

地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (令和4年度)

Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation
of Radioactive Waste in Fiscal Year 2022

丹羽 正和 島田 耕史 末岡 茂 石原 隆仙
小川 大輝 箱岩 寛晶 渡部 豪 西山 成哲
横山 立憲 小形 学 福田 将眞 藤田 奈津子
小北 康弘 中嶋 徹 鏡味 沙耶 渡邊 隆広
塚原 柚子 川村 淳 長田 充弘

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Takanori ISHIHARA
Hiroki OGAWA, Hiroaki HAKOIWA, Tsuyoshi WATANABE, Nariaki NISHIYAMA
Tatsunori YOKOYAMA, Manabu OGATA, Shoma FUKUDA, Natsuko FUJITA
Yasuhiro OGITA, Toru NAKAJIMA, Saya KAGAMI, Takahiro WATANABE
Yuzuko TSUKAHARA, Makoto KAWAMURA and Mitsuhiro NAGATA

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター

Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

October 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(令和 4 年度)

日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

丹羽 正和, 島田 耕史, 末岡 茂, 石原 隆仙^{※1}, 小川 大輝^{※1}, 箱岩 寛晶^{※2},
渡部 豪^{※2}, 西山 成哲^{※2}, 横山 立憲, 小形 学, 福田 将眞, 藤田 奈津子, 小北 康弘,
中嶋 徹, 鏡味 沙耶, 渡邊 隆広, 塚原 柚子, 川村 淳^{※1}, 長田 充弘^{※2}

(2023 年 7 月 26 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 4 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

**Annual Report for Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste in
Fiscal Year 2022**

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Takanori ISHIHARA^{※1},
Hiroki OGAWA^{※1}, Hiroaki HAKOIWA^{※2}, Tsuyoshi WATANABE^{※2}, Nariaki NISHIYAMA^{※2},
Tatsunori YOKOYAMA, Manabu OGATA, Shoma FUKUDA, Natsuko FUJITA, Yasuhiro OGITA,
Toru NAKAJIMA, Saya KAGAMI, Takahiro WATANABE, Yuzuko TSUKAHARA,
Makoto KAWAMURA^{※1} and Mitsuhiro NAGATA^{※2}

Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received July 26, 2023)

This annual report documents the progress of research and development (R&D) in the 1st fiscal year of the Japan Atomic Energy Agency 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

目次

1. はじめに	1
2. 令和4年度の研究成果	5
2.1 調査技術の開発・体系化	5
2.1.1 断層の活動性に係る調査技術	5
2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術	9
2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術	20
2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	28
2.2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術	28
2.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術	46
2.3 年代測定技術の開発	53
2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術	53
2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術	60
2.3.3 フィッション・トラック(FT)年代測定技術	66
2.3.4 加速器質量分析技術	74

Contents

1. Introduction	1
2. Progress of the research and development in fiscal year 2022	5
2.1 Development and systematization of investigation techniques	5
2.1.1 Investigation techniques for evaluation of fault activities	5
2.1.2 Investigation techniques for high-resolution imaging of crustal heterogeneity	9
2.1.3 Investigation techniques for detection of geofluids	20
2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment	28
2.2.1 Models of geological environment for extremely low-frequency events	28
2.2.2 Development of estimation and evaluation techniques for natural phenomena of very long-term	46
2.3 Development of dating techniques	53
2.3.1 <i>In situ</i> analysis techniques and high-precision isotope analysis techniques	53
2.3.2 Optically stimulated luminescence dating techniques	60
2.3.3 Fission track dating method	66
2.3.4 Accelerator mass spectrometry techniques	74

1. はじめに

日本列島は、プレートの収束帯に位置しており、安定大陸に比べて地殻変動や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し、専門家による地層処分技術の再評価と今後の研究開発課題の検討が行われ、「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性及び地質環境の長期安定性について―」（総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾）が取りまとめられた。その結果、地層処分にとって好ましい地質環境特性を有する地域が我が国にも存在することが改めて示された。しかしながら、地層処分の技術的信頼性を向上させるため、今後の地層処分事業の取り組みと並行した研究開発の必要性も併せて示された。さらに、平成 28 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、などが提言されている（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、平成 29 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、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においても、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）が提示されている（原子力規制委員会, 2022¹⁹⁾）。

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となる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, 2015²⁰⁾）。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。研究開発に当たっては、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。

一方、令和 2 年に文献調査が始まり、今後近いうちに、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。また、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)の初年度にあたる令和 4 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、2.2.1、2.2.2、2.3.2 は、経済産業省からの受託事業「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)」の成果である。また、2.3.1 及び 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:2023 年 6 月 8 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:2023 年 5 月 29 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:2023 年 6 月 8 日).
- 20) 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 4 年度の研究成果

2.1 調査技術の開発・体系化

2.1.1 断層の活動性に係る調査技術

(1) はじめに

地層処分サイト選定に際しては、活断層を避けることが基本となるが、概要調査や精密調査においては、ボーリングや坑道掘削中に新たに遭遇した断層の活動性の評価が求められることも考えられる。この場合、断層変位の有無の判定に係る年代既知の被覆層を伴わないことも多いため、断層破碎帯内物質を用いた鉱物学・地球化学・年代学的手法の適用がしばしば検討される。本研究では、このような破碎帯内物質を用いた断層活動性評価について、従来手法の高度化や新しい手法の開発を通じ、適用性を拡充するとともに、評価手法の信頼性の向上を図る。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

破碎帯内物質を用いた断層活動性評価のうち、化学組成に基づくアプローチについては、断層ガウジの化学組成データを基に機械学習の手法を適用することで活断層と非活断層を判別する新たな手法が提案され(立石ほか, 2021¹⁾)、客観的かつ効率的な手法として有望であるとの見通しが得られている(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁾)。ただし手法の確立のためには、適用事例の拡充に加え、破碎帯内物質における元素移動のメカニズムの解明が課題である。これまでの検討から、TiO₂、MnO、Na₂O、K₂O、Rbの5成分が判別に大きく寄与する成分として挙げられた(原子力機構・電力中央研究所, 2023³⁾)ため、主にこれらの元素の断層ガウジ中における存在状態を明らかにする目的で、粘土鉱物中の層間イオンを把握するための交換性陽イオンの分析、レーザーアブレーション装置と四重極型誘導結合プラズマ質量分析装置を組み合わせた元素イメージングなどを実施してきた(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁾)。令和4年度はさらに、断層ガウジ試料を<2 μmの細粒部と>62 μmの粗粒部に分けて蛍光X線(XRF)分析を行うことにより、各元素の断層ガウジ中での存在状態を検討することにした。断層ガウジの場合、<2 μmの細粒部には粘土鉱物が、>62 μmの粗粒部には石英・長石などの碎屑粒子が濃集すると予想される。TiやMnはRb、Srなど1価や2価の陽イオンを取りやすい元素と異なり、交換性陽イオンの分析で抽出できると考えにくかったことから、本手法により、これらの成分の存在状態が検討できると考えた。

(3) 実施内容・結果

試料は五助橋断層(活断層)から採取されたGSK1、GSK3(浅森ほか, 2012⁴⁾)、六甲断層(活断層)から採取されたFSW1(田中ほか, 2018⁵⁾)の船坂西露頭のF1、六甲花崗岩中の断層(非活断層)から採取されたHRK1、HRK3(田中ほか, 2018⁵⁾)のK-3露頭のF1、広島花崗岩中の断層(非活断層)から採取された15042102-2、15042103-1、15042103-3(植木ほか, 2016⁶⁾)を用いた。採取試料は、ふるいと水ひ法を用いて粗粒部と細粒部にそれぞれ分離した。分離した試料のうち粗粒部は土岐地球年代学研究所設置の高速粉砕機(安井器械株式会社製マルチビーズショッカーPV1001(S))を用いて粉砕した。試料への異質物の混染を防ぐため、試料はポリカーボネート製の粉砕容器に入れ、粉砕にはめのう製のコーンを用いた。

粉砕後の粗粒部及び細粒部の試料は、希釈率1:2のガラスビードを作成し、土岐地球年代学研究所設置の蛍光X線分析装置(株式会社リガク製ZSX Primus II)を使用して分析を行った。ガラスビードの作成方法及び分析方法は清水ほか(2017⁷⁾)に従った。分析は、主成分(SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、

MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅の 10 成分)と微量成分(Ba, Ce, Co, Cr, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, U, V, Y, Zr の 16 成分)について行ったが、ここでは特に機械学習に基づいた検討から判別に大きく寄与する成分として挙げられた、TiO₂, MnO, Na₂O, K₂O, Rb について報告する。分析条件、分析誤差などについては、清水ほか(2017⁷⁾)に準ずる。

XRF 分析の結果を表 2.1.1-1 及び図 2.1.1-1 に示す。TiO₂については、活断層試料の細粒部で最も濃集しており、同じ試料で実施した元素イメージングの結果(原子力機構・電力中央研究所, 2023³⁾)と整合的である。Rb については非活断層試料の細粒部に最も濃集しており、元素イメージングの結果に加え、令和 3 年度に実施した交換性陽イオンの分析結果(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁾)とも整合的である。一方、MnO は、FSW1, HRK1, HRK3 において粗粒部の試料の MnO 濃度が高く、活断層/非活断層での傾向の識別ができなかった。Na₂O, K₂O については、活断層/非活断層、粗粒部/細粒部で明瞭な違いは見られなかった。

(4) 主な成果と課題

本研究では、活断層、非活断層の識別に影響する元素が、断層運動に伴い濃集、溶脱するメカニズムを理解するため、両者の断層ガウジを粗粒部、細粒部に分級し、XRF 分析を行った。分析の結果、機械学習において判別に大きく寄与する成分として検出された成分のうち、特に Ti と Rb については、断層ガウジの粘土鉱物に富む基質部分での存在状態が、活断層、非活断層とを識別するうえで重要であることが見出された。今後は、断層運動に伴うこれらの成分の移動の原因を解明するため、水-岩石反応による各成分の酸化・還元状態の変化や同位体分別を踏まえた検討、摩擦などによるこれらの成分の移動に係る検討などが課題となる。

表 2.1.1-1 <2 μm の細粒部と>62 μm の粗粒部に分級した試料の XRF 分析結果

	SiO ₂ wt%	TiO ₂ wt%	Al ₂ O ₃ wt%	Fe ₂ O ₃ wt%	MnO wt%	MgO wt%	CaO wt%	Na ₂ O wt%	K ₂ O wt%	P ₂ O ₅ wt%	Ba ppm	Rb ppm	Sr ppm
GSK1 <2 μm	50.73	0.32	18.57	5.57	0.07	1.11	2.15	1.35	2.50	0.05	681	137	242
GSK1 >62 μm	77.34	0.07	10.36	0.57	0.02	0.09	1.85	2.45	2.92	0.02	845	83	288
GSK3 <2 μm	50.11	0.31	18.80	5.84	0.07	1.11	2.27	1.08	2.41	0.04	590	122	165
GSK3 >62 μm	77.10	0.07	10.90	0.63	0.02	0.09	1.54	2.87	2.90	0.02	746	83	131
FSW1 <2 μm	45.80	0.36	18.59	16.07	0.08	0.46	0.57	0.29	2.60	0.04	230	217	61
FSW1 >62 μm	65.25	0.06	8.53	14.92	0.13	0.05	0.08	0.52	3.32	0.03	280	132	28
HRK1 <2 μm	54.58	0.02	24.66	4.29	0.09	0.22	1.04	0.21	4.02	0.01	106	511	60
HRK1 >62 μm	81.71	0.02	8.02	2.73	0.10	0.04	0.27	0.82	2.76	0.01	70	177	20
HRK3 <2 μm	53.51	0.03	23.00	3.93	0.09	0.16	0.92	0.51	3.71	0.02	150	690	65
HRK3 >62 μm	77.42	0.02	9.64	3.31	0.11	0.04	0.31	1.17	2.91	0.01	74	214	26
15042102-2 <2 μm	53.57	0.17	23.12	4.57	0.04	1.68	1.60	0.90	3.76	0.02	190	463	61
15042102-2 >62 μm	78.10	0.03	11.12	0.61	0.01	0.08	0.31	2.86	4.21	0.01	253	185	45
15042103-1 <2 μm	51.36	0.16	21.85	3.13	0.07	1.69	1.26	0.89	3.86	0.03	267	610	73
15042103-1 >62 μm	71.85	0.11	14.68	1.60	0.04	0.42	0.61	2.31	4.74	0.02	378	327	68
15042103-3 <2 μm	53.42	0.14	19.85	2.34	0.04	1.85	1.36	0.71	3.19	0.02	284	529	64
15042103-3 >62 μm	77.41	0.08	11.15	0.92	0.02	0.65	0.67	1.15	3.31	0.02	324	288	44

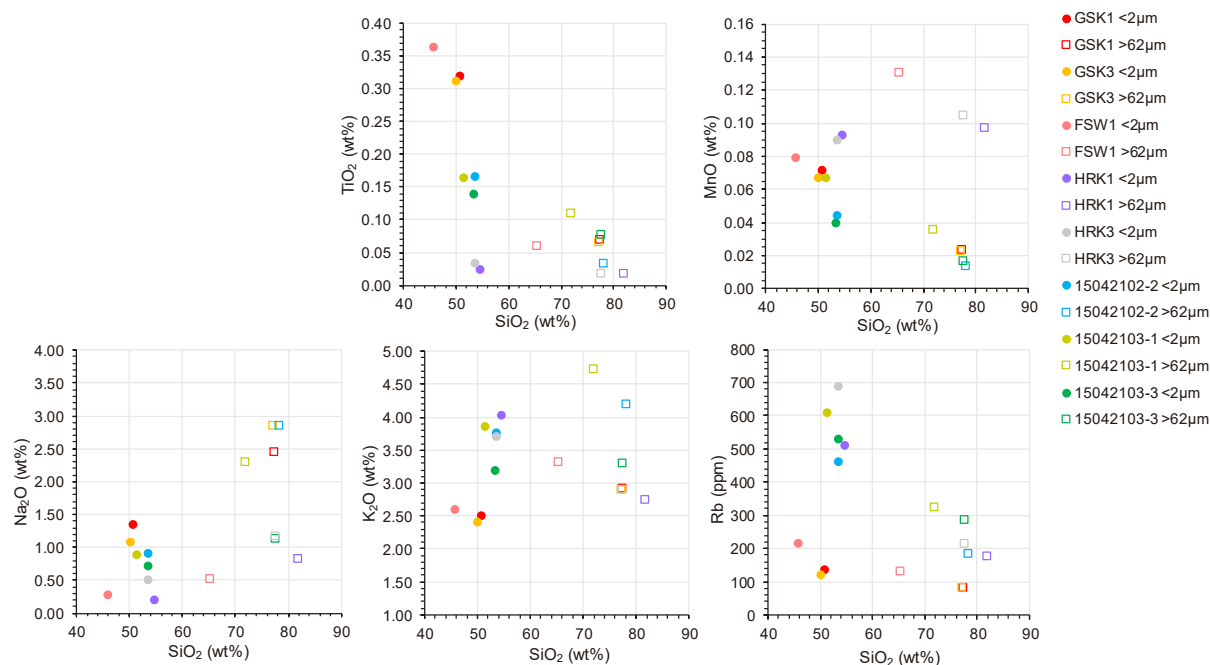


図 2.1.1-1 分級した試料の濃度プロット

参考文献

- 1) 立石 良, 島田耕史, 清水麻由子, 植木忠正, 丹羽正和, 末岡 茂, 石丸恒存, 断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別—線形判別分析による試み, 応用地質, vol.62, 2021, pp.104-112.
- 2) 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.

- 3) 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.
- 4) 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内 歩, 高取亮一, 國分(齋藤)陽子, 松原章浩, 石丸恒存, 梅田浩司, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成 23 年度), JAEA-Research 2012-024, 2012, 132p.
- 5) 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.59, 2018, pp.13-27.
- 6) 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, 292p.
- 7) 清水麻由子, 佐野直美, 柴田健二, 東濃地科学センターにおける蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析, JAEA-Testing 2016-004, 2017, 40p.

2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術

(1) はじめに

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

第3期中長期目標期間においては、地下深部の不均質構造を把握するための技術開発として、特に地震波トモグラフィ法(例えば、原子力機構・電力中央研究所, 2021¹⁾; 産業技術総合研究所ほか, 2019²⁾)及び地磁気地電流(MT: Magnetotelluric)法電磁探査に基づく検討を進めてきた。MT法については、第3期中長期目標期間の中で、地下の流体賦存域の分布を把握するための手法の適用事例の蓄積として、地震に伴い長期間の湧水が継続した事例として知られる2011年の福島県浜通りの地震の震源域(Umeda, 2015³⁾; Umeda *et al.*, 2015⁴⁾)や1965年～1968年の長野県松代群発地震の震源域(原子力機構・電力中央研究所, 2019⁵⁾)、震源断層と流体との関係を検討する事例として2014年長野県北部地震の震源域(石丸ほか, 2019⁶⁾)、マグマの活動範囲の評価に資するための中国地方の青野山単成火山群の分布域(原子力機構・電力中央研究所, 2020⁷⁾)及び前弧域における深部流体の存否や分布を明らかにするための九州を東西に横断する測線(石丸ほか, 2018⁸⁾)において、それぞれ観測及び二次元比抵抗解析を行い、適用事例を提示してきた。ただしMT法では、電力系統等に代表される電氣的構造物により発生する電磁ノイズの混入により、解析結果の信頼性が低下するといった技術的な問題点がある。こうした問題点の解決のため、第3期中長期目標期間において、連続ウェーブレット変換(CWT: Continuous wavelet transform)や独立成分分析(ICA: Independent component analysis)を用いたMT法観測データの品質の改善(Ogawa *et al.*, 2021⁹⁾)等についても取り組んできた。前者に関しては、観測時系列にCWTを適用することで、スペクトル変換に伴う数値誤差を効果的に抑制しつつ非定常信号である約1 Hz未満の自然電磁場の応答を導出する方法を提案した(小川ほか, 2022¹⁰⁾)。令和4年度は、こうした数学的方法を組み合わせたMT法観測データ処理による独自のノイズ低減技術の整備及び改良を行い、その成果を取りまとめた(Ogawa *et al.*, 2023¹¹⁾)。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

MT法において、磁場と電場の両方に高い相関をもって混入するコヒーレントノイズが存在すると、観測上非常に大きな障害となることが古くから知られている。こうした種類のノイズは、直流電化鉄道のほか、高圧送電線、耕作地等での電気柵及びパイプラインの腐食防止等の電気設備を発生源とするため(Oettinger *et al.*, 2001¹²⁾)、国内においても遍在する。電磁場のコヒーレントノイズの間の相関関係を示すインピーダンス(電磁場応答関数)は、同じく高い相関関係を有する自然電磁場間のインピーダンスとの区別が困難である(Larsen *et al.*, 1996¹³⁾)。また、リモートリファレンス処理(Gamble *et al.*, 1979¹⁴⁾)は、目的の観測地域におけるローカルノイズがそこから十分に離れた参照点で取得されたデータとは相関がほとんど無いことを利用したノイズ低減方法として広く活用される。しかし、幅広い帯域で強大なエネルギーを有するコヒーレントノイズが存在する場合自然信号に重畳しやすいため、実際のMT法探査においてはこの方法の適用だけでは十分なデータの品質改善には至らないことが多い(Pádua *et al.*, 2002¹⁵⁾; 上嶋ほ

か, 2010¹⁶⁾。

コヒーレントノイズをはじめとした強大なノイズの影響を抑制することを目標に、観測電磁場の自然信号とノイズへの分解に基づいた MT 法観測データ処理技術が、近年盛んに報告されている。Li *et al.* (2020)¹⁷⁾ や Wang *et al.* (2022)¹⁸⁾ は、自然信号とノイズの波形を効果的に分離するために、変分的モード分解の適用を提案した。さらに Li *et al.* (2022)¹⁹⁾ は直交マッチング追跡に基づくスパースモデリングにより、特に除去が困難とされる矩形波や三角波等の形状のノイズを検出しつつ自然信号の波形を高速に再構成できることを報告した。しかし、これらの観測データ処理手法を用いても、要求される計算設定の恣意性や煩雑さ (Zhang *et al.*, 2021²⁰⁾) がある点や、ノイズの形状や振幅等に信号対雑音比 (S/N 比: Signal-Noise ratio) の改善性能が左右されてしまう点 (Li *et al.*, 2022¹⁹⁾) が依然課題として残っており、MT 法における観測電磁場応答の品質を常に十分に改善できるとは限らない。

観測データを構成する源信号が互いに独立無相関であると仮定すると、自然信号またはノイズの情報を抽出する問題は ICA を用いて解くことができる。そのうち周波数領域 ICA (FDICA: Frequency domain ICA) は、ICA を複素数に拡張して実行可能である。特に MT 法においては、磁場と電場の間の位相差を評価することで両者が時間差を伴って観測されるものと考えため、自然信号やノイズの畳み込み混合として観測電磁場を扱うには FDICA の適用が望ましい (奥田・茂木, 2017²¹⁾; Sato *et al.*, 2021²²⁾)。観測データを入力値に設定して ICA を実行すると源信号の情報を持つ複数の成分 (分離信号成分) が出力されるため、それらのうちノイズに相当する成分を除去することで S/N 比が改善された観測データを再構成することが可能である。しかし、分離信号成分からの値の減算が適切でない場合には、ノイズの影響を受けた値の取りこぼしや除去すべきでない自然信号の値の損失につながり、真の MT 応答の導出に失敗することがある。

以上のようなことから本研究では、コヒーレントノイズへの耐性が強くかつ実際の観測に有用な独自の MT 法観測データ処理手法を開発した。

(3) 実施内容・結果

令和 4 年度までに整備した MT 法ノイズ低減技術について、その特徴及び性能評価の数値実験の概要を以下に記す。詳細は Ogawa *et al.* (2023)¹¹⁾ を参照されたい。開発した MT 法観測データ処理手法の一連の流れを図 2.1.2-1 に示す。

観測時系列に CWT (小川ほか, 2022¹⁰⁾) を適用した上で、時間・周波数領域データとして MT データを周波数毎に扱う。ここで、互いに独立な源信号である自然信号を S 、観測点周辺のローカルノイズによる応答を N とそれぞれ表す。一般に、自然電磁場の信号源は南北 (x) 方向及び東西 (y) 方向の 2 方向に分極して存在すると考えられている (Egbert, 2002²³⁾)。また、観測点から一定の距離離れた参照点におけるノイズレベルは十分に小さく、参照磁場はほぼ S_x と S_y に起因するものと仮定する。これらによれば、電磁場の源信号と、観測点及び参照点で取得されるデータとの関係は、周波数 f における 4×4 の混合行列 $A(f)$ を用いて、

$$\begin{bmatrix} E_x(f, \tau), H_y(f, \tau), R_y(f, \tau), R_x(f, \tau) \end{bmatrix}^T \cong A_{XY}(f) \begin{bmatrix} N_{1XY}(f, \tau), N_{2XY}(f, \tau), S_y(f, \tau), S_x(f, \tau) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_y(f, \tau), H_x(f, \tau), R_x(f, \tau), R_y(f, \tau) \end{bmatrix}^T \cong A_{YX}(f) \begin{bmatrix} N_{1YX}(f, \tau), N_{2YX}(f, \tau), S_x(f, \tau), S_y(f, \tau) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

と仮定できる。ここに E_x と E_y は観測点における水平電場成分、 H_x と H_y は観測点における水平磁場成分、 R_x と R_y は参照点における水平磁場成分を表し、 τ は時間フレームを意味する。なお、観測点の水平電磁場は、東西方向の地磁気変動に関連した XY モードと、南北方向の地磁気変動に関連した YX モードに

大別される。式(1)及び式(2)の左辺にあたる観測データ $\mathbf{X}_{XY(YX)}(f, \tau)$ に対し FDICA をそれぞれ適用し、分離行列 $\mathbf{W}_{XY(YX)}(f)$ を導出することで、式(1)及び式(2)の右辺にあるような源信号の情報を含んだ分離信号 $\mathbf{Y}_{XY(YX)}(f, \tau)$ は、

$$\mathbf{Y}_{XY(YX)}(f, \tau) = \mathbf{W}_{XY(YX)}(f) \mathbf{X}_{XY(YX)}(f, \tau) \quad (3)$$

として与えられる。開発手法では、分離信号の各成分の非ガウス性の最大化に基づいて不動点法の更新則を実行する複素 FastICA (Bingham and Hyvärinen, 2000²⁴⁾)を、FDICA のアルゴリズムとして用いる。このアルゴリズムは、単位ベクトルを各分離行列ベクトルの初期値とし、非常に高速な 3 次的収束を実現可能なことに加え、学習係数等のパラメータを更新則の中で必要とせず安定性が高い。

FDICA により出力された 4 つの分離信号成分のうち、自然信号を表す 2 つの成分とノイズを表す他 2 つの成分は、観測点のノイズの影響を受けない参照磁場を用いて定量的に判定する。信号におけるノイズの寄与が大きくなるに従い、信号と参照磁場との相互パワースペクトルと、信号の自己パワースペクトルの比が小さくなるが(根木ほか, 2010²⁵⁾)、この性質は分離信号にも当てはめることができる。したがって各分離信号成分について、参照磁場との相互パワースペクトルと自己パワースペクトルの比を算出することで、比の値が大きい 2 つの成分が自然信号を、他 2 成分がノイズを主に表すものと、簡便に判定可能となる。分離信号のうち自然信号と判定された成分を Y_{Sx} , Y_{Sy} と、残り 2 成分をノイズの影響が大きい順に Y_{N1} , Y_{N2} と表すこととする。

FDICA による信号分離の不確実性を考慮すれば、ノイズと判定された分離信号成分は実際にはノイズのみでなく一部の自然信号にも起因する可能性がある。そこで、開発手法では、① Y_{N1} 及び Y_{N2} 中の全ての値を差し引く、② Y_{N1} 中の全ての値と Y_{N2} のうち中央値を超える値を差し引く、③ Y_{N1} 中の全ての値を差し引くが Y_{N2} を保存する、④ Y_{N1} のうち中央値を超える値と Y_{N2} 中の全ての値を差し引く、⑤ Y_{N1} 及び Y_{N2} のうち中央値を超える値を差し引く、⑥ Y_{N1} のうち中央値を超える値を差し引くが Y_{N2} を保存する、の最大 6 通りから、分離信号からのノイズの値を減算する最適な方法を探索する。なお、式(3)から、ノイズを低減した分離信号 $\mathbf{Y}_{XY(YX)}(f, \tau)$ に分離行列 $\mathbf{W}_{XY(YX)}(f)$ の逆行列を左から掛けることで、観測データを再構成することができる。減算方法①～⑥により再構成される観測電磁場についての評価を行うことで、どの方法によるノイズ減算を行うのが適切であるかを判定する。

MT 応答関数は一般に水平電場と水平磁場の比として表される。1 回の夜間測定時間に相当する約 10 時間以上の比較的小さい時間スケールでは応答関数がほぼ一定値をとるものとすれば、以下の操作を行うことで、時間領域における応答関数の変動を評価することができる：

- (i) 水平電磁場に対し、微小時間幅による移動平均を行う。
- (ii) 各時間区間 b において、水平電磁場の比($\hat{E}_x$ と $\hat{H}_y$ の比または $\hat{E}_y$ と $\hat{H}_x$ の比)を式(4), (5)のように計算する。

$$\hat{z}_{xy}(f, b) \cong \left| \frac{\langle \hat{E}_x \hat{R}_x^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_x \hat{R}_y^*(f, b) \rangle - \langle \hat{E}_x \hat{R}_y^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_x \hat{R}_x^*(f, b) \rangle}{\langle \hat{H}_y \hat{R}_x^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_x \hat{R}_y^*(f, b) \rangle - \langle \hat{H}_y \hat{R}_y^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_x \hat{R}_x^*(f, b) \rangle} \right|^2 \quad (4)$$

$$\hat{z}_{yx}(f, b) \cong \left| \frac{\langle \hat{E}_y \hat{R}_x^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_y \hat{R}_y^*(f, b) \rangle - \langle \hat{E}_y \hat{R}_y^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_y \hat{R}_x^*(f, b) \rangle}{\langle \hat{H}_x \hat{R}_x^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_y \hat{R}_y^*(f, b) \rangle - \langle \hat{H}_x \hat{R}_y^*(f, b) \rangle \langle \hat{R}_y \hat{R}_x^*(f, b) \rangle} \right|^2 \quad (5)$$

- (iii) 観測時間中の全ての $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ ($\log_{10} \hat{z}_{xy}(f, b)$ または $\log_{10} \hat{z}_{yx}(f, b)$)を複数の階級に区分し、 $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ の度数分布を考える。階級数 K はスタージェスの公式(Sturges, 1926²⁶⁾)により計算でき、

各階級の幅の大きさを d は $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ についての K 個の階級のヒストグラムから与えられる。 K 個の階級 $\mathbf{C} = [C_1, \dots, C_K]$ のうち最大度数 C_{max} を持つ階級の下端及び上端の値をそれぞれ $z_{log_maxcount_low}$, $z_{log_maxcount_low} + d$ とすると, $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ の代表値 z_{log_rep} は,

$$z_{log_rep} = z_{log_maxcount_low} + d \cdot \frac{C_{max} - C_{max-}}{(C_{max} - C_{max-}) + (C_{max} - C_{max+})} \quad (6)$$

と表すことができる。ここに C_{max-} 及び C_{max+} はそれぞれ, C_{max} の階級と縦軸($\log_{10} \hat{z}(f, b)$ の軸)の負の方向と正の方向で隣接する階級の持つ度数である。したがって, z_{log_rep} 近傍に分布する $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ のカウント値を,

Number $\{M\}(f)$

$$\text{ただし } M = \{\log_{10} \hat{z}(f, b) | z_{log_rep} - (\bar{d}/2) \leq \log_{10} \hat{z}(f, b) < z_{log_rep} + (\bar{d}/2)\} \quad (7)$$

と表現する。ここに $\bar{d}$ は, 全てのノイズ減算方法の実行により導出される応答関数の階級幅(最大 6 通り)の平均値を表す。真の MT 応答関数の値は時間変動が小さく代表値近傍に集中するものと考えれば, ノイズが十分に低減された電磁場から求まる応答関数は大きいNumber $\{M\}$ を示すと判断できる。

一方, 周波数領域では, MT 応答関数は周波数方向に滑らかに変動する。各 $\log_{10} \hat{z}(f_i, b)$ ($i = 2, \dots, I$)と隣接する周波数 $f = f_{i-1}$ における代表値との間の距離二乗和を,

$$\Delta(f_i) = \|(z_{log_rep}(f_{i-1}) + (d_{i-1}/2)) - \log_{10} \hat{z}(f_i, b)\|^2 + \|(z_{log_rep}(f_{i-1}) - (d_{i-1}/2)) - \log_{10} \hat{z}(f_i, b)\|^2 \quad (8)$$

と表す。 d_{i-1} は, 周波数 $f = f_{i-1}$ において最適と判定されたノイズ減算方法を実行し再構成された水平電磁場により求まる階級幅を意味する。この距離二乗和 Δ が小さい場合には隣接する周波数間で応答関数の値が急変することを避けることになるため, 周波数方向において応答関数は滑らかに変動する。

以上のように, Number $\{M\}$ が大きいほど MT 応答関数の時間領域における定常性が高く, Δ が小さいほど周波数領域における平滑性が高いものと考え, これら 2 つの性質に関する評価関数 U を,

$$U(f_i) = (1/\text{Number}\{M\}(f_i))_{std} + (\Delta(f_i))_{std} \quad (i = 2, \dots, I) \\ (1/\text{Number}\{M\}(f_i))_{std} \quad (i = 1) \quad (9)$$

