ハイパースペクトルイメージングを用いた 汚染土壌判定に関する研究

北海道大学 助教 有馬 孝彦

概要:

本研究では、トンネル工事で発生した掘削土の中から、自然由来重金属等を溶出する汚染土壌を迅速か つ精確にスクリーニングするために、ハイパースペクトルイメージングと機械学習を組み合わせ、現場で 取得したハイパースペクトルイメージングのみで汚染土壌を判定するモデルを構築することを目的とした。 トンネル工事現場で採取した砒素(As)を含む掘削土:21 試料を対象に、Asの溶出量、含有量等を明らか にした。また、ハイパースペクトルカメラを用いて、ハイパースペクトルイメージング(400-1,000 nm) を取得した。これらのデータを用いて、21 試料のうち、15 試料を教師データとして、溶出量等の判定を行 う深層学習モデルを構築し、残りの6 試料をテストデータとしてモデルの精度を評価した結果、Asの溶出 量、含有量に対してそれぞれ0.9038、0.7836の決定係数の判定精度を示した。以上より、本研究で構築し た判定モデルにより、Asの溶出量等を予測できる可能性が示唆された。

キーワード: 自然由来重金属, ハイパースペクトルイメージング, 深層学習, 砒素

1. 研究背景と目的

トンネル工事等で発生する掘削残土(図1)には、自然 由来の砒素や鉛等の重金属等が含まれることがあり、盛土 材等に活用する際に周辺地下水等を汚染する可能性があ る¹⁾。掘削残土から自然由来の重金属等を溶出する環境汚 染リスクの高い残土(以下,汚染土壌)をスクリーニング (汚染の有無の判定)するには、1週間以上の時間を要す る化学分析が必要となる²⁾。しかし、結果が判明するまで 掘削残土の仮置き等が必要となり、円滑な土木工事推進に 支障をきたしているため、汚染土壌を現場で簡易かつ迅速 に判定する手法の確立が重要である。

そこで本研究では、ハイパースペクトル(図2)と呼ばれる400~1,000 nm(可視光・近赤外線)の超高解像スペクトル情報を特殊なカメラで撮影し、このスペクトル情報を深層学習で解析し、スペクトルと重金属濃度との関係性を評価し、汚染土壌判定プロトコルを開発する。ハイパースペクトルの取得はカメラ撮影のように容易に行えることから、ハイパースペクトルを用いた汚染土壌判定プロトコルを確立することで、各土木施工現場での判定システム導入が期待できる。既往研究では、砒素を含有する鉱石の分類手法として、ハイパースペクトルイメージングと深層学習を組み合わせた手法が検討されていたが、砒素の濃度そのものに着目した研究はこれまで行われていない³。

以上を踏まえ,本研究は,掘削工事で発生する掘削残土

から,自然由来の重金属等を溶出する汚染土壌を,現場で 簡易・迅速・精確に判別するために,ハイパースペクトル イメージングと深層学習を組み合わせた判定手法の確立 を目的とする。



図1 トンネル工事で発生する自然由来重金属等を 溶出する掘削土



図2 ハイパースペクトルイメージングの概念図

(1) 試料採取および化学試験

トンネル掘削現場から採取した自然由来重金属の砒素 (As)を含む3種類の岩石をそれぞれ7試料ずつ(泥岩: Ms1-Ms7,凝灰角礫岩:Tb1-Tb7,安山岩:As1-An7),計21試 料を採取した。採取した岩石試料を室内で風乾後,2mm以 下に破砕し,化学試験に供した。化学試験としては、溶出 量試験,逐次抽出試験,粉末X線回折(XRD),蛍光X線分 析(XRF)を実施し,試料からのAsの溶出特性および化学・ 鉱物組成を評価した。

(2) ハイパースペクトルイメージング撮影

試験に用いた 21 試料のハイパースペクトルイメージン グを取得するために、2 mm 以下に破砕した試料を対象に、 ハイパースペクトルカメラ(SPECIM IQ:コニカミノルタ 製)を用いた。本カメラにより、400~1,000nm(可視光・ 近赤外線)の波長帯のスペクトルデータ約200 バンドを取 得した。また本カメラでは、512×512 ピクセルの高解像度 での撮影が可能であり、ピクセル毎のスペクトルデータを 取得し、各種解析に用いた。

(3) 深層学習アルゴリズムの構築

深層学習モデルとして、畳み込みニューラルネットワーク(CNN:画像データ等から様々な特徴を検出するためのネットワーク)により、Asの溶出量および含有量を判定する モデルを構築した。モデル構築にあたり、21 試料のうち15 試料を教師データとしてモデルの学習を行った。本モデル を用いて、21 試料のうち教師データに用いなかった6 試料 をテストデータとしてモデルの判定精度を評価した。また、 モデルの判定精度と試料中の Asの存在形態や溶出傾向を 踏まえ、本手法の適用性について考察を行った。なお、深 層学習プログラムは数値解析ソフトウェア MATLAB (MathWorks 社製)で実施した。

