

地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (令和6年度)

Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation
of Radioactive Waste in Fiscal Year 2024

浅森 浩一 末岡 茂 小林 智晴 西山 成哲
田中 桐葉 村上 理 福田 将真 小形 学
内田 真緒 小松 哲也 鏡味 沙耶 横山 立憲
小北 康弘 藤田 奈津子 神野 智史 南谷 史菜
渡邊 隆広 奈良 郁子 前田 祐輔

Koichi ASAMORI, Shigeru SUEOKA, Tomoharu KOBAYASHI, Nariaki NISHIYAMA
Kiriha TANAKA, Osamu MURAKAMI, Shoma FUKUDA, Manabu OGATA
Mao UCHIDA, Tetsuya KOMATSU, Saya KAGAMI, Tatsunori YOKOYAMA
Yasuhiro OGITA, Natsuko FUJITA, Satoshi JINNO, Fumina MINAMITANI
Takahiro WATANABE, Fumiko NARA and Yusuke MAETA

東濃地科学センター
Tono Geoscience Center

October 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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 6 年度)

日本原子力研究開発機構
東濃地科学センター

浅森 浩一, 末岡 茂, 小林 智晴^{※1}, 西山 成哲, 田中 桐葉, 村上 理^{※2},
福田 将真, 小形 学, 内田 真緒, 小松 哲也, 鏡味 沙耶, 横山 立憲, 小北 康弘,
藤田 奈津子, 神野 智史^{※3}, 南谷 史菜^{※4}, 渡邊 隆広, 奈良 郁子, 前田 祐輔

(2025 年 6 月 19 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6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
- ※4 博士研究員

**Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
in Fiscal Year 2024**

Koichi ASAMORI, Shigeru SUEOKA, Tomoharu KOBAYASHI^{※1}, Nariaki NISHIYAMA,
Kiriha TANAKA, Osamu MURAKAMI^{※2}, Shoma FUKUDA, Manabu OGATA,
Mao UCHIDA, Tetsuya KOMATSU, Saya KAGAMI, Tatsunori YOKOYAMA,
Yasuhiro OGITA, Natsuko FUJITA, Satoshi JINNO^{※3}, Fumina MINAMITANI^{※4},
Takahiro WATANABE, Fumiko NARA and Yusuke MAETA

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

(Received June 19, 2025)

This annual report documents the progress of research and development (R&D) in the 3rd 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
 - ※4 Post-Doctoral Fellow

目次

1. はじめに	1
2. 令和6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	23
2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術	30
2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	45
2.3 年代測定技術の開発	63
2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術	63
2.3.2 捕獲電子を用いた年代測定技術	70
2.3.3 フィッション・トラック(FT)年代測定技術	75
2.3.4 加速器質量分析技術	94

Contents

1. Introduction	1
2. Progress of the research and development in fiscal year 2024	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	23
2.1.3 Investigation techniques for detection of geofluids	30
2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment	45
2.3 Development of dating techniques	63
2.3.1 <i>In situ</i> analysis techniques and high-precision isotope analysis techniques	63
2.3.2 Trapped-electron dating techniques	70
2.3.3 Fission track dating method	75
2.3.4 Accelerator mass spectrometry techniques	94

1. はじめに

日本列島は、プレート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―地質環境特性およ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する確に技術・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。加えて、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 3 年目にあたる令和 6 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、2.1.3、2.2、2.3.2 の成果は、経済産業省からの受託事業「令和 6 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、わ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 6 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 活断層地形が不明瞭なせん断帯における活構造の分布や力学的影響範囲を把握する手法の検討

(1) はじめに

地層処分サイトの調査においては、将来、地下に伏在する断層の活動により、合理的な工学的対策が困難となるような広範囲の変形・破断などの著しい影響が及ぶ可能性が高いと考えられる範囲についても推定することが求められる(原子力発電環境整備機構, 2021¹⁾)。このため、地震記録及び物理探査等のデータがない地域において地形的に不明瞭な活断層を把握するための手法を整備することが重要である。本研究では、活断層地形が不明瞭であるが、過去の地震データにより活断層が地下に伏在することが確実な地域において調査手法の高度化と適用事例の蓄積を目的に、地表踏査による多数の小断層の姿勢(走向・傾斜)、すべり方向及び運動センスのデータ(以下、「小断層スリップデータ」)の取得及び応力逆解析を実施した。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

一般に、断層の内部構造は、単一または複数の断層コアとその周辺に発達するダメージゾーンから構成される。ダメージゾーンには断層運動によって生じた小規模な断層(以下、「小断層」)が密集して発達することが知られる(吉田ほか, 2009²⁾など)。このダメージゾーンは、断層コアよりも広い領域まで及ぶ。このことを考慮すると、活断層が地下に伏在する場合でも、そのダメージゾーンは地表まで到達している可能性がある。このダメージゾーンは、断層の活動に起因してせん断変形を伴いながら形成されると考えられるため、断層の活動と同様の応力下で形成されると考えられる。そのため、地表踏査により、現在活動的な伏在断層の活動の際に作用した応力と同様の応力が検出された場合、その領域は伏在断層の周辺に発達するダメージゾーンに相当すると期待できる。

応力を推定する手法として、多重逆解法(Yamaji, 2000³⁾)と呼ばれる応力逆解析がある。この解析手法は、断層のすべり方向と断層面上のせん断応力が平行であるという Wallace-Bott 仮説(Wallace, 1951⁴⁾; Bott, 1959⁵⁾)に基づき、断層のすべり方向とせん断応力の方向が近くなるような規格化応力テンソルを推定するものである。この手法により、多数の小断層スリップデータから、その小断層群の活動に影響を与えた応力を検出・分離することが可能となる。

過去に地震が発生したことにより、活断層が地下に伏在することが明らかとなった 1984 年長野県西部地震(Mj6.8)及び 1997 年鹿児島県北西部地震(Mj6.6)の震源地域を対象に、既に研究を実施している。長野県西部地震の事例では、震源周辺の予察的な成果として Nishiyama *et al.* 2024⁶⁾に、鹿児島県北西部地震の事例での成果は Niwa *et al.* 2024⁷⁾にそれぞれまとめている。両地域とも、想定される伏在断層の直上付近において、当該地域に現在作用する応力と類似した応力が検出される結果となり、概ね期待した結果が得られている。一方、1)断層端部における本手法の適用性の検証、2)伏在断層周辺地域における調査事例の蓄積、3)本手法の適用範囲の把握、などの課題が残されており、更なる事例の蓄積が望まれる。

(3) 実施内容・結果

地下に伏在する活断層の分布の推定や、断層活動による影響範囲を把握する手法の検証と事例の蓄積を目的として、1984年長野県西部地震の伏在断層(Yoshida and Koketsu, 1990⁸⁾)の周辺地域を対象に、これまでの調査(Nishiyama *et al.*, 2024⁶⁾; 原子力機構・電中研, 2024⁹⁾)において空白領域となっていた伏在断層の中央部及び東部及び東側の延長部において地表踏査を実施し、小断層スリップデータを拡充し、多重逆解法を実施した。

本研究の調査地域は、中部～上部ジュラ系の美濃帯堆積岩類及び白亜紀後期の苗木・上松花崗岩、上部白亜系の濃飛流紋岩類を基盤岩とする。調査地域北部には第四系の御嶽火山岩類、東部には地蔵峠火山岩類が、南部には上野玄武岩類が分布する(図 2.1.1-1)。今年度の調査により収集した211条の小断層スリップデータは、地蔵峠火山岩類のうち地蔵峠岩体中の小断層も含む。当岩体の噴出年代としては、全岩のK-Ar年代測定から 1.62 ± 0.03 Maの年代が得られている(中野ほか, 2000¹⁰⁾)。

図 2.1.1-2 に、応力逆解析の結果を示す。検出された主応力軸の方位や応力比 Φ は領域ごとに大きく異なる。一方、伏在断層(Yoshida and Koketsu, 1990⁸⁾)の地表トレースの近くに位置するg, l, o, tの領域では、概ねNNW-SSE～WNW-ESE方向で水平な最大圧縮主応力(σ_1)軸を持つ応力が共通して検出された。

各領域において検出された応力状態に関するデータを、表 2.1.1-1 に示す。本調査において検出された応力状態のばらつきを表す平均応力角距離(Yamaji, 2000³⁾)の値は、 $17.9^\circ \sim 70.7^\circ$ の値をとる。a, c, d, e, f, g, j, p, s, t, u, w, x, yの領域における平均応力角距離は 45° 以下である。一方で、b, h, i, k, l, m, n, o, q, r, vの領域については、平均応力角距離の値が 45° を超える結果となった。このようなデータは、比較的ばらつきの大きいデータであることを示しており、明瞭な一つの応力状態に定まらない結果であることが示唆される。

Uchide *et al.* (2022)¹¹⁾の広域応力に対する各領域の応力との応力角距離を表 2.1.1-1 に示す。なお、Uchide *et al.* (2022)¹¹⁾より、本地域の広域応力として、 σ_1 軸の方位(角)・伏角が $291.33^\circ \cdot 2.11^\circ$ 、 σ_3 が 199.34° 、 43.34° 、応力比 Φ が0.08という値を採用した。Yamaji and Sato (2019)¹²⁾では、応力角距離が 59.26° 未満の応力同士を似た応力であるとしている。計算の結果、d, g, l, o, t, uの領域において 59.26° を下回る応力角距離が得られた。これらのうちg, l, o, tは伏在断層延長の地表トレース沿いに位置しており、伏在断層延長の地表トレース付近には、現在の応力状態のもとで活動した可能性のある小断層が多く分布していることが示唆された。また、伏在断層の西側延長部に位置するdでも同様の特徴を示す結果が得られた。

一方で、伏在断層延長の地表トレース付近に位置するi, x、及び伏在断層東側端部の水平延長部に位置するyにおいて検出された応力は、現在の広域応力との応力角距離が 59.26° を上回る結果となった。これらのうちiの領域の平均応力角距離は 50.9° と比較的大きく、複数の応力下で形成された小断層が混在する可能性がある。また、yの領域では、地蔵峠火山岩類(1.62 ± 0.03 Ma; 中野ほか, 2000¹⁰⁾)中の小断層スリップデータも多数収集しており、時代が異なる地質毎にそれぞれの応力を確認できる可能性がある。

また本研究では、航空レーザ測量により取得された2 mメッシュの高解像度DEM(青柳・阿部, 2009¹³⁾)から予察的に判読した微小リニアメント周辺においても、小断層スリップデータを取得した。微小リニアメントを判読した位置を、図 2.1.1-3b 中に示す。微小リニアメントは、ENE-WSW方向に約300 m連続して認められる。微小リニアメントの中央部にはN-S方向の尾根があり、微小リニアメントに沿って僅かに左横ず

れしている(図 2.1.1-3b)。小断層スリップデータは、尾根西側の微小リニアメント周辺において 11 条取得した。11 条の小断層は、全て濃飛流紋岩類中のものである。微小リニアメント中央部の尾根周辺には、御嶽火山岩類が被覆するが(山田, 1961¹⁴⁾), 地表踏査では露頭の露出状況が悪く小断層を確認できておらず、地質時代により小断層の活動時期を制約することは困難である。一方で、11 条の小断層の走向は、ENE-WSW 方向が卓越する。また ENE-WSW 走向の小断層のうち、センス判定が可能なものについては左横ずれとみられる条線も確認されており、微小リニアメントの判読結果と整合的な結果が得られている。このことから、本地域で取得した小断層スリップデータは、微小リニアメントを形成した断層活動との関連性が高いと考えられる。微小リニアメントは、尾根を被覆する第四系の御嶽火山岩類の分布域にも連続していること、リニアメント地形として残存していることから、最近の断層活動によるものであると考えられ、周辺の小断層も同様に最近活動した可能性が高い。このように、高解像度 DEM により微小なリニアメントを抽出し、その周辺において小断層スリップデータを取得することで、地形的に不明瞭とされる伏在断層分布域における最近の活動を把握できる可能性がある。このことから、地形判読地域の拡大及び判読結果に基づく更なる小断層スリップデータの取得により検討事例を蓄積する必要がある。

(4) 主な成果と課題

本研究の調査により、1984 年長野県西部地震の伏在断層周辺における小断層スリップデータを概ね網羅的に取得することができた。応力逆解析の結果、伏在断層近傍のいくつかの領域では、現在の広域応力場と調和的な応力が検出され、現在の応力状態のもとで小断層が活動した可能性が示された。一方で、伏在断層近傍の領域の一部において現在の広域応力とは異なる応力が検出されており、この原因について検討するために解析手法の更なる改良が必要と考える。今年度までに実施した応力逆解析は、完全データのみを使用する多重逆解法を用いており、不完全データは解析に使用されていない。また、今年度までの応力逆解析の結果からは、各領域に対して 1 つの応力を推定し、広域応力との比較検討を行ってきたが、地質体の形成時代から現在までに様々な応力状態を被ってきたことを考慮すると、複数の応力が混在している可能性は十分に考えられる。以上のような状況を踏まえ、今後は、不完全データも用いることが可能な Hough 法の適用、及び複数応力の分離・検出を試みる予定である。また、高解像度 DEM を用いた微小リニアメントの判読に基づく小断層スリップデータの取得は、最近の活動の影響を把握する上で有効な手法である可能性がある。今後は地形判読範囲の拡大、及び判読結果に基づく小断層スリップデータの取得を実施する予定である。

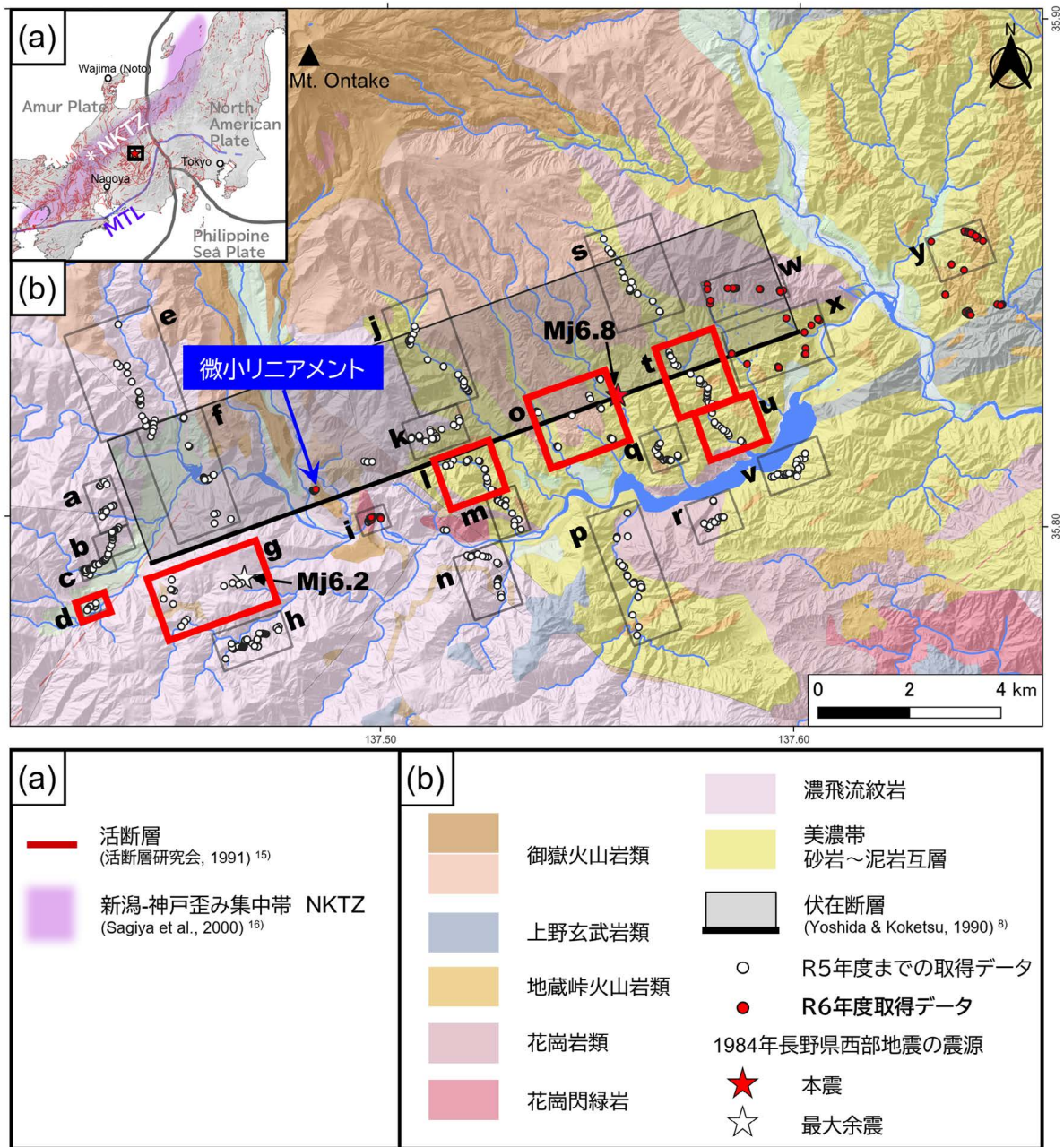


図 2.1.1-1 研究対象地域

(a) 研究対象地域のインデックスマップ。赤線は活断層の地表トレース(活断層研究会, 1991¹⁵⁾)を示す。紫色の領域は新潟-神戸歪み集中帯(NKTZ)の範囲を示す(Sagiya *et al.*, 2000¹⁶⁾)。研究対象地域はNKTZの領域の外側に位置する。MTL(中央構造線)。(b) 研究対象地域において取得した小断層スリップデータの分布。地質図は産業技術総合研究所のシームレス地質図 V2(産総研, 2023¹⁷⁾)を参照した。背景には地理院タイルを使用した。黒実線の長方形はYoshida and Koketsu (1990)⁸⁾による震源断層モデルを表し、太線が伏在断層の上端を示す。a～yの四角の領域は、応力逆解析に用いた各領域を示す。応力逆解析の結果は図 2.1.1-2 に示す。赤で囲った領域では、現在の応力(Uchide *et al.*, 2022¹¹⁾)と似た応力が検出された。

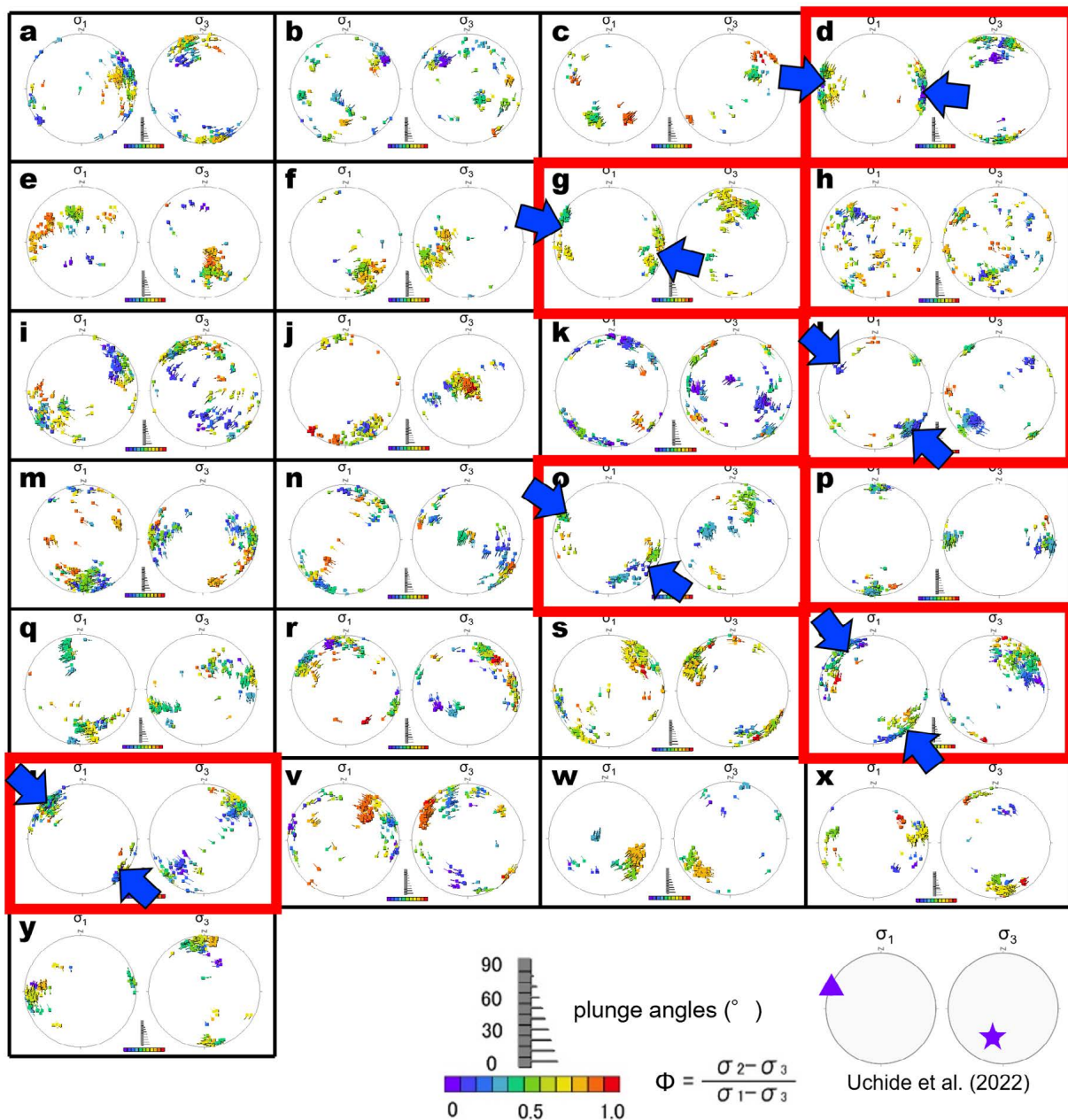


図 2.1.1-2 多重逆解法による応力逆解析の結果

応力逆解析結果は各領域で推定された、小断層スリップデータをよく説明する複数の応力状態の主軸 (σ_1 軸及び σ_3 軸) 方位を下半球等積投影で示した。応力のプロットの色は応力比を示し、そこから伸びる線の方角は対応するもう片方の主応力軸 (σ_1 軸または σ_3 軸) の方位角を、線の長さは伏角をそれぞれ表す。右下に、本地域の現在の広域応力 (Uchide *et al.*, 2022¹¹⁾) を示す。

表 2.1.1-1 各領域における応力逆解析から検出された主応力軸の平均方向、応力比、平均応力角距離及び本地域の広域応力 (Uchide *et al.*, 2022¹¹⁾)との応力角距離。

方位角は北から時計周りの角度とし、伏角は下向きを正とする。現在の応力状態との応力角距離が59.26° 未満のものを赤字で示す。

領域	データ数	平均応力				応力比	平均応力角距離 (°)	現在の応力状態 (Uchide <i>et al.</i> , 2022)との応力角距離 (°)
		σ_1		σ_3				
		方位角 (°)	伏角 (°)	方位角 (°)	伏角 (°)			
a	21	74.9	13.7	344.2	2.5	0.50	37.5	78.2
b	23	227.3	14.8	132.0	19.1	0.27	68.4	112.9
c	26	199.5	45.1	56.0	38.7	0.74	39.5	91.1
d	21	271.0	3.4	1.3	5.0	0.47	35.3	47.7
e	20	325.5	40.4	161.4	48.5	0.80	38.3	72.6
f	21	146.0	27.6	256.3	33.5	0.59	35.6	91.5
g	19	103.5	6.2	9.7	31.8	0.53	41.6	51.5
h	30	330.9	44.7	237.0	4.0	0.12	70.7	88.4
i	30	235.0	4.3	325.5	6.5	0.46	50.9	115.4
j	36	158.1	11.6	321.0	77.8	0.61	33.0	69.9
k	23	23.3	6.2	292.8	4.8	0.04	54.7	116.0
l	21	131.0	9.8	226.4	28.3	0.20	46.0	36.2
m	22	183.0	19.1	273.4	1.2	0.50	47.9	137.7
n	26	29.9	0.7	120.1	10.7	0.20	45.9	127.0
o	20	134.5	19.5	20.0	49.5	0.36	48.3	53.3
p	30	183.2	4.0	93.0	2.9	0.40	17.9	130.1
q	35	162.5	9.1	71.4	7.0	0.51	47.7	101.3
r	23	318.5	10.6	53.9	26.5	0.38	59.4	99.4
s	26	44.5	9.9	313.6	5.3	0.66	39.2	133.5
t	29	318.0	0.2	48.1	23.5	0.40	38.7	54.6
u	27	313.4	6.1	44.1	6.4	0.31	27.3	45.0
v	26	56.4	24.9	320.2	13.1	0.72	59.5	121.4
w	18	122.0	43.1	227.6	16.0	0.73	37.9	66.9
x	13	80.5	9.0	172.7	13.8	0.63	35.2	75.6
y	20	262.8	13.7	353.8	3.8	0.52	27.5	72.4

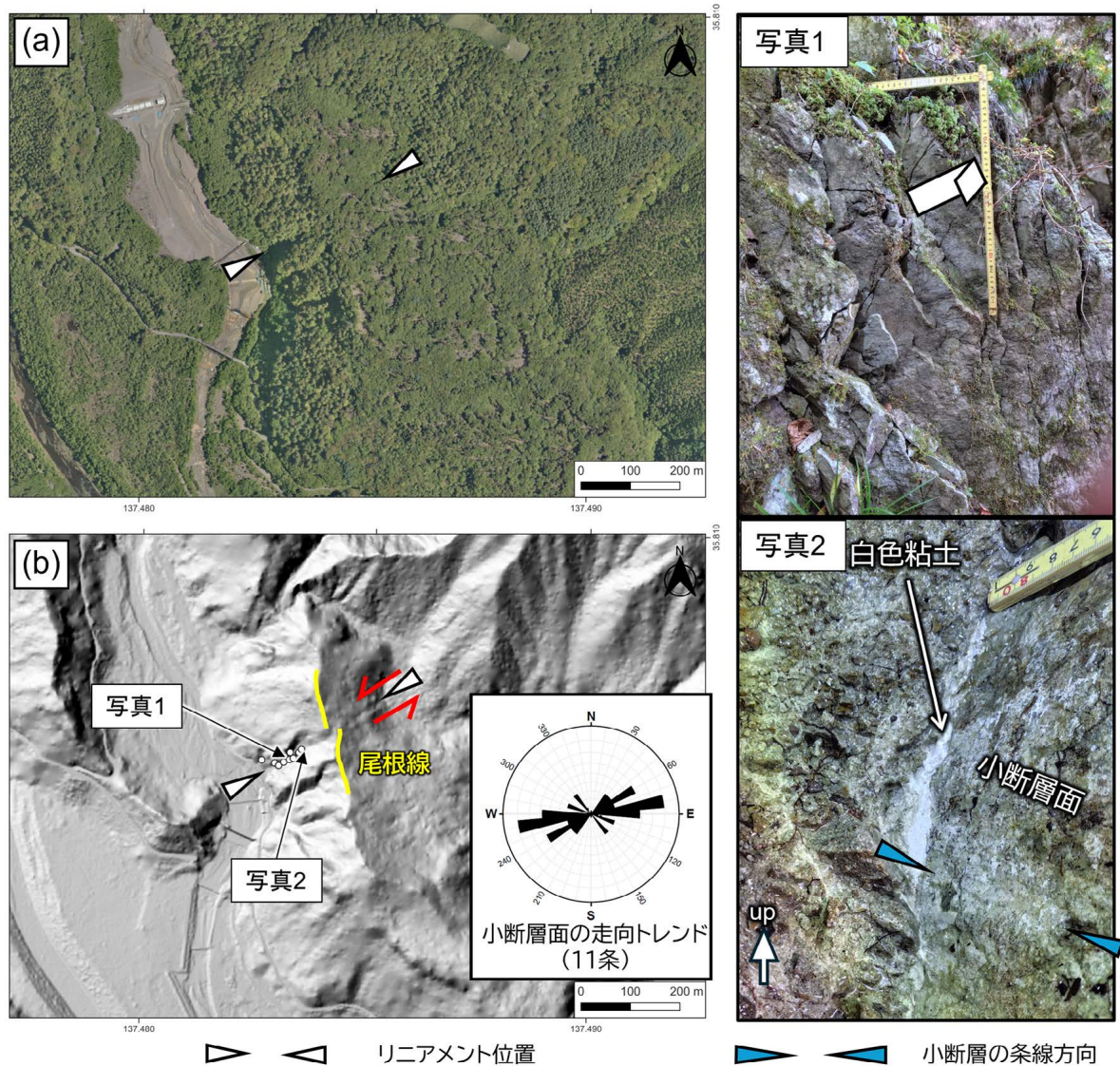


図 2.1.1-3 微小リニアメント周辺に分布する小断層

(a)微小リニアメントが認められた地域の空中写真と(b)2 mメッシュのDEM(青柳・阿部, 2009¹³⁾)より作成した陰影起伏図を示す。南北に伸びる尾根地形より、左横ずれ変位のリニアメントと判断した。尾根の西側のリニアメント周辺において地表踏査を実施したところ、11条の小断層(図b中の白丸)を確認した。これらの走向はENE-WSW方向に卓越し、概ねリニアメントの方向と平行な小断層が多数認められた。また、左横ずれのせん断センスが認められる小断層(写真1)、及び白色粘土のガウジを伴う小断層(写真2)も確認された。なお、写真1の小断層の姿勢はN80° E, 89° N、写真2の小断層はN50° E, 65° Nである。

② 断層の活動性評価指標を提示するための分析・試験，年代測定による検討

(1) はじめに

地層処分概要調査等に用いる調査技術として、上載地層がない場合の断層の活動性や地質断層の再活動性を把握するための技術の高度化が求められている。このような技術は、ボーリングや坑道調査で遭遇した断層に対する調査・評価技術の整備及び断層運動に伴う周辺岩盤の破碎などの影響の評価の観点から重要である。このような断層に適用が試みられた調査・評価技術として、破碎帯内物質の形状などの定性的指標（例えば、Niwa *et al.*, 2016¹⁸）；植木ほか, 2016¹⁹）；田中ほか, 2018²⁰）や化学組成などの定量的指標（例えば、大谷ほか, 2014²¹）；Hirono *et al.*, 2016²²）；椿ほか, 2016²³）, 放射年代測定を用いた手法（例えば、Ikeya *et al.*, 1982²⁴）；Grimmer *et al.*, 2002²⁵）；田上ほか, 2010²⁶）；Tagami, 2012²⁷）などがある。しかし、信頼性の高い調査・評価技術として確立されたものは未だになく、更なる高度化が必要である。そのため、第 4 期中長期目標期間では、従来手法の高度化や新しい手法の開発を通じた適用性の拡充及び評価手法の信頼性向上を進めている。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

断層内物質を用いた定量的な断層活動性評価手法の 1 つに、電子スピン共鳴法: electron spin resonance (ESR) 法により検出される捕獲電子（岩石・鉱物中の格子欠陥に捕獲された電子）を用いた断層年代測定法がある（Ikeya *et al.*, 1982²⁴）；Fukuchi, 1996²⁸）。地殻岩石中の石英・長石などの鉱物粒子は、自然放射線に被曝することにより捕獲電子を蓄積している。蓄積される捕獲電子数は被曝線量によって決まるため、捕獲電子の総数から、現在までに蓄積した被曝線量（総被曝線量）を推定することができる。そして、自然放射線による 1 年間あたりの被曝線量（年間線量率）は一定であると仮定し、総被曝線量を年間線量率で除することで、鉱物粒子が自然放射線を蓄積し始めた年代を算出することができる。一方、断層内物質の鉱物粒子については、地震時に、断層すべりに伴う摩擦発熱や応力の影響を受けることで、蓄積された捕獲電子は検出限界以下まで解放（リセット）されると考えられている。そのため、現在までに蓄積した被曝線量を年間線量率で除した値を最新の断層活動年代と捉えることができる。しかし、断層すべりに伴う捕獲電子のリセットが具体的にどのような条件で起こるのかは明らかでなく、リセットが不完全である場合、算出される最新断層活動年代は過大評価されてしまう（図 2.1.1-4）。そのため、断層すべりの特徴（断層内物質を形成した断層すべりの応力や変位量、母岩の粒径・熱的性質など）が捕獲電子とどのような関係にあるのかを明らかにする必要がある。そこで、地震時に起こる断層すべりを模擬した高速摩擦実験を行い、リセット条件やそのメカニズムを検討した。

(3) 実施内容・結果

様々な物理条件で起こる地震時の断層すべりを室内で再現するため、山口大学に設置された回転式剪断高速摩擦試験機（図 2.1.1-5a）を用いた人工石英粉末の高速摩擦実験を行った。出発物質には、ブロック状の人工石英（日本電波工業）に粉碎・加熱・ γ 線照射・再加熱を施すことで作製された人工石英粉末（45～300 μm ）を用いた。照射線量は、現在、地殻から放出される天然放射線（年間線量率 1.49 Gy/ka；Hans Wedepohl, 1995²⁹）；Guérin *et al.*, 2011³⁰）が 200 万年間被曝することで蓄積される 3000 Gy とした。本試料の製造過程などの詳細については、Tanaka (2022)³¹を参考にされたい。以降、摩擦実験後の人工石英粉末を模擬断層ガウジと呼称する。母岩に相当する供試体には、チタン合金（Ti-6Al-4V）を素材とする円筒（内径 15 mm, 外径 25 mm）を用いた。摩擦実験は、2 つの供試体の間に出発物質 1 g を挟み、室内乾燥環境下で、すべり速度 $V_{\text{eq}} = 1.0 \text{ m/s}$, 変位量 $D_{\text{eq}} = 10 \text{ m}$, 垂直応力 $\sigma_n = 0.26 \sim 5.8 \text{ MPa}$

(HVR Series I)と $V_{eq} = 1.0$ m/s, $D_{eq} = 2$ m, $\sigma_n = 0.94 \sim 5.9$ MPa (HVR Series II)の2パターンで実施された(表 2.1.1-2)。模擬断層ガウジ及びその出発物質に対して、ESR 測定(図 2.1.1-5b)などの分析・観察などを行い、摩擦実験中に発生した粒子粉砕・摩擦熱が模擬断層ガウジに及ぼす影響を評価した。

結果として、石英中の E_1' 中心($\bullet \text{Si} \equiv \text{O}$, \bullet は不対電子, $-$ は共有結合を示す, Jani et al., 1983³²⁾)の捕獲電子の含有量に比例したパラメータである ESR 信号強度(以下、「 E_1' 中心の ESR 信号強度」)は、摩擦仕事率(単位面積あたりの破壊及び摩擦熱に使われたエネルギー)及び垂直応力に依存することが明らかとなった。具体的には、これらのパラメータの増大とともに急増した後、減少に転じ、しばらく減少が続いた後に一定の値に収束した(図 2.1.1-6a, b)。高速摩擦実験に伴う模擬断層ガウジの出発物質の粉砕度(図 2.1.1-6c)および温度変化(図 2.1.1-6d)、粉砕実験・加熱実験により示された粉砕及び熱に対する ESR 信号強度の挙動(粉砕は原子力機構・電中研, 2024³⁴⁾、熱は図 2.1.1-7)に基づくと、ESR 信号強度の増加は粒子粉砕、減少は摩擦発熱に大きく起因していることが示唆される。模擬断層ガウジの摩擦仕事率に対する依存関係については、OSL 法により検出される石英中の捕獲電子含有量が摩擦仕事率に依存しているという報告と整合的である(Oohashi et al., 2020³³⁾)。断層すべりの摩擦仕事率は、垂直応力を変数として含む数式で表現することができる。実際に、垂直応力と摩擦仕事率の間には比例関係が見られており、垂直応力に対する依存関係は摩擦仕事率に対する依存関係と同じ解釈がなされるのかもしれない。

図 2.1.1-8 に、チタン合金供試体(黒点)とセラミックス供試体(ムライト, 赤点)を用いて、垂直応力のみを変化させた高速摩擦実験($V_{eq} = 1.0$ m/s, $D_{eq} = 10$ m)によって得られたデータを比較した結果を示した(セラミックス供試体を用いた実験は令和 5 年度に実施, 原子力機構・電中研, 2024⁹⁾)。どちらの高速摩擦実験においても、垂直応力または摩擦仕事率の増大とともに E_1' 中心の ESR 信号強度が急増したのち、単調減少する傾向が見られた。しかし、同一の垂直応力または摩擦仕事率における ESR 信号強度は、チタン合金供試体を用いた実験で得られた模擬断層ガウジの方が全体的に高い値を有していた。 E_1' 中心の ESR 信号強度は粉砕によって増大すると考えられる。垂直応力および摩擦仕事率に対する粉砕度(比表面積)の比較から、セラミックス供試体を用いた高速摩擦実験のデータの方が粉砕の影響が強く、特定の垂直応力及び摩擦仕事率の摩擦実験に対する ESR 信号強度の変化は摩擦発熱に起因している可能性がある。チタン合金及びムライトの熱伝導率・熱拡散率の代表値はそれぞれ 7.5 W/mK・ 3.3 m²/s と 4.2 W/mK・ 2.1 m²/s である。これは、ムライトの方が熱は逃げにくく拡散するのが遅いことを示しており、効果的に ESR 信号強度を減少させる可能性があることを示唆している。したがって、熱伝導率や拡散率が低い岩石を母岩とする断層破砕物の方が ESR 信号のリセットを経験している可能性が高い。岩石の種類による熱伝導率は、採取地域(例えば、韓国(Shim and Park, 2013³⁴⁾)、中国(Ji et al., 2024³⁵⁾)、トルコ(Balkan et al., 2017³⁶⁾)、ヨーロッパ(Dalla Santa et al., 2020³⁷⁾)によって傾向は異なるが岩石種ごとに違いが見られた。相対的に、堆積岩、火成岩、変成岩の順で熱伝導率は低く、凝灰岩や安山岩、玄武岩が特に低い地域も見られた。したがって、ESR 断層年代測定法を適用する地域に存在する岩石の種類は、適切な年代測定用試料を決定することに資することが予想される。

(4) 主な成果と課題

地震時の断層すべりに伴う ESR 信号のゼロセット条件及びそのメカニズムを明らかにするため、人工石英粉末の高速摩擦実験を行い、石英中 E_1' 中心の ESR 信号強度と断層すべりに係る単位面積あたりの摩擦仕事率などの物理量の関係を調べた。これにより、 E_1' 中心の ESR 信号強度は、垂直応力・摩擦仕事率の増大とともに粒子粉砕が進行することで急増し、垂直応力・摩擦仕事率がさらに増大すると摩擦発熱の影響が大きくなり、摩擦発熱に伴う減少量が粒子粉砕に伴う増大量よりも卓越することで減少に転じ