と定義する。添え字 std は当該配列内のデータの標準化を意味する。FDICA で得た分離信号に対してノイズ減算を実行し, それにより再構成された水平電磁場を用いて $1/\text{Number}\{M\}$ 及び Δ を計算する操作を複数通り(前述の①～⑥の最大 6 通り)行い, 最小の U を与えるノイズ減算方法が適切であると判断しそれを採用することに決定する。ある周波数の分離信号に 6 通りのノイズ減算を試行し再構成された水平電磁場から応答関数を導出し, その分布状態を U を用いて評価した例を図 2.1.2-2 に示す。ここでは $U = (-2.56, -1.10, 2.19, -0.395, -0.676, 2.54)$ が算出され, 減算方法①を適用し Y_{N1} 及び Y_{N2} を全て除去した結果が, 最小の U を与えることが示された。①以外の減算方法を用いた場合には, 図 2.1.2-2 にある通り $\log_{10} \hat{z}_{xy}(f, b)$ の値の時間方向のバラつきが大きいほか, 特に③や⑥の減算方法からは隣接する 0.0401 Hz における代表値との差異が大きい応答関数が算出されていた。このようなことから, FDICA で得た分離信号から過不足の無いノイズ減算を図るために, 評価関数 U の導入が有効であることが示唆される。

本研究では、コヒーレントノイズが卓越しかつ S/N 比が低い地域の実データに対し、開発手法の適用を試みた。観測点 NGN-Site A は長野県白馬村に位置し(図 2.1.2-3(左)), 2016 年 9 月 16 日 17 時から翌 8 時まで、15 時間の電磁場の連続測定が行われた。図 2.1.2-3(右)で見られるように 01:00-05:00 以外の時間帯で電磁場の振幅が非常に大きく、当該観測点の西方を走る JR 大糸線の直流電化区間から漏洩する直流～低周波数の電流による影響を強く受けていたことが分かる。また、気象庁柿岡地磁気観測所が 3 時間ごとに公開する、地磁気擾乱の大小の指数である K 値は、2016 年 9 月 16 日 18 時～翌 17 日 9 時の時間帯では 0～1(5 段階)を記録していたため、地磁気活動が非常に静穏であった。また、この観測点から約 400 km 離れた岩手県西和賀町の参照点で同時刻に取得された、水平磁場のデータも使用された。以上のような実データに対し開発手法を適用して得られた探査曲線の、現地調査で普及している商用ソフトウェアの“SSMT 2000”及び“MTEditor”(いずれも Phoenix Geophysics 社製)を用いたデータ処理結果との比較を、図 2.1.2-4 に示す。いずれの手法の工程にも前述の参照磁場によるリモートリファレンス処理が含まれる。なお、既存のソフトウェアの“MTEditor”にはノイズに汚染された時間帯のスペクトルを自動で判定し除去する“Auto Edit”機能が搭載されている。対象地域の JR 大糸線のような直流電化鉄道と変電所を結ぶ区間は 1 本の電気バイポールに近似されるため(笠谷ほか, 1996²⁷⁾、鉄道区間周辺における観測点ではこの電気バイポールがつくる人工的な電磁場が卓越する。電気バイポールと観測点との距離を r とすると、 r の 3 乗に逆比例する電場と、 r の 2 乗に逆比例する磁場が生じるが、これは人工電流がもたらす「ニアフィールド効果」としてよく知られている(例えば, Oettinger *et al.*, 2001¹²⁾)。こうした影響のために、既存のソフトウェアによるデータ処理を行うと、約 0.3 Hz 以下の低周波数側で見かけ比抵抗の単調増加と電磁場間の位相の 0° (-180°) への漸近が生じ(図 2.1.2-4(左))、地下の情報をほとんど反映しない探査曲線が算出されてしまう。一方、開発手法を適用した結果、直流電化鉄道に起因する「ニアフィールド効果」の影響を、探査曲線から明瞭に低減できたことが認められる(図 2.1.2-4(右))。さらに、開発手法により得られた探査曲線を、鉄道運休時間帯である 01:00-05:00 の時間帯の観測データのみを既存のソフトウェアで処理することで得られた探査曲線(図 2.1.2-4(中央))と比較すると、両者の曲線の傾向は大局的に類似し、かつ多くの周波数において、開発手法による処理結果の方がより高いデータの連続性と小さい観測誤差を示すため、品質が優れていることが分かる。なお、開発手法を適用した場合、約 0.005 Hz 以下の帯域で探査曲線のバラつきが大きくなる。低い周波数に対しては、スペクトル変換における時間窓幅が大きくなることから、全観測時間における時間フレーム数が減少する。そのため、約 0.005 Hz 以下の帯域での探査曲線の品質の低下は、データ長の減少に伴う FDICA の信号分離能力の低下に起因している可能性がある。

(4) 主な成果と課題

本研究では、第 3 期中長期目標期間から検討を続けていた数学的方法の CWT 及び ICA を組み合わせ、独自の MT 法ノイズ低減技術を開発した。これは、観測電磁場の源信号の独立性と応答関数の連続性という 2 つの性質を利用したものである。また、FDICA をはじめとした開発手法におけるアルゴリズムの実行においては、恣意性の高い経験的なパラメータ設定や初期値入力をほぼ必要とせず、観測データを分解して得た自然信号とノイズの定量的な識別や、各周波数における最適なノイズ減算方法の探索を実現する。S/N 比が低く従来 MT 法探査が非常に困難とされてきた直流電化鉄道地域における実データに対し、開発手法の適用を試みた。その結果、直流電化鉄道特有の電磁ノイズがもたらすニアフィールド効果によるバイアスの影響を、探査曲線から明瞭に低減することができたことに加え、開発手法が既存手法に比べて高い品質の探査曲線を与えやすいことが示された。開発した観測データ処理におけるノイズ低減技術が直流電化鉄道地域での観測に対して有効なことが認められた一方、低周波数帯域における品質改善に関しては、今後さらなる検討の余地がある。例えば、自然信号と判定された分離信号成

分に対しても何らかの後段処理を行い混入するノイズを除去できれば、低周波数帯域においてデータ長が減少しICAの信号分離能力が低下する影響を克服でき、さらに高精度にMT応答を導出可能となるものと期待できる。

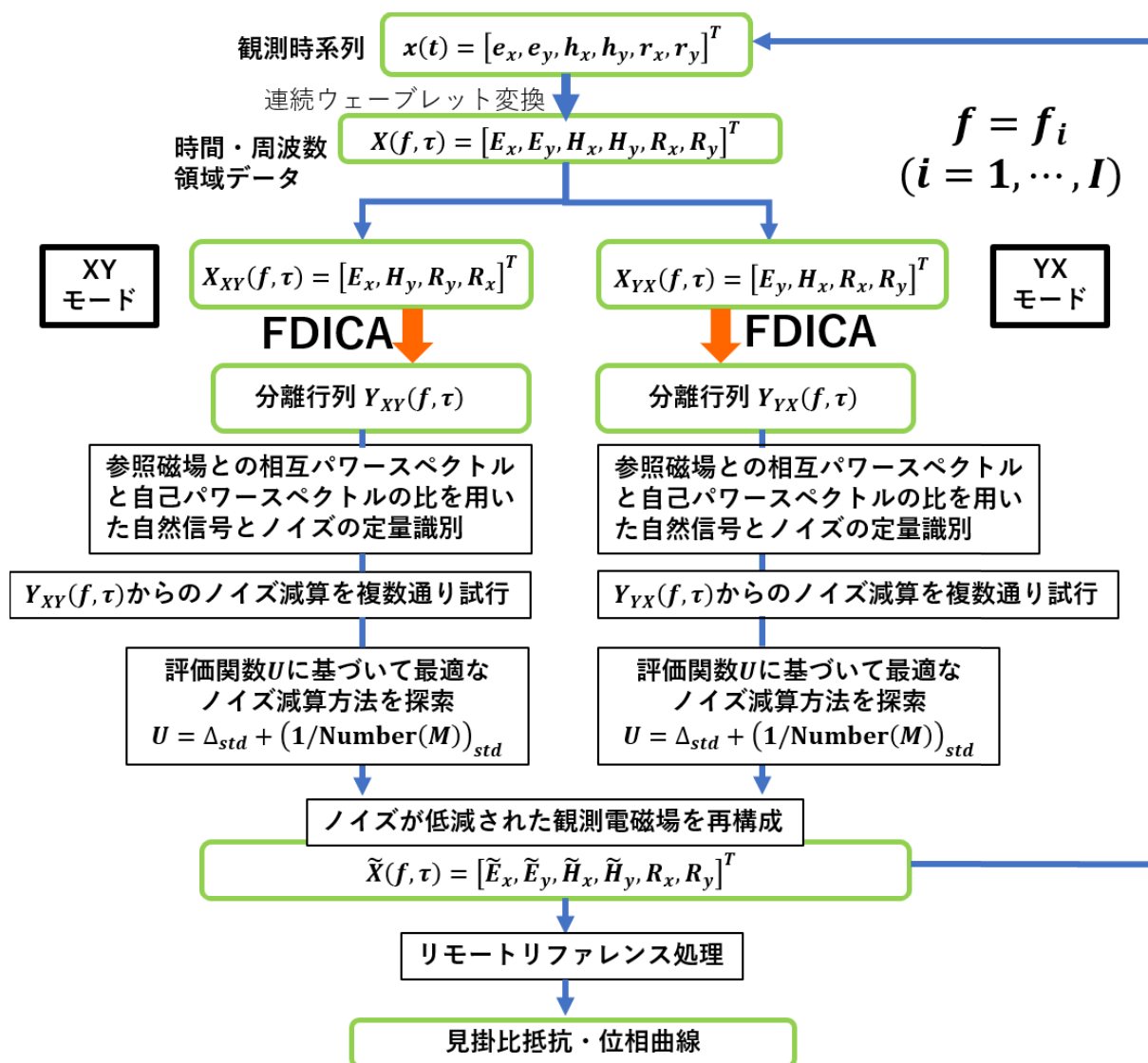
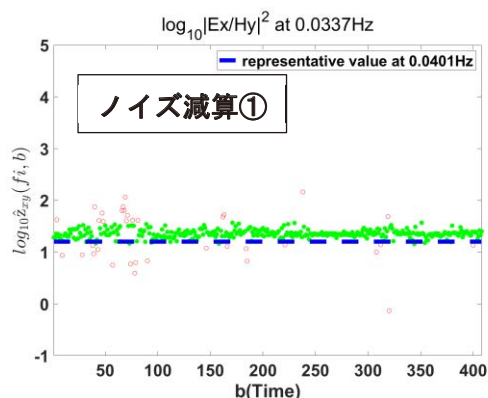
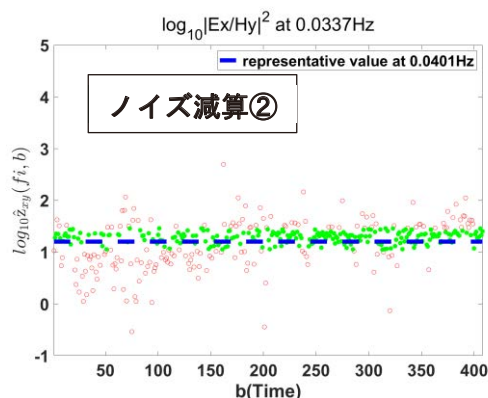


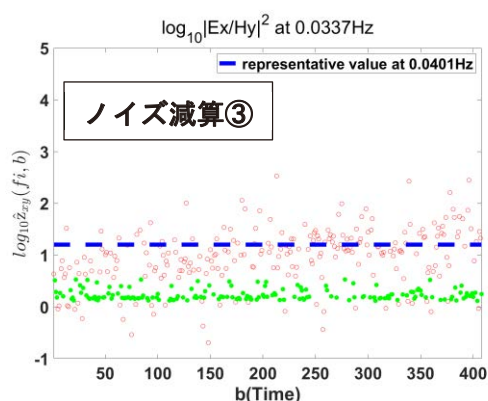
図 2.1.2-1 開発した MT 法観測データ処理手法のフローチャート



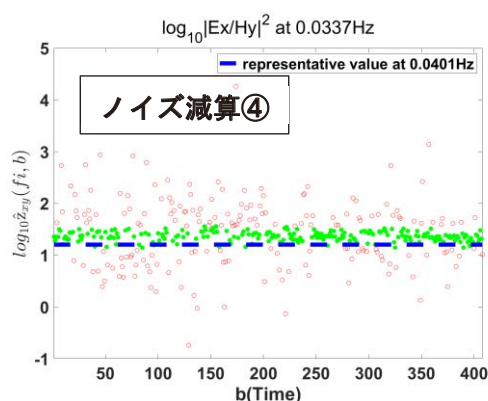
Number $\{M\} = 372, \Delta = 73, U = -2.56$



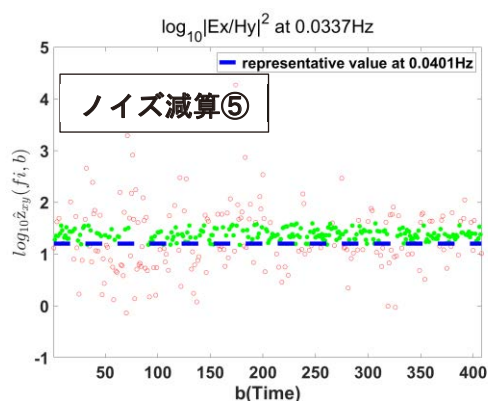
Number $\{M\} = 238, \Delta = 142, U = -1.10$



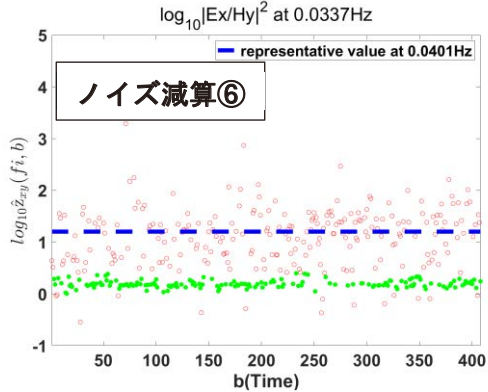
Number $\{M\} = 165, \Delta = 542, U = 2.19$



Number $\{M\} = 226, \Delta = 255, U = -0.395$



Number $\{M\} = 230, \Delta = 208, U = -0.676$



Number $\{M\} = 159, \Delta = 580, U = 2.54$

図 2.1.2-2 全 6 通りのノイズ減算が適用された分離信号から導出された応答関数の例
 青色点線は当該周波数における代表値 $z_{\log_rep}$ を、緑色のプロットは式(7)で定義される $z_{\log_rep}$ 近傍の $\log_{10} \hat{z}(f, b)$ をそれぞれ表す。

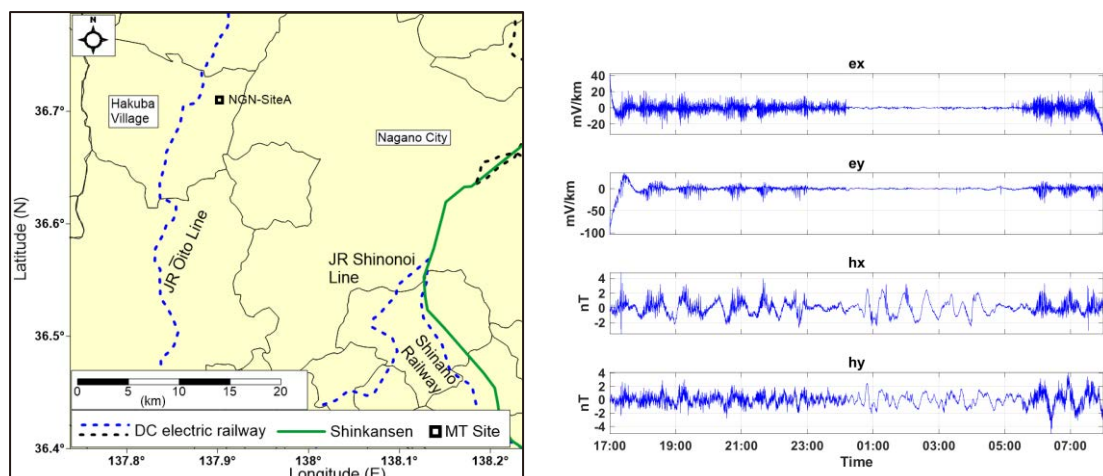


図 2.1.2-3 左)長野県内 MT 法調査地域図 右)観測点 NGN-Site A における水平電磁場の時系列

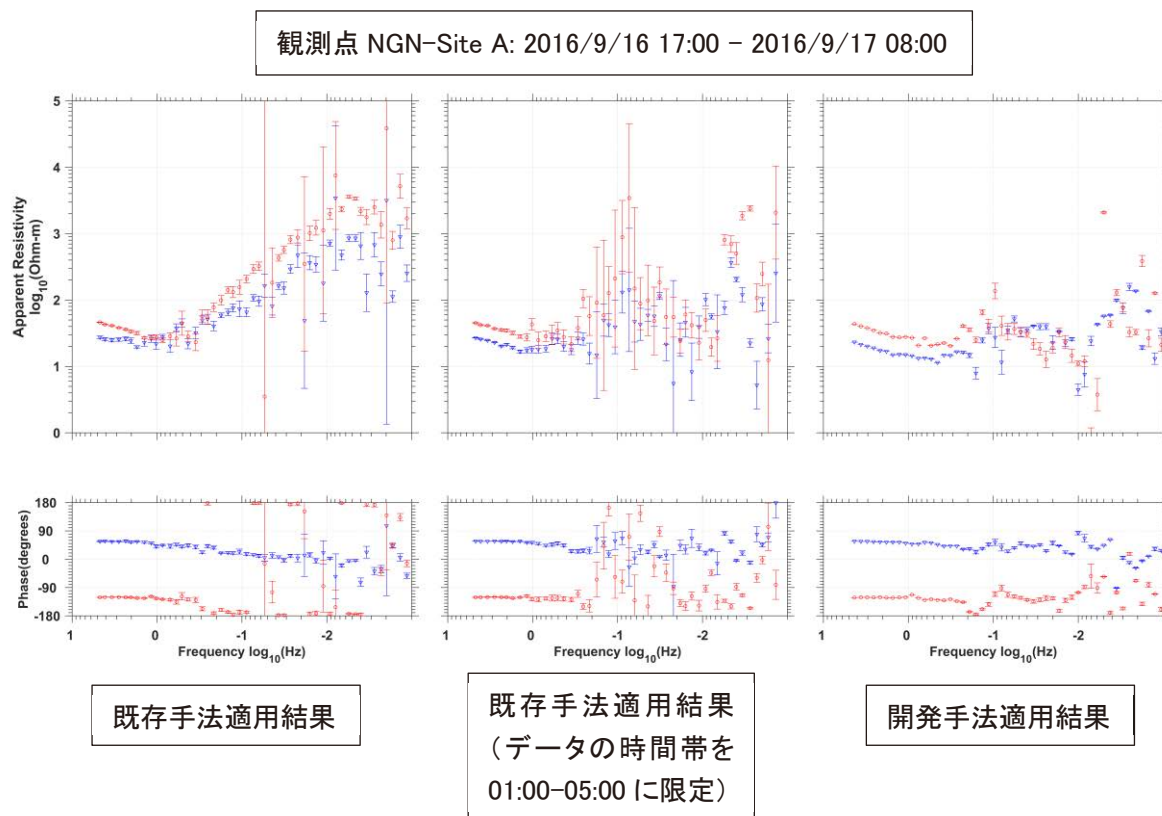


図 2.1.2-4 長野県内観測点における MT 法実データの処理結果例

上段は見かけ比抵抗曲線，下段は位相曲線を表す。青色三角と赤色円形のプロットは XY モード，YX モードの探索曲線をそれぞれ表す。各周波数データのエラーバーは Gamble et al. (1979)²⁸⁾及び Stodt (1983)²⁹⁾の方法に基づいて算出した。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 2 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, 2021, 317p.
- 2) 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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 沿岸部処分システム高度化開発 平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書, 2019, 288p.
- 3) Umeda, K., Localized extensional tectonics in an overall reverse-faulting regime, Northeast Japan, *Geoscience Letters*, vol.2, no.12, 2015, doi: 10.1186/s40562-015-0030-3.
- 4) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K., Hama, Y., Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, no.4, 2015, pp.2279-2291.
- 5) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 平成 30 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, 2019, 200p.
- 6) 石丸恒存, 尾方伸久, 島田顕臣, 浅森浩一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 渡邊隆広, 雑賀 敦, 末岡 茂, 小松哲也, 横山立憲, 藤田奈津子, 清水麻由子, 小川大輝, 植木忠正, 雨宮浩樹, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成 29 年度), JAEA-Research 2018-015, 2019, 89p.
- 7) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 平成 31 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, 2020, 251p.
- 8) 石丸恒存, 安江健一, 浅森浩一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 渡邊隆広, 横山立憲, 藤田奈津子, 雑賀 敦, 清水麻由子, 小川大輝, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成 28 年度), JAEA-Research 2018-008, 2018, 83p.
- 9) Ogawa, H., Asamori, K., Ueda, T., Numerical experiment for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, *Proceedings of 14th SEGJ International Symposium*, 2021, pp.51-54.
- 10) 小川大輝, 濱 友紀, 浅森浩一, 上田 匠, MT 法時系列データ処理における連続ウェーブレット変換の最適な計算設定の提案, *物理探査*, vol.75, 2022, pp.38-55.
- 11) Ogawa, H., Asamori, K., Negi, T., Ueda, T., A novel method for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, *Journal of Applied Geophysics*, vol.213, 105012, 2023, doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.105012.
- 12) Oettinger, G., Haak, V., Larsen, J.C., Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif, *Geophysical Journal International*, vol.146, no.3, 2001, pp.659-669.
- 13) Larsen, J.C., Mackie, R.L., Manzella, A., Fiordelisi, A., Rieven, S., Robust smooth magnetotelluric transfer functions, *Geophysical Journal International*, vol.124, no.3, 1996, pp.801-819.

- 14) Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J., Magnetotellurics with a remote reference, *Geophysics*, vol.44, no.1, 1979, pp.959-968.
- 15) Pádua, M.B., Padilha, A.L., Vitorello, Í., Disturbances on magnetotelluric data due to DC electrified railway: A case study from southeastern Brazil, *Earth, Planets and Space*, vol.54, no.5, 2002, pp.591-596.
- 16) 上嶋 誠, 山口 寛, Patro, P.K., 小河 勉, 加藤愛太郎, 長谷川浩二, 上田哲士, 相澤広記, 長谷英彰, 紀伊半島北西部有田川非火山性群発地震域における広帯域 MT 観測, *Conductivity Anomaly 研究会 2010 年論文集*, 2010, pp.33-40.
- 17) Li, J., Zhang, X., Tang, J., Noise suppression for magnetotelluric using variational mode decomposition and detrended fluctuation analysis, *Journal of Applied Geophysics*, vol.180, 104127, 2020, doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104127.
- 18) Wang, Z., Liu, Y., Du, J., Wang, Z., Shao, Q., De-noising magnetotelluric data using variational mode decomposition combined with mathematical morphology filtering and wavelet thresholding, *Journal of Applied Geophysics*, vol.204, 104751, 2022, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104751.
- 19) Li, J., Liu, S., Peng, Y., Tang, J., Zhang, X., Li, Y., A method for magnetotelluric data processing based on sparsity adaptive stage-wise orthogonal matching pursuit, *Journal of Applied Geophysics*, vol.198, 104577, 2022, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104577.
- 20) Zhang, X., Li, J., Li, D., Li, Y., Liu, B., Hu, Y., Separation of magnetotelluric signals based on refined composite multiscale dispersion entropy and orthogonal matching pursuit, *Earth, Planets and Space*, vol.73, no.76, 2021, doi: 10.1186/s40623-021-01399-z.
- 21) 奥田真央, 茂木 透, 独立成分分析による磁場水平成分のノイズ除去と房総半島における MT 探査への適用, *Conductivity Anomaly 研究会 2017 年論文集*, 2017, pp.77-82.
- 22) Sato, S., Goto, T., Kasaya, T., Ichihara, H., Method for obtaining response functions from noisy magnetotelluric data using frequency-domain independent component analysis, *Geophysics*, vol.86, no.1, 2021, pp.E21- E35.
- 23) Egbert, G.D., Processing and interpretation of electromagnetic induction array data, *Surveys in Geophysics*, vol.23, 2002, pp.207-249.
- 24) Bingham, E., Hyvärinen, A., A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals, *International Journal of Neural Systems*, vol.10, no.1, 2000, pp.1-8.
- 25) 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一, 横井浩一, 大原英史, MT 法スペクトルデータの効率的且つ効果的な編集方法—コヒーレントノイズに対する有効性—, *物理探査*, vol.63, no.5, 2010, pp.395-408.
- 26) Sturges, H.A., The choice of a class interval, *Journal of the American Statistical Association*, vol.21, no.153, 1926, pp.65-66.
- 27) 笠谷貴史, 住友則彦 後藤忠徳, 直流電車からの漏洩電流のモデル化とその応用 (2), *京都大学防災研究所年報*, vol.39, no.B-1, 1996, pp.261-272.

- 28) Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J., Error analysis for remote reference magnetotellurics, Geophysics, vol.44, no.5, 1979, pp.959-968.
- 29) Stodt, J.A., Processing of conventional and remote reference magnetotelluric data, Ph. D. thesis, University of Uta, 1983, 223p.

2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術

(1) はじめに

地質環境に期待される閉じ込め機能の喪失につながる事象の一つが、深部流体の流入である(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, 2014)¹⁾。その流入の可能性や地質環境への影響を適切に評価するためには、深部流体の化学的・熱的特徴だけでなく、流入の経路となり得る地質環境の特性に関する知見を得ておくことが重要である。深部流体の移動経路は上部地殻において、断層や構造線などを水みちとして利用しているものと考えられている(風早ほか, 2014)²⁾。これらの地質構造を地表面に反映していると考えられるリニアメントを構造的弱面の指標とすれば、深部流体の移動経路と考えられる断層や構造線を抽出することが可能と考えられる。しかし、リニアメントには地盤弱面とは関係が小さい河川の侵食などによる直線的な地形も含まれるうえに、実際には熱水湧出している地点において、大部分のリニアメント沿いに深部からの湧出は確認されていない。さらに基盤岩を堆積層が覆った場所ではリニアメント自体が不明瞭となり、深部流体の移動経路の観点から複数の不確かさが存在している。そのため地形判読でリニアメント単体に着目した評価は困難であり、個々のリニアメントの水みちとの関係性を評価するためには、現地調査・ボーリング調査などにより構造的弱面や湧水の有無や連続性の把握が必要である。一方で、リニアメントを潜在的な水みちとなりうる地質構造を示唆する地形と考えると、相対的に地域評価できる可能性がある。このような観点から、和歌山県田辺市本宮地域及び奈良県吉野郡十津川村にて空中写真判読を行い、リニアメント分布密度が高い本宮地域東の川の上流域と、現在地表で熱水が湧出する上湯温泉を事例とした現地調査を実施した。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

我が国には、常磐地域、能登半島、新潟平野、紀伊半島等、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(産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 2004)³⁾。このうち紀伊半島には、湯の峰(92 °C)や白浜(78 °C)等といった、前弧域としては特異な高温の温泉が存在する(産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 2005)⁴⁾。紀伊半島の温泉井及び掘削井における地化学調査の結果(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1994)⁵⁾によると、深部からの熱水(約 210 °C)の上昇により、深度 1,500 m で 100~180 °C、地表では最大 92 °C の温泉が自噴していると報告されている(西村, 2001)⁶⁾。また、これらの熱水の起源については、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指摘されている(例えば, Umeda *et al.*, 2006⁷⁾; Morikawa *et al.*, 2016⁸⁾)。

このような熱水や流体が岩盤中を移動する場合、割れ目などを選択的に流れていることは認識されているが(例えば, Ewert, 1985⁹⁾; 今泉ほか, 2003¹⁰⁾)、移動経路となる地下構造の特徴については未だ不明な点が多い。これまで、地下坑道や内陸地震発生に関わる深部流体の移動に関する研究から、断層や割れ目の交差、分岐(スプレー構造)、ステップ構造などの特徴的な構造の存在が相対的に高透水性を生み出すモデルが提示されている(例えば, 渡辺, 1995¹¹⁾; Sibson, 2020¹²⁾)。しかし、深部流体の経路を考えた場合、露頭で観察される構造の地殻規模の連結性は不明であり、地殻規模の断層の単純なモデルが露頭規模の割れ目の特徴的な構造として縮小され、そのみが表れていることは、露頭の割れ目分布形態の多様性からは考えにくい。モデルの露頭への適合性を確かめるのではなく、実際の露頭の全湧出地点を説明し得る評価手法が必要である。そこで本研究では、

露頭に巻尺を這わせて概ね水平な測線を設定し、測線と交差する割れ目の位置及び姿勢を記録するスキャンライン法を採用した。湧水地点の持つ地質構造的特徴としての地質構造的透水好適性 (structural-permeability favorability ; Schneeberger et al., 2018¹³⁾) を検討するにあたって、走向ベクトル累積プロット、隣接面交線方向ベクトル累積プロット、割れ目間距離の 3 種類の構造的特徴を評価項目として用いた (原子力機構・電力中央研究所, 2023¹⁴⁾ ; 図 2.1.3-1)。

(3) 実施内容・結果

奈良県吉野郡十津川村上湯温泉対岸の熱水湧出露頭(HGS-30)を対象として割れ目解析を実施した。加えて、現在流体は湧出していない露頭でも地質構造的透水好適性が高い部分を抽出できるか検討するため、和歌山県田辺市本宮地域東の川沿いの露頭(HGS-31)にて割れ目解析を実施した。HGS-31 においては層理面と断層面を明瞭に確認できたため、割れ目を各層面ごとに分類した。調査位置図を図 2.1.3-2 に示す。空中写真判読によるリニアメントの抽出は応用地質株式会社による実施された。

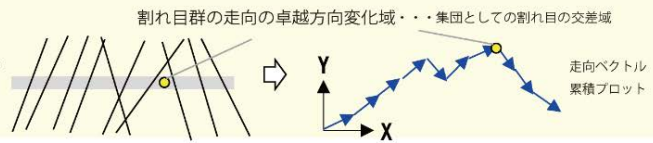
HGS-30 及び HGS-31 の割れ目解析結果を図 2.1.3-3 に示す。HGS-30 は東西走向の割れ目が主体であるが、部分的に南北走向の割れ目が集中して発達する。割れ目間距離も明瞭に疎密境界が確認できる。HGS-31 は全体的に東西走向の層理面が発達し、部分的に南北走向の断層面などが確認できる。HGS-30 において、現在熱水が湧出している割れ目と熱水脈の位置(図 2.1.3-3 赤丸)は、走向・隣接面交線方向ベクトル累積プロットの卓越方向転換点、あるいは割れ目の疎密境界に位置することが分かった。HGS-31 では、水みちとして機能する断層構造を走向・隣接面交線方向ベクトル累積プロットの卓越方向転換点、あるいは割れ目の疎密境界で抽出することができた(図 2.1.3-4)。空中写真判読によるリニアメント抽出からは、判読範囲を 1 km グリッドで区切り抽出したリニアメントの卓越方向を 4 方向に分類した上で色分けを行った(図 2.1.3-5)。その結果、卓越方向が直交するグリッド境界付近に温泉が湧出していることが分かった。

(4) 主な成果と課題

本研究では、深部流体の流入が高温温泉の湧出に関係していると指摘されている紀伊半島上湯温泉を対象に、空中写真判読と露頭の割れ目解析による流体湧出地点の地形・地質構造的特徴に係る知見の抽出を試みた。その結果、空中写真判読からはリニアメント卓越方向が直交に変化する領域に、現在湧出する温泉の位置が整合することが判明した。露頭の割れ目解析からは、走向・隣接面交線方向ベクトル累積プロットの卓越方向転換点、あるいは割れ目の疎密境界で流体湧出地点及び熱水脈、水みちとなりうる断層構造を抽出することができた。これらのことから、露頭スケールから地図スケールの規模で割れ目の卓越方向変化域が、湧出する可能性を持つ地点を捉える判断材料となることが分かった。地質構造的透水好適性の検討から、過去に流体が通った割れ目やその領域の特徴を捉えることによって、将来流体が通る可能性がある割れ目を抽出できると期待できる。今後、様々な岩種に対してこの評価方法が適用できるか検討事例を増やし、評価方法の信頼性向上を図る必要がある。

