事進捗差分コンター図 	
地中熱利用	<ul style="list-style-type: none"> ・地中熱利用適地の抽出、地中熱回収量の評価 ・地下水シミュレーションに用いる地盤モデル構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質境界面モデル ・地層ソリッドモデル ・地層ボクセルモデル ・地下水分布図、地下水水面コンター図 	
土壌汚染	<ul style="list-style-type: none"> ・有害物質の性質や土壌・地下水の性質 ・地質構成・構造、帯水層、難透水層の分布、地下水流動 ・汚染範囲、濃度分布、地層や地下水と汚染の関係 ・汚染メカニズムの解明や、必要な調査・対策検討の有用な地質情報 ・地下水汚染シミュレーションによる遮断壁や浄化対策工等の効果予測 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水流動予測図 ・汚染予測時系列変化図（コンター図） ・対策効果予測図 ・シミュレーションに用いる3次元メッシュモデル ・解析結果の3次元可視化/アニメーション（予測結果、汚染範囲、濃度分布、地層と汚染の関係、地下水と汚染の関係） 	
地震基盤	<ul style="list-style-type: none"> ・浅部地盤構造 ・深部地盤構造 ・地震基盤以深の地殻構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震基盤面コンター図 ・工学的基盤コンター図 ・地質断面図 	
データベース	<ul style="list-style-type: none"> 【DBに求める機能】 ・既存地盤調査等資料の統合管理 ・利用者の立場に立った情報蓄積・提供・可視化 	<ul style="list-style-type: none"> ・電子化された各種地盤情報（図面、報告書、各種資料等） ・サーフェスモデル、ボクセルモデル 	
アカウントビリティ	<ul style="list-style-type: none"> ・技術的判断・評価に資する ・復旧作業等の手順の理解に資する ・実態や影響の速やかな理解や復旧工事等の影響に関する合意に資する 	<ul style="list-style-type: none"> ・基本資料をベースにステークホルダに合わせた資料とする 	

表4.1-2 モデル化の対象となる地形・地質事象における着目点や必要情報の例

対象となる 地形・地質事象	3次元地質・地盤モデル構築時の着目点や必要情報の例
地形	扇状地 <ul style="list-style-type: none"> ・土砂災害、越流・破堤、洪水氾濫等の有無 ・微地形判読（旧河道、天井川、後背湿地、自然堤防等） ・地下水露頭や地下水利用
	台地 <ul style="list-style-type: none"> ・段丘面の平坦性、段丘崖の比高や傾斜 ・地形面分類を裏付ける地質情報（火山灰等） ・ロームや火山灰層等の降下堆積物は現地形や旧地形を考慮する
	丘陵地 <ul style="list-style-type: none"> ・粘性土、砂質土、礫質土が互層状に分布することが想定され、ボーリングデータ間の地層の繋がりに注意 ・現地踏査や既往資料等で確認される地層の走向傾斜に矛盾のないように地質境界を作成 ・層相変化に富む地質の場合、レンズ層が複数挟在することが想定される。レンズ層の厚さの側方変化や端部をどこまで延長するか等、考え方を統一する ・開析谷に分布する谷底堆積物や斜面下方に分布する崖錐堆積物は、基盤層と比較して層厚が薄い。そのため、どの程度の精度でモデルを作成するかを協議する
	山岳地 <ul style="list-style-type: none"> ・より正確な地形図あるいはLP等の地形データを入力し、地質調査の初期より使用すると各種作業の効率化が図れる ・地質モデル作成時には、可能な限り地表地質踏査時の地形図と同じ地形データを用いる ・微地形判読図（傾斜変化、遷急線・遷緩線、初生地形、0次谷、不安定地形、変動地形、植生異常 等） ・地表地質踏査のルートマップ
	急傾斜地 <ul style="list-style-type: none"> ・不安定土塊の分布 ・対象箇所周囲に同様の災害履歴がないか（同種の地形地質条件下では崩壊形態が類似することがある） ・施工に伴う地形改変データ、対策施設の計画、施工計画データ ・現況地形や被覆/構造物情報を把握できる点群データ
地質	軟弱地盤 <ul style="list-style-type: none"> ・礫、砂、泥あるいは泥炭の単層のみで構成されることもある ・表面とは異なった堆積物あるいは種々の粒径をもつ単層の互層で構成されることも多い ・非固結でほぼ水平に堆積している ・単層の厚さ、岩相(粒径と成層構造)および単層の岩体としての形状、水平方向の変化 ・指交関係の処理 ・地形区分図、微地形判読図 ・LP地形データによる地形解析図
	人工地盤 <ul style="list-style-type: none"> ・人工改変前の地形データや土地利用状況を取得 ・地形図を利用する場合は縮尺の違いに注意 ・造成前後の数値標高モデル（DEM）を作成する場合、資料の精度に応じたメッシュ間隔について検討 ・メッシュを用いて土量計算する場合は、造成前後の基礎資料のうちDEMの精度が低いデータに合わせる ・正確な用地境界を取得 ・正確な現地形データ（LP地形データ等） ・堤防周辺の水部の地形計測を実施する際は、航空レーザ測深も有効
	沖積層 <ul style="list-style-type: none"> ・沖積層とその他の時代地層との区分、沖積基底面の決定 ・沖積層の細分の視点（コーン指数、間隙水圧、N値、物理試験、力学試験、見た目（混入物他の土質の物性値から地層判断し、地層形成の特徴を踏まえる）） ・ボーリング間の地層境界を補間するための想定根拠の設定（基底面地形生成史の想定、基底面地形分類の推定、層相からの堆積環境を想定）
	活断層 <ul style="list-style-type: none"> ・微地形判読図（傾斜変化、遷急線・遷緩線、初生地形、不安定地形、変動地形 等） ・トレンチ調査結果 ・LP地形データ
	付加体 <ul style="list-style-type: none"> ・より正確な地形図あるいはLP等の地形データ（地質調査の初期より使用すると各種作業の効率化が図れる） ・地表地質踏査のルートマップ
	地すべり <ul style="list-style-type: none"> ・高精度DEMによる地表データの利用、微地形判読結果の利用 ・対策工設計に用いる地形データと現実の地形との乖離に注意 ・地表地質踏査や簡易測量、UAV等による追加測量で地形データが更新されることがある ・地すべり範囲の地形学的/地質学的認定、動態観測によるすべり面深度の認定 ・地下水位の把握（地下水観測孔や湧水地点調査）
	表層崩壊 <ul style="list-style-type: none"> ・微地形判読結果（傾斜変換線、集水地形等） ・地層の走向、傾斜、節理面(割れ目)の分布、風化層の厚さ、緩みに関する情報 ・崩壊前後の地形比較 ・崩壊素因・誘因の情報 ・切土計画、斜面対策計画
	岩盤崩壊 <ul style="list-style-type: none"> ・斜面の重力変形の抽出、線上凹地等の微地形判読、詳細な地形データによる微地形解析 ・高精度DEMによる地表データの利用、微地形判読結果の利用 ・斜面のパターン化による調査/点検の視点 ・斜面内部の不連続面の分布 ・不連続面の開口の程度や性状、岩盤の風化や破碎の程度

4.2 ワークフロー

3次元地質・地盤モデル構築の作業段階

3次元地質・地盤モデルを構築する流れのなかで重要と思われる作業段階は、作業計画、データの品質管理、モデルの構築、モデルの品質管理、およびコミュニケーションと考えられる。これらの要点は次のようになる。

【作業計画】

対象とする地質事象や作成するモデルの種類により、作成方法やチェックポイントが変わるため、作業着手前に作業計画を立てる。作業計画を立て、かかる期間や費用を見積り、モデル化の流れを示し、クライアントと協議し合意を得て作業に着手する。

【データの品質管理】

モデル構築に用いるデータの精度や座標基準は、意図してそろえない限り統一されていることは稀である。データの整備基準・作成方法、空間座標や精度等の品質を総合的にチェックする必要がある。整合性のないデータは棄却するか、原本データまで遡って品質を確認し、必要があれば修正する。

修正した履歴は必ず残さなければならない。

【モデルの構築】

サーフェスモデル等の3次元地質・地盤モデルを地質学的・地質工学的判断を行いながら、空間補間手法を駆使して作成する。

トライ&エラーが多いプロセスでもある。

【モデルの品質管理】

作成したモデルの形状に矛盾や歪みが無いかチェックする。

ツールの3次元可視化機能を活用し、モデルと入力データを重ね、大きな誤差が無いか、自然な形状か等进行评估してモデルの妥当性を判断する。

【コミュニケーション】

クライアントはモデル化の流れや方法論を知らない場合が多く、事前のヒアリングを十分行い、地質モデルを作る目的や具体的な用途や納期、モデル化の対象、必要な解像度等の方針を決定しなければならない。

さらに、モデル化はコンピュータ・グラフィックス製作や、全自動でできるものではないことを、クライアントに理解してもらうことも重要である。モデルは科学的な性質を持つ情報であり、用途によっては過剰な表現・装飾は誤解を与える場合もあり、注意が必要である。

品質管理手法としてのワークフロー

QMS(Quality Management System:ISO9001品質マネジメントシステム)では、作業を可視化し、改善し易さ、スピードアップ、作業進捗管理、記録の共有化等を図るためにプロセスを重視する。PDCAサイクルにより継続的改善を図り、不良品を0に近づける仕組みを作ることを目指したものである(図4.2-1)。

QMSは、不確実性が避けられない地質モデルの品質管理手法に通じるものがあると考えられる。3次元地質解析もプロセスを規定した標準的なワークフローがあれば、要所で品質チェックのマイルストーンを設けることができる。さらに、モデル化の目的や作業の効率性・生産性向上、成果品出力等を考慮し、適宜フローの組み替えも可能となる。

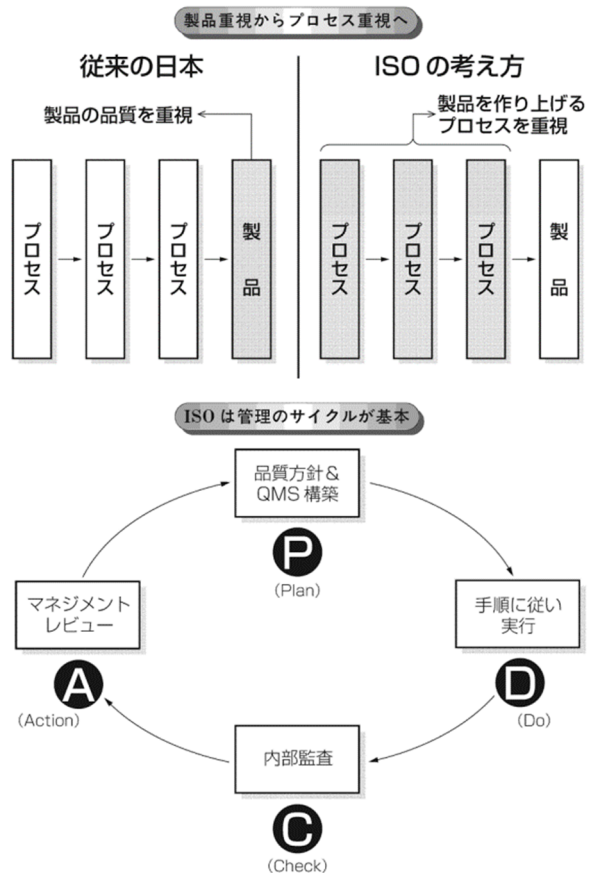


図4.2-1 ISOマネジメントシステムの考え方¹⁾

基本ワークフローの提案

3次元地質モデルの作業段階に基づいた基本的なワークフローを提案する(図4.2-2)。以下、ワークフローの要素を解説する。

①モデリング計画

事業の求める目的や用途に基づき、3次元地質モデルの対象と範囲、サーフェス・ソリッド等の種類・解像度・空間補間アルゴリズム等を検討し、3次元地質モデルの構築方法を組み立てる。

②資料収集・整理と3次元データ化

モデル構築に必要な資料を収集・分類・整理し、座標情報を与えて3次元データ化する。十分なデータが揃えば、③3次元地質解析に移る。

③3次元地質解析

③-1 データクロスチェック

データの3次元的なクロスチェックを行い不適合を抽出し、抽出した不適合を修正するか棄却する。修正及び棄却の記録を残す。

③-2 地質対比

3次元空間における地層の対比作業をおこなう。地質構造の情報が不十分な場合は、地質形成史や地質構造学等を考慮した補填データを追加する。

③-3 補間用データ作成

地質対比データより、サーフェスモデル等の計算に用いる座標データセットを抽出する。

③-4 空間補間処理

空間補間アルゴリズムを適用し、3次元地質モデルを作成する。作成した3次元モデルの形状が地質学的に妥当なものかチェックする。

③-5 地質モデル構築

地質層序判定に基づき3次元地質モデルを作成する。必要に応じて地層ソリッドモデルやボクセルモデルを作成する。最終的に3次元地質モデルの形状が地質学的に妥当なものかチェックする。

④成果品作成

構築した3次元地質モデルを用いて、地質断面・平面図等の図面出力や、データ交換用の3次元モデル作成、3次元可視化資料の作成、シミュレーション等に用いる二次利用データ出力等を行う。

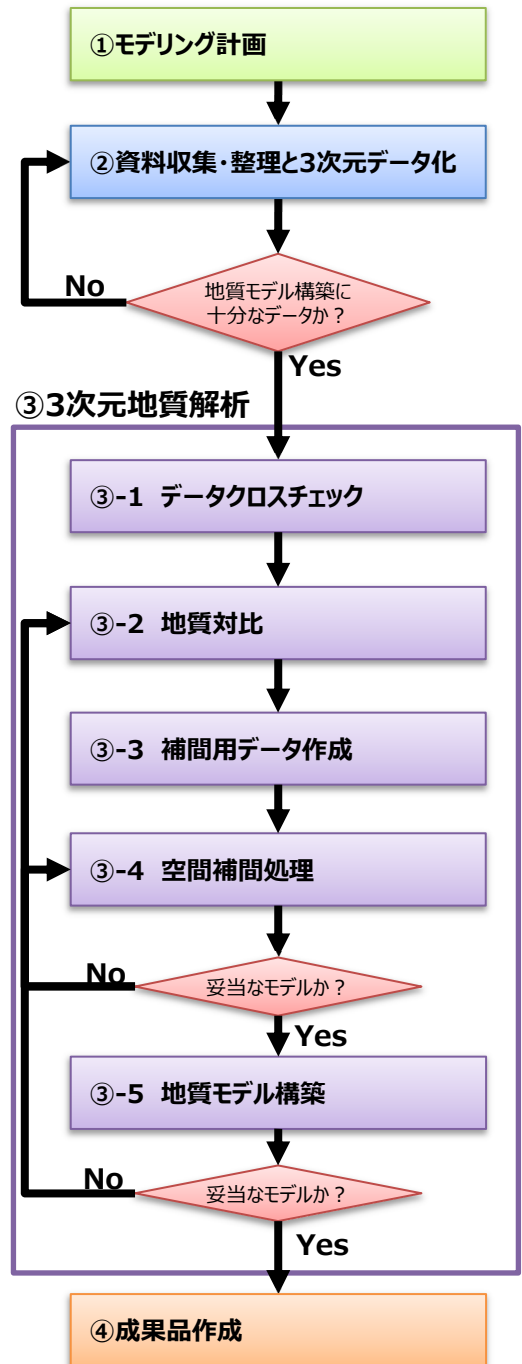


図4.2-2 3次元地質モデル構築の基本的なワークフロー案

4.3 プロセスマップ

プロセスマップとは

プロセスマップとは、業務の開始から終了までに実行される組織横断的な作業の流れを、視覚的に表現したワークフロー図である。プロセスマップには、作業要素毎のインプット・アウトプット、時間、コスト、品質水準等の情報を含めることができる。優れたプロセスマップの条件は、ワークフローにおけるステークホルダーの役割や、各作業要素の相互作用について十分な理解を得られる性能を持つことである。

国土交通省のBIM/CIMにおける段階モデル確認書IDM (Information Delivery Manual)では、業務・工事を実施する一連のプロセスにおけるステークホルダー、作業項目、情報確認が発生する場面を、プロセスマップにより表現している。

プロセスマップを描くための表記法にはいくつかの手法がある。なかでも、プロセスマップのメタデータ構造規格の国際標準 (ISO19510) であるBPMN (Business Process Model & Notation) は、BIMデータ国際交換標準の検討に利用されている。

BPMNの詳細度

プロセスマップは、業務の全情報を網羅的に図化するよりも、作業の階層や利用者の視点に応じて、詳細度を変えて作成する。BPMNにおける詳細度は、簡易な表記によるレベル1 (記述モデル) と、言わばプログラマー向けのレベル2 (分析モデル) に分けられる (表4.3-1)。

表4.3-1 BPMNの詳細度²⁾

レベル1 (記述モデル)	業務実務者の合意形成や、システム構築者に必要な情報を伝える道具として使用する。数少ない記号と注釈文によって、だれでも簡単に作成できて、分かり易い表記とする。
レベル2 (分析モデル)	業務プロセスをBPMシステムなどのITで実現するための設計情報として、業務の統制や例外処理などを記号で表す。使いこなすには、専門的な学習と経験が必要となる。

BPMNの構成

BPMNの構成要素について、以下に概要を示す。各要素の番号に対応した例を図4.3-1に示す。BPMNの詳細な記述ルールは参考書籍²⁾を参照すること。

①アクター

プロセスマップを作成する際に、はじめにアクターを定義する。アクターは、例えば、事業における発注者と受注者のように設定する。プロセスを詳細に記述する側は、役割や専門性で細分化する。

②プール・レーン

アクターはプロセスを記載するプールとレーンの枠でその役割を識別する。プールはアクターが実行する全てのプロセスを表す。レーンはアクターが持つ専門性や役割でプールを細分化する。

③イベント

イベントはビジネスプロセスの開始や終了を表す。

④タスク

タスクはプロセス内でおこなう作業を表す。タスクのうち、それ以上の分解ができないものをアトミックプロセス、さらに細かいプロセスに分解できるものをサブプロセス (複合プロセス) という。タスクのラベルは動詞を用いて具体的に記述する。

⑤フロー

フローはプロセス間を接続する矢印で、プロセスマップ内で実行される論理的な順序を表す。実線の矢印をシーケンスフローという。プール境界を越えて情報を渡す場合は破線矢印のメッセージフローを用いる。

⑥ゲートウェイ

ゲートウェイは、シーケンスフローの分岐と収束を制御するために使用する。

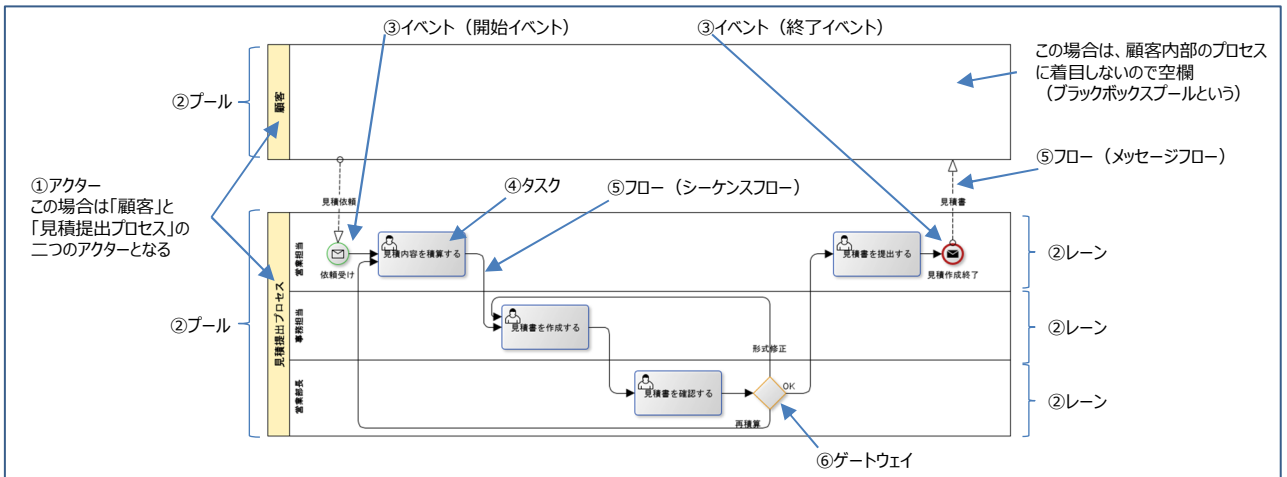


図4.3-1 BPMNの主要要素

3次元地質解析のBPMN

3次元地質解析のワークフローについて、レベル1のBPMN作成を試みた(図4.3-2)。このBPMNでは、3次元地質モデルの評価担当(例えば地質技術者)、3次元地質解析担当(専用ツールを操作する技術者)、電子データ作成担当(例えばデータ処理担当)の3者のアクターに分けている。

作業で作成される3次元地質モデルデータは、ワークフロー自体を流れる。図4.3-2で示される書類アイコン(データオブジェクトという)は、「4.6 属性情報の継承」にて後述する、「3次元地質・地盤モデル継承シート」に含まれる各種書類を示す。例えば、書類のうち「2.属性情報記録シート」は、作業着手時に暫定で入力し、作業が進むにつれて更新していくことを示す。

事業におけるBPMNの例

本マニュアルでは、事業対象別のユースケース(参考資料U-B.1~10参照)にて、3次元地質・地盤モデル作成の役割・タイミング・情報交換を明確にするため、レベル1の詳細度にて事業対象別のBPMN作成を試みた。

これらのBPMNにより、3次元地質・地盤モデルを活用する事業において、どのような場面でデータ交換するのか、照査しなければならないタイミングはどこかが、可視化されているといえる。なお、これらのBPMNは完成形ではなく、視点によっては不足・冗長な部分があるかもしれない。今後、機会があれば議論を深め、より分かり易く業務分析のおこなえるBPMNにしていく必要がある。

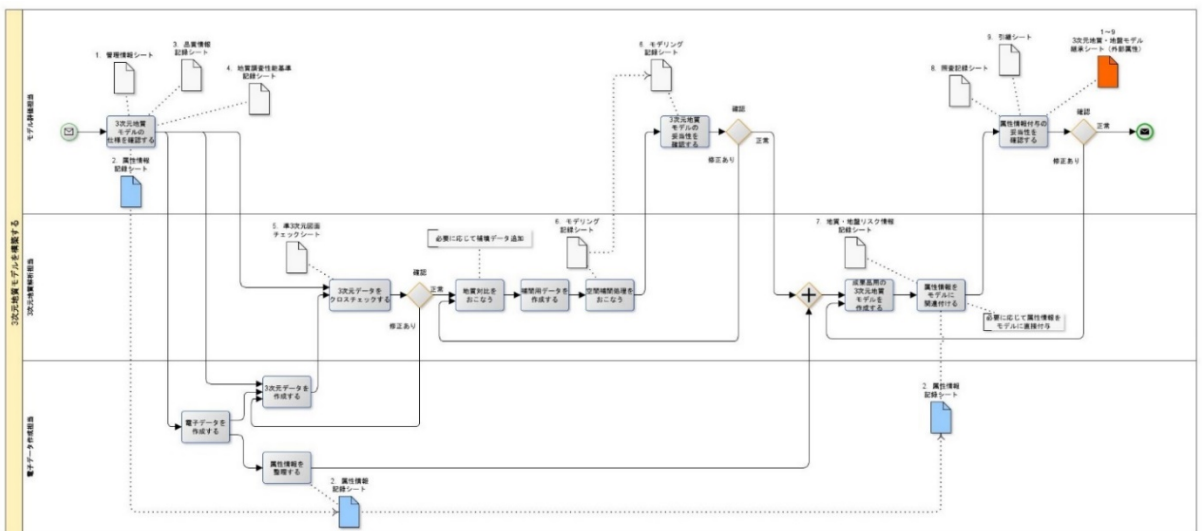


図4.3-2 3次元地質解析におけるBPMNの例

4.4 モデリング計画

「計画」に必要な視点

3次元地質・地盤モデルを構築するには、十分な「計画」を立てる必要がある。「計画」に大切な視点をまとめると次のようになる。

- ◆ 業務内容とモデル構築の目的を理解する
- ◆ 対象地域の地質構成・構造の背景を理解する
- ◆ モデルを作る範囲(解析領域)を決める
- ◆ 地質モデルの対象により、適切なデータ整理手順や補間
 - アルゴリズムを用いる
- ◆ データの流れを把握しワークフローは適切に拡張する
 - (例: 図4.4-1)
- ◆ 作業期間や費用を見積る
- ◆ クライアントと協議し合意を得て作業に着手する

3次元地質・地盤モデルを作成するタイミング

業務対応における3次元地質・地盤モデルを作成する時期は、「現場終了後～成果とりまとめ前」が多い(図4.4-2)。これはデータや地質解釈が整ってからからの着手が多いためと考えられる。

このようなタイミングでは、時間的な余裕が無くなることも考えられるので、地質調査の進捗・地質調査データの流れに注意して早期からの計画策定を推奨する。

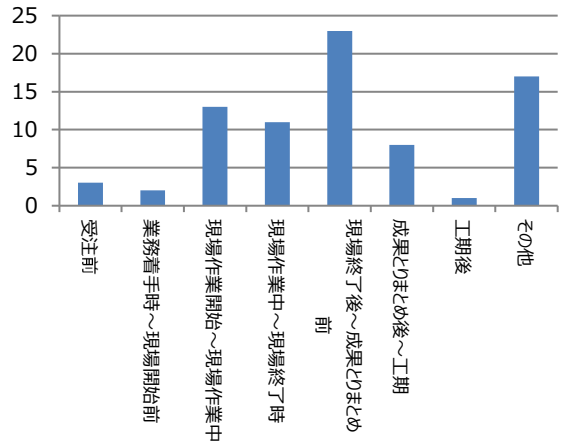


図4.4-2 3次元地質・地盤モデルを作成するタイミング (全78件)

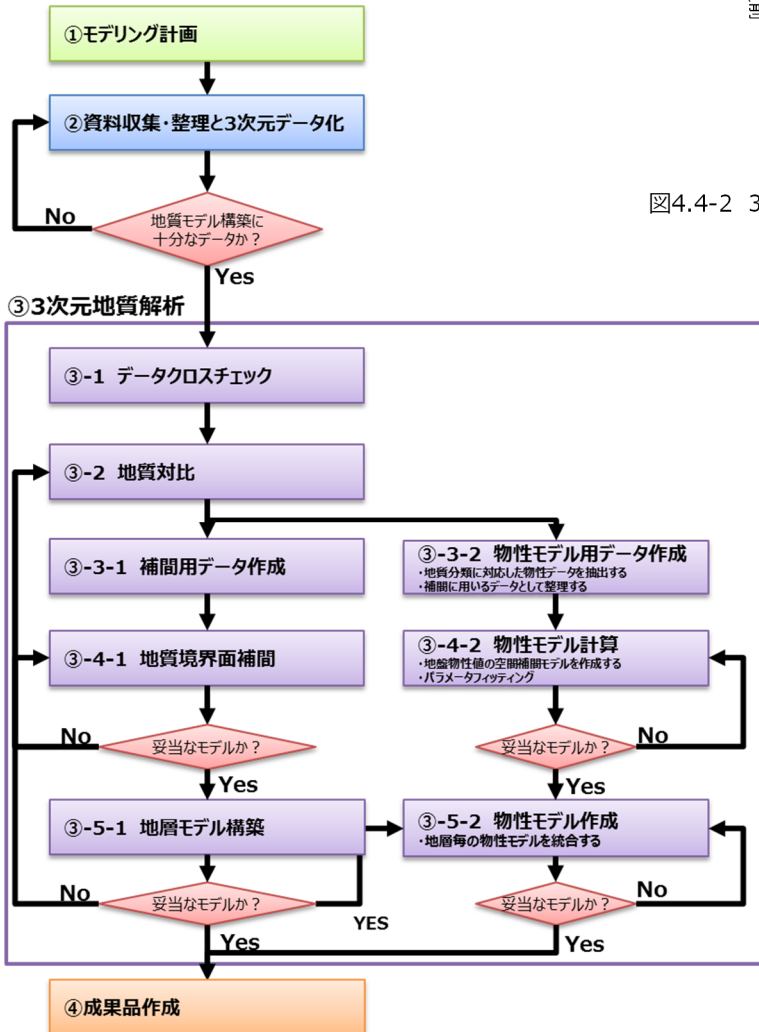


図4.4-1 ワークフローの拡張例 (3次元地盤モデル構築のフロー)

4.5 解析領域

解析領域の考え方

3次元地質・地盤モデルは補間計算を用いて作成する。補間計算に際しては、ボーリング位置における地質境界点や断面図に示される地質境界線より抽出した、“点データ”の座標値を用いる事が一般的である。ここで、解析領域をどう考えるかが問題となる。

図4.5-1 のようにモデル作成範囲内だけに“点データ”が分布すると、外挿処理範囲の形状は発散する。この発散を極力抑えるためには、図4.5-2に示すモデル作成範囲外のデータも使い、モデル作成範囲よりも広い領域で境界面モデルを計算することが望ましい。

これは、モデル作成範囲をデータの分布範囲より狭くするという意味であるが、例えば地下水解析目的では先に解析領域を決め、それからデータを集めることもある。この場合は、不足範囲のモデルを作成するための補助地質断面図や補填データが必要になる。

広域の地質モデルを作成する場合に、地域の特徴による小領域で分割作成し、後にそれらを合成して一つのサーフェスモデルにすることもある。

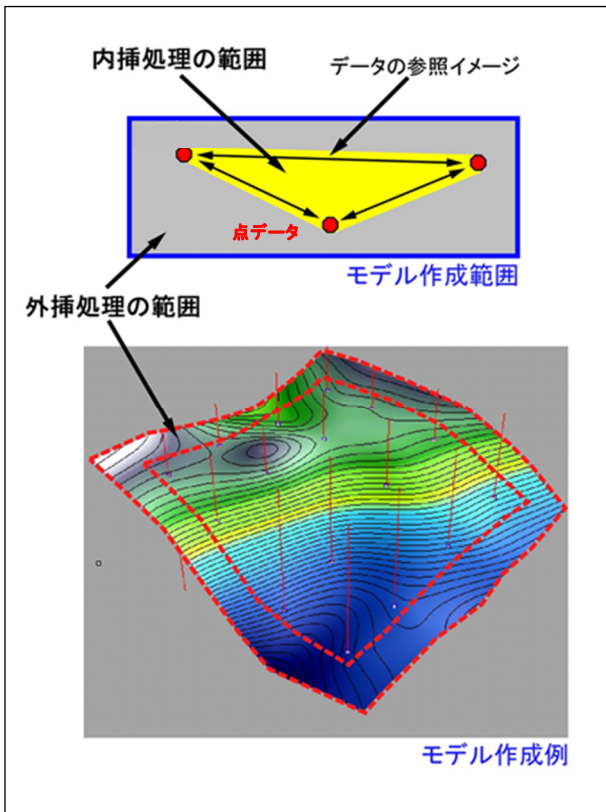


図4.5-1 サーフェスモデル形状の発散例

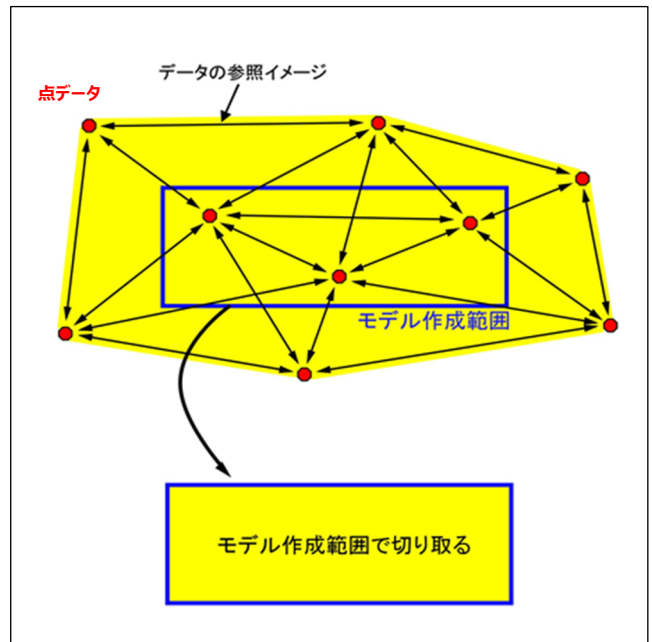


図4.5-2 サーフェスモデルの発散を抑える方法

深度方向の“信頼限界”の考え方

利用者に誤解を生じさせないためにも、3次元地質・地盤モデルの“信頼限界”を設定する必要がある。

ボーリングの調査深度は地質モデル推定深度の下限として考え易い(図4.5-3)。しかし、ボーリングの配置により必ずしもそうはならない(図4.5-4)。地質の種類や構造を考慮して適切に“信頼限界”を設定する必要がある。

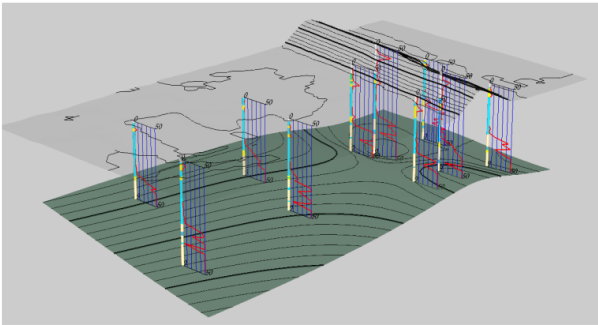


図4.5-3 ボーリング調査深度を用いた“信頼限界”面

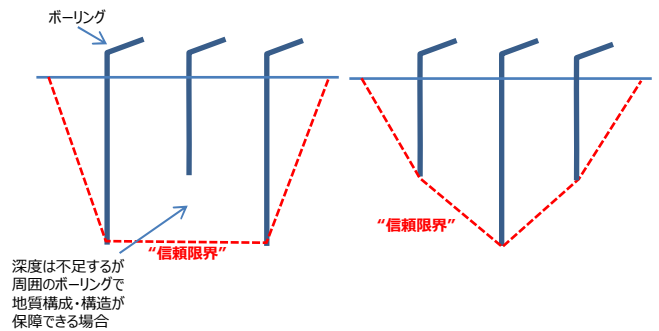


図4.5-4 ボーリングの配置による“信頼限界”の違い

平面の“信頼限界”の考え方

2次元平面でみた“信頼限界”については、地質調査範囲を基本に設定する(図4.5-5)。これは従来の土木地質図における着色範囲(図4.5-6)と同様の扱いと考えられる。

以上の深度方向・平面の信頼限界により、後述する「6.10 モデルの仕上げ」にて不要な範囲をトリミングする。

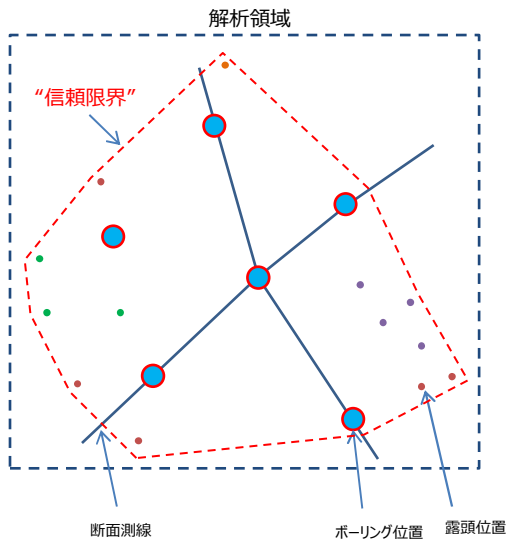


図4.5-5 平面における“信頼限界”の設定例

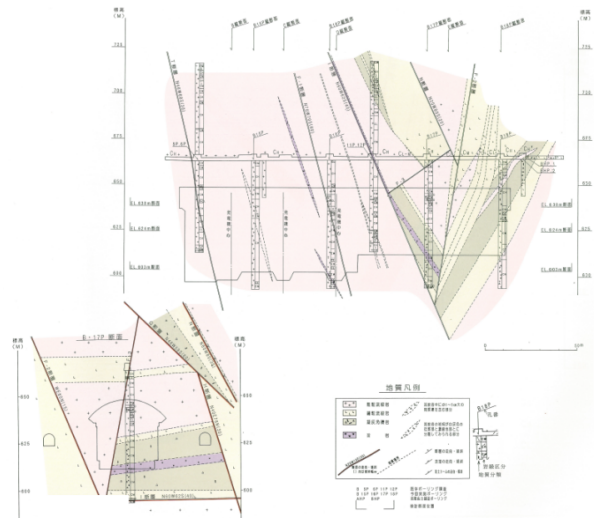


図4.5-6 土木地質図における着色範囲³⁾

4.6 属性情報の継承

BIM/CIMにおける属性情報の継承

BIM/CIMは、建設プロセスに3次元モデルを導入することで、事業全体にわたる関係者間での情報共有を容易にしようとする取り組みである。3次元モデルによる可視化だけでなく、その属性情報を継承し有効に活用して、事業の最適化を図るものである。

3次元地質・地盤モデルを構築する業務は単年度で終わるものばかりではない(図4.6-1)。継続的な業務では追加データによりモデルを更新することもあり得る。将来的なモデルの更新に備えて、十分な記録を残すことが地質情報を扱う技術者の責務といえる。

「全地連 CIM対応ガイドブック-地質調査版-」では、3次元地質・地盤モデルを活用するための課題の一つとなる属性情報のあり方について次のように示している。

「属性情報は設計・施工へと受け渡されることにより、より合理的で経済的なプロジェクトの実施を可能とするために作成・利用される。属性情報は、単に地質の地質・物性のみならず、モデル自体を含めたデータが、どの1次データの何を根拠として、どのような判断によってモデル化されたか、そのモデルの持つ精度はどの程度か、再現・更新の可能なデータか等を、他の作業者が理解できる情報であることが理想³⁾」

3次元地質・地盤モデルの信頼性は、入力データの品質や情報量に依存するため、属性情報を活用することで、作成された3次元地質・地盤モデルの根拠や判断基準を示していく必要がある。建設プロセスの各段階において3次元地質・地盤モデルを継承するためには、属性情報は不可欠である。3次元地質・地盤モデルの安定供給と再利用を図るためにも、属性情報を用いてトレーサビリティを確保することが重要である。

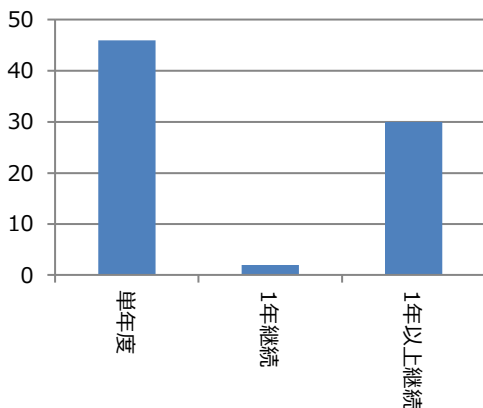


図4.6-1 3次元業務の継続性 (全78件)
「準備会」アンケート集計による

利活用に重要な情報を継承する

3次元地質・地盤モデルは、モデル作成時点までの各事業段階の成果を基に作成されて、次の事業段階へ継承される。そのため、モデルの正しい利活用や更新を見据えた情報の継承が重要と考えられる。

建設プロセスにおける事業段階のレベルがあがると、地質・地盤モデルの精度や信頼性への要求は高くなる。3次元地質・地盤モデルは、調査の進展に伴い既往調査データも踏まえて更新・継承されるバージョン管理が必要なデータと言える(図4.6-2)。

3次元地質・地盤モデルを継承させるためには、地質の形状・分布モデル以外にも、モデルの不確実性、想定される地質・地盤リスク、モデルの根拠となる1次データやモデル化時の補間パラメータ、モデル作成時の位置情報の座標系や使用ソフトウェア等の、モデルの更新に必要な情報について十分な記録を残す必要がある。

属性情報の継承時の注意点

属性情報は、技術担当者が変わっても、モデルの解釈や精度に影響を及ぼさないように、次の点に注意して十分な記録を残す必要がある。

- ◆継承するデータには、入力データやデータ分類等の解釈、空間補間手法の種類・補間パラメータ等、モデルの再構築に必要な情報を保持する
- ◆モデルの限界や適用範囲等を示す
- ◆モデル作成者あるいは監督者を明記し、責任の所在を明らかにする
- ◆モデル+属性表現で伝えられない情報や提示優先度の低いものは、文書や報告書に記す

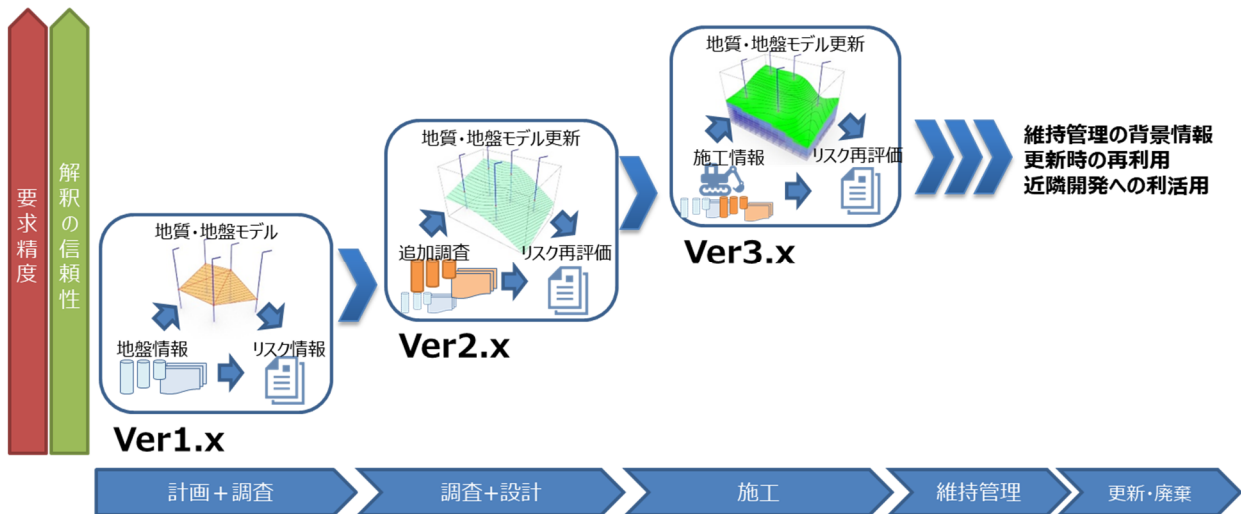


図4.6-2 事業の進展に伴い更新される3次元地質・地盤モデルのイメージ

3次元地質・地盤モデル継承シートの提案

事業における3次元地質・地盤モデルの利活用に必要な情報を継承するために、「3次元地質・地盤モデル継承シート」を提案する。

本シートは、後述する「[7.5 属性情報](#)」にて示す3次元地質・地盤モデルの管理情報・属性情報に加え、モデルの根拠となる地質調査の品質情報、モデルのアルゴリズムや妥当性、照査・引継に至る情報を一つのワークシートに記録するものである。記録の対象とする項目案を表4.6-1に示す。

3次元地質・地盤モデル継承シートの記録フロー

「3次元地質・地盤モデル継承シート」における各項目を記録する流れの例を図4.6-3に示す。コンソーシアムでは、この流れに従いシートに記録するソフトウェアを試作した。今後、属性情報や記録する情報の追加・変更も可能なように、プログラム・ソースは公開する予定である。

表4.6-1 「3次元地質・地盤モデル継承シート」の記録項目案

項目番号	項目	記録内容	本技術マニュアルにおける関連章節および参考資料
1	管理情報シート	対象事業と事業段階毎の管理情報	「7.5 属性情報」
2	属性情報記録シート	3次元モデルの形状情報と属性情報	「7.5 属性情報」
3	品質情報記録シート	地質調査情報の種類と数量	「5.1 品質管理の着目点」
4	地質調査性能基準記録シート	地質調査性能基準	「3.7 モデルの信頼性」
5	準3次元図面チェックシート	準3次元図面の品質確認	「5.4 図面データ等の品質」
6	モデリング記録シート	モデルのアルゴリズムや妥当性	「6.6 補間パラメータ/ログの記録」
7	地質・地盤リスク情報記録シート	地質・地盤リスク情報	「4.7 地質・地盤リスクの継承」
8	照査記録シート	照査結果	「4.8 照査のタイミング」
9	引継シート	引継情報	BIM/CIM活用ガイドライン(案)共通編 ⁵⁾

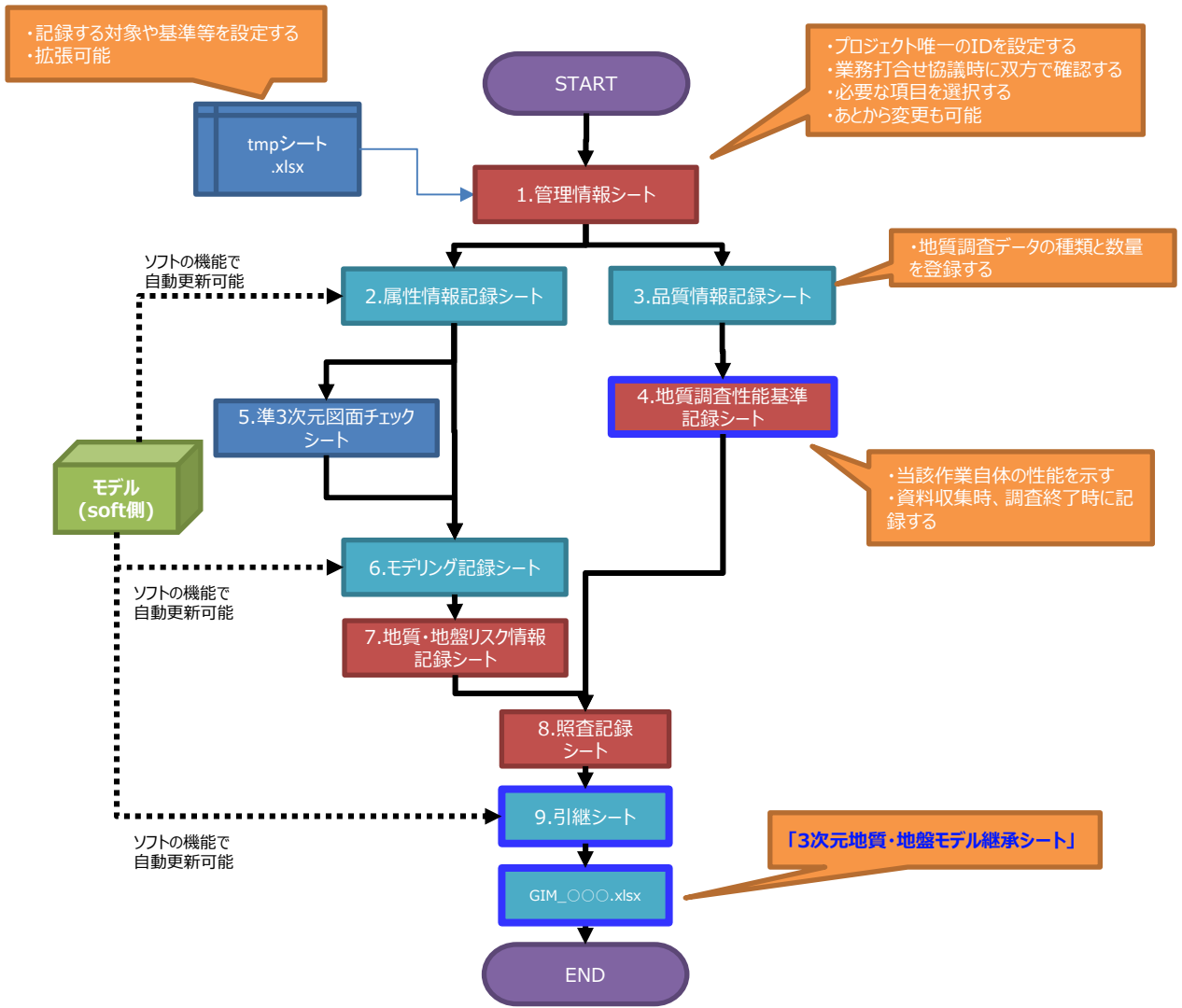


図4.6-3 「3次元地質・地盤モデル継承シート」における各項目を記録する流れの例

4.7 地質・地盤リスクの継承

地質・地盤リスク情報とは

地質リスク学会では「地質に係わる事業リスクを“地質リスク”と定義し、事業コスト損失そのものと、その要因の不確実性を指す」としている⁶⁾。用語として“地盤リスク”も使用される場合もあるが、地質リスクと同義である。本書では、土木事業におけるリスクマネジメントの観点⁷⁾に従い、用語として地質・地盤リスクを用いる。

地質・地盤リスク情報は、土木事業におけるリスク管理に使用する。地質コンサルティングの本質は地質・地盤リスク評価によるリスクマネジメントである。設計・施工で留意すべき地質・地盤リスク要因として一般的な地質調査要領・仕様等⁸⁾では次のようなものを挙げている。

- ◆切土斜面の不安定化
- ◆構造物基礎の支持力不足
- ◆地質を原因とした施工性の悪化
- ◆軟弱地盤の地盤沈下
- ◆地質からの湧水
- ◆地震時の液状化
- ◆地すべり地や斜面上の盛土の不安定化
- ◆掘削ズリの盛土材料としての不適
- ◆土砂災害
- ◆自然由来金属を含む地質による環境汚染
- ◆近接施工による地質変形 等

BIM/CIMにおける地質・地盤リスク

BIM/CIMによる確実な地質調査情報の継承がなされていけば、例えば施工中に予測と異なる地質・地盤リスクが発現した際に、正確なリスク対処法の判定に役立つと考えられる。計画・設計時の地質調査結果は、施工・維持管理時に構造物・施設・周辺環境に変状が発生した場合、原因究明と対策検討に必要な基礎資料となる。

施工後の地質変状・地下水変動は計測機器によるモニタリングにて把握することも可能であるが、その原因究明や変動予測には、初期状態とも言える計画・設計時の地山の地質構成・地質構造・緩み・風化・変質等の地質情報が不可欠である。

リスクマネジメントの観点から、地質・地盤リスク情報は正確に関係者や第三者に伝達され、情報損失無く継承されなければならない。技術担当が変わっても、それまでの内容が遜色なくトレースできて、かつ、使用者の最小負荷で土木建設事業に貢献されるべきである。

地質・地盤リスク情報の提示方法

地質・地盤リスク評価は、一般に地質調査成果により「設計施工上の留意点」として示される。近年、GBR (Geotechnical Baseline Report)⁹⁾は海外の公共工事で導入されており、施主と施工者の地質調査の不確実性に起因する建設事故・訴訟トラブルを回避するためのロジカルな手段に利用される。

GBRや従来の地質調査成果における「設計施工上の留意点」は報告書形式で示されるが、その要約を3次元地質・地盤モデルの属性情報として可視化することも、直感的に理解しやすいリスク情報提示手段と考えられる。

提示法としては、アノテーション(「7.2 アノテーション」参照)を用いて、強調、注目箇所、アラートを示したり、テクスチャマッピング等を3次元モデルにオーバーレイする方法等が考えられる。

文書や各種分類・判定基準表(凡例)・引用文献資料等も、地質・地盤リスク情報を裏付けたり、問題が生じた場合に基本に立ち戻るための重要な情報となるので、モデルからリンクすべき資料である。

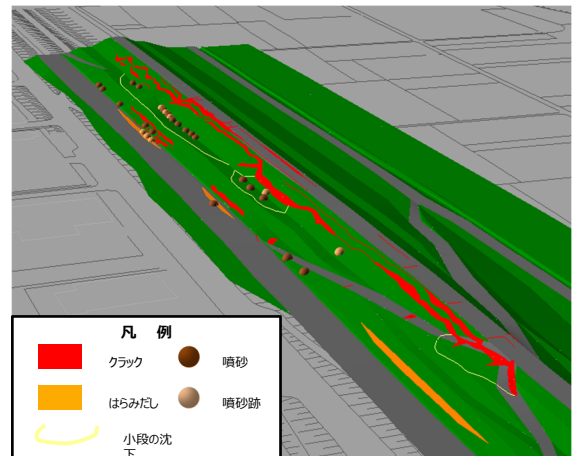


図4.7-1 被害情報表示例

地質・地盤リスク情報の継承

今後は、3次元の表示性能を駆使して、3次元地質・地盤モデル上での可視化やモデルから報告書情報へのリンク等により、直感的に理解しやすいリスク情報提示手段が活用されることが考えられる。

4.8 照査のタイミング

照査のタイミング

合理的に品質を評価するには、ワークフローの要所で照査が必要と考えられる。3次元地質モデル構築のワークフローに対応する照査のタイミングを図4.8-1に例示する。

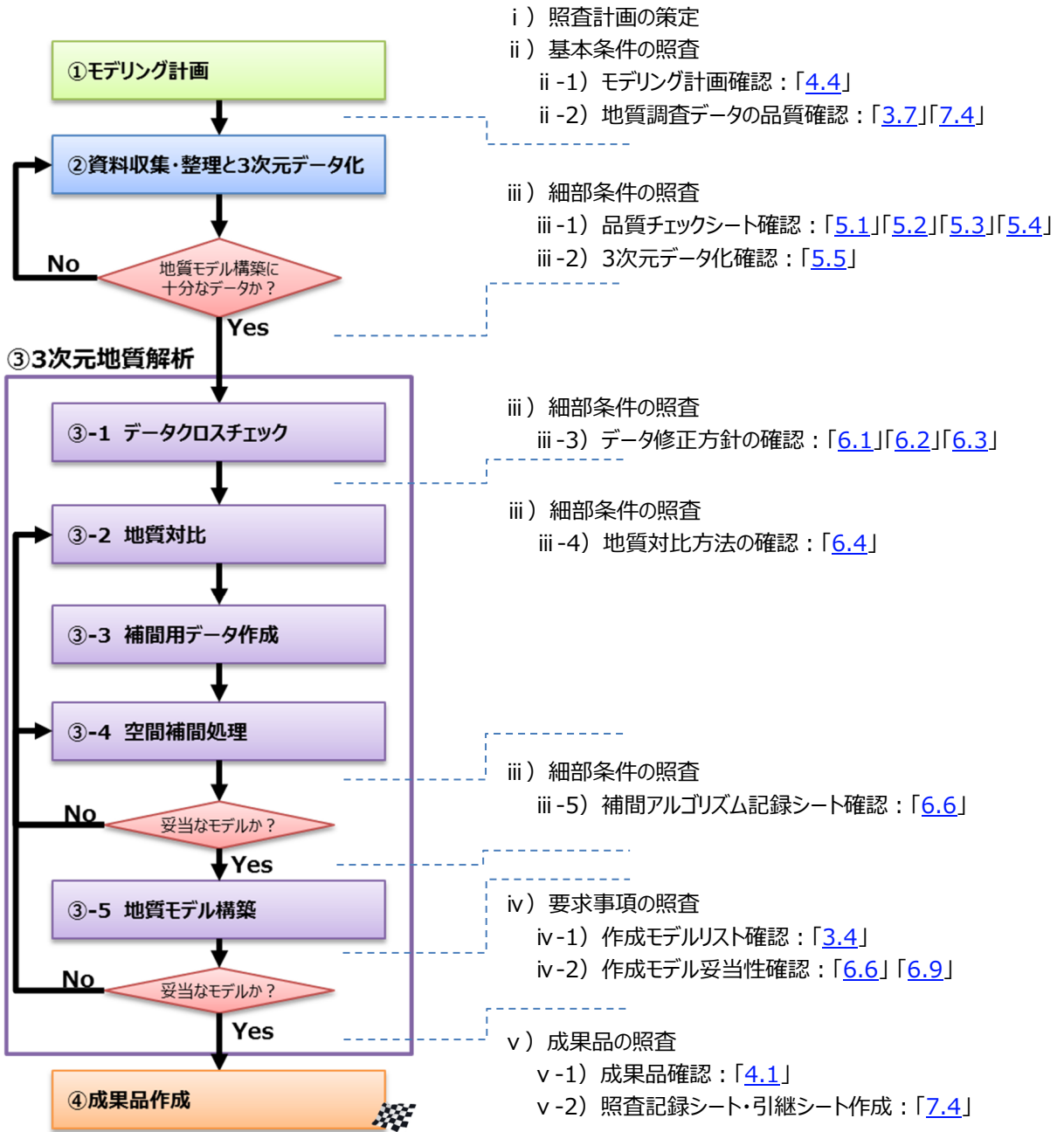


図4.8-1 3次元地質モデル構築のワークフローに対応する照査の例
(参考にする章節番号を「」に示す)

照査に必要な視点

3次元地質解析において、受注者が実施する照査(図4.8-1)の要点を以下に挙げる。要点に沿った照査記録シートの作成・記入例を表4.8-1に示す。

i) 照査計画の策定

作業実施前に、下記の基本条件・細部条件・要求事項・成果品の各段階における照査内容・対象を確認し、照査計画を策定したか

ii) 基本条件の照査

ii-1) モデリング計画確認

3次元地質・地盤モデルを構築するための基本条件を決定し、以降の作業計画を合理的に組み立てているか

ii-2) 地質調査データの品質確認

使用する地質調査データの信頼性について、既存報告書等で把握しているか

iii) 細部条件の照査

iii-1) 品質チェックシート確認

収集した資料は、目的や必要範囲に合致した3次元地質モデルを構築できる品質を有しているか

iii-2) 3次元データ化確認

3次元地質モデル構築に必要なデータを3次元化しているか、もしくは3次元地質解析システムで扱える状態にデータベース化しているか

iii-3) データ修正方針の確認

不適合が認められたデータについて、どのように修正あるいは棄却するか、の基準や方針を立てているか

iii-4) 地質対比方法の確認

地質対比をおこなうための手法や対比の根拠となる基準は適切か

iii-5) 補間アルゴリズム記録シート確認

補間アルゴリズムについて、地質事象に応じた手法を使用し、補間パラメータを正確に記録しているか

iv) 要求事項の照査

iv-1) 作成モデルリスト確認

成果品を作成するために必要なモデルが揃っているか

iv-2) 作成モデル妥当性確認

成果品を作成するために妥当なモデルとなっているか

v) 成果品の照査

v-1) 成果品確認

要求事項を満たした成果品が揃っているか

v-2) 照査記録シート・引継シート作成

照査結果やCIMモデル作成事前協議・引継書シートを記録として残し、確実に次工程に継承できるようにしているか

表4.8-1 照査記録シートの作成・記入例

照査項目	照査内容	照査			備考 例) 関連基準等を記入する
		確認元資料・データ参照先 例) 該当ファイル名、該当ファイルの保存先を 記入する	照査実施 (チェックを入れる)	確認日 (確認した日付を 記入する)	
i) 照査計画の策定	作業の実施前に、以降のii)基本条件、iii)細部条件、iv)要求事項、v)成果品の各段階における照査内容・対象を確認し、照査計画を策定しているか	令和元年度 ○○○業務計画書.doc 【○章 3次元地盤モデル構築照査計画】	■	2019/9/1	・3次元地質解析マニュアルVer2.0
ii) 基本条件の照査					
ii-1) モデリング計画確認	3次元地質モデルを構築するための基本条件を決定し、以降の作業計画を合理的に組み立てているか	令和元年度 ○○○業務計画書.doc 【○章 3次元地盤モデル構築計画】	■	2019/9/1	・3次元地質解析マニュアルVer2.0
ii-2) 地質調査データの品質確認	使用する地質調査データの信頼性について、既存報告書等で把握しているか	○○○業務_地質調査性能基準評価シート.csv	■	2019/10/3	・日本地質学会 地質調査性能基準 ・3次元地質解析マニュアルVer2.0 ・地盤データ品質標準化小委員会_成果報告書
iii) 細部条件の照査					
iii-1) 品質チェックシート確認	収集した資料は、目的や必要範囲に合致した3次元地質モデルを構築できる品質を有しているか	○○○業務_地質調査図面データ等チェックシート.csv	■	2019/10/30	・3次元地質解析マニュアルVer2.0 ・地盤データ品質標準化小委員会_成果報告書
iii-2) 3次元データ化確認	3次元地質モデル構築に必要なデータを3次元化しているか、もしくは3次元地質解析システムで扱える状態にデータベース化しているか	○○○業務_地盤スケルトンモデル.3dm ○○○業務_地盤情報.mdb	■	2019/11/15	・3次元地質解析マニュアルVer2.0 ・3次元地質解析システム【○○】操作マニュアル
iii-3) データ修正方針の確認	不適合が認められたデータについて、どのように修正あるいは棄却するかの方針を立てているか	令和元年度 ○○○業務報告書 【○章 3次元地盤モデル構築方法】	■	2019/11/16	・3次元地質解析マニュアルVer2.0
iii-4) 地質対比方法の確認	地質対比をおこなうための手法や対比の根拠となる基準は適切か	令和元年度 ○○○業務報告書 【○章 3次元地盤モデル構築方法】	■	2019/11/16	・3次元地質解析マニュアルVer2.0
iii-5) 補間アルゴリズム記録シート確認	補間アルゴリズムについて、地質事象に応じた手法を使用し、補間パラメータを正確に記録しているか	○○○業務_管理データシート.csv ○○○業務_モデリング記録シート.csv	■	2020/2/1	・CIM導入ガイドライン(案)第1編 共通編 令和元年 5月 ・3次元地質解析マニュアルVer2.0
iv) 要求事項の照査					
iv-1) 作成モデルリスト確認	成果品を作成するために必要なモデルが揃っているか	○○○業務_地盤モデル.dwg	■	2020/2/15	全てのモデルが作成されていることを確認した
iv-2) 作成モデル妥当性確認	成果品を作成するために妥当なモデルとなっているか	○○○業務_モデリング記録シート.xlsx	■	2020/2/15	・3次元地質解析マニュアルVer2.0
v) 成果品の照査					
v-1) 成果品確認	要求事項を満たした成果品が揃っているか	令和元年度 ○○○業務報告書 【表-○ 3次元地盤モデルリスト】	■	2020/3/1	・○○○業務_特記仕様書
v-2) 照査記録・引継シート作成	照査結果やCIM モデル作成事前協議・引継書シートを記録として残し、確実に次工程に継承できるようにしているか	○○○業務_照査記録シート.csv ○○○業務_CIMモデル作成事前協議・引継書シート.csv	■	2020/3/1	・3次元地質解析マニュアルVer2.0 ・CIM 導入ガイドライン(案)第1編 共通編 令和元年 5月
		照査担当印		2020/3/1	

参考文献

- 1) 萩原 陸幸. ISO9001わかりやすい解釈—2008年追補改訂版対応—.オーム社. 2008, p.17.
- 2) 山原 雅人,明庭 聡,堀内 健司.業務改革、見える化のための業務フローの描き方.マイナビ出版.2018.
- 3) 日本応用地質学会.土木地質図作成マニュアル.1999.
- 4) 全国地質調査業協会連合会. CIMに対応するための地盤情報共有基盤ならびに3次元地盤データモデル標準の検討. 2016, p.36.
- 5) 国土交通省. BIM/CIM活用ガイドライン(案)共通編.
- 6) 地質・地盤リスク学会HP. http://www.georisk.jp/?page_id=558 (2020年11月時点).
- 7) 国土交通省・国立研究開発法人土木研究所・土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会. 土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン—関係者がONE-TEAMでリスクに対応するために—. 令和2年3月.
- 8) 一般社団法人 全国地質調査業連合会. “改訂地質調査要領”. 2013.
- 9) 岩崎公俊、折原敬二. Geotechnical Baseline Report (GBR)について. 地盤工学会誌. 2009, Vol.57, No.5, pp.32-33.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

5章 入力データの 品質管理

[5.1 品質管理の着目点](#)

[5.2 地形データの品質](#)

[5.3 ボーリングデータの品質](#)

[5.4 図面データ等の品質](#)

[5.5 入力データの3次元化](#)

5.1 品質管理の着目点

地質調査データの品質管理の着目点

3次元地質・地盤モデルを作成するための入力データとなる地質調査データには、紙図面をスキャニングした画像(ラスター)やCAD図面、数値データ、ボーリングデータ等がある。入力データの品質チェックを行うには、データそれぞれが持つ限界や問題点を知っておく必要がある。

例えば、ラスター図面はスキャナでデータ化されたものであれば、紙図面の質的な問題をそのまま継承し、さらにスキャナが持つ機械的な誤差が加わることになる。ラスター図面は、紙図面であったときの繊維方向による伸び、作図時の線の太さ、スキャニング時の読み取り方向、スキャナの機械的な誤差等、様々な要因が累積した結果となる。

CAD図面についても、縮尺(尺度)は幾つか、精度(デジタル誤差)は十分か、余計なデータは含まれていないか、線分の種類(ライン・ポリライン・スプライン)は適正か等、チェック項目は多岐にわたる。平面図においては、地理座標の基準となるもの(グリッド線、座標値)が図面上に示されていないと、正確な位置合わせが困難になる。

3次元地質・地盤モデル作成に用いるための地質図面の品質基準はないので、本書では素材データの品質チェックの着目点について、GISデータの品質基準に用いられるJSJG¹⁾を参考に表5.1-1にまとめた。このような視点により地質調査データの品質をチェックすることを推奨する。

地質調査データの優先順位

3次元地質・地盤モデル作成には、客観的なデータを優先的に用いる。3次元地質・地盤モデル作成に用いる地質調査データには、例えば①ボーリングデータ、②ルートマップ、③地質平面図、④地質等高線図、⑤地質断面図、がある。

客観性の観点からこれらの情報に優先順位を付けるとすれば、「①>②>③≧④>⑤」のような序列が考えられる。

すなわち、ボーリングデータやルートマップの情報を、境界面補間計算に優先的に用いるのを基本とする。地質平面図、地質等高線図は、地質技術者の3次元考察による図面であり、客観的・主観的な要素を分類することが難しい。地質断面図も地質技術者の解釈に基づく図面であるがゆえに優先順位は低くなる。

表5.1-1 地質調査データの品質チェックの着目点(案) (分類はJSJG¹⁾を参考)

分類	品質チェックの着目点	備考	
完全性	モデル構築に必要なデータは揃っているか 入力値は正しいか	物性値・座標等の実数、地質・岩級等の判定値	
論理 一貫性	フォーマット 一貫性	データフォーマットは正しいか	フォーマットのバージョン、モデル化の環境で利用可能な形式
		画質は十分か	画像が判読できるか、トレース作業の障害にならないか
	概念 一貫性	座標系は統一されているか	
		デジタルの属性に間違いは無いか	
		地質構造が示されているか	
	定義域 一貫性	地質構成が示されているか	地質層序表や地質判定基準表等が示されているか
		地質境界に理屈に合わない食い違いはないか	螺旋分布等3次元にしてみないと判断が難しいものもある
	位相 一貫性	図面の整合性	図面の名称や分類等の整合性
断面図の交点は合っているか		3次元で交差させてみないと判断が難しい	
位置正確度	境界線の種類が図面毎に変わっていないか		
	デジタルは十分な精度か		
	投影データを使った地質断面図ではないか		
時間正確度	投影距離が示されているか		
	座標基準自体にズレが無いか		
	最新の解釈によって作成された図面か	地質図等最新の知見に基づくものか	
主題正確度	最新の地形データか	最新の測量結果に基づくものか	
	地質学的分類が正しいか		
	工学的分類が正しいか		

地形地質の背景情報 (“地形地質概要”)

地質調査データの概念一貫性に相当するものとして、対象とする地域の基本的な地史、地質層序、地質構造等について整理された資料が必要である。その事例を図5.1-1に示す。

このような資料は、単なるボーリングデータ・地質平面図・断面図等だけでは網羅できない情報を示し、モデリング担当者が3次元地質解析をおこなうための重要な判断材料になる。

【被圧地下水の帯水層】

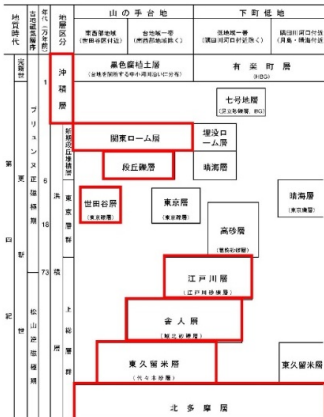
東京地域の帯水層の深度限界は、固結シルト層（ほぼ北多摩層に相当）の上面とみなすのが一般的である（cf. 遠藤ほか, 1974, p. 134-135; 遠藤ほか, 1989, p. 244-245; 東京都, 1990, p. 36; 遠藤ほか, 1995, p. 289; 東京都土木技術研究所, 1996, p. 38; 川島, 2000, p. 8）。北多摩層は厚い固結シルト層を主体とする不透水層であり、その上位の東久留米層、舎人層は砂層・砂礫層の発達で顕著で、良好な被圧地下水の帯水層となっている。

東京都内の固結シルト層（北多摩層）上面の深度分布に関しては遠藤ほか（1974, 1989, 1995）、遠藤（1978）、東京都（1990）、東京都土木技術研究所（1996）などが報告している。

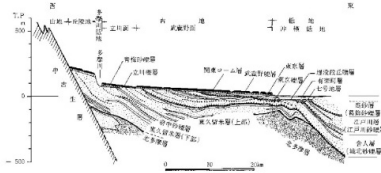
【地質概要】

東京地区

東京地区の地下地質層序は上総群、東京層群、新期段丘堆積物、沖積層に大別される。ここでは東京都土木技術研究所（1996）に従い、舎人層・江戸川層を上総群に含める。



東京都区部の地質層序（東京都土木技術研究所 1996 改）



東京都の模式的な地質断面図（東京都 1990 改）

基盤岩類

三波川帯、秩父帯、白垂系小仏層群（四万十層群相当）、中新統五日市町層群など。北多摩地区では**基盤岩上端面はほぼ南北走向で東へ約 6° 傾斜**している。瑞穂町、武蔵村山市の試錐では、上総層群北多摩層・瑞穂砂礫層（後述）に不整合で覆われる（遠藤ほか, 1995）。

上総層群

瑞穂砂礫層：東京都瑞穂町を中心に、北多摩地域最西部（狭山丘陵の西）地下に分布する粘土質砂礫層。瑞穂・武蔵村山では基盤岩類に不整合で接する。北多摩層下部と同時異相の関係にあると思われる。

北多摩層：最大層厚数 100 m 以上。塊状の固結シルト層を主体とし、**微細砂層**を挟む。外洋～半深海の堆積物。

東久留米層：淘汰の良い砂層を主体とし、シルト層を挟む。陸棚～外洋の堆積物。

舎人層：武蔵野台地中部～北東部、東京低地の地下に分布する。シルト層・砂層・礫層互層からなる。内側陸棚～内湾の堆積物。

江戸川層：東京低地と山の手台地北東部に分布する。シルト層・砂層・礫層互層からなる。内側陸棚～内湾の堆積物。

東京層群

高砂層：東京低地北東～東部の地下に分布する。基底礫層（葛飾砂礫層、層厚約 10 m）が発達する。シルト層・砂層・礫層互層からなる陸棚上部～内湾の堆積物。

東京層：山の手台地東部から低地に分布する。基底礫層（東京礫層）が発達し、上位に不整合に覆われる。シルト層（層厚約 2 m）、細粒～中粒砂層（層厚約 10 m）の順に成層する。

世田谷層：世田谷区北西部～南部に分布。基底砂礫層（東京礫層相当層、層厚 1～3 m）が発達する。内湾性の貝化石を含む粘性土層を主体とし、腐植土を伴う。東京層とは同時異相とされる。

新期段丘堆積層

埋没段丘礫層：武蔵野礫層、立川礫層などがこれにあたり、大部分は

多摩川の河成砂礫層からなる。下位を不整合に覆う。層厚最大 10 m。
関東ローム層：山の手台地の表層近くにみられる層厚 2～10 m の茶褐色ローム層。最下部に最大層厚 5 m のローム質粘土層（渋谷粘土層、板橋粘土層）がみられることがある。

沖積層

七号地層：基底礫層（足立砂礫層、BG）が発達する。主にシルト層・砂層互層からなり、埋没谷を埋める形態で分布する。

有楽町層：下町低地、多摩川低地に分布し、層厚 10～50 m。基底礫層（HBG）にはじまり、上位に向かい砂層、シルト～粘土層、砂礫層・腐植土と層相が変化するとされる。

断層

立川断層：青梅市小曾木¹から立川市街を通り国立市谷保まで約 21 km 続く。北西～南東トレンドの断層。地形面に数 m～数 10 m の高度差を生じさせている（山崎, 1978）。瑞穂砂礫層上限や富士見砂礫層基底面の高度分布から、立川断層（落差約 60 m）の南西側約 1 km に瑞穂断層（落差約 50 m）の存在が指摘されている（川島ほか, 1985, p. 282; 遠藤ほか, 1989, p. 240-242; 東京都, 1990, p. 15; 遠藤ほか, 1995, p. 286-287）。

谷地川断層：足立（1903）命名。五日市から府中南方にかけて、多摩川南方の加住丘陵を西北西から東南東に走る。

荒川断層：荒川低地を北西から南東に走る。

参考文献

足立久男, 1993. 関東平野西縁の谷地川断層について。地球科学, 47, 123-132.
 遠藤 毅, 1978. 東京都付近の地下に分布する第四系の層序と地質構造。地質学雑誌, 84, 505-520.
 遠藤 毅ほか, 1974. 東京の第四系。東京都土木技術研究所年報 (昭和 49 年度), 101-137.
 遠藤 毅ほか, 1989. 北多摩地区の地質および水文地質。東京都土木技術研究所年報 (平成元年年度), 231-250.
 遠藤 毅ほか, 1995. 北多摩地区の地下地質。応用地質, 36, 283-292.
 川島真一, 2000. 東京の地下水環境。地下水技術, 43-3, 6-19.
 川島真一ほか, 1985. 瑞穂町付近の水文地質。東京都土木技術研究所年報 (昭和 60 年度), 275-283.
 東京都, 1990. 東京都総合地質図 (1) — 東京都地質図集 4— 東京都の地盤 (2) 山の手・北多摩地区。東京都, 78p.
 東京都土木技術研究所, 1996. 東京都 (区部) 大深度地下地質図 — 東京都地質図集 6— 東京都 (区部) 大深度地下の地質。東京都土木技術研究所, 東京, 66p.
 山崎健雄, 1978. 立川断層とその第四紀後期の運動。第四紀研究, 16, 231-246.
 . . . モデル化対象層

図5.1-1 地史、地質層序、地質構造等について整理された資料の例

5.2 地形データの品質

地形データの品質チェック

地形モデルは地質モデルを作成するための重要な基盤情報であり、地質調査データを3次元で利用する際に重要な基図になる。地形モデルを作成するためのデータには、等高線、DEM(digital elevation model)、レーザー測量データ等がある。それぞれについて、品質をチェックする際の着目点を示す。

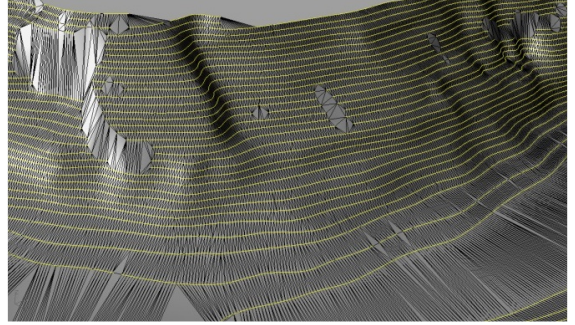


図5.2-1 等高線で作成した地形モデルの例

i) 等高線

等高線は地形を表現する一般的な図法である。データの形式としては、CADやGISのベクトルデータ、DMデータがある。

等高線から地形モデルを作成するには、ベクトルデータの等高線に標高値の属性が割り当てられている必要がある。

また、等高線の利用に際しては、それがどのように作成されたものか、どの程度の精度を持つものなのかを把握しておくことが重要である。特に、等高線の間は何の高さ情報も無いので、等高線以上の精度をそれ自身から得ることができないことに注意する必要がある。

一般にCADの等高線は次のような方法で作成されている。

- ◆紙図面の等高線をCAD等のソフトウェアでトレース
- ◆ソフトウェアで補間処理した地形面モデルより生成

前者では紙図面の状態やトレース作業が、CAD等高線の精度に影響する。後者の場合は、元の地形面モデルを入手できれば良いが、入手できない場合も多い。CAD等高線の作成方法が明らかであれば、等高線データのどこに注意すれば良いか、どうすれば作業を省力化できるかがわかるようになる。

CAD等高線データに問題がないかは、次のような観点でチェックする。

- ◆途中で段差が生じるような不連続な等高線がないか
- ◆異なる図面が接合したものではないか
- ◆ポリラインではなくラインだけで作られていないか
- ◆重複データがないか
- ◆等高線の属するレイヤは何か
- ◆図面の尺度や座標系は何か
- ◆等高線に標高データが付いているか

なお、標高値を持たない等高線は、オブジェクトのプロパティにて標高値(Z値)を入力する必要がある。

ii) DEM

DEMとは決められた間隔で格子状に配列した標高データである。国内でよく用いられるのは国土地理院発行数値標高モデル(5m,10m,250m)で、WEBで無償提供されている。

全地球をカバーするようなデータとして、SRTM、ASTERがあり、いずれもWEBより無償でダウンロード可能である。SRTMは全世界規模で30~90mメッシュの標高データとして整備されているが、極地方や山岳・砂漠等でデータが抜けている場合がある。

有償では、国土地理院発行数値地図50mメッシュ(現在はWEBフリー公開終了)、北海道地図発行10mDEM、航空測量会社販売のDEMデータ等が利用可能である。

DEMデータはランダムな測量データを用い、線形補間法で任意格子位置の標高値を取得したものであるが、地形の再現性を高めるために、独自のアルゴリズムを組み合わせている場合もあり注意が必要である。

DEMデータについては次の観点でチェックする。

①XY座標の定義

測量座標系の場合、X軸が子午線に一致する軸となり、原点から真北に向かう値を正としている。Y軸は原点においてX軸に直交する軸とし、真東に向かう値が正になる。

しかし、GISやモデリングツールの多くは画面上でX軸が水平、Y軸が垂直方向の数学座標を採用している。DEMデータのXY座標がどちらの座標であるかを確認し、測量座標である場合はXY列を入れ替えて、数学座標のデータに修正する必要がある。

②DEMの間隔

例えば国土地理院DEMの場合、緯度経度を基準として分割されたものであるため、表記の数字どおりの間隔になってはいない。緯度によっても縦横間隔は異なる

③DEMの解像度

図5.2-2はDEMの解像度により抽出できる急斜面(傾斜40°以上)の範囲・規模が容易に変わること示す。地質モデルの目的や要求精度を満たす解像度の地形データを使用しなければならない。

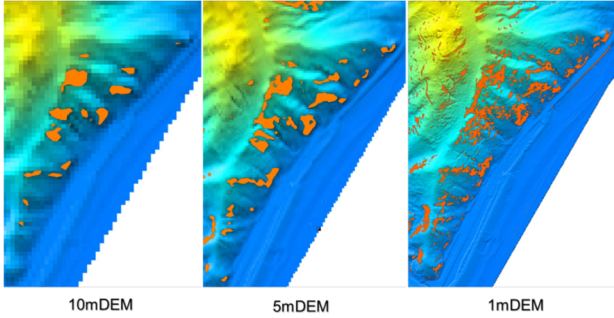


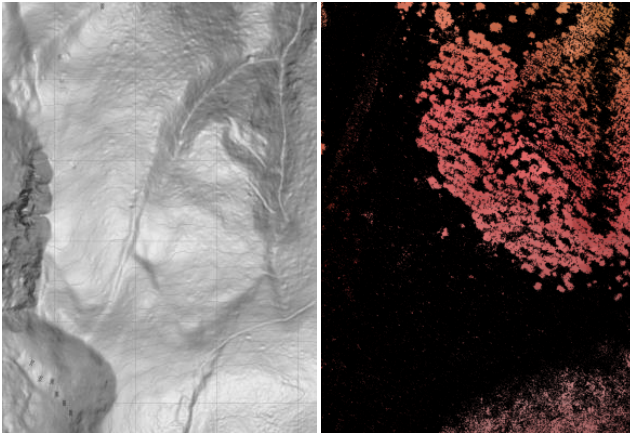
図5.2-2 DEMの解像度による微地形抽出の違い

④DEMの精度

DEMデータの精度は地表(グラウンド)データの取得精度以上のものは得られない。グラウンドデータと重ね合わせて地形DEMの精度を確認することが必要である(図5.2-3,4)。

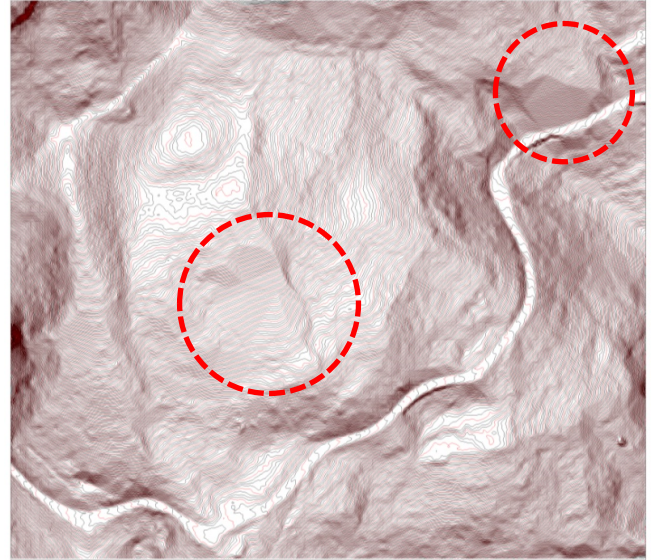
陰影図

グラウンドデータ



右図の明るい部分は植生の影響でグラウンドデータが取得できていない部分である

図5.2-3 DEM地形モデルの精度の問題



赤点円内はグラウンドデータの密度が粗く地形データが取得できていない(Tin補間による三角面が大きくなる)ので、微地形の判読ができない

図5.2-4 DEM地形モデルの等高線にみられる三角面

iii) レーザー測量データ

レーザー測量データは、航空機や地上レーザースキャナで取得された標高データである(「R-T.2 レーザー測量」参照)。

一般には、国土地理院発行数値標高モデル5mメッシュ(一部のデータは航空写真測量によるもの)や、航空測量会社販売データ、測量業務で取得されたデータ等がある。

レーザーデータは数100万点以上の大規模になることが多く、データの間引きやより小さい単位で分割しないと容易には扱えない。前処理や任意の場所だけを取り出すために、GISや点群処理ソフト等を利用してのデータ整理が必要になる。

また、航空測量業務で取得されるデータの場合、オリジナルデータ、グラウンドデータ、DEMデータの3種類がセットであるので、取り扱おうとするデータの種類について把握しておく必要がある。

5.3 ボーリングデータの品質

ボーリングデータの品質チェック

i) ボーリングデータの優先順位

既往ボーリングデータを用いる場合は、ボーリング調査は同一目的・同一条件下で実施されているとは限らないということに留意しなければならない。そのため、地質情報の質的な観点から、例えば次のような優先順位を設けてデータを選別する。なお、選別した場合は、その記録を残す必要がある。

【ボーリング情報の優先順位例:①⇒⑥の順に低くなる】

- ①孔壁情報(ボアホール調査)
- ②高品質ボーリング
- ③オールコア採取
- ④標準貫入試験孔(半コア半ペネ)
- ⑤孔内検層実施孔
- ⑥ノンコア(スライム判定)

複数のボーリング間で内容が整合しないような場合は、次のような序列を付けての利用を検討する。

【実施機関】

- ①同じプロジェクト(貸与資料)のもの > 公開データ等

【実施時期】

- ②新しいデータ > 古いデータ

【記事の有無、土質分類の妥当性】

- ③地質・土質区分や記事が詳細 > 大雑把

ii) ボーリングデータの座標精度

ボーリングデータをDB化している機関毎に座標の入力精度、管理精度が異なる場合がある(図5.3-1)。図は複数機関の同じ柱状図を並べたものであるが、位置情報に誤差が生じるほか、N値のデータ化の定義(無試験区間の扱い等)が異なるために、N値グラフにズレが生じている。このようなデータの場合は、原本の柱状図まで遡ってチェックし、データを修正する必要がある。以上の不具合の原因や修正履歴は残さなければならない。座標精度のチェックポイントとして次のような見方もある。

◆座標値の秒単位の桁が少ない

個人情報や特定されないように意図的に削ったか入力ミスの可能性がある。測量精度で扱うことはできない

◆小数点以下が測量精度以上に桁が多い

座標変換計算等による値がそのまま入力されている可能性がある。測量精度で扱えるかチェックが必要である



図5.3-1 座標やデータ定義の違い²⁾

iii) 座標の優先順位

複数資料における同一孔で孔口座標が複数存在する場合は、座標の取得精度を考慮し、次の優先順位で使用する。なお、1秒単位で小数点以下が丸められている緯度・経度は誤差が大きすぎるので使用しない。

【ボーリング座標の優先順位例:①⇒⑤の順に低くなる】

- ①報告書、測量成果簿等に記載されている座標値
- ②CAD平面図上の位置
- ③構造物との関係で位置を確定しやすい情報
- ④0.001秒単位等高精度の緯度・経度
- ⑤CAD以外の平面図上の位置

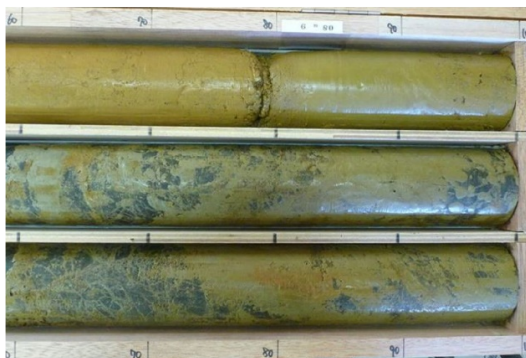
iv) 地質判定と記載内容

既存ボーリングデータについては、記事の記載内容と地質判定に矛盾がないかチェックする。また、調査目的や調査年代によっては同一地質でも地質区分が異なることがあり、必要に応じて統一を図る。

記載内容自体に疑義があり、該当ボーリングコア試料が保管されている場合は、次の点に留意して柱状図の記載を評価し、コア試料を再判定することも有効である。

- ◆ノンコアの場合の記載は適切か？
- ◆室内試験結果との整合は図れているか？
- ◆落下等によるスライム区間が正しく表現されているか？
- ◆地質区分基準や岩級区分基準は的確か？
- ◆コアは洗浄(写真5.3-1)して観察されているか？

洗浄前のボーリングコア状況



洗浄後のボーリングコア状況



写真5.3-1 ボーリングコアの洗浄前後の違い³⁾
マッドケーキを洗い流さないと正確なコア判定は困難である

v) チェックの記録と評価

ボーリングデータの妥当性や整合性を確認し、その結果を一覧表等に記入する。基準等が複数存在する項目については、どの基準を適用しているかを記載する。最終的に以下のように信頼度を評価し、第三者に対してわかり易く示すことが望ましい。

【ボーリングデータの信頼度評価例】

- A:信頼度高。ほぼ全項目が適切に明記しており、その妥当性が確認されたデータセット。モデリングに使用する
- B:信頼度中。最低限、妥当性・整合性を判断するための項目については記載があり、妥当と判断されたデータセット。モデリングに使用する
- C:信頼度低。モデリングに使用しない

iv) ボーリングデータのチェック項目

以上の記録評価について記録するボーリングデータのチェックシートの例を表5.3-1に示す。入力項目は次のようになる。

- ◆位置座標のチェック:測量、地図読み取り、意図的な座標変更、秒単位の精度、新旧測地
- ◆実施時期
- ◆実施機関
- ◆試験有無
- ◆オールコアリング
- ◆記事の有無
- ◆土質分類の妥当性
- ◆孔内水位のチェック、水位測定時期
- ◆調査担当
- ◆オペレーター
- ◆複数情報の矛盾点

表5.3-1 ボーリングデータのチェックシート例

ボーリングデータ名	発注機関	調査期間	ボーリング数	座標系	標高基準	ボーリング深度 (m)	信頼度	孔口座標 / 標高 (角度・方向)	地質・土質分類	孔内水位	SPT N値	RQD (TCR, SCR)

Fl	風化の程度	硬軟	岩級区分	一軸圧縮強度 (MPa)	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	透水係数 (m/s)	孔内水温度 (°C)	割れ目の状態					備考	
									割れ目系	角度・方向	間隔	開口幅	粗さ		

5.4 図面データ等の品質

地質調査図面やデータのチェック

3次元地質・地盤モデルの属性情報として、地質調査、入力データ、各データの品質を確認した記録を残すことが必要である。地質調査図面や数値データ等のチェックシートの例を表5.4-1に示す。

表5.4-1 地質調査図面データ等チェックシートの例

データの種類	チェック対象	チェック	備考	
CAD図面	平面・断面共通	単位はメートル系になっているか	<input type="checkbox"/>	目安になるオブジェクトの長さや距離を調べる
		十分な精度でデジタル化されているか	<input type="checkbox"/>	曲線のノード配置を確認する
		最新の図面であるか	<input type="checkbox"/>	更新日時や図面内の注釈を確認する
		平面図・縦断面図に位置基準が示されているか	<input type="checkbox"/>	平面図であれば測量座標の基準点。断面図であれば距離票や縦横比
		余分なレイヤが含まれていないか	<input type="checkbox"/>	非表示のレイヤは使用できない可能性があるので分類しておく レイヤの削除や保護をおこなう
		不足の情報はないか	<input type="checkbox"/>	
		ブロック定義がないか	<input type="checkbox"/>	ブロック定義が作業の障害になる場合はブロック定義を解除する
		境界線はポリラインになっているか	<input type="checkbox"/>	線集合の場合は結合処理をおこないポリラインに変換する
		ポリラインの幅は0になっているか	<input type="checkbox"/>	ソフトによっては幅をサーフェスに変換しデータが扱いにくくなる。レイヤにも幅が設定されていないか、グローバル幅が設定されていないかを確認する
		線種を実線しているか	<input type="checkbox"/>	装飾線はモデラーのレンダリングに負荷がかかる場合がある
	地質凡例はあるか	<input type="checkbox"/>		
	地質解釈の限界は示されているか	<input type="checkbox"/>	着色範囲が推定限界を示しているかの確認が必要	
	平面図	座標基準が記載されているか	<input type="checkbox"/>	方位や測地系のXY座標の扱いに注意
		コンターに高さがあるか	<input type="checkbox"/>	
		座標の精度を確認したか	<input type="checkbox"/>	基準グリッドが示されている場合はグリッドの寸法が正確かをチェックする
		オブジェクトのZ値に異常がないか	<input type="checkbox"/>	無意味にZ値の値を持っている場合は、作業の障害になる場合があるのでZ値を修正する
	断面図	断面測線が平面図に示されているか	<input type="checkbox"/>	
		断面の起点・終点と平面図測線の起点・終点は合っているか 縦横比を確認	<input type="checkbox"/>	測線の長さや交差位置が正しいかチェックする 合っていないことを前提として確認したほうが良い モデル化の対象や目的に応じて修正する
		目盛や標尺の長さは正確か	<input type="checkbox"/>	デジタル化の図面やデータ変換した図面の場合、目盛や標尺に誤差が生じる場合がある。目盛や標尺の長さを計測して調べる
境界線の末端処理はなされているか 高さを持ったデータが含まれていないか		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	末端に離れや交差がある場合は延長やトリムが必要 断面図を3次元化する際に障害になる場合があるのでZ値を修正する	
画像図面	平面・断面共通	歪みがないか	<input type="checkbox"/>	歪みがある場合は再スキャンする。局所的な歪みはデジタル化時に対応する
		斜めにスキャンしていないか	<input type="checkbox"/>	斜めの場合は再スキャンか、画像処理ソフトで幾何補正する（モデラーにて補正できる場合もある）
		座標基準が記載されているか	<input type="checkbox"/>	
		解像度は十分か	<input type="checkbox"/>	十分でない場合は再スキャンする
数値データ	単位はメートル系になっているか	<input type="checkbox"/>		
	座標系は何か	<input type="checkbox"/>		
	測量座標か数学座標か	<input type="checkbox"/>	座標の逆転に注意する	
	データの範囲 (Min,Max)	<input type="checkbox"/>		
	座標の配列 精度	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	単精度、倍精度、小数点桁数、小数点以下丸め 等	

5.5 入力データの3次元化

入力データを3次元化する目的

3次元地質・地盤モデルを作成するために、入力データを3次元空間に配置する必要がある。地質調査情報を統一した空間に重ねて表示することで、互いの整合性を正確にチェックすることが容易になる。

ツールによっては、ボーリングや断面図等のデータベースと連携して、配置データ自体が3次元オブジェクトとしての実態を持たないものもある。

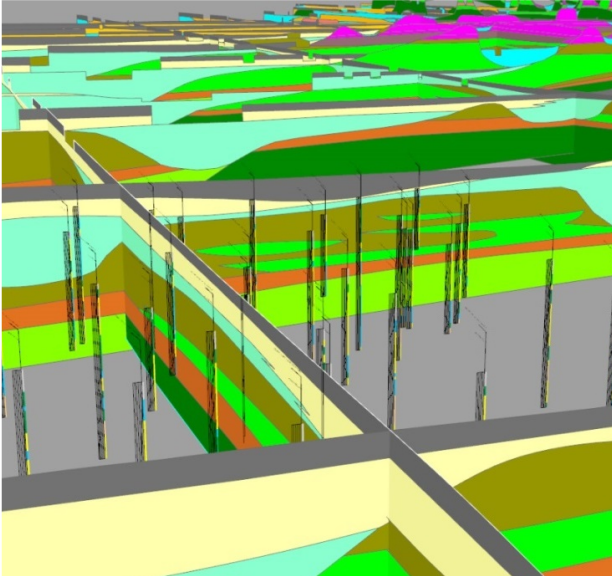


図5.5-1 入力データを3次元空間に配置した例

【ベクターデータ】

サーフェスモデルに地質平面図等のポリゴン・ポリラインを投影したものや、テクスチャを判読して3次元モデル(断面・地形等)上にポリラインやNURBS曲線で直接トレースしたものを指す。

◆利点

- ・モデル作成に用いるための3次元データが得られる
- ・直感的なデータ取得が可能

◆欠点

- ・トレースは手作業になる
- ・トレースラインの精度は地形の精度やテクスチャの解像度に依存する

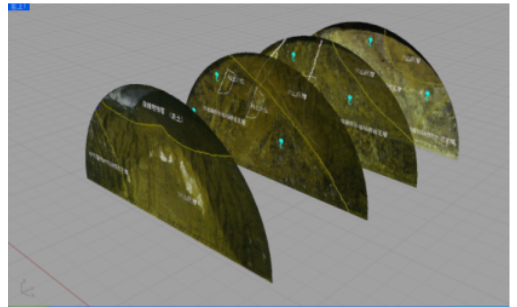


図5.5-2 トンネル切羽のラスターデータを3次元空間に配置した例

露头情報や地質図の3次元化

露头情報や地質図の3次元化には、ラスターデータとベクターデータの2種類を用いる事が多い。それぞれの特徴と利点・欠点について示す。

【ラスターデータ】

サーフェスモデルに地質図面や空中写真等の画像をテクスチャとして貼ったものを指す。

◆利点

- ・比較的作成が簡単
- ・目的に合わせて(あらかじめ用意した)テクスチャを切り替えることができる

◆欠点

- ・急傾斜の部分で画像が引き伸ばされ表現精度が落ちる
- ・テクスチャ解像度で操作のパフォーマンスが左右される
- ・ソフトによっては高い解像度のテクスチャを扱えない
- ・ソフトによってはテクスチャの設定が複数コマンドにわたり作成に手間がかかる

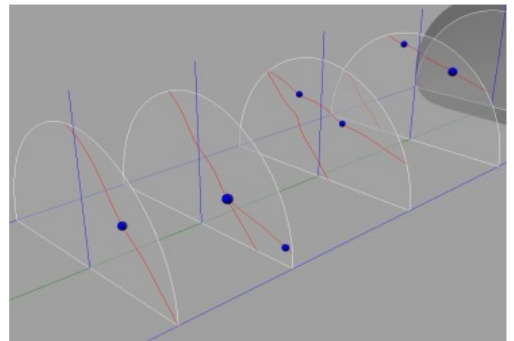


図5.5-3 トンネル切羽のベクターデータを3次元空間に配置した例

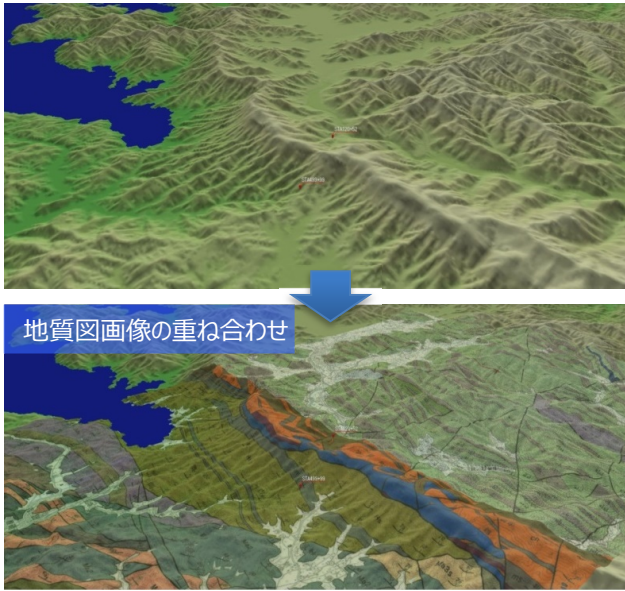


図5.5-4 テクスチャモデル

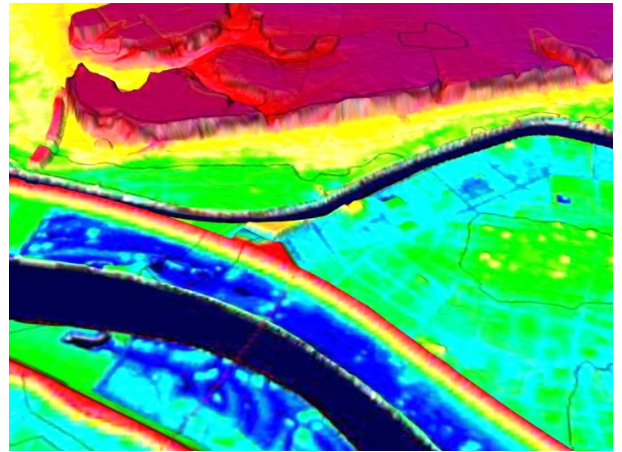


図5.5-6 投影画像の歪み
急傾斜の部分で画像が引き伸ばされて表現精度が落ちる

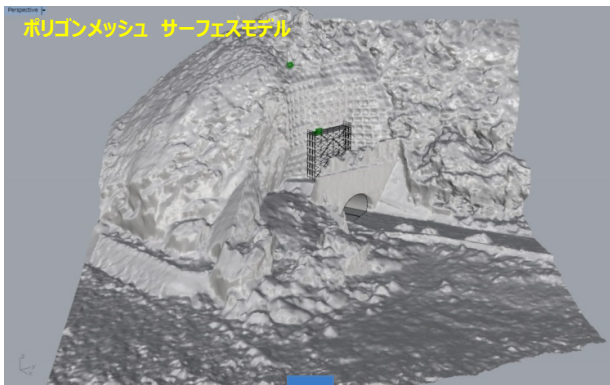


図5.5-5 複雑な形状のテクスチャモデル

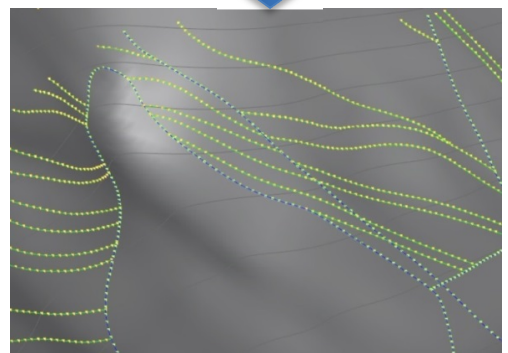
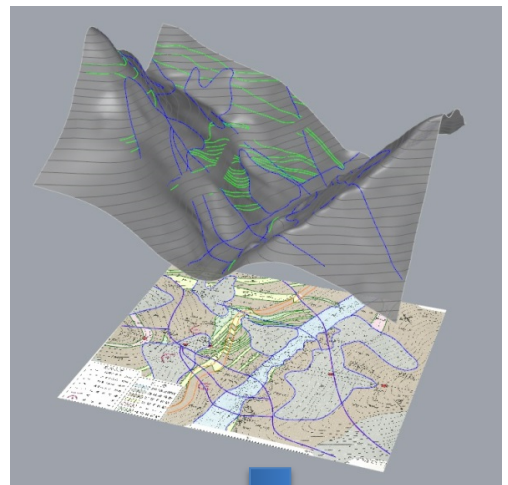


図5.5-7 地質境界線の3次元化例
上段：地質図の地質境界線を地形に投影し3次元のベクターデータを作成
下段：3次元のベクターデータよりサーフェスモデルの計算に用いるポイントデータを等間隔に生成

CAD断面図の3次元化

2次元のCAD断面図を3次元空間に配置する。配置する際は以下の内容について確認する必要がある。

- ・断面測線と断面の始点終点の長さが一致するか
- ・断面交点の位置がずれていないか
- ・投影されているボーリングの位置が正しいか
- ・断面図の縦横比
- ・線形構造物の中心線形の扱い
- ・断面図を曲線に沿って曲げる際の誤差が許容以内か
- ・断面交点間の距離やボーリング間の距離

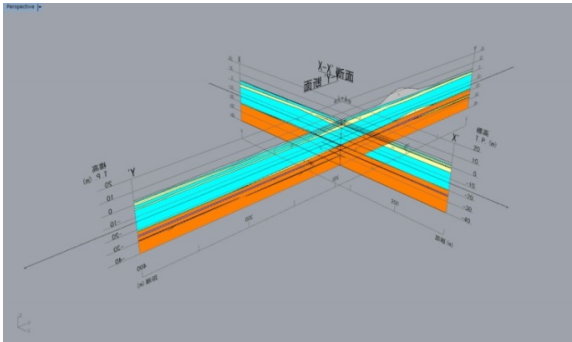


図5.5-8 断面測線に沿い断面図を3次元化した例

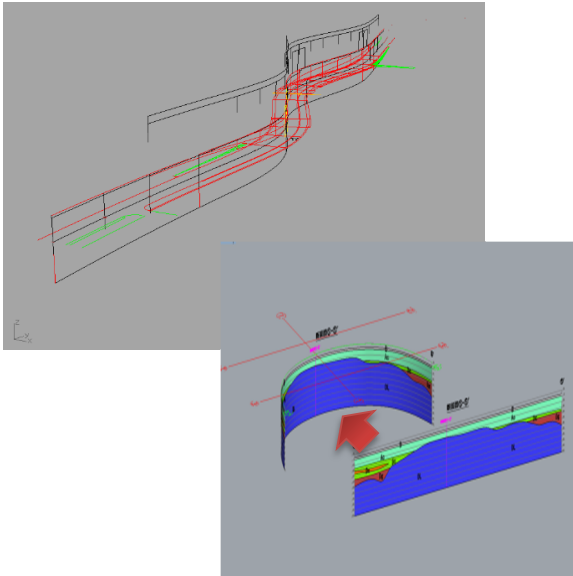
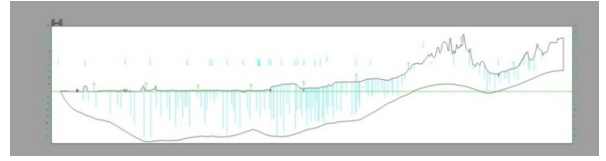


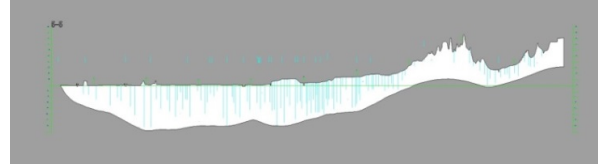
図5.5-9 曲線線形に沿い断面図を3次元化した例

例5.5-1) 断面図のサーフェスを作成し3次元化する

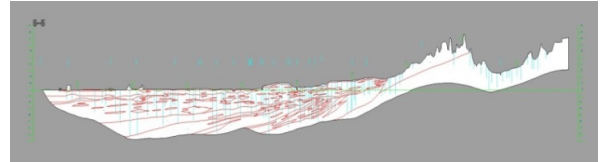
- ①作成したい範囲の閉じたポリライン（や曲線）とサーフェスを作る（下図の場合は地形線と下限線）



- ②①のポリラインでサーフェスをトリムする（以降も同じですが、サーフェスと同じ面上にポリラインや曲線がないと正常にトリムできない）

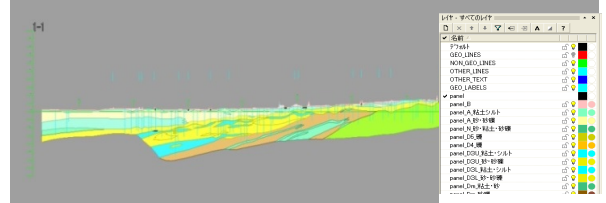


- ③サーフェスパネルを地質境界線で切断していく



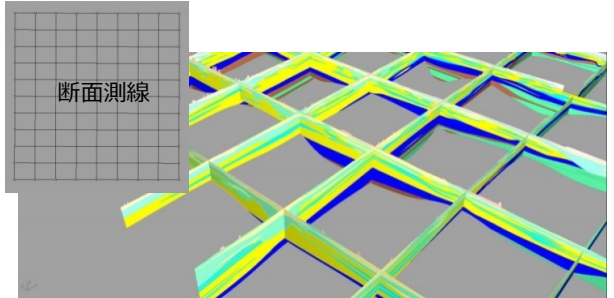
切断するための地質境界線は厳密にサーフェスを包括していないとサーフェスを切断することができない。ポリラインの末端処理や結合処理を確認する。

- ④地質区分毎のレイヤを作り、サーフェスパネルを各レイヤに振り分ける



地質区分毎にレイヤ分類する

- ⑤断面測線に各断面を移動・回転して配置し3次元化する



参考文献

- 1) <https://www.gsi.go.jp/common/000187337.pdf>. (2020年12月時点)
- 2) 工藤 里絵, 西山 昭一, 和田 弘, 水野 敏実. "地盤情報DBの活用事例～3次元地盤モデリングへの適用～". 情報地質 19 (2), 日本情報地質学会, 2008, pp.98-99.
- 3) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会. ボーリング柱状図作成及び ボーリングコア取扱い・保管要領, 2015, p.129.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

6章 3次元地質解析

- [6.1 データのクロスチェック](#)
- [6.2 ドラフトモデリング](#)
- [6.3 不適合の解消](#)
- [6.4 地質対比](#)
- [6.5 空間補間処理](#)
- [6.6 補間パラメータ/ログの記録](#)
- [6.7 補填データ作成](#)
- [6.8 スケルトンモデル](#)
- [6.9 モデルの妥当性](#)
- [6.10 モデルの仕上げ](#)

6.1 データのクロスチェック

クロスチェックが必要な理由

地質データをただ3次元化しただけでは、3次元地質モデルを作成することは困難である。例えば、紙図面をCAD化した断面図では、元の紙図面のゆがみやデジタル化精度等の様々な要因で誤差が生じ得る(「5.1 品質管理の着目点」参照)。

このような誤差を持つ複数の断面図を3次元化しても、断面図の交点で境界線がずれてしまうので、作成したサーフェスモデルは正しい結果とならない。誤差をもつ部分でサーフェスには極端な段差や歪が生じる(図6.1-1)。

これらの不具合は、3次元化し断面図同士の交点チェック等のクロスチェックを行って初めて明らかになることが少なくない。データの3次元クロスチェックを行い不適合を抽出することが重要である。

抽出した不適合は修正するか、場合によっては棄却する判断も必要となる。モデリングに使用できる状態まで修正するために、この時点で多くの時間を費やすことが多い。

なお、クロスチェックは地質情報自体のケアレスミスの発見に役立つという利点もある。

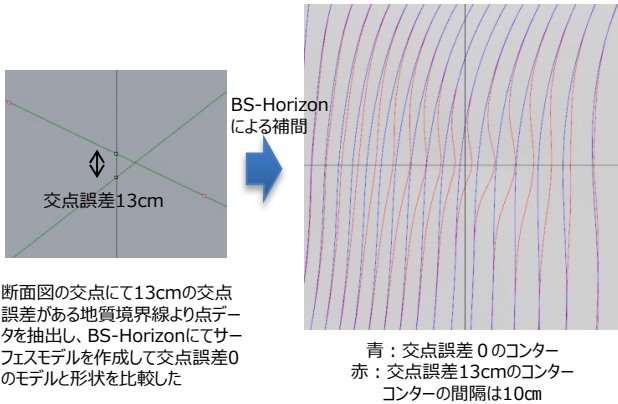


図6.1-1 交点誤差によるサーフェスモデルの歪みの例

クロスチェックの視点

クロスチェックは、表5.1-1に示した「論理一貫性」「位置正確度」の視点による検査に該当する。「論理一貫性」では入力データに用いる地質境界の分類に間違いがないか、入力データに用いる地質図面同士に矛盾がないか、の視点になる。「位置正確度」では入力データと地質図面に乖離がないかに注意する(図6.1-2,3)。

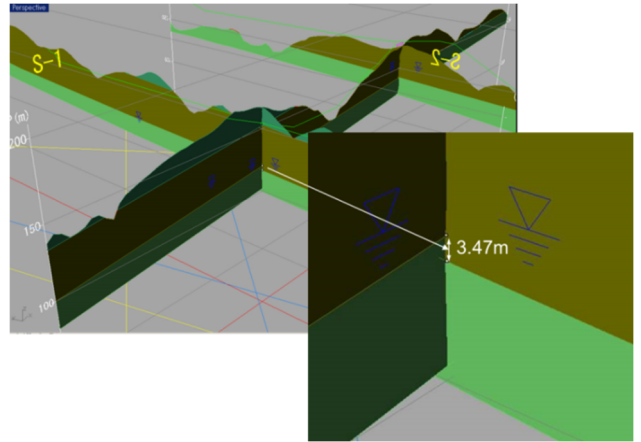


図6.1-2 位置正確度に問題がある地質断面の例 (イメージ)
数字はCADによる実測誤差

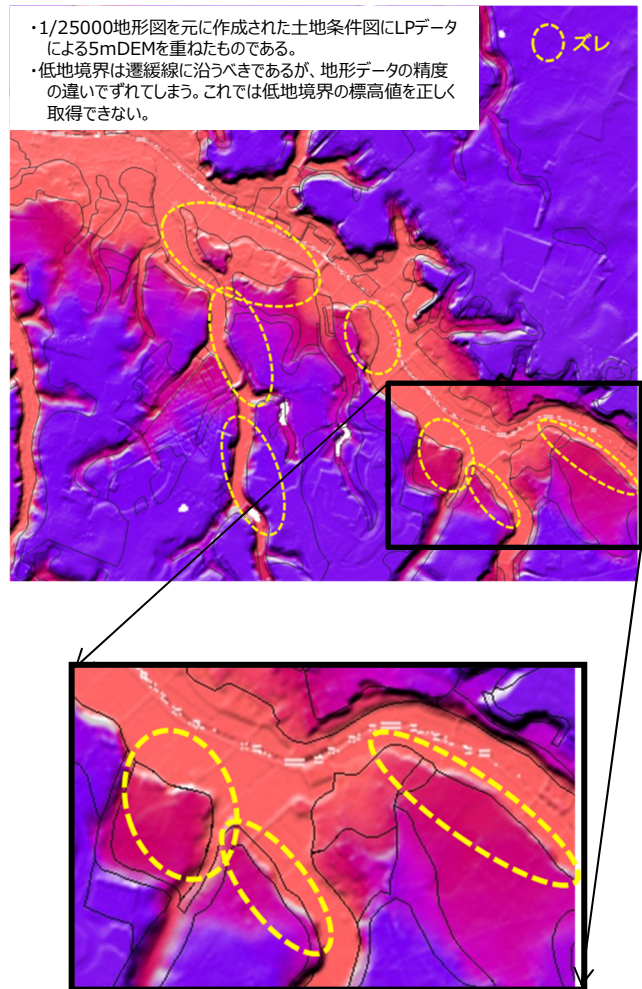


図6.1-3 位置正確度に問題のある地質図面の例

不適合の種類と原因

地質断面図では次のような原因により不適合が生じる。

表6.1-1 地質断面図における不適合と原因の例

不適合の状態	不適合の原因
交差する地質断面で地質境界の位置が合わない	ペンの誤差、トレース時の誤差、作図上の誤差、単純ミス
交差する地質断面で一方の断面にある地質境界線が、もう一方の断面に存在しない	断面作成時の確認ミス、トレースミス、作業中に誤って削除
交差する地質断面で地質解釈が異なる	断面の作成者が違う、断面の作成時代が違う
井桁に交差する地質断面で順番に地質境界を追いかけていくと“螺旋”になる	緩傾斜地層、断面作成者のミス

他にも、次のように不適合以前に技術的未熟ともいえるような問題もある。

- ◆ 調査が追加されたのに地質図面を更新しない
- ◆ ボーリングを投影したのに投影距離が示されていない
- ◆ ボーリングの投影距離を無視し、投影ボーリングを曲線で結ぶ地質境界を描く
- ◆ 道路曲線線形で湾曲しているはずの地質境界が直線で描かれている(つまり2点間を直線で結んでいるだけ)

以上の不適合は、3次元地質・地盤モデルを構築するプロセスで発見次第、是正することになる。実際にコンソーシアム会員が経験した事例の一部を図6.1-4～8の模式図で示す。

洪積層(Dc層)の中に差し込む沖積層(As層)

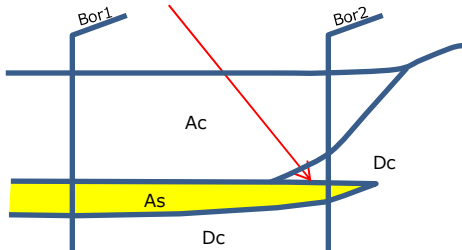


図6.1-4 地層累重の法則に反する例

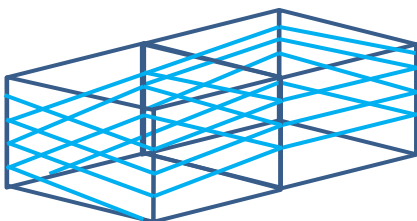


図6.1-5 螺旋状の地質解釈例

複数の格子断面で緩傾斜の堆積層互層を描いているが、一つの断面における傾斜ミスが他の断面に波及した

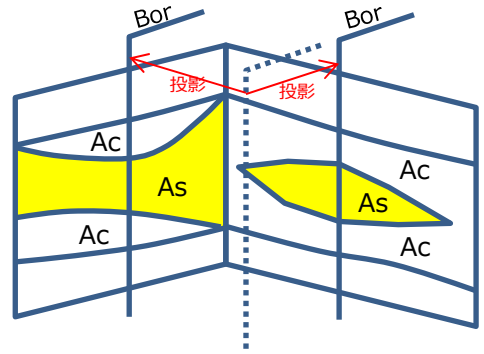


図6.1-6 交差断面で地質解釈が異なる例
同じボーリングデータを使用しているのに地質解釈が違う結果、断面の交点があわなくなっている

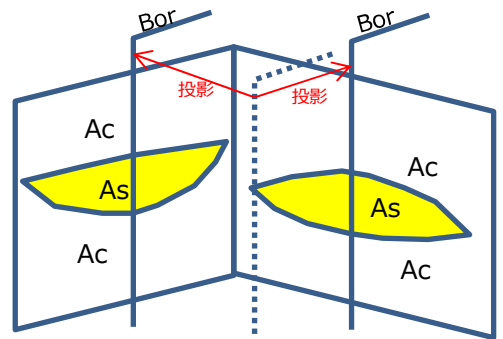


図6.1-7 交差断面で地層形状の解釈が異なる例
同じボーリングデータを使用しているのに、思想に統一性が無い

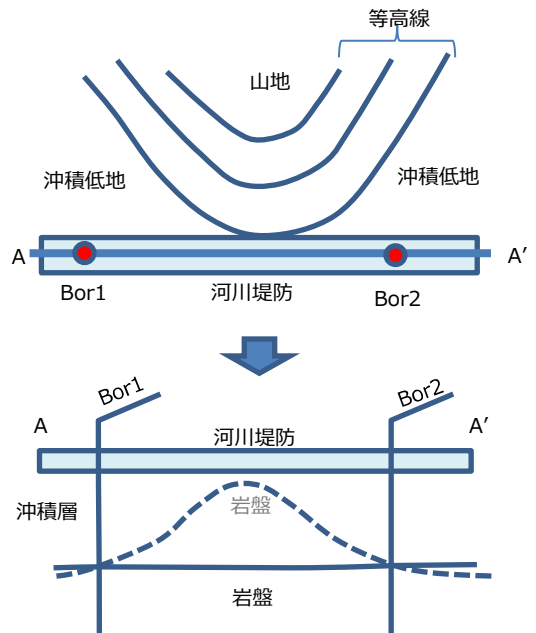
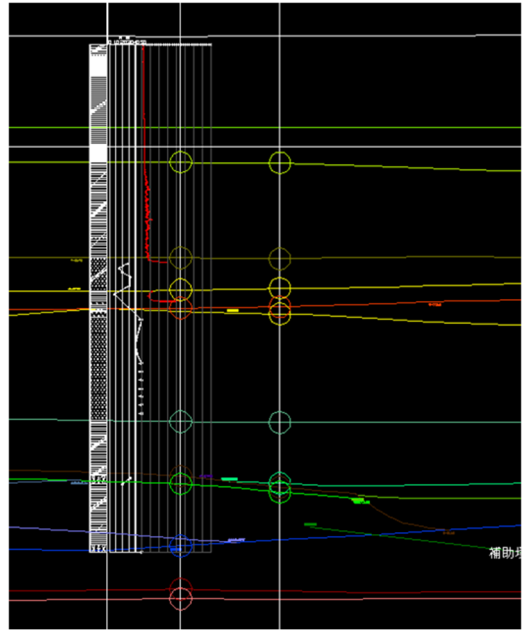


図6.1-8 地質形成過程を考慮しない例
河川堤防の縦断面図で山地が迫っているのに岩盤線を直線につないでだけ

例6.1-1) 3次元地質解析システムによる不適合の抽出例

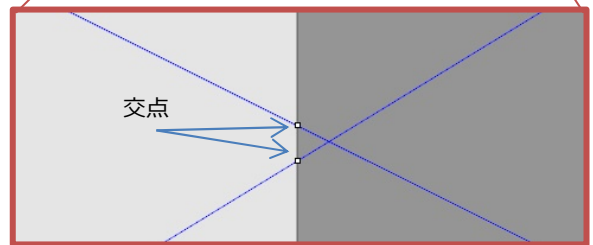
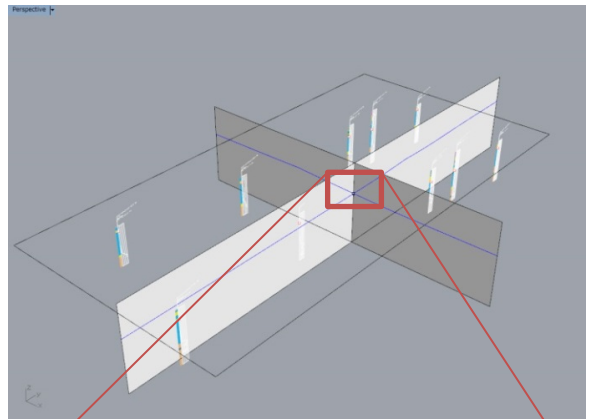
【GEORAMA for Civil3Dの交点チェック例】

- ・断面図や平面図における地質境界の交点を抽出し、2次元断面図・平面図にて円記号を表示する
- ・交点誤差の距離を計測できる
- ・ユーザーは円のズレを目で確認して、円中心を通るように境界線を修正する



【GEO-CREの交点チェック例】

- ・3次元化した断面図・平面図における地質境界線の交点を抽出し、3次元上で表示する
- ・点/線/サーフェス/ソリッド等のオブジェクト同士で交点・交線が抽出できるので交点チェックが柔軟に行える
- ・交点誤差の距離を計測できる
- ・ユーザーは、交点の合っていないところを目で確認して、交点を通るように境界線を修正する



6.2 ドラフトモデリング

ドラフトモデリングとは

ドラフトモデリングとは、下記の予察的検討を行うために、サーフェスモデル(或いはボクセルモデル)を作る手法である。

ドラフトモデリングにより、そのモデルに生じた形の歪み・偏りから、逆に不適合箇所を探すことも可能である。

【予察的検討】

- ◆土質分布や強度分布の傾向をつかむ
- ◆支持層の深度や起伏状況を知る
- ◆おおまかな地下水分布を知る
- ◆適切な調査箇所を検討する
- ◆詳細な3次元地質モデルを作成するための参考とする
- ◆補填データ作成(「6.7 補填データ作成」参照)の目安とする

ドラフトモデリングの役割

ドラフトモデリングは、ワークフロー(図4.2-2)におけるデータの「③-1クロスチェック」に該当する。

ドラフトモデリングにより、予察的モデルを評価する視点は、モデル形状にみられる揺らぎや擾乱が、データ真値によるものかを判定し、ケアレミスが無い、他の不確定要素が無い、調査不足ではないかを調べることにあ

る。ドラフトモデリングはモデリング作業の効率化の観点からも活用してほしい手法である。なお、ドラフトモデリングはできるだけ計算負荷がかからず短時間に実施できることが望ましい。

ドラフトモデリングの注意点

ドラフトモデリングは地質対比が技術的視点で行われている段階ではないので、そのまま詳細設計等には使用することはできない。あくまでも予察的検討に留めるべきである。

ドラフトモデルの着目点

ドラフトモデリングによる3次元地質モデルをチェックするうえでの着目点は次のようになる。

- ◆サーフェスモデルの凹凸に特異点がないか？
- ◆サーフェスモデルの凹凸の形状は自然か不自然か？
- ◆土質の分布と整合するか？
- ◆土質に連続性はあるか？
- ◆土質の深度変化は地質学的に合理的なものか？
- ◆N値(強度)分布に連続性はあるか？
- ◆連続性が途切れる部分は調査が不足していないか？

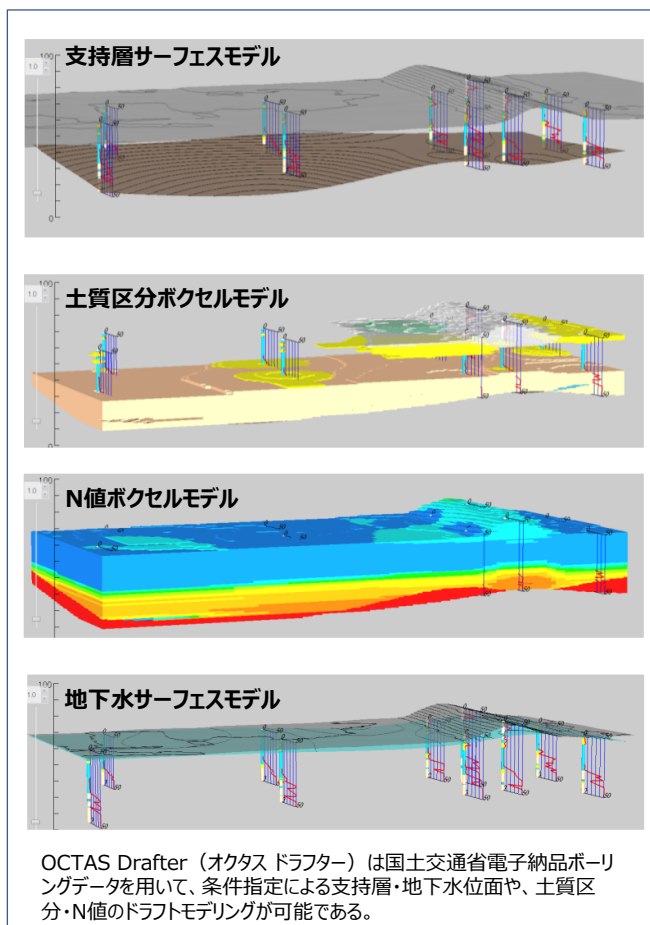


図6.2-1 ドラフトモデルの例

6.3 不適合の解消

不適合の解消方法

クロスチェックで明らかになった不適合は、原本データまで遡り修正したり、3次元地質解析システム上で直接修正することになる。

例えば、地質平面図のデータを入力データに使用する場合、地質平面図作成に用いた地形図がどのような手法で作成され、どの程度の精度を持つものか確認する。地質平面図は地形等高線を判読して描かれたものである。より精度の高い地形データが得られ、その地形データを用いて3次元地質モデルを作成する場合には、精度の高い地形データを用いて地質境界線を修正する必要がある。

不適合解消のレベル

オリジナルデータの誤差以上の解消は合理的ではない。誤差の許容値(1cm未満や10cm未満等)を決め、それ以下の場合は無視し、それ以上の時は修正するといった“ルール”を都度定めることが望ましい。

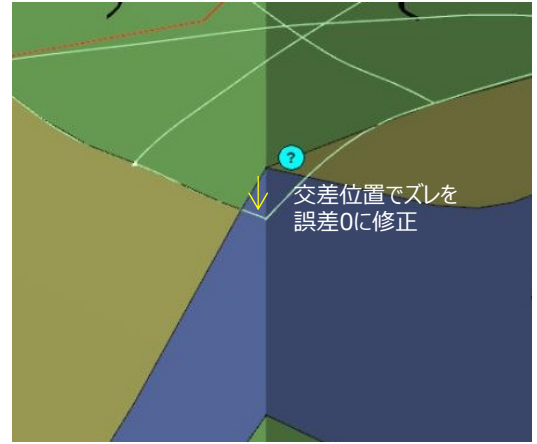
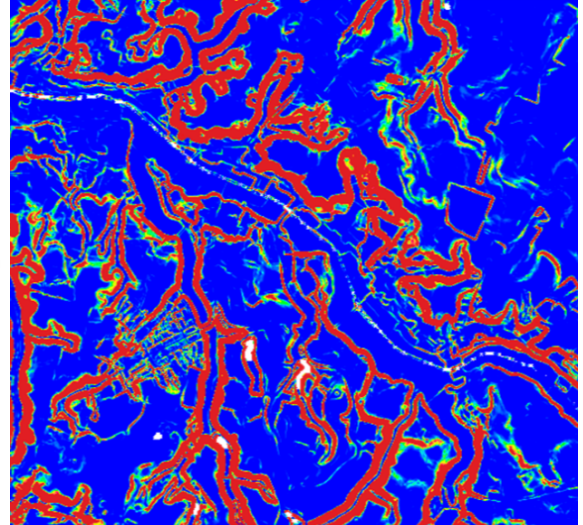
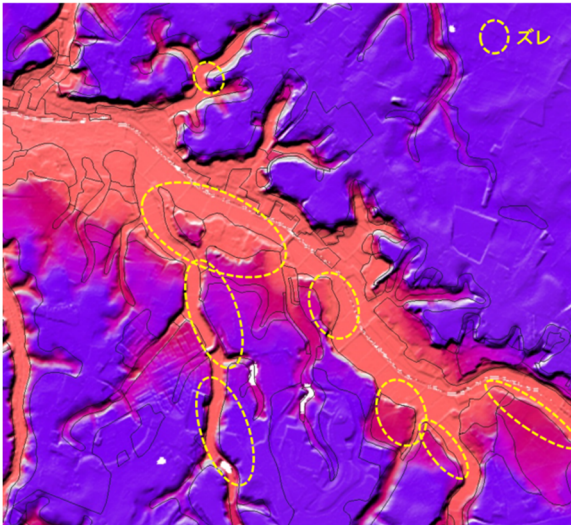


図6.3-1 地質断面図のクロスチェック・修正例

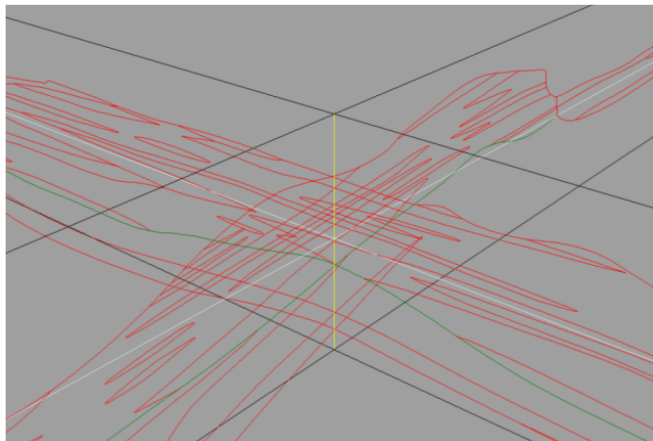


・定量的に遷緩線を抽出するために、例えば傾斜区分図（地形解析図）を背景図にして、傾斜値でコンターを生成しそのコンターベクターデータを利用する

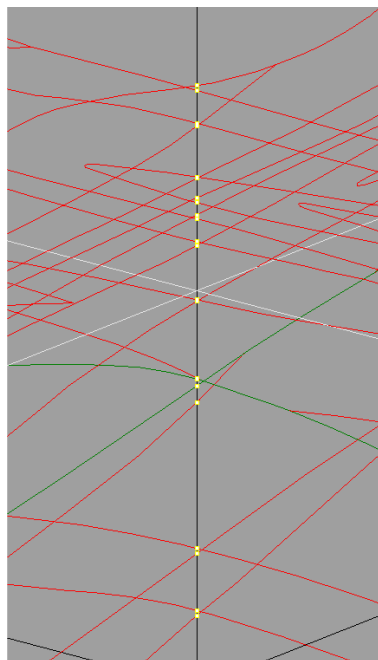
図6.3-2 地質平面図の修正例
地形データは国土地理院数値地図5mメッシュ標高を使用

