

# ボーリングデータ解析による浅部地下地質構造の三次元モデリング : 東京低地北部から中川低地南部の例

Shallow-level subsurface three-dimensional geological modeling  
based on analysis of borehole data  
: A case of the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowland area

木村克己<sup>1</sup>・花島裕樹<sup>1</sup>・西山昭一<sup>2</sup>・石原与四郎<sup>3</sup>

Katsumi Kimura, Yuki Hanashima, Shoichi Nishiyama and Yoshiro Ishihara

<sup>1</sup> 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 応用地質株式会社 (OYO Corporation)

<sup>3</sup> 福岡大学理学部地球圏科学科 (Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University)

**Abstract:** The article presents a 3D geologic modeling method and, constructed by this method, a precise 3D geologic model of shallow-level subsurface geology in the northern Tokyo and Nakagawa lowlands and adjacent area. The modeling method based on borehole data analysis consists of (1) the surface modeling of the base of the Chuseki-so (the latest Pleistocene to Holocene incised-valley fill), which has been improved by interpolating borehole data and (2) a 3D grid modeling of soil classification and *N*-value, constrained by the above surface model. The 3D grid model is very useful as not only geologic expression, but also the ground model of seismic response characteristics, because this can be converted to be S-wave velocity model.

**Keywords:** borehole data, Chuseki-so, surface model, 3D model, grid model, Tokyo lowland, Nakagawa lowland

## 要旨

本研究は、地盤調査のボーリングデータ解析に基づいて、浅部の地下地質構造モデルを高精度に構築する三次元モデリングの手法を整理し、実際に東京低地北部から中川低地南部域をモデル地域として適用を行った。本研究の手法は、木村ほか(2013)による沖積層基底面モデル手法と、江藤ほか(2008)の三次元グリッドモデル手法とを基礎としている。本研究の三次元モデリングの特徴は、①木村ほか(2013)に基づいて、ボーリングデータ解析で得たポイントデータに加えて、埋没地形平坦面の成り立ちを考慮した制約条件を用いてデータの空白域を補填し、沖積層基底面モデルを構築すること、②ボーリングデータから、三次元グリッドモデルを求める江藤ほか(2008)の手法を基礎にし、①で求めた沖積層基底面モデルの上位と下位にモデル領域を分割して計算処理し、その後統合することで三次元グリッドモデルを構築すること、である。本研究では、沖積層基底面モデルと古地形区分図、および三次元グリッドモデルで表現された地質断面図と平面図を用いて、モデル地域の浅部地下地質構造の特徴を明らかにした。

本研究で示した土質と *N* 値の三次元グリッドモデ

ルは、物性モデルに変換できることから、地質学的な表現だけでなく、地震応答特性評価に用いる地盤モデルとしても有用である。

## 1. はじめに

沿岸域に広がる沖積低地と隣接する更新統の台地は、広い平坦な地形面をなす。これらの平坦な地形は生活・産業の立地域として活用され、安心・安全な都市を整備し、その環境を保全する目的で地盤の工学的特性の調査・研究が進められている。その基礎として、三次元的な地盤の工学的特性のモデリングが不可欠であるが、しばしば情報の粗密が問題となっている。地盤工学的特性は地層の年代や堆積環境と密接な関係を有していることから、限られた地盤工学的情報でデータの無い空間を補間する有効な方法の一つは、三次元の地質モデルを基礎にすることであると考えられる。

都市域では、建築・土木事業における地盤のボーリング調査(一般には標準貫入試験調査)が実施され、その一部は柱状図資料集や Web で公開されている。以降、特別に断らない限り、ボーリングデータは標準貫入試験調査で得られたボーリング柱状図データを意味する。ボーリングデータでは、その中に含まれる岩相

(土質) 区分および地盤工学的な特性の一つである標準貫入試験値 ( $N$  値) が有用である ( $N$  値の話編集委員会, 1998). 一方, 地層の堆積年代および堆積環境とその地盤工学的特性に密接な関係があることが知られており (例えば, 清水, 1972), 正確な三次元地質モデルを構築することは, 地盤工学的な研究に直接的に貢献できる (例えば, 木村・石原, 2009). 実際に, 田中ほか (2006) は, 沖積層の粘性土の圧密特性について, 竹村ほか (2013) は, 沖積層粘性土の鋭敏性やせん断剛性率について, それぞれ堆積環境およびその堆積史と密接に関係していることを実験的に明らかにしている. 地震工学や建築工学で有用な地盤の  $S$  波速度については, 地盤の  $N$  値による換算式では誤差が大きいものに対して, 地層の岩質, 時代を変数に加えることで, 相関性の高い換算式が得られることが示されている (太田・後藤, 1976).

地盤の三次元モデリングでは, 地質特性を考慮することで, 地層境界面の連続性や地質構造を合理的に制約することができる (Lemon and Jones, 2003; Kaufmann and Martin, 2008 など). 木村ほか (2013) は, 沖積層基底面モデルについて, 沖積層と沖積層基底面が示す侵食地形面の形成過程を考慮することでボーリングデータの空間の補間法を開発し, 高精度な沖積層基底面モデルを構築した. 沖積層基底面は, 最終氷期最盛期頃に形成された不整合面であり, 同基底面を介して最新期の軟弱な沖積層とその基盤をなし一般に工学的な支持層となる基盤層とが接している. すなわち, 浅部地盤の重要な物性境界面として, 工学的にも重要な面であることが知られている.

地下の地質の特徴は, このような地層境界面の面モデル (サーフェスモデル) で表現される空間の幾何学的特性に加えて, 地層境界面間の地層は, 側方に岩相や粒度, 厚さや分布深度が変化する. これらの地層の特性は地盤の工学的特性に影響を与える. 江藤ほか (2008) は, ボーリングデータの数值処理計算から, 土質区分と  $N$  値の三次元グリッド (ボクセル) モデルの構築手法を開発した. この方法には, ボーリングデータの解釈を行わずに, ボーリングデータだけからプログラムによる計算処理でモデルを構築し, 三次元グリッドで表現された地盤の特性モデルが得られるという利点がある. 木村ほか (2011) は, 江藤ほか (2008) の三次元グリッドモデルの構築手法を改良し, 沖積層基底面でボーリングデータを沖積層とその基盤層とに分け, それぞれの三次元グリッドモデルを独立に求めて, その後で沖積層基底面モデルを介して統合する方法を提示した. この分割・統合処理で, 沖積層で充填される埋没谷や断層で切断された地層などの不整形な地質構造の場合でも, その物性境界を境にした急激な物性変化をモデルで表現することが可能になる.

本研究の目的は, 木村ほか (2013) による沖積層基底面モデリングの手法と江藤ほか (2008) の三次元グ

リッドモデルの構築手法を基礎として, ボーリングデータに基づいて, 沖積低地と隣接する台地における浅部の地下地質構造モデルを高精度に構築する手法を明らかにすることである. そして, この方法を用いて, 東京低地北部から中川低地南部域を研究対象地域として浅部の地下地質構造モデルを構築し, その詳細を表現することにある.

本研究では, 付属資料として, 沖積層基底面モデルについては, その 50 m メッシュの標高数値データを, そして, 三次元グリッドモデルについては, 水平 125 m メッシュ, 垂直 1 m のセルサイズの標高数値データと土質区分データとをそれぞれ作成した.

## 2. 地形・地質概説

海岸平野の沖積低地を構成する沖積層は, 最終氷期最盛期頃までに陸域の河成侵食で形成された開析谷をその後の海進に伴う堆積作用で充填した地層であり, 台地縁辺では, 縄文海進の高海水準期に海岸侵食によって台地が後退して形成された波食台と海食崖地形を被覆している (池田, 1964; 井関, 1983; Matsuda, 1974; Kaizuka et al., 1977). したがって, 沖積層の基底面は開析谷の地形と地表面近くは海岸侵食地形の形状で特徴づけられる. 研究のモデル地域は, 関東平野中南部に位置し, 北緯 35 度 42 分 45 秒 ~ 53 分 00 秒, 東経 139 度 45 分 22.5 秒 ~ 55 分 52.5 秒 (世界測地系) の範囲で, 東西 12.8 km, 南北 18.1 km の広がりを持つ (第 1 図). その地域には, 中川低地・荒川低地・東京低地からなる沖積低地と隣接する下総台地, 大宮台地, 武蔵野台地が分布しており, 低地には中川・江戸川・荒川の大河川が流下する (第 1 図).

東京低地付近の沖積層基底面がなす開析谷地形については, 比較的古くから研究が行われており, 下位から上位へ, 開析谷中軸にあたる本谷底, 立川段丘面に相当する三段の埋没河成段丘面, そして, 埋没波食台が識別されている (Matsuda, 1974; Kaizuka et al., 1977; 遠藤ほか, 1983). これらの地形平坦面は河成の侵食崖によって境されている. さらに, 低地に隣接する台地には, 谷底低地が発達しており, そこを源流とする開析谷は本谷まで流下している (例えば, 遠藤ほか, 1989).

調査地域では, 層序の確立を目的としたボーリング調査とそれで得た堆積物コアの詳細な解析が実施され, 沖積層の堆積相, 堆積システム区分, 堆積年代の情報が公表されている (石原ほか, 2004; 田辺ほか, 2006; 中西ほか, 2011). そして, これらのボーリング柱状図とデータベースに登録された周辺のボーリングデータとの対比から, 沖積層基底面標高が推定されている (中西ほか, 2007; 田辺ほか, 2008; 木村ほか, 2013). 本研究における沖積層基底層準の設定基準は, 木村ほか (2013) に基づいた. それ以前では, 沖積層基



底層準について、中西ほか(2007)、田辺ほか(2008)の両論文において、開析谷底の沖積層基底礫層分布地域ではその上面に、埋没段丘面地域では段丘礫層の上面に、それぞれ設定していた。しかし、これらは、層位的な沖積層基底ではなく、定めやすい層準として便宜的に設定されたものである。木村ほか(2013)は、これらの層準を見直し、層位的な沖積層基底面として基底礫層ではその下面、埋没段丘面ではその堆積物の上面(埋没ローム層相当層の上面)にそれぞれ改めた。

東京低地の中央部と中川低地南部における沖積層層序・堆積相の基準となる柱状図を第2図に示す。同図で、沖積層は、下部から上部へ順に、網状河川、蛇行河川、エスチュアリー、デルタの各堆積システムに細分されている。これらの堆積システムと従来の沖積層層序区分との対比を第3図に示す。以下、木村ほか(2006)に基づき、各システムの概要を紹介する。

網状河川システムは、浅い流路が砂礫州を間に挟んで網状をなす礫質な河川のシステムであり、礫層と礫混じり砂層が卓越する岩相をなす(第2図)。放射性炭素年代値のデータはこれまでに得られていないが、立川段丘礫層を下刻する開析谷底直上に重なる礫質河川堆積物なので、最終氷期頃に海水準が100 m前後下がっていた約20,000～18,000年前(以下、年代はすべて暦年)の堆積体(低海水準期堆積体)にあたりと解釈されている。いわゆる沖積層基底礫層(BG)(Kaizuka et al., 1977)に相当する。

蛇行河川システムは、蛇行する河道、それに随伴する自然堤防、その背後に広がる後背湿地などを形成する氾濫原を堆積場とするシステムである。同システムは、典型的には、河道をポイントバーの側方移動により充填したチャンネル充填の中粒砂相、その上位には、自然堤防にあたる砂泥互層相、後背湿地の有機質な泥相が順次重なり、上方細粒化の堆積相組み合わせを示す(第2図)。下位の網状河川システムの上位に整合的に重なる。本システムは、調査地域の放射性炭素年代値に基づく、14,000～10,500年前頃に相当する。

エスチュアリーシステムは、海の影響が現れる河口域の堆積場にあたり、塩水湿地や泥干潟を示す泥相、潮汐チャンネル充填物や砂干潟・河道砂州にあたる砂相などの堆積相から構成され、全体に上方に向かって細粒化し、海の影響が強くなる堆積環境へと移り変わる(第2図)。エスチュアリーシステムは、調査地域の放射性炭素年代値に基づく、10,500～7,000年前頃の年代範囲である。

デルタシステムは、内湾泥底にあたるプロデルタからデルタフロント、デルタプレーンという次第に上方に粗粒化・浅海化する堆積相から構成される(第2図)。デルタフロントは内陸から海岸線に向かって前進する。放射性炭素年代値によれば、デルタフロントの到達年代は、中川低地南部のGS-SK-1, GS-AMG-1の両地点(第1図)では、7,000年～6,500年前頃、東京低

地北端部付近のHA地点では5,000年前頃、東京低地中央のGS-KM-1地点では4,000年前頃である。東京低地の北東部のGS-KNJ-1, GS-KTS-1の両地点では、海進期後半から高海水準期にかけて、厚い砂層からなる砂嘴システムが発達している(田辺ほか, 2006)。

$N$ 値で0～1の軟弱な海成粘性土は、その大半は、エスチュアリーの上からデルタシステムのプロデルタからデルタフロントの堆積相にあたる(木村・石原, 2009)。なお、ボーリングデータの土質・ $N$ 値の柱状図においては、沖積層下半部の網状・蛇行河川の両システムと上半部のデルタシステムとは、泥質堆積物の貝殻片ないし腐植物の有無に関する情報、および岩相分布とその垂直変化を示す土質・ $N$ 値情報に基づいて、比較的精度よく識別することができる。しかし、それらの間にあたるエスチュアリーシステムについては、海進期の汽水から海成環境を示す堆積相にあたるが、下位の蛇行河川システムから汽水域の環境変化へは岩相的に漸移的であり、汽水環境では貝殻片の情報も極めて限られているため、ボーリングデータにおいて識別することは難しいことが多い。そこで、ボーリングデータを対象とする本研究では、沖積層の層序・堆積相区分の表現において、上記に示した堆積システムだけでなく、必要に応じて、海成泥層の出現層準を指標に区分する沖積層下部と上部の名称も用いる(第3図)。

### 3. ボーリングデータベースと品質確認

産総研地質調査総合センターの都市地質研究プロジェクト(木村, 2004)では、これまでに国土の地下の重要な地質情報として、ボーリング調査資料を収集・整備・電子化を進め、ボーリングデータベースを構築してきた。このデータベースには、埼玉県、東京都、千葉県、およびこれら都県域の市・区に保存されているボーリングデータ、そして、国交省のKunijibanで公表されているボーリングデータなどが収録されている(田辺ほか, 2008)。各ボーリングデータは、国交省の電子納品要領で整理されたボーリング交換用データ(ver.2.10)(国交省, 2004)のXML形式で、電子化され保存されている。

本研究では、都市地質研究プロジェクトのボーリングデータベースのうち、北緯35度42分15秒～57分30秒、東経139度44分15秒～55分52.5秒の範囲における5,718本のボーリングデータを利用した(第4図)。利用したボーリングデータは、木村ほか(2013)のそれと同じものであり、その内訳と品質確認の方法と内容の詳細は、木村ほか(2013)で記述されている。

### 4. 研究手法

本節では、木村ほか(2013)による沖積層基底面モデルを作成するためのデータ処理過程の概要と、江藤

ほか(2008)・木村ほか(2011)の構築手法を基礎にして、沖積層基底面を境にしてボーリングデータを分割処理する三次元グリッドモデルの研究手法を説明する。測地座標系では、世界測地系(JGD2000), UTM座標系(54帯)に基づく。メッシュ区分は、緯度経度による地域メッシュではなく、UTM直交座標系に基づく。ただし、緯度・経度表示についても、必要に応じて、各XYに対応する緯度・経度を求めてその値を併記している。

#### 4.1 沖積層基底面モデル

沖積層基底面モデルの構築手法の処理過程を第5図に示す。同過程では、3段階にわたって、7種類のポイントデータ(第5図の①~⑦)が用いられる。なお、ボーリングデータなどの実データと、仮想データとを区別するため、前者を実ポイントデータ(primary point data)、後者を補填ポイントデータ(secondary point data)と呼称して区別する。

##### 4.1.1 空間補間計算処理プログラムとその条件設定

面モデルを得るための空間補間計算には、野々垣ほか(2008)のプログラムBS-Horizonを利用した。計算処理条件は、最適化原理の曲面の滑らかさの指標である $m_1, m_2$ 、データを満足する程度を示す(充足度)ペナルティ $\alpha$ の3つのパラメータで定める。データの充足度は、得られた面モデルと個々のデータとの標高値残差の2乗平均の平方根(平均エラー値: mean error)で評価される(野々垣ほか, 2008)。

滑らかな地層境界面を描くには、 $m_1 = 0, m_2 = 1, \alpha = 32$ が経験的に適しているとされ(塩野ほか, 2000)、データの充足度と曲面の滑らかさの程度の調整はペナルティ $\alpha$ の値で行う(塩野ほか, 2001)。そこで、本研究では、滑らかさの指標については、 $m_1 = 0, m_2 = 1$ と固定し、ペナルティ $\alpha$ については、面モデルの条件・目的に応じて設定した。すなわち、沖積層基底面の第一次と第二次の面モデルでは、埋没地形面の標高値が側方に急変することの影響を受けやすいことから、 $\alpha = 32$ 、第三次面モデルではその影響を相当程度低減できるため、データ充足度を重視して、 $\alpha = 1,024$ とした。

##### 4.1.2 実ポイントデータと第一次面モデル

実ポイントデータとして、沖積低地におけるボーリングデータで定めた沖積層基底層準のポイントデータに加えて、台地・低地境界線上のポイントデータ、そして、国土地理院の数値地図5mメッシュ(標高)(以下、5mDEMと呼ぶ)から得た台地面のポイントデータをそれぞれ求め、これらを入力値として空間補間計算処理を行い、沖積層基底面の第一次面モデルを求めた。

**ボーリング柱状図のポイントデータ:** XML形式のボーリングデータをボーリング柱状図解析システム(木村, 2011)に読み込み、ボーリング柱状図を投影した地質断面図上で、沖積層基底面層準を個々のボーリング柱状図で定める(第5図の①)。本谷底

の延びの方向を考慮して、東西方向の断面線を400m間隔で設定し、各断面線から200m幅にあるボーリングデータを土質と $N$ 値の柱状図様式で投影して描画した地質断面図を基礎に、解析作業を進めた。この全体を網羅した基本となる地質断面図は43枚であり、さらに、補助断面として、これら東西方向の断面線の中間に、それらに平行に断面線を設定し、それぞれ投影幅100mの地質断面図42枚を、古荒川谷が東西に伸びる西部域では、南北方向および北東-南西方向の地質断面図各10枚をそれぞれ作成した。

**低地・台地境界線のポイントデータ:** 沖積層分布域の境界線として、本地域では低地と台地との境界線(以降、低地境界線と呼ぶ)を設定し、その境界線上のポイントデータを求めた(第5図の②)。ポイントデータは、まず、250m間隔で設定し、その標高値を5mDEMに基づいて求め、つぎに、50m間隔で内挿点を求める。こうして求めたポイント数は計2,609点である。また、低地境界線付近での標高値急変によって発生しやすい面モデル上の問題を制御するために、低地境界線から低地側に隣接する境界線の沖積層基底面標高値から1m以下という不等式条件を有する2,367点の制御ポイントを設定した。

**台地面のポイントデータ:** 沖積層の地表境界線で画された台地域は、沖積層が分布せず、ローム層で覆われていることから、その地形面は最終氷期最盛期頃の開析谷形成当時の台地の地表面を近似していると考えられる。そこで、現在の台地域の地形面も開析谷地形を構成しているものと考えて、そのポイントデータを国土地理院の5mDEMを利用して、50mメッシュの数値標高のポイントデータを求めた(第5図の③)。実際には、50mメッシュ内に位置するポイントの算術平均を求めることで得られている。こうして求めた台地面のポイントデータは合計12,856点である。

**第一次面モデルの結果:** 以上のポイントデータの空間補間計算処理を行い、沖積層基底面の第一次面モデルを求めた。第6図aでは上記の全データのうち、ボーリングデータのポイントデータだけで求めた面モデルを、第6図bは全データで求めた面モデルをそれぞれ示している。両者の比較に基づく、低地境界線および台地面のポイントデータを得ることで、沖積低地から台地にかけて沖積層基底面モデルが両地形境界と整合的に表現されていることがわかる。

##### 4.1.3 補填ポイントデータと第二次面モデル

実ポイントデータだけで求めた沖積層基底面モデルでは、埋没平坦面と段丘崖との境界、台地面から流下する谷筋について、ボーリングデータの不足や偏在による影響を受ける。すなわち、実ポイントデータが乏しい地域では、段丘崖は必要以上にゆるい傾斜面となり、谷筋は断続的な凹みが生じ、不連続な流路となる。この問題解決のため、以下の基準で、埋没地形面の特徴を考慮したポイントデータ補填によって第二次面モ

デルを求める。

**地形平坦面と侵食崖境界の補填 (第5図の④) :** 地形平坦面と段丘崖との境界線の位置とそれらの地形面の形状について、ボーリングデータ密度が大きいエリアを参照して、密度の小さいエリアに補填ポイントデータを付加して地形面の形状を補正する。(第6図b, c)。

**支谷ルートの補填 (第5図の⑤) :** 支谷の存在は、沖積基底面モデルの等高線の形状、支谷の充填堆積相を示唆するボーリングデータの岩相とその累重、および沖積低地に隣接する現在の台地縁に認められる谷底低地の分布などから推定できる。以下の3つの条件で、支谷の谷底の延長にあたりと推定される位置に補填ポイントデータを付加した。

①支谷はその上流で台地縁まで延長する場合には台地縁の谷底低地に端を発するものとし、その下流端は本谷ないし他の支流と合流するものとする。

②支谷底の標高は特に制約条件がない場合は上流から下流へ低下するものとする。

③支谷の幅は、その流域面積におおよそ対応して変化するものとする。

なお、尾根筋についても谷筋と同様に沖積層基底面の等高線図から推定できた場合、補助点を設けた。

**第二次面モデルの結果 :** 第7図は、この処理過程で付加した補填ポイントデータを加えて求めた第二次面モデルの等高線図であり、計算に用いた実と補填の両ポイントデータの分布を区別して示している。補填ポイントデータを加えた第二次面モデル(第6図c)では、第一次面モデル(第6図b)に比べて、平坦な河成段丘・波食台、急斜面をなす段丘崖、谷筋、低地・台地境界がより明瞭に表現されるようになっていることがわかる。

#### 4.1.4 古地形面区分と第三次面モデル

第二次面モデルにおいても、ポイントデータが少ない地域などでは、平坦面と斜面との境界が不明瞭で、谷筋が不自然な形状を示す地域も少なくない(第7図)。これらの問題に対処するために、埋没地形面の地形・地質形成過程を考慮したモデリングを行って第三次面モデルを求める。すなわち、古地形区分図(第8図)で表現された個々の埋没平坦面は、同一時期に形成された地形平坦面であり、異なる平坦面と段丘崖で画されている。そこで、個々の埋没平坦面のエリアで面モデルを分割して処理する方法を導入する(第5図の⑥)。また、支谷の谷筋形状をより明確にするためのポイントデータの補填処理(第5図の⑦)を実施する。以下にその処理過程を示す。なお、全てのデータを統合的に三次元可視化しながら適切に解析を進めるため、市販の三次元モデリングツール(Rhinoceros (Mcneel社製))を利用した。

①古地形区分図に基づき、実ポイントデータを各地形平坦面エリアとそれ以外のエリアとに分ける(第

9図a)。なお、支谷の谷底の面のうち、本谷底に連続し、幅約100m以上の谷底については本谷底エリアに含める。

②地形平坦面毎にそれを構成する実ポイントデータから、面モデルを計算処理で求め、50mメッシュの標高値を得る(第5図の⑥;第9図b)。平坦面に属さない斜面や支谷の部分は別エリアとして地形平坦面から除く(第9図b)。

③支谷の谷筋について周囲の等高線と調和するように、谷筋線沿いに補填ポイントを加える(第5図の⑦;第9図b)。

④上記②で求めた50mメッシュのポイントデータ、地形平坦面外の実ポイントデータ・補填ポイントを用いて、再度サーフェスモデル(第三次)を空間補間計算処理で求める。

**第三次面モデルの結果 :** 本データ処理で求めた第三次面モデルの等高線図を第10図に、その鳥瞰図を第11図に示す。処理後の第三次面モデルでは、本データ処理前の第二次面モデル(第7図)に認められた地形平坦面と段丘崖境界の不明瞭さ、谷幅や段丘崖の上・下端における不自然な形状が解消されている。沖積層基底面の第三次面モデルは、各平坦面とそれらを画する侵食崖や斜面などの各面の特性とその連続性、および谷川の流路の形状や連続性がそれぞれ地形的に自然にみえる形状で表現されている。

## 4.2 三次元グリッドモデル

ボーリングデータを対象とした土質とN値の三次元グリッドモデル構築の処理過程を第12図に示す。計算処理の基本は、不規則に分布するボーリング柱状図の情報を2次元平面上で補間し、補間により作成された等間隔なデータセットを深度方向に積み重ねることで構築することである(江藤ほか, 2008)。本研究では、以下、木村ほか(2011)で暫定的に示したように、沖積層基底面モデルによって制約された三次元グリッドモデルの構築手法を示す。

### 4.2.1 沖積層とその基盤層とのデータ処理計算

**処理用データベースの作成 (第12図の①, ②) :** 沖積層基底面モデルでボーリングデータを分割・処理するために、まず、ボーリングデータのXMLファイルの「地層・岩体区分」項目に、ボーリング柱状図解析システムを利用して沖積層基底面深度値を登録する。つぎに、これらのボーリングXMLファイルから、江藤ほか(2008)の方法にしたがい、計算処理用のデータベースを作成する。なお、データベースは、沖積層とその基盤の更新統とに分けて、2種類作成する。

データベースの項目は、ボーリングID(ボーリングファイル名)、緯度・経度、1m毎の標高(20~-70mの範囲)に対応するN値と土質区分からなる。各ボーリングファイルのN値と土質は、深度方向に等間隔のデータセットにするために、1mの標高区間毎に並び



替えられる。1 m 区間に複数の  $N$  値や土質区分がある場合には、卓越するものを選択する。 $N$  値については、0 ~ 50 の範囲と定め、自沈粘土は 0、50 以上は上限値として 50 にする。土質区分は、碎屑粒子の粒度組成の違いによる礫、砂、砂泥、泥の 4 区分、およびこれら以外の土質として、人工土、腐植土、ロームを設定し、土質コードに変換する（第 1 表）。

**グリッドノードの土質・ $N$  値計算（第 12 図の③）：**個々のグリッドノードの位置は、125 m メッシュ（125 m 四方）の中央点に定めた。土質・ $N$  値の計算処理は、江藤ほか（2008）の方法に基づく。

まず、グリッドノードの位置と間隔を示す緯度・経度のリストを作成する。各グリッドノードは、三次元的には、標高 1 m ごとに同じ位置座標をもつ。標高 1 m 毎の水平面内において、グリッドノード上の補間値を得るために、同一水平面内のボーリングデータについて（第 13 図 a）、土質と  $N$  値それぞれの計算処理を行い、これらを垂直方向に積み重ねることで、三次元の土質・ $N$  値の分布モデル（三次元グリッドモデル）を作成することができる（第 13 図 c）。

計算では、データの参照範囲をグリッドノードから半径 1 km とし、計算対象とするデータの位置の偏りを防ぐために、8 分割法により近隣点を各領域から 2 点、最大 16 点を選択する（第 13 図 b）。また、近隣点のうち、 $N$  値について平均からのずれの大きい値は計算から除く。

各グリッドノードの土質は、参照データの中での最頻値として求める。 $N$  値は逆距離加重法 (IDW) で計算し、0 ~ 50 の連続変数として求める。なお、江藤ほか（2008）では、 $N$  値は土質とは独立に求めたが、本論では、 $N$  値は各グリッドノードの最頻値にあたる土質の  $N$  値だけを対象とする。地震動の応答計算で利用する土質・ $N$  値から  $S$  波速度を求める換算式では、 $N$  値はその土質の値を示すからである。逆距離加重法による計算では、距離による重み係数を決定する乗数は 2 とし、緯度・経度を UTM による XY 座標系に変換した上で実施した。計算結果を示すデータシートでは、各グリッドノードにおける土質と  $N$  値の補間データが、それぞれ 1 行に標高 20 ~ -70 m 範囲において 1 m 毎に配列されている。

#### 4.2.2 沖積層と更新統両モデルの統合と空きグリッド補填処理

**沖積層と更新統両モデルの統合（第 12 図の④）：**上記の計算処理で得られた沖積層とその下位の更新統に関する三次元グリッドモデルについて、125 m メッシュの標高ポイントデータで表現された沖積層基底面モデルを介して統合する処理を実施する。その際に、沖積層基底面境界と整合するように、同境界からはみ出た沖積層と更新統の両グリッドを削除する（第 15 図 a）。

