

# マルチレベルボクセルを用いた地盤の 3次元モデル化手法の検討

山下 亮\*

地盤を3次的にモデル化して解析を行う場合、地質の複雑さ（地層、断層等の構造）に起因して解析モデル（メッシュ）の作成に膨大な手間と時間を要することがある。本研究では、複数サイズの立方体（マルチレベルボクセル）を利用して、複雑な地盤においても地質構造や地下構造物のアウトラインを入力するだけで自動的に3次元の解析モデルを作成する手法を開発し、その精度について3次元地下水流動問題を例題として検証した。その結果、マルチレベルボクセルを用いた場合、通常のメッシュを用いた場合と比較して、節点数、要素数はかなり増加するが、適切なサイズまで細分化したボクセルを用いれば、地下水流動解析結果における湧水量や全水頭分布に関して十分に良い精度を与えることを確認した。そして、本手法は複雑な地盤内に地下構造物を建設する場合の影響評価あるいは合理的設計において有効なツールとして使えることが分かった。

キーワード：マルチレベル、ボクセルモデル、地下水流動解析、3次元モデル、シミュレーション

## 1. はじめに

地下に構造物を構築するプロジェクトにおいては、地盤の力学挙動や地下水挙動、あるいはそれらの連成現象を予測し、適切な設計を行うことが必要である。プロジェクトの特性、目的に応じて、調査、解析が行われ、建設へと進むわけであるが、近年、エネルギー貯蔵や廃棄物処分プロジェクトにおいては、こうした調査、解析の位置づけは非常に重要なものとなってきている。

地盤の調査、解析においては概念モデル、数値解析モデルを構築する際、地盤の構造、特性の不均質性などを適切にモデル化することが求められる。

数値解析モデルの作成は地質の専門家の描いた地質断面図をベースに実施されるが、3次的に複雑な地層をモデル化することは、多くの時間と労力を要する作業である。さらに、調査の進行により新たな情報が加わった場合、あるいは建設予定の構造物のレイアウトを検討するためには、多大の労力を使つてのモデルの修正作業が必要となる。

このようなことから、地盤の数値モデル作成の自動化については、さまざまな研究が行われている。代表的なものとして、CADの技術を用いて作成した地質のソリッドモデルから自動的に解析モデル（解析メッシュ）を作成する方法がある。これは、もともと機械分野の設計技術を土木分野に適用しようとしたものであるが、地質が複雑な場合は良好な結果が得られないこともあるとされる。一方で、同じ形状の小さな立方体要素を用いて形

状近似を行う手法（ボクセル解析法）が研究されてきた。同じ形状の要素を用いる場合、形状の近似精度を上げようとすると要素数が膨大になる欠点があった。

この欠点を克服するべく、複数サイズのボクセル（マルチレベルボクセル）を組み合わせる方法が検討されている。例えば、鈴木らは、マルチレベルボクセルを用いた有限被覆法を提案し、様々な問題に適用を試みている。

対象領域が広く、構造が複雑な地盤のモデル化に対して、形状の近似精度の制御の容易さやモデル構築の効率性の点でマルチレベルボクセルモデルは、極めて強力な手法になるものと考えている。本論文では、既往の有限要素解析コードをそのまま利用することを前提として、マルチレベルボクセルを用いたモデル化の方法について検討を行った。

## 2. モデル化手法の検討

### 2.1 既往の研究と本研究の方針

ボクセル解析手法は、菊池らにより提唱された手法であり、機械工学の分野を初めとして、地盤工学、地下水流動の分野での利用も試みられている（櫻井ら<sup>1)</sup>、鈴木ら<sup>2)</sup>）。

櫻井らは、ボクセルモデルを用いた浸透流解析の適用性について検討し、低透水層あるいは高透水層が存在するケースについて、通常の有限要素メッシュを用いた場合と比較して、間隙水圧分布等が良好に一致することを示している。ただし、放射性廃棄物処分施設の性能評価

