

R-07-2024

MFRI Research Report

山梨県富士山科学研究所研究報告書

第59号

富士山研究

「火山監視観測システムの富士山への最適化と
その情報発信に関する研究」

令和5年度

山梨県富士山科学研究所

R-07-2024

MFRI Research Report

山梨県富士山科学研究所研究報告書

第59号

富士山研究

「火山監視観測システムの富士山への最適化と
その情報発信に関する研究」

令和5年度

山梨県富士山科学研究所

はじめに

およそ 300 年間静寂を保ってきた富士山ではありますが、2000 年の末に直下 15 km 程の深さにおいて火山性の低周波地震が突如激増したことは、富士山が活動的な火山であるという証拠をあらためて突きつけられたと言えます。この出来事をきっかけに作成された富士山ハザードマップは、当研究所の研究成果をはじめとする新しい知見により 2021 年 3 月に改定されました。また、2023 年 3 月にはそのハザードマップに基づいて避難基本計画が刷新されました。

富士山噴火からの近隣住民や観光客等の避難においては、火山の動きをいち早く捉えるための観測体制とその情報伝達のスムーズさが鍵を握りますが、国内において比較的活動的ではない富士山の観測体制は残念ながら十分なものとは言い難いのが実情です。広い想定火口範囲のどこから噴火するかわからない富士山では、逃げ遅れを出さない火山防災体制を目指す上での課題は少なくありません。

こうした背景から、富士山科学研究所では富士山火山に最も近い研究所として、まずは富士山の活動状況をつぶさに把握できる観測体制の構築を進めています。その一環として本富士山研究「火山監視観測システムの富士山への最適化とその情報発信に関する研究」においては、多角的な観測を目指して重力観測を取り入れる点に注力しました。また、自治体の火山防災担当者らへの観測データの共有の推進や、他研究機関との連携体制の強化にも大きな貢献がありました。

本研究の成果及び今後の富士山科学研究所の取り組みが、富士山火山防災にとって重要な役割を果たしていくこと期待しています。

山梨県富士山科学研究所

所 長 藤 井 敏 嗣

目 次

はじめに

概要編

I 研究の概要

I-1 研究テーマおよび研究期間	1
I-2 研究体制	1
I-3 研究の目的	1
I-4 研究成果の概要	1
I-4-1 観測点の整備	1
1) 重力観測網の整備	1
2) 臨時地震観測	2
I-4-2 観測データのリアルタイム流通と情報発信手法の開発	2
1) 観測データのリアルタイム流通	2
2) 流通データの一時処理、可視化と情報発信	2
I-4-3 他機関との連携構築	2
I-5 研究成果の発表	3
I-5-1 誌上发表	3
I-5-2 口頭発表	3
I-5-3 ポスター発表	3
I-6 謝辞	4

本編

II 研究成果報告

II-1 研究の目的：富士山の課題と効果的な観測体制構築	5
II-2 富士山における観測の強化	5
II-2-1 富士山重力観測網の構築と火山モニタリングのための重力観測	5
1) 富士山科学研究所で運用する重力計とその概要	5

2) 富士山重力観測網の構築	6
3) 可搬型相対重力計による往復測定	7
4) 絶対重力測定	7
5) 連続観測用相対重力計による連続測定	9
II-2-2 富士山重力観測網の活用による重力測定の高度化	9
1) 相対重力計のスケールファクター検定	9
2) 絶対重力計の器差検定方法の確立	9
3) 重力鉛直勾配の測定	10
4) 陸水による重力擾乱除去方法の検討	10
5) 重力観測の今後の課題	10
II-2-3 臨時地震観測	10
II-3 データのリアルタイム流通と準リアルタイム発信	11
II-3-1 一元化データの流通システム整備	11
II-3-2 データ一時処理の自動化とデータ公開 Web サイト整備	12
II-3-3 一般向けデータ可視化の難しさ	12
II-4 他機関との連携体制構築	13
II-5 まとめ	13
II-6 引用文献	13

概 要 編

I 研究の概要

I-1 研究テーマおよび研究期間

研究テーマ：

火山監視観測システムの富士山への最適化とその情報発信に関する研究

研究期間

平成 30 年度 ～ 令和 4 年度（5 年間）

I-2 研究体制

研究代表者：本多 亮（富士山火山防災研究センター）

研究分担者：吉本 充宏（富士山火山防災研究センター）

久保 智弘（富士山火山防災研究センター）

内山 高（富士山火山防災研究センター）

山河 和也（富士山火山防災研究センター）

今西 祐一（東京大学地震研究所）

名和 一成（産業技術総合研究所）

研究協力者：大島 弘光（北海道大学・気象庁）

本多 亮（神奈川県温泉地学研究所）

I-3 研究目的

富士山は日本の象徴的存在であり、国内外から多くの観光客や登山客を集める観光地であると同時に、いつ噴火してもおかしくない活火山でもある。富士山噴火の特徴として前兆から噴火までの時間が短いケースが想定されること、加えて火口の出現が想定される領域が非常に広いことが挙げられる。これらのことから、前兆現象をいち早く確実に捉えるための観測体制が必要であるが、富士山はその大きな山体故他の火山に比べても観測点の数が十分とはいえず、逃げ遅れを無くす上では火山の観測体制の充実が望まれる。

本研究では、富士山の火山噴火に際して、住民や観光客のスムーズな避難の基礎となる火山観測体制の充実及びその観測データを即時的に発信する仕組みづくりを進める。また、富士山の観測や火山防災の取り組み、噴火時の協力体制構築等のため他機関との連携を進める。

I-4 研究成果の概要

I-4-1 観測点の整備

富士山において既存の観測項目をその山体の大きさに見合うだけ増設することは、費用面で課題がある。本研究では重力観測という別の物理観測を取り入れることにより、最小限の観測点設置で効果的に火山活動状況を把握できる観測網を構築することにした。また、富士山直下でマグマの活動に伴って発生する低周波地震と、大量の水を含んだ雪が流動するスラッシュ雪崩を観測対象とし、臨時観測点の設置による地震観測および空振観測を実施した。

1) 重力観測網の整備

重力は地下の質量移動を直接検知できる観測量であるため、火山においては地表に近づいたものが重いマグマであるのか軽いガスであるのか、といったことを判断できる場合がある。我々は富士山の想定火口範囲の北麓側を縫うように走る富士山有料道路（スバルライン）を活用して、研究所とスバルライン 5 合目を繋ぐ観測網を構築した。この観測網を利用し、火山活動のシグナル検知のための研究所-スバルライン 5 合目間の往復測定を実施した。また、研究所と 5 合目の標高差に起因する大きな重力差と静かな測定環境を活かし、重力観測精度向上のための様々な取り組みを実施した。

