

3. 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 課題 B 先端的な火山観測技術の開発

サブテーマ 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学・地震研究所	教授	森田 裕一	morita@eri.u-tokyo.ac.jp
同上	教授	大湊 隆雄	takao@eri.u-tokyo.ac.jp
同上	助教	小山 崇夫	tkoyama@eri.u-tokyo.ac.jp
北海道大学・理学研究院	教授	橋本 武志	hasimoto@mail.sci.hokudai.ac.jp
同上	准教授	青山 裕	aoyama@mail.sci.hokudai.ac.jp
東北大学・理学研究科	教授	三浦 哲	satoshi.miura.a7@tohoku.ac.jp
同上	准教授	山本 希	mare.yamamoto@m.tohoku.ac.jp
同上	助教	市来 雅啓	ichiki@m.tohoku.ac.jp
東京工業大学・理学院	准教授	神田 径	kanda@ksvo.titech.ac.jp
同上	講師	寺田 暁彦	terada@ksvo.titech.ac.jp
九州大学・理学研究院	教授	清水 洋	hshimizu@kyudai.jp
同上	准教授	松本 聡	matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp
同上	准教授	相澤 広記	aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	ryou@onken.odawara.kanagawa.jp
同上	主任研究員	行竹 洋平	yukutake@onken.odawara.kanagawa.jp
神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	tatsumi@diamond.kobe-u.ac.jp
名古屋大学・環境学研究科	教授	山岡 耕春	kyamaoka@seis.nagoya-u.ac.jp
鹿児島大学・理工学研究科	教授	中尾 茂	nakao@sci.kagoshima-u.ac.jp
気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	junmiyamura@met.kishou.go.jp
同上	火山機動観測管理官	宮下 誠	m-miyashita@met.kishou.go.jp

(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、霧島火山、箱根火山、俱多楽、三宅島、草津白根火山、蔵王火山、有珠火山、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 年間の年次実施計画（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、硫黄山周辺で地盤変動観測、地震計アレイ観測、電磁気観測を実施し、地震活動、地下比抵抗構造、地盤変動の圧力源の場所から、硫黄山浅部の地下の内部状況の把握に資するデータを取得し、地下比抵抗構造と震源域の関係について予察的な結果を得た。

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

2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根火山では、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、箱根火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火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

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、箱根火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火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、箱根火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火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（令和元）年度：

草津白根火山湯釜では、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した。同時に熱観測等も実施した。

前年度に引き続き三宅島における機動観測を継続した。三宅島では、広帯域地震観測を継続した。昨年度の解析により、地震活動が予想以上に活発であり、浅部に集中していることから、山頂火口の火口縁に 2 点、中腹に 1 点観測点を追加して、地震活動を解析した。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、平成 16 年に実施した MT 観測データを再解析し、地下比抵抗構造を推定した。最近の構造を知るため、全島的な規模で新たに MT 観測を実施した。

また、箱根火山、霧島火山での機動観測を継続し、それぞれ地下構造等の観測結果から火山切迫性評価に資する知見を得るために解析を進めた。さらに、次年度予定されている蔵王火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：

蔵王火山では、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壌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。機動的な広帯域地震観測、地殻変動観測、電磁気観測等を実施して熱活動の詳細を明らかにし、地下の流体供給路・破碎帯の分布から、想定される火口の位置を推定することを試みる。

前年度に引き続き草津白根火山における機動観測を継続する。また、次年度予定されている有珠火山での機動観測の準備を進める。また、活動が継続している霧島火山、箱根火山、三宅島においても規模を縮小して観測・解析を継続する。

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

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を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。

6) 令和3年度：

有珠火山では、平成33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てから噴火が開始するという現象が何度か再現しているが、1910年、2000年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約3日後に噴火、山頂噴火した1977年では約1日後に噴火するなど同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズムを解明することが、有珠火山の噴火切迫性評価に重要である。地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造を明らかにする。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壌CO₂）放出量についても測定を行う。

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

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

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

7) 令和4年度：

伊豆大島は前回の噴火から現時点で既に30年以上が経過し、平均的な噴火間隔（30～40年）に近づいている。火山性地震は山体膨張と極めて良い相関を持つという特徴があり、マグマ溜まりの状況把握と噴火切迫性を評価するために精度の高い地震活動の観測は有用である。また、前回の噴火では噴火の約3ヶ月前から間欠的な火山性微動が発生

し、その後連続微動となって噴火に至った。このようなことから、現在の状況及び将来の噴火時の緊急観測に備えるため、広帯域の地震計アレイ観測を実施し、地震活動度の時空間変化を捉え、火山内部の状態把握を行い、将来の噴火切迫度評価の際の基準とする。

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

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

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

8) 令和5年度：

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

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

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

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

9) 令和6年度：

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

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

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

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

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

10) 令和 7 年度：

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。

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

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

(e) 平成 31（令和元）年度業務目的

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

三宅島では、平成30年度から開始した広帯域地震機動観測を継続するとともに、既存観測点や追加した観測点のデータから、将来の火山活動の切迫性評価の際の比較対象となる現時点の三宅島の火山活動や地震活動に関する情報を抽出する。また、平成12年噴火により、マグマ溜まりと火口を結ぶ火道の状態が大きく変化し、噴火の様式に大きく影響を与える地下水の状況も変化したと考えられる。このことを考慮して、MT探査を行い、噴火後の地下比抵抗構造の時間変化の推定を試みる。

草津白根火山においては、平成30年1月の本白根山の水蒸気噴火を機に、湯釜の活動以外も含めて全山的な活動の切迫性評価が重要な課題になっている。そのため、草津白根火山周辺域にも強化した観測網を維持し、地震活動や地盤変動の状況を把握す

る。また、広域かつより深部までの地下比抵抗構造を推定するために、MT探査を実施する。

蔵王火山では平成24年頃に起こった深部低周波地震活動の活発化以降、火山活動が徐々に高まっており、噴火切迫性評価基準の検討が急がれる。令和2年度以降機動観測を予定しており、広帯域地震観測の計画策定と観測候補地点の選定、MT探査のための観測候補点の選定と許認可手続き等の準備を実施した。

霧島火山では、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進する。箱根火山では、これまでの観測データを整理し、より深部の地震波速度構造の推定を試みる。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを火山噴火切迫性評価に利用するため、即時的なデータ解析を目指した地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を継続して進める。上記のうち、開発がほぼ終わった地震計アレイデータ解析システムは、試験運用を進め、改良点を見つける。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、地下比抵抗構造を推定するための前処理支援ツール、3次元インバージョン解析手法の標準化を目指した開発、比抵抗構造から火山の内部状態を推定するための熱水流動をシミュレーションの利用を進める。他のシステムについては、基本設計を進め、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進める。

本課題を円滑に推進するため、同一課題のサブテーマ代表者会議を開催し、サブテーマ間の連携の強化を図る。本課題の参加者、研究協力者を集めたサブテーマ推進会議を開催し、事業の進捗状況の把握、次年度以降の実施計画の詳細を検討する。本課題で行う機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。令和元年度は、MT観測装置用コイルを整備する。

(2) 平成 31（令和元）年度の成果

(a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造の調査を、三宅島、草津白根火山、霧島火山及び箱根火山において実施した。三宅島では、詳細な震源分布の推定、噴火後の地盤変動解析、地下比抵抗構造の推定を行い、地震活動と地下比抵抗構造の関連や、前回の噴火から現在も活動している圧力源を火口南西方向に見出した。草津白根火山では、広域のかつ深部までの地下比抵抗構造の推定を行い、水蒸気噴火で重要な深部からの熱供給システムが解明されつつある。また、霧島火山、箱根火山ではこれまでの観測データを用いて解析を進め、噴火切迫性評価に資する情報の獲得に努めている。

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

本事業を包括的に推進するため、博士研究員の雇用やリサーチアシスタントの雇用を通して、火山人材育成コンソーシアムと連携をはかった。また、本課題の成果普及を目指し、これまでの成果を気象庁火山噴火予知連絡会で紹介し、気象庁職員と意見交換を行った。

(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) 三宅島における機動観測

i) 三宅島火山の 2000 年噴火後から現在までの活動から得られる情報

2000 年 6 月の三宅島火山の噴火では、6 月 26 日 18 時頃より地震活動が高まり¹⁾、島内に設置された傾斜計や GPS 観測網で顕著な地盤変動が観測された²⁾後、27 日には北西沿岸で海底噴火が発生し³⁾、震源が約 12 時間で島内から島外の北西方向に広がり、10 月上旬までの約 3 か月間の期間、三宅島から神津島・新島を結ぶ長さ約 20 km の帯状の地域で活発な群発地震活動が見られた。海底地震計を用いた解析では、これらの震源がほぼ鉛直の長い面上に分布していることが明らかになった⁴⁾。このような分布と、群発地震活動と同時に GPS により観測された広域の地盤変動から、大規模なダイク貫入が起こったと推定された⁵⁾⁶⁾。さらに精密な震源分布を推定することにより、このダイクを形成したマグマは三宅島直下のマグマ溜まりから直接供給されたのではなく、群発地震域下の少なくとも下部地殻より深い領域から供給されたことが明らかになり⁷⁾、この噴火では大規模なマグマ活動があったことが明らかになっている。

島外での活発な群発地震活動の最中に、三宅島では山頂が陥没する現象が起こった⁸⁾。山頂陥没は、7 月 6 日から 7 月 10 日までの期間、長周期の地震動を伴い、徐々に陥没が進んだ⁹⁾。また、山頂陥没に先行して、山頂南西部を圧力源とする長周期震動が発生した。噴火初期に三宅島島内の地震活動が山頂から南西に延び、その後北西に方向転換して島外に進展していったことと関連し、この領域には噴火活動に大きくか

かわるマグマ供給系が存在していた可能性が示唆されている^{10) 11)}。

山頂陥没の後、二酸化硫黄を中心とする火山ガスの放出がその後 10 数年にわたって続いた。大量の火山ガスの放出は、より深部からマグマ溜まりに供給された新鮮なマグマから、減圧により放出された揮発性成分（火山ガス）が山頂陥没により大きく開いた火道を通じて火口から大量に放出されると同時に、揮発性成分を放出したマグマが密度を増し、再度深部に戻ることににより新鮮なマグマと入れ替わるというマグマ循環が長い期間継続していたと考えられている¹²⁾。

このようなことから、2000 年三宅島噴火は、三宅島だけでなく神津島・新島を含むこの領域の地下深部の大規模なマグマ供給系が深く関与していると考えられる。一方、それ以前の噴火は、規模の小さな山腹割れ目噴火が主体で、島外に範囲が及ぶ大規模なダイク貫入が発生したという根拠もないため、2000 年噴火とは異なる機構で噴火したとも考えられ、今後はどちらの噴火様式になるかわからない。

次回の三宅島噴火の際には、どのような先駆現象からどのような活動に発展するかは、2000 年噴火後から現在までの火山活動の状態を理解することが重要であり、その情報から次回の三宅島噴火の切迫性評価のヒントが得られるものと期待される。ここでは、噴火後から現在までの地震及び地盤変動の推移を調査・解析した結果を示す。

三宅島では、2000 年噴火後の 2006 年頃まで山体は収縮し（図 1, (d)）、1 日あたり数千トンの二酸化硫黄ガスの放出が続いていた。その後、山体膨張に転じ、同時にガ

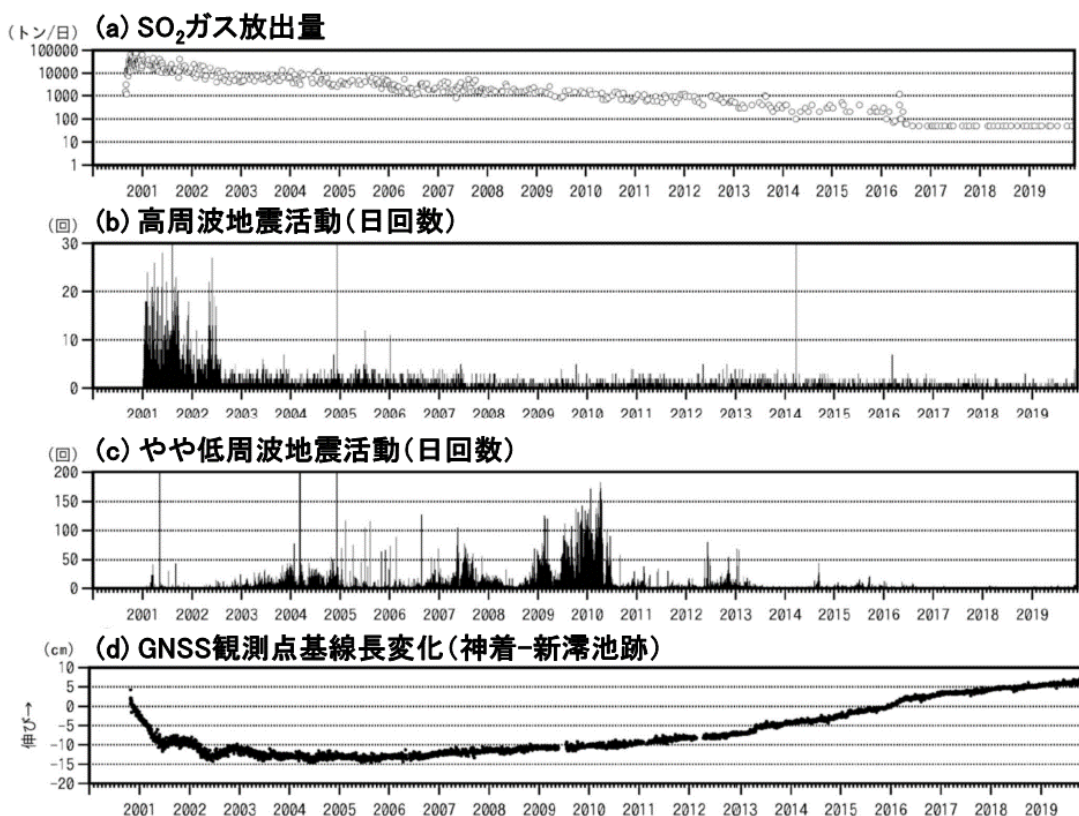


図 1. 三宅火山 2000 年噴火以降の活動。第 145 回火山噴火予知連絡会気象庁資料を加工。(a) 二酸化硫黄ガス放出量、(b) 高周波地震の日回数、(c) やや低周波地震の日回数、(d) GNSS 基線長距離変化（神着 - 新澤池跡）。

ス放出量が日量千トン程度まで低下した。その後、山体膨張が続くと同時に、火山ガス放出量が徐々に減少し、現在に至っている。2006 年以降は、山体膨張と火山ガス放出量が減少しているが、細かく見ると 2015 年末～2016 年半ばまでの期間、基線長距

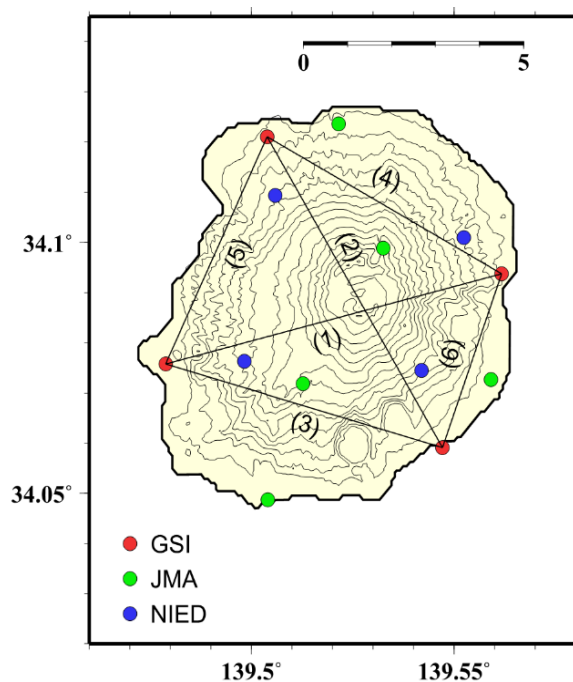


図 2. 三宅島島内の各機関の GNSS 観測点分布。赤は国土地理院、緑は気象庁、青は防災科技研の観測点を示す。図中の(1)～(6)は図 3 に示す基線長変化図を示す観測点組み合わせ。

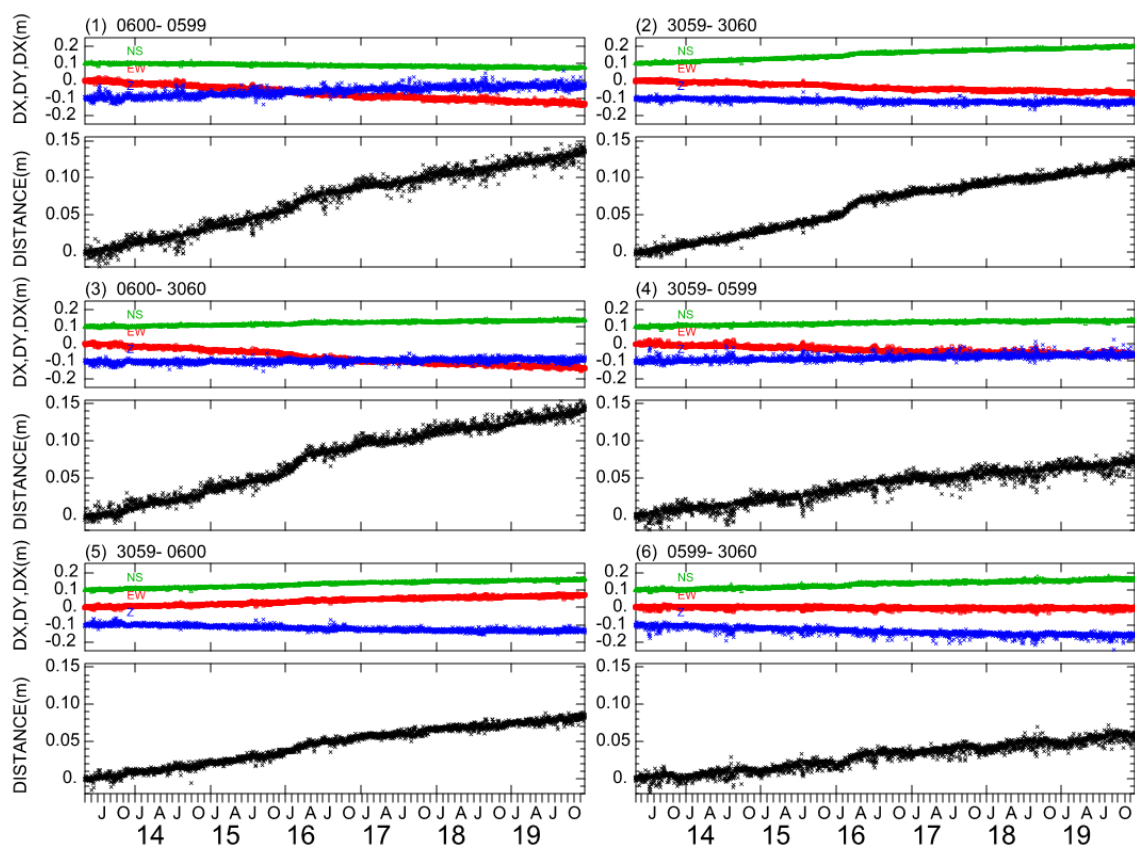


図 3. 三宅島島内の GNSS 観測点の基線長変化の例。図 2 で示した(1)～(6)の基線について 2013 年 5 月から 2019 年 12 月まで。いくつかの基線で、2015 年末から 2016 年半ばにかけて基線長伸長の加速が顕著に見られる。

離の伸長がわずかに加速した様子が見られる。また、それに同期して火山ガス放出量が急激に低下している。

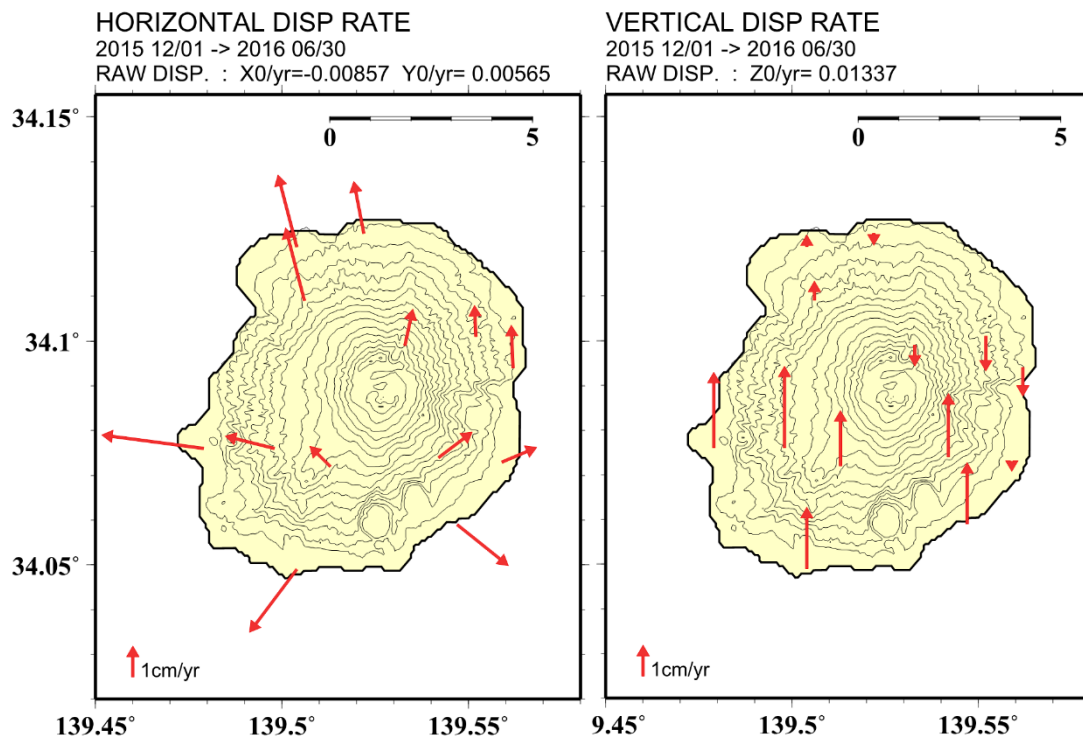


図 4. 2015 年 12 月～2016 年 6 月の GNSS 観測による三宅島の変位速度（年換算）。
左：水平変位速度、右：垂直変位速度。

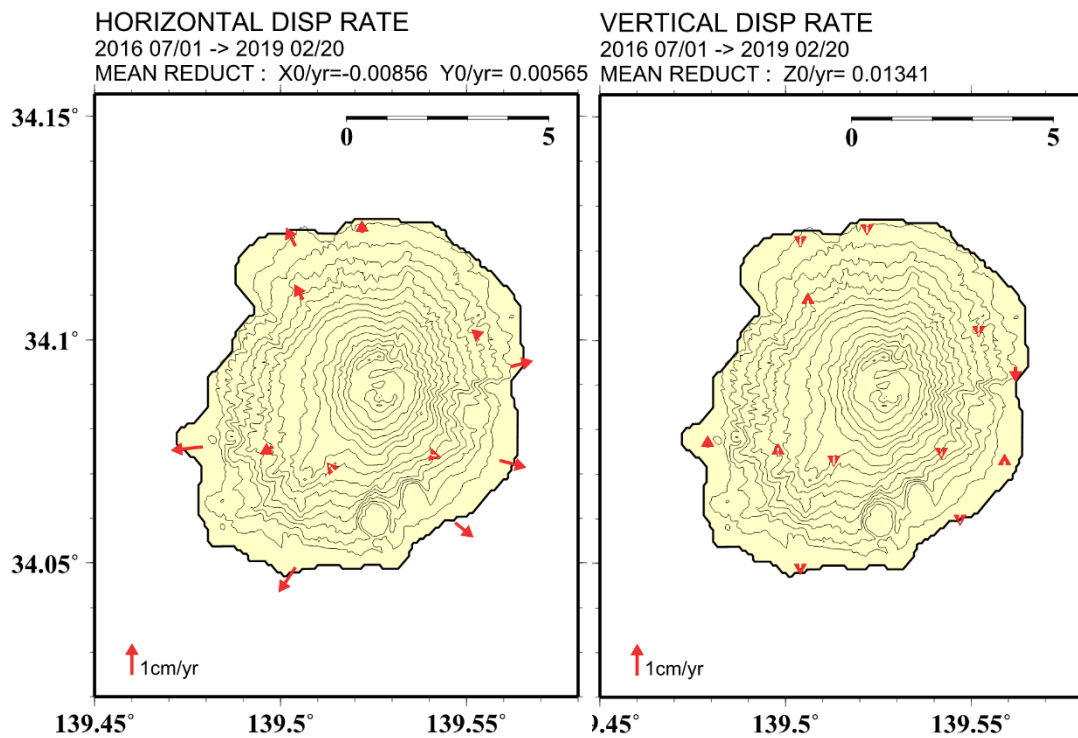


図 5. 2016 年 7 月～2019 年 2 月の GNSS 観測による三宅島の変位速度（年換算）。
左：水平変位速度、右：垂直変位速度。

これを詳しく解析するため、三宅島島内にある気象庁、国土地理院、防災科学技術研究所が設置している GNSS 観測点の生データ（RINEX データ）の提供を受け、三宅島周辺広域の観測点も加えて BERNES5.2 を用いて再解析した。図 2 に三宅島の GNSS 観測点の分布を、図 3 に再解析結果の一部として、図 2 で示した 6 基線の基線長変化を示す。この図からも 2015 年末から 2016 年半ばまでの期間は(1)、(2)、(3)及び(5)の基線長距離の伸長の加速が見られ、特に(2)と(3)の基線で顕著に見られる。この期間の変位の原因を探るため、変位の空間分布を求めた。三宅島に限らず日本の火山の地盤変動を推定する際には、日本周辺でのプレート運動の影響を考慮する必要がある。ここでは、三宅島島内の火山活動を起源とする局所的な変位量を推定するため、島内観測点の平均値が不動であると仮定して、島内の各観測点の変位を推定した。

図 4 に伸長速度が増加した 2015 年末から 2016 年半ばまでの期間の変位速度分布を、また比較のためにそれ以降のものを図 5 に示した。図 4 の期間の変位速度は、図 5 の期間に比べ、水平成分で数倍、垂直成分で 10 倍程度大きい。また、図 4 の期間では、変位速度分布に局所性が顕著に見られる。水平変位速度が放射状であることから、三宅島の地下で増圧を引き起こす現象が起こったと類推され、さらに垂直変位速度の分布から三宅島南西部に力源があったと推定される。

三宅島の南西部は、2000 年噴火の際に、噴火初期の震源分布の広がる方向が山頂から始まり南西方向に広がっていたものが北西方向に急変した場所であることや、噴火直後の地盤変動データからこの周辺で走向の異なるダイクが交わっているモデルが提唱されていること、さらに 7 月上旬に発生していた超長周期震動の力源がこの周辺に存在している場所であり、2000 年噴火の際に何らかの大きな役割を果たした場所であると考えられる。噴火後 15 年以上経過した 2016 年前半において、火山ガス放出の急減に同期して、この周辺で増圧があったことは、今後の三宅島の活動を考慮するうえで重要な情報である。これについては、次節で考察する。

ii) 三宅島における地震機動観測

現在の三宅島における地震活動を詳しく評価する前に、少し長期間での地震活動がどのように変化してきたかを知ることは、現在の活動を評価するうえで重要である。そこで、三宅島島内の各機関の観測点の初動読み取り値が記載されている気象庁の検測カタログを利用し、本プロジェクトでの解析で用いた速度構造を用いて震源を再決定した。その際、観測点補正も考慮した。再解析期間は、気象庁の観測システムが現在のものとほぼ同じになった 2010 年 9 月から 2019 年 8 月までの 9 年間であり、その期間に 1541 個の地震の検測値がカタログに掲載されている。再決定した震源の分布を図 6 に示した。地震は少なくとも現在から過去 9 年間は、山頂陥没で広がった雄山火口の南半分の直下のごく浅部から深さ 2 km 程度まで、垂直の円筒状の領域に集中して発生していることがわかった。

地震活動度の時間変化を調べるため、MT 関係図を作成して図 7 に示した。地震活動全体では発生頻度に大きな時間変化がないように見える（図 7 下図）が、ごく浅部で発生する地震に限ると、大変興味深いことがわかった。震源の深さ 0.5 km 以浅の地震

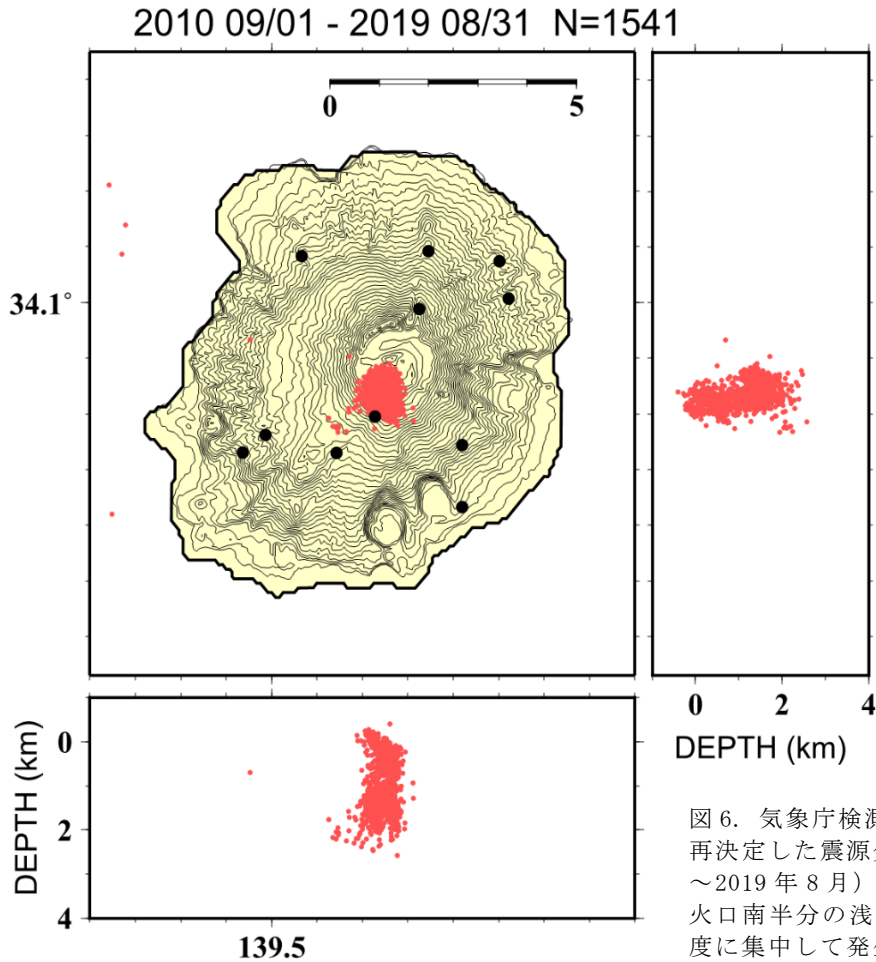


図 6. 気象庁検測カタログを用いて再決定した震源分布（2010 年 9 月～2019 年 8 月）地震は過去 9 年間、火口南半分の浅部から深さ 2 km 程度に集中して発生している。

活動度を見ると（図 7 上図）、2016 年半ば頃に一時的に活動が高まったことが明らかである。この時期は、前節で述べたように山体膨張が一時的に加速した直後、かつ火山ガスの放出が急激に低下した時期に一致する。この時期、火口近傍のごく浅部で発

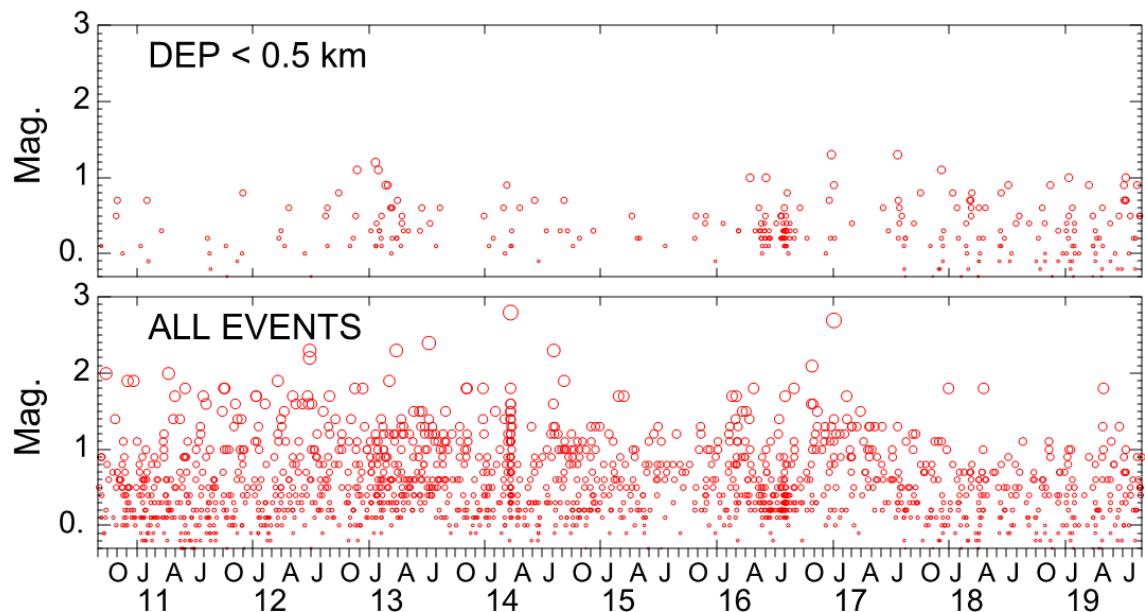


図 7. 庁検測カタログを用いて震源再決定した地震の MT 図。上：震源の深さ 0.5 km 以浅で発生した地震。下：すべての地震。

生する地震の活動が高まったことは大変興味深い。例えば、火口につながる火山ガスの流路の急激な閉塞に対応し、それによる封圧の増加によって地震活動が活発になった可能性が示唆される。