例6.3-1) 地質断面図の不適合の解消

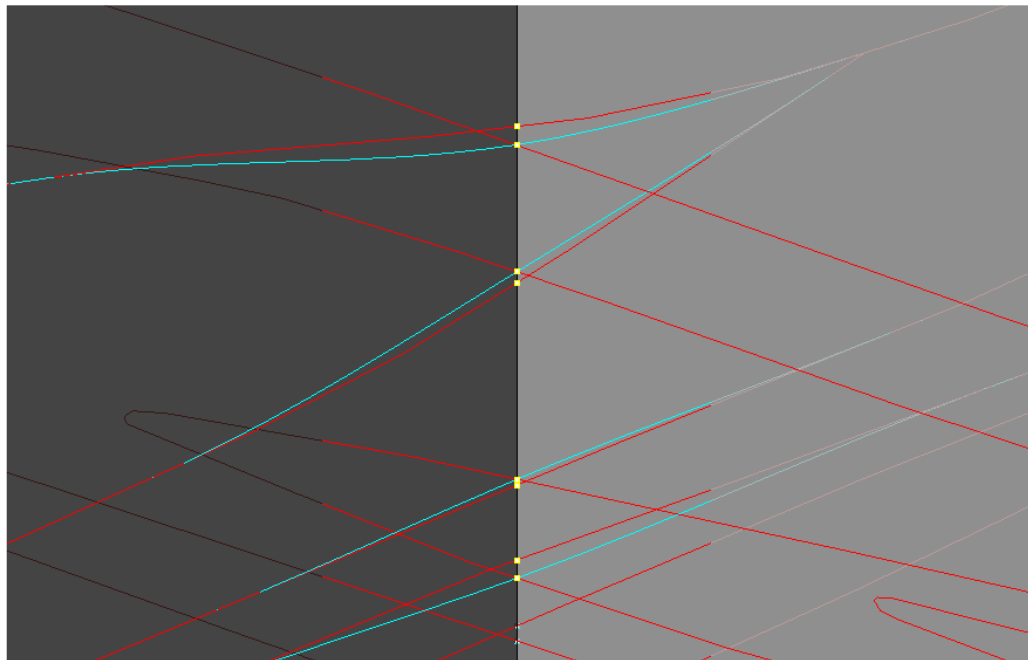
① 断面の交線を作成する



② パネルの交線と境界線の交点を抽出する



③ 交点がずれている場合、境界線を作図し交点を通る曲線・ポリラインを作成して修正する



- ◆ 誤差の許容値（1cm未満や10cm未満等）を決め、それ以下の場合は無視し、それ以上の時は修正するといった“ルール”を決める
- ◆ 優先順位の低い断面図（横断図等）の地質境界線を修正対象として選択する

6.4 地質対比

地質対比とは

本書における地質対比とは、3次元地質モデルを作成するために、地質調査データの同じ条件(同一時代、同じ地質種・地質体、類似物性値等)の境界を判別し、境界データとしてグルーピングする作業である(図6.4-1)。

地質のグルーピングは、一般的に「層(Formation)」を基本単元とし、「層」は「層群(Group)」・「超層群(Supergroup)」にまとめられ、「部層(Member)」、「単層(Bed)」および「流堆積物(Flow Deposit)」の単元に細分される²⁾。地質層序やグルーピングの考え方が地質調査の進展で変わる場合は、地質対比もそれに合わせて修正することもあり得る。

また、同じカテゴリ・グループの地質境界面でも、形成プロセスが局部的に変われば、異なる地質境界面の集合体となる。その場合、地質対比もそのような形成プロセスに応じたものにならなければならない。

なお、3次元地質解析システムにおける地質対比は、3次元空間の中で直接行うものや、2次元断面とリンクしたり、DBを参照するもの等、多様である(「[R.T-1 3次元地質解析システム](#)」を参照)。

地質対比の基準

地質対比の基準となる地質情報には次のものがある。

- ◆微地形情報
 - ・微地形分類図
 - ・DEMデータの地形解析図による地形変換線
- ◆地質模式地および地質図
 - ・既往地質文献資料
 - ・地質図幅、各種地盤図
 - ・既存調査における地質平面図・断面図
- ◆基準ボーリング
 - ・示準ボーリング柱状図
 - ・オールコアボーリング柱状図

地質対比のルール

地質対比作業では地質調査データの重ね合わせで総合的に判定する。地質調査データは、地質図、地質断面図、示準ボーリング、ボーリングの試験情報(原位置試験、検層、室内試験結果)、物理探査結果等を、3次元配置(あるいは2次元配置)して地質対比の判断材料とする。

なお、地質対比方法はモデル作成対象毎にルールを決め、報告書等に明示する必要がある。

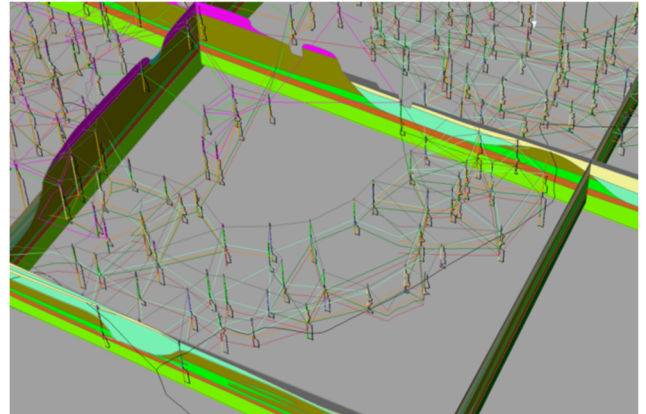


図6.4-1 地質対比が完了した状態

地質対比の視点

地質対比は次のような視点により行う。

【視点1】

地質境界面は自然現象であることを念頭に置き、物理的・地質学的にどのように形成されるのかを考えて対比する(図6.4-2)。

- ①層序学・地質構造的に同じ地質カテゴリ(部層・累層等)やグループの境界を判別する
- ②境界の新旧関係を判定する
- ③境界面の形成プロセスを考慮する

【視点2】

どのような形状にサーフェスモデルを作り、どのような順番でサーフェスモデル同士が切り合えば、地層モデルができるのかをイメージする。あらかじめ地質層序の模式図を作り、地質境界面の位相的關係を明らかにしておくことが大切である(図6.4-3)。

【視点3】

サーフェスモデル同士が交差し互いに切り合うと、その結果としてどのような形状が生みだされるかをイメージする。境界面モデルの形状を様々な手段で観察・チェックし、不自然さをつぶしていく。

地質対比の留意点

地質対比の作業中に地質情報に疑義が生じ判断に迷う場合は、原本に遡り地質情報を再評価する必要がある。原本とは、柱状図であればボーリングコア、地質図であればルートマップであり、疑わしければ対比に用いたデータの修正や棄却をおこなう。その際は、修正や棄却の理由を記録する必要がある。

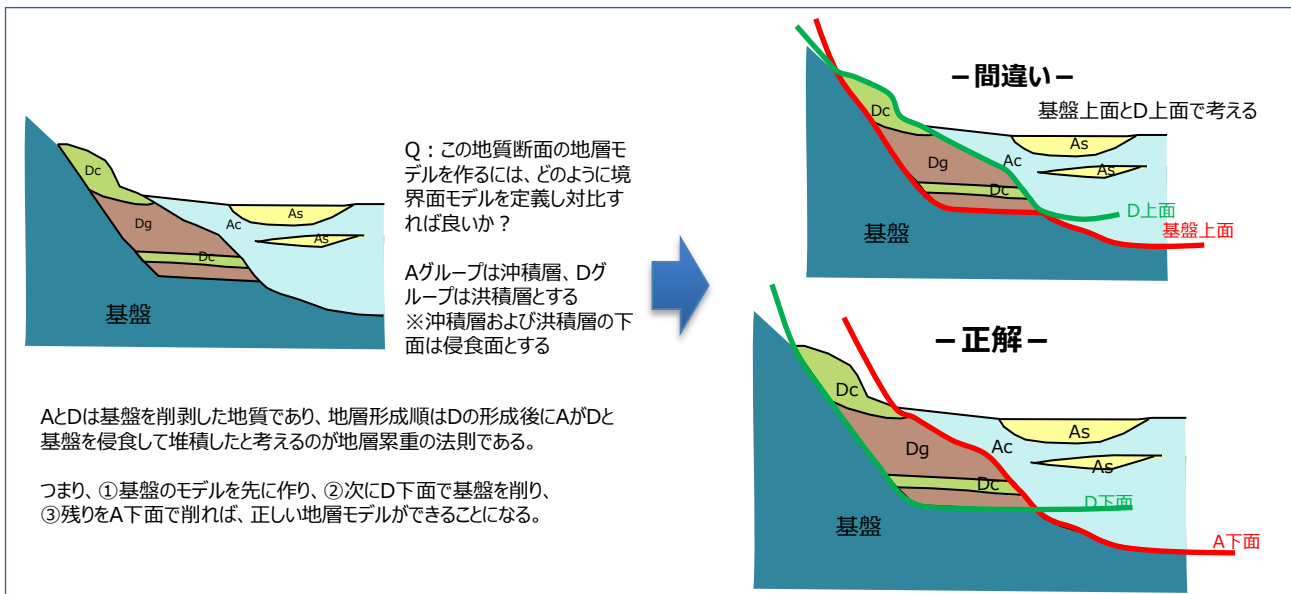


図6.4-2 イベント・グループを考慮した対比の例
自然な地質境界面を再現するために、地層の形成プロセスや地質形成時代を考慮する

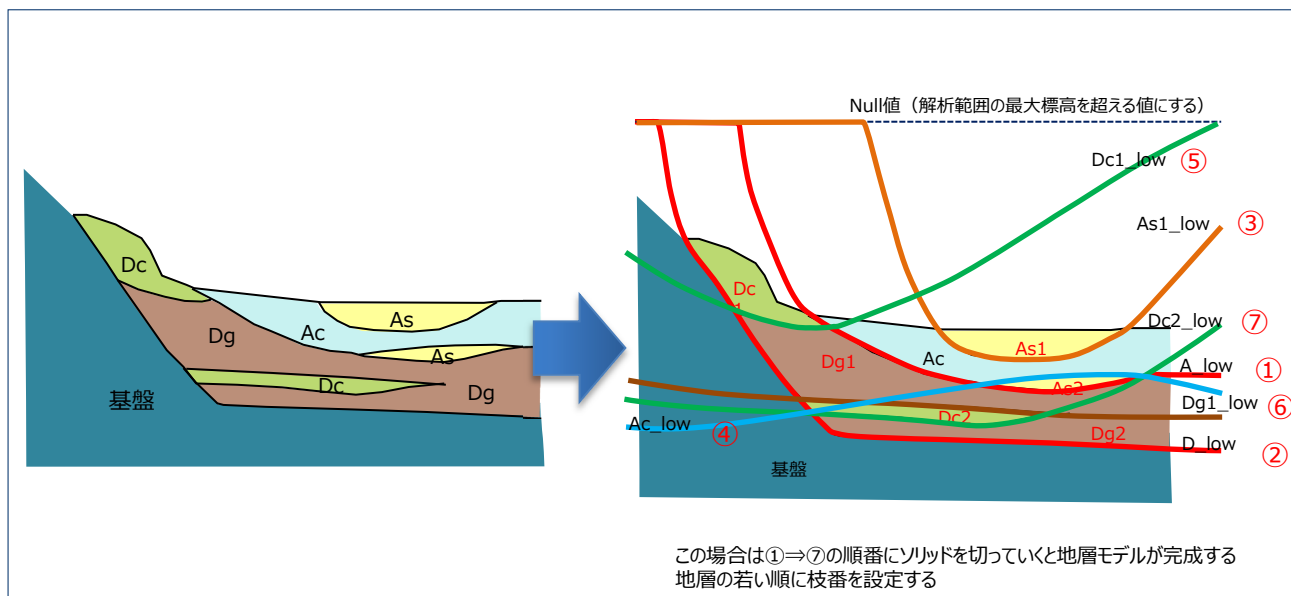


図6.4-3 切り合い順番を考えた対比の例
堆積性の地質が主体の場合、ボーリングの上位（浅い部分）から地層を対比する

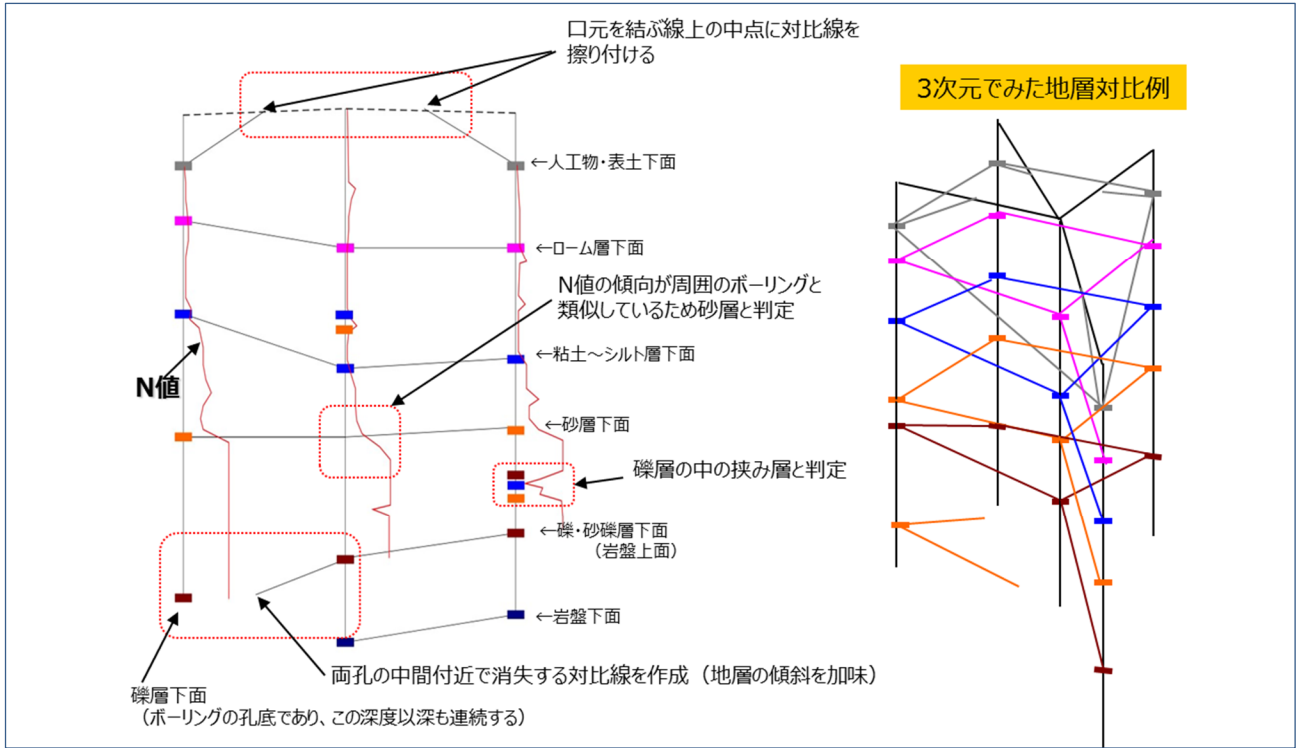


図6.4-4 ボーリング間の地質対比例
 同じ土質分類でも途中からN値の傾向が急変する場合がある（地質境界としての記載が無い）ため、N値のパターンと地層構成を比較対比を行なう

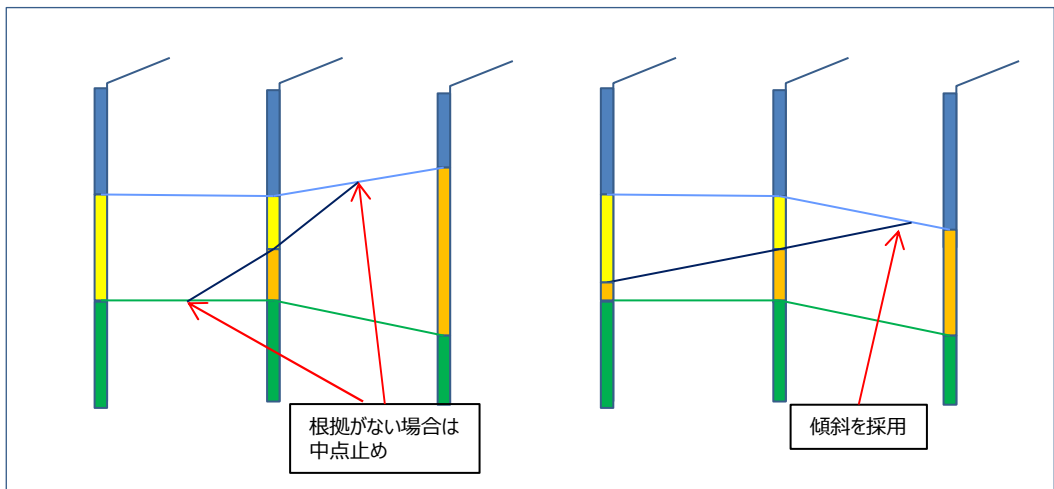
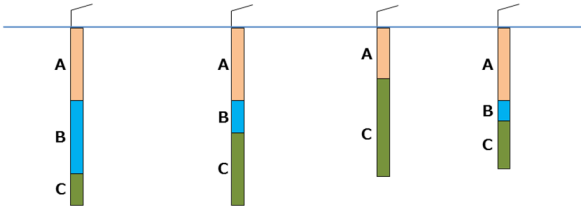
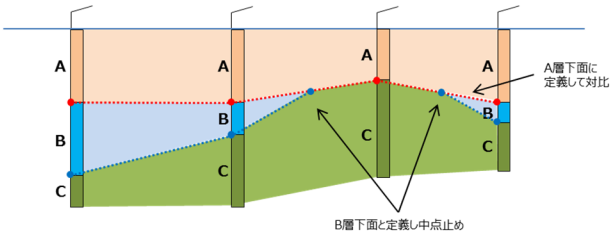


図6.4-5 ボーリング間地質対比の中間処理例
 ボーリング間で地層構成が変わり対比できないものについては、状況に応じて中間付近で消失する対比線を作成する

Q このような柱状図の場合にどのように対比しますか？



A1 A層が下位層を侵食する場合



A2 A層が下位層に堆積する場合

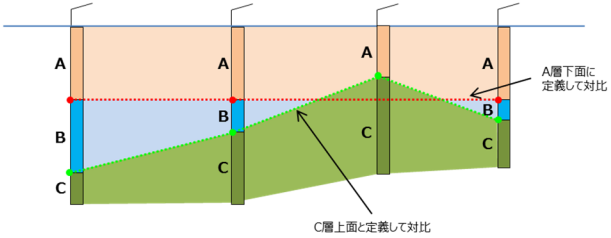
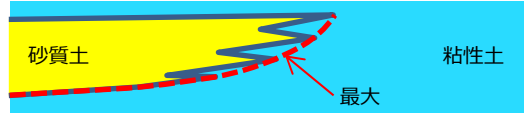
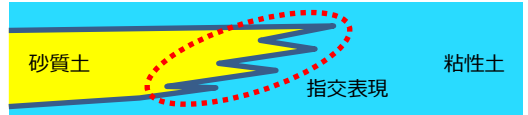
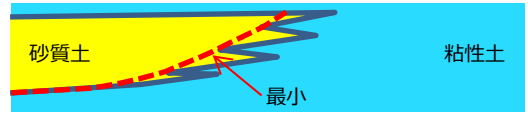


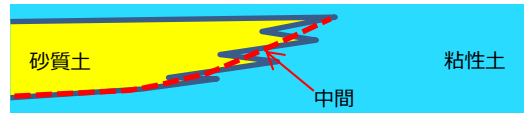
図6.4-6 侵食・堆積の解釈の違いにより異なる対比の例



①液状化評価目的の場合、砂質土層を最大限見込む



②地盤沈下評価目的の場合、粘性土層を最大限見込む



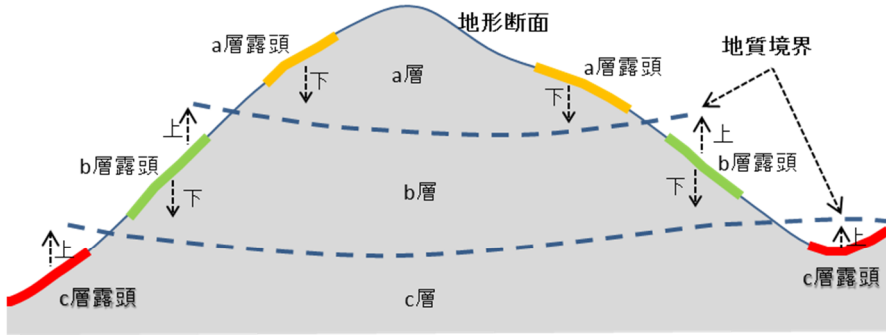
③多様な目的に使う場合は中間をとる

図6.4-7 既存図面における指交表現の解釈例
目的により扱いが異なることに注意

例6.4-1) 地質対比における制約条件

入力データに制約条件を設定して境界面の形をコントロールすることが可能なアルゴリズム※もある。制約条件とは、地質境界を考えるうえでの下図のような条件付けである。

※Horizon2000、BS-Horizon



上の断面図の場合、a層露頭よりも下位で、かつ、b層露頭より上位にa層とb層の境界が存在する(b・c層の場合も同様)。地層境界を計算処理にて推定する際に、この条件 ($b\text{露頭} < a\text{境界} < a\text{露頭}$, $c\text{露頭} < bc\text{境界} < b\text{露頭}$) を地質境界の制約条件と定義できる。

図1 地質断面でみる制約条件の例

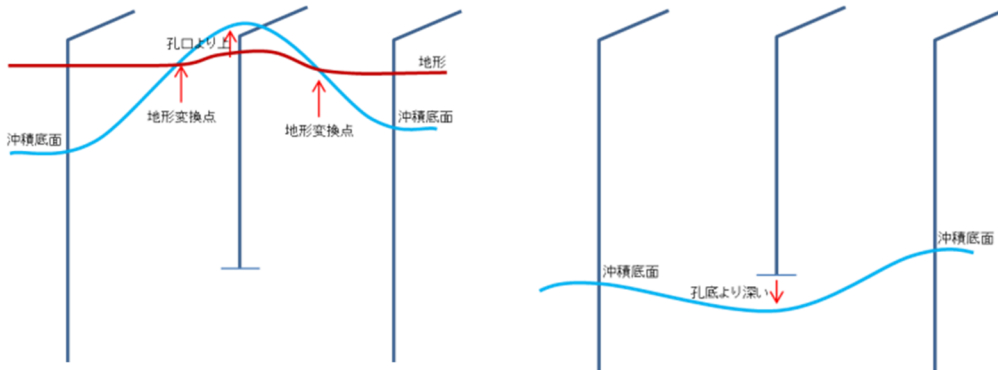
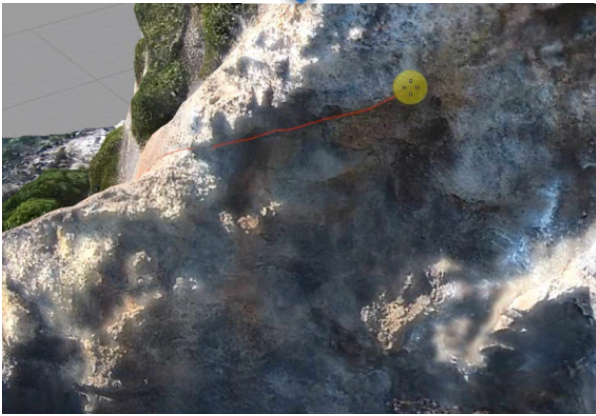


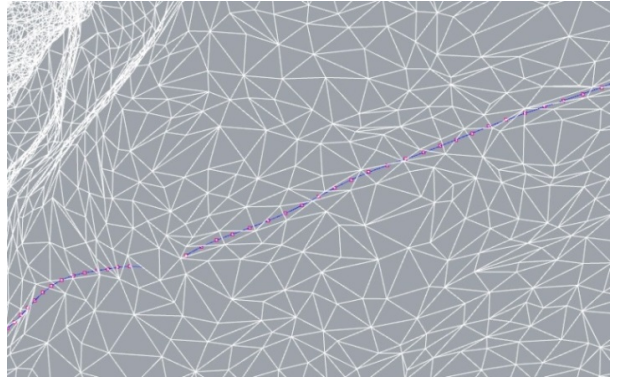
図2 ボーリングデータにおける制約条件の例

例6.4-2) UAVオルソ写真による3次元情報の判読とトレース

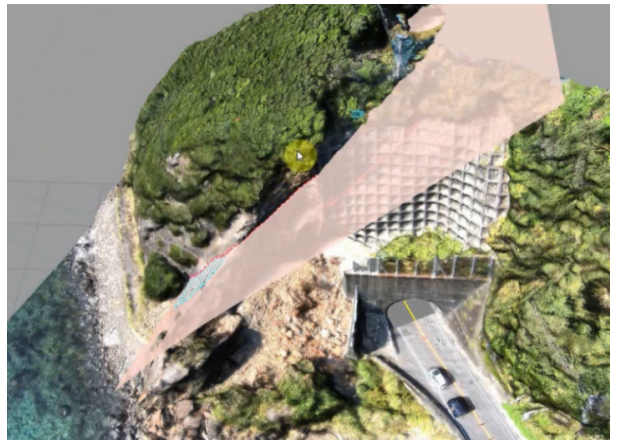
微地形や画像情報を元に、地質境界等の情報を判読・トレースし3次元データとする



VRMLのテクスチャ画像と微地形を判別し地形上に不連続面をトレースし、3次元ベクターデータ（ポリラインあるいはNURBS曲線）を作成する



3次元のベクターデータよりサーフェスモデルの計算に用いるポイントデータを等間隔に生成した例



ポイントデータよりサーフェスモデルを計算した例

6.5 空間補間処理

空間補間処理とは

空間補間処理とは、整理された入力データより、3次元のサーフェスモデルや物性モデルを計算する手法である。

空間補間法の選定

全ての地質事象を一つの空間補間法で再現できるものはないので、様々な空間補間法の特性を考慮し、地質事象毎に適した手法を選定する必要がある(図6.5-1)。

作成するモデルの種類とデータの分布・形態で、適用するアルゴリズムを選ぶことが可能である。例えば、地形面モデルと地質境界面モデルは次のようになる。

【地形面モデルの空間補間アルゴリズム】

地形面モデルは、実測データから逸脱しない面が求められるので、線形補間による内挿処理が望ましい。そのため多くの地形モデルを作成するソフトで採用するのがTinである。

◆データの分布・形態

- ①測量点(平板測量、レーザー測量)
- ②グリッド(数値標高データ)
- ③等高線

【地質境界面モデルの空間補間アルゴリズム】

地質境界面モデルは、少ないデータや不均一なデータから、自然な形状を示す“なめらか”な曲面を作ることが求められることが多い。

◆データの分布・形態

- ①離散点
 - この場合の離散点は、技術者の意図が介在しにくい客観的なデータ(露頭、ボーリング等)
- ②地質境界線(断面図、平面図)
 - 地質図や断面図の境界線は、技術者の知識・経験により描かれた主観的データが混在する
- ③等高線
 - 地質境界面や地層層厚の等高線等

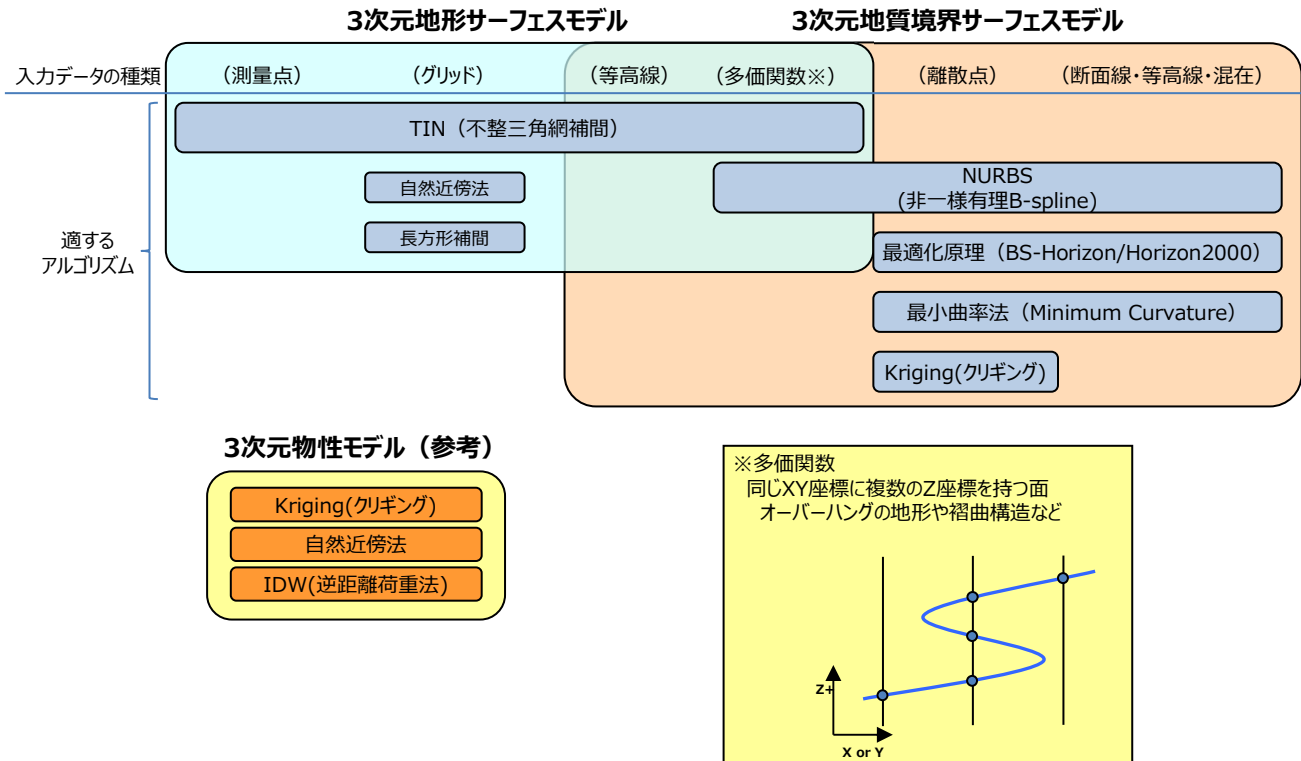


図6.5-1 空間補間アルゴリズムの適用例

補間計算に用いるデータ

本書では、3次元サーフェスモデルの補間法について、グリッド法・曲線法の二つのタイプを取り上げる。

地質境界面等の補間計算にはグリッド法が用いられることが多い。岩盤分類や不連続面等の複雑な曲面を作成するには、曲線法を用いたり、グリッド法・曲線法を合成して作成する。

以上の、適用する補間タイプにより、用いるデータの種類が異なる。

補間計算に用いるデータの種類

グリッド法の入力データには点データを用いる(図6.5-2)。制御情報として、制約条件(「6.4 地質対比」参照)や走向傾斜を用いる場合がある(表6.5-1)。

曲線法では、曲線の制御点における重みベクトル情報を用いて、曲線の接線・法線を継承した曲面を作成する(図6.5-3、表6.5-1)。既存のサーフェスのエッジより曲線を抽出したり、サーフェス自体の制御点情報を継承して新たなサーフェスを作成することも可能である。

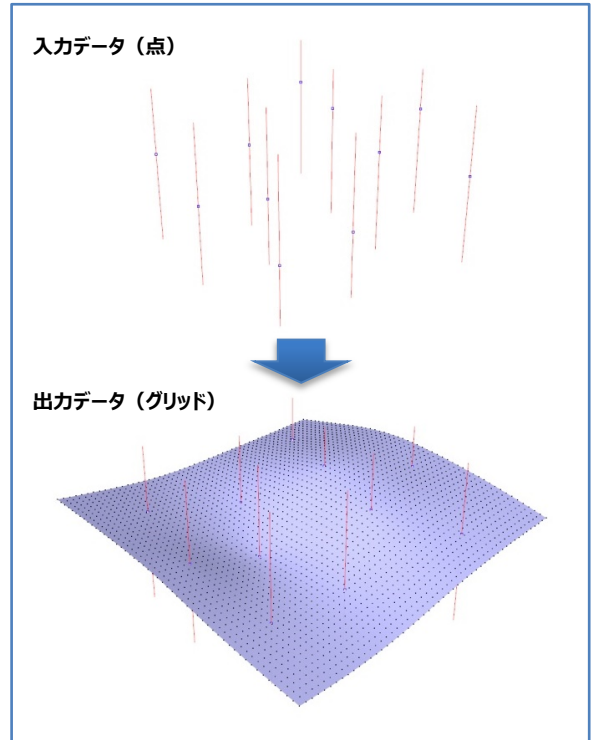


図6.5-2 グリッド法の例

表6.5-1 補間タイプとデータの種類の例

補間タイプ	用いるデータの種類	対応補間アルゴリズム
グリッド法	<ul style="list-style-type: none"> ・点 ・制御情報 (不等号条件付の点データ、走向傾斜データ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・Horizon2000³⁾、BS-Horizon⁴⁾ : 制御情報利用可能 ・Minimum Curvature ・クリギング ・IDW ・他
曲線法	<ul style="list-style-type: none"> ・NURBS曲線 ・NURBSサーフェスエッジ ・NURBSサーフェスの制御点 	NURBS

補間計算用データのまとめ方

補間計算用のデータは、出力データであるサーフェスモデル・ボクセルモデルと対応させるように、データセットとして一まとめにすることが望ましい。これは、トレーサビリティを確保する手段でもある。また、モデル毎にアルゴリズムやパラメータを変える場合もあり、データセットには、適用アルゴリズムとパラメータの記録を推奨する。

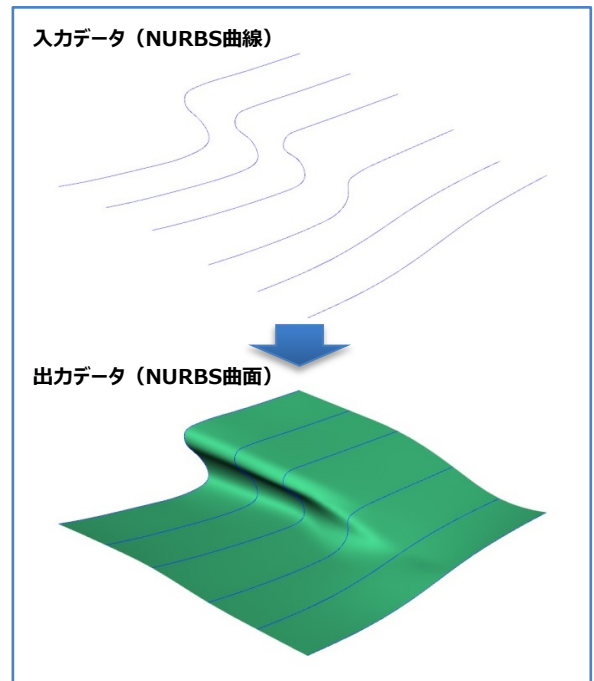
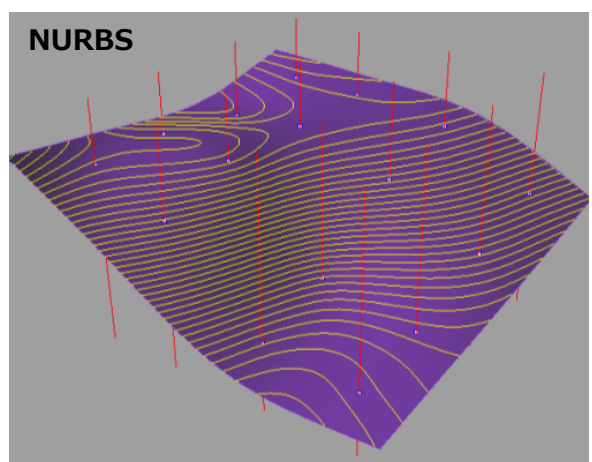
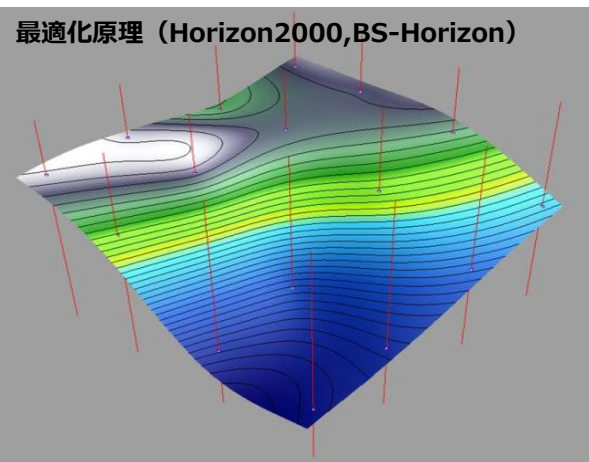
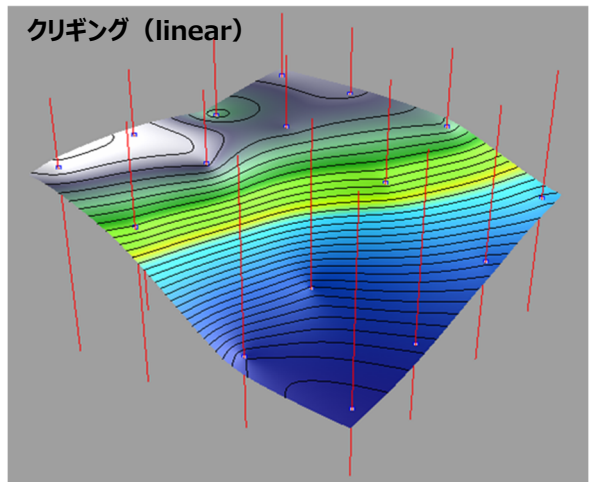
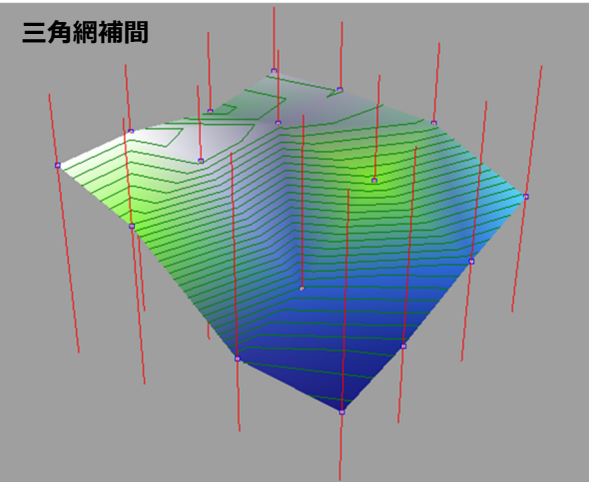
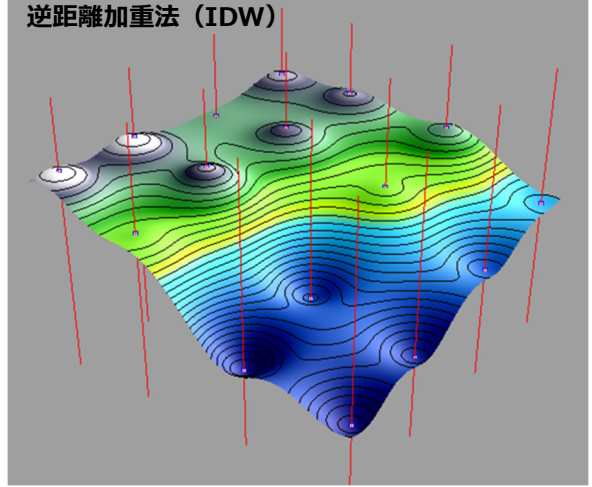
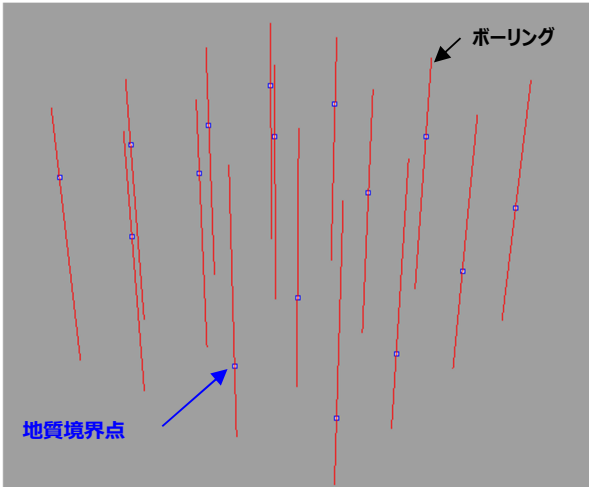


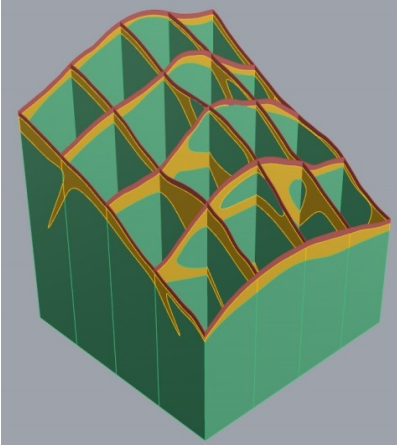
図6.5-3 曲線法の例

例6.5-1) 補間アルゴリズムによるサーフェスモデルの形状比較

仮定のボーリング地点における地質境界点を元に、異なるアルゴリズムにて補間したサーフェスモデルの形状を比較した

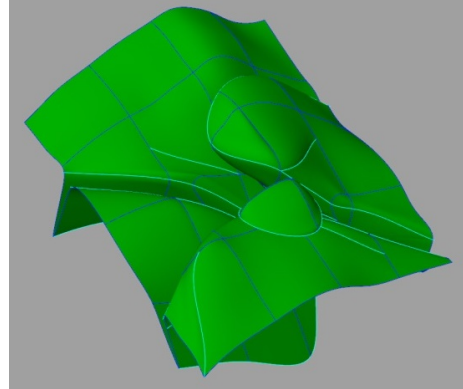


例6.5-2) 曲線法によるB-Repsソリッドモデル作成

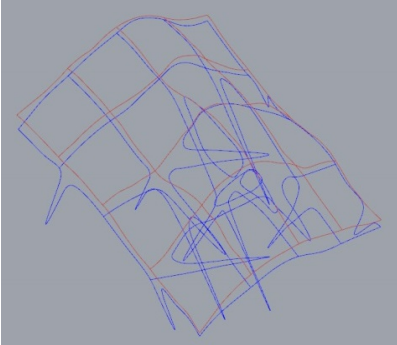


①CAD断面図を3次元配置し、準3次元図面を作成する。

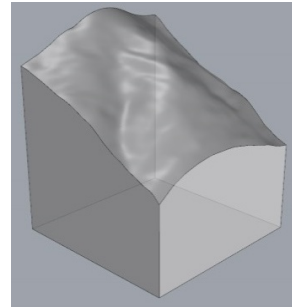
②モデル化対象の境界線を抽出し分類する。



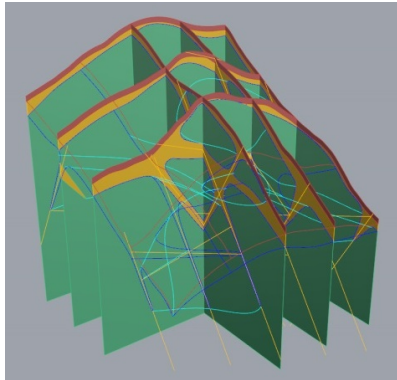
⑤要素毎の曲線ネットワークよりサーフェスモデルを作成する。等高線等で妥当な形状になるか確認しながら作業する



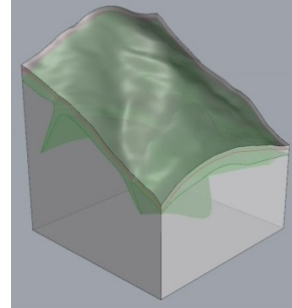
③境界線（ポリライン）の交点をチェック、交点誤差を0に修正した後、NURBSラインに変換する。



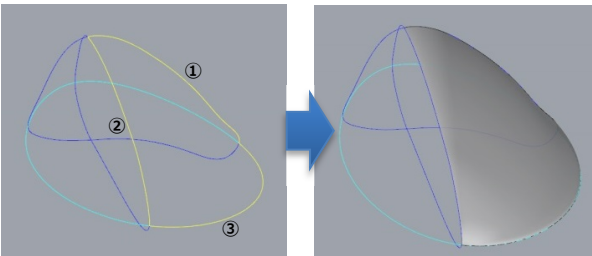
⑥必要範囲のソリッドを作成する。この場合は、断面図のある範囲と、地形面と底面で上端・下端を切断したものとなる。



④境界線の変曲点や地質構造に基づき、境界線の構成要素を分解する。

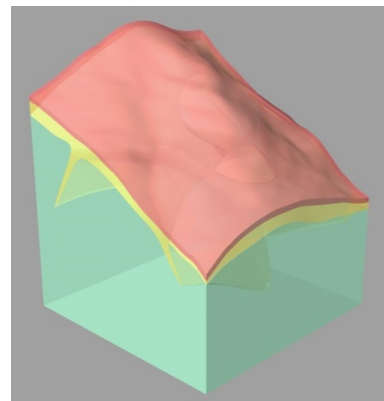


⑦⑤で作成した一連のサーフェスモデルを用いて⑥のソリッドを切断する。



【構成要素の例】

①②③の曲線ネットワークで構成される
※水色線は変曲点を結ぶ補助線



⑧作業完了後の地層ソリッドモデル

⑨必要に応じて、⑧のソリッドモデルを用いて①の箇所を断面図を作成し、①の断面図を置き換える。

例6.5-3) グリッド法の単一面による断層モデリング (1)

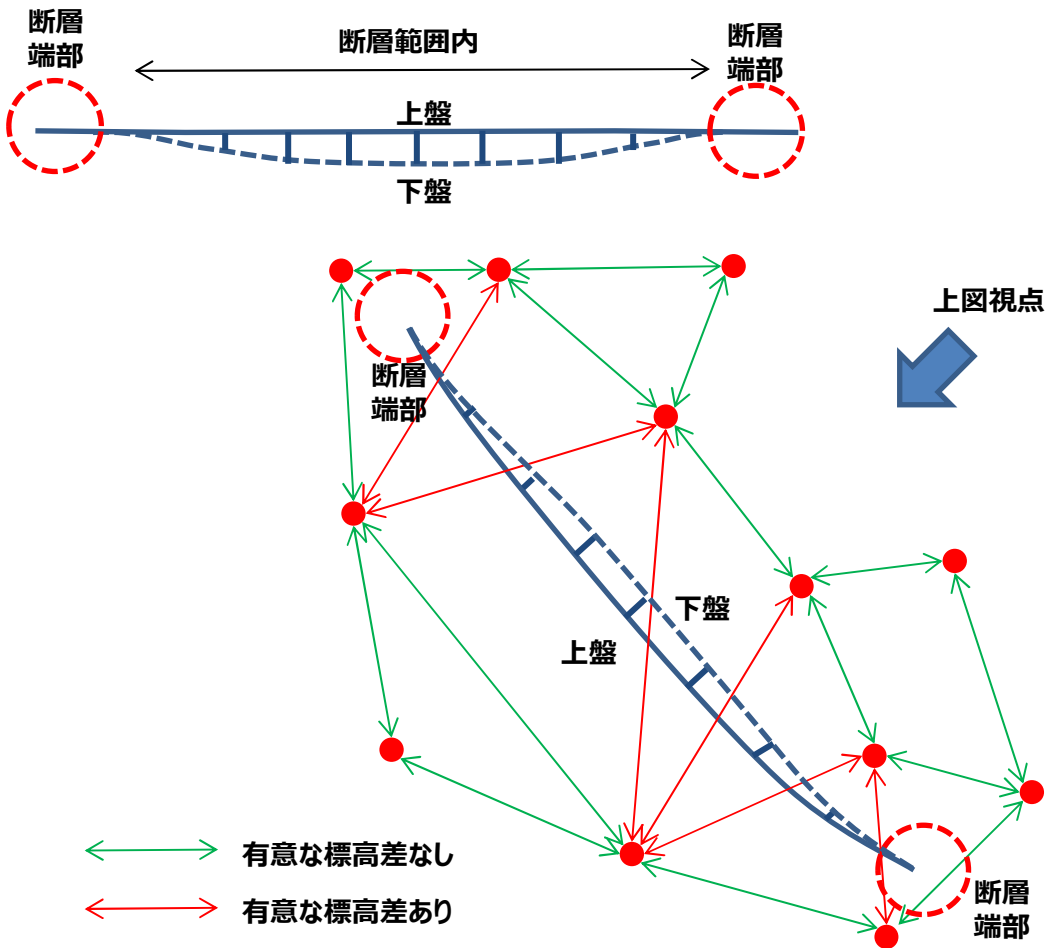
“グリッドサーフェス”のモデラーである「Surfer¹⁾」における断層処理例を示す。“グリッドサーフェス”モデラーで作成できる断層モデルの条件は次のようになる。

- ・断層を境に上盤/下盤に分けることができる
- ・断層端部では段差が消失し上盤/下盤は同一面となる

断層線をグリッド化する場合、断層線がグリッドノードを計算するときの壁として働く。すなわち、断層線の反対側にある観測点は、グリッドノードの計算に使用されない。またグリッドノード計算時、遠くの観測点に対する重みが減る²⁾。

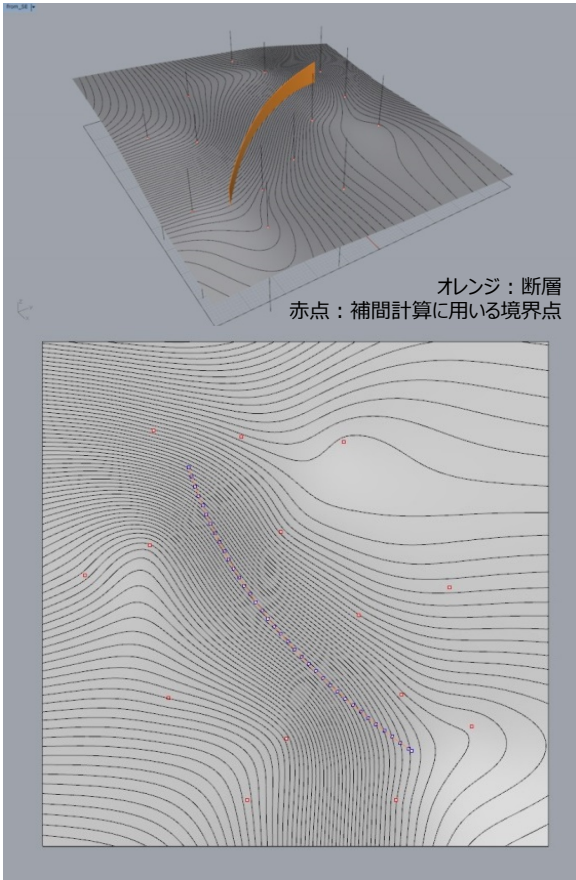
なお、Surferで断層をサポートしているグリッド作成アルゴリズムには以下のものがあるが、自由曲面を作成する観点からすると、最小曲率法と最近傍法しか実用性は無い。

- ・逆距離加重法 (Inverse Distance to a Power)
- ・最小曲率法 (Minimum Curvature)
- ・最近傍法 (Nearest Neighbor)
- ・データメトリクス法 (Data Metrics)

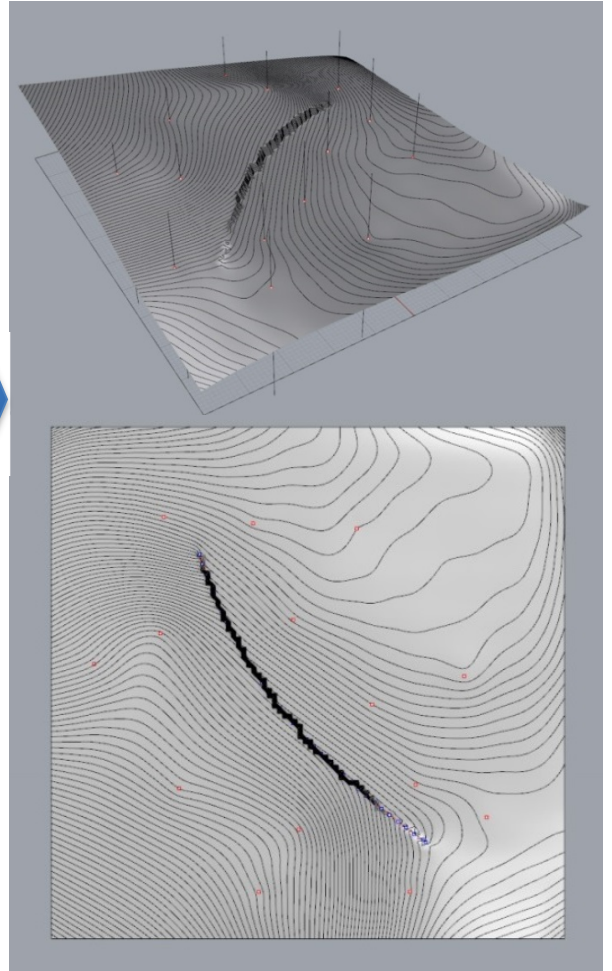


1) https://www.hulinks.co.jp/support/surfer/s10_05.html
 2) https://www.hulinks.co.jp/support/surfer/s8_01.html

例6.5-3) グリッド法の単一面による断層モデリング (2)

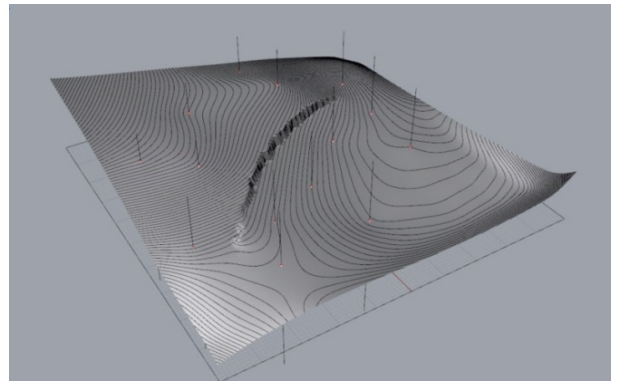


上図のサーフェスモデルはBS-Horizonによる
(断層の影響を考慮していない状態)



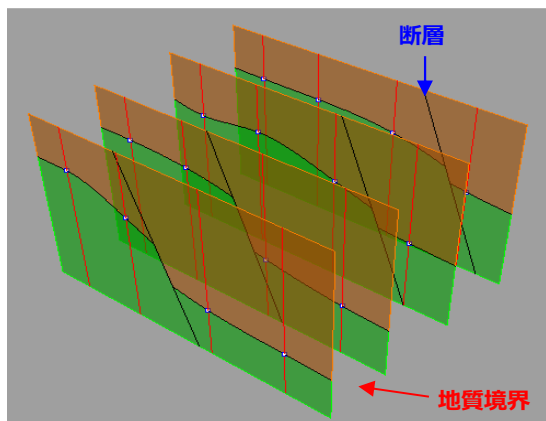
【注意点】

- ①本手法はデータをブレイクライン (座標を結ぶ点) でブロックしただけなので、標高値に矛盾がある場合は意図したものと異なる形になる可能性がある。
- ②右図は最小曲率法のパラメータRelaxation Factorを1.0に変えたものである。サーフェスモデル外縁部の反り上がり (発散) が強調されている。このように、パラメータにより形の変化に注意が必要である。

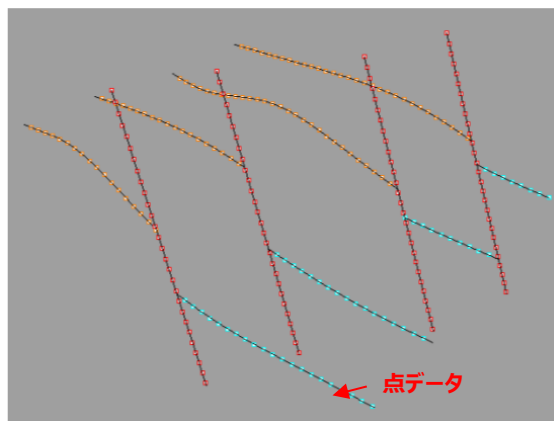


例6.5-4) グリッド法の複数面による断層モデリング

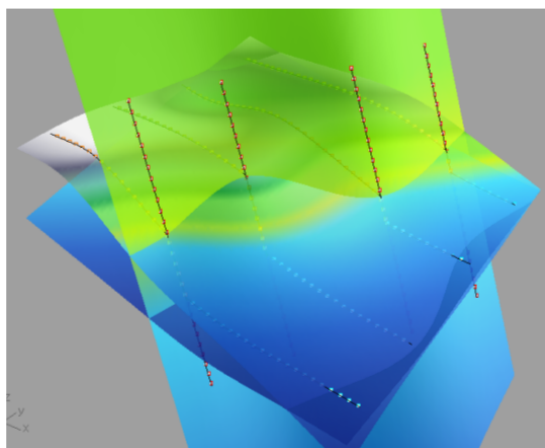
複数面を使用して、断層による段差のある境界面サーフェスモデルを作成する例を示す。



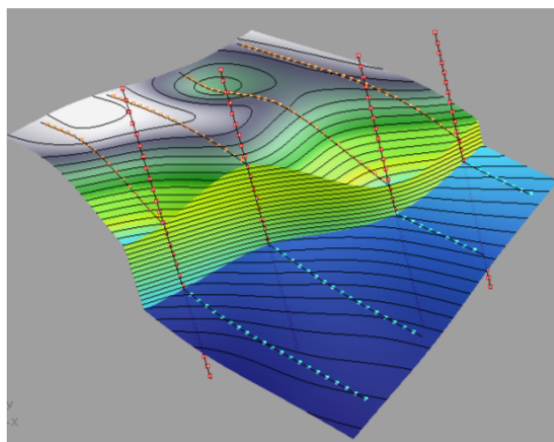
①地質情報の3次元化



②境界線より等間隔で点データを抽出



③点データより境界面モデルと断層モデルを計算



④断層により境界面モデルを切断し、各サーフェスモデルを接合する

6.6 補間パラメータ/ログの記録

補間パラメータとログの重要性

3次元地質・地盤モデル作成に用いる補間アルゴリズムとパラメータの違いは、モデルの形状・分布に影響を与える。アルゴリズム毎に出力されるモデルの形状は異なり(「6.5 空間補間処理」参照)、アルゴリズム毎に調整が必要なパラメータがある(表6.6-1)。

パラメータに応じてモデルの形状・分布も変化する(図6.6-1)ため、モデルの更新を想定して、アルゴリズムとパラメータ設定の記録を属性情報として継承されなければならない。

また、補間結果のログにデータとモデルの誤差を記録する補間アルゴリズムもあり、ログは、入力データに対する出力データ(3次元モデル)の妥当性を評価する資料にもなる。

表6.6-1 補間アルゴリズムとパラメータの例

補間アルゴリズム	主なパラメータ	備考
Horizon2000 ³⁾ BS-Horizon ⁴⁾	α 値: min,max 繰り返し計算回数 走向傾斜データの重み 滑らかさ: m1,m2	繰り返し計算回数は不等号データや走向傾斜データを用いる場合に使用する
Kriging	Variogram Model Kriging Type Drift Type Search Ellipse 他	パラメータは「Sufer」 ⁵⁾ の事例 Variogram Model毎にパラメータは異なる
最小曲率法 (Minimum Curvature)	最大半径 繰り返し計算回数 Relaxion Factor Internal Tension Boundary Tension 他	パラメータは「Sufer」 ⁵⁾ の事例
IDW	水平参照距離 鉛直参照距離 距離重み付け	鉛直参照距離は3次元補間の場合に使用

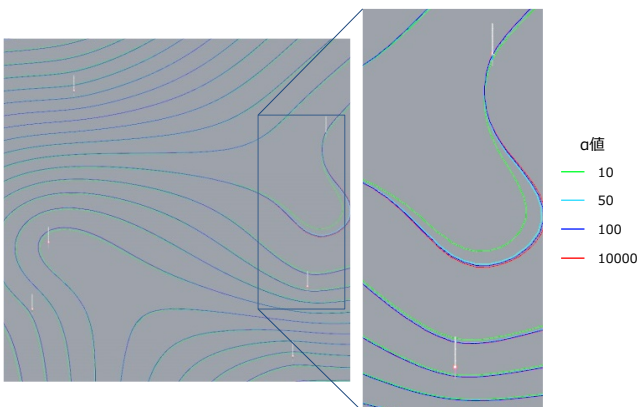


図6.6-1 BS-Horizonにおける α 値の変更による形状の変化

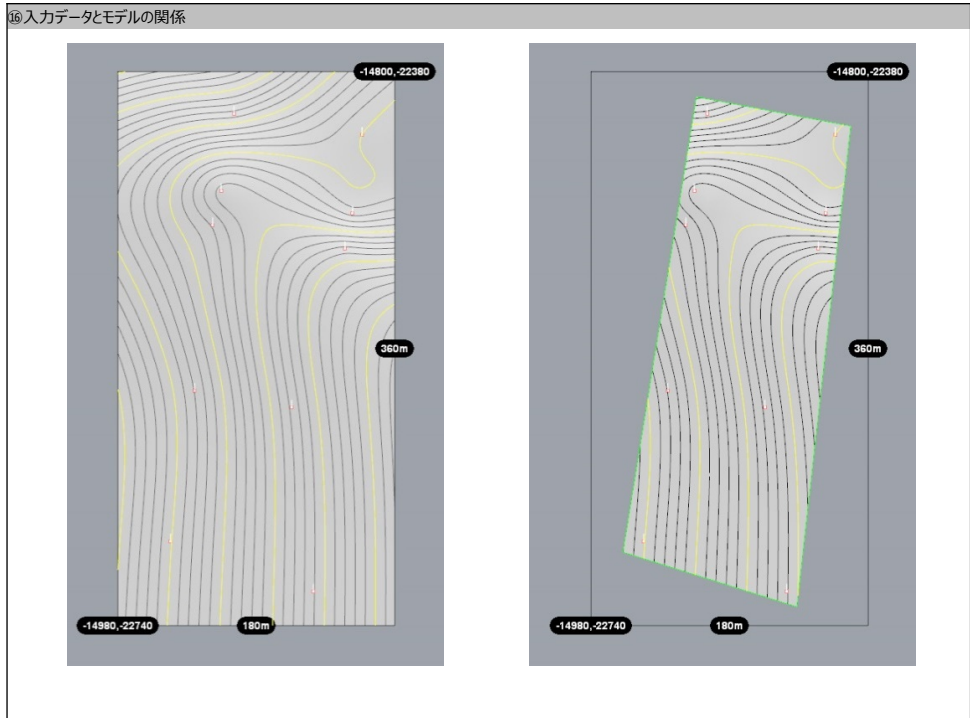
モデリング記録シート

モデル記録シートの事例を図6.6-2に示す。モデル記録シートの記載項目と内容は下記ようになる。

- ①モデル化の対象
例:地質境界面、N値分布物性モデル
- ②モデルを作成する目的
例:地下水解析、プレゼンテーション
- ③モデルの名称
例:地質名や地質記号
- ④モデルを作成した期間
- ⑤モデルを作成した個人名や所属・企業・法人名
- ⑥モデルの解像度と要求される精度
要求精度よりも解像度は上回る必要がある
- ⑦補間に用いたデータファイル名
- ⑧モデルデータファイル名(あるいはレイヤ名)
- ⑨モデルを計算したアルゴリズム
- ⑩座標系
- ⑪補間領域
- ⑫加工の有無
モデルを仕上げるために、地層の切り合い等の処理を加えているか記述する
- ⑬モデル作成に使用したツール
- ⑭モデルタイプ
モデルの形状情報
- ⑮モデルの妥当性
モデルの妥当性を判断した理由を記述する(「6.9」参照)
- ⑯入力データとモデルの関係
入力データと出力モデルの関係が分かるもの
加工前後の状況が比較できると良い
- ⑰精度記録
計算結果
- ⑱補間パラメータ
パラメータの設定値を示す

①対象	地質境界面
②目的	液化化解析
③名称	As1層下面
④作業期間	2017年11月5日~2017年11月19日
⑤作成者	〇〇〇〇 A株式会社
⑥モデル解像度/要求精度	2m/5m
⑦入力データ名	point_As1_low.txt
⑧出力データ名	grid_As1_low.txt

⑨補間アルゴリズム	BS-Horizon
⑩座標系	平面直交 JGD2011 第9系
⑪補間領域	Xs -14980 Xe -14800 Ys -22740 Ye -22380
⑫加工の有無	有り (有効範囲でトリミング)
⑬使用ツール	〇〇〇〇
⑭モデルタイプ	グリッド、NURBS
⑮モデルの妥当性	対象地域の地形地質特性から妥当と判断される



⑰精度記録

```

#####Estimation result#####
iteration= 1 alpha= 0.10000E+03 gamma= 0.00000E+00
-----
H : data = 10 Rh = 0.75087E-06 Error= 0.86653E-03
D : data = 0 Rd = 0.00000E+00 Error= 0.00000E+00
-----
Jx = 0.24804E-02 Jy = 0.12933E-02
Jxx= 0.40930E-02 Jxy= 0.49965E-02 Jyy= 0.16387E-01
J1 = 0.37737E-02 J2 = 0.30473E-01
-----
Q = 0.30549E-01 J = 0.30473E-01 aR = 0.75087E-04
    
```

⑱補間パラメータ

読み込み: As1_low
 出力ポイント数: 10
 1次元方向のグリッド数: 0
 1次元方向のメッシュ数: 0
 方向補正のグリッド数: 0

BS-Horizon実行条件

計算領域

X座標: min -14980 max -14800
 Y座標: min -22740 max -22380
 分割数: Mx 81 My 181
 解像度: Nx 2.0 Ny 2.0

出力範囲へコピー

α値: min 1 max 100
 繰り返し計算回数: 20
 走向・傾斜方向の重み: 10000
 滑らかさ: m1 0 m2 1

出力範囲

X座標: min -14980 max -14800
 Y座標: min -22740 max -22380
 分割数: Mx 81 My 181
 解像度: Nx 2.0 Ny 2.0

図6.6-2 モデリング記録シートの例

6.7 補填データ作成

補填データとは

空間補間はデータの無い空間の地盤形状(あるいは地盤物性)を、限られたデータから推定する手段であるため、地質学的に不自然な結果を生じやすい(図6.7-1)。

例えば、本来のデータだけで補間したサーフェスモデルの形状が不自然であれば、補填データを追加して自然な形にするようにコントロールする必要がある。

補填データは、概念一貫性(表5.1-1)の視点に基づいて作成するため、後述する「[6.9 モデルの妥当性](#)」に示すように、地形・地質学的な考え方が必要になる。

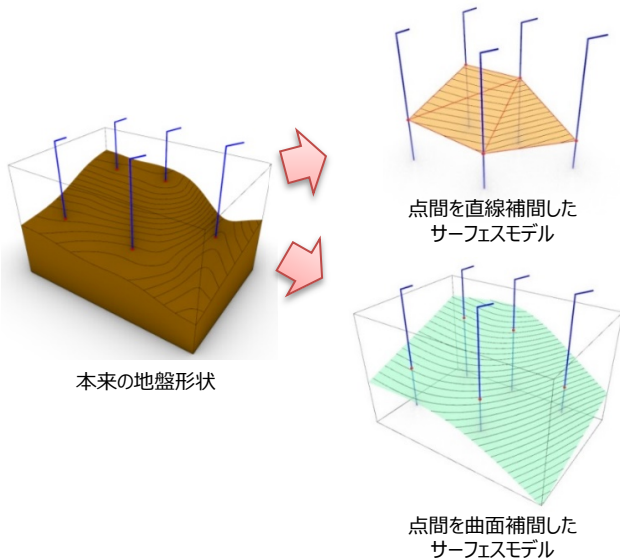


図6.7-1 限られたデータによる空間補間モデルの違い

補填データが必要になるケース

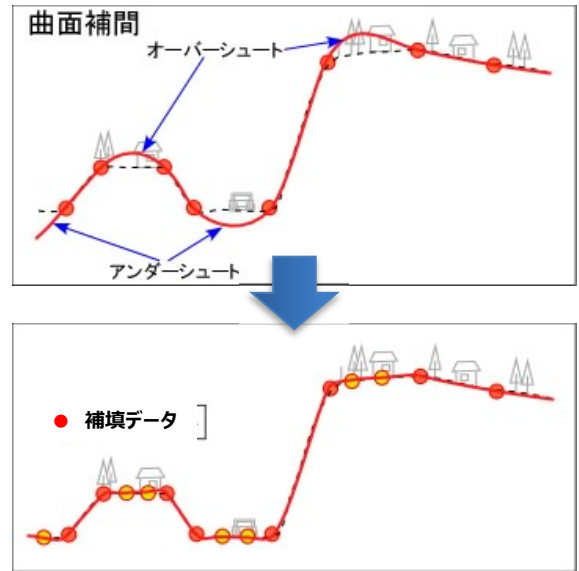
サーフェスモデル計算に補填データが必要になるかは、補間計算を行い出力されたサーフェスモデルを可視化(3次元可視化やコンター表示)した時点で明らかになる場合が多い。

例えば、次のようなケースで補填データが必要になる。

- ◆ 本来のデータだけでは、オーバーシュート・アンダーシュート等の不自然なサーフェスモデルが形成されてしまう(図6.7-2)
- ◆ 本来は存在しない場所に地質境界面が形成されてしまう(図6.7-3)

これらの不適合は、いずれも地質調査量(入力データ)が不足する場合に発生する現象である。その不適合の程度は空間補間法の特長にも影響されるので注意が必要である。

なお、補填データが必要になるかを手早く判断するために、「[6.2 ドラフトモデリング](#)」を用いる事も有効である。



オーバーシュート・アンダーシュートが生じる部分に、補助点や補助線(コンター)を逐次追加し、許容できる結果が出るまで計算を繰り返す

図6.7-2 補填データによる地形面補正例

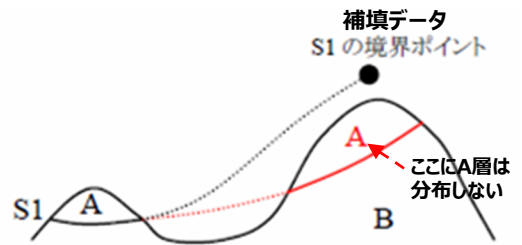


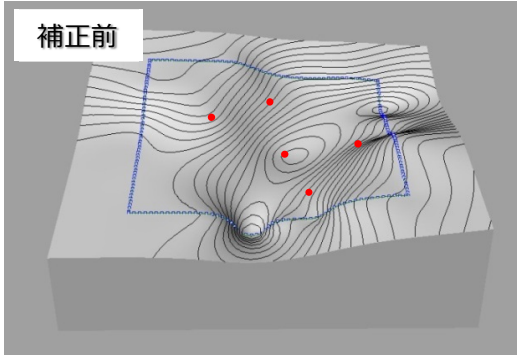
図6.7-3 補填データが必要な例⁶⁾

補填データの適用方法

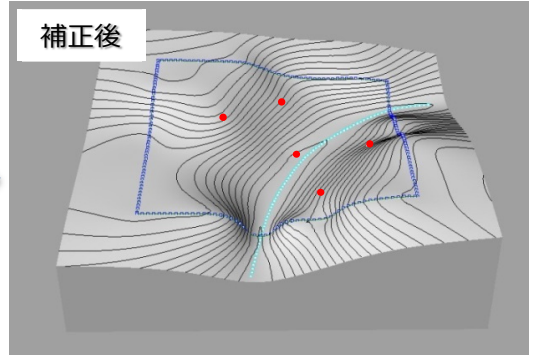
例えば、埋没谷のように地形的な法則が適用できると判断できれば、仮定の河川勾配線(谷底線)を補填データに用いる(図6.7-4,-5)。補間手法の限界で意図した形状にならない場合にも補填データを使用する(図6.7-6,-7,-8)。

補填データには、地形線(谷底線、遷急線、遷緩線等)や地形面、直線性・定傾斜を保つための直線・平滑面等より生成したポイントデータを用いることが多い。

補填データを使用した場合は、後のモデル更新に配慮し、使用した方法と根拠を記録する必要がある。



補正前

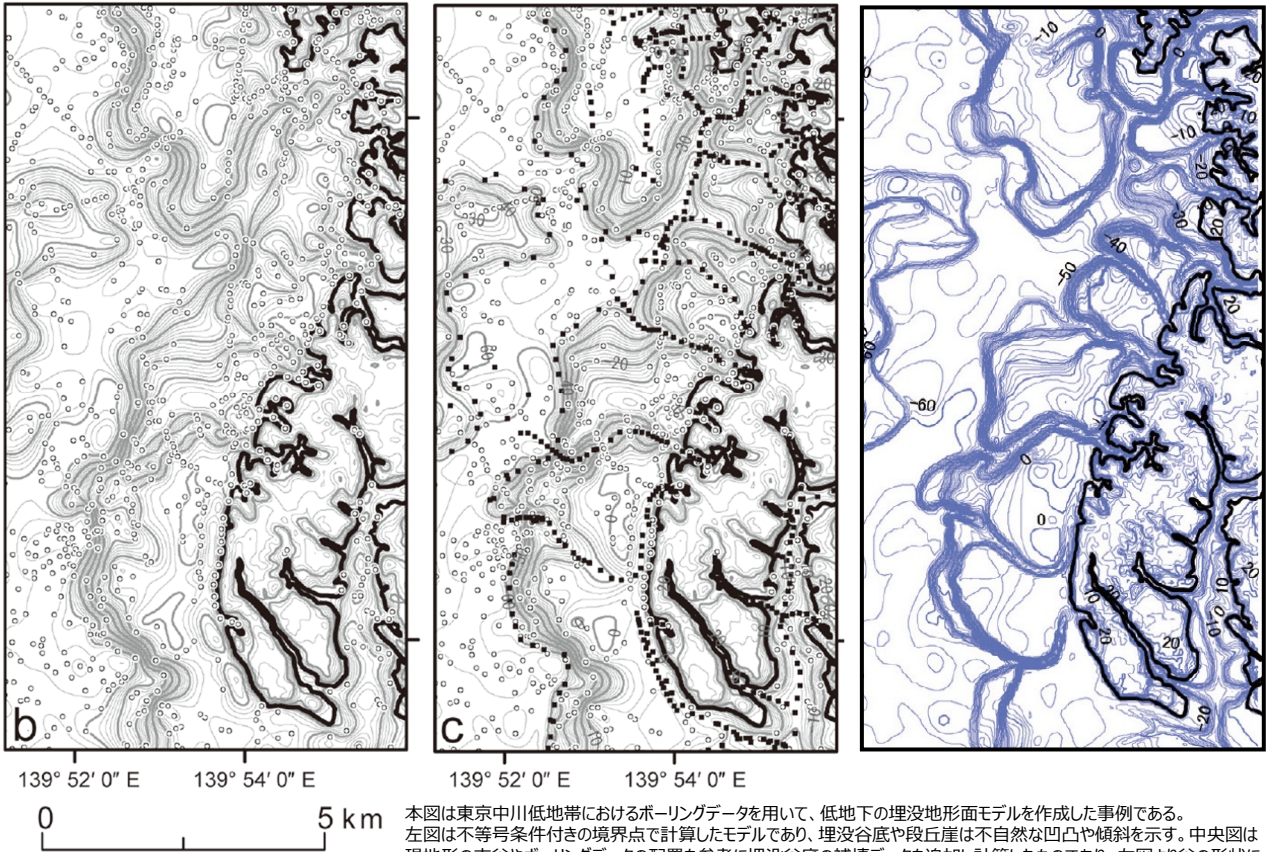


補正後

- ◆埋没谷地形のモデルを格子断面とボーリングの点データだけを用いて作成した
- ◆谷底に閉じたコンターができてしまい、谷地形として水が流れなくなる不自然な形となる。

- ◆断面間を結ぶ仮定の河川勾配線（谷底線）を補助点データとして追加した。

図6.7-4 地質モデルの補填データによる修正例



本図は東京中川低地帯におけるボーリングデータを用いて、低地下の埋没地形面モデルを作成した事例である。左図は不等号条件付きの境界点で計算したモデルであり、埋没谷底や段丘崖は不自然な凹凸や傾斜を示す。中央図は現地形の支谷やボーリングデータの配置を参考に埋没谷底の補填データを追加し計算したものであり、左図より谷の形状に自然さが現れる。右図は最終的に埋没地形面を細区分し、中央図のデータも合わせて計算したものであり、段丘の平坦性まで再現したモデルになる。

図6.7-5 補填データによる地質境界面モデル補正の事例⁷⁾

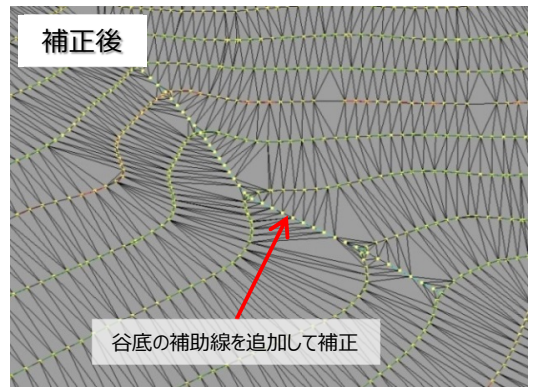
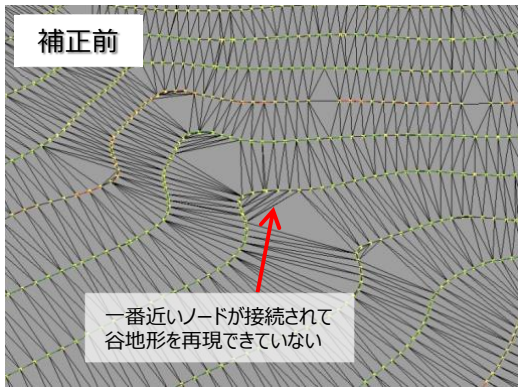


図6.7-6 谷形状を修正するための補填データ例（地形面モデル）

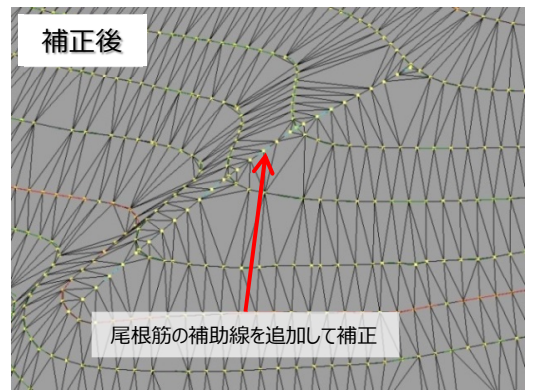
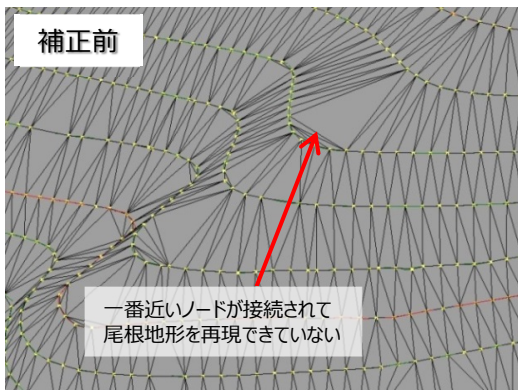
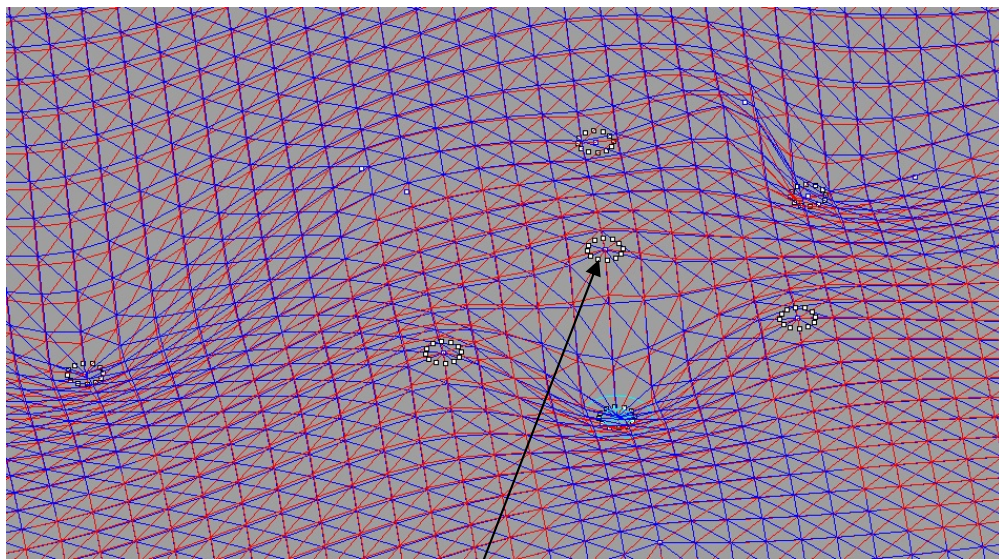


図6.7-7 尾根形状を修正するための補填データ例（地形面モデル）



半径2.5mの円状に補填ポイントを配置

青メッシュ：補正前
赤メッシュ：補正後

図6.7-8 地質境界面の補填データ例
補填ポイントを追加し、ボーリング位置を通る滑らかな曲面に補正

6.8 スケルトンモデル

スケルトンモデルとは

スケルトン (skeleton) とは骨格や物事の概略・骨子を意味し、CADでは3次元で確認できる状態のワイヤーフレームや、設定したコントロールポイント (構造物設置基準点、監視基準点) を視覚化した骨組みの3次元モデルの事を指す。

地質モデルにおけるスケルトンモデル

本書では、スケルトンモデルを3次元地質・地盤モデルを作成するための骨格となる情報として扱う。

サーフェス・ソリッド等モデルを作るための全ての情報を3次元空間に重ねた状態、あるいはいつでも参照できる状態とする。作業データと地質対比情報、考え方、参考資料等が網羅されて、そのデータセットが他者に引き継がれても、同様の結果 (モデル) を導き出すことを可能とする。すなわち、スケルトンモデルは3次元サーフェス・ソリッド・ボクセルモデルを作成する直前の状態 (クロスチェック・地質対比・補填データ作成が済んだ状態) を指す。

スケルトンモデルの構成

スケルトンモデルは、ボーリングデータ/モデル、地形データ/モデル、準3次元図面、地質対比情報 (グループ、層序テーブル等)、補填データで構成される。さらに、クロスチェックの結果や、地質モデルを推定する際の注意書きがテキストで記述・表示されることもある。

現状でスケルトンモデルを扱うには、ソフトウェアの機能・性能に依存するが、モデリングの判断材料や情報伝達、作業の省力化には不可欠な情報と考えられる。

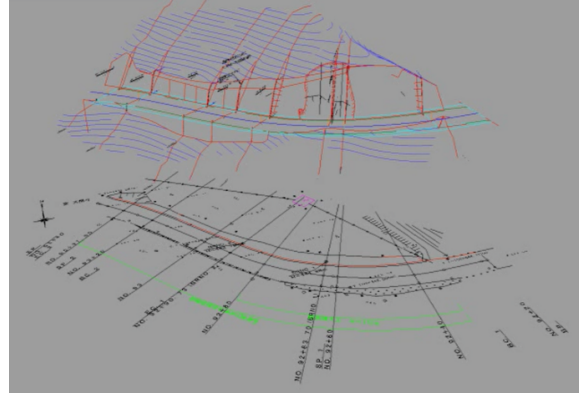


図6.8-1 スケルトンモデルの事例

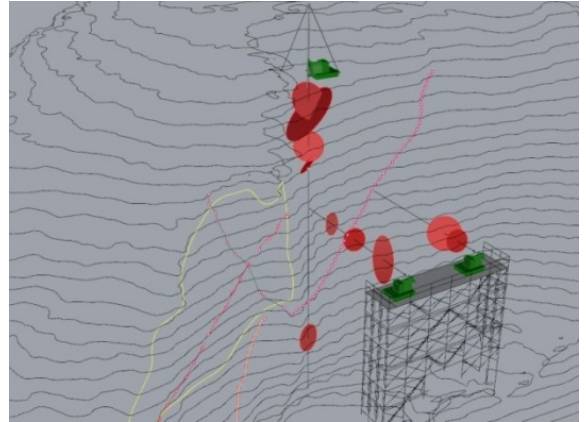


図6.8-2 スケルトンモデルの事例

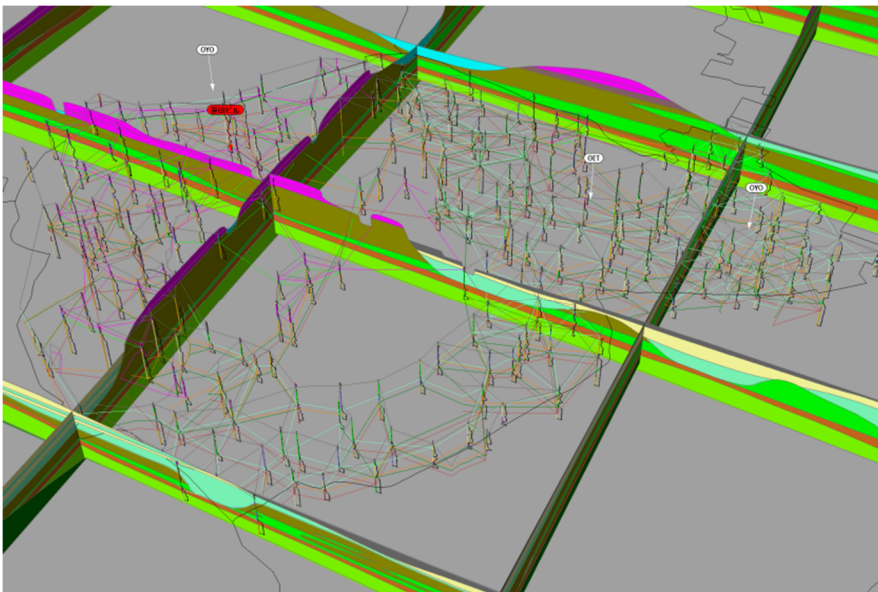
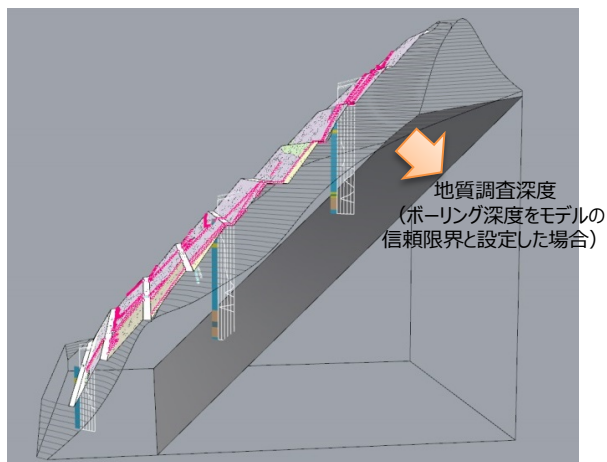
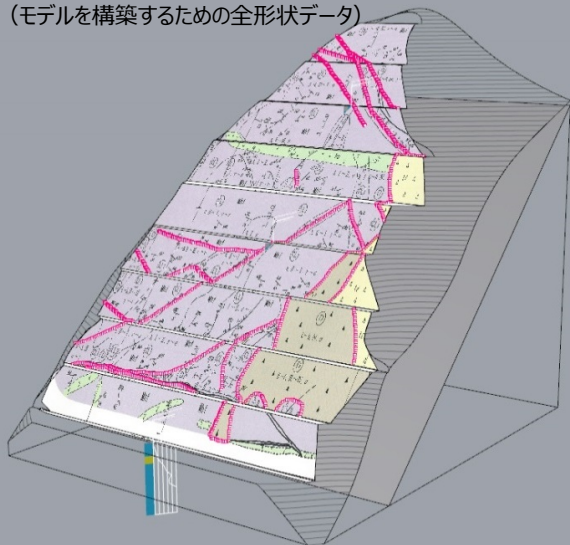


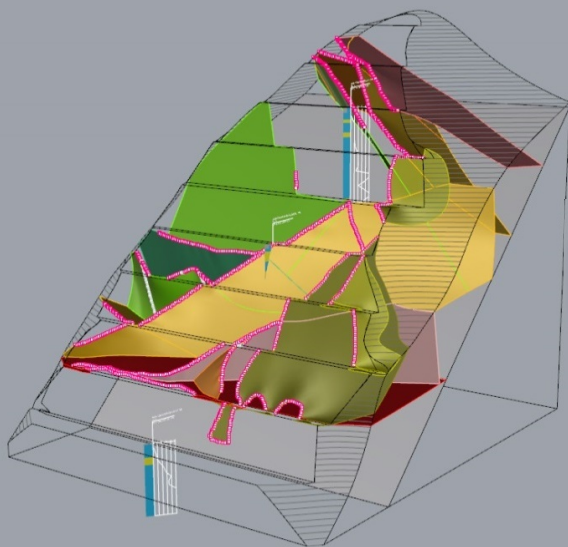
図6.8-3 スケルトンモデルの事例

例6.8-1) スケルトンモデルより斜面ブロックモデルを作成した例

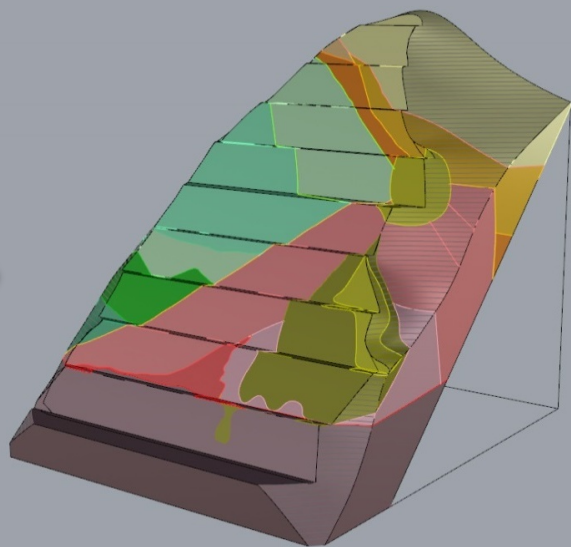
スケルトンモデル
(モデルを構築するための全形状データ)



サーフェスモデル



ソリッドモデル



6.9 モデルの妥当性

モデルの妥当性とは

3次元地質・地盤モデルの妥当性評価は、モデルに不自然さがいないかを判断するプロセスである。ここで言う不自然さとは、地形・地質学的にあり得ない形状や分布を指すことである。単純な空間補間だけでは不自然な地質・地盤モデルになる可能性が高く、例えば、作成したサーフェスモデルが地形形成過程や地層累重の法則等の自然法則に反するという状態になり得る(図6.9-1,2)。

3次元地質・地盤モデルの妥当性評価を行うには、地質専門技術者の判定が必要不可欠である。この判定は、地質技術者の自然現象の観察や類型化、既存文献の理論等に基づき、下記に示す“地質学的にこうあるべき”という評価(思想ともいう)が基本になる。

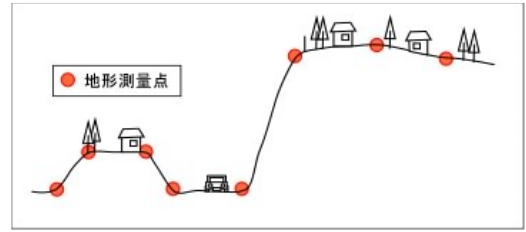
- ◆地質現象を再現している
- ◆地質学的に適切な地質モデルになっている

妥当性を評価する視点

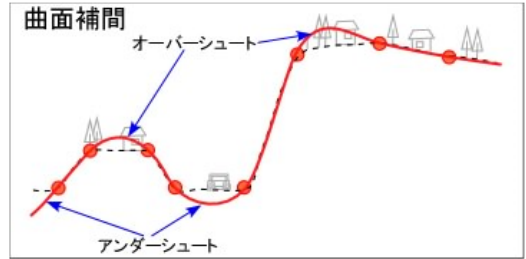
妥当性評価に際しては、どのような現象/事象を原因としてその形を成しているかを論拠付けることが重要である。3次元地質・地盤モデルの妥当性を評価するための重要な視点をまとめると下記のようなようになる。

- ◆基本物理法則
- ◆地形発達過程
- ◆地層累重の法則
- ◆地層同定の法則
- ◆断層や不連続面の切り合い順
- ◆対象地域の地形地質特性
- ◆地形地質の改変や地盤改良履歴

以上の評価は、提供者・利用者間で共通理解を得られる評価基準として報告書等に明示すべきである。



↓ スプライン法でそのまま補間してしまうと



オーバーシュート・アンダーシュートが生じ、“自然”な形状とはいえない

図6.9-1 単純な曲面補間により生じる不適切な形状

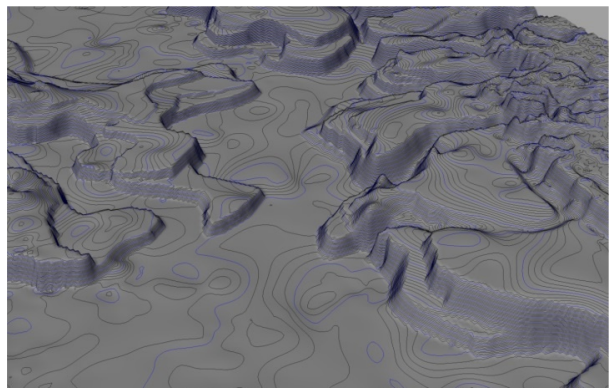
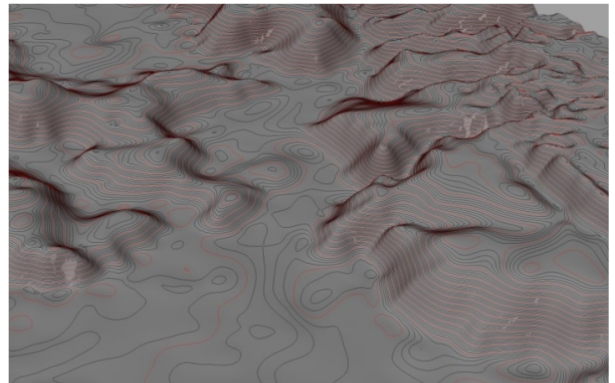


図6.9-2 埋没地形面のサーフェスモデルを作成した事例
上段はボーリングのポイントデータをそのまま用いて計算した境界面であり、
下段は補填データ等を加えてより自然な形状にした境界面である

入力データとモデルの誤差チェック

地質断面図の境界線を用いてモデルを作成した場合は、同じ個所でモデルの断面を作成し、元の境界線と比較することで誤差を確認する。モデル構築の目的を考慮し、その許容誤差以内であれば入力データを反映した妥当性のあるモデルと判断する(図6.9-3)。

形状の妥当性チェック

サーフェスモデルとしての形状に不自然な部分はないかを、サーフェスの歪みを可視化する手法を用いて評価する。

【コンターマップ(図6.9-4)】

コンター(等高線)はサーフェスモデルの歪みを判定する手法として一般的な手法である。任意の間隔でモデルのコンターを作成し、コンターの集中や発散の形状を目視で確認する。ただし、コンター間の形状については評価できないことに注意が必要である。

【ゼブラマップ(図6.9-5)】

ゼブラマップは、縞模様を曲面上に投影し、曲面の欠陥や曲面の接線方向と曲率の連続性、接合した曲面間の連続性の状態を調べる手法である。NURBSサーフェスを扱うCADソフトウェアに実装されている。

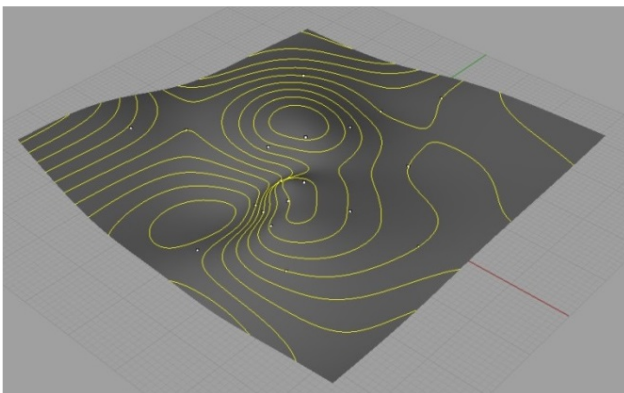


図6.9-4 コンターマップによるサーフェス形状の確認例

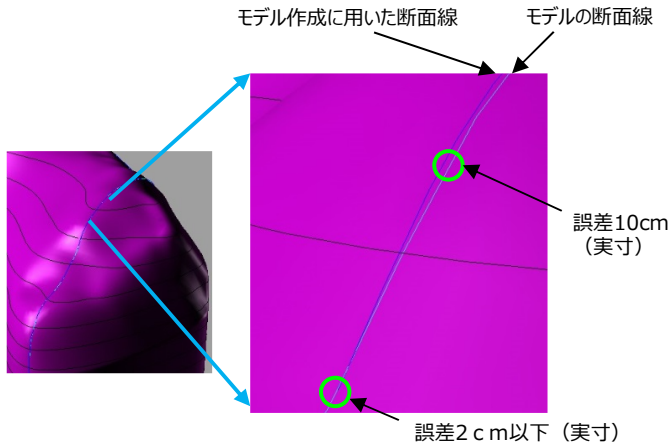


図6.9-3 地質境界線とサーフェスモデルの比較例
地質境界線を入力データとした個所でサーフェスモデルの断面図を作成し、境界線とサーフェスモデルの誤差を確認する

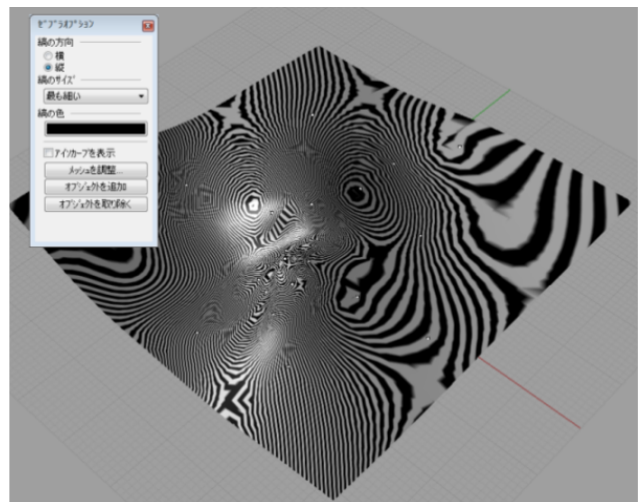


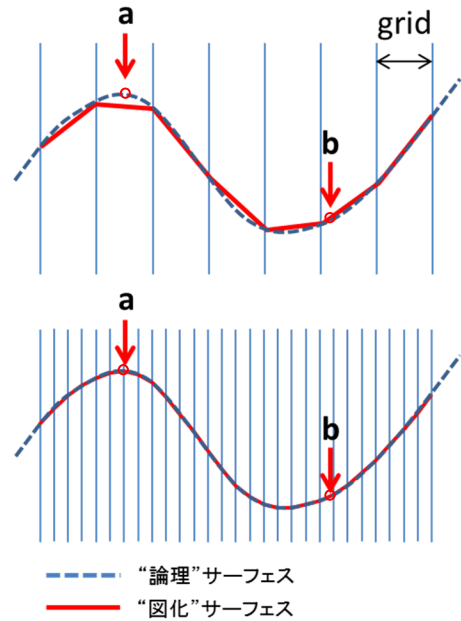
図6.9-5 ゼブラマップによるサーフェス形状の確認例

誤差チェックの落とし穴

ポリゴンメッシュサーフェスの場合に、グリッド化したモデルと入力データ点との標高差を求めようとすると、図6.9-6に示すように正しく誤差が求められない。これは計算で求められるサーフェスモデルは、“論理”モデルであり、“図化”されたポリゴンメッシュサーフェスとは異なるためである。

“図化”サーフェスのグリッド間隔を細かくすれば、より“論理”サーフェスに近づくので、誤差を精度良く調べることができるようになる。ただし、PCで扱うデータサイズに限界があるため、グリッドを細かくしても計測自体が困難になる。

サーフェスモデルの補間アルゴリズムによっては、入力データとモデルの誤差を計算するものもある³⁾が、その値は全入力データの平均誤差である。個々の誤差が評価できるわけではないので参考に留めるべきである。



図化されたサーフェスは計算で求めら
れる“論理”サーフェスを完全に反映
していないことに注意

入力データ（誤差計測）位置（左
図：a b）によっては計算結果の正
確さが比較できない

図6.9-6 グリッドモデルの誤差確認の限界

6.10 モデルの仕上げ

3次元地質モデル作成の最終プロセス

3次元地質モデル作成の最終段階は、地質学的/地質工学的判定に基づき境界面モデルの不要部分の削除や、サーフェスモデルより地層モデルを作成する作業となる。

地層モデルを作成する場合は、例えば、図6.10-1に示すような順番でソリッド(固まり)を境界面モデルで切り出す。多くの3次元地質解析システムは、サーフェスモデルの境界面を整合・不整合等で定義することにより自動処理を可能とする。

この地層モデルを作成する時点でも不適切な形状が現れる場合があるので、その場合は、ワークフローを遡り、地質対比・補填データ追加修正・再モデリングをおこなう。最終的に、深度方向・平面方向の“信頼限界”で地質モデルをトリミングする(「4.5 解析領域」参照)。

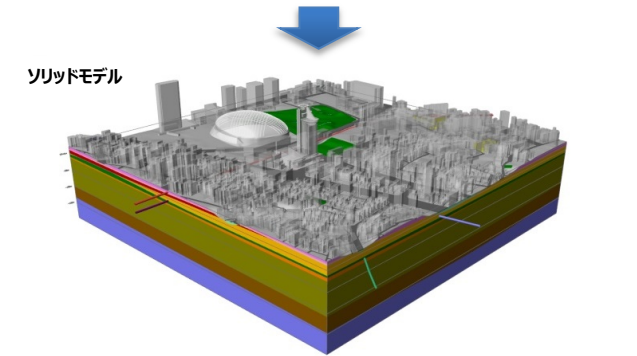
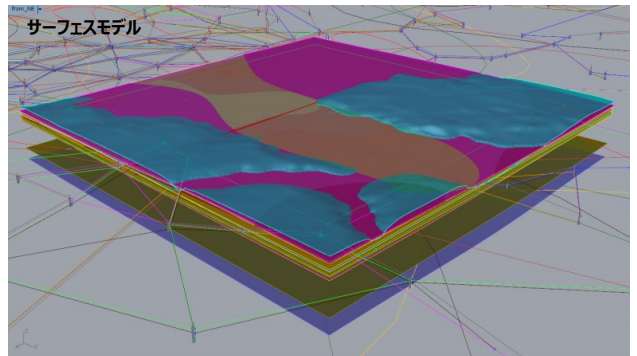
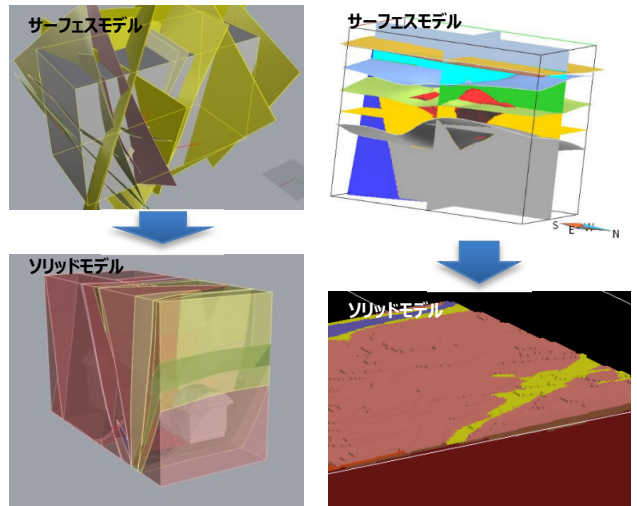
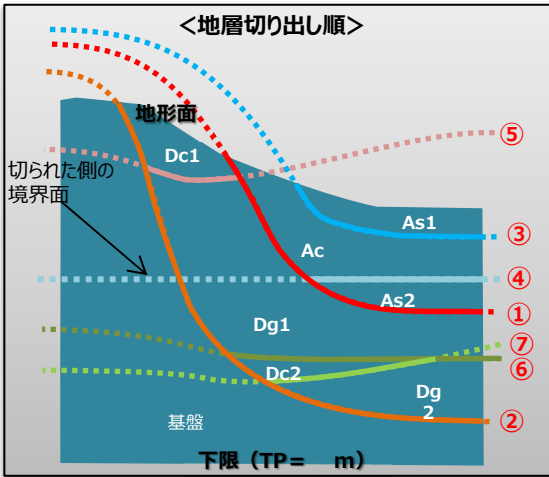


図6.10-2 サーフェスモデルよりソリッドモデルを作成した例



<地層切り出し順のダイアグラム>

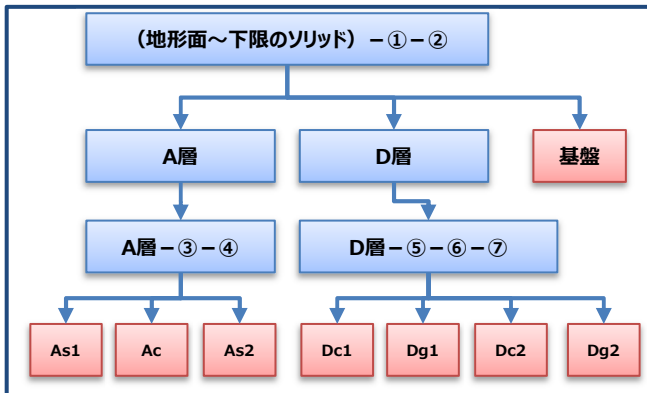


図6.10-1 地質モデル作成例

参考文献

- 1) 国土交通省 地理情報標準推進委員会 地理情報標準第2版(JSGI 2.0)の解説.2002,pp.103.
<http://www.gsi.go.jp/common/000024464.pdf> (2019年3月時点) .
- 2) 日本地質学会<http://www.geosociety.jp/name/content0001.html> (2019年3月時点) .
- 3) 塩野 清治,能美 洋介,升本 眞二,坂本 正徳." Horizon2000 : 等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良". 情報地質. 2001, 第12巻, 第4号, pp.229-249.
- 4) 野々垣 進.升本 眞二.塩野 清治."3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定". 情報地質. 2008, 第19巻, 第3号, pp.61-77.
- 5) https://www.hulinks.co.jp/support/surfer/s10_05.html (2019年3月時点) .
- 6) Georama for Civil3Dマニュアル.
- 7) 木村克己・花島祐樹・石原与四郎・西山昭一"埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの3次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例", 地質学雑誌, vol.119, 2013, pp.537-553.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

7章 成果品作成

[7.1 レンダリング](#)

[7.2 アノテーション](#)

[7.3 地質・地盤リスクの可視化](#)

[7.4 品質管理の記録](#)

[7.5 属性情報](#)

[7.6 共有フォーマット](#)

[7.7 オリジナルファイル](#)

7.1 レンダリング

レンダリングとは

レンダリングとは広義にはデータの可視化一般を指す。例えば、Webブラウザの画面もレンダリングしたうえで表示されているものである。数値データの物体や図形に関する情報を計算によって画像化する処理であり、一般にCGグラフィックを指すことが多い

CGグラフィック技術の進歩はPCの高性能化により進化したし、近年はよりリッチな表現手法(リアルなCGやVR)が用いられる。グラフィックプロセッサを使用した並列処理技術(GPGPU)により、大規模3次元データの高速表示や、リアルタイムレンダリングも可能になっている。

3次元地質解析の実務上は、形状や位置関係がわかる程度で良い場合も多く、3次元ツールの表示画面におけるレンダリング機能そのままでも対応可能である(図7.1-1、2)。

プレゼンテーションや最終的に成果品を作成する際に、説明性を向上させるため、現実感を出す光源・陰影・材質等を詳細に設定することがある(図7.1-3)。

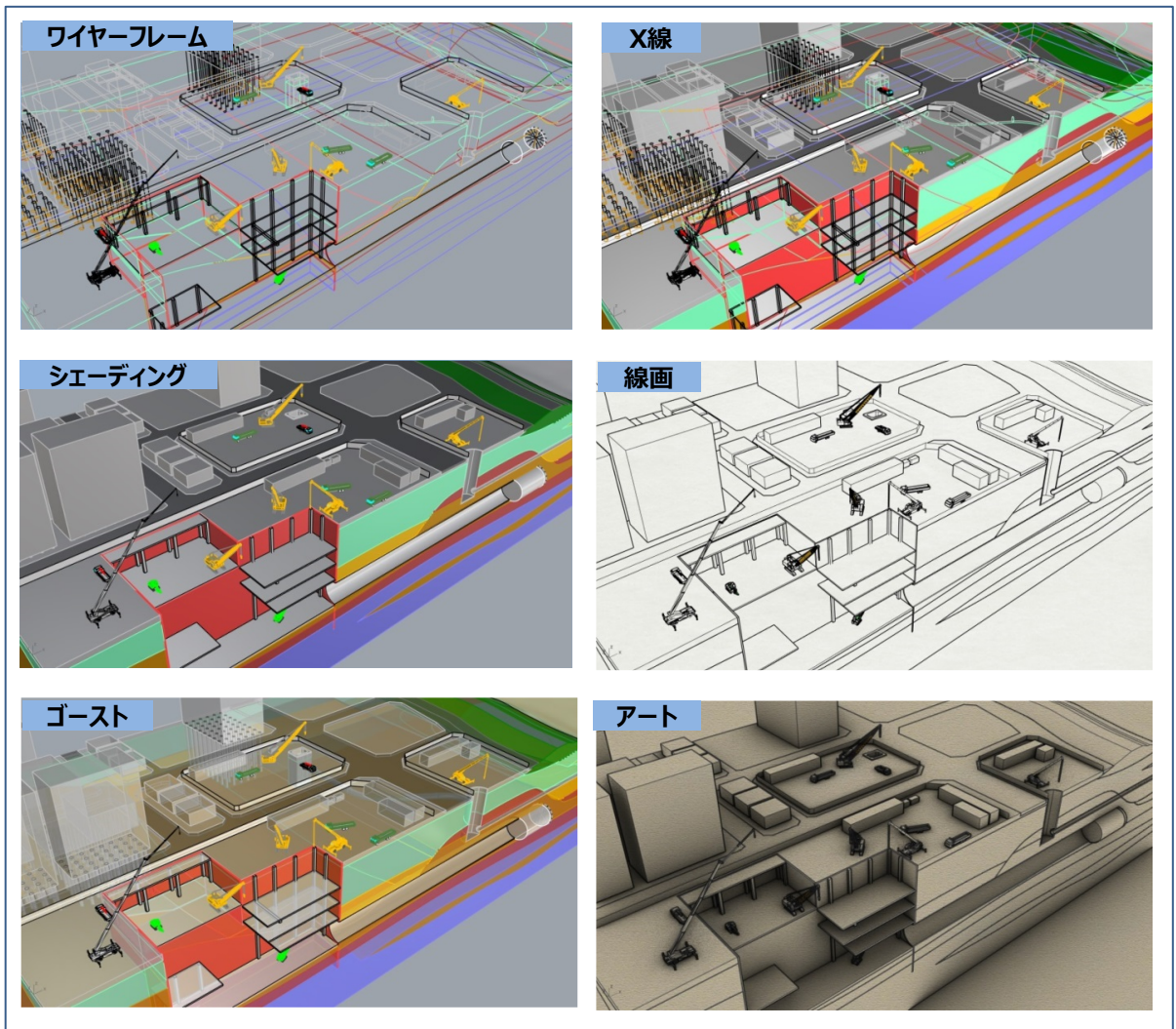
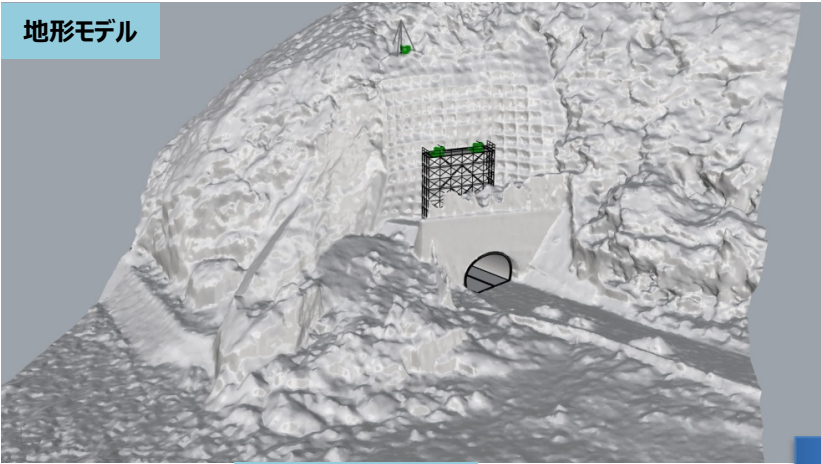
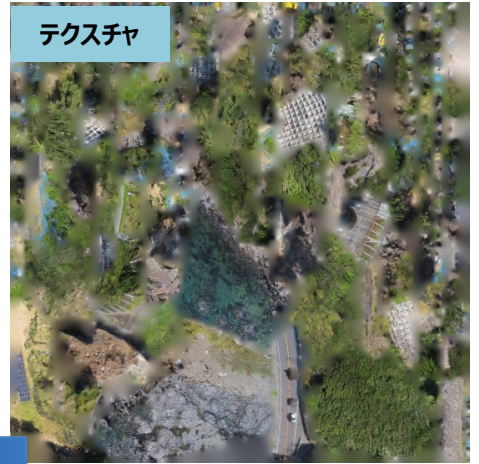


図7.1-1 レンダリングによる3次元モデル表示例

地形モデル



テクスチャ



テクスチャマッピング



図7.1-2 テクスチャマッピングの例

高品質レンダリング

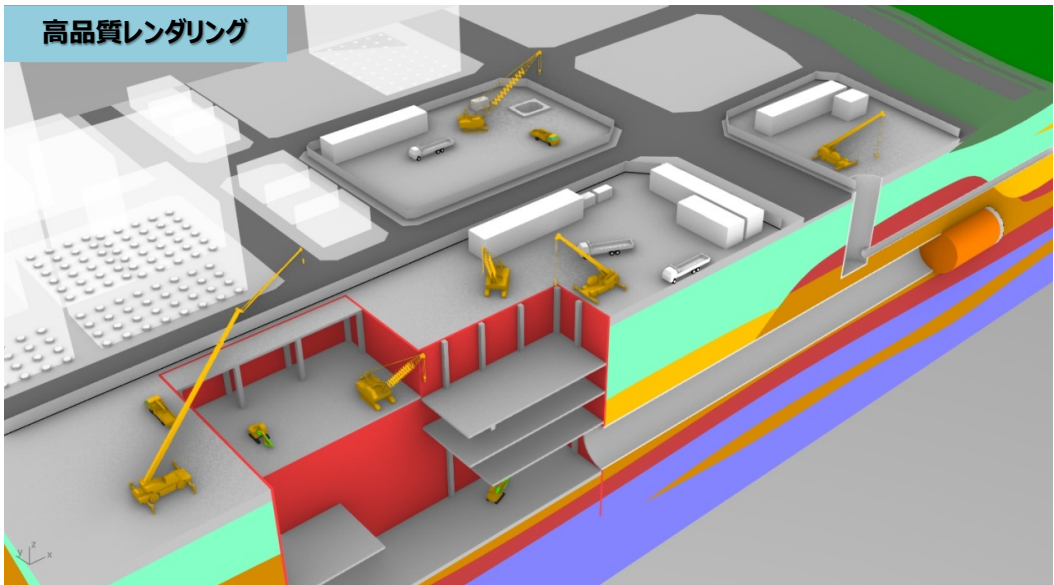


図7.1-3 高品質レンダリングの例

7.2 アノテーション

リスク情報可視化手段としてのアノテーション

アノテーションとは、手動/外部操作の無い可視的なテキストや記号で表した寸法、公差、注記などを指す。3次元CADにおけるアノテーションは、ISO16792に規定されている。

工業製品分野では、3次元単独図(3次元アノテータッドモデル)の情報提示手段としてアノテーション(図7.2-1)が活用されている。3次元単独図とは、製品形状と製品特性(アノテーション、属性)を表した3次元モデルと、製品特性の注記及び管理情報を3次元モデルから独立した情報として表した図面¹⁾と定義されている(図7.2-2)。

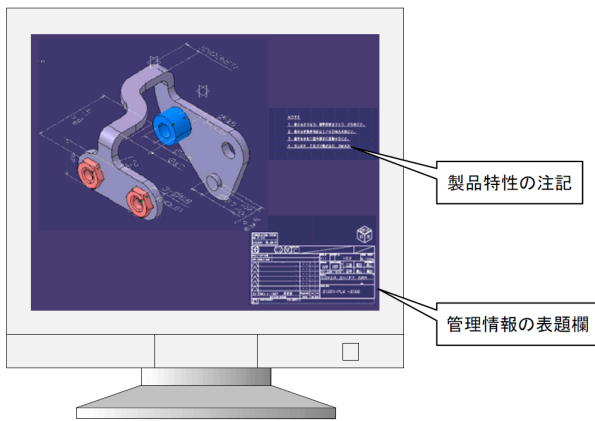


図7.2-1 3次元単独図とアノテーションの例¹⁾

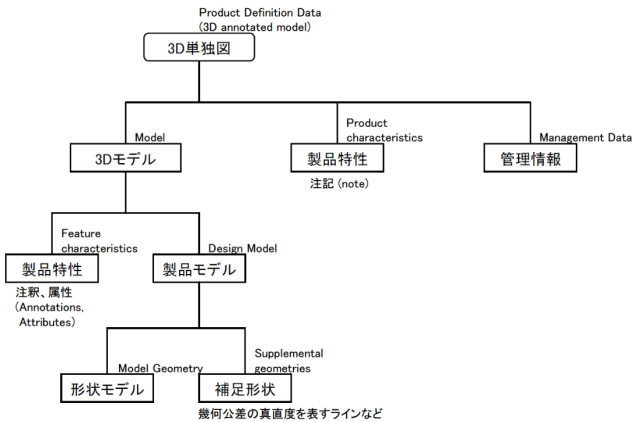


図7.2-2 3次元単独図情報構成¹⁾

BIM/CIMにおけるアノテーション

BIM/CIMでは、契約図書としての3次元モデル作成、詳細設計、官積算、施工、契約変更、完成検査、維持管理のフェースを対象に、3次元モデル表記標準(案)を定めている²⁾。本標準では、土木建設業における3次元単独図を3DAモデル(3D Annotated Model 図7.2-3)と呼称し、3次元モデルの内容を2次元情報として伝達する方法と留意点を提示している。

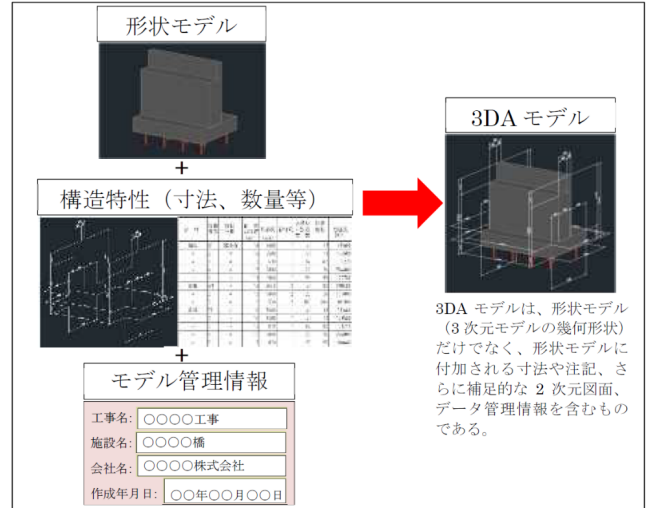


図7.2-3 3DAモデルの構成²⁾

3次元地質・地盤モデルにアノテーション

3次元地質・地盤モデルにおいても、モデル単独だけの情報伝達では、そのモデルの信頼性や重要な伝達意図等が十分に伝わらない恐れがある。アノテーションの情報可視化機能を利用することで、これらの情報を確実に伝達しつつ、直感的に認識できる表現も期待できる(図7.2-3~9)。

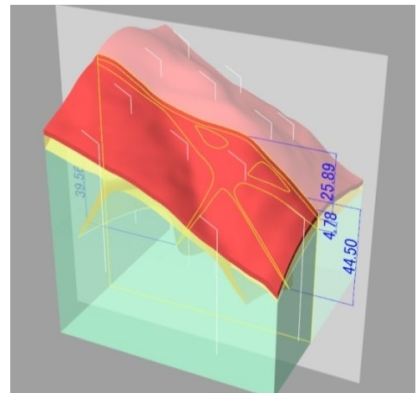


図7.2-4 3次元地質・地盤モデルの寸法表示例

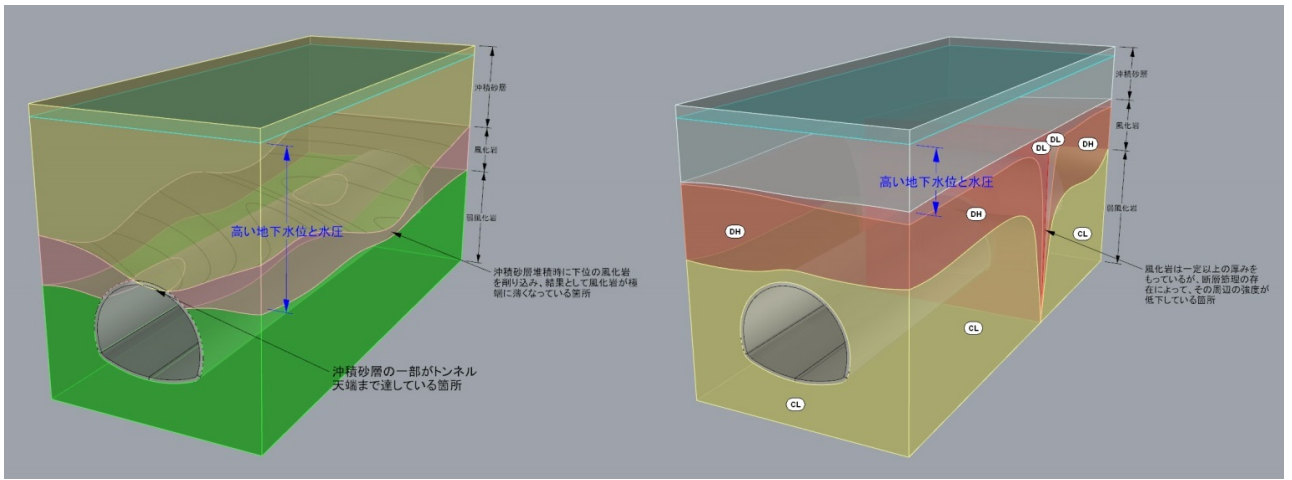


図7.2-5 トンネルにおける地質・地盤リスクのアノテーション表示例

外部ファイルへのLink



図7.2-6 斜面点検を想定したアノテーションの例

7.3 地質・地盤リスクの可視化

構造物と3次元地質・地盤モデルのインタラクション

インタラクション(Interaction)とは、二つ以上の存在が互いに影響を及ぼし合う状態(例えば相互作用)を指す。本書では、構造物モデルと3次元地質・地盤モデルの接触関係を、ソフトウェア上で表現する用語としてインタラクションを用いる。

例えば、地すべり面に対する抑止工の設計や法面掘削範囲における3次元土軟硬区分モデルの掘削量判定等は、複数の3次元モデルのインタラクションがソフトウェア上で実現できることで可能となる(図7.3-1)。

3次元地質・地盤モデルと構造物とのインタラクションは、2次元図面の場合は明示的に示す必要があるが、3次元であればわかり易く可視化することも可能である。他に、可視化機能を活用し、対象オブジェクトの強調表示、閾値による強調・アラート表示、検索/抽出等への活用も考えられる。

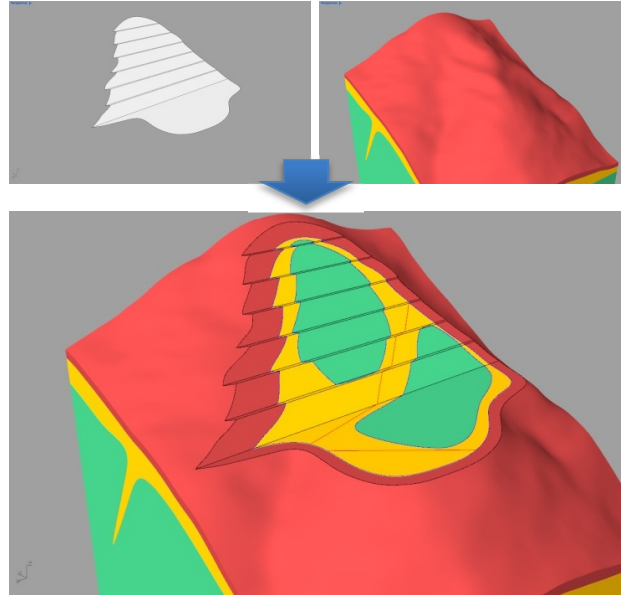


図7.3-1 計画法面と岩盤分類モデルとのインタラクション例

地質・地盤リスク可視化における留意点

地質・地盤リスクを3次元で可視化(図7.3-2～5)する用途もある(「3.3 利用場面」参照)。地質・地盤リスクの可視化に際して留意すべき点は次のように考えられる。

- ◆地質・地盤リスクの根拠となる情報を示す
 - ・地質モデルの根拠となる地質情報、地質構造、地質物性値を示す
 - ・情報判読の補助手段(アノテーション(注釈)、着目点の強調 等)を適切に用いる
 - ・モニタリング結果(移動ベクトル、変位量、閾値アラート 等)を重ねる 等
- ◆事実/推定/概念(イメージ)の違いがわかるものとする
- ◆誤解を与えるような過剰な装飾や表現を避ける

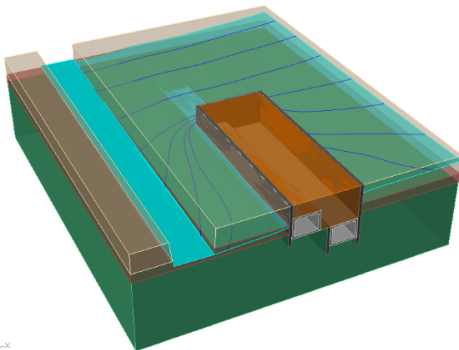


図7.3-2 開削施工部における地下水流動予測の可視化例

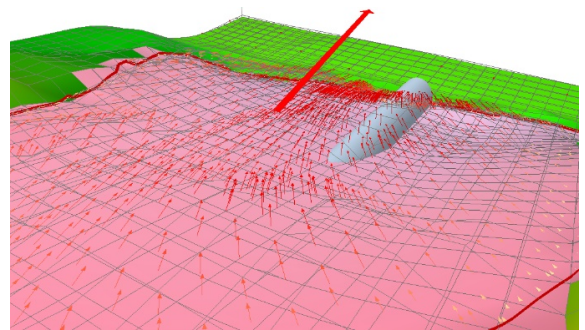


図7.3-3 トンネル坑口斜面のすべり変状予測の可視化例

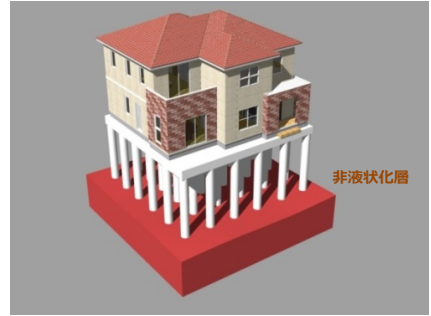
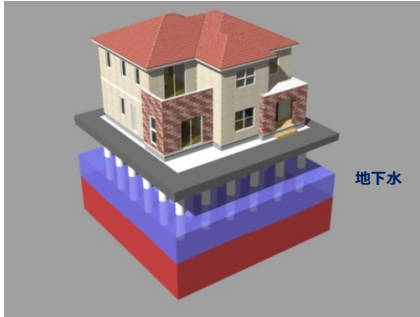
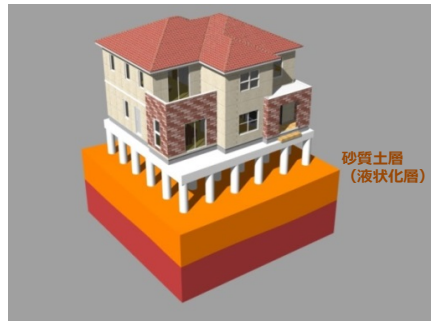
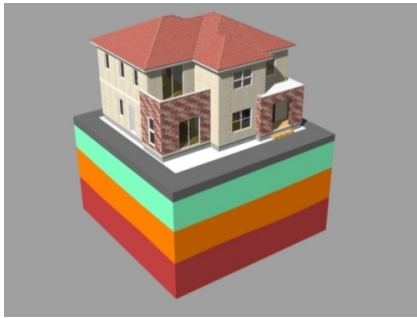


図7.3-4 宅地における地質・地盤リスク可視化例

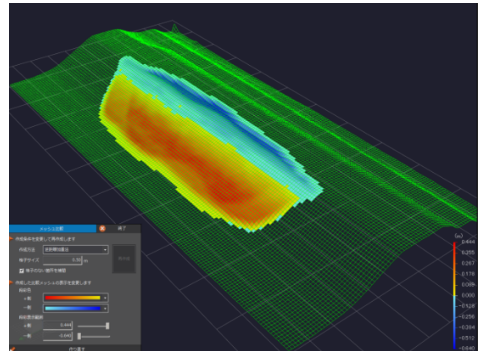
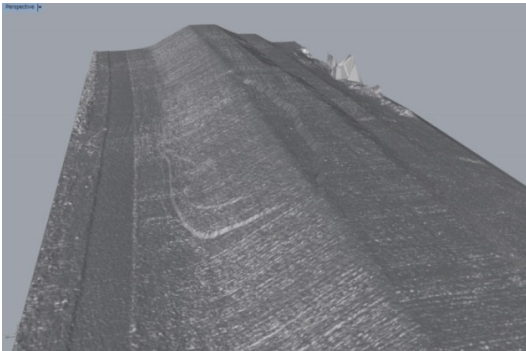


図7.3-5 河川堤防におけるすべり変状の可視化例

7.4 品質管理の記録

3次元地質・地盤モデルの信頼性の保証

3次元地質・地盤モデルの信頼性やトレーサビリティは、次のような内容が記録されていることで確保できると考えられる。

- ◆ 明確なモデル構築プロセス
 - ・ワークフローに準拠しているか
- ◆ 地質調査情報と入力データの品質記録
 - ・地質調査品質の評価記録がある(表7.4-1)
 - ・入力データの整合性がとれている
- ◆ モデルの妥当性評価
 - ・モデルの評価書や報告書がある
 - ・評価技術者の技術資格が示されている
- ◆ トレーサビリティの確保
 - ・信頼性を評価できる物差しや資料が付属し確実に扱えるものになっている
 - ・原本が明らかであり、すぐに情報が引き出せる
 - ・同じデータを用いて同じモデルができる再現性がある
 - ・入力データから出力データまで全ての情報が分かり易い形で残されている

品質管理記録票の提案

現時点の品質管理情報の扱いとして、本書で提案する品質管理記録は次のようになる(表7.4-2)。

- ① ワークフロー/派生ワークフロー
- ② 地質調査データ性能評価シート
- ③ 地質調査データ品質評価票(地形データ、ボーリングデータ、地質調査図面等データ)
- ④ スケルトンモデル
- ⑤ モデリング記録シート
- ⑥ CIMモデル作成事前協議・引継書シート
- ⑦ 照査チェックシート

3次元地質・地盤モデルの品質を保証する手段として、以上の品質管理記録と3次元地質・地盤モデルを散逸しないようにステークホルダに提供することが望ましいと考えられる。

なお、各品質管理項目やチェックシートは、今後のユースケースの収集・分析により、さらに適切な方法としての見直しや拡充が図られることを期待する。

表7.4-1 地質調査品質の評価例 (湾岸埋立地における施設設計を想定)

ランク	沖積層		人工地質体			
	岩相と分布	分布	同定	分布	物理特性調査	汚染調査
A	<input type="checkbox"/> 沖積層堆積過程のモデル化	<input type="checkbox"/> 100年間隔での年代認定に基づく過去2万年間の形成史の確立	<input type="checkbox"/> 構築過程の解明	<input type="checkbox"/> 層厚 cmオーダー、広がり0.1mオーダーでの3次元分布の認定	<input type="checkbox"/> 沈下・液状化・斜面崩壊予測モデルの作成	<input type="checkbox"/> 汚染機構解明と浄化対策の策定
B	<input type="checkbox"/> 地表および地下試料に基づく3次元岩相分布の解明	<input type="checkbox"/> 500年間隔での年代認定に基づく形成史の解明	<input checked="" type="checkbox"/> 構成物質の同定と詳細断面の作成	<input type="checkbox"/> 構成物質と地下水の流れの方向の認定	<input type="checkbox"/> 3次元物理・力学特性の認定	<input type="checkbox"/> 3次元汚染範囲と汚染速度の認定
C	<input type="checkbox"/> 地表および海上からの沖積層の地下分布の探査	<input type="checkbox"/> 堆積相認定と複数層準の年代認定	<input checked="" type="checkbox"/> 地下試料等による人工地質体の同定と断面の作成	<input checked="" type="checkbox"/> 人工地質体と自然地質体の境界認定	<input checked="" type="checkbox"/> 各種試験等による物理・力学特性の確認と断面図の作成	<input type="checkbox"/> 表層における汚染の有無と汚染源(地下浸透箇所)の認定
D	<input checked="" type="checkbox"/> 現地における地質層序の認定及び地形資料・既存地質資料に基づく岩相分布の認定	<input checked="" type="checkbox"/> 層序の認定と既存の形成史への対比	<input checked="" type="checkbox"/> 地表試料による人工地質体の同定	<input checked="" type="checkbox"/> 履歴調査、文献調査等による埋立時期の確認、既存資料からの分布範囲の予測	<input checked="" type="checkbox"/> 原位置における物理・力学特性の確認	<input checked="" type="checkbox"/> 資料等調査による有害物質存在の有無の確認
評価	D	D	B	C	C	D
総評	○○○構造物設計の地質・地盤リスク評価に必要な地質調査品質を満たしている(ランク外無し)					

表7.4-2 品質管理記録の例

品質管理項目	細項目	check	提示・保管フォルダ	本書の参照先
①ワークフロー/派生ワークフロー		<input type="checkbox"/>		「4.3 ワークフロー」
②地質調査データ性能評価シート		<input type="checkbox"/>		「3.7 モデルの信頼性」
③地質調査データ品質評価票	地形データチェックシート	<input type="checkbox"/>		「5.2 地形データの品質」
	ボーリングデータチェックシート	<input type="checkbox"/>		「5.3 ボーリングデータの品質」
	地質調査図面等データチェックシート	<input type="checkbox"/>		「5.4 図面データ等の品質」
④スケルトンモデル		<input type="checkbox"/>		「6.8 スケルトンモデル」
⑤モデリング記録シート		<input type="checkbox"/>		「6.6 補間パラメータ/ログの記録」
⑥CIMモデル作成事前協議・引継書シート		<input type="checkbox"/>		CIM導入ガイドライン共通編 別紙 ²⁾
⑦照査チェックシート		<input type="checkbox"/>		「4.8 照査のタイミング」

7.5 属性情報

属性情報の種類

3次元地質・地盤モデルのデータ構成を表7.5-1に示す。3次元地質・地盤モデルは、管理情報、形状情報、属性情報の3つより構成される。管理情報は、形状情報と属性情報の双方を管理するために使用する。形状情報は、3次元地質情報の形状を再現できる3次元座標値を持つ。

属性情報は、個々の形状情報の属性を保存する。例えば、「地層・岩体区分」、「岩級区分」、「土質区分」、「岩盤強度」や「弾性波速度」等が該当する。

以上の属性情報は形状データに付随させる。属性情報は、XML、CSV、EXCEL等の形式ファイルでまとめ、外部参照できるように、対応する3次元モデルのフォルダに格納する。

補間パラメータの継承

3次元地質・地盤モデル作成に用いる補間アルゴリズムとパラメータの違いは、モデルの形状に影響を与える。アルゴリズムによって出力されるモデルの形状は異なり、アルゴリズム毎に調整が必要なパラメータの値によってもモデルの形状は変化する(表6.6-1、図6.6-1)。

モデルの更新を想定し、アルゴリズムとパラメータ設定は引き継ぐべき情報として重要である。これらの情報は記録シート等で引き継ぐ必要がある。

外部参照する属性情報の取り扱い

設計や施工段階において、受注者が電子成果品等である図面、報告書、工事書類等を、外部参照属性情報として付与する場合は、「BIM/CIMモデル等電子納品要領(案)及び同解説」⁴⁾に基づき、各々の成果品格納フォルダとは別にBIM/CIMモデルの属性情報としてCIMデータフォルダに格納する。

これは、納品されたBIM/CIMモデルがCIMフォルダ単独で次工程等で活用できるようにするための処置である。

表7.5-1 3次元地質・地盤モデルのデータ構成³⁾

名称	概要
形状情報	<ul style="list-style-type: none">地質・土質モデルの3次元座標値を記載したデータである(オブジェクトデータ)。共通IDを付与することによって、属性情報と形状情報を関連づけて、個別管理やモデルの統合などに活用する。
管理情報	<ul style="list-style-type: none">地盤情報データベースを構築する場合の検索に利用する。使用した地質情報やモデル作成方法(地質・土質モデル作成ソフトウェアの種類や地層補間方法のアルゴリズムなど)等を記録する。後続の事業段階に発生が懸念される地質・土質上の課題等を記録する。
属性情報	<ul style="list-style-type: none">地質情報などを付加したデータであり、個別に管理する。共通IDを付与することによって、属性情報と形状情報を関連づけて、個別管理やモデルの統合などに活用する。

7.6 共有フォーマット

BIM/CIMモデルの納品ファイル

BIM/CIM活用業務および活用工事におけるBIM/CIMモデル等の成果品の作成範囲を次に示す。

- ①CIMモデル照査時チェックシート、CIMモデル作成
事前協議・引継書シート等
- ②BIM/CIMモデル(構造物や地形等の各モデル)
- ③統合モデル(各モデルを統合したモデル)
- ④動画等(スライドや動画等のファイル)

各BIM/CIMモデルの納品ファイル形式を表7.6-1に示す。BIM/CIMデータは、納品形式をオリジナルファイルとするが、国際標準の採用を念頭に、IFC及びJ-LandXMLに対応できるデータ・モデルについては、同ファイル形式によるデータ納品が求められている。

ソリッドモデルのようにJ-LandXMLによるデータ保存が行えない形式で作成する場合もある。その場合は、オリジナルファイルを納品する等、受発注者協議において協議のうえ決定する必要がある。

表7.6-1 各BIM/CIMモデルの納品ファイル形式⁴⁾

BIM/CIM モデル	納品ファイル形式
地形モデル	J-LandXML ^{※2} 及びオリジナルファイル
地質・土質モデル	オリジナルファイル
線形モデル	J-LandXML ^{※2} 及びオリジナルファイル
土工形状モデル	J-LandXML ^{※2} 及びオリジナルファイル
構造物モデル	IFC 2x3 ^{※1} 及びオリジナルファイル
統合モデル	オリジナルファイル

※1 buildingSMART JAPAN「土木モデルビュー定義」

※2 国土交通省国土技術政策総合研究所「LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準(案) Ver.1.3(略称: J-LandXML)」

LandXMLの概要

LandXMLは土地造成、土木工事、測量のデータ交換のためのオープンなフォーマットである。米国にて官民から成るコンソーシアムLandXML.orgにより、2000年に開発運営が開始された。

国内事業に適用するため、国土交通省国土技術政策総合研究所が、「LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準(案)」⁵⁾(J-LandXML)を策定している。J-LandXMLでは、以下のような利活用の実現を目指している。

- ①設計、工事の電子納品成果としての利活用
- ②情報化施工や3次元CADへの利活用
- ③国際標準への反映のための基礎資料

IFCの概要

IFC (Industry Foundation Classes)はbuildingSMART International(以下bSI)が策定した3次元モデルデータ交換標準である。2013年にはISO 16739:2013として、建築物の国際交換標準として承認されている。現在は、土木建設分野を対象にした検討も進められている。

平成29年度からのBIM/CIM活用業務及び活用工事では、構造物モデルのデータ交換形式として、オリジナルファイルに加えてIFCを採用した。当面、土木構造物としてのクラス定義や3次元モデルに直接付与する属性情報を含むデータ交換は行えないため、属性情報は外部参照の扱いとしている。

BIM/CIMでは、データの長期再現性や、政府調達(WTO・TBT協定)を踏まえ、現時点でデータ交換可能な範囲で国際標準を採用していくとされる⁶⁾。

現在、「BIM/CIM活用ガイドライン(案)共通編」³⁾に準じてIFCを運用するための仕様「土木モデルビュー定義」の策定、ソフトウェアメカ各社の対応が進められている。なお、3次元地質・地盤モデルの交換標準については、bSIのIFCコモンスキーマグループ、トンネルグループにて検討が進められている。IFC “Geology/Geotechnics”は主要なインフラストラクチャに対応するIFCの共通要素として、2021年に策定予定とされる(図7.6-1)。

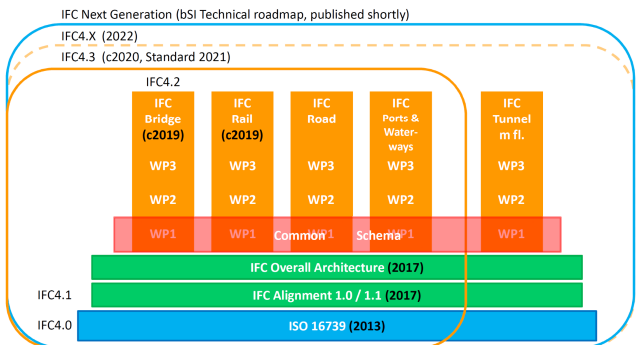


図7.6-1 IFC5策定ロードマップ⁷⁾

7.7 オリジナルファイル

オリジナルファイルの利用に際しての留意点

「BIM/CIMモデル等電子納品要領(案)及び同解説」⁴⁾でいうオリジナルファイルは、BIM/CIMモデルの種類を問わず、作成したソフトウェア独自形式のファイルを指す。

3次元地質モデリングソフトで作成されたオリジナルデータは、ソフト毎に独自のフォーマットまたはバイナリ形式で出力されるものである。したがって、使用したモデリングソフトとオリジナルデータは1対1の関係となり、他のソフトとの互換や、データ交換は期待できない。一方で、作成された3次元地質・地盤モデルは、基本的な3次元オブジェクトで構成されているため、3次元CAD等のソフト間でデータ交換が期待できる。

オリジナルファイルはIFCやLandXML等の共有フォーマットと異なり、作成したソフトウェアへの依存度が高い。そのため、成果品として納品が求められた場合、可読性のあるデータであること(表7.7-1)、データの編集には作成した3次元モデリングツールが必要であることを事前に発注者と確認しておく必要がある。

3次元地質・地盤モデルは、ソフトに依存した形で構築されるため、モデルを構築するために使用した情報(地質図面、ボーリングデータ等)のトレーサビリティをオリジナルファイル内で担保するのか、別途、入力データをまとめるのかは十分協議する必要がある。

表7.7-1 一般的な3Dオブジェクト(ジオメトリ)を格納するASCIIファイルフォーマットの一覧

フォーマット	概要	拡張子
OBJ	Wavefront用のフォーマット形式	obj
VRML	Virtual Reality Modeling Language	wrl
DXF	CADの標準形式のフォーマット	dxf
STL	Standard Triangulated Language	stl
PLY	Stanford University	ply

参考文献

- 1) (社)日本自動車工業会. JAMA/JAPIA 3D図面ガイドライン-3D単独図活用ガイドライン-. 2009-10.
- 2) 国土交通省. 3次元モデル表記標準(案). 令和2年3月.
- 3) 国土交通省. BIM/CIM活用ガイドライン(案)共通編. 令和2年3月.
- 4) 国土交通省. BIM/CIMモデル等電子納品要領(案)及び同解説. 令和2年3月.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所. LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準(案) Ver.1.3.平成31年3月.
- 6) 国土交通省 大臣官房技術調査課. 土木IFC対応ソフトウェア確認要件(案). 令和元年5月.
<http://www.mlit.go.jp/common/001289040.pdf>.
- 7) <https://vimeo.com/419841260>.