2) 臨時地震観測

富士山の直下で 2000 年の 10 月以降一時増加していた火山性の低周波地震は現在も定常的に発生している。この地震は富士山の火山活動の推移を見る上で重要なものである。吉田口登山道 5 合目（佐藤小屋付近）の直下で発生する低周波地震を捉えるため、佐藤小屋付近からスバルライン 4 合目にかけて臨時観測を試みた。また、この観測によって秋季および春季に発生することが多いスラッシュ雪崩の信号も捉えることができる。こうした斜面現象は、火山噴火時に発生する火砕流や土石流といった斜面現象と類似の観測記録を残す現象であり、積極的に観測と解析を行なった。

I-4-2 観測データのリアルタイム流通と情報発信手法の開発

観測面の充実と同時に進めたのは既存観測データを含む火山観測に関するデータの流通と発信に関する仕組みづくりである。

1) 観測データのリアルタイム流通

現在全国の地震計や他の観測データは一元化され、東京のデータセンターに集約されている。それぞれの火山近辺の必要なデータは、観測点維持管理に貢献のある研究機関については自由に利用できる。富士山科学研究所ではこのデータの利用について既に防災科学技術研究所との協定を結んでおり、既に数点の観測点データを研究所でリアルタイム受信できる状況であった。本研究においては富士山で起こる地震活動を把握する上で必要な観測点をさらに厳選の上追加し、流通データを用いた低周波地震の自動および手動解析が可能な状態にした。

2) 流通データの一次処理、可視化と情報発信

流通地震波形データから多くの情報を引き出すことができる。もっとも基本的なものは震源決定処理による地震発生場所の情報であり、この処理は既に自動化されている。ただ、震源決定については高精度な結果を得るために、時間をかけてでも人の手による再処理を実施している。これにより富士山直下の低周波地震の発生場所がわかる。他には、波形データのフィルタリングや並べ替えなどの簡易処理により発生した地震の特徴がよくわかる地震波形画像を生成できる。こうした一次処理の一部を自動化した。自動処理データによる地震波形画像やスペクトル画像等も自動で生成し、ウェブサイト定期的に自動アップロードを行うようにした。こうしたデータ公開は本来広く一般に公開されるべきものであるが、予備的な知識なしで正確に情報を読み取れる性質のものではない。そのため本研究においては、データの見方などについての研修が実施可能な自治体の防災担当者等向けの可視化に取り組んだ。自治体の職員が専門家による一次的発信データから情報を読み取ることが出来ることにより、有事の際の対応の迅速化が期待できる。一般市民向けの公開は今後直感的に理解可能な見せ方を引き続き検討するものとした。

I-4-3 他機関との連携構築

火山観測研究や周辺自治体における防災体制の強化、実際に噴火災害が発生した際の対応やその準備については、同様の研究や業務を行う他の研究機関等関係機関との協力が不可欠となる。既に東京大学地震研究所との間に築いていた研究観測における協力体制のほか、防災科学技術研究所および産業技術総合研究所との有事対応のための協力協定を結んだ。

I-5 研究成果の発表

I-5-1 誌上発表

- 1) 本多亮, 柳澤孝一, 田中俊行, 浅井康広 (2019) 重力変化で捉える既知の水理地質構造中の地下水流動—岐阜県東濃地域における長期水圧低下を例として—. 物理探査, 72, 34-48.
- 2) Imanishi, Y., K. Nawa, Y. Tamura, H. Ikeda, R. Honda, T. Okuda, M. Okubo (2018) Combined Use of a Superconducting Gravimeter and Scintrex Gravimeters for Hydrological Correction of Precise Gravity Measurements: A Superhybrid Gravimetry. IAG Symposia, 149, 71-76.
- 3) 今西祐一, 西山竜一, 本多亮, 田村良明 (2021) 絶対重力計FG5#109と#241の器差の検定について—東京および富士山における相互比較—. 測地学会誌, 67, 18-28.
- 4) 池田航, 市原美恵, 本多亮, 青山裕, 高橋英俊, 吉本充宏, 酒井慎一 (2022) 富士山における雪崩空振現象の多項目観測と統合解析. 雪氷, 84, 4, 421-432.
- 5) 今西祐一, 西山竜一, 本多亮 (2022) 富士山における2台のFG5による絶対重力測定(2022年9月)—相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定—. 地震研究所彙報, 97, 1-11.
- 6) 今西祐一, 西山竜一, 本多亮 (2023) 絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定. 測地学会誌, 69, 8-17.

I-5-2 口頭発表

- 1) Honda, R. (2018) Slush avalanches and its observation plan at Mount Fuji. International symposium on snow and avalanche in Niseko (Hokkaido).
- 2) ペレス-ギレン クリスティーナ, 常松佳恵, 西村浩一, 吉本充宏, 堀川信一郎, 本多亮 (2018: 招待講演) Characterization of Snow Avalanches on Mt. Fuji based on Seismic Analysis and Numerical Simulations. 地球惑星科学関連学会2018年連合大会 (千葉).
- 3) 本多亮, 今西祐一, 名和一成, 田中俊行, 兒玉篤郎, 富山顕 (2019) 富士山科学研究所重力点の設置と「フェーズフリー」重力観測. 地球惑星科学関連学会2019年連合大会 (千葉).
- 4) 本多亮 (2022) 富士山の重力観測体制構築とこれまでの動向報告. 令和4年度ROIS-DS-JOINT2022共同研究集会 (立川).
- 5) 本多亮 (2023) 重力鉛直勾配測定における再現性の検討. 金沢大学重力科研費ワークショップ(金沢).
- 6) 本多亮, 今西祐一, 西山竜一, 名和一成 (2023) 富士山の重力観測網整備状況. 東大地震研共同利用研究集会(富士吉田).
- 7) 本多亮 (2023) 重力鉛直勾配測定における再現性の検討. 日本測地学会第140回講演会(仙台).

I-5-3 ポスター発表

- 1) 本多亮, 大久保慎人, 名和一成, 宮城洋介, 高木朗充 (2017) CG型相対重力計のデータ擾乱からの回復曲線定式化の試み, 日本測地学会第128回講演会, P20, 2017年10月.
- 2) 本多亮, 名和一成, 今西祐一, 田中俊行, 田中愛幸 (2018) 富士山科学研究所重力点の整備とスバルライン5合目までの重力検定ラインの提案. 日本測地学会第130回講演会 (高知).
- 3) 本多亮 (2021) 富士火山における重力観測体制構築状況. 地球惑星科学関連学会2021年連合大会 (千葉).
- 4) 本多亮, 今西祐一, 西山竜一, 名和一成, 風間卓仁 (2023) 富士山の重力観測網の構築とその活用. 地

球惑星科学関連学会 2023 年連合大会（千葉）.

