# 物理探査研究グループの紹介

Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

# 研究グループ長:横田俊之

Leader, Exploration Geophysics Research Group:

Toshiyuki Yokota

e-mail: yokota-t@aist.go.jp

http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeo/

# 1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、地熱・地中熱、鉱物資源、メタンハイドレート、地下水等の地圏資源の調査・研究、放射性廃棄物地層処分、CO<sub>2</sub>地中貯留等の地圏環境の利用と保全のための調査・研究、さらに加えて地盤液状化、地滑り、断層、火山等の防災分野等、広範囲な適用対象に対して、地圏の調査及び分析技術の開発の一環として、物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査法の適用研究を行っている。また、強靱な国土・防災への貢献のためにサステナブルインフラ研究ラボに参画し、インフラ関係の社会課題の領域間融合での解決に積極的に貢献することを心掛けている。2020年度においては、以下の 7 項目を中心にした研究を実施している。

- ▶ 地圏資源の調査・研究として,
- 1) 海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の探査を念頭に 置いた海域での各種物理探査法や, 陸域における AMT 法, 強制分極 (IP) 法等による鉱物資源探査等に関する 研究.
- 2) 地中熱利用における事前評価手法の研究および地熱地域における広域熱水系把握調査および空中電磁探査のデータ解析に関する基礎的技術開発.
- ▶ また、地圏環境の利用と保全のための調査・研究として、
- 3) 地層処分場選定における地質環境評価のため,沿岸域 モデルフィールドにおける 2 次元および 3 次元弾性 波探査反射法適用試験の取りまとめ.
- 4) 二酸化炭素地中貯留プロジェクトでは, CO2モニタリングを前提とした重力探査に関する基礎的研究.
- 5) 土壌汚染に関連して, 過去に実施した物理探査適用結果の取りまとめ.
- ▶ さらに, 地圏の調査及び分析技術の開発として,
- 6) 断層評価のための各種物理探査法の適用結果について の取りまとめ,活動的火山の地下構造解明や物理モニ タリングに関して,データ取得・解析に関する研究.
- 7) インフラ維持管理目的や災害ロボット技術等との連携のために, NMR 法や無人機物理探査技術などの新規物理探査技術開発を領域間融合研究として行い, 民間企業への技術移転やその後の技術の普及を目指した研究連携活動.

## 2. 各研究項目の内容

# 2.1. 二重エネルギー CT よる重元素の非破壊定量法 の開発

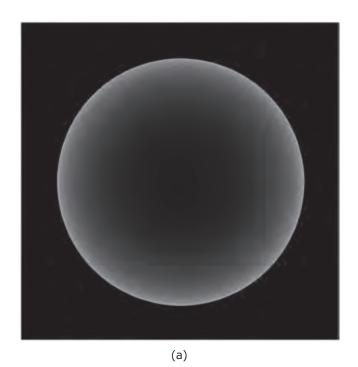
重元素で汚染された地下水あるいは土壌コア試料中の重元素の原子番号モル濃度を計測する場合には、その有害性のために未開封のまま非破壊定量することが望ましい。今回、非破壊スキャンが可能な X 線 CT 法を二重エネルギー式(2つの加速電圧を採用)に拡張することで、このニーズに対応できることを CT の計算機シミュレーションにより確認した。

シミュレーション時には、無視できるほど肉厚の薄い円柱容器に入れた、重元素を分散させた水試料を想定した。図1(a)に示す、ヨウ素ガスを水に溶かした状態に関するシミュレーションでは、X線源の多色性に由来するビームハードニング(カッピング)という偽像(artefact)により、均一な水溶液試料であるにもかかわらず、試料の縁付近の画素値が高い(明るい)結果が得られる。この偽像が重元素の原子番号とモル濃度に敏感であることを利用して、水試料中の重元素を非破壊定量する。

