

# ハイパースペクトルカメラを用いた有害鉱物同定手法の開発

昆 周作・阿南修司・倉上 健・古木宏和

## 1. はじめに

コンクリートの劣化をもたらす鉱物<sup>1)</sup>（以下「有害鉱物」という。）である濁沸石について、100バンド以上に分光された波長帯の反射率データを取得可能なハイパースペクトルカメラ（以下「HSC」という。）で取得したデータを解析し、同定を試みる研究を実施してきた。その結果、室内実験において濁沸石含有の判定に有効性が認められたので、報告する。

## 2. 研究背景

重力式コンクリートダムの本体工事費では、骨材製造関連費が37%と最も高く<sup>2)</sup>、骨材製造コストは事業全体の経済性に大きな影響を与える<sup>3)</sup>。このためダムの規模や立地条件にもよるが、経済性の面からサイト近傍に「原石山」を自ら開発することが一般的である。しかしながら、近年ではダム適地の減少に伴って、サイト近傍で良好な品質の原石山選定が困難となっているため、物理的性状や有害鉱物の含有といった面で品質が劣る地点でも、骨材の歩留まりを確保し、可能な限り骨材として有効利用することが必要となっている<sup>3)</sup>。

原石山の開発においては、骨材品質の区分ごとの空間的分布や賦存量を評価することを目的として、現地踏査やボーリング、調査坑による野外地質調査と、岩石の物理性状の室内試験やコンクリート配合試験を組み合わせた材料調査が行われる<sup>4)</sup>。これらに基づいて、原石山としての適否の判断、および廃棄岩の選別や採取計画の立案を行うこととなる。

物理的性状など一般的な骨材品質は、地山の風化・変質の分布状況を基に区分されるが、コンクリートの施工性や耐久性に影響を与える有害鉱物の含有が問題となる場合には、通常の方法調査に加え、その分布性状や含有量を把握するための調査を実施する必要がある。この調査においては、

ボーリングコアや調査坑から多くの試料を採取し、岩石鉱物学的な室内試験（顕微鏡観察や粉末X線回折試験など）を実施し、野外での地質観察との対比により、有害鉱物の分布と含有量を想定し、これに基づく骨材品質の区分を行っている。

有害鉱物に対する調査は、採取候補地選定段階、設計段階から施工段階にかけて、繰り返し実施する必要があり、野外調査と室内試験を数多く実施するため、時間的かつ経済的に大きな負担となっている。また、原石採取段階で室内試験を組み込むことが難しく、事前の品質区分による安全側の評価とせざるを得ないため、廃棄岩が増加する原因となっていた。このため、有害鉱物の分布と含有量を、野外調査において室内に持ち帰ることなく迅速かつ効率的に把握する技術が求められていた。

近年、可視光領域と近赤外領域の反射強度（400nm～1,000nm）を面的に表したハイパースペクトルデータを地質分野に応用する研究開発が行われるようになった。とりわけ鉱床で採取されるボーリングコアに含まれる鉱物の分布について、走査型電子顕微鏡（SEM）のデータとハイパースペクトルデータの対比を行い、鉱物同定を行う研究開発の報告が目立つ<sup>5)~7)</sup>。このように人間の肉眼では判定が難しい、もしくは不可能な波長の光について機械的に処理および解析することで、瞬時に鉱物を識別することが可能となりつつある。

著者らは、この新手法が有害鉱物の同定にも有効であると考えた。そこで、有害鉱物の中でも識別が難しい濁沸石を取り上げ、HSCで取得したスペクトルデータを解析し、同定することが本研究の目的である。この手法は、野外で活用することによって最大限に効果を発揮するものの、まずは光源が安定している室内において撮影条件の設定する必要があり、さらに膨大な情報量であるスペクトルデータを瞬時に解析できる手法の開発が必要であった。