\* 技術研究所

において重要となる地下施設を通過する地下水流量については、解析条件によってはボクセルモデルを用いた場合、やや通過流量が大きく見積もられることを示している。これは、ボクセルモデルの凹凸により、一旦施設外に流出した地下水が再度施設内を通過する場合を2重にカウントしていることが原因と考えられる。したがって、施設通過流量の評価誤差が大きい問題は、ボクセルによるモデル化の問題というよりも、有限要素解析結果から通過流量を算定する方法に検討の余地があると思われる。

また、鈴木らはマルチレベルボクセルを利用し、有限被覆法を亀裂性岩盤の浸透流解析に適用を試みている。ただし、有限被覆法は、マニフォールド法の1種であり、浸透流解析で通常用いられる飽和・不飽和解析コードはそのまま利用することはできない。

本研究では、以下の2つの条件を満たすモデル化手法を検討した。

- ・複雑な地質構造の地盤を容易かつ効率的にモデル化できること
- ・既存の解析コードをそのまま利用できること

単一サイズのボクセルを用いたモデルでは、詳細な要素分割が必ずしも必要とならない部分についても、それ以外の部分と同じサイズの要素を用いる必要があり、形状の近似精度を上げようとする、節点数、要素数が著しく増加することが問題となる。この点を解消するためには、鈴木らが試みているような複数サイズのボクセルを利用することが効果的である。理化学研究所が進めている「ものづくり情報技術統合化研究プログラム」で開発されているボリューム CAD システム(V-CAD)においても、マルチレベルのボクセルをベースにした検討<sup>3)</sup>が進められている。

本研究においては、マルチレベルボクセルを基本とし、既存の解析コードの入力データとして利用可能なモデル化手法の開発を行った。マルチレベルボクセルを利用することの長所は、必要に応じて形状近似精度を上げることが可能であり、全体モデルの節点数、要素数を抑制できることにある。例えば、浸透流解析の場合、地層中で透水性の大きな(あるいは小さな)地層や破碎帯が存在し、それらが主要な水みちあるいは不透水層となっており、地下水流動系全体に大きな影響を与える可能性がある場合、地層・破碎帯の連続性については確実にモデルで表現されることが重要となる。マルチレベルボクセルによるモデル化では、そのような地層や破碎帯の近傍の要素分割を必要なだけ細分化して、適切にモデル化することが可能である。

## 2.2 マルチレベルボクセルを利用したモデル化

ボクセルモデルおよびマルチレベルボクセルの概念を、図2-1に示す。図に示すように、ボクセルモデルは同一サイズの小さな正方形(3次元の場合は立方体)を用いて、形状の近似を行う。一方、マルチレベルボクセルモデルは、異なるサイズの正方形を組み合わせることによって、より少ない要素数で形状を近似しようとするものである。その際、マルチレベルボクセルでは、8分木分割(2次元モデルの場合は4分木分割)と呼ばれる手法で基準となるボクセルを細分化してゆく手法が用いられ、隣接するボクセルの大きさが急激に変化しないように制御される。本論文では、ボクセルのサイズについて、基準となる最も大きなサイズをレベル1のボクセルと呼び、これを1回細分割したものをレベル2、2回再分割したものをレベル3のボクセルなどと呼ぶことにする。

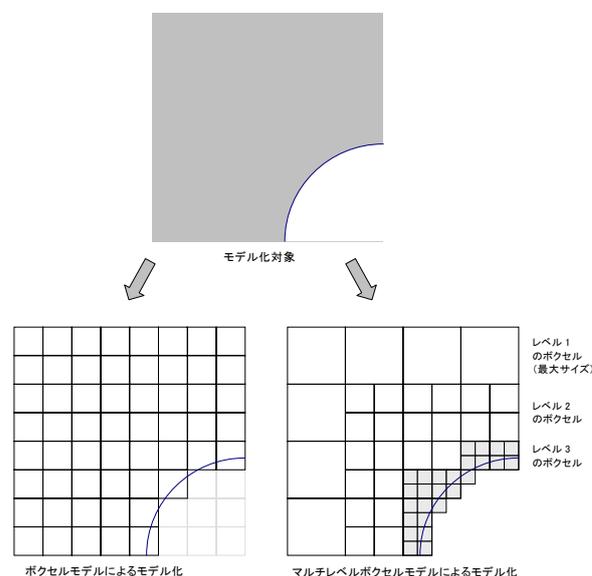


図2-1 ボクセルモデル、マルチレベルボクセルモデルの概念

さて、上述のようにマルチレベルボクセルによって解析領域を要素分割した場合、このメッシュをそのまま有限要素解析に用いることは適切ではない。要素サイズが変化する境界においては、図2-2に示すように、細かい要素の側では節点が存在するが、大きな要素の側には節点が存在しない不整合の状態となる。