**空きグリッド補填計算処理：**上記の処理で得た統合

三次元グリッドモデル（第 12 図の⑤）について、以下の処理を行う。

① 補填処理対象の空きグリッドの選択（第 12 図の⑥） 残存する空きグリッドから、補填対象とするグリッドの選択を行う。本モデルの場合は、117,232 個（沖積層 25,676 個、更新統 91,556 個）であった。その条件は、沖積層とその基盤の更新統とを区別せずに、個々の空きグリッドの水平面内で東西 (X 軸) または南北 (Y 軸) 方向において、それぞれの該当するグリッドを中心に両側で 1 つ以上のデータを有するグリッドが存在することである。このような条件設定によって、第 15 図 b に示すように、沖積層基底面境界近傍やモデルエリアの上限や下限に発生しやすい空きグリッドが補間の対象となる。

② 空きグリッドの補填計算処理（第 12 図の⑦） 補填対象となる空きグリッドについて、水平面内で隣接し土質・ $N$  値のデータを有するグリッドを対象として（最大 4 個）、まず土質種別について、その最頻値となる土質を決定する。もし最頻土質が複数ある場合には、土質コードの小さい土質を優先する（第 1 表）。 $N$  値については、最頻土質に当たるグリッドが 1 個の場合はその  $N$  値、複数の場合はそれらの平均値として求める。該当するグリッドがなくなるまで、以上の計算処理を繰り返し実施する。この水平補間計算は、最初に 59 回実施し、その結果、空きグリッドの数は、4,328 個に減少した（第 2 表）。つぎに、依然残存する空きグリッドの補間計算処理として、同グリッドのうち、垂直方向の両側でデータを有するグリッドが 1 個以上存在するグリッドを選択し、上記の水平方向の処理と同様に、最も隣接する 2 つのグリッドの土質と  $N$  値を対象として、計算処理を実施する。さらに残存する空きグリッドについて、つぎに水平方向の補間、そして垂直方向の補間を繰り返し実施する（第 2 表）。その結果、空きグリッドの数は 348 個にまで減少した。同処理で依然残存した空きグリッドについては、数も少ないことから、土質と  $N$  値をそれぞれ別々に求めるという条件設定で、上記のとおり、水平・垂直方向の計算処理を実施することで、空きグリッドすべてについて補填することができた（第 2 表）。

#### 4.2.3 地形面モデルとの統合と空きグリッド補填処理（第 12 図の⑧）

以上のグリッドモデル処理で得た三次元グリッドモデルについて、現在の地形面との調整を行う。モデル地域の地形面モデルについては、台地面のポイントデータを得た方法と同様に、国土地理院の 5 mDEM を使って 125 m メッシュ毎の標高ポイントデータを求めた。この地形面の標高ポイントデータを基準にして、三次元グリッドモデルの上面付近について、地形面より上位のグリッドを切り取る処理を実施する。その際に、沖積低地域については、地表面より上位にはみ出たグリッドのデータは削除し、地表面下に生じた空き

グリッド(各メッシュで最大2グリッド分)は、直下のグリッドにあたる土質種別(すべて人工土)と $N$ 値をあてた。一方、台地域では最大深度20 mまでのグリッドの多くはデータがないか、データがあっても、実態に合わない値になっていることが多い。その理由としては、ボーリングデータが不足していることに加えて、台地表層の地質は、台地面の地形的凹凸や異なる段丘面間で地質が側方に急変するために、上記の水平補間処理では適切な土質種別になりがたくなると考えられる。そこで、その周辺のボーリングデータや既存の文献(中澤・遠藤, 2002; 中澤・田辺, 2011)を参照して、各台地の地質・地形的特徴を反映した模式柱状図を第3表に示すとおり作成し、台地表層部の空きグリッドの補填を行った。補填の対象とするセルは、異常なデータは削除した上で、台地面から下面は空きセルの下限までの範囲とし、各台地における模式柱状図について、その上面を各グリッドの台地面に合わせて実施した。

以上の地形面モデルによる調整と台地域の空きグリッド補填処理によって最終版となる拡張型統合三次元グリッドモデルが求められる(第12図の⑨)。

## 5. 三次元地質地盤モデル

### 5.1 沖積層基底面モデルの地形面と地質

第8図と第16図bは、沖積層基底面モデルを基図に、沖積層基底面が示す埋没地形面が表現されている。埋没地形面には、形成時期の異なる地形面として、上から下へ、台地面、波食台、埋没河成段丘面(T1-T3)、本谷底の埋没地形平坦面が区分されている。異なる平坦面の間は侵食崖ないし斜面で境されている。以下、木村ほか(2013)にもとづいて、沖積層とその直下の更新統の地質について、地形平坦面毎の特徴を記述する。

台地面では、人工層を除く最上部はローム層と直下の泥層(火山灰質粘土に相当)からなり、その下位は更新統を特徴づける $N$ 値の高い砂・泥層から構成される。

埋没波食台は、完新世の高海水準期(7,500年前頃に最高海水準に達する)に海岸線での波食によって台地縁辺が侵食されて形成された埋没地形平坦面である。埋没波食台に面する台地は急な波食崖をなし、埋没波食台面は深度-12~2 mである。埋没波食台は、本モデルにおいて、基盤をなす更新統の地質の違いから、東部・南西部(Wts)と北西部(Wtm)とを区分している(第16図a)。東部および南西部の波食台は下総層群の $N$ 値20以上の砂層を主体とし、その上位には沖積層の $N$ 値5以下の泥・砂層が重なる。一方、北西部の波食台は下総層群の $N$ 値5以上の泥層(厚さ10~25 m; 木下層相当)からなり、その上位に $N$ 値3以下の沖積層の泥層・砂層が重なる。

埋没河成段丘面は、段丘礫層の厚さとその下面・上面の標高に基づいて、T1, T2, T3(Matsuda, 1974; Kai-

zuka et al., 1977; 遠藤ほか, 1983)の3面に対比・区分できる。段丘堆積物としては、沖積層相当の $N$ 値5以下の軟弱な泥層・砂層の直下に、 $N$ 値では5~10を示すことが多い埋没ローム層およびそれ相当の火山灰質粘性土(厚さ1~6 m)、そして $N$ 値が40以上の砂および砂礫層(厚さ3~10 m)が順次出現する。これらの特徴は、遠藤ほか(1988)による、T2面に位置する墨田区八広で採取したコア試料から得られた堆積相の特徴によく符合している。

本モデル地域で主要な谷地形をなす古荒川谷、古中川谷、東京谷の谷底(本谷底)(第16図b)では、沖積層の下部は層厚1~10 mの基底礫層を伴い、その上位には腐植土が混ざり、貝殻を含まない $N$ 値10~20の泥層および $N$ 値10~50の砂層が重なる。埋没段丘面に認められたローム層は認められない。前述したとおり、これらは、網状河川システムと蛇行河川システムの堆積相にあたる。基底礫層は、 $N$ 値20以上の泥層、 $N$ 値50ないしそれに近い締まった砂層(下総層群相当)を覆っている。基底礫層の基底まで到達しているボーリング柱状図は限られているが、比較的基底礫層の厚さが1~5 mと薄い中川低地域では、基底礫層に到達しているボーリング柱状図のうち、5割強でその下面まで到達し、基底礫層が厚さ4~10 mと厚い荒川低地・東京低地域でも約1割存在し、一つの東西地質断面図では少なくとも2~3本そのような柱状図が認められる。

本谷底に合流する主要な支谷には、古綾瀬川谷、古坂川谷(遠藤ほか, 1989)がある(第16図b)。これら支谷の沖積層基底深度は、周囲の埋没平坦面や斜面域に比較して、数m以上深く、谷底には厚さ1~4 mの基底礫層を伴う。支谷の沖積層は、主に腐植土を伴う粘性土主体の岩相から構成される。

### 5.2 三次元グリッドモデルの特徴

今回作成した三次元グリッドモデルの範囲は、水平面内は、東経139度45分53.3232秒~54分34.7436秒(東西13.2 km長, 94グリッド)、北緯35度42分48.6864秒~52分41.8332秒(南北17.4 km長, 148グリッド)であり、UTM直交座標系(54帯)では、 $X=388,500 \sim 401,375$ ,  $Y=3,952,875 \sim 3,971,000$ である。垂直方向は標高-70~30 mである。1つのグリッドのサイズは、125 m四方(メッシュ)、垂直1 mである。各グリッドの続成値として、そのグリッドノードの位置で既述した方法で得られた $N$ 値と土質種別が与えられている(第1表)。

#### 5.2.1 垂直断面図

三次元グリッドモデルに基づいて、1グリッド単位で145葉の東西方向(X軸方向)の断面図が表現できる(付録資料1参照)。これらから抽出した東西方向の16葉の断面図の位置を第16図と第3表に、各断面図を第17図a~pにそれぞれ示す。各断面図は、土

質区分と  $N$  値のセル（水平 125 m，垂直 1 m）で地質の特性が表現されている。断面図中の地形断面線は国土地理院の 5 mDEM に、沖積層基底面境界線は沖積層基底面モデルにそれぞれ基づいて、125 m メッシュ単位で求めた標高の平均値を連ねた線で表現されている。

**緯度 35.718 ~ 35.758 の地質断面図 (no. 2 ~ 37 ; 第 17 図 a ~ e) :** 当該範囲の地質断面図は、西端の武蔵野台地から、東方へ、東京低地を横断し、東端では下総台地にいたる。沖積低地内で、地形断面で凸状の微高地をなしている地点は、荒川と江戸川の堤防近傍と、地質断面図 no.2 における隅田川右岸沿いの沿岸砂州付近である。

沖積層基底面の地形断面は、西から東へ、台地と低地境界をなす波食崖から東方へ、標高約 -6 ~ 0 m の埋没波食台、標高 -30 ~ -26 m の 2 段の埋没河成段丘面 (T1 と T2)、標高 -65 ~ -61 m の谷底の東京谷、標高 -7 ~ 0 m の埋没波食台から構成される。

更新統は、台地表層堆積物、埋没段丘堆積物と下総層群相当層からなる。下総層群は砂が卓越し、砂泥・泥・礫を伴う。 $N$  値は礫・砂では 25 ~ 50 で標高 -20 以深においては、45 以上を示す。台地表層堆積物は、ローム層と泥層（火山灰質粘性土に対応）からなる。埋没段丘堆積物は、下部の礫層とその上位に重なる砂と泥層から構成される。段丘礫層は厚さ 5 ~ 8 m で水平な構造を示す。断面図 no.2 と no.12 において、その礫層は台地下に平行に延長しているように見えるが、その層位から考えて、台地下の礫層は、東傾斜の構造を示す下総層群中の礫層（東京都土木技術研究所、1996）に対比できる。下総層群は標高 -40 m 以浅ではほぼ水平の構造を呈するが、同以深では、岩相の水平方向の連続性が乏しく、断面図 no.32, 37（第 17 図 d,e）においては、東に傾斜する厚さ 5 ~ 8 m の泥層の分布が認められる。

沖積層は標高 -32 m 以浅とそれ以深とで岩相や  $N$  値が異なる。標高 -32 m 以浅は、海成の泥・砂泥層が卓越し、最上部に分布する砂層はデルタプレーンにあたる。地質断面図 no. 2（第 17 図 a）以北の地質断面図では、海成の泥・砂泥が分布する層準に、東京谷東縁部に南北に延びる砂体の分布が認められる。この砂体は、田辺ほか（2006）で砂嘴にあたと推定されている。沖積層は、上記の砂体を除くと、 $N$  値で見ると、標高 -32 ~ -15 m では上方に向かって  $N$  値は 10 から 0 へと低下し、その上位では逆に上記の砂層基底付近まで  $N$  値が 0 から 5 へと増加していることがわかる。これらは土質の地質断面をみると、それぞれ砂泥から泥への上方細粒化と泥→砂泥→砂への上方粗粒化に相当している。下部の  $N$  値の上方低下と上方細粒化、上部の  $N$  値の上方増加と上方粗粒化はそれぞれ海進期の深海化（エスチュアリー→プロデルタ）、海退期の浅海化（プロデルタ→デルタプレーン）に相当する（木村

ほか、2006 ; 田辺ほか、本 CD ほか）。一方、-32 m 以深は、凹状の本谷底域内に分布が限られている。その基底部に基底礫層相当の礫、その上位に砂・砂泥・泥とが混ざり合った分布を示すが、全体に上方に泥が多くなり、 $N$  値が低下する傾向が認められる。これらは、沖積層の堆積システムモデルと比較すると、基底礫層が網状河川システム、その上位の砂・砂泥・泥が蛇行河川システムから一部エスチュアリーシステムの堆積環境に相当する（木村ほか、2006 ほか）。

**緯度 35.759 ~ 35.780 の地質断面図 (no. 42, 52 ; 第 17 図 f, g) :** 当該範囲の地質断面図は、東西に延びる荒川低地から、東方へ東京低地北部を横断し下総台地西縁にいたる。沖積低地内で、地形断面で凸状の微高地をなしている地点は、荒川・江戸川・中川の堤防施設近傍であり、地質断面図 no.42 では江戸川右岸沿いの金町浄水場地点が微高地をなしている。沖積層基底面の地形断面は、西から東へ、古荒川谷と東京谷、その東端部付近で、平均勾配 130/1000 の河成段丘を介して、標高約 -8 ~ -2 m の埋没波食台を示す。no.52 の地質断面図において、古荒川底の範囲内で標高 -30 m の高まりは、北側に広がる埋没段丘（後述）の南端部にあたる。

更新統は、主に砂層からなり、砂泥・泥を伴う下総層群から構成される。砂の  $N$  値は標高 -12 m 以浅で 25 ~ 40、以深で 45 以上を示す。下総台地の表層は、下総層群の上位に、ローム層と泥層（火山灰質粘性土相当）が重なる。下総層群の地質構造は緯度 35.718 ~ 35.758 の範囲のそれに類似しており、断面図 no.32, 37 の東傾斜の泥層は、断面図 no. 52（第 17 図 g）では、標高 -48 m 以深、西端から 18 ~ 41 メッシュにその延長部が認められる。

淡水成の砂・砂泥が卓越する沖積層下部の上面は、古荒川底沿い西端部の -23 m から東方へ深くなり、東京谷付近では標高約 -30 m となる。谷底に分布する沖積層基底礫層は、東西に連続的に分布しており、南半部（第 17 図 f の地質断面図 no.42）では、北半部（第 17 図 g の地質断面図 no.52）に比較して、東西に厚さが 8 m と一定して厚い。地質断面図 no.52 では、東京谷東部の標高 -22 ~ -9 m に  $N$  値 20 ~ 30 の砂からなり、南北方向に延長する砂嘴の一端が認められる。

**緯度 35.780 ~ 35.814 の地質断面図 (no. 62 ~ 82 ; 第 17 図 h ~ j) :** 当該範囲の地質断面図は、東西に延びる荒川低地北部から、東方へ中川低地を横断し下総台地西縁にいたる。沖積低地内で、地形断面で凸状の微高地をなしている地点は、江戸川の堤防付近である。沖積層基底面の地形断面は、西から東へ、大宮台地に隣接する埋没河成段丘面 (T1 ~ T3) と埋没波食台（最深部の標高 -14 m）、細長い埋没河成段丘を挟んで並列する古綾瀬川谷と古中川谷、そして、古中川谷左岸をなす急な河成段丘崖と狭長な埋没河成段丘面 (T1)、下総台地に隣接する標高約 -12 ~ 2 m の埋没波食台の



形状を示す。

更新統では、下総台地表層部はローム層とその直下の泥層（火山灰質粘性土相当）から構成され、断面図西端の標高 -28 m 付近の埋没段丘面（T1）には、段丘礫層が伴われる。これら両層以外の更新統は、主に砂層からなり、泥・砂礫・砂泥を伴う下総層群から構成される。大宮台地に隣接する埋没波食台下では、標高 -30 m 以浅では、厚さ 3～5 m の砂礫層とその上位には厚さ 10～20 m の泥層がほぼ水平に分布する。これらは大宮台地下に北西-南東方向に連続する木下層の谷埋め堆積物に相当する（中沢・遠藤，2002）。この木下層相当の泥層は、貝殻片が含まれており、岩相上は周辺の沖積層の泥層に類似しているが、*N* 値に明瞭な違いがあり、沖積層の泥層は *N* 値 0～2 に対して、同泥層では *N* 値 5～10 を示す。下総層群の砂の *N* 値は、標高 -12 m 以浅で 25～40、以深で 45 以上を示す。

沖積層の下部は、古綾瀬川と古中川流域では、両谷底の谷埋め堆積物として標高 -30 m 以下に分布するだけである。一方、古荒川流域では、地質断面図 no.62 の西端から 1～10 メッシュの範囲に認められるように、埋没河成段丘面上の標高 -24 m まで沖積層下部の泥層が広がっている。同エリアの泥層は、前述の地質断面図 no.52 から連続的に分布している。同泥層の特徴は、*N* 値が 5～15 と大きく（地質断面図 no.62 の *N* 値断面）、腐植土を混入（同地点付近のボーリング柱状図情報による）していることである。両特徴によって、5.1 節で説明したとおり、沖積層の下部泥層は、沖積層上部の海成泥層や周囲の木下層相当の海成泥層と明瞭に識別できる。沖積層の下部ないし更新統の上位には、海成の泥・砂泥・砂からなる沖積層の上部が重なる。古綾瀬川・古中川谷底に分布する沖積層基底礫層は、厚さ 1 m 以下であるが、実際のボーリング柱状図では厚さ 1～3 m を示すことが多い。古中川谷内の海成の泥・砂泥分布範囲には、標高 -20～-5 m に *N* 値 10～25 の砂からなり、南北方向に延長する砂嘴の一端が認められる。

**緯度 35.815～35.852 の地質断面図 (no.92～122；第 17 図 k～n)：**当該範囲の地質断面図は、大宮台地から、東方へ中川低地を横断し下総台地西縁にいたる。沖積低地内で、地形断面で凸状の微高地をなしている地点は、江戸川と中川の堤防付近と、地質断面図 no.112 の東京外環自動車道・常磐自動車道の高架施設、同 no.122 の JR 武蔵野線の操車場である。沖積層基底面の地形断面は、西から東へ、大宮台地に隣接する標高約 -10～0 m の埋没波食台、古綾瀬川谷（最深部の標高約 -40 m）と古中川谷（最深部の標高約 -50 m）、古中川谷東縁の急な河成段丘崖を介して、下総台地の西に隣接する埋没波食台と古流山谷の形状を示す。

更新統では、大宮台地と下総台地の表層部（地質断面図 no.112, no.122：第 17 図 m,n）は、ローム層とその直下の泥層（火山灰質粘性土相当）からなり、これ

ら台地表層部以外では、砂層が卓越し泥・砂礫・砂泥を伴う下総層群から構成される。全体にほぼ水平成層している。大宮台地とそれに隣接する波食台・緩斜面域には、緯度 35.780～35.814 の地質断面図の地域から連続して、標高 -30 m 以浅に、厚さ 10～20 m の泥層が特徴的に分布する。しかし、本範囲では、北部の no.112, no.122 では同礫層が欠如し、泥層の基底標高も -20 m と浅い。下総層群の砂の *N* 値は、標高 -12 m 以浅で 25～40、以深で 45 以上を示す。

沖積層の下部は、古綾瀬川・古中川谷底の谷埋め堆積物として標高 -30 m 以下に分布するだけであり、それ以外では更新統の上位に直接、主に海成の泥からなる沖積層の上部が重なる。古中川谷東部では、砂嘴相当とデルタプレーン相当の砂・砂泥層が発達し、沖積層下部の砂・砂礫層も厚いのに対して、下総台地付近の古流山谷、古中川谷西部から古綾瀬川谷にかけては、これらの粗粒堆積物がいずれも乏しく、泥層が卓越する。

**緯度 35.853～35.878 の地質断面図 (no.132, 142；第 17 図 o, p)：**当該範囲の地質断面図は、大宮台地に隣接する谷底低地から中川低地を横断し下総台地西縁にいたる。沖積低地内で、地形断面で凸状の微高地をなしている地点は、江戸川と中川の堤防付近と、地質断面図 no.132 における草加市そうか公園、JR 武蔵野線の操車場、常磐自動車道の高架施設である。沖積層基底面の地形断面は、西から東へ、大宮台地東隣の標高 -10～-4 m の埋没波食台、古綾瀬川谷と古中川谷を横断し、古中川谷左岸の急な段丘崖を経て、下総台地に隣接する幅広い埋没波食台の形状を示す。

更新統は、下総台地の表層部は、ローム層とその直下の泥層（火山灰質粘性土相当）から構成される。古中川谷の両岸には標高 -25 m と -30 m 付近の平坦面をなす埋没段丘面が認められ（地質断面図 no.142：第 17 図 p）、砂・砂礫層からなる段丘堆積物が伴われる。これら以外の更新統は、砂・泥が卓越し、砂泥を伴う下総層群から構成される。全体にほぼ水平成層しているが、標高 -40～-30 m の泥層は西への緩傾斜を示す。大宮台地とそれに隣接する波食台・緩斜面域には、標高 -20 m 以浅には、南から連続する、厚さ 10～15 m の泥層が分布する。下総層群の砂の *N* 値は、標高 -15 m 以浅で 25～40、以深で 45 以上を示す。沖積層の下部は、古中川谷底の谷埋め堆積物として標高 -30 m 以下に厚さ約 20 m で分布しているが、古綾瀬川谷には基底付近にわずかに認められるにすぎない。これら谷底以外では更新統の上位に直接、主に海成の泥からなる沖積層の上部が重なる。古中川谷東部にこれまで認められた砂嘴相当の砂・砂泥層は欠如している。

### 5.2.2 水平断面図

*N* 値と土質種別の三次元グリッドモデルに基づいて、10 m 間隔で作成した水平断面図を第 18 図 a～f（標高 -5～-55 m）に示す。各水平断面図では、沖積層

基底面およびその形状が示す開析谷地形の輪郭の断面が、沖積層基底面の地層境界線で表現されている。これらの水平断面図において、沖積層と更新統を比較すると、同一の岩相であっても、 $N$ 値で比較すると、更新統が常に大きいという違いが明瞭である。

主要な開析谷の分布と形状の垂直変化は、標高 -5 m から -55 m の水平断面図（第 18 図）の違いに表現されている。すなわち、標高 -5 m と -15 m の両水平断面図（第 18 図 a,b）を比較すると、後者の標高が埋没波食台面より下位になるために、開析谷の谷幅が急速に狭くなっている。標高 -35 m の水平断面図（第 18 図 d）では、埋没河成段丘面（T1,T2）よりも標高が低く、標高 -45 m の水平断面図（第 18 図 e）では、埋没河成段丘面（T3）よりも低くなるために、順次開析谷の幅が狭くなる。

水平断面図には、沖積層の 3 種類の堆積環境が異なる砂層の分布が認められる。すなわち、①標高 -5 m 水平断面図（第 18 図 a）における東京低地から中川低地にかけて南北方向に幅広く分布する砂と砂泥層、②標高 -15 m 水平断面図（第 18 図 b）において、東縁の下総台地沿いに南北に狭長に分布する砂と砂泥層、③標高 -35 m の水平断面図における古荒川谷沿い、標高 -45 m と -55 m 両水平断面図における古荒川谷、東京谷、古中川谷のそれぞれに幅広く分布する砂層、である。第 17 図の地質断面図や既存研究（石原ほか、2004；田辺ほか、2006；木村ほか、2006；中西ほか、2011）との比較から、これらの砂層は、それぞれ、①はデルタプレーン、②は内湾で形成された海成堆積物（砂嘴）、③は蛇行河川システムの河川成砂層に相当すると考えられる。一方、沖積層の泥層の分布では、標高 -25 m ～ -5 m にかけて（第 18 図 a～c）、古中川谷の西半分から古綾瀬川谷、古荒川谷の北部にかけて、厚い内湾成泥層が広がっているという地域的な特徴が表現されている。

更新統の岩相分布の特徴を次に既述する。標高 -5 m と -15 m の両水平断面図（第 18 図 a,b）において、台地とそれに隣接する埋没波食台下に分布する下総層群の岩相に地域変化が認められる。すなわち、モデル地域の北西部は泥層が卓越し、東縁部と南西端には主に砂層が分布している。これらのうち、泥層は木下層の海成泥層（中澤・遠藤、2002）に相当する。②標高 -25 m の水平断面図（第 18 図 c）では、古荒川谷と古綾瀬川谷間の広い範囲で礫層の分布が認められる。礫層とそれに伴う砂層と泥層は、第 17 図 i～l の地質断面図に認められるように、木下層基底の礫・砂層とその上位に重なる泥層にそれぞれ相当する。古荒川谷の南に隣接して分布する泥層は、埋没河成段丘堆積物に相当する。③標高 -35 m の水平断面図（第 18 図 d）では、全体に下総層群の砂層が卓越するが、モデル地域の北部の埋没波食台下には泥層が、南西部の埋没河成段丘面下には礫層の分布がそれぞれ認められる。前

者は、下総層群中に挟まれる水平に成層する厚さ 5 ～ 10 m の泥層であり、後者は、埋没河成段丘を構成する礫層に相当する。④標高 -45 m と -55 m の両水平断面図（第 18 図 e,f）において、全体に砂層が卓越するが、南西部で、泥層、一部砂泥・礫層が断続的しながらも北西 - 南東方向に帯状をなして分布している。これらは、第 17 図 b～j の地質断面図では、東傾斜の地質構造をなして分布する泥層とその随伴堆積物に相当する。

## 6. まとめ

本研究では、沖積低地と隣接する台地における浅部の地下地質構造モデルを高精度に構築する手法について、既存研究の手法（江藤ほか、2008；木村ほか、2013）を整理し、一部新しい方法を導入した。そして、それを東京低地北部から中川低地南部域の浅部地下地質に適用して三次元モデルを構築した。本研究でとりまとめた三次元モデル構築手法の特徴は、第一に、ボーリングデータの三次元解析で得たポイントデータを基礎に、埋没地形平坦面の成り立ちを考慮した制約条件を用いてデータの空白域を補填し、沖積層基底面の面モデルを構築すること、そして、ボーリングデータから三次元グリッドモデルを求めるにあたって、この沖積層基底面モデルの上位と下位にモデル領域を分割しそれぞれのグリッドモデルを求める計算処理を実施し、その後統合し、空きグリッドの補間処理を加えて三次元グリッドモデルを構築すること、である。今回新しく導入した手法は、上記のうち、グリッドモデルを沖積層基底面モデルで分割処理と空きグリッドの補間処理である。

この手法と適用例は、木村ほか（2011）で暫定版として示したが、その手法では、沖積層基底面モデルは木村ほか（2013）のそれではなく精度が落ちること、および、沖積層とその基盤の更新統のグリッドモデル間の空白域を補填する手法として、仮想ボーリング柱状図を補う手法を取り入れていた。その場合の欠点は、仮想データの妥当性やモデルの実データ充足度のいずれについても評価が難しくなるという点にある。今回は、そのために、グリッドモデルの計算において、実際のボーリングデータだけを用いている。

モデル精度に比べて、解析に利用できるボーリングデータが少ない場合にどのように空間補間を行いモデルの精度を高めるのか、そして、モデルの信頼度をどのように検証し、表現するかはモデリングに伴う基本課題といえる（木村ほか、2013）。この点に関して、本論文では十分な検討ができていない。今後の課題としたい。しかし、本研究の手法を適用するにあたって判明した問題点を以下に整理する。

**微地形と土地改変：**沖積低地では、微地形として自然堤防や沿岸洲、旧河道、湖沼などが識別され（例えば、

久保, 1989), それらは砂や泥・腐植土層で充填されている。しかし, 本三次元グリッドモデルでは, 第17図の地質断面図に認められるように, ボーリングデータの粗密(第14図)と関係なく, 全地域にわたって土質種別が人工土となっていて表現できていない。したがって, 微地形や土地利用に応じた岩相や $N$ 値をモデル化するためには, ボーリングデータに依存するだけでは不十分であり, 今後, 微地形区分図や土地利用図を基礎に, メッシュ単位の地質柱状図モデルを作成するなどの手法の開発が必要である。

**更新統の地質構造:** グリッドモデルの計算は, 江藤ほか(2008)に基づき, ボーリングデータについて同一標高の水平面内で実施している。これは, ほぼ水平に堆積しその後変位を受けていない沖積層の場合は側方への $N$ 値・岩相の連続性と垂直方向への連続性に著しい違いがあり, よい結果を得ることができる(江藤ほか, 2008)。しかし, 更新統の場合では, 堆積後地殻変動を受けて変位している可能性がある。本論のモデル地域においても, 武蔵野台地とその周辺地域では, 上総層群と下総層群には, 北ないし東への傾動構造の存在が明らかにされており(東京都土木技術研究所, 1996), 本論における三次元グリッドモデルでも, その構造に相当する東へ傾斜する地質構造が認められた(第17図d,e)。したがって, 浅部地下を対象としたモデリングにおいて, 傾動や褶曲, 断層などの地質構造をモデルに反映させられる方法の開発が必要である。