このような過去の地震活動を踏まえ、今後発生する次回の噴火の切迫性評価の高度化につなげるため、最近の地震活動を調査した。本プロジェクトにおいて機動的に地震観測点を増設し、三宅島の現在の地震活動を詳細に調査した。平成 30 年 12 月に三宅島に広帯域地震観測点を 3 点増設し、そのデータを既存の観測点のデータと併合して解析し、現在の三宅島における地震活動を調査した。その結果、雄山の火口南西縁に設置されている気象庁の観測点のみで記録されている地震が多数あることから、火口直下浅部で地震が多く発生していることが明らかになった。それを踏まえ、地震活動をさらに正確に捉えるため、令和元年度は火口縁に 2 点、雄山南側の中腹に 1 点の合計 3 点に現地収録型の地震観測装置を設置し、観測を強化した（図 8）。

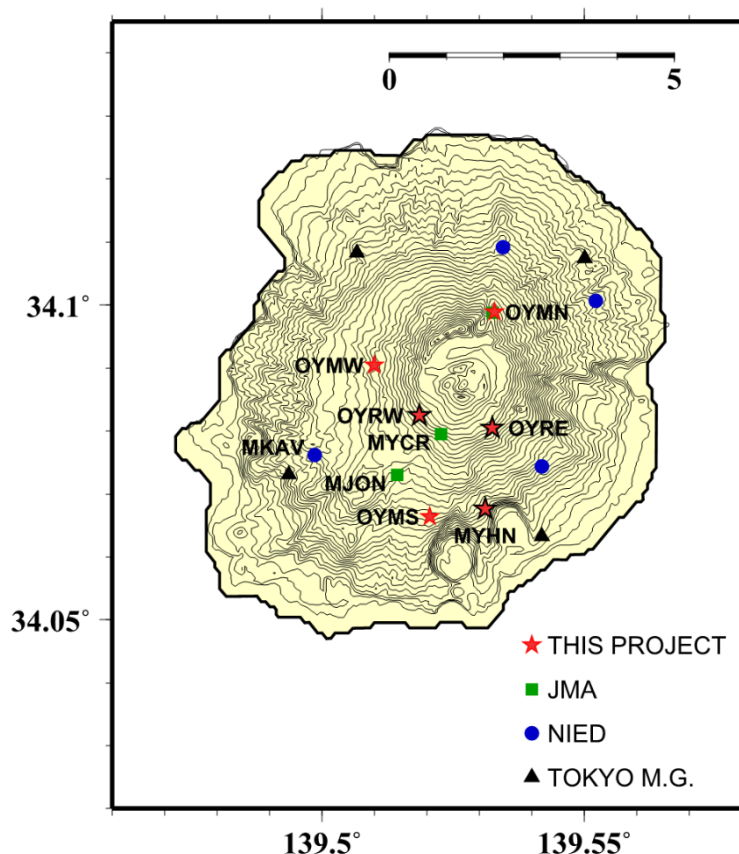


図 8. 本プロジェクトの三宅島機動観測で設置した地震観測点。赤星印で示した OYMN、OYMW、OYMS は平成 30 年 12 月から運用を始めた広帯域地震観測点。黒枠のある星印で示した OYRE、OYRW、MYHN の 3 点は短周期地震計と現地収録方式の地震観測装置で、令和元年 5 月から令和 2 年 2 月まで設置。図 9 で波形例を示す他機関の観測点名も図中に表示した。

三宅島で発生している地震は、他の火山で発生する地震と同様に、その波形の特徴からいくつかの種類に分類できる。今回の機動観測では、P 波及び S 波初動が明瞭な A 型地震、S 波の初動が判別しにくい B 型地震に分けられ、さらに B 型地震はその卓越周波数から比較的高周波成分が卓越する BH 型と低周波成分が卓越する BL 型に分けられる。これらの地震の典型的な波形例として初動部 4 秒間を図 9(a)～(c) に示す。これら地震の分類は、2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発の c) 火山性地震活動総合解析システムの開発の節で後述するように卓越周波数の情報を利用して

客観的に判別できる。

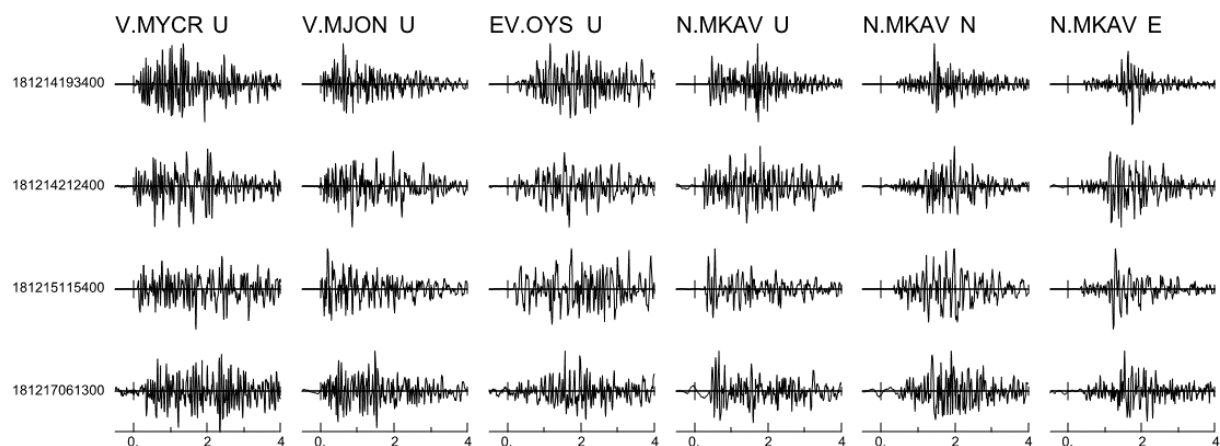


図 9(a). A 型地震の波形例。初動から 4 秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（3 成分）の各観測点で観測された 4 例を示す。

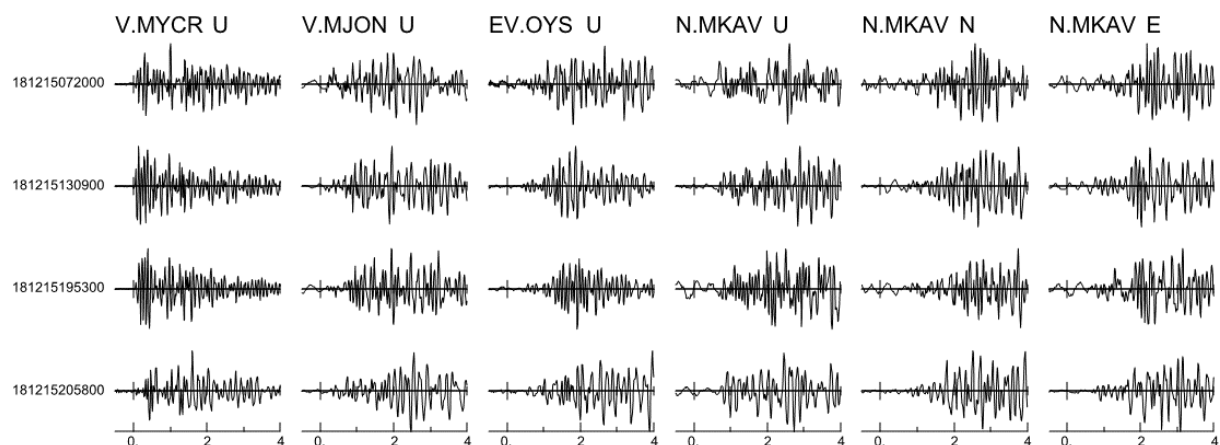


図 9(b). BH 型地震の波形例。初動から 4 秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（3 成分）の各観測点で観測された 4 例を示す。

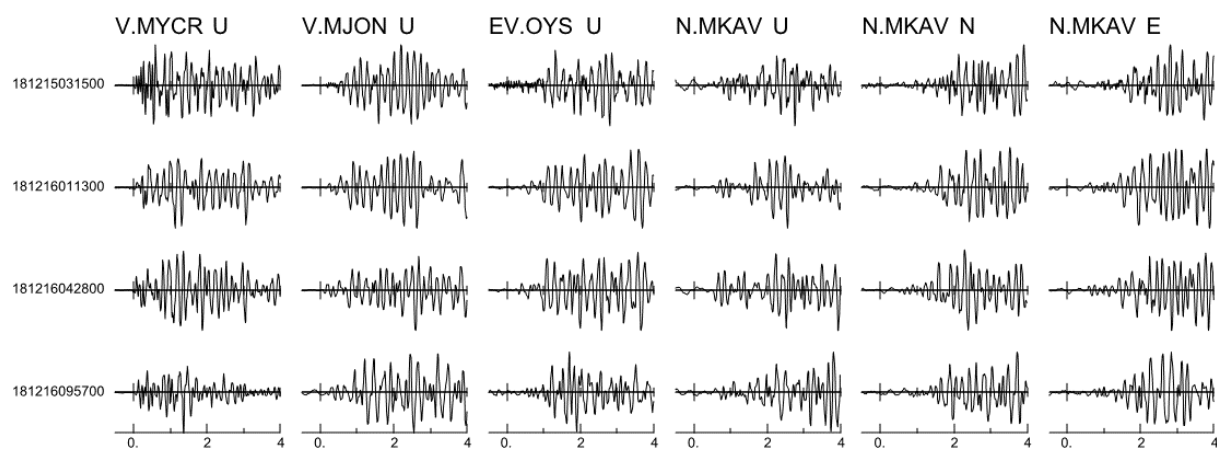


図 9(c). BL 型地震の波形例。初動から 4 秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（3 成分）の各観測点で観測された 4 例を示す。

上記のように波形の違いも考慮し、図 8 で示した他機関の観測点のデータおよび本プロジェクトの機動観測によって設置したすべての観測点を利用して、三宅島の地震活動を解析した。その際、速度構造は水平成層構造を用い、観測点高度と観測点補正値を考慮して震源を推定した。現在まで解析が終了しているのは、機動観測による地震計設置後（平成 30 年 12 月 14 日）から令和元年 9 月末までの約 9 ヶ月半の期間で、その間に震源の推定ができた約 950 個の地震の分布を図 10 に示す。同期間で気象庁の検測カタログに掲載されている地震は 70 余りであることから、約 10 倍の地震の震源が推定でき、火口縁に地震計を設置した効果もあり、検知能力が向上した。

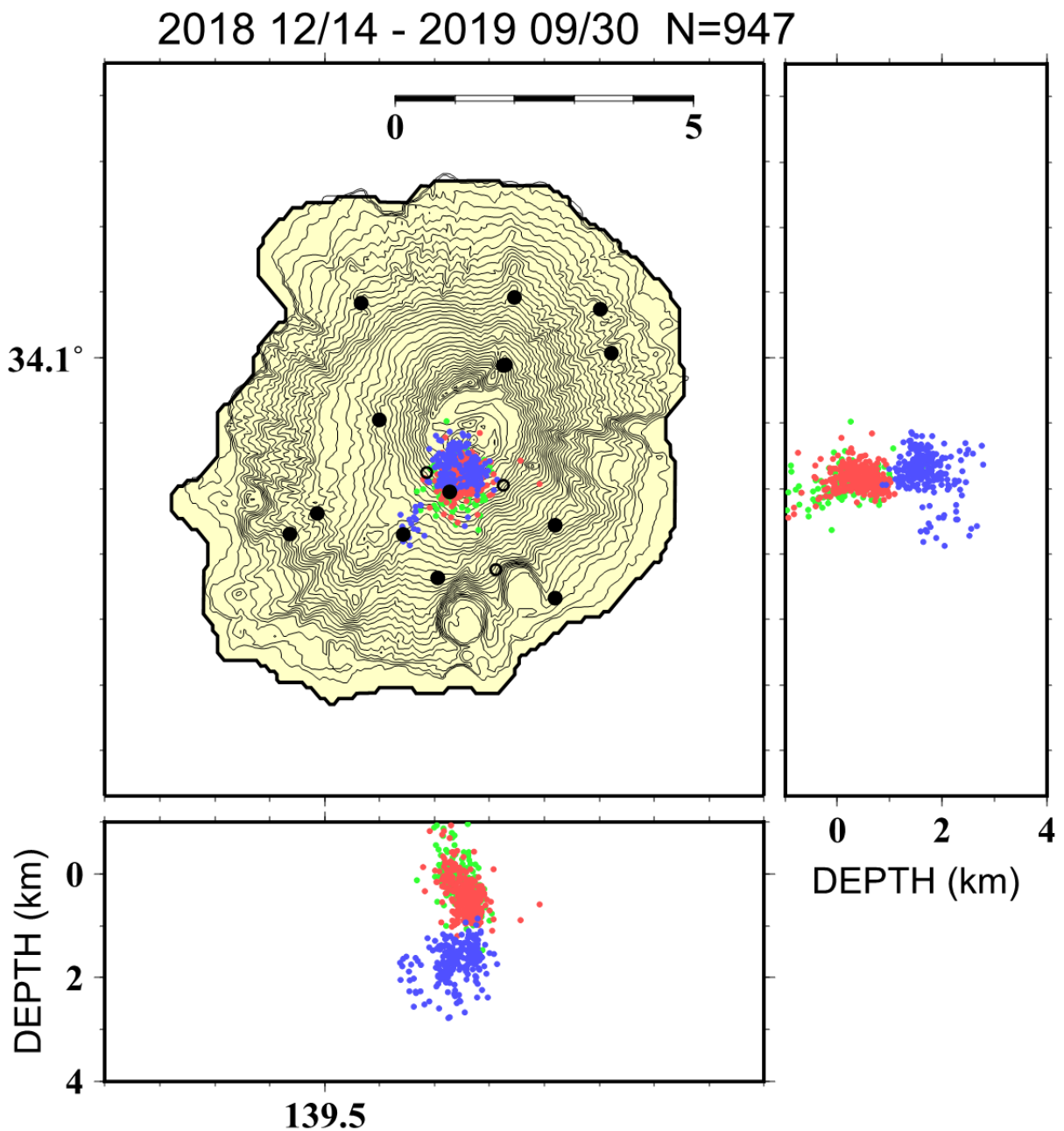


図 10. 本プロジェクトの機動観測により設置された観測点を用いて推定した三宅島の震源分布（2018 年 12 月 14 日から 2019 年 9 月 30 日）。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青は A 型地震の震源。

ここで推定された震源分布で最も特徴的なことは、A 型地震と BH 型と BL 型地震では、発生している震源の深さに明瞭な差異がみられることである。すなわち海拔下 1 km を境にして、それ以浅は BH 型、BL 型地震が発生し、それ以深は A 型地震が発生する。この境界は極めて明瞭である。これまで、色々な火山で、B 型地震の震源は浅く、A 型地震は深いということは良く知られているが、その分布の境界がこれほど明瞭である例はそれほど多くない。このような地震波形の変化が震源の深さにより明瞭に分けられる原因として、地下構造による可能性が示唆される。三宅島では MT 探査が行われ、その地下比抵抗構造の推定結果が本節の iii) で紹介されているが、その結果からこの深度で、低比抵抗の層から高比抵抗の層に急激に変化しており、低比抵抗層には地下水の存在が推定されている。もし、三宅島火口直下のごく浅部の地震が、2000 年噴火の際の山頂陥没の際に作られた多数の亀裂の再活動により発生しているとすれば、多くの火山で見られるような火山流体の動きによって引き起こされる低周波振動が発生する可能性や、地下水の存在により既存の断層面の摩擦力の低下が起こり、応力降下量の小さな地震を発生する可能性が考えられる。このような機構で、地下水量の多い火口直下浅部で低周波の地震が多く発生するとも考えられる。

更に、A 型地震の分布をみると、火口内南側直下の BH 型及び BL 型地震の発生領域の直下だけでなく、そこから南西側に延びる配列もみられる。A 型地震の震源分布を精度よく推定するため、DD 法¹³⁾により、震源再決定した。図 11(a)に再決定前の A 型地震の震源分布、図 11(b)に DD 法により再決定した結果を示す。全体としての特徴は大きくは変わらないが、火口直下の深央分布の中央部の空白域が明瞭になったことと、火口直下の震源の集中する箇所から南西方向に延びる線状の分布がより明瞭に見られるようになった。しかも、このような震源の集中する場所から震源が伸びる方向は、南西方向のみであり、他の方向には見られない。このような線状分布は、ダイク貫入現象等の局所的な応力の集中が起こることが原因と考えられ、火口から南西側へ延びるクラックの存在を類推させる。

これまでに見てきた 2000 年噴火直後の震源分布や地盤変動から推定されたダイク貫入の屈曲域の位置、山頂陥没の直前に見られた長周期震動の力源の位置、2015 年末から 2016 年中頃まで観測された地盤変動の一時的な加速を引き起こした応力源の位置、最近の A 型地震の分布が火口から南西側に延びるクラックの存在を類推させることなどから、火口の南西側深さ数 km の地下に、マグマ溜まり等の三宅島の火山活動に大きく関与する領域が存在し、それが近年まで活動していることが明らかになった。このことは、次回の三宅島の噴火においても、この領域が噴火発生機構に大きくかわる可能性を示唆し、三宅島の活動の切迫性評価においては、火口領域のみならず、火口の南西側の領域の活動にも注目すべきであることを示している。三宅島における今後の噴火過程の研究を防災や研究に活かすための観測戦略の構築に重要なヒントを与える結果であると考えている。

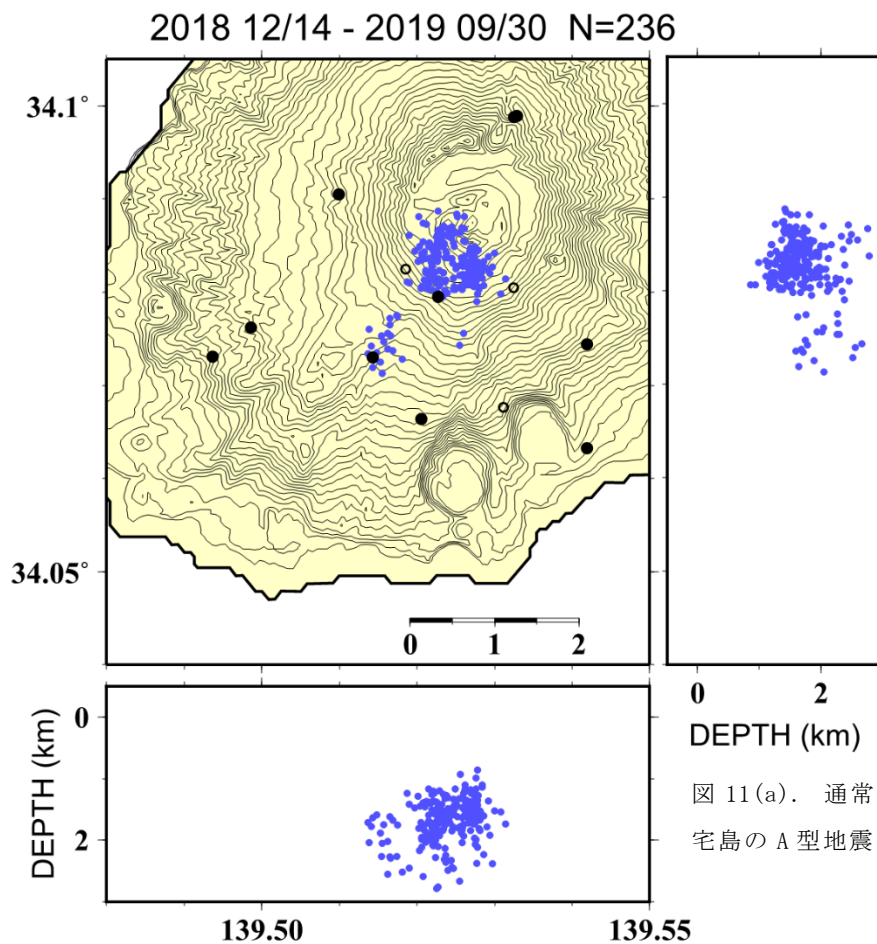


図 11(a). 通常の手法によって推定した三宅島の A 型地震の震源分布。

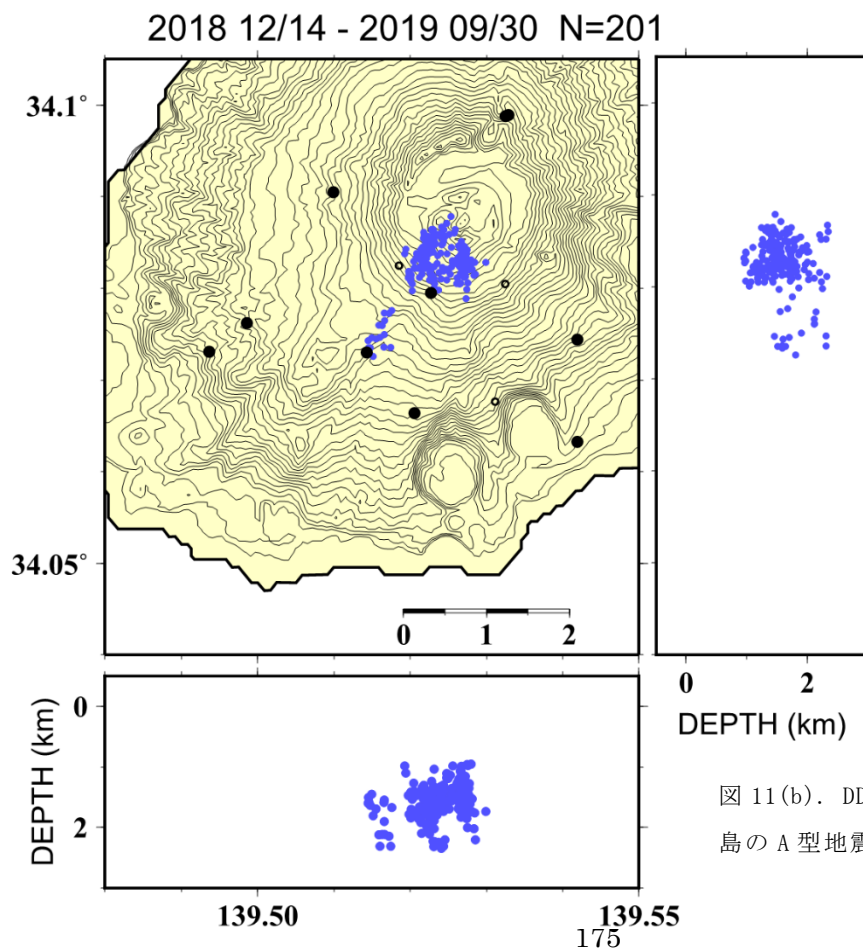


図 11(b). DD 法によって再決定した三宅島の A 型地震の分布。

iii) 三宅島における地下比抵抗構造の推定

三宅島では前回の噴火活動から約 20 年経過しており、近い将来に次の噴火が開始する可能性が高いと思われる。今後の活動推移予測のため、浅部での火山活動に大きく関与する火山性流体（熱水・マグマ等）が、現在地下にどのように分布しているかを把握することが重要である。比抵抗は温度や流体の量によって桁で変化する物理量であるため、地下比抵抗探査法の一つである地磁気地電流法（以下、マグネトテルリクス法：MT 法）は、このような目的に適した探査手法のひとつであると言える。

今年度は、昨年度に引き続き 2012 年度に取得済みの MT 探査データ（図 12）の再解析を進めた。当初の 1 次処理が不完全であることに起因して、昨年度推定された構造に不具合が生じる可能性があることから、今年度はノイズ処理を慎重に施した時系列再解析を行い、3次元比抵抗構造インバージョンにより地下の比抵抗構造を推定した。

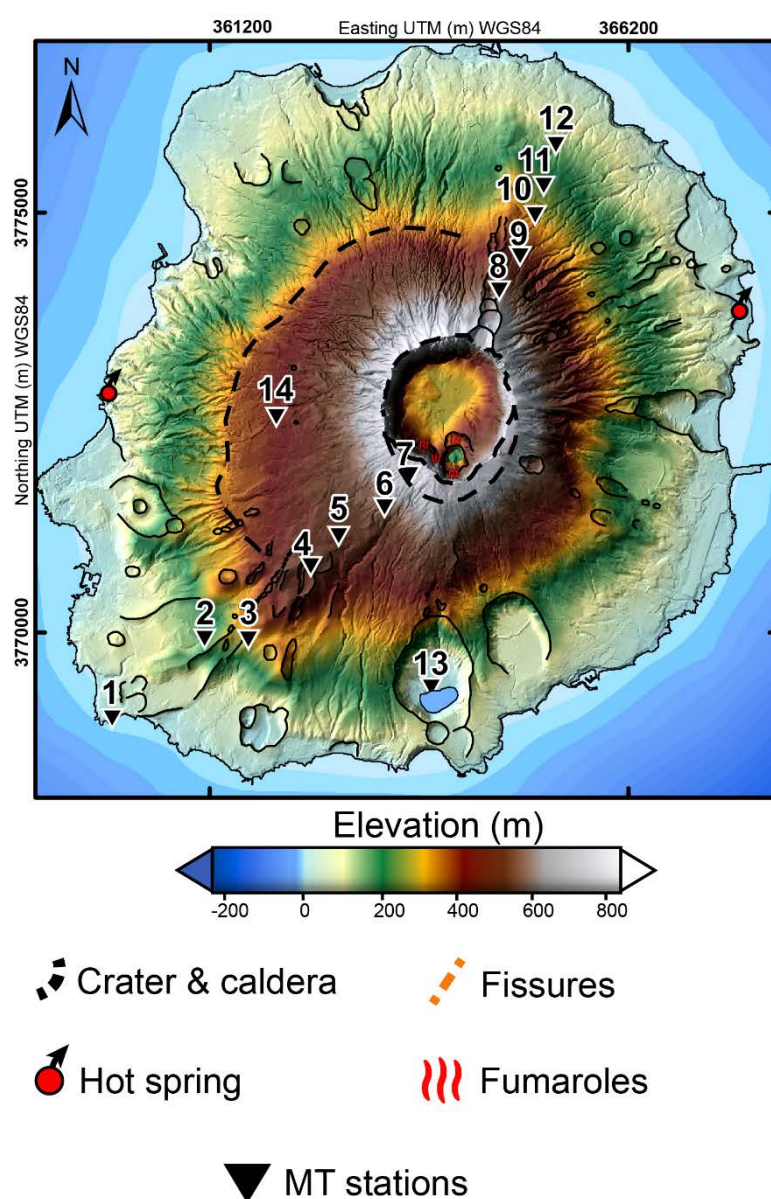


図 12. 2012 年実施の MT 観測の観測点配置図。主に北東—南西測線上で測定。

具体的には、元の時系列を精査してノイズが大きいと思われる時間帯のデータは事前に除く、外部磁気擾乱による電磁場シグナルが強い日時のデータのみを選択するなど、解析に用いるデータの SN 比の向上に努めた。また、時系列データから MT 周波数応答関数を推定する際には BIRRP 法¹⁴⁾を用いた。この計算手法は、時系列解析の際に統計的にロバストな処理を施すことで、異常値を効率的かつ有効に除去し、加えて遠方（本解析では鹿児島県のデータを利用）の磁場データを参照点として使用することでリージョナルなノイズを除去することができる (Gamble et al., 1979¹⁵⁾)。このような処理を行い、信頼性の高い周波数応答関数を取得することができた (図 13)。その上で再度 3 次元比抵抗構造インバージョン解析¹⁶⁾を行った。

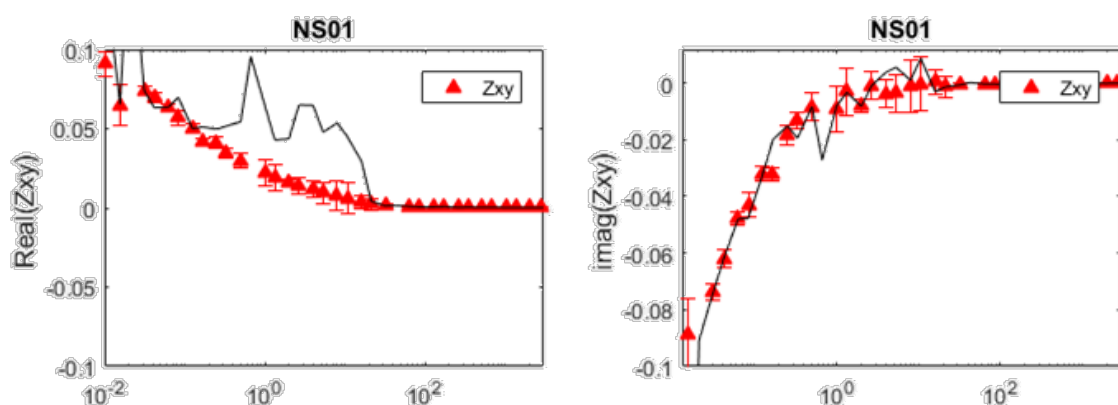


図 13. 改善された応答関数の例。黒線は以前の応答関数、赤線は再解析結果。

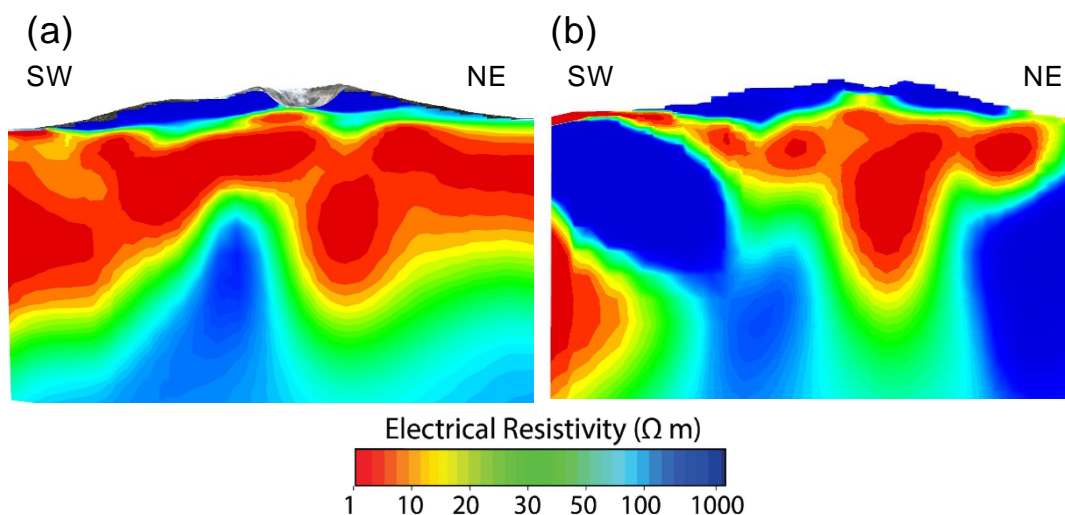


図 14. 三宅島の北東—南西断面の地下比抵抗構造。

(a) これまでの解析による比抵抗構造、(b) 再解析によって推定された比抵抗構造。

図 14 にこれまでの解析結果と今年度実施した再解析の結果を示す。これまでの解析結果では、観測点のない解析領域の両端に広い低比抵抗領域が見えていたが、再解

析の結果では見られなくなり、これらが見かけ上の虚像であることがわかった。再解析の結果から、三宅島の地下比抵抗には、以下の3つの特徴があることが確認できた。

- 1) 地表から深度数百 m(海水面より標高の高い所)に広く高比抵抗の領域が見られる。
- 2) その直下からおよそ海水面下約 1 kmまで低比抵抗層が広い範囲で認められる。
- 3) さらにそれ以深では比抵抗は高くなるが、山頂火口下のみは低比抵抗の領域が存在する。

この構造を別の側面から検証するため、山頂の下のやや深い領域に熱水源が存在すると仮定し、透水率の高い火道を通じて鉛直上向きに熱水が注入されるとその影響により水や温度・圧力がどのような分布をとるのか、混相流計算コード TOUGH2 (Pruess et al., 2012¹⁷⁾)を用いて熱水流動のシミュレーションを行った。シミュレーションから得られた地下水、温度、圧力分布を元に Archie の法則に則って比抵抗値に換算した構造を、MT 法から得られた比抵抗構造と比較した(図 15)。その結果、両者は極めて調和した構造となり、特に先に挙げた3つの特徴をよく再現できていることがわかった。

