



フラクタル理論による堆積岩中の 透水係数分布の推定

前川恵輔 尾方伸久 柳澤孝一 高瀬博康*

東濃地科学センター
* 日揮株式会社

資料番号: 98-8

Modelling of Transmissivity Field in Sedimentary Rocks
Using Fractal Theory

Keisuke Maekawa Nobuhisa Ogata Koichi Yanagizawa
* Hiroyasu Takase
(Tono Geoscience Center, * JGC Corporation)

地層中の水理学的な不均質性を表現するための手法として、フラクタル理論を用いた推定手法がある。本研究は、岐阜県東濃鉱山での試錐孔を利用した調査試験データを用いて、この推定手法による水理学的な観点での岩盤のモデル化および地下水流動解析という一連の解析手法を実際の地層に適用し、本解析の有効性を検討したものである。本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本手法によって推定した透水係数分布は、堆積構造に対応した層状の分布パターンを示した。
- (2) 地下水流動解析の結果、断層に相当する部分の遮水壁的な役割が推定された。
- (3) 推定したウラン分布が γ 線強度の高い部分とほぼ一致したことから、本解析手法の有効性を示すことができた。

1. はじめに

動燃事業団では、地層処分研究に関する基盤的な研究として、我が国の地質環境が本来有している地質や地下水、岩盤の力学的な特性等の把握を目的とした「地層科学研究」を進めている。地層科学研究の一環として行っている地下水流動に関する調査研究では、地表から地下深部までの水理学的環境を調査解析する技術と、その調査解析結果に基づく地下水流動解析の結果の妥当性を評価するための手法の確立を目的とした様々な調査、試験および解析を実施している¹⁾。

一般に、対象とする領域における地下水流動を把握する際には、まず対象領域の地下深部に存在する岩盤の種類や分布、透水性を調べるために、地表から地下深部へ掘削した試錐孔を利用して透水試験や物理検層などの調査を行う。そして、それらの調査データに基づいてコンピュータを用いた地下水流動解析を行い、対象領域における地下水の流動方向や流速、流量等の評価を行っている。こうした解析を精度よく行うためには、実際の調

査から得られる地下深部の情報を計算上できるだけ現実的かつ詳細に考慮することが重要であるが、試錐孔を利用した調査から得られる情報は、3次元の空間的な広がりを持った対象領域においては点ないし1次元の線の情報に過ぎず、この情報量の不足は何らかの推定によって補わなければならない。特に、地下水の流動経路となり得る地層中の連続した高透水性部の存在は、領域内の地下水流動を規制する要因となるため、これを把握することは重要である。しかしながら、現実の地層には、亀裂や断層などの不連続面や堆積構造等による地質構造的な不均質性が存在するため、現実的な推定は困難となっている。

地層中における透水係数等の物性値の空間的な分布を推定する手法としては、地球統計解析手法 (Geostatistics)²⁾が挙げられる。この手法は、空間内にランダムに分布するサンプル点での値には、サンプルの空間的な配置によって決定される関数が存在するという仮定に基づいている。一般的な地球統計解析では、サンプルの離間距離と統

計量（バリオグラム）との関係を定型的関数で近似するため、不均質性が高い領域に対しては近似の精度は悪くなってしまう。本報告で紹介するフラクタル理論による解析手法²⁾は、サンプル点での値に対して近似の自由度が高いべき乗形式の関数を推定し、この関数を満足するように対象領域内のすべての点における値を統計的に割り当てることが可能なため、現実の地層にみられる不均質性や不規則性の表現に適している。

本手法については、これまでに不均質な透水係数分布を人工的に作成した模型実験によって、実験室レベルでの妥当性の検討が行っている³⁾ものの、我が国の実際の地層に対する適用、検討には至っていない。本報告では、このフラクタル理論に基づく透水係数分布の推定手法について、実際の地層に対する適用性を検討するために、岐阜県東濃鉾山の堆積岩層に対する適用を試みた。そして、透水係数分布の推定、地下水流動解析という一連の解析手法の妥当性を検討するために、この解析手法に基づいて対象領域に存在するウランの分布位置を推定し、実際の調査結果との比較を行ったので、その結果を報告する。

2. フラクタル理論による堆積岩中の透水係数分布の推定

2.1 解析対象領域

解析対象領域は、岐阜県南東部に位置する東濃鉾山の敷地内に掘削した、ほぼ直線上に並ぶ4本の試錐孔（試錐孔名：TH-1～4）を含む、水平方向100m、鉛直方向100mの2次元鉛直断面とした。この領域では、4本の試錐孔において、掘削時に

