

第8章 3D地質モデリング手法

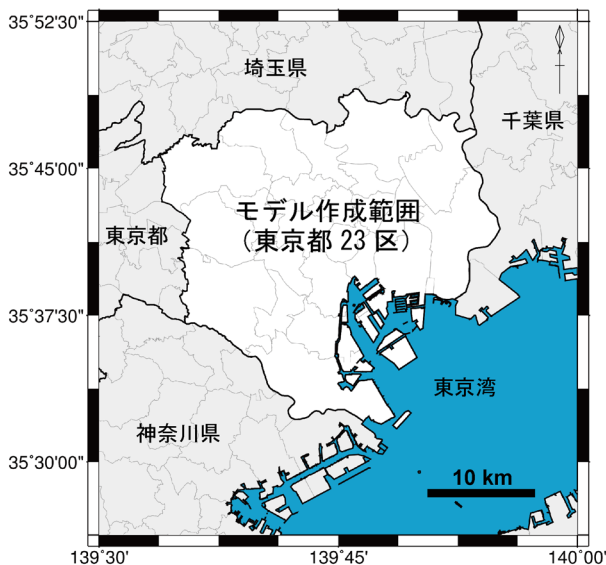
(野々垣 進・中澤 努・納谷友規・小松原純子・宮地良典・尾崎正紀)

8.1 3D地質モデルの概要

ここでの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区分図(第1章参照)を用いた。地下の地質情報には、地形区分図とボーリングデータを用いた地層の対比結果とから作成した地下サーフェイスモデル(後述)を用いた。モデルの作成範囲は東京都23区である(第8.1図)。

8.2 地形区分図の作成

地形図、数値標高モデル、空中写真、ボーリングデータ等の各種空間情報を参考に地形判読を行い、対象範囲の地形区分を表すベクトルデータを作成した(第1.1図)。数値標高モデルには、主として基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュ(標高)(以下、5mメッシュDEM)を用いたが、5mメッシュDEMが存在しない範囲では同10mメッシュ(標高)を用いた。本地形区分では、台地部を下末吉面、武蔵野I面、武蔵野II面、武蔵野III面、立川面の4個の категорияに、低地部を低湿地・谷底低地、砂州・砂嘴及び浜堤、自然堤防、旧河道、干拓地、埋立地、人工河川の7個の категорияに区分した(第1章参照)。



第8.1図 3D地質モデルの作成範囲。
行政区界線には「国土数値情報(行政区界データ)」(国土交通省, 2020)を利用。

8.3 地下サーフェイスモデルの作成

地下サーフェイスモデルは、本プロジェクトで整備した基準ボーリングデータ(第2章～第6章参照)と公共工事の際に作成されたボーリングデータ(以下、既存ボーリングデータ)とを用いて作成した。既存ボーリングデータの利用にあたっては、東京都土木技術支援・人材育成センターの協力を得た。モデル作成では、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)地層対比による等式・不等式標高データの作成、(4)地形区分図を用いた等式標高データの作成、(5)境界面の形状の推定、(6)サーフェイスモデルの作成という6つの処理を順に行った。以下に、各処理について記す。

8.3.1 地質体及び境界面の設定

モデリング範囲の地下約100m以浅には、下～中部更新統上総層群、中～上部更新統下総層群、段丘堆積物及び関東ローム層、上部更新統～完新統の沖積層が分布する(第2章参照)。これを踏まえ、モデリング範囲の地下を形成時期の古いものから順に、 b_1 (上総層群)、 b_2 (荻層)、 b_3 (上泉層)、 b_4 (東京層下部)、 b_5 (東京層上部)、 b_6 (武蔵野I段丘堆積物)、 b_7 (武蔵野II段丘堆積物)、 b_8 (武蔵野III段丘堆積物)、 b_9 (立川段丘堆積物)、 b_{10} (沖積層)という10個の地質体に区分した。関東ローム層については、東京層または段丘堆積物から連続する一連の堆積物として扱い、地質体 b_k ($k=5, 6, \dots, 9$)の一部として扱った。また、各地質体を境する10個の境界面 S_i ($i=1, 2, \dots, 10$)を設定した。境界面 S_i ($i=1, 2, \dots, 9$)はそれぞれ地質体 b_k ($k=2, 3, \dots, 10$)の基底面を表す。境界面 S_{10} 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。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、全ての地質体間の接触関係を不整合として扱った。

8.3.2 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、モデリング範囲の地質構造の変遷(地史)を表すイベント列(塩野ほか, 1998)を作成した。ここでは、モデリング範囲には断層、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上で、イベント列

第 8.1 表 地質構造の論理モデル.

