

地盤技術者のための3次元地質モデル構築とその利用 —IG-Infoによる地質情報表現を例にして—

西山 昭一・小川 卓司・原 弘

An introduction to the geological modeling in three-dimensional space for geotechnical engineers

Syoichi Nishiyama, Takashi Ogawa and Hiroshi Hara

Abstract

Our attempt is laid on introducing practical techniques on three dimensional geological modeling scheme, to engineers who are unfamiliar with them. In this note, first, four sets of topological elements are introduced for computational model presentation. Secondary, geological and geophysical features are combined with these elements. Finally, general introduction about surface and/or volume modeling techniques are set with a field example and some precautions derived from our civil engineering experiences. In the course of explanations given in this note, we use a PC-based, three dimensional visualization tool, named IG-Info.

1 はじめに

近年、地質情報の表示や地質解析をコンピュータ上で行う事例が増えている。その理由は、地質情報の表現力が優れており、そのため、地質情報の整合性や解釈の妥当性を客観的に評価しやすいためと考えられる。また、調査結果の説明性を格段に向上させることができるためとも考えられる。

しかしながら、地質情報をコンピュータ上で3次元的に可視化するためには、個別の情報を3次元の図形要素と対応させ、その要素に固有のデータ構造で情報を記述する必要がある。地盤技術者にとっては、情報の記述に手間がかかることや、その手順自体に馴染みが薄いことから、3次元可視化手法が縁遠いものと思われるのではないだろうか。

本報文では、地盤技術者が3次元可視化手法を利用して3次元地質モデルを構築する場合に必要な基礎知識を整理する。なお、報文中で3次元地質モデルの構築方法をできるだけ具体的に述べることを試みたが、その際、筆者らが開発したIG-Info(Integrated Geological Information tool)を用いた。IG-Infoは、3次元地質解析支援システム¹⁾²⁾の基本機能をWindows PC上で実現した3次元可視化ソフトウェア³⁾である。機能的に類似するソフトは多いが、本ソフトの特徴は、地盤技術者が通常の作業の流れの中で利用することを想定し、そのための機能とユーザーインターフェースを持つようにしたことである。

2 3次元地質モデルの表現方法

本報文における“3次元モデル”とは、点・線・面・ソリッドモデルの図形要素を意味する。これらの3次元モデルにより調査データの分布や地質構造など、地盤に関わる特定の情報や性質を表現したものを“3次元地質モデル”と定義する。

以下に、3次元モデルの種類とそれに対応したデータ構造の概要を整理する。さらに、個々の地質情報を3次元モデルを用いて表現する方法や、3次元地質モデルを構築する際に用いる手法をまとめる。

2.1 3次元モデルの種類と構造

IG-Infoで扱う3次元モデルの種類とその基本的なデータ構造を表-1に示す。3次元モデルは、点・線・面・ソリッドモデルの4種類の図形要素からなる。すべての図形要素は位置情報をもつ点(この場合はノードと呼ぶ)が基本にあり、これに物性値などの属性を持たせたものを点モデルと呼ぶ。また、空間上に分布するノード同士の関係により線・面・ソリッドモデルが形成される。特に、面・ソリッドモデルの場合、ノードが格子状に配置されることを前提としているときに「構造型」と呼び、格子状以外の場合を、「非構造型」と呼ぶ。線・面・ソリッドモデルに物性値などを属性として与えるが、属性をノードに与える場合と、ノードをつなぐ線の中点、およびノードと線で構成された三角形・四面体・立方体などのセル中心に与える場合がある。

表-1 IG-Infoで扱う3次元モデルの図形要素とデータ構造
Table.1 Three dimensional model elements and their data structure.

図形要素	モデルイメージ	データ構造
点		位置座標と点(ノード)の属性
線		点の位置座標、結線情報、点および結線中心の属性
面		【構造型】 1枚の格子状に並んだ点の位置座標と属性
		【非構造型】 1枚の3角形・4角形の形状に配置する点の位置座標、結線情報、点・結線中点・形状中心の属性
ソリッド		【構造型】 立体的な格子状に並んだ点の位置座標と属性。
		【非構造型】 3角錐・立方体等の形状に配置する点の位置座標、結線情報、点・結線中点・形状中心の属性