採取した岩芯を用いた岩芯観察のほか、試錐孔を利用した透水試験や電気検層、γ線検層等の物理検層を実施しており、実測データが豊富である。また、そうした調査結果から、この領域の地下深部にはウラン鉱化部が存在することが分かっていたため、このウランの分布位置を解析結果の妥当性の検討に利用する目的から、鉛直方向の領域はウラン鉱化部が散在する標高100m～200mの範囲とした（図1、2）。

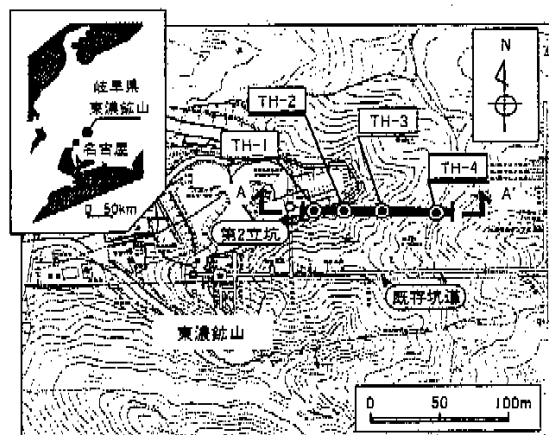
対象領域は、花崗岩を基盤岩とし、標高100m付近から上部には瑞浪（みずなみ）層群と呼ばれる新第三紀の堆積岩が分布している。対象領域の大部分を占める瑞浪層群中の土岐夾（きょう）炭素層は、河川・湖沼成堆積物を母層とし、新第三系堆積前の旧河川系（チャンネル構造）に沿って堆積したものと考えられ、泥岩、砂岩、礫岩、凝灰質砂岩等から構成されている⁵⁾。

岩芯観察の結果などから、対象領域の地層はほぼ水平な層構造を示していることが推定され、領域内西側の3本の試錐孔を横切る断層（月吉断層）が確認されている（図2）。

2.2 解析手順

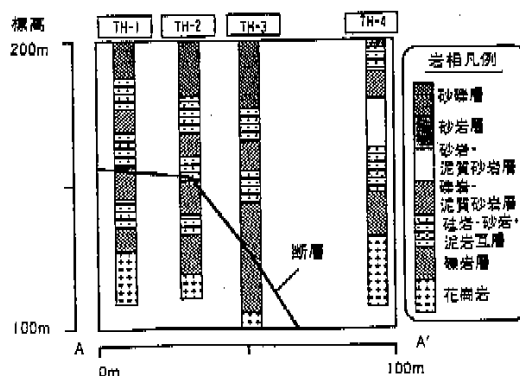
解析の手順は以下の通りである。

- (1) フラクタル理論による透水係数分布の推定
- (2) 推定した透水係数分布に基づく地下水流動解析
- (3) 求められた透水係数分布および地下水流動解析の結果の妥当性を確認するための、ウラン分布位置の推定



〔○は試錐孔位置、TH-1～4は試錐孔名を表わす。〕

図1 解析対象領域（平面図）



〔柱状図の区分は、岩相・透水性による。〕

また、断層と判断した部分の岩相の記述は省略した。〕

図2 解析対象領域（鉛直断面図）

〔図1のA-A'断面〕

以下に、解析の手順に沿って本研究内容を説明する。

2. 3 透水係数分布の推定

2. 3. 1 透水係数分布の推定手法

試錐孔を利用して実施した透水試験の結果は、試錐孔内のわずか数m程度の範囲ごとに限定された離散的な“点”のデータに過ぎないため、このデータを用いて透水係数の空間分布を推定する場合には、データの不足にともなう推定結果の信頼性の低下は避けられない。

これまでの東濃鉱山での調査の結果、堆積岩の部分において対象領域に含まれる4本の試錐孔で実施した透水試験の結果と、電気検層の結果から得られた見かけ比抵抗分布との間に良好な相関関係が認められている。そこで、この相関関係に基づいて、各試錐孔の堆積岩部分における鉛直方向に連続な透水係数分布を求めた⁹⁾。データ間隔は1 mとし、データ総数は299である。

対象領域における堆積構造を考慮すると、水平方向と鉛直方向とでは透水性に関する不均質性は異なることが予想される。そこで、水平および鉛直方向のそれぞれについて独立に不均質性を考慮することとした。

