

第4章 3D 地質モデリング

(野々垣 進・小島隆宏・潮崎翔一・吉田 剛・風岡 修・八武崎寿史・中澤 努)

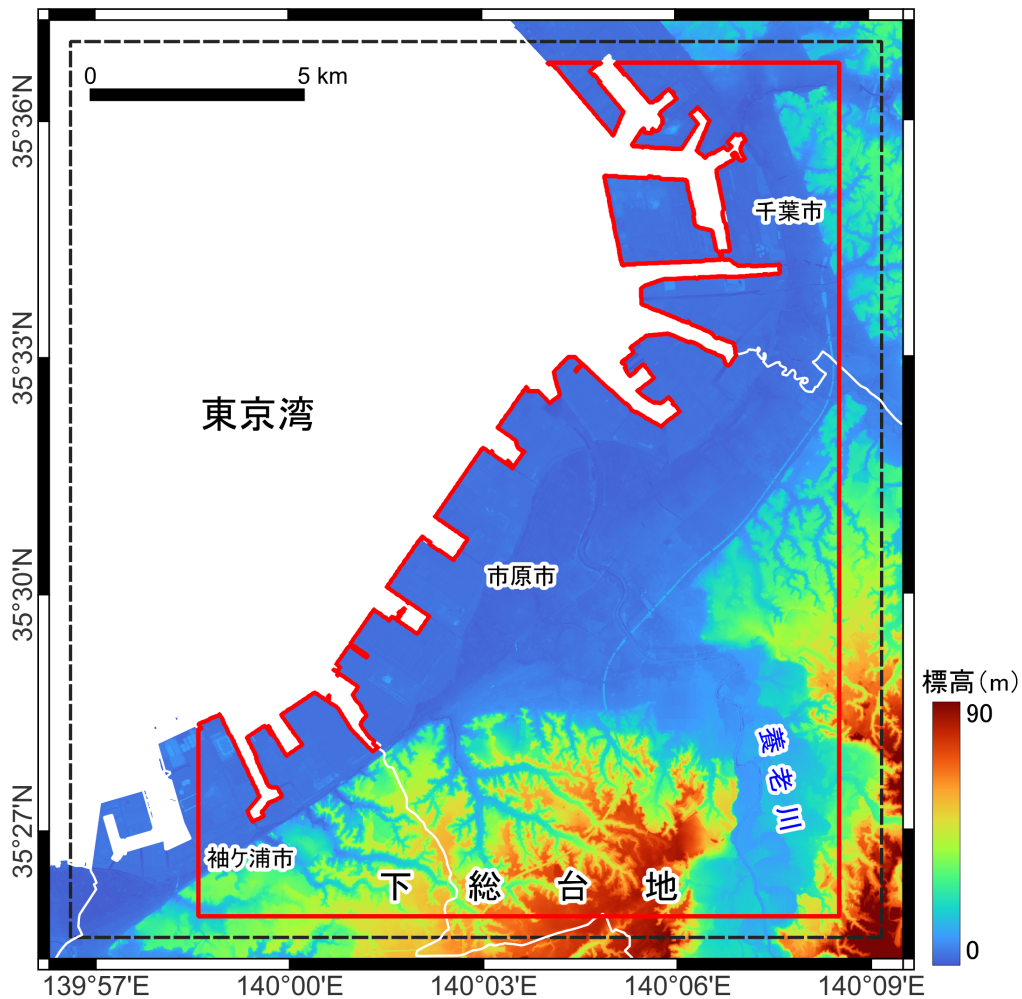
4.1 3D 地質モデルの概要

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、ボーリングデータにおける地層の対比結果と地形区分図とから作成した地下サーフェスマodel(後述)を用いた。モデリング範囲は、千葉県千葉市～市原市～袖ヶ浦市の東京湾沿岸地域を中心とした東西15km×南北20kmの地域である。ただし、陸域に限る。当該地域では、東京湾沿岸

