物理探査データを利用した地下水水質分布の地球統計学的推定法
ーその１ 推定法の有効性ー

清水建設 (正)○櫻井英行・本多眞・山本真哉・鈴木誠
日本原子力研究開発機構 (正)真田祐幸・杉田裕・松井裕哉

1. はじめに

地下深部の地質環境の把握に重要となる地下水水質について，限られた調査から合理的かつ信頼性の高い手法で空間分布モデルを構築する技術は，高レベル放射性廃棄物の地層処分場のような重要地下構造物の設計・施工において，安全性・信頼性の向上はもとより，プロジェクト全体のコスト低減の観点からも非常に重要となる．本稿では地下水水質分布を推定する手法として，広範囲かつ網羅的に調査が可能な電磁探査から得られる比抵抗値との相関関係を利用した地球統計学的推定法を提案し，幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階のデータを用いて有効性の検証を行った．具体的には広域～ボーリング孔のスケールで取得した各種比抵抗値データをその精度に応じて段階的に統合する手法に加えて，統合された比抵抗値モデルとの相関関係を利用して，離散的にしか得られない限られた地下水水質データから三次元分布モデルを構築する手法の有効性について報告する．なお本研究は(独)日本原子力研究開発機構と清水建設(株)との共同研究で得られた成果[1)など]の一部をまとめたものである．

2. 推定法の概要

孔内試験等により得られる空間的に限られた地下水水質データから三次元分布モデルを構築する手法として，地盤の比抵抗値データを補助情報とした手法を提案する．幌延深地層研究計画で取得されている地盤の比抵抗値データには，精度の高い順に，1)試錐孔内の電気検層，2)地上電磁探査，3)空中電磁探査の三種類がある．そこでまず精度の異なる比抵抗値データを統合して三次元分布モデルを構築する．具体的には，対象変量の確率場$Z(\mathbf{u})$をそれより精度の低い比抵抗値データを補助情報$y(\mathbf{u})$とした線形回帰モデルとして次式のように表す．

$$Z(\mathbf{u}) = a + b \cdot y(\mathbf{u}) + \varepsilon(\mathbf{u}) \qquad (1)$$

ここで$\varepsilon(\mathbf{u})$は残差で二次定常性を満たし，$E[\varepsilon(\mathbf{u})] = 0$，$E[\varepsilon(\mathbf{u}) \cdot \varepsilon(\mathbf{u})] = \sigma_\varepsilon^2$となり，$\sigma_\varepsilon^2$が補助情報との回帰誤差分散である．対象変量$Z(\mathbf{u})$の推定は次式のように残差$\varepsilon(\mathbf{u})$のクリギング推定に帰着する．

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{u_0}) = \sum_{i=1}^{n} w_i \varepsilon(\mathbf{u}_i) \qquad (2)$$

統合した比抵抗値モデルから地下水水質分布を推定する際にも，試錐孔内で得られる地下水水質データと統合比抵抗値との相関関係を補助情報として線形回帰モデルで表し，同様の手法で水質の三次元分布モデルを構築する．

なお対象とする変量の分布を正規化し，補助情報との間の相関関係を線形化するため，事前にBoxCox変換[2)]による非線形変換を対象変量，補助変量ともに施している．