3. 結果および考察

(1)化学試験結果

図3に溶出量試験結果を示す。Asの溶出量はTb,An, Msでそれぞれ5.1~26,0.9~6.1,3.6~34 µg/L,pH はそ れぞれ8.1~8.3,8.3~10.9,8.1~9.8となった。Msと Tbの約半数の試料で土壌溶出量基準(10 µg/L 以下)に不 適合となり,Anは全ての試料で基準適合となった。pH に ついてはいずれの試料も弱アルカリ~アルカリ性を示し たが,As 溶出量と pH との相関性は認められなかった。ま た、図4に逐次抽出試験結果を示す。Asの分画は主にイオ ン交換態,有機物・硫化物態,難溶態からなることが確認 された。逐次抽出試験より得られた各分画の総量,すなわ ちAs の全含有量はTb, An, Ms でそれぞれ21.1~184, 4.5 ~14.0, 7.2~151 mg/kg となり, Tb およびMs でAs の全 含有量が高かった。これらの岩相ではXRD の結果から黄鉄 鉱も同定されていることから,本研究対象とした岩石試料 中の As は主に黄鉄鉱中に胚胎したものと,イオン交換態 として鉄等と錯体形成していると推察される。







(2) ハイパースペクトルイメージング

2 mm以下に破砕した 21 試料のハイパースペクトルデー タを図5 に示す。いずれのスペクトルデータも目立った特 徴は確認されなかったが、460-600、670-780、860-950 nm の波長帯において、各試料に特徴的な変化が確認された。





(3) 深層学習による判定結果

図6および図7に深層学習により判定されたAs全含有 量およびAs溶出量の推定結果を示す。As全含有量につい て、テストデータのAs全含有量判定結果としては、高含 有量帯(86-151 mg/kg)と低含有量帯(4.5-7.2 mg/kg)の 大まかな区分はできたが、測定値と推定値には若干の相違 (決定係数: R²=0.7836)が認められた。一方、As 溶出量に ついては、テストデータの測定値(2.8-32 µg/L)に対し て、若干の相違はあるものの、一定の判定精度(決定係数: R²=0.9038)が確認された。これは、溶出量試験により溶出 した As は主にイオン交換態に起因するものであるが、As の吸着に寄与すると考えられる岩石中の鉄やアルミニウ ムとハイパースペクトルが一定の相関性を有する可能性 があると推察された。一方、As の全含有量については、As を胚胎していると推察される黄鉄鉱や難溶鉱物等の複数 の存在形態を有しているため、Asを含有する鉱物等とスペ クトルデータとの相関性が、溶出量試験結果と比較すると より複雑となるため、機械学習により抽出・評価精度が低 下したことに起因すると考えられる。



図6 機械学習(CNN)によるAs 全含有量の判定結果



図7 機械学習(CNN)によるAs 溶出量の判定結果

4. まとめ

ハイパースペクトルイメージングと As 溶出量および As 全含有量の関係性を深層学習 (CNN) により評価し,自然由 来の As を含む汚染土壌の対策要否を判定するためのモデ ルを構築した。本モデルは As 溶出量について一定の予測 精度を有することが確認された。これは、As 溶出量に重要 や役割を果たすイオン交換態のうち、試料に含まれる鉄や アルミニウムが、ハイパースペクトルデータと何らかの相 関性を示したものと推察された。一方、As 全含有量は判定 モデルにより十分な予測結果が得られなかった。これは、 As 全含有量のうち、半分以上を占める有機物・硫化態や難 溶態と関連する鉱物とハイパースペクトルデータとの相 関性がより複雑となったために、判定精度に影響したため と考えられる。

上記のとおり、ハイパースペクトルイメージングと深層 学習により自然由来重金属等の溶出量を予測するための プロトコルを構築することができた。本プロトコルを用い て土木施工現場で汚染土壌を判定する場合には、現場毎で モデルの学習を行う必要がある。具体的には、施工前に掘 削対象となる地質帯から、教師データとして、Asを含む汚 染土壌と As を含まない普通土をあらかじめ用意し、溶出 量試験データとハイパースペクトルイメージングを取得 した後に、本研究で構築した判定モデルに対して学習させ ることで、各現場に適用したハイパースペクトルイメージ ングから溶出量を推定するモデルを構築することができ る。現場に適用したモデルを構築した後に、施工を開始し、 施工中に発生した掘削土に対して、ハイパースペクトルイ メージングを現場で取得し、そのデータを本モデルに入力 することで,評価対象となる自然由来重金属等の溶出量を 出力することが可能となり, 化学試験を要さずに, 施工現 場での土壌汚染判定が可能となる。

今後は教師データを増やすとともに、様々なパターンで As を胚胎する岩石試料に対する本モデルの適用性を検証 することで、本モデルの汎化性能や適用限界等を評価する。

参考文献

- Tabelin, C.B., Igarashi, T., Tabelin, M.V., Park, I., Opiso, E.M., Ito, M., and Hiroyoshi, N.: Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: A review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies, Science of the Total Environment, Vol. 645, pp.1522-1553, 2018.
- 2) 細川迭男, 菅井皇人, 山崎充: 自然的原因により重金属等を溶 出するトンネル掘削土判定と処理-日本海沿道東北自動車道 大館〜小坂 雪沢第二トンネルー, 応用地質, Vol. 47, No. 6, pp.346-353, 2007.
- 岡田夏男,前川陽平,大和田済熙,芳賀一寿,柴山敦,川村洋平: 選鉱プロセスにおけるハイパースペクトルイメージングと深 層学習を用いたヒ素含有鉱石の分類, Journal of MMIJ, Vol. 137, No. 1, pp.1-9, 2021.