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　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	准教授	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	市來 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	竹中 潤	j-takenaka@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いくつかの調査、または電磁気構造探査を実施して地下比抵抗３次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価の基準となる。そのため、整理の終わった観測データや解析結果を本事業の課題Ａに提供し、広く活用を図る。また、機動的な観測や探査を実施する際には、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手をポストドクターとして雇用する他、大学院博士課程の学生で機動観測とそのデータ解析に参加を希望する若手人材をリサーチアシスタントとして受け入れ、現場教育も併せて行うように努める。

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

(d) １０か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

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

2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山では、地盤変動の解析から深さ 8 ㎞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、2018 年１月 23 日に草津白根山（本白根火砕丘付近）で小規模な水蒸気噴火が発生したことから、当初令和２年度以降予定されていた草津白根山の機動観測の一部を前倒しし、地震観測の一部を開始した。また、電磁気構造探査の準備を進めた。さらに平成 30 年１月に噴火警戒レベルが２に引き上げられた蔵王火山は，平成 25 年頃から深部低周波地震の活動が高まり，しばしば火山性微動が観測されるようになるなど，中期的観点から着実に噴火の切迫性が高まっている．そのため，平成 32～33（令和 2～3）年度に実施予定であった蔵王火山の機動観測計画の一部を前倒しし、既存観測網の手薄な想定変動域東側に空振計、傾斜計

を設置するとともに、次年度以降に実施する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。さらに、長期的に活動が上昇している伊豆大島において緊急観測を実施し、多くの研究者の参加を得て、全国の研究者が協力して調査観測研究を実施する体制を確認した。

4) 令和元年度：

草津白根山では、2014 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。この火山では、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深度が判っておらず、長期に継続する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、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する。

前年度に引き続き三宅島、箱根山、霧島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蔵王山での機動観測の準備を進める。

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、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す。

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する。

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・破砕帯の分布から、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山での機動観測の準備を進める。

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：

有珠山では、令和 3 年度時点では前回の噴火から 20 年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現しているが、1910 年、2000 年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約 3 日後に噴火、山頂噴火した 1977 年では約 1 日後に噴火するなど同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズムを解明することが、有珠山の噴火切迫性評価に重要である。地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造を明らかにする。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壌 CO_2）放出量についても測定を行う。

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

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

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

7）令和 4 年度：

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

の噴火時の緊急観測に備えるため、広帯域の地震計アレイ観測を実施し、地震活動度の時空間変化を捉え、火山内部の状態把握を行い、将来の噴火切迫度評価の際の基準とする。

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

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

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

8）令和 5 年度：

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

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

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

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

9）令和 6 年度：

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

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

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

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

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

10）令和 7 年度：

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。

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

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

(e) 平成 30 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。

三宅島で広帯域地震機動観測を開始する。ここで得られた観測データから、現時点の三宅島の火山活動の評価に資する解析を開始する。三宅島では、2000 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。来年度実施予定の MT 探査による噴火後の地下比抵抗構造の時間変化を推定に備えて、既存のデータの解析を行う。

また、霧島山では、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推進する。さらに、箱根山では、これまでの観測データを整理し、地震波速度構造を推定し、深部構造と水蒸気噴火の関連に関する研究を進め、噴火を引き起こす環境についての情報を収集する。

さらに、平成 30 年 1 月に噴火した草津白根山や平成 30 年から活動が高まっている蔵王山については、来年度以降の計画の準備を着実に進めるとともに、その一部を前倒しして実施する。

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、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のツールを開発する。開発を先行して進めた地震計アレイデータ解析システムについては、試験運用を進めて課題の洗い出しを行う。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、地下比抵抗解析を効率的に進めるツールの開発を進めるとともに、地下比抵抗から地下の内部状態を推定するために必要なシミュレーションツールを整備する。火山性地震活動総合解析システムについてはアルゴリズムの検討、遠隔熱情報解析システムは運用のための基礎技術の開発、地震波動場連続解析システムはユーザーインターフェースの検討を進める。

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。平成 30 年度は、広帯域地震計とその記録装置を３セット整備する。

本事業の課題Ａ火山データの一元化への協力を推進する。

(2) 平成 30 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、三宅島火山、霧島火山及び箱根火山において実施した。三宅島火山においては、広帯域地震計を３点設置し、観測を開始した。噴気活動の活発な火口内南側の地下浅部で小さな地震が多く発生していることがわかった。2019 年度実施予定の MT 探査と比較するため、2012 年実施した MT 探査の解析を行い、三宅島の浅部構造を明らかにした。霧島火山及び箱根火山においては、水蒸気噴火を引き起こす場としての特徴を捉えるため、地下構造の推定の関する解析を進めた。また、当初は次年度以降に機動観測を実施予定であった草津白根火山と蔵王火山においては、噴火の発生や活動の活発化に伴い、機動観測の一部を前倒しして実施した。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムは運用試験と改良を行っている。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、地下比抵抗構造を推定する際に利用する便利なツールの開発を進め、次年度以降に研究者へ提供する準備を始めた。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ツールの開発を継続した。

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、本課題内の連携をはかるため、情報交換を行った。

(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）三宅島火山における広帯域地震機動観測

三宅島では 2000 年に発生した噴火から既に 20 年近くが経過し、近年の噴火間隔（約 20 年程度）から、次期の活動期がそれほど遠くないと予想される。2000 年噴火活動の終息とともに地震活動、地盤変動、火山ガスの放出等が示す火山活動が低下の一途をたどってきたが、最近はその低下傾向も収まり、GNSS 観測では一部の基線長が伸張に転じ、次期の噴火に向けた準備が始まっていると思われる。また、現在でも火口近傍の浅部で多数の微小な地震が多数発生している。これらの三宅島の浅部で発生している地震活動の詳細を把握するため、2018 年 12 月より三宅島の山頂（雄山）近傍に広帯域地震計を３地点に設置し、観測を開始した。三宅島では気象庁、防災科学技術研究所、東京都が地震観測を実施しているが、火山活動に特有の長周期の振動現象を捉える広帯域地震観測点が山頂付近に少ない。そのため、山頂を取り囲むように本事業で広帯域地震計を３点設置し、既設観測点のデータと併せて、地震活動の詳細とともに長周期振動の発生の有無について調査することにした。既設観測点と本事業で設置した広帯域地震観測点（３地点）の場所を図１及び表１に示す。三宅島での広帯域地震観測点が設置防災科学技術研究所の観測点４点に本事業で設置した３点が加わり、長周期振動観測網が充実した。

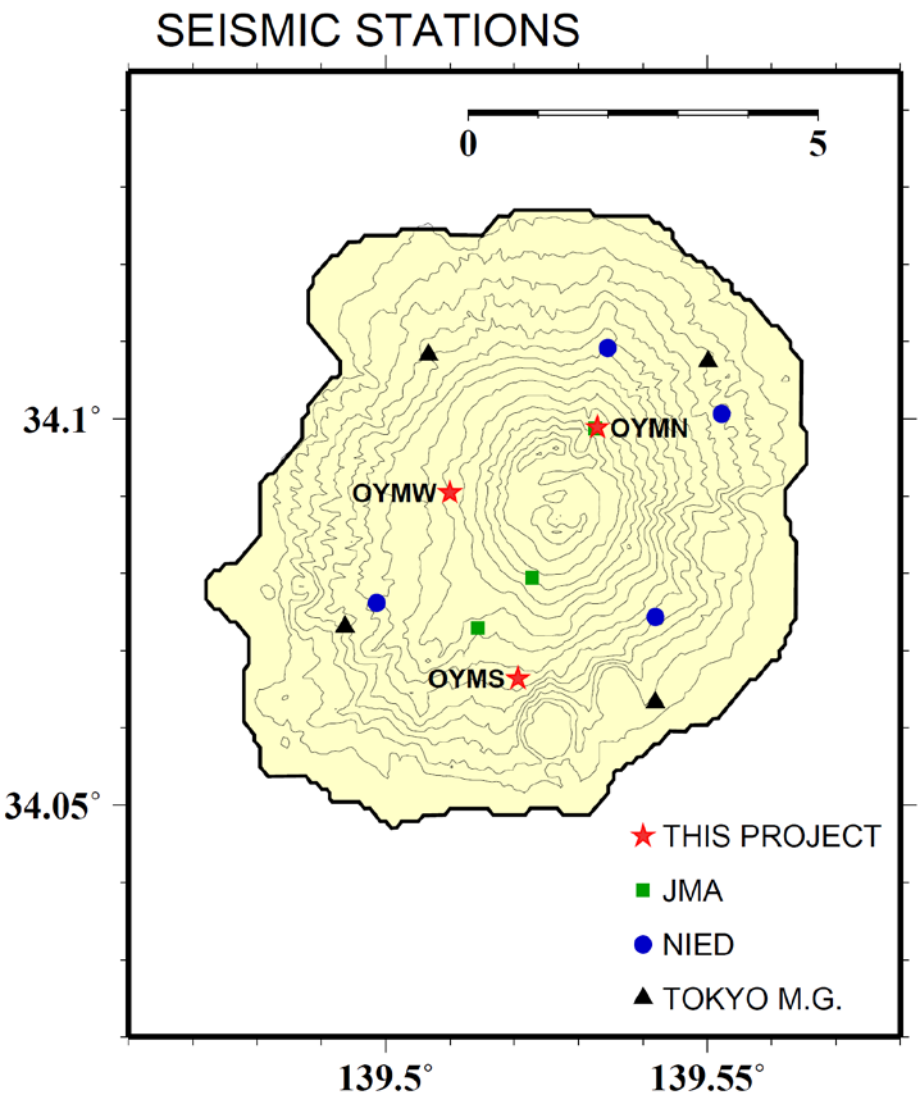


図１．三宅島の地震観測網。　★が本事業で設置した広帯域地震観測点
既設の観測点　■：気象庁、●：防災科学技術研究所、▲：東京都

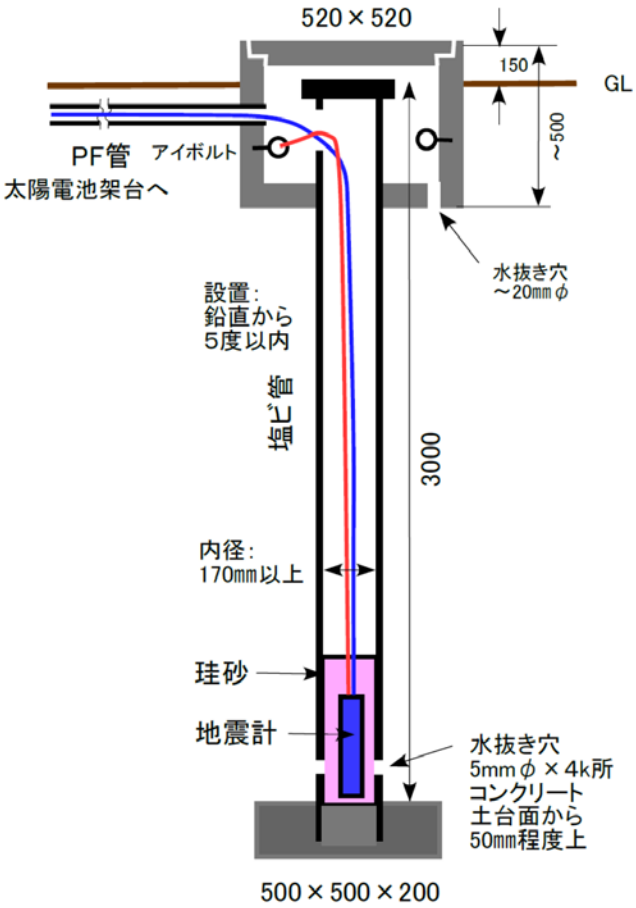
表１．本事業で三宅島に設置した観測点

観測点名	緯度(度)	経度（度）	標高（m）
雄山北(OYMN)	34.09891	139.53289	516
雄山西(OYMW)	34.09048	139.50992	451
雄山南(OYMS)	34.06638	139.52056	383