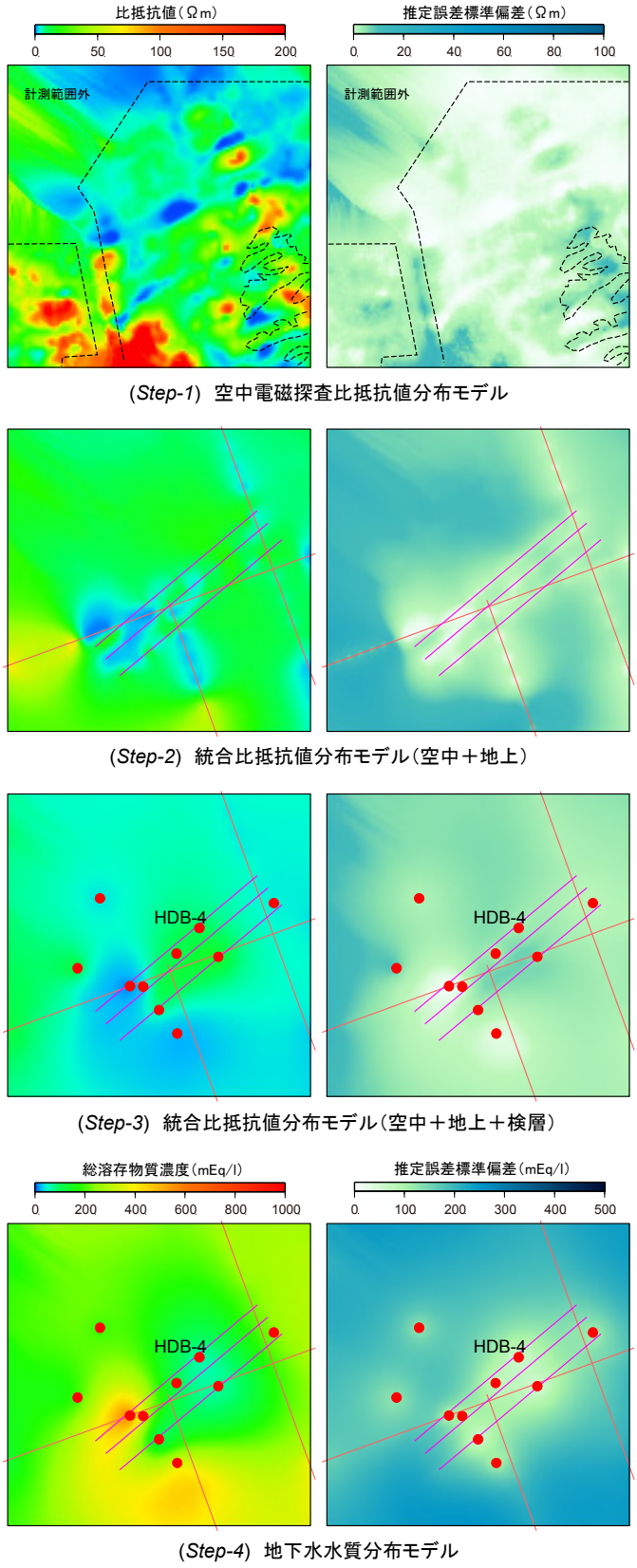

図1 統合比抵抗値及び地下水水質分布モデル(EL-50m水平断面)

キーワード:地球統計学，地下水水質，比抵抗探査，幌延深地層研究計画
連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所総合解析技術センター TEL 03-3820-8316

3. 地下水水質三次元分布の推定と精度検証

図1は前述の手法(手順)に基づき，統合比抵抗値および地下水水質の各ステップ毎に構築された三次元分布モデル(6km×6km×深度500m)をEL.-50mの水平断面でコンター図として示したものである．なお地下水水質は11カ所の試錐孔コアの間隙水の主要8溶存イオン成分(Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-})の総濃度である．

*Step-1*は空中電磁探査の比抵抗値データを基に通常のクリギング手法により設定した格子点で推定を行った結果である．左図が推定値，右図が推定誤差標準偏差の分布を示しており，右図を見ると計測範囲外のエリアで誤差が大きくなっているのがわかる．*Step-2*は*Step-1*の空中電磁探査の比抵抗値との線形回帰モデルを補助情報として，地上電磁探査の比抵抗値を基にクリギング推定した結果である．対象変量が地上電磁測線上に限られる上，線形回帰モデルのばらつきも大きいことから，空中電磁探査の比抵抗値分布はほとんど考慮されていないことがかわる．*Step-3*は●印の試錐孔内検層比抵抗値データを基に，*Step-2*の比抵抗値モデルを補助情報として推定した結果であり，推定値は*Step-2*に比べて小さな値にシフトしている．最終的に*Step-4*では，試錐孔で得られる総溶存物質濃度データから，*Step-3*で構築した統合比抵抗値モデルを補助情報として推定された水質分布を示している．推定値は比抵抗値の分布と類似しており，比抵抗値との相関関係を考慮して推定されている．