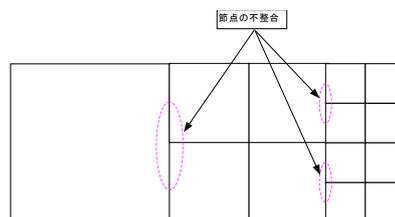


図2-2 要素間での節点の不整合

この場合、有限要素モデルにおいて、そこに何らかの不連続部を仮定していることになるため、これを解消するための処理が必要となる。山城<sup>4)</sup>らは、節点の不連続に起因する問題を解消するために、変形が不整合とならないようにペナルティを導入した手法により、コンクリートの破壊解析を行っている。この手法では、解析プログラム自体を改良する必要があるため、本研究では、以下に示す方法によりモデルを修正することにより、解析プログラムの修正をせずに済む方法を検討した。

すなわち、大きい側のボクセル要素を適切に分割して節点の連続性を保つ方法を用いた。本研究では、図 2-3 に示すように大きい側のボクセルの重心に節点を 1 つ追加し、その節点を利用して 3 角形（3 次元の場合は、3 角錐要素）に分割する手法を用いた。

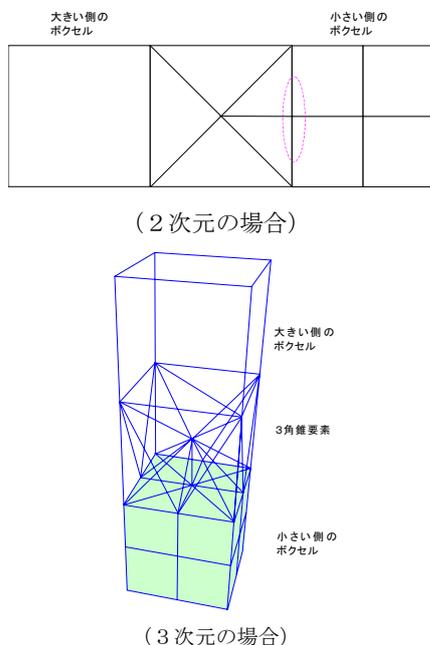


図 2-3 節点の連続性を保つための処理

モデルを構築する手順を図 2-4 のフローに示す。解析領域をまず大きめのボクセルでモデル化し、それを必要に応じて細分化する手順を採る。

細分化するための情報として、解析対象である地質区分の境界面や地下空洞などの構造物の形状データが必要となる。また、物性の割り当てを行うには、各地質区分のボリュームを定義する必要がある。形状の定義は、ポリゴンの集合として定義し、ボリュームの定義は、形状を定義するポリゴンに対しての上下関係等で行った。

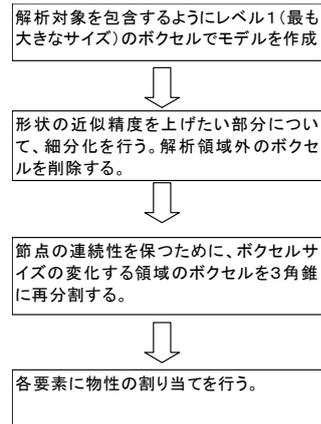


図 2-4 モデル化の手順

### 3. モデル化と浸透流解析事例

今回、開発した手法の適用性を確認するために、例題解析を行った。精度検討のために、通常の方法で地層をモデル化した場合についても解析を実施した。

#### 3.1 例題モデル

検討に用いたモデルは、図 3-1、図 3-2 に示すように、低透水層が存在する地層の下に地下空洞を掘削した場合の一部を切り出したモデルである。また、図には合わせて境界条件、透水係数も示している。このモデルにあるような薄い低透水層が存在する場合、その影響によって、地下空洞の湧水量に大きな影響を与えられられる。このようなモデルを設定した理由は、ボクセルを利用したモデル化の場合に、このような低透水層の影響を正確に評価できるかを確認することにある。特に、ボクセルモデルで粗い要素分割とした場合、低透水層の連続性が途切れてしまい、流動系に大きな影響を及ぼすことが懸念されるため、要素分割の荒さを変えた複数のモデルにより、比較検討を行った。

