



JAEA-Research

2024-013

DOI:10.11484/jaea-research-2024-013

地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (令和5年度)

Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation
of Radioactive Waste in Fiscal Year 2023

丹羽 正和 島田 耕史 末岡 茂 石原 隆仙
箱岩 寛晶 浅森 浩一 村上 理 福田 将真
小北 康弘 鏡味 沙耶 横山 立憲 小形 学
中嶋 徹 藤田 奈津子 神野 智史 渡邊 隆広

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Takanori ISHIHARA
Hiroaki HAKOIWA, Koichi ASAMORI, Osamu MURAKAMI, Shoma FUKUDA
Yasuhiro OGITA, Saya KAGAMI, Tatsunori YOKOYAMA, Manabu OGATA
Toru NAKAJIMA, Natsuko FUJITA, Satoshi JINNO and Takahiro WATANABE

東濃地科学センター

Tono Geoscience Center

November 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department,
Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(令和5年度)

日本原子力研究開発機構
東濃地科学センター

丹羽 正和, 島田 耕史, 末岡 茂, 石原 隆仙^{※1}, 箱岩 寛晶^{※2}, 浅森 浩一, 村上 理^{※2},
福田 将真, 小北 康弘, 鏡味 沙耶, 横山 立憲, 小形 学, 中嶋 徹, 藤田 奈津子,
神野 智史^{※3}, 渡邊 隆広

(2024年7月5日受理)

本報告書では, 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発のうち, 深地層の科学的研究の一環として実施している地質環境の長期安定性に関する研究について, 第4期中長期目標期間(令和4年度~令和10年度)における令和5年度に実施した研究開発に係る成果を取りまとめたものである。第4期中長期目標期間における研究の実施にあたっては, 地層処分事業における概要・精密調査や国の安全規制に対し研究成果を適時反映できるよう, (1)調査技術の開発・体系化, (2)長期予測・影響評価モデルの開発, (3)年代測定技術の開発の三つの枠組みで研究開発を進めている。本報告書では, それぞれの研究分野に係る科学的・技術的背景を解説するとともに, 主な研究成果等について取りまとめた。

東濃地科学センター: 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

※1 技術開発協力員

※2 特定課題推進員

※3 任期付研究員

**Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
in Fiscal Year 2023**

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Takanori ISHIHARA^{※1}, Hiroaki HAKOIWA^{※2},
Koichi ASAMORI, Osamu MURAKAMI^{※2}, Shoma FUKUDA, Yasuhiro OGITA,
Saya KAGAMI, Tatsunori YOKOYAMA, Manabu OGATA, Toru NAKAJIMA, Natsuko FUJITA,
Satoshi JINNO^{※3} and Takahiro WATANABE

Tono Geoscience Center
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received July 5, 2024)

This annual report documents the progress of research and development (R&D) in the 2nd fiscal year of the JAEA 4th Medium- and Long-term Plan (fiscal years 2022-2028) to provide the scientific base for assessing geosphere stability for long-term isolation of high-level radioactive waste. The plan framework is structured into the following categories: (1) Development and systematization of investigation techniques, (2) Development of models for long-term estimation and effective assessment, (3) Development of dating techniques. The current status of R&D activities with previous scientific and technological progress is summarized.

Keywords: Geosphere Stability, Investigation Technique, Development of Model, Dating Technique

※1 Collaborating Engineer
※2 Special Topic Researcher
※3 Senior Post-Doctoral Fellow

目次

1. はじめに	1
2. 令和 5 年度の研究成果	6
2.1 調査技術の開発・体系化	6
2.1.1 断層の活動性に係る調査技術	6
2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術	10
2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術	15
2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	25
2.3 年代測定技術の開発	36
2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術	36
2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術	43
2.3.3 フィッション・トラック(FT)年代測定技術	48
2.3.4 加速器質量分析技術	60

Contents

1. Introduction 1

2. Progress of the research and development in fiscal year 2023 6

 2.1 Development and systematization of investigation techniques 6

 2.1.1 Investigation techniques for evaluation of fault activities 6

 2.1.2 Investigation techniques for high-resolution imaging of crustal heterogeneity 10

 2.1.3 Investigation techniques for detection of geofluids 15

 2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment 25

 2.3 Development of dating techniques 36

 2.3.1 *In situ* analysis techniques and high-precision isotope analysis techniques 36

 2.3.2 Optically stimulated luminescence dating techniques 43

 2.3.3 Fission track dating method 48

 2.3.4 Accelerator mass spectrometry techniques 60

1. はじめに

日本列島は、プレートの収束帯に位置しており、安定大陸に比べて地震・断層活動や火山・火成活動が活発であることから、我が国における地層処分の概念は、「長期的な安定性を備えた幅広い地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置するという特徴を有する(核燃料サイクル開発機構, 1999¹⁾:以下,「第2次取りまとめ」)。すなわち、まず自然現象によって地層処分システムに期待される物理的な隔離機能が損なわれる恐れがないようなサイトを選ぶことが前提となる。さらに、サイト固有の地質環境や想定されるそれらの長期的な変化を見込んだ上で、合理的な地層処分システムを構築し、長期的な安全性を確認することが必要となる。そのためには、サイトやその周辺においてマグマの貫入・噴火や断層運動に伴う岩盤の破壊等、地層処分システムに著しい影響を及ぼす現象が発生する可能性のほか、地殻変動等によって生じる地質環境(例えば、熱環境、力学場、水理場、化学場)の長期的な変化を予測・評価しておくことが重要となる。日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」)では、1988年より「深地層の科学的研究」の一環として、これらの調査・評価に係る研究開発である地質環境の長期安定性に関する研究を進めてきた。

このうち、1999年11月に報告した第2次取りまとめでは、関連する地球科学の分野に蓄積された情報や知見を分析するとともに、地層や岩石の年代測定等を補足的に実施し、過去から現在までの活動の中に認められる傾向や規則性に基づいて、自然現象の将来の活動の可能性や変動の規模等を検討した。その結果、地層処分に適した安定な地質環境が我が国にも広く存在し得るとの見通しが得られた。また、その科学的な根拠となる基盤情報として、活断層や第四紀火山、海成段丘の分布・形成年代等に関する全国レベルでのデータベースを整備してきた(核燃料サイクル開発機構, 1999²⁾)。第2次取りまとめ以降については、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」³⁾(以下、「最終処分法」)の成立や地層処分事業の実施主体の設立等、我が国の地層処分計画が事業の段階に進展したことを踏まえ、最終処分法に定められた最終処分施設の建設スケジュールや段階的な選定要件等を念頭に置きつつ、特に第2次取りまとめやその評価(例えば、原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会, 2000⁴⁾; OECD/NEA, 1999⁵⁾)の過程で明らかにされた研究課題に焦点をあてて研究を進めてきた。さらに2002年には、当時の我が国の規制機関である原子力安全委員会から文献調査段階の予定地の選定に係る要件となる「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」(原子力安全委員会, 2002⁶⁾:以下、「環境要件」)が示されたが、実施主体ではこれらを受けて「概要調査地区選定上の考慮事項」(原子力発電環境整備機構, 2002⁷⁾)を公表した。その一方で、「廃棄物安全小委員会報告書—高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて—」(総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2003⁸⁾)や「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究について」(総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2009⁹⁾)等により、安全規制にとって重要な研究分野や課題が示される等、研究開発を進めていく上での方向性や研究課題がさらに明確にされてきた。

しかしながら、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震及び東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い、我が国の原子力政策や地層処分技術に関する研究開発を取り巻く状況が大きく変化した。「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について(見解)」(原子力委員会, 2012¹⁰⁾)では、「高レベル放射性廃棄物の処分について(回答)」(日本学術会議, 2012¹¹⁾)を踏まえ、現段階での地球科学分野の最新の知見を考慮しつつ、地層処分の実現可能性について調査研究し、その成果を国民と共有すべきとの指摘がなされた。さらに、「今後の原子力研究開発の在り方について(見解)」(原子力委員会, 2012¹²⁾)では、処分施設立地地域の地質条件を保守的に予想した上で、十分に安全を確保し

ていくことができる処分技術の確立に向けて研究開発を推進していくべきとしている。このような背景のもと、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会では、地層処分技術ワーキンググループを設置(現在は、特定放射性廃棄物小委員会の下に設置)し、専門家による地層処分技術の再評価と今後の研究開発課題の検討が行われ、「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性及び地質環境の長期安定性について―」(総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾)が取りまとめられた。その結果、地層処分にとって好ましい地質環境特性を有する地域が我が国にも存在することが改めて示された。しかしながら、地層処分の技術的信頼性を向上させるため、今後の地層処分事業の取り組みと並行した研究開発の必要性も併せて示された。さらに、2016年5月に原子力委員会の下に設置された放射性廃棄物専門部会では、地層処分に関する研究開発について、関係機関間の一層の連携強化、計画策定における処分事業実施主体の一層のリーダーシップの発揮、継続的な人材確保・育成への取り組みの重要性、等が提言されている(原子力委員会, 2016¹⁴⁾)。

これらの背景を踏まえ、地層処分関係研究・行政機関、実施主体、外部有識者が参画する地層処分研究開発調整会議において、今後重点的に取り組むべき研究開発項目が議論され、5年ごとに「地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～平成34年度)」(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2018¹⁵⁾)、「地層処分研究開発に関する全体計画(令和5年度～令和9年度)」(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2023¹⁶⁾) (以下、「全体計画」)が提示されている。さらに、2017年7月には「科学的特性マップ」(経済産業省資源エネルギー庁, 2017¹⁷⁾)が公表されるとともに、実施主体からは、サイト調査から処分場の設計・建設・操業・閉鎖、さらには閉鎖後の長期間にわたる安全確保に関し、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に説明した「包括的技術報告書」が2021年2月に公表されている(原子力発電環境整備機構, 2021¹⁸⁾)。

一方、2020年に文献調査が始まるなど、処分事業に進捗が見られる中で、2012年に発足した現在の我が国の規制機関である原子力規制委員会からは、地層処分において安全確保上少なくとも考慮されるべき事項(断層運動、火山現象、侵食等)が提示された(原子力規制委員会, 2022¹⁹⁾)。さらに、地層処分技術ワーキンググループでは、各専門分野の有識者を交えて文献調査段階の評価の考え方について議論が重ねられ、その結果を踏まえ、「文献調査段階の評価の考え方」が取りまとめられた(資源エネルギー庁, 2023²⁰⁾)。

地質環境の長期安定性に関する研究では、最新の科学的知見を取り込んだ全国レベルでの自然現象に関するデータベースの更新や個別現象の理解といった基盤的な研究に加え、サイト選定や安全評価に必要な調査技術や評価手法の整備にも重点をおいて研究を進めてきた。具体的には、地層処分事業における概要・精密調査や国の安全規制に対し研究成果を反映できるよう、(1)自然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備(調査技術の開発・体系化)、(2)将来の自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための手法の整備(長期予測・影響評価モデルの開発)のほか、(3)最先端の分析装置等を用いた放射年代測定や鍵層の高分解能同定法等による編年技術の高度化(年代測定技術の開発)を進めてきた。

第3期中長期目標期間においては、第2期中期目標期間までに挙げた研究成果や、国の審議会において提示された研究課題(総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾)に基づき、研究計画を策定した(梅田ほか, 2015²¹⁾)。さらにその後、地層処分研究開発調整会議において整理された全体計画にも対応すべく、研究開発を進めてきた。研究開発にあたっては、原子力機構東濃地科学センター土岐地球年代学研究所において整備され

た施設・設備・機器を活用して効果的に成果を挙げることに留意した。

その結果、マグマの影響範囲を把握するための地磁気・地電流法等に基づく調査手法の整備、深部流体(スラブ起源水、化石海水、油田かん水といった非天水起源の地下水;特に、高温、低 pH、高塩濃度といった特徴を有し、地層処分システムに著しい影響を及ぼし得るもの)の移動・流入に係る地震・地質学的解析手法の整備、地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性を把握するための測地・地形・地質学的解析手法の整備、熱年代法や宇宙線生成核種法等による内陸～沿岸部における隆起・侵食の調査・評価技術の整備等を進めることができ、一部に発展的な課題を残しつつも、平成 30 年度～平成 34 年度の全体計画で提示された課題について概ね、成果を提示することができた。第 3 期中長期目標期間までに得られた成果については、原子力機構の地層処分技術に関する研究開発情報と成果を取りまとめた CoolRepR4 (<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>) において公開されている。

前述のように、2020 年に文献調査が始まり、今後、文献調査地域のさらなる拡充に加え、複数の地点で同時並行的に概要調査が行われる可能性が現実的に考えられる状況となってきたが、我が国の地質環境は火山や活断層の分布、隆起・侵食の特徴や地下地質等において地域ごとに大きな違いがある。そのため、地質環境の大きく異なる各サイトにおける自然現象の影響評価に的確に対応できるよう、最先端の科学的知見を常に取り入れながら、幅広い調査・評価技術を整備しておく必要がある。さらに、各自然現象間の相互関係を考慮した総合的な調査・評価としてパッケージで示すことも、個別技術の実用化の上で重要である。

そこで、第 4 期中長期目標期間においても、(1)調査技術の開発・体系化、(2)長期予測・影響評価モデルの開発、(3)年代測定技術の開発の三つの研究開発の柱に基づき、各個別技術の信頼性向上を図るとともに、複数の個別技術を適切に組み合わせたアプローチによる評価手法を提示することにより、実施主体や安全規制当局に対し的確に技術・知見が提供できる状況を維持していく。これらの技術については、地層処分分野への反映のみならず、原子力を取り巻く課題解決や地域防災等の社会のニーズへの対応も考慮して整備を行う。ならびに、大学等研究機関との協働を進め、土岐地球年代学研究所に設置されている施設・設備・機器の更なる利用促進を図るとともに、地球科学分野の研究成果の創出に貢献する。

本報告書では第 4 期中長期目標期間(令和 4 年度～令和 10 年度)の 2 年目にあたる令和 5 年度の研究開発成果を取りまとめた。それぞれの研究において科学的・技術的背景を解説するとともに、課題を克服するための実施内容、研究成果、今後の課題等について報告する。なお、本内容のうち、2.1.1、2.1.2、2.1.3、2.2、2.3.2 の成果は、経済産業省からの受託事業「令和 5 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(地質環境長期安定性総合評価技術開発)」の成果である。また、2.3.1、2.3.3、2.3.4 の成果の一部にも、当該受託事業の成果が含まれている。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999, 634p.
- 2) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 1 わが国の地質環境—, JNC TN1400 99-021, 1999, 559p.
- 3) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(平成 12 年法律第 117 号), 2000.

- 4) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会, 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 2000, 32p.
- 5) OECD/NEA, International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, NEA/RWM/PEER(99)2, 1999.
- 6) 原子力安全委員会, 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について, 2002, 21p.
- 7) 原子力発電環境整備機構, 概要調査地区選定上の考慮事項, 2002, 27p.
- 8) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 廃棄物安全小委員会報告書—高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて—, 2003, 108p.
- 9) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究(平成 22 年度～平成 26 年度)について, 2009, 40p.
- 10) 原子力委員会, 今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について(見解), 2012, 9p.
- 11) 日本学術会議, 高レベル放射性廃棄物の処分について(回答), 2012, 36p.
- 12) 原子力委員会, 今後の原子力研究開発の在り方について(見解), 2012, 15p.
- 13) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—, 2014, 61p.
- 14) 原子力委員会放射性廃棄物専門部会, 最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価報告書, 2016, 43p.
- 15) 経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度～平成 34 年度), 2018, 44p.
- 16) 経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画(令和 5 年度～令和 9 年度), 2023, 73p.
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁, 科学的特性マップ, 2017,
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf (参照:2024 年 6 月 7 日).
- 18) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—本編および付属書, NUMO-TR-20-03, 2021,
https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html (参照:2024 年 6 月 7 日).
- 19) 原子力規制委員会, 特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項, 2022, <https://www.nra.go.jp/data/000402076.pdf> (参照:2024 年 6 月 7 日).
- 20) 資源エネルギー庁, 文献調査段階の評価の考え方, 2023, 36p.

- 21) 梅田浩司, 安江健一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 浅森浩一, 藤田奈津子, 清水麻由子, 島田 顕臣, 松原章浩, 田村 肇, 横山立憲, 渡邊隆広, 徳安佳代子, 濱 友紀, 「地質環境の長期安定性に関する研究」基本計画－第 3 期中長期計画(平成 27 年度～平成 33 年度), JAEA-Review 2015-012, 2015, 43p.

2. 令和5年度の研究成果

2.1 調査技術の開発・体系化

2.1.1 断層の活動性に係る調査技術

(1) はじめに

地層処分サイト選定に際しては、活断層を避けることが基本となるが、活断層から離れた位置において断層運動に伴う変形等の影響がどれほどあるのか評価が求められることも考えられる。この場合、断層変位の有無の判定に係るものとして、活構造の影響範囲を推定できる条線(スリッケンライン)の有無が検討される。条線は不連続面のせん断方向、せん断センスを示す指標として、古くから構造地質学的研究で扱われてきた(例えば Petit, 1987¹⁾; Doblas, 1998²⁾)。また、小断層上に発達する条線の姿勢、変位センスを解析することによって、応力場の方向や応力比などを推定する応力逆解析も近年盛んに行われている(例えば、佐藤ほか, 2017³⁾)。このような条線を利用した研究において、条線の形成条件を推定することは、各手法の妥当性確認の意味で必要であり、活断層の影響を受ける範囲の評価の点でも重要になる。本研究では、条線の形成条件(条線が形成される圧力条件等)の検討を目的とし、一面せん断試験機を用いて様々な圧力条件下で試料をせん断してその結果の観察を行った。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

条線とは、断層沿いのせん断や摩擦で形成された痕であり、断層面上の擦り傷のような線状模様をいう。また、条線には、溝状の凹みや階段状の凹凸(スリッケンステップ)などによる非対称的な構造が見られる(図 2.1.1-1)。断層の運動方向は、条線の線状模様の方向と上述の非対称構造の向きを調べることで判断できる。露頭で観察される条線は、母岩が形成された後、地表に露出するまでの間に断層に沿った変形を受けて形成されたものである。これまでの研究により、多数の小断層データを用いて地下に伏在する活断層の分布やせん断帯の活動の影響範囲の推定を試みているが(Tamura *et al.*, 2020⁴⁾; Niwa *et al.*, 2024⁵⁾; Nishiyama *et al.*, 2024⁶⁾)、個々の条線の実際の形成時期は不明なことが多い。そのため、それらの小断層の一部を活構造の影響によるものと解釈して検討を進めるには、第四紀の地質学的に短い期間の削剥だけでも地表に露出しうる地下浅部の環境において、条線が形成できることを確認しておく必要がある。

(3) 実施内容・結果

一面せん断試験のための試料には、和歌山県田辺市本宮に分布する四万十帯の古第三系中～粗粒砂岩の転石を用いた。転石は同一地点から採取し、各転石の試料名を HGS-20-2A, 2B, 2C, 2D とした。供試体の選定理由として、先第四紀の変形によって割れ目が形成された後に、地殻のごく浅い場所で第四紀の変位を受ける場合を想定すると、条線が形成される面は多少なりとも風化が進んでいる蓋然性が高い。我が国に広く分布する岩体のうち、風化面を模擬しつつ、比較的均質な試料を得るためには、四万十帯の古第三系砂岩試料が適切であると判断した。

採取した試料はセリ矢を用いて人工的に平滑な割れ目になるように割り、試験機に入るよう成形した。試験方法は岩盤不連続面の一面せん断試験に準拠した方法で実施した。本試験が参考とする基準は、地盤工学会の基準 JGS 2541-2008「岩盤不連続面の一面せん断試験方法」とした。試験条件は変位量 7 mm, 変位速度 0.2 mm/min で一定とし、垂直応力を 0.05 MPa, 0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.5 MPa, 1 MPa で一

面せん断試験を実施した。これらの垂直応力は、岩盤の密度を 2500 kg/m^3 とした時、それぞれ深度約 2 m, 4 m, 8 m, 20 m, 40 m に相当する。

試験の結果を表 2.1.1-1 に、試験後の試料写真を図 2.1.1-2 に示す。なお、試験 4 では条線が形成されなかったため試料を変更し、同一試験条件下で試験 5 を実施した。破断面では、不陸が大きい箇所がせん断を受けており、粉状物質が発生していた（以下、この箇所を「せん断部分」と呼ぶ）。せん断部分の割合（面積比）は、垂直応力の大きい試験 1～3 の供試体でも 10% 程度であり、小さい垂直応力下では 1～2% 程度だった。計測した条線の本数は下盤側の面かつ肉眼で確認が容易なものを計測した。条線は小さい垂直応力下でも形成されたが、垂直応力の大きい試験 1～3 で特に明確に形成され、5～16 本の条線が認められた。

各試験で得られたせん断応力とせん断変位曲線を図 2.1.1-3 に示す。条線が明確に形成された試験 1～3 では、ピークせん断応力が 400 kN/m^2 以上、残留せん断応力が 200 kN/m^2 以上の高い値を示す。また、ピークせん断応力に達するまでの変位量が、条線の形成に乏しかった試験 4～6 に比べて 2 倍以上に長いという特徴を持っている。

(4) 主な成果と課題

本研究では、活断層の影響範囲を示す条線が形成される条件を理解するため、古第三紀砂岩試料を用いて一面せん断試験を実施し、垂直応力を変えて条線形成の様子について検討した。試験の結果、垂直応力が 1 MPa, 0.5 MPa, 0.2 MPa の条件でせん断を実施すると明確に条線が形成された。この垂直応力はそれぞれ地表面から 40 m, 20 m, 8 m の深さの条件に相当する。今回の室内試験より、条線が明確に形成される境界は、垂直応力で 0.1～0.2 MPa の間、つまり深さ 4～8 m の間に存在すると推定される。今後せん断試験面を湿潤状態で実施してみるなど、様々な試験条件を適応して条線の形成条件の探索を行い、知見を深めていくことが重要である。

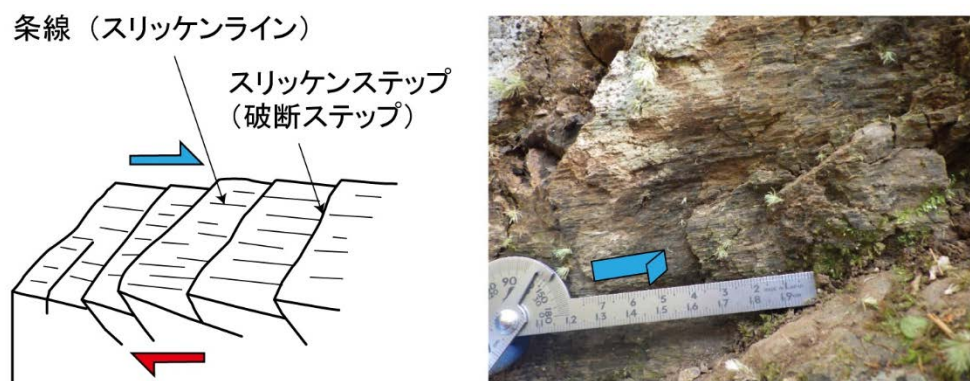


図 2.1.1-1 条線の模式図及び露頭でみられる小断層の条線

条線の模式図は、Petit (1987)¹⁾を改変した。写真の小断層は、写っている岩盤が左方向に動いたと判定される(左ずれ)。

表 2.1.1-1 試験結果一覧表

年度	No	地質	試料名	垂直応力 (MPa)	概略深度 (m)	変位量 (mm)	変位速度 (mm/min)	供試体の状況	条線 (本)	せん断部分 割合(%)
2023	1	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2A-1	1	40	7	0.2	人為的破断面	16	10.76
	2	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2A-2	0.5	20	7	0.2	人為的破断面	9	5.62
	3	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2B-2	0.2	8	7	0.2	人為的破断面	5	2.69
	4	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2C-1	0.1	4	7	0.2	人為的破断面	0	1.69
	5	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2B-1	0.1	4	7	0.2	人為的破断面	2	1.56
	6	中～粗粒砂砂岩	HGS-20-2D	0.05	2	7	0.2	人為的破断面	1	1.42

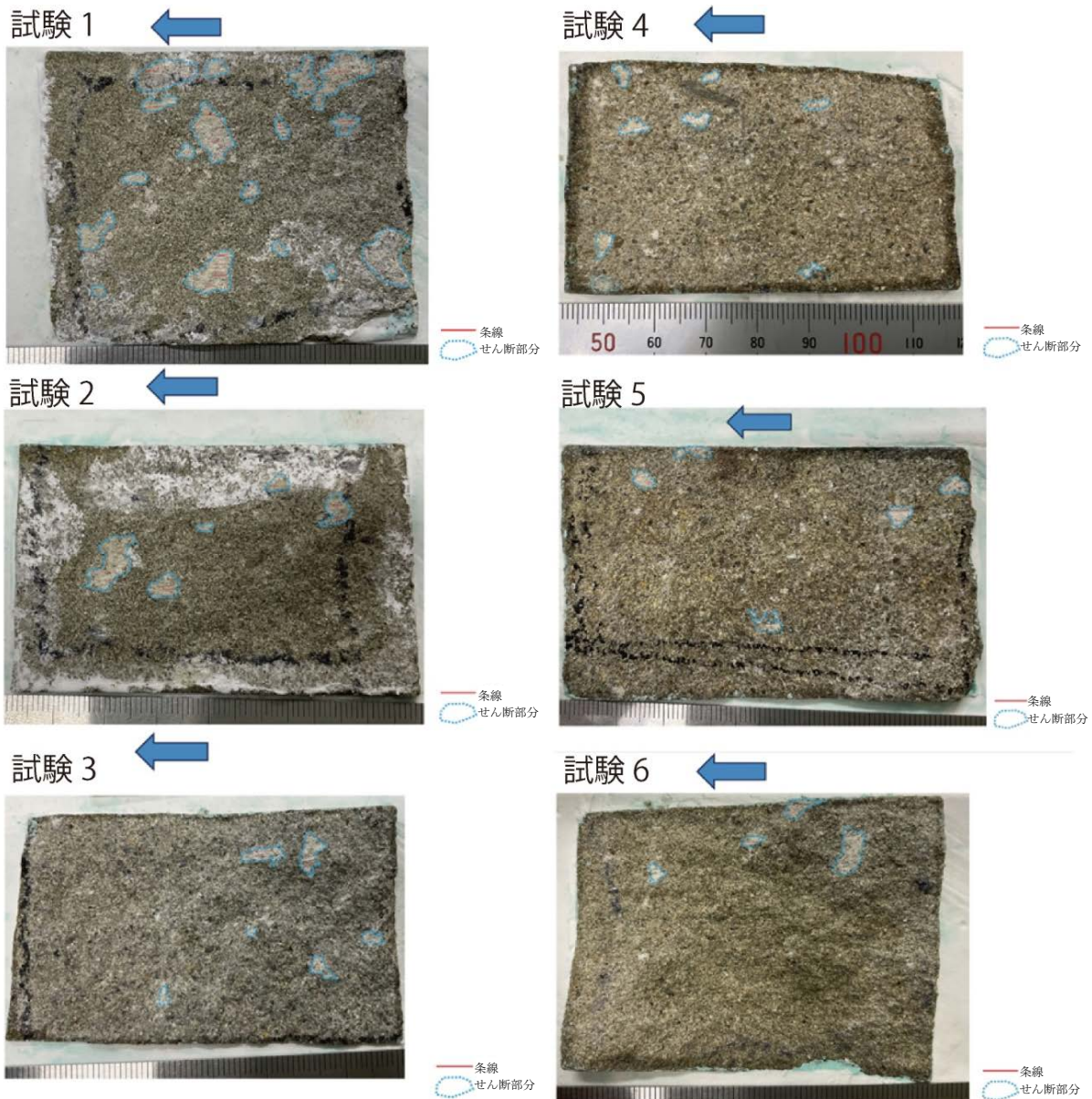


図 2.1.1-2 せん断試験後のせん断面試料写真

各試験番号は表 2.1.1-1 のナンバーと対応する。青矢印はせん断方向(写真に写った試料が動いた方向)を示す。

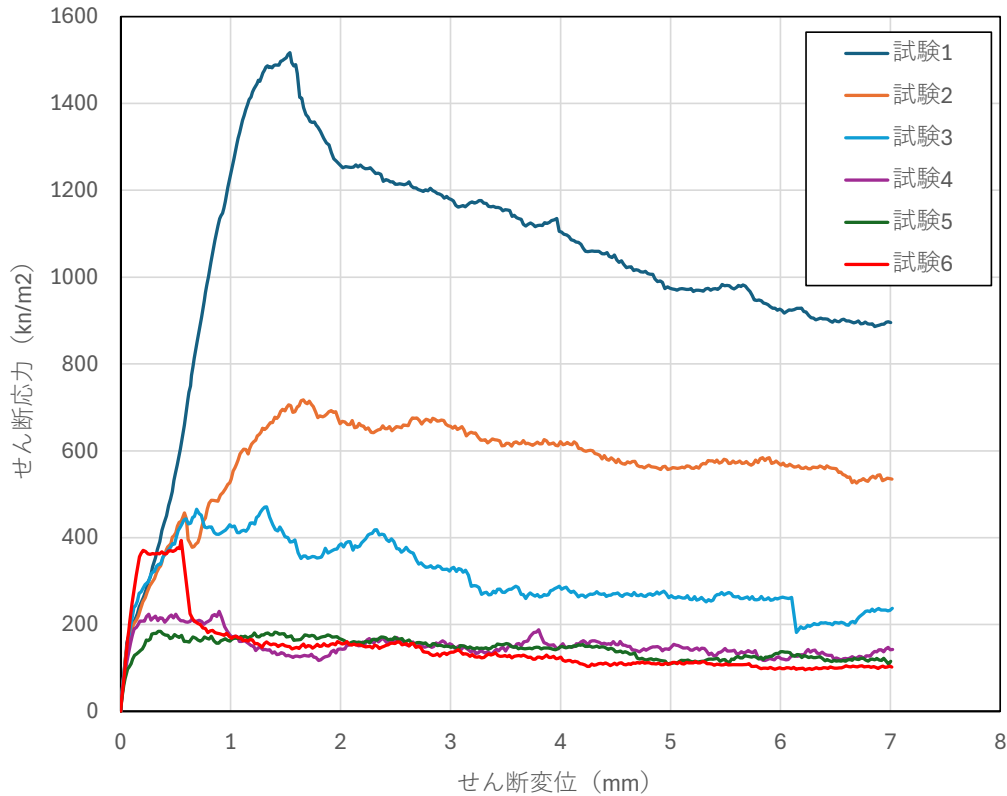


図 2.1.1-3 せん断応力-せん断変位曲線
各試験番号は表 2.1.1-1 のナンバーと対応する。

参考文献

- 1) Petit, J. P., Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks, *Journal of Structural Geology*, vol.9, 1987, pp.597-608.
- 2) Doblas, M., Slickenside kinematic indicators, *Tectonophysics*, vol.295, 1998, pp.187-197.
- 3) 佐藤活志・大坪 誠・山路 敦, 応力逆解析手法の発展と応用, *地質学雑誌*, vol.123, no.6, 2017, pp.391-402.
- 4) Tamura, T., Oohashi, K., Otsubo, M., Miyakawa, A. and Niwa, M., Contribution to crustal strain accumulation of minor faults: a case study across the Niigata-Kobe Tectonic Zone, *Japan, Earth, Planets and Space*, vol.72, no.7, 2020, doi:10.1186/s40623-020-1132-5.
- 5) Niwa, M., Shimada, K., Terusawa, S., Goto, A., Nishiyama, N., Nakajima, T., Ishihara, T. and Hakoïwa, H., Field-based description of near-surface crustal deformation in a high-strain shear zone: A case study in southern Kyushu, Japan, *Island Arc*, vol.33, 2024, doi:10.1111/iar.12516.
- 6) Nishiyama, N., Nakajima, T., Goto, A., Hakoïwa, H., Nagata, M., Shimada, K. and Niwa, M., Analysis of the stress field around concealed active fault from minor faults-slip data collected by geological survey: an example in the 1984 Western Nagano Earthquake region, *Earth and Space Science*, vol.11, 2024, doi:10.1029/2023EA003360.

