

トンネルにおけるノンコア削孔スライムを用いた 自然由来重金属汚染評価

奥澤 康一 鈴木 健一郎 桑原 徹
井出 一貴 三浦 俊彦

Pollution Evaluation of Naturally Caused Heavy Metals with Cuttings of non-Core Drilling

Koichi Okuzawa Ken-ichirou Suzuki Toru Kuwahara
Kazuki Ide Toshihiko Miura

Abstract

Even if risks of naturally caused heavy metal pollution occur in mountain tunneling, a long time and significant costs are required to evaluate pollution in tunnel spoils. To perform an appropriate evaluation while reducing time and cost, techniques evaluating pollution in a mountain tunneling site with cuttings of non-core drilling, and the spatial modeling of pollution data using the geostatistical method are studied. The primary results obtained are summarized as follows. The leaching amount of arsenic of the cuttings is strongly correlated with that of boring cores, and the contamination of cuttings from the already drilled sections can be prevented by flushing the boreholes adequately. Because the leaching amount of arsenic exhibits a clear spatial correlation, the arsenic data can be interpolated precisely.

概 要

山岳トンネルの掘削工事において自然由来重金属等を含むズリの発生が想定される場合、重金属汚染評価のための試料採取や分析には多額の費用や時間がかかる。そこで、重金属評価を適切に行いつつ、工期やコストの削減が可能な方法である、ノンコア削孔スライムを用いた重金属分析について、トンネル等の工事現場を対象に検討を行った。スライムやスライムを模擬した試料の重金属溶出量はボーリングコア等とよく似た傾向を持ち、孔内洗浄により既削孔区間からの粒子の混入も1%程度に抑えられることができた。また、複数のボーリングデータがある場合に、ボーリング孔間の重金属分布を推定する手法として、地球統計学を用いた重金属データの補間について実現場のデータを基に検討したところ、重金属溶出量には空間的相関構造が存在し、データのある地点間の重金属溶出量を補間することができた。

1. はじめに

平成22年4月に改正土壌汚染対策法¹⁾(以下土対法)が施行され、旧法では対象外とされていた自然由来の重金属等を含有する土壌についても法の対象となった。ただし、土対法の対象は、破碎せずに目開き2mmの篩を通過した土壌とされている。岩盤を掘削した際に排出されるズリの大半は2mm以上の粒径であることから、法の対象外となる。しかしながら、多くの公共工事では、国土交通省がまとめた「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(暫定版)」²⁾に示された、岩石の掘削ズリの全量を目開き2mmの篩を通過するまで粉碎し、土壌として試験に供する方法がしばしば採用されている。

山岳トンネルの工事現場において掘削土が自然由来重金属等を含むリスクがある場合、重金属等の測定に掘削ズリを使用する場合と、ボーリングコア試料を使用する場合がある。しかしながら、山岳トンネルの坑口付近には広大な土地が無いことが多く、仮置き場の用意が難し

いことがしばしばある。平成15年3月環境省告示第18号の分析(以下環告18号法)には、試料採取から分析結果が出るまで3~7日程度かかることが多く、その間に出るズリを保管できるだけの仮置き場が必要となる。

一方で、オールコアボーリングは高コストであり、施工サイクルへの影響も大きいことが課題である。また、基準値を超過した要対策土の見逃しを防ぐには詳細に重金属分析を行うことが望ましいが、分析数が増えればその分費用も増加する。

そこで筆者らは、重金属評価を適切に行いつつ、工期やコストを削減する方法の確立を目的として、(1)ノンコア削孔スライムを用いた重金属評価、(2)地球統計学を用いた重金属データの補間、という2つの観点から研究を行った。ノンコア削孔スライムによる重金属評価のイメージをFig.1に示す。本論ではこれらの検討結果について述べる。

2. ノンコア削孔スライムを用いた重金属評価

2.1 ノンコア削孔スライムを用いた重金属評価の課題

ノンコア削孔スライムとは、ノンコア削孔切羽前方探査などの際に発生する、岩屑と削孔水の混合物である。ノンコア削孔スライムによる重金属等の評価を導入するには、スライムによる分析評価結果が、掘削ズリ等の結果とほぼ同等となることを確認することが不可欠である。これに関連して、①削孔水に一度触れた試料を再び溶出試験に供するため、従来の試料とは異なる評価結果になる可能性があること、および②評価区間以外のスライムが混入する可能性があること、という2つの課題があげられる。