### 3. 撮影条件と解析手法

本研究では、対象物の可視光領域と近赤外領域（400 nm ～1,000 nm）の波長帯を204バンドに分光した反射率データを1-2分程度で取得可能とするHSCを使用した。スペクトルデータは縦・横の2次元平面に加え、波長方向への奥行きを持つデータキューブと呼ばれる3次元データとして表すことができる。解像度は、縦512ピクセル、横512ピクセルである。HSCの試料撮影は室内で行い、光源はハロゲンライトを採用し、撮影対象を均一な光量になるようにカメラ後方左右2方向から照射した（図-1）。

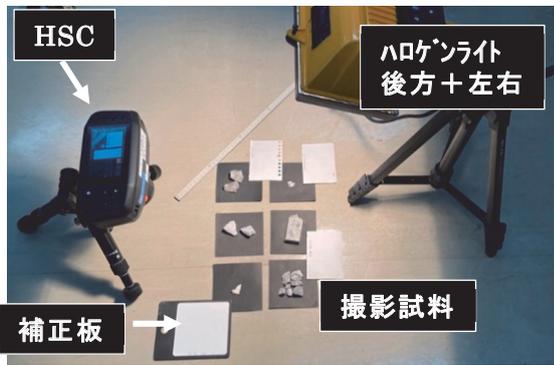


図-1 HSCの撮影状況

HSCのデータの解析は、先行研究ではユークリッド最短距離法といった統計学的手法が用いられることが多い(例えば8)。この手法は、検出対象のスペクトルの数値や傾き、あるいはベクトル量の近似性を求める手法である。本研究では、この統計学的手法に加え、近年めざましい発展を遂げている機械学習による手法（以下「AI手法」という。）を用いて解析を実施した。AI手法は、膨大なデータ量から特徴を捉えることを得意とするため、HSCのスペクトルデータから濁沸石の特徴が捉えられることを期待して、検討を実施した。本研究で使用したAI手法は、スペクトルデータ等を教師データとした教師あり機械学習である。各物質のスペクトルデータについてAIへの学習により物質に対応したスペクトルの特徴を取得し、分類を行うものである。また、AIは膨大なデータ量から特徴を捉えることを得意とすることから、情報量の多いHSCのスペクトルデータから濁沸石等の特徴を抽出できると見込み、検討を実施した。

撮影と判定に用いた試料は、購入したA. 高純度濁沸石、B. 岩石骨材（白色鉍物脈および基質）、C. コンクリート供試体である（図-2）。高純度濁沸石はWakizaka and Anan（2003）<sup>9)</sup>で扱ったもの、濁沸石が含まれる岩石骨材と、その骨材で作製したコンクリート供試体は阿南ほか（2021）<sup>10)</sup>と同じものを用いた。この岩石骨材は四万十帯の砂岩で、濁沸石は白色鉍物脈に分布し、基質にはほとんど認められない。

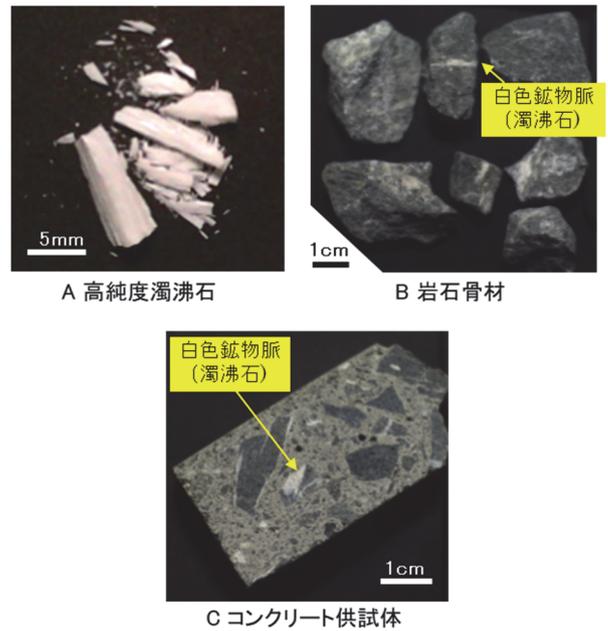


図-2 本研究の撮影試料

図-2におけるA.およびB.の白色鉍物脈（ほとんどが濁沸石で構成される）と基質箇所のそれぞれからハイパースペクトルデータ（図-3、4）を取得し教師データとしたうえで、B.全体とC.における濁沸石の有無の判定を行った。