2.2 地質調査情報の3次元モデル表現

地質調査情報は測定方法や解釈方法に応じて、適切な3次元モデルで表現する必要があり、筆者らは、表-2に示すような表現方法を採用している。

地質調査情報は「調査データ」と「モデリングデータ」に分けることができる。「調査データ」は地質調査によって直接取得される情報であり点や線モデルで表現できるものが多い。例えば、ボーリング位置は、点モデルであり、「ボーリングNo」、「x座標」、「y座標」、「坑口標高」、「その他の情報」という数値列データとなる。また、ボーリングコアの観察によって取得されるコア区分データの場合は線モデルで表現され、「ボーリングNo」、「コア区分名称」、「上端深度」、「下端深度」、「色調情報」、「物性値1」、「物性値2」...などの数値もしくはコード番号によって記述することになる。

「モデリングデータ」は「調査データ」に基づき解析者が作成・構築するもので、面あるいはソリッドモデルによる表現が多用される。一般に、3次元地質モデルという場合には、これらを示すことが多い。地質境界面などは、もっとも単純な構造型の面モデルで表されるケースが多いと考えられるが、その場合のデータの記述は各格子点ごとに、「x座標」、「y座標」、「z座標」、「格子点での物性値1」、「物性値2」...などのようになる。ただし、面あるいはソリッドモデルの場合、次節に述べる何らかのモデリング手法を用いて計算で作成することが多い。

2.3 モデリング

ここでいう「モデリング」とは、3次元空間に不規則に分布する点データから、地質境界面などの面モデルや物性値の分布を示すソリッドモデルを数学的手法で生成し、これらのモデルについて地層の上下関係などの地質学的位相関係を考慮したモデルの「加工」を行い3次元地質モデルを完成させる、一連の作業を指す。

表-2 IG-Infoにおける地質調査情報と3次元モデルの対応
Table.2 Representation of geological features in model elements.

地質調査情報			図形要素				備考
			点	線	面	ソリッド	
調査データ	露頭	位置	○				
		種類	○				露頭を構成する地質等の属性
		不連続面	○				層理・断層・節理等。走向・傾斜の属性を持つ
	ボーリング	位置	○				
		掘削線		○			傾斜角度や孔曲がりの情報を持つ
		境界点	○				地質境界や断層等の位置。走向・傾斜の属性を持つ
		コア区分		○			地質・風化・岩級区分等の区分情報
	試験データ	○	○			点：試験深度一値 線：試験区間一値	
	物理探査			○		電気探査、弾性波探査等	
モデリングデータ	地形面			○			
	境界面			○		地質境界や断層等	
	地層				○		
	物性モデル				○	地質モデル等のノードや要素中心に物性値の属性を付加したもの	
	構造物	○	○	○		CADデータ	

(1) 面・ソリッドモデルの生成手法

面モデルを生成する手法には、不規則に分布する点データより、3次元空間の面を三角網により近似する手法や、格子点上の値を内挿・補間する“グリッディング”による手法がある。ここでは、我々の分野に適していると考えられる“三角網近似”と、グリッディングの代表的手法である“クリギング⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾”の2手法について、その特徴について述べる。なお、これらの手法の若干の解説を巻末の用語集に示した。

三角網近似 (Triangulation) ※1は、面モデルを記述するためのデータ量が他の手法と比較して少ないため、扱いやすいモデルを生成できる利点がある。この方法は点データが多く得られやすい地形面の生成に良く用いられている。この手法による面モデルは非構造型となる。

クリギング (Kriging) ※2は、離散点より2次元あるいは3次元の格子点におけるデータの推定値を計算 (予測) する手法である。筆者らは、地質境界面や地層あるいは物性値の分布などの構造型面 (あるいはソリッド) モデルを生成するために利用している。

(2) モデルの加工

グリッディングなどで生成したモデルは、数学的に発生させたものであり、地質的に有用なモデルとするためには、地層累重の法則や、地形侵食の影響などを考慮した加工を施す必要がある。モデルの加工は、モデル間の関係についての地質学的な考察に基づいた位相幾何学的な操作であり、いわゆる「切り合い」の処理である。その内容の一例を、図-1に示す。

例えば、2枚の面モデル (aおよびa') に挟まれ

た領域を、1つの地層とみなし地層Aのソリッドモデルを作成したり、交差する面モデル (bおよびb') について、境界面の新旧の条件を与えて地層 (B1およびB2) を作成する。また、地形面や不整合面と認定した面で地層のソリッドモデルを切断したり、地層の内部に空間を切り抜くなどの処理がある。このような加工は、解析者が手作業でモデル間の関係を指定し操作する必要があるが、GISS^{1),2)} などのように半自動的に処理する環境を備えているソフトもある。