本事業で設置した広帯域地震観測装置の構成は以下の通りである。いずれの観測点も山頂に近いため、商用電源や電話回線が利用できず、太陽電池パネルによる電力供給により運用することにし、データ伝送は携帯回線網を利用することにした。しかし、OYMS は携帯回線の利用圏外であり、現時点では仕方なくデータを現地収録に拠っている。今後、何らかの方法でデータ伝送する方法を見つけたい。

広帯域地震計　Nanometrics　Trillium 120PH（孔内設置型、120 秒計）
　　ジンバル付き、設置時の許容傾斜 5 度以内
記録装置　　計測技研　HKS9700（24 ビット分解能、100Hz サンプリング、入力±15V）
データ伝送　　OYMN、OYMW：ユビキタスモジュール（携帯回線）で
　　間欠データ伝送
　　OYMS：携帯回線網利用圏外のため、伝送方式検討中
　　現在は現地収録
電源　　太陽電池パネル　100W×４枚
　　ディープサイクル蓄電池（12V）　総容量約 500Ah

地震計の設置に際しては、少しでも良好な SN 比の波形を取得するために図 2 のように深度 3m の縦穴を掘り、その中に広帯域地震計を設置した。



地震計設置孔の孔口

地震計設置後の孔内．この後，孔口まで珪砂を入れて地震計を埋設する．

図 2.　広帯域地震計の設置状況

図 3.　観測点の一例(OYMS 観測点)。手前のマンホールに地震計が設置されている。

広帯域地震計設置後から平成 31 年 3 月 20 日までのデータを、他機関の地震波形データと併せて解析し、本事業で設置した観測点のノイズレベルを調査した。気象庁が設置している火口に最も近い観測点(MYCR)と旧村営牧場にある観測点(MJON)を参照にして、ノイズレベルを比較した。各観測点の上下動成分の地震波形に１～32Hz のバンドパスフィルターを通して RMS 振幅を計算し、1 時間ごとの中間値の時間変化を求めた。各観測点の RMS 振幅は図 4-1 及び図 4-2 の下図に示した。本事業で新設した観測点のノイズレベルは、気象庁の２つの既設観測点の間にあり、ノイズレベルで見る限り比較的良好な観測点であると言える。この図で明らかなように、三宅島においては、３～４日周期でノイズレベルが大きく変化する。これは、火口からの距離にかかわらずどの観測点においても同様の時間変化を示すことや観測された波形の特徴から、天候の変化、特に風や波浪による影響であろうと思われる。特に、三宅島では冬季に季節風が強く、このような３～４日周期で振幅が大きく変化する地動ノイズが観測されると思われる。新設した観測点のうち、雄山北では他の２点に比べて、時々ノイズの振幅が大きくなる。特に、2019 年１月中旬から２月下旬にかけて顕著である。これは、雄山北観測点の設置場所が雄山の北側の植生の発達していない傾斜地にあり、しかも太陽電池の背面が北側（斜面の下る方向）を向いており、季節風を強く受けて太陽電池架台を振動させている可能性が高いと考えられる。今後、ノイズ軽減に向けた対応を考えたい。

既設の地震観測点に本事業で設置した３点のデータも加えて、三宅島浅部で発生する地震の検出と震源再決定を行った。平成 30 年 12 月 13 日の設置後から平成 31 年 3 月 20 日までの約３ヶ月間で地震として検出されたものは約 1140 イベントで、そのうち 265 イベントについて、４観測点６要素以上の初動の読み取りができ、震源の推定が可能であった。地震の日別回数を図 4-1 及び図 4-2 の上図に示す。地震

の日頻度は１～40 回と変化するが、明瞭な群発性や本震―余震様式の活動のパターンを取っていない。推定された震源を図 5 に示す。震源は雄山山頂直下の海抜約 2 km以浅の極めて狭い領域に集中している。この震源域は、噴気を多量に発生している火口内南側噴気地帯の直下に対応している。この領域の震源分布は後述のように、地下比抵抗構造との対比を考えるに極めて重要であり、本事業の観測点の新設により、震源推定精度の向上が見込まれる。

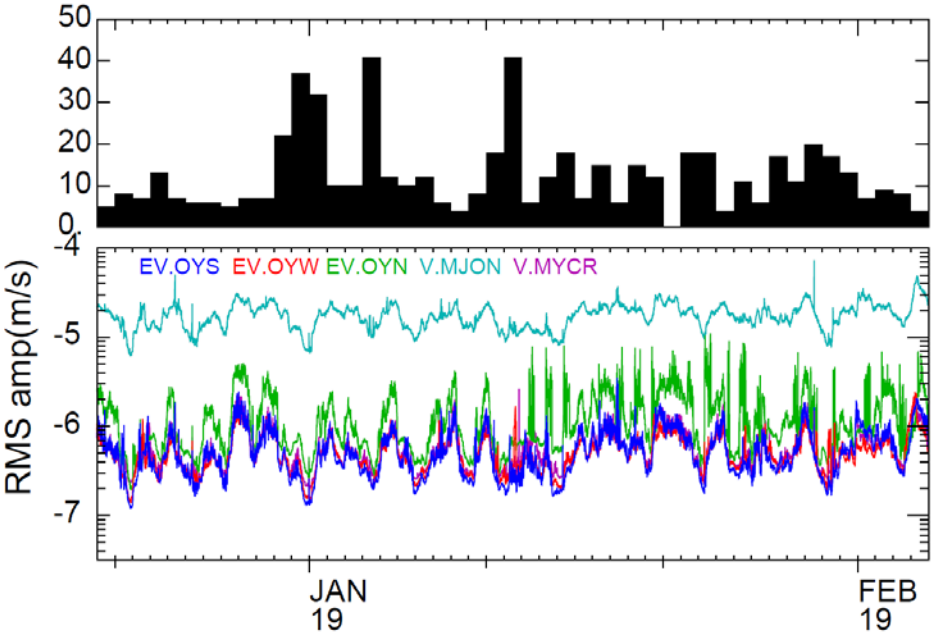


図 4-1.　2018 年 12 月 20 日から 2019 年 2 月 4 までの三宅島浅部で発生する地震の日別回数（上図）と、本事業で新設した３観測点のノイズレベル。

