HOKKAIDO UNIVERSITY

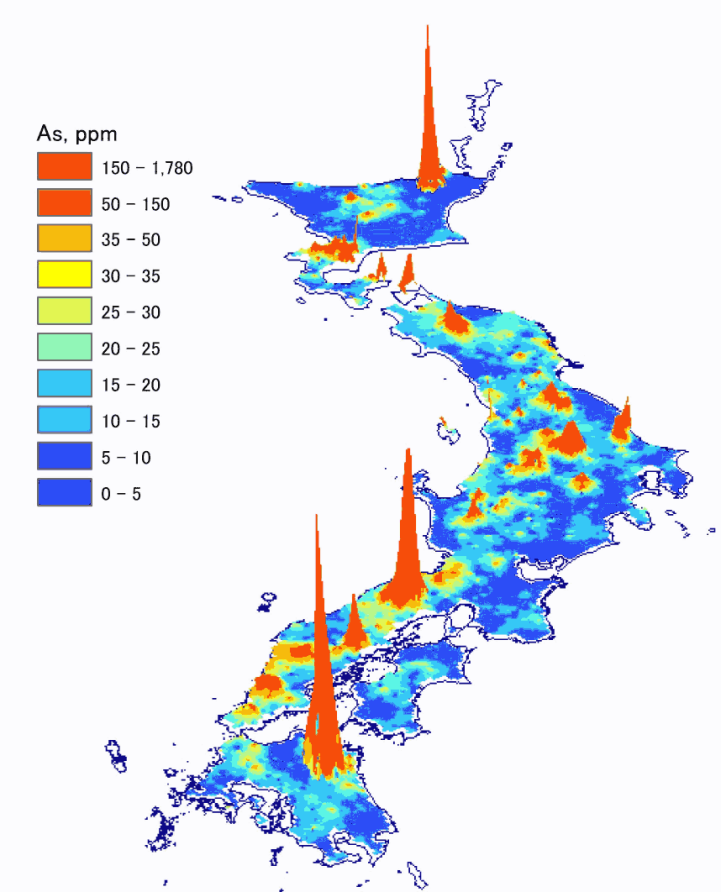
ハイパースペクトルイメージングを用いた汚染土壌判定に関する研究

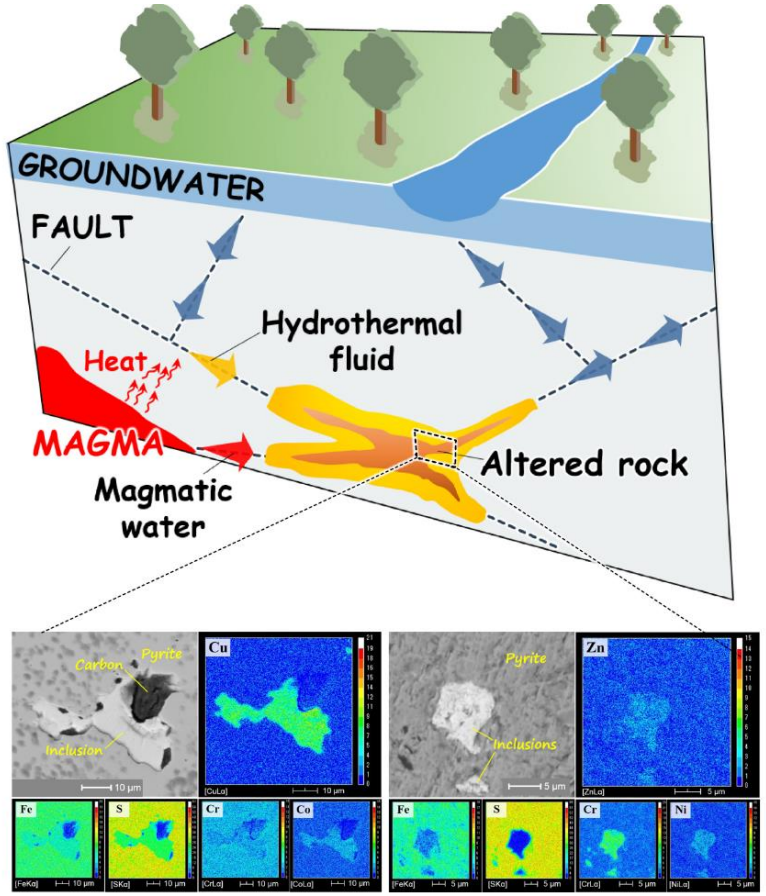
第25回JICE研究開発助成成果報告会　2025年6月6日

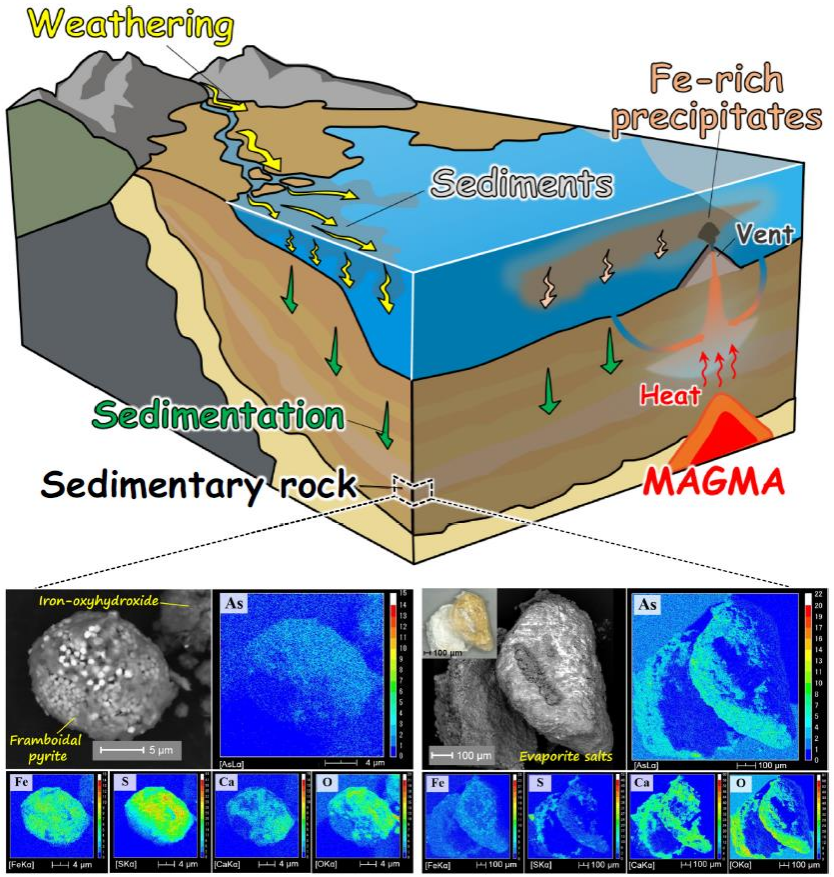
北海道大学大学院工学研究院

環境循環システム部門　助教　有馬　孝彦

■ 砒素(Arsenic: As)等の自然由来重金属等を含む土壌・岩石





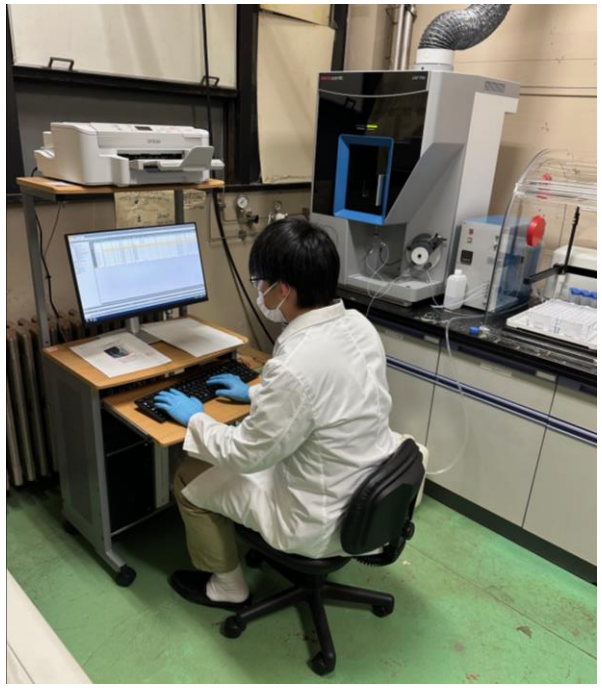


https://www.gsj.jp/researches/topics/geochemmap.htmlc

