

地質空間モデリングにおける補助情報利用の有効性

小池 克明*・呂 磊*・久保 大樹*

Effectiveness of Use of Auxiliary Information for Geologic Spatial Modeling

Katsuaki Koike*, Lei Lu* and Taiki Kubo*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

キーワード：地球統計学，共クリギング，副変数，成分濃度，岩体透水性

Key words: Geostatistics, Co-kriging, Secondary variable, Component concentration, Rock-mass permeability

1. はじめに

金属・エネルギー・水資源の需要の急増に伴い、鉱床中の品位分布、貯留層の地質構造や物性分布の推定精度の向上が急務の課題となっている。また、地すべりや液状化に対する危険度評価、震度予測などの防災面、さらには地下水や地盤環境の保全・汚染防止といった地圏環境面でも地盤物性の空間分布推定は不可欠である。ボーリング調査や岩石試料の分析などによる地質データには、近距離のデータほど類似した値や性質を示すという空間的相関構造が存在するので、これに基づく地球統計学が推定に広く用いられている。しかし、推定の対象とするデータ、すなわち主変数の利用のみでは、測点の配置の偏りやデータ量の少なさなどで妥当な空間モデルが得られない場合が多い。そこで、主変数と関連する副変数を用いて情報を補うことが行われる。本稿では空間推定の精度向上のために、このような補助情報を利用することの有効性について、筆者らの研究事例に基づき検証する。

2. 化学成分と物性値との組み合わせ

ボーリングによる地質情報は精度は高いが、連続的にデータを得ることは困難である。これに対して、ボーリング検層は細かい深度間隔でデータを取得できるとともに、化学成分濃度、透水係数、空隙率など、主変数の対象となる重要な地質物性と関連性をもつので、副変数として利用できる。その例として、JAEA幌延研究サイトを対象とし、10本の深層ボーリングデータと地震波探査データを用いての水理地質構造解析 (Lu et al., 2016) をあげる。まず、主要地質である稚内層、声問層、勇知層、更別層の地層境界と大曲断層の形状をスプライン補間により推定した。断層面の形状が深部で変化すること、4枚の地層境界面は相似形をなしていること、および断層付近で境界面の形状が複雑になり、断層運動の影響が現

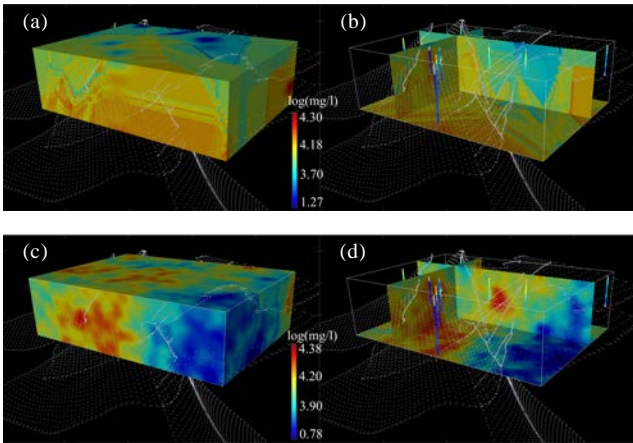
れていること、などが見出された。

当サイトでは塩水型地下水の起源が種々議論されているので、Cl⁻濃度を対象に選び、東西3 km×南北4 km×深度方向1 kmの領域での3次元分布を推定した。まず、普通クリギング (ordinary kriging: OK) を適用し、推定分布と声問層、稚内層、大曲断層・副次断層とを重ね合わせた (第1図a)。これから領域深部はCl⁻濃度が8,000~12,000 mg/Lと高いとともに、大曲断層と副次断層がCl⁻の高濃度と低濃度の明確な境界を形成していることがわかる (第1図b)。これはダメージゾーンの高透水性に起因する特徴であると考えられる。

各ボーリングでは電気検層により密に比抵抗データが得られおり、これとCl⁻濃度とは強い負の相関をもつ (相関係数-0.89)。これらのクロス・セミバリオグラムに関し、その主軸は断層に沿う70°にあり、ガウスモデルで近似でき、レンジは360 mであった。そこで比抵抗データを副変数として逐次ガウス共シミュレーション (sequential Gaussian co-simulation: SGCS) を適用し、10回のSGCSの平均を求めた (第1図c)。OKによる高濃度部と対応する箇所が多く、断層が主要な濃度境界を形成するという特徴も同じである (第1図d)。しかし、データ位置の偏りと疎の分布の影響がOKには強く現れ、2つの近接するデータの垂直二等分線に沿って同じ濃度が延長され、不自然な線状パターンを描いている。この影響はSGCSによって軽減されており、濃度の変化も大きい。よって、解析対象領域の大きさに比べて、データ数が少なく、位置の偏在性が強い場合にはSGCSのような確率的シミュレーションの利用が有効であるといえる。

3. 層厚を補助情報とした金属品位モデリング

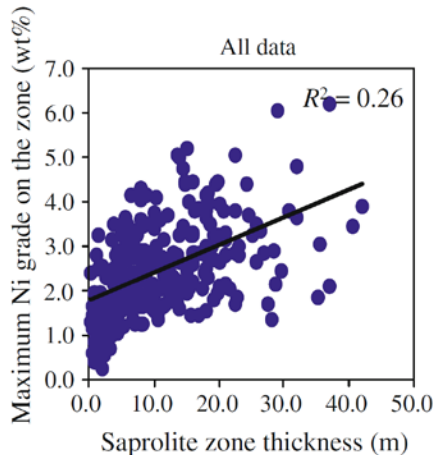
金属鉱物資源の空間モデリングの一例として、ニッケル (Ni) の品位分布解析 (Ilyas et al., 2016) をあげる。風化残留型の一つであるラテライトNi鉱床の探査・開発