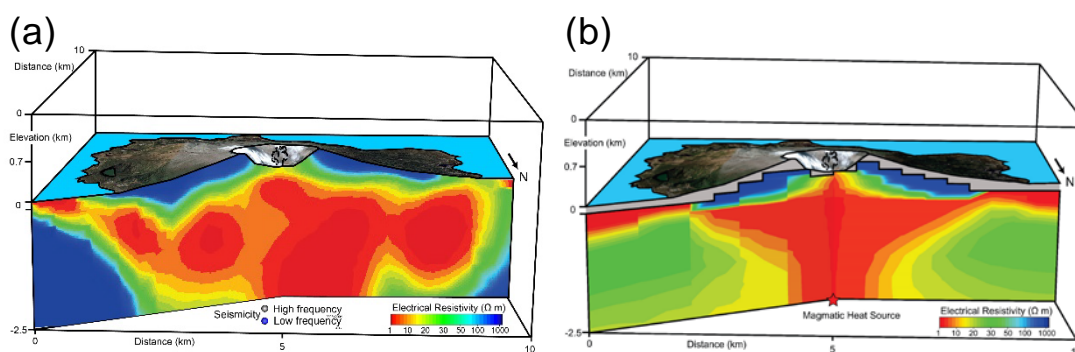


図 15. MT 観測より推定された地下比抵抗構造と透水率の大きな火道を仮定して熱水流動シミュレーションにより得られた比抵抗構造モデルの比較。(a) MT 観測から推定された地下比抵抗構造、(b)熱水流動シミュレーションによって推定された構造。

シミュレーションによる結果を参考に、地下比抵抗構造について、以下のことが言える。

- 1) 浅部の高比抵抗層は、不飽和層に相当するため高い比抵抗となっている。一方、火口直下は熱水が火道に沿って上昇してくるため低比抵抗になる。
- 2) 深部から上昇してきた熱水が飽和し、浅部では水平方向にも浸み出し広がるため、低比抵抗層が水平方向に広く分布する。
- 3) これより深部は熱水の循環が起こらず、相対的に高比抵抗になる、ただし熱水が注入される火口直下のみは低比抵抗となる。

ここで推定された比抵抗分布と前節で推定された三宅島の震源分布とを重ねて比較した(図 16)。その結果、火口直下の深部まで広がる低比抵抗領域を除くと、低比抵抗域と高比抵抗域が海拔下 1km を境に分布し、地震活動もその境界で A 型地震と B 型地震に分かれて分布しているように見える。

地下水の構造の時間変化を知るため、令和元年度にあらためて MT 観測を実施して、

2012 年の観測で推定された比抵抗構造が、どのように時間変化しているかを解明する計画で、今後令和元年度に得られた観測データの解析を進め、比抵抗構造の時間変化を抽出し、火山活動に起因する地下の状態変化を検出することを試みる予定である。

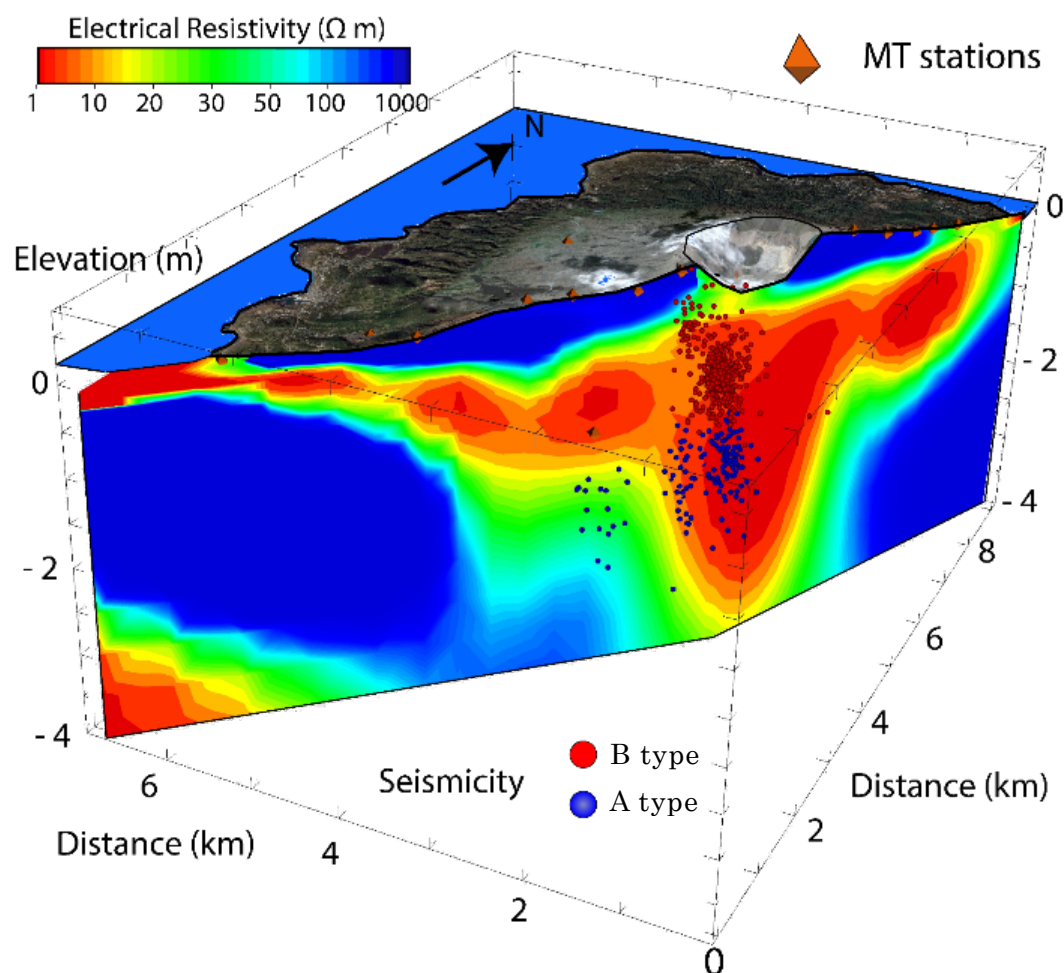


図 16. 三宅島下の震源分布 (2019 年) と比抵抗構造の比較。

b) 草津白根火山における機動観測

草津白根火山では、2014 年 3 月より火山活動が活発に推移し、近年の活動の中心である湯釜火口周辺での水蒸気噴火の発生が懸念されている。一方で、2018 年 1 月 23 日には、湯釜から 2 km 南に位置する本白根山の鏡池北・鏡池火口において、何の予兆もなく、およそ 1400 年ぶりに水蒸気噴火が発生した。本事業で実施する機動観測では、これまで手薄であった本白根山周辺も含めた草津白根火山全体で、i) 比抵抗構造調査、ii) 自然地震観測、iii) GNSS 観測を実施した。これらの観測補助および GNSS 観測データの解析のために博士研究員 1 名を雇用した。

i) 草津白根火山および周辺における比抵抗構造の推定

水蒸気噴火は、地表下浅部に形成される蒸気溜りが何らかの原因によって破裂することで発生すると考えられているが、その発生メカニズムは未だよくわかっていない。我々はこれまでに、水蒸気噴火を繰り返す火山において、噴火の駆動力となりうる熱水や蒸気の分布を予め把握しておくことを目的とし、活動的な火口周辺の浅部地下構造を明らかにしてきた^{18,19)}。その結果、電気の流れにくい(＝高比抵抗)領域の上に電気の流れやすい(＝低比抵抗)熱水変質した透水性の悪い岩石(粘土)層が存在するという共通した特徴を有する構造を持つことが明らかになった。このやや高い比抵抗値を示す領域が蒸気を多く含む蒸気溜りであり、水蒸気噴火発生 of 潜在的な準備領域ではないかと考えている。このような地下浅部の特徴的な構造は、深部に存在するマグマからの熱により地下水や火山性流体が熱せられ、地表付近まで移動することで作り出されていると考えられる。しかしながら、マグマとその上部に発達する熱水系の位置関係については、草津白根火山の場合、深さも含めて明らかにされていない。一方で、既存の定常観測網により、湯釜火口周辺の浅部構造や各種異常を示すデータは捉えられてきている。マグマ溜まりから異常データの発生源までの地下構造が精度良く推定できれば、草津白根火山の特徴的な噴火様式である水蒸気噴火の発生条件にも大きな制約を与えられる可能性がある。

2015 年～2016 年度には、本白根山を東西に横断する測線を中心に広帯域マグネトテルリクス (MT) 法調査を実施し、地下 10 km 程度までの地下構造を推定することを目指した。しかしながら、調査領域の広がり方が 10 km 程度であったため、深さ 4～5 km までの地下構造を精度よく推定できたにすぎなかった²⁰⁾。そこで本事業では、草津白根火山から半径 10 km の領域に調査範囲を広げ、深さ 10 km 程度までの地下構造を明らかにすることを目指し、最新の解析方法により 3 次元比抵抗構造の推定を行うことを計画した。

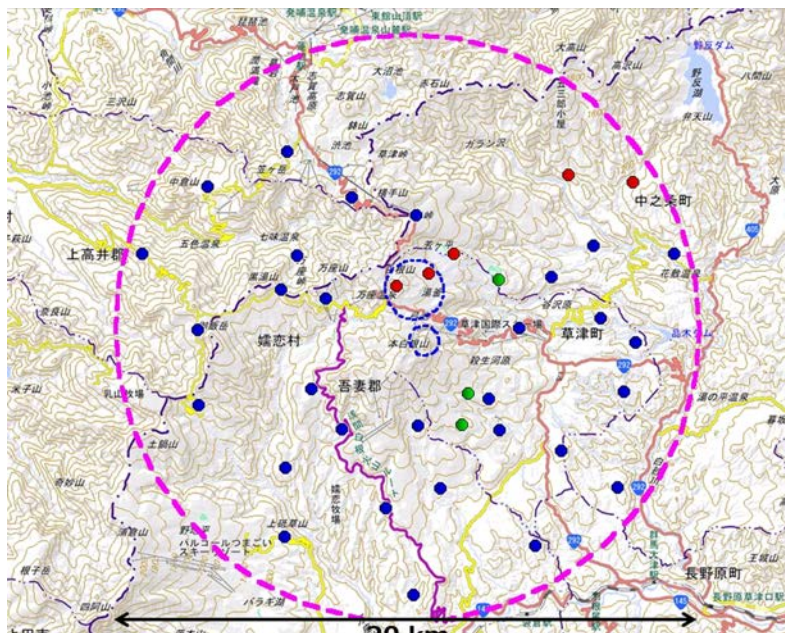


図 17. 2019 年度に草津白根火山周辺で実施した広帯域 MT 調査の観測点分布。青丸：東工大の監督のもと外注で実施した点、赤丸および緑丸：東工大が主体となり実施した点（赤丸：電場・磁場 5 成分の測定、緑丸：電場のみの測定）。青い破線は白根山（湯釜周辺）および本白根山で設定された警戒範囲（火口中心からそれぞれ半径 1km および 500m の範囲）。ピンクの破線は、草津白根火山から半径 10km の領域。

広帯域 MT 観測は、前年度に選定したほぼ全ての場所において実施した。図 17 に観測点分布を示す。データ取得は、2019 年 8 月 5 日～9 月 23 日の期間で、東京工業大学が主体となり観測を実施した点が 8 点（図 17 の赤丸および緑丸）、東京工業大学の監督の下で請負業者が実施した点が 30 点（図 17 の青丸）の合計 38 点で行った（図 18）。測定には、本事業で購入した機器に加えて東京大学地震研究所の共同利用の MT 観測装置（Metronix Geophysics 社製 ADU-06、07、07e）およびインダクションコイル（MFS-06、06e、07e）を複数台用いた。また、東京工業大学が主体として実施した観測では、直前に発生した GPS のロールオーバーの問題により所有する機材が使用できなくなったため、急遽、日鉄鉱コンサルタント(株)から Phoenix Geophysics 社製の MT 観測装置（MTU-5A）2 台を借用して実施した。また、3 観測点については、NT システムデザイン社製の電場測定装置（ELOG-DUAL）を使用して電場のみの測定を行い、磁場データについては近隣の観測点のデータで代用した。電極には、ハンガリー製の非分極平衡電極である鉛一塩化鉛電極を用い、データの取得期間は、すべての観測点で概ね 3 日間またはそれ以上であった。



図 18. MT 法調査の様子。左上：ADU-07 による調査（芳ヶ平：KST204）。右上：Metronix 社製機材の動作確認テスト（静可山：KST214）。左下：MTU-5A による調査（湯釜西：KST208）。右下：ELOG-DUAL による調査（石津：KST218）。

図 19 に、観測期間中の地磁気擾乱を示す国立研究開発法人情報通信研究機構が公開している地磁気活動 27 日チャートを掲げる。これは、気象庁地磁気観測所で発表されている K インデックスを基に地磁気活動の程度を表現したものであり、27 日周期の回帰性が考慮されている。観測期間中に 2 回地磁気活動の強い周期があったが、そのほかの日ではそれほど強い活動があったわけではなく、MT 観測の信号強度とし

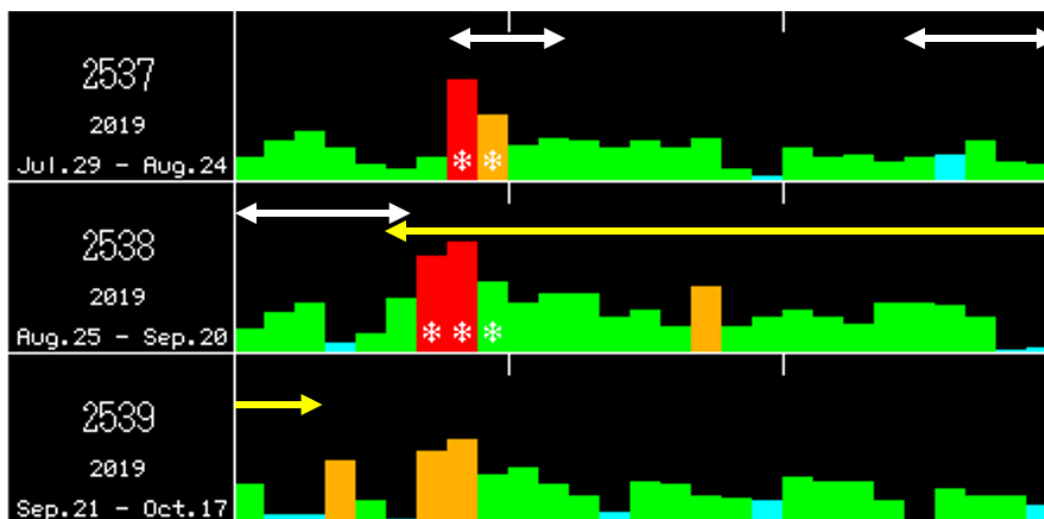


図 19. 観測期間中の地磁気擾乱の程度を表す地磁気活動 27 日チャート（情報通信研究機構の太陽地球環境情報サービス [http://hirweb.nict.go.jp/sedoss/geoact-j] より）。白矢印は、東京工業大学が MT 観測を実施した期間。黄矢印は、請負業者が観測を実施した期間。赤やオレンジの日ほど地磁気活動が高まったことを示す。

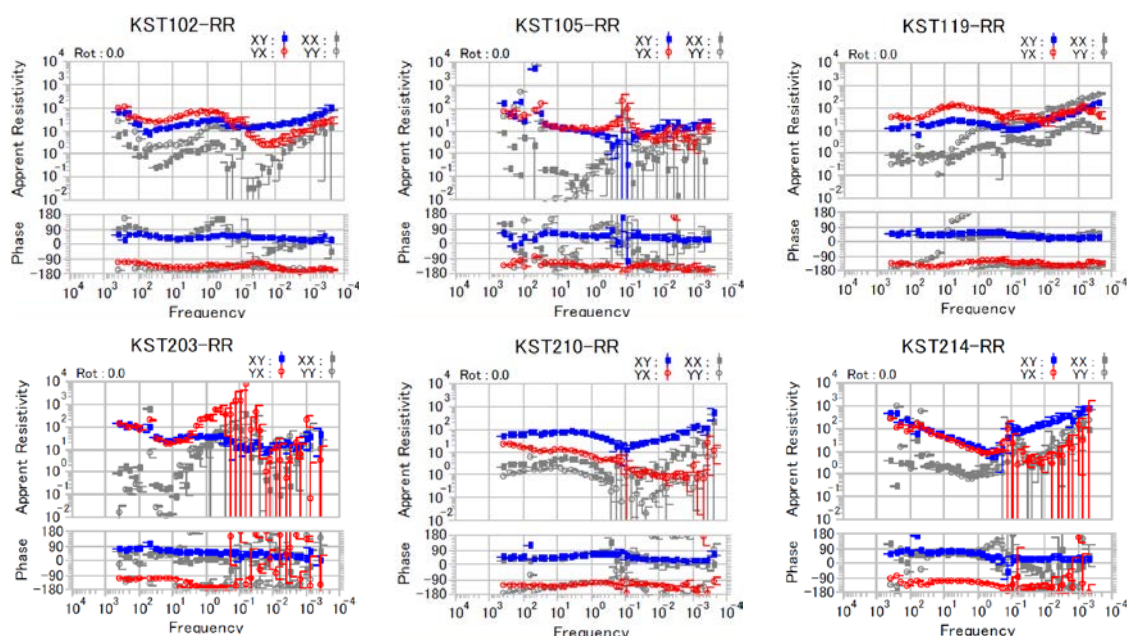


図 20. 測定データから推定された MT 応答関数（見掛け比抵抗および位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数を表す。KST102 は草津町の北の国有林内、KST105 は草津町郊外、KST119 は志賀高原、KST203 は渋峠、KST210 は万座温泉郊外、KST214 は草津町南部の静可山の観測点。青色、赤色がインピーダンスの非対角成分、灰色が対角成分から計算された見掛け比抵抗と位相を表す。

ては、低調な日が多かったことになる。図 20 には、測定された MT データの一部を示す。地熱技術開発(株)が山形県最上郡大蔵村に設置した観測点（草津白根火山から約 270 km）のデータを使用してリモートリファレンス処理した結果である。大まかな傾向として、草津白根火山の北側から西側（万座側）にかけての観測点では、良好なデータが取得できたが、東側の草津町から南にかけては、あまり質の良いデータが取得できていない。地磁気活動が低調であったことに加え、草津白根火山の南に鉄道が走っていることに起因すると思われる。なお、Phoenix Geophysics 社製の機材を用いて取得されたデータについては、日鉄鉱コンサルタント（株）が運用している岩手県和賀郡西和賀町の観測点のデータを使用してリモートリファレンス処理を行った。これらの解析には、米国ウッズホール海洋研究所の A.D. Chave 博士から提供を受けた解析ソフトウェア（Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing: BIRRP¹⁴⁾）を使用した。

本年度末の時点で推定されている MT 応答関数を用いて、草津白根火山周辺の 3 次元比抵抗構造モデルの構築を行った。現時点では全ての観測点のデータ処理が終わっていないため、ここで示したものは暫定モデルである。解析には、四面体メッシュを用いた有限要素法に基づくインバージョンコード **Femtic**²¹⁾ を使用した。図 21 に 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲（左）と観測領域のメッシュ（右）を示す。本白根山の山頂付近を原点にとり、最低周波数のスキンドプスを考慮して中心から±350 km の範囲を解析領域とした。地形データには、陸域については、全ての観測点が含まれる中心から半径 15 km の範囲では国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュデータを用い、その外側では陸域および海域ともに ETOPO1 データ²²⁾を用いた。インバージョンには、2015～2016 年に本白根山周辺で測定された 23 観測点のデータ²⁰⁾を含めた計 57 観測点の MT 応答関数（インピーダンス）4 成分および地磁気変換関数（ティッパー）2 成分を用いた。計算に用いた周波数は、64 Hz～0.0039 Hz の 14 周波数で、対数軸上ではほぼ等間隔になるように選択した。初期モデルとして、海水部分が 0.33 Ωm、陸域部分が 100 Ωm の半無限一様構造を与えた（図 21）。

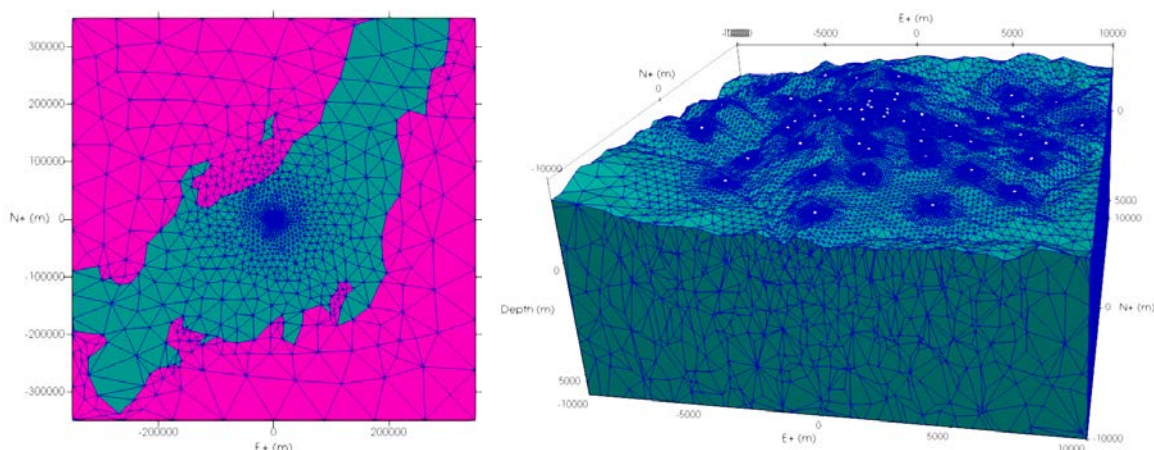


図 21. 左：草津白根火山の 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲。中心から±350 km の範囲をモデル化した。右：調査領域付近の四面体メッシュ（南側から）。白丸は観測点。地形をモデルに組み込み、観測点に近いほど、また地表面に近いほど細かいメッシュを設定した。

図 22～23 に 19 回目の反復計算で得られた 3 次元比抵抗構造モデルを示す。RMS ミスフィット値は、初期モデルで 19.0 であったものが 1.28 となった。草津白根火山の南側では、浅部から低比抵抗領域が広く存在し、海拔下 1-2 km までその傾向が見られる。本白根山～白根山にかけての西側では $1\ \Omega\text{m}$ 以下の特に低い値を示しており、北側の横手山方向へ伸びている。湯釜の東から北にかけては観測点密度が低いため、この低比抵抗体の存在範囲については十分な制約が与えられていないが、先行研究²⁰⁾において本白根山～白根山の下に分布する火山性流体の貯留層と解釈された低比抵抗体 C2 に相当すると考えられる。この低比抵抗体は、深くなるにつれ北側に分布して

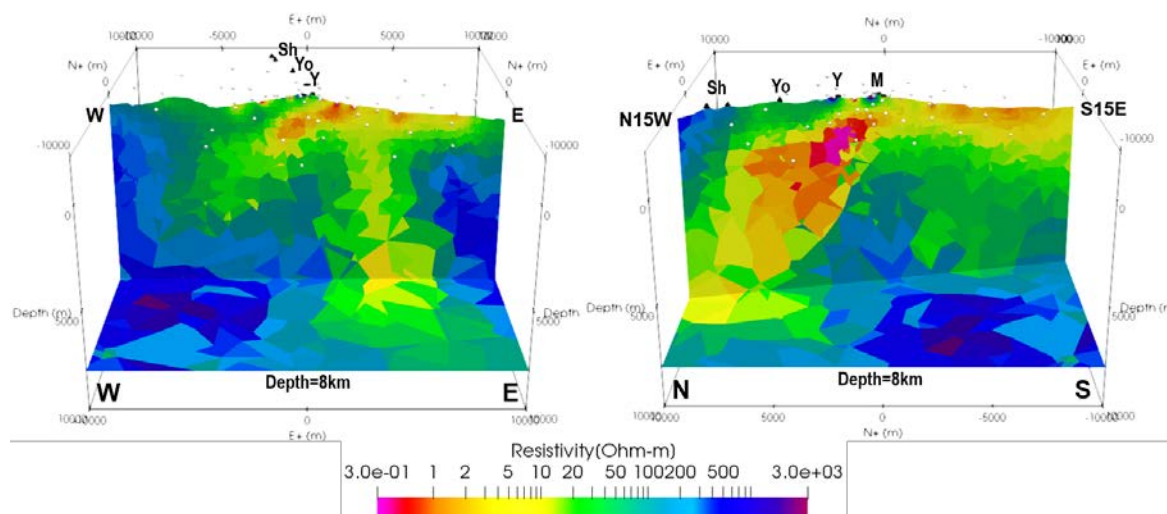


図 22. 草津白根火山周辺の暫定比抵抗構造モデル。左：本白根山山頂を通る東西断面。右：本白根山山頂を通る $N15^{\circ}W-S15^{\circ}E$ 断面。海拔下 8km の水平断面も併せて表示している。Sh：志賀山・鉢山、Yo：横手山、Y：湯釜、M：本白根山。白点は MT 観測点。

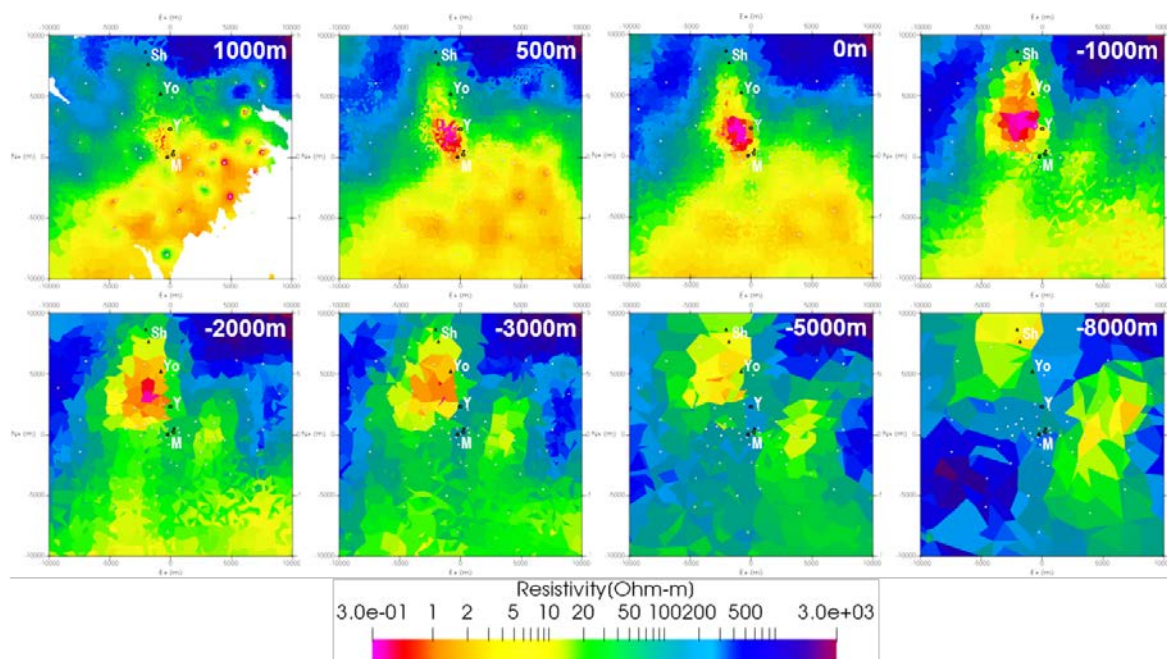


図 23. 草津白根火山周辺の暫定比抵抗構造モデル。標高 1000m、500m、0m、-1000m、-2000m、-3000m、-5000m、-8000 m の水平断面を示す。Sh：志賀山・鉢山、Yo：横手山、Y：湯釜、M：本白根山。白点は MT 観測点。

おり、海拔下 8 km では志賀火山の下に達している（図 22 右）。白根山（湯釜）の西から北西にかけては、広域の GPS 観測から深部に地盤変動源の存在が示唆されており、この圧力源に関係した構造が捉えられた可能性がある。また、本白根山の東側にも深部へ続く顕著な低比抵抗体が見られる（図 22 左）。一方で、本白根山直下の深部には高比抵抗領域が解析されている。今後、処理が終わっていないデータおよび令和 2 年度に取得予定のデータを用いて 3 次元比抵抗構造モデルの構築を進め、これらの構造が草津白根火山のマグマ供給系あるいは熱水系とどのような関係にあるのか、解釈を行っていく予定である。

ii) 草津白根火山および周辺における地震観測

草津白根火山の深部圧力源が存在すると思われる山体西側の震源分布の詳細を検討するために、2018 年度に地震計を 4 か所に設置した。さらに防災科学技術研究所の Hi-net 観測点のデータも利用し、草津白根火山の定常観測網のデータと統合処理する仕組みを構築した。図 24 に臨時観測点の写真を示す。2019 年度は、通信が不安定であった山田牧場に NTT 光回線を敷設した。また、干俣北には傾斜計を新設して試験観測を開始した。いずれに観測点でも、短期間の機器トラブルによる欠測を除いてほぼ連続的に観測データを取得している。

2019 年以降、草津白根火山西方の地震活動は静穏化している。ここでは、2018 年 11 月に発生した群発地震の震源分布を示す（図 25）。今回は、気象庁による一元化震源



図 24. 臨時地震観測点。(a) 山田牧場 YMBJ、(b) 干俣北 KSH、(c) 山田スノーパーク YMSP、(d) 志賀笠越 (SGKG)。これら地点の位置は図 25 を参照のこと。

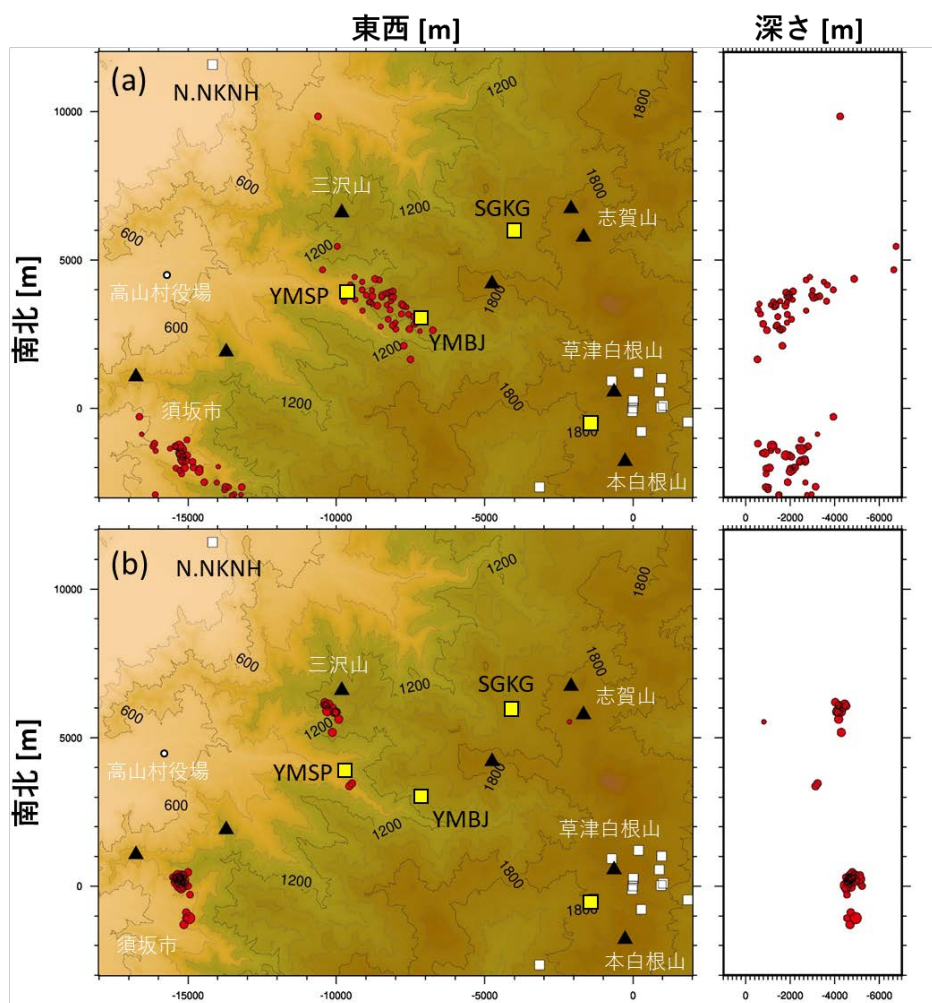


図 25. 2018 年 11 月の草津白根火山西方の地震活動。(a) 気象庁地震カタログ（一元化震源）による $M < 1.5$ のイベント。(b) 同じイベントについて、4 か所の臨時点（黄色四角）と既存点（白四角）を統合処理して手動で決定した震源。

カタログ（図 25(a)）において、マグニチュードが 1.5 以上の地震で、YMBJ、YMSP、SGKG および N.NKNH の 4 観測点で P 波初動が読み取れているイベントについて手動で検測を行った。P 波と S 波の残差は 0.02 および 0.1 秒前後である。その結果、震源カタログでは水平方向・鉛直方向ともに数 km にわたって広く分布していると思われていた震源は、三沢山および須坂市の 2 か所、深さ 4 km 前後に集中して分布していることが明らかとなった（図 25(b)）。また、YMSP 直下の深さ 3 km 付近にも地震活動が認められることが明らかになった。

本観測と同時に、同地域に湧出する温泉水についても調査を行った。本地域の温泉水は SO_4 の卓越する東側と Cl の卓越する西側に大別され、特に三沢山南麓や YMSP 付近では高い Cl 濃度を有する。それら陽イオンの組成比から、当該地域の温泉水は化石海水型の熱水（海水が地層中に長い期間にわたり閉じこめられてできた温泉）を含むことが示唆されている。東側の温泉については、その湧出温度や硫黄安定同位体比の特徴から、火山ガスの関与が推定される（図 26）。

