

# 山岳トンネル掘削データに基づく地質モデリングに適した地球統計学的解析法

久保 大樹\*・奥澤 康一\*\*・小池 克明\*

## Geostatistical Analysis Method Suitable for Geological Modeling Using a Mountain Tunneling Dataset

Taiki Kubo\*, Koichi Okuzawa\*\* and Katsuaki Koike\*

\*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: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

\*\*大林組 技術研究所 Technical Research Institute, Obayashi Corporation, 640 Shimokiyoto 4-chome, Kiyose City, Tokyo 204-8558, Japan.

キーワード：ヒ素，地球統計学，クリギング，空間モデリング，トンネル掘削

Key words：Arsenic, Geostatistics, Kriging, Spatial modeling, Tunnel excavation

### 1. はじめに

山岳トンネルの掘削に際して、ヒ素をはじめとする重金属の濃度分布を適切に把握することは、廃土による環境汚染の防止やその対策のコスト削減のために重要となる。地層中の金属濃度の空間分布推定法としては、鉱床探査などに広く利用されている地球統計学があげられるが、山岳トンネル掘削工事において適用された例はほとんど見当たらない。これは資源調査の場合と異なり、トンネル掘削時に取得される地質情報の種類や空間密度が、工期やコストなどの制約により、極めて限定的となるためである。

そこで本研究では、実際のトンネル掘削時に取得された地質調査データを用いて、ヒ素などの重金属濃度と地層の分布の統計的性質を明らかにしたうえで、地球統計学の適用性についての検討を行った。さらに、これらの結果に基づいて適切な空間分布モデルを作成するために必要となる情報についての議論、およびトンネル掘削現場に適した地球統計学によるモデリング手法の開発を行い、調査コストの削減と推定精度の向上を目指す。

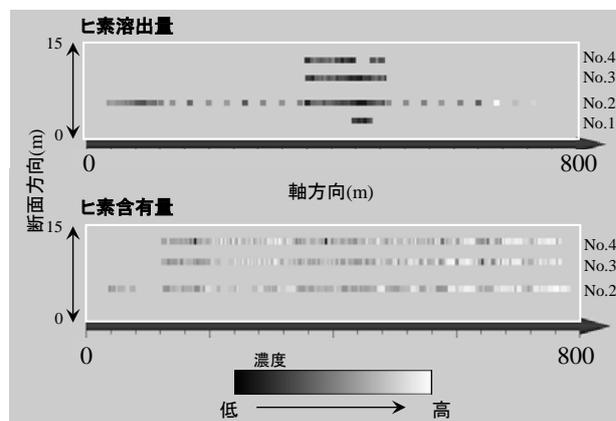
### 2. 重金属濃度と地質データの統計分析

解析には、山岳トンネル掘削時に取得された地質調査データを用いた。当該地山は主に砂岩と頁岩から構成される堆積岩である。本掘削現場では同一の切羽から複数のオールコアボーリングとノンコア削孔が行われており、XRFによる重金属含有量の測定と溶出試験が実施されている。本稿では、最もデータの取得量が多いヒ素溶出量とヒ素含有量を用いた解析について述べる。両者の分布を第1図に示す。それぞれのデータはひとつの連続したボーリングから取得されたものではないが、トンネル断面方向に対する位置を基準として便宜的にボーリング No.1~4 と定義する。また、ほぼ同一の高さで掘削されているため2次元データとして扱う。

各ボーリングでは地質柱状図が作成されており、地層の種類や変質程度などの情報が記録されている。地層を主要な頁岩、砂岩、頁岩・砂岩互層、その他(凝灰岩など)に分類し、それぞれの地層におけるヒ素溶出量と含有量のばら

つきをボックスプロットで第2図(a, b)に示す。ヒ素溶出量はデータ数が少ないため正確性に欠けるが、砂岩と比較すると頁岩層中のヒ素濃度が高い傾向にあることが確認できる。互層においても高い濃度が示されており、これについては砂岩・頁岩のいずれが優勢であるかによって細分化できる可能性があるが、明確な記録がなされていないため現段階での分類は不可能である。その他に分類される凝灰岩や混在岩層は、当該区間においてわずかな範囲に限定されるため、今回は議論の対象としない。