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

8章 おわりに

[8.1 今後の課題](#)

[8.2 今後の展望](#)

8.1 今後の課題

コンソーシアムの成果

コンソーシアムの活動は、技術普及活動として各所への報告や講演、技術セミナーの開催、関連ソフトウェアの開発と公開、3次元地質解析技術マニュアル、および、技術ガイドブックの公開が主な成果となる。

この活動期間に、コンソーシアム発足の背景となるBIM/CIMの動きはさらに活発になっている。国土交通省のBIM/CIMガイドラインや各種基準類の整備が進み、一方で、国際的なBIMデータ交換標準のIFCには3次元地質・地盤モデルも組み込まれることになる。

以上の急激な外部環境変化の真っ只中でコンソーシアムの会期は終了するが、建設ライフサイクルに資する3次元地質・地盤モデルの発展・流通に、コンソーシアムの成果が少しでも役立つことを願うものである。

3次元地質・地盤モデルに要求される性能

3次元地質・地盤モデルには土木地質図で示される大切な情報を網羅しなければならないという難題がある。土木地質図は、地質・地盤リスクを正確に伝えるための情報の詰め物であるが、事業目的等に応じた種類があり、伝える内容や着目点も変わる。

すなわち、3次元地質・地盤モデルも誰に対して何を発信し伝えるべきものか、熟慮して構築しなければならない。伝える情報が正確であることは当然であるが、基本的に、信頼のおける情報によって客観的な見方ができているかが重要と考えられる。

以上のように、3次元地質・地盤モデルに要求される重要な性能は下記に示す信頼性と客観性であり、さらに、事業に役立てられる利便性と考えられる。

【3次元地質・地盤モデルの信頼性】

3次元地質・地盤モデルは事業目的に応じた精度・品質を確保し、その信頼性を保障できなければならない。モデル作成者情報やモデル構築に使用した元データを含めて、品質・信頼性の確認ができて、地質・地盤モデルの修正や更新を可能とするトレーサビリティが重要である。

【3次元地質・地盤モデルの客観性】

3次元モデル特有の表現力を活用し、事業目的や段階に応じて適切でわかり易く表現する必要がある。特に、空間認識力には個人差・経験差があり、利用者の意識を統一し合意形成を図る手段としての性能も求められる。しかし、作成者の伝えたい情報が表現できる面を持つ一方で、これらはときに主観的にもなるので、客観性をいかに保持したモデルにするかが重要と考えられる。

【3次元地質・地盤モデルの利便性】

専門的な解析に特化したモデルの利便性は、その目的で使う限りにおいて高いものであり、他の目的で使おうとすると低くなる。汎用性のある3次元地質・地盤モデルであることが合理的・経済的ではあるが、どのような現場にも適用できる万能なモデルを作ることは難しい。モデルの利用目的や適用限界を明確に示すことが必要である。

3次元地質・地盤モデルと技術の課題

自動化・効率化・労働時間短縮は、高度情報化社会に技術を扱う者に求められる責務であり、3次元地質・地盤モデルの利活用は必然の流れと考えられる。BIM/CIMでは、再利用と確実な継承を可能にする情報パッケージを必要とするため、地質情報の散逸・消耗を防ぐ仕組みの構築も急務である。3次元地質解析技術を普及させるためにクリアしなければならない課題は多いと考えられる。

3章で述べたように3次元地質・地盤モデルを構築するには、相応のスキルを必要とする。スキルに応じた判断と品質責任を伴うものは、適切な価格設定のうえで供給されることが望ましい。

本書では、3次元地質・地盤モデルの基本的な形式や作成方法、その利活用場面やユースケースを例示した。しかし、地質の不確実性を加味した地盤評価は、簡単に解決できる問題ではない。また、3次元地質・地盤モデルの方法論や品質評価には研究対象となる課題も多い。

ICT/IoTの技術は日進月歩であり、本書で示した技術情報は、今後もユースケース分析や研究開発により、更新されていくべきものとする。本技術マニュアルを現場に適用し、品質管理の実践や品質管理意識の浸透を図り、実用面での経験を重ね、マニュアルを改善しつつ本技術の普及を進めていきたい。

8.2 今後の展望

3次元地質・地盤モデルの可能性

3次元地質解析技術は、地質解析の思考作業、空間把握、作図・表現の省力化に寄与できると考えられる。さらに、この技術から構築される3次元地質・地盤モデルには、次のような効果が期待できる。

- ①地下に潜む地盤情報を“見える化”できる
 - ◆2次元図面ではわからない奥行き方向の地盤情報を可視化できる
 - ◆対象構造物と地盤の相互関係が3次元で把握し易くなる
 - ◆わかりやすい図や資料を作成できるので速やかな合意形成に役立てられる
- ②2次元/3次元CADで利用可能なデータを提供できる
 - ◆3次元CADで再利用できる3次元形状データを作成できる
 - ◆3次元的に矛盾の無い2次元CAD地質図面を提供可能である。
 - ◆自由な位置で設計・検討用の図面を作成できる
 - ◆地質と構造物の干渉チェックやボリューム計算が可能である
- ③モデル構築作業がシステム化される
 - ◆思考作業をサポートしつつ生産性向上させるツールになり得る
 - ◆判断・評価時間を短縮可能である
 - ◆トレーサビリティにより情報の追跡・モデルの更新が容易である
 - ◆新たな地盤情報を用いて短期間でのモデル更新が可能である
 - ◆モデル更新費用を安価に抑えることが可能である

3次元地質解析技術への期待

一般に、コミュニケーションツールに求めるものは、理解を助ける、気づきを生み出す、共感を得る、間違いを防ぐ、ブレインストーミング、報告/連絡/相談、合意形成等である。その根底には“わかり易さ”がある。

3次元は“わかり易さ”を得るために利用するのであって、逆に、物事を複雑にしてしまつてはその技術が意味のないものになり兼ねない。3次元地質解析技術が有効に適用され、地質技術者と様々なユーザーを繋ぐコミュニケーションツールになることを期待するが、本書で紹介したようなツールは、そのような用途に適っているだろうか。

みえないものを見えるようにすること自体が、人の本能的な欲求を満たすものでもある。3次元地質解析技術も、事業や業務に役立つことは元より、ワクワク・ドキドキするような気持ちで使える技術へと成長することを期待したい。

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

<参考資料>
【関連技術】

ここでは3次元地質・地盤モデル構築に利用する技術や関連技術についてピックアップする。

※全ての技術を網羅するものではない

[R-T.1 3次元地質解析システム](#)

[R-T.2 レーザー測量](#)

[R-T.3 UAV測量](#)

[R-T.4 地形解析図](#)

[R-T.5 地表踏査](#)

[R-T.6 物理探査](#)

[R-T.7 地中レーダー](#)

[R-T.8 数値解析](#)

[R-T.9 機械学習の適用](#)

[R-T.10 NURBS曲線法](#)

[R-T.11 岩相分布モデル構築](#)

R-T.1 3次元地質解析システム

専用ソフトウェアに必要な機能/性能

建設土木事業分野で利用する3次元地質・地盤モデルは、一般に3次元地質解析システムを使用して構築する。専用ソフトウェアに必要な機能は次のようなものが挙げられる。全機能を網羅できなくても、複数のツールを連携させて処理を遂行することもある。

- ◆データ編集
 - ・入力データ編集
 - ・データのインポート/エクスポート
- ◆3次元モデル作成
 - ・サーフェスモデル
 - ・ソリッドモデル
- ◆モデル編集
 - ・モデルの切断や結合
- ◆分析
 - ・入力データのチェック
 - ・モデル形状のチェック（断面、コンター等の利用含む）
 - ・オブジェクト同士の交差抽出
 - ・オブジェクトの寸法や角度、面積、体積計算
- ◆図化
 - ・レンダリング
 - ・2次元CAD図面作成
- ◆モデルのインポート/エクスポート
 - ・3次元CADデータ出力
- ◆トレーサビリティ
 - ・作業記録を残せる
 - ・属性情報を編集/記録/出力できる

機能比較

コンソーシアムメンバーが実務で使用している3次元地質解析システムについて、右図のワークフローに沿って特徴的な機能/性能を整理した。なお、本表は2018年2月時点のものである。

【掲載順（アルファベット順）】

[i\) Georama for Civil3D](#)

[ii\) GEO-CRE](#)

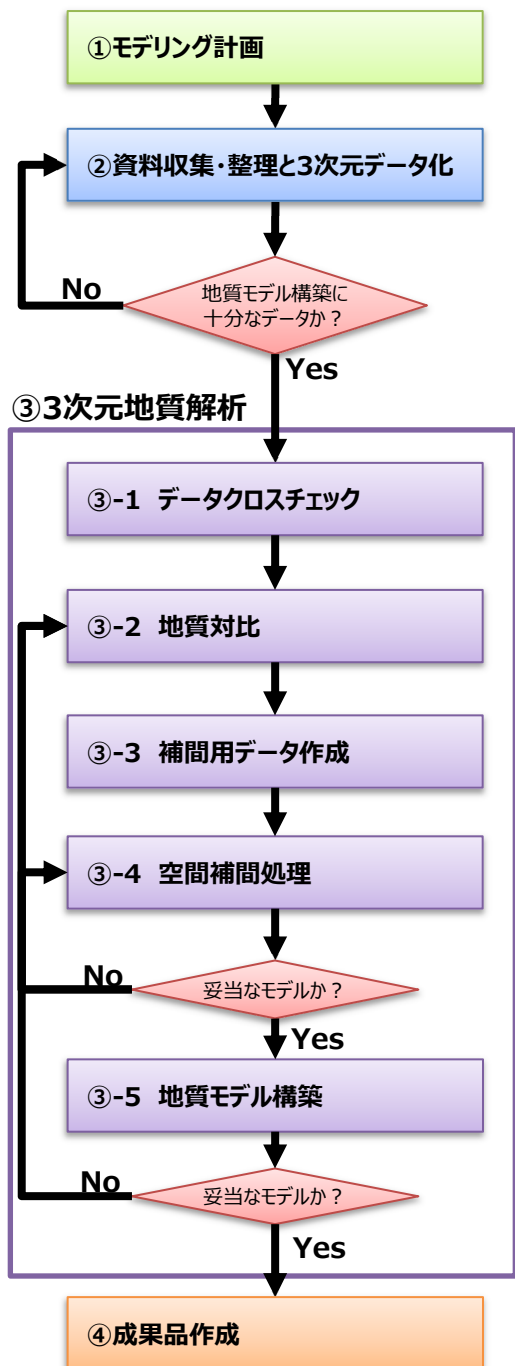
[iii\) GOCAD](#)

[iv\) MakeJiban](#)

[v\) OCTAS Drafter](#)

[vi\) VULCAN](#)

※各ソフトウェアについては図2.2-2のURLを参照



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

表R-T.1-1 3次元地質解析システムの機能比較

作業フローの段階	GEORAMA	GEO-CRE	GOCAD	Makejiban	OCTAS Drafter	VULCAN
①モデリング計画	<ul style="list-style-type: none"> ・成果品様式決定 ・解析領域設定 ・利用データ選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・成果品様式決定 ・解析領域設定 ・利用データ選定 ・プロジェクト作成 	<ul style="list-style-type: none"> ・成果品様式決定 ・解析領域設定 ・利用データ選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・成果品様式決定 ・解析領域設定 ・利用データ選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・解析領域設定 ・プロジェクト作成 	<ul style="list-style-type: none"> ・成果品様式決定 ・解析領域設定 ・利用データ選定
②資料収集・整理と3次元データ化	<ul style="list-style-type: none"> ・ラスタベクタ変換 ・トレース ・断面測線設定 ・断面レイアウト作成 ・既往断面/平面図の再利用/背景図 	<ul style="list-style-type: none"> ・ラスタベクタ変換 ・断面図3次元化 ・3次元トレース ・柱状図入力(xml) ・既往断面/平面図の再利用/背景図 	<ul style="list-style-type: none"> ・ラスタベクタ変換 ・テーブル入力 ・トレース ・航空写真や断面/平面図のデジタル化/3次元化 	<ul style="list-style-type: none"> ・柱状図入力(xml) ・テーブル入力 ・断面トレース ・平面図のデジタル化/3次元化 ・LandXML/DM/SIMA利用 	<ul style="list-style-type: none"> ・柱状図入力(xml) 	<ul style="list-style-type: none"> ・平面図入力、標高設定 ・断面図入力、座標変換 ・Drillhole Database作成
データチェック	チェックシート手入力	チェックシート手入力	チェックシート手入力	チェックシート手入力	チェックシート入力 サポート機能開発中	チェックシート手入力
③-1データクロスチェック	<ul style="list-style-type: none"> ・交点抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ・交点/交線抽出 ・ドラフトモデリング 	<ul style="list-style-type: none"> ・交点/交線抽出 ・ドラフトモデリング 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドラフトモデリング 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドラフトモデリング 	<ul style="list-style-type: none"> ・交点発生 ・交点確認(目視)
③-2地質対比作業	<ul style="list-style-type: none"> ・2次元断面図 ・2次元平面図 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元空間 ・走向傾斜 ・不等号条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元空間 ・走向傾斜 	<ul style="list-style-type: none"> ・2次元断面図 ・2次元平面図 ・不等号条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元空間 ・不等号条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元空間
③-3補間計算用データ作成	<ul style="list-style-type: none"> ・点 	<ul style="list-style-type: none"> ・点 ・線(ノード配置/曲率) ・面(法線/エッジ継承) 	<ul style="list-style-type: none"> ・点 ・線 	<ul style="list-style-type: none"> ・点 ・走向傾斜 	<ul style="list-style-type: none"> ・点 	<ul style="list-style-type: none"> ・点 ・線
③-4地質境界面補間計算	<ul style="list-style-type: none"> ・Horizon2000 ・Tin(地形) 	<ul style="list-style-type: none"> ・BS-Horizon ・NURBS ・Tin 	<ul style="list-style-type: none"> ・DSI ・Tin 	<ul style="list-style-type: none"> ・BS-Horizon ・B-Spline ・Tin 	<ul style="list-style-type: none"> ・BS-Horizon ・IDW(3D:ポクセルモデル計算) ・Tin(地形) 	<ul style="list-style-type: none"> ・Triangulate ・Inverse distance squared interpolation ・Direct contour to grid for string data [splined] ・Direct contour to grid with interpolation ・Direct point to grid
モデルチェック	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター ・ゼブラマップ ・点とサーフェスの偏差 ・オブジェクト交差 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター ・カラーマップ ・点とサーフェスの偏差 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター ・他の面との交差状況 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図 ・コンター ・他の面との交差状況
③-5地質モデル作成	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド 	<ul style="list-style-type: none"> ・NURBSサーフェス ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド ・NURBSソリッド 	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド ・ポクセルモデル 	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド 	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド 	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュサーフェス ・メッシュソリッド
モデルチェック	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター ・オブジェクト交差 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図/切断面 ・コンター 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図 ・コンター
④成果品作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングモデル出力 ・2D/3D断面図出力 ・コンター図出力 ・サーフェスモデルAscii出力 ・コンター図出力 ・印刷 ・3次元CADデータ出力 ・ポクセルモデル出力 ・Landxml出力 ・IFC(2×3)出力 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングモデル出力 ・2D/3D断面図出力 ・コンター図出力 ・サーフェスモデルAscii出力 ・3次元CADデータ出力 ・CGデータ出力 ・2Dレイアウト ・印刷 ・高画質レンダリング ・アニメーション 【下記プラグイン必要】 ・Landxml出力 ・IFC(2×3)出力 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングモデル出力 ・断面図出力 ・コンター図出力 ・属性情報出力 ・サーフェスモデルAscii出力 ・3次元CADデータ出力 ・印刷 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングモデル出力 ・断面図出力 ・コンター図出力 ・3次元CADデータ出力(サーフェス、ソリッド、断面、ボーリング、その他オブジェクト) ・画像出力 ・サーフェスモデルAscii出力 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングモデル出力 ・断面図出力 ・コンター図出力 ・フルビュアデータセット出力(暗号化) ・属性情報出力 ・サーフェスモデルAscii出力 ・ソリッドモデルAscii出力 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面図出力 ・コンター図出力 ・サーフェスモデルAscii出力 ・ソリッドモデルAscii出力 ・サーフェスモデルDXF出力 ・ソリッドモデルDXF出力 ・3次元PDF出力 ・画面の画像出力 ・画面の動画出力

i) Georama for Civil3D

<3次元地質モデル構築の流れ>

(GEORAMA for Civil3Dにおいて、サーフェスモデルを作成するまでの一連の流れ)

【概要】

GEORAMAは、AutoCAD Civil 3Dのアドオンソフトウェアであり、地質情報をAutoCAD Civil 3D上で管理、作成できるように拡張するものである。

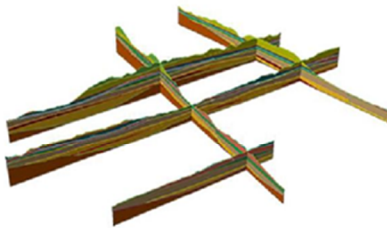
【機能】

- ①地質情報の3次元管理のデータベース（属性付加）
- ②3次元土木地質GIS的データの取り込み
- ③解析シミュレーションのためのモデリングアウトプット機能

【開発】

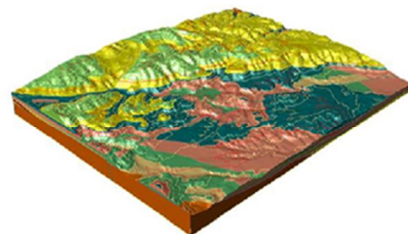
AutoCADの設計機能の一部としてCTCにより開発され、AutoCAD Civil 3Dのバージョンアップに追従してリリースされている。

GEORAMA for Civil 3D



3次元的に整合性の取れた地質図面を作成、管理するドローイングツール。

調査技術者による多角的な知識や経験による地質学的推測のため、3次元的思考をサポートするツール。



2次元図面と3次元地質モデルを結びつけるモデリングツール。

土木技術者による設計のための工学的判断に必要な任意セクションの地質関連図を得ることが可能。

<GEORAMA for Civil3D> サーフェスモデルを作成するまでの一連の流れ

① 3次元地質モデル構築の作成コンセプト

GEORAMA Drawing : 地質図を作成する過程での懸案のひとつである「3次元的に整合性のとれた地質図」を作成するドローイングツール

GEORAMA Modeling : GEORAMA Drawing で得られた「3次元的に整合性の取れた地質図」を使用して、3次元地質モデリングを行う

① 作成コンセプト

3次元空間に配置される2次元地質モデルの整合化と3次元地質解析システムの連携による地質境界面(サーフェス)の作成

② GEORAMA Drawing :

・既存断面の収集作成と3次元空間配置
・地質データの入力
・地質技術者による断面図作成(層序決定と整合調整)

② 3次元モデル構築に必要な各断面を作成し、各断面の完成度の整合をとる
・既存の地質平面図と2次元断面を配置する。3次元地質解析に必要な配置箇所がない場合、新たな断面を作成する。特に、地形地質現象のコントロールポイントを表現できる断面を作成する。

・各断面の地質の整合を検討し、層序の解釈を統一する。
・各断面の交差部の整合を調整する。

平面・断面の地質境界の整合

No

Yes

③ GEORAMA Modeling :

・3次元地質解析の整合
・推定空間の確認
・地質対比作業/地質構造検討作業
・地質モデル構築作業

③ 3次元モデルで配置した各断面の地質境界線からサーフェスを生成する。

・地質層序学的な、「切り合いの関係」からサーフェスの表示優先度を確定させる。
・「最適化理論により関連づけられた推定サーフェス」と断面のない空間の作成結果の地質的整合を確認する。3次元地質解析に不適切な推定結果の場所を、地形地質現象のコントロールポイントとして新たな断面の境界線、制約ポイントを配置する。

・再度、自動推定により、推定結果を確認する。
・コンタマップ、断面等で全域のサーフェスを確認する。

④ 成果品の利用

・AutoCAD製品への出力
・CTC製品への出力
・3次元元可視化資料
・パネルダイヤグラム
・各種図面作成 等

④ 構築した地質モデルを元に、3次元可視化資料や、シミュレーション等に用いる二次利用データ、各種3次元モデルデータの出力や加工、地質断面・平面図等の図面を作成する。

i) Georama for Civil3D

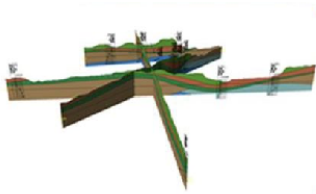
①作成コンセプト

3次元空間に配置される2次元地質モデルの整合化と3次元地質解析システムの連携による地質境界面（サーフェス）の作成

- ◆3次元地質モデルを構築する一部となる2次元断面を、「GEORAMA Drawing」で3次元空間に作成（配置）し、それぞれの地質境界線から、「GEORAMA Modeling」で地質境界面（サーフェス）を作成する。
- ◆地質断面は、計画の都合による断面であり、地質構造を代表する面となっていない場合がほとんどである。また、ダムサイトや環境調査におけるグリッド法による断面が3次元推定上理想的な配置であるが、道路や線路等の線形計画物沿いの3次元推定は、推定上不利となるため、モデル構築上、注意が必要である。

①GEORAMA Drawing

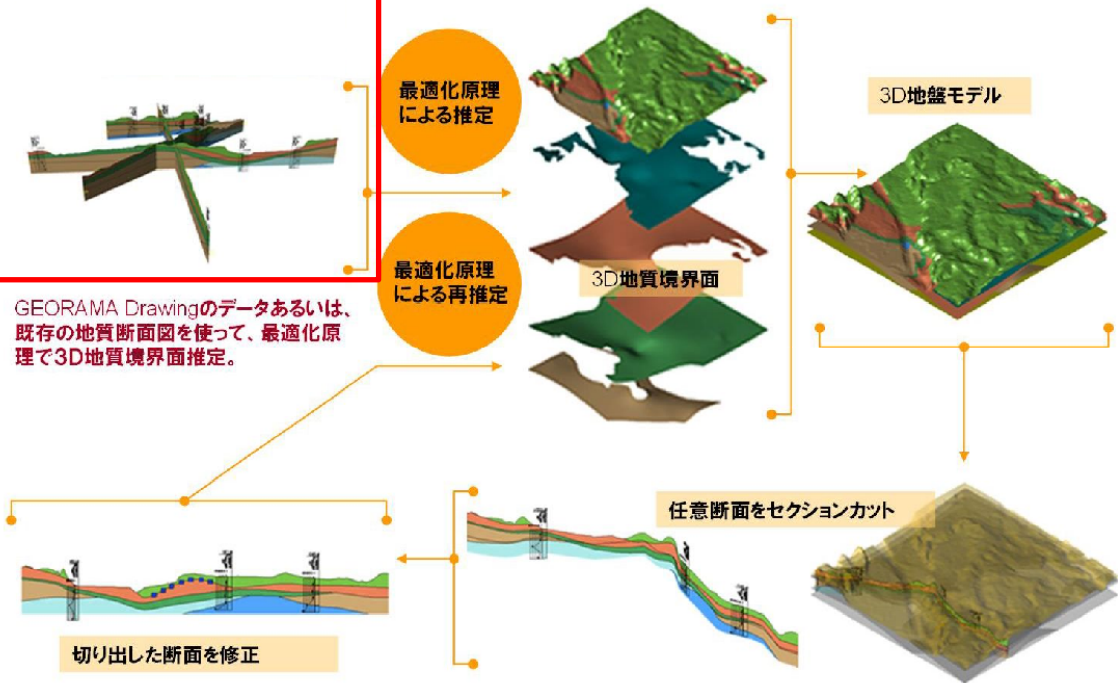
地質図を作成する過程での懸念のひとつである「3次元的に整合性のとれた地質図」を作成するドローイングツール



GEORAMA Drawingのデータあるいは、既存の地質断面図を使って、最適化原理で3D地質境界面推定。

②GEORAMA Modeling

GEORAMA Drawing で得られた「3次元的に整合性の取れた地質図」を使用して、3次元地質モデリングを行う



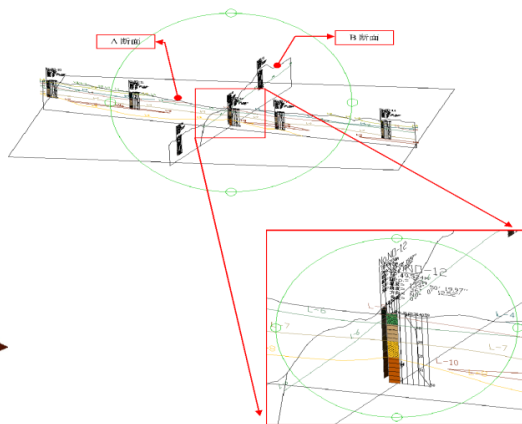
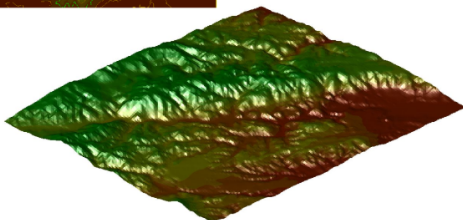
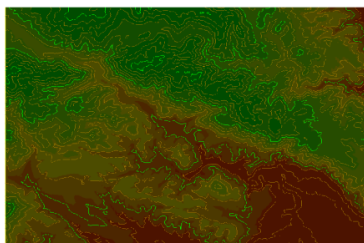
i) Georama for Civil3D

②GEORAMA Drawing

3次元空間に配置される2次元地質モデルの整合化

◆GEORAMA Drawing 機能は、地質図面作成ワークフローを効率化するツールである。地質解析者は、膨大な調査データを、頭の中で3次的に組み立てて、「断片的データ間を埋めていく作業」をしている。GEORAMA Drawing 機能では、そのとき必要な「3次的思考」をサポートし、地質関連図（平面・断面）をスピーディーに得られるような機能を搭載している。

手順	手順	機能	備考
②-1 準備	<ul style="list-style-type: none"> 地形データ (TIN) の作成と推定空間の指定 作業領域、解析領域の設定 3次元空間に断面を配置する。 	<ul style="list-style-type: none"> メッシュデータから作成 高度を持ったポリラインコンタからの作成 2次元コンタの場合の高度付加機能 AUTOCADオブジェクトからの作成 DMファイルからの作成 SIMAファイルからの作成 	測地座標系の選択モード有り
		立方体的空間の定義 (X、Y、Z)	斜め配置も可能
		平面表示での線分による自動断面作成	自動追尾で断面変更に対応
②-2 地質データの入力	柱状図データの作成・取り込み	柱状図データの作成	
		電子納品柱状図データの取り込み	XMLデータ
②-3 断面の作成	各地質断面図の作成	地質技術者による層序決定、整合調整	



i) Georama for Civil3D

◆平面・断面の地質境界の整合

3次元地質モデルを構築する一部となる2次元断面を作成し、それぞれの地質境界線から、地質境界面（サーフェス）を作成するため、平面図、断面図の整合をチェックする機能を搭載している。

GEORAMA では、整合性の取れた地質断面図をつくるための主な機能として、次の5つのファンクションが用意されている。

● 断面ビュー機能

ユーザーが設定した断面線に沿って、ボーリングデータを投影した断面図作成用ビューを提供する。

● 交差点表示機能

断面ビュー上に、交差する断面位置および地質境界線の交点を表示する。

● 交差線表示機能

交差する断面位置および地質境界線上に、地質の境界を線の色分けで表示する。

● 水平断面ボーリング表示機能

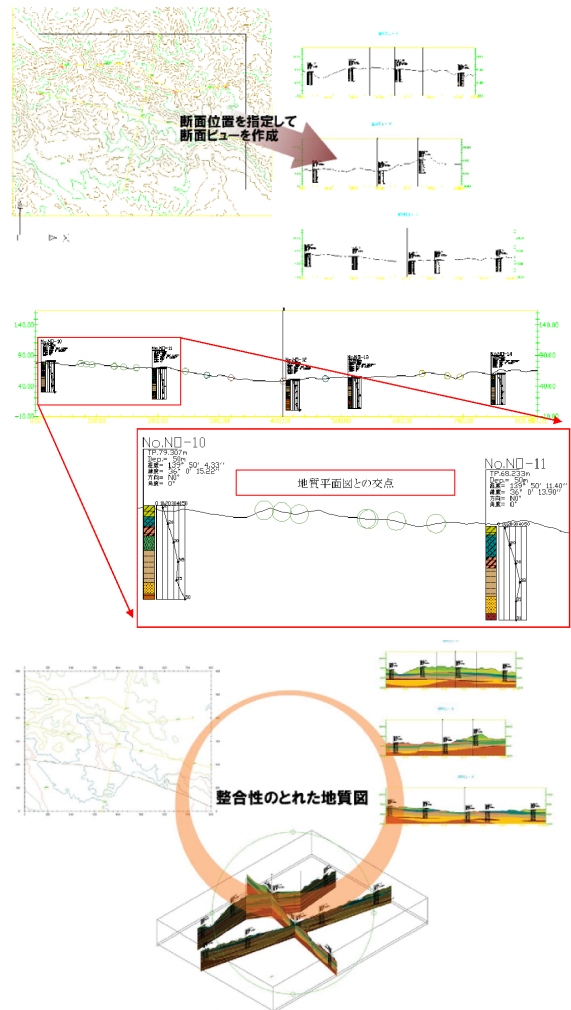
水平断面ビューに、そのレベルでのボーリング柱状図の断面を表示する。

● 3次元ダイアグラム表示機能

断面ビュー上につくった地質断面図、平面図を3次元パネルダイアグラムにして表示し、ユーザーの3次元的思考をサポートする。

GEORAMA では、この5つの機能を繰り返し使って完全に整合性のとれた3次元地質図面を作成できる。

※既にCAD 地質断面図が存在する場合は、外部断面入力機能を使って尺度を合わせて断面ビューに取り込むことができる。

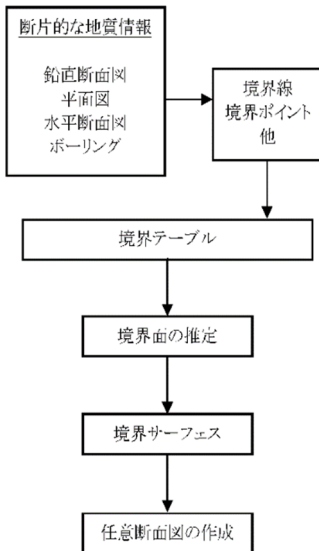


i) Georama for Civil3D

③GEORAMA Modeling

GEORAMA では、断片的な地質情報（ボーリングデータ、断面図等）から3次元地質モデルを推定する。推定した結果は、境界サーフェスとして出力される。境界サーフェスからは任意の断面を作成することが可能である。

◆断片的な地質情報だけではModeling を行うことはできない。それらの情報を推定が行えるようにまとめる必要がある。GEORAMA ではそのために境界テーブルが準備されている。境界テーブルに登録された境界（境界面属性がついたもの）のみがModeling の対象となる。



Tips... (境界テーブル設定)

境界テーブルで設定した境界は、以下のように順番に境界面を入力したイメージになります。

- 1) はじめに初期化領域の“粘性土2”ですべての領域を定義します。
- 2) 次に境界（粘土質ローム-砂礫）でその上側領域（面種）を“粘土質ローム”で定義します。
- 3) 次に境界（砂礫-礫混り粘土）でその上側領域（面種）を“砂礫”で定義します。
- 4) 次に境界（礫混り粘土-礫質土）でその上側領域（面種）を“礫混り粘土”で定義します。
- 5) 次に境界（礫質土-粘性土1）でその上側領域（面種）を“礫質土”で定義します。
- 6) 次に境界（粘性土1-粘性土2）でその上側領域（面種）を“粘性土1”で定義します。

優先度（プライオリティ）は上記定義の順番を表します。

境界テーブル

名称	色	面	指定	有効	固定	優先度	面種	地質	ブロックパラメータ	ブロックパラメータ			
1 粘土質ローム-砂礫	78	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	上	■粘土質ローム	1	2	3	4	5
2 砂礫-礫混り粘土	159	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	上	■砂礫					
3 礫混り粘土-礫質土	43	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	上	■礫混り粘土					
4 礫質土-粘性土	95	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	上	■礫質土					
5 粘性土-粘性土2	9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	上						
6	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	なし						

初期化領域: ■粘性土2

i) Georama for Civil3D

◆境界テーブルについて

境界テーブルではGEORAMA で使用する境界線や境界面（サーフェス）を管理する。登録される境界には

- 1) 断面図間の整合性を見るための境界線
- 2) 地質境界として境界面属性を持ち、推定の対象となるサーフェス（境界面）
- 3) 地質モデルとは直接関係なくても登録するサーフェス

がある。それぞれの境界は境界属性のスイッチで制御され、相互に変更することもできる。

【面チェック】

“面”をチェックすると境界は、境界面として取り扱う。面チェックがない場合は、境界線となり、それ以降、右側のパラメータを入力することができない。

【指定ボタン】

“指定”ボタンを押すとCivil3D で作成したサーフェスを登録することができる。登録されると、推定境界線として断面上に図化することができる。

【有効チェック】

“有効”をチェックするとモデルとして推定する境界面の対象となる。したがって、入力した境界線やボーリングデータ、境界ポイントからモデリング計算（補間計算、交面処理）が行われる。有効チェックがない場合は、それ以降、右側のパラメータを入力することはできなくなる。

【固定チェック】

“固定”をチェックするとチェックした境界面はモデリング計算をした後、固定されるので変化しない。

No.	名称	色	境界属性				境界パラメータ		ブロックパラメータ					
			面	指定	有効	固定	優先度	面種	地質	1	2	3	4	5
1	粘土質ローム-砂礫	79	<input checked="" type="checkbox"/>	...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	上	■ 粘土質ロ					
2	砂礫-礫混り粘土	153	<input checked="" type="checkbox"/>	...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	上	■ 砂礫					
3	礫混り粘土-礫質土	43	<input checked="" type="checkbox"/>	...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	上	■ 礫混り粘					
4	礫質土-粘性土	95	<input checked="" type="checkbox"/>	...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	上	■ 礫質土					
5	粘性土-粘性土2	9	<input checked="" type="checkbox"/>	...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	上	■ 粘性土					
6		7	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	なし						

初期化領域: ■ 粘性土2

OK キャンセル

i) Georama for Civil3D

◆境界面パラメータについて

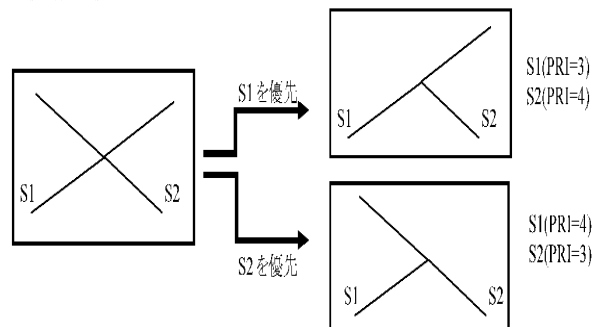
モデリング計算機能により、境界面として推定処理する場合（有効チェックがONの場合）、境界パラメータを設定する必要がある。境界パラメータには、優先度、面種、地質がある。また必要に応じてブロックパラメータも設定する。特に優先度（プライオリティ）及び面種の考え方は重要である。

No.	名称	色	面指定	境界パラメータ			ブロックパラメータ							
				有効	固定	優先度	面種	地質	1	2	3	4	5	
1	粘土質ローム-砂礫	78	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	上	■粘土質ロ						
2	砂礫-礫混り粘土	158	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	上	■砂礫						
3	礫混り粘土-礫質土	43	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	上	■礫混り粘						
4	礫質土-粘性土	95	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	上	■礫質土						
5	粘性土-粘性土2	9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	上	■粘性土						
6		7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	なし							

初期化領域: ■粘性土2

【優先度（プライオリティ、PRI）】

複数の境界が交わった場合にどの境界が優先するかを決めるパラメータ。整数で表す。値が小さいほどプライオリティが高く、他の境界面を切る。GEORAMAでは、プライオリティ1は地表面、2は底面（解析下限）とシステムに予約されているので3以上の値を用いる。



i) Georama for Civil3D

◆境界面パラメータについて

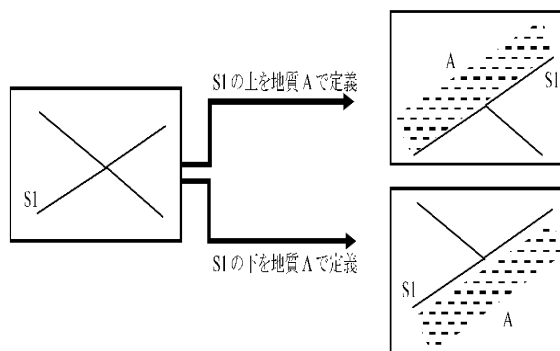
モデリング計算機能により、境界面として推定処理する場合（有効チェックがONの場合）、境界パラメータを設定する必要があります。境界パラメータには、優先度、面種、地質があります。また必要に応じてブロックパラメータも設定します。特に優先度（プライオリティ）及び面種の考え方は重要である。

【面種(KS)】

地質境界面で区切られる2つの領域の内、どちら側の領域を指定した“地質”で定義するかを決めるパラメータ。“地質”とセットになる。

5種類の値がある。

- 上：上部を定義する
- 下：下部を定義する
- 上-：上部を“または”の関係で定義する
- 下-：下部を“または”の関係で定義する
- なし：定義を行わない



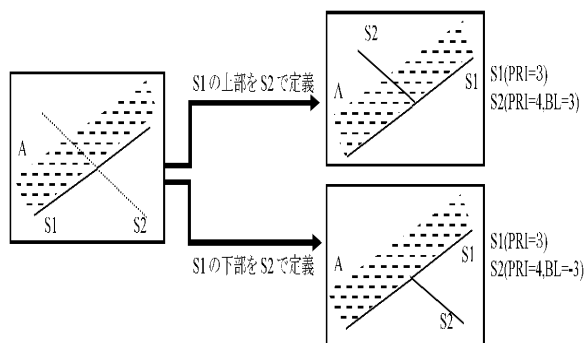
【ブロックパラメータ(BL)】

複数もしくは一つの境界面で定義された領域内または領域外に境界面を定義するとき用いるパラメータ。値としては、既に定義されている境界面の優先度（プライオリティ）が入る。

プライオリティの高い境界で定義した領域にプライオリティの低い境界面を定義したい場合に用いる。

（断層等で用いる）

- 値が正の場合：領域内に境界を定義
 - 値が負の場合：領域外に境界を定義
- 値が負の場合は、領域外定義なので基本的に優先度（プライオリティ）との関係から省略することも可能である。

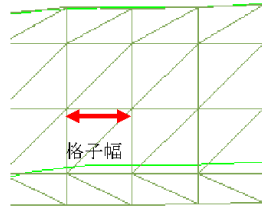
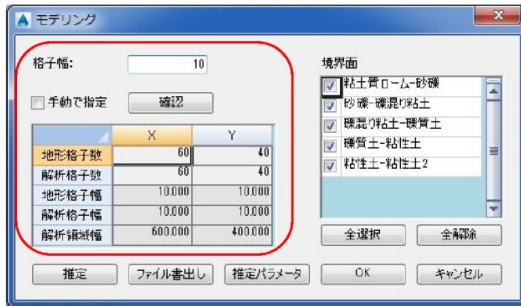


i) Georama for Civil3D

◆モデリング計算

境界面の推定は、[モデリング] ダイアログで行う。[モデリング] ダイアログでは、推定を行う前に、格子幅及び推定したい境界面の指定を行う。ここでは格子幅に関する説明、及び境界面指定の説明、推定方法（推定パラメータ）についての説明を行う。格子幅は、推定結果である境界サーフェスの細かさ(基本の幅)を決めるパラメータである。

格子幅が小さいほど境界サーフェスを構成するメッシュの幅が細かくなり、より精度の高い境界面ができるが、データ量が大きくなるため、パフォーマンスが落ちる。格子幅の値の設定は、基本的に領域全体の大きさ及び地層の表現能力を考えて設定する。



◆推定結果のチェックと表現での注意点

<パネルダイアグラム (入力データ) >

- ・配置断面の境界線が、各モデル化での変化点となっているか？

<サーフェスモデル (推定結果) >

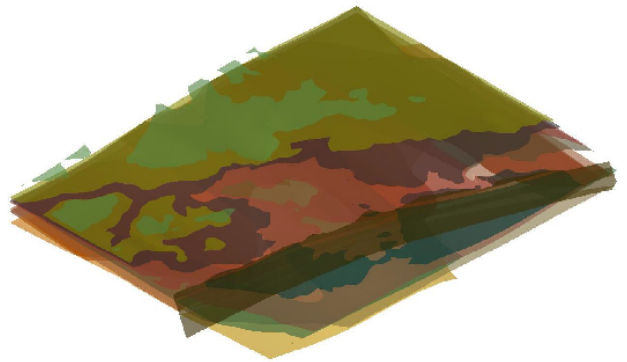
- ・推定のメッシュサイズは、曲線を表現できているか？
(パネルの推定線とモデル化した推定線に乖離がないか？許容範囲か？)
例：20mメッシュのため、10m程度の凹凸構造が表現できない等
- ・推定したサーフェスモデルの補完領域に異常な凹凸が発生していないか？
(等高線表現等でチェック、メッシュの中央が、へこんでいないか？)
- ・DWF等透過サーフェスとして表現できるか？

<ソリッド>

- ・サーフェスで推定した空間を、ソリッド変換する。

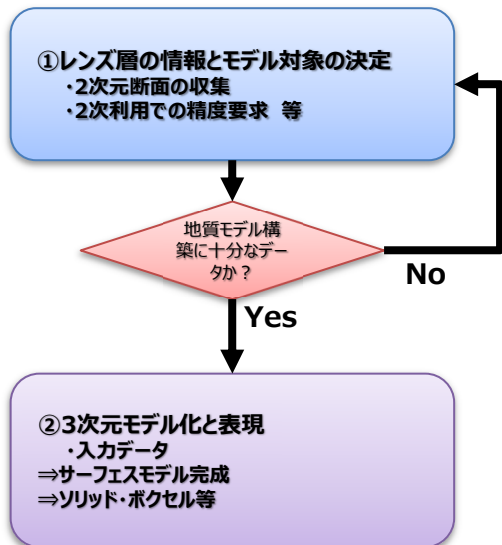
<ボクセル>

- ・メッシュサイズ等の影響で、端部等がどこまで反映されているか？
- ・2次利用者に、オリジナルとのかい離を伝達できるか？



i) Georama for Civil3D

◆ レンズ層の作成方法

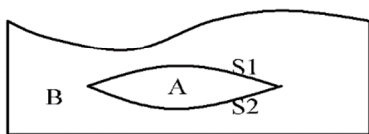


<断面の地質境界線により、レンズが作成される場合>

- ・ S 1、S 2 のサーフェスが存在。
- ・ P R 1 : 切った切られるの関係が同等
- ・ サーフェス S 1 の下面側に地質 A が存在、S 2 の上側に地質 A が存在
- ・ 周辺領域は地質 B

(2) プライオリティが同じケース
プライオリティが同じ境界面の場合、切断関係は同等(互いに区切られる)になり、共通領域を定義することになります。

P-6



	PRI	KS	地質	BL
S1	3	下	A	
S2	3	上	A	

初期化領域 B

(S1 よりも下 “カマ” S2 よりも上)の共通領域が A として定義されます。レンズ層等に用いることができます。

レンズの定義 (GEORAMA2016 Getting Started マニュアル pp.5-16)

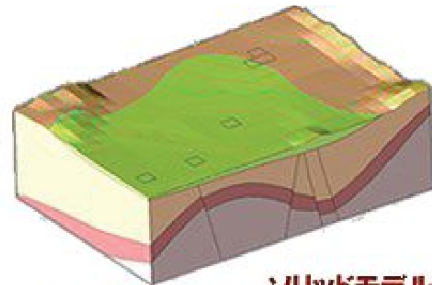
i) Georama for Civil3D

④ 成果品の利用

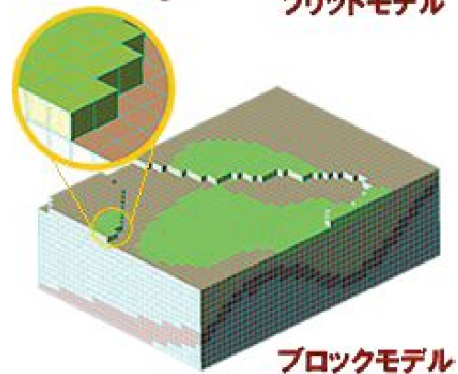
- ・AutoCAD製品への出力・C T C製品への出力・3次元可視化資料
- ・パネルダイヤグラム・各種図面作成 等

◆ 3次元地質・地盤モデルを構築する様々な機能

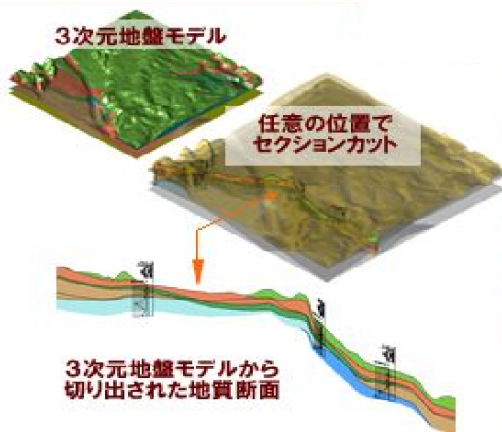
- ・作成した境界面をもとに、任意の断面作成、ソリッドモデルやブロックモデル、FEM メッシュを作成
- ・ブロックモデルでは、施工情報や濃度情報等、任意の属性を管理
- ・さらに、境界線・ポイントを高度に活用する機能を使用して、より精度の高い3次元地質モデルを構築



ソリッドモデル



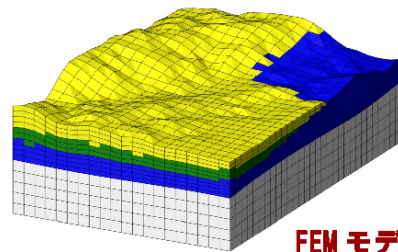
ブロックモデル



3次元地盤モデル

任意の位置で
セクションカット

3次元地盤モデルから
切り出された地質断面



FEM モデル

i) Georama for Civil3D

<Georamaの計算限界（メッシュサイズ、境界面枚数（層数）、PC性能）>

<PC環境>

PCの機種：DELL Precision M3800

OS名：Win7 64bit professional

OSバージョン：

モニタサイズ：3200×1800

グラフィックボード：Quadro K1100M(2GB)

搭載RAM：16GB

<条件>

メッシュサイズ 20m

モデル化 領域：3km×4.5km 標高0~200m

地質境界面 11枚

地下水面 5枚

<条件>

メッシュサイズ 20m

モデル化 領域：3.5km×3.5km 標高10~2500m

地質境界面 4枚

<比較>

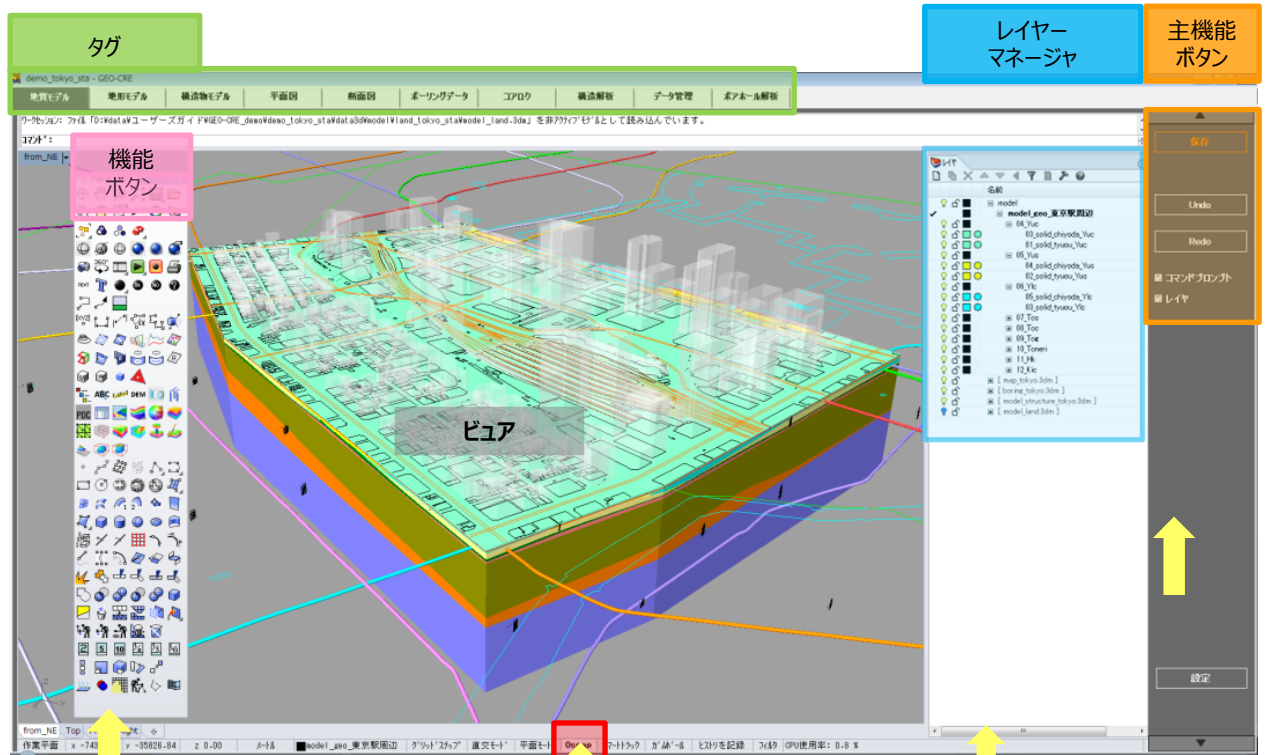
メッシュサイズ 20m⇒推定OK

15m⇒推定OK(応答なしログがときどき出ながら)

10m⇒推定NG

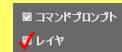
ii) GEO-CRE

【インターフェース】



マウスのホイールをクリックすると機能ボタンが出現します

Osnap をクリックするとスナップバーが表示されます



レイヤーにチェックするとレイヤーマネージャが出現します

【GEO-CRE/GEO-CRE PROの動作環境】

- ◆対応OS
Windows 7/8/10 64bit推奨 (32bitでも動作可能)
- ◆PC
Intel Corei3~i7 および互換プロセッサ
8GB以上のRAMを推奨
グラフィックボード※
- ◆モニター
フルHDサイズモニター (解像度1920×1080px) 以上
グラフィックボードがある場合は、作業空間を広くできるデュアルモニタを推奨する

※標準のグラフィック機能でも動作可能だが、グラフィックボードがあると3次元表示の精度やパフォーマンスが向上する。グラフィックボードを使わない標準グラフィック機能では、テクスチャマッピングに不具合が生じる場合がある

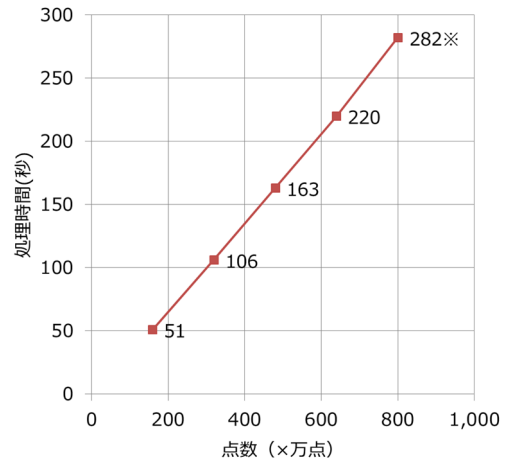
ii) GEO-CRE

【Tin補間の処理限界】

LPデータのような大容量点群データより地形モデルを作成する場合は、処理時間に注意が必要である。

右図はGEO-CREの機能による、点群の総数に対する、地形メッシュモデルを計算する時間を示している。計算時間は点数に比例して増加する。

大容量の点群データを使用する場合は、処理時間と限界を考慮し、点群データを分割しておく前処理が必要になる。



※搭載RAM16GBでは処理不可

テスト環境: Win7(64bit)
Corei7 3.4GHz 16GB RAM
Xeon 3.5GHz 128GB RAM

【グリッド補間計算の処理速度】

10万メッシュ (解像度は概ね 316×316)

⇒40秒～1分

40万メッシュ (解像度は概ね 630×630)

⇒5分～8分

100万メッシュ (解像度: 1000×1000)

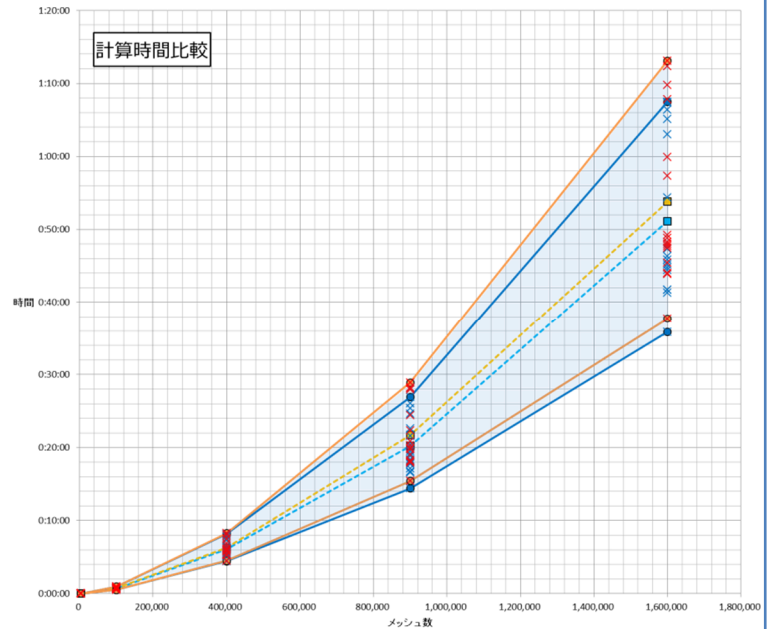
⇒17分～35分

160万メッシュ (解像度は概ね 1250×1250)

⇒45分～1時間10分

処理時間に幅があるのは、入力データ数やデータ配置等の要因によるものと考えられる。

実用的には10万メッシュ程度が妥当である。



テスト環境: Win7(64bit)
Corei7 3.4GHz 16GB RAM
Xeon 3.5GHz 128GB RAM

ii) GEO-CRE

【走向傾斜データの扱い】

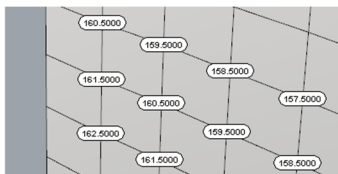
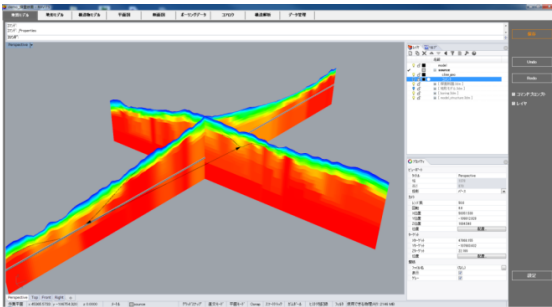
- ◆ 地表地質調査等により得られた「走向・傾斜」の地質構造情報は次の手順で登録する
- ◆ 走向傾斜は境界面モデルの計算に利用可能



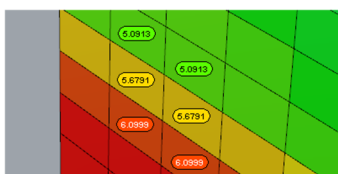
走向傾斜記号と数値表示の例

【物理探査データの扱い】

- ◆ 物理探査データのGeoPlot形状ファイルと測線測量情報ファイルより、Quad（四角）形状のメッシュを作成し物理探査情報を3次元可視化することが可能である

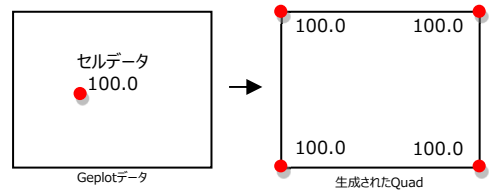


メッシュ形状に設定されているスカラー値がノードデータの場合は、Quad形状の各4点に注釈が表示される

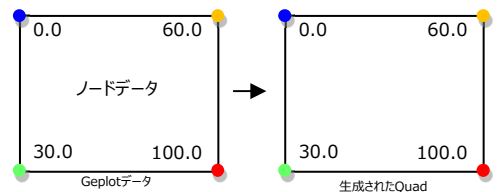


メッシュ形状にカラーマップ情報が付与されている場合、注釈色に反映される

- ◆ セルのスカラー値が指定されている場合は、生成されたQuad形状の各接点に対してスカラー値を設定する。また、スカラー値がセルに対して指定されている場合は、Quad形状の各4点に同じスカラー値が設定される。

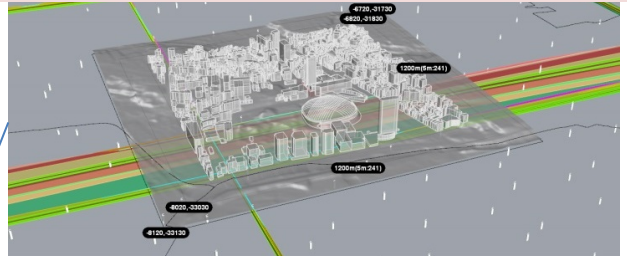
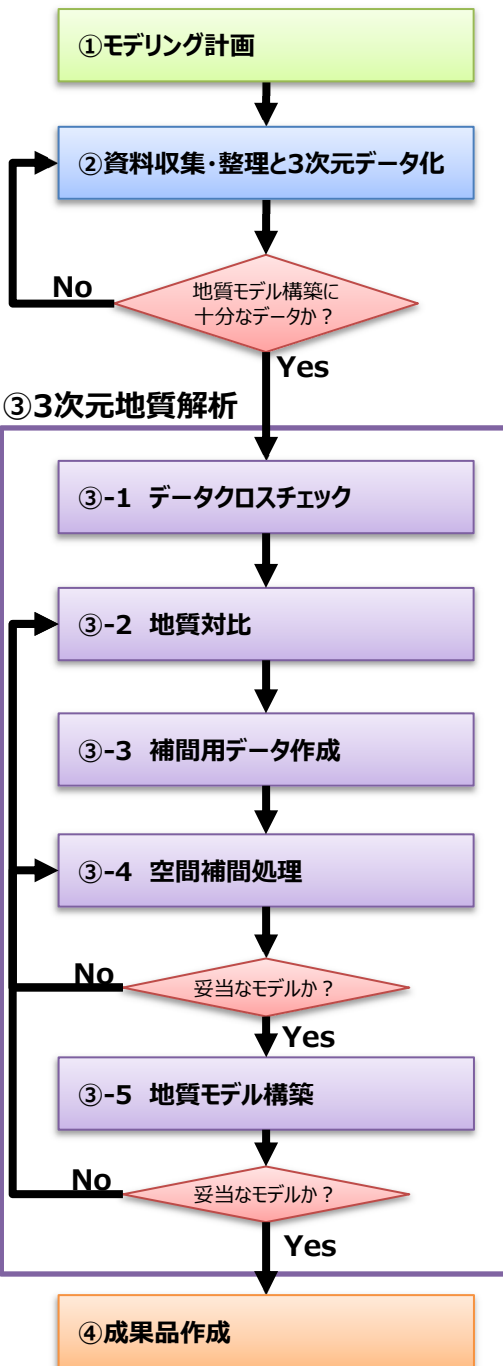


- ◆ スカラー値がノードに対して指定されている場合は、Quad形状のそれぞれ4点にスカラー値を設定する。

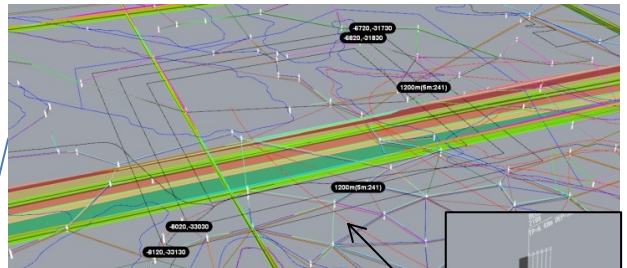


ii) GEO-CRE

【3次元地質モデル作成手順の例】

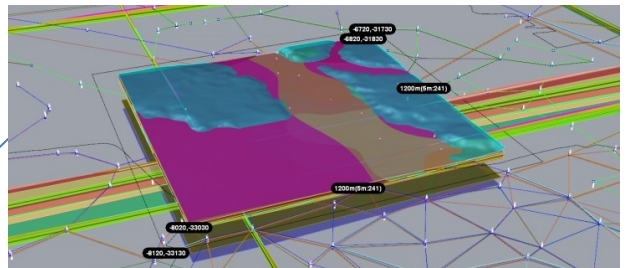


- ◆作成対象の地質モデルとモデルを作成する範囲を決め、地質調査データを3次元化する

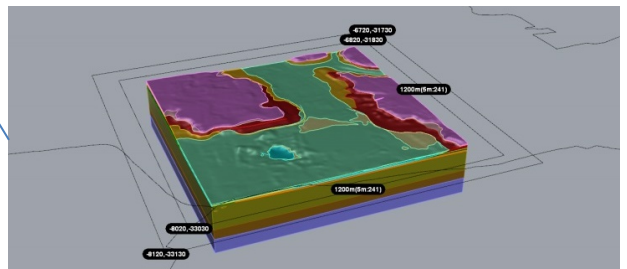


- ◆3次元化したデータの整合性をチェックしながら、既存資料を参考にボーリングデータの地質対比を行う
- ◆地質対比を完了したもから地質境界サーフェスモデルを計算するための点データを抽出する

ボーリングデータ



- ◆点データを用いて各地質境界面サーフェスモデルを計算する
- ◆妥当な形状とならないモデルは、地質対比まで遡ってチェックし、修正や補填データを追加する等の処置を繰り返し、モデルを仕上げる



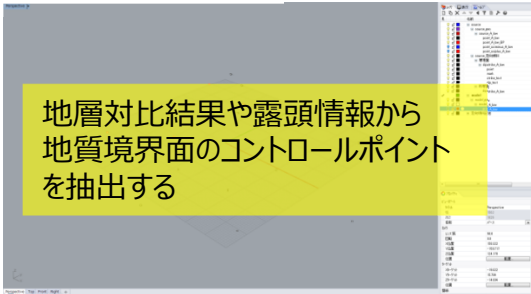
- ◆サーフェスモデルを用いて地質層序に従い地層モデルを作成する
- ◆地層モデルに地質学的な矛盾がある場合は、作業を遡り地質対比や補填データをチェック・修正し地層モデルを仕上げる

※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

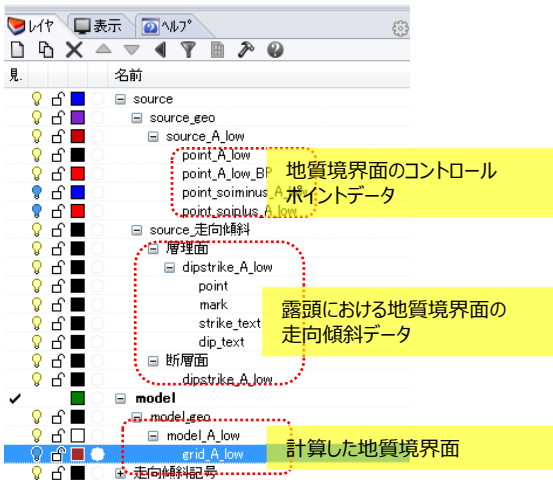
ii) GEO-CRE

【BS-Horizonによる空間補間】

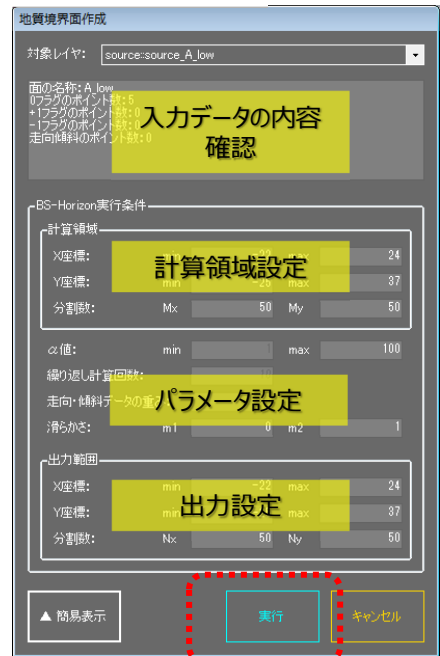
【手順1】地質対比



【手順2】補間計算用データ抽出

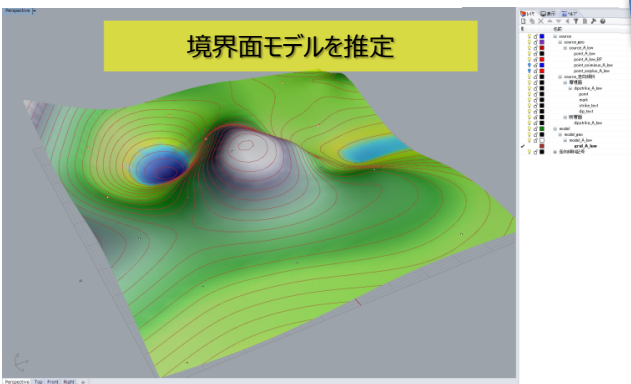


【手順3】補間処理



実行ボタンを押すと境界面を計算する

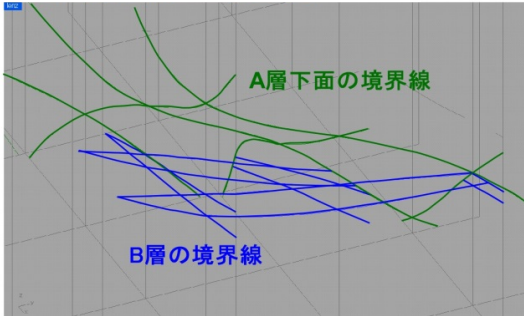
【手順4】境界面モデルの形状チェック



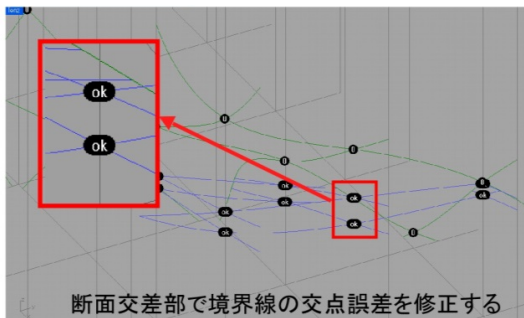
ii) GEO-CRE

【NURBS曲線によるサーフェスモデル作成例】

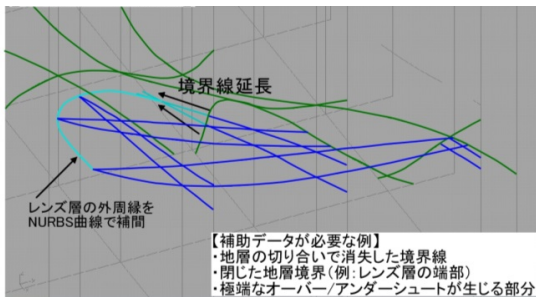
①地質境界線のグルーピング



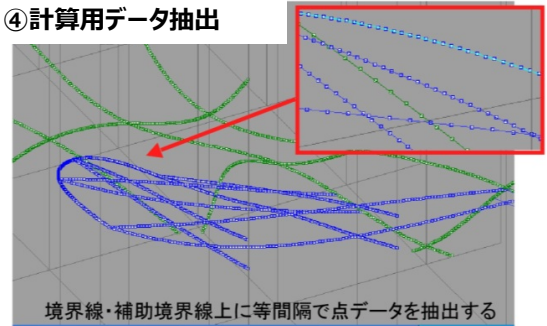
②クロスチェック



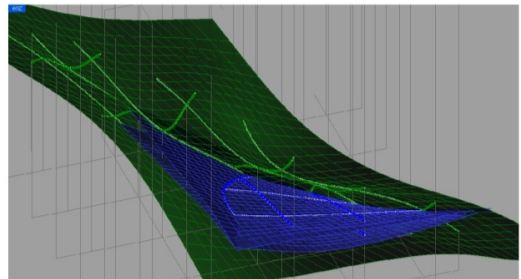
③補助データ作成



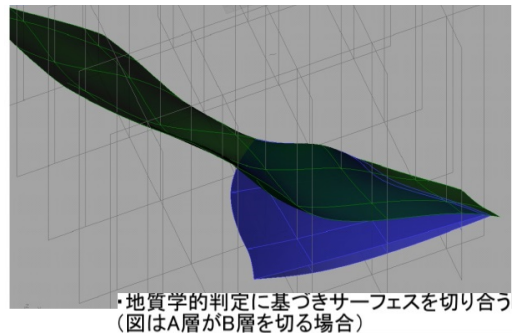
④計算用データ抽出



⑤NURBSサーフェス作成

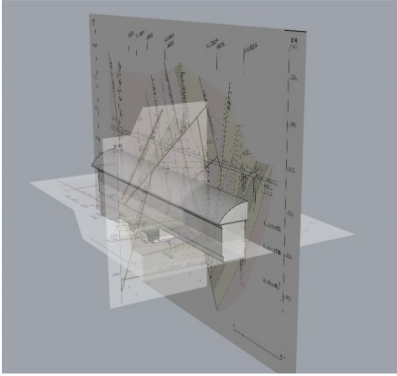


⑥サーフェス切合い

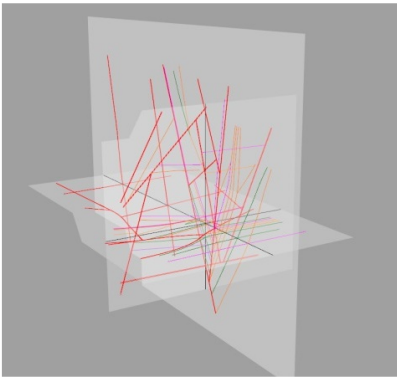


ii) GEO-CRE

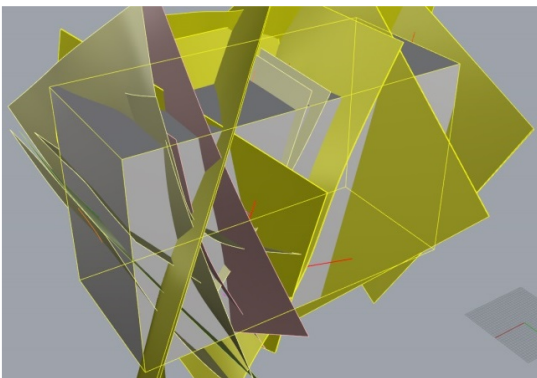
【NURBS曲面によるソリッドモデル作成例】



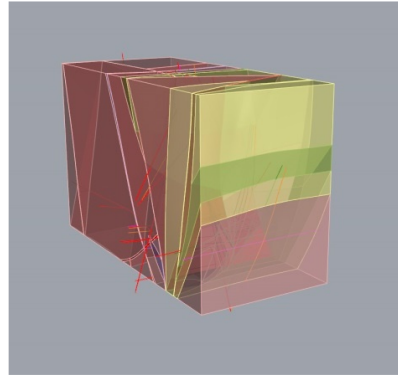
①ラスタ図面を3次元配置し、準3次元図面を作成する



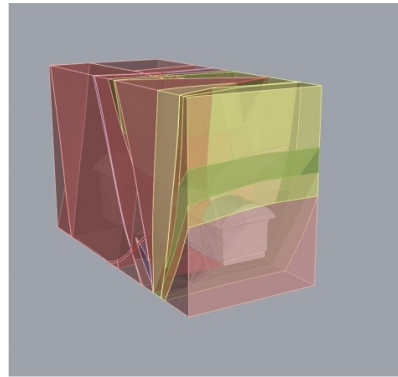
②図中の不連続面をNURBS曲線にてトレースする。この際に交点チェックにより誤差があれば修正する



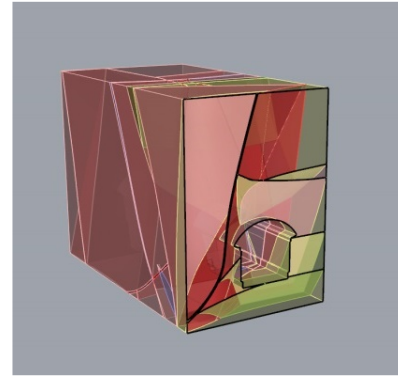
③トレースライン(NURBS曲線)やトレースラインより抽出したポイントデータよりNURBSサーフェスモデルを作成する



④ブール演算により必要範囲のソリッドをサーフェスモデルにより切断し、地質ソリッドモデルを作成する
※構造物のレイアウトが変わることを考慮し、このモデルは別に保存する

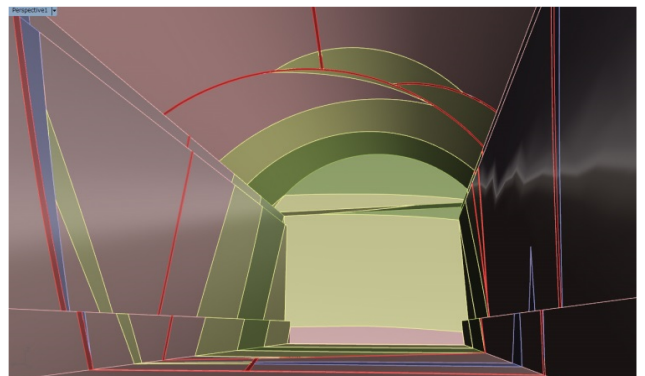


⑤地下空洞のソリッドモデルを用いて地質ソリッドモデルをくり抜く



作業完了後の地層ソリッドモデルの切断面

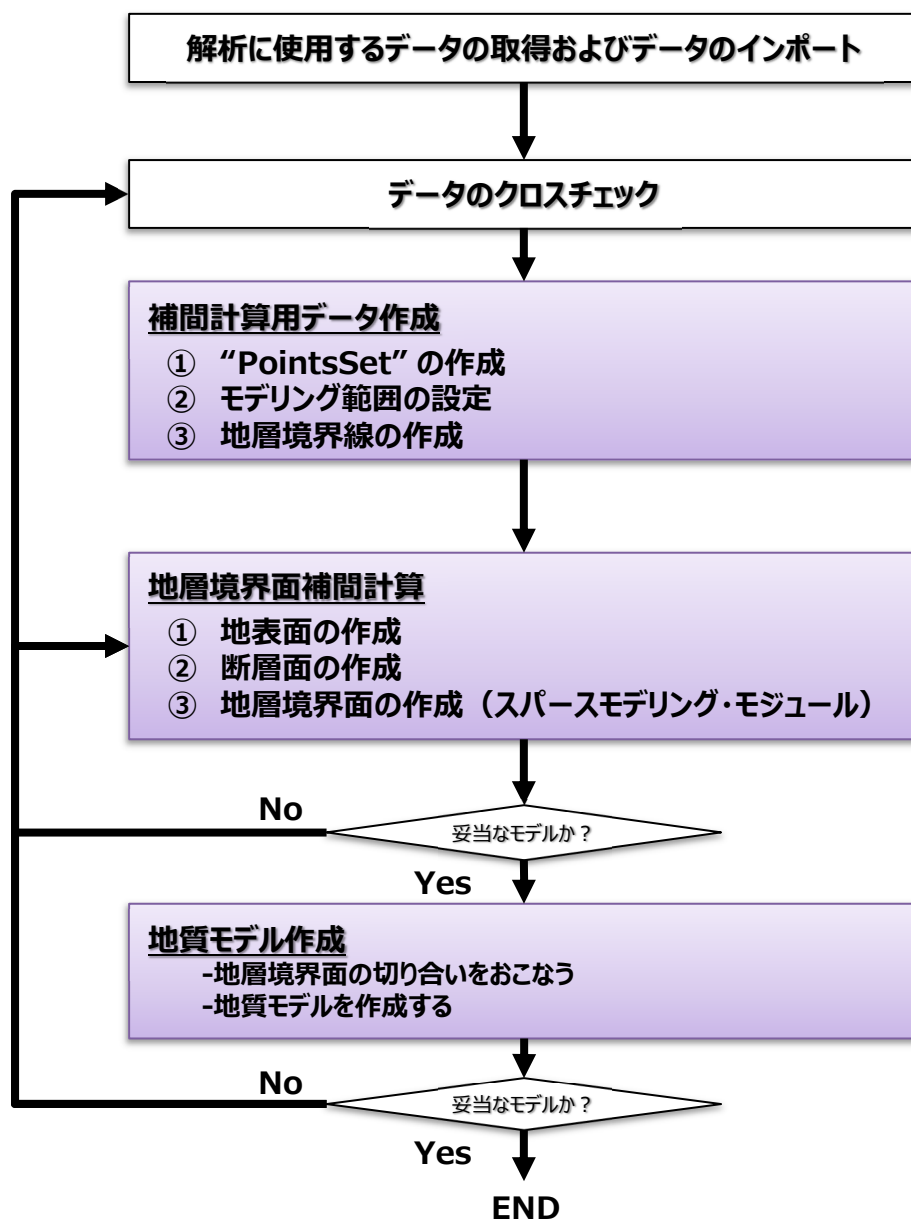
空洞内部よりみたモデルの状況



iii) GOCAD

「GOCAD」による3次元地質モデルの作成

＜解析の流れ＞

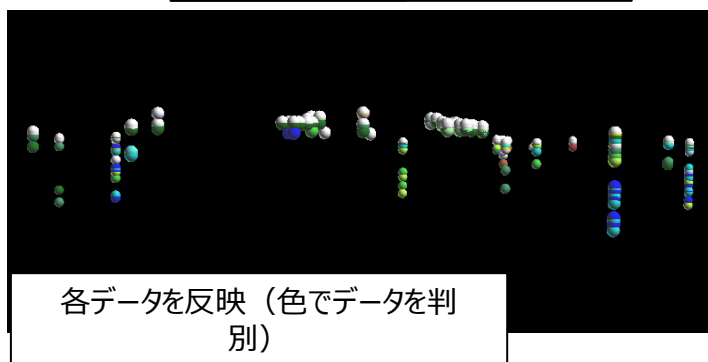


iii) GOCAD

<補間計算用データ作成>

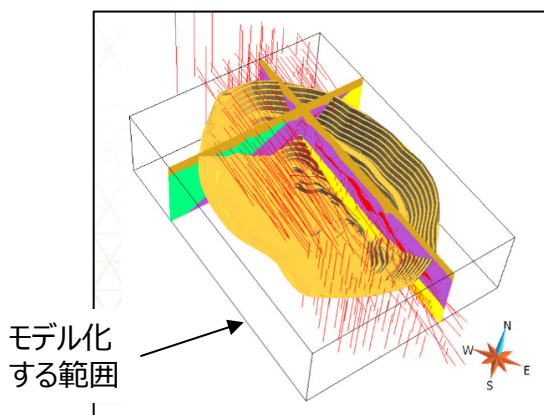
“PointsSet” (点データ) の作成

- DEM (Digital Elevation Model)
- 孔口位置
- 地層境界
- 岩種境界
- 岩級境界
- 風化度境界 等



モデリング範囲の設定

- 「PointsSet」を利用してモデル化する範囲を設定する
- 任意の座標を指定し、範囲を設定することも可能である
- GOCADでは、モデル化する範囲を「Voxet」と呼ぶ



(引用) GOCAD Geotech tutorial, Mira Geoscience.

地層線の作成

- 作成したPointsSetのうち同一のデータ種から成る点同士を繋ぎ、任意で境界線を作成する
- 地質図や断面図を用いて地層境界線を作成する

iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

地層境界面補間計算について

- Discrete Smooth Interpolation (DSI) と呼ばれるアルゴリズムを使用する (下図)

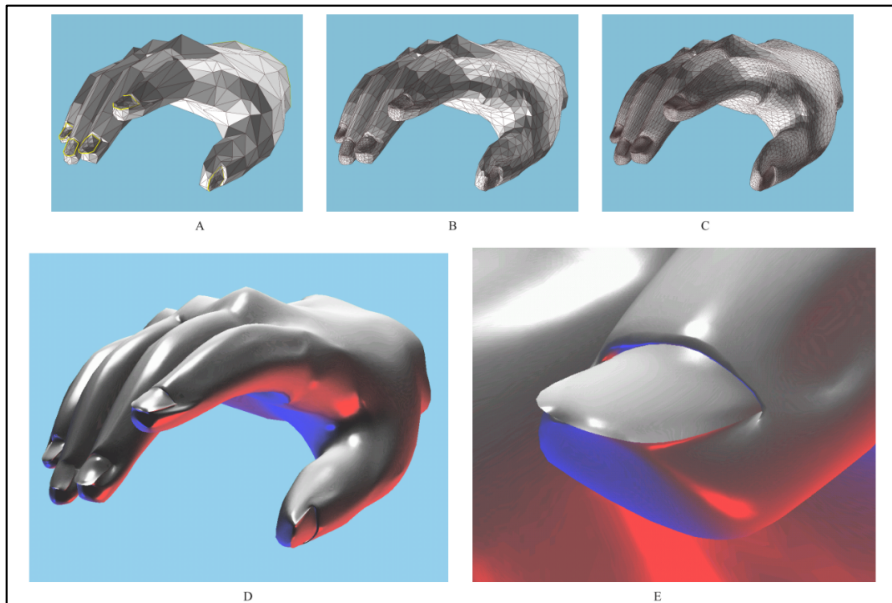
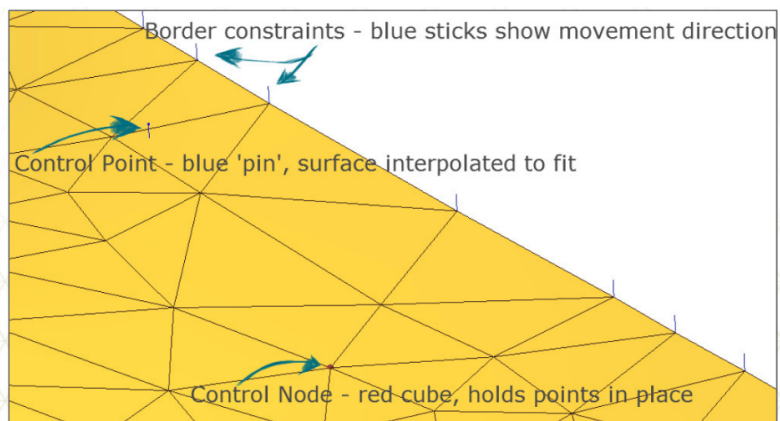


Figure 11: A,B,C,D: Meshes M^0 , M^1 , M^2 and limit surface M^∞ . Infinitely sharp creases are highlighted in yellow in M^0 ; E: Closeup of the thumb nail; F,G,H: A cartoon-like character obtained by smoothing a simple mesh M^0 ; I,J: Data points have been honored to *influte* the nose.

(引用) Lévy, B., & Mallet, J. L. (1999). Discrete smooth interpolation: Constrained discrete fairing for arbitrary meshes. Available on [www at http://www.loria.fr/levy/Papers/1999/s99dsi.pdf](http://www.loria.fr/levy/Papers/1999/s99dsi.pdf).

- 三角形のメッシュを変形し滑らかな面を作成する
- 変形の制御に必要な点を各メッシュの頂点や面の境界に作成することが可能である (下図)



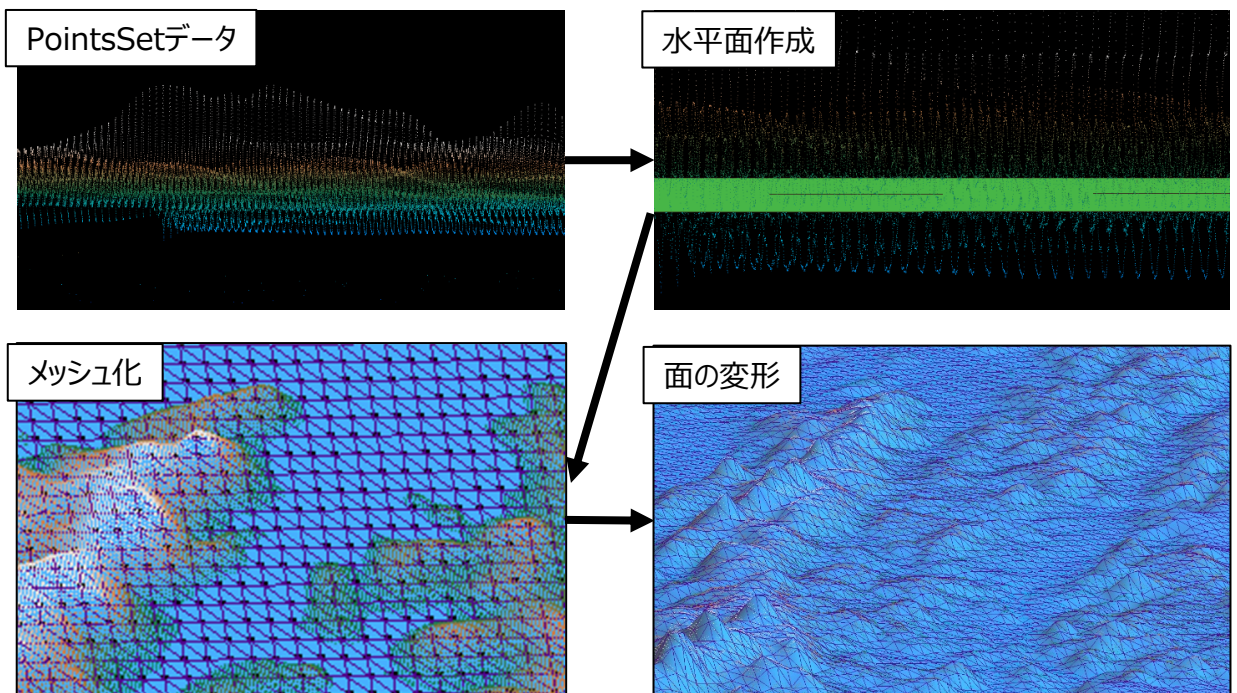
(引用) Advanced Constraints and SPARSE Structural Modelling in GOCAD, Mira Geoscience.

iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

地表面の作成手順

1. 地形図やDEM等から作成したPointsSetの中間の高さに水平面を作成する
2. 作成した面をメッシュ化（細分化）する
3. 点群に合うようにメッシュ化した面を変形させる
4. 作成した地表面が妥当であるか確認し、必要に応じて追加補正を行う

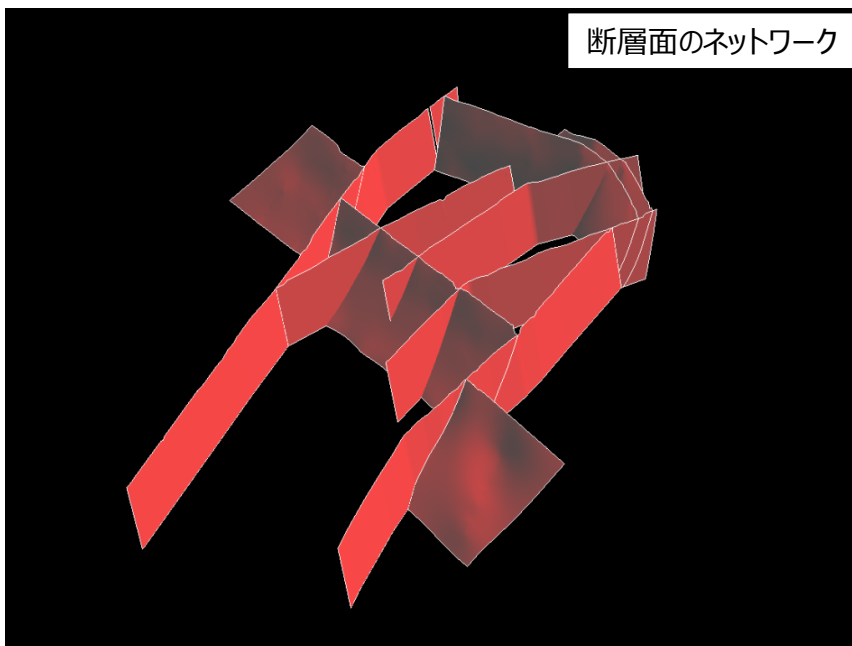


iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

断層面の作成手順

1. 地表面上に断層線を作成する
2. 断層線の直下に領域を指定した断層面となる面を作成する
3. 2で作成した面に角度を与える
4. 断層面に問題がないか確認し、必要に応じて補正する
5. 1～4 繰り返し、断層面のネットワークを作成する



iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

地層境界面の作成について

地層境界面の作成には、「**スパースモデリング・モジュール**」の構造解析ツールを利用する。

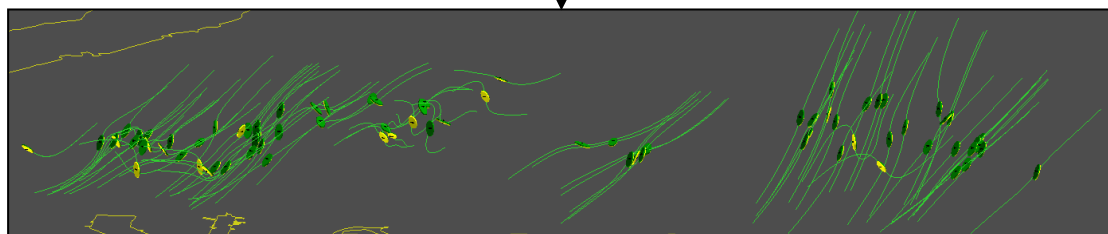
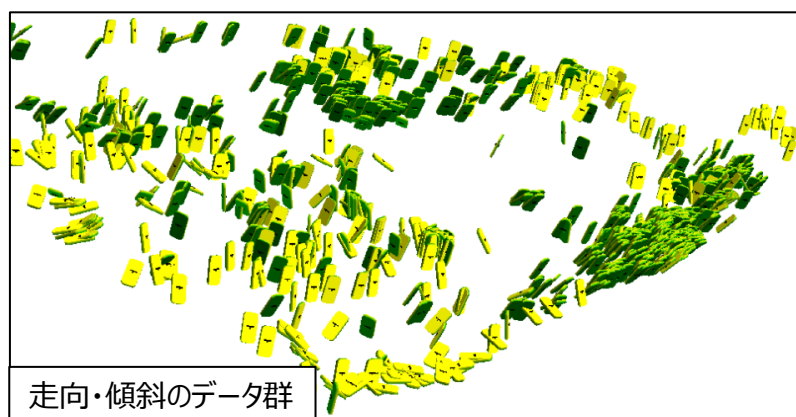
- A) Structural Field Interpolator (SFI)
- B) Creating Surface by PointsSet
- C) Creating Surface by Map Trace and Keel
- D) Creating Surface by Map Trace
- E) Free-form Sparse Model

作成されたどの面においても技術者の判断で必要に応じて追加補正を行う必要がある。

A) Structural Field Interpolator (SFI)

作成手順

1. 走向・傾斜を反映させたデータ群（図中：黄色・緑色）を作成する
2. 反映させた走向・傾斜から想定される地層傾斜の曲線を作成し、大まかな地質構造を可視化させる
3. 可視化した構造線をもとに地層境界線を作成し、境界面を作成する



(引用)
Parametric Surface Modelling in GOCAD, Mira Geoscience.

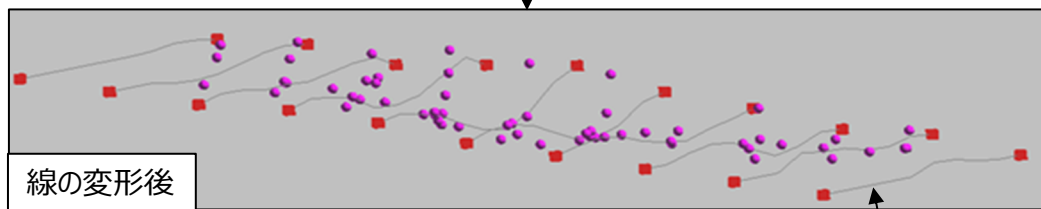
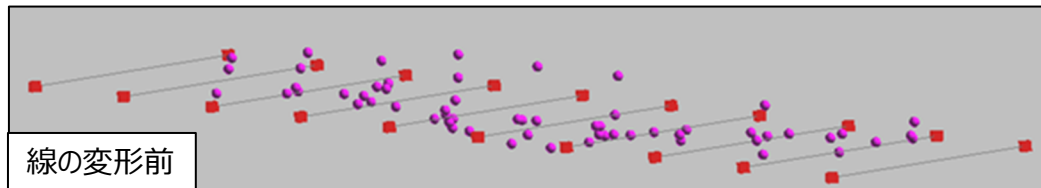
iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

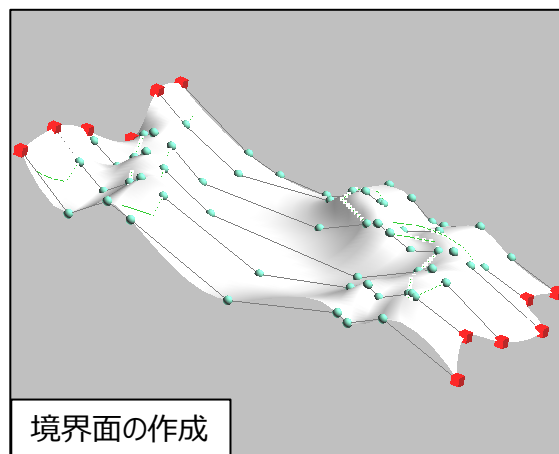
B) Creating Surface by PointsSet

作成手順

1. 作成する境界面のベースとなるPointsSetを表示させる
2. 境界面の枠組となる線 (Gripframe) を作成する
3. PointsSetに沿うように線を変形し、境界面を作成する



Gripframe



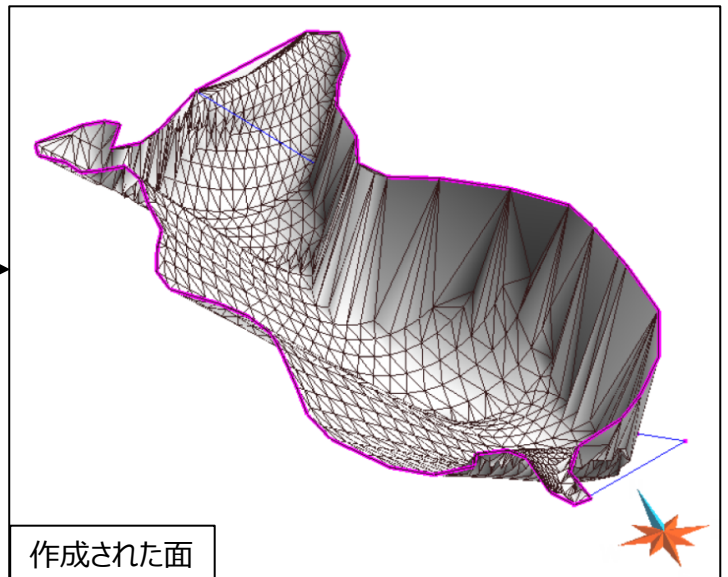
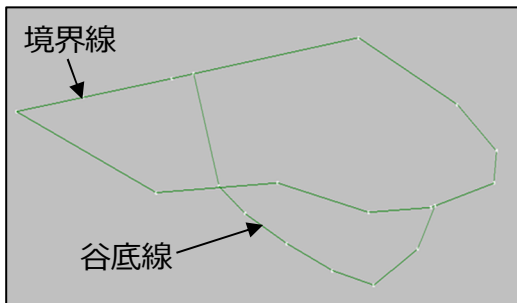
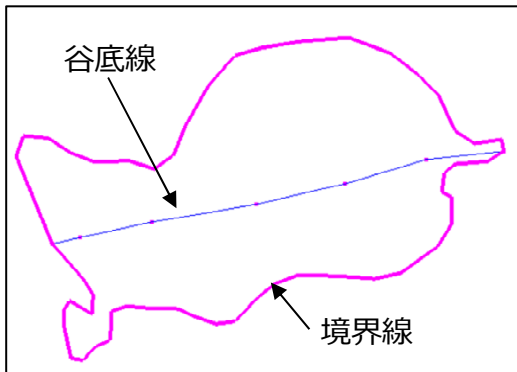
iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

C) Creating Surface by Map Trace and Keel

作成手順

1. 作成する面の境界となる線をトレースする
2. 高さを考慮した谷底線を作成する
3. 境界線と谷底線に合うように面を作成する



(引用) Parametric Surface Modelling in GOCAD, Mira Geoscience.

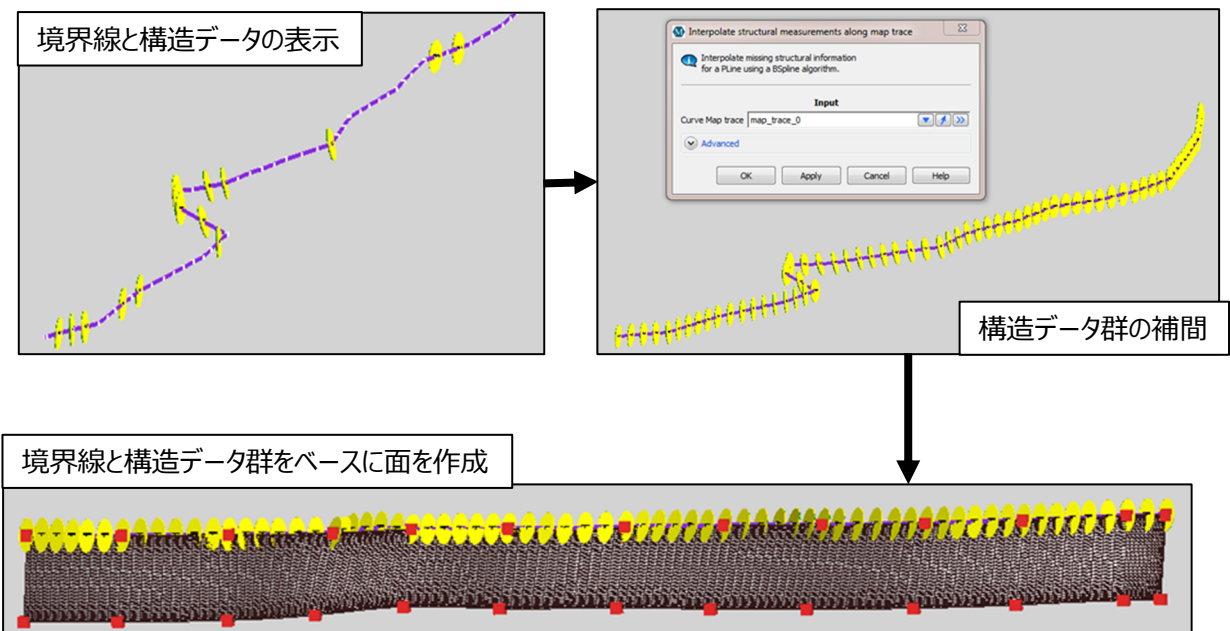
iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

D) Creating Surface by Map Trace

作成手順

1. 境界線とその境界線がもつ構造データを表示させる
2. 表示させた構造データに調和的なデータ群を境界線上に補間する
3. 作成する境界面の範囲を指定し、補間した構造データを基に面を作成する



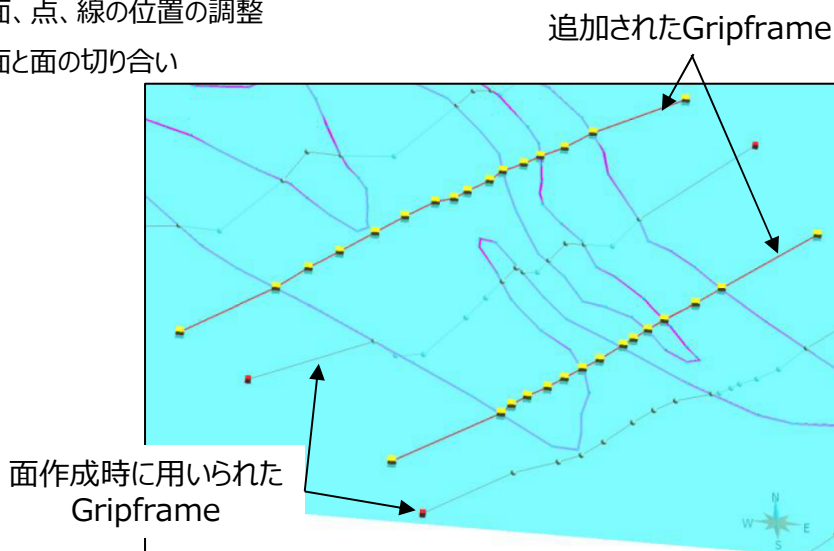
iii) GOCAD

<地層境界面補間計算>

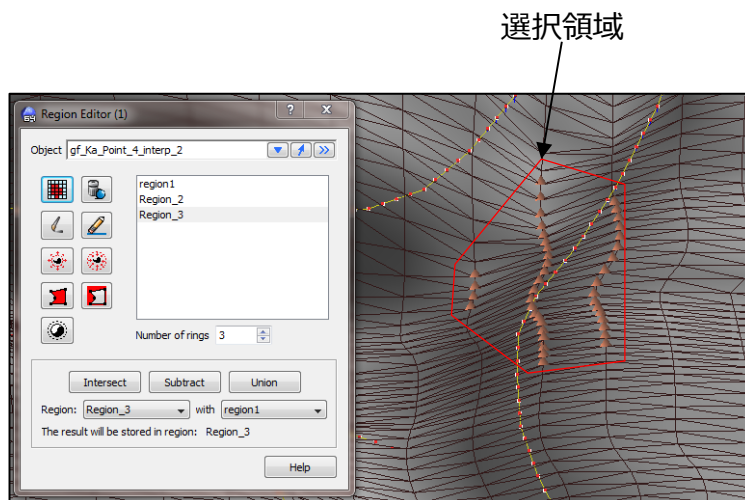
E) Free-form Sparse Models

自由に扱えるツールの例（面補正に使用）

- 任意の場所にGripframeやコントロールポイントを追加
- 任意の面の領域を選択して変形
- メッシュや点を削除
- 面、点、線の位置の調整
- 面と面の切り合い



(引用) Parametric Surface Modelling in GOCAD, Mira Geoscience.

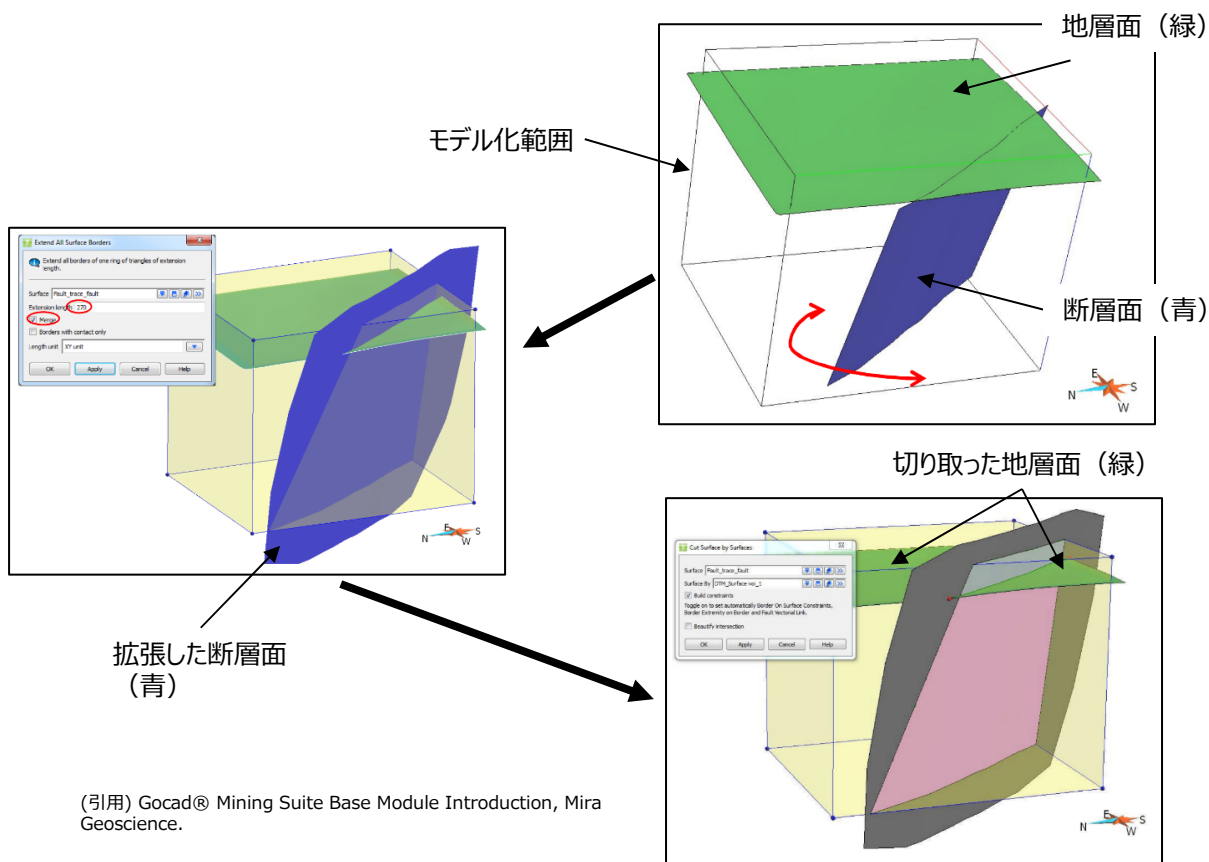


iii) GOCAD

<地質モデル作成>

3次元地質モデル作成のための境界面補正

- A) 地層面が他の地層面やモデル範囲面と交わる時は、両者で切り取り処理を行う
- B) 地層面を断層面で切り取る（下図）
1. 切る面（断層面）をモデル化範囲（Voxel）より大きくなるように拡張する
 2. 切り取る面（地層面）を拡張した断層面で切り取る
 3. 切り取った地層面をスライドさせる



iii) GOCAD

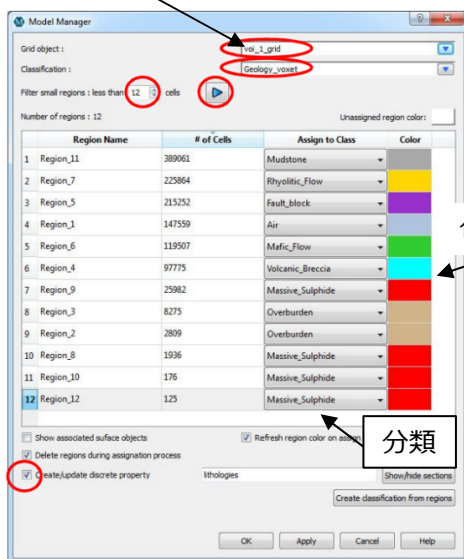
<地質モデル作成>

3次元地質モデルの作成

- 地層領域の設定を行う
 1. モデル化するデータの選択
 2. 各領域の割り当て作業（カテゴリーや色の選択）
 3. 地質モデルの作成

データの選択

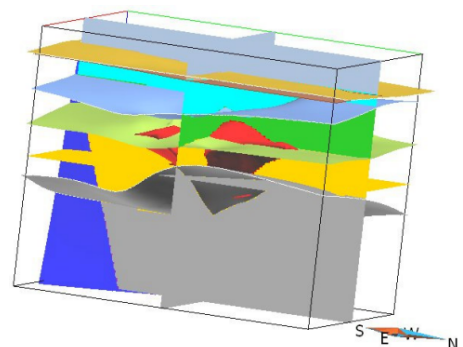
Solid Model 作成の流れ



色選択

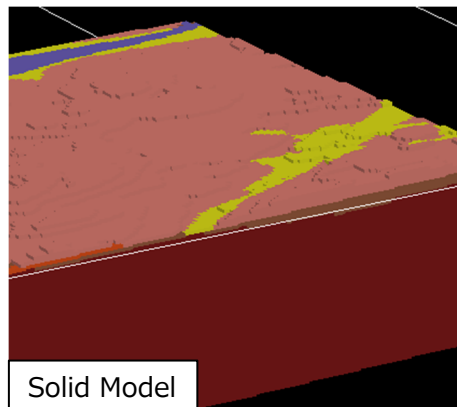
分類

地層領域の設定画面



領域が反映された境界面のモデル図

(引用) Gocad® Mining Suite Base Module Introduction, Mira Geoscience.



