

第7章 3D 地質モデリング手法

(野々垣 進)

7. 1 3D 地質モデルの概要

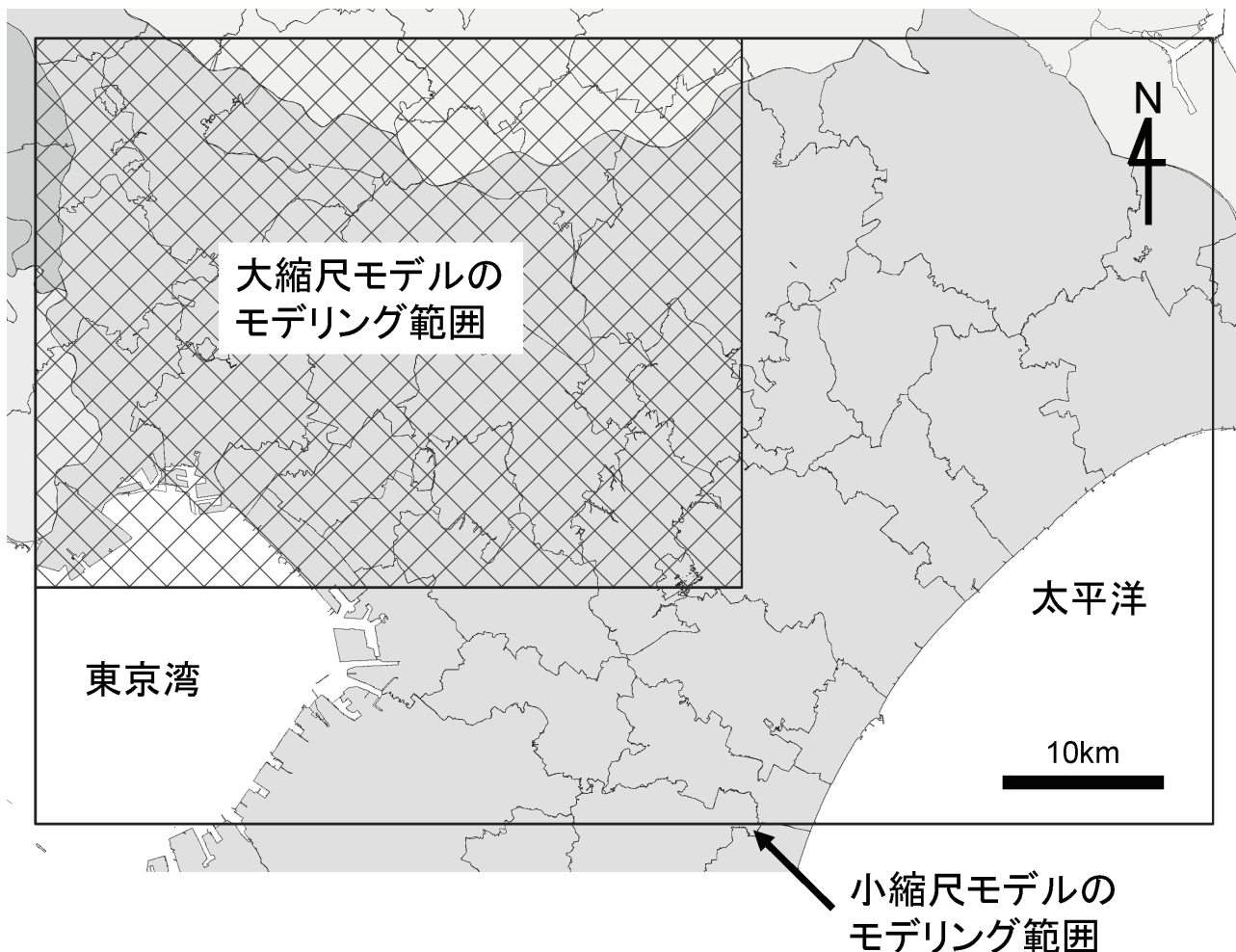
3D 地質モデルは、地表の地形情報と地下の地質情報とを統合した地質地盤モデルである。地表の地形情報には各種空間情報から作成した地形分類図（第1章参照）を用い、地下の地質情報には基準ボーリングデータや露頭柱状図などから作成した地下地質モデル（後述）を用いた。大縮尺モデルのモデリング範囲は、東西 45 km×南北 35 km の地域（世界測地系（JGD2011）平面直角座標系第9系における東西 [3500, 48500]×南北 [-43000, -8000] の矩形領域）、小縮尺モデルのモデリング範囲は、東西 75 km×南北 50 km の地域（世界測地系（JGD2011）平面直角座標系第9系における東西 [3500, 78500]×南北 [-58000, -8000] の矩形領域）である（第7.1図）。