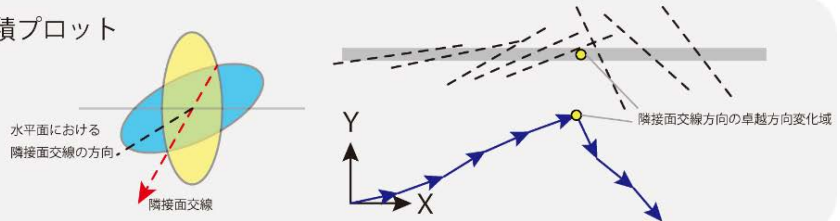
□ 走向ベクトル累積プロット

- ・ 割れ目姿勢の卓越方向を、走向線を単位ベクトルとみなし、縦軸上方向を北、横軸右方向を東として、割れ目出現順に連結することで把握する。



□ 隣接面交線方向ベクトル累積プロット

- ・ 隣り合う割れ目の交線の水平面方向を、単位ベクトルとみなし、縦軸上方向を北、横軸右方向を東として、割れ目出現順に連結し卓越方向変化域を抽出する。



□ 割れ目間距離

- ・ 割れ目の疎密を、近隣の割れ目の間の距離の違いから抽出する。

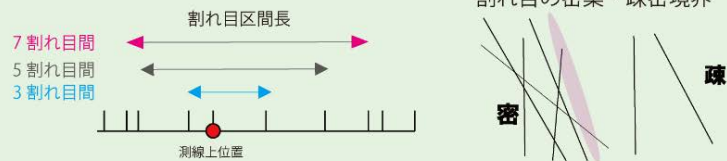


図 2.1.3-1 地質構造的透水好適性の模式図

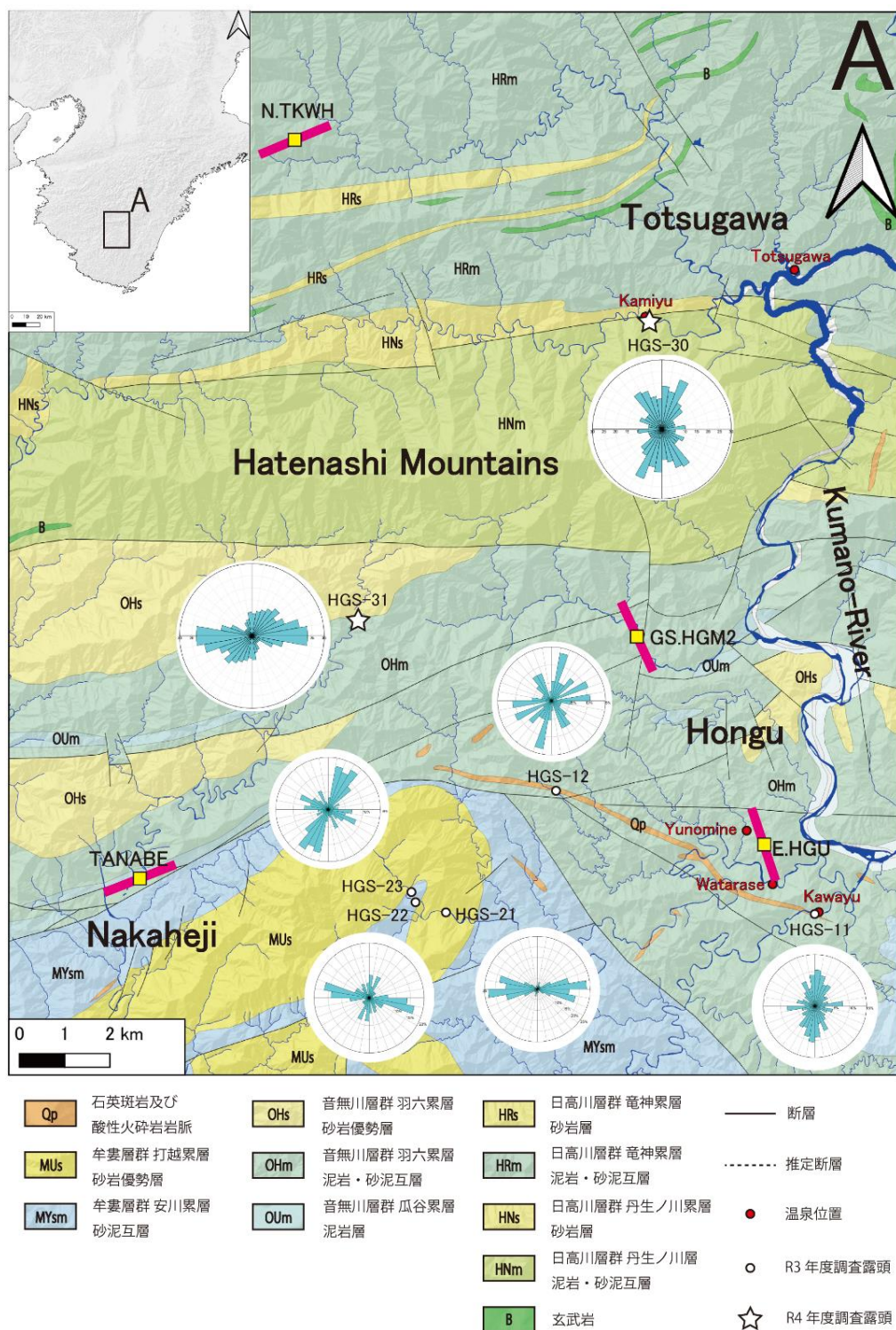
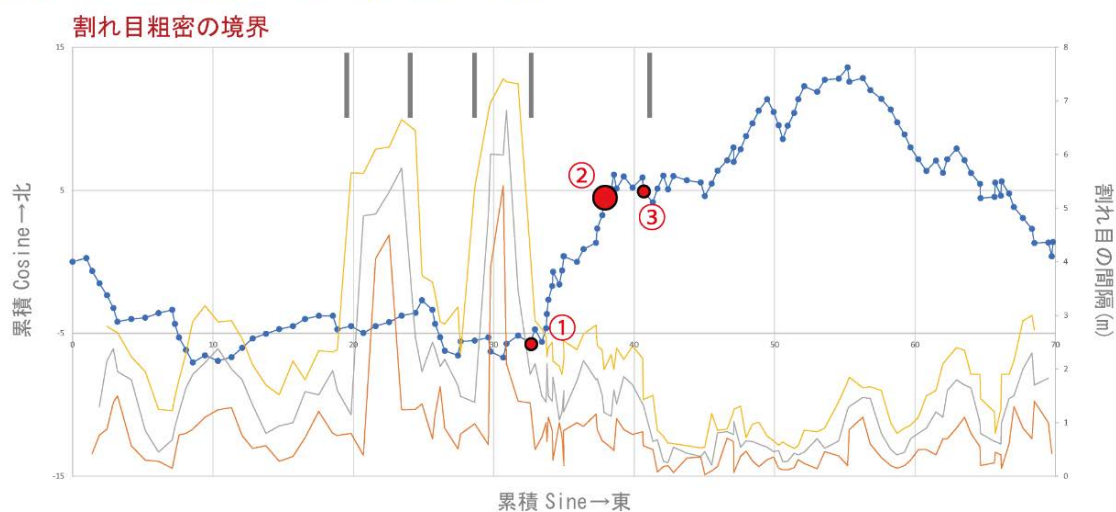


図 2.1.3-2 割れ目分布調査地点の位置図と割れ目走向のローズダイアグラム

ローズダイアグラムは露頭で計測した割れ目の走向分布を示す。黄色の四角は地震観測点の位置、桃色のバーの向きは S 波スプリッティング解析に基づく速い S 波の振動方向 (ϕ) の卓越方向を示す。地質分布は産総研地質調査総合センター (2020)¹⁵⁾ 及び鈴木ほか (1979)¹⁶⁾ を用いた。

(a) 走向ベクトル累積プロット・割れ目の疎密



(b) 隣接面交線方向ベクトル累積プロット・割れ目の疎密

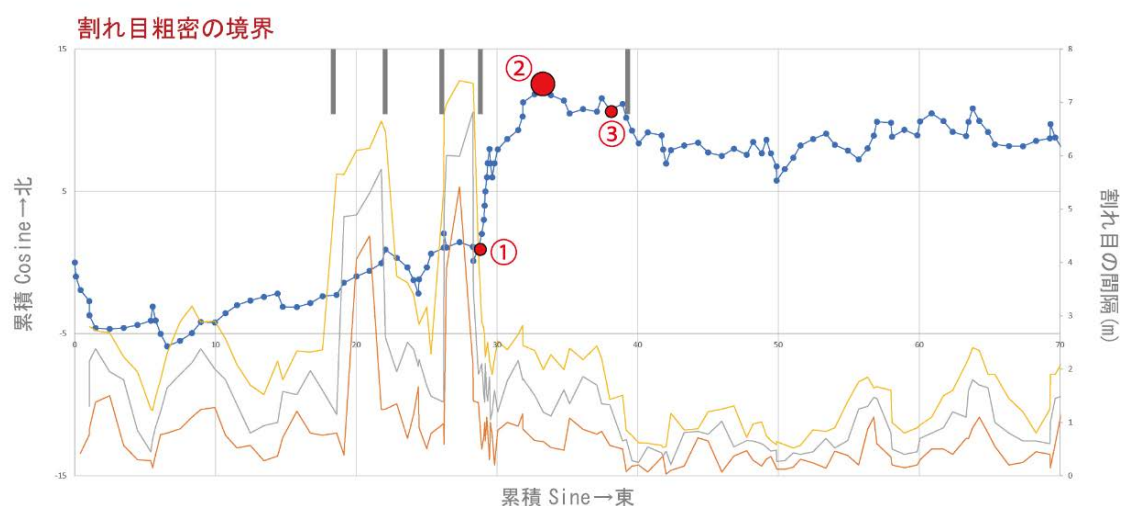
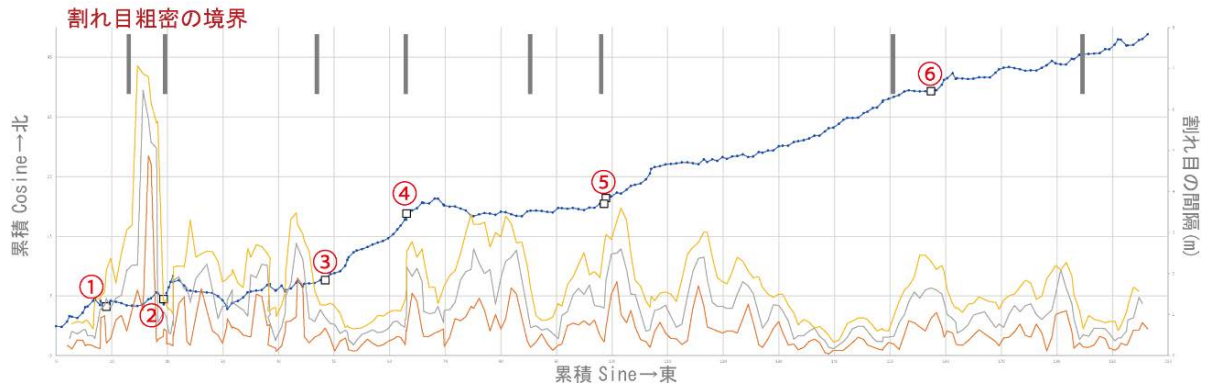


図 2.1.3-3 HGS-30 露頭の地質構造的透水好適性検討図

(a,b)各構造的特徴における抽出箇所の考え方は図 2.1.3-1 参照。灰色縦線:割れ目の疎密境界, 大きい赤丸:熱水湧出割れ目, 小さい赤丸:古い熱水湧出割れ目, 橙色折れ線:3 割れ目間隔, 灰色折れ線:5 割れ目間隔, 黄色折れ線:7 割れ目間隔。

(a) 走向ベクトル累積プロット・割れ目の疎密



(b) 隣接面交線方向ベクトル累積プロット・割れ目の疎密

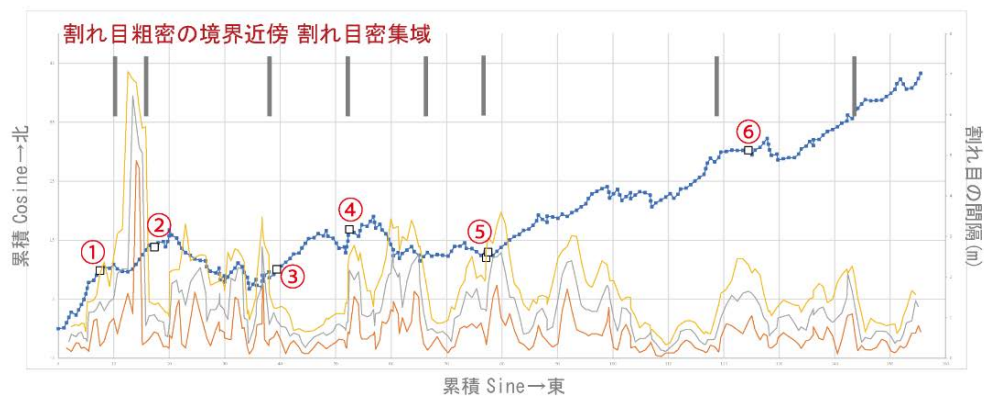


図 2.1.3-4 HGS-31 露頭の地質構造的透水好適性検討図

(a,b)各構造的特徴における抽出箇所の考え方は図 2.1.3-1 参照。灰色縦線:割れ目の疎密境界, 白四角:断層位置, 橙色折れ線:3 割れ目間隔, 灰色折れ線:5 割れ目間隔, 黄色折れ線:7 割れ目間隔。

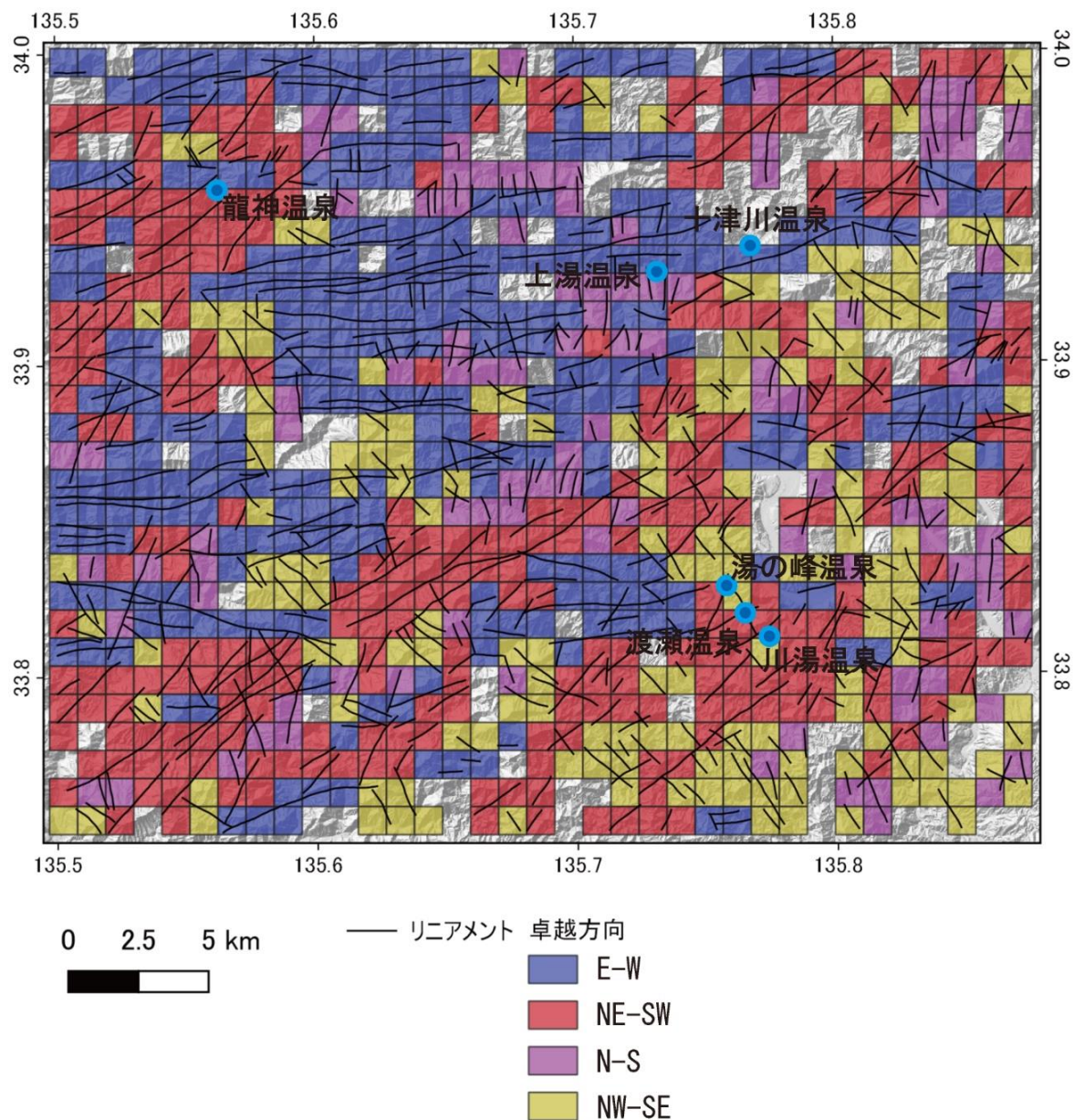


図 2.1.3-5 リニアメントの卓越方向

水色丸が温泉の位置を示す。1 km メッシュ領域ごとにリニアメントの卓越方向を色分けして表示した。背景に地理院タイル(陰影起伏図)を用いた。

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) 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, 日本水文科学会誌, vol.44, pp.3-18, 2014.

- 3) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 P-5, 2004.
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 CD-ROM 版 (第 2 版), 数値地質図 GT-2, 2005.
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 本宮地域, 地熱開発促進調査報告書, no.37, 1994, 885p.
- 6) 西村 進, 紀伊半島の温泉とその熱源, 温泉科学, vol.51, no.3, 2001, pp.98-107.
- 7) Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K., Oikawa, 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, no.1-2, 2006, pp.47-61.
- 8) Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, M., Inamura, A., Takahashi, H.A., Yasuhara, M., Ohwada, M., Sato, T., Nakama, A., Handa, H., Sumino, H., 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.
- 9) Ewert, F. -K., Rock grouting with emphasis on dam sites, Springer-Verlag, 428p, 1985.
- 10) 今泉眞之, 石田 聡, 土原健雄, 割れ目系岩盤地下水の流動特性, 農業工学研究所報告, vol.42, pp.63-90, 2003.
- 11) 渡辺邦夫, 地下水研究に関する最近の話題—特に岩盤浸透流の場の評価について—, 土と基礎, vol.43, pp.1-16, 1995.
- 12) Sibson, R. H., Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault valve action, Earth, Planets and Space, 72:31, 2020.
- 13) Schneeberger, R., Egli, D., Lanyon, G. W., Mäder, U. K., Berger, A., Kober, F. and Herwegh, M., Structural-permeability favorability in crystalline rocks and implications for groundwater flow paths: a case study from the Aar Massif (central Switzerland), Hydrogeology Journal, vol.26, pp.2725-2738, 2018.
- 14) 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.
- 15) 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, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>, データ更新日:2022 年 3 月 11 日.
- 16) 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.

2.2 長期予測・影響評価モデルの開発

2.2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

(1) はじめに

深部流体の評価に関し、地殻深部からの流体移動経路が断層やクラックの性状に起因すると考えた場合、それを知るために有効な手法の一つとして、S 波スプリッティング解析を挙げることができる。この手法は、地震波の実体波の一つである S 波が地下空間を伝播する時、流体などで満たされた媒質を通過する際に二つに分裂し、異なる速度で地表へ到達する、という特徴を有することを最大限に利用している。この解析を通して、 ϕ と dt という二つの物理量が推定され、速く到達した S 波の振動方向 ϕ は、地下の割れ目などの卓越するクラックの走向を示すと考えられている(金嶋, 1991¹⁾)。また、速い S 波と遅い S 波の到達時間差 dt は、クラック内の流体占有量に依存して異方性が増大し、大きくなる(長くなる)という特徴を有する(金嶋, 1991¹⁾)。本研究では、2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震(Mw 6.6)を対象とし、S 波スプリッティング解析を行い、異常湧水が発生し得る地質環境への影響の評価技術について取りまとめた。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)は、約 600 年に一度の頻度で発生する“超巨大地震”とされ、生じた地震動や大津波により、東北地方の沿岸部を中心として広範囲にわたって甚大な被害がもたらされた(地震調査研究推進本部²⁾)。また、この地震による応力変化は、誘発地震と考えられるマグニチュード 6 以上の内陸地震を長野県、静岡県、茨城県、福島県、新潟県などで相次いで発生させた(Toda *et al.*, 2011³⁾; 桑原, 2012⁴⁾)。本研究で対象とした福島県浜通りの地震もその一つであり、福島県浜通り地域(福島県相馬市、南相馬市、双葉郡、いわき市)では、東北地方太平洋沖地震の発生の一か月後、福島県浜通りの地震が発生した。この地震で、井戸沢断層及び湯ノ岳断層の一部で同時に破壊が生じ、地表地震断層が現れている(堤・遠田, 2012⁵⁾)。さらに、地震直後から、いわき市内の数か所で温泉の異常湧出が確認されており、それらは湧出量の変化を生じつつも、2018 年以降も継続した(Sato *et al.*, 2020⁶⁾)。これに関し、異常湧出は、東北地方太平洋沖地震発生に伴う伸張応力による広域的な地殻変動によるものであるとの推定もなされている(Sato *et al.*, 2020⁶⁾; 川辺・中野, 2013⁷⁾)。一方で、異常湧出が確認された井戸(Sato *et al.*, 2020⁶⁾)近傍の地震観測点では、福島県浜通りの地震時の dt の急激な上昇と地震後の減衰が確認された(原子力機構・電力中央研究所, 2021⁸⁾; 2022⁹⁾)。このことは、地下深部に存在する流体が、地震の影響を受けて地下浅部に上昇し、地表付近の割れ目に流入することで、その領域を伝わる地震波の伝搬を遅らせたと解釈でき、地震後の割れ目の閉塞とともに地震波の伝搬状態が回復し、 dt が減衰する様子が示されていると解釈された(原子力機構・電力中央研究所, 2022⁹⁾)。

ϕ と dt という二つの物理量に主眼を置いた上記の解析を通して、それらの物理量の大まかな時空間分布や地域性を明らかにすることができたが(原子力機構・電力中央研究所, 2021⁹⁾; 2022¹⁰⁾)、さらに進んだ解析として、異方性媒質の分布する深さやクラック密度の推定が考えられ、これにより、流体移行経路を知るための重要な情報がもたらされることが期待できる。そこで、本研究では、上記に述べた稀頻度自然現象に対する地質環境への影響評価技術の開発の一環として、異方性媒質の分布する深さやクラック密度に着目し S 波スプリッティング解析を行い、深部からの流体移行経路についての考察を行った(原子力機構・電力中央研究所, 2023¹⁰⁾)。

(3) 実施内容・結果

福島・茨城・栃木県に位置する防災科学技術研究所の高感度地震観測網、気象庁及び東北大学が運用する22観測点(図2.2.1-1)で取得された2004年4月から2018年12月30日に深さ30 km以浅で発生した気象庁マグニチュード1.0以上3.4以下の19,566個の地震を対象として解析を行った。ここでは、Silver and Chan (1991)¹¹⁾の手法を用い、SP変換波によるS波到達時の位相擾乱を回避するため、入射角が35°以内の震源と観測点の組み合わせを対象とした。そして、速いS波と遅いS波の波形の相関係数が0.9以上となる4,543イベントを採用した。なお、地震波速度構造は、Nakajima *et al.* (2001)¹²⁾を利用した。

その結果、 ϕ の空間分布は、東北地方沿岸部・内陸部で、日本海溝に対して概ね平行な方向が推定された(図2.2.1-2)。この結果は、Iidaka and Obara (2013)¹³⁾やIidaka *et al.* (2014)¹⁴⁾のS波スプリッティング解析結果と調和的であった。さらに、東北地方太平洋沖地震後の地震について、 dt を震源距離で除した距離規格化 dt (以下、 ndt)に関する空間分布を調べたところ、いわき市のIWAKMZ観測点でそれらの平均値が他の観測点と比べて高いことが示された。同観測点は、Sato *et al.* (2020)⁶⁾で示された湧水の継続している温泉付近に存在することから、地殻内に存在する深部流体の賦存域や移行経路を反映し、他の観測点に比べて大きな ndt が得られたと考えられる(原子力機構・電力中央研究所、2022⁹⁾)。

続いて、Sato *et al.* (2020)⁶⁾で湧水量の時間変化(減少)やHiramatsu *et al.* (2005)¹⁵⁾で地震後の dt の顕著な減衰(時間変化)が示されていることを踏まえ、 ndt の時間変化についても調べた。この結果、震源域直上の7つの観測点で、時間とともに ndt が減衰する様子が示された(図2.2.1-3)。N.THGH観測点では、 ndt の減衰傾向の様子が他の観測点と異なり、0.005 sec/km付近で二分されているように見えたため、 ndt が0.005 sec/km未満の地震とそれ以上の地震でグループ分けしたところ、 ndt が0.005 sec/km未満の436地震は、N.THGH観測点の北西側に位置し、北北西-南南東方向のクラスターを形成することがわかった。一方で、 ndt が0.005 sec/km以上の411地震は、N.THGH観測点の北東から南側に位置し、北北東-南南西方向にクラスターを形成することがわかった(図2.2.1-4)。これと併せて、同観測点近傍の活断層(棚倉活動セグメント、高萩活動セグメント: 産業技術総合研究所(2015)¹⁶⁾活断層データベースより)などの分布と考察を行ったところ、速い ndt の ϕ は西側の棚倉構造線の走向に近く、遅い ndt の ϕ は東側の高萩断層の走向に近いことが示された。これは、活断層ごとに近傍の流体の存在の有無や流体の移動経路となり得るクラックの多寡などの性質(個性)が異なる可能性を示しているものと考えられる。

さらに、上記の構造と震源分布を比較するため、hypoDD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000¹⁷⁾)を用いて、震源の再決定を行った。この結果、N.THGH観測点付近の経度と深さ方向の断面を南方から見ると“y”字型の分布を示し、これらの震源は、西側の棚倉構造線側で深さ3 kmから7 kmまで、東側の高萩断層側で深さ3 kmから10 kmまで直線状に分布し、約7 kmの深さで互いに交わることが明らかとなった。同観測点で得られたS波スプリッティング解析の結果をこれらの断面にプロットすると、南から北へ向かうにつれてそれらの震源が深部から浅部へと移動する様子が確認できた(図2.2.1-5)。これに関し、Umeda *et al.* (2015)¹⁸⁾は、電磁探査によって深さ20~30 kmに低比抵抗体の存在を示し、そこから上昇した流体が直上のいわき地方の地震活動を生じさせたと結論付けている。この結果を踏まえると、低比抵抗体起源の地殻内流体が、より深部まで震源が伸びる高萩断層を伝わって上昇し、深さ約7 kmの分岐点で棚倉構造線側と高萩断層側という二つの経路に分かれ、さらに浅部まで上昇したと考えられ、断層が流体の移動経路となっている様子が示唆された(原子力機構・電力中央研究所、2022⁹⁾)。

最後に、流体の賦存域(深さ分布)やそれらの構造に着目し、S波偏向異方性の強度やクラック密度の推定を行った(原子力機構・電力中央研究所、2023¹⁰⁾)。異方性強度の推定は、Mizuno *et al.* (2001)¹⁹⁾の手法に基づいて行った。この解析から、異方性強度(γ_0)がどの深さ(Z_0)に分布するかを推定でき、図2.2.1-6に示したように異方性強度がある深さで一定となる(モデルA)か、地表からある深さまでに一

定の異方性強度を有する(モデル B)か、という二つのエンドメンバーについて調べた。解析には、これまでに得られた結果より、観測値として震源の深さと dt 、境界条件の地震波速度構造として、Nakajima *et al.* (2001)¹²⁾を用いた。さらに、到達時間の速い S 波と遅い S 波の相関係数が 0.9 以上のデータを対象とし、計算された解の両端となる $dt = 0.01 \text{ sec}$ と $dt = 0.3 \text{ sec}$ は、十分な拘束ができていないと判断して、この解析から除外した。そして、 γ_0 と Z_0 を未知数として、 γ_0 は $0.001 \leq \gamma_0 \leq 0.3$ の範囲で 0.001 間隔、 Z_0 は $0 \leq Z_0 \leq 30$ の範囲で 0.01 km 間隔でグリッドサーチを行い、観測された dt と二つのモデルから計算される dt との残差の L2 ノルムが最小となる γ_0 と Z_0 の組合せとモデルを選択した。さらに、推定誤差の計算のため、それらの値を初期値として、同一の範囲で非線形のフィッティングを行った。なお、個々の観測点で得られた全てのデータを用いた解析では、上記の二つのモデルへのフィッティングが難しかったため、地震がクラスター的に発生する領域や dt 、 ϕ などの空間分布を参照し、個々の観測点で 2~6 個、全体で 33 個のクラスターについて計算を行った(図 2.2.1-7, 図 2.2.1-8)。ここでは、誤差を含めて γ_0 と Z_0 を推定できた 24 個のクラスターで得られた結果について言及する。

モデル A が最適と判断されたクラスターは 1 か所のみで、残りは全てモデル B が最適と判断された(図 2.2.1-8)。モデル A が採用された N.JUOH 観測点のクラスター(c)は、 γ_0 が 0.106 ± 0.018 となり、モデル B も含めた 24 個のクラスター中で最大となった。なお、 Z_0 は $7.38 \pm 0.56 \text{ km}$ であった。一方、モデル B では、 γ_0 が $0.011 \sim 0.072$ となり、N.KIBH 観測点のクラスター(b)で最小、HITACH 観測点のクラスター(a)で最大となった。 Z_0 は N.THGH 観測点のクラスター(a)で最小($4.86 \pm 0.61 \text{ km}$)、N.IWEH 観測点のクラスター(b)で最大($19.98 \pm 8.46 \text{ km}$)となった。N.IWEH 観測点のクラスター(b)と N.KIBH 観測点のクラスター(c) ($Z_0 = 19.81 \pm 13.65 \text{ km}$)のみ、他の観測点より著しく深い Z_0 が推定されたが、推定誤差が大きいことや N.IWEH 観測点においては十分な地震数が確保されていないことなどが、深い Z_0 が推定された原因であると考えられる。これら二つの推定値を除くと、 Z_0 は平均で $9.24 \pm 2.47 \text{ km}$ となった。

クラック密度については、50 個のクラスターに関して推定を行った(図 2.2.1-7)。この解析の理論背景の詳細については、原子力機構・電力中央研究所(2023)¹⁰⁾に記されているが、Hudson(1981)²⁰⁾や O'Connell and Budiansky(1974)²¹⁾の理論に従って、速い S 波及び遅い S 波の伝搬速度である V_{qs1} 及び V_{qs2} 内のクラック密度(ϵ)と K 中のアスペクト比(d)を未知数として、 ϵ は $0.0001 \leq \epsilon \leq 0.1$ の範囲で 0.0001 間隔、 d は $0.001 \leq d \leq 1$ の範囲で 0.001 km 間隔でグリッドサーチを行い、観測された dt と計算から得られる dt との残差の L2 ノルムが最小となる ϵ と d の組合せを選択した。さらに、推定誤差の計算のため、それらの値を初期値として、同一の範囲でフィッティングを行った。ここでは、観測値として、先の異方性強度の推定で用いた dt と併せて、 ϕ や波線の入射角、震源の逆方位角の出力結果も用いた。また、剛性率(μ)や λ などのラメ定数は、 $\mu = \lambda = 32 \text{ GPa}$ (Saiga *et al.*, 2003²²⁾)と仮定し、地震波速度構造として、Nakajima *et al.* (2001)¹²⁾を用いた。

その結果、全てのクラスターについて、クラック密度は、0.0066~0.0652 と推定された。最小は N.THGH 観測点のクラスター(a)(図 2.2.1-9(3/4))、最大は IWAKMZ 観測点のクラスター(e)(図 2.2.1-9(2/4))であった。IWAKMZ 観測点については、これまでの解析から、対象領域の中で dt の平均値が最大となった観測点であるとともに、Sato *et al.* (2020)⁶⁾によって福島県浜通り地域後に温泉の異常な湧き出しが報告された井戸(図 2.2.1-2 の SA, SB)に最も近い観測点である。さらに、同観測点の設置場所は、水石山(みずいしやま)と呼ばれ、その由来が、古くから山頂には水が溜まっている石があり、日照りでも枯れることがないために「水石」と名付けられた(福島県観光物産交流協会²³⁾)という伝承からも、地下に流体が定常的に存在することが示唆され、大きな dt 値といった観測事実と調和的な結果となった。また、全てのクラスターについて、クラック密度の平均は、 0.0233 ± 0.0134 であったが、IWAKMZ 観測点の 6 つの全てのクラスターで平均以上のクラック密度が推定され(図 2.2.1-9(2/4))、観測点直下や近傍に流体の賦存域が分布している可能性が強く示唆された。

