

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 先端的な火山観測技術の開発

「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	大湊 隆雄
同上		准教授	行竹 洋平
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
名古屋大学・環境学研究科	参加機関	教授	山岡 耕春
神戸大学海洋底探査センター	参加機関	教授	金子 克哉
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
鹿児島大学・理工学研究科		教授	中尾 茂
同上	参加機関	准教授	八木原 寛
神奈川県温泉地学研究所		主任研究員	本多 亮

(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しており、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壤拡散 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。しかし、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 日後に噴火する場合や、1977 年の山頂噴火のように地震発生の約 1 日後に噴火するなど、必ずしも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解明が、有珠山の噴火切迫性評価にとって重要である。今年度は地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造推定を進めた。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った。

前年度に引き続き、蔵王山での機動観測を継続した。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とともに、比較研究として三宅島の比抵抗データの解析を進めた。また、活動が継続している草津白根山、霧島山、箱根山においても規模を縮小しつつ観測およびデータ解析を継続した。また、データや解析結果の課題 A への集約を進めた。

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の洗い出しを進めた。

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。

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。蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根、三宅島については規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 A への集約を進める。

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。有珠山、蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根、三宅島については規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 A への集約を進める。

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。有珠山、蔵王山、草津白根山、伊豆大島、霧島山、箱根、三宅島については規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 A への集約を進める。

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。これまでの観測対象火山についても、活動が継続している場合は規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、データの解析と課題 A への集約を進める。

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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

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

2015年 4 月～6 月及び2018年 1 月～3 月に火口周辺警報（噴火警戒レベル 2）が発表された蔵王火山では、2012年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後想定火口域浅部における熱消磁や長周期地震が観測されるなど火山活動の活発化がみられており、中期的な噴火切迫性の評価が重要である。今年度は、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。

国内学会（JpGU:横浜市で開催・オンライン併用）に出席し、国内外の火山研究についての情報収集・情報交換をおこない、蔵王火山の噴火切迫度の評価の高度化につなげる。

b) 有珠火山における機動観測

有珠火山では、前回の噴火から20年が経過し、次回の噴火に向かう準備段階を迎えていると想像される。これまで有珠火山では、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。ただし、1910年や2000年噴火の山腹噴火では、群発地震開始から約3日後に噴火している一方で、山頂噴火した1977年では、群発開始の約1日後に噴火しており、詳しく見るとこのような違いもある。こうした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るが、現状では事前にその違いを見分けることはできていない。有感地震が群発する以前の段階から、噴火切迫性を評価できるようにするのが将来の目標であるが、それには、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手がかりとなる。

このため、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索する。また、有珠火山では、噴火前後に大きな地盤変動を伴うことから、実際に噴火が近づいた際には、迅速に多点の臨時地盤変動観測網を展開することが重要となる。このために、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。加えて、2000年噴火の半年前に顕著な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) 伊豆大島火山における機動観測準備

伊豆大島では、前回1986年11月に開始した一連の噴火活動は1990年11月の水蒸気噴火を最後に活動が低下し、1990年代半ばころまで山体の収縮が継続した。その後、徐々に山体の膨張が始まり、現在では長期的には山体の膨張の傾向が続いているのに加え

て、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。その圧力源は伊豆大島カルデラ内北部の深さ約5kmと推定されている。また、山体周辺の火山性地震も活発に起こり、伊豆大島の沿岸の岡田、元町、野増の各地区からその沖合にかけて有感地震を含む群発地震が時々発生するとともに、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が見られており、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、平成30年～令和元年度に機動観測を実施した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。

d) 草津白根火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。特に、深部圧力源が存在すると考えられている草津白根山の西側では、平成30年夏から秋にかけて地震が群発したため、地震計や傾斜計を機動的に設置してきた。同地域の群発地震活動は沈静化しているものの、いまだに散発的な地震活動が認められる。また、草津白根山北側の志賀高原においても独立した地震活動が新たに見出されている。草津白根山の噴火警戒レベルも2のままであるため、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進めるために、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草津白根山を中心とする半径10 km圏内の50ヶ所以上でMT観測データを取得した。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

1) 霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

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。地震計、傾斜計については携帯電話通信網を用いたテレメータによりリアルタイムで収録する。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・空間変化を検出して、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る。これらに基づき、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

また、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。これまで蓄積してきた火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むように新たに観測点を設置することで、深さ20km程度までの地下比抵抗構造を高い空間解像度と信頼性で推定する。

2) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

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連続観測を実施する。上記 1) と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火や切迫度評価に資する情報を獲得する。

3) 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行う。

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、2017年までに実施した機動観測で得た波形データを用いて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ガス や熱水を供給する亀裂系の特徴を明らかにする。2017年の機動観測のみでは解析に使用できるデータが不足することも予想されるため、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、システムの改良を行ってきた。今後は、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

i) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

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を作成する。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。

ii) 熱水流動シミュレーション

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、現実の観測例に類似したものがないかについても検討する。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。

iii) 坑井データの読取と整理

比抵抗と浸透率の定量的・経験的関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、北海道大学で上記 i) とは別のリサーチアシスタント 1 名を雇用する。

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

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。具体的には、少数のパラメータで波形の特徴を自動的に高速で抽出するアルゴリズムの作成に引き続き取り組む。平成 30 年～令和元年度まで三宅島で機動観測を実施し、そこで多数の A 型地震、BH 型地震、BL 型地震の波形を取得した。これらの地震は発生場所が異なり、それぞれの型の地震活動の時間変化により、火山活動の変化が捉えられる可能性がある。特に、2016 年の火道閉塞前後の型別の地震活動度の変化は、火道閉塞現象の理解に重要な情報を与える可能性があるため、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大変興味深い。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を作成し、その妥当性を検証して改良を加える。

ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽山

とその周辺の地震計で得られた波形データから火山性微小地震を自動検知し、データをリアルタイムに整備する。また、効果の検証を可能にするため、御嶽山地域にある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

火山研究者自身がセンサー開発、観測計画から運航まで主体的に関わる無人機（ドローン）の運用を一層発展させる。具体的には、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いて活動活発化が認められた場合は、機動的な遠隔湖水採取を実施する。さらに、空中赤外線観測を遠距離から実施するために、改修されたドローンを用いた赤外線観測試験を行う。実際の飛行調査においては、様々な準備と複雑な作業手順を必要とするため、どれかひとつを欠いただけでも有効なデータの取得がままならない。噴火発生時等に研究者がドローンを広く活用できることを意図して、これまでに得た知見に基づき、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・解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。今年度は、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、連続記録を安定して取得することが必要であるため、通信回線の冗長化等の観測システムの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、可能であれ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、情報の交換を行う。

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検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。この際、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、推進委員会に気象庁職員に出席してもらい、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する。

全国の火山の活動を常に念頭に置き、このサブテーマで実施する研究開発の成果を最大限にするため、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、機動的観測の対象火山の年次の変更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、2022 年度に実施する有珠山機動観測および 2022、2023 年度に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、これとこれまでに購入した機材を併せて利用して本事業を実施する。

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・グループに参加して、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。

(2) 令和3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を把握するための調査を、蔵王山、有珠火山、草津白根山、霧島山及び箱根山において実施した。また、伊豆大島において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

蔵王山では、昨年度の解析で得られた低比抵抗体分布の信頼性評価、傾斜計の新設、地震機動観測データの機械学習に基づく地震種別分類等を行った。有珠山では、GNSS の機動観測の開始およびテレメータ化の準備、山頂噴火に備えた地震アレイ観測の実施とその性能評価、AMT/MT 法による3次元比抵抗探査、全磁力観測、土壌CO₂フラックス観測を実施した。伊豆大島では次年度に予定されるAMT・MT法による機動観測の実施に向けて、観測予定点の選定や許認可手続きの確認等を進めた。また、伊豆大島と同様の地学的条件下にある三宅島との比較を行うため、三宅島の機動観測データの再解析を行った。草津白根山では、3次元比抵抗構造を高精度に推定し、他のデータと合わせることでよりマグマ熱水系の構造を明らかにした。さらに、地震観測データの統合処理を進め、定常的に震源を決めることができる範囲を拡張した。霧島山では、多項目観測を継続し噴火発生場の構造やその変化、空振発生メカニズムの解明、様々な地殻変動データの統合解析による地下圧力源の推定を実施した。また、3次元比抵抗構造の分解能向上にむけて、広域MT観測を拡充した。箱根山では、レシーバ関数法による深部地震波速度構造の推定を進めるとともに、S波スプリッティング解析による浅部亀裂系の統計処理とその解釈を進めた。

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の運用実験を継続した。地下比抵抗・熱水流動解析システムについ
ては、熱水流動シミュレータの出力を比抵抗値に変換するポストプロセッサを開発し、草
津白根山での観測値との比較解析を進めた。また、倶多楽火山を模擬した3次元シミュ
レーションの試行や坑井データの読み取り・整理を進めた。火山性地震活動総合解析シス
テムについては機械学習手法の組み込みに取り組んだ。遠隔熱情報解析システムによる阿蘇
火山のガス観測を実施した。地震波動場連続解析システムについても、実地での運用と改
良を進めた。

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) 蔵王火山における機動観測

今年度は、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
の推定を行った。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った。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た。

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
を雇用した。

国内学会（JpGU:横浜市で開催・オンライン併用）に出席し、国内外の火山
研究についての情報収集・情報交換をおこない、蔵王火山の噴火切迫度の評
価の高度化につなげた。

i) 電磁気観測による3次元比抵抗構造の推定

水蒸気噴火を繰り返す火山における比抵抗構造探査によって、深さ約 1 km 以浅に非常に電流を流しやすい低比抵抗層が存在し、その層の下にはやや比抵抗の高い領域が存在していることが複数の火山に共通して明らかになってきた。草津白根山¹⁾や霧島硫黄山²⁾などでは、その低比抵抗層下限のやや比抵抗の高い領域側に、熱水や水蒸気による破壊を示唆する火山性地震震源の上限、熱水膨張を示唆する圧力膨張源、熱消磁源が位置することから、その領域が熱水や水蒸気の通り道となっており、その上側に存在する低比抵抗層は、熱水や水蒸気の上昇を阻止する難透水性のスメクタイトを主とする熱水変質層であると解釈されている。さらに草津白根山では、その下の深さ約 2 km 付近に低比抵抗体が存在し、そこが熱水溜り本体であると考えられている。蔵王山も、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³⁾が、その浅部構造は殆んど明らかになっていなかった。令和 2 年度の本事業報告書において、蔵王山の深さ約 1 km 以浅と深さ約 2 km に低比抵抗体が存在するという共通の特徴が見られることを報告した。今年度は昨年度に引き続き、2014 年度の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」と令和 2 年度の本事業で取得した可聴域周波数帯域地磁気・地電流法 (AMT 法) と鉛直磁場-水平磁場変動間の地磁気変換関数のデータを詳細に解析し、火山性地震の震源や長周期地震の知見との関係について考察した。

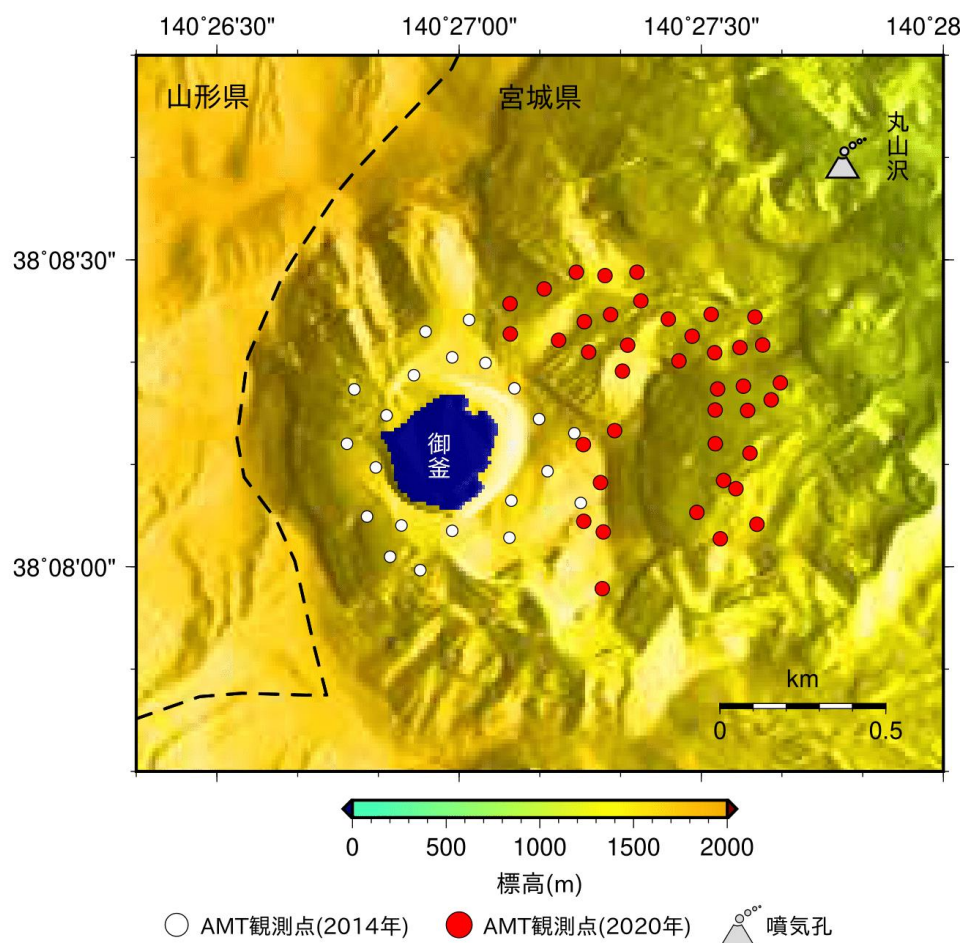


図1 AMT 観測点配置図。破線は宮城・山形県境を示す。

図 1 に今回の解析で使った観測点の配置図を示す。AMT 法と地磁気変換関数周波数応答関数を求めるデータ処理は BIRRP 法⁴⁾を、比抵抗構造を推定する逆問題解析手法は WSIVN3DMT 解析コード⁵⁾をそれぞれ用いた。逆問題解析で用いたデータの周波数を 2^n Hz ($n=0\sim13$) の 14 周波数としたことから、データ数は 60 観測点 \times 14 周波数 \times 12 応答関数=10,080 個である。モデル領域は、御釜東側の五色岳付近を中心に水平方向に ± 14 km、深さ方向に 30 km の領域をモデル化した。今回の逆問題解析の改善点の 1 つは、比抵抗モデル空間を従来の南北 38 \times 東西 48 \times 深さ 75=106,219 ブロックから南北 104 \times 東西 104 \times 深さ 139=1,503,424 ブロックに精緻化したことである(図 2)。国土地理院による 10 m 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を 100 m、湖水の比抵抗を 5 Ωm として固定し、モデルに組み込んでいる。

地表から深さ約 2 km 付近の低比抵抗体の信頼性を評価するため、逆問題解析で用いる先験情報による違いを考察した。比抵抗構造の逆問題解析では、ある基準となるモデルを初期値として先験的に与え、基準モデルからモデルパラメータの分散が最小になるような制約を与える⁵⁾。与える基準モデルの違いによって、得られるモデルの特徴は異なる場合が多い^{6,7)}。構造が複雑な地殻では一般的な基準モデルが無いいため、地球内部を一樣としたモデルを基準モデルとし、基準モデルを逐次アップデートしながらモデルを改善する方法が提案されている^{8,9)}。本報告では文献 9 に従い、一樣モデルを基準モデルとして与え、比抵抗値として 30、100、300、1000 Ωm を用いた場合の逆問題解析をそれぞれ行った。各基準モデルに対し、これまでに得られた比抵抗モデルの平面図と断面図を、図 3、4 に示す。

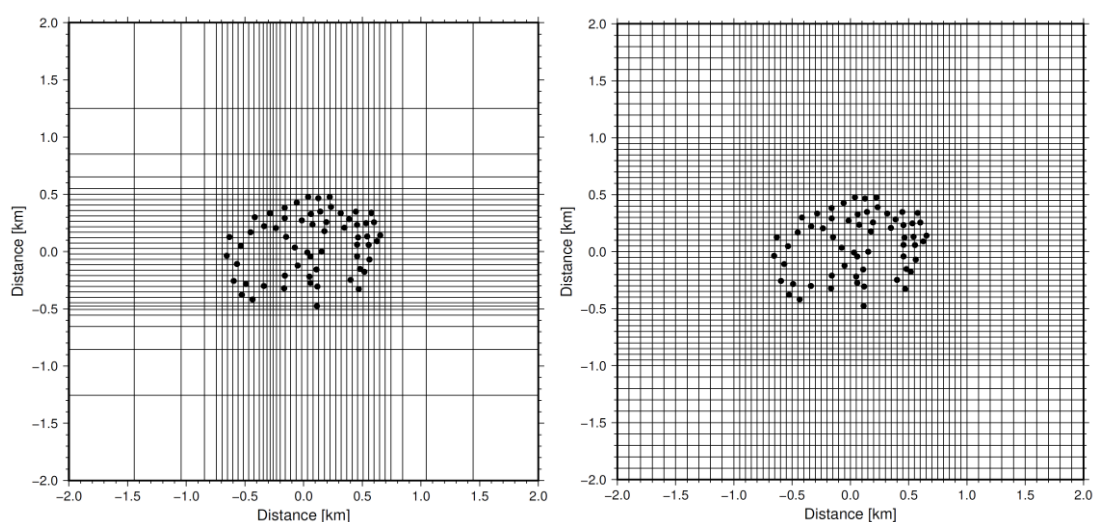


図 2 比抵抗構造解析で用いたメッシュの中央付近東西南北 ± 2 km 領域の平面図。(左) 令和 2 年度に行った解析で用いたメッシュ。(右) 今回の解析で用いたメッシュ。黒点は観測点を示す。

基準モデルが異なる場合でも、表層付近の浅部低比抵抗層と海拔下約 1.5 km の低比抵抗体は安定して推定されていることが分かる。しかし草津白根山と比較すると、海拔下約 1.5 km の低比抵抗体の比抵抗値はそれほど低くなく、その拡がりも限定的であるように見える。この低比抵抗体が深部の熱水溜りであると仮定すると、比抵抗

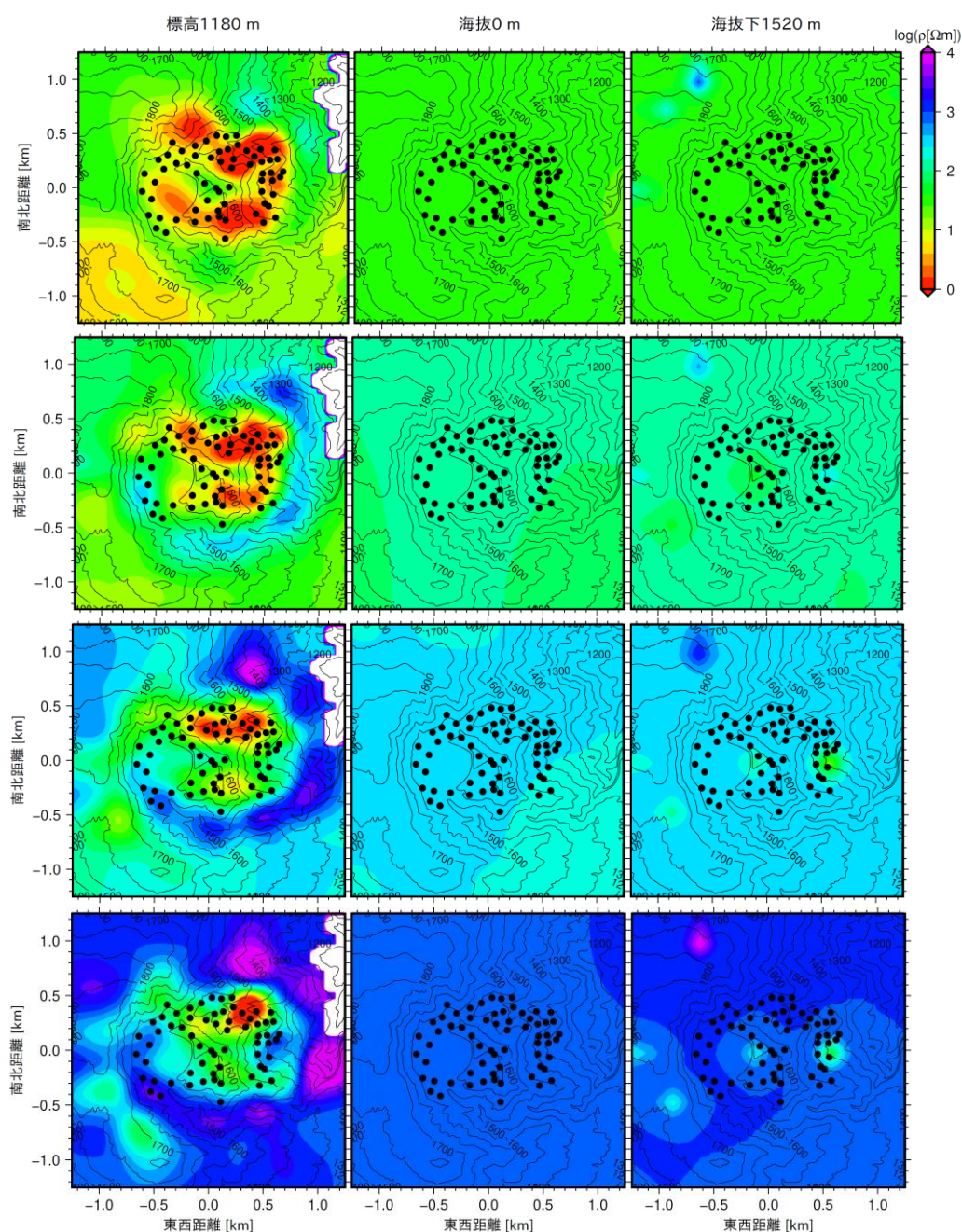


図3 推定された比抵抗構造の水平断面図。左列から右列へそれぞれ標高 1180 m、海拔 0 m、海拔下 1520 m での値。基準モデルの比抵抗値は上段から下段に向かってそれぞれ 30、100、300、1000 Ωm とした。カラスケールは比抵抗値を示し、黒点が観測点、実線が等高線（50 m 間隔）である。白抜き領域は地表面よりも上側（空中）であることを示す。

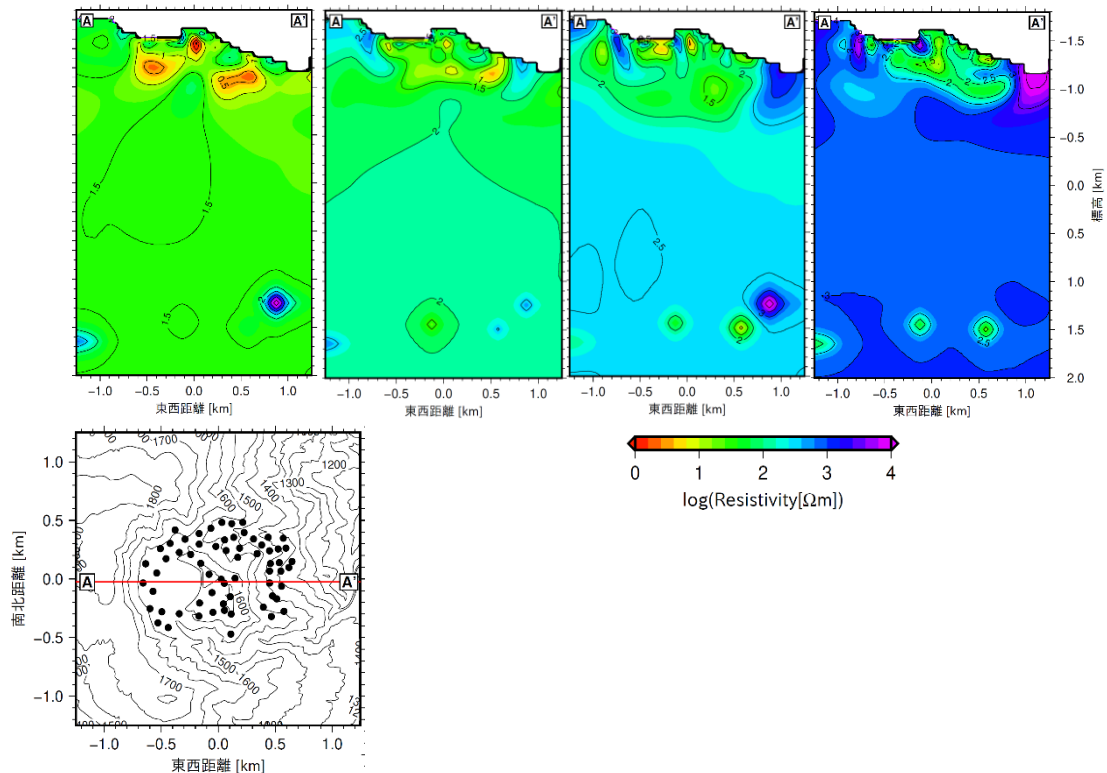


図4 下図 A-A' における比抵抗モデルの東西鉛直断面図。左から、基準モデルの比抵抗値を 30、100、300、1000 Ωm とした場合の結果を示す。

構造からは蔵王山の深部の熱水溜りは草津白根山程は発達していない可能性を示唆する。

一方表層付近の低比抵抗層は比抵抗値としては顕著に低い値を示し、図3(左)が示すように御釜の北東約500 m付近に存在している。この位置はiii)で報告する長周期地震の震源として推定されているほぼ鉛直の開口亀裂の位置と対応している。そこで開口亀裂解の走向に沿った比抵抗構造の断面と、火山性地震の震源域、開口亀裂解、全磁力観測から推定された熱消磁源の位置との関係を図5に示す。図5で示した比抵抗構造は、RMS misfit が最小(4.04)となった基準モデルを100 Ωm とした場合の結果である。長周期地震の開口亀裂解の上端が、浅部低比抵抗層の下端と概ね一致している。このことは熱水の通り道となりうる開口亀裂の上端周辺が変質層によってシールされるという、冒頭に述べた水蒸気噴火を繰り返す火山に共通して見られる構造的な特徴が蔵王山においても成立していることを示唆する。熱消磁源の位置は浅部低比抵抗層と同じ深さであるが、水平位置が異なっている。熱消磁源の推定結果についてはRMS misfit が7.5を上回っており、解の信頼性としては低い。また、開口亀裂の下端が深部低比抵抗体の深さと一致していることも興味深い。さらに熱

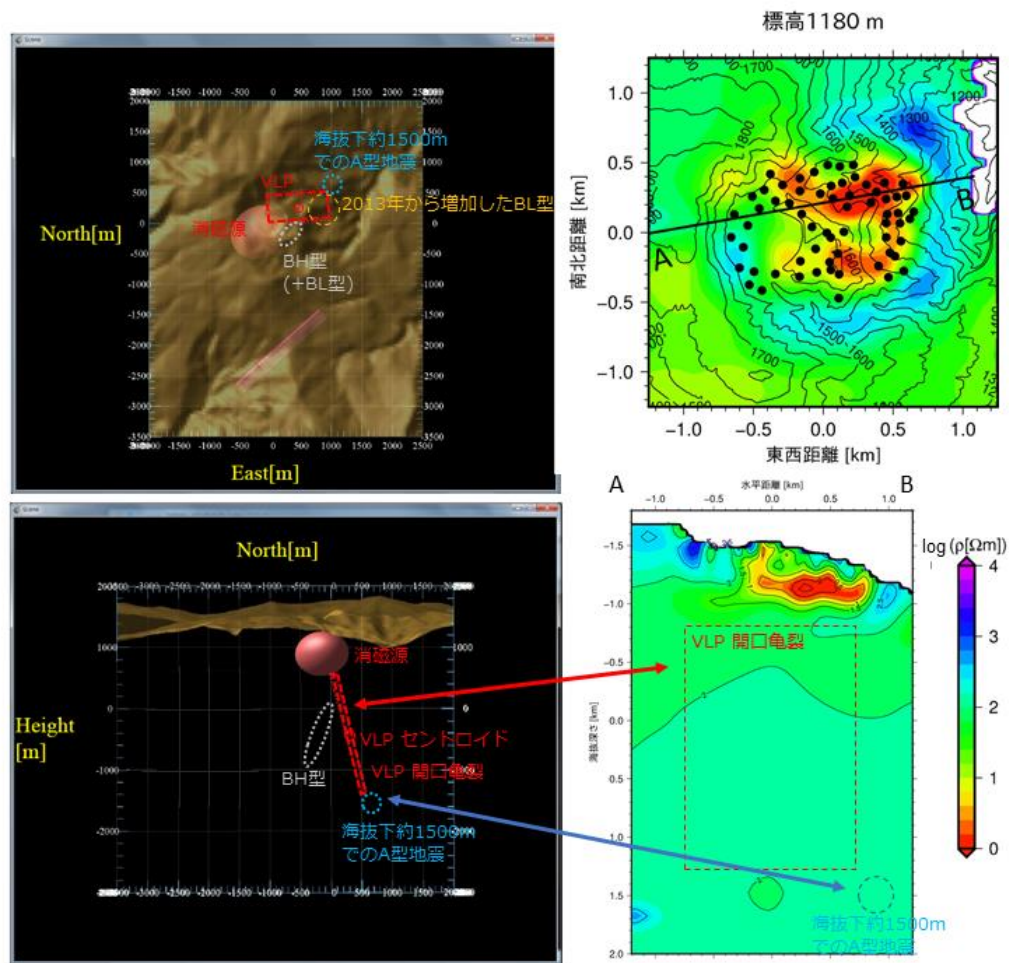


図5 火山性地震の震源域（A型、BH型、BL型）、長周期地震（VLP）の震源のセントロイド及び開口亀裂、熱消磁源の位置と比抵抗構造の位置関係。平面図（左上）及び南北断面図（左下）を示す。右上図は標高1180 mにおける比抵抗構造水平断面図、右下図は右上図中A-B線に沿った鉛直断面図。