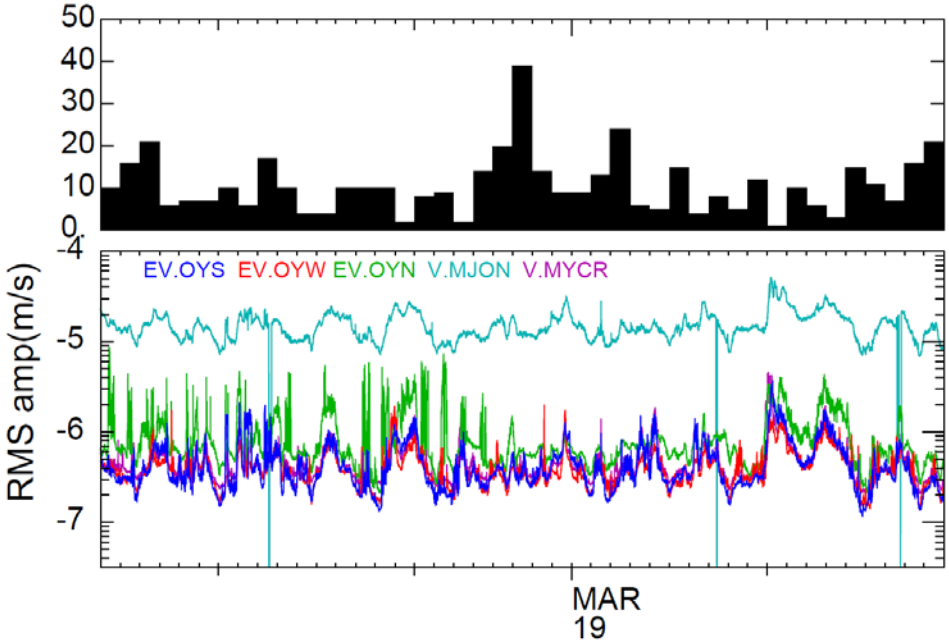


図 4-2.　図 4-1 と同様の図。但し、2019 年 2 月 5 日から 3 月 20 日までの期間。

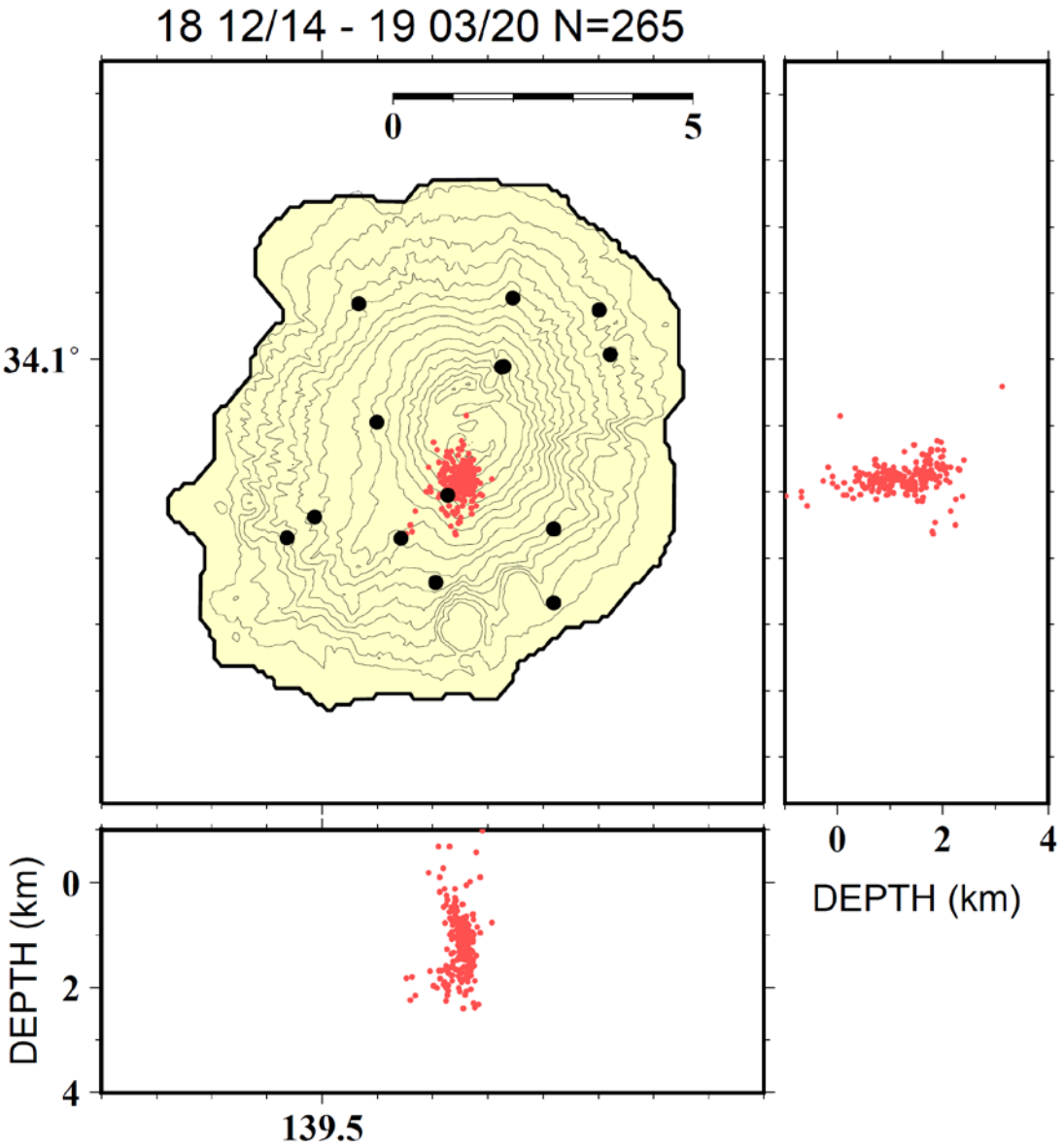


図 5.　本事業で新設した 3 点と既設観測のデータを用いて推定した 2018 年 12 月 14 日から 2019 年 3 月 20 日までの震源分布図。この間、265 地震の震源が推定できた。ほとんど、火口内の噴気孔直下の限られた領域の深さ 2 km以浅で発生している。

以上のように、平成 30 年 12 月より三宅島で広帯域地震機動観測を開始し、その観測点のノイズレベルをチェックし、有用な観測データが得られていることを確認した。また、平成 30 年度末までの地震活動度や震源分布についても調査した。来年度もこの調査を継続し、比抵抗構造と地震活動の関係を詳細に調査するとともに、今後活動が活発になった時のベンチマークとして利用できるデータとして保存する計画である。

ⅱ）三宅島における地下比抵抗構造の推定

三宅島では 2000 年噴火の際に大規模な山頂部の陥没が起こり、マグマ溜まりから火口までのマグマの経路である火道の状態に大きな変化があったと推定され、それにより今後発生する噴火の様式は、これまでと大きく異なることが予想される。特に、噴火様式に大きな影響を与えると考えられる地下水の構造が大きく変化したと思われるため、三宅島の地下比抵抗構造の変化を調査することは極めて重要である。三宅島においては、2019 年５～６月に地下比抵抗構造の探査を計画しているが、それと比較するために過去に取得したデータから地下比抵抗構造を推定した。

解析に用いたのは、2012 年夏に実施した MT 探査データで、図 6 に示す 14 点で Metronix 社の ADU07 を用いて約１ヶ月間の観測を行った。これらのうち、12 点は北東―南西方向に並ぶように配置され、この方向の２次元断面は特に精度よく構造が推定できると期待できる。得られた電場と磁場の時系列データを BIRRP 法（Chave and Thomson, 2004[1)]）を用いて周波数毎のインピーダンスに変換した。その際の信号の周期は 0.01～1000 秒の範囲で、17 の周期帯で解析した。この時、局所的なノイズを低減するためにリモートリファレンス処理（Gamble et al., 1979[2)]）を施している。このようにして得られたインピータンステンソル及び地磁気変換関数を用いて、３次元比抵抗構造を推定した。

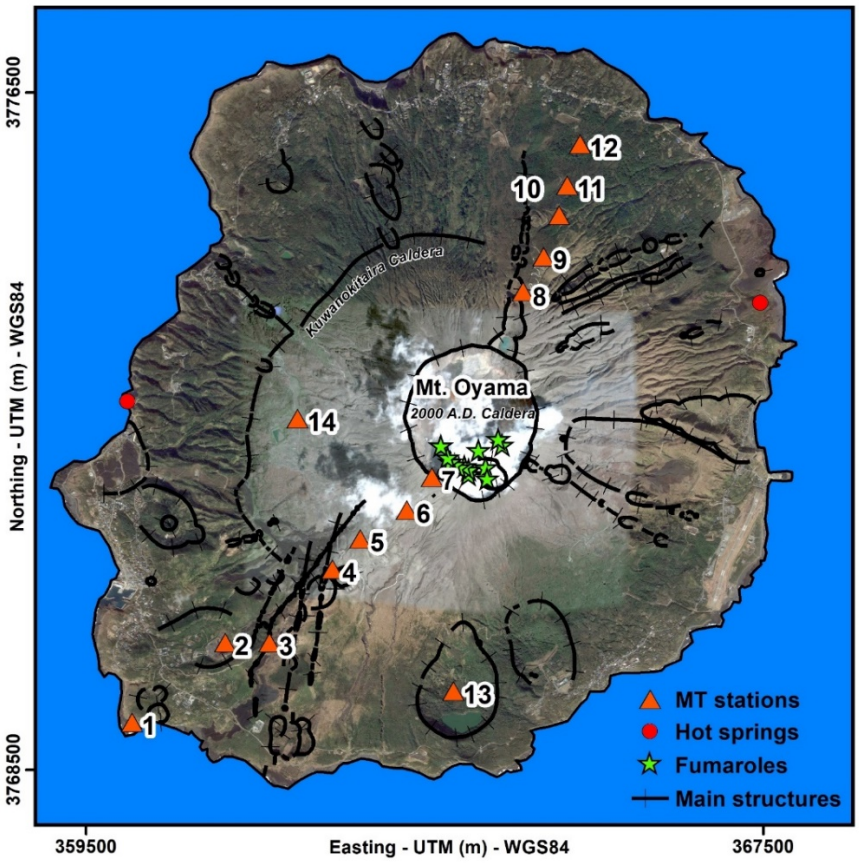


図 6.　2012 年夏に実施した MT 探査の観測点の分布図

３次元構造を求める際のメッシュは、図 7 のように、全体を 200 km×200 km×400 km

の十分に大きな領域を 45×45×59 に区切った上で、三宅島島内は、水平面内は 250m ×250m として、鉛直方向には海水面上は 40m のグリッドとし、深くなるに従いグリッドサイズを大きくして、3 次元インバージョンコード WSINV3DMT(Siripunvaraporn and Egber, 2009[3]) を用いて各グリッドの比抵抗値を推定した。

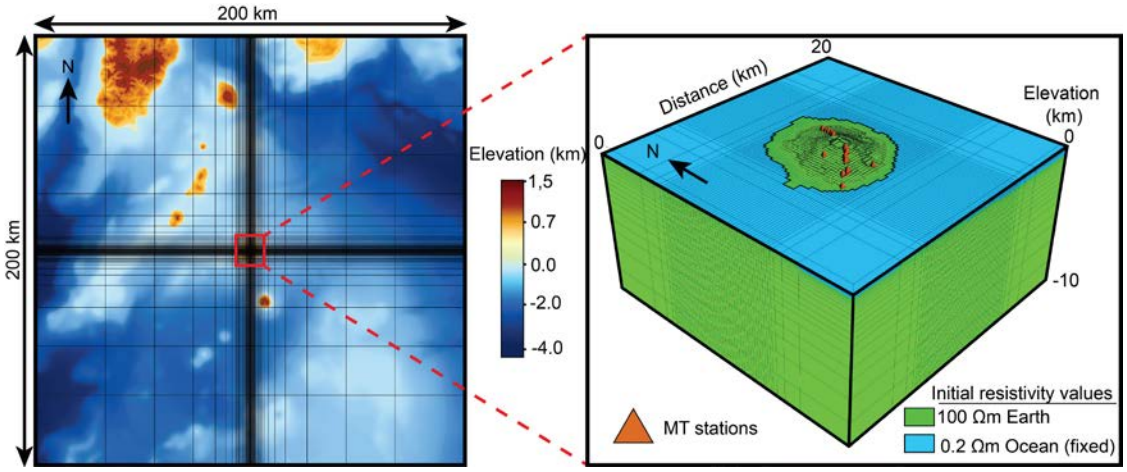


図 7.　三宅島の 3 次元 MT 構造を推定する際に用いたメッシュの切り方

ここで得られた 3 次元比抵抗構造を図 8 に示す。ここでは測線の方向に沿った北東—南西の断面を示している。この図から 2012 年時点における三宅島の地下比抵抗構造の特徴は以下のようにまとめられる。

1）地表から 500m 程度まで 500Ωm 以上の高比抵抗構造（第 1 層と呼ぶ）が見られる。これは溶岩流等を主体とした層で、地下水がそれほど多くない不飽和層であると考えられる。

2）第 1 層の直下から厚さ 500m～1 km の範囲で 1 ～ 5 Ωm の低比抵抗構造（第 2 層と呼ぶ）が見られ、山頂火口直下では火口南側の主噴気孔とつながっているように見える。気象庁の決めた震源をプロットすると、山頂下の低比抵抗の深さの範囲に低周波地震の発生域が重なっているように見える。低比抵抗層は熱変成に生成された粘土層の存在を示すとも考えられるが、地下水層が連結して電気を通りやすくしている可能性もある。現在の噴気活動や山頂直下の地震活動との関連も含めて、2019 年度に実施する比抵抗構造探査の結果も踏まえて、解明したい点である。

3）第 2 層の下に 100～250Ωm の高比抵抗層（第 3 層と呼ぶ）が広がっている。火口直下では上端が浅く周辺部になるに従い深くなっている。また、南西側から火口に近づくにつれてより高比抵抗の部分が浅くなっている特徴が見られる。地震は、この高比抵抗領域に対応して分布しているように見える。この領域についての解釈は色々考えられるが、そのひとつとしてこの領域は山頂に続く火道域で、これまでの噴火の際に供給されたマグマが噴火に際して脱ガスし、固結度の高い岩石が密集している。過去のマグマ上昇運動により、多くの亀裂を生じており、その断層運動により微小地震