推定されたクラック密度に関する比較の結果、宮崎平野地域は、0.0075~0.0205(原子力機構・電力中

央研究所 (2023)¹⁰⁾), 1995 年兵庫県南部地震の震源域とその近傍は, 0.006~0.029 という値が得られており (Tadokoro *et al.*, 1999²⁴⁾), 最大値だけ比較すると, 先行研究事例に対して本結果は約 2~3 倍高い値となった。この原因については, 数値シミュレーションなどの定量的な考察が必要であるが, 既に IWAKMZ 観測点付近には, 流体が豊富に存在することが明らかであるので, 宮崎平野や兵庫県南部地震の震源域とその近傍で実施された S 波スプリッティング解析は, 流体の存在が不明もしくは豊富でない地域での平均値を示している可能性があり, その差として高い値が推定されたのかもしれない。

同一の観測点でも, クラスタ間で顕著なクラック密度の差が生じる観測点 (HITACH 観測点 (図 2.2.1-9(1/4)), TU.IWK 観測点 (図 2.2.1-9(4/4)) 等) がある。TU.IWK 観測点では, 6 つのクラスターのうち, 5 つのクラスターで概ね 0.01~0.02 程度のクラック密度であったが, クラスタ(b)では 0.0536 ± 0.0120 となり, 有意に高い値を示した。このクラスターは, 畑川破碎帯 (例えば, 久保ほか, 2003²⁵⁾) 付近に分布し, 表層が海成層・砂岩泥岩互層に覆われており, このような高いクラック密度を反映しているのかもしれない (図 2.2.1-9(4/4))。S 波スプリッティングの解析対象は, 地震観測点近傍のせいぜい半径数十 km 程度であるが, 上記のような地域差が顕著に検知できたことは, 把握すべき空間スケールの再検討は必要であるものの, 本解析手法がクラック分布の数 km スケールの不均質性の検出に有効な可能性があることを示している。また, アスペクト比は, ほとんどのクラスターにおいて, グリッドサーチで仮定した上限の値である 1 となり, グローバルミニマムな解を推定するのは難しいことがわかった。これに関し, 全てのクラスターについて, Mizuno *et al.* (2001)¹⁹⁾で示された, クラック密度とアスペクト比の RMS 分布を作成し, クラック密度に対して, アスペクト比の残差が尾根上に分布していることを確認した。

クラック密度と ϕ のばらつき (分散) の関係に着目し, これら二つの値に関する可視化を行った。その背景として, これまでに紀伊半島の本宮地域で実施した S 波スプリッティング解析 (原子力機構・電力中央研究所, 2021⁹⁾; 平塚ほか, 2022²⁶⁾) から, ϕ のばらつきが大きい領域ほど dt が高い値を示していることや, 松代群発地震時の湧水発生域付近及びいわき地方の解析から, 構造の交差する領域には多くの流体が集中する可能性が高いことが推測されていることが挙げられる。そこで, クラック密度と ϕ のばらつきの関係について, 定量化が行えるか試行した。

この解析では, クラック密度を推定した 50 個のクラスターにおいて, 既に得られている ϕ に関してそれらのクラスターごとに分散を Mardia (1972)²⁷⁾の定式に基づいて計算した (図 2.2.1-10)。図 2.2.1-10 から明らかなように, クラック密度と ϕ の分散の上限値には, 正の相関関係が見いだされた。このことは, ϕ の方向がある一方向に収束せず, ϕ のばらつきが大きい領域ほどクラック密度が高い (クラック密度の下限値が大きい) ということを定量的に示した結果といえる。これまでいわき地方で行った S 波スプリッティング解析から, クラック密度の高い領域で dt も大きな値が示されたことと併せると, そのようなクラック密度の高い領域が流体の経路となる可能性を示唆していると考えられる。この結果は, 本宮地域で実施した S 波スプリッティング解析結果 (原子力機構・電力中央研究所, 2021⁹⁾; 平塚ほか, 2022²⁶⁾) や原子力機構・電力中央研究所 (2023)¹⁰⁾で述べられている露頭の割れ目調査などの結果と調和的な結果であり, ϕ のばらつきが大きい領域ほど dt が大きな値となり, そこが流体の移動経路や賦存域となる可能性を示唆する。

(4) 主な成果と課題

S 波スプリッティング解析より, ϕ や dt (ndt) の時空間分布の地域性が明らかとなり, 流体の賦存域を示すことができた。また, 一つの観測点 (N.THGH) で ndt の明瞭な差が確認でき, 近傍の断層における ϕ の方向と類似することが示され, それら二つの断層が流体の移動経路となっている可能性が示唆された。さらに, クラック密度と ϕ の分散との関係には, 正の相関が見られ, ϕ のばらつきが大きい領域でクラック密度が大きくなり, 流体の経路となる可能性を示せた。

今後の課題として, 異方性強度の推定については, データのクラスタリングなどに任意性が残ることが

懸念され、適切な解析手法の検討・導入が今後の課題となる。また、 ϕ の分散について、クラスターに含まれる地震数の多寡による値の変化も予想されるので、規格化やクラスターから一定数の地震をランダムサンプリングする等によって、扱うデータの地域差の均質化を図るなど、より客観的な手法への改良が今後の課題として挙げられる。また、クラック密度と ϕ の分散との関係に関し、Crampin and Peacock (2005)²⁸⁾では、間隙流体圧と ϕ の 90° 回転(90°-flips)について言及している。その中で、間隙流体圧が臨界状態まで高まると、最小水平圧縮応力の方向へ ϕ が 90° 回転することが報告されている(Crampin and Zatsepin, 1997²⁹⁾)。本研究においても、最もクラック密度の大きかった TU.IWK 観測点のクラスター(b)で、二つの ϕ の方向が確認でき、その差が 90° に近いことから(図 2.2.1-9(4/4))、 ϕ の 90° 回転が生じたものと考えられる。したがって、 ϕ の分散が小さいことは、クラックの方向が類似していることを示し、間隙流体圧の上昇に伴い、クラックの方向が斜交し始め、それとともに ϕ の分散が大きくなると予想される。いずれにせよ、注水実験などの文献レビューを踏まえつつ、上記の予想を検証するためのモデル構築も課題の一つとして挙げられる。

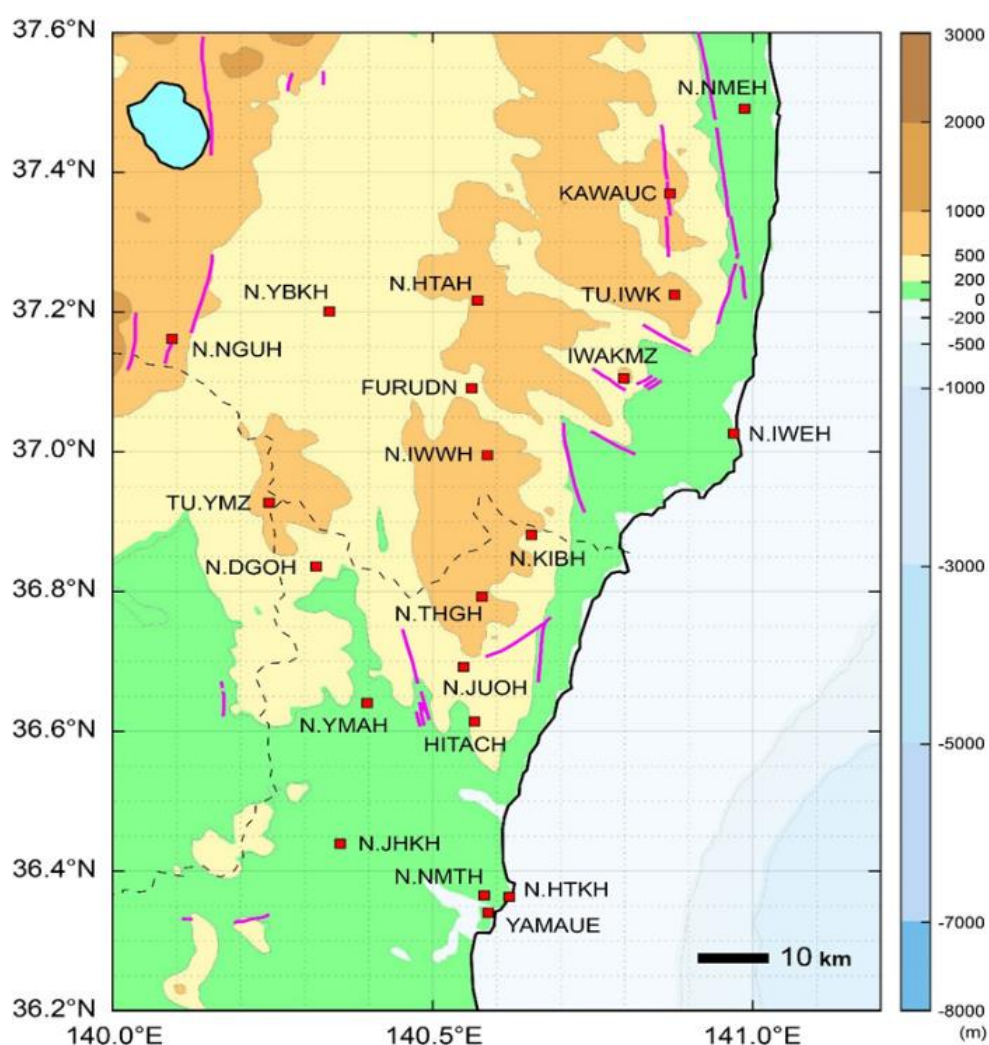


図 2.2.1-1 いわき地方の S 波スプリッティング解析で使用した観測点

赤色四角形は、地震観測点を示す。桃色線は、活断層や活断層の疑いのあるリニアメント(活断層研究会編, 1991³⁰⁾)を示す。N.KIBH は、後に N.KI2H としてリプレースされた観測点。

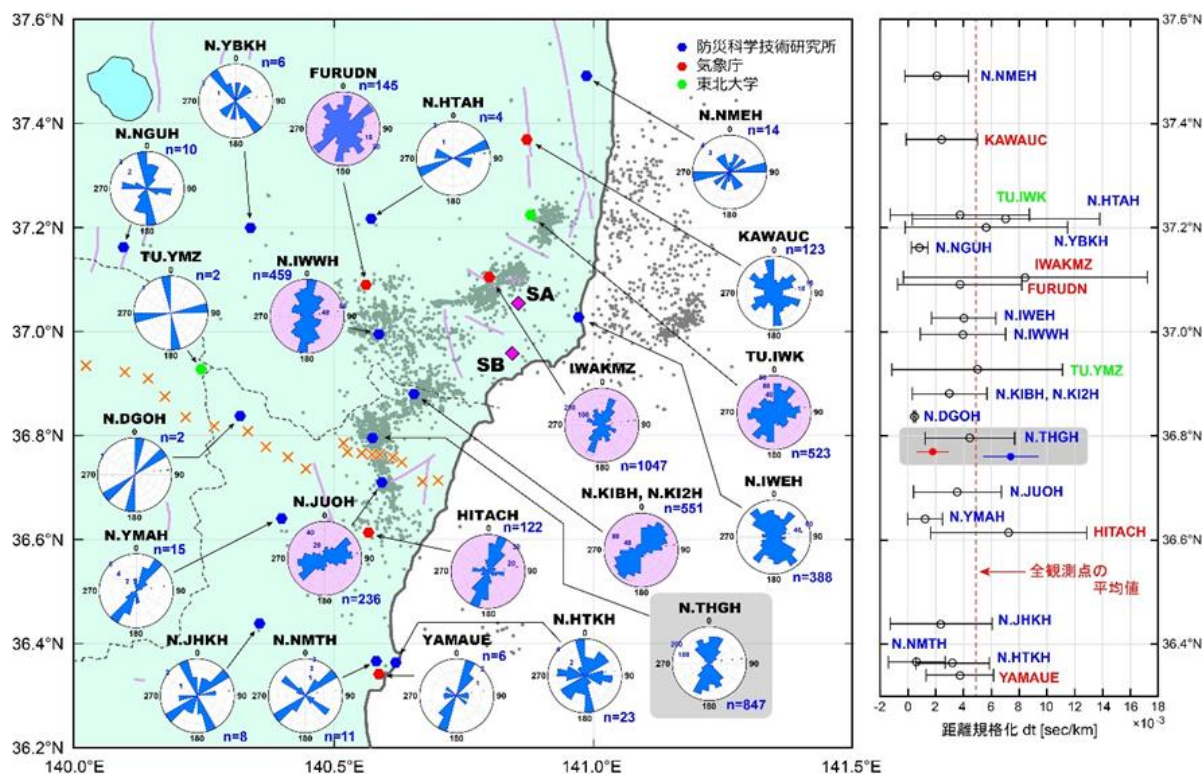


図 2.2.1-2 各観測点の ϕ の分布と ndt の空間変化

(左) 2004 年 4 月 9 日から 2018 年 12 月 30 日までに深さ 30 km 以浅で起きた気象庁マグニチュード 1.0 以上 3.4 以下の地震で相関係数 0.9 以上のもの(灰色丸)を用いて解析を行った結果を示す。n は各観測点で解析に用いた相関係数が 0.9 以上の地震数を示す。ローズダイアグラムの背景が半透明の赤色の観測点は、ndt の時間変化が明瞭な観測点を示す。さらに、Umeda *et al.* (2015)¹⁸⁾で実施した電磁探査の測線を橙色×で示した。桃色菱形 SA と SB は、Sato *et al.* (2020)⁶⁾で示された異常な湧き出しのあった温泉を示す。(右) 個々の観測点で、ndt の平均値(白丸)とそれらの標準偏差(エラーバー)を計算し、観測点名とともに緯度方向に沿ってプロットした。青色は防災科学技術研究所、赤色は気象庁、緑色は東北大学の観測点を示す。また、赤色点線で全観測点の ndt の平均値を示した。なお、N.THGH 観測点(灰色のハッチを付した)は、全データの平均値を白丸で、ndt の速いグループを赤丸、遅いグループを青丸で示した。

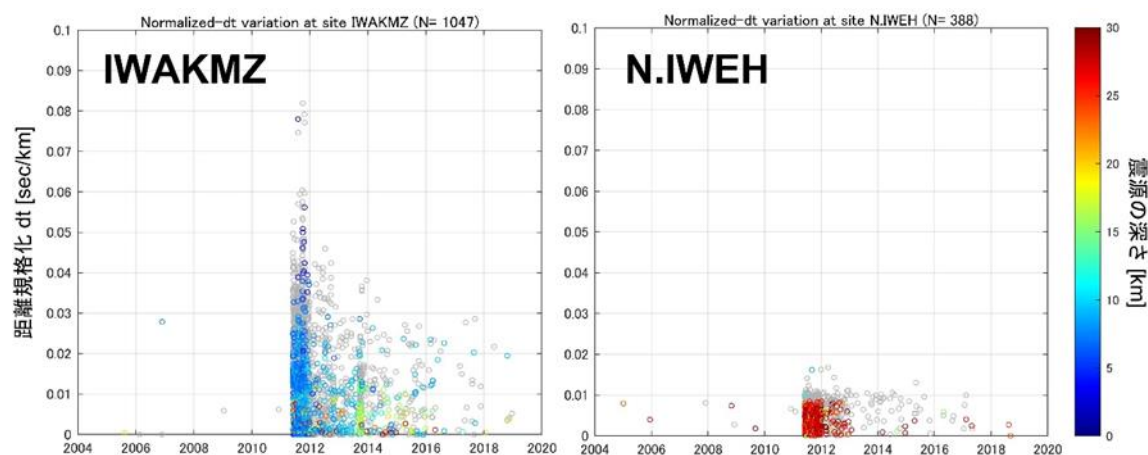
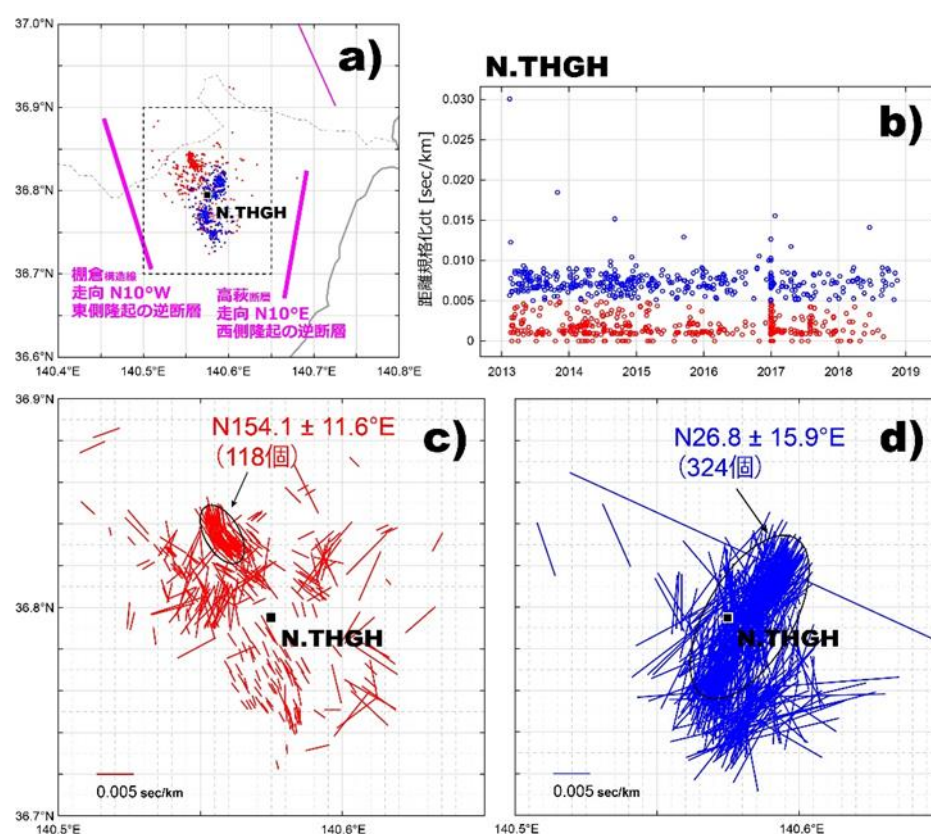


図 2.2.1-3 ndt の時間変化

色付きの丸は、速い S 波と遅い S 波の相関係数が 0.9 以上の地震を、また、それらの色は震源の深さを、N はそれらの地震数を示す。灰色丸は、相関係数が 0.9 未満の地震を示す。(左) ndt の時間変化が明瞭であった IWAKMZ 観測点、(右) ndt の時間変化が不明瞭であった N.IWEH 観測点での例を示した。

図 2.2.1-4 N.THGH 観測点で得られた ndt と ϕ の分布

a) 解析で得られた N.THGH 観測点付近の震央分布と断層や構造、b) N.THGH 観測点でとらえた地震の ndt の時間変化、c) 速い ndt グループの ϕ の分布、d) 遅い ndt グループの ϕ の分布。

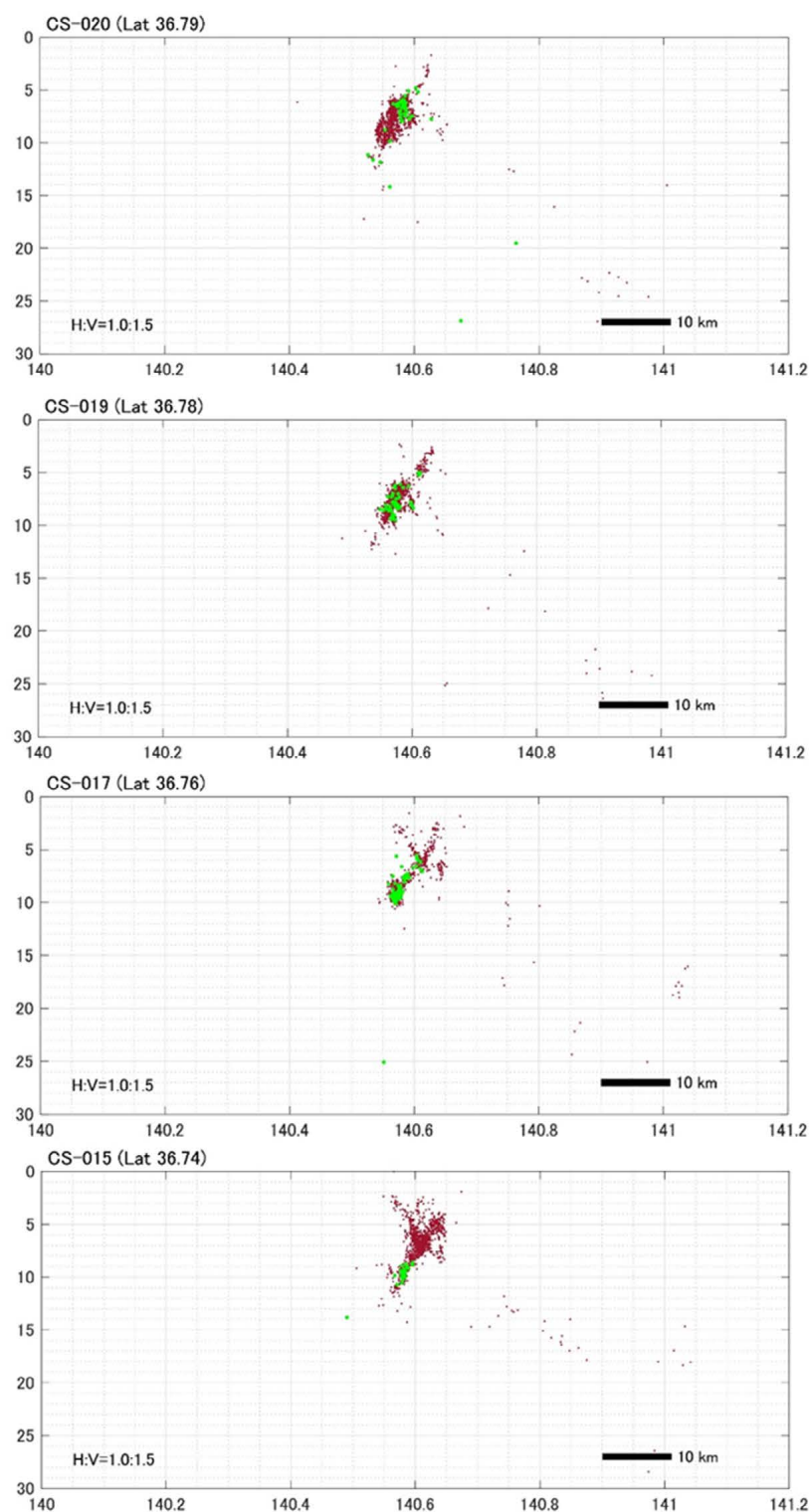


図 2.2.1-5 N.THGH 観測点付近の震源分布

臙脂色丸は, hypoDD 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000¹⁷⁾) で再決定した震源を示し, 緑色丸は S 波スプリッティング解析で使用した震源を示す。N.THGH 観測点付近を東西に横切る領域をプロットした。紙面上が北側, 紙面下が南側を示す。南から北へ向かうにつれて, 緑色丸で示した震源の深さが徐々に浅くなる様子が見られる。

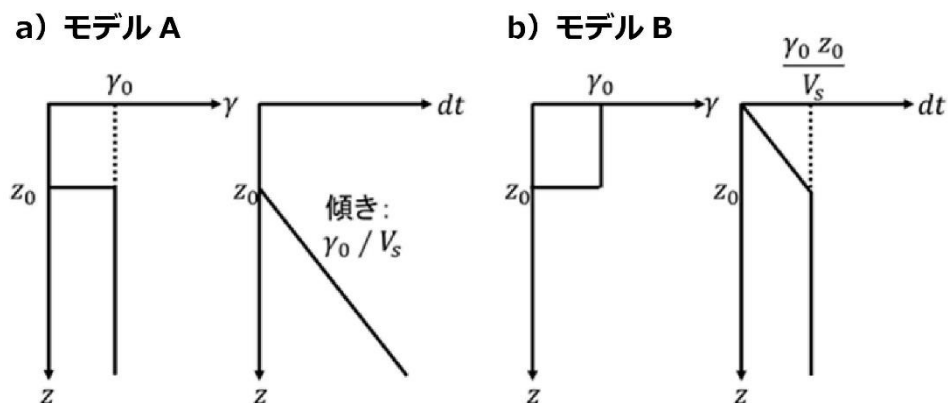


図 2.2.1-6 異方性強度の分布域に関する二つのモデル

a) モデル A: 深さ Z_0 以深で一定の異方性強度 γ_0 を有するモデル, b) モデル B: 地表面から深さ Z_0 までに一定の異方性強度 γ_0 を有するモデル。Mizuno *et al.* (2001)¹⁹⁾を基に作成。

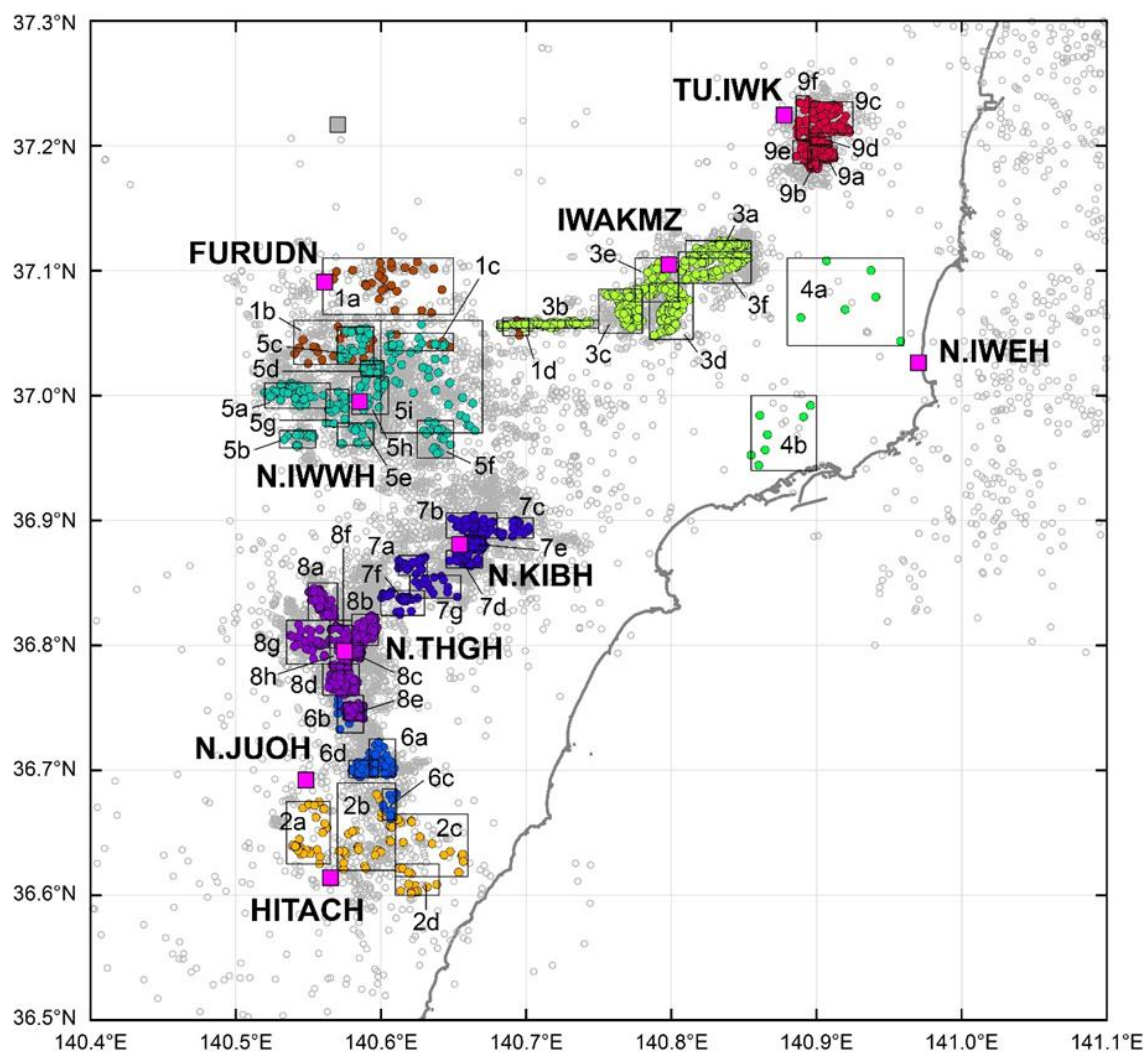


図 2.2.1-7 本解析で定義した震源のクラスター分布

灰色以外の丸は、異方性強度などの推定やクラック密度推定に利用した地震を、灰色はそれらの解析では使用しなかった地震を示す。

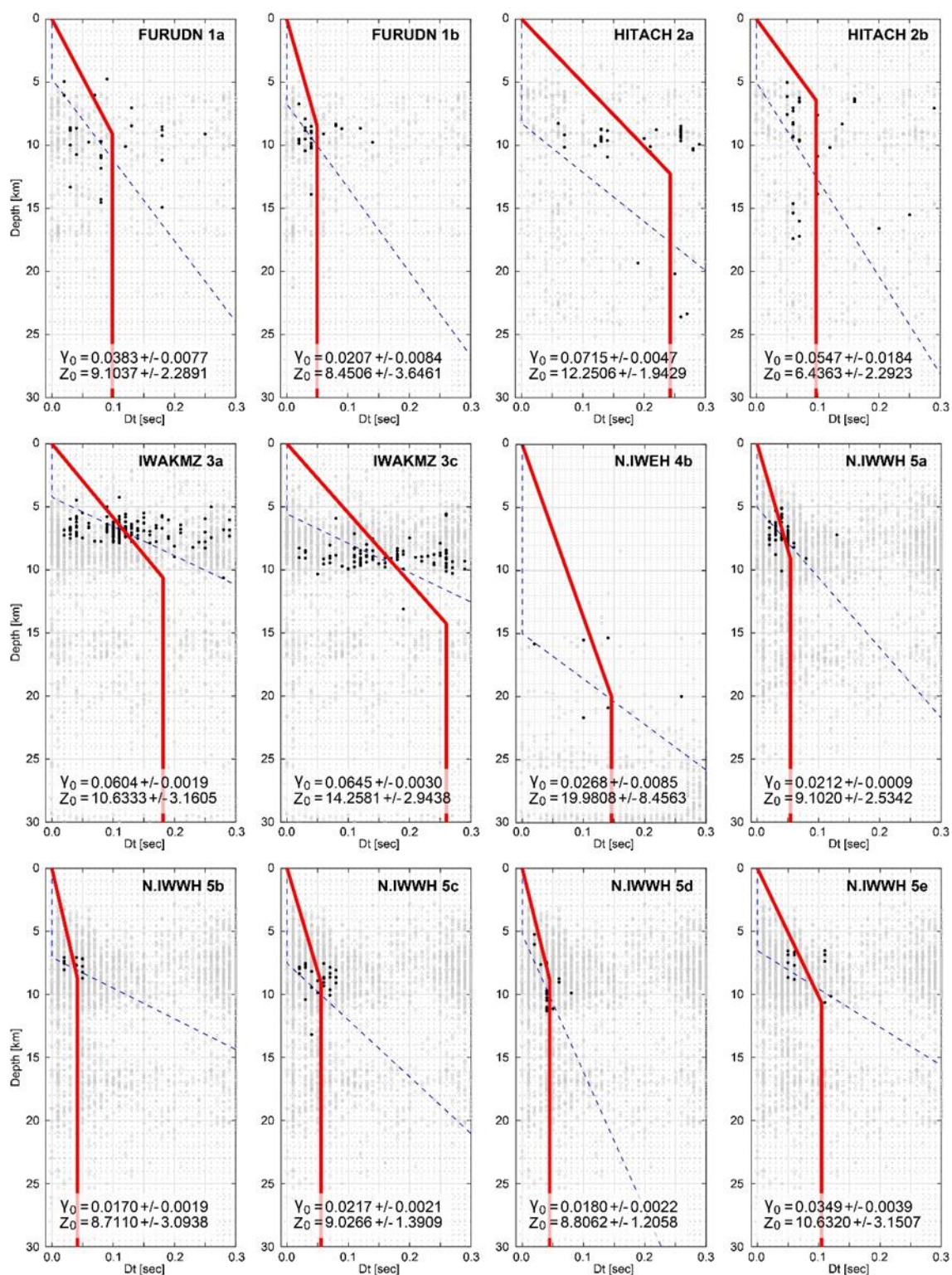


図 2.2.1-8 異方性強度とその深さの推定結果(1/2)