Solid Model

iv) MakeJiban

<解析作業の流れ>

- 1.モデル化範囲の決定
- 2.データ素材の選定と作成手法
- 3.地表面のモデル化
- 4.地層境界面のモデル化
- 5.地層領域の設定
- 6.可視化、出力

1.モデル化範囲の決定

モデル化対象地域の座標範囲を決めるにあたり

- ・座標は直角座標、メートル単位とする
- ・座標値原点は、任意座標、測地座標、UTMのいずれでもよい
- ・演算負荷の程度はモデル範囲・密度・地層数が影響するため、PC性能とも合わせて考慮する

2.データ素材の選定と作成手法

地表

- ・国土地理院標高タイル
- ・平面コンター図
- ・LANDXML (TIN) /SIMA/KIH
- ・任意のXYZ座標点

地層

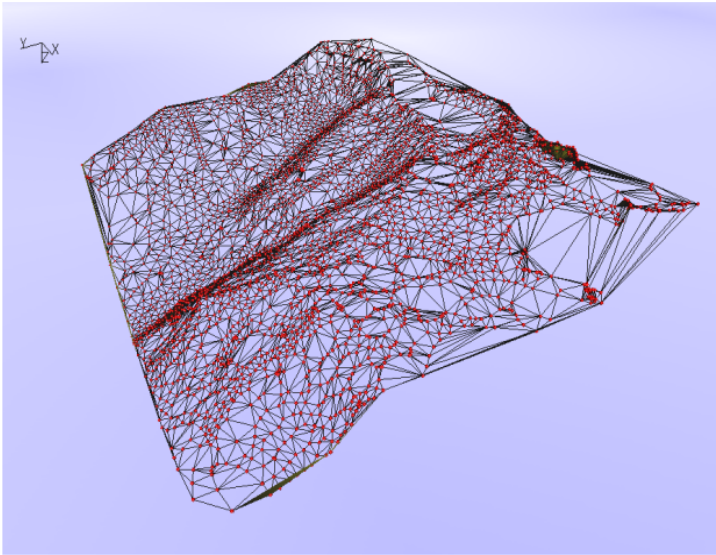
(地下水面)

- ・断面図 (CAD図または画像)
- ・ボーリングデータ
- ・走向傾斜
- ・地表の地質境界 (地質図)

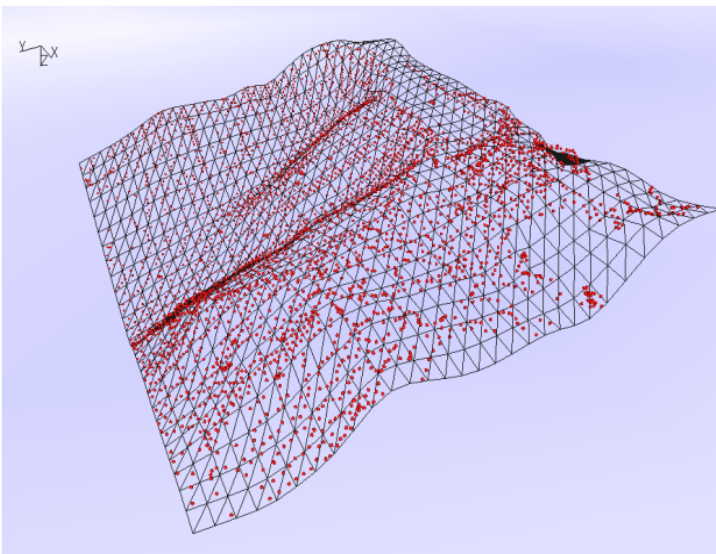
iv) MakeJiban

2. データ素材の選定と作成手法

サーフェスの作成は、入力されたコントロールポイントを接点とした三角形網（TINモデル）を作成するDelaunay法と、曲面推定により接点座標を補間する曲面推定法に大別される。



Delaunay法



曲面推定法
(B-Spline)

Delaunay法は、面を構成する接点が地盤形状の特徴を表すに十分な密度で得られる場合に使用する。既知の構成点を直線的に結ぶため形状の再現性が高い。

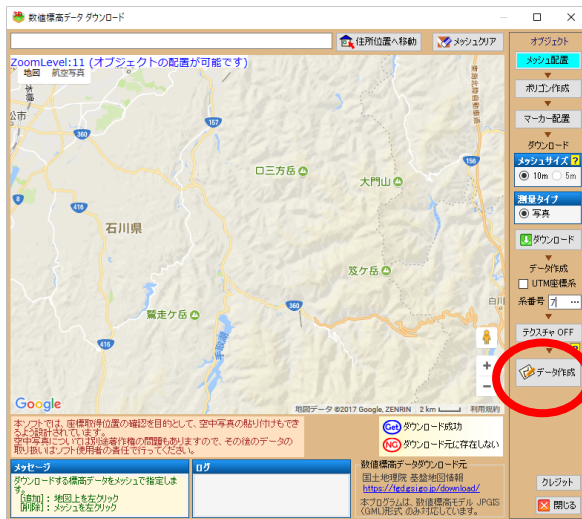
一方、曲面推定法はコントロールポイントの密度が比較的粗い場合にその間隙を埋める目的で使われ、また、走向傾斜を反映させる場合には必ず用いる。

iv) MakeJiban

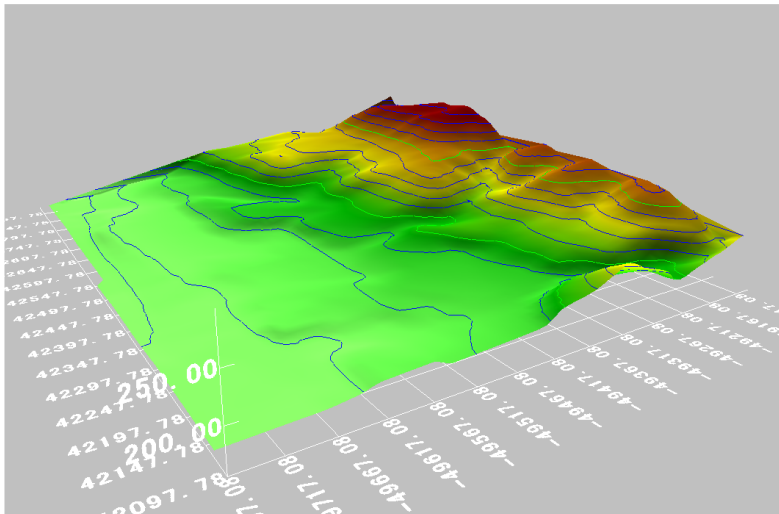
3.地表面のモデル化

地表面モデルは、国土地理院の5m・10mメッシュ標高タイル、LPデータ/写真測量のXYZ点、CAD等高線図等の高密度のデータ入手が容易なことから、これらを用いてDelaunay法を適用し三角形網を作成するが多い。

※ 国土地理院標高メッシュを取得して地表面サーフェスを作成した事例



Godai3次元Reader

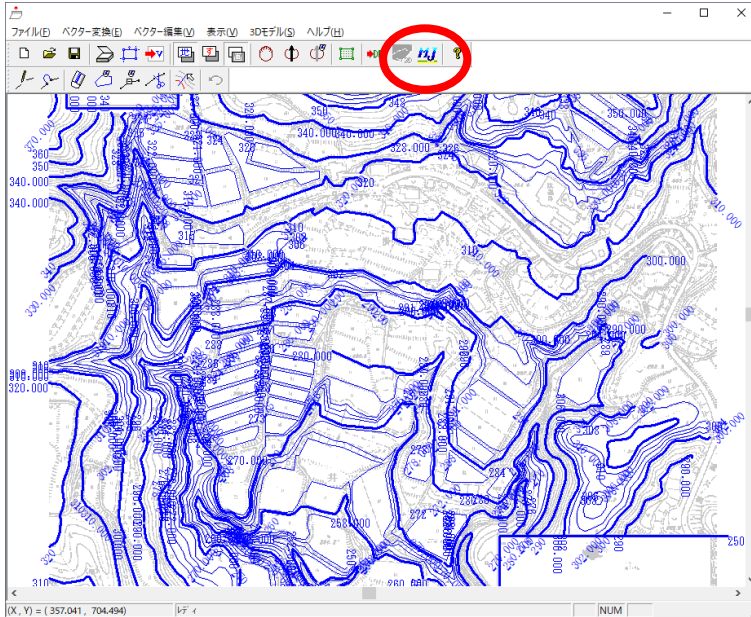


Delaunay法により地表面TINモデルを作成

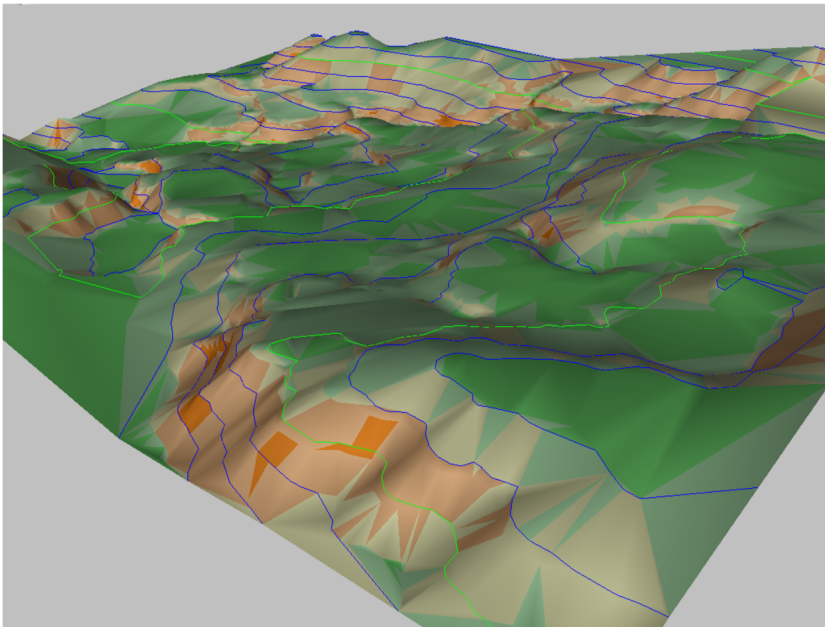
iv) MakeJiban

3.地表面のモデル化

等高線CADデータからDelaunay法により地表面TINモデルを作成した事例



ContTo3次元



Delaunay法により地表面TINモデルを作成

iv) MakeJiban

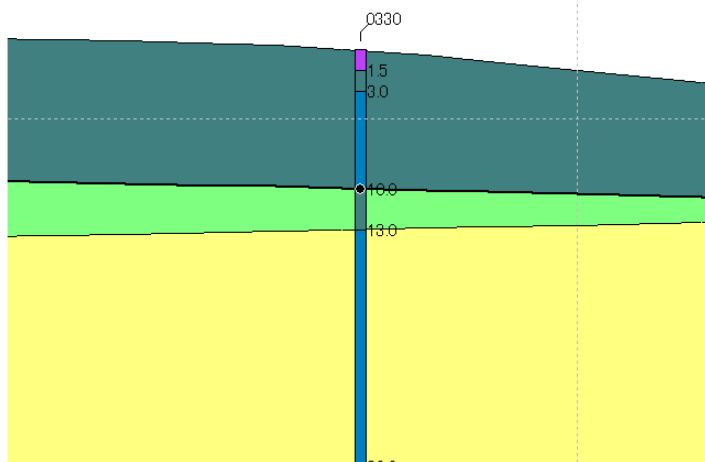
4.地層境界面のモデル化

地層境界面を作成するための素材は、ボーリング、露頭、地質断面図等であり、データの密度が粗い。

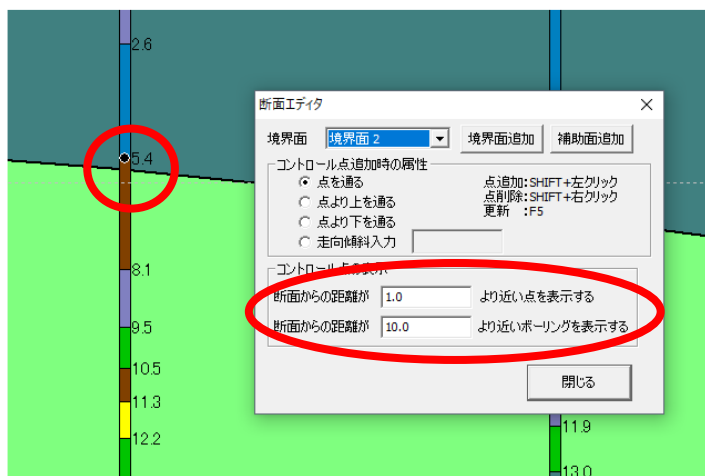
地層境界面は、これらの情報から曲面推定を行い、構成点を補間させて作成する場合が多い。作成される面形状は曲面推定アルゴリズムとパラメータに依存するため、推定結果が妥当であるかを確認し、必要に応じてコントロールポイントを追加補正を行う。

断層や急激に勾配が変化する箇所、レンズ形、オーバーバングは、複数の面を合成することで表現する。

ボーリングから地層境界面を作成する場合、垂直断面に投影されるボーリングの地層境界点をマウスクリックすることにより、コントロールポイントを追加することができる。



断面図上に投影されるボーリングは、断面の線形から近傍のボーリングを全て表示するため、ジャストポイントではないことがあり、留意すること。



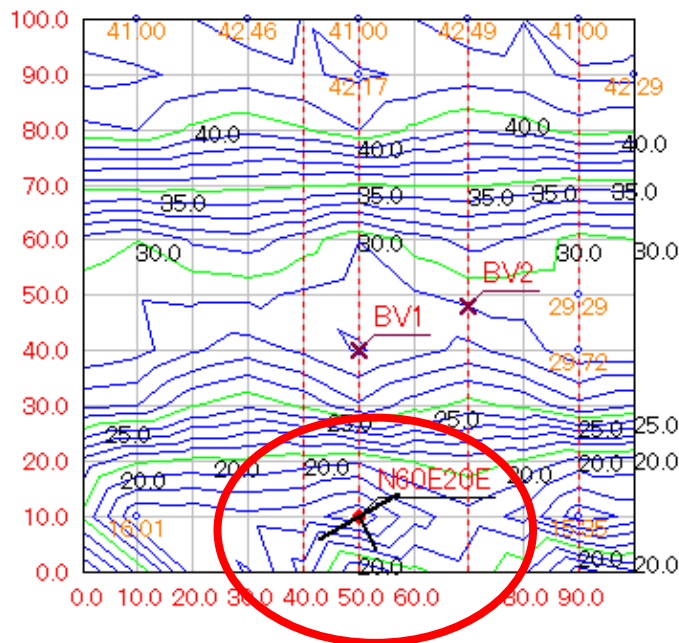
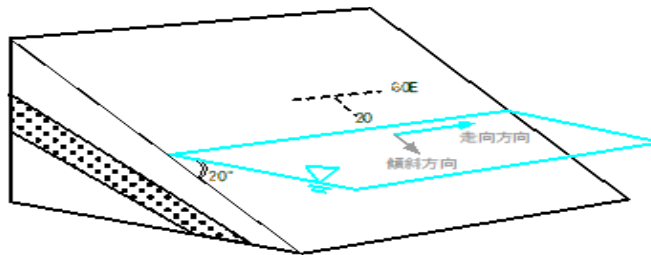
iv) MakeJiban

4.地層境界面のモデル化

地層境界面に走向傾斜情報を反映するには、コントロールポイントの制約条件に走向傾斜を与える。

傾斜方位

	X	Y	走向傾斜	▲
1	47.95848	100.0	N60E20E	
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				



iv) MakeJiban

5. 地層領域の設定

地層境界面Sによって仕切られる上下の空間をそれぞれ

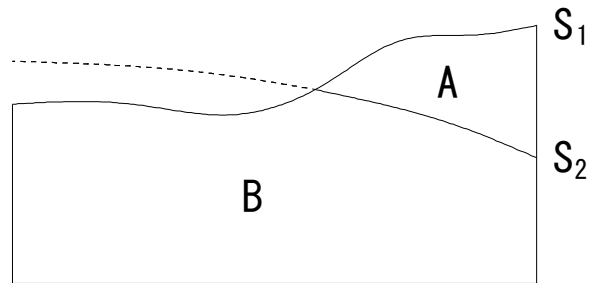
- ・Sの上に位置する領域を「S+」
- ・Sの下に位置する領域を「S-」

と表すなら、図に示す地層A Bは

- ・地層 A = S1- かつ S2+
- ・地層 B = S1- かつ S2-

と定義できる

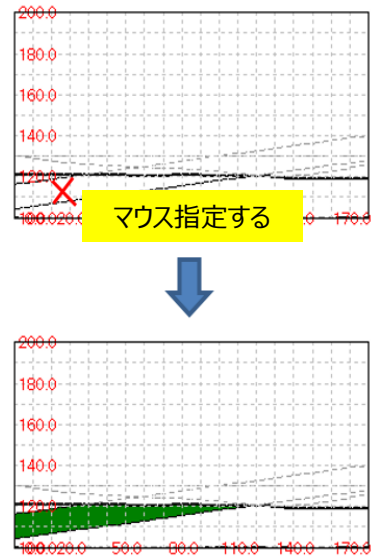
※地表面はS+を持たない地層境界ともいえる



前述の S+を“上”、S- を“下” として、地層領域を設定する

地層を定義するための地層境界が複数必要な場合は、条件式を組み合わせる

	地層名	色	地表面	湛水面	境界面 1	境界面 2	すべり面
1	崩土		下				上
2	泥岩 1		下		上	上	
3	凝灰岩		下		上	下	
4	泥岩 2		下		下	下	
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

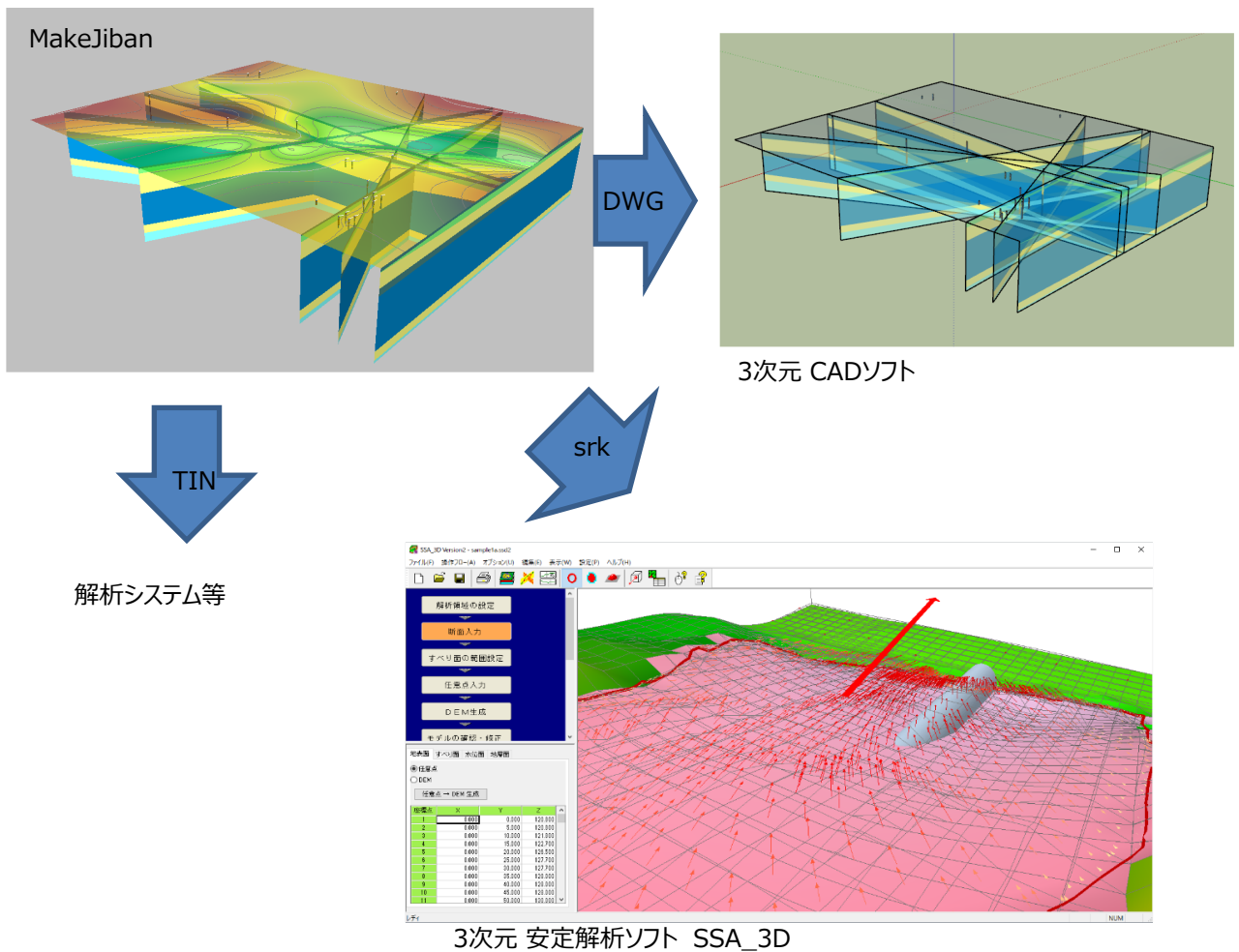


なお、この設定を簡略に行うため、断面図上をマウス指定することで地層定義を行うGUIが別途用意されている

iv) MakeJiban

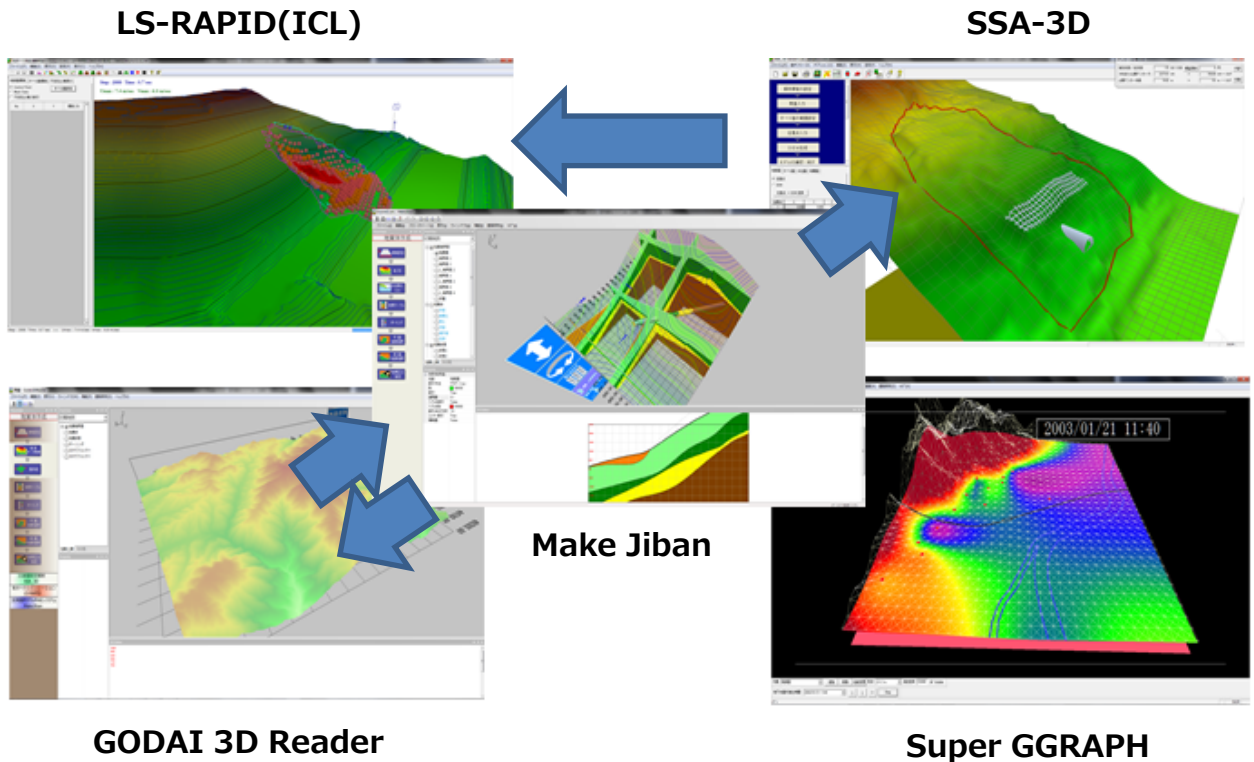
6.可視化、出力

サーフェスモデル、パネルダイアグラム、ボーリング等の要素を可視化する
可視化モデルはDWGを経由して3次元CADに渡すことができる
TINデータ出力によりサーフェスモデルを解析システムへ渡すことができる



iv) MakeJiban

7.地盤モデル作成、安定解析のデータ互換



データ読み込み機能あり
一般的なデータとの互換一覧

	3次元メッシュ自動生成	柱状体モデル	ボクセルモデル	線形縦横断面図	横断面図	SIMA	LANDXML	XVL	3次元 - dxf / dwg	google earth	Universal 3次元	CIMビューワ	基盤地図情報	Csv / txt	その他
GODAI3次元Reader	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	○	×
Make Jiban	×	×	△	×	○	○	△	×	○	×	×	×	○	○	○
SSA_3次元	×	×	×	×	○	○	△	×	○	×	×	×	○	○	○
LS-RAPID(ICL)	×	×	×	×	○	○	△	×	○	×	×	×	×	○	○

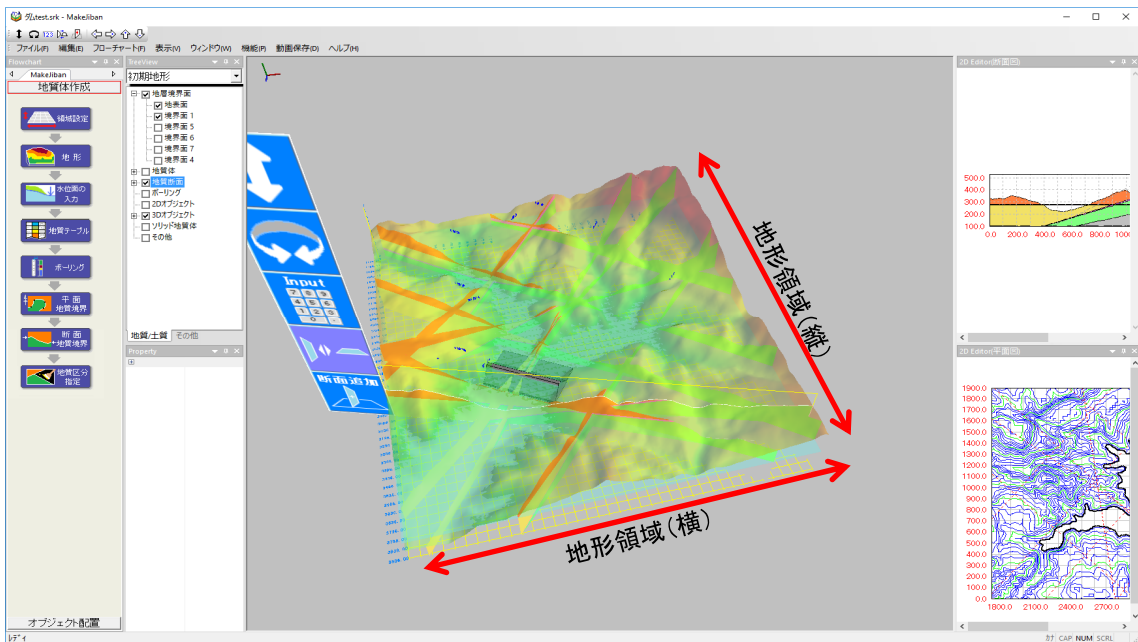
・安定計算の実施においては、地形・水位の改変のトライアルを行うことが多く、計画地形の読み込み・出力機能が必要な場合がある。
 ・対策工を考えたとき、抑制工の場合の土量、抑止工の場合の概算工事費等の算出機能の利用価値は高い。

※2018年2月時点
 ※○は入出力どちらか一方でも○とした。
 ※その他は、ボーリング、土質定数、地下水観測データ、概算工事等のいずれか
 ※△は次バージョンにて計画予定のもの

iv) MakeJiban

8.3次元地盤モデル作成実績例

サンプル	地形領域		メッシュ サイズ (m)	地表面点 数	地層数 (地表面 含む)	ボーリング (本)	ストレス	備考
	縦 (m)	横 (m)						
1	9900	16200	500	1200000	8	3000	地層境界面の計算に時間がかかる。 計算が完了すれば表示は早い	50MB
2	100	300	5.0	177	5	43	負荷なく使用できる	1.5MB
3	9200	15500	500	50000	1	430	読み込みに少し時間がかかるが、負 荷なく使用できる。	3.7MB
4	1900	2160	50	10400	6	0	読み込みに少々時間がかかるが 負荷なく使用できる	1.0MB
5	1000	1000	50	10	12	10	地表面はメッシュDEM 非常に軽い。構造物CADあり	5.0MB

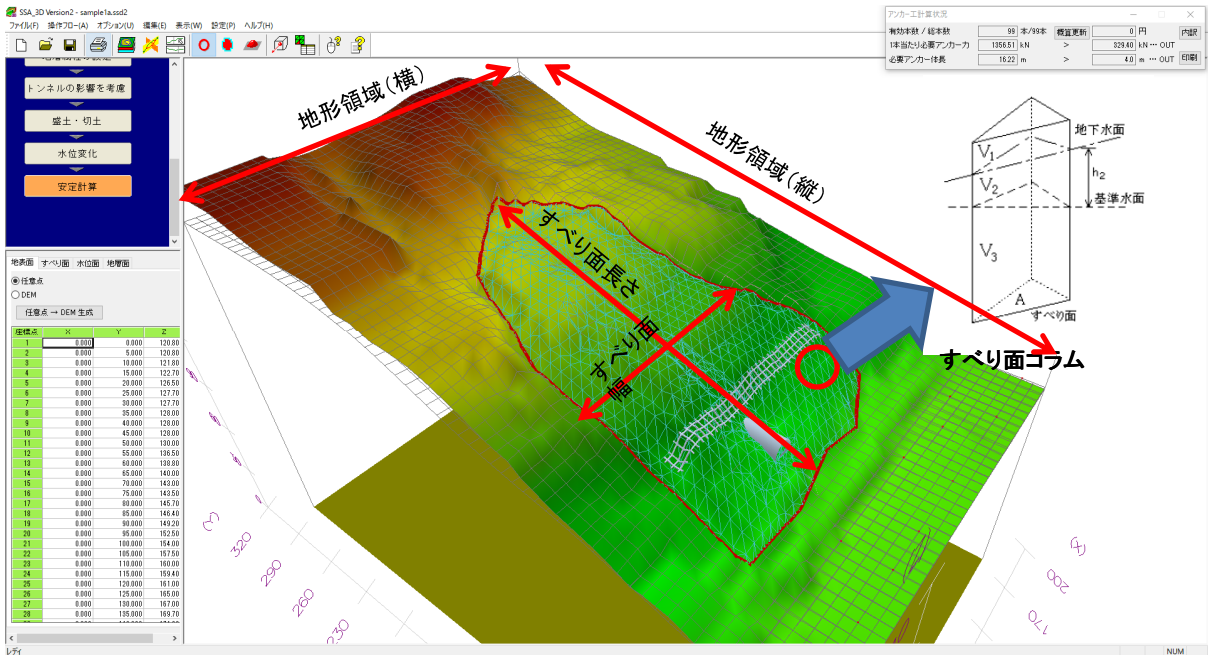


- ・検証は、推奨スペックPCを使用。
- ・ストレスは、データ量に比例する傾向がある。
- ・データ量は、入力点、ボーリング本数、地層数に影響を受ける。
- ・作成実績の上限は、
 - 1) 縦1000メッシュ×横1000メッシュ
: 1000000メッシュ の場合 1層
 - 2) 縦100メッシュ×横100メッシュ
: 10000メッシュ の場合 10層
 - 3) 縦50メッシュ×横50メッシュ
: 2500メッシュ の場合 20層程度

iv) MakeJiban

9.3次元斜面安定計算実績例

サンプル	地形領域		メッシュ サイズ (m)	メッシュ 数	すべり面			すべり面 コラム数	地層 数	ボーリン グ (本)	ストレス	備考
	縦 (m)	横 (m)			長さ (m)	幅 (m)	深さ (m)					
1	400	400	2.0	40000	170	190	40	22800	2層	0	負荷なく使用できる	アンカー工計算あり 65MB
2	300	400	2.0	30000	220	180	50	1100	1層	10	計算が重い。	トンネルあり 73MB
3	210	150	1.5	14000	140	50	25	339	1層	0	負荷なく使用できる	14MB
4	500	600	5.0	12000	300	300	50	5200	1層	49	負荷なく使用できる	アンカー工計算あり 9MB
5	200	270	1.5	54000	140	160	18	2300	1層	0	計算が重い。	トンネルあり アンカー工計算あり 132MB

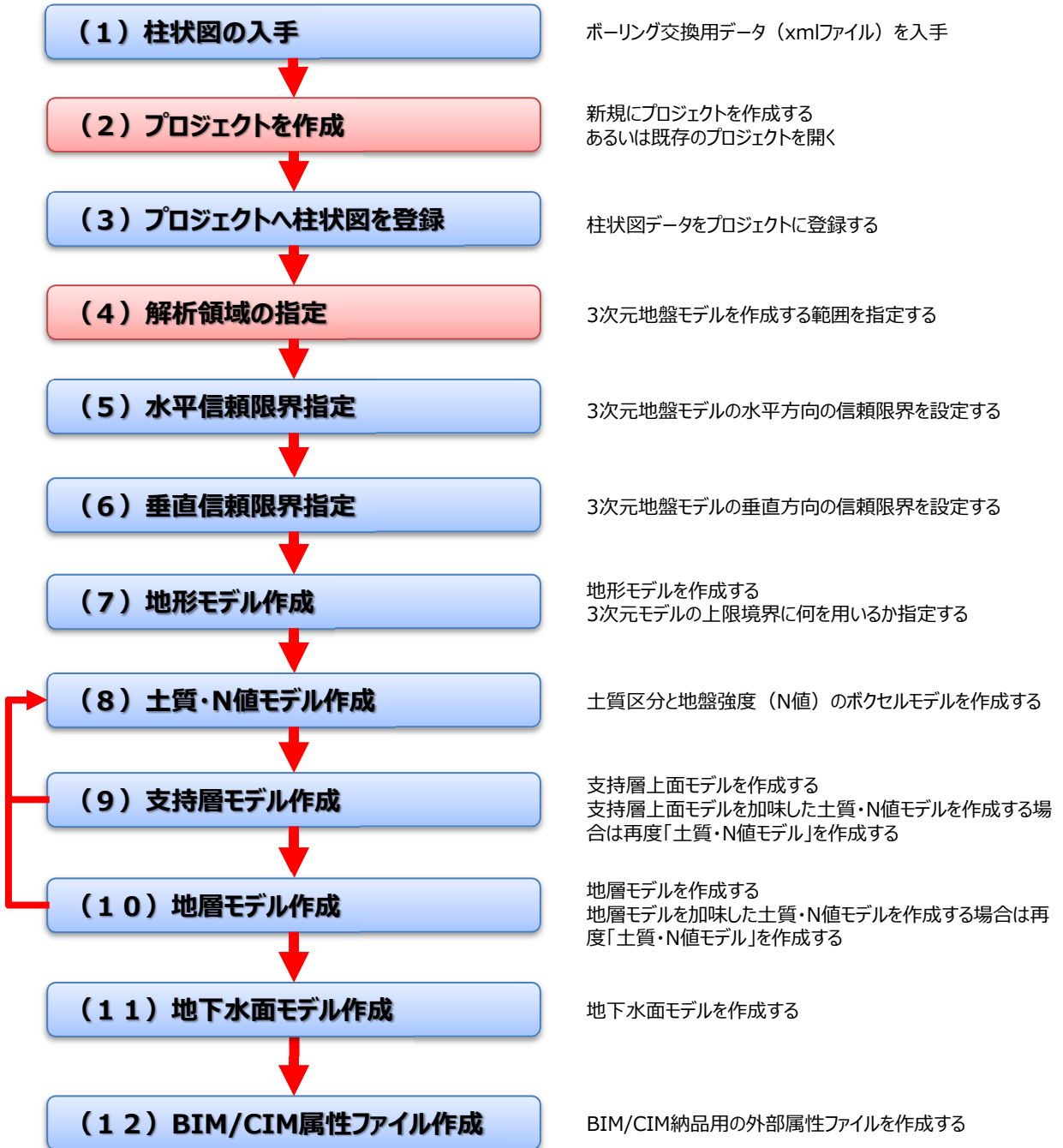


- ・検証は、推奨スペックPCを使用。
- ・ストレスは、データ量に比例する傾向がある。
- ・データ量は、メッシュ数、コラム数、トンネル、アンカーに影響を受ける。

・実績で多いのは
地形領域 : 200 ~ 300m
メッシュサイズ : 1.0~10.0m
地層 : 2~5層

v) OCTAS Drafter

◆OCTAS Drafterを使用する流れの例



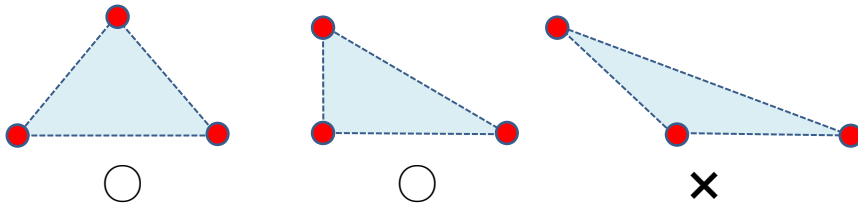
v) OCTAS Drafter

土質/N値モデル作成の目安

土質/N値ボクセルモデルを作成する目安は次のようになります。本モデルはあくまでも地質構造の推定の参考にするものであり、地質構造の推定には詳細な検討が必要になる。

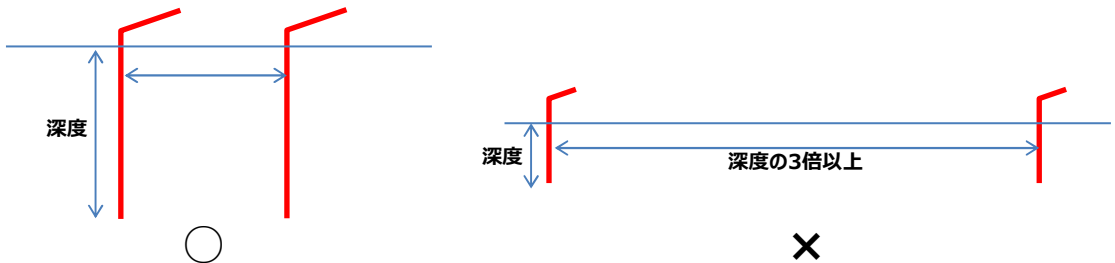
①ボーリング本数と配置

- ・3本以上必要（3本以上ないと地層の真の傾斜を把握できない）
- ・近接する3本を結ぶ線分で作る三角形が、鋭角/直角三角形となる



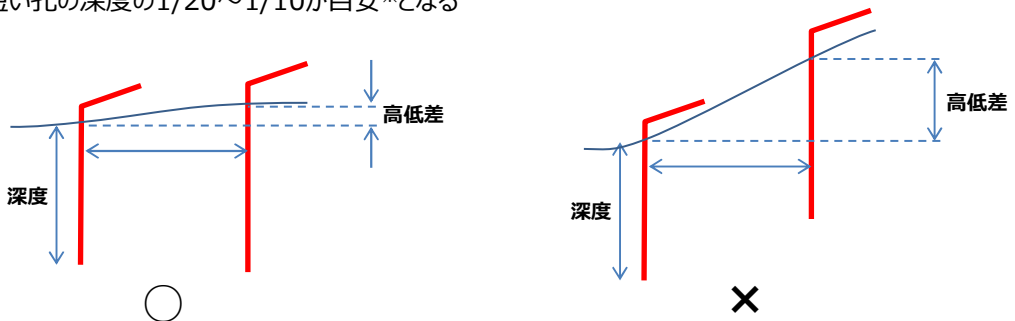
②隣接するボーリング間隔

- ・平均的なボーリング深度の3倍以内※が目安となる



③隣接するボーリング孔口の高低差

- ・概ね短い孔の深度の1/20～1/10が目安※となる



※この距離はボーリング調査自体の間隔・数量の基準にはならない
ボーリング間隔・数量は各機関の調査仕様を参照すること

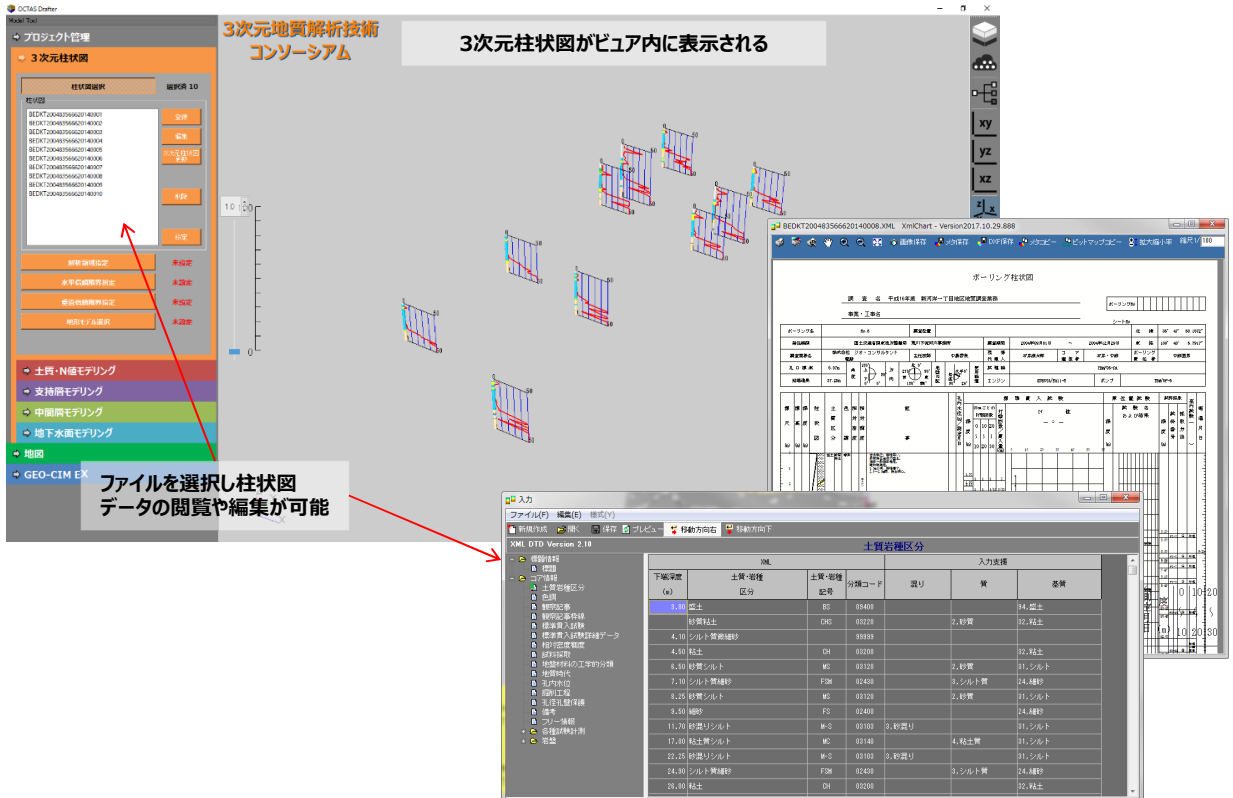
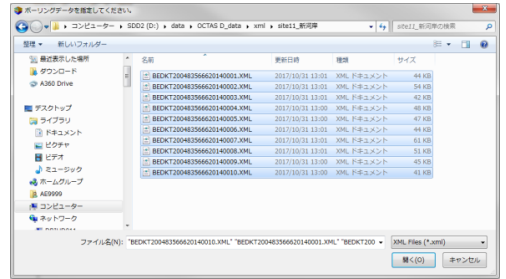
v) OCTAS Drafter

◆ダウンロードした柱状図をプロジェクトに登録する



「柱状図選択」ボタンを押す

「登録」ボタンを押して対象のxmlファイルを選択する



3次元地質解析技術
コンソリアム

3次元柱状図がビュー内に表示される

ファイルを選択し柱状図データの閲覧や編集が可能

土質岩種区分

下層番号	土質・岩種区分	記号	分類コード	選り	集	高層
3.00	粘土	RC	03400			14. 粘土
4.00	粘質粘土	CHC	03200	3. 砂質		12. 粘土
4.10	シルト質粘質砂		03000			
4.30	粘土	CH	03200			12. 粘土
6.30	砂質シルト	MC	03120	3. 砂質		11. シルト
7.10	シルト質粘砂	FMC	02400	3. シルト質		24. 粘砂
8.20	砂質シルト	MC	03120	3. 砂質		11. シルト
9.30	粘砂	FC	02400			24. 粘砂
11.70	砂質シルト	MC	03100	3. 砂質		11. シルト
17.30	粘土質シルト	MC	03140			11. シルト
21.20	砂質シルト	MC	03100	3. 砂質		11. シルト
23.00	シルト質粘砂	FMC	02400	3. シルト質		24. 粘砂
25.30	粘土	CH	03200			12. 粘土

v) OCTAS Drafter

(4) 解析領域の指定

◆3次元モデルを作成する範囲を指定する

「解析領域指定」ボタンを押して平面(xy)・深度(z)の範囲、分割数、解像度を指定する

「解析領域指定」ボタンを押すとビューはxyモードに変わる。「解析領域指定」ボタンを解除すると元の状態のビューに戻る

赤枠が解析領域
マウスで大きさや位置を変えることができる

解析領域指定	X	Y	Z
最小[m]	-14860	-22780	-28
最大[m]	-14820	-22480	18
分割数	20	66	61
解像度[m]	0		1



指定が完了したら「適用」ボタンを押して確定する

解析領域指定	X	Y	Z
最小[m]	-14860	-22780	-28
最大[m]	-14820	-22480	18
分割数	20	66	51
解像度[m]	0		1



解析領域を指定すると「設定済」と表示される

柱状図選択	選択済 10
解析領域指定	設定済
水平信頼限界指定	
垂直信頼限界指定	
地形モデル選択	未設定

【注意】

分割数と解像度には下記の制限がある

XY分割数：X分割数 × Y分割数 = 10,000以下

Z分割数：100以下

v) OCTAS Drafter

(5) 水平信頼限界指定

◆3次元地盤モデルの水平方向の信頼限界を指定する。水平信頼限界は、CADで作成したポリゴンのDXFファイルを読み込むか、地図上で領域指定する*。水平信頼限界を指定しない場合は「指定なし」をチェックする

OCTAS Drafter

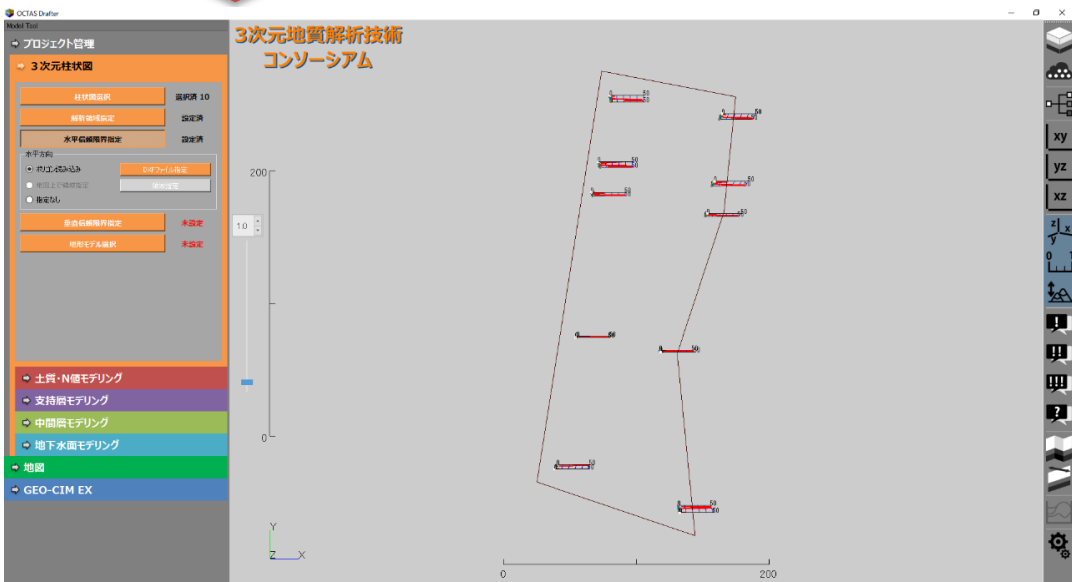
※「地図上で領域指定」のオプションはまだ使用できない



「水平信頼限界指定」ボタンを押して、「ポリゴン読み込み」「地図上で領域指定」「指定なし」のいずれかを選択する



ポリゴンを読み込んだ場合

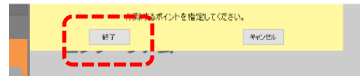
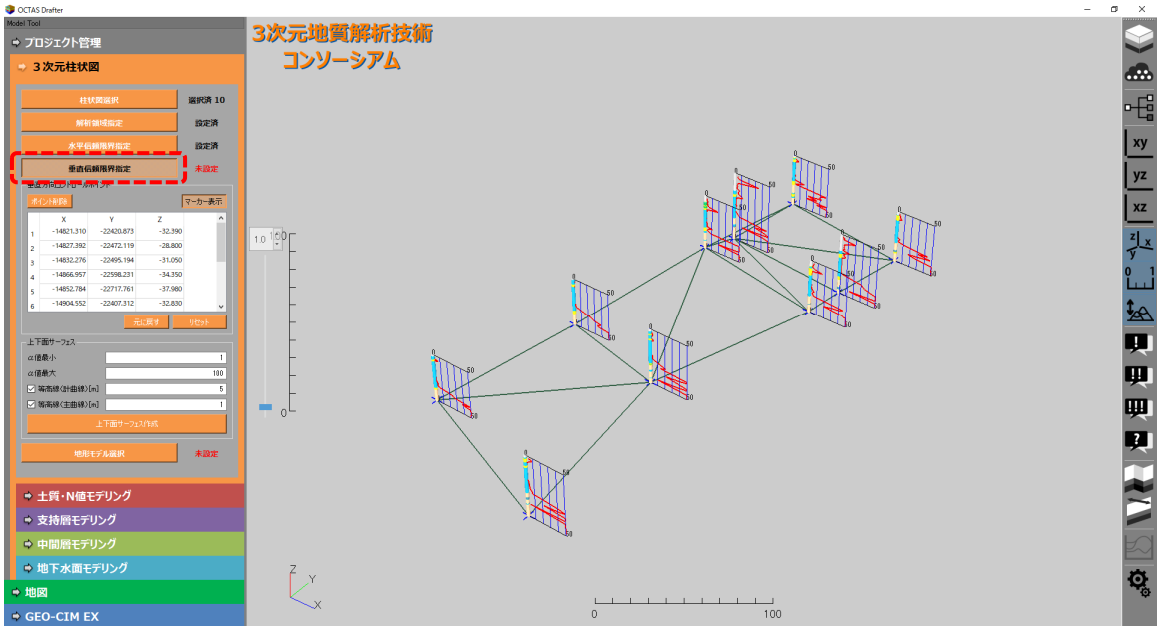


v) OCTAS Drafter

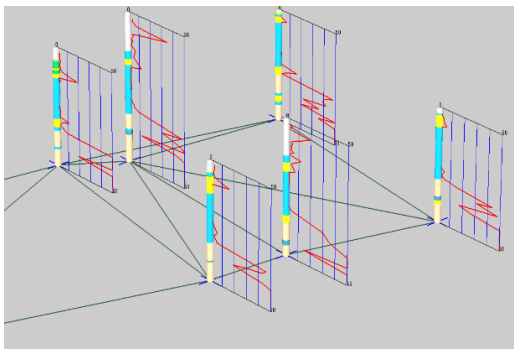
(6) 垂直信頼限界指定

◆ボーリングの上限・下限を垂直方向の信頼限界として、上限・下限（上面・下面）のサーフェスマデルを作成する

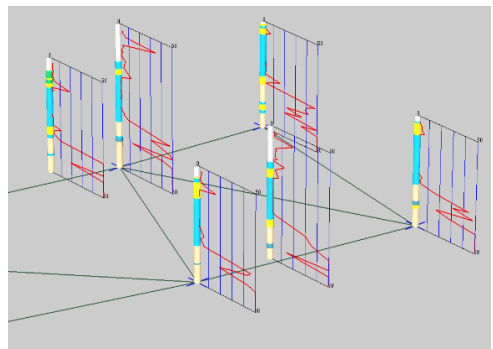
「垂直信頼限界指定」ボタンを押すと、ビューにボーリングの下限を結ぶ対比線が表示される。対比線のコントロールポイントは指定して削除できる。



コントロールポイントを削除する場合は、「ポイント削除」ボタンを押し、該当するポイント（対比線の結線部）をマウス左クリックで指定し、ビュー左上の「終了」ボタンを押す

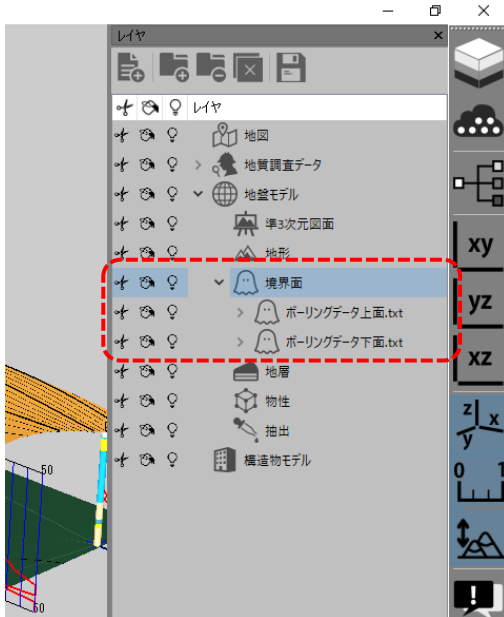
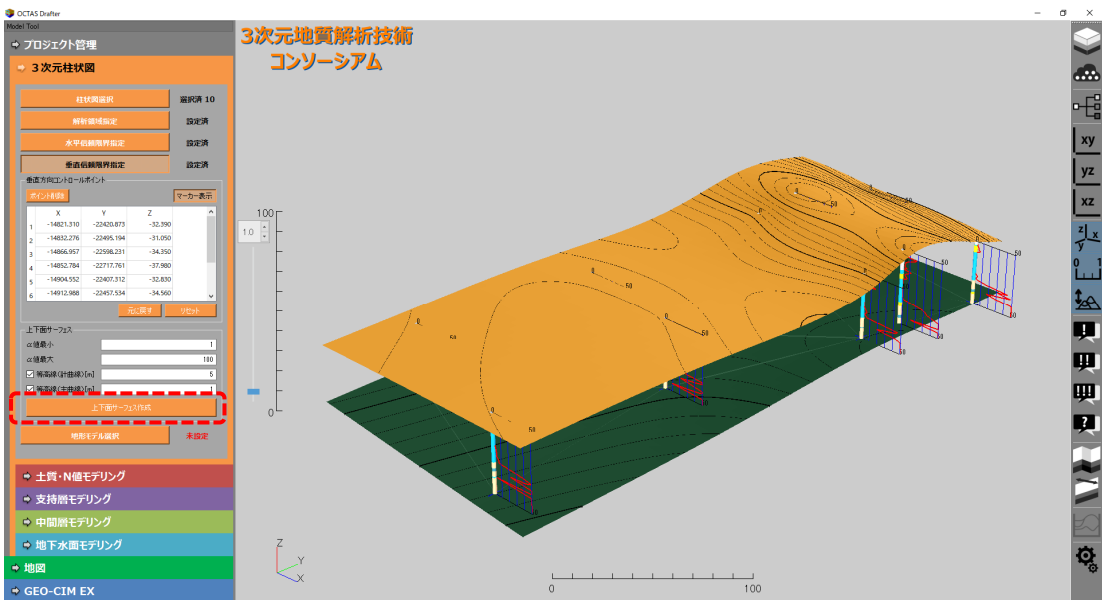


削除後



v) OCTAS Drafter

◆「上下面サーフェス作成」ボタンを押すと上面・下面のサーフェスモデルがビューに表示される。

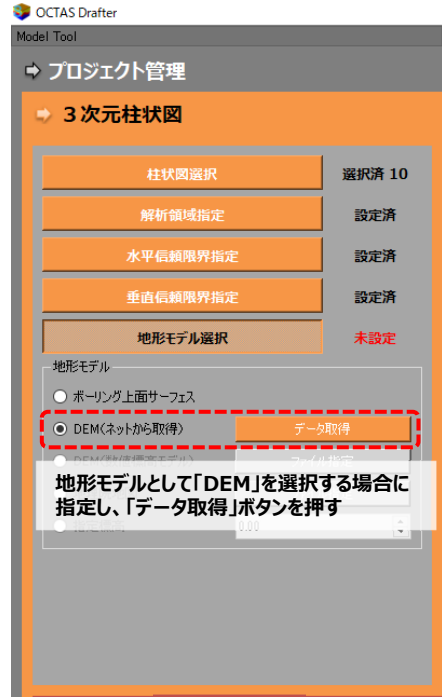
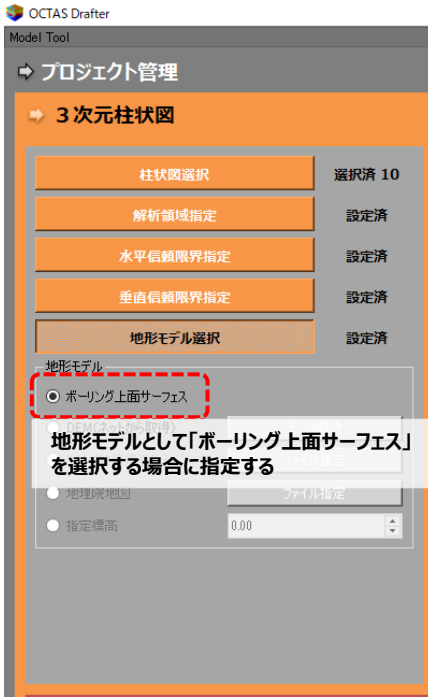


サーフェスモデルができるとレイヤマネージャに該当レイヤが加わる

v) OCTAS Drafter

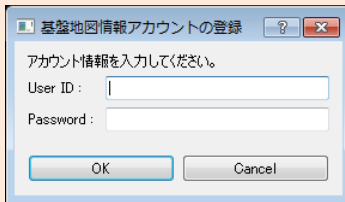
(7) 地形モデル作成

◆地形モデルを作成します。地形モデルは3次元地盤モデルの上境界サーフェスとして使用します

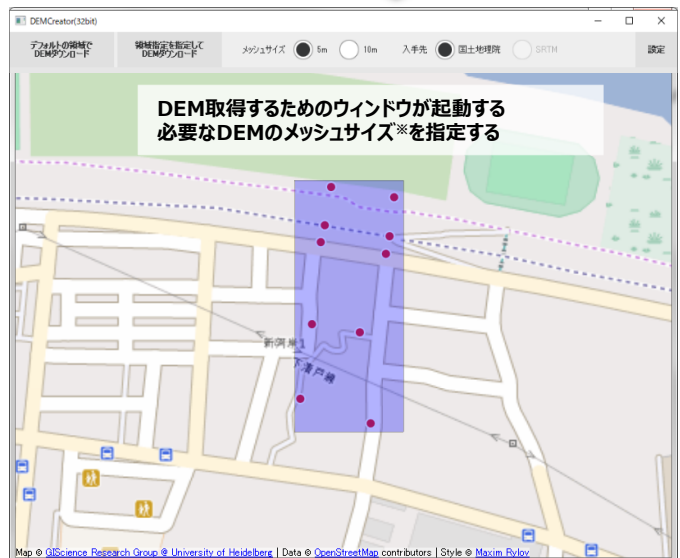


【注意】

- ・初回起動時には基盤地図情報サービスのアカウントを入力する



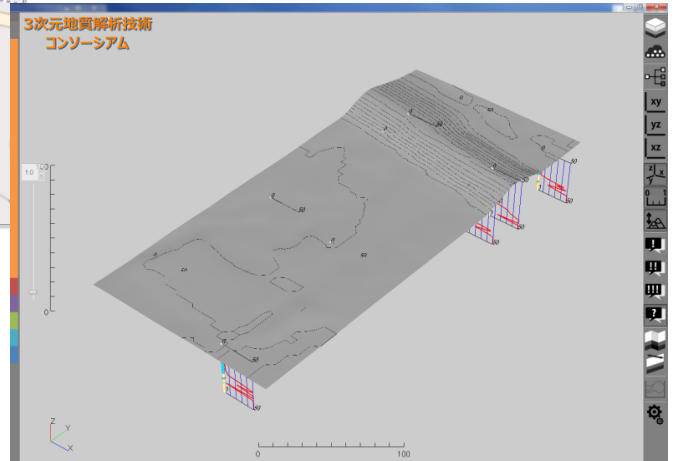
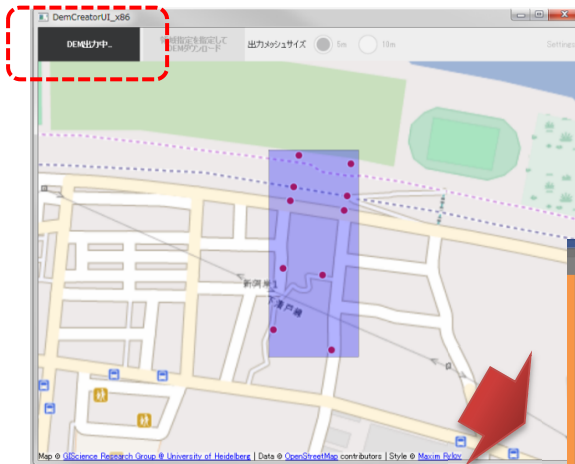
- ・本機能はネットワーク通信環境に依存するので、DEM取得までに時間がかかる場合がある



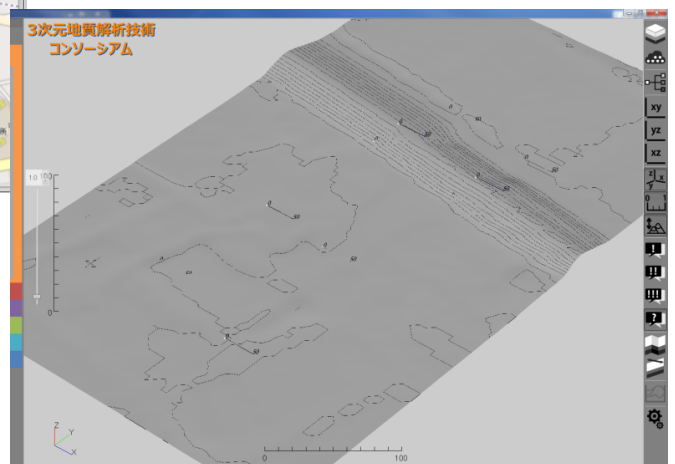
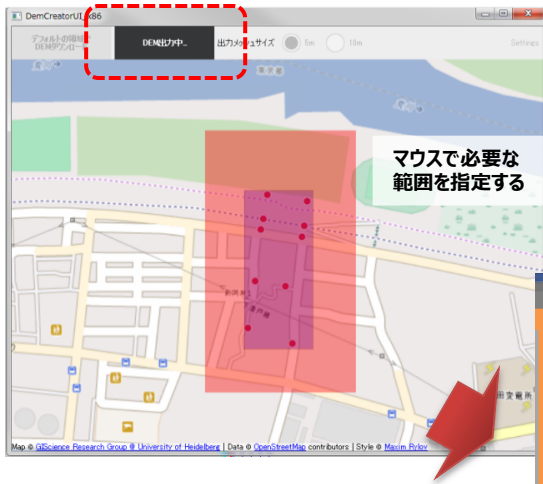
※メッシュサイズ5mと10mは、基盤地図情報数値標高モデルの5mメッシュ10mメッシュを指す
DEMを取得するには基盤地図情報ダウンロードサービスへの登録とインターネット接続環境が必要である
(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)

v) OCTAS Drafter

解析領域と同じ範囲を取得する際に押す



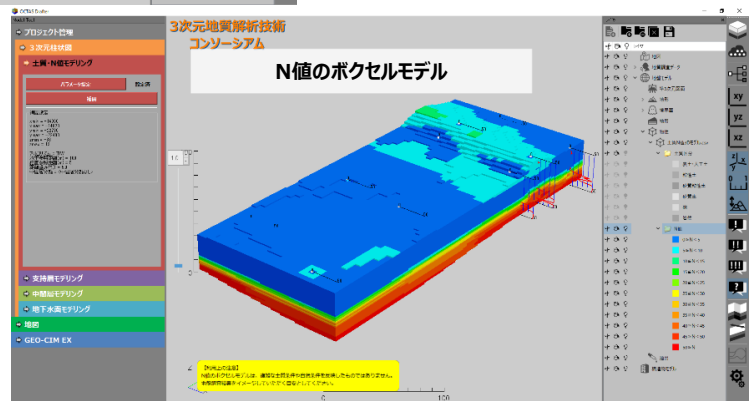
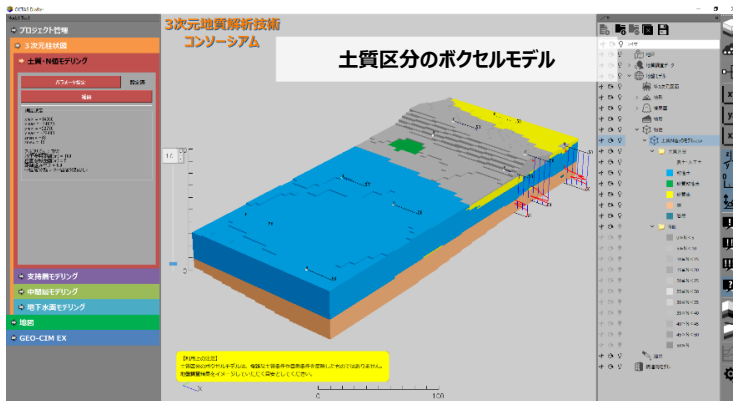
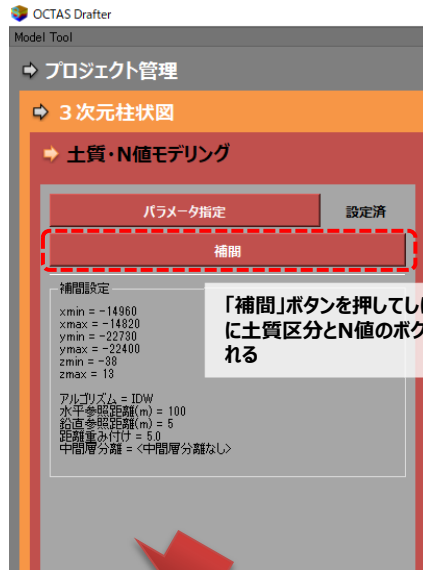
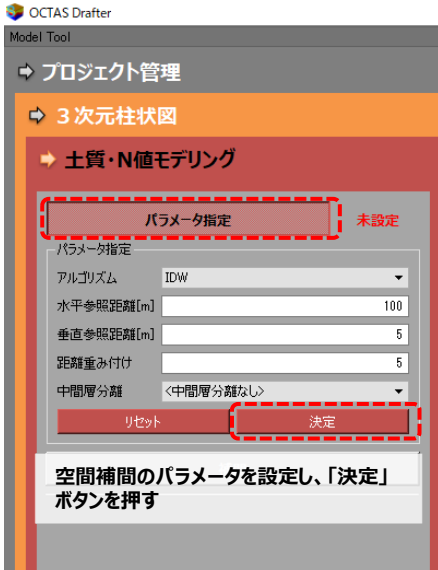
解析領域よりも広い範囲で取得する際に押す



v) OCTAS Drafter

(8) 土質・N値モデル作成

- ◆ 標準貫入試験を実施しているボーリングデータを対象として土質・N値のボクセルモデルを作成する
(標準貫入試験データが無ければボクセルモデルを作成することはできない)



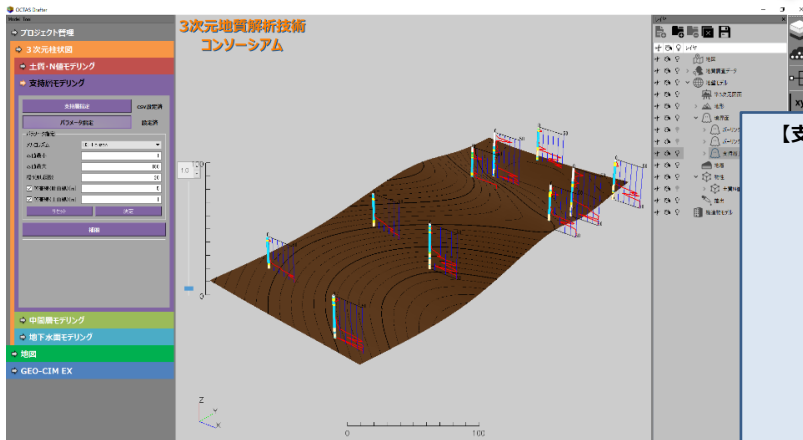
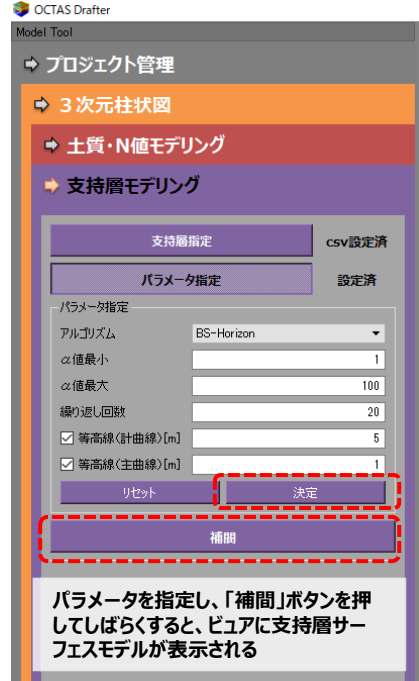
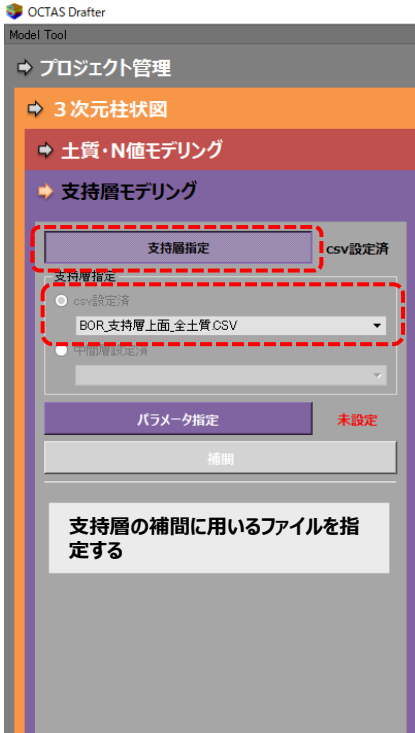
【注意】

ボクセルモデルが読み込まれた時点で、土質・N値両方のモデルが重なるので、レイヤマネージャで表示するモデルを切り替える

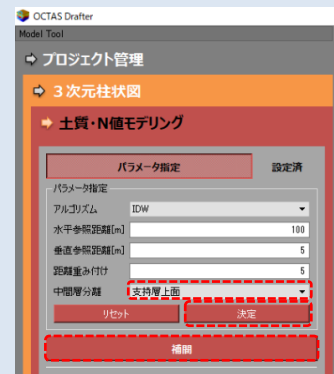
v) OCTAS Drafter

(9) 支持層モデル作成

◆ 支持層のサーフェスマデルを作成する



【支持層の分布を加味したボクセルモデルを作る】



支持層の上下でボクセルモデルを分離する場合※は「土質・N値モデリング」の「中間層分離」より「支持層上面」を選択し、「決定」ボタンを押して「補間」ボタンを押す
※補間の都合上、支持層以下でもN値が低い場合がある

【注意】

- ① 支持層はN値50以上が5m続く区間の上端を抽出している (N値50以上6区間の上端試験深度)
- ② 支持層が確認されないボーリングについては、その孔の下端以下に存在するものとして扱う

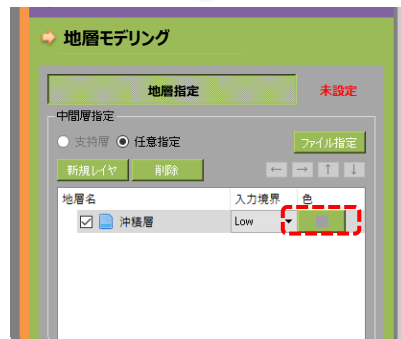
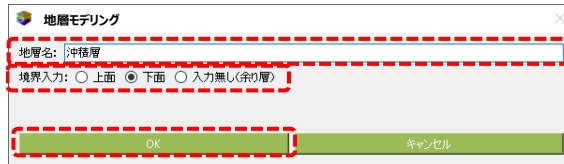
v) OCTAS Drafter

(10) 地層モデル作成

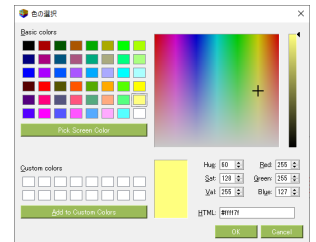
◆地層のソリッドモデルを作成する



「地層指定」ボタンを押し、「新規レイヤ」ボタンを押し、作成する地層の名称と、地層の上面・下面のいずれかを指定します



地層の色を指定します



地層の順番を「←→↑↓」ボタンやドラッグアンドドロップで指定します。上位の地層を上に移動します



左例は、Asは沖積層のグループに含まれるという指定

v) OCTAS Drafter

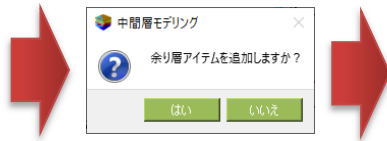
右下の「保存」ボタンを押して確定します

余り層の地層名を入力し、色を指定して右下の「保存」ボタンを押して確定します



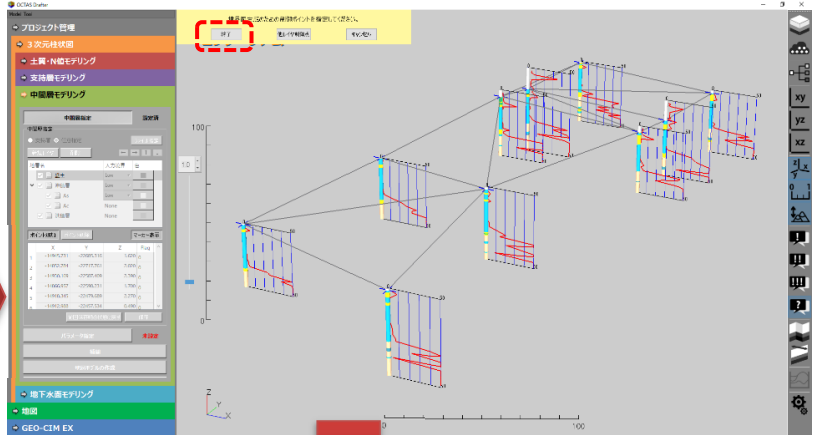
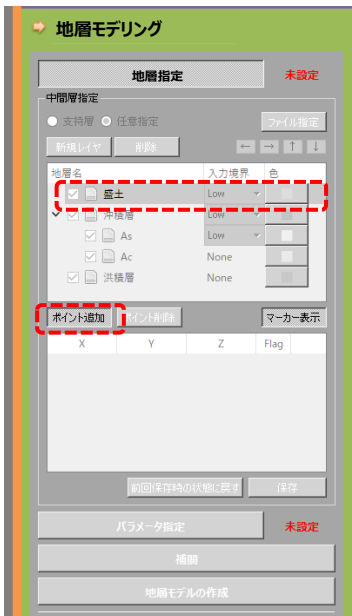
余り層※アイテムを追加します

※余り層とは境界面サーフェスモデルで塊（ソリッド）を分割した際に、残る一方のソリッドを指します



◆地層の指定面を対比します

対象の地層名を指定し、「ポイント追加」ボタンを押すとビューが地質対比モードになります
対象の境界点をマウスでボーリング位置で指定していきます
対比が終了したらビュー左上の「終了」ボタンを押します



右下の「保存」ボタンを押して確定します

v) OCTAS Drafter

【対比作業に役立つオプション】

他の地層の対比線を参照したり、他の対比線にコントロールポイントをすり付ける場合は、「他レイヤ制御点」ボタンを押して、表示したい他の対比線を選び表示させます

The screenshot shows the '他レイヤ制御点' (Other Layer Control Point) dialog box. It contains the following text and options:

境界面生成のための制御ポイントを指定してください。

他レイヤ制御点の表示

表示しないレイヤをチェックしてください。

As_low
 As_low

The main interface shows a 3D model of a geological cross-section with various layers and control points. A text box on the right states: 「表示した他の対比線の中点や線の上にコントロールポイントを追加できます」 (Control points can be added to the midpoint or line of the displayed other comparison line).

対比が完了したら、補間パラメータを設定し、「補間」ボタンを押して、境界面サーフェスモデルを作成します
 境界面の形状が妥当かをチェックします

The screenshot shows the '3次元地質解析技術 コンソーシアム' (3D Geological Analysis Technology Consortium) interface. The left sidebar shows the 'Model Tool' menu with the following options:

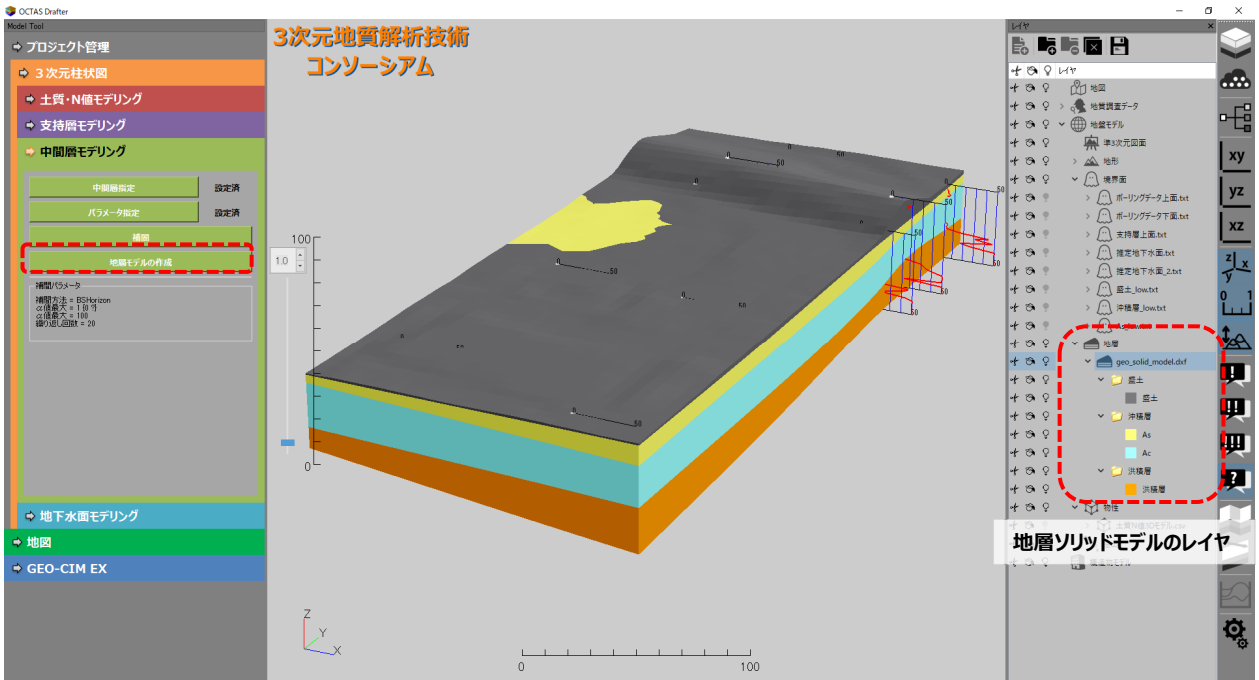
- プロジェクト管理
- 3次元柱状図
- 土質・N値モデリング
- 支持層モデリング
- 中間層モデリング
 - 中間層指定 (設定済)
 - パラメータ指定 (設定済)
 - 補間
 - 地層モデルの作成
- 地下水面モデリング
- 地図
- GEO-CIM EX

The main area displays a 3D model of a geological cross-section with various layers and control points. The right sidebar shows the 'レイヤ' (Layer) menu with the following options:

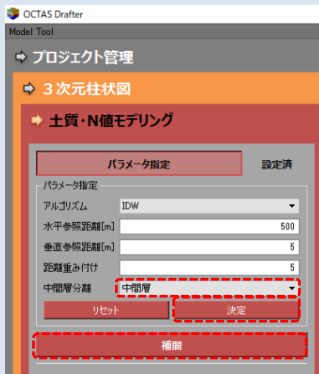
- レイヤ
- 地形
- 地質調査データ
- 地盤モデル
- 準3次元図案
- 境界面
- ボーリングデータ上層.txt
- ボーリングデータ下層.txt
- 支持層上層.txt
- 指定地下水層.txt
- 指定地下水層2.txt
- As_low.txt
- As_low.txt
- 地層
- 物性
- 土質N値IDE形式.csv
- 抽出
- 構築物モデル

v) OCTAS Drafter

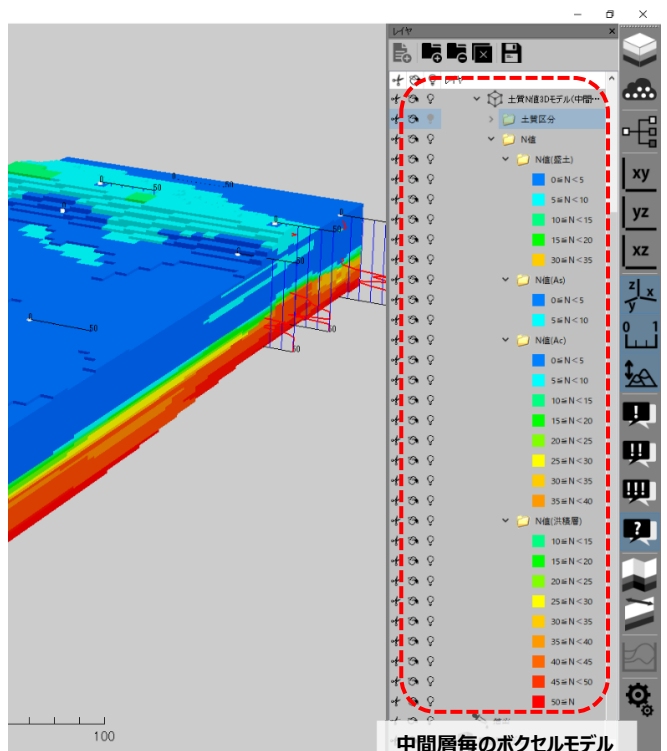
境界面サーフェスマodelに問題がなければ、「地層モデルの作成」ボタンを押して、地層ソリッドモデルを作成します
レイヤマネージャに地層モデルが登録されていることを確認してください



【中間層の分布を加味したボクセルモデルを作る】



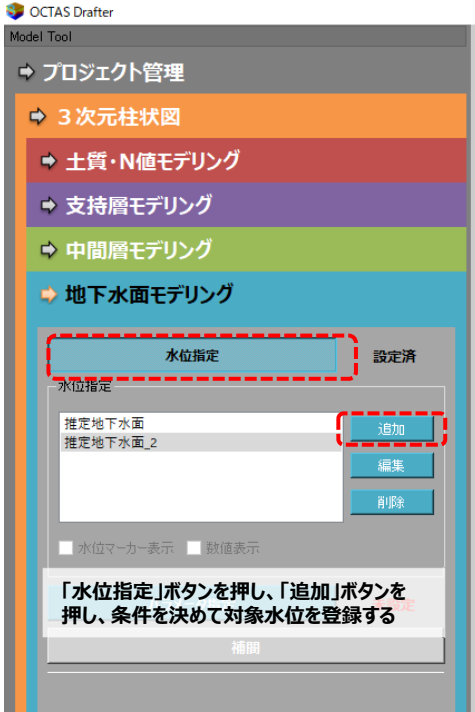
中間層でボクセルモデルを分離する場合は「土質・N値モデリング」の「中間層分離」より「中間層」を選択し、「決定」ボタンを押して「補間」ボタンを押す



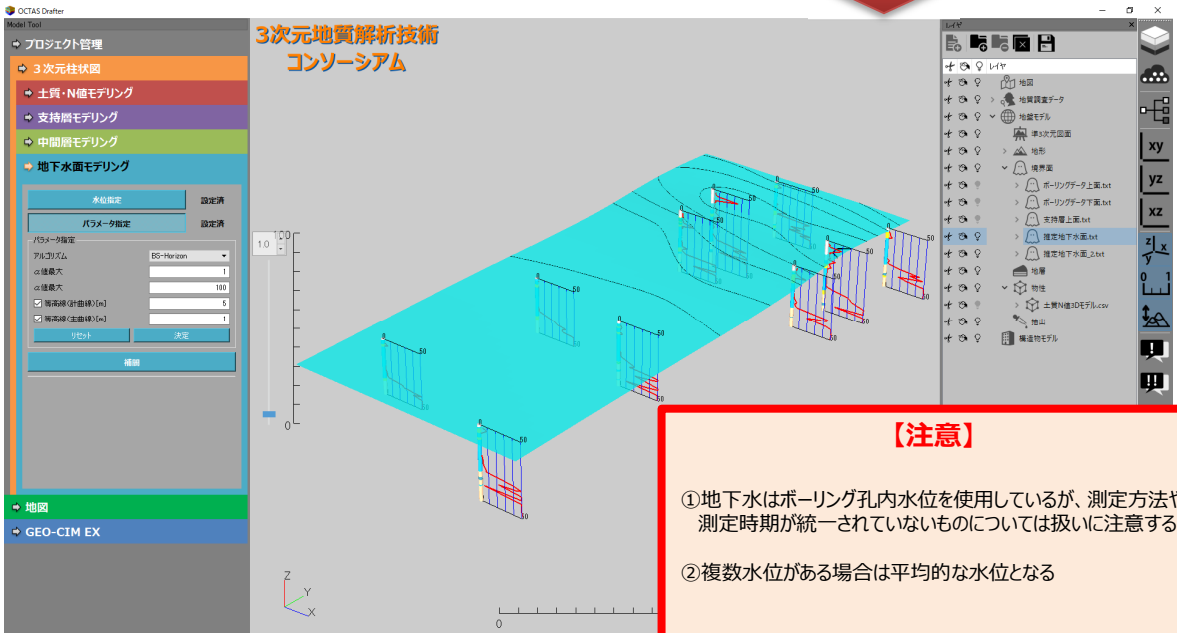
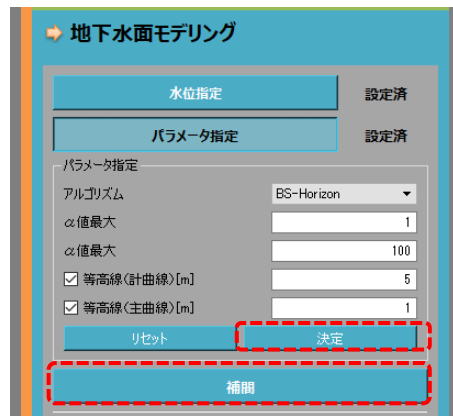
v) OCTAS Drafter

(11) 地下水面モデル作成

◆地下水のサーフェスモデルを作成する



- ・パラメータを設定し「決定」ボタンを押す
- ・「補間」ボタンを押してしばらくすると、ビューに地下水サーフェスモデルが表示される
- ・水位を複数登録している場合は複数のサーフェスモデルが作成される



VULCANのサーフェスモデル作成手順

<手順概略>

1. 準備
2. データ入力・作成
3. Grid modelモデリング
4. Triangle modelに変換
5. Triangle modelを直接作成
6. Triangle modelの整形

1. 準備

- ①作業フォルダを作成または指定する
- ②作業画面の設定をする
 - ・初期画面のX,Y,Z最小値・最大値
 - ・画面表示の縦横比
 - ・Grid type (平面直角、UTM、Mercator 等)
 - ・単位系 (メートル、ヤード、フィート)
- ③Design database名を指定する →作成される

※VULCANのファイル・データ構成

◆線データ・点データ

ファイルであるDesign databaseに格納する
Layer→Object (構成点 + 連結情報) の形式で管理される

◆ボーリングデータ

ファイルであるBoring databaseに格納する

◆面モデル

Grid model (正方または長方格子の格子点に標高) とTriangle model (TIN) がある
Triangle modelは鉛直面、オーバーハングする面も作れる
どちらも個々のモデル毎のファイルとなる

地形、地質境界、断層、構造物等の区別はなくユーザが管理する

◆ボクセルモデル

Block modelとして管理される

2. データ入力・作成

◆地形データ

DEM、測量データ、等高線、標高点等を線データ・点データとして取り込んで必要があれば標高を設定する

◆ボーリング

柱状図からBoring databaseに入力する
XMLを変換してBoring databaseに取り込む
(変換プログラムは別途準備)

◆断面図 (CADデータ)

線データとして取り込んで平行移動・回転移動する

◆その他

露頭データは点 (線) データとして取り込むまたは当該位置に点 (線) データを作成する

◆地質境界データ

Boring databaseから境界毎のデータを抽出してLayerに整理する
断面図データを境界毎のLayerに整理する
その他地質境界に該当するデータがあれば同様に整理する

◆補助データ (モデリングしながら作成)

断層や不整合の先・空中等に断面線を延長する
背斜軸・向斜軸等を作成する
必要に応じて断面線の構成点を追加・削除する
モデルの形状を適切にするための線を作成する

3. Grid modelモデリング

- ①モデル名を決めて設定画面を起動する
- ②モデリング範囲等を設定する
 - ・X,Yの最小値、最大値と格子間隔
 - ・外側にデータを確認していく範囲 (格子数)
- ③モデリング手法等を選択する
 - ・モデリング手法 (次ページ)
 - ・モデルの表示範囲
- ④モデリングに使用するデータを選択
 - ・線データ・点データ (Layer単位、3つまで)
 - ・ボーリングデータ (上限深度、下限深度 等)

※Grid modelのモデリング手法

Triangulate

Delaunayの三角網法による補間
曲面の次元が指定できる
通常はこの手法を使用する

Inverse distance squared interpolation

逆距離加重法による補間
コンターに目玉がしやすい

Direct contour to grid for string data [splined]

Direct contour to grid with interpolation

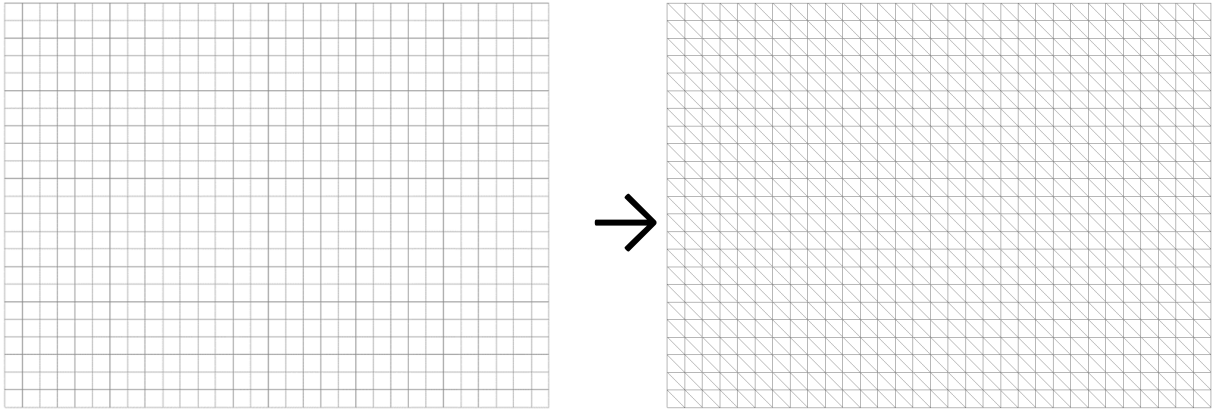
Direct point to grid

下2つはおおむね直線的な補間

4. Triangle modelに変換

① Grid modelをTriangle modelに変換する

→ Grid modelの各四角を2分して三角にしたTriangle modelができる。



5. Triangle modelを直接作成

地形面等データが多い場合や単純な構造の場合は線データ・点データから以下により直接 Triangle modelを作成する

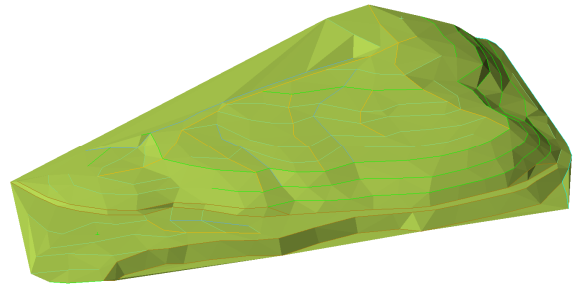
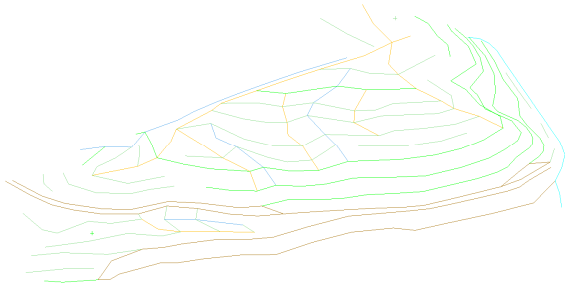
この場合はTriangle modelの構成点は使用する線データ・点データの構成点のみとなる

CADの3次元面をTriangle modelとして取り込むこともできる

5. Triangle modelを直接作成

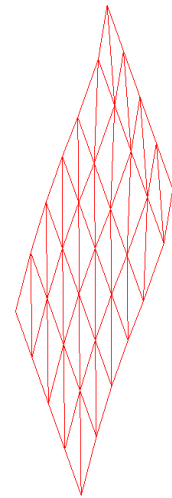
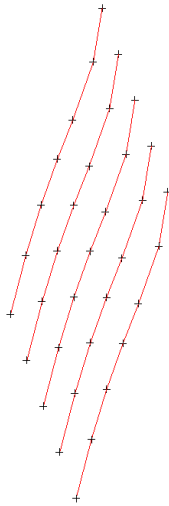
Triangle Surface → Create

選択した線データ・点データをつなぐ面を作成
モデル外郭の線データも指定可能



Triangle Solid → Create

連続して選択した線データをつなぐ面を作成



6. Triangle modelの整形

切り切れ処理

- ① 2面を相互の交線で分割して不要な部分を削除(Boolean)
- ② 線データの外側または内側を削除(Rerimit)

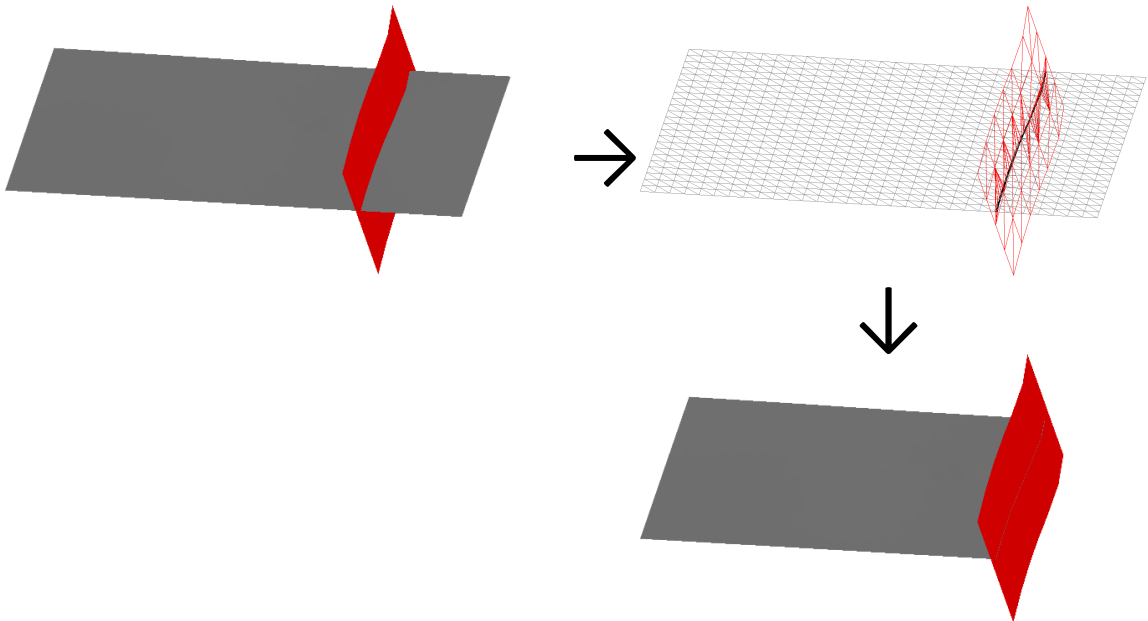
微修正

- ① 構成点の追加、削除、移動
- ② 三角の追加、削除、つなぎかえ

合併

- ① 複数の面→合併した1つの面

※ Boolean、断層の上盤側を削除する例



R-T.2 レーザー測量

レーザー測量による3次元地形モデル作成の方法

レーザーで距離を計測するには、発射したレーザー光線が対象の地物に反射して戻ってくるまでの時間を測定し距離に換算する方式や、複数の周波数のレーザー光線を同時に照射して、その反射波のそれぞれの位相を測定して距離に換算する方式がある。更に、レーザーの発射した位置と照射角度により、地物の座標を算出する。

有人航空機にレーザー scanner を搭載して測量を行う「航空レーザー測量」は、航空レーザー測量システムを用いて地形を計測し、格子状の標高データである数値標高モデル（以下「グリッドデータ」という。）等の数値地形図データファイルを作成する作業をいう。

航空レーザー測量システムのGNSS/IMU装置による位置姿勢解析結果とレーザー計測の距離データを統合して、3次元点群データが生成される。

必要に応じて3次元点群データからグリッド形式、テクスチャ付きの不整三角網(TIN: Triangulated Irregular Network)を作成する。

航空レーザー測量とは

航空レーザー測量は航空機にレーザー scanner、カメラ等を搭載して、空から面的に点群データ、写真画像を取得する方法。固定翼(セスナ等)に搭載した計測と回転翼(ヘリコプター等)に搭載した計測の2種類に大別されている。災害・防災分野、河川砂防分野、森林分野等で実用的に活用される。

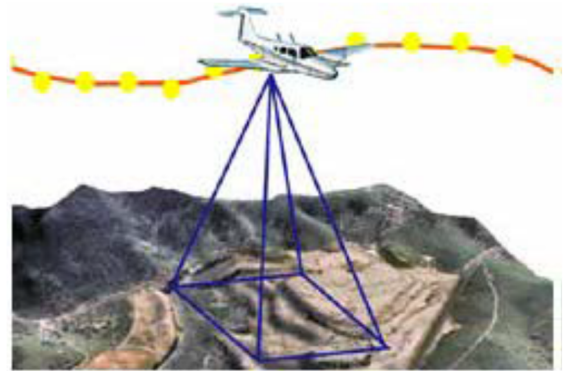


図 R-T.2-2 航空レーザー測量の概念図

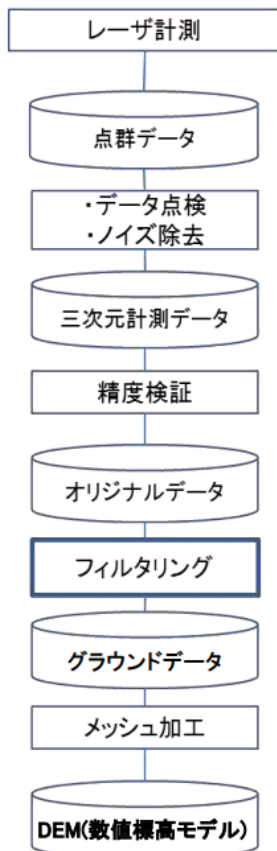


図 R-T.2-1 地形データの作成フロー¹⁾

航空レーザー測量の特徴

【メリット】

上空から計測するため、地上から立ち入れない区域のデータも取得できる。

【デメリット】

上空から構造物等により遮断される部分は取得できない。ただし、樹木下は、葉や枝の隙間をレーザーが通過することから、地表からの反射波を記録することができるため、フィルタリング処理により地表面を再現できる。なお、フィルタリング処理とは、地物表面から建物や橋等の人工構造物、樹木等の植生を取り除く処理である。

【地形測量精度】

標高精度は標準偏差で25cm 以内（機械精度は15cm 程度）、水平精度は30cm 程度である。内挿補間した後のメッシュデータは、メッシュ内に計測点があるかないかで精度区分が異なる（メッシュ内にある場合：0.3m 以内、ない場合：2.0m 以内）。

航空レーザー測深機

ALB（Airborne Laser Bathymetry：航空レーザー測深機）は、海域および河川において、広域かつ面的に水面下の地形データが取得可能である。測量船が進入できない浅瀬や岩礁エリアの水中地形を上空から計測可能である。

ALBは、陸上部と水面を計測する近赤外レーザー（波長1,064nm）と水中部を計測する緑色レーザー（波長532nm）を同時に照射し、水面で反射するパルスの往復時間と、水を透過し水底で反射するパルスの往復時間差から水深を算出して、陸上部と同時に水中部の3次元座標を計測する。同時に高解像度デジタル航空カメラでの撮影も行うため、3次元情報と共に、フルカラーおよび近赤外画像データを取得することができる。

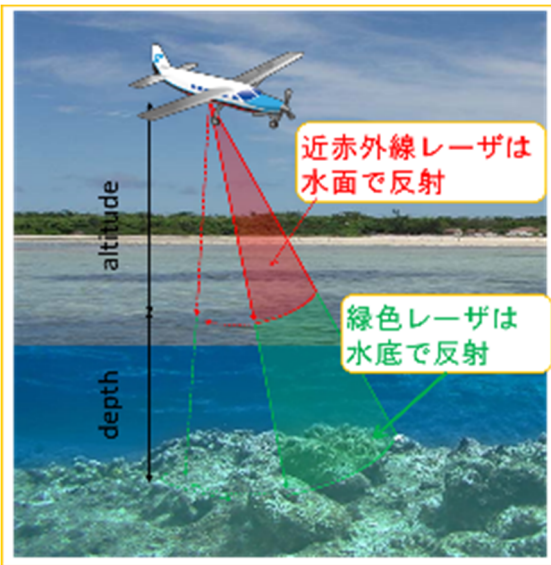


図 R-T.2-3 航空レーザー測深器の概念図

【計測事例（図 R-T.2-4）】

ALBを使用して河川を横断する橋梁の橋脚部の洗掘状況調査を実施した。音響測深機による深淺測量の測量結果との比較検証の結果、標高較差の標準偏差は3.7cmであり、ALBは深淺測量と同程度の精度であることが明らかになった。

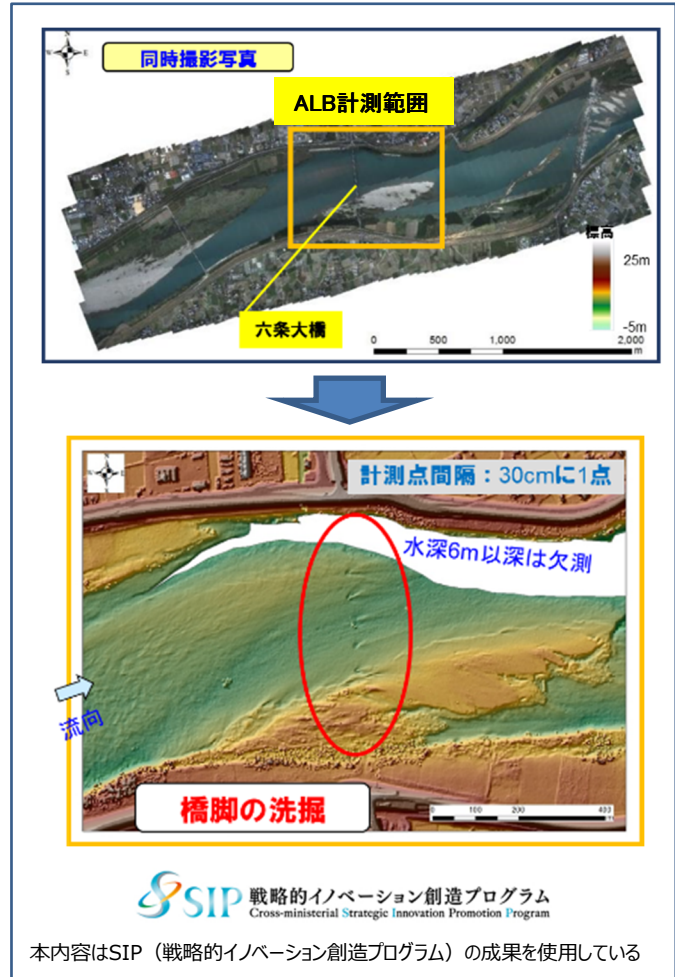


図 R-T.2-4 ALBによる計測事例

モバイルマッピングシステム

MMS（モービルマッピングシステム）は、車両に前方（+後方）上下2段のレーザスキャナ（2～4台）、デジタルカメラ（2～6台）を搭載し、「3D点群データ」と「デジタル画像」を取得する技術である。得られた3D点群データは、デジタル画像を用いてカラー点群として表示可能である。

車両の位置・姿勢は、GPS（3台）・IMU・オドメトリの複合解析により、高精度で測位/位置・姿勢を計算し、FKP（面補正パラメータ）方式によるGPS補正、IMUによる角度および加速度データ、オドメトリ（車輪の回転による距離計）による移動距離を同時調整して正確に計算する。

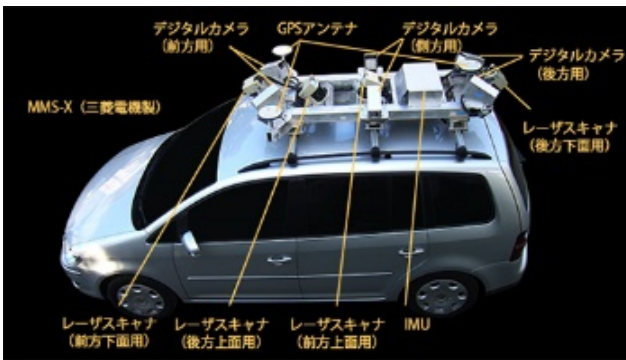


図 R-T.2-5 MMSの機器構成

【計測事例（図 R-T.2-6）】

MMS用数値図化システム（PADMS-Solid:Pasco Digital Mapping System-Solid Model）を使用し、MMSが取得したレーザ点群データを用いて、2次元の道路台帳図データやカーブミラー、標識等の施設関連データに高さ情報を付与することにより、地上空間の3次元データを作成した。2次元のマンホールの施設データから地下埋設物の3次元化の基準となる位置を決定し、施設データが持つ属性値（種別、口径、管底高等）を組み合わせることで、施設の地下空間モデルを再現した。

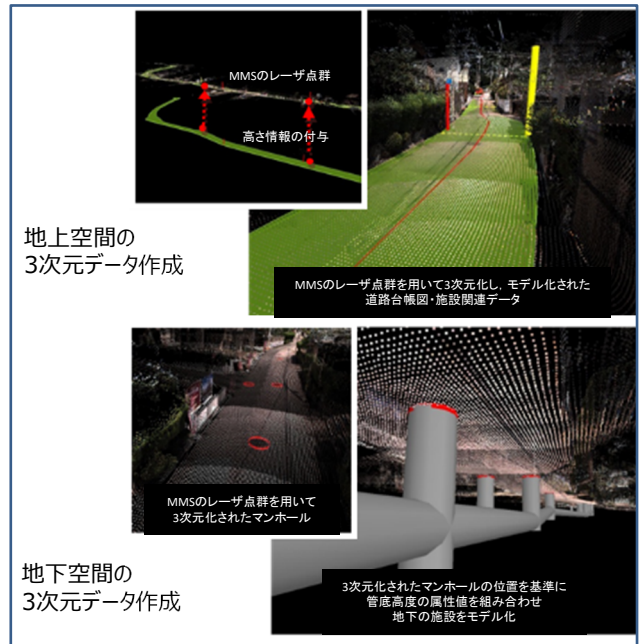
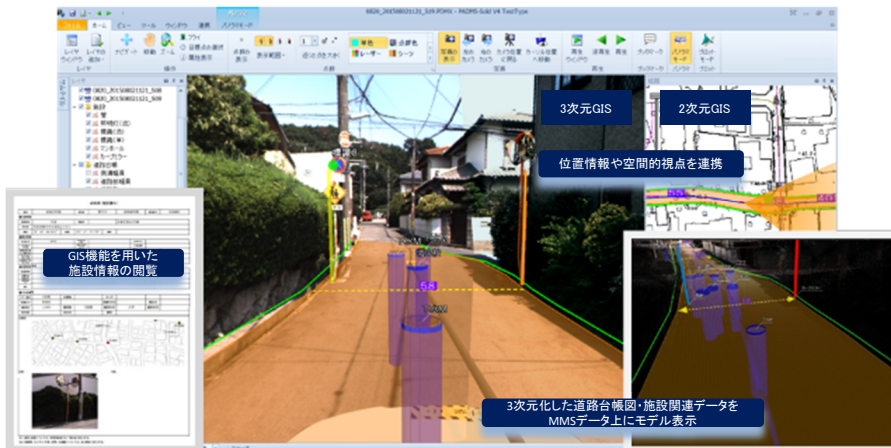


図 R-T.2-6 MMSによる計測事例²⁾



MMS用数値図化システムにより、2次元の地図情報と3次元の道路空間情報を一元的に視認することが可能となるよう、位置情報や空間的な視点を連携できる

図 R-T.2-7 MMS用数値図化システムの例²⁾

BIM/CIMにおける3次元モデル化の手法

BIM/CIMの中で用いる地形モデルの構築（面計測）に際しては、様々な測量手法の中から事業目的に見合う精度を求めて、最適な手法の選択、また、これらの組み合わせ手法を採用することが重要となる。この際、局所的な測量に適するトータルステーションによる測量手法では経済的に不利であるため、面的な3次元データの取得が可能な計測手法が利用される。

面的な3次元データの取得が可能な計測手法と各計測手法の特徴を表R-T.2-1に示す。各計測手法は方式の違い、撮影高度の違いや、1回の計測、撮影等により行われる際の計測精度、面的な密度及び計測可能範囲に違いがあるほか、走向・飛行等に伴う燃料やバッテリー、経済性等の制約により、様々な特徴を持つ。

問題抽出と検討 -道路設計を例として-

道路設計を例として、従来手法における地形情報取得から図面作成までの流れと、BIM/CIM手法における流れを比較する。

従来の各種設計の場合には、一般に概略設計では、空中写真測量により作成した1/2,500～1/5,000レベルの地形図を活用し、予備設計で1/1,000レベルの精度の地形図を利用していることが多い。詳細設計の段階では、実測による縦横断面図を用いて幅杭設計や擁壁・法面等の計画を行い平面図に展開している。

表 R-T.2-1 地形モデル計測手法の特徴³⁾

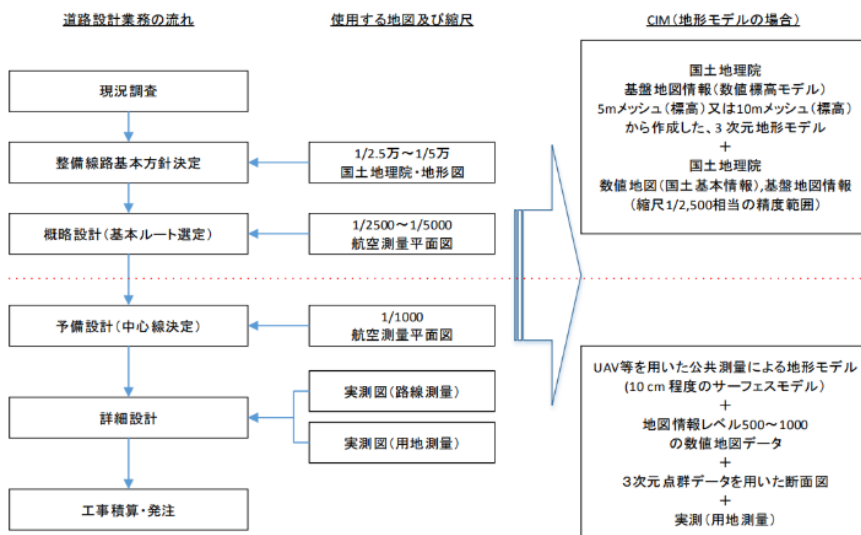
地形モデル計測手法	適用性	計測制限等の特記事項
地上レーザ測量	局地的範囲に対応	現地に立ち入れない区域は計測できないが、急傾斜地を対象にした河川対岸部は、データ取得可能。
UAV	写真測量	橋梁下部工など高架橋下も計測可能。強風時は計測成果に影響が出る。また、太陽光の影響を受ける。草木が存在し地面を撮影できない場合には、DSM ¹⁾ のみでDTM ²⁾ は取得できない。
	レーザ測量	橋梁下部工など高架橋下も計測可能。強風時は計測成果に影響が出る。草木がある程度ある場合でも地面の計測が可能となり、DSM ¹⁾ とDTM ²⁾ の双方の標高モデルが取得可能。
車載写真レーザ測量	路線計測範囲に対応	道路周辺やトンネル内部は計測可能だが、道路沿いであっても建物、樹等にさえぎられる箇所へのデータは取得できない。
航空レーザ測量	広域的範囲に対応	高架橋下、トンネル内は取得できない。DSM ¹⁾ とDTM ²⁾ の双方の標高モデルが取得可能。
空中写真測量 (自動標高抽出)	広域的範囲に対応	高架橋下、トンネル内は取得できない。DSM ¹⁾ のみでDTM ²⁾ は取得できない。
衛星画像処理	地球的範囲に対応	高架橋下、トンネル内は取得できない。DSM ¹⁾ のみ。局所的な利用には不向き。

¹⁾DSM (Digital Surface Model) : 数値表面モデル (建物や樹木の高さを含んだ地表モデル)

²⁾DTM (Digital Terrain Model) : 数値地形モデル (建物や樹木の高さを取り除いた地表モデル)

これに対し、BIM/CIMにおける道路設計の場合には、概略設計では、国土地理院基盤地図情報（数値標高モデル）等の既存の測量成果を使用し、地形モデルを作成する（図R-T.2-8）。予備設計(B)・詳細設計の段階では、面的な3次元計測（UAV等を用いた公共測量）又は実測により地図情報レベル250～500に対応する地形モデルを作成する。

すなわち、BIM/CIM手法における地形情報収集上の課題は、地形図の精度上の問題であり、このために、精度の高い3次元測量の手法が求められていると言える。



※予備設計には、実測による縦横断面測量が必要ない場合（予備設計A）、実測による縦横断面測量が必要な場合（予備設計B）の2通りがある。UAV写真測量及び地上レーザ測量により3次元点群データを取得している場合には、測量計測機関の承認を得られたならば、「3次元点群を使用した断面図作成マニュアル（案）平成29年3月」（国土交通省国土地理院）に沿った手法を用いることにより、実測による縦横断面測量に替えることができる。

図R-T.2-8 従来手法とBIM/CIMの手法とのワークフローの比較 (道路設計の例) ⁴⁾

3次元モデル化の注意点 –道路設計を例として–

道路設計を例として、航空レーザー測量で得られた地表面データを用いた3次元モデル化で、適用の難しい部分は以下の点である。

- ◆航空レーザー測量で得られた地形モデルは、各々の地物の属性を持たないので、地目や構造物情報を知るすべがない。必然的に2次元の地形図、若しくは地物によるサーフェスモデル、ソリッドモデル等、別途3次元モデルの作成が必要となる。
- ◆予備・詳細設計では、少なくとも精度的に地図情報レベル³⁾ 500～1000に対応する3次元地形モデルが必要となる。道路部以外の周辺地形も同等レベルの精度が必要となる。
- ◆詳細設計では、地形モデルのほかにコントロールポイントとなる構造物のエッジや境界測量成果が必要となる。実測平面や実測横断面図が必要な理由は、たとえば、木造等屋根が張り出している建物の場合、実測で建物壁面位置を把握し、建物壁面にかかるか、かからないかで、補償費用に影響する等、重要な用地幅決定の情報になるからである。航空レーザー測量による図化では建物壁面は取得することができないため、要求精度を満たす測量手法として、TS測量等を利用する。
- ◆道路設計の最終成果では、平面図に法面を展開して土量等の数量計算を行う。従来法では、実測による区間ピッチの横断面測量成果を使用して区間内の法面を推定していたため、精度が劣っていた。TSによる測線上の標高精度そのものは良いが、土量計算では3次元地形モデル（レーザー計測成果等面的な点群データ）の方が全体的な精度が良いと考えられる。

今後の方向性

従来のレーザー計測機器は、レーザーパルスのラストリターンを地表面と想定していたため、森林、草地等植生が著しく繁茂した場所では、高精度な地形計測が困難であった。

近年、地表面からの微弱な反射強度をより深く記録できる方式（波形記録方式）により地形計測（フィルタリング作業）の高精度化が図られている。今後も技術向上が期待できる分野である。

参考文献

- 1) 国土交通省CIM導入推進委員会.CIM導入ガイドライン(案)「第1編 共通編」. 2019, p.43.
- 2) 今西暁久・丹治直人・岡本竜郎・幸場喜郎・西村修・宮辻和宏 (2018) MMSデータを活用した3次元道路管理手法の検討, 応用測量論文集, 29
- 3) 国土交通省CIM導入推進委員会.CIM導入ガイドライン(案)「第1編 共通編」. 2019, p.34.
- 4) 国土交通省CIM導入推進委員会.CIM導入ガイドライン(案)「第1編 共通編」. 2019, p.36.

UAVの利用拡大

近年、UAV（Unmanned Aerial Vehicle、無人飛行機）は、社会インフラの維持管理（橋梁点検ほか）や災害調査（深層崩壊箇所、地すべり調査ほか）、人の立ち入り禁止区域の調査（火山変動調査ほか）、情報化施工、環境調査等様々な目的に利用されるようになってきた。



図R-T.3-1 UAVの計測機器と撮影成果

UAV測量の特徴

【メリット】

- ・上空から計測するため、地上から立ち入れない区域のデータも取得できる。
- ・局地的な範囲の地図作成が優れている。

【デメリット】

- ・上空から構造物等により遮断される部分は取得できない。
- ・UAVの落下に対する安全の確保が必要。
- ・空中写真測量を基本とした技術であり、草木が存在している場合にはその下の地面を撮影できないため、標高を取得することができない。

【地形測量精度】

- ・地形測量精度については、「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）平成29年3月」（国土地理院）にて、地理情報レベル250、500を標準としている。
- ・現状の3次元点群測量へのUAVの適用状況を踏まえ、GNSS/IMU装置は装備されていないものとして規定している。

表R-T.3-1 地図情報レベルと測量精度

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差
250	0.12m 以内	0.25m 以内	0.5m 以内
500	0.25m 以内	0.25m 以内	0.5m 以内

UAV（無人飛行機）の安全にかかわる課題

急速に普及しつつあるUAV技術であるため、安全基準、運用基準の作成が急務となっていた。このため次の様な各種の法制・手引き等が整備された。

- ・「測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き2015年5月25日」（一般社団法人日本写真測量学会）
- ・「航空法の一部を改正する法律」（平成27年）
- ・「無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要領」（平成27年11月）
- ・「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」（国土交通省 航空局）
- ・「公共測量におけるUAVの使用に関する安全基準（案）平成28年3月」（国土交通省 国土地理院）

UAV計測の安全リスクには、第一に機体墜落の危険、第2にバッテリー発火の危険が指摘されている。UAVの重量は、軽量とはいえ5kg程度はあるので落下速度を加味すると、地上にあたる衝撃は相当なものとなる。万が一、人や民家に墜落すれば大事故になりかねない。

測量業に供するUAVを用いた測量・調査に限定したとしても多くの課題が存在し、主なものとして次の項目が挙げられる。

表R-T.3-2 UAV（マルチローター型）計測の安全にかかる課題

項目	課題
使用機材の制限	使用機材の翼数と安全性は必ずしも比例しない。一般には翼数が多いほど安定性が高いと言われているが、暴走した場合の墜落場所が予測困難になるし、部品数が多くなり不良品や整備不良の可能性は高くなる。一方、4枚だと不安定であるが、墜落するときには、管理ができる直下に落ちる。どちらにも一長一短があり、機材の翼数や制限重量について、基準を作る必要がある。
飛行体制、運航制限	航空法を遵守する中での飛行高度・飛行範囲、操縦者の資格、保安員を含めた飛行体制、機器の点検等実際の運行について基準を設ける必要がある。また、UAV飛行は低空飛行となるため、住宅地においては、個人へのプライバシーの配慮や飛行中の騒音対策にも配慮する必要がある。
バッテリーの発火防止	バッテリーは、高い電圧を発生させることができる一方、可燃性電解質を使用しているため発火し易いという欠点がある。そのためUAVの利用ではバッテリー側か、機体側のどちらかに発火防止がとられていることを要求するとともに、墜落して発火した際の延焼を防ぐために機体に発信器を付けることを要求している。
保険加入・補償	万が一の事故に備え、保険や補償について一定の基準を示す必要がある。

UAVを用いた空中写真による3次元モデル化の手法

「写真測量」は、撮影位置によって空中写真と地上写真に大きく分けられるが、UAVを用いる場合は、BIM/CIMで用いる地形データを作成するために空中写真を用いることとなる。

「空中写真測量」による数値地形図データ作成の工程別作業区分及び順序は、公共測量作業規程では次の図の通り定義され、数値地形図データ作成を作成するものである。



図 R-T.3-2 公共測量作業規程

第3編 第3章 空中写真測量における工程別作業区分及び順序¹⁾

しかし、UAVを用いた空中写真による3次元点群測量では、処理の仕方は大きく異なる。同時調整、数値地形モデルの作成、正射変換、モザイクといった一連の工程は、3次元形状復元という一工程に集約され、かつ3次元形状復元は自動処理により行うことを前提とする。

3次元形状復元は、空中写真からSfM (Structure from Motion) により特徴点を抽出して撮影状態を求めるとともに、撮影状態に基づきMVS(Multi View Stereo)により空中写真から高密度に3次元点群を抽出し、3次元形状を復元するものである。



図R-T.3-3 UAVを用いた空中写真による3次元点群測量における工程別作業区分及び順序¹⁾

「UAVを用いた空中写真による3次元点群測量」では、数値地形モデルと写真地図データが一体になったともいえる空中写真の色を属性とする3次元の座標、いわゆる3次元点群データを成果とし、必要に応じて3次元点群データからグリッド形式、テキスト付きの不整3角網(TIN: Triangulated Irregular Network)、写真地図を作成することも規定している。

今後の方向性

UAVによる地形モデル作成上の今後の方向性としては、UAVレーザー測量が挙げられる。「UAVレーザー測量」は、UAVにレーザースキャナーを搭載して空中から面的に3次元で地形を計測する手法で、高精度計測を実施するためGNSS/IMUを搭載するものも存在する。

新しい技術ではあるが、新しい技術であることから精度検証が不十分であり、またシステムとして高価となることから現時点では普及には至っていない。しかし、「UAVを用いた空中写真による3次元点群測量」にはない特徴を有することから実用化が進められている。

なお、公共測量作業規程への記載及び国土地理院による標準が整備されていないため、公共測量に使用するに当たっては、第17条の特例規定を満たす必要がある。

UAVを用いたレーザー測量による3次元点群測量の主な特徴を次に示す。

【メリット】

- ・レーザーを利用するため、フィルタリングと組み合わせることで樹木が存在する状況で、地面を計測可能。
- ・十分な日照が得られない場合でも計測が可能。
- ・局地的な範囲の地図作成が優れている。
- ・人が立ち入れない箇所でも、計測が可能。

【デメリット】

- ・UAVの落下に対する安全の確保が必要。
- ・レーザースキャナーを搭載するため高価である。GNSS/IMUを搭載する場合は更に高価となる。

【地形測量精度】

- ・現在、各種機関で精度検証が行われている。

参考文献

1) 国土交通省CIM導入推進委員会.UAVを用いた公共測量マニュアル(案).2017, pp.1-2.

R-T.4 地形解析図

地形解析の目的

レーザー計測等によって取得された3次元標高データは、そのままでは地形を定量的に表現することは難しい。地形解析では、3次元標高データに所定の処理を行い、微地形や地質・地質構造の特徴を判読するための地形解析図（地形表現図）を作成することを目的とする。

地形解析に用いるデータ

地形解析に用いるデータには次のようなものがある。

i) グラウンドデータ

レーザー測量や空中写真解析により取得した3次元標高データをオリジナルデータという。オリジナルデータから支障物を除去するフィルタリングを行い、グラウンドデータを作成する。グラウンドデータは、オリジナルデータのうち地表面の高さを示すデータをいう。

ii) メッシュデータ

グラウンドデータから内挿補間によりメッシュデータを作成する。内挿補間は、グラウンドデータ密度を考慮して、最近隣法、TIN、IDW、Kriging、平均法のいずれかを用いる。

メッシュデータは下記の3種類が利用される。

◆DSM(Digital Surface Model)：数値表面モデル
建物や樹木等の高さを含めたデータをメッシュ化したモデル。航空レーザー測量等で直接得られる高さのデータであり、地物の高さを含めた標高データが必要な場合に使用する。

◆DEM(Digital Elevation Model)：数値標高モデル
建物や樹木等の高さを取り除くフィルタリング作業を行って得た地表面だけの高さのデータからメッシュ化したモデル。地表の高さを表現したい場合に使用する。

◆DTM(Digital Terrain Model)：数値地形モデル
DTMはDEMと同義に扱われることもあるが、DEMはDSMを含む場合もあるため、地表面を扱っていることを強調する場合にDTMを用いる。

地形解析の成果品

地形解析図には以下のようなものがある。

i) 一般的な地形解析図

等高線図、陰影図、段彩図、傾斜量図、開度図等

ii) 特殊な地形解析図

陰陽図、赤色立体図、ELSAMAP、地形起伏図、凸凹イメージマップ、CS立体図、スーパー地形表現、多重光源陰影図等

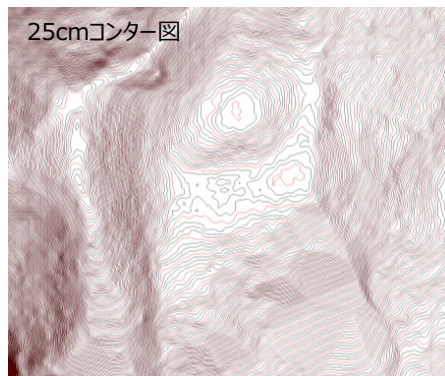
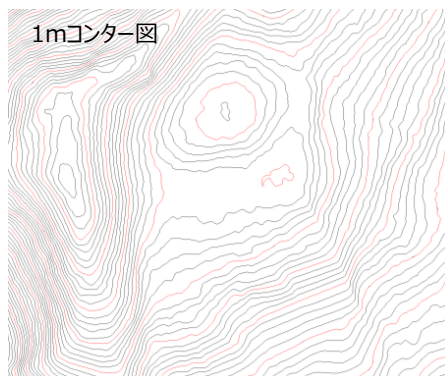
i) 一般的な地形解析図

①等高線図（図R-T.4-1）

基準面からの高さが一定の水平面と地表面との交線を表した等高線によって、地形を表現する図。一般的によく使われる地形表現方法。地形の高低（尾根・谷）を読み取るのが困難な場合もある。また、傾斜の緩い斜面では等高線の間隔が広くなり、微地形の判読が難しくなる（図R-T.4-2）。



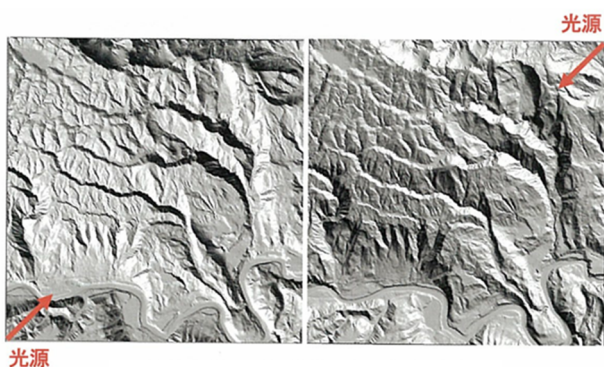
図R-T.4-1 等高線図



図R-T.4-2 等高線間隔の違いによる微地形表現の差

②陰影図 (図R-T.4-3)

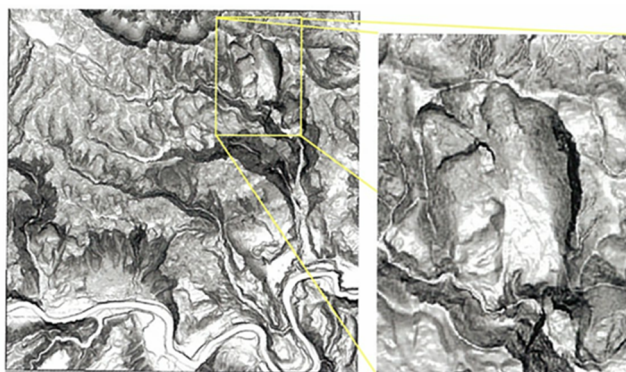
地形に斜めから上から光を照射したときに、光の当たる部分を明るく、光の当たらない部分を暗く表現することで、立体感を得られるようにした図¹⁾。方向依存性があるため、斜面傾斜方向により表現しにくい斜面が生じる場合がある。また、光の当たる方向により地形の高低が逆転して見える場合もある。



図R-T.4-3 陰影図
(左：南投光源 右：北東光源)

④傾斜量図 (図R-T.4-5)

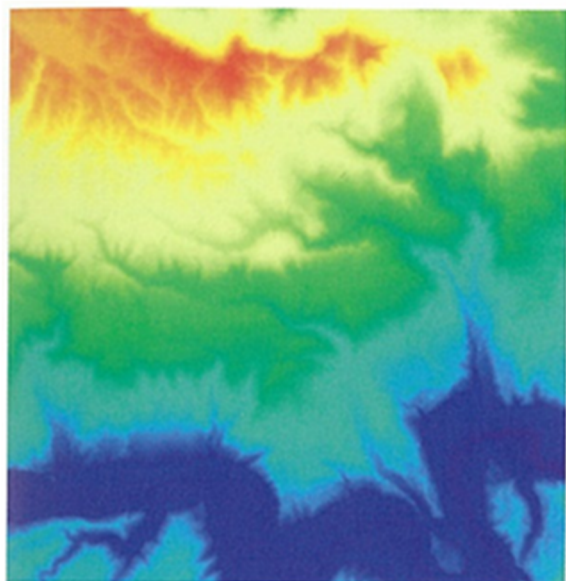
地形の傾斜の程度によって土地を分類し表現した図。傾斜の程度を連続的な色調の変化であらわした場合は傾斜量図という¹⁾。陰影図のような斜面の方向依存性が無く、微地形を表現することができる。平坦部分は同色で表現されるため、尾根・谷の違いは表現されにくく、膨らんでいる地形が窪んでいる地形かがわかりにくい。傾斜量を色で区分し、定量的に表現することも可能である (図R-T.4-6)。



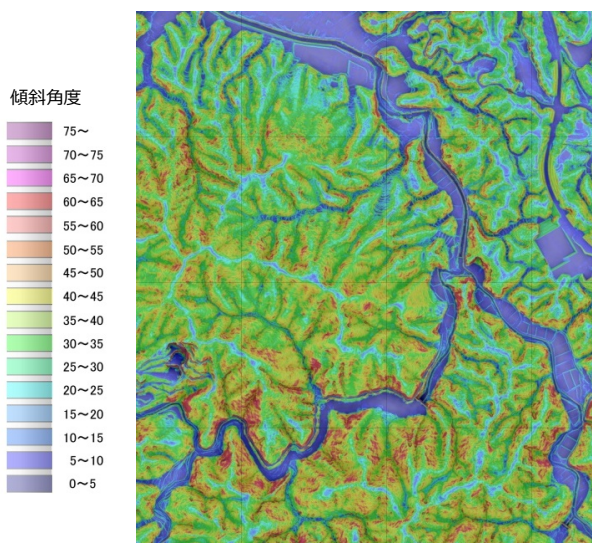
図R-T.4-5 傾斜量図

③段彩図 (図R-T.4-4)

段彩とは、等高線図において、値をいくつか段階区分し、等高線間の区域を段階ごとに異なった色または同じ色の濃淡をつけて彩色する手法¹⁾。色をグラデーション配色して表現することから、小地形の高低差は読み取りやすいが、微地形を表現するには困難な場合がある。



図R-T.4-4 段彩図



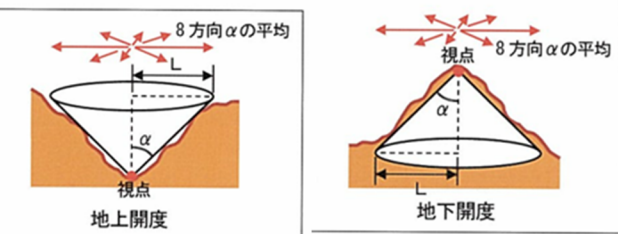
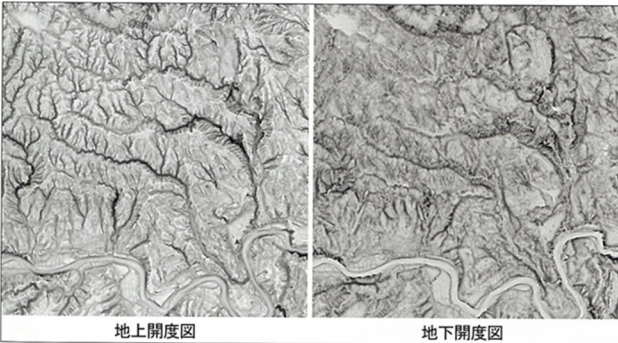
図R-T.4-6 傾斜量を色で区分した図

⑤開度図（図R-T.4-7）

開度図には、地上開度・地下開度がある。

地上開度とは、着目点を中心とするある半径内で天頂と地平線のなす角度（空を見ることができる角度）の最大値である。尾根部ほど大きく谷部ほど小さな値を示す。

地下開度とは着目点を中心とするある半径内で天底（観測点から鉛直線を下方に延ばして天球と交わる直下の点で天頂の反対）と地平線のなす角度（地下の広さを示す角度）の最大値である。尾根部ほど小さく谷部ほど大きな値を示す²⁾。地上開度、地下開度ともに、尾根と谷の明度が逆に示されるため、尾根と谷の抽出に優れる。



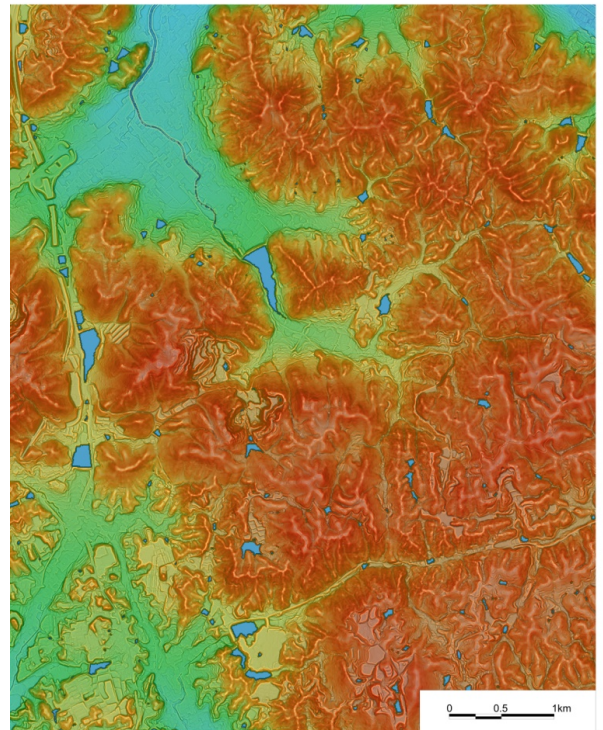
図R-T.4-7 開度図

ii) 特殊な地形解析図

DEMを使用した地形解析の方法としては、一般的な微地形表現方法を組み合わせることで、微地形解析図を作成する。微地形解析図は様々な機関で提案されているが、特許技術も含まれることから、解析を担当する会社により解析結果の表現方法が異なるのが実態である。

表R-T.4-1 特殊な地形解析図

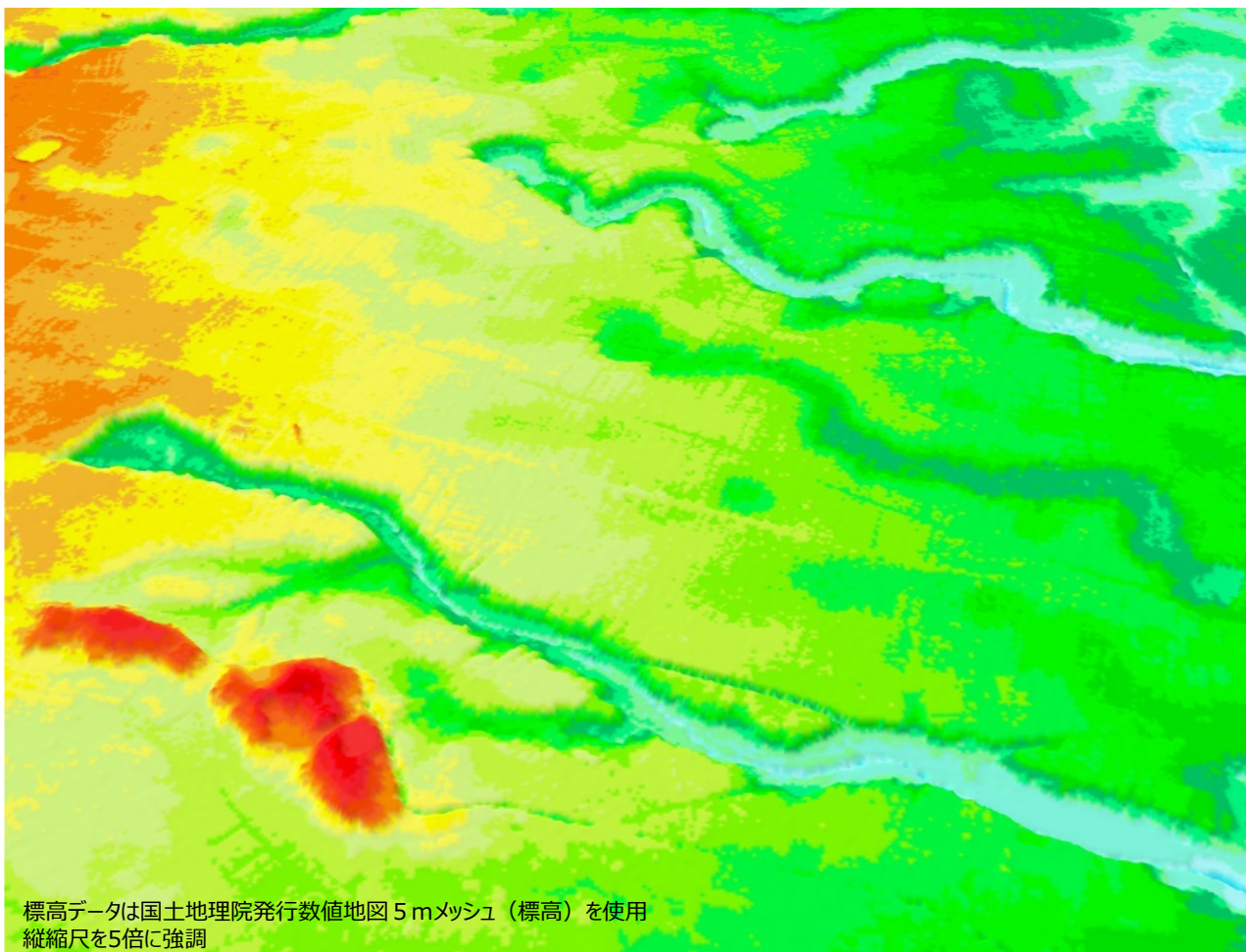
	汎用的な微地形表現方法						変換・調整方法
	等高線図	陰影図	段彩図	傾斜量図	開度図		
					地上開度図	地下開度図	
一般的地形図		光源を設定	同一標高に任意の色割り当て	傾斜量を計算して、角度により明度を変化	天頂から地平線までの角度	天底から地平線までの角度	
特殊な地形表現図							
陰陽図		○		○			フーリエ変換色調整
赤色立体地図					○	○	
ELSAMAP			○	○			
地形起伏図			○				微地形に応じた色付け
凸凹イメージマップ						○	ウェーブレット変換
CS立体図	○			○			曲率
スーパー地形表現		○	○	○	○		
多重光源陰影段彩図		○	○				3方向の光源



図R-T.4-8 特殊な地形解析図（CS立体図）の例
標高データは国土地理院発行数値地図5mメッシュ（標高）を使用

地形解析図の使用方法

地形解析図は3次元の地形モデルを2次元で表現するために使用するものである。しかしながら、3次元地質・地盤モデルを作成する際に地表面に地形解析図をテクスチャマッピング等で重ねることで、地形を強調表現した3次元地質・地盤モデルを作成することが可能となる。



図R-T.4-9 3次元地形モデル上に段彩図をテクスチャマッピングした事例

参考文献

- 1) 日本地形学連合編, “地形の辞典”, 2017.
- 2) 公益社団法人日本測量調査技術協会, 航空レーザー測量による災害対策事例集, 2013, p.195.