水活動と関連していると考えられているA型地震の震源域は水平位置こそ異なるものの、深部低比抵抗体の深さとほぼ一致している。

ii) 傾斜観測による浅部地殻変動源の推定

本事業では、蔵王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活動切迫度評価に資するため、傾斜観測網の強化を図っている。令和元年度には想定火口域東側に御釜東傾斜観測点（ZOKE）を設置し（図6）、令和2年度には、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や許認可に必要な書類作成を業者に委託するなど準備を進めた。既設観測点の配置を考慮し、想定火口域に予想される圧力源の時空間変化を効率よく捉えるために、気象庁の坊平観測点と御釜のほぼ中間地点にある御田ノ神避難小屋の近くに選点した（図6）。令和3年度には、



図6 蔵王山周辺の傾斜観測点配置図



主な仕様	
傾斜計	Pinacle(防水仕様)
設置深度	20m
データ伝送	携帯回線網
電源	太陽電池＋鉛蓄電池
竣工日	2021年10月15日

図7 御田ノ神観測点 (ZODA) の写真 (左) と設置した傾斜計の主な仕様 (右)。

許認可手続きを行った後、10月15日に傾斜計の設置工事を行った。設置した傾斜計は、米国Pinacle社の気泡型傾斜計で、設置深度が県道からの距離が数10 mと近く、車両通行によるノイズ混入が懸念されたため、同傾斜計としては最深深度である20 mとした。

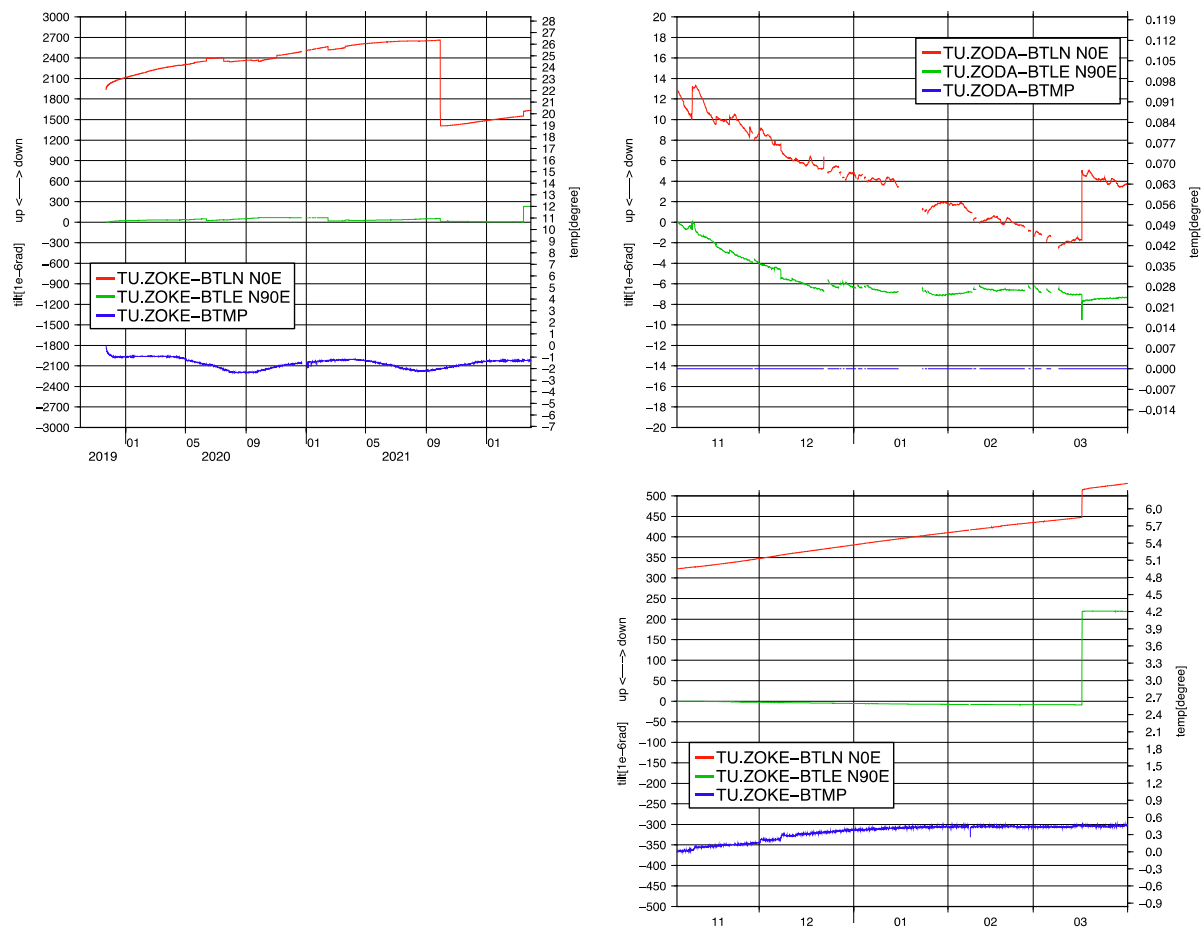


図8 本事業で新設した御釜東観測点（ZOKE，左上）及び御田ノ神観測点（ZODA，右上）においてこれまでに観測された傾斜変化。表示期間は、ZOKEは2019年から2022年3月まで、ZODAは2021年11月から2022年3月まで。右下の図はZODAと同じ期間における既存観測点ZOKEの傾斜変化を示す。

御田ノ神観測点（ZODA）近くを通る県道は11月初めから4月末まで冬季閉鎖となり、商用電源が利用できないため、太陽電池パネルと鉛蓄電池により給電している。図7に新設した観測点の外観、設置した傾斜計の使用を示す。収集したデータはロガーを介して携帯電話回線網を用いたデータ伝送システムを利用して、東北大学に伝送している。

図8に令和元年度に設置された御釜東観測点（ZOKE）及び令和3年度に設置された御田ノ神観測点（ZODA）において、これまでに観測された傾斜変化を示す。同図左上のZOKEの南北成分では北下がり方向のドリフトが非常に大きいのにに対し、東西成分は比較的落ち着いている。2021年9月初めに両成分で見られる大きなトビは、現地作業時にゼロ調を行ったことによるものである。青色のトレースは傾斜計内の温度変化であり、約2℃の年周変化を示している。同図右上のZODAではZOKEほどの大きなドリフトは見られず、両成分とも比較的安定している。データがところどころ抜けているのは、太陽電池パネルへの着雪により給電が停止したことが原因であると考えられるため、来シ

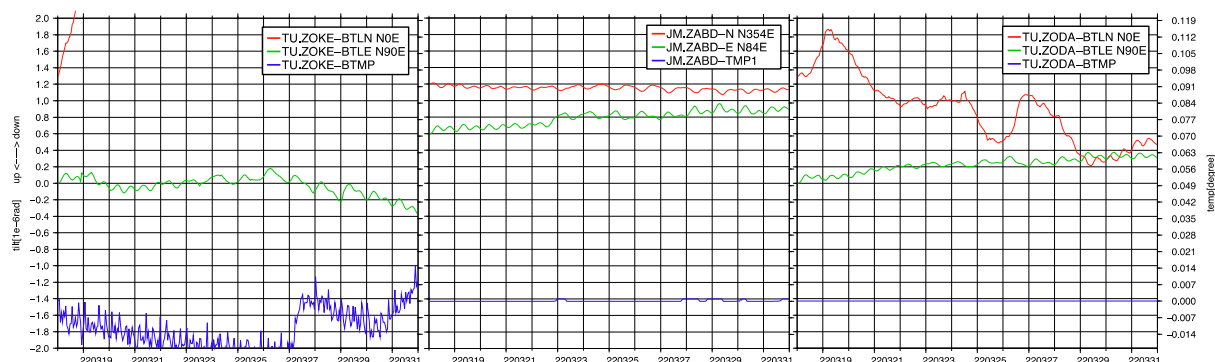


図9 御釜東観測点（ZOKE，左）、気象庁坊平観測点（ZABD，中央）及び御田ノ神観測点（ZODA，右）で観測された最近の傾斜変化（2022年3月18日～3月31日）。

ーズンには鉛蓄電池の容量を増やすなどの対策を講じる予定である。ZODA及びZOKE両観測点で3月半ばに見られるトビは、3月16日の福島県沖の地震（M7.3）によるものである。また、ZODAの傾斜計内の温度変化は設置しているデータロガーの仕様の都合で伝送できていない。これについても雪解けを待って交換する予定である。

図9に2022年3月18日～3月31日までの期間の傾斜変化を示す。ZOKE（左）では上述のように南北成分のドリフトが大きいものの、東西成分は比較的安定しており、地球潮汐の信号が明瞭に記録されている。ZODA（右）でも南北成分では、数日周期のノイズが重畳しているが、この成分でも潮汐変化とみられる周期的な傾斜変化が捉えられている。同図中央に示した気象庁坊平観測点（ZABD）は、設置深度が約100 mと深いこともあって非常に安定して潮汐成分が観測されている。その振幅はZOKEやZODAで観測されているものと同様であり、本事業で設置した観測点でもnano-radianレベルの分解能が達成できていると考えられる。

iii) 機動地震観測による浅部熱水系構造の推定

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。これらの火山深部から地表付近における一連の火山活動の推移は、Ikegaya and Yamamoto (2021)¹⁰⁾で示されているように、深部マグマだまりの下部から活動が開始し、その後マグマや揮発性物質が次第に地表付近へと移動することによって浅部熱水系の活動活発化が引き起こされたと理解することができる（図10）。

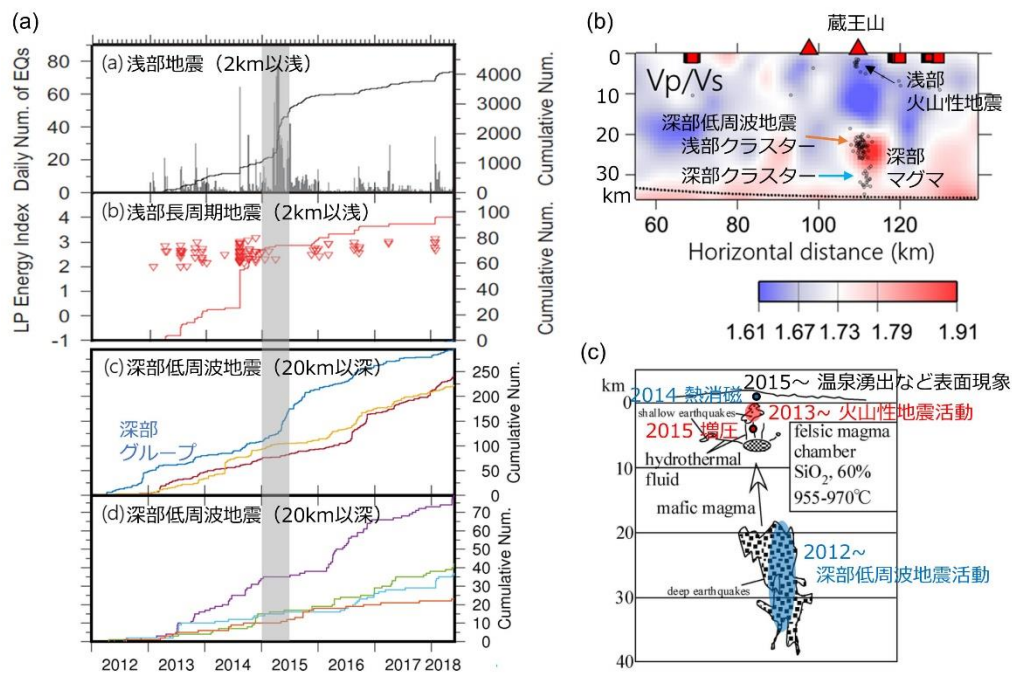


図 10 2012 年以降の蔵王山の火山活動とその概念図。(a) 深部低周波地震の活動と浅部における火山性地震の活動推移 (Ikegaya and Yamamoto, 2021)。(b) 蔵王山直下の地震学的構造 (V_p/V_s 比; Okada et al., 2015¹¹) に加筆)。(c) 蔵王山のマグマ供給系の概念図と 2012 年以降の火山現象とその発生領域 (Ban et al., 2016¹²) に加筆)。

これらの火山活動は2019年頃から全般的に低下傾向となってきたが、蔵王山の噴火ポテンシャル評価のためには、このような深部から浅部への物質・エネルギー輸送を明らかにし、水蒸気噴火を引き起こす地下浅部の流体系を解明することが重要であると考えられる。

そこで本事業では、想定火口域直下の浅部熱水系の実態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、既設の観測網が手薄な火山性地震発生領域の南側及び西側に3点の機動地震観測点設置し、令和2年秋から連続観測を開始した。設置した機動観測点では、商用電源や固定回線が利用できないため、本事業で開発を行っている地震波動場連続解析システムで試験を進めてきた携帯電話回線網を利用したデータ伝送システムを利用し、太陽電池パネルと鉛蓄電池を用いて給電し観測を実施している。

図11に、機動観測点を含む観測網のデータを用いて得られた震源分布を示す。蔵王山で発生する火山性地震は、P波・S波の初動が明瞭なA型と初動が不明瞭なBH型及びBL型に分類されるが、BH型とBL型の震源は主として火口湖御釜の東側から南東側にかけての海拔下1 kmから標高0.6 kmの範囲に分布する。また、これらのBH型・BL型の震源領域とはやや離れた御釜東側約1.5 kmの海拔下約1.5 kmの領域(噴気・地熱地帯直下)にA型地震の震源が分布する。これらのA型地震については、従来の観測網では精度よく震源決定を

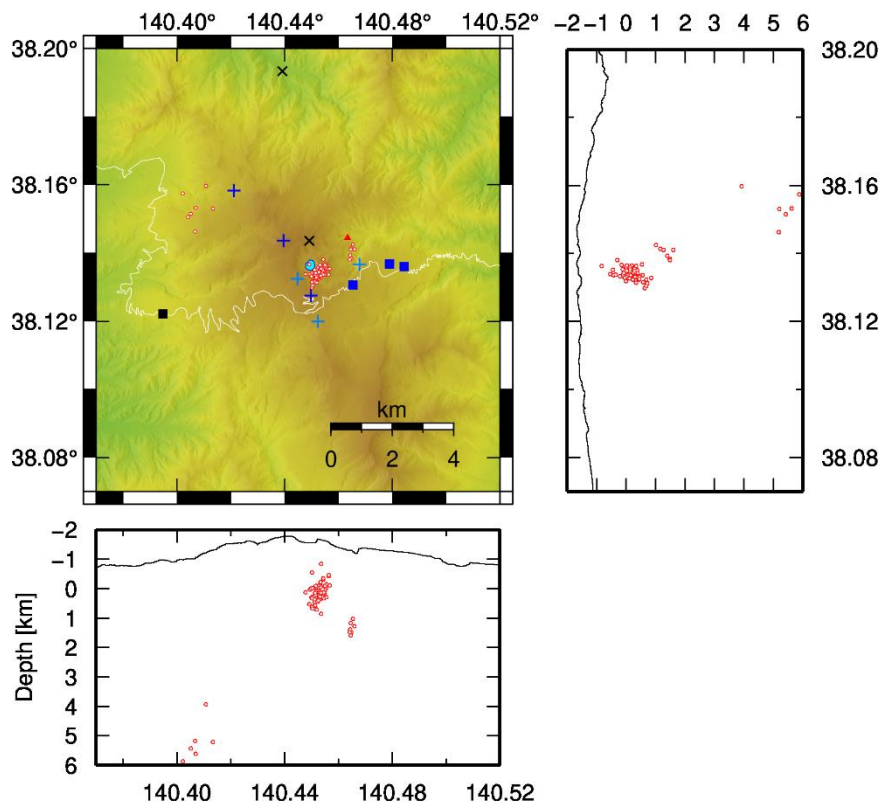


図11 火山性地震の震源分布と機動地震観測点の配置。●と▲はそれぞれ火口湖御釜と新噴気孔を表し、○は2018年1月から2021年11月の期間に発生した火山性地震の震源を表す。■と×はそれぞれ気象庁のボアホール型地震計と地上設置型地震計。■と+はそれぞれ東北大学のボアホール型地震計と地上設置型地震計。+が本事業で設置した3点の機動地震観測点。

行うことが困難であったが、震源域直上付近に機動地震観測点を設置したことにより、特に深さの震源決定精度が向上した。また、火口湖御釜を含む蔵王山の想定火口域内においては、卓越周期約10秒の長周期地震が2013年以降断続的に発生しているが、その記録も新設した機動地震観測点で得ることができた。モーメントテンソル解析により、これらの長周期地震の力源は、セントロイドが御釜の北東端付近の海拔下約0.4 kmにあり、走向が東北東－西南西方向でやや傾斜した開口亀裂であることが推定されていることから、長周期地震は蔵王山浅部における熱水系の振動によるものと解釈されている¹³⁾。また、長周期地震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る。さらに、この長周期地震の発生の前後に頻発する微小なBL型地震の震源は、上記の開口亀裂東側上端の地表面近く極浅部に推定されており、この長周期地震源が地下からの熱・流体の供給路となっていることが示唆される¹⁴⁾。この長周期地震源のセントロイドの位置は2013年以降明瞭な変化は見られていないが、御釜の西側に新設した機動観測点（広帯域地震計）の粒子軌跡では、

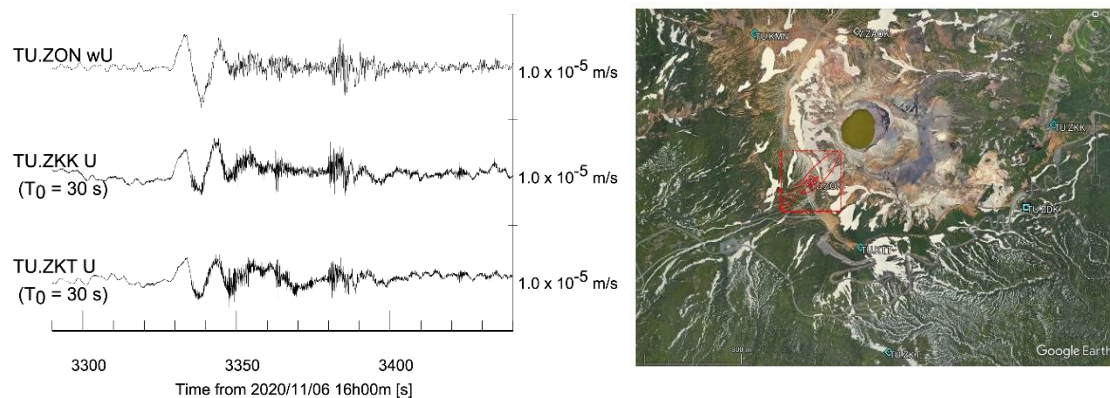


図 12 機動地震観測点における長周期地震の波形と粒子軌跡の例： 2020 年 11 月 6 日 16 時台．（左）本事業で新設した機動地震観測点 3 点における上下動速度記録。機動地震観測のうち 2 点は、電源容量の制約から冬季は短周期地震計で観測しているため、固有周期 30 秒相当に機器特性を補正して得た波形。（右）TU.ZON 観測点における水平面内粒子軌跡。

この長周期地震の振動源がこれまでの推定結果同様に御釜の北東側に位置することが確認できる（図12）。つまり、長周期地震は、御釜の東側から南側で発生するBH型及びBL型とは異なる領域で発生している。昨年度の報告においても指摘したように、このような長周期地震源である開口亀裂と火山性地震の発生領域の棲み分けは、阿蘇山や草津白根山など浅部熱水系の発達した他の火山でも見られており、今後比較研究を進めることが重要であると考えられる。

今年度は、これらの機動地震観測によるデータを用いた解析に加えて、機械学習による地震種別分類手法を蔵王山で観測された火山性地震に適用し、火山活動の推移に伴う地震活動の変化の精査も行った。この地震種別分類手法は本事業の地震波動場連続解析システムの開発において昨年度検討を行ったものであり、今年度は火山性地震活動総合解析システムと連携して蔵王山及び三宅島における火山性地震への適用を進めた。この地震種別分類手法では、3成分地震波形のスペクトログラム画像とCNN（Convolutional Neural Network）を用いて地震の種別を確率付きで分類することができる。ここでは、蔵王山で2013年から2017年に観測されたBH型・BL型地震を対象として、種別毎の活動推移を検討した。その結果、図13(a)に示したようにBH型とBL型の分類は、用いる観測点によらず概ね整合的に判定が行うことができ、2013年以降の火山性地震活動の活発化においてはBL型の増加が顕著であったことを再確認することができた（図13(b)）。また、2015年4月から5月に火山性地震が頻発した時期においては、BL型である確率がやや低下する傾向があることが明らかになった。このことは、同じBL型の特徴を有するものであっても、この時期には波形の特徴が他の時期のものに比べやや異なる地震が混在していたことを示す。本報告書の「2)火山噴火切迫度評価に有用

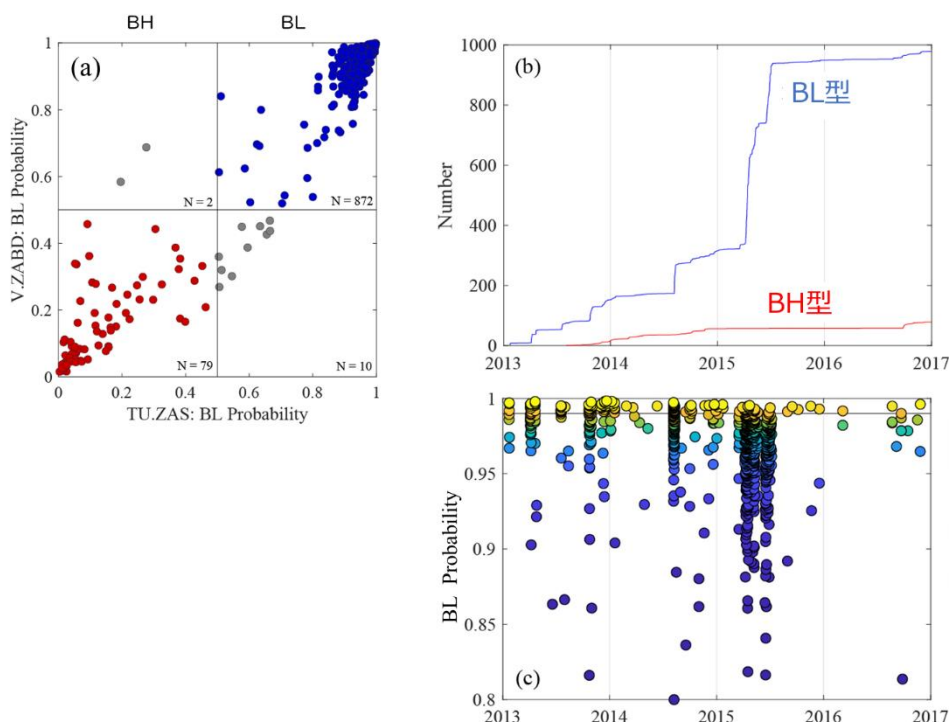


図 13 機械学習 (CNN) を用いた蔵王山の火山性地震の種別分類及び各種別の活動推移。(a) 気象庁 V. ZABD 観測点、東北大学 TU. ZAS 観測点それぞれにおいて BL 型である確率を求めた結果。(b) 2013 年から 2017 年までに発生した各種別の火山性地震の累積発生回数。(c) BL 型と分類された各地震についての BL 型である確率。

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」で後述するように、三宅島で観測された BL 型地震においても、時期によって波形の周波数特性のわずかな変化が確認されており、火山性地震の特徴や活動推移が火山体内部の状態変化を反映していることが示唆される。

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設置した機動地震観測点における観測によって、火山性地震の震源決定精度が向上し、浅部熱水系や流体供給系の理解に資する結果が得られつつある。次年度以降も機動地震観測を継続してデータの蓄積を進めるとともに、浅部熱水系の時間変化の精査などを進める予定である。

b) 有珠火山における機動観測

有珠山は最新の噴火からすでに 22 年が経過している。20 世紀に起きた噴火の間隔から推測すると、現在は次の噴火の準備期にある可能性が高い。このため、比較の基準となる静穏期の状態を正確に把握しておくことが、次の噴火の前兆的異常を検出する上で重要である。噴火準備過程におけるマグマ蓄積を検出することを目指して GNSS 臨時多点観測を展開した。また、過去に何度も噴火地点となっている山頂火口原において、地震、電磁気、CO₂ それぞれに関する機動観測を実施した。機動観測においては、

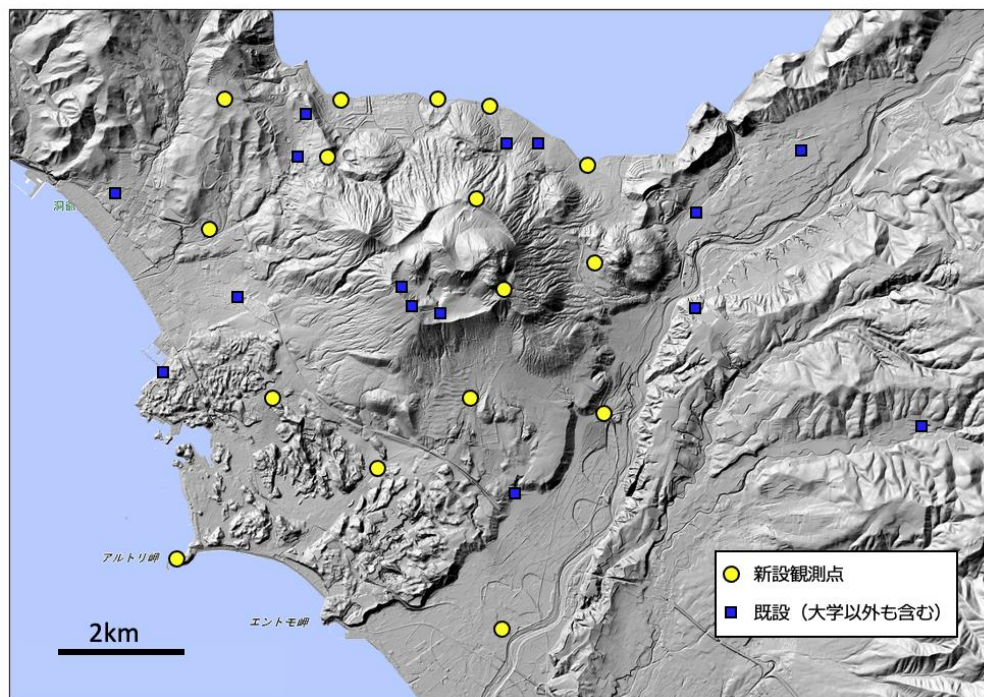


図 14 GNSS 観測点の分布。本事業で新設した地点を黄色の丸で示した。

北海道大学で雇用したリサーチアシスタント 2 名のほか、技術職員と研究生も業務の補助に従事した。

i) GNSS 臨時多点観測の展開

噴火の直前に顕著な地震活動と地盤変動が起こることが有珠山の特徴のひとつである。噴火地点を予測する上で地盤変動観測は強力なツールのひとつであるが、噴火直前に出口を求めて迷走するマグマの動きを正しく捉えるためには、多数点での観測が不可欠である。本事業では、16 地点で観測ピラーを新設し、2021 年夏に各地点 2 週間の臨時測量を行った（図 14、図 15）。得られたデータを用いて測位計算を行い、水平・鉛直方向、共に精度よく決定できていることを確認した（図 15）。今年度は現地収録方式で観測したが、次年度以降に連続観測テレメータ化することを目指している。そのための通信テストも今年度実施した。GNSS 受信機は 1 セット 10 万円程度の廉価な組み込みユニットを用いて構築した。電源はバッテリーと太陽電池でまかなっている。アンテナを固定するためのピラーの設置は外注した。

