様式 H-2

2025 年度 共同利用実施報告書（研究実績報告書）
（高エネルギー素粒子地球物理学公募研究）

１．課題番号　　２０２５－H－０３

２．研究課題名（和文、英文の両方をご記載ください）

和文：室内実験スケールでのミュオンと弾性波の融合測定：孔隙性媒体におけるガス飽和率と弾性定数の推定

英文：Combined measurement of muons and elastic waves on a laboratory scale

３．研究代表者所属・氏名　東京大学大学院新領域創成科学研究科・松島　潤

（地震研究所担当教員名）　田中宏幸　教授

４．研究組織の詳細（研究代表者を含め、当課題に参加した全ての研究者を記載し、必要に応じ行を追加してください。）

氏名	所属・職名	参加内容
田中宏幸	地震研究所・教授	総合評価
松島　潤	新領域創成科学研究科・教授	研究取り纏め・理論的構成
Hamid Basiri	新領域創成科学研究科・特任研究員	室内実験・ミュオンシミュレーション

５．研究計画の概要（申請書に記載した「研究計画」を 800 字以内でご記載ください。変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。）

本研究は、ミュオグラフィと弾性波探査の融合による地下物性評価手法を、非孔隙性媒体から孔隙性媒体へ拡張し、ガス飽和率および 2 種類の弾性定数（体積弾性率・せん断弾性率）の同時推定可能性を室内実験スケールで検証することを目的とする。これまでにアクリルやアルミニウムなどの非孔隙性媒体を対象として本手法の有効性は実証されており、本研究ではより実フィールドに近い孔隙性媒体へ適用することで、地下貯留層評価への展開を目指す。

前年度は、北海 Sleipner CCS プロジェクトの 4 次元地質モデルを用いたシミュレーション研究により、実フィールドスケールでの融合探査の可能性を検討した。その結果、ミュオンフラックスの統計的挙動および弾性波応答の解析から、CO_2飽和率の識別可能性が示唆されている。一方で、深度約 1000m 環境におけるミュオン統計や弾性波との統合処理の妥当性には不確実性が残されており、室内実験による基礎的検証が不可欠である。

本研究では、20cm 立方の水槽に豊浦標準砂を充填し、孔隙率に基づきガス飽和率を段階的に制御した試料を作成する。これに対してミュオン観測および超音波計測を実施することを計画していたがミュオン測定に限定し、密度変化を取得する。ミュオンデータについては、建物構造および入射方向を考慮したフラックス–密度長変換関係を確立するとともに、気圧・気温変動の影響を基準測定器により補正する。また、モンテカルロシミュレーションを併用し、実験結果の妥当性を検証する。

以上により、孔隙性媒体における融合測定の推定精度と限界を体系的に整理し、CO_2貯留などの実フィールドにおけるミュオグラフィと弾性波の融合探査の有効性を室内実験レベルで実証する。さらに、異分野融合による発展を促進するため、関連分野の研究者を集めた国際ワークショップを開催し、本手法の応用可能性と将来展開について議論する。

6．研究成果の概要（図を含めて１頁で記載してください。）

キーワード（3～5 程度）：ミュオグラフィ、弾性波探査、ガス飽和率、孔隙性媒体、密度推定

本研究では、「室内実験スケールでのミュオンと弾性波の融合測定」に向けた基盤的検証として、ガス飽和率が異なる孔隙性媒体に対するミュオグラフィの適用性を詳細に評価した。特に、密度に高感度なミュオン透過減衰と、弾性波が有する弾性定数への感度の相補性に着目し、将来的な両者の融合による物性推定の可能性を検討することを目的とした。

室内実験では、既知密度を有するアクリルおよび砂試料を対象とし、砂については 0%から 100%まで段階的に飽和率を変化させた条件でミュオンフラックスを測定した（図 1）。その結果、ミュオンフラックスは密度長に応じて指数関数的に減衰し、飽和率の増加に伴うバルク密度の上昇を明瞭に反映することが確認された。特に、乾燥状態から完全飽和に至る過程で透過ミュオン数は系統的に減少し、密度推定誤差は最大で約 10%程度まで改善された。さらに、ガウシアンフィルタによるノイズ低減および指数関数＋定数項モデルの導入により、実験データの適合性と推定精度が大きく向上することが示された。

また、モンテカルロシミュレーションとの比較により、観測された減衰特性の再現性とモデルの妥当性が確認され、ミュオグラフィが約 0.1 g/cm^{3}程度の微小な密度変化にも感度を有することが明らかとなった 。加えて、時間積分的なミュオンフラックスの累積差分解析により、統計ノイズの影響を低減しつつ密度変化を安定的に捉えられることが示され、長時間観測の有効性が確認された。

