令和 6 年度廣川研究助成事業報告：
地殻構造の描像と地震発生過程の解明に向けた最先端研究の情報収集

椎名　高裕[1]

1．はじめに

令和 6 年度廣川研究助成事業の支援を受け，2024 年 4 月 14 日から 19 日にかけて，オーストリアのウィーンで開催された European Geosciences Union（EGU）の年次総会（EGU General Assembly 2024）に参加しましたのでご報告いたします．本学会では，地殻を含む地球内部構造やそのイメージング技術に関する研究発表を聴講し，その最新動向を収集するとともに，2024 年能登半島地震とその余震分布の特徴に関する研究を発表しました．

2．研究の背景

日本列島周辺では陸のプレート（北米プレート及びユーラシアプレート）の下に，海洋プレート（太平洋プレートやフィリピン海プレート）が沈み込んでいます．このような沈み込み帯に位置する日本列島周辺は世界的にも地震活動が活発な地域の一つです．日本列島内陸部で発生する地震の多くは，陸のプレートの最上部を構成する地殻の内部で発生しており，これらは一般的に内陸地震と呼ばれています．内陸地震は，人間の生活圏に近い，地下の比較的浅い場所で発生するため，ひとたび規模の大きな地震が発生した場合には，強い地震動等による大きな被害を引き起こすことが懸念されています．このような背景から，日本列島内陸部における地震の規模や活動の評価・予測手法を確立することは，内陸地震による被害軽減に資する情報を提供する上で極めて重要です．そして，その実現のためには，内陸地震の発生メカニズムへの理解を深めることが不可欠であり，特に地震活動の時空間的な消長に関連した地殻構造の特徴の解明が求められています．

内陸地震に対してはしばしば活断層周辺や群発的地震活動域に集中した分布が観測されています．このような局在化した活動域の形成には既存の断層分布や地殻内部の水（地殻流体）の存在が密接に関係していると考えられています．実際，地表で計測される地震記録には，断層や地殻流体が分布することで生じた特徴的な波形が観測されることがあります．茨城県北部周辺では，直達 S 波の到達後に明瞭な後続波（S 波反射波）が観測されており，この地域の地下に豊富な地殻流体が存在することを示しています（Shiina *et al.*, 2024a）．また，より広域の地下構造を可視化する技術として地震波トモグラフィ法が知られています．最も一般的な手法では，地震波（直達 P 波と直達 S 波）の到達時刻を用いて地震波速度異常（地震波の伝播速度が周囲に比べて速いか遅いか）の分布を推定します．この方法により，日本列島内陸部ではおおよそ 10–20 km 程度の空間スケールで地殻の不均質構造の推定が可能となっています．これまでの研究では，内陸地震活動域周辺には高速度異常域が分布し，その直下には低速度異常域が存在することが示されており，これらの構造が内陸地震の活動域形成に寄与していると考えられています（例えば，Shiina *et al.*, 2018；Nakajima，2022）．しかしながら，地震波速度異常はあくまでも相対的な指標に過ぎません．このため，不均質構造の実体，すなわち，地殻内部の物質構造や断層・地殻流体の分布を直接的に制約することは困難です．この課題を克服するため，地震波速度そのものを指標とする地下構造のイメージング技術の開発が世界各地で進められています．

地震波速度など，物理量とその不確定性を定量的に評価する方法として，マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC 法）を用いたアプローチが注目されています．MCMC 法はベイズ統計学に基づいた解析手法の一つであり，近年の計算機性能の飛躍的な向上に伴って，さまざまな分野での応用が進んでいます．地震学分野では，Bodin and Sambridge（2009）の表面波を用いた地下構造推定への導入を契機として，以降，一次元速度構造と震源位置の同時推定問題（例えば，Ryberg and Haberland，2019；Shiina and Kano，2022）などへと発展しています．そこで，筆者は日本列島周辺における地殻の地震波速度構造の定量的イメージング

1 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門
キーワード：廣川研究助成事業，地殻構造，内陸地震，地震学，地震波トモグラフィ，島弧地殻

を目的として，MCMC 法を適用した新しい地震波トモグラフィ法（ベイズ型地震波トモグラフィ法）の研究・開発を行っています．本手法により，従来の解析では困難であった地震波速度そのものを指標とした地殻構造のイメージングの実現が期待されます．

3．EGU General Assembly 2024 への参加と地殻構造に関する研究の情報収集

EGU General Assembly は例年オーストリア・ウィーンで開催されており，欧州を中心とした地域で最も大規模な地球惑星科学分野の国際学会です．特に欧州では，MCMC 法をはじめとするベイズ的アプローチによる解析手法の研究開発が活発に進められています．筆者は，そのような研究の最新動向を収集し，自身の地下構造の定量的イメージング技術に関する研究に活かすことを目的として，EGU General Assembly 2024（写真 1）に参加しました．

