

2. 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 課題 B 先端的な火山観測技術の開発

サブテーマ 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(b) 担当者

| 所属機関 | 機関種別 | 役職 | 氏名 |
|---------------|------|-------|-------|
| 東京大学・地震研究所 | 代表機関 | 教授 | 森田 裕一 |
| 同上 | | 教授 | 大湊 隆雄 |
| 同上 | | 助教 | 小山 崇夫 |
| 北海道大学・理学研究院 | 参加機関 | 教授 | 橋本 武志 |
| 同上 | | 教授 | 青山 裕 |
| 同上 | | 助教 | 田中 良 |
| 東北大学・理学研究科 | 参加機関 | 教授 | 三浦 哲 |
| 同上 | | 准教授 | 山本 希 |
| 同上 | | 助教 | 市来 雅啓 |
| 東京工業大学・理学院 | 参加機関 | 准教授 | 神田 径 |
| 同上 | | 講師 | 寺田 暁彦 |
| 九州大学・理学研究院 | 参加機関 | 准教授 | 相澤 広記 |
| 同上 | | 教授 | 清水 洋 |
| 同上 | | 教授 | 松本 聡 |
| 同上 | | 准教授 | 松島 健 |
| 神奈川県温泉地学研究所 | 参加機関 | 主任研究員 | 本多 亮 |
| 同上 | | 主任研究員 | 行竹 洋平 |
| 神戸大学海洋底探査センター | 参加機関 | 教授 | 金子 克哉 |
| 名古屋大学・環境学研究科 | 参加機関 | 教授 | 山岡 耕春 |
| 鹿児島大学・理工学研究科 | 参加機関 | 教授 | 中尾 茂 |
| | | 准教授 | 八木原 寛 |
| 気象庁 | 協力機関 | 火山対策官 | 長谷川嘉彦 |

(c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し、取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、倶多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、

富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年 2 火山程度をそれぞれの火山について約 2 年間の機動的な観測または電磁気構造探査を実施して、各火山のその時点での火山内部状況を示す詳細な震源分布、地震活動、全磁力分布、山体膨張等のうち可能なもののいくつかの調査、または電磁気構造探査を実施して地下比抵抗 3 次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価の基準となる。そのため、整理の終わった観測データや解析結果を本事業の課題 A に提供し、広く活用を図る。また、機動的な観測や探査を実施する際には、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手をポストドクターとして雇用する他、大学院博士課程の学生で機動観測とそのデータ解析に参加を希望する若手人材をリサーチアシスタントとして受け入れ、現場教育も併せて行うように努める。

このような観測で得られたデータを即時的に解析するためのツールとして、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムを開発する。これらのツールは、個々の火山の特性や環境を無視した画一的な仕様では実用的なものとはならない。そのため、色々な条件下（例えば、観測点の配置、観測点密度、地形）で実施する機動観測で利用して改良を重ね、より広く利用できるツールの作成を事業期間中に目指す。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

最近、熱活動が見られる霧島山硫黄山の現状を把握するために、硫黄山周辺で地殻変動観測、地震計アレイ観測、電磁気観測を実施し、地震活動、地下比抵抗構造、地盤変動の圧力源の場所から、硫黄山浅部の地下の内部状況の把握に資するデータを取得し、地下比抵抗構造と震源域の関係について予察的な結果を得た。

観光地に近く、水蒸気噴火が発生すると大きな被害が予想されるにもかかわらず、地下構造をはじめ、ほとんどの情報がない倶多楽において、水蒸気噴火の際に大きな影響を与える熱水溜まりの位置の推定に有用な地下比抵抗構造の探査を、平成 29 年度に約 50 地点で実施する予定である。そのための準備として、観測予定点の用地交渉を行うと共に、観測環境が悪いと予想される地点でノイズ調査を行った。また、現時点での地盤変動、地震活動についても調査した。

2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山では、地盤変動の解析から深さ 8 km 付近にマグマ溜まりが存在すると推定されている。しかし、これまで分解能が高い地震波速度構造が推定されていないため、マグマや熱水の供給系についての情報が不足している。そのため、箱根山周辺に機動的に地震観測点を増設して、詳細な 3 次元地震波速度構造を推定するための観測を開始した。

平成 30-31 年度実施予定の三宅島及び平成 31-32 年度実施予定の草津白根山の機動観測の準備を行った。

本事業で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムな

どのツールの開発を開始した。平成 28 年度は、上記のうち、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して進めた。

本事業の本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本課題の進捗状況の確認及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

2) 平成 29 年度：

前年度に予備調査を実施した倶多楽の地下比抵抗構造の探査を実施した。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 km、南北約 10 km の範囲の 49 地点で探査を実施した。得られたデータを解析し、この地域の 3 次元地下比抵抗構造の推定を行い、予察的な結果を得た。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根山における機動観測を継続した。また、次年度以降に予定されている三宅島と草津白根山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

3) 平成 30 年度：

三宅島では 2000 年噴火から 17 年以上が経過し、前回の噴火後に収縮していた山体も 2006 年以降は膨張に転じ、次期の噴火の準備が始まっている。また、現在も極めて規模の小さな火山性地震が多数発生している。2000 年噴火前は山腹噴火が続いてきたが、2000 年噴火により火道の状況が大きく変わったため、次の噴火様式の予想が困難である。火道が開放されているときには、火口浅部で長周期地震の発生することが予想されるが、火口近傍に広帯域地震計が設置されていないため、その詳細な活動は不明であった。三宅島において長周期地震・微動活動の有無を確認するため、機動的に広帯域地震観測を実施し、長周期地震活動のデータを取得した。また、これまでに取得した MT 観測データを整理し、地下比抵抗 3 次元構造の推定を試みた。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根山における機動観測を継続し、データの解析を進め、水蒸気噴火を引き起こす火山の地下構造を求めた。また、次年度以降予定されている草津白根山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析シス

テムなどのツールの開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

草津白根山湯釜では、平成 26 年 3 月以降火山活動が活発に推移し、水蒸気噴火の発生が懸念されている。一方、平成 30 年 1 月にはこれまでそれほど活動が注目されていなかった本白根山で水蒸気噴火が発生した。この火山では、火山全体の活動を支配していると考えられる深部の構造が求められておらず地表への熱の供給源であるマグマ溜まりの位置も知られていないため、活動の今後の見通しを立てるための情報が不足している。そのため、平成 30 年噴火後に急遽増設された観測網を維持して、詳細な地震活動や地盤変動の情報を得るとともに、広域に MT 観測等を行うことにより深さ 10km 程度までの地下比抵抗構造を明らかにし、マグマ溜まりの位置の推定を目指す。同時に熱観測等も実施した。

前年度に引き続き三宅島、箱根山における機動観測を継続した。三宅島では、平成 12 年の噴火以降の地下の構造、特に地下水分布の変化を調査するため、MT 観測を実施した。さらに、次年度予定されている蔵王山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を進め、アルゴリズムの確定、プロトタイプの完成を目指した。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

5) 令和 2 年度：

蔵王山では、約 3 万年前に馬の背カルデラが形成され、その後カルデラ内に発達した火口湖御釜および近傍の地熱地帯において断続的な火山活動が現在まで継続している。有史以降も数十年間隔で水蒸気噴火や泥流が発生しており、降灰や酸性水による土壤汚染等の災害を引き起こしてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震以後、マグマ活動を示唆する深さ 20～35km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013 年以降は浅部における火山性地震・火山性微動や熱消磁の発生が認められている。噴火を引き起こすポテンシャルの判断材料となる火山性流体や変質帯の分布を明らかにするため、比抵抗構造探査実施した。また、深部流体の移動を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を実施した。

前年度に引き続き草津白根山における機動観測として、比抵抗構造調査、自然地震観

測、GNSS 観測を実施した。また、次年度予定されている有珠山での機動観測の準備として土壌拡散 CO₂ 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。また、活動が継続している霧島山、箱根山、三宅島においても規模を縮小して観測およびデータ解析を継続した。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールのプロトタイプの開発を継続した。実データで利用し、実用化に際しての問題点を明らかにすることを進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

6) 令和 3 年度：

有珠山では、令和 3 年度時点では前回の噴火から 20 年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現しているが、1910 年、2000 年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約 3 日後に噴火、山頂噴火した 1977 年では約 1 日後に噴火するなど同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズムを解明することが、有珠山の噴火切迫性評価に重要である。地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造を明らかにする。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壌 CO₂）放出量についても測定を行う。

前年度に引き続き、蔵王山での機動観測を継続する。また次年度予定されている伊豆大島での機動観測の準備を行う。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールのプロトタイプの開発を継続する。実データで利用し、実用化に際しての問題点を明らかにする。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を図るためサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

7) 令和 4 年度：

伊豆大島は前回の噴火から現時点で既に 30 年以上が経過し、平均的な噴火間隔（30～40 年）に近づいている。火山性地震は山体膨張と極めて良い相関を持つという特徴があり、マグマ溜まりの状況把握と噴火切迫性を評価するために精度の高い地震活動の観測

は有用である。また、前回の噴火では噴火の約3ヶ月前から間欠的な火山性微動が発生し、その後連続微動となって噴火に至った。このようなことから、現在の状況及び将来の噴火時の緊急観測に備えるため、広帯域の地震計アレイ観測を実施し、地震活動度の時空間変化を捉え、火山内部の状態把握を行い、将来の噴火切迫度評価の際の基準とする。

前年度に引き続き、有珠山での機動観測を継続する。また、次年度に予定されている富士山での機動観測の準備を行う。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて開発を進める。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

8) 令和5年度：

富士山ではすでに各種観測が実施されているが、火山ガスの観測についてはあまり進められていない。火山ガスの成分変化は噴火切迫性の評価に有効であると思われるが、わが国ではそれほど実績がない。課題Bサブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」で開発予定の火山ガス観測システムを用いて火山ガス成分の変化を追跡するとともに、火山ガス、温泉溶存ガスの分布と関連が深い富士山周辺の地下水分布を、広域にMT観測を実施し、地下比抵抗流体流動解析システムを用いて地下比抵抗構造を推定する。

前年度に引き続き伊豆大島での機動観測を継続する。また、次年度予定されている新潟焼山での機動観測の準備を行う。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて開発を進める。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

9) 令和6年度：

新潟焼山は、小規模ながら20世紀に6回の噴火活動を経験している。2015年末から噴煙を高く上げるようになり、2016年5月には18年ぶりに降灰も確認されるなど、活動度が低い火山ではないと認識すべきである。近年は水蒸気噴火を繰り返しているが、250年前には住居地域へ到達する火砕流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸

念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため、MT 観測を実施する。また、広帯域地震観測も並行して実施する。可能であれば空中磁気測量を行い、全磁力分布を明らかにする。

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて、実用化のための開発を進める。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を図るためサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造の探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

10) 令和 7 年度：

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールを実用化し、行政官庁、研究者コミュニティに公開する。

本課題を総括するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマ推進会議を開催し、事業の成果をまとめる。

(e) 令和 2 年度の業務目的

火山噴火切迫性の評価に必要な火山内部構造と内部状態の把握のため、活動的な火山において機動観測を着実に進め、切迫性評価の基準となる観測データを取得する。また、切迫性評価に必要な情報を抽出するための観測データ解析ツールの開発も行う。

草津白根火山においては、平成30年1月の本白根山の水蒸気噴火を機に、湯釜の活動以外も含めて全山的な活動の切迫性評価が重要な課題になっている。そのため、草津白根火山周辺域にも強化した地震および傾斜観測網を維持し、地震活動や地盤変動の状況を把握する。また、広域かつより深部までの地下比抵抗構造を推定するために、MT探査を実施する。草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探るためGNSSキャンペーン観測を実施する。

中期的には噴火切迫性が高まりつつあると見られる蔵王火山においては、熱水系と変質帯の分布を把握することを目的とする比抵抗構造探査を実施する。また、熱水の移動や火山性流体の上昇及び蓄積を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計に

よる地殻変動観測を実施する。傾斜計の新設も進める。

有珠山においては、次年度の機動観測準備として土壌拡散CO₂フラックスの予備調査と、地震アレイ観測および傾斜観測の候補地選定を進める。

三宅島では、平成30年度から開始した広帯域地震機動観測を継続し、既存観測点や追加した観測点のデータから、将来の火山活動の切迫性評価の際の比較対象となる現時点の三宅島の火山活動や地震活動に関する情報を抽出する。また、地下水の状況や熱構造の変化を把握するために自然電位と空中磁気探査を実施する。

霧島火山では、多項目観測を継続し、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震・地殻変動活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進する。広域の地殻変動を捉える GNSS 観測や地球物理情報の解釈を支援する地質情報の取得も進める。

箱根山火山では、これまでの観測データを整理し、レーンバー関数解析法を用いてより深部の地震波速度構造の推定を試みる。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを火山噴火切迫性評価に利用するため、即時的なデータ解析を目指した地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を継続して進める。

開発がほぼ終わった地震計アレイデータ解析システムは、試験運用を進め、必要に応じて改良する。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、地下比抵抗構造を推定するための前処理支援ツールの改良など3次元インバージョン解析手法の標準化を目指した開発と比抵抗構造から火山の内部状態を推定するための熱水流動をシミュレーションの利用を進める。また、地熱ボーリングの公表データの読み取りと整理を進める。火山性地震活動総合解析システムについては、基本設計と動作試験データの整備を行い、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進める。遠隔熱情報解析システムについては、観測に用いるドローンの運用実績を積むと共に、観測データの遠隔回収実験を進める。地震波動場連続解析システムについては地震波干渉法解析の GUI 改良を行うなど、実観測データへの適用と動作テストを実施する。

本課題を円滑に推進するため、同一課題のサブテーマ代表者会議を開催し、サブテーマ間の連携の強化を図る。本課題の参加者、研究協力者を集めたサブテーマ推進会議を開催し、事業の進捗状況の把握、次年度以降の実施計画の詳細を検討する。本課題で行う機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。令和2年度は、蔵王火山で使用する広帯域地震計と土壌ガス流量計を購入する。また、データ一元化を担う課題Aへ観測データを集約するための具体的な方策を検討する。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造の調査を、草津白根山、蔵王山、三宅島、霧島山及び箱根山において実施した。また、有珠山において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

草津白根山では、本白根山から横手山付近に至る顕著な低比抵抗領域が北北西方向に海拔 10km 程度まで伸び、志賀高原一帯の地下に広がっていることと粘土鉱物層と見られる低比抵抗領域が浅部に広がっていることを見出した。地震観測を行い、草津白根山西方群発地震の震源を精度よく決めた。

蔵王山では、比抵抗構造探査により火山性地震の震源域付近に低比抵抗領域が分布することを示した。また、地震観測および傾斜観測により、火山性流体の蓄積上昇に関連すると考えられる長周期地震の位置や特徴を把握した。

有珠山では、次年度に計画されている機動観測に向けて土壌拡散 CO_2 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。

三宅島では、これまでに得られた地震及び地殻変動データの再解析を進め、現在の地震・地盤変動の変化と今後の噴火の際の切迫性評価の視点について考察を行った。自然電位分布の測定を行い、2012 年と比較して 2020 年に熱水系に変化が現れていることが示された。また、地下温度分布の変化を検出するための空中磁気測量を行った。

霧島山では、これまでの多項目観測データを解析し 2018 年に硫黄山で発生した小規模水蒸気噴火の開始過程を考察した。また、圧力源の位置と体積変化量を把握するための精密水準測量を実施した。

箱根山では、速度構造モデルに基づきマグマ熱水供給系の構造と噴火機構を推定した。また、地震学的手法により深部地震波速度構造と浅部亀裂系の特徴を捉えた。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムは運用実験を行った。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、比抵抗探査データ構造を前処理する際に有用なツールをパッケージ化し、関連研究者に提供を開始した。さらに、熱水流動と地盤変動等の観測データを総括的に評価するツールの開発を進めている。また、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システム等の各ツールの開発も継続した。

本事業を包括的に推進するため、博士研究員の雇用やリサーチアシスタントの雇用を通して、火山人材育成コンソーシアムと連携をはかった。

(b) 業務の成果

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

a) 草津白根山における機動観測

本事業で実施する草津白根山における機動観測は、本白根山の噴火を受けて一部前倒しして実施した項目を含めると 3 年目にあたる。令和 2 年度も前年度からの継続で、

i) 比抵抗構造調査、ii) 自然地震観測、iii) GNSS 観測を実施した。これらの観測補助および GNSS 観測データの解析のために博士研究員 1 名を雇用した。また、リサーチ

アシスタント1名を雇用し、草津白根山周辺の比抵抗構造調査で得られたデータの解析を通じて地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発補助作業にあたった。

i) 草津白根火山とその周辺における比抵抗構造調査

草津白根火山の深さ10 km程度までの地下比抵抗構造を推定するために、草津白根山から半径10 kmのエリア内の14観測点（うち1観測点は令和元年に実施した観測点における再観測）において、広帯域マグネトテルリクス（以下、MT）法調査を実施した。図1に観測点分布を示す。

前年度に高品質のデータが取得できなかった草津町の南東地域や観測密度の低い草津白根山北側を中心にデータを取得した。なお、このうち2点は、人材育成コンソーシアム構築事業の野外実習の一環として、受講生7名がデータ取得作業にあたった（図2）。

コロナウィルスの影響を受けたため9月からの観測開始となったが、11月の降雪期を前に測定を終えることができた。測定には、東京大学地震研究所の共同利用のMT観測装置（Metronix Geophysics社製ADU-07）および東京工業大学が所有するPhoenix Geophysics社製のMT観測装置（MTU-5A）を用いた。登山を要する観測点では、NTシステムデザイン社製の電場測定装置（ELOG-DUAL）を使用して電場のみの測定を行い、磁場データについては近隣のMT観測点のデータで代用した。電極には、ハンガリー製の非分極平衡電極である鉛一塩化鉛電極を用いた。データの取得期間は、すべての観測

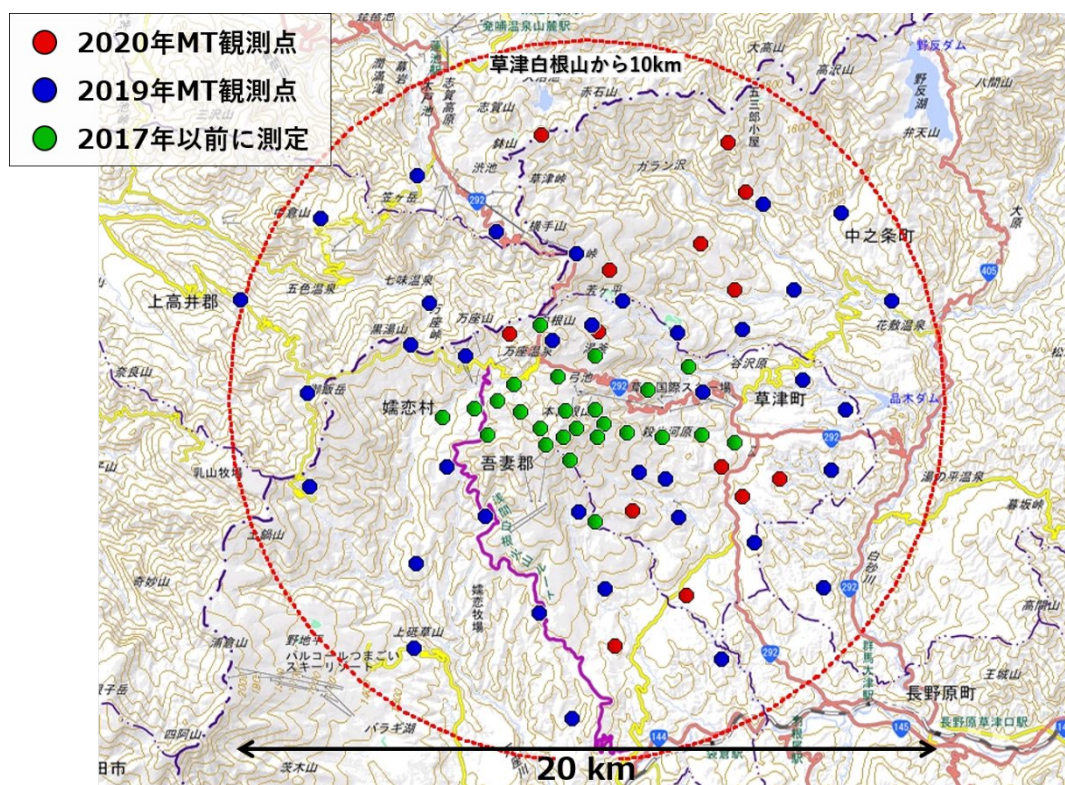


図1. 2020年度に草津白根火山周辺で実施した広帯域MT法調査の観測点分布（赤丸）。青丸：2019年度測定点、緑丸：2017年以前に測定した観測点。赤色の点線は、草津白根火山から半径10 kmの領域を示す。

点で概ね1週間程度であった。なお、リモートリファレンス処理のため、ADU-07で取得したデータについては、地熱技術開発（株）が運用する山形県最上郡大蔵村の観測点のデータを、また、MTU-5Aで取得したデータについては、日鉄鉱コンサルタント（株）が運用する岩手県和賀郡西和賀町の観測点のデータを提供いただき、解析に使用した。

図3に、今年度測定したデータから推定したMT応答関数の例を示す。これらの解析には、米国ウッズホール海洋研究所のA. D. Chave博士から提供を受けた解析ソフトウェア（Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing: BIRRP¹⁾）を使用した。昨年度未解析であったデータの処理も同様に行った。前述のように、観測の開始が9月となったためスケジュールが厳しくなり、地磁気擾乱を狙って



図 2. MT 法調査の様子。下段の 2 枚の写真は、人材育成コンソーシアムの野外実習時の様子。

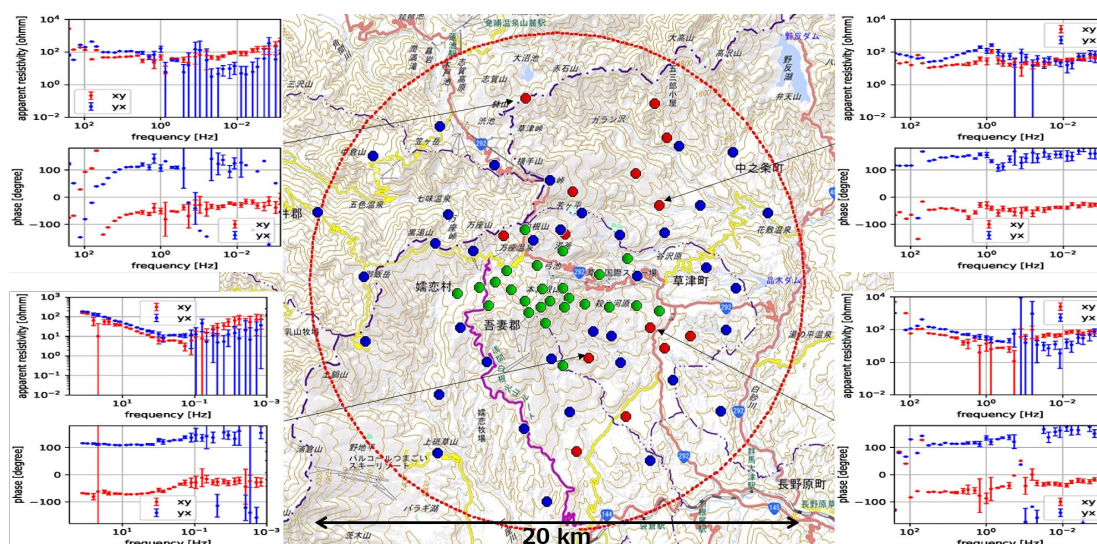


図 3. 2020 年度に測定したデータから推定された MT 応答関数（見掛け比抵抗および位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数を表す。上段が見かけ比抵抗で下段が位相を示す。インピーダンスの非対角成分（XY および YX）のみ示している。

観測を行うことができなかった。それでも一部の観測点を除き、周期数百秒まで概ね良好なデータの取得に成功している。

草津白根山の機動観測としてこの2年間に本事業で測定した51観測点のデータに、2015-2017年に取得済みの24観測点のデータ²⁾を加えた合計75観測点のMT応答関数を用いて、3次元比抵抗構造の構築を行った。解析には、四面体メッシュを用いた有限要素法に基づくインバージョンコードFemtic^{3、4)}を使用した。図4に、インバージョンの初期モデルと設定したメッシュを示す。これまでと同様に、本白根山の山頂付近を原点にとり、解析に用いた最低周波数(0.00391 Hz)のスキンドープスを考慮して中心から±350 kmの範囲を解析領域とした。地形データには、陸域については、全ての観測点が含まれる中心から半径15 kmの範囲では国土地理院の基盤地図情報10mメッシュデータを用い、その外側では陸域および海域ともにETOPO1データ⁵⁾を用いた。入力データとしては、インピーダンス4成分および使用可能な観測点では地磁気変換関数(ティッパー)2成分も用いた。計算に用いた周波数は、256 Hz～0.0039 Hzの17周波数で、対数軸上ではほぼ等間隔になるように選択した。初期モデルとして、海水部分が0.33 Ωm、陸域部分が100 Ωmの半無限一様構造を与えた(図4)。

インバージョンのパラメータやメッシュサイズなどを変えて何通りかの計算を行った結果、図5および図6に示す最適モデルが得られた。初期モデルのRMSミスフィットは32.4であったが、7回目の反復計算で1.68となった。これらの図から白根山西部の万座温泉付近を中心として、本白根山から横手山付近に至る1 Ωm以下の顕著な低比抵抗領域が、標高1000m～海拔下5 km程度まで見られる。この低比抵抗体は、深部ではやや比抵抗値が大きくなるが、北北西方向に海拔10 km程度まで伸び、志賀高原一帯の地下に広がっている。

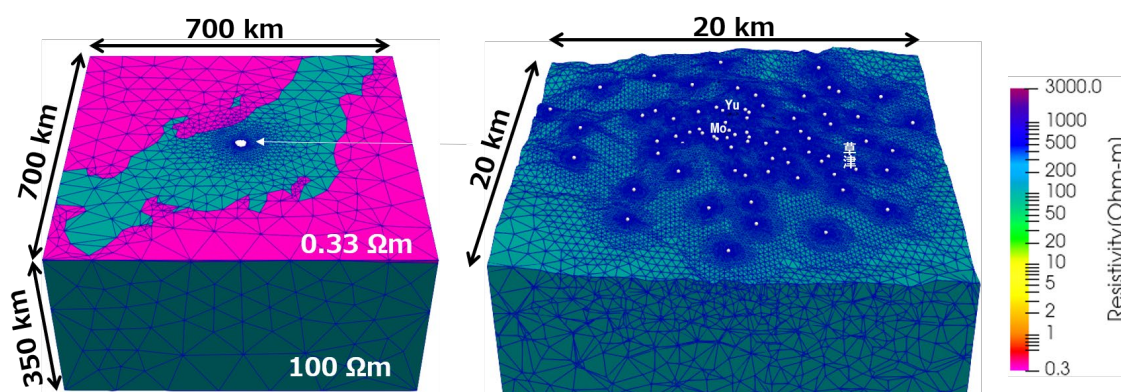


図4. 左：草津白根火山の3次元比抵抗構造モデルの計算範囲。右：調査領域の四面体メッシュ。白丸は観測点。地形をモデルに組み込み、観測点に近いほど、また地表面に近いほど細かいメッシュを設定した。Yu：湯釜火口、Mo：本白根山。

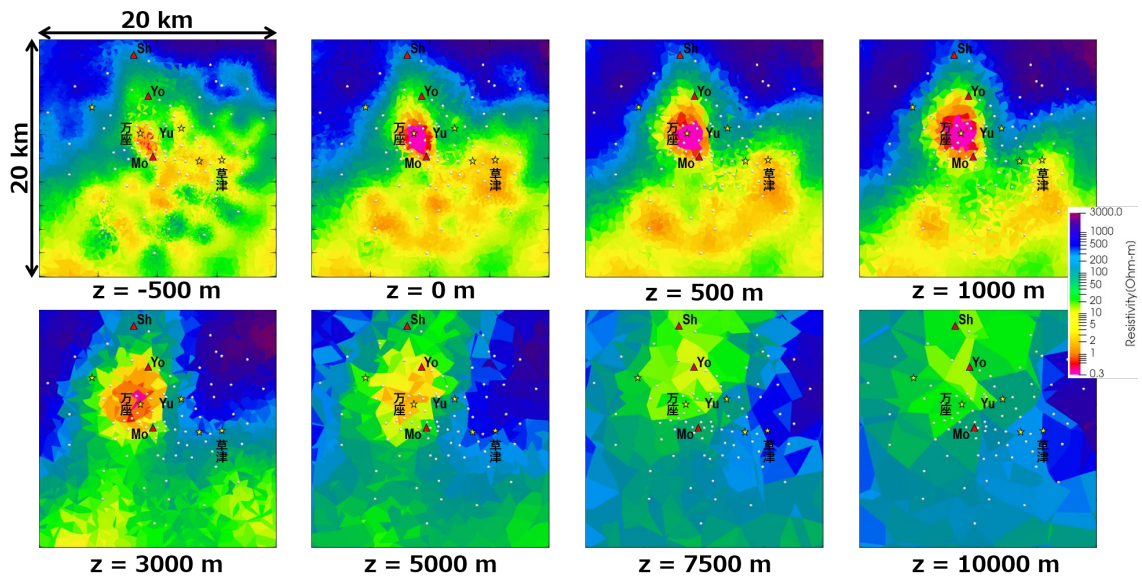


図5. 草津白根火山周辺の3次元比抵抗構造モデル。左上から標高500 m、0 m、-500 m、-1000 m、-3000 m、-5000 m、-7500 m、-10000 m の水平断面図を示す。Sh: 志賀山、Yo: 横手山、Yu: 湯釜、Mo: 本白根山。白点はMT観測点。

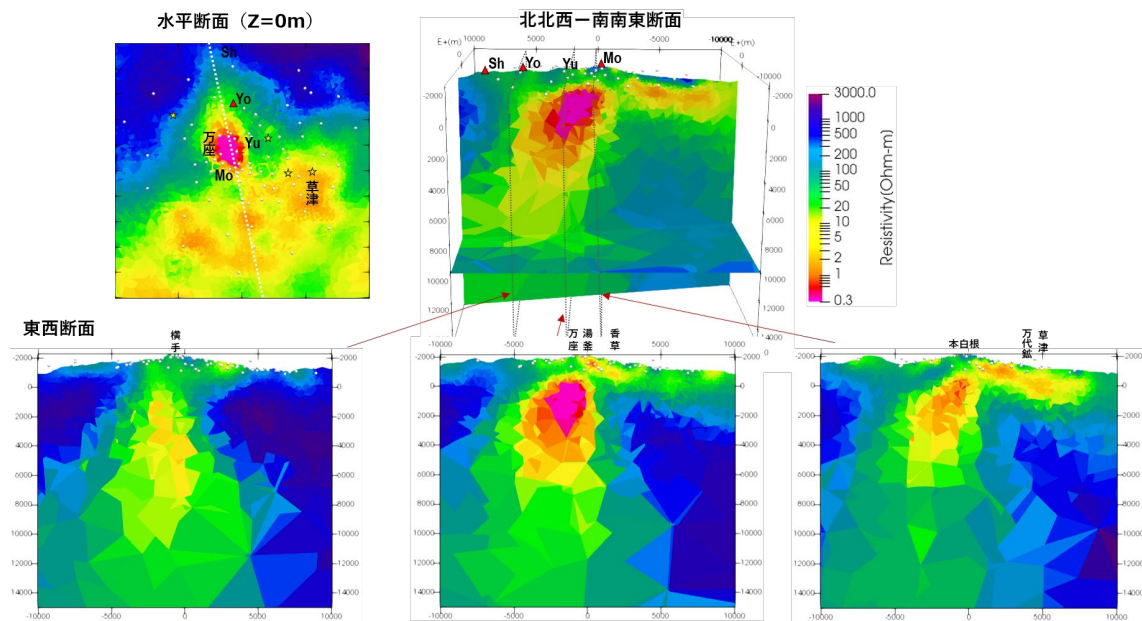


図6. 草津白根火山周辺の3次元比抵抗構造モデル。上段は、標高0 mにおける水平断面図と北北西—南南東断面図（断面の位置は水平断面図内の白点線）を示す。下段は、左から横手山、湯釜、本白根山を通る東西断面図。Sh: 志賀山・鉢山、Yo: 横手山、Yu: 湯釜、Mo: 本白根山。白点はMT観測点。

昨年度までのデータを用いた解析では、この低比抵抗体はさらに北側へ伸びていたが、今年度取得したデータにより、低比抵抗体の存在範囲をより精度よく制約することができた。一方、草津白根山の南側～東側にかけては、厚さ～2 kmの低比抵抗領域

が山体浅部に広く分布しており、深部に低比抵抗領域は見られない。この浅部の低比抵抗層は、以前から見つかっているスメクタイトに富む層^{2,6)}であると考えられる。草津白根山直下では、海拔0 mより深い地震はほとんど発生していない。すなわち、顕著な低比抵抗体内ではほとんど地震が発生していない。また、最新の研究により、湯釜西方の低比抵抗体の下部付近（海拔下5 km付近）に、広域のGNSS観測により推定された深部膨張源の存在が示唆されている。

以上のことから、今回推定された比抵抗構造により、草津白根山の深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路がイメージされた可能性がある。今後、熱水流動シミュレーションなどを用いて、この仮説を検証する予定である。

ii) 草津白根火山および周辺における地震観測

2018年1月23日本白根山噴火直後に本白根山周辺の4か所に地震計を設置した（図7のKSZ、KSI、KSHおよびKSKN）。2018年9月から2019年春にかけて草津白根山西方で地鳴りを伴う群発地震が発生したこと、深部膨張源が同じく草津白根山西方にあることがGNSS解析により示唆されたことから、2018年10-11月に地震観測点を追加整備した（図7のYMBJ、YMSP、SGKG）。さらに、2019年度にはKSHに傾斜計を追加整備したうえ、YMBJと併せてテレメータ化した。

2020年度は、これら観測点における連続観測を維持してデータを取得した。さらに草津町南部のKSKNには無線機を設置し、志賀高原で運用中のSGKG観測点には商用光回線を敷設した（図7）。これにより、東京工業大学草津白根火山観測所にて、草津白根山周辺10 kmの範囲で発生する地震の震源を定常作業にて決定する仕組みが構築され、冬季や活動活発時の欠測リスクの低減も実現できた。さらに、志賀高原地域に地震観

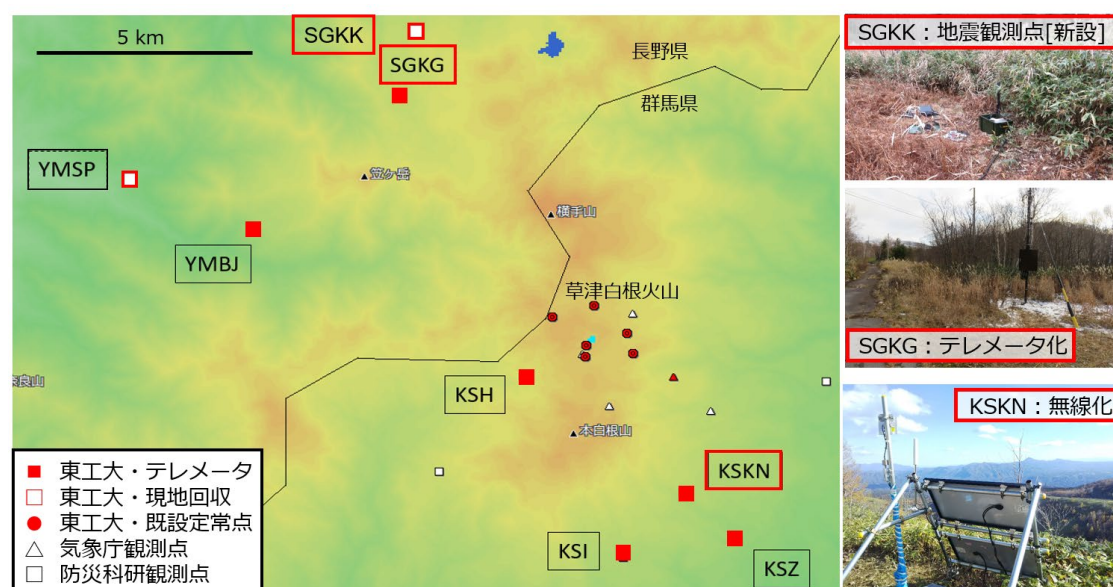


図7. 東京工業大学（赤）および他機関（白）の地震観測点配置図。ここで、■□は2018年本白根山噴火以降に設置された観測点に対応する。■はテレメータ式、□は現地収録式である。

測点SGKKをもう一台設置して、当該地域で発生する微小地震の震源決定精度向上のためのデータ取得を開始した。

本年度は、2019年度までに得られたデータのうち、特に草津白根山西方領域について、臨時観測点のデータも併せて検討した。図8に一元化处理で得られた気象庁地震カタログによる草津白根山西方領域の震源分布を示す。当該地域の地震活動は2011年頃から活発化が認められ、特に2018年9-12月に顕著な群発地震が発生した。当地で有感

