

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 —その2 不確実性の評価—

清水建設 (正)○本多眞・櫻井英行・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

空間的に不均質な物性値の空間分布を限られた調査から推定する場合に、いかなる手法を用いても推定結果には不確実性が含まれることになる。地球統計学的手法による地下水水質分布推定のメリットは、不確実性を確率分布として評価できる点であり、著者らが提案する手法¹⁾により構築された地下水水質分布モデルに含まれる不確実性を定量的に評価することができれば、それを効率的に低減するための方法論や調査の進め方などの確立につながり、モデルの信頼性も大きく向上することになる。そこで本稿では、推定された地下水分布モデルに含まれる不確実性の要因を整理して、できる限り定量的に評価するため、データに基づくシミュレーションによる評価を試みた。そして推定されたモデルを意志決定につなげるための課題を整理した。

2. 不確実性の分類

原子力施設関連の安全評価における確率論的リスク評価(PRA)においては、考慮すべき不確実性要因を大きく2つに区分している²⁾など。

- **偶然的な不確実性 (aleatory uncertainty)**: 確率的に生起する現象に起因する不確実性であり、現象そのもののランダムな特徴としての属性であるため、データが増えても減少させることのできない不確実性。
- **認識論的不確実性 (epistemic uncertainty)**: 知識が不足あるいは不正確であることに起因する不確実性であり、知識(データ)に帰属した属性であるため、その蓄積により低減することが可能な不確実性。

地下水水質分布に関して言えば、本来持っている空間的な不均質性が「偶然的な不確実性」にあたり、これは与えられたデータに依らず不偏のものである。しかし比抵抗値との相関関係を前提としたモデル化では、相関モデルからのばらつきという形で不均質性が表現され、相関性が強ければ強いほど不均質性は小さくなる。すなわち「偶然的な不確実性」は、現象を説明するモデルに依存して変化する。言い換えれば、水質データに同地点の比抵抗値という新たな情報が付加されることにより不確実性が低減すると考えることもできる。

一方で「認識論的不確実性」は、上記の「偶然的な不確実性」に対応する確率分布にモデルをあてはめて、与えられたデータから推定されるパラメータや、採用したモデルに含まれる不確実性であり、データ量が増大すれば低減できる不確実性である。水質と比抵抗値の回帰モデル

を構築する場合、推定される回帰パラメータ(回帰係数、回帰誤差分散)には、両者の真の関係に存在するばらつき(偶然的な不確実性)に加えて、データ量に起因したばらつき(認識論的不確実性)が混在していることになる。

3. モデルのばらつき検討

物性値のもつ本来のばらつき(偶然的な不確実性)も含めてデータから推定せざるを得ない現実からすると、厳密に分離して定量化することは困難であるが、それぞれの影響を整合的に整理・評価することは重要である。

提案手法¹⁾では水質分布を比抵抗値分布との回帰モデルに基づき推定するものであり、回帰誤差には偶然的な不確実性と認識論的不確実性が含まれている。この内データ量に依存する後者を定量的に分離するため、標本データから重複を許してランダムサンプリングを繰り返して推定値のばらつきを算出するブートストラップ法³⁾による検討を実施した。ブートストラップ標本から求めた1,000個の回帰直線をデータの散布図(○印)に薄緑色の線で重ね描いたものが図1である。併せてデータから求めた回帰線(黒実線)および回帰誤差標準偏差 $\pm\sigma$ の範囲(黒破線)を示した。図から回帰線のブートストラップ分布は $\pm\sigma$ の範囲に含まれていることがわかる。また回帰線のばらつきは中心部で小さく、外側ほど大きくなっている。すなわち回帰モデルの認識論的不確実性はデータ分布の端程大きいことを示す。