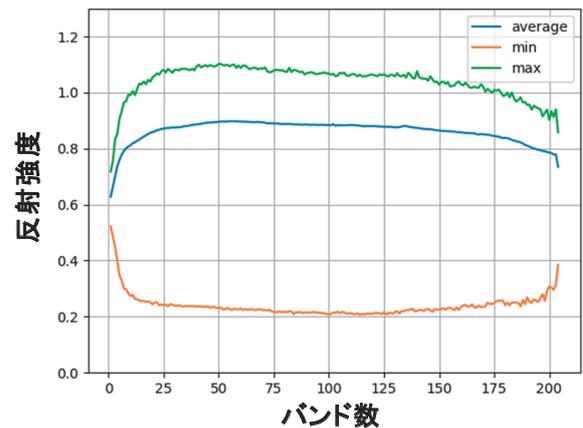


図-3 高純度濁沸石のスペクトルデータ例

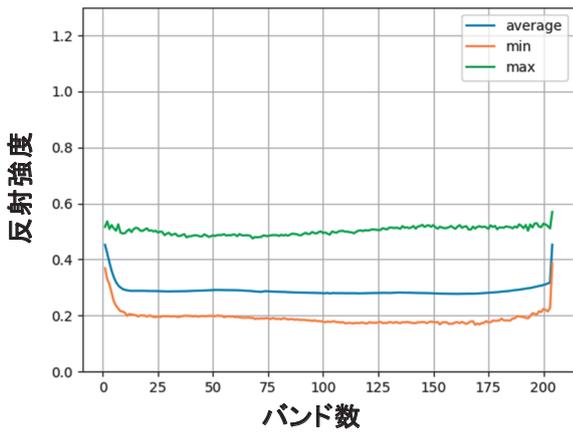


図-4 基質のスペクトルデータ例

#### 4. 解析結果

岩石骨材とコンクリート供試体について、統計学的手法を用いた解析とAI手法を用いた解析結果を表-2に示す。統計学的手法とAI手法によって濁沸石と判定した箇所を黄色、橙色とし、基質と判定した箇所を赤色で示している。B、Cに共通する結果として、濁沸石と判定すべき箇所は、統計学的手法、AI手法ともに検出可能であった。2つの手法を比較すると、AI手法の方が精度良く検出できる傾向が認められた（表中青○）。とくにAI手法では、微小な筋状の白色部も検出していた。これは技術者でも一定の経験が必要なレベ

ルの判定である。加えて、本手法は画像上で検出結果を表示可能であるため、濁沸石が分布する面積を計算することでき、定性的に判定されがちな調査への利活用も期待できる。

一方で、C. コンクリート供試体における統計学的手法の解析結果では、セメント箇所を濁沸石の分布と判断してしまう誤判定が多発した。これらの誤判定を招いた原因は、次のように考えられる。

- ① コンクリート供試体の濁沸石とセメントのスペクトルの類似性
- ② 教師データサンプル数の少なさ

①については、Bの骨材起源の濁沸石は、Aの高純度濁沸石に比べてやや白濁色を呈し、セメントのスペクトルとの区別が難しかった可能性がある。また、検出対象である濁沸石に関して、統計学的手法では過小評価の傾向であったため、これらの課題を解決するために、下記の方策を検討中である。

- ① 現場で採取される濁沸石と、高純度濁沸石の化学的組成の違いを明らかにしつつ、ハイパースペクトルデータを蓄積
- ② 濁沸石と類似するハイパースペクトル情報を持つ鉱物（石英、方解石など）、基質、セメントなどの教師データを準備し、解析、検証を実施

表-1 スペクトルによる鉱物同定結果

	入力画像	統計学的手法	AI(機械学習)
B 岩石骨材 (白色 鉱物)			
C コンクリート 供試体			

濁沸石

石基(砂岩)