①の課題に対し、筆者らはスライムを目開き 2mm の篩にかけ、篩を通過しなかった粒子のみを抽出し、目開き 2mm の篩を通過するまで粉砕して溶出試験に供することを提案している³⁾。以下では、岩石試料を目開き 2mm の篩を全量が通過するまで粉砕して溶出試験に供する方法を、一般的な前処理方法と呼ぶ。スライム中の粒径が 2mm を超過する粒子のみを抽出して粉砕することで、溶出試験に供する粒子における水に触れていない新鮮な面の割合が増え、上記の試料の処理方法による試料の状態に近づけることができる。さらに採取時に水切りがしやすく、試料の分析前処理のうち最も時間のかかる風乾時間を短縮できる。

②の課題に対しては、評価対象区間を削孔する前に、孔内洗浄を十分に行い、既掘削区間のスライムが混入することを防ぐ方法を提案している³⁾。この課題に対しても、2mm を超過する粒径を持つ粒子のみを評価に用いる事で孔内洗浄時間を短くする効果がある³⁾が、粗粒分と細粒分の間で重金属の偏りが生じる可能性の検討が残されていた。

そこで次節以降では、スライムとボーリングコア(岩石試料)の重金属溶出量の関係、混入を抑制するための孔内洗浄の効果、粒度毎の重金属の偏り、について検討した結果を報告する。

2.2 スライムとボーリングコアの重金属溶出量の関係

2.2.1 試料採取および分析方法

砒素溶出量についてはトンネルの同一の区間から採取されたボーリングコアとスライムの比較を行った^{4),5)}。検討対象トンネルの地質は砂岩および頁岩から構成されており、全体的に大小様々な規模の断層が多いという特徴がある。砒素、水銀、セレン、ふっ素、ほう素が土壌溶出量基準値を超過する恐れがあり、1本のボーリングコア試料の分析結果から対策の要否を判定していた。本研究では、頁岩主体の 125m 区間のスライムとボーリングコアを採取して、重金属溶出量の比較検討を行った。

スライム試料の試料調整フローを Fig. 2 に示す。検討区間では、ドリルジャンボを用いて 45m のノンコア削孔切羽前方探査が 3 回実施され、スライムを 3m 毎に 1 試料採取し、目開き 0.85mm の篩を用いてその場で水切り

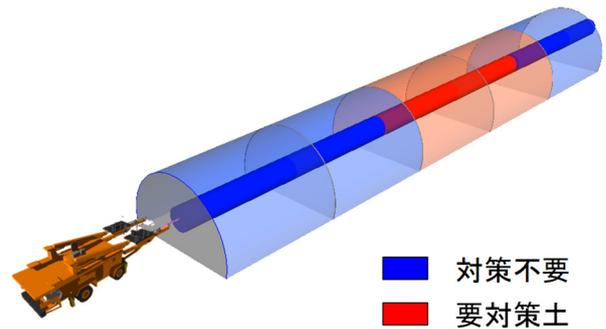


Fig. 1 ノンコア削孔スライムによる重金属汚染評価のイメージ

Conceptual Diagram of Evaluation of Heavy Metal Pollution with Cuttings of Non-Core Drilling

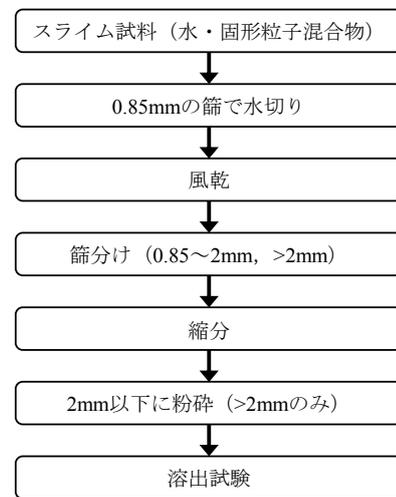


Fig. 2 ノンコア削孔スライムの試料調整フロー
Flow Chart of the Sample Preparation of the Cuttings

をした。既往削孔区間からのスライム粒子の混入を抑制するため、9m 毎に 5 分間の孔内洗浄を行った。採取したスライムを室温で乾燥(風乾)させ、篩を用いて粒径が 0.85~2mm と 2mm を超過する粒子に区分した。区分した試料の一部を、粒度分布の偏りが出ないように取り出し(縮分)、粒径が 2mm を超過する粒子については目開き 2mm の篩を通過するまで粉砕して、溶出試験を行った。