水平方向および各試錐孔ごとの鉛直方向のバリオグラム $\gamma(h)$ は、次式により求めた。

$$\gamma(h) = \langle (\psi(x) - \psi(x+h))^2 \rangle \quad (1)$$

ここで、 $\psi(x)$ はサンプル点 (位置 x) における透水係数、 h は異なる2つのサンプル点の離間距離、 $\langle \rangle$ は離間距離 h の2点から成るサンプル群において $\langle \rangle$ 内の統計量の平均値を求める演算を意味する。求めたバリオグラムに(2)式で表される関数 (フラクタルスケーリング則) をフィッティングすることによって、定数 a 、 p を決定した。

$$\gamma(h) = ah^{2p} \quad (a, p: \text{定数}) \quad (2)$$

フラクタル理論によるモデル (フラクタルモデル) の考え方は、統計量であるバリオグラムが(2)式のフラクタルスケーリング則に従うとする、統計的自己相似性が成り立つという仮定に基づいている。定数 p ($0 < p < 1$) が小さいほど、隣接する2点間の相関性は低く粗い不均質性が表現され、逆に p が大きいほど、隣接した2点間の相関性が高い滑らかな不均質性が表現される。こうした滑らかさの程度は、フラクタル特性に関する基

本的な指標であり、ユークリッド幾何学における次元 n ($= 1$ [直線]、 $= 2$ [平面]、 $= 3$ [空間]) に対して、 $n+1-p$ をフラクタル次元 D と呼ぶ。式から明らかに、フラクタル次元 D は p を決めることで求められる。

対象領域の水平方向のフラクタル次元 D_x は1.4~1.6の間にあることが推定された。各試錐孔での深度方向のフラクタル次元 D_y は、各試錐孔で求めたバリオグラムから1.6~1.9の間にあることが推定された。このことから、各方向のフラクタル次元を、水平方向については3通り ($D_x = 1.4, 1.5, 1.6$) 鉛直方向については4通り、($D_y = 1.6, 1.7, 1.8, 1.9$) 設定し、それぞれのケースを組み合わせた合計12通りのケースごとに透水係数分布の推定を行った。推定の手順は次の通りである。まず対象領域を直交格子に分割し (今回の場合は、水平方向50×深度方向100)、試錐孔位置に透水試験結果と見かけ比抵抗分布との相関から求めた1次元の透水係数分布を割り当てる。次にこの透水係数分布から、各格子間の距離に応じて a 、 p および(2)式で表される分布特性を満足するようなデータの組み合わせを、ランダムに複数個発生させる。そして、各サンプル点での推定値が実測値 (各試錐孔での値) と一致するように各推定値の重み係数を調整し、複数のデータ群のうちから、その分散が実測値の分散に最も近いものを最適解として選択した。

各ケースごとに推定した透水係数分布における分散の程度は、それぞれのフラクタル次元の適合性に関する尺度として捉えることができることから、推定結果の分散が最も小さかった (D_x, D_y) = (1.6, 1.9) の異方的なフラクタル次元の組み合わせを、最も適当な推定結果として採用することとした。

2. 3. 2 透水係数分布の推定結果

対象とした2次元鉛直断面における透水係数分布の推定結果を図3に示す。

図より、前項のようにして決定した透水係数分布の推定結果が、領域内の4本の試錐孔での岩芯観察などの調査結果から直接推定した層状の堆積構造を表現していることが示された。

2. 4 地下水流動解析

2. 4. 1 解析条件

対象領域における地下水流動を把握するために、地下水の浸透流解析を実施した。解析は、領域内での完全飽和を仮定した、差分法による定常

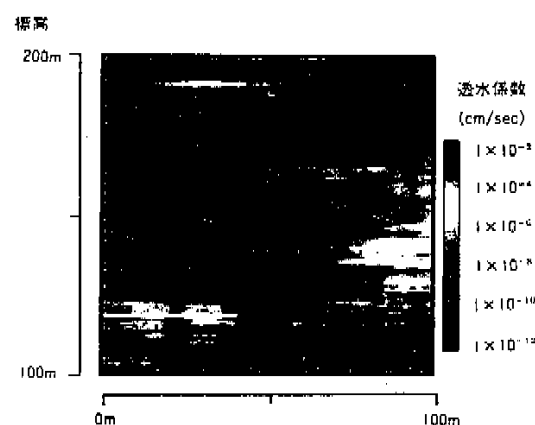
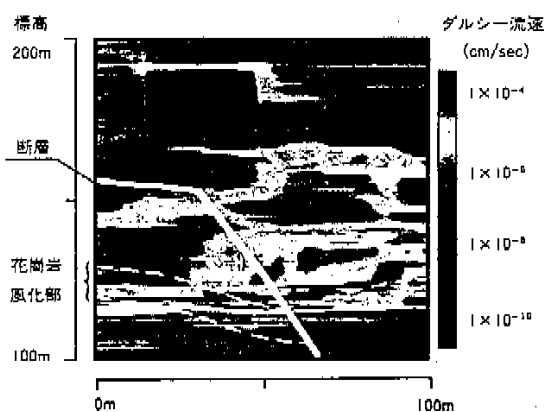
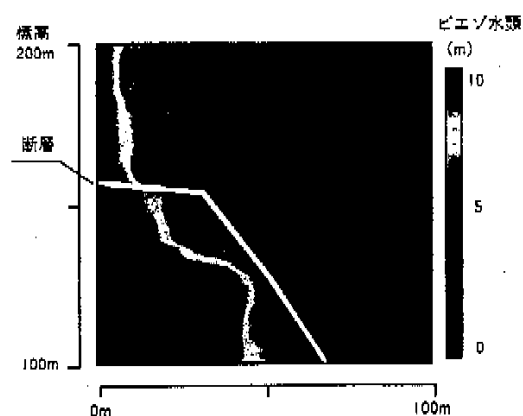