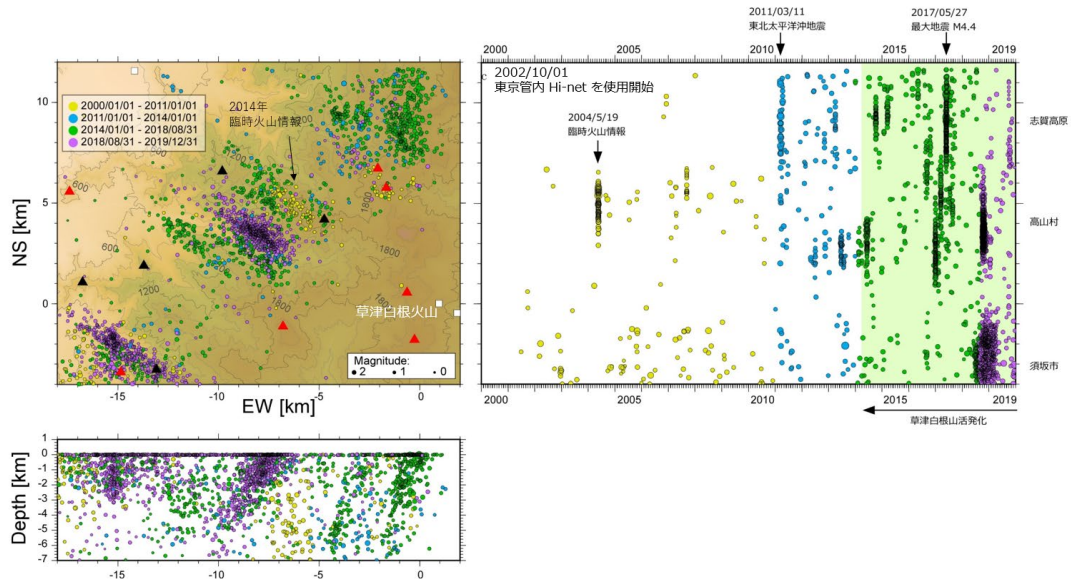


図 8. 草津白根山西方の震源分布図。震源情報は一元化处理に基づく気象庁地震カタログから引用した。

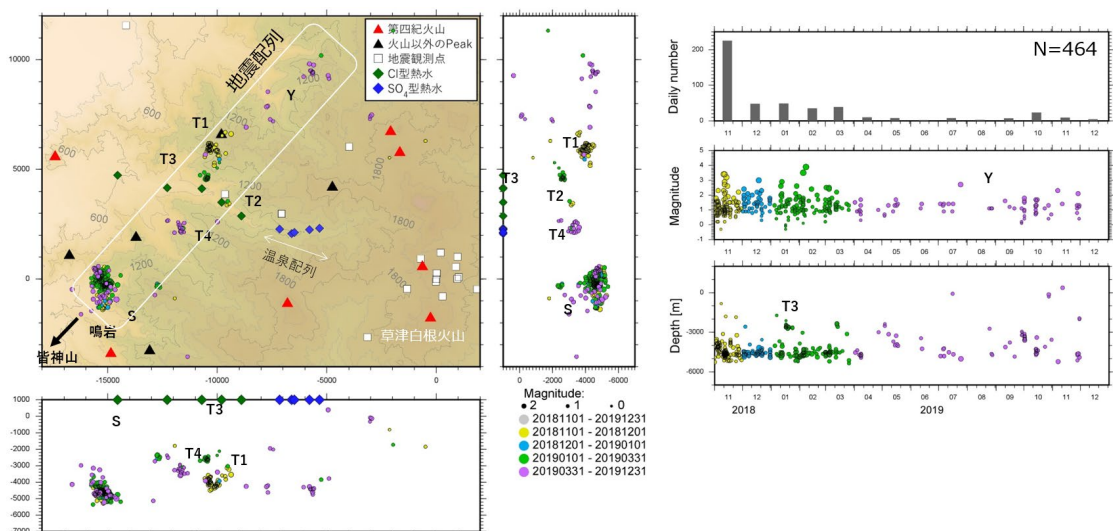


図 9. 東京工業大学による震源再決定結果（2018 年 11 月～2019 年 12 月）。月発生頻度、マグニチュードおよび深度の時間変化も併せて示す。図中の S、T1～T4 および Y は震源クラスターの呼称である。

となる群発地震は過去数10年間では発生しておらず、今回がこの期間で初めてである。図8によれば、複数の震源域が雁行し、一部はその配列が草津白根山の方角を向いているように見えている。しかし、観測点配置から震源分布の信頼性は低いと思われる。

上記の震源カタログから、2018年8月以降のイベント（図8の紫点）を抽出し、本学観測点（図7）および近隣の防災科学技術研究所観測点（N. NKNH）の波形記録を用いて、P・S波到着時刻から震源再決定を行った（図9）。その結果、微小地震の複数のクラスターが存在すること、それらが北東～南西に配列していることが明らかとなった。この配列は長野盆地西縁断層系の走向と調和的であるほか、その南西延長は松代群発地震の震源域の皆神山周辺に相当する。その一方で、震源配列は草津白根火山の方角を向いていない。以上のことから、群発地震は当地域に伏在する北東～南西走向の断層の活動によると思われる（図10）。

当該地域には温泉湧出が認められる。この地域の温泉は、 Cl 、 SO_4 、 HCO_3 、 Na および Ca 等の組成比にもとづき、化石海水に関係したグリーンタフ型と推定されている。さらに、 Li/Cl 比が高く、高温を経験したスラブ脱水流体の関与が示唆されている。2018年以降に実施している温泉成分の繰り返し成分分析の結果、震源域に近い一部の温泉については塩化物イオン（ Cl ）濃度が明瞭に上昇したのち、ゆるやかに低下する成分変動が認められた。前述のこの地域の温泉の特徴と併せて考えると、2018年の震源列は伏在する断層に沿って深部流体が上昇することで発生したと考えられる。

草津白根山西方領域には、草津白根山のマグマ溜りに対応すると思われる深部膨張源の存在が指摘されている。本研究で推定した伏在断層の周辺に湧出する温泉水に火山性流体の関与を示す化学的特徴は認められない。また、より草津白根山に近い温泉水については、その $\delta^{34}\text{S}$ および $^3\text{He}/^4\text{He}$ から火山ガスの関与が考えられるが、2018年の群発地震に対応する変動は認められない。以上のことから、深部圧力源の増圧に



図10. 草津白根山西方領域の地学環境のまとめ。△は第四紀火山の位置を、赤線は長野盆地西縁断層系を示す。黒および青で描かれたコンターはブーゲー異常を示す。赤色立体図を含む基図の作成には、産業技術総合研究所「地質図Navi」WEBサービスを使用した。

より、草津白根山・湯釜や本白根山の火山活動活発化や、同火山西方の群発地震活動が併せて引き起こされたと考えられる。

iii) 草津白根火山および周辺におけるGNSS観測

草津白根火山の地下深部活動に伴う地殻変動を捉えるために、2017年度に整備したGNSS繰り返し観測網を用いて、GNSSキャンペーン観測を引き続き実施した（図11）。今年度で4年目（計5回目）となるデータ取得作業は、10月14日～10月27日にかけて行った。図11の水色の星印で示す6観測点において測定作業を実施したが、電源トラブルにより1観測点（NHH1）のデータは取得できなかった。今年度は、コロナウィルスの影響のためスケジュールが厳しくなったため、再測定をすることができず、NHH1を除く5観測点のみのデータを用いて解析を行った。なお、連続観測点については、一部欠測が生じたものの順調にデータの蓄積が進んだ。データの処理・解析方法は例年と同様であり、取得したデータをRINEXファイルに変換し、GNSSデータ解析ソフト（GIPSY OASYS II Ver. 6.3⁷⁾）を用いて座標値を推定した（表1）。今年度は、全般的にやや測定誤差が大きかった。

得られた座標値から、連続観測点のデータと併せて火山用地殻活動解析支援ソフト

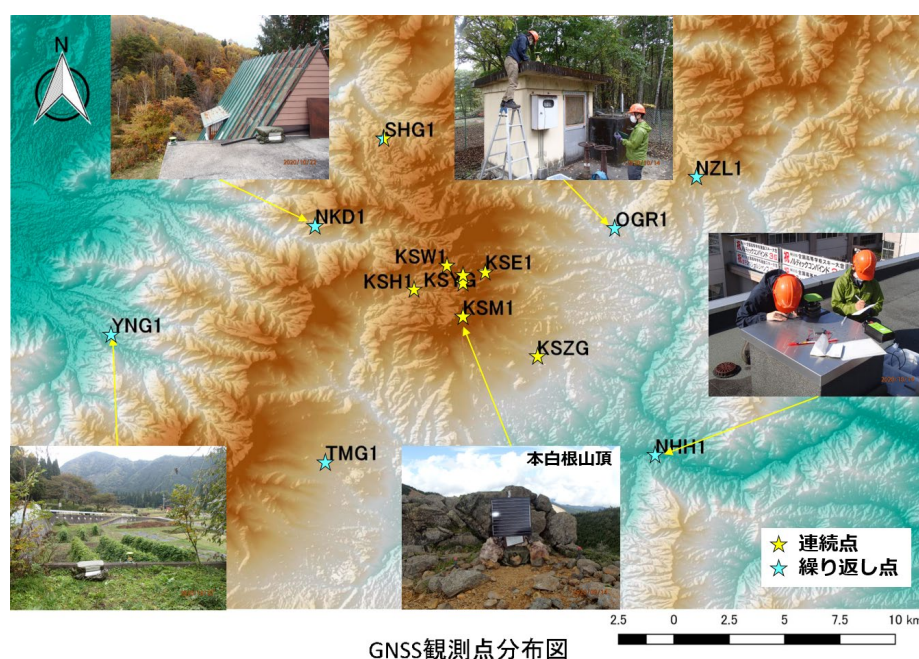


図11. 2017年より整備した東京工業大学のGNSS観測点分布

表1. 解析により得られた各測定点の座標値（測地系はWGS84）

| No. | ID | 名称 | 観測期間 | ID | x (m) | y (m) | z (m) | sdx (mm) | sdz (mm) | sdz (mm) |
|-----|------|-------|-------------|------|---------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|
| 1 | NZL1 | 野反湖 | 10/14-10/21 | NZL1 | -3845020.8920 | 3383649.6116 | 3790962.5072 | 7.2 | 3.7 | 5.7 |
| 2 | OGR1 | 小倉 | 10/14-10/21 | OGR1 | -3843649.7867 | 3387262.1163 | 3788400.2551 | 50.7 | 91.4 | 92.7 |
| 3 | NHH1 | 長野原高校 | 10/14-10/21 | NHH1 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 4 | KSM1 | 本白根山頂 | 連続点へ移行 | KSM1 | — | — | — | — | — | — |
| 5 | SHG1 | 信州大志賀 | 連続点へ移行 | SHG1 | — | — | — | — | — | — |
| 6 | NKD1 | ニュー笠岳 | 10/22-10/27 | NKD1 | -3834830.1004 | 3397513.5533 | 3788738.9695 | 5.3 | 4.8 | 4.8 |
| 7 | TMG1 | 東海大蓼恋 | 10/21-10/27 | TMG1 | -3840963.9826 | 3402336.8113 | 3778083.1654 | 14.0 | 12.2 | 12.6 |
| 6 | YNG1 | 米子不動尊 | 10/22-10/27 | YNG1 | -3830962.9346 | 3406351.3096 | 3783383.8224 | 18.0 | 15.7 | 11.5 |

(MaGCAP-V⁸⁾)を用いて、変位変化量の時系列や変位変化分布を求めた。その際、草津白根火山から北北東へ約25 km離れた GEONET の電子基準点 (長野栄: 020982) を基準とした。図12および図13に2019年10月～2020年10月の1年間、および2017年10月～2020年10月の3年間の変位分布をそれぞれ示す。いずれの期間においても、地下深部におけるマグマ溜りの膨張 (球状圧力源) やマグマの貫入 (板状圧力源) に伴う顕著な地殻変動は認められなかった。本事業による繰り返し観測開始前の GEONET の広域の GNSS 観測データを用いた解析によれば、深部膨張源が、本観測網の内側の群馬県と長野県の県境付近 (白根山西方) に推定されている。比抵抗構造からも白根山西部に顕著な低比抵抗領域が推定されており、今後も本観測を継続してゆくことが必要である。

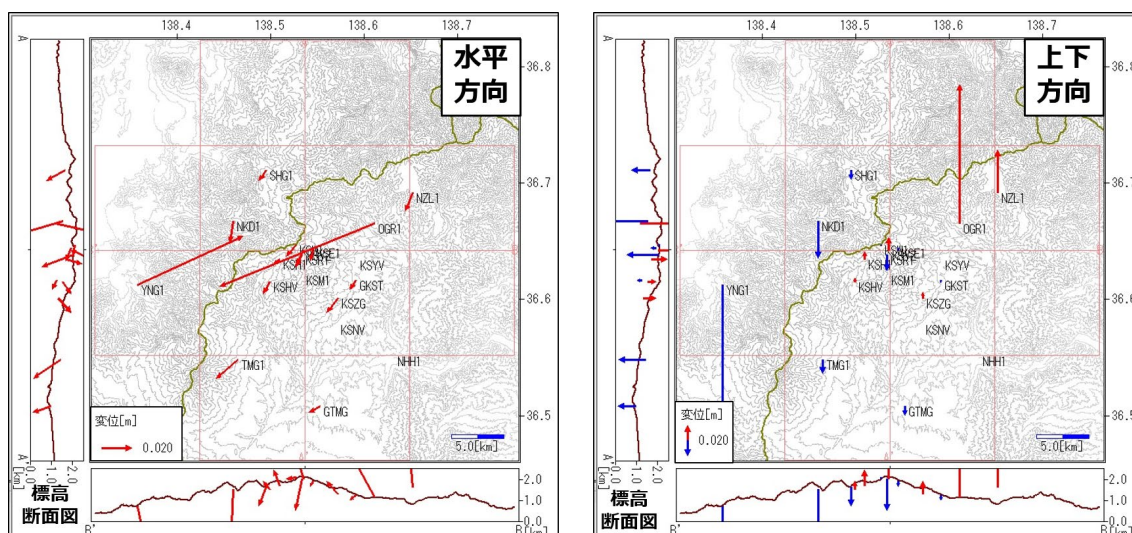


図12. 2019年10月～2020年10月における変位変化分布。左) 水平変化、右) 鉛直変化。GEONETの電子基準点 (長野栄) を基準とする (MaGCAP-V⁸⁾)を用いて作成)。

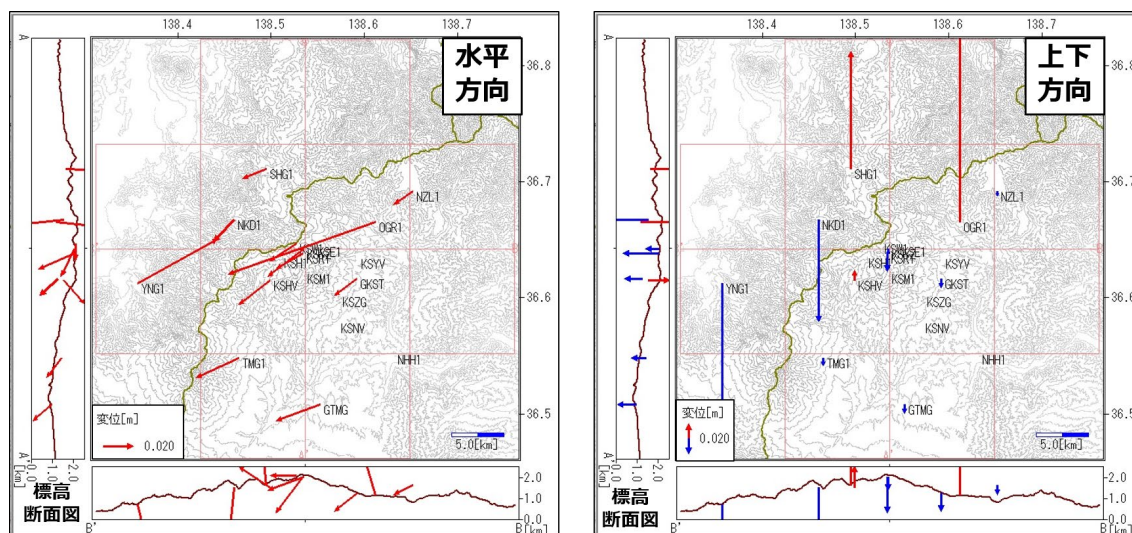


図13. 2017年10月～2020年10月における変位変化分布。左) 水平変化、右) 鉛直変化。GEONETの電子基準点 (長野栄) を基準とする (MaGCAP-V⁸⁾)を用いて作成)。

b) 蔵王火山における機動観測

i) 蔵王火山における電磁気構造探査

蔵王山は、有史以来馬の背カルデラ内の火口湖御釜において水蒸気噴火を繰り返しているが⁹⁾、現在御釜近傍では顕著な噴気活動は見られない。一方、1940年に御釜の北東約1.5 km離れた丸山沢で小規模な水蒸気噴火を起こし⁹⁾、現在は小規模な噴気がそこで発生している。どちらの場所で近い将来の噴火を引き起こすポテンシャルが高いかを判断する上で、これら領域下の火山性流体（熱水、マグマ）又は変質帯（粘土層）の分布は有力な情報となる。火山地帯における地下の電気比抵抗構造探査による高伝導体は火山性流体又は変質帯を反映しているとされ、可聴域周波数のMT法（AMT法）は火山地帯浅部の比抵抗構造探査に最も効率的手法である。本課題に先立ち、科学技術・学術審議会建議「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、2014年9月に御釜近傍のAMT法探査が行われ（図14）、火口湖面からの深さ約350 m（標高約1200 m）に低比抵抗体が推定されたが、分布は極めて限定的で過去の噴火活動の名残である変質帯であると解釈されている¹⁰⁾。2014年の観測点分布は平面的には500 m程度の広がりであり、より広範囲でデータを取得することにより、より深い領域の分解能向上が期待できる。以上の2点を踏まえ、本課題では図14に示すような御釜から丸山沢に至る地域を含んだ領域でのAMT法探査を計画し、前年度に40観測点の選定と許認可手続き終え、2020年9月28日から10月21日に外注業者によってAMT法観測を実施した。

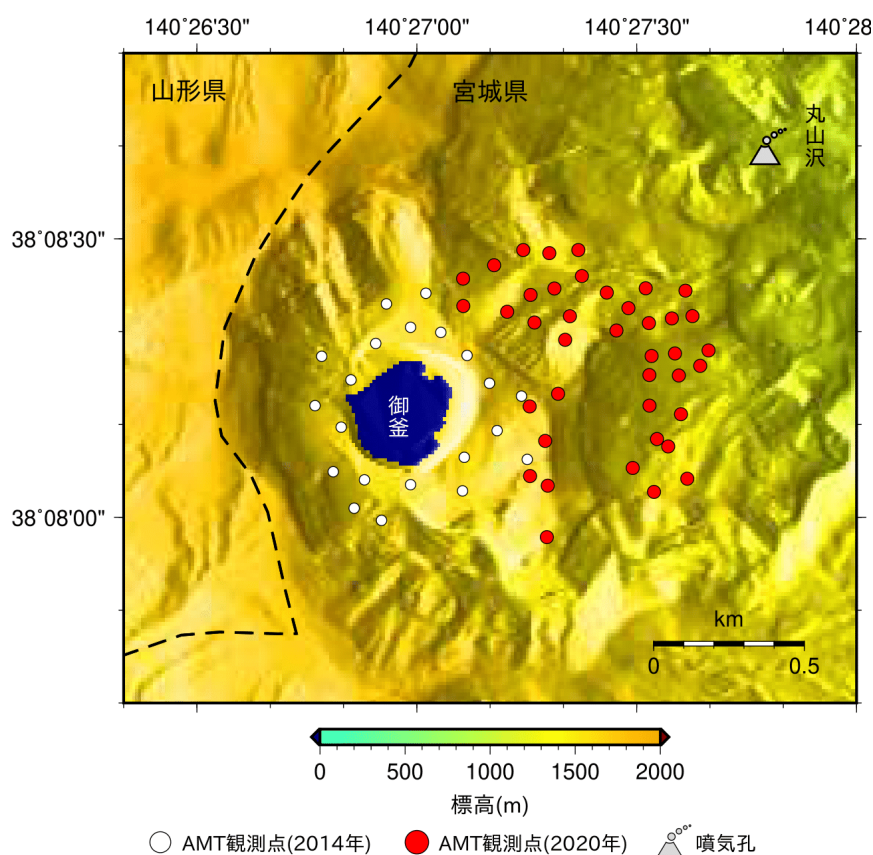


図 14. AMT 探査観測点図。破線は宮城・山形県境を示す。

観測では本事業で購入した機材と東京大学地震研究所の管理する共同利用機器である Metronix 社製 ADU07e(制御装置)及び MFS07e(磁力計)を合わせて 5 セット使用した。各観測点の地表面で観測された地磁気と地電流それぞれの時間変化を周波数領域に変換し、ノイズが多い時間区間を自動的に取り除いて AMT 周波数応答関数を求めるデータ処理に BIRRP 法¹⁾を用いた。各観測点のノイズ判定に用いる参照観測点での地磁気時間変化は、御釜から西南西に約 5 km 離れた蔵王ライザスキー場で観測した。ここでは、2014 年に取得したデータも併せて解析し、その結果について記述する。図 15 はデータ処理によって得られた位相テンソル行列式平方根の逆正接、 $\tan^{-1}(\Phi_2)$ を示したものである。AMT 探査では地電流測定時の電極周辺に静電荷が溜まり、データノイズとして全周波数に影響を与える¹¹⁾。位相テンソルはこの影響を打ち消した指標である¹²⁾。その逆正接は 45° を超えると観測点直下の高伝導物体、 45° を下回ると高比抵抗物体の存在を示唆する¹³⁾。周波数は電磁波の表皮効果・表皮深度に対応して、低周波数ほど地下の深い構造、高周波数ほど浅い構造を反映する。表皮深度は比抵抗値にも依存するが、平均的な地下比抵抗を $100 \Omega\text{m}$ と仮定すると、8、128、512 Hz は地表から 1.8、0.44、0.22 km の表皮深度に相当する。図 15 で示した、8、128、512 Hz における $\tan^{-1}(\Phi_2)$ の空間分布では、一貫して御釜東側の外輪山に当たる五色岳付近に極大領域が現れている。このことから、蔵王山直下の火山性流体または変質帯の分布は主に五色岳直下に分布することが示唆される。

図 16 はデータ処理によって得られた実部のパーキンソンベクトル¹⁴⁾を示したものである。パーキンソンベクトルは、AMT 探査における地電流の時間変化の代わりに磁場の鉛直成分の時間変化を用いた周波数応答から得られる。パーキンソンベクトルは

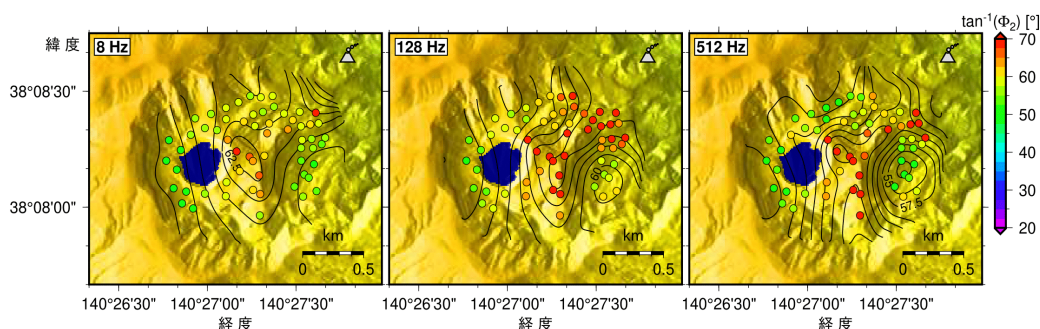


図 15. 8、128、512 Hz の位相テンソル行列式平方根逆正接の空間分布。
等値線は 2.5° 間隔。

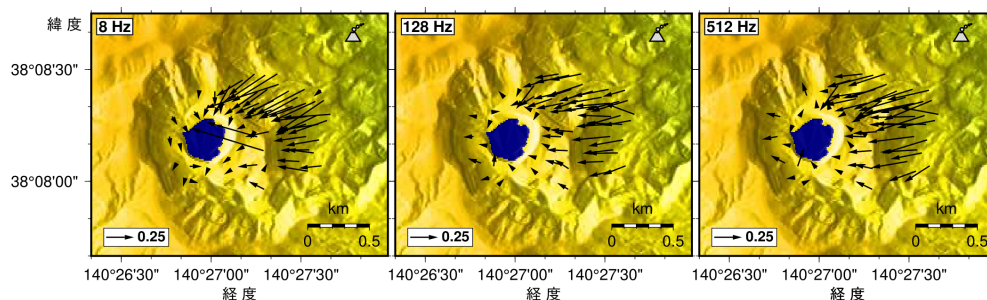


図 16. 8、128、512 Hz の実部パーキンソンベクトル。

各観測点下の周波数に対応する深さにおいて、側方方向に相対的高伝導物体が存在する方向を指す¹⁴⁾。図 16 で示した各観測点のパーキンソンベクトルは、2020 年の観測点では概ね西から西南西方向の御釜方面を指向する。2014 年の観測点におけるパーキンソンベクトルの大きさはほぼ 0 で、パーキンソンベクトルによる結果でも五色岳直下から御釜直下に火山性流体又は変質帯が分布することを示唆する。一方、北東に位置する丸山沢方面を指向するパーキンソンベクトルは皆無で、地下の顕著な火山性流体や変質帯の分布は、丸山沢側よりも御釜側に存在することを示唆する結果となった。

これらの AMT 周波数応答関数、磁場の周波数応答関数両方を用いて、3 次元比抵抗構造逆問題解析を行った。逆問題解析には、WSIVN3DMT 解析コード¹⁵⁾を用いた。逆問題解析で用いたデータの周波数は 1 Hz から 2 の冪乗で 8192 Hz までの 14 周波数で、データ数は 60 観測点×14 周波数×12 応答関数=10080 個である。比抵抗モデル空間は、御釜東側の外輪山である五色岳付近を中心に±14 km の領域と、深さ 30 km の領域を南北 38×東西 48×深さ 75=106219 ブロックで解析を行い、中心付近の最も細かいブロックの大きさは南北 30 m、東西 25 m、厚さ 10 m とした。国土地理院による 10m メッシュ電子標高データによって地形を考慮し、御釜の火口湖は深さ 100m、湖水 5 Ωm として固定し、モデルに組み込んでいる。

ここでは現時点での暫定的な最尤比抵抗構造モデルについて報告する。このモデルによる計算値と観測データの一致度は、標準誤差で規格化した残差二乗和平均の平方根(RMS misfit)で 5.78 となる。図 17 は標高 1250m、450m、海拔下 550m それぞれにおける地下の比抵抗モデル平面図である。標高 1250 m の平面図に見られる図 15、16 で示唆された御釜東側の高伝導体は標高 1500m 付近から出現し、標高 900m まで分布している。標高 450m の平面図に見られるような平均からやや比抵抗の高い状態が標高 900m から海拔下 300m まで続くが、海拔下 300m 以深において海拔下 550m の平面図に見られるような 30Ωm 以下のやや比抵抗の低い極小領域が図の中央付近に認められる。

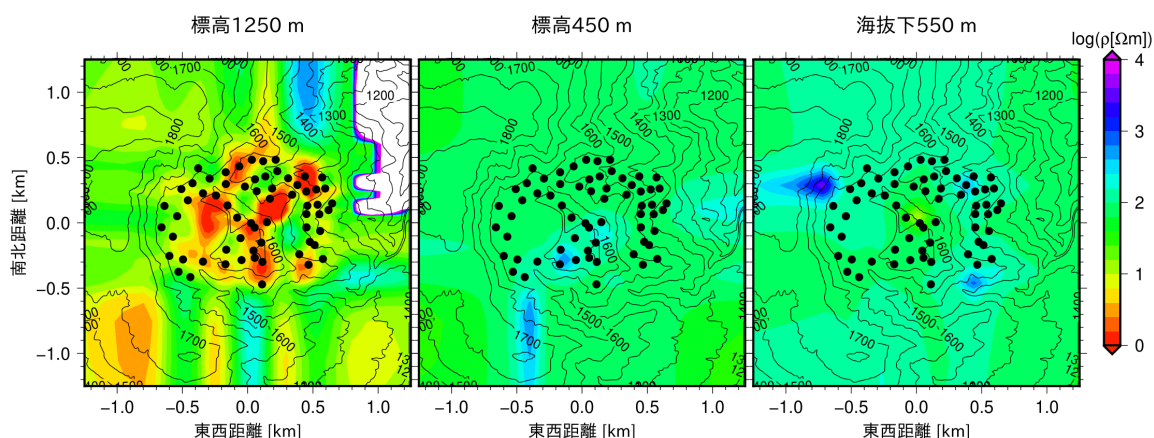


図 17. 標高 1250 m (左図)、450 m (中央図)、海拔下 550 m (右図) の暫定最尤比抵抗モデル平面図。背景の色が比抵抗値、黒点が観測点、実線が等高線を示す (間隔 50 m)。白い部分はモデルに組み込まれた地形によって現れる空中の領域。

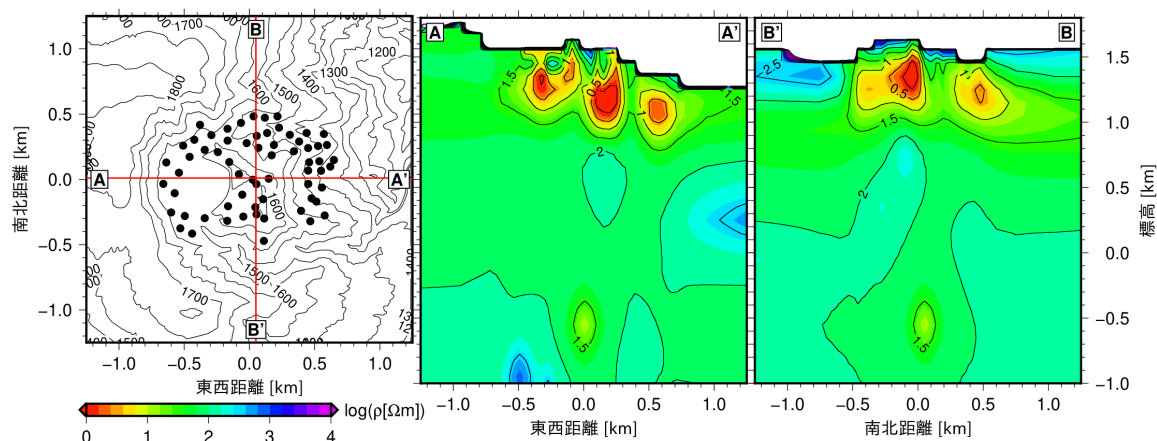


図 18. 左図の A-A'、B-B' の位置で示した東西（中央）、南北（右図）の暫定最尤比抵抗モデル断面。

この様子は図 18 に示した東西及び南北断面図で確認できる。海拔下 500m 付近に $30\Omega\text{m}$ の比抵抗の極小領域がみられ、この位置は蔵王山の火山性地震の震源域極近傍にあたる。本事業で実施した AMT 探査データにより、このやや高伝導の構造が初めて明らかになった。また、2014 年のデータで推定されていた標高 1000 から 1500m の高伝導領域は、 $3\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗体の大きさでみると、今回得られたモデルでは 300 m 程度の広がりを持ち、以前推定されていたよりも大きい可能性が高いことが明らかとなった。今後は比抵抗逆問題解析のパラメータ探索範囲を拡張して比抵抗モデルの信頼性を高めるとともに、長周期地震によるモーメントテンソル解や開口クラック解、地殻変動データによる膨張源との空間的位置関係を比較検討する。

なお、この成果は JpGU-AGU Joint meeting（オンライン開催）で発表し、関連研究者との議論により、今後の解析方針や結果の解釈について、貴重な助言を得た。

ii) 蔵王山における機動地震観測

蔵王山では、2012年頃から深さ 20～35 km で発生する深部低周波地震が活発化し、2013年以降にはやや深部（深さ約 6 km）を圧力源とすると思われる山体膨張や浅部（深さ 2 km）における全磁力変化、火山性地震・長周期地震（卓越周期約 10 秒）の増加など、火山活動の活発化の兆しが見られた¹⁶⁾。図 19 に示した火山性地震の活動推移に見られるように、火山活動は全般的に低下傾向となってきたが、今後の噴火活動のポテンシャル評価のためには、水蒸気噴火を引き起こす地下浅部の流体系の解明は重要である。火山性地震や長周期地震の発生領域や活動推移を詳細に精査することはそのための有力な手がかりの一つと考えられる。

蔵王山では、東北大学が 1992 年に想定火口近傍及び火山体周辺の 2 地点に、気象庁が 2010 年に火口湖御釜の西南西約 5 km に定常観測点を設置して以降、定常的な地震観測・火山性地震のモニタリングが行われてきた。また、2013 年以降の火山活動の活発化を受けて、東北大学及び気象庁では観測網の強化

を行い、想定火口域周辺で発生する火山性地震の震源決定精度が大幅に向上した。一方で、これらの観測点の多くは既設の道路沿いなどに展開されているため、火山性地震発生領域の南側及び西側における地震観測は手薄であった。また、火山活動に特有の長周期振動現象を捉えるために有用な広帯域地震観測点が想定火口域近傍には少ない。そのため、想定火口域直下の浅部熱水系を解明し噴火ポテンシャル評価に資する情報を得ることを目的に、本事業において令和2年度に3点の地震機動観測点を想定火口域近傍に新設した。既設観測点と本事業で設置した観測点の配置を図20及び表2に示す。

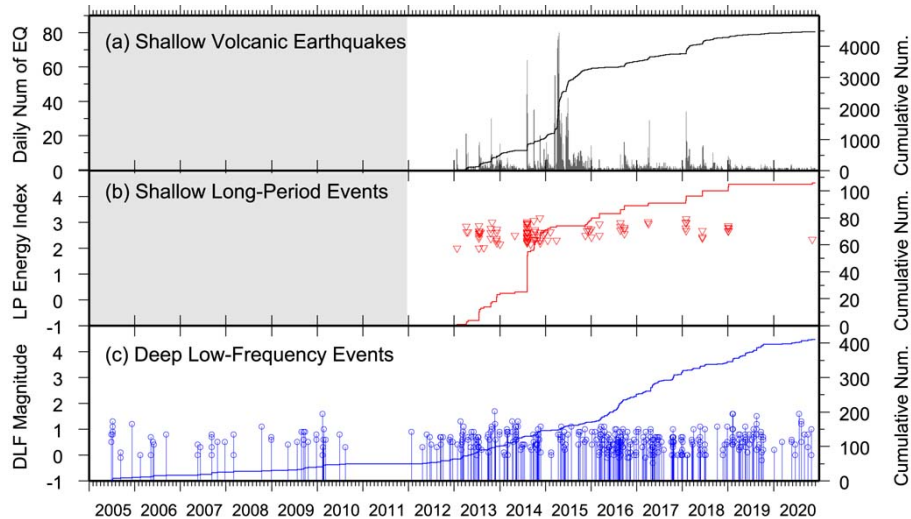


図 19. 蔵王山における火山性地震の活動推移。(a) 火山性地震（A型・B型）の日別発生数及び累積発生数。蔵王観測点（TU.ZAS）において頂点間振幅が $0.8 \mu\text{m/s}$ 以上のものを計数。(b) 浅部長周期地震（卓越周期約 10 秒）の M-T ダイアグラムと累積発生数。(c) 蔵王山直下の深部低周波地震の M-T ダイアグラムと累積発生数（一元化震源による）。(a) 及び (b) の灰色は未精査の期間を表す。

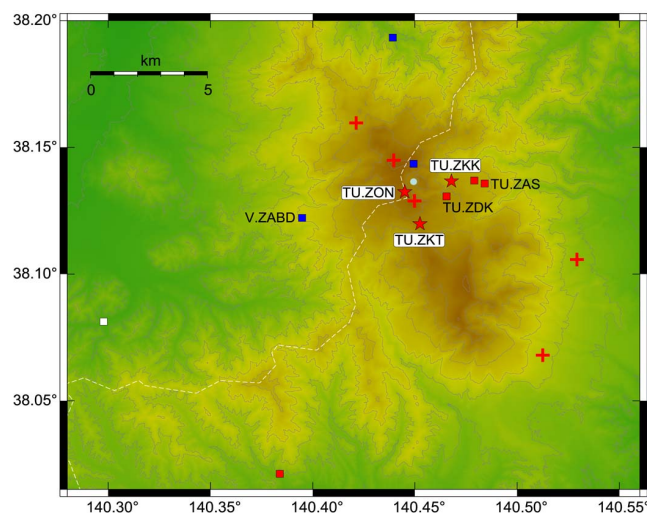


図 20. 蔵王山想定火口域周辺の地震観測網。★が本事業で設置した機動観測点。■と+はそれぞれ東北大学の既設定常観測点、既設機動観測点。■は気象庁の既設定常観測点。●は火口湖御釜。

本事業で設置した機動観測点は、いずれも登山道沿いなどの商用電源や電話回線が利用できない地点であるため、観測機器の給電には太陽電池パネルと鉛蓄電池を用い、データ伝送には携帯電話回線網を利用した。地震計の設置作業については、新型コロナの影響もあり当初予定していた役務外注による資材運搬・設置が困難となったため、本事業で雇用している博士研究員やリサーチアシスタントを含む東北大学関係者が主体となり実施した。各観測点では、ハンドオーガーを用いて掘削した縦穴の底にコンクリート平板等を組み合わせた簡易地震計台を作り、地震計を設置した。また、蔵王山では冬季を中心に強風が吹くことが多く、太陽電池パネル架台や機器設置パンザマストなどがノイズ源となることが想定されたため、データロガーや太陽電池パネルなどは低背の収納ボックスに収納してノイズ軽減を図った。設置した機動観測点の例を図21に示す。携帯電話回線網を利用したデータ伝送は、本事業で実施している地震波動場連続解析システムで開発・試験を進めてきたシステムを利用したが、さらなる省電力化のためにデータロガーと通信装置をシリアル通信で通信するためのソフトウェアを今年度本事業で開発した。

表2. 本事業で蔵王山に設置した観測点

| 観測点名 | 緯度（度） | 経度（度） | 標高（m） |
|---------------|---------|----------|-------|
| 蔵王御釜西（TU.ZON） | 38.1324 | 140.4449 | 1711 |
| 蔵王刈田峠（TU.ZKT） | 38.1199 | 140.4525 | 1545 |
| 蔵王駒草平（TU.ZKK） | 38.1367 | 140.4679 | 1363 |



図21. 観測点の設置例。（左）蔵王御釜西観測点（TU.ZON）。（右）蔵王駒草平観測点（TU.ZKK）。本事業で新設した機動観測点では浅い穴底に地震計を設置した。そのため、周辺樹木の振動等に起因するノイズを避けるために樹木等の少ない地点を設置箇所として選定した。

図22に新設した機動地震観測点において観測された長周期地震の例を示す。蔵王山で断続的に観測されている長周期地震(卓越周期約10秒)は、図22(a)、(b)に示すように短期的な地盤変動(傾斜変動・準静的変位)を伴い、モーメントテンソル解析によって推定されたその振動源は、御釜やや東側に位置する東北東-西南西走向の傾斜開口亀裂における増圧、圧力緩和過程を示唆するものである。また、その高周波成分は数十秒以上の長い継続時間を呈し、浅部熱水系における火山性流体の挙動を強く反映したものと考えられている¹⁷⁾。本事業で新設した3点の機動地震観測点では、この幅広い周波数帯に渡る振動現象を高精度に捉えることができており、今後の観測データの蓄積により長周期地震の発生メカニズムの解明が進むことが期待できる。

本事業で新設した機動観測点では、長周期地震以外の火山性地震(主にB型地震)も捉えられている。機動地震観測点設置以降の地震活動は低調であるため、火山性地震の発生領域の精査はデータの蓄積を待つ必要があるが、長周期地震の振動源と火山性地震発生源の関係を精査することは今後の課題の一つである。