本研究で示した土質と $N$ 値による三次元グリッドモデルリング手法は, 関口ほか(2014)にあるとおり,  $S$ 波速度や密度などの地盤物性モデルに経験式を用いて変換できることから, 地質学的な表現だけでなく, 地震応答特性評価に用いる地盤モデルとしても有用であると考えられる。今後, そのモデルの精度をあげるために, 上記で検討した微地形と土地改変, および更新統の地質構造をモデル化する上で必要な手法の開発を進める所存である。

**謝辞** 本論執筆にあたって, 元東京都土木技術センターの中山俊雄氏, 埼玉県国際科学技術センターの八戸昭一博士, 防災科学技術研究所の大井昌弘博士には, 各機関所有のボーリングデータの利用において大変便宜をはかっていただいた。産業技術総合研究所の田辺晋博士, 小松原純子博士, 元産業技術総合研究所の中西利典博士には, ボーリングデータのデータベースの整備, 沖積層層序の研究調査で協力していただいた。大阪市立大学の根本達也博士, 産業技術総合研究所の野々垣進博士には空間補間計算処理法に関してご教授いただいた。産業技術総合研究所の岸本清行博士には, 付属資料に掲載した沖積層基底面モデルのアナグリフを作成していただいた。以上記して深く感謝する次第です。

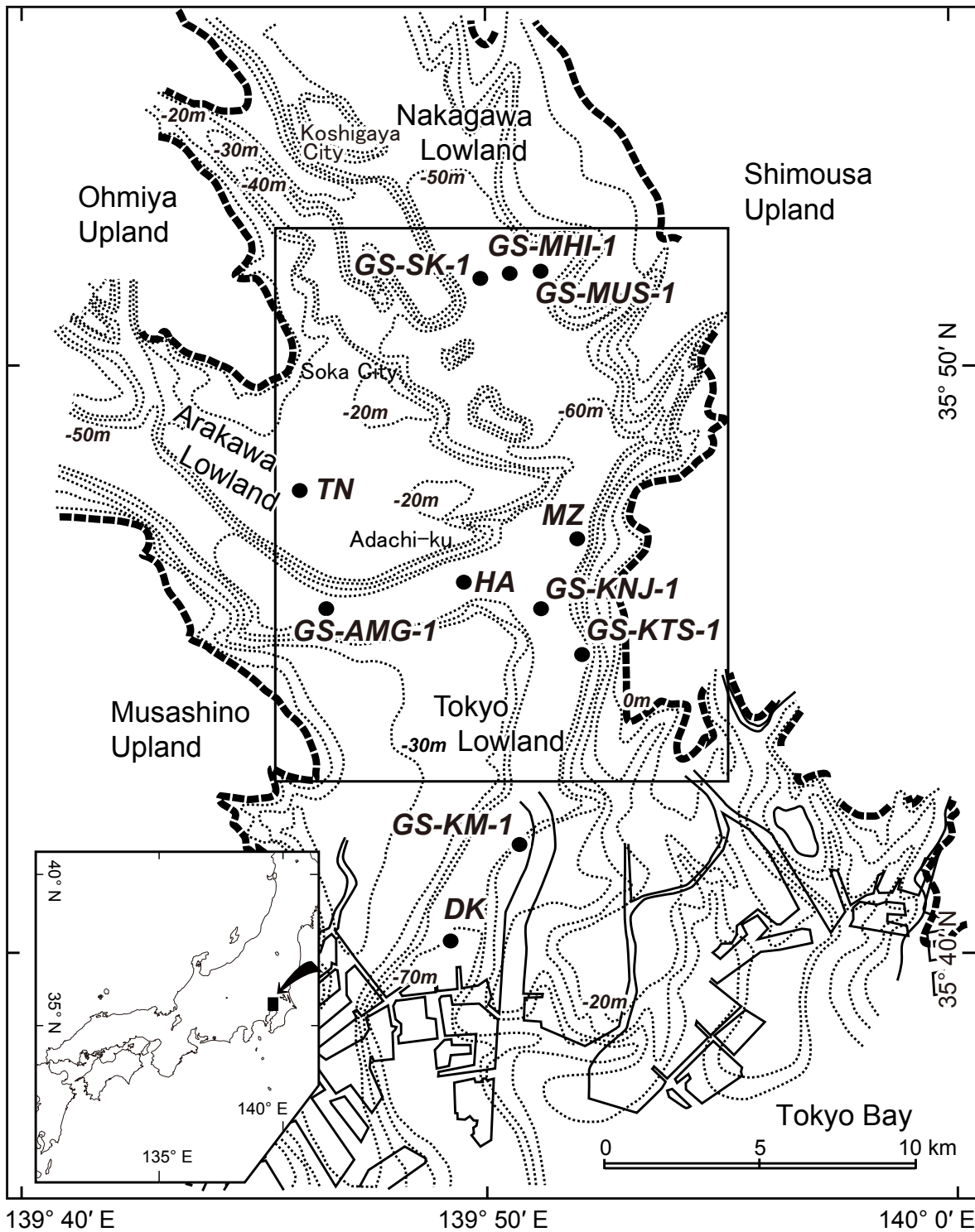
## 文献

- 青木 滋・柴崎達雄(1966)海成”沖積層”の層相と細分問題について. 第四紀研究, **5**, 113-120.
- 遠藤邦彦・印牧もとこ・中井信之・森 育子・藤沢みどり・是枝若奈・小杉正人(1992)中川低地と三郷の地質. 三郷市史, 35-111.
- 遠藤邦彦・小杉正人・松下まり子・宮地直道・菱田量・高野 司(1989)千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義. 第四紀研究, **28**, 61-77.
- 遠藤邦彦・関本勝久・高野 司・鈴木正章・平井幸弘(1983)関東平野の沖積層. アーバンクボタ, no. 21, 26-43.
- 遠藤秀典・相原輝雄・宇野沢 昭・松本英二・富樫茂子(1988)東京低地の本所埋没段丘及びその埋積堆積物の形成年代. 第四紀研究, **28**, 401-405.
- 江藤佳佳子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄(2008)ボーリング柱状図資料を用いた $N$ 値と岩相の3次元分布モデル—東京低地北部における沖積層の例—. 地質学雑誌, **114**, 187-199.
- 池田俊雄(1964)東海道における沖積層の研究. 東北大学地質古生物学教室邦文研究報告, no.60, 1-85.
- 石原武志・須貝俊彦・八戸昭一(2011)荒川低地中・上流域と妻沼低地における最終氷期の埋没地形面群. 第四紀研究, **50**, 113-128.
- 石原与四郎・木村克己・田辺 晋・中島 礼・宮地良典・堀 和明・稲崎富士・八戸昭一(2004a)埼玉県草加市柿木地区で掘削された沖積層ボーリングコア(GS-SK-1)の堆積相・堆積物特性と放射性炭素年代. 地調研報, **55**, 183-200.
- 石原与四郎・木村克己・中島 礼・宮地良典・田辺 晋・中山俊雄・斎藤文紀(2004b)東京低地と荒川低地から得られた3本のボーリングコアの堆積相と放射性炭素年代:DK コア(江東区新砂), TN コア(足立区舎人公園), HA コア(東綾瀬公園). 地調研報, **55**, 221-235.
- 井関弘太郎(1983)沖積平野. 東京大学出版会, 145p.
- Kaizuka, S., Naruse, Y. and Matsuda, I. (1977) Recent formations and their basal topography in and around Tokyo Bay, central Japan. *Quaternary Research*, **8**, 32-50.
- Kaufman, O. and Martin, T.(2008) 3D geological modeling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, **34**, 278-290.
- 木村克己(2004)巻頭言:都市地質研究の展開. 地調研報, **55**, 181-182.
- 木村克己(2011)ボーリングデータ処理システムの公



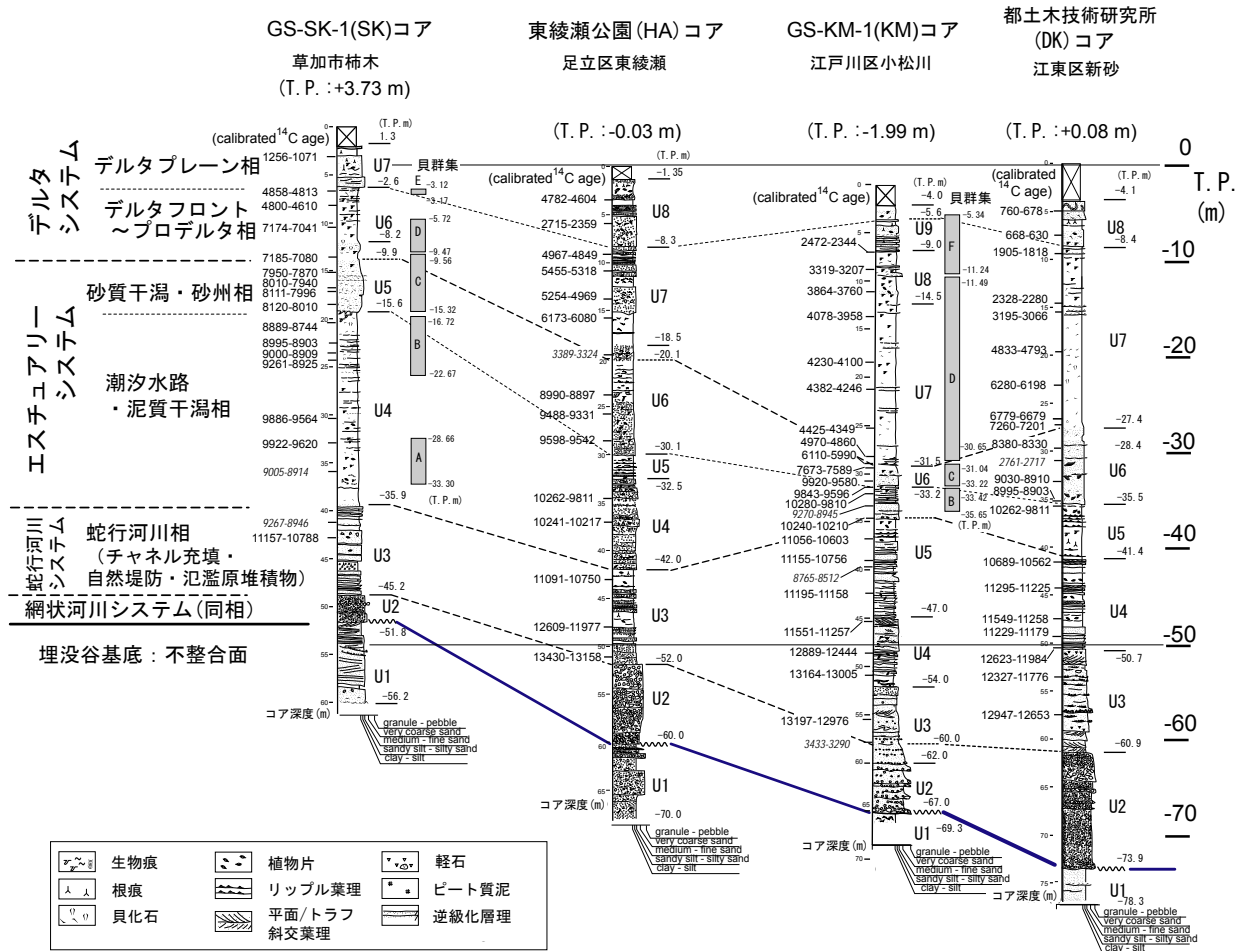
- 開. 産業技術総合研究所 TODAY, 11, no.1, 19.
- 木村克己・花島裕樹・石原与四郎・西山昭一 (2013) 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの三次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例. 地質学雑誌, **119**, 537-553.
- 木村克己・石原与四郎 (2009) 東京低地付近の沖積層を例とした沖積層研究の新展開. 地盤工学会誌, **57**, 4-7.
- 木村克己・石原与四郎・宮地良典・中島 礼・中西利典・中山俊雄・八戸昭一 (2006) 東京低地から中川低地に分布する沖積層のシーケンス層序. 地質学論集, no.59, 1-18.
- 木村克己・石原与四郎・花島裕樹・根本達也 (2011) 沖積層の三次元グリッドモデルとその作成手法 (概要) -東京低地北部から中川低地南部の例-. 地質調査総合センター研究資料集, no.539, 29p.
- 国土交通省 (2004) 地質・土質調査電子納品要領 (案) 平成 16 年 8 月. 135p.
- 久保純子 (1989) 東京低地における縄文海進以降の地形の変遷. 早稲田大学教育学部学術研究, **38**, 75-92.
- Lemon, A.M. and Jones, N.L. (2003) Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers and Geosciences*, **29**, 547-555.
- Matsuda, I. (1974) Distributions of the recent deposits and buried landforms in the Kanto Lowland, central Japan. *Geog. Rep. of Tokyo Metrop. Univ.*, **9**, 1-36.
- 宮地良典・木村克己・石原与四郎・田辺 晋・中島 礼・堀 和明・中山俊雄・齋藤文紀 (2004) 東京都江戸川区小松川地区で掘削された沖積層ボーリングコア (GS-KM-1) の堆積相・堆積物物性と放射性炭素年代. 地調研報, **55**, 201-219.
- 中島 礼・木村克己・宮地良典・石原与四郎・田辺 晋 (2004) 東京都江戸川区小松川と埼玉県草加市柿木において掘削した沖積層ボーリングコアから産出した貝化石群集. 地調研報, **55**, 237-269.
- 中西利典・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・八戸昭一・稲崎富士 (2007) ボーリング柱状図資料の解釈による中川低地南部の沖積層基底図. 地質調査総合センター研究資料集, no.454, 39p.
- 中西利典・田辺 晋・木村克己・中島 礼・内山美恵子・柴田康行 (2011) 埼玉県三郷市彦成地区の沖積層ボーリングコア (GS-MHI-1) の堆積相・珪藻化石群集組成・物性・放射性炭素年代値. 地調研報, **62**, 3-46.
- N 値の話編集委員会 (1998) N 値の話. 理工図書, 188p.
- 中澤 努・遠藤秀典 (2002) 大宮地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 41p.
- 日本道路協会 (1996) 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編.
- 野々垣 進・升本眞二・塩野清治 (2008) 3 次 B-スプラインを用いた地層境界面の推定. 情報地質, **19**, 61-77.
- 太田 裕・後藤典俊 (1976) S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み. 物理探査, **29**, 31-41.
- 関口春子・吉田邦一・木村克己・花島裕樹 (2014) 中川低地の浅部地盤の地震動応答特性. 関東平野中央部の地下地質情報とその応用, 特殊地質図, no.40 (CD), 地質調査総合センター, 136-177.
- 清水恵助 (1972) "沖積層" の土質工学的性質とくに東京港地区を例として. 地質学論集, no.7, 252-266.
- 塩野清治・升本眞二・坂本正徳 (2000) 14 地層面の推定-曲面の補間・平滑化-. 地質情報技術研修プログラム-地質情報・空間情報コース-講習会テキスト, 11-56, 日本情報地質学会.
- 塩野清治・能美洋介・升本眞二・坂本正徳 (2001) Horizon2000: 等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良. 情報地質, **12**, 229-249.
- 竹村貴人・小田匡寛・濱本昌一郎・川本健・赤間友哉・田井秀迪・木村克己 (2013) 沖積粘性土の剪断剛性率とその堆積時環境依存性に関する研究-関東平野南部における事例-. 地学雑誌, **122**, 472-492.
- 田中勝法・竹村貴人・木村克己 (2006) 堆積環境の変遷から見た沖積層の圧密特性. 地質学論集, no.59, 191-204.
- 田辺 晋・中島 礼・中西利典・石原与四郎・宮地良典・木村克己・中山俊雄 (2006) 東京都葛飾区における沖積層の堆積相と堆積物物性: 奥東京湾口の砂嘴堆積物の時空間分布. 地調研報, **57**, 261-288.
- 田辺 晋・中西利典・木村克己・八戸昭一・中山俊雄 (2008) 東京低地北部から中川低地にかけての沖積層の基盤地形. 地調研報, **59**, 497-508.
- 東京都土木技術研究所 (1969) 東京都地盤地質図. 東京都土木技術研究所.
- 東京都土木技術研究所 (1996) 東京都 (区部) 大深度地下地盤図-東京都地質図集 6-. 東京都土木技術研究所.
- 山口正秋・須貝俊彦・大上隆史・藤原 治・大森博雄 (2006) 高密度ボーリングデータ解析にもとづく濃尾平野沖積層の三次元構造. 地学雑誌, **115**, 41-50.

(受付: 2013 年 12 月 19 日 受理: 2014 年 2 月 14 日)



第1図 モデル地域の位置図 沖積層基底標高は、遠藤ほか(1983)にもとづく。四角の範囲がモデル地域を示す。  
●: 基準ボーリング調査地点, ラベルはその名称.

Fig. 1 Index map of the study area, which is marked by contour lines of the basal surface of the latest Pleistocene to Holocene incised-valley fills (the Chuseki-so) in the Tokyo and the Nakagawa Lowlands (after Endo et al., 1983). A square area in the map indicates the surface model area of the Chuseki-so presented by this article. Closed circles with abbreviation show the borehole sites referred as the standard stratigraphy of the Chuseki-so in this article.



第2図 東京低地および中川低地域のボーリング柱状図の堆積相と堆積システム (木村ほか, 2006) 柱状図の位置は第1図参照. U1 ~ U9: 各地質柱状図の堆積相ユニット. 貝群集 (中島ほか, 2004) A・E: 潮間帯, B: 潮間一潮下帯, C・F: 潮下帯, D: 内湾の潮下帯. GS-SK-1: 石原ほか (2004a), GS-KM-1: 宮地ほか (2004), HA・DK: 石原ほか (2004b)

Fig. 2 Stratigraphic columns of the Chuseki-so constructed based on the borehole cores (Kimura et al., 2006). Mollusc assemblages (Nakajima et al., 2004) A/E: intertidal zone, B: subtidal/intertidal zone, C/F: subtidal zone, D: subtidal zone (inner bay). GS-SK-1: Ishihara et al. (2004a), GS-KM-1: Miyachi et al. (2004), HA・DK: Ishihara et al. (2004b) The sites of the columns are shown in Fig. 1.

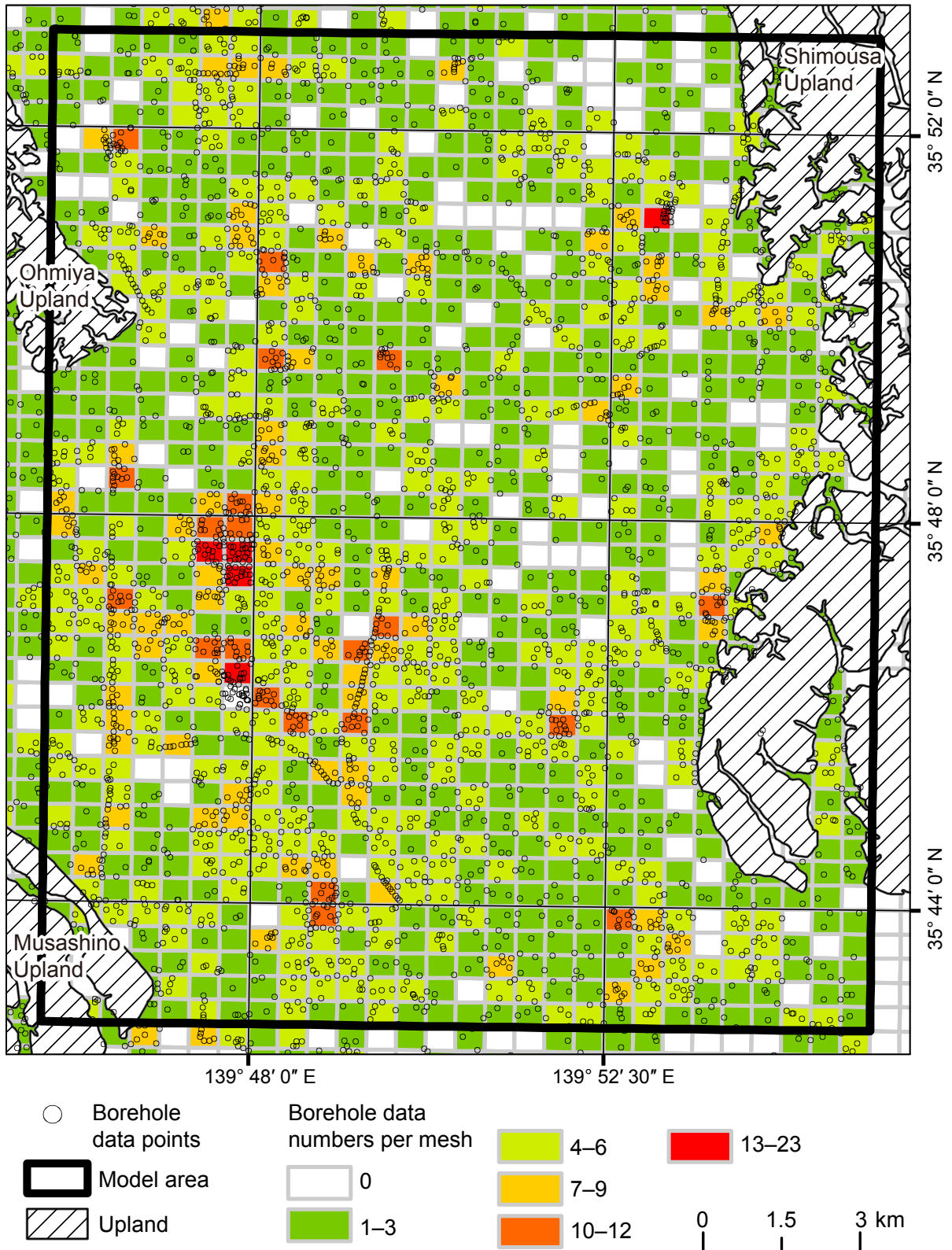


青木・柴崎(1966) 土木技術研究所(1969)		Kaizuka et al (1977)			遠藤ほか(1983)		木村ほか(2006)		本研究
有楽町層	上部層	U	UA	Upper alluvial deposits	有楽町層	上部層	デルタシステム	デルタプレーン相	上部
	下部層		US	Upper sand		下部層		プロデルタ ~デルタフロント相	
UC			Upper clay	HBG			エスチュアリーシステム	砂質干潟・砂州相 RS 潮汐水路・泥質干潟相	
七号地層	砂・粘土互層	M	MS	Middle sand	七号地層	砂泥層	蛇行河川システム 網状河川システム	蛇行河川相 TS 網状河川相	下部
		L	LS and LC	Lower clay (LC) and Lower sand (LS)					
	砂質粘土	B	BG	Basal gravel	BG(基底礫層)				

..... MFS: 最大海氾濫面相当の地層境界面  
 - - - RS: 内湾ラビーンメント面相当の地層境界面  
 - . - TS: 海進面  
 HBG 完新世基底礫層  
 .... 対比線

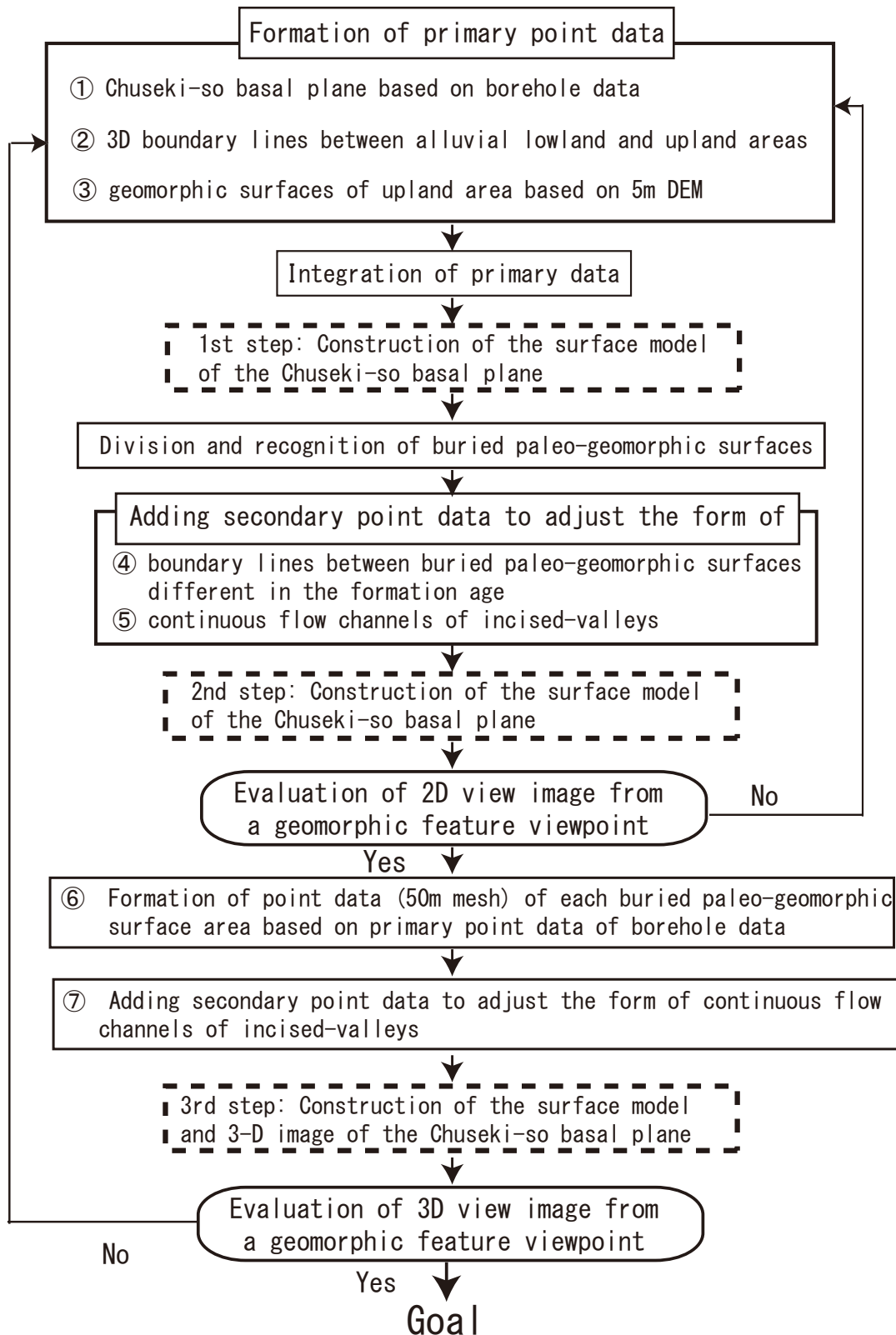
第3図 沖積層の層序対比 (木村ほか, 2006)

Fig. 3 Correlation of stratigraphic classification of the Chuseki-so (reprinted from Kimura et al., 2006)



第4図 ボーリングデータの位置図 (木村ほか, 2013) メッシュ: 8分の1基準メッシュ (約500m四方)