I-6 謝辞

本研究で実施した様々な観測機器の設置や観測研究において、富士山有料道路管理事務所、環境省富士五湖管理官事務所、富士吉田市歴史文化課、鳴沢村教育委員会、富士吉田市外二ヶ村恩賜県有財産保護組合に便宜を図っていただいた。防災科学技術研究所には相対重力計を使用させていただいた。東京大学地震研究所には地震計および空振計とそれらのデータロガーを使用させていただいた。富士山有料道路管理事務所には、気象観測データを提供していただいた。記して感謝いたします。

本 編

II 研究成果報告

II-1 研究の目的：富士山の課題と効果的な観測体制構築

富士山は日本の象徴的存在であり、国内外から多くの観光客や登山客を集める観光地であると同時に、いつ噴火してもおかしくない活火山でもある。富士山噴火の特徴として前兆から噴火までの時間が短いケースが想定されること、加えて火口の出現が想定される領域が非常に広いことが挙げられる。

噴火の前兆現象をいち早く確実に捉えるためには、ある程度密な観測点分布による観測体制が必要であるが、富士山はその大きな山体故他の火山に比べても観測点の数が十分とはいえない。富士山には気象庁による観測網、東京大学地震研究所による地震観測点、防災科学技術研究所による基盤的火山観測網（V-net）と国土地理院によるGNSS観測網があるが、そのほとんどは地震計とGNSS観測点であり、次いでV-net点に付随する傾斜計が観測点数としては比較的多い観測項目となっている。こうした比較的多数の観測点がある観測項目にしても、他の火山における観測点密度には遠く及ばないのが富士山の大きさに起因する課題である。また、2000年の終わりごろに低周波地震が急増したことを除けば、表面的には目立った活動がみられない富士山は、火山観測全般において研究者の研究対象となり難い側面もあり、観測網は全国一斉に配備された以上の物になっていない。

本研究では、富士山の火山噴火に際して、住民や観光客のスムーズな避難の基礎となる火山観測体制の充実及びその観測データを即時的に発信する仕組みづくりを進める。また、富士山の観測や火山防災の取り組み、噴火時の協力体制構築等のため他機関との連携を進める。

II-2 富士山における観測の強化

火山観測網を強化するということは何らかの観測点を新たに増設するということである。この時、既存の観測項目の観測点をさらに密なものにできれば理想的ではあるが、例えばV-netのような高感度地震観測を含む多項目観測点を多数増設することは費用の面で現実的ではなく、比較的安価に設置できる観測点にしても、設置すべき数を考えると費用は莫大なものとなる。そこで、富士山では観測がなされていない別な物理量の観測を取り入れることで観測の多角化を実現し、最小限の観測点拡充により効率的に観測強化を進めることとした。この観点から、火山現象のシグナルを捉えた実績（例えばFuruya et al., 2003; Carbone et al., 2009; Kazama et al., 2015）のある重力観測を導入した。

重力観測以外では、噴火時に発生する可能性のある火砕流や土石流といった斜面災害に類似した観測の試みとして、富士山において春秋に発生することが多いスラッシュ雪崩の観測に取り組んだ。

II-2-1 富士山重力観測網の構築と火山モニタリングのための重力観測

重力観測に関する基本的な理論や諸問題、観測機器とその仕組みや特性についてはCrossley et al. (2013)で詳細にレビューされている。

1) 富士山科学研究所で運用する重力計とその概要

重力計は、測定地点におけるその時点の重力加速度を直接的に計測できる絶対重力計と、重力値が既知の点との相対値を精密なバネばかりによって計測する相対重力計とに大きく2分される。本報告に登場する重力計の概観を図1に示す。国内の絶対重力測定で用いられるMicro-g LaCoste社製FG5絶対重力計は、真空槽の中を自由落下する落体の位置をレーザー干渉により追跡し、ルビジウム時計で正確な時刻を付与することで、重力加速度を算出することを可能にしている(Niebauer et al., 1995)。相対重力計のうち据え置きでの連続観測に特化したものがMicro-g LaCoste社製gPhone/gPhoneX重力計であり、可搬型の重力計に

は主に LaCoste 社（現 Micro-g LaCoste 社）製の G 型重力計と Scintrex 社製の CG 型重力計を用いている。

富士山科学研究所では、gPhoneX 重力計を 1 台リースした。また、令和 4 年に閉所した公益財団法人地震予知振興会東濃地震科学研究所から同型旧モデルの gPhone 重力計 2 台、可搬型の Scintrex 社製 CG3M 相対重力計 1 台と、レーザーの不調により調整の必要はあるものの FG5 絶対重力計 1 台を寄付された。令和元年より防災科学技術研究所の所有する CG3M 相対重力計を貸与いただいている。構築した重力観測網において、これらの機材をやり繰りしていくほか、他機関からの協力を得ながら観測を進めていく。

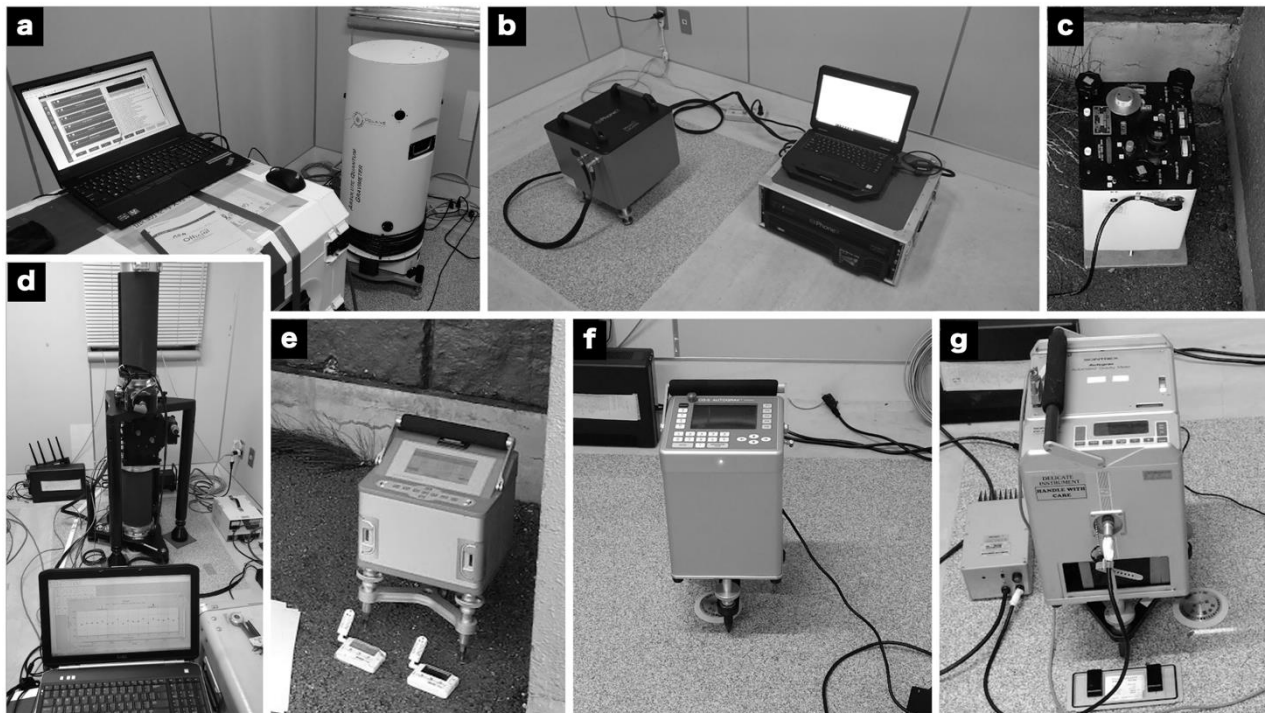


図 1 重力計の概観

a: Muquans 社製量子絶対重力計 AQQ、b: Micro-g LaCoste 社製相対重力計 gPhone/gPhoneX、c: LaCoste & Romberg 社製相対重力計 G 型、d: Micro-g LaCoste 社製絶対重力計 FG5、e: Scintrex 社製相対重力計 CG6、f: Scintrex 社製相対重力計 CG5、g: Scintrex 社製相対重力計 CG3/CG3M。