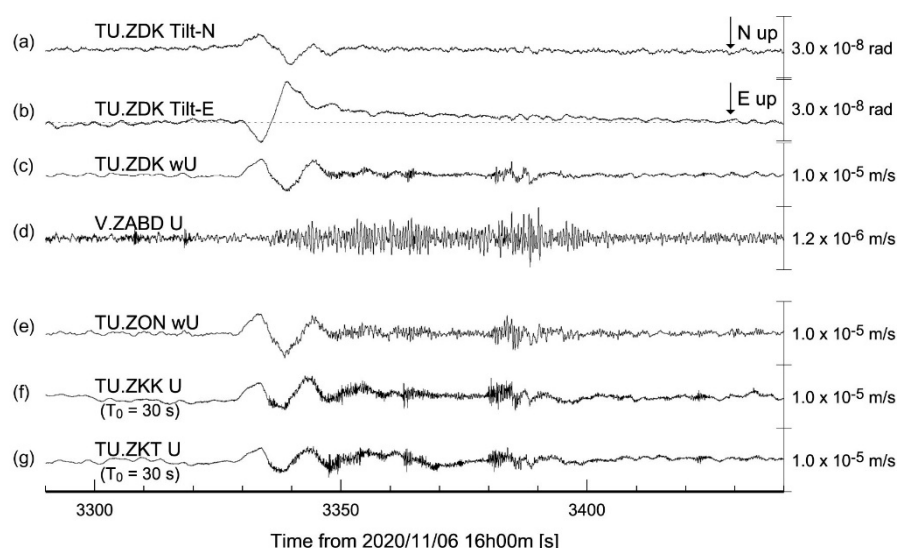


図22. 長周期地震とそれに伴う傾斜変動・高周波振動の例： 2020年11月6日 16時台。(a)～(c) 既設の蔵王大黒天観測点 (TU.ZDK) における傾斜記録及び上下動速度記録。(d) 気象庁坊平観測点 (V.ZABD) における上下動速度記録。(e)～(g) 本事業で新設した機動地震観測点3点における上下動速度記録。新設機動地震観測のうち2点は、電源容量の制約から今冬は短周期地震計で観測しているため、(f)、(g) は固有周期30秒相当に機器特性を補正して得た波形。Tilt-N、Tilt-E はそれぞれ傾斜計の南北、東西成分、wU は広帯域地震計の上下動成分、U は短周期地震計(固有周期1秒)の上下動成分を表す。

図23に想定火口域近傍で2016年以降に発生したB型地震の震源分布を示したが、震源は火口湖御釜と五色岳直下の海水準付近の狭い領域に集中している。また、震源は南西下がりの傾斜した分布をしており、長周期地震源（傾斜開口亀裂）とはやや斜交した空間的位置関係となる。この震源分布は観測点配置に影響されている可能性も考えられるが、長周期地震源と火山性地震震源域が異なる分布を持ち斜交する同様の事例は阿蘇山など浅部熱水系の発達した他の火山でも見られているため¹⁸⁾、新設機動観測点のデータを含めた高精度の震源決定を進めることが必要である。

以上のように、本事業の一環として、蔵王山想定火口域近傍に機動地震観測点3点の新設を行い、有用な観測データが得られるようになった。今後は、機動観測点における観測を継続するとともに、本事業で得られた比抵抗構造や地殻変動源と火山性地震活動領域の比較や火山性地震活動の再精査を進める計画である。火山活動の再精査にあたっては、2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発 の e)地震波動場連続解析システムの開発 の節で後述するように、機械学習を用いた地震タイプの分類なども検討を行う予定で

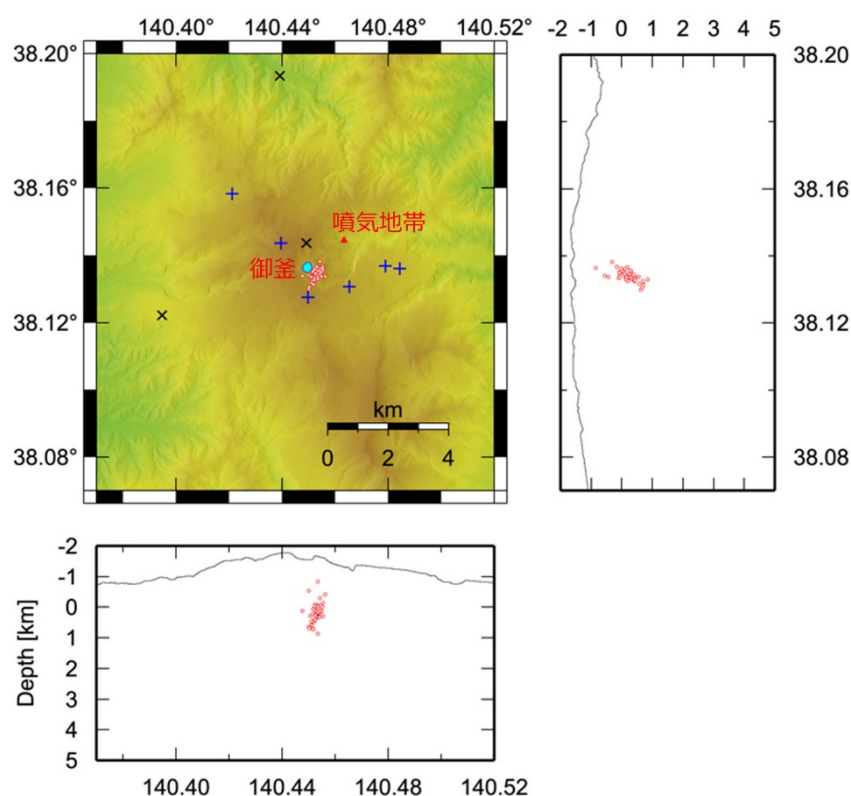


図23. 蔵王山想定火口域周辺で発生する火山性地震の震源分布。2016年1月から2020年12月の期間に発生したB型地震のうち、4観測点6相以上の読み取り値があるものを表示。

ある。

iii) 傾斜計観測

本事業では、蔵王火山直下の地殻変動源・熱水系の空間分布及びその時空間変化を捉えて火山噴火切迫性評価に資するため、傾斜観測網の強化も図っている。令和元年度には想定火口域東側に御釜東傾斜観測点を設置し(図24)、令和3年度に想定火口域西側に傾斜観測点を新設するため設置場所の選定を行い(図25)、許認可に必要な書類作成を業者に依頼するなど準備を進めた。

御釜東傾斜観測点(ZOKE)では、データの蓄積が順調に進んでいる。図26には、図22で示した長周期地震発生時の傾斜記録を示した。蔵王大黒天観測点(ZDK; 機器設置深度120 m)では、明瞭な傾斜変化が記録されているのに対して、ZOKE観測点では、ZDK観測点に比べてSN比が十倍程度悪いこともあって、長周期地震に伴う変化は記録できていないことがわかる。ZOKE観測点には、別予算でGNSS連続観測システムも併設しており、図27に気象庁の坊平観測点との基線長(約7.3 km)の時間変化を示す。バラつきは20 mm以内に収まって



図 24. 蔵王山周辺の傾斜観測点分布（上）と令和元年度に設置した御釜東傾斜観測点竣工時の写真（下）。

おり、安定に稼働している。

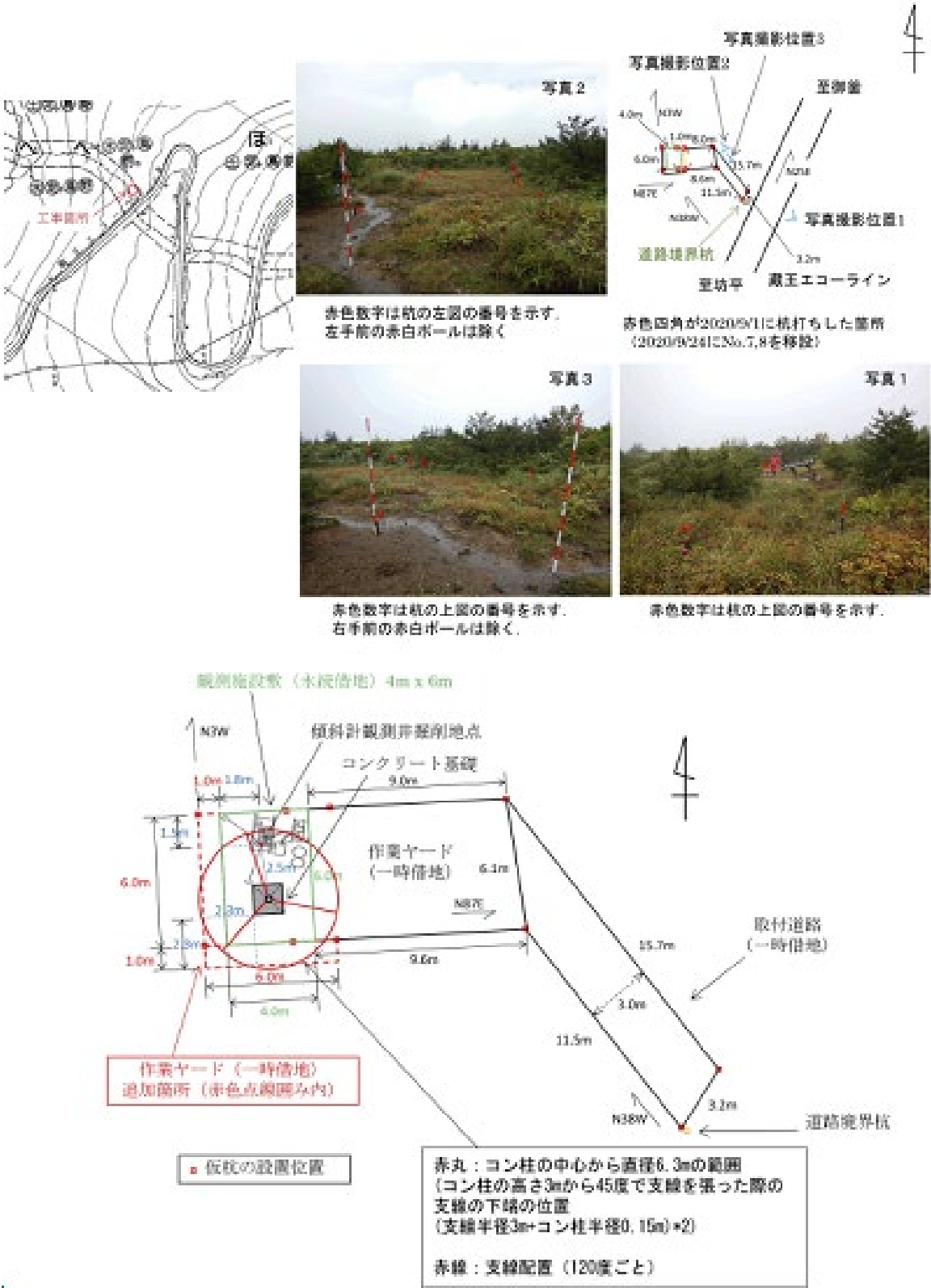


図 25. 令和 3 年度に設置予定の御田ノ神傾斜観測点。

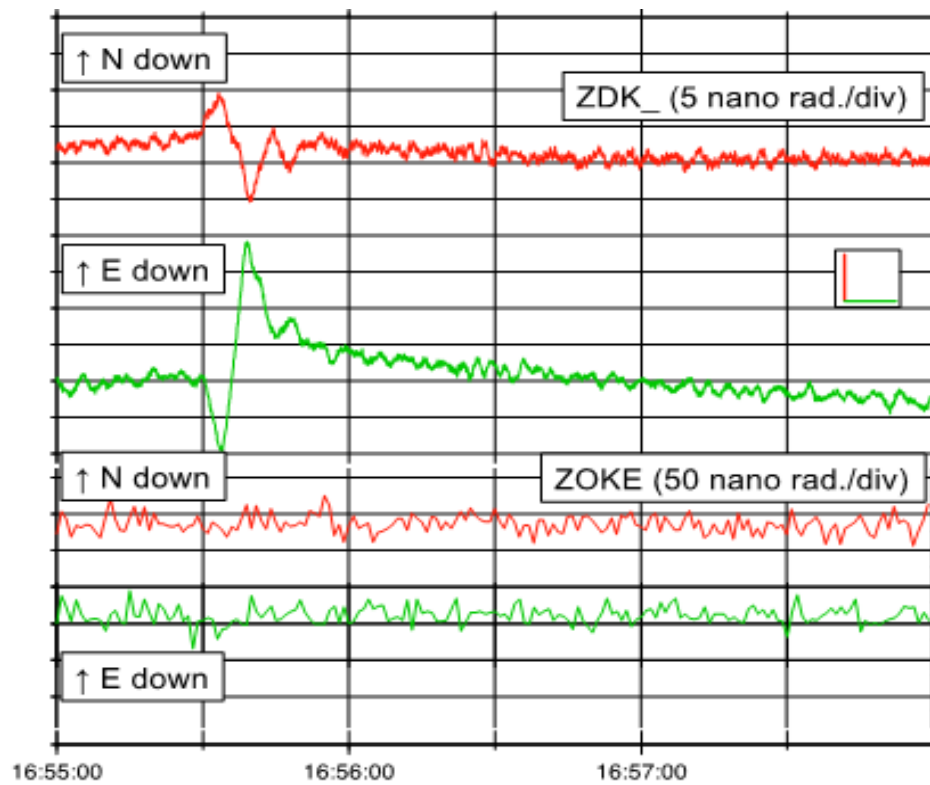


図 26. 2020 年 11 月 6 日 16:55 に発生した長周期地震に伴う傾斜変動。上が蔵王大黒天観測点 (ZDK)、下が御釜東観測点 (ZOKE)。赤が北向き傾斜成分、緑が東向き傾斜成分を示す。

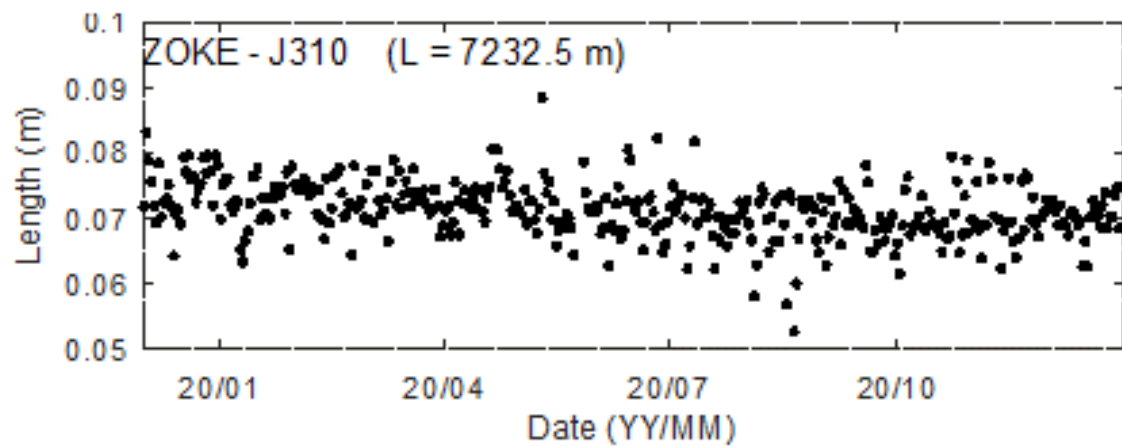


図 27. GNSS 連続観測により得られた基線長変化。御釜東観測点 (ZOKE) と気象庁の坊平観測点 (J310) の間の基線。バラつきは概ね 20 mm 以内に収まっており、安定に稼働している。

c) 有珠山における機動観測準備

令和 3~4 年度に機動観測を計画している有珠山では、機動観測を効率的に実施するための準備として、令和 2 年度に土壤拡散 CO_2 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。以下それぞれについて詳述する。また、2021 年 3 月に起こった群発地震活動についても簡単に報告する。

i) 土壤拡散 CO_2 放出率観測

有珠山では、2000 年噴火の約半年前に、土壤拡散 CO_2 放出率が増加したことが報告されている (Hernández et al., 2001¹⁹⁾)。有珠山の場合、前兆有感地震の発生から噴火開始までの猶予が数日程度しかないことを考えると、半年前に噴火の切迫性を把握できる可能性のある指標として、土壤 CO_2 放出率は極めて重要な観測項目のひとつであるといえる。しかしながら、2000 年 6 月以降は測定が行われていなかった。そこで本課題では、次の噴火に向けて現状を把握し、今後の変化の検出の基準となるベースマップを得るために、今年度山頂火口原で土壤拡散 CO_2 放出率のマッピングを実施した。当初計画では、令和 2 年 5 月に北海道で予定されていた国際火山ガスワークショップに参加し、国内外の火山ガス専門家と協力してこの測定を行うこととしていたが、新型コロナウイルスの世界的蔓延に伴い、このワークショップが中止となったため、北海道大学のメンバーのみで規模を縮小して実施したものである。

Hernández et al. (2001)¹⁹⁾によって、2000 年噴火に前駆する山頂火口域の土壤拡散 CO_2 放出率の増加が捉えられている。彼らは、1998 年 9 月、1999 年 9 月、2000 年 6 月の計 3 回観測を行った (図 28)。 CO_2 放出率が高い領域は、地表温度が 40°C 以上の領域や、亀裂や断層などの不連続構造の分布とよく対応している。また、総放出率は 3 回の観測のうちに、120 ton/day (1998 年 9 月)、340 ton/day (1999 年 9 月)、39 ton/day (2000 年 6 月) と変化し、噴火の約 6 ヶ月前の総放出率の増加、噴火後の急速な減少が観測された。

ただし、Hernández et al. (2001)¹⁹⁾の測定点の配置は不均一であり、近年この研究分野で主流の解析手法とされる逐次ガウスシミュレーション等の統計的評価には向いていない。そこで、本研究では可能な限り等間隔で均一な測定点配置をとることとした。測定には、本プロジェクトで導入した West Systems 社製の portable diffuse

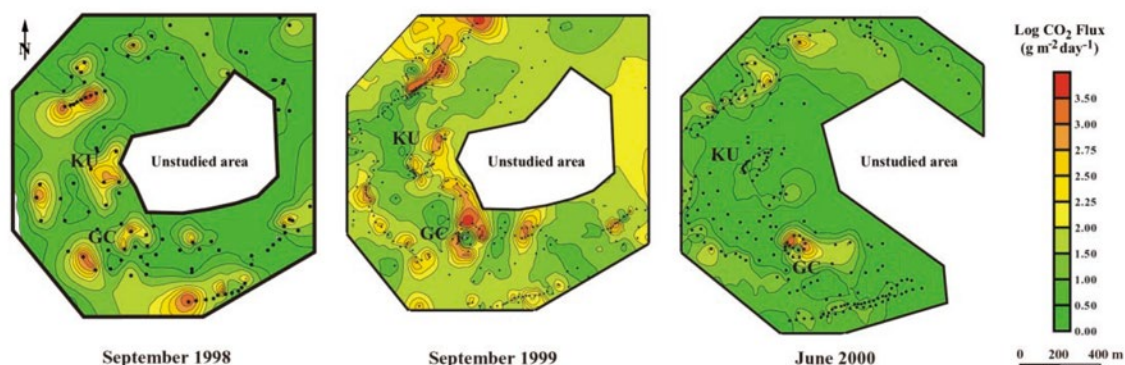


図 28. 2000 年噴火前後の土壤拡散 CO_2 放出率の変化 (Hernández et al., 2001¹⁹⁾)。黒点は測定点を表す。

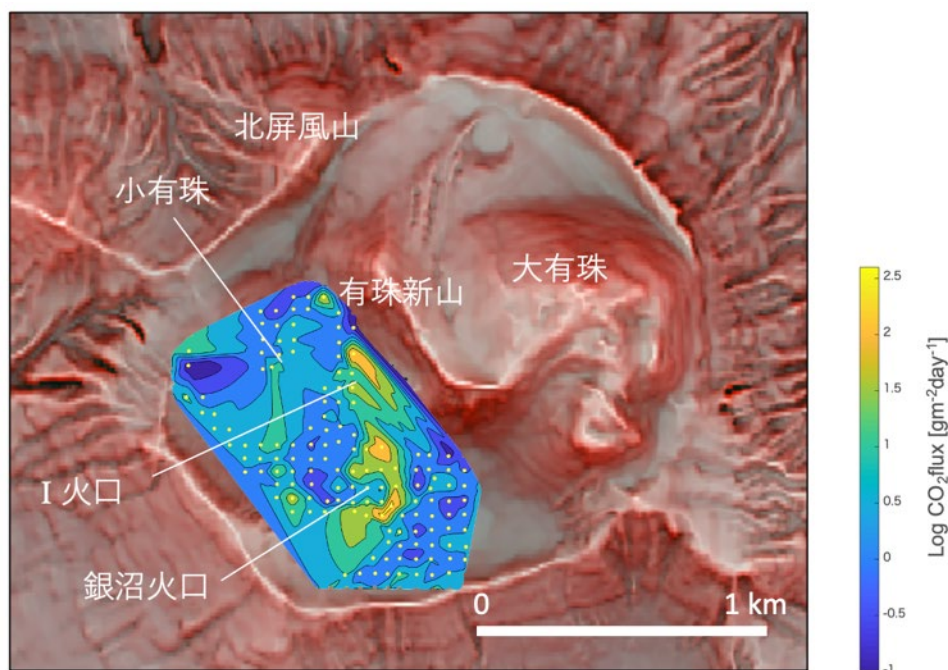


図 29. 本研究で観測した有珠山山頂火口原内の土壌 CO₂ 放出率分布。本図は、アジア航測株式会社の赤色立体地図作成手法（特許 3670274、特許 4272146）を使用し、北海道大学が作成した。

flux meter を用いた。また、付随する消耗品は本事業 B-3 に参加している東京大学理学部より拝借した。測定日は 2020 年 10 月 27 日から 11 月 1 日と、11 月 11 日から 12 日の期間である。測定点は計 167 点であり、可能な限り 50 m の等間隔になるように配置した。ただし、急斜面や植生が深い地点については、移動の困難さと植生による土壌拡散 CO₂ 放出率への影響を考慮して、測定対象から外した。放出率の分布を図 29 に示す。なお、各地点では熱電対を用いて 25cm 深地温も同時に測定した。

相対的に高い放出率は、銀沼火口周縁部や I 火口付近で観測された。また、25cm 深地温の 40℃以上の高温域ともよく対応しており、こうした特徴は Hernández et al. (2001)¹⁹⁾と同様であった。土壌拡散 CO₂ の起源（火山活動由来か生物由来かなど）を区別するために、放出率の累積確率分布を図 30 に示す。本測定の結果は、火山起源と考えられる高放出率のグループと、生物起源などの低放出率のグループの 2 つの群に分離することができるように見え、両者の比は 1:9 程度と考えられる。現状では、全体の測定点数が少ないため、高放出率の測定点数が十分ではなく、放出率の平均値や分散を正確に推定できていない可能性がある。今後、測定点を増やすことで、統計的に起源を分離し、火山活動に由来する CO₂ 放出率を推定する必要がある。

測定領域の範囲や測定点の配置の違いから、Hernández et al. (2001)¹⁹⁾と直接の比較はできないが、同様に測定されている銀沼火口周辺や小有珠周辺を比較すると、1998 年 9 月と同程度かそれ以下であるように見受けられる。従って、土壌 CO₂ 放出率で見る限り、現状では噴火が切迫した状況にあるとは考えにくい。なお、Hernández et al. (2001)¹⁹⁾の報告している総放出率の値と比較するためには、測定範囲を山頂火口

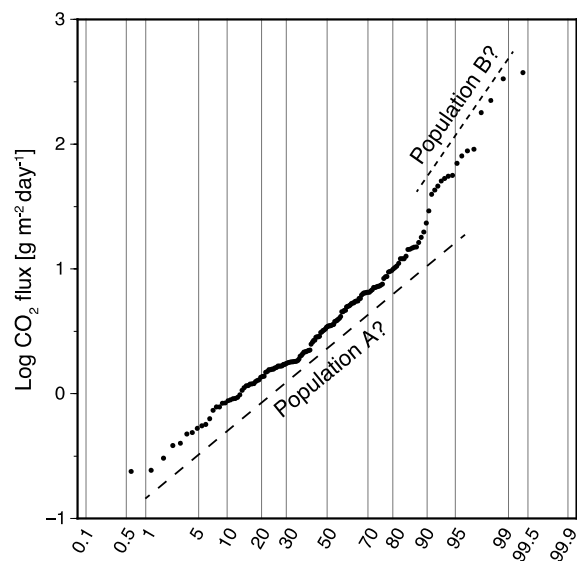


図 30. 本研究で観測した山頂火口原内の土壌 CO₂ 放出率の累積確率分布。

population A が生物起源の低放出率グループ、population B が火山起源の高放出率グループに対応する。2つの分布の境界は累積確率 90%の付近にあるように見える。

原全体に広げる必要がある。

なお、この成果は日本火山学会秋季大会、地球電磁気・地球惑星圏学会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と意見交換を行った。また、JpGUにおいても、関連研究者の発表を聴取し、今後の研究の方向に役立てる予定である。

ii) 臨時地震観測及び臨時 GNSS 観測の準備

有珠山の地震活動は、北海道大学、気象庁、防災科研等の常時観測点で把握できおり、発震機構も 2006 年に実施した集中総合観測で推定を終えている。そこで、本事業では、山頂直下で現在も定常的に起こっている微小地震を利用し、地震波形の到着時刻検測に頼らずに振動現象を把握するための試験的な観測を実施する。これは有珠山の前兆地震活動の最盛期は個々の地震を分離して検測することが難しいほか、プリニー式噴火による連続微動の発生も想定されるためである。機動観測では、1 辺 200 m 規模の三角形の臨時アレイを 2～3 箇所に設置する計画である（図 31）。今年度は、このための現地見と用地交渉を進めた。

また、次の噴火で噴火位置の事前（即時）予測を目指すため、令和 3 年度から GNSS 基準点の整備とデータ取得を開始する。気象庁札幌管区气象台とも調整の上、気象庁の観測点も有効活用することとしている。測量基準点となるピラーを設置する候補地を図 32 に示す。令和 3 年度と 4 年度の 2 カ年の繰り返し観測では、まずは基準点の正確な座標値と変動ベクトルの推定までを目標としているが、将来的には、重要な地点は連続観測への置き換えも検討する。今年度は、候補地点の下見と関係各所との折衝を進めた。また、本課題は、近年普及し始めている、安価な GNSS モジュールでの多点観測を想定しており、試作品として必要な部材を購入し、観測装置としてパッケージ化する準備も行った。

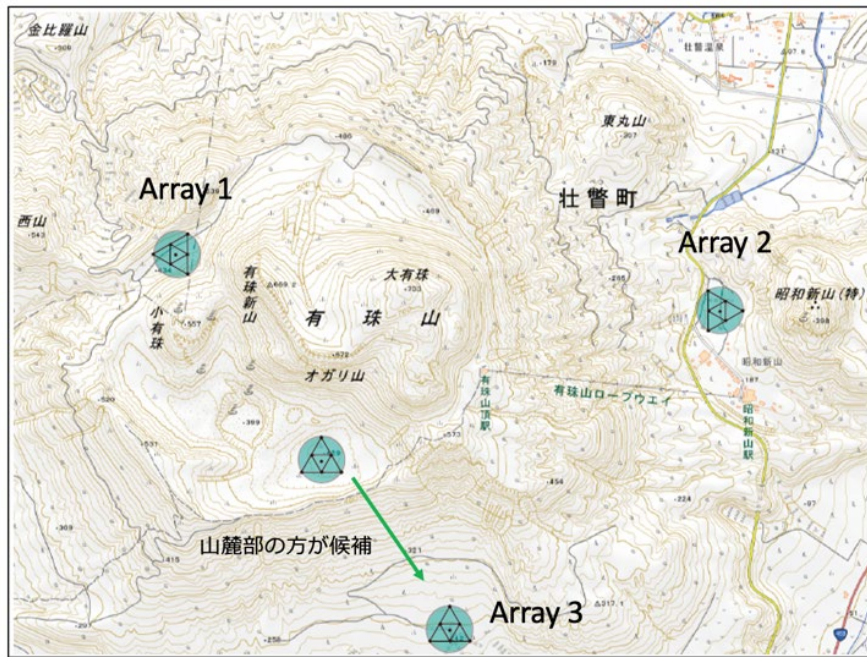


図 31. 臨時地震アレイ観測の候補地点。

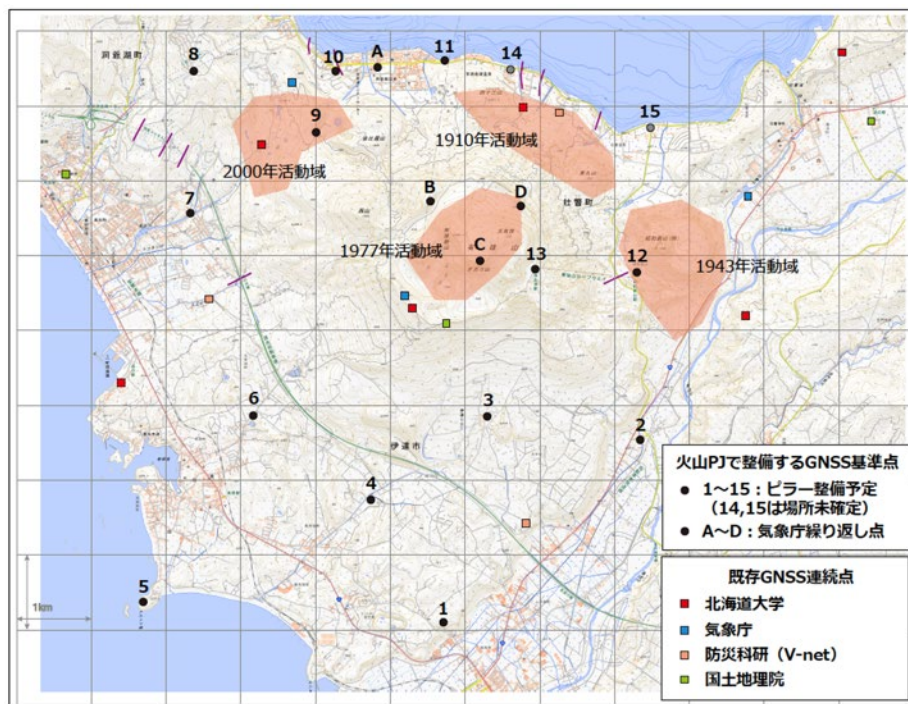


図 32. 臨時 GNSS 観測の候補地点

iii) 2021 年 3 月の群発地震

有珠山では、山頂火口原内の浅い領域（海水面下 1 km 程度まで）を中心とした微小地震活動が継続的に発生している（図 33）。震源は 1977 年の山頂噴火時に活動した U 字型断層に沿う地域に主に分布し、2006 年に実施した臨時稠密地震観測で推定した

震源分布から目立った変化はない。気象庁の計数基準に達する規模の地震の平均的な月あたりの発生回数は20～30回程度となっており、2000年噴火以前（特に1995年頃まで）に比べると地震活動度はやや高い状態にあるものの、2000年噴火活動の終息以降で大きくは変わっていない（図34）。

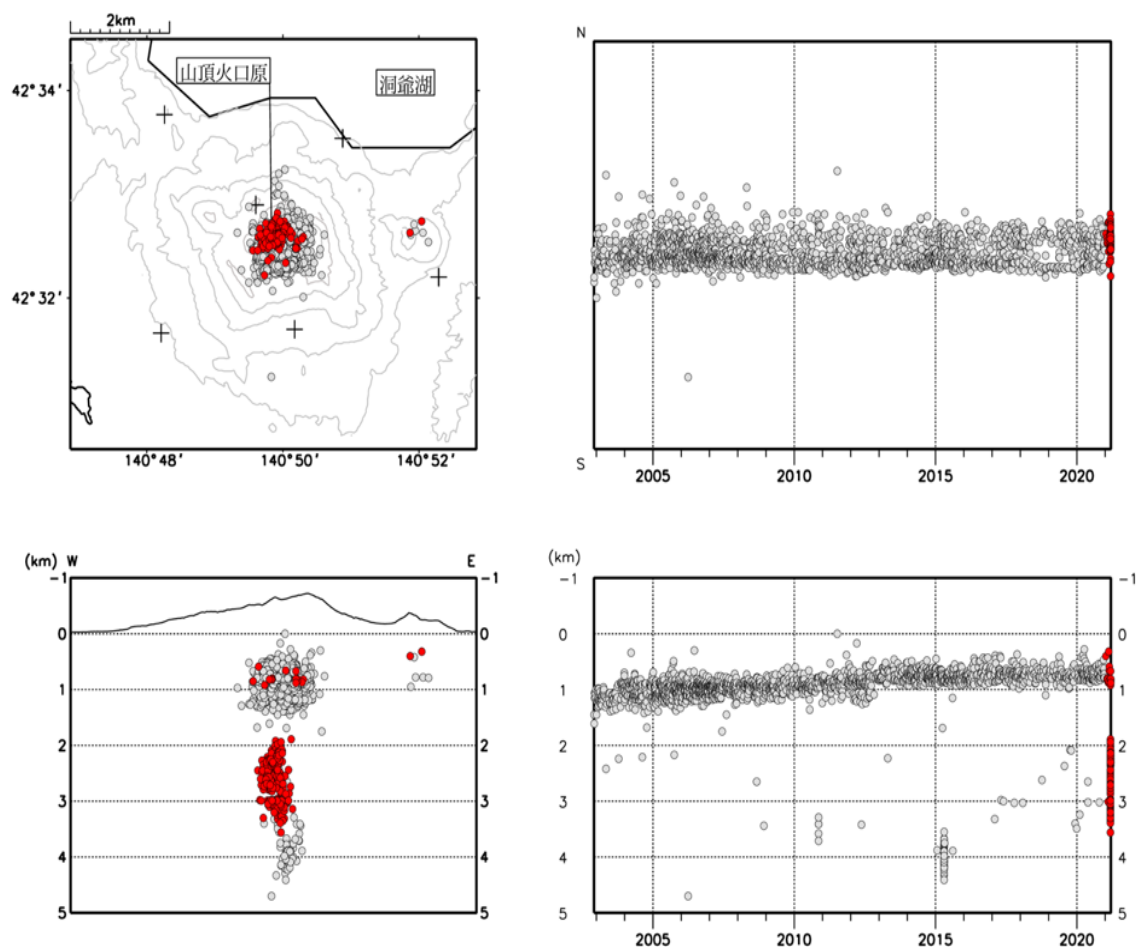


図33. 2003年以降の有珠山の震源分布（札幌管区気象台地域火山監視・情報センター，2021私信）。赤丸は2021年1月以降の震源を示す。

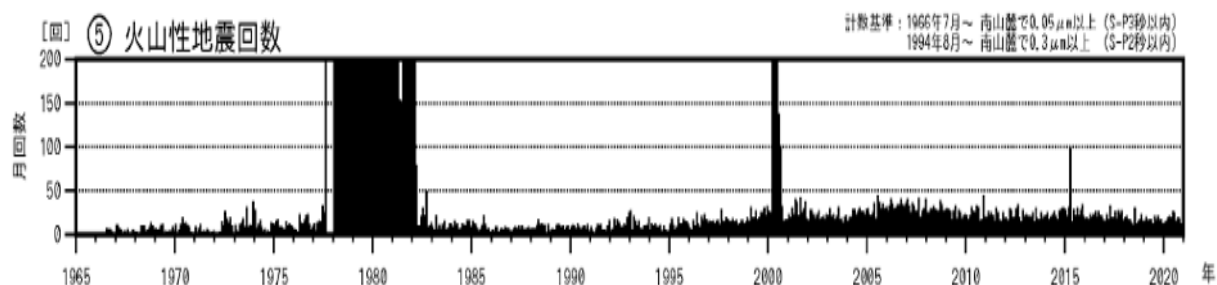


図34. 1965年以降の有珠山の火山性地震回数（札幌管区気象台地域火山監視・情報センター，2020²³⁾）。1995年以前に比べると地震活動度の高い状況が続いているが、2000年噴火終息後の20年は大きく変化していない。

2000 年の噴火以降に発生した地震活動で特記すべきは、2015 年 4 月および 2021 年 3 月に見られた海水面下 4 km 付近を中心として発生したやや深い領域での地震活動である（図 33）。有珠山体下の海水面下 4 km 付近という場所は、2000 年 3 月 27 日午後 12 時に噴火の前兆地震活動が開始した領域に相当する（Onizawa et al., 2007²⁰⁾）。2000 年の活動では、日付が変わる深夜 0 時過ぎには気象庁の計数基準に達する地震の発生頻度が 1 時間あたり 100 回を超えるまで急激に増大するとともに有感地震も発生し始めた（札幌管区気象台・他、2002²¹⁾）。

2015 年 4 月のやや深部での地震活動は 4 月 19 日から 21 日の 3 日間で主に発生し、震源が推定された地震は約 60 個であった（図 35）。この活動の最大地震は 21 日 02:37 に発生し、地震波形は P 波や S 波の到着が明瞭に認識できる火山構造成地震の特徴を示す。この地震活動にはマグニチュード 1 級の地震が複数含まれるものの（気象庁で震源決定できた地震の下限マグニチュードはおおよそ 0.5）、震源がやや深いため観測された地震波の振幅は小さく、壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）では人工的なノイズ（日中の人間活動や車両の通行などによる）を大きく超えて明瞭に認識できる地震は少なかったことがわかる。時間あたりの発生回数が数時間のうちに 100 回以上にまで増大するような急激な活動の増大がなく、地震活動に対応した表面現象や地盤変動が観測されなかったことから、火山活動に切迫した変化が認められるという判断には至らなかった。