本観測により、草津白根火山西方で 2018 年に発生した群発地震の震源域は、白根

火砕丘から 12 km 離れており、空間的に孤立していることが明らかである。その一方で、この地域の深部には草津白根火山に関係する深部圧力源が推定されている。2018 年の高山村付近の群発地震は、2018 年 9 月の草津白根火山白根火砕丘浅部膨張と約 1 週間程度の時間差で開始した。さらに、2019 年 9 月頃に Cl 濃度が高い一部の温泉水の組成に変化が認められている。

この地域に酸性火山ガスを放出する噴気孔などは認められず、温泉水の水質は、本質的には化石海水である。また、群発地震の震央は、化石海水の関与が強い温泉の湧出領域に一致する（図 26）。草津白根火山西方の深部マグマだまりの増圧により、当該地域の地下に伏在する化石海水由来の熱水が上昇し、それが群発地震や温泉水形成に関与したものと考えられる（図 27）。

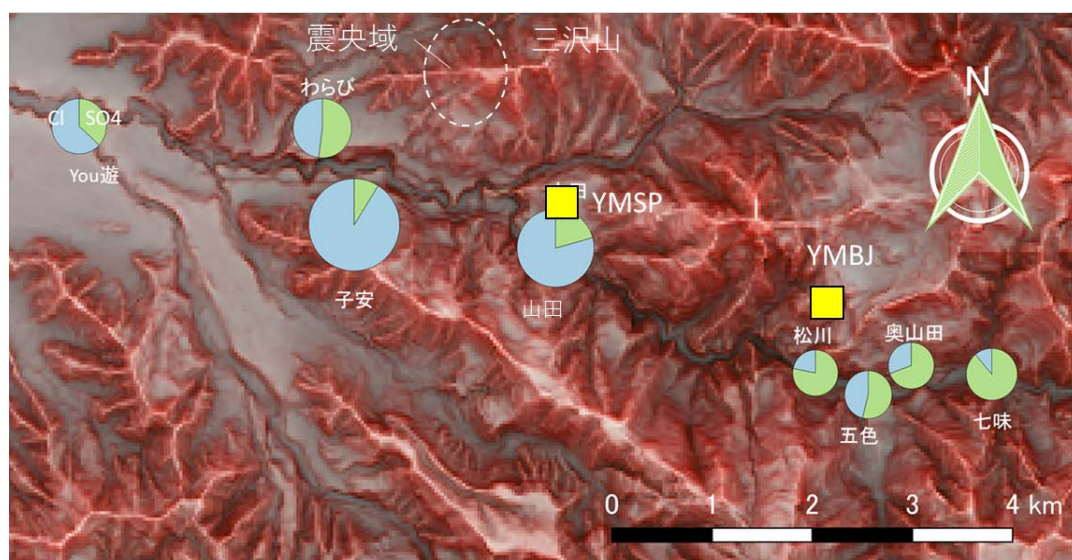


図 26. 高山村温泉群の組成の特徴（円グラフ）、地震臨時観測点（黄色四角）および震央域（白破線）。各温泉に付した円グラフにおいて、ベージュと水色はそれぞれ SO_4 および Cl 濃度を ppm 単位で示し、円グラフの半径は SO_4 と Cl 濃度の総和に対応する。赤色立体図は国立研究開発法人産業技術総合研究所が提供する地質図 Navi（アジア航測株式会社作成）から引用。

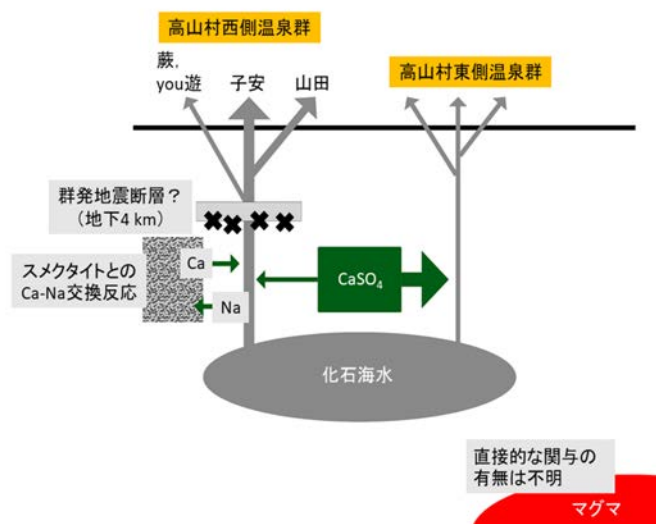


図 27. 草津白根火山西方における熱水系概念図。西側では、海水組成が Ca-Na 交換反応により変質している。東側では温度が高く、蒸気加熱型を示唆する硫黄同位体比を有し、マグマの関与が示唆される。

iii) 草津白根火山および周辺における GNSS 観測

草津白根火山の地下深部活動に伴う地殻変動を捉えるために、2017 年度に整備した GNSS 繰り返し観測網を用いて、GNSS キャンペーン観測を引き続き実施した。今年度で 3 年目（計 4 回目）となるデータ取得作業は、10 月 17 日～11 月 1 日にかけて行った。繰り返し観測点を設置している群馬県嬬恋村や長野県高山村では、台風 19 号で被災したため、その復旧作業等の影響により当初の観測日程に遅れがでたものの、計画通り 6 観測点における測定データを取得することができた。データの処理・解析方法は例年と同様であり、取得したデータを RINEX ファイルに変換し、GNSS データ解析ソフト（GIPSY OASYS II Ver. 6.3²³⁾）を用いて座標値を推定した。その結果、水平方向に 2-17 mm、鉛直方向に 1-16 mm の変動誤差で座標値を得ることができた。得られた座標値

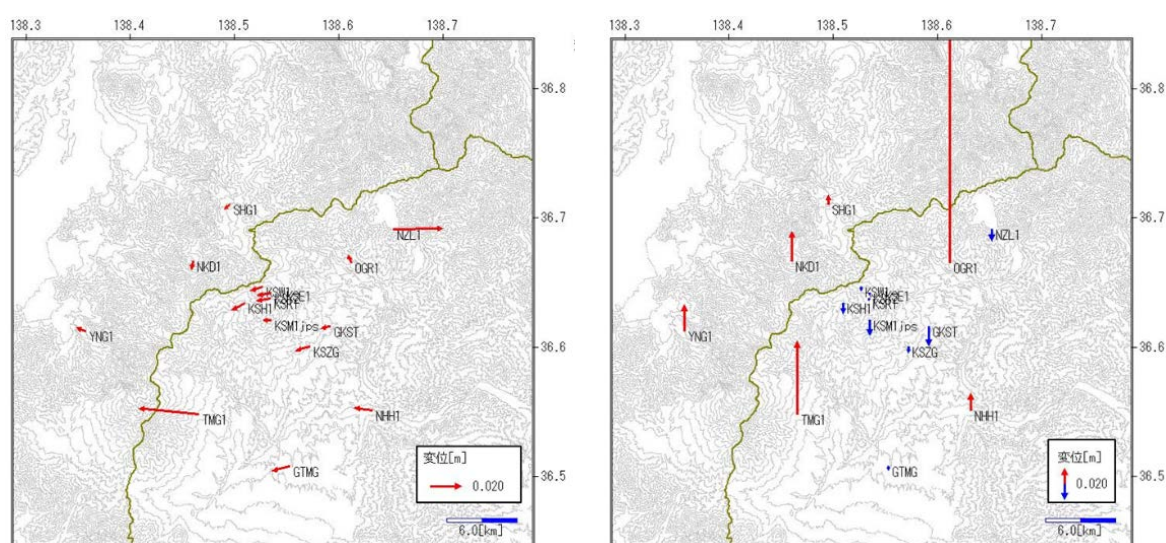


図 28. 2018 年 10 月～2019 年 10 月における変位変化分布。左) 水平変化、右) 鉛直変化。GEONET の電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V²⁴⁾を用いて作成）。

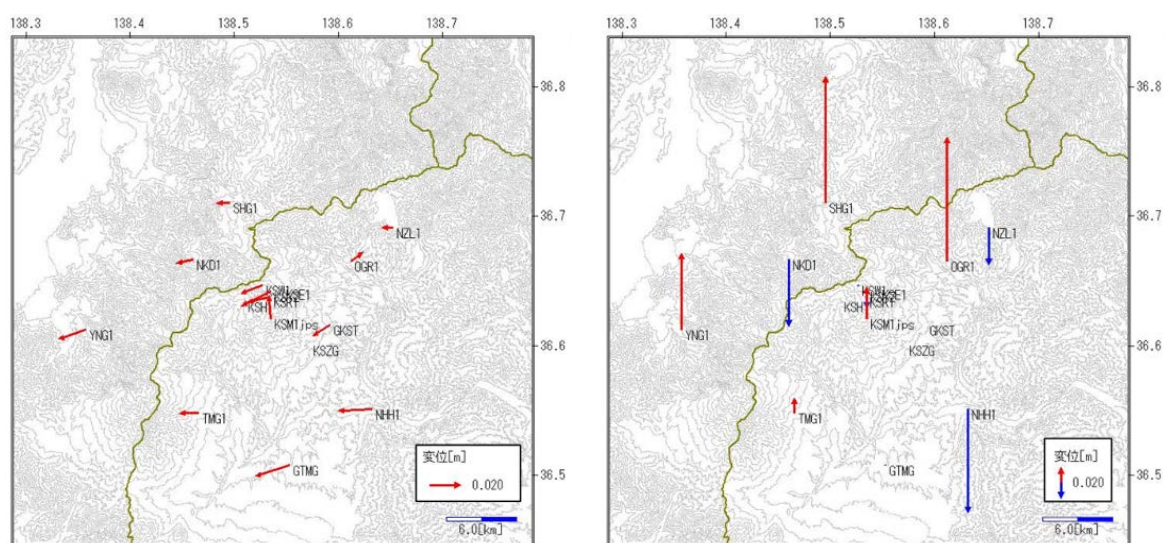


図 29. 2017 年 10 月～2019 年 10 月における変位変化分布。左) 水平変化、右) 鉛直変化。GEONET の電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V²⁴⁾を用いて作成）。

から、連続観測点のデータと併せて火山用地殻活動解析支援ソフト（MaGCAP-V²⁴⁾）を用いて、変位変化量の時系列や変位変化分布を求めた。その際、草津白根火山から北北東へ約 25 km 離れた GEONET の電子基準点（長野栄：020982）を基準とした。図 28 および図 29 に 2018 年～2019 年（1 年間）および 2017 年～2019 年（2 年間）の変位分布をそれぞれ示す。いずれの期間においても、地下深部におけるマグマ溜りの膨張（球状圧力源）やマグマの貫入（板状圧力源）に伴う顕著な地殻変動は認められなかった。なお、繰り返し観測点の構築と 2 回目までの観測結果をまとめた論文を JDR 誌の火山プロジェクト特集号に出版した。

2018 年 1 月の本白根山噴火を受けて新たに 4 点の連続観測点を設置し、今年度も観測を継続した。このうち、湯釜火口から北西に約 10 km 離れた志賀高原（長野県）に位置する観測点（SHG1）は、アンテナ上に毎年 2m ほどの積雪が見込まれるため、冬季を除く期間（5 月～11 月初め）に観測を行っている。連続観測点のデータも概ね順調に取得することができたが、本白根山の山頂の観測点（KSM1）は、台風 15 号により被災した。観測データは携帯電話（3G）回線でテレメーター化されているが、9 月の中旬から観測データが途絶えていた為、10 月の台風 19 号の通過後に観測点の点検を行った。その結果、アンテナケーブルがコネクタから断線していることが判明したため現地で応急処置を行った（図 30）。次年度により強度のあるケーブルと交換予定である。また、3G 回線のアンテナケーブルも破損していたため、3G 回線から 4G 回線への移行作業も同時に実施した。4G 回線の通信不調により 2019 年 11～12 月もデータ回収に失敗しているが、測定は継続して行われており冬季閉鎖明けにデータを回収する予定である。なお、現在は順調にデータ回収が行われている。いずれの連続観測点においても火山活動に関連した顕著な変位変化は認められていない。しかし、広域の地殻変動観測は開始したばかりであり、長期的な観測とデータの蓄積が長期広域の変動を把握するには必要不可欠である。将来の噴火を伴う火山活動に備えるために、本観測を継続していくことが重要である。

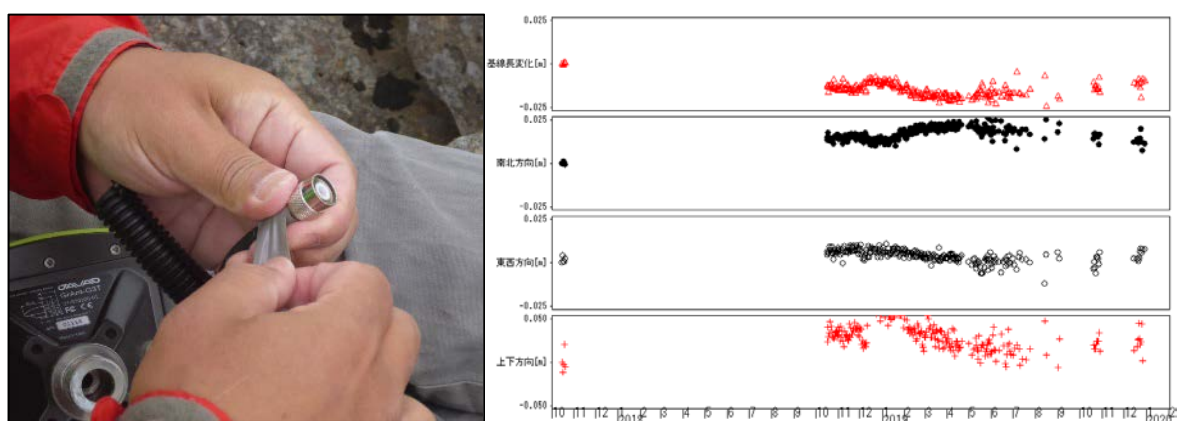


図 30. 本白根山山頂（KSM1）の整備と観測結果。左：断線したアンテナケーブルの補修。右：GEONET 電子基準点（長野栄）を基準とした 2017 年 10 月以降の変位変化量の時系列（MaGCAP-V²⁴⁾を用いて作成）。連続観測は 2018 年 10 月より開始。

c) 蔵王火山における機動観測

令和2年度に予定している蔵王火山の機動観測では、噴火切迫性を評価するため表層付近深さ 5km までの地下比抵抗構造を推定することを主眼としている。平成 30 年度成果報告書で指摘した活動度が高いと考えられている火口湖御釜のやや東側を中心として、令和元年度は AMT 探査の観測点選定と観測許認可交渉を行った。御釜のやや東側は地形が急峻でアクセスが困難であるため AMT 観測を実施できない場所が多いが、地形の急峻な場所に近づける限界まで密に観測点を選定した(図 31)。観測予定域は国定公園であるため、宮城県大河原地方振興事務所と仙台森林管理署に許認可について交渉を行い、実施年度に申請するよう指導があったので、令和元年度は申請書類準備までを行い、令和2年及び3年度の実施前に申請を行うこととした。御釜やや東側での活動があった以前には、平成 26 年度に御釜を中心とした領域で AMT 観測を実施し、御釜から五色岳直下の標高 800m 程度の位置に孤立した小規模な低比抵抗体が推定され、変質帯であると解釈した (Ichiki et al., 2017²⁵⁾)。令和2~3 年度に実施する観測と平成 26 年度の観測結果を併せて構造解析を行う予定である。

本年度は、前年度に実施した 2015 年 1 月~6 月に GNSS によって捉えられた山体膨張現象の再調査を継続した。前年度はモデルパラメータ推定方法として非線型最小二乗法 (Matsu'ura and Hasegawa, 1987²⁶⁾) を採用したが、本年度は MCMC 法を用いた逆解析法 GBIS (Bagnardi and Hooper, 2018²⁷⁾) を導入した。その結果、御釜の東約 1 km (馬の背カルデラ内)、海拔下約 4 km で増圧現象が起きていたことが明らかとなった。Ban et al. (2016)²⁸⁾によると、過去約 2 千年間の噴火は地下約 4~6 km にある珪長質マグマに、深部由来の苦鉄質マグマが注入・混合したことによって発生したとされており、最近の活動も浅部マグマ溜まりへマグマが供給されたことによるものと示唆されている。これまでの種々の研究成果も併せて考えると、最近の蔵王火山の活動源は御釜の東側の地下に存在することが考えられる。一方、この地域は既存観測網が手薄であったため、今年度は高精度傾斜計を設置して水蒸気噴火に対する切迫度評価に資する情報を収集することとした。図 33 に新設した観測点の位置と完成後の写真を示した。

平成 30 年度に設置した想定変動域東側における広帯域地震観測を継続し、熱水活動に伴う長周期振動の記録蓄積を進めた。また、これまでの解析結果をもとに長周期振動源の推定精度を向上させる観測点配置について検討を行い、令和2年度に実施予定の広帯域地震観測点の設置候補点を確定し、環境ノイズや携帯電話回線によるテレメーター実施可否などの現地調査を行った。

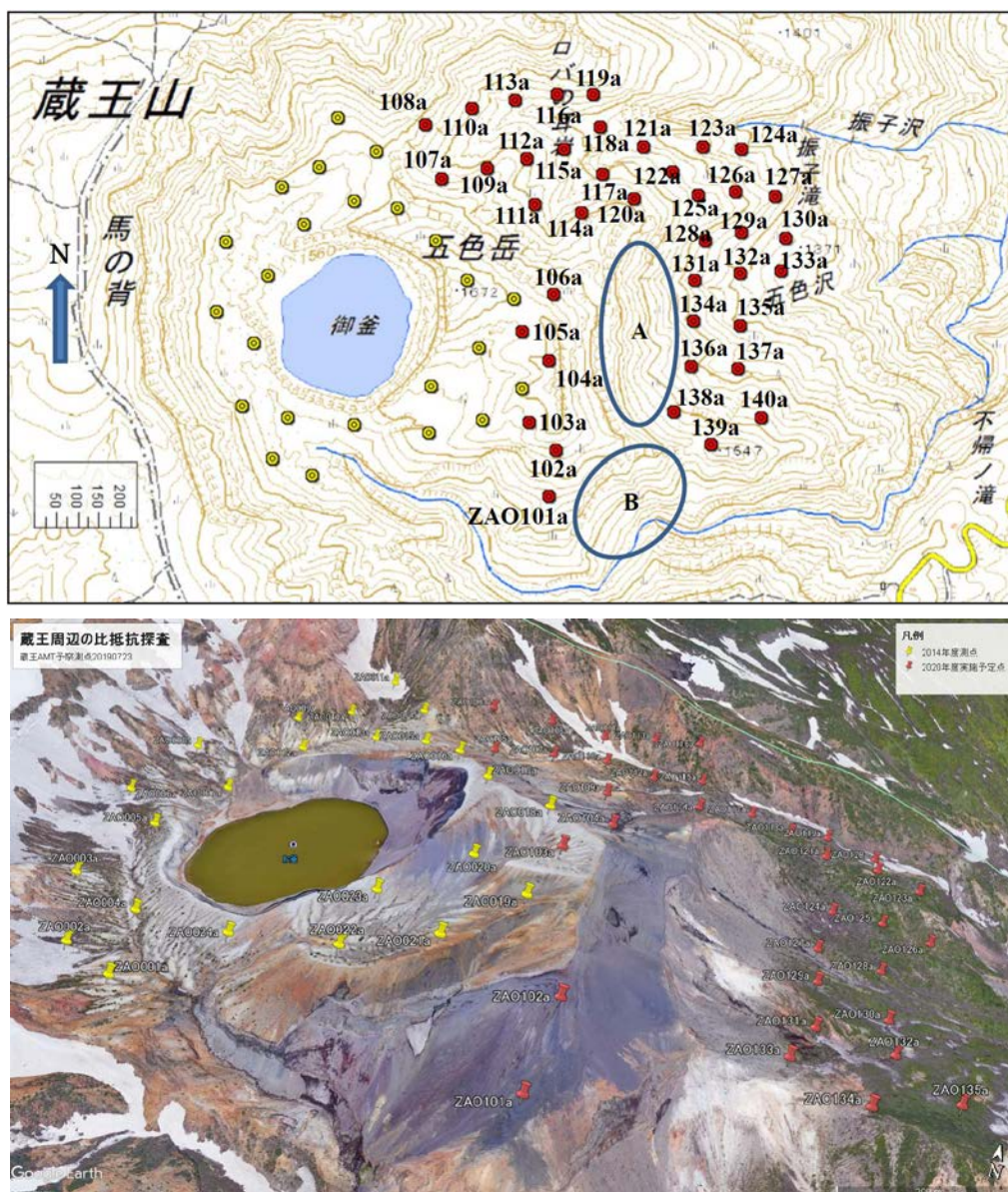


図 31. (上) 令和 2-3 年度観測予定点図(赤二重丸)。楕円 A,B はアクセスが困難とみられる地域。黄二重丸は平成 26 年度に実施した観測点。(下) 観測予定点の鳥瞰図。赤ピンマーク：令和 2-3 年度観測予定点、黄ピンマーク：平成 26 年度に実施した観測点。人的アクセス可能な限界範囲まで観測点を配置した。

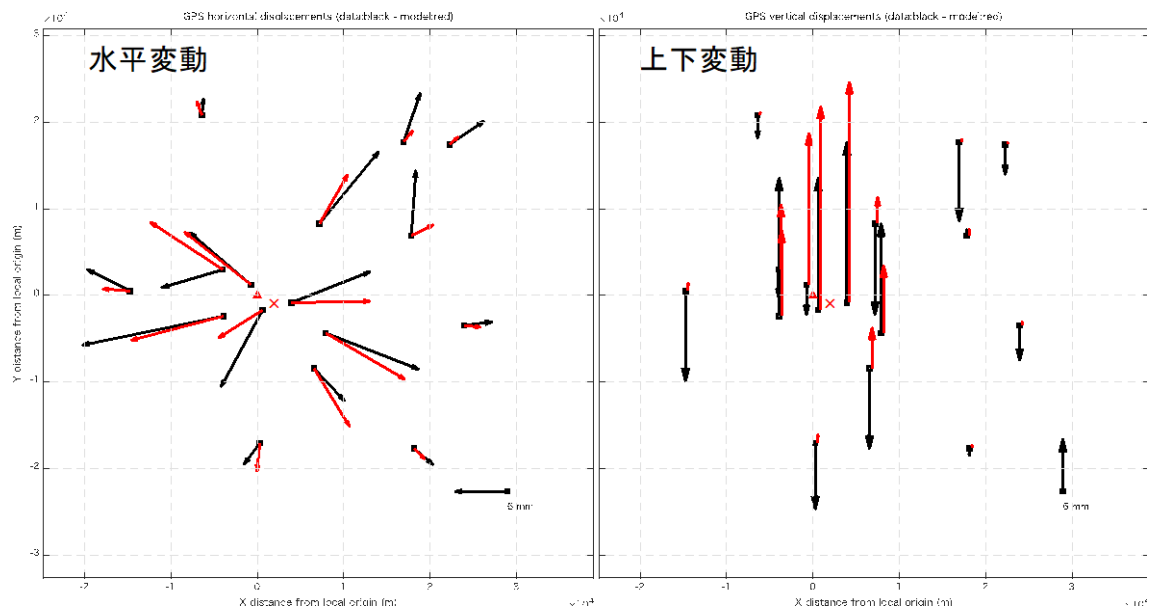


図 32. 茂木モデルを仮定した解析によって推定された各パラメータから計算された地盤変動（赤矢印）と観測値（黒矢印）の比較。赤三角印は最高峰熊野岳の位置を、赤×印は推定された点圧力源の位置を示す。



図 33. 新設した傾斜観測点の位置（左）と完成後の写真（右）。写真中右側の背の低い塩ビパイプが孔井式傾斜計（深度 10m）の管頭部、左はソーラーパネルとデータロガーや通信機器、鉛蓄電池を収納するキャビネットを取り付けたコンクリート柱。

d) 霧島火山における機動観測

霧島火山において地震(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)、電磁気(全磁力・広帯域 MT)などの観測データの解析を行い、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特徴をまとめた。また、同火山では現在も活発な火山活動が続いていることから、地震の連続観測や水準測量・GNSS などの繰り返し観測を継続した。地震観測は新湯温泉近傍からえびの高原までに 10 点の地震観測点を設置し、現在データの解析を行っている。また、えびの高原には 6 点の地震計アレイをオンラインで展開し、活動状況をモニターしている。これらの観測データの解析と構造・物性モデルの高度化に従事するリサーチアシスタント 1 名を雇用した。

i) 小規模水蒸気噴火前後の流体移動

2018 年 4 月 19 日に硫黄山で発生した小規模水蒸気噴火について、噴火開始前後の地震、空振、地殻変動(傾斜)、電磁場変動の解析を行った。また、水蒸気噴火時の傾斜変動の圧力源を推定し、2018 年度に作成した硫黄山の噴火発生場の構造・物性モデルに基づいて水蒸気噴火の開始過程について考察した。

図 34 に地震と空振の RMS 振幅、相互相関関数 (Ichihara et al., 2012²⁹⁾)、振幅 2 乗コヒーレンス (Matoza & Fee, 2014³⁰⁾)、傾斜変動の時系列を示す。噴火初期の空振は微弱なため、風などに由来するローカルなノイズの影響を大きく受けている可能性があるが、地震との相互相関関数やコヒーレンスの時系列変化から噴火による空振シグナルを識別できる。解析の結果、15:40 頃より明瞭な空振の到来が確認でき、これは気象庁の監視カメラで確認されている噴火開始時刻とほぼ一致した。火口が目視できない場合でも地震と空振の同時解析から噴火発生時刻を推定できる可能性がある。

一方、噴火開始約 5 分前の 15:34 頃から地震、傾斜、電磁場の変動が始まっていることが分かった。噴火直前の 6 分間 (15:34-15:40)の傾斜変動について 3 観測点(気象庁硫黄山南西 V.KIIN、九大えびの KU.KREB、鹿大霧島観測所 G.KVO)のデータを用いて圧力源の推定を行った結果、標高 580m 付近の球状圧力源(収縮)および標高 1050m 付近のほぼ鉛直のダイク(膨張)が力源として推定された(図 35)。力源の体積変化量は球状収縮源が約 4 万 m³、膨張ダイクが約 5 万 m³とほぼ等しく推定された。硫黄山の噴火発生場モデル (Tsukamoto et al., 2018³¹⁾)と比較すると、球状圧力源は粘土層(キャップロック)下の熱水だまり、ダイクは粘土層の上面付近に対応すると考えられる。Tsukamoto et al. (2018)³¹⁾では 4 月 19 日の水蒸気噴火について、熱水だまりから粘土層の亀裂を上昇する熱水の供給量が増加し、熱水が深さ 130m 付近の粘土層上面で急激に沸騰したことにより発生した可能性に言及している。今回の圧力源推定結果は、熱水の上昇によって熱水だまり(=球状圧力源)が収縮し、粘土層上面での熱水の相変化による急激な膨張がダイクの開口を引き起こしたことを示唆し、Tsukamoto et al. (2018)³¹⁾と調和的な結果である。

水蒸気噴火の発生した場所から約 500m 北に位置する広帯域 MT 連続観測点では、地震・傾斜変動と同期して噴火開始の 5 分前から電磁場の変動が見られた(図 36)。

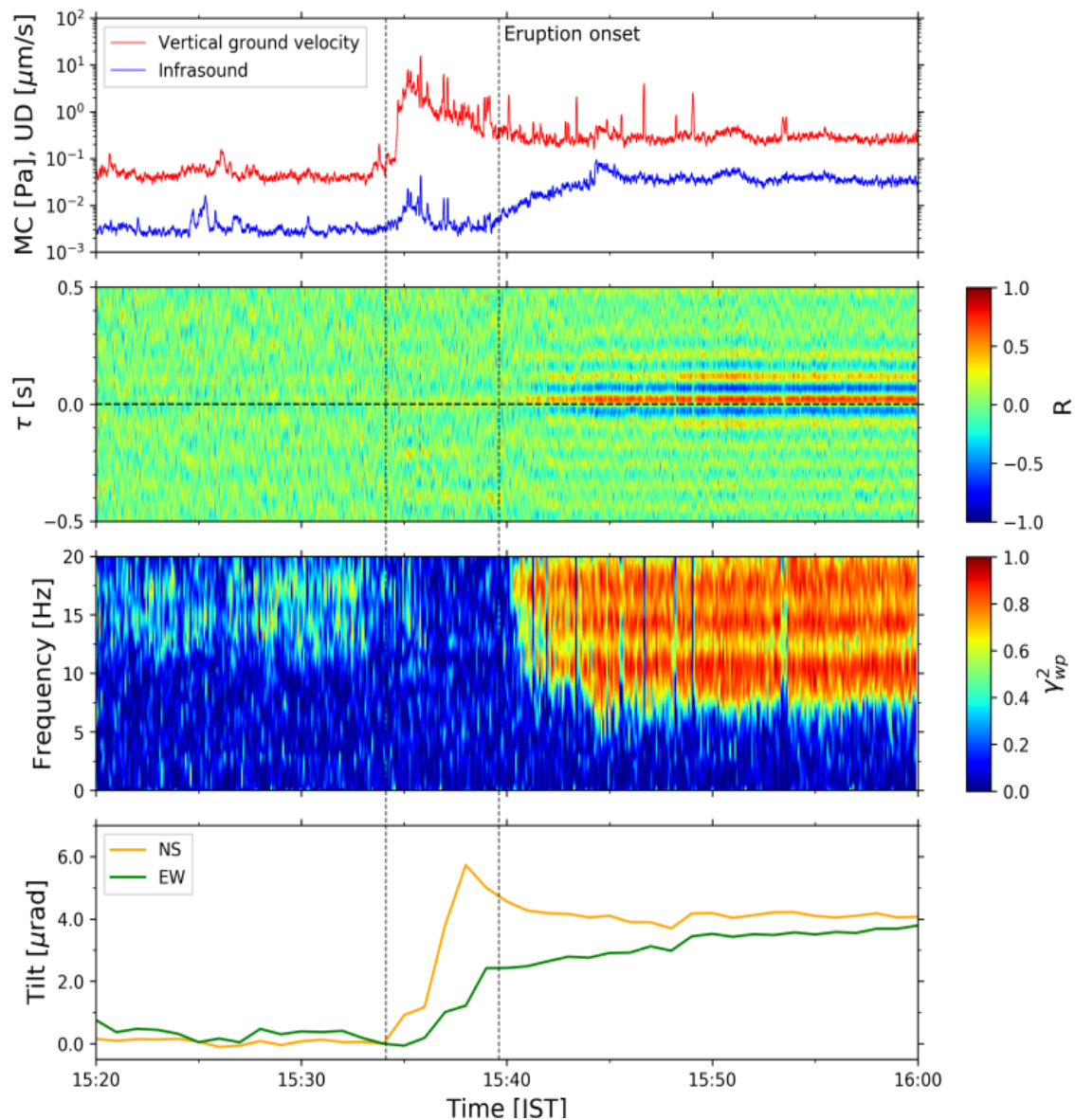


図 34. 九州大学えびの観測点 (KU.KREB) で観測された噴火開始前後の地震と空振の RMS 振幅 (3 秒間平均値)、規格化相互相関関数、振幅 2 乗コヒーレンス、および傾斜変動の時系列変化。2 本の点線はそれぞれ傾斜変動の開始時刻と噴火開始時刻を表す。

磁場変動についてはコイルの傾斜変動による寄与が大きいため、電場にのみ注目すると、電場の南北成分は増大しており、一つの可能性として噴火口付近に正の電流源が一時的に形成されることが考えられる。電場変動が流動電位によると仮定すると、噴火口付近で流体が正の電荷を運ばなくなる、つまり噴火口付近で地下水 (液相) が水蒸気 (気相) に変化することで定性的に説明が可能である。特筆すべきは、この電場南北成分の変化のピークが、水蒸気噴火開始およそ 6 分後のコックステールジェットと対応している点である。気象庁硫黄山南観測点の噴火映像によると、このコックステールジェットは水蒸気噴火のクライマックスであるが、近傍の観測点の地震・傾斜計