ることが明らかとなった。この結果は、垂直応力や摩擦仕事率が、最新の断層すべりによって E_1' 中心の ESR 信号強度がどのように変化したのかを推定する指標となりうることを示唆している。一方で、 E_1' 中心の ESR 信号強度には断層すべりに伴う粉碎と摩擦発熱の両現象がともに強く影響することから、複雑な挙動を示す。石英中には、 E_1' 中心以外にも捕獲電子を持つ欠陥が存在するため、今後は、そのような捕獲電子を含む天然石英を用いて、より現実に近い環境での摩擦実験を実施し、断層すべりに対する捕獲電子の挙動を明らかにする。

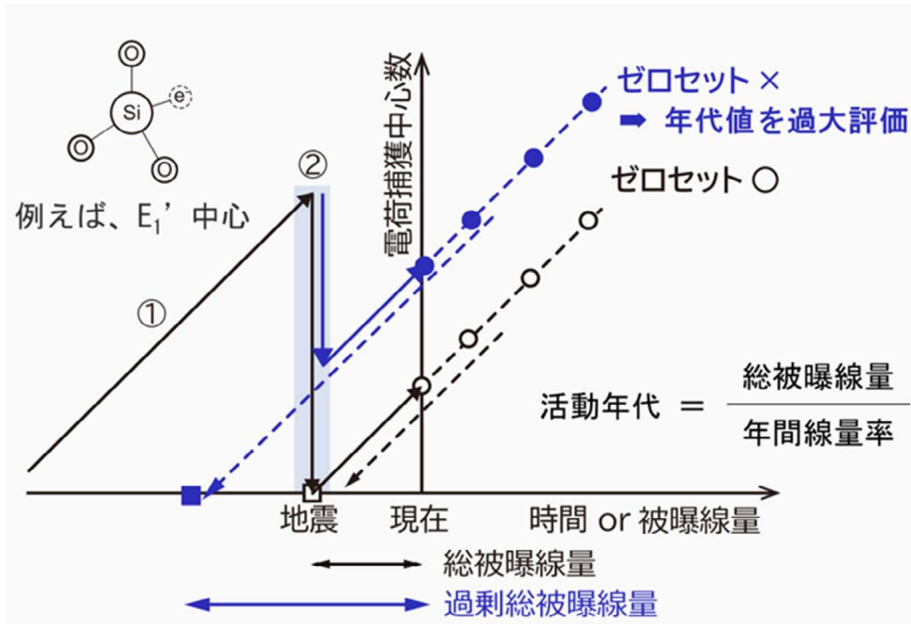


図 2.1.1-4 ESR 断層年代測定法の原理と課題

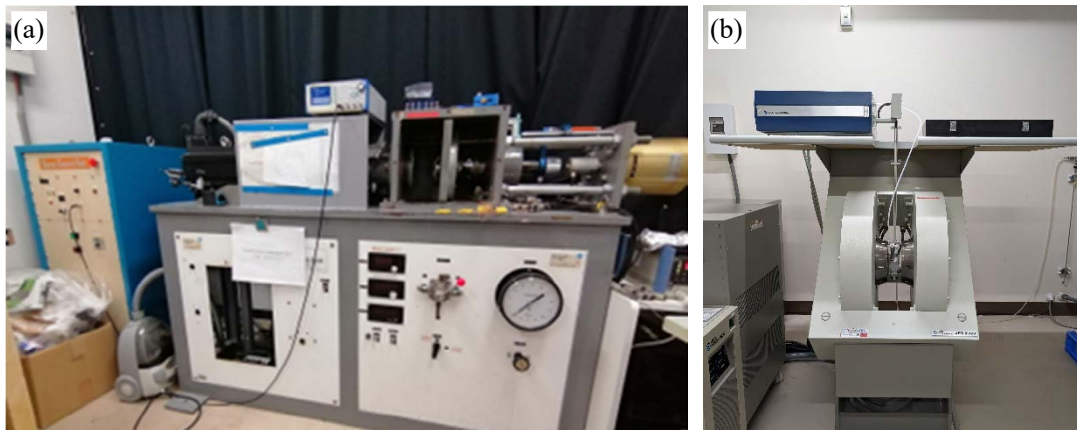


図 2.1.1-5 地震時の断層すべりに伴う ESR 信号強度の変化を調べるための主要な装置
(a)回転式高速剪断摩擦試験機(山口大学), (b)ESR 装置(日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター)。

表 2.1.1-2 高速摩擦実験の条件および関連したパラメータ

Run No.	等価変位速度 [m/s]	等価変位量 [m]	垂直応力 [MPa]	摩擦仕事率 [MW/m ²]	最高到達温度 (observation) [°C]	平均動態温度 (observation) [°C]	比表面積 [cm ² /g]	テフロン混入率 [wt%]
HVR Series I								
HVR5051	1	10	0.94	0.86	378	324	0.11469	0
HVR5052	1	10	3.0	1.2	581	489	0.15200	1.49
HVR5053	1	10	4.0	1.3	665	605	0.15055	1.18
HVR5054	1	10	4.9	1.7	721	661	0.24285	4.12
HVR5064	1	10	2.0	0.88	592	505	0.11007	0
HVR5065	1	10	0.42	0.23	291	233	0.12292	0
HVR5069	1	10	1.5	0.68	447	399	0.14954	0
HVR5070	1	10	0.26	0.28	305	258	0.03165	0
HVR5071	1	10	0.77	0.44	427	359	0.12633	0
HVR Series II								
HVR5072	1	2	5.0	2.9	558	445	0.20304	0.36
HVR5073	1	2	5.9	3.5	601	452	0.15195	0
HVR5074	1	2	1.9	1.1	248	202	0.07129	0
HVR5075	1	2	0.94	0.47	158	124	0.07693	0

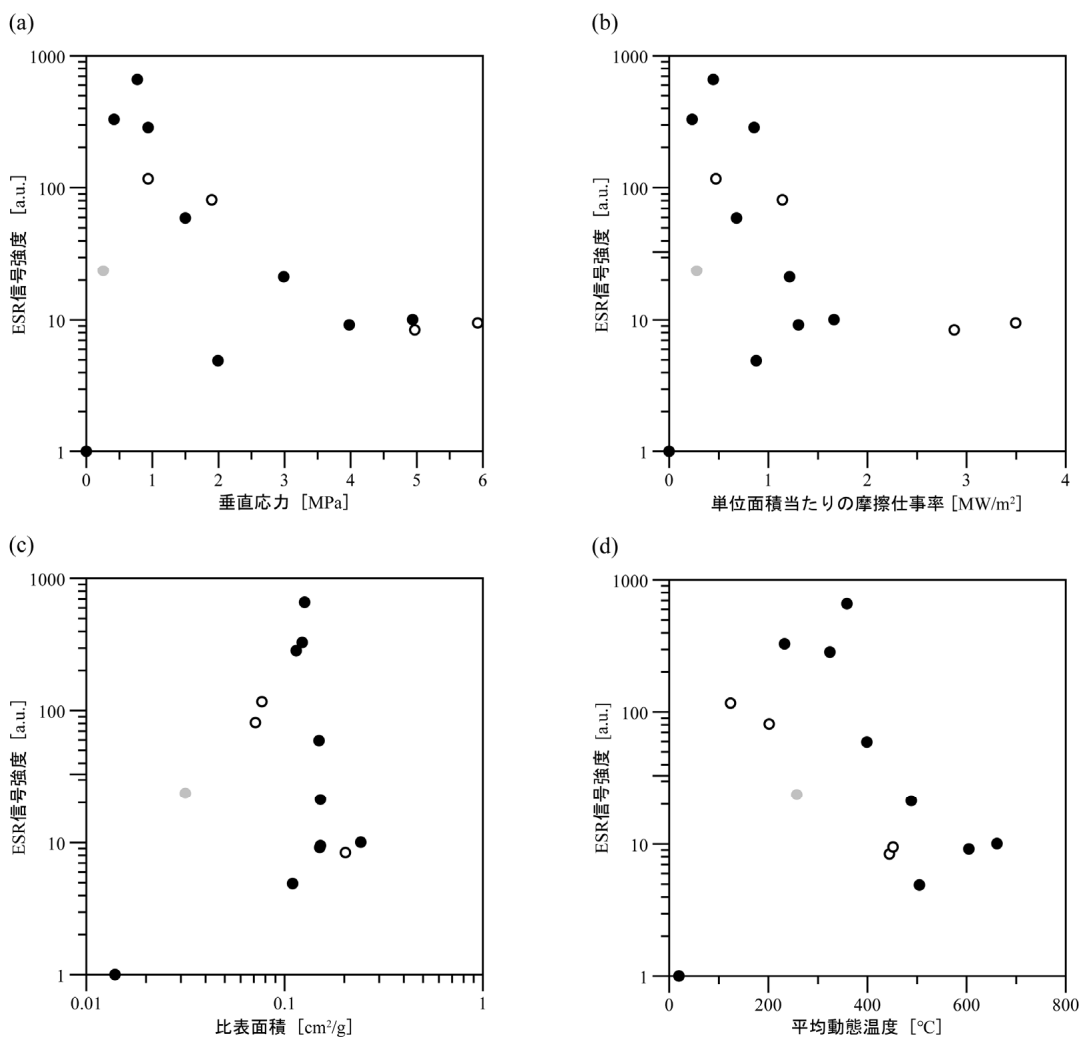


図 2.1.1-6 模擬断層ガウジの E_1' 中心の ESR 信号強度と高速摩擦実験と関連した物理量 E_1' 中心の ESR 信号強度と(a)垂直応力, (b)摩擦仕事率, (c)模擬断層ガウジの比表面積, (d)摩擦面近傍温度の平均動態温度の関係。黒点は HVR Series I で生成された模擬断層ガウジ, 白抜きのは HVR Series II で生成された模擬断層ガウジ, 灰色点は, 粉砕度が他の模擬断層ガウジと大きく異なるガウジのデータを示す。

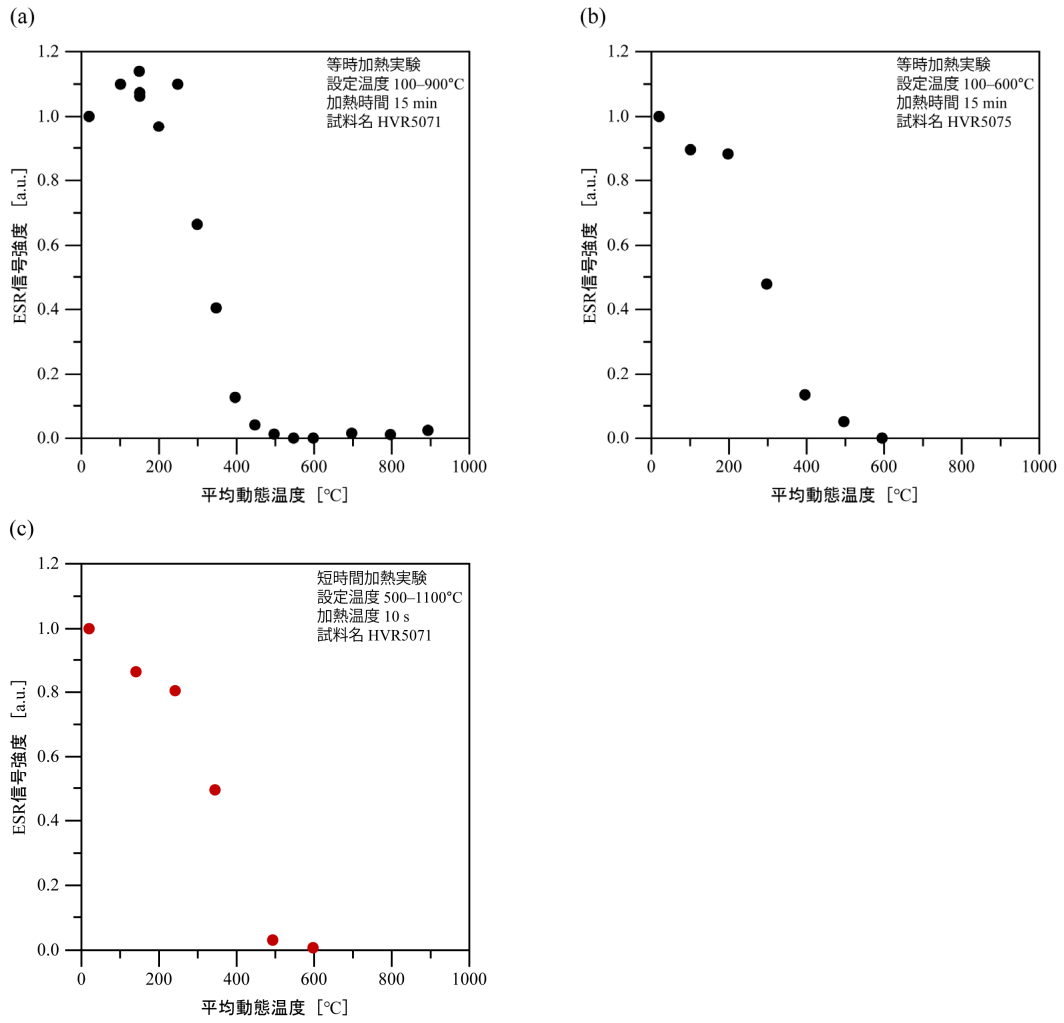


図 2.1.1-7 加熱実験に伴う模擬断層ガウジの石英 E_1' 中心の ESR 信号強度変化
 (a) HVR5071 により生成された模擬断層ガウジの等温加熱実験 (b) HVR5075 により生成された模擬断層ガウジの等温加熱実験 (c) HVR5071 により生成された模擬断層ガウジの短時間加熱実験によって得られた結果を示す。

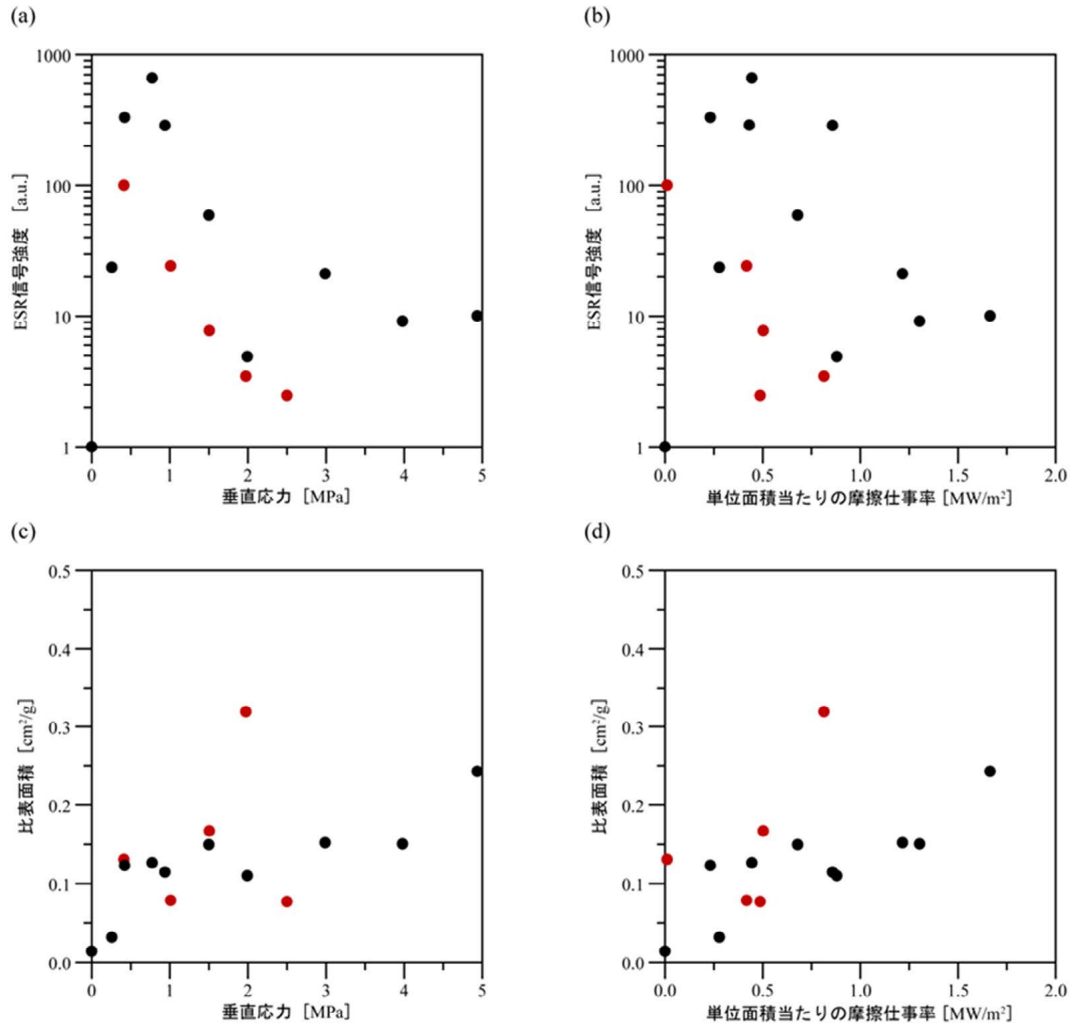


図 2.1.1-8 異なる素材からなる供試体を用いた高速摩擦実験によって得られたデータの比較
 (a) 垂直応力, または, (b) 摩擦仕事率と E_1' 中心の ESR 信号強度の関係。(c) 垂直応力, または, (d)
 摩擦仕事率と比表面積の関係。黒点はチタン合金供試体を用いた高速摩擦実験(HVR Series I), 赤点
 はセラミックス供試体を用いた高速摩擦実験で得られたデータを示す。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現, 2021, 807 p.
- 2) 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司, 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み, 応用地質, vol.50, no.01, 2009, pp.16–28.
- 3) Yamaji, A., Multiple inverse method applied to mesoscale faults in mid Quaternary sediments near the triple trench junction off central Japan, *Journal of Structural Geology*, vol.22, 2000, pp.429–440.
- 4) Wallace, R.E., Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Geology*, vol.59, 1951, pp.118–130.
- 5) Bott, M. H. P., The mechanics of oblique slip faulting. *Geological magazine*, vol.96(2), 1959, pp.109–117.
- 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, e2023EA003360, 2024.
- 7) Niwa, M., Kurosawa, H., and Ishimaru, T., Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: A field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. *Engineering Geology*, vol.119(1-2), 2011, pp.31–50.
- 8) Yoshida, S., and Koketsu, K., Simultaneous inversion of waveform and geodetic data for the rupture process of the 1984 Naganoken-Seibu, Japan, earthquake, *Geophys. J. Int.*, vol.103, 1990, pp.355–362.
- 9) 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關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, 276 p.
- 10) 中野 俊, 宇都浩三, 内海 茂, 上野玄武岩類および地蔵峠火山岩類の K-Ar 年代と化学組成の時間変化, *火山*, vol.45(2), 2000, pp.87–105.
- 11) 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, no.6, e2022JB024036, 2022.
- 12) Yamaji, A., and Sato, K., Stress inversion meets plasticity theory: a review of the theories of fault-slip analysis from the perspective of the deviatoric stress-strain space. *Journal of Structural Geology*, vol.125, 2019, pp.296–310.
- 13) 青柳恭平, 阿部信太郎, 明瞭な活断層が見出されない地域での震源断層評価--長野県西部地震震源域における地球物理学的調査. 電力中央研究所報告. 研究報告. N08038, 2009.
- 14) 山田直利, 5 万分の 1 地質図幅「加子母」、および同説明書, 地質調査所, 1961, 25 p.
- 15) 活断層研究会(編), 新編 日本の活断層 分布図と資料, 東京大学出版会, 1991, 440 p.
- 16) Sagiya, T., Miyazaki, S. I., and Tada, T., Continuous GPS array and present-day crustal deformation of

- Japan. *Pure and applied Geophysics*, vol.157, 2000, pp.2303–2322.
- 17) 産総研地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, オリジナル版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (参照:2025 年 1 月 31 日).
 - 18) Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K., Ishimaru, T., Microscopic features of quartz and clay particles from fault gouges and infilled fractures in granite: Discriminating between active and inactive faulting, *Engineering Geology*, vol.210, 2016, pp.180–196, doi:10.1016/j.enggeo.2016.06.013
 - 19) 植木忠正, 田辺裕明, 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 花崗岩中に発達する粘土脈の観察・分析データ, JAEA-Data/Code 2016-010, 2016, doi:10.11484/jaea-data-code-2016-010
 - 20) 田中義浩, 亀高正男, 岡崎和彦, 鈴木一成, 瀬下和芳, 青木和弘, 島田耕史, 渡邊貴央, 中山一彦, 断層面の形態観察に基づく断層活動性評価手法の検討, *応用地質*, vol.48, no.1, 2018, pp.205–214, doi:10.5110/jjseg.59.13
 - 21) 大谷具幸, 河野雅弘, 小嶋智, 前期更新世までに活動を停止した断層における破砕帯の鉱物学的・地化学的特徴, 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, R15-O-12, 2014, doi:10.14863/geosocabst.2014.0_262
 - 22) Hirono, T., Asayama, S., Kaneki, S., Ito, A., Preservation of amorphous ultrafine material: a proposed proxy for slip during recent earthquakes on active faults, *Scientific Reports*, vol.6, no.1, 2016, pp.1–9, doi:10.1038/srep36536
 - 23) 椿純一, 大谷具幸, 河野雅弘, 小嶋智, 第四紀後期に活動していない断層における破砕帯の特徴—奈良県大淀町における中央構造線を例として—, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会講演要旨, pp.SSS31-P11, 2016.
 - 24) Ikeya, M., Miki, T., Tanaka, K., Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials, *Science*, vol.215, no.4538, 1982, pp.1392–1393, doi:10.1126/science.215.4538.1392
 - 25) Grimmer, J. C., Jonckheere, R., Enkelmann, E., Ratschbacher, L., Hacker, B. R., Blythe, A. E., Wagner, G. A., Wu, Q., Liu, S., Dong, S., Cretaceous–Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China), *Tectonophysics*, vol.359, no.3–4, 2002, pp.225–253, doi:10.1016/S0040-1951(02)00513-9
 - 26) 田上高広, 渡邊裕美子, 板谷徹丸, 地震断層の年代学—最近の新展開と今後の展望, *月刊地球*, vol.32, no.1, 2010, pp.3–9.
 - 27) Tagami, T., Thermochronological investigation of fault zones, *Tectonophysics*, vol.538–540, 2012, pp.67–85, doi:10.1016/j.tecto.2012.01.032
 - 28) Fukuchi, T., Direct ESR dating of fault gouge using clay minerals and the assessment of fault activity, *Engineering Geology*, vol.43, no.2–3, 1996, pp.201–211, doi:10.1016/0013-7952(96)00061-0
 - 29) Hans Wedepohl, K., The composition of the continental crust, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.59, no.7, 1995, pp.1217–1232, doi:10.1016/0016-7037(95)00038-2
 - 30) Guérin, G., Mercier, N., Adamiec, G., Dose-rate conversion factors: update, *Ancient TL*, vol.29, no.1, 2011, pp.5–8.

- 31) Tanaka, K., Experimental Study on Behavior of E_1' Center in Quartz during Fault Slip, In: Doctoral Thesis, Tohoku university, 2022.
- 32) Jani, M. G., Bossoli, R. B., and Halliburton, L. E., Further characterization of the E_1' center in crystalline SiO_2 . *Physical Review B*, vol.27, 1983, pp.2285–2293, doi:10.1103/PhysRevB.27.2285
- 33) Oohashi, K., Minomo, Y., Akasegawa, K., Hasebe, N., Miura, K., Optically stimulated luminescence signal resetting of quartz gouge during subseismic to seismic frictional sliding: a case study using granite-derived quartz, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.125, no.10, 2020, e2020JB019900, doi:10.1029/2020JB019956
- 34) Shim, B. O., Park, C.-H., Ground thermal conductivity for (ground source heat pumps) GSHPs in Korea, *Energy*, vol.56, 2013, pp.167–174, doi:10.1016/j.energy.2013.04.059
- 35) Ji, M., Wei, S., Zhang, W., Liu, F., Liao, Y., Yuan, R., Yan, X., Original article characterization of rock thermophysical properties and factors affecting thermal conductivity – A case study of Datong Basin, China, vol.7, no.4, 2024, pp.360–372, doi:10.26599/JGSE.2024.9280002
- 36) Balkan, E., Erkan, K., Şalk, M., Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey, *Journal of Geophysics and Engineering*, vol.14, no.4, 2017, pp.909–919, doi:10.1088/1742-2140/aa5831
- 37) Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., Bertermann, D., Mendrinós, D., Pasquali, R., Perego, R., Pera, S., Di Sipio, E., Cassiani, G., De Carli, M., Bernardi, A., An updated ground thermal properties database for GSHP applications, *Geothermics*, vol.85, 2020, 101758, doi:10.1016/j.geothermics.2019.101758

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。このため、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。

地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある自然現象のうち、火山活動に伴うマグマの貫入・噴出は、地層の物理的な隔離機能を広範囲にわたり喪失させる恐れがある。サイト選定ではその影響範囲を回避する必要があるが、その範囲の考え方については第四紀火山から半径 15 km 以内を避けることが適当とされている(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, 2017¹⁾)。これに加えて、2022 年に示された「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」(原子力規制委員会, 2022²⁾, 以下「考慮事項」)では、「第四紀に活動した火山が存在しない場所であっても、新たな火山が生じる可能性のある場所」についても避けることとしているが、その評価方法については「研究段階であり、現時点においては確立された評価方法は見当たらない」(原子力規制庁, 2022³⁾)と指摘されている。

プレートの沈み込み帯である日本列島では、陸のプレートの下に沈み込んだ海のプレート起源の水の働きによって上部マントルの一部が融けて上昇していき、マグマが形成される。このような過程で形成されたマグマは、一旦地殻内のマグマだまりに蓄えられるなどした後、地表に噴出し、これが島弧の火山になると考えられている(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, 2017¹⁾)。このため、新たな火山の発生に係る潜在的なリスクを排除するためには、将来の火山形成に寄与する可能性がある地下深部の高温流体(マグマやその固化に伴い放出された水など)の有無や分布をあらかじめ把握することが重要となる。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

マグマ等の高温流体の存在を確認するためには、温度や流体の存在に応じて変化する性質をもつ物性値の 2 次元あるいは 3 次元的な空間分布を把握することが肝要である。これに有用な地球物理学的情報として、地殻や上部マントルを対象として推定が可能な地震波速度構造(例えば、Zhao *et al.*, 1992⁴⁾; Nakajima *et al.*, 2001⁵⁾)、地震波減衰構造(例えば、Tsumura *et al.*, 2000⁶⁾)、比抵抗構造(例えば、Aizawa *et al.*, 2004⁷⁾)が挙げられる。このほか、地温勾配(例えば、矢野ほか, 1999⁸⁾)、地震発生層の深さ分布(例えば、Ito, 1990⁹⁾)、S 波反射面の分布(例えば、堀ほか, 2004¹⁰⁾)、地震波散乱体分布(例えば、浅野ほか, 1999¹¹⁾)もマグマや高温流体等の存在についての情報を与えることができる。

しかしながら、これらの情報を得るためのそれぞれの手法は、対象領域の様々な条件により適用性や分解能が異なるほか、対象とする領域が深いため、その推定結果をボーリング掘削により直接的に確認することはできない。そのため、地下深部の高温流体等の調査にあたっては、単独の手法による観測結果のみならず、複数かつ互いに独立した観測や解析による地球科学的情報をもとに総合的に考察し、その信頼性を向上させる必要がある(浅森・梅田, 2005¹²⁾)。本報ではその事例として、日光白根火山群及びその周辺を対象とした MT (magnetotelluric) 法電磁探査により推定した二次元比抵抗構造と、浅発地震の震源再決定により得られた詳細な震源分布をもとに、火山に供給されるマグマや高温流体等の存在

について検討した結果を報告する。

(3) 実施内容・結果

① MT 法電磁探査による二次元比抵抗構造の推定

日光白根火山群は、東北日本の火山フロントを構成する火山地域の中心部に位置し、その周辺には男体・女峰火山群などの活火山を含め、多数の第四紀火山が分布する(図 2.1.2-1)。この火山地域では、休止期を挟みつつ、第四紀を通じて断続的に火山活動が繰り返されている(産業技術総合研究所, 2013¹³⁾)。本研究では、この火山地域をおよそ西北西-東南東方向に横断する約 80 km の区間において、リモートリファレンス方式の MT 法電磁探査を行った。観測では、21 地点に観測点を配置し、Phoenix 社製 MTU-5 システムを使用して磁場 3 成分及び電場 2 成分の時系列を測定した。比抵抗構造の解析では、品質が良好な観測データを二次元インバージョン法(Ogawa and Uchida, 1996¹⁴⁾)に適用し、深さ 20 km までの二次元比抵抗構造を推定した。解析によって推定された二次元比抵抗構造を図 2.1.2-2 に示す。これによると、地表から深さ約 20 km までの地殻は主として 1000 Ωm 以上の高比抵抗域としてイメージされるが、解析領域の中央部ではそれを深部から貫くように 100 Ωm 以下の顕著な低比抵抗体が分布する。この低比抵抗体は、深さとともに広がり、上部地殻から下部地殻まで連続するようにイメージされる。乾燥した地殻内の岩石は、1000~100,000 Ωm の高い比抵抗を持つことが知られているが(例えば, Schwarz, 1990¹⁵⁾)、空隙率が高く、流体を含む岩石は低比抵抗を示す。金属鉱床も非常に高い導電率を示す可能性があるが、これほど大きな空間的広がりを持つ金属鉱床が分布するとは考えにくい。したがって、この低比抵抗体は、メルトまたは水、あるいはその両者の流体を含み、相互によく連結した流体の存在に起因すると考えられる。

② 3 次元地震波速度構造を考慮した震源再決定

地震発生層の下限深度は、400~450°C の等温線に対応する脆性-延性遷移を反映していることが知られている(例えば, Omuralieva *et al.*, 2012¹⁶⁾)。本研究では、地殻温度構造を反映する地震発生層の深さ分布をもとに前述した低比抵抗体が部分熔融域のような高温領域であるか否かを検討するため、気象庁一元化地震カタログ(Okada *et al.*, 2004¹⁷⁾)に掲載されている地震の震源を再決定した。解析に用いた地震データは、2003 年 1 月から 2022 年 12 月までに発生した浅発地震の到達時刻データであり、これらを 3 次元地震波速度モデルを考慮可能な震源決定法(Zhao *et al.*, 1992⁴⁾)に適用した。解析に考慮した地震波速度モデルは、3 次元 P 波及び S 波速度構造(図 2.1.2-3)であり、その空間分解能は水平方向に 33 km、鉛直方向に 15 km である(Asamori and Zhao, 2015¹⁸⁾)。本解析により得られた震源のうち、深さの誤差が 1 km 以下の震源分布を図 2.1.2-2 及び図 2.1.2-4 に示す。これによると、いくつかの第四紀火山の近傍では、震源の深さが周辺に比べて局所的に浅い傾向が認められ、それぞれの火山下に熱源が存在していることを示唆する(図 2.1.2-4)。日光白根火山群の近傍では、約 3 km の幅をもつ地震発生層が明瞭に見られ、その下限深度は日光白根火山に向かって浅くなる傾向が認められる。また、その形状は低比抵抗体の分布域と調和的であることから(図 2.1.2-2)、この低比抵抗体は高温流体の存在を示唆しており、火山活動に関連する部分熔融域またはメルトの固化に伴って放出された熱水の存在を示唆していると考えられる。以上の結果は、同地域における他の地球物理学的な観測結果として、キュリー点深度(Okubo *et al.*, 1989¹⁹⁾)が局所的に浅く高温域の存在を示唆すること、流体の存在を示唆する地震波低速体・散乱体や S 波反射面が分布すること(長谷川・松本, 1997²⁰⁾; Matsumoto and Hasegawa, 1996²¹⁾; Nishigami, 1997²²⁾)とも調和的である。

③ 過去に生じた火山活動との空間的対応性

火山活動の時間的な特性として、個々の火山には誕生から活動停止までのライフサイクルがあることが知られており、マグマだまりの熱的寿命は、(マグマ供給系としてダイアピルを仮定すると)数十万年程度と考えられている(東宮, 1991²³)。一方で、活動期間が150万年に及ぶ岩手火山群など、東北日本の岩手・秋田駒ヶ岳・八幡平・焼山、あるいは磐梯・安達太良・吾妻といった火山群の直下には地震波トモグラフィによって顕著な地震波低速度体が認められることなどから、火山下の熱源はダイアピルのような孤立した熱源ではなく、マンツルの連続的な対流(マンツルからの連続的な高温流体の供給)によるといった可能性が指摘されている(東宮, 1991²³)。

日光白根火山群を含む火山地域では、最近数千年以内に活動した火山が、東西の端部(男体女峰火山群、燧ヶ岳)と中央部(日光白根火山群)に分布しており(図 2.1.2-1)、その時空間分布に明瞭な傾向は認められない。ただし、火山地域全体を一つの活動域として見た場合は、第四紀を通じて断続的に火山活動が繰り返されている(産業技術総合研究所, 2013¹³)。本研究の結果によると、第四紀に活動した火山は、地殻内に分布する低比抵抗体の直上またはその近傍に分布する(図 2.1.2-2)。また、既往の地震波トモグラフィによって推定された地震波速度構造(例えば、長谷川・松本, 1997²⁰; Zhao *et al.*, 2015²⁴; Niu *et al.*, 2018²⁵; Asamori and Zhao, 2015¹⁸)によれば、この火山地域の直下には、地殻からマンツルウェッジまで地震波低速度体または高ポアソン比体が分布しており、火成活動に寄与する流体が沈み込むスラブの脱水とマンツルウェッジを通じた高温物質の上昇によって、地殻に安定的に供給されていることを示唆している(Zhao *et al.*, 2015²⁴; Niu *et al.*, 2018²⁵)。比抵抗構造や地震波速度構造といった地球物理学的な観測の結果は、火山・火成活動に関連する現在の地殻～マンツルウェッジの不均質を示す情報であるが、これらと過去の火山活動範囲が空間的に対応していることは、現在と同様の流体供給経路が地殻の中～深部からマンツルウェッジにおいて長期間安定して存在していた可能性を示唆する。

(4) 主な成果と課題

本研究では、日光白根火山群及びその周辺を対象とした MT 法電磁探査により推定した二次元比抵抗構造と、浅発地震の震源再決定により得られた詳細な震源分布をもとに、火山に供給する高温流体の分布を推定した。さらに、過去に生じた火山活動との空間的対応性から、地下深部における流体供給経路の時空間的な安定性について考察した。本研究は火山地域を対象とした事例であるが、同様のアプローチによって高温流体が非火山地域においても存在する可能性が既に報告されている(Umeda *et al.*, 2006²⁶, 2007²⁷)。新たな火山が生じる可能性を検討するための方法論としてこのアプローチを適用することを想定し、今後は非火山地域に潜在する火成活動の時空間的な安定性などに係る科学的知見を積み上げていくことが重要と考えられる。

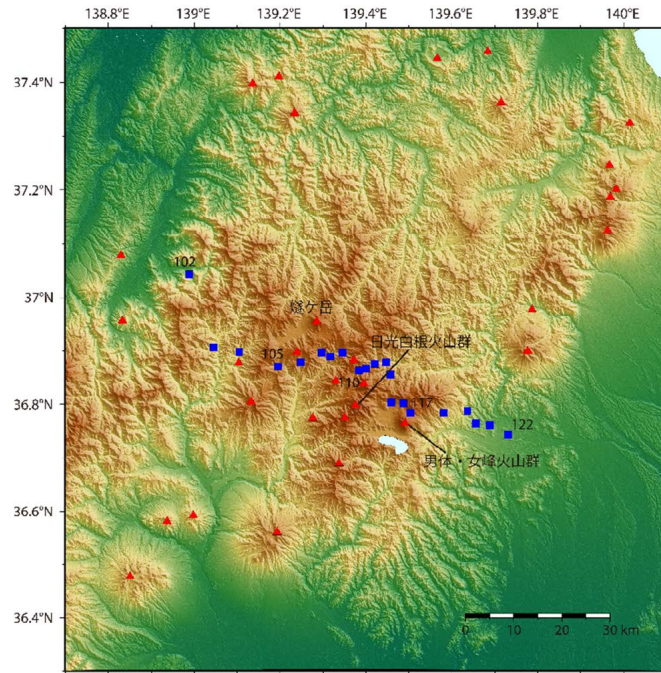


図 2.1.2-1 MT 法電磁探査の観測点(青四角)及び第四紀火山(赤三角:産業技術総合研究所, 2013¹³⁾)の分布

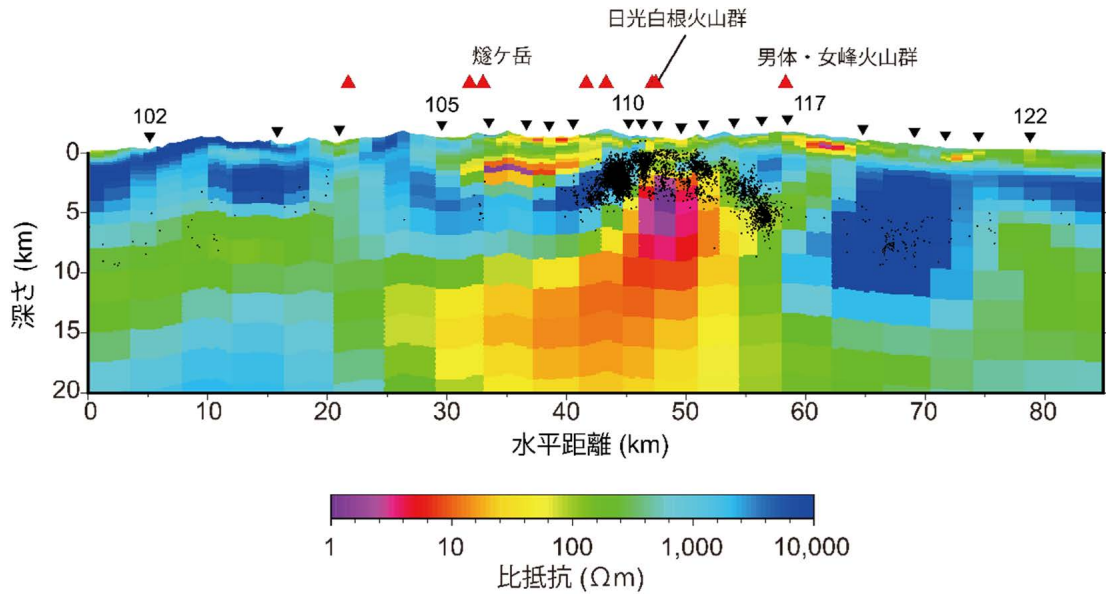


図 2.1.2-2 MT 法電磁探査により推定した 2 次元比抵抗構造
赤三角及び黒三角は、それぞれ第四紀火山(産業技術総合研究所, 2013¹³⁾)及び MT 法電磁探査の観測点を示す。黒点は、本研究により再決定された地震の震源を示す。

