

第6章 3D地質モデリング

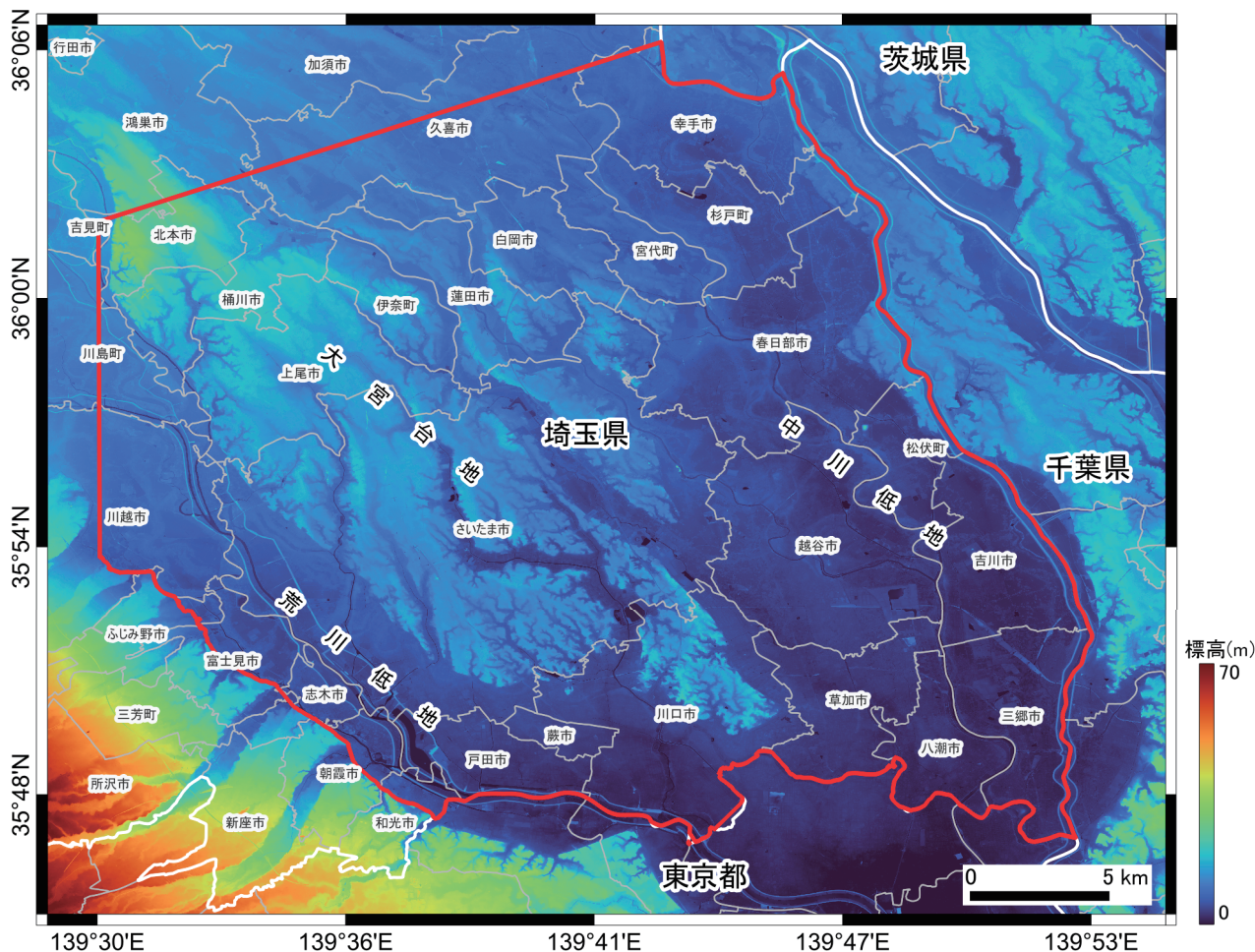
(野々垣 進・米岡佳弥・中澤 努・小松原純子・尾崎正紀)

6.1 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モデル（後述）を用いた。モデリング範囲は埼玉県南東部である。当該地域には、中央部に北西-南東方向に大宮台地が分布し、その東西に荒川低地及び中川低地が広がる（第6.1図）。

6.2 地形区分図の作成

地形図、標高段彩図、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1.3図）．地形区分にあたっては、モデリング範囲の台地部を木下面（S面）、大宮面・下総下位面（M1面）、綾瀬川面（M2面）の3つに、低地部を構成する微地形を後背湿地・谷底低地、旧河道、自然堤防、河畔砂丘、砂州の5つに区分した．また人工地形として、人工河川敷、河川堤防、埋立地・盛土地、調整池の4つのカテゴリーを設けた（第1章参照）．



第 6.1 図 3D 地質モデルの作成範囲.

