

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

Phone: 029-861-2464, e-mail: yokota-t@aist.go.jp

http://unit.aist.go.jp/georeserv/explogeol/

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、CO₂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。2021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。
- 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。
- 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. 空間・時間・密度を考慮したミュオントモグラフィでの密度異常検出可能性

ミュオグラフィは宇宙線ミュオンを利用した密度推定手法である。物体を透過するミュオンの個数を測定することで透過経路の平均密度が推定でき、レントゲン写真のように密度分布を推定できる。近年は複数の地点からミュオンを観測し、3次元密度推定をトモグラフィックに行う事例が増えている。今回は、ある大きさ・密度を持つ物体を検出するのに必要な観測時間、その時の物体の大きさ・密度を指標としてミュオントモグラフィの検出能力評価を考えた。特定の観測条件下で密度異常が検出可能かどうかについて評価するためには観測条件を考慮して数値計算を行う必要がある。多次元数値計算結果により検出能力を評価し、検出能力を基準にインバージョン手法の比較を行った。

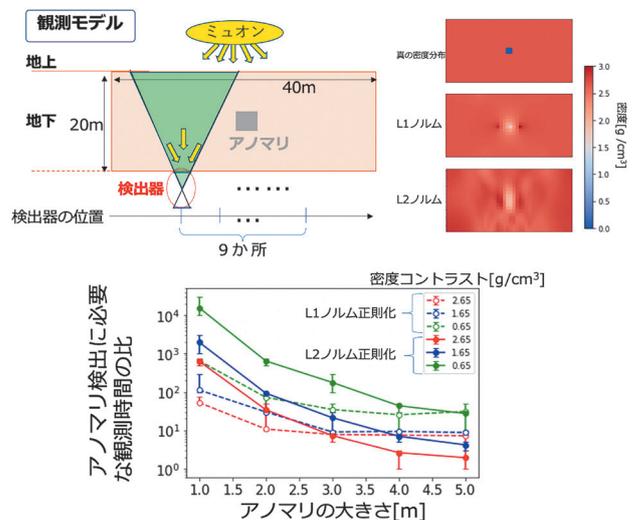


図1 左上：観測モデル（深さ20m、横幅40m、バックグラウンド密度2.65g/cm³）。右上：L1およびL2ノルム正則化最小二乗法を用いたミュオントモグラフィによる推定密度分布。下：L1およびL2ノルム正則化最小二乗法を用いたミュオントモグラフィの検出能力評価結果。

今回は図1（左上）のように、地下20mにおいて検出器を2.5m間隔の9か所において密度推定を行い、その推定結果を用いてモデル中央部の密度異常体（アノマリ）を検出する2次元モデルを仮定した。図1（右上）はL1ノルムとL2ノルムの異なる正則化項を用いた最小二乗法による推定密度分布の結果を示している。L1ノルム正則化ではス

パースな解が選択されやすく、L2ノルムと比べた際により空間的な変化が小さな密度分布となっている。図1(下)はアノマリの密度・大きさを変えた場合に検出に必要な観測時間を計算したものである。アノマリの大きさおよびアノマリとバックグラウンドとの密度コントラストが大きくなるほどに観測時間が単調に減少しており、またアノマリの密度や大きさに応じて2つのインバージョン手法による異常検出に必要な観測時間の違いが見られた。このように検出すべきターゲットに応じてインバージョン手法を比較し、より最適な手法を決定できると考えられる。

2.2. トリプルX線CTによる鉛土壌汚染サンプルの非破壊分析

鉛や水銀など人体に有毒な重金属で汚染された土壌サンプルは、容器を開封せずに原子番号と濃度を3次元スキャンできる手法が望まれている。X線管球の加速電圧を2種類用いたデュアルX線Computed Tomography(CT)は、3次元元素マッピングに多用されてはいるが、原子番号(Z)がおおむね40を超えるような重金属に対してはZを一意的に決定することが困難になり、信頼性が落ちる。そこで、我々は鉛(Z=82)などの高いZ値の物質に対しても信頼できるCT分析法を開発するため、3種類の加速電圧を用いたトリプルX線CT法の可能性をCTの計算機シミュレーションで評価した。粘土の中に、鉛、バリウム、アンチモン、イオウを含む鉱物が濃集した4つの領域を計算機上で構築し、この仮想的な系に対して70, 100, 140kVで電子を加速して得たX線源で3枚のCT画像を数値的に画像再構成した(図2)。