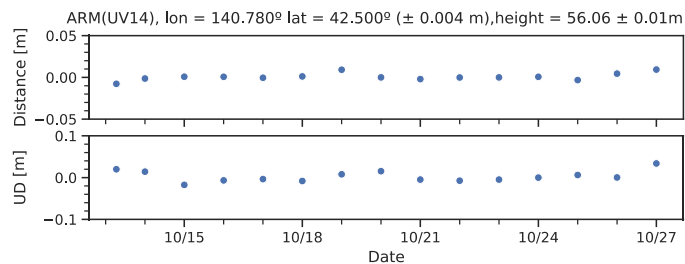


図 15 (左) 新規展開中の GNSS 観測点の外観 (アルトリ岬)。(右) 臨時観測の測位結果。

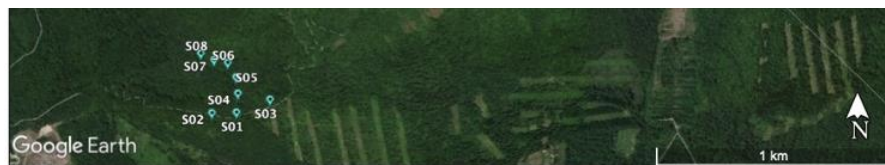


図 16 臨時地震観測点の分布。火口原北西部および山体南西斜面に小規模アレイを展開した。

ii) 小規模アレイ地震観測

1977 年噴火のような山頂噴火の場合には、VEI3 以上のプリニー式噴火となることが想定される。連続的な噴火に伴う連続微動の解析には、山体近傍でのアレイ観測が有効であるため、試験的な観測によりアレイ観測の場所や大きさ、地震波の検出能力などを確認しておくことが重要である。そこで、山頂火口原内の北西部と山体南西側中腹の 2 カ所に、2021 年 9 月中旬から 10 月上旬にかけて地震計アレイを設置し、火口原内浅部で発生する火山性地震を対象とした観測を実施した (図 16)。地震計 (L-22D 上下動) とデータロガー (近計システム EDR-X-1000) は地震研究所より借用した。11 月中旬に観測網を撤去してデータを回収した。その後、常時観測網の地震記録との対比が可能なイベントを抽出した。来年度はさらにデータ解析を進める。

iii) AMT/MT 比抵抗探査

令和 3 年 10 月～11 月にかけて山頂火口原内外の 18 地点で AMT (一部は広帯域 MT) 探査を実施した (図 17)。北海道大学と東京工業大学が所有する MTU-5A システム (Phoenix Geophysics 社製) を観測に用いた。今年度取得したデータのみで予察的な 3 次元インバージョン解析を行い比抵抗構造を求めた (図 18)。インバージョンコードには ModEM¹⁵⁾ を用い、地形の起伏を組み込んだ。表層の 200 m 程度は溶岩層に対応して概ね高比抵抗を示した。しかし、銀沼火口や I 火口など噴気が出ている場所では局所的に低比抵抗が見られた。これとは別に、火口西部の標高 700m 付近 (深さ約 500m) には顕著な低比抵抗異常 C1 が広がっている。現状では火口原南東部が測定できていないため断定できないが、この低比抵抗域は火口原の西部に局在している

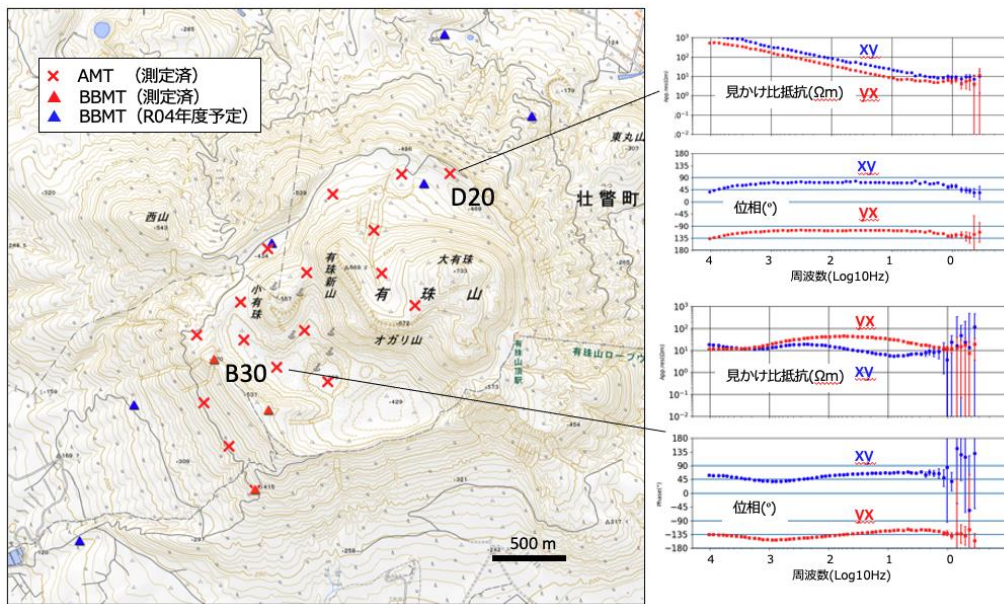


図 17 MT 観測点の分布。赤色の×と三角印が今年度測定した地点。右のグラフは地点 D20 と地点 B30 における見かけ比抵抗と位相のデータを示す。

可能性がある。一方、有珠新山 (US) の地下は相対的に概ね高比抵抗で、先行研究¹⁶⁾で指摘されているように、1977-82 年噴火で貫入し有珠新山を隆起させた冷却中のマグマに対応している可能性がある。地磁気全磁力の継続的な冷却帯磁傾向や、同じく長期に亘る地盤沈降など、今後地下構造と比較検討すべき材料は多い。

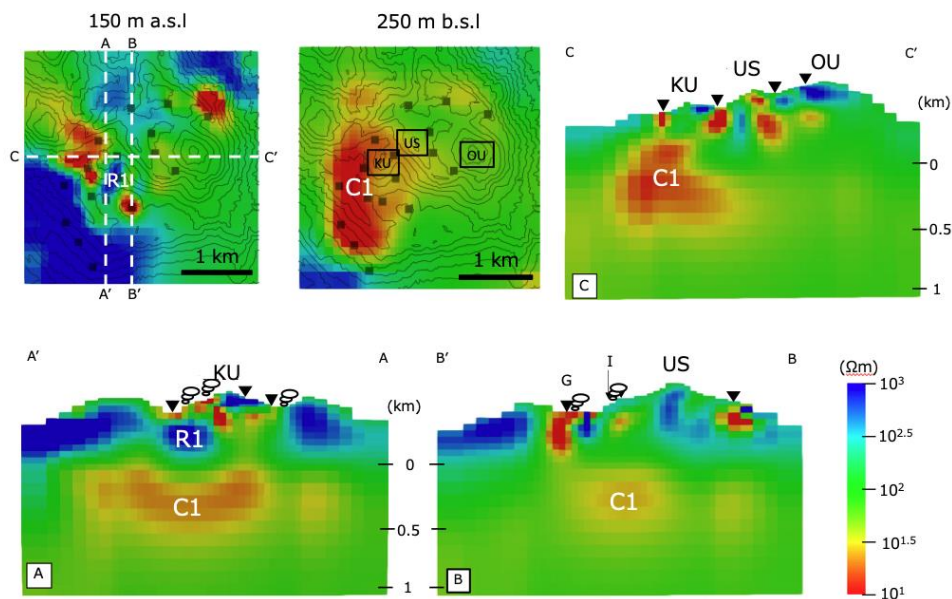


図 18 今年度取得したデータによる予察的な 3 次元比抵抗インバージョン解析の結果。KU：小有珠、US：有珠新山、OU：大有珠、G：銀沼火口、I：I 火口。

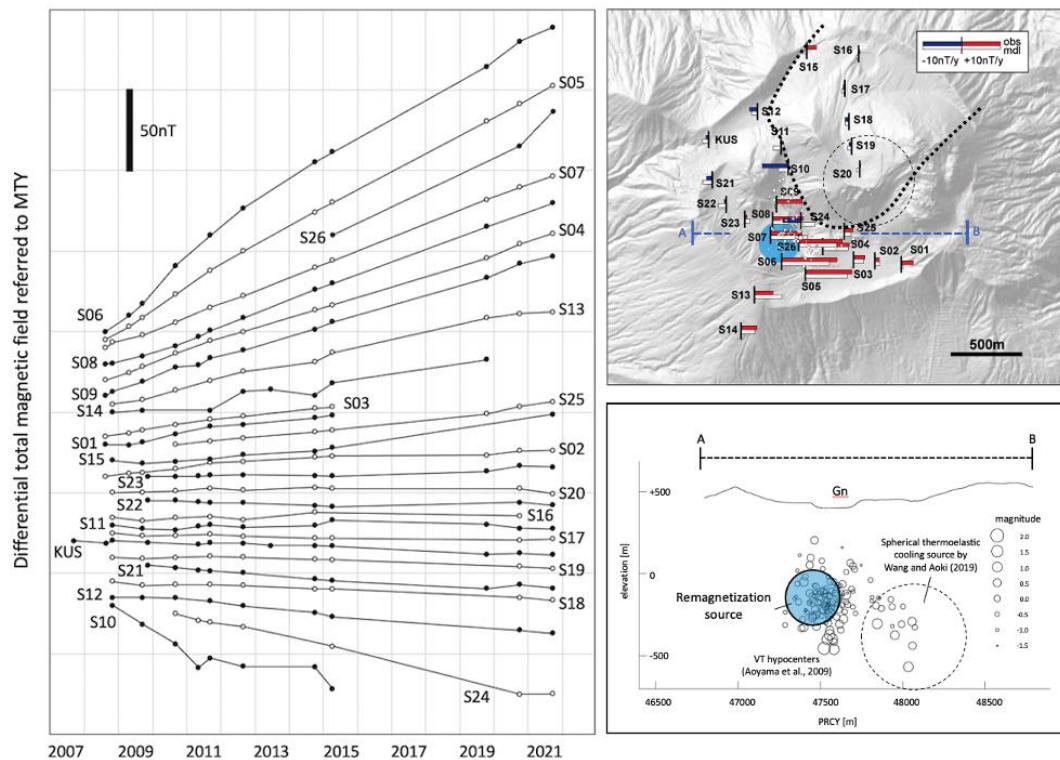


図 19 (左) 有珠山の山頂火口原で観測された全磁力変化 (2007 年から 2021 年)。(右上) 各磁気点における年変化率 (時系列グラフを直線近似したときの傾き) の観測値 (色付棒グラフ) とモデル計算値 (白抜棒グラフ)。水色の円は 1A/m 一様帯磁球モデルの最適解を表す。白丸は微小地震の震源¹⁸⁾、破線円は継続的な収縮性地盤変動のソース¹⁹⁾を表す。(右下) 上図の A-B に沿った断面。Gn は銀沼火口。

iv) 地磁気全磁力観測

有珠山の冷却過程を調べるため、山頂火口原で地磁気全磁力の繰り返し観測を実施した。2007 年以降の長期変化を見るため、北海道大学がこれまで行ってきた繰り返し観測のデータと合わせて解析を行った。測定は 2021 年 10 月に有珠山で行われた人材育成コンソーシアム野外実習項目のひとつとして、課題 B の実施担当者の監督下で受講生が行った。データを解析した結果、銀沼火口付近の地下浅部を中心とした冷却帯磁が長期間継続していることが明らかとなった (図 19)。一様帯磁球のモデルから求めたソースは銀沼火口やや西側の深さ約 500m の位置に求められた。1977-82 年噴火で貫入したマグマの長期的な冷却過程を反映したものと考えられる。なお、最近数年間で変化傾向の急変は認められないことから、現時点で噴火が切迫していることを示唆するような異変はないと判断している。解析結果は論文にまとめて Journal of Disaster Research 誌に投稿した (現時点で査読中)。2021 年までの観測データは JVDN システムに登録して公開した¹⁷⁾。

v) 土壌拡散 CO₂ フラックス観測

CO₂ はマグマ起源の揮発性成分のひとつであり、山体の表面から滲出するマグマ由

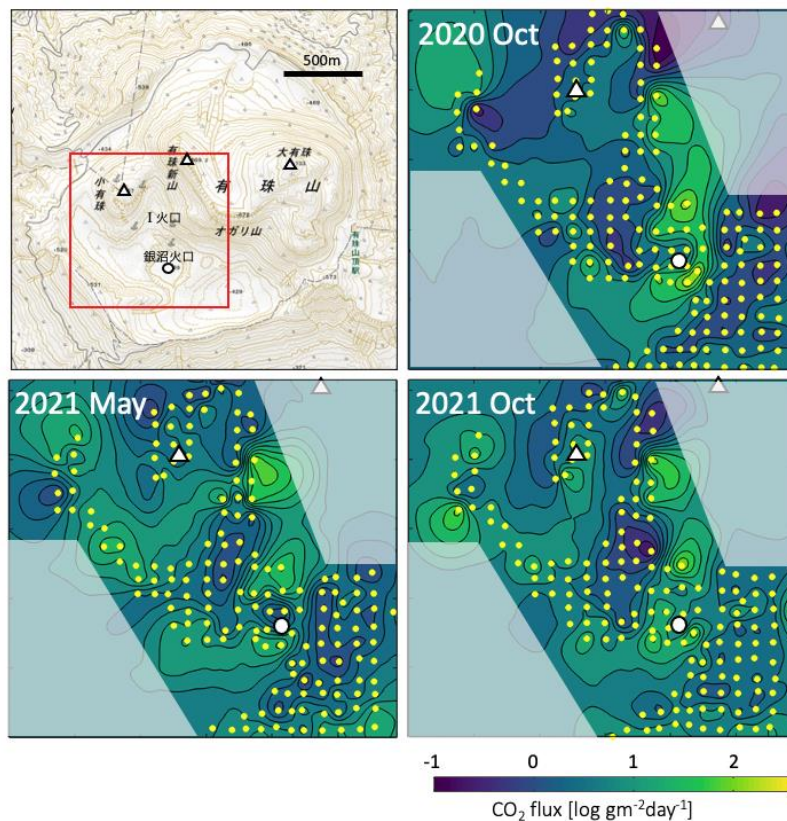


図 20 山頂火口原内の土壌拡散 CO_2 放出率の推移。左上の地図上の赤枠内が測定範囲を表す。黄色の丸は測定地点。空間補間はクリギング法による。

来の CO_2 ガスはマグマからの脱ガスをいち早く反映すると考えられている。有珠山では、2000 年の噴火の約半年前に放出率が顕著に増大したという報告²⁰⁾があることから、有感地震の群発よりも長いリードタイムで、次の噴火の切迫性を検知する有力な観測手法のひとつと目されている。今年度は、本事業で従前に整備した West Systems 社製のフラックス計を用いて、火口原内の放出率分布を 2021 年 5 月と 10 月に測定した。これで昨年度（2020 年 10 月）の測定も含め 3 回の放出率マップが得られた（図 20）。2021 年 3 月の群発地震の前後を比較したが、放出率の分布に顕著な違いは見られなかった。その後の 2021 年 10 月の測定でも、明らかな放出率の増大は認められていない。今年度 10 月期の観測では、サブテーマ 3 と連携して CO_2 フラックス測定地点の一部でガス試料も採取した。サブテーマ 3 では炭素同位体比とヘリウム同位体比が測定され、その結果の解析が現在進められているが、銀沼火口や I 火口で採取したガスの同位体比は、2000 年の噴火当時と大きく変わらないことが報告されている。なお、2021 年 3 月の群発地震のように、噴火の切迫が疑われる事象の発生は今後も想定される。事態の進展によっては山頂域への立ち入りが制限されることもないとは言えない。そのような場合でも山麓部で応急的な観測を行って活動評価に資することができるよう、アクセスが容易な明治新山周辺域の林道沿いに測線を設けることにした。2021 年 5 月に 1 回目の放出率測定を行い、静穏時の状態を把握した。

c) 伊豆大島火山における機動観測準備

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。令和 4 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。地下比抵抗構造については、伊豆大島と同様の広域応力場の環境にある三宅島との比較を進めることが重要であることから、今年度は、平成 30 年～令和元年度に機動観測を実施した三宅島の比抵抗データの再解析を実施し、令和 2 年度に実施した自然電位観測データと合わせて解析することにより、三宅島の浅部熱水系の詳細な構造を得た。過去の伊豆大島の MT、AMT データについては、令和 4 年度以降に再解析を実施し、三宅島の解析結果との比較を行う予定である。今年度実施した三宅島電磁気データ再解析のために博士研究員を雇用した。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した。

伊豆大島カルデラ内浅部構造を把握することを目的として令和 4 年度に実施することが予定されている AMT・MT 法観測計画実施に関わる準備作業としては、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った。観測点の選定にあたり、伊豆大島の構造に関する以下の知見を考慮した。

伊豆大島では、前回 1986 年 11 月に開始した一連の噴火活動は 1990 年 11 月の水蒸気噴火を最後に活動が低下したが、1990 年代半ばから徐々に山体の再膨張が始まり、現在では長期的には山体の膨張傾向が続いていることに加えて、1～3 年周期の山体の膨張と収縮が繰り返し起きている。その圧力源の位置は、地殻変動観測により伊豆大島カルデラ内北部の深さ約 5 km と推定されている（森田・2009 年伊豆大島構造探査実験グループ、2021²¹⁾）。また、カルデラ内の稠密空中磁気探査からカルデラ下 1 km 深程度に高磁化の領域が北西－南東方向に伸びるように存在し、過去に貫入したマグマが未噴出のまま固結し再帯磁したものと示唆される（図 21、Koyama et al.、

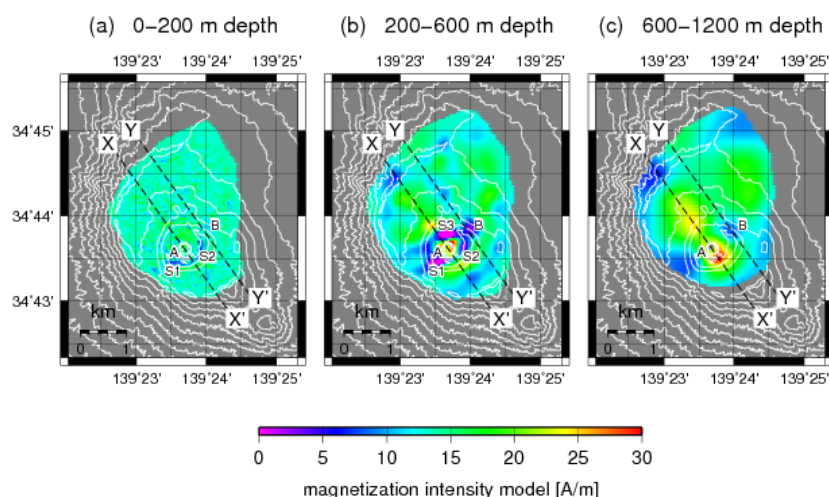


図 21 稠密空中磁気測量で推定された深さ 1200m までの磁化強度分布(Koyama et al., 2022²²⁾)。

2022²²⁾。1986 年の割れ目噴火はこのような固結マグマが中央火口噴火に伴うマグマ・熱供給により融解・噴出したと考えられている。また、伊豆大島のような火山島では地下に海水が浸水し、その上に天水による淡水層（淡水レンズ）が存在することが知られており、伊豆大島でも飲料水等のために取水されている。このような地下水の存在は（マグマ）水蒸気噴火を引き起こし、島の周囲に位置する居住地域にも火山灰をもたらすリスクとなりうる。このような膨張圧力源や固結マグマ・地下水の分布およびその周辺の構造・状態を把握することは、次期噴火活動の準備過程の理解および活動推移予測をする上で重要である。

このカルデラ内、特に北側の領域を、探査深度は地表から海水準程度をカバーする稠密 AMT 法と探査深度 5-10 km 程度を見込む MT 法探査を実施するために必要となる現地予察を令和 4 年 3 月に実施した。図 22 に予定される観測点の配置を示す。赤印 20 点が AMT 法観測予定点、黄印 3 点が MT 法観測予定点を示す。黒は既往の AMT・MT 観測点である。AMT 法・MT 法ともに、各観測点につき、磁場計測のための 50-70cm 長・ ϕ 10cm 程度のインダクションコイル 3 本をそれぞれ南北方向・東西方向・鉛直方向に埋設し、また、電場（電位差）を計測するために 15cm 長・ ϕ 10cm 程度の電極を東・西・南・北・中心の 5 か所に埋設設置する必要がある。地表に溶岩が露出している箇所では、機器埋設作業が苦慮され、また、接地抵抗が極めて高くなり有効な電場計測が困難となることが予想されることから、できるだけ避けるように配置した。水平方向の解像については、探査深度を考慮し、AMT 法は観測点間隔をおよそ 300-400m とし、MT 法はおよそ 1-2km 間隔とした。

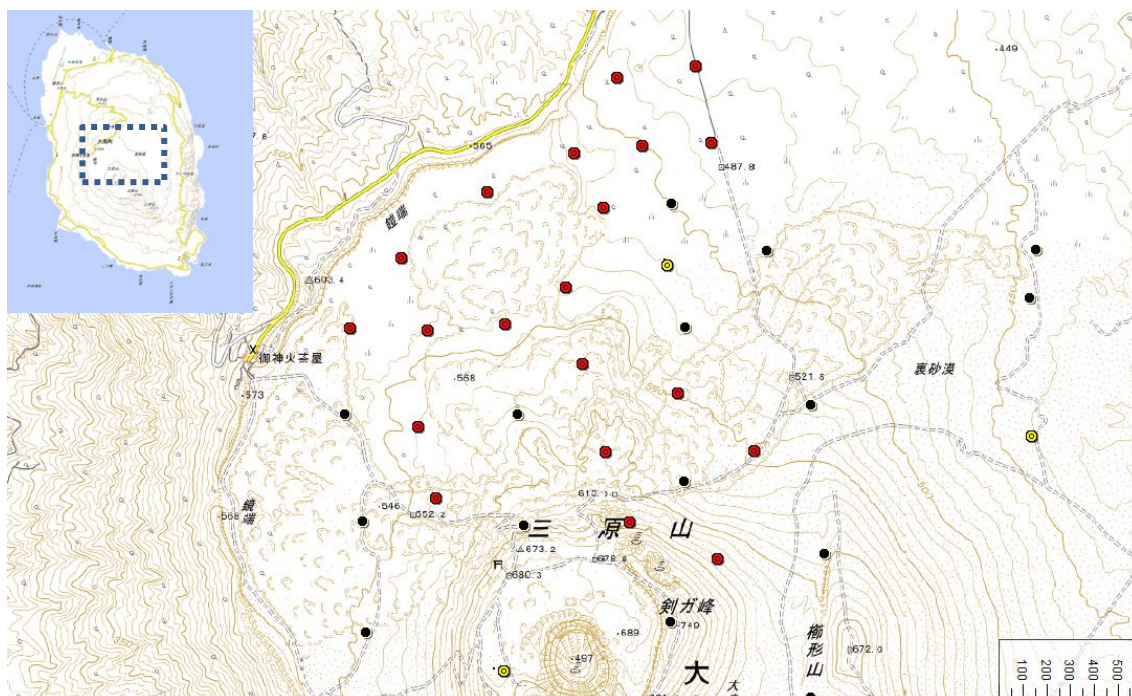


図 22 伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 法探査観測点予定配置図。●が AMT 法観測予定点（20 か所）、●が MT 法観測予定点（3 か所）。●は既往の観測点。

観測作業に関わる許認可申請をおこなうために、環境省関東地方環境事務所伊豆諸島管理官に本計画の説明を行い、また、許認可申請（「特別保護地区内工作物の新築許可申請」）に際しての注意説明を受けた。

令和4年度は、早期に借地（地権者：大島町）とあわせて許認可申請をおこなう。必要な許認可が下り次第、当観測を完遂する予定である。なお、AMT法は各観測点につき1昼夜、MT法は各観測点につき1ヶ月程度の観測を見込んでいる。

d) 草津白根火山における機動観測

平成30年1月の本白根山噴火²³⁾を受けて、平成30年度に本事業の予定を前倒しして本白根山周辺4か所に設置した地震機動観測点については、令和3年度も観測を継続した。また、深部圧力源²⁴⁾の存在が推定されている長野県側の2か所に設置したテレメータ式地震観測点、および2か所の現地収録式観測点についても運用を継続した。これらの機動観測点8か所に加えて、東京工業大学の従来からの定常点6か所、および他機関のデータを統合処理する仕組みを構築した。この結果、草津白根山の周辺10km程度までの広域にわたり、定常的な震源決定作業が可能となった。

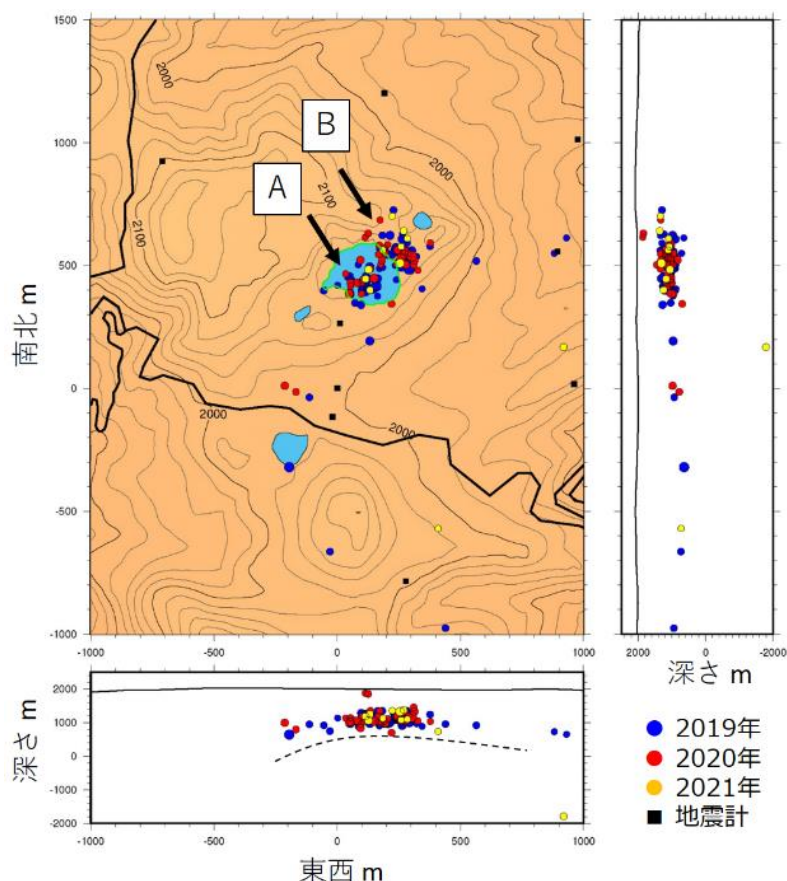


図23 草津白根山・湯釜火口湖周辺の震源分布。黒曲線は主要な車道を表す。P波が4観測点かつS波が2観測点以上で読めたイベントのうちM>1以上のみ表示。2021年は未処理区間がある。東工大6点のほか、気象庁2点も使用している。

まず、草津白根山・湯釜火口湖周辺における地震活動についてまとめる。本領域の地震活動は消長しつつ令和3年度も継続した。震源分布は、従来どおり白根山周辺の海拔500～1000 mに集中し、これは先行研究により明らかにされている浅部低抵抗層の下部¹⁾に対応する(図23)。震源には2つのクラスター(図中AとB)が認識でき、Aは2014年以降、Bは2018年以降に活動が始まったものに対応する。震源の深さは、2014年以降に観測されている湯釜直下の緩やかな膨張の圧力源深度²³⁾に一致する。令和3年度を通じて、地震発生状況に変化は認められない。また、海拔500 mよりも深部に求まる地震が存在しないことが改めて示された(図23の黒破線)。すなわち、この深度で400℃以上の高温に達しているものと考えられる。

次に、より広域の地震活動について述べる。湯釜から南へ1 kmの逢の峰火砕丘・本白根山2018年火口周辺では散発的な地震活動が認められてきた²⁵⁾が、令和3年度は低調であった(図24a)。本白根山のそれ以外の領域の地震活動は従来と変わらず不活発である。一方で、湯釜から東へ3 km離れた東山麓では、海拔下2 km付近のやや深い場所で地震活動が認められることが分かった(図24aの破線円)。

草津白根山の北方では、志賀火山へと至る帯状の地震活動が約5 kmにわたり認められた(図24bの破線円)。本領域には、草津白根山の活動に関係すると思われる深部膨張圧力源²⁴⁾が推定されている。帯状の震源分布は志賀山まで伸びており、同地域では