図3 透水係数分布の推定結果

図4 地下水流動解析結果
(ダルシー流速分布)図5 地下水流動解析結果
(ピエゾ水頭分布)

解析とした。

境界条件は、これまでに東濃地域を対象として実施してきた地質調査などの結果である花崗岩上部のチャンネル構造の形状⁹⁾から、対象とした断面では西から東へ向かう地下水流動が卓越していることが推定されているため、領域の西側から東側へ水頭差が生じるように設定することとした。水頭差は、対象領域の両境界での実測値がないため、一つの参考値として動水勾配が0.1となるよう、西側から東側へ10mの水頭差を設定した。また、対象領域の上面は粘土化の進んだ部分であり、底面は花崗岩の健全部であることから、上面および底面は不透水の条件を設定した。

2. 4. 2 地下水流動解析結果

地下水流動解析の結果を図4、5に示す。

流速分布図(図4)から、領域内において明らかに地下水の流れやすいチャンネル状の部分が複数推定された。

また、ピエゾ水頭分布図(図5)からは、領域内の断層に相当する部分を境とした水頭の急激な変化が認められた。対象領域の透水係数分布を推定する段階で、断層部分の透水性については、不透水の条件を与えるなどの特別な条件設定を行っていないにも関わらず、図5のような結果が生じた。このことは、各試錐孔の断層部分が比較的低い透水係数を有していたことにより、フラクタルモデルによる透水係数分布の推定時に、自動的にこの断層部分の連続性が発生されたものと考えられる。このことから、断層のような水理学的な不均質性を生じる因子の表現に対して、本解析手法が有効である可能性を示すことができたものと考ええる。

2. 5 解析手法の妥当性について

これまでの東濃鉱山でのウラン鉱床に関する調査研究から、東濃地域のウラン鉱床はウランが地下水によって堆積岩中を移動し、還元環境のもとで鉱化して形成されたものと推定されている。ウラン鉱化部における岩石中のウラン含有量と透水性の関係を調べた結果からは、ウラン鉱化部のうちウランが相対的に多く濃集している部分では、その他の部分に比べて透水性も相対的に高いことが分かっている。また、 α -オートラジオグラフや走査型電子顕微鏡(SEM)などによる岩石中の空隙構造調査から、ウラン鉱化部では鉱物粒子間の空隙にウランが濃集していることが確認されている⁷⁾。これらのことから、東濃地域のウランの移

行・濃集には、岩石の持つ収容能力だけでなく、地下水が流れることができる移行経路の有無が大きな影響を及ぼしていることが考えられる。このような知見に基づいて、ここでは地球化学的な影響を考慮した厳密な意味でのウランの鉱化過程の推定を行うのではなく、地下水の移流によるウランの移動のみに着目し、ウランが多く移行する位置、すなわちウランが濃集する可能性が高い位置の推定を行った。そして、実際にウランが存在する位置を示す γ 線検層結果との定性的な比較を行うことによって、本解析手法の妥当性を示すこととした。

具体的な手順は次の通りである。まず、地下水流動解析の結果複数推定された地下水の流れやすいチャネル状の部分の上流を、対象領域へのウランの供給源と仮定した。そして、これらの各点から、ウランに見立てた粒子を投入し、時間の経過とともに地下水によって移動する粒子の分布位置を計算した（こうした解析手法は粒子追跡法と呼ばれる）。実際の計算では、粒子の供給源として合計7ヶ所の点を仮定した。粒子の移行経路を明瞭に表現するために、粒子の投入はそれぞれ1ヶ所の供給源からのみ行い、合計7通りの計算を行った。時間ステップは、単位時間 $100 \times R_d$ 年（ R_d ：遅延係数）ごとに10ステップを設定したため、合計70通りの粒子の分布データが得られた。これらのデータを重ね合わせることで、ウランに見立てた粒子が多く通過する位置の分布が求められた。