が多発している可能性が考えられる。

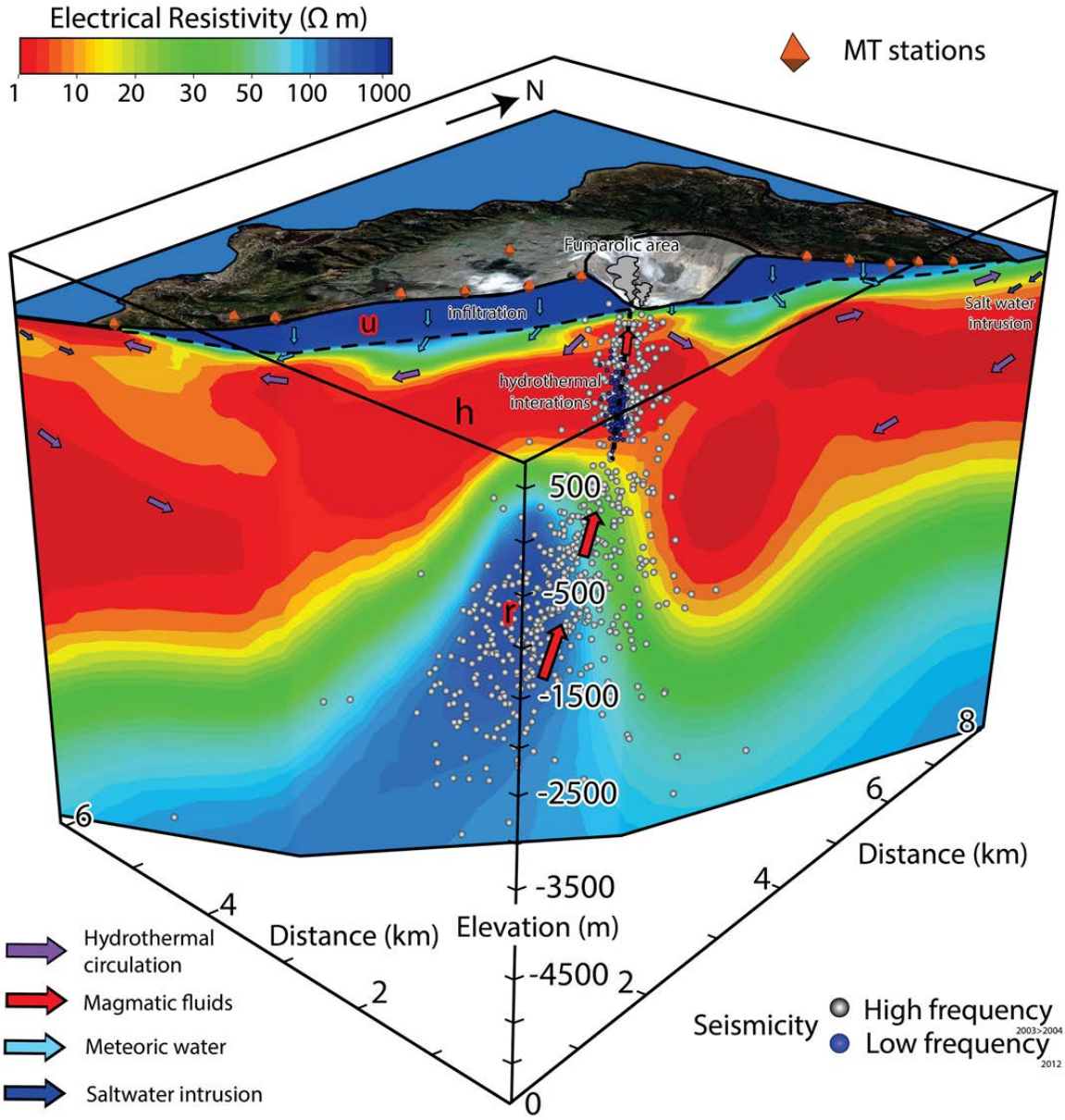


図 8.　2012 年 MT 探査テータを用いた三宅島の 3 次元比抵抗構造

このように、2012 年夏に行った MT 探査のデータを解析して、この時点での比抵抗構造が推定できた。三宅島の比抵抗構造の時間変化を推定するため、2019 年度に再度 MT 構造探査を計画している。今年度得られた構造と対比することにより、火山体構造の時間変化が見いだせると期待している。

b)霧島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

霧島火山において、平成 28 年度～29 年度に実施した地震(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)などの集中観測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時間･空間変化の特徴をまとめた。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。水準観測については、ⅱ)にその実施内容を記載するが、これも含めてすべての観測データからえびの高原(硫黄山)の火山噴火切迫度評価に資する「噴火発生場の構造・物性モデル」を作成した。観測の準備作業とデータ処理(地震の験測・震源決定)を補助する技術補佐員を雇用した。観測データの解析と構造・物性モデルの作成に従事するリサーチアシスタントを雇用した。

水準測量により推定された圧力源の位置を表 2 に示す。圧力源の位置は、2017 年 10 月以前は硫黄山噴気群の東側約 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、この地点の標高を 1300m と考えると、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., 2018[4])、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 9 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。このとき、圧力源の位置は表 2 に示した場所に固定して、体積変化量の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 月では 15.6 万 m^3 と推定された。2017 年 10 月以降は 2018 年 4 月の小噴火直後の一時的な圧力低下を除いて、地下圧力源の膨張が続いていたが、2018 年 12 月以降は膨張が止まり、若干の収縮傾向となっている。この時期は特に大きな地上現象の変化はなく、熱水湧水量や水蒸気量も安定していることから、地表噴出増加による体積減は考えにくく、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつある可能性が示唆される。

平成 28、29 年度に硫黄山周辺で実施した広帯域 MT 探査データから 3 次元比抵抗構造を推定した(Tsukamoto et al., 2018 [4])。広帯域 MT 探査では 0.005～2000 秒の周波数応答関数を推定するため、火山浅部でよく見られる低比抵抗層よりはるかに深部まで比抵抗構造を推定することが可能である。得られた構造の特徴は硫黄山（えびの高原３叉路付近）から東側の深さ 200～700m において 3Ωｍ以下の低比抵抗体が推定されたことである(図 10、図 11)。この低比抵抗層の下部では地震が多く発生していることから、この低比抵抗層は水を通しにくい粘土層で、その下には深部から上昇してくる火山ガスや熱水が閉じ込められ圧力が増加していると解釈でき

る(図 12)。水準測量によって推定された圧力源（Morita et al.., 2017 [5]）が粘土層の下部に位置していることもこれを支持している。圧力源の実体としては、粘土鉱物の存在できる温度条件と水の相図を利用して液相である熱水だまりであると推定した。これとは別の圧力源が InSAR 観測によりごく浅い場所に推定されているが（NIED, 2017 [6]）、熱水が気相に変化する深さ（深さ 130 m）が粘土層の上面におよそ一致する事から、浅部地下水の液相から気相への変化が InSAR 観測による地表付近の圧力変動を引き起こしている可能性を示唆した。また、2018 年 4 月 19 日のごく小規模な水蒸気噴火は、深さ 700m 付近の熱水だまりから粘土層内の亀裂を上昇する熱水の供給量が何らかの理由で増加し、粘土層上面、深さ 130m 付近で急激な沸騰を起こしたことにより発生したと解釈した。粘土層下部の圧力源のさらに深部には鉛直方向に広がる別の低比抵抗体が見られ、その内部で地震が発生していないことから、より深部からの 400℃以上の高温流体の供給路と解釈できる。より広域の 80 点のデータを用いた比抵抗構造解析(相澤他, 2018 [7])によれば、この硫黄山地下へ続く体比抵抗な流体供給路は新燃岳噴火に関連した深部圧力源（深さ 10km 付近, 例えば、Nakao et al., 2013 [8]）とつながっているように見え、硫黄山の地下には深さ 10km 付近のマグマ貫入域から脱ガスした揮発性成分が供給されていると考えることができる。また、この解析では深部圧力源はその近傍に低比抵抗体はあるものの高比抵抗領域に対応すると思われる。推定した構造では新燃岳～韓国岳～大幡山の深さ 8 km 以深に低比抵抗体が存在する可能性も示されたが、対象領域の観測データが不足しているため確実とは言えず、今後観測領域を広げる必要がある。

表 2　精密水準測量データから推定された霧島山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	31.946777
東経	130.85460	130.853975
海抜高度	600m	680m

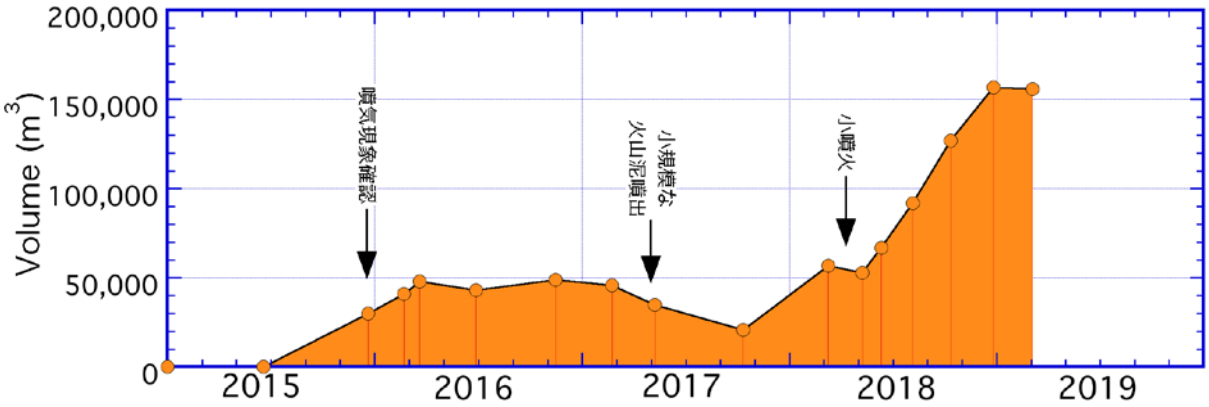


図 9.　水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量。2017 年 10 月からは地下の圧力源の膨張傾向が続いていたが、2018 年 12 月以降は若干の収縮傾向となっている。

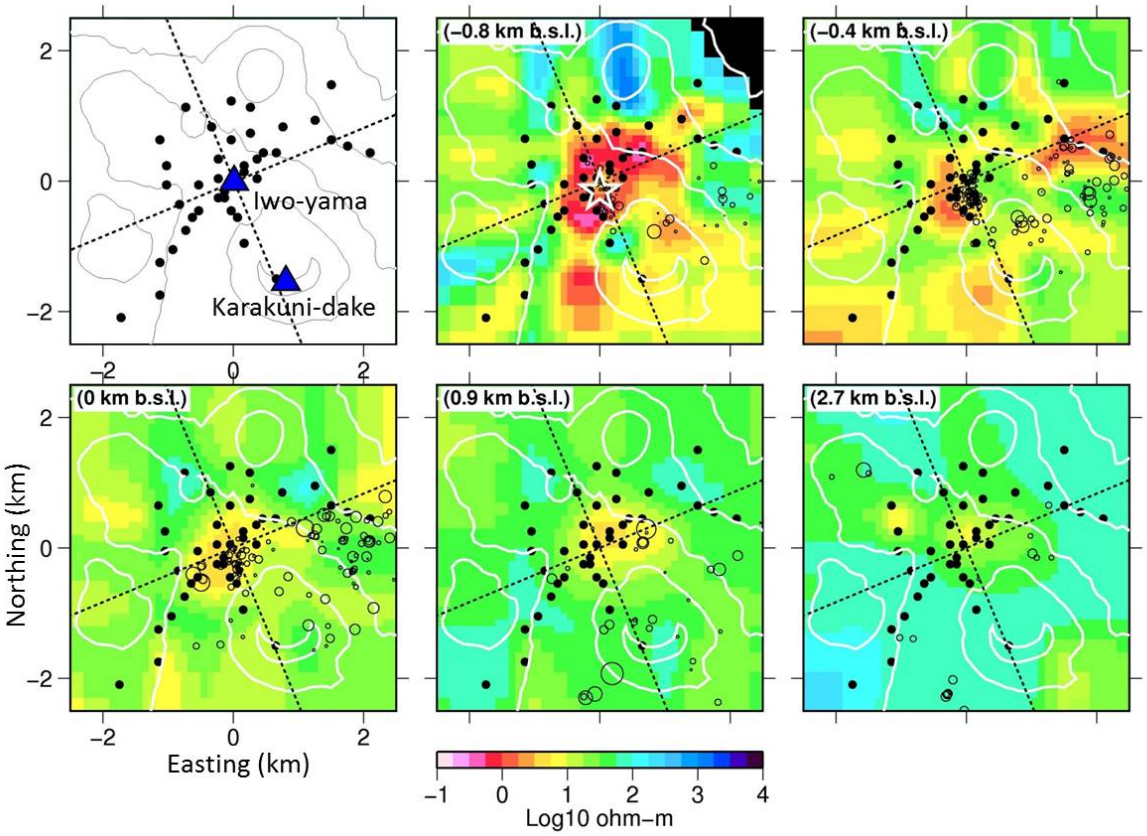


図 10.　硫黄山地下の比抵抗構造(水平断面)。黒丸印は観測点。星印は水準測量による地表から深さ 700m 付近の圧力源（Morita et al., 2017 [5]）