地表踏査の役割

地表踏査は地質図を作成するために欠かせない手法である。地層の走向傾斜を測るのは地質情報を集める基本であり、地質構造推定の精度に密接に関わってくる。また、走向傾斜のみならず、風化帯の把握、湧水地点の確認等目的に応じて地表踏査で確認する項目は様々ある。

踏査で得られる情報とその後の活用例は次のようになる。

- ◆ 走向傾斜
 - 地層分布の把握、地質構造の推定、変状予測 等
- ◆ 風化帯
 - 岩級区分、不安定岩盤の把握、建築材料の把握 等
- ◆ 湧水
 - 地下水の存在や賦存量の把握、水みちの推定 等
- ◆ 植生
 - 地層分布の推定、不安定斜面の把握、用地調査 等
- ◆ 地形
 - 地層変化の推定、活断層調査、不安定斜面調査 等
- ◆ 転石
 - 後背地の地質の推定、不安定斜面の把握 等

地盤調査で主に取得されるボーリングデータは、平面図上では点のデータ（断面図では線）でしかないため、地表踏査で得られる情報は、ボーリング地点間の地質情報を推定するために重要となる。特に露頭情報を得やすい山間部・丘陵部においては有効な手段である。

地表踏査データ利用の課題

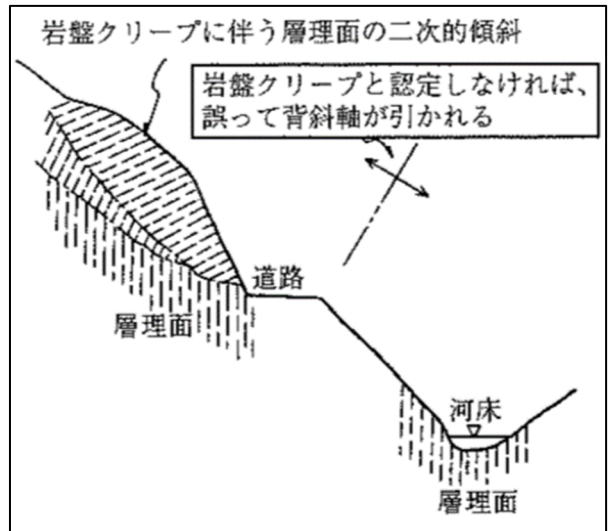
踏査で得られた情報をモデルへ反映する際には、その情報が何を表しているか吟味する必要がある。特に、上記の情報の中でも、解釈が難しいのは走向傾斜であると考えられる。

走向傾斜は地層にクリノコンパスを当てることによって得られる情報である。しかし、得られた走向傾斜が何を意味しているかを単純に判断できるわけではない。

例えば、図R-T.5-1に示すように岩盤クリープによる二次的傾斜を背斜軸によるものと判定してしまえば、測った値は正確でも現実の構造とは異なった地質構造を導いてしてしまう。このようなことが起きる要因にはスケール（時間や規模等）が大きすぎる、露出が悪いために全てを見ることができない（植物が繁茂している、露頭自体が小さい等）ことにある。

測定した走向傾斜がいったい何者なのか吟味してから利用しなければ、的外れな地質モデルを作ってしまう恐れがある。

もちろん走向傾斜以外の情報でも判断は必要になってくる。風化帯であれば、風化の原因によって地質モデルへの反映の仕方が異なってくる。観察している対象が人為的に改変されたものであるかどうかの判断も必要である。



図R-T.5.1-斜面における地質構造の相違¹⁾

理想としては、全ての走向傾斜が何を測ったものなのか理解できることである。しかし、実際には様々な制約（用地的・時間的・予算的等）から必ずしもその答えを出せるものばかりではない。つまり走向傾斜の解釈には不確かさが付きまとうのである。

実務においては全ての走向傾斜については理解ができていない状態であったとしても地質モデルを作成しなければならない場合がほとんどである。地質モデルを作成する際には、どの走向傾斜は十分に理解できていて、どれが十分に理解できていない（不確かな）ものなのか明示しておくことが望ましい。例えば、大局的な構造とは明らかに違うが何かわからないもの、見通しで測った精度の低い走向傾斜等は（ ）付きにする等区別できるようにするべきである。

露頭観察から得られる情報

写真R-T.5-1は露頭をほぼ真上から撮影したものである。碎石層の「隙間から高位段丘堆積物のくさり礫層が見えており、その中にはほぼ垂直な粘性土層を挟んでいる。

この地域の大局的な地質構造は $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 程度の緩い向斜構造をしているため、この粘性土層がどのようなものなのかは吟味しなければならない。写真R-T.5-2は同じ地域の別の露頭である。緩傾斜だった地層が撓曲し、ほぼ垂直になっていることがわかる。撓曲の成因としては断層が考えられる。写真10.4.4-1の粘性土層もこのような撓曲を真上から見ているとすると、地下に断層があることが推定される。

測った走向傾斜が何を表しているかは、必ずしも一つの露頭で答えを得られるわけではない。走向傾斜を正しく解釈するためには、多くの露頭で走向傾斜を測ることが重要である。これは走向傾斜に限らず他の情報についても同様のことが言える。



写真R-T.5-1 高位段丘堆積物中の垂直粘性土層



写真R-T.5-2 粘性土層の撓曲

参考文献

- 1) めざせフィールドの達人編集委員会、土木地質の秘伝 めざせ！フィールドの達人. 2011, p.179.

3次元地質・地盤モデル構築に有効な物理探査とは

物理探査とは、対象物（地盤）における種々の物性値を、物理的手法を駆使して取得・解析する手法である。

3次元地質・地盤モデル構築にもっとも有効と考えられる物理探査手法は、屈折法や反射法である。これは、手法自体に多様な地盤への適用性が高いためである。しかし、物理探査手法には、適用できる地盤条件に制限がある（たとえば浅層反射法により地下水分布の推定は困難である）。

物理探査の結果による地質構造検討は、あくまでも物性値からの推測であるため、それだけでは複数の異なるモデルが得られる。この混乱を防ぐため、ボーリング結果をもとに物性値の持つ意味を考える必要がある。つまり、物理探査から3次元モデルを構築するのではなく、ボーリングによって得られた1次元地質モデルを2次元・3次元に拡張するのが物理探査の役割といえる。下記に物理探査の役割をまとめる。

①地質構造推定に有効な物理探査

- ◆ 屈折法弾性波探査
- ◆ 浅層反射法探査

②既存の地質モデルに物性値を付与する物理探査

- ◆ 孔内速度検層・密度検層（弾性波速度、密度）
- ◆ 孔内電気検層（見かけ比抵抗値）
- ◆ 比抵抗電気探査（見かけ比抵抗値）
- ◆ 電磁探査（見かけ比抵抗値）

3次元地質・地盤モデルを作る際の課題

物理探査結果をもとに作成する3次元地質・地盤モデルは、測定される物性値に基づく。調査目的によって物理探査手法は異なるため、結果として得られる物性値とそれによる3次元地質・地盤モデルも異なってくる。

各種物理探査によって得られた物性値の逆開析を行うことで、2次元及び3次元の物性値に基づく地質モデルが得られる。モデルの層厚や地質的な構造は解析的に求めることは可能であるが、複数の解が得られる。そのため、ボーリングデータとのすり合わせが必要となる。

物理探査の解像度は、一般的に測線間隔、電極配置、周波数等のパラメータから算出されるため、「この物理探査ならば、この程度である」とは簡単には求まらない。さらに、深度が深くなるにつれ解像度は落ちる。各物理探査手法から得られる物性値と、それぞれの分解能を整理して表R-T.6-1に示す。

この点を意識せずに3次元地質・地盤モデルを作成すると、大きな誤解を招く恐れがある。物理探査ではソリッド・ボクセルモデルで3次元地質・地盤モデルを作成することが多いため、なめらかな3次元モデルとは合わないことがある。

表R-T.6-1 物理探査手法と分解能

測定対象	手法	得られる情報	分解能
弾性波	屈折法弾性波探査	弾性波速度構造	¼波長
	浅層反射法探査	反射境界面の形状	¼波長
	速度検層	弾性波速度構造	Sampling rateと孔内移動速度に依存
電磁波	電磁探査	比抵抗分布	電磁波波長
	地中レーダ探査	反射境界面の形状	½波長
比抵抗	電気探査	比抵抗分布	電極配置に依存
	電気検層	比抵抗分布	Sampling rateと孔内移動速度に依存
放射線	密度検層	密度分布	10in.

R-T.7 地中レーダー

地中レーダーの利用場面

地中レーダーとは高周波の電磁波を地中に向けて放射し、その反射波の走時を測定することで地中の状態を探査する物理探査手法である。反射強度や波形により、反射物の種類を予測可能である。

地中レーダーの主な利用場面として、埋設物探査に多く利用されている他、以下の利用がある。

- ◆ 地下インフラの埋設工事における先行埋設物の探知
- ◆ 壁のボーリングにおける鉄筋位置の確認
- ◆ 人工建造物のメンテナンス、路面下空洞調査
- ◆ トンネル等のコンクリート内部（天井部含む）の空洞の調査
- ◆ 橋床検査
- ◆ 構造物（堤防、ダム、道路）、土壌、岩盤内の水分モニタリング等
- ◆ 地殻変動調査、活断層調査、地震履歴調査等の地震地質学等の分野
- ◆ 沖積低地、地すべり堆積物、河川氾濫原の浅層地下構造

表R-T.7-1 利用分野と主な対象物

利用分野	主な対象物
埋設物探知	パイプ・ケーブル 埋設投棄物
非破壊検査	コンクリート、建造物、トンネル
路面保全	舗装状態、空洞検出
土木・建設	地盤調査、掘削前方監視
環境・農業	地下水、土壌水分、樹木、根の計測
地質・資源調査、 遺跡探査	埋設物、構造物内部可視化
社会安全	地雷探知

利用上の課題

【メリット】

- ◆ 測定自体は短時間で可能である
- ◆ 利用分野は多岐にわたり実用的利用が進んでいる

【デメリット】

他の物理探査手法と比べ、比較的短時間で測定が可能であるが、データの解釈に当たっては、経験が必要とされる。レーダー断面図は地下の状況を正確に表現している訳ではないため、地下構造を判読し解釈するには、多くの経験を必要とする。他にも次のような問題がある。

- ◆ 埋設物の種類までは特定できない
- ◆ 特定された反応の正体は、実際に試掘して確認する必要がある
- ◆ 海生の粘性土等に埋設されている配管については、信号が減衰してしまい、データの把握が難しい



写真R-T.7-2 地中レーダー



写真R-T.7-1 道路陥没の事例



写真R-T.7-3 路面下探査車

3次元地質・地盤モデル構築に用いる際の留意点

地中レーダ結果を3次元地質・地盤モデル構築に用いる際の注意点を下記に示す。

- ①データの精度を向上させるには、測線の設定をある程度密にする必要がある。
- ②空洞の位置や埋設物の位置等を改めて測量することなく正確に現地、又は平面図に作成するためには、GNSS(GPS)データと地中レーダー探査記録を融合させる等により、地中レーダー探査の波形データに位置情報を正確に結びつけることが必要となる。
- ③レーダ断面図の判読性向上を目的とし、現在多く使用されている処理法として、2次元マイグレーション処理とタイムスライス処理が挙げられる。しかし、いずれの処理法も取り扱う空間が、ある一測線におけるレーダ断面図のみであるため、測線間に存在する物体に関しては問題を持つ。

以下、特に重要と考えられる2次元マイグレーション処理及びタイムスライス処理について、その問題点を記述する。また、その解決策として3次元マイグレーションについても記述する。

2次元マイグレーションの問題点

マイグレーション処理法は、アンテナで受信した反射波を受信位置から逆伝播させることにより、レーダ断面図内における埋蔵物体の形状及び存在位置を容易にするレーダ画像処理技術である。地震波を用いた探査技術の研究から応用され、様々なマイグレーション処理法が存在する。

従来は、このマイグレーション処理を2次元空間であるレーダ断面に適用しているため、ここでは2次元マイグレーション処理と称する。2次元マイグレーションの手順は次のようになる。

- ①画像の深さ方向を地中の比誘電率 ϵ を用いて、遅延時間から距離に変換する。
- ②レーダ波を受信した点から受信した信号を逆伝播させる。
- ③実施に物体のある位置で全ての信号が重なり合う。

2次元マイグレーション処理法は、レーダ画像のような2次元の世界で考えていると、効果的な処理法であるが、3次元の世界に結果を還元した場合、問題が生じる。つまり、2次元マイグレーションでは波の逆伝播先がレーダ断面図内に限定されてしまう。そのため、一つずつのレーダ断面画像において2次元マイグレーションを行うと、測線直下以外に存在する埋設物からの反射波も測線直下のレーダ断面画像に復元されてしまう。よって、アンテナから物体までの距離は再現できているが、測線からの反射波の反射位置を復元することができていない。

タイムスライスの問題点

タイムスライスとは、複数のレーダ断面図からある一定の伝搬往復時間における反射信号を抜き出し、測線位置に並べたものである。これは、反射信号の編面分布を提示するため、遺跡等の概略を把握するのに効果的なデータ表現方法である。深度を順次変化させることにより、発掘調査と同じような感覚で埋設物の状態を推定することができるために、探査結果をイメージしやすい表現方法といえる。

しかし、タイムスライスは反射信号を測線直下に並べており、測線間についてはデータを補間して表現している。そのため、測線間に存在する物体に関しては、その大きさ・位置を表現してはいない。

タイムスライスは、複数測線にわたって存在するような比較的大型の遺物の存在状況を把握するには効果的な方法であるが、測線と測線の間に存在するような小さな物体の位置を推定することは不可能である。

さらに、点物体がレーダ断面画像では放物線として捉えられてしまう様に、レーダ断面画像は、物体の形状を反映している訳ではない偽像を有する。もし、偽造を含んだままタイムスライスを作成すれば、偽像がさらに偽造を生み出してしまふという問題が生じる。

3次元マイグレーション

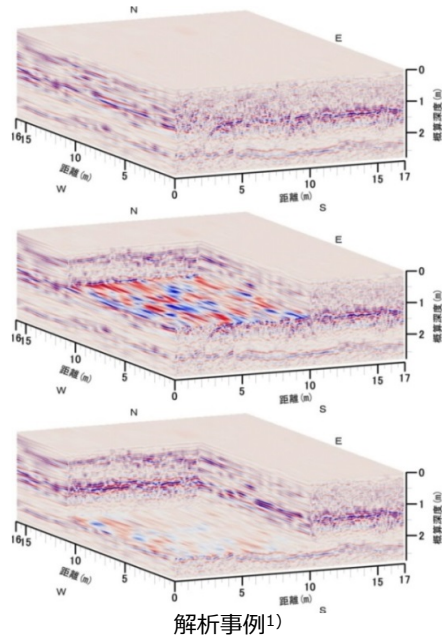
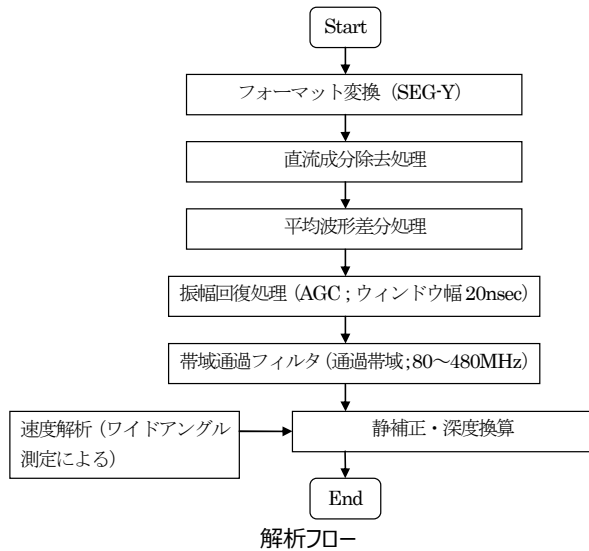
現在まで用いられてきた2次元マイグレーション及びタイムスライスは、その処理結果に問題を含んでおり、その問題を認識せずに用いた場合、結果解釈に大きな誤解を生じる。これら問題の解決策として3次元マイグレーションが用いられている。

3次元マイグレーション法では、特に2次元マイグレーション及びタイムスライスでは解決できない測線間に存在する物体の検出と位置推定が可能となる。

マイグレーションの手法にはいくつかの種類があるが、その基礎となる原理はいずれも、前述した波の逆伝播である。すなわち、各測定点で得られた受信波を、受信点から逆伝播させると、全ての点から逆伝播する波がある点で交わり、その点が実際に物体のある点であるということである。

事例R-T.7-1) インパルスGPRによる3次元探査 (表層地質)

- ◆測線縦断方向20cm間隔に対して、横断方向は1m。これを縦断・横断とも20cm間隔になるように横断方向を補間。

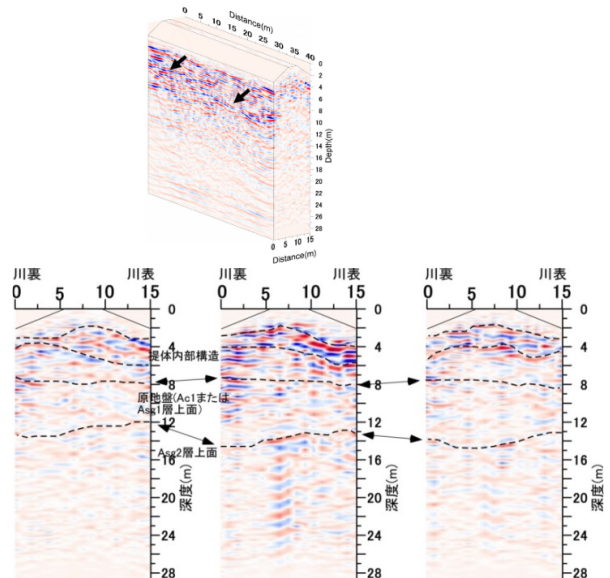
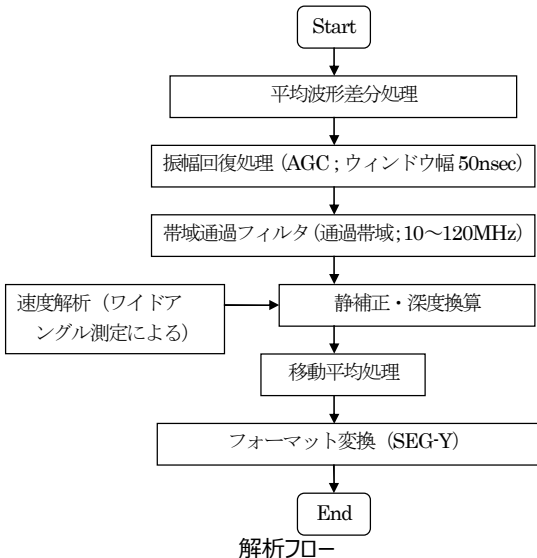


解析事例¹⁾

- 1) 高倉ほか、北関東地下水観測サイトにおける比抵抗法と地中レーダの繰り返し調査. 物理探査学会第118回学術講演会論文集, 2007.

事例R-T.7-2) 連続波GPRによる3次元探査 (河川堤防)

- ◆測線縦断方向20cm間隔に対して、横断方向は1m。これを縦断・横断とも20cm間隔になるように横断方向を補間。
- ◆堤防法面の測線については、測線の標高が異なるため、電磁波速度を考慮して補正する必要がある。



解析事例¹⁾

- 1) 鈴木ほか、河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究 (その3) -連続波レーダによる実堤防試験探査-. 物理探査学会第118回学術講演会論文集, 2008.

地盤変形解析における3次元地質・地盤モデルの利用

ここでは特に地盤の変形問題等を扱う場合の、3次元モデル作成の目的や留意点、手順等を示す。

FEM、FDM、DEM等に代表される数値解析を行う上で、解析手法に適した3次元地質・地盤モデル、つまり3次元構造や属性情報（解析に必要なパラメータ、境界条件等）を構築することを目的とする。数値解析を行うための3次元地質・地盤モデルとしては、下記の点が重要となる。

- ◆ 解析に適したメッシュ形状を作成
- ◆ 解析に適した境界条件(地層境界、モデル端部)を設定
- ◆ 解析に必要な属性データ(物性値)と適切な境界区分

地盤変形解析における課題

数値解析をおこなうための3次元地質・地盤モデルとしては、ボクセルモデル等のメッシュモデルや粒状体モデルがあるが、ここでは汎用性の高いメッシュモデルを作成する際の留意点を示す。

i) 要素形状の留意点

FEMによる解析では、6面体要素の場合は、一般に各メッシュが正立方体に近いほど解析精度は高い。しかし、もともと地盤には不均質性や外部条件の影響が大きいことから、解析結果に許容誤差を考慮して安全側のモデル設定をすることが多い。

また、地質構造の複雑性から、三角錐（四面体）要素を多用することが多いが、地盤の数値解析においては問題はないものの、鋭角に尖った三角錐では形状が解析結果に影響を与える影響が大きくなることもあるため、可能な限り鋭角な要素は排除するべきである（表R-T.8-1）。

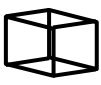



ボクセルモデルで地質・地盤モデルを構築し、地層境界周辺や、地層変化の大きな部分のボクセルを小さくする、傾斜部等で部分的に六面体要素を用いる等工夫することで、解析精度を確保したうえで、後の対策工モデルが作成しやすくなる等自由度の大きなモデルとなる場合がある。

ii) 対策工法を考慮したモデルの構築

対策工を検討する際には、最初のモデルから対策工の設計を考慮したモデルを構築する必要がある。すなわち、地盤改良や擁壁等を検討する場合は、対策前の現況解析モデルにおいても、対策工モデルを追加できるようにメッシュ構築する必要がある。

2次元解析ではモデルの再構築も大きな口は生じないが、3次元解析ではモデルの再構築による手戻りの影響は非常に大きくなる恐れがある。

表R-T.8-1 要素形状と解析精度(品質)

解析精度	◎	○	△	×
形状				

3次元地下水解析における3次元地質・地盤モデルの利用

3次元地下水解析の実施には3次元地下水解析モデルが必要である。3次元地下水解析モデルの構築に使用する地形情報、地質情報等は3次元地質解析によって作成される。

3次元地下水解析には次のような目的・用途が想定される。これらの目的・用途や計算に使用するソルバ、計算マシンのスペックに応じた3次元地下水解析モデルを構築することになる。

- ◆ 工事等の影響予測、対策検討・評価
 - ・トンネル掘削や切土による地下水位低下・湧水量減少・沢涸れ 等
 - ・掘削構造物の構築や矢板貫入にともなう地下水位低下や流動阻害 等
- ◆ 水資源量評価
 - ・井戸の採水可能水量 等
- ◆ 汚染予測、対策検討・評価
 - ・地質・地下水汚染の汚染物質の流動・拡散 等
 - ・海岸付近の掘削にともなう塩水流入 等

3次元地下水解析モデルを構成するデータには次のようなものがある。このうち、①と②は3次元地質・地盤モデルに基づいて作成し、その他はソルバまたはプリプロセッサで作成することが多い。

- ① 構造データ
 - ・節点座標・要素構成、格子点座標等
- ② 材質分布データ
 - ・要素または格子点毎の材質 = 地質等 = 分布
- ③ 物性値データ
 - ・各材質の水理物性値
- ④ 初期条件データ
- ⑤ 境界条件データ

3次元地下水解析における課題

i) 解析領域と地質データ分布範囲

3次元地下水解析の解析領域は境界に妥当な水理境界条件が設定できるように決めることが多く、地質データの分布範囲とは必ずしも整合しない。

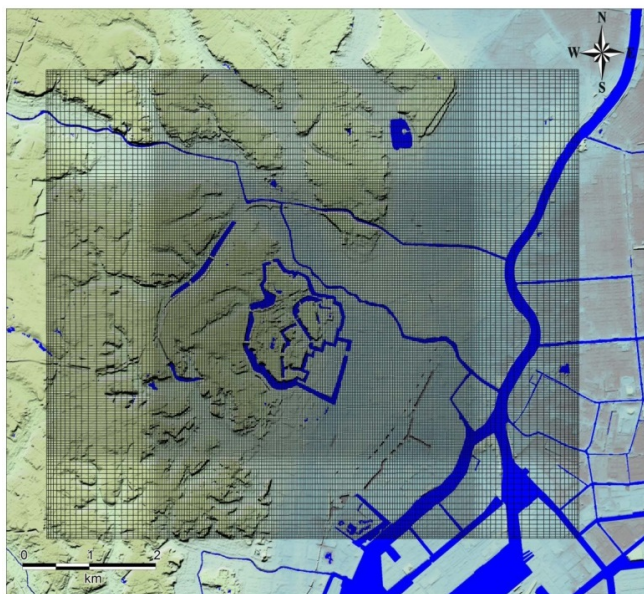
解析領域が当該プロジェクトで得られている地質データの分布範囲より広い場合、分布範囲外のデータを収集することになる。その場合、データ間の不整合や精度の管理に留意する必要がある。

ii) メッシュ規模

計算に使用するソルバの制約、実用的な計算時間との兼ね合い等により、3次元地下水解析モデルの規模（節点数・要素数、格子点数等）には上限がある。そのため、関心領域の計算格子において解像度を变化させることがある（図R-T.8-1）。

iii) メッシュ形状

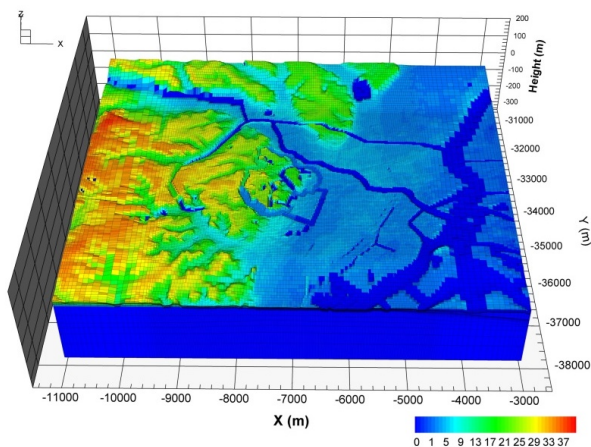
差分法メッシュの場合は原則として立方または直方格子となる。有限要素法メッシュの場合は要素形状の制約は比較的小さいが、扁平率が大きい要素は好ましくない等の制約がある（図R-T.8-3）。



図R-T.8-2 差分法における平面格子⁸⁾
中央の関心領域の格子を細かく設定した事例

四角柱	三角柱	四角錐	三角錐

図R-T.8-3 3次元地下水解析モデルのメッシュ形状
(Dtransu-3D・ELの場合)



図R-T.8-1 差分法における3次元モデル⁸⁾

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、応用地質株式会社 株式会社地圏環境テクノロジー-東京大学, "都市における地中熱大規模利用可能性の総合評価". 2013.

地すべりシミュレーションにおける3次元地質・地盤モデルの利用

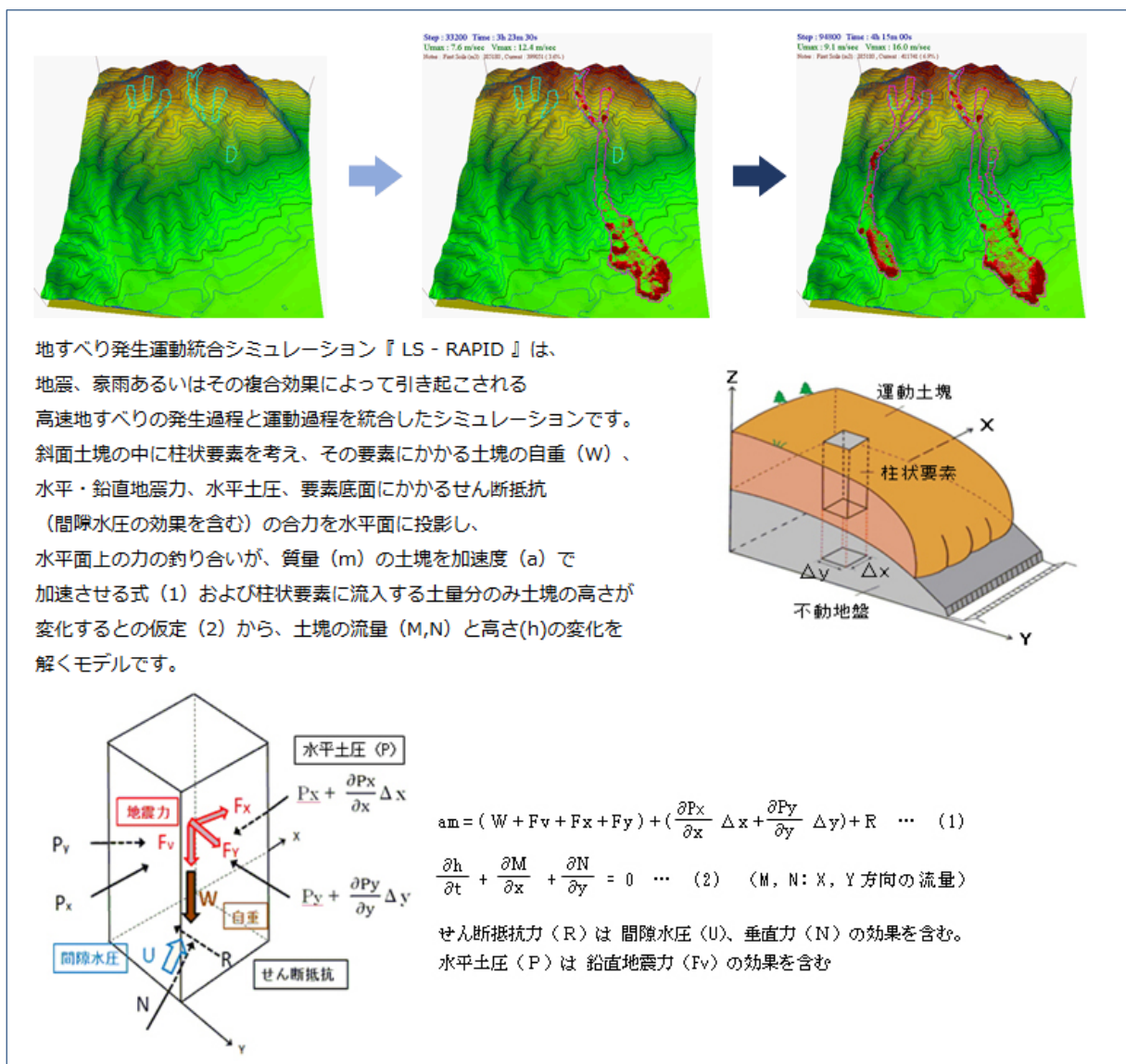
時間とともに変化する地すべり土塊の到達範囲を予測することで、避難警戒対策の立案に対する効果的な活用が期待できる。

一般に、対策工の効果は事前と事後の動態観測結果により判定しているが、対策工法設計の時点でシミュレーションを行うことにより、地すべり土塊の移動を抑制・抑止する効果的な対策工の選定や、その組み合わせ及び配置等の検討に活用が期待できる。

地すべりシミュレーションにおける課題

地すべりのシミュレーションに用いるパラメーターは、原位置試験並びに室内試験結果を活用し設定する。さらに、すべり面の特性や地すべり土塊とその周辺を構成する地盤の特性、地下水状況、地震や降雨を適切に表現することが必要である。

しかしながら、これらの特性を厳密に再現することは難しく、定式化は複雑になり、モデルを記述するパラメーターの数も多くなる。現象の予測に必要な精度を有しつつも、できるだけシンプルな構成モデルにすることが望ましい。



図R-T.8-3 地すべり発生運動統合シミュレーションの例¹⁾

参考文献

- 1) 五大開発HP：地すべり発生運動統合シミュレーションLS-RAPID(ICL)
<http://www.godai.co.jp/soft/product/products/LS-RAPID/> (2018年2月時点)。

3次元地質・地盤モデルデータの二次利用

ここでは一般的な構造解析や地盤解析ソフトの種類や適用範囲・性能について比較する。代表的な3次元 F E M 構造解析ソルバーの例を表R-T.8-2に、国内販売の3次元 F E M 地盤解析ソルバーの例を表R-T.8-3に示す。

表R-T.8-2 構造解析ソフトの種類や適用範囲・性能についての比較

プログラム名		ABAQUS	ANSYS	DIANA	MARC	NASTRAN	MIDAS	
解析機能	微小変形	弾性解析	○	○	○	○	○	○
		弾塑性解析	○	○	○	○	△	○
		動的応答解析	○	○	○	○	△	○
		座屈解析	○	○	○	○	○	○
	大変形	弾性解析	○	○	○	○	△	○
		弾塑性解析	○	○	○	○	不明	○
		動的応答解析	○	○	○	○	不明	○
		座屈解析	○	○	○	○	不明	○
	接触問題	○	○	○	○	△	○	
	熱伝導解析	○	△	△	○	○	○	
USER SUBROUTINE	○	●	○	○	○	○		
備考	汎用性・拡張性に定評あり	建設業界での使用実績に乏しい	コンクリート要素の非線形ライブラリが充実している				土木構造物専用機能が充実	

※2018年2月時点

【凡例】 ○：標準装備、△：オプション、×：機能なし、●：特殊対応

表R-T.8-3 地盤解析ソフトの種類や適用範囲・性能についての比較表

プログラム名		PLAXIS	SoilPlus	GTS NX	GeoFEAS 3次元	VGFlow	ProSAS
解析機能	段階施工解析	○	△	△	○	×	○
	圧密解析	○	△	△	○	×	○
	大変形解析	○	△	△	○	×	○
	せん断強度低減法	○	△	△	○	×	○
	液状化解析	○	△	△	×	不明	○
	動的応答解析	△	△	△	×	×	○
	浸透流解析（定常）	○	△	△	×	○	不明
	浸透流解析（非定常）	△	△	△	×	○	不明
備考	四面体要素。二つの並列ソルバーを実装。多様な構成則	多様な要素形状	多様な要素形状。応力-浸透の連携解析・完全連成解析が可能	多様な要素形状。多様な構成則	同左別途、同社の斜面安定計算ソフトへ連携可能	多孔質要素可能。任意の応力-歪曲線使用可能	

※2018年2月時点

【凡例】 ○：標準装備、△：オプション、×：機能なし

構造解析ソフトへ持ち込む際のデータフォーマット互換

代表的な構造解析アプリプロセッサ「Femap」の例を表R-

T.8-3に示す。

表R-T.8-4 FemapにおけるCADデータ（読み込み）/構造解析ソルバーデータ（出力）対応一覧

読み込み可能なCADデータ	出力可能なソルバーデータ
IGES	ABAQUS
STEP	ANSYS
Parasolid	Nastran (NX, MSC, Nei)
ACIS	Marc
NX	LS-Dyna
Pro/Engineer	
SolidWork	
CATIA	
AutoCAD	
I-deas	
Solid Edge	
STL	

参照URL : http://www.rccm.co.jp/download/files/I-Deas_to_Solidedge_Femap_rev2.pdf?pdf=307 (2018年2月時点)

事例R-T.8-1) 地下水解析のための3次元地質・地盤モデル構築 (1)

モデル化範囲

山岳トンネルの建設に伴う周辺の水文環境への影響評価（沢洩れ・流量減少、井戸洩れ・水位低下等）を目的に3次元地質・地盤モデルを構築した。本件の成果物は、地形、地質境界、トンネル他のTINサーフェスモデルであり、材質情報を含む有限要素メッシュの構築にこれらを使用した。

地下水解析の解析領域を図1に示すとおりに決め、3次元地質・地盤モデルの構築範囲はこの解析領域と同じにした。地下水解析の解析領域は境界条件の設定を考慮し、次に示す位置を外郭とすることが多い。本例では下記の位置を外郭とした。なお、4トンネルを3つの解析領域に分けている。

- ・河川、谷筋、尾根筋（水の出入りがない）
- ・海岸、湖岸、大きな河川（水位が一定または決められる）

【南北境界】

- ・（前提）既往検討による影響予測範囲より外側
- ・（前提）評価対象（沢+集水範囲、井戸、湧水点）の分布範囲の外側
- ・南に十分離れた位置にある河川
- ・南に平地を挟んで山列がある区間はその東西方向の尾根筋
- ・路線を横切る河川・谷筋の流域北限の尾根筋
- ・遠方から流下する河川については狭窄部を形成する尾根筋

【東西境界】（3領域相互の境界も含む）

- ・路線の明かり区間を横切る河川
- ・河川がトンネル範囲から東へ遠ざかる区間は南北方向の尾根筋

その他留意点

本例の地下水解析では沢流量、井戸・湧水点水位を評価する必要があるため、地形面のモデリングにあたって次の点を重視した。

- ・評価対象の沢が適切な形状になっていること
- ・評価対象の沢の流域の分水界が適切な位置にあること
- ・評価対象の井戸の位置の標高が井戸の地盤高に合っていること
- ・評価対象の湧水点の標高が当該位置の標高と合っていること

地山区分

地質ごとの透水性、断層の規模や性状を考慮し、地山区分は表1に示すとおりとした。3次元地質・地盤モデルの地質境界面としては、この地山区分境界の3次元サーフェスモデルを構築した。

透水性の観点で断層をみると、破碎帯沿いに水が流れやすい場合、粘土化した破碎帯が遮水層として働く場合の両方がある。これらの状況に対応できるように、断層を厚みを持たせた層としてモデル化した。

表1 地山区分

記号	地質時代	特徴
rd	完新世	砂礫を主体とする未固結堆積物
tf		
dt		ルーズな粘性土混じり礫～礫混じり粘性土
Ha	後期～中期更新世	上部は固結スコリア、下部は半固結ローム
ACg	前期更新世	固結度の高い堆積岩層
ASs	～後期鮮新世	
ASs-Md		
MCg	後期中新世	巨礫を含む凝灰質礫岩、亀裂が少なく硬質 主体は凝灰角礫岩、凝灰質砂岩、火山凝灰岩を介在 潜在的な亀裂が発達
MPc		
Th	中期中新世	玄武岩～安山岩溶岩、安山岩質～玄武岩質凝灰岩、 火山凝灰岩、凝灰角礫岩 潜在的な亀裂が発達
N断層		東西系の主要断層の破碎帯
K断層		東西～北西-南東系の主要断層の破碎帯
断層		南北系の断層のうち主要なものの破碎帯

構造物

トンネル施工後の予測解析も実施するため、解析対象となる次の構造物も3次元サーフェスモデルを構築した。

- ・トンネル壁面
- ・注入範囲外郭面（トンネル壁面からの距離で設定）
- ・切土面

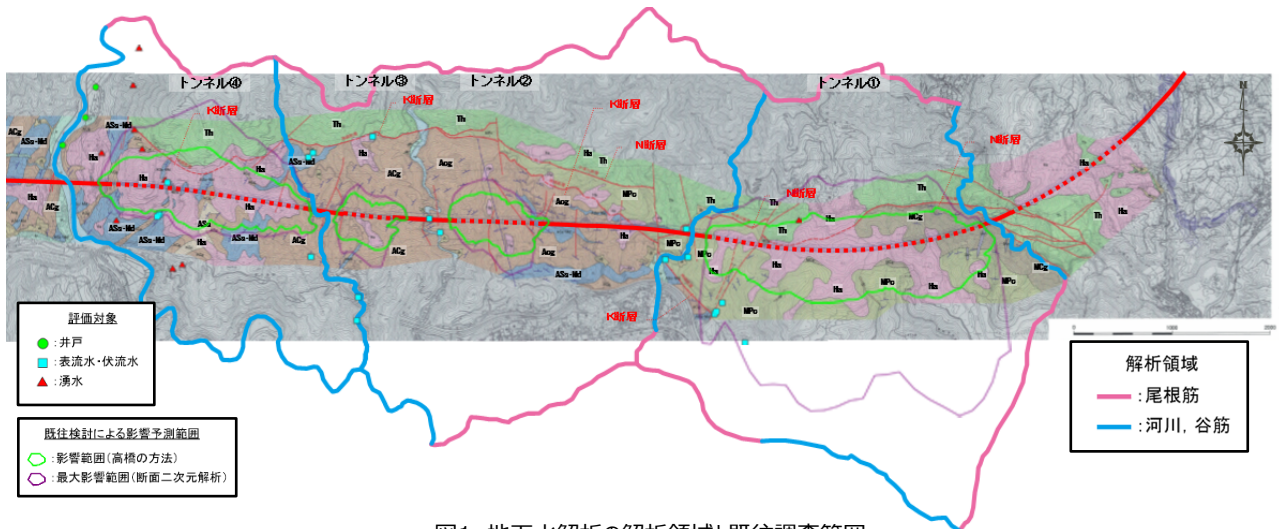


図1 地下水解析の解析領域と既往調査範囲

事例R-T.8-1) 地下水解析のための3次元地質・地盤モデル構築 (2)

地質データの補充

本例の対象路線で詳細な地質調査・解析が実施されている範囲は路線の両側0.5~1kmであった(図1で地質区分による色が塗られている範囲)。一方、地下水解析の解析領域は路線の両側2km程度である。そのため、詳細な地質調査・解析が実施されていない範囲の地質モデルも構築する必要があった。このため、3次元地質・地盤モデル構築の前に、以下に示す地質データの補充を実施した。

◆使用したデータ

- ・事業初期に作成された広域地質平面図
- ・広域地質平面図作成時に参照された文献

◆実施した作業

【地質分布(被覆層)】

- ・地形も考慮して被覆層(rd, dt, tr, Ha)の分布範囲、下限位置を推定

【地質境界(断層)】

・広域地質平面図の外郭まで延びている南北系断層を更に延長

- ・長くて屈曲しているN断層、K断層の傾斜を適宜推定
- ・傾斜が不明な断層の傾斜を推定

【地質境界(その他)】

- ・A層群、M層群内の境界を南へ延長

3次元地質・地盤モデル構築

本例の3次元地質・地盤モデル及び構造物モデルは次のデータをTIN補間して構築した(図2、地質境界面(その他)と切土面は非表示)。

◆地形面

- ・等高線、標高点、河川・沢筋・尾根筋の連結線
- ・路線の地盤高、ボーリング孔口、井戸・湧水点の地盤高

◆地質境界面(被覆層下限)

- ・地形標高を設定した分布範囲外郭線、内部の推定下限線

◆地質境界面(断層)

- ・地形標高を設定した地質平面図の断層線上に配置した傾斜線(厚み分ずらした位置に配置)

◆地質境界面(その他)

- ・地質平面図・断面図から推定した境界面コンター

◆構造物

- ・トンネルの縦断線形上に配置した横断形状線
- ・切土形状線

地下水解析メッシュ構築

本例の地下水解析メッシュは次の手順で構築した。

- ①地形面、地質境界面、構造物のサーフェスマデルを相互の交線で分割
- ②分割したサーフェスマデルから特定領域を囲むものを集めてソリッドモデルに統合
- ③ソリッドモデルの内側をメッシュ分割
- ④全領域のメッシュを統合して地下水解析メッシュ完成(図3)

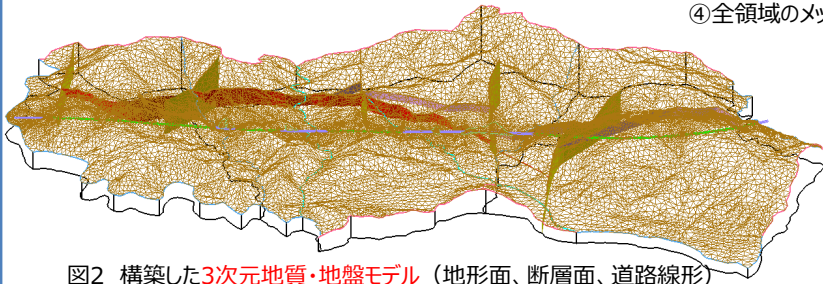


図2 構築した3次元地質・地盤モデル(地形面、断層面、道路線形)

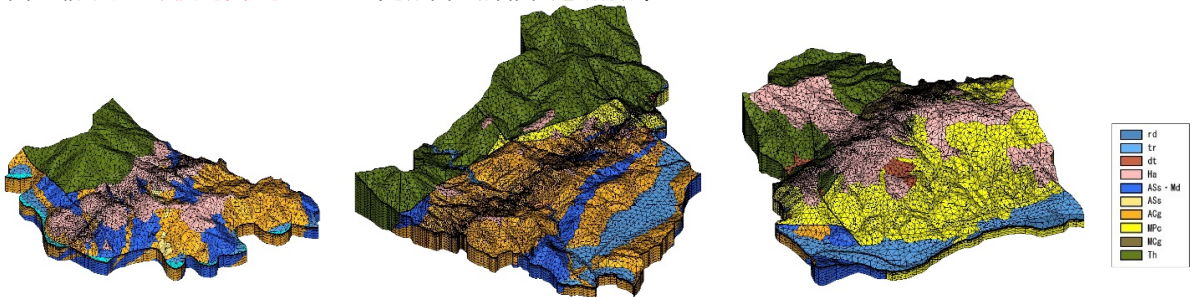


図3 構築した地下水解析メッシュ

事例R-T.8-2) 3次元FEMアプリケーションによるソリッドモデル作成事例

概要

3次元FEMにおける、3次元ソリッドモデルの作成事例を示す。

○検討上の問題点

鉄道に直交する谷に道路盛土が計画されていたが、この谷には軟弱地盤が分布するとともに鉄道への近接施工となることから、盛土に伴う基礎地盤の破壊・変形と鉄道軌道への影響が懸念された。しかし、検討に際して、本線盛土が鉄道軌道に斜交することから、解析主測線を一義的に決められなかった。これらを解決するために、3次元FEMによる変形解析を実施した。

○解析プログラム

MIDAS GTS_NX (土/水連成変形解析)

○解析モデル

要素数 = 82847要素

ソリッドモデル作成手順

- ① 現況地形サーフェス、計画盛土サーフェスモデルの作成
※地形測量CAD、計画盛土設計CAD3次元モデルを作成
- ② 基盤面サーフェスモデルの作成
※地形や地質調査結果をもとに基盤面を3次元サーフェス化
- ③ 地質断面図をもとに地質境界面のサーフェス作成 (図1、図2)
※地層面は、2次元地質断面をそのまま横方向に拡張した。
地質調査は、谷中央の測線上での複数のボーリング、微動アレイ探査を実施した。
- ④ 長方体ソリッドを各サーフェスの組み合わせでカット (図3、図4)
現況地形→計画盛土サーフェス→基盤面サーフェス→各堆積層サーフェスの順にカットすることで各地層のソリッドモデルを作成する。
- ⑤ オートメッシュ機能で3次元メッシュ作成
※オートメッシュ機能により、3次元メッシュモデルを作成 (図5)
- ⑥ 土/水連成解析により、地盤変形 (図6)、圧密変形、地盤破壊を解析

技術的成果

解析の結果、軌道の変位が最も大きい地点は盛土が最も近接する地点であったが、谷中央付近の変位量も比較的大きく、解析主測線を一義的に決められないことがわかった。このようなケースでは3次元地質解析が有効であることがわかったが、解析モデルの精度向上が重要な課題である。

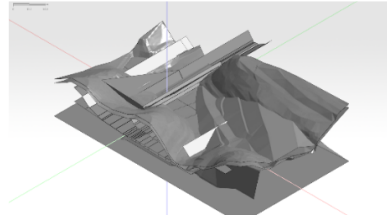


図3 3次元地形・地層境界サーフェス組み合わせ

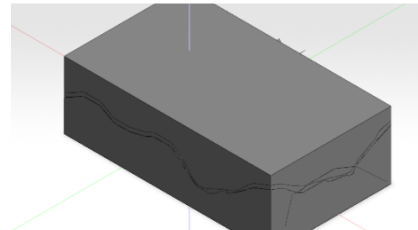


図4 長方体ソリッドをサーフェスで切り取り

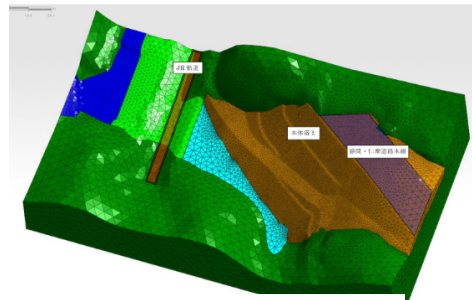


図5 3次元解析モデル (メッシュ)

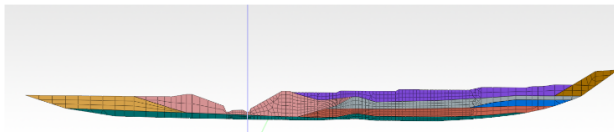


図1 2次元地層モデル (2次元FEM)

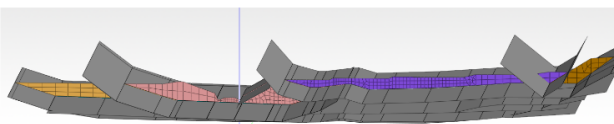


図2 2次元地層モデル+3次元サーフェス

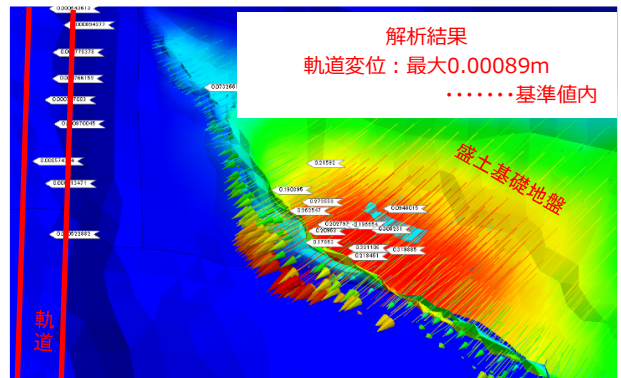


図6 3次元FEM解析結果 (変位ベクトル)

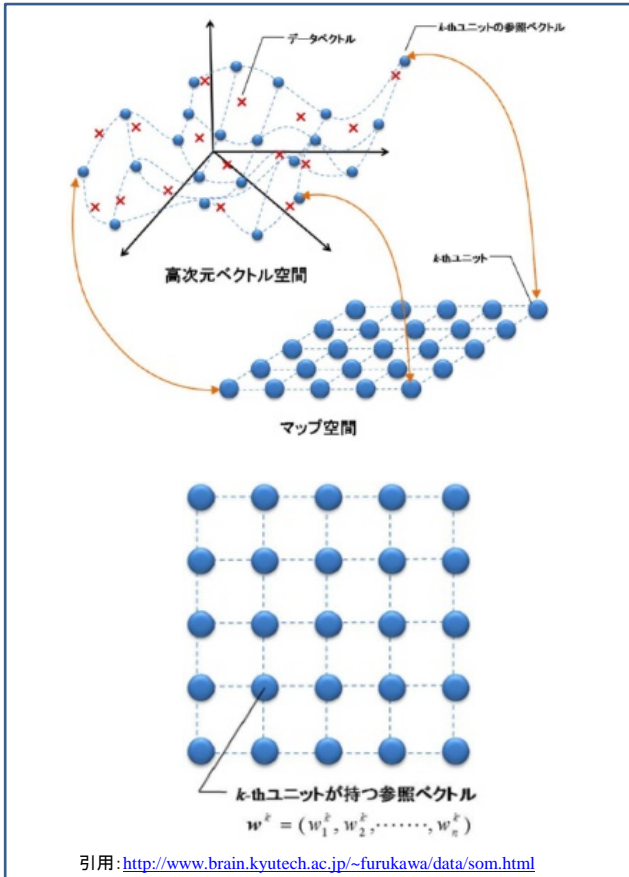
機械学習の有効性について

3次元地質・地盤モデルの作成においては、ボーリング調査や物理検層で取得される複数の情報のうち、目的に応じた入力情報の選定が重要である。これまでは、主にクロスプロットが広く用いられてきたが、扱えるデータが2次元または3次元に限られるため、近年では高次元の物性データを扱う総合的評価手法として、土木分野への自己組織化マップ（以下、SOM）の適用が広がりつつある。

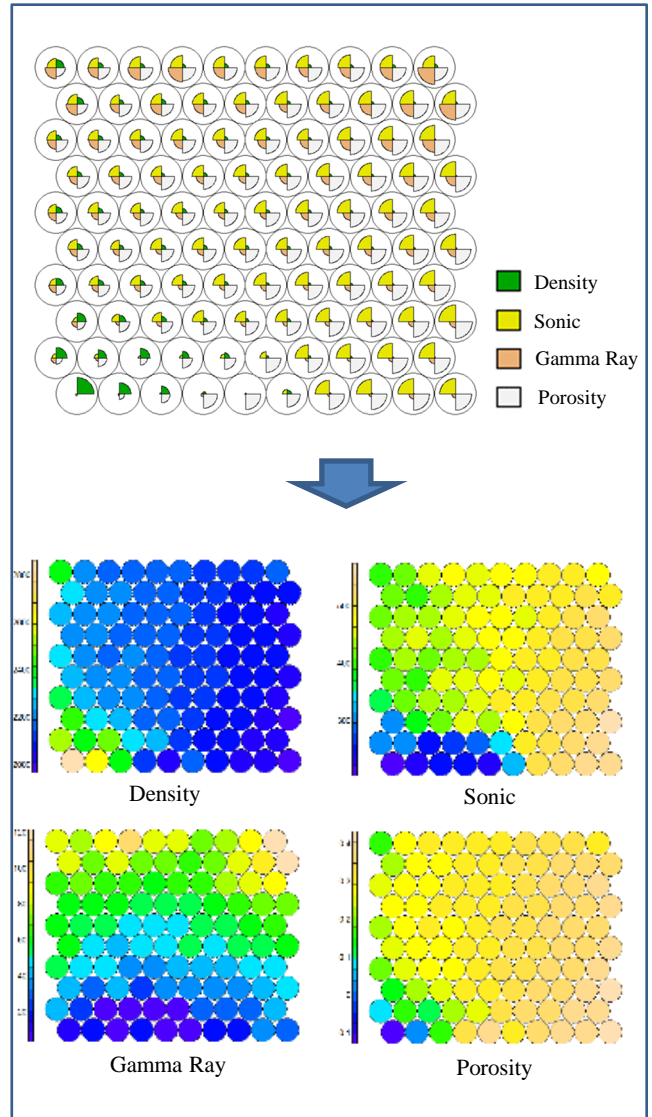
SOMは、競合型ニューラルネットワークの一種であり、複数の物性データを組み合わせて類似した特徴を持つ領域ごとにクラス分けを行う方法である。SOMの適用によって、コア観察だけでなく、より物性値を反映した岩相分類または、コアの欠損区間の岩相の推定が可能となると考える。

SOMでは、類似した特徴を持つデータは近くに、異なった特徴を持つデータは離れた位置に配置されるようなマップを作成することで、高次元のベクトルデータを2次元平面に投影することができる。

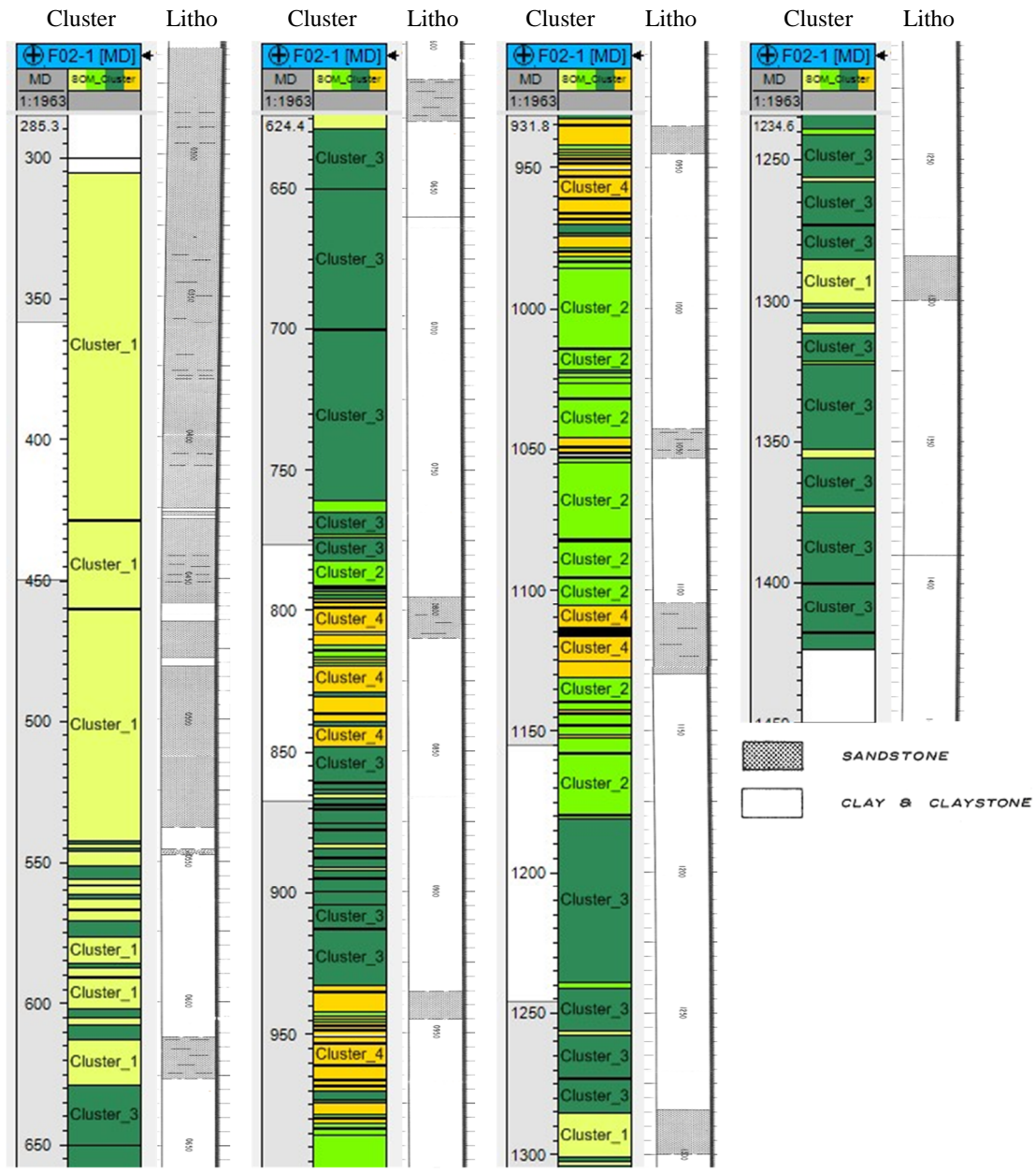
SOMの主な利点としては、複数の検層データを同時に結果に反映できることおよび、検層データと地盤の工学的性質について事前検討が必要ないことの2つがある。



図R-T.9-1 SOMの概要



図R-T.9-2 SOMマップ上での各物理量の分布



岩相	Cluster	密度	速度	GR	孔隙率
砂岩	1	低	遅	低	高
	4	高	速	低	低
泥岩	3	低	遅	高	高
	2	高	速	高	低

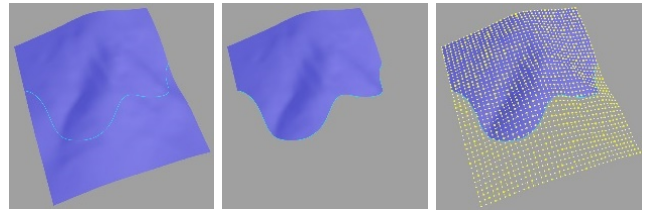
図R-T.9-3 SOMによるクラス分けの結果と岩相の比較例

R-T.10 NURBS曲線法

NURBS曲線法の概要

“NURBS曲線法”とは、NURBS曲線を組み合わせた骨格（スケルトンモデル）を用いて、複雑な3次元地質・地盤モデル境界のサーフェスを作成する手法の造語である。本マニュアルにおける曲線法（表6.5-1）に相当する。

本手法は地質・地盤工学の解釈図面を補間し、地質技術者の思索による複雑な構造イメージをCAD形状情報にすることが可能な手法である。習得には相応の訓練を必要とするが、使いこなすことができれば、モデル構築の効率化や成果品質の向上のみならず、地質解析の3次元思考を具現化する有用な手法になり得ると考えられる。

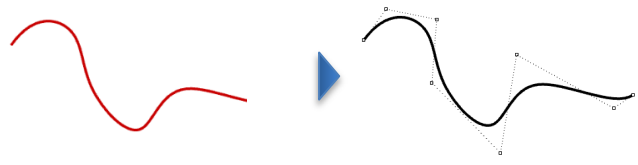


図R-T.10-1 NURBSサーフェスに保持される形状情報の例
左：サーフェス上の曲線 中：曲線で切断されたサーフェス
右：切断されていても保持されるサーフェスのCP情報

NURBSとは

(1) 起源

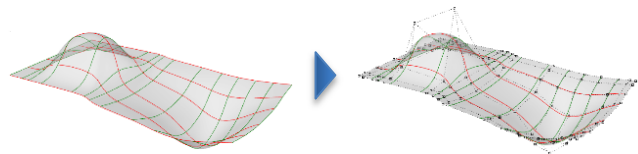
NURBSとは、非一様有理Bスプライン（Non-Uniform Rational B-Spline）の略称である。1950年代に航空機や自動車の外表面形状を作る自由曲面を数学的に表現するために開発された。NURBSは、CADやCAM、CAEで一般的に用いられている図化技術であり、IGES、STEP、ACIS等数々の世界標準に採用されている。



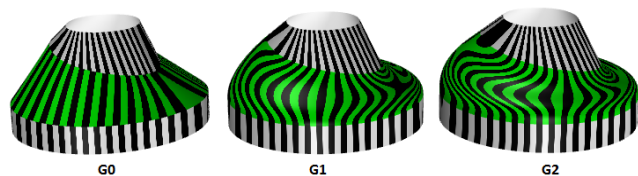
図R-T.10-2 NURBS曲線の制御構造¹⁾

(2) 特徴

- ①CP（コントロールポイント）をどのように配置しても、煩雑な形状処理無しに自動的に曲率が連続する形状を保持できる
- ②サーフェス形状をコントロールする情報（図R-T.10-1）を保持できるので、加工・編集が容易である（トライ&エラーが短時間で済む）
- ③曲線の制御情報を継承したサーフェスを作成可能であり、逆に、作成したサーフェスから曲線を抽出してモデリングに再利用することも可能である
- ④複数サーフェス間の幾何学的連続性を保つことが可能である（図R-T.10-4）
- ⑤NURBSサーフェスに保持される形状情報は、次元、u方向とv方向の次数、コントロールポイント、制御点の重み、結び目、サーフェスを切断した曲線の情報である



図R-T.10-3 NURBSサーフェスの制御構造¹⁾



- G0（連続した位置）
2つの面が結合した状態
- G1（接線連続）
ジョイントエッジに沿った2つの面の対応する接線が、u方向とv方向の両方で平行な状態
- G2（曲率連続）
曲率と接線が共通のエッジで両面で一致した状態

図R-T.10-4 NURBSサーフェスの幾何学的連続性¹⁾

NURBS曲線法によるモデリング手順

(1) 利用できる地盤情報

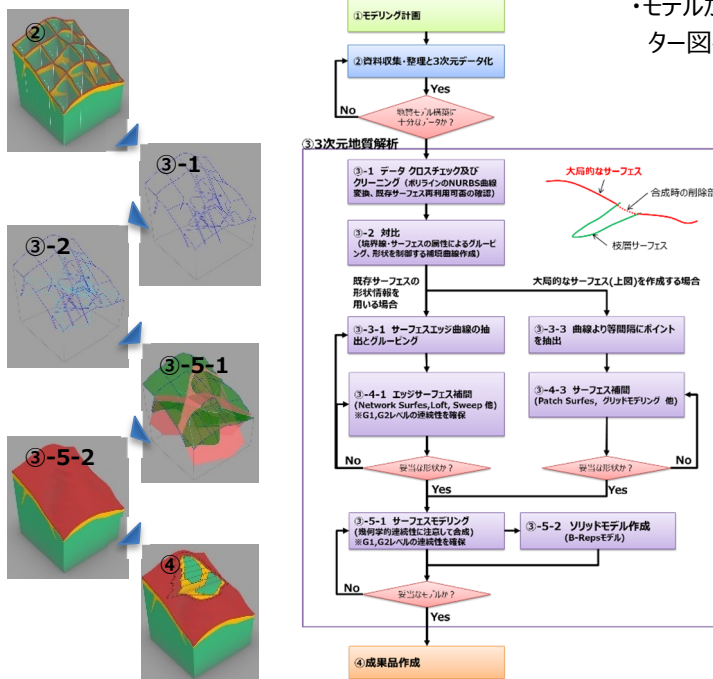
準3次元図面（平面図・断面図）等のCADデータ

(2) 作業上の主なルールと注意点

- ・CADの線/ポリラインはNURBS曲線に変換する必要がある
- ・CAD同士の曲線交点は、必ず誤差0にしなければならない
- ・作成したサーフェスモデルのノードを直接移動して形状を変更してはならない
- ・サーフェス形状の地質学的妥当性について常にチェックが必要である
- ・モデルの形状が地質モデルの確からしさを保証するものではない。本手法は作図手法であり、地盤情報の信頼性は提供者の責任である

(3) ワークフローの例

NURBS曲線法によるワークフローを図R-T.10-5に示す。



図R-T.10-5 “NURBS曲線法”による3次元モデル構築フローの例

NURBS曲線法による3次元地質・地盤モデル作成の利点

- ① オーバーハングするような複雑な地質体を作成することが可能
- ② ルールと手順を守れば作成するモデルの個人差が解消できる
- ③ モデルに可逆性を持たせることが可能
- ④ データの追加・修正等の局所的な変更に対応可能
- ⑤ 形状パラメータをオブジェクト自体に保持できるので正確なデータ継承が可能
- ⑥ NURBSサーフェスの断面はNURBS曲線であるため、メッシュモデルの断面（ポリライン）と違い作図上のスムージングの必要性が無い

NURBS曲線法の適用場面

- ・解釈図面通りの正確なサーフェスモデルを作成する場合
- ・3次元空間で地質構造を思索し正確に形状化する場合
- ・施工対応等、速やかなモデル更新の対応を求められる場合
- ・モデルから曲線（ポリラインではない）による断面図・コンター図を作成する場合

NURBS曲線法の課題

- ・適用場面を着手前に見極める必要がある
- ・3次元空間で地質構造を正確に思考する必要がある
- ・データ・モデルの管理を適切におこなう必要がある
- ・適切な期間の訓練が必要である

参考文献

- 1) <https://developer.rhino3d.com/guides/general/essential-mathematics/parametric-curves-surfaces/>
- 2) Hirok,H,Shoichi,N,Kazuo,K,Toshiro,O. Visualization of geologic model for a cut slope using 3D geological analysis system.2015,第15回国際地盤工学会アジア地域会議.

R-T.11 岩相分布モデル構築

岩相分布モデル構築の概要

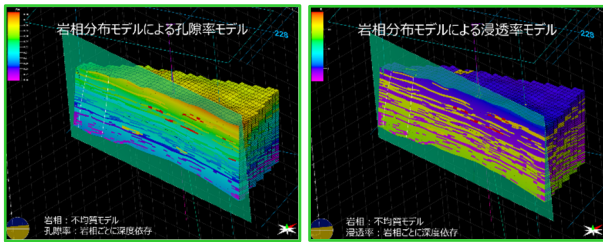
3次元地質・地盤モデルを構築するに際して、孔井間の地質状況を把握するためには、地層の物性を面的に捉えることができる物理探査を組み合わせた地質解釈手法が有効であると考えられる。

ここでは、孔井データと3次元弾性波探査を用いた地質モデル構築手順について、モデルの骨組みを構築する「構造モデリング」、モデルの中身を構築する「属性モデリング」の観点から紹介する。

属性モデリングについては、地球統計学的手法を適用した岩相分布モデルの構築事例と各種物理探査の統合解析による3次元地質・地盤モデルの構築事例について示す。

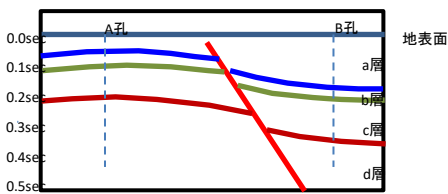
岩相分布モデルの用途

岩相分布モデルは、岩相に地質特性（例えば、孔隙率や浸透率）を設定することで、物質移行解析等の入力データとして活用できる（図R-T.11-1）。



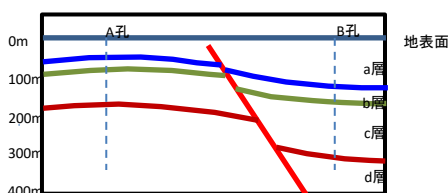
図R-T.11-1 弾性波探査速度断面の深度変換イメージ

地質解釈断面（時間断面）



時間 × 速度 = 深度

地質解釈断面（深度変換後）



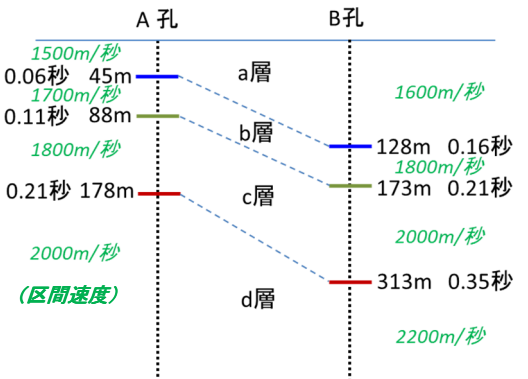
図R-T.11-2 弾性波探査速度断面の深度変換イメージ

構造モデリング（骨組みの作成）

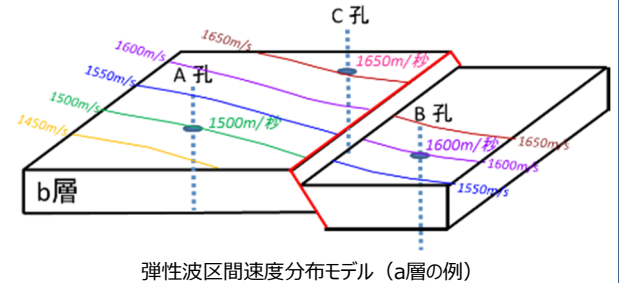
弾性波探査データは時間領域で処理されるため、その解釈結果を3次元地質・地盤モデルに反映させるためには、深度に変換する必要がある（図R-T.11-2）。

深度変換にはいくつかの手法があるが、ここでは孔井における地層境界深度と、弾性波探査断面から判読した地層境界の時間から各地層における弾性波の区間速度を求め、深度に変換する流れを図R-T.11-3に示した。

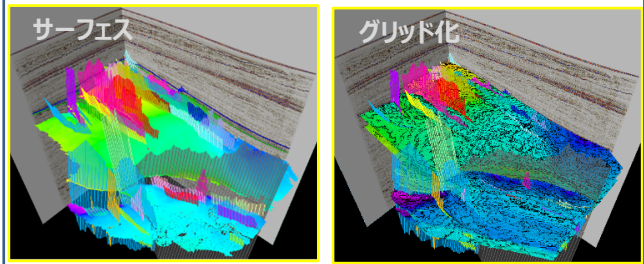
①各地層における弾性波の区間速度を、孔井の地層境界深度と弾性波探査判読結果における地層境界の時間深度から求める



②各孔における区間速度から、弾性波速度の空間分布モデルを作成し、3次元モデルの深度変換に適用する



③深度変換された地質構造モデルから、3次元のサーフェスモデル、グリッドモデルを作成する



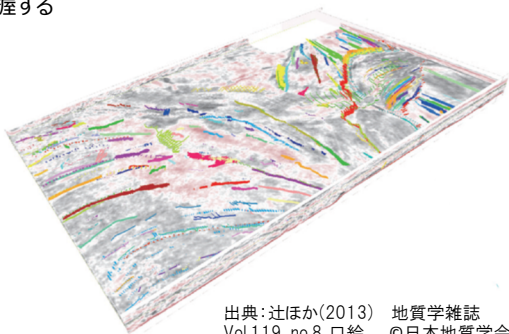
図R-T.11-3 弾性波探査データによる構造モデリングの流れ

属性モデリング（中身の作成）

地層分布が複雑な場合は、孔井データの単純な内外挿ではその空間的分布を十分に再現することは難しい。ここでは、地球統計学的手法のうち多点法を適用した岩相分布モデルの構築事例について示す（図R-T.11-4,5）。

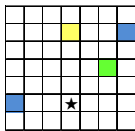
多点法は3点以上の相関性を取り扱う。バリオグラム代わりに地質分布の概念図を直接用いる。そのため、複雑な分布をする地層のモデリングに威力を発揮する。なお、二点法は2点間の類似性を関数（バリオグラム）化して取り扱う手法である。

①弾性波探査データ（深度スライス断面）より岩相分布様式を把握する



②この場合は蛇行河川システムと認定し訓練像を作成する

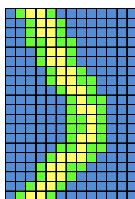
実測データ



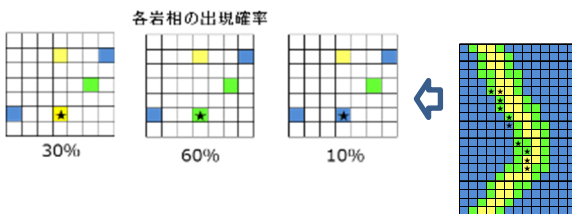
Channel
Levee
Overbank

★Facies unknown cell

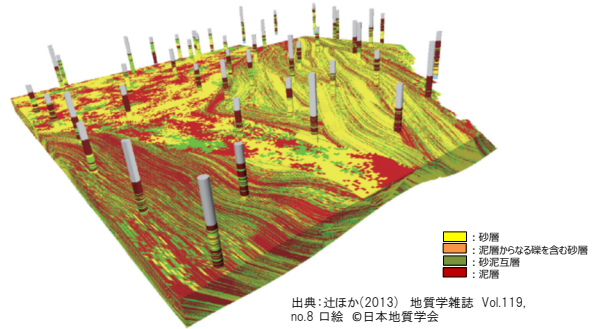
訓練像



③出現確率に応じて、目的セルの堆積相を確率的に設定する。この操作を全てのセルの堆積相が決まるまで繰り返す。堆積相が決まったモデルを具現像と呼ぶ。



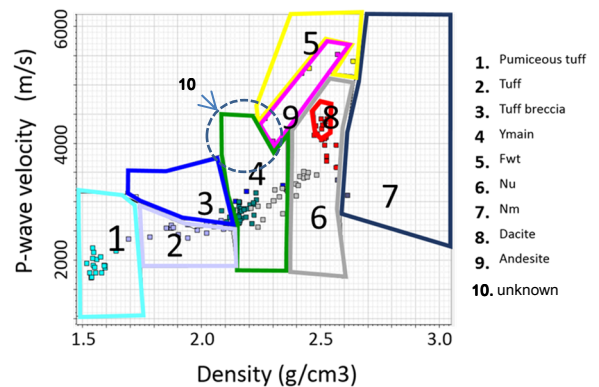
図R-T.11-4 多点法地球統計学の適用イメージ



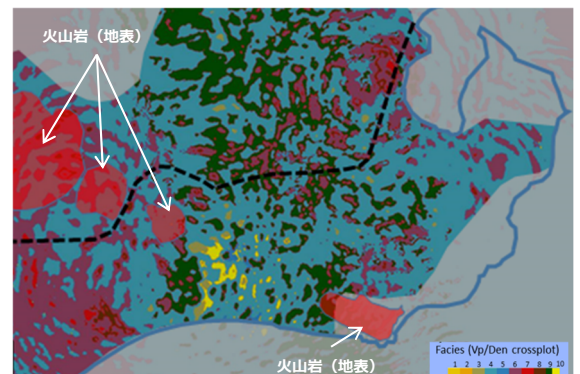
図R-T.11-5 地球統計学的手法にて作成した岩相分布モデルの例

事例R-T.11-1) 岩相分布モデルの構築事例

火山岩分布地域について、孔井の物理検層データとコア試料の測定値（P波速度、密度、比抵抗、温度）についてクロスプロット解析を試みた結果、P波速度と密度の関係において岩相毎に異なった領域にプロットされる傾向が見られ、岩相区分の指標として有効であることが示された（図中の各点は各孔井での実測値）。



以上のP波速度と密度の関係を適用し、サイズミックインバージョンを実施して岩相モデルを作成した（下図は深度スライス断面）。



密度：MTデータの逆解析+密度検層（初期密度モデル）
速度：弾性波探査データの速度解析+速度検層（初期速度モデル）
→サイズミックインバージョンを行い反射法記録の振幅を説明する密度と速度の高分解能モデルを推定

出典 青木ほか（2017）物理探査 vol.70, p124-141. ©物理探査学会
持永ほか（2017）物理探査学会第136回学術講演会講演論文集 p.163-166（一部加筆）©物理探査学会

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

<参考資料> 【ユースケース】

ここでは様々なユースケースにおける地質調査の役割と求められる成果品を示し、3次元地質・地盤モデルを構築する場合の着目点と考え方を例示する。

さらに、具体事例や利用場面を想定した仮想事例により、3次元地質・地盤モデル構築上の課題を抽出する。

※全てのユースケースを網羅するものではない

[U-B 事業対象別](#)

[U-O 目的別](#)

<ユースケースの読み方>

U-B 事業対象別

<p>基本的事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地質情報の役割 ・地質調査の成果品と利用場面の例 ・3次元地質・地盤モデル構築上の課題 ・その他 	
--	--

<p>プロセスマップの例</p> <p>※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。</p>	<p>例 or 事例</p>
---	-----------------------

例：仮想事例
事例：実際のモデル化事例

U-O 目的別

<p>基本的事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地質情報の役割 ・地質調査の成果品と利用場面の例 ・3次元地質・地盤モデル構築上の課題 ・その他 	
--	--

<p>例 or 事例</p>

例：仮想事例
事例：実際のモデル化事例

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

【ユースケース】 U-B 事業対象別

各事業対象で示すプロセスマップは、3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。

※全てのユースケースを網羅するものではない

[U-B.1 土工](#)

[U-B.2 トンネル](#)

[U-B.3 ダム](#)

[U-B.4 河川](#)

[U-B.5 橋梁](#)

[U-B.6 斜面防災](#)

[U-B.7 地中熱利用](#)

[U-B.8 土壌汚染](#)

[U-B.9 地震基盤と工学的基盤](#)

[U-B.10 データベース](#)

地質情報の役割

土工(土地造成工、道路土工・河川土工・砂防土工等)においては、次のような目的で地質情報が必要とされる。

- ◆切土範囲における地質分布 (表U-B.1-1)
- ◆掘削土量の把握
- ◆地質分に応じた切土のり面勾配の検討 (表U-B.1-2)
- ◆地山の土軟硬区分に基づく掘削工法選定
- ◆盛土範囲における軟弱層分布の把握
- ◆旧造成地の切り盛り箇所の把握
- ◆盛土材料 (表U-B.1-3) の調達や材質・賦存量の把握
- ◆帯水層を掘削する際に生じる地下水排水や減濁水等の対策検討

成果品と利用場面の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆地質断面図 (岩種・岩級の判定が示されている)
- ◆地質平面図
- ◆地質境界面コンター図 (特定の地質に着目)
- ◆地下水水位面コンター図

表U-B.1-2 掘削の難易による土と岩の分類¹⁾

名称	説明	適用		
土	礫まじり土	礫の混入があつて掘削時の能率が低下するもの	礫の多い砂、礫の多い砂質土、礫の多い粘性土	礫 (G) 礫質土 (GF)
	砂	バケツ等に山盛り形状になりにくいもの	海岸砂丘の砂 まさ土	砂 (S)
	普通土	掘削が容易で、バケツ等に山盛り形状にし易く空けきの少ないもの	砂質土、まさ土 粒度分布の良い砂 条件の良いローム	砂 (S) 砂質土 (SF) シルト (M)
	粘性土	バケツ等に附着し易く空けきの多い状態になり易いもの トラフカビリテが問題となり易いもの	ローム 粘性土	シルト (M) 粘性土 (C)
	高含水比粘性土	バケツ等に附着し易く特にトラフカビリテが悪いもの	条件の悪いローム 条件の悪い粘性土 火山灰質粘性土	シルト (M) 粘性土 (C) 火山灰質粘性土 (V) 有機質土 (O)
	有機質土			高有機質土 (Pt)
岩または石	硬岩	きれつがまつくないか、少ないもの、密着の良いもの	弾性波速度 3,000m/sec以上	
	中硬岩	風化のあまり進んでいないもの (きれつ間隔30~50cm程度のもの)	弾性波速度 2,000~4,000m/sec	
	軟岩	固結の程度の良い第4紀層 風化の進んだ第3紀層以前のもの、リッパ掘削できるもの	弾性波速度 700~2,800m/sec	
	転石群	大小の転石が密集しており、掘削が極めて困難なもの		
	岩塊・玉石	岩塊・玉石が混入して掘削しにくく、バケツ等に空けきのできやすいもの		玉石まじり土、岩塊 破砕された岩 ごろごろした河床

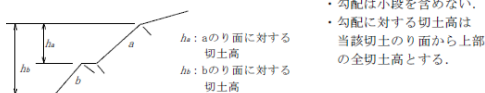
表U-B.1-1 切り土に対する標準法面勾配¹⁾

他に、労働安全衛生規則による安全勾配や特に注意が必要な切土・盛土がある²⁾

地山の土質	切土高	勾配
硬岩		1:0.3 ~ 1:0.8
軟岩		1:0.5 ~ 1:1.2
砂	密実でない粒度分布の悪いもの	1:1.5 ~
砂質土	密実なもの	5m以下 1:0.8 ~ 1:1.0 5 ~ 10m 1:1.0 ~ 1:1.2
	密実でないもの	5m以下 1:1.0 ~ 1:1.2 5 ~ 10m 1:1.2 ~ 1:1.5
砂利または岩塊混じり砂質土	密実なもの、または粒度分布の良いもの	10m以下 1:0.8 ~ 1:1.0 10 ~ 15m 1:1.0 ~ 1:1.2
	密実でないもの、または粒度分布の悪いもの	10m以下 1:1.0 ~ 1:1.2 10 ~ 15m 1:1.2 ~ 1:1.5
粘性土	10m以下	1:0.8 ~ 1:1.2
岩塊または玉石混じりの粘性土	5m以下	1:1.0 ~ 1:1.2
	5 ~ 10m	1:1.2 ~ 1:1.5

注) (a) 上表の標準勾配は地盤条件、切土条件等により適用できない場合があるので、「道路土工のり面工・斜面安定工指針 (3-2-1(1) のり面勾配の標準)」に記載される本文を参照すること。

(b) 土質構成等により単一勾配としないときの切土高および勾配の考え方は下図のようにする。



(c) シルトは粘性土に入れる。

(d) 上表以外の土質は別途考慮する。

(e) のり面の植生工を計画する場合には表-3.5.2 も参照する。

表U-B.1-3 盛土材料および盛土高に対する標準法面勾配¹⁾

盛土材料	盛土高(H)	勾配(N)	摘要
粒度の良い砂(S)、礫および細粒分まじり礫(G)	5m以下	1:1.5~1:1.8	基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の影響のない盛土に適用する。
	5~15m	1:1.8~1:2.0	
粒度の悪い砂(SG)	10m以下	1:1.8~1:2.0	() の統一分類は代表的なものを参考に示す。
	10m以下	1:1.5~1:1.8	
岩塊(ずりを含む)	10~20m	1:1.8~1:2.0	標準のり面勾配の範囲外の場合は安定計算を行う。
	5m以下	1:1.5~1:1.8	
砂質土(SF)、硬い粘質土、硬い粘土(洪積層の硬粘質土、粘土、関東ロームなど)	5m以下	1:1.5~1:1.8	
	5~10m	1:1.8~1:2.0	
火山灰質粘性土(V)	5m以下	1:1.8~1:2.0	

注) 盛土高とは、のり肩とのり尻の高低差をいう (図-3.4.1参照)。

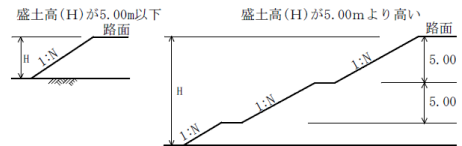


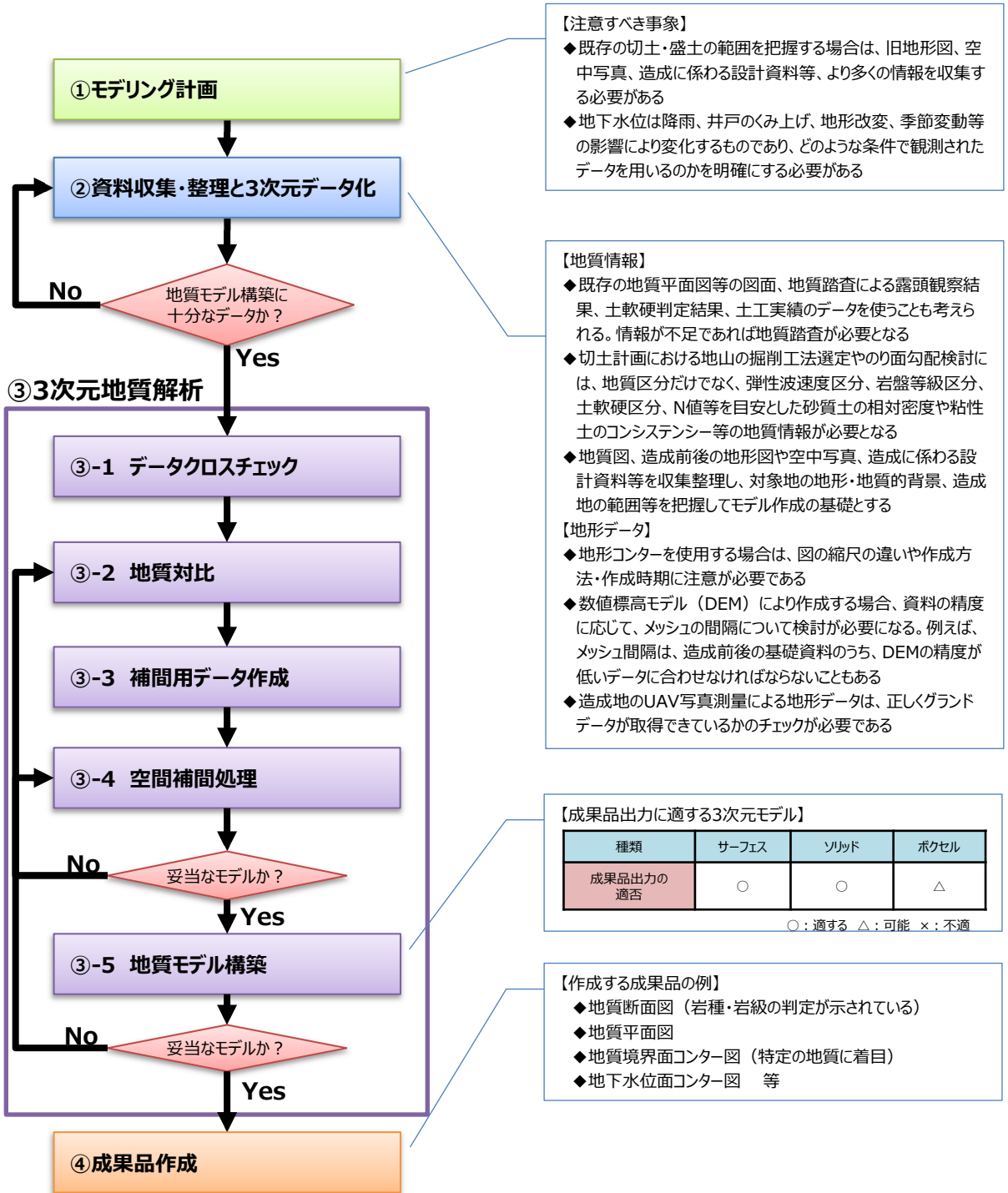
図-3.4.1 盛土のり面勾配標準図

注) 1. この標準図は、基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の影響のない盛土に適用する。
2. 盛土高さが5m程度で変化する場合に前後の状況により同一勾配としてもよい。

参考文献

1) 設計要領第一集 土工建設編. 2016, pp.1-7.

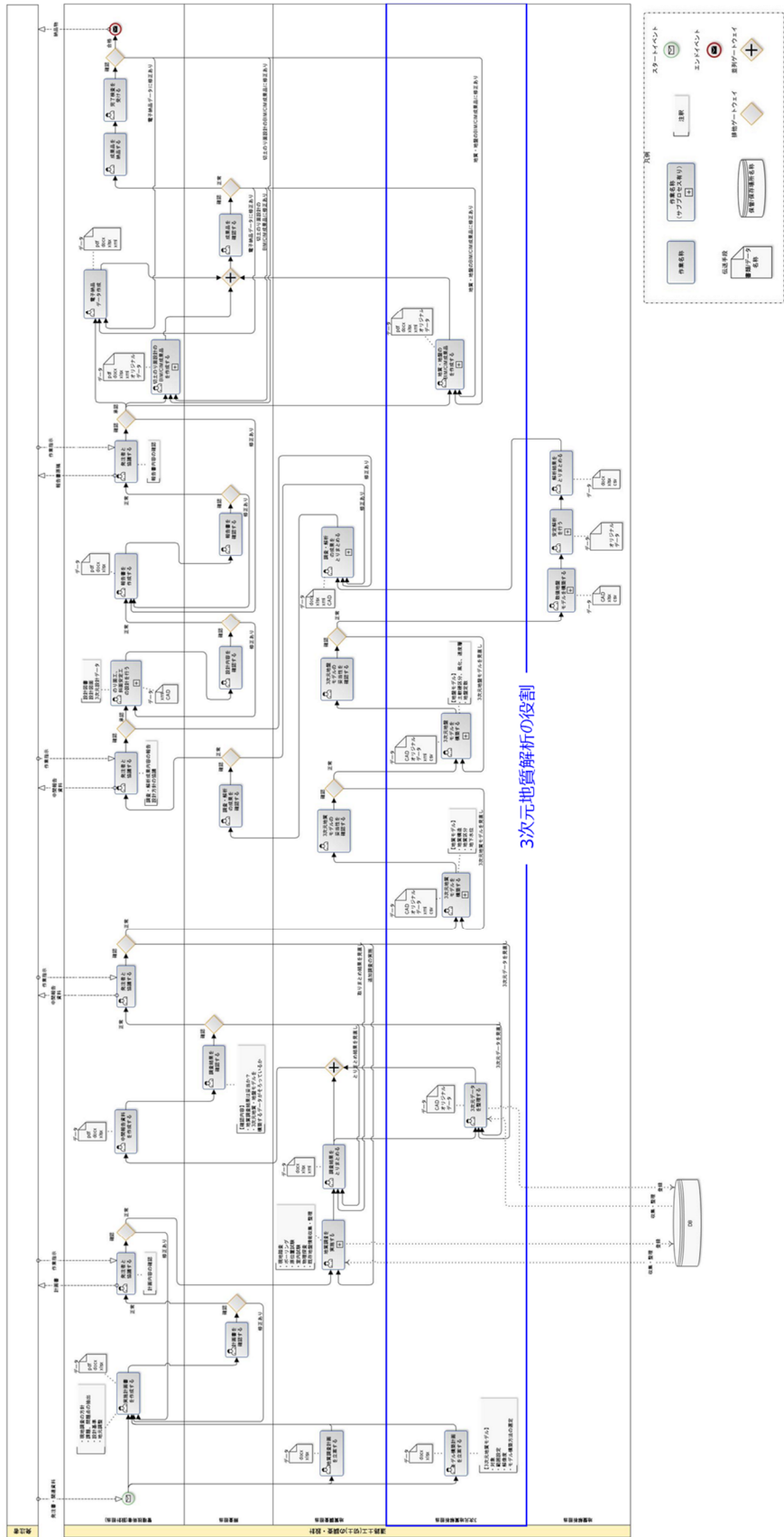
＜土工を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

道路土工の調査・設計において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



地質情報の役割

本書では地質情報の精度の違いから、トンネルにおける地質調査の対象を坑口区間とトンネル区間に分ける。対象区間と事業段階（調査・設計、施工、維持管理）における地質調査への要求事項を表U-B.2-1にまとめた。

表 U-B.2-1 対象区間と事業段階毎の地質調査に対する要求事項の例

項目	調査・設計	施工時	維持・管理
坑口周辺部 (坑口構造物、坑門工等)	<ul style="list-style-type: none"> ・孔口斜面の安定性評価 ・基礎地盤の支持力評価 ・偏圧区間の把握と安定解析に用いる地質情報の把握 ・低土被り状況の把握と安定解析に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・変状時の原因特定と対策検討 ・対策効果の判定 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質断面図、地質平面図 ・点検台帳
トンネル区間	<ul style="list-style-type: none"> ・施工管理、安全管理への留意事項 ・自然由来重金属の有無と分布の把握 ・低土被り区間のゆるみ範囲の把握 ・応力解析に用いる地質情報の把握 ・水文解析に用いる地質情報の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・切羽前方予測による地質情報の把握 ・内空変位計測結果を用いた地山応力解析 ・変状時の原因特定と対策検討 ・対策効果の判定 ・水文解析に用いる地質情報の把握 	

トンネルを対象とする地質調査の限界

トンネルを対象とする地質調査は、土被りが厚くなるほど調査密度が低くなり、結果、調査精度・信頼性が低下する。山岳トンネルを例に挙げると、計画・設計段階における地質調査の適用には図U-B.2-1に示すような限界がある。

坑口周辺ほど調査密度・調査精度は高くなり、トンネル区間の中央ほど低くなる。特に、土被りが数百mに及ぶような大土被りトンネルにおいては、施工基面における精度の高い地質・地山評価は困難である。

一方、施工段階になると、切羽観察や切羽前方探査による地質情報が得られるので、工事の進行に伴い地山の詳細な評価が可能となる。地質情報の精度が最も高くなるのは、施工後の維持管理段階となる。

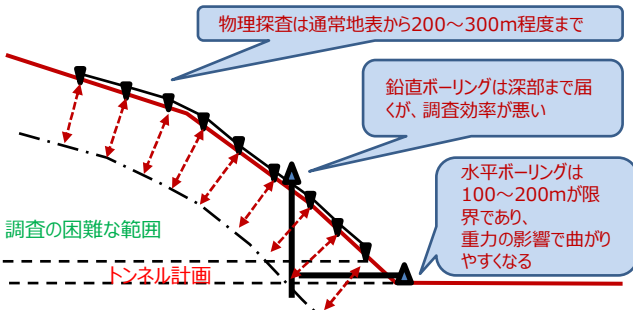


図 U-B.2-1 トンネル区間と調査密度のイメージ

地質調査の成果品

トンネルに対する各検討・対応フェーズにて要求される成果図面の例を表U-B.2-2に示す。

表U-B.2-2 対象区間と事業段階毎の成果図面の例

項目	調査・設計	施工時	維持・管理
坑口周辺部 (坑口構造物、坑門工等)	<ul style="list-style-type: none"> ・地質平面図 ・地質縦断面図 ・地質横断面図 ・斜面評価図 (地すべり地形分布図、不安定土砂コンター図等) 		<ul style="list-style-type: none"> ・地質断面図、地質平面図 ・点検台帳
トンネル区間	<ul style="list-style-type: none"> ・地質平面図 ・地質スライス平面図 ・地質横断面図 ・地質縦断面図 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質平面図 ・地質スライス平面図 ・地質横断面図 ・地質縦断面図 ・切羽観察台帳 	

3次元地質・地盤モデル作成上の課題

i) 地質の複雑性

例えば、国内の山岳地にみられる付加体のような複雑な地質からなる地域では、FL（トンネル底盤）の地質分布の推定は慎重におこなわなければならない。含まれる石灰岩・砂岩・チャート・緑色岩等のブロックや、破碎帯・低角度断層・横臥褶曲、メランジュ等により構造が複雑化するため、高い調査精度が必要である（「C-G.4 付加体」参照）。

キャップロック状の地質構造では、従来の剥ぎ取り法による弾性波探査は適用できないため、ボーリング孔を併用してのトモグラフィー解析により調査精度を高めることが望ましい。

掘削ズリ処理で問題となる自然由来重金属についても、その正確な位置や規模・影響等の把握は、正確な地質予測が行われていることが前提となる。

ii) 地質データの取得

山岳地のトンネルを対象とした地質調査は、トンネル地質縦断面図を作成する目的で、地表地質踏査を基本に、ボーリングや物理探査（弾性波、電気探査等）が行われる。

調査ボーリングは坑口付近における鉛直ボーリング・水平ボーリングと、トンネル区間の着目箇所（地質構造の把握し易さや、弱部が想定される箇所等）で実施される鉛直ボーリング、斜めボーリングが基本的な組み合わせである。

しかし、ボーリング調査はトンネルの延長に比較して調査延長が短かく、ボーリング調査が及ばない区間も多くある。それらの区間では地表地質踏査や物理探査の結果を補完して地質を想定しなければならない。

iii) 地山評価の限界

地質調査の限界による不確実な地質情報を前提に、土被りと設計定数から縦断図上の地山評価（地山等級等）や設計施工上の留意点について評価しなければならない。

iv) トンネル工法に係る課題

トンネルは対象となる地盤・地山の地形・地質に適した工法が用いられる。大別すれば、開削工法、沈埋工法、シールド工法、TBM工法、NATM工法等があるが、概ね前者3工法が未固結～半固結層、後者2工法が岩盤を対象していると言える。

前者は、海底下の沈埋工法等を除き、比較的地質情報を得やすく精度も高い反面、沈下や地下水阻害等、既設の建造物、生活環境への影響が直接的に顕れることがあり、地盤沈下や地下水モデルの精緻な検討が必要となる。

モデル構築の面では、隣接する道路や地下インフラの配置等を含めた検討が必要なケースが想定され、既存の地盤情報モデルの取り込みや検証も必要なケースが想定される。また、未固結層と半固結層の地質境界の再現性や、例えば河川の礫層等によるイレギュラーな地層境界の変化が想定される場合には、その可能性や追加調査の必要性を明確に情報として盛り込むべきである。

後者では、坑口周辺や小土被り区間では詳細な地質情報が得られるが、土被りが大きくなるほど地質調査結果の精度が低下するため、地山評価や突発湧水への備え、あるいは地下水保全検討に資するモデルの精度も低下する。それを補うために、切羽前方探査による調査結果をいかに地盤モデルに反映させるか適切に計画しておく必要がある。

切羽前方探査結果と地表踏査結果をリンクさせて地質構造の再現を行う場合に、探査手法による調査結果の精度や、地質事象自体が持つ複雑性によるイレギュラーの可能性について、情報を確実に伝える必要がある。現時点で調査密度や土被りの大小に基づく地質モデルの精度評価基準はないので、その代わりに、想定される引き継ぐべき地山情報の項目等も規定しておくことが必要と考えられる。

v) 3次元地質・地盤モデルの構築範囲

モデルを作成する範囲は次のような条件が考えられる。

【鉛直方向】

FLを基準とし、坑口のFL-2d（トンネル幅）程度から地表面までを作成範囲とする。FL-2dの明確な根拠は無いが、調査時に計画FL-3～5m程度は確認するケースが多いことによる。

【水平方向】

FLから左右45°上方の地表との交点の範囲以上を作成（≒土被り程度の範囲）する。比較的浅いトンネルの地表への沈下影響範囲は、FLより上方45°の範囲と言われるためである。

大土被りトンネルにおいては、内空変位が発生しても、地表面との関連を検討できないことが多く、土被り1000mのトンネルで、1000m幅のモデルは必要ないと考えられるが、地山状況により大きく迂回することもあり、モデルを幅広くとることはその備えになる。

【その他】

内空変位計測に基づく応力解析を行ったり、特種断面（メガトンネル・偏圧トンネル）で応力解析をおこなう場合、モデル自体はトンネル直近のみに定数や条件を与えることは可能であるため、地表付近までモデルが必要とは限らない。

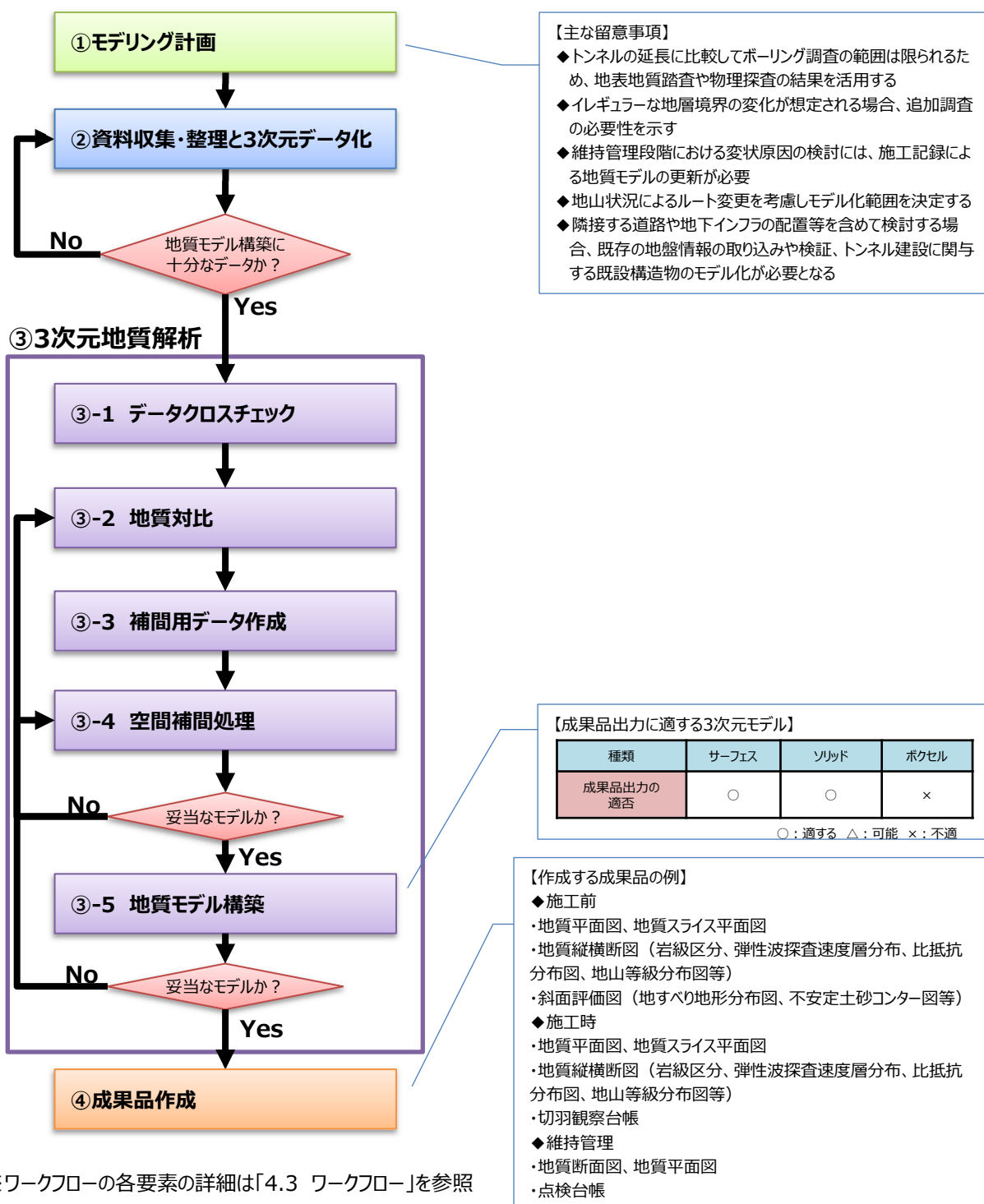
トンネル建設に影響を与える、あるいはトンネル建設により影響を受ける既設構造物等の3次元モデルが必要になる場合がある。

vi) モデルの更新

施工中に得られる地質情報の役割は重要であり、切羽情報や切羽前方調査が地質・地盤リスク予測の大きな役割を占めるようになる。また、維持管理段階において内空変位が生じた場合は、その原因を検討するために地質情報は必須となる。

そのため、施工記録（切羽観察記録、支保パターン等）から地層や断層弱線の分布等が施工前のモデルと変わっていれば、モデルの更新が必要になる。

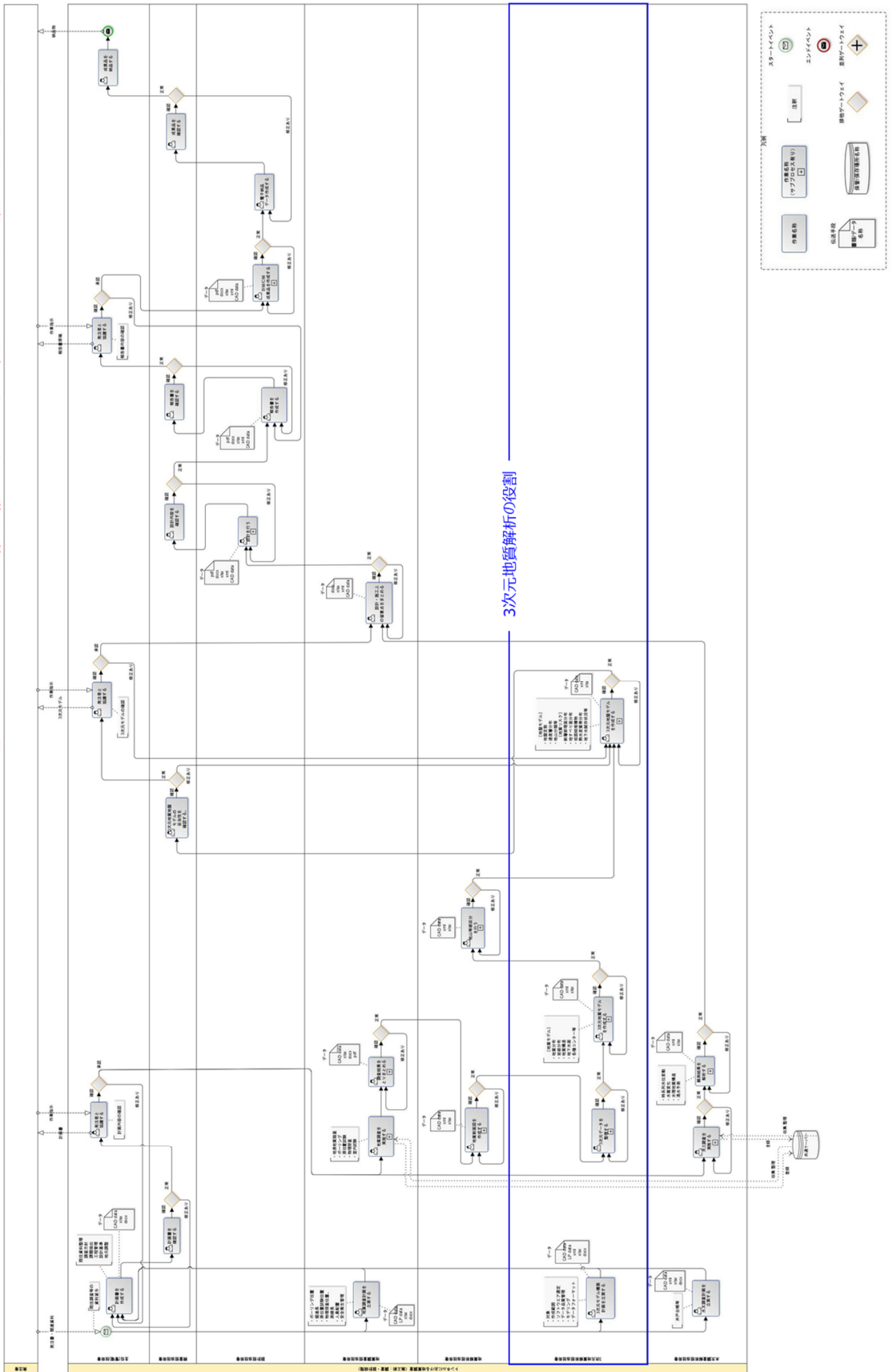
＜トンネルを対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

トンネルにおける調査・設計段階において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における
全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



例U-B.2-1) 塊状岩盤の山岳トンネルにおける3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

地質・地盤リスクの抽出

◆地質的背景(図1)

起点側に花崗岩、起点側に花崗岩、終点側に流紋岩等の古期火山岩が分布する。両者は貫入接触関係である。

【花崗岩】

- ・風化深度は大きく、深層風化帯を形成
- ・起点側坑口ではマサが厚く分布
- ・一般部は硬質岩盤で亀裂が発達

【古期火山岩】

- ・全体に硬質であるが亀裂が発達しており、表層部では亀裂治いに緩み
- ・終点側坑口には巨石を伴う崖錐堆積物が分布

【地質境界部】

- ・花崗岩/古期火山岩の貫入接触部は熱水変質作用により脆弱化
- ・脆弱部が遮水層となって地下水を堰上げ

◆想定される地質・地盤リスク

【起点側坑口部】

- ・深層風化によるマサ脆弱化、不安定化、湧水による切羽流出

【終点側坑口部】

- ・亀裂面に沿った開口や緩みによる岩塊の崩落
- ・巨石を伴う崖錐堆積物の不安定化

【一般部】

- ・亀裂治いに岩盤崩落

【地質境界部】

- ・熱水変質による脆弱部の不安定化
- ・湧水による切羽流出
- ・突発湧水

成果品

以上の地質・地盤リスクを評価するための成果品には次のようなものがある。

- 地質区分断面図
- 岩級区分断面図
- 熱水変質帯分布図
- 巨石岩塊分布図
- 亀裂面分布図
- 地下水水面コンター図
- 各種コンター図

モデル構築の計画と準備

◆各地質の特徴

- ・風化深度、亀裂面の分布、巨石分布、変質分布

◆地下水の賦存状況

◆作成モデル(特にリスクに関連した部分)

- ・起点側坑口部の花崗岩深層風化部の3次元モデル
- ・終点側坑口部の崖錐堆積物や不安定岩塊の3次元モデル
- ・一般部の岩盤崩落を考慮した3次元モデル
- ・境界部熱水変質帯の3次元モデル

◆必要な地質情報

- ・調査ボーリングデータ、物理探査データ
- ・孔内水位観測データ、現場透水試験データ
- ・室内土質試験データ、岩石試験データ
- ・現地踏査データ
- ・精密測量データ

◆考慮すべき地形・地質学的背景および着目点

- ・構成地質と風化変質履歴の違いによる岩盤劣化深度の差、亀裂面の発達状況の差、崩落形態や規模の差、地下水賦存状況の差等

モデル構築手順

【起点側花崗岩の深層風化に着目した岩級分布、地下水水面分布モデル】

- ・ボーリングによる地質分布、地下水の賦存状況や物性値の確認、ボーリング孔による速度検層やジオトモグラフィ解析結果等から、マサ部の岩級分布や地下水水面分布の3次元モデルを作成する

【終点側崖錐堆積物や不安定岩塊に着目した地形区分モデル】

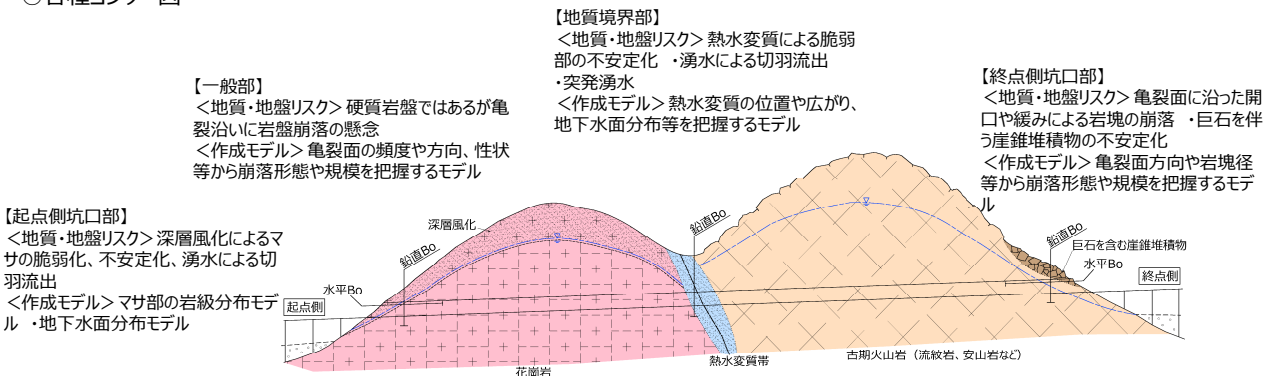
- ・ボーリングや踏査による地質分布、亀裂方向の確認、崖錐堆積物に含まれる岩塊含有量、最大径や基質部の性状、精密測量等から、急崖や亀裂、岩塊分布の3次元モデルを作成する

【一般部岩盤崩落形態モデル】

- ・地表地質踏査やボーリングによる亀裂面の頻度、方向、亀裂面の性状等から、崩落形態や規模を把握する3次元モデルを作成する

【境界部熱水変質帯分布モデル】

- ・ボーリングや踏査による位置、幅、深度、強度、透水性、地下水水面等から熱水変質帯分布の3次元モデルを作成する



例U-B.2-2) 層状岩盤の山岳トンネルにおける3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

地質・地盤リスクの抽出

◆地質的背景 (図1)

- ・起点側に砂岩頁岩互層、終点側にメランジュ等の混在岩分布
- ・地質境界には断層やせん断帯が発達

【砂岩頁岩互層】

- ・板状で層理面、劈開が顕著、剥離しやすい

【混在岩】

- ・泥質基質中に大小様々な大きさのチャート、石灰岩、砂岩、緑色岩等のブロックを伴う
- ・全体にせん断作用を被っており、断層や劈開が発達して脆弱

◆想定される地質・地盤リスク

<起点側坑口部>

- ・層理面や劈開面沿いに岩盤すべりの発生

<終点側坑口部>

- ・層理面や亀裂面に沿った開口、緩みによる岩塊の崩落

<一般部>

- ・断層や劈開の著しい発達による岩盤の脆弱化
- ・地下水による脆弱部からの多量湧水
- ・地下水貯留層である石灰岩、砂岩、チャートブロックからの突発湧水

成果品

以上の地質・地盤リスクを評価するための成果品には次のようなものがある。

- 地質区分断面図
- 岩級区分断面図
- すべり面分布図
- 亀裂面分布図
- 断層せん断帯分布図
- 地下水面コンター図
- 各種コンター図

モデル構築の計画と準備

◆各地質の特徴

- ・ブロック状岩体、断層せん断帯、亀裂面分布、岩塊分布

◆地下水の賦存状況

◆作成モデル(特にリスクに関連した部分)

- ・起点側坑口部の岩盤すべりに対する3次元モデル
- ・終点側坑口部の不安定岩塊に対する3次元モデル
- ・一般部のせん断性脆弱岩盤、地下水貯留層である大型ブロックに対する3次元モデル

◆必要な地質情報

- ・調査ボーリングデータ、物理探査データ
- ・孔内水位観測データ、現場透水試験データ
- ・室内土質試験データ、岩石試験データ
- ・現地踏査データ
- ・精密測量データ

◆考慮すべき地形・地質学的背景および着目点

- ・構成地質の違いによる差別的風化、亀裂面の発達状況の差、地下水賦存状況の差等、特にブロック状岩体を伴うことによる地質的、水理地質的な差
- ・断層やせん断帯、劈開の発達による脆弱化

◆モデル構築の限界

- ・大型ブロックの分布をボーリングによって把握することは坑口付近以外では実質的には困難である
- ・施工中の前方探査データの活用が重要となる

モデル構築手順

【起点側岩盤すべり面に着目した地質分布、地下水面分布モデル】

- ・ボーリングによる地質分布、弱面(層理面、劈開面)の分布や性状、弱面の物性値、精密測量による地形地質解析から3次元モデルを作成する

【終点側急崖部からの岩塊崩落に着目した地形地質モデル】

- ・ボーリングによる弱面(断層、層理面、節理面、劈開面)の分布や性状、弱面の物性値、精密測量から崩落形態や規模を把握する3次元モデルを作成する

【一般部脆弱部の位置、広がりに着目した地質分布モデル】

【大型ブロックの位置、広がり、地下水の賦存状況に着目した地質分布モデル】

- ・地表地質踏査やボーリングによる断層せん断帯、大型ブロックの分布、性状の把握、地下水の賦存状況から3次元モデルを作成する

【一般部】

- ・地質・地盤リスク>断層や劈開の著しい発達による岩盤の脆弱化
- ・地下水による脆弱部からの多量湧水
- ・地下水貯留層である石灰岩、砂岩、チャートブロックからの突発湧水
- ・作成モデル>脆弱部の位置、広がりに着目した地質分布モデル
- ・大型ブロックの位置、広がり、地下水の賦存状況に着目した地質分布モデル

【起点側坑口部】

- ・地質・地盤リスク>層理面や劈開面沿いに岩盤すべりの発生
- ・作成モデル>岩盤すべり面に着目した地質分布モデル、地下水面分布モデル

【終点側坑口部】

- ・地質・地盤リスク>層理面や亀裂面に沿った開口、緩みによる岩塊の崩落
- ・作成モデル>表層急崖部の地形や亀裂に着目した地形地質区分モデル

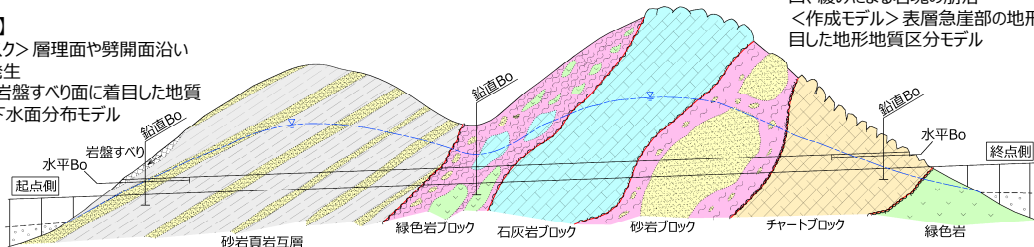


図1 層状岩盤における地質・地盤リスクと作成モデルの概要

例U-B.2-3) 低固結岩盤の山岳トンネルにおける3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

地質・地盤リスクの抽出

◆地質的背景(図1)

- ・起点側に新第三紀層等の低固結岩盤
- ・終点側に第四系等の溶結凝灰岩

【新第三紀層】

- ・低固結な砂岩泥岩互層、凝灰岩、流紋岩等より構成
- ・板状で層理面が顕著、剥離しやすい
- ・鉍化変質帯を伴う

【溶結凝灰岩】

- ・柱状節理の発達で急崖を形成
- ・最下部は弱～非溶結部が分布
- ・流紋岩との境界には旧河道や旧谷底に堆積した砂礫層が分布

◆想定される地質・地盤リスク

【起点側坑口部】

- ・層理面や小断層沿いに地すべりの発生

【終点側坑口部】

- ・柱状節理面や亀裂面に沿った開口、緩みによる岩塊の崩落

【一般部】

- ・鉍化変質帯に含まれる硫化物や重金属により、酸性水や重金属を含む有毒水の発生
- ・掘削ズリとして搬出した際の周辺環境への影響
- ・鞍部断層の地下水堰上げと貫通による突発湧水
- ・砂礫層掘削時の多量湧水と切羽不安定

◆作成モデル(特にリスクに関連した部分)

- ・起点側坑口部の地すべりに対する3次元モデル
- ・終点側坑口部の不安定岩塊に対する3次元モデル
- ・一般部の鉍化変質帯、断層、旧河道や旧谷底の砂礫堆積物、非溶結部に対する3次元モデル

◆必要な地質情報

- ・調査ボーリングデータ、物理探査データ
- ・孔内水位観測データ、現場透水試験データ
- ・室内土質試験データ、岩石試験データ
- ・現地踏査データ
- ・精密測量データ

◆考慮すべき地形・地質学的背景および着目点

- ・地質構成による弱面や亀裂面の発達状況、強度の差、鉍化変質帯、非溶結部や旧河道堆積物の分布による強度や地下水賦存状況の差等

◆モデル構築の限界

- ・地表部に鉍化変質帯が確認できても、トンネルルート内でその分布性状を把握することはかなり困難である
- ・施工中の前方探査データの活用が重要となる

モデル構築手順

【起点側地すべり面や地下水分布等に着目した地質分布、地下水分布モデル】

- ・ボーリングによる弱面(断層、層理面、節理面)の分布や性状、弱面の物性値、精密測量等による地形地質解析から、地すべり面や地下水分布の3次元モデルを作成する

【終点側不安定岩塊に着目した地形地質モデル】

- ・ボーリングによる地質、亀裂方向の確認、物性値や地下水の賦存状況、現地調査や精密測量等から、崩落形態や規模を把握する3次元モデルを作成する

【一般部鉍化変質帯、断層、旧河道や旧谷底の砂礫堆積物、非溶結部の分布性状に着目した地質分布、地下水分布モデル】

- ・鉍化変質帯；ボーリングによる位置、深度、幅、強度や透水特性、地下水の分布(毒性)から3次元モデル作成
- ・断層；ボーリングによって断層の位置、幅、深度、強度、透水性や地下水の賦存状況から3次元モデル作成
- ・砂礫、非溶結部；ボーリングによって位置、幅、深度、強度、透水性や地下水の賦存状況から3次元モデル作成

成果品

以上の地質・地盤リスクを評価するための成果品には次のようなものがある。

- 地質区分断面図
- 岩級区分断面図
- 鉍化変質帯分布図
- 巨石岩塊分布図
- 断層節理面分布図
- 地下水コンター図
- 各種コンター図

モデル構築の計画と準備

- ◆各地質の特徴(弱面の分布・性状・物性値、亀裂面の方向、鉍化変質帯、旧河道堆積物の分布・強度)
- ◆地下水の賦存状況

【一般部】

<地質・地盤リスク> 鉍化変質帯に含まれる硫化物や重金属により、酸性水や重金属を含む有毒水の発生、掘削ズリとして搬出した際の周辺環境への影響 ・鞍部断層の地下水堰上げと貫通による突発湧水 ・砂礫層掘削時の多量湧水と切羽不安定