2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術

(1) はじめに

将来の地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性がある現象(例えば、断層運動、火山・火成活動、熱水活動)の潜在的なリスクを排除するためには、地表からの調査の段階において、地下深部における震源断層や高温流体(溶融体を含む)等の存否や構造をあらかじめ確認しておくための調査技術が必要となる。特に、地殻中部に存在する微小地震の集中域や地殻深部に流体等が存在するような領域の付近では、将来の活動によって、地殻浅所まで破断が伸展することやそれに伴って地下深部の高温流体等が流入する可能性も考えられるため、これらに関連する地下深部の不均質構造を把握するための技術基盤の整備を進めている。

地層処分システムが長期的に安全機能を発揮するためには、地層処分の場となる地質環境に期待される閉じ込め機能の観点から、地下水の流動やその化学組成などといった地質環境特性が好ましい範囲で長期にわたって維持されることが重要となる。例えば 1965 年に生じた松代群発地震では、これらの顕著な変化が観測されている(例えば、Kitano *et al.*, 1967¹⁾; 奥澤・塚原, 2001²⁾)。このような地下水の性状の顕著な変化は、地下深部を起源とする流体が天水起源の表層地下水へ混入することによって生じた可能性が指摘されている(例えば、Wakita *et al.*, 1978³⁾; Sato *et al.*, 2020⁴⁾)。地下深部から流体が流入する可能性を適切に評価するためには、その経路となり得る地質環境の特性に関する知見を得ておくことが重要である。本研究では、九州地方の前弧域を事例として、S 波スプリッティング解析により地殻の異方性構造を推定し、深部流体の移動経路の抽出を試みた(小川ほか, 2024⁵⁾)。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

本研究で用いた S 波スプリッティング解析は、地震波が異方性媒質中を伝播する際に生じる S 波の分離を利用して、地下の異方性構造(S 波偏向異方性)を推定する手法である。一般に、これにより推定できる速い S 波の偏向方向(φ)と分離した S 波の到達時間差(dt)は、クラックの卓越方向や流体の飽和度等に依存する。火山地域では、観測された S 波偏向異方性を火山性流体が流入するクラックの存在に起因すると解釈した事例(例えば、Pezzo *et al.*, 2004⁶⁾; Nihara *et al.*, 2013⁷⁾)が報告されている。このことから、地殻深部やマントルを起源とする流体の上昇が、クラックに卓越した高透水性の領域を通じて生じると考えた場合、S 波偏向異方性を詳細に調べることによってその有無や特徴を捉えることができる可能性がある。

(3) 実施内容・結果

九州地方の日向灘沿岸では、地震波速度構造、地震波減衰構造、比抵抗構造などから、フィリピン海スラブの脱水によってその上位に放出された非火山性の流体が、マントルウェッジや地殻深部に存在すると考えられている(例えば、Ichiki *et al.*, 2000⁸⁾; Zhao *et al.*, 2000⁹⁾; Saita *et al.*, 2015¹⁰⁾; Asamori and Zhao, 2015¹¹⁾)。本研究では、この領域を含む九州地方の前弧域を対象として、地震観測点で記録された地震波形データを Silver and Chan (1991)¹²⁾による S 波スプリッティング解析に適用し、それぞれの観測点ごとに φ と dt を推定した。解析に用いた地震波形は、2004 年 4 月～2020 年 3 月の期間に深さ約 20 km 以浅で発生した地震によるものである。

図 2.1.2-1(a) に示す各観測点で推定された φ によると、火山フロントの周辺では東西～北東－南西方向に卓越する。これらは、Uchide *et al.* (2022)¹³⁾によって推定された地殻内の水平最大主応力軸が東西

～北東－南西方向を示すことと調和的である。地殻内の S 波偏向異方性の多くは、水平最大主応力の方位に平行な方向に発達したクラックの存在が原因であると考えられている(例えば、Kaneshima, 1990¹⁴; Savage, 1999¹⁵)ことから、これらの異方性は地殻内の応力場にしがって配向したクラックの存在に起因すると考えられる。

一方で、日向灘沿岸では、この水平最大主応力の方位と整合的でない方向に ϕ が卓越する地点が多く、同様の解釈を適用することは難しい。日向灘沿岸部の最大水平圧縮応力の方位は概ね東西方向であると推定されている(Uchide *et al.*, 2022¹³)ことに対して、本研究で推定した ϕ は北北東－南南西あるいは北西－南東方向を示す。地殻の S 波偏向異方性は、クラックの卓越方向のほか、地層の堆積過程で形成される成層構造が原因となる場合がある(例えば、石瀬・小田, 2009¹⁶)。九州東部には、白亜紀から新第三紀のはじめにかけて形成された付加体堆積岩類が広く分布し、日向灘沿岸で厚く、これに比べて内陸部では薄いことが人工地震観測によって推定されている(宮町・後藤, 1999¹⁷)。それらは、大局的に北西ないし西方に傾斜し、多くの走向断層で切られて地層の繰り返しが著しい(寺岡, 2004¹⁸)とされ、地層境界は北東－南西走向が卓越する。解析に用いた地震波が付加体堆積岩類の内部を伝播して観測点に到達したと考え、北北東－南南西の方向に卓越した ϕ は、このような地質構造を反映している可能性がある。また、観測点 N.HYGH 及び TSUNO で見られる北西－南東方向の ϕ は、応力解放法により宮崎平野北部で測定された地表付近の水平最大主応力軸(N4°W;長ほか, 2009¹⁹)に近いことから、ごく浅い領域の応力状態を反映している可能性もある。

図 2.1.2-1 (b) に示す各観測点で推定された dt は、地震波の入射角や到来方向によって大きく異なる。このことは、それぞれの観測点の近傍で ϕ の方向に卓越する異方性媒質が不均質に分布している可能性を示唆する。この dt をもとに地震波伝播経路上の平均的な異方性強度を計算することができるが、既往の研究によると、流体の流入経路となるクラックが発達した領域の異方性強度は 5～10%に達すると指摘されている(Crampin and Zatsepin, 1997²⁰)。例えば、箱根火山では、最大で 7%の異方性強度が観測され、流体やガスの移動経路を示唆すると解釈されている(Honda *et al.*, 2014²¹)。

本研究で推定した dt から異方性強度(Mizuno *et al.*, 2001²²)を計算すると 0.3～10.9%となるが、地殻深部やマントル最上部に非火山性の深部流体の存在が示唆されている沿岸部では、5%以上を示すデータは認められなかった。Umeda *et al.* (2007)²³及び原子力機構・電力中央研究所 (2024)²⁴によると、この領域における地下水溶存・遊離ガスのヘリウム同位体比は大気のそれと同程度かそれより低い値を示しており、マントル起源ヘリウムの地表への供給はほとんど認められない。一方で、観測点 G.TKAO, N.TGOH, N.NOBH の近傍では、スラブ起源深部流体の地下水への混入を示すとされる高い Li/Cl 比(風早ほか, 2014²⁵)が認められている(風早ほか, 2015²⁶)。そのため、深部からの流体の流入の有無や程度については議論の余地が残されているが、本解析では、震源から観測点まで連続するような流体上昇経路を示唆する顕著なデータは得られていないと考えられる。

(4) 主な成果と課題

本研究では、地殻深部～マントル最上部に非火山性の深部流体が存在すると考えられている九州地方の前弧域を事例として、S 波スプリッティング解析により地殻の S 波偏向異方性を推定した。その結果、流体の上昇経路を明確に示すデータは得られなかった。この解析手法は、震源－観測点間の地震波伝播経路(波線)ごとに異方性を推定できる。そのため、震源や観測点が密に分布する領域では高い空間分解能で異方性を推定できるが、本研究ではこのような条件が十分でなかったことが、流体の上昇経路を明確に捉えることができなかった要因の一つとして挙げられる。今後は、2.1.3 項に示すように、より多く

のデータが確保できる領域を事例とした解析により、流体移動経路の特徴やそれを把握する技術としての有効性・適用条件を検討する必要がある。

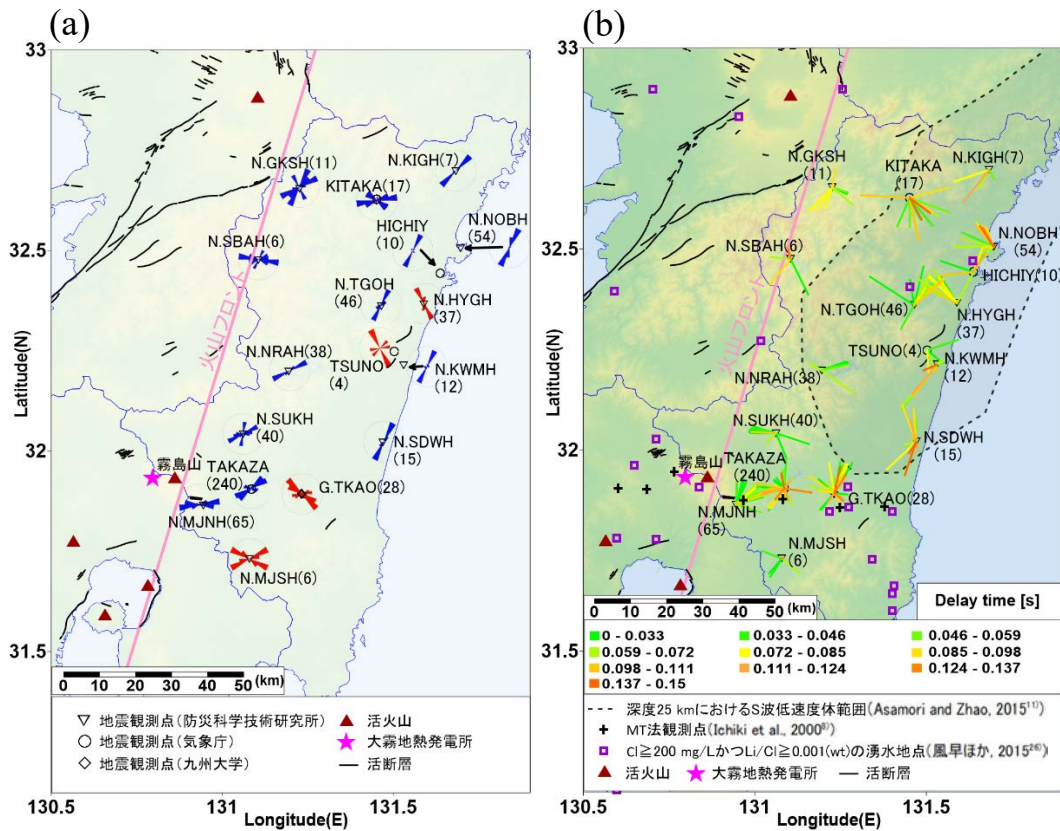


図 2.1.2-1 (a) S 波スプリッティング解析により推定した速い S 波の偏向方向 φ 及び (b) 分離した 2 つの S 波の到達時間差 dt (原子力機構・電力中央研究所, 2023²⁷⁾)

(a) 真北を 0° とした場合の φ の平均値が 0° 以上 90° 以下の範囲である観測点のローズダイアグラムを青色、φ の平均値が 90° を超える観測点のローズダイアグラムを赤色で示す。(b) それぞれの観測点から伸びる実線とその色は、地震波伝播経路 (波線) とその dt を示す。各観測点名の後の数字は、解析に使用した地震データ数を示す。

参考文献

- 1) Kitano, Y., Yoshioka, R., Okuda, F. and Kazuo, K., Geochemical study of ground waters in the Matsushiro area. Part 1: Chemical composition of ground waters, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, vol.17, 1967, pp.47-71.
- 2) 奥澤 保, 塚原弘昭, 松代群発地震地域に湧出する深層地下水, 地震 第 2 輯, vol.53, 2001, pp.241-253.

- 3) Wakita, H., Fujii, N., Matsuo, S., Notsu, K. and Takaoka, N., “Helium Spots”: Caused by a Diapiric Magma from the Upper Mantle, *Science*, vol.200, 1978, pp.430-432.
- 4) Sato, T., Kazahaya, K., Matsumoto, N. and Takahashi, M., Deep groundwater discharge after the 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.72, 54, 2020, doi:10.1186/s40623-020-01181-7.
- 5) 小川大輝, 平塚晋也, 浅森浩一, 島田耕史, 丹羽正和, 九州前弧域における S 波偏向異方性の推定, *物理探査*, vol.77, 2024, pp.15-23.
- 6) Pezzo, E.D., Bianco, F., Petrosino, S. and Saccorotti, G., Changes in the coda decay rate and shear-wave splitting parameters associated with seismic swarms at Mt. Vesuvius, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.94, 2004, pp.439-452.
- 7) Nihara, Y., Tadokoro, K., Yukutake, Y., Honda, R. and Ito, H., Spatial distribution of crack structure in the focal area of a volcanic earthquake swarm at the Hakone volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.65, 2013, pp.51-55.
- 8) Ichiki, M., Sumitomo, N. and Kagiya, T., Resistivity structure of high-angle subduction zone in the southern Kyushu district, southwestern Japan, *Earth. Planets. Space.*, vol.52, 2000, pp.539-548.
- 9) Zhao, D., Asamori, K. and Iwamori, H., Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone, *Geophysical Research Letters*, vol.27, 2000, pp.2057-2060.
- 10) Saita, H., Nakajima, J., Shiina, T. and Kimura, J., Slab-derived fluids, fore-arc hydration, and sub-arc magmatism beneath Kyushu, Japan, *Geophysical Research Letters*, vol.42, 2015, pp.1685-1693.
- 11) Asamori, K. and Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, *Geophysical Journal International*, vol.203, 2015, pp.1752-1772.
- 12) Silver, P.G. and Chan, W.W., Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.96, 1991, pp.16429-16454.
- 13) Uchide, T., Shiina, T. and Imanishi, K., Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.127, 2022, doi:10.1029/2022JB024036.
- 14) Kaneshima, S., Origin of crustal anisotropy: shear wave splitting studies in Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.95, 1990, pp.11121-11133.
- 15) Savage, M.K., Seismic anisotropy and mantle deformation: What have we learned from shear wave splitting?, *Reviews of Geophysics*, vol.37, 1999, pp.65-106.
- 16) 石瀬素子, 小田 仁, 日本列島の地震波異方性速度構造, *地震 第 2 輯*, vol.61, 2009, pp.S187-S197.
- 17) 宮町宏樹, 後藤和彦, 島弧としての九州の構造探査, *月刊地球*, 号外 no.27, 1999, pp.222-226.
- 18) 寺岡易司, 九州の四万十累層群, *地質ニュース*, vol.599, 2004, pp.40-48.

- 19) 長 秋雄, 国松 直, 金川 忠, 藤井真希, 横山幸也, 小川浩司, 田仲正弘, 我が国における地下岩盤内の初期地圧状態－応力解放法による実測データに基づく－, 地質調査研究報告, 産業技術総合研究所, vol.60, no.7/8, 2009, pp.413-447.
- 20) Crampin, S. and Zatsepin, S.V., Change of strain before earthquakes: The possibility of routine monitoring of both long-term and short-term precursors, *Journal of Physics of the Earth*, vol.45, 1997, pp.41-66.
- 21) Honda, R., Yukutake, Y., Yoshida, A., Harada, M., Miyaoka, K. and Satomura, M., Stress-induced spatiotemporal variations in anisotropic structures beneath Hakone volcano, Japan, detected by S wave splitting: A tool for volcanic activity monitoring, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.119, 2014, pp.7043-7057.
- 22) Mizuno, T., Yomogida, K., Ito, H. and Kuwahara, Y., Spatial distribution of shear wave anisotropy in the crust of the southern Hyogo region by borehole observations, *Geophysical Journal International*, vol.147, 2001, pp.528-542.
- 23) Umeda, K., McCrank, G.F., Ninomiya, A., Helium isotopes as geochemical indicators of a serpentinized fore-arc mantle wedge, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.112, 2007, B10206, doi:10.1029/2007JB005031.
- 24) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 5 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性総合評価技術開発 報告書, 2024, 276p.
- 25) 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, *日本水文科学会誌*, vol.44, 2014, pp.3-16.
- 26) 風早康平, 高橋正明, 切田 司, 内藤一樹, 渡部芳夫, 日本列島におけるスラブ起源水の上昇地域の分布図, 地質調査総合センター研究資料集, no.616, 2015, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 27) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2023, 312p.

2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術

(1) はじめに

地質環境の長期安定性を評価するためには、「地層処分研究開発に関する全体計画(令和5年度～令和9年度)」(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2023¹⁾)において述べられているように、非火山性の深部流体(深部上昇水や長期停滞水)について、地下深部における形成や移動に関する現象理解を深めるとともに、地下深部から地表付近への流入の可能性やその影響を合理的・体系的に把握するための調査・評価に関する方法論を整備することが不可欠である。

深部流体の移動経路を評価するための地震学的手法としては、S波スプリッティング解析が挙げられる。これまで、紀伊半島(平塚ほか, 2022²⁾)やいわき地域(原子力機構・電力中央研究所, 2022³⁾, 2023⁴⁾)などを対象として、S波スプリッティング解析を行ってきた。これらの地域は、マントル起源と推定される高温流体が湧出していたり、大地震後の湧水の増加が観測されていた地域である。一方で、地表での明瞭な湧水の増加などは観測されていないが、能登半島北東部では、2020年11月末から地震活動が極めて活発となった。これらの地震活動は、群発地震の様相を呈しており、Nishimura *et al.* (2023)⁵⁾は地殻内の流体が、この群発地震活動やそれに伴う地殻変動の原因である可能性を指摘している。そこで本研究では、能登半島地域を対象としたS波スプリッティング解析を行った。

なお、2024年1月1日に、この群発地震の震源域内を破壊開始点とするMj7.6の大地震が発生した(令和6年(2024年)能登半島地震)。本報告書では、速報的にMj7.6の余震を用いたS波スプリッティング解析の結果も報告する。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

能登半島地域では、2020年11月末以降に地震活動が活発化する以前には、2007年能登半島地震が能登半島西部で発生しており、また能登半島の沖合では1993年能登半島沖地震が発生している。また、Umeda *et al.* (2009)⁶⁾は能登半島周辺地域における温泉水やガスのヘリウム同位体比を測定しており、能登半島南部でのヘリウム同位体比は低い一方、能登半島北岸でのヘリウム同位体比は高く、マントル起源の流体である可能性を指摘している。そのため、2020年11月以降の活発となった地震活動を引き起こした可能性のある深部流体は、マントル起源である可能性がある。

2020年11月以降の群発地震を用いて、Nakajima (2022)⁷⁾は能登半島地域を対象とした地震波トモグラフィー解析を行い、群発地震の震源域の下に低速度異常域が存在することを示し、マントルから地殻へ流体が供給されていた可能性を示唆した。また、Nishimura *et al.* (2023)⁵⁾は、群発地震の震源域周辺に展開したGNSS観測網のデータから最大70mmの隆起を報告し、群発地震の震源域における非地震性すべりが生じていた可能性を報告した。これらの研究はいずれも、群発地震の震源域における深部流体の存在を示唆しており、S波スプリッティング解析による深部流体の移動経路の推定方法の適用可能性が高いことを示している。

(3) 実施内容・結果

能登半島での地震活動は、群発地震活動が始まった2020年11月末以降、2021年9月16日にMj5.1の地震が、2022年6月19日にMj5.4の地震が、2023年5月5日にMj6.5の地震が発生していた。その後、2024年1月1日にMj7.6の大地震が発生した。2024年1月1日のMj7.6の地震発生以前

の地震活動は、上述のように比較的大きな地震が時折発生しているものの、その活動は群発的であり地殻流体の影響が想定されている(例えば、Nakajima, 2022⁷⁾; Amezawa *et al.*, 2023⁸⁾; Nishimura *et al.*, 2023⁵⁾)。

解析にあたっては、2004年4月1日から2024年1月7日までに能登半島周辺地域で発生したMj1.0以上の地震のHi-net及び気象庁の常設地震観測点で記録された連続地震波形データを用いた。それぞれの地震－観測点ペアにおける、観測点への地震波線の入射角の計算にあたっては、Matsubara *et al.* (2019)⁹⁾の日本列島下の3次元地震波速度構造から、各観測点位置について補間して作成した1次元速度構造を用いた。各観測点において、地震波線の入射角が35°以下となる地震－観測点ペアについて、共分散行列法によるS波スプリッティング解析を行った(Silver and Chan, 1991¹⁰⁾)。共分散行列法の適用後に、推定された速いS波と遅いS波の地震波形の相関係数が0.9以上となる地震－観測点ペアのみを採用した。

図2.1.3-1に、能登半島周辺地域の常設地震観測点における速いS波の偏向方向のローズダイアグラムを示した。能登半島北部の観測点の多くの速いS波の偏向方向は、2024年1月1日から1週間の間に発生した地震の帯状の分布の方向や、岡村ほか(2010)¹¹⁾で推定されていた既存の活断層セグメントの走向方向と調和的であり、これらの観測点でのS波の偏向方向は、structure-induced anisotropyを示しているものと考えられる。一方で、能登半島北東部の東岸に位置する観測点SUZUの速いS波の偏向方向は、これらとは異なった北西－南東方向を示している。Hiramatsu *et al.* (2015)¹²⁾によれば、この領域の最大水平圧縮応力の方向は北西－南東方向であり、観測点SUZUの速いS波の偏向方向と調和的である。したがって、観測点SUZUでの速いS波の偏向方向はstress-induced anisotropyを示していると考えられる。

各観測点における速いS波の偏向方向の時間変化を見るため、能登半島北部の5観測点について、図2.1.3-1に示したローズダイアグラムを期間別に分けて示した(図2.1.3-2)。なお、能登半島東岸に位置する観測点SUZUでの地震波形記録はMj7.6の本震発生以降、欠測であったため、この比較からは除外した。2024年Mj7.6の地震の余震域西側に位置する観測点N.TGIH(富来)では、2024年Mj7.6の地震前後で速いS波の偏向方向にほぼ変化がない一方、東側に位置する観測点N.SUZH(珠洲)やN.UCUH(内浦)では、卓越した速いS波の偏向方向がMj7.6以前の北東－南西方向から西北西－東南東方向に変化していることが分かる。これらの5観測点のMj7.6前後の速いS波の偏向方向について、Watson-Williams検定により検定したところ、東側の2つの観測点(N.SUZHとN.UCUH)については平均方位が等しいという帰無仮説が棄却され、平均方位に違いがあると推定される。一方、西側の3観測点については、Watson-Williams検定から平均方位の違いは見出せなかった。余震域の東側では、2024年Mj7.6の地震が発生する以前から群発地震活動が活発であり深部流体が豊富であった一方、西側では顕著な群発地震活動は見られていなかったことから、この余震域の東西での偏向方向の変化の様相の違いは、豊富な深部流体の有無が影響している可能性が考えられる。

さらに、2024年Mj7.6の地震の発生前の、群発地震活動時の速いS波の偏向方向の時間変化について調べた。ただし、群発地震活動は能登半島北東部に限定されているので、以降では観測点N.SUZHのみに着目する。また、2024年Mj7.6の地震以前の群発地震活動は、4つのクラスターから構成されていたことから(例えば、Amezawa *et al.*, 2023⁸⁾)、クラスター別に調べた。期間については、Nishimura *et al.* (2023)⁵⁾による期間に基づき設定した(表2.1.3-1)。

クラスターS(南部のクラスター)内の地震による期間別のローズダイアグラムを図2.1.3-3に示した。これらの8つの期間別の速いS波の偏向方向の平均方向について、方位統計的な取り扱いではないが、

予察的に Tukey の多重比較検定により平均値が等しいという帰無仮説で検定したところ(有意水準 5%), 期間 O と期間 C1 ならびに期間 C1 と期間 E の組み合わせについてのみ, 平均値が等しいという帰無仮説が棄却された。

クラスターW(西部のクラスター)内の地震による期間別のローズダイアグラムを図 2.1.3-4 に示した。このクラスターは観測点 N.SUZH からやや遠く, 入射角 35°未満という条件を満たす地震が少ないため, クラスターSと同様な Tukey の多重比較検定を行っても, どの期間の組み合わせでも平均値が等しいという帰無仮説は棄却されなかった。

クラスターN(北部のクラスター)内の地震による期間別のローズダイアグラムを図 2.1.3-5 に示した。このクラスターについては, 多くの期間の組み合わせにおいて平均値が等しいという帰無仮説が棄却された。このうち, 連続した 2 期間で平均値が等しいという帰無仮説が棄却された期間の組み合わせは, 期間 B と期間 C1, 期間 C2 と期間 D, 期間 D と期間 E の 3 つであった。特に, 期間 C2 の始まりである 2022 年 Mj5.4 の発生以降の, 期間 C2 と期間 D, 期間 D と期間 E の期間では, 平均値が徐々に時計回りに回転していく傾向が見られる。観測点 N.SUZH とクラスターNの間は, クラスターNとクラスターNEとの間のギャップの領域が存在し, Yoshida *et al.* (2023)¹³⁾は, 2022 年 Mj5.4 の地震のすべり量の大きな領域がこのギャップ内に位置することを示している。このことから, 2022 年 Mj5.4 の地震以降の平均値の変化は, 2022 年 Mj5.4 の地震破壊によるギャップ域の透水性の変化が影響している可能性が考えられる。

クラスターNE(北東部のクラスター)内の地震による期間別のローズダイアグラムを図 2.1.3-6 に示した。このクラスターの期間別の平均値についても, いくつかの期間の組み合わせで平均値が等しいという帰無仮説が棄却されたが, 連続する 2 期間の組み合わせでは期間 E と期間 F の組み合わせでのみ帰無仮説は棄却された。上述の 2024 年 Mj7.6 の地震による N.SUZH の速い S 波の偏向方向の変化は, このクラスターNE内の地震による影響が強いと考えられる。

(4) 主な成果と課題

本研究では, 2020 年 11 月末以降に地震活動が活発となった能登半島北東部地域を対象として, S 波スプリッティング解析を行った。その結果, 多くの観測点で地殻構造に起因する structure-induced な異方性を示すこと, 2024 年 1 月 1 日の Mj7.6 の地震によって速い S 波の偏向方向に変動が見られたのは能登半島北部でも東側に限られること, 能登半島北東部では Mj7.6 の地震発生前から, 速い S 波の偏向方向の緩やかな変動が見られることが分かった。特に, Mj7.6 発生以前の速い S 波の偏向方向の時間変動は, 地殻流体の移動あるいは地殻流体の間隙圧の変動を反映している可能性があることから, もう 1 つの S 波スプリッティングパラメータである dt (分離した S 波の到達時間差)を用いたクラックモデリングなどによる, さらなる検討が不可欠である。ただし, 能登半島北部の断層面は南東に傾斜した断層面であるので, シンプルな鉛直断層面の仮定は不適切である。今後, 傾斜した断層面を仮定したクラックモデリングにより, 推定された S 波スプリッティングパラメータからクラック密度やアスペクト比の推定を行うことで, 上述の推論の妥当性が評価できるものと思われる。また, 今年度は膨大なデータ処理の都合上, 2024 年 1 月 7 日までの地震の解析を行ったが, 能登半島での地震活動は依然として活発であることから, さらなるデータの拡充が可能と思われる。