青線と赤線はモデル A と B(図 2.2.1-6)によるフッティングの結果を示し、採用したモデルを太線で示す。図中に γ_0 と Z_0 の推定値を 1σ の推定誤差とともに示した。黒色丸は使用した震源データを、灰色丸はその他の震源を示す。各クラスター番号は、図 2.2.1-7 を参照のこと。

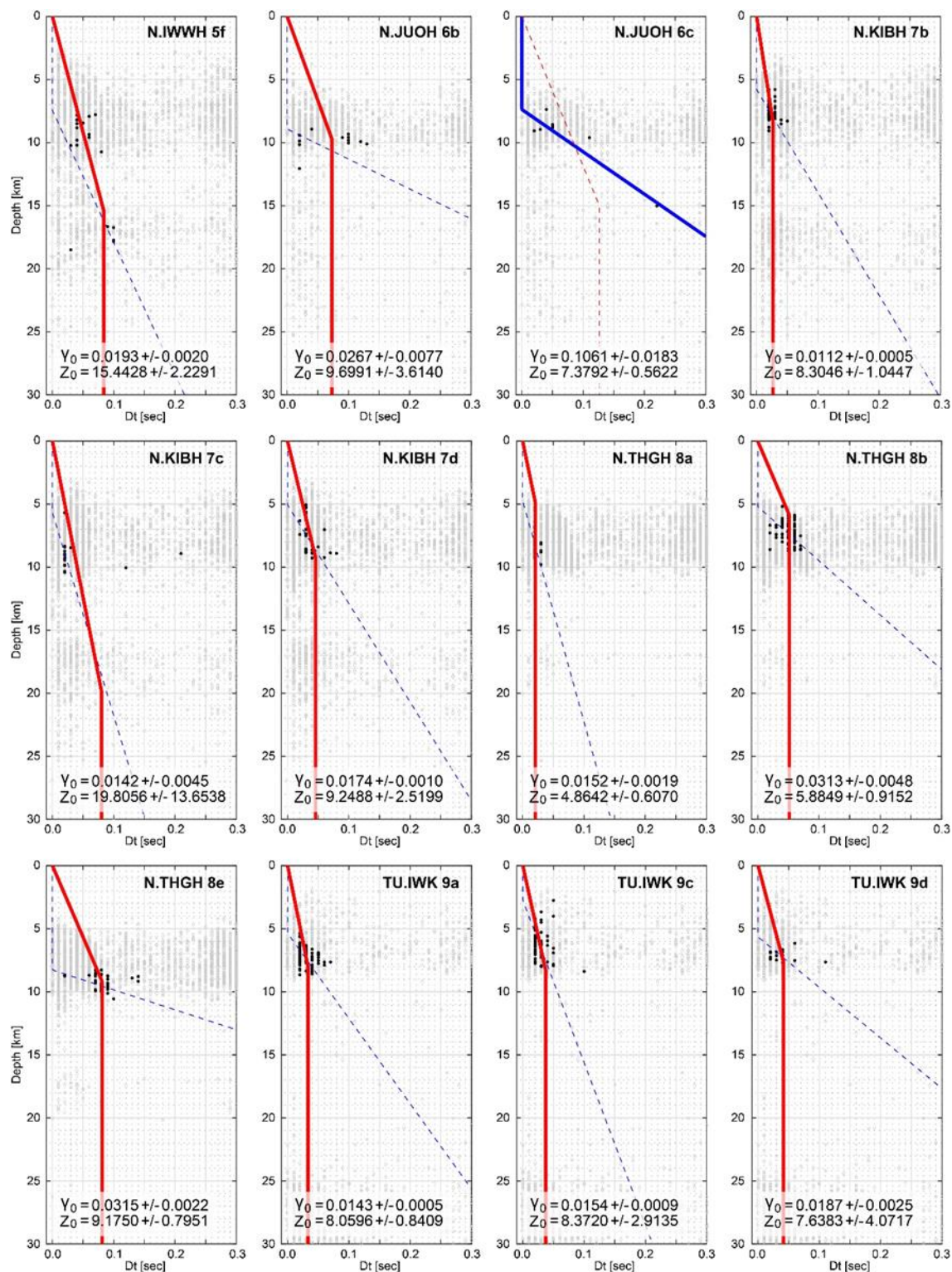


図 2.2.1-8 異方性強度とその深さの推定結果 (2/2)

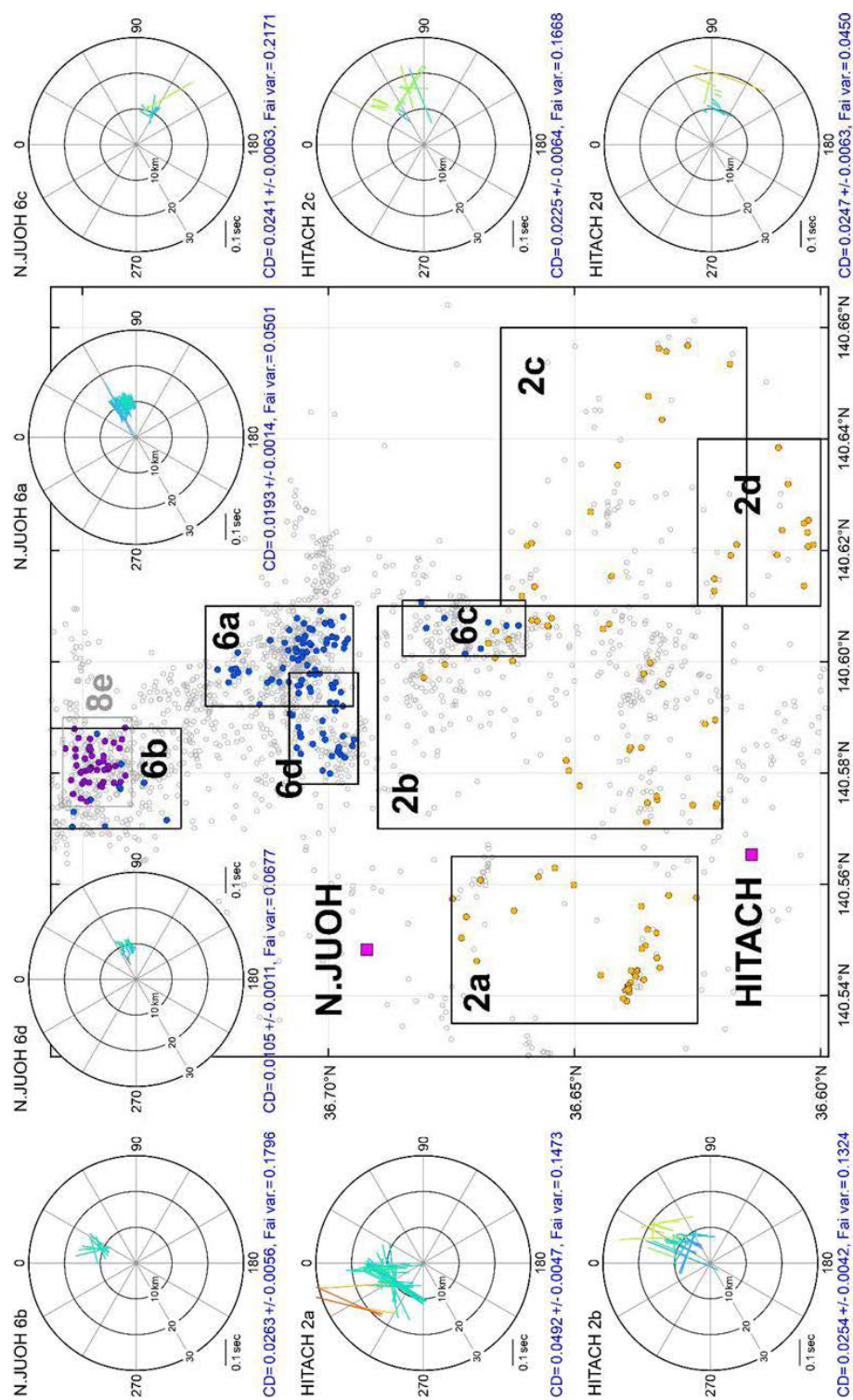


図 2.2.1-9 各クラスターにおけるφの等積投影(1/4)
 クラスター番号は図 2.2.1-7 に示した。また、各クラスターのクラック密度(CD)とφの分散(Fai var.)を
 等積投影図中に青字で示した。

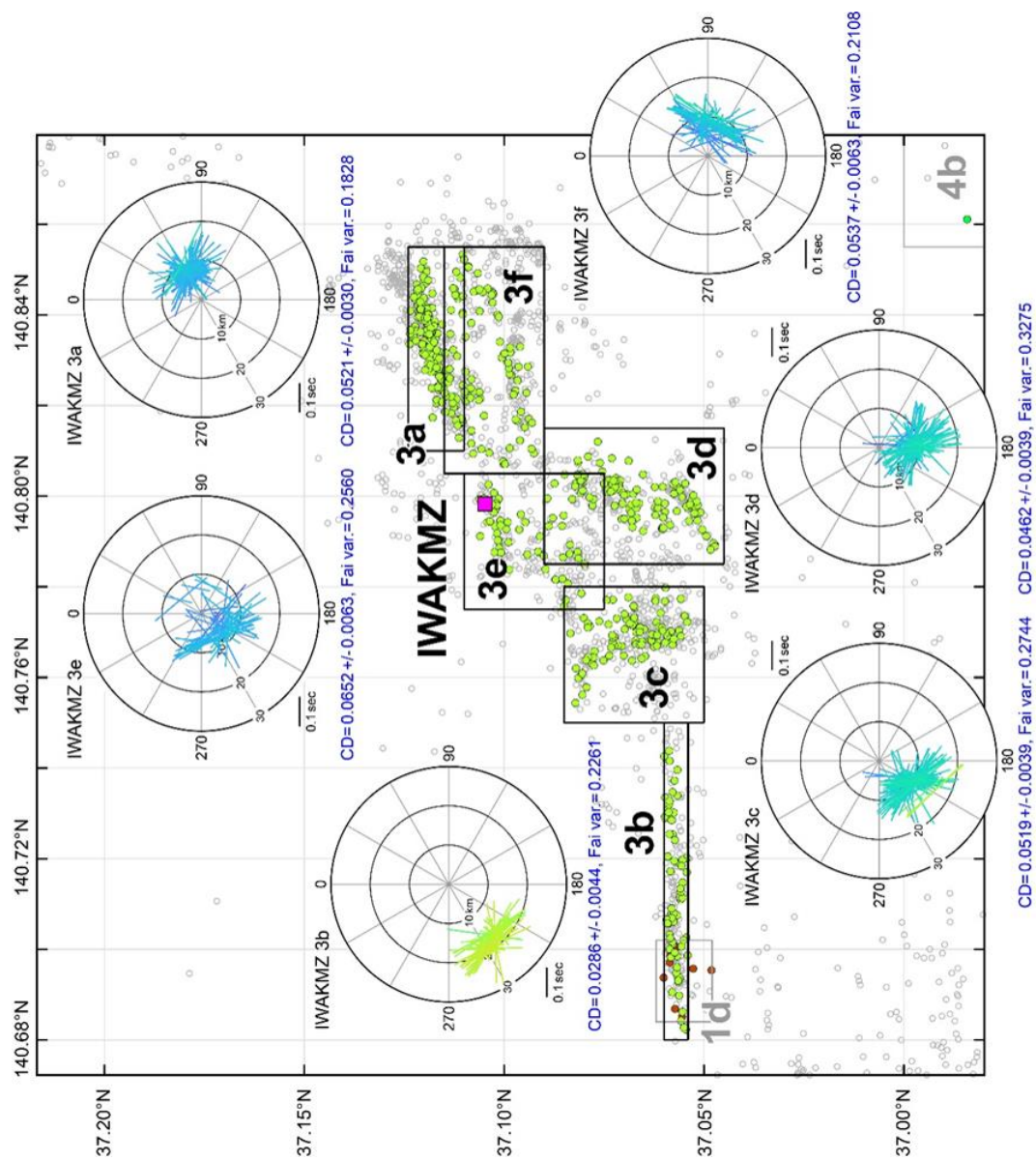


図 2.2.1-9 各クラスターにおけるφの等積投影 (2/4)

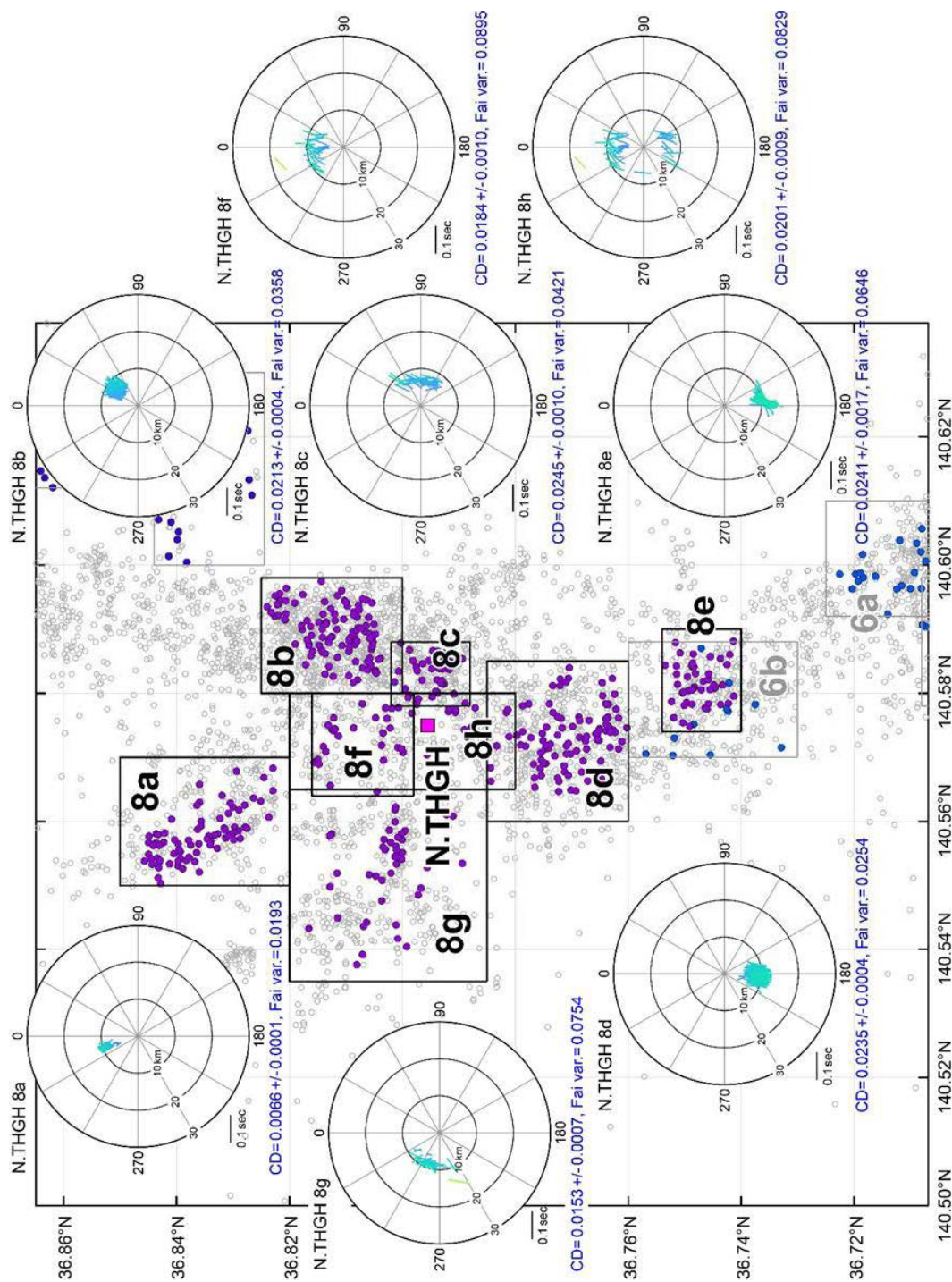


図 2.2.1-9 各クラスターにおける ϕ の等積投影 (3/4)

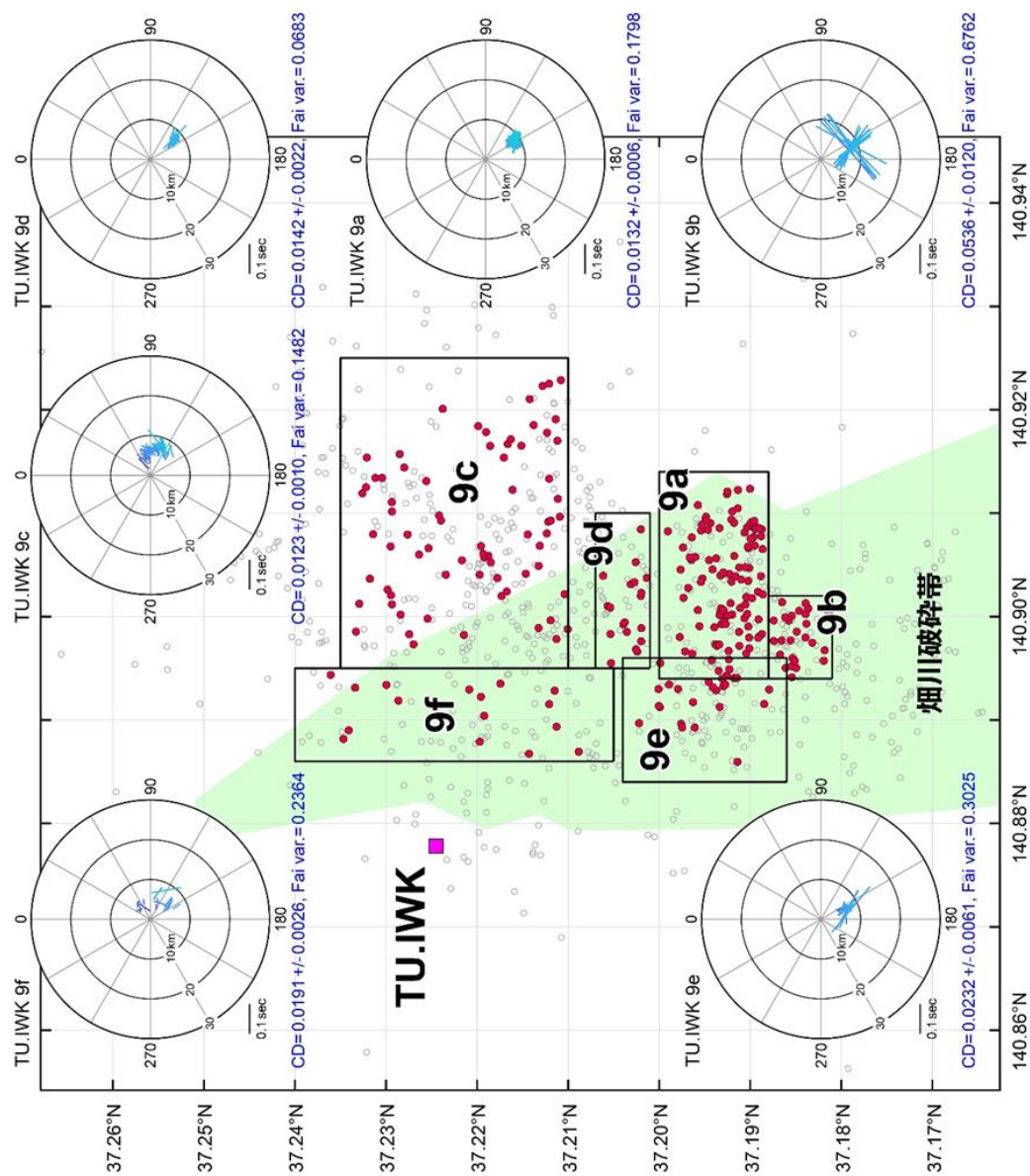


図 2.2.1-9 各クラスターにおけるφの等積投影 (4/4)

煙川破砕帯の概略位置について、久保ほか (2003)²⁵⁾を参考に緑色のハッチを付けて示した。

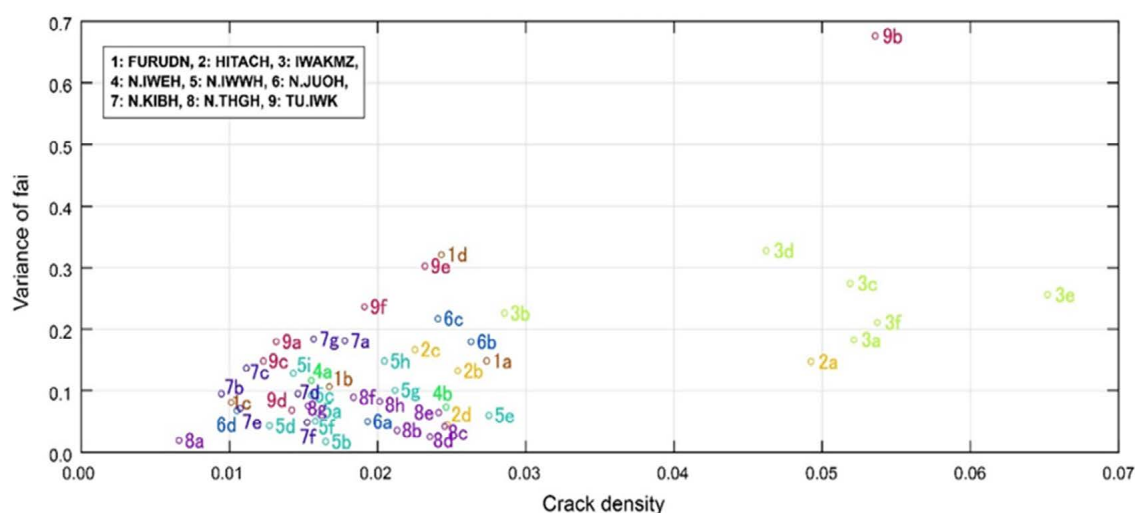


図 2.2.1-10 クラック密度と ϕ の分散との関係

図 2.2.1-7 で示した各クラスターでの計算結果。横軸はクラック密度、縦軸は ϕ の分散を示す。wet なクラックを仮定した場合の結果を示す。

参考文献

- 1) 金嶋 聡, 地球内部の異方性と S 波のスプリッティング, 地震第 2 輯, vol.44, pp.71-83, 1991.
- 2) 地震調査研究推進本部, 超巨大地震(東北地方太平洋沖型), https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/rs_tohokuoki_eq-type/ (2023 年 5 月 15 日最終閲覧).
- 3) Toda, S., Stein, R.S., Lin, J., Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, Geophysical Research Letters, vol.38, L00G03, 2011, doi:10.1029/2011GL047834.
- 4) 桑原保人, 2011 年東北地方太平洋沖地震で誘発された内陸地震活動の現状と地震災害リスク評価のための調査研究プロジェクトの紹介, GSI 地質ニュース, vol.1, 6, pp.172-174, 2012.
- 5) 堤 浩之, 遠田晋次, 2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震の地震断層と活動履歴, 地質学雑誌, vol.118, pp.559-570, 2012.
- 6) Sato, T., Kazahaya, K., Matsumoto, N., Takahashi, M., Deep groundwater discharge after the 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake, Japan, Earth, Planets and Space, vol.72, 54, 2020.
- 7) 川辺孝幸, 中野啓二, 2011 年東北地方太平洋沖地震による温泉湧出異常と誘発地震, 東北地域災害科学研究, vol.49, pp.17-22, 2013.
- 8) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 2 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, 2021.
- 9) 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.

- 10) 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.
- 11) Silver, P.G., Chan, W.W., Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *Journal of
Geophysical Research*, vol.96, pp.16429-16454, 1991.
- 12) Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., Zhao, D., Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs
beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, *Journal of Geophysical
Research*, vol.106, no.B10, pp.21843-21857, 2001.
- 13) Iidaka, T., Obara, K., Shear-wave splitting in a region with newly-activated seismicity after the 2011
Tohoku earthquake, *Earth, Planets and Space*, vol.65, pp.1059-1064, 2013.
- 14) Iidaka, T., Muto, J., Obara, K., Igarashi, T., Shibazaki, B., Trench-parallel crustal anisotropy along the
trench in the fore-arc region of Japan, *Geophysical Research Letters*, vol.41, pp.1957-1963, 2014,
doi:10.1002/2013GL058359.
- 15) Hiramatsu, Y., Honma, H., Saiga, A., Furumoto, M., T. Ooida, Seismological evidence on characteristic
time of crack healing in the shallow crust, *Geophysical Research Letters*, vol.32, L09304, 2005,
doi:10.1029/2007GL022657.
- 16) 産業技術総合研究所, 活断層データベース 2015 年 8 月 11 日版,
https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html (2023 年 5 月 15 日最終閲覧).
- 17) Waldhauser, F., W.L. Ellsworth, A double-difference earthquake location algorithm: method and
application to the northern Hayward Fault, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*,
vol.90, pp.1353-1368, 2000.
- 18) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K., Hama, Y., Triggering of earthquake swarms
following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,
vol.120, pp.2279-2291, 2015, doi:10.1002/2014JB011598.
- 19) Mizuno, T., Yomogida, K., Ito, H., Kuwahara, Y., Spatial distribution of shear wave anisotropy in the
crust of the southern Hyogo region by borehole observations, *Geophysical Journal International*, vol.147,
3, pp.528-542, 2001.
- 20) Hudson, J.A., Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophysical
Journal Research*, vol.64, 1, pp.133-150, 1981.
- 21) O'Connell, R.J., Budiansky, B., Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *Journal of
Geophysical Research*, vol.79, 35, pp.5412-5426, 1974.
- 22) Saiga, A., Hiramatsu, Y., Ooida, T., Yamaoka, K., Spatial variation in the crustal anisotropy and its
temporal variation associated with a moderate-sized earthquake in the Tokai region, central Japan,
Geophysical Journal International, vol.154, 3, pp.695-705, 2003.
- 23) 福島県観光物産交流協会, ふくしまの旅 水石山, <https://www.tif.ne.jp/jp/spot/spot.html?spot=3389>
(2023 年 10 月 1 日最終閲覧).
- 24) Tadokoro, K., Ando, M., Umeda, Y., S wave splitting in the aftershock region of the 1995 Hyogo-ken

Nanbu earthquake, Journal of Geophysical Research, vol.104, pp.981-991, 1999.

- 25) 久保和也, 柳沢幸夫, 利光誠一, 坂野靖行, 兼子尚知, 吉岡敏和, 高木哲一, 最新地質図の紹介 5 万分の 1 地質図幅「川前及び井出」, 地質ニュース, no.584, pp.22-25, 2003.
- 26) 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.
- 27) Mardia, K.V., Statistics of directional data, Academic press London and New York, 1972, 357p.
- 28) Crampin, S., Peacock S., A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth, Wave Motion, vol.41, pp.59-77, 2005.
- 29) Crampin, S., Zatsepin, S.V., Modelling the compliance of crustal rock. II. Response to temporal changes before earthquakes, Geophysical Journal International, vol.129, pp.495-506, 1997.
- 30) 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, 440p., 1991.