Tabelin et al., Science of the total Environment2018

■ 自然由来重金属等を含有する土壌等の判定方法

試験室へ
持ち込み



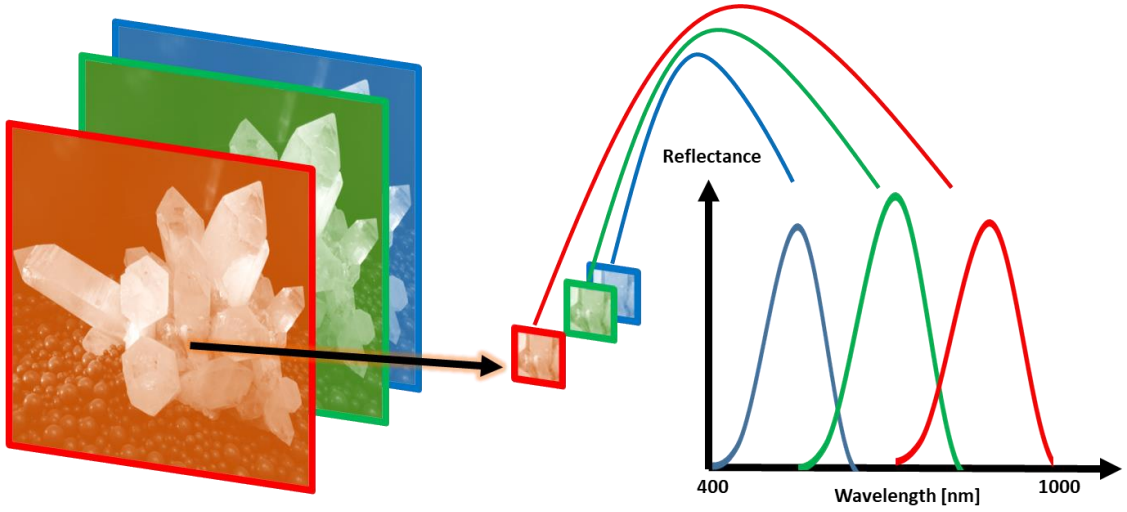
試験室で分析：1-2週間必要

- 合理的な対策手法の構築：遮水シート，不溶化処理，吸着層工法の代替案
- 迅速な分析手法の開発：掘削・即時判定を可能とするシステム開発

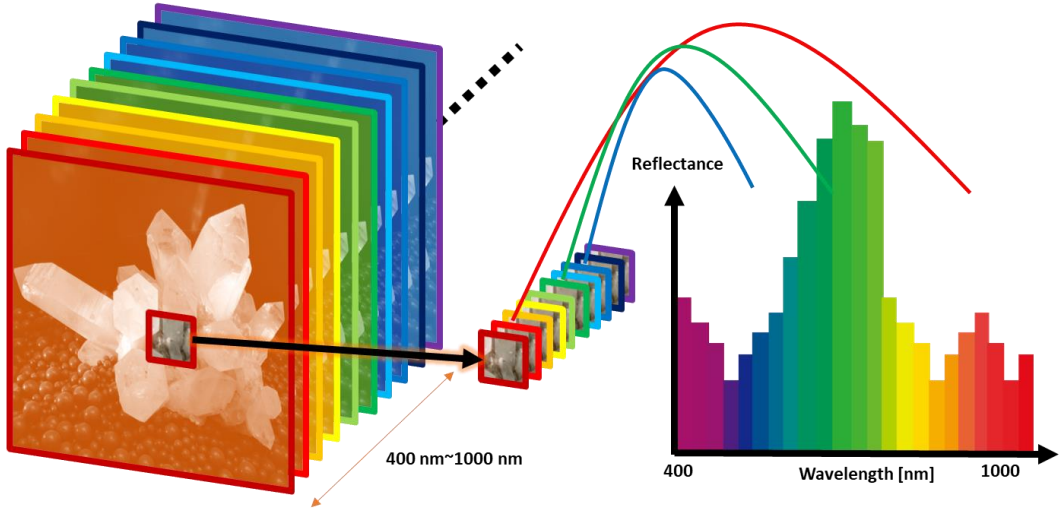
■ハイパースペクトルイメージング

スマホカメラ

ハイパースペクトルカメラ

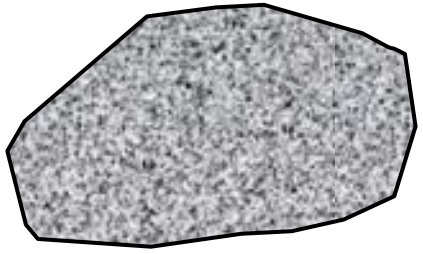


RGB Imaging

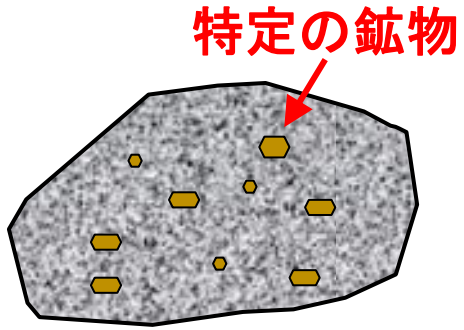