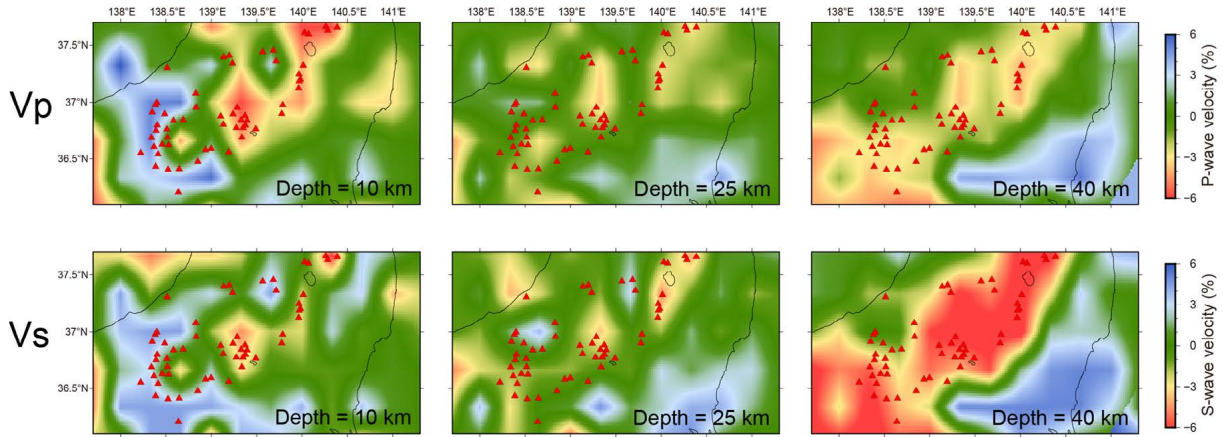


図 2.1.2-3 震源再決定に用いた 3 次元地震波速度構造 (Asamori and Zhao, 2015¹⁸⁾ の地震波速度モデルを用いて作成
それぞれの図は、深さ 10, 25, 40 km における P 波速度偏差 (V_p) 及び S 波速度偏差 (V_s) を示す。

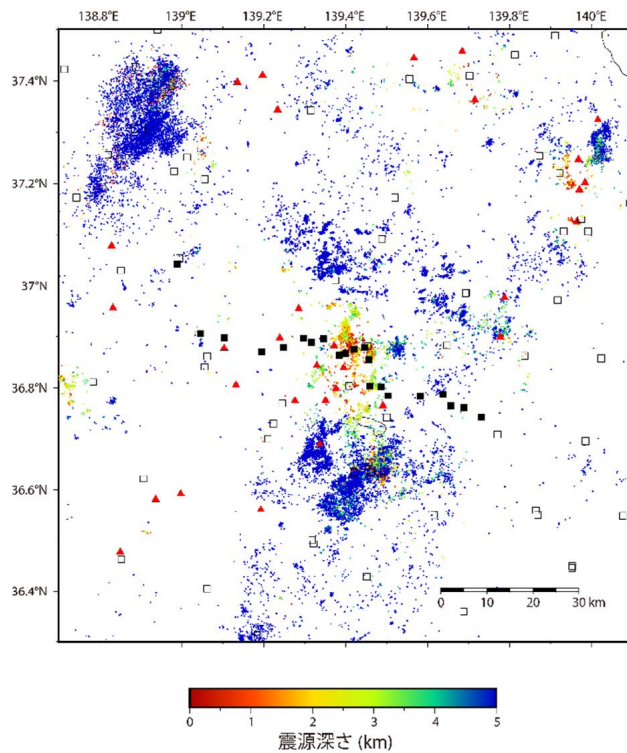


図 2.1.2-4 震源再決定により得られた地震の震央分布
地震の震源深さをカラースケールにしたがって示す。赤三角は第四紀火山の分布 (産業技術総合研究所, 2013¹³), 黒四角は MT 法電磁探査の観測点, 白四角は震源再決定に用いた地震観測点の分布を示す。

参考文献

- 1) 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 WG, 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術 WG とりまとめ), p.89, 2017.
- 2) 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:2025 年 4 月 10 日).
- 3) 原子力規制庁, 我が国における火山の発生メカニズム等に関する科学的・技術的知見の整理, 2022.
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA007000020?contents=NRA007000020-002-003#pdf=NRA007000020-002003> (参照:2025 年 4 月 10 日).
- 4) Zhao, D., Hasegawa, A., Horiuchi, S., Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.97, 1992, pp.19,909–19,928.
- 5) Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., Zhao, D.: Three-dimensional structure of V_p , V_s , and V_p/V_s beneath the northeastern Japan arc: Implications for arc magmatism and fluids, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.106, 2001, pp.21,843–21,857.
- 6) Tsumura, N., Matsumoto, S., Horiuchi, S., Hasegawa, A.: Three-dimensional attenuation structure beneath the northeastern Japan arc estimated from spectra of small earthquake, *Tectonophysics*, vol.319, 2000, pp.241–260.
- 7) Aizawa, K., Yoshimura, R., Oshiman, N.: Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma chamber beneath Mt. Fuji, *Geophysical Research Letters*, vol.31, 2004, doi:10.1029/2004GL019477, 2004.
- 8) 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司 昇, 300 万分の 1 日本列島地温勾配図, 地質調査所, 1999.
- 9) Ito, K., Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *Journal of Physics of the Earth*, vol.38, 1990, pp.223–250.
- 10) 堀修一郎, 海野徳仁, 河野俊夫, 長谷川昭, 東北日本弧の地殻内 S 波反射面の分布, 地震第 2 輯, vol.56, 2004, pp.435–446.
- 11) 浅野陽一, 海野徳仁, 中村綾子, 岡田知己, 堀修一郎, 河野俊夫, 仁田交市, 佐藤俊也, 長谷川昭, 小菅正裕, 長谷見晶子, DAT アレイ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺域における地震波散乱体分布の推定, 地震第 2 輯, vol.52, 1999, pp.379–394.
- 12) 浅森浩一, 梅田浩司, 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術—鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用—, 原子力バックエンド研究, vol.11, 2005, pp.147–155.
- 13) 産業技術総合研究所, 日本の火山 第四紀火山, 2013,
https://gbank.gsj.jp/volcano/Quat_Vol/index.html (参照:2025 年 4 月 10 日).
- 14) Ogawa, Y., Uchida, T., A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophysical Journal International*, vol.126, 1996, pp.69–76.

- 15) Schwarz, G., Electrical conductivity of the earth's crust and upper mantle, *Sureys in Geophysics*, vol.11, 1990, pp.133–161.
- 16) Omuralieva, A. M., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J., Okada, T., Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis, *Tectonophysics*, vol.518-521, 2012, pp.93–105.
- 17) Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiKnet, *Earth planets Space*, vol.56, 2004, pp.xv–xxviii.
- 18) Asamori, K., Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, *Geophysical Journal International*, vol.203, 2015, pp.1752–1772.
- 19) Okubo, Y., Tsu, H., Ogawa, K., Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan, *Tectonophysics*, vol.159, 1989, pp.279–290.
- 20) 長谷川昭, 松本 聡, 地震波から推定した日光白根火山群の深部構造, *火山*, vol.42, 1997, pp.S147–S155.
- 21) Matsumoto, S., Hasegawa, A., Distinct S wave reflector in the midcrust beneath Nikko-Shirane volcano in the northeastern Japan arc, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.101, 1996, pp.3067–3083.
- 22) Nishigami, K., Spatial distribution of coda scatterers in the crust around two active volcanoes and one active fault system in central Japan: Inversion analysis of coda envelope, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol.104, 1997, pp.75–89.
- 23) 東宮昭彦, 島弧火山の寿命に対応するマントルダイアピールの大きさ, *火山*, vol.36, 1991, pp.211–221.
- 24) Zhao, D., Kitagawa, H., Toyokuni, G., A water wall in the Tohoku forearc causing large crustal earthquakes, *Geophysical Journal International*, vol.200, 2015, pp.149–172.
- 25) Niu, X., Zhao, D., Li, J., Precise relocation of low-frequency earthquakes in Northeast Japan: new insight into arc magma and fluids, *Geophysical Journal International*, vol.212, 2018, pp.1183–1200.
- 26) Umeda, K., Asamori, K., Negi, T., 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, pp.1–8. doi:10.1029/2006GC001247
- 27) Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S., 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, pp.1–9, doi:10.1029/2006JB004590

2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術

(1) はじめに

非天水起源の深部流体には、高温、高塩濃度、低 pH、炭酸化学種濃度が高いものが存在する。そのため、これらが流入する範囲では地質環境として好ましくない熱環境や化学場が形成される可能性があり、概要調査等においてその影響を排除することが望ましい(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, 2014¹⁾)。そのため本研究では、深部流体の移行経路と熱的特性に関する調査技術の整備を目標としている。

深部流体の移行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⁾)、宮崎平野(小川ほか, 2024⁵⁾)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りした地域である。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)⁶⁾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。また、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(令和 6 年(2024 年)能登半島地震)が発生しているが、本地震の発生にも深部からの流体の流入が影響を与えた可能性が指摘されている(Ma *et al.*, 2024⁷⁾)。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。

深部流体の熱的特性(温度、活動時期、活動継続期間)を評価するためには、過去の熱水活動の痕跡である熱水変質帯の露頭を対象とした、地質温度計などを用いたアプローチが有効である可能性がある。令和 4 年度までは、鉍物脈の流体包有物解析と周辺母岩の熱年代解析とを組み合わせた手法について提示した(Sueoka *et al.*, 2023⁸⁾)。しかし、熱年代解析による結果、鉍物脈からの距離に応じた熱年代の有意な変化は確認できず、熱年代を若返らせるには、対象とした鉍物脈を形成した熱水活動は、温度が低過ぎたか活動期間が短過ぎた可能性が示された。そのため、令和 5 年度は、当該手法の不確実性を低減させる目的で、特定の元素が鉍物脈から壁岩へ拡散する際に形成される濃度プロファイルの解析により流体の滞留時間を推定する手法についての検討に着手した。研究対象は、令和 4 年度までと同様に、和歌山県田辺市本宮地域の付加体中に産する鉍物脈(石英脈)とその壁岩とした。

(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)⁹⁾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)¹⁰⁾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)⁶⁾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 70 mm の隆起を報告し、群発地震の震源域において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

リッピング解析による深部流体の移行経路の推定を試みることによって、同手法の適用性を示すことができる可能性がある。

紀伊半島は前弧域の非火山地帯にもかかわらず、高温の温泉が湧出している地域がいくつか存在することが知られており(産業技術総合研究所, 2005¹¹), 温泉水の同位体組成のほか、低周波地震の分布、地震波速度構造、比抵抗構造といった地球化学・物理学的な情報から、フィリピン海スラブから脱水した流体が関与していると考えられている(例えば, Umeda *et al.*, 2006¹²; Morikawa *et al.*, 2016¹³)。深部流体は、流体包有物として鉱物中に包有されるほか、岩石を構成する含水鉱物や鉱物中の結晶水・微量元素組成としてその痕跡を残す。そのため、深部流体と平衡共存した鉱物に対して、相平衡岩石学的解析に基づき地質温度圧力計を適用すると、当該鉱物が深部流体と平衡状態にあった温度圧力条件を見積もることができる(例えば, 佐脇, 2005¹⁴; Anderson *et al.*, 2008¹⁵)。また、鉱物脈と壁岩の境界から壁岩方向に鉱物化学組成変化が認められた場合、鉱物脈の伸びに対して垂直方向に流体流動は卓越していないため、主に鉱物粒界拡散および鉱物粒内拡散によって壁岩方向に元素が移動した結果だと解釈できる。したがって、拡散係数が既知の元素において拡散プロファイルが確認できた場合、流体流動の温度条件を制約できれば、拡散方程式を適用することで当該温度の継続時間を見積もることが期待できる(例えば, John *et al.*, 2012¹⁶; Taetz *et al.*, 2018¹⁷)。

(3) 実施内容・結果

① 深部流体の移行経路と空間的広がりに関する調査・評価技術の整備

S波スプリッピング解析の実施にあたっては、2004年4月1日から2024年5月31日までに能登半島周辺地域で発生したMj1.0以上の地震の常設地震観測点に記録された連続地震波形データを用いた。令和5年度では、Hi-net及び気象庁による常設地震観測点のみを用いていたが、令和6年度はこれらに加えて東京大学と京都大学による能登半島地域の常設地震観測点(E.WJM, DP.HRJ, DP.NNJ)による地震波形データも用いた。ただし、E.WJM観測点は2011年11月に、DP.HRJ観測点は2017年12月に観測を終了しているため、これらの2観測点については、地震波形データの利用できる期間が、他の観測点に比べ短いことに注意が必要である。また、2024年能登半島地震発生前後には、各研究機関により臨時地震観測点が設置されているが、このうち Sakai *et al.* (2022)¹⁸による臨時地震観測(2022年10月から2024年5月)の2観測点の地震波形も利用させていただいた。このように拡張したデータに対して、S波スプリッピング解析により得られた、各観測点における速いS波の偏向方向を図2.1.3-1に示す。

これらの推定された速いS波の偏向方向について、期間別の偏向方向の変動の有無を統計的検定により調べた。前年度は予察的にTukeyの多重比較検定法を用いたが、これは線形なデータに対して適用されるべき手法であり、本研究における方位データの場合には適切な取り扱い方法ではない。方位データの多重比較検定はいまだ発展途上であるが、近年、Tasdan and Yeniay (2016)¹⁹が、統計解析言語Rにより方位データの多重比較検定を行うスクリプトを開発した。彼らのスクリプトでは、Rのp.adjust関数と、Agostinelli and Lund (2024)²⁰のcircularパッケージを用いることで、方位データの多重比較検定を可能にしている。circularパッケージに組み込まれているwatson.williams.test関数あるいはwatson.wheeler.test関数により、2つの方位データ群について、Watson-Williams検定あるいはMardia-Watson-Wheeler検定により検定を行い、p.adjust関数により古典的Bonferroni法と、改良Bonferroni法であるHolmの方法、Hochbergの方法、Hommelの方法のそれぞれを用いた多重比較検定を行っている。ただし、Watson-Williams検定については、比較を行う各群のデータの分布についてvon Mises分布を仮定し、さらにその集中度パラメータkが十分大きくなければならない($k > 1$)、という適用条件がある。一方で、ノンパラメトリック

クな方法である Mardia-Matson-Wheeler 検定については、各群のデータ数が 10 個以上という制約のみである。そこで、本研究では取り扱いが比較的容易な Mardia-Watson-Wheeler 検定を用いることとした。

2004 年 4 月 1 日から 2024 年 5 月 31 日までの解析期間を 8 つの期間に分割した(表 2.1.3-1)。2024 年 1 月 1 日に Mj7.6 の能登半島地震が発生する以前は、2020 年 11 月頃に能登半島北東部で群発地震活動が始まっていた。この群発地震の活動域内で、2021 年 9 月 16 日に Mj5.1 の地震が発生し、2022 年 6 月 19 日には Mj5.4 の地震が、2023 年 5 月 5 日には Mj6.5 の地震が発生した。Nishimura *et al.* (2023)⁶⁾は、地殻変動パターンと地震活動に基づいて 2020 年 11 月から 2022 年 6 月までの観測期間を 3 つの期間に分けている。彼らの期間に準拠して、本研究でも 2020 年 11 月から 2022 年 6 月までの期間を 3 つの期間に分割した(period A, B, C)。ただし、Mj5.1 の地震が 2021 年 9 月 16 日に発生しているので、period C については、この地震の前後で period C1 と C2 の 2 つの期間に分けた。Period A 以前の期間を period O とし、period C2 以降の期間については、2022 年 6 月 19 日の Mj5.4 の地震発生から 2023 年 5 月 5 日の Mj6.5 の地震が発生するまでの期間を period D、Mj6.5 の地震発生以降の 2024 年 1 月 1 日の Mj7.6 が発生するまでの期間を period E、Mj7.6 発生から 2024 年 5 月 31 日までを period F とした。

群発地震活動の空間的な分布については、以下の 4 つのクラスターに分けた。群発地震活動は能登半島北東部の南側で始まり(クラスターS)、その後、時間の経過とともに西側のクラスター(クラスターW)、北側のクラスター(クラスターN)、北東部のクラスター(クラスターNE)と時計回りに活発な地震活動領域が遷移していった(e.g., Amezawa *et al.*, 2023²¹⁾)。2023 年 5 月 5 日の Mj6.5 の地震発生後は、さらに北の海域でも地震活動が活発となり、これを別のクラスターと判別することもあるが(e.g., Yoshida *et al.*, 2023²³⁾)、それ以前には、この海域での地震活動は活発ではなかったため、本研究では取り扱わず 4 つのクラスター領域内で発生した地震による地震波形を主に扱った。

これらの 8 つの期間、4 つのクラスターに対して、各観測点で推定された速い S 波の偏向方向について、クラスターごとに Tasdan and Yeniay (2016)¹⁹⁾の方位データの多重比較検定法を適用した。その一例を表 2.1.3-2 と図 2.1.3-2 とに示す。なお、前述のように Tasdan and Yeniay (2016)¹⁹⁾の方位データの多重比較検定では、複数の多重比較検定方法により検定が行われるが、以降では古典的 Bonferroni 法による検定結果のみを示す。

図 2.1.3-2 の下段に期間別の速い S 波の偏向方向を示す。ただし、観測点 SUZU のクラスターS については、period C1, D, E の 3 期間では利用可能なデータ数が 10 個未満であるため、Tasdan and Yeniay (2016)¹⁹⁾の多重比較検定の適用対象から除外し、残りの 5 期間について検定を行った。その結果、表 2.1.3-2 のように一部の期間ペアについては、分布が同じという帰無仮説が棄却された(有意水準 5%)。速い S 波の偏向方向は、媒質の S 波偏向異方性を生み出すクラックの卓越方向を表しており、そのクラックの方向が構造に由来するか(structure-induced anisotropy)、応力方向に由来するか(stress-induced anisotropy)によって、その成因が解釈されることが多い。クラスターS 近傍では、顕著な活断層は認められないこともあり、これらの速い S 波の偏向方向は、クラスターS 近傍の応力方向を反映していると考えられる。そして、本研究の方位データの多重比較検定から、その応力方向が時間変化していた可能性が示唆される。

Tasdan and Yeniay (2016)¹⁹⁾の方位データの多重比較検定の適用にあたっては、データ数が 10 個以上ある期間全ての期間ペアについて検定を行なった。このうち連続する 2 期間についての検定結果のみを表 2.1.3-3 に示す。データ数が 10 個未満の期間ペアが多く見えるが、観測点 E.IDES と E.YUOS については、地震波形データが利用可能な期間が period D 以降であるため、それ以前の期間についてはそ

もそもデータがない。Period D/period E と period E/period F の期間ペアについては、複数の観測点・クラスターで、分布が等しいという帰無仮説が有意水準 5%で棄却されている。Period D/period E では、期間の境目は 2023 年 Mj6.5 の地震であり、period E/period F の期間の境目は 2024 年 Mj7.6 の地震である。S 波スプリッティング解析から推定される速い S 波の偏向方向は、伝播する媒質における卓越したクラック方位を反映しているため、これらの期間ペアにおける分布の違いは、大規模地震の発生によるクラック方位の変動を反映している可能性がある。一方で、観測点 N.SUZH のクラスター N の事例のみではあるが、規模の大きな地震が発生していないにもかかわらず、period B/period C1 の境目でも分布の違いが検出されている。これらの 2 期間について、Nishimura *et al.* (2023)⁶⁾は、クラスター W からクラスター N に遷移していく期間を period B とし、クラスター N から NE へと地震活動が拡大していく期間を period C (本研究での period C1 と period C2 に相当する)としている。したがって、この期間ペアでの速い S 波の偏向方向の分布の違いは、深部流体の移行あるいは間隙流体圧の増加によるクラックの卓越方位の変動を反映している可能性が高い。

② 鉱物脈の微量元素、流体包有物解析による調査・評価技術の整備

令和 5 年度は、和歌山県田辺市本宮地域の付加体中に産する鉱物脈(石英脈)の露頭を事例対象として、岩石試料の採取、両面研磨薄片の作成、X 線元素マッピングを実施した。令和 6 年度は、引き続き元素濃度プロファイルの解析を進め熱水活動の滞留時間の制約を試みることに、流体流入時の温度圧力条件の制約を目的として、流体包有物の加熱・冷却実験と壁岩中の炭物質のラマン分光分析を実施した。X 線元素マッピングの取得とカソードルミネッセンス像(CL 像)の撮影は、京都大学大学院理学研究科設置の波長分散型電子線マイクロプローブアナライザー JEOL JXA-8105を用いて実施した。ラマン分光分析には京都大学大学院理学研究科設置のレーザーラマン分光光度計(JASCO NRS 3100)を用い、Kouketsu *et al.* (2014)²³⁾の炭質物ラマン温度計を適用した。流体包有物の分析は、東濃地科学センター設置の加熱・冷却ステージ(Linkam 10002L)を用いて実施した。塩濃度と isochore の計算には Bakker (2018)²⁴⁾の AqSo_NaCl プログラムを使用した。

本研究の事例地域である和歌山県田辺市本宮地域は、四万十帯に属し、下位から順に音無川層群に属する瓜谷累層、羽六累層、さらに牟婁層群に属する安川累層、打越累層、合川累層に区分される(鈴木ほか, 1979²⁵⁾)。なお、音無川層群の最下部は本地域には露出していない。中新世後期の熊野酸性火成岩類に伴う火砕岩脈と石英斑岩脈が小規模な岩脈としてみられ、一部には熱水変質帯が認められる(鈴木ほか, 1979²⁵⁾)。本研究で対象としたのは、安川累層から採取した石英脈を含む砂質泥岩試料である。採取試料中には、堆積構造を切るように最大幅約 5 mm の石英脈が貫入する様子が確認された。壁岩には Na に富む斜長石が多く含まれ、主に石英、斜長石、カリ長石、黒雲母から構成される。一方、石英脈中には、石英のほか、微量の斜長石、カリ長石、方解石、黄鉄鉱が産する。石英脈と壁岩の境界は直線的であり、石英脈周囲の壁岩は、一部褐色に変質している。石英脈中の鉱物粒径は、壁岩よりも優位に大きく、壁岩に対して垂直方向に伸びた配列を成す。

石英脈中の流体包有物の加熱・冷却実験(図 2.1.3-3)の結果を表 2.1.3-4 に示す。1 次包有物は塩濃度が約 15 wt%_{NaCl_{eq}} と非常に高く、石英脈を形成した深部流体が高塩流体であったことがうかがわれた。また、均質化温度(T_h)が 300°C 以上であることから、少なくとも流入時に 300°C 以上の高温状態であったと推察される。また、2 次包有物は 1 次包有物に比べ塩濃度が低く、高密度であった。本試料が流体流入後に極端な埋没を被っていないと仮定した場合、2 次包有物を形成した熱水は、1 次流体包有物を形成した熱水に比べて低温であったと考えられる。

ラマン分光分析では壁岩のうち石英脈と接する部分と、脈から 20 cm 以上離れた部分で最高被熱温度の推定を行い、それぞれ 305.1°C と 314.4°C (炭質物ラマン温度計に伴う誤差 $\pm 30^\circ\text{C}$: Kouketsu *et al.*, 2014²³⁾) という結果を得た。これらの推定値を単純に最高被熱温度と捉えた場合、石英脈中の 1 次包有物の T_h との挟み打ちにより、流体流入時の温度圧力条件は約 300°C と推定された。また 1 次流体包有物の密度から、このときの圧力条件は 7.8 MPa (地下 300 m) 程度と推定できる。一方、炭質物の結晶化度は高温継続時間にも依存するため (例えば, Mori *et al.*, 2017²⁶⁾), 熱水活動に伴う高温継続時間が短かった場合には、これらの推定値は熱水の温度条件を過小評価している可能性がある。今年度の測定では石英脈の壁面と 20 cm 以上離れた箇所で最高被熱温度に有意な差は認められなかったため、熱水が壁岩に与えた熱的影響はこれらのデータからは評価することができない。以上をまとめると、1 次包有物の T_h より、石英脈を形成した熱水は高塩流体であり、流入時 300°C 以上だったことが明らかになった。

壁岩の石英粒子は、石英脈との境界に沿って約 100 μm の幅で CL の輝度が暗くなる一方、石英脈中の石英粒子は、壁岩に沿って約 500 μm 幅で CL の輝度が高くなる (図 2.1.3-4)。壁岩の構成鉱物は、CL 像で累帯構造は確認できない。石英脈においては、壁岩付近の CL の輝度が高い粒子に累帯構造が見られない一方で、石英脈中心部の粗粒石英は、中心から外側にかけて CL の輝度が暗くなる累帯構造が見られる。また、X 線元素マッピング像によれば、壁岩を構成する斜長石は、石英脈近傍で K, Ca, Ti 濃度が下がり、Fe, Mn, Mg, P, S 濃度が上昇する。いずれの元素もシャープな濃度変化境界を持たず、徐々に濃度が減少・増加する傾向が見られる。元素濃度が変化する範囲は元素によって異なる。図 2.1.3-5 に示す元素の中では、P と S が最も濃度変化が見られる壁岩の領域が大きく、石英脈と壁岩の境界から約 1 mm 壁岩側へ元素濃度変化が見られる。一方、K, Ca, Ti, Fe, Mn, Mg は約 300 μm 壁岩側へ元素濃度変化が見られる。図 2.1.3-4 及び図 2.1.3-5 の、石英脈の形成が壁岩に与える影響範囲は、CL 像では石英脈幅の 50 分の 1 程度であり、元素マッピングからは元素によって異なるものの最大石英脈幅と同程度と判断できる。また、石英脈内部においても、壁岩と相互作用している部分が CL 像により判断できるが、石英脈内の CL 輝度変化の要因は決定できていない (図 2.1.3-4)。本試料の壁岩における石英脈近傍と脈から約 20cm 離れた場所の最高被熱温度は誤差範囲で一致するため、石英脈形成時、本年度に分析した範囲内に温度勾配はなかったと考えられる。したがって、石英脈と接する壁岩部分に見られる CL の輝度及び元素濃度変化は、約 300°C で形成されたと言える。温度勾配無しに元素濃度が変化しており、かつ、元素によって濃度変化の距離に違いがあることから、拡散が主たる元素移動プロセスであり、個々の元素が持つ拡散係数が濃度変化の距離を決定している可能性がある。ここで、拡散係数が決定できれば、石英脈を形成する流体の流入時間を制約することができる。しかし、先行研究で報告されている拡散係数は、500°C 以上で行われた実験結果から決定されていることが多く (Dohmen and Milke, 2010²⁷⁾), 本試料に適用するには複数の条件を仮定した上で外挿しなければならない。この評価方法については今後の課題である。

(4) 主な成果と課題

深部流体の移行経路と空間的広がりに関する調査・評価技術の整備のため、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。さらに、S 波スプリッティング解析により推定される速い S 波の偏向方向について、期間別クラスター別に、方位データの多重比較検定を適用した。その結果、一部の期間ペアにおいて、速い S 波の偏向方向の分布が等しいという帰無仮説が有意水準 5% で棄却され、その期間ペアについては分布が異なる可能性が示唆された。連続する 2 期間のペアのみに着目すると、期間ペアの境目が規模の大きな地震に対応している場合には、連続する 2 期間における分布の違いは、大規模地震の発生によるクラック方位の変動を反映している可能性がある。期間ペアの境目において規模の大きな地震が発生していない場合には、2 期間

の分布の違いは、深部流体の移行あるいは間隙流体圧の増加によるクラックの卓越方位の変動を反映している可能性が高い。これらの結果は、極めて多数の地震データを用いることが可能な場合、S波スプリッティング解析によるS波偏向異方性の推定が、深部流体の移行経路を把握するために有用であることを示唆する。今後、地震観測点分布が稠密なケースを事例として、S波変更異方性の密な空間分布の推定を行う予定である。

鉍物脈の微量元素、流体包有物解析による調査・評価技術の整備のため、紀伊半島(和歌山県田辺市本宮地域)の付加体中に産する鉍物脈(石英脈)の露頭を事例に、流体流入の温度-圧力条件及び熱水活動に伴う壁岩における化学組成の変化について検討した。その結果、石英脈を形成した深部流体が、高塩濃度で約300°C以上の温度で流入したことが明らかとなった。深部流体の流入による、石英脈から壁岩にかけての有意な温度勾配は確認できないことから、壁岩の元素濃度変化は、流入した深部流体の温度と同程度で起きたと考えられる。同様に深部流体の流入に伴う、熱水脈沿いの元素の移動を検出した事例は、約500°C以上の高温の熱水流入を対象とした報告例はいくつか知られているが(例えば、John *et al.*, 2012¹⁶⁾; Taetz *et al.*, 2018¹⁷⁾)、本研究のような低温の事例は貴重であり、地殻浅部における深部流体活動の熱的・化学的評価への適用が期待される。以上の結果により、本研究で用いたアプローチの深部流体の熱的・化学的特性評価への適用性に係る見通しが得られた。

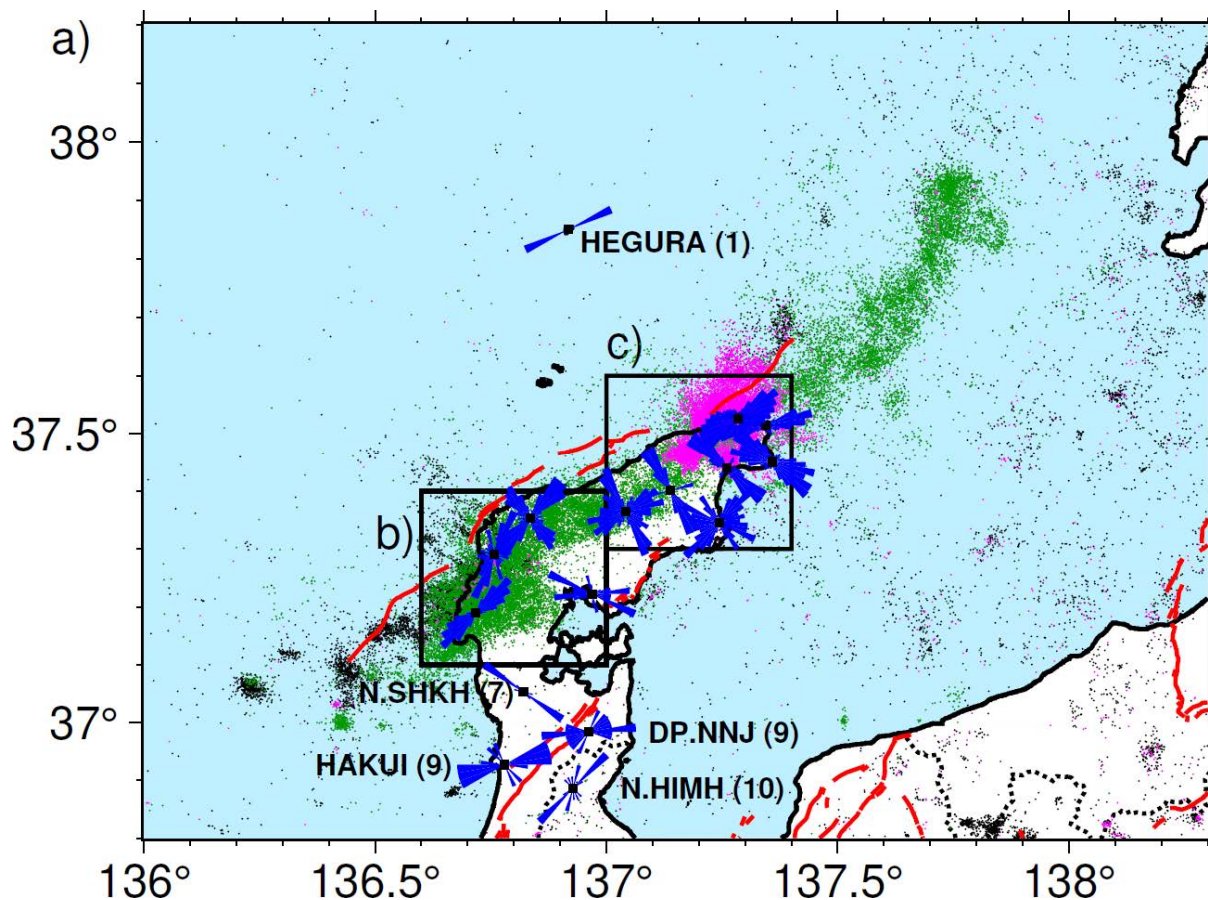


図 2.1.3-1 能登半島地域の地震観測点における速い S 波の偏向方向

能登半島全域における速い S 波の偏向方向を、各観測点の位置の青の rose diagram で示した(図 a)。観測点名に続く括弧内の数字は、推定された速い S 波の偏向方向データの数である。2004 年 4 月 1 日から 2020 年 12 月 31 日までに発生した Mj1.0 以上の地震の震央を黒の点で、2021 年 1 月 1 日から 2023 年 12 月 31 日までの Mj1.0 以上の地震の震央をピンク色の点で、2024 年 1 月 1 日から 5 月 31 日までに発生した Mj1.0 以上の地震の震央を緑色で示した(震源はいずれも気象庁一元化震源による)。赤の線は、産業技術総合研究所の活断層データベースによる活断層を表す。図中の b)と c)の 2 つの黒線の四角形は、図 b)と図 c)に示す拡大図の領域を示す。

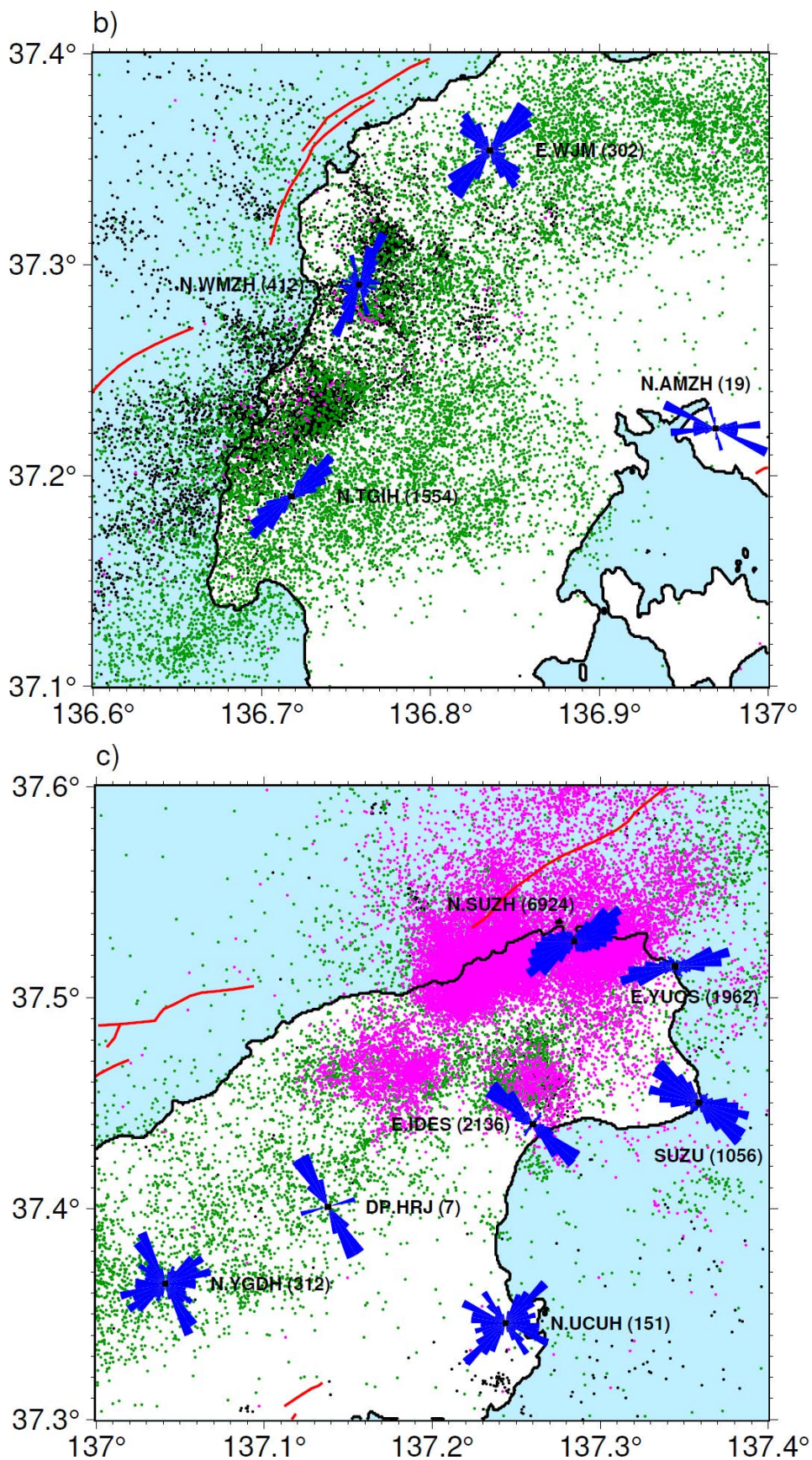


図 2.1.3-1 能登半島地域の地震観測点における速い S 波の偏向方向(続き)

表 2.1.3-1 地震活動等による解析期間の区分

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 – 2021/09/16
Period C2	2021/09/16 – 2022/06/19
Period D	2022/06/19 – 2023/05/05
Period E	2023/05/05 – 2024/01/01
Period F	2024/01/01 – 2024/05/31

表 2.1.3-2 観測点 SUZU, クラスタ S の速い S 波の偏向方向の分布についての多重比較検定結果。×は、2 つの期間でのそれぞれの分布が同じという帰無仮説が棄却されなかったことを表し、5%は有意水準 5%で分布が同じという帰無仮説が棄却されたことを表す。Period C1, D, E については推定された速い S 波の偏向方向データの数が 10 個未満であるため、検定対象から除外した。

	O	A	B	C2	F
Period O		×	×	5%	5%
Period A			×	5%	5%
Period B				×	×
Period C2					×
Period F					