2.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

(1) はじめに

我が国における信頼性の高い地形学的時間スケール(数千から数十万年)での隆起速度の推定は、放射性炭素(^{14}C)年代測定法やテフクロノロジーにより離水時期が制約された海成段丘や河成段丘に基づいている。逆にいえば、段丘が存在しなかったり、段丘が存在しても、その離水時期が ^{14}C 年代の適用限界である約5万年以前であり、かつ段丘構成層や被覆層にテフラが検出できなかったりする場では、隆起速度の推定は難しい。本研究では、そうした場における、離水地形の離水時期の制約に基づいた隆起速度の推定技術の適用性の拡充を目指す。特に重点を置くのは、複数の年代測定手法を組み合わせたマルチ年代測定法による離水地形の離水時期制約である。具体的には、離水地形に対して、我が国における地形・堆積物の一般的な編年技術であった ^{14}C 年代測定法やテフラ分析に加えて、10万年前以前の地形・堆積物の編年が可能な長石の赤外光ルミネッセンス(InfraRed Stimulated Luminescence:以下、「IRSL」)年代測定法の適用を検討する。

本研究のテーマは、内陸部を対象としたものと沿岸部を対象としたものに大別される。本報告書では、内陸部を対象とした研究開発について述べる。具体的には、大井川中流部を対象に、河成段丘に代わる過去の河床高度を近似する離水河成地形を認定し、それらの離水時期の制約から下刻・隆起速度を推定する手法について検討を行う。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

河成段丘に代わる過去の河床高度を近似できる離水河成地形として、穿入蛇行跡である環流旧河谷がある(安江ほか, 2014¹⁾)。環流旧河谷から旧河床堆積物を見出し、それらと現河床との比高を、河川流路堆積物の堆積時期で除することで、河川の下刻速度を算出できる。さらに、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可能である。

環流旧河谷の河川流路堆積物を対象に、長石のIRSL年代測定法を適用し、隆起速度の評価を行った研究例がある。小形ほか(2021)²⁾は、紀伊山地の新宮川中流部に分布する環流旧河谷を対象に、ボーリング調査により河川流路堆積物を取得し、IRSL年代測定法が適用可能であるとの見通しを得た。また、大井川中流部で実施した研究でも同様に、環流旧河谷で掘削したコアに、IRSL年代測定を適用することで、下刻・隆起速度が推定されている(塚原ほか, 2022³⁾;小形ほか, 2022⁴⁾)。

以上のように、内陸部での下刻・隆起速度の推定において、環流旧河谷を指標にした事例は複数地域で蓄積されており、手法として確立されつつある。しかし、離水地形・堆積物に基づく手法により得られる下刻・隆起速度の信頼性や実用性をさらに向上させるためには、多種多様な指標に基づいた検討が行えるように、幅広く手法を整備することが重要である。このような視点から、本研究では、大井川中流部に分布する、尾根沿いに断片的に残された河川流路堆積物の露頭を対象に調査及び分析を実施した。露頭から採取した堆積物を対象に、IRSL年代を測定することで、大井川中流域の下刻・隆起速度の評価を行うと共に、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)を用いたレーザー計測を行うことで、露頭周辺の地形的特徴の抽出を試みた。

(3) 実施内容・結果

大井川流域に分布する離水地形や河川流路堆積物の離水年代と堆積環境の推定を行い、下刻速度の算出事例を蓄積するとともに、得られた下刻速度の妥当性を評価した。調査地点の位置は図 2.2.2-1a

に示す。尾根沿いに断片的に残された河川流路堆積物は、図中の3地点(SWM①～③)で露出する。

SWM①の露頭柱状図を図 2.2.2-1b に示す。主に灰白色シルト層と暗褐色のシルト質砂層からなる砂泥互層、有機質な黒色シルト層が確認される。砂泥互層には粒径の揃った砂層が狭在するほか、露頭最下部では垂角礫を主体とする角礫層が認められる。有機質な黒色シルト層は還元環境で形成されて保存されたことを示す。細かい平行葉理が発達する灰白色シルト層は、浮遊運搬された粒子のみが間欠的に供給される本流から離れた三日月湖や沼沢地のような止水環境で形成されたことを示唆する。

SWM①～③が露出する尾根沿いでは、円礫層が露出している(図 2.2.2-2)。円礫層には直径数 cm の赤色チャートがまれに含まれる。赤色チャートは、赤石山脈から発する大井川において、四万十帯構成層の白根層群のシート状岩体もしくは混在岩中の岩塊として、本流の上流域のみに分布する(杉山ほか, 2010⁵⁾)。以上のことから、林道で露出する円礫層は大井川本流起源の堆積物であると判断される。

これらの観察結果を総合して解釈すると、SWM①～③の細粒堆積物や円礫層は現在の大井川本流が開析谷を削り込む以前に残した地層であると判断できる。したがって、本露頭の細粒砂層に含まれる長石の IRSL 年代を測定し、露頭の離水時期を算出することで、大井川中流部の下刻速度を推定できる。以下に、SWM①の露頭を対象に実施した IRSL 年代測定の結果及び算出した下刻速度、並びに本露頭周辺の高解像度 DEM による地形判読の結果について記載する。

① IRSL 年代測定及び下刻速度の算出

SWM①で採取した SWM①-1o と SWM①-3o の IRSL 年代測定を行った(図 2.2.2-1b)。SWM①-2o と SWM①-3o-2 の IRSL 年代測定も試みたが、IRSL 測定に必要なカリ長石量を抽出することができなかった。本研究では、IRSL 強度が自然に減衰するフェーディング現象の影響を抑制するために、post-IR IRSL (pIRIR; Thomsen *et al.*, 2008⁶⁾) 測定を採用した。測定温度は 50℃と 225℃とした。年間線量算出用の放射性元素濃度の測定には、ポータブル蛍光エックス線分析装置(Niton XL5 Plus; Thermo Fisher Scientific 社製; 山本ほか, 2022⁷⁾)を用いた。その他の IRSL 測定条件と年間線量率の算出方法については小形ほか(2021)²⁾を参照されたい。IRSL 年代の算出には、統計ソフト R と「Luminescence」パッケージ(Kreutzer *et al.*, 2012⁸⁾)を用いた。各試料で8アリコートずつ測定を行った。SWM①-1o のほとんどのアリコートはフェーディング率(g2days)が0%以下であったため、フェーディング補正を行わずに蓄積線量を算出した。SWM①-3o については、一部アリコートを除き、1.5%以上の g2days 値を示したので、フェーディング補正を行って蓄積線量を求めた。蓄積線量の単純平均値(誤差は標準誤差)から算出した SWM①-1o, SWM①-3o の IRSL 年代は 147 ± 15 , 125 ± 15 ka であった(表 2.2.2-1)。これらの年代値は層序関係に対して逆転しているが、誤差範囲を考慮すれば整合的である。SWM のカリ長石試料はフェーディング率が不安定であるため、この年代の信頼性については、IRSL 信号の安定性評価や他年代測定法とのクロスチェックとともに慎重に議論する必要がある。

次に、測定した IRSL 年代に基づいて下刻速度の算出を行う。下刻速度は、離水面と現河床の比高を離水年代で除することで算出できる。本研究では、河川流路堆積物の堆積年代が離水年代を示すと考え、IRSL 年代(147 ± 15 , 125 ± 15 ka)と現河床との比高(約 280 m)から、SWM①における下刻速度を $1.9 \pm 0.2 \sim 2.2 \pm 0.3$ mm/yr と算出した。算出した下刻速度は、同地域において異なる時間スケール・手法で求められた上下変動速度や削剥速度とも整合的であった(図 2.2.2-3)。これより、尾根沿いに断片的に残された河川流路堆積物を指標に、下刻速度を推定できる可能性を示した。

② 高解像度 DEM による地形判読

1976 年撮影の国土地理院カラー空中写真や国土地理院の基盤地図情報の 10 m メッシュの数値標

高モデル(digital elevation model; DEM)を用いた地形判読では、SWM①～③が露出する尾根において離水地形は認められなかった。本研究では、尾根で離水を示唆する地形を認定できるか確認するために、無人航空機を用いたレーザー計測を行った。計測範囲は露頭が露出する尾根を取り囲むような領域とし(図 2.2.2-1a)、取得した点群データからは 10 cm メッシュの DEM を作成した。さらに、DEM から作成した地形表現図に基づいて、計測範囲の地形判読を実施した。

図 2.2.2-2 に、地形表現図及び認定した地形の分布を示す。計測範囲において、河成段丘や旧流路地形と読み取ることのできる地形は認定できなかった。しかし、SWM①～③の細粒堆積物や円礫層といった河川流路堆積物が露出する地点の尾根上では、残丘状の小ピークや斜面内の緩斜面が認められる。明瞭な平坦面が観察されない場において、地表踏査で河川流路堆積物の露頭を探す際、これらの微地形を手掛かりにできる可能性がある。

(4) 主な成果と課題

本研究では、尾根沿いに断片的に残された河川流路堆積物を指標に、下刻速度を推定できる可能性を示した。このことは、離水の指標となる河川流路堆積物が、明瞭な離水地形が認められない場に保存されている可能性を示しており、下刻・隆起速度を評価するための指標の多様化が期待される。一方で、河川流路堆積物を対象にした IRSL 年代測定には、太陽光曝による年代初期化(ブリーチ)が不完全な場合が多いため年代が過大評価されやすいという課題が残されている。そのため、蓄積線量の分布からブリーチの評価及び補正を行い、IRSL 年代値の精度・確度を向上させていくことが望ましい。また、高解像度 DEM を用いた地形判読からは、このような堆積物を小ピークや不明瞭な緩斜面などの微地形を指標にすることで発見できる可能性が示された。今後、明瞭な離水地形を伴わない河川流路堆積物の検出や離水年代の推定について手法を整備すると共に、事例を蓄積することで適用性を慎重に検討していく必要がある。

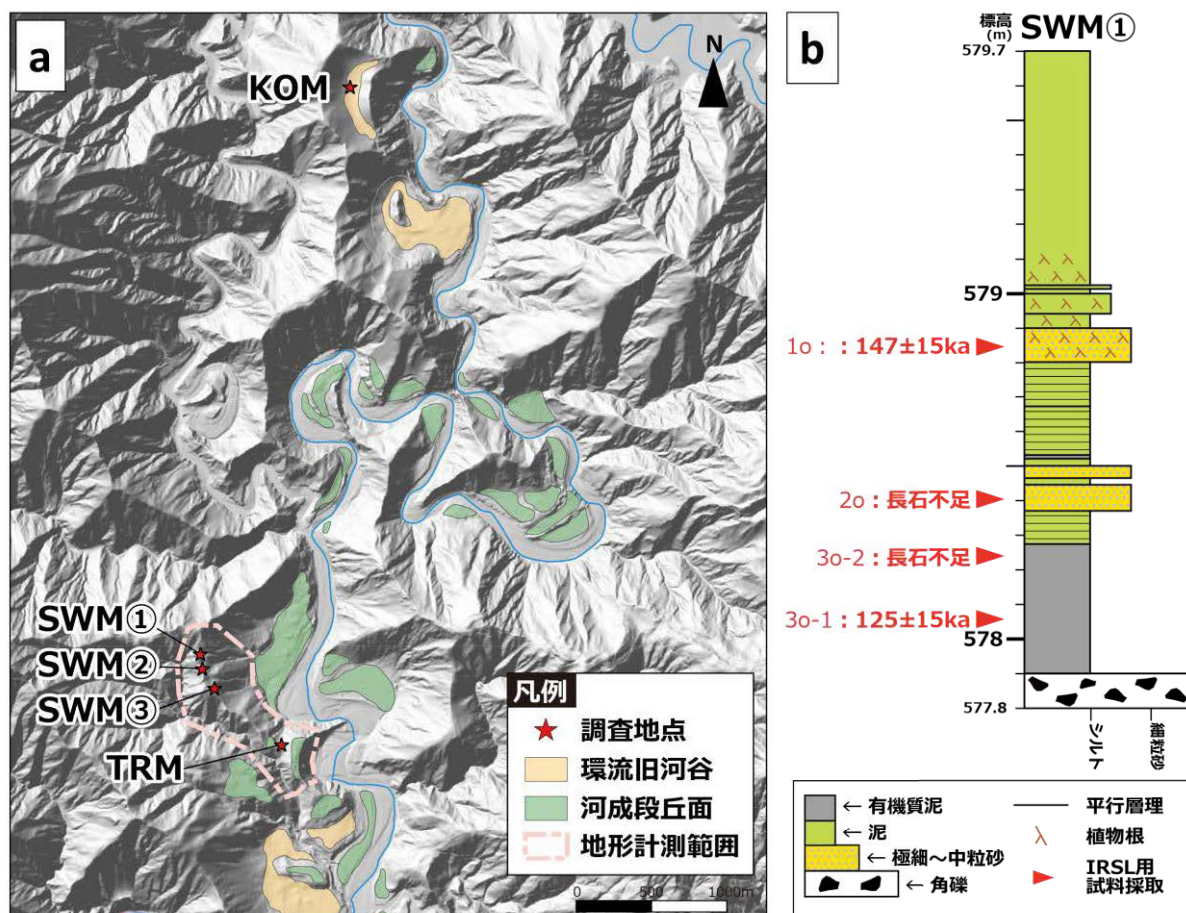


図 2.2.2-1 調査地点の位置 (a), 及び SWM①の柱状図 (b)

背景図には地理院タイルを使用した。地形区分はカラー空中写真の実体視判読に基づく。KOM は環流旧河谷におけるボーリング掘削地点, TRM は河成段丘露頭, SWM①～③は尾根沿いに断片的に残された河川流路堆積物の露頭の位置を示す(原子力機構・電力中央研究所, 2022⁹⁾; 塚原ほか, 2022³⁾)。

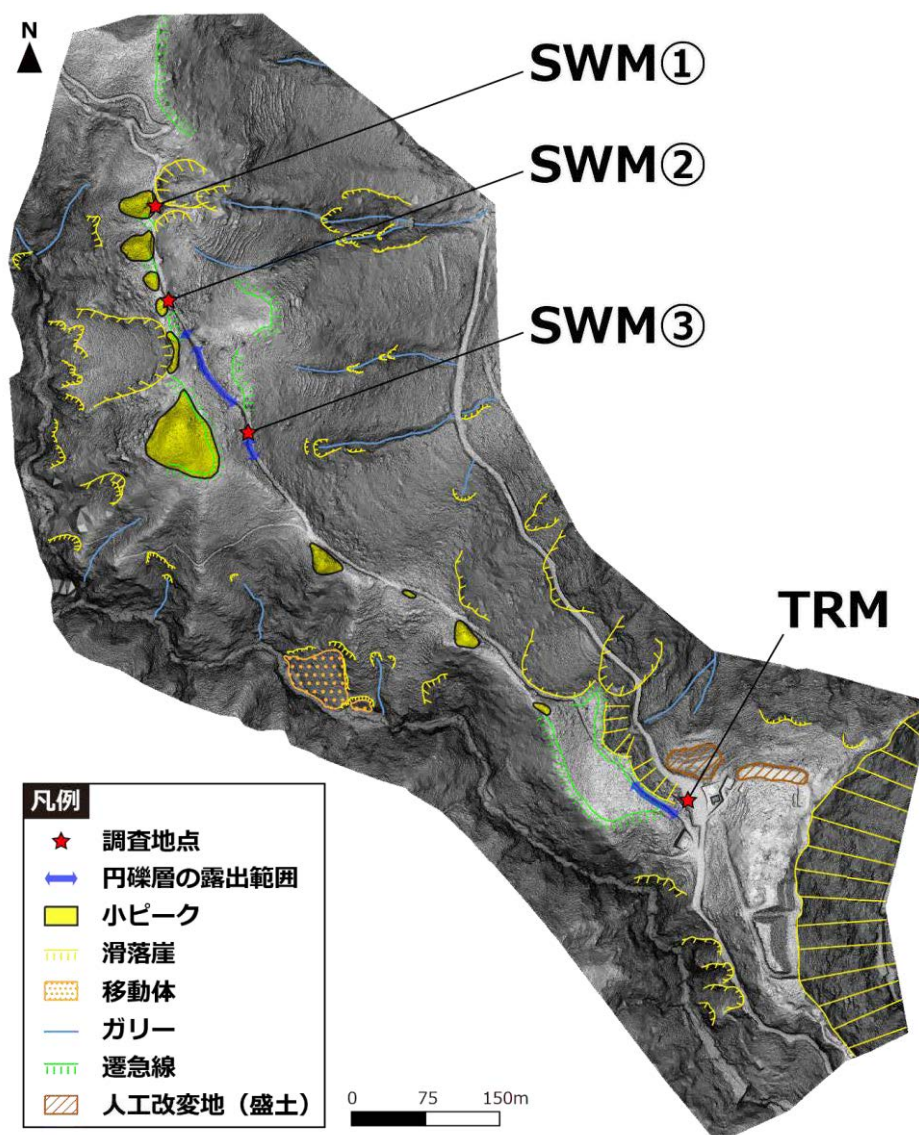


図 2.2.2-2 地形表現図と地形判読結果

地形表現図は、地形勾配を示す「傾斜度」と、凹凸を示す「天空率」を合成することで作成した。

表 2.2.2-1 SWM①の IRSL 年代

試料名	測定数	採用数	年間線量率 (Gy/ka)	g_{2days} (%/decade)	年代 (ka)
SWM①-1o	8	8	4.52 ± 0.23	-	147 ± 15
SWM①-3o	8	6	4.69 ± 0.23	2.07 ± 0.44	125 ± 15

※SWM①-1o の g_{2days} 値は 0%以下であった。SWM①-3o については、 g_{2days} 値が 0%以下のアリコートを除外し、年代を算出した。

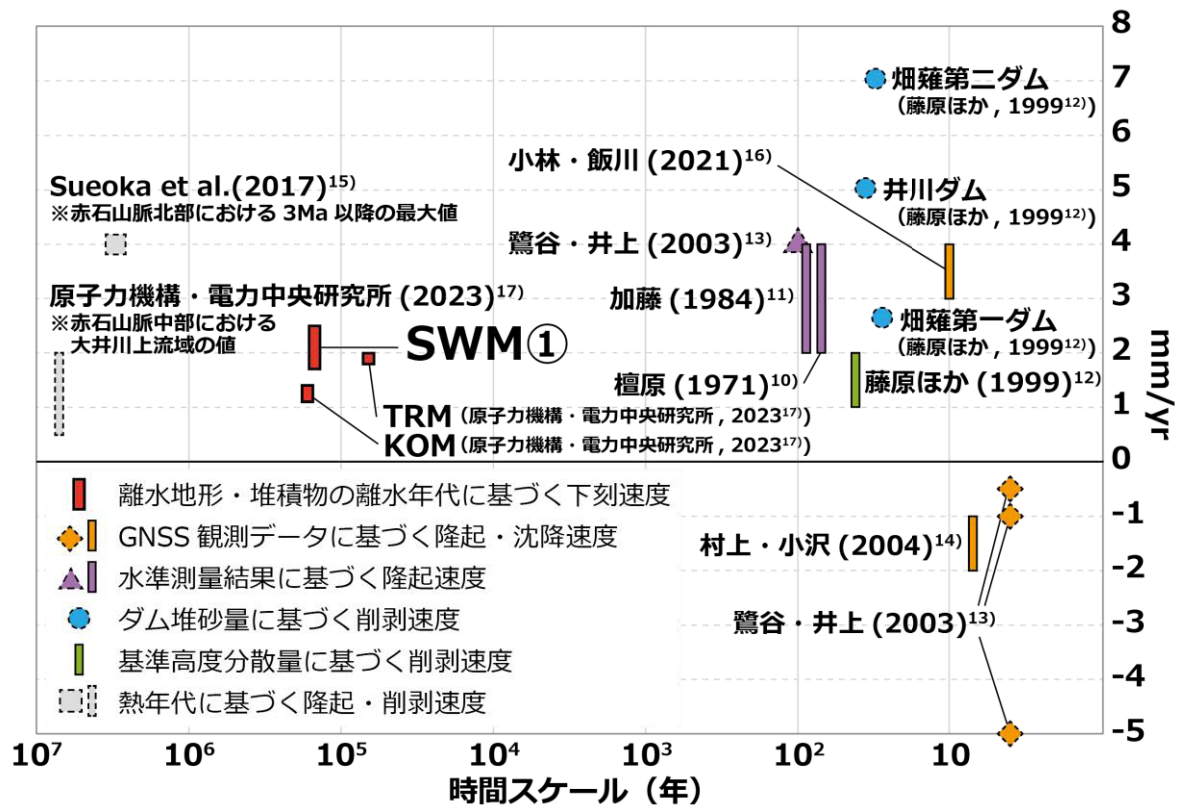


図 2.2.2-3 赤石山脈における隆起・沈降・下刻・削剥速度

実線枠は、既往研究で示されたコンター図から読み取った研究対象地域の値を示す。破線枠は、研究対象地域の近傍で得られた値を示す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 塚原柚子, 小形 学, 川村 淳, 菅野瑞穂, 西山成哲, 末岡 茂, 中西利典, 小松哲也, 穿入蛇行河川の旧流路地形・堆積物に基づく下刻速度の推定: 赤石山脈南部, 大井川の事例, 日本第四紀学会 2022 年大会要旨, 2022.
- 4) 小形 学, 塚原柚子, 川村 淳, 菅野瑞穂, 西山成哲, 末岡 茂, 小松哲也, 中西利典, 安江健一, 長石の OSL 年代測定による離水時期の推定: 能登半島と大井川の事例, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会要旨, 2022.
- 5) 杉山雄一, 水野清秀, 狩野謙一, 村松 武, 松田時彦, 石塚 治, 及川輝樹, 高田 亮, 荒井晃作, 岡村行信, 実松健造, 高橋正明, 尾山洋一, 駒津正夫, 20 万分の 1 地質図幅「静岡及び御前崎

(第2版), NI-54-32, 2010, 33.

- 6) 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.
- 7) 山本悠介, 渡邊隆広, 丹羽正和, 島田耕史, 東濃地科学センターにおけるポータブル蛍光エックス線分析装置を用いた岩石試料等の主要元素及び微量元素の定量分析, *JAEA-Testing* 2021-003, 2022, 58p.
- 8) Kreutzer, S., Schmidt, C., Fuchs, M.C., Dietze, M., Fischer, M. and Fuchs, M., Introducing an R package for luminescence dating analysis, *Ancient TL*, vol.30, 2012, pp.1-8.
- 9) 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.
- 10) 檀原 毅, 日本における最近70年間の総括的上下変動, *測地学会誌*, 17, 1971, pp.100-108.
- 11) 加藤照之, 東海地方の地殻上下変動, *第四紀研究*, vol.23, no.2, 1984, pp.111-116.
- 12) 藤原 治, 三箇智二, 大森博雄, 日本列島における侵食速度の分布, *サイクル機構技報*, vol.5, 1999, pp.85-93.
- 13) 鷲谷 威, 井上政明, 測地測量データで見る中部日本の地殻変動, *月刊地球*, vol.25, no.12, 2003, pp.918-928.
- 14) 村上 亮, 小沢慎三郎, GPS 連続観測による日本列島上下地殻変動とその意義, *地震*, vol.57, 2004, pp.209-231.
- 15) Sueoka, S., Ikeda, Y., Kano, K., Tsutsumi, H., Tagami, T., Kohn, B. P., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S., 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.
- 16) 小林和宏, 飯川健勝, 測地データからみた日本列島中央部の変動, *地球科学*, vol.75, 2021, pp.73-81.
- 17) 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.

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、山地の隆起・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。従って、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 年代測定に加えて、同時に同領域から Ti 濃度を分析し、結晶化年代と結晶化温度を同時に推定する手法を確立した(Yuguchi *et al.*, 2020²⁾, 2022³⁾, 2023⁴⁾)。また、例えばジルコンのハフニウム(Hf)同位体組成やアパタイトのストロンチウム(Sr)同位体組成など同位体組成の情報は、起源マグマやマグマの混合、結晶分化作用に伴うマグマの化学組成の変化等に制約を与え得るため、これらの同位体分析技術の整備も進めてきた。さらに、微量元素組成から火山砕屑物(テフラ)を特徴付けるアプローチに必要な技術として、LA-ICP-MS による火山ガラスの微量元素分析技術を確立した(鏡味ほか, 2021⁵⁾)。岩石中での微量元素の挙動(移動)の把握に有効な微量元素マッピング(イメージング)技術も整備している。

これまでに開発してきた LA-ICP-MS による分析技術について、年代評価をより厳密にするために湿式 ICP-MS での取得データの検証も行いつつ、分析精度の向上を図り、また、適用範囲を拡大するなど手法を高度化することで、研究課題である火山・火成活動におけるマグマの定置・貫入プロセスや、山地の隆起・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 4 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、既存技術の高度化・高精度化及び適用範囲の拡大を狙い、以下の技術整備を進めた。湿式での超高精度同位体分析に向け、試料前処理手法についても検討を始めた。

① 単一測定点での同位体組成と微量元素濃度の高精度同時分析技術の構築

鉱物内には、段階的な結晶成長やその後の変質で化学的な不均質が生じる場合があり、単一微小領域の分析からできるだけ多くの化学的情報を得ることは、高い時空間分解能で岩石の形成過程を明らかにすることにつながる。LA-ICP-MS では、従来は鉱物のマイクロスケール領域について、複数の分析プロセスで同位体組成や元素濃度の情報を取得しているが、この分析手法は、破壊分析であることから、厳密には同一領域から複数の情報を得ることはできなかった。そこで、鉱物の単一微小領域の測定から「高精度な同位体分析(年代測定)」と「元素濃度の定量分析」を同時に実施することを可能にする技術を整備した。既存技術の中で同様の技術として、ジルコンの結晶化年代と結晶化温度を同時に求める分析手法があるが、本手法は年代測定及び元素濃度分析の精度向上を目標として、1 つの LA 装置(Photon-Machines, Analyte G2)を複数台の誘導結合プラズマ ICP 質量分析装置に接続し、LA サイトで得られた試料を各質量分析装置に分配して(Split Stream)分析する手法(LASS-ICP-MS)の開発を行った。ICP 質量分析装置には、年代測定に係る同位体分析のためマルチコレクタ型の ICP 質量分析装置(Thermo Fisher Scientific, Neptune-Plus)と、元素濃度の定量のためにトリプル四重極型 ICP 質量分析装置(Thermo Fisher Scientific, iCAP-TQ)を用いた(図 2.3.1-1)。

ジルコンを対象に、単一の測定点から U-Pb 年代測定(同位体分析)とチタン(Ti)濃度分析を同時測定し、鉱物の結晶化年代と元素の分配から推定される結晶化温度データを取得する分析を試行した。年代値と Ti 濃度の両方の推奨値が報告されているジルコン標準試料がないため、U-Pb 年代測定(同位体分析)は標準ジルコン OD-3、Ti 濃度測定は標準ジルコン 91500 を用いて、開発した手法を用いる場合の精確さを評価した。その結果、LASS-ICP-MS による OD-3 の U-Pb 年代は、 33.39 ± 0.42 Ma ($n=10$) (Ma: 100 万年前)が得られ(図 2.3.1-2a)、Iwano *et al.* (2013)⁶⁾で報告されている推奨値 33.0 ± 0.1 Ma と一致した。また、LASS-ICP-MS による 91500 の Ti 濃度測定では、 5.07 ± 1.29 ppm ($n=20$) が得られ、Szymanowski *et al.* (2018)⁷⁾で報告されている推奨値 4.73 ± 0.15 ppm と整合的な結果が得られた(図 2.3.1-2b)。以上の結果から、LASS-ICP-MS による分析法の精確さを評価できた。今後は、実試料への適用を進めていく。

② 地質イベントの超高精度復元に向けた新しいジルコン標準試料の探求

ジルコンは多くの地質試料に含まれる鉱物であり、その元素組成や同位体組成から岩石の形成過程や形成年代が議論される。岩体の形成から、変質・変成作用及び隆起・侵食など複雑な地質イベントを年代学的に理解するため、近年、ジルコン等の鉱物から様々な手法(U-Pb 法やフィッション・トラック(FT)法)でデータを取得する傾向にあり、既述のように 1 つの分析スポットから複数種のデータを同時取得する技術も開発されている。元素分析や年代測定に係る同位体分析の際には、分析条件の最適化や未知試料の測定値の補正のために標準試料が利用される。また、分析値(年代値)の真度評価では、年代標準試料も必要となる。さらに、近年ではジルコンの年代学として 100 万年より形成年代が若いものが対象とされ始めている。こうした背景から、複数の手法に対して有効で、比較的形成年代の若い標準試料のニーズが高まっており、その選定が必要不可欠となっている。そのため、複数の年代測定手法に対応したジルコンの標準試料の探求を目的として、文献等の調査から標準ジルコン候補となりそうな岩石を探索し、その地質の野外調査及び入手試料の各種分析を行った。

文献及び分析から、岩手県仁左平層(NST:22 Ma)、石川県鷲走ヶ岳層(NFS:22 Ma)、兵庫県歌長流紋岩(TRG04:2.7 Ma)及び大阪層群ピンクタフ層(OGPK:1.0 Ma)が候補試料として挙げられた。これらの候補試料について、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA:日本電子, JXA-8530F)を用いたジルコンのカソードルミネッセンス像観察, LA-ICP-MS(LA: Photon-Machines, Analyte G2; ICP-MS: Thermo Fisher Scientific, Neptune-Plus)による U-Pb 年代測定, FT 自動計測機(Autoscan systems: Trackscan Plus Professional)を用いた FT 年代の取得及び FT 年代既報値の整理, LA-ICP-MS(LA: Photon-Machines, Analyte G2; ICP-MS: Thermo Fisher Scientific, Neptune-Plus)による Hf 同位体分析を実施した。

観察及び分析結果に基づく、各試料の標準試料としての適性について、その評価結果を表 2.3.1-1 に示す。カソードルミネッセンス像観察においては、単調な成長様式を示す(元素分布が均質)ものやジルコン結晶中に包有物の少ないものを適性が高いと判断した。U-Pb 年代については、重みつき標準偏差の 2 乗平均(MSWD)を指標に、年代値ばらつきの小さいもの(形成年代が均一なもの)を適性が高いと判断した。FT 年代については、FT 長の観察・計測において、初期長より有意に短い FT 長(後天的な熱イベントの痕跡)の有無で適性を評価した。Hf 同位体分析においては、U-Pb 年代と同様に MSWD を指標として、均一なものかどうかを評価した。

これらの評価の結果、仁左平層(NST)、歌長流紋岩(TRG04)及び大阪層群(OGPK)が標準試料として適性が高いと判断できた。今後は、他の研究機関へ配分し、ラウンドロビン等を実施することによってこれらの試料の標準試料としての適用性を評価する必要がある。

③ チタナイトの U-Pb 年代測定技術の開発

近年では、LA-ICP-MS などの局所分析によるジルコンの U-Pb 法による年代測定が広く実施されている。一方で、ジルコンは熱や水質変質に強い特徴を持つ鉱物であるため、低温下での結晶化作用や、変質など二次的な地質イベントの年代情報をジルコンから引き出すことは困難である。ジルコンの U-Pb 年代測定のみでは得られなかった地質イベントの年代推定を可能にするため、既存分析手法の U-Pb 年代測定法を別の鉱物であるチタナイトへ適用を進めた。

チタナイトはカルシウム(Ca)に富む石灰質な火成岩や準堆積岩等に普遍的にみられる鉱物であり、U や Th を比較的多く含有する。また、チタナイトの U-Pb 同位体系の閉鎖温度は $\sim 700^{\circ}\text{C}$ とされており、ジルコンの U-Pb 同位体系(閉鎖温度 $\sim 900^{\circ}\text{C}$)に比べて閉鎖温度が 200°C ほど低い。従って、火成岩や変成岩中に含まれるチタナイトの U-Pb 年代測定から、マグマの温度が 700°C 程度まで低下した際、または岩石が 700°C 程度の温度にさらされた際の年代情報を引き出すことができると考えられる。

ICP-MS による分析では、質量差別効果の補正のため、標準試料を必要とする。また LA-ICP-MS に依る分析において、各種鉱物のアブレーション効率が異なるため、同じ鉱物の標準試料を準備することが望ましい。本研究では、LA-ICP-MS(LA: Photon-Machines, Analyte G2; ICP-MS: Thermo Fisher Scientific, Neptune-Plus)によって、Bear Lake Ridge titanite (BLR-1) ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.074308$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.17636$; Aleinikoff *et al.*, 2007⁸⁾)をチタナイトの標準試料として、年代値の報告のあるチタナイト Fish Canyon Tuff titanite (FCTT) ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age: 28.395 ± 0.049 Ma; Schmitz and Bowring, 2001⁹⁾)及び Mount Dromedary Complex titanite (MDCT) (FT age: 98.7 ± 5.8 Ma; Green, 1985¹⁰⁾)の分析を行った。

その結果、FCTT 及び MDCT についてそれぞれ、 26 ± 16 Ma 及び 98.1 ± 4.1 Ma の年代値を得た(図 2.3.1-3(a), (b))。これらの年代値は既報値と良く一致するものの、特に FCTT においては、大きな不確かさ($\pm 50\%$)を伴う結果となった。チタナイトはジルコンと異なり、結晶化時に Pb を取り込む(初生 Pb)ため、その Pb 同位体組成は初生 Pb の組成と放射壊変起源の Pb を混合した組成となる。ここでチタナイトの年代決定では、試料の分析値から得られる回帰直線と年代一致曲線(コンコーディア)との交点から年代値を算出するため、比較的均質な組成を持つ FCTT については、回帰直線の堅牢性が確保できずに大きな不確かさを伴っていると判断される。

この分析手法を山形大学から提供を受けた遠野複合深成岩体 (Tono Plutonic Complex: TPC) のチタナイトに適用した。TPC は黒雲母 K-Ar 年代として 122.6 ± 2.7 Ma が得られている (Yuguchi *et al.*, 2020¹¹⁾)。TPC の試料では、チタナイトが熱水等による変質作用で二次的に形成されたと考えられる産状が認められる。この岩石試料からチタナイトを分離し、既述の手法によってチタナイトの U-Pb 年代測定を行った。その結果、 123.0 ± 5.7 Ma の年代値が得られた (図 2.3.1-3(c))。分析結果から、TPC のチタナイトの形成をもたらした二次的イベントは、既報の年代値と誤差の範囲内で有意差がない時期に生じたことが示唆される。今後は年代決定の精度向上に向けて、LA-ICP-MS での分析の前に試料の不均質性を事前評価することを検討する。また、形成年代と変質・変成の年代が明確に異なる試料をモデルケースとして準備し、チタナイトの年代測定がどこまで有意義な年代学的情報をもたらすのか検証していく。

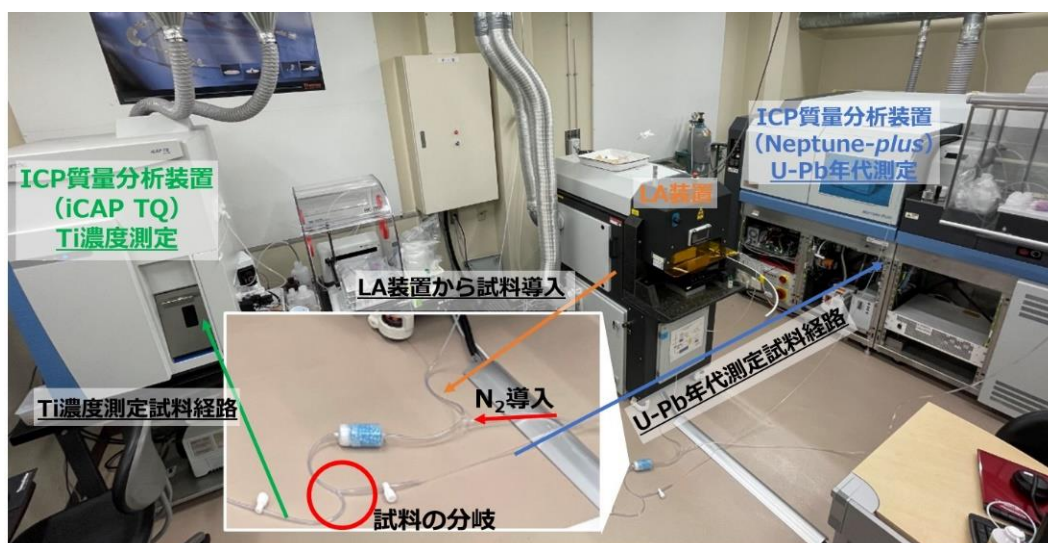


図 2.3.1-1 LASS-ICP-MS の概念図

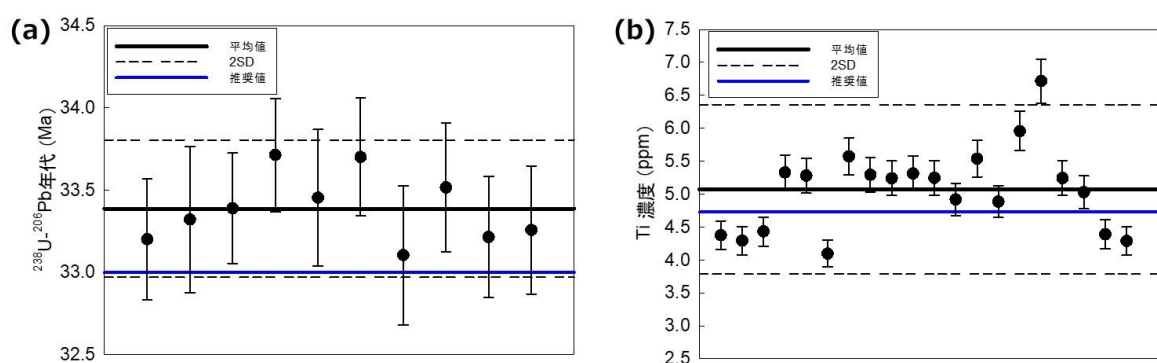


図 2.3.1-2 LASS-ICP-MS による(a)U-Pb 年代測定の結果(b)Ti 濃度測定の結果

表 2.3.1-1 観察及び各種分析結果からの適性評価

	NST	NFS	TRG04	OGPK
① カソードルミネッセンス観察	○	◎	◎	○
② U-Pb 年代	◎	◎	◎	◎
③ フィッション・トラック年代	□	×	□	□
④ Hf 同位体組成	○	○	○	○