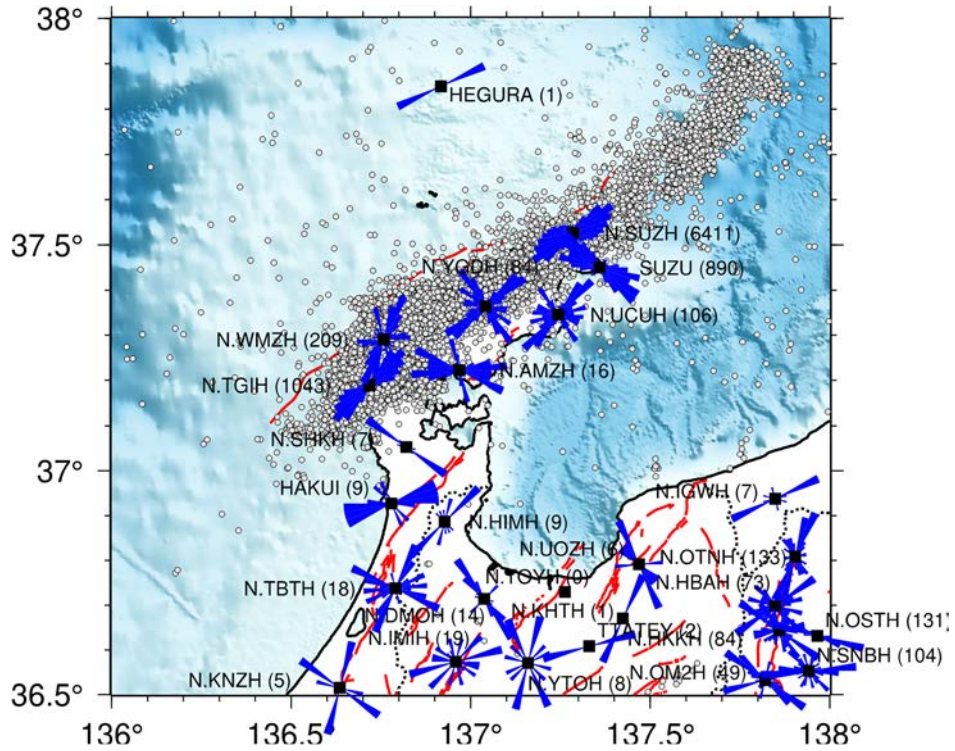


図 2.1.3-1 能登半島周辺の常設地震観測点における速い S 波の偏向方向

各観測点(黒四角)上の青のローズダイアグラムが速い S 波の偏向方向を示す。観測点名に続く括弧内の数字は、推定された速い S 波の偏向方向の数である。赤線は活断層で、産業技術総合研究所(2024)¹⁴⁾による。グレーの丸は、2024 年 1 月 1 日から 7 日までに発生した Mj1.0 以上の地震の震央(気象庁一元化震源)を示す。

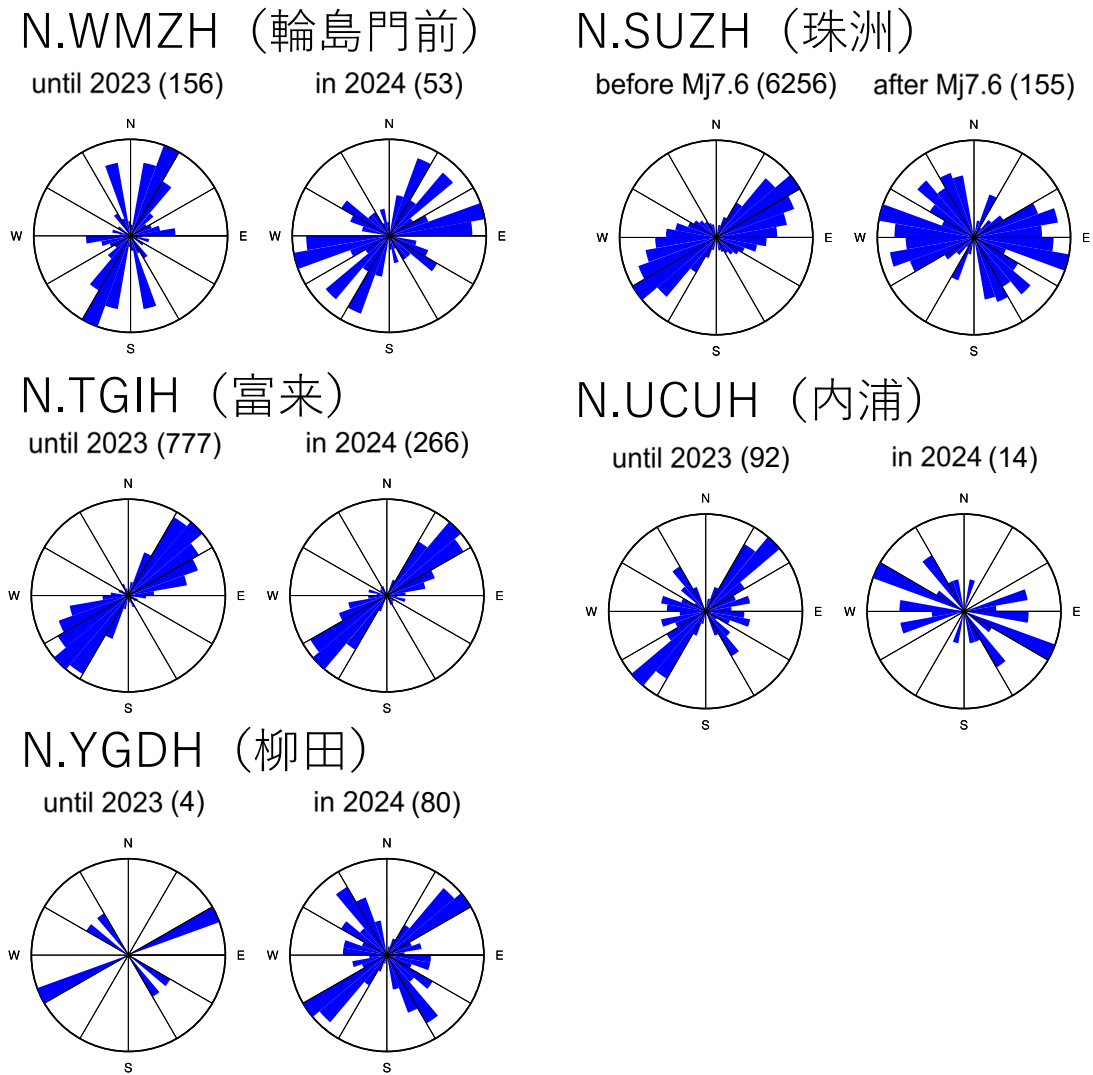


図 2.1.3-2 能登半島北部の 5 観測点における 2024 年 Mj7.6 発生前後の速い S 波の偏向方向
各観測点について、左側のローズダイアグラムが 2024 年 Mj7.6 発生前の地震による速い S 波の偏向方向を表し、右側が 2024 年 Mj7.6 発生から 7 日間の地震による速い S 波の偏向方向を表す。括弧内の数字は、それぞれの推定された速い S 波の偏向方向の数である。

表 2.1.3-1 群発地震活動の各期間

期間名	期間
Period O	2004/04/01 – 2020/10/31
Period A	2020/11/01 – 2021/02/28
Period B	2021/03/01 – 2021/06/30
Period C1	2021/07/01 – 2021/09/15
Period C2	2021/09/16 – 2022/06/18
Period D	2022/06/19 – 2023/05/04
Period E	2023/05/05 – 2023/12/31
Period F	2024/01/01 – 2024/01/07

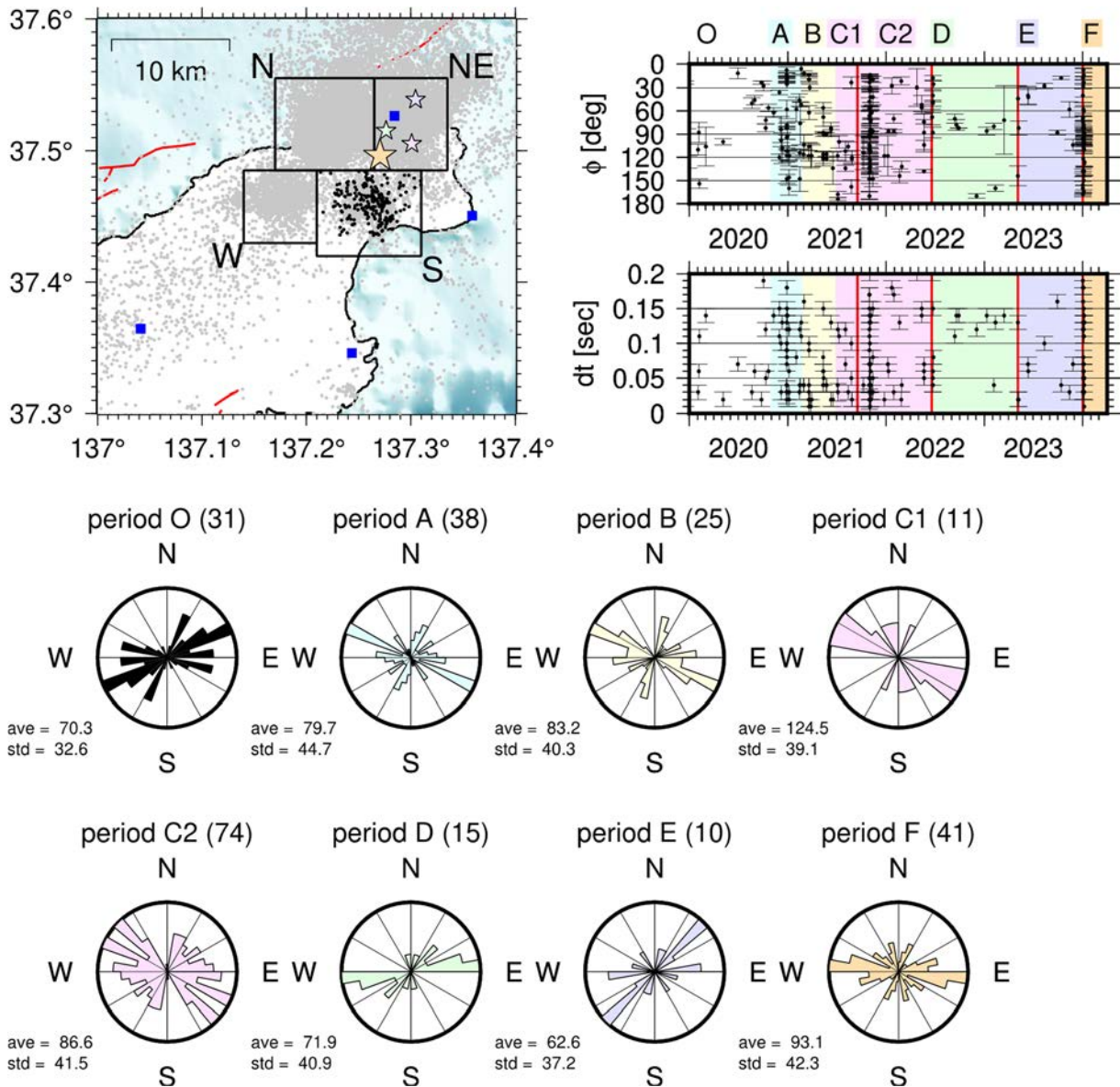


図 2.1.3-3 クラスタ S による観測点 N.SUZH における期間別のローズダイアグラム

(左上) S 波スプリッティング解析を適用したクラスタ S 内の地震の分布 (黒点)。グレーの点は、2004/4/1 から 2024/1/7 までに発生した Mj1.0 以上の地震の震央を示す。4 つの黒の矩形は、4 つのクラスタそれぞれの領域を表す。4 つの青四角形は常設観測点の位置を示す (N.SUZH, SUZU, N.YGDH, N.UCUH)。赤の線は活断層を表している。4 つの星印は、期間 C2, D, E, F の始まりに発生した Mj5~7 クラスの地震の震央を示し、色はそれぞれの期間に対応している。(右上) 2 つの S 波スプリッティングパラメータである速い S 波の偏向方向 (ϕ) 及び速い S 波と遅い S 波との間の到達時間差 (dt) の時間変動。背景の色は期間の違いを表し、赤の縦線で Mj5~7 クラスの地震の発生時間を示した。(下) 8 つの期間の期間別のローズダイアグラム。期間名に続く括弧内の数字は、それぞれの期間中で速い S 波の偏向方向が推定された地震の数を示す。ローズダイアグラムの左下の 2 つの数字は、それぞれの期間での平均方位 (ave) とその標準偏差 (std) を表す (単位は度)。

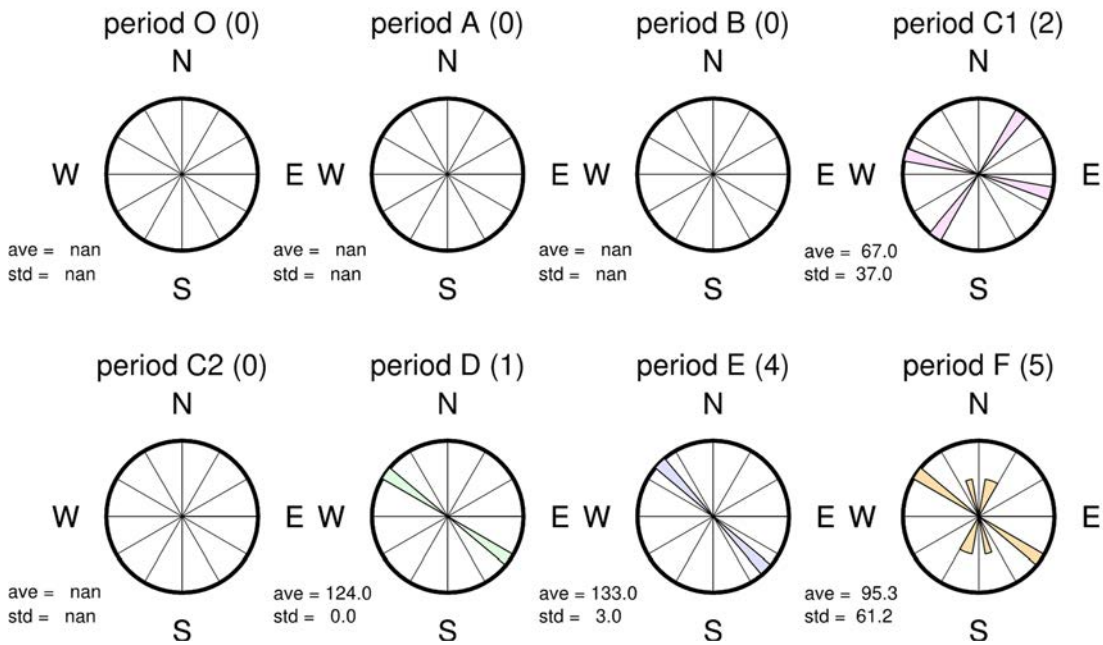
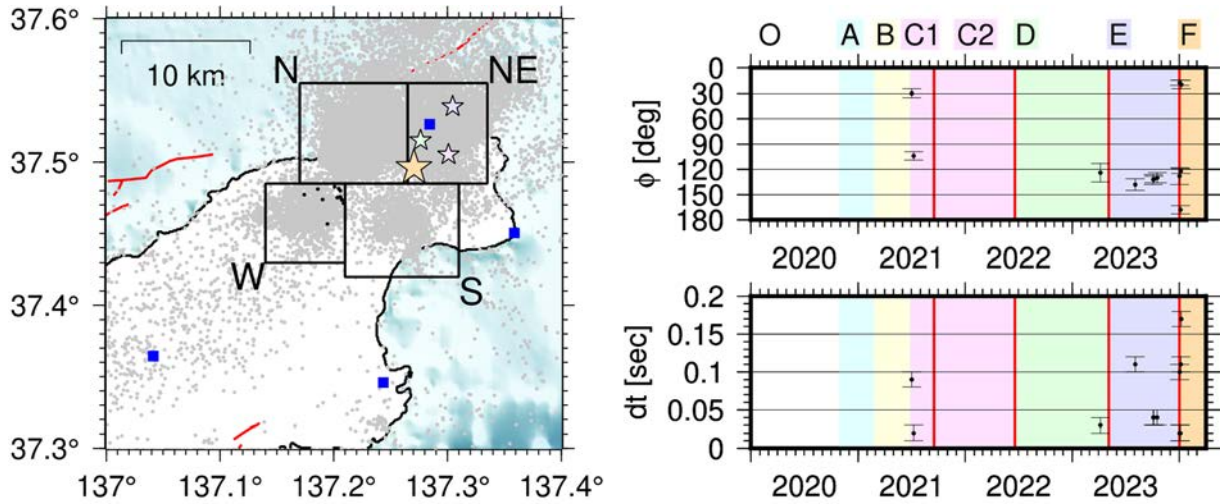


図 2.1.3-4 クラスターW による観測点 N.SUZH における期間別のローズダイアグラム
記号や表記は、図 2.1.3-3 と同じ。

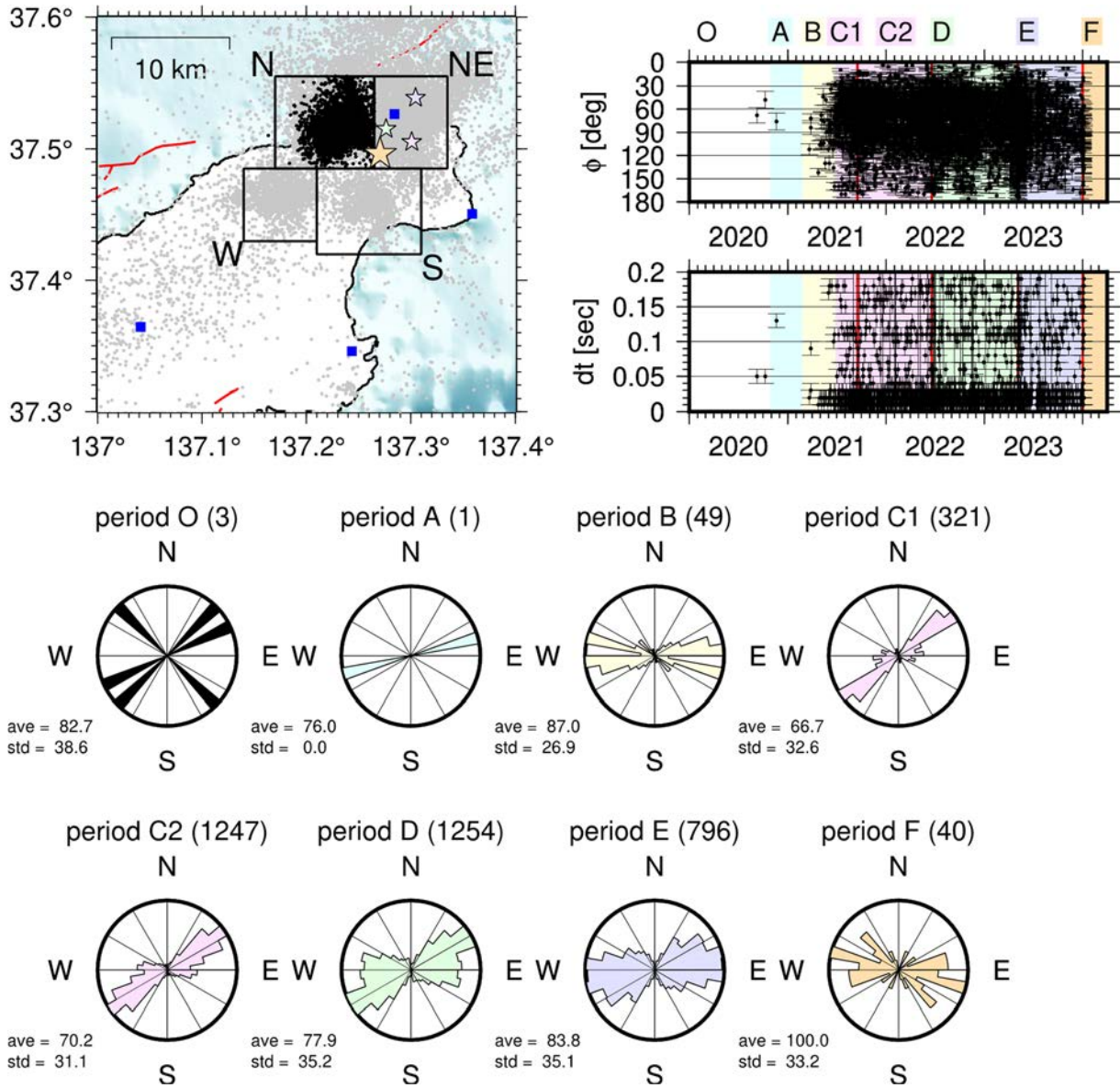


図 2.1.3-5 クラスタ-N による観測点 N.SUZH における期間別のローズダイアグラム
記号や表記は、図 2.1.3-3 と同じ。

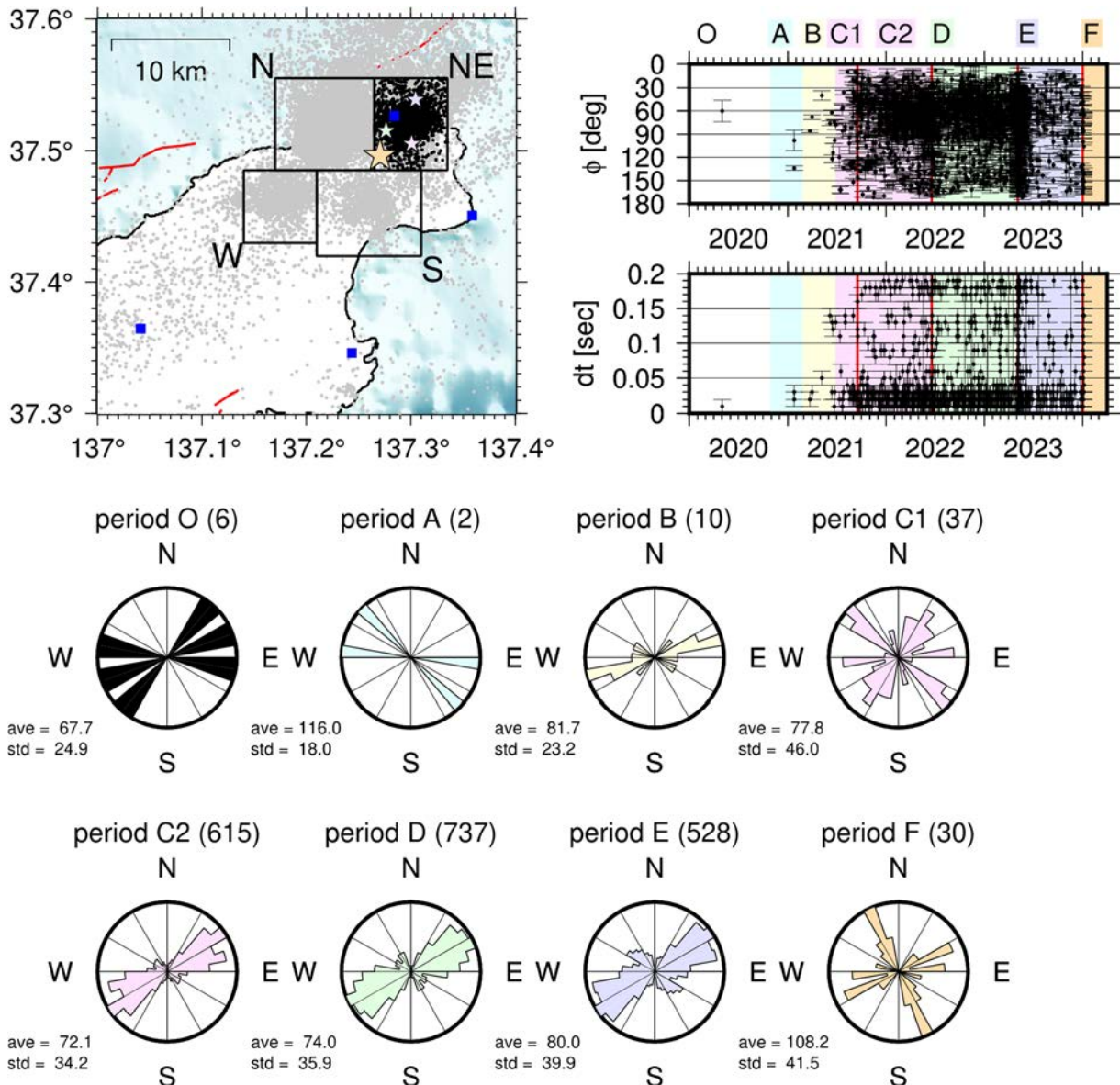


図 2.1.3-6 クラスタ-NE による観測点 N.SUZH における期間別のローズダイアグラム
記号や表記は、図 2.1.3-3 と同じ。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画(令和 5 年度~令和 9 年度), 2023, 73p.
- 2) 平塚晋也, 浅森浩一, 雑賀 敦, S 波スプリットング解析を用いたスラブ起源流体の移行経路推定の試み, JAEA-Research 2022-002, 2022, 38p.
- 3) 日本原子力研究開発機構・電力中央研究所, 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に
関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発報告書, 2022, 311p.

- 4) 日本原子力研究開発機構・電力中央研究所, 令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に
関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発報告書, 2023, 312p.
- 5) Nishimura, T., Hiramatsu, Y. and Ohta, Y., Episodic transient deformation revealed by the analysis of
multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, *Scientific Reports*, vol.13, 8381, 2023,
doi:10.1038/s41598-023-35459-z.
- 6) Umeda, K., Ninomiya, A. and Negi, T., Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto
Peninsula, Central Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.114, B1, 2009,
doi:10.1029/2008JB005812.
- 7) Nakajima, J., Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan, *Earth, Planets
and Space*, vol.74, 160, 2022, doi:10.1186/s40623-022-01719-x.
- 8) Amezawa, Y., Hiramatsu, Y., Miyakawa, A., Imanishi, K. and Otsubo, M., Long-living earthquake
swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan, *Geophysical
Research Letters*, vol.50, 2023, doi:10.1029/2022GL102670.
- 9) Matsubara, M., Sato, H., Uehira, K., Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N., Suzuki, K. and
Kamiya, S., Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic
tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, seismic waves—probing earth system,
IntechOpen, London, 2019, pp.1-19.
- 10) Silver, P.G. and Chan, W.W., Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *Journal of
Geophysical Research: Solid Earth*, vol.96, 1991, pp.16429-16454.
- 11) 岡村行信, 井上卓彦, 尾崎正紀, 池原 研, 駒澤正夫, 大熊茂雄, 加野直巳, 伊藤 忍, 横田俊之,
山口和雄, 海陸シームレス地質情報集, 「能登半島北部沿岸域」数値地質図 S-1, 地質調査総
合センター, 2010.
- 12) Hiramatsu, Y., Idaka, T. and The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area,
Stress state in the upper crust around the source region of the 1891 Nobi earthquake through shear wave
polarization anisotropy, *Earth, Planets and Space*, vol.67, 52, 2015, doi:10.1186/s40623-015-0220-4.
- 13) Yoshida, K., Uno, M., Matsuzawa, T., Yukutake, Y., Mukuhira, Y., Sato, H. and Yoshida, T., Upward
earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring-
shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system, *Journal of Geophysical
Research: Solid Earth*, vol.128, 2023, doi:10.1029/2022jb026047.
- 14) 産業技術総合研究所, 活断層データベース 2024 年 4 月 26 日版, 2024,
<https://gbank.gsj.jp/activefault/> (参照:2024 年 6 月 7 日).