及び養老川等の河川沿いに低地が発達し、低地の南側及び東側に下総台地が広がる(第4.1図)。また、本モデリング範囲北端は、納谷ほか(2018)による千葉県北部地域の大縮尺版3D地質モデルの作成範囲の南端と接する。

4.2 地形区分図の作成

地形図、標高段彩図、空中写真、地質図幅、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4.1図 3D地質モデルの作成範囲。

赤色実線枠は3D地質モデルを作成した範囲、黒色破線枠はBS-Horizonによる地層境界面の推定範囲、白色実線は市町村の境界をそれぞれ示す。標高段彩図と行政区界線にはそれぞれ「基盤地図情報5mメッシュ(標高)」(国土交通省, 2025a)と「国土数値情報(行政区画データ)」(国土交通省, 2025b)とを利用。

(第 1.2 図). 地形区分にあたって, モデリング範囲には姉崎面, 市原面, 南総面という 3 つの段丘面が認められるが, 今回は低地の沖積層及び人工地層を対象とすることから, 台地は区分せず一括した. 低地については, 沖積段丘面, 低湿地・谷底低地, 旧河道, 自然堤防, 砂州・浜堤, 埋立地という 6 つの категорияに区分した. また, その他の区分として水域を設けた (第 1 章参照).

4.3 地下サーフェスモデルの作成

本地質地盤図で整備した層序ボーリングデータ (以下, 基準ボーリングデータ) (第 2 章参照) と公共工事など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) との 2 種類を用いて, 地下サーフェスモデルを作成した. 既存ボーリングデータには, 千葉県環境研究センターから提供されたものと千葉県開発局 (1969) に掲載されているものを利用した. 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.

4.3.1 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, 主に中～上部更新統下総層群, 新期段丘堆積物及び関東ローム層, 沖積層, 人工地層が分布する (第 2 章参照). これらの地層のうち, 今回対象とするのは低地の沖積層及び人工地層である. これを踏まえ, ここではモデリング範囲の地下を, 沖積層基底面を基準として地質体 b_1 (未区分更新統) と地質体 b_2 (沖積層及び人工地層) に区分した. 段丘堆積物及び関東ローム層については, 下総層群から連続する一連の堆積物として扱い, 地質体 b_1 (未区分更新統) の一部として扱った. また, これらの地質体の分布域を定める 2 つの境界面 S_1 と S_2 を設定した. 境界面 S_1 は地質体 b_2 の基底面であり, 沖積層基底面に相当する. 境界面 S_2 は地表面であり, 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.

4.3.2 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, イベント列を $I_2 = (v_1, c^*)$ 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

第 4.1 表 地質構造の論理モデル.

		S_1	S_2
α	上部空間		+
b_2	沖積層及び人工地層	+	-
b_1	未区分更新統	-	-

b_k ($k=1, 2$) は地質体を表し, S_i ($i=1, 2$) 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.

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 4.1 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.

4.3.3 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「面は指定した標高以浅を通過する」または「面は指定した標高以深を通過する」という制約条件を与える標高データである (野々垣ほか, 2008).

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, モデリング範囲及びその周辺で作成された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_1 (沖積層基底面) 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, 産業技術総合研究所が開発したボーリング柱状図解析システム (AIST-Borehole Log Analysis) を使用した. データ作成にあたっては, 地層の対比時に境界面 S_1 (沖積層基底面) の位置を特定できる場合には等式標高データを作成した. また, 境界面 S_1 (沖積層基底面) の位置を特定できないが, その上下いずれか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, 孔底部が地質体 b_2 (沖積層及び人工地層) であった場合には, 「境界面 S_1 (沖積層基底面) は孔底標高以深を通過する」という制約条件を与える不等式標高データを作成した. なお, 既存ボーリングデータの測地系は作成年代によって異なり, 座標系は度分秒を単位とする地理座標系である. しかし, 3D 地質モデリングでは距