<作成モデル> 鉍化変質帯の位置、広がりや地下水分布等に着目した地質分布モデル ・断層の位置、広がりや地下水分布等に着目した地質分布モデル ・砂礫、非溶結部の位置、広がりや地下水分布等に着目した地質分布モデル

【起点側坑口部】

<地質・地盤リスク> 層理面や小断層沿いに地すべりの発生

<作成モデル> 特に地すべり面や地下水分布等に着目した地質分布、地下水分布モデル

【終点側坑口部】

<地質・地盤リスク> 柱状節理面や亀裂面に沿った開口、緩みによる岩塊の崩落

<作成モデル> 表層急崖部の地形や亀裂に着目した地形地質区分モデル

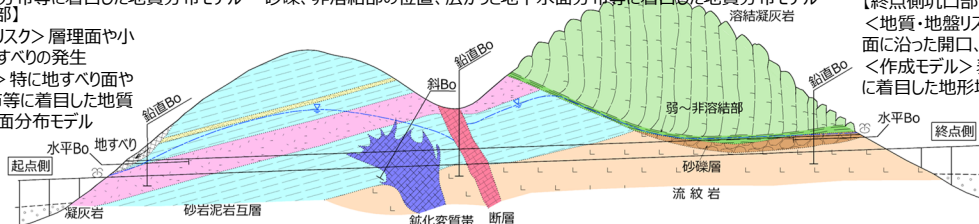


図1 低固結岩盤における地質・地盤リスクと作成モデルの概要

例U-B.2-4) 低土被り岩盤の山岳トンネルにおける3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

地質・地盤リスクの抽出

◆地質的背景(図1)

- ・起点側に低固結の第三紀～第四紀層、風化の進んだ花崗岩、それらを段丘堆積物や盛土が覆う 都市部を想定
- ・終点側は基盤の砂岩泥岩互層の上に火砕流堆積物が累重し、台地を形成
- ・段丘と火砕流台地の境界に断層が分布

【第三紀～第四紀層】

- ・低固結の礫岩、砂岩、泥岩等から構成

【段丘堆積物】

- ・未固結の礫、砂 一部盛土を含む

【花崗岩】

- ・亀裂沿いに風化が進み、全体的に風化深度が大きい

【砂岩泥岩互層】

- ・旧地表部の風化、軟質化

【火砕流堆積物】

- ・弱溶結、柱状節理発達、砂岩泥岩互層との境界部は非溶結

◆想定される地質・地盤リスク

<起点側坑口部>

- ・低固結堆積物のため不安定化、湧水による切羽流出

<終点側坑口部>

- ・非溶結部および砂岩泥岩互層風化による軟質化、不安定化

<一般部>

- ・花崗岩風化や低土被り厚による天端陥没や地表面への影響
- ・火砕流堆積物非溶結部、旧地表風化部の不安定化
- ・火砕流台地上に廃棄物等が存在すると地下水浸透により、汚染水がトンネル内に流入

成果品

以上の地質・地盤リスクを評価するための成果品には次のようなものがある。

- 地質区分断面図
- 岩級区分断面図
- 断層節理面分布図
- 地下水面コンター図
- 各種コンター図

【一般部】

<地質・地盤リスク> 花崗岩風化および小土被り厚による天端陥没や地表面への影響 ・火砕流堆積物非溶結部、旧地表風化部の不安定化 ・火砕流台地上に廃棄物等が存在すると地下水浸透により、汚染水がトンネル内に流入

<作成モデル> 段丘堆積物下底面や花崗岩風化部の下底面に着目した地質岩級区分モデル ・断層の位置、広がりと地下水面分布等に着目した地質分布モデル

【起点側坑口部】

<地質・地盤リスク> 低固結堆積物のため不安定化、湧水による切羽流出

<作成モデル> 低固結岩盤の広がりや地下水面分布に着目した地質分布モデル

モデル構築の計画と準備

- ◆各地質の特徴(低固結岩盤と風化の影響、強度の低下、亀裂面の方向、非溶結部の分布・強度)

- ◆地下水の賦存状況

- ◆作成モデル(特にリスクに関連した部分)

- ・起点側坑口部の低固結岩盤に対する3次元モデル
- ・終点側坑口部の非溶結部、風化岩盤に対する3次元モデル
- ・一般部の低土被り、断層に対する3次元モデル

- ◆必要な地質情報

- ・調査ボーリングデータ、物理探査データ
- ・孔内水位観測データ、現場透水試験データ
- ・室内土質試験データ、岩石試験データ
- ・現地踏査データ
- ・精密測量データ

- ◆考慮すべき地形・地質学的背景および着目点

- ・低固結岩盤の分布、低土被り、風化履歴による強度低下、火砕流堆積物最下部の非溶結部の存在、それらに関連した地下水賦存状況の差等

モデル構築手順

【起点側低固結岩盤の広がりや地下水面分布に着目した地質分布モデル】

- ・ボーリングによる堆積物の分布、強度、透水特性、地下水の賦存状況の把握から3次元モデルを作成する

【終点側非溶結部、風化岩盤に着目した地質分布モデル】

- ・ボーリングによる非溶結部、風化岩盤の分布、強度、透水特性、地下水の賦存状況の把握から3次元モデルを作成する

【一般部低土被り、断層に着目したモデル】

- ・段丘堆積物下底面や、花崗岩風化部の下底面に着目した地質岩級区分モデル
- ・断層の位置、広がりや地下水面分布等に着目した地質分布モデル
- ・複数のボーリング施工による土被り厚、風化状況、透水特性、地下水の賦存状況の把握から3次元モデルを作成する

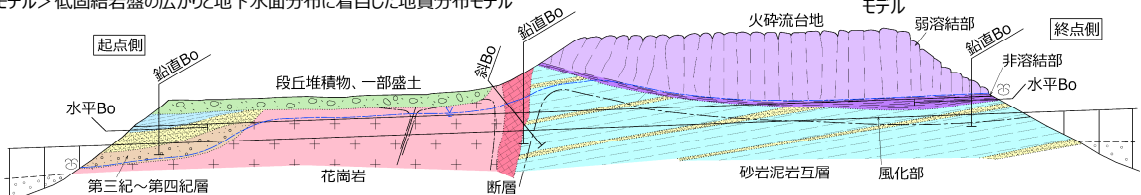


図1 小土被りにおける地質・地盤リスクと作成モデルの概要

例U-B.2-5) 低土被り地山のトンネルにおける3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

地質・地盤リスクの抽出

◆地質的背景(図1)

- ・古第三紀層弱風化岩、同風化岩、沖積砂層が分布
- ・沖積砂層は高透水性で高い地下水面をもつ
- ・風化岩は強度的にはDL～DH級であるが低～難透水層

◆トンネル設計の前提条件

- ・風化岩が難透水層として、十分な厚みで安定分布する
- ・風化岩の必要強度(DH級)が、十分な厚みで安定して分布する

る

◆想定される地質・地盤リスク

- ・沖積砂層が埋没谷を形成し、風化岩が極端に薄くなっている
- ・風化岩の強度にバラツキがあり、弱部のDL級が厚く分布する
- ・断層の影響でその周辺のDL級が深部まで及んでいる
- ・風化岩の透水性にバラツキがあり、難透水層が薄くなっている
- ・これらの条件によっては陥没や地表面変位のリスクが想定される

成果品

以上の地質・地盤リスクを評価するための成果品には次のようなものがある。

- 地質区分断面図
- 岩級区分断面図
- 透水性区分図
- 地下水面コンター図
- 各種コンター図

モデル構築の計画と準備

地質構成とそれぞれの特性、設計の前提条件を確認する

◆地質構成・層序・分布

◆各層の特徴(層厚、強度、透水性)

◆作成モデル(特にリスクに関連した部分)

- ・沖積層の3次元分布モデル
- ・風化岩中のDL級の3次元分布モデル
- ・断層周辺のDL級の3次元分布モデル
- ・風化岩中の高透水部の3次元分布モデル

◆必要な地質情報

- ・調査ボーリングデータ、物理探査データ
- ・標準貫入試験データ、孔内水平載荷試験データ
- ・室内土質試験データ、岩石試験データ
- ・孔内水位観測データ、現場透水試験データ、低圧ルジオンテストデータ

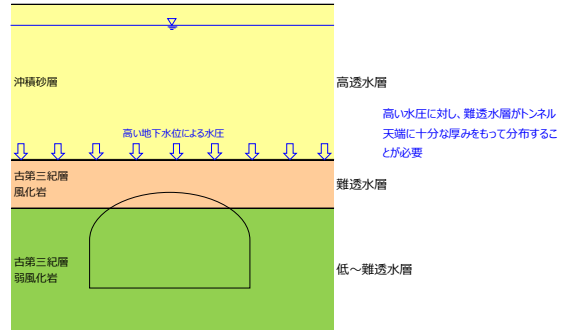


図1 低土被り地山(沖積低地)における地質・地盤リスクの背景および要因

◆考慮すべき地形・地質学的背景および着目点

- ・旧河川による浸食と埋没谷の存在、河川勾配や埋積物の土質構成
- ・構成地質と風化履歴の違いによる風化深度の差
- ・文献および地形地質から読み取れる断層・活断層の分布
- ・構成地質と風化履歴の違いによる透水特性の差

モデル構築手順

【埋没谷地形に着目した沖積砂層分布モデル】

- ・ボーリングや物理探査、現地地形データから、埋没谷地形の3次元モデルを作成する

【風化深度や埋没谷地形に着目したDL級分布モデル】

- ・ボーリングや物理探査、孔内水平載荷試験、室内土質試験、岩石試験データから、DL級分布の3次元モデルを作成する

【断層分布に着目した断層周辺のDL級分布モデル】

- ・ボーリングや物理探査、孔内水平載荷試験、室内土質試験、岩石試験データから、断層を含むDL級分布の3次元モデルを作成する

【風化深度や埋没谷地形に着目した高透水層分布モデル】

- ・ボーリングや物理探査、孔内水位観測、現場透水試験、低圧ルジオンテスト、室内土質試験データから、高透水層分布の3次元モデルを作成する

地質情報の役割

ダムの地質調査は、一般的な土木構造物に対する調査と比べると継続的に長期間実施され、その精度を向上させていく性格を持つ。3次元地質・土質モデル（地盤モデル）は設計・施工・維持管理の各段階で必要に応じて作成するとされる¹⁾。このため、モデルの作成および使用に際しては、調査時期や調査箇所と推定箇所に留意する必要がある。各事業段階において必要な地質情報を表U-B.3-1に示す。

表U-B.3-1 地質・地盤モデルの作成目的¹⁾

段階	地質・土質調査の目的・内容		地質・土質モデルの作成目的
	目的	内容	
事業計画策定段階（ダム軸選定）	選定されたダムサイトでダム軸の優劣を判断するに当たり必要な地質情報を得ること。ダムの型式・規模、掘削量、止水処理範囲及び地質上の課題等、ダム軸を選定するに当たり必要な情報を明らかにするため。	<ul style="list-style-type: none"> • 地表地質調査、物理探査、ボーリング調査(ルジオンテスト)、必要に応じて横坑調査 • 第四紀層調査(一次調査) • 貯水池周辺地すべり等調査(概査) • 堤体材料等調査 	事業計画検討モデル作成を行う場合に、必要に応じて作成することを基本とする。 ダムサイト、貯水池斜面等が複雑な地形又は地質の場合には、航空レーザ測量等による精度の高い地形図又はデータを活用すると、以後の地形地質調査の精度が向上するため、必要に応じて作成、更新又は活用することを基本とする。
設計（実施設計）	ダム建設に関する実施設計及び施工計画の作成に当たり必要な地質情報を得ること。ダムの座取り、岩盤掘削線、止水処理工の設計が可能となる地質情報を得るため。	地質構成、地質構造、断層・破砕帯、風化帯、熱水変質帯、ゆるみ領域等の形態を把握するとともに、基礎岩盤の強度、変形係数、弾性係数、透水係数(ルジオン値)等のうち必要な物性を測定する。 • ボーリング調査及び必要に応じて横坑調査	必要に応じて、ダムの実施設計のために作成することを基本とする。 ダムサイトが複雑な地形又は地質の場合には、航空レーザ測量等による精度の高い地形図やデータを活用すると、以後の地形地質調査の精度が向上するため、必要に応じて作成、更新又は活用することを基本とする。
施工時	設計条件の妥当性の確認、施工時や完成後の維持管理等に必要となる地質情報を得るため。	ボーリング調査及び必要に応じて横坑調査あるいは原位置試験等による地質調査の補足及び施工中における掘削面観察、基礎処理工解析等。	必要に応じて、設計後の調査、掘削面観察、基礎処理工から得られた情報を基に、設計条件の妥当性の確認、施工時、試験止水時及び完成後の維持管理に必要な地質情報を得るために作成することを基本とする。 ダムサイトが複雑な地形又は地質の場合には、航空レーザ測量等による精度の高い地形図やデータを用いて、必要に応じて作成、更新又は活用することを基本とする。
完成後（維持管理段階の追加調査）	ダムや貯水池等の安全性の確認を行う場合や再開発等の工事を行う場合に、必要に応じて施設の維持管理や再開発等に必要となる地質情報を得るため。	建設後若しくは供用中であることに伴い、調査手法や調査箇所との制約があるため、建設当時及び試験止水時の調査・試験資料を充分に活用するとともに、これまでの貯水状況や計測データ、建設前と現在までの変化等も踏まえて地質状況を評価した上で必要な地質調査を実施する。	必要に応じて、維持管理時の地質・土質モデルは、施工時及び試験止水時に得られた情報で作成することを基本とする。 なお、完成後において、ダムや貯水池等の安全性の確認、再開発等の検討、及びダム機能の健全性を検討するために調査を実施した場合には目的に応じて既存モデルの更新もしくは新規モデルを作成することを基本とする。 ダムサイトが複雑な地形又は地質の場合には、航空レーザ測量等による精度の高い地形図やデータを用いて、必要に応じて作成、更新又は活用することを基本とする。

※出典「国土交通省 河川砂防技術基準 調査編 平成26年4月」（国土交通省 水管理・国土保全局）から一部引用及び一部加筆

地質調査の成果品

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。
◆各種地質図面（地質平面図、地質断面図、岩級区分図、ルジオンマップ等）、コンター図（岩級区分、地下水位）、掘削平面図（地質区分、岩級区分）

3次元地質・地盤モデル作成上の課題

ダム基礎は岩盤に求めることが主である。岩盤は均質・等方であることは稀で、不均質・異方性を持つものである。このため、土質地盤とは比較できないほどの地質学的な時間の中で受けてきた地質現象（地質体の生成過程・地質構造発達・地形発達・風化変質作用等）を理解・解釈し、その結果を適切に表現したモデルを作成することが重要である。

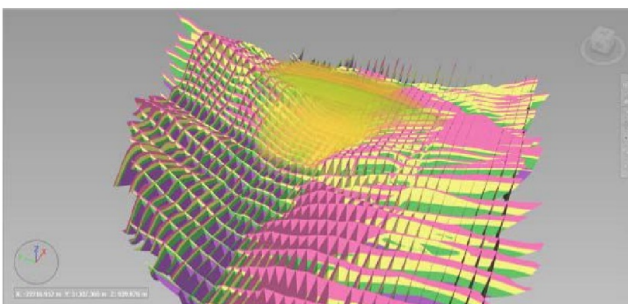
また、ダムを設計・施工する上で、必要とする地質情報の種類・量・質は何か、成果がどのように反映されるか、また地質・地盤リスクの影響についても理解したうえでモデル化しなければならない。

現行のダムサイト地質解析では、20～40m間隔のグリッドシステムにより調査された結果をもとに、2次元断面を作成しているが、上記の内容を踏まえた上で、調査がない空間について地質的に解釈した上で地質分布を補完し、縦断面図、横断面図、水平断面をグリッドより細かい間隔で作成する。

このため、情報量が多くなり、地質モデルの基本的表現として2次元成果と同等の情報量、表現に応じた準3次元断面を作成することが主流となっている。CIM導入ガイドライン(案)¹⁾では、次のような準3次元モデルを基本としている。

- ◆ボーリング（横坑）柱状図モデル
- ◆準3次元地質平面図モデル（テキストモデル）
- ◆準3次元地質縦断面図・横断面図・水平断面図
- ◆掘削面地質図モデル

3次元モデルの作成時期については、ダムの地質調査は一般的な土木構造物に対する地質・土質調査と比べると継続的に更新されることを考慮し、設計・施工・維持管理の各段階毎の節目とする。また、3次元モデル化の必要性について検討した上で作成することを基本とする必要がある。

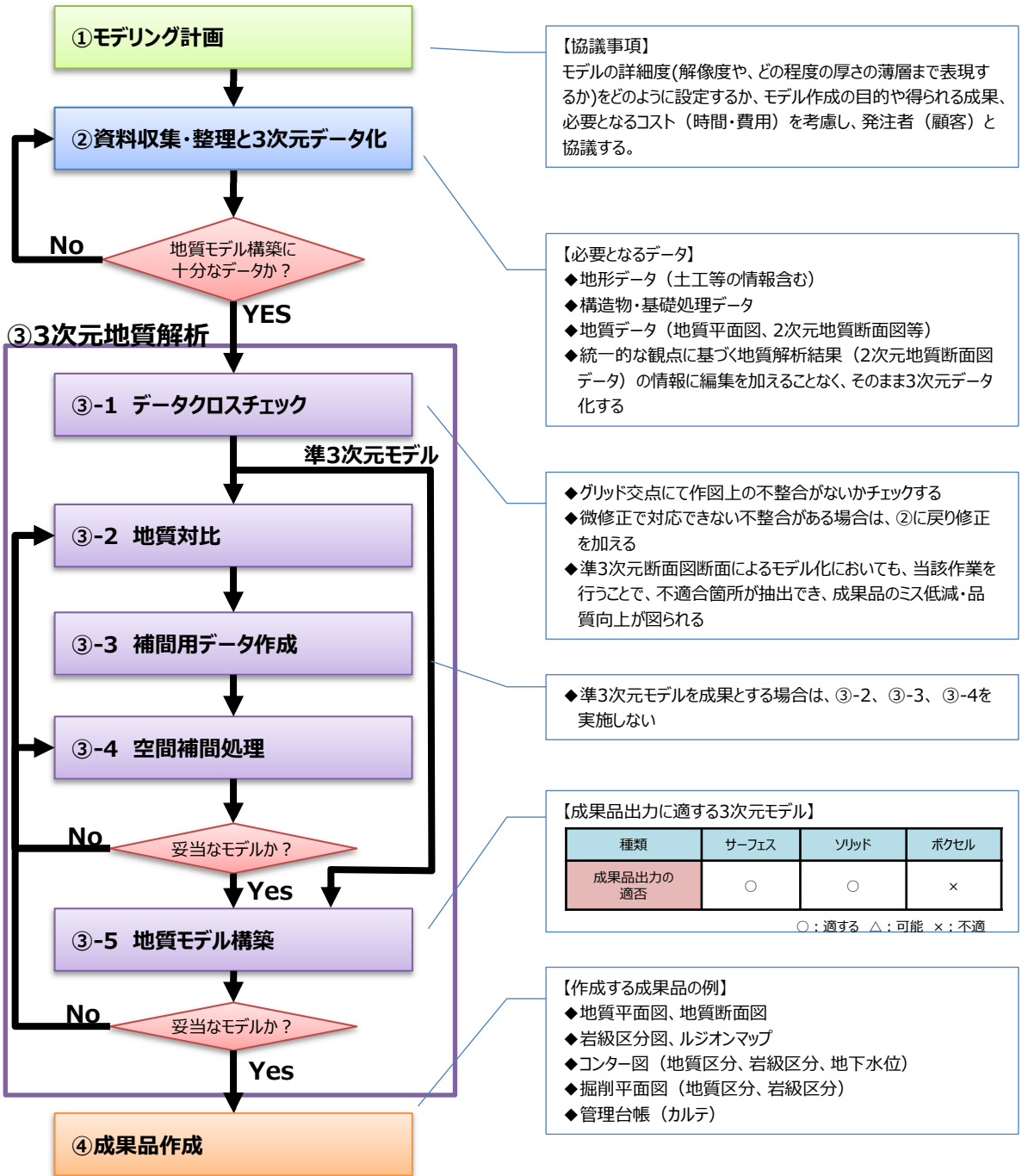


図U-B.3.1 小石原ダムにおける準3次元断面図²⁾

参考文献

- 1) 国土交通省CIM導入推進委員会, CIM導入ガイドライン(案)第4編 ダム編, 2017.
- 2) 坂井田輝・有馬慎一郎・桜庭博司, 小石原川ダムにおけるCIMの導入と活用策の検討, 独立行政法人水資源機構HP.

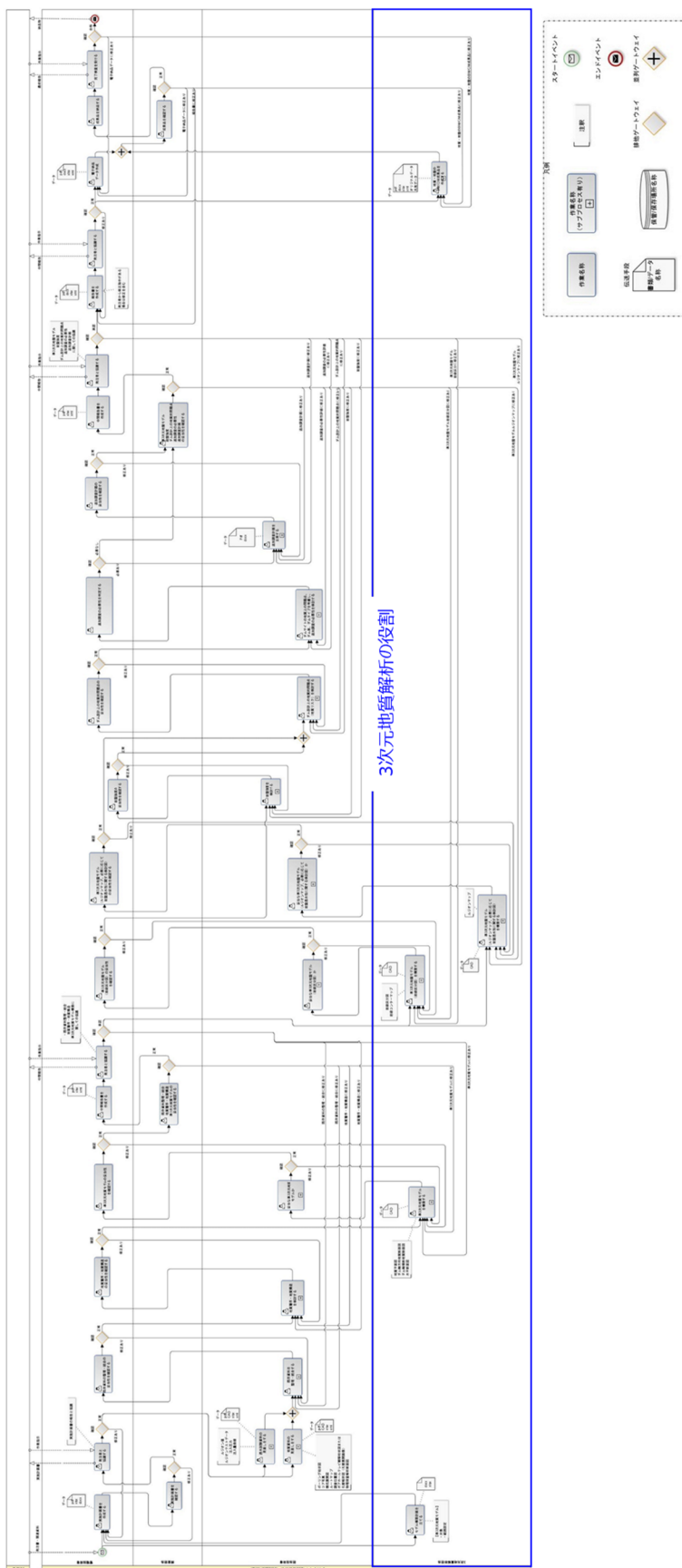
＜ダムを対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

ダムサイト地質総合解析（詳細設計段階）において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



地質情報の役割

河川堤防や河川構造物の計画、設計、施工、維持管理、災害対策において、安全性等に影響する地盤の情報を把握することを目的として地質調査を実施する。災害時においては、その原因を把握し復旧方針を検討する目的で行われる。

地質調査の成果品の例

河川堤防および河川構造物における地質調査に要求される成果品の例を表U-B.4-1に示す。

3次元地質・地盤モデル作成上の課題

長大な河川堤防は、トンネル同様に対象範囲の規模（延長）に対しての地質情報が不足するインフラである。近年は、調査不足を補完するために、連続的な調査として統合物理探査が目ざされている（表U-B.4-2）。また、河川沿いの航空レーザー測量成果の整備が進み、地形地質の形成履歴を判読するための微地形情報も取得可能になっている。

3次元地質・地盤モデルの作成に際しては、これらの情報を合理的かつ効率的に活用することが望ましい。

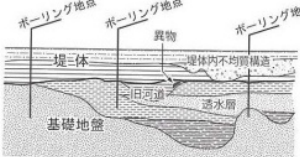
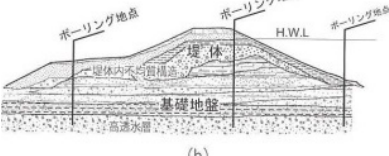
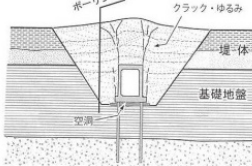
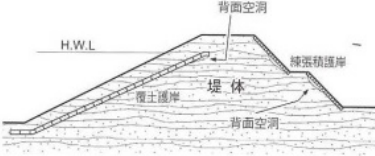
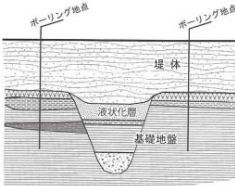
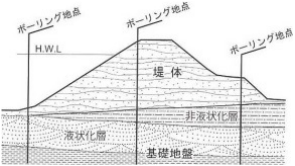
河川における3次元地質・地盤モデルの作成上、注意すべき地盤情報は次のようになる。

- ◆ 旧河道等の要注意地形の分布
- ◆ 河川改修履歴や既設対策工
- ◆ 基礎地盤における透水層の分布範囲・層厚
- ◆ 基礎地盤における沈下特性
- ◆ 液状化層の分布範囲・層厚
- ◆ 砂質土のN値・粒度特性
- ◆ 堤体の土質構成
- ◆ 透水層および被覆土層の分布状況
- ◆ 樋門等構造物周辺や護岸背面空洞における緩みや空洞の有無・大きさ
- ◆ 遺物（木片、瓦礫等）の有無
- ◆ 河川周辺の斜面変動
- ◆ 被災履歴、被災原因
- ◆ 地下水分布

表U-B.4-1 河川堤防および河川構造物の地質調査成果品の例¹⁾

段階	調査標準	主な成果品	
河川堤防の土質地質調査	新設時	河川堤防の安全性等に影響する地盤の分布及びそれらの状況を適切に把握する 堤防に使用する土質材料に対しては、材料選定のための調査を実施する	【既往の土質・地質調査資料収集・整理】 現在の地形図、空中写真、治水地形分類図、旧版地形図、古い空中写真、災害記録、河川改修等工事記録 【本調査1次】 堤防法線付近に沿う土質縦断面図、ボーリング調査、サウンディング試験、土の判別分類のための試験結果を基に、軟弱地盤、液状化地盤又は透水性地盤を判定 【本調査2次】 堤防付近に沿って軟弱地盤の土質、層厚、深さ方向の強度変化等が分かる土質縦断面図・土質横断面図を作成。土質試験の結果は、深さ方向の含水比、土粒子の密度、湿潤密度、間隙比、非排水せん断強さ、圧密降伏応力、圧密係数、粘着力等の変化が分かるように整理し図示する。 【盛土材】 土取場予定地の土量計算ができる精度の地形図に整理。土質横断面図を作成。土質試験及び原位置試験の結果は、それぞれの土質について整理。 地下水変動調査による地下水の等水位曲線図。各観測地点の水位時間曲線も図示する。
	既設の河川堤防の安全性照査時	既設河川堤防の安全性等に影響する地盤の分布及びそれらの状況を適切に把握する	【予備調査及び現地踏査】 地形・地盤条件、堤防構造、被災履歴、既設対策工、河道特性や洪水氾濫区域等が同一、又は類似する区間である一連区間の設定 液状化特性把握は、液状化の可能性のある砂質土の位置・強度と地下水位を的確に把握する 【本調査】 ボーリング調査及びサウンディング試験や土質試験結果を土質縦・横断面図に取りまとめる
	被災時	軟弱地盤調査、液状化地盤調査及び透水性地盤調査等を実施する	【予備調査】 被災前後の河川水位及び降雨の状況、堤防の諸元、堤防の築堤・被災の履歴、堤防と基礎地盤の土質、高水敷の有無、堤内地盤高、旧地形、既設対策工の有無、構造物とその周辺の変状、堤防開削調査結果等を図示。地震については、震央や規模等の地震の諸元、被災箇所近傍の震度や加速度等 【現地踏査】 被災の規模・形態、被災後の断面形状、発生経緯、周辺地盤や周辺構造物の変状等を確認するとともに、被災当時の状況や既往の被害等についての聞き取り調査結果 【本調査】 被災の状況及び想定される発生メカニズムに応じた適切な調査や解析
	河川堤防開削時	堤防の開削時には、開削調査を行い、築堤の履歴や堤体を構成する土質、水みち等を把握する	【基礎調査】 既往の土質・地質調査資料、現在の地形図や空中写真、治水地形分類図あるいは旧版地形図、古い空中写真、災害記録、河川改修等工事記録（築堤履歴や変状・補修の履歴） 【事前調査】 堤体表面や構造物の現状、変状の概要を調査し、変状が確認された場合には、変状の種類と規模を定量的に把握する 【開削時調査】 開削法面における土質分布、混入物及び空洞や亀裂等の変状等の観察スケッチ・写真。樋門等構造物及びその周辺は、上記に加え、埋め戻し土の土質とその範囲や構造物自体の変状、構造物下の変状の観察結果 液状化による被災後の場合には、地下水位をより正確に把握するために、開削調査前にトレンチ掘削を実施することが有効な場合がある。堤体内に貫入した噴砂痕や流動した砂層（堤体の場合もある）を正確に記録し、築堤履歴や変状、地下水位との関係を整理する
河川構造物の土質地質調査	新設時	河川構造物の計画、設計、施工等の目的に応じ、適切かつ十分な情報が得られるように行う	【予備調査】 地形や地盤の構成の概略状況を既存の土質・地質調査資料あるいは地形図、航空写真等を通じて把握。地点周辺の地質図や地形分類図、地すべり等の発生の有無、施工上の障害又は問題となる地形・地質の有無を示す 【本調査】 河川構造物の予備設計・詳細設計を行うために必要な地盤条件や施工条件、設計に用いる地盤定数等を明らかにするために、ボーリング調査及びサウンディング試験等を行うとともに、採取した試料より土質試験等を実施し結果をまとめる
	維持管理時	河川構造物自体とその周辺が堤防の弱点とならないように継続的な点検を行う	【予備調査】 構造物（施設）台帳、設計・竣工図書、構造物地点及びその周辺の土質・地質調査資料、破壊・沈下・液状化・漏水等の被災履歴を記録した資料等の調査を行う。現地踏査においては、構造物の内外と周辺を観察して変状の有無とその程度を把握する 【本調査】 必要に応じてボーリング調査及びサウンディング試験、原位置試験（連通試験等）、土質試験等を行う

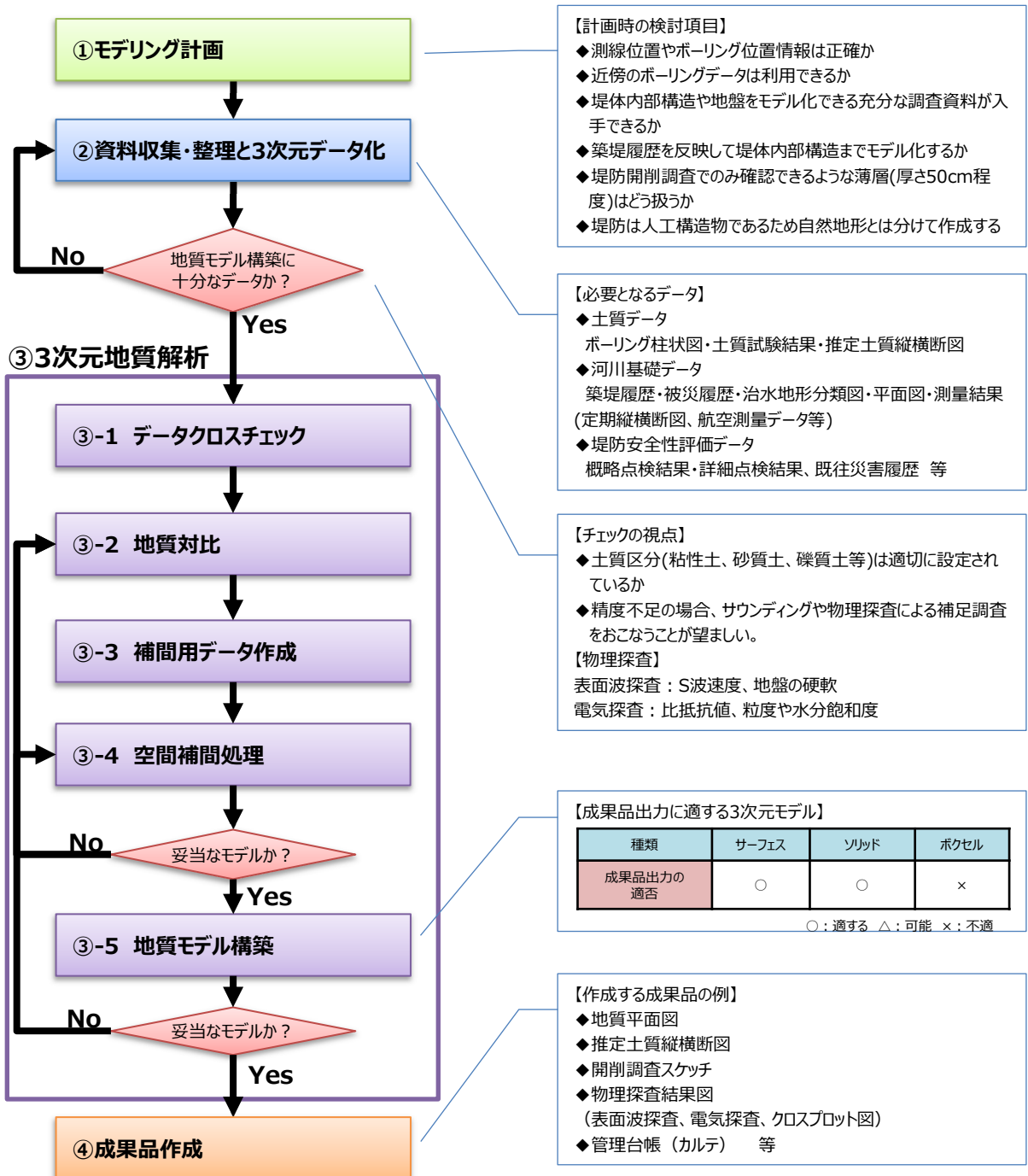
表U-B.4-2 堤防の安全性照査・設計に係る調査事項と統合物理探査の役割²⁾

現象	調査対象		調査によって把握すべき事項	物理探査の役割	参照図
浸透	一般堤防部	縦断方向	<ul style="list-style-type: none"> 堤体の土質構成 基礎地盤における透水層の分布範囲・層厚 旧河道等の要注意地形の分布範囲 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査では把握できない地盤構造の解明 ボーリング柱状図の妥当性評価 	
		横断方向	<ul style="list-style-type: none"> 遺物（木片、瓦礫等）の有無 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査では捉えられない異常箇所の把握 	
	構造物周辺	<ul style="list-style-type: none"> 樋門等構造物周辺における緩みや空洞の有無・大きさ 	<ul style="list-style-type: none"> サウンディング等では捉えられない空洞の広がりや局所的な異常箇所の把握 		
	堤防表裏のり	<ul style="list-style-type: none"> 護岸背面空洞の有無・大きさ 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査や目視調査では捉えられない空洞の拡がりの把握 		
地質	一般堤防部	縦断方向	<ul style="list-style-type: none"> 液状化層の分布範囲・層厚 砂質土のN値・粒度特性 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査等では把握できない地盤構造の解明 ボーリング柱状図の妥当性評価 	
		横断方向	<ul style="list-style-type: none"> 液状化層の分布範囲・層厚 砂質土のN値・粒度特性 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査では把握できない詳細地盤構造の解明 	

参考文献

- 1) 「河川砂防技術基準 調査編 平成26年4月」(国土交通省 水管理・国土保全局)。
- 2) (独)土木研究所・(社)物理探査学会編著. 河川堤防の統合物理探査-安全性評価への適用の手引き-. 株式会社愛智出版. 2013, p.17-18, p.39, p.93.

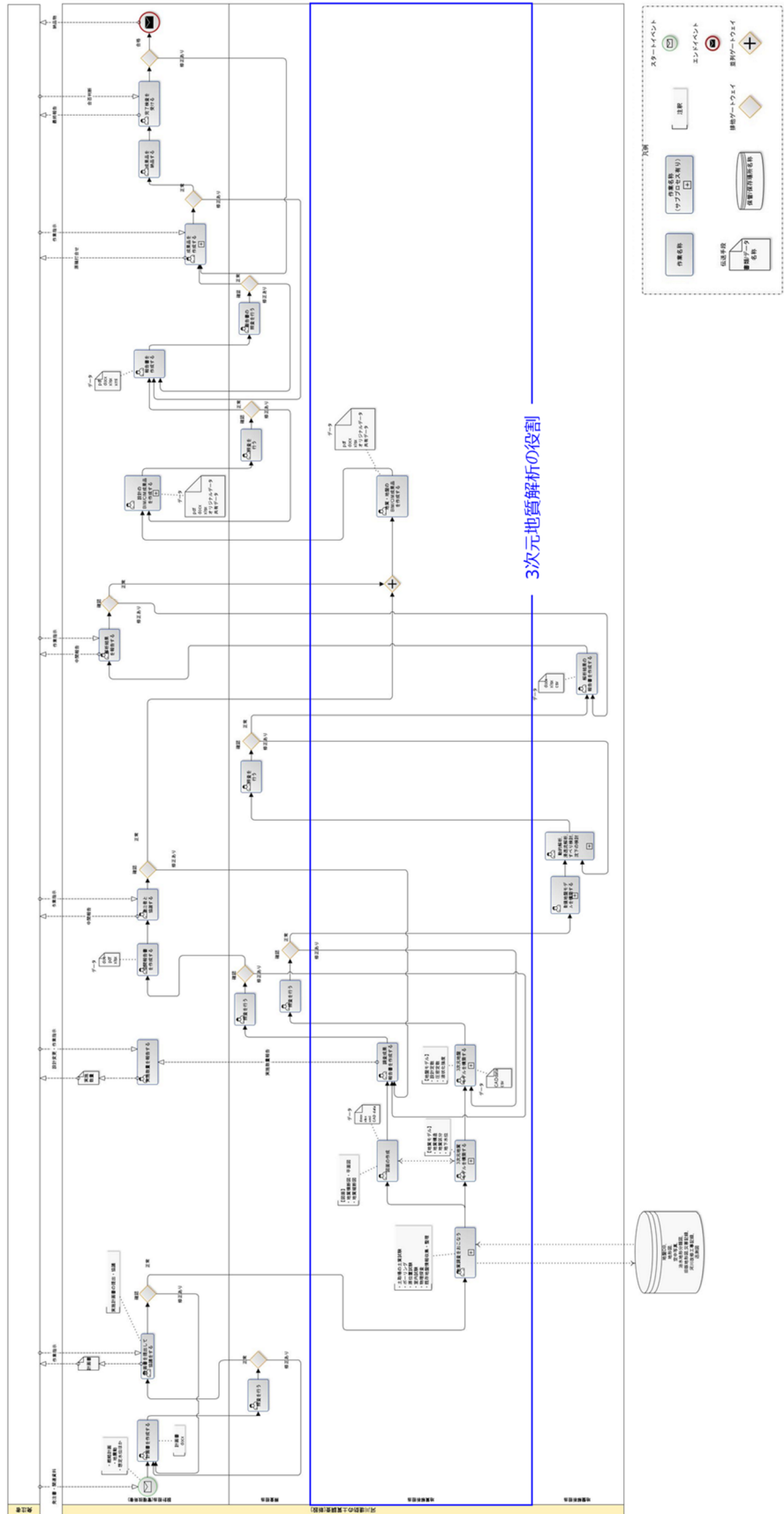
＜河川構造物を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

河川堤防の土質調査（新設）において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



地質情報の役割

橋梁計画・設計時には、橋梁に影響を与える地質・地盤リスク・自然災害リスクの把握と適切なリスク評価が必要となる。リスク評価対象には、橋台・橋脚基礎の安定性はもちろんのこと、斜面移動体や落石等の周辺地形地質状況に起因するものや、出水時の洗堀等の災害発生要素等も加える必要がある。

事業段階毎の地質調査の目的は次のようになる。

①概略・予備設計

- ◆路線選定に係る地質・地盤リスクの把握

②予備調査

- ◆地盤性状の把握
- ◆周辺地質・地盤リスクの把握
- ◆動的解析用地盤モデル作成
- ◆基礎形式の選定に用いる地質情報の把握

③施工

- ◆基礎構造と支持層の関係把握
- ◆動的解析用地盤モデル作成
- ◆施工時の安全確保に用いる地質情報の把握
- ◆施工に伴い明らかになった地質情報によるモデル更新

地質調査の成果品と利用場面の例

橋梁基礎に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆空中写真判読図
- ◆地質平面図、地すべり分布図
- ◆物理探査結果図
- ◆地質平面図、地質断面図（縦断・横断図）、コンター図
- ◆動的解析用モデル図

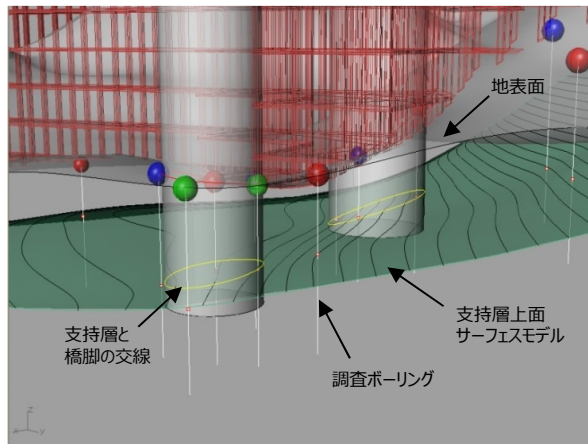
3次元地質・地盤モデル作成上の課題

3次元地質・地盤モデルは上記の成果図面作成に用いるほか、地質・地形に起因する橋梁設計・施工上の課題（地質・地盤リスク・自然災害リスク）を表現できることが望ましい。

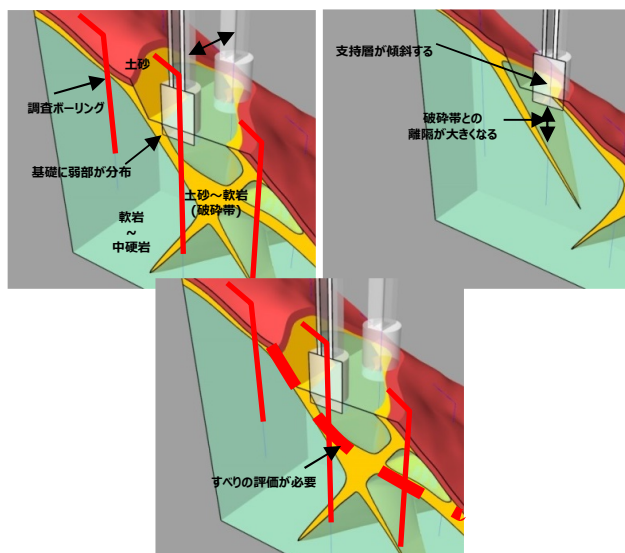
3次元地質・地盤モデル作成時の課題を例示する。

i) 支持層

橋梁基礎と支持層・岩盤線との関係をわかり易く示すため、支持層上面と基礎との関係を明示する（図U-B.5-1）。山地－平野境界付近、旧河道やおぼれ谷が想定される箇所等では、支持層上面形状が複雑となる場合がある。これらを精度よく表現する必要がある（図U-B.5-2）。



図U-B.5-1 支持層分布の可視化例



図U-B.5-2 傾斜地での橋台基礎の3次元地質・地盤モデル例

支持層に被圧帯水層が存在し、その影響で杭施工時にコンクリート流動が生じ、結果的に支持力不足が生じた事例もある（図U-B.5-3）。地下水水位や地下水流動状況も表現できることが望ましい。

ii) 沈下・変形

沈下・変形が発生しやすい軟弱地盤の分布を精度よく把握できることが求められる。側方移動の要因となる背後盛土の存在や地すべり・崩壊等の地形要素等がないかの確認も必要である。

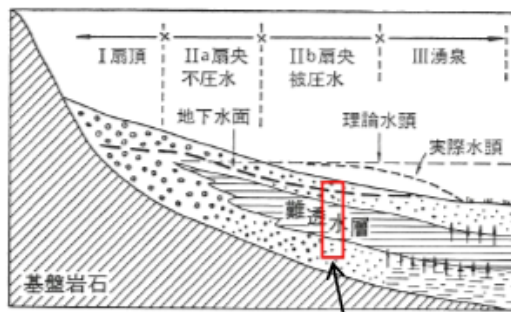
iii) 液状化

液状化の可能性のある砂質土や液状化の素因になる地下水分布を精度よく把握する必要がある。旧河道で噴砂・液状化が生じた事例もあり、微地形判読が可能な地形モデルが求められる。

平野部における橋梁基礎の主な変状原因と注意すべき地形を表U-B.5-1に示す。

iv) 洗掘・侵食

洗掘・侵食が予想される箇所を抽出するため、微地形判読が可能な地形モデルが求められる。



コンクリートが流出

図U-B.5-3 扇状地での杭コンクリート流出事例における地質断面図¹⁾

表U-B.5-1 平野部における橋梁基礎の主な変状原因と注意すべき地形¹⁾

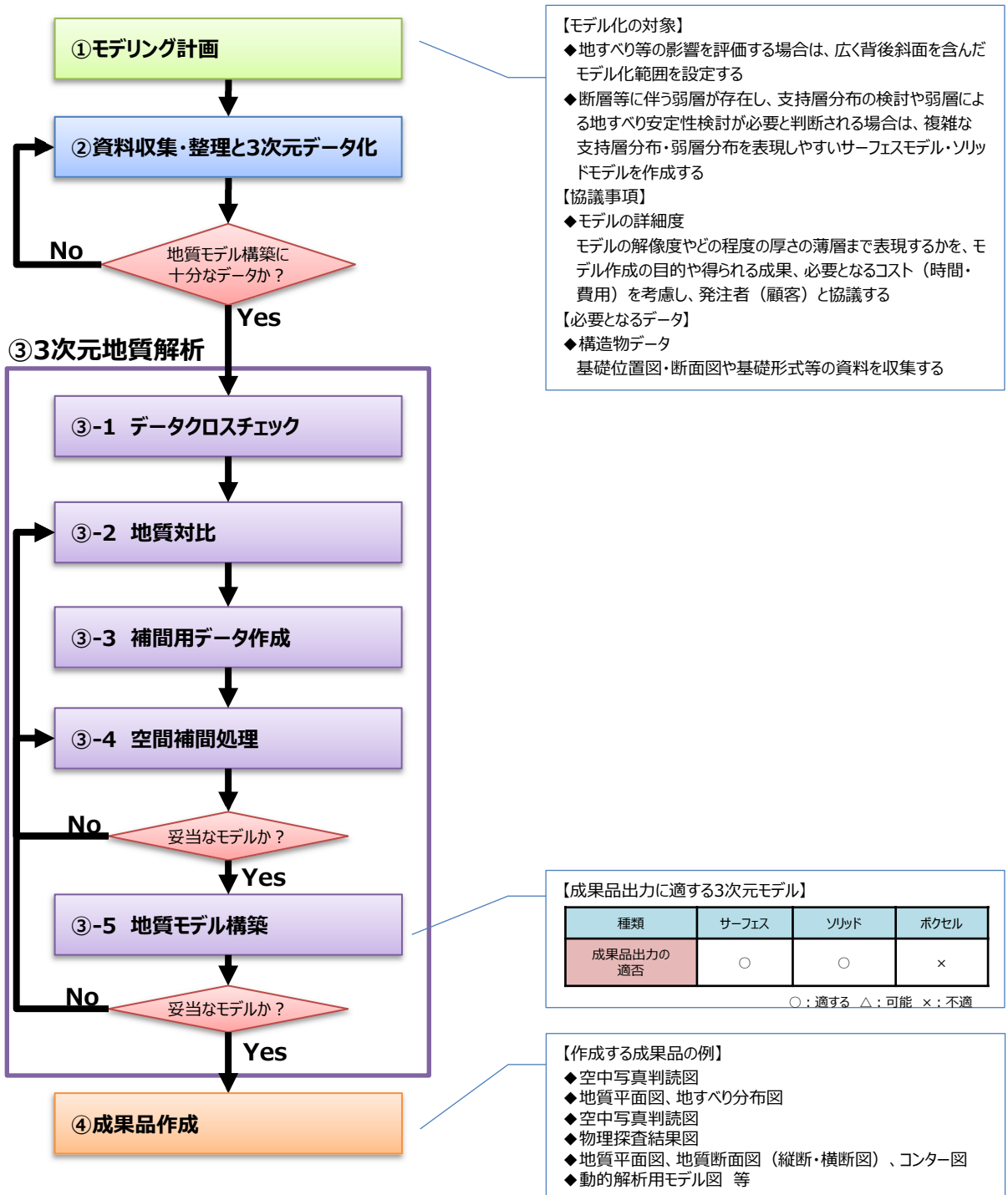
変状原因 地形	支持層	沈下	変形	液状化	洗掘、侵食	その他
扇状地	地下水の被圧 地下水流速が速い	—	—	—	河道内での 基礎の侵食	土石流に伴う 盛土侵食
自然堤防 後背湿地	—	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布	—	有害ガスの 発生
三角州	—	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布	—	有害ガスの 発生
土砂供給の 多い河川沿岸	支持層深度が深い 地下水の被圧 地下水流速が速い	沖積粘性土の圧密 薄層支持させる場 合の支持層下の圧 密	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布	河道内での 基礎の侵食	—
オボレ谷埋 積地	支持層の傾斜・三 次元的分布	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	—	—	有害ガスの 発生
海岸砂州 堤間低地	—	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布	—	—
潟湖跡	支持層の傾斜	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	—	—	有害ガスの 発生
旧河道	—	沖積粘性土の圧密	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布 旧河道の埋立 土の液状化	—	局所的な地 層変化
埋立地	—	沖積粘性土の圧密 埋立粘土の圧密と ネガティブフリク ション	橋台の側方移動	沖積砂質土の 分布 埋立土の液状 化	—	埋土層の複 雑な地層分 布

※上記の変状原因は各地形における代表的なものであるが、これが全てではなく、リストアップされて
いない変状原因が潜在することもあるので注意が必要である。

参考文献

- 1) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会、構造物の安全性・信頼性向上のための調査計画ガイドライン(案)
—注意すべき地形・地質に対する調査計画ガイドライン—、平成27年3月、p.36,p.57,p.60.

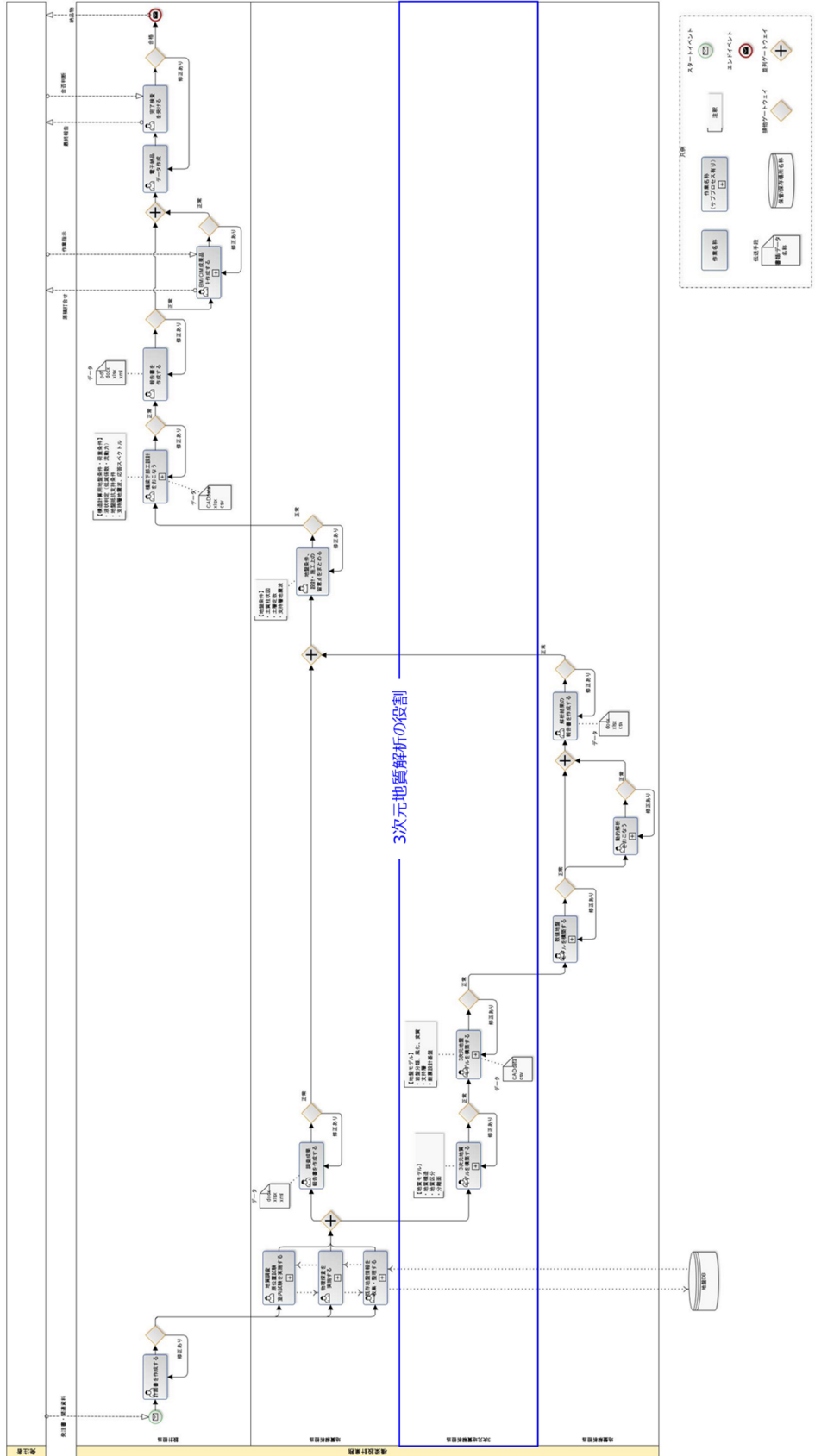
＜橋梁を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

橋梁設計業務において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



地質情報の役割

斜面防災は地すべり・急傾斜・落石・岩盤崩落・雪崩による災害を防止・抑止するためのハード対策やソフト対策に係る事業を指す。本書では地盤に由来する斜面変動を対象とする。

斜面変動の定義は、その発現で災害に結び付く可能性が高い重力移動体とする。その種類は、地すべり、岩盤崩壊、表層崩壊、深層崩壊、落石である。斜面変動に影響する地質事象は下表に示すように多岐にわたる。

表U-B.6-1 斜面変動を支配する地層、岩石・地質構造・割れ目及び割れ目に転化しやすい構造と表現上の課題¹⁾

斜面変動を支配する地層、岩石	斜面変動を支配する地質構造	割れ目及び割れ目に転化しやすい構造
泥質軟岩 凝灰岩 結晶片岩 千枚岩 粘板岩 炭層 蛇紋岩 砂岩泥岩互層 温泉余土・熱水変質 風化の進んだ斜面	キャップロック構造 岩脈を含む岩盤・貫入岩 流れ盤構造 褶曲（背斜構造） 断層・破碎帯	層理 片理・劈開（微褶曲の軸面劈開、スレート劈開） 節理 断層

保安物件に対する斜面変動の検討・対応は次の4段階でおこなわれ、それぞれに重要な判断材料として地質情報が関与することが多い。

i) 調査/設計

斜面災害リスクを評価するために、正確な地質情報の把握、各種資料作成、安定解析、リスク監視基準策定等がおこなわれる。

ii) 施工

施工時の安全確保のため、モニタリングや目視によるリスク監視がおこなわれる。施工掘削面等で得られた地質情報によりリスク評価をチェックし、監視基準が変更される場合もある。

iii) 維持管理

竣工後の日常安全管理のために、観測機器によるモニタリング、カルテ等による点検がおこなわれる。モニタリング・点検結果によっては、地質情報の見直しや追加地質調査を実施し、リスク評価基準の変更や監視基準の変更もあり得る。

iv) 緊急時

変調時の崩壊予測や、発災時の災害対応、応急工事におけるでき高/でき型管理に地質情報が用いられる。なお、復旧時は「③維持管理」と同様の内容となる。

成果品と利用場面の例

斜面変動に対する各検討・対応段階にて要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆地質断面（主断面、解析断面）
- ◆すべり面コンター図：3次元安定解析や対策工設計に使用
- ◆平面図：斜面変動の規模や影響範囲
- ◆管理台帳（カルテ）

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

地すべりのすべり面形状や側方拘束の影響まで考慮し、安全率をシビアに評価する場合、3次元安定解析の適用が考えられる。

3次元安定解析には3次元地質・地盤モデルが必要となる。斜面変動の3次元地質・地盤モデル構築上の課題は次のようになる。

①3次元地質・地盤モデル作成に必要な地質情報の取得
現状では、斜面の安定解析は主測線の2次元断面で実施されるのが主流であり、地質調査は主測線沿いにおこなわれることが多い。そのため、既往の調査資料からすべり面等の3次元形状を推定するには地中の情報が不足する場合がある。また、急崖斜面等、地形的にボーリング調査が困難な場合もある。

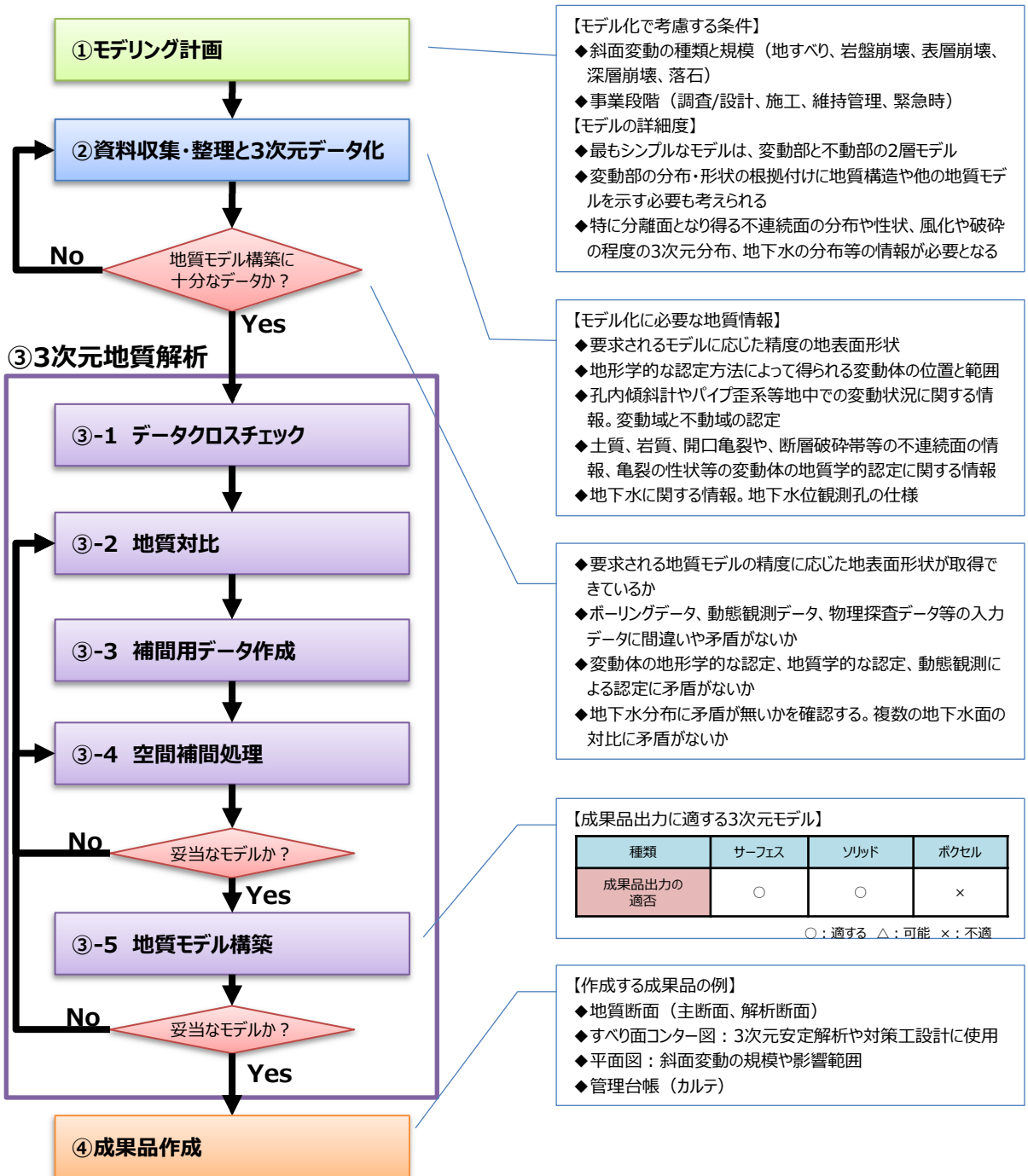
②各段階に対応するモデルの構築
調査設計、施工、維持管理と、緊急時の各段階に応じた適切なモデルの構築が必要である。また、斜面変動は、地形や地下水状況、活動度が時系列で変化することもあり、これらをどう把握するかも重要である。

③用途に応じたモデルの詳細さの決定
斜面変動の3次元地質・地盤モデルは、対象を変動体と不動部と捉えれば、シンプルなモデルで表現可能である。しかし、現実には、変動体中に別の変動体を内包したり、変動体が別の変動体によって切断されたり覆われたりと、変動体と不動部のみに着目したとしても複雑なモデルとなることがある。これに地層構成や地質構成を加えるとさらに複雑となる。

参考文献

1) 日本応用地質学会編：斜面地質学—その研究動向と今後の展望—。応用地質学会。1999, pp.18-42.に加筆

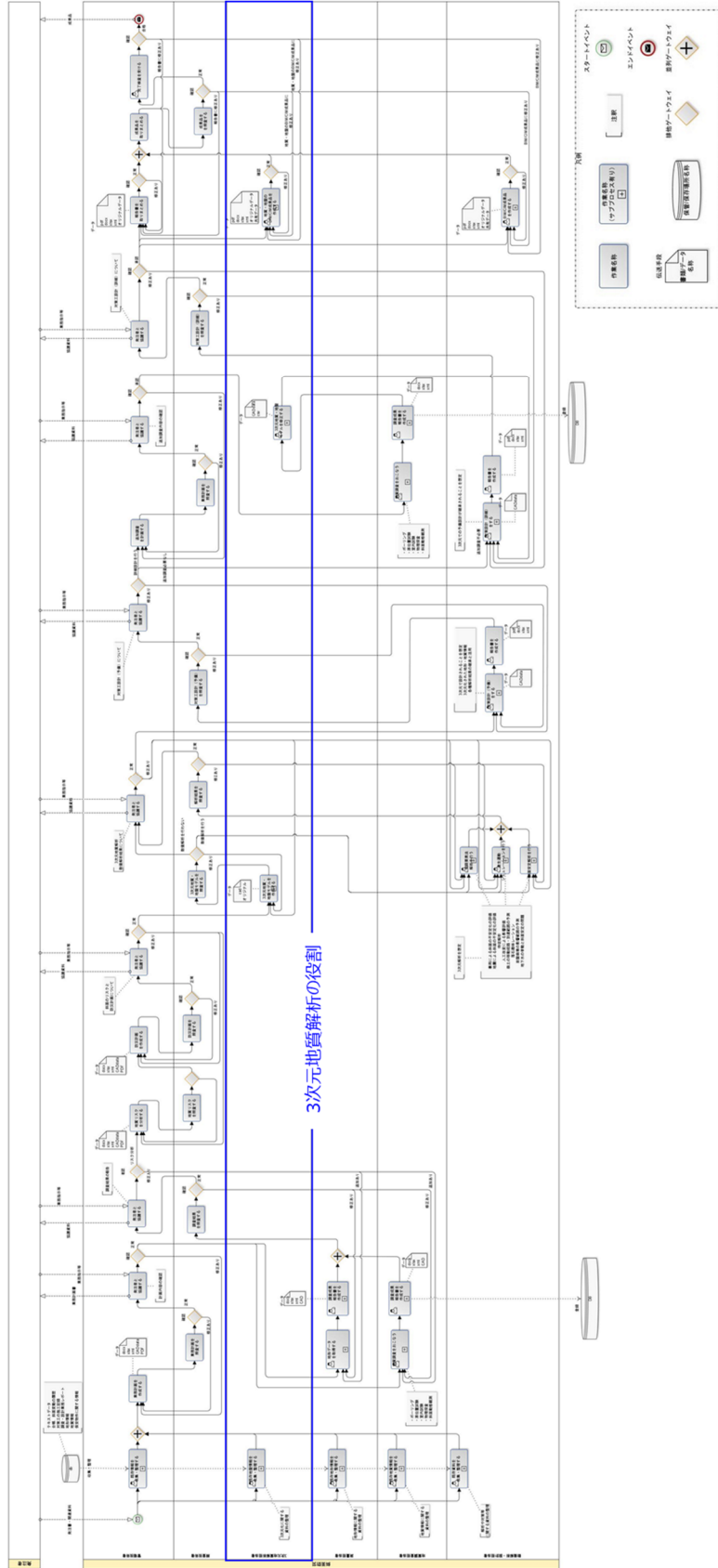
＜斜面変動を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

斜面防災において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



事例U-B.6-1) 道路新設工事における3次元地質・地盤モデル作成(1)

目的

大規模切土法面工事において下記を目的として3次元モデルを導入した事例を紹介する。本件の目的は次のようになる。

(1) 当初設計方針の妥当性確認

事前調査から想定される地質情報を3次元モデルに反映し、当初設計(法面勾配・法面保護工)の妥当性確認や追加対策の必要性検討に用いる。

(2) 施工時の安全確保

3次元モデルに基づき施工前に不安定要素や危険箇所を抽出し、施工業者と情報共有を行うとともに、施工中は危険箇所についてTS測量で法面の挙動を監視することにより、施工時の安全を確保する。

(3) 維持管理情報の提供

事前調査で得られた地質情報や施工時の法面状況(湧水・亀裂・緩み箇所等)等の情報を3次元モデルに一元化し、供用後の維持管理情報として道路管理者に提供する。

工事概要

工事内容：東海環状自動車道の岐阜県関市広見地区における道路新設工事

発注者：国土交通省中部地方整備局岐阜国道事務所

受注者：青木あすなろ建設株式会社

工事規模：L=440m、掘削工 139,000m³

盛土工 40,570m³

分布地質：主として亀裂の卓越するチャートおよび泥岩
一部は崖錐堆積物に覆われている

事前に予測された施工時の不安定要因

- ①法面に対して流れ盤構造を示す連続性を有する亀裂面
- ②地質境界部に形成された破碎質な劣化帯や湧水
- ③法面の平行方向に急立した層理面等の不連続構造

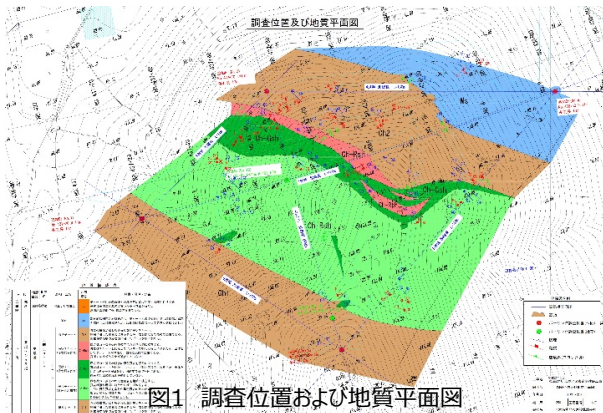


図1 調査位置および地質平面図

3次元モデル作成に期待されたこと

視覚的に法面と地質構造の関係が分かりやすくなる。断面図間の空白域も想定地質分布を確認できる。

想定される災害

- ① 法面に対して流れ盤構造を示す亀裂面に沿った肌落ちや小崩落・落石等
- ② 破碎質な劣化帯や湧水による肌落ちや小崩落
- ③ 法面と平行方向に急立した不連続面による岩盤クリープ性の法面変状・崩壊

作成モデルと得られた成果

当初災害要素として挙げられた①は3次元モデル上に表現が困難だったため、②・③の災害要素となる脆弱部や地質構造可視化のため地質境界のみ3次元モデル化した。

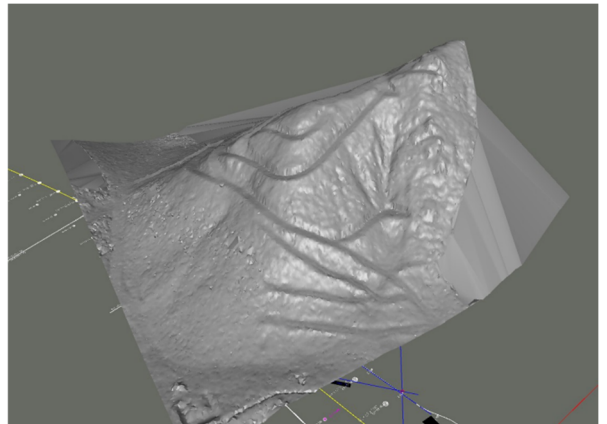


図2 施工前(工事用道路施工中)

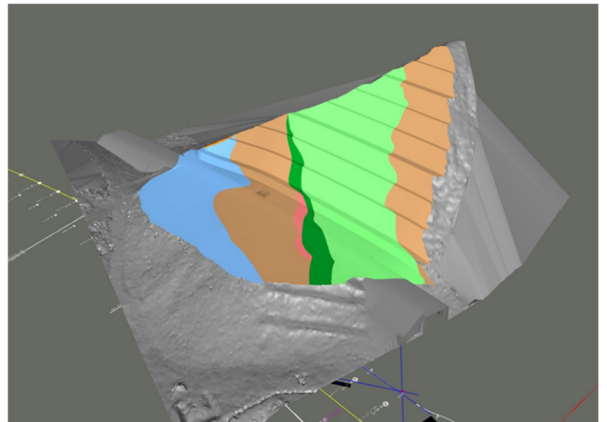


図3 施工後

事例U-B.6-1) 道路新設工事における3次元地質・地盤モデル作成 (2)

事前調査で想定された地質境界(脆弱部)は概ね施工時にも同箇所を確認され、施工時の安全管理上の情報ツールとして活用し、安全な施工に結び付けることができた。

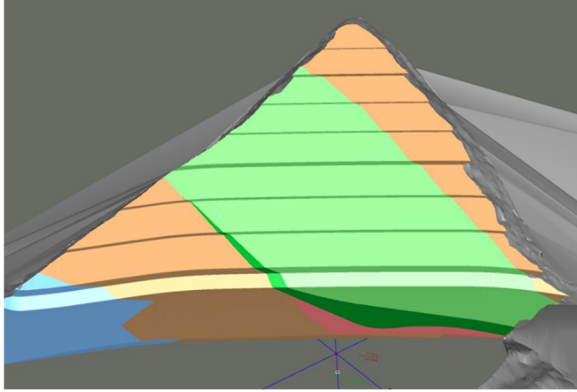


図4 計画時
地表踏査(施工前)の結果を基にした計画時の地質

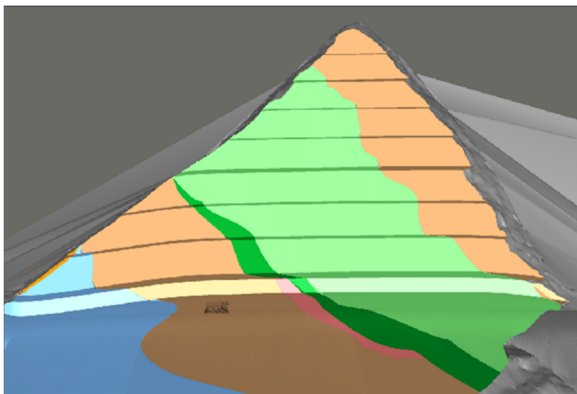


図5 施工後
施工後に法面観察を行い実際の地質分布を反映

垂直層の表現

Civil3Dで作成されるサーフェスモデルでは90°以上のサーフェスを作成することができない。また、垂直に近い地層はZ軸方向の点密度が低くなる。

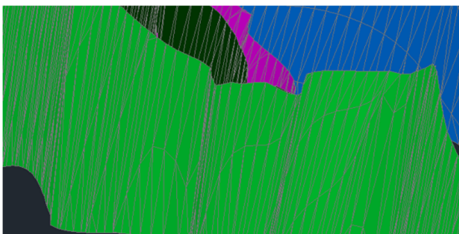
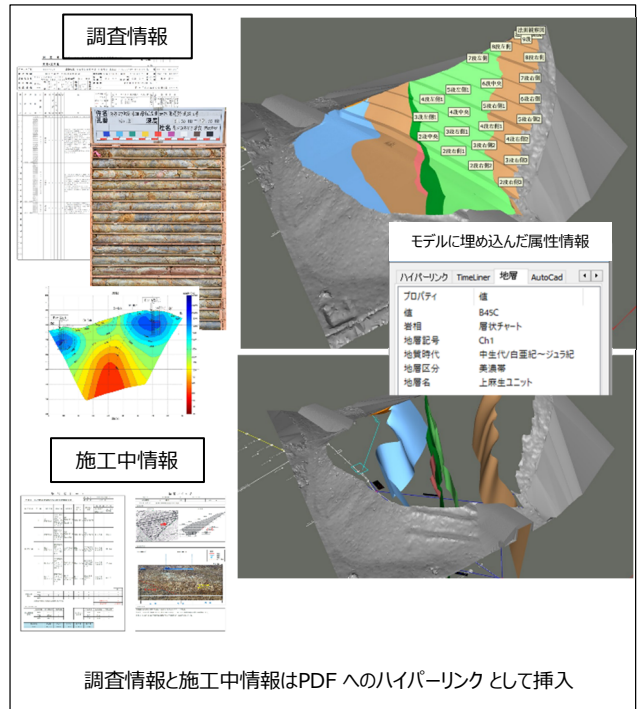


図6 Civil3Dによる垂直層の表現

情報集約ツールとしての活用

CIMモデル上に調査情報や施工中の情報を集約し、維持管理情報として道路管理者に提供した。法面の情報を視覚的に分かりやすい状態で一元化することで効率的な維持管理に寄与する。



調査情報と施工中情報はPDFへのハイパーリンクとして挿入

図7 情報集約ツールのイメージ

事例U-B.6-1) 道路新設工事における3次元地質・地盤モデル作成 (3)

適用事例から得られた今後の課題

◆3次元モデル化の対象についての課題

対象事例では、肌落ちや小崩落の素因として挙げられた流れ盤の亀裂面は連続性に乏しく、事前調査での出現箇所の推定や、施工前の3次元モデル上への表現が困難であった。このため今回の事例では亀裂沿いの崩落に対しては、3次元モデルの活用ができなかった。

このことは、3次元モデルを活用する際に「どのようなスケールの地質事象をモデル化の対象とするか(できるか)」という問題を事前に十分吟味し、「付与情報の取捨選択」や「3次元モデルの適用の可否」を検討する必要があることや、モデルスケールの精度を適切に選定することが重要であることを示している。

◆地質境界の自動生成における課題

今回、3次元的地質分布を示す地質境界サーフェスを作成するソフトとして「GEORAMA for Civil 3D」を用いた。本ソフトは、「平面図」「ボーリング情報」「断面図」等から最適化原理を用いて各層ごとに地質境界を推定しサーフェスを作成する。

しかし、適用事例のように岩盤の急立した地質構造や変質帯等の不規則な分布を示す地質では、最適化原理に基づく自動計算ではスムーズなサーフェスを描くことができず、このため技術者の手作業でサーフェスを作成あるいは修正する必要が生じた。

また、適用事例では、既存の2次元で作成された図面を基に新たに3次元モデルを作成したため、作業が重複した。そのため、今後の作業プロセスとしては、調査当初より3次元モデルを活用し3次元モデルから2次元の図面を作成することが望ましい。

◆CIM 活用・適用対象事業の選定に関する考え方

事業における3次元CIMの活用・適用の可否は、想定される災害や地質の不確実性等、対象となる地質・地盤リスクに対するB/Cで評価されるべきものとする。したがって、今後、同様の事例でCIMを活用・適用するかどうかは、事前に地質・地盤リスクマネジメント手法等を用いて、客観的に評価を行う必要があるものと考えられる。

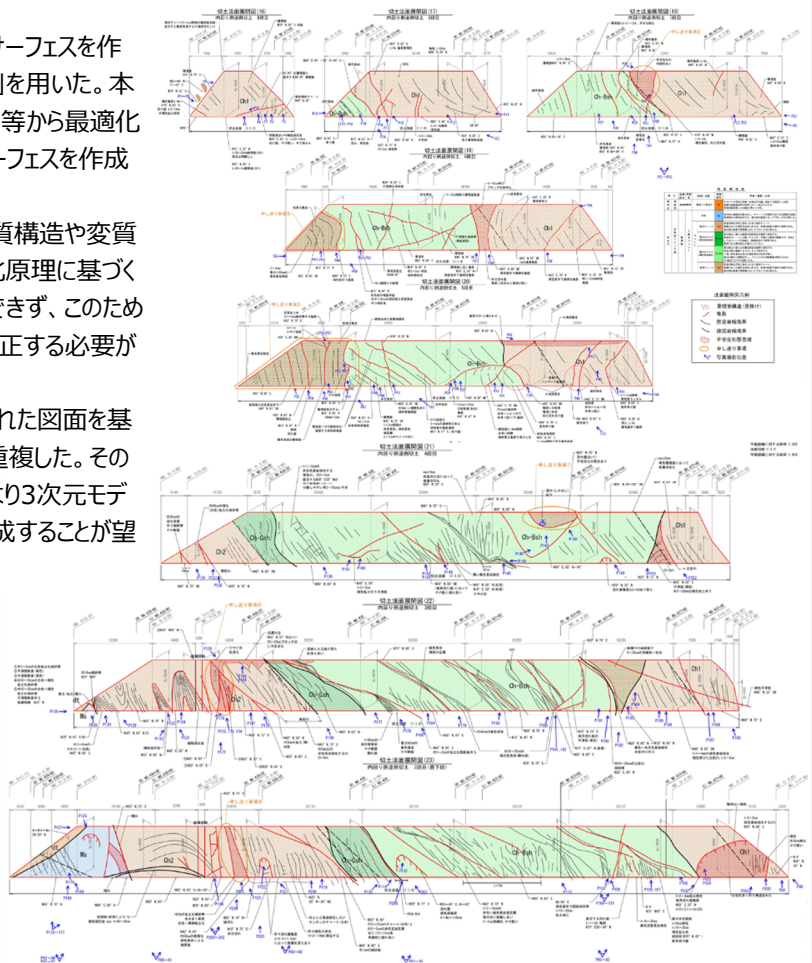


図8 法面展開図

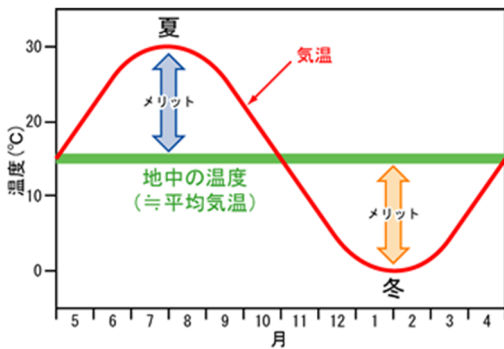
U-B.7 地中熱利用

地質情報の役割

地中熱は「昼夜間又は季節間の温度変化の小さい地中の熱的特性を活用したエネルギー」と定義される¹⁾。

地中熱利用の対象となる地質は、透水性が高く連続性の良い地層が望ましい。それらの地層が地下水位以下で飽和状態にあれば、高い熱伝導性が期待できることや、地中熱交換井のバリエーションが増える等の利点もある。

地中熱を利用するためには、地域の地下環境に応じた地中熱の利用可能性を、地中熱ポテンシャルとして評価する手法が試みられている。地中熱ポテンシャルは、地盤モデルを用いて評価するが、地下水の流れが重要であるため、3次元陸水シミュレーションを用いて詳細な検討を行うことがある。シミュレーション結果を元に、地中熱ポテンシャルマップを作成し、地中熱利用適地の抽出、地中熱回収量を評価する。

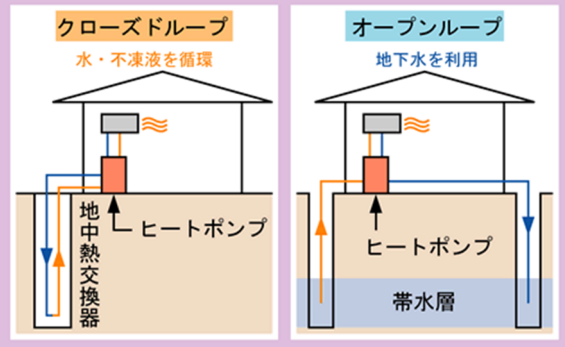


図U-B.7-1 地中温度と気温差¹⁾

ヒートポンプの熱源として利用
温度調節が可能で汎用性が高い

ヒートポンプシステム

住宅・ビル等の冷暖房・給湯、プール・温浴施設の給湯
道路等の融雪、農業ハウスの冷暖房など



図U-B.7-2 地中熱利用形態の例¹⁾

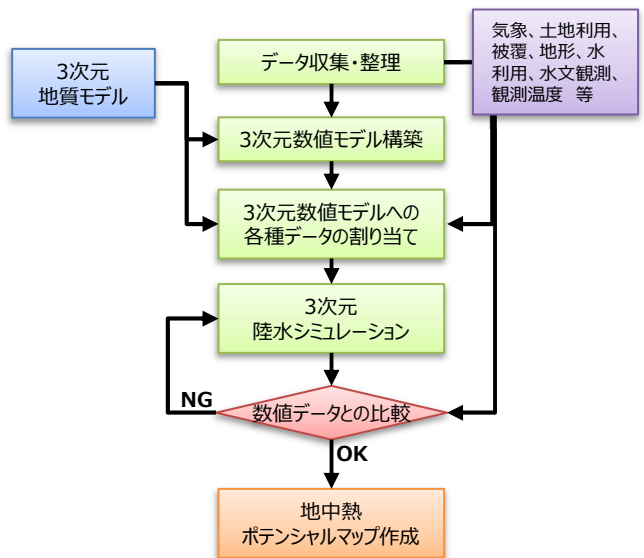
成果品と利用場面の例

ここでは地中熱ポテンシャルマップの作成事例を挙げる。地中熱ポテンシャルマップを作成する流れを図U-B.7-3に示す。

3次元地質・地盤モデルは、3次元陸水シミュレーションに用いる数値モデル（解析メッシュ）の作成への利用と、数値モデルへの地質データの割り当てに使用される。主に次のモデルが必要となる。

- ◆地質境界モデル
- ◆地層モデル
- ◆深度毎の土質分類グリッドモデル
- ◆土質分類毎の透水性状 等

また、ポテンシャルマップを図化する際の背景図や説明用資料として3次元地質・地盤モデルを利用する場合もある。



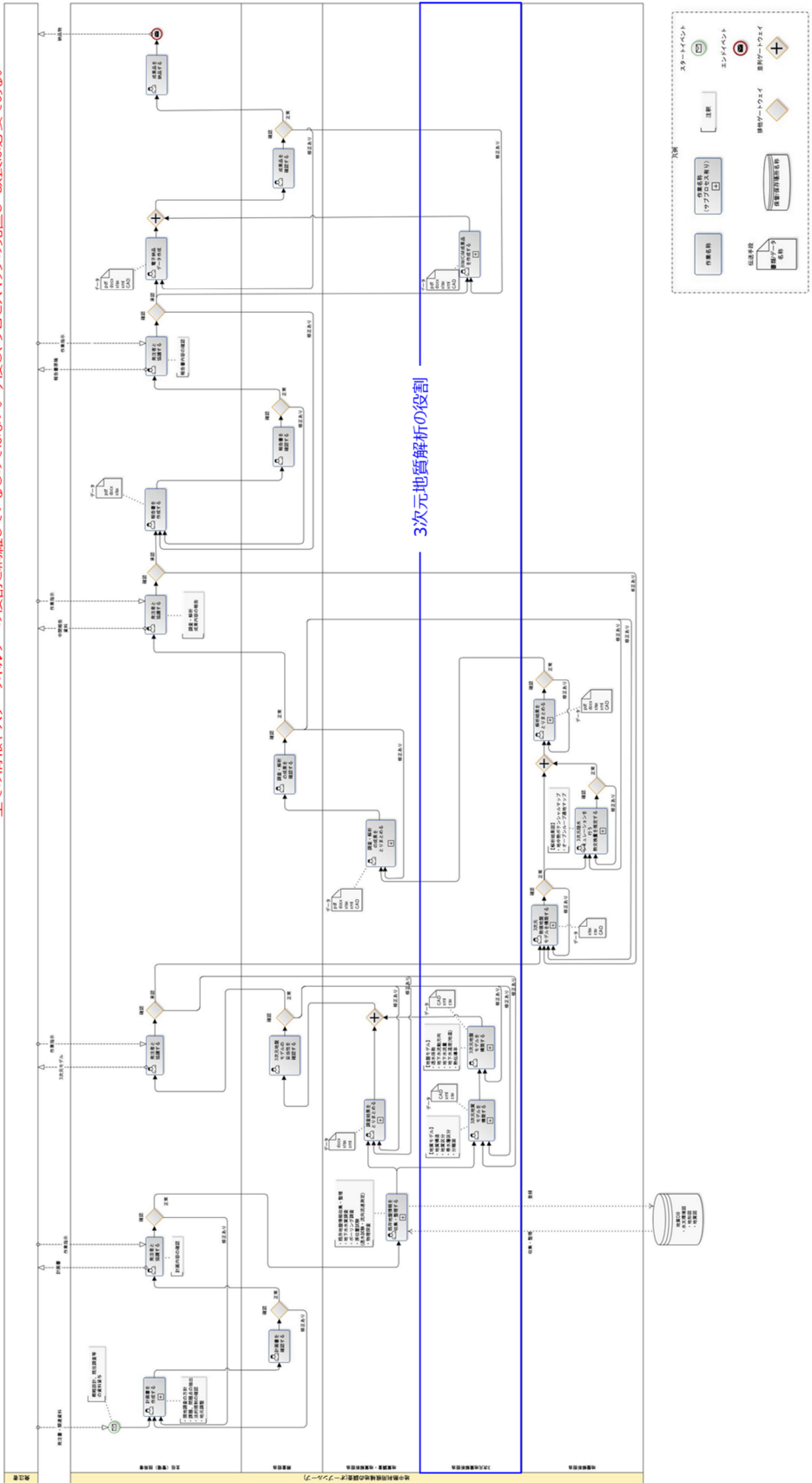
図U-B.7-3 地中熱ポテンシャルマップ評価の流れの例

参考文献

1) 地中熱利用促進協会 <http://www.geohpaj.org/> , (2018年2月時点) .

地中熱利用候補地の調査（オープンループ）において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における
全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



事例U-B.7-1) 地中熱ポテンシャルマップの事例

東京都都心部の地中熱ポテンシャルマップを作成することを目的に、3次元地下水解析を実施した¹⁾。3次元地質・地盤モデルは、地下水解析格子モデルの作成と水理特性の付与に用いるために構築した。モデル構築にはGEO-CREを使用した。

解析範囲は、検討地域の千代田区を中心とする8区を包括する範囲にて、上総層の分布深度を考慮しTP-250m以浅とした(図1)。国土地理院数値地図5mメッシュの地形データと、公開されているボーリング柱状図データ、および地盤断面図を3次元化し、地盤断面図および微地形判読図を参考にボーリング孔間の地質対比をおこなった(図2)。

50mメッシュの3次元地質ソリッドモデル(図3)を構築し、そのメッシュデータを地下水解析格子モデル作成に活用した。

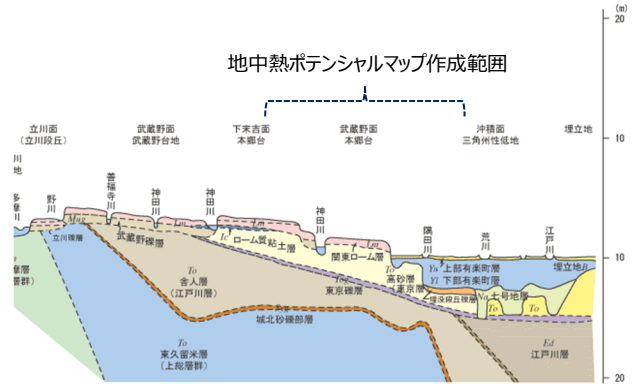


図1 東京都の模式地質断面図¹⁾

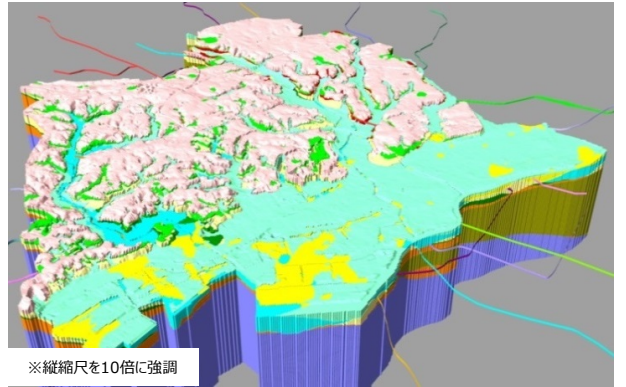


図3 3次元地質・地盤モデル²⁾

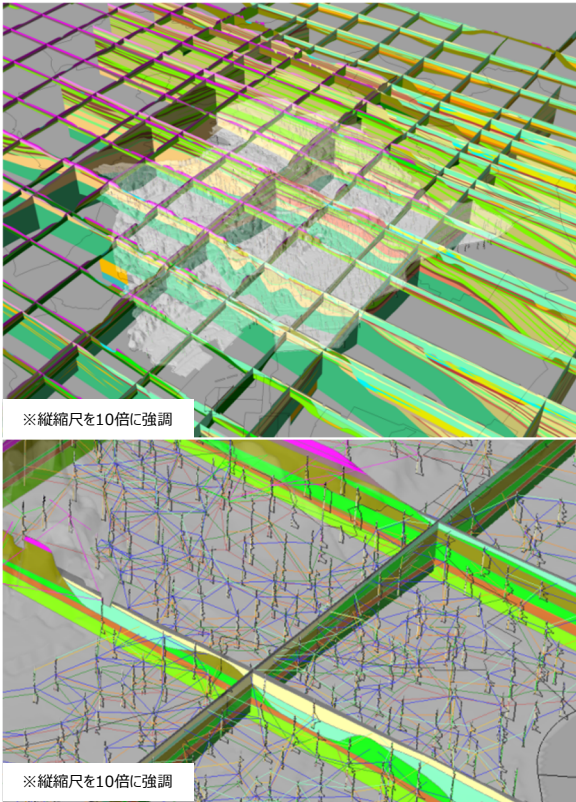


図2 スケルトンモデル²⁾

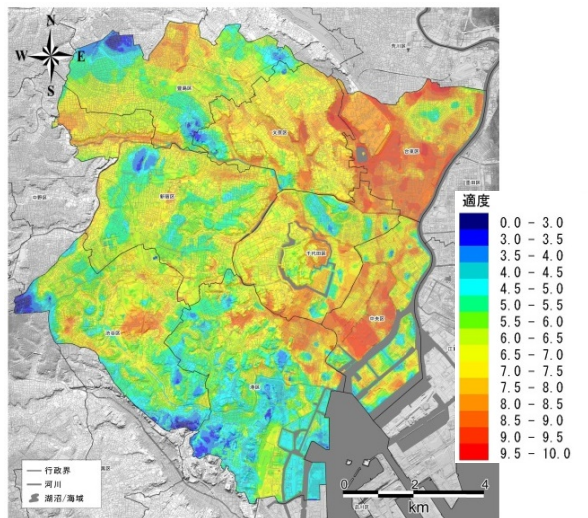


図4 地中熱ポテンシャルマップの例²⁾

- 1) 一般社団法人 東京都地質調査業協会
<http://www.tokyo-geo.or.jp/html/action2-.htm>
(2018年2月時点)。
- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、応用地質株式会社 株式会社地圏環境テクノロジー、東京大学。都市における地中熱大規模利用可能性の総合評価。2013。

地質情報の役割

土壌汚染とは、人の健康に係る被害を生じる恐れのある「特定有害物質」である鉛、砒素、トリクロロエチレンその他の物質（放射性物質を除く）が土壌に含まれる状態を指す¹⁾。

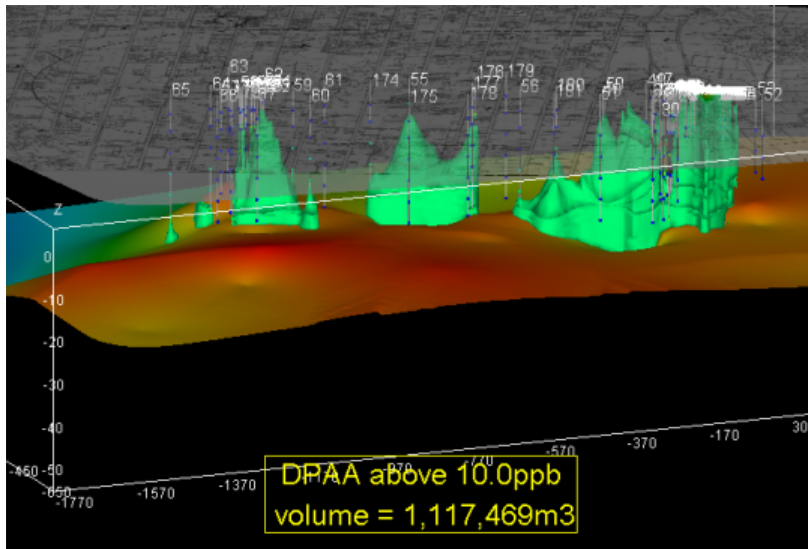
有害物質は地下水により移流・拡散するため、地質構成、地下水分布、汚染範囲、濃度分布等を調査し、地層や地下水と汚染の関係を把握することが重要である。土壌汚染調査解析や影響予測業務では、汚染メカニズムの解明や、必要な調査・対策検討の有用な情報を得ることを目的として、3次元地質・地盤モデルの作成や、これを用いた3次元地下水汚染シミュレーションを行うことがある。

3次元地下水汚染シミュレーションでは、流出した有害物質がどのように地下浸透し移流・拡散するかを再現解析・予測解析し、遮断壁や浄化対策工等の効果予測を行う。特に、地質構成・構造、帯水層、難透水層の分布、地下水流動等を踏まえて、汚染メカニズムを検討する必要がある。3次元地下水汚染シミュレーションに際しては、対象となる有害物質の性質や土壌・地下水の性質をどうモデル化するかが重要となる。

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルは汚染メカニズム解明や、調査・対策検討以外にも、シミュレーションモデルの作成や関係者間のリスクコミュニケーションを図る場面などでも利用できる。一方で、3次元地質・地盤モデル構築上の課題は次のようになる。

- ◆地質に加えて、土壌・地下水汚染状況、地下水面の3次元モデル化が必要である
- ◆汚染データを機械的に3次元化しただけでは、不自然な分布になることがある。地質構造、地下水流動、化学的メカニズム等を踏まえての十分な検討が必要である
- ◆3次元地質・地盤モデルの地層分布の作成と同様に、3次元の汚染分布も、データとデータの間は補間計算による推定値であるため、精度の低い値の一人歩きには注意が必要である

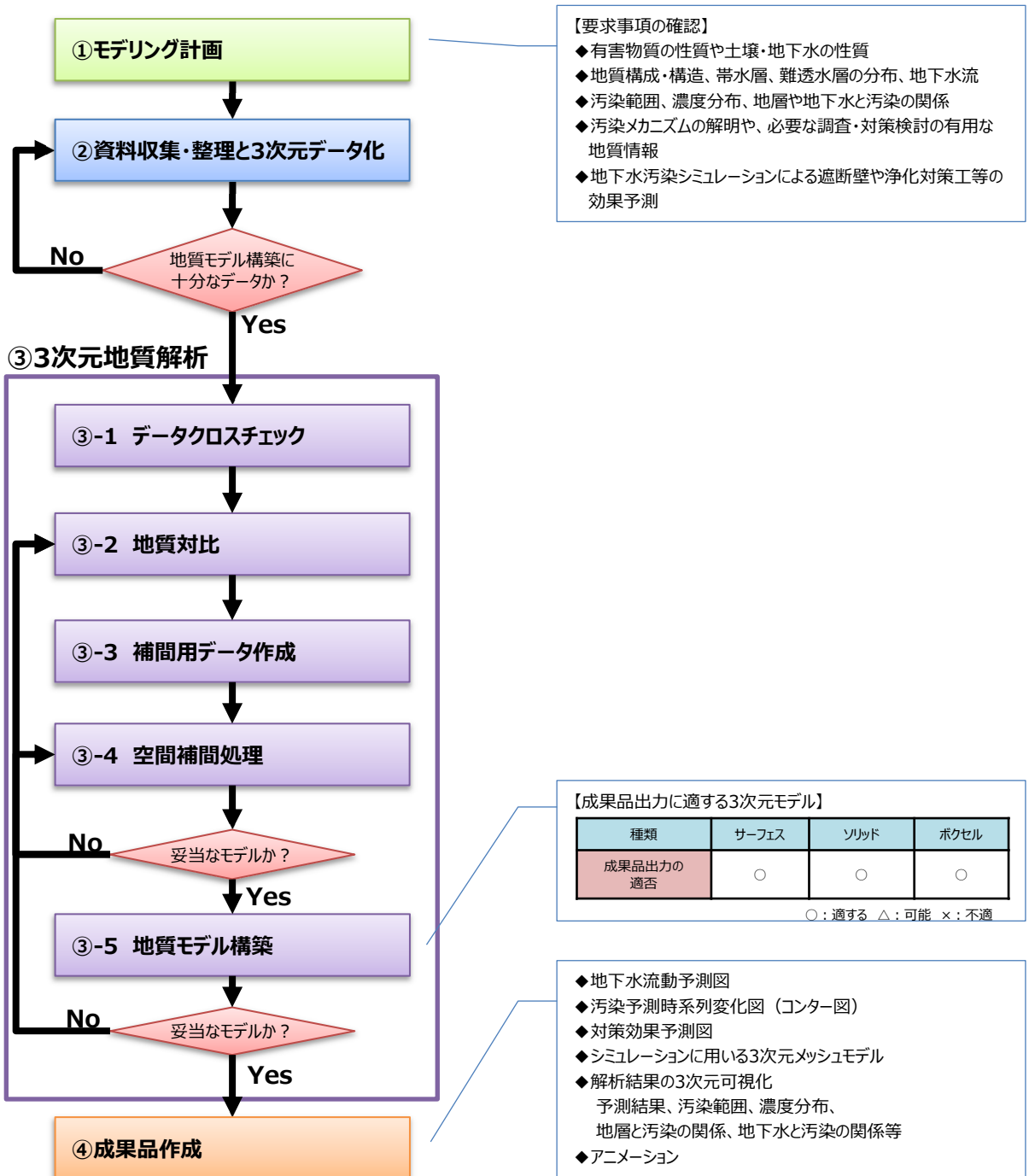


図U-B.8-1 地質及び土壌汚染の3次元モデル化の例²⁾

参考文献

- 1) 環境省, 土壌汚染対策法 <http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html> (2018年2月時点) .
- 2) 環境省. 茨城県神栖町における汚染メカニズム解明のための調査 中間報告書. 2005, 5章, p.108.

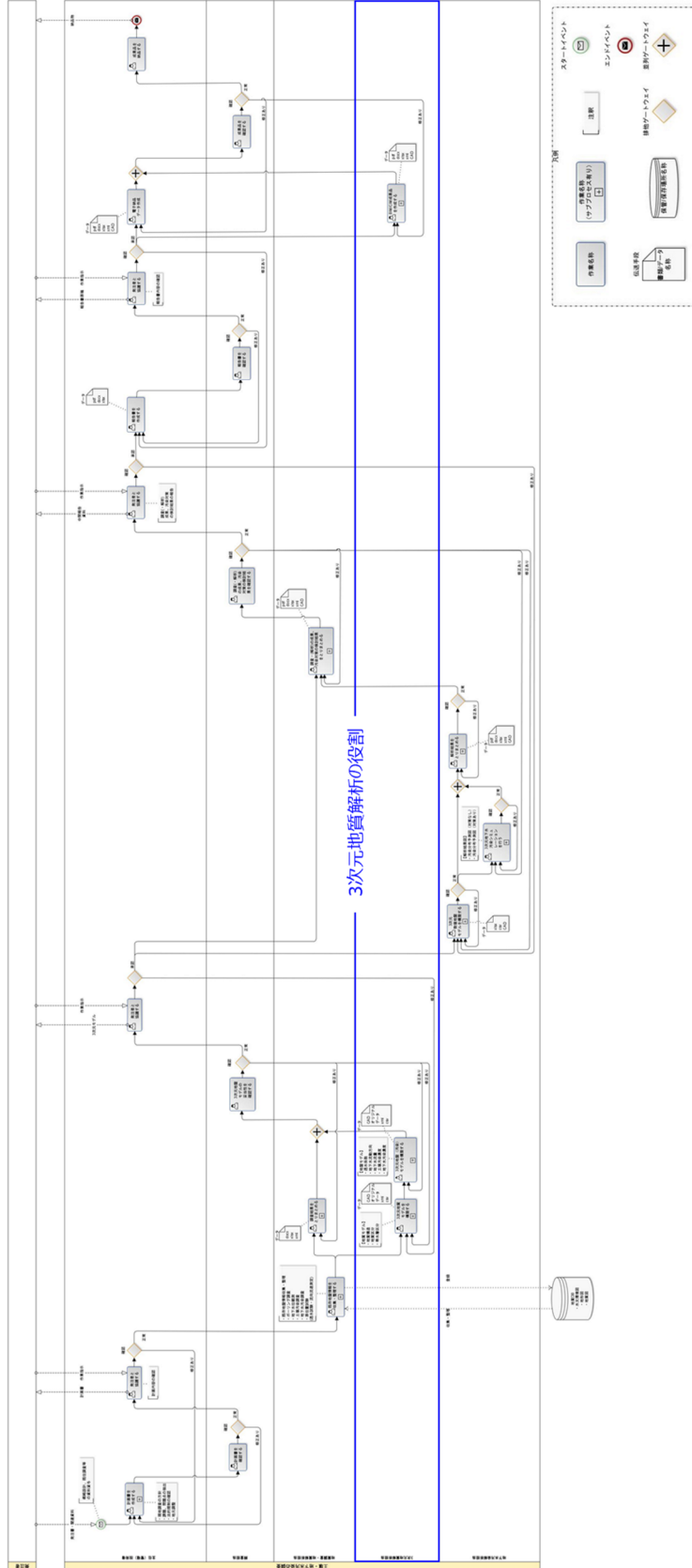
＜土壌汚染を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

土壌・地下水汚染の調査において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



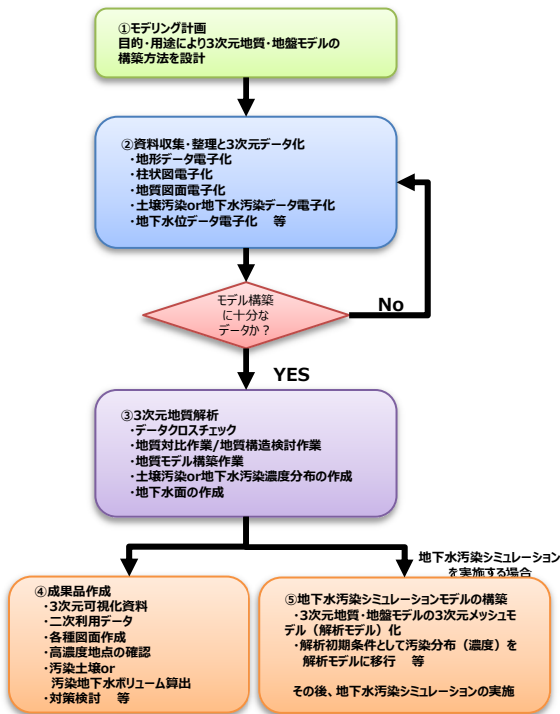
事例U-B.8-1) 土壌・地下水汚染を対象とした3次元地質・地盤モデル作成 (1)

1. はじめに

土壌・地下水汚染の調査・検討では、地質や地下水と汚染の関係を把握することが重要である。そのため、地質や汚染分布の3次元モデル化は、地質や地下水と汚染の関係を3次的・視覚的に認識することができる大変有用な方法である。

また、汚染メカニズムの解明や調査・対策内容の検討のために行う、3次元の地下水汚染シミュレーションにおいては、地質の3次元モデル化は必須となる。

2. モデル構築の流れ



※赤字：土壌・地下水汚染に関係する項目

図1 モデル構築のワークフロー

3. 3次元モデル化手法

土壌・地下水汚染を対象とした3次元モデルの構築では、地質に加えて、土壌・地下水汚染状況、地下水面の3次元モデル化を行う。3次元化手法としては、地質境界面と同様にクリギング手法等を用いて行うことが多い

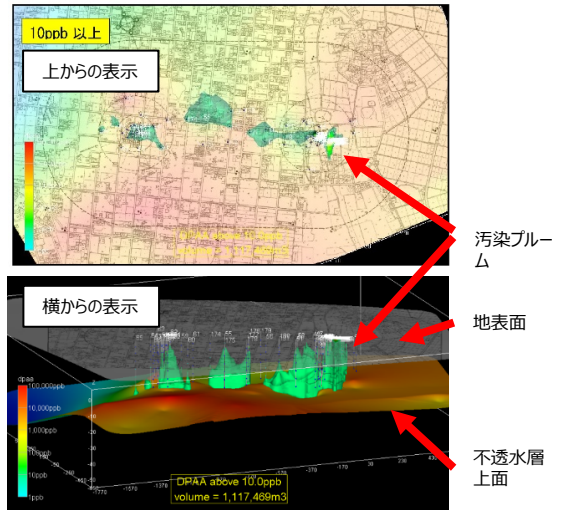


図2 地質及び土壌汚染の3次元モデル化の例¹⁾

4. 土壌・地下水汚染を対象とした3次元地質・地盤モデル構築のプラス面・マイナス面

(1) プラス面

【汚染状況の3次元化】

- ・汚染範囲、濃度分布、また地質と汚染の関係、地下水と汚染の関係を3次元で視覚的に認識することが可能
- ・汚染土壌(地下水)や汚染物質のボリュームを簡単に算出可能
- ・濃度毎の表示(〇mg/kg以上のみ表示等)、汚染ブルームの断面表示等が容易
- ・これまでのように複数の図面ファイル(断面図、平面図)が不要
- ・ソフトによっては、汚染データを時系列的に動画(アニメーション)として示すことも可能
- ・次に必要な調査・対策検討や汚染メカニズムの解明の際の有用な材料となる(対策の構造物も同じモデル内に表示可能)
- ・関係者間のリスクコミュニケーションを図る上で有効

【地下水汚染シミュレーション関係】

- ・3次元地質・地盤モデルから地質構造・汚染分布を移行することで、3次元メッシュモデル(解析モデル)構築の作業を簡略化できる
- ・シミュレーション結果(汚染分布等)を3次元地質・地盤モデル上で表示できる

(2) マイナス面

- ・精度良く3次元化するためには地質同様、汚染データも数が必要
- ・汚染データ間の精度の低い範囲の値の一人歩きに注意が必要(地質モデルと同様)

事例U-B.8-1) 土壌・地下水汚染を対象とした3次元地質・地盤モデル作成 (2)

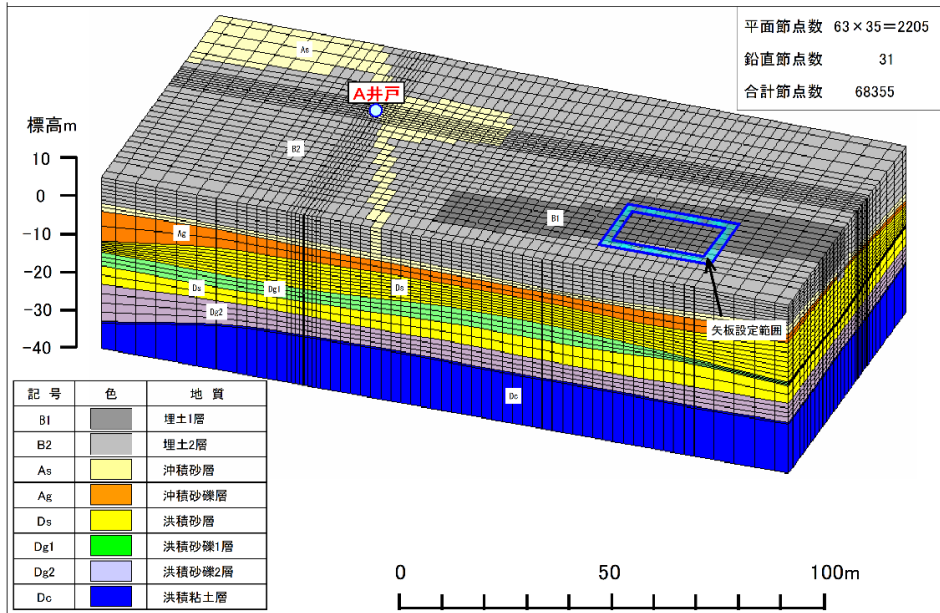


図3 3次元地下水汚染シミュレーションモデルの例²⁾

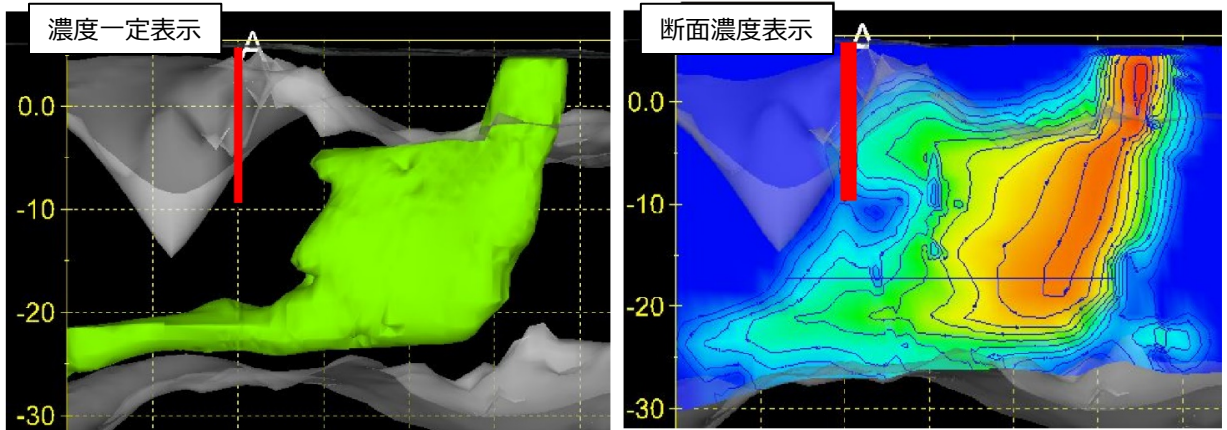


図4 3次元地下水汚染シミュレーション結果の表示例²⁾

5. 着目点・注意点

3次元地質・地盤モデルの構築にあたっては、特に汚染の拡がりに関係する「帯水層」、「難透水層」の形状を精度よく再現することが重要である。汚染データは深度方向も必要（X、Y、Z、濃度）。

汚染データを機械的に3次元化しただけでは、データの偏り等から、実際と異なる分布になることがある。その場合は地質構造、地下水流動、汚染メカニズム等を踏まえて修正が必要である。

参考文献

- 1) 環境省. 茨城県神栖町における汚染メカニズム解明のための調査 中間報告書. 2005, 5章, p.108
- 2) 環境省. 茨城県神栖町における汚染メカニズム解明のための調査 シミュレーション等報告書. 2007, 5章, p.5-8, p.5-24, p.5-27

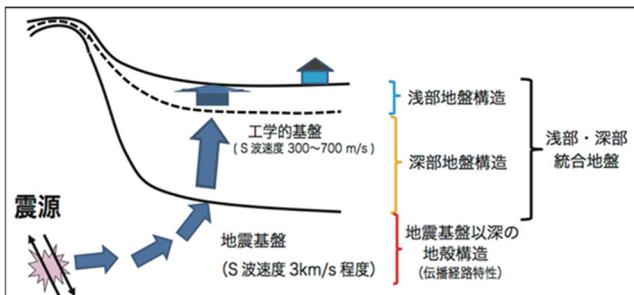
地質情報の役割

地震応答解析は、地震時に地面や建物がどのような挙動を示すかを計算する技術である。解析結果は構造物の耐震・免震・制震設計や液化化対策等に利用される。

ある地点において、地震の際にどの程度の揺れに見舞われるかを予測（強振動予測）する際の手順として、まず地盤の影響を大きく受けにくいところまでの地震動を、地震のマグニチュードと震源距離で設定し、次に地盤による増幅特性を別の方法で評価するという方法を用いる。

前者の、地盤の影響を受けずに振動が伝わる面を地震基盤と言う。地震基盤上面の3次元的分布モデルは、強振動予測を行う際の基本情報を提供するモデルとなる。必要とされる地質モデルの対象は、地殻最上部のS波速度3.0km/s以上の地層である。しかし、深部の地下構造に関する情報は少なく、構造物等の設計に用いるための精度を確保することは困難である。

その為、後者の増幅特性の評価については、観測記録の豊富な地震基盤よりも浅いS波速度300~700m/sの地層を工学的基盤と考え構造物の設計に用いられている。



図U-B.9-1 地震基盤と工学的基盤のモデル図¹⁾

地質調査の成果品と利用場面の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆地震基盤面コンター図
- ◆工学的基盤コンター図
- ◆地表から工学的基盤までの地質断面図

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

地震基盤はS波速度3.0kmで定義される地層上面をサーフェスモデルとして構築する。解析評価範囲は広域であり、深度が深く地質情報は限られていることから、kmオーダーのメッシュに代表させて作成する。地表から工学的基盤までの地質は、用途に応じて250m~50mのメッシュサイズで作成する。

地質モデルを構築するための情報は次のようなものが挙げられる。

◆直接情報

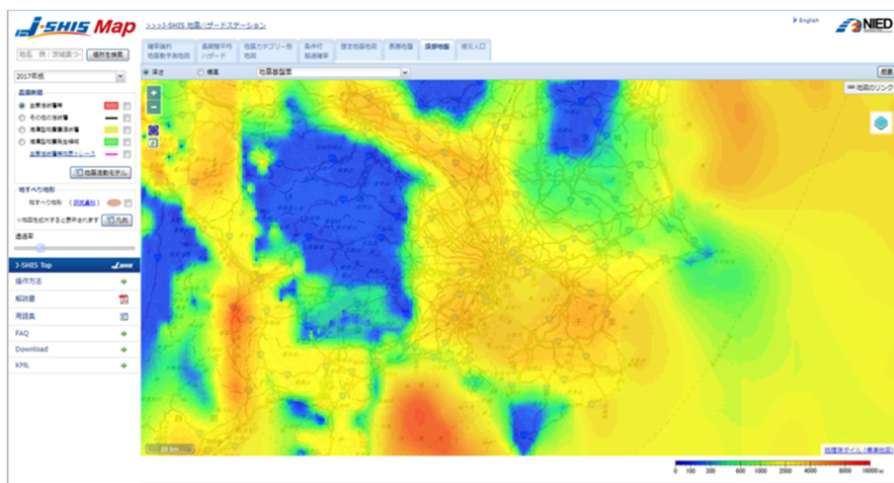
反射法・屈折法地震探査や自然地震の走時を用いた地震波速度（P波・S波）、基礎試錐等の大深度ボーリング調査による物性値（PS検層・密度検層、VSP）、微動アレイデータ、地震探査断面解釈結果、既存ボーリングデータ（浅部地盤構造推定に利用）等

◆間接情報

重力データ（ブーゲー異常値、残渣重力）

震源決定・震源インバージョン解析に使われている地殻モデル

3次元地震波速度構造（トモグラフィモデル）、地形分類図（浅部地盤構造推定に利用）等

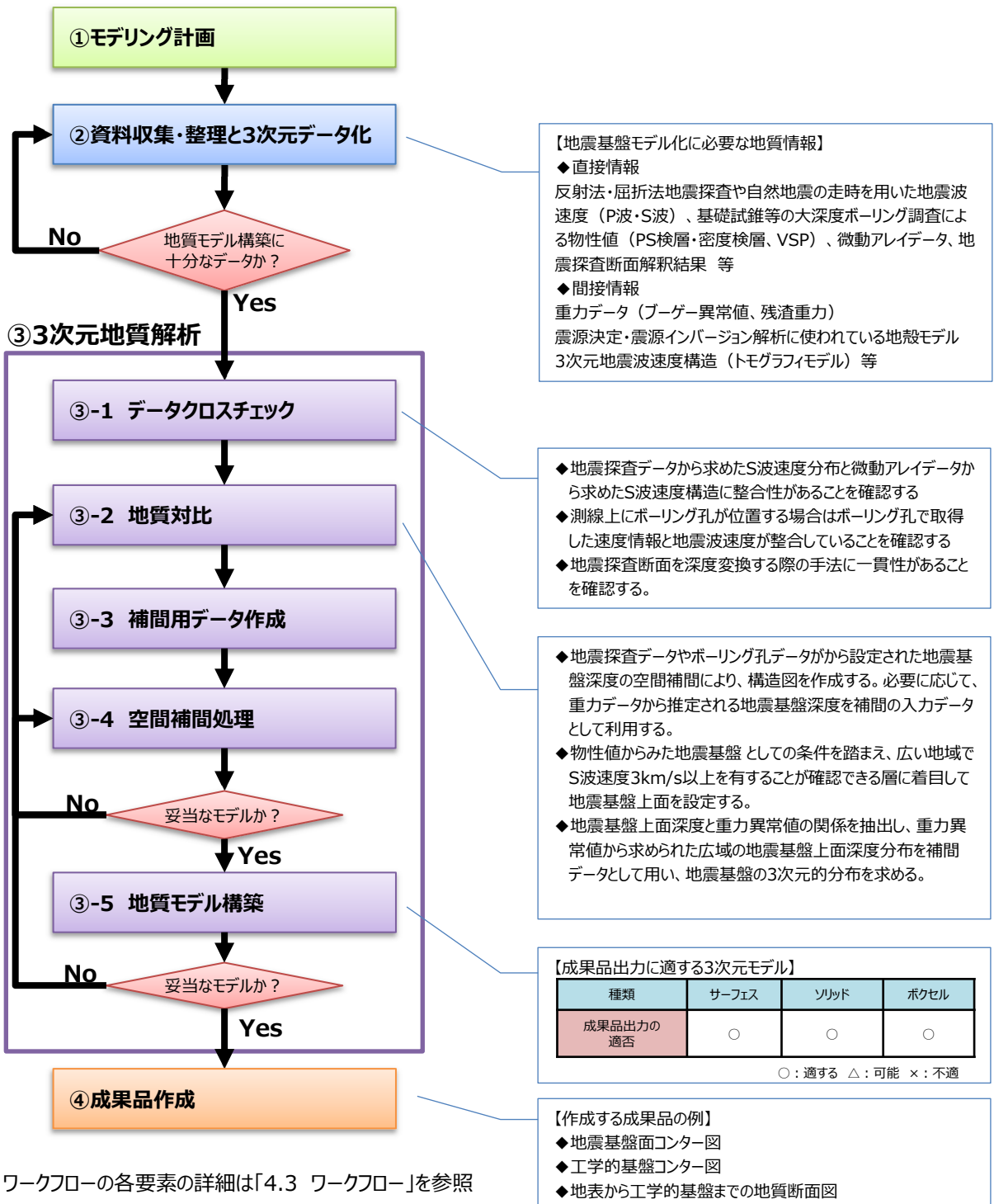


図U-B.9-2 関東地方における地震基盤面の深度分布図の例²⁾

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会. 地下構造モデル作成の考え方. 2017, pp.1-1.
- 2) 防災科学技術研究所, J-SHIS/ハザードステーション <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019年2月時点).

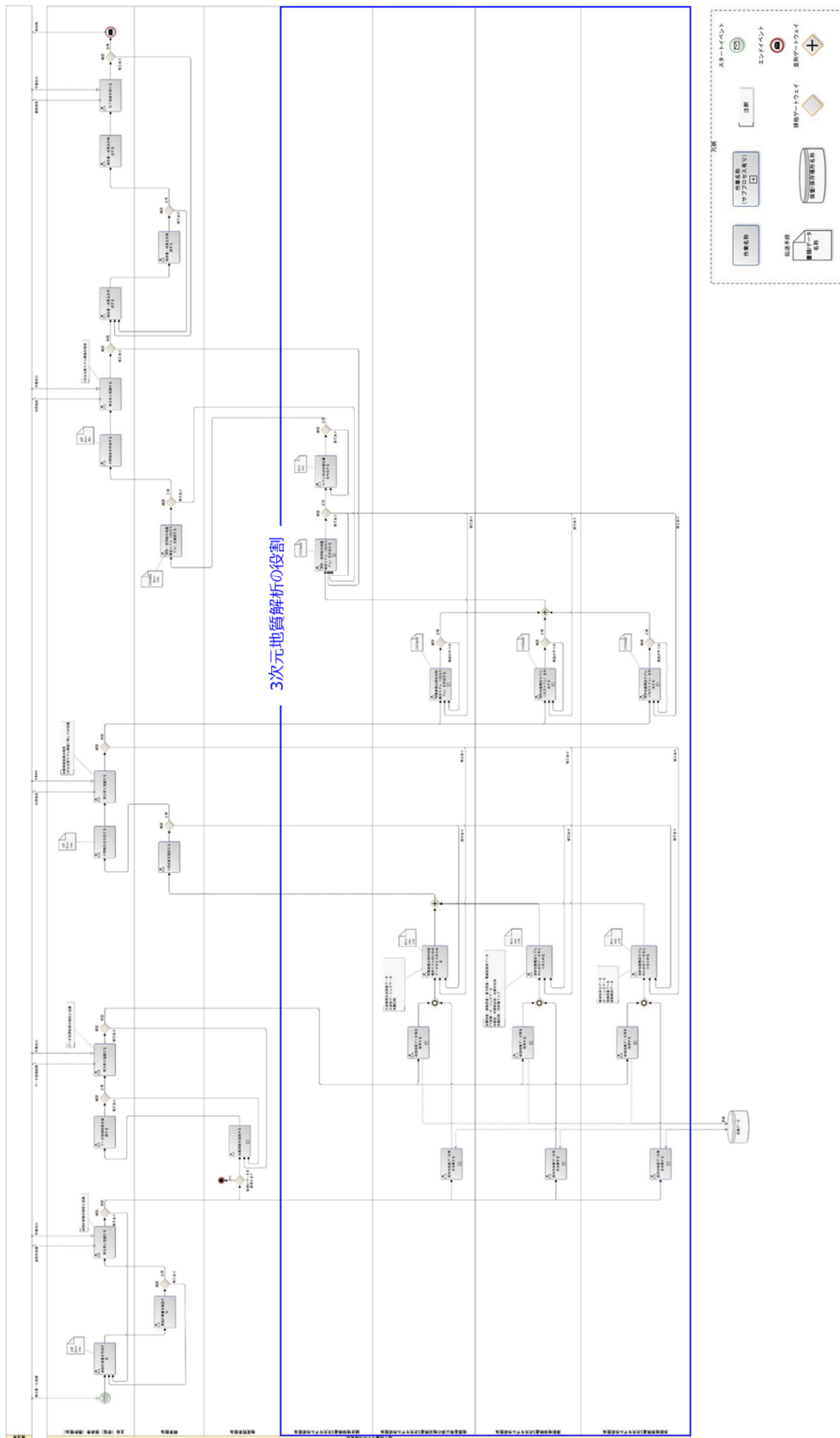
<地震基盤と工学的基盤を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方>



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

地下構造モデル作成業務において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後も、プロセスマップの見直し・改良は必要である。



事例U-B.9-1) 3次元グリッドモデルに基づく地震動増幅特性の評価 (1)

埼玉県東部に広がる中川低地は、軟らかい沖積層が厚く堆積している、いわゆる軟弱地盤である。この地域は、1923年の大正関東地震の際に、周辺地域よりも大きな被害を受けており、推定された震度分布では周辺よりも一段高い震動域となっている²⁾。

本事例は3次元グリッドモデル手法³⁾を用いて作成された、和田ほか⁴⁾のモデルに基づき、中川低地南部において表層地盤のS波速度構造モデルを作成し、対象地域の地震動増幅特性を評価したものである。

地震動の増幅評価には、Vsが必要であるが、PS検層を実施している調査地点は少ない。そこで、N値からVsを推定する方法を採用した。

i) 対象地域

モデル化の対象地域は、埼玉県東南部の川口市、草加市、越谷市、吉川市、八潮市、三郷市にまたがる東西方向約12km 南北方向約11km の範囲を図に示す(図1)。この地域は、文献⁵⁾によると、南側の東京低地から中川埋没谷(最深部では標高-60m程度)が続いており、地域内で北西方向に綾瀬川埋没谷が現われる等、沖積層基底深度が複雑に変化している。

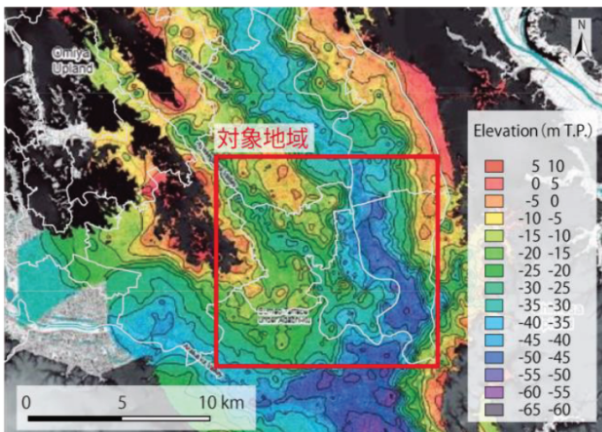


図1 モデル化対象地域²⁾

ii) 3次元グリッドモデルの作成と検証

3次元グリッドモデルは、木村ほか³⁾の手法に従い、次の①～③の手順で構築した。

①ボーリングデータの整理

モデルの元データとして、位置情報や品質を確認済みのボーリングデータを使用した。その内訳は、埼玉県環境科学国際センター、埼玉県危機管理防災部、さいたま市総務局危機管理部の3機関から貸与されたデータならびに、国土情報検索サイト「KuniJiban」からダウンロードしたデータの合計1932本である。

②ボーリングデータへの地質区分付与と地層境界面モデルの作成

3次元グリッドモデルの制約条件とするために、沖積層基底の面モデルを作成した。ボーリングデータの層序は、木村ほか(2013)⁵⁾の沖積層基底面モデルならびに既往研究⁶⁾を参考に、層相とN値から同定した。

作業には(国)産業技術総合研究所が無償公開している「ボーリング柱状図解析システムver.2.1」を使用した。ボーリングデータの分布密度に偏りがあるため、層序読み取りデータと木村ほか(2013)⁵⁾の沖積層基底面モデルデータの両者をコントロールポイントとして面モデルを作成した。

③3次元グリッドモデルの作成

単位グリッドのサイズは、水平方向100m 鉛直方向1mである。上記i)で算出した面モデルで区切られた沖積層と更新統下総層群のそれぞれについて、標高1m 毎の水平面内で、逆距離荷重法により土質の最頻度値とそれに対応するN値の平均値を算出した。

グリッドノードからのデータ最大参照範囲は、ボーリングデータの分布と沖積層の水平方向の層相変化を勘案し2000mとした。また、距離による重み付け係数を2とした。作成された2つのグリッドモデルを統合した後、空きグリッドについて水平方向に隣接するグリッドの値を基に補間処理を行った。

事例U-B.9-1) 3次元グリッドモデルに基づく地震動増幅特性の評価 (2)

iii) 伝達関数の卓越周期分布

作成された地盤モデルの各グリッドにおいて、S波速度を太田・後藤式⁷⁾より推定した。下限値は付近のPS 検層を参考に120m/sとしている。また、上記の補間を用いても埋まらなかった空きグリッドは、1m 上のデータを参考にした。

下図に地盤モデルの固有周期の分布を示す。地盤モデルの固有周期を求める際、周期0.45 秒以上の範囲を対象とした。綾瀬川埋没谷、中川埋没谷の地域で長周期になる等、推定された固有周期は沖積層基底面深度に応じて変化している。

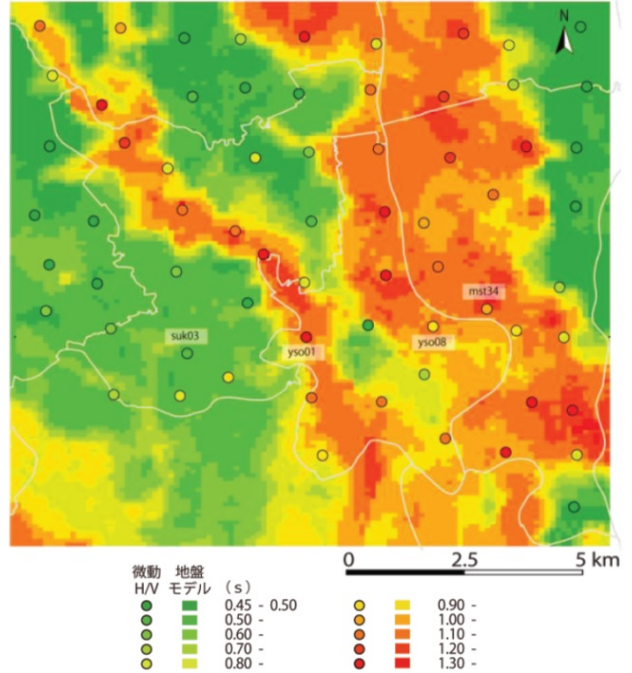


図3 地盤モデルの卓越周期分布

- 1) 清水 翼, 関口 徹, 王寺秀介, 鈴木一成. 3次元グリッドモデルに基づく中川低地南部における地震動増幅特性の評価. 第52回地盤工学研究発表会. 2017.
- 2) 諸井孝文・武村雅之. 関東地震(1923年9月1日)による木造住宅被害データの整理と震度分布の推定. 日本地震工学会論文集. 2002, 第2巻, 第3号.
- 3) 木村克己・花島祐樹・山本浩司・石原与四郎・王寺秀介・和田理絵・大井昌弘. ボーリングデータを用いた都市地盤モデルを対象とした3次元グリッドモデル構築手法とその適応性. 第51回地盤工学研究発表会. 2016.
- 4) 和田理絵・王寺秀介・木村克己・大井昌弘・花島祐樹. 3次元グリッドモデル構築手法の適用事例—中川低地南部—. 第51回地盤工学研究発表会. 2016.
- 5) 木村克己・花島祐樹・石原与四郎・西山昭一. 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの3次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例. 地質学雑誌 2013, vol.119, pp.537-553.
- 6) 田辺晋・中西利典・木村克己・八戸昭一・中山俊雄. 東京低地北部から中川低地にかけての沖積層の基底面地形. 地質調査研究報告. 2008. Vol.59, No.11/12, pp.497-508.
- 7) 太田 裕・後藤典俊. S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探査. 1976, 第29巻, 第4号.