2.2 長期予測・影響評価モデルの開発

(1) はじめに

地層処分における将来の地質環境の予測・評価は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。しかしながら、過去のイベントや変動パターン・規模に係る記録は、遡る年代や地域によって識別できる分解能が異なることから、予測結果に伴う不確かさも様々である。外挿法の信頼性向上のためには、多様な時空間スケールにおける調査事例の蓄積を通じ、時間スケールごとの変動方向や速度に及ぼす影響を評価するとともに、将来予測に用いられる変動データの時空間代表性が吟味されることが望まれる。本研究では、主に地形・地質学的アプローチに基づき、過去数百年～数十万年の期間を中心に、異なった時間スケールでの変動方向・速度の解析事例を蓄積する。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

地層処分事業において、過去から現在までの火山・火成活動の履歴や時空間分布、活動傾向の評価は、火山・火成活動の将来予測に繋がる重要課題の一つである。特に新たな火山の発生の蓋然性評価については、マントルウェッジの対流や沈み込む海洋プレートの特性などを加味した評価モデル等の構築などが貢献可能であると期待されるが、現時点でその評価手法が確立されているとは言えず、新手法の構築を含めたさらなる検討が必要である。そこで、地下のマグマ等の高温流体の存否を把握するための電磁探査と、(U-Th)/He 法等の低温領域の熱年代法を山地横断方向に適用して隆起形態を明らかにする手法とを組み合わせることにより、地下に熱源を持つ非火山の将来の火山活動への発展性について評価する手法について検討する。火山・火成活動は地下深部で形成されたマグマが地表ないし地表付近で活動する現象を指し、マグマの生成は海洋プレートの沈み込みに伴う温度上昇及び脱水によるマントルウェッジへの水の供給等に起因する。火山の直下にはマグマ溜まりが存在すると考えられ、その地殻中における分布やマントルへの連続性などの検討には、地震波トモグラフィや、電磁探査などの地球物理学的探査が有効である。一方で、火山フロントより背弧側の非火山性山地の地下にも、マグマ溜まりと思しき高温流体の存在が指摘された事例がある(例えば、Umeda *et al.*, 2006¹⁾, 2007²⁾; Asamori *et al.*, 2011³⁾)。こうした地下に高温流体の存在が示唆される非火山性山地では、将来新たな火山活動が生じる可能性が考えられるが、このような山地の成因や特徴に関する知見は限られている。本研究では、それらの知見を把握することを目的に、既に熱年代学によって隆起形態が検討された山地との比較を念頭に、知見の収集及び事例研究の蓄積を試みる。そこで、令和 5 年度より、東北地方の飯豊山地及び太平洋山地を対象とした事例研究に着手した。

一方、熱年代法は、過去数百万年～数十万年スケールでの山地の侵食を評価する代表的な技術としても適用できる。ただし、熱史・熱構造が複雑な地域では、単純に熱年代法のみで侵食履歴を評価することは難しい。そこで本研究では、地質温度圧力計(鉱物の包有物残存圧力計、Ti-in-Zircon 地質温度計、Zr-in-Titanite 地質温度計等)と U-Pb 年代測定とを組み合わせることにより、岩体の侵食履歴を評価する手法についても検討する。令和 5 年度は、ジルコンを用いた U-Pb 年代(結晶化年代)とチタン濃度(結晶化温度)の同時測定手法について検討を進めた。

(3) 実施内容・結果

① 火山・火成活動の発生及び影響の調査・評価技術の高度化

本研究では、地下にマグマ溜まりが分布する可能性のある特徴的な非火山性山地を事例対象として、

地磁気・地電流法(Magnetotelluric 法:以降, MT 法)に基づく地下の低比抵抗体の高精度な検出及び低温領域の熱年代法に基づく山地の隆起形態の推定, の2つのアプローチを組み合わせられた検討に着手した。近年, 日本国内の山地を対象に, 熱年代の空間分布から山地の隆起形態の推定に成功した事例がいくつか報告されている。具体的には山地横断方向に取得した系統的な熱年代データの空間分布と, 斜面発達式(Hirano, 1968⁴⁾)に基づいて異なる基盤隆起のパターンを与えたときに得られた侵食の空間的なパターンを比較することで, 山地の地質学的時間スケールにおける隆起形態を推定するものである(Sueoka *et al.*, 2012⁵); Fukuda, 2020⁶); 福田ほか, 2021⁷)。例えば, 山地の縁を逆断層に境された断層地塊山地である木曾山脈や赤石山脈の事例では, 山地横断方向に熱年代学的分析を行った結果, 山麓に分布する断層に向かって年代値が若返る傾向が得られた(Sueoka *et al.*, 2012⁵); 2017⁸)。東西の逆断層運動の寄与率の違い(年代の若返りの程度の違い)も踏まえて, 木曾山脈では西傾動したポップアップ隆起(Sueoka *et al.*, 2012⁵), 赤石山脈では東側の逆断層の傾動(Sueoka *et al.*, 2017⁸)によって隆起が説明された。一方, 火山フロントに沿って分布する東北日本弧の奥羽脊梁山地や南部フォッサマグナ地域の関東山地では, 山頂に向かって熱年代が若返る傾向がみられ, ドーム状の隆起モデルで説明できる(Fukuda, 2020⁶); Sueoka *et al.*, 2022⁹)。このように現在の地形だけでは判別が困難な隆起形態が, 山地横断方向の系統的な熱年代法の適用により判断できることがある。本研究では, 地下に高温流体の分布が示唆される山地について, 熱年代データが断層地塊山地のような構造的(非火山性)山地と同様のブロック状の隆起形態を示すのか, 火山性山地のドーム状を示すのかを検証する(図 2.2-1: 福田・末岡, 2021¹⁰)。

事例対象として, 既往研究によって地球物理学的探査によって地下に流体賦存域や高温領域が認められる可能性のある山地を選出した。まず飯豊山地及び朝日山地については, Umeda *et al.* (2006¹, 2007²)や Asamori *et al.* (2011)³)は, MT 法と温泉水の ³He/⁴He 同位体比を用いて, これらの非火山性山地の直下にマグマ溜まりと思われる高温流体の分布を推定している。また, 同様に背弧側の hot finger 上に分布する非火山性山地として, 太平山地が挙げられる。太平山地では, Kanda and Ogawa (2014)¹¹)による地磁気観測データの解析に基づき, 低比抵抗体の分布が男鹿半島周辺と奥羽脊梁山地周辺で認められるが, 太平山地周辺や直下の比抵抗構造は不明瞭な分布を示す。しかし, 本観測は島弧スケールの比抵抗構造の推定を目的に約 20 km 間隔の格子状に観測点が配置されていて解析の空間解像度に乏しいため, 太平山地周辺の詳細な低比抵抗構造については, 観測点を数 km 間隔で配置した MT 観測による追検討が必要である。

そこで, 令和 5 年度は太平山地と飯豊山地の 2 つの地域を対象とした事例研究に着手した。両山地において山地を横断する方向にアパタイト及びジルコンの(U-Th)/He 法とフィッション・トラック(FT)法を適用し, 地下構造との比較を通じて山地の隆起形態について検討する。太平山地については, 山地を横切る一つの測線を設定し, MT 法による地下構造探査を実施した。加えて, 既往試料を用いた予察的な熱年代測定を実施した。飯豊山地においては, 上述の通り既に MT 法における検討が行われているため, 熱年代法の適用のみを行う。令和 5 年度は飯豊山地の尾根沿いを中心に試料採取を実施するとともに, 既往試料を用いた予察的な年代測定を実施した。

MT 法による自然電磁場変動の観測は, 地殻深部の構造を推定する上で有効な手法の一つである。地球は導体であるため, 外部起源の自然電磁場変動に対応した電流が地下に誘導される。MT 法では自然電磁場の観測を行い, 地場変動に対する電場変動の比(インピーダンス)を測定することによって地下の比抵抗分布を推定する。比抵抗は岩石の特徴を反映してオーダーで変化する物性値であり, 空隙率が高く, メルトや水といった導電率の高い流体を含む岩石は低比抵抗を示す。また, MT 法は地殻深部もしくは上部マントルまでの比抵抗構造を推定できることや, 二次元解析や三次元解析手法(例えば,

Ogawa and Uchida, 1996¹²⁾; Siripunvaraporn *et al.*, 2005¹³⁾)が開発されていることなどから、主に地殻～マントル最上部を対象とした流体賦存域の分布の把握に用いられている(例えば, Mitsuhashi *et al.*, 2001¹⁴⁾)。その一例として、富士山周辺で行われた MT 法による観測では、火山下の深さ 20 km 以深に顕著な低比抵抗体が見出され、sensitivity test と呼ばれる手法によってその信頼性が評価されている(Aizawa *et al.*, 2004¹⁵⁾)。ただし、岩石の比抵抗はそれに含まれる流体の種類のほかにも含有率などによっても変化することから、このような低比抵抗体がメルトの存在に起因するものなのか、あるいは水が含まれることによるものなのかを比抵抗構造のみから判別することは難しい。このため、地震波速度構造、微小地震の震源分布、火山噴出物の結晶化深度などとの比較により、火山地域では部分熔融域や火山性流体の賦存域として解釈されることが多い。

本研究では、太平山を通る長さ約 65 km の区間において MT 観測を行った。観測では、およそ北西～南東方向の測線上に 3～12 km 程度の間隔で合計 25 点の観測点を配置した(図 2.2-2)。電磁場の測定には Phoenix Geophysics 社製 MTU-5C システムを使用し、磁場 3 成分及び電場 2 成分の時系列を測定した。また、対象地域のノイズ環境を考慮して測定時間は夜間を含む 13 時間とし、各観測点で 2～9 晩の測定を行った。測定されたデータの例として、2 つの観測点における見掛比抵抗及び位相を図 2.2-3 に示す。観測域から約 100 km 離れた地点での観測データを用いたリモートリファレンス処理(Gamble *et al.*, 1979¹⁶⁾)の結果、周波数約 400～0.001 Hz で信頼性の高いインピーダンスを得ることができた。今後は、これらの観測データを用いたインバージョンにより比抵抗構造を推定し、太平山地直下におけるマグマの有無や分布を明らかにする予定である。

熱年代法に基づく隆起形態の推定では、令和 5 年度は、飯豊山地における白亜紀～古第三紀花崗岩類の採取と熱年代分析のため、現地での露岩状況の把握と岩石試料計 11 点の採取を行い、アパタイト及びジルコンの分離作業を実施した。また、飯豊山地及び太平山地において過去に採取された試料に対し予察的な熱年代法の解析を実施した。年代分析については、アパタイト FT(AFT)年代測定は東濃地科学センターにおいて実施し、ジルコン及びアパタイトの(U-Th)/He(それぞれ, ZHe, AHe)年代測定はメルボルン大学に依頼した。両山地における現時点までの熱年代の測定結果を図 2.2-4 に示す。今年度得られた結果として、飯豊山地では白亜紀または古第三紀花崗岩類から新たに 1 地点の AFT 年代(3.6 ± 3.0 Ma, 以降誤差範囲は 2σ)を取得し、太平山地については白亜紀～鮮新世の花崗岩類から 5 地点の AHe 年代(16.4 ± 1.0 Ma～ 6.0 ± 1.3 Ma)、白亜紀花崗岩類から 1 地点の AFT 年代(10.1 ± 3.3 Ma)、白亜紀～鮮新世の花崗岩類から 5 地点の ZHe 年代(60.6 ± 4.0 Ma～ 3.8 ± 0.4 Ma)を取得した。太平山地の鮮新世花崗岩類の一部の試料では、AHe 及び AFT 年代測定に適した鉱物粒子に乏しく、データが取得できなかった。飯豊山地の AFT 年代データについては、近傍の先行研究のデータ(4.6 ± 0.7 Ma: Fukuda *et al.*, 2019¹⁷⁾)に整合する年代値が得られているが、データの誤差範囲が大きいため追加測定による精度の向上が求められる。太平山地については、白亜紀花崗岩類から 83.9 ± 8.9 Ma と 9.9 ± 1.0 Ma の ZHe 年代及び 4.9 ± 0.8 Ma の AHe 年代が報告されており(Fukuda *et al.*, 2020¹⁸⁾)、本研究のデータと整合的である。各手法間の年代データは閉鎖温度の関係を考えると概ね整合的であるが、鮮新世岩体の一部のデータについては、形成年代を示すジルコン U-Pb 年代(4.84 ± 0.09 Ma: 中嶋ほか, 2023¹⁹⁾)や新たに得られた 4.0 ± 0.4 Ma の ZHe 年代よりも有意に古い 16.4 ± 1.0 Ma の AHe 年代が得られ、年代値の逆転が見られる。本試料については AFT 年代測定におけるエッチング後の観察の結果、大半の粒子に大量の包有物や結晶歪由来の損傷が確認され、AFT 分析が困難であると判断された。また、AHe 年代は U や Th などを含む包有物の影響により、年代が古くなることが考えられるため、このようなアパタイト粒子を測定した可能性がある。今後は、各山地の横断方向に熱年代データを拡充し、年代値の逆転についても考察しつつ、山地の隆起形態を明らかにしていく予定である。

② 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

隆起量・侵食量の評価において、深成岩体の貫入・定置時の温度・圧力等の環境及び年代情報は、岩体形成史を復元するだけでなく、その後の上昇・剝離過程での冷却や後発的な貫入による変成作用等で被る岩体の熱的な影響(熱履歴)を追う上でも、起点の情報として有用となる。レーザーアブレーション試料導入誘導結合プラズマ質量分析法(LA-ICP-MS)などの局所分析手法によって、鉱物の単一粒子中の複数のスポット(マイクロスケール領域)から年代情報と温度情報を一度に取得することができれば、高い時間分解能でマグマの冷却過程を読み解くことが可能となる(例えば、Yuguchi *et al.*, 2020²⁰, 2022²¹, 2023²²)。本研究では、マグマの固結開始の年代・温度を制約することを目的として、LA-ICP-MS によるU-Pb 同位体分析及びチタン濃度の同時定量分析(Yuguchi *et al.*, 2020²⁰)を深成岩体のジルコンに対して実施し、ジルコンの結晶化年代と結晶化温度の推定を行い、各対象岩体の形成プロセスについて議論を行った。一般に数万年～50 万年程度とされるマグマの寿命を考慮すると年代決定における誤差の絶対値は 50 万年よりも小さくしなければ、固結開始から終了までの温度・圧力変化の履歴を追うことが難しい(形成年代の有意差を認めにくい)。原理的には、数百万年前程度の若い年代値を示す試料であるほうが分析によって得られる年代の誤差の絶対値は小さいため、結晶化に係る年代・温度・圧力の変遷を解読しやすい試料であると言える。そのため、今年度は、形成年代の若い第四紀の深成岩からのジルコンについても事例を蓄積した。

対象としたジルコンは、熊本大学及び山形大学より提供を受けた 3 つの深成岩体(遠野岩体、堺ノ神岩体、黒部川岩体)から抽出されたジルコンとした。レーザー径は試料の年代に応じて 15～25 μm の範囲で調整し、妥当な分析値が得られるように最適化した。ジルコンの結晶化年代及び結晶化温度を導出する上で、ジルコンの成長様式を反映するカソードルミネッセンス(CL)像による内部構造の評価が必要であるため、山形大学所有の走査型電子顕微鏡とカソードルミネッセンス検出装置で CL 像の取得を行った。U-Pb 年代・チタン濃度同時定量を行う分析点は、CL 像観察によって得られた内部構造に基づき選定を行った。ジルコンの結晶化温度の決定には、分析点のチタン濃度のほか、ジルコン結晶時の TiO_2 活動度と SiO_2 活動度の設定が必要となる。遠野複合深成岩体と堺ノ神深成岩体の TiO_2 活動度は、熱力学計算プログラム‘Rhyolite-MELTS’を用いて算出する方法(Ghiorso and Gualda, 2013²³)により導出を行った。黒部川花崗岩体の TiO_2 活動度は、Yuguchi *et al.* (2022)²¹ での検討に基づき 0.2 を仮定した。 SiO_2 活動度は、各岩体の各試料で石英の晶出が認められることから 1.0 と仮定した。

遠野岩体の 6 試料(中心相 3 試料、主岩相 3 試料)のジルコンに対して U-Pb 同位体分析及びチタン濃度の同時定量分析を実施した結果、外来性ジルコンのデータを除き、遠野複合深成岩体を形成した本質的なマグマ活動によって、中心相、主岩相ともに 140 Ma から 100 Ma の期間に 800～1100°C 程度の温度のマグマ活動が継続していたことが明らかとなった。また、中心相と主岩相の年代の分布は重複しており、双方のマグマの活動年代には明確な相違がないことが分かった。一方、ジルコンの結晶化温度の加重平均値は、中心相では 897 ± 34 °C (サンプル No.102, n=10), 956 ± 23 °C (サンプル No.025, n=23), 主岩相では 1020 ± 25 °C (サンプル No.405, n=31)であった。つまり、ジルコン晶出時のマグマの温度条件は、岩体内(マグマ溜り内)の位置により相違があることが示唆された。

堺ノ神岩体の 2 試料(アダカイト質岩、非アダカイト質岩)それぞれのジルコンに対して U-Pb 同位体分析及びチタン濃度の同時定量分析を実施した結果、アダカイト質岩と非アダカイト質岩の年代の分布は重複しており、双方のマグマの活動年代に明確な相違はないことが示唆された。一方、非アダカイト質岩のジルコン晶出温度はアダカイト質岩のそれよりも高い温度条件であったことが示された。堺ノ神深成岩体において、アダカイト質マグマの Th/U 比は組成分布幅が非アダカイト質マグマのものより広く、かつ相

対的に高い値をもつことが分かった。一方、非アダカイト質マグマの Th/U 比の最小値はアダカイト質マグマの Th/U 比の最小値と同程度である。このことは、アダカイト質マグマ中のジルコンは、結晶分別の進行度の低いマグマから晶出が開始し、マグマの温度の低下及び結晶分別の進行とともに、ジルコンの晶出も進行したことが示唆された。また、非アダカイト質マグマでは、アダカイト質マグマより高温の状態での結晶分別が進行していたと考えられる。上述のように誤差範囲を考慮しつつ、アダカイト質マグマと非アダカイト質マグマの間の年代、チタン濃度(温度)、Th/U 比の相違からマグマ溜りプロセスの違いを議論することが可能であることが示唆された。

黒部川岩体の優白質岩のジルコンの 2 粒子 11 地点(均質領域とオシラトリゾーニング領域)に対して U-Pb 同位体分析及びチタン濃度の同時定量分析を実施した結果、ジルコン U-Pb 年代は 1.05 ± 0.13 Ma から 0.65 ± 0.09 Ma の年代幅を有することが分かった。U-Pb 年代の加重平均は 0.79 ± 0.08 Ma (MSWD=5.1) であった。図 2.2-5 は均質領域とオシラトリゾーニング領域を有するジルコン粒子内の分析点について、U-Pb 年代とチタン濃度及び Th/U 比の分析結果を示した図である。No. KRB5 の粒子において、均質領域及びオシラトリゾーニングを有する領域から導出した全ての U-Pb 年代は有意差がなく、内部構造と関連する挙動(結晶化年代の相違)を評価することができなかった。一方で、チタン濃度と Th/U 比に関しては、コアとリムの間で誤差の範囲を超えた相違を有する分析点があることが分かった。また、No. KRB7 の粒子内で隣り合う分析地点 KRB7-1 と KRB7-2 においては、U-Pb 年代が誤差の範囲を超えた変化を有していた。このことから、結晶内の U-Pb 年代、チタン濃度、Th/U 比の変動を捉えていることが示唆され、本課題で適用した技術によりマグマの温度変化を高い時間分解能で議論できる可能性が示された。

(4) 主な成果と課題

将来的な火山活動への発展に関する蓋然性を提示するための手法として、MT 法に基づく地下の低比抵抗体の検出と、熱年代解析による山地の隆起形態の推定という 2 つのアプローチを組み合わせた手法の適用性を検討するため、飯豊山地と太平山地の 2 つの山地についてそれぞれ事例研究に着手した。太平山地については、MT 法の測定点を数 km 間隔で計 25 地点配置し、地下の比抵抗構造のデータを取得した。測定データの処理や二次元・三次元解析に基づく比抵抗構造の推定は、令和 6 年度以降の実施を予定している。飯豊山地については、既に MT 法による既往研究が存在していることから、山地規模での熱年代法の適用を目的とした試料採取及び鉱物分離を行った。また、いずれの山地でも、既存の試料を用いて予察的な熱年代法の適用を進めた。基本的には既往熱年代データに整合的な年代が新たに得られた一方、解釈が困難なデータも得られており、今後、データの精度の向上や分析数の拡充などによる詳細な検討が必要である。

隆起・侵食評価の起点となる深成岩の形成環境や貫入・定置年代を推定可能な技術の高度化として、遠野複合深成岩体、堺ノ神深成岩体及び黒部川花崗岩体のジルコンに対して U-Pb 年代、チタン濃度、Th/U 比の取得とその分析条件の検討及びそれらのデータの解析を実施した。今回扱った深成岩体中のジルコンでは、一定の分析精度が得られたものの、マグマの固結過程を議論するには、試料に応じた分析手法の更なる最適化など、未だ手法の高度化を図る必要性を伴うことが分かった。一方、黒部川花崗岩体のジルコン粒子内での同時取得したデータに基づく検討から、結晶内の U-Pb 年代、チタン濃度、Th/U 比の変動を定量的に議論できる可能性も示唆されたため、対象とする分析粒子の戦略的な選定が必要と考えられる。

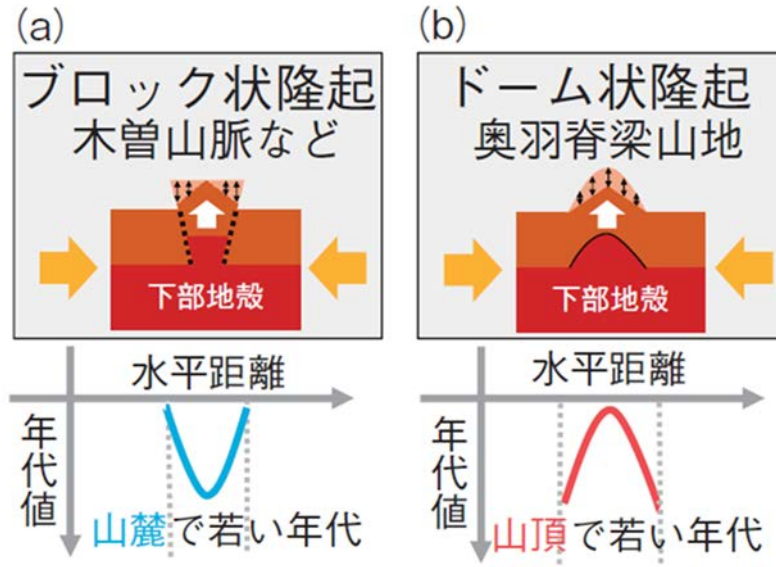


図 2.2-1 (a) 構造性山地と(b)火山性山地の隆起形態とそれらに対応する年代分布(福田・末岡, 2021¹⁰⁾)

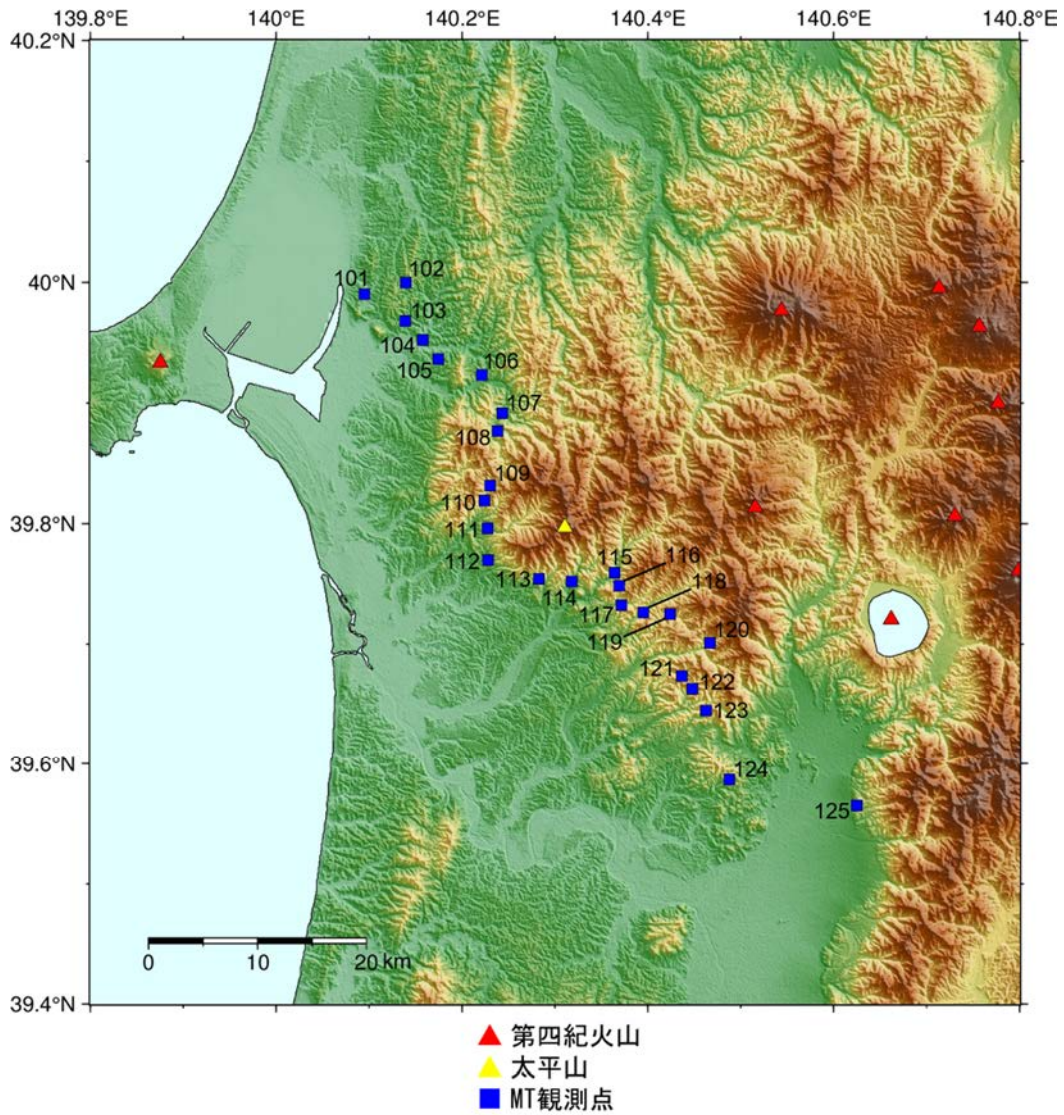


図 2.2-2 MT 観測の観測点分布
 標高データは SRTMGL1 tiles (NASA JPL, 2013²⁴) を用いた。

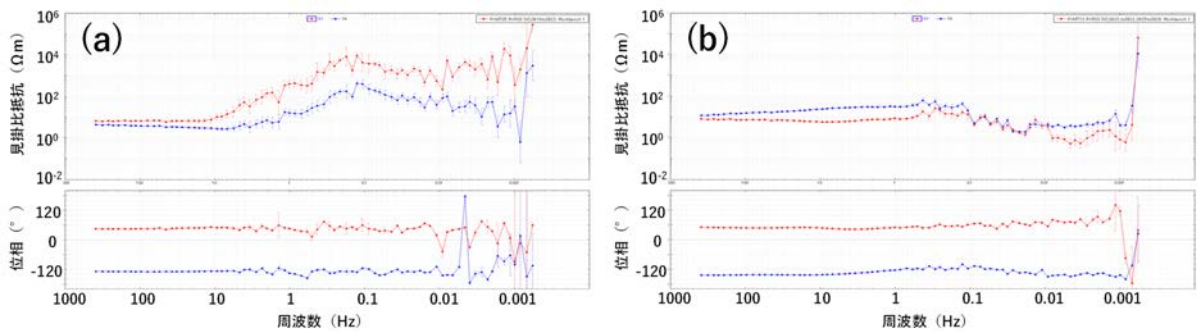
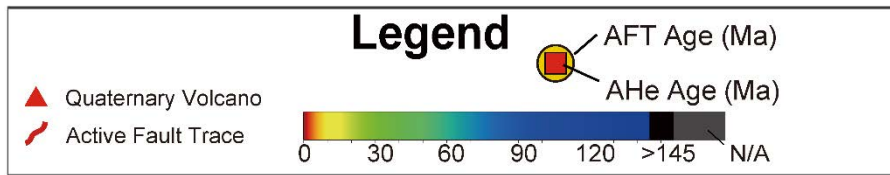
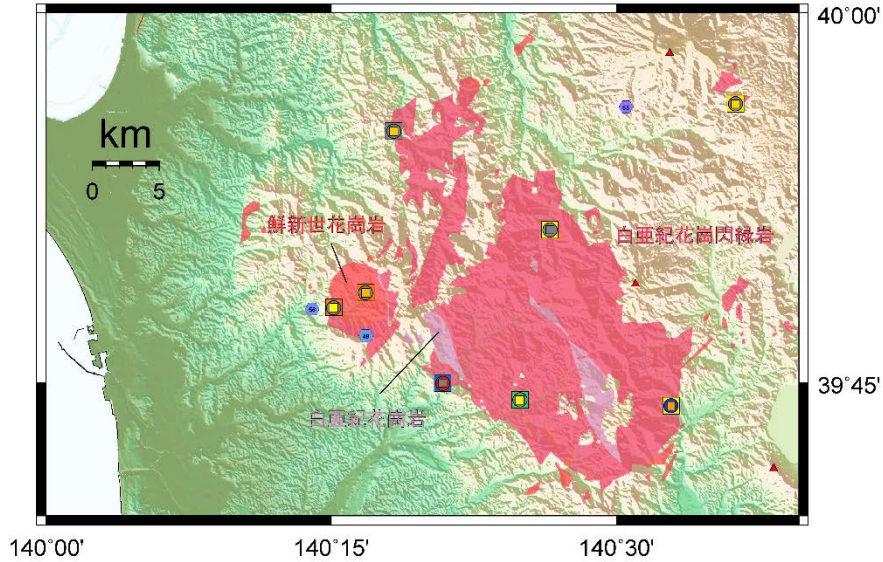
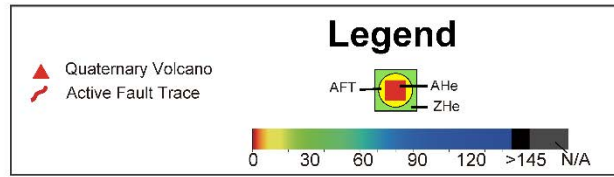


図 2.2-3 観測点 5(a) 及び 13(b) における XY モード(赤)及び YX モード(青)の見掛け抵抗と位相

(a)



(b)

