

地盤の3次元モデル化 —福岡平野を例として—

3D Modeling of Subsurface Geology: In the Case of Fukuoka Plain

石 原 与四郎 (いしはら よしろう)

福岡大学 理学部 助教

1. はじめに

都市地盤の3次元モデルは、地盤情報データベースの整備の進展に伴って活発に作成されるようになってきた^{1),2)}。このようなモデルは、地盤情報データベースのうちでもボーリング情報の土質や N 値に関して作られる³⁾。そしてその結果は、地下地質構造の解明だけではなく、その活用に関しても期待される^{3),4)}。地質情報の3次元モデル化自体は、デジタル地質図の作成⁵⁾や、貯留岩の評価⁶⁾、そして都市地盤の評価のために発展してきた⁷⁾。前者はデジタル地質図を作るために問題となる論理的問題点の解決、後者二つでは主に地層やターゲットとなる鉱体の分布の確率的な解析が目的である。

ボーリング情報の3次元モデル化に際しては、大きく分けて2種類の手法が採られる。すなわち、個々のボーリング柱状図の地層区分を行い、その境界深度を広域に対比・モデル化する手法¹⁾と、ボーリングデータからそのままグリッドモデルやボクセルモデルを構築する手法²⁾とがある。いずれもオペレータによる記載方法の違いやデータベースの精度、データベース化の過程によるデータの整理の問題が存在するが、前者は特に地層区分の判定基準によって異なったモデルになってしまうという問題がある。後者は、ボーリングデータをそのまま活用し、土質や N 値の連続性を決定論的・確率論的に推定する方法であることから、人為的に生じる問題点は少ない。実際、後者の方法によって、東京・中川・荒川低地では3次元地盤モデルが構築され、層序ボーリングとの対比に十分に耐えうる精度になっている⁴⁾。

本稿では、九州地盤情報共有データベースに収録されたxml形式のボーリングデータを用い、筆者らの手法^{2),8)}によって福岡平野(図-1)の3次元モデルを構築した例を紹介する。

2. 福岡平野の地盤の3次元モデル

2.1 福岡平野の地盤とボーリングデータベース

福岡平野は、北～北西を博多湾に面し、福岡市中心部、春日市、大野城市にまで広がる平野で、東西約14 km、南北約16 kmの三角形を成す。福岡平野の地盤を特徴づけるのは、福岡市中心部で北西—南東方向に伸びる警固断層と、これを挟んだ両側における第四系の層厚の違いである。すなわち、警固断層の東側では最大70 mを越える厚い堆積層が分布するのに対し、西側では比較的薄

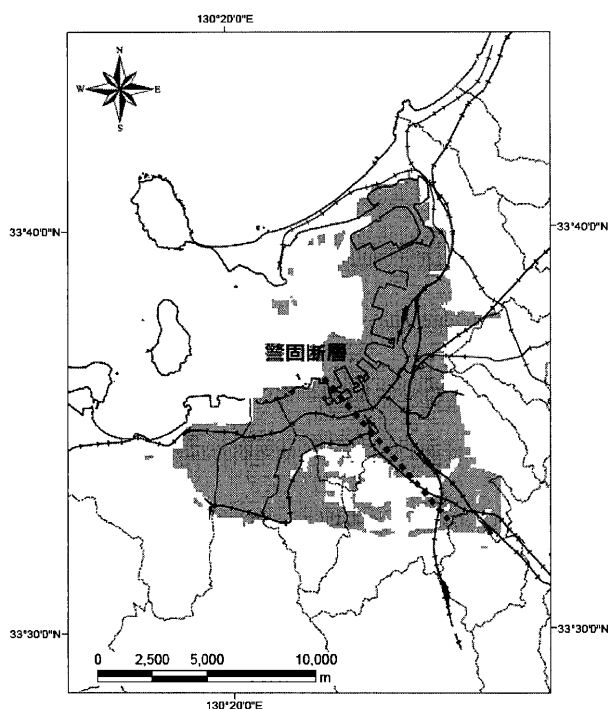


図-1 モデルを構築した地域

い。厚い堆積層は、古第三系も若しくは花崗岩の基盤を覆う非海成～海成の第四紀層からなる。福岡平野は南方・東方の山地からの距離が近いこと、室見川、那珂川をはじめとする複数の河川が流れ込むこと、北西—南東方向に延びる複数の断層により基盤岩の凹凸が著しいことなどから、複雑な地盤構造を成す。すなわち、これらの基盤岩を覆って下位から金武礫層、博多粘土層、荒江層の更新統、そして沖積層である中州層と累重する⁹⁾が、これらは基盤の凹凸や堆積環境から、海成層を除いて不連続性が強い。