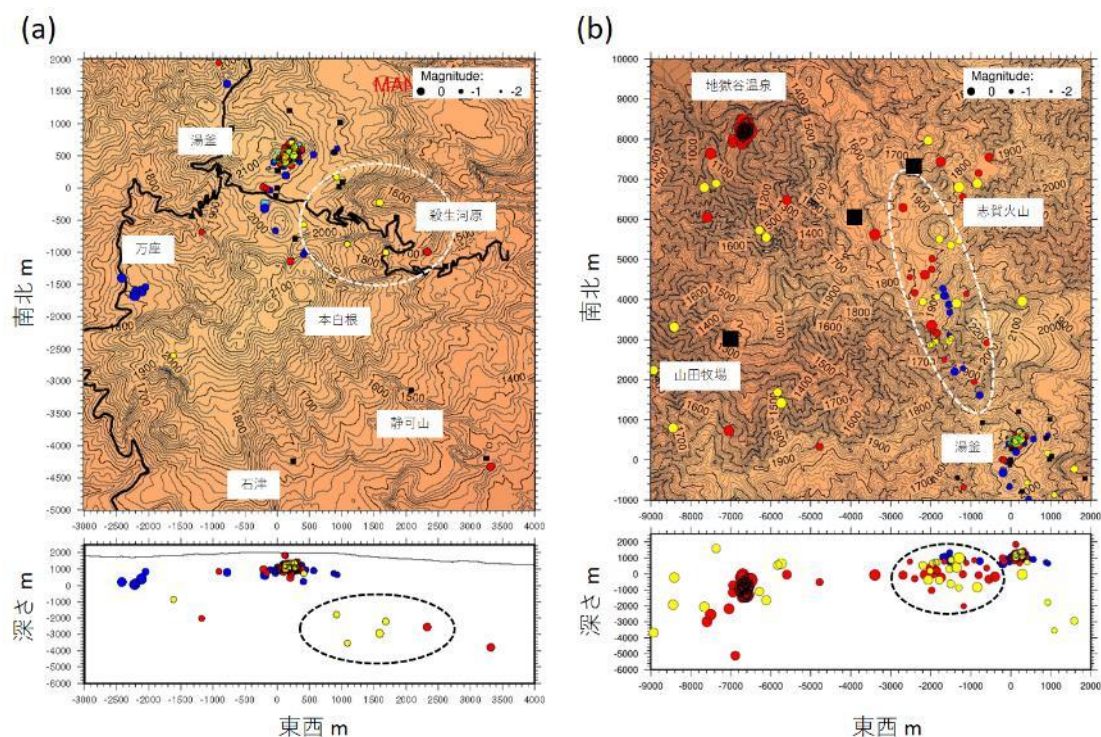


図24 (a) 草津白根山周辺、および(b) 草津白根北方領域の震源分布。青、赤、および黄色は、それぞれ令和元年、2年、および3年に発生した地震に対応する。黒四角は地震観測点の位置である。黒曲線は主要な車道を表す。本図では、P波4点かつS波2点以上で読めたイベントのうちM>1のみを表示。2021年は未処理区間がある。震源決定には東工大14点のほか、他機関の観測点も使用している。

新しい水蒸気爆発堆積物が見つかったことから、今回見いだされた地震活動は、志賀火山と草津白根火山の関係を考えるうえで重要である。

平成 30 年以降、草津白根山西方 10～20 km の領域で認められた活発な地震活動は、衰退しつつ令和 3 年度も継続した。同地域の地震活動は複数のクラスターで構成され、それらが南西から北東方向へ線状配列し、その配列方向は、同地域に存在する活断層の走向に一致する。その最北端部分を構成するのが地獄谷温泉の地震活動であり、特に令和 2 年は活発な活動が観測された（図 24b）。この線状配列する地震活動の消長が深部圧力源の膨張に同期しているように見えることから、同領域の地震活動が深部からのマグマ上昇に誘発されている可能性がある。

令和 2 年度までに本事業で取得した 51 観測点の広帯域 MT 法データに加え、2015–2016 年にかけて本白根山周辺で取得した 22 観測点のデータ²⁶⁾を用いた合計 73 観測点の MT 応答関数を用いて、草津白根火山全体の 3 次元比抵抗構造モデルを推定した。インバージョンの手法や手順は昨年度の報告書に記載した内容と同様である。図 25 に最終的に得られた草津白根山の比抵抗構造モデルを示す。このモデルでは、顕著な低比抵抗領域が 3 ヶ所に認められた（C1、C2a、C2b）。C1 は厚さ 2 km 程度の低比抵抗層であり、山頂部から草津白根山の南側～東側にかけての山体浅部に広く分布している。この浅部の低比抵抗層は、以前から見つかったスメクタイトに富む層^{26, 27)}であると考えられる。このモデルの最も大きな特徴は、山頂域の標高 0.5 km（地表からの深さ 1.5 km）付近からやや北西の、少なくとも海拔下 10 km（深さ 12 km）付近まで伸びる鉛直状の低比抵抗領域（C2a および C2b）が存在することである。この領域の上部（C2a：海拔下 4 km 以浅）は、極端な低比抵抗（ $<1 \text{ } \Omega\text{m}$ ）を示すことから火山性

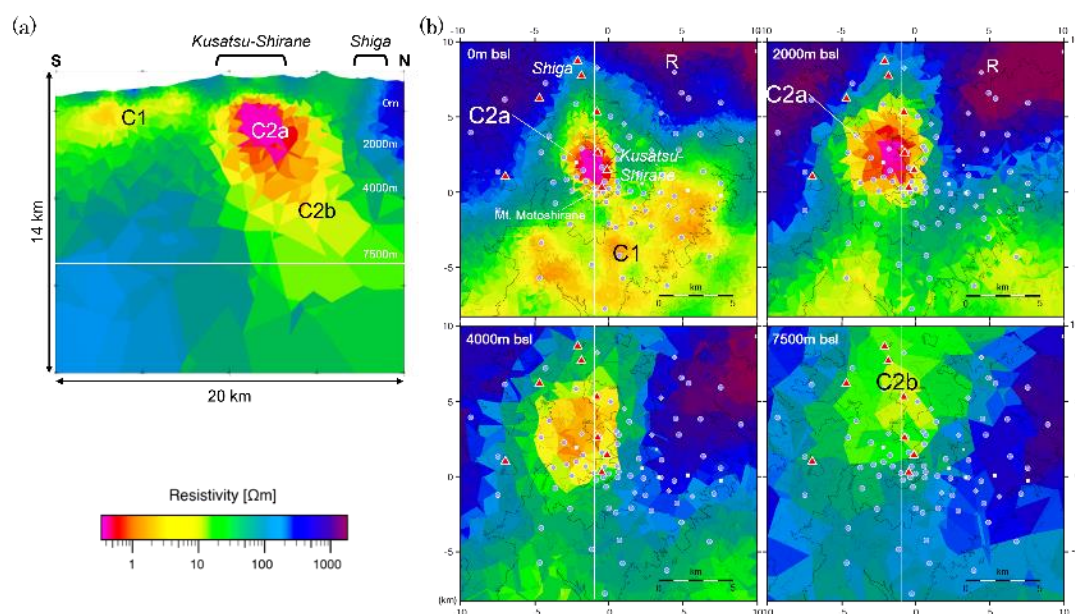


図 25 草津白根火山周辺の最終 3 次元比抵抗構造モデル。(a) 草津白根山山頂域を通る南北断面図。(b) 海拔下 0 m、2000 m、4000 m、7500 m における水平断面図。それぞれの断面の位置は各図の白線で表されている。

の高濃度塩水の存在領域、下部（C2b：海拔下 4 km 以深）は、中程度の低比抵抗（10–20 Ωm ）を示すことから部分的に溶融した岩石を含む高温領域と解釈した。

C2a の比抵抗値を再現するために、NaCl 換算でどのくらいの塩分濃度が必要か見積もった。図 26a には、300 °C におけるいくつかのバルク比抵抗値について、間隙流体中の塩水の体積分率に対する NaCl 濃度を示す。母岩の空隙率を 0.1 と仮定した場合、1 Ωm の比抵抗値を再現するためには、約 2 wt% の濃度の NaCl 水が必要であることがわかった。次に、C2b について、C2b 領域が約 5000 年前に噴出した殺生溶岩と同じ組成を持つ岩石の部分溶融領域であるとの仮定の下、どのくらいのメルトが存在しているのかを見積もった。岩石学的研究から殺生溶岩の形成温度がマグネシウム含有量により 911 °C または 1076 °C と見積もられている³²⁾ことから、これらの温度におけるバルクの比抵抗値を計算した^{28, 32)}。その結果、メルト中の水の含有量を 3–5 wt% としたときに、観測された 10–20 Ωm の比抵抗値を再現するためには、体積分率にして 5–35 % のメルトが必要であることが示唆された（図 26b）。

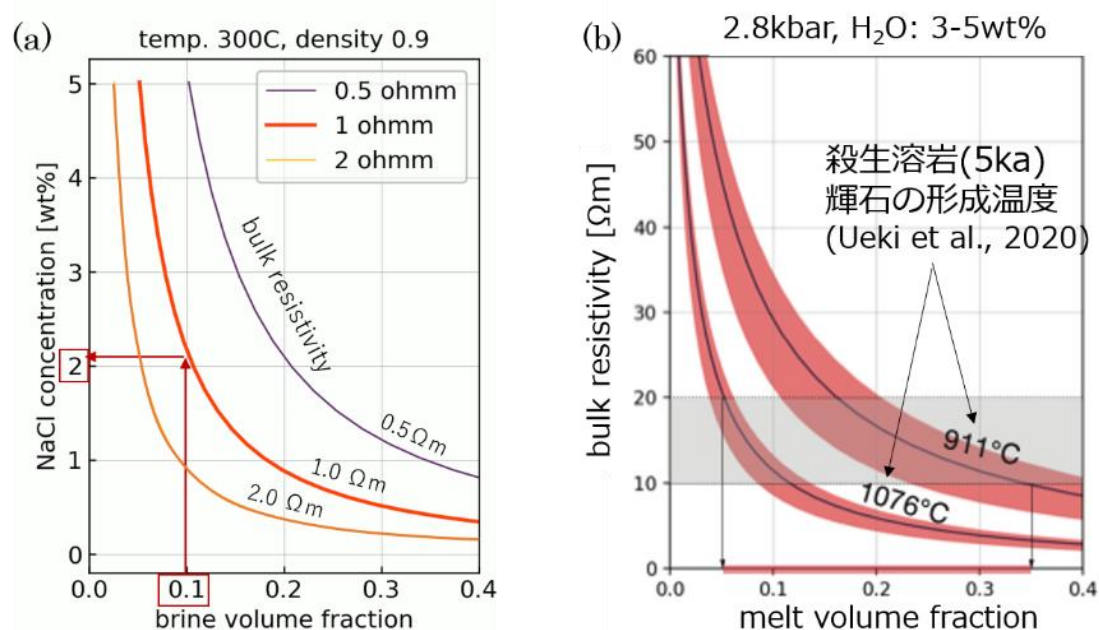


図 26 (a) 300 °C におけるいくつかのバルク比抵抗値について、間隙流体中の塩水体積分率の関数としての NaCl 濃度。バルク比抵抗は、岩石の比抵抗を 100 Ωm 、空隙は NaCl 水で満たされていると仮定し、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用して計算している。NaCl 水の比抵抗値は、文献値^{29, 30)}を使用している。(b) 911 °C および 1076 °C におけるメルトの体積分率に対するバルク比抵抗値。バルク比抵抗は、岩石の比抵抗を 100 Ωm 、空隙はメルトで満たされていると仮定し、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用して計算している。また、ケイ酸塩メルトの比抵抗値は、SIGMELTS³¹⁾を用いて計算している。黒線はメルト中の水の含有量が 4 wt% の場合で、赤色の帯は 3–5 wt% の場合に計算される比抵抗値の範囲。

以上のことに加え、震源分布や地殻変動源を考慮することで、草津白根山のマグマ熱水系を図 27 のように解釈した。火山性地震の発生領域は、高塩濃度流体領域 (C2a) の上部から火口湖付近まではほぼ鉛直状に分布していることから、震源域は火山性流体の上昇域と考えられる。一方、C2a より下では地震はほとんど発生していないこと、また、先行研究の熱水系モデル^{25,33)}との比較により、C2a の上面は脆性-塑性境界に相当し、流体の上昇を妨げるシーリングゾーンが形成されていると考えられる。このシーリングゾーンの存在により、山頂部への流体の上昇を制御していることが予想される。また、部分熔融領域と解釈した C2b の上部かつ C2a の直下 (海拔下 4.8 km 付近) には、測地的研究により火山活動が活発化した際の膨張源が推定されている²⁴⁾ことから、部分熔融領域の内部には活動的な脱ガスマグマが含まれていると解釈した。これらの成果をとりまとめ、Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に投稿し、現在改訂作業を進めている。

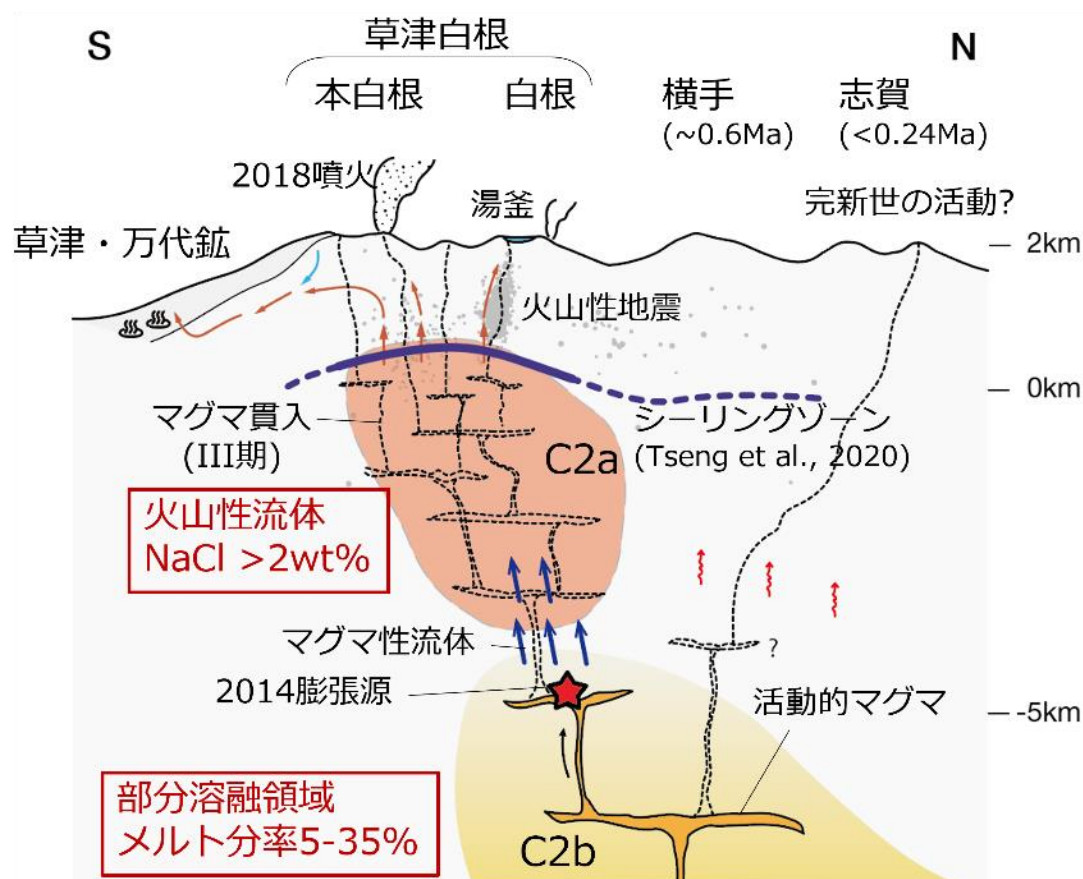


図 27 3次元比抵抗構造モデルの南北断面に基づき推定された草津白根山のマグマ熱水系。赤色の星印は 2014 年の活動期に観測された膨張源²⁴⁾。灰色の点は火山性地震の震源。シーリングゾーンより上の赤と青の矢印は、それぞれ高温および低温流体の流れを示す。

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

火山噴火切迫度評価に向けたモデルの高度化のために、霧島火山の特に硫黄山周辺において地震（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・航空地形測量）、電磁気（広帯域 MT）などの諸観測を継続実施し、噴火発生場の構造・物性モデルおよび熱水噴出現象との関連について考察した。

霧島硫黄山の 2018 年小規模水蒸気噴火後に数多く観測されたパルス状空振シグナルを解析し、その発生メカニズムについて考察した。観測されたパルス状空振は噴火の経過とともに高周波から低周波な波形へと遷移していることが分かった。（図 28a）。これらの解析結果と気象庁監視カメラ映像との比較に基づき、空振シグナルと噴火表面現象の時間変化は、泥懸濁液の含水率増加による粘性・降伏応力の低下により気泡の破裂様式が遷移したことが原因である、というアイデアを提案した（図 28b）（Muramatsu et al., 2022³⁴⁾）。また、水蒸気噴火の先行相は気泡破裂直前の泥表面の隆起（変形）で説明できるとした。噴火発生場最上部の降伏応力の変化がパルス状の空振波形の変化から推測できることを示した。

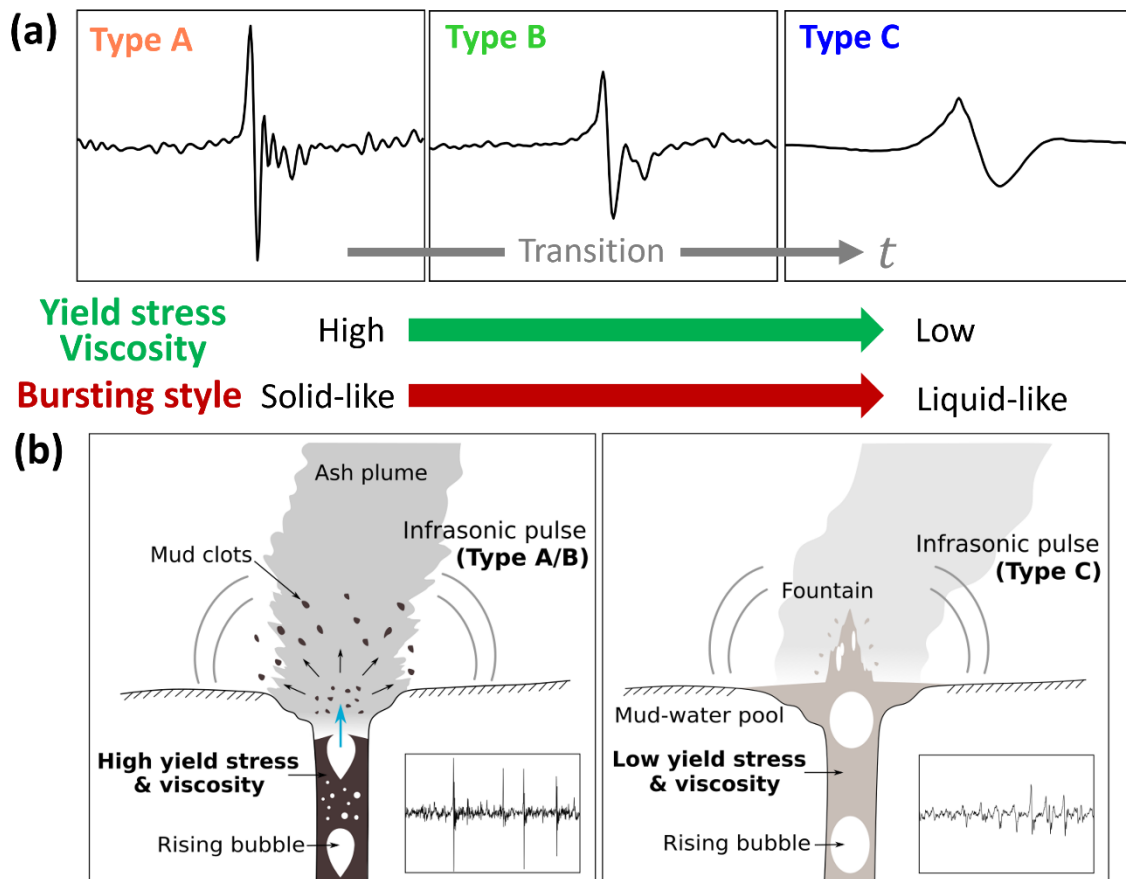


図 28 硫黄山 2018 年水蒸気噴火に伴うパルス状空振とそのメカニズム。(a) パルス状空振の時間変化。(b) 空振シグナルと表面現象の遷移を説明する概念モデル。

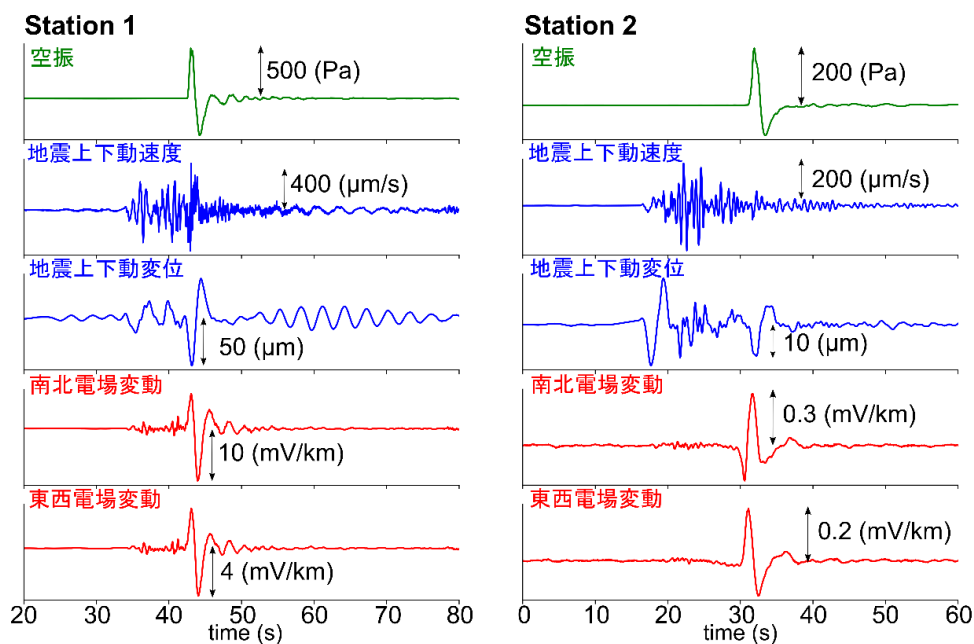


図 29 爆発的噴火で観測された波形例。左：観測点①（2018 年 3 月 9 日 1 時 54 分）。右：観測点②（2018 年 3 月 10 日 18 時 11 分）。空振波（緑色）の到来によって電場が変動（赤色）している、すなわち電流が流れていることが分かる。同時に地面も上下に振動している（青色）。

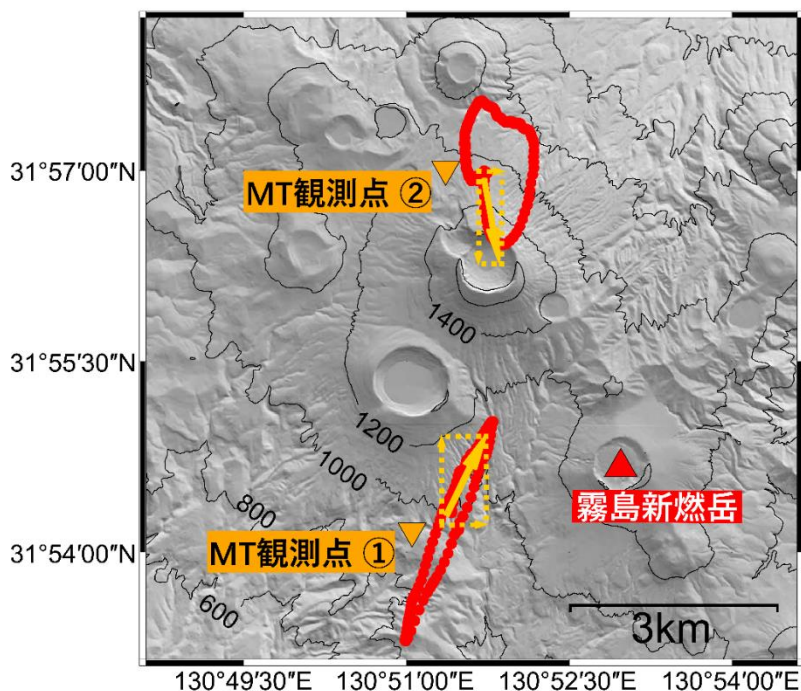


図 30 MT 観測点で記録された電場変動（電流）の方向性（赤線）。期間中に観測されたイベントの平均値をプロットした。黄色い実線矢印は、空振到来時に最初の電場変動が生じる方向で、水平 2 成分（点線矢印）を合成して示している。どの成分も観測点から火口に向かう方向の電場変動が最初に生じていることが分かる。

2018 年の新燃岳噴火時の爆発的噴火時の波形を解析した結果、爆発による空振到来によって電場変動が生じる（地中に電流が流れる）ことを発見した（図 29, 30）。観測点に空振が到来すると、鉛直方向の地盤変動と水平方向の地下水流動が誘発される。この際、多孔質媒質中を地下水が流れる際に生じる界面での相対的なすべり運動によって電位差が生じ、空振による電場変動が観測されていることが示唆された（Aniya et al., 2022³⁵⁾）。空振と電場の関係は、観測点下の地下水の状態（水深や地下水量等）に支配されていると考えられるため、空振と電場の並行観測が観測点近傍の地下水—熱水系のモニタリングに有効である可能性を示した。

2021 年 4 月に硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象（周期 17～70 時間）についてタイムラプスカメラ、温度、電位差、地震、傾斜、空振の集中観測を行った（図 31）。間欠的熱水噴出現象の 1 サイクルは次のようなものであった。①噴気孔 Fs から熱水が湧出し、湯溜まりを形成し噴気孔は水没する。②次第に Fs 孔からの噴湯が目立つようになる。③熱水噴出から 17～70 時間後には噴湯が停止して水位が急速に低下して湯溜まりが干上がるが、その 20～30 分後には再び熱水が噴出する。以上のサイクルに対応する温度および電位差の時間変化がみられた（図 32）。噴気孔の温

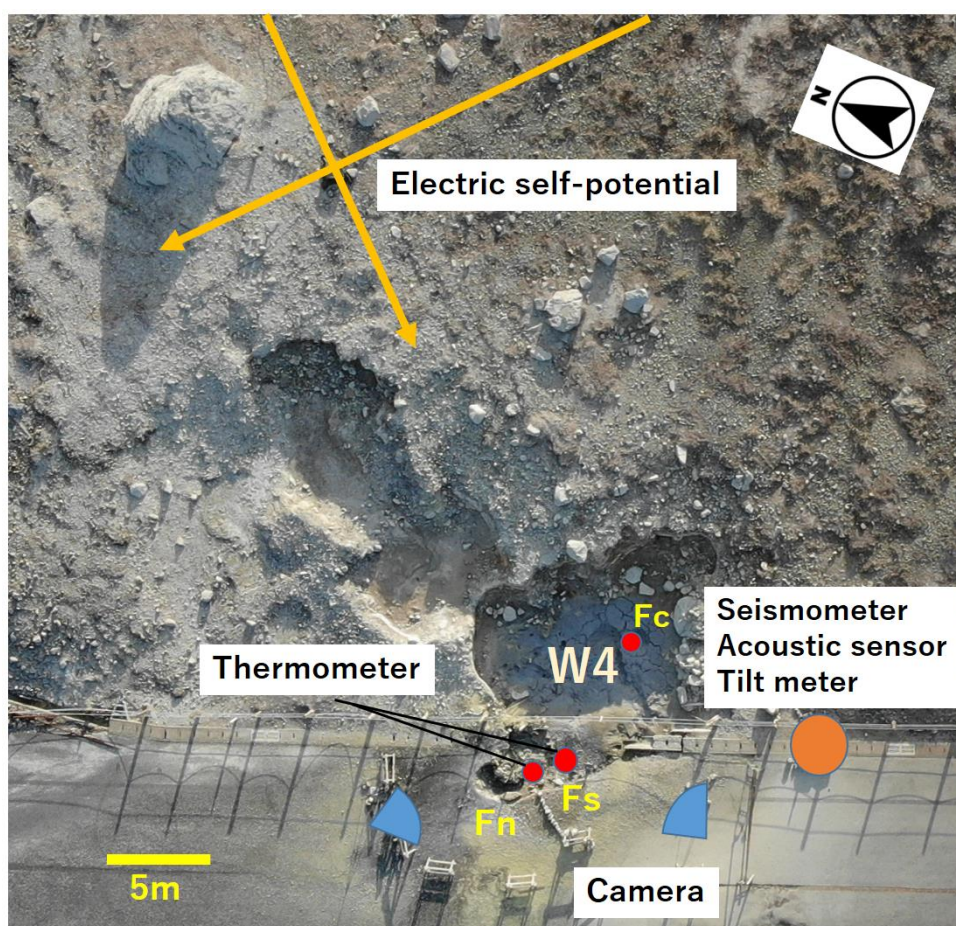


図 31 硫黄山西火口周辺に展開した観測点配置図。赤丸は噴気孔の位置を示す。自然電位観測点（2ch）の矢印は図 30 に示す火口方向および直交方向の電位差の正の向きを示す。