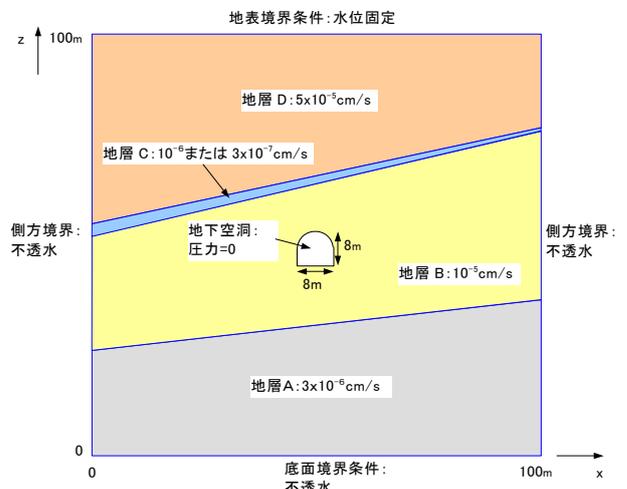


図 3-1 比較検証のための例題（正面図）

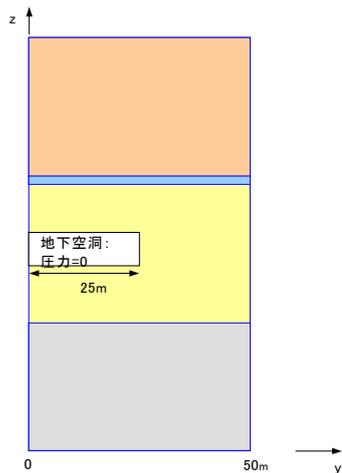


図 3-2 比較検証のための例題 (側面図)

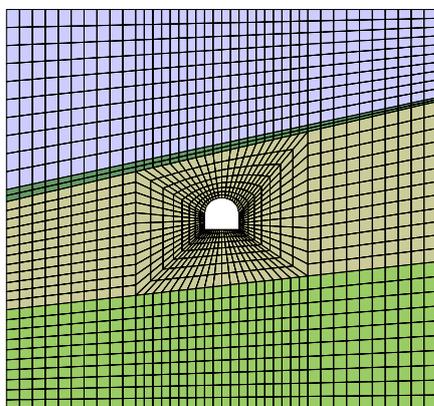


図 3-3 モデル 1  
(節点数=11664, 要素数=9180)

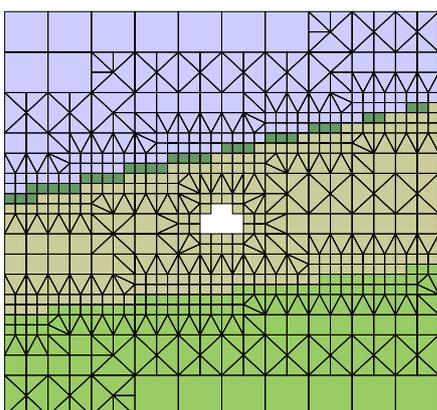
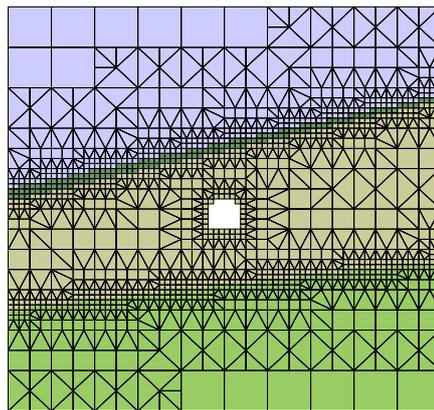