離計算が求められることから、同一の測地系かつメートル単位の投影座標系に基づく座標を用いることが望ましい。このため、等式・不等式標高データを作成にあたっては、すべてのボーリングデータの座標を日本測地系 2011 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系に基づくものにした。

4.3.4 地形区分図を用いた等式標高データの作成

地下サーフェスモデルにおける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、地形区分図と地表面の標高を利用して境界面 S_1 (沖積層基底面) に関する等式標高データを作成した。具体的には、地形区分図から沖積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、その標高値を等式標高データとした。ただし、地表面の標高を求めるにあたっては、国土地理院による基盤地図情報数値標高モデル (10 m メッシュ) (以下、10 m メッシュ DEM) を利用した。また、等式標高データの座標を、日本測地系 2011 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系に合わせた。

4.3.5 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、及び別プロジェクトで作成された既存の等式・不等式標高データを利用して、境界面 S_1 (沖積層基底面) の形状を推定した。既存データには、千葉県北部地域の 3D 地質モデリング (納谷ほか, 2018) で利用された沖積層基底面に関する等式・不等式標高データを用いた。推定計算に用いた全標高データのうち、ボーリングデータの地層対比によるデータは 2,621 個、地形区分図の界線構成点を利用して得たデータは 14,452 個である。

境界面の推定処理には、入力した標高データの充足度と面の滑らかさとのバランスを調節できる野々垣ほか (2008) の BS-Horizon を用いた。推定計算では、まずモデリング範囲よりもやや広い日本測地系 2011 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系における東西 [10,000 m, 29,000 m] × 南北 [-63,500 m, -42,500 m] (おおよそ北緯 35°25'38.0" ~ 35°37'00.7", 東経 139°56'36.5" ~ 140°09'12.5") の矩形領域で (第 4.1 図), 東西 1,901 点

× 南北 2,101 点の標高値をもつ 10 m メッシュの DEM を作成した。そのうえで、モデリング範囲外における DEM の標高値を NULL とするマスク処理を施した。