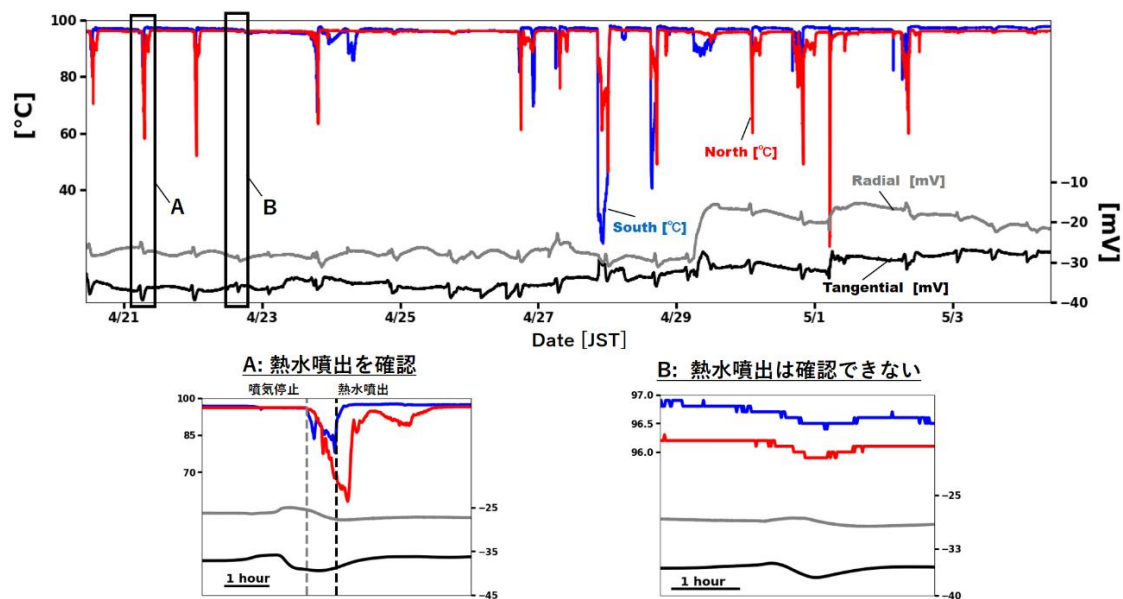


図 32 (上) 地電位と温度の全観測期間のデータ。赤と青はそれぞれ図 31 の Fn と Fs における温度データ。灰色と黒はそれぞれ地電位の Radial と Tangential 成分を表す。正の変化は図 31 の矢印方向の電位が増加することを示す。下段に A 枠の時間帯 (2021/4/21 4:00~10:00) 、および B 枠の時間帯 (2021/4/22 13:30~17:30) の拡大図を示す。

度データは熱水噴出と共に上昇する。熱水噴出直後は 80-90 °C と比較的低温を示すが、熱水噴出から 7~14 分後には西火口の標高 (1233 m) での沸点である 96 °C 付近の温度を保つようになる。その後 96 °C 付近の温度を保つが、熱水噴出の数 10 分前の噴気停止の際には 96 °C から 70~80 °C まで急激に温度が低下する。地電位データは熱水噴出のおよそ 2 時間前に変動を開始する。ただし、地電位変動は生じるものの地表では熱水の噴出は認められず、一時的に微小な温度低下を生じさせているサイクルも確認された。地電位変動は流動電位によると考えられ、熱水噴出のおよそ 2 時間前に噴気孔下部に周辺から冷水が流入すると考えられる。これにより熱水の沸騰が弱められるが、さらに冷水の流入量が多くなると熱水から供給される大量の火山性ガスの成分を含む気泡が流入した冷水を押し上げて熱水噴出に至ると解釈した。

広帯域 MT 観測によって 3 次元比抵抗構造を推定した。新燃岳や御鉢周辺、さらには山麓部で新たな広帯域 MT 観測データを取得することで既存の比抵抗構造に対して分解能の向上を試みた。予察的な解析では硫黄山、新燃岳、御鉢といった活動的火山の火口や地熱地帯は、海拔下 3 km の低比抵抗体の中心直上には位置せず、多くは低比抵抗体の端部、もしくは周辺部に位置していることが推定された (図 33)。九重火山における稠密広帯域 MT 観測でも同様の結果がえられている (Aizawa et al., 2022³⁶)。これは低比抵抗体が全体として流体の通路として機能するのではなく、その端部が中心部より高浸透率な流体の通路として機能している可能性を示唆する。

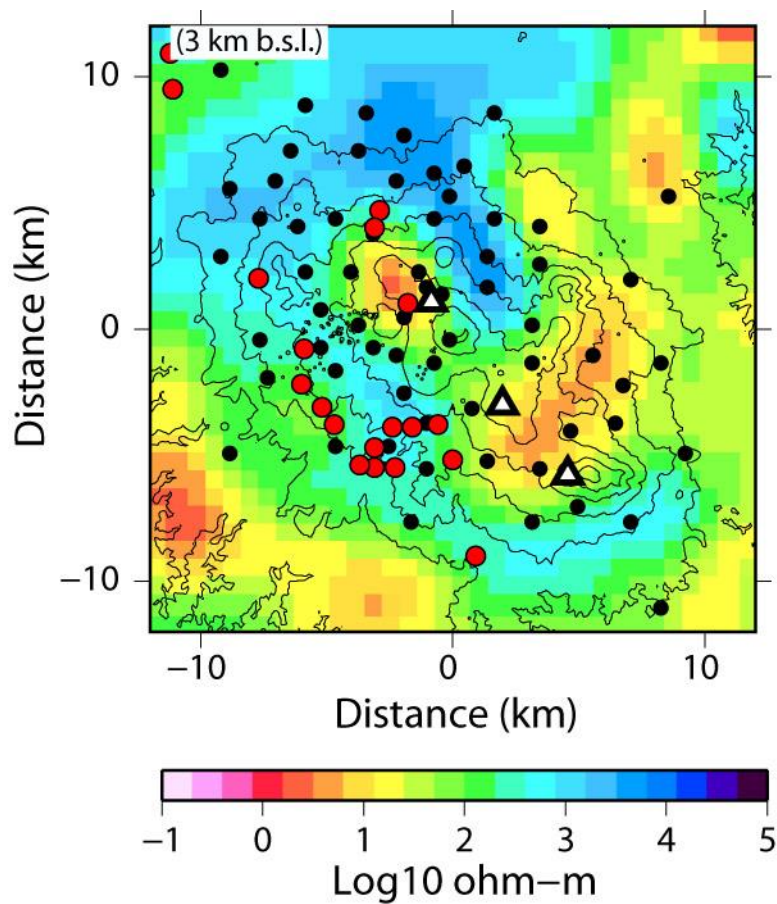


図 33 海拔下 3 km における比抵抗構造と火口および地表の地熱地帯との関係。赤丸は地熱地帯、△は火口位置(硫黄山、新燃、お鉢)をそれぞれ示す。黒丸は解析に使用した広帯域 MT 観測点および電位差観測点。

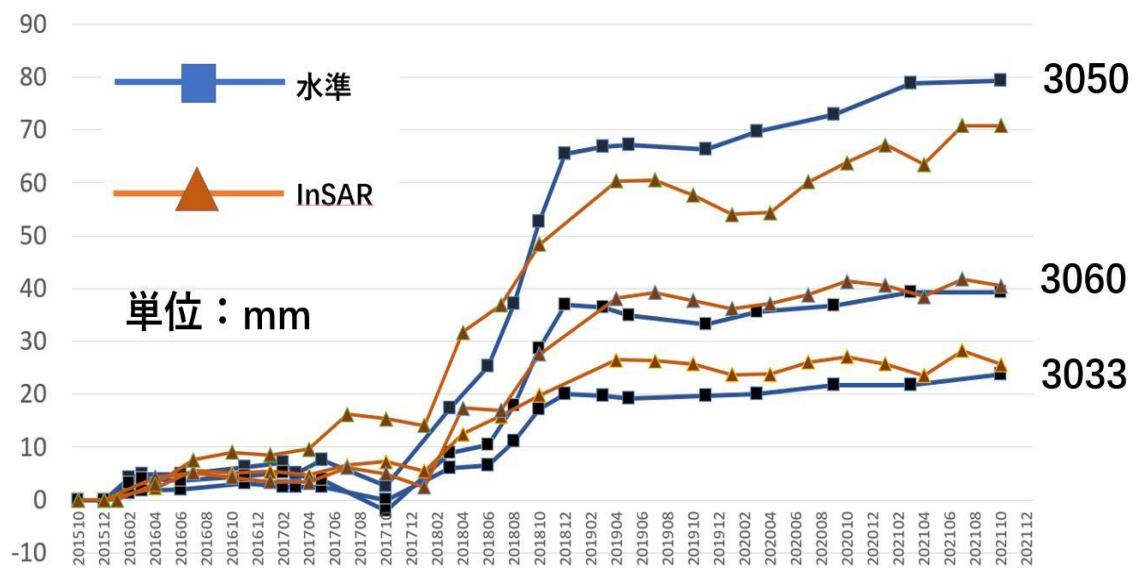


図 34 InSAR 解析から求められた上下方向の変位量と対応する水準測量地点の変位量の比較。観測点 (3033, 3050, 3060) は図 35 に対応。

水準測量・GNSS 測量・ InSAR の統合解析により霧島硫黄山の圧力源を推定した。一般的に植生が多い日本においては、InSAR 解析には L バンドの SAR 衛星データを使うことが多いが、波長が長い分精度が良くなかった。しかし霧島硫黄山の火口周辺は植生がほとんどないことから、短波長の C バンドでも十分に干渉可能であり、精度の高い地殻変動を推定することができる。また硫黄山周辺は標高が高いため、水蒸気量の推定誤差も小さく、季節変動が小さいという利点もある。Sentinel1(C バンド) 衛星の干渉画像から求められる視線方向の地殻変動を、2 つの軌道分を組み合わせることで、上下方向と東西方向の変動量に分離することが可能であり、このうち上下方向の変動量と水準測量から得られた上下地殻変動量を比較したところ、InSAR 解析でも十分な精度の上下方向地殻変動を面的に得ることが可能であることがわかった。図 34 に InSAR 解析から求められた上下方向の変位量と対応する水準測量地点の変位量の比較を示す。BM3060 点と BM3033 点は非常に良い対応を示している。M3050 点は InSAR 解析のほうの変動量が少なめに求められている。これは水準測量では特定のポイントの変動量を求めるのに対し、InSAR 解析では約 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ の範囲の平均的な地殻変動量を推定するためと考えられ、局所的に変動量が大きい地域では両者に差が出ている。

図 35 に 2018 年 10 月から 2020 年 10 月の水準測量、InSAR、GNSS 変動量と、これらの統合解析から求められた圧力源の位置を示す。GNSS 変動量との結果は差が大きい、水準測量と InSAR の結果は推定モデルの妥当性を示している。同様の解析を 2015 年 6 月から 2021 年 10 月の期間で行ったところ、2018 年噴火以降、深さ約 700

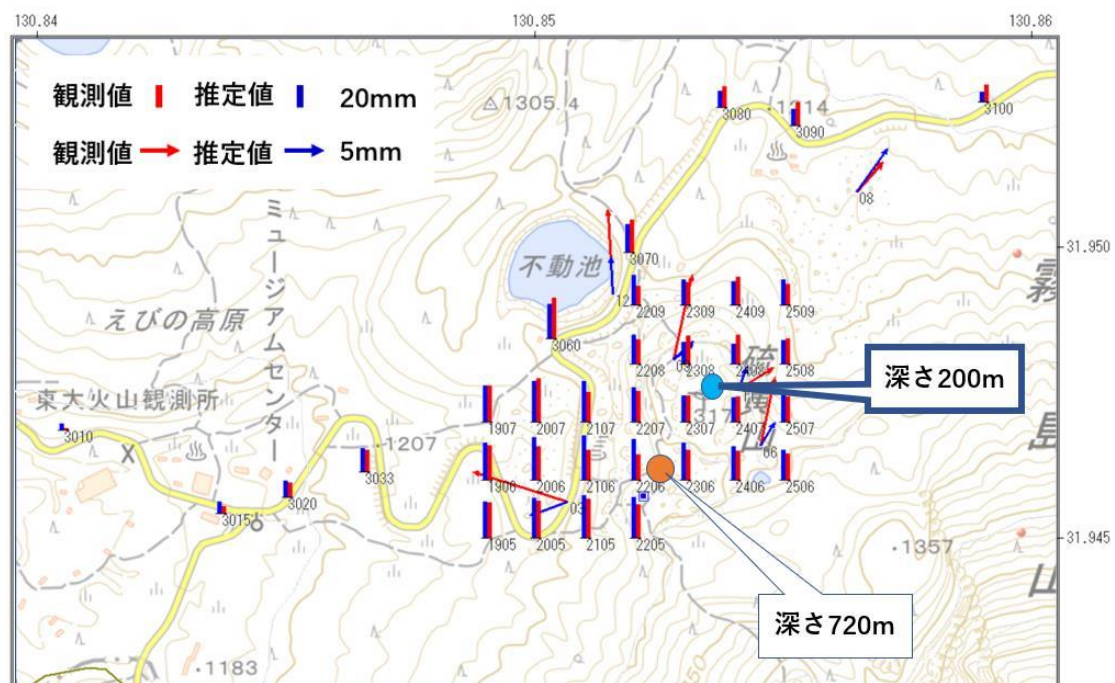


図 35 2018 年 10 月から 2020 年 10 月の水準測量、InSAR、GNSS 変動量と、これらの統合解析から求められた圧力源。深さ 700m の圧力源は $5.0 \times 10^4\text{ m}^3$ の膨張、深さ 200 m の圧力源は $2.0 \times 10^3\text{ m}^3$ の収縮と推定された。

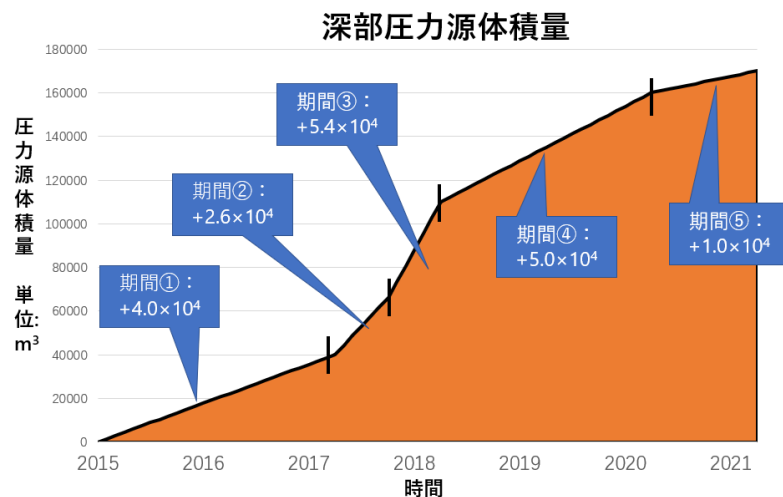


図 36 深さ約 700m 付近に推定された圧力源の体積変化

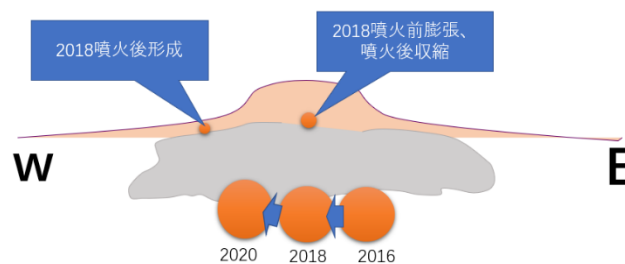


図 37 硫黄山の地下にある圧力源の模式図

m の圧力源が膨張し続け（図 36）、徐々に西側に移動し（図 37）、火口直下の浅部圧力源（深さ約 200 m）は収縮していることが分かった。加えて硫黄山西火口の位置、深さ 50 m 付近にも収縮源が推定された。

ii) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

今年度も、引き続き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。コロナ禍により県外への出張等を取りやめる時期が長期間にわたりテレメタ機器のメンテナンスが困難であったものの、継続的に取得されたデータにより、2022 年 1 月ごろから新燃岳をまたぐ基線において伸長を観測している。KKCD-950486（国土地理院牧園）基線（基線長 19.4km）においては 4 カ月で約 5 mm 伸長した。

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 年噴火による噴出物の地質記録への残り方に関する検討を継続して実施している。

f) 箱根火山における機動観測

i) 箱根の深部構造に関する研究

火山の深部構造を対象としたレーシーバ関数 (RF) 解析は、インバージョンの実施に向けてさまざまな予備解析を進めてきた。これまで広域のデータを用いた結果から、火山直下の 43 km 付近に不連続面を検出し、これがモホ面であることが明らかになっている。しかし、機動観測のデータから得られた詳細な地震波速度構造モデルおよび浅部の地盤モデルを用いてレーシーバ関数を計算し観測波形と比較すると、これらの既知のモデルだけでは説明できないピークが存在することが明らかとなった。図 38 の上段に理論 RF の計算に用いた構造、下段に理論波形と観測波形（黒）を示す。Matsubara et al (2019)³⁷⁾の広域な構造（深部）と J-SHIS（浅部）、Yukutake et al (2021)³⁸⁾に基づいて作成したローカルな 1 次元構造を方位ごとに色を変えて示している。理論波形の色は、用いた構造の色と合わせてある。観測波形との比較から、3 ～ 4 秒付近に理論波形では再現できないピークが見える（例えば、KZY, MOT, VHNN）。深さ 43 km 付近のモホ面によるピークは 5 秒くらいに現れるので、これらはモホ面よりも浅い場所に低速度の異常が存在することを示唆している。

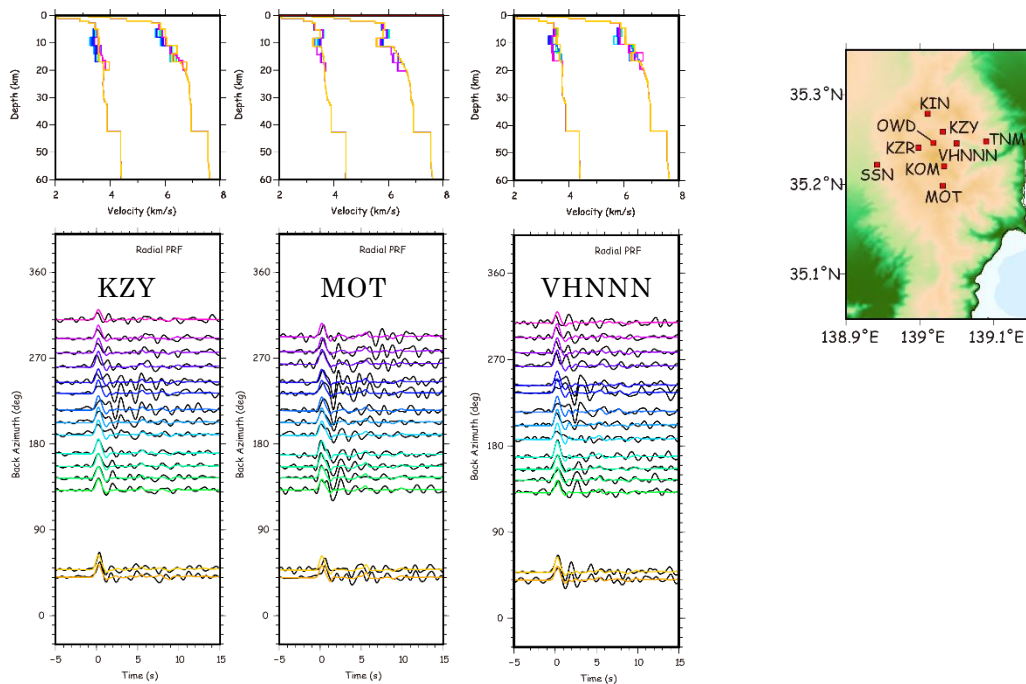


図 38 上段は理論 RF の計算に用いた構造、下段は観測 RF（黒）と理論 RF の比較。黒以外の色で示した構造は Matsubara et al. (2019)³⁷⁾の広域な構造（深部）と J-SHIS（浅部）、Yukutake et al. (2021)³⁸⁾から作成した入射方位ごとのローカルな 1 次元構造。

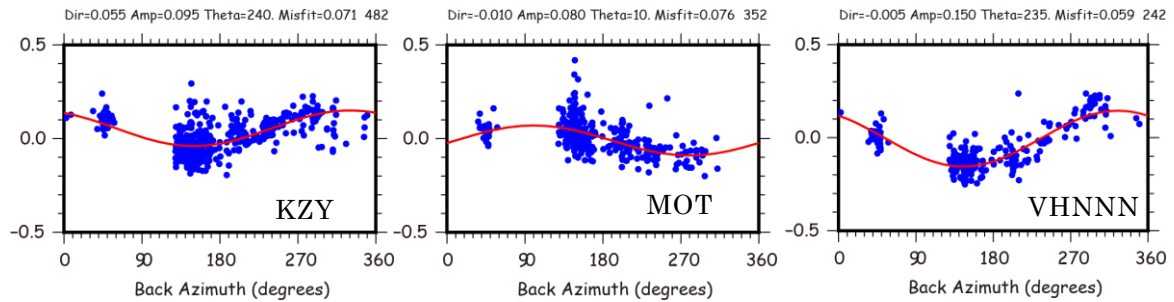


図 39 RF のトランスバース成分の初動振幅の方位依存性。赤線はサインカーブによるフィッティングの結果。

次に、観測される RF の方位依存性を整理した。図 39 に RF のトランスバース成分について、入射方位と初動振幅の関係を示している。本来 RF はトランスバース成分を持たないが、伝搬経路に傾斜した不連続面などが存在すると、トランスバース成分にもピークが現れる。傾斜方向に対して直行する方向から入射した場合に、トランスバース成分の初動振幅がもっとも大きく現れ、上側に低速度の不連続面が入射方向に対して左に傾斜している場合には RF の負のピークとして、右に傾斜している場合には正のピークとして表現される（振幅は入射方向と傾斜の角度で変わる）。したがって、一枚の傾斜した面があると、トランスバース成分の初動振幅の方位依存性はサインカーブで表現できる。図のデータ（青○）の分布から、傾斜した不連続面の存在が示唆される。そこで、トランスバース成分の初動振幅をサインカーブでフィッティングし、傾斜方向（ Φ ）を推定した。もし北向きに傾斜した面が存在すると、入射方位が 0 度と 180 度で振幅が 0 になるサインカーブで表現できる。フィットした結果が図の赤線である。ほとんどの観測点で、推定された Φ （傾斜方向）は 200～290 度であることから南西から西南西の傾斜面が広域に存在することが示唆され、松原らの広域の速度構造なども考慮すると、おそらく最上部マントルの低速度層の影響と考えられる。

このようなマントルの不均質による影響が無視できないデータを使って解析を実施すると、地殻内の不均質に原因を押し付けることになるため、正しい構造が推定できない可能性がある。そのため、このような方位依存性を補正したうえでインバージョン解析を実施する必要がある。令和 4 度はより詳細な調査を実施し、このような方位依存性の補正を試みる。

ii) 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。

S 波の速度が周囲より遅い媒質を含む亀裂が配向した異方性媒質中を進む S 波は、直交した振動方向を持ち速度の異なる 2 つの S 波に分離する。このうち速い S 波の振動方向（LSPD）は、亀裂の走向に平行になることが期待される。2 つの S 波の間の

遅延時間(dt)は、伝播長および亀裂密度に比例する(e.g., Hudson, 1981)³⁹⁾。遅延時間は異方性媒質に対して重要な情報を持つが、本報告では LSPD にのみ着目する。

解析に使用したデータの観測期間は 2016 年 7 月から 2017 年 9 月である。解析には、深さ 20km 以浅、マグニチュード 0.0 以上、観測点への入射角が 40 度以下の地震の速度波形の水平成分に、2~8Hz のバンドパスフィルタをかけたものを使用した。スプリッティングパラメータ (LSPD, dt) の検出には相互相関法(e.g., Shih and Meyer, 1990)⁴⁰⁾を使用した。対象時間窓は S 波到達時間を含む 0.5 秒間である。得られたスプリッティングパラメータの誤差は t 検定を用いて推定し、95%信頼区間が dt で 0.05 秒、LSPD で 15 度より大きいものは対象外とした。一般に、機動観測点でのセンサー方位の精度は、定常観測点での精度に比べて劣る。本報告では、推定された LSPD を補正するために、本多ほか(2020)⁴¹⁾に基づいてセンサー方位を補正した。

箱根火山周辺の亀裂系の特徴を明らかにするために、得られた LSPD に対してクラスタリング処理を行い、箱根カルデラ内の亀裂系の特徴を推定した。まず、各観測地点で推定された LSPD に、相互相関係数と単位移動距離あたりの遅延時間を用いて重み付き平均を計算した。次にファジーデータに対応する分類法である FCM (Fuzzy C-Means 法)⁴²⁾を用いて観測点を分類した。データは、3 つの特徴量、観測点の位置(経度および緯度)、および平均 LSPD に基づいてクラスタリングされる。クラスタリングがうまくできているかは FPC(Fuzzy Partition Coefficient)であらわされる。図 40(a)は、2~7 までの様々なクラス数に対して計算された FPC の分布を示している。この結果によると、FPC はクラスター数が 2 と 4 でほぼ同程度の大きさである。以下、クラスター数 4 の場合に着目する。

図 40(b)は、4 クラスタの場合の平均 LSPD のクラスタリング結果である。この場合、クラスター A1(赤)、A2(オレンジ)、B1(水色)、B2(青)の 4 つのサブクラスターに分けられる。図 41 に観測点分布を示す。各観測点の色は、所属するクラスターを示す。LSPD が NS 方向に並ぶ傾向のあるクラスター B2 は、箱根カルデラの北と南に別々に分布していることがわかる。ほぼ EW 方向に LSPD を持つ観測点(クラスター A1)は芦ノ湖周辺に集中し、クラスター B1、B2 に囲まれている。

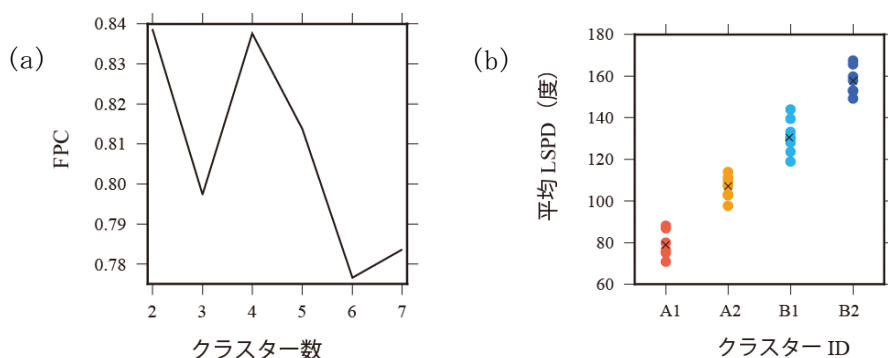


図 40 (a)クラスター数ごとに得られた Fuzzy Partition Coefficient(FPC)の値。クラスター数 2 もしくは 4 の場合によくクラスタリングされていることを示す。(b)クラスター数が 4 の時の、LSPD のクラス分け。

