物理探査研究グループの紹介

Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

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.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.

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/

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 ー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(⁵³Iを中心とする円)は、キセノ ンの誤差円(⁵⁴Xe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





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)

40

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、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

- <u>Nakashima, Y.</u> (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, 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 <u>Nakashima, Y.</u> (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
- <u>高倉伸一</u> (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.