Hyperspectral Imaging

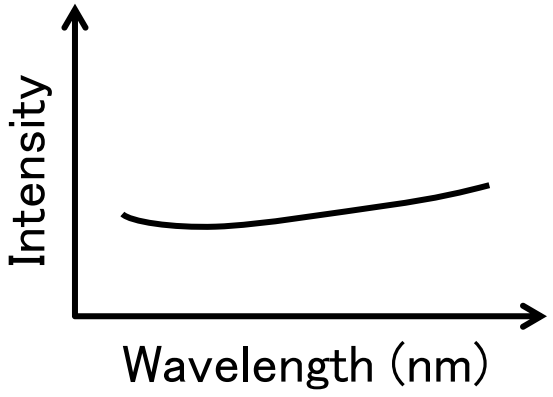
■ ハイパースペクトルイメージングの活用方法

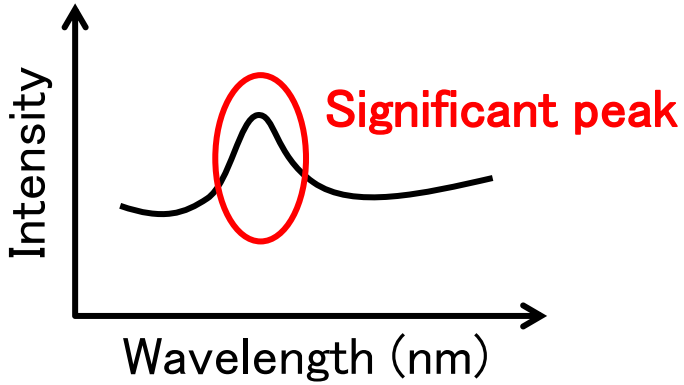


試料A

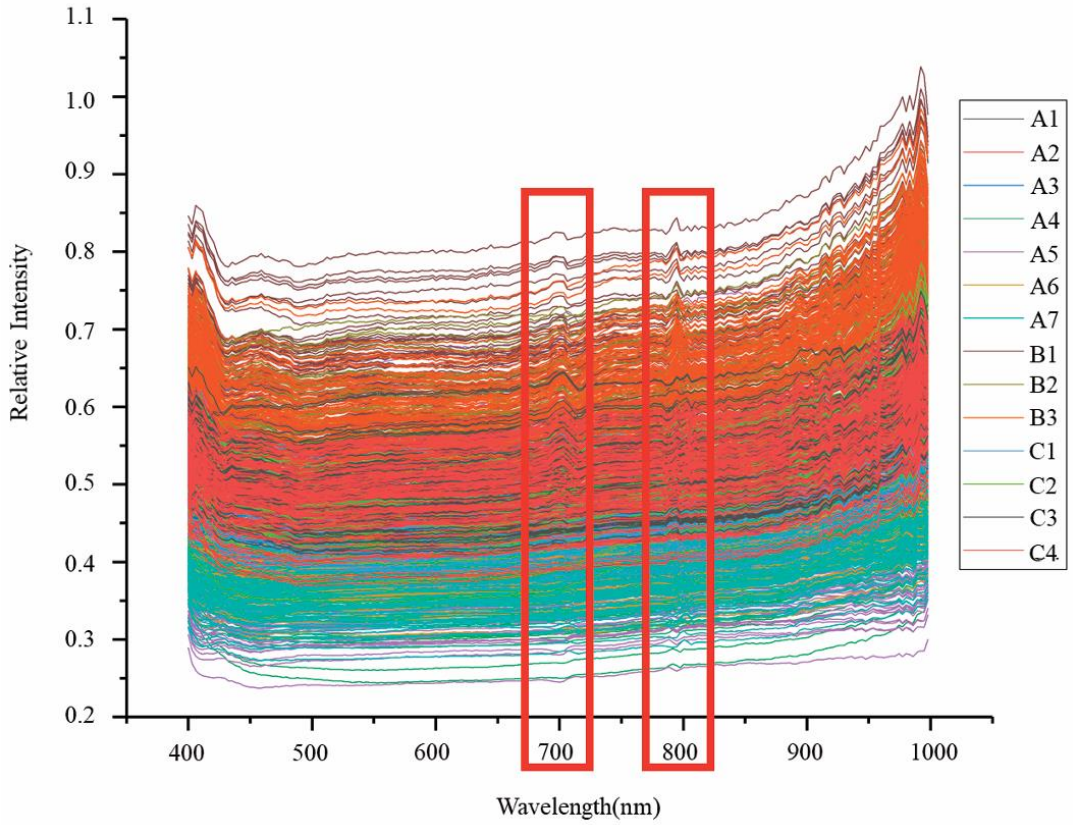


試料B





■ ハイパースペクトルイメージングの活用方法（鉱石の分類事例）

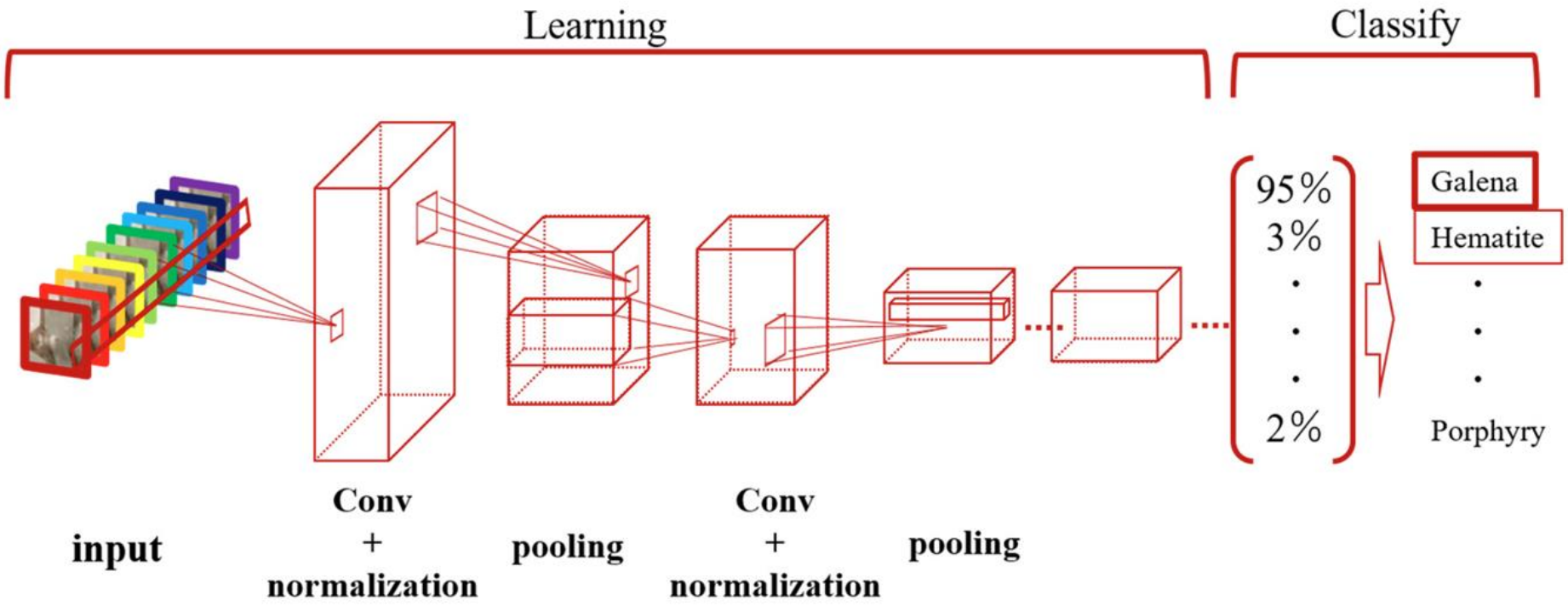


試料A1−A7：砒素・銅 含有量　高
試料B1−B3：砒素・銅 含有量　中
試料C1−C4：砒素・銅 含有量　低

砒素・銅の含有量が高い試料には特定の波長に顕著な変化が認められる。

Okada et al., MMIJ 2021

■ ハイパースペクトルイメージングのデータ解析：CNN（畳み込みニューラルネットワーク）



Okada et al., Minerals 2020

- CNNによって，情報量の多いハイパースペクトルイメージングとAs濃度の相関性を評価
- 未知のAs濃度に対して，ハイパースペクトルイメージングを用いてAs濃度を予測

■本研究の目的

現場で迅速かつ精確に汚染土壌を判定する手法を構築したい。

↓

ハイパースペクトルイメージングと深層学習を併用して，

汚染土壌のAs濃度を推定するモデルを作成

■本研究の流れ

1. 試験試料の地球化学的特性の評価（溶出量試験・逐次抽出試験・SEM-EDX）
2. ハイパースペクトルイメージングの取得（ハイパースペクトルカメラを使用）
3. ハイパースペクトルイメージングからAs濃度を予測するための機械学習モデルの構築
4. 機械学習モデルの性能評価