地球内部構造の解明は地震学分野における主要な研究テーマの一つであり，EGU General Assembly 2024 でも関連した多くの研究発表が行われていました．中でも，全波形インバージョン法（Mohammadi *et al.*, 2024）に代表される，地震波形記録の多角的な活用による地球内部構造の解析手法の発展とそれらの世界各地への応用が進んでいる点が印象的でした．この技術は推定精度の向上やより小規模な不均質構造の抽出を可能としており，地球内部構造の高解像度化・高精度化が着実に進んでいることを実感しました．

MCMC 法を用いた研究に関しては，地球内部構造の推定だけでなく，震源決定や大規模地震における断層すべり解析などにも応用が広がっており，対象とする推定量（地震波速度や震源位置，断層のすべり量など）とその誤差を定量化するための基盤的技術であることを改めて認識しました．特に，異なる性質を持つ地球物理学的観測データ（例えば，レシーバー関数と表面波，地震波形記録と GNSS 記録）の統合解析への MCMC 法の適用に関する発表もありました．筆者自身，複数項目の観測データを統合した解析は地殻構造研究における新しい潮流として注目していました．このため，統合解析の枠組みや検証方法に関する具体的な知見を得られたことは，本学会に参加した大きな成果の一つです．

写真 1　EGU General Assembly 2024 の会場の様子（オーストリア・ウィーン，オーストリアセンター）．

現地では，フランスの Electricité de France に所属する Pierre Arroucau 博士と，地殻構造の定量的イメージングに関する研究打ち合わせを行う機会を得ました．Arroucau 博士は，地震波形記録を用いた定量的解析，特に MCMC 法による震源決定や地下構造推定の分野で深い知識と経験を持っており，筆者が直面している技術的課題を中心に，地下構造研究に関する意見交換を行いました．特に，現在構築を進めているベイズ型地震波トモグラフィ法において適用可能な数理的アプローチや計算アルゴリズムについて多くの示唆が得ることができました．その一例として，震源決定に MCMC 法を用いる際，震源位置の推定誤差が数 km 程度であるという先見情報を組み込むことで計算速度を大幅に改善できた事例（例えば，Nicholson *et al.*, 2004）を紹介いただきました．これらの計算科学的視点に基づく助言は，計算コストの増大が想定されるベイズ型地震波トモグラフィ法において，迅速かつ信頼の高い解析を実現するために非常に有益であると考えています．現在は，Arroucau 博士との議論で得られた知見に基づいて，ベイズ型地震波トモグラフィ法の構築と改良を行っています．

また，Arroucau 博士の紹介により，彼の共同研究者であり，MCMC 法を用いた地震学的研究の先駆者であるオーストラリア国立大学の Malcolm Sambridge 教授及びその研究グループのメンバーと交流する機会を得ました．この交流を通じて，彼らが取り組んでいる最先端の研究に触れ，直接議論できたことは貴重な経験となりました．特に，ポスドクの Fabrizio Magrini 博士が開発を進めている MCMC 法の解析ツールは，実用性と拡張性の観点から非常に興味深く，今後の研究に向けた大きな刺激を受けました．

4．2024 年能登半島地震の余震分布に関する研究発表

EGU General Assembly 2024 では，2024 年 1 月 1 日に能

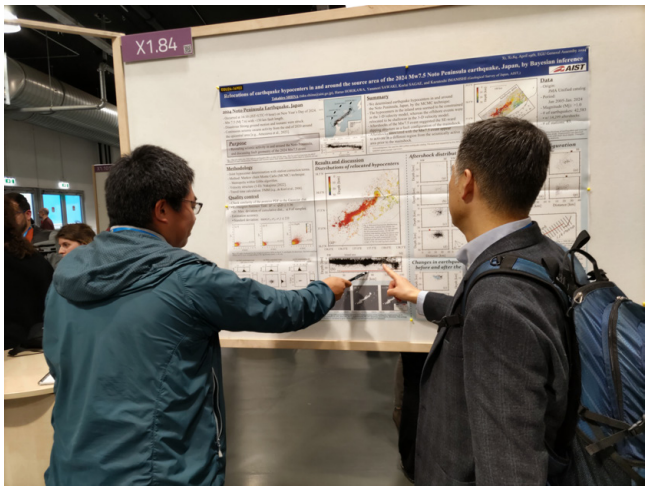

写真 2　ポスター発表の様子（左が筆者）.

写真 3　学会会場近くで撮影したドナウ川.

登半島で発生した地震（Mj（気象庁マグニチュード）7.6）についての特別セッションが設けられ，このセッションで筆者は 2024 年能登半島地震の余震分布に関する研究成果のポスター発表を行いました（Shiina *et al.*, 2024b）（写真 2）．本研究は，MCMC 法と現実的な地震波速度構造（Nakajima, 2022）を用いて地震の震源位置を高精度で決定し，2024 年能登半島地震に伴う余震の全体像の把握と能登半島周辺における過去の地震活動との関係を明らかにすることを目的としています．ポスター発表では，地震波速度構造が震源位置の推定に与える影響を検討しました．加えて，高精度な余震分布に基づいて 2024 年能登半島地震の余震分布の特徴を明らかにし，同地震に伴って発生した津波の波源域の空間的関係性についても議論しました．