(3) 適用事例

以上、これまでに説明した3次元地質モデルの表現方法を、やや具体的に実際のデータの流れの形でまとめてみる。図-2は、ダムサイトにおける水理地質構造を検討する目的で3次元地質モデルを構築した例である。モデルの構築には、地表地質踏査やボーリング調査で確認した地質境界位置、ボーリング92孔で実施したルジオン試験 (約1450データ) の調査データを用いている。

地形面は、デジタイズを行い電子データとした等高線を、標高値を持った離散点とした後、クリギングにより面モデルを生成させている。地質境界面は、露頭やボーリングコア観察に基づき地質境界の点データを作成し、クリギングにより面モデルを作成している。ルジオン値のソリッドモデルは、試験区間のデータを用いてクリギングにより空間的なルジオン値の分布を計算している。なお、地質境界の面モデルとルジオン値のソリッドモデルは、それぞれのモデルを生成した後、地形面により「切り合い」処理を行っている (図-3)。

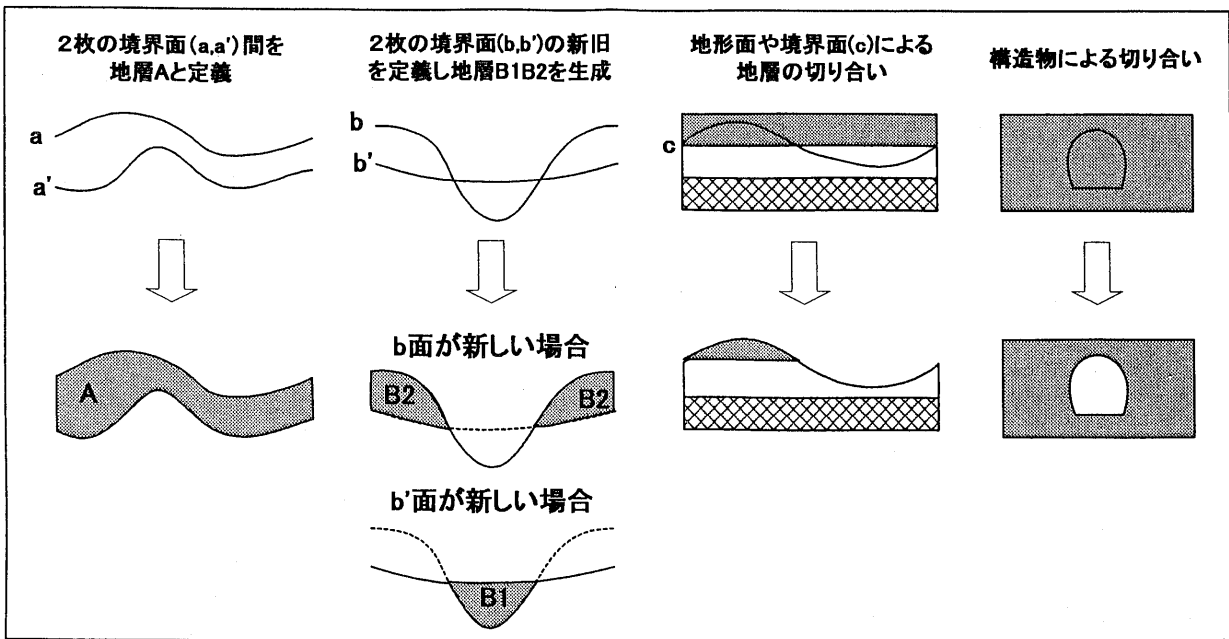


図-1 モデルの加工の概念図

Fig.1 Schematic examples of geomorphological operations according with geological relationships among modeled strata.