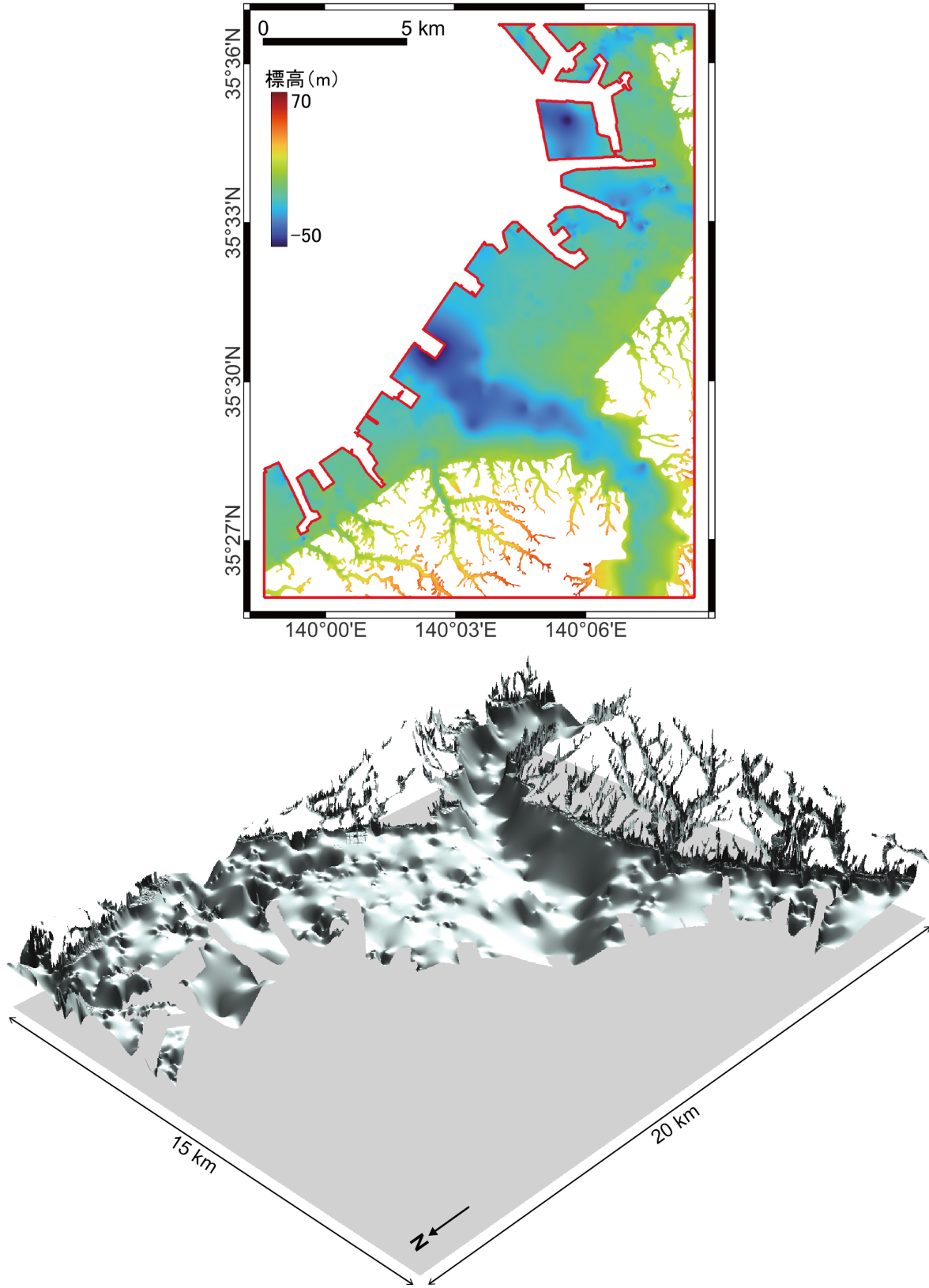
ボーリングデータに記録されている標高値には、ある程度の誤差が含まれていることを鑑み、BS-Horizon の計算パラメータには、データ地点における入力標高値と推定標高値との二乗平均平方根誤差が 1 m 未満になるものを用いた。具体的には、双 3 次 B-スプラインを定義する際の東西方向と南北方向の推定領域の分割数 M_x と M_y をそれぞれ 475 と 525 した。これは、双 3 次 B-スプラインを定義するための節点間隔を東西方向、南北方向ともに 40 m としたことに相当する。また、外点ペナルティ関数法におけるペナルティ α の初期値を 1, 終了値を 500, 反復計算回数を 10 とした。面の水平性と平面性の重みパラメータである m_1 と m_2 はそれぞれ 0.9 と 0.1 にした。各計算パラメータの役割の詳細については、野々垣ほか (2008) を参照されたい。結果として得た境界面 S_1 (沖積層基底面) の入力データに対する二乗平均平方根誤差は 0.570 m である。境界面 S_2 (地表面) については、推定処理を行わず 10 m メッシュ DEM を利用した。ただし、10 m メッシュ DEM は地理座標系による座標情報をもつため、平面直角座標系第 IX 系による座標情報への変換を行った。