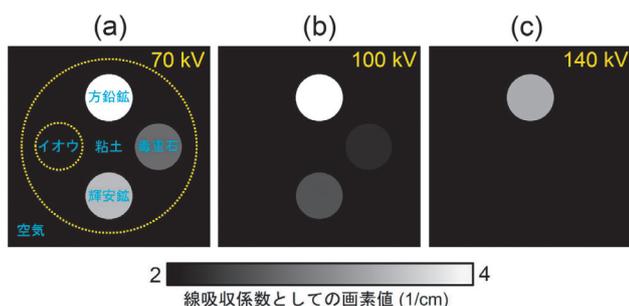


図2 3種類のX線管球の加速電圧に対応する、仮想的な土壌サンプルの二次元CTシミュレーション結果。直径270 μmの円形領域の粘土のなかに、直径72 μmの4つの小さい円形領域を確保し、そこに6vol%の方鉛鉱(PbS)、毒重石(BaCO₃)、輝安鉱(Sb₂S₃)、自然イオウ(S₈)をそれぞれ埋め込んだ。黄色い点線で輪郭を示した粘土とイオウの領域は、このグレースケールでは、サンプルを取り囲む空気と識別できないくらい暗い。

一般に加速電圧が上がると物質のX線吸収係数が低下するのでCT画像が全体的に暗くなるが、その暗くなり方がZに敏感に依存することを利用するのがポイントである。そ

の結果、図2の一番明るい円形領域に埋め込まれている重金属の原子番号Zが82であること(つまりバリウムやアンチモンやイオウではなく鉛であること)を正しく言い当てることができた。なお、このシミュレーションではZの決定だけでなく、粘土中の鉛の濃度の推定にも成功している。このように仮想的なサンプルを用いて、トリプルX線CTの土壌汚染分野への有効性・将来性を確認できた。最後に、このトリプルX線CTは、土壌汚染以外の分野にも適用しうることを強調したい。たとえば、金・白金・ランタノイド(レアアースの一種)の3次元選鉱にも使える可能性がある。今後とも、社会ニーズへのマッチングを強く意識しながらトリプルX線CTの可能性を追求していきたい。

2.3. 金属鉱床探査支援のための岩石物性データベースの作成

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。そこで、2019年度から一般財団法人日本鉱業振興会の助成を受け、日本鉱業協会からの受託研究「金属鉱床探査を支援する岩石物性データベースの作成」を開始し、昨年度までに岩石物性データベースの設計とプロトタイプの実行を行った。今年度はプロトタイプに岩石物性データの追加・登録を行い、それを日本鉱業協会資源部会物探委員会で紹介し、会員の企業で使用していただいた。そして、会員から寄せられたコメントや指摘を集約・検討して、ユーザーが利用しやすいデータベースにするために以下の改修を行った。

まず、データベースの初期画面を地理院地図(電子国土Web)にして、登録されている岩石試料の位置を表示し、ユーザーがそこから岩石物性データを検索して閲覧できるようにした(図3)。また、検索画面では鉱床タイプ、試料区分、鉱山名の項目をプルダウン方式で選べるほか、岩石・鉱物名、鉱床タイプ、鉱山名については文字入力で曖昧検索ができるようにした。さらに、検索した岩石試料の情報や物性データを一覧表示した個票をA4サイズで印刷する機能を設けた(図4)。そして、各種物性の数値データについてはCSVファイルとしてダウンロード可能とした。今後も岩石物性データベースの改修を行うとともに、データの収集・登録を増やし、多くの人々に利用されるデータベースとなるように努力していきたい。