7. 2 地形分類図の作成

地形図、数値標高モデル、土地条件図、空中写真、地質図幅などを用いて地形判読を行い、対象範囲の地形分類図を作成した（第1.1図）。地形図、数値標高モデル、土地条件図には、国土地理院発行のものを用いた。数値標高モデルには、主として 5 m メッシュを用いたが、5 m メッシュが存在しない範囲では 10 m メッシュを用いた。空中写真には、1:20000 以上の縮尺のものを用いた。

7. 3 地下地質モデルの作成

地下地質モデルは、本プロジェクトにおいて整備した基準ボーリングデータ、既存研究で報告されている



第7.1図 モデリング範囲。

北西部の小さい矩形領域が大縮尺モデルのモデリング範囲を、外側の矩形領域が小縮尺モデルのモデリング範囲を示す。背景図には、国土地理院の基盤地図情報を用いた。

第 7.1 表 地質構造の論理モデル.

(a)

		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
α	上部空間								+
b_8	埋立層							+	-
b_7	沖積層						+	-	-
b_6	常総層					+	-	-	-
b_5	木下層上部				+	-	-	-	-
b_4	木下層下部			+	-	-	-	-	-
b_3	清川層・横田層		+	-	-	-	-	-	-
b_2	上泉層	+	-	-	-	-	-	-	-
b_1	上総層群・地蔵堂層・葦層	-	-	-	-	-	-	-	-

(b)

		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
α	上部空間						+
b_6	木下層					+	-
b_5	清川層・横田層				+	-	-
b_4	上泉層			+	-	-	-
b_3	葦層		+	-	-	-	-
b_2	地蔵堂層	+	-	-	-	-	-
b_1	上総層群	-	-	-	-	-	-

(a) 大縮尺モデル, (b) 小縮尺モデル.

(a) はイベント列 $V_8 = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$ に基づく. b_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) は地質体を表し, S_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) は境界面を表す. α は地上の空気や水などの空間を表す. (b) はイベント列 $V_6 = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$ に基づく. b_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は地質体を表し, S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は境界面を表す. α は地上の空気や水などの空間を表す. (a) と (b) において, 地質体の行と境界面の列との交差セルにおける記号 (空白, +, -) が, 地質体と境界面との論理的関係を表す. 空白は地質体と境界面とが無関係であることを, + は地質体が境界面よりも上位であることを, - は地質体が境界面よりも下位であることを表す.

露頭柱状図 (中里・佐藤, 2016), 及び, 自治体等が保有している既存ボーリングデータを用いて作成した. 既存ボーリングデータの利用にあたっては, 千葉県環境研究センター地質環境研究室の協力を得た. モデリングでは, 岩村ほか (2012) を参考に, (1) 地質体及び境界面の設定, (2) イベント列及び地質構造の論理モデルの作成, (3) 等式・不等式標高データの作成, (4) 等式・不等式標高データの調整, (5) 境界面の推定, (6) 地下地質モデルの作成, という 6 つの処理を順に行った. 以下では, それぞれの処理について記す.

7. 3. 1 地質体及び境界面の設定

モデリング範囲の地下約 100 m 以浅には, 鮮新統 - 中部更新統上総層群, 中 - 上部更新統下総層群, 上部更新統の常総粘土, 新期段丘堆積物及び新期関東ローム層, 上部更新統 - 完新統の沖積層, 埋立層が分布する.

大縮尺モデルでは, モデリング範囲の地層を下位より, b_1 (上総層群, 地蔵堂層, 葦層), b_2 (上泉層), b_3 (清川層及び横田層), b_4 (木下層下部), b_5 (木下層上部),

b_6 (常総層), b_7 (沖積層), b_8 (埋立層) という 8 つの地質体に区分した. 常総粘土, 新期関東ローム層, 及び新期段丘堆積物については, 下総層群の木下層あるいは常総層から連続する一連の堆積物として扱い, 地質体 $b_4 \sim b_6$ のいずれかの一部として扱った. また, 各地質体を境する 8 つの境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) を設定した. 境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) はそれぞれ地質体 b_i ($i = 2, 3, \dots, 8$) の基底面を表す. 境界面 S_8 は地表面を表し, 地下の地質体空間と地上の空気や水などの空間 (上部空間: α) とを境する面である.