■ 研究に用いた試料

凝灰角礫岩: Tb

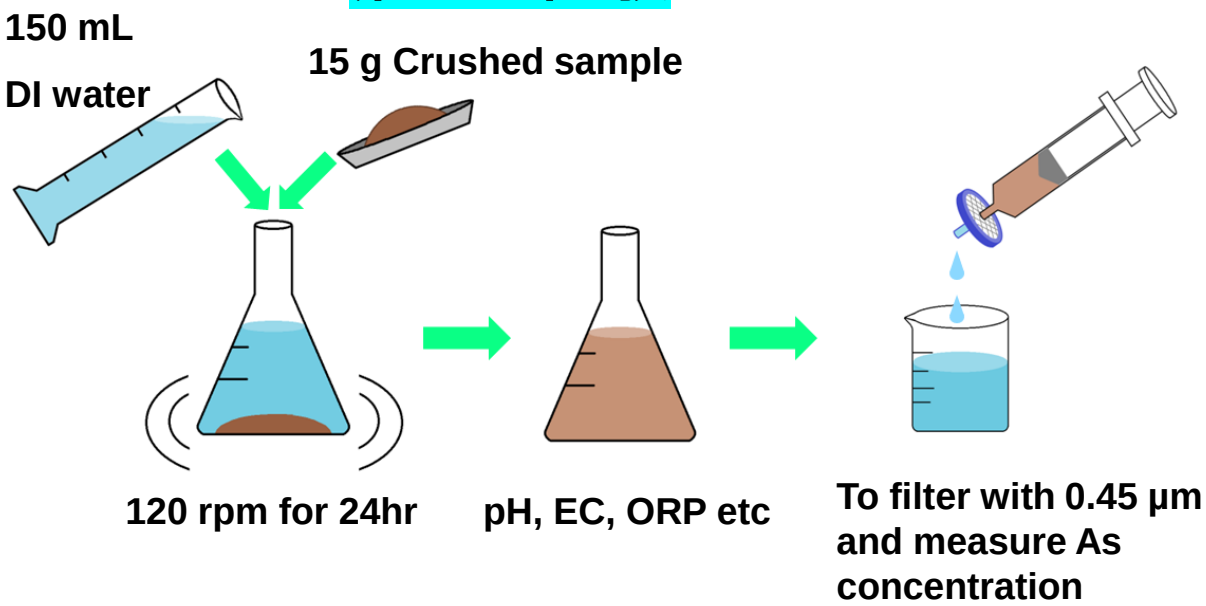
安山岩: An

泥岩: Ms

- 21 試料: 凝灰角礫岩 (7試料), 安山岩 (7試料), 泥岩 (7試料)
- 研究対象は砒素: As

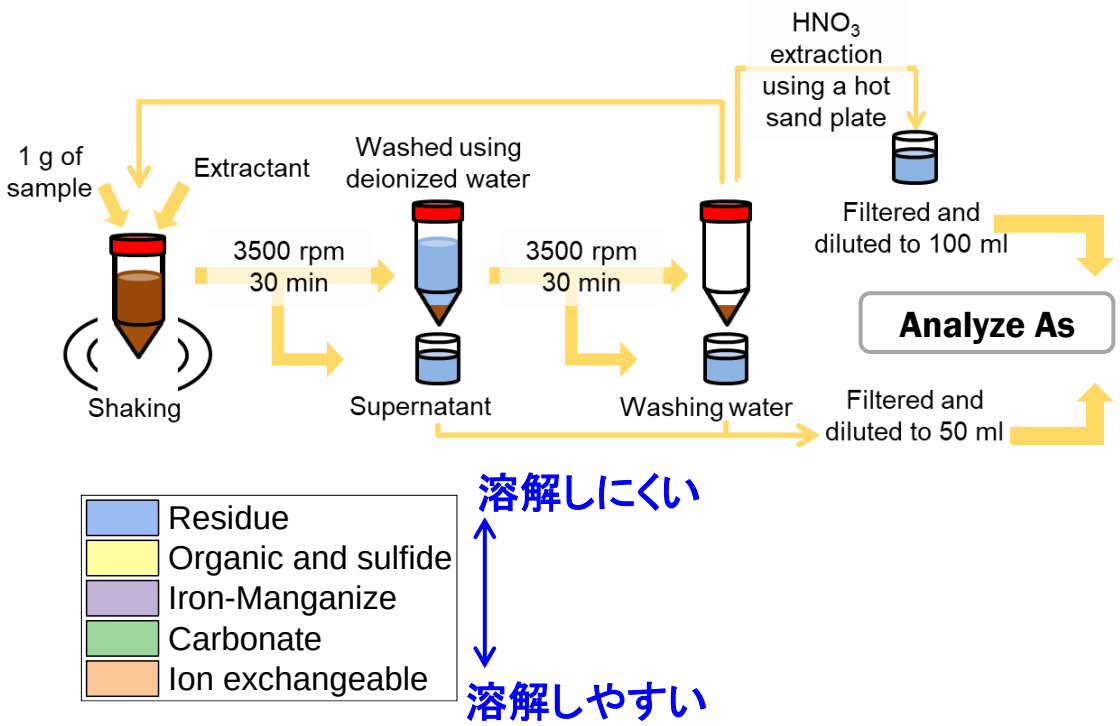
■ 試験方法：溶出量試験・逐次抽出試験

溶出量試験



Asの溶出量を評価
（溶出量基準値：10μg/L）

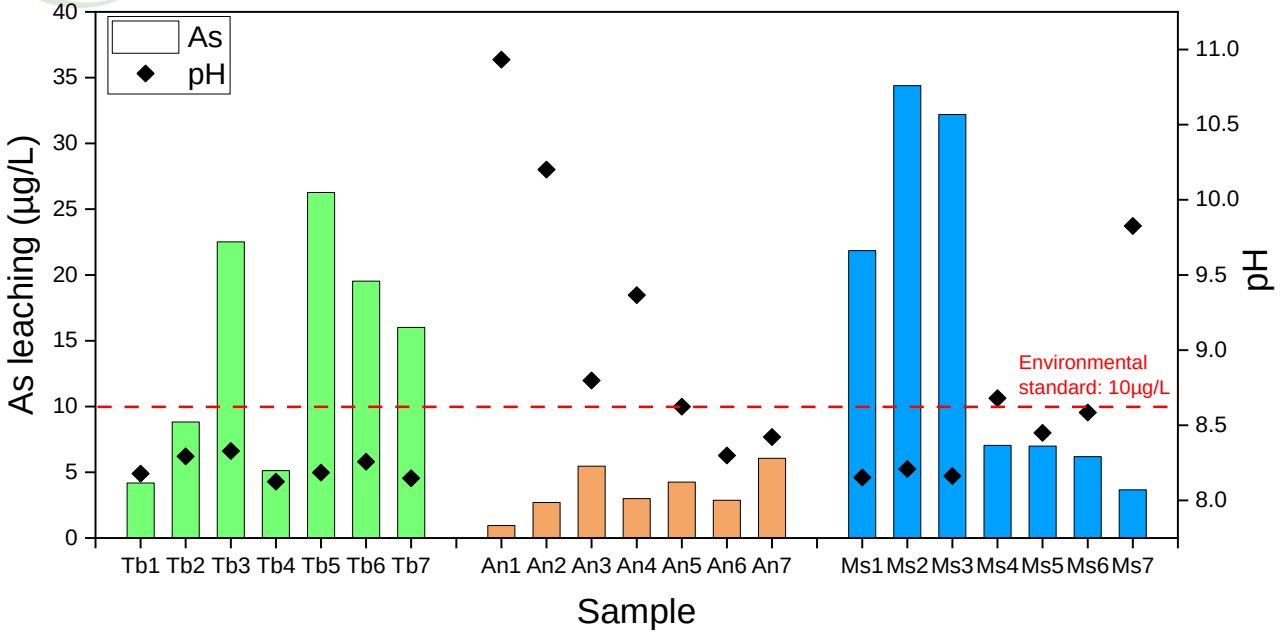
逐次抽出試験



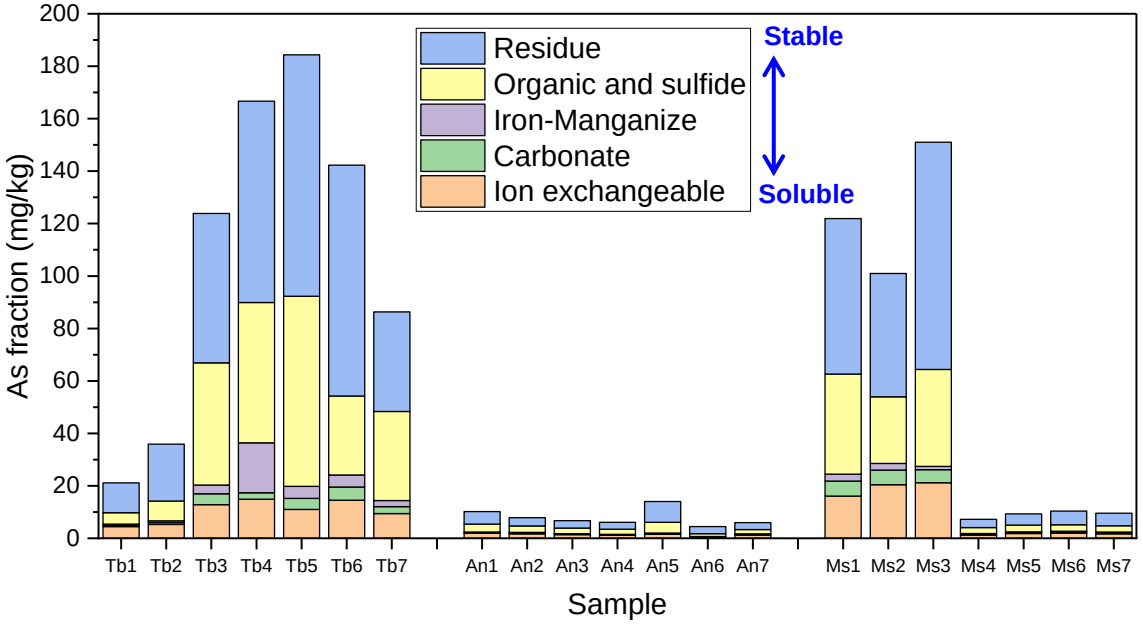
試料のAs分画およびAs総量（含有量）を評価