ボーリングコア試料については、スライムと同様に 3m 間隔で分析を行った。スライムは削孔区間の岩片が混ざって出てくることから、分析対象区間の平均的な溶出量データを取得するため、5 点混合法にてボーリングコアを採取した。3m の区間を 5 等分し、細分した区間の中央付近から試料を採取し、風乾、粉砕後に均等に混ぜ合わせて 3m 区間の分析試料とした。以上の試料を環状 18 号法により分析した。

2.2.2 スライムとボーリングコアの分析結果 検討

対象区間では全試料で砒素が土壌溶出量基準値を超過し (Fig. 3), 坑口から 570~600m 付近で比較的低く, 600m 以降では上昇し, 650m 以降再び低下する傾向が認められた。610m 以降は砒素溶出量の変動幅が大きくなるものの, 変動の幅はコアとスライムで同様の傾向となっている。ノンコア削孔切羽前方探索トンネルナビ[®]では, 610m 以降は多亀裂帯の存在を示したことから, 同区間では断層が数多く分布すると考えられ, 異なる砒素溶出量を持つ地層が断層によって複雑に入り組むことにより, 610m 以降では地山の砒素溶出量のばらつきが大きくなっている可能性が考えられる。

トンネル軸方向に砒素溶出量が大きくばらつく区間では, 同一切羽内でもばらつきが大きい可能性が高いと考えられる。そのような地点では, 若干でも離れた場所で採取されたスライムとボーリングコアの砒素溶出量を比較して違いが認められても, その違いが試料の採取方法によるものなのか, 地山の砒素溶出量の違いによるものかは分からない。そこで, 比較的ばらつきの少ない 560~610m 区間を対象に, コアとスライムの砒素溶出量の相関関係を検討した。その結果, 粒径が 0.85~2mm のスライムよりも, 粒径が 2mm を超過する粒子のみを抽出して 2mm 以下に粉砕した方が, ボーリングコア試料に近い傾向があることが確認された (Fig. 4)。スライムの方がボーリングコアよりも砒素溶出量がやや低い傾向にあり, 評価にあたっては係数をかけて補正する必要がある。スライムの方が低くなる要因としては, 粒度分布の違いに起因する比表面積の違いや, 粒子の一部の表面にある砒素が削孔水で洗い流された可能性が考えられる。

2.3 スライムを模擬した試料による室内試験

前節で記載した区間では, 砒素以外の重金属溶出量が非常に低かったため, 鉛, ふっ素, ほう素, セレンについて, 他のトンネルから掘削ズリ試料を採取し, スライムを模擬した試料 (以下模擬スライム) を作製して, 一般的な分析方法との比較を行った。

2.3.1 試料調整および分析方法

砂岩および頁岩の掘削ズリ計 14 試料を風乾し, 粗粉砕した後, 粒度分布に偏りが出ないようにしながら, それぞれの試料を①~③の 3 つに区分した (Table 1)。①の試料は目開き 2mm の篩を用いて粒径が 2mm を超過する粒子のみを抽出し, 固液比 1:10 の割合で水に投入して 1 分間振とうし, 風乾後目開き 2mm の篩を通過するまで粉砕して溶出試験に供した。②の試料は篩分けせず浸水固液比 1:10 の割合で水に投入して 1 分間振とうし, 風乾後全量が目開き 2mm の篩を通過するまで粉砕して溶出試験に供した。③の試料は, 一般的な分析方法と同様に, 風乾後浸水させずに全量が目開き 2mm の篩を通過するまで粉砕し, 溶出試験に供した。

2.3.2 模擬スライムの分析結果

模擬スライムと浸水しなかった試料の分析結果を Fig. 5 に, 試料毎に 3 パターンの分析結果の比を求め, それらの平均値を Table 2

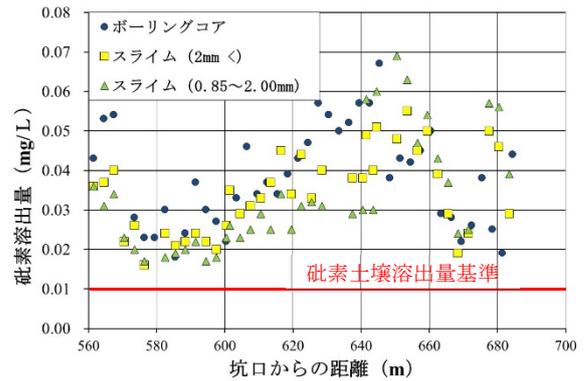


Fig. 3 スライムとボーリングコアの砒素溶出量変化⁴⁾
Changes of the Leaching Amount of Arsenic of the Cuttings and Boring Cores