このような特徴を持つ福岡平野に関して、本研究では、九州地盤情報データベースに収録されたボーリング柱状図をもとに、3次元地盤モデルを作成した。このデータベースは、九州地盤情報共有協議会によって編纂された2005版および2012版が発行されており^{10),11)}、総計63 000本(30 622本:2005; 32 722本:2012)を越えるボーリングが、閲覧ソフトとともに収録されている。このうち、モデル作製の際に用いたのは、福岡平野中心部の約4 300本のボーリングである。

2.2 3次元モデルの構築

モデルは作製したい空間に等間隔に設置したグリッド

の値を推定する手法を用いた^{2),8)}。モデル作製のための手順は、(1)xml形式のボーリング柱状図からのデータ抽出、(2)データベースの再構築、(3)水平方向へのデータ補間、(4)(3)で構築された水平モデルの垂直方向へのスタック、である。

(1)、(2)のデータ抽出及びデータベースの再構築は、モデル構築の際に必要な情報の抽出と、情報の規格化のために行った。データ抽出の作業においては、ボーリング位置座標、孔口標高等の他、土質岩種区分、分類コード、 N 値とそれらが得られた深度、そして孔内水位を得る。これらのデータのうち、土質と N 値、孔内水位に関しては孔口標高を参照し、標高(深度)1mの精度で整理し直した。 N 値のうち、50を越える値については換算 N 値で置き換えられていることも多いため、これらは50で統一した。一方、土質は、すでに土質岩種区分分類コードによって規格化されているが、特に古い柱状図を数値化した場合には記載と異なっていることも良くある。そこで、ここでは土質岩種区分をもとに、福岡平野を構成する主な土質11種に再区分を行った(粘性土、砂質粘性土、砂質土、砂礫(3種)、花崗岩類、基盤岩(古第三系)、人工土等)。モデルを作製する N 値、土質区分の情報は、それぞれ対応する位置座標、標高で管理できるようにデータベースを作成した。

本研究では、上述のようなデータベースを用いてボクセルモデルを作製した。ボクセルモデルは、それぞれが値を持つ小さな直方体の集合からなる。連続性の悪いことの多い河川層や、側方変化をしやすい海成層からなる沖積層のモデル化には、ボクセルモデルは適していると言える。ボクセルモデルの構築は、水平方向(標高方向)に連続性の良い沖積層の特徴を踏まえた、(3)水平方向へのデータの補間とその(4)垂直方向へのスタックの手順で行った。水平方向への土質や N 値の推定は、東京低地で検討された手法²⁾を改良したもの⁸⁾を用いた。手順は、①モデルを作製したい範囲及び解像度のグリッドを設定する、②グリッドノードを中心とし、ノードからの最大の参照範囲を設ける。そして、ノードを中心に北を基点とした8方位に区切り、各扇形のセクター内でノードから最も近い指定数(ここでは最大2、最小1)のボーリングデータを選択する。③②で選択されたボーリングデータを用いたグリッドノードの値を、各データに対する距離について重み付けを行い⁸⁾、推定する(図-2)。

この手法⁸⁾では、選択されたボーリングの土質に関して、グリッドノードと選択された個々のボーリングとの距離に基づきそれぞれ重み付けを行い、より近隣にあるボーリングが反映されるようにグリッドノードの土質を推定している。土質が m 種類($m \leq 11$)あるとしたとき、手順は以下ようになる(a~f)。

(a)選択されたボーリングデータのうち、ある土質 l について考える。(b)土質 l のデータを b_n ($n \leq 16$)とし、これらのボーリングのグリッドノードからの距離を d_n とする。(c)土質 l の各ボーリングデータ b_n について、グリッドノードとの距離に対する重み付けを $1/(d_n)^{\beta}$ と