赤線枠内が3D地質モデルを作成した範囲。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, 2024a)と「国土数値情報(行政区画データ)」(国土交通省, 2024b)とを利用。白色実線は県、灰色実線は市町村の境界を示す。

6.3 地下サーフェスモデルの作成

本プロジェクトで整備した層序ボーリングデータ（第2章～第5章参照）や当該地域の地質図幅作成時に整備された層序ボーリングデータ（以下、基準ボーリングデータ）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、埼玉県環境科学国際センターから提供を受けたものと、国や学術団体が Web 公開し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。

6.3.1 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、上部更新統の新期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、及び埋立層が分布する（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 （地蔵堂層）、 b_2 （藪層）、 b_3 （上泉層）、 b_4 （清川層）、 b_5 （木下層下部）、 b_6 （木下層上部）、 b_7 （大宮層）、 b_8 （沖積層）という8つの地質体に区分した。段丘堆積物及び関東ローム層については、木下層または大宮層から連続する一連の堆積物として扱い、地質体 b_k ($k = 5, 6, 7$) 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_k ($k = 2, 3, \dots, 8$) 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。実際の地質体間の接触関係には、不整合と整合の両者が認められる場合があるが、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。

6.3.2 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 $V_8 = (v_1, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*, c^*)$ 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6.1表）。イベント列から地質構造の論理モデル

第6.1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 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| α | 上部空間 | | | | | | | | + |
| b_8 | 沖積層 | | | | | | | + | - |
| b_7 | 大宮層 | | | | | | + | - | - |
| b_6 | 木下層上部 | | | | | + | - | - | - |
| b_5 | 木下層下部 | | | | + | - | - | - | - |
| b_4 | 清川層 | | | + | - | - | - | - | - |
| b_3 | 上泉層 | | + | - | - | - | - | - | - |
| b_2 | 藪層 | + | - | - | - | - | - | - | - |
| b_1 | 地蔵堂層 | - | - | - | - | - | - | - | - |

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。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。

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。

6.3.3 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（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、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 ($i = 1, 2, \dots, 7$) 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、孔底部において藪層は確認できるが地蔵堂層との境界は確認できない場合には、「藪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、いくつかの境界面について、より実態に即した形状推定を行えるようにするため、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。具体的には、境界面 S_i ($i = 4, 5$)（木

第 6.2 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) | 地形区分図による 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 | 礫層基底面 | 521 | 0 | 0 | 521 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.5 | 0.5 | 9 | 0.0001 |
| S_2 | 上泉層基底面 | 1,781 | 0 | 0 | 1,781 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.5 | 0.5 | 7 | 0.150 |
| S_3 | 清川層基底面 | 3,316 | 0 | 0 | 3,316 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.5 | 0.5 | 7 | 0.191 |
| S_4 | 木下層下部基底面 | 1,125 | 3,516 | 0 | 4,641 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.5 | 0.5 | 8 | 0.192 |
| S_5 | 木下層上部基底面 | 4,157 | 171 | 0 | 4,328 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.5 | 0.5 | 8 | 0.194 |
| S_6 | 大宮層 | 4,402 | 0 | 635,819 | 640,221 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.9 | 0.1 | 8 | 0.536 |
| S_7 | 沖積層基底面 | 7,338 | 0 | 74,270 | 81,608 | 800 | 800 | 1 | 500 | 10 | 0.9 | 0.1 | 8 | 0.680 |

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二乗平均の平方根であり、平均推定誤差に相当する。

下層下部基底面、木下層上部基底面) について、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_4 (木下層下部基底面) の場合、地質体 b_6 (木下層上部) 以降に形成された地質体いずれかの直下に、地質体 b_4 (清川層) 以前に形成された地質体を確認でき、かつ境界面 S_5 (木下層上部基底面) 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。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、正確な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。