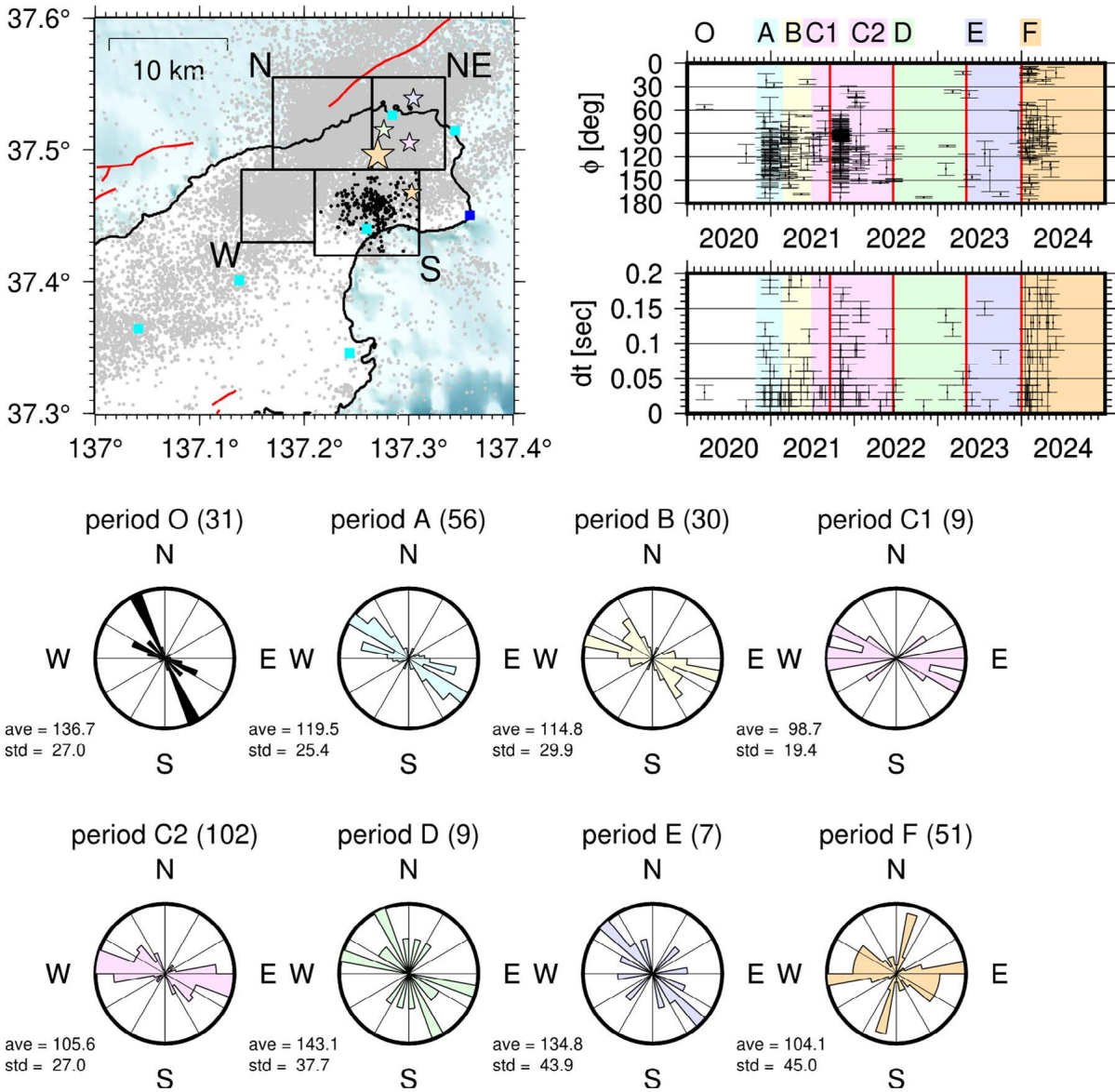


図 2.1.3-2 観測点 SUZU におけるクラスター S の領域内で発生した地震のみを用いた速い S 波の偏向方向の期間別の分布 (下段)

左上に使用した地震の震央を黒の点で示した。グレーの点はそれ以外の地震の震央を表す。水色の小さな四角形は、表示領域内の地震観測点の位置を表し、青の小さな四角形が観測点 SUZU を表す。4 つの黒の矩形領域は、4 つのクラスター領域を表す。星印はそれぞれ、2021 年 9 月 Mj5.1 (薄桃色)、2022 年 6 月 Mj5.4 (薄緑)、2023 年 5 月 Mj6.5 (薄青)、2024 年 1 月 Mj7.6 (薄橙色) の震央を示している。右上には、S 波スプリッティング解析により推定された速い S 波の偏向方向 ϕ と速い S 波と遅い S 波の到達時間差 dt を時間に対して図示した。

表 2.1.3-3 連続する 2 期間のみについての速い S 波の偏向方向の分布の多重比較検定の結果
 ×は、2 つの期間でのそれぞれの分布が同じという帰無仮説が棄却されなかったことを表し、5%は有意水準 5%で分布が同じという帰無仮説が棄却されたことを表す。-は、一方もしくは両方の期間でのデータがないかあるいはデータ数が 10 個未満であることを表している。O/A から E/F までは、period O と period A の比較、period E と period F の比較を意味する。

観測点	領域	O/A	A/B	B/C1	C1/C2	C2/D	D/E	E/F
E.IDES	S	-	-	-	-	-	×	5%
	W	-	-	-	-	-	×	5%
	N	-	-	-	-	-	×	×
	NE	-	-	-	-	-	5%	×
E.YUOS	S	-	-	-	-	-	-	-
	W	-	-	-	-	-	-	-
	N	-	-	-	-	-	×	×
	NE	-	-	-	-	-	5%	5%
SUZU	S	×	×	-	-	-	-	-
	W	-	-	-	-	-	-	-
	N	-	-	-	-	-	-	-
	NE	-	-	-	×	×	×	×
N.SUZH	S	×	×	×	×	×	×	×
	W	-	-	-	-	-	-	-
	N	-	-	5%	5%	5%	5%	×
	NE	-	-	×	5%	×	×	5%

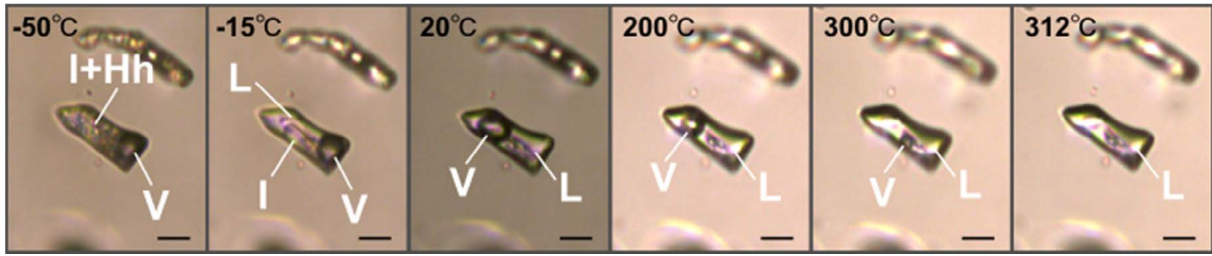


図 2.1.3-3 体包有物の加熱・冷却実験の様子

Hh: ハイドロハライト, I: 氷, L 液相(H₂O-NaCl), V: 気相。スケールバーは 10 μm。

表 2.1.3-4 流体包有物の加熱・冷却実験の結果

ID	T _m (°C)	T _h (°C)	XNaCl	wt% _{NaCleq}	rho	note
01	-10.9	309.1	0.051	14.87	0.87	1 次包有物
02	-10.6	310.3	0.050	14.57	0.86	1 次包有物
03	-10.6	311.3	0.050	14.53	0.86	1 次包有物
04	-8.6	251.8	0.042	12.43	0.92	2 次包有物
05	-5.2	203.4	0.027	8.18	0.93	2 次包有物

流体包有物の氷融点温度(T_m), 均質化温度(T_h), 塩モル分率(XNaCl), 塩濃度(wt%_{NaCleq})及び密度(rho)を示す。

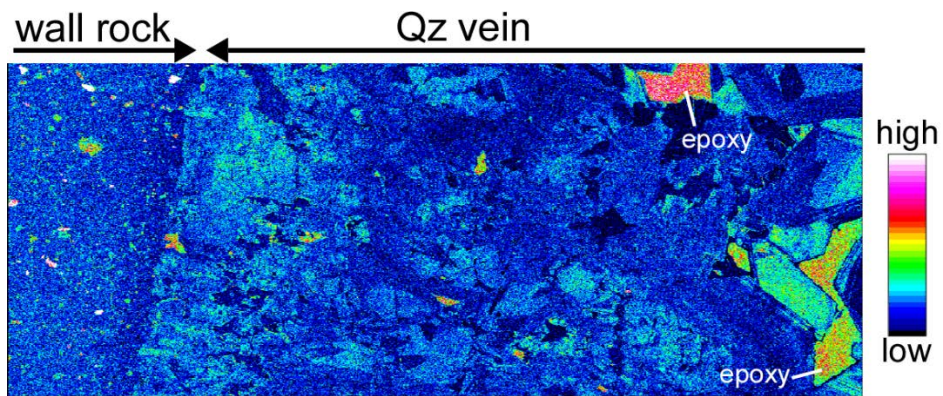


図 2.1.3-4 英脈と壁岩の疑似カラーCL 像

CL 像の縦は 2mm。

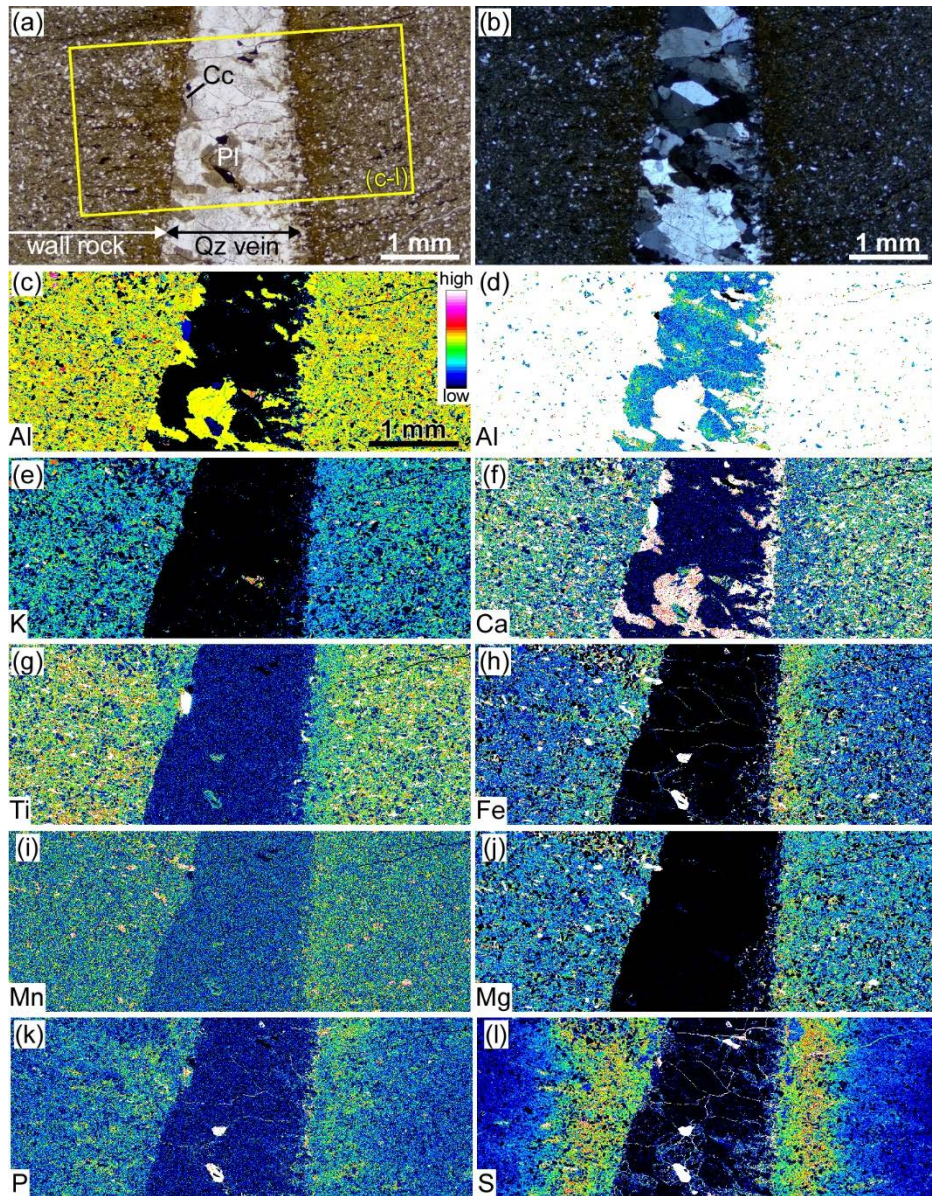


図 2.1.3-5 英脈と壁岩の X 線元素マッピング像

(a) 偏光顕微鏡写真。オープンニコル。(b) (a)と同領域の偏光顕微鏡写真。クロスニコル。(c-l) (a)に示した領域の X 線元素マッピング像。(c, d) Al の元素マッピング像。(c)と(d)はそれぞれ輝度を変化させたものである。石英脈を構成する石英は、Al 濃度の組成累帯構造を持つことが分かる。(e) K の元素マッピング像。(f) Ca の X 線元素マッピング像。(g) Ti の X 線元素マッピング像。(h) Fe の X 線元素マッピング像。(i) Mn の X 線元素マッピング像。(j) Mg の X 線元素マッピング像。(k) P の X 線元素マッピング像。(l) S の X 線元素マッピング像。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 平塚晋也, 浅森浩一, 雑賀 敦, S 波スプリッティ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) 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, pp.15-23, 2024, doi:10.3124/segj.77.15
- 6) 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
- 7) Ma, Z., Zeng, H., Luo, H., Liu, Z., Jiang, Y., Aoki, Y., Wang, W., Itoh Y., Lyu, M., Cui, Y., Yun, S., Hill,
E. M. and Wei, S., Slow rupture in a fluid-rich fault zone initiated the 2024 Mw 7.5 Noto earthquake,
Science, vol.385, 2024, pp.866–871, doi:10.1126/science.ado5143
- 8) Sueoka, S., Iwano, H., Danhara, T., Niwa, M., Kanno, M., Kohn, B.P., Kawamura, M., Yokoyama, T.,
Kagami, S., Ogita, Y. and Hirata, T., Thermochronology of hydrothermal alteration zones in the Kii
Peninsula, southwest Japan: an attempt for detecting the thermal anomalies and implications to the
regional exhumation history, Earth, Planets and Space, vol.75, 177, 2023. doi:10.1186/s40623-023-
01921-5
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 産業技術総合研究所, 日本温泉・鉱泉分布図及び一覽(第 2 版), 産業技術総合研究所地質調
査総合センター数値地質図 GT-2 (CD-ROM), 2005.
- 12) Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Negi, T., Aqueous fluids derived from a subducting slab:
Observed high ³He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula
southwest Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.149, 2006, pp.47–61.
- 13) Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, M., Inamura, Takahashi, H., Yasuhara, M., Ohwada, M.,
Sato, T., Nakama, A., Handa, H., Sumino, H. and Nagao, K., Widespread distribution of ascending
fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and
major element composition of deep groundwater in the Kii Peninsula, southwest Japan, *Geochimica et
Cosmochimica Acta*, vol.182, 2016, pp.173–196.
- 14) 佐脇貴幸, 流体包有物—その基礎と最近の研究動向—, 岩石鉱物科学, vol.32, 2003, pp.23–41.
- 15) Anderson, J.L., Barthm, A.P., Wooswn, J.L. and Mazdab, F., Thermometers and thermobarometers in

- granitic systems, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol.69, 2008, pp.121–142.
- 16) John, T., Gussone, N., Podladchikov, Y.Y., Bebout, G.E., Dohmen, R., Halama, R. Klemd, R., Magna, T. and Seitz, H.-M., Volcanic arcs fed by rapid pulsed fluid flow through subducting slabs, *Nature Geoscience*, vol.5, 2012, pp.489–492, doi:10.1038/ngeo1482
 - 17) Taetz, S., John, T., Bröcker, M., Spandler, C. and Stracke, A., Fast intraslab fluid-flow events linked to pulses of high pore fluid pressure at the subducted plate interface, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.482, 2018, pp.33–43, doi:10.1016/j.epsl.2017.10.044
 - 18) Sakai, S., Kurashimo, E., Iidaka, T., Uchida, N., Yoshida, K., and Okada, T., Seismic Data from Temporary Seismic Observation in the Northeast Noto Peninsula, Central Japan [Data set], Zenodo, 2022, doi:10.5281/zenodo.6767363
 - 19) Tasdan, F., and Yeniay, O., A comparative simulation of multiple testing procedures in circular data problems, *Journal of Applied Statistics*, vol.45(2), 2016, pp.255–269, doi:10.1080/02664763.2016.1273886
 - 20) Agostinelli, C. and Lund, U., R package 'circular': Circular Statistics (version 0.5-1), 2024, URL <https://CRAN.R-project.org/package=circular>.
 - 21) 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
 - 22) Yoshida, K., Uchida, N., Matsumoto, Y., Orimo, M., Okada, T., Hirahara, S., et al., Updip fluid flow in the crust of the northeastern Noto Peninsula, Japan, triggered the 2023 Mw 6.2 Suzu earthquake during swarm activity. *Geophysical Research Letters*, vol.50, 2023, doi:10.1029/2023GL106023
 - 23) Kouketsu, Y., Mizukami, T., Mori, H., Endo, S., Aoya, M., Hara, H., Nakamura, D. and Wallis, S., A new approach to develop the Raman carbonaceous material geothermometer for low-grade metamorphism using peak width, *Island Arc*, vol.23(1), 2014, pp.33–50, doi:10.1111/iar.12057
 - 24) Bakker, R. J., AqSo_NaCl: Computer program to calculate pTVx properties in the H₂O-NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation, *Computers & Geosciences*, vol.115, 2018, pp.122–133, doi:10.1016/j.cageo.2018.03.003
 - 25) 鈴木博之, 原田哲朗, 石上知良, 公文富士夫, 中屋志津男, 坂本隆彦, 立石雅昭, 徳岡隆夫, 井内美郎, 栗栖川地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1図幅)地質調査所, 1979, 54p.
 - 26) Mori, H., Mori, N., Wallis, S., Westaway, R. and Annen, C., The importance of heating duration for Raman CM thermometry: evidence from contact metamorphism around the Great Whin Sill intrusion, UK, *Journal of Metamorphic Geology*, vol.25, 2017, pp.165–180, doi:10.1111/jmg.12225
 - 27) Dohmen, R. and Milke, R., Diffusion in polycrystalline materials: grain boundaries, mathematical models, and experimental data, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol.72(1), 2010, pp.921–970, doi:10.2138/rmg.2010.72.21

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更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ーや、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 6 年度より東北地方の飯豊山地及び太平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 6 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。

隆起速度の評価においては、従来、放射性炭素(¹⁴C 法)年代測定法や火山灰(テフラ)編年学により離水時期が制約された海成・河成段丘の高度分布に基づいてきた。裏を返せば、段丘が存在しない地域や、存在しても上記の年代測定法が適用できない場合(有機物やテフラが含まれない,¹⁴C 法の年代適用範囲を超える等)では、隆起速度の評価が困難になる。そこで本研究では、離水地形の離水時期に基づいた隆起速度推定技術の整備・高度化を目的に、環流旧河谷を指標とする下刻・隆起速度推定法

(高取ほか, 2013⁴⁾; 安江ほか, 2014⁵⁾)の開発・高度化を進めてきた。これは、環流旧河谷から旧流路堆積物を見出し、それらの形成面高度と現河床との比高を、旧流路堆積物の離水時期で除することで河川の下刻速度を算出する方法である。対象とする河川が下刻速度と隆起速度が釣り合う平衡河川であれば、下刻速度を隆起速度に読み替えることができる。従来の¹⁴C年代測定法に基づいたアプローチでは数万年前より古い離水面の編年は困難であったが(安江ほか, 2014⁵⁾)、適用年代範囲が数十万年前に及ぶ長石の光ルミネッセンス(optically stimulated luminescence: OSL)年代測定法を用いることで、紀伊山地の十津川で約28万年以降(小形ほか, 2021⁶⁾)、赤石山脈の大井川で約16~14万年前(原子力機構・電中研, 2023⁷⁾)と離水時期を制約し、それぞれ0.4-0.9 mm/yr, 1.2±0.1-1.3±0.1 mm/yrの下刻・隆起速度が得られた。これらの結果はそれぞれの地域の先行研究(小形ほか, 2021⁶⁾と原子力機構・電中研, 2023⁷⁾の引用文献を参照されたい)と整合的であり、これにより旧流路地形を用いた数十万年前以降の内陸部の隆起評価の可能性が示された。しかし、この手法の適用実績は少なく、信頼性向上のため事例研究の蓄積・拡充が必要である。そこで令和5年度より、大井川沿いの環流旧河谷3地点を対象に事例研究を進めている。令和6年度は各環流旧河谷の形成面高度を推定するために、令和5年度に採取したボーリングコアの肉眼観察、X線CT解析、花粉分析を実施した。

(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と推定される特徴的な非火山性山地を事例対象として、①地磁気・地電流法(Magnetotelluric法:以降, MT法)に基づく地下の高温流体の高精度な検出及び②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、検討事例の蓄積を試みた。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, 1968⁸⁾)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.*, 2012⁹⁾; Fukuda, 2020¹⁰⁾; 福田ほか, 2021¹¹⁾)。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減少する傾向が得られた(Sueoka *et al.*, 2012⁹⁾; 2017¹²⁾)。東西の逆断層運動の寄与率の違い(年代の減少の程度の違い)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.*, 2012⁹⁾)、赤石山脈では東側の逆断層運動による西傾動(Sueoka *et al.*, 2017¹²⁾)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減少する傾向がみられ、ドーム状の隆起モデルで説明できる(Fukuda, 2020¹⁰⁾; Sueoka *et al.*, 2022¹³⁾)。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。本事業では、地下に高温流体が分布する山地について、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隆起を示すのかを検証する(図2.2-1: 福田・末岡, 2021¹⁴⁾)。また、現在の地下構造のスナップショットであるMT法に基づく低比抵抗体の分布と、地質学的時間スケールの熱年代データの分布の比較を行うことで、両者の関連性や低比抵抗体の時空間的安定性について考察する。

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)¹⁵⁾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。令和 5 年度より、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、山地の隆起形態と地下構造等の対応について検討した。太平山地については、山地を北西-南東方向に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った。令和 5 年度は飯豊山地の尾根沿いを中心に山地縦断方向(北西-南東方向)の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。令和 6 年度は、太平山地については、令和 5 年度に実施した MT 法による地下構造探査の結果の再解析及び熱年代分析用の試料採取を実施した。飯豊山地においては、令和 5 年度に採取した試料に熱年代法を適用するとともに、追加の試料採取を実施し、得られた熱年代分布の空間的な傾向や既往研究で推定されている地下構造との関連性について考察を行った。

MT 法に基づく高温流体の検出については、令和 5 年度に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。令和 6 年度は、これらの観測データに S/N 比を向上させるためのリモートリファレンス処理(Gamble *et al.*, 1979¹⁶⁾)を適用した上で、Siripunvaraporn *et al.* (2005)¹⁷⁾による三次元インバージョン法を用いて太平山地周辺の地殻における比抵抗構造を推定した。インバージョンによって得られた三次元比抵抗構造を図 2.2-3 に示す。これによると、地表付近では、大局的に測線の南西側で低比抵抗、北東側で高比抵抗を示す。この傾向は Kanda and Ogawa (2014)¹⁸⁾により推定された比抵抗構造と同様の特徴であるが、太平山の南方では深さ約 2~7 km において小規模な低比抵抗体が認められる。

一般に、浅発地震の地震発生層の下限深度は、地殻内の脆性-延性境界を示し、その温度は約 400°C に相当すると考えられている(Ito, 1992¹⁹⁾)。図 2.2-3b に示す震源分布によると、僅かではあるがこの低比抵抗体よりも深部に浅発地震の震源が分布している。また、地殻熱流量及び地温勾配(Matsumoto *et al.*, 2022²⁰⁾)においても、本地域に高温の熱源を示唆するようなデータは見られない。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。これらのことから、太平山の南方に分布する低比抵抗体は高温のメルトによるものではなく、地殻浅部の局所的な構造不均質(例えば、間隙流体が豊富に含まれる高間隙率の岩体)に起因している可能性が考えられる。なお、太平山の近傍では、新生代後期のカルデラ(Yoshida *et al.*, 2013²¹⁾)あるいはコールドロン(岩本ほか, 2007²²⁾)の存在が指摘されていることから、これらに関わる高間隙率の岩体に対応する可能性も考え得る。

熱年代法に基づく隆起形態の推定では、令和 6 年度は、飯豊山地及び太平山地における熱年代分析のため、現地での露岩状況の把握と地質試料計 10 点(飯豊山地 4 点、太平山地 6 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。一部の試料については追加で分離を実施したが、大半の試料において熱年代分析に十分量のアパタイト及びジルコンが得られた。また、熱年代分析は飯豊山

地において採取された白亜紀～古第三紀花崗岩類を対象に実施し、過年度に採取済みの試料から分離した鉱物を用いた。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、アパタイト及びジルコンの(U-Th)/He(それぞれ, AHe, ZHe) 年代測定はメルボルン大学に依頼した。太平山地については令和 5 年度以降に新たに得られたデータはないため、以降は飯豊山地についてのみ議論を行う。

飯豊山地における年代分析が完了している 12 地点を図 2.2-4 に示す。令和 6 年度に熱年代分析を実施した地点は、図 2.2-4 中における IID 及び FSN17-18 を除く 10 地点であり、新たに 10 点の AHe 年代 ($2.7 \pm 0.2 \text{ Ma} \sim 33.7 \pm 2.1 \text{ Ma}$, 以降誤差範囲は 2σ) 及び 10 点の ZHe 年代 ($4.4 \pm 0.2 \text{ Ma} \sim 43.2 \pm 3.1 \text{ Ma}$) を取得した(図 2.2-5)。飯豊山地において新たに得られた AHe 及び ZHe 年代データは 2σ の誤差範囲を考慮すると、近傍の先行研究の He 年代 (Sueoka *et al.*, 2017²³⁾) 及び AFT 年代 (Fukuda *et al.*, 2019²⁴⁾) とは、閉鎖温度の大小関係と整合的な年代値であった。東西方向の年代値の空間分布に着目すると、飯豊山地の山頂に向かって年代値が減少し、山麓では増加する傾向にある(図 2.2-5)。この年代の減少は、飯豊山地の温度構造が山頂と山麓ではほぼ同様であると仮定すれば、隆起・剝離速度の差に起因するものと解釈できる。、このような空間分布は図 2.2-1(b)の奥羽脊梁山地の傾向に類似しており、飯豊山地もドーム状に隆起している可能性がある。更に、MT 法により検出された低比抵抗体の分布域と、東西方向の熱年代データを照合すると、深度 20 km 以浅に低比抵抗体が張り出している領域と、もっとも若い年代値が得られた領域は概ね整合的である(図 2.2-5)。したがって、地下の高温流体の存在が、飯豊山地のドーム状隆起の原因に関係していると考えられる。なお、熱年代の空間分布と現在の地下の高温領域の分布が対応していることを考えると、約 3 Ma 以降地下の高温領域の賦存域がほとんど変化していない可能性が示唆される。すなわち、このように地下の比抵抗構造と地表の熱年代の分布を比較することで、数百万年スケールにおける地下のマグマだまりの位置の安定性を評価できる可能性がある。本研究結果は年代値の分布と低比抵抗体の分布に関連性が示唆された初めての事例であるが、今後もデータの拡充を行うことで検討を継続したい。

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

令和 5 年度は大井川沿いの環流旧河谷 3 地点(NSY, KNZ, OIZ)を選定し、各地点において環流旧河谷の形成面高度(離水面)の把握を目的としたボーリングコア(NSY-1, KNZ-1, OIZ-1)を採取した(図 2.2-6)。令和 6 年度は、採取した 3 本のボーリングコアを対象に、肉眼観察、X 線 CT 解析を実施した。また、NSY-1 については、花粉分析も実施した。それぞれのコアの分析結果を以下に述べる。

NSY 地点は、東西約 900 m, 南北約 300 m の扇状地的な谷底堆積低地となっており、現在の大井川の流向と逆向きに西から東に傾斜している(図 2.2-7)。環流旧河谷の東端及び西端には西山沢と下中山沢の 2 つの沢が流れており、それぞれの沢と環流旧河谷との出会いには沖積錐や扇状地が発達している。本地域では大井川の現河床との比高 146.5m の地点でボーリングコア(NSY-1)を掘削した。コア観察の結果に基づき、下位より、基盤(混在岩;深度 37.4~39.7 m)、河川流路堆積物(垂円~円礫層;深度 31.9~37.4 m)、湖成堆積物(生痕を含む泥層;深度 23.6~31.9 m)、湖成デルタ堆積物(泥~細粒砂層と角~円礫層の互層;深度 16.8~23.6 m)、扇状地性堆積物(角~円礫層;深度 0.2~16.8 m)、人工埋積物(深度 0.0~0.2 m)と区分した(図 2.2-8)。河川流路堆積物には本流性起源と解釈できる赤色チャート礫が含まれるのに対し、それより上位の層には含まれていない。また、河川流路堆積物の上位の湖成堆積物は、本地域に流れる 2 つの沢と環流旧河谷の出会いに発達する沖積錐や扇状地(図 2.2-7)によってせき止められたことで形成されたと考えられる。湖の形成に関与したと考えられるこれらの地形は、大井川

本流をせき止めるほどの規模とは考えにくい。したがって、大井川本流の蛇行切断（環流旧河谷の形成）後に湖が形成されたと推定し、湖成堆積物と本流性流路堆積物の境界を環流旧河谷の形成面（深度 31.9 m）と認定した。よって、本地点の環流旧河谷の形成面と現河床との比高は 114.6 m となる。花粉分析から湖の発達期間を通してモミ属、ツガ属、トウヒ属を主体とする亜寒帯性針葉樹林が湖の周囲に成立していたと推定できた。このことから、湖は氷期に形成されたものと考えられる。

KNZ 地点は、環流丘陵とその周囲の斜面に囲まれた狭い谷底堆積低地である（図 2.2-9）。環流旧河谷の北側及び環流丘陵の斜面には滑落崖・崩落崖が認められ、それらに伴う崖錐・崩落堆及び地滑り堆が発達している。本地域では、大井川の現河床との比高 95.5m の地点でボーリングコアを掘削した（KNZ-1）。コア観察の結果に基づき、下位より、基盤（混在岩；深度 19.5～21.0 m）、河川流路堆積物（亜円～円礫層及び砂層；深度 13.2～19.5 m）、マスマーブメント堆積物（角～亜角礫層；深度 0.0～13.2 m）と区分した（図 2.2-10）。河川流路堆積物は僅かに赤色のチャート礫を含むため、本流性起源と解釈した。これらの結果より、マスマーブメント堆積物と本流性河川流路堆積物の境界を環流旧河谷の形成面（深度 13.2 m）と認定した。よって、本地点の環流旧河谷の形成面と現河床との比高は 82.3 m となる。

OIZ は、環流丘陵とその周囲の斜面に囲まれた狭い谷底堆積低地である（図 2.2-11）。環流旧河谷を取り囲む斜面全体には滑落崖・崩落崖が認められ、それらに伴う崖錐・崩落堆及び地滑り堆により、環流旧河谷の下流側の形状は不明瞭となっている。本地域では大井川の現河床との比高 46.5 m の地点でボーリングコアを掘削した（OIZ-1）。コア観察の結果に基づき、基盤（混在岩；深度 17.2～20.0 m）とマスマーブメント堆積物（角～亜角礫層；深度 0.0～17.2 m）に区分した（図 2.2-12）。本コアでは、河川流路堆積物が認められなかった。その理由として、マスマーブメントによる河川流路堆積物の削剥、もしくは大井川本流の流下時に本地点の河川流路堆積物の堆積が極小だったことが考えられる。いずれの場合でも環流旧河谷の形成後にマスマーブメント堆積物が堆積したと考えられるため、マスマーブメント堆積物と基盤の境界（深度 17.2 m）を環流旧河谷の形成面と仮定した。よって、本地点の環流旧河谷の形成面と現河床との比高は 29.3 m となる。

(4) 主な成果と課題

非火山地域に潜在する火成活動の時空間的な安定性に関する知見の創出するための手法として、太平山地については、令和 5 年度に取得した MT 探査データに三次元解析を適用した結果、マントルから地殻へ供給される高温流体を示唆する顕著な低比抵抗体は認められなかった。熱年代解析については、両山地において山地規模の系統的な地質試料採取を行い、熱年代法の適用に必要な鉱物を抽出した。また、飯豊山地においては、既存の地質試料を用いて AHe 及び ZHe 熱年代法の適用を行い、低比抵抗構造に対応する領域を中心に年代の減少が見られることが明らかとなった。この傾向は、逆断層によるポップアップモデルでは説明困難であり、奥羽脊梁山地のようなドーム状隆起の傾向を示していると考えられる。さらに、熱年代データと比抵抗構造の位置に対応が見られることから、これらの手法を組み合わせることで地下の高温領域の時空間的な安定性について議論できる可能性がある。今後は AFT 法による熱史逆解析による高精度な熱履歴の復元や、分析数の拡充などにより詳細な検討を試みる。

環流旧河谷を指標とする下刻・隆起速度推定法の開発・高度化では、令和 5 年度に大井川の 3 地点の環流旧河谷で掘削したボーリングコアの肉眼観察、X 線 CT 解析、花粉分析を実施し、環流旧河谷の形成面の認定を行った。2 地点においては、本流性を示唆する赤色チャート礫を含む河川流路堆積物を確認でき、その上位層との境界を形成面とした。残りの 1 地点では、河川流路堆積物を確認できなかったため、基盤岩とマスマーブメント堆積物の境界を形成面と仮定した。今後は、環流旧河谷の形成時期を推定するために、形成面を挟在する堆積物の OSL 年代測定を実施する予定である。

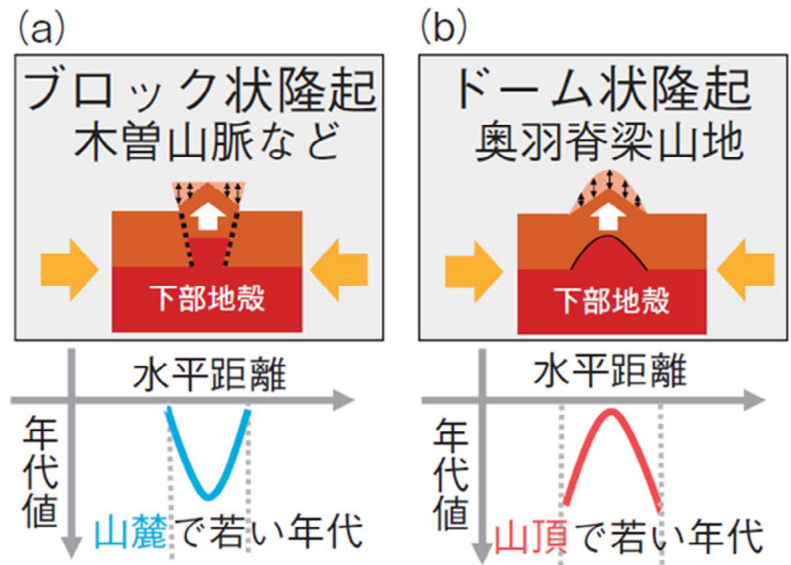


図 2.2-1 (a) 構造性山地と(b)火山性山地の隆起形態とそれらに対応する年代分布(福田・末岡, 2021¹⁴⁾)

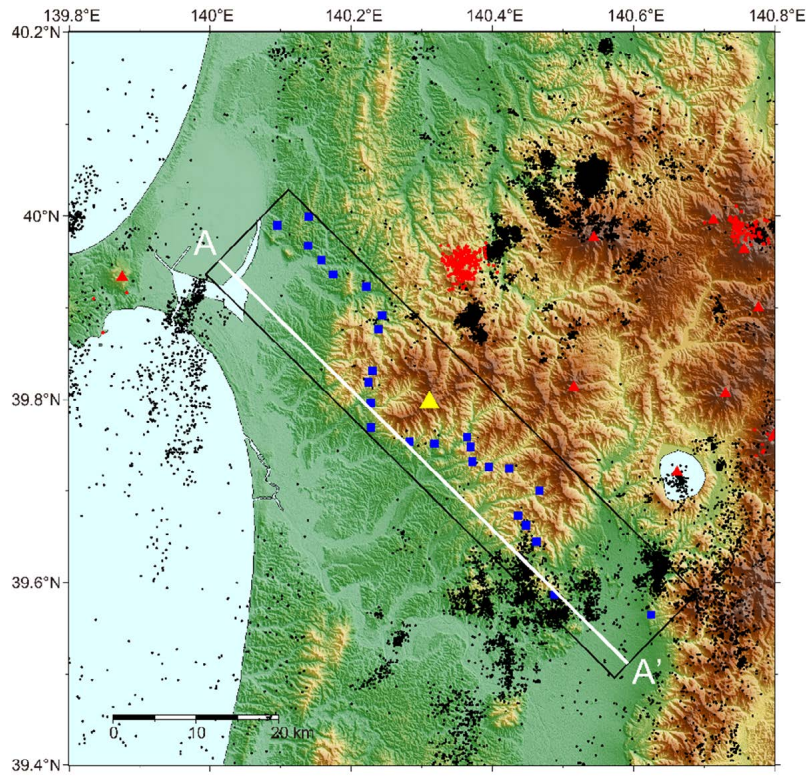


図 2.2-2 MT 観測の観測点分布。

青四角, 赤三角及び黄三角は, それぞれ MT 観測点, 第四紀火山(産業技術総合研究所, 2013²⁵)及び太平山を示す。また, 黒丸及び赤丸は, それぞれ深さ 40 km 以浅で発生した通常地震及び低周波地震の震央(気象庁「地震月報」)を示す。標高データは SRTMGL1 tiles (NASA JPL, 2013²⁶)を用いた。