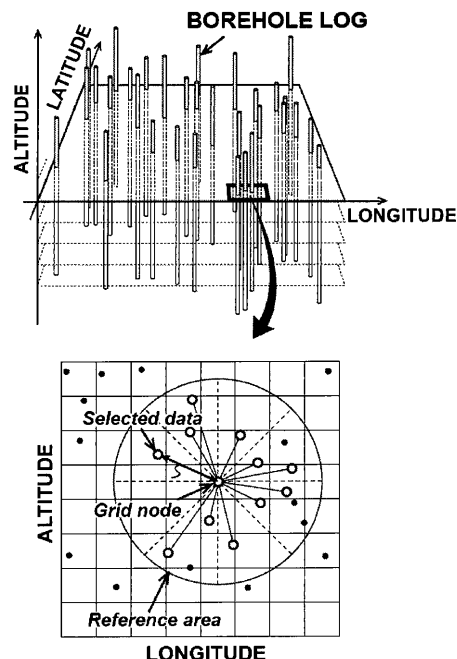


図-2 ボーリングの選択²⁾

定義する。 w_l は、土質ごとに指定することができる重み付け係数である。(d)土質 l に関する距離の重みの総和 G_l を、 n 個のボーリングそれぞれ重み付けを求めて足し合わせることで得る。(e) m 種類の土質についてそれぞれ総和を求め、それに対する土質 l の重みの総和 G_l の割合 L_l を求める。この L_l を土質のスコアとする。これは土質 l がどの程度あるグリッドノードに寄与するかの指標と考えることができる。(f)認められたすべての種類の土質スコアの総和は1となり、この中で最も大きなスコアを示すものをグリッドノードの土質として選定する。

距離による重み付け係数は地層が形成された堆積環境によって変化させることができる。すなわち、連続性の良い地層が予想される場合には、重み付け係数を小さくすることでより推定に用いられやすく調整できる。

N 値は、選択されたボーリングの中で推定された土質に対応するものだけ抽出し、土質の推定と同様に距離に応じた重み付けを行い、平均する(逆距離荷重法)。土質 l の N 値の逆距離荷重法による平均 N_l は、以下の式で求められる。

$$N_l = \frac{\sum \frac{N_{b_n}}{d_n^\beta}}{\sum \frac{1}{d_n^\beta}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき、 N_{b_n} は、土質のスコア L_l に基づき選択された土質の N 値、 β は w_l とは別に指定できる重み付け係数(IDW指数)である。

このような推定は、ある標高におけるグリッドノードすべてについて行うが、②の選択において八つ扇形のセクターから最低でも一つのデータが得られない場合には、十分な情報量が無いものとしてそのグリッドノードは計算していない。④この推定は、設定されたグリッドについて標高ごとに行い垂直方向に重ねる。

報 告

以上のようにして得られたモデルは、設定されたグリッドのうち、一定の信頼性の基準を満たすグリッドノードの値のみが推定されたモデルになる。

3. 福岡平野の3次元モデルの特徴

本研究では、前述の手法を用いることで、おおよそ緯度33度41分～33度32分、経度130度17分～130度28分のエリア（東西約16 km、南北21 km）に50 m 間隔のグリッドノードを配置し、標高10 m～-60 m までのモデルの推定を行った。グリッドノードからのデータ参照範囲は1500 m とし、IDW 指数 β は基本的に2、土質の重み付けは基盤岩のみ3とした。

このような条件では、博多湾を取り巻くように標高-37 m までのモデルが構築された（口絵写真-4～5）。構築された3次元モデルでは、従来から指摘されているように警固断層を境界として地層の層厚の顕著な違いが認められるのが可視化された。基盤岩となる花崗岩及び古第三系の起伏を覆う更新統は、あまり連続性が良くない一方で、沖積層の海成層は良く連続する。

土質モデルでは、モデル作製範囲を北西―南東方向に走る警固断層沿い及び博多湾に面した領域で軟弱な第四紀層が厚く分布し、南西・南東部には花崗岩類、北東部から南部は古第三系の基盤岩が卓越するのが明瞭である¹²⁾。基盤を覆う第四紀層の内部構造は特に沖積層以深で複雑である。比較的単純な構造を持つ沖積層については、標高0 m 付近の断面で示されるように砂体が広く分布する。これらは博多湾に注がれる河川砂層及び海岸砂丘、海浜砂であると推定される。標高-5 m では、内陸部まで広く軟弱な粘性土若しくは砂質粘性土が分布する。標高-10 m では、湾岸部では粘性土が分布するのに対し、南東部の内陸部では河川性と思われる礫層及び砂層が帯状に分布する。これらの分布のうち、多々良川流域と那珂川・御笠川流域では、前者は礫質が卓越するのに対し、後者が砂質～砂礫質であるのが読み取れる。

N 値の分布は、土質と良い対応を示す。すなわち、古第三紀層及び花崗岩類からなる堆積盆の「器」は高い N 値を示すのに対し、内部の第四紀層は低い N 値を示す。標高0 m の砂質土では、同じ砂層の中でもやや N 値の高い領域（ N 値10～20）が海岸に沿って数列の帯状分布するのが認められる。これらは恐らく、砂丘列であると考えられる。標高-5 m 及び-10 m においては、不規則な形態をなす高い N 値を持つ基盤岩に対し、 N 値が10以下の粘性土や砂質粘性土が隣接して分布する。一方、河川成と考えられる内陸部の礫質土は N 値が高い。