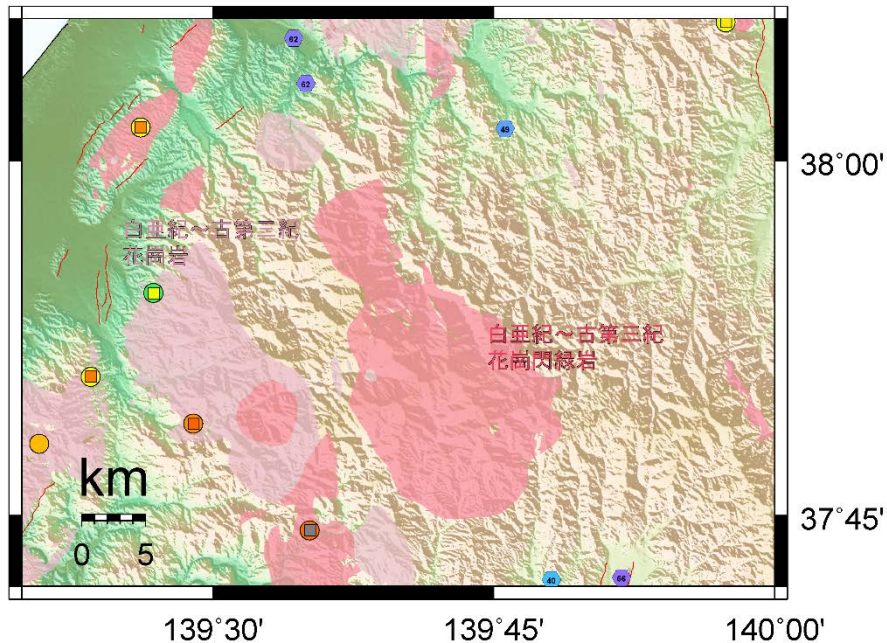


図 2.2-4 (a) 太平山地及び(b) 飯豊山地における熱年代分布

国土地理院発行の 50 m メッシュ数値標高モデル及び産総研発行の 20 万分の 1 シームレス地質図 V2 をもとに作図した。第四紀火山は第四紀火山カタログ委員会 (1999)²⁵, 活断層は中田・今泉 (2002)²⁶, 六角形のアイコンは田中ほか (2004)²⁷に基づく地温勾配。

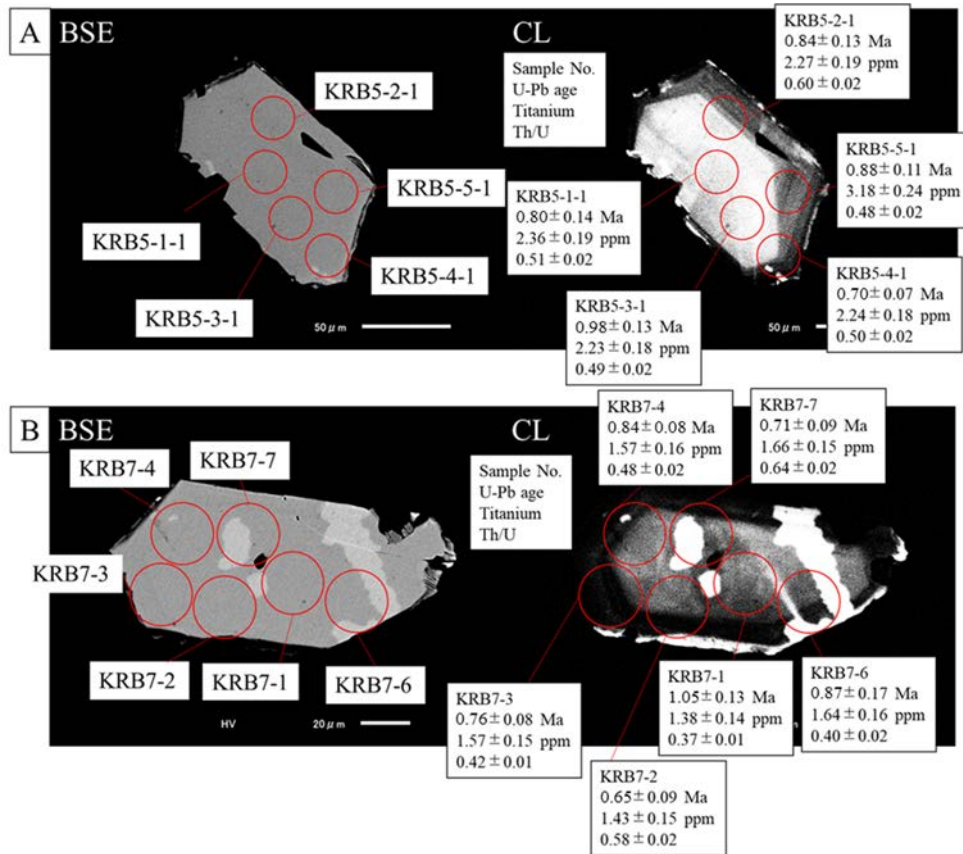


図 2.2-5 黒部川花崗岩体(優白質岩)のジルコン粒子内の結晶化年代とチタン濃度(結晶化温度)及び Th/U 比(A:No. KRB5, B:No. KRB7)
 BSE:反射電子組成像, CL:カソードルミネッセンス像。

参考文献

- 1) Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y., Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a nonvolcanic region, northeast Japan, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.7, 2006, doi:10.1029/2006GC001247.
- 2) Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T., Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.112, 2007, doi:10.1029/2006JB004590.
- 3) Asamori, K., Umeda, K., Ninomiya, A. and Negi, T., Manifestations of upwelling mantle flow on the Earth's surface, in Phillips, J.M. (Ed.), *The Earth's Core: Structure, Properties and Dynamics*, Nova Science Publishers, Inc., 2011, pp.79-94.
- 4) Hirano, M., A mathematical model of slope development -An approach to the analytical theory of erosional topography-, *Journal of Geosciences*, Osaka City University, vol.11, 1968, pp.13-52.
- 5) Sueoka, S., Kohn, B.P., Tagami, T., Tsutsumi, H., Hasebe, N., Tamura, A. and Arai, S., Denudation

- history of the Kiso Range, central Japan, and its tectonic implications: constraints from low-temperature thermochronology, *Island Arc*, vol.21, 2012, pp.32-52.
- 6) Fukuda, S, Thermochronometric investigations of the northeast Japan Arc, Doctoral Thesis of Kyoto University, 2020.
 - 7) 福田将眞, 末岡 茂, 田上高広, フィッション・トラック法を利用した島弧山地の熱年代学, *RADIOISOTOPES*, vol.70, 2021, pp.173-187.
 - 8) Sueoka, S., Ikeda, Y., Kano, K., Tsutsumi, H., Tagami, T., Kohn, B.P., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Shibata, K., Uplift and denudation history of the Akaishi Range, a thrust block formed by arc-arc collision in central Japan: Insights from low-temperature thermochronometry and thermokinematic modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.122, 2017, pp.6787-6810.
 - 9) Sueoka, S., Kobayashi, Y., Fukuda, S., Kohn, B.P., Yokoyama, T., Sano, N., Hasebe, N., Tamura A., Morishita T. and Tagami, T., Low-temperature thermochronology of active arc-arc collision zone, South Fossa Magna region, central Japan, *Tectonophysics*, vol.828, 229231, 2022, doi:10.1016/j.tecto.2022.229231.
 - 10) 福田将眞, 末岡 茂, ミクロからマクロへ: 鉱物の年代測定から山地の形成過程に迫るー低温領域の熱年代学的手法から見えた奥羽脊梁山地の隆起形態ー, *原子力機構の研究開発成果* 2021-22, 2021, p.86.
 - 11) Kanda, W. and Ogawa, Y., Three-dimensional electromagnetic imaging of fluids and melts beneath the NE Japan arc revisited by using geomagnetic transfer function data, *Earth, Planets and Space*, vol.66, 2014, doi:10.1186/1880-5981-66-39.
 - 12) Ogawa, Y. and Uchida, T., A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophysical Journal International*, vol.126, no.1, 1996, pp.69-76.
 - 13) Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y. and Uyeshima, M., Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol.150, no.1-3, 2005, pp.3-14.
 - 14) Mitsuhashi, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T. and Uchida, T., Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, *Geophysical Research Letters*, vol.28, no.23, 2001, pp.4371-4374.
 - 15) Aizawa, K., Yoshimura, R. and Oshiman, N., Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma chamber beneath Mt. Fuji, *Geophysical Research Letters*, vol.31, L09603, 2004, doi:10.1029/2004GL019477.
 - 16) Gamble, T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J., Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, vol.44, 1979, pp.53-68.
 - 17) Fukuda, S., Sueoka, S., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Tagami, T., Thermal history analysis of granitic rocks in an arc-trench system based on apatite fission-track thermochronology: A case study of the Northeast Japan Arc, *Journal of Asian Earth Sciences: X*, vol.1, 100005, 2019, doi:10.1016/j.jaesx.2019.100005.

- 18) Fukuda, S., Sueoka, S., Kohn, B.P. and Tagami, T., (U–Th)/He thermochronometric mapping across the northeast Japan Arc: towards understanding mountain building in an island-arc setting, *Earth, Planets and Space*, vol.72, 24, 2020, doi:10.1186/s40623-020-01151-z.
- 19) 中嶋 徹, 長田充弘, 福田将真, 末岡 茂, 秋田県太平山複合プルトンから得られたジルコン U–Pb 年代, *地質学雑誌*, vol.129, 2023, pp.503-507.
- 20) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U–Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, *Lithos*, vol.372-373, 105682, 2020, doi:10.1016/j.lithos.2020.105682.
- 21) Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon crystallisation age and temperature: common thermal evolution of mafic magmatic enclaves and host granites in the Kurobegawa granite, central Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.226, 105075, 2022, doi:10.1016/j.jseaes.2021.105075.
- 22) Yuguchi, T., Itoh, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Suzuki, S., Ogita, Y., Yagi, K., Imura, T., Motai, S. and Ohno, T., Outlining zircon growth in a granitic pluton using 3D cathodoluminescence patterns, U–Pb age, titanium concentration, and Th/U: Implications for the magma chamber process of Okueyama granite, Kyushu, Japan, *Lithos*, vol.440-441, 107026, 2023, doi:10.1016/j.lithos.2023.107026.
- 23) Ghiorso M.S. and Gualda, G.A.R., A method for estimating the activity of titania in magmatic liquids from the compositions of coexisting rhombohedral and cubic iron–titanium oxides, *Contribution to Mineralogy and Petrology*, vol.165, 2013, pp.73-81.
- 24) NASA JPL, SRTMGL1v003 NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2013, <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003> (参照:2024年6月7日).
- 25) 第四紀火山カタログ委員会, 日本の第四紀火山カタログ v. 1.0, CD-ROM Version, 日本火山学会, 1999.
- 26) 中田 高, 今泉俊文, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- 27) 田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 DGM P-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.

2.3 年代測定技術の開発

2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術

(1) はじめに

地質環境の長期安定性に関する研究を進める上で、過去の自然現象の復元のためには岩石や鉱物の形成年代やその後の変質・変成を受けた年代の決定が必要不可欠である。一般に、岩石や鉱物の年代測定では、放射性核種の壊変を利用する放射年代測定が用いられる。火山・火成活動におけるマグマの定置・貫入プロセスや、地表の隆起・沈降、侵食・堆積のプロセス及び断層運動の履歴等を理解するためには、複数の同位体系による年代測定が必要となる。また、地質試料から火成活動における鉱物の結晶化プロセスや堆積層の後背地の解析、断層運動等による熱変成あるいは水質変質の履歴を復元するには、放射年代測定のみではなく、鉱物組成や元素・同位体組成を取得することが重要となる。本研究では、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS: Inductively coupled plasma mass spectrometry)及びレーザーアブレーション装置とICP質量分析装置を連結して利用するレーザーアブレーションICP質量分析法(LA-ICP-MS: Laser ablation-ICP-MS)を用いた各種年代測定に必要な微量元素の定量分析や同位体分析のための技術開発及び既存技術の高度化を進めた。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

岩石を溶解し溶液に調製する従来の湿式 ICP-MS による分析と比較すると、LA-ICP-MS は簡便な試料前処理でマイクロメートルスケールの局所領域から化学情報を得ることが可能な分析手法であり、岩石を構成する鉱物ごとあるいは鉱物内のマイクロスケール領域ごとの元素・同位体組成(これに基づく形成年代)等まで取得することが可能である。したがって、近年は国内外で急速に LA-ICP-MS 等を用いた局所分析技術の整備・開発及び適用範囲の拡大など高度化が進んでいる。その一方で、従来の湿式分析法は空間分解能に限りがあるものの、元素組成や同位体組成の値付けには欠かせない高精度な分析手法であり、LA-ICP-MS での分析精度向上や高度化においても必須となる。東濃地科学センターでは、これまでに LA-ICP-MS による同位体分析技術の開発として、炭酸塩鉱物やジルコン等を対象としたウラン(U)-鉛(Pb)年代測定技術を確立し(例えば、Yokoyama *et al.*, 2018¹⁾)、各種試料の年代測定を実施してきた。ジルコンについては U-Pb 年代測定に加え、同時に同領域から Ti 濃度を分析し、結晶化年代と結晶化温度を同時に推定する手法を確立した(Yuguchi *et al.*, 2020²⁾, 2022³⁾, 2023⁴⁾)。また、例えばジルコンのハフニウム(Hf)同位体組成やアパタイトのストロンチウム(Sr)同位体組成などの情報は、起源マグマやマグマの混合、結晶分化作用に伴うマグマの化学組成の変化等に制約を与え得るため、これらの同位体分析技術の整備も進めてきた。さらに、微量元素組成から火山砕屑物(テフラ)を特徴付けるアプローチに必要な技術として、LA-ICP-MS による火山ガラスの微量元素分析技術を確立した(鏡味ほか, 2021⁵⁾)。岩石中での微量元素の挙動(移動)の把握に有効な微量元素マッピング(イメージング)技術も整備している。

これまでに開発してきた LA-ICP-MS による分析技術について、年代評価をより厳密にするために湿式 ICP-MS での取得データの検証も行いつつ、分析精度の向上を図り、また、適用範囲を拡大するなど手法を高度化することで、研究課題である火山・火成活動におけるマグマの定置・貫入プロセスや、地表の隆起・沈降、侵食・堆積のプロセス及び断層運動の履歴等の過去の地質現象の詳細な解明に貢献すると考えられる。

(3) 実施内容・結果

令和5年度は、第4期中長期目標期間の初年度であった令和4年度に引き続き、これまでに整備した分析技術を用いてデータの蓄積を行った。また、既存技術の高度化・高精度化及び適用範囲の拡大を狙い、以下の技術整備を進めた。湿式での超高精度同位体分析に向け、試料前処理手法についても技術整備を始めた。

① 火山灰を用いた堆積年代評価手法の高度化

火山灰等の火山砕屑物(テフラ)を用いた地層の堆積年代の決定では、テフラの対比のためにその特徴(構成鉱物種、火山ガラスの屈折率、主要元素組成等)を把握することが重要である。同じ給源から異なる時期に噴出したものなど特徴がよく似たテフラを識別する場合には、微量元素組成等のより詳細な指標を用いて比較することが要求される場合がある。テフロクロロジーの高度化に向け、令和4年度までに、LA-ICP-MSによる火山ガラスの微量元素分析手法を確立してきた。本研究では、火山ガラスの Sr・Nd 同位体組成を新指標として導入し評価することを目指し、局所分析手法の開発を進めた。令和5年度は、富山大学より提供を受けた呉羽山地域(富山市寺町けやき台公園付近)に認められる3層のテフラ層(図 2.3.1-1)を対象とした。全ての試料で火山ガラスの形態や主要元素組成、屈折率は類似しており、これらの指標では識別することができなかったが、LA-ICP-MSによる火山ガラスの微量元素組成(特に Ba/La 比, La/Y 比)により、3 試料(試料 A, B, C)を識別できることが明らかとなった(図 2.3.1-2)。

② 隆起・侵食評価に係る局所分析手法の高度化

隆起・侵食の評価において、深成岩体の貫入・定置時の温度・圧力等の環境及び年代情報は、岩体形成史を復元するだけでなく、その後の上昇・削剥過程での冷却や後発的な貫入による変成作用等で被る岩体の熱的な影響(熱履歴)を追う上でも、起点の情報として有用となる。結晶化温度が比較的高い鉱物についてその生成過程を解明することは、マグマの固結開始温度や当時の圧力の推定に繋がる。例えば、深成岩に普遍的に含まれるジルコンやチタナイトなど複数の鉱物種を対象とすれば、温度の低下や圧力の低下などマグマ固結時の冷却過程や定置深度に係る情報を取得できることが期待される。また、これらの年代測定可能な鉱物が結晶化する際に内包される流体包有物を利用した温度・圧力の推定手法からも同様の情報を抽出可能であると期待される。これまでもマグマの固結開始時の情報を取得するため、東濃地科学センターがこれまでに開発・整備した LA-ICP-MS によって鉱物の単一粒子中の複数のスポット(マイクロスケール領域)から年代情報と温度情報を一度に取得する分析手法を用い、複数の深成岩体に対してデータの蓄積を行ってきた。令和4年度からは、対象とする鉱物について、ジルコンのみならず、深成岩に一般的に含有されるチタナイトにも着目して分析技術の整備を進めている。チタナイトは晶出時の温度(Hyden *et al.*, 2008⁶⁾、圧力(Erdmann *et al.*, 2019⁷⁾)及び年代(Yoshida *et al.*, 2021⁸⁾) が推定可能な鉱物として知られている。ジルコンと同様にチタナイトからこれらの情報を読み解くことができれば、岩体冷却の温度時間履歴をより詳細に復元可能となり、地殻の隆起・侵食史の評価に資する熱履歴の解明に繋がると考えられる。チタナイトの温度、圧力、年代はそれぞれジルコニウム(Zr)濃度定量、アルミニウム(Al)濃度定量、U-Pb 同位体分析を行うことで推定することが可能である。近年では、変成岩中のチタナイトに LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定を適用して数億年前の年代情報を得る試みがなされている(Yoshida *et al.*, 2021⁸⁾; Harada *et al.*, 2021⁹⁾)。令和5年度は、隆起量・侵食量評価において必要な、約数千万～数百万年前に形成された(もしくは変質を被った)地質試料への年代測定手法の適用を目指し、分析手法の構築に必要な標準チタナイトの入手とその評価を実施した。チタナイトの U-Pb 年代測定に適した標準物質として、U/Pb 比や Pb 同位体組成、年代値が報告されているチタナイトである MKED1 ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb} = 3.7629$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.09600$, Pb-Pb-U-Pb concordia age = 1518 Ma; Spandler *et*

al., 2016¹⁰)をアデレード大学より提供いただいた。また、二次標準として使用可能な年代既知のチタナイトとして MDC titanite (98.7 Ma; Green, 1985¹¹)を株式会社京都フィッション・トラックより提供いただいた。

③ 断層活動性評価等に係るルビジウム・ストロンチウム同位体分析手法の整備

過去に生じた流体－岩石の相互作用を解明する上で、希土類元素や金属微量元素及びそれらの同位体組成情報は重要である。例えば、地震時の断層において、高温の流体と岩石が反応した際の元素の挙動が把握できれば、断層運動でどのような流体と関与したか、あるいはその断層運動の規模への制約の推定にも貢献できる。例えば、リチウム・ルビジウム・セシウム等のアルカリ金属元素(ナトリウムを除く)は、200°C以上の温度で流体層へ移行し、対照的にストロンチウムは 200°C以上の温度で固相に分配されることが実験的に知られている(You *et al.*, 1996¹²)。このような特徴を利用し、断層試料については、微量元素及び同位体組成情報から、断層の熱圧化(断層運動に伴う間隙水圧の上昇によるせん断応力の低下)に対して考察する試みが行われてきている(Ishikawa *et al.*, 2008¹³)。令和 5 年度は、ICP-MS によって、ルビジウム(Rb)及びストロンチウム(Sr)同位体を高精度に分析する手法の整備を進めた。熱イオン化質量分析法(TIMMS: Thermal ionization mass spectrometry)や ICP-MS による同位体分析では、分析中の同位体分別や同位体差別効果についての補正を必要とする。通常、同じ元素の同位体を用いて補正をするが、Rb は同位体が ⁸⁵Rb と ⁸⁷Rb の 2 つであり、⁸⁷Rb/⁸⁵Rb 比の測定では Rb 同位体での補正ができず、分析の精確さを確保するのが難しい。本研究では、Nebel *et al.* (2005)¹⁴)にしたがい、同位体差別効果の補正のために質量数の近いジルコニウム(Zr)試薬を添加し、ICP-MS (Thermo Fisher Scientific 製 Neptune-Plus)によって標準試料の NIST 984 の分析を実施した。その結果、文献値と整合的な値が得られた(図 2.3.1-3)。また、Sr 同位体分析手法の整備においては、標準試料の NIST 987 を始め、岩石標準試料 JB-3 (Imai *et al.*, 1995¹⁵)、断層試料にしばしば含有される自生イライトを想定したイライトの標準試料(Rochester Shale; Folk, 1962¹⁶)の細粒フラクション及び六甲山地の五助橋断層(活断層)の細粒フラクションについて ICP-MS により試験的に分析を行った。手順の簡易化・迅速化を目的として、岩石試料の前処理においては、陽イオン交換での化学分離操作を実施せず、Eichrom 製 Sr Resin のみで Sr の単離を試みた。その結果、本研究の化学分離操作では、Sr の回収率が 70~90%と低いことが明らかとなった。本前処理手法では、岩石試料に含有される多量のカルシウム、ナトリウムイオンによって Sr 回収率が低下したと考えられる。一方、同手法で前処理した岩石標準試料 JB-3 については、Sr 同位体分析結果が文献値と比較して有意差が認められなかったことから、この前処理手法において、Sr の同位体分別は生じていない、もしくは極めて小さい分別であることが明らかとなった。令和 6 年度は、より適切な前処理手法を検討し、ICP-MS による分析に加え、新たに導入予定の表面電離型質量分析装置を用いた TIMS による分析に係る手法の整備を行っていく。

④ U-Th 非平衡年代測定手法の整備

第四紀の火山・火成活動について、放射年代測定で年代学的制約を与える手法は極めて限定的である。昨今、LA-ICP-MS により、第四紀の深成岩や火山岩について、U-Pb 法や U-Th 非平衡年代測定が実施され、第四紀火山の火成活動を解明するための年代測定技術についての高度化が進みつつある(Ito, 2014¹⁷); Guillong *et al.*, 2015¹⁸); Niki *et al.*, 2022¹⁹)。令和 5 年度は、Niki *et al.* (2022)¹⁹)に倣った LA-ICP-MS による火成岩のジルコンに対する U-Th 非平衡年代測定技術の整備に向け、東濃地科学センターにフェムト秒レーザーアブレーション装置(Thermo Fisher Scientific 社製)を導入するとともに、洞爺火砕流堆積物等の標準試料候補となり得る試料を入手(弘前大学より提供)した。今後、分析条件の検討や入手した試料の分析を行い、手法の整備を行っていく。

(4) 主な成果と課題

ICP-MS 及び LA-ICP-MS による各種年代測定に必要な微量元素の定量分析や同位体分析のための技術開発及び既存技術の高度化として、「火山灰を用いた堆積年代評価手法の高度化」、「隆起・侵食評価に係る局所分析手法の高度化」、「断層活動性評価等に係るルビジウム・ストロンチウム同位体分析手法の整備」、「U-Th 非平衡年代測定手法の整備」を進めた。

火山灰を用いた堆積年代評価手法の高度化では、火山ガラスの Sr・Nd 同位体組成を対比の新指標として導入し評価することを目指して研究を進め、令和 5 年度は呉羽山地域の試料を対象として、LA-ICP-MS による微量元素分析を実施した。今後は、同試料について Sr・Nd 同位体の分析を実施し、これらの同位体組成情報がテフラ対比の新指標として有効かどうかを検討する。

隆起・侵食評価に係る局所分析手法の高度化では、岩体冷却の温度時間履歴の復元に寄与するものとして令和 4 年度から進めているチタナイトの U-Pb 年代測定について、標準チタナイトを入手するなど技術整備を進めた。令和 6 年度以降は、これらの標準チタナイトを用いて、チタナイトの形成年代、形成温度及び形成時の圧力情報を取得する分析手法の整備を進めていく。

断層活動性評価等に係るルビジウム・ストロンチウム同位体分析手法の整備では、ICP-MS による高精度ルビジウム同位体分析手法を整備し、ストロンチウム同位体分析手法の整備については標準岩石試料を対象に前処理手法の検討及び予察的な分析を実施した。令和 6 年度は、より適切な前処理手法を検討し、ICP-MS による分析に加え、新たに導入予定の表面電離型質量分析装置を用いた TIMS による分析手法の整備を行っていく。

U-Th 非平衡年代測定手法の整備では、分析に必要な設備の整備及び標準試料となり得る試料の入手を進めた。今後は、分析条件の検討や入手した試料の分析等により手法の整備を図っていく。

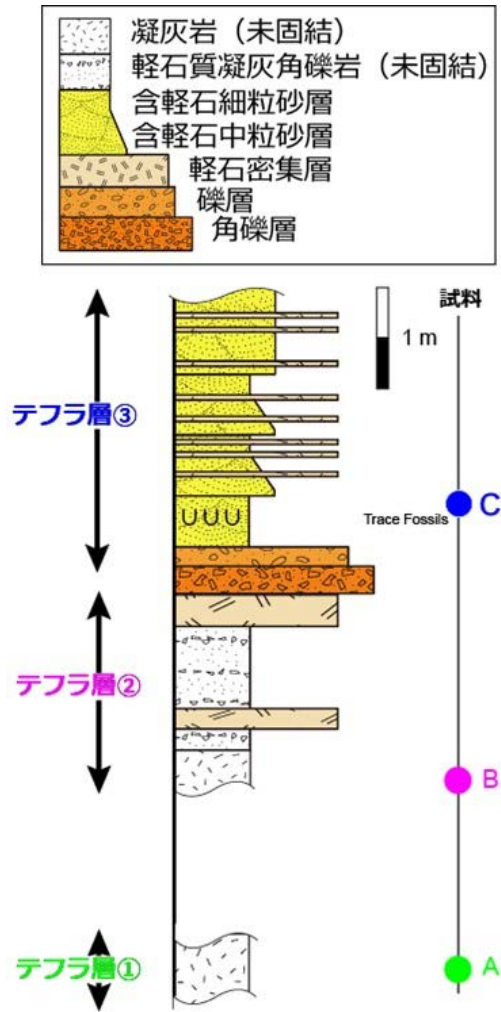


図 2.3.1-1 呉羽山地域(富山市寺町けやき台公園付近)に認められる3層のテフラ層(露頭柱状図)

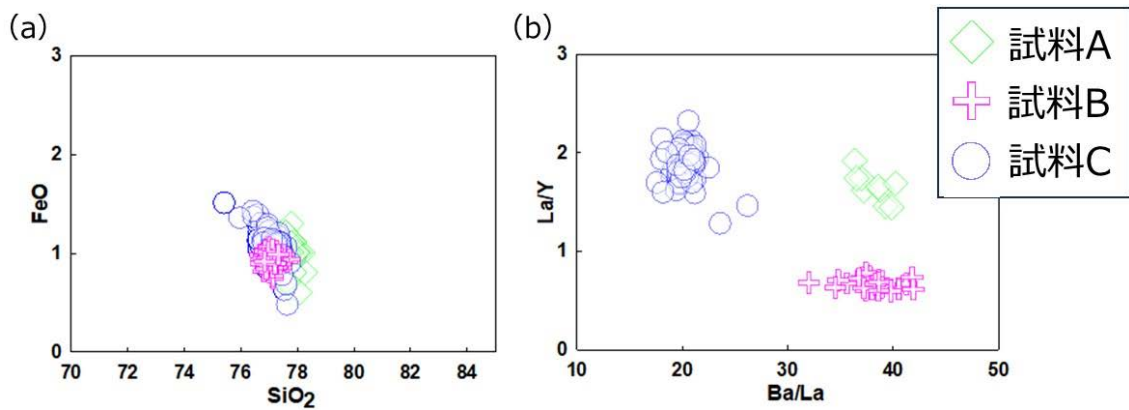


図 2.3.1-2 火山ガラスの(a) 主要元素組成の結果及び(b) 微量元素組成の結果

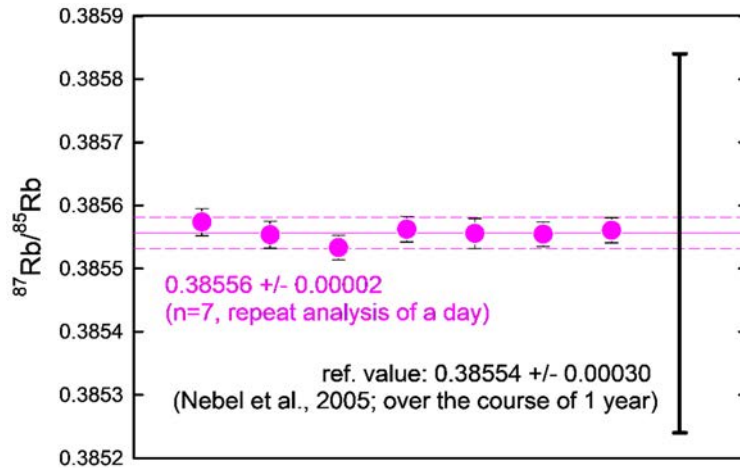


図 2.3.1-3 NIST 984 の測定結果

ピンク色丸が本研究の分析結果(1日間で7回繰り返し分析した際の平均値と標準偏差(2 σ))を示し、黒色バーが Nebel *et al.* (2005)¹⁴⁾の文献値(通年分析の標準偏差(2 σ))を示す。

参考文献

- 1) Yokoyama, T., Kimura, J.-I., Mitsuguchi, T., Danhara, T., Hirata, T., Sakata, S., Iwano, H., Maruyama, S., Chang Q., Miyazaki, T., Murakami, H. and Saito-Kokubu, Y., U–Pb dating of calcite using LA-ICP-MS: Instrumental setup for non-matrix-matched age dating and determination of analytical areas using elemental imaging, *Geochemical Journal*, vol.52, no.6, 2018, pp.531-540.
- 2) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U–Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, *Lithos*, vols.372-373, 105682, 2020, doi: 10.1016/j.lithos.2020.105682.
- 3) Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon crystallisation age and temperature: Common thermal evolution of mafic magmatic enclaves and host granites in the Kurobegawa granite, central Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.226, 105075, 2022, doi: 10.1016/j.jseaes.2021.105075.
- 4) Yuguchi, T., Ito, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Suzuki, S., Ogita, Y., Yagi, K., Imura, T., Motai, S. and Ohno, T., Outlining zircon growth in a granitic pluton using 3D cathodoluminescence patterns, U–Pb age, titanium concentration, and Th/U: Implications for the magma chamber process of Okueyama granite, Kyushu, Japan, *Lithos*, vols.440-441, 107026, 2023, doi:10.1016/j.lithos.2023.107026.
- 5) 鏡味沙耶, 横山立憲, 梅田浩司, 東濃地科学センターにおける火山ガラスの化学組成分析手法—EPMA を用いた主要元素分析及び LA-ICP-MS による微量元素分析—, *JAEA-Testing 2021-001*, 2021, 49p.
- 6) Hyden, L.A., Watson, E.B. and Wark, D.A., A thermobarometer for sphene (titanite), *Contribution to Mineralogy and Petrology*, vol.155, 2008, pp.529-540.