計算の結果を図6に示す。試錐孔を利用した γ 線検層の結果、実際にウランが分布していると推定される γ 線強度が高い部分（図中の楕円で囲ま

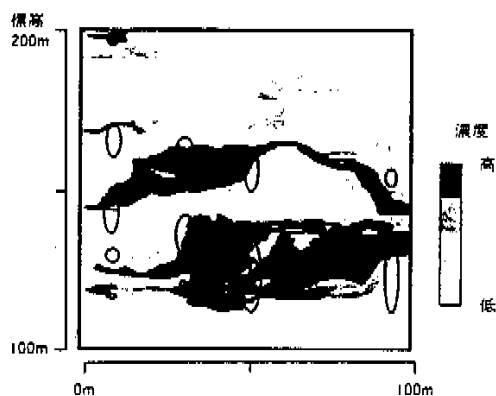


図6 パーティクル分布の推定結果
(楕円内は、高 γ 線強度部分)

れた部分。 γ 線強度5,000cpm以上)と、粒子が多く通過している箇所は、定性的により一致を示した。

3. おわりに

3.1 結論

本研究によって、以下の知見が得られた。

- (1) フラクタル理論による透水係数分布の推定手法によって、実際の堆積岩層中での堆積構造に対応した層状の分布パターンを示すことができた。
- (2) 解析領域内に存在する断層の位置や透水性について、これらをモデル上考慮していないにも係わらず、地下水流動解析の結果、断層部分を境にして水頭差が生じた。このことから、本解析手法によって、水理学的な不均質性を生じる断層のような地質構造が推定できることが示され、断層に相当する部分が遮水壁的な役割を果たしていることが推定できた。
- (3) 透水係数分布の推定および地下水流動解析の結果に基づいて行った粒子追跡法によるウラン分布（正確には、ウランが分布する可能性が高いと思われる部分）の推定結果が、領域内の各試錐孔で行った γ 線検層の結果 γ 線強度が高かった部分とほぼ一致したことから、本解析手法の妥当性を示すことができた。

3.2 今後の課題

現実の地層を対象として、より精度の高いモデル化手法を構築するために、以下のような検討が必要である。

- (1) 一般に、地層中には透水性に関する不均質性とともに異方性が存在する。また、地層中の収容能力等がウラン鉱床の形成過程に影響を及ぼしていることが考えられる。そこで、地層中の透水異方性や収容の効果などの、水理および地球化学的な要因を考慮できるよう手法の改良を行う。
- (2) 本解析手法によって広範囲な領域における地下水流動を把握するために、より広い領域における本解析手法の適用性を検討する。
また、対象領域のスケールに関する適用範囲を明らかにするための検討を行う。
- (3) 実際の現象をより正確に近似するために、3次元領域を対象とすることができるよう、本解析手法を拡張、改良する。
- (4) 例えば、本解析手法によって推定される地下水の流動経路等の特徴的な結果に基づいて、対

象領域をモデル化する上で必要な調査用の新規試錐孔の位置を提示するなど、解析結果を実際の調査の方針に還元することによって、解析モデルの精度を向上させる手法を開発する。

参考文献

- 1) 動燃事業団：「地層処分研究開発の現状（平成5年度）」、動燃技術資料、PNC TN1410 94-094 (1994)。
- 2) A.G. Journel, Ch. J. Huijbregts：「MINING GEOSTATISTICS」, Academic Press (1978)。
- 3) P. Grindrod, M.D. Impey：「Channeling and Fickian Dispersion in Fractal Simulated Porous Media」, *W.R. R.*, 29, 12, p4077-4089 (1993)。
- 4) K. Hatanaka, S. Watari：「Experimental Study on Groundwater Flow and Mass Transport in a Heterogeneous Porous Medium」, MRS Fall Meeting (1995)。
- 5) 糸魚川淳二：「瑞浪地域の地質」, 瑞浪市化石博物館研究報告, 1, p9-42 (1974)。
- 6) 尾万伸久, 大澤英昭, 他：「堆積岩の地質学的特性および透水性係数。見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用」, 応用地質, 32, 6, p51-62 (1992)。
- 7) H. Yoshida, M. Yui, et al.：「Flow-Path Structure in Relation to Nuclide Migration in Sedimentary Rocks—An Approach with Field Investigations and Experiments for Uranium Deposit, Central Japan」, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 31, p803-812 (1994)。