

地質情報や物理法則を考慮した地球統計学による空間モデリングの深化

小池 克明*・切山 拓也**・呂 磊**・劉 春学**・Mohamad N. Heriawan***

Deepening of Geostatistics-based Spatial Modeling by Considering of Geologic Information and Physical Law

Katsuaki Koike*, Takuya Kiriyaama*, Lei Lu**, Chunxue Liu**
and Mohamad N. Heriawan***

*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

** School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, China.

***バンドン工科大学 Institute of Technology Bandung, Indonesia, Jl. Ganesha 10, Bandung
40132, Indonesia.

キーワード：鉱床，金属濃度，クリギング，主成分分析，移流拡散方程式

Key words: Ore deposit, Metal content, Kriging, Principal component analysis,
Advection-diffusion equation

1. はじめに

金属は社会のあらゆる工業製品やインフラストラクチャーの材料であり，中国や発展途上国での経済成長に伴い，世界的な需要の指数関数的増加が2050年まで見込まれている(Halada *et al.*, 2008)．需要増加に対処するためには，(i)「開発中の鉱床，あるいは有望地域における品位(鉱石中の金属濃度)の高精度空間分布推定」，および(ii)「鉱床を形成した物理法則と形成時の地質環境の解明」の2つが不可欠である．金属濃度の空間分布推定には，これまで地球統計学が広く用いられてきた(例えば Ilyas *et al.*, 2016)．地球統計学はサンプルデータの定常性を仮定し，データ間の空間的相関構造に基づく手法であるが，2つの問題点があげられる．1つはデータ値が地質に依存する場合もあることで，データ間の距離と方向のみの相関構造ではこの地質依存性が考慮されない．他方はデータ値分布を支配する何らかの法則が，空間統計のみでは抽出できない点である．例えば，金属濃度分布は元々溶解していた鉱液の流動形態に強く支配されると考えられ，鉱液も物理法則に従って流動する．しかし，このような物理法則をトレンドとして地球統計学で考慮されたことはこれまでにない．

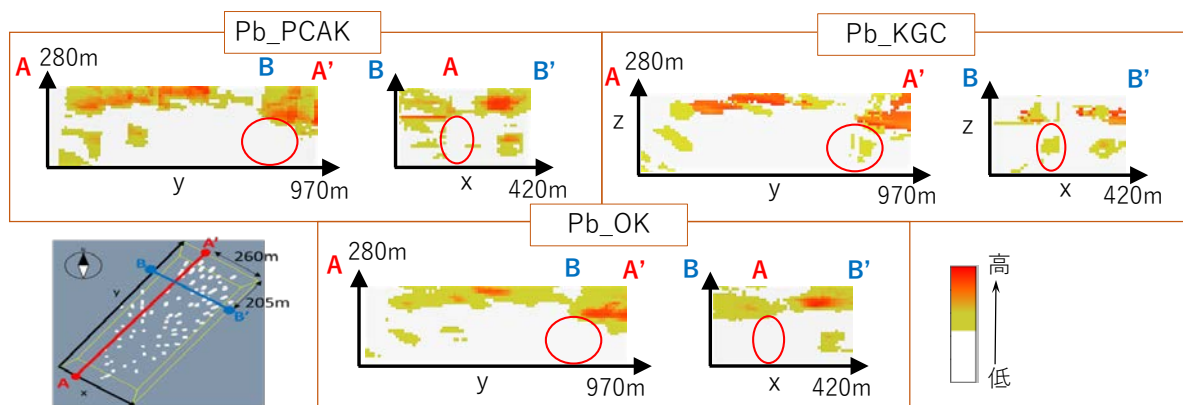
これらの問題点に対処し，地質データの空間モデリング精度を向上させることを目的として，本研究では金属濃度分布をケーススタディに選び，地質情報，物理法則を取り入れた2つの地球統計学的手法の開発を試みた．地質情報の考慮は上記(i)に関連する．また，(ii)の物理法則・地質環境が解明できれば鉱床形成プロセスを把握でき，地質的性質の類似する地域での鉱床有望地の検出に

活用できるようになる．(ii)は開発途中であるが，これをSPG (Spatial modeling by joint use of Physical law and Geostatistics) と称し，手法(i)との統合を目指している．

2. クリギングへの地質情報の組み込み

本研究で用いた金属濃度データは，秋田県北鹿地域に位置する大規模な黒鉄鉱床での調査ボーリングによる．ボーリング数は77本であり，いずれも垂直，あるいはそれに近い．解析領域は，データ密度が最も高くなるように直交3軸を定め，水平方向から8°傾くようにxy軸を取った．領域の大きさは，x, y, z軸方向にそれぞれ420 m, 970 m, 280 mであり，領域をxy軸方向に10 m, z軸方向にも10 mの格子で区切った．

地質情報の利用としては，次の2つの手法を検討した．前処理として，地質柱状図に記載の地質を複数のタイプにまとめる．1つめでは，各ボーリングデータで注目する地質タイプは1，それ以外は0を与えるというバイナリーセットを作成し，これと主要金属濃度を組み合わせて主成分分析(PCA)を行う．得られた主成分値に対してクリギング計算，さらにその逆解析によって，地質タイプと金属濃度，および金属ペアの相関性を考慮する．これをPCA-kriging (PCK) と称する．他方では，地質タイプごとに主要金属濃度のクリギング計算を行い，平行して作成した地質モデルと重ね合わせることで，各地質タイプの分布範囲にクリギング計算結果を合わせる．そのため，地質データのバイナリーセットにPCKを適用し，地質モデルを作成する．これは，地質タイプと金属濃度の相関性に重点を置く手法であり，kriging with geological