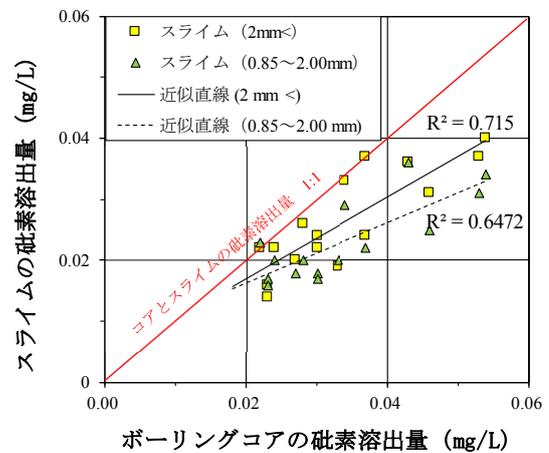


Fig. 4 スライムとコアの砒素溶出量の相関性
Correlation of the Leaching Amount of Arsenic between the Cuttings and Boring Cores

Table 1 模擬スライムの前処理手順
Preparation Procedure of Simulated Cuttings and Normally Processed Sample

条件\試料	①	②	③
事前の篩分け	○(2mm<のみ抽出)	×	×
浸水・振とう	○	○	×
風乾後 2mm 以下に粉砕	○	○	○

に示す。各元素ともに, 大部分のデータが土壌溶出量基準値以下の低い値であり, ①, ②パターンの両方で通常の溶出試験結果である③パターンと正の相関を持つことが確認され, 粒径 2mm 以上の粒子を抽出した①パターンの方が, 全粒径を浸水させた②パターンよりも③パターンに近い結果が得られた。一方, ②パターンの結果は①と比べて元素毎の傾向の違いが明瞭であった。また, こ

これらの結果から、スライムから2mm以上の粒子を抽出して溶出試験に供する方法の優位性が確認された。

2.4 孔内洗浄によるスライム混合の抑制

孔内洗浄により、既削孔区間からのスライムの混入をどれほど低減できるかA～Cの3現場において計4回検討を行った。A トンネルではドリルジャンボを用いて30m削孔し、削孔区間の地質は珪質片岩、泥質片岩であった。B トンネルでは2回の検討を行い、いずれもドリルジャンボを用いて45m削孔し、削孔区間の地質は頁岩であった。C トンネルでは水圧ハンマーを用いて78m削孔し、削孔区間の地質は砂岩と粘板岩であった。洗浄水の流量は各削孔機の最大流量とし、ドリルジャンボで約60L/min、水圧ハンマーでは約150L/minであった。洗浄開始直後の5分間は、ビットを前後させてスライムの排出を促進させた。その後はビットを静止させて孔の先端から水を流し続け、孔口から出てくる洗浄水を採取し、SS(浮遊物質量)の測定を行った。

その結果、洗浄水中のSSは洗浄開始後10分で元のスライムの1%程度に低下した(Fig. 6)。これは、10分間洗浄を行ってから重金属の評価を行う区間を削孔すれば、得られるスライムに含まれる既削孔区間から混入した粒子の割合は1%程度になることを意味する。10分以降はSSが低下せず、孔壁の崩壊により孔内で新たに固体粒子が形成されているためにSSが低下しないものと推定される。特にSSが下がらなかったのはトンネルBである。トンネルBでは、頁岩が乾湿の繰り返しにより岩石が細粒化するスレーキングを起こすことが確認されており、他のトンネルよりも孔壁が崩壊しやすかったと考えられる。

2.5 粗粒分のみによる重金属評価の妥当性の検証

未固結堆積物においては、細粒な地層に重金属等が多く含まれる場合があることが知られている²⁾。固結した岩石をノンコア削孔により粉砕する際にも、細粒分に重金属等が偏在する可能性を検討した。様々な砒素溶出量を持つ頁岩および砂岩の掘削ズリ6試料をジョークラッシャーで粗砕し、四分法を用いて試料を2つに分け、1つは4段階に篩分けをして、各試料の砒素の溶出量と含

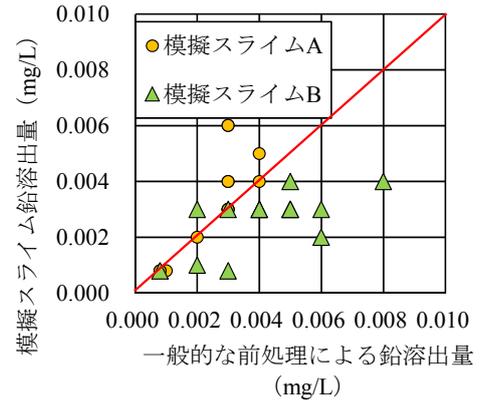
Table 2 模擬スライムと一般的な溶出試験を実施した試料の重金属溶出量の比の平均値