4. 3次元モデル化における問題点

本研究においては、比較的迅速に構築可能な地盤の3次元モデル化の手法を紹介した。しかしながら、本研究のようなボーリングデータベースを用いた地盤の3次元モデル化においては、いくつかの注意点がある。ここでは、データベースに起因する問題点、モデル化手法の

問題点及びモデルの信頼性について述べる。

4.1 データベースに起因する問題

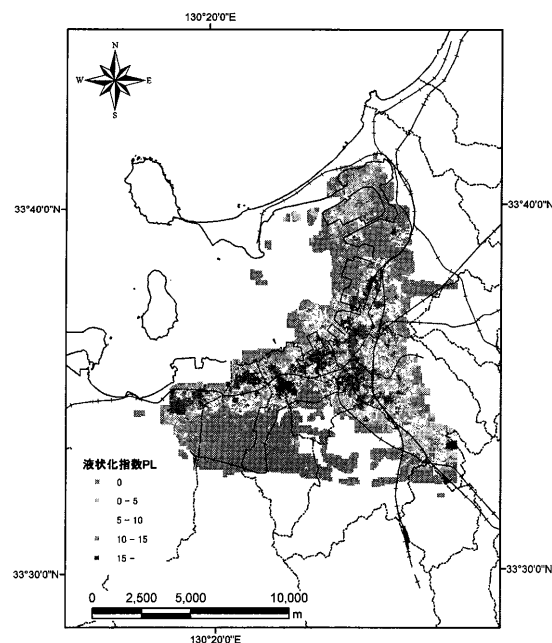
モデル化の際に問題になる幾つかの問題点のうち、モデル作製過程において根本的に解消しがたいものがデータベースに含まれるエラーである。これらには、入力ミスによるボーリング位置の違いや、土質の判定のミスなどが含まれており、その原因を明らかにしたり、修正したりするのは極めて時間がかかる。沖積層でしばしば作成される地盤のサーフェイスモデル¹⁾では、これらはモデル作成者の経験と目視で整合性が判断され、除外が行われる。これらの判定には経験も問われることから、再現性にも注意する必要がある¹³⁾。本研究で用いた手法では、最大で16点の比較によってもっともらしいボーリングデータが推定され、概ね他の地質分布と整合的な推定がなされている。また、これらのモデルを作る際に、その地域における層序区分の経験や熟練度は要しない。一方で、このようにして作製したモデルの場合でも、ノードの場所がボーリングに著しく近い場合にはエラーボーリングが反映されたと思われる推定値も認められる。このような場合には再度参照されるボーリングのチェックを行う必要がある。

4.2 モデル化手法の問題

本研究では、モデル化はほぼ自動化され、比較的迅速に作製することができる。しかしながら、この手法ではいくつかの制限がある。本研究の手法が、沖積層の連続性が側方に良いという特徴を用いている点は、しばしば基盤岩との境界部分や不連続な形態をなす堆積体、異方性のある堆積体をうまく表現出来ないことがある。すなわち、堆積相、地層の累重様式、堆積体の形状を考慮して重み付け係数やその重み付けをするセクターを定めない場合には、地質学的・堆積学的に整合的ではない場合がある。軟弱地盤を構成する沖積層や上部更新統は、河川成、海成の砂層や粘性土層、礫層を主体とする場合が多い。これらはこれらの形成された時代の海水準変動や碎屑物の供給量とのバランスで様々な連続性や形態、累重様式を取る。本研究で紹介した手法は3次元の情報も取り扱うことは可能であるが、そのまま適用するのは望ましくなく、より正確なモデルを作製するためには、地層の累重様式や堆積相を考慮に入れる必要がある。

4.3 作製されたモデルの信頼性の評価

モデルの信頼性を評価する上ではしばしば、もともになるボーリングのデータセットからあらかじめ幾つかのデータを省いておき、それらを作ったモデルと比較する。この比較ではモデルと省いたデータセットがよく一致する場合によりよいモデルができたかと判断される。しかしながら、このような手法はどこでも同等にそのモデルの信頼性を評価できるものではない。たとえば、広く大規模な河川を持つ大阪平野や関東平野の例では、特に厚い沖積の海成層が卓越するので、この層準の近隣のボーリングの情報はよく類似する。一方で福岡平野のように相対的に狭く、複数の河川が注ぎ込む堆積盆では同じような層準であっても異なった特徴を持つボーリングである