図 3-4 モデル 2  
(ボクセル: 粗: 節点数=11623, 要素数=31692)



(a) 正面図

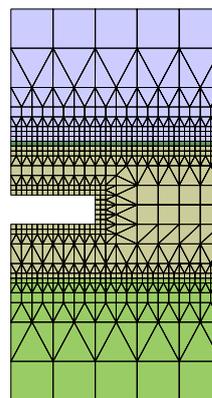


図 3-5 モデル 3 (ボクセル: 中: レベル 4 まで分割)  
(節点数=47814, 要素数=137742)

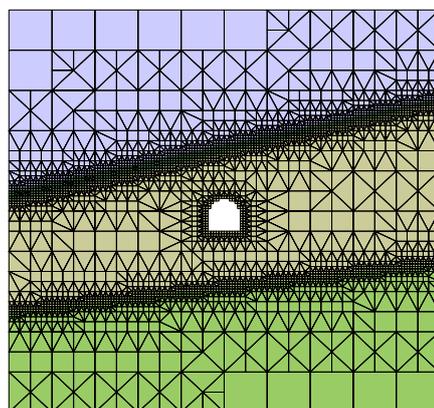


図 3-6 モデル 4 (ボクセル: 細: レベル 5 まで分割)  
(節点数=211104, 要素数=600975)

通常メッシュで作成したモデル-1 とボクセルサイズを変えて自動作成したモデル-2 ~モデル-4 を図 3-3 から図 3-6 に示す。

なお上図では、3次元モデルをカットして作成したため、節点の連続性が途切れているように見える部分も存在するが、3次元的にはつながっている。

節点数・要素数に関しては、通常の分割に比べ、ボクセルを利用した場合、かなり多くなる傾向にある。比較的粗く分割したモデル-2で同程度の節点数であるが、低透水層の連続性をある程度表現するには1桁以上の節点数、要素数を要していることがわかる。なお、レベル5と同じサイズの単一のボクセルで分割する場合、節点数は約200万程度となる。これはマルチレベルボクセルを用いた場合のモデル-4の10倍程度となり、複数サイズのボクセルを用いることで節点数をかなり低減できることが確認された。

解析は、低透水層の透水係数を  $1 \times 10^{-6}$  cm/sec (ケース1) と  $3 \times 10^{-7}$  cm/sec (ケース2) の2通りについて実施した。

### 3.2 解析結果の比較

解析結果の比較は、空洞への湧水量、全水頭分布について行った。通常の解析メッシュであるモデル-1を正解として、ボクセルを用いたモデルの結果を評価した。

各モデルの  $y=5$ m 断面での全水頭分布のコンターを図3-7と図3-8に、湧水量の解析結果一覧を表3-1に示す。

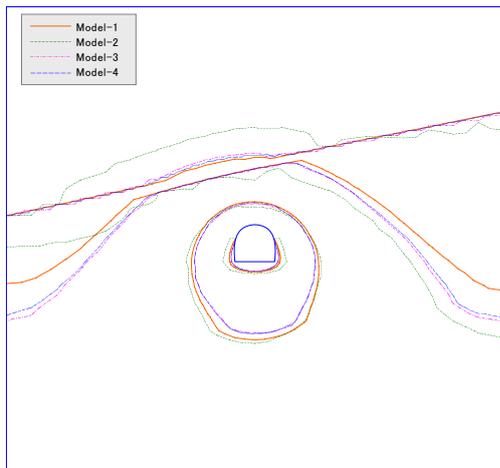


図 3-7 全水頭分布 (ケース 1)

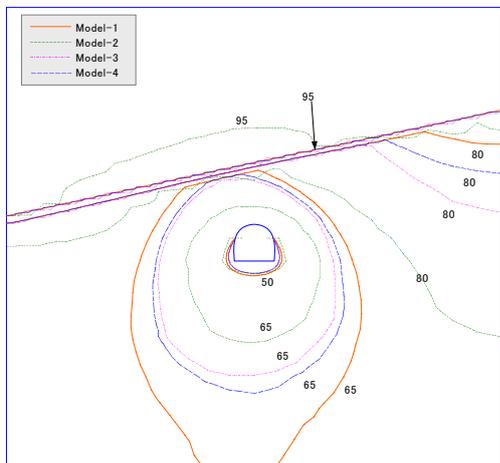


図 3-8 全水頭分布 (ケース 2)