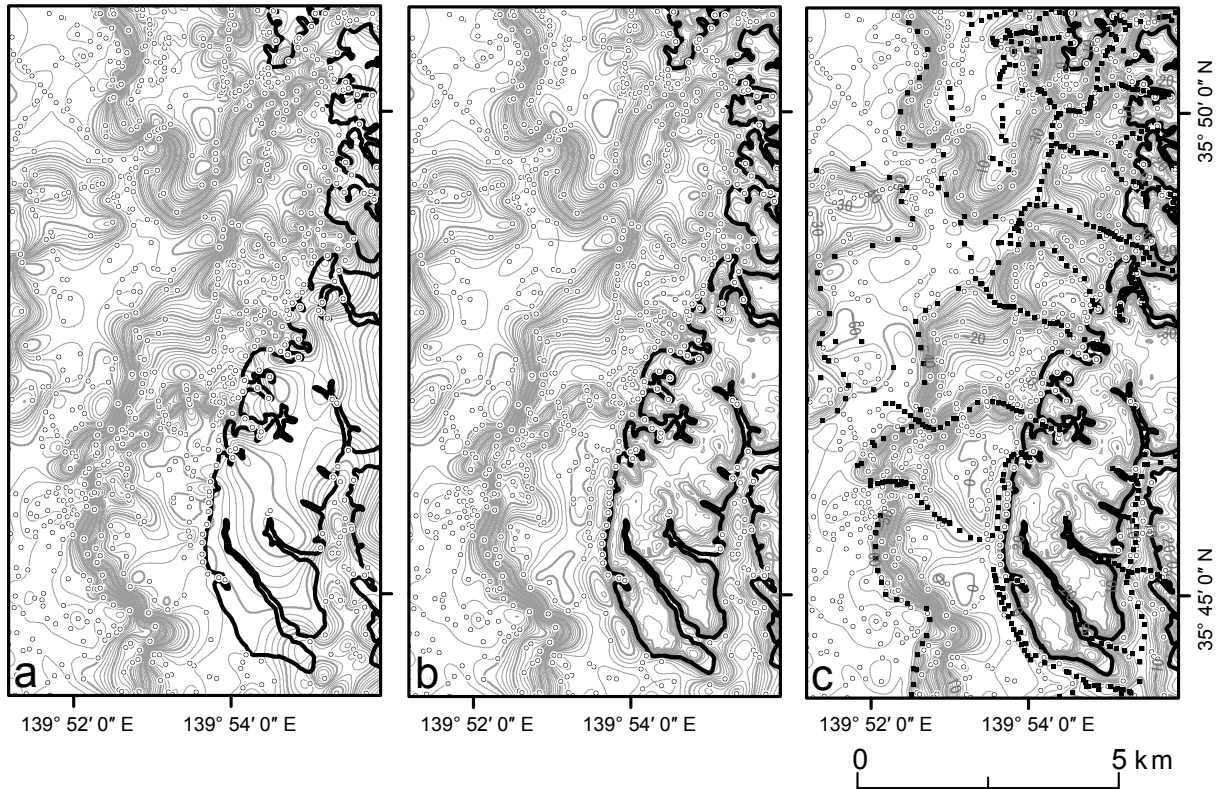
Fig. 4 Distribution of borehole data used in this study. The grid mesh follows the 500-m grid of the standard area mesh of the Digital National Land Information. (reprinted from Kimura et al.(2013) )



第 5 図 沖積層基底面モデルの処理過程 (木村ほか, 2013)

Fig. 5 Flowchart depicting the method used to construct the surface model of the base of the Chuseki-so. (reprinted from Kimura et al.(2013))

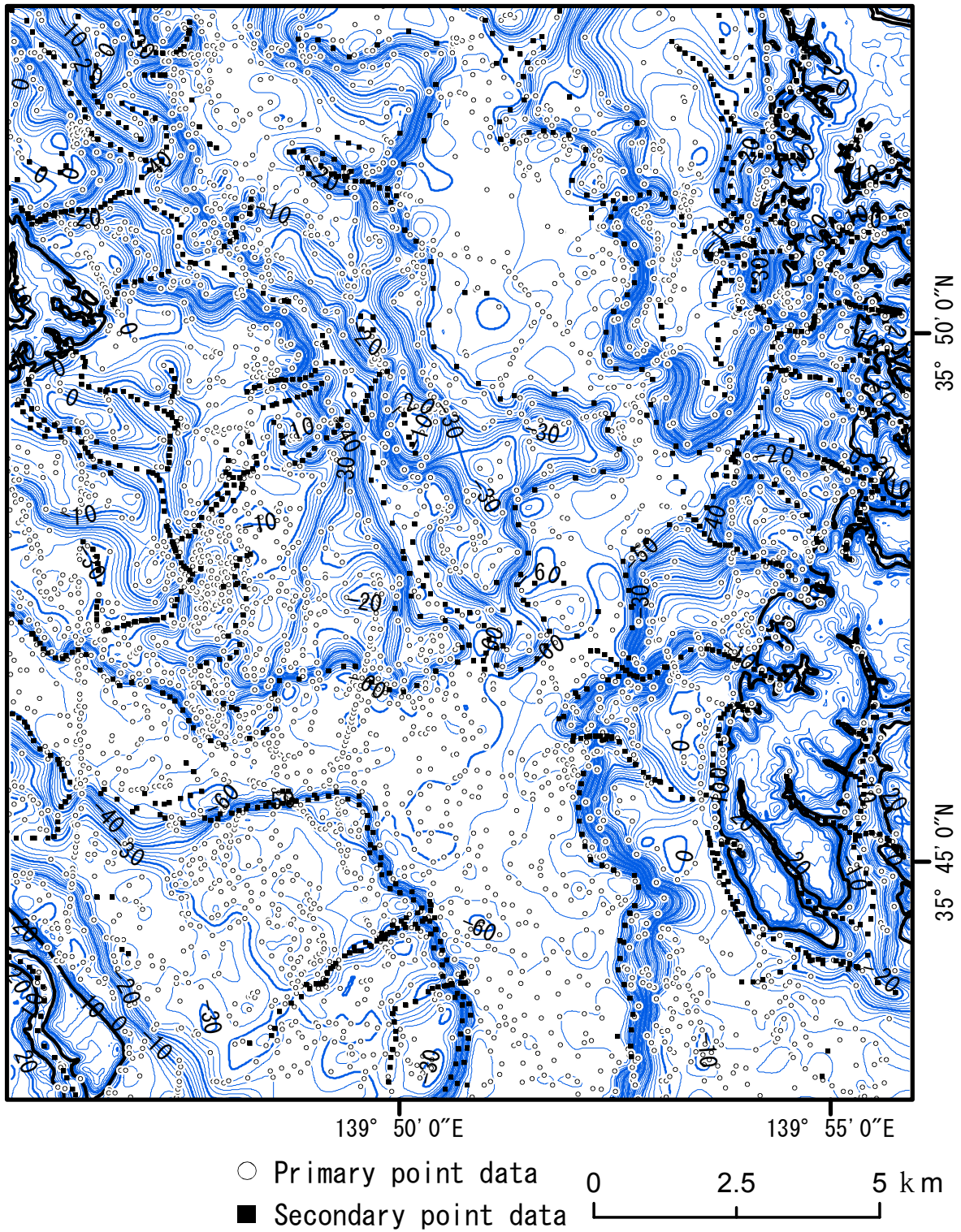




第 6 図 沖積層基底面モデルにおける沖積・台地境界と谷の流路制約の効果 (木村ほか, 2013)

(a) ボーリングデータから得た標高値だけに基づく基底面モデル (第 5 図の①), (b) 沖積・台地境界と台地面のポイントデータを加えて求めた基底面モデル (第 5 図の第 1 段階), (c) 埋没地形面境界や谷の流路を制約するための補填データを加えて求めた基底面モデル (第 5 図の第 2 段階). 本図の位置は第 8 図参照.

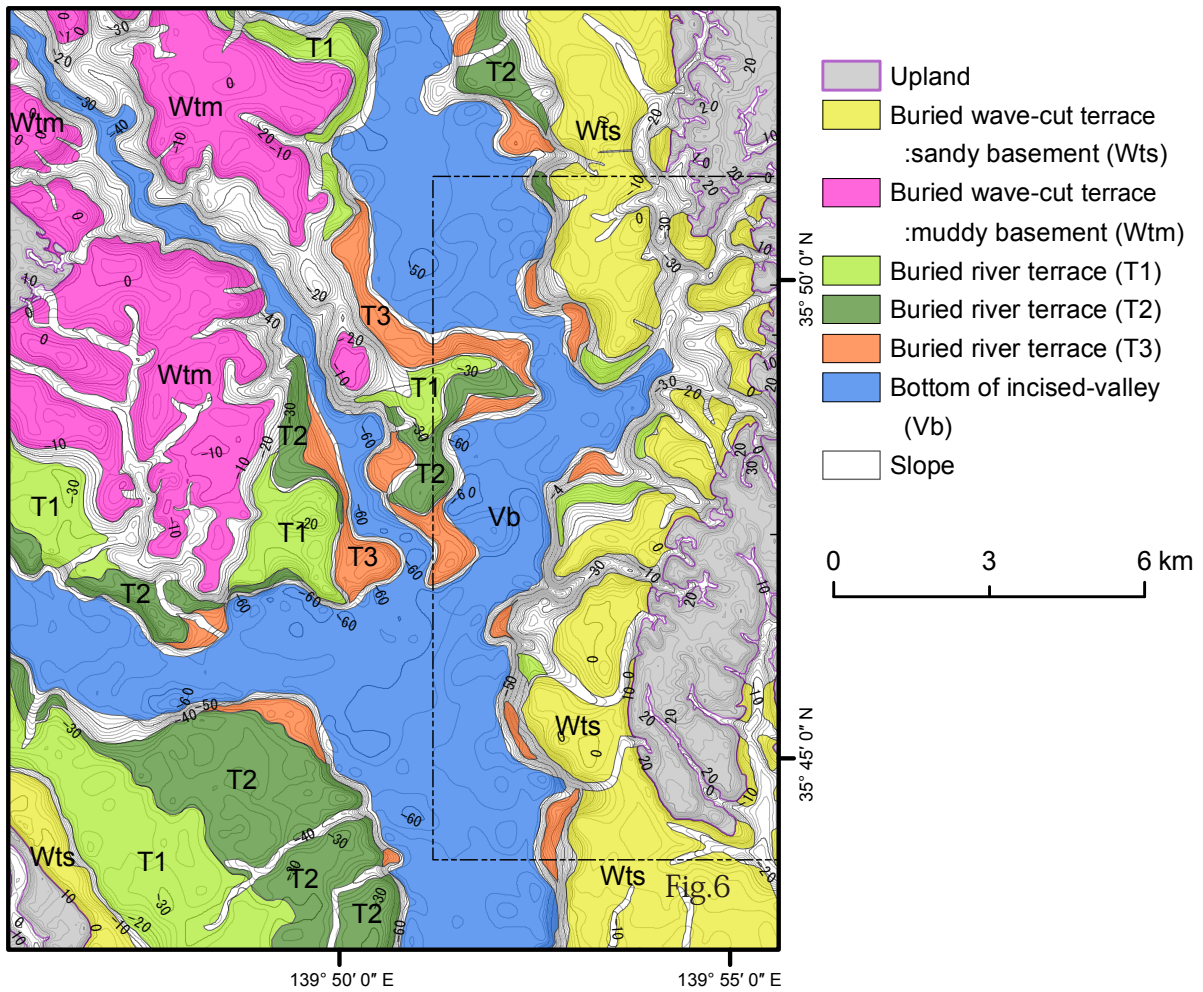
Fig. 6 Contour maps comparing the surface models of the base of the Chuseki-so constructed in the first and second step of the modeling procedure. (reprinted from Kimura et al.(2013) ) (a) A surface model calculated based only on the primary point data of borehole data ( ① of Fig. 5). (b) The first-step surface model calculated based on all primary point data ( ① , ② , ③ of Fig. 5). (c) The second-step surface model (see Fig. 5). Open circles: primary point data of borehole data, Rectangles: secondary point data. Black line: boundary line. Contour lines in the upland area in (b) and (c) are calculated based on 50-m mesh topographic elevation values. Contour interval: thin lines at intervals of 2m and thick line at intervals of 10 m. The location of the area is shown in Fig. 8.



第7図 沖積層基底面の第二次面モデル (木村ほか, 2013)

Fig. 7 The second-step surface model of the base of the Chuseki-so calculated using both primary and secondary point data in the model area. (reprinted from Kimura et al.(2013) )

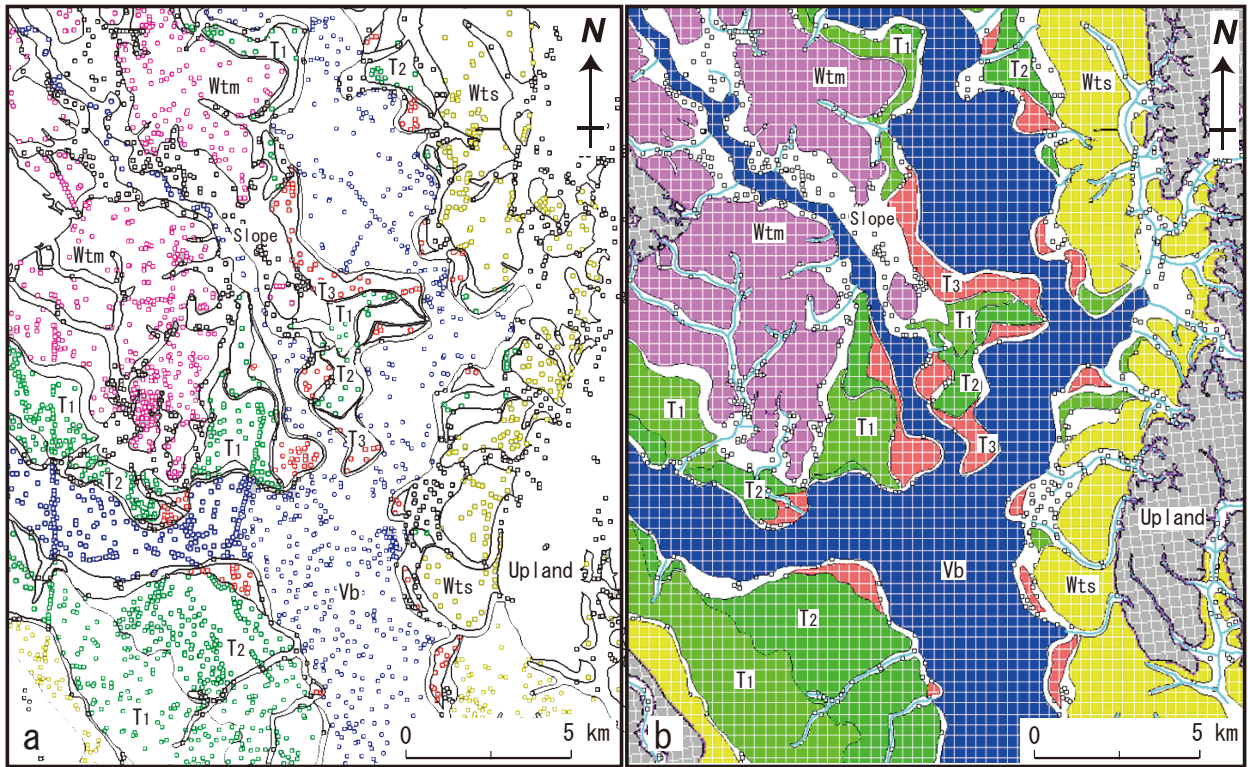




第 8 図 沖積層基底面モデルに基づく埋没地形面区分 (木村ほか, 2013)

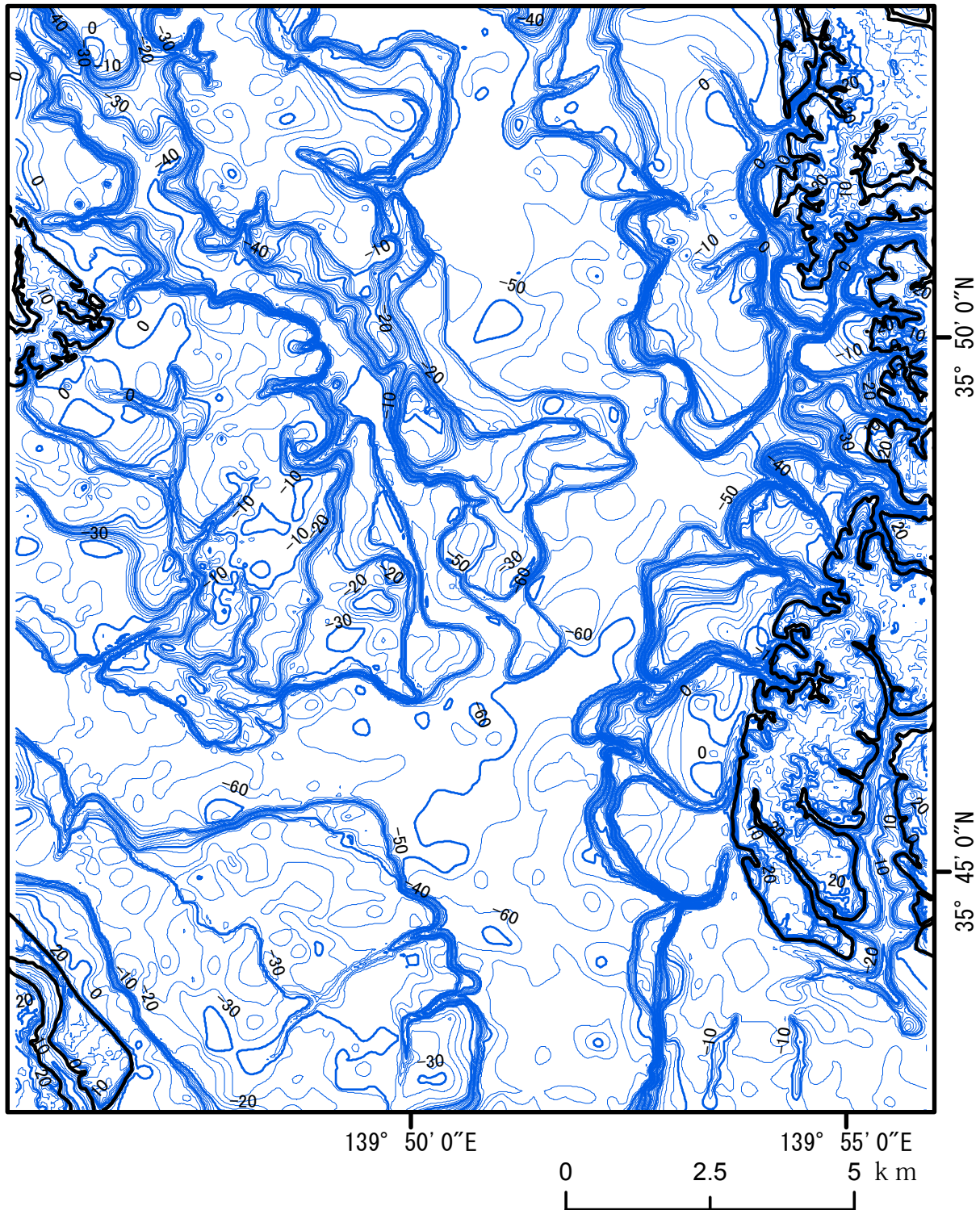
Fig. 8 Surface map of buried paleogeomorphic units constructed based on the second-step surface model of the base of the Chuseki-so. (reprinted from Kimura et al.(2013) )





第9図 埋没地形面区分とポイントデータ分布 (木村ほか, 2013) (a) 地形面区分と実ボーリングデータ分布との関係, (b) 50m メッシュで表現された地形面区分と地形面に属さない実ボーリングデータの分布図. 図中の記号は第8図参照.

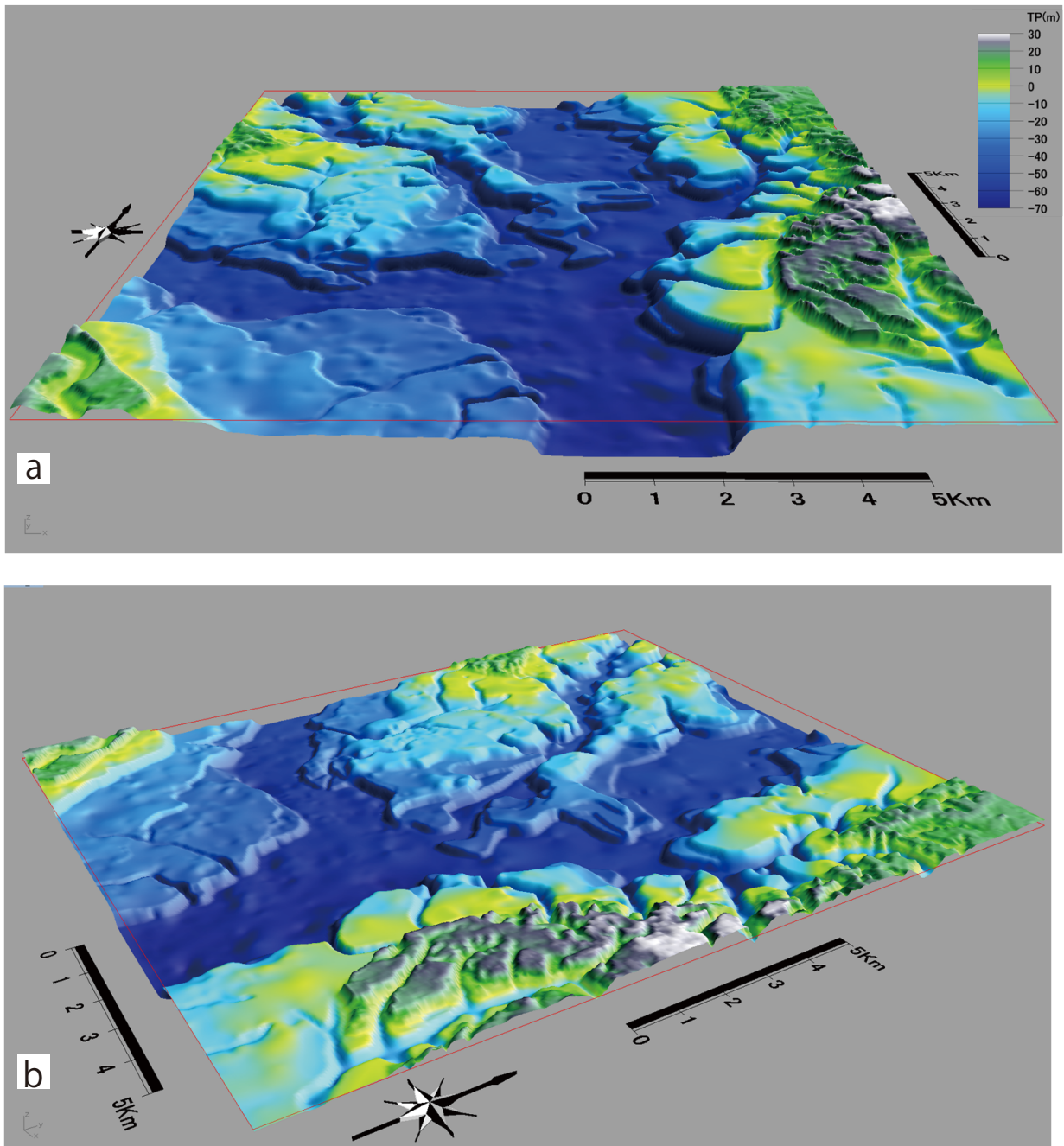
Fig. 9 Spatial relationship between the surfaces of different buried geomorphic units and primary point data in the third-step surface model of the base of the Chuseki-so. (a) Diagram showing the relationship between the geomorphic units and the distribution of primary point data. (b) Diagram showing the geomorphic units over a 50-m mesh grid and the distribution of point data over different geomorphic surface. Note that for (a) and (b), the point data marked with the same color belong to the same geomorphic surface. The abbreviation and the location of the figure are the same as for Fig. 8. (reprinted from Kimura et al.(2013) )



第 10 図 沖積層基底面の第三次面モデル (木村ほか, 2013)

Fig. 10 The third-step surface model of the Chuseki-so basal plane in the model area. (reprinted from Kimura et al.(2013) )



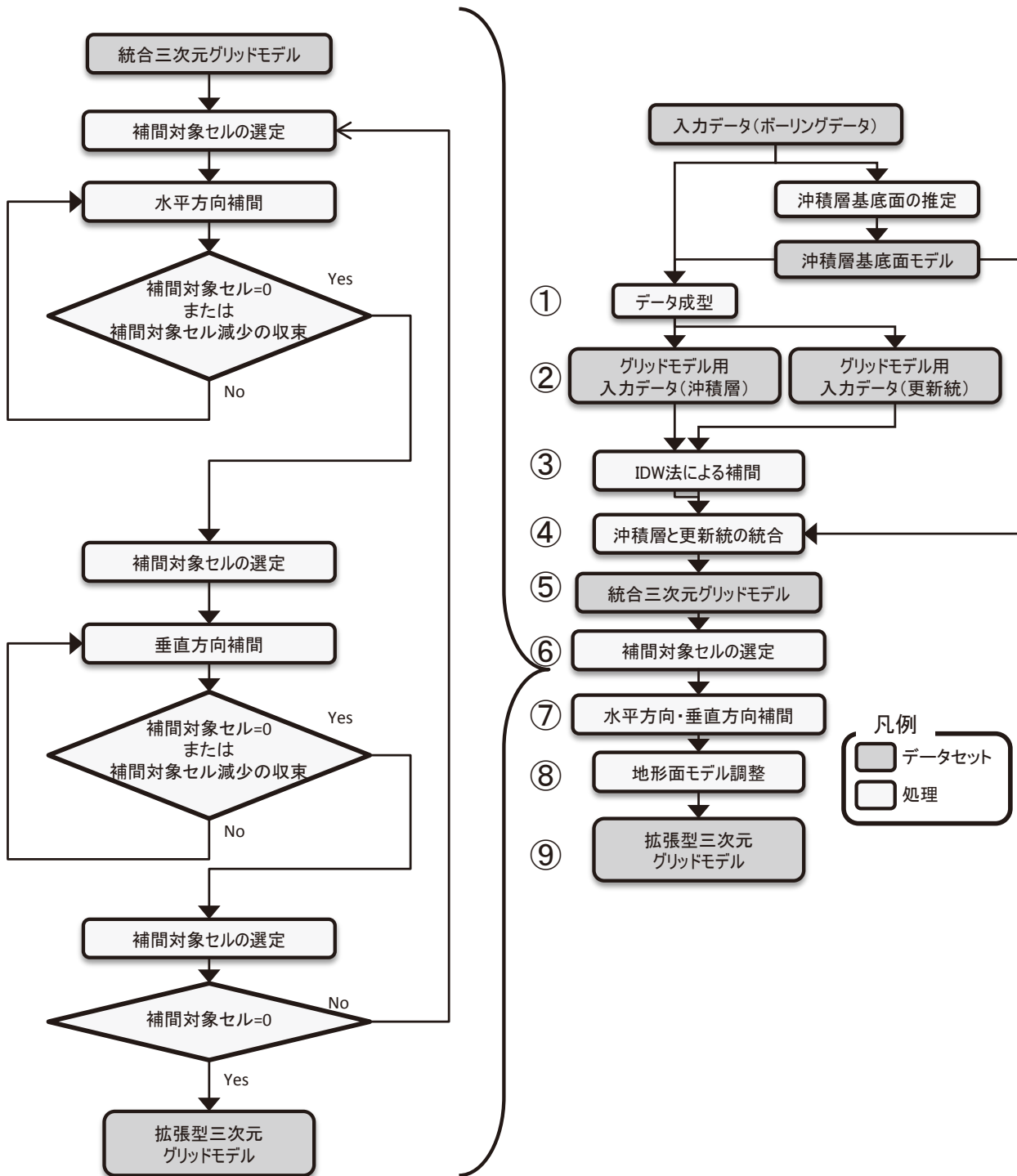


第 11 図 第 10 図の沖積層基底面モデルの鳥瞰図 (木村ほか, 2013)

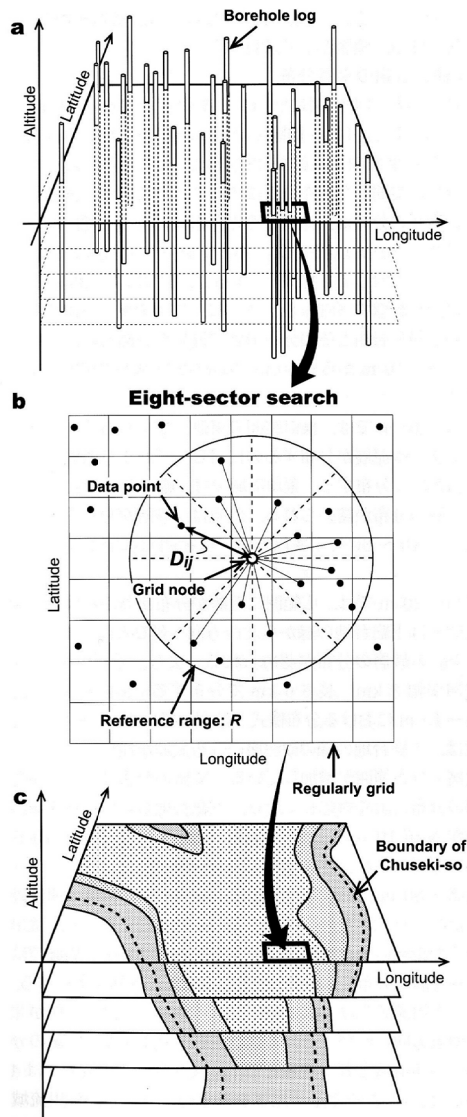
(a) 南からの画像, (b) 南東からの画像. 縦 10 倍に拡大.