◎ : 非常に良い (均質), ○ : 良い (比較的均質), □ : 参照値あり, × : 悪い

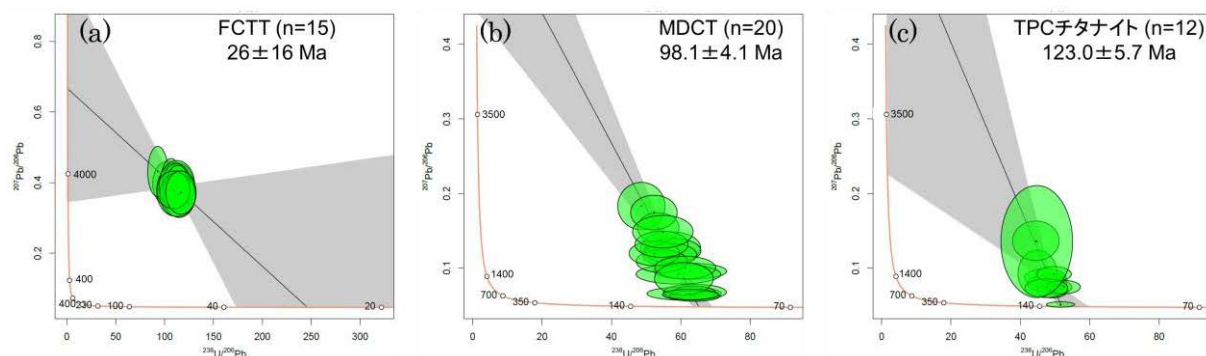


図 2.3.1-3 チタナイトの U-Pb 年代測定結果
(a) FCTT, (b) MDCT, (c) TPC

参考文献

- 1) Yokoyama, T., Kimura, J.-I., Mitsuguchi, T., Danhara, T., Hirata, T., Sakata, S., Iwano, H., Maruyama, S., Chang Q., Miyazaki, T., Murakami, H. and Saito-Kokubu, Y., U-Pb dating of calcite using LA-ICP-MS: Instrumental setup for non-matrix-matched age dating and determination of analytical areas using elemental imaging, *Geochemical Journal*, vol.52, no.6, 2018, pp.531-540.
- 2) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U-Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, *Lithos*, vols.372-373, 105682, 2020, doi: 10.1016/j.lithos.2020.105682.
- 3) Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon crystallisation age and temperature: Common thermal evolution of mafic magmatic enclaves and host granites in the Kurobegawa granite, central Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.226, 105075, 2022, doi: 10.1016/j.jseaes.2021.105075.
- 4) Yuguchi, T., Ito, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Suzuki, S., Ogita, Y., Yagi, K., Imura, T., Motai, S., Ohno, T., Outlining zircon growth in a granitic pluton using 3D cathodoluminescence patterns, U-Pb age, titanium concentration, and Th/U: Implications for the magma chamber process of Okueyama granite, Kyushu, Japan, *Lithos*, vols.440-441, 107026, 2023, doi: 10.1016/j.lithos.2023.107026.
- 5) 鏡味沙耶, 横山立憲, 梅田浩司, 東濃地科学センターにおける火山ガラスの化学組成分析手法—EPMA を用いた主要元素分析及び LA-ICP-MS による微量元素分析—, *JAEA-Testing* 2021-001, 2021, 49p.
- 6) Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J.-I., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y., Yamamoto, K., An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard, *Island Arc*, vol. 22, 2013, pp.382-394.

- 7) Szymanowski, D., Fehr, M.A., Guillong, M., Coble, M.A., Wotzlaw, J-F., Nasdala, L., Ellis, B.S., Bachmann, O., Schönbächler, M., Isotope-dilution anchoring of zircon reference materials for accurate Ti-in-zircon thermometry, *Chemical Geology*, vol.481, 2018, pp.146-154.
- 8) Aleinikoff J.N., Wintsch R.P., Tollo R.P., Unruh D.M., Fanning C.M., Schmitz M.D. Ages and origin of the Killingworth complex and related rocks, south-central Connecticut: implications for the tectonic evolution of southern New England, *American Journal of Science*, vol.307, 2007, pp.63-118.
- 9) Schmitz, M.D., Bowring, S.A., U-Pb zircon and titanite systematics of the Fish Canyon Tuff: an assessment of high-precision U-Pb geochronology and its application to young volcanic rocks, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.65, 2001, pp. 2571-2587.
- 10) 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.
- 11) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K., Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U–Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, *Lithos*, vol. 372-373, 105682, 2020, doi: 10.1016/j.lithos.2020.105682.

2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術

(1) はじめに

光ルミネッセンス(OSL)年代測定法は、自然放射線を浴びることによって鉱物結晶内に捕獲された不対電子が、光刺激を受けたときに正孔と再結合することで放出されるルミネッセンス(蛍光)を利用する手法であり、石英では数十年～十数万年前、長石では数千年～数十万年前までの年代決定を得意とする。蓄積された捕獲電子は光刺激によって解放(初期化)されるため、OSL年代測定法は原岩の形成年代に依存しない堆積物の埋没年代を推定することが可能である。また、近年では、OSL信号の蓄積速度の熱依存性を利用し、試料の熱史を推定するOSL熱年代法が提唱された(Herman *et al.*, 2010¹⁾; Herman and King, 2018²⁾)。この手法は、フィッション・トラック法や(U-Th)/He法といった既存の熱年代法では測定が困難な、過去数十万年の低温領域(約 100°C 以下)の熱史の推定を得意とし(Herman *et al.*, 2010¹⁾; Herman and King, 2018²⁾; Ault *et al.*, 2019³⁾)、一般的な地温構造を仮定すると、深度 1~2 km 以浅における侵食史の評価ができる。東濃地科学センターでは、隆起評価に係る堆積年代推定のために OSL 年代測定法の、そして、侵食評価に係る熱年代推定のために OSL 熱年代法の利用及び高度化を行ってきた。本項では、OSL 熱年代法の研究開発について述べる。なお、OSL 年代測定法については「2.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術」も参照されたい。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

OSL 熱年代法の詳細な原理については、令和 2 年度の年度報告書(石丸ほか, 2021⁴⁾)で述べたため割愛する。OSL 信号は数万年から数十万年で飽和するため、OSL 熱年代法による侵食速度の定量化は侵食速度の速い地域に限られ、先行研究の大半も東ヒマラヤや南アルプス(ニュージーランド)、飛騨山脈といった侵食速度が数 mm/yr を超える地域を対象としてきた(Herman and King, 2018²⁾)。一方、Guralnik *et al.* (2015)⁵⁾は過去約 2500 万年間熱的に安定している地域で掘削された大深度ボーリングコア(ドイツ; KTB borehole; Hirshmann *et al.*, 1997⁶⁾)を用いて、地下の未飽和な試料を対象に、OSL 熱年代法を用いた侵食評価を試みた。すなわち、ナトリウム長石に OSL 熱年代法を適用し、OSL 信号から復元した古地温構造とボーリング孔温度が整合的であることを報告した。これにより、侵食速度が遅い地域であっても、ボーリング試料を用いて古地温構造を復元することで、熱安定性、すなわち侵食が緩慢であることを評価できることが示された。しかし、侵食速度が遅い地域に対する OSL 熱年代法の適用事例は Guralnik *et al.* (2015)⁵⁾が唯一であり、また、ナトリウム長石を対象としていることから、適用事例の蓄積及び OSL 測定で一般的に用いられるカリ長石に対する適用性の検討が課題である。

(3) 実施内容・結果

本研究では、侵食速度が遅い地域に対するカリ長石の OSL 熱年代法の適用性を検討してきた。昨年度までに、比較的侵食速度が遅い岐阜県の東濃地域(約 0.1 mm/yr 以下)と兵庫県の六甲山地(0.1~1.0 mm/yr)で掘削されたボーリングコアに multi-OSL 熱年代法(Li and Li, 2012⁷⁾; King *et al.*, 2016⁸⁾)を適用し、逆モデリングによる熱史の推定と古地温復元による熱安定性(侵食)評価を行ってきた(試料や実験の詳細については令和 2 年度までの報告書を参照されたい)。令和 4 年度は、熱安定性に関するカイネティックパラメータの導出方法の再検討による古地温復元解析法の見直しと、カリ長石 OSL 熱年代法の適用範囲についての取りまとめを行った。

熱的脱トラップ速度に関するパラメータは、等温減衰測定データの(設定温度: 170°C, 190°C, 210°C, 230°C, 250°C, 300°C, 350°C; isothermal holding data; 以下, ITL データ)の組合せによって変化すること

が報告されているため(Bouscary and King, 2022⁹⁾), 昨年度までの測定結果を用いて, 様々な ITL データの組合せからパラメータを導出した。これらのカイネティックパラメータと OSL 熱年代式(King *et al.*, 2016⁸⁾)から, 古地温の復元を行った(Guralnik *et al.*, 2015⁵⁾; Ogata *et al.*, 2022¹⁰⁾)。以下に解析手順を示す。

①OSL 測定で求めたカイネティックパラメータと OSL 熱年代式を基に, フェーディング減衰のみを考慮したトラップ電子(IRSL 信号)の成長曲線を推定する。

②-50~100°C(0.5°C 間隔)で過去 100 万年間等温環境であることを仮定し, それぞれの設定温度に対する熱減衰の影響も加えてトラップ電子の成長曲線とその最大値を推定する。

③試料のトラップ電子量(IRSL 信号強度)の測定値と成長曲線の最大値が最も近似する設定温度を古地温とする。

古地温復元結果を図 2.3.2-1 と図 2.3.2-2 に示す。以下, 測定温度 $T(^{\circ}\text{C})$ の赤外光ルミネッセンス(infrared stimulated luminescence; IRSL)信号を IR_T 信号と表記する。MIZ-1 コアについては, 浅部 3 試料の IR_{50} 信号は飽和していたため, 古地温の最大値のみを求めた。深部 3 試料の IR_{50} 信号では, ITL データの組み合わせの最高温度が 230°C, 250°C の場合, 特に 190~250°C の組合せにおいて(図 2.3.2-1), 復元温度と現在温度は良い一致を示した。一方で, 300°C, 350°C の ITL データを含めた組合せでは, ほぼ全ての復元温度は現在温度と一致しなかった。これは, プレヒート温度(250°C)以上の加熱(300°C, 350°C)によるトラップ電子の熱遷移(thermal transfer)によって正確な熱的脱トラップ量を測定できなかったことが原因と考えられる(Bouscary and King, 2022⁹⁾; Ogata *et al.*, 2022¹⁰⁾)。 IR_{100} , IR_{150} , IR_{225} 信号では, ほぼ全ての ITL データの組合せで, 復元温度と現在温度が一致しなかった(図 2.3.2-1)。IRSL 信号の測定温度とともに熱安定性が高くなることを考慮すると(Li and Li, 2012⁷⁾; King *et al.*, 2016⁸⁾), IR_{100} , IR_{150} , IR_{225} 信号による古地温復元の適用温度は MIZ-1 コアの温度領域(最高 43.8°C)よりも高いと考えられる。甲山コアについては, 浅部 2 試料の IR_{50} 信号は飽和しているため, 古地温の最大値のみを求めた。深部 2 試料の IR_{50} 信号では, 210~250°C と 170~300°C の組合せで復元温度と現在温度が一致しているように見える(図 2.3.2-1)。しかし, 210~250°C を除いて, 最高温度が 230°C, 250°C の組合せによる復元温度は現在温度と一致せず, 東濃地域の結果とは異なった(図 2.3.2-1 と図 2.3.2-2)。また, ITL データの最高温度が高くなると復元温度が減少する傾向にあり, これは飽和 IRSL 信号で古地温を復元したときと同様の傾向である(図 2.3.2-1a, b, c, g, h)。これらより, 甲山-3 と-4 の IR_{50} 信号も飽和状態にあり, 古地温の復元及び上述の部分安定領域の推定には利用できないと判断した。 IR_{50} 信号による古地温復元の適用温度は甲山コアの温度領域(最高 38°C)よりも高いと考えられる。この結果は, MIZ-1 コアで IR_{50} 信号による復元温度と現在温度が一致した 3 試料が, いずれも 38°C より高温で採取されたものであることと整合的である。 IR_{100} , IR_{150} , IR_{225} 信号においては, ほぼ全ての ITL データの組合せで, 復元温度と現在の温度が一致せず(図 2.3.2-1 と図 2.3.2-2), 熱感度は六甲地域の地温(最高 38°C)よりも高いと考えられる。

MIZ-1 コアにおいては, ITL データを選別して適切なカイネティックパラメータを導出することで, 深部 3 試料(地温: 39.2~43.8°C)の IR_{50} 信号から復元した古地温と現在温度は一致した。この結果は, 過去から現在まで地温にほとんど変化がない(侵食が緩慢である)ことを示し, 東濃地域の侵食速度(約 0.1mm/yr 以下)と整合的であった。以上より, ボーリングコアを用いたカリ長石 OSL 熱年代法による古地温復元解析によって, 侵食が緩慢であることを評価できることが示された。甲山コア(地温: 23~38°C)の IR_{50} 信号では古地温を復元できなかったことから, IR_{50} 信号による OSL 熱年代法の適用温度は約 40°C 以上と考えられる。 IR_{100} , IR_{150} , IR_{225} 信号については, MIZ-1 コアと甲山コアの両方で古地温復元が成

功しなかったこと、また、測定温度が高いほど IRSL 信号の熱安定性が高くなることから、適用温度は IR₅₀ 信号より高い温度(少なくとも約 44°C 以上)であると考えられる。OSL 熱年代法による熱安定性(侵食)評価の時間スケールは、試料の IRSL 信号(蓄積線量)の飽和値と周囲の放射線量率(主に放射性元素濃度に依存)から決定される。MIZ-1 コア(土岐花崗岩)では約 10~20 万年、甲山コア(六甲花崗岩)では約 10~15 万年であった。両コアの放射性元素濃度は一般的な花崗岩と大きな差異はないため、花崗岩試料での評価可能な時間スケールは 10~20 万年程度と推定される。また、花崗岩と同じく日本の地下に多く存在する堆積岩は、花崗岩に比べ放射性元素濃度が低い傾向にあるため、より長い時間スケールで評価できる可能性がある。

(4) 主な成果と課題

本研究では、東濃地域と六甲山地で掘削されたボーリングコア(地温はそれぞれ、22.7~43.8°C と 23~38°C)を用いて侵食速度が遅い地域に対するカリ長石の multi-OSL 熱年代法の適用性を検討してきた。その結果、カリ長石の IRSL 信号から復元した古地温と現在温度を比較することで、侵食が緩慢であることを評価できることが示された。IR₅₀ 信号の適用温度は約 40°C 以上、IR₁₀₀、IR₁₅₀、IR₂₂₅ 信号の適用温度はそれ以上(少なくとも約 44°C 以上)と考えられる。熱安定性(侵食)評価の時間スケールは、試料の IRSL 信号の飽和値と周囲の放射線量率にもよるが、花崗岩試料においては 10~20 万年程度と推定される。また、等温環境を前提とする古地温復元解析の妥当性を補強するために、逆モデリングによる熱史推定(詳細は令和 2 年度までの報告書を参照)の結果とクロスチェックを行い、統合的に熱史・侵食史を評価することが有効と考えられる。

OSL 熱年代法の課題としては、未だ適用事例が少ないこと、また、それにともない手法の適用条件・適用限界の詳細が明らかになっていないことや、技術の体系化ができていないことが挙げられる。そのため、OSL 信号の熱安定性評価等の基礎研究や、様々な地形・地質・テクトニクス条件の地域を対象とした OSL 熱年代法の適用事例の蓄積を進め、本手法の高度化、体系化及び信頼性の向上を図ることが必要である。

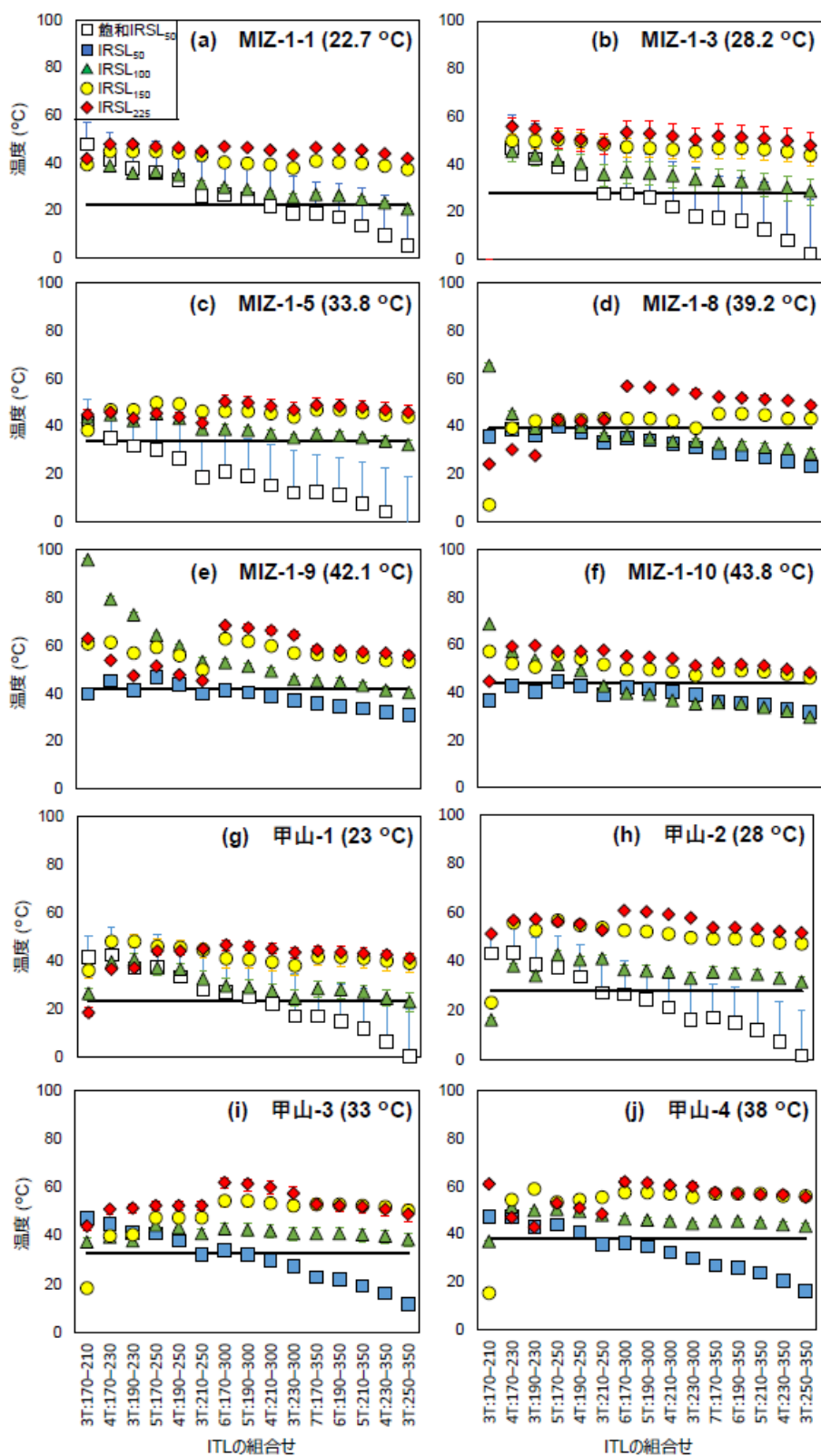


図 2.3.2-1 様々な ITL 組合せを用いて復元した MIZ-1 コアと甲山コアの古地温度の実線は現在の温度を示す。MIZ-1 コアのデータは Ogata *et al.* (2022)¹⁰⁾より引用している。

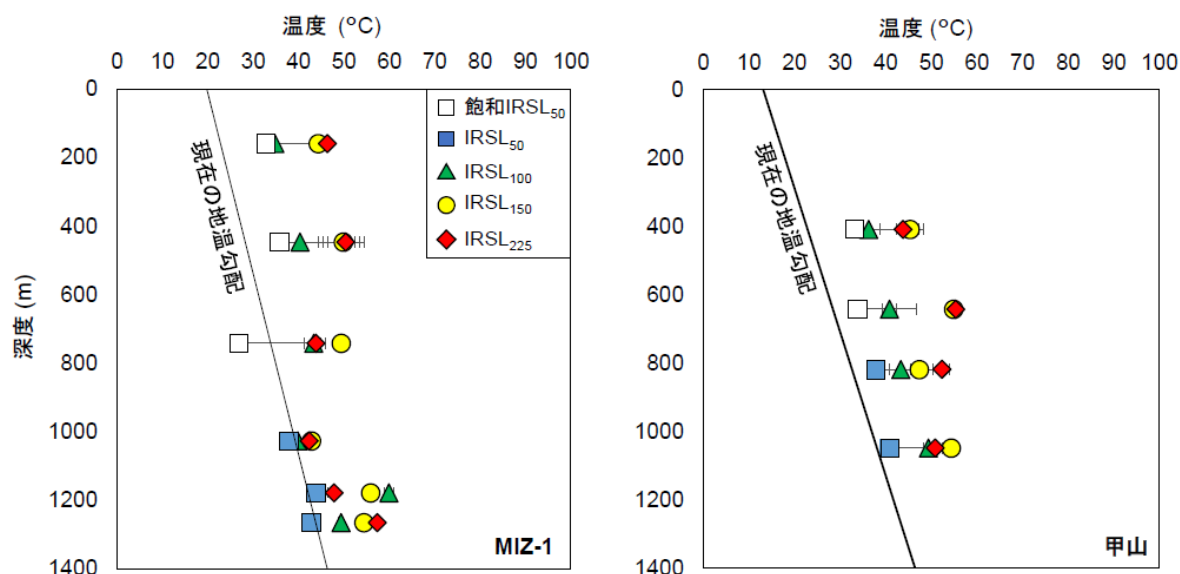


図 2.3.2-2 190～250°C の ITL 組合せを用いて復元した MIZ-1 コアと甲山コアの古地温
縦軸(深度)については、MIZ-1 コアは垂直深度、甲山は掘削長を表す。MIZ-1 コアのデータは Ogata *et al.* (2022) ¹⁰⁾より引用している。

参考文献

- 1) Herman, F., Rhodes, E. J., Braun, J. and Heiniger, L., Uniform erosion rates and relief amplitude during glacial cycles in the Southern Alps of New Zealand, as revealed from OSL-thermochronology, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.297, 2010, pp.183-189.
- 2) Herman, F. and King, G. E., Luminescence thermochronometry: Investigating the link between mountain erosion, tectonics and climate, *Elements*, vol.14, 2018, pp.33-38.
- 3) Ault, A.X., Gautheron, C. and King, G.E., Innovations in (U-Th)/He, fission track, and trapped charge thermochronometry with applications to earthquakes, weathering, surface-mantle connections, and the growth and decay of mountains, *Tectonics*, vol.38, 2019, pp.3705-3739.
- 4) 石丸恒存, 尾方伸久, 國分(齋藤)陽子, 島田耕史, 丹羽正和, 島田顕臣, 渡邊隆広, 末岡 茂, 横山立憲, 藤田奈津子, 小北康弘, 福田将眞, 塚原柚子, 鏡味沙耶, 長田充弘, 小川大輝, 後藤翠, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(令和 2 年度), JAEA-Research 2021-007, 2021, 65p.
- 5) Guralnik, B., Jain, M., Herman, F., Ankjærgaard, C., Murray, A.S., Valla, P.G., Preusser, F., King, G.E., Chen, R., Lowick, S.E., Kook, M. and Rhodes, E.J., OSL-thermochronometry of feldspar from the KTB borehole, Germany, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.423, 2015, pp.232-243.
- 6) Hirschmann, G., Duyster, J., Harms, U., Kontny, A., Lapp, M., De Wall, H. and Zulauf, G., The KTB superdeep borehole: petrography and structure of a 9-km-deep crustal section, *Geologische Rundschau*, vol.86, 1997, pp. S3-S14.
- 7) Li, B. and Li, S.-H., Determining the cooling age using luminescence-thermochronology,

- Tectonophysics, vol.580, 2012, pp.242-248.
- 8) King, G. E., Herman, F., Lambert, R., Valla, P. G. and Guralnik, B., Multi-OSL-thermochronometry of feldspar, Quaternary Geochronology, vol.33, 2016, pp.1-12.
 - 9) Bouscary, C. and King, G.E., Luminescence thermochronometry of feldspar minerals: Optimisation of measurement conditions for the derivation of thermal kinetic parameters using isothermal holding experiments, Quaternary Geochronology, vol.67, 2022, 101240.
 - 10) Ogata, M., King, G. E., Herman, F. and Sueoka, S., Reconstructing the thermal structure of shallow crust in the Tono region using multi-OSL-thermometry of K-feldspar from deep borehole core, Earth and Planetary Science Letters, vol.591, 2022, 117607.

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いて、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、ひいては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 等による U 濃度の測定によって年代測定が可能である。FT 法において、世界で広く実用化されている対象鉱物の閉鎖温度は、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 長計測のために、土岐地球年代学研究所では、本邦唯一となる FT 自動計測装置（Autoscan Systems 社製 Trackscan Plus Professional）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の蓄積のみならず、新たな対象鉱物の検討、分析装置の高度化、現行の前処理方法の改良等を進めることにより、FT 分析のさらなる効率化及び応用可能性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、火山ガラスを対象としており（Hurford, 2019⁵⁾）、これらに基づく応用研究は世界的にも盛んである。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イイト等の FT 年代測定の適用範囲を拡大できる可能性がある。特に、新たな対象鉱物としてモナザイト FT 法の実用化を目的とした基礎研究（例えば、Weise *et al.*, 2009⁷⁾; Jones *et al.*, 2019⁸⁾; 2021⁹⁾）が進められつつある。この手法は、閉鎖温度が 25~45 °C 程度と極めて低温領域であるため、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。

また、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 濃度のデータ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 Systems 社の Trackscan が世界的にも普及しており、これまでのマニュアル作業に比較して FT 計数における飛躍的な効率化が実現された。Trackscan Plus Professional 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.*, 2019¹⁰⁾）。ただし、ジルコン等の一部の鉱物については、結晶の透過率と撮影した FT の明度の関係で、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なり、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、あとは手動で FT の識別・計数を実施しているが、ジルコンについても自動認識の高精度化が可能になれば、分析時間の圧倒的な効率化を図ることが可能となる。また、分析の効率化を検討可能な余地として、FT 年代測定の前処理作業が挙げられる。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)を行う必要がある。これらの分析手順は既に確立している(Kohn *et al.*, 2019¹¹⁾) が、効率化を目指すためには重鉍物の精選方法や新たな包埋材の検討、研磨作業の改良等が挙げられる。

このような背景から、第 4 期中長期目標期間においては、FT 法における新たな対象鉍物の確立に向けた基礎実験や、自動測定装置の画像処理技術の高度化、前処理法の再検討の主に 3 項目について実施した。これにより、FT 法の測定対象の拡大や分析の効率化を図る。

(3) 実施内容・結果

① 新たな対象鉍物についての技術開発

新たな FT 法の対象鉍物の潜在性があるモナザイトやバデレイトについて、両鉍物における先行研究で検討されたエッチングレシピをもとに FT が確認できるか検証を行った。まず、モナザイトについては、岩石試料から抽出するための鉍物分離法と、FT 観察のためのエッチング条件について検討を行った。モナザイトは一般的に比重 5 g/cm^3 を超える重鉍物であるため、一般的な重鉍物分離法を用いることで石英や長石といった軽鉍物からの分離が可能である。しかし、モナザイトはジルコンやチタナイトといった他の重鉍物と色や晶癖が似ている場合があり、これらの鉍物からの分離法は未確立であった。本研究ではモナザイトが弱い磁性を示すことに着目し、磁性の異なる 2 種類の磁石を用いることで、従来よりも高精度にモナザイトを分離する手法を検討した。検討に用いた試料は先行研究でモナザイトの産出が報告されている氷上花崗岩 (ca. 450 Ma, 下条ほか, 2010¹²⁾)、荷尾杵花崗岩 (ca. 135 Ma, Tsutsumi, 2022¹³⁾)、木部花崗岩 (ca. 98 Ma, Skrzypek *et al.*, 2016¹⁴⁾)、柳生花崗岩 (ca. 75 Ma, 沢田・板谷, 1993¹⁵⁾)、武節花崗岩 (ca. 80~70 Ma, Takatsuka *et al.*, 2018¹⁶⁾)、洞爺イグニンプライト (ca. 0.1 Ma, Ito, 2014¹⁷⁾) である (括弧内は形成年代)。試料は京都大学が別の研究のために過去に採取したもののほか、東京大学や富山大学から提供されたものを用いた。これらの試料に対し粉碎、水簸、ふるい掛け、椀掛け処理を行い、重鉍物を濃集した。その後フェライト磁石とネオジム磁石を用いて、強・弱磁性鉍物を分離した。残った非磁性鉍物フラクションについてはポリタングステン酸ナトリウム (SPT) 溶液 (比重 3.0 g/cm^3) とジヨードメタン (比重 3.3 g/cm^3) を用いた重液分離処理を行い、軽鉍物と重鉍物を分離した。分離された各フラクションよりモナザイトと思われる粒子をハンドピック後、樹脂マウントへの埋め込み、研磨、炭素蒸着処理を行い、土岐地球年代学研究所設置のエネルギー分散型 X 線分析装置を用いて鉍物種の同定を行った。検討に用いた岩石試料のうち、荷尾杵花崗岩以外の 5 試料からはモナザイトが分離された。モナザイトはいずれの試料においても弱磁性フラクション中に発見され、それ以外のフラクションからは発見されなかった。また、モナザイトと混同されやすいジルコンやチタナイトは弱磁性フラクション中にほとんど含まれなかった。このことからモナザイトの分離にはフェライト磁石とネオジム磁石を用いた磁性分離が有効であることが明らかになった。また、今回用いた試料の中で最も若い年代である洞爺イグニンプライト中のモナザイトは無色透明であり、他の古い地質試料中から産する典型的なモナザイトとは外観が異なることが新たに確認された。したがって、洞爺イグニンプライト中のモナザイトは混同しやすい他の鉍物との肉眼での識別が難しい。今後は様々な年代や化学組成のサンプル間で外観や結晶形状などの情報を集積・比較しつつ、確実かつ効率的なモナザイトの抽出条件や識別方法についても検討していく。

次に、モナザイト FT のエッチング条件は試薬や温度、加熱時間に至るまでこれまで複数の検討例が報告されていたが、Jones *et al.* (2019)⁷⁾により 6M HCl を用いて 90℃の温度条件で 60~90 分間のエッチングを行うことが好ましいとされた。一方 Jones *et al.* (2019)⁷⁾はモナザイト粒子ごとにエッチングの進行速度に差異を認めており、原因を粒子ごとの U 濃度と、それによる放射線損傷の蓄積度合の違いに求めた。Jones *et al.* (2019)⁷⁾で実験に用いられたモナザイトは U 濃度が高く (約 5,000 ppm)、かつ非常に古いため