以上の成果は、ミュオグラフィが孔隙性媒体中の流体飽和状態の変化を非破壊かつ連続的に検出可能であることを示すとともに、弾性波探査と組み合わせることで、ガス飽和率と弾性定数の同時推定における非一意性低減に寄与する可能性を示した。室内実験スケールにおいてその有効性を実証した本研究は、CO_2地中貯留や地下ガス挙動の高精度モニタリングに向けた統合物理探査手法の確立に重要な基盤を提供するものである。

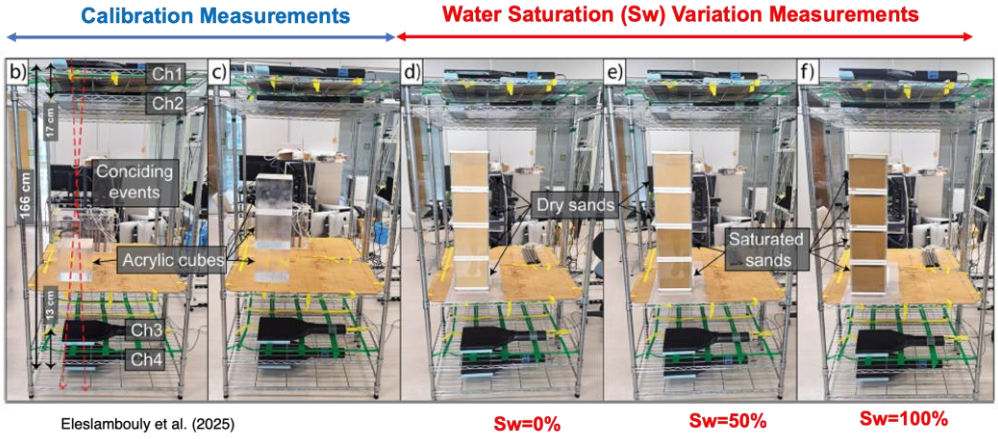


図１：孔隙媒体における水飽和率測定実験。左２つの図は較正用。

本研究の成果の一環として、2026 年 3 月 31 日に、ミュオグラフィの国際的展開と学際的融合を目的としたワークショップを開催した。参加者は約 60 名にのぼり、講演者は国内外から計 7 名（日本、カナダ、フィンランド、ドイツ、ベルギー）を招へいし、大学・研究機関および企業の専門家が幅広く参加した。講演では、資源探査、CCS モニタリング、希土類元素探査など多様な応用分野における最新技術や実証研究が紹介されるとともに、人工ミュオン源や大規模シミュレーション技術などの最先端動向が共有された。特に、ミュオグラフィと弾性波探査の融合による地下流体飽和率および弾性定数の定量化手法に関して活発な議論が行われ、本研究の独自性と実フィールドスケールへの展開可能性を国際的に発信する重要な機会となった。

７．研究実績

※所外の課題代表者は、所内担当教員に必ず実績について地震研業績 DB への登録依頼をしてください。

国際学会発表（招待講演）

（学会発表かつ招待講演の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）、招待について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 (invited)）

該当無し。

国際学会発表

（学会発表の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 ）

該当無し。

論文

（下記表の項目について記載してください。）

#	論文情報（著者、論文タイトル、雑誌名、巻、頁、出版年、DOI）	査読の有／無	出版年月	著者に地震研所員を含む／含まない	謝辞の有／無
記載例	Kazushige Obara, Aitaro Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. Science 353, 253-257 (2016). DOI:10.1126/science.aaf1512	有	2016.7	含む	無
1	Eleslambouly, Ahmed, Hamid Basiri, Mohammed Y. Ali, Jun Matsushima, Fateh Bouchaala, Masashi Kodama, and Toshiyuki Yokota. Laboratory-scale muography experiments to estimate density and saturation in porous media. *Communications Earth & Environment,* **6**, 1038 (2025). DOI:10.1038/s43247-025-03010-9	有	2025.11	含まない	有
2	Matsushima, Jun, Masashi Kodama, Hamid Basiri, Mohammed Y. Ali, Fateh Bouchaala, Ahmed Eleslambouly, Toshiyuki Yokota, and Hiroyuki KM Tanaka. "Contributions of muography to monitoring carbon dioxide geological storage." *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)* 134, 625-638 (2025). DOI:10.5026/jgeography.134.625	有	2025.12	含む	有

８．外部資金の申請・採択状況（※任意、本紙提出後に採択された場合にはメールでお知らせください。）

科研費基盤(B)・採択