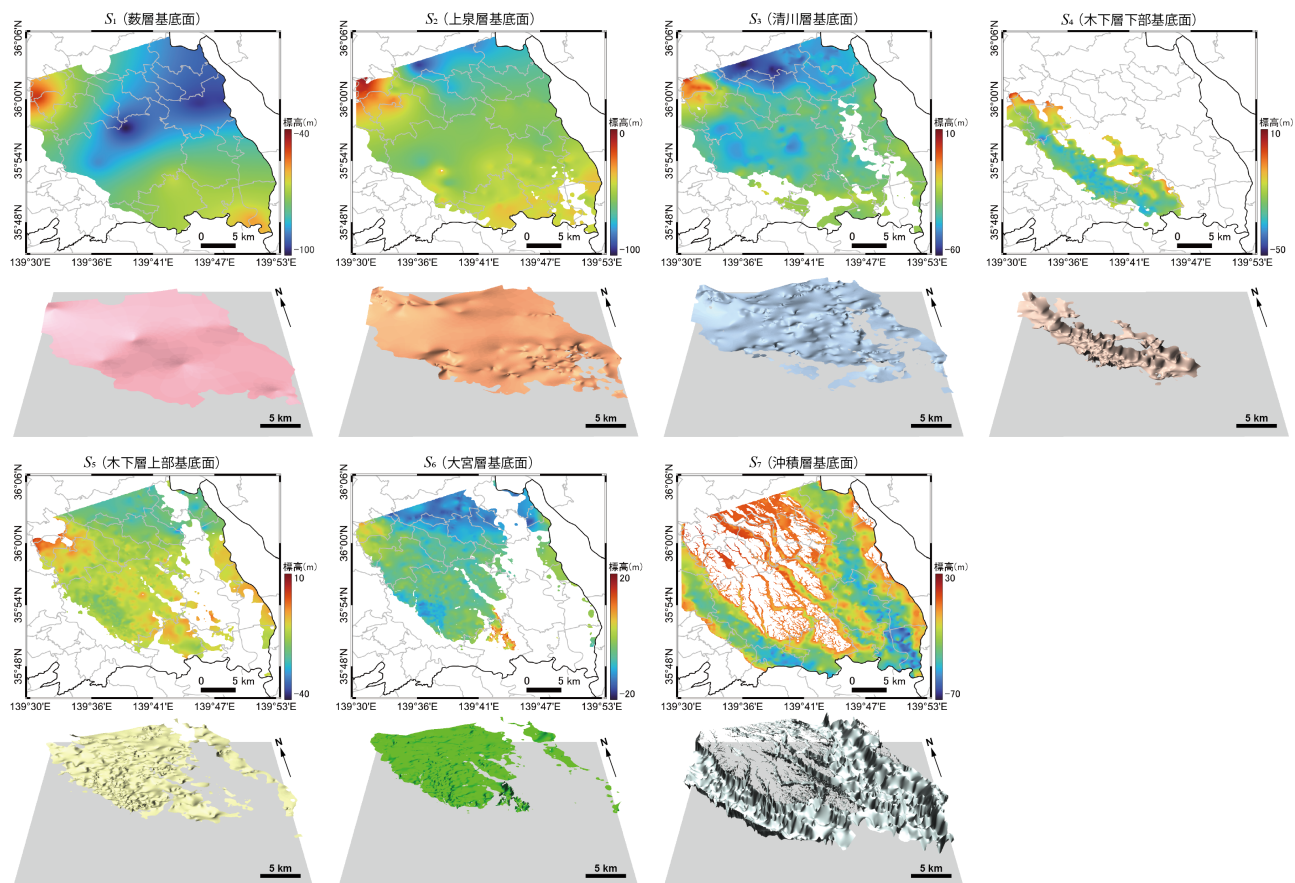
6. 3. 4 地形区分図を用いた等式標高データの作成

地下サーフェスモデルにおける大宮層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、地形区分図と地表面の標高を利用して境界面 S_i ($i = 6, 7$) (大宮層基底面、沖積層基底面) に関する等式・不等式標高データを作成した。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 (5 m メッシュ) (以下、5 m メッシュ DEM) を利用した。境界面 S_6 (大宮層基底面) については、地形区分図から大宮面・下総下位面 (M1 面) (第 1 章参照) 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。また、川口市北部などボーリングデータの地層対比結果の乏しい一部の地域については、大宮面・下総下位面 (M1 面) における 5m メッシュ DEM の値を用いて「大宮層基底面は地表面の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。境界面 S_7 (沖積層基底面) については、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。各等式・不等式標高データの座標は、日本測地系 2011 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系に合わせた。

6. 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 ($i = 1, 2, \dots, 7$) の形状を推定した。各境界面は日本測地系 2011 (JGD2011) 平面直角座標系第 IX 系における東西 $[-30,000 \text{ m}, 7,500 \text{ m}] \times$ 南北 $[-27,500 \text{ m}, 12,500 \text{ m}]$ (おおよそ北緯 $35^\circ 45' 05.9'' \sim 36^\circ 06' 45.6''$, 東経 $139^\circ 30' 00.3'' \sim 139^\circ 55' 00.0''$) の矩形領域において、東西 8,001 点 \times 南北 7,501 点の標高値をもつ 5 m メッシュの DEM である。境界面の推定処理には、入力する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。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、推定計算で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 (Root Mean Square Error : RMSE) が 1 m 未満となる計算パラメータを設定した。推定処理における計算パラメータ等を第 6.2 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。なお、BS-Horizon では、矩形でしか境界面を推定できないというアルゴリズムの性質上、等式・不等式標高データのほとんど存在しない範囲においても、周辺のデータを用いて何らかの標高値が出力される。このため、推