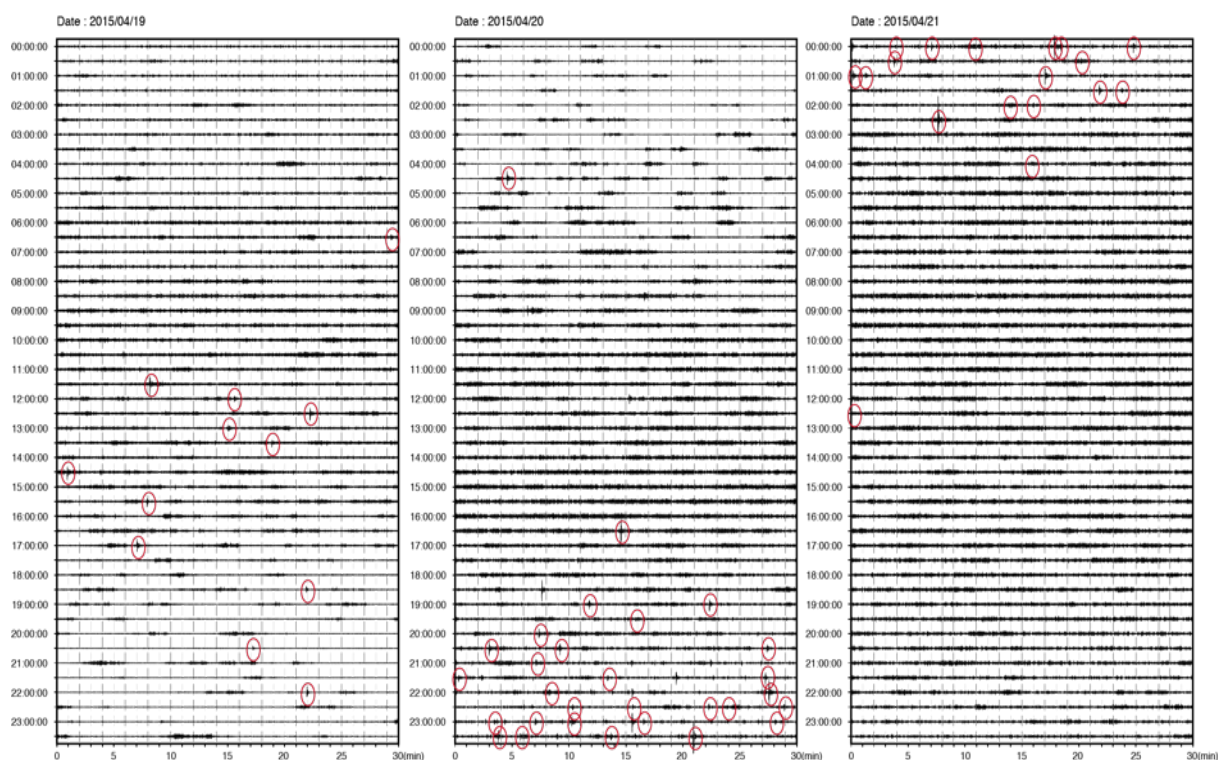


図 35. 壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）の 2015 年 4 月 19 日～21 日の地震観測波形。赤丸で囲った振動が気象庁で震源決定できた地震を示す。日中の時間帯を中心に多数現れる振動は、車の通行など人間活動に起因するものである。赤丸の振動以外にも地震と思われる信号が散見されるが、いずれも振幅は小さく数もそれほど多くない。

2021 年 3 月 9 日から 10 日にかけて発生した地震活動は、地震発生数や地震規模の点で 2015 年 4 月の活動をやや上回った。気象庁の検測処理結果（図 33）によれば 2015 年の活動よりもやや震源が浅く推定されているが、深さの差異の有意性について今後の精査が必要である。3 月 9 日の午前 9 時頃から始まった地震活動は、9 日の夜から 10 日の未明にかけて最初の極大を迎え、9 日 22:39 の地震が最大であった（図 36）。この地震活動の極大の時間帯に、山麓部の複数の傾斜観測点で 1 マイクロラジアン未満のごくわずかな傾斜変動が観測された。10 日の午前中は一時的に活動の低下が認められ、午後に入るとわずかに回数が増えて明瞭に地震を認識できる時間帯があったが、20 時頃にはやや深部での地震は見られなくなった。11 日から 13 日にかけては、山体浅部（海水面下 1km 未満）で規模のやや大きな地震が数回発生した。13 日正午前の地震では、ロープウェイ山頂駅で有感との報告が入っている（札幌管区気象台，2021 私信）。

暫定的に推定した最大地震の発震機構解は北北西-南南東を圧縮軸とする横ずれ断層の活動を示唆するが（図 37a）、初動極性分布が大きく異なる地震もあり（図 37b）、こちらも検測処理結果の再確認が必要である。2021 年 3 月の活動の地震発生回数は、気象庁の速報値で 9 日 179 回、10 日 147 回、11 日 5 回であった（札幌管区気象台，2021²²⁾）。2015 年に比べれば 2021 年は規模の大きな活動であったものの、最大でも時間あたりの地震回数が 20 回程度であったこと、明瞭かつ継続的な地盤変動が認められなかったことからマグマ噴火に至るような切迫した地震活動とは判断されなかった。

なお、これら以外の時期にもやや深部に震源が決まる地震は散見されるが、いずれ

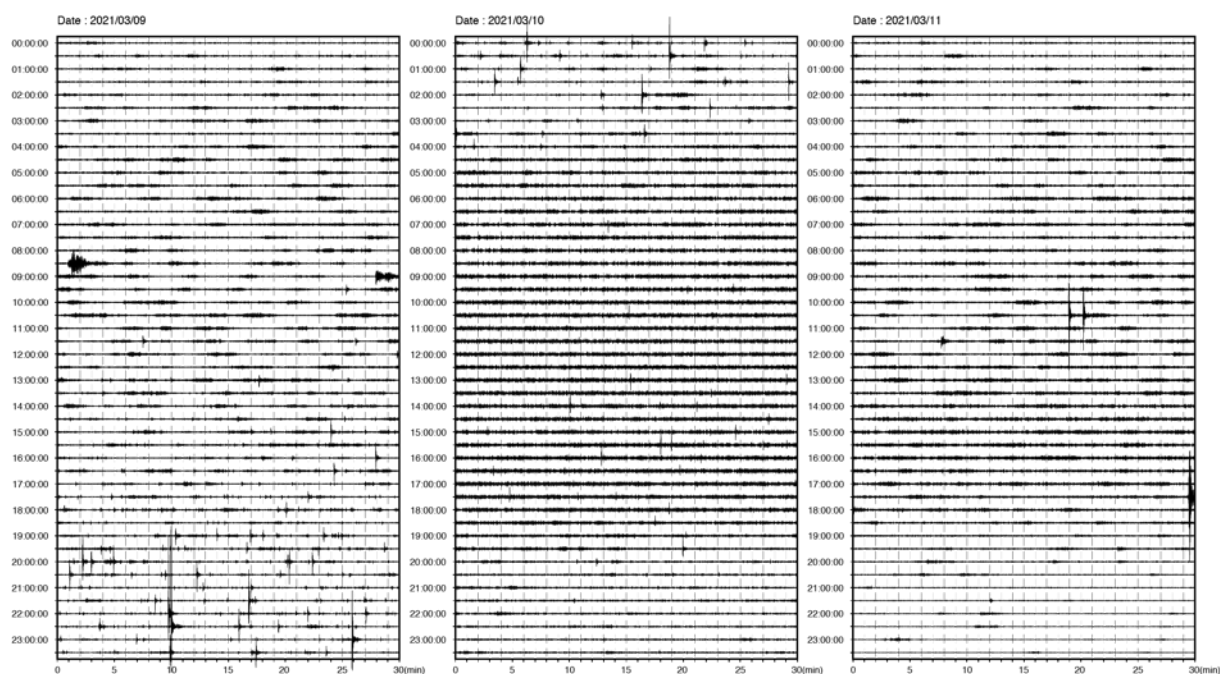
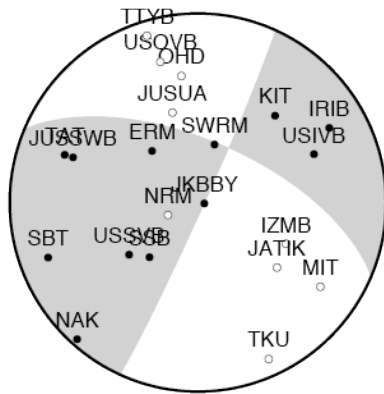


図 36. 壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）の 2021 年 3 月 9 日～11 日の地震観測波形。描画時の振幅設定は前図と同一であり、2015 年の活動と振幅の違いをそのまま評価できる。3 月 11 日 10:50 頃および 17:59 の地震は、山頂火口原内の浅いところを震源とする地震である。

(a) 2021/3/9-22:39:57.900
 42.54817N 140.82851E 3.890km M2.2
 Plane1: Az=293 Dp=63 Rk=177
 Plane2: Az=23 Dp=24 Rk=21
 HASH mechanism quality: A



(b) 2021/3/9-22:27:3.850
 42.54783N 140.82817E 4.370km M1.2
 Plane1: Az=205 Dp=64 Rk=158
 Plane2: Az=15 Dp=17 Rk=20
 HASH mechanism quality: A

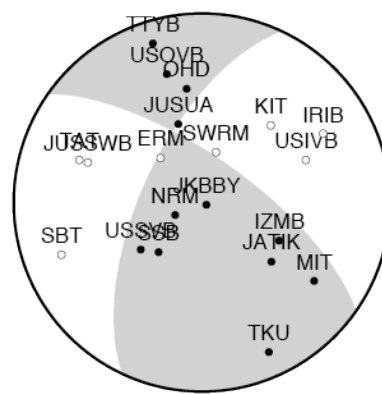


図 37. (a) 最大地震の発震機構解。(b) その約 12 分前に発生した地震。2 つの地震で初動極性分布が大きく異なっていることが分かる。
 も散発的な活動である (2020 年は深さ 3 km 付近に 4 個)。

d) 三宅島における機動観測

2018 年度から 2019 年度に、本事業において三宅島において、臨時地震観測と地下比抵抗構造の調査を行った。今年度は、そこで得られたデータを解析するとともに、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院の GNSS 観測データを再解析し、地殻変動の解析も併せて行い、現在の地震・地盤変動の変化と今後の噴火の際の切迫性評価の視点を考察した。さらに、地下比抵抗構造の推定から、三宅島においては熱水活動が重要であることが明らかになったので、自然電位分布を測定し、過去のデータとの比較を行い、この数年間での三宅島の地下熱水状態の変化について調査した。更に、ドローンを用いた空中磁気測量を行い、広域の地中温度変化の調査を実施した。以下に、それぞれについて、詳しく記載する。

i) 三宅島における現在の地震・地盤変動観測と次回の噴火の際の切迫性評価

本事業において 2018 年度から 2019 年度に、三宅島において臨時地震観測点を 6 点設置し、稠密な地震観測を行った (図 38)。これにより、現在の三宅島においては、2000 年噴火によって中心が陥没して、大きく広がった火口の南側直下で多数の微小な地震活動が現在も継続していることを明らかにした。また、その震源を DD 法²⁴⁾で再決定したところ、火山構造的な地震である A 型地震の分布と、火山浅部でよく見られる BH 型及び BL 型地震の分布が震源の深さにより明瞭に分かれることが分かった (図 39)。

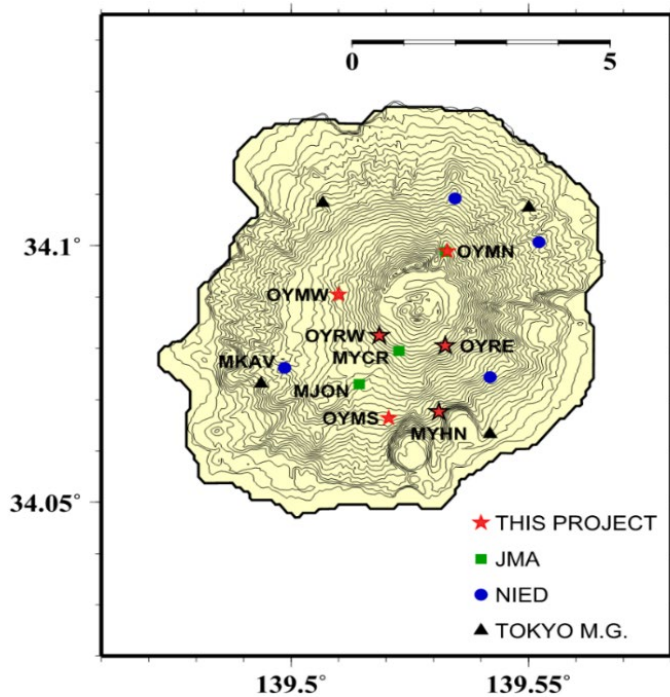


図 38. 三宅島の地震観測点。赤星印が本事業で設置した臨時地震観測点。黒枠の観測点は撤収済み。

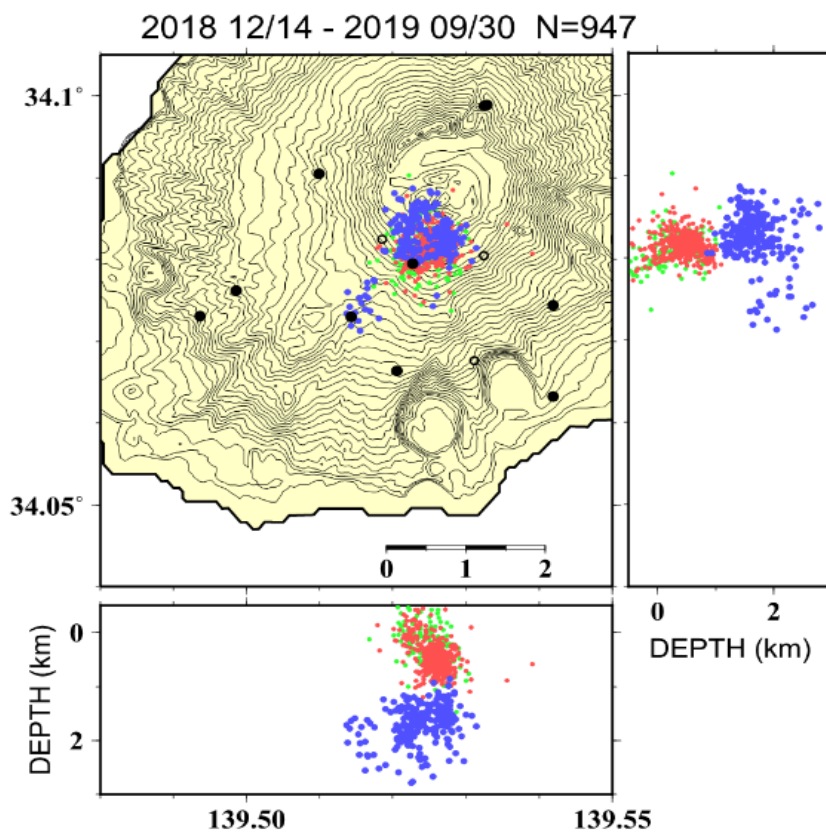


図 39. 2018 年 12 月～2019 年 9 月の期間約 950 地震の震源を推定。同期間の気象庁カタログは約 90 地震。赤：BL 型，緑：BH 型，青：A 型。

三宅島の長期的な火山活動の推移を見ると、2016 年前半にいくつかの GNSS 観測点の基線長の伸びが加速し、急激な山体膨張が発生している可能性と、それに同期して火口から噴出する火山ガスが急激に減少したことを昨年度の報告書で指摘した（図 40）。今年度は、2016 年の急激な山体膨張に注目し、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院の GNSS 観測データの提供を受け、それを再解析して 2016 年前半に起こった地盤変動と地震活動の関係を調査し、2000 年噴火時の活動との関係も考察した。解析に用いた GNSS 観測点は図 40(b)に示した三宅島島内に設置されているすべての GNSS 観測点である。この図のように、三宅島には国土地理院が 4 観測点、気象庁が 5 観測点、防災科技研が 4 点の観測点を設置し、全機関を併せると 13 点の観測点がある。それぞれの機関から RINEX データを提供頂き、新潟県に設置された国土地理院大潟観測点（950241 観測点）を固定点として、中部日本、伊豆諸島の GNSS 観測点約 40 点と共に BERNEASE5.2 で網解析を行い、各観測点の 1 日毎の座標値を推定した。このようにして得られた三宅島島内の GNSS 観測点の座標値を用いて、三宅島島内の国土地理院の観測点の基線長変化の例を示したのが図 40(c)である。特に、図 40(b)の(2)と(3)の基線において 2016 年前半での基線長変化の加速が明瞭である。この時の変化に注目し、その圧力源を以下の方法で推定した。

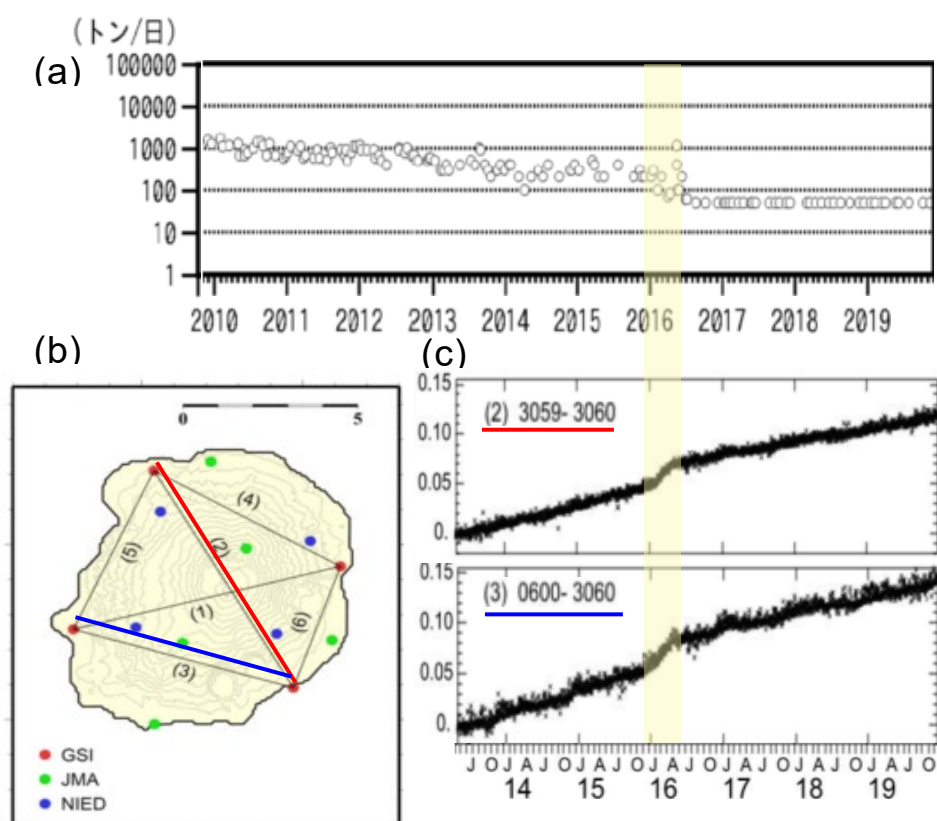


図 40. 最近の三宅島の活動。(a) 二酸化硫黄放出量。第 145 回火山噴火予知連絡会三宅島資料（気象庁）を一部改変。(b) 三宅島島内の GNSS 観測点分布。(c) 図(b)の(2)と(3)の基線長変化。2016 年前半に火山ガスの噴出が検出限界まで下がると同時に、GNSS 観測ではいくつかの基線で山体膨張の加速が見られた。

山体膨張の加速の開始と終了を 2015 年 12 月初旬と 2016 年 6 月末頃とし、各地点のそれぞれ連続する 10 日間（12 月 1 日～12 月 10 日、及び 6 月 21 日から 6 月 30 日）の日々の座標値の平均値を取り、その差をこの期間の変位ベクトルとした。その値を用いて三宅島島内にある 13 観測点のすべての組み合わせで 2 点間、3 成分の差を取り、それを観測データとして等方圧力源を仮定し、圧力源の位置をインバージョンで推定した。この際、短期再現性、つまり前後 10 日間の座標値のばらつきを観測誤差として、インバージョン解析に取り込んだ。この方法により、三宅島島内の全観測点が共通に持つプレート運動の成分が除去でき、島内の局所的な変位、つまり火山活動起源の圧力源による変位が精度よく推定できた。

図 41 にはこのようにして推定した圧力源の位置を緑色の星印で、観測された変位ベクトル、推定されたモデルから計算される変位ベクトルをそれぞれ青矢印と赤矢印で示したものを示した。これらの変位ベクトルは、三宅島全観測点で共通に現れる変位成分は除去している。圧力源の位置は、図中星印の位置で、深さ約 5 km と推定された。この圧力源の位置は 2 つの点で大変興味深い。1 つは、A 型地震の震源分布と圧力源の位置関係である。もう一つは、前回の 2000 年噴火の際に、見られた色々な特異な現象の起源となった位置との関係である。以下に、それぞれについて説明し、最後に全体を併せて、今後の三宅島の火山活動の切迫性評価のために何をなすべきかについて述べる。

図 42 は震源再決定した地震のうち、A 型地震の震源分布（青丸）とここで求められ

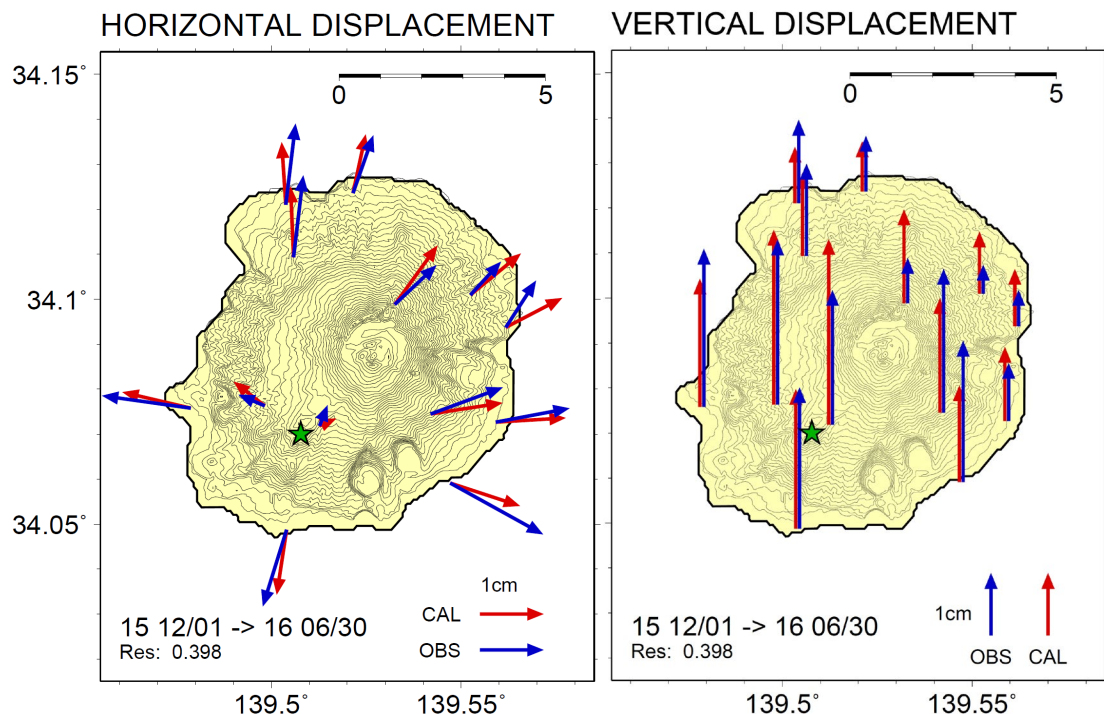


図 41. 気象庁、国土地理院、防災科学技術研究所の GNSS のデータを提供頂き、再解析して 2015 年 12 月～2016 年 7 月の期間の変位から膨張源を推定した。星印の下、深さ 5 km と求められた。

た圧力源の位置を示したものである。A 型地震のほとんどは、火口内南側領域直下の深さ 1～2.5 km に集中して発生しているが、一部の地震はそこから離れて南西側に延びる鉛直面状に分布しており、その延長上の下方に今回推定された圧力源が位置する。注目すべきは、圧力源のある方向以外の方向には、火口から延びる地震の震源分布が見られず、火口内南側領域以外ではこの領域のみで地震活動が見られることである。このように、A 型地震は、火口と 2016 年前半の膨張源を結ぶ深さ 1～2.5 km の領域でも発生していることが判った。

今回推定された圧力源の位置と 2000 年噴火時の活動についても興味深い関連が見られる。西村・他 (2002)²⁵⁾ は、2000 年噴火前に三宅島に 4 点設置されていた GPS 観測点のデータと、島内の 1 周道路で実施された 2 回の水準測量の結果から、図 42 の◇の位置の深さ 9.5 km に、噴火に先立って圧力源があったとしている。また、2000 年噴火時の地盤変動に関しては、その大部分は地震活動に同期して発生したダイクの開口、規模の大きな地震による断層変位で説明できるとされているが (Ueda et al, 2005²⁶⁾)、Irwan et al (2006)²⁷⁾ は、GPS データを高時間分解能で詳細に解析するとダイクの開口以外にも三宅島の南西部の深さ 6.6 km に収縮源が必要であるとしている。この場所を、図 42 の○で示した。2000 年噴火前の膨張源、2000 年噴火初期の収縮源と 2016 年前半の膨張源の位置は、深さは若干異なるが、ほぼ同じ場所であると考えられる。

更に、この場所は 2000 年噴火の最初期に起こったダイクの貫入が、火口から南西方向に延びていたものが北西方向へと走行を大きく変えた場所とも一致している (Ueda et al, 2005²⁶⁾、Irwan et al, 2006²⁷⁾)。また、2000 年噴火の最初期のダイク貫入から山頂火口の陥没に至るまでの 7 月上旬から 8 月初旬までの期間に、多数の長周期震動

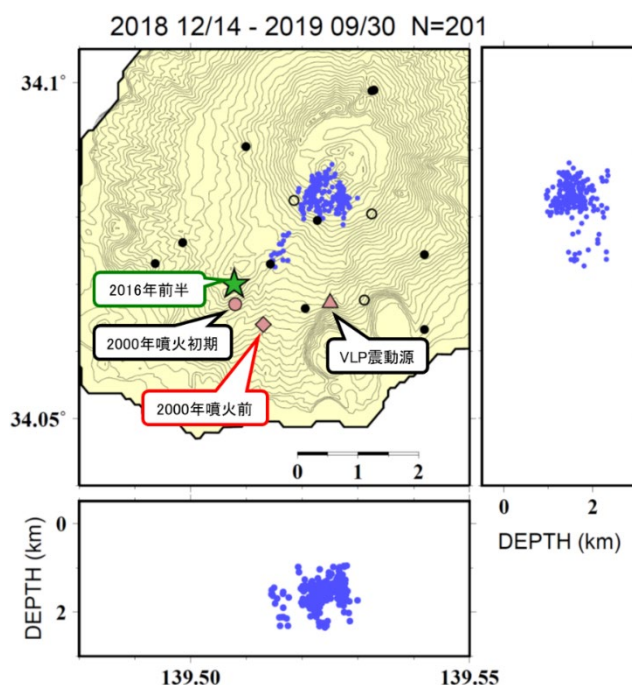


図 42. 今回の機動観測で推定された A 型地震の震源分布に 2016 年前半の山体膨張の膨張源及び 2000 年噴火時活動の鍵となった場所。三宅島南西部にそれらが集中している。

成分を持つ特異な地震（VLP 地震）が発生した。その震源の位置も火口の南西側の図 42 中△の深さ 3.5 km に推定されている（Kobayashi et al, 2012²⁸⁾）。このように、2016 年前半の山体膨張の加速の原因の圧力源は 2000 年噴火の際に深部から火口へと続くマグマの供給路あるいは浅部のマグマ溜まり等、2000 年噴火の際に大きな役割を果たした領域であると考えられる。

ここで重要なことは、最近の地震活動と 2016 年の山体膨張の加速期の膨張源の位置の推定から、2000 年噴火の際のマグマ供給に大きな役割を果たした領域が最近まで活動していた可能性を示していることである。2000 年噴火の大きな特徴として、山頂の陥没後、多量の火山ガス（SO₂ ガス）が放出されたことが挙げられる。また、放出された火山ガスの総量が、この噴火に関与したと考えられる地表の観測から推定されたマグマの総量に比べて極めて多いことから、地下浅部でマグマからの脱ガスした火山ガスが火口から放出されると同時に、脱ガスしたマグマは密度が増して深部に戻り、それに代わってガス成分を多量に含む新たなマグマが上昇してくる、一種のマグマ循環が起こっていたとするモデルが提唱されている（Kazahaya et al., 2004²⁹⁾）。この考えに従えば、2016 年前半の山体膨張の加速と火山ガス放出量の急減、A 型地震の分布等が以下のように整合的に説明できる。

2016 年前半の山体膨張の加速と火山ガス放出量の急減から、2000 年噴火直後には浅部で起こっていたマグマ循環も次第に深くなり、その深さは数 km 近くになっていた可能性がある。2016 年前半に火山ガスの放出が急減したことは、このマグマ循環の上端と火口を結ぶ流路の一部が閉塞したと考えられる。それに伴い循環していたマグマの滞留が起こり、山体膨張の加速が起こった。膨張源と火口を結ぶ経路では、応力の集中が起こりやすいため、A 型地震が発生すると考えられる。図 43 では、このような過程を模式的に示した。

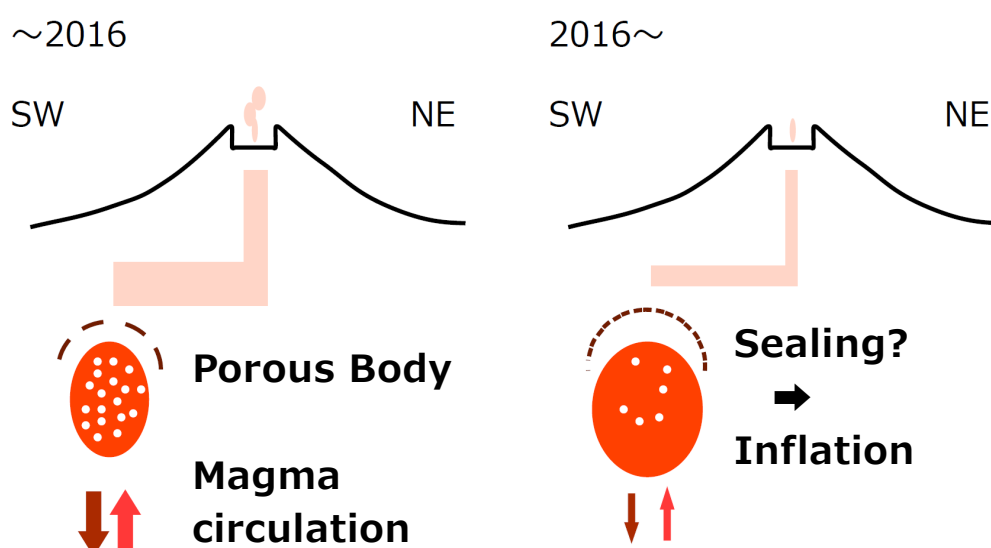


図 43. 今回の既往観測による震源分布。2016 年前半の山体膨張の膨張源の位置から想像される三宅島の現在の活動の概念図。三宅島南西のマグマ溜まりが現在も活動していると考えられる。

ここで提案するモデルが正しいのであれば、三宅島における次回の噴火の切迫性を評価する際には、山頂火口近傍だけでなく、今回の解析で明らかになった 2016 年までマグマ循環の最浅部であり、少なくとも 2016 年までは深部からのマグマ供給のあった火口から南西へ 2~3 km の地下 5 km 付近の浅部マグマ溜まりの状態の変化をモニターすることが重要であると思われる。なぜなら、2000 年噴火から 16 年間程度活動的であったマグマ供給系が突然停止するとは考えにくく、今後もしばらくはその機能が維持されると考えられるからである。現在の地震観測網では、三宅島では山頂火口中心に配置され、三宅島南西沿岸には地震観測点がない。この領域の観測強化が必要である。殊に、海岸付近は波浪ノイズが大きいことや、三宅島の地形から海岸近くに人家が集中することから、できれば大深度のボアホールの地震計と傾斜計、ひずみ計を設置することが、三宅島の火山防災には必要であると考えられる。

ここで提唱したモデルを検証するには、山体膨張の加速が起こった 2016 年前後で、三宅島で発生していた地震活動や震源分布がどのように変化したかを再調査することが重要である。本事業で明らかにしたように、震源の分布は地震種別により異なることから、地震種別に注目した地震活動の変化を詳細に調査することが有効である。2016 年以前、多数の微小な地震が発生したことから、人力による解析・処理には限界があるため、地震種別の自動判定が重量な課題である。後述の 2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発、c) 火山性地震活動総合解析システムの開発は、この点を念頭に開発を進めることにしている。

ii) 地下比抵抗構造の推定

2000 年噴火後、現在まで地下比抵抗がどのように時間変化したかは、火山噴火後の活動推移を理解する上で、極めて重要な情報である。そのため、本事業では 2019 年に MT 探査を 2012 年の MT 探査とほぼ同じ観測点において実施した。2012 年の探査については、データ処理を進めてその結果とその成果をまとめと同時に、地下流体の流動に関する考察を加え、外国人研究者との議論を行い、国内研究者と外国人研究者による共著論文として国際誌に投稿した。また、日本火山学会秋季大会や地球電磁気・地球惑星圏学会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と議論を行った。2019 年の MT 探査については、取得したデータの整理を行い、2012 年のデータ解析と同様に解析すべく、その準備を進めた。

iii) 自然電位観測

三宅島雄山の地下熱水系を調査するため、三宅島を北東―南西に横切るように、自然電位観測を実施した。測点間隔は 100m、山頂近傍のみ 50m 間隔とした。測定結果を図 44 に示す。横軸は標高、縦軸は電位である。典型的な W 字型の電位分布を示し、雄山下に熱水系が発達してと推定される。

2012 年測定時と比較すると 1) 標高 300m 以下では変化が見られない。2) 電位の最小値が 2020 年観測時のほうが低い。3) 最小電位値と山頂での電位値との差は、2020 年観測の方が大きい、という 3 つの特徴がある。特徴 1) から、地下水が地形によっ

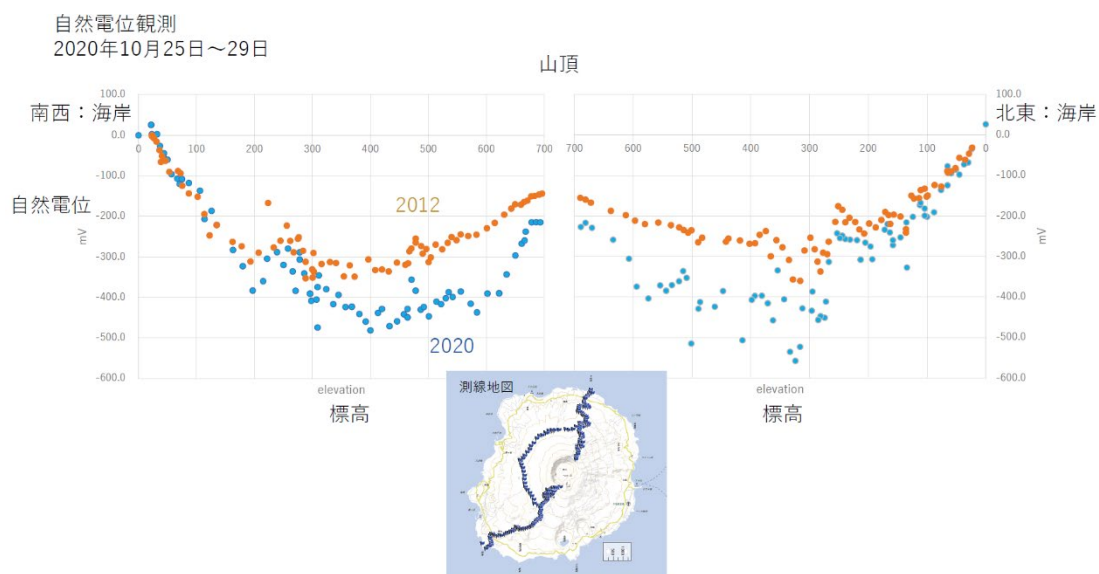


図 44. 三宅島における自然電位測定結果。2020 年 10 月 25 日～29 日に実施。オレンジ色は 2012 年の実施結果。青色が今年度の実施結果。下図に測線を示す。海岸付近では変化が少ないが、山腹での電位低下により W 字型の分布が顕著になった。

て降ることによる地形効果は、2012 年と 2020 年とで違いがないことを示し、空隙率やそれに伴うゼータ電位が両者で変化がなかったことを意味する。一方、特徴 2) の最小電位値が 2020 年観測時のほうで低いことは複数の解釈ができ、この自然電位データだけでは一意性がない。一つの解釈としては、熱水系にその原因を求めるとすると、熱水駆動が弱まったと解釈することで、相対的に地形効果が卓越する、つまり、標高 300m 以下での電位勾配が標高 400m まで続いていると言える。もう一つの解釈は、地形効果に原因を求めるとすると、標高 400m までの場所でのごく浅い部分の固液相のカップリングが経年変化で強まりゼータ電位が増加したことで、地形効果が卓越したと解釈することができる。特徴 3) は、山頂直下の比抵抗が低下していることを意味しており、熱水系の発達によって地下の比抵抗が変化していることが示唆される。今後も繰り返し自然電位観測を実施することで、熱水系の時間変化に着目することで、火山活動を把握していく。

iv) ドローンを用いた空中磁気測量

繰り返し磁気測量を実施することにより、岩石磁化の時間変化による強弱、つまり、一義的には温度昇降による消磁・再帯磁を検出することができる。ただし、岩石磁化による磁場は非常に微小であるため、地表ごく近傍で磁場を測定する必要がある。一方で、地表での定常観測は観測点数が限られてしまうため、分布を把握することは困難である。そこで、両者の欠点を解決するために、本事業では、ドローンを用いた低対地高度高解像度の磁場測量を雄山全域で実施した。

図 45 に対地高度 100m での全磁力測定結果を示す。測線間隔はおよそ 100m と高空間解像度の測定を実施することができた。測定結果から、全磁力が山体南側で強く北

側で弱い、典型的な山体磁化による全磁力分布を検出することができた。全磁力異常は peak-to-peak でおよそ 6,000nT におよぶ。また、カルデラ縁では、北カルデラ縁の内側で強く、南カルデラ縁の内側で弱い、地形による局所的な磁気異常も明瞭に検出することができた。