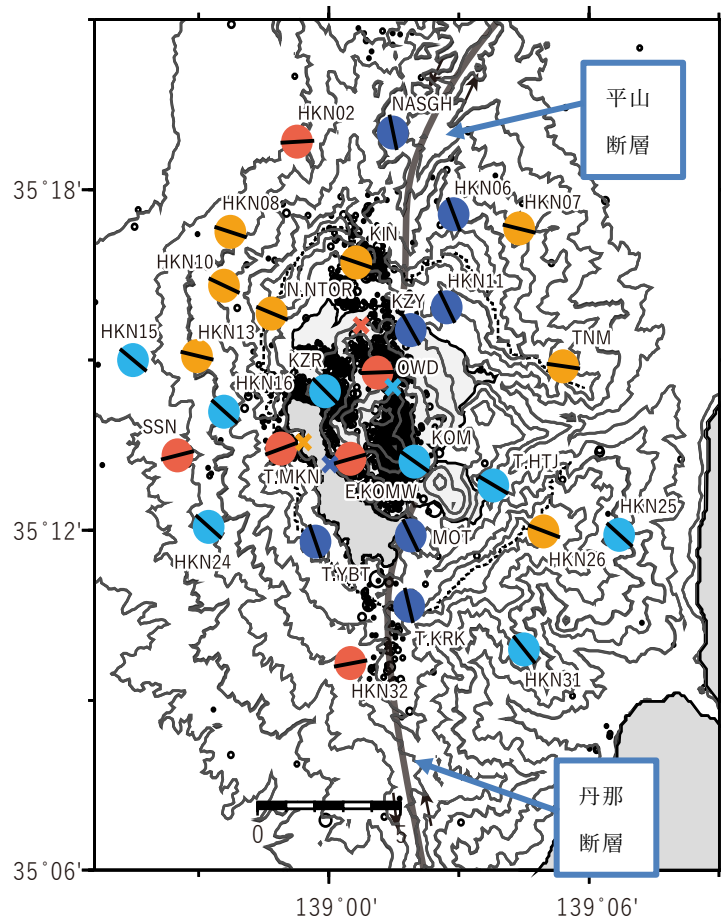


図 41 クラスタリングの結果

この LSPD 分布の特徴を、地震テクトニクス観点から考える。箱根火山の発達初期には、伊豆半島の衝突により地域的な応力場は NW-SE 圧縮の環境下にあった。その後、箱根火山を南北に貫くプルアパート構造を構築した丹那断層系と平山断層系が発達した。現在の箱根火山のマグマ供給システムは、このプルアパート構造を利用している可能性がある（長井・高橋, 2008⁴³⁾；萬年, 2008⁴⁴⁾）。Yukutake et al. (2010)⁴⁵⁾ は、微小地震の震源が平面的な分布をしており、全体として NW-SE または EW 方向の走向を持つ面が卓越していることを指摘した。中央火口丘直下では、微小地震の震源分布は NW-SE, EW, NS 方向が混在しており、芦ノ湖や仙石原周辺では EW 方向が卓越している。彼らは、大涌谷や湯ノ花沢などの地熱地帯の地下で発生する微小地震の震源分布が、深部から侵入した熱水の流路を形成している可能性を示唆したとした。

本研究の LSPD クラスタリングの結果は、上記の微小地震の平面構造の空間分布と良い一致を示している。一般に、地殻の異方性は広域応力場によって構築された微小な割れ目や断層破砕帯によって影響を受ける（Kaneshima, 1990⁴⁶⁾）。箱根火山周辺の広域応力は基本的に N145E 方向のフィリピン海プレートの圧縮に起因するため（Seno et al., 1993⁴⁷⁾）、微小な亀裂や古いダイク、噴火口の配列は NW-SE 方向であり、断層の走向は NS または EW 方向に卓越していると考えられる。クラスタ B1 の LSPD は広域応力場の圧縮軸の方向を反映しており、他のクラスタの LSPD は広域応

力下で形成された断層の破碎帯を反映していると考えられる。特に、クラスターB2は、箱根のプリアパート構造を形成する丹那断層と平山断層の断層破碎帯の存在を示唆している。クラスターB1はマグマや水蒸気噴火に伴う開口クラックの走向を示唆するが(Doke et al. 2018⁴⁸⁾; Honda et al. 2018⁴⁹⁾)、中央火口丘の下でもNW-SE方向の走向を持つ横ずれタイプの地震が発生している。これは、広域応力場に最適な走向以外の断層も活動していることを意味し、中央火口丘直下の深部から熱水が供給され、間隙水圧によって断層面上の摩擦が減少するため、広域応力場から予想される走向から外れた断層で地震が発生しやすいことを示している⁴⁷⁾。

FCMを用いたLSPDのクラスタリングにより、箱根火山の割れ目系に関する詳細な情報が得られた。芦ノ湖や仙石原周辺では東西方向のLSPDクラスターが存在し、断層破壊帯を反映している。中央火口丘付近ではNW-SE方向のLSPDクラスターが卓越し、過去にマグマの貫入や熱水の上昇に利用された割れ目系であることが示唆される。カルデラの北側と南側ではN-Sに近いLSPDが得られ、丹那断層系と平山断層系の破碎帯の存在が示唆される。

より詳細な亀裂系の分布を推定するためには、観測地点の空間密度を上げるだけでなく、長期間の観測や波の伝搬方向を考慮することで、有効なデータ量を増やすことが必要である。

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。今後も、これらの改善を可能な範囲で続ける。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

vi) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

熱水流動シミュレータ TOUGH3⁵⁰⁾の出力結果から、比抵抗値に変換するポストプロセッサを開発した。この業務の実施にあたり、東工大でリサーチアシスタントを1名雇用した。TOUGH3の出力では、流体の塩濃度(c)、密度(ρ)および温度(T)が各セルで出力される。そこでこれらの値を用いて、まず各セルにおける流体の電気伝導度(σ_l)を下記の式³⁰⁾を用いて計算した。

$$\log(\sigma_l) = -1.7060 - 93.78/T + 0.8075 \log(c) + 3.0781 \log(\rho) + \log(\Omega_0(T, \rho)),$$

$$\Omega_0 = 1573 - 1212\rho + 537062/T - 208122721/T^2$$

ただし、この式は塩分濃度が低い場合には適用できないため、低塩分濃度の場合にはQuist and Marshall (1968)²⁹⁾の実験データを用いている。次に、得られた流体

の電気伝導度を用いて、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用してバルクの比抵抗値を計算した。この一連のスキームにより、熱水流動シミュレーションの結果を比抵抗の3次元分布に焼き直すことができる。なお本研究では、状態方程式として EC02N V2.0 モジュール⁵¹⁾を使用した。このモジュールは、マグマ性流体の主成分である水、CO₂、NaCl の混合物の非等温および混相流のシミュレーションに適用できるためである。

上記のポストプロセッサの適用例として、本事業で探査された草津白根山の比抵抗構造に基づいた浸透率構造モデルを作成し、シミュレーション結果から焼き直した比抵抗分布を計算した。浸透率構造モデルの作成においては、観測された比抵抗値を基準に、予め設定した5種類の岩石タイプ (CLAY, SEAL, BASE, MAT, COND) を割り当てることで浸透率構造を作成した。CLAY は粘土層、SEAL はシーリング層、BASE は基盤岩、MAT は母岩、COND は火道に対応し、MAT を基準に CLAY, SEAL, BASE は低浸透率、COND を高浸透率の岩石タイプとした。シミュレーションでは、火道の底部

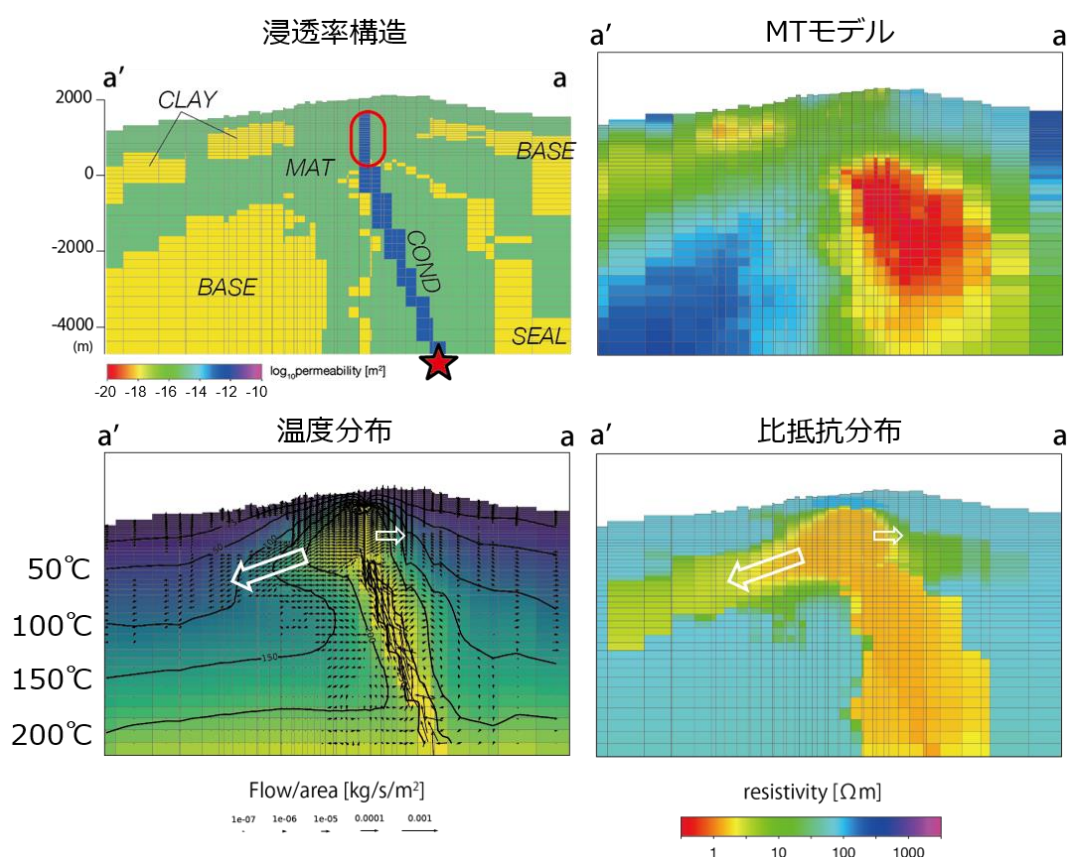


図 42 (左上) 3 次元比抵抗構造モデルを基に作成した浸透率構造モデル。CLAY, SEAL, BASE, MAT, COND の 5 つの岩石タイプに浸透率を与えた。赤色の星印は火山性流体の注入位置であり 2014 年の活動期に観測された膨張源²⁴⁾に対応する。赤線の楕円は震源域を示す。(右上) 草津白根山で推定された 3 次元比抵抗構造モデル。TOUGH3 シミュレーションで使ったメッシュで表現している。(左下) 流体注入開始から 17000 年後の温度分布および流体の流れ分布。(右下) シミュレーションの結果から再現された比抵抗分布。

からマグマ性流体（290 ° C の H_2O と $NaCl$ ）を注入することで、山体内部の熱水対流の再現を試みた。シミュレーションは、草津白根山の現在の活動期が 17000 年前に始まったことを考慮し、流体注入から 17000 年後まで計算を行い、その時の出力から比抵抗分布を計算した。図 42 に、試行錯誤の結果得られた浸透率構造と温度分布、元となった比抵抗構造（MT モデル）、および計算された比抵抗分布を示す。高塩濃度領域と解釈された C2a 領域をはじめとした MT モデルの特徴が概ね再現されていることがわかる。また、地表での流体放出量を計算すると、山頂部東西の谷筋に沿って大きな湧出量が求められ、万座温泉や常布温泉などの実際の温泉の地理的分布と整合性のある結果が得られた。なお、これらの成果の一部は、Journal of Disaster Research 誌に投稿し、現在改訂作業を進めている。

直交座標系の MT 3 次元インバージョンコード（ModEM）の前処理ツール（MFB）については、GitHub で公開するとともに JDR 誌の特集号に投稿した（査読中）。

vii) 熱水流動シミュレーション

本事業で過年度に北海道大学に導入した市販のシミュレータ TOUGH2 を用いて熱水流動数値計算を行った。昨年度までは円筒座標 2 次元で地形を考慮しない計算だったが、今年度は現実の火山への適用を念頭に置き、本事業で既に MT 比抵抗探査を実施済みの倶多楽火山（登別地域）を模擬して地形を考慮した 3 次元の計算を試みた。流動計算に与えた浸透率構造モデルを図 43 に示す。計算領域の下部（Inlet zone と表示）から 250°C の熱水を 3000 t/日 で供給して定常状態を再現した。さらに、温度を考慮した Archie の式⁵²⁾を用いて、熱水流動計算の出力（温度・圧力・飽和度）から比抵抗値に変換した（図 43 右上）。このようにして推定された比抵抗分布は、先行研究で実際に観測された比抵抗構造^{53), 54)}の特徴をよく再現している。登別地域の地

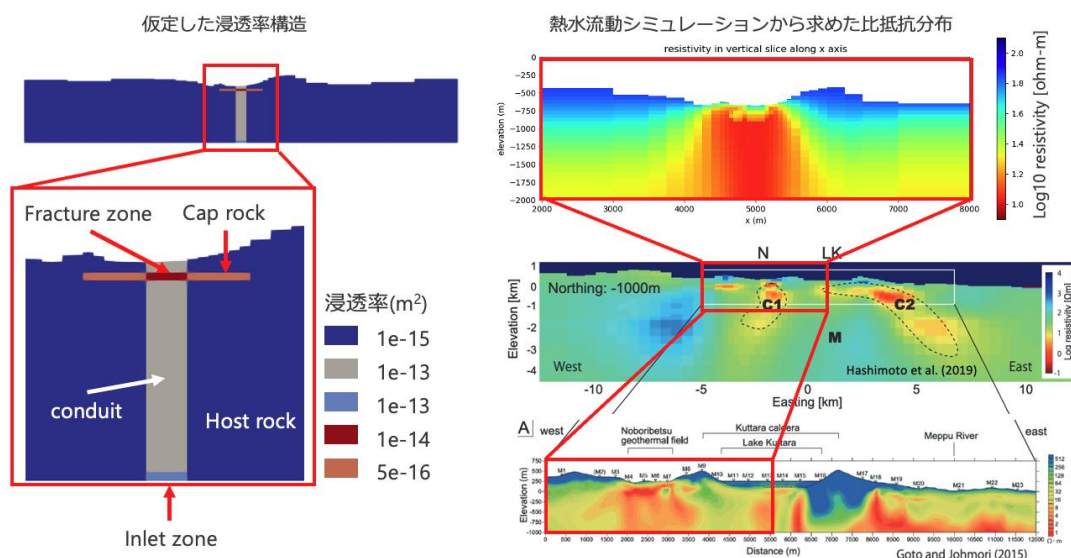


図 43 倶多楽火山（登別地域）を模擬した熱水流動シミュレーション。左側は流動計算に与えた浸透率構造、右図上段は流動計算の結果から変換した比抵抗分布、中段・下段はそれぞれ 3 次元 MT 法⁵³⁾、2 次元 CSAMT 法⁵⁴⁾による比抵抗断面。

下浅部には熱水上昇域に対応する低比抵抗が広く分布しており、その最浅部では熱水が一部蒸気化してやや高比抵抗になっている領域も再現できた。さらには、unrest を想定して熱水上昇域の浸透率や熱水供給率が急激に変化した場合に何が起こるかを計算した。熱水上昇域浅部（図 44 の fracture zone）の浸透率を定常状態から 1 桁下げると、fracture zone より下部では増圧する一方、上部では減圧するとともに

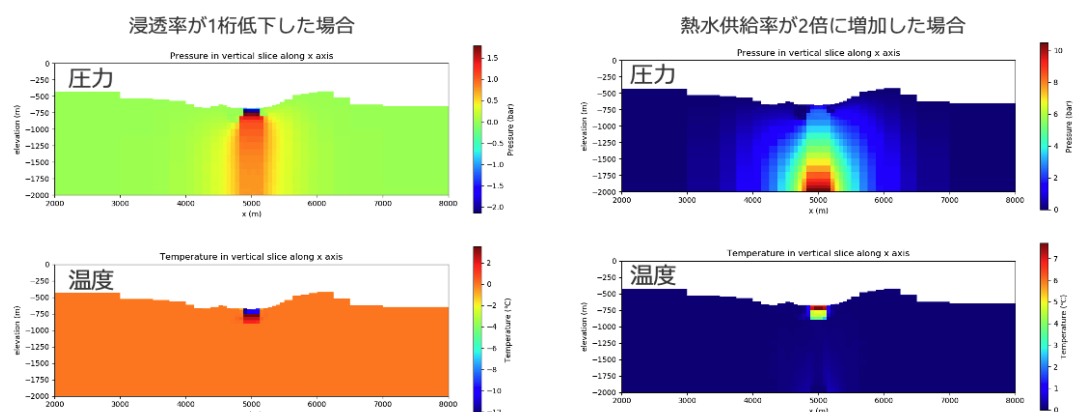


図 44 倶多楽火山（登別地域）を模擬した熱水流動シミュレーション。左側は、conduit 浅部（図 43 の fracture zone）の浸透率を一桁下げた場合の 1 年後の圧力と温度の分布。右側は、conduit 下部からの熱水供給率を 2 倍に増やした場合の 1 年後の圧力と温度の分布。

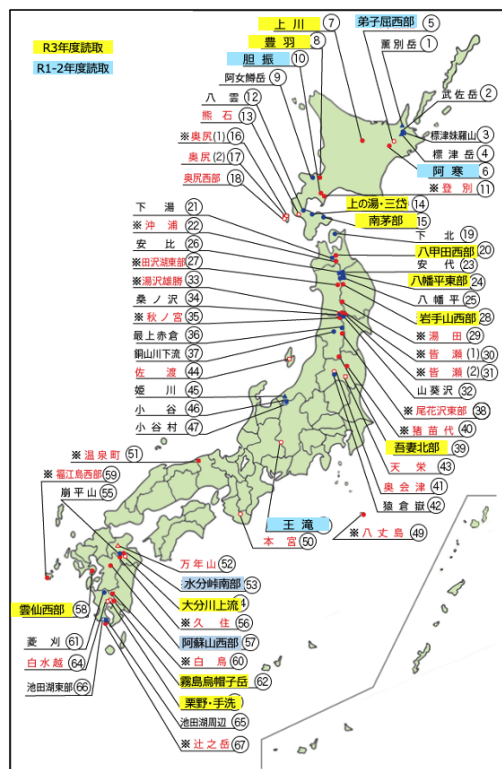


図 45 公開されている NEDO の地熱開発促進調査ボーリング報告書の調査地域（JOGMEC のホームページから引用した地図に加筆）。黄色は令和 3 年度に読取、水色は令和 1～2 年度に本事業で読取を完了した地域を表す。

熱水の上昇量が減るため温度も下がる（図 44 左）。また、熱水供給率を 2 倍に増やすと、conduit のやや深部で圧力が高まるとともに、流量が増加するため地表温度も上昇することがわかった（図 44 右）。こうした応答特性を参考にして、地温や地盤変動観測のデータを検討することにより、unrest の解釈が容易になると期待される。この業務の実施にあたり、令和 3 年度は北大でリサーチアシスタントを 1 名雇用した。

viii) 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、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、雲仙西部・上川・霧島烏帽子岳・栗野・手洗・吾妻北部・岩手山西部・南茅部・八甲田西部・豊羽・大分川上流・上の湯・三岱・八幡平東部のデータを読み取って整理した。昨年度までに整理したものと合わせ、これまでに処理が完了した地域を図 45 にまとめて示す。データが蓄積されてきたことで、地域によらない共通の特性が見えてきた。そのひとつが有効空隙率と比抵抗の関係である（図 46）。すべての地域のデータを掲載すると煩雑になるので一部のみを示すが、両者の間には両対数軸の散布図上で明瞭な負の相関が見られた（図 46 左）。このことは過年度の報告書でも予察的结果として指摘してきたが、データが増えたことでより確実になった。試料の多くは空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向を示し、概ね Archie 則に従っているように見える。図 46 では、昨年度と同じ方法で各試料の粘土鉱物導電指標を算出し、図 46 のマーカーをその値で色分けしている。導電性粘土が多く含まれる試料はグラフの右寄り、すわわり有効空隙率が高い領域にプロットされる傾向を示していることがわかる。また、低比抵抗層が難透水性粘土層となっている例は、これまでに整理した NEDO のボーリング試料を見る限りでは希であった。

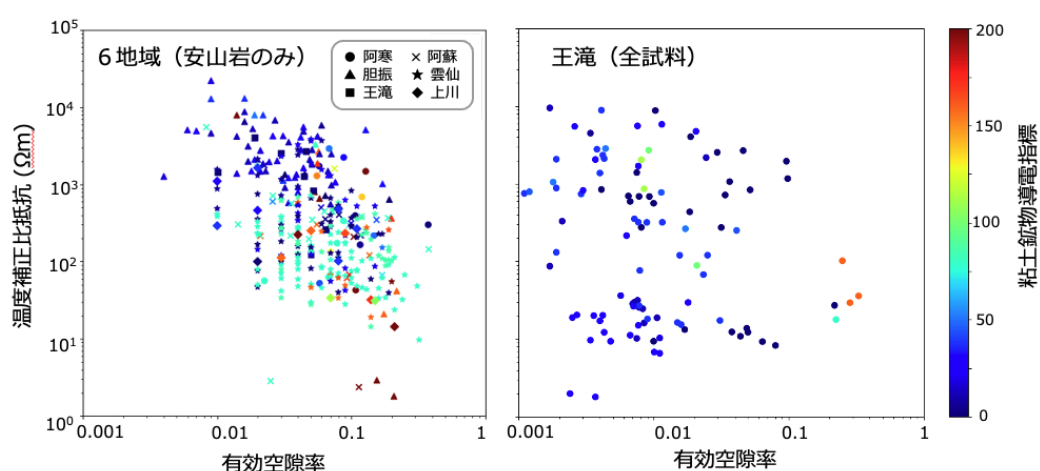


図 46 掘削コア試料の有効空隙率と同じ深度における検層比抵抗値の比較。比抵抗値は昨年度の報告書と同じ方法で 20℃相当に換算した値。左図は 6 地域の試料のうち安山岩のみのデータをまとめたもの。右図は王滝地域の全試料のデータ。

コアの試料は、溶岩ないし角礫岩（その多くは安山岩質）、凝灰岩、堆積岩に大別できる。このように分類したときに、安山岩は散布図上で相対的にまとまりの度合いが高く上記の負相関がより明瞭であった。一方、地域によっては、凝灰岩や堆積岩は低比抵抗側に向かって大きなばらつきを示した。図 46 の右図に示した王滝地域はその例のひとつである。王滝の図では、低空隙率かつ低比抵抗の試料もそれなりに存在する。ただし、それらの試料の導電指標はさほど大きいとはいえない。

本業務の成果は日本火山学会および Conductivity Anomaly 研究会で発表した。

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

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り、自動的に波形を峻別するアルゴリズムの開発が不可欠である。本年度は、従来から進めてきた、三宅島の波形を教師データとし周波数指数に基づいて種別判定を行うアルゴリズムの検討を進めるとともに、他火山への拡張性を考慮して、異なるアルゴリズムと異なる教師データに基づく機械学習手法について、火山性地震への適用可能性の検討を開始した。

・三宅島データを教師データとする手法

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 型地震と種別を分類することができ、それらの震源位置や活動推移が異なることが本事業での機動観測の結果明らかになった。したがって、地震波形の特徴を正確に識別し地震の種別（A 型、BH 型、BL 型等）を自動的に判別するシステムを構築することは、今後の火山活動活発化時における噴火の切迫性評価のために重要であると考えられる。

昨年度までは、各地震波形の周波数特性を表す指標である周波数指数（FI, Buurman and West, 2010⁵⁵⁾）を三宅島で観測される火山性地震について適用し、周波数帯として 4-8 Hz と 10-16 Hz の帯域を選ぶことが妥当であり、種別ごとの周波数指数の分布範囲の分割手法などの構築が今後必要であることを示した。そこで今年度は、この周波数指数に基づく種別分類手法の検討を進めるとともに、周波数指数同様に火山性地震の周波数特性に基づく分類手法として、スペクトログラム画像の機械学習による種別分類手法の検討を行った。ここでは、Nakano et al. (2019)⁵⁶⁾で提案された自動分類手法（SRSpec-CNN）に着目し、三宅島で観測される火山性地震の種別毎の卓越周波数帯と各周波数成分の継続時間の特徴を機械学習し、地震波形の学習モデル（分類器）の作成を行った。なお、本解析手法は、本事業で開発を進めている地震波動場連続解析システムの一部として昨年度検討を行ったものを改良したものである。

本事業の一環として三宅島の山頂火口を囲む機動地震観測網が 2018 年に展開され、火山性地震の初動付近の波形の詳細な特徴を用いたタイプ分類が可能となった。森田・大湊(2020)⁵⁷⁾ は、2018 年 12 月から 2019 年 9 月に観測された火山性地震の分類と震源決定を行い、各タイプの発生領域の棲み分けと比抵抗構造との関係を明らかにした。そこで、CNN (Convolutional Neural Network) の学習モデルの作成にあたっては、森田・大湊(2020)⁵⁷⁾ によって種別分類された火山性地震 (A 型地震 241 個、BH 型地震 218 個、BL 型地震 487 個) を「教師」として用い、気象庁 V.MJON と防災科学技術研究所 V.MKAV の 2 点の定常観測点について学習モデルをそれぞれ作成した。CNN は 2 層の畳み込み層、プーリング層、全結合層で構成され、最後は softmax 関数を用いて各タイプの確率を出力する。CNN の入力には 3 成分のランニングスペクトル画像を用い、最終的な種別分類は 2 観測点で出力された確率の積を用いて評価する。画像の範囲は、時間方向は V.MJON での P 波初動の 1 秒前から 5.12 秒間、周波数方向は 0~25 Hz とし、初動付近の卓越周波数とエネルギー継続時間の特徴量を利用した (図 47)。

作成した学習モデルを、2013 年 1 月から 2016 年 8 月までの 2160 個の火山性地震に適用して種別分類を行った結果、A 型地震 (523 個)、BH 型地震 (126 個)、BL 型地震 (1481 個) となった。この機械学習による種別分類結果では、A 型地震には P・S 波が明瞭で 10 Hz 以上が卓越する震動継続時間が 2 秒程度のものが分類され、P・S 波が不明瞭な BH 型地震と BL 型地震は、初動から 2 秒以内の高周波成分 (5-15 Hz 程度) の含み具合によって分類される傾向がある。また、機械学習による種別分類結果は、周波数指数 (FI) を用いた分類結果と概ね整合的である (図 48)。このことは、機械学習によって火山性地震の波形に含まれる特徴量を抽出することにより、周波数指数による分類の際に用いる周波数帯等の任意性を排して、同等の分類を客観的に行うことができる可能性を示唆する。

次に、分類の精度や一貫性を検証するために、2013 年 1 月から 2015 年 6 月までのデータを教師として CNN の学習モデルを作成し、2015 年 7 月から 2016 年 8 月までのデータにモデルを適用して適合率と再現率、F1-score を導出した。適合率とは、例えば、A 型であると予測した波形のうち、実際に A 型であった波形の割合、再現率

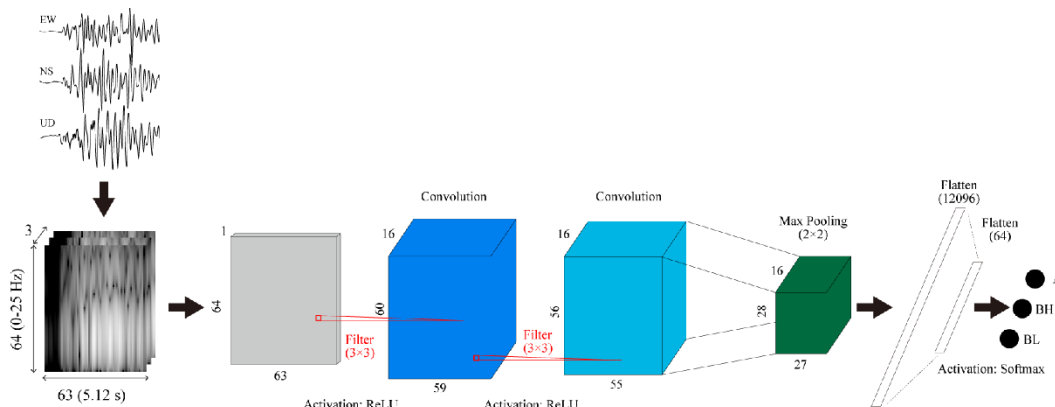


図 47 スペクトログラム画像と CNN を用いた火山性地震の種別分類の概要。

とは実際に A 型である波形の内、正しく A 型と予測できた割合、F1-score は適合率と再現率の調和平均を取ったものである。本手法による分類結果（CNN 分類）と気象庁による分類結果（JMA 分類）を用意し、それぞれの場合で 3 種別（A 型、BH 型、BL 型）の適合率と再現率、F1-score の 3 値の平均値を求めた結果、CNN 分類で 0.808、0.828、0.817、JMA 分類で 0.649、0.646、0.640 といずれも CNN 分類が良好な値を示した。このことは、CNN により長期的な地震活動をより高精度でかつ一貫した分類に基づいて評価できることを意味する。

また、BL 型地震の波形の特徴と活動推移に着目すると、初動付近に高周波成分をより多く含むものが 2016 年の 4-5 月頃から増加していることが明らかになった。この時期は、火山ガス放出の急減やマグマ溜まりの増圧が観測されており、火山性地震の特徴や活動推移が火山体内部の状態変化を反映していることが示唆される。今後、より長期的な活動について、一貫性のある基準による系統的なタイプ分類・各タイプの活動推移の検討を進めていくことで、火山活動推移の詳細が明らかになることが期待される。