2) 富士山重力観測網の構築

図 2 に新規に設置した重力観測網を示し、表 1 にそれぞれの重力点の諸元を示す。大掛かりな絶対重力計による計測や連続的に重力時系列データを観測する点については電源の確保も必要であるので屋内（もしくは風雨の凌げる環境）の観測点を整備した（MFRI、SL4ST、SL5ST）。一例として図 3 に MFRI 点の写真を示す。小型で可搬型の相対重力計による観測ができれば良い点に関しては屋外に整備した（SL2ST、OKUNIWA、RINDO4）。一例として図 4 に RINDO4 点の写真を示す。重力計については後述する。想定火口範囲の外にある MFRI 点を重力値不動点となる基準観測点とし、RINDO4 点を除くスバルライン沿いの 5 観測点（MFRI 点もスバルラインの基点として）の往復観測を繰り返して行うことにより、想定火口範囲内の複数点における重力時空間変化を追うことで火山活動のモニタリングが可能となる。MFRI 点と RINDO4 点間の往復測定はスバルラインを通行せずに実施可能であるため、今後補助測線として運用する。スバルライン終点の SL5ST 点は当初 5 合目総合管理センター内に設けていたが、人の出入りが多いことと夜間の電力供給が不安定なこともあり、2020 年に休憩所およびスバルライン 5 合目事務所のある建物内に移設し、現在に至る。

3) 可搬型相対重力計による往復測定

可搬型相対重力計を用いた機動観測で1点あたりの測定に要する時間は、通常10分から1時間程度である。相対重力計はそのタイプによって度合いは異なるが、センサーバネの経年変化により時間とともに重力値が変化していく。これをドリフトと呼ぶ。この特性のため、相対重力計による測定は基準点からスタートして全ての測定箇所を測定後基準点に戻り、最初の測定値との重力差を使って時間経過による重力変化を補正する必要がある。その方法としては往復測定が一般的であり、富士山重力観測網ではMFRI→SL2ST→SL4ST→OKUNIWA→SL5ST→OKUNIWA→SL4ST→SL2ST→MFRIという順番で測定を実施するが、例えばMFRI→SL4ST→SL5ST→SL4ST→MFRIといったように短縮することもできる。これまでに東京大学や京都大学、産業技術総合研究所など多数の大学や研究機関による往復測定が実施された。これは後述する重力測定の高高度化のための測定を兼ねたものであり、他機関にとっては重力計の検定ができるメリットがあり、観測網を検定測線として提供する我々にとっては火山モニタリングデータを得られるメリットがある。また、こうした測定は1日で完了することで学生実習のテーマとして最適な規模の観測であることから、既に学生による観測も何度か実施されている。今後このような形で様々な機関による富士山重力観測網の往復測定が定期的に行われ、火山モニタリングのための重力観測データが蓄積してゆくことが期待される。

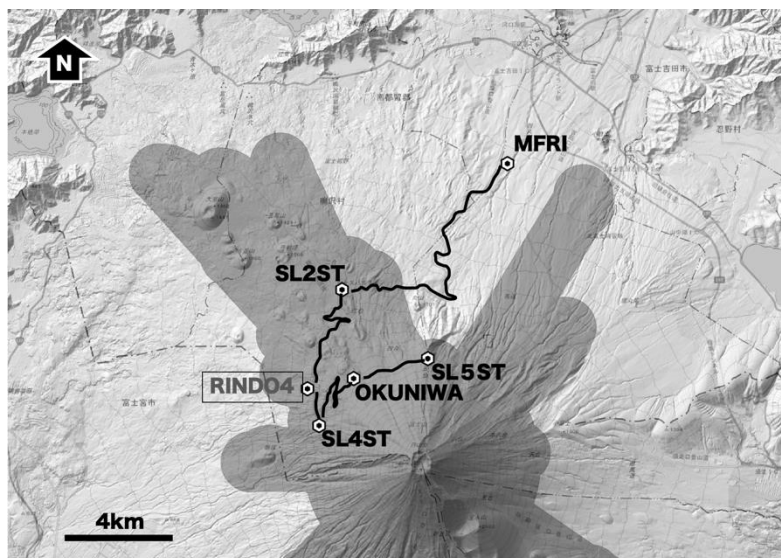


図2 富士山重力観測網

重力点名を添えた重力点の位置図。黒線でスバルラインを示す。RINDO4点はスバルラインからはアクセスできない。濃灰色のエリアが想定火口範囲。背景地図は地理院地図を使用。

このように短縮することもできる。これまでに東京大学や京都大学、産業技術総合研究所など多数の大学や研究機関による往復測定が実施された。これは後述する重力測定の高高度化のための測定を兼ねたものであり、他機関にとっては重力計の検定ができるメリットがあり、観測網を検定測線として提供する我々にとっては火山モニタリングデータを得られるメリットがある。また、こうした測定は1日で完了することで学生実習のテーマとして最適な規模の観測であることから、既に学生による観測も何度か実施されている。今後このような形で様々な機関による富士山重力観測網の往復測定が定期的に行われ、火山モニタリングのための重力観測データが蓄積してゆくことが期待される。

表1 富士山重力観測網各観測点の基本情報

観測点	MFRI	SL2ST	SL4ST	OKUNIWA	SL5ST	RINDO4
緯度(度)	35.45355	35.41544	35.37448	35.38852	35.39482	35.38436
経度(度)	138.76257	138.70206	138.69269	138.70566	138.73284	138.68806
標高(m)	1029.39	1661	2022	2235	2298	1865
絶対重力測定	◎実施中	×不可	×不可	×不可	◎実施中	×不可
連続重力測定	◎実施中	×不可	◎実施中	×不可	○可能	×不可

4) 絶対重力測定

可搬型重力計による往復観測は空間的な重力分布を知ることが可能にするものの、ドリフトの影響を除去するために定期的に絶対重力測定値を参照する必要がある。MFRI 基準点は2018年に2つの重力測定用基台を備えた測定室を整備し、2018年11月には国土地理院によってFG5絶対重力計による絶対重力測定、GNSS