■ 試験結果：溶出量試験・逐次抽出試験

Tb：凝灰角礫岩
An：安山岩
Ms：泥岩



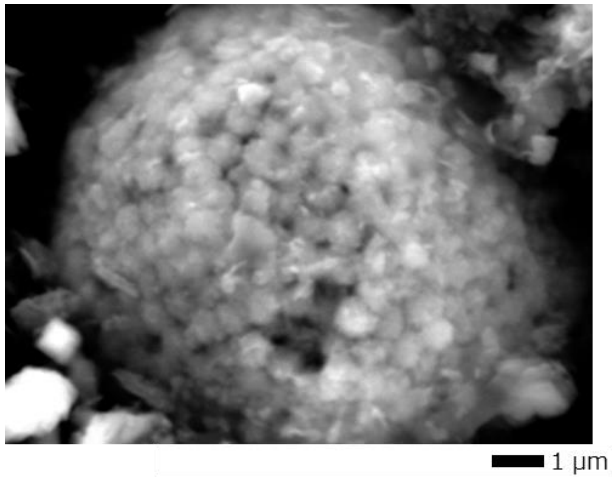
Asの溶出量



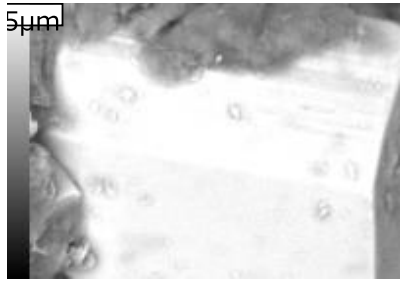
Asの分画および総量（含有量）

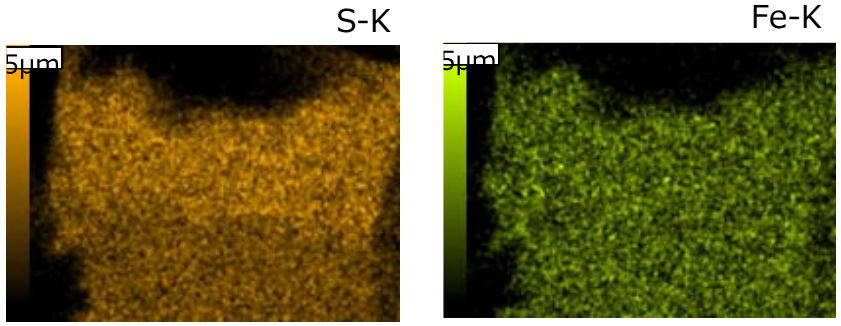
- As溶出量: Tb：5.1～26 μg/L, An：0.9～6.1 μg/L, Ms：3.6～34 μg/L
- As含有量: Tb：21～184 mg/kg, An：4.5～14 mg/kg, Ms：7.2～151 mg/kg
- As分画：難溶態＞硫化物態＞イオン交換態の順で多く含まれていた。