Ratio of the Averages of Leaching Amount of Heavy Metals between Simulated Cuttings and Normally Processed Sample

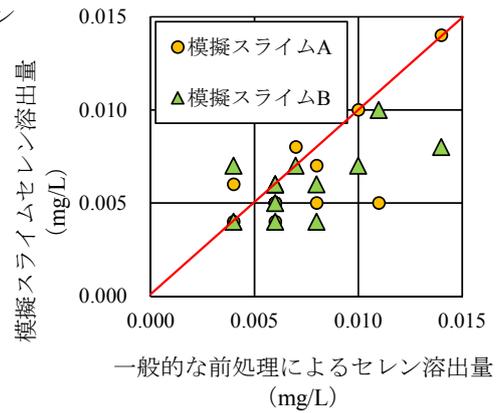
	鉛	セレン	ふっ素	ほう素
A/C	0.83	0.84	1.00	0.91
B/C	0.70	0.83	1.23	0.54

(①および②は模擬スライム、③は通常の前処理方法による溶出試験結果)

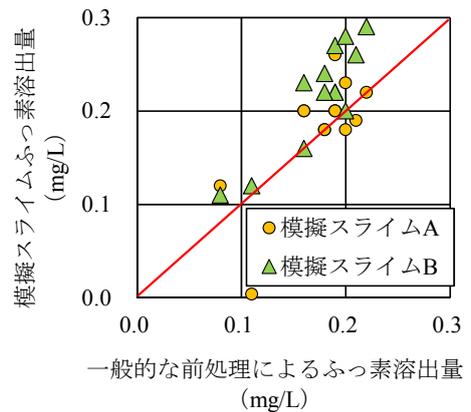
(a) 鉛



(b) セレン



(c) フッ素



(d) ホウ素

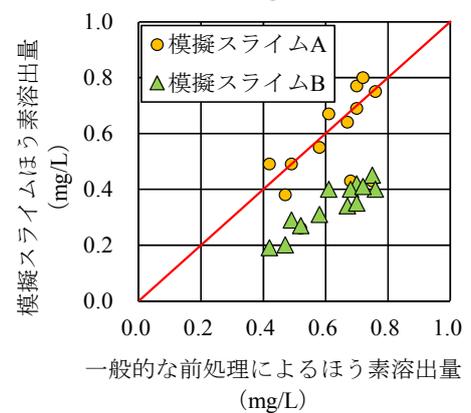


Fig. 5 模擬スライムと一般的な前処理による試料の溶出試験を実施した試料の重金属溶出量の関係。赤線は両社が1:1の線を示す。

Relationships of Leaching Amount of Heavy Metals between Simulated Cuttings and Normally Processed Sample

有量を分析した。もう1つは篩分けをせずに砒素の溶出量と含有量を分析した。溶出試験は、2mmを超過する粒子は2mm以下に粉碎し、環告18号法に準じて行った。含有量は、微粉碎した試料を強酸で溶解させ、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)を用いて分析した。

粒度毎に細分せず、全量を溶出試験ないし含有量試験に供した場合の分析値を1とした時の、粒度毎に細分して分析した溶出試験および含有量試験の結果を Fig. 7, 8 に示す。溶出試験結果は、0.85mm未満以下の粒子の砒素溶出量が大きく、他の粒径の試料は篩分けをせずに全量を2mm以下に粉碎した場合の溶出量に近い(Fig. 7)。一方、含有量は細粒分と粗粒分ではほぼ同じであり(Fig. 8)、砒素は各粒径の試料に均等に含まれていることがわかる。したがって、固結した地山については、スライムで2mmを超過する粒子のみを抽出して評価を行っても、重金属の偏在という問題は生じない場合があることがわかった。本検討は1現場のみでの結果であることから、スライムによる重金属等の溶出量評価を行う場合には、同様の検討を行うことが望ましいと考えられる。