		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
α	上部空間										+
b_{10}	沖積層									+	-
b_9	立川段丘堆積物								+	-	-
b_8	武蔵野Ⅲ段丘堆積物							+	-	-	-
b_7	武蔵野Ⅱ段丘堆積物						+	-	-	-	-
b_6	武蔵野Ⅰ段丘堆積物					+	-	-	-	-	-
b_5	東京層上部				+	-	-	-	-	-	-
b_4	東京層下部			+	-	-	-	-	-	-	-
b_3	上泉層		+	-	-	-	-	-	-	-	-
b_2	荻層	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b_1	上総層群	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

b_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) は地質体を表し, S_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) は境界面を表す. α は地上の空気や水などの空間を表す. 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. + 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, 空白は地質体と境界面とが無関係であることを表す.

を $V_{10} = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$ とした. ここで, v_1 及び c^* はそれぞれ塩野ほか (1998) で示された初期状態及び堆積・侵食イベントを表す. こ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 8.1 表). 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.

8. 3. 3 地層対比による等式・不等式標高データの作成

基準ボーリングデータと既存ボーリングデータを利用して, 境界面を推定するための等式・不等式標高データを作成した. 等式標高データとは「面は指定した標高を通過する」という制約条件を与える標高データであり, 不等式標高データとは「面は指定した標高よりも上側を通過する」または「面は指定した標高よりも下側を通過する」という制約条件を与える標高データである.

ここでは, 基準ボーリングデータにおける地層の対比結果を軸として, 既存ボーリングデータについて地層の対比を行うことで, 境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) についての等式・不等式標高データを作成した. ボーリングデータの対比作業には, ボーリング柱状図解析システム (AIST-Borehole Log Analysis ver. 2.2) (産業技術総合研究所, 2015) を使用した. データ作成では, 対比時に地質体間の境界位置を特定できる場合には等式標高データを作成した. 境界位置を特定できないが, 上位または下位の地質体を確認できる場合には, 地質構造の論理モデルから導かれる地質体と境界面との論理的関係を利用して, 不等式標高データを作成した. たとえば, 孔底部において荻層は確認できるが上総層群との境界は確認できない場合には, 「荻層基底面は孔底

標高よりも下側を通過する」という制約条件を与える不等式標高データを作成した.

また, 各地質体の分布域を正確に表現する 3D 地質モデルを作成するために, いくつかの境界面について, 地層の対比結果を拡張した不等式標高データを追加した. 境界面 S_i ($i = 1, 3, 4$) (荻層基底面, 東京層下部基底面, 東京層上部基底面) については, 地質構造の論理モデルから導かれる地質体と境界面との論理的関係をもとに, 地質体 b_{i+2} 以降に形成された地質体いずれかの直下に, 地質体 b_i 以前に形成された地質体を確認でき, かつ, 境界面 S_{i+1} 以降に形成された面のいずれかに等式標高データがある地点に限定して不等式標高データを追加した. たとえば, 境界面 S_3 (東京層下部基底面) の場合, 地質体 b_5 (東京層上部) 以降に形成された地質体いずれかの直下に, 地質体 b_3 (上泉層) 以前に形成された地質体を確認でき, かつ境界面 S_4 (東京層上部基底面) 以降に形成された面のいずれかに等式標高データ (標高値を h とする) がある地点について, 「標高 h よりも上側を通過する」という制約条件を与える不等式標高データを追加した. 境界面 S_2 (上泉層基底面) については, その分布域を上泉層の基底礫層を識別できた既存ボーリングデータの分布域周辺にとどめるための不等式標高データを追加した. 具体的には, 武蔵野Ⅰ面域に存在し, かつ上泉層の基底礫層を識別できなかった一部のボーリングデータ地点で「境界面 S_5 (武蔵野Ⅰ段丘堆積物基底面) よりも上側を通過する」という制約条件を与える不等式標高データを追加した. 境界面 S_5 (武蔵野Ⅰ段丘堆積物基底面) については, その分布形態が境界面 S_6 (武蔵野Ⅱ段丘堆積物基底面) と漸移的であることから, 境界面 S_6 (武蔵野Ⅱ段丘堆積物基底面) の等式標高データを「ここよりも上側を通過する」という不等式標高データに置き換えて追加した. 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 IX 系に合わせた.