と水準測量による座標（緯度・経度・標高）の決定が実施された。これをもって MFRI 基準点は国土地理院の基準重力点「富士吉田」としての運用が開始された。その後 2021 年からは MFRI 点と SL5ST 点において、東京大学地震研究所によって FG5 絶対重力測定による測定が毎年実施されている。また、2022 年には国土地理院による絶対重力測定が再度実施され、この測定では国土地理院が国内に初めて導入したフランス Muquans 社製の新型絶対重力計 AQG と従来型の FG5 絶対重力計の同時測定も実施された。

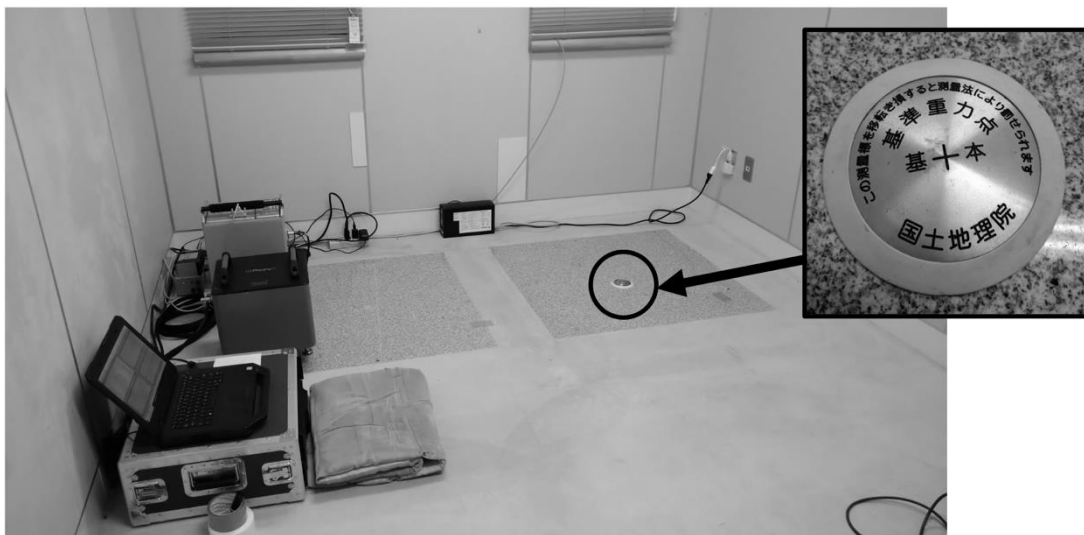


図3 重力観測点「MFRI」

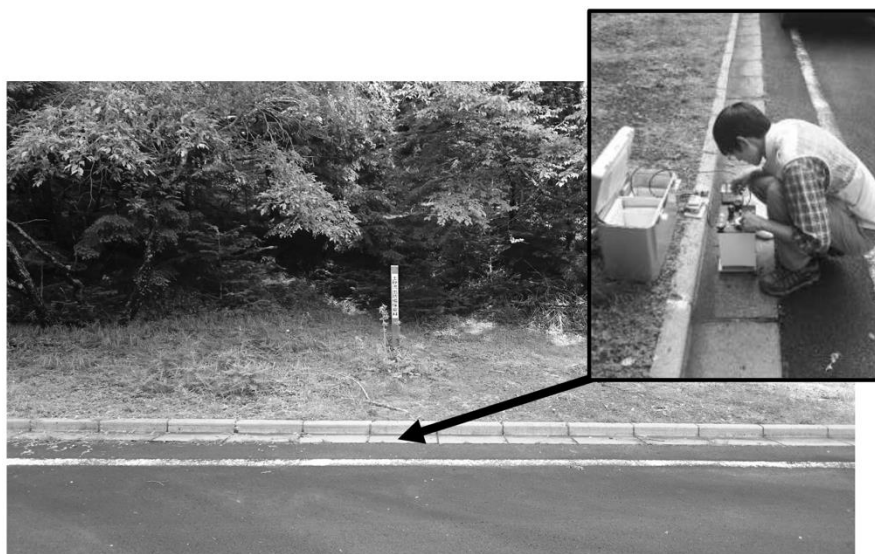


図4 重力観測点「RIND04」

絶対重力測定は通常 3 日程度の観測を行い、その中でもノイズの少ない夜間のデータを採用して重力値を決定することが多い。定期的な絶対重力観測を実施し、想定火口範囲外の MFRI 点と想定火口範囲内の SL5ST における重力値を正確に追う。富士山科学研究所の FG5 絶対重力計については 2022 年 9 月に東京大学地震研究所の絶対重力計のレーザーを借用することで無事に稼働し、計測結果も前年の測定結果と $2 \mu\text{Gal}$ 以内での一致をしており整合的であった。富士山科学研究所の FG5 絶対重力計についてはレーザーの修繕後に運用が開始できる見込みである。

5) 連続観測用相対重力計による連続測定

連続的に重力観測データを得ることは、火山の地下の状態が変化することによる重力時間変化を検出する上では必要な観測である。本研究では噴火時に重力変化が無いと予想される MFRI 点と想定火口範囲内の SL4ST 点にそれぞれ gPhone 重力計を設置し、1 Hz サンプルングでの連続観測を開始した。地球潮汐や陸水の影響など様々な要素が重力を乱すが、2地点の観測データの差分を見ることで、共通する擾乱成分を出来るだけ多く相殺し除去できることが期待される。ただ、本研究においては2地点間の距離や標高差が大きく、例えば降雨のパターンが明瞭に異なる。他にも同じ擾乱源からそれぞれの点に及ぼす重力擾乱効果に大きな差異があることも想定されるため、この手法による擾乱の除去はそれほど容易では無いことが想像できる。

II-2-2 富士山重力観測網の活用による重力測定の高度化

1) 相対重力計のスケールファクター検定

相対重力計はバネの伸びを何らかの形で読み取りそれを重力値に換算している。例えば LaCoste 型重力計の場合はバネの伸びがゼロ長になるまでダイヤルを回してその時のダイヤルメモリを読み取っており、Scintrex 型ではディスプレイに読み取り値が表示される。こうしたそれぞれの読み取り値の差が実際にどれだけの重力差に相当するかは、重力値が既知である2点の重力差を相対重力計で測定することで確認できる。これを相対重力計のスケールファクター検定という。スケールファクターを正確に決定することは相対重力計の測定精度を左右する重要な作業である。また、近年このスケールファクターが重力計の読み取り値に依存するという報告があり (Onizawa, 2019; 若林・ほか, 2022)、相対重力計のスケールファクターについての様々な検証が求められている。

バネの伸びの読み取り値がどのぐらいの重力変化に相当しているかを出来るだけ正確に計測するためには、大きな重力差の2地点で測定された絶対重力値を参照する必要がある。絶対重力観測が可能で短時間で行き来できる MFRI 点と SL5ST 点の大きな重力差 (約 294656 μ Gal) を利用して精度よくスケールファクターを決定できることから、富士山重力観測網はスケールファクターの決定にとって理想的な場所である。2022 年のキャンペーン観測によって決定されたスケールファクターを表 2 に示す。