Fig. 11 Perspective view of the third-step surface model of the base of the Chuseki-so (Fig. 10) in the model area. (a) View from the south. (b) View from the south-east. Vertical exaggeration is  $\times 10$ . (reprinted from Kimura et al.(2013) )





第 12 図 三次元グリッドモデル構築の処理過程  
 Fig. 12 Work flow chart of the method to construct the 3D grid model

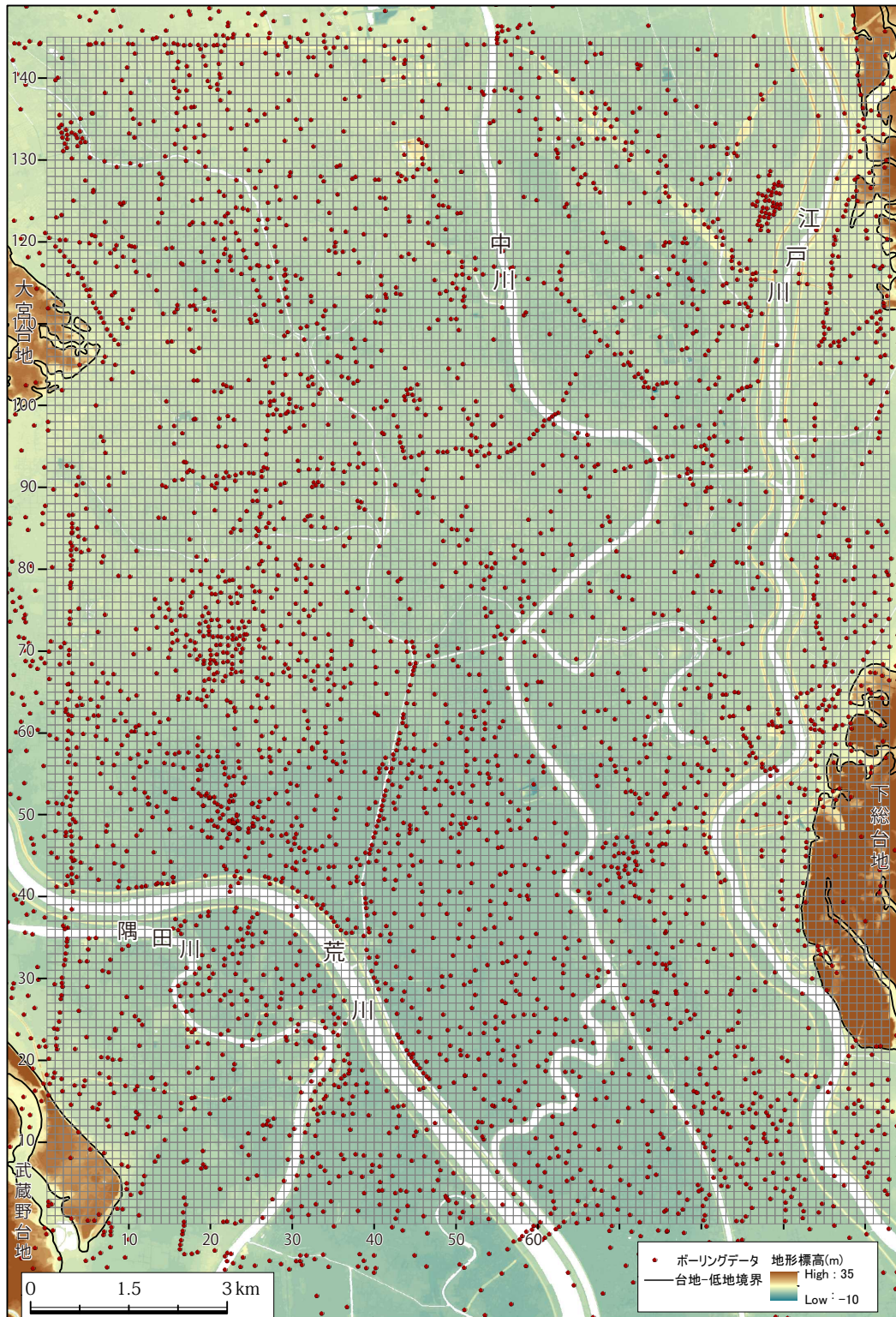


第 13 図 三次元グリッドモデル構築の概念図 (江藤ほか, 2008)

- (a) ボーリング柱状図の空間分布と任意の水平面
- (b) グリッドノードにおける補間計算のデータ参照法として、8分割法と参照半径を示す。
- (c) 補間計算で得られたグリッドノードの2次元水平分布とそれを積み重ねた状態を示す。

Fig. 13 Schematic diagram of constructing a three-dimensional model. (reprinted from Eto et al.(2008) )

- (a) Randomly distributed borehole logs in 3D space, (b) Selection of data points for calculations using an eight-sector search. (c) Stacked two-D models with extra datasets.



第 14 図 東京低地北部から中川低地南部付近におけるボーリングデータ分布図

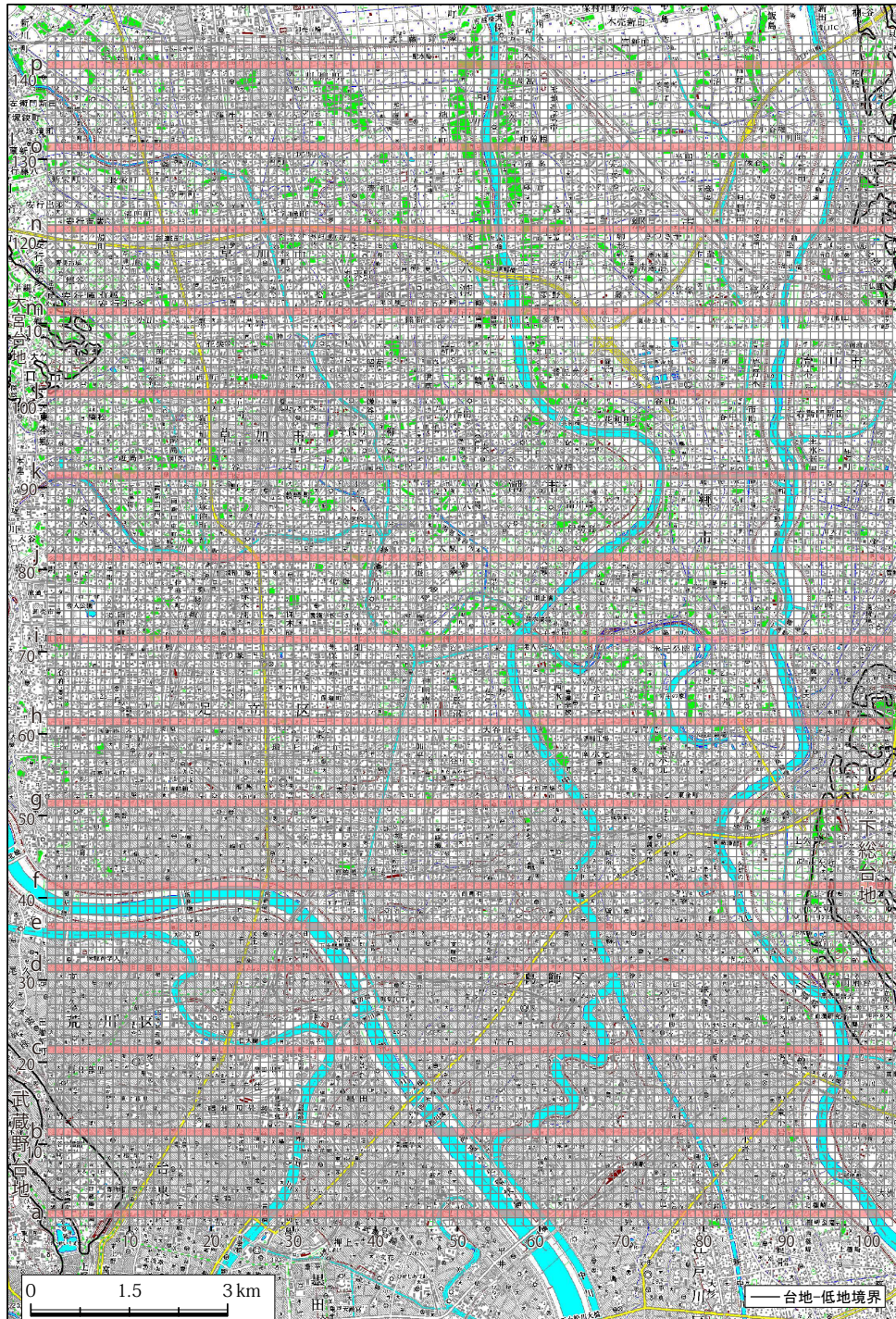
基図: 国土地理院の数値地図 5m メッシュ (標高) を利用して作成した地形面段彩図. メッシュは 125m 単位で, UTM 直交座標系 (54 帯) による.

Fig.14 Locality map of borehole data and schematic borehole data around the northern Tokyo lowland and southern Nakagawa lowland. basemap: the topographic altitude map drawn based on 5 mDEM of Geographic Survey Institute. The mesh is divided into the unit of the 125m length based on UTM coordinate system (zone 54).





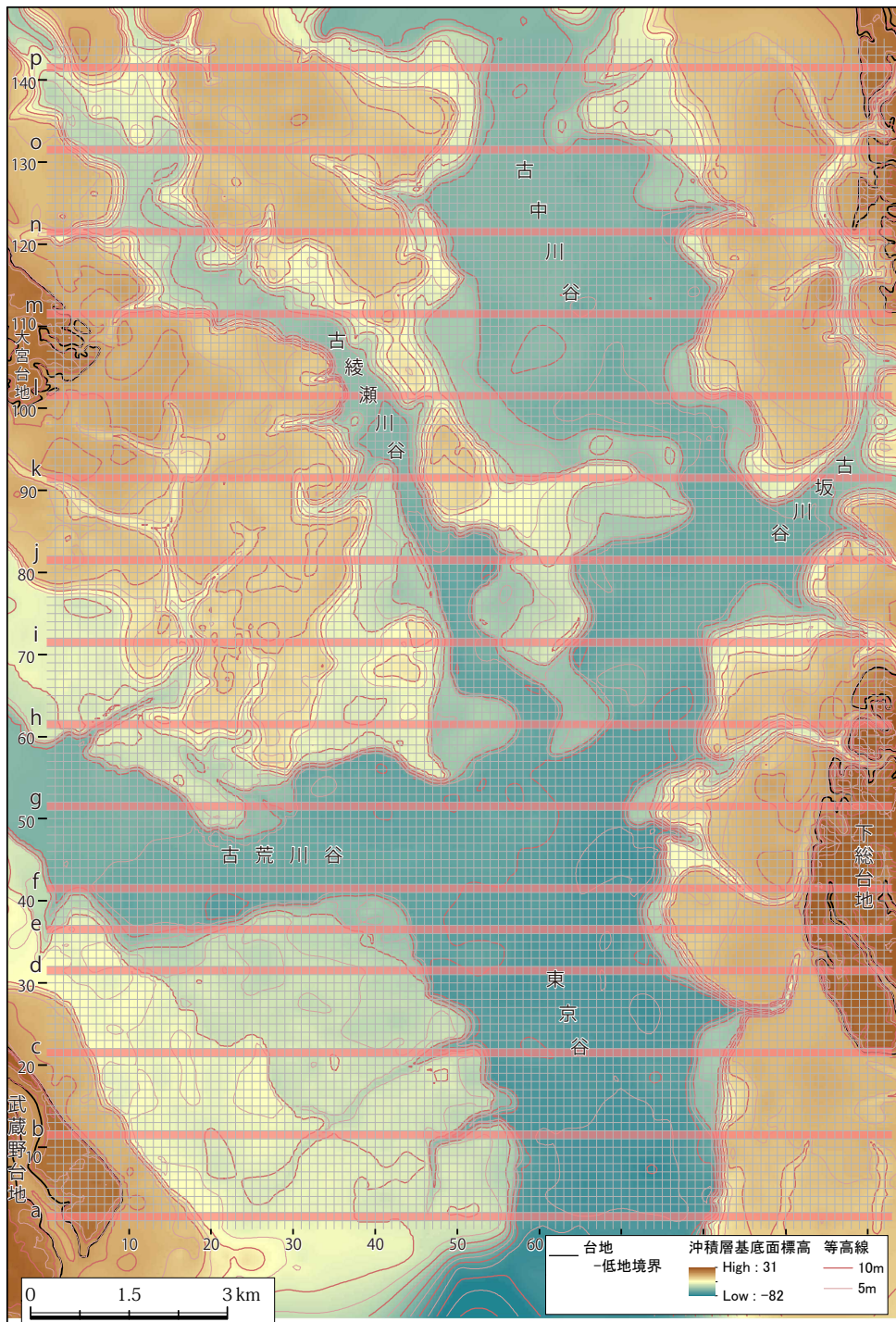




第16図 a モデル地域の125mメッシュと地質断面図の位置図 基図：国土地理院の数値地図50000（地図画像）「埼玉・東京・神奈川」メッシュはUTM直交座標系（54帯）による。

Fig.16a Index map of 125 m mesh and locality of vertical geologic sections based on the 3D grid model basemap: Digital Map 50000 (Map Image) SAITAMA · TOKYO · KANAGAWA of GSI The mesh is divided into the unit of the 125 m length based on UTM coordinate system (zone 54).

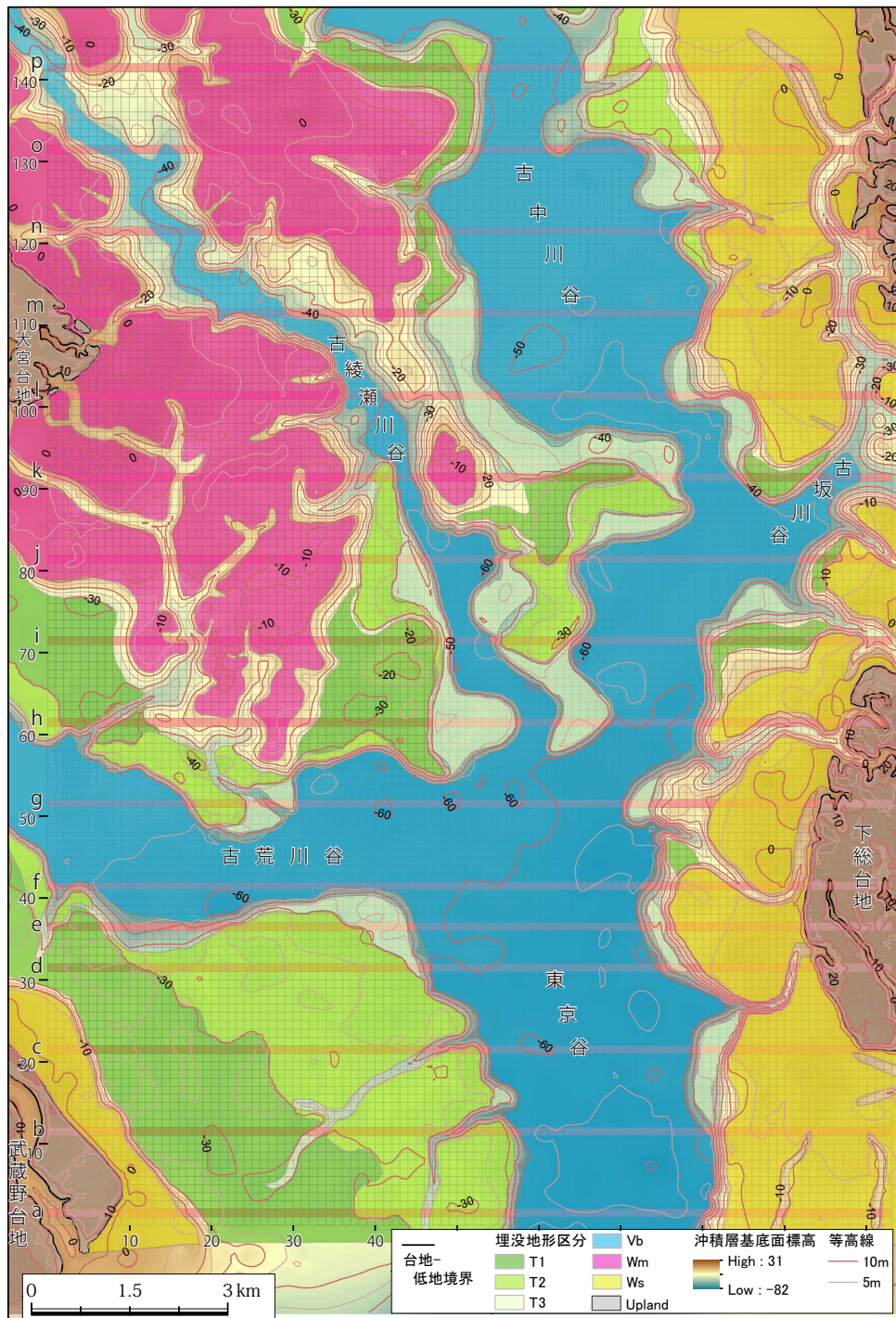




第 16 図 b モデル地域の 125m メッシュと地質断面図の位置図 基図：沖積層基底面モデルの等標高線図 メッシュは UTM 直交座標系 (54 帯) による。

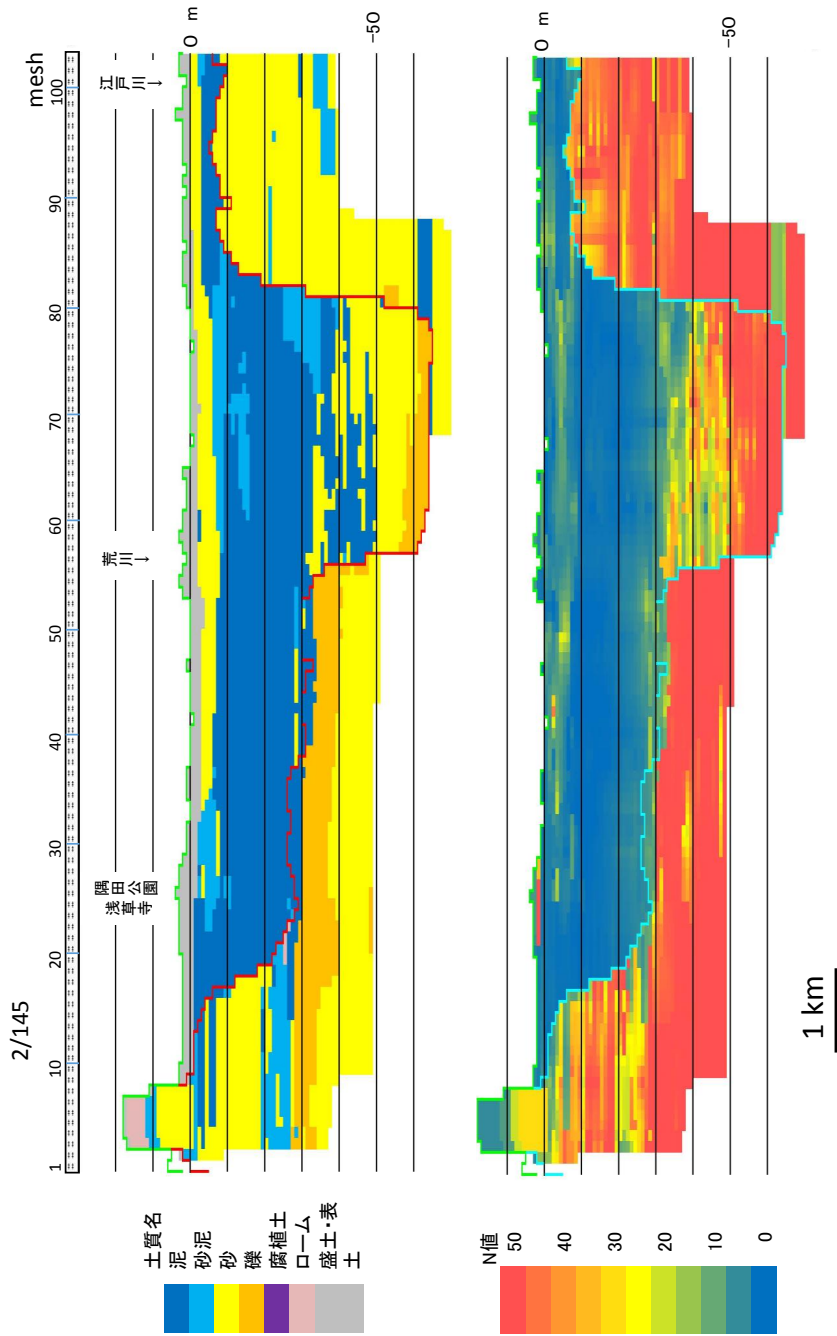
Fig.16b Index map of 125m mesh and locality of vertical geologic sections based on the 3D grid model basemap: the surface model of the base of the Chuseki-so (Kimura et al., 2013) The mesh is divided into the unit of the 125m length based on UTM coordinate system (zone 54).



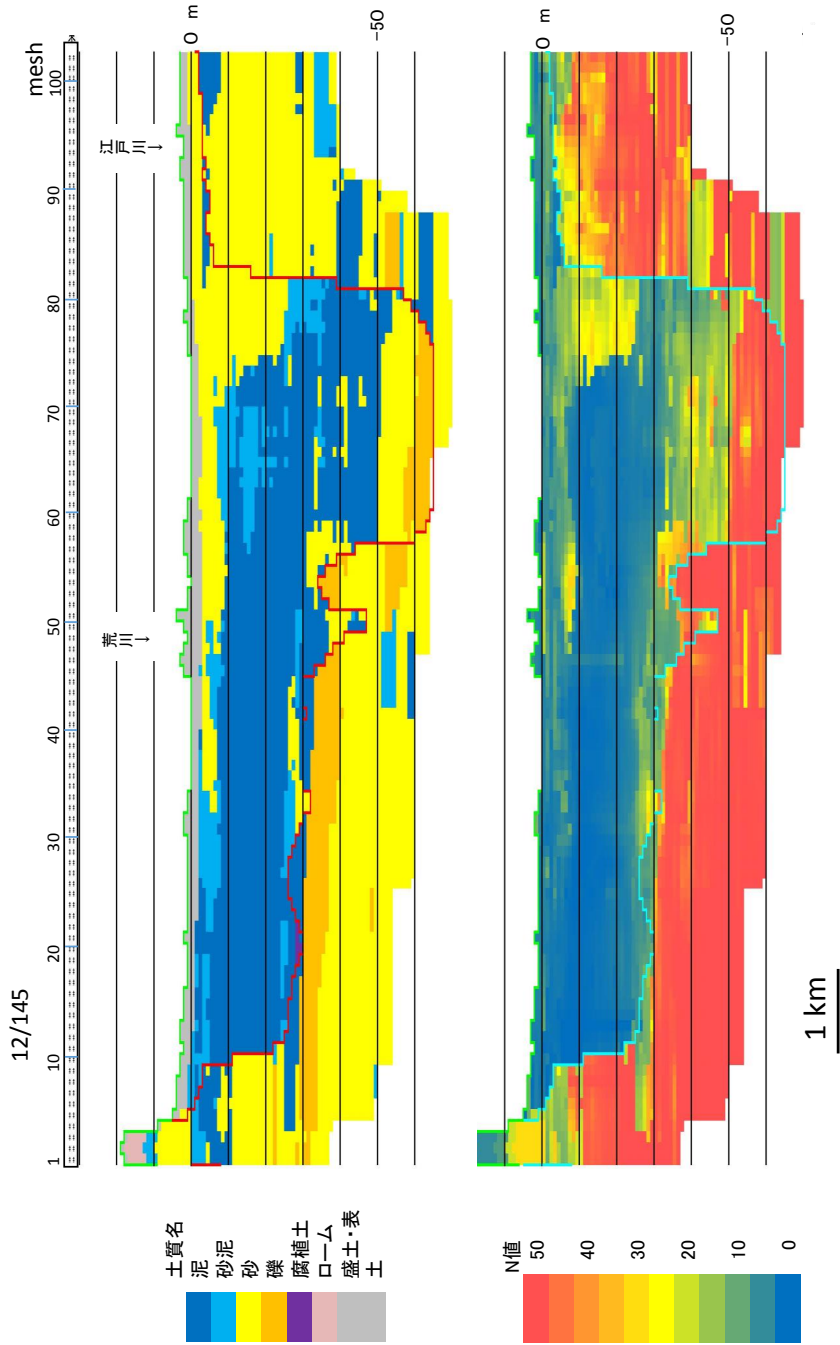


第 16 図 c モデル地域のメッシュと地質断面図の位置図 基図：沖積層基底面モデルに基づく埋没地形面区分図 メッシュは UTM 直交座標系（54 帯）による。

Fig.16c Index map of 125m mesh and locality of vertical geologic sections based on the 3D grid model basemap: the surface map of buried paleogeomorphic units (Kimura et al., 2013). The mesh is divided into the unit of the 125m length based on UTM coordinate system (zone 54).