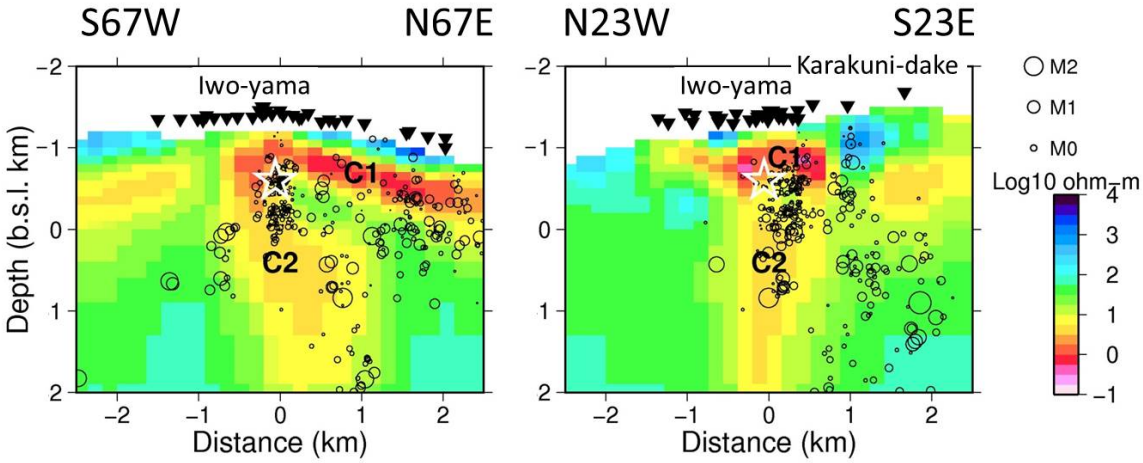


図 11.　硫黄山地下の比抵抗構造(鉛直断面)。図 10 の破線に対応している。
○は地震の震源(2013 年 1 月から 2016 年 11 月)を示している。

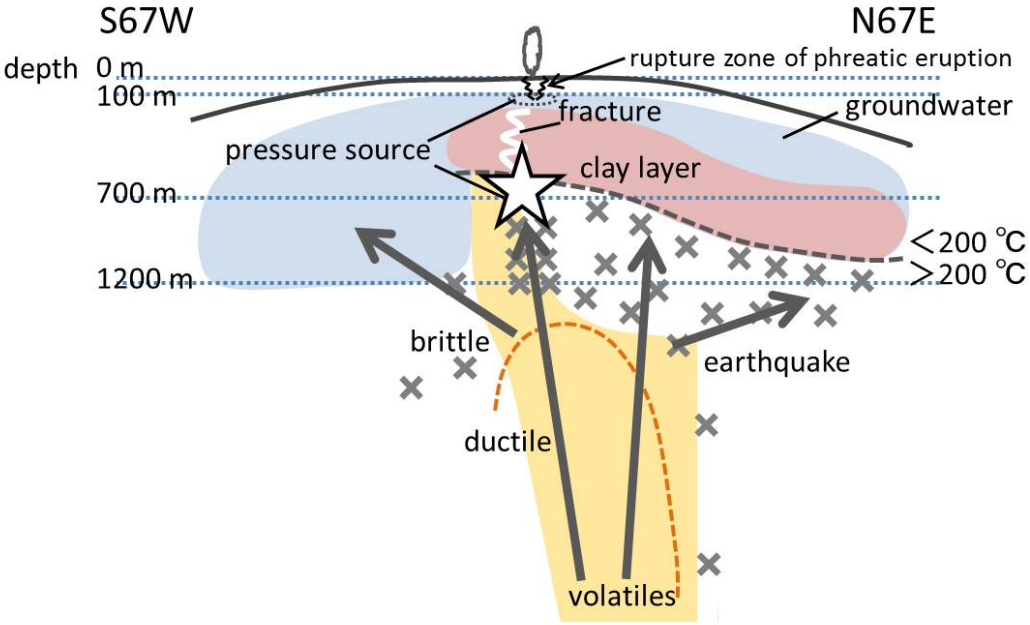


図 12.　硫黄山の地下構造の解釈図。スメクタイトの存在可能温度から粘土層の下面は 200℃と推定している。水準測量による深さ 700m付近の圧力源、InSAR 解析による地表付近の圧力源は、それぞれ粘土層の下部と上部に位置すると解釈した。粘土層の下部には別の低比抵抗領域(C2)が存在し、その内部では地震が発生していないことから 400℃以上の高温の流体供給路と推定した。

ⅱ）霧島火山における地盤変動機動観測の実施

2018 年 4 月の硫黄山噴火に伴い、今年度は水準測量の頻度を高め、2018 年 5 月、6 月、8 月、10 月、12 月、2019 年 3 月に測量を実施した（図 13)。水準路線を図 14 に示す。

2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を図 15 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 15 に示す。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 月以降の隆起量を図 14 の等値線で示す。硫黄山山頂に近い BM3050 で 2019 年 12 月までに 66.4 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前よりは、南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。この隆起は　2018 年 12 月以降にほぼ停止もしくは沈降傾向に反転し

図 13.　硫黄山周辺での水準測量風景(2018 年 5 月 7 日撮影)

ている。

これらの測量の結果の解釈については、他の観測量も考慮してｉ）でまとめて記述した。

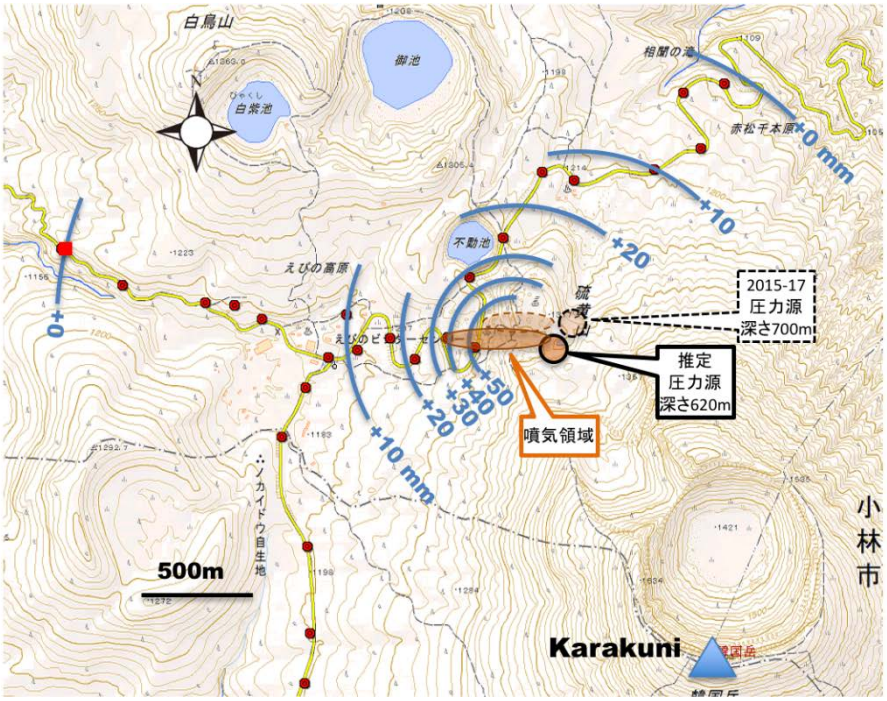


図 14.　えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2017 年 10 月から 2018 年 10 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

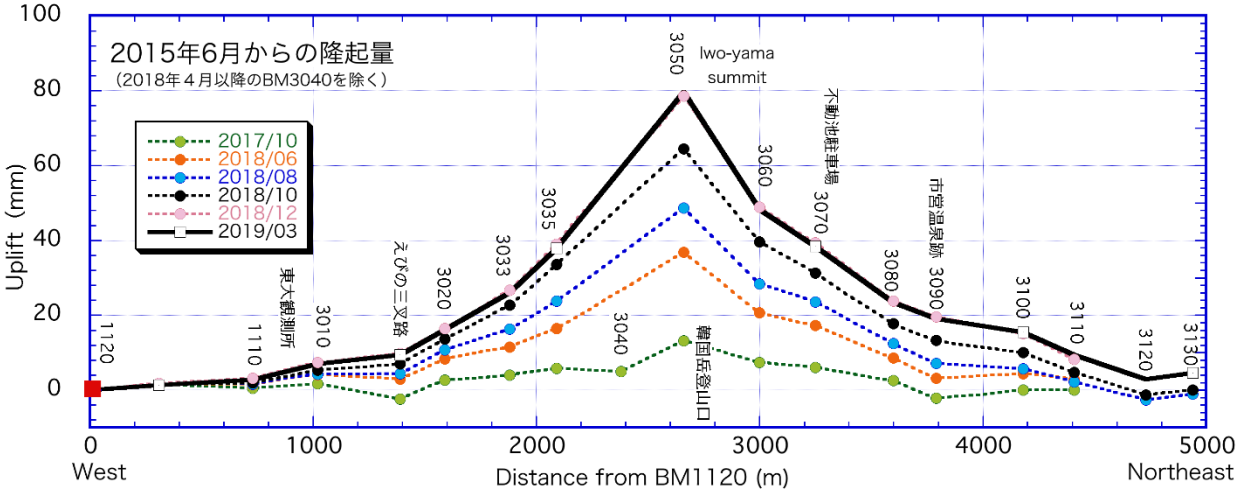


図 15.　2017 年 10 月以降の主な水準測量結果。隆起の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月と 2019 年 3 月の測定値はほぼ重なっている。

c)箱根火山における機動観測

水蒸気噴火の切迫性評価の高度化を目指して、箱根山の水蒸気噴火の発生メカニズムの理解に必要な詳細な地下構造を得ることを本事業で推進した。本年度は平成 28 年度に構築した機動地震観測網を継続しつつ、本年度中に回収した観測データから地震波形を切り出し、定常観測点のデータと統合して震源決定を行った。また，箱根周辺域（丹沢や静岡県東部等）について，気象庁カタログを利用して、温泉地学研究所でトリガーがかからなかった地震波形も取り込み、初動の読み取りを実施して震源の再決定を行った。さらに、再決定した震源と P 波および S 波の読み取り値を用いて、地震波速度構造の解析に着手した。地震波速度構造解析のためのグリッドは、箱根カルデラ域で水平方向に 3km 間隔、深さ方向には深さ 18km まで 3km 間隔に設定した。初期構造に Yukutake et al. (2015) [9] による箱根火山の 3 次元速度構造を用い、Double-difference トモグラフィー法（Zhang and Thurber, 2003[10]）により速度構造の推定を行った。