表 2 重力計ごとに決定されたスケールファクター

測定年	月	日	測定機関 (重力計)	重力差 [μ Gal] (SL5ST-MFRI)	スケールファクター*
2022	9	30	北大 (G31)	-294639	1.000057
2022	9	30	京大 (G534)	-294630	1.000090
2022	9	30	北大 (G791)	-294689	0.999888
2022	9	21	産総研 (CG6-20010228)	-294309	1.001179
2022	9	21	産総研 (CG5-961035200)	-294766	0.999629
2022	9	21	産総研 (CG5-150241329)	-294674	0.999940
2022	9	21	産総研 (CG5-120340890)	-294686	0.999899
2022	10	1	金沢大 (CG3M-9507302)	-293912	1.002531

富士山重力観測網でのスケールファクターの検定の詳細については今西・ほか (2022) に原著論文として報告したので参照されたい。

2) 絶対重力計の器差検定方法の確立

絶対重力計 FG5 は非常に精密に地球の重力を計測できるが、ひとつひとつの機械がハンドメイドであることから、重力計のセンサーの組み付け位置の微妙な差異は避けられず、結果としてそれぞれの機械によって重力測定値に差がある。また、同様の原因によって、定期的にメーカーに送り返して実施するオーバーホールメンテナンス作業の前後で測定される重力値が変わっている疑いがある。こうした測定差は非常に小さな

ものではあるが、火山のシグナルを検知しようとした時には無視できないものである。そこで、我々は2つの測定基台を備え、ノイズレベルも小さいMFRI点を利用して、2台のFG5絶対重力計の器差と、2つの基台の重力差を同時に決定することを試みた。絶対重力計の器差検定についての詳細は今西・ほか(2021)に原著論文として報告したので参照されたい。

3) 重力鉛直勾配の測定

絶対重力計FG5の測定精度は公称 $2\ \mu\text{Gal}$ とされている(Niebauer et al., 1995)。測定値は床面から130 cmの高さに位置する真空槽の中心において計測された重力値を床面もしくは金属標上面に化成される。この時必要な重力鉛直勾配値 dg/dz は、測量用三脚等を用いて可搬型相対重力計によって為されるため相対重力計による重力鉛直勾配測定精度が重要になる。可搬型相対重力計の測定精度は機器のタイプや計測スタイルによって異なるが、概ね数 μGal ~数十 μGal といわれてきた(例えば鈴木, 1962; Lederer, 2009)。我々はScintrex社製のCG型重力計が移動の直後に非線形なドリフト挙動を見せる点に注目し、この非線形ドリフトの影響が及ばないような測定方法を検討した。相対重力計による高精度測定についてはImanishi et al. (2018)に原著論文として詳細を報告しているので参照されたい。また、絶対重力計自体を嵩上げすることによる鉛直勾配の測定を試みた。FG5絶対重力計を用いた鉛直勾配測定の試みについての詳細は今西・ほか(2023)に原著論文として報告したので参照されたい。

4) 陸水による重力擾乱除去方法の検討

陸水の影響をいかに除去するかという点は重力観測をする上で最も重要かつ困難な課題となっている。これまでに経験的モデル(Imanishi et al., 2006)やDEMを用いた陸水学に基づく降雨効果の補正(Kazama et al., 2015)などが試みられている。その地域の水理地質構造が明らかになっていて、ある程度地下水の挙動が観測できる井戸があるならば、地下水流動による重力時間変化を計算できる。富士山北麓地域では内山(2020)によって水理地質構造が示されており、いくつかの地下水位観測井による観測データもあることから、それらを活用した陸水補正が可能である。本多・ほか(2019)では他地域のデータセットではあるものの、既知の水理地質構造での地下水流動による重力効果シミュレーションによって複数点での観測重力値の時間変化を全て説明できることを示したので、富士山で適用するべき陸水補正手法についての詳細はそちらを参照されたい。また、手法によらず必要となる気象データについては、富士山有料道路管理事務所より定期的に提供いただいている。

5) 重力観測の今後の課題

富士山北麓地域に、研究所とスバルラインを利用した重力観測網を構築した。この観測網は火山観測のための重力モニタリングを行うためのものであると同時に重力測定の高度化にとってこの上なく良い条件を備える。このことにより研究者にとって富士山で観測するモチベーションが創出され、国内の重力研究従事者が富士山での測定に集い、自ずとモニタリングのための重力データの蓄積が進むこととなった。一方で、研究者にとってのモチベーションが大きいことは同時に課題の多さを意味する。火山のシグナルを捉えるためには陸水の影響等あらゆる重力擾乱について解き明かしていく必要があり、本研究においては最終的にそのスタートラインに立ったに過ぎない。

II-2-3 臨時地震観測

斜面現象を捉えるための臨時地震観測については池田・ほか(2022)に原著論文として報告したのでこれを参照されたい。

II-3 データのリアルタイム流通と準リアルタイム発信

観測面の充実と同時に、既存観測データを含む火山観測に関するデータの流通とその発信に関する仕組みづくりを進めた。

II-3-1 一元化データの流通システム整備

現在全国の地震計や他の観測データは一元化され、東京のデータセンターに集約されている。それぞれの火山近辺の必要なデータは、この観測点維持管理に参画する研究機関については自由に利用できる。富士山科学研究所も忍野村内にて運用中の地震観測点 (N. FY1V) のデータをこの観測網に提供することで、富士山周辺の観測点のデータ流通を受ける。本研究計画に着手時点で富士山周辺の 29 点の観測点データを研究所にリアルタイム受信できる状況であった。本研究においては富士山周辺の観測点のうち、気象庁観測点を中心に流通観測点を新たに 6 点追加した。また、富士山で起こる地震活動を把握する上で利用する遠方の観測点 12 点を、国内全体にまばらに分布するように追加した。合計 18 点を増設し、これで 41 点の地震観測点データが研究所にリアルタイム流通することとなった (図 5)。ひずみ計や傾斜計といった他の観測項目については今後順次流通を進めていく。これらの流通する地震観測波形データを用いて富士山周辺で発生する地震の震源決定を進めた。