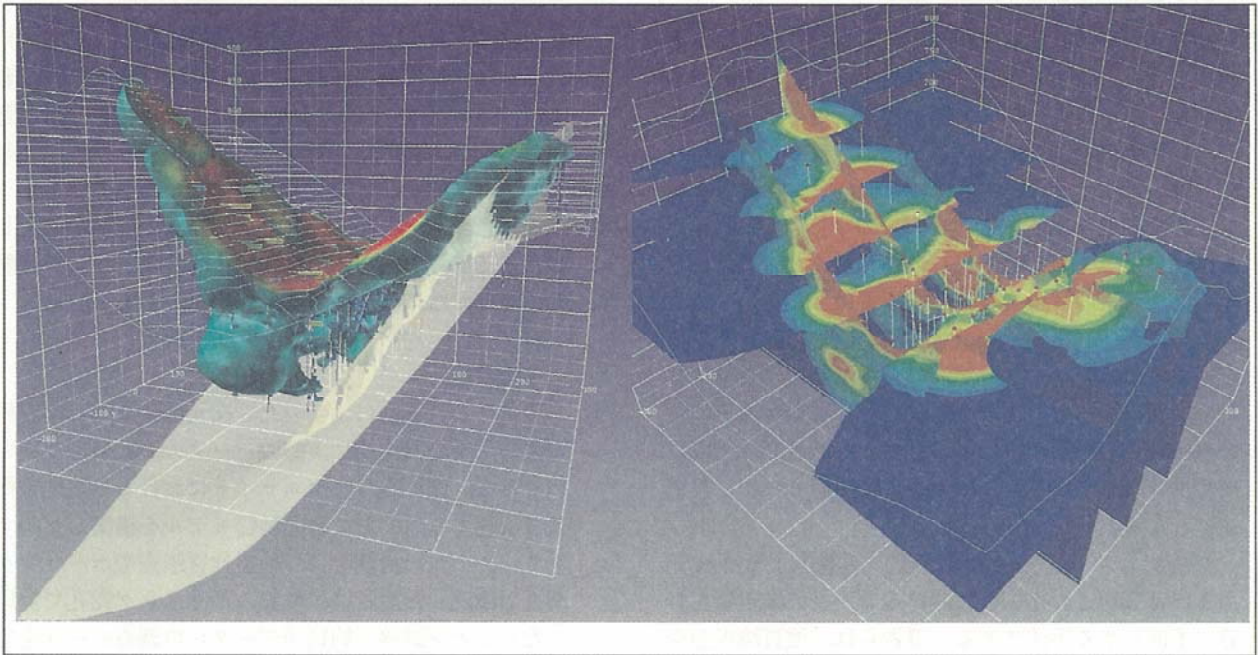


図-2 ダム地質調査における3次元地質モデル構築の例
 (左図：高ルジオン部の分布と地質境界面，ボーリング情報，地形面の等高線
 右図：ルジオンソリッドモデルのダム軸・水平方向のパネルダイアグラム)

Fig. 2 Examples of three dimensional geological model expression on a planned site of dam construction.
 (Left: A geological boundary estimated from observations of cored samples is modeled by a surface model. Individual measured Lugeon value is mapped along with each drill line. Aerial distribution of Lugeon value is modeled by solid. Volume contained a region showing Lugeon value of 20 or more, is rendered according to their values. Right: Once one build a solidified Aerial Lugeon map model, it can generate an arbitrary set of vertical and horizontal sections from its body.)

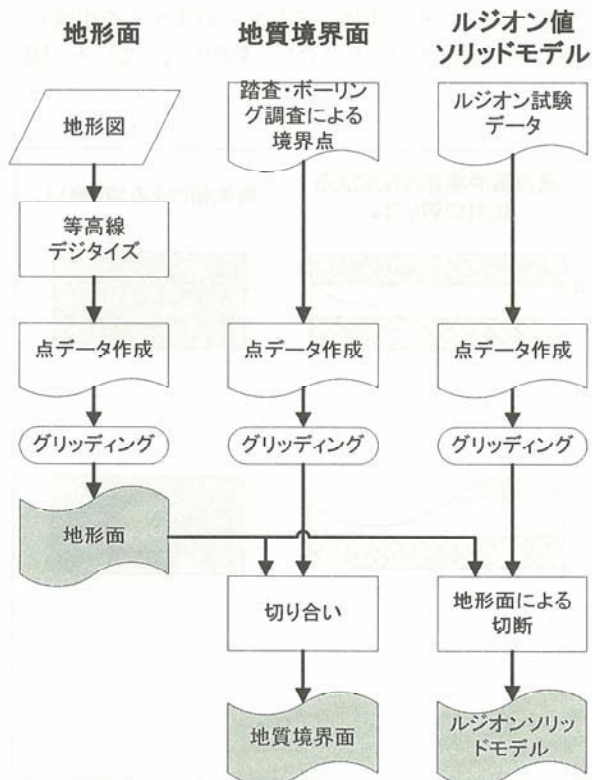


図-3 モデリングフロー
 Fig. 3 Flow chart of data manipulations in obtaining a set of models presented in Figure 2.