- 7) Erdmann, S., Wang, R., Huang, F., Scaillet, B., Zhao, K., Liu, H., Chen, Y. and Faure, M., Titanite: A potential solidus barometer for granitic magma systems, *Comptes rendus – Geoscience*, vol.351, 2019, pp.551-561.
- 8) Yoshida, K., Niki, S., Sawada, H., Oyanagi, R., Hirata, T., Asakura, K. and Hirajima, T., Discovery of the Early Jurassic high-temperature pre-Sanbagawa metamorphism recorded in titanite, *Lithos*, vols.398-399, 106349, 2021, doi:10.1016/j.lithos.2021.106349.
- 9) Harada, H., Tsujimori, T., Kon, Y., Aoki, S. and Aoki, K., Nature and timing of anatectic event of the Hida Belt (Japan): Constraints from titanite geochemistry and U–Pb age of clinopyroxene-bearing leucogranite, *Lithos*, vols.398-399, 106256, 2021, doi:10.1016/j.lithos.2021.106256.
- 10) Spandler, C., Hammerli, J., Sha, P., Hilbert-Wolf, H., Hu, Y., Roberts, E. and Schmitz, M., MKED1: A new titanite standard for in situ analysis of Sm–Nd isotopes and U–Pb geochronology, *Chemical Geology*, vol.425, 2016, pp.110-126.
- 11) Green, P.F., Comparison of zeta calibration baselines for fission-track dating of apatite, zircon and sphene, *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, vol.58, 1985, pp.1-22.
- 12) You, C.F., Castillo, P.R., Gieskes, J.M., Chan, L.H. and Spivack, A.J., Trace element behavior in hydrothermal experiments: implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.140, 1996, pp.41-52.
- 13) Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuo, J., Tadaï, O., Sakaguchi, M., Hirono, T., Mishima, T., Tanikawa, W., Lin, W., Kikuta, H., Soh, W. and Song, S.R., Coseismic fluid–rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault, *Nature Geoscience*, vol.1, 2008, pp.679-683.
- 14) Nebel, O., Mezger, K., Scherer, E.E. and Münker, C., High precision determinations of $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb}$ in geologic materials by MC-ICP-MS, *International Journal of Mass Spectrometry*, vol.246, 2005, pp.10-18.
- 15) Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A., 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, “Igneous rock series”, *Geostandards Newsletter*, vol.19, 1995, pp.135-213.
- 16) Folk, R.L., Petrography and origin of the Silurian Rochester and McKenzie Shales, Morgan County, West Virginia, *Journal of Sedimentary Research*, vol.32, no.3, 1962, pp.539–578.
- 17) Ito, H., Zircon U–Th–Pb dating using LA-ICP-MS: Simultaneous U–Pb and U–Th dating on 0.1 Ma Toya Tephra, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.289, 2014, pp.210-223.
- 18) Guillong, M., Schmitt, A.K. and Bachmann, O., Comment on “Zircon U–Th–Pb dating using LA-ICP-MS: Simultaneous U–Pb and U–Th dating on 0.1 Ma Toya Tephra, Japan” by Hisatoshi Ito, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.296, 2015, pp.101-103.
- 19) Niki, S., Kosugi, S., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., Development of an in situ U–Th disequilibrium dating method utilising multiple-spot femtosecond laser ablation-CRC-ICP-MS, *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol.46, 2022, pp.589-602.

2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術

(1) はじめに

光ルミネッセンス(OSL)年代測定法は、自然放射線を浴びることによって鉱物結晶内に捕獲された不対電子が、光刺激を受けたときに正孔と再結合することで放出されるルミネッセンス(蛍光)を利用する手法であり、石英では数十年～十数万年前、長石では数千年～数十万年前までの年代決定を得意とする。蓄積された捕獲電子は光刺激によって解放(初期化)されるため、OSL年代測定法は原岩の形成年代に依存しない堆積物の埋没年代を推定することが可能である。また、近年では、OSL信号の蓄積速度の熱依存性を利用し、試料の熱史を推定するOSL熱年代法が提唱された(Herman *et al.*, 2010¹⁾; Herman and King, 2018²⁾)。この手法は、FT法や(U-Th)/He法といった既存の熱年代法では測定が困難な、過去数十万年の低温領域(約100°C以下)の熱史の推定を得意とし(Herman *et al.*, 2010¹⁾; Herman and King, 2018²⁾; Ault *et al.*, 2019³⁾)、一般的な地温構造を仮定すると、深度1～2 km以浅における侵食史の評価ができる。東濃地科学センターでは、隆起評価に係る堆積年代推定のためにOSL年代測定法の、そして、侵食評価に係る熱年代推定のためにOSL熱年代法の利用及び高度化を行ってきた。本報告書では、このうち前者の成果について述べる。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

地盤の隆起と海水準変動の相互作用により形成される海成段丘は、主に数千年～数十万年前での隆起速度推定に利用される。その際、段丘構成層や被覆層に放射性炭素年代測定が可能な有機物や年代マーカーとなるテフラが含まれないと堆積時期の制約が難しく、隆起速度の評価が困難となる。長石のOSL年代測定法は、1)長石が我が国の第四紀の堆積物に普遍的に含まれること、2)堆積物の埋没(堆積)年代を推定可能なこと、3)数千年～数十万年前の年代に適用可能なことから、中期～後期更新世の海成段丘の絶対編年に貢献できると考えられる。実際、先行研究では、テフラ編年との比較により、日本のMIS 5海成段丘への長石OSL年代測定法の適用性が示されている(Thiel *et al.*, 2015⁴⁾; Ito *et al.*, 2017⁵⁾; Hayashizaki *et al.*, 2022⁶⁾; Tamura *et al.*, 2022⁷⁾)。

紀伊半島南部は後期更新世の海成段丘がよく発達する地域であるが、地形の年代を決める直接的な資料に乏しく、広域テフラも発見されていないため、段丘とその堆積物の年代の推定は地形層序学的な検討に留まっている(米倉, 1968⁸⁾; 小池・町田編, 2001⁹⁾)。本研究では、海成段丘への長石OSL年代測定法の適用性の拡充のため、紀伊半島南部の全域に分布し、地形層序学的にMarine isotope stage (MIS) 5eに対比される海成段丘面(米倉, 1968⁸⁾)の堆積物を対象に長石OSL年代測定を行った。

(3) 実施内容・結果

本研究では、熊野川河口の右岸に位置し、米倉(1968)⁸⁾でL₁面(MIS 5e; 小池・町田編, 2001⁹⁾)に対比される段丘面を研究対象とした。この段丘面の露頭では、層厚5 m程度の泥～砂層(標高37.6～42.8 m)とそれを覆う層厚5 m程度の砂礫層を確認した(図2.3.2-1)。泥～砂層は平行葉理が発達し、直径約1 cmの生痕が多く存在する。砂礫層はよく淘汰されており、円盤状の円礫で構成される斜交層理が発達する。これらの特徴より、泥～砂層は前浜環境で堆積し、砂礫層はより運搬力が大きな堆積環境で堆積したことが示唆される。本研究では、前浜堆積物である泥～砂層の長石OSL年代測定を行った。測定試料は、太陽光曝露を防ぐため、直径約4 cm、長さ約30 cmの塩化ビニルパイプを打ち込んで3点採取した(HTK-1, HTK-3, HTK-4; 図2.3.2-1)。

試料処理及び OSL 測定は、光曝によるルミネッセンス信号の減少を防ぐため、赤色灯下で行った。まず、採取した試料から OSL 測定用のカリ長石を抽出するため、以下の手順で処理した: 1) 露光している可能性がある塩化ビニルパイプ周縁部の約 1 cm と両端部約 5 cm を取り除く; 2) ふるいを用いて、200~250 μm に選別する; 3) 10%の塩酸で炭酸塩、35%の過酸化水素で有機物を除去する; 4) ポリタングステン酸ナトリウム水溶液を用いて、比重 2.58 g/cm^3 未満の粒子を選別する; 5) ネオジウム磁石を用いて、磁性鉱物を分離する。抽出したカリ長石を、直径約 10 mm のステンレスディスクの中心部(直径約 2 mm)に載せ、OSL 測定を行った。また、1)で取り除いた試料を用いて年間線量測定を行った。年間線量測定については、小形ほか(2021)¹⁰⁾を参照されたい。

OSL 測定には、東濃地科学センターの Risø TL/OSL-DA-20 (Bøtter-Jensen *et al.*, 2010¹¹⁾)を用いた。本装置は、人工放射線源として β 線源 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$; 1.48 GBq; 約 0.1 Gy/s)、励起光源として赤外光発光ダイオード(870 nm)を搭載する。 β 線源の線量率は Risø 校正用石英で校正した (Hansen *et al.*, 2015¹²⁾, 2018¹³⁾; Autzen *et al.*, 2022¹⁴⁾)。赤外光励起ルミネッセンス (Infrared stimulated luminescence: IRSL) は光電子増倍管と Schott BG39 と BG3 を用いて検出した。本測定では、single-aliquot regenerative dose 法 (Murray and Wintle, 2000¹⁵⁾) 用いた post-infrared infrared stimulated luminescence (pIRIR) 測定 (Thomsen *et al.*, 2008¹⁶⁾; Buylaert *et al.*, 2009¹⁷⁾) を採用した (表 2.3.2-1)。IR 測定温度は 50°C、pIRIR 測定温度は 150°C、もしくは 225°C とした。以後、pIRIR 信号の測定温度を下付き文字で表す (例えば、pIRIR₁₅₀)。繰り返しの加熱によるルミネッセンス感度の変化を補正するため、天然で蓄積された pIRIR 信号及び本照射による pIRIR 信号 (L_x) をテスト照射による pIRIR 信号 (T_x) で規格化した。OSL 測定では、等価線量、放射線応答曲線、フェーディング速度を求めた。各測定法の概要については、小形ほか(2021)¹⁰⁾を参照されたい。

OSL 測定の結果を基にフェーディング補正 (Huntley, 2006¹⁸⁾; Kars *et al.*, 2008¹⁹⁾) を行い、OSL 年代を求めた。HTK-1, 3, 4 の pIRIR₁₅₀ 年代は 118 \pm 10 ka, 128 \pm 11 ka, 126 \pm 7 ka, pIRIR₂₂₅ 年代は 128 \pm 7 ka, 130 \pm 7 ka, 143 \pm 9 ka と推定された (図 2.3.2-1)。HTK-4 の pIRIR₂₂₅ 年代を除く全ての年代値は、誤差の範囲で MIS 5e の年代範囲 (Spratt and Lisiecki, 2016²⁰⁾; Thompson and Creveling, 2021²¹⁾) と整合し、本研究の対象段丘は MIS 5e に形成されたことが示唆された。これは、地形層序学的な段丘編年 (米倉, 1968⁸⁾; 小池・町田編, 2001⁹⁾) とも整合的である。HTK-4 の pIRIR₂₂₅ 年代 (143 \pm 9 ka) は他の pIRIR 年代と比較し、古く見積もられた (図 2.3.2-1)。原因としては、年間線量率の過小評価やフェーディング速度の過大評価、太陽光曝による年代の初期化が十分でなかったことが挙げられる。より正確な年代測定のためには、これらを評価し、補正することが必要である。OSL 年代には上述のような不確実性があるが、本研究においては複数の試料及び測定温度の pIRIR 年代でクロスチェックすることで評価でき、その重要性が示された。

(4) 主な成果と課題

本研究では、紀伊半島南部の海成段丘に対して長石 OSL 年代測定を行い、MIS 5e に対比されることを示した。この結果は紀伊半島の更新世海成段丘の絶対編年として初の成果である。長石 OSL 年代測定法の適用範囲は数千年~数十万年であることから、より上位・下位の段丘に対して本手法を適用することで、より強固な段丘編年を行うことができると考えられる。また、本成果は、未だ絶対編年がされていない他地域の海成段丘に対しても長石 OSL 年代測定法が貢献できることを示唆するものである。ただし、OSL 年代は 10%以上の相対誤差を持つことが多いため、サブステージを区分する場合 (例えば、MIS 5c と 5e) には、複数の試料及び測定温度の pIRIR 年代でクロスチェックし、信頼性を確かめることが必要である。また、年間線量率、フェーディング速度、太陽光曝による年代の初期化等の評価・補正も重要である。

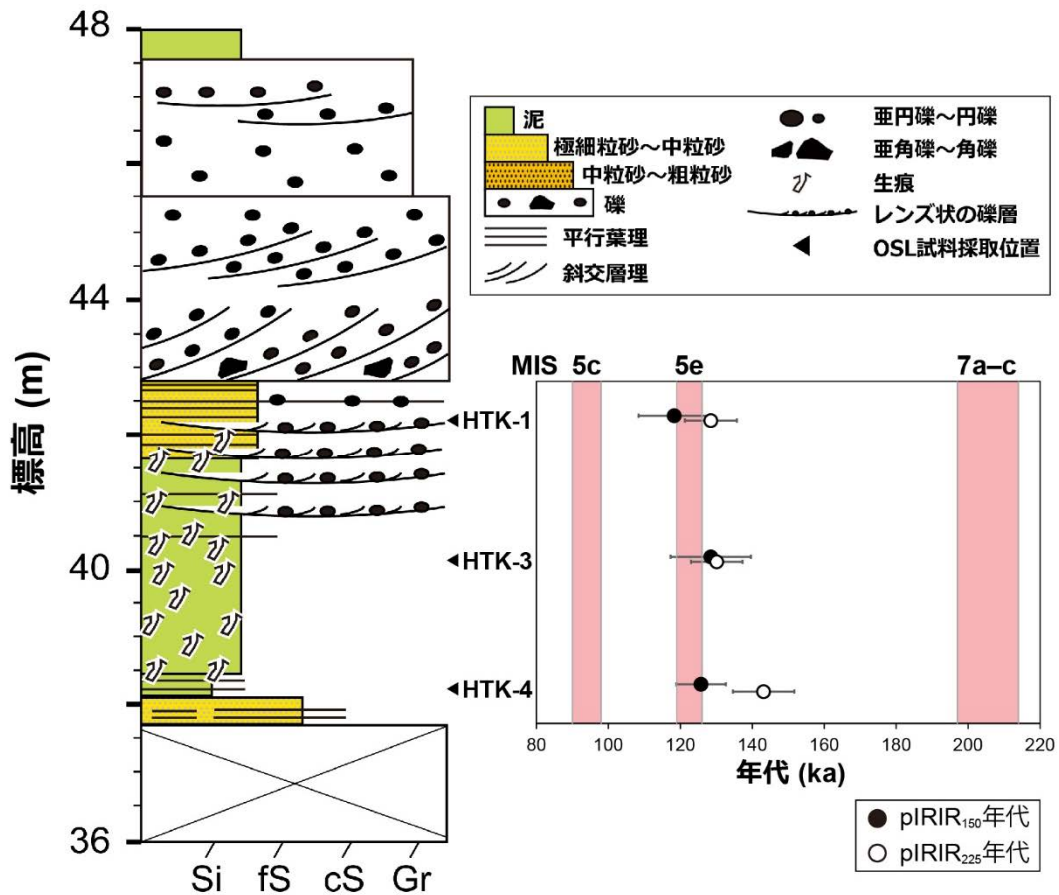


図 2.3.2-1 試料を採取した露頭の柱状図と OSL 年代

OSL 年代は MIS 5e, 5c, 7a-c (Spratt and Lisiecki, 2016²⁰; Thompson and Creveling, 2021²¹) と比較している。

表 2.3.2-1 OSL 測定プロトコル

ステップ	測定内容	測定信号
1	本照射	
2	プレヒート(180°C もしくは 250°C, 60 秒)	
3	IR 測定(50°C, 200 秒)	
4	pIRIR 測定(150°C もしくは 225°C, 200 秒)	L_x
5	テスト照射	
6	プレヒート(180°C もしくは 250°C, 60 秒)	
7	IR 測定(50°C, 200 秒)	
8	pIRIR 測定(150°C もしくは 225°C, 200 秒)	T_x
9	IR ホットブリーチ(290°C, 100 秒)	
10	1 に戻る	

参考文献

- 1) Herman, F., Rhodes, E. J., Braun, J. and Heiniger, L., Uniform erosion rates and relief amplitude during glacial cycles in the Southern Alps of New Zealand, as revealed from OSL-thermochronology, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.297, 2010, pp.183-189.
- 2) Herman, F. and King, G. E., Luminescence thermochronometry: Investigating the link between mountain erosion, tectonics and climate, *Elements*, vol.14, 2018, pp.33-38.
- 3) Ault, A.X., Gautheron, C. and King, G.E., Innovations in (U-Th)/He, fission track, and trapped charge thermochronometry with applications to earthquakes, weathering, surface-mantle connections, and the growth and decay of mountains, *Tectonics*, vol.38, 2019, pp.3705-3739.
- 4) Thiel, C., Tsukamoto, S., Tokuyasu, K., Buylaert, J.P., Murray, A.S., Tanaka, K. and Shirai, M., Testing the application of quartz and feldspar luminescence dating to MIS 5 Japanese marine deposits, *Quaternary Geochronology*, vol.29, 2015, pp.16-29.
- 5) Ito, K., Tamura, T. and Tsukamoto, S., Post-IR IRSL dating of K-feldspar from last interglacial marine terrace deposits on the Kamikita coastal plain, northeastern Japan, *Geochronometria*, vol.44, 2017, pp.352-365.
- 6) 林崎 涼, 最終間氷期の段丘堆積物の OSL 年代測定 -福島県塚原海岸で採取した試料での測定例-, 電力中央研究所報告, NR21005, 2022, 13p.
- 7) Tamura, T., Okazaki, H., Naya, T., Nakashima, R., Nakazato, H., Seike, K. and Okuno, J., Luminescence chronology for identifying depositional sequences in an uplifted coast since the Middle Pleistocene, eastern Japan, *Frontiers in Earth Science*, vol.10, 967572, 2022, doi:10.3389/feart.2022.967572.
- 8) 米倉伸之, 紀伊半島南部の海岸段丘と地殻変動, *地学雑誌*, vol.77, 1968, pp.1-23.
- 9) 小池一之, 町田 洋編, 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会, 2001, 122p.
- 10) 小形 学, 小松哲也, 中西利典, 長石光ルミネッセンス(OSL)年代測定法を用いた穿入蛇行河川堆積物の年代推定:紀伊山地十津川の事例, *第四紀研究*, vol.60, 2021, pp.27-41.
- 11) Bøtter-Jensen, L., Thomsen, K.J. and Jain, M., Review of optically stimulated luminescence (OSL) instrumental developments for retrospective dosimetry, *Radiation Measurements*, vol.45, 2010, pp.253-257.
- 12) Hansen, V., Murray, M., Buylaert, J.P., Yeo, E.Y. and Thomsen, K., A new irradiated quartz for beta source calibration, *Radiation Measurements*, vol.81, 2015, pp.123-127.
- 13) Hansen, V., Murray, A., Thomsen, K., Jain, M., Autzen, M. and Buylaert, J.P., Towards the origins of over dispersion in beta source calibration, *Radiation Measurements*, vol.120, 2018, pp.157-162.
- 14) Autzen, M., Anderson, C.E., Bailey, M. and Murray, A.S., Calibration quartz: An update on dose calculations for luminescence dating, *Radiation Measurements*, vol.157, 106828, 2022, doi:10.1016/j.radmeas.2022.106828.

- 15) Murray, A.S. and Wintle, A.G., Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, *Radiation Measurements*, vol.32, 2000, pp.57-73.
- 16) Thomsen, K.J., Murray, A.S., Jain, M. and Bøtter-Jensen, L., Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts, *Radiation Measurements*, vol.43, 2008, pp.1474-1486.
- 17) Buylaert, J.P., Murray, A.S., Thomsen, K.J. and Jain, M., Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar, *Radiation Measurements*, vol.44, 2009, pp.560-565.
- 18) Huntley, D.J., An explanation of the power-law delay of luminescence, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol.18, 2006, pp.1359-1365.
- 19) Kars, R.H., Wallinga, J. and Cohen, K.M., A new approach towards anomalous fading correction for feldspar IRSL dating - tests on samples in field saturation, *Radiation Measurements*, vol.43, pp.786-790.
- 20) Spratt, R.M. and Lisiecki, L.E., A late Pleistocene sea level stack, *Climate of the Past*, vol.12, 2016, pp.1079-1092.
- 21) Thompson, S.B. and Creveling, J.R. A global database of marine isotope substage 5a and 5c marine terraces and paleoshoreline indicators, *Earth System Science Data*, vol.13, 2021, pp.3467-3490.

2.3.3 フィッション・トラック(FT)年代測定技術

(1) はじめに

地層処分における地質環境の長期安定性に関して、地質学的時間スケールにおける隆起・侵食評価や、断層の活動性評価、熱水活動の制約等に寄与する手法開発や応用研究の蓄積は重要である。FT年代測定に代表される熱年代解析は、年代測定法によって得られた年代値と、測定法・鉱物の組み合わせに固有な閉鎖温度に基づき、岩石や鉱物の温度-時間履歴(熱履歴)を推定する手法である。したがって、高精度な熱履歴の復元や適用範囲の拡大、分析の効率化を目指すことで、地質環境の長期安定性評価に貢献できると期待される。FT法は、絶縁性固体におけるウラン-238(^{238}U)の自発核分裂現象によって結晶格子に形成される線状損傷を計数し、ICP-MS等でU濃度を測定することによって年代測定を行う。FT法の閉鎖温度は、アパタイトで 100°C 前後(例えば、Ketcham *et al.*, 1999¹⁾)、ジルコンで 300°C 程度(Ketcham, 2019²⁾)である。また、他の熱年代法にない特長として、加熱によってFTの長さが段階的に短縮・消滅するアニーリングと呼ばれる現象を利用し、年代測定とFTの長さ分布の測定を併用して専用のソフトウェア(HeFTy: Ketcham, 2005³⁾; QTQt: Gallagher, 2012⁴⁾)で計算することにより、高精度に熱史を制約できる。効率的なFT年代測定及びFT長計測のため、東濃地科学センターでは、我が国で唯一となるFT自動計測装置(Autoscan System社製 TrackScan)を所有し、FT分析の運用に活用している。地質試料に対する継続的な応用研究事例の蓄積のみならず、新たな対象鉱物の検討、分析装置の高度化、現行の前処理方法の改良等を進めることにより、FT分析のさらなる効率化及び応用範囲の拡大が期待できる。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

FT法では、主にアパタイトやジルコン、チタナイト、火山ガラスが測定対象として用いられてきた(Hurford, 2019⁵⁾)。一方で、新たな鉱物についての基礎研究についても進められており(末岡ほか, 2021⁶⁾)、より閉鎖温度が低温であると期待されるモナザイト(Jones *et al.*, 2019⁷⁾, 2021⁸⁾)や、苦鉄質岩中のバデレアイト等、FT年代測定の適用範囲を拡大する試みがなされている。特に、モナザイトFT法の実用化を目的とした基礎研究(例えば、Weise *et al.*, 2009⁹⁾; Jones *et al.*, 2019⁷⁾, 2021⁸⁾)及び応用研究(Jones *et al.*, 2023¹⁰⁾)が近年活発に進められている。この手法は、閉鎖温度が $25\sim 45^{\circ}\text{C}$ 程度と極めて低温である可能性が指摘されており、深度 $1\sim 2\text{ km}$ 以浅の地殻表層の隆起・侵食履歴の復元や、より最近の断層運動の活動性評価など、これまでの熱年代法でアプローチが困難だった温度・時間領域の推定が可能になると期待される。

FT法に基づく地質試料の熱年代分析では、地質試料採取、粉碎・鉱物の抽出、分析の前処理、FTの計数、U定量といった流れで分析を行い、得られたFT密度とU濃度に基づいて年代値を取得する。2010年頃から画像解析法によるFTの自動計測が実用化され、代表的な装置として豪・Autoscan System社のTrackScanが世界的にも普及し、これまでの手作業に比較してFT計数における飛躍的な効率化が実現された。TrackScanでは、ソフトウェアによる顕微鏡の制御と画像処理技術により、観察領域の自動的な疑似三次元画像の撮影と、FT構造の自動認識が可能となっている(Gleadow *et al.*, 2019¹¹⁾)。ただし、ジルコン等の一部の鉱物については、結晶の透過率と撮影したFTの明度の影響で、FTとバックグラウンドのコントラスト比がアパタイトよりも小さく、FT構造の自動認識は大きな不確実性を伴う。現状では、粒子画像の自動撮影までを他の鉱物同様に実施し、手動でFTの識別・計数を実施している。ジルコンについても自動認識の高精度化を実現することで、分析時間の圧倒的な効率化を図ることが可能となる。

また、FT年代測定の前処理作業においても、作業の効率化を検討可能な余地がある。FT年代測定では、対象鉱物の高精度な鉱物分離や、樹脂・テフロン材への包埋、一定深度までの研磨等を経て、酸やアルカリ等の化学処理(エッチング)を行う。これらの分析手順は既に確立している(Kohn *et al.*, 2019¹²)だが、効率化を目指すためには重鉱物の精選方法や新たな包埋材の検討、研磨作業の改良等、個々の手順には効率化・改善の余地が残っている。

以上の背景から、第4期中長期目標期間の初年度であった令和4年度の検討では、新たな対象鉱物についての技術開発、ジルコンにおけるFT自動計測についての実用化及び前処理技術の高度化の主に3つの項目について検討を行ってきた。まず、新たな対象鉱物についての技術開発に関しては、モナザイトの鉱物分離法の検討により、2種類の磁石を使った磁性分離によってモナザイトが効果的に分離可能であることを見出した。さらに、モナザイトFT法及びバデレアイトFT法におけるエッチング条件について基礎実験を行った結果、モナザイトについては第四紀の若い試料を除いてFTの検出に成功したが、バデレアイトについてはFTが検出できなかった。ジルコン等におけるFT自動計測についての実用化については、TrackScanの画像解析条件の変更により、自動計測が可能になるか検証を行ったが、効果的な条件は見出せず実用化には至っていない。また、前処理技術の高度化については、ジヨードメタンやネオジム磁石、ダイヤモンドラッピングフィルムを導入し、効率的な前処理法について検討してきた。令和5年度においては、引き続き、新たな対象鉱物についての技術開発と、ジルコンやモナザイトにおけるFT自動計測についての実用化に関する2項目の検討を実施した。これにより、FT法の測定対象の拡大や分析のさらなる効率化を図る。

(3) 実施内容・結果

① 新たな対象鉱物についての技術開発

新たなFT法の対象鉱物として、近年バデレアイトやモナザイトが着目されている。これらの鉱物の年代測定のためには、鉱物分離後のフラクションからの迅速な同定や前処理作業のルーティン化、エッチング法の確立などの基礎的な課題の解決が求められる。バデレアイトFT法の実用化については令和4年度から検討を進めており、檀原ほか(1999)¹³で検討されているエッチング条件(228°CのNaOH-KOH共融液、20°Cの40%HF)をもとに、ロシア産(1.5 Ga)のバデレアイトを用いた検証を行ったが、研磨痕の出現と拡大は観察された一方でFTは検出されなかった(中嶋ほか, 2022¹⁴)。これらのエッチング条件でFTが観察されなかった原因として、中嶋ほか(2022)¹⁴は以下の3つの可能性を指摘している:1)FT密度が極端に低い; 2)FTが実験中に熱アニールされている; 3)何らかの理由でバデレアイトのFTが選択的にエッチングされづらい。令和5年度は、これらの原因究明を目的として、試料固有の影響の可能性を排除するため、南アフリカ産(2.0 Ga)のバデレアイトを新たに使用して比較を試みた。また、試料にFTが観察されなかったことを受けて、イオン照射を実施することで人工的にイオントラックを形成させ、エッチングによってイオントラックが観察可能か実験を行った。イオントラックのエッチング試験に先立って、バデレアイトのイオン照射による結晶構造の変化を把握するため、南アフリカ産のバデレアイトを用いた340 MeVのAuイオン照射及びTEM観察を実施した。昨年度の結果と同様、TEM観察においても天然のFTは観察されなかった。一方で、Auイオン照射後の観察ではZrO₂に特有の形状である菱形の断面を有したイオントラックが観察された(Ishikawa *et al.*, 2024¹⁵)。また、照射領域ではほとんどアモルファス領域は見られずに結晶構造が保持されており、斜方晶系から正方晶系に相転移していることが観察された(Ishikawa *et al.*, 2024¹⁵)。このように、バデレアイトへのイオン照射では、結晶の相転移という形で照射領域にイオントラックが形成されることが明らかとなった。次に、イオン照射後のバデレアイトのエッチングを試みた。前処理の手順は通常のFT法と同様で、試料をハンドピックしてテフロンシートに包埋し、表面を露出させる