3. 地球統計学を用いた重金属データの補間

離散的に分布するデータの間の値を予測する手法の一つとして、種々の分野で地球統計学⁷⁾が用いられている。地球統計学は、元々は鉱山の採掘現場において、鉱石品位の確率分布を予測するために開発された手法で、様々な現象の空間的、時間的な関連性をモデル化して推定を行う統計学である。同手法を用いた場合、様々な地質パラメータを解析に加えることで、より精度良く重金属分布を評価できる可能性があり、データ間の補間による詳細評価、分析数や試料採取地点配置の最適化、切羽前方のデータ未取得区間の予測等に適用できる可能性がある。そこで、2つの現場で得られた重金属溶出量データを対象に、その空間的な相関性や地質パラメータとの関連性の有無についての検討を行った。

3.1 山岳トンネルにおける砒素溶出量の2次元分布

3.1.1 解析データ

2章で記述したトンネルの125m区間では、同一の断面につき4本のボーリングコアが掘削されている。このうち、1断面につき3本のボーリングコアから試料を採取し、砒素溶出量を分析した。1本のボーリングコアは2章で記述したように3m間隔で試料を採取しているが、残りの2本については、5m間隔で試料を採取している。コア試料の砒素溶出量の分析方法は、2章で記述した通りである。砒素溶出量の分布を Fig. 9 に示す。なお、地球統計学による解析で扱うことができるデータは、正規分布に従うデータのみである。本章で扱う溶出量データは、そのままでは正規分布に従わないことから、すべての溶出量データを常用対数に変換し、解析に用いている。

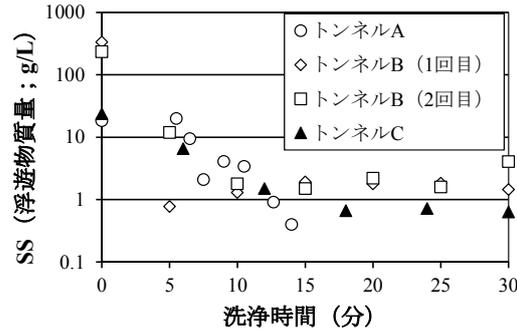


Fig. 6 洗浄水中のSS(浮遊物質質量)の時間変化
Temporal Change of Suspended Solids Contained in Bore-Hole Flushing Water

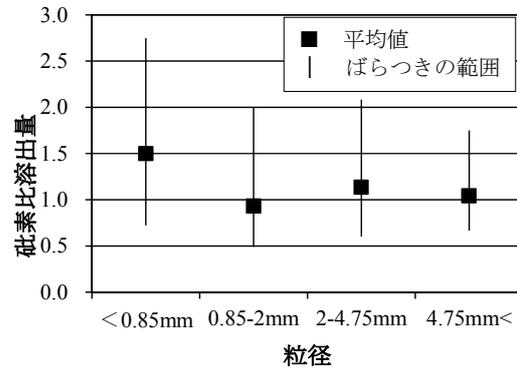


Fig. 7 粒径ごとの砒素比溶出量
Difference of Ratio of Leaching Amount of Arsenic for each Grain Size

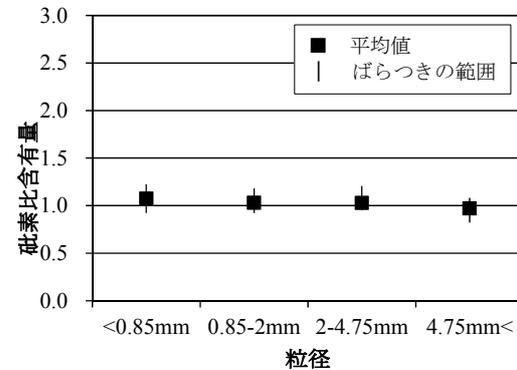


Fig. 8 粒径ごとの砒素比含有量
Difference of Ratio of Content of Arsenic for Each Grain Size

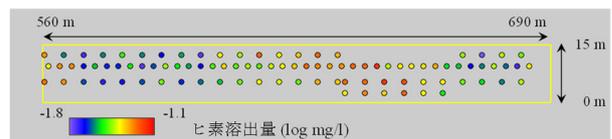


Fig. 9 地球統計解析に用いたトンネル内の砒素溶出量データ分布
Distribution of Leaching Amount of Arsenic Data for Geostatistical Analysis