Agから Po までの重元素の単体を水に分散させた仮想的な試料で二重エネルギー CT シミュレーションを行った結果を図1(b)に示す。装置の誤差レベルを考慮しても、ヨウ素を含む水試料の値(53 I を中心とする円)は、キセノンの誤差円(54 Xe を中心とする円)に一部が重なっているものの、他の元素とは明確に異なる位置にプロットされることがわかる。ヨウ素を含む試料については、キセノンを含む試料との識別は若干困難であるが、この手法で原子番号を特定可能である。KI 水溶液(赤丸)についてもヨウ素単体とほぼ同じ位置にプロットされているので、軽元素(カリウム)の重元素特定作業への悪影響は深刻ではない事がわかる。なお、詳細は省略するが、水溶液中のヨウ素のモル濃度の推定にも成功している(Nakashima and Nakano、2020)。今後は、鉛などを含む土壌汚染コア試料への拡張を計画している。

# 2.2. 金属鉱床探査支援のための岩石物性データベースの設計

金属鉱床探査の対象は地下深部の潜頭性鉱床に移りつつあり、物理探査への期待が高まっている。物理探査からは地下の物性分布の情報が得られるが、その情報を用いて地質構造を解釈するとなると不十分なことが多い。その原因の



● 各元素の単体の粉末が水に分散しているケース・ KI水溶液

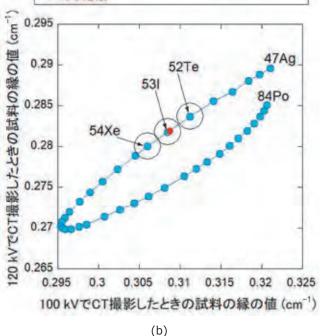


図1 CTシミュレーション結果. (a) 円柱試料(直径8cm)に43mMのヨウ素を分散させた均一な水溶液試料を100kVで二次元CTシミュレーション撮影した結果. (b) 同一円柱試料を100kV と120kV の加速電圧でCT撮影したときの水溶液試料の縁の画素値のクロスプロット. 現実のCT装置の典型的な誤差レベルを3元素について黒い円で示した.

一つとして、岩石物性に関する知識の不足があげられる。金属鉱床地域にある岩石や鉱石の物性を記録したデータベースが構築されれば、物理探査データの解釈の基準ができ、探鉱支援者を大いに支援できると期待される。経済産業省資源エネルギー庁の探査基盤技術高度化支援事業で開発・運用していた探鉱支援システム GRIAS では、鉱石の物性データを検索・表示するライブラリがあり、データベースとし

て利用されていた.しかし, GRIAS は独自のサーバー上で 運用されており, 情報セキュリティに優れていたが, 一般 ユーザーにとっては, 必ずしも使いやすいものではなかった. そこで, 誰もが利用しやすい岩石物性データベースの構 築を目指し, スタンドアローンの PC 上で動作するプロトタイプを作成した.

### (1) 基本設計

岩石物性データを Excel で整理・記録し, オープンソースのデータベース管理システム SQLite にインポートして, ブラウザ上で表示や検索可能とした.

## (2) 記録するデータの項目

データベースに記録する項目を表 1 に示す. 物性データに加え, 岩石・鉱物の地質学・岩石学・地化学データ, 採取位置などのデータも記録した.

#### (3) データ表示

各項目のデータを表形式で表示, 化学分析結果, グラフやサンプル写真のような画像データ, SIPやTDIPの測定データのテキストファイルをハイパーリンクで参照可能とした. 個々の岩石試料についての代表的なデータやグラフを個票として表示可能とした(図2). また, 岩石試料の位置を電子地図上に表示する機能を設けた(図3).

## (4) 検索機能

データ検索は,鉱石の種類,鉱床タイプ,岩石・鉱物名,鉱 山名などの項目で実施可能とした.また,国内鉱床,海外鉱 床,標準的試料,一般岩石(非鉱石)でも絞り込みできる.