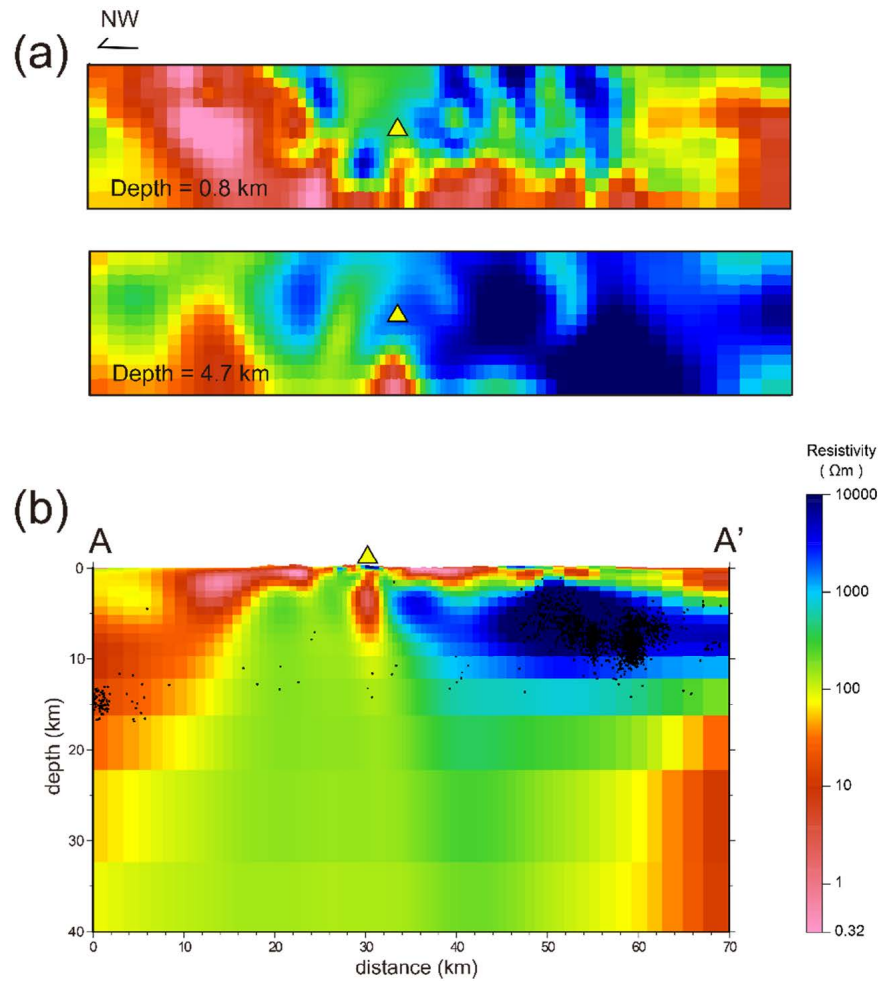


図 2.2-3 三次元解析により推定した比抵抗構造の平面図(a)及び断面図(b)
 平面図及び断面図の位置は、図 2.2-2 中に黒枠及び白線で示す。黄三角及び黒丸は、太平洋山及び通常地震の震源(気象庁「地震月報」)を示す。

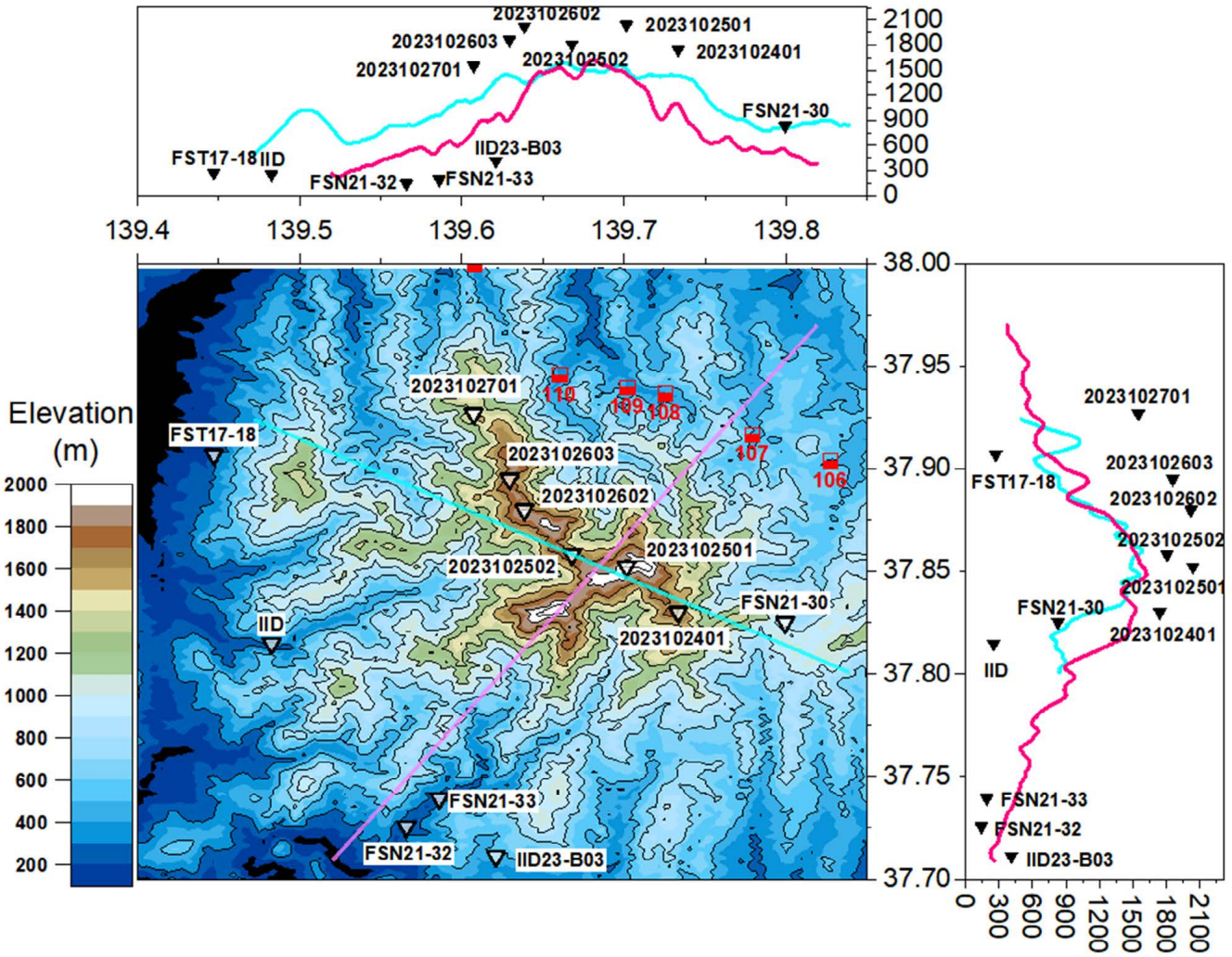


図 2.2-4 飯豊山地における試料採取地点及び標高プロファイル

国土地理院発行の 50 m メッシュ数値標高モデルを基に作図。赤四角の凡例は Umeda *et al.* (2006)¹⁾ で実施された MT 探査地点。

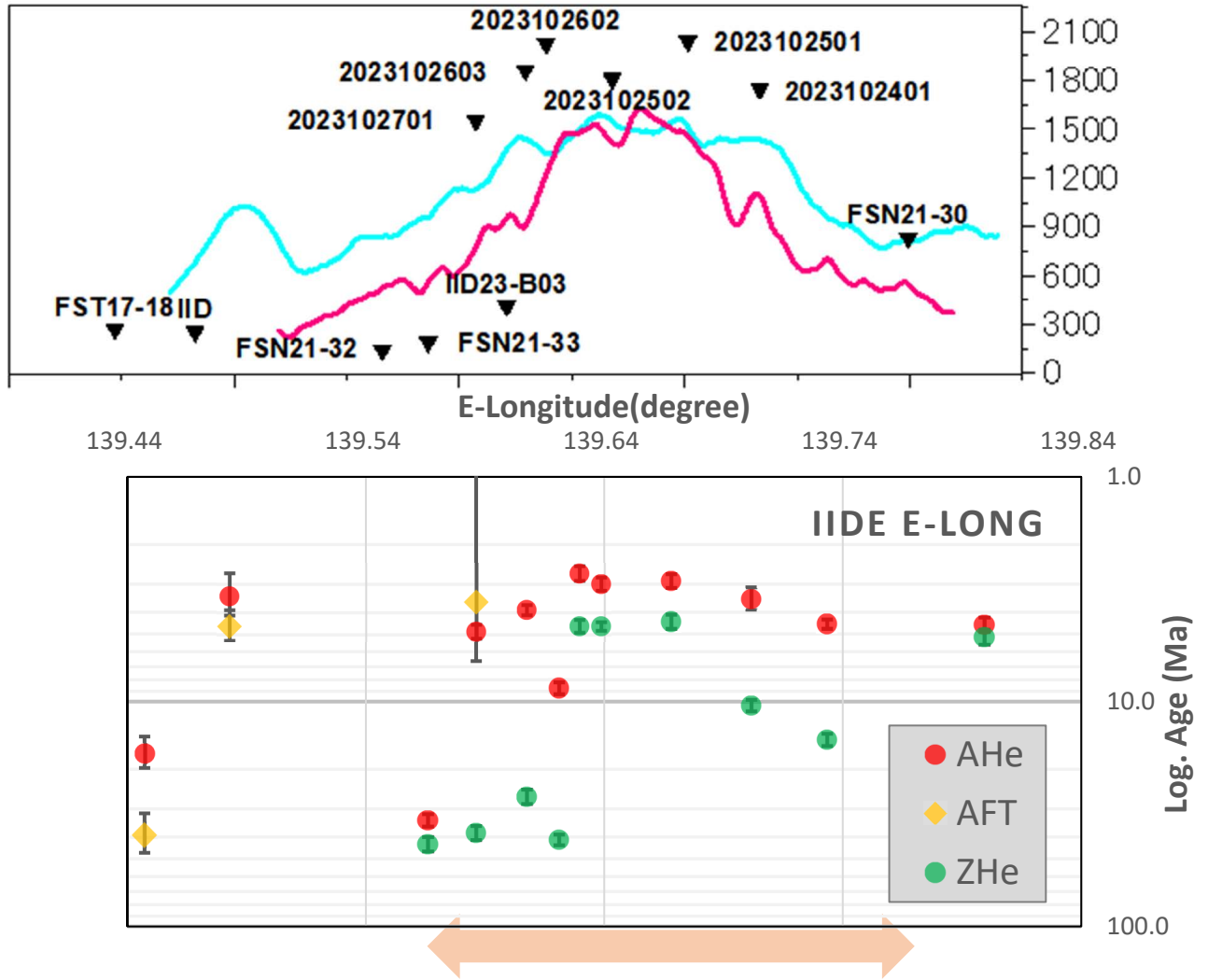


図 2.2-5 飯豊山地における東西方向の標高プロファイル及び熱年代プロット
 橙色の両矢印は Umeda *et al.* (2006)¹⁾で示された 20 km 以浅に低比抵抗体が分布している範囲を示す。IID のデータは Fukuda *et al.* (2019)²⁴⁾より引用。

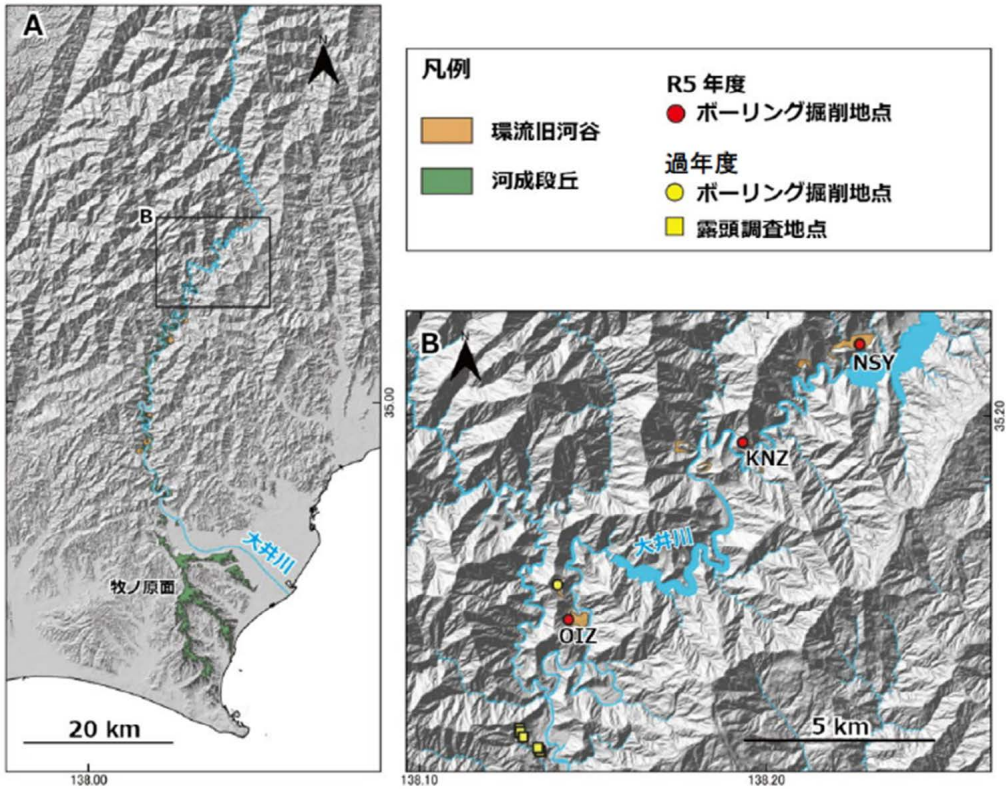


図 2.2-6 離水地形区分図と調査地点
基図には地理院タイルを使用した。

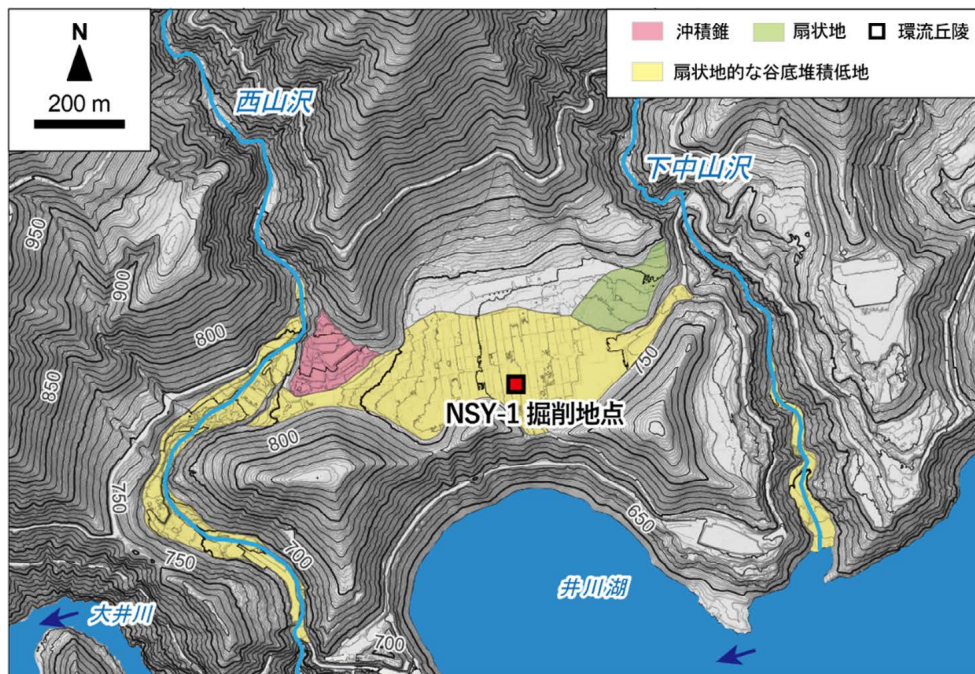


図 2.2-7 NSY-1 のボーリング掘削位置図

基図には、VIRTUAL SHIZUOKA の 0.5 m メッシュの DEM を基に作成した等高線、傾斜量図、陰影起伏図を重ね合わせたものを使用した。

凡例

	盛土		土壌		土壌		泥		砂		基盤 (混在岩 (砂岩・泥岩))		生痕		平行葉理 / 層理		斜交葉理 / 層理		亜円～円礫		角～亜角礫		赤色チャート礫
--	----	--	----	--	----	--	---	--	---	--	---------------------	--	----	--	-----------	--	-----------	--	-------	--	-------	--	---------

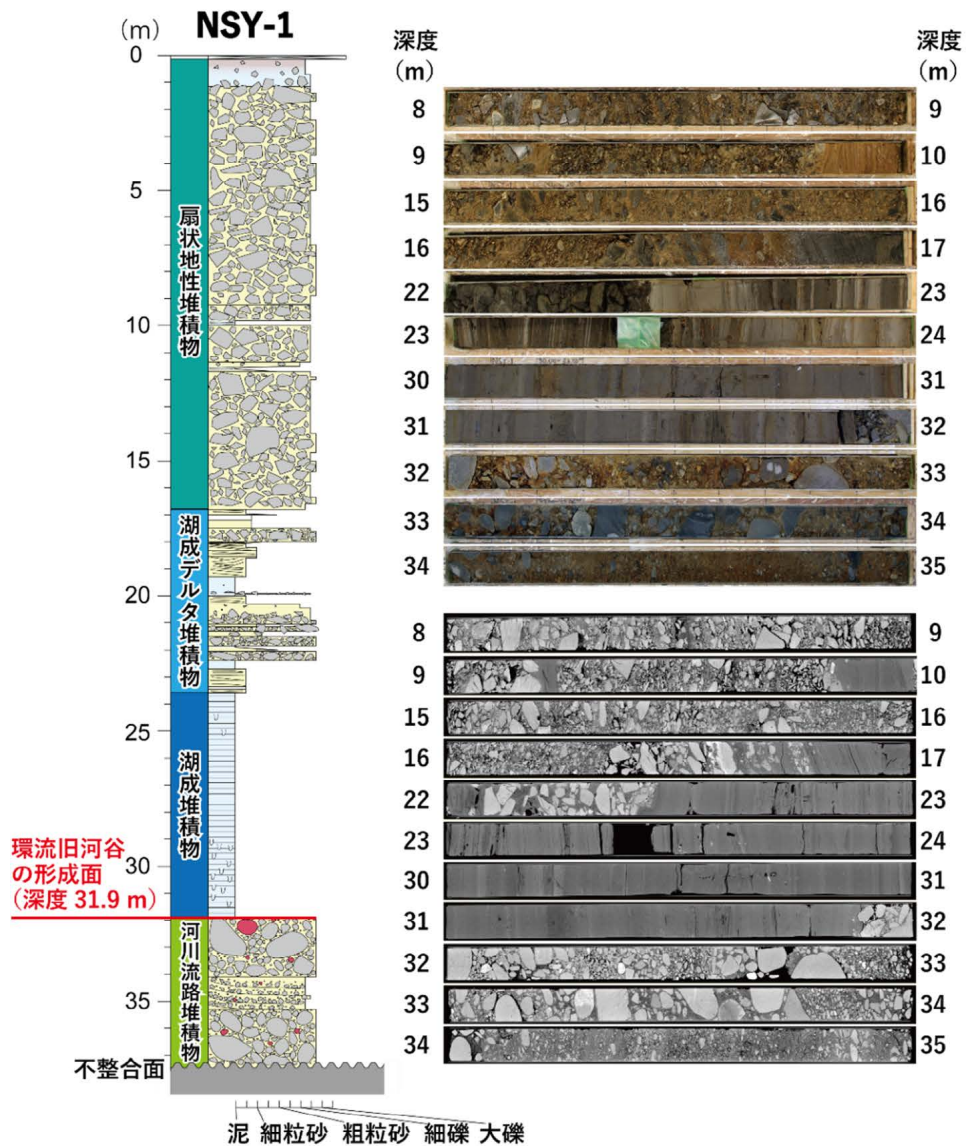


図 2.2-8 NSY-1 コアの柱状図, X 線 CT 及び半裁写真

X 線 CT 及びコア写真は、各堆積物の境界及び代表的な岩相が見られた深度の写真を示す。

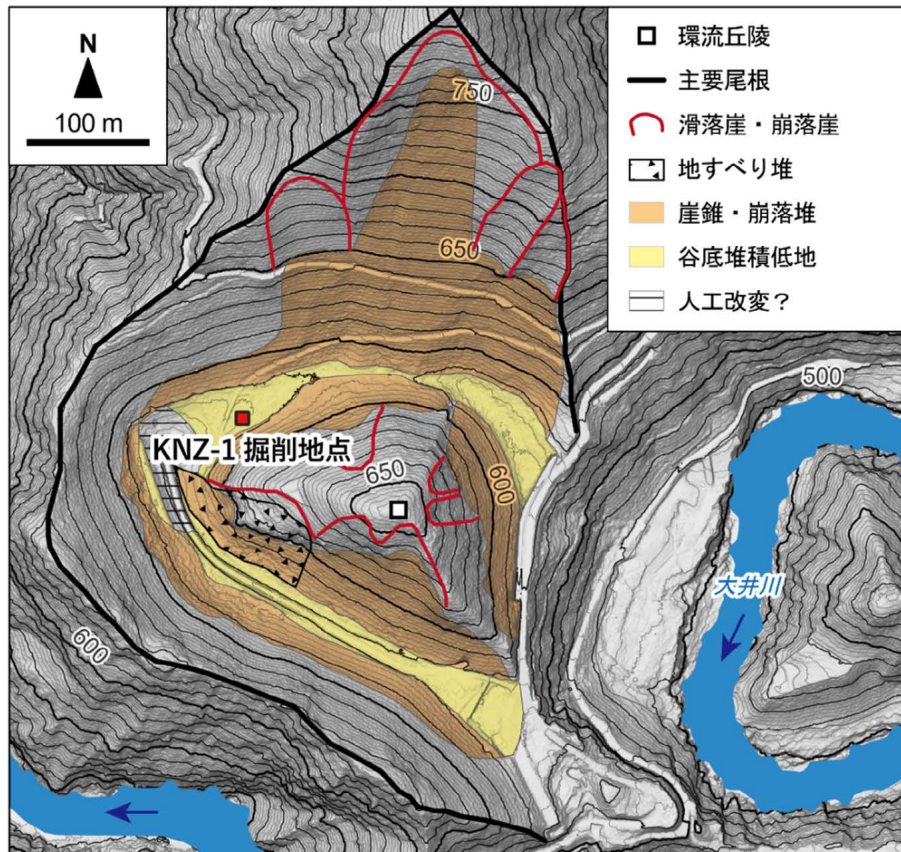


図 2.2-9 KNZ-1 のボーリング掘削位置図

基図には、VIRTUAL SHIZUOKA の 0.5 m メッシュの DEM を基に作成した等高線、傾斜量図、陰影起伏図を重ね合わせたものを使用した。

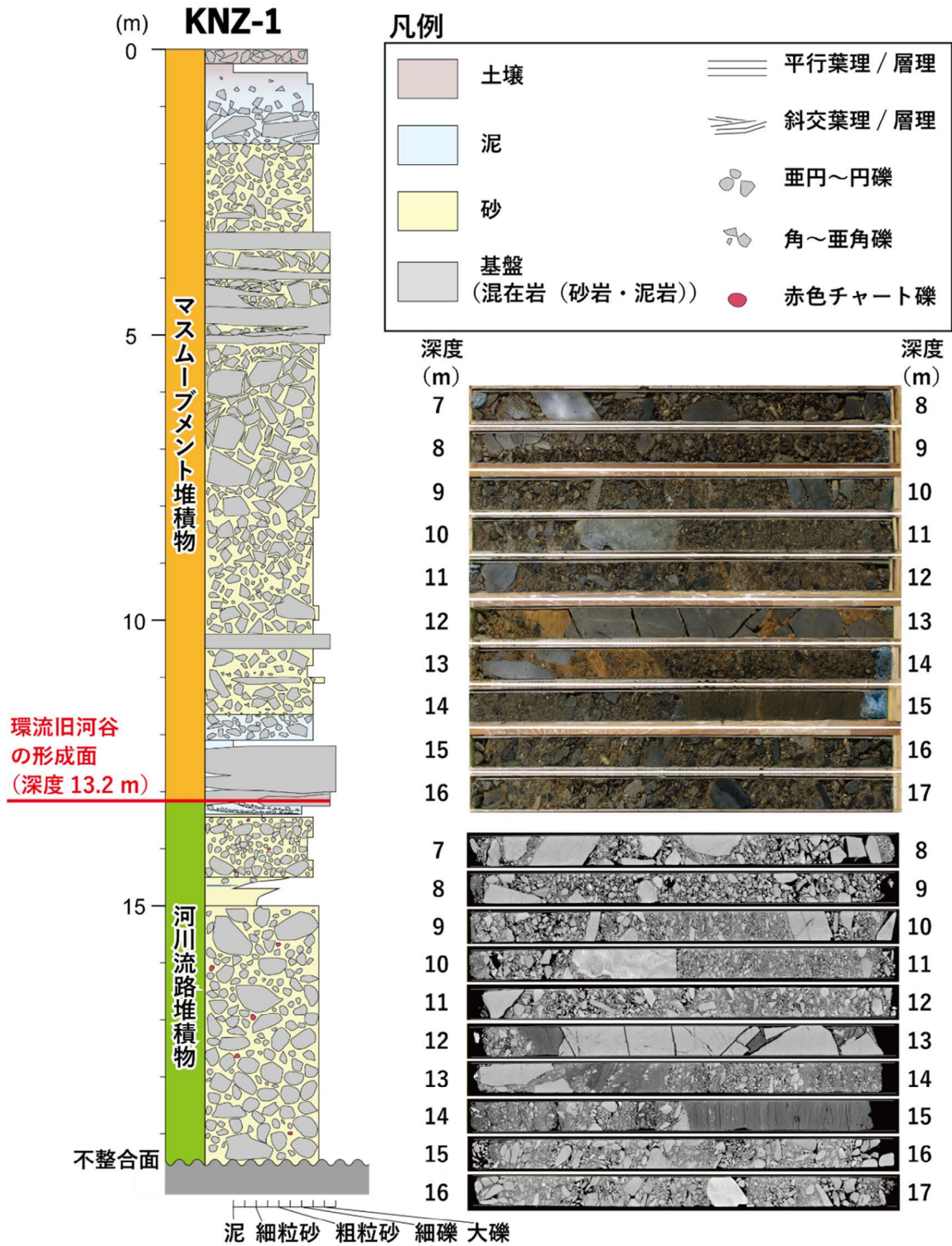


図 2.2-10 KNZ-1 ボーリングコアの柱状図, X線 CT 及び半裁写真
 X線 CT 及びコア写真は, 各堆積物の境界及び代表的な岩相が見られた深度の写真を示す。

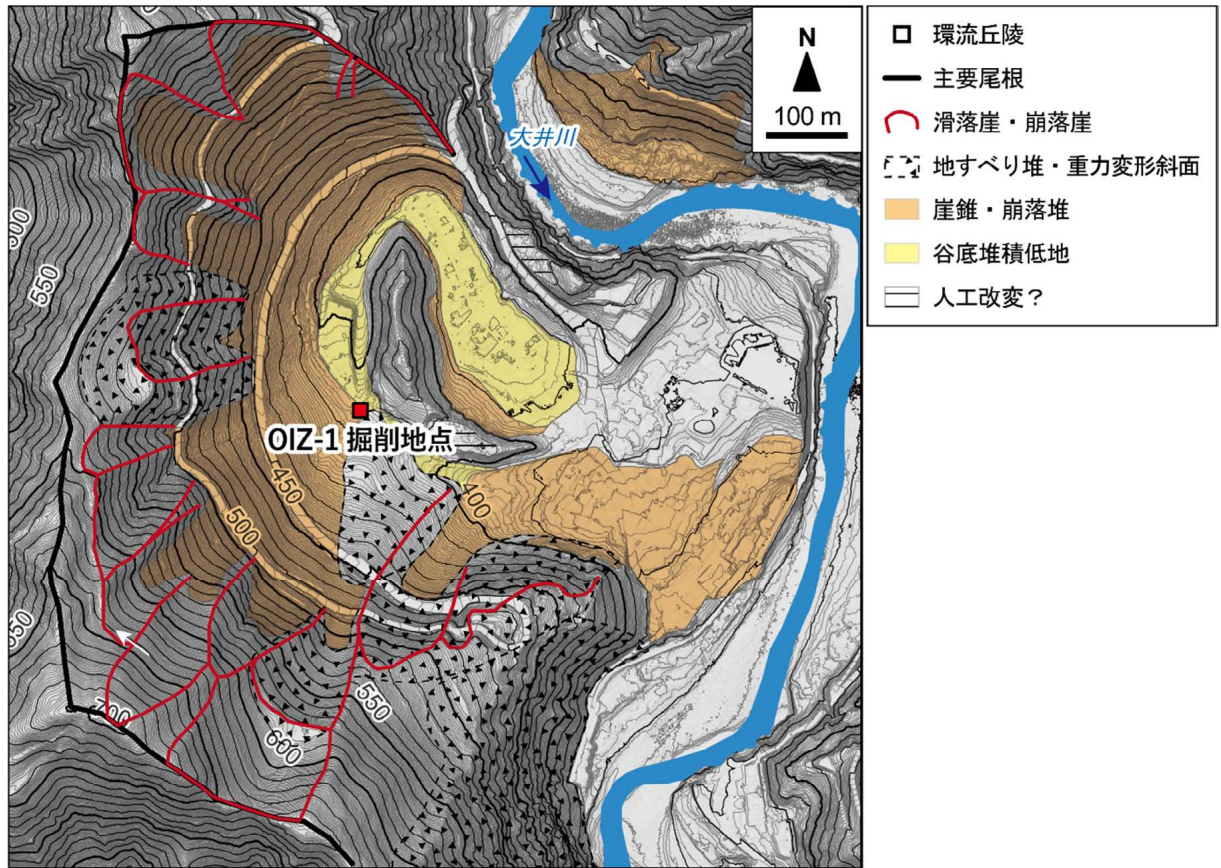


図 2.2-11 OIZ-1 のボーリング掘削位置図

基図には、VIRTUAL SHIZUOKA の 0.5 m メッシュの DEM を基に作成した等高線、傾斜量図、陰影起伏図を重ね合わせたものを使用した。

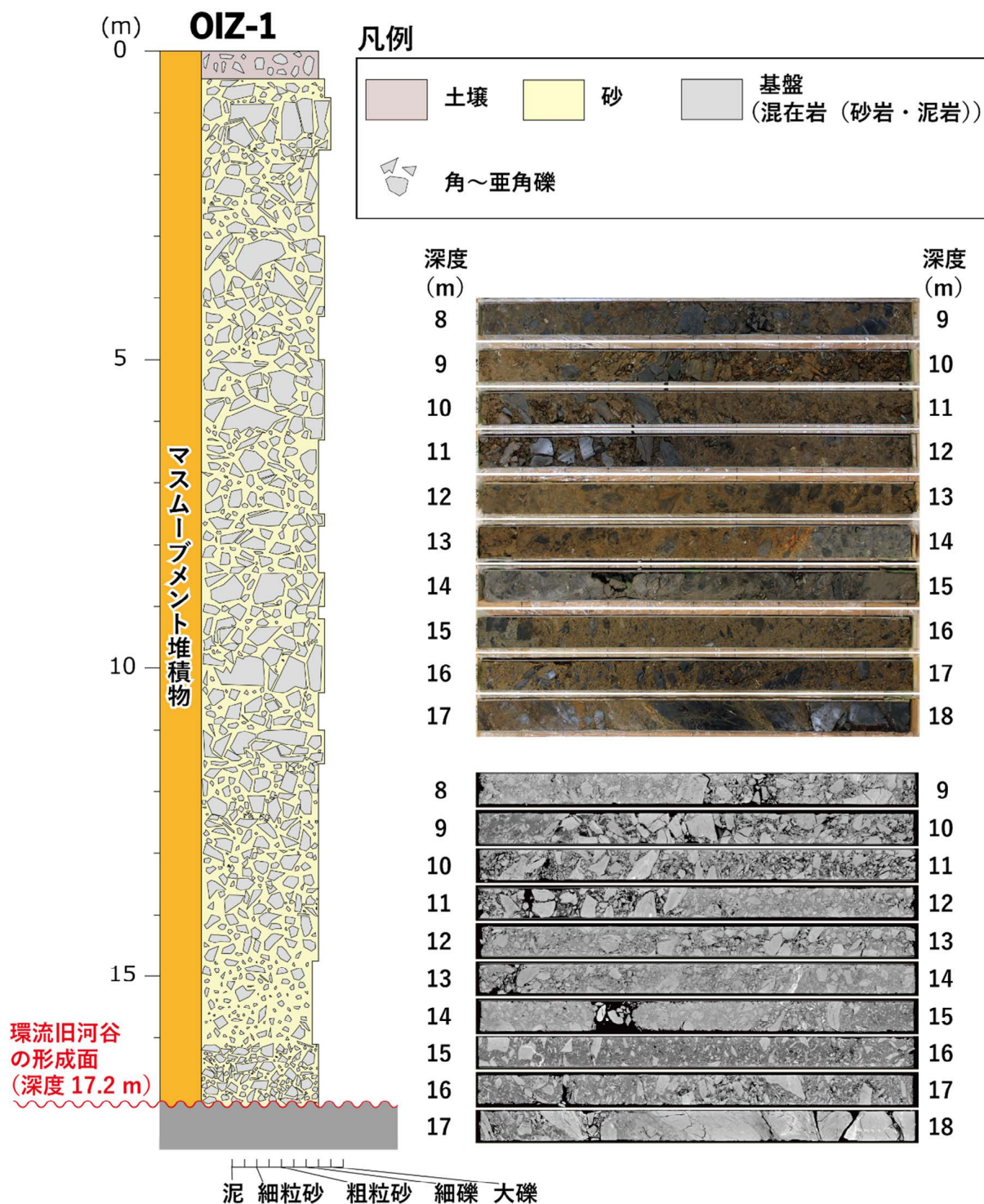


図 2.2-12 OIZ-1 ボーリングコアの柱状図, X線 CT 及び半裁写真
 X線 CT 及びコア写真は, 基盤と堆積物との境界及び代表的な岩相が見られる深度を示す。

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) 高取亮一, 安江健一, 谷川晋一, 二ノ宮 淳, 日本列島における環流旧河谷分布データベースの作成, *JAEA-Data/Code* 2012-028, 2013, 15p, doi:10.11484/jaea-data-code-2012-028
 - 5) 安江健一, 高取亮一, 谷川晋一, 二ノ宮 淳, 棚瀬充史, 古澤 明, 田力正好, 内陸部における侵食速度の指標に関する検討: 環流丘陵を伴う旧河谷を用いた研究, *地質学雑誌*, vol.120, 2014, pp.435–445, doi:10.5575/geosoc.2014.0045
 - 6) 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: 紀伊半島の事例, *第四紀研究*, vol.60, 2021, pp.27–41, doi:10.4116/jaqua.2007
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) Fukuda, S, Thermochronometric investigations of the northeast Japan Arc, Doctoral Thesis of Kyoto University, 2020.
 - 11) 福田将真, 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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
 - 14) 福田将真, 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—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—, 原子力機構の研究開発成果 2021-22, 2021, p.86.

- 15) 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
- 16) Gamble, T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J., Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, vol.44, 1979, pp.53–68.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Ito, K., Cutoff depth of seismicity and large earthquakes near active volcanoes in Japan, *Tectonophysics*, vol.217, 1992, pp.11–21.
- 20) Matsumoto, T., Yamada, R., Iizuka, S., Heat flow data and thermal structure in northeastern Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.74, no.1, 2022, 155.
- 21) Yoshida, T., Kimura, J., Yamada, R., Acocella, V., Sato, H., Zhao, D., Nakajima, J., Hasegawa, A., Okada, T., Honda, S., Ishikawa, M., Prima, O. D. A., Kudo, T., Shibazaki, B., Tanaka, A., Imaizumi, T., Evolution of late Cenozoic magmatism and the crust-mantle structure in the NE Japan Arc. *Geological Society, London, Special Publications*, vol.385, 2013, pp.335–387, doi:10.1144/SP385.15
- 22) 岩本達也, 水田敏夫, 石山大三, 秋田県新第三紀仁別花崗岩体と周辺に分布する酸性火山岩類との地球化学的関連性, 日本鉱物科学会 2007 年度年会講演要旨集, G2-P01, 2007, doi:10.14824/jakoka.2007.0.22.0
- 23) Sueoka, S., Tagami, T., Kohn, B. P., First report of (U–Th)/ He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: implications for the long-term inelastic deformation. *Earth, Planets and Space*, vol. 69:79, 2017, pp.1–18, doi:10.1186/s40623-017-0661-z
- 24) 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
- 25) 産業技術総合研究所, 日本の火山 第四紀火山, 2013, https://gbank.gsj.jp/volcano/Quat_Vol/index.html (参照:2025 年 2 月 26 日).
- 26) NASA JPL, NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second, 2013, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, doi:10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003 (参照: 2025 年 2 月 26 日).