今後磁化構造解析を行うことにより温度分布異常を把握するとともに、繰り返し同一測線で磁気測量を実施していくことで、地下温度の時間変化を検出することも計画していく。

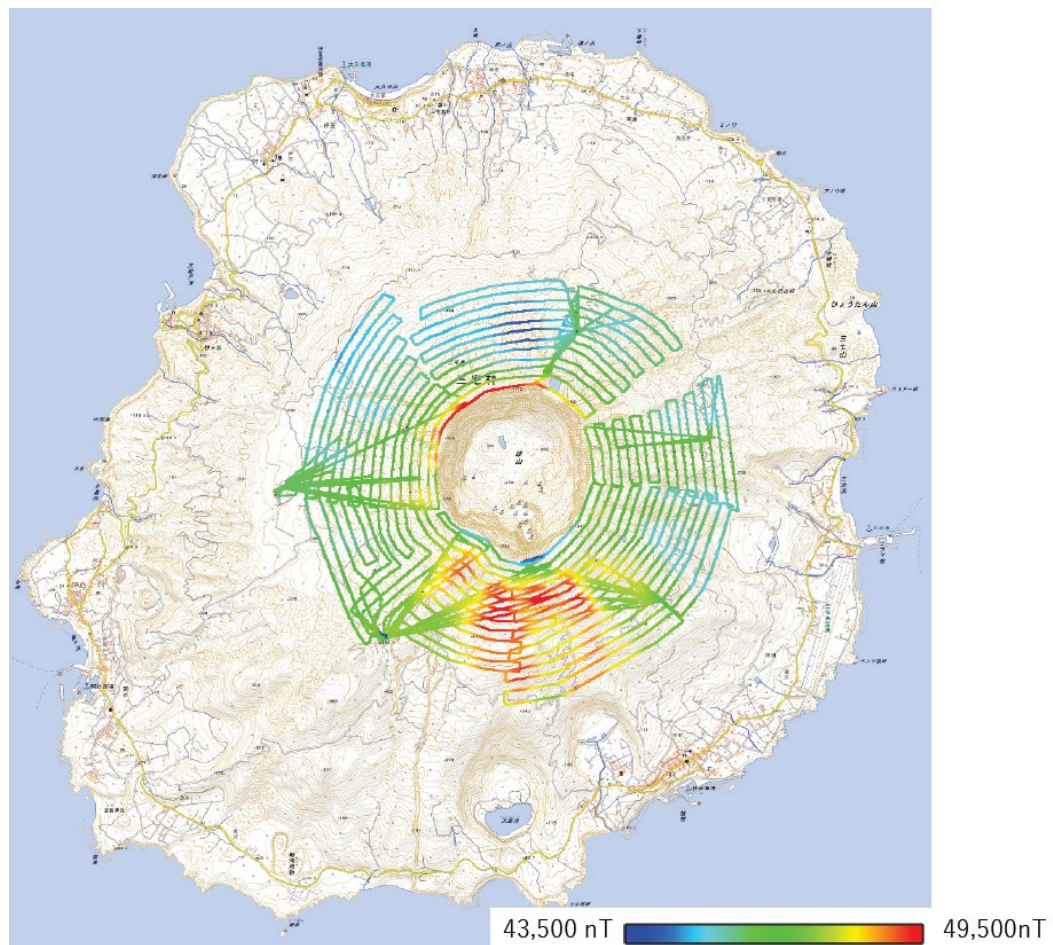


図 45. ドローンによる空中磁気測量結果。2021 年 3 月 23 日～27 日に実施。線はフライトパス。対地高度は 100m を維持した。色は磁気強度を表す。

e) 霧島火山における機動観測

i) 霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

ア) 小規模水蒸気噴火前後の流体移動

2018 年 4 月 19 日に硫黄山で発生した小規模水蒸気噴火について、噴火開始前後の傾斜変動の圧力源を推定し、硫黄山の噴火発生場の構造・物性モデルに基づいて水蒸気噴火の開始過程について考察した。また、空振相互相関解析を行い 2018 年噴火の表面活動の時系列モデルを再構築した (Muramatsu et al., 2021³⁰⁾)。

図 46 に 4 月 19 日 15 時台の傾斜変動 (秒値) を示す。噴火開始約 4 分前の 35:00 頃から変動が始まり、37:00 頃に傾向が変化している。38:15 頃には再び変動の傾向が変化し、同時刻に既存噴気孔の活発化が監視カメラで確認されている。活発化から約 1 分後の 39:15 頃に噴火が始まり、5 分後の 44:10 頃にはコックステール状ジェットの噴出が監視カメラで確認されている。

これらの傾斜変動の時間変化と表面活動、および水蒸気噴火開始過程との関係を調べるため、傾斜変動圧力源の推定を行った。推定においては、変動が始まる直前の 34:35 頃の値を基準とし、①34:35-37:00 (傾向変化)、②34:35-38:15 (傾向変化・噴気活発

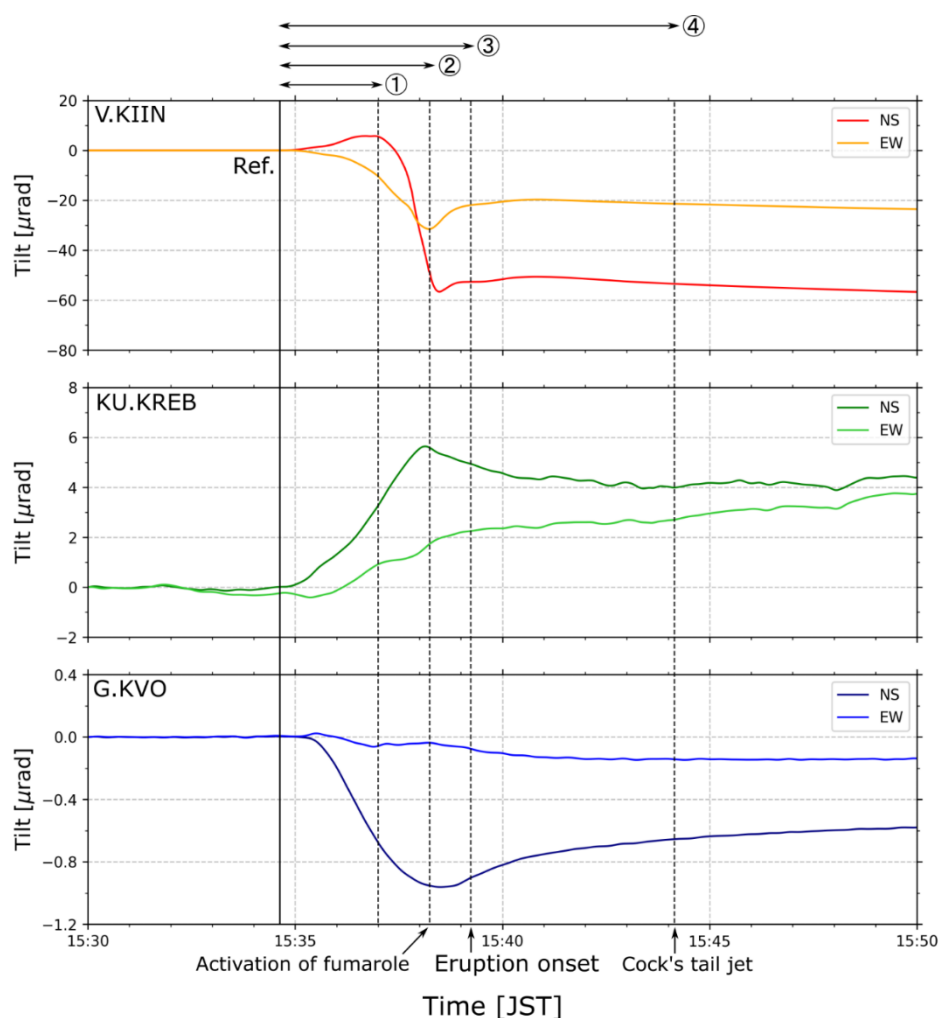


図 46. 噴火開始前後の傾斜変動の時系列変化

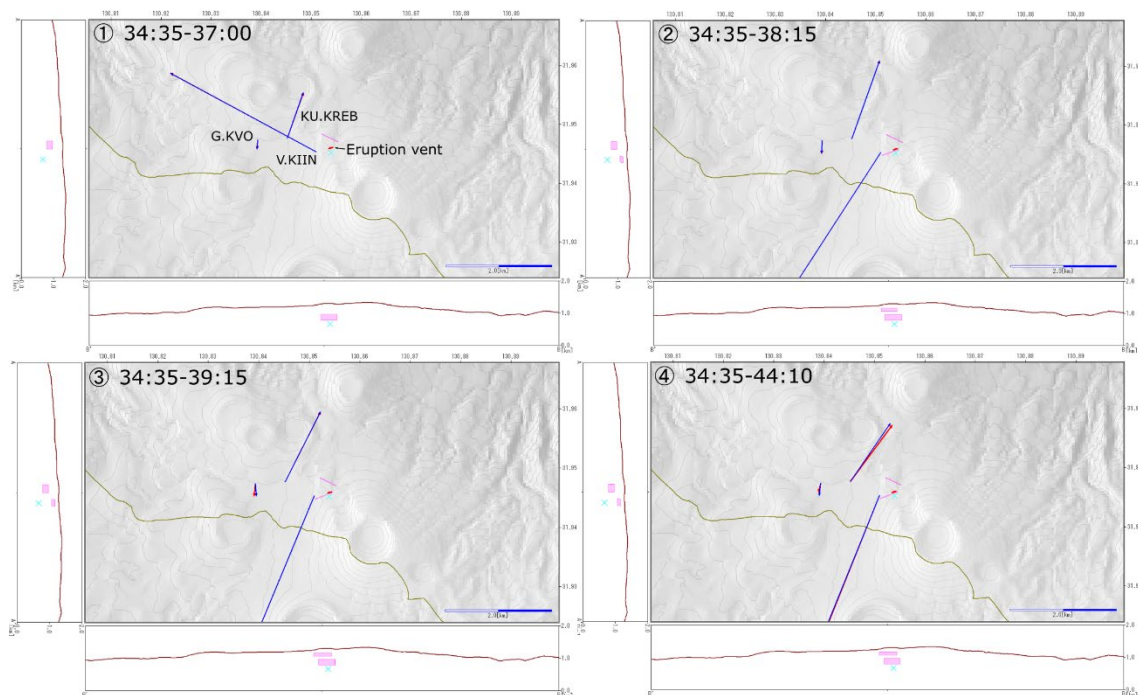


図 47. 傾斜変動の圧力源推定結果。

化)、③34:35-39:15 (噴火開始)、④34:35-44:10 (コックステールジェット)、の4つの期間に分けてそれぞれ傾斜ベクトルを計算し、力源推定を行った。図 47 に推定結果を示す。期間①では深さ 600m 付近の球状圧力源 (収縮) および深さ 350m 付近のダイクの膨張が力源として推定された。期間②～④では球状圧力源とダイクに加え、深さ 150m 付近にも浅部ダイクの膨張を仮定すると傾斜変動を説明できることが分かった。この浅部ダイクの走行方向は、噴火で形成された地表の火口列方向と同じである。

硫黄山の噴火発生場モデル (Tsukamoto et al., 2018³¹⁾) と比較すると、球状圧力源は粘土層 (キャップロック) 下の熱水だまり、深いダイクは粘土層内部、浅いダイクは粘土層の上面にそれぞれ位置する。Tsukamoto et al. (2018) では 4 月 19 日の水蒸気噴火について、熱水だまりから粘土層内部の亀裂を上昇する熱水の供給量が増加し、熱水が気相に変化する深さ 130m 付近の粘土層上面で急激に沸騰したことにより発生したと解釈している。今回の圧力源推定の結果と合わせると、まず熱水供給量の増加を伴って粘土層内部での亀裂開口 (= 深部ダイク) と熱水だまりの収縮 (= 球状圧力源) が生じ、それに続く粘土層上面付近での熱水の相変化が浅部ダイクの開口を引き起こし、噴火に至ったと考えられる。また、粘土層の上面付近には浅部熱水系が発達していると考えられており (Tajima et al., 2020³²⁾; Narita et al., 2020³³⁾)、深部ダイクの開口による熱水供給量増加で浅部熱水系が活発化し、それが噴火 1 分前の既存噴気孔の活発化を起こした可能性がある。

次に、硫黄山周辺の 2 観測点で記録された空振の相互相関解析を行った (Muramatsu et al., 2021³⁰⁾)。図 48 に結果を示す。走時差から、南火口とそこから 500m ほど離れた西火口のシグナルを同定できる。今回の解析により、これまで活動時期が不明であった西火口の噴火時刻が推定された。また、火口位置が既知である場合、最低 2 つの

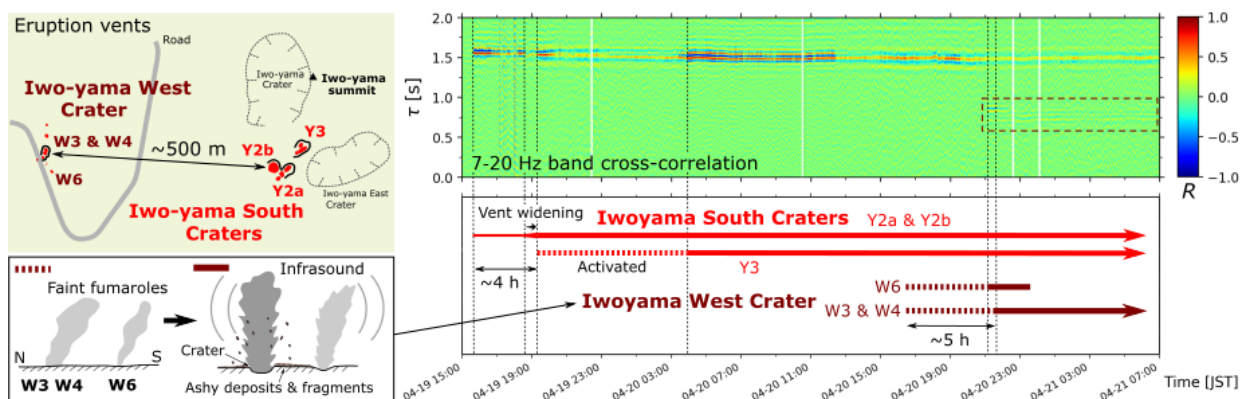


図 48. 空振相互相関解析の結果と再構築された表面活動の時系列変化
空振計があれば複数火口のシグナルが分離でき、噴火表面活動の推移を十分に制約できることが分かった。

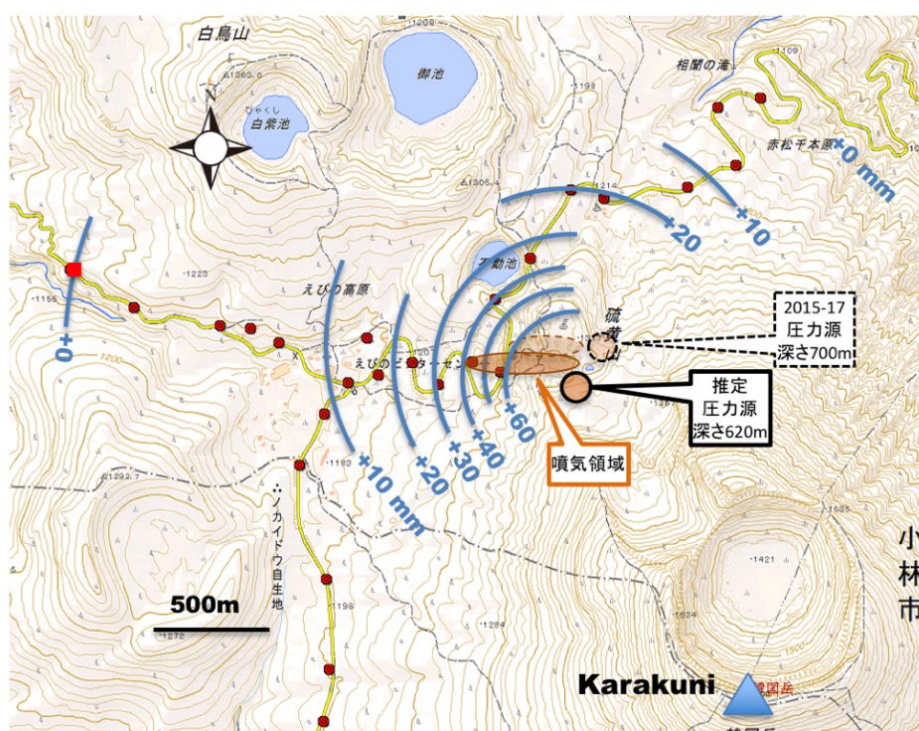


図 49. えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2017 年 10 月から 2018 年 12 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

イ) 霧島・硫黄山地下の圧力源変動

九州大学を中心とした大学合同水準測量班は、2015 年 6 月にえびの高原周辺に水準路線を増設した（図 49）。

硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をとまなう火山性微動がたびたび発生し、2015 年 12 月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017 年 5 月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018 年 2 月には火山性地

震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。4 月上旬から硫黄山の南側に沿って東西に新たな噴気孔列が生じ、一部で小噴火を発生させている。本年度は 2020 年 9 月上旬、2021 年 3 月上旬の 2 回の精密水準測量を実施した。2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を図 50 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 51 に示す。

いずれも 2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。再隆起が始まった 2017 年 10 月以降の隆起量は図 49 に等値線で示されている。硫黄山山頂に近い BM3050 で 2020 年 9 月までに 72.7 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前よりは、南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。この隆起は硫黄山西側の BM3040 を除いて、2018 年 12 月以降はほぼ停止状態になっている。

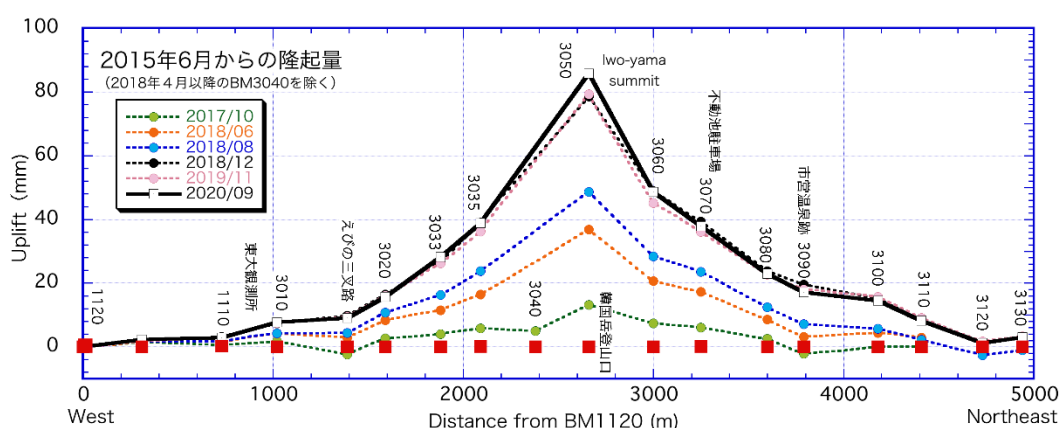


図 50. 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果 (BM3040 を除く)。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2019 年 11 月以降は硫黄山西麓の 3033～3060 間で若干の隆起傾向が見える。

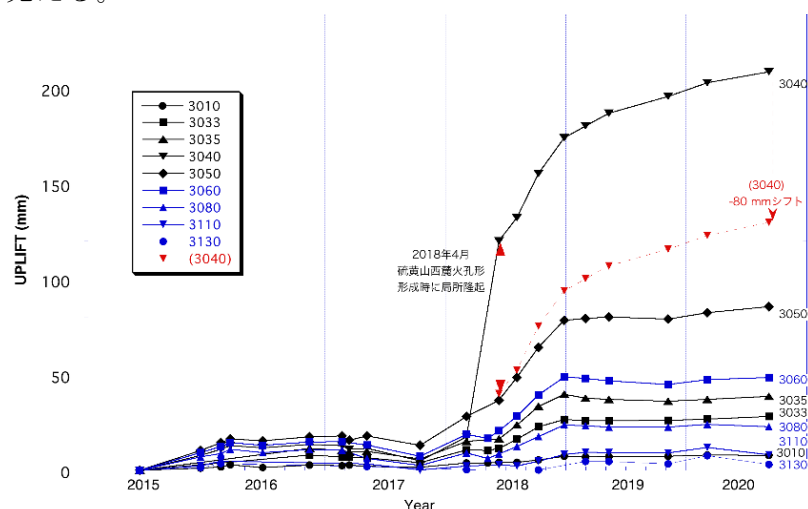


図 51. 主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点でほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8 cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きい。また、2019 年 11 月以降は、硫黄山西麓にあたる 3033～3060 の基準点でわずかに隆起傾向となっている。

推定された圧力源の位置を表 3 に示す。圧力源の位置は、2017 年 10 月以前は硫黄山噴気群の東側約 100 m であったが、2017 年 10 月以降は硫黄山南噴気孔の南側に存在していると考えられる。またその深さも、この地点の標高を 1300m と考えると、地表からそれぞれ、700m、620 m となり、圧力源の位置も徐々に上昇していると考えられる。硫黄山直下では厚さ 700 m 程度の低比抵抗層(スメクタイト層と推定)が 3 次元 MT 解析で推定されており (Tsukamoto *et al.*, 2018³¹⁾)、これがキャップロックとなりこの直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。

図 52 に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。この際、圧力源の位置は表 3 の場所に固定し、体積変化量のみを変化させて最適値を求めている。2015 年 6 月を基準とした体積増加量は、2018 年 12 月では 15.7 万 m³、2019 年 3 月 15.6 万 m³、11 月 15.2 万 m³、2020 年 3 月 15.9 万 m³、9 月 16.2 万 m³ 推定された。2017 年 10 月からの地下圧力源の膨張は 2018 年 12 月以降停滞状態である。2019 年以降は硫黄山南火口や西麓噴気孔の熱水湧水量や水蒸気量に明らかな減少が見られることから、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつあると考えられる。

図 53 に最近の地殻変動の比較を示す。左図は 2017 年 10 月から 2018 年 12 月まで、右図は 2019 年 11 月から 2020 年 9 月の水準測量による上下変位と気象庁 GNSS による水平変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が隆起傾向にあったが、後者の最近 1 年間は硫黄山西麓の狭い領域に隆起がとどまっている。このことから、2019 年 11 月以降は硫黄山西麓のごく浅い部分が膨張していると考えられる。この領域は 2020 年以降、

表 3 精密水準測量データから推定された、硫黄山直下の圧力源

| | 2017 年 10 月以前 | 2017 年 10 月以降 |
|------|---------------|---------------|
| 北緯 | 31.946777 | 31.94517 |
| 東経 | 130.85460 | 130.853975 |
| 海拔高度 | 600m | 680m |

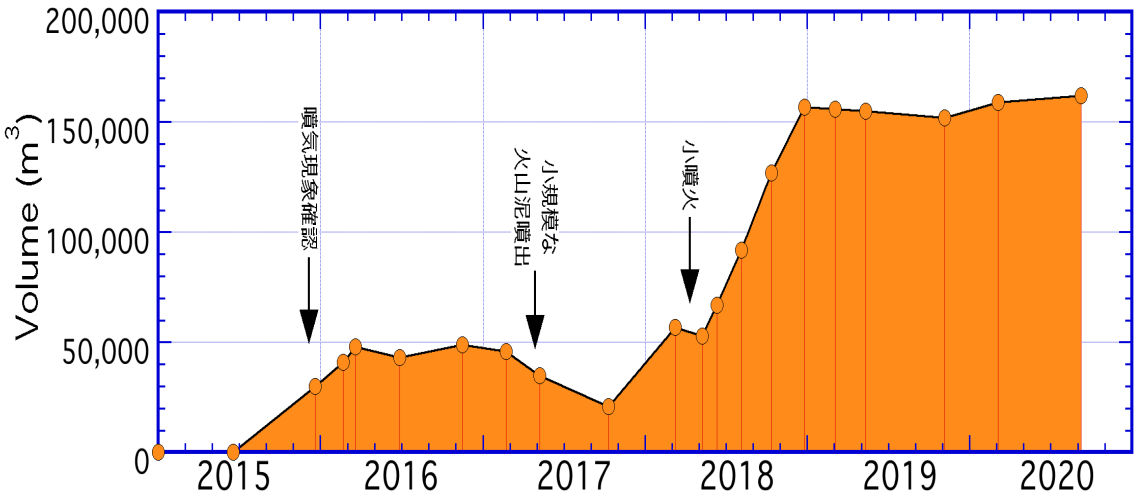


図 52. 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量。

噴気や熱水の湧出、地熱異常が多く確認されている領域であり、膨張の原因としては地温上昇や間隙水圧増加に伴う浅部の地層の体積増加が想定される。

硫黄山から北北東に 500m 離れた地点で継続している広帯域 MT 連続観測による比抵抗値は、年周変化に加え、長期的な変動が観測される(図 54)。80–8 Hz 帯の平均化された見掛け比抵抗 (Rung-Arunwan et al., 2016³⁴)は 2016–2017 年頃から数パーセントほどと、わずかながら低比抵抗化が示唆されており、硫黄山の火山活動活発化に対応して、地表から地下数 100m 付近が低比抵抗に変化している可能性がある。

ii) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

霧島火山のえびの高原付近および霧島火山周辺を含む広域で GNSS 連続観測を実施した。霧島火山周辺の国土地理院 GEONET、気象庁、防災科学技術研究所 VNET の GNSS データとともに解析を進め、霧島山のマグマ蓄積状況について調査し、気象庁火山噴火予知連絡会に情報を提供した。

iii) 霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山の小噴火も含めた過去の火山活動を正確に評価するため、VEI-3 噴火である新燃岳 2011 年噴火の産状の変化を調査し、地層記録への残り方を評価した。

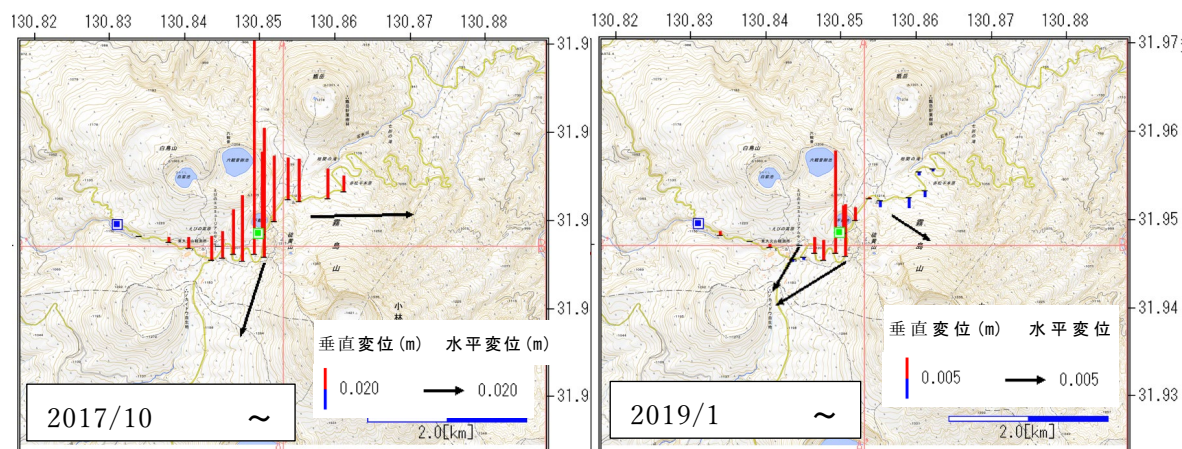


図 53. 最近の地殻変動の比較. 左図は 2017 年 10 月から 2018 年 12 月まで、右図は 2019 年 11 月から 2020 年 9 月の水準測量による上下変位と気象庁 GNSS による水平変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が大きく隆起傾向にあるが、後者の最近 1 年間は硫黄山西麓の狭い範囲に隆起がとどまっている。このことから、2019 年 11 月以降は硫黄山西麓のごく浅い部分がわずかに膨張していると考えられる。地形図には国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

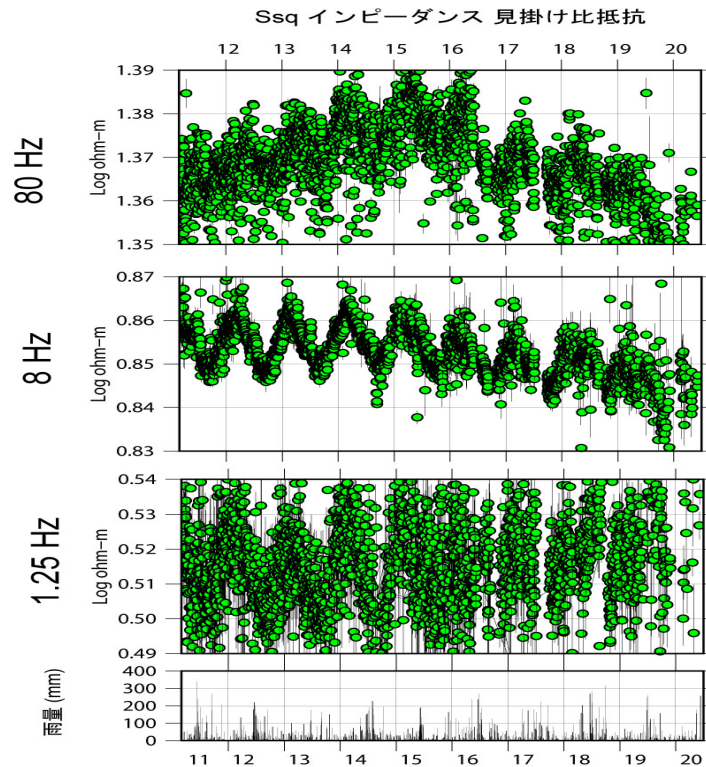


図 54. 硫黄山北北東 500m の地点の平均化された地下見かけ比抵抗。広帯域 MT 連続観測で得られた電磁場データの解析により、見かけ比抵抗を 1 日ごとに算出した。下段は気象庁えびの高原観測点での雨量。

f) 箱根火山における機動観測

i) 箱根におけるマグマ-熱水供給系に関する検討

令和 2 年度はこれまで得られている新たに推定した箱根火山の速度構造モデルから、マグマ-熱水供給系についての検討を行った。この速度構造モデルでは、箱根中央火口丘直下の深さ 6km 以深に低速度の領域が存在する (図 55)。この低速度領域について固液複合系モデル (Takei, 2002)³⁵⁾に基づいて解釈すると、深さ 9km 付近 (LV2) では低アスペクト比のクラック中に結晶化の進んだメルトの存在が示唆される一方、深さ 6km 付近 (LV1) は水もしくはガスに富んだ領域すなわち熱水溜まりが存在すると考えられ、水と仮定した場合の体積分率は 17%となる。この熱水溜まりの深さの上限は地震発生層の下限に対応し、また GNSS 等から推定される膨張源の深さとも一致する。地震発生層の下限を脆性-延性境界であると考え、そこでの温度は 360°C程度であり、マグマ性流体が存在した場合に溶解した石英の結晶化が起これと考えられている。速度構造モデルと圧力源の深さの関係から、山体膨張はこの結晶化によるシーリングによってマグマだまりから供給される熱水やガスが脆性-延性境界の下に蓄積し、圧力が高まった結果であることが示唆される。2015 年の噴火では、脆性-延性境界付近でのシーリングが破壊され、熱水が上昇したために浅部での間隙流体圧が増大し、群発地震活動が発生したと考えられる。これらの解析結果と解釈は学術雑誌に投稿済みである (Yukutake et al, 2021)³⁶⁾。

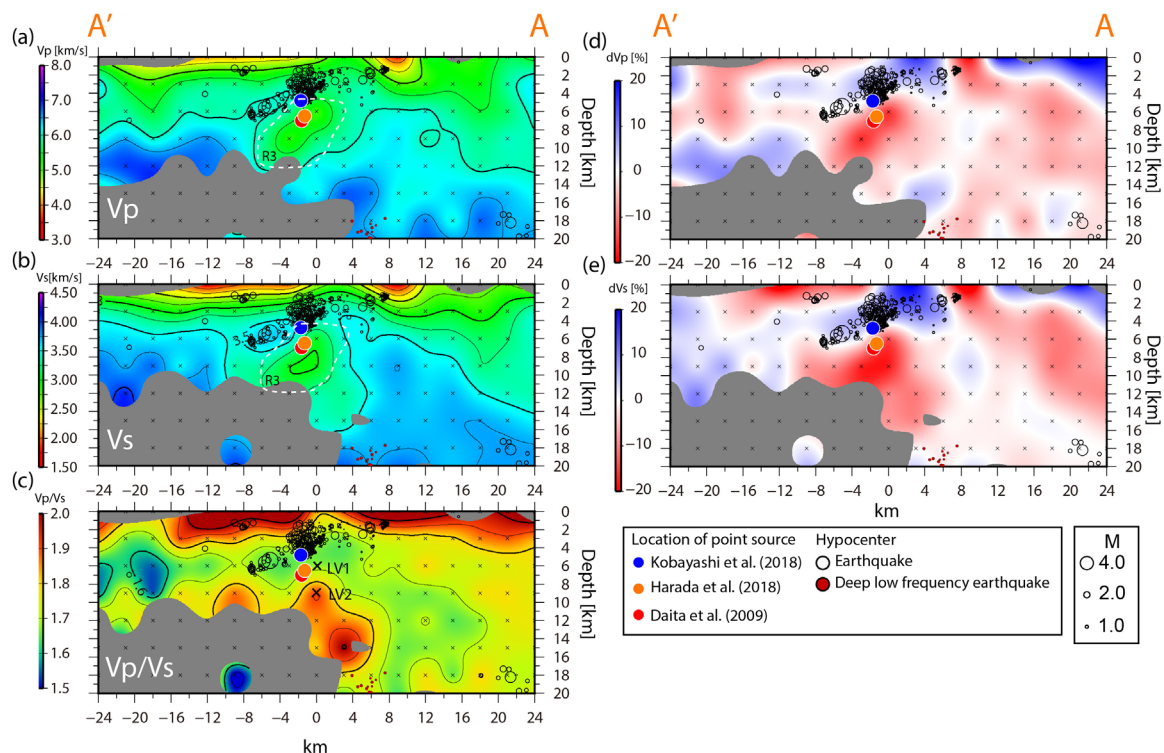


図 55. 箱根火山を切る南北断面図 (a) P 波速度 (V_p), (b) S 波速度 (V_s), (c) V_p/V_s 比, (d) V_p パータベーション (e) V_s パータベーション。圧力源の位置を青、赤、オレンジの○で示す。VT 地震と深部低周波地震 (DLFE) は断面の位置を中心に 1.5km の範囲を投影した。

また、地震学的に得られた速度構造とその解釈に加え、大涌谷やその周辺で観測される火山性ガスの組成変化などから、2015 年の水蒸気噴火やその後の火山活動について、地下でどのような現象が起きているかについて検討を行った (Mannen et al., 2021)³⁷⁾。2015 年の水蒸気噴火以後、2017 年と 2019 年に山体膨張や群発地震活動を伴う火山活動の活発化があった。しかしこれらの活動では、2015 年以前と比べ、浅い部分での地震活動度が明らかに低かった。これは、2015 年の水蒸気噴火時に浅部のキャップロックが破壊され、熱水系での間隙水圧の蓄積が阻害されたためと考えられる。一方、 SO_2 、 HCl 、 CO_2 などのマグマ成分と噴気ガス中の熱水成分 H_2S の相対的な増加や、蒸気生産井の蒸気中での Cl 量の増加が認められたが、噴気孔の温度が安定していること、非テクトニックな地震 (低周波地震や微動など) が発生していないこと、 SO_2 の排出量が限られていること (100t/d 以下) などを見ると、浅部へのマグマの貫入の可能性は低いと考えられる。むしろ、深部からの熱量の増加により気液共存型熱水系の最浅部で液相が枯渇したことによって、熱水系ガス (H_2S) に比べてマグマ系ガス (SO_2 と HCl) の割合が増加したことを示唆している。また、火山活動が活発化しているにもかかわらず 2015 年のように C/S 比が急激に上昇せずゆるやかな変動になっていること (図 56) は、 CO_2 の上昇を阻害するシーリングの効果が低下していることを示唆しており、脆性-延性境界付近に位置すると思われるシーリングゾーンも 2015 年の噴

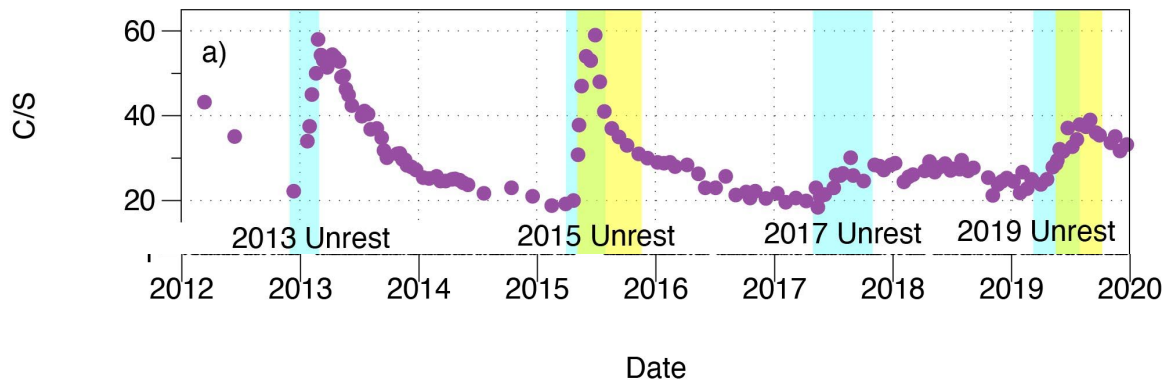


図 56. 上湯における $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の時間推移。2013 年、2015 年の火山活動活発化に伴う急激な変動にくらべ、2017 年、2019 年ではゆるやかに変動していることが分かる。