第1図 幌延サイトでの普通クリギングによるCI濃度分布と地層境界面、大曲断層と副次断層との重ね合わせ(a)、水平・垂直断面図とボーリングデータの分布(b)、およびこれらの表示に対応する逐次ガウス共シミュレーションによつてのCI濃度分布(c)と断面図(d)(領域の大きさは東西3 km×南北4 km×深度方向1 km)

が世界中で進められているが、Niの品位分布は複雑であり、その正確な予測と品位分布を支配する因子の特定はいまだ困難である。解析対象は、インドネシア・スラウェシ島に位置する大規模なNi鉱山である。対象範囲は東西1.6 km・南北1 kmであり、ここに294地点でボーリングが実施された。隣り合う地点の水平方向での間隔は約50 mで、ボーリングの平均長は26.62 mである。また、本地域の地質は、地表からリモナイト、サブロライト、基盤岩（主にハルツバージャイト）の3層に区分できる。

まず、種々の統計分析により、Ni品位が地形やサブロライト層の層厚と関連することを見出した。すなわち、傾斜が緩い地形で基盤岩の風化層であるサブロライト層が厚いほどNiの品位が高い傾向にある(第2図)。そこで、Ni品位を主変数、サブロライト層厚を副変数とした普通共kriging (ordinary co-kriging: OCK) により、Ni品位の分布を推定した。前述の幌延サイトよりもデータは密にあるものの、それでもOCKによる推定分布には平滑化効果が強く現れた。これがOCKによれば軽減でき、OCKではほぼ一様であったNi品位の領域において、品位の細かい変化が推定できるようになった。OCKに対してのOCKの推定結果の妥当性は、クロス確認によっても確かめられた。

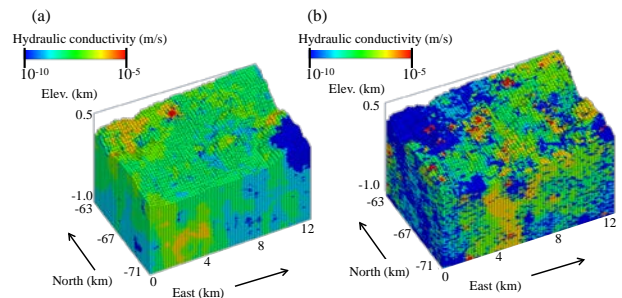


第2図 サプロライト層の層厚とNi品位との相関性

4. 岩体透水性モデリングへの亀裂情報の利用

CCSやHLW地層処分などの地層の貯留機能利用において、水理地質構造の詳細な把握が不可欠となる。岐阜県東濃地域を対象とした広域的な水理地質構造解析、および亀裂分布と地下水流動系モデルの構築（久保ほか、2013; Koike et al., 2015）は、これに対するアプローチの例である。解析領域は東西12 km・南北8 km・深度方向1.5 kmであり、25孔を利用した計395区間において透水試験が実施され、透水係数データが得られている。しかし、透水試験位置の水平方向での偏りは大きいので、領域全体の透水係数分布を詳細に把握するのは困難である。

そこで、GEOFRACによる3次元亀裂分布モデル（Koike et al., 2015）と透水係数データとの組み合わせを試みた。すなわち、透水係数のデータ点近傍を通るシミュレーション亀裂を抽出し、亀裂面積と透水係数の値を比較した。その結果、これらに正の相関関係が見出されたため、シミュレートされた亀裂面に回帰式から透水係数を与えることによって、サンプルデータを増やした。これにより、領域全体の透水係数分布を逐次ガウスシミュレーション (sequential Gaussian simulation: SGS) によって妥当に推定することが可能となった。得られた空間モデルは、実測値のみを用いたSGSによるモデルよりも空間的な連続性が向上し、値の極端なばらつきを抑えられている(第3図)。さらに、MODFLOWへの適用によって概ね長さ2 km以上の亀裂面が主要な地下水流動経路を形成し、広域的な流動形態を支配していることなどを明らかにできた。



第3図 逐次ガウス共シミュレーションによる(a)亀裂-透水データ、(b)測定データのみを用いての3次元透水係数分布モデルの比較

5. まとめ

本稿での例は限られてはいるが、地質関連の空間モデリングの精度向上には、主変数の偏在性やデータ不足を補うため、これと関連する他種データ、および目的に得られる物理探査データや衛星画像データなどのソフト情報を補助変数に利用することが必須と考えられる。また、従来の地球統計学に加えて、主変数と副変数をさらに有効に組み合わせるための数理モデルの開発も必要である。

文献

Ilyas, K., Kashiwaya, K. and Koike, K. (2016) *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 165, pp. 174–188.
 Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, A., Kurihara, A., Matsuoka, T. and Lanyon, B. (2015) *Tectonophysics*, vol. 660, pp. 1–16.
 久保大樹・小池克明・劉春学・栗原新・松岡稔幸 (2013) 地学雑誌, vol. 122, no. 1, pp. 139–158.
 Lu, L., Kashiwaya, K. and Koike, K. (2016) *Environmental Earth Sciences* (in press).