クリギング手法による推定では共分散関数をデータから推定するため、そこにデータ量に依存した不確実性が存在する。これを定量的に把握するため、11孔の試錐孔における地下水水質データから3~10孔を重複を許さないで抽出する組み合わせの標本群を作成して同定された共分散関数を評価した。推定された共分散関数のうち例として水平相関距離のばらつきを抽出試錐孔数ごとに箱ひげ図で表したものが図2である。赤線は全11孔のデータを用いて推

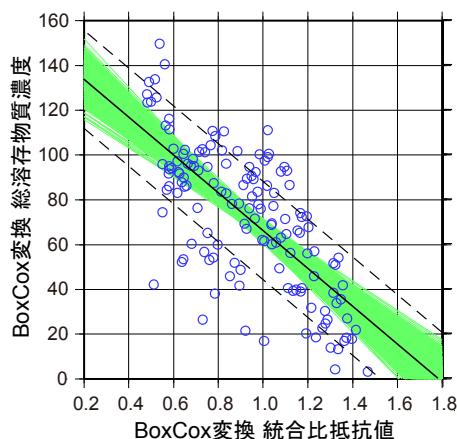


図1 回帰モデルのばらつき

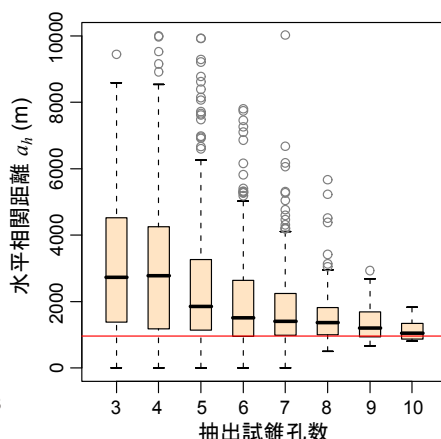


図2 共分散関数モデルのばらつき

キーワード: 不確実性, 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

定した推定値である。試錐孔数が増えるに従って推定結果のばらつきは小さくなっているが、抽出試錐孔数が増えると抽出されるデータの多様性も低くなるため、この結果から不確実性の定量化は難しい。しかし相関距離のばらつきが最終的に推定される地下水水質モデルへの影響を検討することは重要であり、ここでは3孔抽出したとき相関距離が最小(MIN)・最大(MAX)となる2ケース(表1参照)について他の条件は同じとして構築した地下水水質モデルの推定精度を検証した。図3は交差検証による残差分布であり、提案手法に加え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(以下、UKb)を同時に示している。結果は、何れの手法も二つのケースはオリジナル(REF)に対して推定残差のばらつきが大きくなっている。またMINのケースは、提案手法に比べてUKbの方が大きなばらつきを生じている。相関距離が小さいときには推定値はデータ近傍以外はほぼ平均値に収束するため、UKbでは深度依存の回帰モデル、提案手法では比抵抗値との回帰モデルに基づく推定値となり、その違いが結果に表れている。

4. 不確実性の定量化

以上の結果から不確実性を整理して定量化を試み、提案手法の有効性と意思決定につなげるための情報としての課題を整理する。図4は地下水水質分布の不確実性を誤差標準偏差として整理したグラフである。縦軸が推定された水質分布の不確実性を誤差標準偏差として表したもので、手法毎に95%信頼区間と共に示した。まず143個の水質データの標本標準偏差(赤実線)とその信頼区間(赤破線で囲まれたグレーの範囲)をブートストラップ法により求めた。

これに対して比抵抗値との相関関係に着目した回帰モデルに基づく予測の誤差標準偏差とその信頼区間を赤紫色で示した。これはサイト内の特定できない位置で比抵抗値が与えられた時に水質の回帰モデルによる予測値の不確実性を定量化したものである。比抵抗値を考慮しない場合(データの標本標準偏差)に比べて不確実性が大幅に低減されているのがわかる。回帰モデルの相関関係が強ければ、この低減幅はより大きくなる。それはデータ量には依存せず、本質的なばらつき(偶発的不確実性)である。ただし信頼区間はデータの増大に伴い狭くなる。