ために研磨を行った。次に研磨済みのロシア産と南アフリカ産のバデレアイトに 200 MeV の Xe イオンを照射したのち、228℃の NaOH-KOH 共融液でエッチングを行い、イオントラックの拡大が観察されるか検証を試みた。2～29 時間の段階エッチングを実施した結果、これまでの結果と同じく FT は観察されなかったが、イオントラックと思しき短い線状構造が観察され、エッチング時間の増大に伴って拡大している様子が観察された(図 2.3.3-1)。ただし、一部の粒子ではイオン照射方向と異なる方向の線状構造が観察されていたり、万遍なくイオントラックが観察される粒子もあれば、全く観察されないものも見られ(図 2.3.3-2)、粒子内及び粒子間で不規則な分布をしていることが明らかとなった。この原因として、化学組成や放射線損傷が粒子内で不均質な分布をしていることに起因して、イオントラックのエッチング効率が異なる可能性や、アルカリエッチングによる加熱でイオントラックが一部アニーリングしている可能性も考えられる。このような不規則な分布の原因の探求は今後の課題であり、イオン照射後に加熱を伴わない HF や混酸によるエッチングなどを検討予定である。

次にモナザイト FT 法の実用化や FT 分析の前処理について、令和 4 年度の検討ではモナザイトを単離するために磁性分離を利用した効果的な抽出方法を見出した。ただし、一部のモナザイト試料では一般的な淡黄色～褐色を呈さない無色透明の結晶が観察され、肉眼で他の鉱物との判別が難しいことが課題であった。また、FT 法などの年代測定に用いる鉱物は、最終的には鏡下観察を通して結晶形や色などを基準に選別するため、前処理の効率は分析者の知識や経験に依拠していた。さらに、従来の EPMA(電子プローブマイクロアナライザー)や ICP-MS を利用した化学分析による同定法は、高精度な定量データが得られる一方で、樹脂への包埋や研磨などの煩雑な前処理と長い分析時間が必要である。そこで、分析者のスキルに依存しない確実かつ効率的な鉱物の同定や識別方法の検討のため、顕微鏡下での化学組成が測定可能な KEYENCE 製の元素分析ヘッド付きデジタルマイクロスコープ(EA-300+VHX-8000)を新たに導入し、レーザー誘起ブレイクダウン分光法(Laser Induced Breakdown Spectrometry: LIBS 法)に基づく化学分析からデータの収集を試みた。本装置を用いた LIBS 分析では前処理不要であり、鉱物結晶の 10 μm 径の領域をレーザーでアブレーションし、1 分析点で 1 秒ほどの分析時間で迅速に化学組成が得られる。また、AI サジェスト機能により化学組成データベースに基づいて物質名を自動で判別可能であるが、測定困難な元素もあるため定量性は劣る。令和 5 年度は様々な鉱物を用いて化学組成データから鉱物種を峻別可能か検証を試みるため、既往試料のアパタイト、モナザイト、バデレアイト、ジルコンの分析を実施し適用性を確認した。本研究で用いたアパタイト及びジルコンは株式会社ニチカが販売しているスリランカ産のカーボナタイトから分離されたフッ化アパタイト(Ca₅(PO₄)₃F)及びオーストラリア産の海浜漂砂鉱床中のジルコン(ZrSiO₄)を用いた。モナザイトは、山口県岩国で採取された白亜紀の領家帯花崗岩類から分離したセリウムモナザイト(CePO₄)、バデレアイトは上述のエッチング試験で使用したものと同様のロシア産と南アフリカ産のもの(ZrO₂)を用いた。LIBS 分析の結果として、全ての鉱物で固有の化学式に概ね整合的な組成比が得られ、迅速に判別できることが分かった(図 2.3.3-3)。懸念事項として、試料表面の汚染に注意が必要である点や、鉱物の化学組成の不均質性や包有物の存在などの影響で理想的な組成値が得られない場合もあることが分かった。また、wt%オーダーの元素のみ測定可能であり、ppm オーダーで含有される微量元素は測定できないため、正確な定量には ICP-MS などの分析が必要であることにも留意すべきである。今後は、組成値が既に測定された鉱物での LIBS 分析に基づく定量値の精確性の評価や、今回用いなかった他の鉱物での分析データの蓄積を通して、肉眼観察での判断材料の一つとして適用するための LIBS 分析としての確立を目指す。

② ジルコンやモナザイトにおける FT 自動計測についての実用化

TrackScan にインストールされているソフトウェアを用いて、モナザイトやジルコンの自動測定を実施可

能とするために複数の検討を行った。まず、自動撮影の条件設定を変更することで、画像解析結果の確度が向上するかを検証した。TrackScan における画像解析では、透過光画像と反射光画像を二値化して合成し、バックグラウンドとのコントラストが大きい領域が双方の画像中で同一位置の場合に FT として検出している(Coincidence Mapping)。上述のように、ジルコンなどでは結晶の透過率や FT の明度の関係で自動計測が成功しない場合が多く、これまでは撮影した画像を基にマニュアルモードで FT を認定し計数していた。自動測定が成功しない主な原因として、FT とバックグラウンドのコントラスト比が小さいことが考えられる。そこで、画像の撮影時にカラーフィルターを用いることでコントラストを強調させ、自動計測に改善が見られるか検討した。カラーフィルターは TrackScan のオートステージ顕微鏡(Zeiss Axio Imager M2m)に備え付けられているものを使用した。透過光と反射光それぞれにカラーフィルターを付けられるが、透過光画像にカラーフィルターを用いた場合には特に変化が見られなかった。反射光画像にカラーフィルターを用いた場合、青色及び緑色フィルターを使った場合に自動計測結果の確度が向上することが分かった(図 2.3.3-4)。この原因としては、アパタイトの場合は無色透明なためフィルター無しでもコントラストが生まれやすいが、ジルコンやモナザイトは淡黄色～褐色などの色が付いていることが多いため、結晶特有の黄色～赤系統の色の影響をフィルターにより低減できたことでコントラストを増大できたことが考えられる。TrackScan の開発グループの一つであるメルボルン大学では、エッチング後のアパタイトやジルコンのマウントに Au 蒸着を行うことを分析ルーティンとしており、蒸着によって結晶の反射率や透過率を調整できるため自動計測に成功している。今後の展開として、ジルコンやモナザイトのマウントに Au 蒸着を試験的に導入し、自動計測の成功率の向上が見られるか検証する必要がある。

次に、画像解析技術の高度化として、深層学習に基づく新たな検出アルゴリズムの開発を試みた。近年、人工知能や深層学習を用いた FT の自動検出アルゴリズムの開発が進められつつある(Nashtergaale and De Grave, 2021¹⁶⁾; Ren *et al.*, 2023¹⁷⁾)。本検討では、MathWorks 社の MATLAB を用いて TrackScan で既に撮影したアパタイトの画像データをベースに深層学習を行い、セマンティックセグメンテーションと呼ばれる物体認識による FT の判別を試みた。この手法は、画像 1 ピクセルごとにクラス分類やカテゴリ分類を行い、画像中の画素に対してラベリングを行う画像解析法である。物体が画像内で重なっている場合に区別が難しいという欠点があるが、不定形の領域の検出が可能であるため、FT の検出にも適していると考えられる。データ処理や画像処理には Python を用いた。FT 検出に用いた領域識別のフローを図 2.3.3-5 に示す。物体認識で処理可能な画像サイズに制限があるため反射光・透過光画像をそれぞれ 16 分割し、深層学習セグメンテーションによって FT の領域を検出し、それぞれの画像を元のサイズに復元した。最終的に反射光・透過光の論理積領域を FT として認定した。また、反射光・透過光撮影した粒子画像は深度方向に 16 段階のスタックがあるため、全てのスタックで同様の画像処理と FT 検出を実行した。深層学習には既に FT 計数済みの 1 枚の粒子画像のみを学習させており、教師データと同一のデータで再現可能かどうか検証した。まず、粒子表面にピントが合うスタック画像を一枚選んで物体認識を行ったところ、結晶内部で見られる線状構造をほぼ全て選出できたが、結晶と樹脂の境界領域にも誤認識した領域が見られた(図 2.3.3-5)。次に特定領域での FT 検出を全スタック画像で行った結果、検出対象となる FT が出現するスタックとフォーカスレベルに依存し、表層と深層では検出できないレイヤーがいくつか出現した(図 2.3.3-6)。これを粒子全体の画像に復元し識別回数をマッピングした結果を図 2.3.3-7 に示す。計数済みの画像と比較すると、誤認はあるものの FT の領域はほぼ漏らすことなく検出できていることが分かる。表面の傷や包有物などの紛らわしい構造は検出回数が少ないため、識別回数を調整することである程度の選別が可能であることが期待される。また、透過光のみに絞って全スタックでの識別回数を 3～10 回と 5～10 回に絞って検出した結果、識別回数が少ない場合、明らかな FT を検出対象から除外してしまうことが分かった(図 2.3.3-8)。検出領域の面積でフィルタリングする方法などを活用することで、より高精度な物体認識による FT 検出ができる可能性がある。現時点では、本検討で構築したアルゴ

リズムは粒子内の割れ目や研磨痕などの構造の誤認などが少なく比較的高精度ではあるが、TrackScan 同様に FT の誤認や検出漏れが見られるため、依然としてマニュアルでのチェックは必須である。また、学習に用いたデータはアパタイトであるため、ジルコンやモナザイトでの適用性については不明であるが、同様のフローでジルコンやモナザイトを用いた学習を行うことで、高精度な FT の検出ができる可能性がある。

なお、2023 年に開催された熱年代学の国際学会 (Thermo2023) において、TrackScan の自動計測ソフトウェアのアップデートが予定されていることが公表されたほか、ニューラルネットワークを利用した深層学習によって高精度な FT の自動検出が期待できる結果が示された (Boone *et al.*, 2023¹⁸⁾)。今回の FT 検出アルゴリズムは、自動計測装置の制御 PC とは別の PC で解析する必要があり、ソフトウェアのアップデートに伴う PC の互換性の問題も生じ得るため、本検討については今後の継続は実施しない。

(4) 主な成果と課題

令和 5 年度の成果として、新たな対象鉱物についての技術開発では、バデレアイト FT 法の実用化に向け、イオン照射後のエッチングを試みた結果、イオントラックと思しき構造が検出された。ただし、不規則な分布をしている原因については、加熱を伴わないエッチング条件や試料固有の原因などを含めた検討が必要である。また、LIBS 法に基づく化学分析により、鉱物を迅速に同定できることを見出した。今後は分析値の定量性の確認や分析データの蓄積を通じ、肉眼鑑定に援用できる形態的特徴の把握などを探求していく。また、ジルコンやモナザイトにおける FT 自動計測についての実用化に関しては、反射光画像にカラーフィルターを用いた場合にモナザイトでは自動計測の成功率が向上することが分かった。深層学習を用いた物体検知アルゴリズムの構築では、アパタイトを使った検討のみではあるものの高精度に FT を検出可能であることが示された。今後は Au 蒸着後の自動計測などを行う予定である。

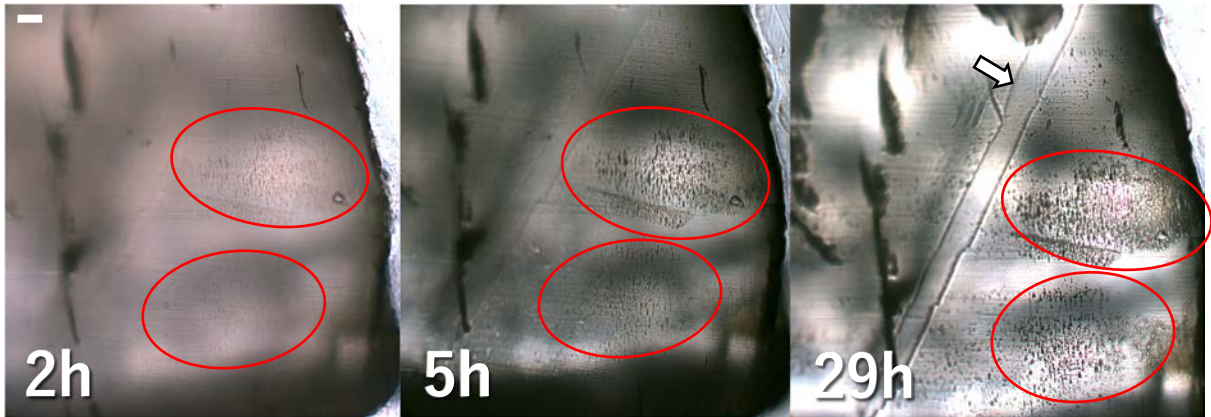


図 2.3.3-1 ロシア産バデレイトを用いた 2 時間, 5 時間, 29 時間後の段階エッチング後の顕微鏡画像
エッチング時間の増加に伴い, 粒子画像中央の研磨痕(矢印)の拡大が観察されており, 赤色の楕円内
に見られるイオントラックと見られる短いほぼ鉛直方向の線状構造も同様に拡大されている。図中の左上
のスケールバーは 10 μm を示す。

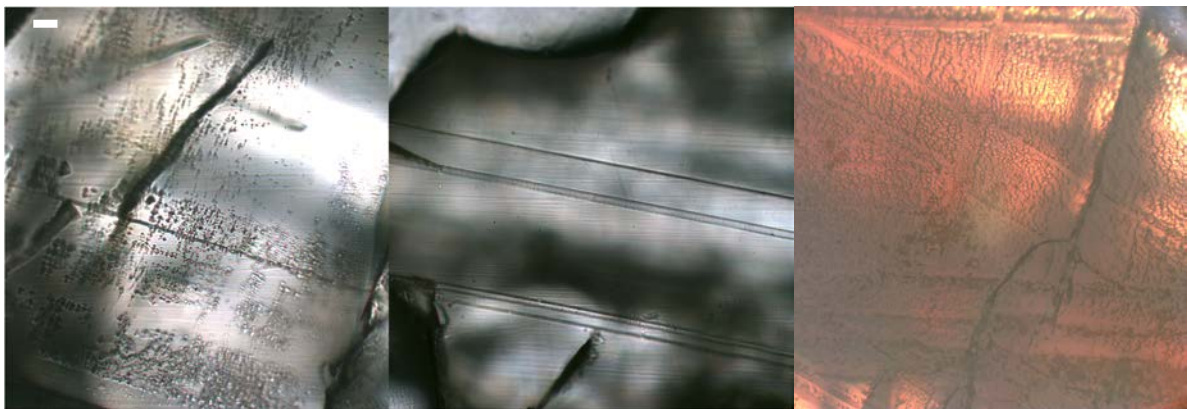


図 2.3.3-2 29 時間エッチング後のロシア産バデレイト(左, 中央)及び南アフリカ産バデレイト(右)の
顕微鏡画像
図中の左上のスケールバーは 10 μm を示す。

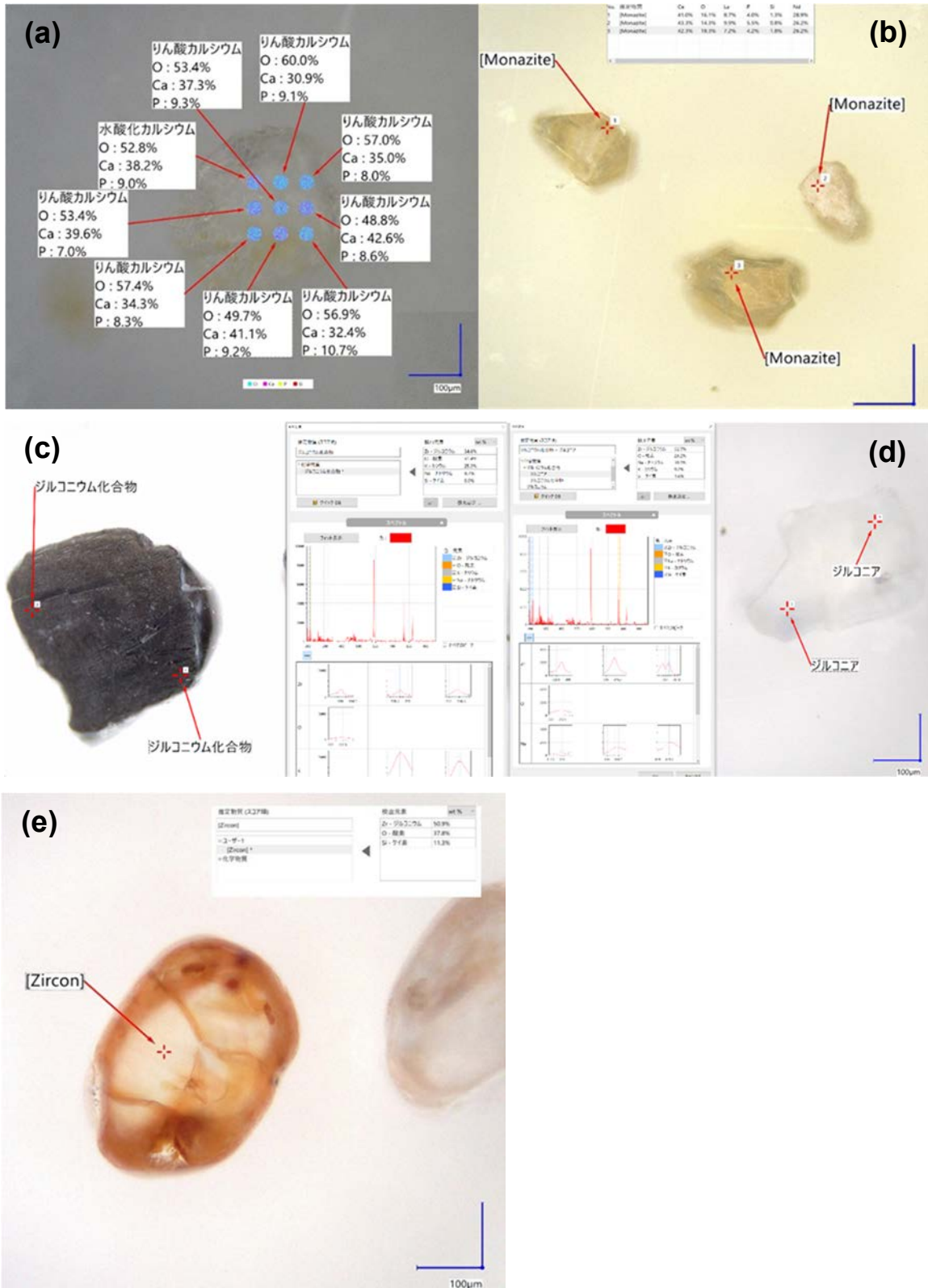


図 2.3.3-3 各種鉱物の顕微鏡画像と LIBS 分析結果

(a)スリランカ産の標準アパタイト, (b)山口県岩国産の白亜紀領家帯のモナザイト, (c)南アフリカ産のバデレライト, (d)ロシア産のバデレライト, (e)オーストラリア産のジルコンサンド。

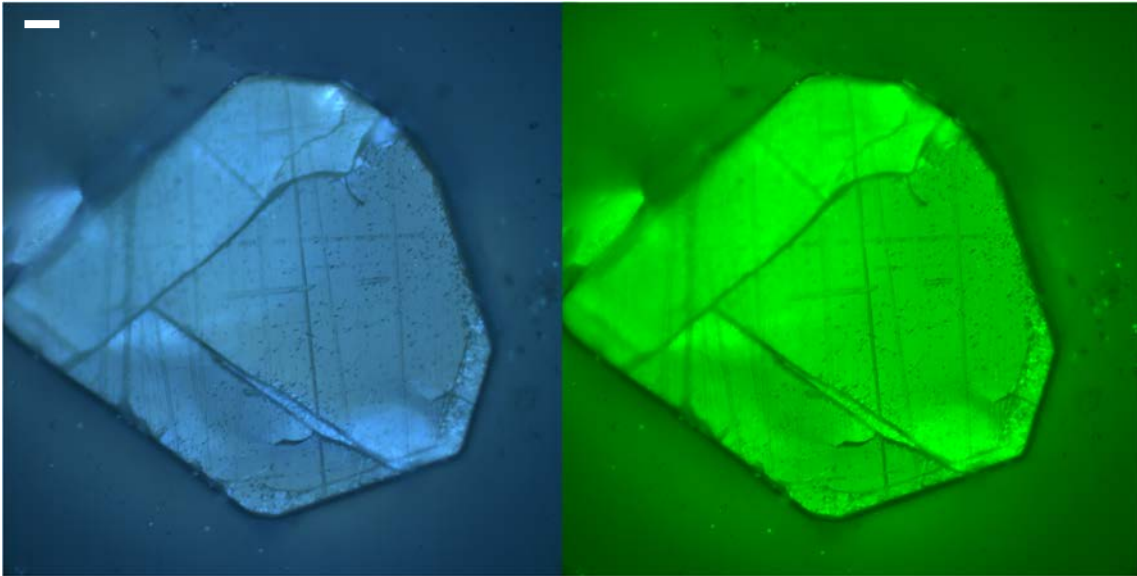


図 2.3.3-4 エッチング済みのモナザイトの反射光画像(青フィルター, 緑フィルター)
 図中の左上のスケールバーは 10 μm を示す。

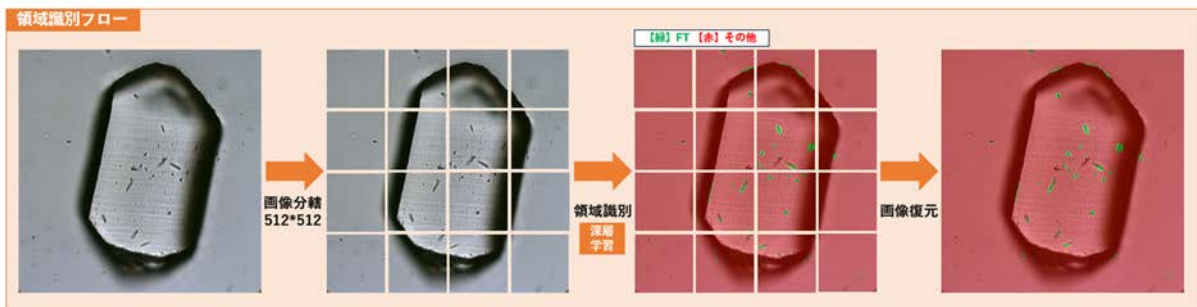


図 2.3.3-5 深層学習セグメンテーションを用いたエッチング済みのアパタイトの FT 検出の
 フローと検出結果

復元画像は、反射光及び透過光で検出領域の論理積を取り、両方の画像で検出されたものを FT として
 緑色でマーキングした。

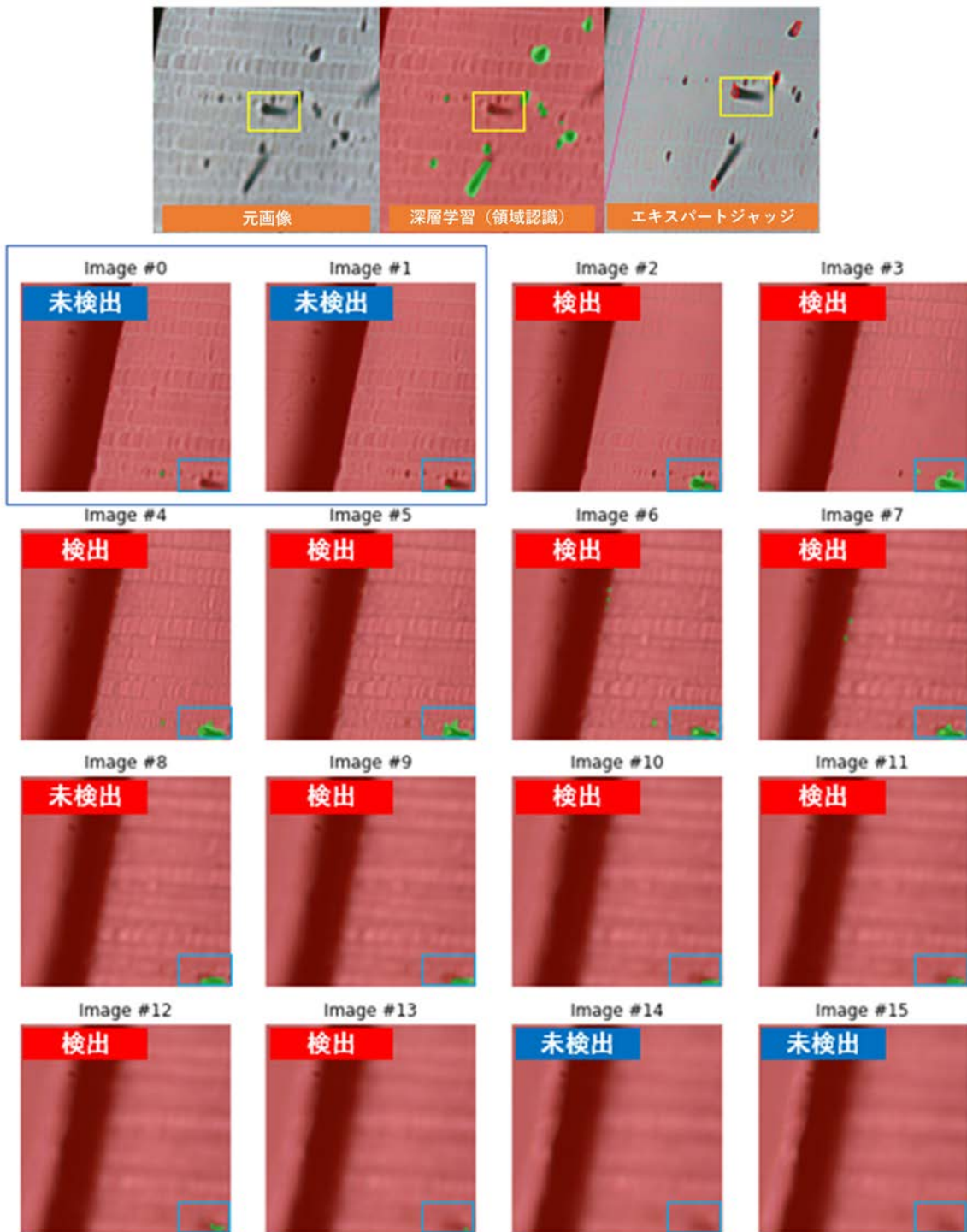


図 2.3.3-6 同一領域の深度方向への深層学習セグメンテーションを用いたエッチング済みアパタイトの FT 検出の結果

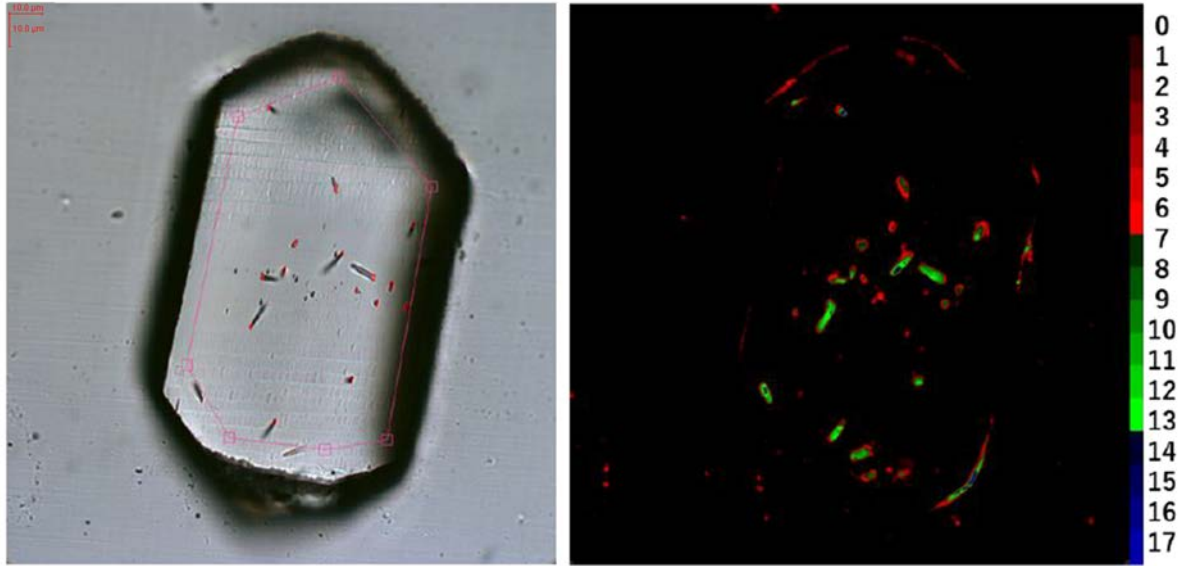


図 2.3.3-7 自動計測装置で計数済みの FT 画像と、深層学習セグメンテーションで反射光と透過光それぞれの 16 層のスタック画像から検出された領域のカウント数
赤から緑、青に向かうにしたがって同一地点の検出回数が多い。