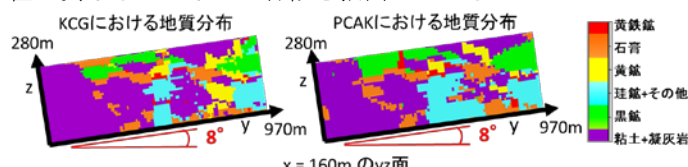
第1図 3つの地球統計学的手法による垂直断面での鉛濃度分布の比較(黒鉱鉱床)。丸はKGCのみに現れている高濃度部を示す。

constraint(KGC)と称する。

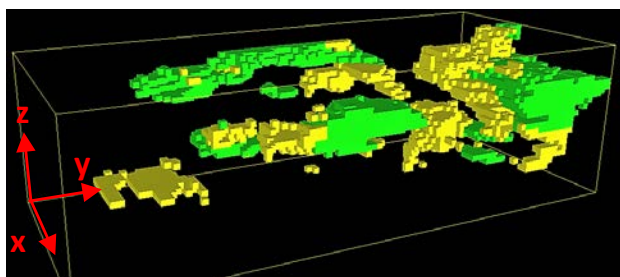
金属濃度データに含まれる空間的相関構造の異方性を考慮して、水平方向と垂直方向のバリオグラムを描き、球モデルに当てはめた。以上の設定のもとで、普通クリギング (ordinary kriging : OK), PCAK, KGCによる推定精度を、cross-validation (以下CV) によって比較した。銅、鉛、亜鉛の濃度に対するCVでの相関係数はKGCが多少大きいものの、3つの手法には大差なかった。しかし、鉱量評価で最も重要となる高濃度部での推定精度がKGCによれば向上し、平滑化効果を軽減できた。これは第1図の鉛濃度推定分布が示すように、KGCによる高濃度部の連続性が最も良いとともに、KGCのみに現れている高濃度部があることから確かめられる。

また、PCAKとKGCによれば3次元の地質モデルも作成できるという利点もある。黒鉱鉱床では、一般に下位から上位に向けて珪鉱→黄鉱→黒鉱の順に分布することが知られているが、KGCによる地質モデルの方がこれに整合的である(第2図)。さらに、この地質モデルによれば黒鉱と黄鉱の3次元分布も明らかにでき(第3図)、資源開発計画の策定に寄与できる。

スラウェシ島(インドネシア)の大規模斑岩銅鉱床に対してもKGCを適用し、金属の種類によって濃集部の位置が異なることなどの特徴を抽出している。



第2図 主成分を利用した2つの手法による地質モデルの比較



第3図 KGC地質モデルによる黒鉱(緑)と黄鉱(黄)の3次元分布

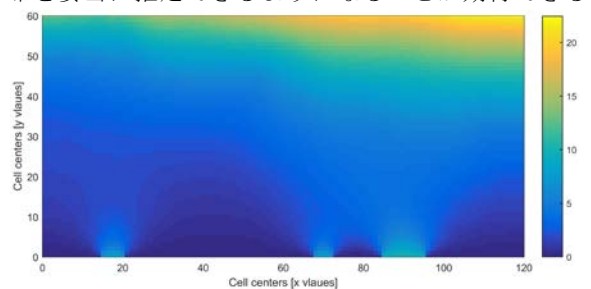
3. 移流拡散方程式を用いた SPG アプローチ

KGCによる地質モデルと金属高濃度部を重ね合わせ

たところ、高濃度部は黒鉱と黄鉱の分布と重なるので、高濃度部のトレースは、鉱液の主要なパスに対応する可能性が高い。よって、鉱液の移動と金属の沈殿は移流拡散現象で近似できると考えられる。移流拡散方程式による金属濃度の物理モデル $s(\mathbf{u})$ (\mathbf{u} は領域での任意の地点の座標)、サンプルデータのクリギングによる推定値 $z^*(\mathbf{u})$ 、および移流拡散方程式によるサンプル点での計算値を用い、これとクリギングによる \mathbf{u} での推定値 $s^*(\mathbf{u})$ は、次式で条件付き推定 $\zeta(\mathbf{u})$ になるように組み合わせられる。

$$\zeta(\mathbf{u}) = z^*(\mathbf{u}) + [s(\mathbf{u}) - s^*(\mathbf{u})]$$

以上がSPGの基本原理である。非線形最小二乗法によりサンプルデータから直接、移流拡散方程式を解けるのが理想であるが、収束性に問題がある。そのため、フォワード計算によりKGCによる濃度分布に適合するようにソースの位置とパラメータの値を与えた。その結果を第4図に示す。まだ十分な計算結果ではないが、SPGによれば、サンプルデータが殆どない疎な領域で金属濃度分布を妥当に推定できるようになることが期待できる。



第4図 移流拡散方程式による金属濃度分布(濃度は相対値)

4. まとめ

黒鉱鉱床での金属濃度分布を例として、主成分分析を用い、クリギングによる空間モデリングに地質情報を組み込むことの有効性を実証できた。また、移流拡散方程式という物理法則もクリギングで考慮することで、地質学的により妥当な空間モデルの作成を進行させている。
謝辞：黒鉱鉱床の貴重なボーリング調査資料のご提供と整理にご協力いただいたDOWAメタルマイン(株)、エコシステム花岡(株)に深甚の謝意を表したい。

文献

- Halada, K., Shimada, M. and Ijima, K. (2008) *Materials Transactions*, vol. 49, no. 3., pp. 402-410.
Ilyas, K., Kashiwaya, K. and Koike, K. (2016) *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 165, pp. 174-188.