構築モデルの精度検証のため試錐孔1孔(検証孔)のデータを全て除いて，その位置における比抵抗値および総溶存物質濃度を推定する方法を採った．なお検証孔のデータを除いて推定する際には，線形回帰モデルを含めて全ての統計量について再算出する．**図2**は例としてHDB-4孔を検証孔とした結果を示したもので，左図が比抵抗値モデル，右図が地下水水質モデルである．各グラフで実測値(青実線 or 青丸)に対して，赤色点線で推定値を示し，また黄色で推定誤差標準偏差の範囲を示した．この実測値との残差を11孔全てに対して求めて箱ひげ図としたものが**図3**である．箱ひげ図は値のばらつく範囲を，矩形と"ひげ"と呼ばれる破線で表したもので，矩形はその中に50%(25%～75%)のデータが含まれ，破線はその1.5倍の範囲で最も大きな値，またそれから外れた値を○印で示している．図には今回提案する手法の結果に加えて，比較対象として補助情報を考慮しない一般的なユニバーサル・クリギングによる2つの手法の結果も示した．UKnはデータ変換なし，UKbは最適BoxCox変換データを用いたものである．全体として中央値，50%の範囲は0(ゼロ)を中心としており，推定結果に平均的には大きな偏りは見られない．比抵抗値モデルは提案手法が他の手法と比べて推定残差のばらつきが小さく，3種類の比抵抗値データを段階的に統合した提案手法が，検層比抵抗値データのみから推定した比較手法より精度良く推定できている．またデータ変換なしのUKnでかなりばらつきが大きくなっており，非正規性の強い分布の比抵抗値にはBoxCox変換によるデータ変換が有効であることも示された．

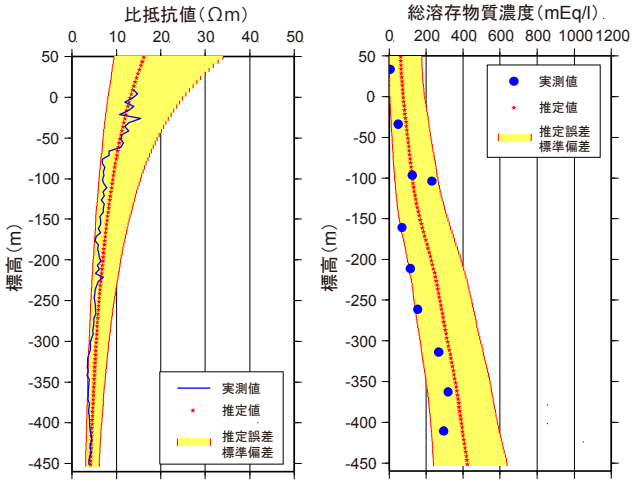

図2 HDB-4孔における交差検証例(左:比抵抗値/右:地下水水質)

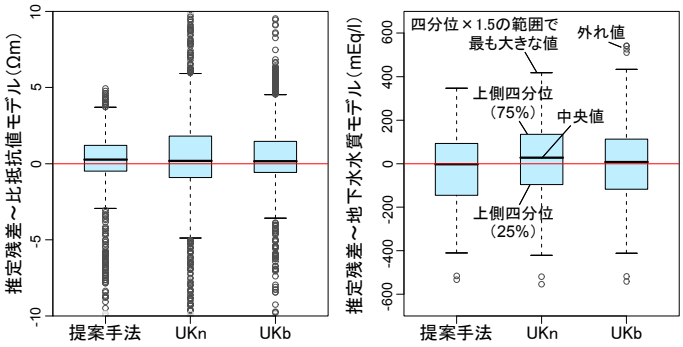

図3 推定残差の箱ひげ図(左:比抵抗値／右:地下水水質)

地下水水質モデルは比抵抗値ほど顕著ではないが，提案手法の方が推定残差のばらつきは小さい．しかしその差は僅かであり，水質データのみから推定した比較手法でも大差なく推定できている．これは水質データの空間的な相関性が非常に強く，特に鉛直方向のトレンド(深度依存性)の影響が大きいために，比抵抗値を補助情報としないモデルでも精度良く推定できたと考えられる．

4. おわりに

地下深部の地質環境を把握する上で重要となる地下水水質の空間分布について，比抵抗値データとの相関関係に着目した地球統計学的手法による推定法を提案して，幌延深地層研究計画で取得された実際のデータを用いて検証を行った．補助情報を利用しない従来の手法と比較することで提案手法の有効性を示すことができた．

参考文献

1) 本多，桜井，鈴木，岩佐，松井: 地盤統計学的手法を用いた地質環境モデル構築手法に関する研究(共同研究),p.73,日本原子力研究開発機構JAEA-Research 2008-038,2008.

2) Sakia,R.M.: The Box-Cox transformation technique: a review, The Statistician,Vol.41,pp.169-178,1992.