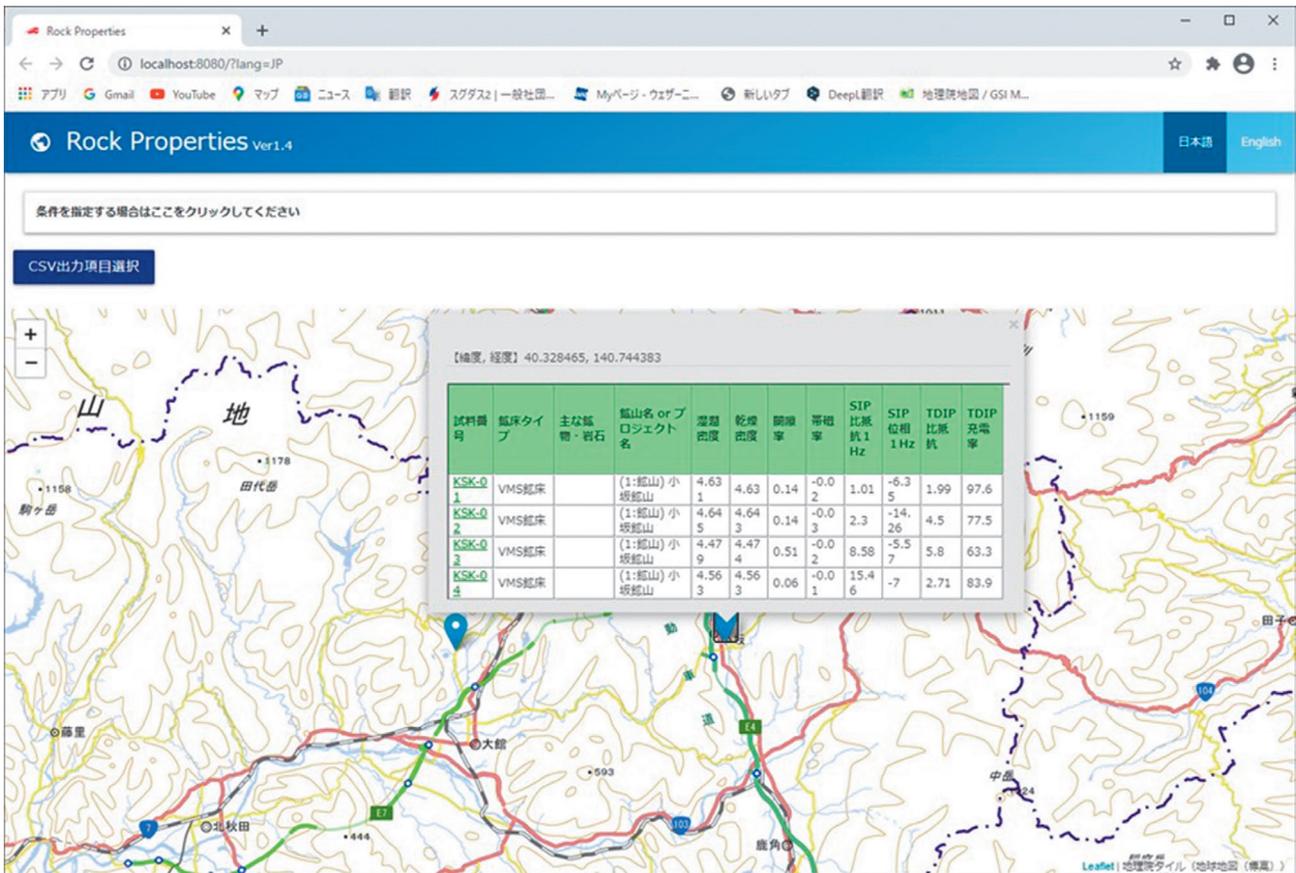


図3 登録されている岩石試料の地理院地図（電子国土 Web）上での表示例。表示位置をクリックすると、試料に関する基本的な情報や代表的な物性値を見ることができる。

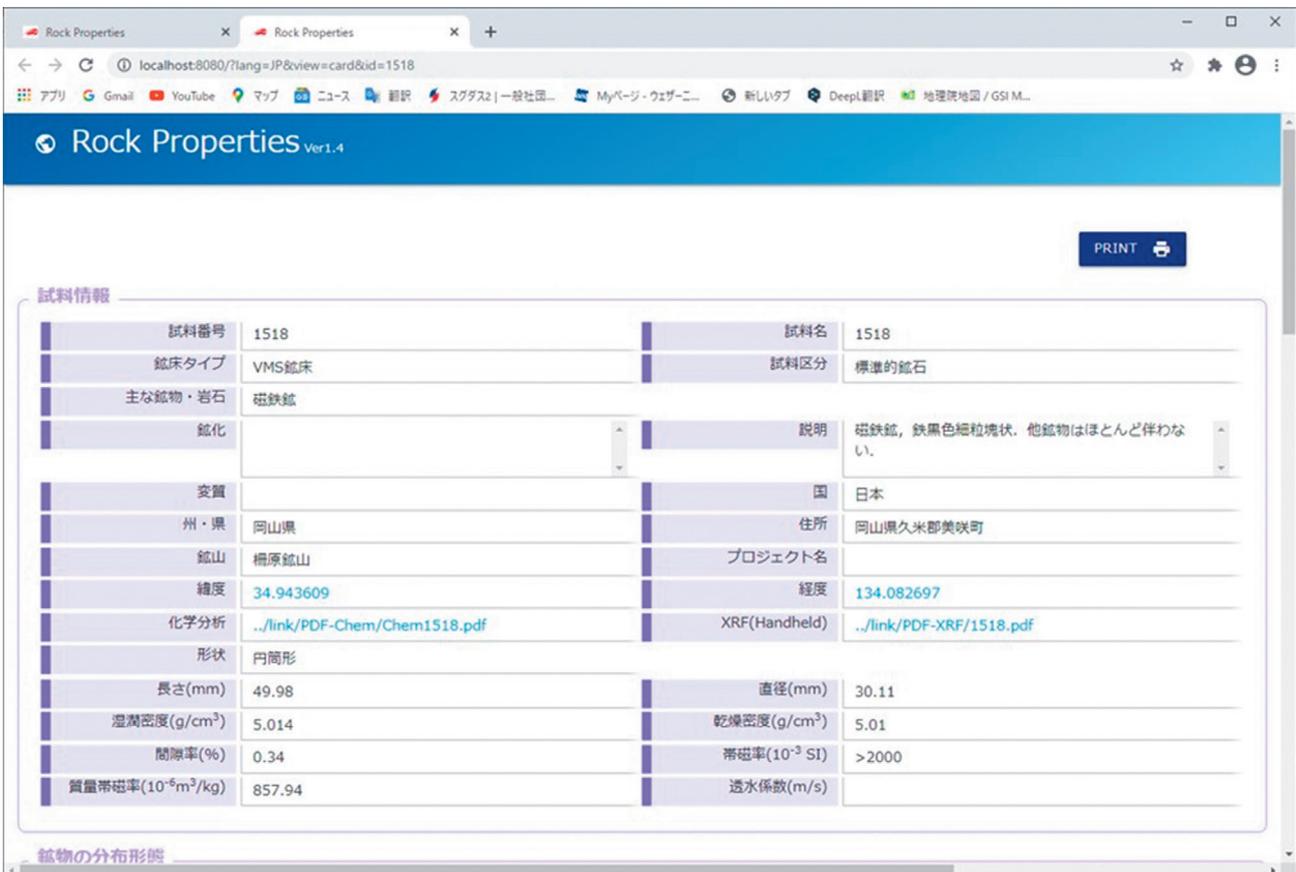


図4 岩石物性データベースの個票の表示例。右上の「PRINT」をクリックすると、個票の情報がA4サイズで印刷される機能を追加した。

3. グループの体制

3.1. 人員体制 (2021.10.1現在)

以下の13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 (主任研究員)
 梅澤良介 (研究員)
 児玉匡史 (研究員)
 上田匠 (客員研究員)
 松島潤 (客員研究員)
 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)
 木村タ子 (テクニカルスタッフ)

部門内では、地下水研究グループ、CO₂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) (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CO₂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

Umezawa, R., Katsura M., and Nakashima, S. (2021), Effect of Water Saturation on the Electrical Conductivity of Microporous Silica Glass, *Transport in Porous Media*, **138**, 225-243. <https://doi.org/10.1007/s11242-021-01601-6>
 Horikawa, T., Katsura, M., Yokota, T. and Nakashima, S. (2021) Effects of pore water distributions on P-wave velocity-water saturation relations in

partially saturated sandstones, *Geophysical Journal International*, **226**, 1558-1573.

<https://doi.org/10.1093/gji/ggab143>

Asada, M., Moore, G. F., Kawamura, K., and Noguch, T. (2021) Mud volcano possibly linked to seismogenic faults in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, *Marine Geophysical Research*, **42**.

<https://doi.org/10.1007/s11001-020-09425-7>

Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., Takakura, S., Koyama, T., Noguchi, R., Yukutake, Y., Ishikawa, M., Fukai, M., Harada, M., and Abe, Y. (2021) Imaging the Source Region of the 2015 Phreatic Eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, Using High-Density Audio-Frequency Magnetotellurics, *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL091568.

<https://doi.org/10.1029/2020GL091568>

Aizawa, K., Takakura S., et al. (2021) Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *Kyushu Island, Japan, Earth Planets and Space*, **73**: 12.

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., Takakura, S., 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., Takakura, S., 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>