## 表 1 データベースに記録した項目

- ・サンプル番号、サンプル名、鉱床タイプ、岩石・鉱物名、岩石の記載情報、鉱化や変質状況
- ・コア提供者からの情報(品位を含む)
- 採取位置(国,地方・県,市町村,鉱山,緯度,経度)
- · 化学分析[PDF], XRF 分析[PDF]
- ・サンプルの情報 (写真[JPG], 形状・断面積・長さ)
- ·湿潤密度, 乾燥密度, 有効間隙率, 帯磁率, 質量帯磁率, 浸透率,
- ・SIP 電気物性(測定条件,代表的周波数の比抵抗と位相, 比抵抗と位相のグラフ [GIF],数値データファイル [CSV])
- ・TDIP 電気物性 (測定条件, 比抵抗, 充電率, 減衰曲線 のグラフ[GIF], 数値データファイル[CSV])



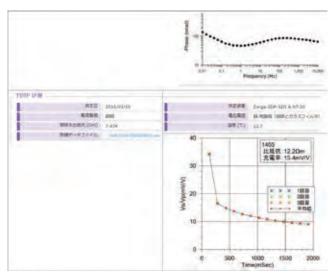


図 2 データやグラフの表示イメージ. 高倉(2020)のFig.2 および Fig.3を一部改変

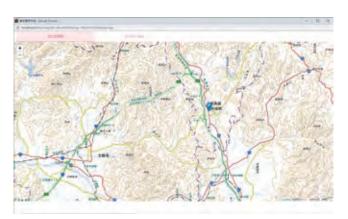


図3 岩石サンプルの取得位置表示の例. 背景地図は地理院 地図を用いた. 高倉 (2020)の Fig.4を引用

# 2.3. スパースモデリングを利用したミュオントモグラフィの空間・時間・密度分解能の評価

ミュオグラフィは、素粒子ミュオンの強度を測定することにより、物体内部の密度分布を推定する方法である。これまでは、火山、遺跡、原子炉等の密度分布推定に適用されてきたが、近年、検出器の小型化により地下への適用が可能になってきた。例えば、検出器をボアホール内に挿入し、地下の3次元密度分布を得ることも現実的になりつつある。そのように、計測に関する発展はあるものの、依然として地下における検出器の数は限られており、観測データ数は限定的であるため、未知数である密度分布を求める問題は劣決定問題となることが多い。これまでは、平滑化付き最小二乗法などコンベンショナルな手法が用いられてきたが、密度分布の大部分が一様と仮定できる場合には、スパースモデリングを利用することにより、限られた観測データから密度異常検知をすることが期待できる。

そこで、密度異常検出に対するスパースモデリングの適用性について検討をおこない、従来の手法との比較検討をおこなった。また、これまでのところ、ミュオグラフィの空間・時間・密度分解能の定量的相互関係はわかっていないため、それらに関しても検討をおこなった。

今回は、それらの検討を数値シミュレーションによりおこなった。その際に用いたモデルは、図4に示す空洞を模したモデルである。モデルのスケールは、9m×9mで空洞の上部および下部に1m間隔で9個の検出器を設置して観測を行うことを想定した。空洞のサイズを1m×1mおよび0.6m×0.6mとした二つのモデルについて検討をおこなった。

図5にシミュレーション結果を示す.空洞(密度異常)のサイズが大きい1m×1mの場合よりも,そのサイズが小さい0.6m×0.6mの方が両者の結果に差が大きいことが見て取れる。

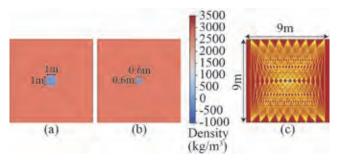


図4 空洞を模した密度モデルおよび検出器の配置. (a),(b) は空洞が存在する場合の密度モデル,空洞のサイズは,それぞれ1m×1m および0.6m×0.6mである. (c) は観測配置の概念を示している. 空洞の上下でミュオンを計測し,その減衰より経路上の密度を逆解析する.