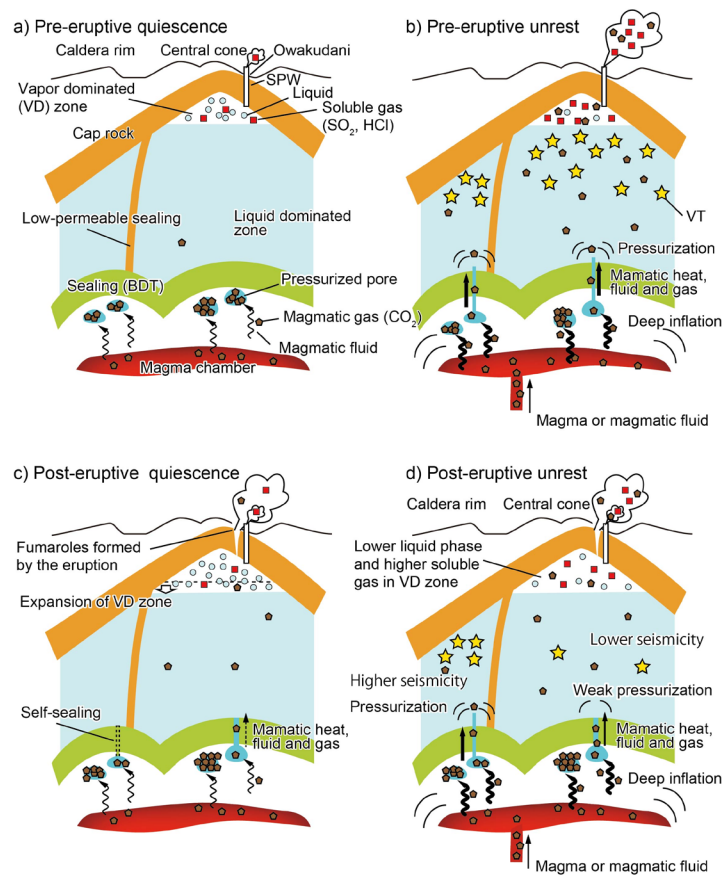


図 57. 箱根の熱水系システムの概念図

- (a) 静穏期（水蒸気噴火前） (b) 活発化（水蒸気噴火前）
 (c) 静穏期（水蒸気噴火後） (d) 活発化（水蒸気噴火後）

火で破壊されたと考えることができる。2015 年水蒸気噴火前後でのマグマ熱水系の概念図を図 57 に示す。

ii) 箱根の深部構造に関する研究

地震波速度構造解析では十分な解像度が得られていない深い領域について、レーシー

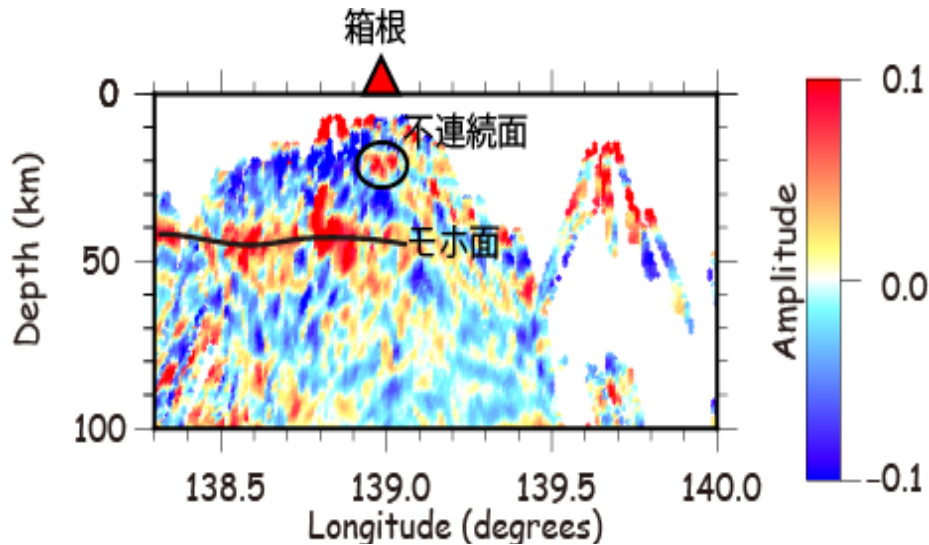


図 58. 箱根火山を切るレシーバー関数振幅の東西断面

バー関数解析を実施することでマグマだまりを検出する試みを実施している。昨年度は各個の観測点で遠地地震波形からレシーバー関数を作成し、箱根火山直下にモホ面を検出してその深さを推定した。本年度は定常観測点のデータについてレシーバー関数を作成し、重ね合わせて深さ断面を作成した。その結果、箱根火山下深さ 20km 付近に速度不連続面の存在を示唆する結果が得られた（図 58）。この不連続面は、低速度領域の下面に対応すると考えることができ、今後解析を進めることにより、地震波トモグラフィー解析で明らかになった低速度領域の下限深度の拘束につながる可能性がある。

iii) 箱根の浅部における亀裂系に関する研究

深さ数キロ程度までの浅部における亀裂系の特徴を抽出するため、機動地震観測で得られたデータを用いて S 波スプリッティング解析を行った。この解析においては S 波を、早く到達する振動方向（LSPD: Leading Shear-wave Polarization Direction）と遅く到達する振動方向に分解すると共にその時間差（Dt）を求める。LSPD は地震波の伝播経路に存在する亀裂系の並びの方向に対応し、Dt は亀裂の密度に対応する。S 波スプリッティング解析では、分離した S 波の振動方向から亀裂系の並びの方向を推定するため、センサの方位のずれは解析結果に直接影響する。しかし、機動観測であるため観測実施時に方位が数度から数十度程度、東西南北からずれることは珍しくない。そこで、遠地地震波形を用いて地震計の方位を補正したうえで、稠密観測網のデータから箱根火山における S 波異方性構造を推定した（本多ほか, 2020）³⁸⁾。

単位伝搬距離当たりの時間差で重みづけした LSPD のローズダイアグラムを図 59 に示す。また、観測点ごとに LSPD の平均値を求め、東西に近い観測点を赤で、北西南東～南北に近い観測点を青で示す。解析結果が得られなかった観測点はグレーで示してある。定常観測点のみを使用した解析では全体的に北西 - 南東の亀裂系が推定された（本多ほか, 2015）³⁹⁾が、今回の空間密度の高い観測点を用いた解析からは、広域応力

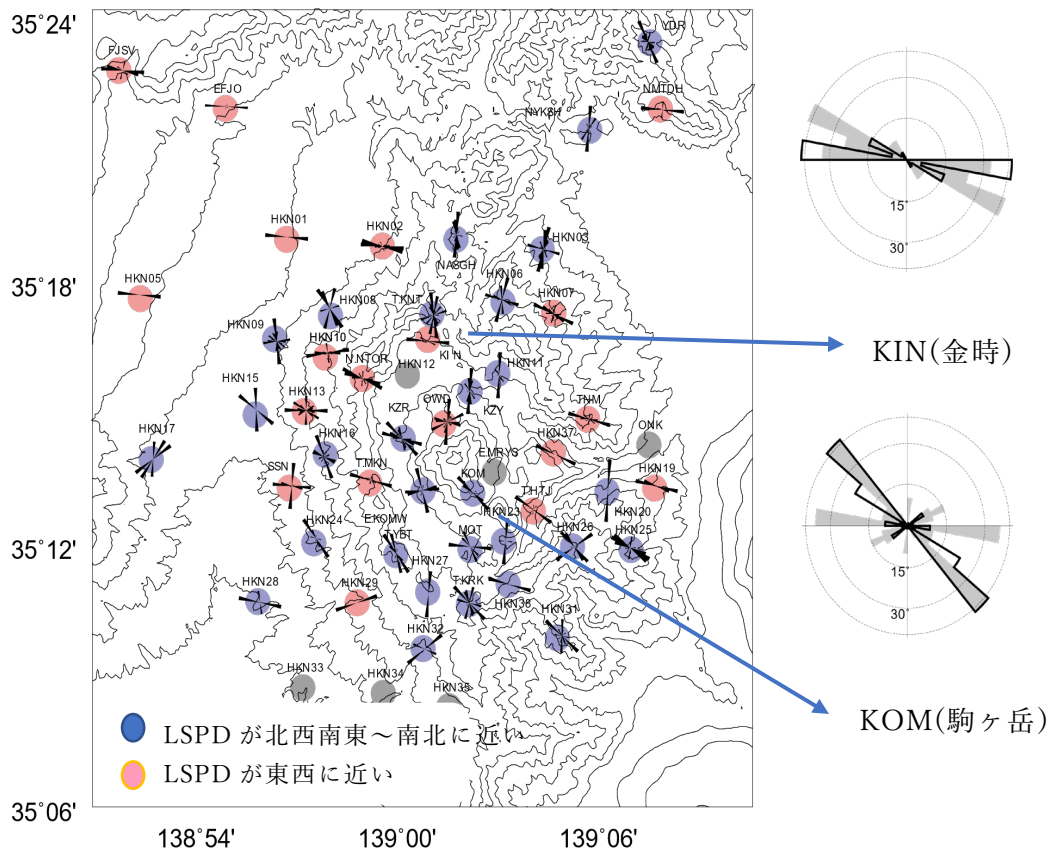


図 59. 速い S 波振動方向 (LSPD) の空間分布。LSPD の平均が東西に近い観測点を赤丸で、北西南東～南北に近い観測点を青丸で示す。また、右に定常観測点のうち、金時観測点 (上) と駒ヶ岳観測点 (下) で得られた LSPD のローズダイアグラムを示す。LSPD の頻度をグレーの網掛けで、それに単位伝播距離あたりの時間差で重み付けしたものを黒線で示す。

場とは異なる方向の LSPD を持つ観測点が、カルデラ内で一定の空間的広がりを持って分布しているように見える。例えば、金時観測点周辺では西側に向かって東西に近い LSPD を持つ観測点が分布するように見える。このことから、この領域では広域応力場に起因する亀裂系とは異なる亀裂系が存在していることが示唆される。実際、仙石原から金時山付近で発生する群発地震は、東西に近い方向に震源が並ぶことが多い。また、金時観測点の東側から北東に分布する観測点では、北北東方向の LSPD が推定されている。この領域には平山断層と呼ばれる逆断層が存在し、その走行は LSPD で示される北北東と一致する。この断層の地表露頭は箱根カルデラ内では確認されていないが、LSPD の分布からはカルデラ内の地下まで断層が伸びている可能性が示唆される。

本多ほか (2016)⁴⁰⁾では、定常観測点の位相差スペクトルを用いて微小クラックの特徴を推定した。その結果、東西に近い LSPD を持つ金時観測点は、他の観測点に比べてクラックの特徴的なサイズが大きい可能性が示唆されている。一方で異方性強度の深さ分布は、駒ヶ岳など北西 - 南東方向に LSPD を持つ観測点に比べて、浅いところに異方性が集中している (本多ほか、2015)³⁹⁾。このような特徴を機動観測点でも明らかにすることができれば、火山活動の活発時における熱水系の供給系路の推定につな

がると考えられる。さらにクラスタリング等の手法を用いて客観的に LSPD に基づいた観測点の分類ができれば、その分布から LSPD が何によって決定されているかを明らかにできると期待できる。

なお、ここで示した箱根火山における地震波速度構造と、箱根火山のマグマ - 熱水系に関する研究成果は、JpGU 及び日本火山学会秋季大会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と議論を行った。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システムの開発

今年度も昨年度に引き続き開発したソフトウェア「ちょいプロ」の霧島における地震観測データの表示への適用を行った。ソフトウェア「ちょいプロ」は HP 上 (<http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/choiplo/>) にて公開している。また、大学院生の講義において「ちょいプロ」を演習の一環として導入し、利用者拡大に努めるとともに、演習の中で上がったいくつかの改善すべき点を集めた。今後はこれらを可能な範囲で改善する。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

i) 前処理支援ツールパッケージ化

草津白根山における機動観測により取得された MT データや過去に取得した他火山の MT データの解析を通じて、四面体メッシュインバージョン^{3, 4)}の支援ツールのパッケージ化を進めた。この作業の補助として東工大でリサーチアシスタント 1 名を雇用した。今年度は、新たに海底電磁場観測装置 (OBEM) および Phoenix 社製の新たな MT 観測装置 (MTU-5C) のデータに対する入力データ作成支援機能を追加した。また、インバージョンの最適なメッシュサイズについて検討し、改良を加えた。

本支援ツールでは、前年度までにメッシュサイズを半自動で決定するような機能を持たせていたが、草津白根山等においてインバージョンによる比抵抗構造モデルの構築を行うなかで、その機能に不具合が見つかった。図 60 は、同じデータセット（観測点数および計算周波数が同じ、地形データも同じ 10 m メッシュデータを組み込み）に対して異なるメッシュサイズを設定した場合の結果の違いを示す。図 60(a) および (b) で示したように、観測点周辺のメッシュサイズを変更したところ、得られた比抵抗構造モデルに違いがあることがわかった（図 60(c) および (d)）。インバージョンの際のパラメータは両者とも同じである。観測点近傍のメッシュを細かくした場合、観測点の周辺で低比抵抗と高比抵抗が対をなす小さなパッチ状の比抵抗分布が得られた（図 60(c) 左）。これは、データが持つ分解能以上に未知数を設定しているためと考えられる。インバージョンでは、観測データに含まれる表層付近の電場の歪みを補正するためのディストーション項が考慮されている³⁾が、この項をミスフィット項やラフネス項と共に最小にする過程において、低比抵抗と高比抵抗が対となるような分布を作り出したと考えられる。何通りかのメッシュサイズで検討したところ、観測点近傍のメッシュサイズを荒くすることで、このパッチ状

の分布が見られなくなることがわかった（図 60(d)左）。また、南北断面を見ると、図 60(c)のモデルでは、草津白根山の南側の山腹で低比抵抗領域が地表付近にまで

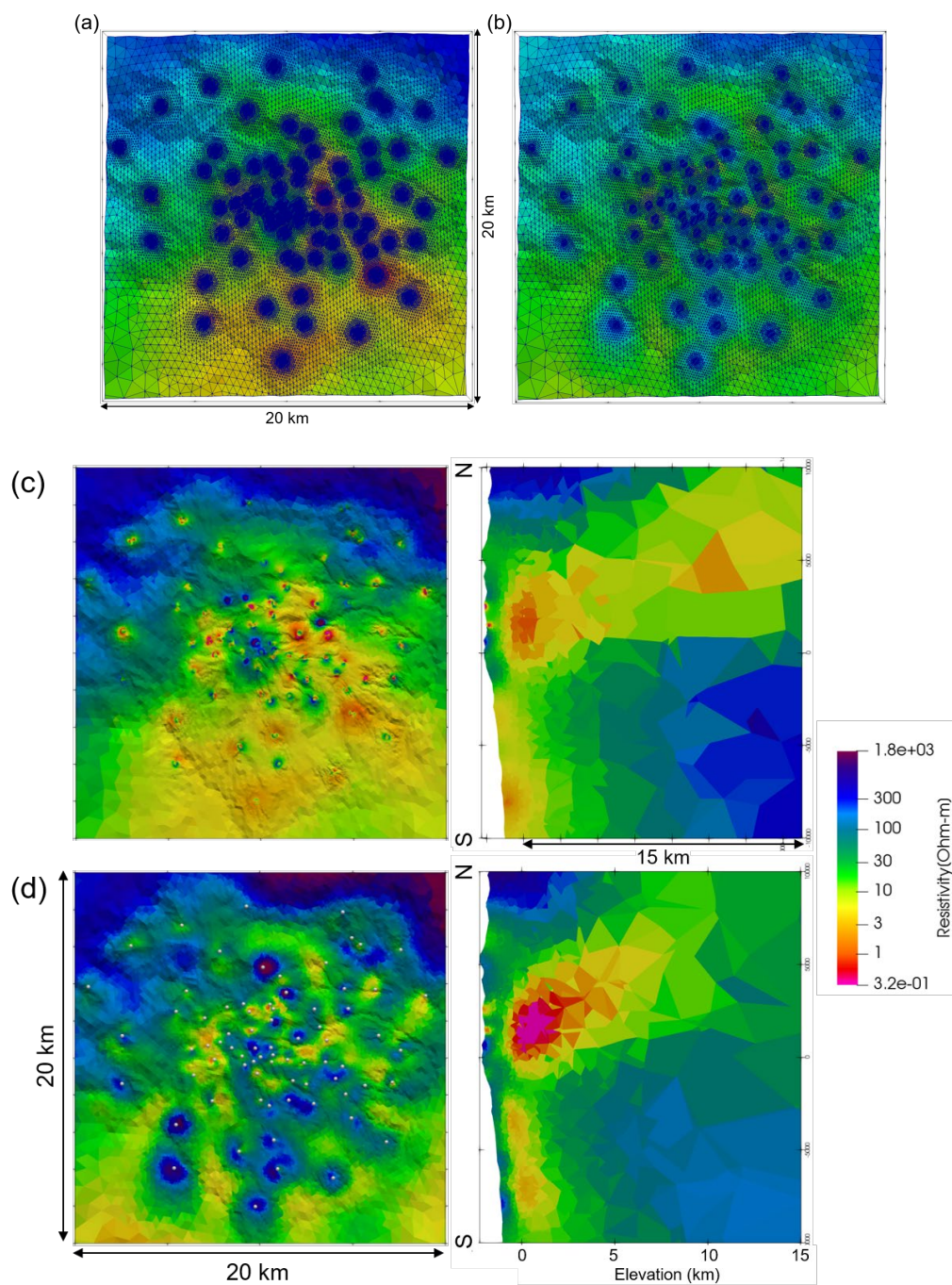


図 60. 同じデータセットに対して異なるメッシュサイズを設定した場合のインバージョン結果。(a) 観測点周辺のメッシュサイズを細かく設定した例（地表のメッシュを示している）、(b) やや大きなメッシュサイズの例。(c) (a) のメッシュを用いたインバージョン結果、(d) (b) のメッシュを用いたインバージョン結果。左図は地表面の比抵抗分布で右図は湯釜火口付近を通る南北断面図を示す。

推定されているが、これは、これまでに得られている草津白根山の比抵抗構造や地質分布などの知見と整合しない。図 60(d)右のモデルのように、表層付近の高比抵抗の下に低比抵抗領域が広がるというモデルの方が尤もらしい。さらに、比抵抗構造モデルの違いは表層のみにとどまらず、地下深部の低比抵抗の分布にまで及んでいるため、観測点近傍のメッシュサイズを最適なものにすることが重要であることがわかる。

前年度は、本事業で取得された倶多楽火山における MT データを用いて、海底地形データの違いによるインバージョン結果の違いを検討し、陸上の観測点のみを用いた場合には、海岸線付近でデータを取得した場合であっても、500 m メッシュの海底地形データ⁴¹⁾のみを用いた結果とより細かい M7000 シリーズデータも用いた場合とで結果にほとんど違いが見られないことを確認した。今年度は、海底に観測点がある場合の MT データに対応するため、過去に始良カルデラ周辺で取得したデータ⁴²⁾を用いてインバージョンを行った。このため、入力データ作成支援機能を OBEM データにも対応するように改良した。その結果、海底に観測点がある場合には、500 m メッシュの海底地形データでは不十分であったため、より詳細な海上保安庁水路部発行の沿岸の海の基本図（鹿児島湾北部）の水深データ（M7000 相当）を組

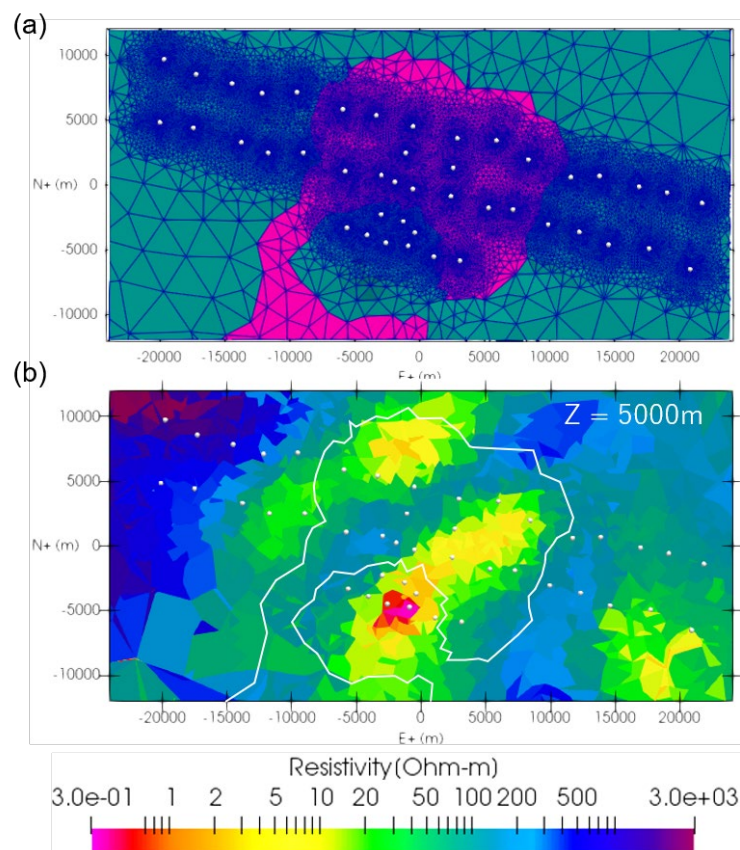


図 61. 始良カルデラ周辺で取得された MT データへの適用例。(a) 初期モデルと地表のメッシュ分布。海水が占める領域は、 $0.33 \Omega m$ の比抵抗値で固定している。白丸は観測点を示し海域 16 点、陸域 28 点のデータを用いた⁴²⁾。(b) 推定された比抵抗構造モデルの深さ 5 km における水平断面図。

み込んだ。また、上記のメッシュサイズに起因する観測点近傍におけるパッチ状構造の問題も見られたが、これも同様にメッシュサイズを荒くすることで解決した。図 61 に最終的なメッシュ分布と比抵抗構造モデルの深さ 5 km における水平断面図を示す。始良カルデラ北東部の若尊カルデラの地下から桜島にかけて低比抵抗の領域が繋がっていることがわかり、桜島のマグマ供給系をイメージしたものと考えられる。

ii) 熱水流動シミュレーション

本システムを火山活動の現況評価や噴火切迫性予測に利用するには、熱水流動シミュレーションの結果を各種のモニタリング観測のデータと対比させることが重要となるため、この部分のツール開発にも取り組んできた。令和 2 年度は、TOUGH2 による熱水流動シミュレーション結果の温度圧力場から、COMSOL Multiphysics を利用して有限要素法で地表面の変形（多孔質媒質の弾性変形＋熱変形）を計算できるようにしたほか、Matlab スクリプトで地磁気全磁力（磁場変化）を計算するツールについて開発を進めた（図 62）。このツールを用いたシミュレーションの例を以下に示す。まず、熱水流動シミュレータ TOUGH2 を用いて、軸対称のモデル空間の中心軸に設定した噴気火道の最下部から高温流体を 3000 t/day の率で注入して定常状態を再現した。その後、噴気火道の深さ 200 m の部分の浸透率を 10^{-12} から母岩と同じ 10^{-14} m^2 に下げ（以下ではこの操作を「火道閉塞」と呼ぶ）、その後の応答を調べた。火道閉塞から 1 年間の圧力変化と地表変形を示したのが図 62(右)である。

閉塞部直下で最大 2 MPa 程度圧力が高まっている一方で、閉塞部より上部では熱水が上昇しにくくなるため減圧していることがわかる。また、温度変化とそれに伴う熱消磁がもたらす全磁力変化について計算した結果を図 63～65 に示す。これらは、すべて火道閉塞直前の状態との差分として示している。火道閉塞直後から、高

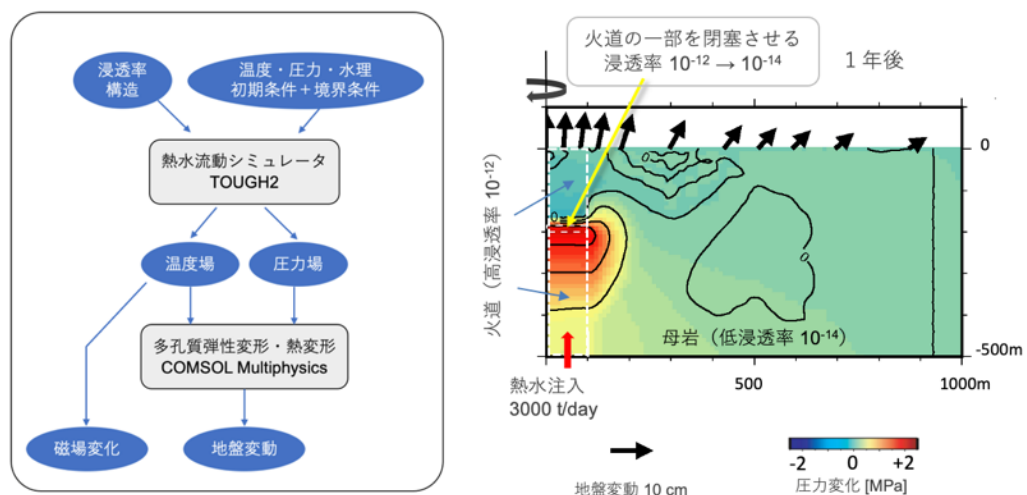


図 62. 熱水流動シミュレータの出力から地盤変動と磁場変化を計算する処理スキーム（左）とその計算例（右）。噴気火道の一部（深さ 200m）の浸透率をある時点で 2 桁下げた場合の、1 年後の圧力場（初期分布からの変動分）をカラーで、地表の変形を矢印で示している。モデル空間は軸対称で、左端が噴気火道に対応する。

温流体が閉塞部より上に供給されにくくなるため、閉塞部直上の温度が数 10 K 低下し、この低下域が上方に移動していくのがわかる。これに伴い、火道内の岩石磁化が再帯磁するため、地上では、火口の南側で全磁力が増加し北側で全磁力が減少する、双極子型の磁場変化が観測される。以後、しばらくはこの傾向が徐々に強ま

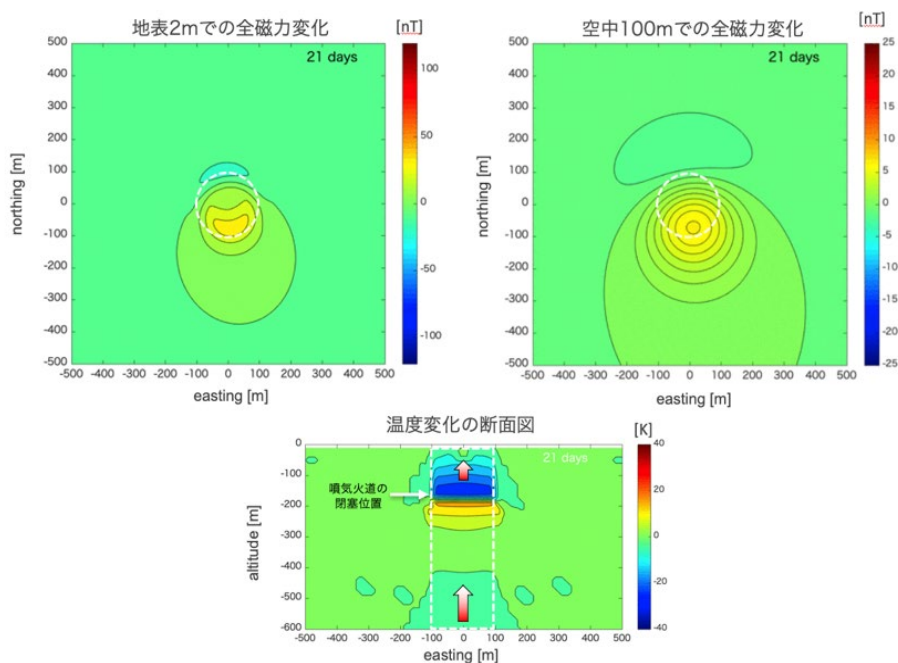


図 63. 火道閉塞後 27 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

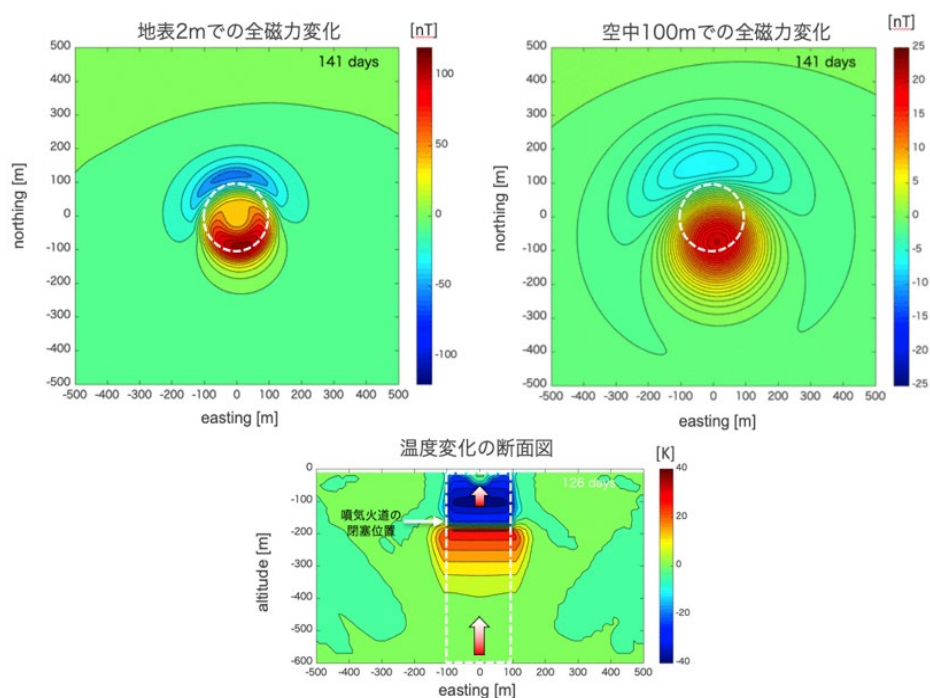


図 64. 火道閉塞後 141 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

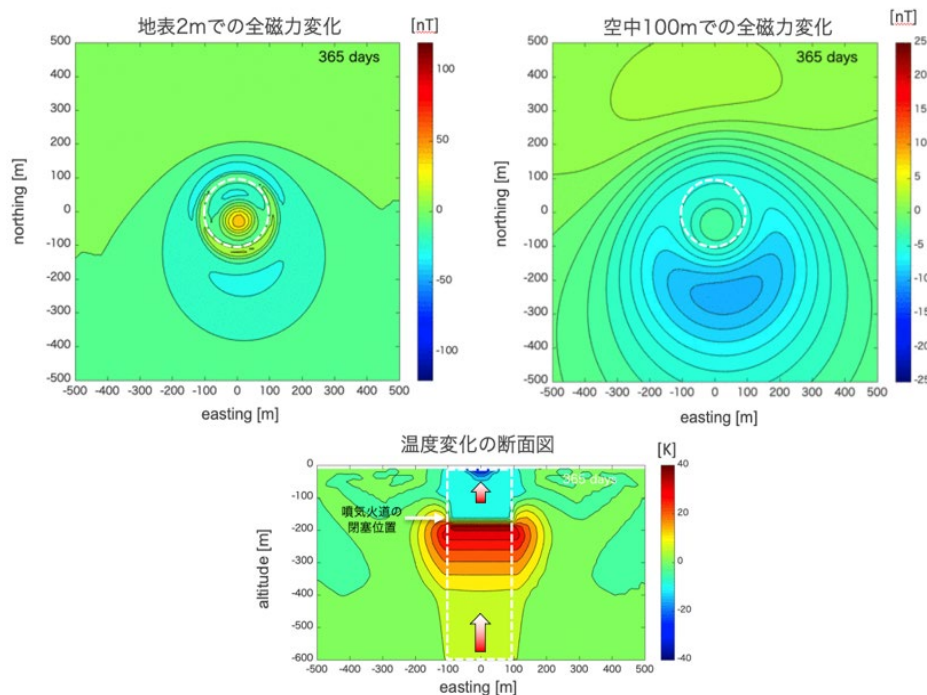


図 65. 火道閉塞後 365 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

るが、火道閉塞後 1 年ほど経過すると、低温化した部分はほぼ地上に排出されてしまい、閉塞部の下部に発達した温度上昇域の影響が卓越するようになる。このため、全磁力変化は熱消磁のパターンを示し始める。

この傾向は上空 100 m から観測した場合に明瞭であるが、地上付近で観測した場合には、火口域に依然として局所的な帯磁のパターンが残っているのがわかる（図 65）。火道閉塞は、水蒸気噴火の前に起こり得る現象のひとつと考えられているため、今後さらに精査して地盤変動と全磁力変化を時系列ベースで比較し、実際の観測事例との比較も試みたい。

iii) 坑井データの読取と整理

昨年度に続き、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が公開している地熱開発促進調査のボーリングデータを利用して、比抵抗とコア物性の関係を検討した。データの利用にあたり、コア物性値については報告書の PDF ファイルから数値を手作業で読み取る作業が必要であるため、令和 2 年度は、このデジタル化業務のために北大でリサーチアシスタント 1 名を雇用した。今年度は、胆振・王滝・阿寒・水分峠南部・阿蘇山西部のデータを整理した。昨年度読取を行った登別と弟子屈西部を合わせると、これまでに 7 地域のデータの読取が完了している。これ以外にも、雲仙西部、霧島烏帽子岳、上川地域についても部分的に整理を進めている。

今年度に読取を行った、胆振⁴³⁾・王滝⁴⁴⁾・阿寒⁴⁵⁾・水分峠南部⁴⁶⁾・阿蘇山西部⁴⁷⁾のデータを用いて、それぞれ図 66～70 を作成した。各図について、左のパネル

は、有効空隙率に対する比抵抗値の対数-対数プロットである。ここで、比抵抗値は、ロングノルマルの電気検層比抵抗値として報告書に書かれている値（ ρ ）を、横山・他（1986）⁴⁸⁾が示した安山岩の場合の実験式（式（*）および（**））に基づいて、温度依存性を補正し 20℃の比抵抗値（ ρ_{20} ）に換算している。

$$G = \rho / \rho_{20} \quad (*)$$

$$T = \frac{870}{\log G + 3.08} \quad (**)$$

ここで、 T は絶対温度、 ρ は換算前の比抵抗、 ρ_{20} は 20℃換算比抵抗である。中央及び右側のプロットは、それぞれ粘土鉱物量と粘土鉱物指標に対する 20℃換算比抵抗を示している。NEDO の報告書には、X線分析結果一覧表に試料中の鉱物量が示されているが、本研究では、これを数値化（微量=1、少量=2、中量=3、多量=4）した上で単純和を求めて、その試料の粘土鉱物量とした。さらに、これらの粘土鉱物がバルク比抵抗に与える影響度の違いを考慮するために、白水（1988）⁴⁹⁾、高倉（2014）⁵⁰⁾に示された、粘土鉱物の陽イオン交換容量（CEC）を参考に、モンモリロナイトに 80、緑泥石に 6、セリサイトに 13、カオリンに 6 の係数を各粘土鉱物量にかけて重み付けした和を、「粘土鉱物導電指標」とした。

まず、有効空隙率と比抵抗の関係（図 66～70 の左）について見ると、王滝と阿寒を除く地域では、概ね有効空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向が認められる。これは、昨年度報告した弟子屈西部や登別地域の結果と同じで、Archie の法則が成り立っていることを示唆している。バルクの比抵抗を ρ 、間隙水の比抵抗を ρ_w 、空隙率を ϕ で表すと、Archie 則は $\rho = a\phi^{-m}\rho_w$ と書くことができる（ a 、 m は定数）。これを対数表示にすると、 $\log \rho = \log(a\rho_w) - m \log \phi$ であることから、両対数グラフでの傾きは m 値を表している。王滝と阿寒以外のデータでは m 値はおよそ 1.0 から 1.5 であり、これも昨年度の結果と同じであった。王滝地域では、有効空隙率が 1%以下の試料の割合が高く、他の地域と顕著に異なっているが、他地域と比較して粘土鉱物量が多いわけではない。一方、阿寒地域の試料には、有効空隙率が 10%を超えるものが多かった。種類を特定しない粘土鉱物量と比抵抗との関係は明瞭ではない（図 66～70 の中央）のに対して、導電性への寄与を考慮した粘土鉱物導電指標に対する比抵抗のプロット（図 66～70 の右）で見ると、試料数の少ない王滝地域を除いて、概ね右下がりの相関が見て取れる。これは、CEC の高いモンモリロナイト（スメクタイト）が多く含まれる試料ほど低比抵抗であることを意味している。しかしこのことは、これらの試料が含まれる地層が難透水性であることを意味している訳ではない。というのも、データを見る限りこうした試料の多くは、有効空隙率が高い試料に対応しているからである。有効空隙率は、相互に連結した空隙の割合を表していると考えられることから、浸透率とも相関が高いはずである。従って、近年の研究でしばしば解釈されているように、モンモリロナイトを豊富に含む低比抵抗層がキャップロック層（難透水性シール）になっているような事例は、むしろかなり特

殊な状況である可能性が高い。従って、比抵抗構造モデルから、熱水流動シミュレーションに与える水理構造を推定する際には、まず参照モデルとして、Archie 則を仮定した空隙率・浸透率を与えるのが妥当ではないかと考えられる。もちろん、近似式を求めること自体は可能でも、実際のデータが示すように、ばらつきは非常に大きいので、決め打ちでシミュレーションを行っても信頼性に欠ける結果しか得られないであろう。将来、MCMC 法などを用いて確率的な予測を行う際に利用しやすいように、ここで整理したボーリングデータ等に基づき、確率分布の形で浸透率を与えるのが現実的であるかもしれない。