■ 試験結果：SEM-EDXによるAsの胚胎状況

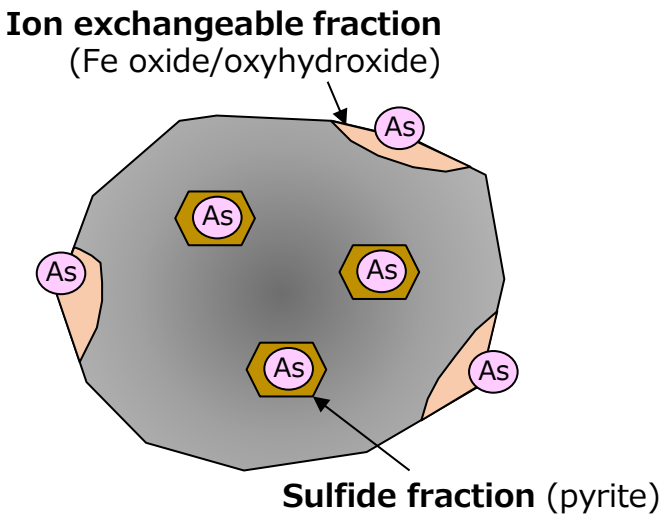


泥岩中に含まれる
フランボイダル黄鉄鉱





凝灰角礫岩中に含まれる
結晶状の黄鉄鉱



サンプル中に含まれる
Asの分布イメージ

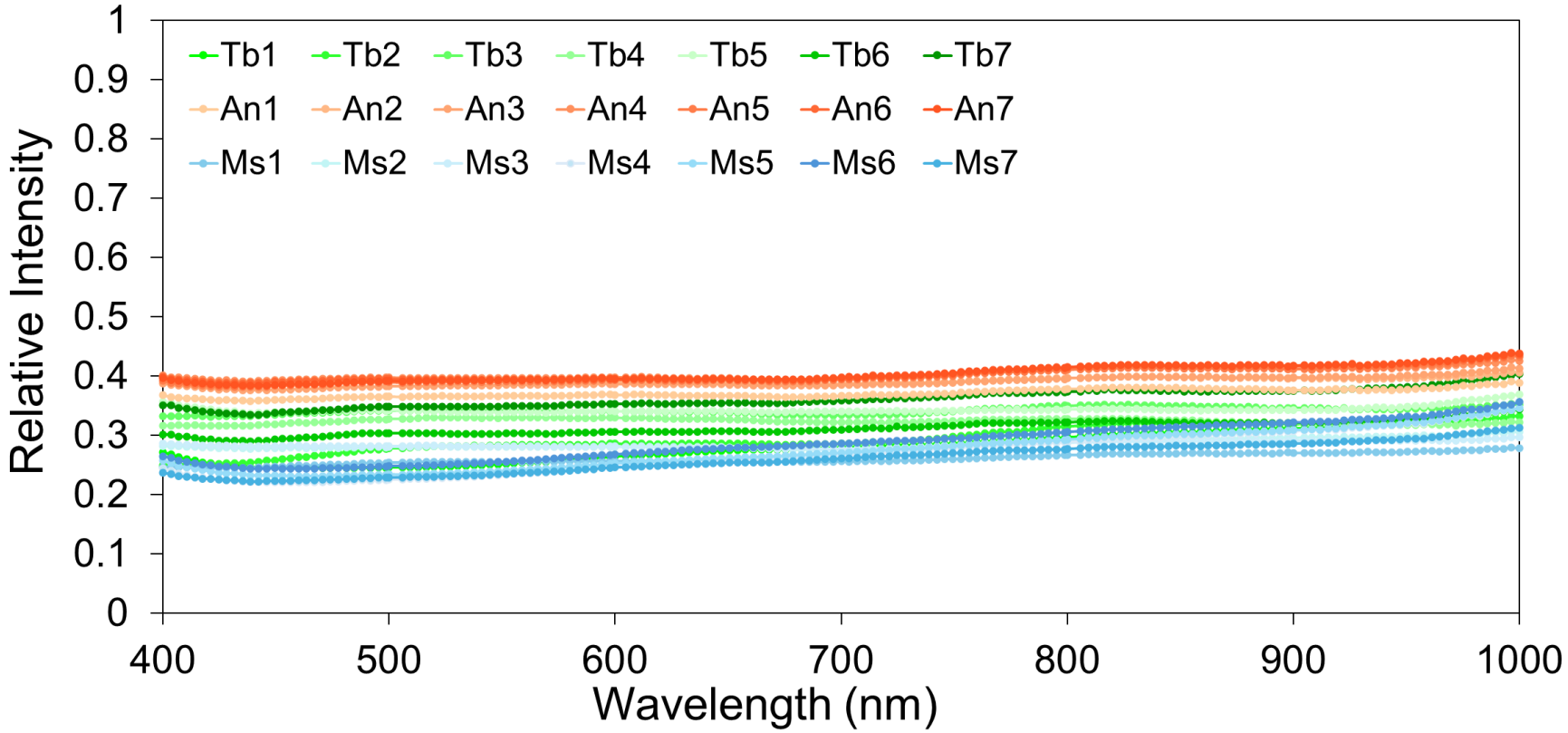
■ 試験方法：ハイパースペクトルイメージング取得

撮影実施状況

ハイパースペクトルカメラ: Specim IQ

- 撮影対象波長: 400～1,000 nm
- バンド数：204
- 撮影は暗所＋ハロゲンによる光源管理下で実施

■ 試験結果：ハイパースペクトルイメージング

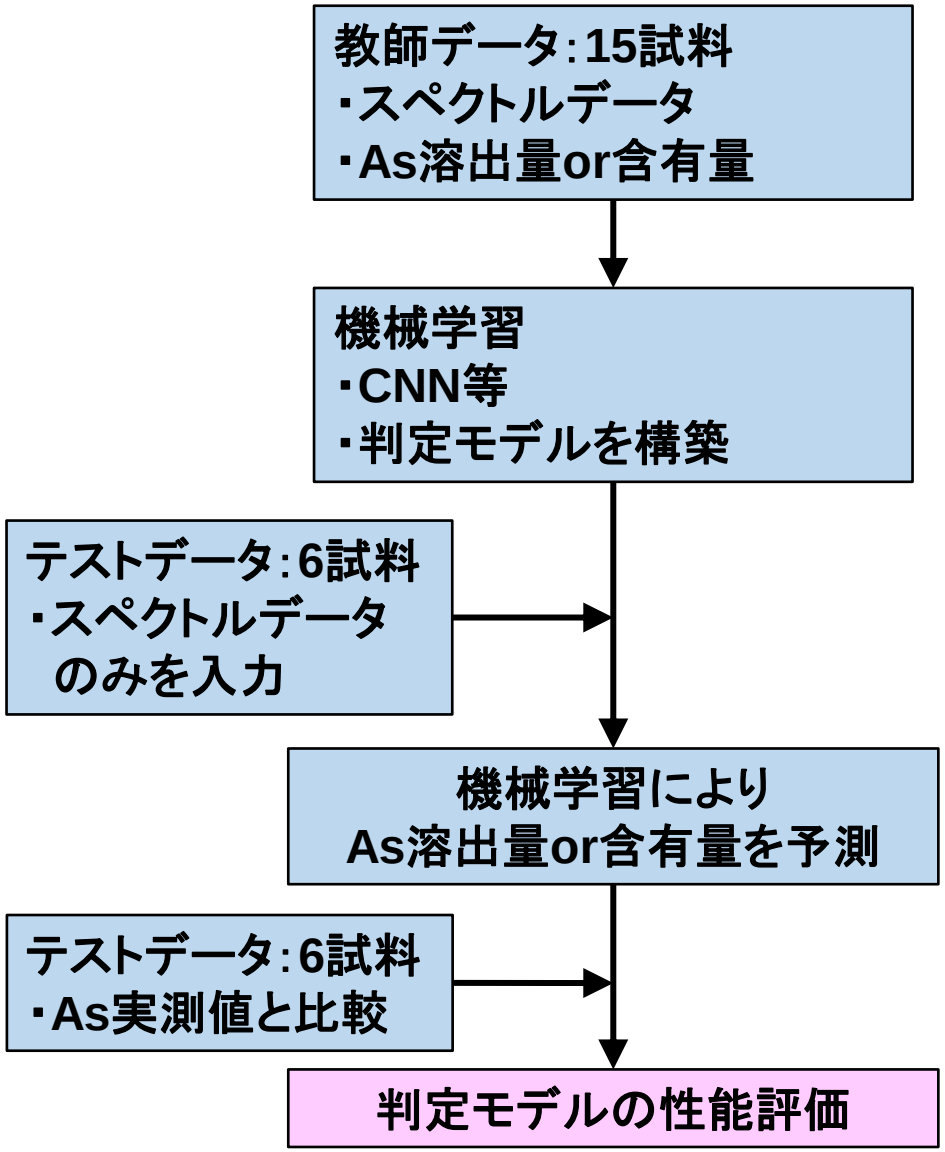


Tb：凝灰角礫岩
An：安山岩
Ms：泥岩

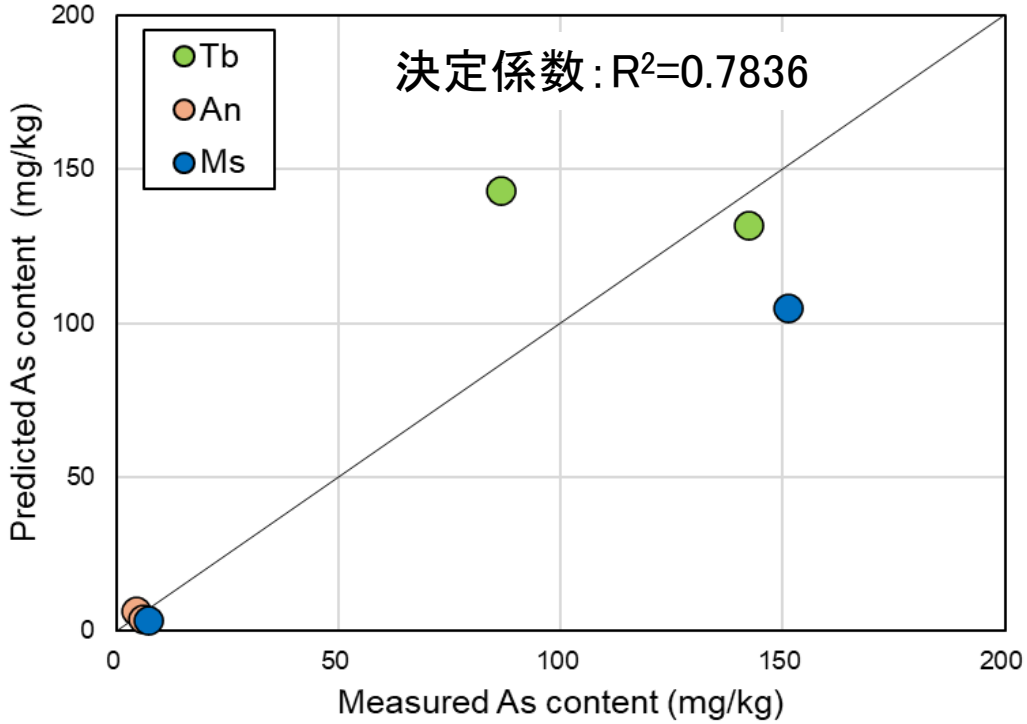
- スペクトルの特徴に明瞭な相違は認められなかった。
- 460–600 nm, 670–780 nm, 860–950 nm 帯に若干の相違が確認された。

■ 機械学習

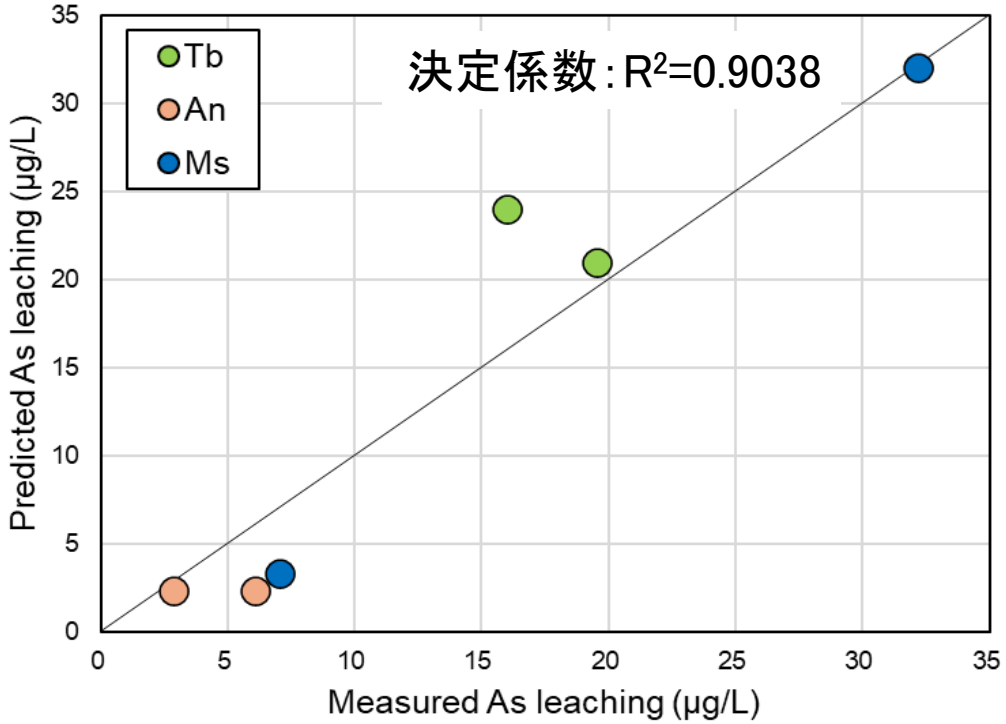
- 機械学習にはMATLAB（Math Works社製）を使用
- 教師データ：15試料として機械学習を実施
- インプットデータとしてスペクトルデータとAs溶出量（またはAs含有量）を使用
- 機械学習モデルとして，線形回帰・アンサンブル法・決定木・ニューラルネットワーク（CNN）等を実施