小縮尺モデルでは, モデリング範囲の地層を下位より, b_1 (上総層群), b_2 (地蔵堂層), b_3 (葦層), b_4 (上泉層), b_5 (清川層及び横田層), b_6 (木下層) という 6 つの地質体に区分した. 常総粘土, 新期関東ローム層, 及び新期段丘堆積物については, 下総層群の木下層から連続する一連の堆積物として扱い, 地質体 b_6 の一部として扱った. また, 各地質体を境する 6 つの境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) を設定した. 境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) はそれぞれ地質体 b_i ($i = 2, 3, \dots, 6$) の基底面を表す. 境界面 S_6 は地表面を表し, 地下の地質体空間と上部空間 α とを境する面である.

実際の地質体間の接触関係には, いずれも不整合と整合の両者が認められるが, ここではモデリング処理の都合上, 大縮尺・小縮尺両モデルにおいて, すべての地質体間の接触関係を不整合として扱った.

7. 3. 2 イベント列及び地質構造の論理モデルの作成

地質体間の接触関係をもとに, 地質構造の変遷 (地史) を表すイベント列 (Yonezawa *et al.*, 2002; 塩野・山根, 2009 など) を作成した. ここでは, モデリング範囲では, 断層, 地すべり, 貫入などによる地質構造の変化はなく, 堆積・侵食作用のみが働いたと考えた. その上で, 大縮尺モデルのモデリング範囲におけるイベント列を $V_8 = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$, 小縮尺モデルのモデリング範囲におけるイベント列を $V_6 = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$ とした. ここで, v_1 は初期状態, c^* は堆積・侵食イベントを表す. これらのイベント列を用いて, 地質体の分布域と境界面との論理的関係を表す, 地質構造の論理モデル (塩野ほか, 1998) を作成した (第 7. 1 表). なお, イベント列を作成するにあたっては, 塩野ほか (1998) の定義に従った. イベント列から地質構造の論理モデルを作成するにあたっては, 米澤ほか (2004) の漸化式を利用した.

7. 3. 3 等式・不等式標高データの作成

境界面の形状を推定するための等式・不等式標高データ (野々垣ほか, 2008) をボーリングデータなどから作成した. 等式標高データは「境界面は指定した標高を通る」という制約条件を与える標高データ, 不等式標高データは「境界面は指定した標高よりも上側または下側を通る」という制約条件を与える標高データで

第 7.2 表 境界面の計算パラメーターと推定誤差.

(a)

面	x_{\min}	x_{\max}	y_{\min}	y_{\max}	N_H	M_x	M_y	α_{\min}	α_{\max}	N_{ITR}	m_1	m_2	ID_{OPT}	$RMSE$ (m)
S_1	3,000	49,000	-44,500	-6,500	1,809	230	190	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	2.92×10^{-1}
S_2	3,000	49,000	-44,500	-6,500	4,307	230	190	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	4.21×10^{-1}
S_3	3,000	49,000	-44,500	-6,500	2,323	230	190	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	8	7.04×10^{-1}
S_4	3,000	49,000	-44,500	-6,500	6,993	230	190	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	4.22×10^{-1}
S_5	3,000	49,000	-44,500	-6,500	17,808,917	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.9	0.1	9	1.25×10^0
S_6	3,000	49,000	-44,500	-6,500	18,482,910	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.9	0.1	9	2.14×10^0
S_7	3,000	49,000	-44,500	-6,500	3,569	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.9	0.1	5	2.15×10^{-1}

(b)

面	x_{\min}	x_{\max}	y_{\min}	y_{\max}	N_H	M_x	M_y	α_{\min}	α_{\max}	N_{ITR}	m_1	m_2	ID_{OPT}	$RMSE$ (m)
S_1	0	80,000	-60,000	-6,000	185	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	3.58×10^{-1}
S_2	0	80,000	-60,000	-6,000	759	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	2.70×10^{-2}
S_3	0	80,000	-60,000	-6,000	1,809	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	7.82×10^{-1}
S_4	0	80,000	-60,000	-6,000	4,307	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	3.50×10^{-1}
S_5	0	80,000	-60,000	-6,000	7,044	600	600	0.1	1.0×10^3	10	0.5	0.5	5	3.58×10^{-1}