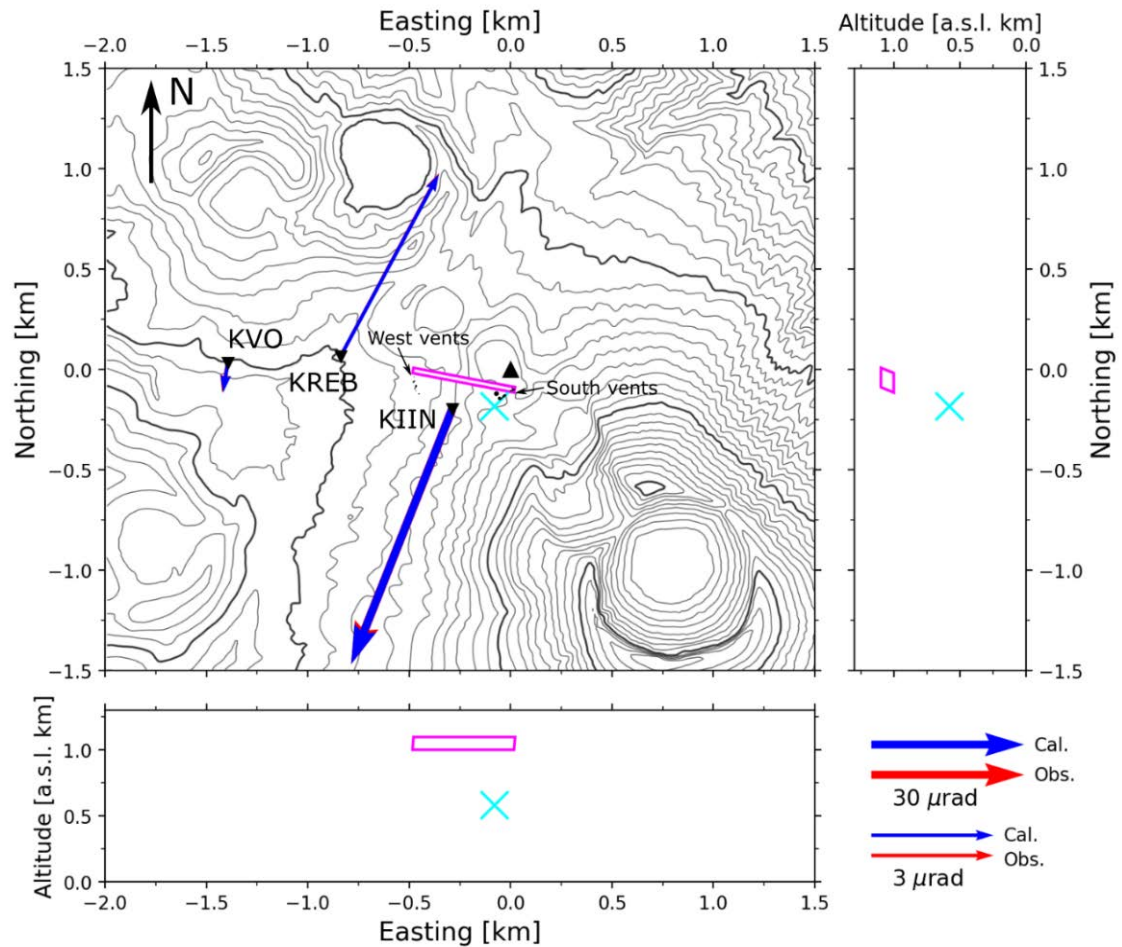


図 35. 傾斜変動の圧力源推定結果。×が球状圧力源（茂木ソース）、四角形がダイクの位置を表す。▲は硫黄山の山頂。矢印の向きは相対的に沈降する方向を表す。

に、それに対応した変化は見られず、水蒸気噴火に対して、電場変動が力学的な変動とは独立の情報を与えることを示している。上記の電場の南北変動に対して、電場の東西変動は噴火開始 5 分前から不可解な変動を示している。今後、傾斜変動解析の時間分解能を上げ、噴火開始前 5 分間のモデリングを行う予定である。

ii) 精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動

九州大学を中心とした大学合同水準測量班は、2015 年 6 月にえびの高原周辺に水準路線を増設した（図 37）。その後、硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をとともなう火山性微動がたびたび発生し、2015 年 12 月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017 年 5 月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018 年 2 月には火山性地震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。4 月上旬から硫黄山の南側に沿って東西に新たな噴気孔列が生じ、一部で小噴火が発生した。

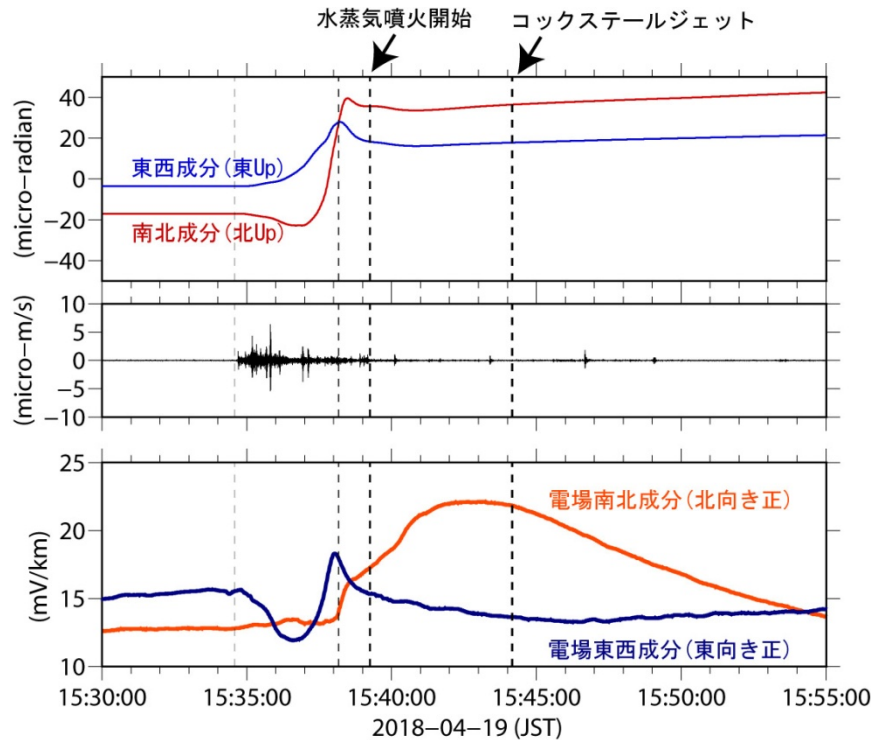


図 36. 2018 年 4 月 19 日の水蒸気噴火にともなう地震・傾斜変動（気象庁硫黄山南西観測点：噴火口から西におよそ 200m）と、電場変動（硫黄山北広帯域 MT 連続観測点：噴火口から北北東におよそ 500m）の比較。

本年度は 2019 年 5 月中旬、11 月上旬、2020 年 3 月上旬の 3 回の精密水準測量を実施した。2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を図 38 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 39 に示す。いずれも 2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。再隆起が始まった 2017 年 10 月以降の隆起量を等値線で示す（図 37）。硫黄山山頂に近い BM3050 では 2020 年 3 月までに 69.6 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前に比べて南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。この隆起は硫黄山西側の BM3040 を除いて、2018 年 12 月以降はほぼ停止状態になっている。

表 1 に推定された圧力源の位置を示す。圧力源の位置は、2017 年 10 月以前は硫黄山噴気群の東側約 100m であったが、2017 年 10 月以降は硫黄山南噴気孔の南側に存在していると考えられる。またその深さも、この地点の標高が 1300m であることから、地表からそれぞれ、700m、620m となり、圧力源の位置も徐々に上昇していると考えられる。硫黄山直下では厚さ 700m 程度の低比抵抗層（スメクタイト層と推定）が 3 次元 MT 解析で推定されており（Tsukamoto et al., 2018³¹⁾）、これがキャップロックとなりこの直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。

図 40 に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。この時、圧力源の位置は第 1 表の場所に固定し、体積変化量のみを変化させて最適値を求めている。2015 年 6 月を基準とした体積増加量は、2018 年 12 月では 15.7 万 m^3 、2019 年 3 月 15.6 万 m^3 、11 月 15.2 万 m^3 、2020 年 3 月 15.9 万 m^3 と推定された。2017 年 10 月からの地下圧力源の膨張は、2018 年 12 月以降止まっていた。2019 年は硫黄山南火口や

西麓噴気口の熱水湧水量や水蒸気量に明らかな減少が見られることから、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつあると考えられた。しかし 2020 年 3 月はわずかながらも圧力源の膨張傾向がみられ、地表の熱活動も温度の若干の上昇が見られることから、今後も継続的な調査が必要である。

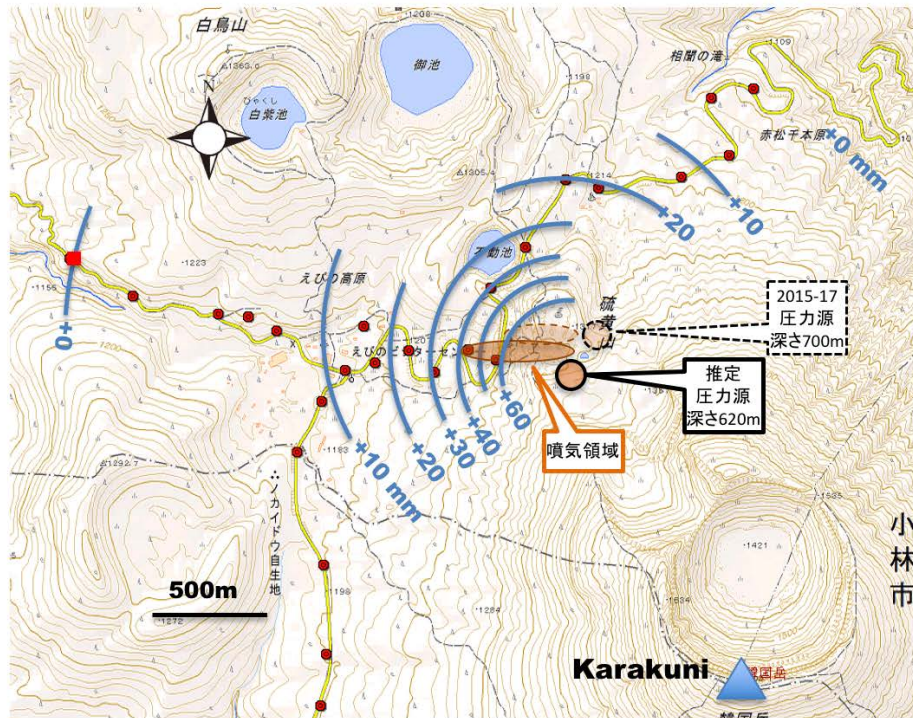


図 37. えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2017 年 10 月から 2018 年 12 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

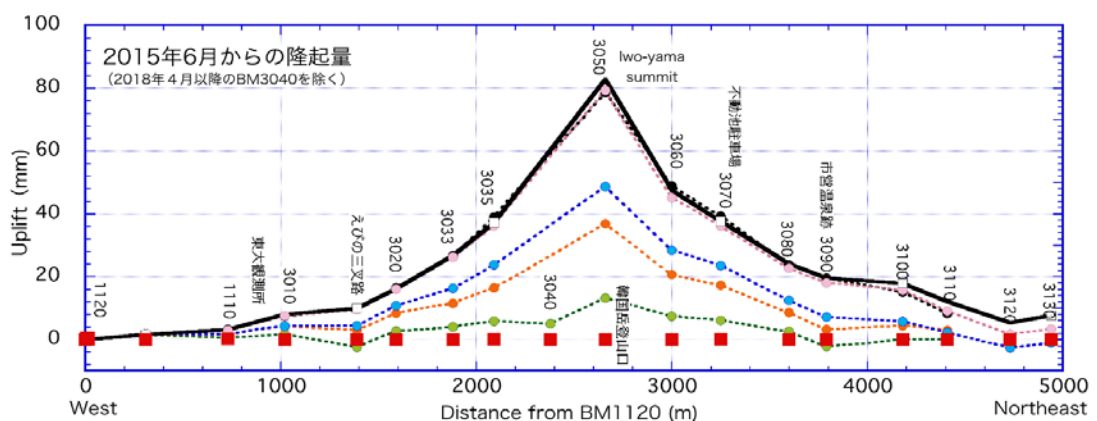


図 38. 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果（BM3040 を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月以降の値はほとんど重なっている。

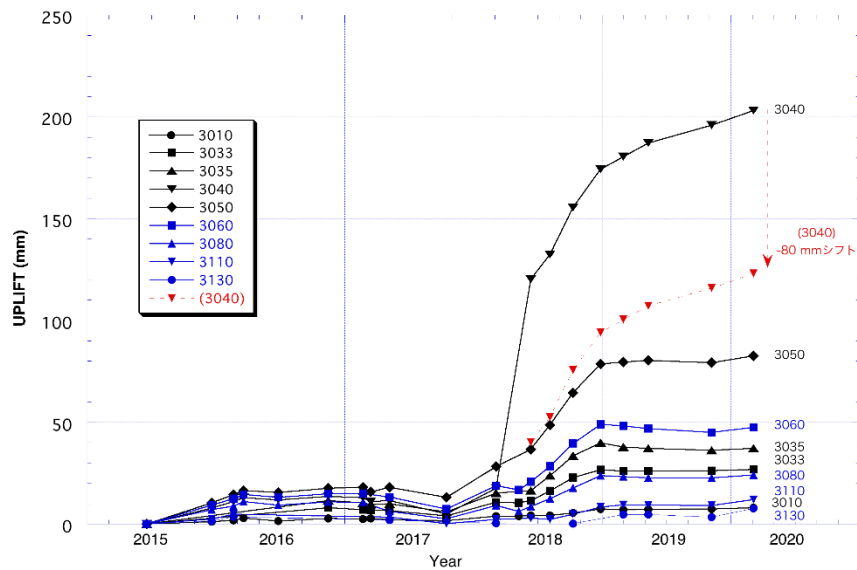


図 39. 主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点ではほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きいので、圧力源解析では使用していない。

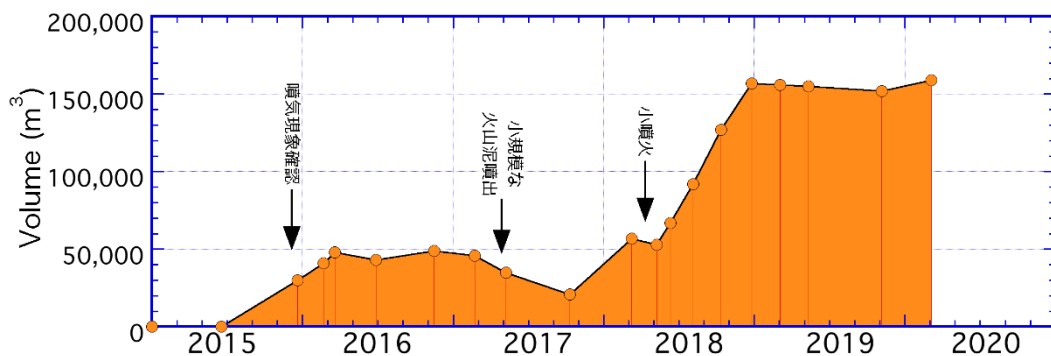


図 40. 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量

表 1. 精密水準測量データから推定された、硫黄山直下の圧力源の位置

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

e) 箱根火山における機動観測

令和元年度は、昨年度までに実施した機動観測のデータによって得られた地震波速度構造に加え、より深部の構造についての知見を得るために、レシーバ関数による解析の準備を進めた。火山地帯におけるレシーバ関数による解析として、Abe et al, (2017)³²⁾ による阿蘇火山における例が挙げられる。阿蘇火山では、各観測点で得られたレシーバ関数を説明できる 1 次元 S 波速度構造を遺伝的アルゴリズムで探索し、深さ 40km 程度までの構造を推定している（図 41）。その結果、深さ 20km 付近に、深部低周波地震の震源を取り囲むように低速度の領域があることが分かった。今回、同様の解析を箱根火山で実施するため、予備的な解析として駒ヶ岳（KOM）と大涌谷（OWD）の観測データを用いてレシーバ関数を推定した（図 42）。いずれの観測点でも、深部の不連続面に起因すると考えられるピークが現れており、データを増やすことによって地震波速度構造解析で得られたよりもさらに深部の構造が推定できることが期待できる。

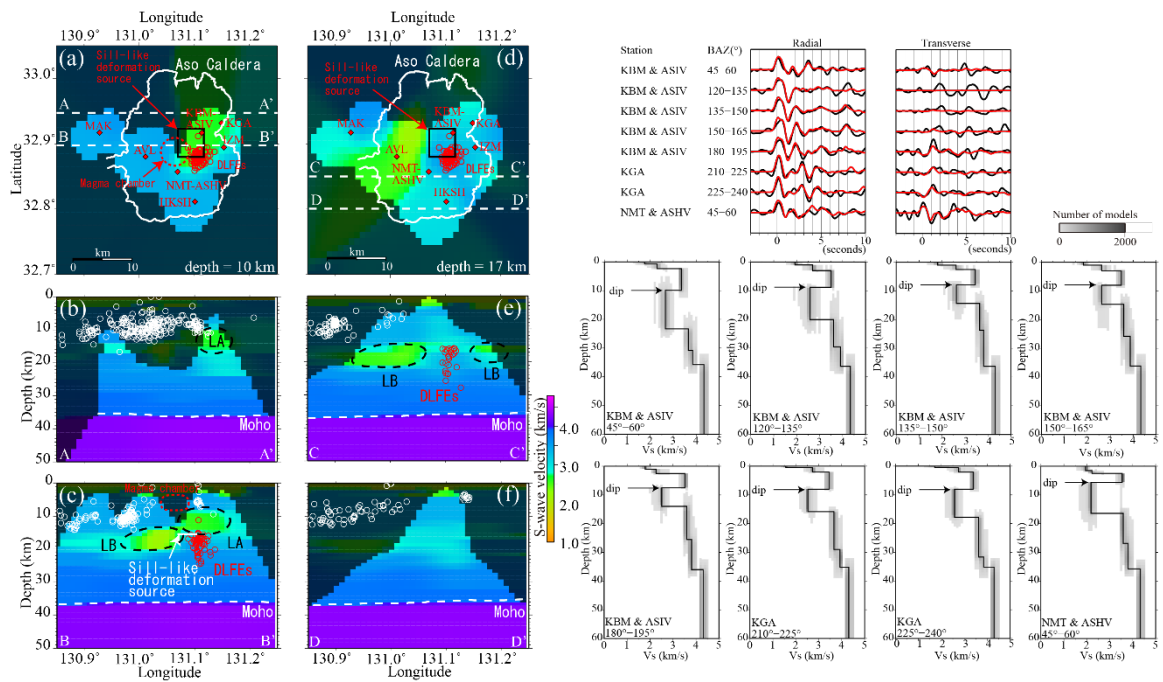


図 41. 阿蘇火山での解析例（Abe et al., 2017³²⁾）。右図はレシーバ関数とそれから得られた 1 次元速度構造の一部。多数得られる 1 次元構造から、それぞれの波線の位置を考慮することで左図のような 3 次元構造が推定できる。

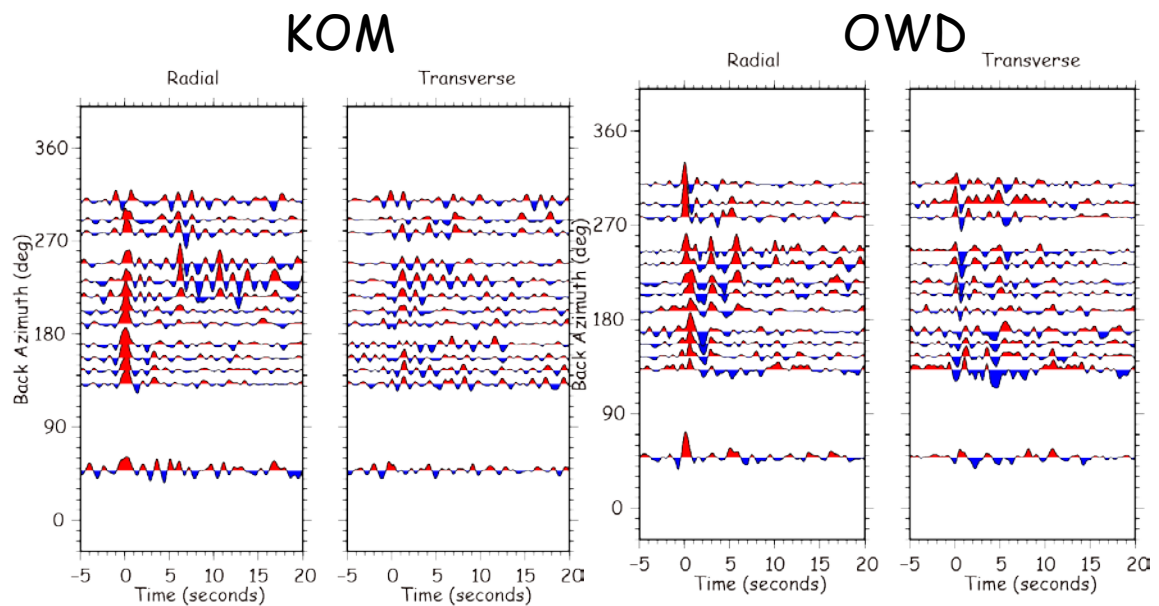


図 42. 駒ヶ岳（左）と大涌谷（右）でのレーザ関数の例。機動観測点のレーザ関数を用いることで、地震波トモグラフィ法で解明された深さ 15km 程度よりも深い領域の構造を把握できる。

箱根火山では 2019 年 3 月より地震活動の活発化が観測され、芦ノ湖周辺において顕著な群発地震活動が発生した 5 月 19 日には、噴火警戒レベルが 2 へ引き上げられた（瀧沢，2020³³⁾）。このような群発地震活動は、2015 年の水蒸気噴火を起こしたイベント以来であり、GNSS による観測でも箱根火山をまたぐ複数の測線で基線長の伸びが観測された。図 43 に 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの震央分布と時系列を示す。また、図 44 に 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの箱根をまたぐ測線の基線長変化を示す。地震活動が最も盛んであったのは芦ノ湖付近の深さ 2km 付近が中心であったが、箱根火山全体が山体の膨張傾向を示しており、深部の火山活動を起源としている活動であったと考えられる。2019 年 2 月と 2019 年 5 月の間の GNSS のデータから、圧力源を推定した結果を図 45 に示す（道家・他、2019³⁴⁾）。開口クラックと茂木モデルをそれぞれ一つずつ仮定して、それらの位置、開口量、クラックの方向をインバージョン法により推定した。その結果、茂木モデルは深さおよそ 9.6km、開口クラックは深さおよそ 0.4~3.3km 付近に推定された。本プロジェクトで実施した機動観測によって得られた地震波速度構造と比較すると、開口クラックはガスや水などの流体だまりから浅部への移動を、茂木モデルはマグマだまり最上部における膨張を反映していると考えられる。大涌谷における火山ガスの観測でも、2019 年 4 月ごろからマグマ起源の火山ガスの増加が観測されており、山体の膨張と同期するようにして火山活動が活発化していることが分かる（図 46）。

一方で、SAR による観測では 2015 年に見られた大涌谷における局所的な隆起はみられず、また GNSS で推定されたクラックなどによる地表面の変化も観測できていない。したがって 2019 年の活動は、深部のマグマだまり周辺で圧力増加などがみられ、

地表で観測される火山ガス組成も変化したもの、地表付近における熱水系の活動は、2015年の活動とは明らかに異なっていたことが分かる。

今後、レシーバ関数解析を進め、より深部まで構造を明らかにできれば、2019年のような火山活動の活発化が発生した際の火山深部における活動の解釈に、地球物理学的な根拠を与えることが可能となり、水蒸気噴火の切迫性の評価にも寄与できると考えられる。

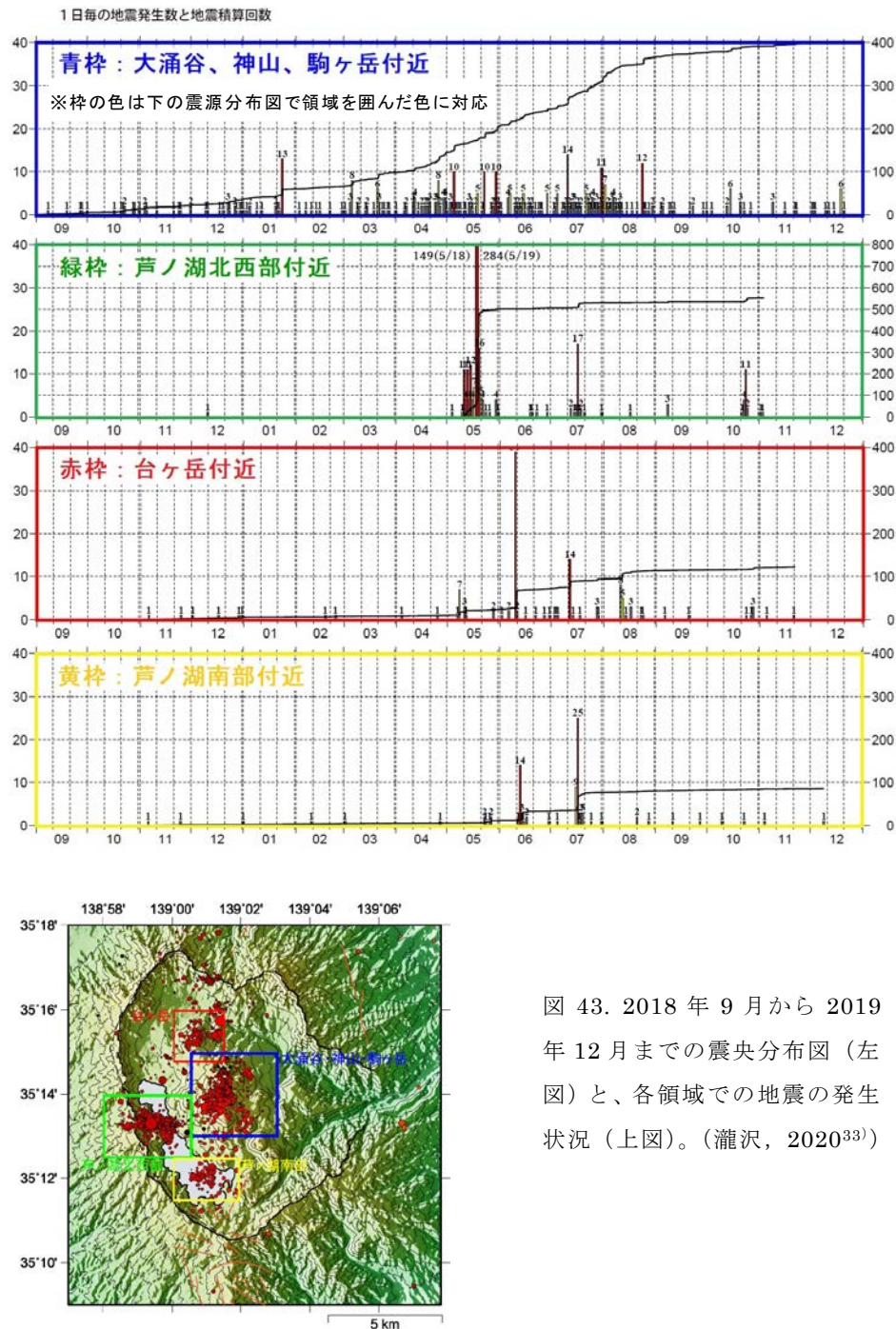


図 43. 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの震央分布図（左図）と、各領域での地震の発生状況（上図）。（瀧沢，2020³³⁾）

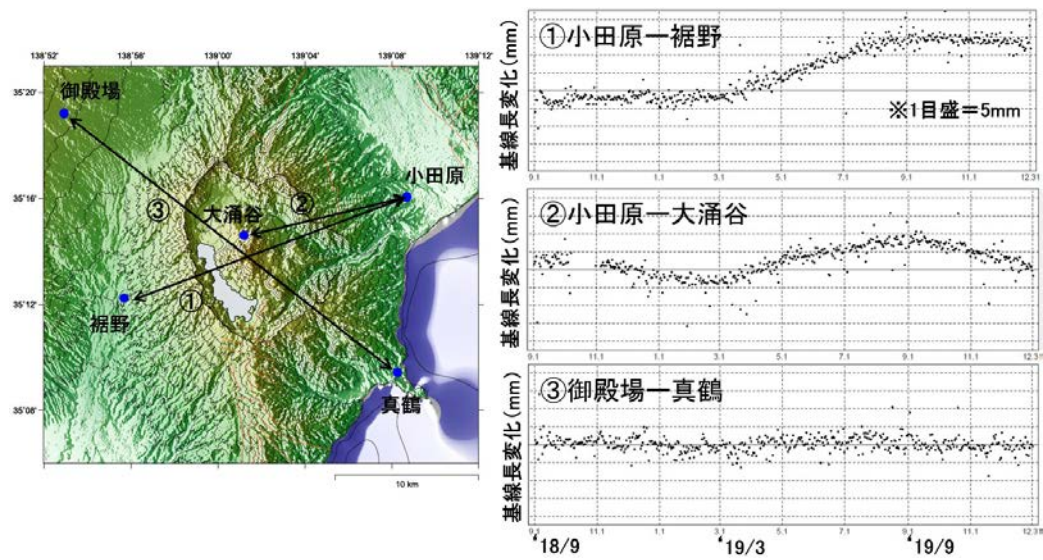


図 44. GNSS 観測点の基線長変化（2018 年 9 月から 2019 年 12 月）。
瀧沢（2020）³³⁾より引用。

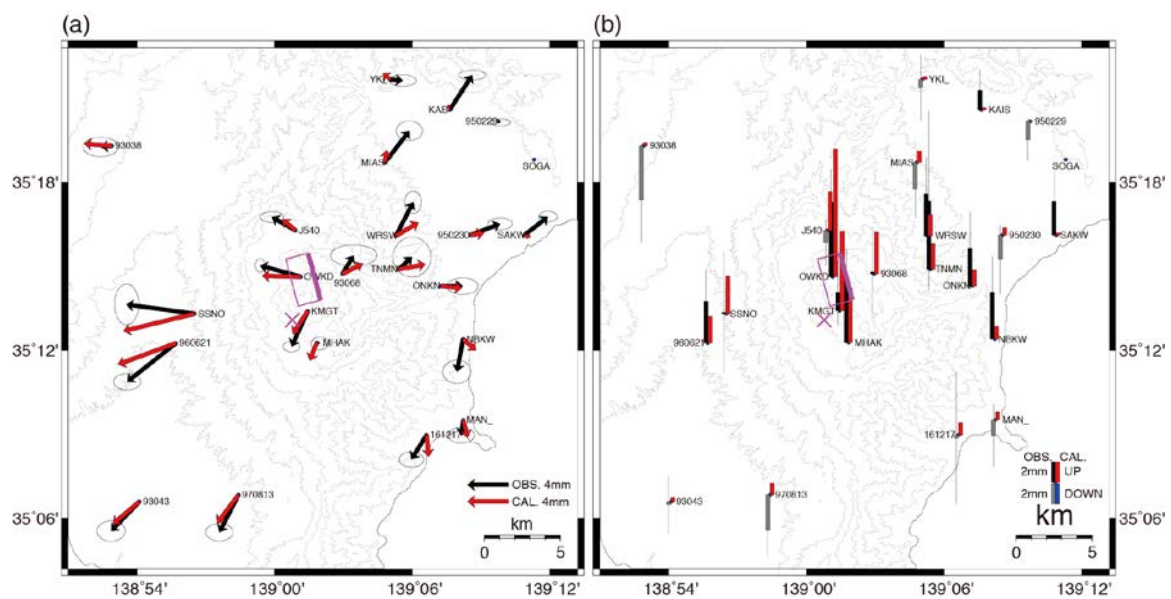


図 45. 道家ほか（2019）³⁴⁾による、活動初期における変位ベクトルおよびモデルによるシミュレーション結果。(a) 水平変位、(b) 上下変位。ベクトルは、2019 年 2 月 19 日～ 28 日と 2019 年 5 月 23 日～ 6 月 1 日のそれぞれの平均値の差分で示している。ピンク色の×印が茂木モデル、矩形が開口クラックモデル（太線が上端）の位置を示す。パラメータの詳細は道家ほか（2019）³⁴⁾を参照。

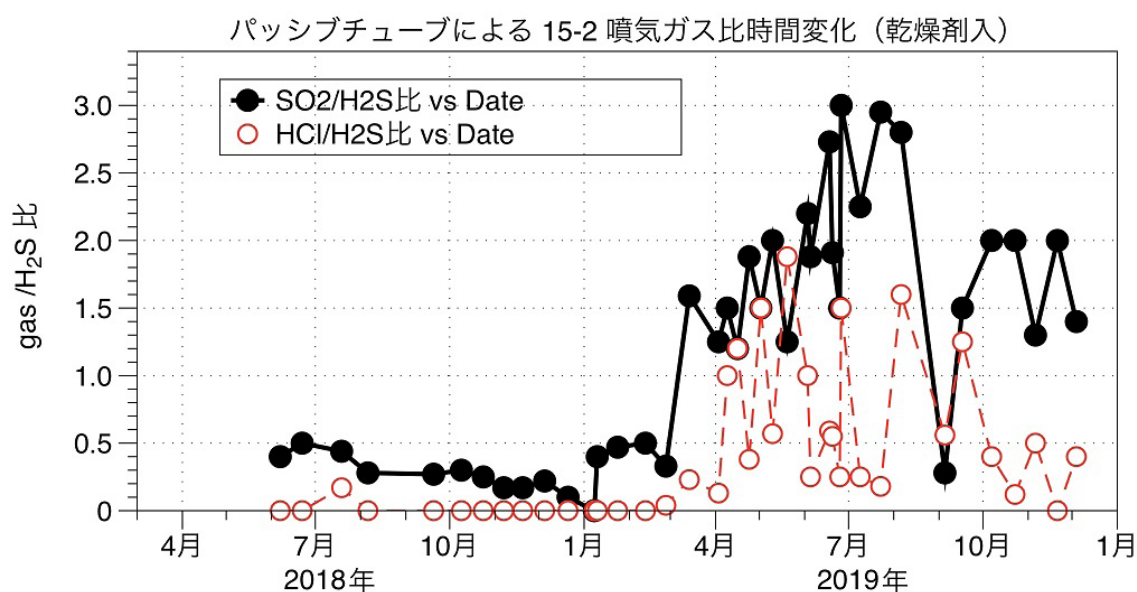


図 46. 大涌谷 15-2 噴気孔における火山ガス観測 (2018 年 7 月～2019 年 12 月)。
瀧沢 (2020) ³³⁾より引用。

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

今年度は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。また、大学院生の講義において「ちょいプロ」を演習の一環として導入し、利用者拡大に努めるとともに、演習の中で上がったいくつかの改善すべき点を集めた。今後はこれらを可能な範囲で改善する。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