(約 370 Ma), 放射線損傷の影響を強く受けていることが予想される。そのため, 今後モナザイト FT 法を未知試料に適用するためには, 様々な年代のモナザイトを用いてエッチング条件をさらに検討する必要がある。本研究では前述の試料のうち木部花崗岩, 柳生花崗岩, 洞爺イグニブルライトより抽出されたモナザイトを用いて, エッチング実験を行った。まず Jones *et al.* (2019)⁷⁾により提案された 6M HCl を用いたエッチング実験を行った。90℃の温度条件で 60 分間エッチングを行ったところ, 木部花崗岩と柳生花崗岩のモナザイトには FT が観察され, 洞爺イグニブルライトのモナザイトには FT が観察されなかった。その後段階的に追加のエッチングを行い, 木部花崗岩は 90 分で, 柳生花崗岩は 120 分で最も細い FT の径が一定の太さに達したため実験を終了した(図 2.3.3-1(a), (b))。洞爺イグニブルライトのモナザイトについては 240 分で FT と思しき線状組織がかすかに観察されたが, 十分な太さに達しなかった(図 2.3.3-1(c))。Jones *et al.* (2019)⁷⁾が指摘しているように, 放射線損傷の蓄積がエッチング速度に関係しているとなると, 洞爺イグニブルライトは極端に形成年代が若い(放射線損傷が極めて少ない)ために, 他の試料のようにエッチングが進行しなかったと解釈できる。柳生花崗岩や洞爺イグニブルライトのエッチング実験の結果から, 先行研究で示されたエッチング時間が一部の試料に対しては不十分であることが明らかになった。今後, 様々な条件の未知試料にモナザイト FT 法を適用する上で, 試薬や温度条件, 時間, エッチングの終了条件を再検討し, より汎用的なエッチング条件を確立する必要がある。

バデレアイトについては, 檀原ほか(1999)¹⁸⁾で検討されているエッチング条件での追検証を行い, FT が実際に観察されるか検証を行った(中嶋ほか, 2022¹⁹⁾)。使用したバデレアイトは, 京都フィッション・トラックの檀原徹 博士から提供いただいたロシア産バデレアイトを用いており, U-Pb 年代が約 1.5 Ga と報告されている試料を用いた(檀原ほか, 1999¹⁸⁾)。まず 228℃の NaHO-KOH 共融液で 3~12 時間エッチングさせた結果, 研磨痕の出現と拡大が観察される一方で, FT は検出できなかった(図 2.3.3-2: 中嶋ほか, 2022¹⁹⁾)。同様に, 20℃の 40%HF で 0.5~20 時間のエッチングも試みたが同様に FT は観察されなかった(図 2.3.3-2: 中嶋ほか, 2022¹⁹⁾)。これらのエッチング条件で FT が観察されなかった原因として, 中嶋ほか(2022)¹⁹⁾は以下の 3 つの可能性を指摘している: ①FT 密度が極端に低い, ②FT が実験中に熱アニールされている, ③何らかの理由でバデレアイトの FT が選択的にエッチングされづらい。今後はこれらの可能性の排除のために, モナザイト表面にイオン照射を行って人工のイオントラックを作成してから, 同様のエッチングを試みる予定である。また, バデレアイトのエッチングについて, 様々な試薬や温度時間条件でのエッチングを試み, 年代や化学的特性の異なる他のバデレアイトについても検討を継続したい。

② ジルコンにおける FT 自動計測についての実用化

Trackscan Plus Professional にインストールされているソフトウェアを用いた, ジルコンの自動測定を実施可能とするために複数の検討を行った。ジルコンは, 高温かつアルカリのエッチャントに浸漬させるため, 基本的には高温及び薬品耐性の高いテフロンへの包埋が原則となっており, 包埋材の変更は検討しなかった。今回は従来と同様の条件で前処理を行い, Trackscan Plus Professional の撮影・画像解析の条件を変更することで自動計測が可能になるかどうかを検証した。結論としては, 従来法と画像解析結果がほとんど変わらず, 自動計測の実用化には至らなかったため, 本項目については今後も引き続き検討を行う予定である。

③ 前処理技術等の高度化

FT 法の前処理技術の高度化や改良について検討を行った。まずは, 従来から実施している重鉍物の抽出のための重液分離について, 一般的に活用されている試薬や器具ではあるが, 土岐地球年代学研究所での鉍物分離作業のさらなる効率化のために SPT 重液(檀原ほか, 1992²⁰⁾)に加えてジョードメタンとネオジム磁石を導入した。ジョードメタンは比重が 3.3 g/cm³ と比較的高く, 主に非磁性フラクションからアパタイトとジルコンを分離する場合に用いる。ただし, 有毒性の高い物質であることや, 光分解する性質

のため、局所排気装置内での使用や、冷暗所での保管を徹底する必要がある。また、ネオジム磁石は、鉍物フラクションに使用することで磁性と非磁性のフラクションに分離することができ、非磁性のアパタイトやジルコンを含むフラクションからヘマタイトや黒雲母などの不要な磁性鉍物の除去や、フェライト磁石と併用することで弱磁性を有するモナザイトを分離する際に活用できる。これにより、簡便かつ高効率の鉍物分離が実施可能になった。次に研磨作業について、従来はダイヤモンドペーストを塗布した研磨シート上を回転研磨盤で動かし、研磨を行っていた。ただし、荷重を定量的に設定できないことや、ダイヤモンドペーストの粒度を変える際に、マウントの超音波洗浄が必要なため、作業に比較的時間がかかることが懸念点であった。今回は、3 μm , 2 μm , 0.5 μm の3種類の粒度のダイヤモンドラッピングフィルムを導入した。ダイヤモンドラッピングフィルムは、研磨面に細かいダイヤモンドが固定されている研磨シートで、手で研磨をする必要性はあるが、ダイヤモンドペーストを用いる研磨よりも研磨部の接触面積が広いため効率的に研磨できるという利点がある。結果として、より短時間で研磨作業を終えることができ、効率化できることが分かった。今後の展開として、UV レジンやアクリル樹脂などの新たな包埋材を使った前処理法についても検討したい。

(4) 主な成果と課題

令和4年度の成果として、超低温領域の熱年代法であるモナザイト FT 法に必須であるモナザイトの鉍物分離法とエッチングの有効性が確認できた。土岐地球年代学研究所におけるモナザイト FT 法の整備までは、若い試料におけるエッチング条件やウラン濃度測定法の確立が必要であり、今後も検討を継続していきたい。ジルコンにおける FT 自動計測についての実用化については、令和4年度中は有効な手段を発見することができなかった。一方、新たにモナザイトの FT 観察が可能になってきたため、ジルコンと併せて画像処理の条件や包埋材の選出などの検討を継続したい。前処理技術等の高度化では、ジョードメタンやネオジム磁石を用いた鉍物分離法の導入により、より高効率での年代測定鉍物の抽出が可能となってきた。また、研磨作業の改善については、複数の粒度のダイヤモンドラッピングフィルムを用いることで、研磨作業を迅速に行うことができることを見出した。今後は、新たな包埋材を用いた検討を行う予定である。

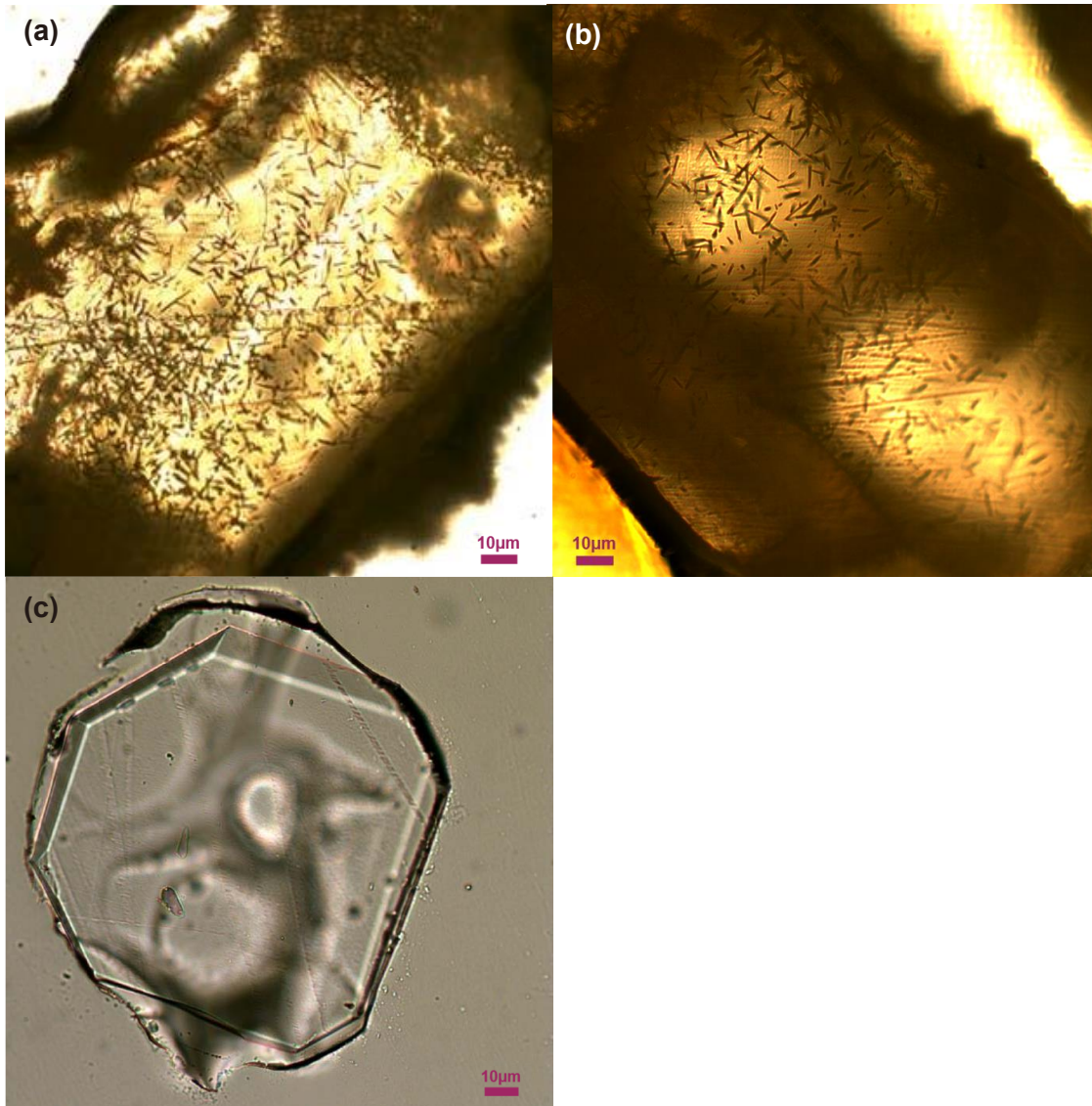


図 2.3.3-1 エッチング後のモナザイトの顕微鏡画像

エッチング実験は Jones *et al.* (2019)⁷⁾ に倣って 90℃ の 6M HCl で加熱を行った。(a): 90 分エッチング後の木部花崗岩のモナザイト。(b): 120 分エッチング後の柳生花崗岩のモナザイト。(c): 240 分エッチング後の洞爺イグニブレイトのモナザイト。

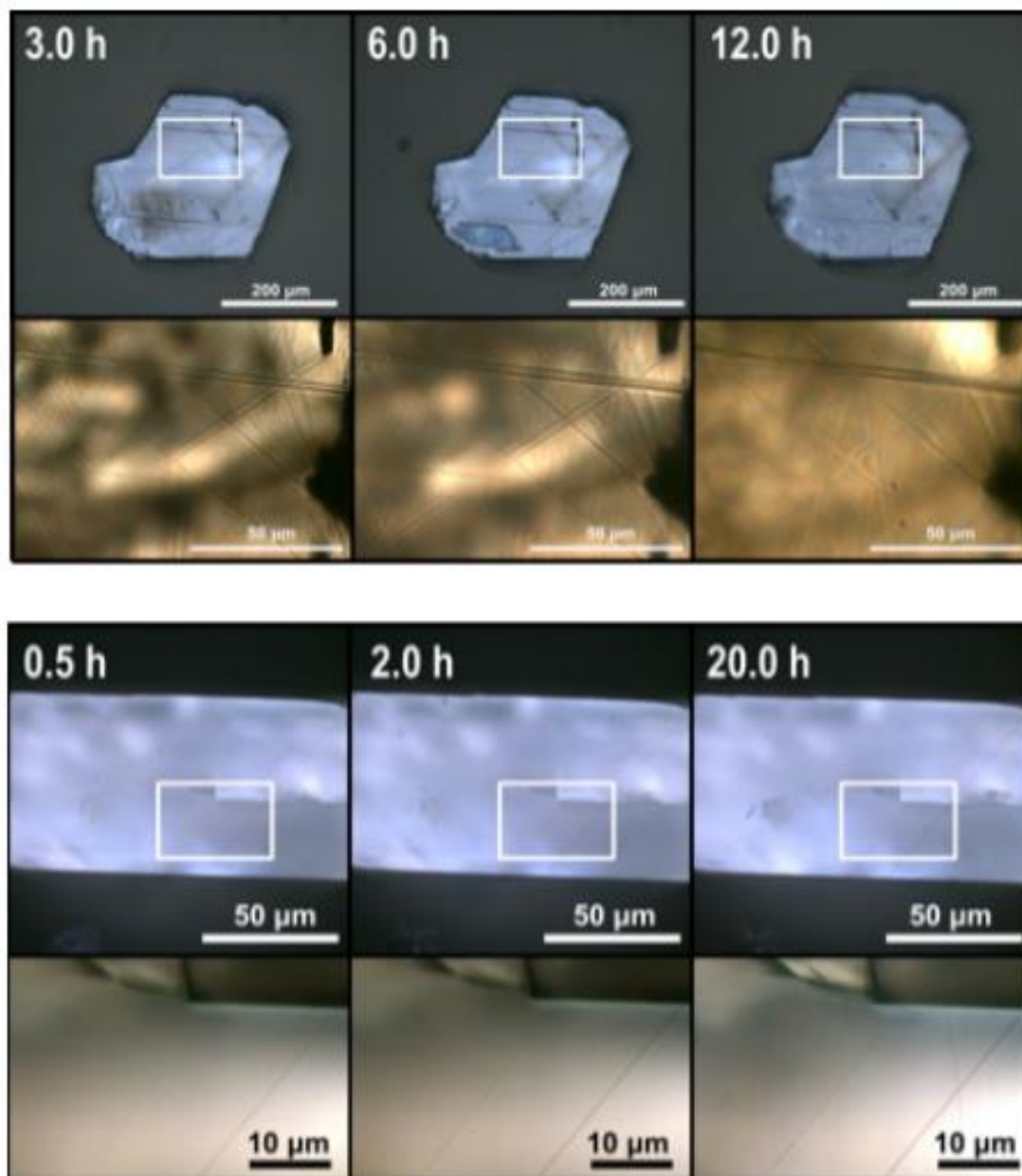


図 2.3.3-2: エッチング後のバデレライトの顕微鏡画像(中嶋ほか, 2022¹⁹⁾)
上:NaOH-KOH 共融液を用いた段階エッチング結果。下:HF を用いた段階エッチング結果。

参考文献

- 1) Ketcham, R.A., Donelick, R.A. and Carlson, W.D., Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales, American Mineralogist, vol.84, no.9, 1999, pp.1235-1255.
- 2) Ketcham, R.A., Fission-track annealing: From geologic observations to thermal history modeling,

- Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, 2019, pp.49-75.
- 3) Ketcham, R.A., Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data, Review in Mineralogy and Geochemistry, vol.58, no.1, 2005, pp.275-314.
 - 4) Gallagher, K., Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.117, no.B2, 2012, B02408, doi:10.1029/2011JB008825.
 - 5) Hurford, A.J., An historical perspective on fission-track thermochronology, 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, pp.189-207, 2021, doi: 10.3769/radioisotopes.70.189.
 - 7) Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B. and Reddy, S.M., Etching of fission tracks in monazite: An experimental study, Terra Nova, vol.31, no.3, 2019, pp.179-188.
 - 8) Jones, S., Gleadow, A. and Kohn, B., Thermal annealing of implanted ^{252}Cf fission tracks in monazite, Geochronology, vol.3, no.1, 2021, pp.89-102, doi: 10.5194/gchron-3-89-2021.
 - 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, doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.12.014.
 - 10) Gleadow, A., Kohn, B. and Seiler, C., The future of fission-track thermochronology, Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, 2019, pp.77-92.
 - 11) Kohn, B., Chung, L. and Gleadow, A., Fission-track analysis: field collection, sample preparation and data acquisition, Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, 2019, pp.25-48.
 - 12) 下條将徳, 大藤 茂, 柳井修一, 平田岳史, 丸山茂徳, 南部北上帯古期岩類の LA-ICP-MS U-Pb ジルコン年代, 地学雑誌, vol.119, 2010, pp.257-269.
 - 13) Tsutsumi, Y., Zircon U–Pb ages of the Higo plutonic complex: Implication for migration of Cretaceous igneous activity in Kyushu, southwest Japan, Island Arc, vol.31, 2022, e12446.
 - 14) Skrzypek, E., Kawakami, T., Hirajima, T., Sakata, S., Hirata, T. and Ikeda, T., Revisiting the high temperature metamorphic field gradient of the Ryoke Belt (SW Japan): New constraints from the Iwakuni-Yanai area, Lithos, vol.260, 2016, pp.9-27.
 - 15) 沢田順弘, 板谷徹丸, 琵琶湖南部後期白亜紀環状花崗岩質岩体の K-Ar 年代: 巨大コールドロンにおける冷却史, 地質学雑誌, vol.99, 1993, pp.975-990.
 - 16) Takatsuka, K., Kawakami, T., Skrzypek, E., Sakata, S., Obayashi, H. and Hirata, T., Age gap between the intrusion of gneissose granitoids and regional high-temperature metamorphism in the Ryoke belt (Mikawa area), central Japan, Island Arc, vol.27, 2018, e12224.
 - 17) Ito, H., Zircon U–Th–Pb dating using LA-ICP-MS: simultaneous U–Pb and U–Th dating on the 0.1 Ma

Toya tephra, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.289, 2014, pp.210-223.

- 18) 檀原 徹, 岩野英樹, 吉岡哲, バデリアイト(ZrO_2)によるフィッション・トラック年代測定を試み, フィッション・トラックニュースレター, 第 12 号, 1999, p.45.
- 19) 中嶋 徹, 福田将眞, 長田充弘, 檀原 徹, 岩野英樹, 末岡 茂, バデリアイトのフィッション・トラック年代測定に向けて:エッチング実験の結果とその考察, フィッション・トラックニュースレター, 第 35 号, 2022, pp.34-36.
- 20) 檀原 徹, 岩野英樹, 糟谷正雄, 山下 透, 角井朝昭, 無毒な重液 SPT (ポリタングステン酸ナトリウム)とその利用, 地質ニュース, 455 号, 1992, pp.31-36.

2.3.4 加速器質量分析技術

(1) はじめに

地質環境の長期安定性に関する研究の着実な実施と、処分事業・安全規制への成果の反映を進めるため、土岐地球年代学研究所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。土岐地球年代学研究所では、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⁾)。さらにルーチンの年代測定だけでなく、年代測定法の高度化も重要であり、JAEA-AMS-TONO-5MV においては地下水の滞留時間の推定を目的とした ^{36}Cl 年代測定法の実用化を目指している。 ^{36}Cl 年代測定法のための技術開発では、すでに試料調製法や測定法等に係る文献レビューに着手しており、標準試料の前処理及び試験測定を一通り行った結果、 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、本中長期計画においては、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、装置の改良に加えて、保存状態の良い地質試料の確保と様々な地質試料に適応可能な試料の前処理手法の改良が求められる。本研究では、試料の選定に必要な化学分析手法の高度化も同時に進める。

(2) 当該分野に係る科学的・技術的背景

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

一方、ボーリングコアなどの地質試料の ^{14}C 年代測定では、可能な限り多くの試料を確保し、測定点の空間分解能を高くすることで、より確実な年代軸の構築が可能となる(Nara *et al.*, 2022⁶⁾)。しかし、試料量の不足により連続データの取得が困難となるケースが多い。特に、 ^{14}C 年代測定の対象となる有機物は地層中で分解が進むことから、植物片などの原形を維持する質の良い試料の確保が課題となる。解決策として、従来法に比べてより少量での ^{14}C 年代測定を実用化させることが有効である。加えて、試料前処理の自動化を同時に進めることで、効率的な連続データの取得につながると期待される。第 3 期中長期目標期間においては市販の自動グラファイト調製装置 (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 $50\text{ }\mu\text{g}$ での少量試料の ^{14}C 年代測定を実施した (Watanabe *et al.*, 2021⁷⁾)。試料量を減少させることで、前処理などの際に混入するわずかな炭素汚染の影響が相対的に大きくなる。少量試料での測定時の炭素汚染の評価と低減、ブランク補正、測定結果の安定化等が今後の課題となる。また、試料の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の蓄積を着実に進めることが重要である。

(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、装置の組上げとアライメントを行い、超小型 AMS 装置を構成する表面ストリッパとして使用している KCl 結晶表面を用いた表面散乱実験を行った。C を KCl 結晶に微小角度で入射後、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することで荷電変換の割合を算出した。さらに、荷電変換後の正イオンのビーム調整を行い、分析電磁石の下流での解離片の検出や比例計数管を用いたイオン検出を確認した。

開発中の ^{36}Cl 年代測定法については、前処理法の最適化の検討を実施した。図 2.3.4-1 の左に既存の未知試料の前処理工程の一部を示す。未知試料の前処理では、妨害元素である硫黄の除去方法の検討のために、塩化銀を溶解した後、硝酸バリウムを入れて、硫黄除去しているが、今まで標準試料にはこの工程を入れていなかった。そのため今までどおりの前処理法 (通常; N) と硝酸バリウムを入れた工程 (Ba 法による S 除去工程; Ba) と硝酸バリウムを過剰に入れた工程 (Ba 法による S 除去工程に $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ を追加) の硫黄量を比較することとした。試料は標準試料 (Sharma *et al.*, 1990⁸⁾) である STD4-1 (S4-1 ; $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}=1.000\text{e}^{-11}$)、STD5 (S5 ; $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}=5.000\text{e}^{-13}$)、 ^{36}Cl がほとんど入っていない試薬であるブランク試料 (Fisher chemical 製; BLK; $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}=5.000\text{e}^{-14}$) を使用した。今までどおりの前処理を実施した STD4-1 の硫黄量の平均を 100 としたときの結果 (S4-1) を図 2.3.4-2 に示す。これより硫黄除去工程をはさんだ方が硫黄量が下がっていることが分かる。しかしオーダーが変わるほどの減少量とはならなかった。これは反応過程の順番や反応温度、反応時間など改善の余地があることを示していると考えている。

また、元素分析装置に自動グラファイト調製装置を接続した EA-AGE3 を用いて、炭素量約 $50\text{ }\mu\text{g}$ での少量試料の ^{14}C 年代測定を実施した。今回の試験では国際標準試料を用いて少量試料での ^{14}C 年代測定時の炭素汚染の評価とバックグラウンドの安定化を試みた。国際標準試料として、NIST-SRM-4990C (シュウ酸)、IAEA-C1 (炭酸塩)、C4 (木片)、C5 (木片)、C6 (スクロース) 及び C7 (シュウ酸) を用いた。秤量後の試料を事前に 500°C でベーキングした銀カプセルに包み、ヘリウムガスでパージされたオートサンプラーを用いて試料を EA へ導入した。試料中の炭素は EA 内の燃焼炉で酸化銅及び酸素ガスにより酸化され、燃焼炉内で発生した試料由来の二酸化炭素をキャリアーガス (ヘリウム) にとともに AGE3 へ導入した。次に、AGE3 内のゼオライトトラップで単離された試料由来の二酸化炭素を、鉄粉を触媒として水素

ガスにより還元することで AMS 測定用のグラファイト試料を調製した。AMS 装置による IAEA-C1 の繰り返し測定結果は 2.0 ± 0.1 pMC 及び 2.1 ± 0.1 pMC であり、ブランク補正に必要な安定した値を得ることができた。NIST-SRM-4990C (9 試料) の測定結果は 134.1 ± 0.5 pMC であった。IAEA-C4, C5, C6 及び C7 については、不確かさの範囲内 ($\pm 1\sigma$) で測定結果と既報値とが一致し、先行研究 (Watanabe et al., 2021⁹⁾) と比べて大きく改善した。AMS 装置のコンディションの維持及びビーム調整の最適化により、安定した測定結果を得ることができた。

pXRF の適用範囲の拡大のため既報の天然試料である津波堆積物 (Watanabe et al., 2021⁹⁾; 2022¹⁰⁾) の測定を実施した。令和 4 年度は静岡平野の堆積物試料中の主成分及び微量成分の定量分析を新たに実施した。本研究では、静岡平野の大谷低地で採取された 6 本のボーリングコア試料 (各試料長さ約 8 m) 及び同地域の砂浜表層試料の定量分析を行った。得られたデータから約 1000 cal BP, 約 3500 cal BP 及び約 4000 年 cal BP の津波堆積物の地球化学的な特徴について検討した。加えて、従来の大型の蛍光エックス線分析装置により得られている既報値 (Watanabe et al., 2021⁹⁾; 2022¹⁰⁾) と比較し、pXRF による津波堆積物の分析手法の妥当性について評価した。pXRF による定量分析結果の大部分は既報値とよく一致した。したがって、本手法は静岡平野の堆積物試料にも適用可能であることが示された。pXRF を適用することで、1 試料あたり約 2 分で試料中の 28 元素の定量値を得ることが可能である。本手法を用いて継続してデータを蓄積していくことで、津波堆積物の簡易的かつ迅速な化学的特徴の抽出や地球化学的判別へ貢献できることが示唆された。

(4) 主な成果と課題

AMS 装置の小型化に向けた技術開発については、装置の組上げとアライメントを終え、KCl 結晶表面でのイオンの鏡面反射を確認し、最終検出部までイオンビームを輸送することができた。今後、荷電変換効率の向上を期待して、テルル化スズを KCl 結晶表面に蒸着して表面散乱実験を実施する。また、最適な測定パラメータの探索、表面散乱過程のモデル構築などを進め、超小型 AMS 装置による ^{14}C 測定の原理実証に向けた取り組みを行う。さらに、 ^{14}C 測定の検出限界の確認を行う。並行して表面ストリッパの耐久性向上に向けた試験を進める。

^{36}Cl 年代測定法の実用化及び先進技術の開発については、前処理の改善として硫黄除去工程を標準試料にも適用し、硫黄の除去率を検討した。減少量はオーダーで減るものではなかったため、今後反応過程の順番や反応温度、反応時間などの改善や、塩化物塩の析出方法の再検討を行う予定である。

試料前処理技術等の高度化については、少量試料での ^{14}C 年代測定について、6 種類の国際標準試料による試験測定を実施した。炭素量約 50 μg での試験測定では、不確かさの範囲内 ($\pm 1\sigma$) で測定結果と既報値とが一致した。また ^{14}C を含まない炭酸塩試料によるブランク値の試験においても安定した結果 ($2.0\text{--}2.1$ pMC) が得られた。今後は継続して試験測定を実施し、さらに少量 (約 20~30 μg) での測定に必要な前処理条件の検討を進める。また、pXRF については、静岡平野の津波堆積物 (約 3500 cal BP 及び約 4000 cal BP) に適用させ一部の元素について既報の値とほぼ同様の結果が得られた (Watanabe et al., 2021⁹⁾; 2022¹⁰⁾)。今後は、標準試料等を追加し、測定元素及び対象試料の拡充を継続して進めていく。



図 2.3.4-1 塩素の前処理工程の一部と比較した試料一覧

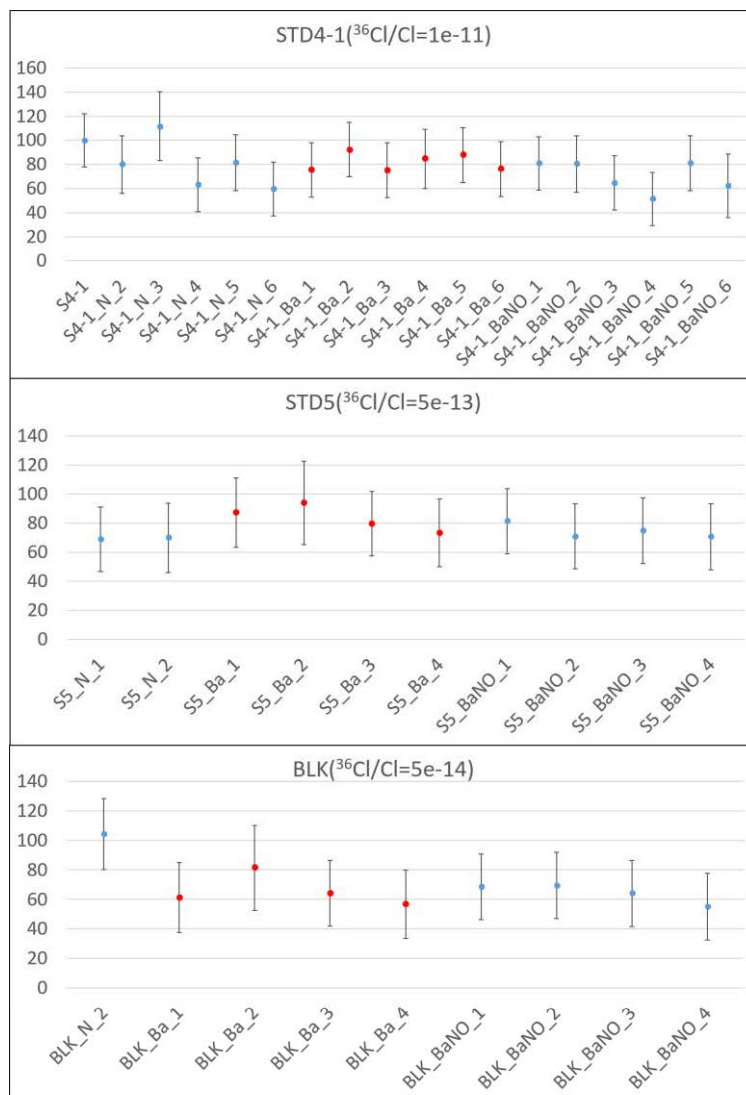


図 2.3.4-2 塩素の標準(STD4-1)の既存の前処理時の硫黄量の平均を 100 としたときの硫黄量の割合
試料名は標準試料の種類_前処理工程_測定番号を表す。なお Ba 法による S 除去工程を含んだデータは赤丸で示している。

参考文献

- 1) Xu, S., Ito, S., Iwatsuki, T., Abe, M., 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., 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., 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., 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) Nara, F.W., Watanabe, T., Loughheed, B., Obrochta, S., Updated radiocarbon age-depth model from Lake Baikal sediment: Implication for past hydrological changes for last glacial to the Holocene, Abstracts of the 24th Radiocarbon and 10th ^{14}C & Archaeology Conference, Sept. 11-22, 2022, Zurich, Switzerland.
- 7) Watanabe, T., Fujita, N., Matsubara, A., Miyake, M., Nishio, T., Ishizaka, C., 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) Sharma, P., Kubik, P.W., Fehn, U., Gove, H.E., Nishiizumi, K., Elmore, D., Development of ^{36}Cl standards for AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol. 52, 1990, pp. 410-415.
- 9) Watanabe, T., Tsuchiya, N., Kitamura, A., Yamasaki, S., Nara, F.W., Geochemical characteristics of paleotsunami deposits from the Shizuoka plain on the Pacific coast of middle Japan, Geochemical Journal, vol.55, no.6, 2021, pp.325-340.
- 10) Watanabe, T., Kagami, S., Niwa, M., Geochemical and heavy mineral signatures of marine incursions by a paleotsunami on the Miyazaki plain along the Nankai-Suruga trough, the Pacific coast of southwest Japan, Marine Geology, vol.444, 2022, 106704.