当該工区においては地山評価パラメータとして利用される正規化削孔速度比(以下、NDVR)の計測が行われている。NDVRの計測位置はボーリング No.2 とほぼ同じであり、1次元のデータではあるが、第1図に示したヒ素濃度測定区間を含む約1000mの解析範囲中に51,503点という高密度の情報が得られている。ヒ素濃度と同様に各地層におけるNDVRのばらつきを第2図(c)に示す。NDVRの数値は地山の状態が悪い(岩盤が弱い)ほど大きな値を示す。したがって、第2図(c)からは頁岩層が砂岩層よりも軟弱な岩盤であることがわかり、ヒ素濃度のばらつきと組み合わせれば、このような地層にヒ素が濃集していると解釈できる。



第1図 ヒ素溶出量・含有量のデータ取得位置と濃度

### 3. ヒ素濃度の空間分布モデリング

前項の検討よりヒ素濃度の空間分布モデリングに際して、地層分布を補助変数とした多変量解析を利用できる可能性が示された。しかしながら、数値データではない地層の分類を地球統計学解析に組み込むのは困難であるため、地層の分類と関連する NDVR を用いてヒ素濃度の co-kriging (以下、CK) を実施した。いずれも断面方向 15 m・軸方向 800 m の範囲の 2 次元モデルであり、計算グリッドの大きさは 1 m×1 m と設定した。また、NDVR はヒ素濃度と座標を揃えるために、1 m 間隔で平均化した値を用いた。

バリオグラムはヒ素溶出量・含有量ともに約 40 m のレンジをもつ球モデルで近似できた。NDVR とのクロスバリオグラムは、ヒ素含有量はレンジ 51 m の球モデルで適切に近似できたが、ヒ素溶出量については 300 m のレンジをもつガウスモデルが最適であるものの、フィッティングは十分ではない。地層中でのヒ素の存在形態など諸種の要因により、溶出量は必ずしも含有量と比例しないことが知られており(丸茂, 2007)、自然状態とは異なる二次的な数値であるともいえる。したがって、地層と密接に関連する NDVR との相関関係が含有量と比較して低いことは妥当な結果であると考えられる。

上記のバリオグラムを用いて計算された CK モデルとヒ素濃度のみを用いた OK (ordinary kriging) モデルから、ボーリング No.2 の位置での値を抽出し、第 3 図において比較する。含有量・溶出量ともに CK, OK で大差はないが、含有量の CK 結果では、100 m 付近において OK 結果には現れていない濃度の変動が見られる。100 m 付近は含有量の測定値が疎な領域であり、NDVR による補助情報の効果が確認できる。また溶出量の CK 結果では、700 m 以降の値が OK よりも高くなっている。本解析では計算の簡略化のため NDVR を 1 m 間隔で平均化しているが、使用する情報量の密度を増すことで、より詳細な空間分布モデルを構築できると考えられる。また、NDVR は多くの現場で掘削時の前方探査として利用されており(桑原ほか, 2008)、現場で計測結果が取得できることから、比較的低コストで情報の追加が可能である。NDVR を複数のボーリングで実施することにより、モデリングの精度向上が期待できる。

### 4. NDVR を用いたモデリング法の検討

前項で述べたように複数のボーリング孔で取得した NDVR を空間分布モデリングに利用することを想定し、仮想的に設定した NDVR データセットを用いた解析を行った。仮想データセットは現場で取得された 1 次元の NDVR データを 3 分割し、第 4 図 (a) のように 3 次元的に配置した。このデータに対するバリオグラムは、レンジ 10 m の球モデルで近似できた。モデリング範囲を軸方向 40 m、断面(水平)方向 10 m、断面(垂直)方向 5 m、計算グリッドを 10 cm 四方として OK を行った結果を第 4 図 (b) に示す。計算結果は軸方向には細かく変化しているが、断面方向ではボーリング周辺が一樣に引き伸ばされた不自然な分布となっている。この問題は計算に用いるデータの配置とアルゴリズムに起因する。NDVR のデータは 1 m の範囲に 20 点以上と極めて密であり、推定点の計算にレンジ内のすべての既知データを使用した場合、計算時間や必要となる機器のスペックが増加し実用的でなくなる。そのため、多くの地球統計学に対応したソフトウェアでは、計算時に使用するデータ数を制限する機能を有するが、推定点からの距離が近いものが選択される。よって、NDVR のように 1 次元的に密なデータセットでは、ひとつのボーリングのみからデータが抽出されることになり、隣接する他のボーリングの