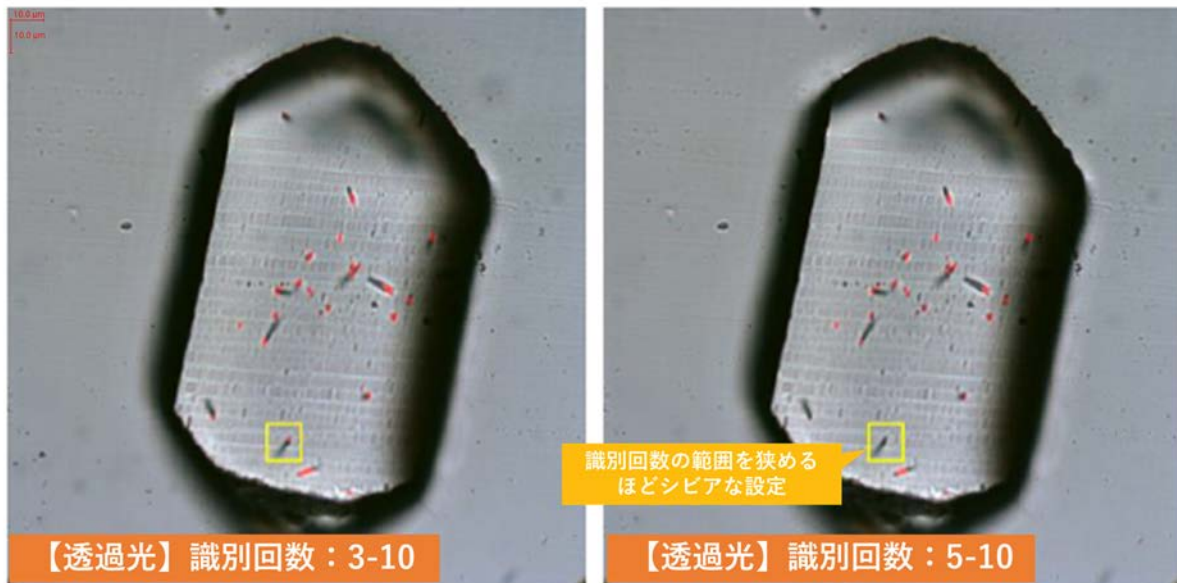


図 2.3.3-8 識別回数の上限と下限を変更した場合の画像解析結果の比較
閾値を狭めることで、FT と思しき構造を検出しない場合がある。

参考文献

- 1) Ketcham, R.A., Donelick, R.A. and Carlson, W.D., Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales, *American Mineralogist*, vol.84, no.9, 1999, pp.1235-1255.
- 2) Ketcham, R.A., *Fission-track annealing: From geologic observations to thermal history modeling, Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.49-75.
- 3) Ketcham, R.A., Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data, *Review in Mineralogy and Geochemistry*, vol.58, no.1, 2005, pp.275-314.
- 4) Gallagher, K., Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.117, no.B2, 2012, B02408, doi:10.1029/2011JB008825.
- 5) Hurford, A.J., An historical perspective on fission-track thermochronology, In: Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.G., eds., *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.3-23.
- 6) 末岡 茂, 島田耕史, 長谷部徳子, 田上高広, フィッション・トラック法における近年の新たな展開—測定技術の高度化, アニーリング特性の理解, 新手法の開発—, *RADIOISOTOPES*, vol.70, no.3, 2021, pp.189-207.
- 7) Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B. and Reddy, S.M., Etching of fission tracks in monazite: An experimental study, *Terra Nova*, vol.31, no.3, 2019, pp.179-188.
- 8) Jones, S., Gleadow, A. and Kohn, B., Thermal annealing of implanted ^{252}Cf fission tracks in monazite, *Geochronology*, vol.3, no.1, 2021, pp.89-102.
- 9) Weise, C., van den Boogaart, K. G., Jonckheere, R. and Ratschbacher, L., Annealing kinetics of Kr-tracks in monazite: Implications for fission-track modeling, *Chemical Geology*, vol.260, 2009, pp.129-137.
- 10) Jones, S., Kohn, B., Gleadow, A., Skrzypek, E. and Tagami, T., Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. *Tectonophysics*, vol.864, 229998, 2023, doi:10.1016/j.tecto.2023.229998.
- 11) Gleadow, A., Kohn, B. and Seiler, C., The future of fission-track thermochronology, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.77-92.
- 12) Kohn, B., Chung, L. and Gleadow, A., Fission-track analysis: field collection, sample preparation and data acquisition, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.25-48.
- 13) 檀原 徹, 岩野英樹, 吉岡哲, バデリアイト(ZrO_2)によるフィッション・トラック年代測定の試み, フィッション・トラックニュースレター, no.12, 1999, p.45.
- 14) 中嶋 徹, 福田将眞, 長田充弘, 檀原 徹, 岩野英樹, 末岡 茂, バデリアイトのフィッション・トラック年代測定に向けて:エッチング実験の結果とその考察, フィッション・トラックニュースレター, no.35, 2022, pp.34-36.

- 15) Ishikawa, N., Fukuda, S., Nakajima, T., Ogawa, H., Fujimura, Y. and Taguchi, T., Ion tracks and nanohillocks created in natural zirconia irradiated with swift heavy ions, *Materials*, vol.17, 547, 2024, doi:10.3390/ma17030547.
- 16) Nachtergaele, S. and De Grave, J., AI-Track-tive: open-source software for automated recognition and counting of surface semi-tracks using computer vision (artificial intelligence), *Geochronology*, vol.3, 2021, pp.383-394.
- 17) Ren, Z., Li, S., Xiao, P., Yang, X. and Wang, H., Artificial intelligent identification of apatite fission tracks based on machine learning, *Machine Learning: Science and Technology*, vol.4, 2023, 045039, doi:10.1088/2632-2153/ad0e17.
- 18) Boone, S., Faux, N., Nattala, U., Jiang, C., Church, T., Chung, L., Mcmillan, M., Jones, S., Jiang, H., Liu, D., Ehinger, K., Drummond, T., Kohn, B. and Gleadow, A., Towards fully automated digital fission-track analysis through artificial intelligence. 18th International Conference on Thermochronology (Thermo2023) abstract, 2023, p.18.

2.3.4 加速器質量分析技術

(1) はじめに

地質環境の長期安定性に関する研究の着実な実施と、処分事業・安全規制への成果の反映を進めるため、東濃地科学センターで実用化した最先端の年代測定技術等をさらに高度化し、それらの適用範囲を拡大していくことが重要である。加速器質量分析法(AMS: Accelerator mass spectrometry)では天然に存在する炭素-14(^{14}C)、ベリリウム-10(^{10}Be)、アルミニウム-26(^{26}Al)、塩素-36(^{36}Cl)、ヨウ素-129(^{129}I)等の極微量の放射性同位体を計測することが可能である。AMSは地質試料の年代測定や地下水の供給源推定等に有効な手法の一つである。東濃地科学センターでは、過去数千～数千万年間を対象とした年代測定の重要性が増すことを想定し、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{129}I 等の複数の長半減期放射性核種の年代測定が可能となるAMS装置2台(JAEA-AMS-TONO-5MV; NEC社製15SDH-2 1997年設置(Xu *et al.*, 2000¹⁾)、JAEA-AMS-TONO-300kV; HVEE社製4103Bo-AMS 2019年設置(Fujita *et al.*, 2022²⁾)を導入し、年代測定に利用している(Saito-Kokubu *et al.*, 2023³⁾)。さらにルーチン的な年代測定だけでなく、年代測定法の高度化も重要であり、JAEA-AMS-TONO-5MVにおいては地下水の滞留時間の推定を目的とした ^{36}Cl 年代測定法の実用化を目指している。 ^{36}Cl 年代測定法のための技術開発では、すでに試料調製法や測定法等に係る文献レビューに着手しており、標準試料の前処理及び試験測定を一通り行った結果、 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比で 1×10^{-13} 程度は測定が可能であることを確認している。しかし、未知試料の年代測定を行うには未確立の点が多く、第4期中長期目標期間においては、標準試料中の硫黄を除去するための前処理法の検討及び装置の技術開発を実施する。

上記の技術開発に加え、AMS装置を小型化することを目標にする研究も進めている。現状 ^{14}C 年代測定法においては、市販のAMS装置としては加速電圧200 kVが最小の電圧であるが、加速電圧をイオン源の引き出し電圧のみとした超小型AMS装置の開発に向けて技術開発を実施している。また、 ^{36}Cl 年代測定法においては一般的に加速電圧6 MV以上が必要といわれているが、それよりも小さい加速電圧で精度よく測定するための技術開発を進めることで、AMS全体の小型化を推進することができ、年代測定技術に関する新たな知見の蓄積が期待される。さらに、年代測定結果の精度を維持するためには、装置の改良に加え、保存状態の良い地質試料の確保と様々な地質試料に適応可能な試料の前処理手法の改良が求められる。本研究では、試料の適切な選定に必要な化学分析手法の高度化も同時に進める。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

宇宙線は大気中の元素や地表物質と反応し、さまざまな放射性核種を生成する。そのような反応で生成した宇宙線生成核種を用いた年代測定法は、岩石の露出年代や地下水年代の推定に有用な手法である。AMSでは岩石の露出年代等を推定するため、宇宙線によって表層の岩石や土壌に含まれる石英中に生成する ^{10}Be と ^{26}Al の蓄積量を定量し、組み合わせることで、より精度の高い年代推定を可能にする。また、 ^{36}Cl と ^{129}I 年代測定法は地下水の滞留時間等の推定が可能であり、 ^{14}C 年代測定法より古い年代を測定できるため、これらを組み合わせることにより幅広い年代を精度よく測定することが可能となる。現在、国内で ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{129}I 等のAMSの多核種測定を実施できる施設は、同規模の加速器を有する東京大学タンデム加速器研究施設(MALT: Micro Analysis Laboratory, Tandem Accelerator)(Matsuzaki *et al.*, 2020⁴⁾)及び筑波大学(Sasa *et al.*, 2018⁵⁾)に限られている。また ^{129}I 測定については上記に加え、原子力機構青森研究開発センターのJAEA-AMS-MUTSUにおいても測定が可能であるが、放射性同位体計測の需要の高まりに伴い、東濃地科学センターにおいてAMSを用いた年代測定の高

度化及び多核種の技術開発を進めることの意義は大きい。

一方、ボーリングコアなどの地質試料の ^{14}C 年代測定では、可能な限り多くの試料を確保し、測定点の空間分解能を高くすることで、より確実な年代軸の構築が可能となる(Watanabe *et al.*, 2010⁶⁾)。しかし、試料量の不足により連続データの取得が困難となるケースが多い。特に、 ^{14}C 年代測定の対象となる有機物は地層中で分解が進むことから、植物片などの原形を維持する質の良い試料の確保が課題となる。解決策として、従来法に比べてより少量での ^{14}C 年代測定を実用化させることが有効である。加えて、試料前処理の自動化を同時に進めることで、効率的な連続データの取得に繋がると期待される。第 3 期中長期目標期間においては市販の自動グラフアイト調製装置 (IonPlus 社製 AGE3 (Automated graphitization equipment 3)) の最適化を進め、試料前処理を自動化し、測定実績を蓄積させるとともに、従来法の試料量と比べて約 20 分の1となる炭素量約 50 μg での少量試料の ^{14}C 年代測定を実施した (Watanabe *et al.*, 2021⁷⁾)。しかし、試料量を減少させることで、前処理などの際に混入するわずかな炭素汚染の影響が相対的に大きくなる。少量試料での測定時の炭素汚染の評価と低減、ブランク補正、測定結果の安定化等が今後の課題となる。また、試料の適切な選定に必要な化学分析手法の高度化については、可搬型蛍光エックス線分析装置 (pXRF: portable X-ray fluorescence spectrometry system) 等の測定元素や対象試料の拡大のため、天然試料への適用実績を着実に蓄積していくことが重要である。

(3) 実施内容・結果

超小型 AMS 装置の実用化に向けた技術開発として、装置の構成要素である表面ストリッパーとして KCl 結晶表面を用いた表面散乱実験を行ってきた (Matsubara *et al.*, 2018⁸⁾; Fujita *et al.*, 2022⁹⁾)。これに引続き、テルル化スズ (SnTe) 結晶を用いて同様の実験を行った。劈開した KCl 結晶は原子レベルで平坦な表面を持ち、KCl 結晶とはほぼ同じ格子定数を持つ SnTe を真空チャンバー内で蒸着することで、原子レベルで平坦な導電性のある表面にできると考えた。この SnTe 結晶に微小角度で C を入射後、鏡面反射した粒子を静電ビームディフレクターによって価数で分離し、マイクロチャンネルプレートを用いてビームプロファイルを観測した。さらに妨害分子の入射において、分析電磁石の下流で分離片を検出した。時間とともに真空チャンバー内をわずかに漂うガスが SnTe 結晶表面に吸着することで荷電変換効率が落ちていくが、SnTe の蒸着を追加で行うことで荷電変換効率が元に戻ることが確認された。このことは表面ストリッパーの耐久性能を向上させることができることを示唆している。

^{36}Cl 年代測定法においては干渉核種となる硫黄 (^{36}S) をビームライン上の反応セルで除去するための装置開発に着手するとともに、前処理法の最適化の検討を継続した。装置開発ではまずビーム軌道シミュレーションを行い、これに基づいて装置の設計製作を行った。負イオン源、質量分析器、反応セルはそれぞれ表面電離型イオン源、ウィーンフィルター、イオンファネルを採用した。現状は真空チャンバー内にこれらの構成要素を組み込み、テストベンチを構築したところである。

前処理法の最適化のための検討では、令和 4 年度の段階で未知試料に適応させている硫黄除去工程を挟んでも、硫黄量を最大で半分程度しか下げることができなかったことから、引き続き硫黄除去のための最適化の検討を行った。試料は標準試料 (Sharma *et al.*, 1990¹⁰⁾) である STD4-1 (S4-1; $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}=1.000\text{e}^{-11}$) と ^{36}Cl がほとんど入っていない試薬であるブランク試料 (Fisher chemical 製; BLK; $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}=5.000\text{e}^{-14}$) を使用し、塩化銀 (AgCl) またはオキシクロライド塩の形態にして測定した (図 2.3.4-1)。本検討では、既存の前処理手法の条件改善の検討、S 除去用の前処理手法の新規検討、塩素析出方法の新規検討を行った。本検討において調製した AMS 測定結果から、条件「S 除去操作で使用するろ過用フィルターの酸洗浄あり」及び条件「ろ過操作時に SO_4^{2-} 除去用のイオン交換カートリッジを使用」の

測定試料は既存方法を用いた測定試料に対して $^{36}\text{S}/^{35}\text{Cl}$ の相対値が低い傾向にあること、加えて測定のばらつきが比較的小さいことから、試料の前処理時におけるS除去の効果及び再現性が高く、既存方法よりも前処理手法として有効であると考えられる。しかし、別の測定結果から、これら2つを組み合わせた派生条件の $^{36}\text{S}/^{35}\text{Cl}$ は既存方法よりも高く、ばらついた傾向を示しているため、使用する SO_4^{2-} 除去用カートリッジの洗浄や個体差などについても検討していく必要があると考えられる。塩素析出方法の新規検討として調製したビスマス(Bi)のオキシクロライド塩の測定試料は、測定結果から $^{36}\text{S}/^{35}\text{Cl}$ の測定が可能であることを確認できた。

東濃地科学センターで確立したAMS測定技術の適用例の蓄積として、堆積物試料の ^{14}C 年代測定、岩石試料の ^{10}Be 測定等を行い原著論文の公開を着実に進めた(Nara *et al.*, 2023¹¹⁾12)。特に、 ^{14}C 年代測定結果に基づく堆積物試料の深度-年代モデルを構築するための統計学的手法の改良を実施し、過去約3万年間に相当する堆積層の年代軸を作成することができた(Nara *et al.*, 2023¹¹⁾)。また、炭素量約50 μg 以下での少量試料(国際標準試料)を対象とした ^{14}C 年代測定について継続して検討を進めた。国際標準試料として、NIST-SRM-4990C(シュウ酸)、IAEA-C1(炭酸塩)、C4(木片)、C5(木片)、C6(スクロース)及びC7(シュウ酸)を用いた。各試料は炭素量で概ね20~30 μg となるようにマイクロ天秤で秤量した。少量試料用の試料前処理装置として元素分析装置(EA)に自動グラファイト調製装置(AGE3)を接続したEA-AGE3を用いて、各固体試料からAMS測定用のグラファイトを調製する作業の検討を進めた。今年度は、炭素量約50 μg 以下の少量試料でのグラファイト調製が可能であること及びAMS装置による ^{14}C の検出が可能であることまで確認することができた。さらに、AMS測定用のグラファイトの状態を確認するため、東濃地科学センターで運用中の微小部エックス線分析装置(XGT)及びレーザー誘起ブレークダウン分光装置(LIBS)を用いて、プレスされたグラファイト試料の表面の化学組成の取得を試みた。XGTは蛍光エックス線による測定のため、軽元素である炭素は検出することができず、グラファイトを調整する際に触媒として使用する鉄のみが検出された。一方、LIBSはレーザー照射によりプラズマ化した試料の発光スペクトルを測定する原子発光分光に基づくため、炭素等の軽元素の測定も可能である。グラファイト試料の表面のLIBS測定結果を図2.3.4-2に示す。今回測定したグラファイト試料では中央付近(No.7~9, 幅約100 μm)はほぼ鉄であり、中央付近より外側で炭素の割合が高くなる傾向が見られた(No.1~6, 炭素濃度 約97~99%)。今後、測定例を追加していく必要はあるが、グラファイト試料表面の化学組成の傾向を把握しておくことで、試料前処理手法やAMS測定の改善に繋がる可能性が考えられる。

試料の適切な選定に必要な化学分析手法の高度化については、年代測定用試料の供給源推定で重要となる安定同位体比の測定手法の整備と最適化を進めた(山本ほか, 2024¹³⁾)。さらに、化学組成の取得において重要となるpXRFの適用範囲の拡大と効率的な測定手法の整備のため(山本ほか, 2022¹⁴⁾)、天然試料である津波堆積物への適用事例の蓄積を継続して実施し、原著論文等による公開を着実に進めた(Nara *et al.*, 2022¹⁵⁾; Watanabe *et al.*, 2023¹⁶⁾; 渡邊ほか, 2024¹⁷⁾)。特に、固体試料中のハロゲン元素(ヨウ素及び臭素等)の蛍光エックス線測定による定量分析に向けて、標準試料の選定と試験測定を繰り返し実施した。ヨウ素及び臭素について、蛍光エックス線測定により得られるスペクトルを評価し適切にバックグラウンド補正等を行うことで定量分析に必要な検量線を作成することができた。

(4) 主な成果と課題

AMS装置の小型化に向けた技術開発については、KCl結晶表面にSnTeを蒸着させてSnTe結晶表面でのイオンの鏡面反射を確認した。今後、効率向上を目指し、最適な測定パラメータの探索、表面散乱過程のモデル構築、荷電変換の割合や妨害分子の解離効率の調査が必要となる。さらに ^{14}C 測定の

検出限界の確認を行い、超小型 AMS 装置 による ^{14}C 測定 の原理実証に取り組んでいく。また、追加の SnTe 蒸着による表面ストリッパの性能維持の評価を進める。

^{36}Cl 年代測定法における装置開発においては、干渉核種となる硫黄 (^{36}S) をビームライン上の反応セルで除去するための装置のテストベンチを構築した。今後、イオンビームを発生させ、質量分析器で目的のイオンを選別した後、反応セルであるイオンファネルへ導く実験を行う。さらに未完成部分の反応セルの下流に質量分析器と検出器を構築し、イオンの透過率や反応ガスとの反応による生成物を評価する。前処理法の最適化の検討では、昨年度に引き続き標準試料等に対し、既存の前処理手法の条件改善の検討、S 除去用の前処理手法の新規検討、塩素析出方法の新規検討を行った。試料の前処理時における S 除去の効果及び再現性が高い方法は、組み合わせて前処理を行うと $^{36}\text{S}/^{35}\text{Cl}$ が高く、ばらついた傾向を示しているため、使用する SO_4^{2-} 除去用カートリッジの洗浄や個体差などについて検討していく必要がある。また、Bi のオキシクロライド塩の測定については、 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ の測定について未検討であるため、今後の課題となった。しかし、Bi を用いたオキシクロライド塩の調製は AgCl の調製に比べ前処理操作が容易なため、実用化できた場合は前処理操作の効率化が期待される。

地質試料への AMS 測定技術の適用を着実に実施しており、成果については継続して原著論文等による公開を進めている。試料前処理技術等の高度化については、少量試料 (炭素量約 $50\ \mu\text{g}$ 以下) での ^{14}C 年代測定に重要な前処理手法の検討等を実施した。今年度は少量試料でのグラファイト調整の検討を進めた。今後は、AMS による少量試料の測定条件の検討とともに試料調製法の変更も含め効率的な (炭素の回収率をより高めるための) 前処理手法の検討を進めていくことが重要である。試料の適切な選定に必要な化学分析手法の高度化については、安定同位体比測定手法の整備及び pXRF の適用範囲の拡大を継続して進めた。今年度に構築したハロゲン元素の定量分析手法については、今後、堆積物等の天然試料への適用例を増やしていくことで、各試料の特性に合わせた分析手法の選択が可能になる等、データ取得から解析までのプロセスの改良に繋がると期待される。

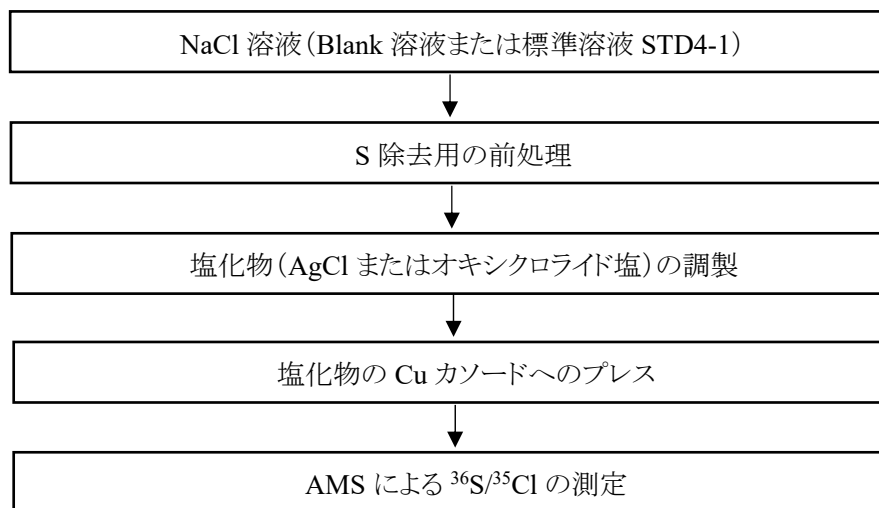


図 2.3.4-1 硫黄を除去するための前処理法の検討における作業フロー

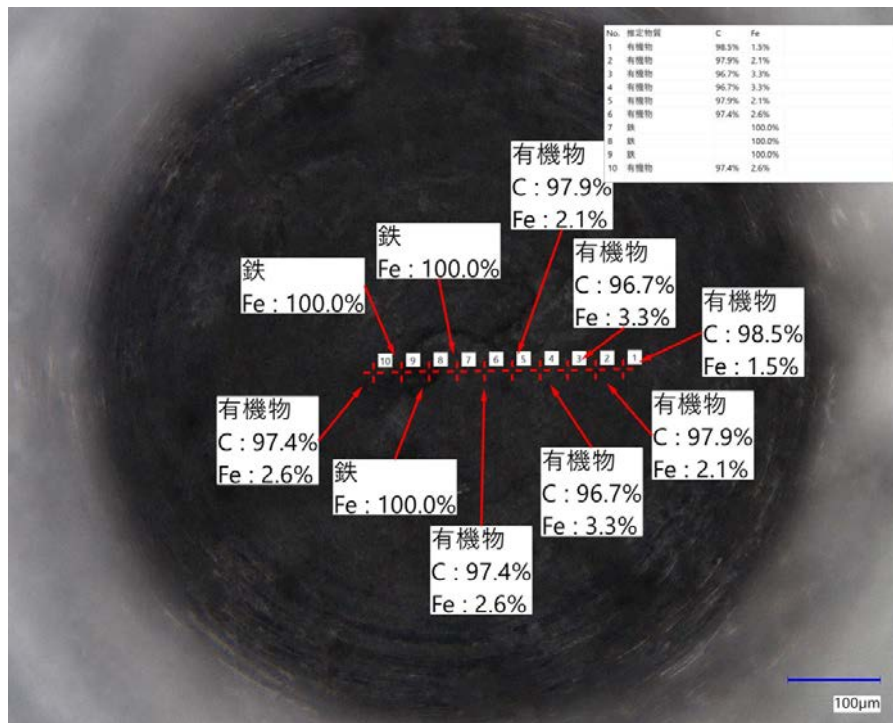


図 2.3.4-2 グラファイト試料表面の LIBS 測定結果

参考文献

- 1) Xu, S., Ito, S., Iwatsuki, T., Abe, M. and Watanabe, M., A new AMS facility at the JNC Tono Geoscience Center, Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol.172, no.1-4, 2000, pp.8-12.
- 2) Fujita, N., Miyake, M., Matsubara, A., Saito-Kokubu, Y., Klein, M., Scognamiglio, G., Mous, D., Columba, E., Shimada, A. and Ishimaru, T., The new 300 kV multi-element AMS system at the TONO Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.533, 2022, pp.91-95.
- 3) Saito-Kokubu, Y., Fujita, N., Watanabe, T., Matsubara, A., Ishizaka, C., Miyake, M., Nishio, T., Kato, M., Ogawa, Y., Ishii, M., Kimura, K., Shimada, A. and Ogata, N., Status report of JAEA-AMS-TONO: Research and technical development in the last four years, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.539, 2023, pp.68-72.
- 4) Matsuzaki, H., Miyake, Y., Nakasyoji, K., Tokuyama, H., Tsuchiya-Sunohara, Kusuno, H. and Toya, M., Current status of MALT AMS facility: A report of updated performance and recent achievement, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.463, 2020, pp.55-63.
- 5) Sasa, K., Takahashi, T., Matsunaka, T., Hosoya, S., Matsumura, M., Shen, H., Honda, M., Takano, K., Ochiai, Y., Sakaguchi, A., Sueki, K., Stodola, M. and Sundquist, M., The 6 MV multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, Japan: First performance report, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.437, 2018, pp.98-102.

- 6) Watanabe, T., Matsunaka, T., Nakamura, T., Nishimura, M., Izutsu, Y., Minami, M., Nara, F.W., Kakegawa, T., Wang, J. and Zhu, L., Last glacial–Holocene geochronology of sediment cores from a high-altitude Tibetan lake based on AMS ^{14}C dating of plant fossils: Implications for paleoenvironmental reconstructions, *Chemical Geology*, vol.277, 2010, pp.21-29.
- 7) Watanabe, T., Fujita, N., Matsubara, A., Miyake, M., Nishio, T., Ishizaka, C. and Saito-Kokubu, Y., Preliminary report on Small-mass graphitization for radiocarbon dating using EA-AGE3 at JAEA-AMS-TONO, *Geochemical Journal*, vol.55, no.4, 2021, pp.277-281.
- 8) Matsubara, A., Fujita, N., Ishii, K., Applications of ion channeling in accelerator mass spectrometry, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.437, 2018, pp.81-86.
- 9) Fujita, N., Matsubara, A., Kimura, K., Jinno, S., Saito-Kokubu, Y., Project for development of a downsized AMS system based on the surface stripper technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.532, 2022, pp.13-18.
- 10) Sharma, P., Kubik, P.W., Fehn, U., Gove, H.E., Nishiizumi, K. and Elmore, D., Development of ^{36}Cl standards for AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.52, 1990, pp. 410-415.
- 11) Nara, F.W., Watanabe, T., Lougheed, B. and Obrochta, S., Alternative radiocarbon age-depth model from Lake Baikal sediment: Implication for past hydrological changes for last glacial to the Holocene, *Radiocarbon*, 2023, pp.1-18.
- 12) Nara, F.W., Watanabe, T., Saito-Kokubu, Y. and Zhu, L., ^{10}Be analysis of the rock samples from the northeastern shore of Lake Pumoyum Co in south Tibetan Plateau, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.539, 2023, pp.28-32.
- 13) 山本悠介, 渡邊隆広, 丹羽正和, 島田耕史, 東濃地科学センターにおける熱分解型元素分析装置/安定同位体比質量分析装置を用いた岩石試料等の水素と酸素の安定同位体比測定, *JAEA-Testing 2023-003*, 2024, 67p.
- 14) 山本悠介, 渡邊隆広, 丹羽正和, 島田耕史, 東濃地科学センターにおけるポータブル蛍光エックス線分析装置を用いた岩石試料等の主要元素及び微量元素の定量分析 ―エックス線照射径 3 mm での全岩化学分析手法―, *JAEA-Testing 2021-003*, 2022, 58p.
- 15) Nara, F.W., Watanabe, T., Matsunaka, T., Yamasaki, Y., Tsuchiya, Y., Seto, K., Yamada, Y. and Yasuda, Y., Late-Holocene salinity changes in Lake Ogawara, Pacific coast of northeast Japan, related to sea-level fall inferred from sedimentary geochemical signatures, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol.592, 2022, 110907, doi:10.1016/j.palaeo.2022.110907.
- 16) Watanabe, T., Kagami, S., Yokoyama, T. and Niwa, M., LA-ICPMS U–Pb dating of zircon in paleotsunami deposits from Miyazaki plain, southwest Japan, *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, vol.132, no.4, 2023, pp.353-361.
- 17) 渡邊隆広, 津波防災に貢献できる津波堆積物の特定方法を提案, 令和 5 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報意見交換会資料, 2024, <https://www.jaea.go.jp/04/tono/topics/20240329/pdf/O.05.pdf> (参照:2024年6月7日).

This is a blank page.