表 3-1 湧水量の比較

	ケース 1		ケース 2	
	湧水量 (m3/min)	誤差 (%)	湧水量 (m3/min)	誤差 (%)
モデル-1	$1.75 \times 10^{-02}$	—	1.16E-02	—
モデル-2	$1.74 \times 10^{-02}$	-0.6	1.21E-02	3.9
モデル-3	$1.76 \times 10^{-02}$	0.6	1.27E-02	9.3
モデル-4	$2.15 \times 10^{-02}$	23.1	2.06E-02	77.0

地下空洞への湧水量の比較では、ケース1においてモデル-2以外はモデル-1とほぼ同じ湧水量が得られている。モデル-2では低透水層が連続した形でモデル化できておらず、湧水量はモデル-1に比べてかなり多くなっている。また、ケース2では、モデル-2～モデル-4のいずれもモデル-1との差が大きくなっており、ボクセルサイズの細分化レベルの大きいほど、その差は小さくなる傾向にある。また、モデル-1との差は、モデル-4で約4%であり、十分に良好な精度であると言える。

これらの結果から、本手法によりモデル化を行う場合、低透水層などの重要な部分の連続性が保たれるようにボクセルの細分化を制御することが必要であり、低透水層が周囲に比べて著しく小さな透水性である場合には特に重要であることがわかった。また、ケース2のように透水性のコントラストが大きい場合、誤差が大きくなる傾向があり、より細分化のレベルを大きくしたモデルとすることが望ましいと考えられる。

### 4. まとめ

複雑な地質構造を効率的にモデル化・解析するための手法としてマルチレベルボクセルを用いたプログラムを開発した。例題として地下水解析での地下空洞への湧水問題に適用を試みたところ、十分細かいレベルまでボクセルを細分化すれば、このモデル化手法によって十分に良好な精度の解析結果(全水頭分布、湧水量)が得られることを確認した。この手法は、地下水流動系に大きな影響を与えると考えられる、低透水層や高透水の破碎帯などを効率的にモデル化することが可能であり、今後実務への応用を図ってゆきたい。また、本論文では、地下水流動について、検討を行ったが、地下構造物の力学安定性の解析等にも、有効に活用することが可能である。

マルチレベルボクセルを利用することで、単一サイズのボクセルを用いたモデルに比べて、大幅に節点数を低減できるとは言え、塩淡境界問題や連成解析など複雑な現象を扱う解析では、計算時間の観点からは、できるかぎり節点数を減らすことが望ましい。この点については、

解析結果に対して、感度の比較的小さな部位については形状近似のレベルを落とすなどの処理をすることで改良することが可能と考えられ、今後の課題としたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 櫻井英行, 白石知成 : 地下施設計画のための地下水浸透流ボクセル解析, 土木学会論文集 No. 687, pp. 155-168, 2001. 9.
- 2) 鈴木克幸 他 : マルチレベル有限被覆法によるアダプティブ浸透流解析, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 263-269, 2002. 8.
- 3) 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究 (第5回), 2005. 6.
- 4) 山城 建樹 他 : 二次元ボクセル有限要素法による不整合要素を用いたコンクリートの引張破壊解析, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp. 1209-1210, 2005. 9

---

---

### Three Dimensional Geological Modeling Based on Multilevel Boxel Approach

Ryou YAMASHITA

In order to construct a 3D numerical model to analyze geologic media, considerable time and manpower are required due to complexity of stratum, such as fracture zones. In this study, a multilevel boxel based technique is developed to model strata effectively. Using the developed technique, finite element grids are generated automatically from surface and volume data. Regarding an example of underground flow problem, the calculated results using the multilevel boxel model and a manually constructed finite element model(normal grid model) were compared. Using a fine multilevel boxel model, the amount of flow and distribution of hydraulic potential showed good agreement with the normal grid model. It is confirmed that the developed technique is very useful to analyze geologic media 3 dimensionally for environmental evaluation and/or other engineering purposes.