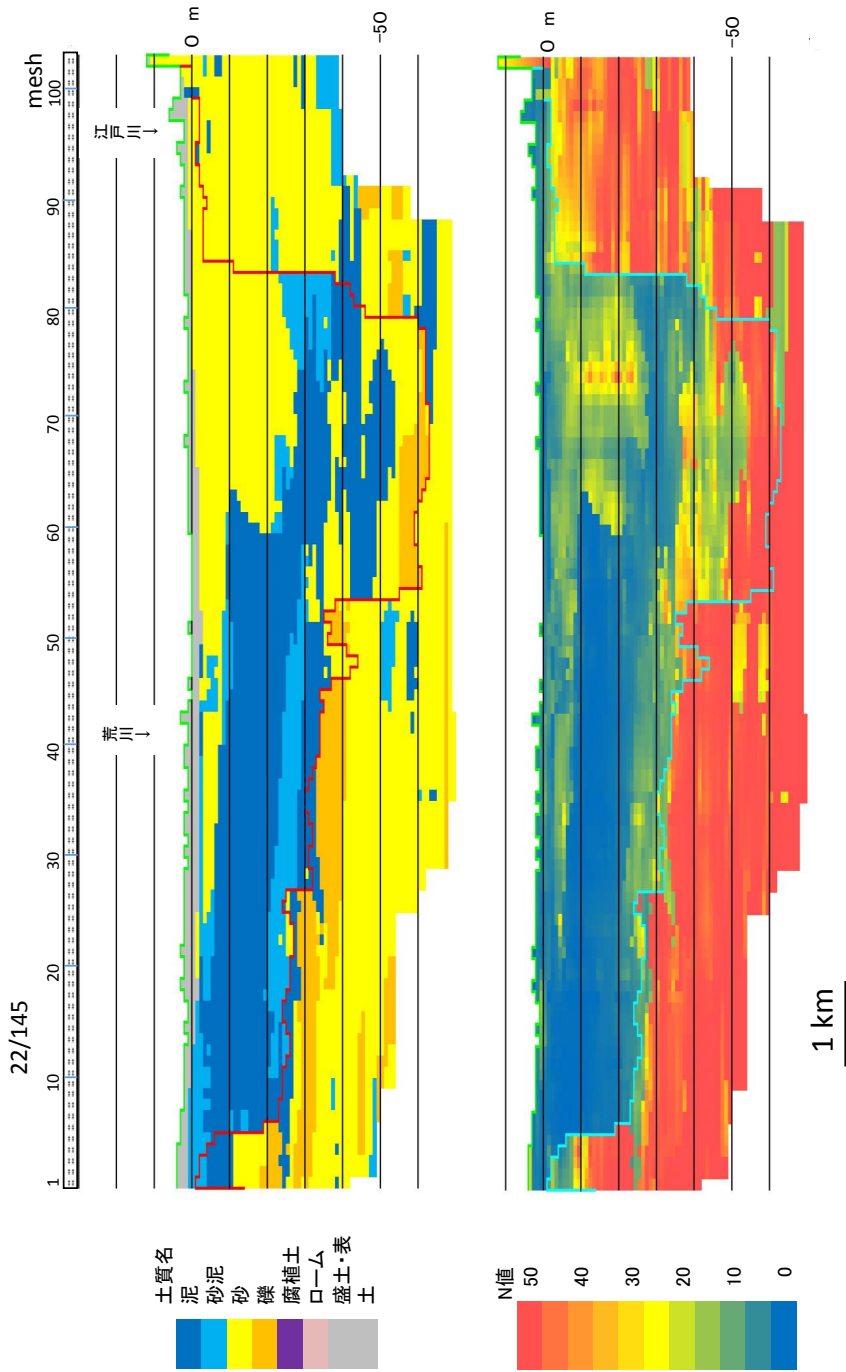


第 17 図 a 三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の東西方向の垂直地質断面図 (no.2) 断面図の位置は第 16 図参照。  
 Fig. 17a E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 2 of 2/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

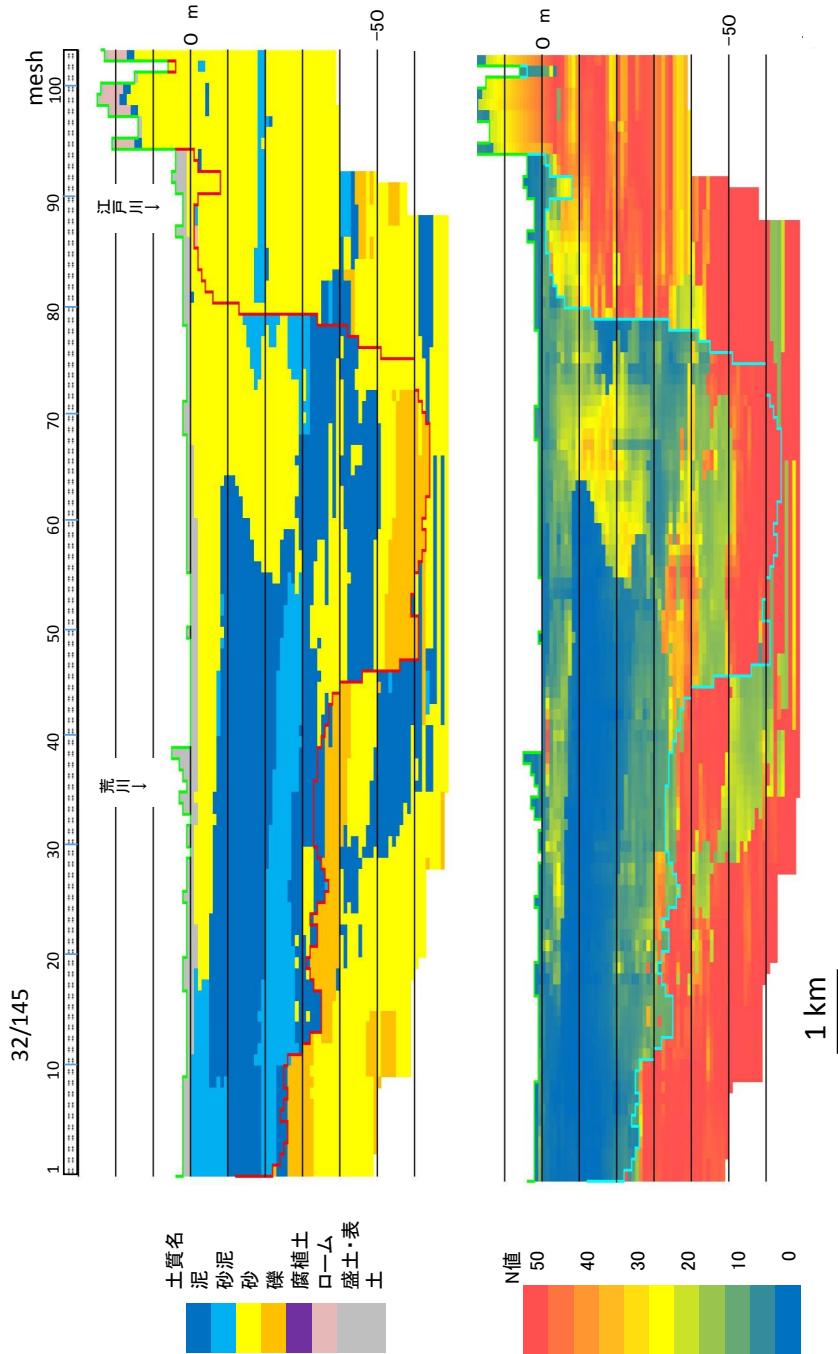


第17図 b 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.12) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17b E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 12 of 12/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

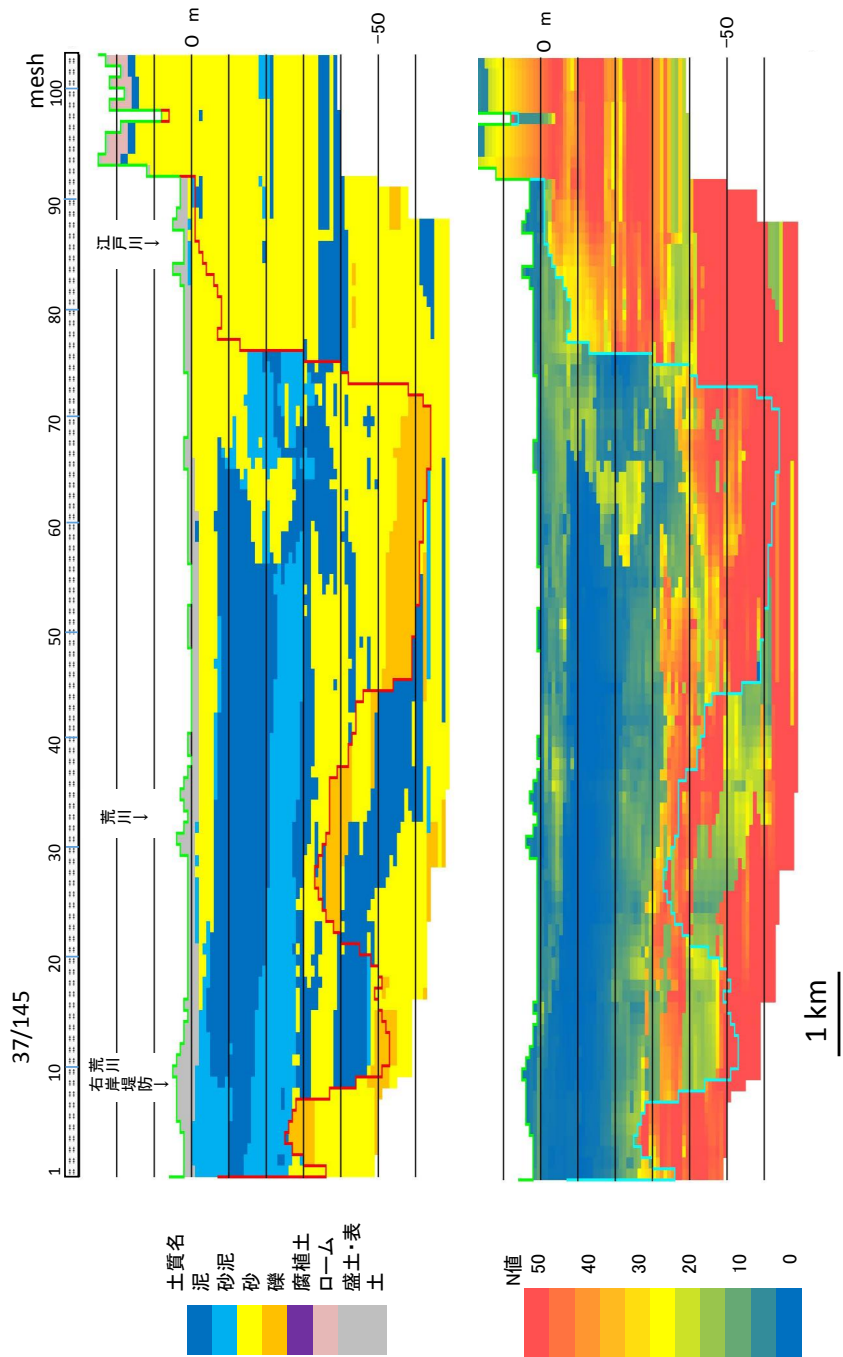




第 17 図 c 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.22) 断面図の位置は第 16 図参照.  
 Fig. 17c E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 22 of 22/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

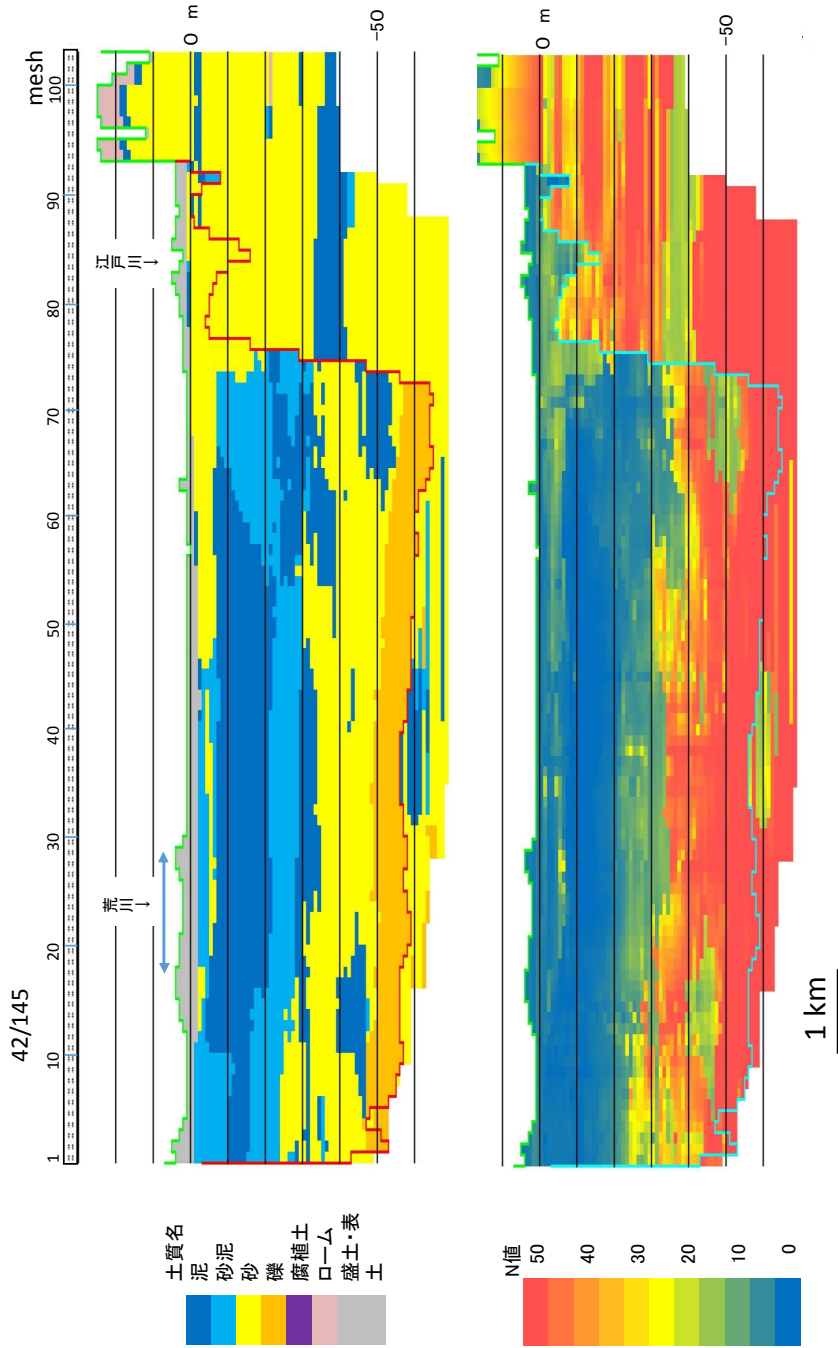


第17図 d 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.32) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17d E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 32 of 32/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

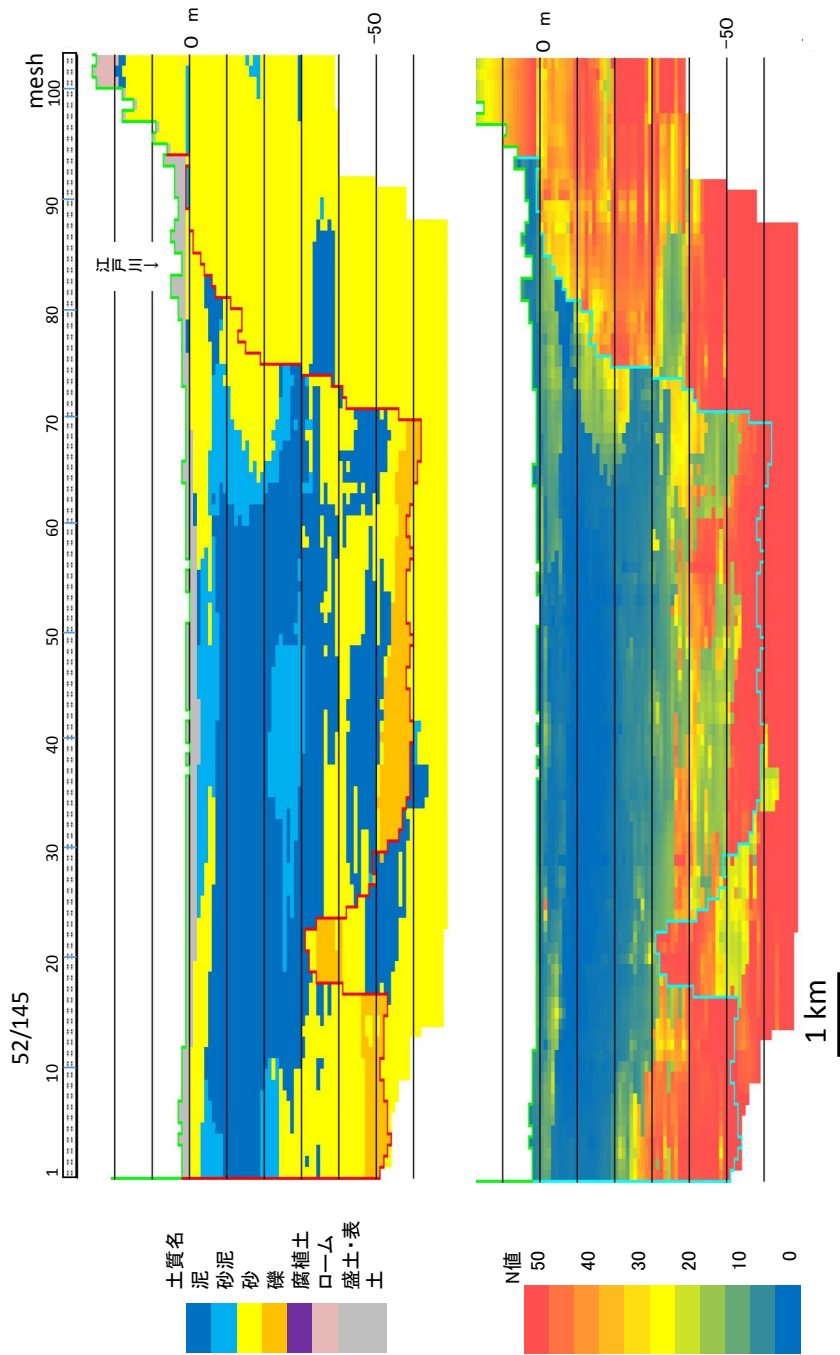


第17図 e 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.37) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17e E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 37 of 37/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

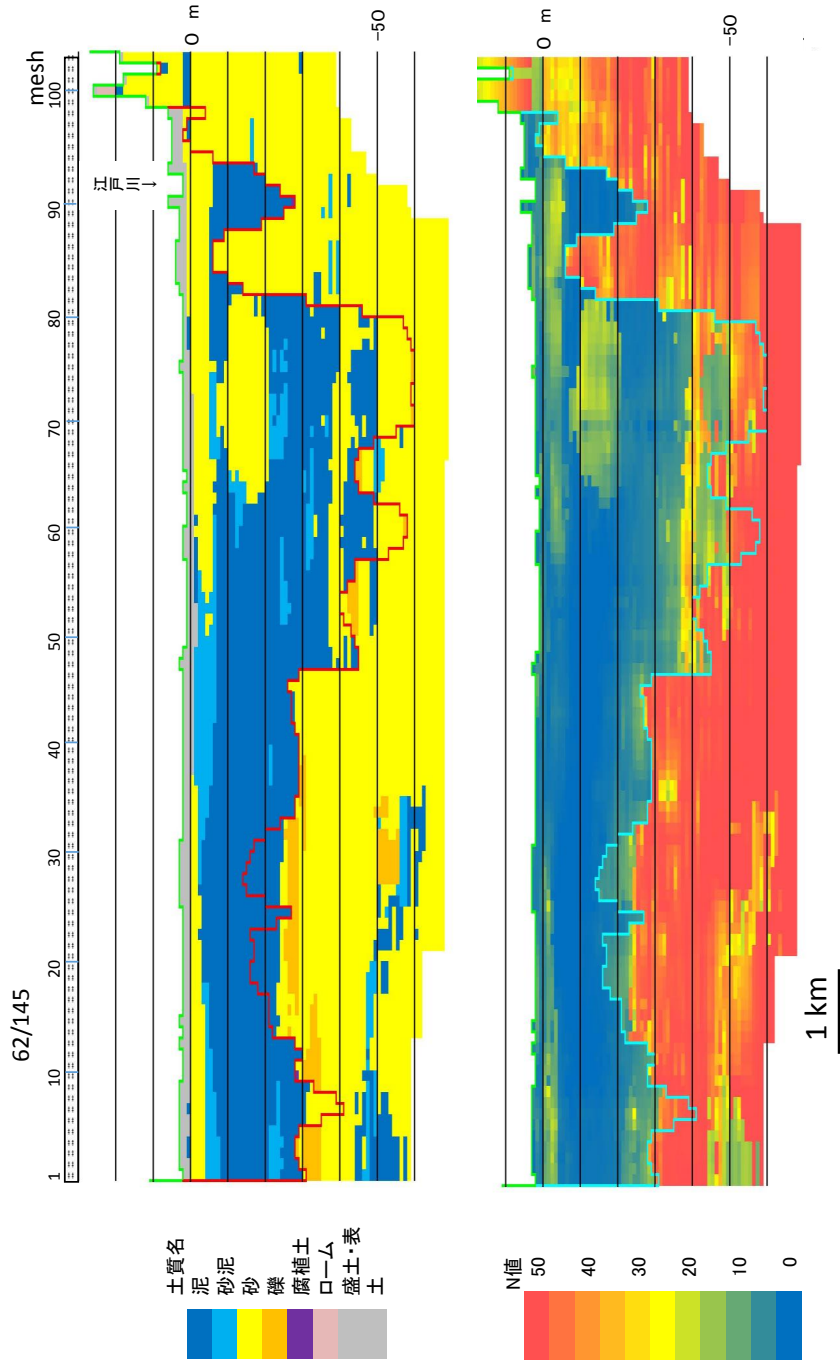




第 17 図 f 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.42) 断面図の位置は第 16 図参照.  
 Fig. 17f E-W directed vertical sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 42 of 42/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

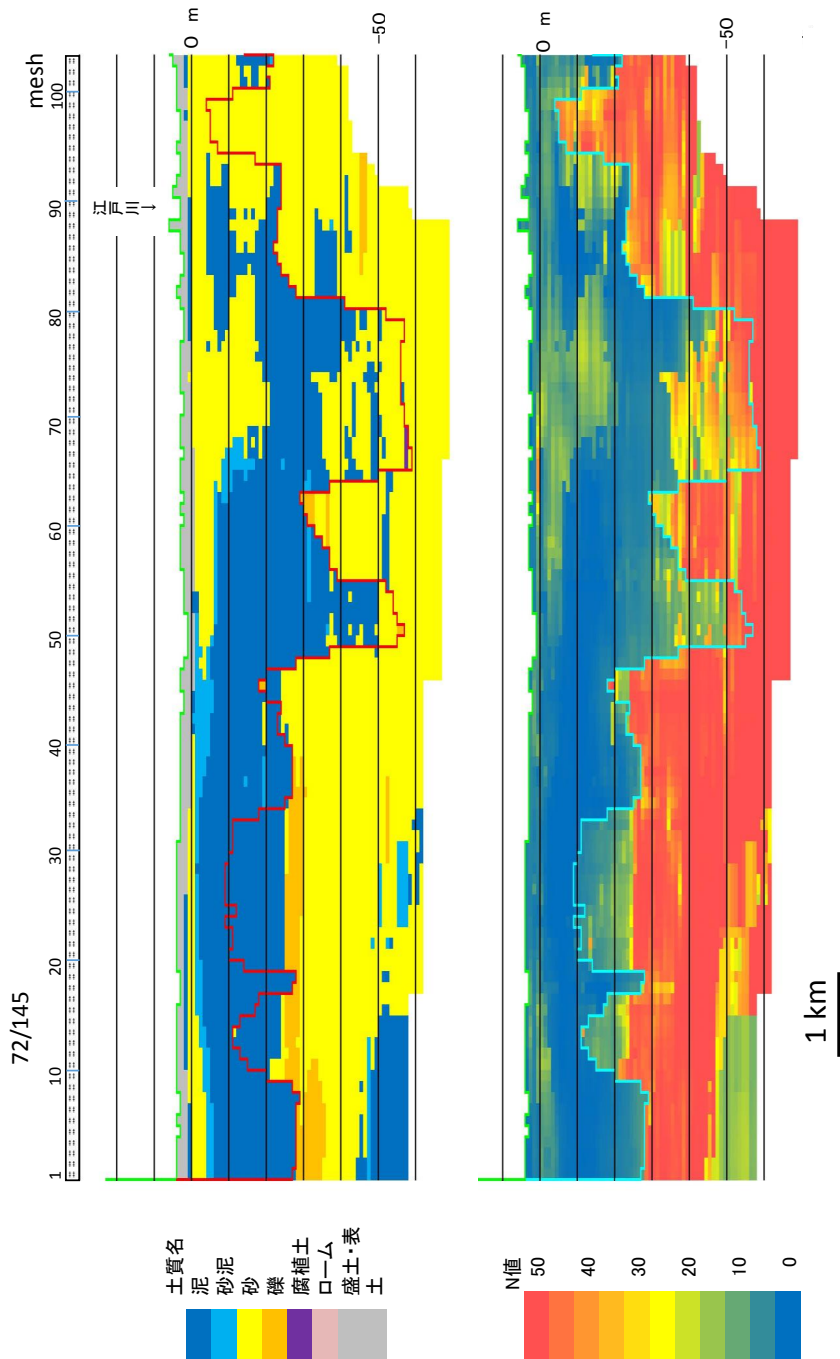


第 17 図 g 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.52) 断面図の位置は第 16 図参照。  
 Fig. 17 g E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 52 of 52/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

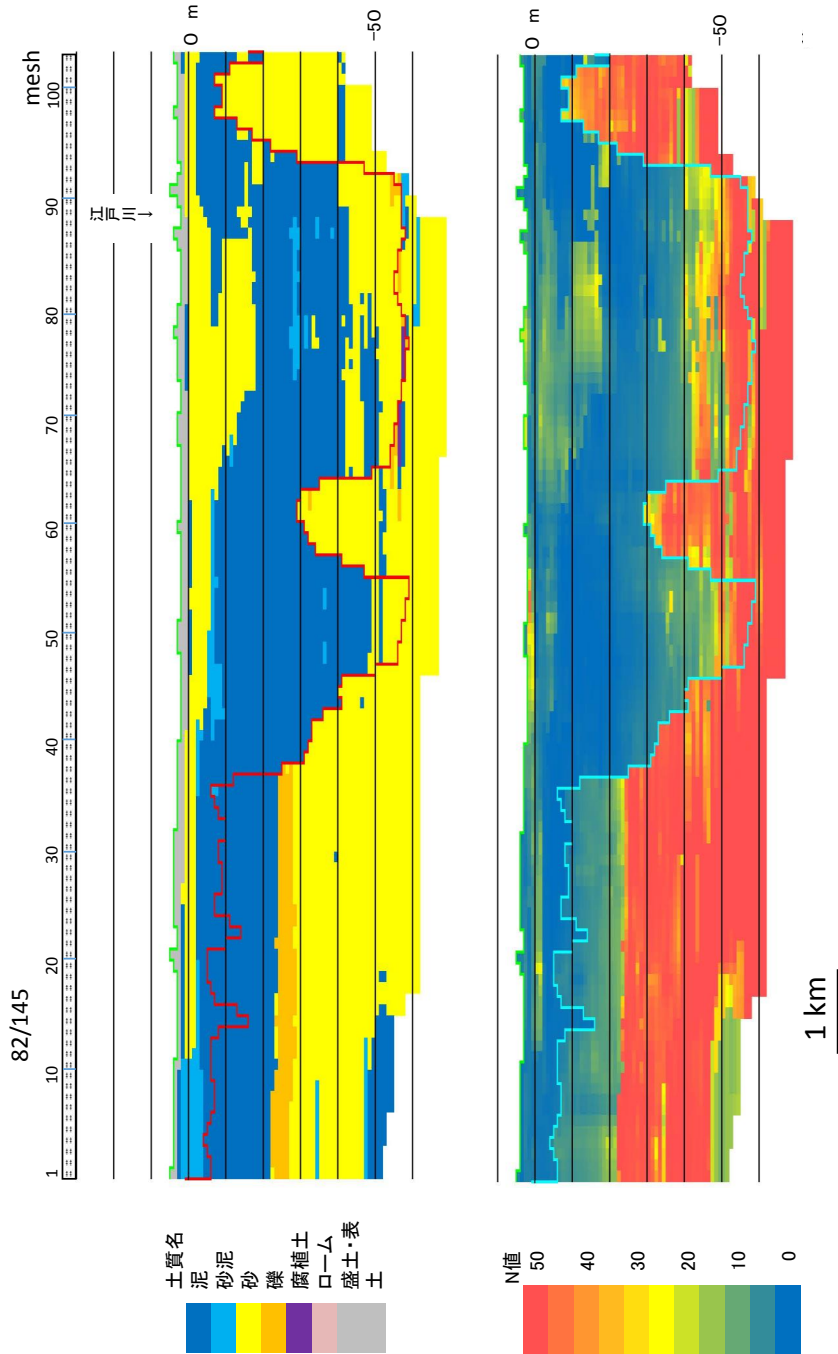


第17図 h 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.62) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17h E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 62 of 62/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

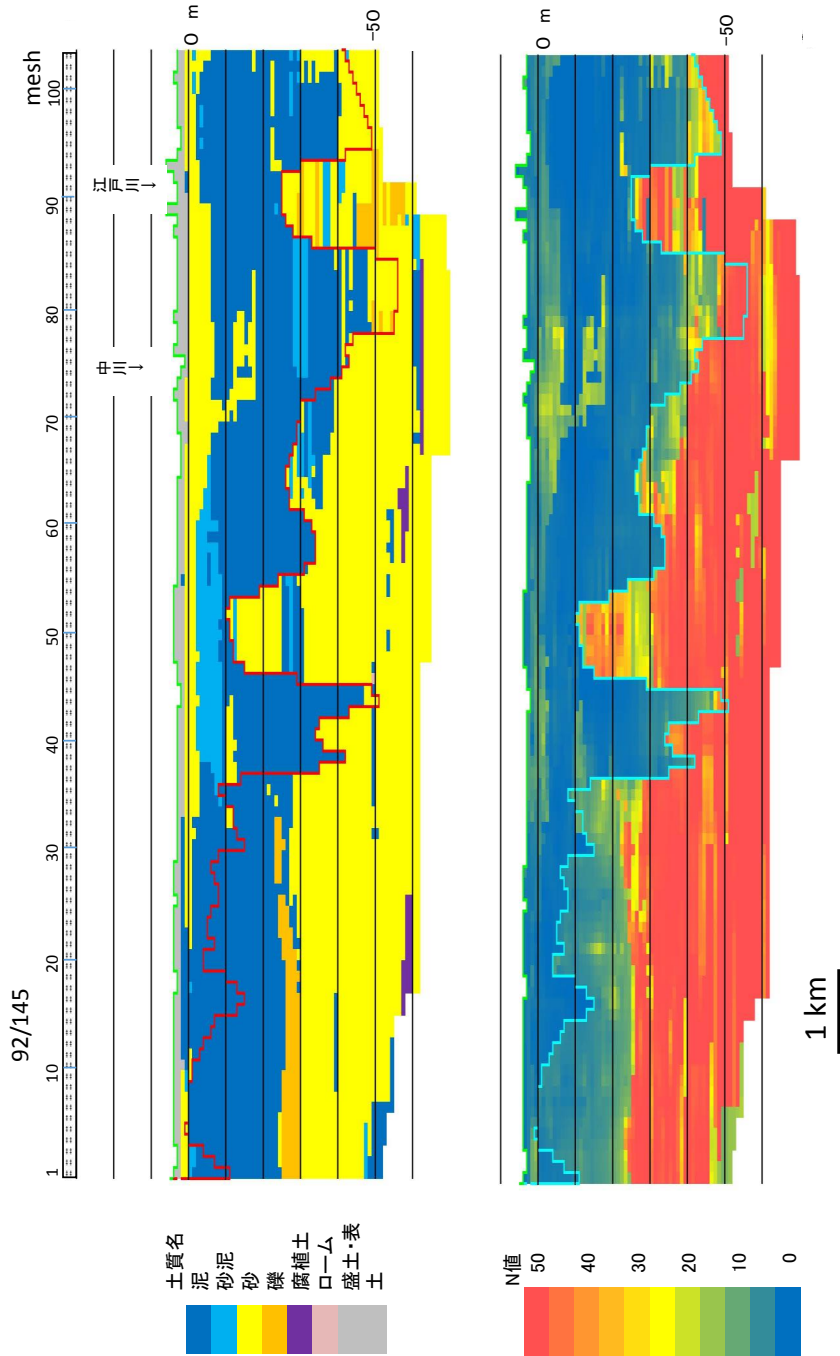




第 17 図 i 三次元グリッドモデルに基づく土質と  $N$  値の東西方向の垂直地質断面図 (no.72) 断面図の位置は第 16 図参照。  
 Fig. 17: E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and  $N$ -values expressed based on the 3D grid model. Number 72 of 72/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