(a) 大縮尺モデル, (b) 小縮尺モデル.

x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max} はそれぞれ推定範囲の西端, 東端, 南端, 北端の座標である. N_H は等式・不等式標高データの総数である. M_x と M_y はそれぞれ, 双 3 次 B-スプラインを定義する際の東西方向と南北方向の推定領域の分割数である. α_{\min} と α_{\max} はそれぞれ, 拡大目的関数におけるペナルティ α の初期値と終了値である. N_{ITR} は反復計算回数である. m_1 と m_2 はそれぞれ, 面の水平性と平面性の重みパラメーターである. ID_{opt} は反復計算過程で得た境界面のうち, 何回目の計算で得た結果を最適面としたかを表す. $RMSE$ は, 制約条件を満たさなかった標高データと境界面との残差の自乗平均であり, 平均推定誤差に相当する.

ある.

データ作成では, まず基準ボーリングデータにおいて各境界面の位置を認定し, 等式標高データを作成した. 境界面の正確な位置を認定できないが地質体を確認できる場合は, 地質構造の論理モデルから得られる地質体と境界面との論理的関係を用いて, 不等式標高データを作成した. 次に, 基準ボーリングデータの場合と同様の方法で, 中里・佐藤 (2016) の露頭柱状図から等式・不等式標高データを作成した. 最後に, 基準ボーリングデータを軸として, 既存ボーリングデータへの地質体の対比を行うことで, 既存ボーリングデータに関する等式・不等式標高データを作成した. 各等式・不等式標高データの座標は, 世界測地系 (JGD2011) 平面直角座標系第 9 系に統一した.

7. 3. 4 等式・不等式標高データの調整 (大縮尺モデルの場合のみ)

大縮尺モデルの作成では, 地形分類図の常総層, 沖積層及び埋立層の分布域を利用して, 境界面 S_5 (常総層の基底面), S_6 (沖積層の基底面) 及び S_7 (埋立層の基底面) の等式・不等式標高データを調整した.

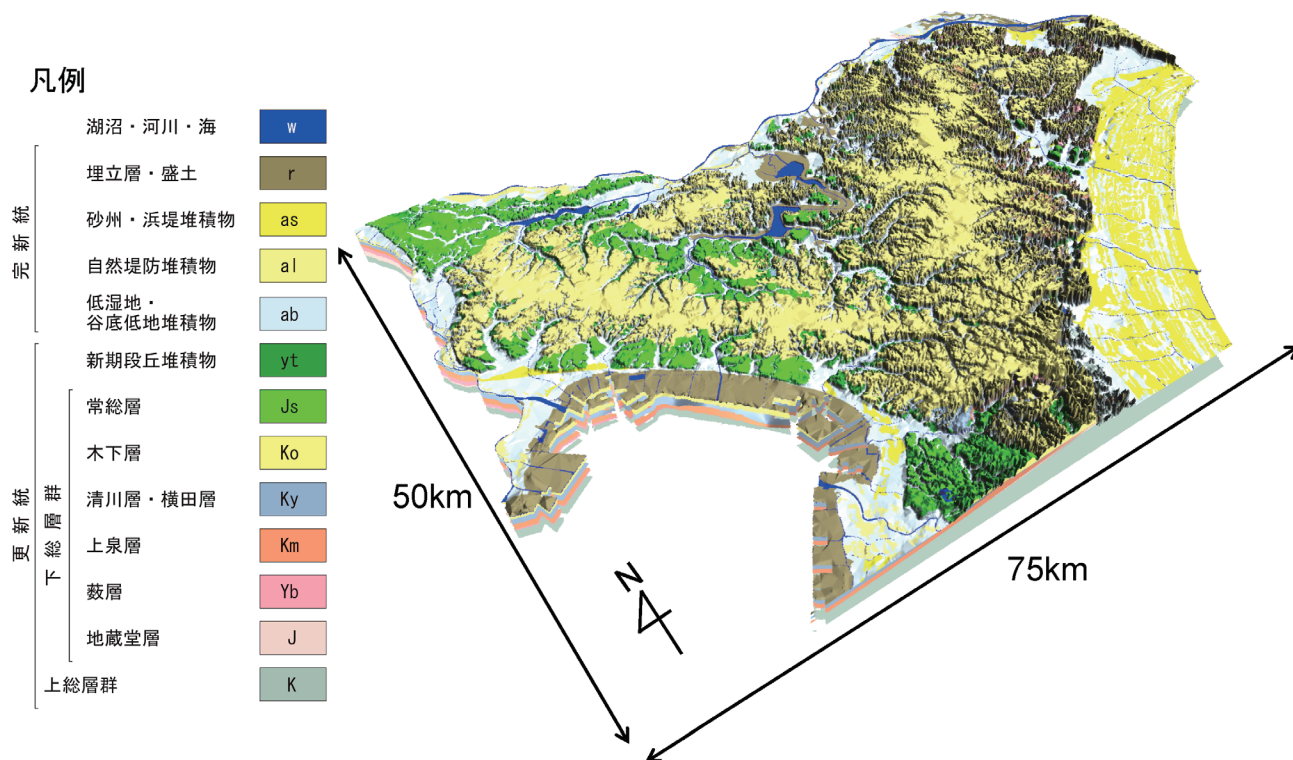
境界面 S_5 (常総層の基底面) については, 地形分類図のベクトルデータを用いて, 常総層の分布域を指定する界線の構成点における標高を等式標高データとして追加した. 構成点における標高は, 国土地理院の標高 API (URL1) を利用して算出した. また, 国土地理院発行の基盤地図情報・数値標高モデル (10 m メッシュ) を用いて, 常総層の分布域の地表面標高を「境界面はここよりも下側を通る」という不等式標高デ