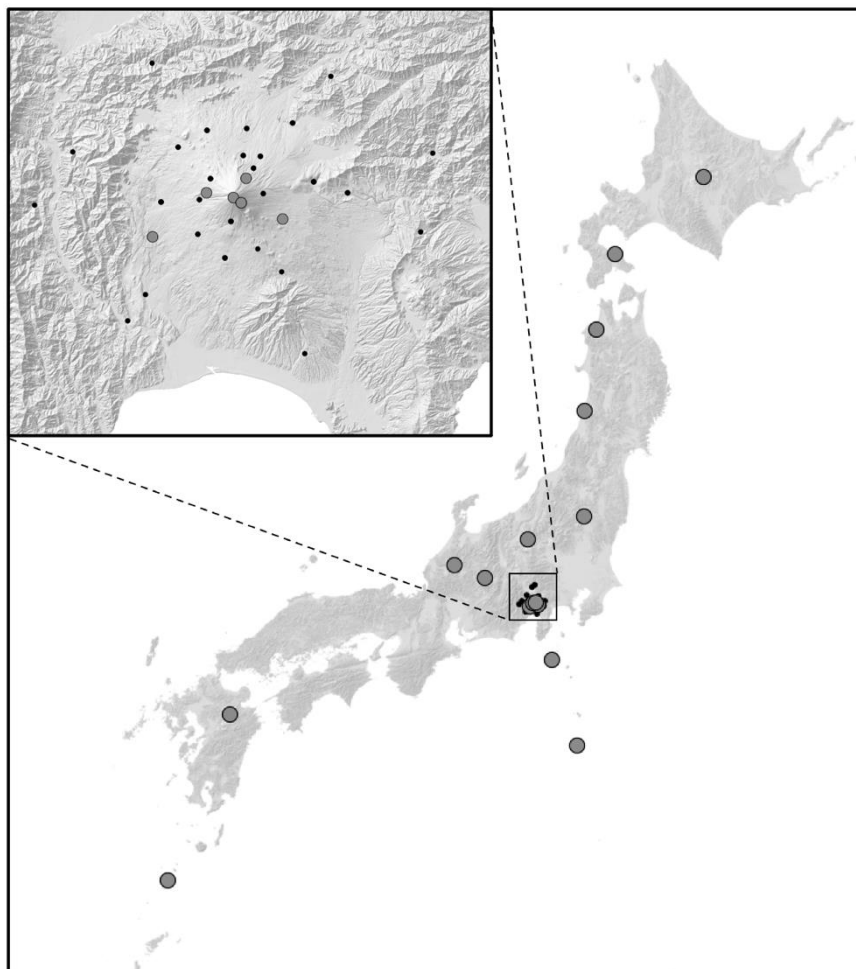


図 5 研究所に波形データが流通する地震観測点
黒点が既存の観測点、濃灰色で塗りつぶした丸印が新規に追加された観測点。

II-3-2 データ一次処理の自動化とデータ公開 Web サイト整備

流通地震波形データからは震源以外にも多くの情報を引き出すことができる。まずは富士山で発生した地震をいち早く認知するための可視化をおこなった。例えば北海道から九州、また小笠原諸島といった遠方の観測点データを併せて一斉表示する仕組みを整備した。フィルタリングや簡易処理を行った上で東から西に順に並べた 1 時間分の全観測点地震波形画像を 1 時間ごとに自動生成するようにした。これによって地震波伝播の基礎的知識を有していれば、観測波形記録が遠方で発生した地震によるものか、富士山近辺で発生したものか、はたまた地震であるのかノイズであるのかといった大凡の見当をつけることが可能となる。図 6 に示したのは北海道で大きな地震が発生した際と、富士山直下で低周波地震が発生した際の例である。北海道で発生した大きな地震は東から西の順で全ての観測点で揺れが観測されていることがわかる。一方で富士

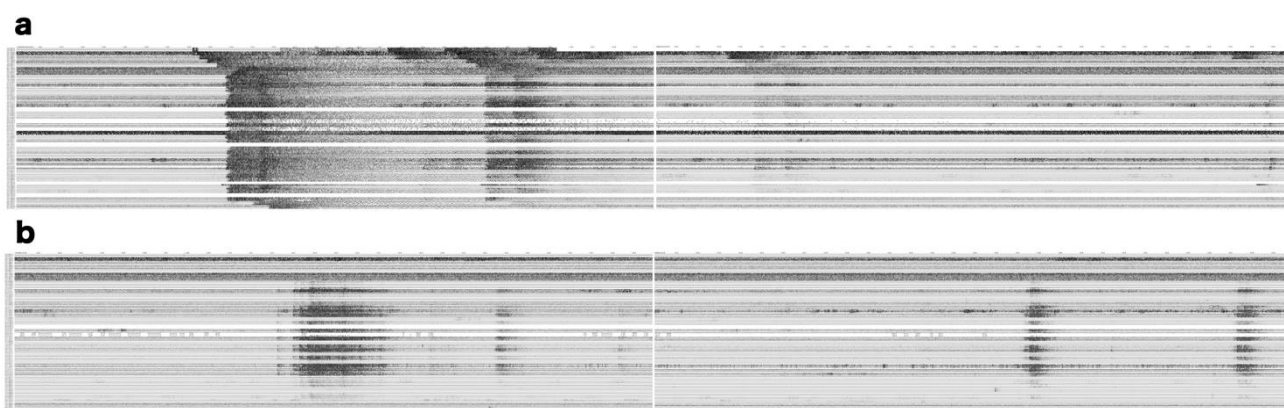


図 6 流通する全観測点による 1 時間分の連続地震波形画像

上から下に、それぞれの観測点の上下動成分のみを東から順に並べた連続波形画像で全幅が 1 時間分。a は北海道で発生した比較的規模の大きな地震の波形画像例、b は富士山直下で発生した低周波地震の波形画像の例。

山周辺の低周波地震の波形は富士山周辺の観測点のみで揺れが観測される。このようにすべての観測点がどのように揺れているかがわかることで、富士山で起きた地震か遠方で発生した地震であるかが即座にわかる。他にはスペクトル画像等も自動で生成し、発生した地震が低周波であるかどうかといった特徴を色彩のパターンにより容易に見分けることができる。こうした画像を登録者が閲覧可能なウェブサイトに 1 時間毎に自動アップロードを行うようにした。

II-3-3 一般向けデータ可視化の難しさ

前項で述べたようなデータ公開は本来広く一般に公開されるべきものであるが、本研究においては自治体の防災担当者向けの可視化に取り組み、専門的な図表の見方に馴染んでもらう取り組みを始めた。専門的な図表とは、ひとつは火山研究者が普段から利用している観測結果の図を前項で述べたような工夫とともに改良したものである。また、既に気象庁や防災科学技術研究所等がウェブ公開しているものについて、集約して閲覧できるツールを整備した。こうしたものを自治体の火山防災担当者が閲覧できる環境を構築した。これらの専門的な図表はある程度のトレーニングを経て情報を読み取れるようになるものであり、そうした普及啓発・教育について今後継続的に取り組んでいく必要がある。一方、当初一般市民向けの可視化を検討する計画ではあったが、いくつかのワークショップ等で検証した結果、専門知識のない市民に理解してもらえる可視化を実現するためには解決すべき課題が多いことがわかった。例えば、地図上に情報を掲載するタイプの図においては地図や自身の位置が読み取れない、グラフで情報を見せる場合にはグラフ自体に抵抗感を示す等、いくつかのハードルがあった。全ての地元住民に対して情報の見方を普及させることが難しいことに加え、観光客に至っては情報の見せ方に関するレクチャーを実施する機会がない。一般市民向けの公開