解析の結果、箱根直下の深さ 6km 以深において顕著な低速度域が検出された（図 16）。低速度域は、Vp/Vs で見ると深さ 6km 付近が low Vp/Vs、深さ 9km 付近が high Vp/Vs で特徴づけられる 2 つの領域に分けられる。それぞれの領域について、Takei (2002) [11] の固液混合系の多孔質媒質中における弾性波速度に対する理論モデルを使って、媒質に含まれる流体とその体積分率について推定した。モデルで示された地震波速度低下率、アスペクト比および固体及び液体の圧縮率比の関係から、深さ 6km 付近での地震波の速度低下率は、メルトが存在すると仮定した場合の圧縮率比では説明できない。水もしくはガスを仮定すると、その体積分率は 17%程度で空隙のアスペクト比は 0.15 程度であると見積もられる。一方、深さ 9km 付近については、メルトでも水でも説明が可能である。したがって、深さ 6km 付近の low Vp/Vs の領域はガスや水に富んだ領域であり、それより深い high Vp/Vs の領域にはマグマが存在する可能性が考えられる。2015 年の群発地震活動の際には、深さ 7km 付近に圧力源が存在することが GNSS のデータから示唆されている（Harada et al., 2018[12]）が、今回の結果から、この時の地盤変動はガスもしくは水の移動による圧力増加を観測した可能性があると考えられる（図 17）。また、水蒸気噴火の直前の傾斜計や SAR のデータから、深さ数百メートル付近に開口クラックの存在が明らかとなっており、このクラックを押し広げた原動力も同様にメルトではなくガスや水であったと推定されていることも(Doke et al., 2018[13], Honda et al., 2018[14])、今回の解析結果と調和的である。

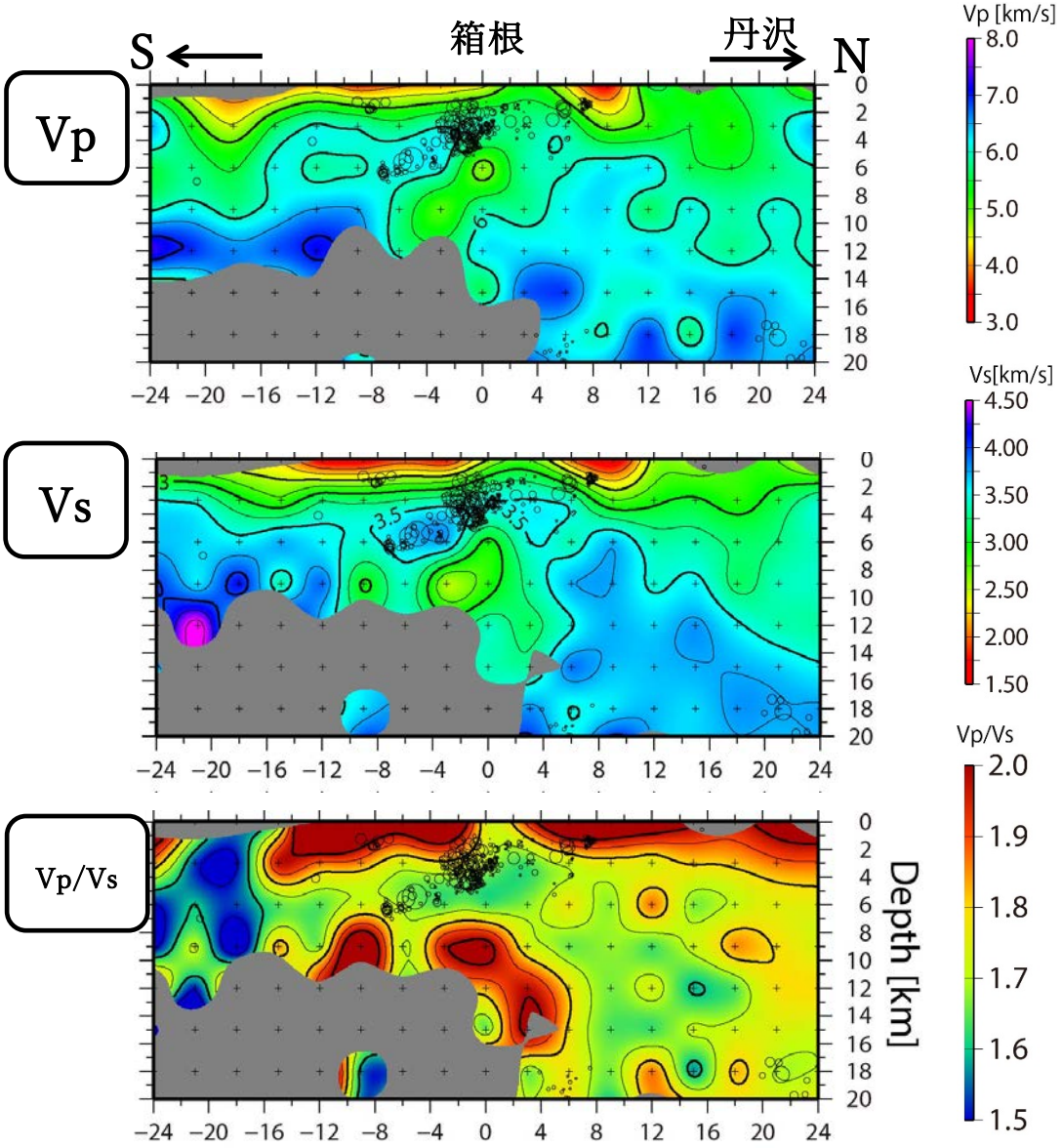


図 16. 機動観測データを用いて推定した地震波速度構造。箱根火山は図中央に位置する。

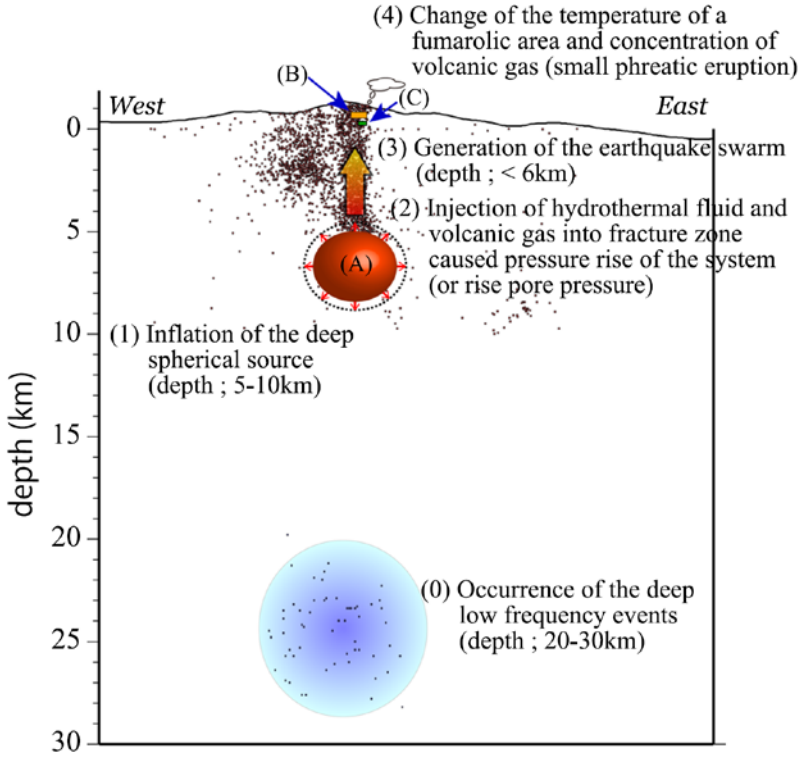


図 17. GNSS データを用いて推定された、箱根火山直下の圧力源の位置（Harada et al, 2018[12] より）。圧力源のサイズは誇張して描かれている。

d)草津白根山における機動観測

草津白根火山（本白根山鏡池北火砕丘）において、2018 年 1 月 23 日に水蒸気噴火が発生したことを踏まえて（図 18)、当初 2019～2020 年度に実施予定であった機動観測の一部を前倒しすることとし、地盤変動調査のための GNSS 観測および解析、ならびに地震・電磁気機動観測の補助のために博士研究員 1 名を雇用した。

図 18.　（左）本白根山で 2018 年 1 月 23 日に発生した水蒸気噴火の主噴火口（鏡池北火砕丘)。（右）登山道に落ちた噴石と博士研究員。2018 年 10 月 20 日撮影。

2019 年度に計画している地震観測の準備として、現地調査とともにノイズレベルの調査も行い観測に適した候補地を選定し、あわせて設置方法等を検討した。その結果、今年度は図 19 で示すような観測点配置で機動観測を開始した。噴火直後に実施された本プロジェクトの緊急観測調査によって本白根山を取り囲むように暫定的に設置した 3 カ所の地震計（KSZ, KSH, KSI）のうち２ヶ所（KSH および KSI）は、より観測に適した場所（いずれも当初より北側）へと移設した。さらに、本白根火口に近い 1 ヶ所に地震計を新設した（KSKN)。データは順調に取得されており、湯釜周辺から離れた本白根山や山体西側の地震活動が明らかになりつつある（図 20)。本白根山では，2018 年火口周辺の 1.5 km 程度の範囲で地震活動が認められた。また、2019 年 1 月 23-24 日にかけて，万座温泉から南へ約 1 km，海抜 500 m 付近で地震活動が認められた。

6 月から須坂市で、また 9 月以降は高山村や志賀高原でも活発な地震活動が報告され、観測や地権者交渉で訪れた長野県高山村を中心とする白根山西方で地鳴りの報告も多数寄せられた。高山村付近は、草津白根火山の深部膨張源の真上に相当する可能性があり、白根山湯釜周辺の火山活動も 9 月末より再活発化したことから、火山活動との関連を調べるため、2019 年度観測開始予定であった長野県内の 3 ヵ所に臨時点を設けて観測を開始した（図 19 の SGKG, YMBJ, YMSP)。このうち 2 箇所（YMBJ および YMSP）には低周波マイクロホンも設置し、音波と地震波の同時観測を実施している。また、YMBJ については、積雪期前まではオンラインでデータを取得した。地鳴りとの関係については、高山村の住民の協力を得て地鳴りの発生時刻を記録してもらい、地元住民が地鳴りを認識した時刻の±1 分以内に多くの場合地震が発生していたことを

明らかにした。そのうち規模が比較的大きな 23 個の震源を決定したところ、気象庁一元化震源処理では不明瞭だった震源の配列が明らかとなった（図 21）。いずれの震源も３つの狭い領域（須坂市、高山村、志賀高原）に集中し、最も草津白根山に近いクラスタでも湯釜から 11 km 以上離れている。このほか、志賀高原の鉢山（最後のマグマ噴火は約 1 万年前）直下にも、地鳴りを起こす地震が見出された。深さはほとんどの地震が海抜下 4～5 km に推定されたが、鉢山付近の地震は海抜下 1 km 程度とやや浅い場所に求まった。さらに空振観測波形は、地震動と極めて良い相関を示したことから、地鳴りは地震動が通過する観測点近傍で励起されていると考えられる（図 22）。今回の地鳴りを伴う地震活動は、地震の規模が小さく、震源の深度がやや深いことが特徴で、地表では揺れをほとんど感じないが、高周波の震動が樹木や建物を揺らして地鳴りだけが聴こえたため、地鳴りに関する報告が多かったと考えられる。なお、これらの結果は、火山噴火予知連絡会での報告に加え、高山村村長および防災担当者にも本プロジェクトの成果として説明した。地震観測のための機材準備や現地作業は，東北大学、北海道大学、秋田大学、防災科学技術研究所、および気象研究所の研究者と連携して実施した。観測は順調に進んでおり、冬季にいかに欠測なくデータを取得