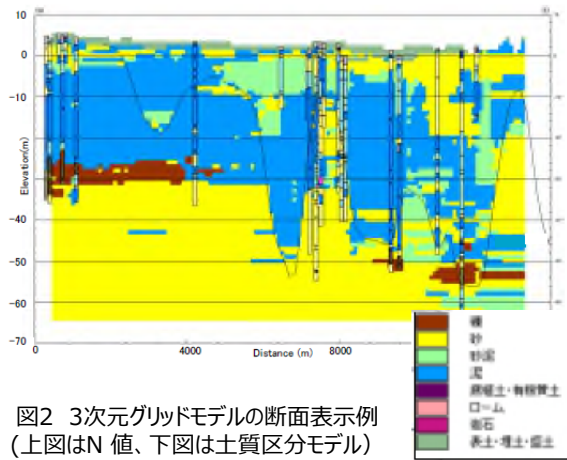
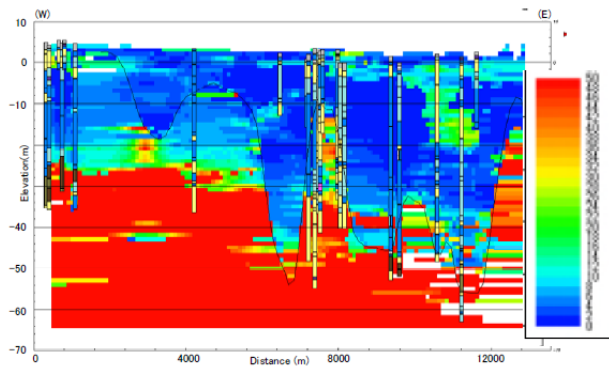


図2 3次元グリッドモデルの断面表示例 (上図はN 値、下図は土質区分モデル)

地盤情報データベースの役割

本書におけるデータベース（以降DB）は地盤情報DBを指す。DBは多岐にわたる情報管理に有効であり、速やかな情報の提供や、情報の散逸防止に役立つ手段である。

地盤情報DBは、既存地質調査等の資料を統合管理する性能や、利用者の立場に立った情報蓄積・提供・可視化等、最適な利用法を考えた機能が望まれる。そして、恒常的な地質・地盤リスク管理にこそ地盤情報DBが活用されるべきと考えられる。

地盤情報DB構築上の課題

地質・地盤リスクは特定施設に限ったものではなく、地形・地質の類似性から近隣施設や周辺地域も直接・間接的に同じ状況に直面する。地質・地盤リスク情報は、事業対象と地域全体で考え、地盤情報DBにより蓄積・管理・運用するのが理想である。

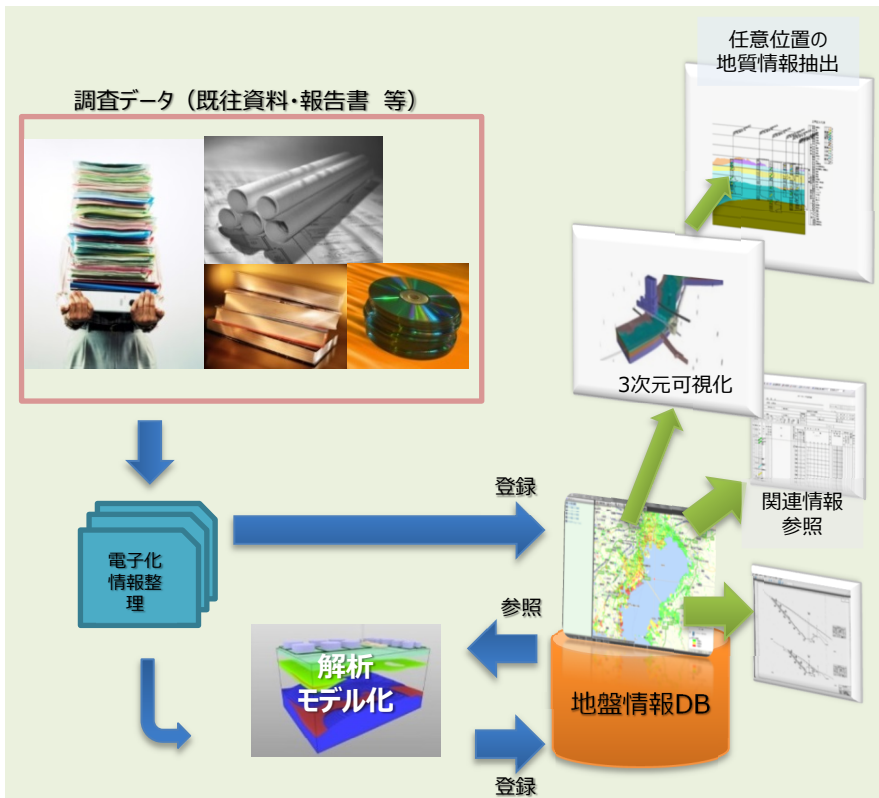
地盤情報DBを有効活用するための、「情報登録」「情報参照」の要求性能は次のように考えられる。

【地盤情報DBの「情報登録」に求める性能】

- ・地質情報より構築された地盤モデルとそれに付随する属性情報の登録
- ・地質調査報告書に示される地質・地盤リスク情報の登録
- ・各種施設工事時に取得された地質情報の時系列登録
- ・地域地質に関連する文献資料の登録
- ・地域の基本的な地形情報として、高密度のレーザー測量情報を扱う
- ・劣化しやすい地質露頭やボーリングコア等の情報は、高画質の写真や詳細な観察資料等を登録する
- ・土木地質分野の電子納品データを取り込める
- ・登録情報は共通フォーマットあるいは可読性のある情報とする
- ・登録更新時期がわかるようにする

【地盤情報DBの「情報参照」に求める性能】

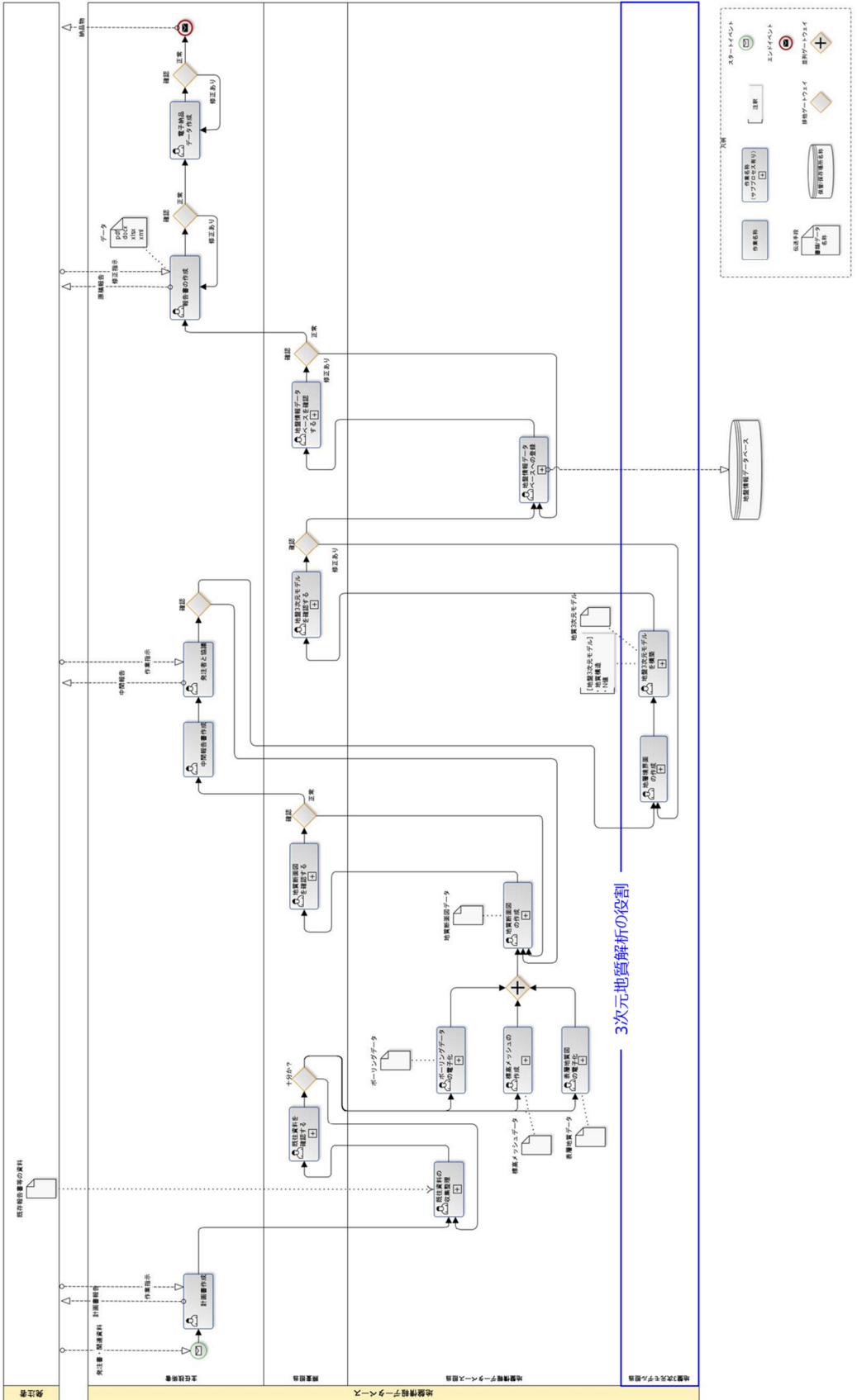
- ・ユーザーの立場と用途を考慮した“入り口”を設ける
- ・出力/図化機能を柔軟にする
- ・3次元情報は3次元可視化し、任意位置で地質断面等の情報を抽出する
- ・物理探査や現位置試験等で得られる地盤物性情報は、数値データまで遡りチェックや再解析ができる状態とする



図U-B.10-1 地盤情報DBのイメージ

地盤情報データベース構築作業において
3次元地質・地盤モデルを適用した場合のプロセスマップの例

※本プロセスマップは3次元地質・地盤モデルを構築する際の情報の流れを分析するために作成したものであり、各事業における全ての情報やステークホルダーの役割を網羅しているものではない。今後、プロセスマップの見直し・改良は必要である。

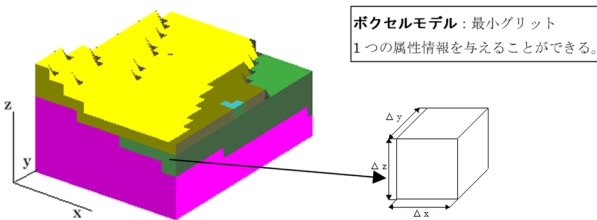


事例U-B.10-1) 地質情報DBを利用した地盤可視化への試み

本事例では、ボーリングデータ・断面図データのデータベース化システムを用いて、地盤・地質構造の3次元化を試みた。

i) データ形式 (ボクセルモデル)

地質3次元モデルの表現方法として、ボクセルモデルを採用した。ボクセルデータとは、XYZ方向の最小グリット間隔を1単位とした直方体であり、各ボクセルに対しては1つの属性情報を与えることができる。下図にボクセルモデルの概念図を示す。



ii) 3次元地質・地盤モデル (ボクセルモデル) の作成手順

3次元地質・地盤モデル(ボクセルデータ)は以下の手順で構築した。

①ボーリングデータの入力

このモデルサイトではすでに2次調査まで行われ、ボーリングデータが約120本存在した。そこでボーリングデータのデータベース化を行った。データベース化を行った項目は、N値・標高値・岩種区分・地質時代区分の4項目である。

②地形標高データの作成

このモデルサイトでは、1/2000地形図上の等高線図から高さを拾うことによって標高離散点データを約40000点作成し、最適化原理²⁾を適用してメッシュデータを作成した。メッシュ間隔は、5mである。

③表層地質区分データの作成

すでに作成された手書き表層地質図をスキャナーで読み取り、表層地質図のデジタル化(メッシュ化)を行った。ここで表層地質区分データは、地質3次元モデルの地表面境界に用いる。

④地質断面図の作成

上記のボーリングデータ・地形標高データ・表層地質区分データを用いて地質断面図を作成した。断面線は格子状に分布し、約30断面作成した。

⑤仮想ボーリングデータの作成

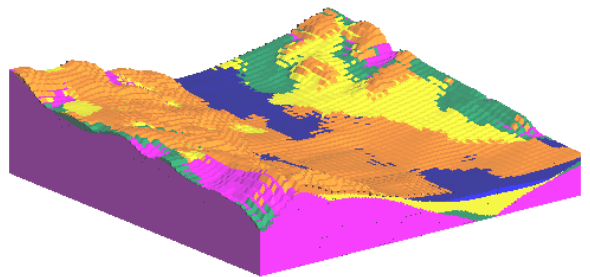
地質断面図データから仮想ボーリングを作成した。仮想ボーリングは、地層の連続性や地層境界線の形状を制御する目的で設定し、ボーリングデータと同精度で計算に使用した。今回、約750本の仮想ボーリングを作成した。

iii) 3次元地質・地盤モデルの構築

3次元地質・地盤モデル(ボクセルデータ)は、パネルダイアグラムにより囲まれた領域を上記のボーリングデータ他のデータを用いて、最適化原理²⁾の内挿する手法で作成した。また計算終了後、以下の処理を行っている。

◆地形標高メッシュデータと重合せ、最上面を地形標高データに一致させる。

◆各地層に優先度をつけ、地層の逆転を抑制する。



3次元地質・地盤モデル(ボクセルモデル)の表示

1) 王寺秀介, 後藤晃治, 西江俊作, “ボクセルデータを用いた地盤可視化への適用性に関する研究”, 第34回地盤工学研究発表講演集, 1999.
2) 塩野清治, 弘原海晴, 升本真二, “最適化原理による地層断面の推定”, 情報地質, 1986, (11) .

事例U-B.10-2) シンガポールにおける広域3次元地質モデリング

概要

国土面積が狭いシンガポールでは、地下空間の有効活用が国家戦略として考えられており、実際にその必要性が増し開発が増えている。地下開発に先立ち地質状況を理解するために、5つのエリアで地質調査を実施し、3次元地質・地盤モデルを構築した。また、大深度地下の開発に適した場所を見つけるために、3次元ハザードマップを作成した。

経緯

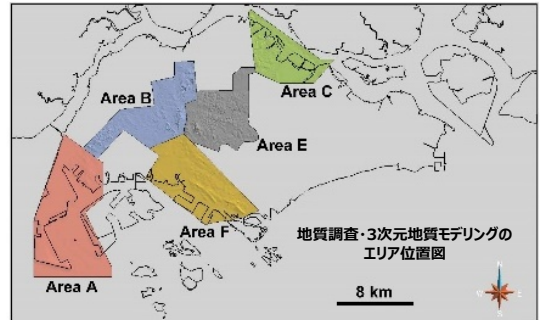
近年、シンガポールでの地下空間の有効活用の必要性が高まり、開発が増えている。シンガポールの基盤岩は主として三畳紀のプキティマ花崗岩（BT）と三畳紀～ジュラ紀のジュロン層（JF）の堆積岩で構成されており、後者には北東-南西の圧縮場による褶曲・断層が多く認められる。過去の地下開発工事で起こった事故は、地質状況やそれに伴うリスクの理解不足によるものである。

地下開発に先立ち地質状況を理解するために、2012～2017年にかけて、シンガポール建築・建設庁（BCA）の依頼で、基礎地盤コンサルタンツ（株）が5つのエリアで地質調査を実施し、3次元地質・地盤モデルを構築した。作成した3次元地質・地盤モデルは英国地質調査所（BGS）による照査を受け、2018年に完成した。

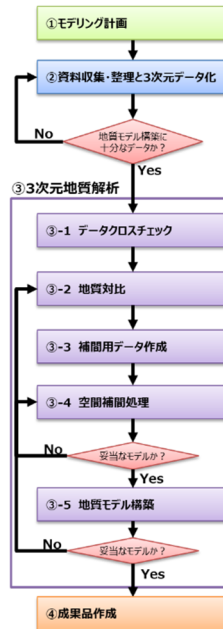
3次元地質解析システムとしてGOCADを使用し、トレーニングを受けた地質技術者とオペレータがモデリングを実施した。

使用した地質情報

- ◆ 深掘りボーリング（掘進長100～200 m主体、オールコア）：約170地点
- ◆ ボーリング（掘進長30～70 m主体）：約13,200地点（公共データおよび民間データ）
- ◆ 弾性波探査結果（探査深度300～500 m）：約155 km
- ◆ 公表地質平面図・断面図、地質記録
- ◆ 空中写真
- ◆ 地表地質踏査結果
- ◆ 原位置試験結果
- ◆ 物理検層結果
- ◆ 室内試験結果
- ◆ DEM、DTM

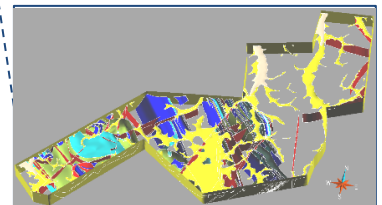
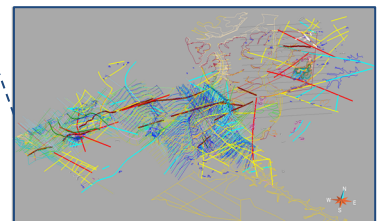


ワークフロー



- ◆ モデル範囲：入力データを包括するようにモデル後、対象エリアでトリミング。深度は500 mと200 m
- ◆ ボクセルモデルのセルサイズ：
15 m W x 15 m D x 10 m H

- ◆ DEM(30 mメッシュ)、DTM(標高2 m解像度)
- ◆ 地質平面図
- ◆ 地質断面図
- ◆ 柱状図、原位置・室内試験結果



事例U-B.10-2) シンガポールにおける広域3次元地質モデリング

品質管理

◆入力データの妥当性・整合性チェック

入力データセット毎に、その妥当性及整合性を3次元上で確認し、一覧表に記録した。チェック結果に基づき、ボーリングデータを信頼度で以下の3区分に振り分けた。

区分A：信頼度高。ほぼ全項目が適切に明記しており、その妥当性が確認されたデータセット。モデリングに使用。

区分B：信頼度中。妥当性・整合性を判断するための項目については最低限記載があり、妥当と判断されたデータセット。モデリングに使用。

区分C：信頼度低。モデルへ組み込まない。

◆記載基準の統一

強度・風化区分の記載基準が既往調査と今回調査で異なったため、既往調査での区分を今回調査で適用した基準に基づき再解釈した。

◆メタデータの作成・納品

◆BGSによる第三者照査

モデリングの入力データおよび地質学的解釈、構築した3次元モデル自体についての照査

シンガポールでの3次元モデルの利活用と課題

◆3次元地質・地盤モデルの利用

- ・地質データベースとして利用
- ・シンガポールの複雑な地質・地質構造を理解・解釈するためのツール

◆3次元ハザードマップの利用

- ・大深度地下開発の適地の選定に利用できたが、ハザード指数の算定について定量的手法の更なる研究が必要
- ・断層や褶曲の影響範囲を推定するための調査データが少ない

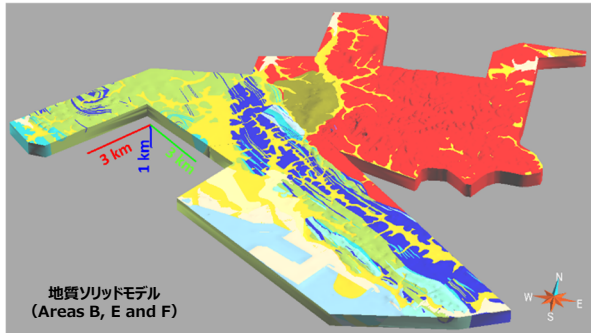
◆3次元モデルの限界

モデル範囲の面積は約300 km²に及ぶが、その範囲に約170本の深掘りボーリングしかない。また、用地占有許可の関係で調査地点の分布には偏りが見られる。

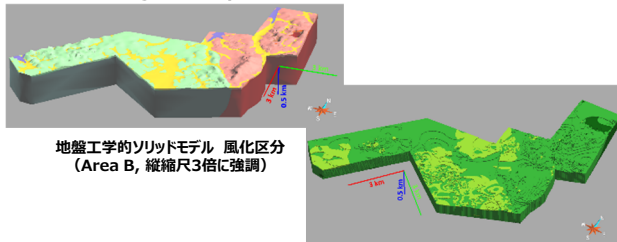
結果として、深掘りボーリング間の距離は0.5～3 kmとなっている。さらに、弾性波探査は最大で深度500mまでカバーしているが、深掘りボーリングのほとんどは深度200mまでしか掘進していない。地質情報が少ない部分は特にモデルの不確実性が増し、信頼性が損なわれている。より多く、深く、ボーリング調査を実施することでこの課題を軽減することができる。

構築した3次元モデル

①地質モデル：地層(地質構造)と断層の3次元分布

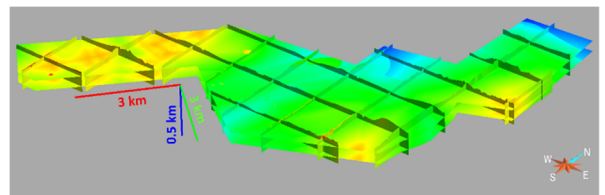
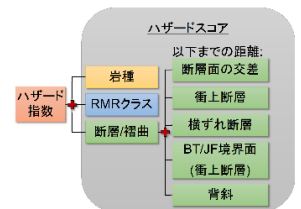


②地盤工学的モデル：風化区分および岩盤分類(Rock Mass Rating, RMR)に基づく



③ハザードマップ：ハザード指数による相対的・概略的な地盤災害リスクの可視化

ハザード指数は、岩種・RMRクラス・断層/褶曲からの距離に応じて決めたハザードスコアの総和。算出したハザード指数をフェンスタグラム上にカラースケールで表示した。



参考文献

- 1) Tomohiro Yasuda, Khun Tun Lu, Lau Chui Leh, Kiefer Chiam and Lau Sze Ghiong (2019). "Development of 3D Geological Model of Singapore". Japanese Geotechnical Society Special Publication Volume 6 Issue 2, 67-72

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

【ユースケース】 U-O 目的別

※全ての目的を網羅するものではありません

[U-O.1 支持層](#)

[U-O.2 岩盤分類](#)

[U-O.3 アカウンタビリティ](#)

[U-O.4 教育](#)

U-O.1 支持層

地質情報の役割

支持層とは、構造物の鉛直荷重を構造物基礎や杭基礎で伝達し、構造物を支えることができる地盤（地層）を指す。一般的にN値を用いて支持層としての判定をおこなう（表U-O.1-1）。

対象構造物により支持層の基準は異なる（表U-O.1-2）ので注意が必要である。

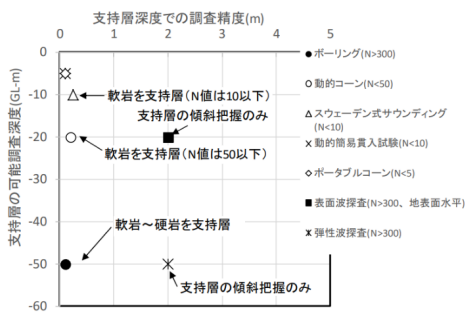
表U-O.1-1 N値による基礎地盤判定の目安¹⁾

	N 値	硬 軟	注 意 事 項
粘 土	0~4	やわらかい	注意を要する軟弱地盤であり精密な土質調査を行う必要がある。
	5~14	中~かたい	安定については大体問題はないが、沈下の可能性がある。
土	15以上	非常にかたい	安定および沈下の対象としないでよいが、中小構造物の基礎地盤としては20以上が望ましい。
砂 質 土	0~10	ゆるい	沈下は短期間に終わるが、土工構造物の設計に当たっては考慮する必要があり、地震時に液状化のおそれがある。
	10~30	中位	中小構造物の基礎地盤となり得る場合もあるが、一般に不十分である。
土	30以上	密	大構造物の基礎地盤としては、50以上（非常に密）が望ましい。

表U-O.1-2 支持層の基準例

基準・指針	粘性土	砂質土 礫質土	備 考
道路橋示方書 ²⁾ (IV下部構造編)	N値 ≥ 20 qu ≥ 0.4N/mm ²	N値 ≥ 30	良質な支持層
道路橋示方書 ³⁾ (V耐震設計編)	N値 ≥ 25	N値 ≥ 50	耐震設計上の基礎面 (十分堅固な地盤の上面) せん断弾性波速度300m/s程度
NEXCO ⁴⁾ (設計要領第二集)	N値 ≥ 20	N値 ≥ 30	良質な地盤

※qu：一軸圧縮強度

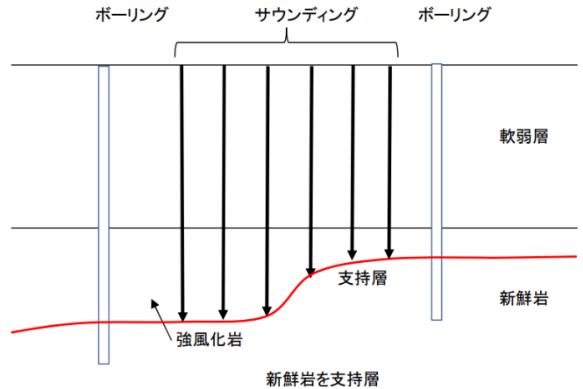


図U-O.1-1 支持層を把握するための各種調査法の比較⁵⁾

参考文献

- 公益社団法人 日本道路協会. 道路土工要領(平成21年度版). 平成21年6月, p.58.
- 公益社団法人 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 I 共通編IV 下部構造編. 平成24年3月, pp.278-279.
- 公益社団法人 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編. 平成24年3月, p.33.
- (株) 高速道路総合技術研究所. 設計要領第二集 橋梁建設編. 平成28年8月, pp.4-14.
- 一般社団法人全国地質調査業協会連合会. 「岩を支持層とする杭基礎の調査法」に関する 検討委員会報告書(案), 2017.

特に構造物の規模に応じて、支持層の深度・傾斜・不陸を把握可能な調査法が選定される（図U-O.1-1）。例えば、ボーリング間を補完するために物理探査や、ボーリングよりも安価なサウンディングを併用することもある（図U-O.1-2）。



図U-O.1-2 ボーリングの補完方法としてのサウンディング⁵⁾

成果品と利用場面の例

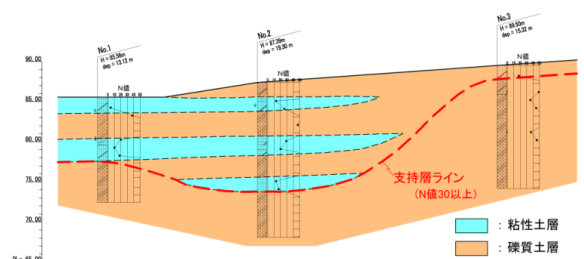
構造物支持力の設計に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆ 支持層線断面図
- ◆ 支持杭位置におけるクロス断面
- ◆ 支持層分布カウンター図（地質境界面カウンター図）

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

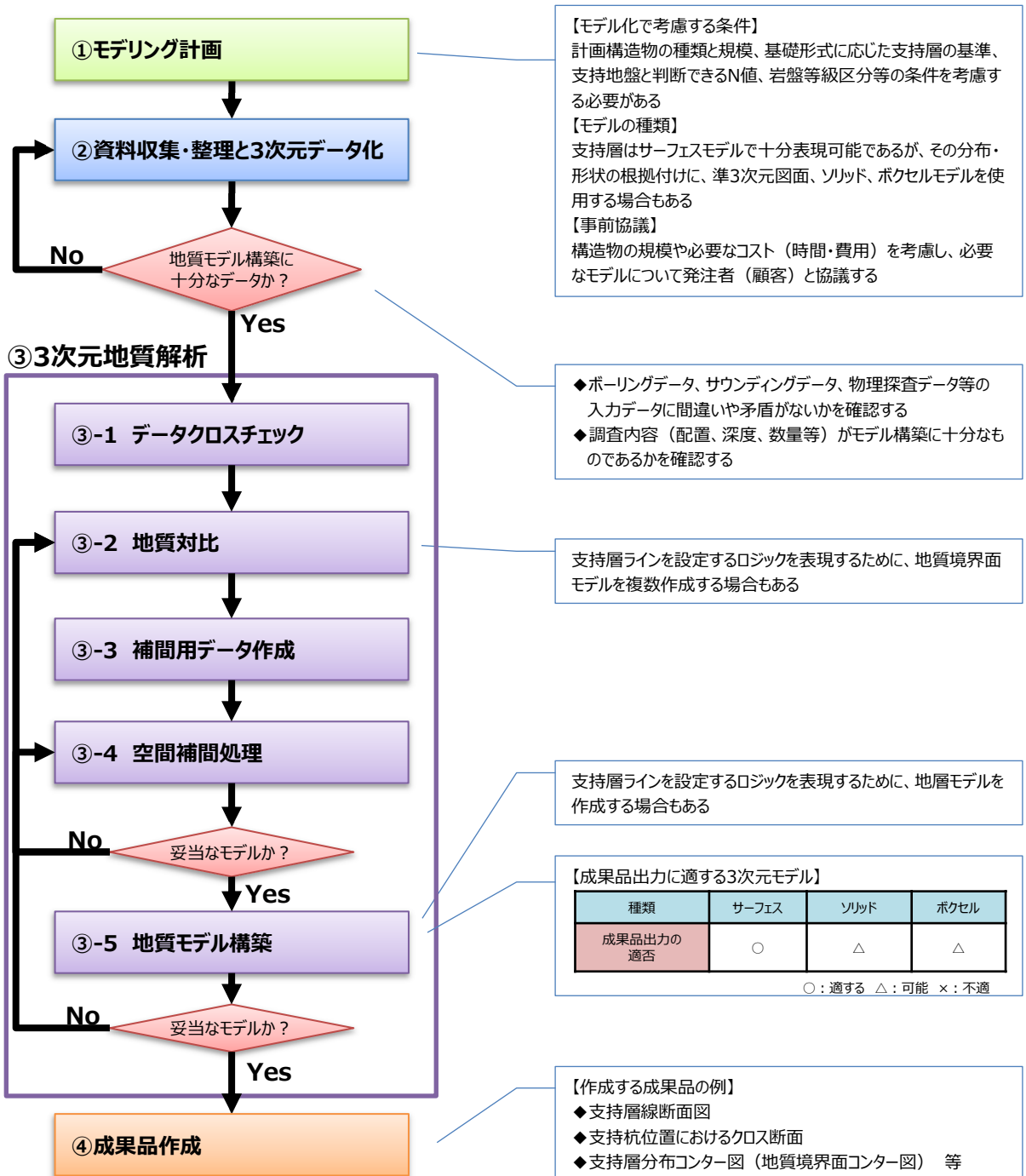
3次元地質・地盤モデルは成果図面を作成する材料に用いるほか、支持層の位置（深度）、連続性、傾斜、不陸等を確認するために可視化する用途もある。

特に、風化層、軟弱層、レンズ状挟在層等の分布状況によって、支持層ラインが地層境界でない地層中に分布することが少なくない（図U-O.1-3）。3次元地質・地盤モデルにおいても、支持層ラインを設定する根拠を正しく示す必要がある。



図U-O.1-3 地層境界と異なる支持層のイメージ

＜支持層を対象とした3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方＞



※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

事例U-O.1-1) 沖積 – 新第三紀層の3次元地質解析と杭の鉛直載荷試験 (1)

概要

沖積低地における沖積層と新第三紀層の3次元地質解析を行うと共に、当該地で実施した杭の鉛直載荷試験装置および構造を3次元化して示した。

対象地層の地質解析

当該地は海岸線に位置する沖積低地であり、新第三紀と沖積層の不整合面（河川侵食面）が形成される。地質解析のポイントは、この不整合面のモデル化と開析作用面の検討および各地層の分布の広がり の検討である。これらを踏まえ3次元地層モデルを作成した。

3次元地質解析

本件における地質構造の分布を考慮する際の検討事項を示す。

- ①新第三紀の凝灰質泥岩（H-1層）と堆積泥岩（H-2層）の分布範囲の想定
- ②不整合面の設定、波食または河川浸食等の開析作用による埋没地形の形成状態の想定
- ③沖積層（C層、A-s層、A-sc層）の堆積環境の想定

使用データおよびソフトウェア

使用ボーリングデータ21本 地層確認最大深度GL-92m

使用ソフト：AutoCAD Civil3D (AUTODESK)

GEORAMA for Civil3D (CTC)

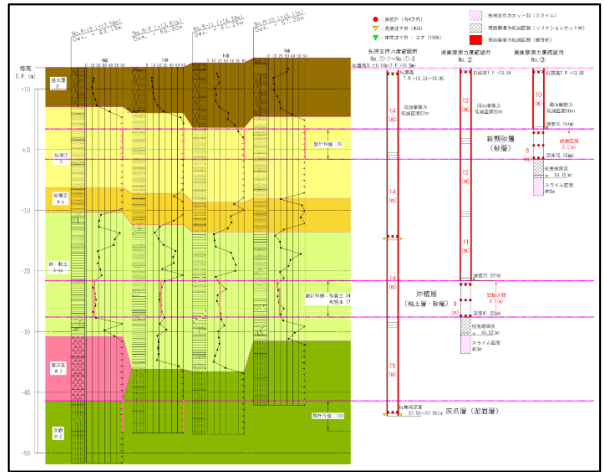


図1 2次元モデル

表1 地質層序表

地層名	土層区分	記号	主な土質	出現標高 T.P. (m) [層厚 (m)]	N 値 (平均値)	特徴
現世層	盛土	F	細砂	+15.12~ +12.61 [4.80~8.70]	3~32 (13.3)	暗黄褐色、暗茶褐色。 所々に瓦礫や粘土塊を混入する。
沖積層	砂層①	C	細砂	+8.16~+6.01 [11.35~ 18.20]	29~ 60以上 (105.7)	暗黄褐色、暗茶褐色。 中砂や粗砂を混入する。
	砂層②	A-s	細砂	-4.50~-9.31 [0~6.65]	10~ 60以上 (60.1)	暗青色、暗灰色。 上層部には1.20 m 以下の厚さで粘土を挟む地点が多い。
	砂・粘土	A-sc	細砂 粘土	-9.00~-15.26 [3.15~24.15]	6~ 60以上 (23.0)	暗青色、暗灰色。 粘性土が優勢な互層。 所々に腐植物を含み暗茶褐色を呈す。
第三紀層	凝灰質	H-1	凝灰質砂岩 凝灰質泥岩	-12.15~ 34.99 [0~24.40]	10~ 60以上 (75.3)	白灰色、青緑灰色 黄灰色を呈する部分もあり、 色調が不規則に変化する。
	泥岩①	H-2	砂質泥岩 泥岩	-19.84~ 41.39 [9.88以上]	46~ 60以上 (143.8)	暗灰色、暗青色。 一部に白灰色を呈する 凝灰質部分がみられる。

注) 1. 30 cm 以上の貫入量を示すN値は、換算N値を用いた。
2. N値の平均値は200を上限とした換算N値を用いて算出した。

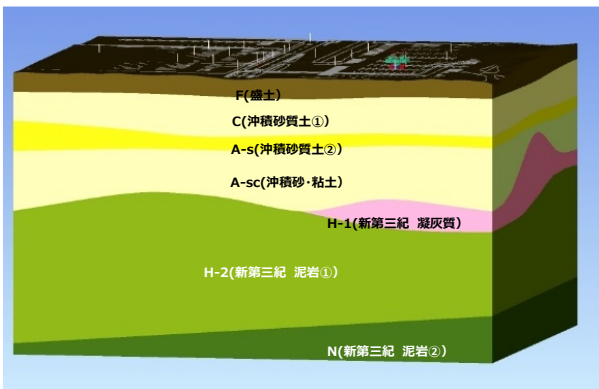


図2 ソリッドモデル

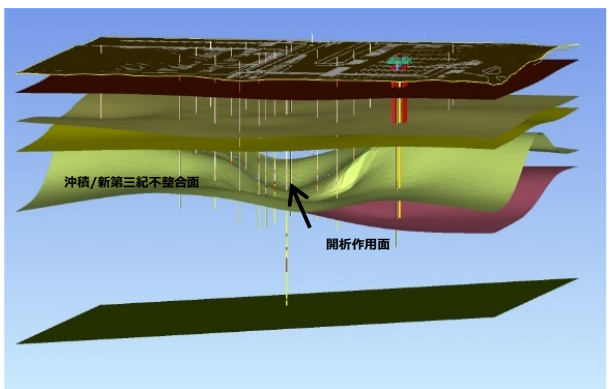


図3 サーフェスモデル

事例U-O.1-1) 沖積 - 新第三紀層の3次元地質解析と杭の鉛直載荷試験 (2)

杭の鉛直載荷試験概要

杭の鉛直載荷試験は、支持層の鉛直支持力と中間層の周面摩擦力を把握する目的として実施した。3次元化することにより全体的な地層分布と試験杭との関係をイメージ化しやすい形で示した。

試験対象とした地層は新第三紀層のH-2層（泥岩）と沖積層のA-sc層（沖積砂・粘土層）である。試験条件および、試験結果を以下に示す。

【試験条件】

先端支持力確認（対象層：H-2層 最大載荷10,000kN）

周面摩擦力確認（対象層：A-sc層 最大載荷4,800kN）

この試験では、杭の先端支持力および周面摩擦力をそれぞれ単独で把握するために杭体に潤滑剤を塗布し、さらに鋼管杭を外側に巻いて対象外の地盤との摩擦力を極力低減させて実施した。

3次元モデル化の表現について

全体の概要は3次元モデルを使用した場合、イメージ化しやすい反面、縮尺等の検証が紙面上では困難となるため、注釈や属性の記載が重要となる。

平面的な媒体で3次元モデルを表現する場合、2次元モデルとの対比等を行うことによって、理解度の向上が図れるものと考えられる。

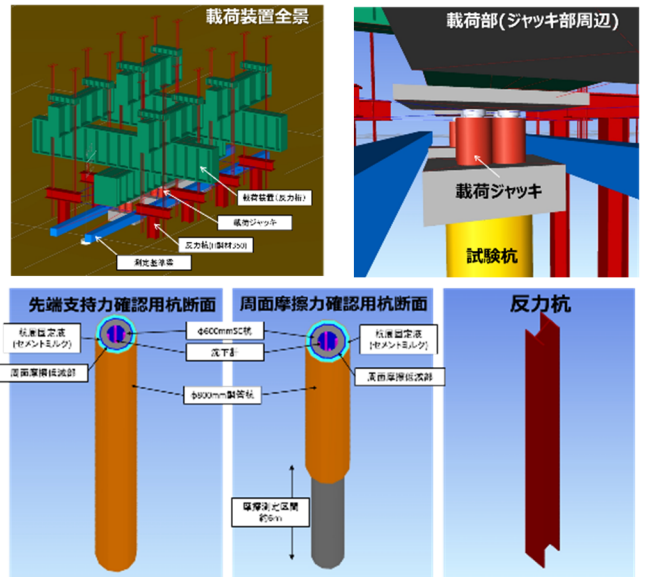


図4 載荷試験機器の概要

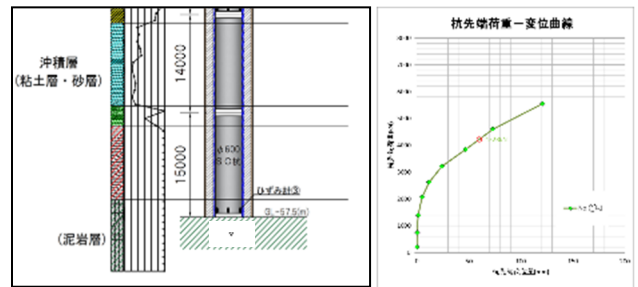


図6 先端支持力確認試験結果

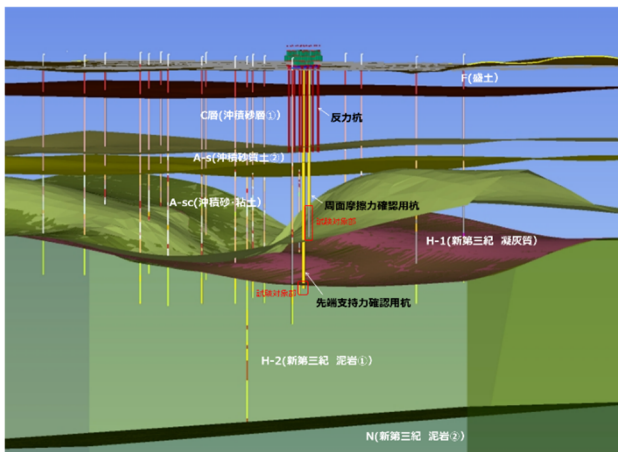


図5 載荷試験全体構成図

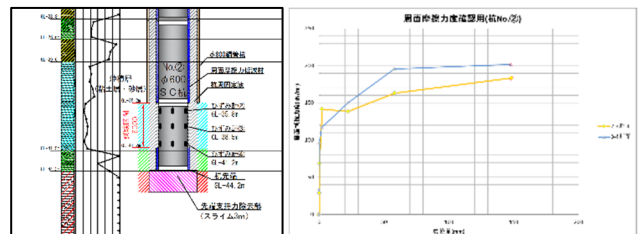


図7 周面摩擦力確認試験結果

表2 杭設置深度一覧

杭種	杭番号	杭設置深度	対象土層
先端支持力確認用杭 (φ800鋼管杭φ600SC杭)	No.①	GL-57m	泥岩層(H-2層)
周面摩擦力確認用杭 (φ800鋼管杭φ600SC杭)	No.②	GL-44m	沖積粘土・砂互層(A-sc層) (試験区間6m)
反力杭 (H型鋼材350)		GL-22m	沖積砂層①(A-s層)

事例U-O.1-2) 建築構造物基礎のための3次元地質・地盤モデルの構築事例

概要

過年度の業務で、構造物の支持層はN値50以上が約5m連続して分布した中間砂礫層と判断されていた(図1)。しかし、杭の試験施工を行った際に、部分的に中間支持層が確認できなかったため、4箇所の調査ボーリングを実施した。

この結果、支持層とされていた中間砂礫層は不陸が大きく、構造物基礎杭の約半数で消滅していることがわかった(図2)。このため、基礎地盤の地層分布状況を、3次元モデルで可視化することで支持層を検討した。

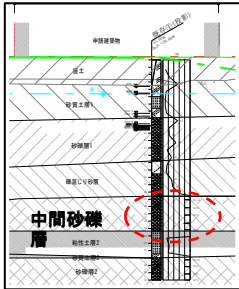


図1 当初地層推定

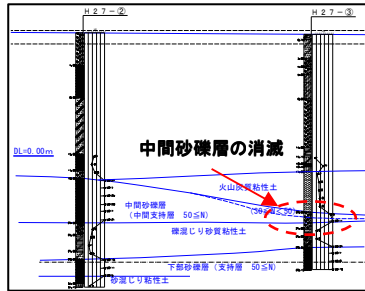


図2 追加ボーリング後の推定断面図

支持層決定手順

ボーリング結果や、基礎杭の試験施工結果をもとに、Make Jibanにより地層推定を行った。この際、建築構造物の外側のボーリング結果も考慮して、内挿補間により地層推定を行った。曲面推定アルゴリズムを用いて地層面を推定したが、3次元地盤モデルを作成する際に、推定地層面の端部は不自然な形状になる傾向があるため、検討対象範囲のさらに外側にも地層境界のコントロールポイントを設けることで、その影響を最小限とした。

3次元で可視化した地盤モデルを見ると、当初設計で支持層とされていた中間砂礫層では部分的に十分な根入れが確保できないこと、またはなくなっていることがわかった(図3)。

そこで、さらに深部に分布する下部砂礫層(50≦N)について、地質体を透過させた3次元地質図(図6)を見ると、分布深度に大きな不陸はないことがわかった。また、一部で層厚が2m程度と薄い部分もあるが、中間砂礫層の周面摩擦を考慮すると支持層として問題ないことがわかった。

技術的成果

3次元地質・地盤モデルを構築・活用することで、複雑な地層構成の全体像を把握し、適切な支持層の選定を行うことができた。よって、3次元地質・地盤モデルを用いることで、基礎杭

1本1本の長さ、支持層深度、根入れ長を細かく設定することができ、厳しい条件に対してよりシビアな設計を行うことができた。

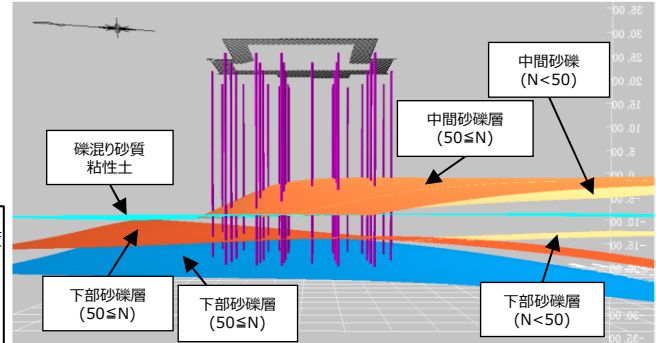


図3 水平面付近の投影図(地層上面)

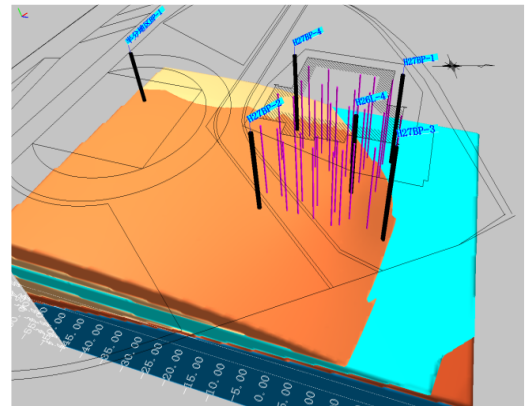


図4 鳥瞰図(中間砂礫層以深)

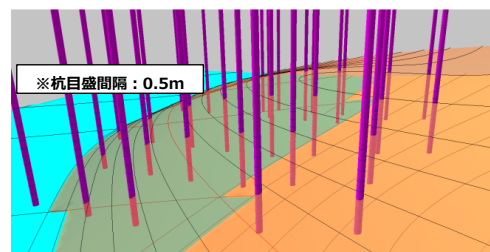


図5 透視図(中間砂礫層貫入状況)

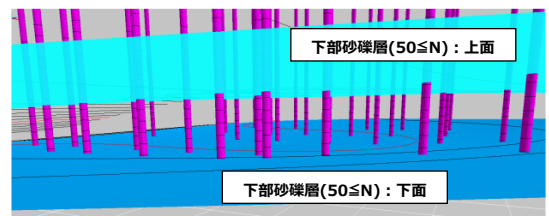


図6 透視図(下部砂礫層貫入状況)

U-O.2 岩盤分類

岩盤分類の役割

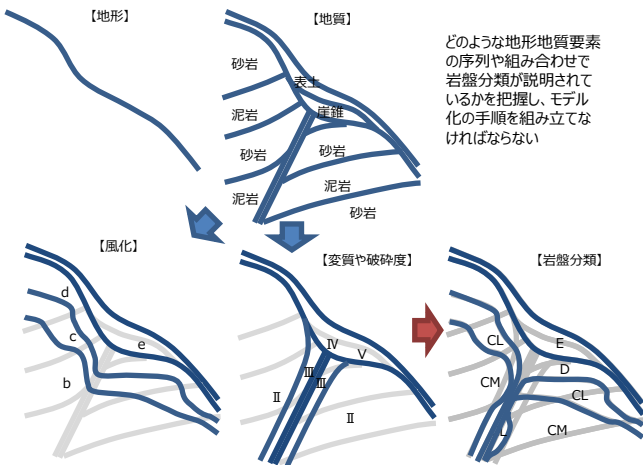
岩盤分類（地山分類）はダム・トンネル・橋梁等の土木構造物建設に際し、適切な設計・施工をおこなうために、基礎岩盤の工学的性状を分類する手法である。トンネルでは慣例的に地山分類が用いられており、岩盤分類と地山分類は厳密に区分されている訳ではない。本書では同義として扱う。

岩盤分類には専門機関や対象とする構造物毎に様々な方法が提案されている。

岩盤分類には次のような目的・用途が想定される

- ◆地盤安定性評価
地震応答評価、切羽予測、斜面不安定化予測、等
- ◆設計/施工管理
支持力検討、基礎処理や根入れ範囲・深度計画、リップビリティ、トラフィカビリティ、でき高管理、掘削土量計算 等

岩盤分類図を作成するには、岩盤分類判定基準がどのような地形・地質要素や工学特性に影響を受けているか、例えば、地形効果（除荷、応力分布）、岩種、風化・変質、断層・節理等、序列化や組合せの等の整理が必要となる。



図U-O.2-1 岩盤分類の要素序列・組合せの例

成果品と利用場面の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

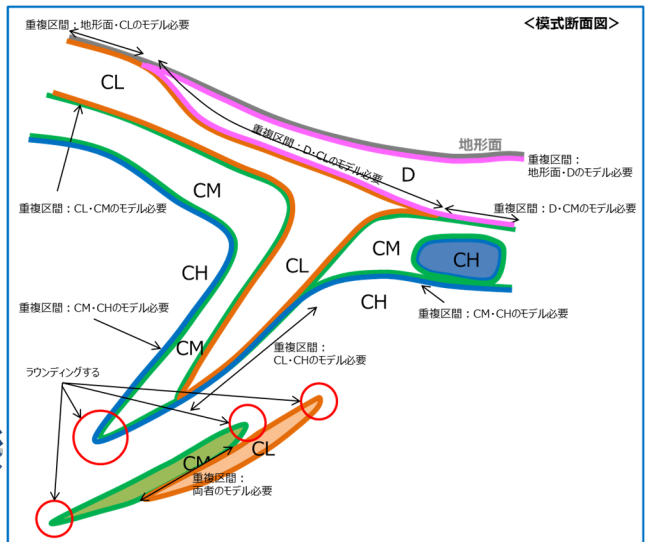
- ◆岩盤分類断面図
- ◆岩盤分類境界面コンター図
- ◆岩盤分類層厚コンター図
- ◆工事進捗差分コンター図

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

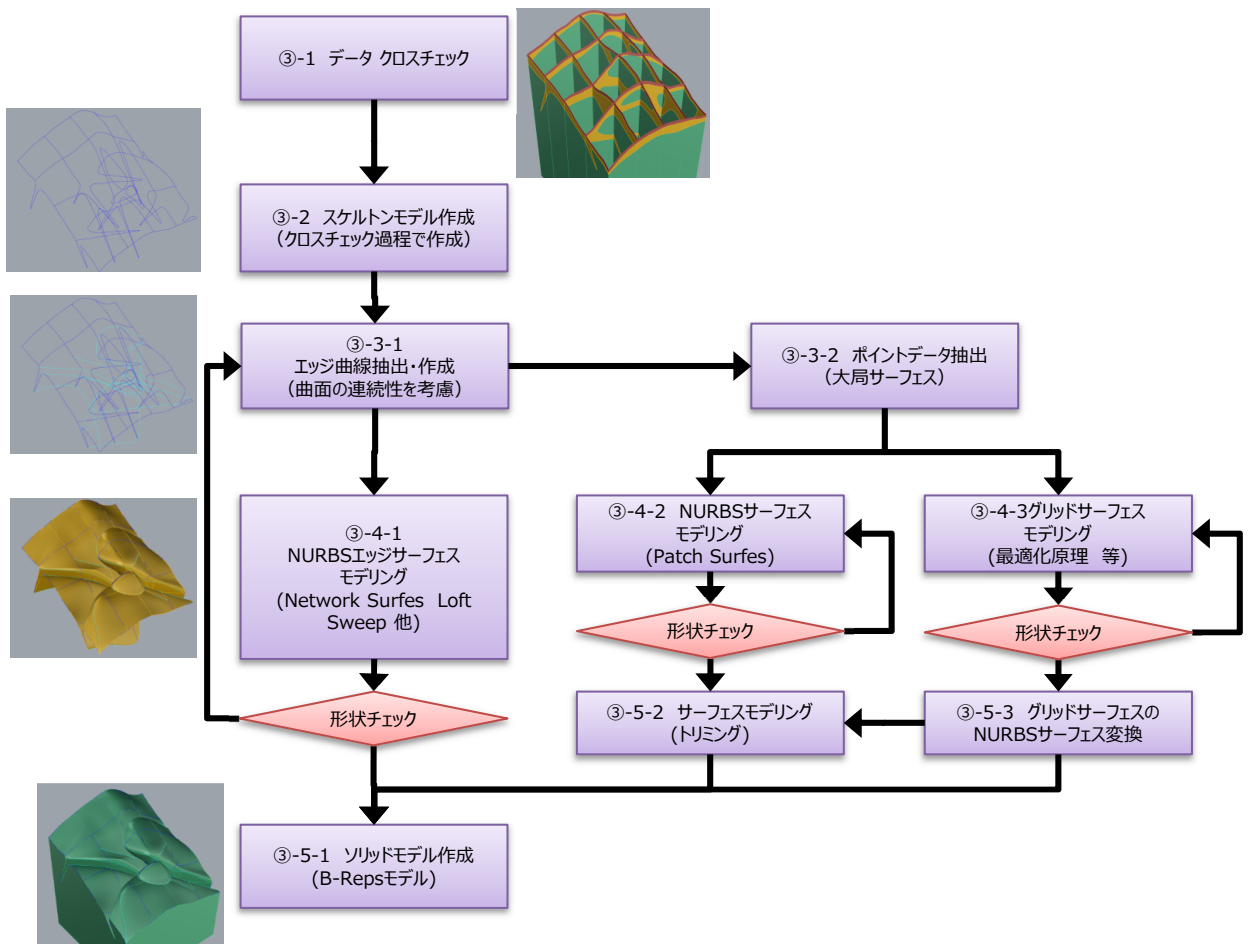
3次元岩盤分類モデルを構築すると、構造物との関係が把握し易くなり、さらに、掘削土量予測を行うことも容易になる。

ただし、岩盤分類モデルの作成の前に、岩級区分を支配する要因としての地形・地質・不連続面・風化・変質等のモデルを先行して作成する必要がある。どのような地形地質要素の序列や組み合わせで岩盤分類を説明するか（図U-O.2-1）、モデルをどのような構成で組み立てるか（図U-O.2-2）を検討しなければならない。

このような複雑な形状の3次元地質・地盤モデルを構築するためのワークフローの例を図U-O.2-3に示す。岩盤分類モデルは、要素組合せであるため複雑な形状になることが多い。このような形状を再現するには、複数の3次元モデルを合成することが必要になるため、「NURBS曲線法」は有力な手法と考えられる。

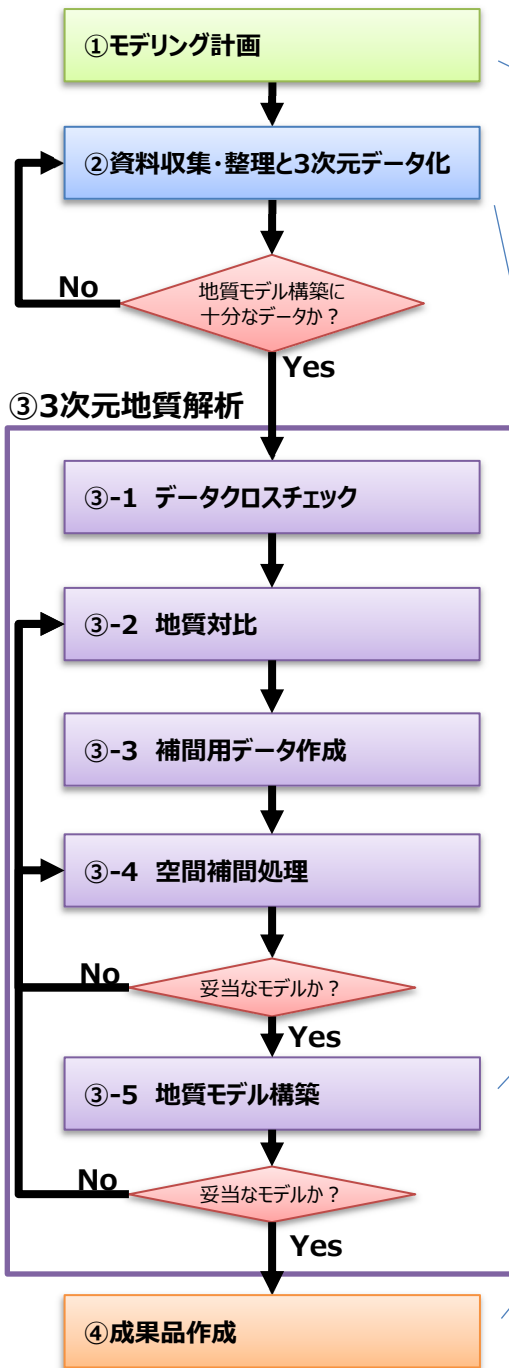


図U-O.2-2 岩盤分類モデルの構成例



図U-O.2-3 NURBS曲線法による3次元岩級区分モデルの構築フロー

＜3次元岩盤分類モデル構築上の着目点と考え方＞



【地形・地質学的背景の考慮】

- ◆ 岩盤分類に関連のある地形地質要素は先行してモデル化する必要がある
- ◆ どのような地形地質要素の序列や組み合わせで岩盤分類が説明されているかを把握し、モデル化のイメージを組み立てる【作り込むモデルの“レベル”】
- ◆ 岩盤分類モデルは複雑な自由曲面から構成されることが多い
- ◆ 目的と成果やコスト（時間・費用）を考慮し、必要十分なモデルがどのようなものになるかを、あらかじめ発注者（顧客）と協議する必要がある

【モデラー（3次元地質解析システム）の選定】

次のような自由曲面を作れるモデラーを使用することが望ましい

- ◆ オーバーハングや捻じれを示すサーフェスモデルの再現
- ◆ サーフェスモデルのオフセット（等距離でサーフェス作成）
- ◆ サーフェスモデルの融合（ラウンディング等）
- ◆ 作成状況や精度を速やかに確認できる性能

【モデル更新に備える】

- ◆ 工事対応になると更新に要する時間がタイトになる
- ◆ 複雑な形状であればあるほど更新時間を要する
- ◆ スムーズな更新を可能とするトレーサビリティ（モデル作成手順の記録、入力データの保持）が必要である

【データの準備】

- ◆ 既存の岩盤分類図を用いてモデル化する場合が多く、図面に基いてモデル化するためには岩盤分類の思想を反映させなければならない
- ◆ 既存図面自体の整合性（作成思想、作図法、）のチェックが必要
- ◆ 既存図面に加えて中間断面が必要になることがある

【成果品出力に適する3次元モデル】

種類	サーフェス	ソリッド	ボクセル
成果品出力の適否	○	○	△

○：適する △：可能 ×：不適

【作成する成果品の例】

- ◆ 岩盤分類断面図
- ◆ 岩盤分類境界面コンター図
- ◆ 岩盤分類層厚コンター図
- ◆ 工事進捗差分コンター図

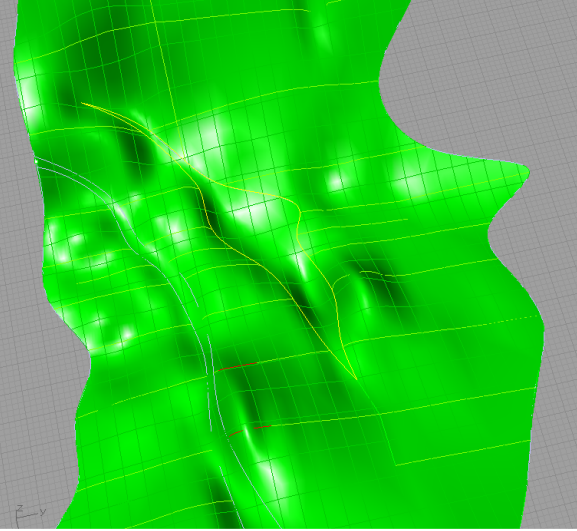
※ワークフローの各要素の詳細は「4.3 ワークフロー」を参照

例U-O.2-1) 岩盤分類サーフェスモデルの構築例

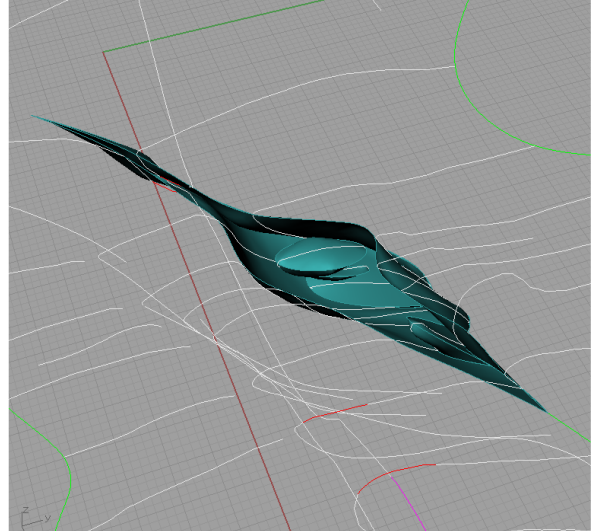
ダム基礎地盤の岩盤分類サーフェスモデルを作成した。

◆使用ソフト GEO-CRE

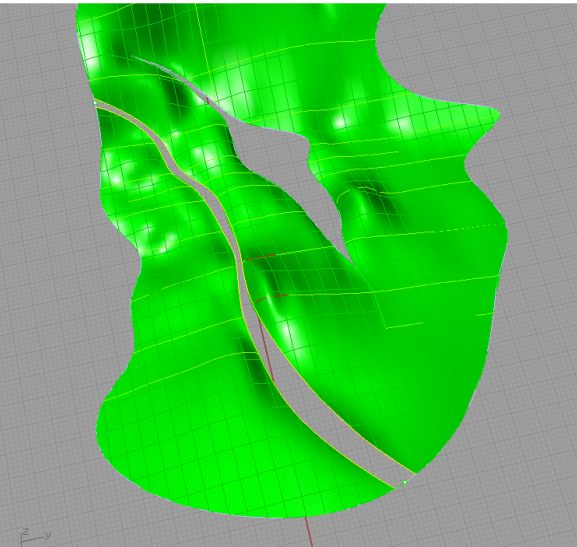
①大局面のサーフェスモデル作成



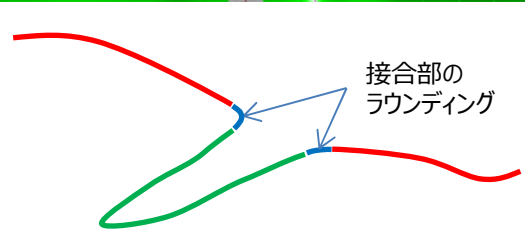
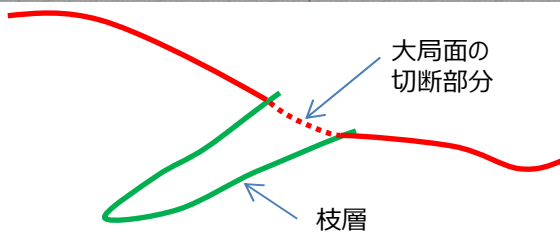
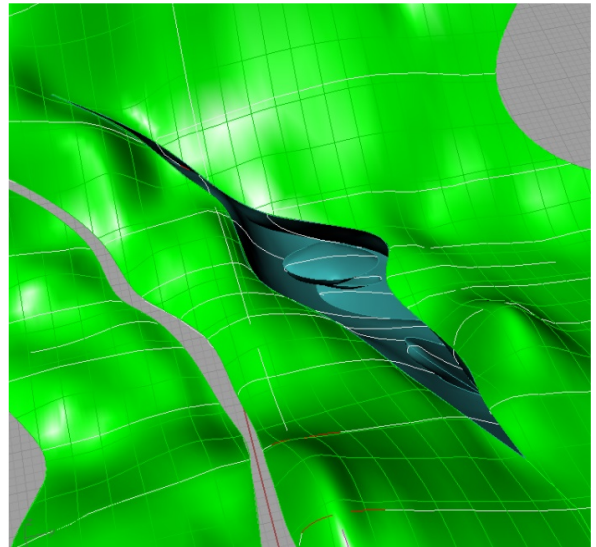
②枝層のサーフェスモデル作成



③大局面サーフェスについて枝層のサーフェスモデルと交わる箇所を切断



④大局面サーフェスモデルと枝層のサーフェスモデルを接合する。必要に応じて接合部をラウンディングする



地質情報の役割

アカウンタビリティ（説明責任）とは、権限を行使する者が、利害関係者（ステークホルダー）に対し、その活動や内容、結果等の報告をおこなう責任を指す。

ここでは、建設時の事故（都市トンネル事故）を想定し、行政関係者、工事関係者、一般市民のそれぞれへ、施工過程と地質との関係から、事故の原因や経緯を説明する場合を例示する。

表U-O.3-1 ステークホルダーに提示する資料の比較例

行政関係者	工事関係者	一般市民
地形面（崩壊前後） 調査ボーリングデータ 各種試験データ 地質解釈図面 全地質境界面 対象地質（設計時想定と崩壊後調査時） 地下水位 掘削面および立坑 土留め壁（崩壊前後） 切ばり 地盤沈下量 土留め壁変位量	地形面（崩壊前後） 調査ボーリングデータ 各種試験データ 対象地質（設計時想定と崩壊後調査時） 地下水位 掘削面および立坑 土留め壁（崩壊前後） 地盤沈下量 土留め壁変位量	地形面（崩壊前後） 対象地質（設計時想定と崩壊後調査時） 土留め壁（崩壊前後）

上記のように、説明対象者の理解度に合わせて用いる資料は異なる。ステークホルダーとしての行政関係者は「専門家」も含まれ、技術的判断・評価を求める。工事関係者は「非専門家」であり、復旧作業等の手順の理解を求める。一般市民も「非専門家」であるが、被害者を含む場合があり、実態や影響の速やかな理解や、復旧工事等の影響に関する合意を求める。

なお、資料作成者は偏った視点を持たぬように、中立な立場を保つことが重要である。

情報伝達のポイント

対象者に合わせて、どのような情報を最優先で伝えるべきかを整理して、相手に理解できる共通言語で分かりやすく伝える。

行政関係者には技術的判断・評価を求めるため、その根拠となる地質や地盤変状、事故状況、施工情報等の事実関係を論理的に伝える。工事関係者には復旧作業等の手順の速やかな理解を求めるため、事故状況や対策工を合理的に伝える。一般市民には安全・安心のため、事故状況とその影響および復旧工事のスケジュール、保証等を明示する。

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

地質情報を専門家以外に正確に伝えるのは難しい仕事である。3次元地質・地盤モデルは、目には見えない地表面下の地質や施工状況、地盤変状等を可視化し、その関連性を分かりやすく説明することが可能である。しかし、わかり易いがゆえに間違った情報や誤解を与える表現により、ステークホルダーの理解をミスリーディングする恐れもある。

対象者に合わせて、モデルの対象(可視化内容)や解像度、表現方法を変えて、各対象者の説明要求に答えられる資料を作成する必要がある。地質をモデルとして再現する際の観点や、構造物の解像度をどの程度に定めるか、各種データを3次元上でどのように表示するか等、十分に検討して作成する必要がある。

表U-O.3-2 地質モデルの3次元アウトプット・成果品の例

行政関係者	工事関係者	一般市民
ボーリングモデル 準3次元図面 サーフェスモデル テクスチャモデル 時系列でのソリッドモデル（設計時想定、掘削レベル毎、崩壊後等） 観測結果の可視化 アニメーション	ボーリングモデル 準3次元図面 サーフェスモデル テクスチャモデル 時系列でのソリッドモデル（設計時想定、掘削レベル毎、崩壊後等） 観測結果の可視化 アニメーション	サーフェスモデル テクスチャモデル 時系列でのソリッドモデル（設計時想定、崩壊後等） アニメーション

地質情報の役割

ここでは、3次元地質・地盤モデルを理科（科学）教育の教材として活用する場面を想定する。

【目的】

- ◆理科（科学）教育や防災教育の教材として活用
- ◆科学的、客観的視点の構築
- ◆理科離れ、地学離れの解消

【題材の例】

- ◆地域の地形や地質を題材として、防災や地下空間に興味、関心を惹く
- ◆災害防止の普及啓発を図るために、小・中学生対象の学習会において活用する
- ◆土砂災害等の現象を理解し、自ら身を守る行動をとるための基礎知識を習得してもらう
- ◆実在の地区をモデル化することが困難な場合、架空のモデル地区を設定する

【伝えるもの】

題材を通して伝えるものは、現象面だけではなく、自らどのように行動するべきかまで理解を醸成し、実践につなげられるようにすることである。

- ◆個人としてどのような行動をとるのか
⇒ 避難する（自助、公助、共助）
- ◆公共としてどのような対応をとるのか
⇒ 危険度の周知、避難場所の確保、対策工の施工

【コンテンツの内容】

- ◆現象を理解しやすい、ある程度簡素化されたイメージモデルとなっている
- ◆小学生にもわかりやすい内容（視覚重視）
- ◆既資料のパワーポイント、映像資料を補足できるような表現がされたもの
- ◆第三者（県土木職員OBやボランティア等）が動かすことができるような簡単なアプリケーションである
- ◆シミュレーションを活用し、ある程度の自動再生の動画として活用できるもの
- ◆レンダリングした画像のスナップショット
- ◆視点を連続的に変化させた動画
- ◆テクスチャマッピング
- ◆3Dプリンタによる模型

等

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

教育に用いる3次元地質・地盤モデルは、次のような性能に配慮する。また、どの程度のレベルのものを作成するのか、対象者に応じて数パターンのケースを用意する場合もある。

- ◆論理性や妥当性よりも、現象のイメージを重視させる
- ◆視覚にダイレクトにアピールすることにより、より明確なイメージを形成する
- ◆何を伝えるべきか、ポイントを絞る

例U-O.4-1) 斜面災害の教育ツール

【目的】

- ・斜面災害のリスクコミュニケーション
- ・崩土の拡散等のシミュレーションによるアニメーションを用い、時系列で表現
- ・地質条件と地すべりの関係（素因）を視覚的に表現。斜面変動の素因となる「物質的要因（地質）」と「場の要因（地形や環境因子）」「変動要因」を同時に可視化する

【コンテンツ】

- ◆地すべりの発生運動シミュレーション¹⁾ 動画
- ◆レンダリングした画像のスナップショット

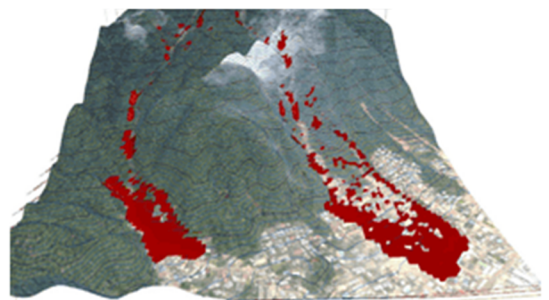


図1 地すべりの発生運動シミュレーション¹⁾

1) 五大開発HP：地すべり発生運動統合シミュレーションLS-RAPID(ICL)

事例U-O.4-1) 理科教育の事例

ドローンや3次元地質・地盤モデルを活用した「おもしろ理科出前授業」の取り組み¹⁾を実施した事例を紹介する。

教育活動に期待する効果

地質調査業の理解や普及には、より多くの人に地質や地盤工学に興味を持ってもらうことが課題であり、教育活動はその主要なアプローチと位置付けられる。特に初等教育には、その吸収力の高さとともに、児童生徒を通して家庭への普及を促進するという副次的効果も期待される。

授業内容とねらい

- ・中山間地の小学校で実施
- ・3年生～6年生の児童16人が対象
- ・授業時間90分（教科書にある程度沿ってればあとは講師が自由に計画可能）
- ・授業タイトル「地面の下はどうなっているのか」
- ・単元内容「土地のつくりと変化」→小学校6年理科の内容
- ・土地のつくりとでき方、変化について学ぶ

課題

- ・学年差による知識量の違いに配慮が必要
- ・90分の長丁場を飽きさせない工夫
- ・地質をより身近に感じてもらう工夫

【実施内容】

◆児童にとって身近な学校敷地にフォーカス
ドローンによる空撮データを用いて学校敷地を3次元表示により俯瞰する（児童の身近な存在から導入）。

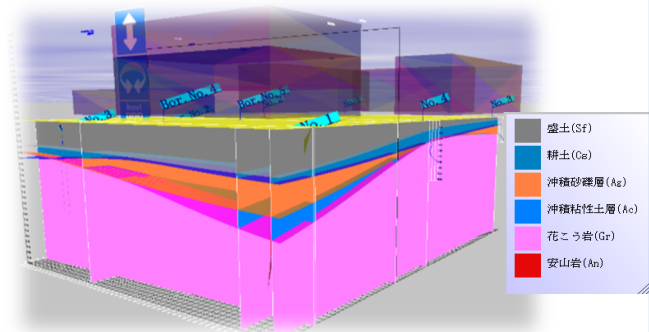
◆地層や地盤をより身近に感じてもらえるように配慮
敷地内の既存ボーリングデータから学校敷地内の3次元地質・地盤モデルを作成し、地層や基盤岩を3次元で表示することによって様々な角度からモデルを観察する。校舎及び体育館の建設時に実施されていた9本のボーリングデータを基に、3次元地質・地盤モデルを作成した。視覚に訴えかける表示により、小学校中学年にもボーリング調査によって地下の様子を知ることができることを分かり易く提示した。

◆実験中心のダイナミックな授業（楽しさを共感）
簡易な実験により礫、砂、泥の混合物が水中で分級されて成層する様子を観察する。礫岩、砂岩、泥岩の顕微鏡観察をおこなう。

1) 増田 信・吉岡 崇, ドローン・3次元地質・地盤モデルを活用した小学校理科出前授業の実践事例, 四国技術フォーラム2017in香川 講演集, 2017. pp.51-52.



児童にとって身近な存在である学校にフォーカス



地層の重なり方を説明 様々な方向の断面を見せる

【備考】

- ・地質モデルの作成には五大開発社製Makejibanを使用
- ・建物の形状は、ドローンによる3次元点群データを福井コンピュータ社製TREND-POINTで処理したものを基に3DCADで作成

事例U-O.4-2) 3次元地質・地盤モデルの地質学教育での活用 —武蔵野台地を例として—

概要

初学者にとって、見えない地下の地質をイメージすることは難しい。地質構成やその成り立ちを理解するための補助ツールとして、3次元地質・地盤モデルは教育現場でも力を発揮するものと思われる。そこで模式的なモデルを作成し、社内教育に利用することを試みた。モデリングにはジーエスアイ(株)製のGeomap3Dを用いた。

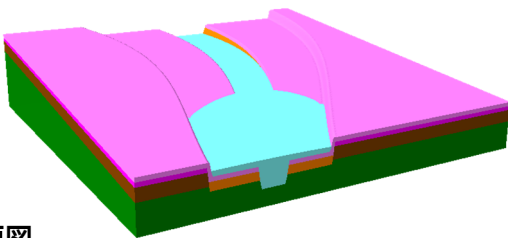
モデルの概要

武蔵野台地を想定した模式的なモデルを作成した(下図)。モデル全体を俯瞰すると、武蔵野台地を構成する地形面群(武蔵野段丘・立川段丘・沖積低地)と、それらを境する段丘崖がみられる。下流部(手前側)では立川段丘が沖積層により埋積されている。

モデルを作成する上で、地史に対応した以下のような面を設定した(カッコ内はGeomap3Dで指定する属性)。

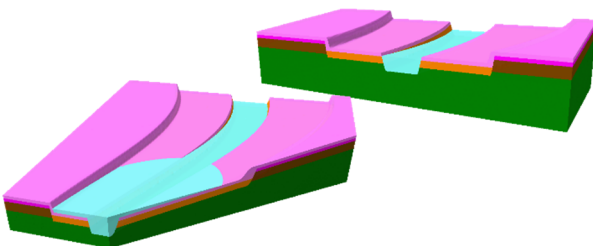
- ◆ 沖積層 (堆積)
- ◆ 浸食面2 (浸食)
- ◆ 立川ローム (堆積)
- ◆ 立川礫層 (堆積)
- ◆ 浸食面1 (浸食)
- ◆ 武蔵野ローム (堆積)
- ◆ 武蔵野礫層 (堆積)
- ◆ 基盤層 (堆積)
- ◆ 基底面 (基底)

浸食面1および浸食面2は、海水準低下による下方浸食に対応する。



断面図

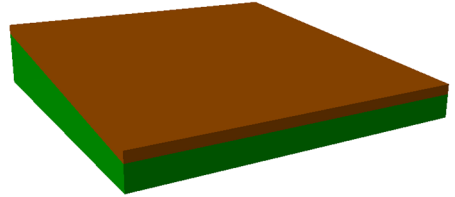
任意の平面でモデルを切断し、断面を表示することができる。



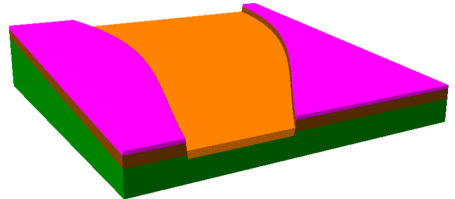
地形・地質の成り立ち

過去の時点におけるモデルを作成することで、地形・地質の成り立ちを確認することができる。

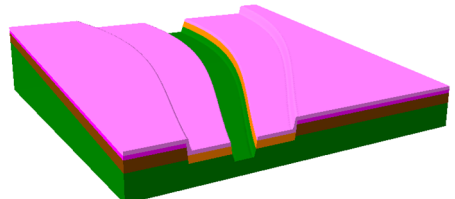
① 武蔵野礫層が堆積する。



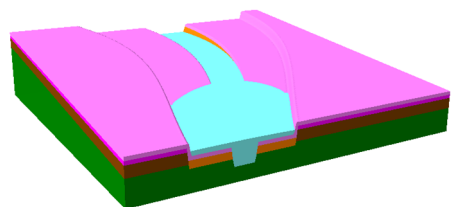
② 下方浸食され、立川礫層が堆積する。
この間に武蔵野ロームが降下する。



③ 再び下方浸食される。
この間に立川ロームが降下する。



④ 沖積層が堆積する。



まとめ

- ・社内での地質学教育に3次元地質・地盤モデルを活用した。
- ・教材として武蔵野台地の模式的なモデルを作成した。
- ・学習者が任意の平面でモデル断面を確認できるため、地質の全体像を容易に把握することができた。
- ・地史を考慮したモデリングを行うことで、地形・地質の成り立ちの理解に役立った。

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

〈参考資料〉

【地形地質事象毎の モデル化の留意点】

ここでは様々な地形・地質事象における地質調査の役割と求められる成果品を示し、3次元地質・地盤モデルを構築する場合の着目点と考え方を例示する。

さらに、具体事例や利用場面を想定した仮想事例により、3次元地質・地盤モデル構築上の課題を抽出する。

※全てのユースケースを網羅するものではない

[C-T 地形別](#)

[C-G 地質別](#)

<地形地質事象毎のモデル化の留意点の読み方>

C-T 地形別

C-G 地質別

<p>基本的事項</p> <ul style="list-style-type: none">・地質情報の役割・成果品と利用場面の例・3次元地質・地盤モデル構築の課題・その他	<p>3次元地質・地盤モデル構築の着目点と考え方</p>	<p>例 or 事例</p>
--	------------------------------	------------------------

例：仮想事例

事例：実際のモデル化事例

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

【地形地質事象毎のモデル化の留意点】

C-T 地形別

※全ての事象を網羅するものではありません

[C-T.1 扇状地](#)

[C-T.2 台地](#)

[C-T.3 丘陵地](#)

[C-T.4 山岳地](#)

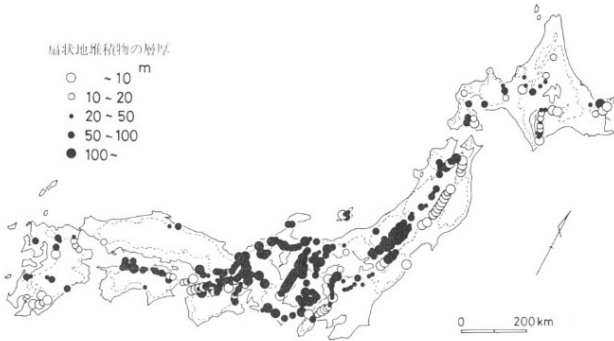
[C-T.5 急傾斜地](#)

C-T.1 扇状地

地質情報の役割

扇状地は「河川が山地から平地にでたところを扇の要として、河道を移動させてできた半円錐形状の地形¹⁾」と定義され、主に砂礫により構成される。

我が国には数多くの扇状地が分布しており、多くの県庁所在地が扇状地上あるいは扇状地の近くに立地する等、生活・経済の場として機能している（図C-T.1-1）。

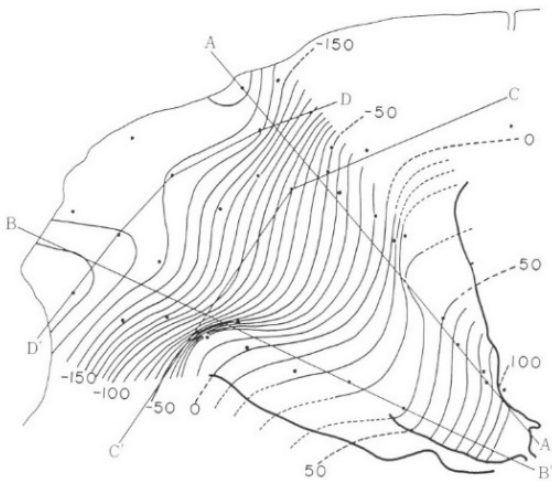


堆積物の層厚は、扇状地により0mから250mに及ぶものまで、さまざまである。堆積物の薄い扇状地（白丸）は、北海道、北上河谷、関東平野に多い。一方、堆積物の厚い扇状地（大きい黒丸）は、山形盆地、松本盆地、甲府盆地などで、よくみられる。

図C-T.1-1 全国の扇状地堆積物の層厚¹⁾

【扇状地の発達過程】

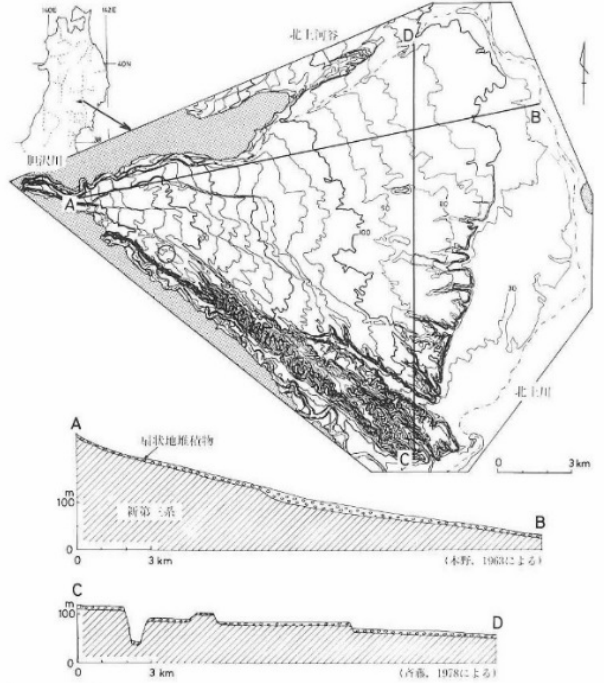
一口に扇状地と言っても発達過程は各扇状地で異なっており、複数の扇状地が積み重なることで厚い砂礫層を形成するものや（図C-T.1-2）、比較的薄い砂礫層の扇状地群が階段状に分布するもの等、様々な形態がある（図C-T.1-3）。



基盤標高図（榎根・山本、1971）

点は基盤までの深さが判明した地点、単位はm。

図C-T.1-2 黒部扇状地の基盤標高図³⁾

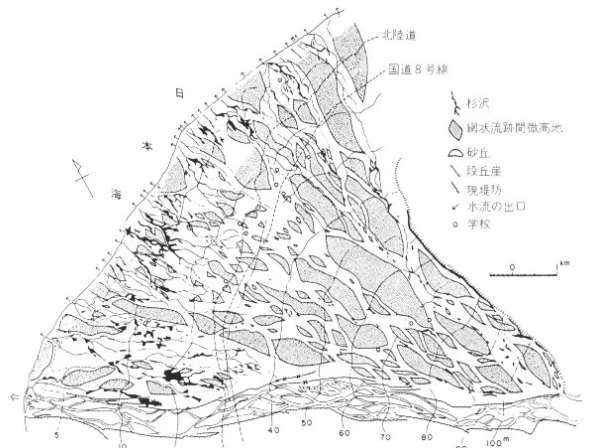


扇状地の等高線を見ると、数段の扇状地からなるように思われる。しかし、台地を構成する硬層は、せいぜい10m程度しかなく、このような半円錐形状地形が、扇状地なのかどうか議論されてきた。

図C-T.1-3 胆沢扇状地の地形¹⁾

【扇状地の地質構造】

扇状地は、河川の氾濫や河道変更の結果により形成される（図C-T.1-4）ことから、海成層に認められるような面的な広がりや規則性に乏しい。扇状地堆積物の地質対比は、微地形判読も合わせて慎重におこなう必要がある。



図C-T.1-4 黒部扇状地における微地形区分⁴⁾

【扇状地における地質調査の目的】

扇状地における地質調査の目的としては以下のようなものがあり、地下水利用や土砂災害等の正負両面での利用が想定される。

◆土砂災害、越流・破堤、洪水氾濫等の影響評価
扇状地そのものが河川氾濫による土砂堆積により形成されたものであり、土砂災害のリスクを持つ土地である。

◆建設工事のリスク評価
扇状地は主に未固結の砂礫層で構成され、地下水が豊富であることから、建設工事の際には崩壊・出水等の発生が懸念される。

◆地下水利用、地中熱利用評価
一般に扇状地は良好な帯水層として機能することから、地下水および地中熱利用の適地となりうる。

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

◆微地形の把握

扇状地の等高線は、扇頂を中心とした同心円を描くものの、多少の出入りが認められる。このようなわずかな起伏により形成される微地形は、過去の地形発達の履歴をとどめていると言われ、微地形の研究は扇状地の形成条件や仮定の解明に寄与している。

扇状地の3次元地質・地盤モデルを作成する場合は、対象となる扇状地の微地形を把握することが重要である。特に、地下水に関わる事象を目的とする場合、「埋没された旧河床が水脈を形成することが多い²⁾」ことから、微地形判読や現地踏査もあわせて旧河床の把握が重要となる。

◆既存井戸資料の収集整理

一般に扇状地は砂礫層により構成されていることから、比較的浅い深度に支持層が分布している。したがって、建設基礎を対象とした既存ボーリングデータは表層付近に留まり、扇状地の全体を把握できる深度のデータが少ない場合が多い。

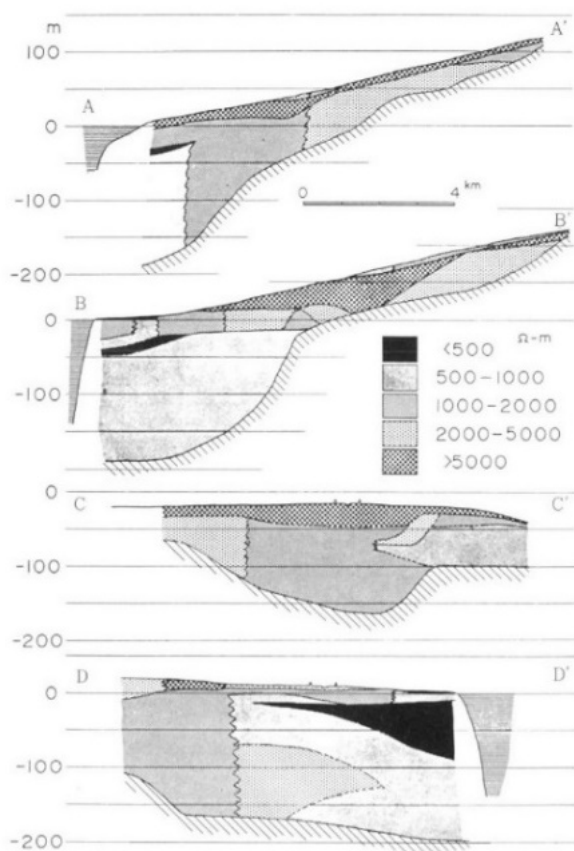
しかし、扇状地は地下水利用が行われることが多く、深い深度までの既存井戸資料が存在する場合が多い。既存井戸資料（例：全国地下水資料台帳³⁾）の情報も慎重※に利用すれば有効である。

※井戸資料使用の留意点

井戸情報は、位置座標が記録されていないか、されていても住所レベルであったり、間違っている場合もある。また、井戸目的であることから、無水掘りやスライムによる土質判定が多く、地質情報の精度は低く、統一されていないものが多い。

◆比抵抗値等による地質構造の検討

礫質土、砂質土、粘性土が複雑に分布する扇状地においては、比抵抗値等のデータが地質構造を検討する上で有効となる（図C-T.1-5）。また、既存井戸資料の電気検層データや、物理探査データが連続性のあるデータとして利用可能である。



図C-T.1-5 比抵抗値による地層の区分例⁴⁾

1) 齊藤享治. 日本の扇状地. 古今書院. 1988, pp.52-58.

2) 山本莊毅. 新版地下水調査法. 古今書院. 1983, pp.75-78.

3) 国土交通省. “水基本調査(地下水調査)”.

<http://nrwww.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html> .(2017年2月時点).

4) 榎根 勇. 実例による新しい地下水調査法. 山海堂. 1991. pp.17-19.

地質情報の役割

本書における台地は、日本で一般的に使われている洪積台地を指す。台地は、更新世の氷期と間氷期の繰り返しによる海水準変動や地殻変動によって形成された平坦面と急崖からなる、概ね標高数十m以下の地形である。

基盤岩の上に更新統の堆積物、ローム、段丘堆積物等が堆積する地質構成となっており、台地を開削する河谷沿いや海岸付近では河岸段丘が形成されることが多い。河岸段丘の模式図を図C-T.2-1に示す。下記に、台地において特徴的な地形地質要素を挙げる。

①段丘面

段丘堆積物の下限面は図C-T.2-1に示すように段丘面にほぼ平行で比較的平らな部分と背後の崖の続きの部分からなる。

②急崖

台地は比較的平坦な台地面・段丘面・低地面と急峻なことも多い台地崖・段丘崖から構成される。

③地層

洪積層中の地層は沖積層と同様に複雑である。

④ローム層

ローム層は陸成層であり形成時の地形を覆って分布している。

台地は生活や経済活動の場であり、様々なインフラや構造物が建設され、下記のような用途・目的で地質情報のニーズがある。

◆建設工事の設計/施工管理

トンネル・掘削構造物・地下構造物の建設、大規模造成、宅地開発 等

◆地盤の評価

台地崖・段丘崖の分布 等

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルを作成するうえで、各地形地質要素における注意点を挙げる。

①段丘面

段丘堆積物の下限面の変わり目は面の向きの変化が大きいため、最適化原理やスプラインのような手法で一括して適切な形状の面を作成することが難しく、モデリングに工夫を要する。

②急崖

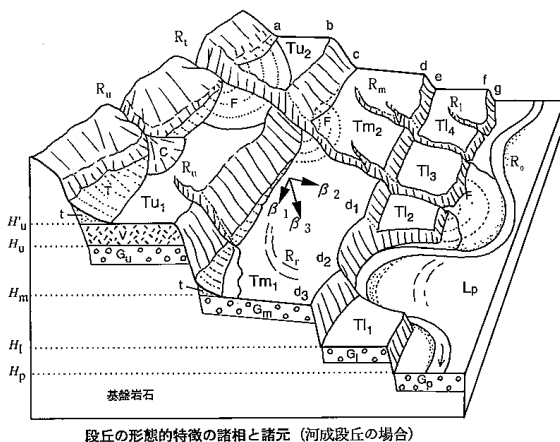
間隔の大きいグリッドデータを使用すると崖の形状が適切に表現できない(例C-T.2-1図3)、間隔が小さく標高の解像度が粗いグリッドデータを使用すると平坦面が平らにならないといった状況が起こりやすい(例C-T.2-1図4)。

③地層

地質構成が複雑であり、地層の対比には注意を要する。ボーリングだけでは対比が困難であり、地形分類図等を含めた複合的な判断が必要である。

④ローム層

ローム層は形成時の地形なりに分布するため、層準の対比には注意を要する。ローム層のように降下堆積物の場合は、現地地形を基準として層厚モデルを用いたモデリングも有効である(例C-T.3-1参照)。



段丘の形態的特徴の諸相と諸元 (河成段丘の場合)

Tu・Tm・Tl：上位・中位・下位段丘面、添字は各段丘面の断片を示す。
 a：山麓線、c, e, g：段丘崖の崖頂線、
 b, d, f：段丘崖の崖頂線。
 Lp：現成の河成低地、T：崖錐、C：沖積錐、F：支流の扇状地。
 R0：本流、R1：古い支流とその段丘開折谷、R2・R3・R4：上位・中位・下位の段丘形成後に生じた河川とその段丘開折谷、R5：流路跡地。
 H0・H0'：上位段丘面の実質高度・名目高度、H1・H1'：中位段丘面・下位段丘面・現成低地の実質高度。
 h0 (=H0-H0') と h0' (=H0'-H0)：現河床から上位段丘面までの実質比高と名目比高、中位・下位段丘でも同様。
 beta1, beta2, beta3：中位段丘面の縦断勾配、横断勾配および最大勾配ならびにそれらの傾斜方向。
 Gm, Gm', Gp, Gp'：上位、中位、下位の段丘および低地の堆積物、V：火山灰層、t：崖錐堆積物。

図C-T.2-1 河岸段丘の模式図¹⁾

参考文献

1) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地. 古今書院, 1998, p.561.

例C-T.2-1) 台地崖の地形モデル作成

地形コンターを用いて台地崖のモデルを作成した例を示す。モデリングに使用したコンターとモデリング範囲は図1に示す。コンターの主曲線が2m間隔である。

図2はコンターを直接つなぐTINを作成した例である。崖の形状が概ね表現できている。ただし、TINの三角形のサイズは、細長いものも含めて大小様々となっている。

図3は南北21×東西25のグリッドからTINを作成した例である。標高の精度0.1mである。崖の存在は明瞭であるが、崖の範囲が広く表現され、一部で傾斜が緩くなる、階段状の形状になる等、精度は悪くなっている。

図4は南北51×東西61のグリッドからTINを作成した例である。標高の精度は1mである。台地面や崖下が標高1m毎の平面とその間の段差で構成されているようなモデルになり、標高精度が良いとは評価できない。

なお、図3、図4のモデル作成に使用したグリッドデータは図2のモデルから作成した。

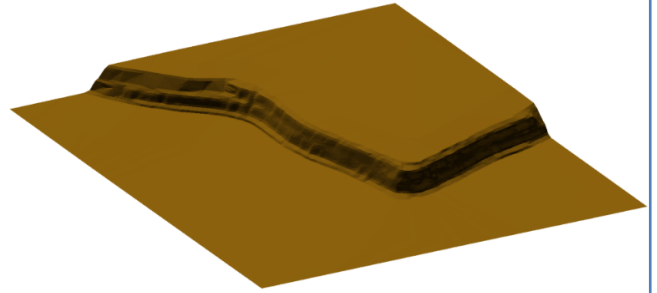


図2 コンターから直接TINを作成

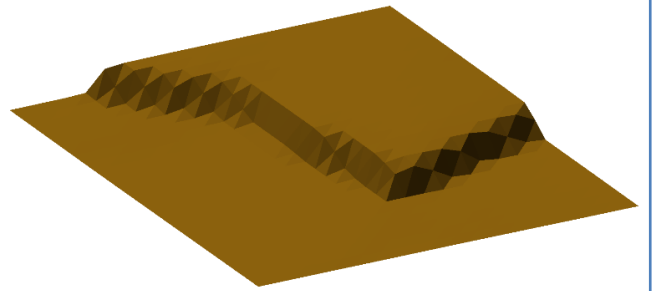


図3 メッシュサイズが大きい場合

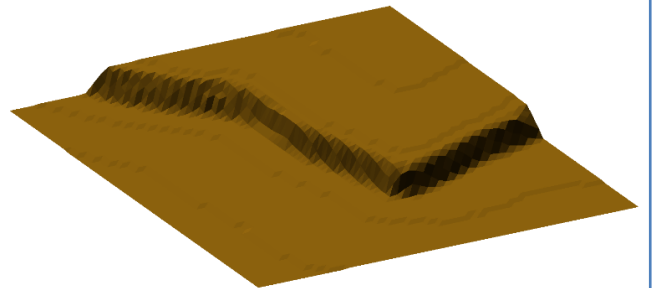
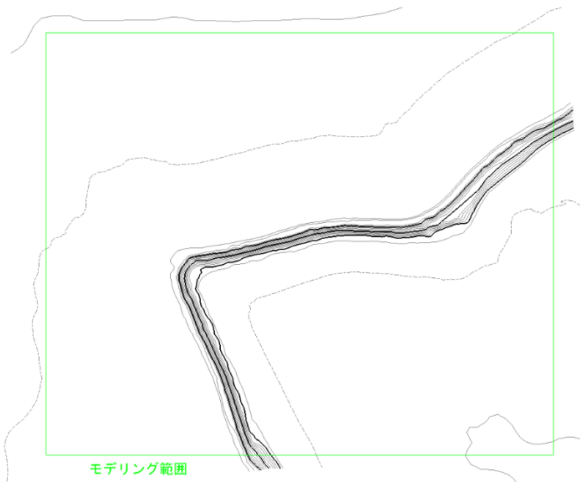


図4 標高の精度が悪い場合



モデリング範囲

図1 コンターとモデリング範囲 (平面図)

地質情報の役割

丘陵地には次のような地形・地質的な特徴がある。

①地形

200～300m程度の高度で緩慢な斜面と谷底をもつ。開析が進み多くの谷が形成される。頂部は丸みを帯びなだらかであるが、側部は比較的急勾配な斜面が形成されている。表C-T.3-1に丘陵地を構成する地形種の特徴を示す。

表C-T.3-1 丘陵地を構成する地形種の特徴¹⁾

構成する地形種		特徴
前輪廻地形		山頂小起伏面が多い
段丘	河成段丘	主要谷ぞいに数段が広く発達し、一般に最上位は堆積段丘で、中位以下は侵蝕段丘である
	海成段丘	定高性をもつ主要尾根の頂部にしばしば残存
主要河谷(5次以上)の谷底		一般に床谷であり、主要河谷ぞいに侵蝕低地、堆積低地および支谷閉塞低地が発達する
集団移動地形		地すべり地形、沖積錐、崩落地、麓局面
その他		変動地形、断層削剥地形、ケスタ、カルスト地形

②地質

洪積層や新第三紀層の新期地層が分布する丘陵地と、新第三紀より古い時代の堆積物や岩石で構成される古期地層が、風化侵食されて形成された丘陵地に概ね分けられる。

新期地層では、粘性土、砂質土、礫質土が互層状に分布し、単斜構造により地層の傾斜が見られるものがある。

古期地層では、風化の進行により風化残留岩塊が混在する等の硬軟不同となることがある。

③地下水

粘性土と砂質土、礫質土が互層状に分布する場合には、粘性土（不透水層）下位の砂質土、礫質土（帯水層）に被圧地下水が分布することがある。また、丘陵地の縁沿いでは湧水が見られる箇所がある。

丘陵地では下記のような用途・目的で地質情報のニーズがある。

- ◆土砂災害(斜面崩壊、地すべり、落石等)の影響評価
- ◆都市周辺の造成(宅地、商業地、道路等)
 - ・土工計画
 - ・造成に伴う表流水、地下水への影響検討
- ◆亜炭採掘跡や採石跡等の状況把握 等

3次元地質・地盤モデル構築上の着目点

◆地層の走向傾斜

粘性土、砂質土、礫質土が互層状に分布することが想定されるため、ボーリングデータ間の地層の繋がりに注意する。現地踏査や既往資料等で確認される地層の走向傾斜に矛盾のないように地質境界を作成する。

◆地層の連続性

層相変化に富む地質の場合、レンズ層が複数挟在することが想定される。レンズ層の厚さの側方への変化や端をどこまで延長するか等、考え方を統一してモデル化する必要がある。

◆モデルの詳細度

開析谷に分布する谷底堆積物や、斜面下方に分布する崖錐堆積物は、基盤層と比較して層厚が薄い。そのため、どの程度の精度でモデルを作成するかを発注者と協議する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地. 古今書院, 1998, p.561.

例C-T.3-1) 丘陵地における地形に調和的な地質モデル作成

丘陵地に相当する当該地の地質は、地質の成因により二つのグループに分けることができる。

グループA：ローム (Lm)、凝灰質砂 (tfs)

グループB：強風化凝灰岩 (Wtf)

グループAは火山活動により空中に噴出した火山砕屑物が降下堆積して形成された地質であり、火山活動のあった時代の地形（古地形）を覆って分布する（図1）。

グループBは古地形や現地形を構成する岩盤（当該地では凝灰岩と礫岩）が地表面からの風化作用を受けて形成されたものである（図2）。

【モデル構築手順】

地形面に調和的に分布する地質の場合は、基準地形面を設定し、これに対する地質層厚を割り当てるモデルが妥当と考えられる（図3）。モデルは次の手順で作成した。

①基準地形面作成

現地形モデルは細かい起伏があるため、これをスムージングした基準地形面を作成した。基準地形面の空間補間計算にはBS-Horizon¹⁾を使用した。

②層厚モデル作成

各ボーリングにおける地層層厚を求めた。地層層厚の空間補間モデルを計算した。なお、空間補間計算にはBS-Horizon¹⁾を使用した。

③地質境界面作成

基準地形面に対し②の層厚モデルを割り当て各地質境界面モデルを作成した。

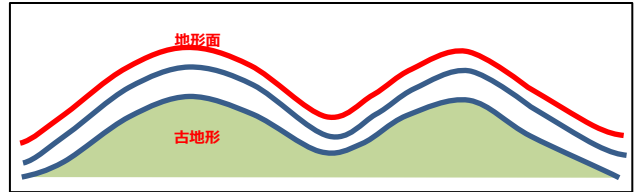


図1 グループAの概念図

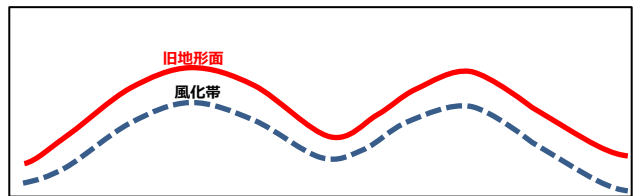


図2 グループBの概念図

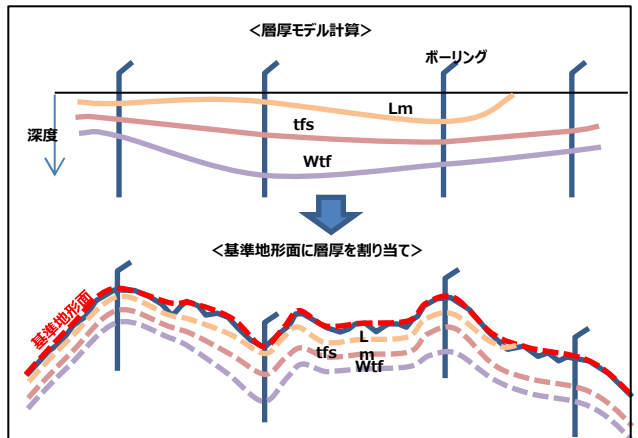


図3 層厚モデルを基準地形面へ割り当て

参考文献

1) 野々垣 進, 升本 真二, 塩野 清治. 3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定. 情報地質. 2008, 第19巻, 第3号, pp.61-77.

地質情報の役割

山岳地は広義の山地（平地の対義語）地形を対象とする。山岳地はその大部分が斜面で構成されるため、急峻な地形も多く、自然災害（表C-T.4-1）や建設工事の際に問題となる事項（表C-T.4-2）が多い。

このような数多くのリスクを予測し防災・減災対策や建設工事に役立てるため、地質情報には重要な役割がある。

山岳地において想定される主な事業と地質・地盤リスクを挙げる。

【建設工事全般】

- ◆切土斜面や盛土・埋土の安定性評価
- ◆支持層の把握
- ◆掘削土処理（自然由来重金属）等

【山岳トンネル】

- ◆路線選定時の地質・地盤リスク
- ・地すべり、崖錐、扇状地、崩壊履歴、断層・破碎帯、不安定地形等の地形地質要因の評価
- ◆トンネル坑口

- ・坑口斜面の安定性
- ・橋梁基礎の支持力と安定性

【斜面防災】

- ◆地すべり、表層崩壊、岩盤崩壊、落石等の安定性評価
- ◆土石流危険渓流評価

【地下水利用】

- ◆建設工事に伴う周辺地域への地下水環境影響の検討等

表C-T.4-1 地形種に基づく地盤条件、地下水および自然災害の予測例¹⁾

地形種	主要な地形種 (日本の場合)	地盤条件 (約5m以深)		地下水両 深さ(m)	主要な自然災害*		地盤災害**	
		主要な構成物質	深さ		程度	特徴	程度	特徴
山 地 ・ 丘	前輪凹小起伏面	厚い風化帯	>30	裂き水	掘削	小		
	山壁・山頂・峰	厚い風化帯	>30	裂き水	掘削、崩壊	小		
	緩傾斜面	厚い風化帯	>30	裂き水	掘削、ガリー侵蝕	小	崩壊	
	緩傾斜面	厚い風化帯、岩盤	>30	裂き水	掘削、ガリー侵蝕、地すべり	中	崩壊	
	侵蝕前線下方	深い風化帯、岩盤	>30	裂き水	崩落、ガリー侵蝕、地すべり	中	崩壊	
	地すべり地	砂状物、膨脹性粘土	変動大	変動大	地すべり、崩落、ガリー侵蝕	中	崩壊、地すべり	
	崩壊地	硬砂岩、風化石	>30	裂き水	崩落、ガリー侵蝕	小	崩壊	
	丘陵	岩野、角礫	>30	>10	崩落、掘削	小	落石	
	沖積堆	角礫	>30	>10	土石流、冠水	小	土石流	
	0字谷	風化帯、岩盤	>30	>10	崩落、ガリー侵蝕	中	崩壊	
河 谷	急湍流	新鮮な各種岩石	>30	0~2	崩落、土石流、下割	中	崩壊、土石流	
	侵蝕性の谷底	新鮮な各種岩石	>30	0~2	鉄鉱石、下割、割削	小		
	堆積性の谷底	非固結な堆積物	>30	0~8	高水変動、割削	小		
	カルスト地形	石灰岩	>30	>10	崩落、陥没	大	陥没	

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルを作成するために必要な地形データは、国土地理院発行基盤地図情報の数値標高モデルの活用が考えられる。しかし、山岳地は5mメッシュの未整備地区が多く、全国公開されている10mメッシュでは、地質工学的評価に使用できるレベルの微地形判読が困難である。

必要に応じて航空レーザー測量等により詳細なDEMを作成することが望ましいが、適切な測量時期の選定やデータ容量の大型化による解析処理負荷等の課題がある。

地質情報については、都市部と比較しボーリングデータ等の既存資料は少なく、また、存在したとしても、山岳地は地質構成の変化が激しいため慎重に利用しなければならない。

一方で、山岳地ゆえに沢部等に分布する地質露頭情報が期待できる。地表地質踏査によりこれらの情報を取得し作成される地質図は、地質工学的評価の基本となる。また、都市部よりも用地面での制約が少ないため、弾性波探査や電気探査等の物理探査を合理的に活用すべきである。

表C-T.4-2 地形種に基づく建設工事上の問題事項の予測例

主要な地形種 (日本の場合)	主要な建設工事での問題となる主要事項（自然災害と欠乏を除く）				
	基礎・盛土	切り取り・開削	トンネル	ダム・池敷 ¹⁾	
前輪凹小起伏面	基礎根入	崩落	風化岩落盤	漏水	
山壁・山頂・峰	基礎根入	崩落	風化岩落盤	漏水(峠)	
山 地 ・ 丘	緩傾斜面	基礎根入、偏圧	崩落	風化岩落盤、湧水	崩壊、表土除去
	緩傾斜面	基礎根入	崩落	崩口落盤	崩壊、表土除去
	侵蝕前線下方	崩落、偏圧	崩落、地すべり	崩片、裂目崩壊	崩壊、表土除去
	地すべり地	基礎移動、崩落	地すべり、崩落	落盤、偏圧、湧水	根腐、変位、漏水
	崩壊地	基礎根入	崩落	偏圧、変位崩壊	崩壊
	丘陵	基礎移動、偏圧	崩落	落盤	根腐、崩壊、漏水
	沖積堆	基礎根入	崩落	落盤、湧水	根腐、漏水
	0字谷	基礎根入	崩落	坑口落盤	根腐
	急湍流	洗掘	湧水	湧水	堆砂
	侵蝕性の谷底	洗掘	湧水	湧水	堆砂
河 谷	堆積性の谷底	洗掘	崩壊、湧水	落盤、湧水	根腐、漏水、堆砂
	カルスト地形	陥没	陥没	湧水、落盤	空溜、漏水

参考文献

- 1) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門 第1巻 読図の基礎. 古今書院. 1998, pp.14-15.
- 2) 今村遼平. 地形工学入門 地形の見方・考え方. 鹿島出版会. 2012, p.108.

地質情報の役割

本書における急傾斜とは、急傾斜危険箇所を対象とする。急傾斜地対策施設の計画、施工に関して、斜面と保安物件の関係、施工段階における地形改変の状況等を把握することができる

【急傾斜地崩壊対策事業の区分】

急傾斜地崩壊対策事業では、図C-T.5-1に示すように急傾斜地で生じる比較的浅い表層崩壊や強風化岩の崩壊形態を地質的特徴とともに分類している。

急傾斜危険箇所における地質調査は次の目的でおこなわれる。

- ◆ 不安定土塊の分布を把握し、崩壊の規模、崩壊深を決定
- ◆ 対策施設の支持地盤の分布を把握
- ◆ 急傾斜地の対策施設施工に伴う地形改変の影響を把握
- ◆ 対策計画/設計/施工/維持管理

地質調査の成果品の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ・地質断面図、地質平面図
- ・影響範囲図（崩壊発生時の影響範囲評価として利用）
- ・支持地盤コンター図、崩壊深コンター図

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルを作成する際の課題を示す。

- ◆ 表現するエリアは狭いが、実測データによる微地形の正確な表現が必要である
- ◆ 微地形に加えて構造物（既設擁壁、石積み）等の表現が必要となる
- ◆ 対策施設の計画や施工計画の図面をひずみなく貼り付けることが必要である
- ◆ 微地形、斜面と保安物件、対策施設計画と斜面の関係が表現されている
- ◆ 地層の分布が浅いものや薄いものまでわかりやすく表示できる
- ◆ 崩壊深は斜面直角方向（法線方向）の深さで表現する必要がある
- ◆ ブロック別の崩壊深がPC上で計算、抽出できる
- ◆ 傾斜で斜面範囲を自動的に抽出できる（急斜面の上端を明確にする）
- ◆ 簡易貫入試験の調査ポイントの座標管理が難しく、正確な位置の再現に注意が必要となる
- ◆ 多くの簡易貫入試験データをスピーディーにデータ化する必要がある
- ◆ 施工開始後、地層分布や支持地盤が想定と異なっていた場合、早急な修正作業が必要となる
- ◆ 工事用道路等の付帯構造物は、地質調査が実施されない場合が多い。斜面の地質判定に役立つこともあり、より多くの地質情報収集が望まれる

	表土の崩壊	表土の崩壊
①	崩壊土塊の崩壊。表土の崩壊は崩壊土塊が人工により、大規模な崩壊に発展する可能性がある。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	表土の崩壊は、火山崩壊、火山崩壊（ロー、マシラスなど）、崩壊土、既設タイ構造物など。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
②	シラス・ロームの崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 シラス・ロームの崩壊 シラス・ロームの崩壊	シラス・ロームの崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 シラス・ロームの崩壊 シラス・ロームの崩壊
③	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
④	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
⑤	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
⑥	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
⑦	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
⑧	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊
⑨	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊	崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。崩壊土塊の崩壊。 崩壊土塊の崩壊 崩壊土塊の崩壊

図C-T.5-1 急傾斜地崩壊対策事業における崩壊分類の例¹⁾

参考文献

- 1) 全国地すべりけがれ崩れ対策協議会，“けがれ崩れ対策の手引き～急傾斜地崩壊対策事業の実務”。1999, p.72.

事例C-T.5-1) 急傾斜地危険箇所の3次元地質・地盤モデル作成事例 (1)

概要

急傾斜地崩壊防止施設設計業務に伴い、通常の委託業務にて取得する平板測量データ、地質調査データを用いて対象斜面の3次元地質・地盤モデルを作成した。

3次元地質・地盤モデル化対象斜面

対象者面の長さは、約100m×100m 高さは約80mである。斜面下部は地形改変され、構造物（石積）が施工されている。斜面中部～上部は急斜面で、斜面中に段差、石積、露頭が分布する。狭い範囲の中で地形が細かく変化している

利用データ

当初は3次元地質・地盤モデル化を意識していなかったため、通常業務において取得した下記のデータを使用した。

- ・測量図面（平板測量、横断測量）
- ・簡易貫入試験 10測線 43箇所

利用アプリケーションと使用PC

- ・五大開発 MakeJiban
- ・Windows7Intel(R)Core (TM)i7-4790 CPU 3.60GHz 実装メモリ 16.0GB 64BitOS

モデル化のフロー

- ①3次元地質・地盤モデル化の範囲決定
↓
- ②平面図データの3次元化
平面図コンターに高さを与える
ドローネー分割にて面作成
↓
- ③簡易貫入試験データの入力
試験実施地点のチェック
座標、高さデータの読み取り
試験結果のXMLデータ作成（地層区分）
↓
- ④地層境界深度データによる境界面の作成
各試験ポイントを結線
↓
- ⑤測量、地表踏査における露頭の平面境界作成
測線がない部分の平面境界を指定
露頭の分布位置確認
↓
- ⑥表現方法の決定
踏査結果の貼り付け、測線断面図の作成
境界面の表示等



写真1 斜面全景と測線位置

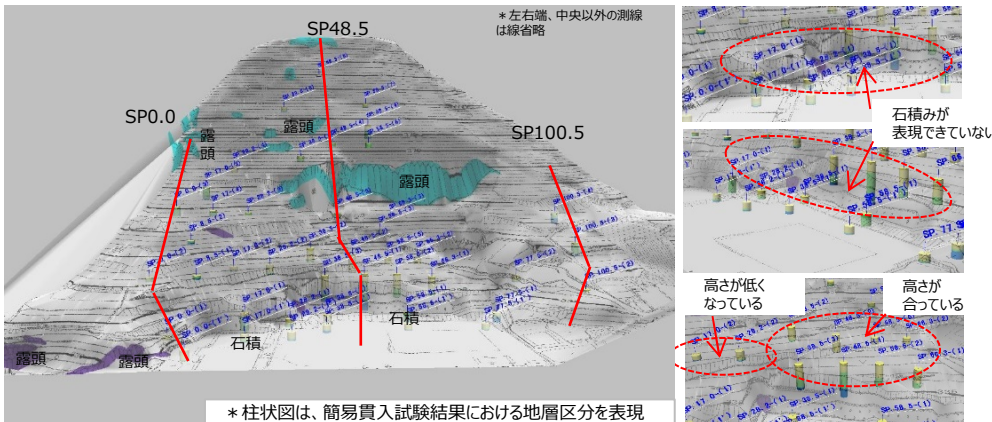


図1 3次元モデル作成状況

* 柱状図は、簡易貫入試験結果における地層区分を表現

事例C-T.5-1) 急傾斜地危険箇所の3次元地質・地盤モデル作成事例(2)

苦労した点、問題点

(1) 地形の3次元化

等高線を利用した場合、段差地形や小さなり面、石積み構造物等、微小な部分のデータを作ることが難しい。作成事例では等高線データのみを利用している。形状を整えるために、高さを持つ補助線をこまめに配置してみたが、それでも、細かな地形を正確に表現することはできなかった。

(2) 簡易貫入試験のデータ化

入力データとしてXMLデータを柱状図作成ソフトで作成したが、Nc値(10cm毎)のデータが30cm相当に換算されてしまうため、グラフのデータが作成できなかった。

試験結果を配置すると、作成した地形データと、試験箇所の高さに少し違いが出ることから、突出やへこみが出る。

(3) 表現方法

斜面が急勾配であるため、モデル化した地形に平面図ラスターデータを貼り付けると、やはりひずみが生じる。

急傾斜地業務の場合、測線を最急勾配線とするため、折れ点が出るケースも多々あり、実測断面とモデルから作成した地層推定断面に少し違いが生じる。

地層が薄い部分は、表現しきれない。構造物は、別途オブジェクト作成により貼り付けなければ表現が難しい。

まとめ

急傾斜地の3次元地質・地盤モデルを作成する場合、取り扱う地形や地層のスケールが小さい(cm単位)ものとなる。よって、3次元地質・地盤モデル化を前提としたデータ収集計画を立て、通常業務+αのかなり細かなデータ収集を行う必要がある。

調査測線間の狭い範囲でも地形、地層の変化が複雑であり、測線間の補完が非常に困難な状態になる。地形が詳細にモデル化できなければ、地質も反映できず、設計、施工への具体的な利用は難しい。そのためにはデータ収集のほかに技術者の熟練やアプリケーション特有のちょっとしたコツのようなもの(こうすれば地形が正確に表現できる等)を知っておく、加えて構造物(家屋や既設対策施設)のオブジェクト作成までできるようになる必要がある。

一方、ある程度ラフな状態の3次元地質・地盤モデルでも大まかな地層分布の傾向を把握し、地質状況の説明や地質上の問題点、追加調査の提案に利用することは十分に可能である。設計に重要な崩壊深の設定や施工時の利活用については、より精度の高い地盤モデルの作成が必要である。

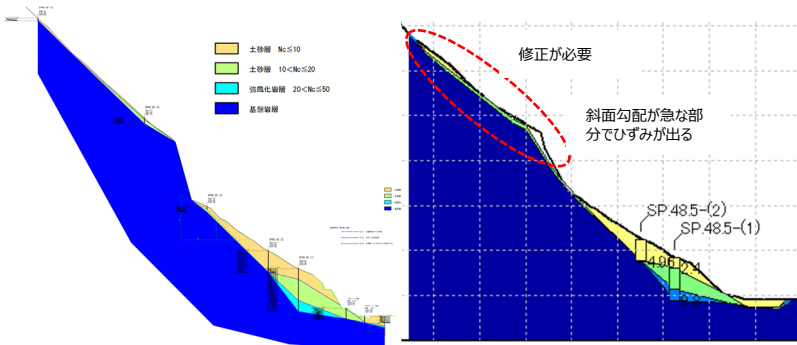


図2 個別横断面図

- 左 SP48.5測線
実測横断面図より作成
(最急勾配線の影響で平面上は折れている)
- 右 SP48.5測線
3次元地質・地盤モデルより48.5(1)と(2)
方向に直線で断面図を作成

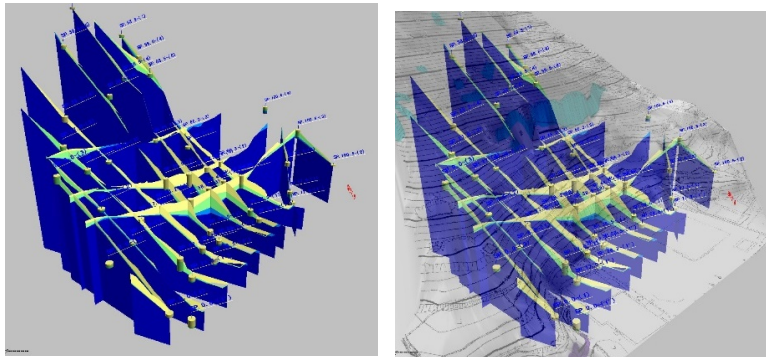


図3 縦横断面図

- 左 地層分布を縦横断面線で表現
- 右 左図に地形を追加(透過)

細かい部分まで表現できていないが、斜面中央下部付近の不安定土砂層の分布状況がよく把握できる。
地盤状況の説明用として効果的に利用できる。

3D
Geological
Analysis
Technology
Consortium

【地形地質事象毎のモデル化の留意点】

C-G 地質別

※全ての事象を網羅するものではありません

[C-G.1 軟弱地盤](#)

[C-G.2 人工地盤](#)

[C-G.3 沖積層](#)

[C-G.4 活断層](#)

[C-G.5 付加体](#)

[C-G.6 地すべり](#)

[C-G.7 表層崩壊](#)

[C-G.8 岩盤崩壊](#)

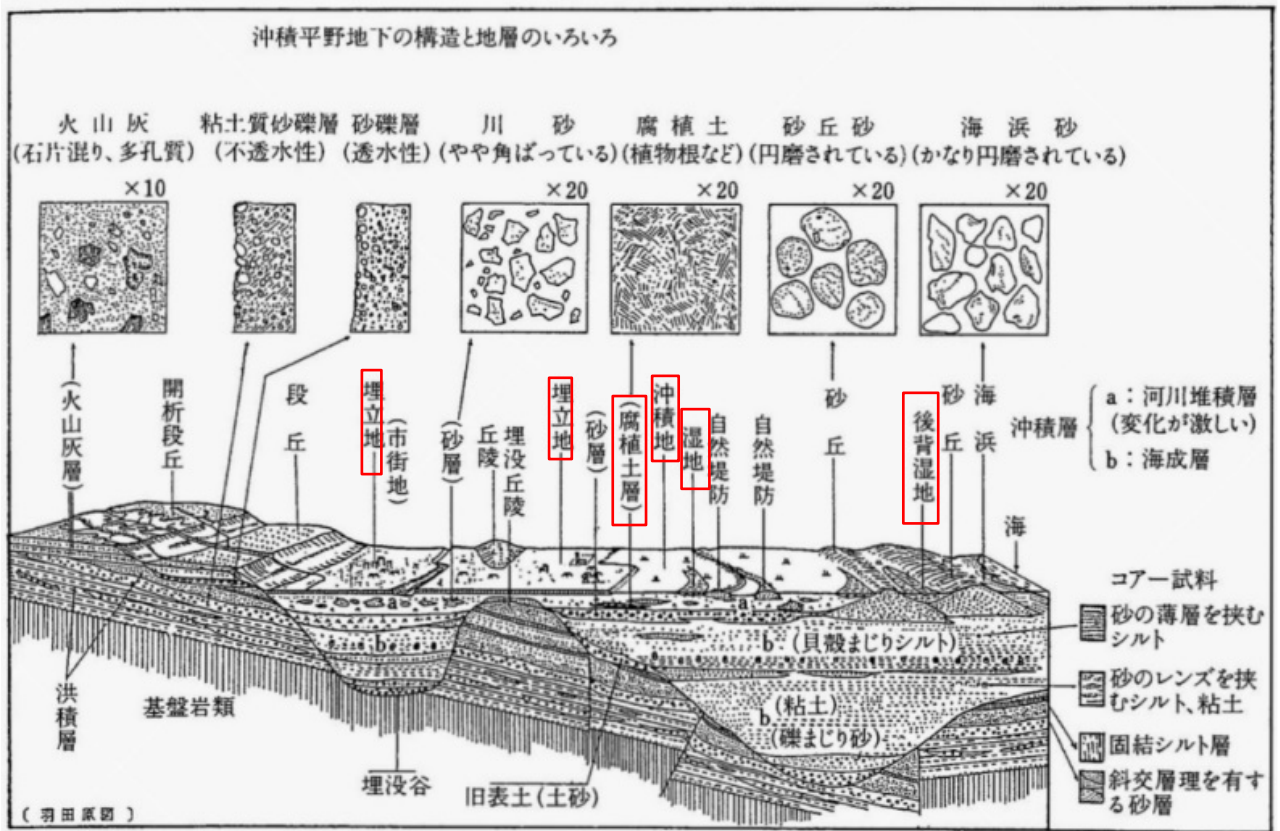
C-G.1 軟弱地盤

地質情報の役割

軟弱地盤とは建造物の基礎地盤として十分な地耐力を有しない地盤で、一般に、軟らかい粘土、シルト、有機質土、あるいは緩い砂質土等の土層で構成される地盤をいう。主として沖積平野、沼沢地、山間の谷部等に堆積した沖積地に多く存在する。浚渫粘性土による埋立地等人工地盤に多い。一般的に、軟弱地盤と呼ばれる地盤では“長期圧密沈下”、“支持力不足”、“液状化”が問題となることが多い。

このような軟弱地盤上に建造物を施工する場合には、地盤の支持力、変形、土圧、透水性、液状化等が問題となり、それらに対応した軟弱地盤対策が必要となる。軟弱地盤か否かは目的に応じた相対的な評価となるため、目的によって求められる土性や地盤構造評価が異なる。

図C-G.1-1の堆積低地模式図に軟弱地盤と定義される地形区分を示す。以降に地形区分の特徴を挙げる。



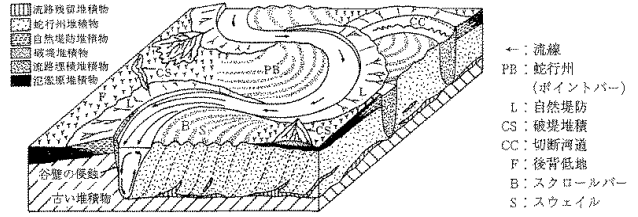
図C-G.1-1 堆積低地の模式図¹⁾

蛇行湾曲部

河川の蛇行に伴い、複雑な地盤構造を形成する。自然堤防の形成とその破堤を繰り返し、周辺に軟弱地盤を形成する。

【特徴】

- ① 後背低地(湿地)には軟弱なシルト、粘土、泥炭が分布する
- ② 蛇行切断によってできた三日月湖、牛角湖にはシルトや粘土、泥炭で埋められ、軟弱地盤を形成する



図C-G.1-2 蛇行湾曲部の模式図¹⁾

自然堤防と後背低地

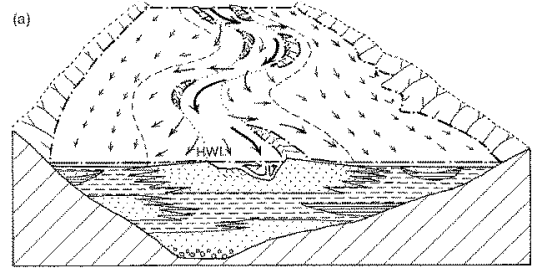
自然堤防と後背低地は河川の横断方向に並行し、成因的にも一対の河成単式堆積地形である。

【特徴：自然堤防】

- ① 横断幅は数十m～1km内外におよぶ
- ② 構成物質は、自然堤防を形成した河川の河床堆積物とほぼ同じかやや細粒である
- ③ 自然堤防下には指交関係となる砂泥互層部が存在する可能性がある

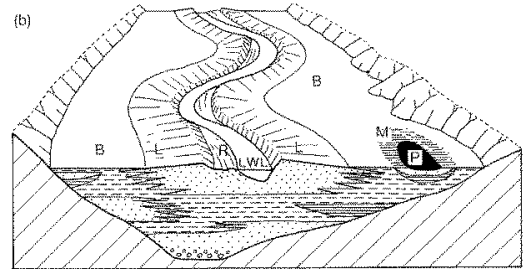
【特徴：後背低地】

- ④ 浮流物質(シルト、粘土)を含む洪水流が洪水のために薄く広がるため、極めて低平な堆積低地となり、排水ならびに乾燥が遅い
- ⑤ 泥の堆積によって沼沢地、湿地さらには泥炭地となり、軟弱地盤を形成する



R：河川敷，L：自然堤防，B：後背低地，M：後背湿地，P：後背沼沢地・湖沼

(a)洪水時における氾濫水の流れ



(b)低水時にみられる地形

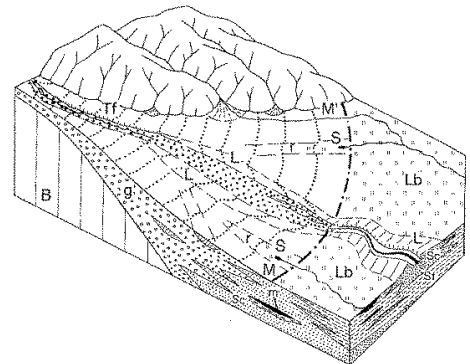
図C-G.1-3 自然堤防と後背低地の模式図¹⁾

扇状地

扇状地とは、山麓の谷口を頂点として下流の低地に、扇形に広がり低下する半円形ないしイチョウ葉状の平面形をもつ凹形尾根型の極緩斜面であり、河川によって掃流運搬された主として礫の堆積によって形成された河成複式堆積低地である。

【特徴】

- ① 扇端線付近より下流には細粒砂や泥層が分布し、軟弱地盤を形成する
- ② 流れの方向に対しても指交関係となる地層境界が形成される可能性がある
- ③ 地下水は選択的に流れることが多く、水みちの把握が難しい



Tr：扇頂溝，L：現成の自然堤防，M-M'：扇端線，S：扇端湧泉，r：流路跡地，Lb：後背低地，B：基盤岩石，g：礫層，Sc：粗粒砂，Sf：細粒砂・泥層，m：泥層

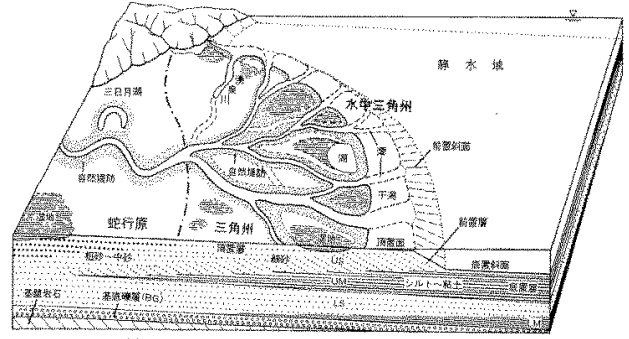
図C-G.1-4 扇状地(中型)の模式図¹⁾

三角州

河成堆積低地の一種であり、静水域(海または湖)に河川の流送した細粒物質の堆積によって形成された極めて平坦な低湿地である。分岐流路、感潮河川、細粒砂質の低い自然堤防、泥質の後背低地、後背湿地および後背沼沢地で構成されている。

【特徴】

- ① 下位より基底礫層、下部砂層、シルトや粘土からなる低置層、上部砂層という構成となる
- ② 三角州には泥質な湿地からなる軟弱地盤が形成される



US：上部砂層，UM：上部泥層，LS：下部砂層，LM：下部泥層。

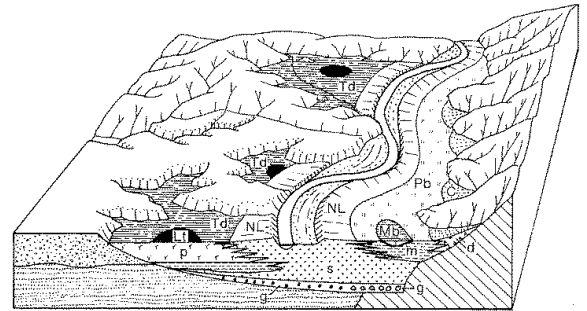
図C-G.1-5 三角州の模式図¹⁾

支谷閉塞低地

谷底堆積低地の一種であるが、本流の堆積物によって閉塞された支谷が短期的ないし長期的に凹地になり、そこが湖沼となり、さらに支流および本流からの細粒物質が堆積して平坦な低湿地となった河成複式堆積低地である。

【特徴】

- ① シルトや粘土、表層は泥炭層が比較的厚く堆積する
- ② 本流と支流の堆積速度の差異が大きい組み合わせの場合ほど顕著に発達する
- ③ 本流との境界部では指交関係になる可能性がある



NL：自然堤防，Pb：後背低地，Mb：後背湿地，Td：支谷閉塞低地，Lt：支谷閉塞湖沼，c：沖積錐，g：旧河床礫層，s：砂礫層，m：泥層，p：泥炭層，d：土石流堆積物（角礫層）。

図C-G.1-6 支谷閉塞低地の模式図¹⁾

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

軟弱地盤に分類される各地形区分において、表C-G.1-1に地質モデルを構築するための留意すべき事項を示す。これに合わせて、次のような点についても留意が必要である。

- ◆ 礫、砂、泥あるいは泥炭の単層のみで構成されることもある
- ◆ 表層とは異なった堆積物あるいは種々の粒径をもつ単層の互層で構成されることも多い
- ◆ 非固結ではほぼ水平に堆積している
- ◆ 単層の厚さ、岩相(粒径と成層構造)および単層の岩体としての形状をはじめ、堆積物全体の厚さ(総層厚)も水平方向に著しく変化する
- ◆ 指交関係の処理

表C-G.1-1 軟弱地盤の区分と留意すべき事項²⁾

区 分	問題となる現象	地質モデルを構築するために必要な項目	事 例
蛇行湾曲部	液状化(砂部),圧密沈下(後背湿地)	旧河道部,粘性土分布予測	阿賀野川など
自然堤防	液状化(堤防下の砂泥互層の把握)	詳細なボーリング調査(コア試料確認等)	
後背低地(湿地)	圧密沈下	粘性土層厚(圧密対象層の層厚確認)	
扇状地	圧密沈下(扇端部下流の後背低地)	粘性土層厚(圧密対象層の層厚確認)	酒匂川,木曽川など
三角州	液状化(砂部),圧密沈下(三角州)	粘性土分布予測,支持層の確認	富士川,安倍川,大井川河口など
支谷閉塞低地	液状化(砂部),圧密沈下(泥炭部)	泥炭(圧密対象層)層厚	霞ヶ浦,北浦,印旛沼,手賀沼

参考文献

- 1) 鈴木隆介, "建設技術者のための地形図読図入門 第2巻 低地". 古今書院. 1998, p.215, p.251, p.285-286, p.298, pp.338-339.
- 2) (社)地盤工学会. 地盤工学用語辞典. 2006, p.415.