前年度までにプロトタイプとして試作した比抵抗構造解析前処理支援ツールのスクリプト群 (MFB: ModEM File Builder) をパッケージ化した。それを本事業に關係する研究や教育活動に利用してもらうことを念頭に操作マニュアルを作成し、本事業内外の地球電磁気学専門分野の研究者に配布した。また、JVDN システムへの受け入れ体制が整い次第、本ツールを提供したい旨、課題 A の担当者に申し入れた。

比抵抗 3 次元インバージョン解析については、海域に隣接した地域の地下比抵抗構造の推定には海底地形を考慮する必要がある、その際にどの程度の細かな海底地形が必要かについてはよくわかっていなかった。そのため、2017 年度に本プロジェクトで取得した倶多楽火山周辺の MT データに対し、2 通りの海底地形データの組み合わせを用いて、四面体メッシュの計算コード (femtic²¹⁾) でインバージョン解析を行った。図 47 に 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲と使用した陸域および海域の地形データ

の範囲を示す。倶多楽湖の中心付近を原点にとり、陸域については中心から半径 15 km の範囲では、国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュデータを用い(図 47 の **d**)、その外側は ETOPO1 データ²²⁾を用いた (図 47 の **a**)。海域については、緯度および経度が共に中心から ± 2 度の範囲では、日本海洋データセンターの 500m グリッドデータ J-EGG500³⁵⁾を用い (図 47 の **c**)、その外側は ETOPO1 データを用いた (図 47 の **b**)。図 48 に、中心から半径 15 km の範囲の海底地形データに、(a)日本水路協会発行の M7006 データ (津軽海峡東部)を使用した場合、(b) J-EGG500 データを使用した場合、にそれぞれ得られた比抵抗構造を示す。インバージョンには、全 49 観測点のインピーダンス 4 成分およびティッパ-2 成分の 12 周波数 (384 Hz \sim 0.0039 Hz) を用い、東京工業大学の TSUBAME3 において計算した。全ての観測点は、中心から半径 15 km の範囲内に含まれている。初期モデルとして、海水部分が $0.33 \Omega\text{m}$ 、陸域部分

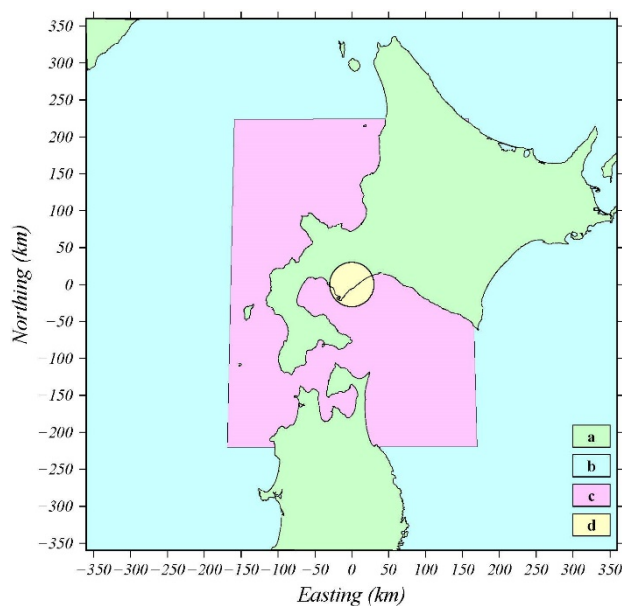


図 47. 倶多楽火山の 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲と使用した陸域および海域の地形データの種類と範囲。倶多楽湖の中心付近を原点とする座標系で、中心から $\pm 360\text{km}$ の範囲をモデル化した。**a**: ETOPO1²²⁾ (陸域)、**b**: ETOPO1 (海域)、**c**: 日本海洋データセンターの J-EGG500³⁵⁾、**d**: 陸域：国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュ数値標高モデル、海域：日本水路協会発行の M7006 (津軽海峡東部)。

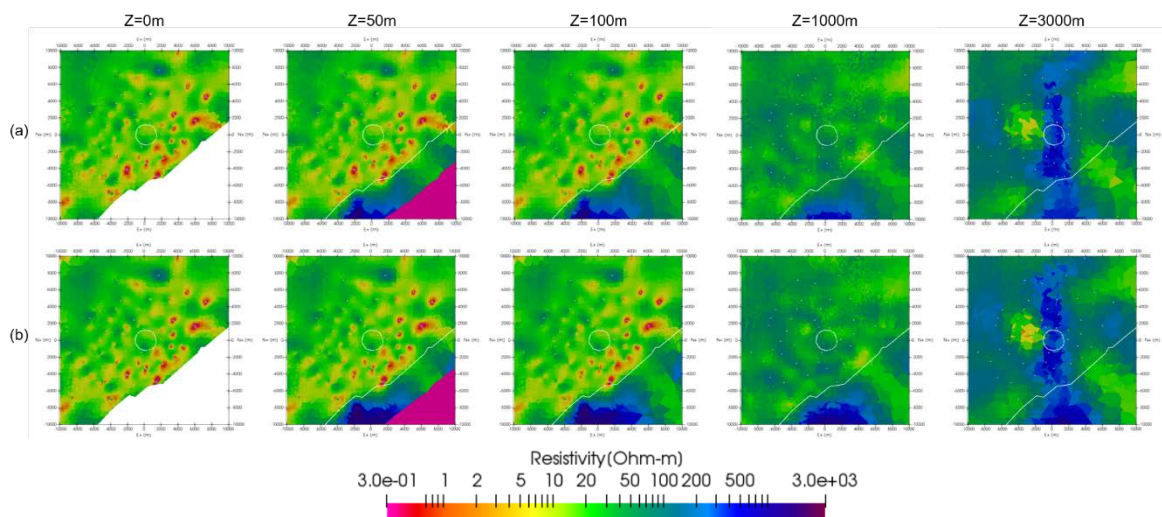


図 48. 倶多楽火山の 3 次元比抵抗構造モデル。中心から半径 15km の領域の海底地形に (a) M7006 データを用いた場合、(b) 周囲と同じ J-EGG500 データを用いた場合。両モデルとも、左から海拔下 0m、50m、100m、1000m、3000m の水平断面を示す。白線は倶多楽湖の輪郭および海岸線を表す。

が $100\ \Omega\text{m}$ の半無限一様構造を与え、両モデルとも 21 回目の iteration の結果を示した。RMS ミスフィットはそれぞれ (a) 1.85、(b) 1.87 であった。両モデルを比較すると、海域の地下構造については、若干の違いがみられる。M7006 データを用いたモデル (a) の方が詳細な海底地形を組み込むため、海域部の比抵抗構造も浅部の海底地形を良く反映しているような分布をしている。しかし、浅部から深部に至るまで両者の地下構造に大きな違いはなく、地下構造の議論に与える影響はほとんどないと言える。これは、本研究で用いたデータセットが陸域のデータのみであることに起因すると考えられる。従って、少なくとも本研究で用いた周波数範囲においては、海底地形データは J-EGG500 で十分であることがわかった。また、四面体メッシュインバージョンで得られた構造は、これまでに実施済みの直方体メッシュインバージョン (ModEM³⁶⁾) により推定された構造と概ね同様であることも確認できた。

本システムを火山活動の現況評価や噴火切迫性予測に利用するためには、シミュレーションの結果を各種のモニタリングデータと対比させることが重要となる。そこで、今年度はこの部分のツール開発にも取り組んだ。商用のシミュレータである TOUGH2 を用いて、比較的単純な軸対称の構造モデルで熱水流動を計算した。具体的には、モデル空間の中心軸付近に噴気火道を設定し、最下部から高温流体を注入して定常状態を再現したのち、噴気火道の一部を低浸透率化（部分閉塞）させた場合にどのような応答が起こるかを調べた。さらに、シミュレーションの出力である温度圧力場から、商用ソフトである COMSOL Multiphysics を用い、有限要素法で地盤変動を求めることを試みた。その際、通常の弾性変形ではなく、孔隙弾性変形 (poroelasticity) と熱膨張／収縮の効果を考慮して変位を推定している (図 49～55)。こうしたツールは、本サブテーマの基本要素の一つであるだけでなく、火山活動監視や火山性地盤変動の研究にも応用できるもので汎用性が高い。適切な時期にマニュアル等を整備してノウハウを広く共有できるようにしたい。これらの業務補助のため、リサーチアシスタン

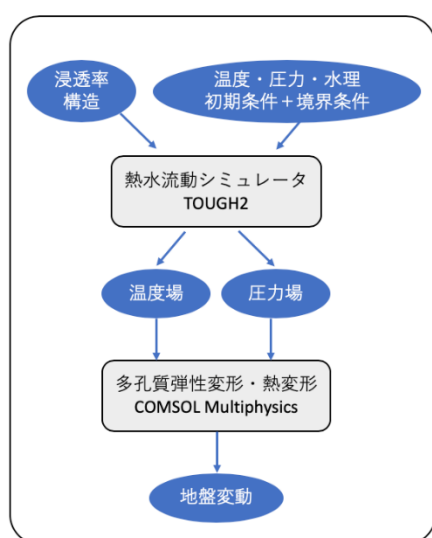


図 49. 噴気経路の閉塞に伴う地盤変動計算の手順。

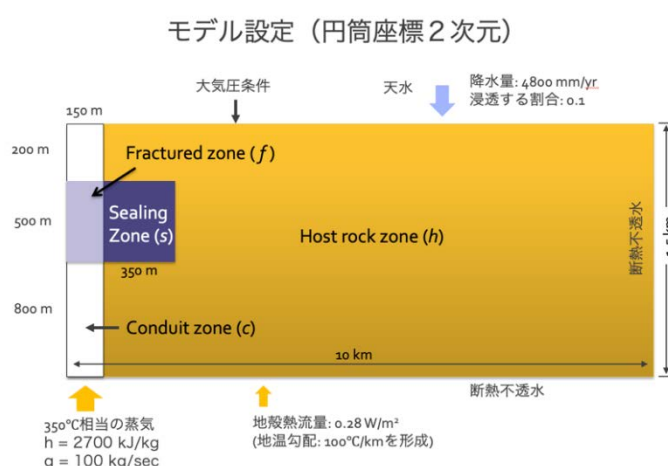


図 50. 熱水流動シミュレーションの設定。

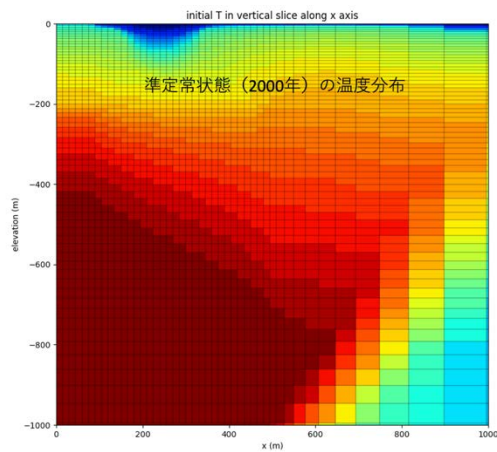


図 51. 準定常初期状態の温度分布。

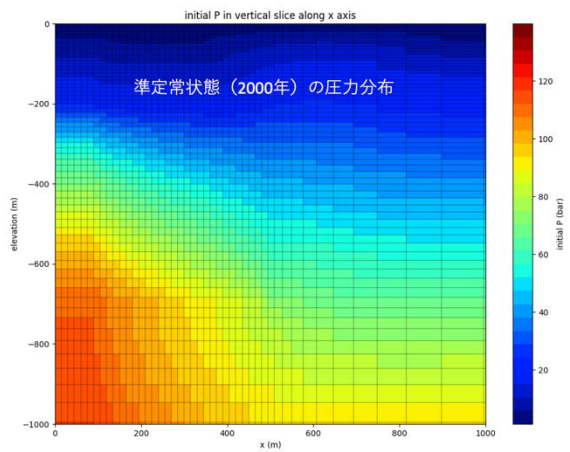


図 52. 準定常初期状態の圧力分布。

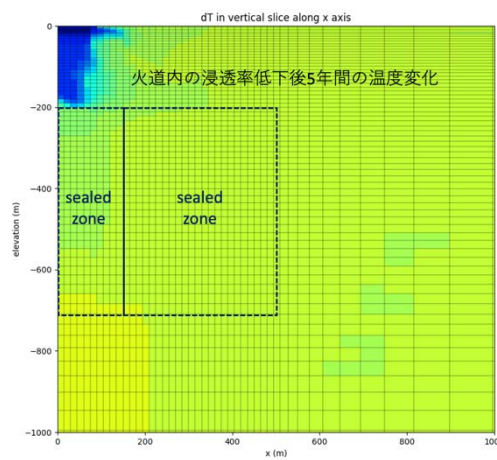


図 53. 浸透率低下後 5 年間の温度変化。

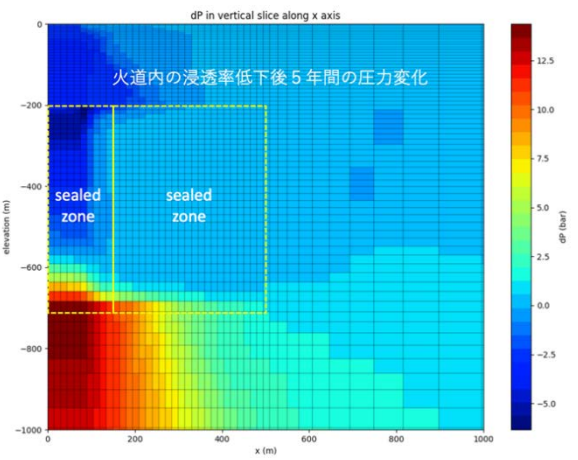


図 54. 浸透率低下後 5 年間の圧力変化。

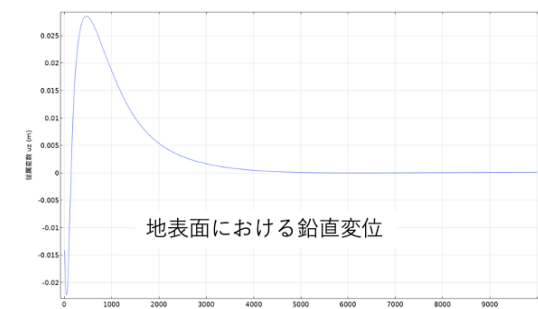
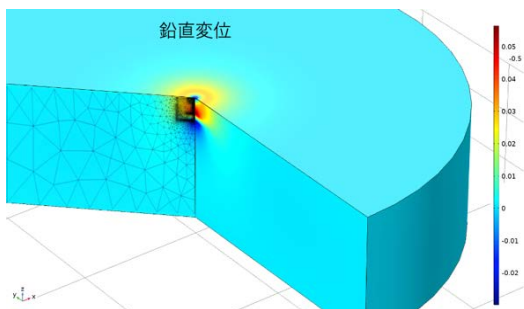
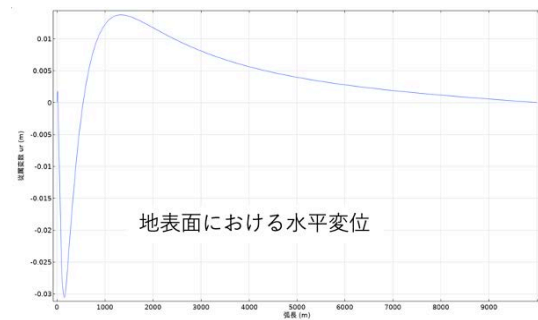
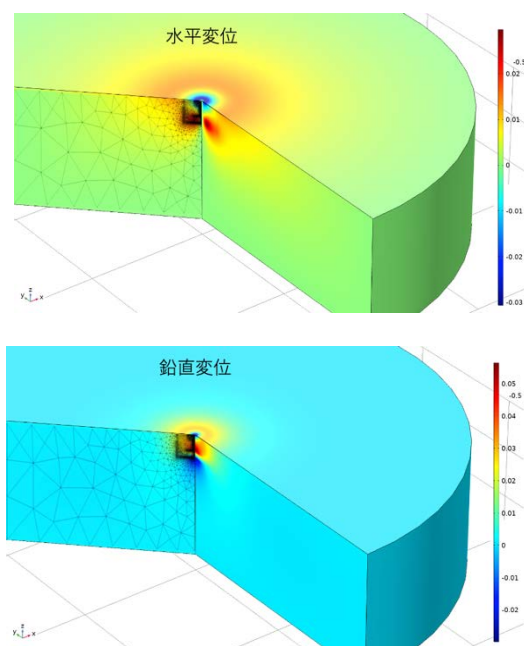


図 55. 火道の浸透率低下後 5 年間の地盤変動分布。

ト 1 名を雇用した。このリサーチアシスタントは、業務の遂行にかかわる情報収集と

国外専門家との議論のために国際学会(国際測地学地球物理学連合:モントリオール)に参加した。

さらに、前年度に引き続き、既存の地熱調査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。参照したのは、JOGMEC(石油天然ガス・金属鉱物資源機構)が公開している NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の地熱開発促進調査報告書(NEDO, 1985³⁷⁾; 1991³⁸⁾である。一部の項目についてはデジタルデータとして公開されているが、コア物性値については報告書の PDF ファイルから数値を読み取る作業が必要であった。昨年度予察的に調べた登別地域のデータの再読み取りに加えて、今年度は新たに弟子屈西部地域の6本の坑井データを整理した。まず、電気検層(100 cm ロングノルマル)による比抵抗値と、コア物性試験結果一覧表から読み取った有効空隙率の関係を確認した(図 56)。その際、横山・他(1986)³⁹⁾の実験式(安山岩)を参考にして、比抵抗の温度依存性を補正して 20°C の比抵抗値に換算した。その結果、比抵抗と有効空隙率の相関は補正前よりも高くなった。大半の試料は空隙率 1%以上の範囲にあり、空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向が認められる。このことは、この範囲では空隙が水で満たされていると見なせ、Archie の法則がほぼ成り立っていることを示唆している。バルクの比抵抗を ρ 、間隙水の比抵抗を ρ_w 、空隙率を ϕ で表すと、Archie 則は $\rho = a\phi^{-m}\rho_w$ と書くことができる(a, m は定数)。両対数グラフでの傾きは m 値を表しており、今回のデータでは m は約 1.5 であることがわかった(図 56 右)。一方、空隙率が 1%未満の試料は、この傾向から明瞭に外れた低比抵抗側にプロットされた。仮にこのように空隙率の低い領域で Archie 則を適用しようとすると、比抵抗値が極めて低い間隙水を仮定しなければならず、現実的ではない。この領域では、強い変質に伴う粘土鉱物などの高導電性物質が圧密を受けて、空隙が電氣的に連結した状態になっていると考えるのが妥当と思われる。実際に、この領域にプロットされたデータ(図 56 右の破線楕円で示した領域)のほぼすべては、登別の坑井 N63-NB-4 の 1000m 以深の試料によるものであり、変質した玄武岩質凝灰岩～凝灰角礫岩(大曲沢層)から成っている。ただし、粘土鉱物としてはスメクタイ

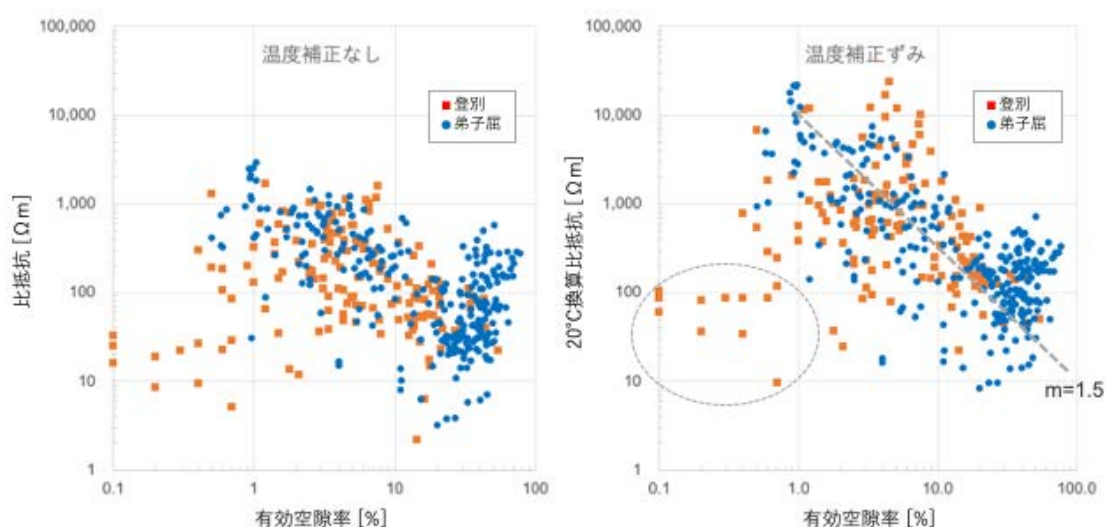


図 56. 有効空隙率と比抵抗の関係 (NEDO のボーリングデータ^{37), 38)}。

ト（モンモリロナイト）ではなく緑泥石に富んでいて、石英脈の多い珪化帯である。近年の研究では、火山地帯で行われる比抵抗探査で検出された数 Ωm 以下の低比抵抗帯は、スメクタイトに富む不透水層と解釈されていることが多いが、本研究の結果を見る限りでは、こうした状況はむしろ例外的である可能性もある。

次に、変質鉱物と比抵抗の関係を整理した（図 57 及び図 58）。NEDO の報告書には、顕微鏡観察で変質鉱物の量が記載されているので、各鉱物について、微量を 1、少量を 2、中量を 3、多量を 4 として数値化した。ここでは、その単純和を「粘土鉱物量」として定義した。さらに、これらの粘土鉱物がバルク比抵抗に与える影響度の違いを考慮するために、白水（1988）⁴⁰⁾、高倉（2014）⁴¹⁾に示された、粘土鉱物の陽イオン交換容量（CEC）を参考に、モンモリロナイトに 80、緑泥石に 6、セリサイトに 13、カオリンに 6 の係数を各粘土鉱物量にかけた和を、「粘土鉱物導電指標」と定義した（カオリンの記載がない弟子屈西部地域ではそれ以外の 3 種で算出）。その上で、それぞれと 20℃換算比抵抗の関係を調べたのが図 57 及び図 58 である。図 57 を見ると、粘土鉱物量と比抵抗は一見して概ね正の相関を示している。ところが、CEC を反映した粘土鉱物導電指標との関係（図 58）で見ると様相は大きく異なっており、粘土鉱物導電指標が 80 未満の試料と 80 以上の試料の間には、比抵抗値に明瞭なギャップがあることがわかる。このギャップは、試料にモンモリロナイトが含まれているか否かの違いに対応している。この結果は、モンモリロナイトは微量であっても比抵抗値を下げる効果が大いというこれまでの知見（例えば高倉，1995）⁴¹⁾とも整合的である。ただし、比抵抗が低いことは、鉱物種を問わず粘土の量が多いことを意味するわけではなく、モンモリロナイト以外の粘土量が多い試料はむしろ逆に高比抵抗を示す傾向にあることには改めて注意が必要である。

本サブテーマでは、水蒸気噴火の発生場となるような、熱水系の上部に難透水性のキャップ構造をいかにして同定するか、という点が重要になるので、この観点からここまでの知見を整理しておく。スメクタイト（モンモリロナイト）は、概ね 200℃以下の低温域でしか安定的に存在せず、膨潤性が高いことから、熱水系の上部に難透水

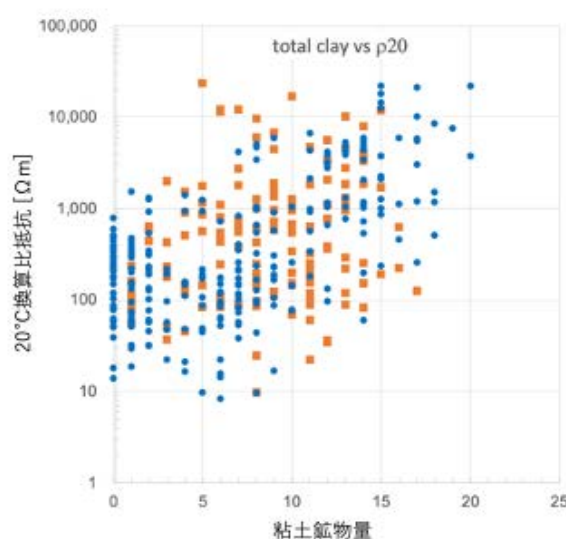


図 57. 粘土鉱物量と比抵抗の関係。

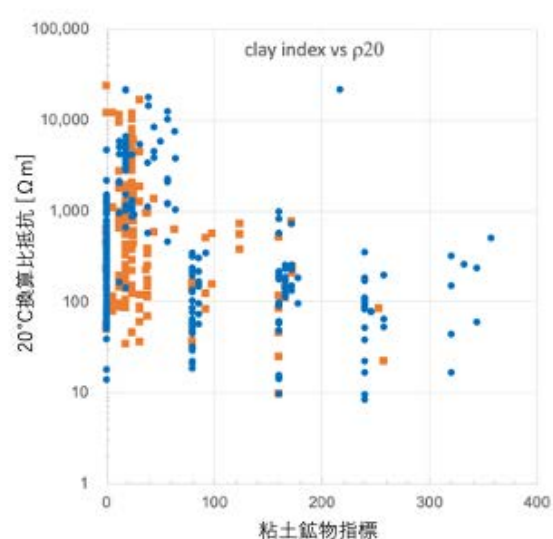


図 58. 粘土鉱物導電指標と比抵抗の関係。

性キャップを形成する原因物質の候補として考えやすく、かつ、CEC が高く表面電導によってバルク比抵抗を下げる効果が高い（高倉, 2014⁴²⁾）。しかし、ある領域の比抵抗値が低い（例えば数 $10 \Omega\text{m}$ 以下）ことのみを根拠として、その空隙率が低いと推測することには明らかに無理があると言わざるを得ない。こうした低比抵抗域は、むしろ熱水貯留層そのものに対応した高空隙率域である可能性も十分あり得ることを念頭に置く必要がある。非噴火時の地震活動や地盤変動との関係なども考慮し、いくつかの候補となる浸透率構造を想定した熱水流動シミュレーション等に基づいて、仮定した構造の妥当性も評価することが必要と考えられる。本サブテーマで調査対象としてきた霧島硫黄山や倶多楽の比抵抗構造についても、このような目で再度見直してみる必要がある。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

火山活動の活発化や噴火に伴い、火山周辺では様々な波形を持つ地震や微動が発生する。これら互いに異なった特徴の波形を持つ火山性地震や微動は、火口周辺や火山体内部で起こっている火山現象と密接な関連があり、その発生機構の解明や発生頻度の時間変化に関する研究は、火山噴火現象の理解の側面からだけでなく、火山噴火予測を目指した防災対応の高度化への応用など幅広い目的で推進されてきた。火山性地震は火山活動の変化を示す最も重要な指標であるとされ、火山観測の歴史では当初から主要な位置を占めており（McNutt, 1996）⁴³⁾、多くの火山で様々な観測手法で活動監視されている現在であっても、最も重要な観測手法であると言える。火山性地震はその波形の特徴により、古くからいくつかの種類に分類されてきた。Minakami (1960)⁴⁴⁾ は複数の火山での地震活動に関する研究を精力的に行い、そこで発生している火山性地震の波形の特徴、震源分布、その時の火山活動の対比から、火山地域で発生する震動を A 型地震、B 型地震、爆発地震、火山性微動に大別した。この分類は現在においても火山噴火活動監視に有効であり、日本のみならず海外でも広く用いられている。火山性地震は波形の特徴、例えば卓越する震動の周期、S 波初動が明瞭に見られるか、振動継続時間の長短等で判別され、その呼び方も火山毎に異なり、統一されていないことが多い（西村・井口, 2006）⁴⁵⁾。

このような異なった波形を持つ火山性地震の発生機構を解明するための最初のアプローチは、種別の異なる地震の発生場所がどれほど異なるかについて解明し、その発生頻度と火山活動の関連を明らかにすることが有効であろう。本報告書の「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) 三宅島における機動観測」において、三宅島における地震機動観測を行い、最近の地震活動について報告した。その際、S 波初動が明瞭に読み取れる A 型地震とそれ以外の BH 型、BL 型地震の震源分布に明瞭な差異があり、その境界は海拔下約 1 km にあり、地下比抵抗構造が急変する深さに対応していることを述べた。当初、この地震種別の判定は、検測者の主観的な判断で行ってきたが、本システムを用いて、客観的に判定する仕組みの開発を開始した。

従来、火山周辺で発生する A 型地震と B 型地震の判別は、その観測波形の卓越周波数が異なることから、低周波数帯域の振幅と高周波数帯域の振幅比から判断してきた。例えば、2006 年 Alaska の Augustine 火山の噴火において、Buurman and West (2010)⁴⁶⁾ は噴火前から噴火に至るまでの多数の火山性地震を、次式で定義される周波数指数 (*FI*) : 地震波形の高周波数成分と低周波数成分の比を用いて、地震活動と火山内部状態の時間変化について考察している。

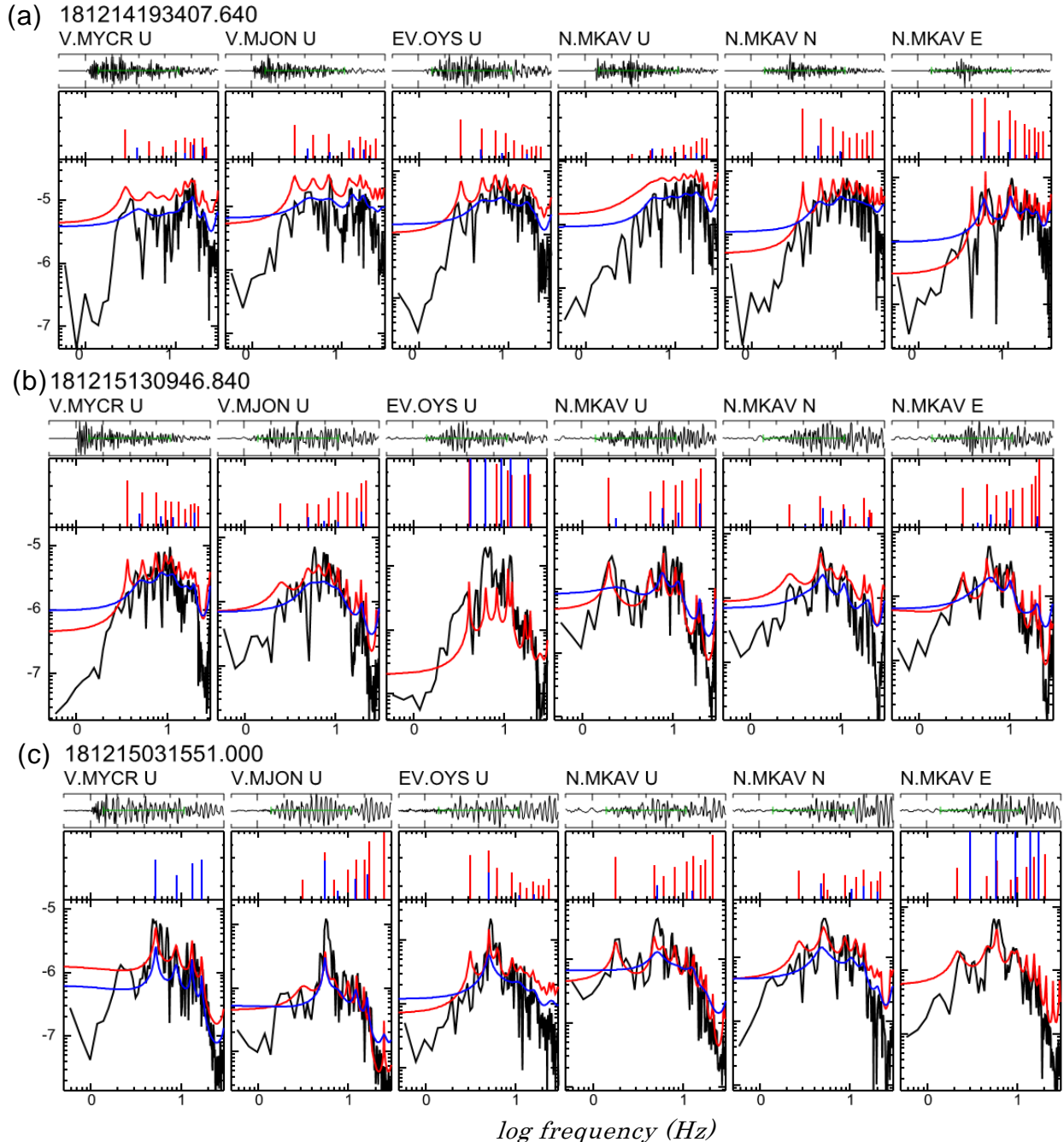


図 59. 4 観測点での波形と振幅スペクトル。黒は FFT による推定、赤は AR による推定、青は次数を低減させた AR による推定。(a)は A 型地震、(b)は BH 型地震、(c) BL 型地震。

$$FI = \log_{10} \left\{ \frac{\text{mean}(A_{\text{upper}})}{\text{mean}(A_{\text{lower}})} \right\},$$