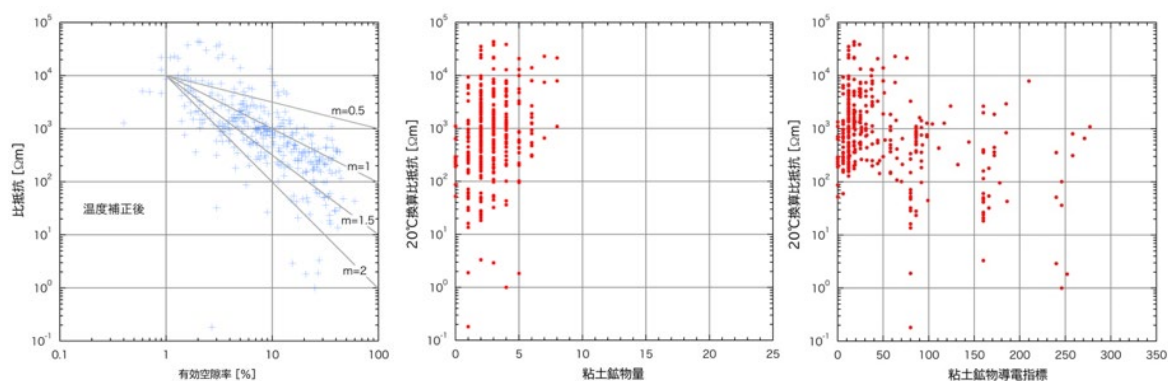


図 66. 胆振地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1983)⁴³⁾。

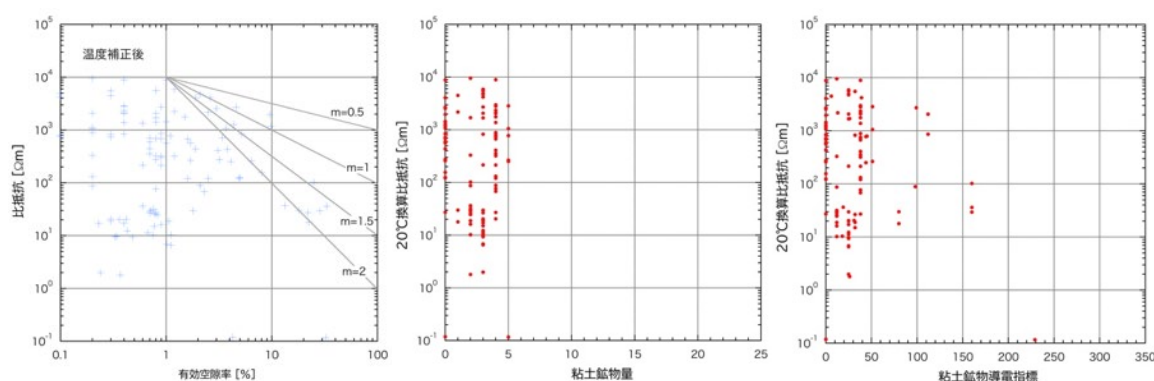


図 67. 王滝地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1988)⁴⁴⁾。

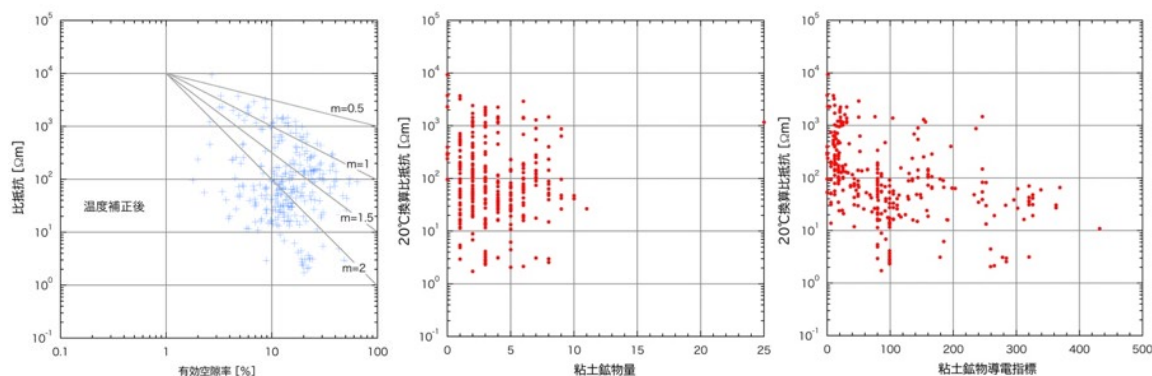


図 68. 阿寒地域の坑井データの読取結果。原データは NEDO(1992)⁴⁵⁾。

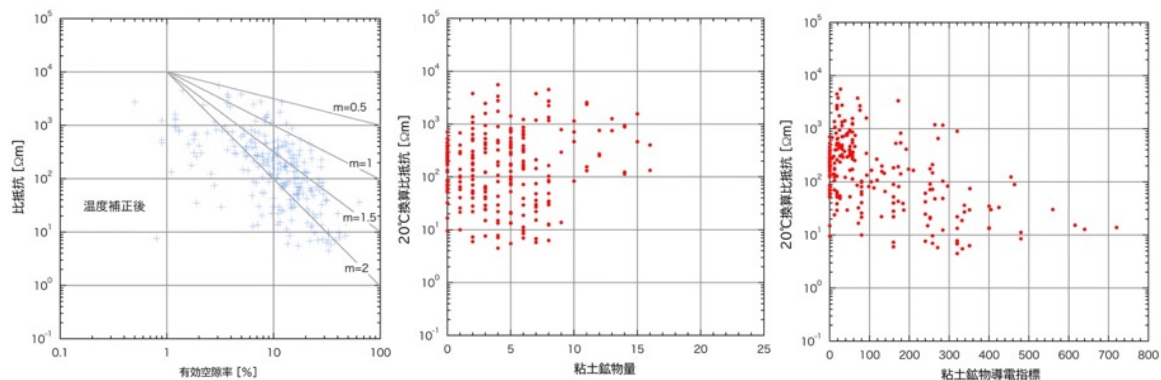


図 69. 水分峠南部地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1994)⁴⁶⁾。

システムを構成する要素のうち、比抵抗インバージョンに関するツールの開発は概ね順調に進んでおり、一部はパッケージ化して関連する研究にも活用され

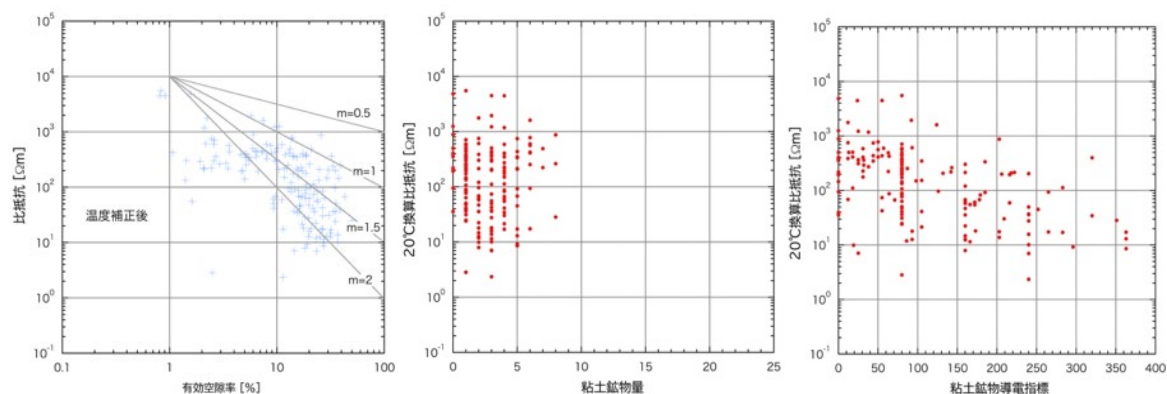


図 70. 阿蘇山西部地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1995)⁴⁷⁾。

は始めている。熱水流動シミュレーションに関する部分については、比抵抗構造と浸透率構造への変換は依然として難しいが、地熱ボーリングのデータ収集は順調に進んでおり、統計的なアプローチで解決策が見いだせる可能性がある。一方、浸透率構造を仮定して流動シミュレーションを行い、地盤変動や地磁気変化などのモニタリング観測と比較するための道筋には目処がついてきた。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

i) システムの基本設計

昨年度の本事業の報告書で記述したように、火山活動の活発化や噴火活動に伴い、火山周辺では様々な特徴の波形を持つ地震や微動が発生するが、火山の内部状態の変化の把握には、波形の特徴に注目した地震種別に着目して、地震活動度の変化に注目することが重要である。本報告 1)「機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握」、d)「三宅島における機動観測」の項で記述したように、三宅島においては、高周波成分が卓越して P 波及び S 波の到達時刻が明瞭に読み取れる A 型地震と、S 波の到達が不明瞭な B 型地震、その中でも波形の高周波成分が卓越する BH 型地震と低周波成分が卓越する BL 型地震では、その震源の位置が明瞭に異なる

ることが明らかになった（1）—d）の図 39）。BL 型地震や BH 型地震は、火口内の南側で、現在も噴気をあげる領域直下の浅部で多数発生しており、その起源は噴気活動が大きく関与していると考えられる。また、A 型地震の発生状況は、火山ガスを発生させるマグマ循環の最浅部と火口とを繋ぐ流路の状態を反映していると思われる。2016 年前半に起こった、山体膨張の一時的な加速と火山ガスの放出の急減過程と、これらの地震活動の変化には、何らかの関連があることが予想されるが、その詳細についてはこれまで何ら情報が得られていない。次の噴火の際には、これらの地震活動の活発化も予想されるため、この情報の整理は、次の噴火の際の切迫性評価に必要な情報であると考えられる。

三宅島で発生する地震の数は非常に多く、その活動を正確に表す地震カタログを作ることは極めて困難である。一方、地震活動度の時間変化をある程度推定を可能とするものとして、地震波検測自動処理のトリガー数が挙げられる。例えば、図 71 は地震研究所が気象庁、防災科研、東京都の設置した観測点の地震波形データの提供を受け、自動地震検測処理した際の月別のトリガー数の時間変化である。このトリガー方式は LTA と STA の比を判断基準とする初歩的なものであり、トリガーのかかったイベントの中には、地震ではない地動のノイズや、三宅島以外で発生した地震も含まれている。しかし、実際の波形を見てみると、その多くは三宅島浅部で発生した、震源が決められないごく小さな地震であると考えるのが妥当と思われる。とは言え、このトリガー数の時間変化を見ると、山体膨張の一時的な加速と火山ガス放出の急減の起こった 2016 年前半で、トリガー数が急減していることが明らかで、この事象を境に三宅島浅部で発生する地震の活動にも大きな変化があったと想像できる。

本事業で開発に取り組んでいる火山性地震活動総合解析システムは、ここで見られるような 1 ヶ月に多いときには 6000 回に達するようなトリガーの中から、地震波形の特徴を正確に識別し、その地震の種別（A 型、BH 型、BL 型等）を自動的に判別するシステムを想定している。昨年度は、検測者が判定した地震種別と次式に示す Buurman

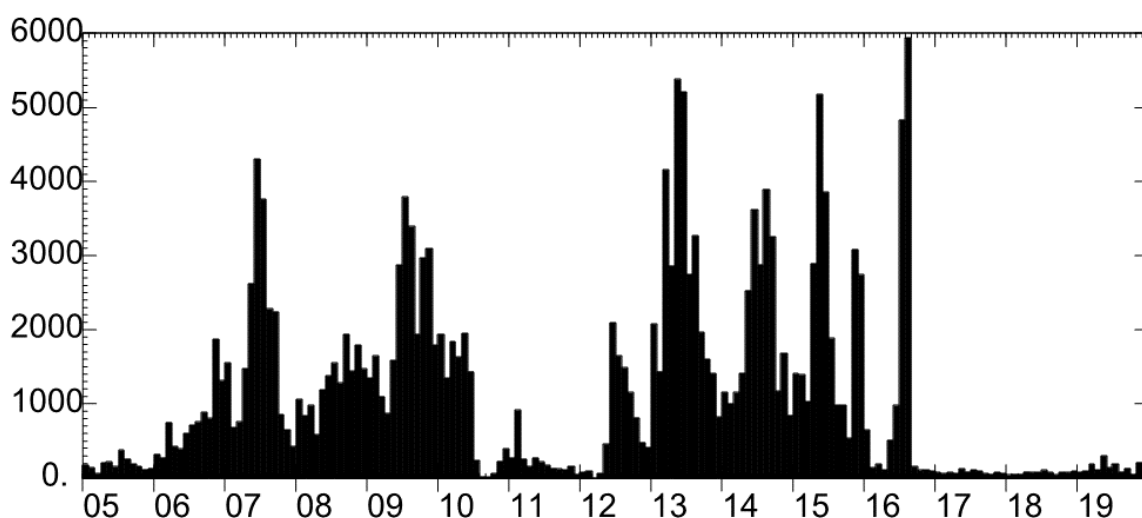


図 71. 東京大学地震研究所で気象庁、防災科研、東京都の地震波形データを用いて、自動処理した月別地震発生トリガー数。2005 年～2019 年の期間。

and West (2010)⁵¹⁾ が提唱した周波数指数 (FI) に良い相関があり、その周波数帯として、4-8Hz と 10-16Hz の帯域を選ぶことが妥当であることを示した。

$$FI = \log_{10} \left\{ \frac{\text{mean}(A_{4-8\text{Hz}})}{\text{mean}(A_{10-16\text{Hz}})} \right\}$$

この周波数指数を用いて、地震種別の判定を行う際に、効率的に地震種別を判定するには、A 型、BL 型及び BH 型地震で、判別に用いるパラメータの分布に明瞭な差異が現れるように工夫することが有効である。そこで単に周波数指数の分布を見るのではなく、どちらかの周波数帯域の振幅と併せて分布を調べた。その結果を図 72 に示す。周波数指数を求める時、その基準を高周波数帯域の振幅値に選ぶ方が、判別が容易になる。これは、脈動等の影響で低周波数帯域側の振幅の推定の誤差が大きくなるためであると考えられる。特に、振幅が小さい地震の場合には、その傾向が顕著であることをこの図が示している。今後、周波数指数を用いた地震種別の判定アルゴリズムの開発を目指す、その際にはこの点について留意する必要があることがわかった。

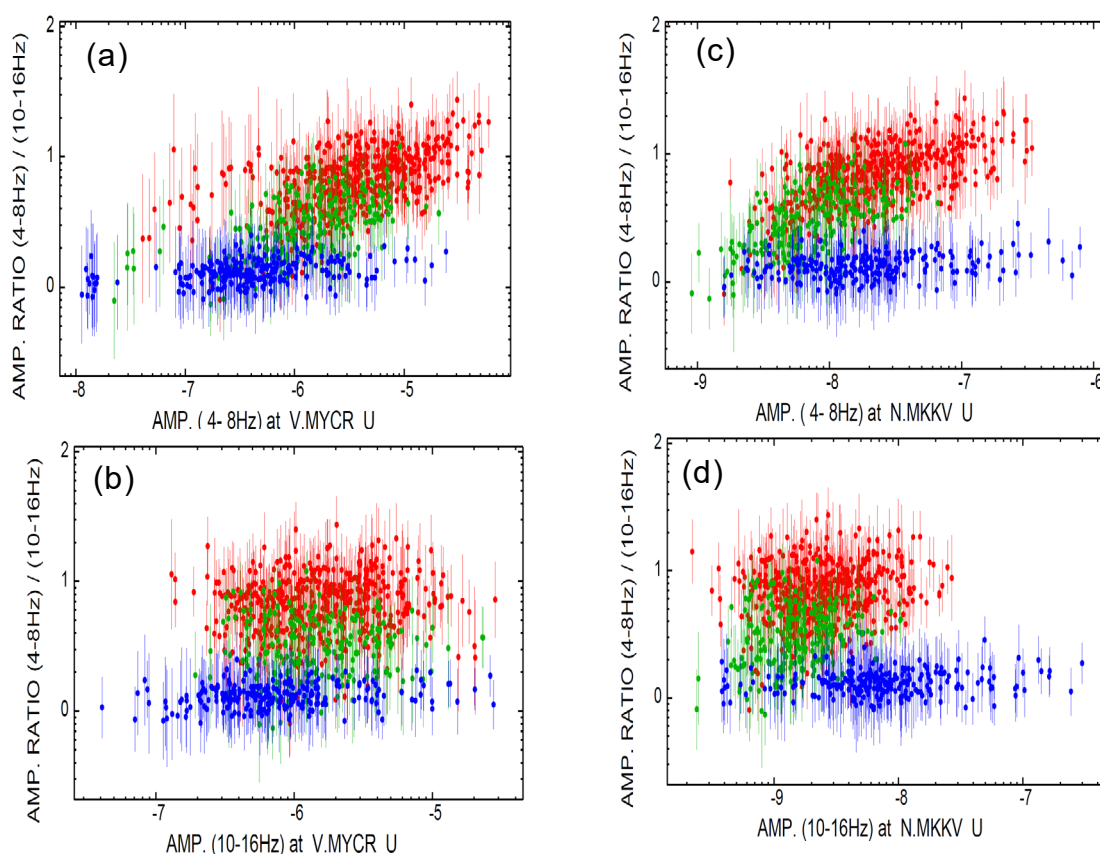


図 72. 個々の地震の周波数指数（縦軸）と振幅（横軸）の関係。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青は A 型地震。丸が各帯域での振幅の平均値、縦線は標準偏差の幅を示す。(a), (b) は気象庁山頂火口南 MYCR 観測点での値。(a) は基準を低周波数帯 (4-8Hz) に取ったもの。(b) は高周波数帯 (10-16Hz) に取ったもの。(c), (d) は火口から少し離れた防災科研神着 MKKV 観測点についての同様の図。両観測点とも低周波数帯の振幅を基準にすると地震種別の識別が困難になる。これは他の観測点でも共通にみられる特徴である。

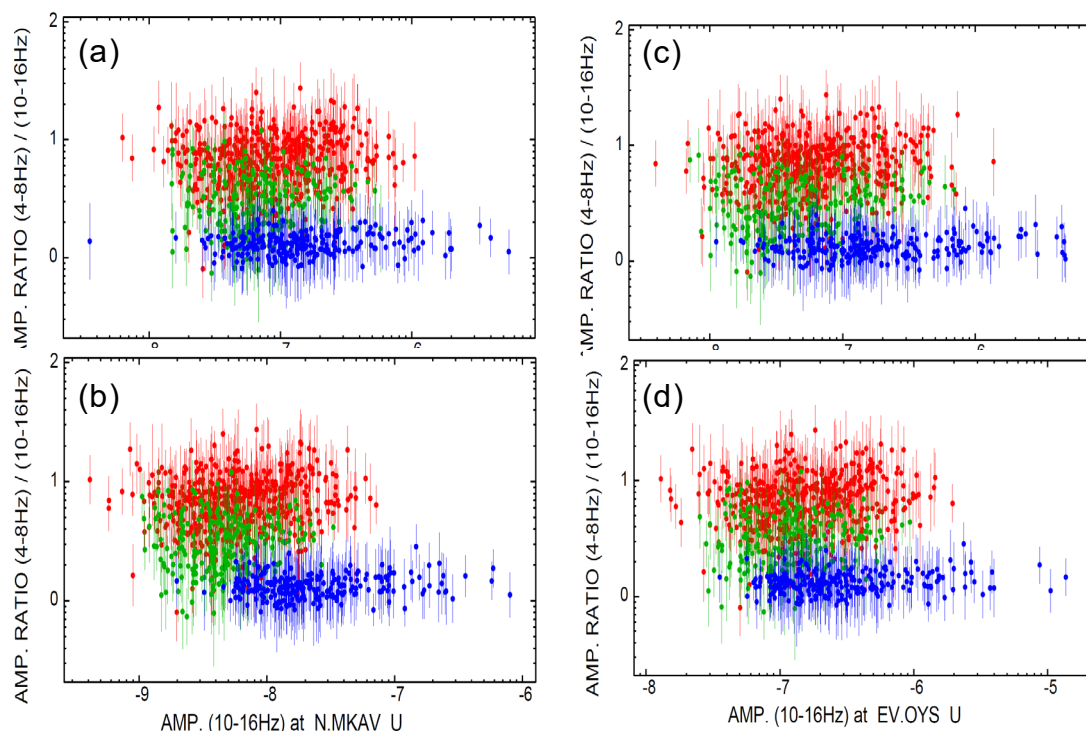


図 73. 個々の地震の周波数指数（縦軸）と振幅（横軸）の関係。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青は A 型地震。丸が各帯域での振幅の平均値、縦線は標準偏差の幅を示す。すべて、振幅を高周波数帯(10-16Hz)に取ったもの。(a) 気象庁村営牧場南 MJON 観測点、(b) 防災科研阿古観測点、(c) 本事業の雄山西 OYW 臨時観測点、(d) 本事業の雄山南 OYS 臨時観測点。どの観測点においても、周波数指数が地震種別判定に有効であるが、分布の重なる部分があり、判別に工夫を要することがわかる。

いくつかの観測点で周波数指数と地震種別の分布についても更に調査したが（図 73）、どの観測点においてもこのような考え方が有効であることがわかった。一方で、それぞれの地震種別で明瞭な分布の境界はなく、これをうまく判別する手法の開発には工夫が必要である。本年度は、すでに検出者が判定した地震種別を基に、パターン認識で用いる非線形部分空間法の適用について着手した。これは最終的にはニューラルネットワークと等価であることから⁵²⁾、現在広く開発されている機械学習による判別と等価であると言える。そのため、広範に用いられている機械学習のソフトウェア・ライブラリの利用を念頭に設計を進めている。

ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

2014 年御嶽山噴火前のデータに加え、噴火後に整備された地震観測点による観測データを整備した。データは、機械学習を用いた火山地震解析に活用された (Maeda et al. 2020⁵³⁾)。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

i) 熱・火山ガス解析システムの開発

前年度までに行った室内実験結果に基づき、多成分火山ガス測定装置を製作した。本装置を用いて霧島火山で測定実験を行い、地上ガス観測結果に矛盾しない値が得られることを確認した。また、移流とともに進行する H_2O の相変化による組成変動が測定できた。草津白根山では、火山活動の変化に対応したと思われる $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の時間変化を観測した。本システムは、文部科学省・次世代火山人材育成総合プロジェクトにおける火山実習に活用され、学生が実際にドローンを操縦して観測実習を行った。

・ 観測手法の改良

本年度は、室内実験結果に基づき送風ファンとガスセンサーを組み合わせた4成分火山ガス測定装置 (H_2O 、 CO_2 、 H_2S 、および SO_2) を作成した (図 74)。この目的は、草津白根山のような噴火準備期に認められる高さ数 10 m 程度の小規模噴煙活動を想定して、ドローンによる短時間・低濃度領域での測定であっても、より確実にガス組成比を推定するためである。

図 75 に、霧島火山硫黄山 V2 噴気を対象として、2020 年 11 月 25 日に観測された各ガス濃度の時系列を示す。ファンを動作させた場合の測定結果は、濃度変化速度がより早く、かつ、高周波に富む。これはファンによるセンサ時定数低下による。また、ファンなしの場合で顕著に認められる不自然な挙動が、ファンありでは改善している

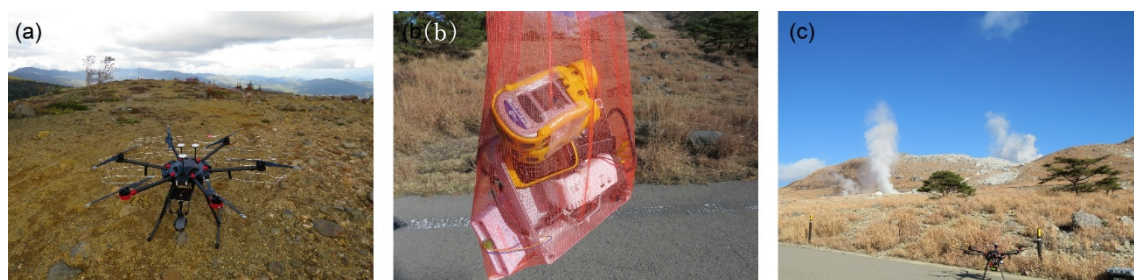


図 74. ドローン火山ガス観測システム。(a) 使用したドローン：DJI Matrice600 Pro。

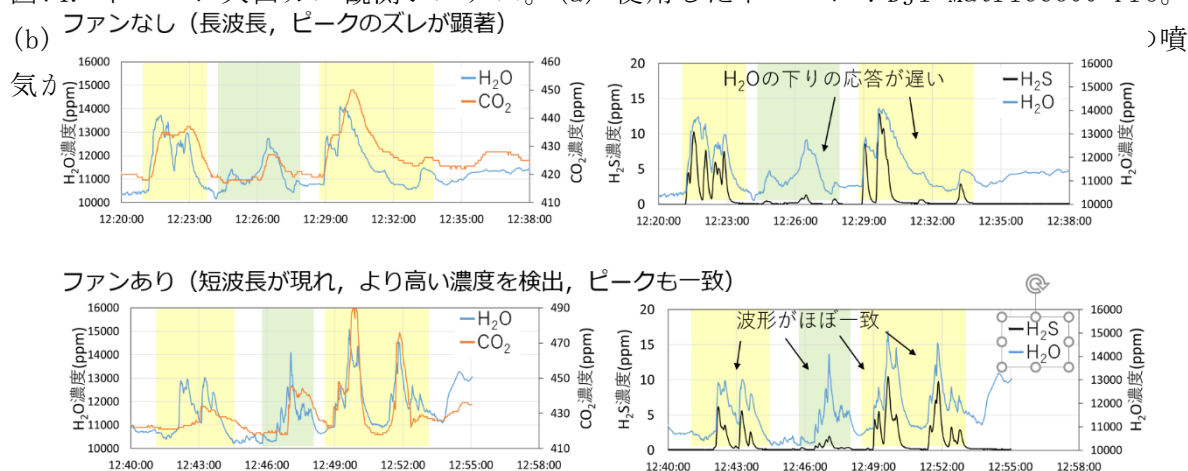


図 75. 霧島火山硫黄山のV1およびV2噴気におけるドローン火山ガス観測例。ここでは H_2S 、 CO_2 および H_2O の時系列について、ファンの動作あり・なしを示している。ハッチでの黄色と緑の色分けは、それぞれ、V2 および V1 噴気ガス周辺に滞空していることを示す。

表4. 霧島火山硫黄山V2噴気における2020年11月25日の観測結果。地上において同26日に採取されたガスの室内分析結果も併せて示す（大場・他、私信）。ここで3/6とは、6回の測定機会において3回定量できたことを意味する。定量の可否判断基準は、興味あるガスの相関図において $R^2 > 0.5$ とした。

| | SO ₂ /H ₂ S | H ₂ O/H ₂ S | CO ₂ /H ₂ S |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ドローン（ファンなし） | 2.0 (6/6) | 140 (3/6) | — (0/6) |
| ドローン（ファンあり） | 2.2 (6/6) | 220 (6/6) | 3.1 (2/6) |
| 地上採取ガス室内分析 | 2.0 | 580 | 4.9 |

ことが分かる。不自然な挙動の原因は、噴気中の水滴の付着による測定妨害と考えられ、これについても送風による液滴の蒸発促進により改善している。

ガス組成比の推定結果を表4に示す。ここで組成比は、ガス濃度時系列データに基づき、同時刻に得られた興味ある2種類のガス濃度の散布図を直線近似したとき、その傾きを濃度比とする標準的な手法に基づく⁵⁴⁾。ここで、直線の R^2 が0.5以上のときに組成比を定量できたと判定すると、ファンなしでは6回の観測機会中3回のみ定量できたH₂O/H₂Sは、ファンありでは全6回について定量できた（表4）。H₂O/CO₂は、ファンなしでは6回全てで定量できなかったが、ファンありでは2回定量できた。

以上のことから、本事業で製作した観測装置は、ガスの測定時間が限られるドローン観測に有効であることが確認できた。また、本年度は大容量バッテリーを追加整備したことで、連続10回の観測飛行が可能となった。良好なガスデータを取得するための繰り返し飛行に加えて、地表面温度測定や湖水採取なども併せて実施できる体制が構築された。さらに、観測飛行を安全かつ確実に実施するために、火山ガス観測飛行マニュアルを2020年10月に策定し、事前点検を行う体制を構築した。本マニュアルを霧島火山において2020年11月25日に実施した観測に適用し、火山研究者1名でトラブルなく良好なデータの取得が可能なことを確認した。

・火山における繰り返しガス観測

霧島火山硫黄山V2噴気を対象として2020年11月25日に繰り返し観測を実施し、地上ガス観測結果と比較した（表4）。ファンを稼働させた場合のSO₂/H₂Sは、地上採取ガス分析結果よりも1割程度大きい値が観測された。測定2か月後に実施した感度確認によればSO₂/H₂Sは最大3割程度の過大評価が想定されていることから、本観測は地上採取ガス分析に矛盾しないと言える。ドローン観測から推定されたCO₂/H₂Sは、地上採取ガス分析に比較して30%程度の過小評価である。この原因は、おそらく凝結水の妨害によりCO₂が低く測定されたためと考えられる。水滴の存在しない、噴気孔から離れた低濃度空域での測定を行うために、より感度の高いCO₂センサーを用いる必要があることが判った。

ドローンで測定されたH₂O/H₂Sは、地上採取ガス分析の半分程度であった。この原因として、噴気孔から放出されたH₂Oの一部が凝結水として空中に存在しており、水蒸気を測定する本観測装置での測定から漏れていることが考えられる。すなわち、ド

ローン観測においては、噴気の移流とともに水蒸気に対するガス組成比が変化するのであろう。噴気中の水滴と水蒸気の比は測定されていない。今後、水蒸気 H₂O 量の変化を H₂S に対して検討することで、噴気ガス組成の空間変化を直接的に測定できると思われる。

草津白根山では、火山活動に応じて噴気組成が変化することが知られている⁵⁵⁾。2020年10月6日および28日に、白根火砕丘北側噴気域のC噴気孔を対象としてドローンによる観測を2回実施し、その間に地上採取されたC噴気ガスの室内分析結果と比較した(表5)。CO₂/H₂Sに注目すると、同15日実施の地上観測の値(3.2)に対して、2回のドローン観測結果は若干の違いが見られた(4.5および1.9)ものの、平均すると3.2となり両者は一致する(表5)。時間変化に注目すると、10月の1ヶ月間を通じてCO₂/H₂Sは低下傾向に見える。これは、草津白根山火山の長期的な活動低下に対応する可能性がある。今後は観測回数、期間を拡大して、火山活動解析のための観測手段として実証的な研究観測を進める。

・研究者による運用

ドローンを用いた熱情報解析に必要な多項目観測を、ドローン航行専門業者の支援なしに研究者だけで実施可能となった。例えば、草津白根山では2020年11月12日に傾斜変動を伴う火山性微動が発生したが、その41時間後の11月14日12時頃に、湯釜において黒灰色変色が発生した。これを受けて、同日14時頃に湯釜火口から約800 m離れた領域からドローンを用いた臨時の湖水採取作業を実施した。室内分析の結果、湖水成分に大きな変化がないことを確認し、資料として火山噴火予知連絡会や草津町へ情報提供した(表6)。従来、このような火山活動の活発化時に火口周辺で機動観測を行うことは観測者の安全上の大きな問題があった。危険な地上火口調査に代わり、ドローンを用いた火口作業を迅速かつ安全に実施するとともに、それが防災対

表5. 草津白根山・白根火砕丘北側噴気域における噴気Cの観測結果。*はドローンを用いた測定、**は地上採取ガスの室内分析に基づく(大場・他、私信)。

| | CO ₂ /H ₂ S |
|--------------|-----------------------------------|
| 2020/10/6* | 4.5 |
| 2020/10/15** | 3.2 |
| 2020/10/28* | 1.9 |

表6. 草津白根山湯釜火口の成分分析⁵⁶⁾。

| Date | WT | pH | EC | Cl | SO ₄ | Mg | Mg/Cl |
|--------------|------|------|------|------|-----------------|------|--------|
| | °C | | S/m | mg/L | mg/L | mg/L | |
| 2020/11/5* | 16.6 | 1.13 | 3.90 | 4040 | 1420 | 33.9 | 0.0084 |
| 2020/11/14** | N.D. | 1.09 | 3.89 | 4110 | 1430 | 34.2 | 0.0083 |

*U1地点で採水。 **U1地点の近傍でdroneを使用して採水。



写真 1．霧島火山硫黄山における火山実習（2021年3月9日）。

応に貢献できることを確認できた。

また、2021 年 3 月 7 日～12 日に霧島火山にて実施された文部科学省・次世代火山人材育成総合プロジェクトにおける実習プログラムにおいて、地球化学班としてドローンを用いた火山ガス観測実習を行った（写真 1）。本実習では、本事業で開発した測定装置を使用し、受講生 8 名がドローンを操縦して火山ガス観測を実習した。実習最終日には、データ解析担当の 4 名が成果発表を行った。

ii) 観測データ遠隔回収手法の実証試験

活発な火山活動により研究者が観測地点への立ち入りが安全上制限される場合には、現地に設置した観測機器からのデータ回収が大きな問題になる。令和元年度まで、課題 B2-1「空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発」において、大型ドローンを用いて空中よりマイクロ波を用いて送電し、その電力で記録されていたデータを同時にドローンで回収する装置の開発を進めていた。しかし、まだ多くの技術的課題が残っていることから、令和 2 年度は無人航空機による遠隔データ回収システムの開発に絞り、本サブテーマの下に統合して開発を続けてきた。

本年度は、霧島山または草津白根山において長期間の実証実験を実施する予定であったが、新型コロナウイルス感染症対策により用地使用許可の手続が間に合わなかったため、霧島山においてドローンによるデータ回収実験のみを行い、長期安定性の実証実験は雲仙岳で実施した。

なお、この実証試験課題はほぼ所定の成果を収めたので、令和 2 年度をもって終了することとなった。

ア) 長期安定性実験

実験は、雲仙岳の麓にある九州大学地震火山観測研究センター敷地内で実施した。

電源として 30W のソーラーパネルを用い、12V12Ah の密閉蓄電池に蓄電した。センサーには固有周期 2Hz の上下成分地震計(マークプロダクツ社製 L22D)を用い、白山工業社製 LS8800 を使用してデジタル変換を行った。シリアルポートから出力されるデジタル波形データをシモレックス社製 ScAirBackup ホストで収録した。実験は 2020 年 5 月に開始し、2021 年 4 月現在も問題なくデータ収録が継続されている。図 76 に本収録装置で記録された地震波形の例を示す。

イ) コンシューマードローンによるデータ回収実験

地上に設置されたデータ収録装置にドローンを使って接近し、ドローンに搭載したデータ回収装置が無線通信で地震や GNSS データ回収する実験を行った。

令和元年度の実験では大型の産業用ドローンを使ったデータ回収実験を桜島火山で実施しており、ドローンが目標地点の 10m 以内に接近すればデータを正常に回収できることを確認した。しかし産業用ドローンは重量が大きく、専門のオペレータが必要であることから、本年度は一般に販売され操作も非常に簡便であるコンシューマタイプの小型ドローンを使用してデータ回収実験を行った。データ回収装置は、シモレックス社製 ScAirBackup クライアントを使用した。この機器は Android 端末で動作するアプリケーションソフトであり、2.4GHz 無線 LAN を使用して地上装置からのデータを回収する。装置は小型軽量であるため、小型のコンシューマードローンにも搭載可能である。本実験では DJI 社製 MAVIC 2 Enterprise および DJI 社製 Phantom 4 を使用し

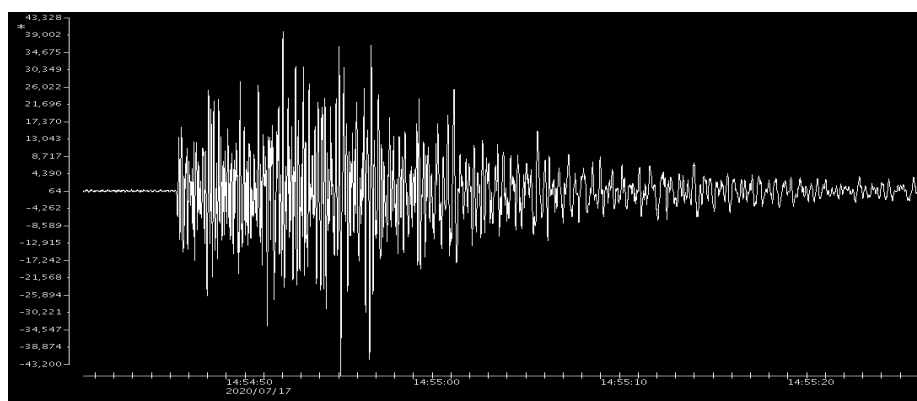


図 76. 本装置で収録・回収された地震波形。2020 年 7 月 17 日 14 時 54 分に熊本県熊本地方の深さ 10km で発生したマグニチュード 3.9 の地震による地震動波形である。



図 77. 遠隔データ回収装置を搭載したドローン。左 Mavic 2 Enterprise、右 Phantom 4。

て実験を行った。図 77 に使用したドローンの写真を示す。MAVIC 2 の場合は遠隔データ回収装置をドローンの背面に固定した。Phantom 4 は下部の脚部にカゴを取りつけ、そこに遠隔データ回収クライアント装置を固定した。

データ回収実験は霧島硫黄山西麓で 2020 年 11 月 24 日に実施した。ドローンは約 100m 離れた所から離陸して、道路アスファルト上に仮設置したデータ収録クライアント装置に接近し、データを回収した。結果としては、MAVIC 2 ではデータ回収ができず、Phantom 4 では地上装置の直上 3m に接近しないとデータ回収ができなかった。この原因として、大型の産業用ドローン装置ではドローンと地上のオペレータの間が、920MHz 帯の無線を使っているのに対し、DJI 製のコンシューマードローンは 2.4GHz 帯をドローン制御用に使用しており、これが干渉して、同じ 2.4GHz の無線 LAN を使用するデータ回収装置に悪影響をあたえているものと推測された。ドローンのアンテナは水平方向に指向性を高めてあるため、下方には電波強度が弱い。そのため Phantom 4 では地上装置の直上に 3m に接近しないと通信できなかったと推測される。データ回収装置をドローンの上面に固定した MAVIC 2 に到っては、地上装置との間にドローン本体があるため、データ回収通信ができなかったと思われる。海外では映像伝送には 5.8GHz を使用するのが一般的であるが、日本国内においては 5GHz 帯の無線 LAN は ETC 等との混信があるため屋外での使用が禁止されており、無線 LAN は 2.4 GHz を使用しなければならないという制約があるこのため 2.4 GHz 帯の無線 LAN が混雑する原因となっている。

解決方法としては、データ回収に 2.4GHz 無線 LAN を使わない方法が考えられるが、屋外空中使用の場合には専用周波数の取得に時間がかかるとともに、データ回収装置に新たな無線機器を開発して取り付けることになるため多大な開発・製作費用が発生してしまう。またデータ回収クライアント装置をドローンからつり下げることとも考えられるが、小型ドローンでは比高が不安定となり危険性が高くなってしまうことが考えられる。したがって、現在の解決方法としては、2.4GHz 無線 LAN を使用しない産業用ドローンを使用してデータ回収を行うことが最も現実的であるということが分かった。

e) 地震波動場連続解析システムの開発

地震波動場連続解析システムは、火山周辺の地震波動場を用いて火山体内部の状態変化を評価するための地震波干渉法解析⁵⁷⁾、地震波逆伝播解析⁵⁸⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和 2 年度は、これまで検討を進めてきた地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析について解析手法のチューニングを引き続き進めるとともに、平成 30 年度から開発を開始した地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの改良及び機能強化を行った。また、火山周辺の既設地震観測網や本プロジェクト等で取得した観測データを用いた連続解析の試行を進めた。さらに、観測点から安定して連続記録を伝送するための通信回線の冗長化や電源システムについての検討を継続し、蔵王山における機動地震観測等において実地での運用試験を行った。

地震波干渉法解析については、活火山周辺の地震観測点から受信したリアルタイム

伝送データを共有メモリ上で周波数フィルター処理を行い、各周波数帯域における解析を準リアルタイムに行い、MySQL データベースに解析結果の蓄積を行う処理を実装し、令和元年度から運用を行っている。現在は、準リアルタイム処理は蔵王山・吾妻山等の東北地方の火山を中心に実施し、その解析結果の蓄積を行っているが、全国地震観測データ流通システム JDX-net に流通している観測点のデータについても、2008 年以降の連続データを用いた解析も並行して進めた。これらの解析に用いる観測データの取得や処理、情報収集の補助のためにリサーチアシスタント 1 名を雇用した。

本事業では、地震波干渉法解析の解析結果を可視化するための表示プログラムについても開発を進めているが、令和 2 年度にはその機能強化を役務外注により行った。当表示プログラムは、データベースに登録されている観測点組合せや解析パラメータを GUI 対話的に選択することにより効率的に解析結果を表示・確認をすることができるものであるが、本年度は相互相関関数の波形相関や速度変化量を表示する機能などを追加した（図 78）。これにより、火山内部状態の時間変化を多量の解析結果の中から効率的に確認・可視化することが可能になった。

地震波逆伝播解析については、仮想震源を仮定した波形重合（slant stack）を行うことを基本としたアルゴリズムを実装し、試験運用を進めた。手法的には Source-Scanning Algorithm⁵⁹⁾と類似したものであるが、本システムでは解析対象とする火山性長周期地震の周期帯が 10 秒前後の帯域であり震源が浅いことから、遠方への地震波動伝播が表面波に卓越したものであると仮定して、レイリー波の伝播を仮定した連続波形の重合を行う。また、このレイリー波の伝播は、対象火山の想定火口域周辺の観測点と広域の基盤観測網の観測点の各ペアについて常時微動干渉法解析によって事前に計算したものを利用した。本年度は、この手法を用いた長周期地震の検出能力の検証のために、蔵王山で断続的に発生している長周期地震（卓越周期約 10 秒）を対象とした過去データの解析を中心に行った。複数の周期帯域における試行を行った結果、目視・手動検出によって検出した長周期地震のうち比較的規模の大きなイベントについては、ほぼ漏れなく検出をすることができ、検出した発振源のエネルギーは長周期地震の規模と概ね相関することが明らかとなった。図 79 に、長周期地震波動場の伝播とその重合処理解析による長周期地震検出結果の例を示す。一方で、気象要因な