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⁾, 2024⁵⁾)。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(原田ほか, 2023⁶⁾)。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, 2021⁷⁾)。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(Yokoyama *et al.*, 2018¹⁾)。

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や新規技術を開発・整備することで、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 6 年度は、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、令和 5 年度末に LA-ICP-MS の新たな導入系としてフェムト秒レーザーアブレーション装置を導入したため、これを用いて U-Pb 年代測定法等の既存技術の高度化・高精度化を行うとともに、これまで対象としてきたジルコンだけでなくチタナイトなど他の鉱物の U-Pb 年代測定に係る技術整備や、より形成年代の若い(数万年～数十万年)試料の年代学的評価のために、U-Th 非平衡年代測定法の整備を行った。さらに、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 既存分析技術及び開発中の技術の実試料への適用と各手法の高度化

令和 5 年度に引き続き、ジルコンや炭酸塩鉱物の U-Pb 年代測定、ジルコンの Hf 同位体分析、アパタイトの Sr 同位体分析、火山ガラスの微量元素分析等、既に確立している分析技術を、各種試料に適宜適用し、データの蓄積を図った。令和 5 年度末に導入したフェムト秒レーザーアブレーション装置 (Jupiter solid nebulizer; 株式会社エス・ティー・ジャパン製)を用いて U-Pb 年代測定等の分析条件を検討・最適化し更なる高精度化を図った。その結果、U-Pb 年代測定に係る分析では、これまで利用していたエキシマレーザーアブレーション装置 (Analyte G2; Photon-Machines 製)と比較して、より精確な(特に真度の高い)同位体分析が可能となることが分かった。一方で、装置の試料室の構造や特性上、エキシマレーザーに導入しているような分析試料の形状(主として 1 インチマウントや薄片サイズ)では、ICP 質量分析へのキャリアガスの乱流を生じさせる要因となり、特に元素比分析に大きな影響が生じることが分かった。これを避けるためには、分析試料は比較的コンパクト(5～10 mm 角程度)な試料の形状に加工する必要があるが、また、試料室の上面と試料の上面との間(ガスの流れる領域)のボリュームは小さくする必要があることも判明した。令和 7 年度以降は、必要に応じて Hf 同位体分析等にもこのフェムト秒レーザーアブレーション装置を試料導入系として使用していく予定である。

また、令和 5 年度に引き続き、湿式 ICP 質量分析による断層ガウジ試料の Rb, Sr 同位体組成取得のため、前処理手法の改良及びその手法の実試料への適用を行った。Sr を効率的に単離する化学分離手法を整備し、六甲山地の五助橋断層(活断層)に適用した。断層活動面からの距離に応じて、Sr 同位体組成が低くなる傾向が明らかになった。今後は、微量元素組成等の化学的情報と合わせて、断層における流体岩石相互作用について考察していく予定である。

② 既存技術の適用性拡大

令和 5 年度に引き続き、U-Pb 年代測定や LA-ICP-MS を用いた微量元素測定等の既存技術をジルコン以外の造岩鉱物へ適用する検討を進めた。令和 6 年度は、特に U-Pb 年代測定をチタナイトへ適用する検討を進めた。令和 5 年度までにチタナイトの U-Pb 年代測定に必要な、元素比(U/Pb 比)や Pb 同位体組成及び形成年代が報告されている参照物質として MKED1 ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb} = 3.7629$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.09600$, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 1521.02 ± 0.55 Ma, 1518.87 ± 0.31 Ma, and 1517.32 ± 0.32 Ma, respectively; Spandler *et al.*, 2016⁸⁾) を入手した。また、年代既知のチタナイトとして Mt. Dromedary Complex titanite (weighted mean of hornblende and biotite K-Ar age and whole rock and biotite Rb-Sr age: 98.7 ± 0.6 Ma; Green, 1985⁹⁾) を入手した。令和 6 年度は、チタナイトの分析から得られる年代値の妥当性の評価に適した深成岩体として、遠野複合深成岩体や土岐花崗岩体等、これまでの研究から形成年代(ジルコンの U-Pb 年代)や熱史が理解されている岩体を選択し、チタナイトの産状等、岩石記載を行った。今後はこのような岩石記載を行ったチタナイトに対して LA-ICP-MS による U-Pb 同位体分析を実施し、年代学的な評価を行っていく。

また、これまで火山ガラスを対象に確立してきた LA-ICP-MS による微量元素分析を、アパタイトへ適用する検討も進めた。火成岩に含まれるアパタイトの微量元素組成は、マグマの結晶分化の程度や酸化・還元状態などを反映していると考えられ、火成活動の制約に資する。フェムト秒レーザーアブレーション装置 (Jupiter solid nebulizer) とトリプル四重極型 ICP 質量分析装置 (iCAP TQ; Thermo Fisher Scientific) を用いて分析条件の検討・最適化を行った。 ^{43}Ca を内標準同位体とし、微量元素組成が参照できる 2 種類のアパタイト (Durango, Mud Tank) を用いて、分析手法の妥当性を評価した。その結果、先行研究 (Yang *et al.*, 2014¹⁰) と整合的な希土類元素パターンが得られた (図 2.3.1-1)。Mud Tank の希土類元素分析では、Durango に比べ、元素濃度が低いため、分析値のばらつきが大きくなった。今後は、開発した手法を実試料へ適用し、また岩石に含まれる主要・微量鉱物への適用性拡大を目指していく予定である。

③ 湿式分析による高精度同位体分析手法の確立

令和 6 年度は導入した表面電離型質量分析装置 (Triton-XT; Thermo Fisher Scientific) を用いた熱イオン化質量分析法 (TIMS) による各種同位体分析を高精度に実施するため、分析対象元素を効率的に岩石試料等から単離する手法の検討を行った。特に火山・火成活動の評価に有用な、地球化学データの取得・拡充のため、火成岩等の岩石試料について、1 つのフラクションから Sr, Nd, Pb 同位体を効率よく分離できるような化学分離プロセスを検討した。イオン交換樹脂及び Sr spec 樹脂による元素分離を試験し、それぞれ溶離曲線を取得した結果、陽イオン交換樹脂では、Sr, Nd が分離されずに共に溶離する部分を確認され、Sr, Nd を陽イオン交換樹脂だけでは分離することが難しいことが確認された。一方で、Sr spec 樹脂であらかじめ Sr を分離し、その後陽イオン交換樹脂による元素分離で Nd を分離することで、Sr, Nd は双方が、また他の主要元素からも分離されることが分かった (図 2.3.1-2)。今後は、同位体参照試薬や標準岩石試料を元素分離した試料について TIMS による同位体分析を実施していく。

④ U-Th 非平衡年代測定技術の整備

第四紀の火山噴出物 (テフラ)・火山岩・深成岩・凝灰岩の年代の決定に有用な手法の整備として、Niki *et al.* (2022)¹² で提唱されたレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法 (LA-ICP-MS) によるジルコンの U-Th 非平衡年代測定の手法に倣い、令和 5 年度末に東濃地科学センターに導入した高速多点フェムト秒レーザーアブレーション装置 (Jupiter solid nebulizer) とトリプル四重極型 ICP 質量分析装置 (iCAP TQ) を用いた分析手法の整備を試みた。手法の妥当性については、放射平衡に達しているジルコン参照物質や年代既知の試料を用いて検証した。令和 6 年度は、 $^{230}\text{Th}^+$ の測定感度の最大化及び $^{230}\text{Th}^+$ に干渉する同重体 (m/z 230) の信号強度の低減に係る分析条件の探索を試みた。また、最適な測定条件下でジルコン参照物質の測定を実施したところ、適切に測定できていることが確認された。今後は、1 万年よりは古く 50 万年前よりも形成年代が若い第四紀のジルコン参照物質 (例えば、洞爺テフラ中のジルコン等) について測定を実施し、整備した技術の妥当性の検証をさらに進めていく。

(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、「既存分析技術及び開発中の技術の実試料への適用と各手法の高度化」、「既存技術の適用性拡大」、「湿式分析による高精度同位体分析手法の確立」、「U-Th 非平衡年代測定技術の整備」を進めた。

既存分析技術及び開発中の技術の実試料への適用と各手法の高度化では、令和 5 年度末に導入したフェムト秒レーザーアブレーション装置を用いて U-Pb 年代測定等の分析条件を検討・最適化し、さらなる高精度化を図った。今後は、既存のエキシマレーザーアブレーション装置と併用して LA-ICP-MS に

利用していくとともに、Hf 同位体分析等への適用性も確認していく。また、Sr を効率的に単離する化学分離手法を整備し、六甲山地の五助橋断層(活断層)を対象とした Sr 同位体分析を実施した。今後は、微量元素組成等の化学的情報と合わせて、断層における流体岩石相互作用について考察していく予定である。

既存技術の適用性拡大では、これまで進めてきたチタナイトの U-Pb 年代測定法の整備について、チタナイトの分析から得られる年代値の妥当性の評価に適した深成岩体を選択し、岩石薄片試料中のチタナイトの産状等、岩石記載を行った。今後はこのような岩石記載を行ったチタナイトに対して LA-ICP-MS による U-Pb 同位体分析を実施し、年代学的な評価を行っていく。また、これまで火山ガラスを対象に進めてきた LA-ICP-MS による微量元素分析をアパタイトに適用し、分析技術の整備を行った。今後は、開発した手法を実試料へ適用し、岩石に含まれる鉱物への更なる適用性拡大を目指す。

湿式分析による高精度同位体分析手法の確立では、火山・火成活動の評価に有用な、地球化学データの取得・拡充に資するため、火成岩等の岩石試料について、1 つのフラクションから Sr, Nd, Pb 同位体を効率よく分離できるような化学分離プロセスを検討した。今後は、同位体参照試薬や標準岩石試料を元素分離した試料について TIMS による同位体分析を実施していく。

U-Th 非平衡年代測定手法の整備では、フェムト秒レーザーアブレーション装置とトリプル四重極型 ICP 質量分析装置を用いた分析手法の整備を試みた。また、放射平衡に達しているジルコン参照物質や年代既知の試料を用いて手法の妥当性を検証した。今後は、洞爺テフラ中のジルコン等について測定を実施し、整備した技術の妥当性の検証をさらに進めていく。

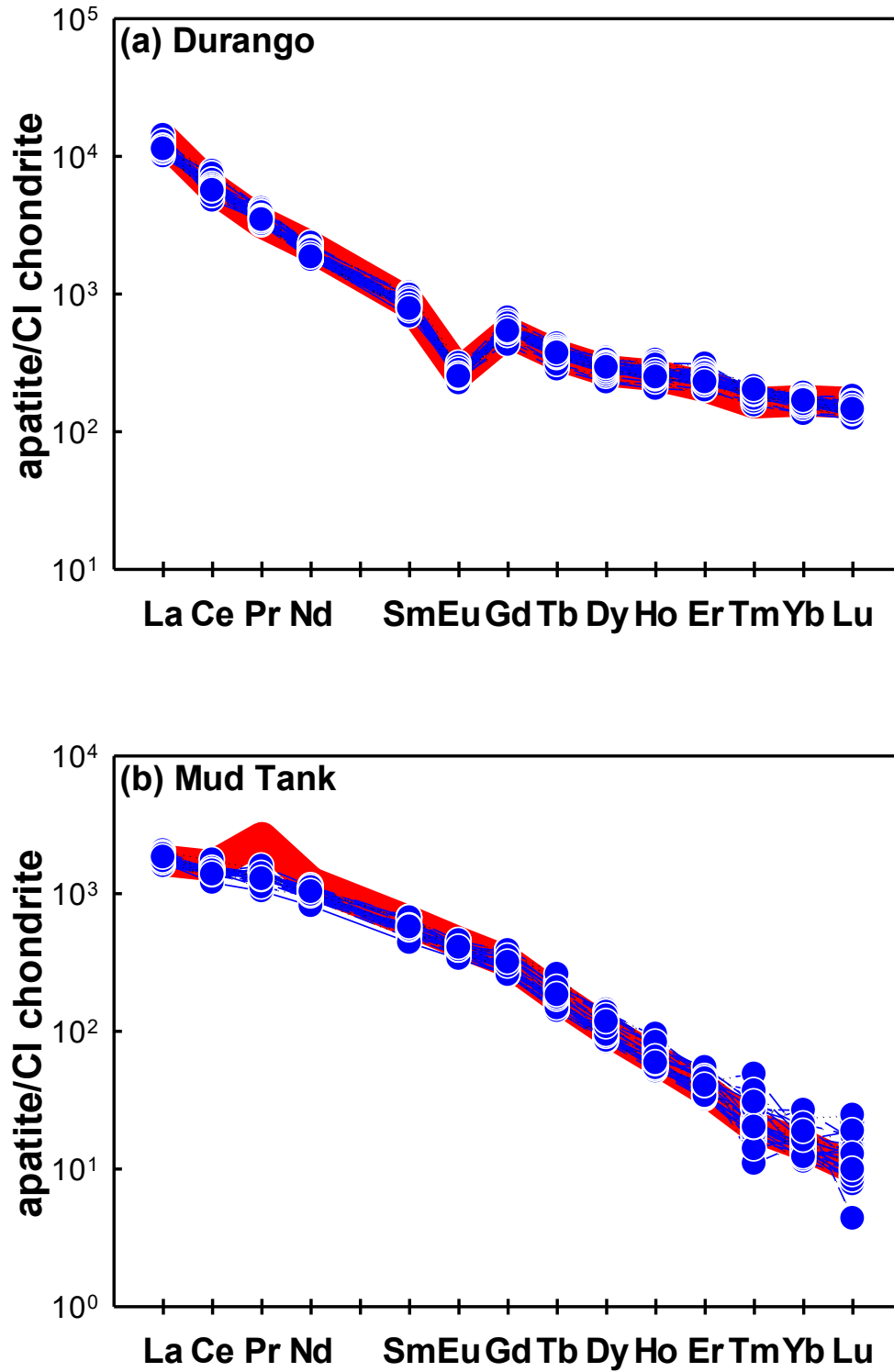


図 2.3.1-1 CIコンドライト (McDonough and Sun, 1995¹¹⁾) の化学組成で規格化した希土類元素パターン
 (a) Durango, (b) Mud Tank
 赤色: Yang *et al.*, 2014¹⁰⁾ の報告値, 青色: 本研究での分析値

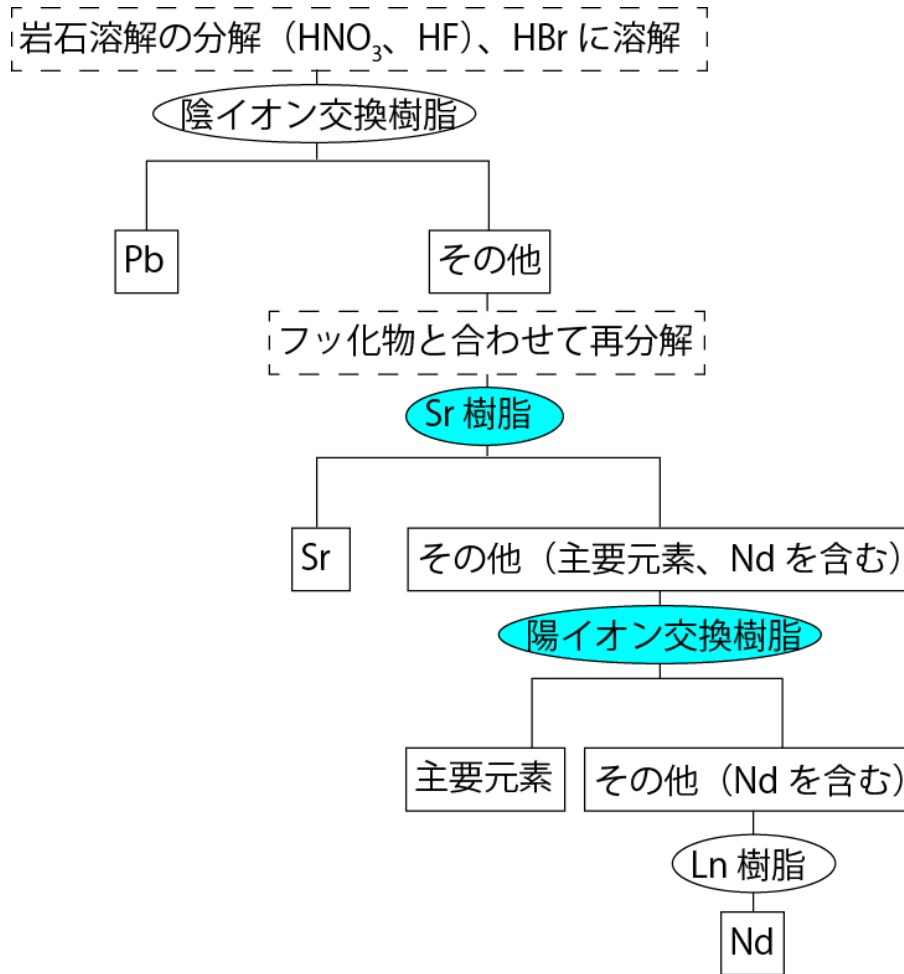


図 2.3.1-2 Sr, Nd, Pb の元素分離フロー

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, doi:10.2343/geochemj.2.0541
- 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) Yuguchi, T., Kato, T., Ogita, Y., Watanabe, M., Yamazaki, H., Kato, A., Itoh, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Ohno, T., Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.265 106091, 2024, doi:10.1016/j.jseaes.2024.106091
 - 6) 原田拓也, 長田充弘, 小北康弘, 鏡味沙耶, 横山立憲, 北部北上山地, 下部白亜系原地山層の流紋岩および凝灰岩のジルコン U–Pb–Hf 同位体と全岩化学組成, *地学雑誌*, vol.132, 2023, pp.57–65, doi:10.5026/jgeography.132.57
 - 7) 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., doi:10.11484/jaea-testing-2021-001
 - 8) 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, doi:10.1016/j.chemgeo.2016.01.002
 - 9) 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, doi:10.1016/0168-9622(85)90023-5
 - 10) Yang, Y. H., Wu, F. Y., Jin-Hui Yang, J. H., Chew, D. M., Xie, L. W., Chu, Z. Y., Zhang, Y. B. and Huanga, C., Sr and Nd isotopic compositions of apatite reference materials used in U–Th–Pb geochronology, *Chemical geology*, vol.385, pp.35–55, 2014, doi:10.1016/j.chemgeo.2014.07.012
 - 11) McDonough, W. F. and Sun, S. S., The composition of the Earth. *Chemical geology*, vol.120, 1995, pp.223–253, doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4
 - 12) 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, 2023, pp.589–602, doi:10.1111/ggr.12458

2.3.2 捕獲電子を用いた年代測定技術

(1) はじめに

光ルミネッセンス(optically stimulated luminescence: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。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年代測定法の利用及び高度化を行っている。令和6年度は、礫試料を対象としたOSL年代測定法の整備を進めた。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

従来のルミネッセンス年代測定法は、試料の粒径が泥～砂サイズの試料にほぼ限定されていたが、近年、礫試料のコアを円盤状に切断し、それを直接測定する方法が開発され、礫のOSL年代測定が可能となった(塚本, 2018¹⁾)。しかし、国内での礫のOSL年代測定の適用事例は未だ少なく、事例蓄積による信頼性の向上が必要である。特に、日本列島の石英のOSL感度は低く、泥～砂サイズの石英であってもOSL年代測定は困難であるため(伊藤, 2021²⁾; 田村, 2021³⁾)、石英を対象とした礫のOSL年代測定の適用性の検討は重要である。また、礫のOSLに対する年間線量率の算出方法は、現状ケースバイケースであるため、体系化が課題である。本研究では、OSL法の適用範囲の拡充を目的に、礫のOSL年代測定の事例を蓄積し、信頼性の向上、適用条件の整備、手法の体系化を行う。令和6年度は礫試料の整形手順の整備とOSL測定プロトコルの検討を行った。

(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)⁴⁾でL₁面(MIS 5e; 小池・町田編, 2001⁵⁾)に対比される海成段丘の堆積物を対象に事例の蓄積を行う。試料を採取した露頭は平行葉理が発達した層厚5m以上の極細粒砂層とそれを覆う斜交層理が発達した層厚4m程度の砂礫層から成る。砂層のカリ長石からは、105±4～137±4 kaのOSL年代が報告されている(Ogata *et al.* 2024⁶⁾)。その他、対象露頭の詳細についてはOgata *et al.* (2024)⁶⁾を参照されたい。本研究では、砂礫層中の砂岩礫試料(HTK-R1)のOSL年代測定を目的とする。

礫のOSL年代測定では、試料内部の等価線量のプロファイルを評価する必要があるため、試料表層から内部にかけて連続スライス試料の作成が重要となる。本研究では、Ishii *et al.* (2022)⁷⁾とIshii (2024)⁸⁾に倣い、次の手順で試料整形を行った。なお、試料整形及びOSL測定は、露光によるOSL信号の減衰を防ぐため、暗室化で行った。まず、ボール盤とダイヤモンドホールソーを用いてHTK-R1をコアリングした。ダイヤモンドホールソーはくり抜いたコアの直径が約10mmになるものを選択した。また、コアリングの際は、摩擦熱によるOSL信号の減衰を防ぐため、冷却水をかけ続けた。次に、コア試料を切断し、スライス試料を作製した。等価線量のプロファイルを密に取るためには、可能な限り薄く切断することが好ましい。本研究では、摩擦熱を抑えることも考慮し、低速精密切断機(Isomet LS, Buchler)を用いて厚さ約1mmに切断した。最後に、スライス試料を超音波洗浄し、整形中に生じた粉末を除去した。

スライス試料中の石英と長石を対象にOSL測定を行った。一般的に、砂試料のOSL測定(単一鉱物測定)において、石英OSLは青色、カリ長石OSLは赤外光で励起させる。石英は赤外光に反応しない

が、一方でカリ長石は青色光にも反応する特性を持つ。そのため、礫のスライス試料中の石英 OSL を選択的に測定するためには、事前に長石 OSL を除去する必要がある。そこで本研究では、赤外光励起後に青色光励起を行う post-infrared (IR) OSL プロトコルによってスライス試料の石英 OSL を測定した(表 2.3.2-1)。青色励起には青色発光ダイオード(470 nm)、赤外光励起には赤外光発光ダイオード(870 nm)を用いた。石英 OSL の検出波長は、Hoya U-340 フィルターを用い紫外領域に制限した。赤外光励起ルミネッセンス(Infrared stimulated luminescence: IRSL)の測定温度は 50 °C、OSL の測定温度は 125 °C に設定した。スライス試料の長石 OSL の測定には、post-IR IRSL (pIRIR) プロトコル(Thomsen *et al.*, 2008⁹⁾; Buylaert *et al.*, 2009¹⁰⁾)を用いた(表 2.3.2-1)。長石 IRSL の検出波長は、Schott BG39 と BG3 フィルターを用いて青色領域に制限した。IRSL 信号強度の最初の測定温度は 50 °C、2 回目の測定温度は 225 °C に設定した。その他、測定装置と測定条件については丹羽ほか(2024)¹¹⁾を参照されたい。令和 6 年度は、年代測定への利用可能性を評価するために、各測定プロトコルで線量応答曲線測定を実施した。また、長石の OSL ではフェーディングが生じるため、pIRIR プロトコルでフェーディング測定を実施した。

石英の post-IR OSL の結果を図 2.3.2-1、長石の pIRIR 測定の結果を図 2.3.2-2 に示す。発光曲線測定の結果については、従来の砂サイズの OSL との比較のため、post-IR OSL 測定では線量率校正用石英(Batch200; Autzen *et al.*, 2022¹²⁾)、pIRIR 測定では HTK-R1 を採取した層の下位に位置する砂層のカリ長石(HTK-3; Ogata *et al.*, 2024⁶⁾)の結果も示している。

石英 OSL は減衰速度が速いものから fast, medium, slow 成分と呼ばれ(Smith and Rhodes, 1994¹³⁾)、fast 成分が最も年代測定に適している。本研究の post-IR OSL の発光曲線において、Batch200 の OSL は急激に減衰しており、fast 成分が卓越することを示す(図 2.3.2-1a)。一方で、HTK-R1 の発光開始時の発光量は比較的 low、かつ緩やかな減衰を示した。HTK-R1 の線量応答曲線は、指数関数形の飽和曲線で表したモデルである first-order kinetics モデル(Guralnik *et al.*, 2015¹⁴⁾)と良く一致する(図 2.3.2-1b)。しかし、線量応答曲線の飽和に係るパラメータである D_0 は 591 Gy であり、Batch200 (330~441 Gy) よりも高い値を示した。これらの結果から、HTK-R1 の post-IR OSL 特性と Batch200 の OSL 特性は異なるものと考えられる。この原因として、1) HTK-R1 の石英 OSL の fast 成分が乏しい、もしくは 2) 長石 OSL の除去が不十分であることが考えられる。1) の場合、HTK-R1 の post-IR OSL を年代測定へ利用することは困難である。一方、2) であれば、長石 OSL 除去に係る測定条件を見直すことで年代測定が可能と考えられる。これらを検討するためには、HTK-R1 から石英のみを抽出し、石英単一測定での石英 OSL 特性の評価が必要である。

カリ長石の発光曲線は、石英と比較し、緩やかに減衰する傾向にある。HTK-3 は典型的なカリ長石の pIRIR 発光曲線を示し、HTK-R1 も同様の形状を示した(図 2.3.2-2a)。HTK-R1 の線量応答曲線は first-order kinetics モデルと良く一致した(図 2.3.2-2b)。また、HTK-R1 の D_0 は 710 Gy であり、HTK-3 (600~829 Gy) と同等の値であった。フェーディング測定では、経過時間に対する信号減衰が明瞭に検出され、フェーディング速度(g_{2dasy})も HTK-3 と同程度の値を示した(図 2.3.2-2c)。これらの結果から、HTK-R1 (スライス試料)と HTK-3 (カリ長石単一試料)の pIRIR 特性は一致することが示された。これにより、本測定プロトコルによって HTK-R1 中の長石 OSL のみを選択的に検出できることが確認でき、スライス試料中のカリ長石が十分であれば、従来のカリ長石単体測定と同程度の確度での等価線量測定及びフェーディング測定が可能であることが示唆された。

(4) 主な成果と課題

本研究では、礫の OSL 年代測定の事例蓄積に向けて、MIS5e 海成段丘の砂岩礫を対象に礫の OSL 測定プロトコルの検討を行った。砂岩中の石英をターゲットとする post-IR OSL 測定では、年代測定に有

効な OSL 信号を検出することができなかった。この原因として、砂岩礫中の石英の fast 成分が乏しいこと、もしくは長石 OSL の除去が不十分であったことが考えられる。一方、長石をターゲットとする pIRIR 測定では、典型的なカリ長石 OSL 信号が検出され、年代測定への利用可能性が示された。今後は、本試料の石英と線量率校正用石英の OSL 特性の差異を評価するとともに、礫の OSL 年代測定に向けて、礫試料を対象とした線量率校正法と年間線量補正法の整備を実施する予定である。

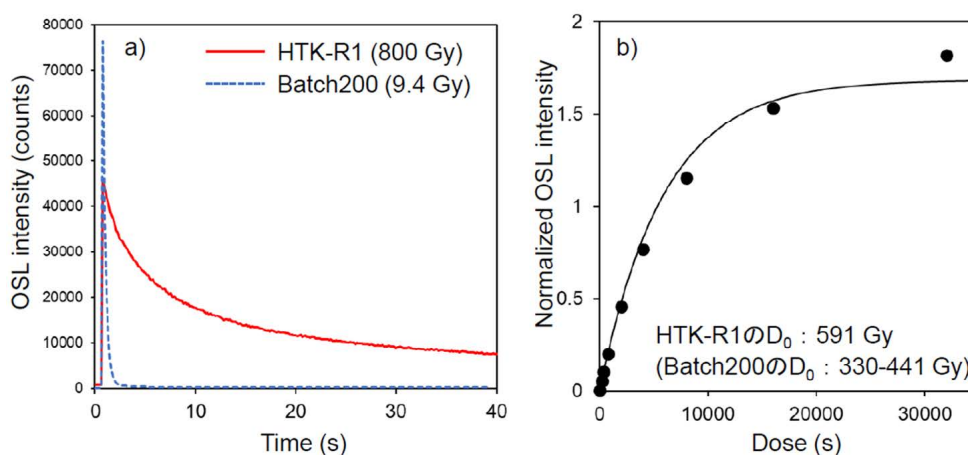


図 2.3.2-1 石英の post-IR OSL 測定の結果

a) 発光曲線測定, b) 線量応答曲線測定。発光曲線測定 of HTK-R1 の照射線量は、スライス試料に対する $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線源の線量率を 0.1 Gy/s と仮定して算出した。

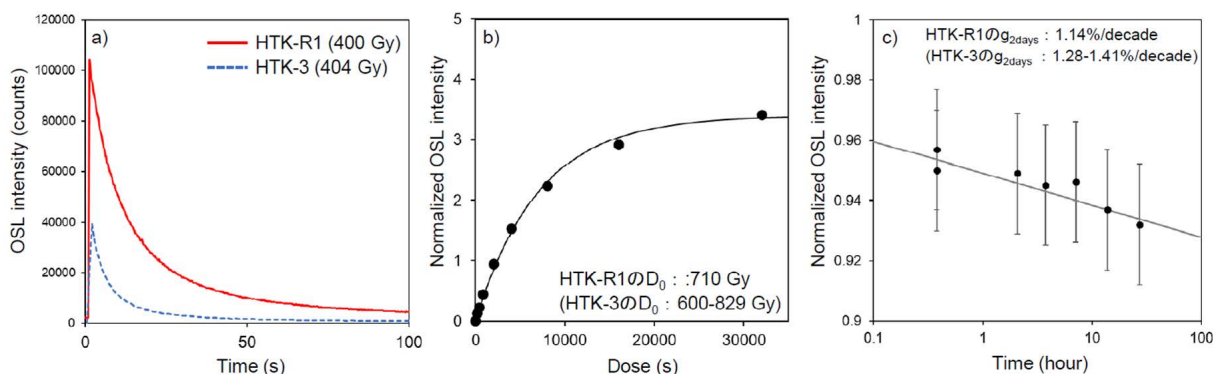


図 2.3.2-2 長石の pIRIR 測定の結果

a) 発光曲線測定, b) 線量応答曲線測定, c) フェーディング測定。発光曲線測定 of HTK-R1 の照射線量は、スライス試料に対する $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線源の線量率を 0.1 Gy/s と仮定して算出した。

表 2.3.2-1 OSL 測定プロトコル

Step	pIR-OSL (石英)	pIRIR (長石)
1	放射線照射	放射線照射
2	プレヒート(260 °C, 10 秒)	プレヒート(250 °C, 60 秒)
3	IRSL 測定(50 °C, 200 秒)	IRSL 測定(50 °C, 200 秒)
4	Blue OSL 測定(125 °C, 44 秒)	IRSL 測定(225 °C, 200 秒)
5	テスト照射(2000 秒)	テスト照射(2000 秒)
6	カットヒート(220 °C)	プレヒート(250 °C, 60 秒)
7	IRSL 測定(50 °C, 200 秒)	IRSL 測定(50 °C, 200 秒)
8	Blue OSL 測定(125 °C, 44 秒)	IRSL 測定(225 °C, 200 秒)
9	ホットブリーチ(280 °C, 40 秒)	ホットブリーチ(290 °C, 100 秒)
10	1 に戻る	1 に戻る

参考文献

- 1) 塚本すみ子, 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の最近の発展と日本の堆積物への更なる応用の可能性, 第四紀研究, vol.57, 2018, pp.157–167.
- 2) 伊藤一充, 光ルミネッセンス(OSL)法を用いた堆積物の年代決定, RADIOISOTOPES, vol.70, 2021, pp.147–157.
- 3) 田村 亨, 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法, RADIOISOTOPES, vol.70, 2021, pp.107–116.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Ogata, M., Komatsu, T., Nakanishi, T., OSL dating of marine isotope stage 5e marine terrace deposits on southeastern Kii Peninsula, southwestern Japan, Earth, Planets and Space, vol. 76, 2024, 11p.
- 7) Ishii, Y., Takahashi, T., Ito, K., Luminescence dating of cobbles from Pleistocene fluvial terrace deposits of the Ara River, Japan, Quaternary Geochronology, vol.67, 2022, 101228.
- 8) Ishii, Y., IRSL and post-IR IRSL dating of multi-grains, single grains, and cobble surface to constrain fluvial responses to climate changes during the last glacial period in the Tokachi Plain, northern Japan, Quaternary Geochronology, vol.79, 2024, 101486.
- 9) 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.

- 10) 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.
- 11) 丹羽正和, 島田耕司, 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, 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), *JAEA-Research 2024-013*, 2024, 65p.
- 12) 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
- 13) Smith, B.W., Rhodes, E.J., Charge movements in quartz and their relevance to optical dating, *Radiation Measurements*, vol.23, 1994, pp.329–333.
- 14) Guralnik, B., Li, B., Jain, M., Chen, R., Paris, R.B., Murray, A.S., Li, S.-H., Pagonis, V., Valla, P.G., Herman, F., Radiation-induced growth and isothermal decay of infrared-stimulated luminescence from feldspar, *Radiation Measurements*, vol.81, 2015, pp.224–231.

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分析の更なる効率化及び適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⁾; Nakajima *et al.*, 2024¹⁰⁾)及び応用研究(Jones *et al.*, 2023¹¹⁾ Jepson *et al.*, 2025¹²⁾)が近年活発に進められている。この手法は、閉鎖温度が25~45°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1~2 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.*, 2019¹³⁾)。ただし、ジルコン等の一部の鉱物については、結晶の透過率の低さと撮影したFTの明度の低さの影響で、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、作業の効率化には検討の余地がある。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.*, 2019¹⁴⁾) が、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 期中長期目標期間では、新たな対象鉱物についての技術開発、ジルコン等における 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う。これにより、FT 法の測定対象の拡大や分析の更なる効率化を図る。

新たな対象鉱物についての技術開発に関して、令和 4 年度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。これを受けて令和 5 年度では、イオン照射後のバデレアイトを用いてエッチングを試みたところ、一部の粒子でイオントラックと考えられる線状構造が観察されたが、全く観察されない粒子も見られた。令和 6 年度は同一試料を使って更にエッチングを重ねるなどの追実験を試みたが、イオントラックの検出には至らなかったため、令和 5 年度に見られた線状構造は試料に固有の結晶転移などを見ていた可能性がある。したがって、エッチング条件の決定には至らなかったため、本稿では令和 6 年度のバデレアイトにおける検討結果の紹介は割愛する。モナザイト FT 法においては、U 濃度測定に向けた標準試料の入手として、壩・Graz 大の研究者より標準試料候補のモナザイトを受領しており、令和 6 年度は化学組成の均質性評価のため、EPMA によるマッピングを実施した。

次に、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、令和 4 年度は 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。令和 5 年度においては、MATLAB を利用した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、高精度に FT 検出できる可能性が示唆される結果が得られたが、同年度の熱年代学の国際学会(Thermo2023)において TrackScan のソフトウェアのアップデートが公表されたため、これ以上の検討を中止した。

最後に、前処理技術の高度化については、令和 4 年度にお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 年度は FT 法の対象鉱物であるアパタイトやジルコン、モナザイトについてレーザー誘導ブレイクダウン分光(LIBS)分析が可能で元素分析ヘッド付きデジタルマイクロスコープを用いることで、肉眼では区別が困難だった試料であっても迅速に判別できることが示された。令和 6 年度においては、外観や組成が多様であるモナザイトにおける化学組成データの収集を試みた。また、ジルコン等の鉱物に Au 蒸着を行うことで、FT の自動計測結果が向上するか検証を実施した。

(3) 実施内容・結果

① 新たな対象鉱物についての技術開発

新たな対象鉱物についての技術開発においては、前述の通り、バデレアイトのエッチング条件の決定には成功しなかったため、モナザイト FT 法における検討結果のみ紹介する。モナザイト FT 法においては、年代測定のために必須となる年代標準試料のみならず、U 濃度測定のための標準試料も決定されていないのが現状である。まずは、U 濃度測定における標準試料候補として、Graz 大の研究者より均質な化学組成のサンプル(MPG-15)を入手した。この試料は Sri Lanka の Ratnapura の宝石商より購入した、

粗くファセットされた巨晶のモナザイトであり、原産地は不明である。受領した MPG-15 はワイヤーソーを使って 2×2 mm の平板のピースとして切り出し、ラウンドロビンテストのために複数の研究機関に配分されたものの 15 番目のピースである。試料左上の角は、湿式分析用に切断されている。本試料は事前に Graz 大の EPMA による BSE 像の観察及び化学分析が行われており、ThO₂ は～8.17wt%、UO₂ は 0.265wt%、PbO は 0.190wt% という結果となっており、U-Pb 年代は 493 Ma と推定されている。この試料について、東濃地科学センターの EPMA を用いて分析時に重要となる Si, Y, Th, U について化学組成マッピングを実施した。顕微鏡観察の結果からは、結晶の内部に包有物や熱水が関与していると思われる変質部などが観察される(図 2.3.3-1)。一部、裂罅や空洞などは見られるが、BSE 像や各元素のマッピング結果からは、数百 μm の範囲において組成的に均質であるという結果が得られた(図 2.3.3-1)。したがって、分析標準試料としての適性が認められる結果となった。また、U 濃度が低い(<0.1wt%) 未知試料のモナザイトを分析する場合、EPMA では検出下限付近であるため LA-ICP-MS 分析を行う必要性があり、その分析用標準試料として有用なサンプルであることが期待される。今後は、湿式分析によって各元素の定量値を決定し、in-house スタンドとして活用するために検討を継続する。また、新たにフラックス法によるモナザイトの結晶合成も着手しており、標準試料となり得る均質な化学組成の鉱物の合成についても検討を続ける。

② 前処理技術の高度化

モナザイトとされる複数種類の鉱物について、鏡下観察と LIBS 分析に基づく化学組成の取得によるデータの収集を行った。また、形態的特徴から肉眼でモナザイトを判別するための指標となる外観や形態について考察を行った。LIBS 分析を行った試料は、年代既知の鉱物分離済の試料 9 点及び年代不詳の鉱物標本計 4 点の試料を用いた。まず、年代既知の試料については、(株)京都フィッション・トラックによって鉱物分離済である白亜紀の苗木花崗岩 2 点(TD23-01, TD23-02)、富山大学の研究者から受領した南極のリュッツォホルム岩体(ARP04, HND01, RK2)及びナピア岩体(01110406A, 0112701A, 0112901A, 0120102A)から採取された先カンブリア時代～カンブリア紀の試料 7 点の計 9 試料である。年代不詳の試料は、オーストラリア産の漂砂鉱床から採取されたモナザイトサンド(MNZ-S)、ブラジル産のほぼ純塊とみられる不完全結晶の巨晶標本、アメリカ産の少量の雲母鉱物を伴う Th-rich モナザイトの巨晶標本、マダガスカル産のシリカ脈を含む巨晶標本である。LIBS 分析においては、分離済みの苗木花崗岩については重液・磁性分離後のモナザイトのフラクションから、南極試料については磁性フラクションからモナザイトと判別された結晶をハンドピックして使用した。モナザイトサンドはカプセルから適量取り出してハンドピックして用いた。これらの試料についてはスライドガラスに両面テープを貼付し、その上に結晶を接着させており、巨晶標本についてはそのままの状態デジタルマイクروسコープのステージに静置し、観察および LIBS 分析を実施した。顕微鏡写真および LIBS 分析の結果を図 2.3.3-2～図 2.3.3-13 に示す。なお、測定は画像の上端側から下端側へ向かって順に行い、測定結果の表中の番号と対応している。結果として、モナザイトの化学組成(LREE(PO₄))が検出された試料は、南極試料のうち ARP04, 0120102A, オーストラリア産のモナザイトサンド、巨晶標本のうちブラジル産、マダガスカル産の 5 試料であった。これら全ての試料においてモナザイトの自形(単斜晶系)を示す粒子はほぼ見られず、いずれも半自形か円磨された結晶であった。またモナザイトの結晶の色としては、淡黄色～褐色が主であり、稀に無色透明の粒子が見られるが、モナザイトサンドの LIBS 分析の結果(淡褐色、赤橙色)や、ブラジル産・マダガスカル産の巨晶標本の結果(黒色不透明)から、結晶の色や透明度に至るまで多様であることが明らかとなった。おそらく、モナザイトの端成分である軽希土類元素(Ce, Nd, Sm, Gd 等)の化学組成の違いや放射線損傷の蓄積の度合いなどに起因していると考えられるが、LIBS 分析では化学組成データの定量性に乏しいため、これ以上の議論は差し控える。また、今回の分析から淡桃色の結晶はほぼジルコンをはじめとするケイ酸塩鉱物であることが多いことが判明した。加えて、苗木花崗岩の試料からは、磁