能登半島地震は EGU General Assembly 2024 でも注目度が高く，多くの参加者が筆者のポスター発表に関心を示してくださいました．特に，能登半島北東部で長期間継続していた群発地震活動やそれらを駆動したと考えられている地殻流体の分布（例えば，Amezawa *et al.*, 2023）が，本震の地震時すべり分布や余震分布とどのような関係があるかという点について海外の研究者も強い興味を持っているようでした．また，台湾から参加した研究者からは，観測網の外側で発生した地震のより現実的かつ信頼性の高い震源分布の推定方法に関して強い関心を寄せられました．台湾では，2024 年能登半島地震が沿岸域で発生した大規模地震とそれに伴う津波が観測された重要な先行事例として位置付けられていることがうかがえました．そこで，陸域の観測データのみを用いた震源決定における地震波速度構造の影響やその検証方法について，日本と台湾の地震観測状況を比較しながら議論しました．本発表を通じた海外の研究者との意見交換を通して，能登半島地震に関する本発表の位置付けやその意義を再確認することができました．

5．終わりに

EGU General Assembly 2024 は，筆者にとって初めて参加する欧州開催の国際学会となりました．これまでに参加経験のあるアメリカ地球物理学連合の年次大会とは異なり，EGU General Assembly 2024 では欧州をはじめ，アフリカやアジアなどさまざまな地域からの参加者が集まっていました．本学会では，主目的である地殻構造研究に関する多くの最先端研究事例や技術的進展に関する情報を多数収集できたことに加え，これまで接する機会の少なかった地域の研究発表にも触れることができました．その結果，会期中は充実した 1 週間を過ごすことができました．また，今回の学会参加を通じて改めて実感したのは，海外の国際学会は世界各地で進められている最新の研究を知り，分野・地域を越えた研究者と意見を交換する重要な場であるということです．このような貴重な機会を頂いた廣川研究助成事業のご支援に深く感謝いたします．今回の学会参加を通じて得られた経験や海外研究者とのネットワークを，今後の島弧地殻構造や内陸地震に関する研究に積極的に活かしていきたいと考えています．

最後に，滞在したウィーンは美しい石造りの街並みが印象的な都市であり，学会会場近くを流れるドナウ川（写真 3）やフライトの機内から見えた欧州の広大な景色には圧倒されました．今回は初めての欧州訪問であったことから，緊張もあり，これらの景色や欧州特有の雰囲気を楽しむ余裕ができたのは帰国間際のわずかな時間だけでした．

次回，学会等で欧州を訪れる際には，研究活動に加えて，現地の景観や文化にじっくり触れる機会を持ちたいと考えています．

文　献

Amezawa, Y., Hiramatsu, Y., Miyakawa, A., Imanishi, K. and Otsubo, M.（2023）Long‐living earthquake swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophysical Research Letters*, **50**, e2022GL102670.

Bodin, T. and Sambridge, M.（2009）Seismic tomography with the reversible jump algorithm. *Geophysical Journal International*, **178**, 1411–1436.

Mohammadi, N., Beller, S., Monteiller, V. and Operto, S.（2024）High-resolution 3D imaging of crustal and upper mantle structure in the Alps from full waveform inversion of teleseismic P wave. EGU General Assembly 2024, EGU24-21544.

Nakajima, J.（2022）Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan. *Earth, Planets and Space*, **74**, 160.

Nicholson, T., Gudmundsson, O. and Sambridge, M.（2004）Constraints on earthquake epicenters independent of seismic velocity models. *Geophysical Journal International*, **156**, 648–654.

Ryberg, T. and Haberland, C.（2019）Bayesian simultaneous inversion for local earthquake hypocentres and 1-D velocity structure using minimum prior knowledge. *Geophysical Journal International*, **218**, 840–854.

Shiina, T. and Kano, M.（2022）Bayesian-based joint determination of earthquake hypocenters and 1-D velocity structures divided by a structural boundary. *Geophysical Journal International*, **230**, 759–775.

Shiina, T., Takahashi, H., Okada, T. and Matsuzawa, T.（2018）Implications of seismic velocity structure at the junction of Kuril-northeastern Japan arcs on active shallow seismicity and deep low-frequency earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**, 8732–8747.

Shiina, T., Amezawa, Y., Horikawa, H., Imanishi, K. and Uchide, T.（2024a）Deep crustal fluids and their relation to cutoff depths of crustal earthquakes in the North Ibaraki area of northeastern Japan inferred from reflected S-waves. *Tectonophysics*, **885**, 230415.

Shiina, T., Horikawa, H. and Imanishi, K.（2024b）Relocations of earthquake hypocenters in and around the source area of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake, Japan, by Bayesian inference. EGU General Assembly 2024, EGU24-14903.

SHIINA Takahiro（2025）Report of the Hirokawa Research Fund in the 2024 fiscal year: Advanced research on the relationship between crustal structure imaging and earthquake generation mechanisms.

（受付：2025 年 5 月 12 日）