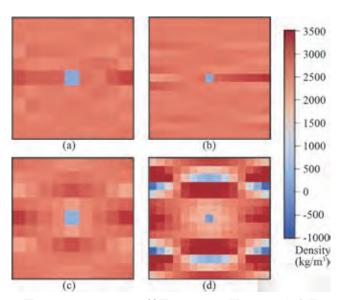


図 5 シミュレーション結果. (a),(b) は図 4に示した空洞 モデルに対して,スパースモデリングを適用した結 果. (c),(d) は同じモデルに通常の平滑化制約付き最 小二乗法インバージョンを適用した結果.

# 3. 研究グループの体制

# 3.1. 人員体制(2020.10.1現在)

以下の14人体制で研究を実施している.

横田俊之(グループ長)

高倉伸一(上級主任研究員)

中島善人(上級主任研究員)

神宮司元治 (主任研究員)

浅田美穂(主任研究員)

小森省吾 (研究員)

梅澤良介(研究員)

上田匠 (客員研究員)

松島潤(客員研究員)

佐竹海(リサーチアシスタント)

児玉匡史(リサーチアシスタント)

井手健斗 (リサーチアシスタント)

山口和雄(テクニカルスタッフ)

木村夕子(テクニカルスタッフ)

部門内では、地下水研究グループ、CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ、鉱物資源研究グループ、燃料資源地質研究グループ等、産総研内では、再生可能エネルギー研究センター、活断層・火山研究部門、地質情報研究部門、知能システム研究部門等と、さらに、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構等と連携して研究を推進している。

# 3.2. 研究予算

研究予算としては、産総研運営費交付金に加えて、以下のような公的外部予算プロジェクトに従事している.

- ・令和2年度国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発等事業)(資源エネルギー庁)
- ・ 令和 2 年度鉱物資源開発の推進のための探査等事業(資源開発可能性調査)(資源エネルギー庁)
- ・安全な CCS 実施のための CO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発に係る 再委託 (二酸化炭素地中貯留技術研究組合)等々.

また,民間企業とも積極的に共同研究を実施し,ニーズの把握と成果の橋渡しの促進に努めている.

# 4. 最近の主な研究成果

- Nakashima, Y. (2020) Development of a hand-held magnetic resonance sensor for the nondestructive quantification of fat and lean meat of fresh tuna. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **14**, 2947–2955.
- Nakashima, Y. and Nakano, T. (2020) Nondestructive quantification of heavy elements through the

- analysis of beam hardening artifacts using double-exposure X-ray computed tomography: A Theoretical Consideration. *Chemistry Africa*, **3**, 363-370.
- Matsunaga, Y., Kanda, W., <u>Takakura, S.</u>, Koyama, T., Saito, Z., Seki, K., Suzuki, A., Kishita, T., Kinoshita, Y., and Ogawa, Y. (2020) Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **390**, 106742. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106742
- Kanda, W., Utsugi, M., <u>Takakura</u>, <u>S</u>., and Inoue, H. (2019) Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model. *Earth Planets Space* **71**, 37. https://doi.org/10.1186/s40623-019-1017-7
- Nakashima, Y. (2019) Non-Destructive quantification of lipid and water in fresh tuna meat by a single-sided Nuclear Magnetic Resonance scanner. Journal of Aquatic Food Product Technology, 28, 241-252. https://doi.org/10.1080/10498850.20 19.1569742
- Nakano, T., and Nakashima, Y. (2019) Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography. Journal of X-Ray Science and Technology, **26**, 691–705. https://doi.org/10.3233/XST-18378
- Ikeda, S., <u>Nakashima, Y.</u>, and Nakano, T. (2019) Three–dimensional observation of the boundary region between massive feldspar and graphic granite by X–ray computed tomography. *Journal* of Mineralogical and Petrological Sciences, **114**, 1–17. https://doi.org/10.2465/jmps.180114
- 高倉伸一 (2020) 金属鉱床探査を支援する岩石物性データ ベースの設計,物理探査学会第143回学術講演会論文 集,38-41.