3 3次元地質モデル構築時の留意点

本章では、3次元の地質モデルを構築する上で、また、作成したモデルを評価する上で留意したい点を、筆者らの経験に基づいてまとめる。

(1) データ密度とモデルの信頼性

面・ソリッドモデルの生成手法に共通する問題点は、点データの密度により、生成するモデルの精度・信頼性に偏りが生じてしまうことである。データの疎な部分や欠落している範囲では、面あるいはソリッドモデルは計算上生成されるが、データの密なところと同等に評価しては危険である。これは当然のことであるが、モデリングの結果である地質モデルだけを見る場合、往々にしてつまずくところである。例えば、図-2のルジオン値のソリッドモデルでは、ボーリング調査を実施していない外挿の範囲のデータは低ルジオンと表現されてしまい、誤解を招く可能性がある。“グリidding”は解析エリアを矩形で指定するため、この手法では、モデルの外挿範囲の信頼性が低下することに注意すべきである。

(2) モデルの格子間隔と解析エリアの関係

地形面や境界面モデルに多用される構造型面モデルでは、格子間隔を小さく設定すると、データの局所的な値に左右されるため、面の起伏が著しくなる場合がある。また、モデル自体を記述するデータの量が著しく増加し、モデリングの計算やモデル自体の表示に時間を要するようになる。構造型面モデルの生成に際しては、事前にモデルに必要とする精度とデータの分布状態を考慮し、細か過ぎない格子間隔とする必要がある。図-2の事例では、高角度の地質境界や微地形を表現するため、格子間隔を5mに設定したが、それ以下としてもモデルの精度が地形測量の精度を上回ることがないと判断した結果である。この場合は解析エリアが600m×600mであるので、地形面でいえば $121 \times 121 = 14641$ 点の格子点を生成させたことになる。この程度のデータ量であれば、標準的なパーソナルコンピュータで扱うことができる。

(3) 複雑な地質モデルの処理方法

構造型面モデルでは、構成する点の位置座標の重複が許されない。そのため、褶曲構造や高角度断層、急崖のオーバーハングのような形状を、一枚の面モデルで表現しようとした場合、1つのx,y座標に複数のz座標(標高値)を持つ多価関数となるため構造型面モデルによる表現が不可能である。これらのモデルを表現するには、構造型面モデルを複数枚組み合わせるか、結線情報を定義できる非構造型面モデルを用いることが考えられる。筆者らの場合、前者の方法を採用することが多いが、必要に応じて3次元CADソフトや専用のモデリングソフトウェアを用いることがある。

4 あとがき

地質調査データを3次元モデルを用いて表現するための基礎的な概念や手法を整理し、モデル構築の手順を筆者らの経験を含めて、やや具体的な事例を用いてまとめた。実務的には、本報文に含まれない多様な操作テクニックを駆使する必要に迫られることも多いが、3次元地質モデル構築の概要についてはある程度の理解が得られたものとする。

3次元地質モデルを作成し、それを可視化することが、本質的に複雑な地質および地質構造を2次元(紙面)で表現してきた場合よりも、視覚的で直感的な説明手段であることは多くの人が認めているところであり、そのような努力はこれまでもなされてきた。今後、ここに述べたような手法を多くの事例に適用して経験を重ねることで、地盤技術者にとってより扱いやすい3次元モデリング・可視化環境を構築してゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 和田弘・原 弘・小川卓司(1999): 3次元地質解析支援システムの提案, 日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集, pp.311-314.
- 2) 原 弘・小川卓司(2000): 3次元地質解析支援システム, 応用地質技術年報, No.20, pp.131-138.
- 3) 西山昭一・原 弘・小川卓司(2002): 地質情報の統合化ツールの開発, 日本応用地質学会平成14年度研究発表会講演論文集, pp.309-310.
- 4) 松岡俊文(1997): 地球統計学, 物理探査, 第51巻, 第1号, pp.96-98.
- 5) 新井勝男(1985): 地球統計学の基本概念とその応用-鉱床品位のクリギングとシミュレーションについて-, 鉱山地質, 35, pp.229-311.
- 6) 間瀬茂・武田純(2001): 「空間データモデリング」-空間統計学の応用-, データサイエンスシリーズ⑦, 共立出版, pp.136-159.
- 7) Deutsh C.V. and Journel A.G. (1998): 「GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide Second Edition」Oxford University Press, pp.63-116.

【用語解説】

※1 三角網近似

三角網近似(Triangulation)は、隣接する点データを連結してできる三角形によって面を近似する方法である。この手法の最大の特徴は、離散点の座標値のみによって定義された面モデルを生成することであり、このため、データ密度が高い場合には補間計算をしないでも十分に高い精度で面を生成することができる。

※2 クリギング

クリギング(Kriging)は、仮定した面に対して、点データの推定分散・共分散が最少になるように面の形状を調整する手法で、一般化された最小自乗法である⁷⁾。クリギングでは、他の手法と比較して、自然な形状に近い滑らかな面モデルを作成することができるといわれている。