この時の Augustine 火山の噴火場合には、低周波数側として 1~2Hz の帯域を、高周波数側を 10~20Hz とし、 FI が -0.4 以上を高周波地震、-1.3 以下のものを低周波地震として、その間の地震を Hybrid 地震と分類し、噴火に前駆して高周波地震が、噴火を繰り返すうちに低周波地震が増えることを示している。このような地震の種別の変化は、他の火山でも見られることもあり、火山活動評価に重要な指標として利用されている。しかしながら、これらの波形変化には色々な原因が考えられるので、その変化と火山内部状態の変化を結びつけるのは容易ではない。一方、三宅島では震源の深さにより、発生している地震の種別が異なることが示され、周辺岩体の物性のよりこれらの地震の発生条件が異なる可能性が示唆され、A 型と B 型の地震の発生原因の相違を解明するため、地震種別を客観的に判別することが重要となる。

三宅島における A 型地震、BH 型地震、BL 型地震の特徴を抽出するため、図 59 に図 8 で示した 4 観測点での (a) A 型地震、(b) BH 型地震、(c) BL 型地震の振幅スペクトルの例を示す。この例で示したように、A 型地震の多くはほぼすべての観測点の波形で数

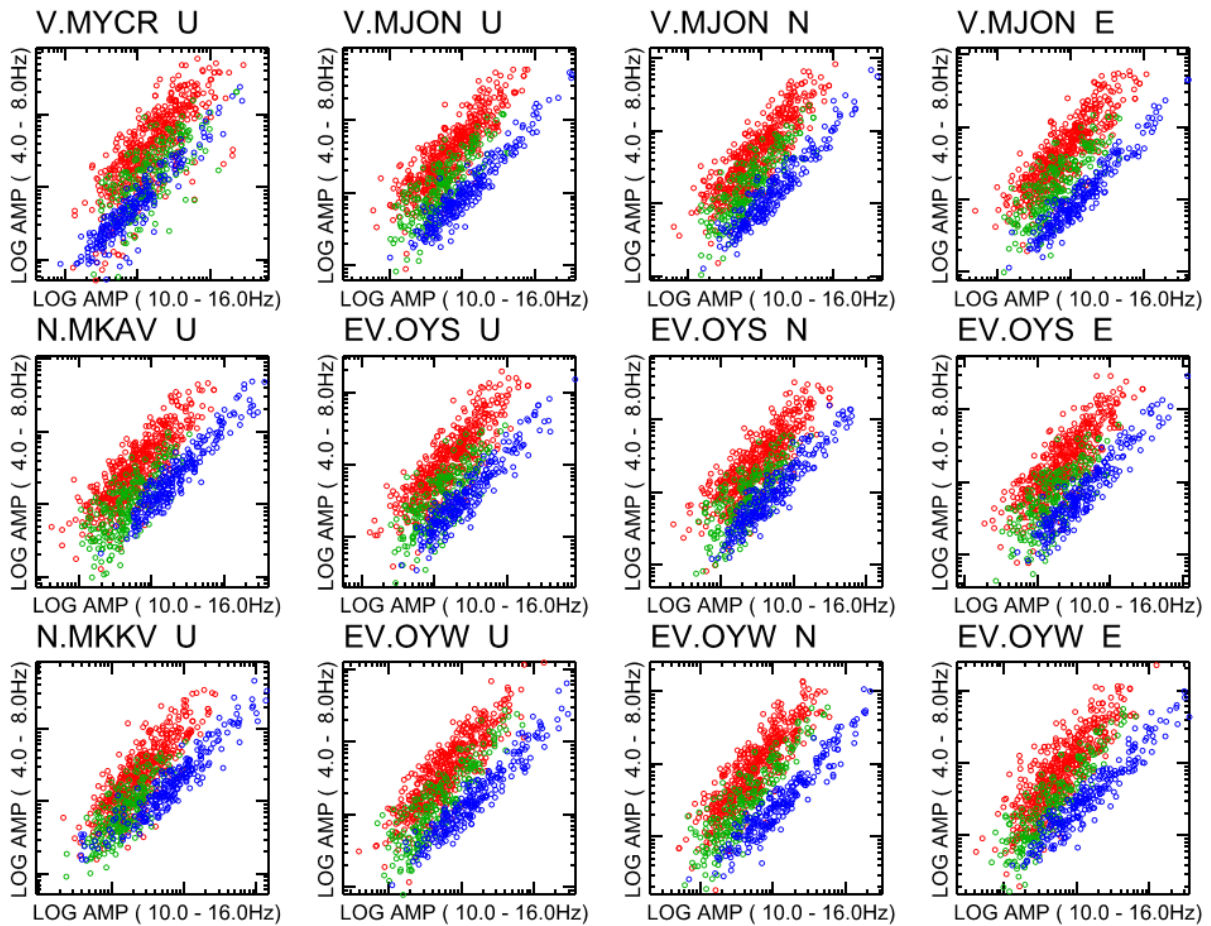


図 60. 三宅島の各観測点の各成分での地震波形振幅の 4~8Hz 成分と 10~16Hz 成分の比。色は検測者が主観的に判定した地震種別を示す。青：A 型地震（244 イベント）、緑：BH 型地震（218 イベント）、赤：BL 型地震（491 イベント）。地震種別によって、2 つの周波数帯域での振幅比が異なり、地震種別の判定に利用できる。

Hz から十数 Hz の帯域で大きな振幅を持ち、BL 型地震ではどの観測点でも数 Hz にスペクトルのピークを持ち、高周波での振幅は小さい。BH 型地震は A 型地震と BL 型地震の中間の周波数帯域で振幅が大きい。つまり、三宅島でも Augustine 火山で導入されたように周波数指数 (FI) を導入することは有効である。図 59 で示した三宅島の A 型、BH 型、BL 型地震の周波数スペクトルを参考にして、4~8Hz と 10~16Hz の 2 つの周波数帯での各イベントの振幅分布を図 60 に示した。この図では検測者が判断した地震種別により、色を変えてそれぞれの周波数帯域の振幅をプロットした。これから明らかなように、検測者が A 型地震と判定したものは高周波数側の振幅が低周波側の振幅に比べて相対的に大きく、BL 型と判定したものは低周波側の振幅が相対的に大きい。つまり、三宅島においても地震種別の判定に周波数指数を利用することは極めて有効であることが確認できた。

周波数指数の性質を詳しく見るため、本プロジェクトで広帯域地震計を設置した雄山西 (OYMS) 観測点及び防災科学技術研究所の設置したボアホール観測点である阿古観測点 (MKAV) の 2 観測点で、解析したすべての地震についてそれぞれの観測点で観測された波形の振幅 (X 軸) と図 60 で示したすべての観測点・成分での周波数指数の平均値と標準偏差 (Y 軸) が、地震種別によりどのように分布するかを図 61 に示した。ここでは示さないが、多くの観測点で共通して見られる特徴として、図 61(a) で示すように低周波数側の振幅を基準とした場合には、振幅が小さくなると脈動等の低周波数側のノイズの影響が大きくなり、A 型地震と BL 型、BH 型の地震の判別が困難になる。一方、高周波数側の振幅を基準にすると、振幅によらず周波数係数は地震種別ごとに分かれて分布し、その判別は容易になる傾向が見える (図 61(b), (c))。さらに、観測点によって周波数指数による地震種別が容易な観測点 (図 61(c)) とそれほど容易でない観測点 (図 61(b)) があり、どの観測点の組み合わせで、どのような基準で地震種別をするのが最適であるかを見出すアルゴリズムを作り出すことが、次の課題として考えられる。

本年度は、三宅島の機動観測で得たデータを用いて、火山活動の評価に重要な地震種別の判定に周波数指標という特徴量が有力であることを示した。さらに、いくつかの観測点でその特徴量のあらわれ方が異なることも示した。ここでは地震波形の周波数スペクトルを推定する際に FFT を用いたが、スペクトル推定には自己回帰 (AR) 過程の適用による推定方法 (例えば、北川, 1993⁴⁷⁾) もある。この方法による試行もすでに一部で行い (図 59 の赤線や青線)、ほぼ同様の結果を得ている。地震波形の AR 過程の適用による解析手法は、地震波形の特徴を少数のパラメータで表現できることから、昨年度の成果報告書で示したように N 型地震の判定に有力な手法と考えられる。今年度の A 型、BL 型、BH 型地震の判別に加えて、同じパラメータを用いて N 型地震の判別が可能になれば、より効率的な地震種別の判定方法が開発できると期待される。今後は、観測点ごとに特徴量の現れ方が異なることも考慮に入れて、精度の高い地震種別の判別方法を自動的に見つけ出すアルゴリズムの開発を目指す予定である。

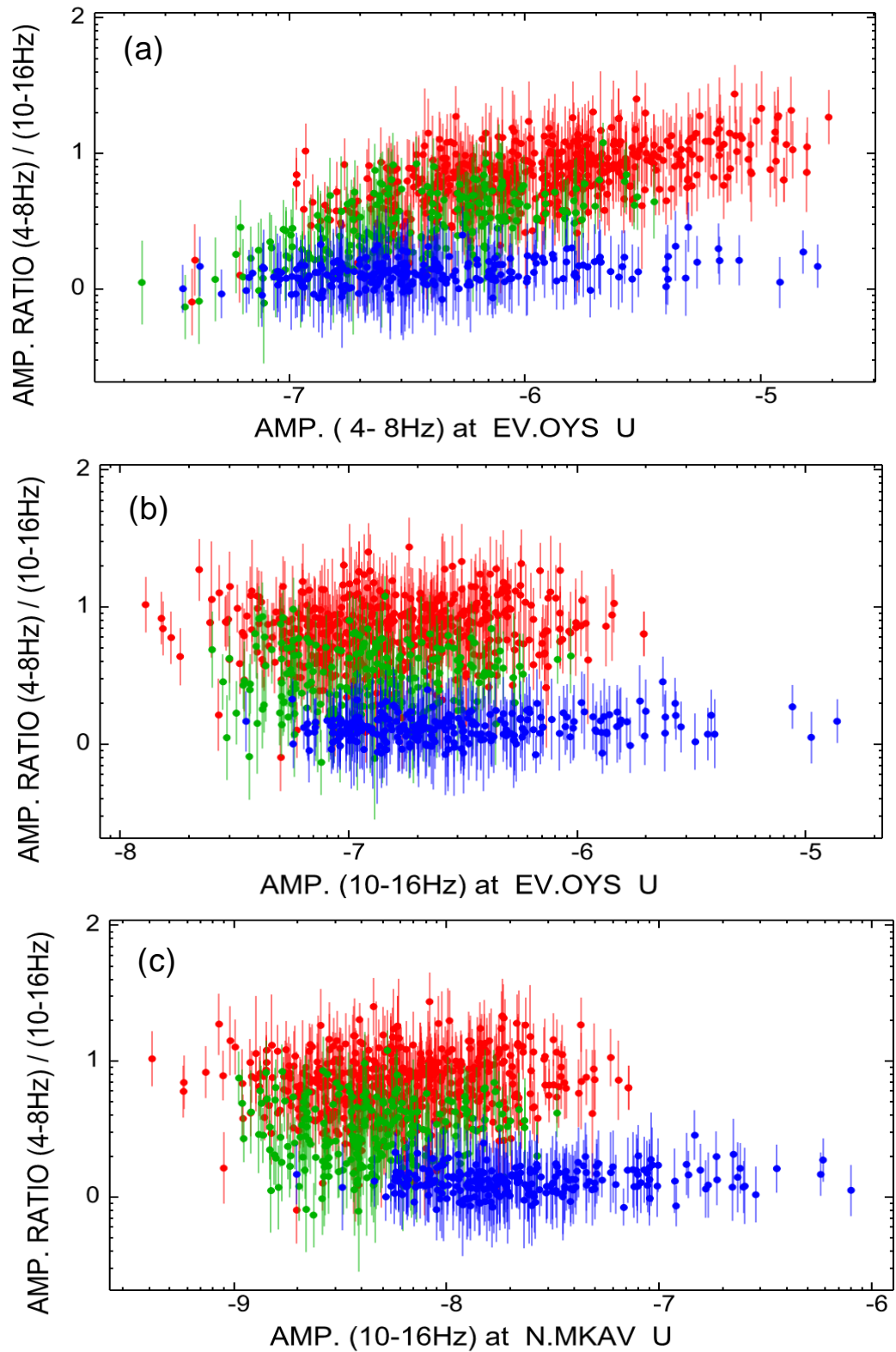


図 61. 観測点での振幅と全観測点・成分で平均した周波数指数（周波数帯域 4～8Hz と 10～16Hz の振幅比）の分布。(a) 雄山南観測点低周波帯域の振幅を基準。(b) 同観測点の高周波域振幅を基準。(c) 阿古観測点の高周波域振幅を基準。青：A 型地震（244 イベント）、緑：BH 型地震（218 イベント）、赤：BL 型地震（491 イベント）。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

本年度は、遠隔熱情報解析システムの実践的な運用を行いつつ装置の改良を進めた。その結果、従来までは測定や採取することがほぼ不可能であったデータについても、研究者自身で観測することが可能となった。これにより、火山活動で危険になった地域に近づくことなく、火口温度測定および水・ガス試料の分析を行い、熱学的な観測情報を行政機関へ提供できた。以下に、4つの内容に大別して報告する。

i) 草津白根火山での観察飛行と行政機関への情報提供

火山活動の変化に対応して 2019 年度は 9 回にわたりドローンを飛行させ、同火山の活動中心である湯釜火口湖面を高解像度カメラで撮影した(図 62)。その結果、2019 年 6 月 30 日の火山性微動に対応して、湖面が黒灰色に変色する現象を確認した。画像資料を気象庁火山噴火予知連絡会へ提供したほか、草津町に対しては湖水分析結果とともに解説を行った。

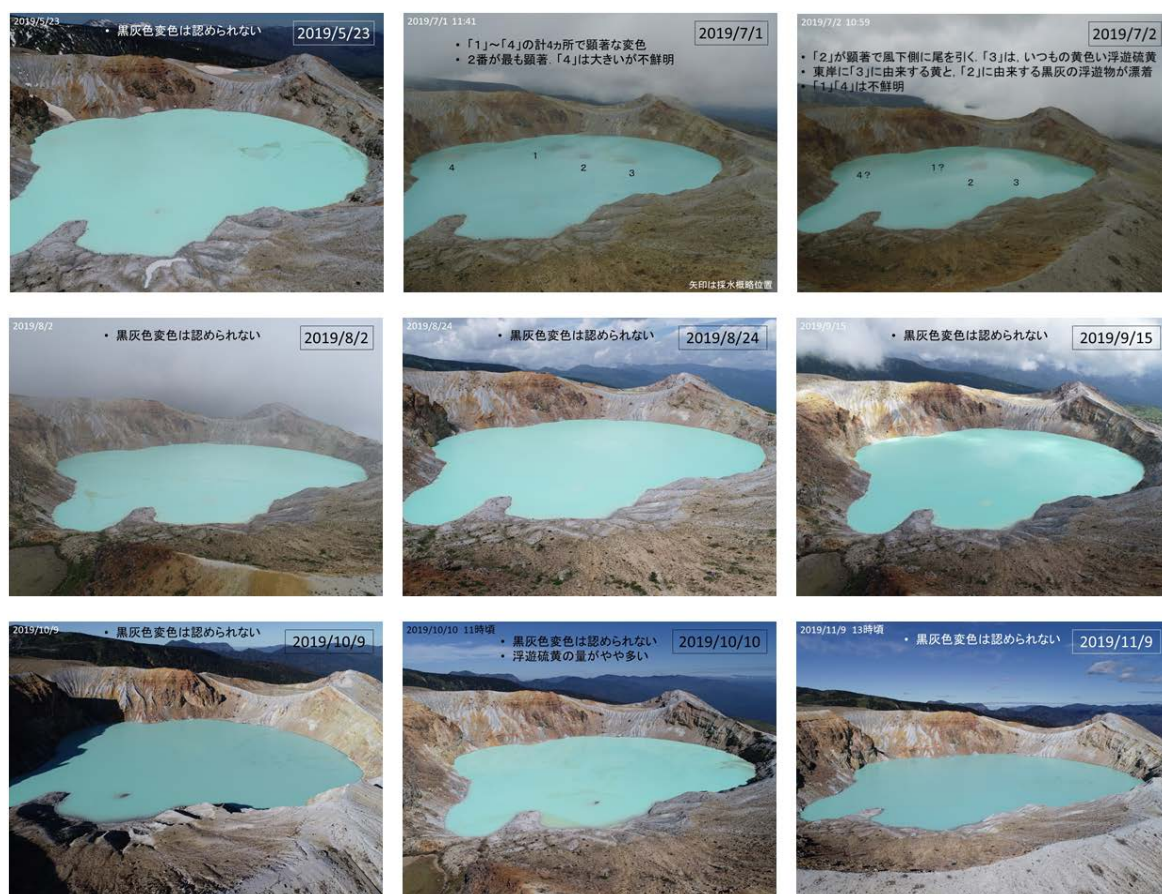


図 62. 2019 年に実施した草津白根火山湯釜火口湖の定点空撮画像の遷移。火山性微動発生直後の 2019 年 7 月 1 日と 2 日に黒灰色変色域を認識した(上段中・右)。

ii) 草津白根火山・湯釜火口湖からの採水作業高度化

昨年までに開発してきたドローンをを用いた火口湖からの遠隔採水技術⁴⁸⁾をさらに高度化し、任意の場所・深度からの採水を可能とした。本手法は、遠隔操作可能なドロー

ン用ウインチ（NSi 真岡社製）を用いることで実現したもので、i)で述べた変色水域、あるいは湖底熱水湧出孔近傍からの水試料採取を繰り返し実施した（図 63）。

分析の結果、従来からの湖岸定点で人手により採取されてきた試料とは異なる組成比を有する試料をドローンによって得られたことを確認した。数値計算から予測される火口湖組成の時間変化と比較した結果は、湖底熱活動の変化を、従来よりも敏感かつ早期に捉えられる可能性を示唆するものであった⁴⁹⁾。

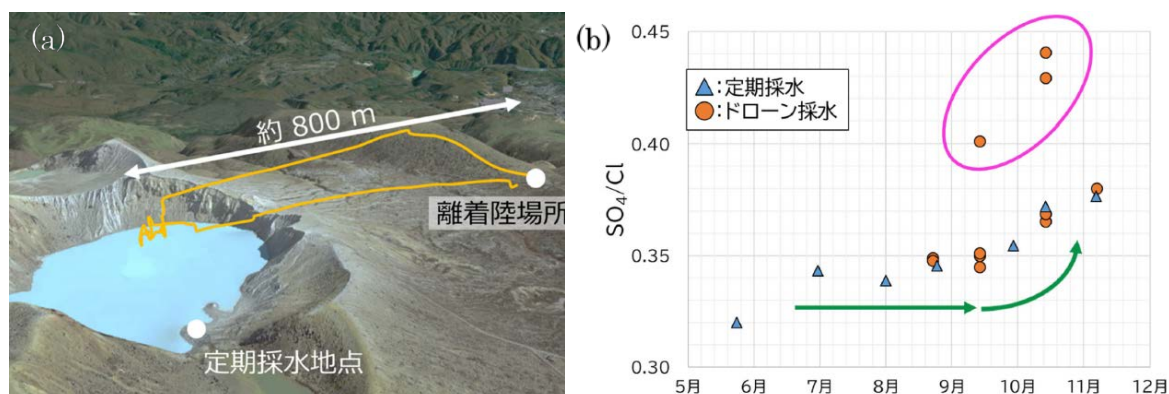


図 63. (a) 草津白根火山湯釜火口湖の湖底湧出孔付近、水深 20m からの採水。(b) 定点採水とドローン採水の比較。定点で SO_4/Cl 比が長期的に上昇するよりも前に、ドローン採水では高い SO_4/Cl 比が検出された。

iii) 室内実験に基づくドローン搭載ガス観測装置の制作

ドローンによる噴煙観測では、限られた短い時間で測定する必要がある⁵⁰⁾。このような測定を安価なシステムでの実現を目指し、室内実験を行った。その結果、風速 1.5 m/s の送風を行うことで各センサの応答時間を揃え、従来まで想定された濃度値の不確定を 120 % から約 30 % へと大きく減少できた（図 64）。以上の仕組みをパッケージ化することで、ドローンによるガス組成比測定をより正確に実施できるようになった。

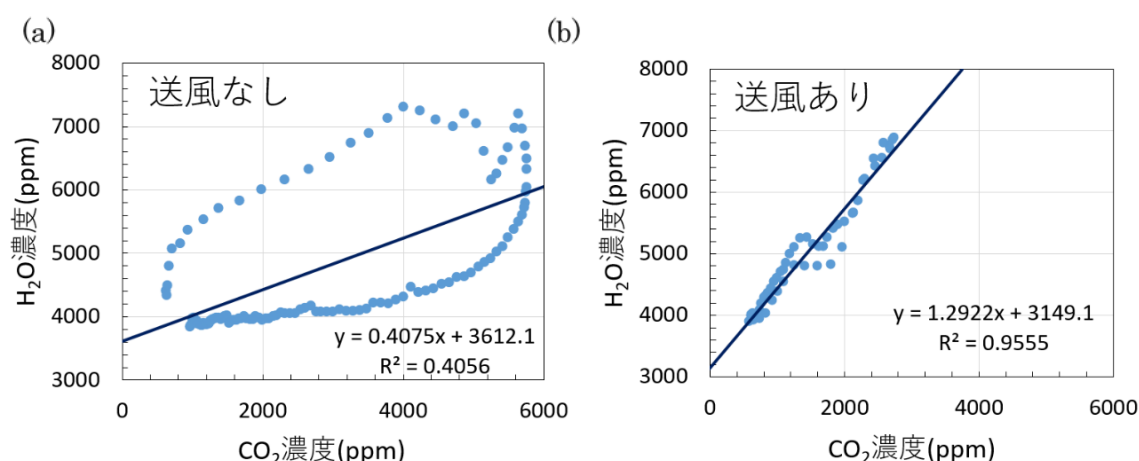


図 64. H_2O と CO_2 濃度比の測定。 H_2O と CO_2 濃度を同時測定し、同時刻における両ガスの濃度を表示したもの。センサ応答時間が一致しているとき、その直線的関係に基づき濃度比を見積もることができる。（左）送風の無い状態。（右）送風を与えた場合。

iv) 伊豆大島三原山火口での火山ガス観測

三原山火口底内の主噴気を2019年6月4日にドローンを用いて観測した(図65(a))。同火口は、ほぼ垂直な火口壁に囲まれているうえ、噴気が小規模であることが観測を困難としている(図65(b))。本観測では、iii)で述べたウインチの実用実験として、火口近傍からドローンを離陸させ、ウインチを用いてセンサを降下させた。測定の結果、主噴気の $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比を初めて測定することができた(図65(c))。組成比は、三原山火口外で最も優勢な剣が峰噴気(Ke)の組成比に近く、三原山周辺の熱水系について重要な示唆が得られた(図65(d))。伊豆大島火山の活発化時には、さらに遠方のカルデラ壁に位置する御神火茶屋などから同様の観測を実施することも可能であり、活動活発化時でのドローンを用いた安全な火山ガス採取の実現に目途が立った。

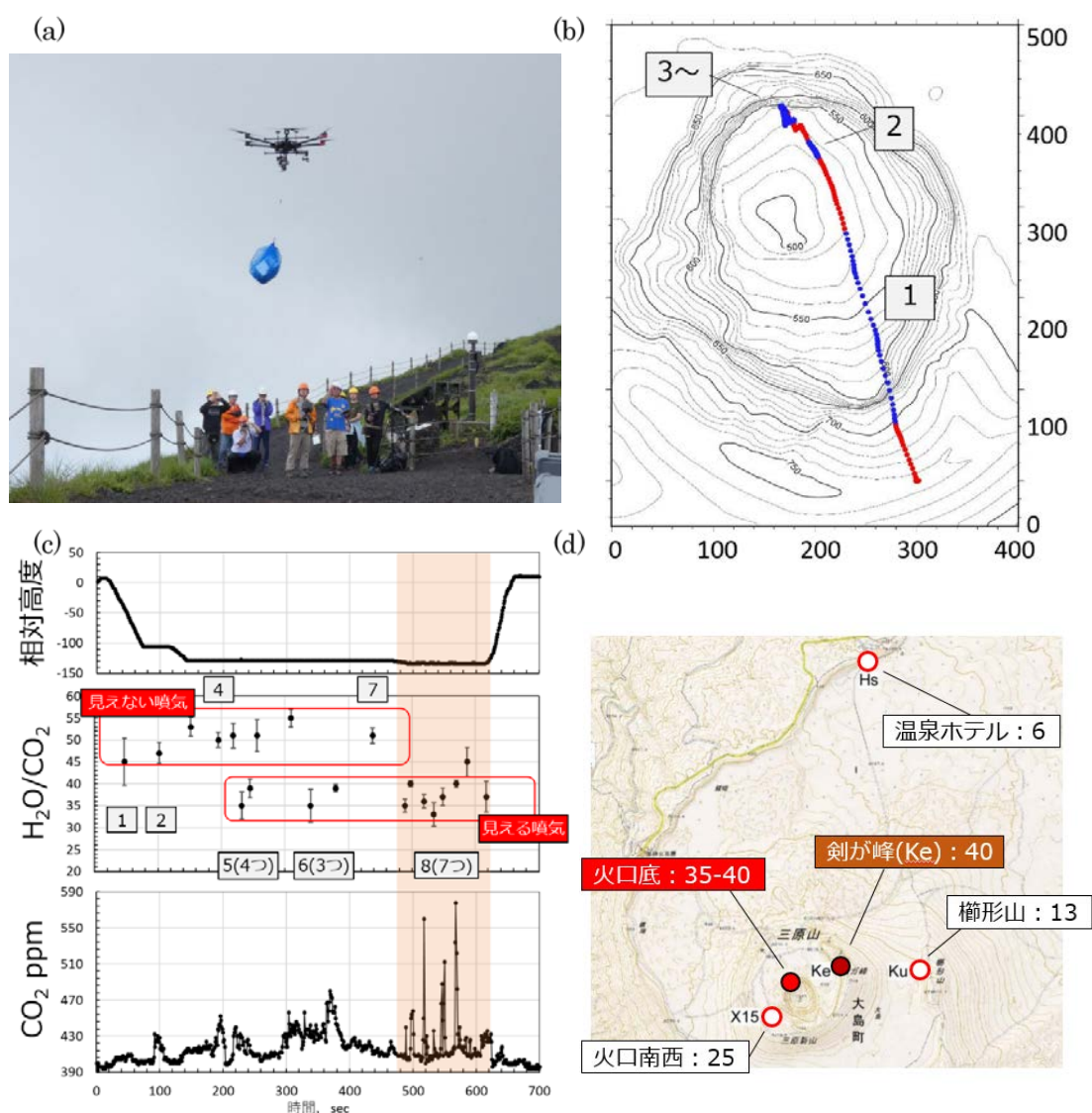


図 65. (a) 離陸の様子。三原新山展望台付近。(b) 飛行経路。青は火山ガスが計測された領域。(c) ドローン相対高度、見積もられた組成比、および処理前の測定 CO_2 濃度値。ピーク 1、2、4 および 7 は目に見えないが火口内に滞留している噴気ガス。オレンジハッチはウインチ降下中に対応する。(d) $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 組成比の空間分布。

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連続解析し火山体内部の状態変化を評価するために地震波干渉法解析⁵¹⁾⁵²⁾、地震波逆伝播解析⁵³⁾⁵⁴⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。

令和元年度は、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計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを引き続き進めるとともに、平成30年度に試作した地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの改良及び機能強化を行った。また、地震波逆伝播解析部のGUIについての検討を行い、MATLABを用いたGUIプロトタイプを試作を行った。さらに、地震波動場連続解析システムを安定的に運用するために必要となるデータ伝送安定化に向けた通信・電源システムの運用試験を引き続き実施するとともに、本プロジェクトで取得した観測データ等を用いた連続解析の試行を進めた。

地震波干渉法解析については、観測点からリアルタイムに送られてくる連続波形データを準リアルタイムに処理し、解析結果をデータベースに格納を行っている。今年度も全国地震観測データ流通ネットワークJDXnetにリアルタイム配信されている活火山周辺の地震観測データについて地震波干渉法解析結果の蓄積を継続し、解析プログラムの動作安定性を確認することができた。これらの解析結果から火山帯内部状態の変化を抽出するために開発中の地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの概要を図64に示す。本表示ソフトウェアでは、解析結果を格納したMySQLデータベースから、表示する観測点ペアや解析条件を画面上で指定し、解析結果を表示することを効率的に行うことができる。なお、本表示ソフトウェアはJavaで作られているため、WindowsやLinux等のOSで稼働するクライアントとして実行可能である。今年度は、平成30年度に実装した解析結果表示機能の改良に加え、ユーザが選択した基準期間の相互相関関数の平均に対する全解析期間の解析結果の差分を表示する機能などを実装し機能強化を

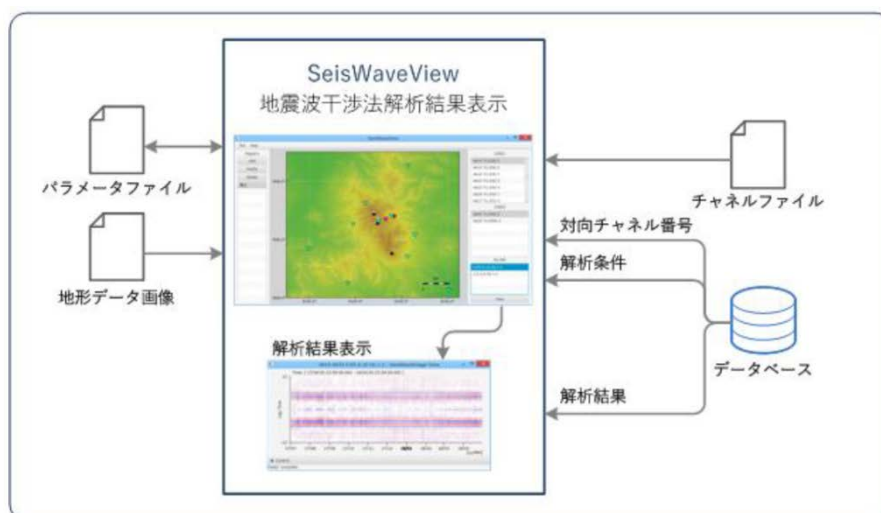


図 66. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの概要。本表示ソフトウェアでは、解析結果を格納したデータベースから、表示する観測点ペアや解析条件を画面上で指定し、解析結果を効率的に表示することができる。

行った（図67）。これにより、火山内部状態変化による地震波速度変化等を多量の解析結果のなかから効率的に確認・可視化することが可能になった。

本プロジェクトで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、蔵王火山・吾妻山での機動地震観測点で検証を進めるとともに、本プロジェクト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。展開した臨時地震観測点のうち、KSI観測点及びKSKN観測点では、太陽電池2枚のみで収録機器・通信機器への給電を行っているが、2018年の設置以来現在まで冬季の積雪期も含めて収録・リアルタイムデータ伝送ともに稼働しており、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。

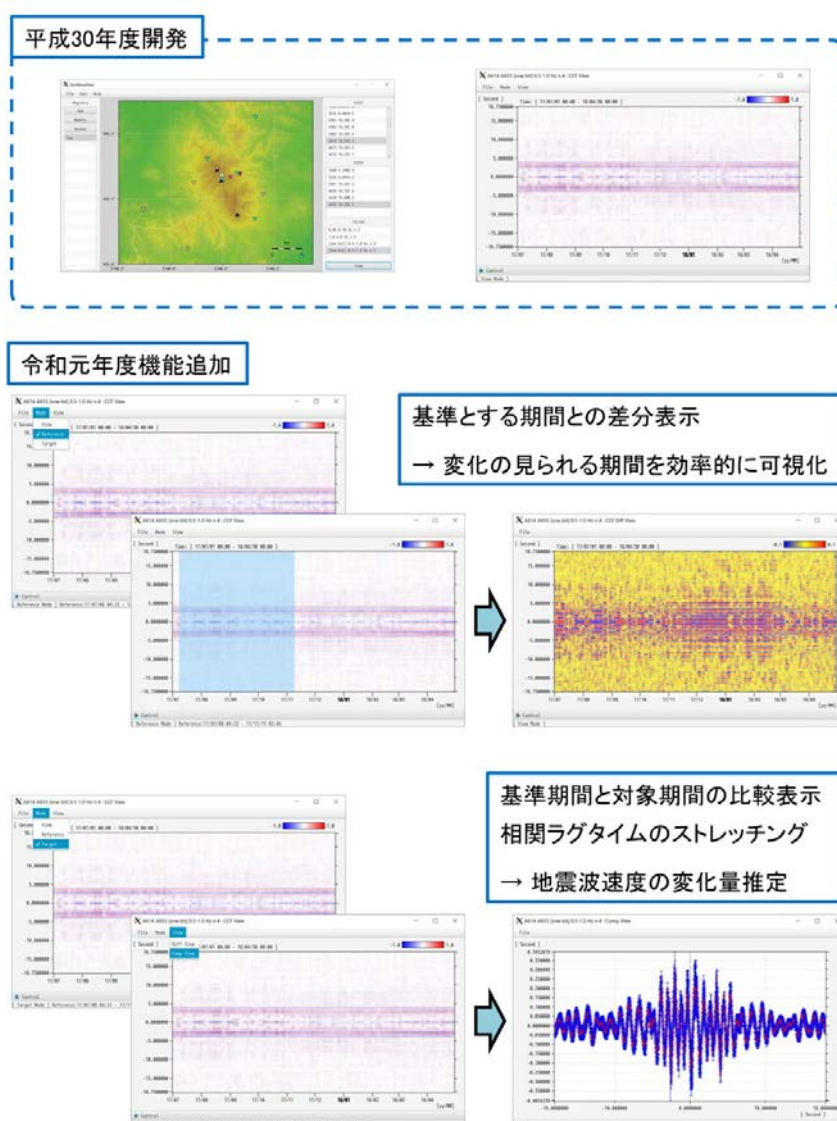


図 67. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの機能強化の概要。火山帯内部状態の変化に伴う地震波速度変化を多量の解析結果のなかから効率的に確認・可視化するために、解析結果（相互相関関数）の基準期間との差分表示・比較表示等の機能を実装した。