ータとして追加した. 同様に, 常総層以外の領域の地表面標高を「境界面はここよりも上側を通る」という不等式標高データとして追加した. ただし, 基盤地図情報・数値標高モデル (10 m メッシュ) は世界測地系 (JGD2011) 地理座標系の座標情報をもつため, あらかじめ Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) により平面直角座標系第 9 系による座標情報へ変換した. 境界面 S_6 (沖積層の基底面) についても, 境界面 S_5 (常総層の基底面) の場合と同様に, 地形分類図の界線の構成点における標高を等式標高データとして, 当該地質体の分布域及びそれ以外の領域における地表面標高を不等式標高データとして追加した. 境界面 S_7 (埋立層の基底面) については, 地形分類図の界線の構成点における標高を等式標高データとして追加した.

7. 3. 5 境界面の推定

等式・不等式標高データを用いて, 野々垣ほか (2008) の手法により, 境界面の形状を推定した. 大縮尺モデルと小縮尺モデルを構成する境界面それぞれの計算パラメーター及び平均推定誤差を第 7.2 表に示す. 計算パラメーターの詳細は, 野々垣ほか (2008) を参照されたい.

推定した境界面は, いずれも 10 m 間隔の数値標高モデルとして出力した. 数値標高モデルの出力範囲は, モデリング範囲に等しい. 大縮尺モデルに用いた数値標高モデルのデータ数は東西 4500×南北 3500 点, 小縮尺モデルに用いた数値標高モデルのデータ数は東西 7500×南北 5000 点である. 地表面 (大縮尺モデルの境界面 S_8 と小縮尺モデルの境界面 S_6) については推定を



第 7.2 図 小縮尺モデルの表示例.

行わず，国土地理院の基盤地図情報・数値標高モデル（10 m メッシュ標高）を用いた．ただし，この数値標高モデルは世界測地系（JGD2011）地理座標系による座標情報をもつため，GDAL により平面直角座標系第 9 系による座標情報へ変換して利用した．また，変換と同時に海域の標高を NULL（データ無し）とした．

7. 3. 6 地下地質モデルの作成

地質構造の論理モデルと境界面の数値標高モデルを用いて，Masumoto *et al.*（2004）のアルゴリズムにもとづき，地下地質モデルを作成した．

7. 4 3 次元地質モデルの作成

地形分類図と地下地質モデルのそれぞれがもつカテゴリ値を再分類することにより，3 次元地質モデルを作成した．この 3 次元モデルは，地表では地形分類図及び地下地質モデルの情報を持ち，地下では地下地質モデルの情報をもつ（第 7.2 図）．