性分離後の試料であってもジルコン結晶が数多く検出されることが判明し、包有物等による影響の可能性が考えられる。今後も継続的にデータの収集に努め、鏡下観察での判別に貢献する形態的特徴の把握を試みる。

次に、ジルコン等の鉱物における TrackScan による自動計測結果の向上を目的として、Au 蒸着によって自動計測結果が向上するのか検討した。豪・メルボルン大の研究者より、TrackScan で撮影された未処理のジルコンの粒子画像データ及び同一粒子に Au 蒸着を施した画像データをそれぞれ受領し、東濃地科学センターの TrackScan を用いて自動計測を行うことにより(図 2.3.3-14(a, b)), Au 蒸着の有効性について検証を行った。未蒸着・蒸着済それぞれで同一の 9 粒子における反射光・透過光のスタック画像を受領しており、その中で未蒸着の画像において最も自動計測に成功した粒子を選出した。また、自動計測の有効性の検証のため、Au 蒸着済のジルコンにおける自動計測結果についてマニュアルモードによる修正結果(図 2.3.3-14(c))との比較に基づき、未蒸着及び蒸着済のジルコンにおいてどの程度の割合のトラックが自動認定に成功しているのかを検証した。結果の比較においては、FT 検出数のみに着目して単純化するため、測定領域(Region of Interest: ROI)はほぼ同一地点で同程度の面積になるように設定した上でカウントを行った。まず、未蒸着のジルコンにおける自動計測結果は 52 本となったが、単一のトラックを 2 本ないし 3 本と誤認しているもの(図 2.3.3-14(a)中の青色および桃色)や FT ではない構造を検出しているケースが多く、さらに左下側の領域はほとんど計測できていない。これに対して、蒸着済のジルコンにおける自動計測結果は 69 本となり、ROI の中で比較的万遍なく計測できているだけでなく、数え落としはあるものの概ね FT を検出できており、単一のトラックを複数本と誤認するケースは格段に減少している(図 2.3.3-14(b))。マニュアル測定における測定結果は 125 本であり、検出率を単純計算すると、未蒸着の場合で約 42%、Au 蒸着済の場合で約 52%となった。数値で単純比較すると 10%程度の差があることになるが、前述のように検出結果の質には差がみられる。また、そのほかの粒子では未蒸着の試料では全く FT を検出できない一方で、Au 蒸着をすると検出可能になるサンプルも存在し、Au 蒸着は効果的であることが分かった。おそらく、Au 蒸着を行うことでジルコンの結晶表面の反射率が向上することによってバルク結晶の輝度が向上し、結果的に暗色の FT 領域とのコントラストを増大させる効果があるためであると考えられる。今後は、モナザイトにおいても同様の蒸着を実施し、自動検出における検出効率の増大が見込めるのか検証を予定している。

(4) 主な成果と課題

令和 6 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、モナザイト FT 法の年代測定に用いる分析標準試料の候補となるモナザイトの化学分析を実施し、その適性が認められた。バデレアイト FT 法については、イオン照射後のトラックにおけるエッチングに失敗したため、エッチング条件の見直しを検討する。前処理技術の高度化については、LIBS 法に基づく化学分析により、モナザイトと同定された鉱物の形態的特徴の収集に努めた。また、ジルコンにおける自動計測結果の向上を目的として、Au 蒸着が有効であることを確認した。今後は、モナザイトにおいても同様の蒸着処理を施し、自動計測が機能するか検証する予定である。

MPG-15

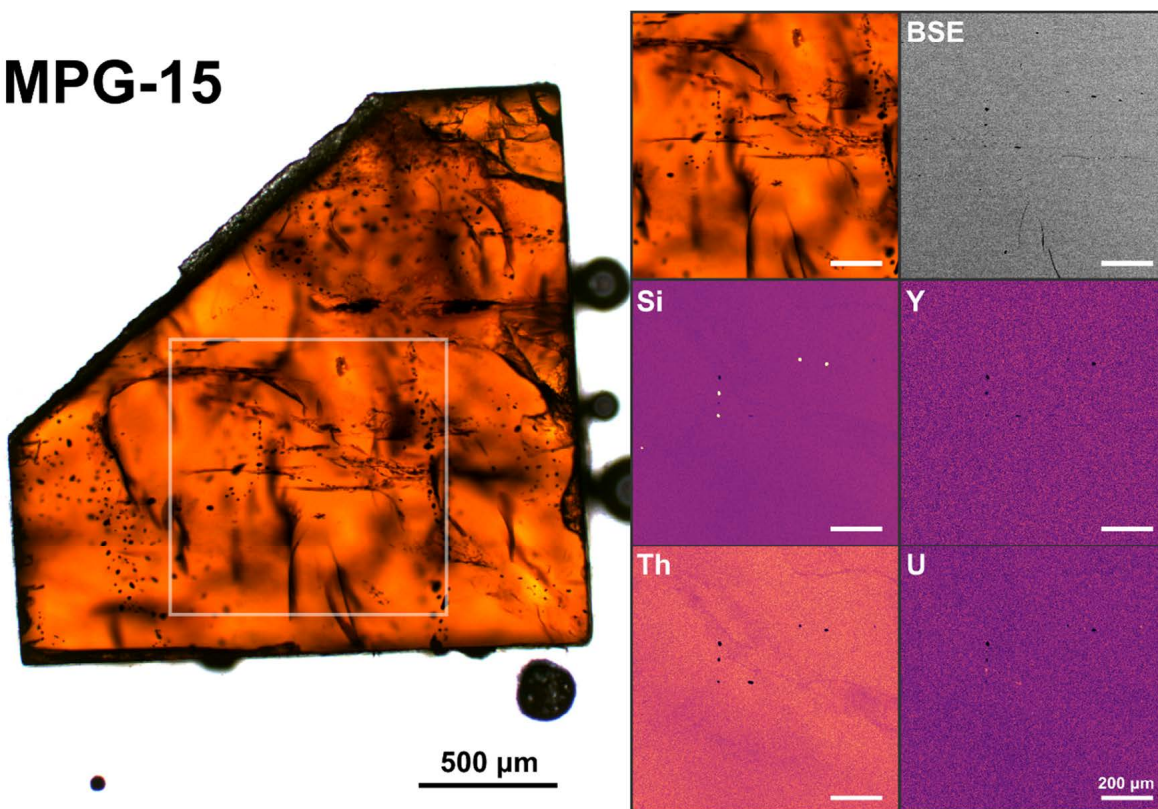


図 2.3.3-1 標準試料候補のモナザイト MPG-15 の顕微鏡画像と, EPMA による BSE 像および化学組成マッピングの結果

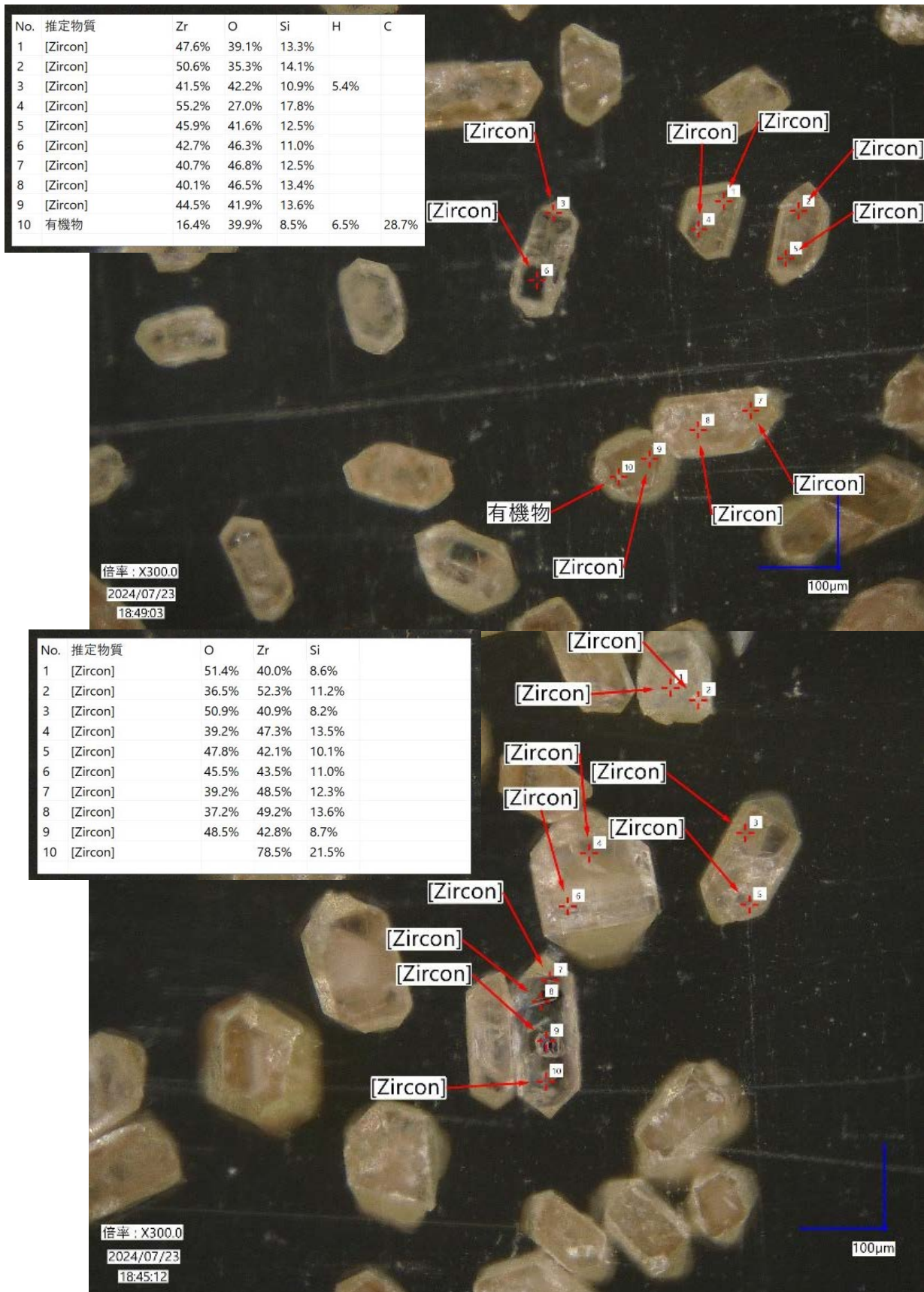


図 2.3.3-2 苗木花崗岩(上:TD23-01, 下:TD23-02)の LIBS 分析結果

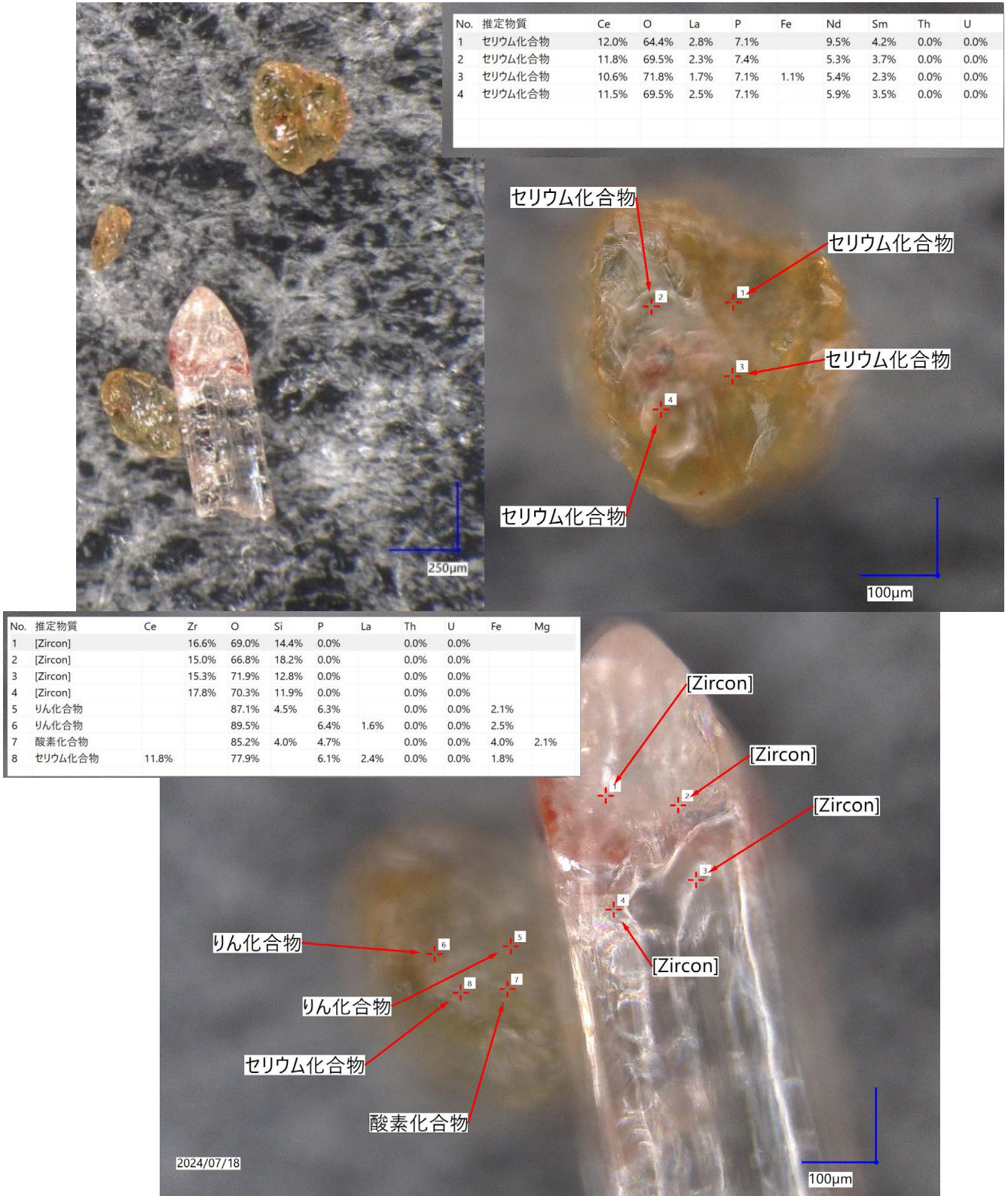


図 2.3.3-3 南極試料 (ARP04) の顕微鏡写真 (左上) と LIBS 分析結果 (右上, 下)

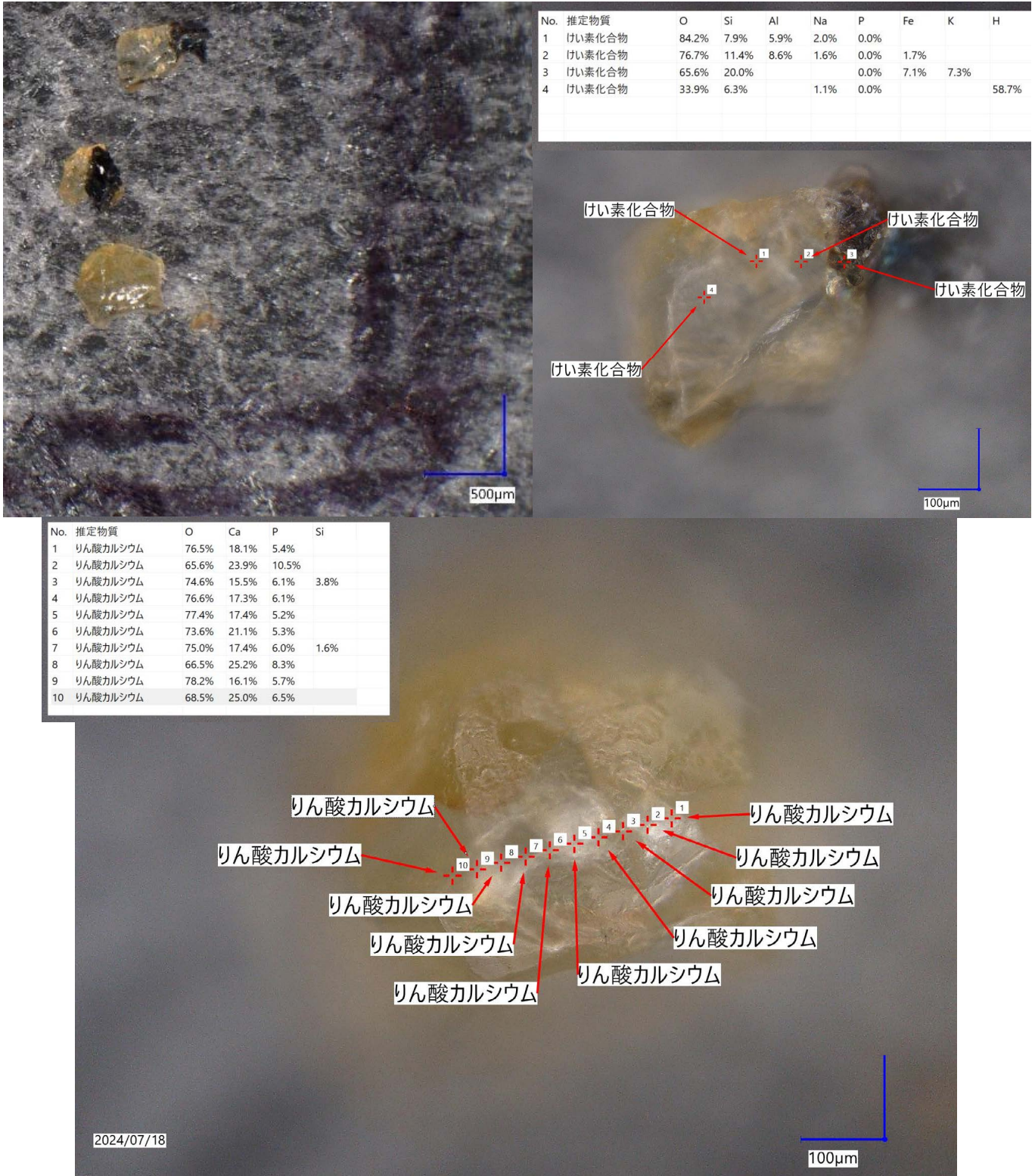


図 2.3.3-4 南極試料 (HND01) の顕微鏡写真 (左上) と LIBS 分析結果 (右上, 下)

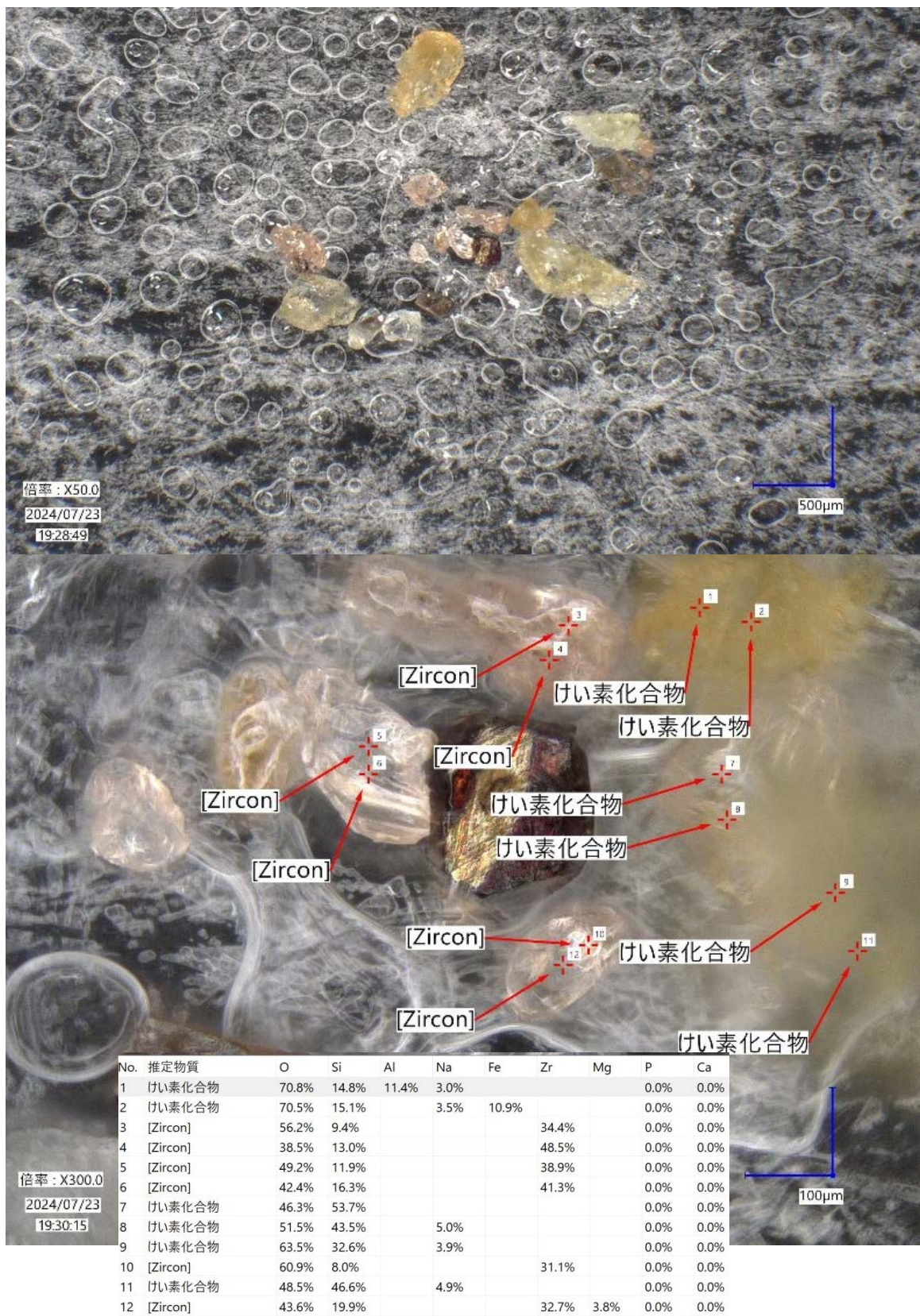


図 2.3.3-5 南極試料(RK2)の顕微鏡写真(左)と LIBS 分析結果(右)

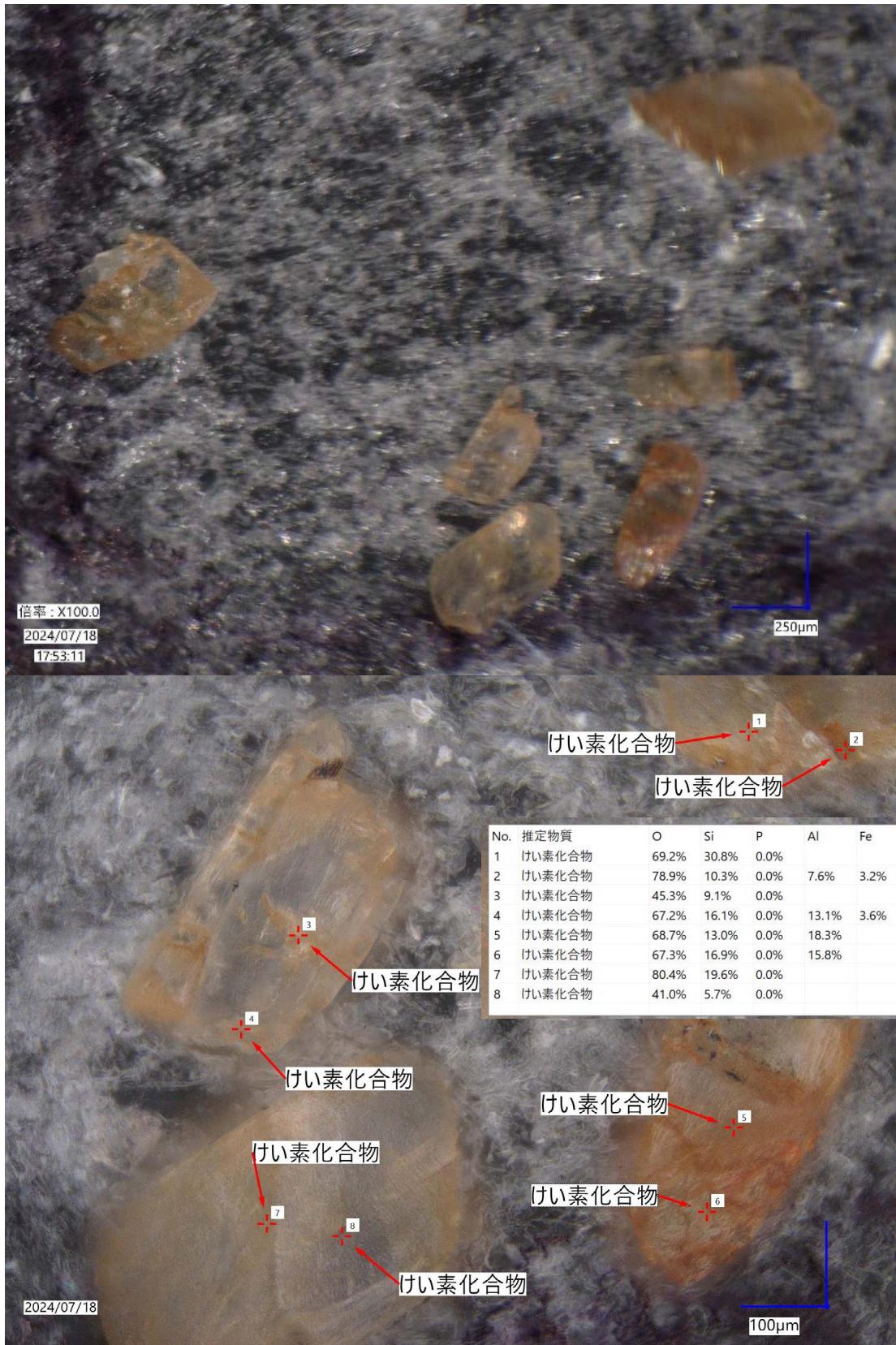


図 2.3.3-6 南極試料 (0111406A) の顕微鏡写真 (左) と LIBS 分析結果 (右)

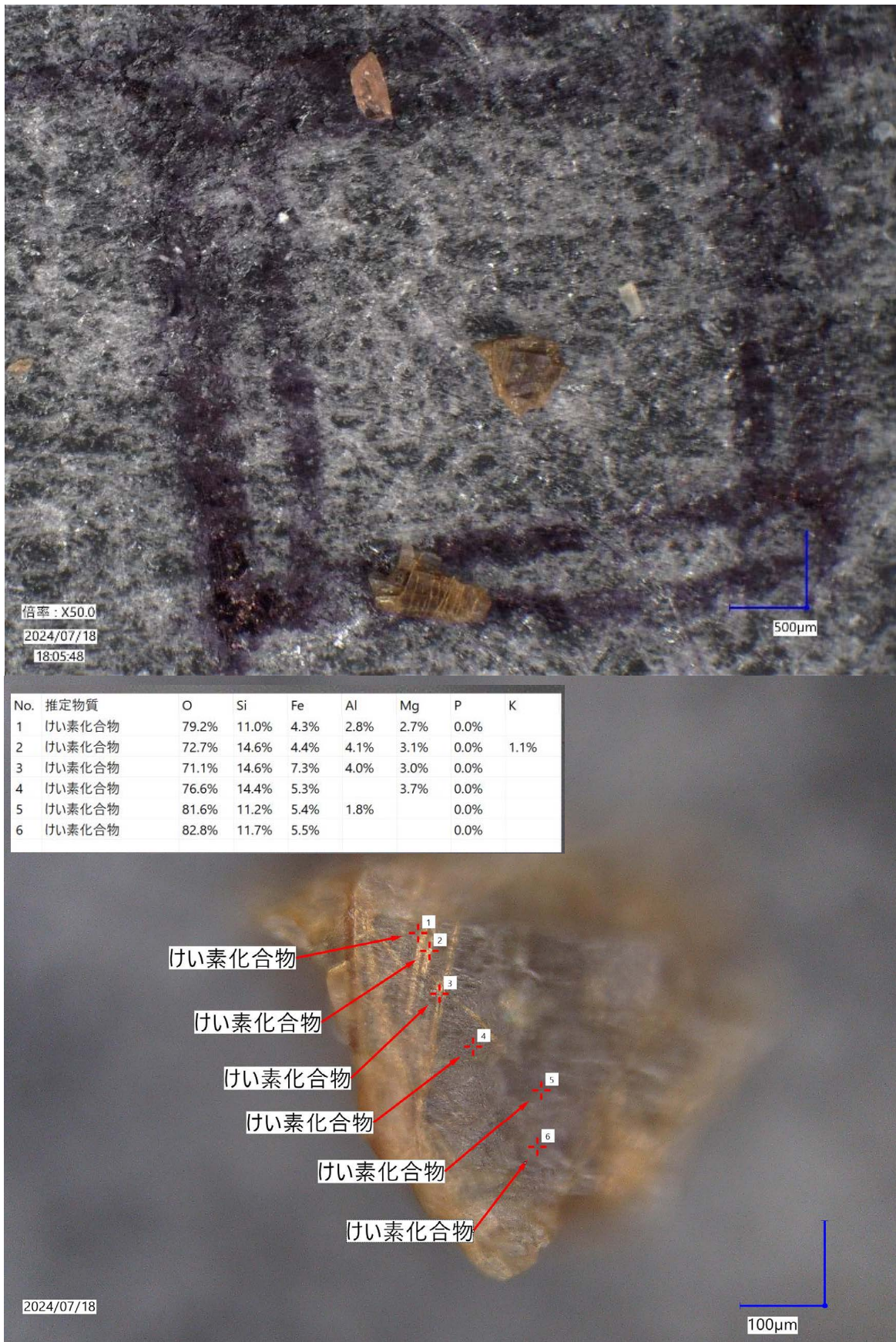


図 2.3.3-7 南極試料(0112701A)の顕微鏡写真(上)とLIBS 分析結果(下)

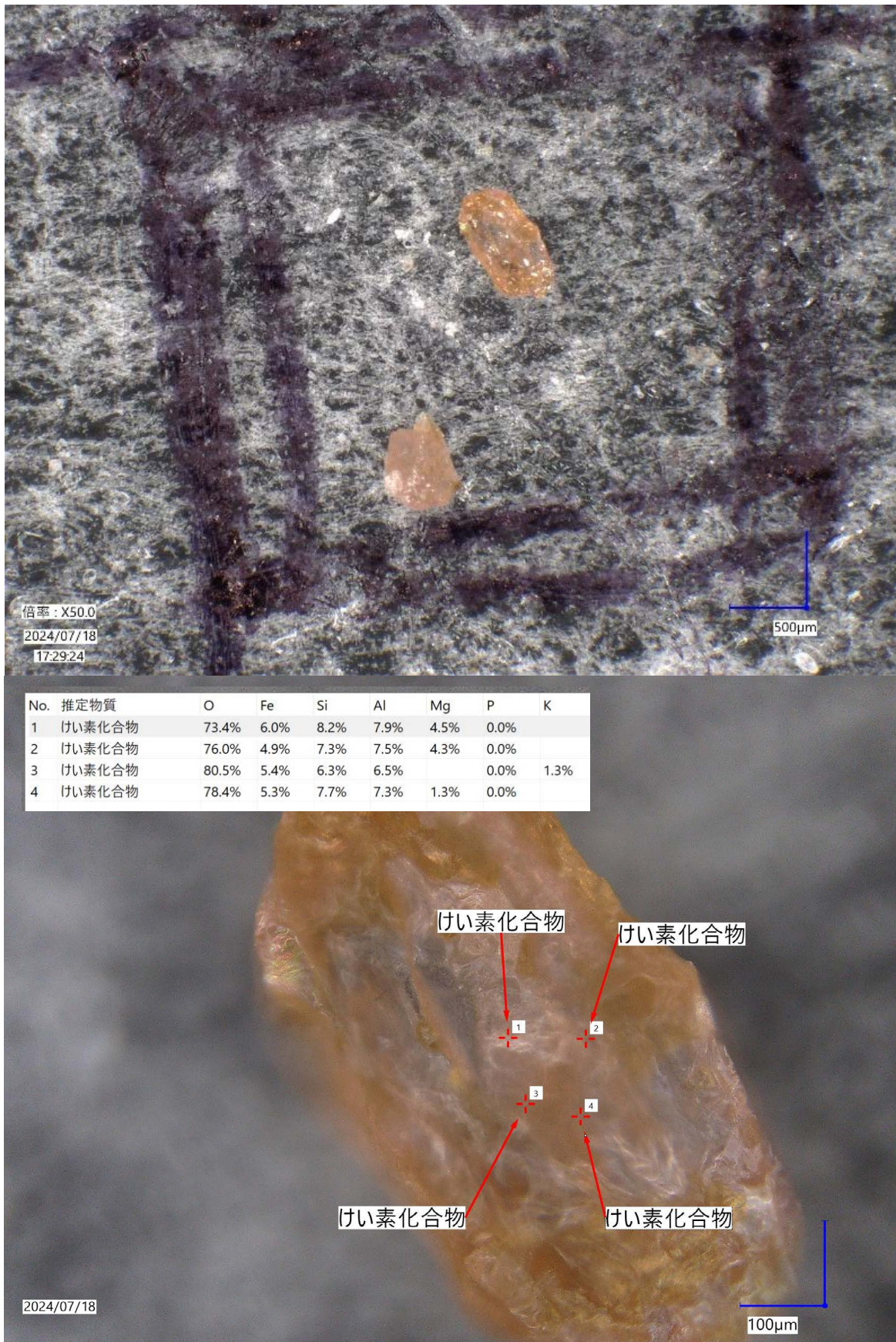


図 2.3.3-8 南極試料(0112901A)の顕微鏡写真(左)と LIBS 分析結果(右)

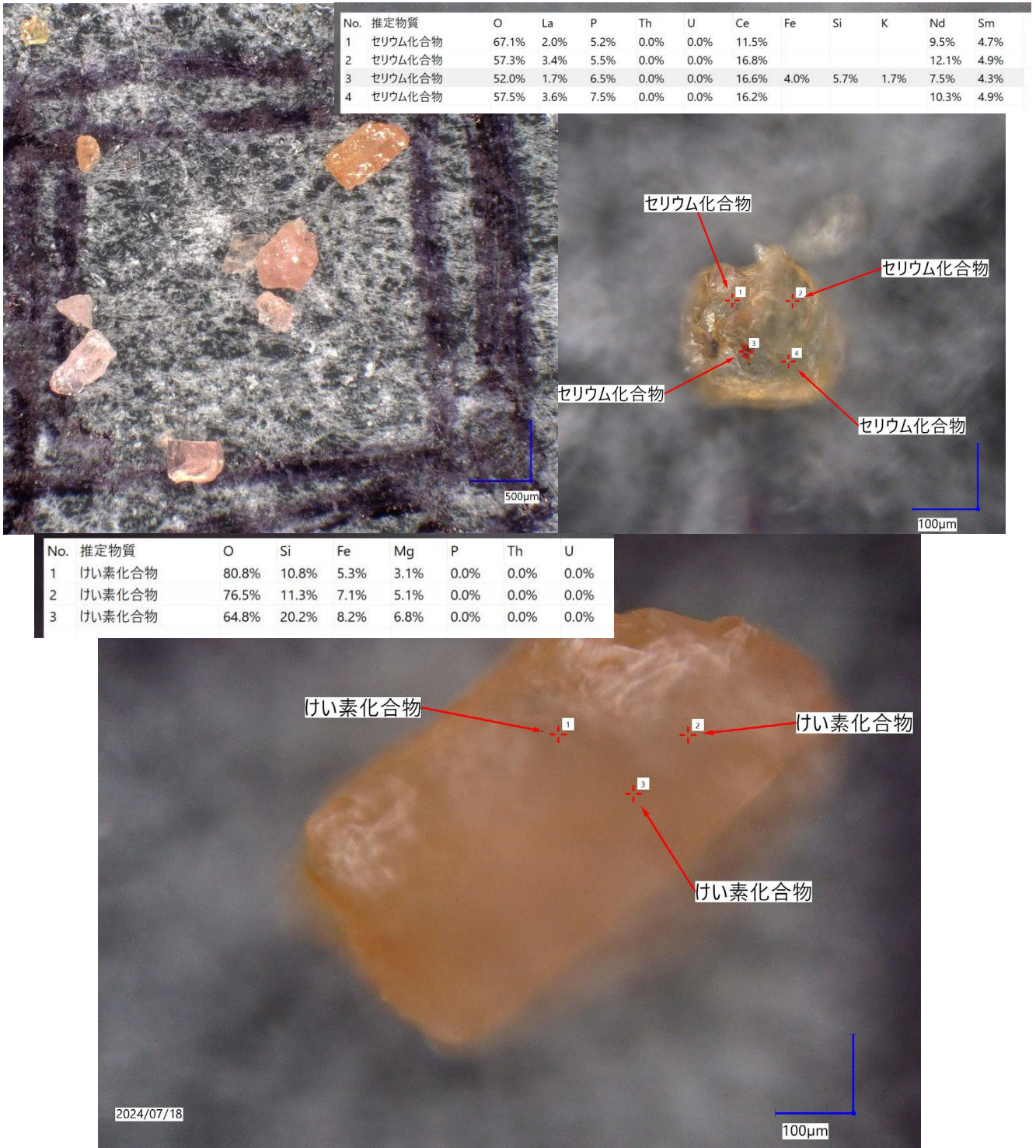
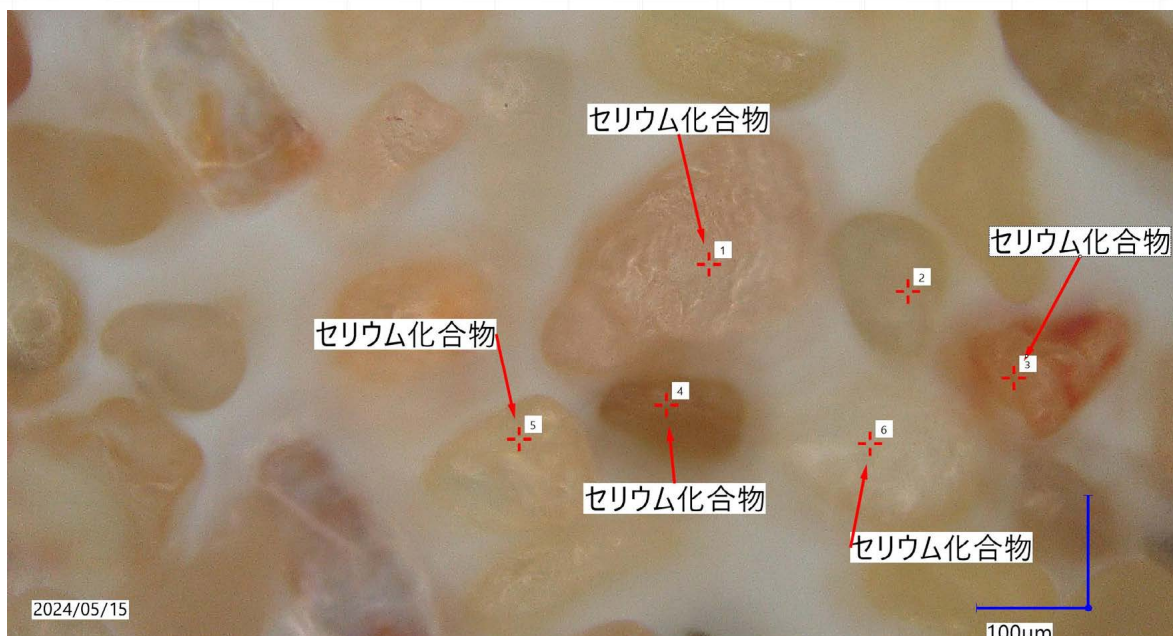