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 2 年 1 月 10 日 13 時～15 時に開催し、各サブテーマの進行状況に関する情報交換をおこなった。火山人材育成コンソーシアムの修了生を研究プロジェクトで雇用することが推奨されていることから、来年度も人材育成コンソーシアムから RA の雇用の要請があった。この研究プロジェクトでは、人材育成コンソーシアムとの連携が重要視されていることから、サブテーマの枠を越えて課題 B 全体で、RA の雇用を支えることを確認した。

本課題の社会への利活用を目指し、課題 B の 4 つのサブテーマのこれまでの成果を第 145 回火山噴火予知連絡会、第 1 部火山活動懇談会で紹介し、火山監視にあたる気象庁職員と意見交換を行った。

b) サブテーマ 4「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進会議」を令和 2 年 1 月 24 日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今後協力して実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。特に、プロジェクトの中間評価の結果を踏まえ、今後の方針について協議した。総合協議会からのコメントにあった気象庁との連携強化を目指し、気象庁本庁や管区气象台から多数の参加者があり、情報交換を行った。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った。

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広帯域地震観測に必要な以下の機材を整備した。

MT 観測用インダクションコイル 2 セット（3 成分×2）

これまで購入した機器及び地震研究所の共同利用機器と併せて、本事業の推進に利用した。

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) 結論ならびに今後の課題

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、三宅島と草津白根火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2年度に機動観測を実施予定である蔵王火山において、その準備を進めた。更に、平成30年度まで機動観測を継続していた霧島火山と箱根火山において、機動観測で取得した観測データを解析し、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。

三宅島においては、地震機動観測を一層強化し、浅部で発生する地震活動の詳細の解明に努めた。三宅島浅部で発生している地震は波形の特徴からA型地震とB(BH及びBL)型地震に分けられ、それらの震源の分布は、海拔下約1kmを境にして、それ以浅はB型地震、それ以深はA型地震と明瞭に分かれて分布している。更に、火口域に機動観測点を増設したことによりA型地震の震源を精度よく推定することができ、地震は火口南側直下のみならず、火口から南西側に線状に延びる領域でも発生していることがわかった。この火口の南西領域は、前回の2000年噴火の際にも色々な力源となっていることや、GNSSデータの再解析により2015年末から2016年半ばまでの山体膨張の加速時期の圧力源にもなっていることがわかり、今後の噴火切迫性評価の際の鍵となる領域である可能性が高いことがわかった。また、平成24(2012)年に実施したMT探査の再解析を進め、先に述べたA型地震とB型地震の分布境界である海拔下1kmで地下比抵抗構造が急変していることがわかった。令和元年度には、再度MT探査を実施した。今後はこのデータを解析し、2012年時点の地下比抵抗構造と現在のそれとの時間変化を知り、噴火切迫性評価に活かすことや、比抵抗構造の境界と発生する地震種別の違いの原因について解明することが今後の課題である。

草津白根火山においては、大規模なMT探査を実施し、広域、かつ深部までの地下比抵抗構造の推定に着手した。これまでの解析で、水蒸気噴火発生に重要な役割を果たす火山流体の貯留層と考えられる低比抵抗域は、深くなるにつれ草津白根火山湯釜付近から北方へ延び深さ8kmでは長野県の志賀火山付近の地下まで広がっていることが明らかになった。これまで草津白根火山については、深部構造がわからないため深部からの熱の供給システムの理解が不足し、それが噴火切迫性評価を困難にしていた。今回の解析を進めることで、深部のマグマ供給システムの理解が進み、どの地域の深部活動に注目すべきかの情報が得られる可能性が高い。今後は、地下構造の推定精度を上げるため、令和元年度で良質のデータが得られなかった領域でMT観測を実施する。また、ここで得られた構造と、地震や地殻変動との関連についても引き続き解析を進める予定である。

蔵王火山では、令和2年度の実施予定の機動観測の準備を着々と進め、その実施計画を立てた。霧島火山では、データを再解析し、2018年4月の硫黄山(えびの高原)の水蒸気噴火直前のデータから、興味ある現象を見つかり、今後はその解析を計画している。箱根火山では、これまで推定した深さ約10km程度までの地震波速度構造の推定範囲をさらに深部にまで広げることを目的に、レシーバ関数を利用した速度構造の推定を計画している。その実現可能性をいくつかの観測点で検証した。また、箱根火山2019年の活動活発化の状況と2015年の水蒸気噴火時の状況の比較を行い、噴火切迫性評価の情報

を整理した。

噴火切迫性評価に有用な各種ツールの開発では、霧島火山での観測データを利用して地震計アレイデータ解析システムの開発を進め、利用者からの意見を集約し、公開されているプロトタイプの改良を行った。今後も、利用者からの意見を参考に改善を行う予定である。

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発では、比抵抗構造解析支援ツールのパッケージ化を進め、関連研究者への提供を開始した。また、地下比抵抗構造の推定時の海域地形の影響についての定量的な評価をすすめ、海域の地形は陸域の構造にはそれほど影響がないことを明らかにした。地下比抵抗構造から火山内部状態の推定を目指すため、地下の熱水流動シミュレーションと、弾性変形だけでなく温度や熱水の存在に大きく影響を受ける孔隙弾性変形も取り込んだ解析システムの開発に取り組み、精度の高い水蒸気噴火の切迫性評価を目指している。MT 探査から得られた地下比抵抗構造と透水率という物理量の関連を明らかにするため、ボーリングの検層データとの比較を行い、いくつかの興味深い結果を得た。比抵抗と透水率を結びつけるのは容易ではなく、更に多くの地域でこのような比較が必要である。今後も、このような比較を継続して実施する。

火山性地震活動総合解析システムの開発では、三宅島機動観測データを利用して、A 型地震、B 型地震の判別を自動化する手法の開発に着手した。これまでいくつかの火山で提唱されている周波数指標が、三宅島浅部で発生する地震でも有効であることを確認した。しかし、観測点により地震種別による周波数指標の違いの表れ方が異なるので、どの観測点にどれ位の重みをつかるか等の工夫が必要で、これを自動化する手法の開発を今後目指す予定である。

遠隔熱情報解析システムの開発では、本事業で導入したドローンを研究者自らが操作して、実際の調査飛行を実施する体制を構築しつつある。実際、草津白根火山の湖水の変化や伊豆大島の火口内での火山ガスの採取に成功し、実用的な段階に近づきつつある。今後も搭載するセンサや治具等の開発を進める

地震波動場連続解析システムの開発は、地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析の計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを進め、平成 30 年度に試作した解析結果表示ソフトウェアの改良及び機能強化を行った。今後は、本プロジェクトで取得した観測データ等を用いた連続解析の試行を進め、その有効性の検証を進める。

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

(d) 引用文献

- 1) Uhira, K., T. Baba, H. Mori, H. Katayama and N. Hamada: Earthquake swarms, preceding 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, 67, 219-230 2005.
- 2) Ukawa, M., E. fujita, E. Yamamoto, Y., Y. Okada and M. Kikuchi: The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakajima observation network, *earth Planets Space*, 52, xix-xxvi, 2000.
- 3) Kaneko, T., A. Yasuda, T. Shimano, S. Nakada, T. fujii, T. Kanazawa, A. Nishizawa and Y. Matsumoto: Submarine frank eruption preceding caldera subsidence during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, 67, 243-253, 2005.
- 4) 酒井慎一, 山田知朗, 井出哲, 望月将志, 塩原肇, ト部卓, 平田直, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 西沢あずさ, 藤江剛, 三ヶ田均: 地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動, *地学雑誌*, 110, 145-155, 2001.
- 5) Irwan, M., F. Kimata, N., Fujii, S. Nakano, H. Watanabe, S. Sakai, M. Ukawa, E. Fujita and K. Kawai: Rapid ground deformation of the Miyakejima volcano on 26-27 June 2000 detected by kinematic GPS analysis, *earth Planets Space*, 55, e13-e16, 2003.
- 6) Ueda, E., E. Fujita, M. Ukawa, E., Yamamoto, M. Irwan and F. Kimata: Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 activity of Miyakejima, Central Japan, inferred from tilt and GPS data, *Geophys. J. Int.*, 161, 891-906, 2005.
- 7) 松山 諒太郎: 2000 年三宅島噴火のマグマ貫入に関連する震源移動現象の研究, 東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文, 1-69, 2014
- 8) Nakada, S., N. Nagai, T. Kaneko, A. Nozawa and K. Suzuki-Kamata: Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, 67, 205-218, 2005.
- 9) Kumagai, H., T. Ohminato, M. Nakano, M. Ooi, A. Kubo, H. Inoue and J. Oikawa: Very-long-period seismic signals and caldera formation at Miyake Island, Japan, *Science*, 293, 687-690, 2001.
- 10) Kobayashi, T., T. Ohminato, Y. Ida and E. Fujita: Very long period seismic signals observed before the caldera formation with the 2000 Miyake-jima volcanic activity, *japan, J. Geophys. Res.*, 114, B02211-
doi:10.1029/2007JB005557, 2009.
- 11) Kobayashi, T. and T. Ohminato: Intermittent inflations recorded by broadband seismometers prior to caldera formation at Miyake-jima volcano, in 2000, *Earth Plane. Sci. Lett.*, 357-358, 145-151, 2012.
- 12) Kazahaya K., Y. Nakahori, H. Mori, H. Iino, M. Miyashita, J. Hirabayashi, H. Shinohara, K. Uto and M. Odai: Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano,

- Japan, caused by caldera collapse, *Geology*, 32, 425-428, 2004.
- 13) Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth: A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368, 2000.
 - 14) Chave, A.D., and D. J. Thomson: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, *Geophys. J. Int.*, 157, 988-1006, 2004.
 - 15) Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote reference, *Geophysics*, 44, 53-68, 1979.
 - 16) Siripunvaraporn, W., and G. Egbert: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth Planet. Int.*, 173, 317-329, 2009.
 - 17) Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis: TOUGH2 User' s Guide, Version 2.1, Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., 2012.
 - 18) Seki, K., W. Kanda, T. Tanbo, T. Ohba, Y. Ogawa, S. Takakura, K. Nogami, M. Ushioda, A. Suzuki, Z. Saito and Y. Matsunaga: Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 325, 15-26, 2016.
 - 19) Kanda, W., M. Utsugi, S. Takakura, H. Inoue: Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model, *Earth Planets Space*, 71:37, 2019.
 - 20) Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita and Y. Ogawa: Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 390, 106742, 2020.
 - 21) Usui, Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya and T. Kagiya: Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, *Geophys. J. Int.*, 208, 1359-1372, 2009.
 - 22) Amante, C. and B. W. Eakins: ETOP01 1 Arc-Minute arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp., 2009.
 - 23) Zumberge, J.F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005-501, 1997.
 - 24) Fukui, Y., S. Ando, K. Fujiwara, S. Kitagawa, K. Kokubo, S. Onizawa, T. Sakai, T. Shimbori, A. Takagi, T. Yamamoto, H. Yamasato and A. Yamazaki: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013, Kagoshima, 2013.

- 25) Ichiki, M., T. Kaida, T. Demachi, S. Hirahara, T. Nakayama, M. Yamamoto, S. Miura, T. Moriyama, M. Akutagawa, T. Kobayashi, S. Matsuura, S. Omori, K. Ono, S. Seki, W. Kanda, K. Seki, Y. Ogawa, M. Ushioda, M. Uyeshima: Audio-frequency magnetotelluric, and total magnetic intensity observations in 2014-2016, at Zao volcano, NE Japan, AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017.
- 26) Matsu'ura, M., and Y. Hasegawa: A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Phys. Earth and Planet. Int.*, 47, 179-187, 1987.
- 27) Bagnardi, M., and A. Hooper: Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 2194-2211. Doi:10.1029/ 2018GC007585, 2018.
- 28) Ban, M., Y. Takebe, T. Adachi, R. Matsui and Y. Nishi: 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.
- 29) Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato: Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi:10.1029/2011GL050542, 2012.
- 30) Matoza, R. S., and D. Fee: Infrasonic component of volcano - seismic eruption tremor, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1029/2014GL059301, 2014.
- 31) Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki T. and Kishita: Three - Dimensional Resistivity Structure of Iwo - Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12,821-12,828, doi/10.1029/2018GL080202, 2018.
- 32) Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa, and H. Inoue: Low-velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2016JB013686, 2017.
- 33) 瀧沢倫明：2019年の箱根山の火山活動について, 温泉地学研究所観測だより, 70, 1-6, 2020
- 34) 道家涼介, 原田昌武, 板寺一洋, 加藤照之： GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動, 神奈川県温泉地学研究所報告, 51, 1-9, 2019
- 35) 浅田昭：日本周辺の 500m メッシュ海底地形データとビジュアル編集プログラム, 海洋調査技術, 12, 21-33, 2000.
- 36) 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.
- 37) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)：地熱開発促進調査報告書 No. 22 登別地域, 1-554, 1985.

- 38) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) : 地熱開発促進調査報告書 No.6 弟子屈西部地域, 1-845, 1991.
- 39) 横山秀吉・中塚勝人・阿部司・渡部賢一 : 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について, 日本地熱学会誌, 5, 103-120, 1986.
- 40) 白水晴雄 : 粘土鉱物学 -粘土化学の基礎-, 朝倉出版, 1-185, 1988.
- 41) 高倉伸一 : 新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗, 物理探査, 48, 161-175, 1995.
- 42) 高倉伸一 : 電磁探査から推定される広域的な地熱系の構造, 物理探査, 67, 195-203, 2014.
- 43) McNutt, S. : Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of state-of-the art and case histories. In Monitoring and mitigation of volcanic hazards (edited by Scapra and Tilling), 99-146, Springer-Verlag, New York, 1996.
- 44) Minakami, T. : Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part 1. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 38, 497-544, 1960.
- 45) 西村太志・井口正人 : 日本の火山性地震と微動, 京都大学出版会, 京都, 242pp, 2006.
- 46) Burrman, H. and M. West: Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano, U.S.G.S. Prof. paper, 1769, 41-57, 2010.
- 47) 北川源四郎 : 岩波コンピュータサイエンス「FORTRAN77 時系列解析プログラミング」, 岩波書店, 390pp. 1993.
- 48) Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yaguchi and W. Kanda: Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, Earth Planets and Space, 70:64, doi: 10.1186/s40623-018-0835-3, 2018.
- 49) 鈴木レオナ : 草津白根山・湯釜火口湖水の不均質性から推定される湖底熱水の化学的特徴, 東京工業大学化学系 2019 年度卒業論文, 47p, 2020.
- 50) 松浦弘毅 : ドローンを用いた火山ガス組成観測手法の構築, 東京工業大学理学部化学科卒業論文, 2019.
- 51) Campillo, M., and A. Paul: Long-range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551, 2003.
- 52) 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.
- 53) Fink, M. : Time reversal in acoustics, Contemp. Phys., 37, 95-109, doi: 10.1080/00107519608230338, 1996.
- 54) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, Geophys. Res. Lett., 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月
Yukutake, Y., Y. Abe, and R. Doke	Deep Low - Frequency Earthquakes beneath the Hakone volcano, Central Japan, and their Relation to Volcanic Activity.	Geophysical Research Letters, 46	令和元年 9 月
Mannen, K., T. Tanada, A. Jomori, T. Akatsuka, G. Kikugawa, Y. Fukazawa, H. Yamashita K. Fujimoto	Source constraints for the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano, Japan, based on geological analysis and resistivity structure	Earth, Planets and Space 71:135	令和元年 12 月
Noguchi, R., T. Nishizawa, W. Kanda, T. Ohkura, A. Terada	Installation of new GNSS network around Kusatsu- Shirane Volcano, Japan: Its perspective and the first result	J. Disaster Res., 14, 744- 754, 2019	令和元年 8 月
Yaguchi, M., Terada, A., Ogawa, Y.	Air-fall ash from the main crater of Asama volcano on August 7, 2019, and its water-soluble components	J. Disaster Res., 15, 53-36, 2020	令和 2 年 2 月
Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita, Y. Ogawa	Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano	J. Volcanol. Geotherm. Res. 390, 106742, doi:10.1016/j. jvolres.2019. 106742	令和 2 年 1 月
James, M. R., Carr, B., D' Arcy, F., Diefenbach, A., Dietterich, H., Fornaciai, A., Lev, E., Liu, E., Pieri, D., Rodgers, M., Smets, B., Terada, A., von Aulock, F.,	Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges	Volcanica, 3, 67-114, doi: 10.30909/vol. 03.01.67114	印刷中

Walter, T., Wood, K. and Zorn, E.			
松永康生	草津白根火山（本白根山）の地下構造から推定されるマグマ熱水系	2020 年 Conductivity Anomaly 研究会論文 文集, 41–52	令和 2 年 3 月
三浦哲、山本希、太田雄 策、市來雅啓、出町智嗣	2015 年蔵王山膨張イベントの変動源	東濃地震科学研究所報告, No. 44, 7–13	2020 年 3 月
道家涼介、原田昌武、 板寺一洋、加藤照之	GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動	神奈川県温泉地学 研究所報告, 51, 1–9	令和元年 12 月
Hashimoto, T., M. Utsugi, T. Ohkura, W. Kanda, A. Terada, S. Miura and M. Iguchi	Source characteristics of demagnetization and ground deformation during inter- eruptive periods	International Association of Geodesy and Geophysics (IUGG), General Assembly, Montréal, Canada	令和元年 7 月
Seki, K., W. Kanda, K. Mannen, H. Shinohara, S. Takakura, T. Koyama, R. Noguchi, Y. Yukutake, M. Ishikawa, M. Fukai, M. Harada, Y. Abe	Hydrothermal system beneath Owakudani, Hakone Volcano, inferred from 3D resistivity structure and composition of fumarolic gases	International Association of Geodesy and Geophysics (IUGG), General Assembly, Montréal, Canada	令和元年 7 月
Yukutake, Y., Y. Abe and R. Doke	Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and Their Relation with the Volcanic Activity	American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting, San Francisco	令和元年 12 月
Matsunaga, Y., W. Kanda, T. Koyama, S. Takakura, T. Nishizawa	Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano	American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2019, San Francisco	令和元年 12 月
Terada, A.	Relationship between phreatic eruptions and the active	International Workshop on the	令和 2 年 1 月

	hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, Japan	mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	
Yukutake, Y.	Earthquake swarms, subsurface structure and deep low frequency earthquakes beneath Hakone volcano, and its relation to magma- hydrothermal system	International Workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Mannen, K.	The 2015 Hakone eruption; rupture of shallow vapor pocket triggered by magma replenishment?	International workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Doke, R.	Detection of local surface deformation using InSAR: a case study of the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano	International workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Kanda, W., K. Seki, Y. Matsunaga	Resistivity structure of preparation zone for phreatic eruptions in several volcanoes in Japan	International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, M. Hata, H. Hase, K. Aizawa, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Ueda, T. Rung-Arunwan and Y. Yamaya	Constraining electrical resistivity structure of volcanoes using multiphase flow modelling: an example of Miyake-jima	日本地球惑星科学 連合 2019 年大会	令和元年 5 月
三浦哲、山本希、市來雅 啓、出町智嗣	蔵王山の 2015 年膨張イベント	日本地球惑星科学 連合 2019 年度大 会、千葉幕張	令和元年 5 月
古賀 勇輝、松島 健、	GNSS 観測と精密水準測量による	日本地球惑星科学	令和元年

内田 和也、村松 弾、 岩佐 悠一	霧島硫黄山の地下圧力源の研究	連合 2019 年度大会、千葉幕張	5 月
岩佐 優一、松島 健	Study of UAV photogrammetry toward efficiently grasping volcanic landform	日本地球惑星科学 連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
森 啓悟、益田 晴恵、 新谷 毅、羽渕 元哉、 古谷 宗三、石橋 純一 郎、松島 健、大嶋 将 吾、井川 怜欧	霧島火山群・硫黄山水蒸気噴火 に関連した熱水循環プロセス	日本地球惑星科学 連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
羽渕 元哉、益田 晴 恵、新谷 毅、古谷 宗 三、森 啓悟、石橋 純 一郎、松島 健、武内 章記、大嶋 将吾、井川 怜欧	霧島連山と薩摩硫黄島における 熱水活動に伴うヒ素と水銀の挙 動	日本地球惑星科学 連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
道家涼介、板寺一洋	活火山の噴気地帯の干渉 SAR 解 析結果に認められる特異な変位： 箱根火山上湯地区の例	日本地球惑星科学 連合 2019 年大会、千葉幕張	令和元年 5 月
行竹洋平・安部祐希	箱根火山深部低周波地震活動様 式から見るマグマ供給過程	日本地球惑星科学 連合 2019 年大会、千葉幕張	令和元年 5 月
Gresse, M., T. Koyama, M. Uyeshima, T. Ishido, Y. Morita, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Hase, W. Kanda, Y. Matsunaga, K. Aizawa, H. Ueda, T. Rung- Arunwan, M. Hata and Y. Yamaya	3-D multiphase flow model: a method to constrain electrical conductivity structure of volcanoes	日本火山学会 2019 年秋季大会、 神戸大学	令和元年 9 月
山田大志、黒川愛香、寺 田暁彦、神田径、上田英 樹、青山裕、大倉敬宏、小 川康雄、棚田俊収	地震波解析から推定される草津 白根火山本白根山 2018 年噴火の 噴火過程	日本火山学会 2019 年秋季大会、神戸 大学	令和元年 9 月

谷口無我，大場武，寺田 曉彦	草津白根山山頂火口湖湯釜の水 質と火山活動との対応	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
寺田曉彦，森俊哉，大場 武，谷口無我，鬼澤真也， 大野鷹士，森田裕一	伊豆大島三原山火口底の火山ガ ス組成測定	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
香取慧，寺田曉彦，西野 佳奈，沼波望，大場武，谷 口無我	草津白根火山における浅部熱水 だまりの化学組成	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
三浦哲、山本希、太田雄 策、出町智嗣、立花憲 司、市來雅啓	2015 年蔵王山膨張イベントの変 動源	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 市，神戸大学	2019 年 9 月
村松弾、松島健、岩佐優 一、市原美恵	霧島硫黄山 2018 年 4 月 19 日の 水蒸気噴火に伴う空振シグナル の解析	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
山下 慧、石橋純一郎、宮 本知治、松島 健、益田晴 恵、田島靖久	霧島火山群硫黄山における湯だ まりの微量元素の地球化学的特 徴	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
本多亮	地震時に見られる傾斜計のステ ップに関する考察	日本火山学会 2019 年秋季大会、神戸 大学	令和元年 9 月
原田昌武、萬年一剛、 板寺一洋、安部祐希	箱根大涌谷における放熱量の時 間変化	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
代田寧、大場武、谷口 無我、十河孝夫、瀧沢 倫明、原田昌武	箱根山における火山活動活発化 に伴う噴気組成の変化	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
道家涼介、原田昌武、 板寺一洋、加藤照之	箱根火山 2019 年群発地震活動に 伴う地殻変動	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
行竹洋平	箱根山 2019 年火山活動において 観測された深部低周波微動	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸 大学	令和元年 9 月
Gresse, M., T. Koyama, M. Uyeshima, T. Ishido, Y. Morita, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Hase,	3-D multiphase flow model: a method to constrain electrical conductivity structure of volcanoes	第 146 回地球電磁 気・地球惑星圏学 会講演会，熊本大 学(2019 年 SGEPS S 秋季大会)	令和元年 10 月

W. Kanda, Y. Matsunaga, K. Aizawa, H. Ueda, T. Rung-Arunwan, M. Hata and Y. Yamaya			
Tseng, K.H., 小川康雄, S.B. Tank, 臼井嘉哉, 神田径, 深井雅斗	3-D resistivity modeling of Kusatsu-Shirane volcano, with revisited magnetotelluric data	第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 熊本大学(2019 年 SGEPS 秋季大会)	令和元年 10 月
道家涼介	干渉 SAR 解析による箱根火山 2015 年水蒸気噴火時の地表面変位	2019 年度 特定共同研究(B) 研究集会 精密地球物理観測ネットワークによる地殻活動の総合的な理解	令和元年 12 月
東京工業大学	草津白根火山の地殻変動および湯釜火口湖の様子	第 144 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 吾妻山、草津白根山、箱根山、85-86	令和元年 6 月
東京工業大学	湯釜火口湖における黒灰色変色	第 145 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 草津白根山、霧島山、53-55	令和元年 12 月
香取 慧	草津白根山の山頂および東西山麓に湧出する温泉水の化学組成に基づく火山熱水系のモデリング	東京工業大学理学院化学系化学コース 2019 年度修士論文、70p	令和 2 年 2 月
鈴木レオナ	草津白根山・湯釜火口湖水の不均質性から推定される湖底熱水の化学的特徴	東京工業大学化学系 2019 年度卒業論文、47p	令和 2 年 3 月

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和2年度業務計画案

① 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

a. 草津白根火山における機動観測

草津白根火山の本白根山において 2018 年 1 月に発生した噴火を踏まえ、2018 年度及び 2019 年度に、新規に開始した地震観測および傾斜観測を継続する。草津白根火山の火山活動は活発な状態で推移しており、観測点の大半を常時テレメーター化する等の観測強化に努める。特に、深部圧力変動源が存在すると考えられている草津白根火山・長野県側に地震観測点を設置し、震源分布を高精度に推定し、本白根山から志賀高原周辺を含めた 10 km 程度の範囲の地震活動を明らかにする。

電磁気観測については、地下比抵抗構造を推定するために、令和元年度に実施した 38 観測点のデータの解析を進めるとともに、その際に高品質のデータが取得できなかった地域や観測密度の低い草津白根火山北側を中心に新たに 10 点程度で MT 観測を実施する。過去に取得したデータも併せて解析を行い、草津白根火山広域の深さ 10 km 程度までの 3 次元地下比抵抗構造の推定を行う。この解析作業補助ためにリサーチアシスタント 1 名を雇用する。

草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的として 2017 年度に整備した GNSS 繰り返し観測網を用いて、GNSS キャンペーン観測を引き続き実施し、深部の地盤変動源の有無を引き続き調べる。この GNSS 観測および解析、ならびに上記の地震・MT 観測の補助のために博士研究員 1 名を雇用する。

b. 蔵王火山における機動観測

2018 年 1 月 30 日に噴火警戒レベルが 2 に引き上げられた蔵王火山では、2012 年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後しばしば火山性微動を観測するなど、中期的には着実に噴火切迫性が高まっている。令和2年度は、令和元年度に選定した観測点において電磁気観測を実施し、過去に蔵王火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、機動的な地震観測を実施して流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。前年度に火口湖である御釜の東側に設置した傾斜観測点を含む既設観測網のデータ解析を進める。さらに、地盤の傾斜を伴う火山性微動現象の検知能力向上のため、山頂周辺に新たに傾斜計観測点の新設を計画し、観測点候補地を選定する作業等を実施する。

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。

c. 有珠火山における機動観測準備

令和 3 ～ 4 年度に機動観測を計画している有珠火山では、2000 年噴火の際には噴火の約半年前に、土壌拡散 CO₂ フラックスが増加したことが報告されている。次の噴火に向けて現状を把握し、今後の変化の検出の基準となるベースマップを得るために、機動観測を効率的に実施する準備として、有珠火山の山頂火口原で土壌拡散 CO₂ フラックスのマッピング

観測を実施し、令和3年以降の機動観測の計画の詳細を再検討する。また、令和3年度に展開予定の臨時地震観測と地盤変動観測については、できるだけ本年度中に観測点候補地の選定や土地交渉を進める。

d. 三宅島における機動観測

平成30年度から広帯域地震観測を山腹の3地点で開始し、令和元年度には火口近傍に臨時に短周期地震計を増設して、現在浅部で発生する地震活動の詳細を把握することを進めた。この解析により地震活動が現在でも高いことがわかったので、広帯域地震計については今年度も観測を継続する。これらの地震波形の読み取りを行う技術支援職員を1名雇用する。

火口を含む浅部の地下構造を調査するため、令和元年度にMT観測による地下比抵抗構造探査を実施した。このデータを処理・解析を進め、平成24年に実施したMT観測による結果と比較して地下構造の時間変化を検討する。そのため、博士研究員を1名雇用する。状況に応じて無人ヘリコプターによる空中磁気測量や島内の電位差分布測定を行う。

e. 霧島火山における機動観測

霧島火山は現在も活発な状態にあることから、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）、電磁気（全磁力・広帯域MT）などの諸観測を継続する。これらの観測データの解析により、えびの高原（硫黄山）周辺の地震・微動活動や浅部地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化を検出して、噴火発生場の構造・物性モデルの高度化をはかる。2018年4月19日に発生した水蒸気噴火前後の地殻変動と空振を解析し、水蒸気噴火前後の流体の移動を推定する。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。

f. 箱根火山における機動観測

平成30年度までに実施した機動観測点のデータを用いて得られた地震波速度構造モデルを元にし、岩石・鉱物学的知見や火山ガスなどの地球化学的知見を考慮しながら、箱根火山の熱水系・マグマ供給系についての検討を行う。また、より深部の構造について、定常観測点および機動観測点のデータを用いてレシーバ関数解析を実施し、より深部にあると推定されるマグマ供給源のイメージングを試みる。更に、S波スプリッティング解析により、箱根火山の異方性構造を推定し、深部から浅部へガスや熱水を供給する亀裂系について考察する、そのため、追加の機動観測を行う。

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、霧島火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

前年度にパッケージ化して本事業研究者及びその周辺の関係者に配布した前処理支援ツールについて、不具合の修正や機能拡張を行う。四面体メッシュを用いた解析ツール群についても、本事業で取得を進めている草津白根火山周辺のMTデータの解析を通してパッケージ化を進める。東京工業大学で雇用するリサーチアシスタント1名がこの作業を補助する。

将来の火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に役立てることを念頭に、流動シミュレーションの出力である温度圧力場から、地盤変動や地磁気変化など地表から観測可能な量を計算するスキームを構築し、実際のフィールドへの適用も試みる。

比抵抗と浸透率の定量的・経験的關係を抽出するために、過去に行われた地熱ボーリングの公表済み報告書等から情報を読み取り整理する。この作業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。

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。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。噴火前後では地震や微動が頻発するので、このような状況の観測データを用いて動作試験を行い、アルゴリズムの妥当性を検証して改良を加える。特に火山性微動の発生時には判別が難しくなることから、その判定法の改良に努める。

d. 遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者が主体的に運用する無人機（ドローン）を利用した観測手法の開発を引き続き進める。火山ガス組成比測定を草津白根火山で繰り返し実施し、観測のための技術的課題と安全管理などの諸問題を整理する。また、地上により採取された噴気ガスの組成比との比較を行い、ドローンで得られた観測データの妥当性評価を行うほか、噴気ガスの移流に伴う噴気自身の組成変化の程度を検討する。あわせて、熱情報解析に必要な諸パラメータを得るために、湖水採取や地表面温度測定などの繰り返し多項目観測を試みる。

活発な火山活動により研究者が観測地点への立ち入りが安全上制限される場合には、現地に設置した観測機器からのデータ回収が大きな問題になる。これまで課題 B2-1「火山観測に必要な観測技術の開発 - 空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発」において、GNSS 等の観測装置からドローン等を用いてデータ回収するシステムを開発し、ほぼ完成の域に達している。しかし、その実証試験を行う必要があることから、霧島硫黄山または草津白根火山島で実証試験を行う。

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・プロトタイプを作成を行う。今年度は、平成 29 年度に実装を開始した地震波干渉法解析の GUI の改良を行うとともに、本プロジェクト等で取得した観測データへの適用や動作テストを実施する。本システムを構成する解析アルゴリズムについて改良をすすめる。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。

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。

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。

c. 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2020 年実施予定の蔵王火山機動観測で利用する広帯域計を購入する。蔵王火山では、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。

2021 年実施予定の有珠火山機動観測では、本年度はその準備として山体のいくつかの場所で土壌から噴出する火山ガスの分布を測定する。そのため、土壌ガス流量計を購入する。なお、この機器は、他の火山でも今後随時利用する予定である。

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。