- 判定精度が最も優れたCNNを最終的な判定モデルとして使用
- 判定モデルでは，テストデータ：6試料を対象に実施



■ 機械学習：判定モデルによるテストデータ（6試料）のAs含有量・溶出量の判定結果



As含有量試験の判定結果



As溶出量試験の判定結果

- As含有量：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相違が認められた。
- As溶出量：テストデータの測定値（2.8–32 μg/L）に対して，若干の相違はあるが，ある程度の判定精度が確認された。

■ 研究成果のまとめと今後の展望

- 機械学習によるAs含有量および溶出量の判定モデルは，溶出量の判定については一定の判定精度が得られた。これは，溶出量試験により溶出するAsが，主にイオン交換態を起源とし，イオン交換態と関係性のある岩石中の組成（AlやFe等のAsの吸着に寄与する成分）がスペクトルデータとリンクしたためと推察される。
- 今後は，判定モデル構築に用いる教師データおよび判定モデルの精度を評価するためのテストデータ数を増やすとともに，上記の推察にも述べたAsの吸着に寄与するAlやFeおよび黄鉄鉱等の難溶態のAsを胚胎する鉱物とハイパースペクトルデータとの相関性を評価する。さらに，多様な岩相への適用性を検証する。

ご清聴ありがとうございました。

本研究は、一般財団法人国土技術研究センターによる
研究助成を受けて実施されました。ここに記して、同センターの
ご支援に深く感謝申し上げます。