3.1.2 重金属溶出量の空間分布推定 砒素溶出量の空間的相関性を検討するため、全データを用いて普通クリギング(OK)の適用を試みた^{5),8)}。OKとは、バリオグラムと呼ばれる測定データから空間確率場の特性を推定する方法を用い、空間的確率場を考慮して、任意の地点の値を周囲のデータの重み付平均から求める方法である⁹⁾。解析プログラムには SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software)¹⁰⁾ を使用した。各ボーリングは、ほぼ同一水平面でトンネル軸方向へ掘削されているため、OKの計算グリッドは1×1mの2次元モデルとした。データのバリオグラムは球モデルで近似でき、レンジ(データ間に相関性が存在する最長距離)は約40mである。レンジはデータ間隔と比べて十分に大きく、OKを用いたデータの補間は十分に可能であると考えられる。OKによる砒素溶出量の推定空間分布をFig. 10に示す。OKによる解析結果は、同じ頁岩の中であっても、砒素溶出量が高い領域と低い領域が混在することを示している。

3.2 大規模切土工事における重金属溶出量の3次元補間

これまでの記述は山岳トンネルで取得したデータに関するものであった。しかしながら、山岳トンネルでは3次的に分布する重金属データを取得することができなかつたため、大規模な切土工事を対象に、地球統計解析を用いて重金属データの3次的な補間を行った例について以下に記す。

3.2.1 解析データ 本検討の対象としたデータは、大規模な切土工事で得られたもので、60×120mのエリアを対象に、30m四方を1区画として各区画で1本ずつ計8本のノンコアボーリングを実施し、採取されたスライムの重金属溶出量を分析したものである¹¹⁾。スライム試料を風乾後、篩分けで2mm以上の粒径の粒子のみを抽出し、環告18号法に準じて溶出試験を行った。各ボーリングの掘進長は19~25mで、地表面から10mまでは地表からの風化が及んでいたため、10m以深から1m間隔で試料を採取した。

3.2.2 重金属溶出量の3次元解析 本検討では、砒素、セレン、ほう素の各溶出量を対象とした。各溶出量データには空間的相関性が認められ、バリオグラムは球モデルで近似可能であるが、レンジは元素ごとに異なる。砒素は水平、鉛直方向のレンジがそれぞれ50、14mと方向によって異なるため、解析には異方性モデルを使用した。一方、セレンとほう素は等方性モデルを採用した。セレンのレンジは20m、ほう素は14mであった。セレンとほう素については、レンジがボーリング孔間距離よりも短いため、OKによる高精度の解析は難しく、ここではシミュレーション法の一つである Sequential Gaussian Simulation(SGS)の適用を試みた結果について述べる。SGSは乱数を用いた確率シミュレーションである。解析結果は乱数発生ごとに異なることから、10回解析を行い、その平均値を最終結果とした。計算グリッドは1×1×1m

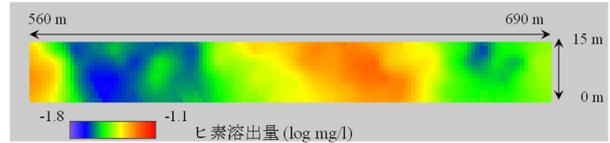


Fig. 10 普通クリギング (OK)による砒素溶出量の空間分布推定結果
Inferred Spatial Distribution Map of Leaching Amount of Arsenic by Ordinary Kriging Analysis