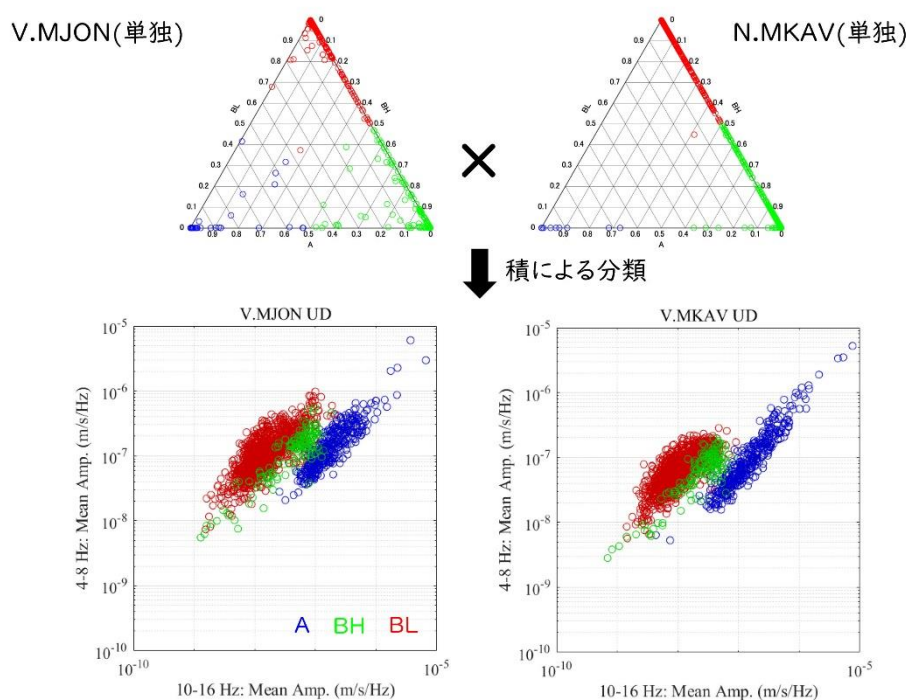


図 48 CNN による種別分類結果と周波数指数の対応。(上段) 観測された個々の火山性地震が各種別へ分類される確率の分布。(下段) 2 観測点における確率積によって分類された火山性地震の低周波側（4-8 Hz）と高周波側（10-16 Hz）の振幅の関係。この 2 つの周波数帯は、周波数指数を用いて種別分類を行う際に用いたものであり、両周波数帯の振幅比が周波数指数を表す。

・他火山のデータを教師データとする手法

火山性地震の活動度評価においては、地震の検出に加えてその発生場所や規模をできる限り高精度に推定する必要がある、そのために地震波の立ち上り時刻を高い信頼性で検知できる、自動検測システムの整備が重要となる。先に述べた、三宅島データを教師データとする手法の開発に加え、他の火山で得られたデータを教師データとする手法の検討を開始した。

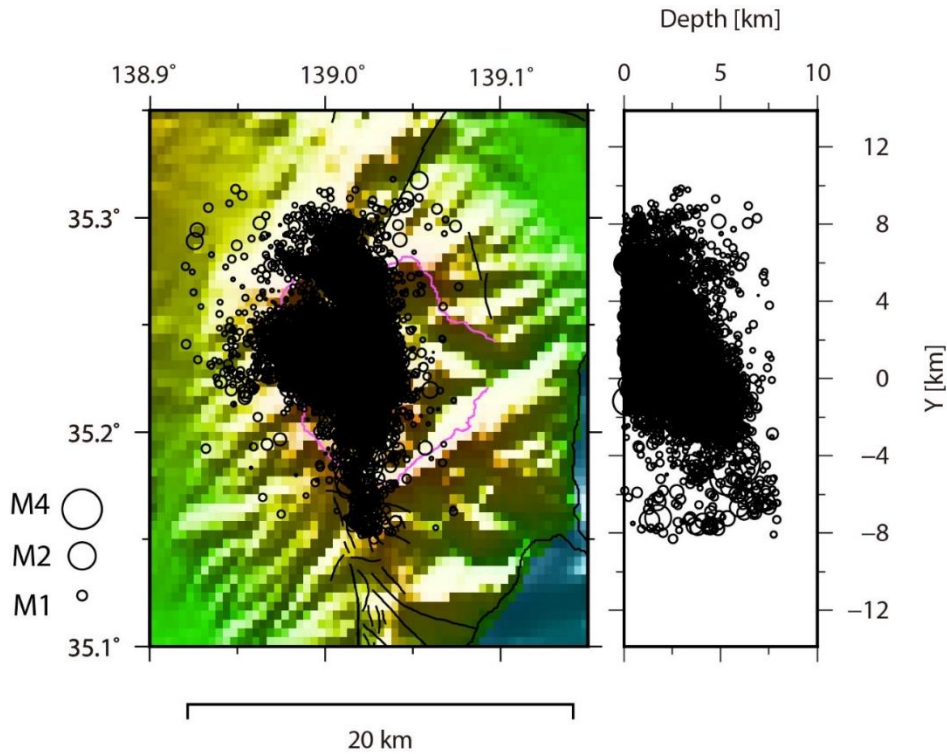


図 49 1999 年から 2020 年までの箱根火山における火山性地震の分布図（神奈川県温泉地学研究所による震源カタログを使用）。

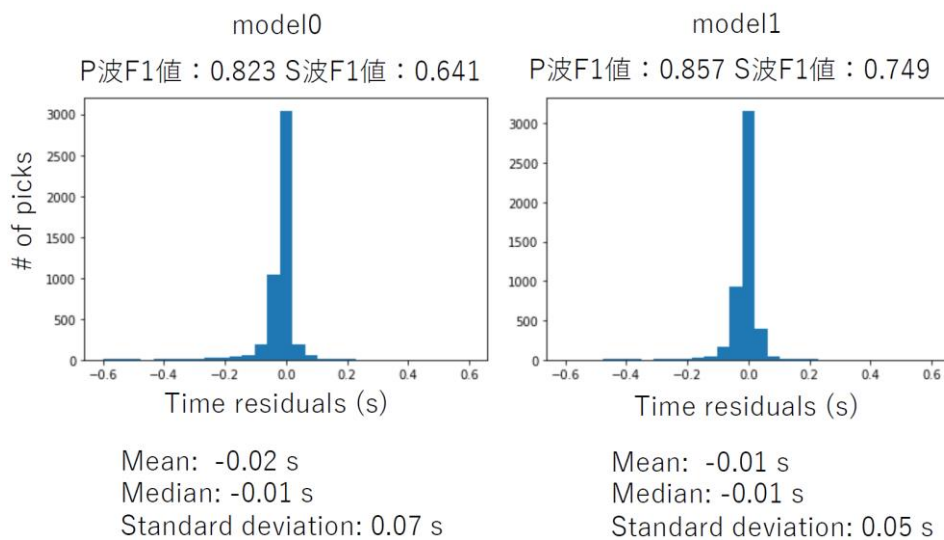


図 50 Zhu & Beroza(2019)⁵⁹⁾により公開されている学習モデル(model0)と火山性地震記録をもとに新たに構築した学習モデル(model1)を使って得られた自動検測値と、手動で得られた検測値との時間差の頻度分布。

機械学習のフレームワークを用いて、地震の検出及び検測を行ういくつかの手法が近年開発されている(例えば、Ross et al., 2018⁵⁸⁾; Zhu & Beroza, 2019⁵⁹⁾)。しかしながら、これらの手法は主に地殻内地震を訓練データに用いて構築された学習モデルに基づいており、火山性地震の検出や位相検測には適用が難しい可能性がある。今年度は、Zhu & Beroza(2019)⁵⁹⁾によって構築された PhaseNet のアーキテクチャを利用してのシステム開発を進めた。火山性地震に対する訓練データの作成にあたり、箱根火山において神奈川県温泉地学研究所により手動で整備された 1999 年から 2020 年までの約 3 万イベントの火山性地震(図 49)の検測情報を使用した。箱根火山の定常観測点及び機動的に設置された観測点での様々な規模の火山性地震波形に対する手動検測記録をもとに、P 波もしくは S 波の立ち上りを中心として約 22 万トレースの波形記録を切り出し、それらを訓練データとして、PhaseNet における学習モデルの構築を行った。

構築された学習モデルと PhaseNet のアーキテクチャを用いて、箱根火山での検証データに対して性能評価を行った(図 50)。ここでは、Zhu & Beroza(2019)⁵⁹⁾により公開されている学習モデル(model0)と火山性地震記録をもとに今年度新たに構築し

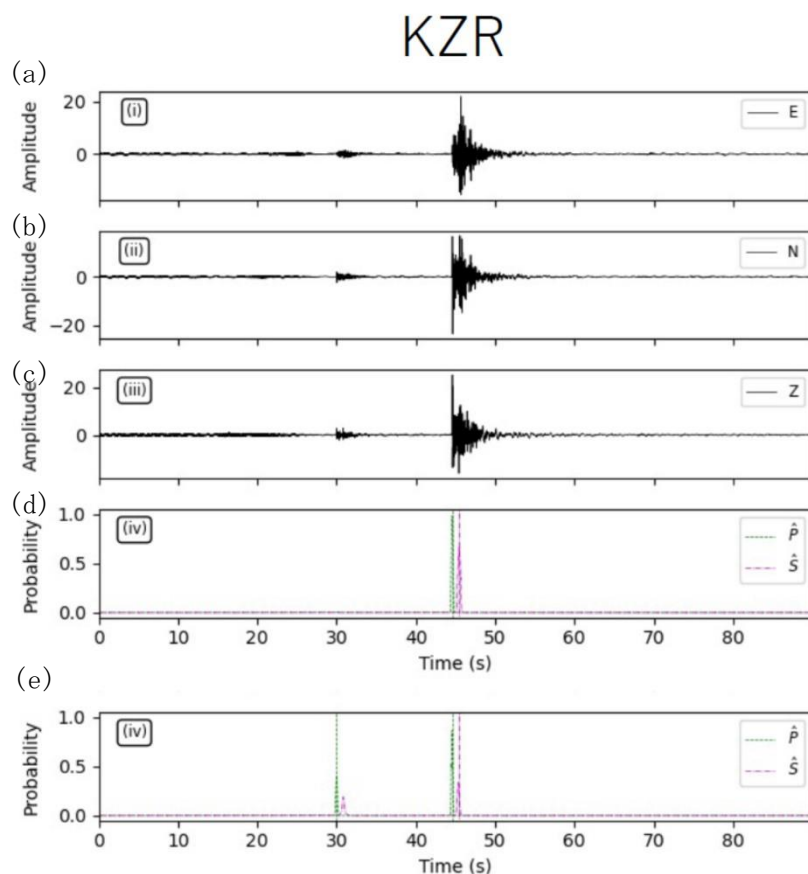


図 51 箱根湖尻観測点での火山性地震の 3 成分波形記録(a)～(c)と、model0(d)及び model11(e)を用いて得られた自動検測結果。30 秒付近の振幅の小さな波形記録に対して、model0 では P 波及び S 波に対する確率が大きくなり(d)、model11 では確率が高くなり(e)P 波及び S 波の立ち上りとして識別されている。

た学習モデル(model1)を使って得られた自動検測値と、手動で得られた検測値との時間差の頻度分布を調べた。その結果、model1 を用いたことにより読み取り精度が向上されたことが確認できた。また、model0 では P 波及び S 波が検出できていなかった振幅の小さな火山性地震に対して、model1 を適用することにより P 波及び S 波の検出が認められ、構築された学習モデルにより火山性地震の検知能力が向上されたことが示された（図 51）。そのほか、model0 では連続波形記録にたいしてノイズを P 波及び S 波と誤検出する事例が多く見られたが、model1 では誤検出が改善され、火山性地震に対して従来モデルを上回る性能を示すことが分かった。

このフレームワークを他の火山に適用できるかを検証するため、霧島新燃岳北観測点の波形データに適用した結果、火山性地震により振幅増加に対して箱根火山同様に高い確率を示すことが分かり（図 52）、他の火山への適用も可能であることが明らかになった。今後は、異なる観測点での同一の地震からの地震波の同定（Phase association）処理を組み込み、自動検測記録から高精度な震源カタログの構築や準リアルタイム化、波形の周波数特性などに基づいた地震の分類を目指すとともに、他の火山での低周波地震や微動記録を含む多様な火山地震波形記録を訓練データとして取り込み、学習モデルの汎用性を高めることを進めていく予定である。

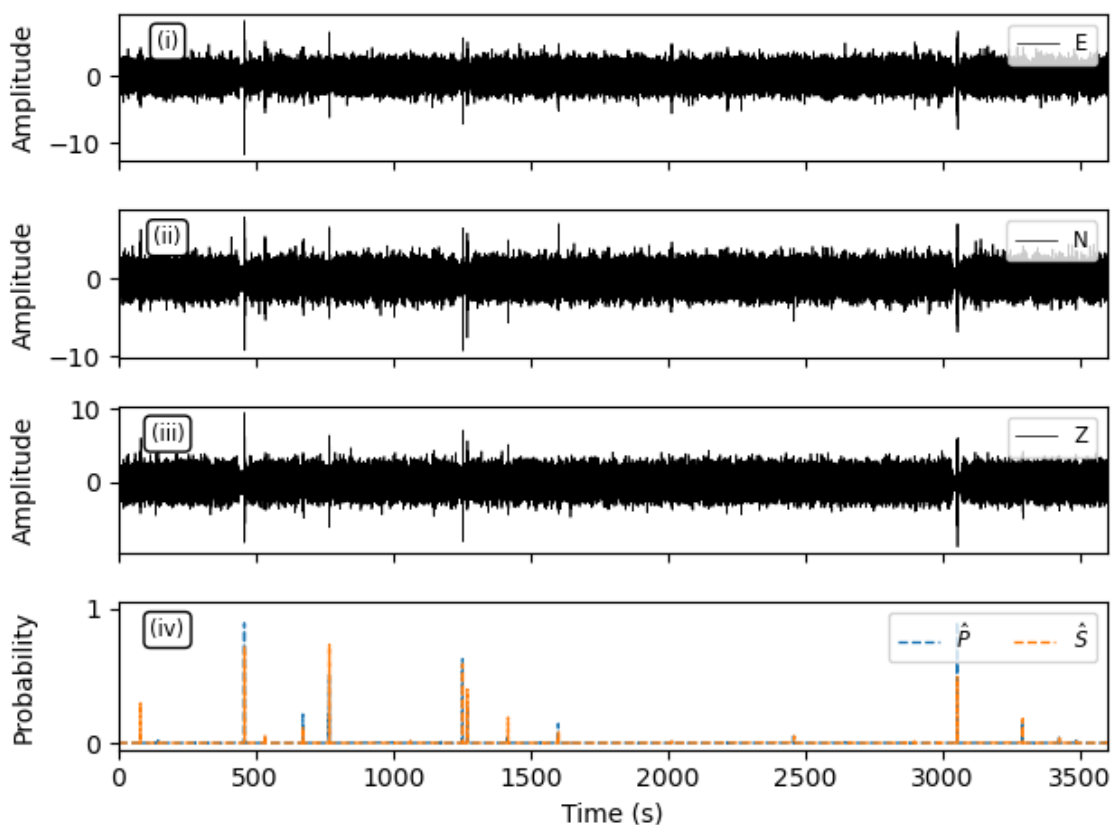


図 52 霧島新燃岳北観測点での 1 時間波形記録に対して、model1 を学習モデルとした PhaseNet を適用した結果。

ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽山とその周辺の地震計で得られた波形データから火山性微小地震を自動検知し、データをリアルタイムに整備した。また、効果の検証を可能にするため、御嶽山地域にある火山研究施設でデータの試験的表示を行った。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

従来は専門業者の協力が不可欠であった無人機（ドローン）による火山観測を、火山研究者自身で行う自己完結した観測システムを確立してきた。例えば、火山ガスの組成比を測定するためのマルチガスセンサシステムを前年度までに構築した。このシステムで使用するマルチガスセンサについては、 H_2O および CO_2 センサーから得られる濃度記録に不安定なデータが存在することが、前年度の霧島火山における地上観測との比較から示唆されている。実験的に求めたセンサー応答特性に基づく数値的検討を行った結果、水の蒸発・凝結が測定に影響していることが示唆された。この影響を回避するには、噴気孔に接近しすぎない等、飛行方法を工夫する必要があることがわかった。これらの主に草津白根山をテストフィールドとして開発した成果を取りまとめ、Journal of Disaster Research 誌に投稿中である。

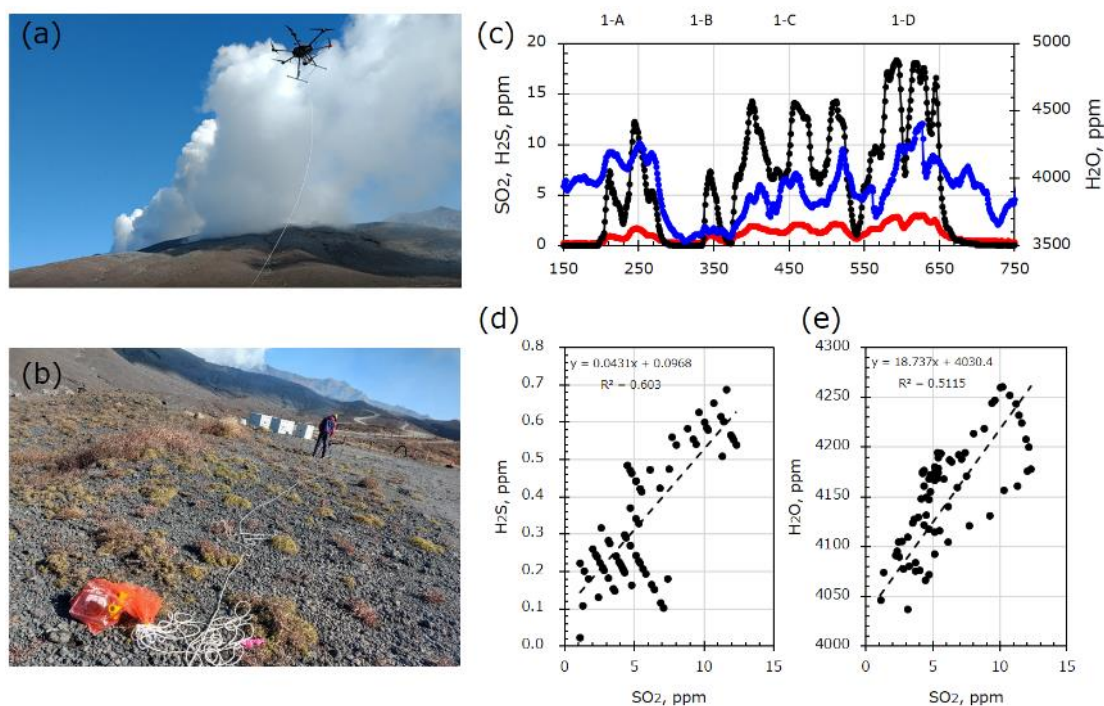


図 53 阿蘇火山において令和 3 年 11 月 27 日に実施したドローンガス観測。(a) 飛行中のガス観測ドローン。(b) 観測に使用したマルチガスセンサ。(c) 各ガス濃度の観測例。横軸は秒を表す。ピーク 1-A における (d) H_2S と SO_2 、(e) H_2O と SO_2 の濃度相関図。

令和 3 年 11 月、このシステムを使用して阿蘇火山においてガス観測を実施した。その結果、同火山の令和 3 年 10 月の噴火後初めてとなる火山ガスの組成比を測定することに成功した（図 53）。求められた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は 19-25（モル比）、および $\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ は 15-19（モル比）で、従来から観測されてきた同火山の活発期の値⁶⁰⁾に矛盾しないことが示された。また、可視画像とともに赤外線画像の試験観測を併せて実施し、噴石によるインパクトクレーター形成密度の計量に用いられた⁶¹⁾。

草津白根山においては、ドローンを用いた遠隔湖水採取⁶²⁾を引き続き実施した^{63, 64)}。また、地球化学的観測技術の開発（課題 B-3）との共同研究として、令和 3 年 6 月 14 日にガス採取装置 SeIPS⁶⁵⁾を搭載したドローンを草津白根山で飛行させ、良質な噴気ガス試料の採取に成功した。さらに、ドローンおよび水中ドローンによる同時採取実験（次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトに参画している株式会社 NTT ドコモ 法人ビジネス本部との共同観測）を 2021 年 10 月 25 日に実施し、湖水組成の空間的不均質性を評価した。これら現地観測は、安全確保および複雑な観測手順を間違いなくこなすための作業マニュアルに基づき実施した。

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⁶⁶⁾、地震波逆伝播解析⁶⁷⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和 3 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及び解析結果表示プログラムの改良を引き続き行うとともに、火山周辺の既設地震観測網や本事業等で取得した観測データを用いた連続解析を進めた。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に対して共有メモリ上で周波数フィルタ処理を行い、各周波数帯域における解析を準リアルタイムに行った結果を MySQL データベースに蓄積する処理を実装し、令和元年度から蔵王山・吾妻山等の東北地方の火山を中心に試験運用を行っている。また、準リアルタイム処理に加えて、全国地震観測データ流通システム JDX-net に流通している活火山周辺の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ている。これらの解析結果についても、準リアルタイムの処理結果同様にデータベースに蓄積を行っており、本事業で開発を進めた表示プログラムによって効率的に解析結果を表示・確認をすることができる。

このようにして得られた地震波干渉法解析結果には、火山活動による火山内部構造の変化による地震波速度変化に加えて、これまで多くの先行研究によって示されてきたように地震動による表層地盤の強度変化及び雑微動場の波動場構成や入射方位角分布等の変化に伴う速度変化も現れる。このような火山内部構造状態以外の要因による地震波速度変化をどのように判別し、火山内部構造変化の情報を抽出するかは今後の検討課題の一つである。

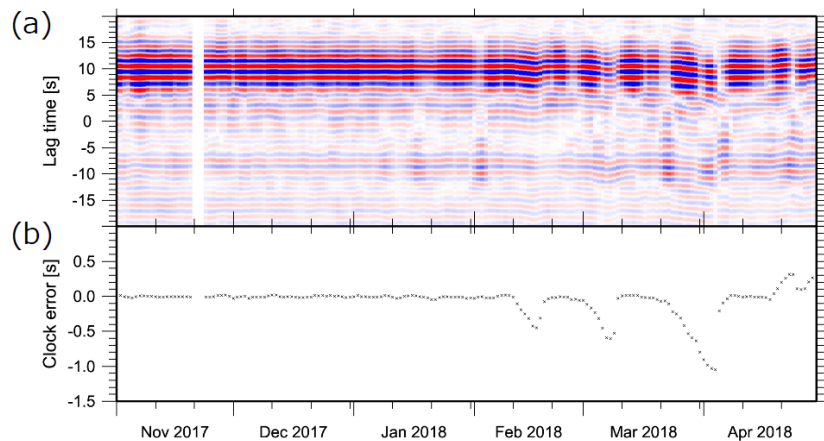


図 54 地震波干渉法による刻時誤差推定例。(a) 東北大学の新秋田駒ヶ岳観測点と西木観測点の2観測点間についての地震波干渉法解析結果。(b) 地震波干渉法解析によって推定した西木観測点の刻時誤差。

一方、このような地震波干渉法解析結果の蓄積によって、火山観測データの解析に資する情報が得られることも明らかになった。地震波干渉法解析では、2観測点間を伝播する波動の向きが相互相関関数の正負のラグタイムに対応するため、火山体内部構造の速度変化の影響はゼロ・ラグに対して対称に現れる。それに対し、データ収録装置の時刻同期障害のような個々の観測点に起因する影響は時間軸の一方向へのバイアスとして現れるため、各観測点の刻時誤差等を推定することができる。Sens-Schönfelder (2008)⁶⁸⁾ は、このような地震波干渉法解析の特徴を用いて、雑微動の解析によって観測網内の時刻同期を行えることを提唱した。図 54 に、この手法に基づいて本解析システムの処理結果から時刻同期障害を検知した例を示す。この例では、秋田駒ヶ岳周辺の東北大学の定常観測点2点（新秋田駒ヶ岳観測点と西木観測点）における相互相関関数の時間変化及び周辺観測網を用いて推定した西木観測点の刻時誤差を示したが、ほぼ同一の相互相関関数がラグタイムの正負の方向に揺らいで現れるという刻時誤差の影響が確認できる。その後の西木観測点における現地保守によって、刻時用 GPS アンテナのケーブル不良が認められているため、この刻時誤差は GPS による時刻同期が行えず、データロガーの内部時計が自走状態になったため生じたものと考えられる。なお、刻時誤差の推定精度は 40 ms 以下程度である。一般に、火山活動に伴う火山性地震の震源決定においては、絶対時刻精度は必ずしも必要ではなく、観測点間での相対的な走時差の精度がより重要である。したがって、この地震波干渉法解析による刻時誤差推定手法は、各観測点の時刻校正が GPS 等で行われていなかった時代から維持されている観測網において記録された過去の火山活動の再解析に活用できる可能性がある。静穏期の長い火山も多いため、このような地震波干渉法の連続解析の結果・知見の蓄積は、過去の火山活動推移の精査に資することができると期待される。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。

なお、課題 A の JVDN システムにおいても、JDX-net で流通している防災科学技術研究所及び気象庁の定常観測点についての地震波干渉法解析結果の提供が令和 3 年度から開始された。知見の共有及び双方のシステムの位置付け・活用方法の差異については課題 A の担当者とも議論を進めている。

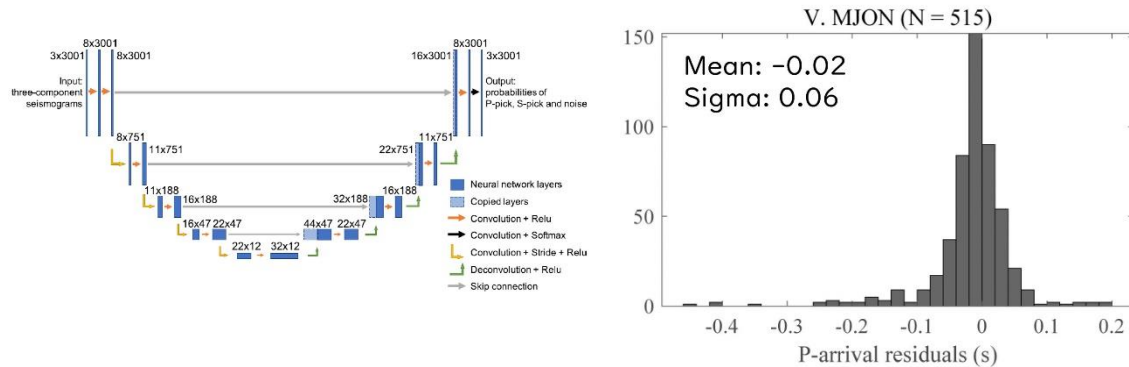


図 55 三宅島の火山性地震への PhaseNet 適用結果の例。(左) PhaseNet の処理構造。(右) 気象庁による P 波の手動検測値との比較。2018 年から 2019 年に観測された 3557 個の火山性地震のうち、気象庁による手動検測値と PhaseNet によって得られた検測値の双方が揃う 515 個の火山性地震についての検測値時間差の頻度分布を示す。

本システムの一環として検証実験を進めてきた携帯電話回線を用いたデータ通信システムについては、蔵王山・吾妻山での機動地震観測点で検証を進めるとともに、2018 年に本事業における本白根山緊急観測で展開した観測点の一部において引き続き活用し、長期安定性の確認を行った。臨時地震観測点のうち KSI 観測点においては、機器の強化を今年度実施したが、太陽電池による収録機器・通信機器への給電によって収録・リアルタイムデータ伝送とも積雪期も含めて概ね順調に稼働しており、長期の動作安定性に大きな問題がないことが確認できた。

さらに本年度は、地震波動場連続解析システム及び火山性地震活動総合解析システムの高度化を目標に、機械学習による火山性地震の検測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。

火山性地震の初動到達時刻は、火山性地震の発生位置推定の基礎となるデータであり、STA/LTA 法⁶⁹⁾や AR-AIC 法⁷⁰⁾ など多様な手法がこれまで用いられてきた。しかしながら、火山体の強い短波長不均質性の影響等により火山性地震の初動立ち上がりは不明瞭であることが多く、目視による手動検測がこれまで広く用いられてきた。そこで、本システム等における火山性地震の震源決定 や 火山性地震活動総合解析システムの項で述べた機械学習による地震種別分類に必要なデータセットの作成等の処理を効率的に行うことを目標に、今年度は Zu and Beroza (2019)⁵⁹⁾ による深層ニューラルネットワークを用いた検測手法 PhaseNet の火山性地震への適用可能性を検討した。

PhaseNet は、生物医学分野において細胞画像中の要素を認識するために開発された深層学習プログラム U-net (Ronneberger et al., 2015⁷¹⁾) をもとにした CNN (Convolutional Neural Network) を用いた検測プログラムであり、3 成分地震波形