図 2.3.3-9 南極試料 (0120102A) の顕微鏡写真 (左上) と LIBS 分析結果 (右上, 下)

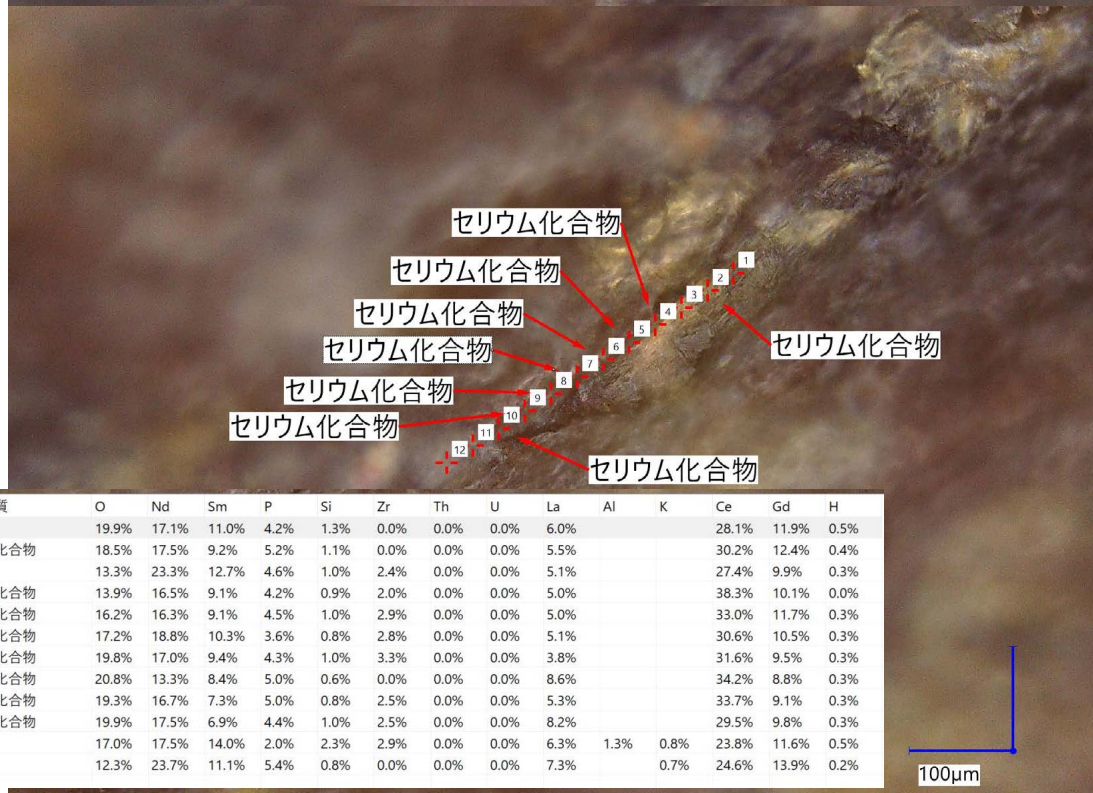
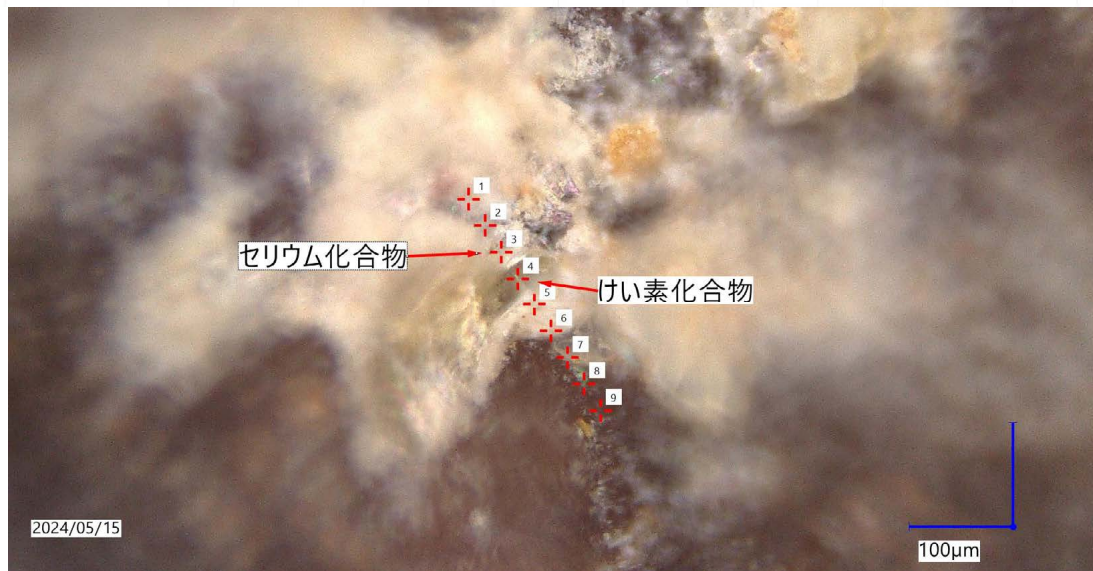
No.	推定物質	Ce	O	Nd	La	Sm	P	Fe	Si	Zr	U	S	Gd	H	Th
1	セリウム化合物	39.1%	21.8%	10.0%	7.0%	6.1%	4.0%	1.8%	1.1%	0.0%	0.0%		8.7%	0.4%	0.0%
2		22.6%	21.6%	19.9%	3.9%	10.2%	3.8%		1.0%	0.0%	0.0%		16.5%	0.5%	0.0%
3	セリウム化合物	34.2%	19.5%	12.4%	10.3%	8.3%	3.8%	1.4%	0.7%	0.0%	0.0%		9.2%	0.2%	0.0%
4	セリウム化合物	28.1%	20.2%	10.7%	5.5%	5.1%	3.6%	2.0%	1.7%	0.0%	0.0%	15.2%	7.6%	0.3%	0.0%
5	セリウム化合物	31.6%	19.3%	15.1%	10.3%	9.9%	3.6%		0.8%	0.0%	0.0%		9.2%	0.2%	0.0%
6	セリウム化合物	34.5%	24.2%	12.9%	8.8%	6.4%	4.4%		0.7%	0.0%	0.0%		7.7%	0.4%	0.0%



No.	推定物質	Zr	O	Nd	Si	Sm	U	La	P	Ce	Fe	Al	Gd	H	Th
1		23.3%	22.3%	9.2%	4.3%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%			12.0%	0.3%	0.0%
2	セリウム化合物	0.0%	18.6%	14.9%	1.8%	8.7%	0.0%	7.0%	4.1%	33.7%			11.2%	0.0%	0.0%
3		18.0%	20.0%	13.5%	4.2%	4.5%	0.0%	0.0%	0.0%	26.0%			13.3%	0.5%	0.0%
4	セリウム化合物	0.0%	17.6%	17.3%	0.9%	12.6%	0.0%	5.7%	3.2%	30.3%	2.1%		10.0%	0.3%	0.0%
5		0.0%	28.5%	12.2%	1.8%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.4%	11.5%	4.8%	13.6%	1.2%	0.0%
6		0.0%	16.4%	25.5%	0.8%	10.8%	0.0%	10.2%	3.6%	24.1%			8.6%	0.0%	0.0%

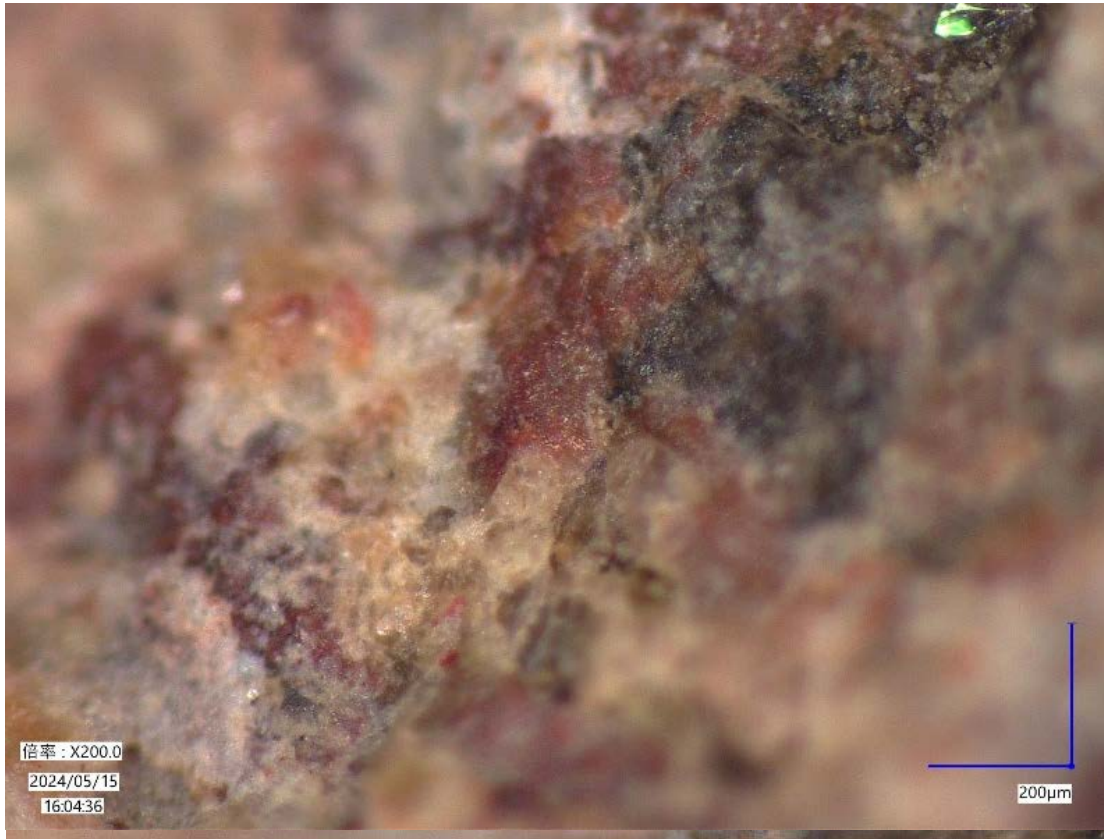


No.	推定物質	Nd	O	Sm	Zr	P	Si	Th	U	La	K	Al	Fe	Ce	Gd	H
1		17.9%	17.6%	17.1%	3.4%	2.9%	2.3%	0.0%	0.0%	6.1%				20.1%	11.8%	0.8%
2		19.2%	16.6%	16.5%	0.0%	2.4%	3.4%	0.0%	0.0%	5.6%	1.0%			19.3%	15.7%	0.3%
3	セリウム化合物	27.0%	10.4%	10.7%	0.0%	3.6%	4.3%	0.0%	0.0%	5.1%	2.9%			36.0%	0.0%	0.0%
4	けい素化合物	0.0%	36.7%	0.0%	0.0%	0.0%	14.7%	0.0%	0.0%	0.0%	10.4%	13.4%	3.3%	20.8%	0.0%	0.7%
5		15.0%	38.0%	8.8%	0.0%	0.0%	6.3%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	5.4%		22.7%	0.0%	1.8%
6		30.2%	9.5%	15.2%	0.0%	3.9%	7.6%	0.0%	0.0%	5.4%				28.2%	0.0%	0.0%
7		19.7%	18.7%	10.9%	0.0%	3.7%	1.8%	0.0%	0.0%	9.0%	0.6%			22.6%	12.6%	0.4%
8		20.2%	19.2%	15.2%	3.5%	2.5%	0.7%	0.0%	0.0%	4.6%				23.6%	10.1%	0.4%
9		17.1%	19.5%	12.3%	3.2%	2.9%	1.3%	0.0%	0.0%	7.8%				26.0%	9.4%	0.5%



No.	推定物質	O	Nd	Sm	P	Si	Zr	Th	U	La	Al	K	Ce	Gd	H
1		19.9%	17.1%	11.0%	4.2%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%	6.0%			28.1%	11.9%	0.5%
2	セリウム化合物	18.5%	17.5%	9.2%	5.2%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	5.5%			30.2%	12.4%	0.4%
3		13.3%	23.3%	12.7%	4.6%	1.0%	2.4%	0.0%	0.0%	5.1%			27.4%	9.9%	0.3%
4	セリウム化合物	13.9%	16.5%	9.1%	4.2%	0.9%	2.0%	0.0%	0.0%	5.0%			38.3%	10.1%	0.0%
5	セリウム化合物	16.2%	16.3%	9.1%	4.5%	1.0%	2.9%	0.0%	0.0%	5.0%			33.0%	11.7%	0.3%
6	セリウム化合物	17.2%	18.8%	10.3%	3.6%	0.8%	2.8%	0.0%	0.0%	5.1%			30.6%	10.5%	0.3%
7	セリウム化合物	19.8%	17.0%	9.4%	4.3%	1.0%	3.3%	0.0%	0.0%	3.8%			31.6%	9.5%	0.3%
8	セリウム化合物	20.8%	13.3%	8.4%	5.0%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	8.6%			34.2%	8.8%	0.3%
9	セリウム化合物	19.3%	16.7%	7.3%	5.0%	0.8%	2.5%	0.0%	0.0%	5.3%			33.7%	9.1%	0.3%
10	セリウム化合物	19.9%	17.5%	6.9%	4.4%	1.0%	2.5%	0.0%	0.0%	8.2%			29.5%	9.8%	0.3%
11		17.0%	17.5%	14.0%	2.0%	2.3%	2.9%	0.0%	0.0%	6.3%	1.3%	0.8%	23.8%	11.6%	0.5%
12		12.3%	23.7%	11.1%	5.4%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	7.3%		0.7%	24.6%	13.9%	0.2%

図 2.3.3-11 ブラジル産巨晶標本の LIBS 分析結果



No.	推定物質	Ce	Nd	O	Gd	Sm	La	Si	Fe	H	K	Zr	Th	U	Nb	Al	Ca	P
1		26.6%	20.2%	16.9%	13.3%	12.9%	3.6%	3.2%	1.9%	0.8%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%				0.0%
2		27.4%	17.0%	18.2%	17.3%	7.0%	0.0%	3.0%	3.4%	0.9%		0.0%	0.0%	0.0%	5.8%			0.0%
3	セリウム化合物	26.4%	0.0%	39.8%	0.0%	13.7%	0.0%	10.1%	3.7%	1.8%		0.0%	0.0%	0.0%		4.5%		0.0%
4	セリウム化合物	36.7%	0.0%	33.9%	0.0%	8.7%	0.0%	8.7%	6.0%	1.6%		0.0%	0.0%	0.0%		4.4%		0.0%
5	セリウム化合物	27.4%	0.0%	41.2%	0.0%	9.3%	0.0%	5.6%		2.0%		0.0%	0.0%	0.0%	10.2%		4.3%	0.0%
6	セリウム化合物	26.8%	22.9%	29.9%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	5.2%	2.0%		0.0%	0.0%	0.0%	8.9%			0.0%
7	セリウム化合物	31.6%	14.2%	19.0%	17.9%	6.4%	0.0%	2.4%	2.9%	0.9%		0.0%	0.0%	0.0%	4.7%			0.0%

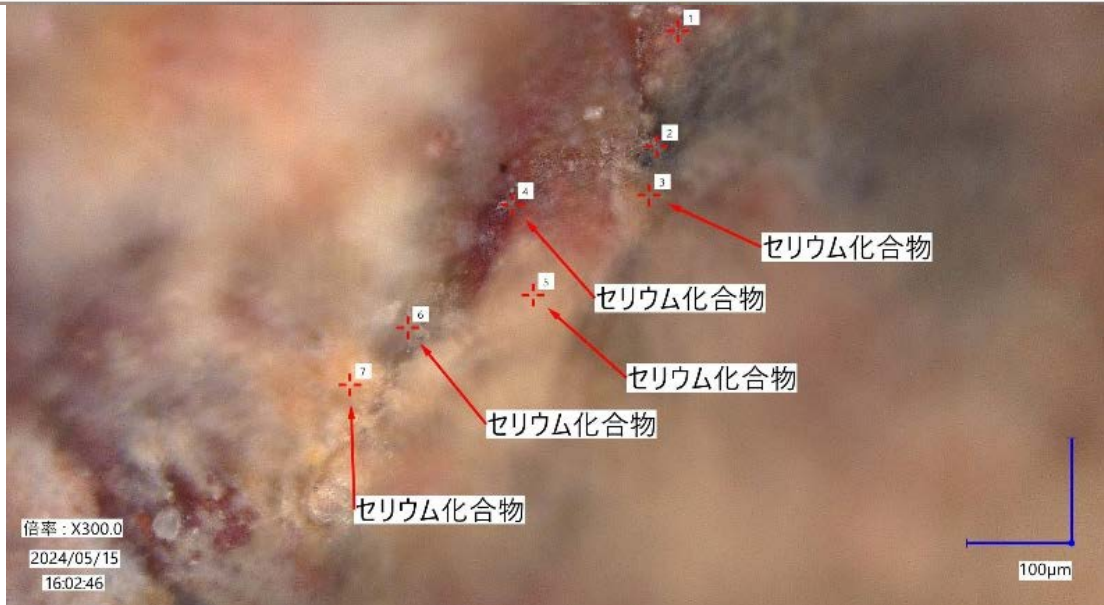


図 2.3.3-12 アメリカ産巨晶標本の顕微鏡写真（上）と LIBS 分析結果（下）



No.	推定物質	Nd	O	Sm	Si	Al	Fe	K	Zr	Th	U	La	P	H	Ce	Gd
1		27.7%	19.3%	13.9%	7.9%	5.0%	3.0%	2.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		1.0%	20.1%	0.0%
2	ネオジム化合物	37.4%	10.5%	14.0%	1.9%	2.2%	3.9%		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		1.1%	20.6%	8.4%
3	セリウム化合物	0.0%	21.0%	14.4%	7.5%	5.4%	15.8%	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		1.2%	32.0%	0.0%
4	セリウム化合物	20.0%	20.0%	11.0%	1.5%				0.0%	0.0%	0.0%	3.5%	2.3%	0.7%	28.4%	12.6%
5		22.5%	20.5%	12.1%	1.1%		2.2%		0.0%	0.0%	0.0%	3.2%	2.4%	0.9%	24.2%	10.9%
6	セリウム化合物	0.0%	45.2%	0.0%	4.8%	13.3%			0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		4.6%	32.1%	0.0%
7	セリウム化合物	25.6%	21.1%	13.5%	1.6%	6.5%			0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		2.3%	29.4%	0.0%

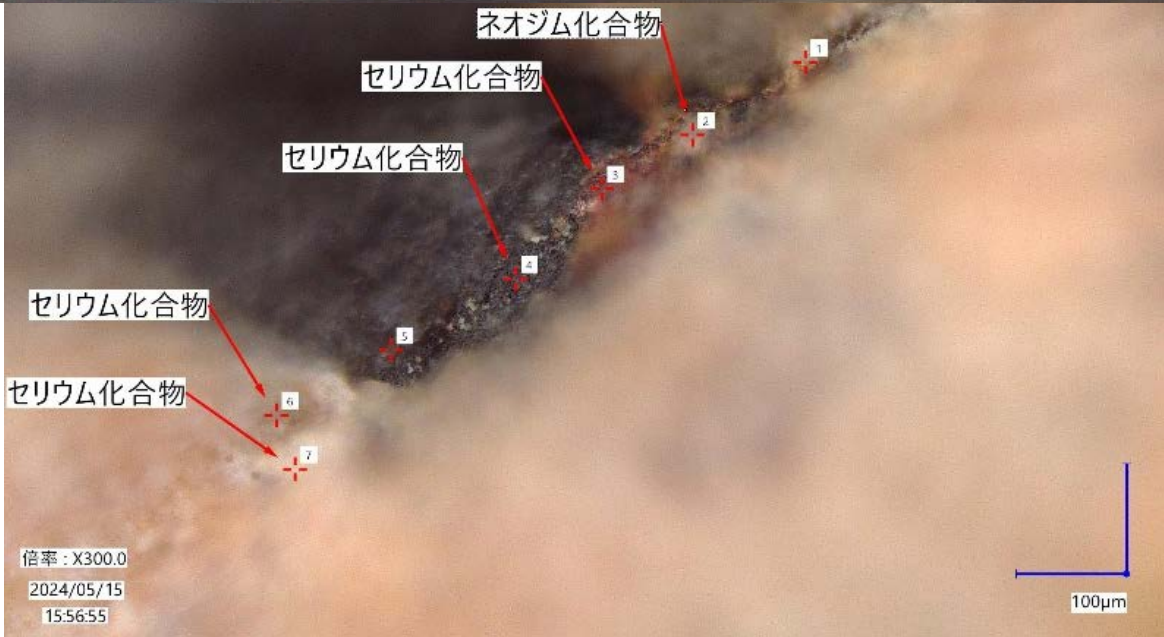


図 2.3.3-13 マダガスカル産巨晶標本の顕微鏡写真(上)と LIBS 分析結果(下)

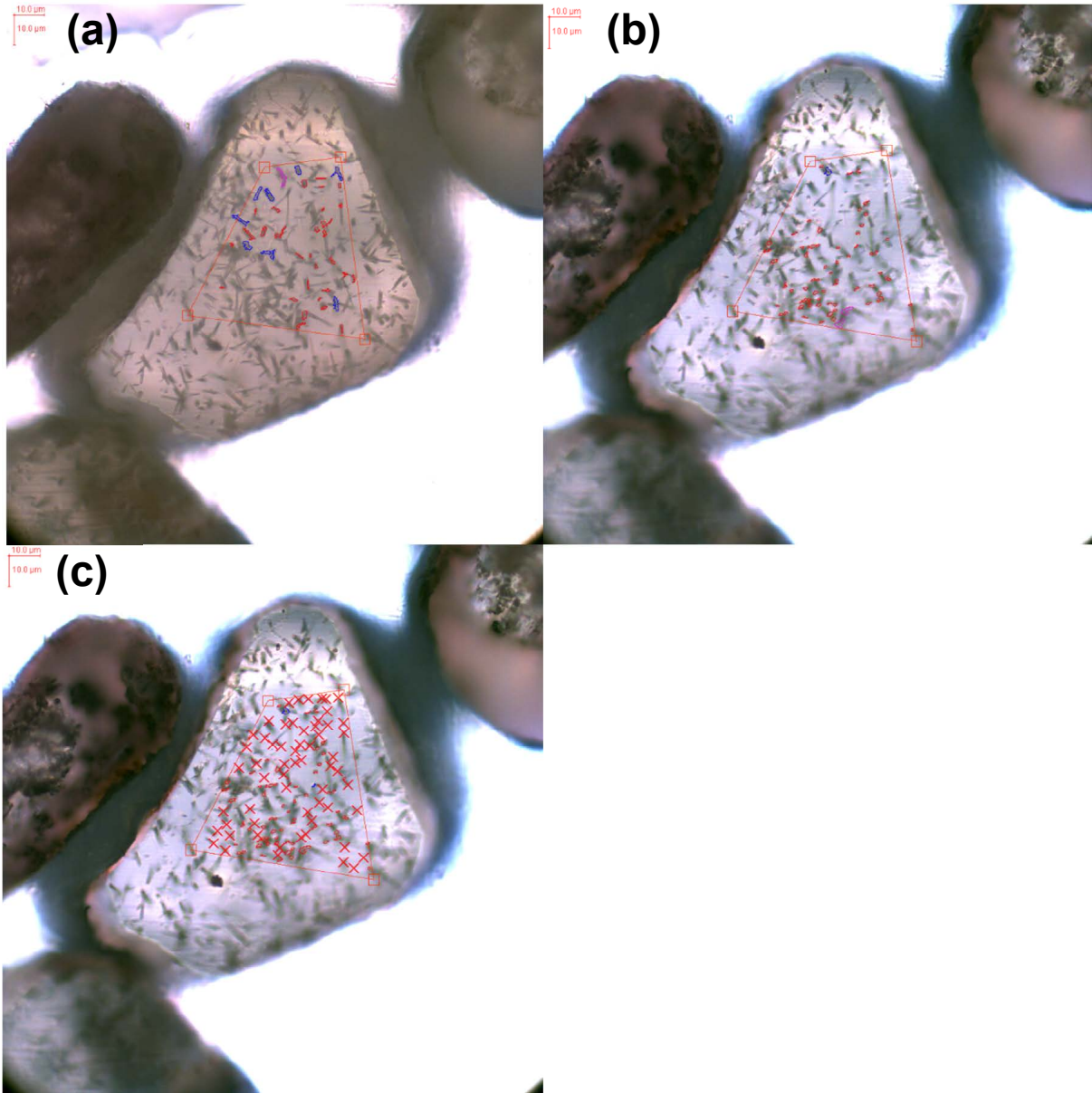


図 2.3.3-14 TrackScan を用いたジルコンにおける自動測定結果

(a): 未蒸着のジルコンにおける自動計測結果, (b): Au 蒸着済のジルコンにおける自動計測結果, (c): Au 蒸着済のジルコンにおける計測結果(マニュアル測定による確認済)。粒子状の楕円は、画像解析による自動測定を実施した FT を指し、赤は 1 本、青は 2 本、ピンクは 3 本の認定結果を表す。×印はマニュアル測定によって認定した FT である。

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, In:

- Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.G., eds., *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, アニール特性の理解, 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 ²⁵²Cf 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) Nakajima, T., Fukuda, S., Sueoka, S., Niki, S., Kawakami, T., Danhara, T., and Tagami, T., Inverse correlation between radiation damage and fission-track etching time on monazite, *Geochronology*, vol.6, no. 3, 2024, pp.313–323.
 - 11) 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
 - 12) Jepson, G., Carrapa, B., Jones, S., Kohn, B. P., Gleadow, A. J., George, S. W., Howlett, C. J., Gallagher, K., Frickenstein, A. N., Gehrels, G., and Triantafyllou, A., An assessment of monazite fission-track thermochronology as a proxy for low - magnitude cooling, Catalina - Rincon Metamorphic Core Complex, AZ, USA. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.26, no.4, 2025, e2024GC011881.
 - 13) Gleadow, A., Kohn, B. and Seiler, C., The future of fission-track thermochronology, In: Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.G., eds., *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.77–92.
 - 14) Kohn, B., Chung, L. and Gleadow, A., Fission-track analysis: field collection, sample preparation and data acquisition, In: Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.G., eds., *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.25–48.

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、地層処分事業・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、既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。一般的な試料前処理法では、処理に要する時間コストが大きいことから一日に測定可能な分析点数が制限され、分析試料量も比較的多い量(炭素量約 1 mg)を要する。迅速分析を可能にするレーザーアブレーション法と気体試料を直接分析するガスイオン源 AMS を組み合わせることで、前処理の簡略化と迅速分析を実現し、高精度な迅速年代測定が確立できると期待される。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と、前処理の簡略化を同時に進める。

(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、様々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 ¹²⁹I 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 ¹⁴C 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、¹⁴C 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 ¹⁴C 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 ¹⁴C 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僅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⁾; Jinno *et al.*, 2024¹⁰⁾)。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。これらの結晶に微小角度で 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解離片を検出した。SnTe は KCl に比べて荷電変換効率の僅かな向上が観測されたが、妨害分子の解離効率の改善は見られなかった。そこで、理論的な考察から仕事関数が高い物質であれば定性的に荷電変換効率が高くなると予測できることから、金属の中でも比較的平坦な表面を得ることができるマイカに蒸着された金 (Au) を使用した。その結果、これまでよりも高い荷電変換効率を得られ、妨害分子の解離効率の向上を確認した。

前処理を簡略化するレーザーアブレーション装置による試料前処理法の開発では、まず法令に基づいたレーザー使用環境の整備を行い、レーザー及び試料導入部を完全に遮蔽する専用ケースを設計・作製した。高出力・高分解能なレーザーマーカーを用いた木材のレーザー加工テストを実施し、高精度で年代推定を行うウイグルマッチング法で重要な西暦 775 年前後にみられる比較的狭い年輪幅 (0.25mm 程度) を 1 年単位でレーザー照射できることを確認した。ただしレーザーを長時間照射すると試料由来の蓄積物 (デブリ) がガラス表面に付着したことから、既存の試料チャンバーではレーザーの透過率とガス回収効率の低下が予想された。

³⁶Cl 年代測定法においては干渉核種となる硫黄 (³⁶S) 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。装置開発においてビーム軌道シミュレーション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。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。表面電離型イオン源の昇華用フィラメントに NaCl, SiO₂, Al₂O₃ を混合した試料を塗布し、負イオンを生成するために仕事関数を下げる効果のある(Ba-Sr-Ca)CO₃ をイオン化用フィラメントに塗布した。これらのフィラメントを加熱し負イオンを生成し、ウィーンフィルターによる質量分析をしたところ Cl⁻ビームを確認した。

前処理法の最適化のための検討では、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.*, 1990¹¹⁾)である STD4-1, STD5, ³⁶Cl 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)を使用し、塩化銀(AgCl)またはオキシクロライド塩(BiOCl)の形態にして、試料中に含まれる硫黄量の測定を同じ試料を用いて 2 回実施した。この結果、試料内の硫黄量のばらつきが2回目のほうが大きく、試料作成後から時間がたつと空気中の硫黄を取り込んでばらつきが大きくなることが示唆された。一方で、本測定は 2 回しか実施していないため、繰り返し測定を実施する必要があることも分かった。また本試料を名古屋大学にある電界放射型分析走査電子顕微鏡(FE-SEM; 日本電子 JSM-6330F)を用いて観察した(図 2.3.4-1)。この結果、全体的に粒径が 1 μm前後の一次粒子から構成されており、それらが固まって 1 μm 以下の孔を多数持つ多孔体の見た目になっていることが分かった。また、微粒子や粒子形状の乱れが観察されるのは、硫黄濃度が特に高いサンプルというわけではないことも分かった。

東濃地科学センターでは AGE3 を用いた少量試料のグラファイト調製の開発に加えて、さらに精度・確度がよくバックグラウンドの低い微量測定法を構築するため、鉄と炭素の化合物であるセメンタイト Fe₃C を用いた微量試料調製法にも着手した。セメンタイトを用いた調製法は均質なターゲット合成と安定した測定が特徴であり、東京大学で開発された手法である。本センターで最適な調製法を確立するため、令和 6 年度は鉄の種類や使用条件・反応収率・測定の再現性・バックグラウンド等を検討した。サンプルサイズは、通常量での測定の 1/10 となる炭素量 100 μg で実施した。まず試料調製では、粒径 45-150 μm の 5 種類の鉄触媒(和光純薬社製・45 μm, 和光純薬社製・100 μm, Alfa Aesar 社製・100 μm, 高純度化学社製・120 μm, ニラコ社製・150 μm)を比較し、最適な使用条件を検討した。鉄を予備的に還元してセメンタイトを作成したところ、反応がほとんど進まないか、反応速度が遅かった(6 時間以上)。そこで AGE3 で用いられる鉄の使用条件などを参考に、鉄を予備的に還元する前に短時間(30 分程度)酸化させたところ、ほぼ全ての鉄触媒で 90%前後の高い収率でのターゲット生成に成功した。またエックス線回折装置(XRD)を用いて合成したターゲットの化学成分を分析したところ、触媒である鉄に加えセメンタイトのピークが観察され、セメンタイトを作製できていることが確認できた。測定条件は検討段階であるが、初回の測定では電流値を 1 時間ほど維持し、分析精度は NIST(アメリカ国立標準技術研究所)SRM4990c の ¹⁴C/¹²C 測定で 0.9%程度、バックグラウンドはブランク測定用シュウ酸(和光純薬社製)で ¹⁴C/¹²C が 1.6 × 10⁻¹⁴ 程度(1.9 pMC)となっている。今後は実用化に向けて実試料を含めた測定例を蓄積する。

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、令和 6 年度は年代測定用試料の供給源推定で重要となる軽元素の安定同位体比を測定するために室内環境の整備を進めた。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、地質試料の分析データを継続して取得し得られた成果を取りまとめ公表した(渡邊ほか, 2024¹²⁾)。また、地質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を実現するため、検量線作成に必要な土壌や堆積物等の標準試料を選定した。令和 6 年度は東濃地科学センターの波長分散型 XRF での測定結果と、東北大学環境科学研究科のエネルギー分散型 XRF により得られたヨウ素及び

臭素濃度とを比較検討し、検量線の評価を進めることで天然の堆積物試料へ本手法を適用させることができた(木田ほか, 2024¹³⁾)。

(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, SnTe, Au それぞれの結晶表面において炭素負イオンが鏡面反射する際の荷電変換効率及び妨害分子の解離効率を測定した。今後、効率向上を目指し、表面散乱過程のモデル構築、それに基づく最適な結晶表面と測定条件の探索、及び荷電変換効率と妨害分子の解離効率の実験的調査が必要となる。その上で ^{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。

レーザーアブレーション装置による試料前処理法の開発では、レーザーの使用環境の整備とレーザー加工テストを実施した。狭い樹木年輪に対して高空間解像度でレーザー照射ができた。ただしレーザーを長時間照射すると試料由来の蓄積物(デブリ)がガラス表面に付着し、レーザーの透過率とガス回収効率が低下することから、デブリがガラスに付着しないよう新しくチャンバーを設計する必要がある。新しいチャンバー及びレーザー装置を用いて樹木年輪等に適用し、ガス回収率や放射性炭素測定結果の評価と、ガスイオン源 AMS と組み合わせた分析法の開発を進める。

^{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。表面電離型イオン源によりイオンビームを発生させ、質量分析器により Clビームを確認した。今後、イオンビームを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の割合を評価する。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を用いて硫黄量の測定と試料の観察を行った。試料観察の結果、液中での分散状態によっては、遠心して沈殿させた際に意外と粒子間の水がうまく流動せず、内部に硫黄を含む液が残ってしまう可能性があるかもしれないことが分かった。今後は、ゆっくり結晶成長させることで、粒子径を大きくしたりすると、硫黄含有量が改善する可能性があり、引き続き検討を行う。

セメンタイトを用いた微量試料調製法の確立では、東濃地科学センターで最適な鉄触媒の選定及び使用条件の検討を行い、XRD によるセメンタイトの生成を確認した。AMS 測定では、通常量のグラファイトの測定と比較してビームの強度や形状が異なること、さらにビーム強度の減衰や測定結果のばらつき、高いバックグラウンドが確認された。今後はセメンタイトに最適なイオン源の設定を検討し、バックグラウンド低下のための定期的な前処理器具のクリーニングや前処理法の検討を行う。また IAEA 国際標準物質を用いて測定の再現性を評価し、実用可能なレベルに繋げる。

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 XRF 等による分析手法の改良を継続して進めた。ヨウ素及び臭素等の定量分析手法については、引き続き新たな標準試料の探索を進め、各試料に合わせた検量線範囲の調整と検出限界下限値の評価等を行う必要がある。

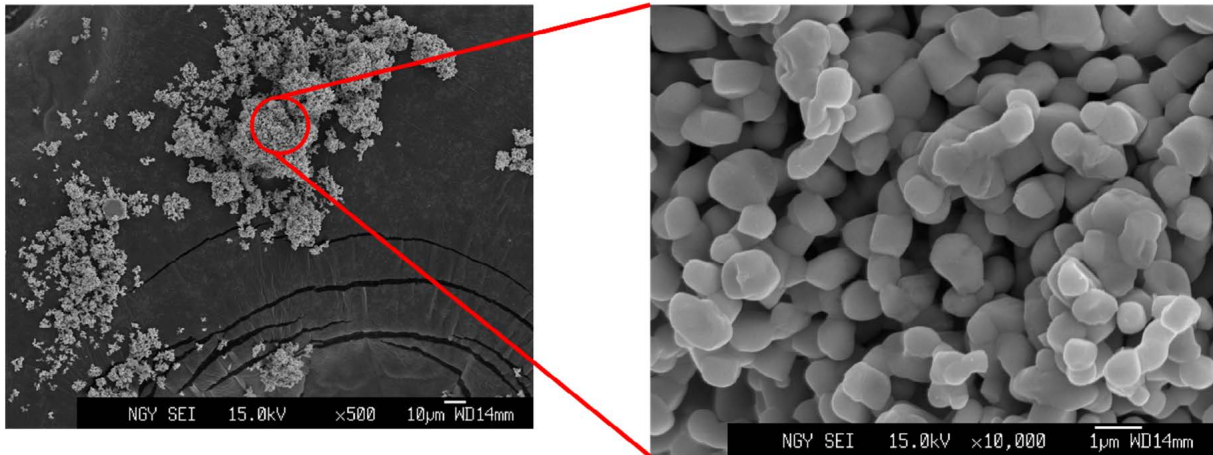


図 2.3.4-1 作成した AgCl を FE-SEM で観察した結果

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., Columna, 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) Jinno, S., Matsubara, A., Fujita, N., Kimura, K., Validation of crystal surface scattering method for downsizing accelerator, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.557, 2024,165545, doi:10.1016/j.nimb.2024.165545
 - 11) Sharma, P., Kubik, P.W., Fehn, U., Gove, H.E., Nishiizumi, K. and Elmore, D., Development of ³⁶Cl standards for AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol.52, 1990, pp. 410–415.
 - 12) 渡邊隆広, 山本悠介, 北村晃寿, 高潮堆積物及び津波堆積物の地球化学判別手法の検討, 日本陸水学会第 88 回熊本大会講演要旨集, 2024, P-24.
 - 13) 木田福香, 落合伸也, 渡邊隆広, 松中哲也, 橋野虎太郎, 山崎慎一, 山岸裕幸, 土屋範芳, 奈良郁子, 木場潟堆積物のハロゲン元素(Br) を指標とした日本海沿岸における完新世の海水準変動復元, 2024 年度日本地球化学会第 71 回年会講演要旨集, 2024, p.103.

This is a blank page.