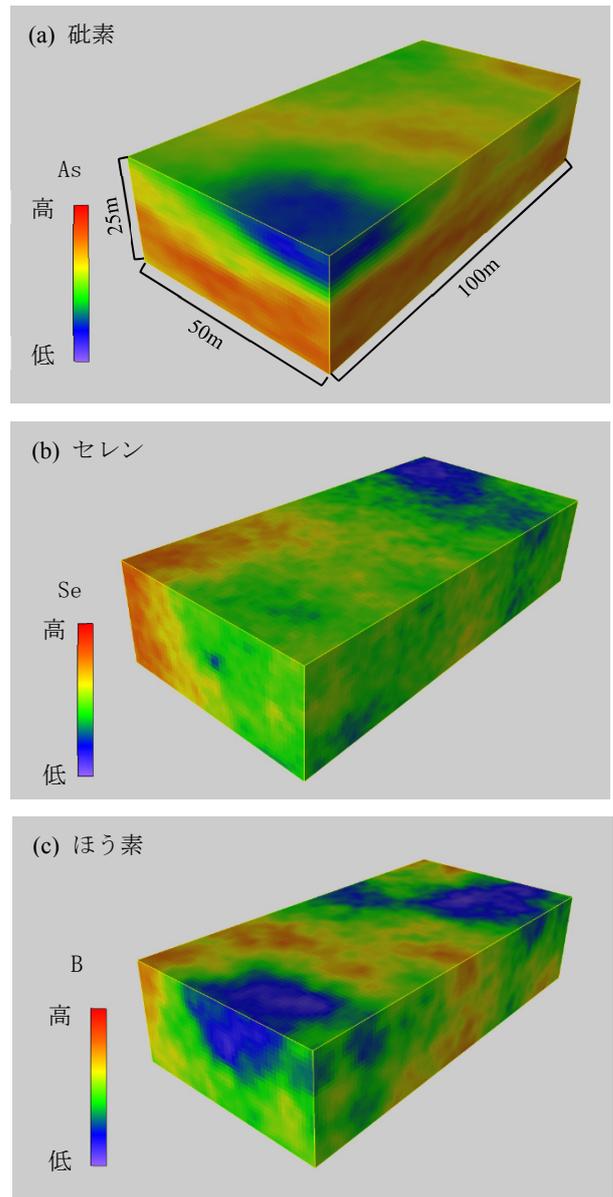


Fig. 11 Sequential Gaussian Simulation (SGS)による重金属溶出量3次元分布解析結果¹¹⁾
3D Analysis of Leaching Amount of Heavy Metals with Sequential Gaussian Simulation

の3次元モデルとした。解析範囲は、水平方向は50×100m、鉛直方向は25mとし、地形面は考慮に入れずに解析を行った。解析結果をFig. 11に示す。各元素共に解析範囲中

央部で帯状に溶出量の高い領域が認められ、砒素溶出量は深部ほど高い傾向が認められた¹¹⁾。SGSを用いて解析を行う場合、レンジがボーリング孔間よりも短い場合でも補間が可能であることが確認された。

4. まとめ

重金属評価を適切に行いつつ、工期やコストを削減する方法として、ノンコア削孔スライムを用いた重金属分析および地球統計学を用いた重金属データの補間について、実現場を対象として検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) ノンコア削孔スライムについては、2mm以上の粗粒な粒子のみを分析に用いた場合でも、砒素溶出量はボーリングコアと正の相関を持ち、孔内洗浄により既削孔区間からの粒子の混入も1%程度に抑えられることを確認した。ただし、スライムの方がボーリングコアよりも重金属溶出量が低い傾向がみられ、かつ本研究で検討した現場数も限られることから、最初はスライムとボーリングコアを併用して重金属評価を行い、相関性の確認やスライムの分析結果の補正係数の決定を行う事が望ましい。
- 2) 地球統計学の適用性検討では、重金属溶出量は空間的相関性を持ち、データのある地点の間の砒素溶出量の補間が可能であることを確認した。

謝辞

地球統計解析にあたっては、国立大学法人京都大学小池克明教授、久保大樹研究員にお世話になった。記して深謝致します。

参考文献

- 1) 土壤汚染対策法(平成十四年法律第五十三号)平成二十九年六月二日公布(平成二十九年法律第四十五号)改正 http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=414AC0000000053, 2017.6
- 2) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル検討委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(暫定版)，90p.，2010.3
- 3) 奥澤康一，他：ノンコア削孔スライムを用いた切羽前方重金属予測技術に関する考察，土木学会第70回年次学術講演会，III-066，pp.131-132，2015.9
- 4) 奥澤康一，他：ノンコア削孔スライムを用いた切羽前方重金属予測技術に関する考察(その2)，土木学会第71回年次学術講演会，III-432，2016.9
- 5) 奥澤康一，他：山岳トンネル掘削ズリのヒ素溶出量の簡易的な評価方法の試み．第14回岩の力学連合会国内シンポジウム，講演集，106，6p.，2017.1
- 6) 桑原 徹，他：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.1-10，2009.11.
- 7) Goovaerts, P.: Geostatistics for Natural Resources Evaluation, 483 p., Oxford University Press., 1997.1
- 8) 奥澤康一，他：地球統計学を用いた山岳トンネル掘削ズリのヒ素溶出量空間分布評価の試み，日本応用地質学会平成28年度研究発表会講演論文集，pp.141-142，2016.10
- 9) 正路徹也，小池克明：講座「地球統計学」クリギング：誤差を考慮した空間データの補間，日本地熱学会誌，29，4，pp.183-194，2007.4
- 10) Stanford University: SGeMS Stanford Geostatistical Modeling Software, <http://sgems.sourceforge.net/>, 2018年9月23日閲覧
- 11) 奥澤康一，他：大規模切土工事におけるノンコア削孔スライムと地球統計学を用いた重金属の3次元分布評価の試み．土木学会第72回年次学術講演会，III-297，2017.9

- 1) 土壤汚染対策法(平成十四年法律第五十三号)平成二