を入力として、各時刻における P、S 波初動及びノイズである確率を出力する。CNN による深層学習は特徴量抽出のための Convolution 処理を繰り返し行うことが一般的であるが、PhaseNet (U-net) は Convolution 処理のあとに Deconvolution 処理を加えることで出力の解像度を上げる点の一つの特徴である。PhaseNet は、北カリフォルニアにおける地震の手動検測値を用いて学習が行われているが、ここでは三宅島における火山性地震についての気象庁の検測値を「教師」とすることで再学習を行い、火山性地震特有の波形の特徴を抽出し、検測に反映するようにした。なお、PhaseNet においてあらかじめ学習が行われている北カリフォルニアにおける非火山性地震を「教師」としたモデル、国内の活火山における気象庁検測値を「教師」としたモデルの二つの学習モデルを用いた PhaseNet の適用も試行したが、三宅島の手動検測値を用いた学習モデルを用いた場合が読み取り誤差が最も小さくなった。これは、火山性地震の発生メカニズムの多様性や各火山固有の構造による波形の崩れの差異が影響しているためと考えられる。図 55 に三宅島のデータで再学習を行った PhaseNet による検測の結果の例を示す。PhaseNet によって得られた P 波の初動到達時刻は、気象庁による手動検測値と概ね一致し、今後このような機械学習 (CNN) による検測手法の検討をさらに進めることにより、立ち上がりの不明瞭な火山性地震の検測をより効率的かつ客観的に行えるようになることが期待できる。

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機械学習の適用について検討を進めてきたが、今後も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システム JVDN との連携についての検討も継続し、火山体内部の状態変化を評価するシステムの開発を進める予定である。

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 4 年 1 月 12 日 13 時～14 時に WEB 会議により開催した。予算配分方針の確認、各サブテーマの進行状況に関する情報交換、2 月に行われるフォローアップ評価会への対応等について確認した。また、サブテーマ間、課題間の連携の必要性が評価会で指摘されていることを受けて、具体的な連携を示すために、有珠や伊豆大島での合同観測実施や観測データに関する合同 WS の開催を検討することとした。

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委員会」を令和 4 年 1 月 28 日 10 時～13 時に WEB 会議により開催した。代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今年度の成果を報告するとともに、各種解析ツールの開発状況についての情報交換および今後の方針に関する意見交換を行った。次年度の予算配分の方針及び RA あるいは PD の雇用予定を確認した。また、年度末に向けた作業内容及び日程を確認した。

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。

広帯域地震計	5 セット
機動観測用テレメータ装置	5 セット

広帯域地震計および機動観測用テレメータ装置は、令和4年度に実施する有珠山および伊豆大島における機動観測において利用する予定である。

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。

(c) 結論

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、蔵王火山と有珠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4年度に機動観測を実施予定である伊豆大島において、その準備を進めた。更に、これまで機動観測を継続していた草津白根山、霧島火山と箱根火山において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。

蔵王火山においては、令和2年度までの解析で深さ約1 km以浅と深さ約2 kmに低比抵抗体が存在するという特徴が見られているが、今年度は解析に用いるメッシュを精緻化するとともに、解析結果に対する先験情報の影響を評価することで、得られた結果の信頼性を評価した。また、既に詳細な比抵抗構造が得られている草津白根山の比抵抗構造との比較を行った。蔵王山西方に新設した傾斜計については、潮汐成分が観測されていることから必要とする観測精度が達成されたと考えられ、今後データ蓄積が進むことが期待される。機動地震観測については、得られた地震データの解析が進み、長周期地震の発生域とその他の火山性地震の発生域が空間的に分かれていることなどが明らかになった。今後は、同様の特徴が見られている阿蘇山や草津白根山などの浅部熱水系が発達した火山との比較研究を実施することが重要である。

有珠山については、噴火直前に起きる顕著な地殻変動を捉えることを目的として、多点GNSS観測網を構築した。現在は現地収録による観測であるが、テレメータ化された連続観測への移行が必要であることから、通信テストなどを実施した。有珠山の山頂火口原では、小規模アレイ地震観測、比抵抗探査、全磁力探査、土壌拡散CO₂フラックス観測を実施し、噴火前の異常検知のために必要となる静穏期のデータ蓄積を進めた。なお、今年度の観測では噴火につながる顕著な変化は見られていない。今後は、将来の噴火に備えた観測網の構築と維持、活動評価に必要な静穏期のデータ蓄積およびデータ評価手法の高度化が必要である。

伊豆大島においては、令和4年度に予定される電磁気観測のための準備を進めた。また、同じく予定されている地震機動観測に必要な機材の購入を行った。さらに、伊豆大島と同じ地学的条件下にある火山島である三宅島について、平成30年から令和元年に実施し

た機動観測で得られたデータを再解析し、詳細な地下構造モデルを得た。伊豆大島のデータ蓄積が進み、その解析が進んだ段階で、このモデルを用いた伊豆大島と三宅島の比較研究を進めることが重要である。

草津白根山においては、これまでに設置した機動観測点のデータとその他データを統合的に処理するシステムを構築することで、これまでよりも広い範囲での定常的な震源決定が可能になった。これにより、火口周辺の詳細な地震活動に加え、より深部のマグマ供給系の活動を反映する広域地震活動の把握が進むことが期待される。これまでに取得されたMTデータの解析により詳細な3次元比抵抗モデルが得られた。岩石学的知見や、震源分布、地殻変動源の位置などを考慮することで、草津白根のマグマ熱水系に関する詳細なモデルを構築することができた。今後は、本課題で開発を進めている、地下比抵抗・熱水流動解析システムを活用することでモデルの評価を行いたい。

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。2018年小規模噴火後に多項目観測で得られたデータの解析を進め、噴火に関する詳細な物理機構の解明が進んだ。また、空振と電場の並行観測が観測点近傍の地下水—熱水系のモニタリングに有効である可能性を示すことができた。広帯域MT観測による3次元比抵抗構造については観測点を追加することで分解能の向上を進めており、低比抵抗体が流体の通路として果たす役割がより詳細に明らかになりつつある。地殻変動観測については、様々な手法を組み合わせることで地下圧力源の位置やその動きが詳細に捉えられている。霧島硫黄山は熱水系が卓越し水蒸気噴火発生を理解するために最適なフィールドの一つであることから、今後も、電磁氣的観測、地震・空振観測、地殻変動観測を継続し、データ蓄積とその解析を継続することが重要である。

箱根山については、レシーバ関数解析による深部構造の理解とS波スプリッティング解析による浅部亀裂系の解析が進んだ。深部構造の解析をさらに進め、これまでの地震・地殻変動観測で得られている浅部構造と組み合わせることにより、箱根山のマグマ供給系の全体像を把握することが期待される。

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等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、実地での試験運用が進み、更なる改良が進められている。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、シミュレーション結果を地下比抵抗構造に変換するポストプロセッサの開発が進んだことから、機動観測で得られている比抵抗構造と比較することが可能になりつつある。今後は、具体的な火山を対象としたモデルと観測の比較を進めることが重要である。火山性地震活動総合解析システムについては、教師データとなる観測波形の分類が進んだことから、今後、機械学習による地震の検出・分類手法の開発をさらに進める環境が整いつつある。遠隔熱情報解析システムについては、令和3年10月に噴火した阿蘇での火山ガス観測の実施が行われ、観測のためのノウハウに加えて、得られたデータの解析ノウハウも蓄積されつつある。今後も火山噴火の機会を活かし機動的な運用実績を積むことが肝要である。地

震波動場連続解析システムについては実観測データへの適用と動作テストを継続して実施しているが、火山内部構造状態以外の要因による地震波速度変化をどのように判別し、火山内部構造変化の情報を抽出するかは今後の検討課題の一つである。

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、サブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間の情報共有を進めるとともに、サブテーマ間の具体的な協力体制に関する協議を継続した。また、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、関係機関による会議を開催した。各機関により得られた成果やデータの共有、開発中の各種ツールの開発状況の把握、その活用方法の検討などを行った。観測機材についても計画どおり導入した。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) Tseng, K. H., Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Ujihara, N., Honkura, Y., Terada, A., Usui, Y., Kanda, W.: Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu - Shirane volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests. *Earth, Planets and Space*, 72(1), doi: 10.1186/s40623-020-01283-2, 2020.
- 2) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., Utsugi, M., Seki, K., 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), 12,821-12,828, 2018.
- 3) 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.
- 4) Chave, A. D., Thomson, D. J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation. *Geophysical Journal International*, 157(3), 988-1006, 2004.
- 5) Siripunvaraporn, W., Egbert, G.: WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3-4), 317-329, 2009.
- 6) Ichiki, M., Ogawa, Y., Kaida, T., Koyama, T., Uyeshima, M., Demachi, T., Hirahara, S., Honkura, Y., Kanda, W., Kono, T., Matsushima, M., Nakayama, T., Suzuki, S., Toh, H.: Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 7937-7965, 2015.
- 7) Robertson, K., Thiel, S., Meqbel, N.: Quality over quantity: on workflow and model space exploration of 3D inversion of MT data. *Earth, Planets and Space*, 72(1), doi: 10.1186/s40623-019-1125-4, 2020.

- 8) Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Mishina, M., Asamori, K.: Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan. *Earth, Planets and Space*, 66(1), 1-13, 2014.
- 9) Ichiki, M., Kaida, T., Nakayama, T., Miura, S., Yamamoto, M., Morita, Y., Uyeshima, M.: Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, *Earth, Planets and Space*, doi: 10.1186/s40623-021-01451-y, 2021.
- 10) Ikegaya, T., Yamamoto, M.: Spatio-temporal characteristics and focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath the Zao volcano, northeastern Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107321, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107321, 2021.
- 11) Okada, T., Matsuzawa, T., Umino, N., Yoshida, K., Hasegawa, A., Takahashi, H., Yamada, T., Kosuga, M., Takeda, T., Kato, A., Igarashi, T., Obara, K., Sakai, S., Saiga, A., Iidaka, T., Iwasaki, T., Hirata, N., Tsumura, N., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Nakamichi, H., Okuda, T., Horikawa, S., Katao, H., Miura, T., Kubo, A., Matsushima, T., Goto, K., Miyamachi, H., Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in NE Japan: Implications for crustal fluid distribution and crustal permeability, *Geofluids*, 15, 293-309, doi: 10.1111/gfl.12112, 2015.
- 12) Ban, M., Takebe, Y., Adachi, T., Matsui, R., Nishi, Y., Eruption histories of Zao and Azuma volcanoes and their magma feeding systems for recent activities, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 91, 25-39, 2016.
- 13) 東北大学：第 130 回噴火予知連絡会資料，2014.
- 14) 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.
- 15) Kelbert, A., N. Meqbel, G.D. Egbert, K. Tandon, ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, *Comput. Geosci.*, 66, 40-53, 2014.
- 16) Matsushima, N., H. Oshima, Y. Ogawa, S. Takakura, H. Satoh, M. Utsugi, and Y. Nishida, Magma prospecting in Usu volcano, Hokkaido, Japan, using magnetotelluric soundings, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 109, 4, 263-277, 2001.
- 17) <https://jvdm.bosai.go.jp/app/pages/index.html?root=anyFileEdit&id=d52a79f2-d3df-497f-bc8f-5c512d09b47f>
- 18) Aoyama, H., S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima, and H. Mori, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217, 2009.

- 19) Wang, X. and Y. Aoki, Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 335-357, 2019.
- 20) 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.
- 21) 森田裕一・2009年伊豆大島構造探査実験グループ, 2009年海中爆破実験による伊豆大島及びその周辺の地震波速度構造, *東京大学地震研究所彙報*, 96, 11-27, 2021.
- 22) Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, A. Yasuda, T. Ogawa, A. Watanabe, S. Sakashita, M. Takeo, T. Yanagisawa, Y. Honda and K. Kajiwarra, An ultra-high-resolution autonomous uncrewed helicopter aeromagnetic survey in Izu-Oshima Island, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 425, 107527, 2022.
- 23) Terada, A., Kanda, W., Ogawa, Y., Yamada, T., Yamamoto, M., Ohkura, T., Aoyama, H., Tsutsui, T., Onizawa, S., The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network, *Earth Planets Space*, 73, 157, 2021.
- 24) Munekane, H., Modeling long-term volcanic deformations at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series, *Earth Planets Space*, 73, 192, 2021.
- 25) Yamada, T., Kurokawa, A.K., Terada, A., Kanda, W., Ueda, H., Aoyama, H., Ohkura, T., Ogawa, Y., Tanada, T., Locating hydrothermal fluid injection of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano with volcanic tremor amplitude, *Earth Planet Space* 73, 14, 2021.
- 26) Matsunaga, Y., Kanda, W., Takakura, S., Koyama, T., Saito, Z., Seki, K., Suzuki, A., Kishita, T., Kinoshita, Y., Ogawa, Y., Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 390, 106742, 2020.
- 27) Nurhasan, Ogawa, Y., Tank, S.B., Honkura, 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.
- 28) Hashin, Z., Shtrikman, S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *J. Appl. Phys.*, 33, 3125-3131, 1962.
- 29) Quist, A.S., Marshall, W.L., Electrical conductances of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 800 °C and at pressures to 4000 bars. *J. Phys. Chem.*, 72, 684-703, 1968.

- 30) Sinmyo, R., Keppler, H., Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600 °C and 1 GPa. *Contrib. Mineral. Petrol.* 172, 4, 2017.
- 31) Pommier, A., Le-Trong, E., “SIGMELTS” : A web portal for electrical conductivity calculations in geosciences, *Comput. Geosci.*, 37, 1450-1459, 2011.
- 32) Ueki, K., Inui, M., Matsunaga, K., Okamoto, N., Oshio, K., Oxidation during magma mixing recorded by symplectites at Kusatsu-Shirane Volcano, Central Japan. *Earth Planets Space*, 72, 68, 2020.
- 33) Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., Temporal changes in the chemistry of lake water within Yugama Crater, Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Implications for the evolution of the magmatic hydrothermal system, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 131-144, 2008.
- 34) Muramatsu, D., Ichihara, M., Matsushima, T., Kuwano, O., and Tajima, Y. (2022), Surface eruptive dynamics of 2018 small phreatic eruption of Iwo-Yama volcano, Japan: Constraints from seismo-acoustic observation and mud suspension rheology, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Issue 421, Article number 107452. [https://doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107452](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107452)
- 35) Aniya S., Aizawa K., and Matsushima T. (2022), Infrasound-electric-field coupling associated with the 2018 Shinmoe-dake eruptions, Kirishima volcanic complex, Japan, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096555. <https://doi.org/10.1029/2021GL096555>
- 36) Aizawa, K., Utsugi, M., Kitamura, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Matsushima, N., et al. (2022). Magmatic fluid pathways in the upper crust: insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan. *Geophysical Journal International*, 228(2), 755-772. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- 37) Matsubara M, Sato H, Uehira K, Mochizuki M, Kanazawa T, Takahashi N, Suzuki K. and Kamiya S., Seismic velocity structure in and around the Japanese island arc derived from seismic tomography Including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data. *IntechOpen*, DOI: 10.5772/intechopen.86936., 2019.
- 38) 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*, 126, e2020JB021236. <https://doi.org/10.1029/2020JB021236>, 2021.
- 39) Hudson, J. A., Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophys. J R Astr. Soc.* Vol.64, pp. 133-150, 1981.
- 40) Shih, R. X. and R. P. Meyer, Observation of shear wave splitting from natural events: south moat of Long Valley Caldera, California, June 29 to August 12, 1982, *J Geophys. Res.* Vol.95,1990.
- 41) 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.
- 42) Ross, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

- 43) 長井雅史・高橋正樹, 箱根火山の地質と形成史, 神奈川博調査研報 (自然), vol 13, pp25-42. 2008
- 44) 萬年一剛, 箱根カルデラ -地質構造・成因・現在の火山活動における役割-, 神奈川博調査研報 (自然), vol.13, pp. 61-76, 2008
- 45) Yukutake, Y., Tanada, T., Honda, R., Harada, M., Ito, H. and Yoshida, A., Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms, *Tectonophysics*, Vol.489, pp. 104-118, 2010.
- 46) Kaneshima, S., Origin of crustal anisotropy: shear Wave splitting studies in Japan, *J. Geophys. Res.*, 95, Vol.87, pp. 11121-11133, 1990.
- 47) Seno, T., S. Seth, and G. Alice, A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, Vol.90, pp. 17941-17948, 1993.
- 48) Doke, R., D., Harada, M., Mannen, K., Itadera, K. and Takenaka, J., InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan, *Earth, Planets Space*, Vol.70, pp. 63, 2018.
- 49) Honda, R., Yukutake, Y., Morita, Y., Sakai, S., Itadera, K. and Kokubo, K., Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, *Earth Planets Space*, Vol.70, pp. 117, 2018.
- 50) Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S., Pollyea, R.M., TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. *Comput. Geosci.* 108, 2-7, 2017.
- 51) Pan, L., Spycher, N., Doughty, C., Pruess, K., ECO2N V2.0: A TOUGH2 fluid property module for modeling CO₂ - H₂O - NaCl systems to elevated temperatures of up to 300 °C, *Greenhouse Gases: Sci. Tech.* 7, 313-327, 2017.
- 52) Carbonari, R., Di Maio, R., Piegari, E., Feasibility to use continuous magnetotelluric observations for monitoring hydrothermal activity. Numerical modeling applied to Campi Flegrei volcanic system (southern Italy), *Frontiers in Earth Science*, 7:262, 2019.
- 53) Hashimoto T., W. Kanda, Y. Morita, M. Hayakawa, R. Tanaka, H. Aoyama, M. Uyeshima, Significance of Electromagnetic Surveys at Active Volcanoes: Toward Evaluating the Imminence of Wet Eruptions, *J. Disas. Res.*, 14, 5, 580-591, 2019.
- 54) Goto, Y. and A. Johmori, Internal Structure of Kuttara Caldera, Hokkaido, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. J.*, 60, 35-46, 2015.
- 55) 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.
- 56) Nakano, M., Sugiyama, D., Hori, T., Kuwatani, T., Tsuboi, S.: Discrimination of seismic signals from earthquakes and tectonic tremor by applying a convolutional neural network to running spectral images, *Seismological Research Letters*, 90, 530-538, 2019.
 - 57) 森田裕一・大湊隆雄: 最近の三宅島における地震活動, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SVC45-28, 2020.
 - 58) Ross ZE, Meier MA, Hauksson E, Heaton TH (2018) Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning *Bull Seismol Soc Am* 108:2894-2901
doi:10.1785/0120180080
 - 59) Zhu, W., and Beroza, G. C., PhaseNet: A deep neural network based seismic arrival time picking method, *Geophysical Journal International*, 216, 261-273, doi: 10.1093/gji/ggy423, 2019.
 - 60) Shinohara, H., Yokoo, A., Kazahaya, R., Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014-2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 70, 151, 2018.
 - 61) Yokoo, A., Terada, A., Morita, M., Tanaka, R., Yasuda, Y., Nashimoto, S., Uno, K., Utsugi, M., Yoshikawa, S., Inoue, H., Ohkura, T., Morita, Y., An aerial survey using unoccupied aerial vehicles in response to the phreatic explosion of Aso volcano in October 2020, *JpGU2022*, SVC31-15, 2022.
 - 62) Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori, T., Ohba, T., Yaguchi, M., Kanda, W., Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 70, 64, 2018.
 - 63) Yaguchi, M., Ohba, T., Terada, A., Groundwater interacting at depth with hot plastic magma triggers phreatic eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane volcano (Japan), *Front. Earth Sci.*, 9, 741742, 2021.
 - 64) Terada, A., Yaguchi, M., Ohba, T., Quantitative assessment of temporal changes in subaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest based on a time-series of lake water chemistry, *Front. Earth Sci.*, 9, 740617, 2022.
 - 65) Shingubara, R., Tsunogai, U., Ito, M., Nakagawa, F., Yoshikawa, S., Utsugi, M., Yokoo, A., Development of a drone-borne volcanic plume sampler, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 412, 107197, 2021.
 - 66) 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.
 - 67) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, *Geophysical Research Letters*, 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.
 - 68) Sens-Schönfelder, C.: Synchronizing seismic networks with ambient noise,

- Geophysical Journal International, 174, 966-970, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03842.x, 2008.
- 69) Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., Trujillo, J.: A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection, Bulletin of the Seismological Society of America, 88, 95-106, doi: 10.1785/bssa0880010095, 1998.
- 70) 横田崇・周勝奎・溝上恵・中村功：地震波データの自動検測方式とオンライン処理システムにおける稼動実験，東京大学地震研究所彙報，56，449-484，1981.
- 71) Ronneberger O., Fischer P., Brox T., U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention - MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9351, 234-241, doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28, 2015.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

特許出願

なし

ソフトウェア開発

なし

仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和4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) 有珠火山における機動観測

令和3年度は、近年普及しつつある低価格のGNSS受信ユニットを用いた地盤変動観測・伝送システムを製作し、既存のGNSS観測網を高密度化して噴火準備過程のマグマ蓄積を捉えるべく、臨時観測用のピラーを16箇所の新設した。このGNSS観測網は、噴火直前期のマグマの動きを迅速に把握し、山体のどの位置から噴火するかを即時的に予測することにも活用できる。このため、令和4年度は、前年度に新設した臨時観測点を常時テレメータ化（役務外注）する。

歴史時代の9回の噴火のうち6回が山頂火口から起きていることをふまえ、本課題では山頂火口原を中心とした火山体浅部の詳細な比抵抗構造の解明も目指す。令和4年度は、昨年度予察的に展開したAMT/MT法探査の追加観測を行う（一部外注）。前年度のデータと合わせて3次元比抵抗インバージョ

ン解析を行う。

前年度実施した地磁気全磁力観測により、過去10年以上にわたって冷却帯磁傾向が続いていることが明らかになった。令和4年度も引き続き観測を行い、これまでのトレンドから外れるような異常変化がないかを確認する。

山頂火口原では、2000年噴火の半年前に土壌拡散CO₂フラックスが顕著に増大したとの報告事例がある。このため、早期に噴火の切迫性を検知できる手法のひとつとされているが、一昨年度と昨年度の観測では特段の異常は認められていない。令和4年度も再観測を実施し、異常の有無を確認する。

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3名も補助的に従事させる。機動観測で取得したデータは、本プロジェクトのその他の関連データも含め、このリサーチアシスタントのうちの1名がJVDNへの登録作業やその前処理を業務として担当する。

b) 伊豆大島における機動観測

今年度は、前年度に観測予定点選定等の準備を進めてきた伊豆大島カルデラ内AMT・MT観測を実施し、火山内部の状況を把握する。山体膨張源であるカルデラ内中央火口の北側を中心として、1週間～1か月間程度、水平電場2成分・磁場3成分の5成分測定を実施する。取得された電磁場時系列データは周波数解析後に、3次元比抵抗構造解析をおこなう。得られた構造は地震波速度構造や密度・磁化構造などと比較し、火山内部状態を把握する。また、カルデラ内を中心として臨時地震観測点を設置し、浅部速度構造や震源の推定を行う。

c) 蔵王火山における機動観測

今年度は、令和2年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測データを用いた3次元地下比抵抗構造推定で明らかになった御釜の北東における表層付近の低比抵抗帯及び海拔深さ1-2 kmの低比抵抗体について、構造の精緻化と分解能を評価し、最終的な比抵抗モデルを提出する。また、令和元年度及び令和3年度に本プロジェクトで新設した傾斜観測点2点のデータを既設地殻変動観測網におけるデータと統合して解析することにより浅部地殻変動源の推定を試みる。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、火山性地震の震源分布の精査や長周期地震の波形解析により流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。また火山活動推移に伴う長周期地震の波形特性の変化を調査する。

得られた想定火口域（馬の背カルデラ）直下の3次元地下比抵抗構造を震源分布等と併せて解釈することにより、蔵王山における水蒸気噴火発生の場合となる浅部熱水系の描像を明らかにし、切迫性評価の高度化に資する知見と蓄積する。

d) 草津白根山における機動観測

令和3年度までに実施してきた機動観測により、草津白根山の北側および西側における地震活動の存在が明らかになった。本領域は、その深部にマグマだまりの存在が示唆されている重要地域であることから、令和4年度も引き続き本事業で構築した観測網の運用を継続する。蓄積されたデータに、機動観測として令和3年度までに追加設置した現地収録点とを併せて解析を進め、同地域の震源分布をより詳細に示す。一方、同火山南側に対応する本白根山の地震活動が低下している。機動観測を継続することで、震源分布の検討に必要なイベント数の確保を目標とする。

3次元地下比抵抗構造モデルについては、令和2年度までに本事業で取得したデータならびに既存観測点との統合解析を行い、草津白根山のマグマ-熱水系の地下構造がほぼ明らかになっている。本年度は、この結果を投稿論文としてまとめることを目指すことに加え、上記地震活動が見られる北側および西側では、観測点が少ないため追加観測を検討する。また、令和2年度に本白根山周辺で取得した2018年噴火口周辺でのAMTデータの解析を進め、投稿論文としてまとめることを目標とする。

e)霧島火山における機動観測

1)霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

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。地震計、傾斜計については携帯電話通信網を用いたテレメータによりリアルタイムで収録する。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・空間変化を検出して、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る。これらに基づき、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

また、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。これまで蓄積してきた火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むように新たに観測点を設置することで、深さ20km程度までの地下比抵抗構造を高い空間解像度と信頼性で推定する。

2)霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

現在も地表の高温域が存在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連続観測を実施する。上記（1）と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火や切迫度評価に資する情報を獲得する。

3)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

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究（地震、地盤変動、地下比抵抗構造）を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学および岩石学的な情報を取得するため、霧島山周辺で必要な地質調査を行う。取得した試料の分析および過去の研究のレビューをまとめるための研究支援員を雇用する。

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、レシーバ関数のインバージョン解析を引き続き実施する。また、2017年までに実施した機動観測で得た波形データおよび定常点で得られる長期間の観測波形を用いて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ガスや熱水を供給する経路となる亀裂系の時空間変化について解析を行う。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、湧出水の温度・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。

g) 富士火山における機動観測準備

次年度に予定されている富士山機動観測の観測用地選定などの準備をすすめる。

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、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画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あるいは緊急観測に協力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 4 年度は、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を継続する。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

前年度までの開発状況をふまえ、令和 4 年度は以下の項目を実施する。

i) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

これまで開発してきたポストプロセッサ／プリプロセッサ等の、研究論文での公表や、パブリックな開発プラットフォームサイトでの公開に着手する。また、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う。それにあたり、樽前山、十勝岳、草津白根山など、活動火口浅部の比抵抗構造が既知の火山を対象に、過去に起きた unrest 事象の再現を試みる。これらの業務補助のために、北海道大学および東京工業大学でリサーチアシスタントをそれぞれ 1 名雇用する。

ii) 坑井データの読取と整理

比抵抗と浸透率の定量的・経験的關係を抽出するために、過去の地熱ボーリングの公開データ（報告書等）の読取を行う。読み取った情報はデジタルデータとして整理し JVDN 等で共有する。また、これまで整理したデータを用いて、比抵抗分布から浸透率分布の候補を半自動推定する部分の開発を始める。ここで推定する浸透率分布は、項目 i) のシミュレーションの初期構造として用いることを想定している。この業務補助のために、北海道大学で項目 i) とは別のリサーチアシスタント 1 名を雇用する。

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。今年度は、箱根、伊豆大島や三宅島などにおいてこれまでの地震観測で得られた地震波形記録及び手動による検出記録を教師データとし、機械学習アルゴリズムにより連続波形記録から自動で P 波や S 波の立ち上りを識別し、火山性地震の検出並びに震源・マグニチュードの推定を行うシステムの開発を行う。さらに、検出された地震に対して、波形相関処理により得られた走時差データを用いた、高精度相対震源決定を実施することにより、高分解能な地震活動の描像を得ることにも取り組む。霧島火山などを対象にこれまで取得された地震観測データに開発したシステムを適用し、手法の妥当性を検証するとともに改良を加える。システムを動作させる計算サーバおよび解析用データ・解析結果を保存するデータサーバを導入する。

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽山とその周辺の地震計で得られた波形データから火山性微小地震を自動検知し、データをリアルタイムに整備する。また、御嶽山地域にある名古屋大学御嶽山火山研究施設と共同してデータの信頼性を検証する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者自身が無人機（ドローン）を用いた観測計画の立案、運航、測定、および解析までを一貫して実施する仕組みを確立させる。具体的には、これまで開発してきた多成分ガス測定装置を用いた遠隔火山ガス組成比の測定を、草津白根山や霧島硫黄山、伊豆大島三原山、有珠山などの各火山を候補として実施する。草津白根山の活動活発化が認められた場合は、湯釜火口湖の湖水遠隔採取を機動的かつ安全に実施する体制を維持する。空中赤外線観測については、機体振動の影響を抑制するための機材改修を行い、風環境による測定値の不確定性を低減させる。

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・解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。地震波干渉法解析については、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適用を進め解析結果の蓄積を進めるとともに、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の検討を引き続き行う。また、連続解析の効率化のために、機械学習の応用についても検討を行う。

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、連続記録を安定して取得することが必要であるため、通信回線の冗長化等の観測システムの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

令和4年実施予定の伊豆大島における機動観測で利用するMT観測装置および地震データ記録装置を購入する。伊豆大島では、これまでに購入した機材と令和4年度に購入する機材とを併せて機動観測を実施する。

機動的な観測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。

e) 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。