濁沸石検出部

機械学習による手法は、入出力間の計算過程が不透明である。このため、本検討では従来の統計学的手法と組み合わせた上、適切なデータを教師データとしてAIの学習の素材としていることが説明性の担保に繋がると考える。

本技術を活用することで、視覚的、定量的な解析結果を提示することが可能である。可搬性の優位性も含めて簡易な現地調査手法として今後の検証及びデータの蓄積に努めたい。

## 5. まとめ

本研究では、統計学的手法とAI手法を用いて、ハイパースペクトルカメラによる簡易的な有害鉱物同定手法の開発を行い、骨材とコンクリート供試体における適用性の検討を行った。可搬性があり、かつ詳細な光学情報を取得可能なハイパースペクトルカメラとAIの解析手法を用いることで濁沸石を判定できる可能性が示された。この結果から、濁沸石に限らず、様々な鉱物の分布を把握する一助として活躍が期待できると考えられる。今後の課題は以下の3点が挙げられる。①本検討は屋内の検証に留まったため、光源が異なる野外での適用性を試みること、②濁沸石と類似するハイパースペクトル情報を持つ鉱物を含めた解析の実施、③教師データの蓄積と検証、である。地質分野において有害鉱物の判定は、慎重を期する必要があるものの、日進月歩のセンシング技術やAI技術を併用し、調査手法の高度化と省力化の一助として活用できるようデータ蓄積と適用範囲を見定めていきたい。

## 参考文献

- 1) Erlin, B., and Jana, D., Forces of Hydration That Can Cause Havoc in Concrete. Concrete International, Vol. 25, No. 11, pp. 51-57, 2003
- 2) 上阪恒雄、吉田等、松井健一、瀬ノ田明敏：コンクリートダム事業における骨材生産コスト、ダム技術、No.194、pp.22～34、2002
- 3) 山口嘉一、岩下友也、小堀俊秀：ダムコンクリートにおける骨材の有効利用事例、コンクリート工学、Vol.46、No.5、pp.38～41、2008
- 4) 武田和久：ダム地質調査の現状と今後、応用地質、39(1)、pp.35-45、1998
- 5) Acosta, I.C.C., Khodadadzadeh, M., Tusa, L., Ghamisi, P., Gloaguen, R., A machinelearning framework for drill-core mineral mapping using hyperspectral and highresolution mineralogical data fusion. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. Vol. 12, No. 12, 4829-4842, 2019
- 6) Lorenz, S., Seidel, P., Ghamisi, P., Zimmermann, R., Tusa, L., Khodadadzadeh, M., Contreras, I.C., Gloaguen, R., Multi-sensor spectral imaging of geological samples: A data fusion approach using spatio-spectral feature extraction. Sensors (Switzerland), 19, 2787, 2019
- 7) Tusa, L., Andreani, L., Khodadadzadeh, M., Contreras, C., Ivascanu, P., Gloaguen, R., Gutzmer, J., Mineral mapping and vein detection in hyperspectral drill-core scans: Application to porphyry-type mineralization. Minerals, 9, 122, 2019
- 8) 沖一雄、猿渡琢哉、野川祐治、州浜智幸、大政謙次：ハイパースペクトルデータによる都市域における植生分類手法の検討、Eco-Engineering、17(1)、pp.67～72、2005
- 9) Wakizaka, Y., and Anan, S., Deterioration of concrete due to laumontite and its mechanism, Proceeding of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, IAEG, pp.647-654, 2003
- 10) 阿南修司、昆周作、松尾達也：有害鉱物による劣化コンクリートの健全度評価、土木研究所成果報告書、No.7～1、2021

昆 周作



土木研究所 地質・地盤  
研究グループ地質チ  
ーム 主任研究員、博士  
(理学)  
Dr. KON Shusaku

阿南修司



土木研究所 地質研究監  
ANAN Shuji

倉上 健



日本工営(株)中央研究所  
KURAKAMI Takeru

古木宏和



日本工営(株)中央研究所  
FURUKI Hirokazu