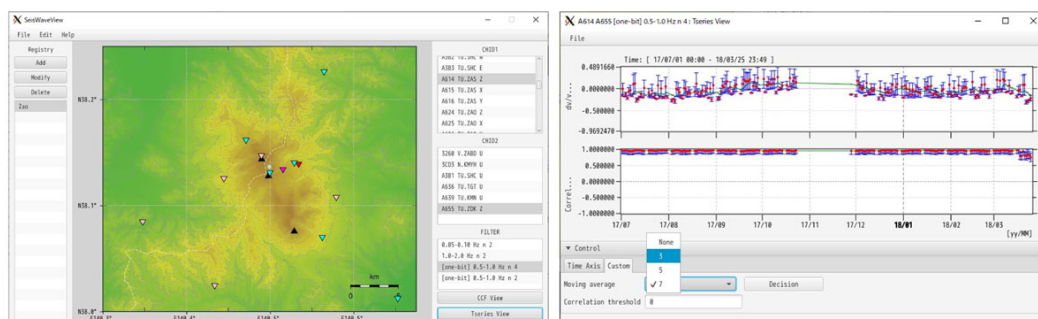


図 78. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの機能強化例。地震波干渉法解析によって得られた相互相関関数の波形相関や地震波速度量を効率的に確認・可視化するための機能を実装した。

どにより常時微動の振幅が相対的に大きな時期などはデータの S/N 比が検出率に大きな影響を与えることがわかった。そのため、解析に用いる観測点数や距離範囲については今後も引き続き検討が必要であることが課題として明らかになった。近年、AELUMA 法 (Automated Event Location Using a Mesh of Arrays)⁶⁰⁾ など本手法と同様に広域の地震観測網を用いたイベント検出を行う手法が提唱されているが、これらの連続波動場の自動処理を最適化していくことにより、火山活動の推移把握に資することができることが期待される。

さらに本年度は、1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握 b) 蔵王火山における機動観測 での活用を念頭に、機械学習による火山性地震のタイプ分類手法の検討を本事業で雇用した博士研究員を中心として進めた。

本課題で並行して開発を進めている火山性地震活動総合解析システムの三宅島への適用結果でも示されているように、火山性地震のタイプ毎の活動領域や活動推移を明らかにすることは、火山活動の変化を把握するうえで非常に重要である。一方で、火山性地震のタイプ分類は解析者が目視による判断で行うことが従来一般的であり、担当者の入れ替わり等に伴いその判断指標が時期とともに変化し、長期的な活動推移の把握に影響を与えることもある。そこで、より客観的かつ時間的に均質なタイプ分類を実現するために、機械学習を用いたタイプ分類⁶¹⁾ の適用性を検討した。火山性地震のタイプ間の差異が周波数特性に最も大きく現れることから、3 成分地震波形のスペクトログラムをデータとして CNN (Convolutional Neural Network) によって画像分類を行う手法をここでは検証した。2017 年から 2020 年に蔵王山で観測された BL 型、BH 型地震を教師データとして分類器を作成し、2012 年から 2016 年に観測された B 型

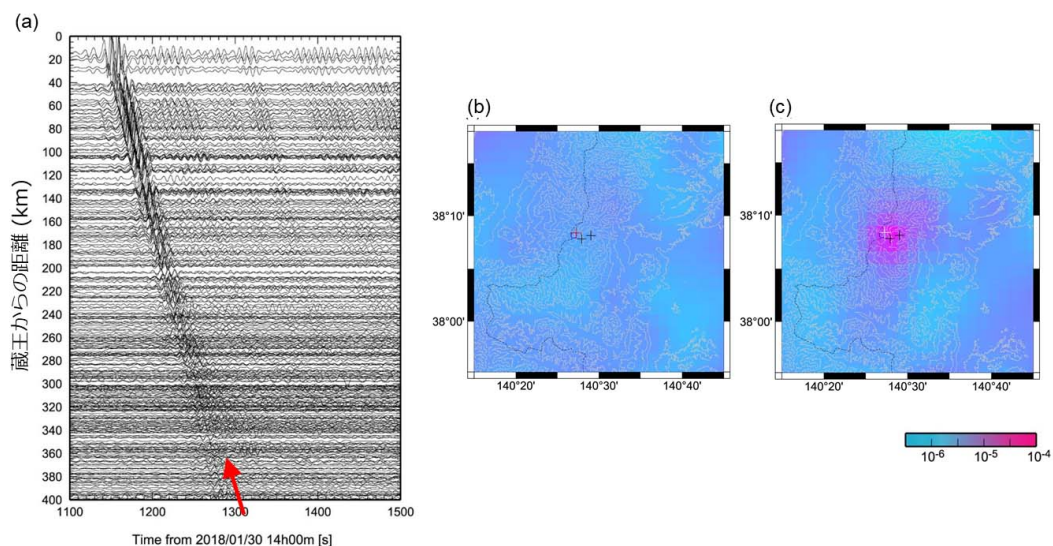


図79. 重合処理による蔵王山長周期地震の検出例。(a)防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netで捉えられた長周期地震波動場（特性補正を行った波形ペーストアップ）。赤矢印で示した波群が長周期地震の主要部分。(b)重合処理によるエネルギー分布（ノイズ時間帯）。(c) 長周期地震発生時のエネルギー分布。御釜近傍に振動源が推定される。

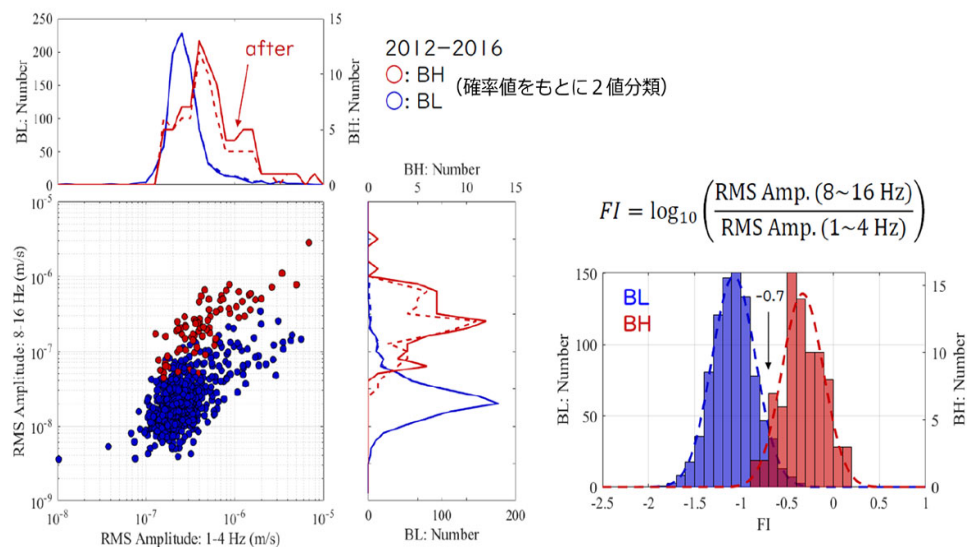


図 80. 機械学習 (CNN)を用いた火山性地震のタイプ分類と周波数特性の対応例。学習済分類器を用いて 2012 年から 2016 年に観測された B 型地震を BH 型と BL 型に 2 値分類した結果 (左図の赤線と青線) は、目視による分類結果 (赤点線と青点線) と整合的であり、タイプ毎の周波数特性の特徴も捉えることができている。

地震約 1000 イベントを BL 型と BH 型の 2 値に分類した結果の例を図 80 に示す。機械学習を用いることの利点の一つは確率とともにラベル付けを行うことができる点であるが、ここではより高い確率をもつタイプに分類し、各地震の周波数特性との関係を示した。この結果からは、機械学習によるタイプ分類と目視による分類は概ね整合的であり、地震タイプ毎の特徴の抽出を CNN を用いて客観的に行える可能性が示唆される。また、このような機械学習 (CNN) による分類を通じて、周波数指数 (FI: Frequency Index) によるタイプ分類の際に必要な周波数帯域の最適化や閾値の設定をより客観的に行えることも期待される。

本年度は、以上のような連続地震波動場の連続自動処理や地震タイプ分類手法の検討を進めてきたが、今後は各手法の高度化を目指すとともに、火山観測データ一元化共有システム (JVDN システム) との連携についても検討し、火山体内部の状態変化を評価するシステムの開発を目指す予定である。

3) プログラムの総合推進

a) 課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を令和 3 年 1 月 4 日 13 時～14 時に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進行状況に関する情報交換をおこなうと共に、予算配分の方針や、1 月 19 日に開催予定のフォローアップ評価会について確認した。火山人材育成コンソーシアムの修了生を研究プロジェクトで雇用することが推奨されていることから、令和 3 度も人材育成コンソーシアムからリサーチアシスタントの雇用の要請があった。この研究プロジェクトでは、人材育成コンソーシアムとの連携が重要視され

ていることから、サブテーマの枠を越えて課題 B 全体で、リサーチアシスタントの雇用を支えることを確認した。

また、サブテーマ間、課題間の連携が評価会で指摘されていることを受けて、新型コロナウイルスの蔓延の影響を考慮し、可能であれば課題 B 全体で、適切なフィールドにて合同で観測と討論会を実施することを話し合った。検討会では、各サブテーマ参加者が出席し、今後の研究の展開や噴火切迫性評価の高度化の方策について、課題参加者で議論する計画とした。

b) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進会議」を令和 3 年 1 月 29 日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今年度の成果について、意見交換を行った。また、今後協力して実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。さらに、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。

課題 A との連携の観点から、このサブプロジェクトで取得した MT 探査データの提供に方針について、北海道大学橋本教授から、本サブプロジェクトで取得したデータを、課題 A で構築する JVDN システムに保管する方針が提案され、了承された。

c) 機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

この課題で実施する機動的な観測の実施に必要な以下の機材を整備した。

| | |
|---------------|-------|
| ポータブル土壌ガス測定装置 | 1 セット |
| 広帯域地震計及び記録計 | 2 セット |

このうち、ポータブル土壌ガス測定装置については、今年度に有珠火山にて利用し、その結果は、本報告書に記載した。また、広帯域地震計については、令和 3 年度早々に利用予定である。

d) 課題 A で取り組むデータ一元化への協力

本事業の中で設置されているデータ利活用タスクフォース、及びその後継組織であるデータ利活用推進タスクフォースにサブテーマ代表者が参加し、具体的なデータ流通の在り方について意見交換した。まずは、MT 探査のデータについて提供する方針を決めた。

(c) 結論ならびに今後の課題

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、草津白根火山と蔵王山を中心に機動観測を実施し、噴火切迫性評価に資することを念頭に置いた現時点の火山活動や地下の構造調査を行った。また、令和 3 年度に機動観測を実施予定である有珠山において、その準備を進めた。更に、平成 30 年度まで機動観測を継続していた霧島火山と箱根火山と令和元年まで機動観測を継続していた三宅島において、機動観測で取得した観測データ

を解析し、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。

草津白根火山においては、平成30年1月の本白根山の水蒸気噴火を機に、湯釜の活動以外も含めて全山的な活動の切迫性評価が重要な課題になっている。そのため、草津白根火山周辺域にも強化した地震および傾斜観測網を維持し、地震活動や地盤変動の状況を把握した。また、広域かつより深部までの地下比抵抗構造を推定するために、MT探査を実施し、マグマの上昇経路を示唆する低比抵抗域の北部への広がりや、熱水系の発達により生成した粘土鉱物を示唆する浅部の低比抵抗層の広がりを見出した。さらに、草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探るためGNSSキャンペーン観測を実施した。今回推定された比抵抗構造により、草津白根山の深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路がイメージされた可能性があり、今後、熱水流動シミュレーションなどを用いて、この仮説を検証する必要がある。また、草津白根山西方領域で発生する地震活動と火山性流体の供給源の関係の有無の解明が今後の課題である。

蔵王火山においては熱水系と変質帯の分布を把握することを目的とする比抵抗構造探査を実施し、火山性地震発生域近傍に低比抵抗域があることがわかった。また、熱水の移動や火山性流体の上昇、蓄積を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を継続し、傾斜計の新設も進めた。今後は比抵抗逆問題解析のパラメータ探索範囲を拡張して比抵抗モデルの信頼性を高めるとともに、長周期地震によるモーメントテンソル解や開口クラック解、地殻変動データによる膨張源との空間的位置関係を比較検討することが重要である。

有珠山においては、次年度の機動観測準備として土壌拡散CO₂フラックスの予備調査と、地震アレイ観測および傾斜観測の候補地選定を行った。予備調査の結果を踏まえ、CO₂フラックス測定に関しては、より多くの測定点が必要であることと過去の報告と比較するために測定範囲を山頂火口原全体に広げることが必要であることがあきらかになった。

三宅島では、平成30年度から開始した広帯域地震機動観測を継続し、既存観測点や追加した観測点のデータから、将来の火山活動の切迫性評価の際の比較対象となる現時点の三宅島の火山活動や地震活動に関する情報を抽出した。また、地下水の状況や熱構造の変化を把握するために自然電位と空中磁気探査を実施した。切迫性評価に関しては、2016年に発生した急激な山体膨張に着目し、圧力源の位置とA型地震の震源分布を精密に決定した。その結果、山体膨張は地下で循環するマグマの上端と火口を結ぶ流路の一部が閉塞したためにガス放出が滞ることによって山体膨張が加速し、応力集中によりA型地震が発生した、という描像を描くことができる。このモデルに基づけば、火口近傍だけでなく、火口の南西2～3km、深さ5km付近に位置すると推定される浅部マグマ溜まりへのさらに深部からのマグマ供給系の状態をモニターすることが、三宅島の火山活動の切迫性を評価するためには重要であり、波浪ノイズを避けられるボアホール型の地震計、傾斜計、歪計等を南西沿岸付近に設置することが必要である。

霧島火山では、多項目観測を継続し、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震・地殻変動活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進した。広域の地殻変動を捉えるGNSS観測や地球物理情報の解釈を支援する地質情報の取得も実施した。硫黄山周辺の地殻変動は変化が狭い領域に集中する局所化が目立ち、膨張源が

浅部に集中していることを示す。今後は、膨張の物理メカニズムを解明することが小規模水蒸気噴火のメカニズムを推定する上で重要である。

箱根山火山では、これまでの観測データによる浅部速度構造の解明とそれに基づく活動モデルの構築はおおむね完了した。今後は、より深部からのマグマ供給経路を探るためにレシーバー関数解析法を用いた解析に重点を置く必要がある。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを火山噴火切迫性評価に利用するため、即時的なデータ解析を目指した地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を継続して進めている。開発がほぼ終わった地震計アレイデータ解析システムは、試験運用が進んでいる。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、地下比抵抗構造を推定するための前処理支援ツールの改良など3次元インバージョン解析手法の標準化を目指した開発を進めているが、観測点近傍のメッシュサイズの取り方が結果に大きく影響することが判明し、メッシュサイズをいかに最適化するか、が問題となっている。熱水流動をシミュレーションの利用については、試験的な動作の検証を行っている段階であり、今後は実データとの比較を試みる必要がある。地熱ボーリングの公表データの読み取りと整理が進むが、データのばらつきが非常に大きいことから、データをシミュレーションに反映させる方法の検討が必要である。火山性地震活動総合解析システムについては、基本設計と動作試験データの整備を行い、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進めている。遠隔熱情報解析システムについては、観測に用いるドローンの運用実績を積んでいる。む観測データの遠隔回収実証実験については、ほぼ所定の成果を収めたため令和2年度をもって終了することとなった。地震波動場連続解析システムについては地震波干渉法解析のGUI改良を行うなど、実観測データへの適用と動作テストを実施している。連続波動場ちゅうの長周期地震検出については、気象要因などによるS/Nの低下が検出率に大きく影響することがわかり、解析に用いる観測点や距離範囲について更なる検討が必要である。

本課題に属する4つのサブテーマの相互連携を図るため、昨年度に引き続きサブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間における具体的な協力体制について、今後も協議を継続する。サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」を推進するため、代表機関、参加機関、協力機関全体で協力して今後実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。また、気象庁との連携、協力体制を確認した。更に、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。この課題で今後必要とされる観測機材のうち令和2年度導入予定分については、計画どおり導入が終わった。今後も、計画的に必要な観測機材の整備を行う。更に、火山観測データの共有化を目指して、課題A「火山データ一元化」との意見交換も継続する。

(d) 引用文献

- 1) Chave, A.D., and D. J. Thomson: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, *Geophys. J. Int.*, 157, 988-1006, 2004.
- 2) Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita and Y. Ogawa: Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 390, 106742, 2020.
- 3) Usui, Y.: 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, *Geophys. J. Int.*, 202, 828-849, 2015.
- 4) Usui, Y., Ogawa, Y., Aizawa, K., Kanda, W., Hashimoto, T., Koyama, T., Yamaya, Y., and Kagiya, T.: Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, *Geophys. J. Int.*, 208, 1359-1372, 2017.
- 5) Amante, C. and Eakins, B.W.: ETOPO1 1 Arc-Minute arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp., 2009.
- 6) Nurhasan, Ogawa, Y., Tank, S.B., Honkuram Y., Onizawa, S., Mori, T., and Makino, M.: Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, *Earth Planets Space*, 58, 1053-1059, 2006.
- 7) Zumbege, J.F., Heflin, M. B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., and Webb, F. H.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102, 5005-5017, 1997.
- 8) Fukui, Y., Ando, S., Fujiwara, K., Kitagawa, S., Kokubo, K., Onizawa, S., Sakai, T., Shimbori, T., Takagi, A., Yamamoto, T., Yamasato, H., and Yamazaki, A.: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013, Kagoshima, 20
- 9) 気象庁：蔵王山，日本活火山総覧（第4版），
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/33_Zaozan.pdf, 2013.
- 10) 市來雅啓，海田俊輝，出町知嗣，平原聡，中山貴史，佐藤真樹子，山本希，三浦哲，森山多加志，芥川真由美，小林宰，松浦茂郎，大森茂生，小野幸治，関晋，神田径，関香織，小川康雄，潮田雅司，上嶋誠：電磁気学的に観た蔵王山の 2014-2016 年の活動と地殻構造，日本火山学会2016年度秋季大会，富士吉田市，2016.
- 11) Le Mouel, J. L., and MenVielle, M.: Geomagnetic variation anomalies and deflection of telluric currents, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 68, 575-587, 1982.
- 12) Caldwell, T. Grant, Bibby, H. M., and Brown, C.: The magnetotelluric phase

- tensor, *Geophysical Journal International*, 158, 457-469, 2004.
- 13) Heise, W., Bibby, H. M., Caldwell, T. G., Bannister, S. C., Ogawa, Y., Takakura, S., and Uchida, T.: Melt distribution beneath a young continental rift: The Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *Geophysical Research Letters*, 34, 1-6, 2007.
 - 14) Hobbs, B. A.: Terminology and symbols for use in studies of electromagnetic induction in the Earth, *Surveys in Geophysics*, 13, 489-515, 1992.
 - 15) Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M.: Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150, 3-14, 2005.
 - 16) 池谷拓馬、山本希：蔵王山直下の深部低周波地震活動，日本地震学会 2018 年度秋季大会，郡山市，2018.
 - 17) 山本希、三浦哲、市來雅啓：蔵王山における浅部長周期地震活動とその発生機構，日本火山学会 2014 年度秋季大会，福岡市，2014.
 - 18) Kawakatsu, H. and Yamamoto, M.: 'Volcano Seismology' in 'Treatise on Geophysics (2nd edition)', Oxford: Elsevier, 2015.
 - 19) Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Pérez, N. M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, 292, 83-86, 2001.
 - 20) Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H. Y. Mori, Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H., and Okada, H.: P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 160, 175-194, 2007.
 - 21) 札幌管区气象台・室蘭地方气象台・気象庁火山課： 2000 年有珠山噴火の活動経過 -2000 年 3 月～2001 年 5 月-，火山噴火予知連絡会会報，77, 11-24, 2002.
 - 22) 札幌管区气象台地域火山監視・警報センター：有珠山の火山活動解説資料，令和 3 年 3 月 10 日 12 時 30 分，5p, 2021.
 - 23) 札幌管区气象台地域火山監視・警報センター：令和 2 年（2020 年）の有珠山の火山活動，火山活動解説資料年報，9p, 2020.
 - 24) Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth: A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368, 2000.
 - 25) 西村卓也・村上亮・小沢慎三郎・石本正芳・鷲谷威・矢来博司・多田堯・海津優・鶴川元雄，三宅島 2000 年噴火前後の地殻変動と変動源の推定 -1983 年噴火後から 2001 年 5 月までの収縮・膨張源一、地震研究所彙報，77, 55-65, 2002.
 - 26) Ueda, E., E. Fujita, M. Ukawa, E., Yamamoto, M. Irwan, F. Kimata, Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 activity of Miyakejima, Central Japan, inferred from tilt and GPS data, *Geophys. J. Int.*, 161, 891-906, 2005.

- 27) Irwan, M., F. Kimata, N., Fujii, Time dependent modeling of magma intrusion during the early stage of the 2000 Miyakejima activity, *J. Volcano. Geotherm Res.*, 150, 202-212, 2006.
- 28) Kobayashi T., T. Ohminato, Y. Ida, E. Fujita, Intermittent inflations recorded by broadband seismometers prior to caldera formation at Miyake-jima volcano, in 2000, *Earth Plane. Sci. Lett.*, 357-358, 145-151, 2012.
- 29) Kazahaya K., Y. Nakahori, H. Mori, H. Iino, M. Miyashita, J. hirabayashi, H. Shinohara, K. Uto, M. Odai, Gigantic So₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse, *Geology*, 32, 425-428, 2004.
- 30) Muramatsu, T., Matsushima T., and Ichihara M.: Reconstructing surface eruptive sequence of 2018 small phreatic eruption of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, by infrasound cross-correlation analysis, *Earth Planets and Space*, 73(8), doi.org/10.1186/s40623-020-01344-6, 2021.
- 31) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., Utsugi, M., Seki, K., and Kishita, T.: Three - Dimensional Resistivity Structure of Iwo - Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption, *Geophysical Research Letters*, 45(23), [doi:10.1029/2018GL080202](https://doi.org/10.1029/2018GL080202), 2018.
- 32) Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T., Nagai, M., Funasaki, J.: Shallow Magmatic Hydrothermal Eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama Volcano in Kirishima Volcano Group, Kyushu, Japan, *Geosciences* 10 (5), [doi:10.3390/geosciences10050183](https://doi.org/10.3390/geosciences10050183), 2020.
- 33) Narita, S., Ozawa, T., Aoki, Y., Shimada, M., Furuya, M., Takada, Y., Murakami, M.: Precursory ground deformation of the 2018 phreatic eruption on Iwo-Yama volcano, revealed by four-dimensional joint analysis of airborne and spaceborne InSAR, *Earth Planets Space* 72 (1), [doi:10.1186/s40623-020-01280-5](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01280-5), 2020.
- 34) Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W., Utada, H.: On the Berdichevsky average. *Phys Earth Planet Inter* 253:1-4. [doi:10.1016/j.pepi.2016.01.006](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.01.006), 2016.
- 35) Takei, Y.: Effect of pore geometry on VP/VS: From equilibrium geometry to crack, *Journal of Geophysical Research*, 107(B2), 2002.
- 36) Yukutake, Y., Abe Y., Honda R., and Sakai, S.: Magma Reservoir and Magmatic Feeding System beneath Hakone Volcano, Central Japan, Revealed by Highly Resolved Velocity Structure, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, in press.
- 37) Mannen, K., Abe, Y., Daita, Y., Doke, R., Harada, M., Kikugawa, G., Honma, N., Miyashita, Y., and Yukutake, Y.: Volcanic Unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption – Reactivation of a Ruptured Hydrothermal System?, *Earth Planets Space* 73, 80, 2021, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01387-3>.
- 38) 本多亮, 行竹洋平, 安部祐希, 酒井慎一: 箱根機動観測点の設置方位推定, 神奈川県温

- 泉地学研究所報告, 69-78, 2020.
- 39) 本多亮, 行竹洋平, 酒井慎一, 森田裕一, 道家涼介, 原田昌武: 箱根地域で観測された異方性強度の時空間分布, 日本地震学会秋季大会予稿集, S06-P05, 2015
 - 40) 本多亮: 位相差スペクトルを用いて推定した箱根直下の異方性構造の特徴, 神奈川県温泉地学研究所報告, 11-16, 2016.
 - 41) 浅田昭: 日本周辺の 500m メッシュ海底地形データとビジュアル編集プログラム, 海洋調査技術, 12, 21-33, 2000.
 - 42) Kanda, W., Kasaya, T., Yakiwara, H., Ichihara, H., Hashimoto, T., Koyama, T., Utsugi, M., Inoue, H., Sonoda, T., and Ogawa, Y.: Resistivity structure around the Aira caldera, SW Japan, inferred from the magnetotelluric measurements, IAVCEI2013, Kagoshima, 2013.
 - 43) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 地熱開発促進調査報告書 No. 4 胆振地域, 1983.
 - 44) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 地熱開発促進調査報告書 No. 17 王滝地域, 1988.
 - 45) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 地熱開発促進調査報告書 No. 26 阿寒地域, 1992.
 - 46) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 地熱開発促進調査報告書 No. 35 水分峠南部地域, 1994.
 - 47) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 地熱開発促進調査報告書 No. 38 阿蘇山西部地域, 1995.
 - 48) 横山秀吉・中塚勝人・阿部司・渡部賢一: 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について, 日本地熱学会誌, 5, 103-120, 1.
 - 49) 白水晴雄: 粘土鉱物学 -粘土化学の基礎-, 朝倉出版, 1-185, 1988.
 - 50) 高倉伸一: 電磁探査から推定される広域的な地熱系の構造, 物理探査, 67, 195-203, 2014.
 - 51) Buurman, H. and M. West, Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano, U.S.G.S. Professional paper, 1769, 41-57, 2010.
 - 52) 石井健一郎・上田修功・前田英作・村瀬洋、パターン認識、オーム社、204pp, 1998.
 - 53) Maeda, Y., Yamanaka, Y., Ito, T., Horikawa, S.: Machine learning based detection of volcano seismicity using the spatial pattern of amplitudes. Geophys. J. Int., ggaa593, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa593>, 2020.
 - 54) Shinohara, H.: A new technique to estimate volcanic gas composition: plume measurements with a portable multi-sensor system, J. Volcanol. Geotherm. Res., 143, 319-333, 2005.
 - 55) Ohba, T., Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Tsunogai, U., Ito, M., and Shingubara, R.: Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, Front. Earth Sci., 7:249,

2019.

- 56) 気象研究所, 東海大学, 東京工業大学: 湯釜湖水の化学組成 (2020 年 11 月 14 日観測), 第 147 回火山噴火予知連絡会資料, 2020.
- 57) Brenguier, F., N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, and A. Nercessian: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, *Nature Geoscience*, 1, 126-130, doi:10.1038/ngeo104, 2008.
- 58) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, *Geophys. Res. Lett.*, 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.
- 59) Kao, H. and S.-J. Shan: The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space, *Geophys. J. Int.*, 157, 589-594, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x, 2004.
- 60) de Groot-Hedlin, C. D. and M. A. Hedlin: A method for detecting and locating geophysical events using groups of arrays, *Geophys. J. Int.*, 203, 960-971, doi:10.1093/gji/ggv345, 2015.
- 61) Nakano, M., D. Sugiyama, T. Hori, T. Kuwatani, and S. Tsuboi: Discrimination of Seismic Signals from Earthquakes and Tectonic Tremor by Applying a Convolutional Neural Network to Running Spectral Images, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 530-538, doi: 10.1785/0220180279, 2019.

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

該当なし

2) ソフトウェア開発

該当なし

3) 仕様・標準等の策定

該当なし

(3) 令和3年度の業務計画案

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

a) 蔵王火山における機動観測

令和3年度は、前年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測のデータの解析を進め、過去に蔵王山周辺で取得したデータも併せて3次元地下比抵抗構造の推定を行う。また、前年度に選定した御釜西側の候補地に傾斜観測点を新設し、令和元年度に御釜東側に設置した観測点を含む既設地殻変動観測網のデータと併せて、浅部地殻変動源の推定を行う。令和2年度に開始した機動的な地震観測も引き続き継続し、火山性地震や長周期地震の解析を進め、流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。

既設の地震・傾斜観測点のデータ解析を進めつつ、既往研究による比抵抗構造等を総合して切迫性評価に関する検討等を進めるために博士研究員1名を雇用する。

b) 有珠火山における機動観測

有珠火山では、噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎる頃に噴火が始まるという活動パターンを繰り返している。噴火までの時間や噴火地点の違いは、マグマの上昇速度やそれをもたらす地下の環境の違いによる可能性があり、静穏期の定常的な地震活動のメカニズムを解明することや山体内部の詳細な地下構造を知ることが噴火切迫性評価への手がかりとなる。

現在も山頂火口原直下で定常的に起こっている微小地震活動を、アレイ観測も含めた臨時地震観測で精密に調査するとともに、AMT法で山体内の地下比抵抗構造を探查する。また、噴火が近づいた際に迅速に多点の臨時地盤変動観測網を展開するために、廉価なGNSS受信機を用いた地盤変動観測・伝送システムを準備中であり、令和3年度から4年度の機動観測期間には、本課題でこれを試験運用する。噴火前に異常が検知された実績があり、地震発生との相関も期待される土壌拡散CO₂フラックスについても、前年度よりさらに対象領域を拡大してマッピングを行う。機動観測の業務には、北海道大学で雇用するリサーチアシスタント2名も補助的に従事させる。

c) 伊豆大島における機動観測準備

伊豆大島では、前回1986年の噴火活動後に山体が収縮したが、現在では山体の膨張の傾向が長期的に続き、また、1～3年周期の山体の膨張と収縮が繰り返して起っている。伊豆大島カルデラ内地下浅部では山体膨張に同期した微小地震の活動も見られており、将来発生する噴火に向けて着々と準備している。

伊豆大島では、これまで人工地震による地震波速度構造やMT、AMT法による地下比抵抗構造がそれぞれ別々に推定されてきた。来年度から実施予定の機動観測では地震波速度構造と地下比抵抗構造を比較し、それらの対比から火山内部状態の把握する方法の開発を目指している。本年度はその準備として、過去の構造探査の情報を集め、再解析を試みる。更に、来年度以降の機動観測の準備として、観測予定点の選定と、借地や自然公園法の許認可の準備を行う。

地下比抵抗構造については、過去の伊豆大島のMT、AMTデータを再解析するとともに同様の広域応力場の環境にあり、過去の観測データがある三宅島との比較も進めることが重要である。このため博士研究員を雇用する。また、各種データの整理のため、リサーチアシスタントを雇用する。

国内外の学会に出席し、他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行い、蔵王火山の噴火切迫度の評価の高度化につなげる。

d) 草津白根山における機動観測

令和2年度まで草津白根山周辺で地震および地殻変動の機動観測を実施してきた。周辺では散発的な地震活動が続き、群発的な活動も見られることから、引き続きこの事業で構築した観測網の運用を継続し、データを蓄積する。

既存観測点との統合解析により、これまで不明であった草津白根山周辺の西～北側10 km程度までの震源分布を明らかにし、草津白根山の火山活動との関係を検討する。この震源分布決定作業を実施するために技術限定職員1名を半年間雇用する。また、これまで本事業等により取得したMT観測データとそれ以外の過去に取得したデータも併せて解析を行い、この地域の3次元地下比抵抗構造を高精度に推定し、震源分布等と併せて解釈することにより、草津白根山のマグマ-熱水系の地下構造を明らかにする。

e) 霧島火山における機動観測

霧島火山においては現在も活動が継続していることを考慮して、地震（アレイ地震計・広帯域地震計）・空振、地殻変動（水準測量・傾斜変動・GNSS測量）、電磁気（広帯域MT）などの諸観測を継続する。これらの観測データの解析により、えびの高原（硫黄山）周辺の地震・微動活動や浅部地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化の検出を目指す。また、2018年度に作成した「噴火発生場の構造・物性モデル」に時間軸を入れてモデルの高度化をはかり、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

新燃岳、御鉢を含んだ霧島火山群全体としてのマグマ供給系の構造を広帯域MT観測により推定する。これまでの火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むやや広い範囲に新たに観測点を設置し、より深部の地下比抵抗構造を推定する。

現在も地表の高温域が拡大する霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域でGNSS連続観測を実施し、霧島山新燃岳や硫黄山におけるマグマ噴火・水蒸気噴火の切迫度評価に資する情報を獲得する。

霧島火山において、これまでに得られた地震活動、地盤変動の時間変化や地下比抵抗構造を噴火切迫度評価に繋げるために必要な地質学的な情報を取得するため、霧島山周辺で地質調査の準備を進める。

f) 箱根火山における機動観測

箱根火山の深部におけるマグマ供給源のイメージングを目指して、レシーバー関数のインバージョン解析を実施する。また、過去に実施した機動観測データを用いてS波スプリッティング解析を行い、箱根火山の深部から浅部への流体経路となる亀裂系の特徴を推定する。過去の機動観測データのみでは解像度が足りない場合を想定し、必要に応じて追加の機動観測を実施する。大涌谷の蒸気井や自然噴気の温度・成分・安定同位体比などを観測し、熱水活動と地震・地殻変動との関連性について検討することで、水蒸気噴火の切迫度評価の基礎データとする。国内外の学会に出席し、他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行うとともに、科学誌への成果の発表準備を進める。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、前記の機動観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システム

平成 28 年度から地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプの開発を行い、霧島山での試験観測を通してシステムの改良を進めている。令和 3 年度以降は、開発したソフトウェアの活用を図り、機動的火山観測への適用実績を蓄積する。そのうえでソフトウェアの更なる改善を検討する。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

熱水流動シミュレーションの出力（温度圧力分布）から比抵抗分布を推定するツールの作成を進める。これを用いて、草津白根山などの実探査データに基づく比抵抗構造を試行錯誤的に再現することを試みる。東京工業大学で雇用するリサーチアシスタント 1 名がこの業務を補助する。

火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に資することを念頭に、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行い、火道や難透水層などの特徴的な地下構造がもたらす効果について考察する。その際、前年度までに開発したポストプロセッサを用いて、地盤変動や地磁気変化等の観測量に変換し、実際の観測データとの比較を試みる。この部分の業務補助のために、北海道大学でリサーチアシスタントを 1 名雇用する。

比抵抗と浸透率の定量的・経験的關係を抽出するために、過去に行われた地熱ボーリングの公表済み報告書等から情報を読み取りデジタルデータとして整理し、比抵抗とその他の物性値に関する知見を蓄積する。この業務補助のために北海道大学でリサーチアシスタントを更に 1 名雇用する。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。平成 30 年～令和元年度までに三宅島での機動観測で取得した地震波形データの解析を進める。過去の多数の地震を自動判別により型別に活動度の変化を捉えることは重要であることから、機動観測で得た地震波形を教師データとし過去の多数の地震の種別判定を行うアルゴリズムの作成および性能の検証作業を進める。

地震活動総合解析システムの実用化のためには、様々な火山における実データが必要である。前年度までに御嶽山とその周辺で得られた波形データの整備を進めたが、令和 3 年度は火山性微小地震を自動検知しリアルタイムで処理するシステムの整備を

進める。また、リアルタイム処理の結果を検証するため、御嶽山に近い火山研究施設でデータを試験的に表示する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

噴火時の機動性を高めるため、センサ開発、観測計画の立案から運航まで火山研究者自身が主体的に関わり無人機（ドローン）を運用する仕組みを一層発展させる。これまで開発してきた多成分ガス測定装置を用いて遠隔火山ガス組成比を観測し、地上観測結果と比較しながら測定の妥当性を検証する。また、草津白根山湯釜火口湖における機動的な遠隔湖水採取を試みる。遠距離からの空中赤外線観測を目指し、ドローンによる試験観測を行う。実際の噴火発生時にドローンを活用できるように、これまでに得た知見に基づいた作業手順の簡略化およびマニュアル化を進める。

e) 地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するためのアルゴリズムの検証と解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。令和3年度は、これまで実装を進めた地震波干渉法解析プログラムのGUIの改良及び本プロジェクト等で取得した観測データや既存観測網において得られたデータへの適用を進め、改善点等の検討を行う。また、課題Aにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有について検討を行う。これらの業務補助のため、リサーチアシスタント1名を雇用する。

また、地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、連続記録の安定した取得が必須であることから、通信回線の冗長化などに関する検討を引き続き行う。

3) プログラムの総合推進

a) 課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議を引き続き開催する。そこで、各サブテーマの研究の進捗状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う、また、条件が整えば、他のサブテーマと共通のフィールドで共同観測を実施し情報交換を行う。

b) サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画についての検討と各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。火山防災業務に責任を持つ気象庁との連携をはかるため、気象庁職員の委員会への出席を促し情報の共有を図る。更に、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を課題A「データ一元化」課題に受け渡す方法等について協議を進める。

火山活動の活発化を常に念頭に置き、このサブテーマの成果を最大限に活用するため、関係機関との協議の下に火山噴火緊急観測実施の可能性や本事業の対象火山における機動観測の実施年度を変更すること等についても協議する。

c) 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2021 年実施予定の有珠山機動観測や 2022 実施予定の伊豆大島機動観測で利用する広帯域計を購入する。有珠山では、これまでに購入した機材と令和 3 年度に購入する機材とを併せて利用する。

機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材は、次年度以降も事業の予定を考慮して、本事業の業務の実施に支障のないように計画的に整備する。

d) 課題 A で取り組むデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを課題 A で進めるデータ一元化へ円滑に進めるため、課題 A で設置する具体的な方策を検討するワーキング・グループに参加し、課題 A の活動に協力する。その際、既存観測点の観測データについても議論が進むように協力する。

3. 会議録

(1) 課題 B 「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

日時 令和 3 年 1 月 4 日 (月) 13 時～14 時

場所 オンライン (ZOOM 会議)

出席者 田中, 小澤, 實渕, 森, 大湊, 森田

1. 報告事項・審議事項

○予算配分

火山 PJ 令和 3 年度予算: 総額 640 百万円

【配分希望額報告依頼】 (〆切: 1 月 15 日)

来年度の配分額についても、前年同様にサブ課題ごとの希望額を文科省に伝えることとした。

(各サブテーマの予算配分について、昨年度までの実績について表示し、情報共有を行い、これに準じることとした。)

○フォローアップ報告会の開催の確認

日時: 1 月 19 日 10:55～12:05 プレゼン・質疑応答 50 分

以下の点を確認した。

角野さんが出席できず、代わりに森さんが出席する。

サブテーマ毎にスライドを用意し、プレゼンする。1 サブテーマにつき発表 10 分を目安。

PPT ファイルの形式は、12 月 15 日の運営協議会用に提出したものと同一とし、課題 B 内で形式を統一する。