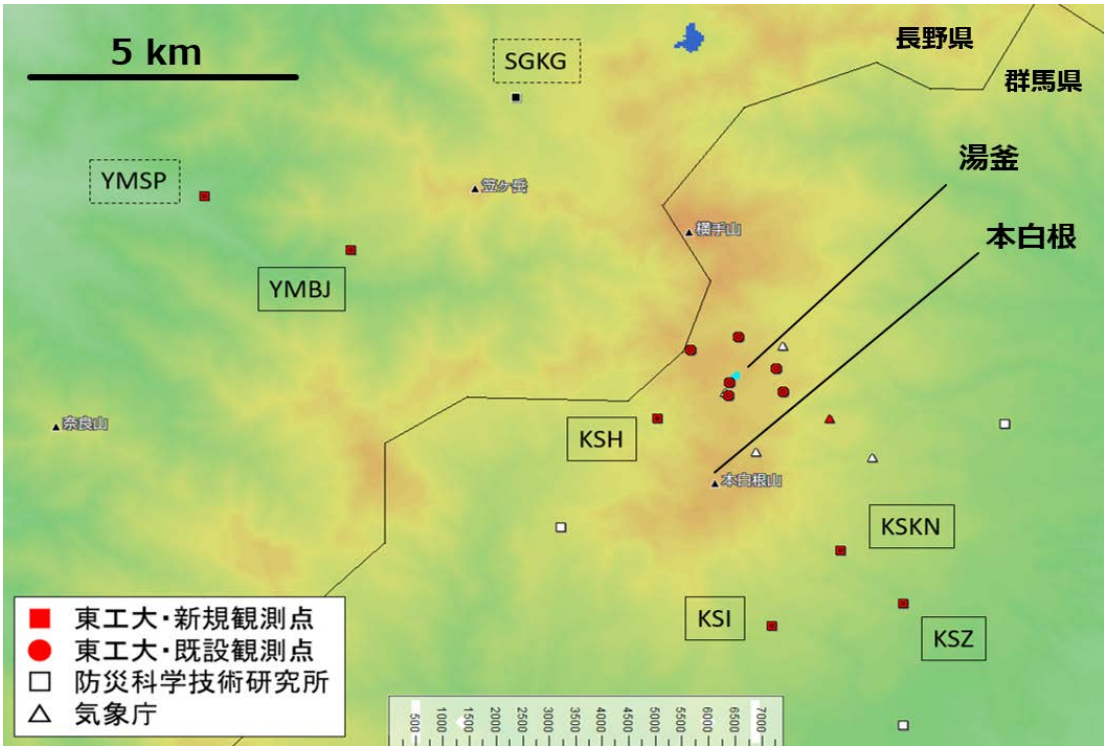


図 19.　本年度整備した地震観測点配置（囲み文字）。KSZ, KSI, KSH の 3 点は、本白根山の噴火を受けた本プロジェクトの緊急観測により暫定的に整備され、KSI と KSH の 2 点はノイズ環境等を考慮した結果、2018 年度中にいずれもやや北側へ移設した。長野県側の 3 点（YMBJ, YMSP, SGKG）は、白根山西方で地鳴りを伴う地震活動が報告されたことから、観測を前倒しして今年度から実施した。

できるようにすることが 2019 年度に解決すべき課題として挙げられる。

2019－2020 年度に予定している MT 観測については、深さ 5～10 km までの地下構造

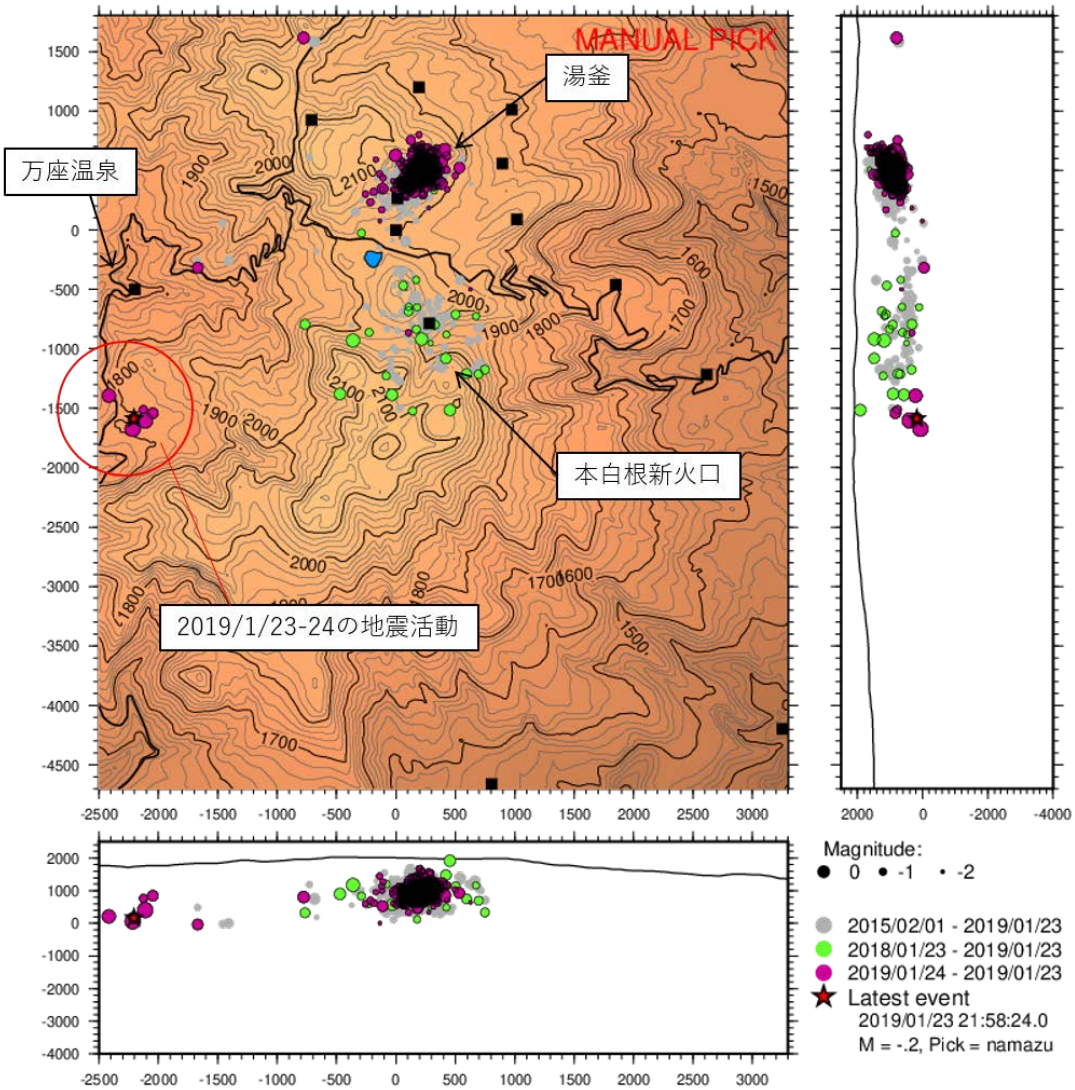


図 20.　2015 年以降の草津白根山周辺の震源分布。2018 年 1 月 23 日の本白根山噴火以降の震源は緑色および紫色の丸印で表示されている。赤丸は、2019 年 1 月 23～24 日に万座温泉南部で観測された地震活動。海抜 0～1000m で地震が群発した。

を推定することを目標に具体的な検討をすすめた。東西方向に約 10 km の広がりを持つ既存のデータを解析するだけでは、海抜下 3 km 程度（山頂からの深さ約 5 km）までしか良い解像度で地下構造を推定できなかった[15]ことや、山頂付近は活動の活発化に伴う入山規制のため調査ができるかどうか不透明な状況であるため、草津白根山から半径 10 km 程度の広域で観測点を選定した。選定した 36 観測点について、用地交渉を進め、全てで地権者からの了解を得た（図 23）。現在、許認可申請の準備を進めているところである。しかし、車道がなくアクセスの悪い草津白根山の北側山腹でいかにデータを取るかということが依然課題として挙げられる。2019 年度の本調査の傍