第 6.2 図 地層境界面の平面図（上）と立体図（下）。

立体図の高さの強調は 50 倍。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, 2024b）を利用。

定後に当該範囲の標高値を NULL とするマスク処理を境界面ごとに施した。境界面 S_8 （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 は地理座標系による座標情報を持ち、かつ、水域で NULL となる。このため、ArcGIS Pro を用いて平面直角座標系第 IX 系による座標情報への変換と NULL の穴埋め処理を行った。

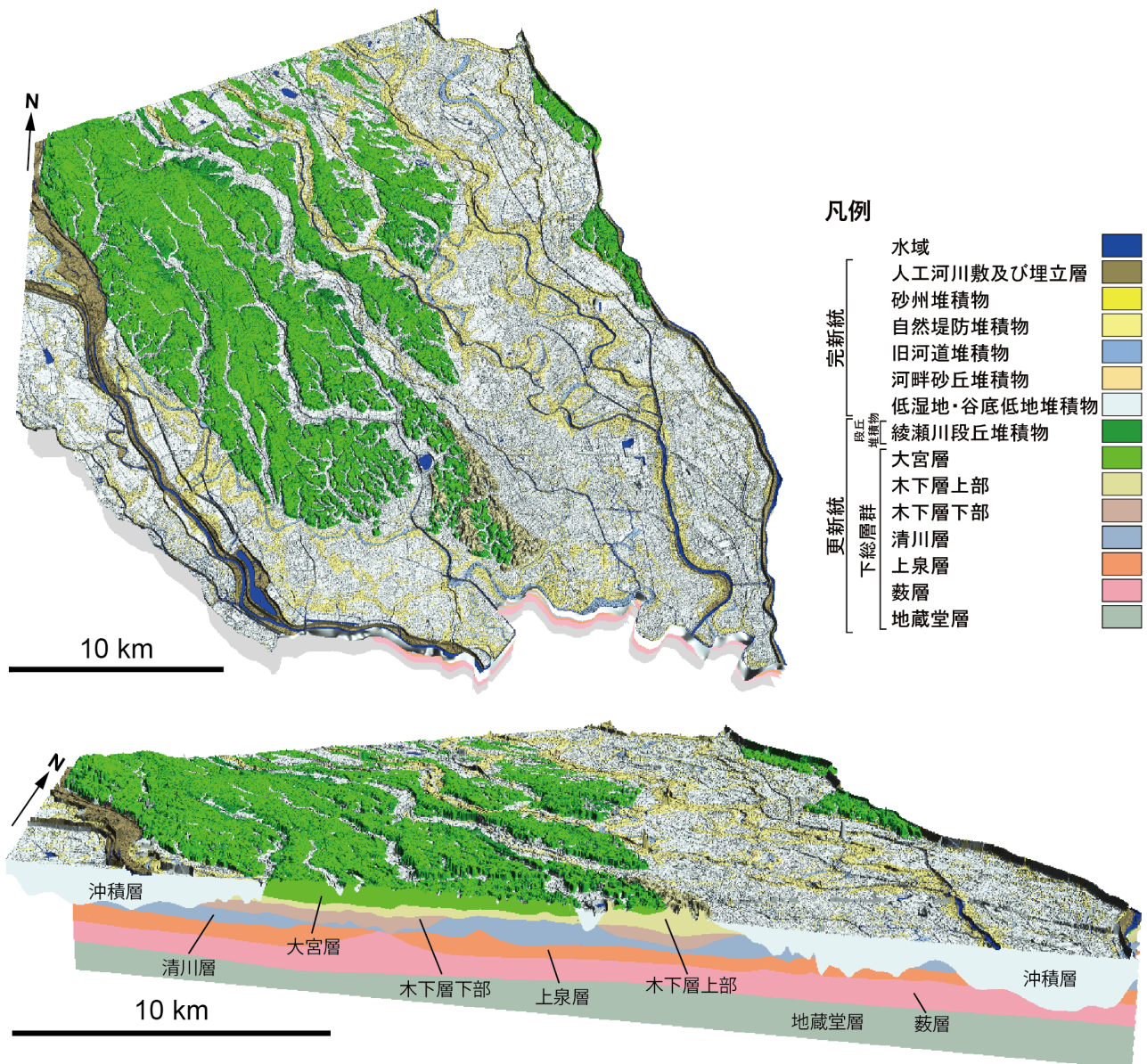
6. 3. 6 サーフェスモデルの作成

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 とから各境界面の具体的な形状を割り出し（第 6.2 図）、その結果を重ね

合わせることで地下における地層の広がりを出すサーフェスモデルを作成した。サーフェスモデルを構成する境界面の詳細については、第 3 章及び第 5 章を参照されたい。

6. 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 6.3 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 6.3 図 3D 地質モデルの表示例。
高さの強調は 50 倍。