一方で地球統計学的手法による提案手法とUKbの結果を、先の相関距離のばらつきも考慮してそれぞれ3ケース示した。比抵抗値を利用しないUKbと比べて、提案手法の不確実性は大幅に低減されている。地球統計学的手法では、データが増えれば信頼区間だけでなく推定誤差標準偏差も低減していく。それは空間のある特定位置でデータが得られた時の条件付き分布は、その位置ではばらつかないというモデルに基づいており、条件付き分布そのものがデータ量に依存した認識論的不確実性となっているため、対象エリア内に無限にデータが得られれば、任意位置の値は一意に決まる。提案手法が信頼区間も含めて回帰モデルに比べてわずかに下回る程度であることは、対象エリアに対してデータ数(試錐孔11孔、計143個)が少なく、地球統計学的手法を用いるメリットが小さいことを示している。むしろこの場合、相関距離推定のばらつきリスクを考慮すると、

表1 相関距離の違いによる推定精度への影響検討ケース

Case	水平相関距離 (m)	鉛直相関距離 (m)	抽出試錐孔
REF	967.0	92.6	全試錐孔
MIN	0.36	3.39	HDB-2, 3, 8
MAX	8581.8	1218.4	HDB-4, 9, 11

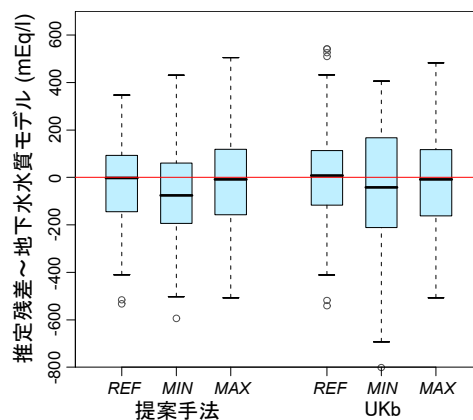


図3 空間相関モデルのばらつきの影響

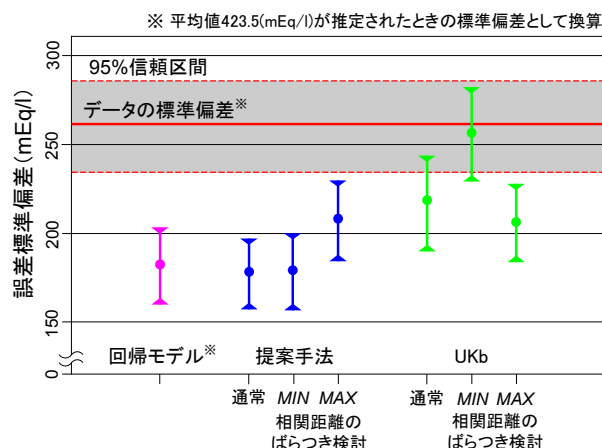


図4 地下水水質モデルの推定誤差標準偏差と95%信頼区間

回帰モデルに比べて不確実性の幅は広がり、回帰モデルのみで推定した方が不確実性は小さいことがわかった。

5. おわりに

地球統計学的手法を用いて推定した水質分布の有する不確実性を整理して、推定手法毎にある程度の定量化をすることができた。不確実性を要因に基づき整理し、それぞれに定量化して示すことは意思決定につなげる情報として大変意味のあることと考えるが、不確実性は採用するモデルによって大きく異なることになり、「どのモデルを採用すべきか」という大きな課題が残っており、今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) 櫻井ら: 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～その1 推定法の有効性～, 第65回土木学会年次学術講演会(本講演会), 2010.
- 2) Helton, J.C. and Burmeister, D.E. (Ed.): Treatment of aleatory and epistemic uncertainty. special issue of Reliability Engineering and System Safety, Vol.54, pp.2--3, 1996.
- 3) Davison, A.C. and Hinkley, D.V.: Bootstrap Methods and Their Application. Cambridge University Press, 1997.