図—3 液状化危険度の評価例

ことも多い。これらは連続性が良い堆積体が卓越する地域や層準なのか、そうでないかの違いであり、モデルの信頼性の評価を行うには十分ではないことが指摘できる。

本研究ではモデルの作製の際に、土質のスコア L_1 を求めた。スコアは近隣でかつ頻度が大きい土質ほど大きくなるので、単純な土質からなる場所では大きくなり、複雑な土質からなる場合には、スコアは拮抗したりする。すなわち、スコアが大きいほど単純な土質からなり、推定されたモデルも信頼性が高く、スコアが小さいほど複雑な土質からなり、推定されたモデルは現実とは異なる可能性がある。このようなことから、スコアをモデルと対応させれば検討すれば信頼性の評価に用いることが可能である。

4.4 モデルを利用した地盤の評価

このように作成された3次元モデルについて、液状化危険度の評価を試みた。液状化危険度を計算する上での F_L 値は、道路橋示方書¹⁴⁾に従った。地震動は、レベル2地震動のタイプIIとした。なお、地下水面は、ボーリングの掘削された時代が様々であるため、ここでは便宜的に地表面下1mに設定した(図—3)。ここで作製したモデルの例では、モデルを作製するための条件を厳しく設定しているため、比較的地表から浅い部分までしかモデル化されていないことがある。その場合には判定を行っていないが、警固断層の東側においても砂層の分布に従う不規則な液状化危険度の高い地域が認められる。

5. おわりに

本研究では、ボーリングデータベースを用いた地盤の3次元モデルの構築方法を紹介し、その例として福岡平

野の例を示した。また地盤の3次元モデル化においては、データベースの問題、モデル化手法の問題等が残されていることも示した。これらを解決する上では、対象とする地層の形成環境を明らかにするためのボーリングの実施が不可欠である。

本研究は、産業技術総合研究所の木村克己氏、田辺晋氏、小松原純子氏らとの共同研究の成果の一部である。図面を作成する上では福岡大学理学部4年(当時)の古賀千裕氏にお世話になった。以上の方々に御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 山口正秋・須貝俊人・大上隆史・藤原 治・大森博雄：高密度ボーリングデータ解析に基づく濃尾平野沖積層の3次元構造，地学雑誌，Vol. 115, pp. 41～50, 2006.
- 2) 江藤雅佳子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄：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，Vol. 114, pp. 187～199, 2008.
- 3) 木村克己・石原与四郎・花島裕樹・根本達也：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. CD-ROM1枚，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2011.
- 4) 田辺 晋・中西利典・中島 礼・石原与四郎・内田昌男・柴田康行：埼玉県の中川開析谷における泥質な沖積層の埋積様式，地質学雑誌，Vol. 116, pp. 252～269, 2010.
- 5) 野々垣進：地質境界面に基づく3次元地質モデリングシステムの現状と課題，情報地質，Vol. 22, pp. 131～142, 2011.
- 6) Deutsch, C: *Geostatistical reservoir modeling*, Oxford University Press, New York, 384p., 2002.
- 7) 渡辺邦夫：推移確率とエントロピーを用いた平野部地下地質の定量的把握と地盤のモデル化—埼玉県所沢，鷲宮コアボーリング柱状図の解析例—，応用地質，Vol. 23, pp. 33～45, 1982.
- 8) 石原与四郎・宮崎友紀・江藤雅佳子・福岡詩織・木村克己：東京港湾地域のボーリング情報を用いた浅層3次元地質・地盤モデル，地質学雑誌(印刷中).
- 9) 九州地質調査業協会：福岡地盤図，174p. 1981.
- 10) 地盤工学会九州支部・九州地盤情報システム協議会：九州地盤情報共有データベース2005, CD-ROM, 地盤工学会九州支部，2005.
- 11) 地盤工学会九州支部・九州地盤情報システム協議会：九州地盤情報共有データベース2012, CD-ROM, 地盤工学会九州支部，2012.
- 12) 唐木田芳文・富田幸臣・下山正一・千々和一豊：福岡地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，地質調査所，192p., 1994.
- 13) Inazaki, T.: Automated borehole data correlation using dynamic depth warping technique and an expert system, *Proceedings Seventh International Congress International Association of Engineering Geology*, pp. 4457～4465, 1994.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解説，318p., 2012.

(原稿受理 2013.2.8)