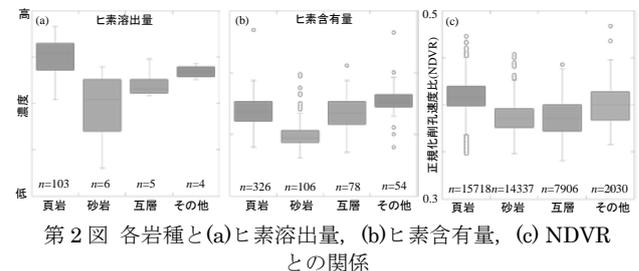
値が考慮されないため、第 4 図 (b) のように断面方向の分布が不自然な結果となる。これを改善するためには、1) 隣接するボーリングの値を優先的に取り込むアルゴリズムを構築する、2) データの平均化などにより軸方向・断面方向のデータ数の偏りを軽減する、などが考えられる。後者の方法は、元のデータセットを編集するのみで計算には既存のソフトウェアをそのまま利用できるが、NDVR を利用するメリットである情報の密度が低下する。

### 5. まとめ

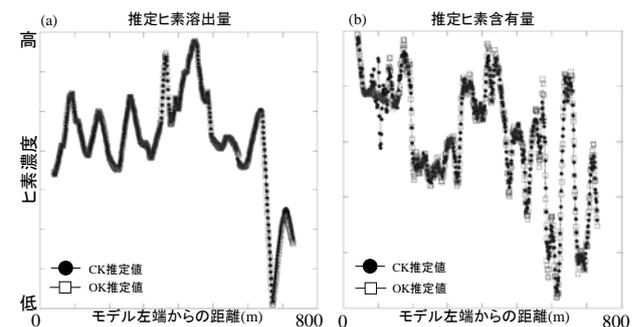
本研究では山岳トンネル掘削工事に適した重金属量の空間モデリング手法の開発を目的として、ヒ素溶出量と含有量に注目し、地層との関連付けと地球統計学的手法による空間分布推定を行った。解析の結果から、正規化削孔速度比 (NDVR) を用いた多変量解析によってモデリング精度が向上する可能性、その利用のためには計算アルゴリズムを改良する必要性が示された。この解析結果に基づき、より実務的な解析フローや計算ツールの開発を行っていく予定である。

### 文献

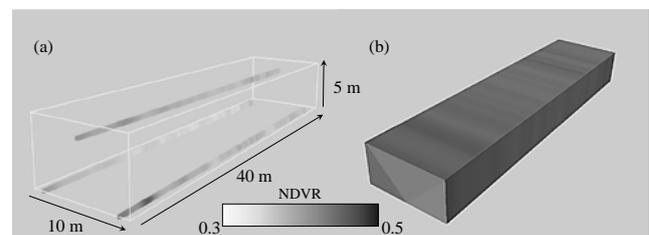
- 丸茂 克美 (2007) 自然由来の重金属に起因する土壤汚染問題への地球科学的アプローチ. 地学雑誌, vol. 116, no. 6, pp. 877-911.  
 桑原 徹・畑 浩二・稲川 雄宣・平川 泰之 (2008) 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術. トンネル工学論文集, vol. 18, pp. 1-10.



第 2 図 各岩種と (a) ヒ素溶出量, (b) ヒ素含有量, (c) NDVR との関係



第 3 図 OK と CK によるボーリング孔に沿った (a) ヒ素溶出量, (b) ヒ素含有量の推定値の比較



第 4 図 (a) 仮想 NDVR データの分布と (b) OK による空間分布推定結果