4.3.6 サーフェスモデルの作成

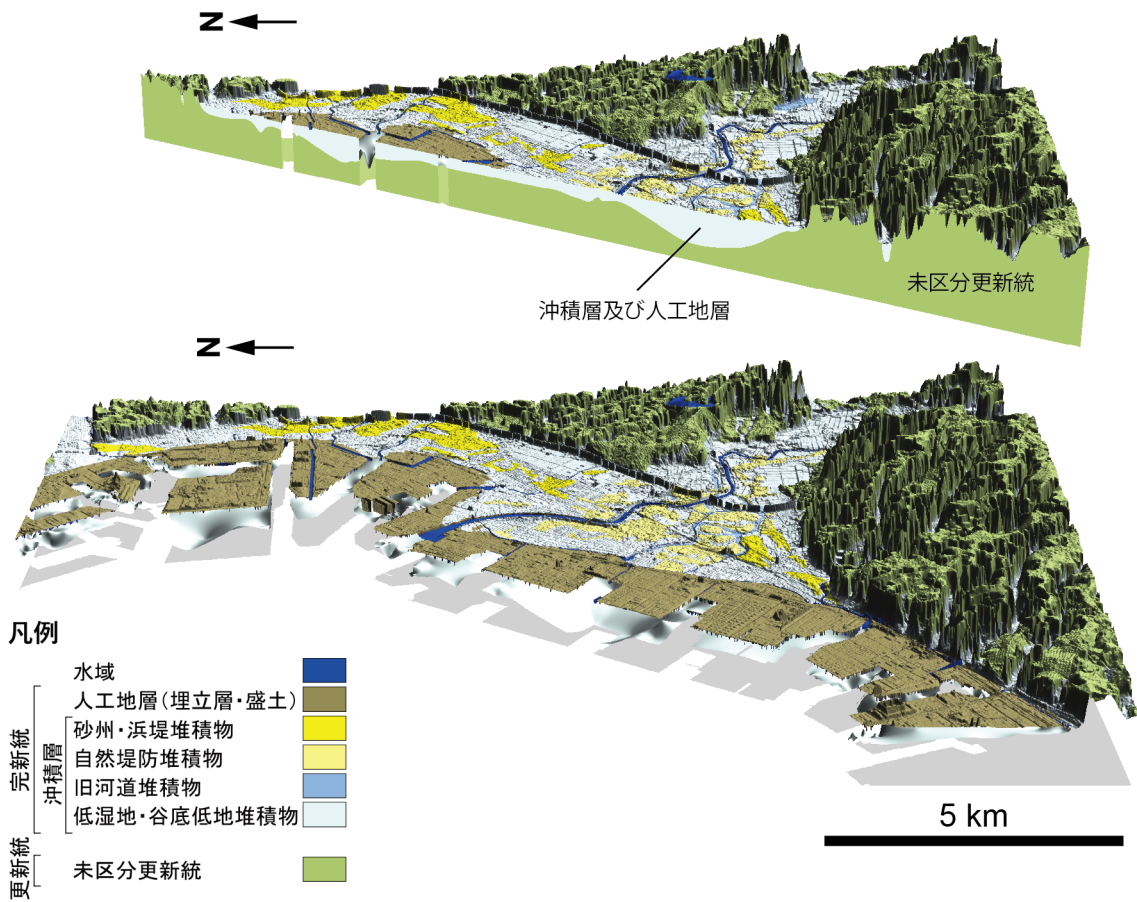
Masumoto *et al.* (2004) のアルゴリズムに基づいて、地質構造の論理モデルと境界面の DEM とから境界面 S_1 (沖積層基底面) の具体的な形状を割り出し (第 4.2 図), その結果を境界面 S_2 (地表面) と重ね合わせることで地下における地層の広がりを表すサーフェスモデルを作成した。境界面 S_1 (沖積層基底面) の詳細については第 3 章を参照されたい。

4.4 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 4.3 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スモデルの情報をもつ。



第 4.2 図 境界面 S_1 (沖積層基底面) の平面図 (上) と立体図 (下).
 平面図の赤色実線枠は 3D 地質モデルを作成した範囲. 立体図の底面の標高は -50 m,
 高さの強調は 20 倍.



第 4.3 図 3D 地質モデルの表示例。
 (上) モデル断面の表示例, (下) 全域の沖積層基底面と地表面の表示例。
 いずれの図も底面の標高は-50 m, 高さの強調は 30 倍。