例C-G.1-1) 内陸における軟弱地盤の3次元地質・地盤モデル

内陸における軟弱地盤には湖成低地と呼ばれ、淘汰の良い成層を示す細粒の地層（湖成堆積物）で構成されているものがある。湖成低地は、段階的に湖から高層湿原に発達していく（図1）。湖沼の地形場と湖岸の地形種、特に湿地や湿原の発達状態から、表1に示すような分類を考慮する必要がある。

3次元モデルを構築するためには、土層は基本的に水平に成層する構造を持つが、すり鉢状の基底形状になり得るか、層相変化がどのようにになっているかを、地質調査データを吟味して検討する必要がある。

地下水水位の設定については、ほぼ地表面付近に分布する傾向であるため、比較的容易であろう。3次元地質・地盤モデルの理想形は右図のような構造を踏襲しつつ、詳細な構造を表現することが望ましい。

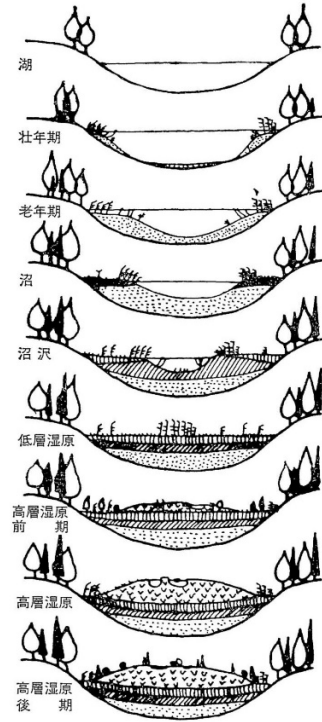


図1 湖沼から湿原への変化¹⁾

表1 湖沼、湖沼起源の湿地等の分類と一般的定義²⁾

分類名称	一般的定義
湖(lake)	深度が大きく、湖心部に沈水植物が生育していない。夏季に水温成層が形成される。
湖沼	
沼(slough; lagg)	湖より浅く、夏季にも水温成層が生じない。周囲に湿地、湿原、泥炭地が発達する。
池(pond)	径約 100 m 以下の小さな湖沼をいう。
沼	
潟(lagoon)	海の一部が海岸州やサンゴ礁などによって外海から分離した湖沼であり、海水が狭い水路を経て直接に、あるいは海岸州の地下を浸透して進入し、汽水湖になっている。
沼	
沼沢地または沼沢(swamp)	排水不良または不透水層の存在のために、常に浅い水面に覆われ、ガマ、マコモ、ヨシ、ショウブや大型のスゲ類などの抽水植物がほぼ一面に繁茂し、ハンノキやヤチダモが周囲に湿地林をつくっている湿地である。湿地や低層湿原とほぼ同義であるが、湿地より水面の占める部分が広い土地である。
沼地・湿地	
塩性沼沢(salt marsh)	海岸の河口部、干潟や潟湖などの潮間帯に生じる塩分濃度の高い沼沢で、アツケシソウ、ハママツナなどの耐塩性植物群落がある。熱帯・亜熱帯で泥の堆積した塩性湿地にはマングロープ林が発達し、マングロープ林塩性湿地ともよばれる。淡水沼沢と塩水沼沢の中間的なものを汽水沼沢という。
湿地	
湿地(marsh; swamp)	排水不良地で、常に湛水するか、洪水時に湛水しやすい土地である。水面の占める面積は沼沢地より小さい。平坦地ばかりでなく、緩斜面にも発達する。
湿原	
湿原(moor)	植生にほぼ全面的に覆われた湿地であり、湿った草原であり、地形種ではなく、生態学的分類用語である。地下水面から湿原の地表面までの高さによって、高層湿原、中間湿原および低層湿原に大別される。
泥炭地(peatland; fen; mire, moss; bog)	泥炭の堆積している土地をいう。地下水面から泥炭層の表面(地表面)までの高さによって、高位泥炭地、中間泥炭地および低位泥炭地に大別される。湖成低地起源のものが多く、斜面にも存在する。

参考文献

1) 鈴木隆介.“建設技術者のための地形図読図入門 第2巻 低地”. 古今書院. 1998, p.373, pp.511-515.

事例C-G.1-1) 内陸における軟弱地盤の圧密沈下解析

山形県南陽市赤湯地区に分布する“白竜湖軟弱地盤”において2次元圧密沈下解析を実施した例を挙げ、3次元地質・地盤モデルを構築する場合の課題を検討する。

【2次元モデルでの解析事例】

◆地質条件および施工計画

例に挙げた軟弱地盤では、図1に示すように非常に複雑な砂泥互層状をなしており、有機質土や砂層、粘性土層が複雑に分布している。深度100mに達しても凝灰岩からなる基盤に届いていない極めてまれな地盤条件であり、盛土を施工した際の沈下量も非常に大きい。この地盤上には高規格幹線道路が計画されており、長期的な圧密沈下対策が必要となる。深度約20mまで分布する完新統の圧密沈下を促進するために、真空圧密工法等が施工されている。

◆2次元圧密沈下解析のためのモデル化

圧密促進工法（ドレーン+真空圧密）の効果を検討するため、地盤のモデル化したものを図2に示す。深度50mまでで23区分という非常に多い対象土層をモデル化している。

【3次元地質・地盤モデル化の課題】

低層湿原の例でモデル化をする際に問題となる項目は次のように考えられる。

- ①有機質土層や粘性土層の境界付近では土質性状が非常に不均一
- ②更新統の二次圧密形状評価
- ③沈下量が大きく人工土の正確な形状把握
- ④圧密では排水層の分布状況により圧密時間に大きく影響するため、多数の砂層を簡略化できない
- ⑤表層付近の有機質土が厚く堆積しているため、リバウンドも懸念される
- ⑥地層の数が多く、データ・モデルサイズが膨大になる

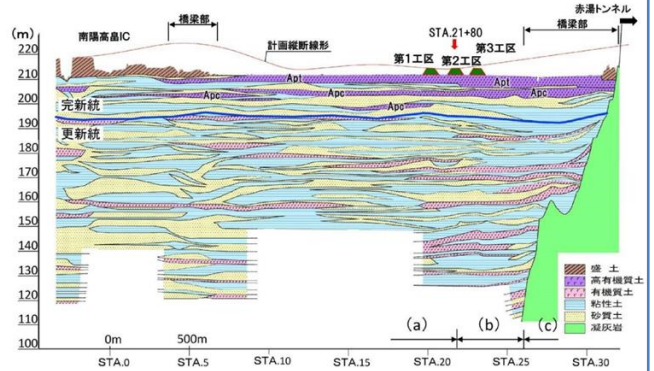


図1 複雑な互層構造の例¹⁾

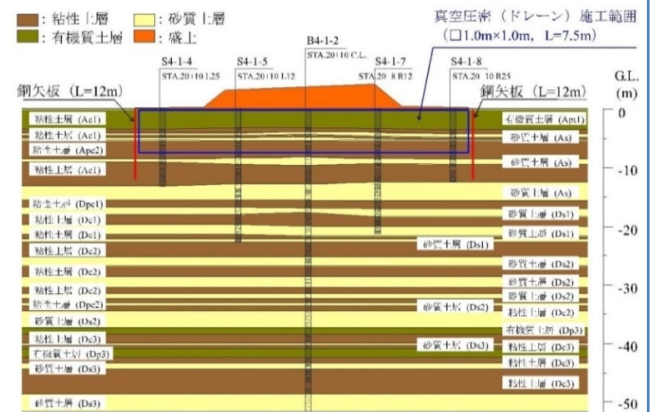


図2 複雑な互層構造の例¹⁾

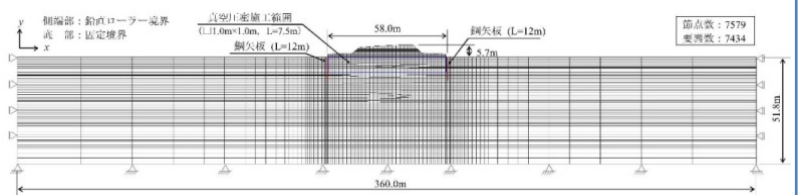


図3 2次元圧密沈下解析のモデル化¹⁾

参考文献

- 1) 平田ほか. “真空圧密工法を施工した超軟弱地盤の長期沈下予測 - 白竜湖地区盛土のFEM解析 -”, 地盤工学ジャーナル, 2015, Vol.10, No.1, pp.97-103.

事例C-G.1-2) 3次元モデルに基づく液状化危険度評価(1)

本事例は、3次元グリッドモデル手法¹⁾を用いて作成された、和田ほか²⁾のモデルに基づき、中川低地南部において表層地盤の液状化危険度を評価したものである。3次元グリッドモデルは、土質区分の他にN値等の物性値を想定できる点で、有効な手法である。

液状化評価には粒度分布が必須であるが、本事例では、細粒分含有率については、「平成24・25年度埼玉県地震被害想定調査報告書」を参考にN値との関係式として設定した。

対象地域

モデル化の対象地域は、埼玉県東南部の川口市、草加市、越谷市、吉川市、八潮市、三郷市にまたがる東西方向約12km 南北方向約11kmの範囲である(図1)。

この地域は、文献³⁾によると、南側の東京低地から中川埋没谷(最深部では標高-60m程度)が続いており、地域内で北西方向に綾瀬川埋没谷が現われる等、沖積層基底深度が複雑に変化している。

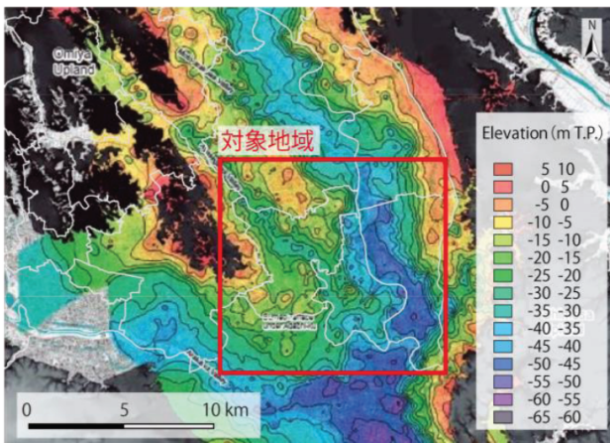


図1 PL法による液状化判定

3次元グリッドモデルの作成

3次元グリッドモデルは、木村ほか¹⁾の手法に従い、次の(1)~(3)の手順で構築した。

i) ボーリングデータの整理

モデルの元データとして、位置情報や品質を確認済みのボーリングデータを使用した。その内訳は、埼玉県環境科学国際センター、埼玉県危機管理防災部、さいたま市総務局危機管理部の3機関から貸与されたデータならびに、国土情報検索サイト「KuniJiban」からダウンロードしたデータの合計1932本である。

ii) 地層境界面モデルの作成

3次元グリッドモデルの制約条件とするために、沖積層基底の面モデルを作成した。ボーリングデータの層序は、木村ほか(2013)³⁾の沖積層基底面モデルならびに既往研究⁴⁾を参考に、層相とN値から同定した。

作業には(国)産業技術総合研究所が無償公開している「ボーリング柱状図解析システムver.2.1」を使用した。ボーリングデータの分布密度に偏りがあるため、層序読み取りデータと木村ほか(2013)³⁾の沖積層基底面モデルデータの両者をコントロールポイントとして面モデルを作成した。

iii) 3次元グリッドモデルの作成

単位グリッドのサイズは、水平方向100m 鉛直方向1mである。上記(1)で算出した面モデルで区切られた沖積層と更新統下総層群のそれぞれについて、標高1m 毎の水平面内で、逆距離荷重法により土質の最頻度値とそれに対応するN値の平均値を算出した。

グリッドノードからのデータ最大参照範囲は、ボーリングデータの分布と沖積層の水平方向の層相変化を勘案し200mとした。また、距離による重み付け係数は2とした。作成された2つのグリッドモデルを統合した後、空きグリッドについて水平方向に隣接するグリッドの値を基に補間処理を行った。

液状化危険度分布図

作成された地盤モデルの各グリッドにおいて、細粒分含有率については、「平成24・25年度埼玉県地震被害想定調査報告書」を参考にN値との関係式として設定した。

計算条件として、外力はマグニチュード8.0、地表面最大加速度200gal、指針は建設基礎構造設計指針⁵⁾を用いた。下図に液状化検討結果を示す。図中には、比較のために関東大震災での液状化発生地点を示している。

図2より関東大震災での液状化発生地点が概ね再現できていることがわかる。ボーリングデータが存在しない箇所は、周辺のボーリングデータから推定した場所であるが、推定した場所でも液状化発生の再現ができていることから、ボーリングデータが存在しない箇所でもある程度の予測が可能であることがわかる。

事例C-G.1-2) 3次元モデルに基づく液状化危険度評価 (2)

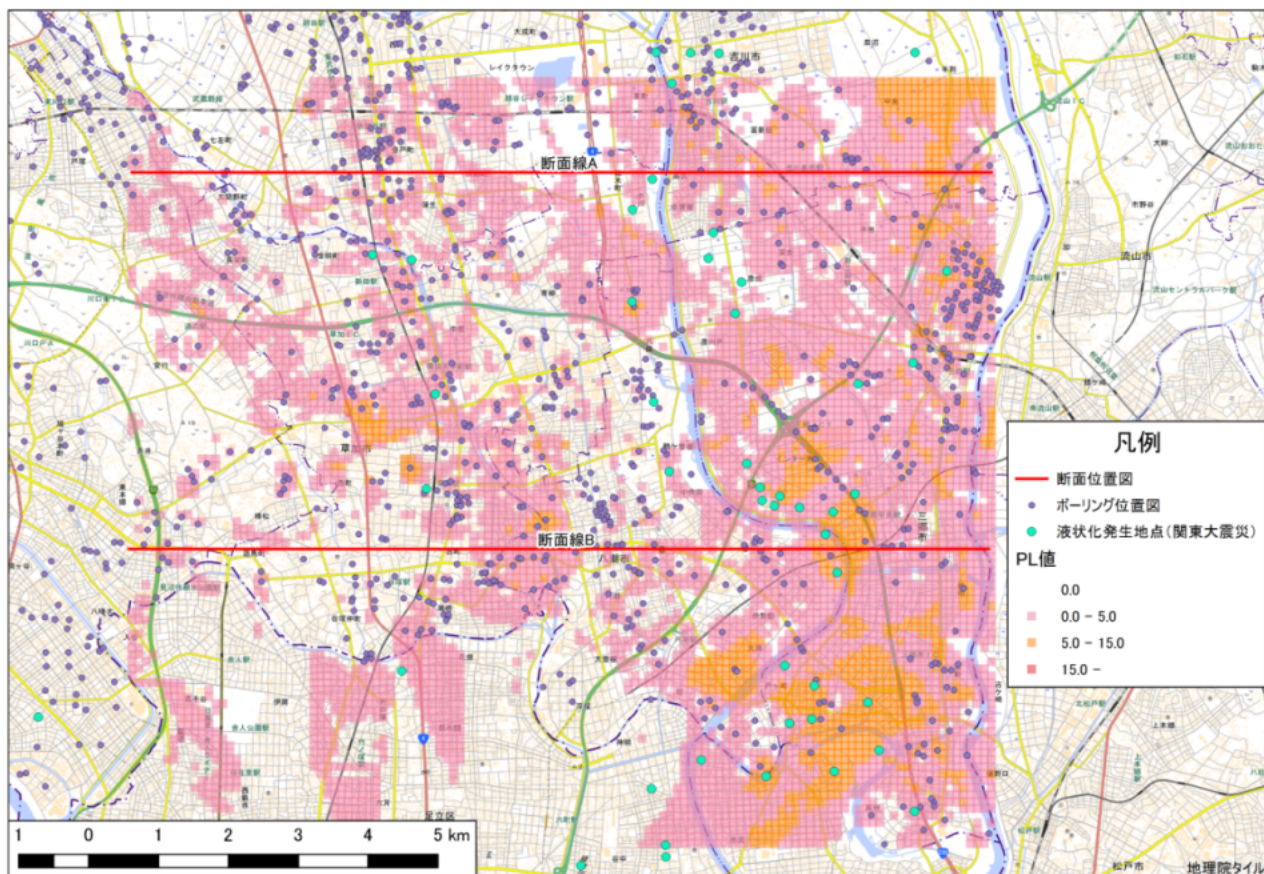


図2 PL値マップ(建築指針 M=8.0 200gal)

参考文献

- 1) 木村克己・花島祐樹・山本浩司・石原与四郎・王寺秀介・和田理絵・大井昌弘. ポーリングデータを用いた都市地盤モデルを対象とした3次元グリッドモデル構築手法とその適応性. 第51 回地盤工学研究発表会, 2016.
- 2) 和田理絵・王寺秀介・木村克己・大井昌弘・花島祐樹. 3次元グリッドモデル構築手法の適用事例—中川低地南部—. 第51 回地盤工学研究発表会, 2016.
- 3) 木村克己・花島祐樹・石原与四郎・西山昭一. 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの3次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例. 地質学雑誌, 2013, vol.119, pp.537-553.
- 4) 田辺晋・中西利典・木村克己・八戸昭一・中山俊雄. 東京低地北部から中川低地にかけての沖積層の基盤地形. 地質調査研究報告, 2008, Vol.59, No.11/12, pp.497-508.
- 5) 日本建築学会編. 「建築基礎構造設計指針2001」. 日本建築学会, 2001.

地質情報の役割

人工地盤は次のようなものが挙げられる。

①堤防・堤防周辺

近年、局地的な集中豪雨や大規模地震による堤防被害が発生し、河川堤防整備の重要性が高まっている。既存堤防ならびに基礎地盤の性状を把握し、浸透危険箇所の有無を判断し、補強・改修をしていくことが防災上重要である。

②切土・盛土造成地

谷や沢を埋めた造成地や傾斜地盤上に腹付けした造成地において、盛土と地山との境界面や盛土内部を滑り面とする地滑りや崖崩れ・土砂流出等による被害が発生している。盛土の土質性状把握とともに切土・盛土の境界を把握することも重用である（図C-G.2-1）。

③埋立地

埋立地の土質や強度は、埋立材料の種類や工事プロセスにより予測が難しく慎重な調査が必要である。液状化や地盤沈下のリスクが高く、その対策として地盤改良がおこなわれていることがある。

人工地盤における地質・地盤リスク

人工地盤における地質・地盤リスクを評価するために必要な情報は次のようになる。

①堤防・堤防周辺

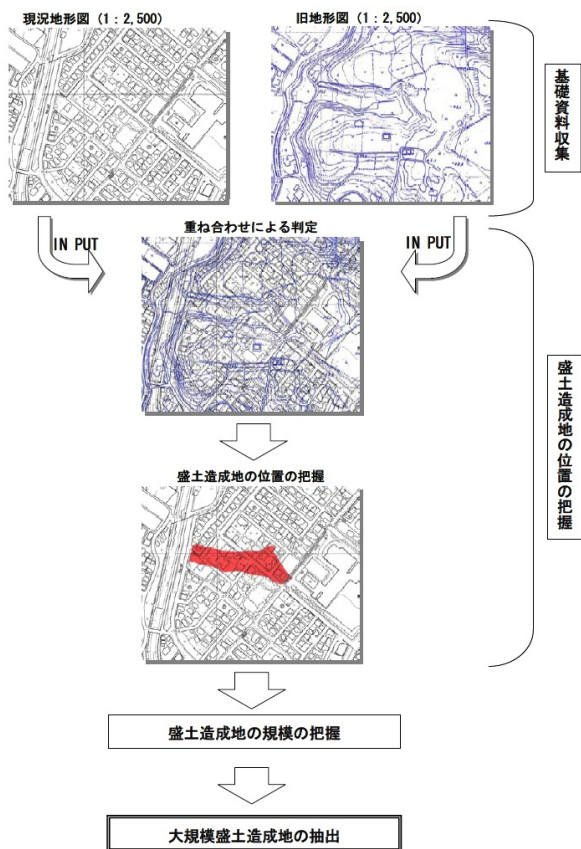
- ◆堤体および基礎地盤の土質特性
- ◆地下水位面
- ◆局所異常箇所
- ◆構造物(樋管・樋門等)配置 等

②切土・盛土造成地

- ◆切土・盛土範囲
- ◆人工地盤および基礎地盤の土質特性
- ◆地下水位面
- ◆支持層の深度・連続性 等

③埋立地

- ◆埋立土および基礎地盤の土質特性
- ◆地下水位
- ◆地盤改良体の範囲および強度特性 等



図C-G.2-1 大規模盛土造成地の抽出例¹⁾

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルを利用し人工地盤を表現する場合、次のような状況を示すことができることが望ましい。

①堤防・堤防周辺モデル

- ◆築堤・改修、腹付け盛土等の履歴表現
- ◆構造物周辺の空洞や緩みゾーンの表現
- ◆堤体の異物の有無、透水層、液状化層の表現
- ◆ボーリング以外の物理探査結果等の表現

②切土・盛土造成地モデル

- ◆人工変更前の地形取得の精度（切土・盛土範囲）

③埋立地モデル

- ◆地盤改良体の分布や地盤強度の表現
- ◆地下水位
- ◆揺れやすさ、液状化評価結果

参考文献

1) 国土交通省. "大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説". 2008, p.16.

地質情報の役割

沖積層は、主に以下に示す埋没地形の上位に分布する堆積層を言い、地質年代としては第四紀更新世後期～完新世における未固結の粘性土や砂質土および基底等を構成する砂礫層が堆積する地層を指す。

【埋没もしくは分布する主な地形面】

- ①埋没谷
- ②埋没海食台
- ③埋没段丘面
- ④砂洲・自然堤防・後背湿地

沖積層の分布する地形面は一般に平坦であり、国民の生活の基盤として多くの人々がその上で暮らしていることから、ボーリング等の調査数は多い。主な都市部においては、既存地盤資料から、埋没している地形面がおおむね把握されており、ボーリング等の情報の入手も比較的しやすい状況である。しかしながら、近年の建築・土木での施工精度の高まりはこれらの地質情報に依存される部分も多くあり、その調査精度の良し悪しで施工品質が左右される等、地質情報の精度には高い要求目標が設定されている。

沖積層における地質情報の役割は以下のものが挙げられる。

- ◆ 支持層が出現する地層境界の把握
- ◆ 地下掘削やトンネル掘削部の地盤状況把握
- ◆ 様々な建築・土木構造物、施設の基礎地盤状況把握
- ◆ 液状化対象層の分布範囲の把握
- ◆ 沈下対象層地盤の分布範囲の把握
- ◆ 帯水層、流動性地下水の分布範囲の把握



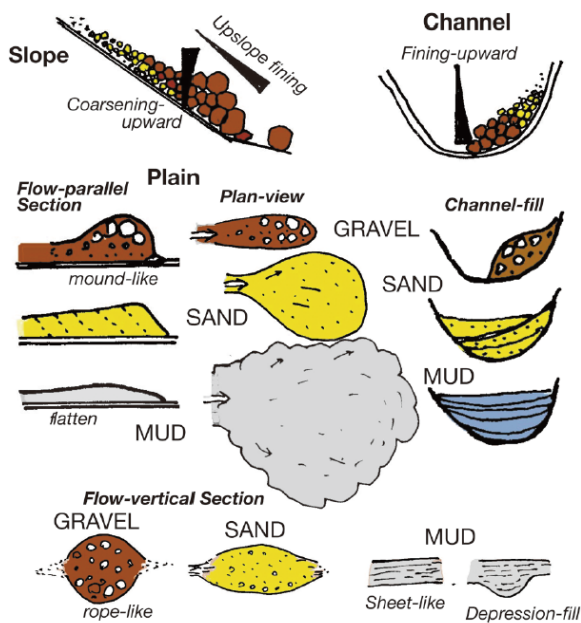
図C-G.3-1 沖積層のイメージ¹⁾

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

低地および埋没谷の形成は氷河期における海退時の海面低下によって生じた河川侵食による台地または丘陵地の開析によって形成されていることから、地形変化が著しい。また、メッシュを用いて液状化予測や地震被害予測をおこなうマイクロゾーニングに3次元地質・地盤モデルが利用されることが多い。

沖積層の3次元モデルの作成にあたっては、下記の点に留意する必要がある。

- ◆ 支持層調査においては埋没する基盤層を捉えることが重要である。情報量や精度が低い場合等は、3次元モデルの安易な適用は誤解を招く可能性がある
- ◆ 堆積環境が河川等の影響を受けている場所の地層構成は複雑で、自然堤防や後背湿地等の堆積環境の違いで地層面が異なることが多い
- ◆ 台地と違い露頭等の堆積環境が目視できる場所は、ほぼ無いに等しく、ボーリングやサウンディング等の調査方法に頼るしか地下の様子を伺うことはできない。堆積環境を把握するための詳細なコア判定が必要な場合もある
- ◆ すでに調査された個所数は非常に多いものの、地質情報の位置情報の精度や過去と現代での調査精度が異なる場合があり、N値等の物性値に違いが生じている可能性がある。地質情報その利用には十分注意する必要がある
- ◆ 軟弱地盤であるがゆえに、地盤改良が施されている場合がある。地盤改良の有無を確認する必要がある
- ◆ 広範囲における3次元地盤作成では、メッシュ等の分割の精度を十分検討する必要がある
- ◆ 既存の文献やボーリングデータの収集と正確な位置データの確保等、地質情報の収集にあたる。また、文献等から、周辺地盤の基底部の傾向を考慮しモデル化に反映する
- ◆ 基底面の開析形成過程を想定する。河川形成（河川侵食）であるか、海岸形成（波食台）もしくは、風成によるものかを根拠立てる
- ◆ 堆積物（碎屑物）の生成史や、生成の特徴も加味する
- ◆ 地層細分化は物性値や記事情報等も参考になる
- ◆ 地層の分布は土質毎の堆積の特徴を考慮する（図C-G.3-2）



図C-G.3-2 層相の違いによる単層や地層の分布形態模式図²⁾

着目点と必要な情報

3次元地質・地盤モデルを作成する際の着目点や必要な情報は次のようなものが挙げられる。

- ◆ 沖積層とその他の時代地層との適切な区分
- ◆ 沖積基底面の決定
- ◆ 沖積層の細分の視点
 - ・コーン指数、間隙水圧、N値、物理試験、力学試験
 - ・見た目（混入物他の土質の物性値から地層判断し、地層形成の特徴を踏まえる）
- ◆ ボーリング間の地層境界を補間するための想定根拠の設定
 - ・基底面地形生成史の想定、基底面地形分類の推定、層相からの堆積環境を想定

参考文献

- 1) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門 第2巻 低地. 1998, p.215.
- 2) 増田富士雄, 佐藤 智之, 伊藤 有加, 櫻井 皆生. Shazam 層序学をボーリングデータベース解析へ適用する試みー 大阪平野の表層地質研究を例にー. 地学雑誌. 2013, 122, 5号, pp.892-904.

事例C-G.3-1) 埋没地形（沖積層底面）モデルの構築

本事例では、地震防災や建築物基礎の評価において重要視されている沖積層基底面の面モデルを作成した¹⁾。

モデル構築条件

DB化されたボーリングデータを用いる。埋没地形面を考慮する。

使用ソフトウェア

GEO-CRE

考慮すべき地形・地質学的背景

沖積層基底面は、下記①～③複合した地形になると考えられている（図1）。

- ①海水準低下期に形成される段丘面
- ②最終氷期の海水準低下速度が最も速い時に形成される谷底地形
- ③縄文海進期（海水準上昇期）の潮汐や波浪による侵食地形

すなわち、モデルを構築するうえでの着目点は次のようなものが挙げられる。

- ・形成時代・営力の異なる境界面が混在する
- ・古地形面間には斜面が存在する
- ・旧河川勾配を考慮する
- ・地形面の地質や地形面上の土質構成（砂礫質）

モデル構築手順

- ①沖積層底面の全点データによるサーフェスモデル（図2）を作成し、古地形面を区分するための下図を作る
- ②古地形面に相当する柱状図の地質性状を調べ、古地形面毎に沖積層底面データをグルーピングする
- ③ボーリングデータや現地形状況を加味して古地形面分布を推定し、古地形面境界を作る
- ④古地形面毎にサーフェスモデルを作成する
- ⑤③の古地形面の範囲で④をトリミングする
- ⑥⑤の点データと①の点データを用いて全体のサーフェスモデルを作成する（図3）
- ⑦⑥のサーフェスモデルを地形・地質的な矛盾（谷筋の逆勾配等）が無いチェックし、矛盾がある場合は補填データを加えてサーフェスモデルを作成する。この作業の繰り返しでモデルを仕上げる（図4）

参考文献

- 1) 木村克己・花島祐樹・石原与四郎・西山昭一．“埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの3次元解析：東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例”，地質学雑誌，vol.119，2013，pp.537-553.

図1

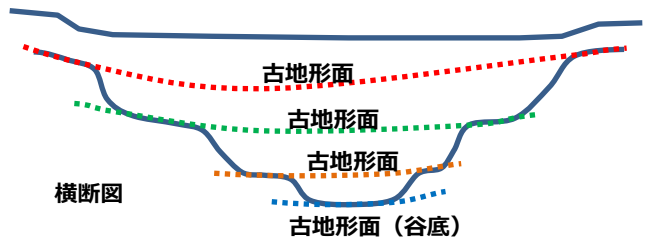


図2

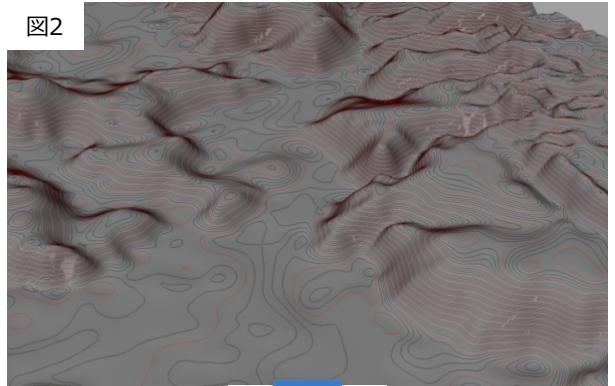


図3

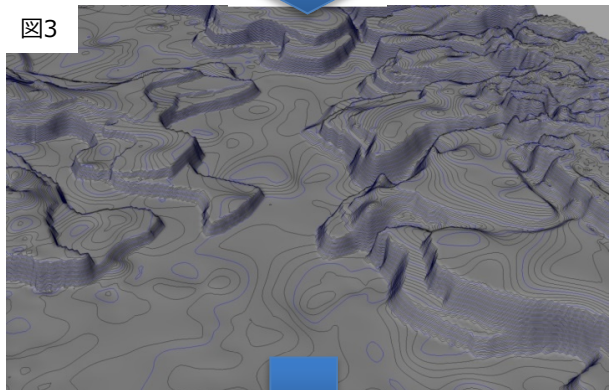
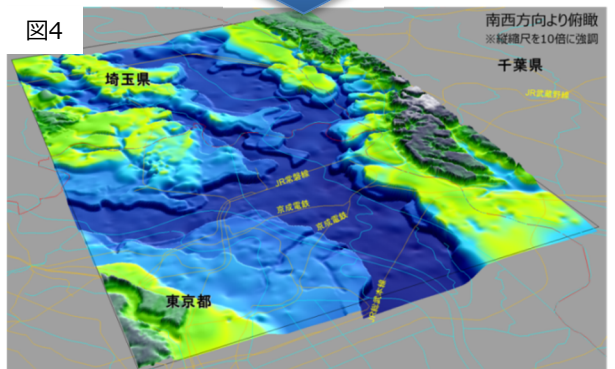


図4



C-G.4 活断層

地質情報の役割

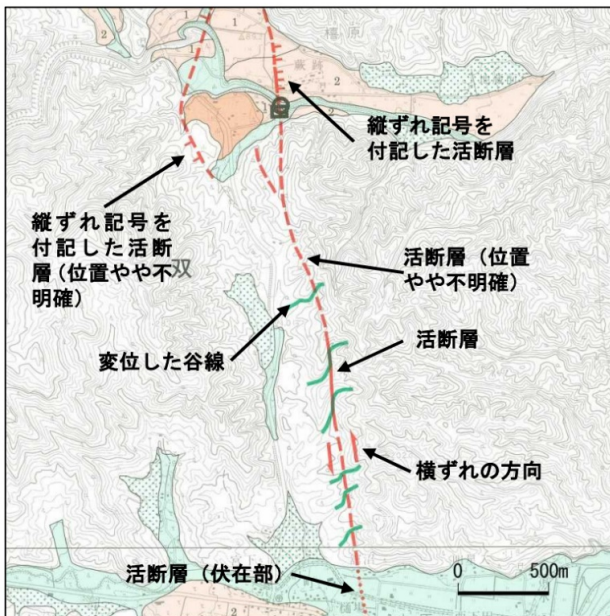
活断層調査では、断層変位地形（図C-G.4-1）やボーリングデータから断層位置を推定し、トレンチ（図C-G.4-2）で正確な位置や活動性等を評価する。

平野下に活断層が存在する場合は、基盤岩や平野を構成する沖積層に変位を与えている特徴を捉えるための調査を実施する。調査における着目点は次のようになる。

- ◆断層はどの位置を通過するか
- ◆断層面の伸長方向(走向傾斜)
- ◆断層の規模(破碎帯幅、変質帯の幅等)
- ◆断層変位はどの層準まで及んでいるか
- ◆累積変位量はどの程度か
- ◆断層の活動周期を明らかにできるか
- ◆断層は複数のセグメントから構成されるか



図C-G.4-2 活断層トレンチ調査の例²⁾



図C-G.4-1 断層変位地形の例¹⁾

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

活断層の3次元モデル構築に際し、断層変位地形と断層の位置、連続性および地質構成と断層変位の関係を検討するための次のようなデータが必要になる。

- ◆空中写真判読データ
- ◆航空レーザー測量地形判読データ
- ◆ボーリング調査データ
- ◆ジオスライサー調査データ
- ◆物理探査データ(浅層反射法地震探査データ)
- ◆トレンチ調査データ
- ◆活断層データベース等の既存資料

活断層の3次元地質・地盤モデルとして示す情報には次のようなものが考えられる。

- ◆断層面モデルや断層分布
- ◆断層を根拠付ける変位地形
- ◆断層変位を伴う地質分布や地質構造
- ◆断層の活動性、特に断層と層毎の変位関係、変位量

参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院応用地理部, “1:25,000 活断層図 (都市圏活断層図) 利用の手引 - 地震被害の軽減に向けて -” 2017.p.4.
- 2) <https://gbank.gsj.jp/activefault/question.html> (2018年2月時点) .

事例C-G.4-1) 活断層周辺の3次元地質・地盤モデル作成(1)

活断層および周辺の3次元地質・地盤モデル作成例(上町断層帯における表層地質構造の3次元地質・地盤モデルの作成)を示す。

目的

【活断層および周辺の3次元地質・地盤モデル化の目的】

- ◆活断層の分布位置の推定、絞り込み
- ◆断層の走向傾斜の推定
- ◆活断層周辺の地質構造の推定
- ◆活断層の活動性(変位量・変位速度)の推定
- ◆詳細活断層調査のための基礎資料の提供
- ◆地震応答解析のための基礎資料の提供
- ◆構造物の設計・施工のための地盤モデルの提供〔高精度モデル〕

モデル構築の留意点

- ◆活断層という社会的影響が大きい事象を扱うため、モデルの作成にはより客観性と慎重さが求められる。
- ①断層の種類と複雑性
 - ・断層には正・逆断層、右横ずれ・左横ずれ断層、縦ずれ横ずれ複合断層等多くの種類がある。
 - ・断層面の傾斜角度の違い等によって様々な形態を示す。
 - ・派生断層を伴うことがある。
 - ・衝上断層では断層に関連した褶曲が発達する場合がある。
 - ・断層面の角度や走向が変化することがある。
 - ・雁行状等、飛び飛びに断層が配列する場合がある。
 - ・未固結堆積物では明瞭な断層面が見られず、地下の断層変位が撓曲として現れる場合がある。
- ②データの質や密度
 - ・地下の断層面の抽出や高精度な断層分布位置の把握には数mオーダー間隔の群列ボーリング等、かなり高密度な調査データが必要。
 - ・高精度モデルの作成には、トレンチや露頭等から断層面や地層の変形構造等の3次元データが必要。
 - ・地盤情報データベース等の第三者データを扱う場合には、データの不均質性に留意する。
 - ・データの追加、更新が容易にできるようにしておく。

③断層変位基準面の設定

- ・変位基準面は原則として同時面(火山灰層や地表面等)とする。
- ・火山灰層等の同時面が無い場合には、埋没段丘面や埋没海底侵食面(ラビメント面)等の初生平坦面を用いる。

④空間補間処理およびモデラーの性能

- ・客観性を保つため、入力データ値の上下限界を超える空間補間をしない。
- ・衝上断層等のオーバーハング構造を表現できる。
- ・作成状況や精度を速やかに確認できる性能/機能。

モデル作成の手順

活断層の分布位置と活断層周辺の地質構造の推定を目的として作成した、上町断層帯における表層地質構造の3次元地質・地盤モデルを例として挙げる。

事例C-G.4-1) 活断層周辺の3次元地質・地盤モデル作成 (2)

i) モデルの構築方法・対象地域

- ◆ 関西圏地質情報データベース¹⁾のボーリングデータを用いる
- ◆ データベースから作成した断面図の構造解析から3次元地質・地盤モデルを構築する
- ◆ データベースのボーリング柱状図データが高密度に存在し、しかも上町断層帯の構造が発達する大阪平野中心部の上町台地周辺を対象地域とする (図1)
- ◆ できるだけ多くのデータを抽出するために、対象地域に200m間隔のメッシュで断面図作成 (データ抽出) 基準線を設定 (図1)

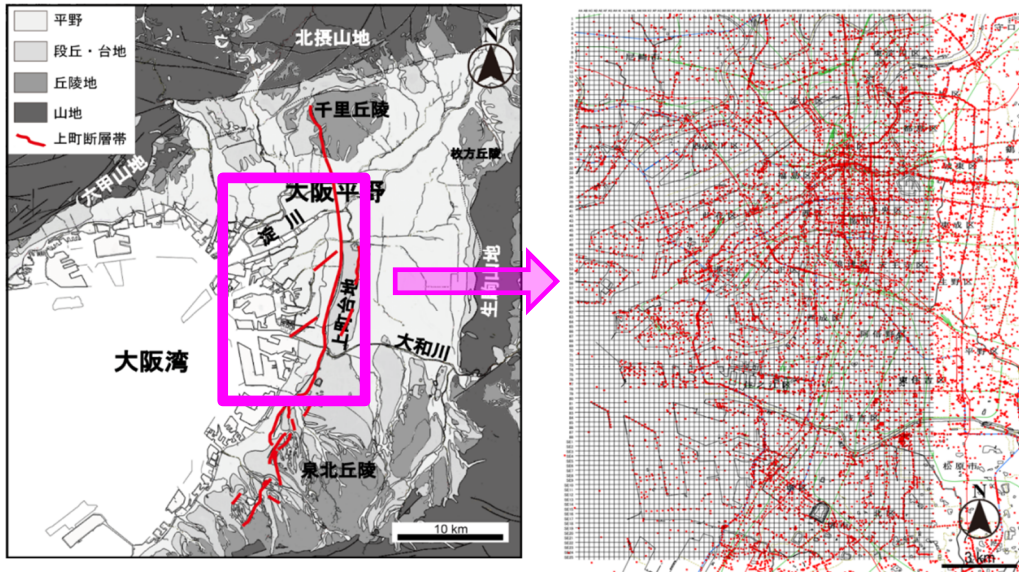


図1 対象地域と断面図作成基準線 (赤点：ボーリング地点)

ii) ボーリング柱状図列断面図の作成

- ◆ 200m間隔メッシュの基準線沿いにボーリングデータを抽出し、ボーリング柱状図列からなる断面図を作成 (図2)
- ◆ データベースの断面図作成機能を使用 (データベース上の作業はここまで)

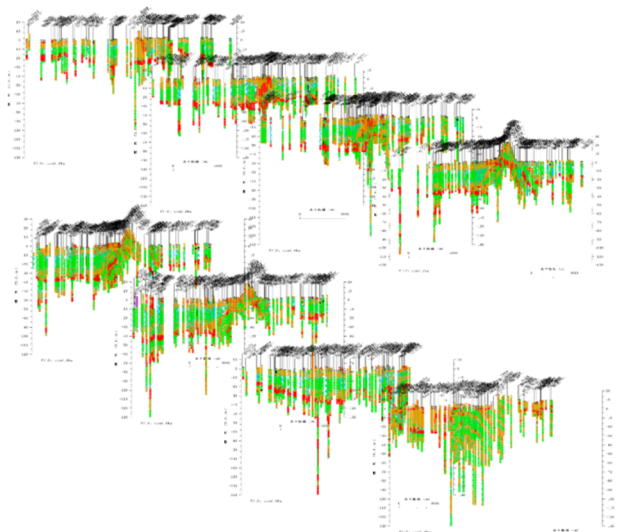


図2 ボーリング柱状図列断面図の代表例

iii) 断面図のボーリング柱状図のチェック

- ◆ 標高、座標値、土質データ入力ミス等による不適切な柱状図を削除 (図3)

事例C-G.4-1) 活断層周辺の3次元地質・地盤モデル作成 (3)

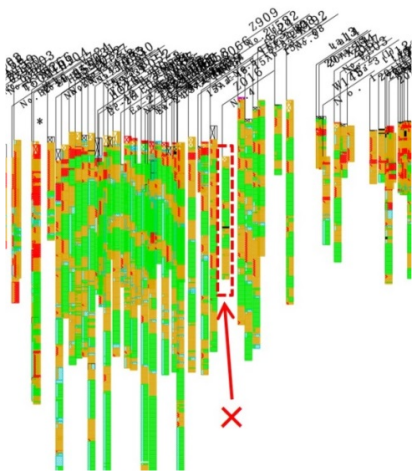


図3 不適切な柱状図を削除した例

iv) 断面図上で地質構造を解析

- ◆断面図の構造解析には、沖積層の下位に分布する大阪層群と中・上部更新統に繰り返し挟まれている海成粘土層基底面を用いる（海成粘土層には下位層準からMaナンバーが付けられている）
- ◆海成粘土層は内湾の泥底に堆積した地層で、その基底面は海進期に湾が広がったために発生した波によって形成された波浪ラビーンメント面²⁾
- ◆ラビーンメント面とは、海水準が連続して上昇しているときに海底面が侵食（外浜侵食）されることによって沖側に形成される平坦面のことで、変形していない初生のラビーンメント面は沖－陸方向の断面では沖側に緩く傾斜した直線で描くことができ、初生のラビーンメント面と構造運動によって変形した下位のラビーンメント面とを比較することによって構造運動像を容易に復元することができる²⁾
- ◆断面図上で海成粘土層基底面を対比し、対比線を描く。
- ◆海成粘土層の層準(Maナンバー)は、既往学術ボーリングや先行研究の断面図を参照して判定
- ◆対比線を描く際には、東西断面と南北断面の交点にあるボーリングで海成粘土層の層準が一致していることを確認する。層準が一致しない場合は、各断面図の海成粘土層の層準を再検討し、対比線を描き直す
- ◆海成粘土層基底面の傾斜方向が変わる部分に褶曲軸が、海成粘土層基底面の傾斜角が急変する部分や急傾斜して断面図上で不連続になっている部分に撓曲や断層が存在するものと推定

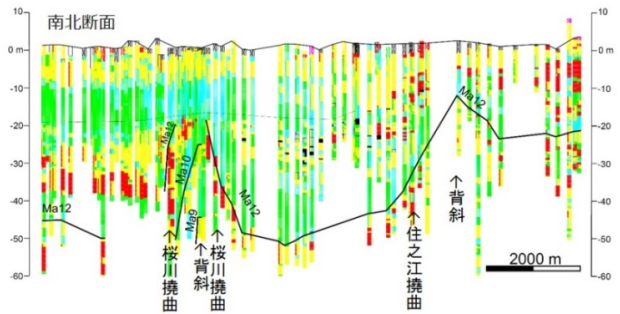
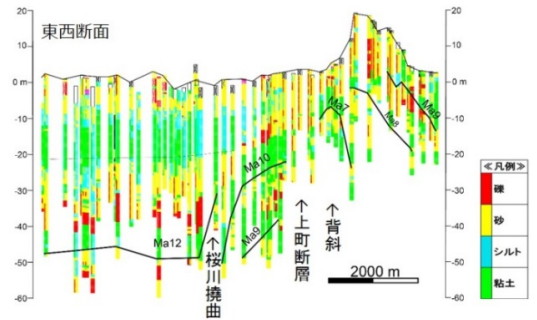


図4 断面図の解析例

v) 空間補間用データの作成

- ◆空間補間計算に用いるデータをスプレッドシートに入力
- ◆データはボーリング地点の座標（緯度・経度）と海成粘土層基底面標高（T.P.）からなる（表4）
- ◆座標はデータベースのボーリング地点情報を参照し、各海成粘土層基底面標高は断面図から直接読み取る

表1 空間補間計算に用いたデータの例

ID	X	Y	Ma10_base	Bor. ID	Sec. EW	Sec. NS	Sheet No.
1	135.510589	34.697347	-42.7	M108	30		29
2	135.511187	34.697253	-35.7	M103	30		
3	135.509075	34.692392	-35.0	T037	33		33
4	135.509164	34.692472	-34.9	HJ07	33		
5	135.509383	34.692525	-39.7	T501	33	CG	
6	135.509636	34.692078	-15.3	T095	33		
7	135.509700	34.692014	-13.5	H557	33		
8	135.506217	34.688506	-48.0	HJ27	35	CF	37
9	135.507975	34.687069	-37.3	HJ39	36	CG	38
10	135.507350	34.684661	-24.7	HO07	37	CF	39
11	135.508211	34.683993	-23.1	HO13	37	CG	
12	135.507828	34.683511	-28.6	HO12	38	CG	40
13	135.506300	34.681817	-21.8	jk14	39	CF	42
14	135.507583	34.681792	-14.6	U499	39		
15	135.508042	34.681836	-11.4	jk27	39		
16	135.508511	34.681758	-6.6	U500	39		
17	135.504125	34.678800	-24.5	HN53	40	CE	45
18	135.505289	34.678772	-17.1	HN54	40		
19	135.506575	34.679150	-9.8	HO28	40	CF	
20	135.508211	34.678817	-8.5	jk32	40	CG	
21	135.503614	34.678064	-21.8	jk15	41	CE	46
22	135.495483	34.675708	-35.9	ik63	42	CA	48

事例C-G.4-1) 活断層周辺の3次元地質・地盤モデル作成 (4)

vi) 海成粘土層基底面の等高線図を作成

- ◆ 座標、標高データをArcGISにインプットし地図上にポイントデータを作成 (図5)
- ◆ 空間補間には自然近傍法を用い、各海成粘土層基底面の等高線図を作成 (図5)
- ◆ 自然近傍法は地形面の補間処理に用いられるが、入力値の最小、最大値を超える補間をしないので客観性を確保できる
- ◆ データ点の無い外縁部をトリミング

vii) 図の妥当性のチェック

- ◆ 各海成粘土層基底面の等高線図において一つのデータ点で特異な目玉が形成されていないか、上下層準と矛盾がないか等をチェックし、不適切なデータを修正もしくは削除する (図6)

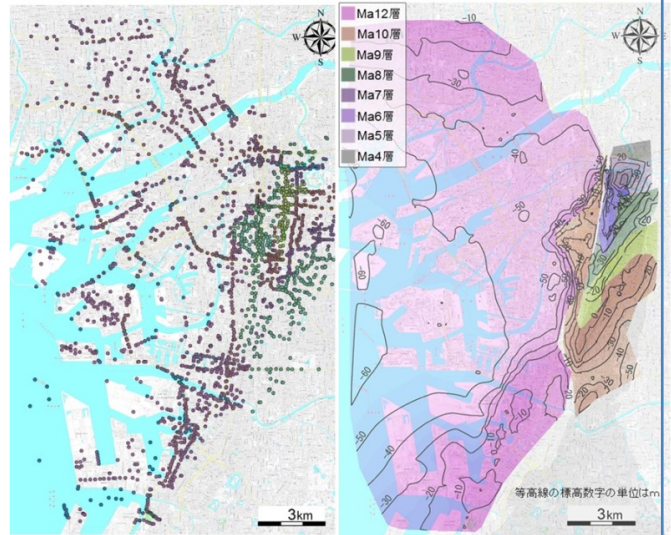


図5 ポイントデータ図と海成粘土層基底面の等高線図

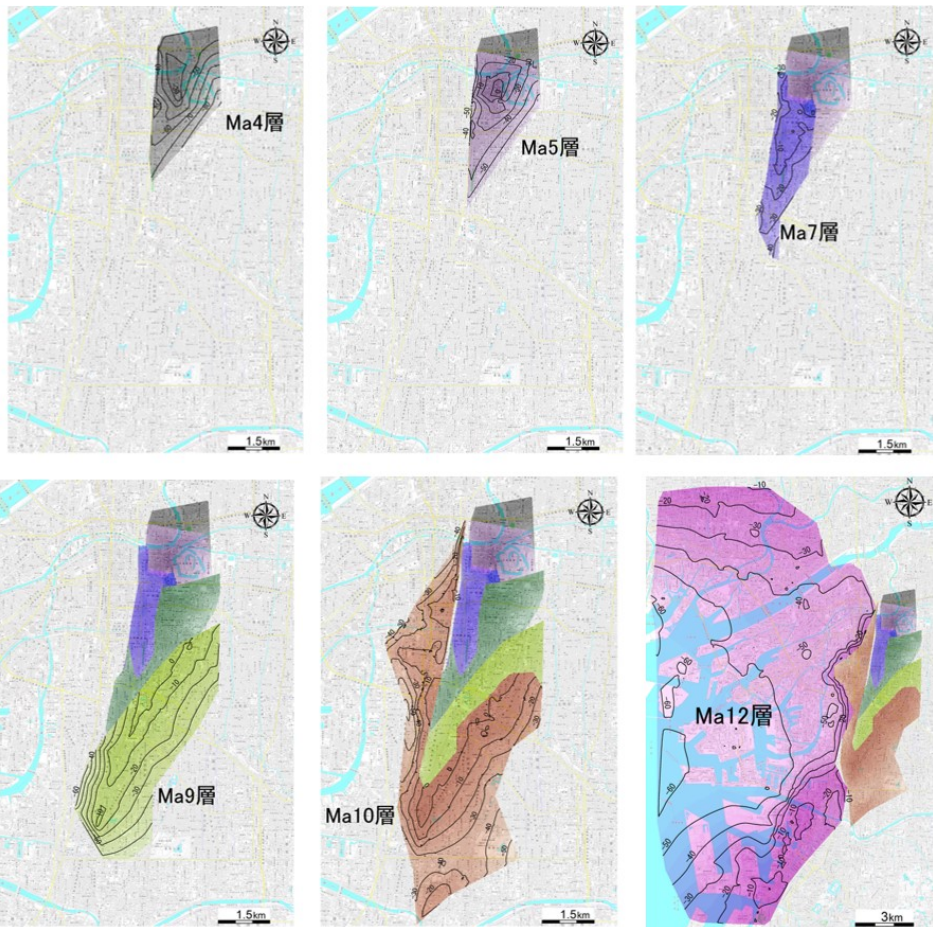


図6 層準毎の海成粘土層基底面の等高線図

事例C-G.4-1) 活断層周辺の3次元地質・地盤モデル作成 (5)

viii) 活断層分布図 (推定) およびサーフェスモデルの作成

- ◆ 断面図の構造解析で推定した断層や褶曲の分布位置を海成粘土層基底面等高線図に追記 (図7)
- ◆ ArcGISの3次元化機能を用いてサーフェスモデルを作成 (地形データは国土地理院10mDEM) (図8)

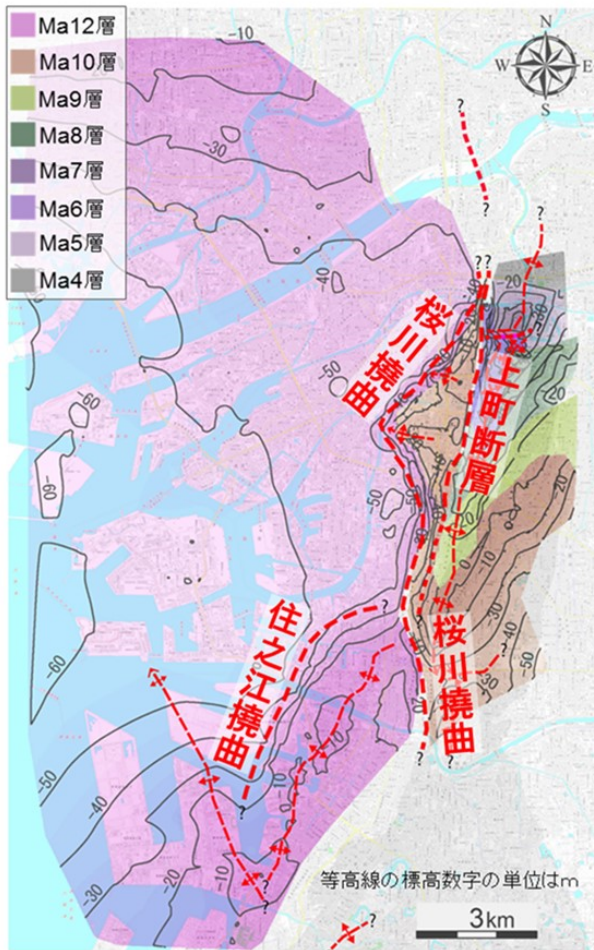


図7 活断層分布図 (推定)

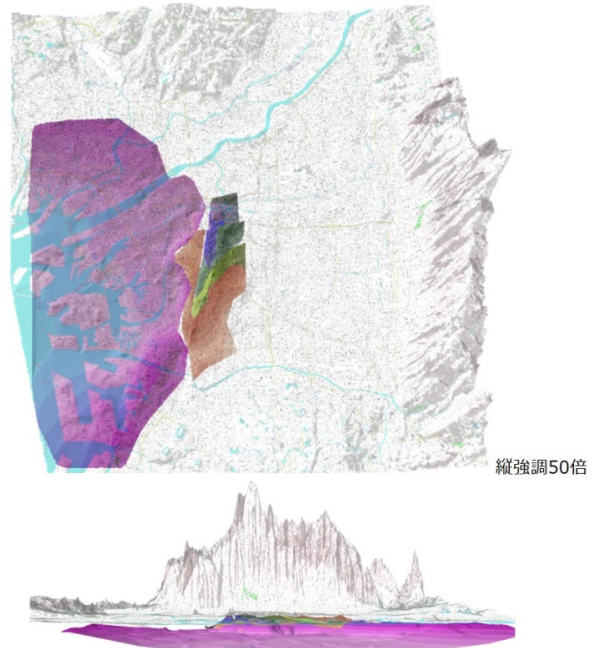


図8 海成粘土層基底面のサーフェスモデル

参考文献

- 1) KG-NET関西圏地盤情報ネットワーク：関西圏地盤情報データベース (<https://www.kg-net2005.jp/db01.html>) . 2014.
- 2) 増田富士雄・佐藤智之・伊藤有加・櫻井皆生. Shazam 層序学をボーリングデータベース解析へ適用する試みー 大阪平野の表層地質研究を例にー. 地学雑誌. 2013, 122(5), pp.892-904.

例C-G.4-1) 平野下における活断層の3次元地質・地盤モデル構築シミュレーション

目的

平野下の活断層の位置、規模、変位量、活動性等を推定し、3次元地質・地盤モデルを用いて表現する

3次元地質・地盤モデルで表現する情報

◆活断層の走向傾斜、規模(破碎帯幅、変質帯幅等)、変位・変位量(図1)

必要な地質調査情報

(1)活断層に係わる文献資料
各種地質調査資料・文献資料

(2)地形データ

断層変位地形の連続性から活断層位置を推定図示した、空中写真判読図やレーザー測量地形判読図

(3)地質データ (図2)

【活断層の活動性を評価するための地質調査例】

- ◆トレンチ掘削詳細スケッチに基づく地層の変位を把握し、どの層準まで変位が及んでいるかを確認する
- ◆トレンチおよび掘削詳細スケッチから走向傾斜、規模、変位・変位量を把握する
- ◆ジオスライサーによる地質資料から活断層規模、変位・変位量を把握する
- ◆鍵層となる火山灰層を同定し、火山灰分析から火山灰の噴出・堆積年代を把握する
- ◆炭素14による地層の堆積年代を測定し、火山灰層に加え地層の堆積年代を把握する
- ◆各層毎の変位量およびその累積変位量を明らかにする
- ◆火山灰や地層の堆積年代と変位量の関係から断層活動の周期性を明らかにする

【成果図面】

- ◆反射パターンから読み取れる地層変位から活断層位置を推定した反射法地震探査深度断面図
- ◆ボーリング、トレンチ等の調査結果に基づく、地層分布と地層変位から、活断層位置や規模を推定した地質断面図

考えられる3次元地質・地盤モデル構築上の留意点

- ◆既往資料も含め、各調査項目における位置座標系は統一されているか
- ◆紙図面等が混在する箇所でのひずみや座標系のずれは解消されているか
- ◆各調査項目において地質名称や地質記号は統一されているか
- ◆既往資料と現資料の名称、記号は統一されているか
- ◆各調査項目の結果が、全て反映されているか

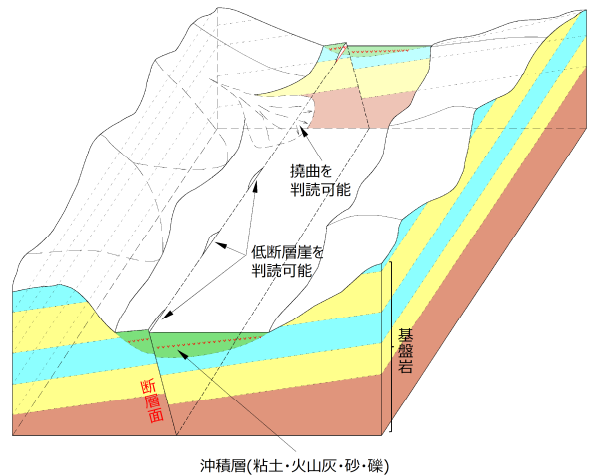


図1 活断層の位置を推定するための地形要素の例

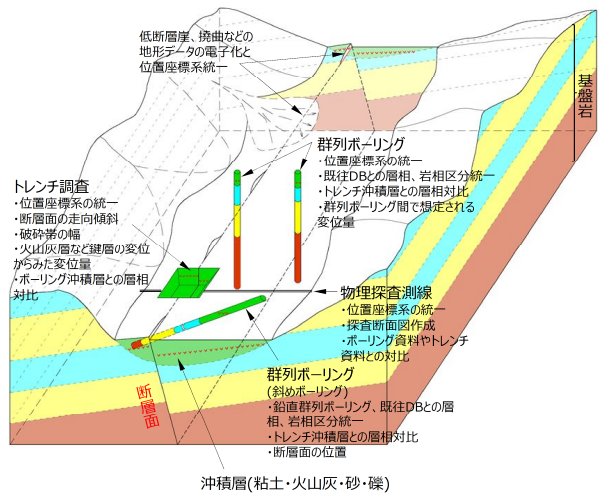


図2 活断層調査における地質調査の例

地質情報の役割

付加体は海洋プレートの沈み込みにより大陸側に付加されて形成される。分布する地質は枕状溶岩やハイアロクラストを母岩とする塩基性岩類（緑色岩類）とチャート等からなる。付加形成時の構造運動により、複雑に褶曲した乱雑な構造となっている場合が多く、地層累乗の法則による新旧関係判断が不可能なものがほとんどである（図C-G.5-1）。

付加体において詳細な予測が困難な複雑な構造として、横臥褶曲、メランジュ、レンズ等がある。構造運動による著しい破碎を受けていたり、泥質岩体内のチャート等、強度や水理特性が異なる岩体が隣接する。そのような複雑な地質構成・地質構造を背景に、付加体地質の工学的問題点としては以下のものが想定される。

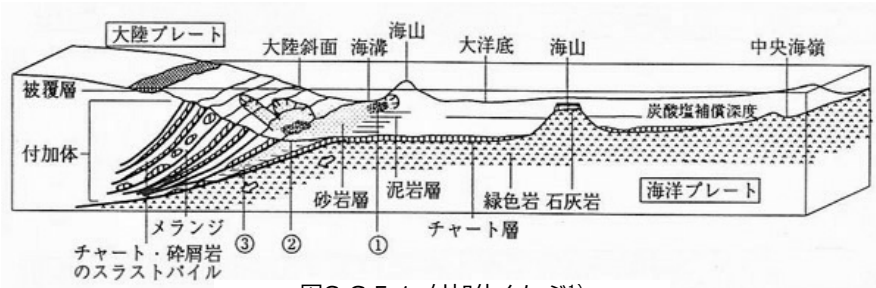
- ◆ 施工前調査による予測と違う地質が出現する
- ◆ 急激な強度不足
- ◆ 突発湧水や施工障害

地質調査での付加体の複雑な構造の詳細な推定には、高い調査精度が必要である（図C-G.5-2）。特に地表踏査における詳細なデータは、ボーリングや物理探査データの解釈や地質構造を推定するために重要となる。

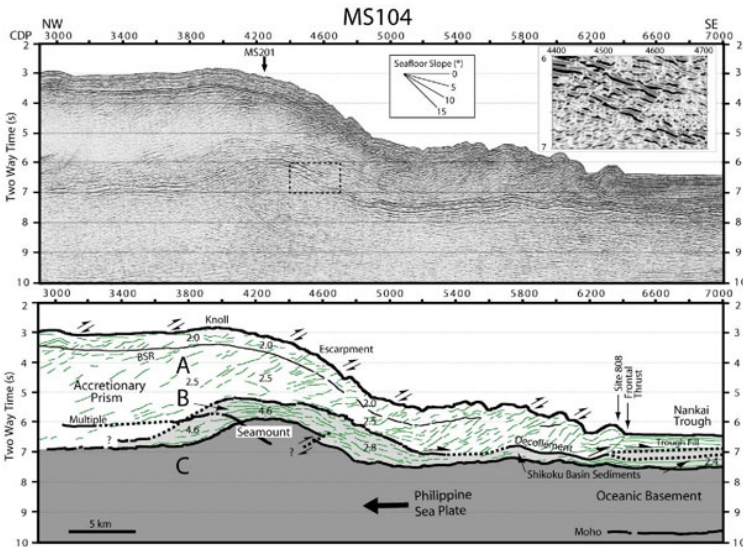
3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルによる可視化は、複雑な地質構造を把握する上で有用な手段となりうる。付加体は地質構成・構造が複雑なため、3次元地質・地盤モデルの表現方法としては、ソリッドモデルが望ましい。

精度の高い地質図は、地表踏査（露頭・転石分布等）もあわせて地質構造を推定するため、オリジナルデータの精度を把握するにはルートマップが不可欠である。調査データの質が低い場合、モデル作成者による補填データが必要となる可能性が高い。複雑な構造ほど地質調査データの量・質を満たす必要がある。正確な地形モデルも必要となる。



図C-G.5-1 付加体イメージ¹⁾



四国沖の反射断面（上段）とその解釈（下段）
垂直方向は約3：1に強調。解釈図内の数字は、P波速度を示す。
反射断面には、沈み込む海山最上部の反射や不連続面、スラスト、横臥褶曲等の構造が示されている。

図C-G.5-2 付加体内部構造の事例²⁾

参考文献

- 1) 地学団体研究会編、「新版地学教育講座⑧ 日本列島のおいたち」,東海大学出版会, 1995, p.15.
- 2) <http://ofqs.aori.C-Tokyo.ac.jp/park/park-res-e.html> (2018年2月時点) .

例C-G.5-1) 付加体の3次元地質・地盤モデル作成

常呂体において地表踏査データから付加体の詳細な地質構造を推定している事例¹⁾を用いて、3次元地質・地盤モデルを試みた。

この事例では地表踏査（露頭・転石分布等）から地質構造を推定しており、モデル化の基本データとして、地質平面図に記載された地層境界線を用いた。分布する地質は枕状溶岩やハイアロクラスタイトを母岩とする塩基性岩類（緑色岩類）とチャートからなる。全体に非常に緩い傾斜を示す軸面を持つ褶曲構造（一部横臥褶曲）と推定されている。

今回は平面図中央部に示されているチャート分布を示すソリッドモデルを作成した。

【作成手順】

以下に3次元地質・地盤モデルの作成手順を示す。なお、モデル作成にはGEO-CREを使用した。

①DEM取得

国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービスHPよりDEMを取得する。今回は10mDEMを使用した

②地表面サーフェスモデルの作成

取得したDEM（点・点群）から地表面サーフェスモデルを作成する。今回の場合はBS-Horizonを用いて補間し、B-Repモデルを作成した

③地質平面図位置の調整

地質平面図をモデル空間に置き、スケール・位置を調整

④地層境界線のトレース

地層境界線を平面上（地質平面図）でトレースする

⑤地層境界線の投影

地表面サーフェスモデルに上記トレース線を鉛直投影する

⑥地層境界サーフェスモデルの作成

地表面に投影されたトレース線をもとに補間を行い、サーフェスモデルを作成する

⑦サーフェスモデルを用い、地質岩体ソリッドモデルを作成する

【まとめ】

このユースケースでは比較的高いレベルの地表踏査結果があったため、3次元地質・地盤モデルの作成は容易であった。しかし調査データの質が低い場合、モデル作成者による補填データが必要となる可能性が高い。複雑な構造ほど調査データの量・質を満たす必要がある。

参考文献

- 1) 橋本祥司ほか、「常呂体における地すべりおよび崩壊発生位置と地質構造の相関—国道333号ルン橋周辺地域を例として」、平成16年度日本応用地質学会北海道支部研究発表会講演集、2004。

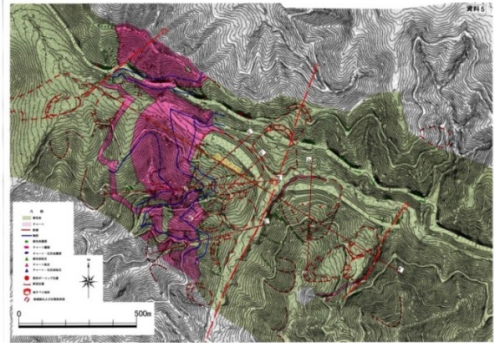


図1 元データとした地質平面図とモデル作成範囲

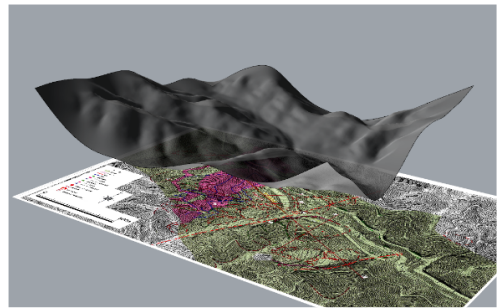


図2 地表面サーフェスモデルと地質平面図

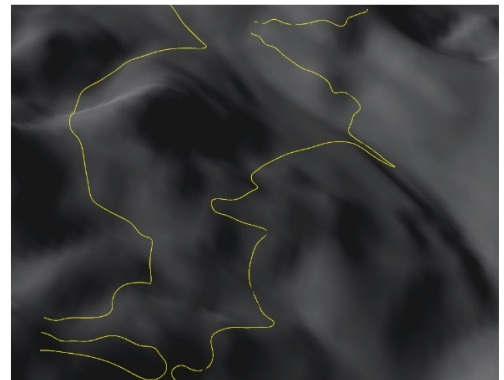


図3 地表面に投影したトレース線（地層境界線）

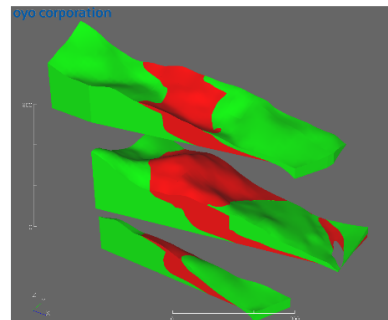


図4 作成したソリッドモデル

地質情報の役割

地すべり現象を把握するために必要な視点を示す。

①地すべりの特徴 (図C-G.6-1)

- ◆「移動体」(地すべり土塊)が存在する
- ◆地すべり移動体と不動部を分ける「すべり面」が存在する。
- ◆形態や分類に多様性がある (表C-G.6-1)
- ◆地すべりは「3次元空間+時間」の現象であり、時間とともに形状や形態が変化する
- ◆現在活動中の土塊、現在は活動を休止している土塊等、時間とともに移動体の活動度が変化する
- ◆地すべりの活動は「降雨や地震」の影響を受ける
- ◆解析や対策を行う上で特に「地下水」が鍵となる

②地すべりの素因・誘因

地すべりの根本的原因とみなされる因子群 (地形地質・土壌・植生等、斜面の一部もしくは全部の持つ性質) を総称して「素因」呼ぶ。一方、発生の引き金となる直接的な原因 (降雨・融雪・地震・火山活動・地形改変等) は、「誘因」と呼ばれる (表C-G.6-2)。地すべりの素因を持つ斜面は地すべりのリスクが高い斜面という見方ができる。

③地質調査の目的

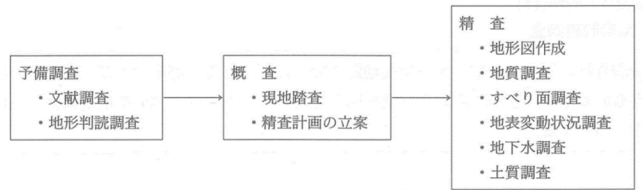
地質調査 (図C-G.6-2) は、地すべりの素因・誘因を把握するとともに、すべり面の認定や、地すべり安定解析による安定性評価および対策工 (図C-G.6-3) の設計/施工/維持管理を目的とする。

④すべり面の認定

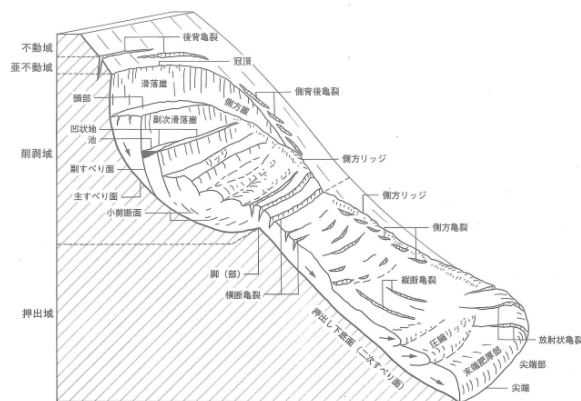
微地形判読や地表地質踏査で設定した地すべりブロックに対して、地形学・地質学・動態観測結果に基づきすべり面を認定する (図C-T.5-4)。

表C-G.6-1 地すべりの分類²⁾

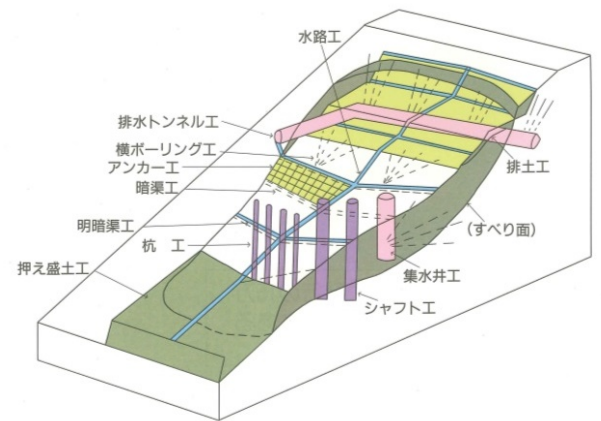
分類	岩盤地すべり	風化岩地すべり	崩壊土地すべり	粘質土地すべり
特徴	馬蹄形、角形	馬蹄形、角形	馬蹄形、角形、沢形 ボトルネック形	沢形、ボトルネック形
平面形	馬蹄形、角形	馬蹄形、角形	馬蹄形、角形、沢形 ボトルネック形	沢形、ボトルネック形
微地形	凸状尾根地形 凸状台地形	凸状台地形 単丘状凹状台地形	多丘状凹状台地形 単丘状凹状台地形	凹状傾斜地形 多丘状凹状台地形
すべり面形	椅子形、舟底形	椅子形、舟底形	階段状、層状	階段状、層状
おもな土塊の性質 (頭部)	岩盤または弱風化岩	風化岩 (亀裂が多い)	巨礫または礫混じり土砂	巨礫または礫混じり土砂
おもな土塊の性質 (末端部)	風化岩	巨礫混じり土砂または強風化岩	礫混じり土砂、一部粘土化	粘土または礫混り土砂化
運動速度 (活動時の平均)	2cm/日以上	1.0~2.0cm/日程度	0.5~1.0cm/日	0.5cm/日以下
運動の継続性	短時間、突発性	ある程度断続的 (数十~数百年に一度)	断続的 (5~20年に1回程度)	断続的 (1~5年に1回程度) または継続的
すべり面の形状	平面すべり (椅子形)	平面すべり (頭部と末端部がやや円弧状)	曲面状と平面状、末端部が流動化	頭部が曲面状だが大部分は流動化 (沢状)
ブロック化	たいてい単一ブロック	末端、側面に2次的地すべり発生	頭部がいくつかに分かれ2~3ブロックになる	全体が多くのブロックに分かれ、相互に関連し合っている
予知の難易	地すべり地形が不明瞭なため非常に困難。綿密な踏査と精査を必要とする	1/3 000~1/5 000 地形図で予知できるし、空中写真の利用も可能	1/5 000~1/10 000 地形図でも確認できる。地元での聞き込みも有用	地元での聞き込みによって予知できるし、非常に容易に確認できる
一般的な斜面形	一般に台地部があるか不明瞭である。凸形斜面に多く、鞍部から発生する	明瞭な段落ち、帯状の陥没地と台地を有す。大きく見れば凹形だが、主要部は凸形	消落崖を形成し、その下に沼、湿地等の凹部があり、頭部にいくつかの残丘があり、凹形斜面に多い	頭部に不明瞭な台地を残し大部分は一般的な緩斜面、沢状の斜面である



図C-G.6-2 地すべりに関する地質調査手法²⁾



図C-G.6-1 地すべり地形模式図¹⁾

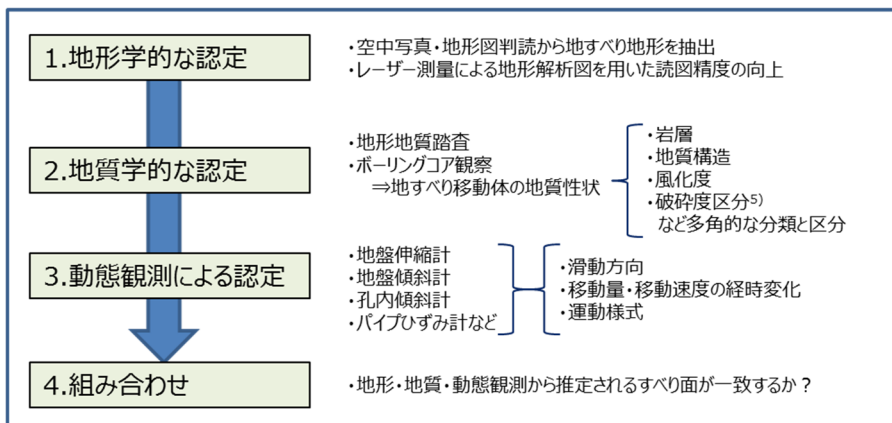


図C-G.6-3 地すべり対策工模式図³⁾

表C-G.6-2 斜面変動の素因の最近の見解

植村 (1974,1982)	羽田野 (1974)	藤田 (1990,1994)
<p>物質的因子群 (斜面構成物質の物性)</p> <p>A 粒度組成、固結度、充填度、鉱物組成、化学組成等岩質や土質と総称される性質</p> <p>B 抗生物質の粒子の集合状態や配列状態、異方性、連続性等</p> <p>岩石や土の内部構造に関するもの</p>	<p>物質要因</p> <p>地質体 (基盤・表層) 土層、土壌等、斜面構成物質に関する因子群</p>	<p>物質要因</p> <p>地質体の岩相・構造、斜面構成物質 (岩石・表土) の物性、とくに弱層 (粘土層等) の強度ならびに鉱物組成 (とくに粘土鉱物) 等</p> <p>地下水</p>
<p>環境因子群 (斜面変動の発生の「場」の性質)</p> <p>物質因子群を変化させる原因となる温度・圧力・媒質 (水) 等</p> <p>媒質としての水の役割 = 化学的風化の促進、含水量の増加によるせん断抵抗の現象、間隙水圧の増加による破壊強度の低下。</p>	<p>地形要因</p> <p>斜面の傾斜・斜面形 (水平断面形・縦断面形)、斜面規模 (比高・奥行・幅・有効起伏量)、傾斜変換点、遷急線 (侵食前線)、集水面積等</p>	<p>場の要因</p> <p>斜面変動の場である斜面の形態</p> <p>斜面の形状、斜面長、起伏量、傾斜、谷密度、集水面積等</p> <p>主として地形的な因子群、斜面表層を覆う植生や地表水の状況等</p> <p>山地の成長等に伴われる斜面の成長過程に関する因子群 (山地の隆起・断層・褶曲による地質体の変化)</p>
	<p>変動要因 (誘因)</p> <p>降雨、地震、水文、植生、人為、侵食、谷と斜面の発達史 (崩壊履歴含む)</p>	

日本応用地質学会編. 斜面地質学—その研究動向と今後の展望—. 日本応用地質学会. 1999, p.17.に加筆



図C-G.6-4 地すべり移動体の認定方法⁴⁾

成果品と利用場面の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆地質断面図（主測線、横断等）
- ◆地質平面図、地すべりブロック図
- ◆すべり面コンター図
- ◆対策工検討図
- ◆管理台帳（カルテ）

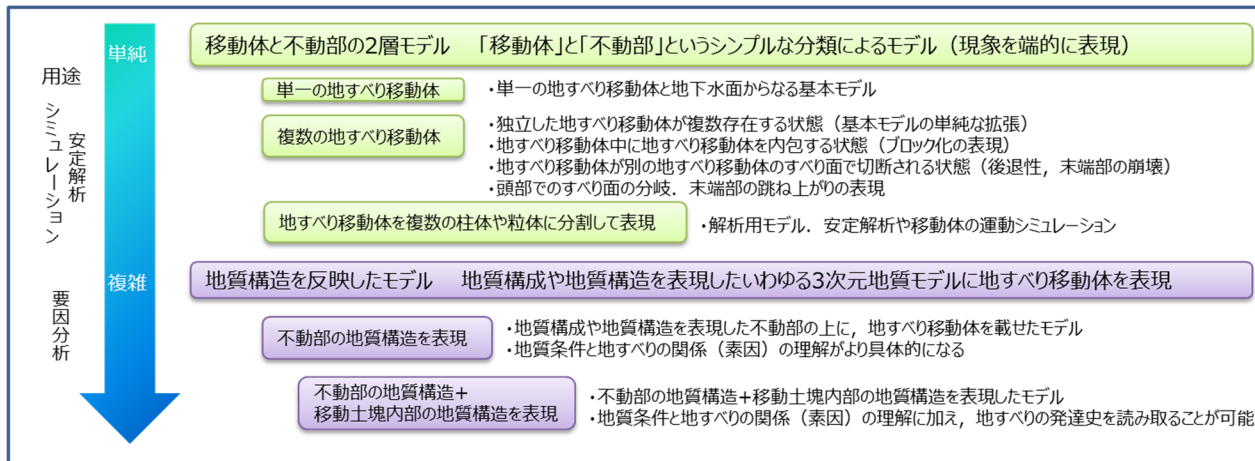
3次元地質・地盤モデル構築上の課題

地すべりのリスクについて、正しい理解を得てリスクコミュニケーションに寄与するには、先に示した斜面変動の素因となる「物質的要因（地質）」と「場の要因（地形や環境因子）」「変動要因」を可視化することが大切である。これらの要因について、3次元地質解析技術を用いて可視化することや、崩土の拡散等のシミュレーションを、アニメーションによる時系列で表現することは、リスクコミュニケーションの手段として期待される。

地すべりの3次元地質・地盤モデル構築におけるメリットは次のように考えられる。

- ◆2次元解析で評価が困難な事象に対応可能
- ◆干渉チェック（すべり面に到達するか、他の対策工と干渉しないか等）や横断形状を考慮した対策により、合理的な対策工の策定が可能になる
- ◆地すべり現象に対する一般的理解が容易になる
- ◆地質条件と地すべりの関係（素因）をより具体的に説明できることで、リスクコミュニケーションに寄与可能
- ◆シミュレーションにより崩落土砂の到達予測範囲の推定や可視化が可能

一方、デメリットとしては、地すべりの3次元地質・地盤モデルは用途や表現する対象の組み合わせでその複雑さが変わることにある（図C-G.6-5）。これは、本質的な地質調査の質・情報量が3次元地質・地盤モデルの信頼性を左右することを示している。すなわち、どのようなレベルの地質情報でモデルが構築されているか、利用者に正しく明示する必要がある。



図C-G.6-5 用途に応じた地すべり3次元モデルの組み合わせ

参考文献

- 1) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門第3巻丘・丘陵・山地. 古今書院. 2000, p.813.
- 2) 建設省河川砂防基準(案)同解説. 1997, 調査編, pp.199-202.
- 3) 山口県砂防課. 山口県の地すべり. 山口県砂防課パンフレット. 1998.
- 4) 脇坂ほか. 地すべり移動体を特徴づける破碎岩四万十帯の地すべりを例として. 応用地質. 2012, 第52巻, 第6号, pp.231-247.

事例C-G.6-1) 地すべりの3次元モデル

当該地すべりは標高1,500～2,000mの高山で発生している大規模地滑りであり、対策事業を有効に進めるため、地すべりの形状と規模をより正確に把握する必要があった。長年にわたり様々な形態で蓄積されてきた地盤情報を同一空間内に整理し、3次元モデルを構築した。モデル化に使用した情報は次のようになる。

◆ボーリング柱状図（約35本）、地表踏査結果、地すべり動態観測結果（地下水水位、地表移動量、地中移動量）、既設対策工変状状況（排水トンネル、集水井、砂防堰堤群）

◆使用ソフトウェア

Ravits（現製品名 GEO-CRE）

すべり面は、地すべりブロック側部での露頭状況、動態観測データ、ボーリング柱状図（基盤岩と地すべり移動土塊として入力）を基にサーフェスモデルとして構築した。このモデル化により、これまで明らかにできなかった地すべり対策工の変状位置と地すべりブロックの関連性を示すことができた。

当該モデルは、斜面安定解析や3次元的視点から対策工設計を検討する上での基礎資料に用いられている。

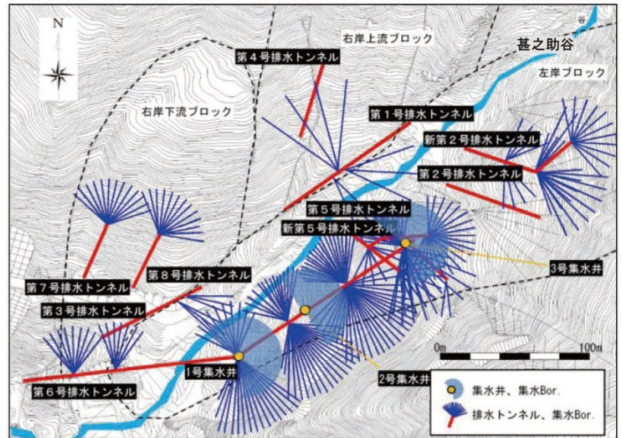


図2 対策工位置図¹⁾

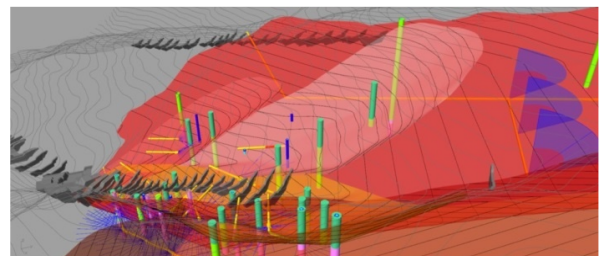
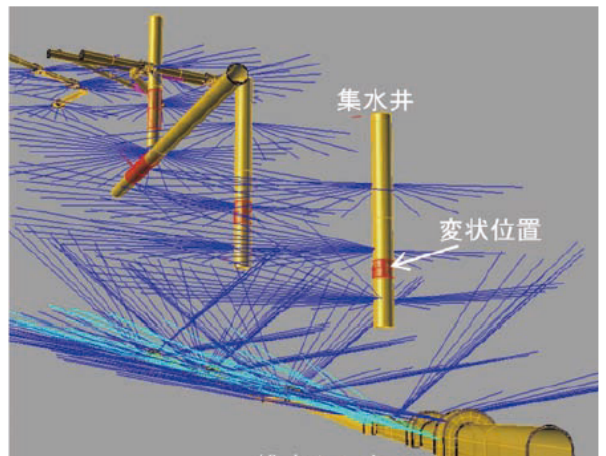
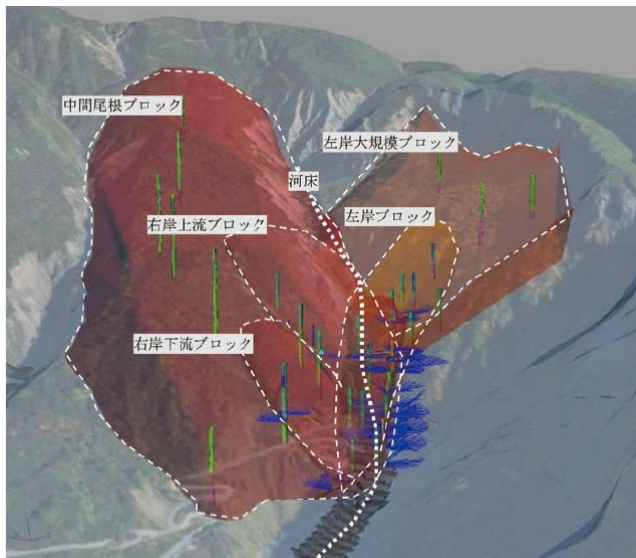


図2 大規模地すべりの3次元モデルの例¹⁾

参考文献

1) 田中・藤田・安達・蚊爪・西山. 基之助谷地すべりにおける3次元モデル構築の試み. 地質と調査. 2014, 139号, pp.12-16.

事例C-G.6-2) 地すべり地質調査におけるすべり面の3次元化と業務での活用例 (1)

概要

地すべり地が大規模かつ移動方向が複雑な場合、従来の2次元断面（主測線や副測線による2次元モデル）で地すべりブロックを理解することは、地質専門技術者であっても、難しい。また、対策工が測線上に配置されるとは限らず、ブロック内の基盤との境界深度の変化等も含めて、関係者の理解が3次元的になされているとはいいがたい状況にある。

したがって、視覚的に有利な3次元モデルにより、情報が共有されることで、速やかな調査～施工へのステップを確実にこなうことができようになることが必要と考える。

地質調査業務において、既存の2次元断面から3次元のすべり面のモデルを作成し、関係者の理解を得た事例を報告する。

当該地の問題点

①【複雑な地すべりブロック】

すべり面深度が左右非対称であり、かつ運動方向が屈曲する特異な形態である。

⇒縦横断面図では複雑なすべり面がイメージし難い

②【複雑な地質構成】

ブロックと隣接ブロックでは基盤深度が異なり、すべり面深度が異なる。基盤岩の岩種も同一でない。対策計画地付近の地質構造も未確認である。

⇒特殊な地質構造の可能性が示唆される

調査位置を選定する上での着眼点

着眼点①

イメージを伝えやすくするため、3次元すべり面モデルを作成し、視覚的な理解、既存断面の整合確認、情報共有の上、調査位置を選定する。

着眼点②

基盤岩の地質境界線上に調査位置を選定し、地層の接触関係（整合または断層等構造帯）を明確にする。

着眼点③

対策計画の参考となる調査位置で実施し、すべり面深度との位置関係を明確にする。

モデル化の環境

使用器財：

ハード&OS：CPU:i7 2.20GHz

メモリ：16GB

GPU:NVIDIA Quadro K1100M、2 GB

OS:win7

ソフト：AutoCAD Civil3D

GEORAMA for Civil3D

Bentley View V8i

データ：

地表：発注者業務による5mDEM

地質：既存2次元断面データ（CAD：2次元dwg）
10断面

モデルの利活用

（1）調査計画時【既存データからの3次元地質解析】

◆パネルダイヤグラムの作成（図1）

単純に断面を3次元空間に配置しただけなので、ボーリングの計画深度とすべり面の関係が明確でない。また、地質分布が明確でない部分については、他断面との位置関係を確認できるため、地質分布推定の助けとなる。

◆すべり面の3次元地質・地盤モデル作成（図2）

各断面のすべり面を連続させ、1連のすべり面（サーフェイス）を作成すると、地質調査地点でのすべり面の推定深度がわかる。（GL-88m）

⇒調査計画時の打ち合わせ資料として活用し、3次元すべり面モデルの視覚的理解により、関係者の理解の促進に寄与し、情報共有により、調査位置を選定できた。

（2）調査中【既存データからの3次元地質解析】

◆すべり面の3次元地質・地盤モデル作成

既存の測線上でない場所での調査であったが、すべり面の位置、基盤の地質や断層の可能性等、視覚的なモデルの理解で不安は少なく、作業にあたることができた。

事例C-G.6-2) 地すべり地質調査におけるすべり面の3次元化と業務での活用例 (1)

(3) 調査後【調査結果を反映させた3次元地質解析】

◆すべり面の3次元地質・地盤モデル作成 (図3)

調査地点でのすべり面深度GL-105mを反映し、すべり面をのサーフェイスモデルを変更した。また、周囲の地質区分を細分したり、破碎構造や基盤のズレがないことを確認した。また、他地区では、複合ブロックモデル (図4) を作成し、ブロックの理解に寄与した。

◆成果品の作成、プレゼンテーションでの工夫

サーフェイスの表現のコンタ表示から、オブジェクトとして3Dポリラインを作成し、透過表示のできないツールでも確認できるようにした。また、汎用的に3次元モデルを操作できるように、3DPDFでの納品を実施した。これは、スペックの低いノートパソコンでも軽快に動作するため、業務検査時のプレゼンテーションに便利であった。

今後の課題

①データ収集、品質管理の問題・課題

今回業務地は、比較的大きな地すべり地帯であり、地質的な解釈は、発注者側での委員会等で、担保されていたため、すべての2次元断面のすべり面をそのまま利用して、サーフェイスを作成することができた。このような事例は、むしろ少ないと思われ、解釈のことなるすべり面から作成する場合には、ボーリングデータ、観測データ等の1次データの検討が必要となる。

②すべり面の推定方法

複合ブロックの作成には、推定ツールで推定したサーフェイスを、いったん、地質的に切られるの法則から外して推定しなおす必要が生じる。

③プレゼンテーションや汎用性 (写真1)

利活用において、3次元モデルをパソコン上で回転させることが重要であり、作成したモデルデータを汎用的に操作できる環境が必要である。今回は、オリジナルはdwgであったが、DWFと3DPDFを活用した。今後、軽快かつインストール不要なビューアが望まれる。

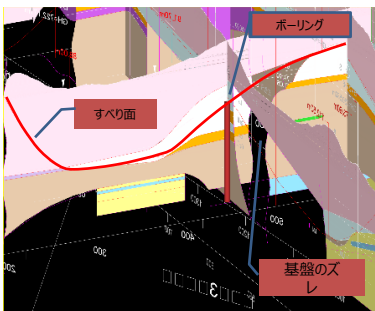


図1 パネルダイアグラム

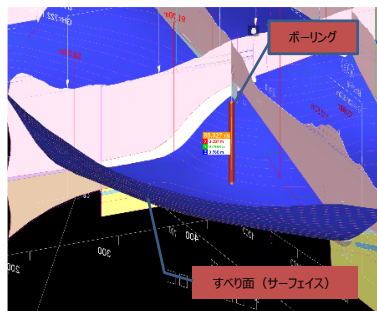


図2 すべり面の3次元地質・地盤モデル (調査前)

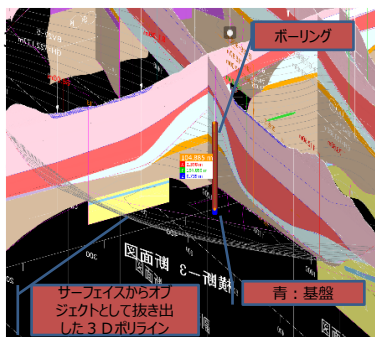


図3 すべり面の3次元地質・地盤モデル (調査後)

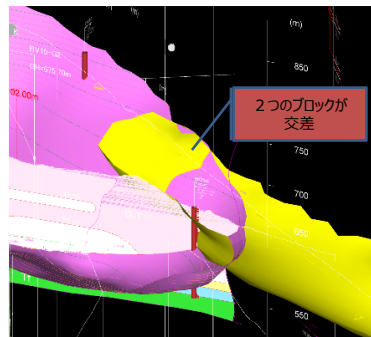


図4 複合ブロックの表現



写真1 3次元モデルを用いたの打合せ状況 (調査位置選定打合せ)

* 図1～3は、同一箇所の同一ビューによるもの * 図4は、別箇所のビュー

地質情報の役割

表層崩壊は一般的に「山崩れ、崖崩れ等の斜面崩壊のうち、厚さ0.5～2.0m程度の表土層が、表層土と基盤層の境界に沿って滑落する比較的規模の小さな崩壊のこと」¹⁾を指す。

切土のり面では、図C-G.7-1に示すように表層付近の強風化岩の崩壊に加えて、切土面の岩盤の表層が風化や岩盤の割れ目に沿って崩壊する事例も示されている。

地質調査の成果品の例

地質調査に要求される成果図面には次のようなものがある。

- ・地質断面図、地質平面図
- ・影響範囲図（崩壊発生時の影響範囲評価として利用）
- ・風化深カウンター図、岩盤上面カウンター図
- ・斜面カルテ

3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元モデルの作成や表層部のゆるみ土塊の調査は既存の技術で可能となっているが、崩壊を正確に予測するための解析手法については研究途上にある。当面は表層崩壊箇所での事例を収集し、崩壊前後の条件を分析することで、解析手法の確立に向けたモデルの活用が必要となる。

3次元モデル作成に必要な調査は、主断面だけでなく、側方の地山の性状を把握できる数と配置のボーリングが必要である。

しかし、調査対象や変状の規模によっては、従来の2次元での解析や対策工設計と比べて、経済的な施工に3次元モデル化が寄与しない場合もあり得る。

側方部の不安定土塊を正確に見積ることによる必要抑止力の軽減や、源頭部でのLP測量で詳細な地形をモデル化により、微地形を考慮した解析や移動土土砂量のより詳細な算出が可能と考えられる。

ハザードマップのような広域の地形や地質(風化層)を対象とした危険区域解析では詳細地形モデルの活用により、集水地形や集水面積といった崩壊危険箇所の周辺地形まで考慮した、危険箇所の抽出が可能である。

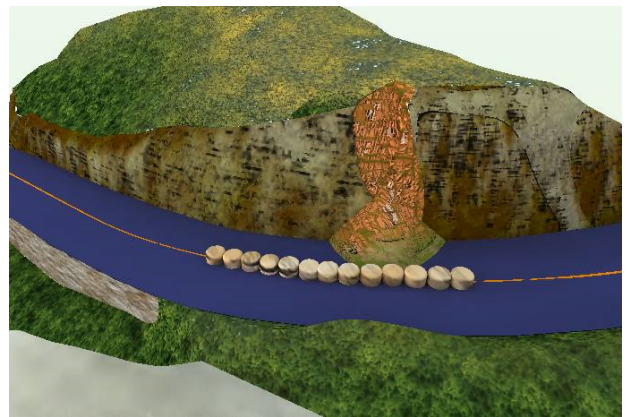
分類	解説	模式図	代表地質	備考
①表層崩壊	①表土が滑落する。時には下層の強風化岩層を含んで滑落する。湧水が誘因となることが多い。		砂質土、粘性土、崩積土、花こう岩、凝灰岩、泥岩、粘板岩、安山岩等の強風化層	
	②岩の表層が風化等に伴って滑落する。		泥岩、凝灰岩、輝緑岩、風化した粘板岩、片岩等	切土のり面では急速に風化が進むため、特に注意を要する。
	③流れ盤構造や、岩盤中の割れ目(節理、小断層、薄層)に沿って岩が滑落する。後者の場合、くさび状の崩壊も多い。		流れ盤構造を有する岩(互層、結晶片岩、粘板岩等)、層理、片理、節理等の発達した岩(粘板岩、結晶片岩、蛇紋岩、花こう岩、流紋岩、安山岩、チャート、石英はん岩等)	

図C-G.7-1 切土のり面の崩壊及び斜面崩壊の発生形態²⁾

表層崩壊の発生は斜面勾配や降雨の状況、周辺地形等に影響される。表層崩壊が土石流のトリガーになることもある。

表層崩壊のリスクを判定するために必要な地質調査は次のようなものと考えられる。

- ◆ 風化層の厚い岩種の分布、集水地形等
- ◆ 降雨浸透による土壌水分量の上昇と崩壊発生の関係
- ◆ 表層崩壊がトリガーとなる土石流発生危険渓流
- ◆ 道路切土法面の崩壊予測や安定解析



図C-G.7-2 表層崩壊3次元モデルの事例

参考文献

- 1) 国土交通省HP 砂防http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/deep_landslide_FAQ.html (2018年2月時点)
- 2) 日本道路協会. 道路土工 切土工・斜面安定工指針(平成21年度版). 2009, pp.20-21.

事例C-G.7-1) 表層崩壊の3次元モデル

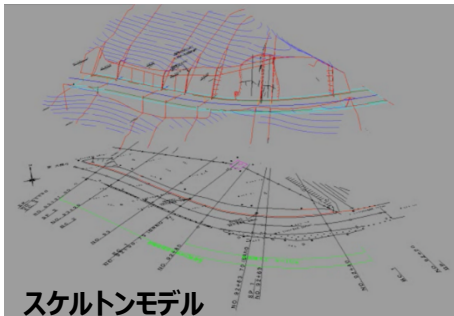
既往崩壊事例について、崩壊プロセスを説明する目的で3次元モデルを作成した。3次元地形モデルおよび崩壊過程毎のサーフェスモデルの作成にはCAD地質平面図・断面図および現地調査結果を用いた。

説明性を向上させるために、CGソフトウェアを利用し植生の装飾表現やテクスチャマッピングを施し、崩壊に至るまでの時系列アニメーションを製作した。

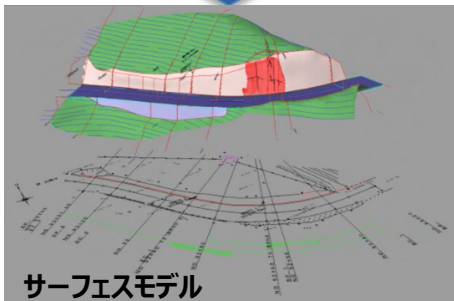
◆使用ソフトウェア

モデル作成：GEO-CRE

CG制作：Vue

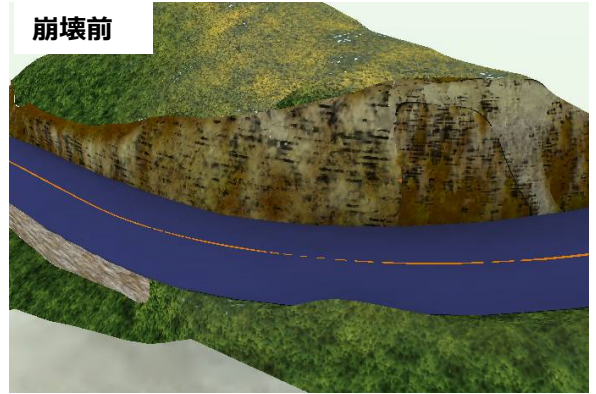


スケルトンモデル

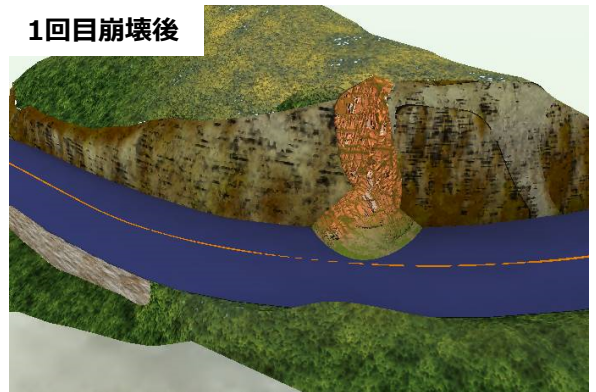


サーフェスモデル

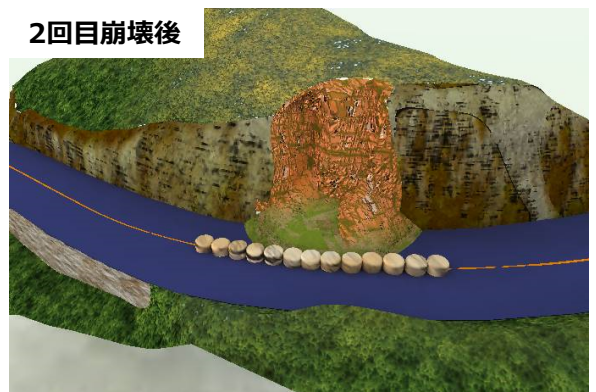
CGソフトウェアを用いての植生表現



崩壊前



1回目崩壊後



2回目崩壊後

C-G.8 岩盤崩壊

地質情報の役割

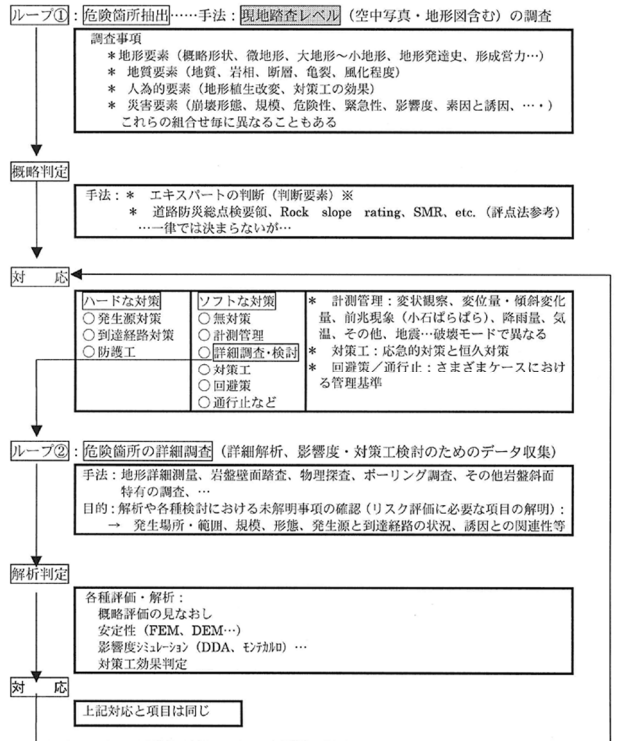
本書における岩盤崩壊は、既存資料¹⁾における、崩落、滑動(すべり)、転倒(トッピング)、座屈(バックリング)を扱う。これらの形態の定義を表C-G.8-1に示す。対象とする斜面は主に自然斜面(急崖)である。

表C-G.8-1 岩盤崩壊の分類¹⁾

岩盤崩壊の形態	模式図
崩落 岩盤からなる急斜面または急崖より、節理等の不連続面を境として、岩塊が剥離する現象で、崩落岩塊が自由落下、跳躍、バウンド回転によって空中を落下する運動形態をいう。	
すべり ひとつあるいは数箇所の面に沿い、せん断変位する運動形態をいい、円弧すべり面に沿う回転すべりや平面すべり面に沿うすべりとなる。また、くさび破壊は岩すべりの形態で、交差するいくつかの不連続面に沿って、これより上部のくさび状岩塊がすべる運動形態をいい、岩盤斜面に特有なものである。	<p>円弧すべり 平面すべり</p> <p>くさび破壊</p>
転倒 移動岩塊に働く重力、近接ブロックの押す力または亀裂間の水圧に伴う転倒モーメントによって、移動岩塊の下端部を支点として前方へ回転する運動形態をいう。	<p>A は最初に崩壊した岩塊 B は転倒後、2つに分離した岩塊 C は転倒中の岩塊 D は転倒中でCにもたれた岩塊 E は転倒前の岩塊</p>
座屈 節理や層理がほぼ垂直に発達している岩盤などで、節理や層理によって分離した板状または柱状の岩体が、その自重によって亀裂や劣化の箇所座屈し、折れ曲がるように上部岩体ごと崩壊する形態をいう。	<p>(a) (b)</p>

岩盤崩壊は、崩壊前兆の発現から崩壊に至るまでの時間が短い現象である。岩盤崩壊の危険度を定量的に評価することはまだ困難で、事前の予防対策が重要とされる¹⁾。

岩盤斜面の調査は、個々の斜面の実情(保全対象、斜面規模、予測される崩壊規模等)に応じ調査段階を踏んで調査検討が行われる(図C-G.8-1)。特に、対象斜面の3次元形状は崩壊の規模や形態、保全対象に与える影響等を検討するために重要な情報となる。斜面形状を把握するための調査方法を表C-G.8-2に示す。



図C-G.8-1 岩盤調査のワークフロー²⁾
 (ループ①は初期段階の調査、ループ②は詳細調査・検討等に対応)

表C-G.8-2 斜面幾何形状の調査方法²⁾

測量・計測・調査方法	可能な縮尺	利点	欠点
写真測量(垂直空中写真)	1/2,500程度まで (樹木の影の影響のない場合より大縮尺可能)	広域的に測量できる	樹木の陰となる部分やオーバーハング部の測量が不可能
写真測量(斜め空中写真)	1/100程度まで?	オーバーハング部にもある程度対応できる	樹木の陰となる部分の測量が不可能 日陰も測量困難な場合がある
写真測量(地表から)	1/100程度まで?	同上 (簡易なシステムあり)	同上
実地測量(地表測量)	任意の縮尺	測定点は正確で信頼性高い	手間がかかる。急崖部は測量困難
空中レーザーローファイター	1/1,000程度まで (測定誤差30cm~1m程度(樹木等の影響のない場合))	広域的面的に測量できる。多少葉がある場所でも地表を測量できる 図化に要する時間が少ない	樹木の陰となる部分の測量が不可能 春~秋期は葉により精度が落ちる 急崖~オーバーハング部は測定困難(飛行方向による)
地表からの3次元レーザー測定	1/100程度まで? (測定誤差数cm程度(樹木等の影響のない場合))	面的に測量できる オーバーハング部にも対応。図化に要する時間が少ない	樹木の陰となる部分の測量が不可能 測定距離が200~300m以内に限られる

成果品と利用場面の例

要求される成果図面には次のようなものがある。

- ◆ 斜面判読図、斜面正面図
- ◆ 地質断面図、スライス地質断面図、亀裂分布図 等

実際に岩盤斜面の3次元モデルを構築した事例を図C-G.8-2に示す。この事例ではレーザー測量にて取得された地形モデルを元に、現地踏査やボーリング調査（ポアホールカメラ解析等）、UAV調査を行い、斜面の地質構成や亀裂分布を把握している。その結果を元に3次元地質・地盤モデル・亀裂モデルを推定し、崩壊形態・領域・規模の検討、2次元弾塑性解析に用いる地質断面や各種検討用の断面図等を出力している。

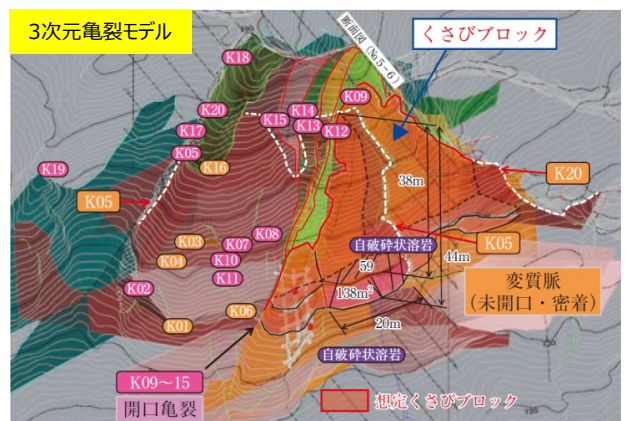
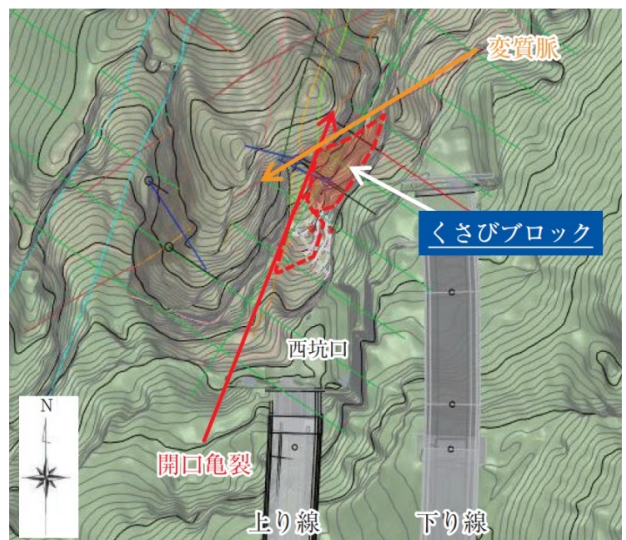
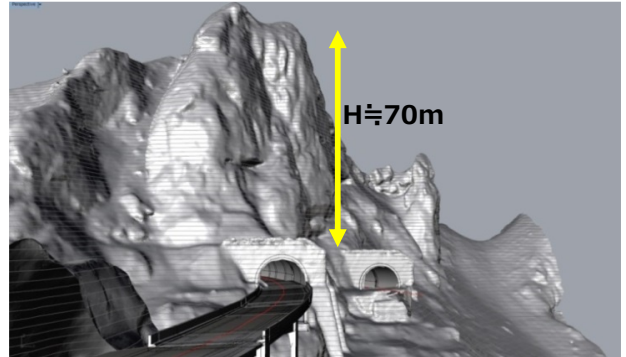
3次元地質・地盤モデル構築上の課題

3次元地質・地盤モデルは岩盤崩壊の形態や運動形式を把握する上で有用なツールと考えられる。しかし、滑動前の岩盤崩壊の認定は容易ではなく、詳細な微地形解析による斜面の重力変形の抽出、線上凹地等の判読等、慎重な斜面観察が必要である。岩盤崩壊を想定した斜面モデル化例を図C-G.8-3に示す。本図は崩壊模式図として取りまとめられたものであり、斜面調査や点検、斜面を3次元モデル化するうえでの着目点となり得る。

さらに、岩盤斜面の評価を行うに際しては、斜面内部の状況、特に崩壊へとつながる不連続面の分布状況を適切に捉える必要がある。その情報が不十分であると、崩壊規模や崩壊形態の予測、ひいては崩壊発生の可能性の判断までを見誤ることになる。

これまで多大な労力を必要としていた斜面形状の図化については、近年のレーザープロファイラーの普及により、短時間でより正確な斜面形状データの取得が可能になった。一方で、3次元モデルを構築するための地中の情報を直接得る手段としては、ボーリング調査（ポアホールカメラ解析等）に頼らざるを得ない状況である。評価の材料となる岩盤斜面の情報取得において、ボーリングを補う新たな調査手法の登場も望まれる。

そのうえで、不連続面の開口の程度や性状、岩盤の風化や破碎の程度等の属性情報を3次元地質・地盤モデルにどう組み込んでいくかが今後の課題と考えられる。



図C-G.8-2 岩盤斜面の3次元モデル化事例³⁾

崩壊形態	平面すべりa	平面すべりb	くさびすべりa	複合すべりa	複合すべりc
地点名	太島内B	大天狗	刀掛B	えりも	北陽
モデル					
崩壊状況	層理面沿いのすべり	柱状節理が連結したすべり	くさび状亀裂によるすべり	斜面に平行な2方向の亀裂に沿ったすべり	流れ盤によるすべり
主因	・細粒火砕岩における流れ盤層理面	・褐色化した流れ盤柱状節理 ・両側方岩体の浸食・欠如 ・流れ盤の分離面(柱状節理)	・2方向の流れ盤崩壊面 ・片側方岩盤の浸食・欠如	・トップリングクリープ現象	・斜面上部の開口亀裂 ・石灰系・チャート互層のキャップロック
伏在要因		・斜面脚部の浸食	・分離面の強度低下	・亀裂沿いの乾溜繰り返しで岩盤劣化・強度低下	・斜面下部の鏡肌を伴う流れ盤亀裂
トリガー	・片側方岩体の浸食・欠如 ・斜面下部の支持力低下または欠如 ・細粒火砕岩の強度低下	・崩壊部背面の強度低下 ・北海道南西沖地震(1993)	・地震動	・地震動 ・暖気による融雪水の浸透	・自重・地下水で岩盤劣化 ・3週間前の記録的豪雨に伴う水頭上昇 ・斜面脚部の崖蝕崩壊
崩壊形態	転倒c	転倒d	転倒e	座屈a	崩落a
地点名	刀掛A	鹿ノ巣A	越前海岸	大崩海岸	釜
モデル					
崩壊状況	下部分離面に沿ったすべりから転倒	背後の分離面形成による転倒	岩体背後の開口亀裂によりトップリングし転倒	脚部流れ盤によるすべり	2方向の垂直亀裂に上部亀裂が連結した崩落
主因	・崩壊面下部の流れ盤分離面 ・側方岩体の浸食・欠如	・斜面の奥に伸びる平滑な分離面 ・片側方岩盤の浸食・欠如	・構造性節理が発達 ・基部(凝灰岩)におけるオーバーハング	・脆弱な構成岩盤	・測面の分離面となる節理 ・脚部オーバーハング
伏在要因	・崩壊面上部の受け盤分離面	・背後におけるやや受け盤状の不規則分離面	・岩体背後の開口亀裂の拡大・劣化	・黒色泥岩におけるすべり面	・斜面に平行な一部新鮮色を残す節理 ・水平な頭部亀裂
トリガー	・地震動 ・岩盤下部分離面の強度低下	・岩盤背面の強度低下 ・岩盤下部の支持領域の減少・欠如	・開口部への落石落下 ・亀裂面の強度低下	・旺盛な浸透水による粘土鉱物の汚泥化 ・背面亀裂の強度低下	・片側方岩体の浸食・欠如 ・分離面の強度低下 ・脚部オーバーハングの進行 ・岩盤上部の強度低下
崩壊形態	崩落b	崩落c	崩落e	凡例	
地点名	滝の沢A	川下	茂津多B		
モデル					
崩壊状況	高角度層理面沿いの崩落	脚部崩壊による多亀裂硬質岩体の崩落	側面亀裂の分離による崩落		
主因	・斜面に平行する火砕岩の流れ盤層理面	・安山岩脚部における軟質な火砕岩の分布	・斜面に平行な褐色化した急立流れ盤の分離面 ・溶岩脚部の火砕岩後退によるオーバーハング化		
伏在要因	・頭部亀裂沿いの浸食	・脚部火砕岩の後退によるオーバーハング化 ・斜面クリープによる荷重集中	・やや新鮮な側面亀裂の分離面化		
トリガー	・層理面の強度低下	・小崩壊による脚部のノッチ化 ・地下水浸透の間隙水圧上昇で上部岩盤亀裂伸張	・地震動 ・側面亀裂の強度低下もしくは亀裂発生 ・岩盤下部の支持領域欠如		

図C-G.8-3 岩盤崩壊を想定した斜面モデルの分類例⁴⁾

参考文献

- 1) 土木学会編, “岩盤斜面の調査と対策”, 1999.
- 2) 土木学会, “岩盤崩壊の考え方 - 現状と将来展望 -”, 2004.
- 3) 渡辺・安積・永井・村本, “上信越道北野牧トンネル西坑口の岩盤崩落リスク低減へむけて”, 月刊基礎工, 2017, H29年7月号.
- 4) 日外・穴戸・阿南・伊藤, “岩盤斜面の既往崩壊事例分析による崩壊原因の整理と崩壊形態のモデル化”, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2010.

例C-G.8-1) 岩盤崩壊を対象とした3次元地質解析

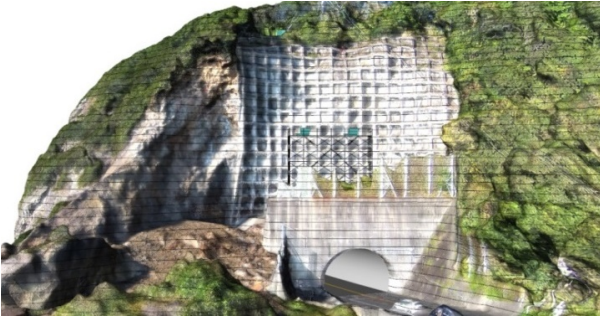
岩盤斜面の安定性を評価するため、不安定ブロックのモデル化をおこなった。なお、実例を示すことができないので、作成のイメージを示した。

◆使用ソフトウェア

モデル作成：GEO-CRE

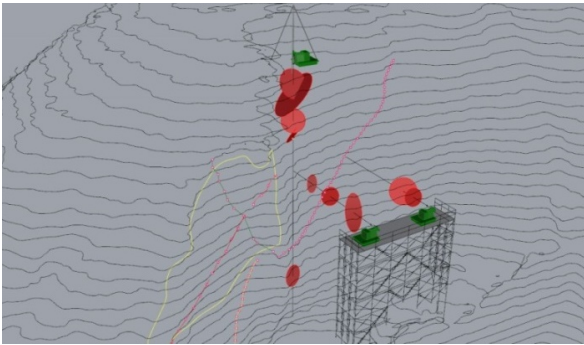
①3次元地形モデル作成

電子化された地形情報やUAVデータ等より地形モデルを作成する



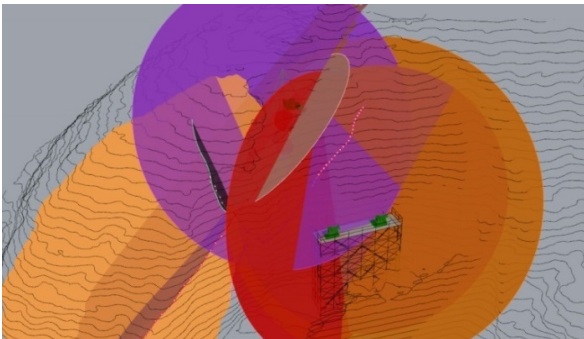
②スケルトンモデル作成

地質調査による様々な情報を3次元化する



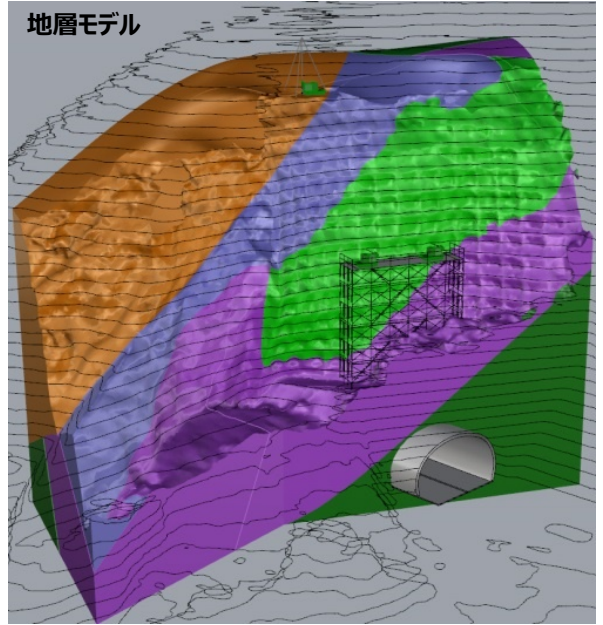
③境界面モデル作成

地質境界や不連続面のサーフェスモデルを作成する

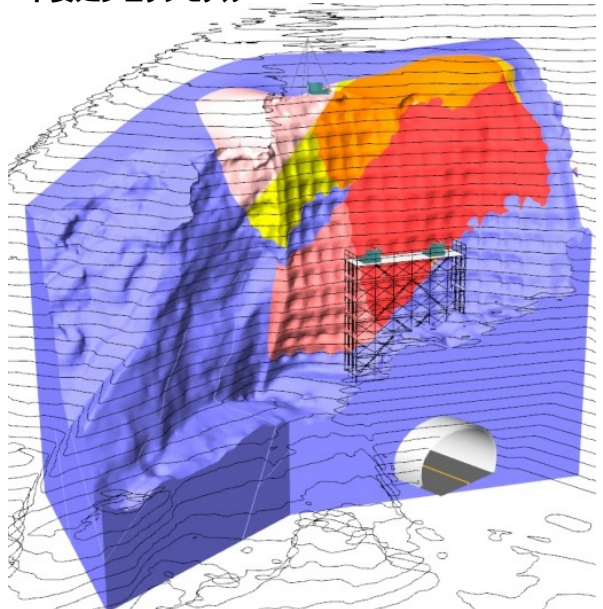


④ソリッドモデル作成

地層モデルを作成後、不連続面モデルを用いて地層モデルをさらに分割し、不安定ブロックモデルを推定する



不安定ブロックモデル



2018年 3月 6日 Ver1.0.0 初版発行
2018年 3月 8日 Ver1.0.1 改訂
2019年 3月15日 Ver1.5.0 改訂
2019年10月 7日 Ver2.0.0 改訂
2020年 9月22日 Ver2.5.0 改訂
2020年12月 1日 Ver3.0.0 改訂

発行元

3次元地質解析技術コンソーシアム

幹事会社 応用地質株式会社 技術本部

〒 331-0812

埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2
電話 048-663-8614 • FAX 048-660-1570

<https://www.3dgeoteccon.com/>

E-mail: 3dgeotec-con@oyonet.oyo.co.jp

**3D Geological
Analysis
Technology
Consortium**