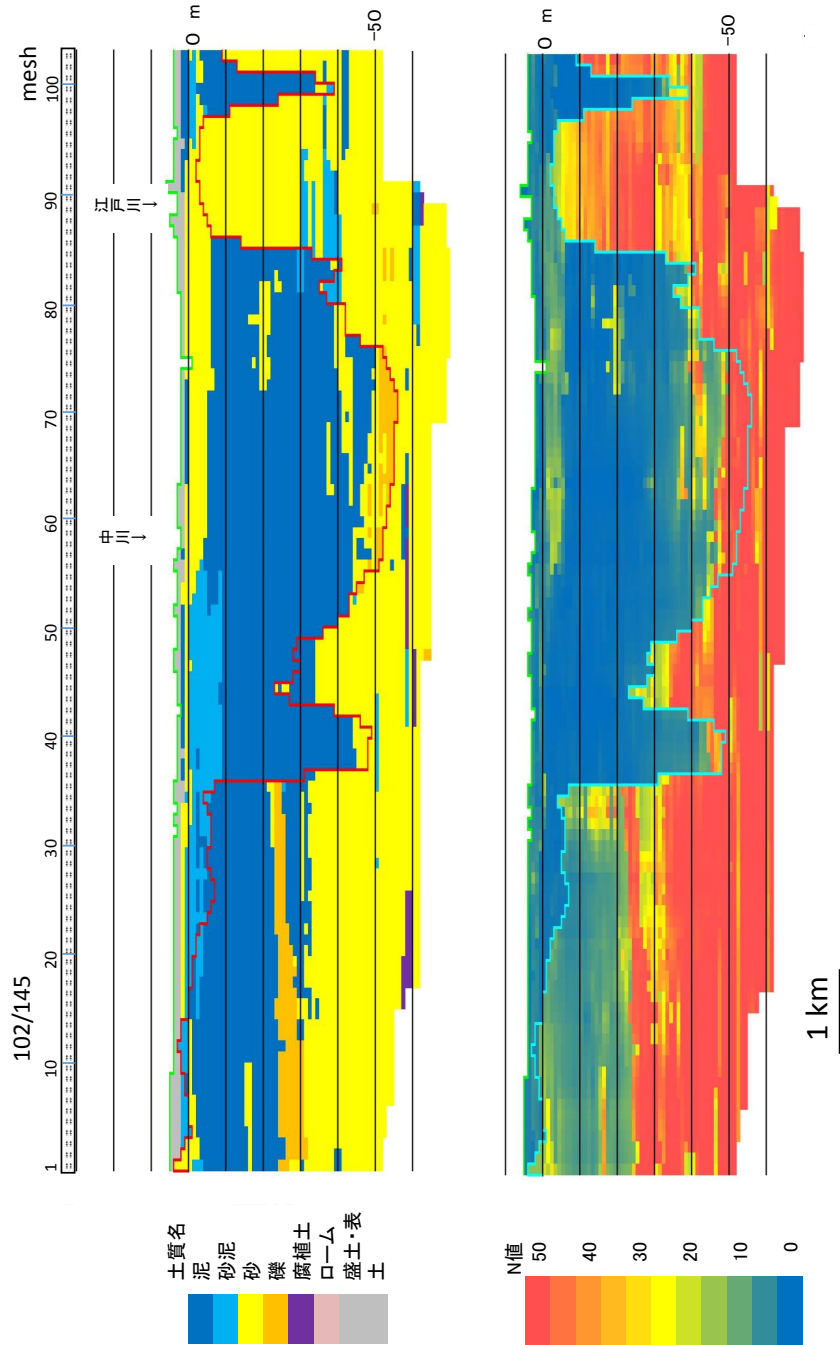


第17図j 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.82) 断面図の位置は第16図参照。  
 Fig. 17j E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 82 of 82/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

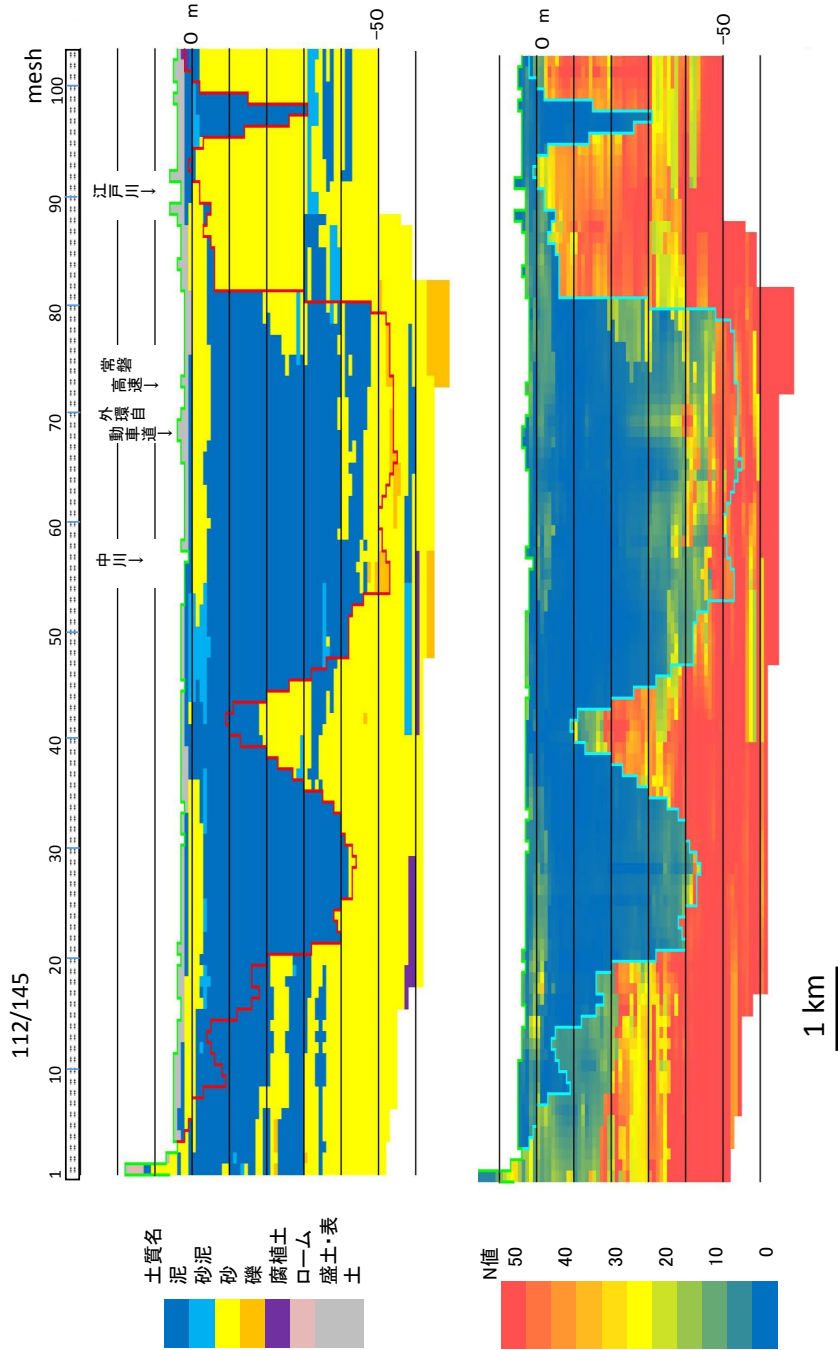


第17図k 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.92) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17k E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 92 of 92/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

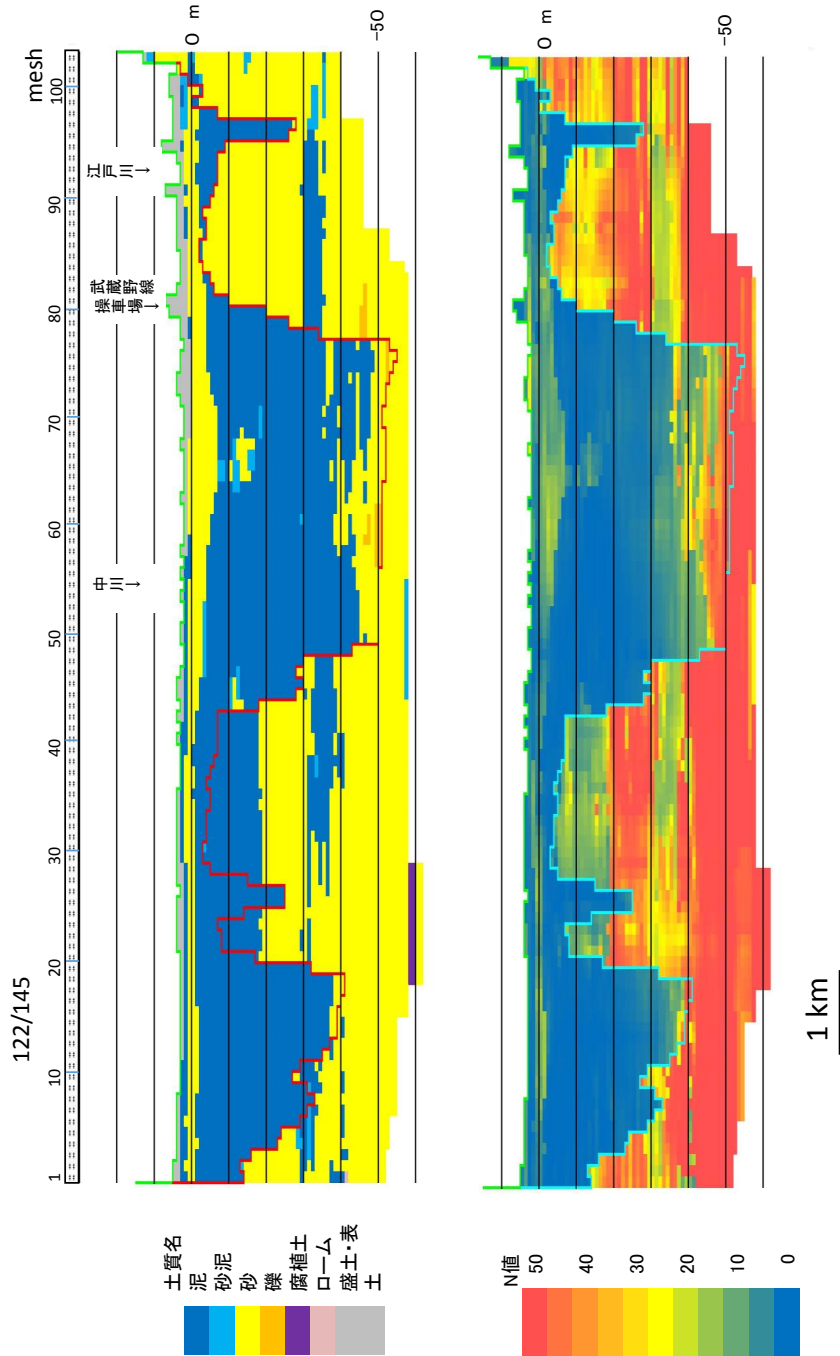




第17図1 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.102) 断面図の位置は第16図参照。  
 Fig. 17) E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 102 of 102/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

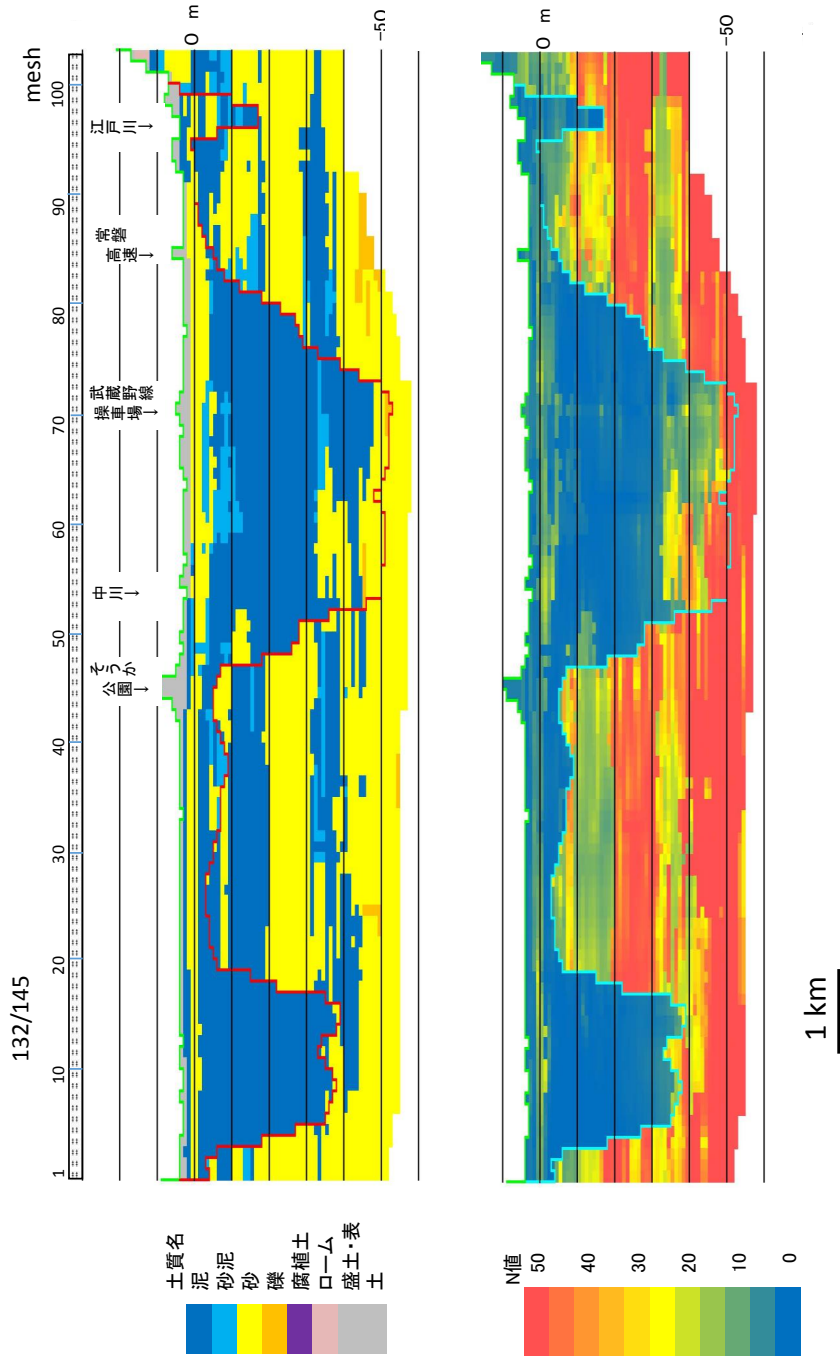


第17図 m 三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の東西方向の垂直地質断面図 (no.112) 断面図の位置は第16図参照。  
 Fig. 17m E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 112 of 112/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig. 16.

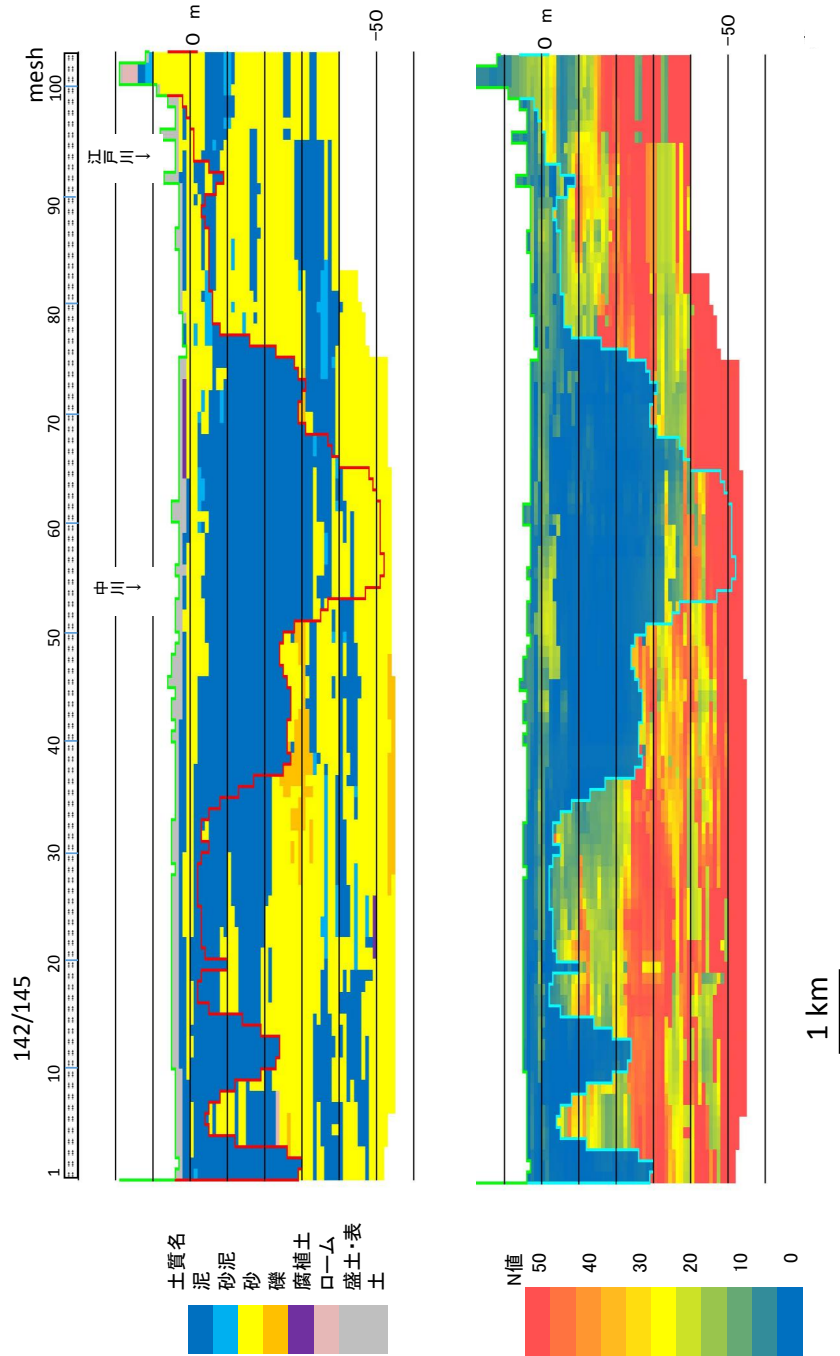


第17図 n 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.122) 断面図の位置は第16図参照.  
 Fig. 17n E-W directed vertical sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 122 of 122/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

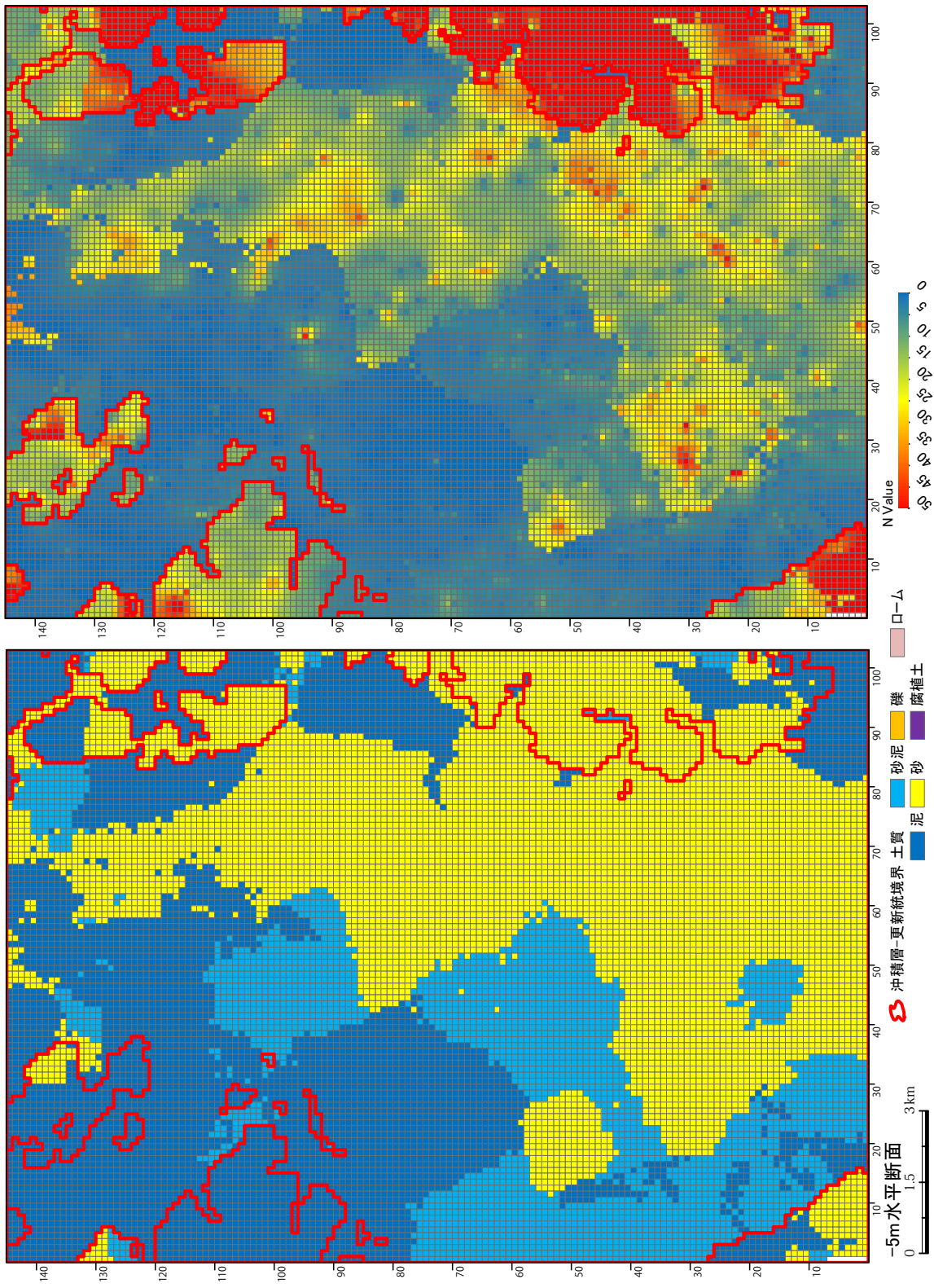




第17図o 三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の東西方向の垂直地質断面図 (no.132) 断面図の位置は第16図参照。  
 Fig. 17o E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 132 of 132/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

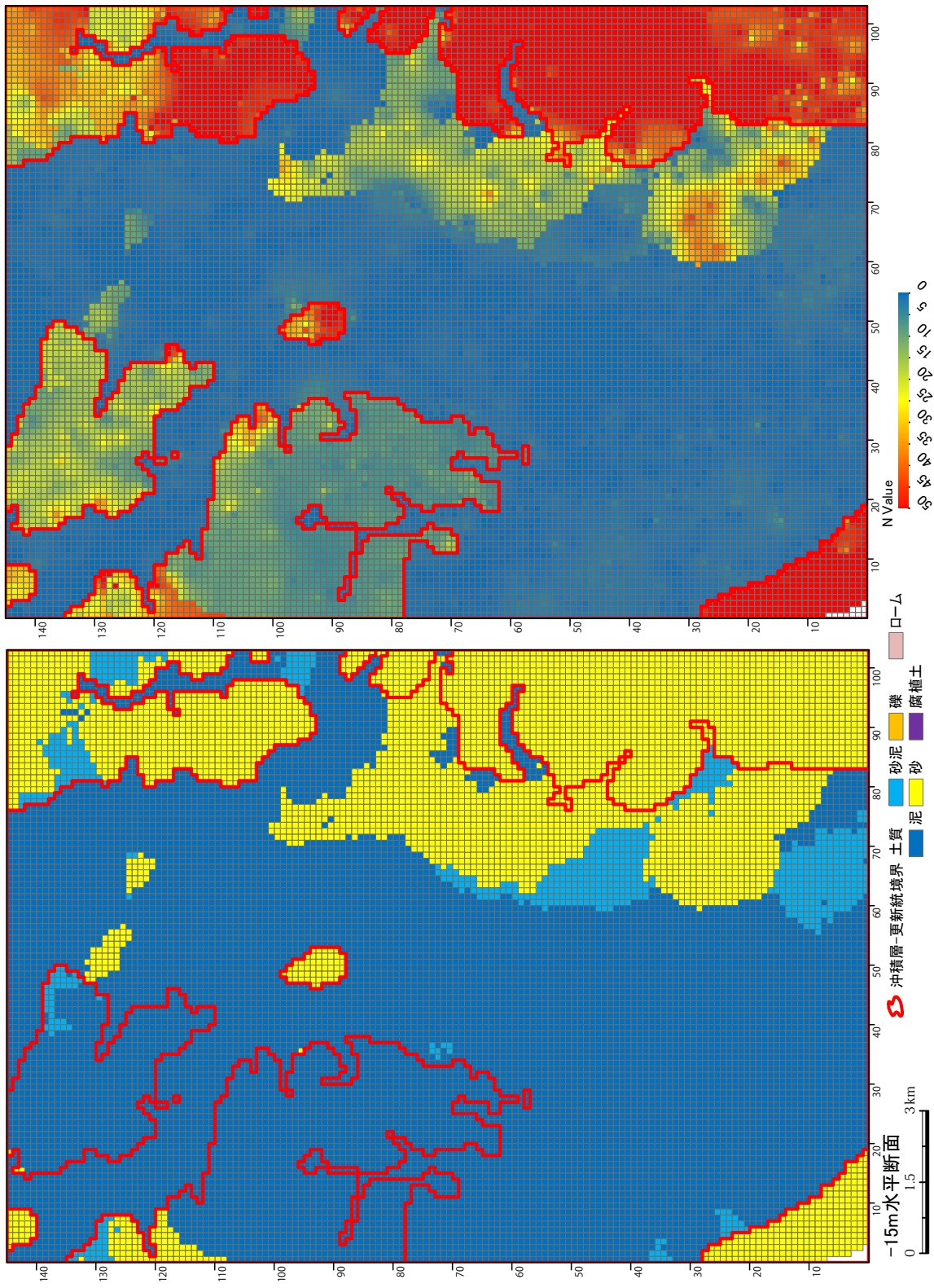


第 17 図 p 三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の東西方向の垂直地質断面図 (no.142) 断面図の位置は第 16 図参照.  
 Fig. 17p E-W directed vertical geologic sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model. Number 142 of 142/145 means serial number of the order from the south. The location of the section is shown in Fig.16.