は今後、動画などのコンテンツを作成することで直感的に理解可能な見せ方を引き続き検討するものとした。

II-4 他機関との連携体制構築

富士山が噴火した際の対応はもちろん、その準備としての普段からの火山観測研究や周辺自治体における防災体制の強化については、同様の研究や業務を行う他の研究機関等関係各所との協力が不可欠となる。II-3-1)で述べたデータの交換については防災科学技術研究所との間に2016年8月1日付で協定「山梨県富士山科学研究所と国立研究開発法人防災科学技術研究所の連携・協力」を締結していたことで実現していた。本研究においてこの防災科学技術研究所との協定に基づいて新たに気象庁観測点のデータ流通が即座に実現したのは、防災科学技術研究所と気象庁の間に、希望する機関にもデータ提供可能な取り交わしがあったためである。このように関係機関との間に実際の協力関係に加えて、文書による取り決めによる周知な準備があることは重要である。

本研究ではまず、MFRI点の重力基準点化に際して富士山科学研究所と国土地理院測地部物理測地課との間に2018年11月8日付で「富士山の火山活動に関わる作業の協力に関する覚書」を交わし、重力観測による富士山の観測協力体制を確立した。続いて2021年7月28日に神奈川県と山梨県の間で「火山噴火時の相互応援及び火山研究職員等の交流に関する協定」を締結し、活火山である富士山と箱根山をそれぞれ抱える両県が協力し合う体制ができた。また、山梨県は2022年8月29日に、産業技術総合研究所との間に「富士山噴火に対応した地域の防災対応力強化に向けた連携・協力協定」を、防災科学技術研究所との間に「富士山火山防災対策等の推進に向けた火山研究職員等の協力に関する協定」をそれぞれ締結した。

こうした協力体制の構築により有事の対応を想定した準備を進めていくが、初めから完全な体制が構築されていることは考え難く、今後必要な修正を加えながら強固なものとしていく必要がある。例えば東京大学地震研究所には観測研究全般において多大な協力を頂いているが、文書の取り交わしが無い。今後はこうした点を改善しながら富士山の火山噴火への備えを進めていく。

II-5 まとめ

富士山の火山防災体制を強固なものとしていくために、観測体制の多角化による強化、データ流通と観測情報の周知の仕組みづくり、他機関との連携の強化を進めた。観測は重力観測を取り入れることで効率よく火山の状態を把握する観測体制作りを中心に進めた。研究所に流通するデータについても整備を進めると同時に、そのデータ処理の自動化を進め、出来るだけ人の手がかからない方法を模索した。観測データの公開については、一般向けのデータの見せ方に課題が多いことも明らかになり今後に課題を残した。一方、防災担当者については図表の見方のトレーニングも可能であることから、観測情報サイトを整備し、限られた対象への公開を進めた。他機関との協力関係については、既存の現場レベルでの協力体制をより強固なものとし、発災時にスムーズに動ける根拠となるような文書の取り交わしを進めた。

本研究で実施してきたこうした取り組みは富士山の火山防災体制の強化の基本であり、この研究計画で終わるものではなく今後継続的に取り組んでいくべき性格のものである。

II-6 引用文献

Carbone, D., P. Jousset, and C. Musumeci (2009) Gravity "steps" at Mt. Etna volcano (Italy): Instrumental effects or evidences of earthquake-triggered magma density changes?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02301, doi:10.1029/2008GL036179.

- Crossley, D., J. Hinderer, and U. Riccardi (2013) The measurement of surface gravity, *Rep. Prog. Phys.*, 76, 046101, doi:10.1088/0034-4885/76/4/046101.
- Furuya, M., S. Okubo, W. Sun, Y. Tanaka, J. Oikawa, H. Watanabe, and T. Maekawa (2003) Spatiotemporal gravity changes at Miyakejima Volcano, Japan: Caldera collapse, explosive eruptions and magma movement, *J. Geophys. Res.*, 108(B4), 2219, doi:10.1029/2002JB001989.
- 本多亮, 柳澤孝一, 田中俊行, 浅井康広 (2019) 重力変化で捉える既知の水理地質構造中の地下水流動—岐阜県東濃地域における長期水圧低下を例として—. *物理探査*, 72, 34-48.
- 池田航, 市原美恵, 本多亮, 青山裕, 高橋英俊, 吉本充宏, 酒井慎一 (2022) 富士山における雪崩空振現象の多項目観測と統合解析. *雪氷*, 84, 4, 421-432.
- Imanishi, Y., K. Kokubo, H. Tatehata (2006) Effect of underground water on gravity observation at Matsushiro, Japan. *J. Geophys. Res.*, 111, 221-226.
- Imanishi, Y., K. Nawa, Y. Tamura, H. Ikeda, R. Honda, T. Okuda, M. Okubo (2018) Combined Use of a Superconducting Gravimeter and Scintrex Gravimeters for Hydrological Correction of Precise Gravity Measurements: A Superhybrid Gravimetry. *IAG Symposia*, 149, 71-76.
- 今西祐一, 西山竜一, 本多亮, 田村良明 (2021) 絶対重力計FG5#109と#241の器差の検定について—東京および富士山における相互比較—. *測地学会誌*, 67, 18-28.
- 今西祐一, 西山竜一, 本多亮 (2022) 富士山における2台のFG5による絶対重力測定(2022年9月)—相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定—. *地震研究所彙報*, 97, 1-11.
- 今西祐一, 西山竜一, 本多亮 (2023) 絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定. *測地学会誌*, 69, 8-17.
- Kazama, T., S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka, E. Koyama (2015) Absolute gravity change associated with magma mass movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances. *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*, 120 (2), 1263-1287, doi:10.1002/2014JB011563.
- 国土地理院 (2023) : 地理院タイル, <<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>>, (参照 2023年11月) .
- Lederer (2009) Accuracy of the relative gravity measurement, *Acta Geodyn. Geomatr.*, 3, 383-390.
- Niebauer, T. M., G. S. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F. Klopping (1995) A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 159-180, doi: 10.1088/0026-1394/32/3/004.
- Onizawa, S. (2019) Apparent calibration shift of the Scintrex CG-5 gravimeter caused by reading-dependent scale factor and instrumental drift, *J. Geod.*, 93, 1335-1345. doi: 10.1007/s00190-019-01247-9
- 鈴木弘道 (1962) LaCoste重力計, *測地学会誌*, 8, 79-85.
- 内山高 (2020) 富士火山北麓および富士五湖の水文地質構造と水文学的特徴, *地学雑誌*, 129, 5, 697-724.
- 若林環, 風間卓仁, 福田洋一, 安部祐希, 吉川慎, 大倉敬宏, 今西祐一, 西山竜一, 山本圭吾 (2022) LaCoste 型および Scintrex 型相対重力計におけるスケールファクターの読取值依存性の検定. *測地学会誌*, 68, 49-68.

R-07-2024

令和5年度
山梨県富士山科学研究所研究報告書
第59号

MFRI Research Report

2024年発行

編集・発行
山梨県富士山科学研究所

〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田剣丸尾 5597-1

電話：0555-72-6211

FAX：0555-72-6204

<https://www.mfri.pref.yamanashi.jp/>