8. 3. 4 地形区分図を用いた等式標高データの作成

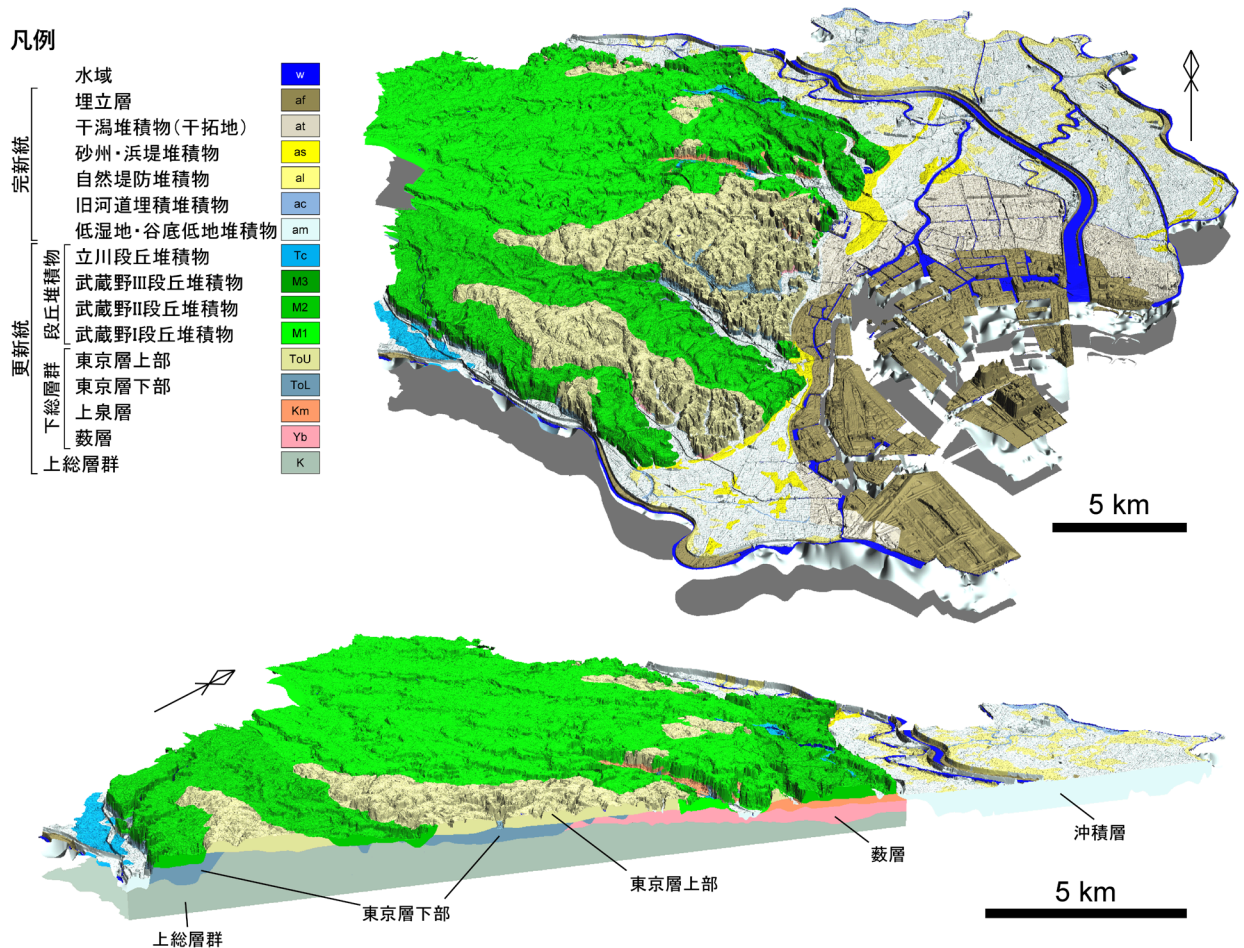
地下サーフェイスモデルにおける段丘堆積物及び沖積層の分布域を地形区分図に示したものと矛盾しないようにするために, 地形区分図の界線情報を利用して, 境界面 S_i ($i = 5, 6, \dots, 9$) (武蔵野Ⅰ段丘堆積物基底面, 武蔵野Ⅱ段丘堆積物基底面, 武蔵野Ⅲ段丘堆積物基底面, 立川段丘堆積物基底面及び沖積層基底面) に関する等式標高データを作成した.