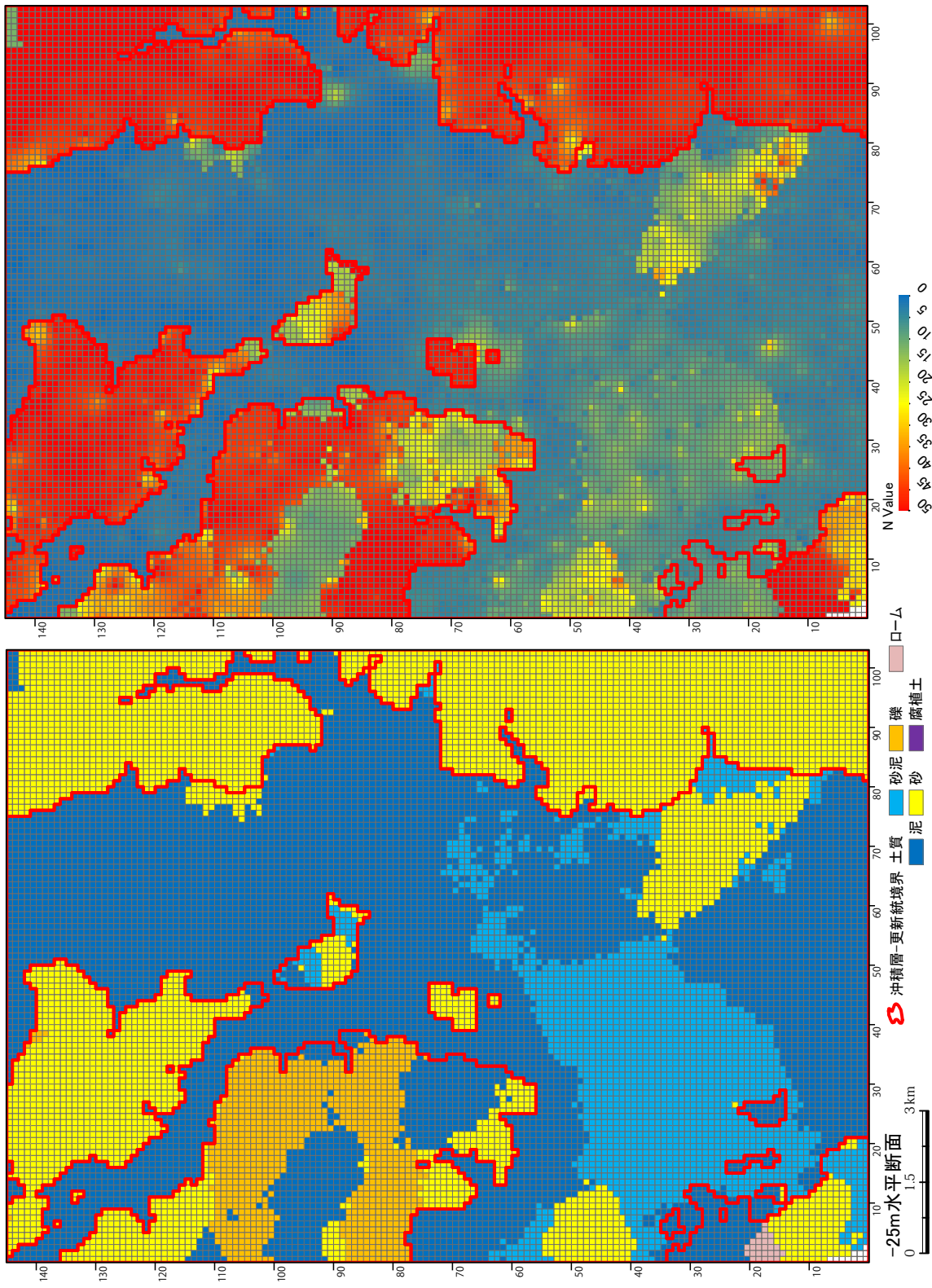


第18図 a モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の水平地質断面図 (標高 -5 m)  
 Fig. 18a Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL. -5 m).

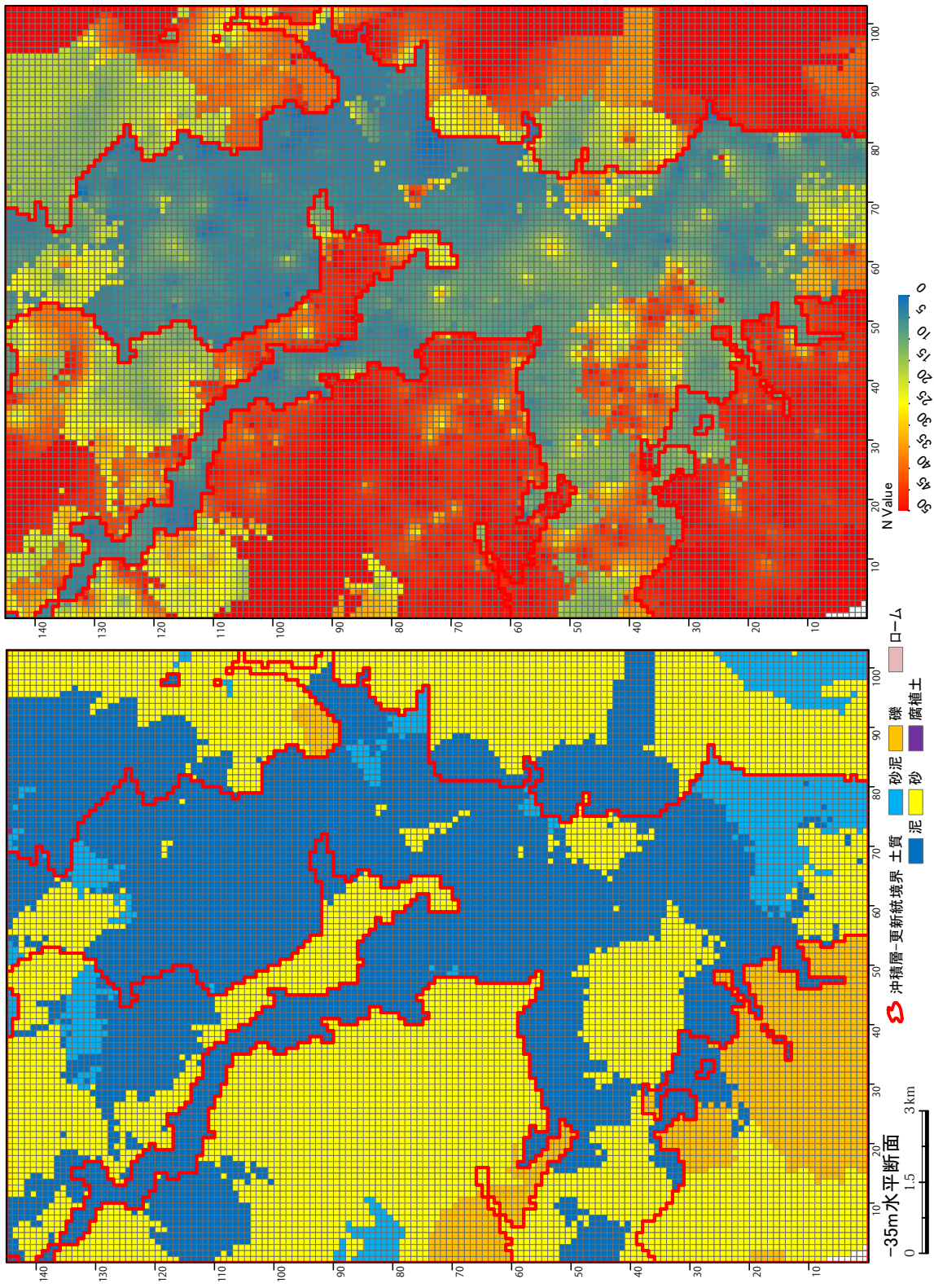




第 18 図 b モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の水平地質断面図 (標高 -15 m)  
 Fig. 18b Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL. -15 m).

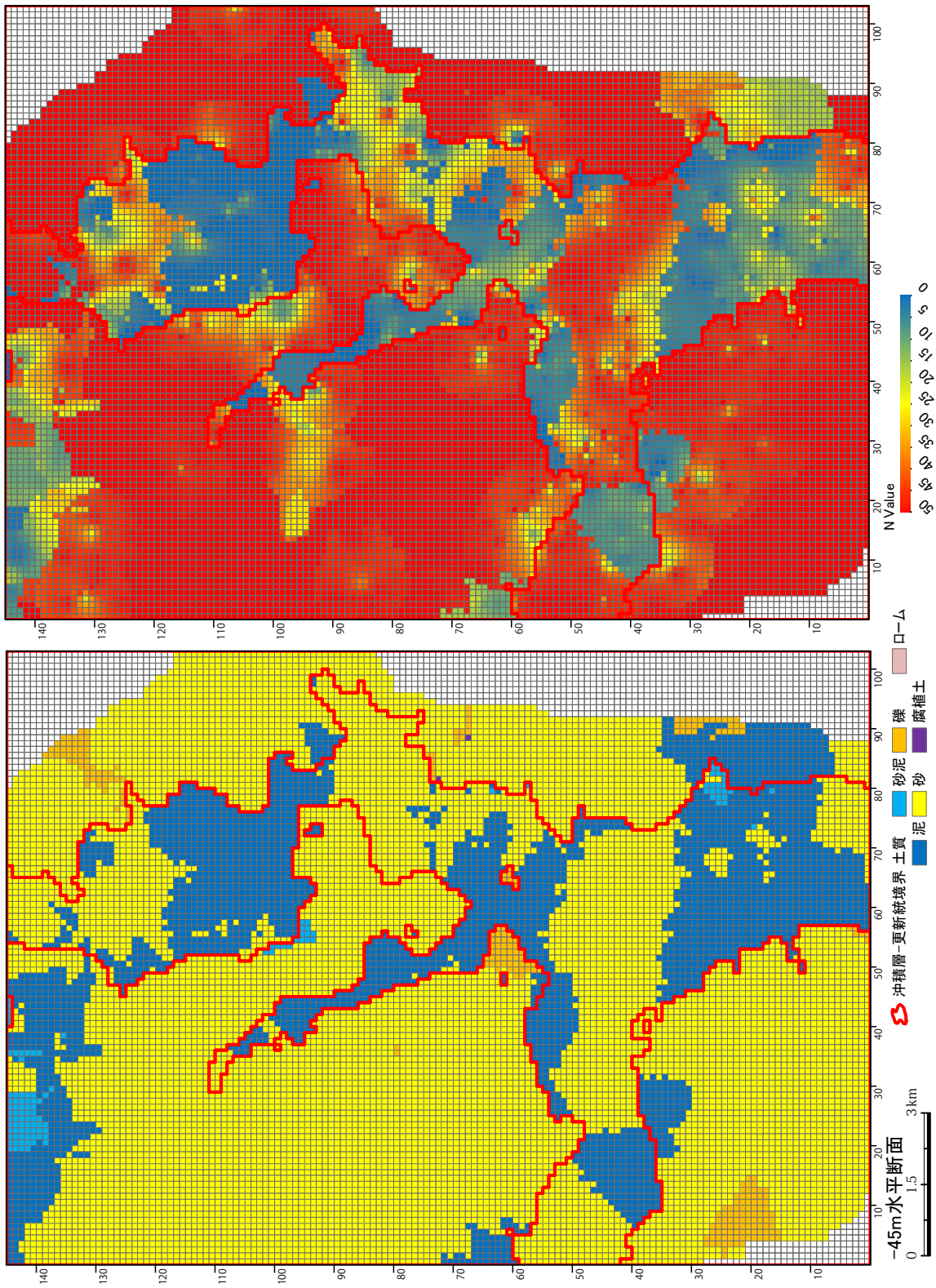


第 18 図 c モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の水平地質断面図 (標高 -25 m)  
 Fig. 18c Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL -25 m).

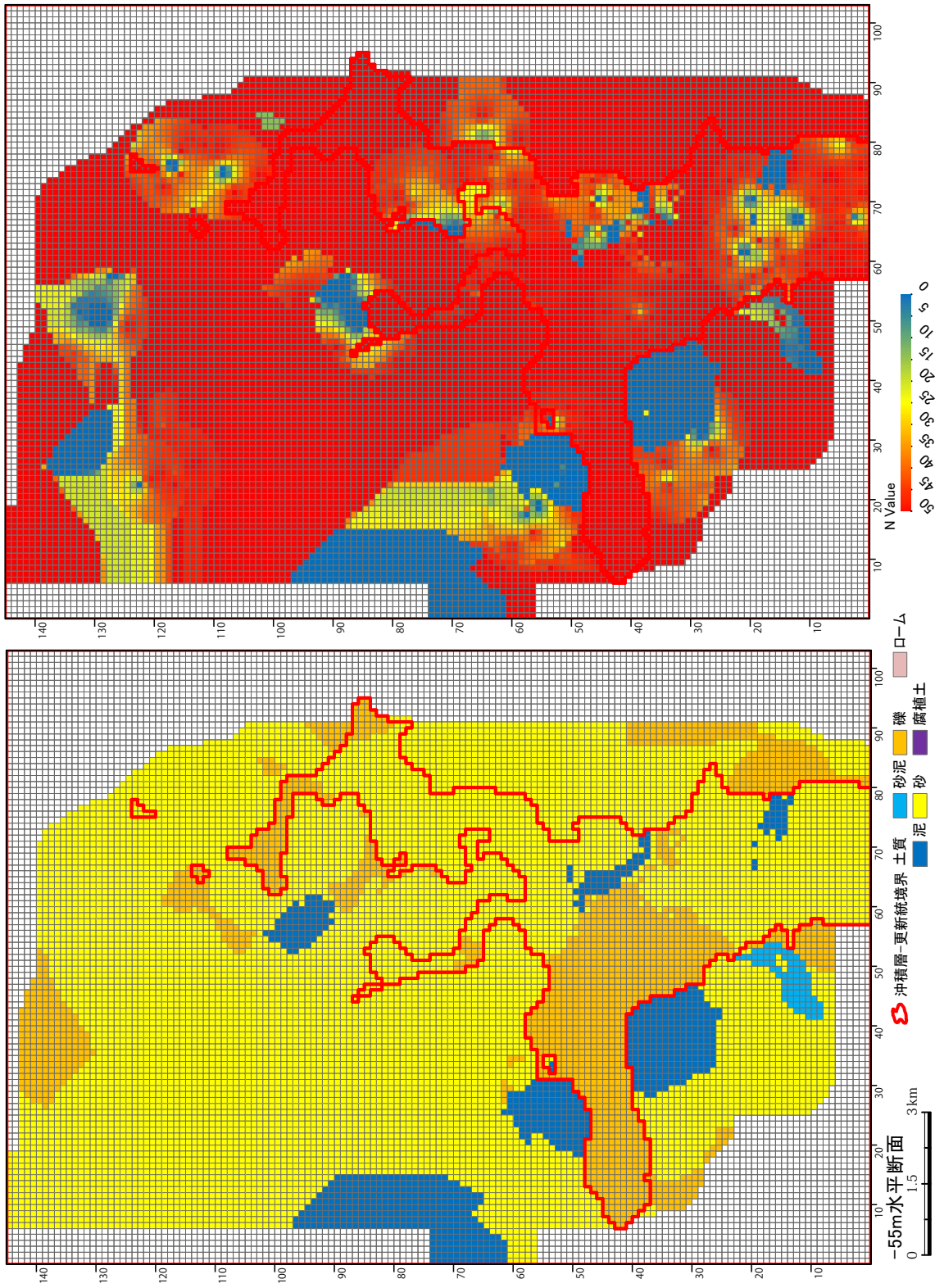


第18図d モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の水平地質断面図(標高-35m)  
 Fig. 18d Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL. -35 m).





第18図e モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質とN値の水平地質断面図（標高 -45 m）  
 Fig. 18e Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL -45 m).



第 18 図 f モデル地域の三次元グリッドモデルに基づく土質と N 値の水平地質断面図 (標高 -55 m)  
 Fig. 18f Horizontal sections of lithofacies and N-values expressed based on the 3D grid model in the model area (EL. -55 m).

第1表 3Dグリッドモデル  
に用いた土質区分と  
コード

Table 1 The classification  
and code of lithofacies  
used in the 3D grid  
model

モデル用土質名	コード
礫	40
砂	30
砂泥	20
泥	10
腐植土	50
ローム	80
人工土	200



第2表 三次元グリッドモデルにおける水平・垂直補間法適用による空きグリッド数の変遷

Horizon: 水平補間, Vertical: 垂直補間, F\_: 土質とN値をそれぞれ独立に求める.

Table 2 The change of the numbers of the space grids resulting from the application of the horizontal and vertical interpolation methods in the 3D grid model. F\_: Lithofacies and N-values are independently calculated each other.

試行回数	空きグリッド数			補間法
	沖積層	更新統	合計	
0	25,676	91,556	117,232	-
1	22,477	8,220	30,697	Horizon
2	20,093	6,032	26,125	Horizon
3	18,056	4,667	22,723	Horizon
4	16,309	3,870	20,179	Horizon
5	14,835	3,336	18,171	Horizon
6	13,537	3,012	16,549	Horizon
7	12,415	2,806	15,221	Horizon
8	11,415	2,664	14,079	Horizon
9	10,500	2,564	13,064	Horizon
10	9,655	2,482	12,137	Horizon
11	8,892	2,425	11,317	Horizon
12	8,208	2,381	10,589	Horizon
13	7,591	2,349	9,940	Horizon
14	7,037	2,324	9,361	Horizon
15	6,543	2,308	8,851	Horizon
16	6,096	2,296	8,392	Horizon
17	5,684	2,290	7,974	Horizon
18	5,312	2,290	7,602	Horizon
19	4,971	2,290	7,261	Horizon
20	4,665	2,290	6,955	Horizon
21	4,391	2,290	6,681	Horizon
22	4,137	2,290	6,427	Horizon
23	3,904	2,290	6,194	Horizon
24	3,709	2,290	5,999	Horizon
25	3,535	2,290	5,825	Horizon
26	3,380	2,290	5,670	Horizon
27	3,243	2,290	5,533	Horizon
28	3,128	2,290	5,418	Horizon
29	3,028	2,290	5,318	Horizon
30	2,937	2,290	5,227	Horizon
31	2,853	2,290	5,143	Horizon
32	2,777	2,290	5,067	Horizon
33	2,711	2,290	5,001	Horizon
34	2,652	2,290	4,942	Horizon
35	2,597	2,290	4,887	Horizon
36	2,547	2,290	4,837	Horizon
37	2,499	2,290	4,789	Horizon
38	2,455	2,290	4,745	Horizon
39	2,416	2,290	4,706	Horizon
40	2,380	2,290	4,670	Horizon
41	2,351	2,290	4,641	Horizon
42	2,325	2,290	4,615	Horizon
43	2,299	2,290	4,589	Horizon
44	2,276	2,290	4,566	Horizon
45	2,254	2,290	4,544	Horizon
46	2,232	2,290	4,522	Horizon
47	2,210	2,290	4,500	Horizon
48	2,189	2,290	4,479	Horizon
49	2,168	2,290	4,458	Horizon
50	2,148	2,290	4,438	Horizon
51	2,129	2,290	4,419	Horizon
52	2,109	2,290	4,399	Horizon
53	2,091	2,290	4,381	Horizon
54	2,075	2,290	4,365	Horizon
55	2,061	2,290	4,351	Horizon
56	2,049	2,290	4,339	Horizon
57	2,040	2,290	4,330	Horizon
58	2,038	2,290	4,328	Horizon
59	2,038	2,290	4,328	Horizon
60	475	1,536	2,011	Vertical
61	270	1,071	1,341	Vertical
62	203	671	874	Vertical
63	186	461	647	Vertical
64	172	407	579	Vertical
65	164	376	540	Vertical
66	157	365	522	Vertical
67	151	362	513	Vertical
68	145	360	505	Vertical
69	141	359	500	Vertical
70	138	359	497	Vertical
71	135	359	494	Vertical
72	133	359	492	Vertical
73	131	359	490	Vertical
74	131	359	490	Vertical
75	55	353	408	Horizon
76	25	349	374	Horizon
77	21	345	366	Horizon
78	21	341	362	Horizon
79	21	338	359	Horizon
80	21	335	356	Horizon
81	21	333	354	Horizon
82	21	332	353	Horizon
83	21	331	352	Horizon
84	21	330	351	Horizon
85	21	329	350	Horizon
86	21	329	350	Horizon
87	20	329	349	Vertical
88	19	329	348	Vertical
89	19	329	348	Vertical
90	19	329	348	Horizon
91	19	329	348	Horizon
92	5	50	55	F_Horizon
93	5	24	29	F_Horizon
94	5	16	21	F_Horizon
95	5	10	15	F_Horizon
96	5	4	9	F_Horizon
97	5	2	7	F_Horizon
98	5	1	6	F_Horizon
99	5	1	6	F_Vertical
100	0	0	0	F_Vertical

第3表 台地表層部の模式的地質柱状図モデル  
 Table 3 Schematic geologic column models in the shallow-level of the upland area

武蔵野台地

	厚さ	N値
人工土	1	5
ローム	5	5
砂泥	3	8
砂	2	20
砂	深度20mまで	30

大宮台地

	厚さ	N値
人工土	1	4
ローム	4	4
粘土	2	4
砂	標高0mまで	10-30

下総台地北部

	厚さ	N値
人工土	1	5
ローム	4	5
粘土	2	3
砂泥	2	4
砂	2	5
砂	3	10
砂泥	2	10
砂泥	2	20
砂	深度20mまで	30-50

下総台地南部

	厚さ	N値
人工土	1	5
ローム	5	5
粘土	2	4
砂	深度20mまで	20-50

第4表 地質断面図 (no.2 ~ 142) の位置情報

Table 4 Location information of vertical geologic sections (no.2 ~ 142) shown in Fig. 17.

断面図 no.	西端				東端			
	緯度	経度	X	Y	緯度	経度	X	Y
2	35.71747453	139.7679689	388,500	3,953,063	35.71894714	139.9213421	401,375	3,953,063
12	35.72874237	139.7677954	388,500	3,954,313	35.73021559	139.9211902	401,375	3,954,313
22	35.74001018	139.7676218	388,500	3,955,563	35.74148401	139.9210381	401,375	3,955,563
32	35.75127798	139.7674481	388,500	3,956,813	35.75275241	139.920886	401,375	3,956,813
37	35.75465831	139.7673959	388,500	3,957,438	35.75613293	139.9208404	401,375	3,957,438
42	35.76254575	139.7672742	388,500	3,958,063	35.76402079	139.9207339	401,375	3,958,063
52	35.7738135	139.7671003	388,500	3,959,313	35.77528915	139.9205816	401,375	3,959,313
62	35.78508123	139.7669263	388,500	3,960,563	35.78655748	139.9204292	401,375	3,960,563
72	35.79634893	139.7667522	388,500	3,961,813	35.7978258	139.9202768	401,375	3,961,813
82	35.80761662	139.766578	388,500	3,963,063	35.80909409	139.9201243	401,375	3,963,063
92	35.81888428	139.7664037	388,500	3,964,313	35.82036236	139.9199717	401,375	3,964,313
102	35.83015192	139.7662293	388,500	3,965,563	35.83163061	139.919819	401,375	3,965,563
112	35.84141954	139.7660549	388,500	3,966,813	35.84289884	139.9196662	401,375	3,966,813
122	35.85268713	139.7658803	388,500	3,968,063	35.85416704	139.9195133	401,375	3,968,063
132	35.86395471	139.7657056	388,500	3,969,313	35.86543523	139.9193604	401,375	3,969,313
142	35.87522226	139.7655308	388,500	3,970,563	35.87670339	139.9192074	401,375	3,970,563



付属資料

Appendix

付属資料 1 東京低地北部から中川低地南部域の沖積層基底面モデルのポイントデータセット（実データ限定の第一次面モデル; 第 5 図参照）（木村ほか, 2013 に基づく） 各ポイントは 50 m メッシュ中央点の xy 座標値 (m; UTM 直交座標系, 54 帯) と標高値の z (m ; T.P.) で表現されている. ポイント数は 94,535 点.

Appendix 1 Point data set of the surface model of the base of the Chuseki-so in the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowlands (the first step version of Fig.5; from Kimura et al., 2013) Each point indicates a center of 50 m mesh, and is expressed with a xy coordinate level (m; UTM coordinate system, zone 54) and an altitude level (T.P.; m). The number of points are 94,535.

付属資料 2 東京低地北部から中川低地南部域の沖積層基底面モデルのポイントデータセット(完成版; 第 5 図参照) (木村ほか, 2013 に基づく) 各ポイントは 50 m メッシュ中央点の xy 座標値 (m ; UTM 直交座標系, 54 帯) と標高値の z (m ; T.P.) で表現されている. ポイント数は 95,160 点.

Appendix 2 Point data set of 50 m mesh covering the surface model of the Chuseki-so basal plane in the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowlands ( the final step version of Fig.5; from Kimura et al., 2013) Each point indicates a center of 50 m mesh, and is expressed with a xy coordinate level (m; UTM coordinate system, zone 54) and an altitude level (T.P.; m). The number of points are 94,535.

付属資料 3 東京低地北部から中川低地南部域の拡張型統合三次元グリッドモデルの岩相 (土質) (a) と *N* 値 (b) の両データセット (完成版; 第 12 図の⑨に相当). テーブルの横軸は標高 (m ; T.P.), 縦軸は 125m メッシュ中央点の xy 座標値 (m ; UTM 直交座標系, 54 帯) を示す. 一水平面内のグリッドノード数は 14,935 点, 全体で 1,508,435 点である. 岩相 (土質) コードの凡例は第 1 表を参照.

Appendix 3 Lithofacies (a) and *N*-value (b) data file of the extended-integral 3D grid model in the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowlands (Full version) This model is equivalent to the step ⑨ of Fig. 12. The horizontal axis of the table shows an altitude level (T.P.; m), and the vertical axis shows a xy coordinate level (m; ; UTM coordinate system, zone 54) of a center of 125 m mesh as a grid node. The number of grid node is 14,935. The legend of code of lithofacies refers to Table 1.

付属資料 4 東京低地北部から中川低地南部域の統合三次元グリッドモデルの岩相 (土質) (a) と *N* 値 (b) の両データセット (水平・垂直補間前; 第 12 図の⑤に相当). テーブルの横軸は標高 (m ; T.P.), 縦軸は 125m メッシュ中央点の xy 座標値 (m ; UTM 直交座標系, 54 帯) を示す. 一水平面内のグリッドノード数は 14,935 点, 全体で 1,209,735 点である. 岩相 (土質) コードの凡例は第 1 表を参照.

Appendix 4 Lithofacies (a) and *N*-value (b) data files of the integral 3D grid model in the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowlands (Intermediate version) This model is equivalent to the step ⑤ of Fig.12. The horizontal axis of the table shows an altitude level (T.P.; m), and the vertical axis shows a xy coordinate level (m; UTM coordinate system, zone 54) of a center of 125 m mesh as a grid node. The number of grid node is 14,935. The legend of code of lithofacies refers to Table 1.

付属資料 5 東京低地北部から中川低地南部域の拡張型統合三次元グリッドモデル (完成版; 第 12 図の⑨に相当)

に基づく 145 葉 (no.1 ~ no.145) の岩相 (土質) (a) と  $N$  値 (b) の両東西地質断面図 (土質) の画像集 (PDF ファイル) 各断面図は X 軸に平行で, 1 メッシュ毎に作成されている. 1 グリッドのサイズは水平 125m 長, 垂直 1m 長である. 断面図位置は第 16 図参照. 岩相 (土質) と  $N$  値の凡例は各ファイルの第 1 頁を参照.

Appendix 5 Image files of all E-W directed vertical geological sections of lithofacies (a) and  $N$ -values (b) expressed based on the extended-integral 3D grid model (Full version). Number (1/145 ~ 145/145) of each cross section means serial numbers of the order from the south. The location of each section is shown in Fig.16. The size of a grid is 125m in width square, and 1 m in height. The legend of lithofacies and  $N$ -value refers to the first page of each file.

付属資料 6 東京低地北部から中川低地南部域の統合三次元グリッドモデル(水平・垂直補間前;第 12 図の⑤に相当)に基づく 145 葉 (no.1 ~ no.145) の岩相 (土質) (a) と  $N$  値 (b) の両東西地質断面図の画像集 (PDF ファイル) 各断面図は X 軸に平行で, 1 メッシュ毎に作成されている. 1 グリッドは水平 125m 長, 垂直 1m 長のサイズである. 各断面図位置は第 16 図参照. 岩相 (土質) と  $N$  値の凡例は各ファイルの第 1 頁を参照.

Appendix 6 Image files of all E-W directed vertical geological sections of lithofacies (a) and  $N$ -values (b) expressed based on the integral 3D grid model (Intermediate version). Number (1/145 ~ 145/145) of each cross section means serial numbers of the order from the south. The location of each section is shown in Fig.16. The size of a grid is 125m in width square, and 1 m in height. The legend of lithofacies and  $N$ -value refers to the first page of each file.

付属資料 7 東京低地北部から中川低地南部域の沖積層基底面モデル関連マップ集 (KMZ 形式) 図面には, 125m メッシュ, 地形面標高段彩, 沖積層基底面モデル, 沖積層基底面の古地形区分, 沖積層基底面モデルのアナグリフ (3D ; 垂直) が含まれている. 各図面の詳細は, 木村ほか (2014) の本文および第 14 図, 第 16 図 b, c を参照. なお, アナグリフは, 産総研の岸本清行氏によって作成・編集された.

Appendix 7 The maps of the base of the Chuseki-so in the northern Tokyo and the southern Nakagawa lowlands (KMZ format). The maps include 125m mesh, the topographic altitude map, the surface map of the buried paleogeographic units, the surface model of the base of the Chuseki-so, and its anaglyph image. The details refer to the main text and Figs. 14 and 16b, c. The anaglyph image is made by Kishimoto K. (AIST) .