データ作成では, 地形区分図から各地形面の界線の構成点を抽出した後, 構成点における地表面の標高を求め, その標高値を各地形面下に存在する境界面の等式標高データとした. ただし, 抽出する界線の構成点は, より古い地形面と接するもののみとした. たとえば, 境界面 S_6 (武蔵野Ⅱ段丘堆積物基底面) の等式標高データを作成する際には, 武蔵野Ⅰ面や下末吉面との界線情報は用いたが, 武蔵野Ⅲ面, 立川面及び沖積面との

第 8.2 表 境界面の推定パラメータと推定誤差.

面	地層対比による 標高データ数(個)	対比結果の拡張による 標高データ数(個)	地形界線による 標高データ数(個)	合計データ数(個)	M_x	M_y	α_{\min}	α_{\max}	N_{ITR}	m_1	m_2	ID_{OPT}	$RMSE$ (m)
S_1 藪層基底面	11,795	7,272	0	19,067	800	800	1	500	10	0.5	0.5	6	0.876
S_2 上泉層基底面	6,843	866	0	7,709	800	800	1	500	10	0.5	0.5	5	0.492
S_3 東京層下部基底面	5,197	16,214	0	21,411	800	800	1	500	10	0.5	0.5	9	0.909
S_4 東京層上部基底面	5,988	14,880	0	20,868	800	800	1	500	10	0.5	0.5	5	0.632
S_5 武蔵野I段丘堆積物基底面	6,169	3,631	2,685	12,485	800	800	1	500	10	0.9	0.1	5	0.980
S_6 武蔵野II段丘堆積物基底面	4,128	0	1,884	6,012	800	800	1	500	10	0.9	0.1	5	0.865
S_7 武蔵野III段丘堆積物基底面	20	0	211	231	800	800	1	500	10	0.9	0.1	4	0.255
S_8 立川段丘堆積物基底面	140	0	1,532	1,672	800	800	1	500	10	0.9	0.1	4	0.644
S_9 沖積層基底面	28,843	0	10,408	39,251	800	800	1	500	10	0.9	0.1	9	0.780

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。



第 8.2 図 3D 地質モデルの表示例。
高さの強調は 20 倍。

界線情報は用いなかった。地表面の標高は 5 m メッシュ DEM を利用して求めた。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 IX 系に合わせた。

8. 3. 5 境界面の形状の推定

地層対比及び地形区分図から得た等式・不等式標高データを利用して、設定した境界面 S_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) の形状を推定した。各境界面は世界測地系 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系における東西 $[-24,500 \text{ m}, 7,900 \text{ m}] \times$

南北 $[-53,200 \text{ m}, -20,200 \text{ m}]$ （おおよそ北緯 $35^{\circ} 31' 13.6'' \sim 35^{\circ} 49' 04.4''$ ，東経 $139^{\circ} 33' 43.9'' \sim 139^{\circ} 55' 14.7''$ ）の矩形領域において，東西 6,480 点 \times 南北 6,600 点の標高値をもつ DEM である．境界面の推定処理には，野々垣ほか（2008）の BS-Horizon を用いた．推定処理における計算パラメータ及び平均推定誤差を第 8.2 表に示す．計算パラメータの詳細は野々垣ほか（2008）を参照されたい．推定計算では，実際には境界面が存在しない領域においても，周辺の等式・不等式標高データから補間された何かしらの標高値が出力される．このため，推定後に当該領域の標高値をデータ無しとするマスク処理を境界面ごとに施した．境界面 S_{10} （地表面）については，推定処理を行わず 5 m メッシュ DEM を利用した．ただし，5 m メッシュ DEM 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 を用いて平面直角座標系第 IX 系による座標情報へ変換して利用した．

8. 3. 6 地下サーフェイスモデルの作成

Masumoto *et al.* (2004) のアルゴリズムにもとづいて，地質構造の論理モデルと境界面の DEM とから地下サーフェイスモデルを作成した．ただし，地下サーフェイスモデルの作成は東京都 23 区内に限り，同区外についてはデータ無しとするマスク処理を施した．サーフェイスモデルを構成する各境界面の形状の詳細については，第 4 章～第 6 章を参照されたい．

8. 4 3D 地質モデルの作成

地形区分図のもつカテゴリー値と地下サーフェイスモデルのもつカテゴリー値を統合・再分類することで，3D 地質モデルを作成した（第 8.2 図）．本モデルは，地上では地形区分図の情報を，地下では地下サーフェイスモデルの情報をもつ．