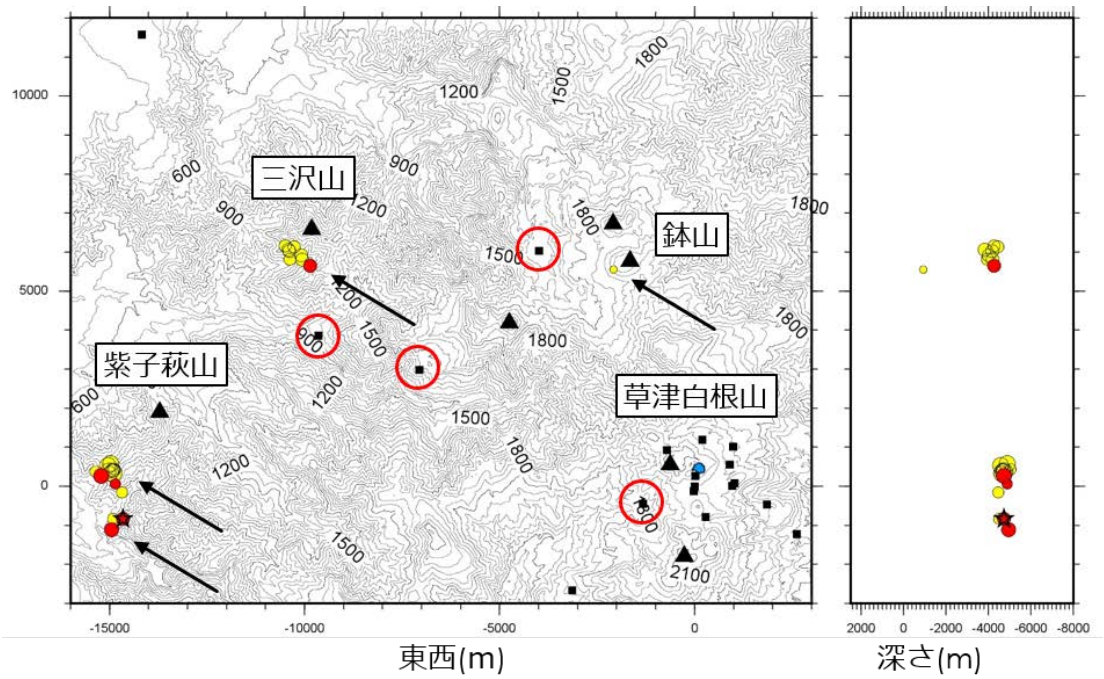


図 21.　地鳴りを伴った地震の震源分布（赤色および黄色の丸印）。地震計の位置を■で示し、このうち，今年度の機動観測で整備した地震計は赤色の○で囲った。

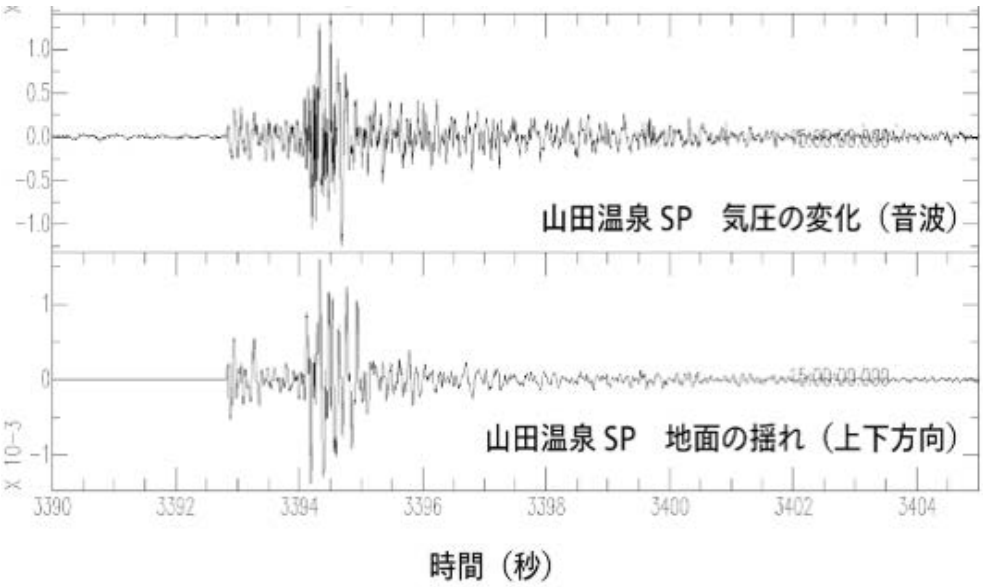


図 22. 山田温泉スノーパーク（YMSP）で観測された地鳴りを伴った地震の低周波マイクロホン（上）と地震動上下変動（下）の同時記録。

ら、翌年度の調査地点の選定を、白根山北側山腹を中心に進める必要がある。

GNSS 繰り返し観測は、昨年度構築した繰り返し観測網 8 カ所で 10 月 9 日～18 日にかけて実施した。GIPSY　OASYS Ⅱ Ver.6.3[16]を用いた PPP-AR 解析の結果、水平方向 10 mm 以下、垂直方向は 8　mm 以下の精度で座標値を得ることができた。なお、2018 年 1

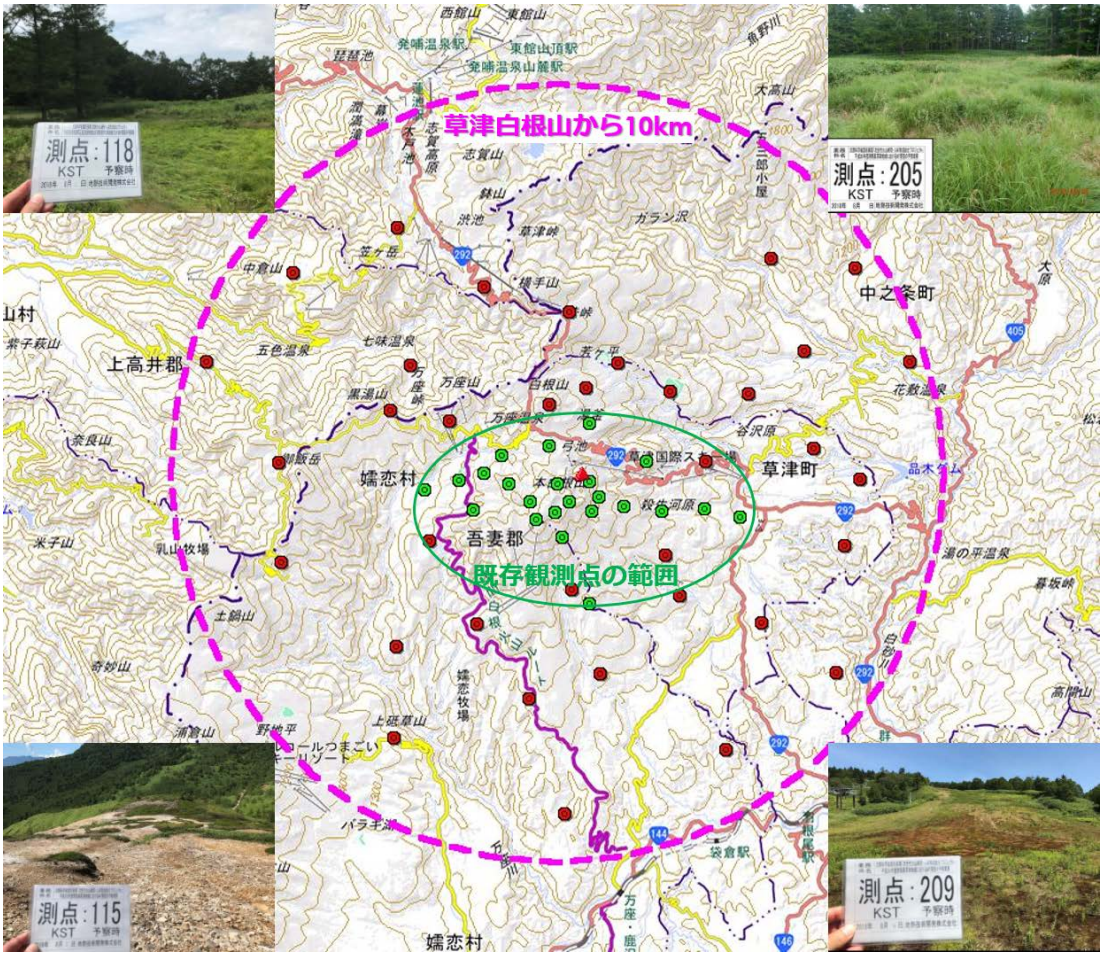


図 23.　2019 年度の広帯域 MT 調査のために選定した観測点分布（赤丸）。緑丸は既存観測点の分布。

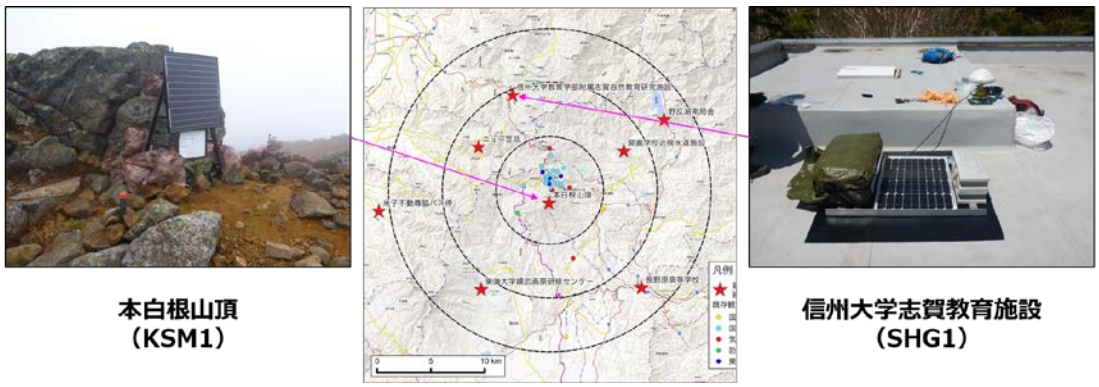


図 24.　GNSS 繰り返し観測網 8 カ所のうち連続観測を開始した 2 カ所。ただし、SHG1 は積雪の影響を避けるため、測定は 5 月から 11 月に限定している。

月の本白根山の噴火を受けて、昨年度構築した繰り返し観測網 8 カ所のうち、2 カ所（本白根山頂および志賀高原）で連続観測とした（ただし、志賀高原は積雪の影響を避けるため 5－11 月のみ測定、図 24）。その後、前年の観測結果及び連続観測点のデ

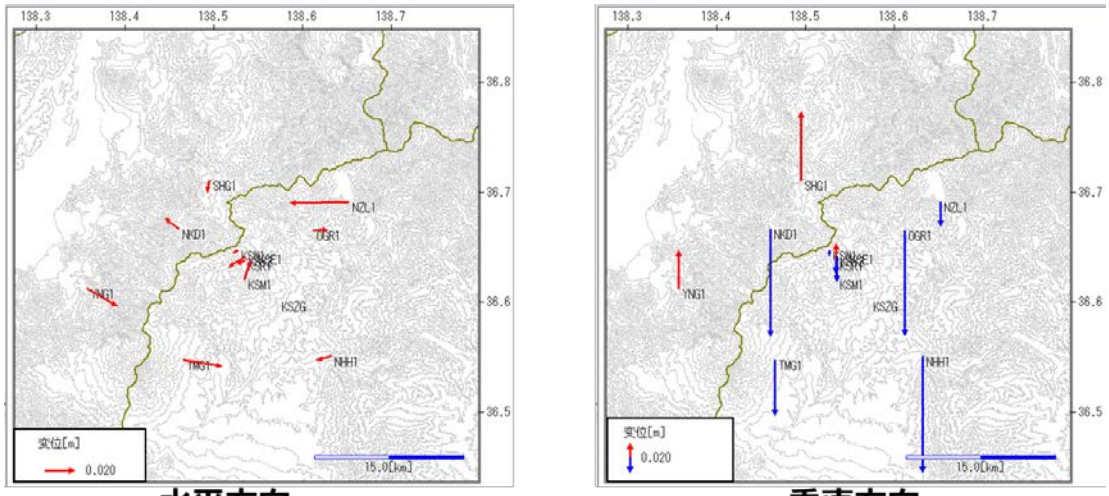


図 25.　2017 年 10 月および 2018 年 10 月の 2 回の繰り返し観測により得られた地盤変動。連続観測点のデータもコンパイルしている。MAGCAP-V[17]を用いてベクトル表示した。国土地理院の電子基準点：長野栄を基準として計算されている。

ータを併せた 2017 年 10 月～2018 年 10 月の期間における地殻変動を MaGCAP-V[17]を用いて図示した（図 25)。各観測点を基準点とした場合の相対変動も調べたが、これまでのところ噴火に伴う変動や火山活動に伴うような系統的な地殻変動は認められない。既存連続観測データとの統合解析をすすめているが、やはりやや深部の系統的変動は検出されていない。2019 年度も引き続き解析を進めてゆく予定である。

2018 年草津白根山噴火を踏まえて、本事業で実施する草津白根火山の機動観測を 2019 年度から本格的に進めるにあたり、研究集会「草津白根山の噴火事象検討会」を本事業課題 C サブテーマ 2 と連携して東京工業大学緑が丘キャンパスで 2019 年 2 月 22 日に開催した。この集会の主たる目的は草津白根山の噴火事象系統樹の作成を目指したものであるが、全国から大学院生を含む 30 名の参加を得て、地質学的研究をはじめとして、地球物理・地球化学・岩石学・災害学など多岐にわたる研究の紹介があり、現在の活動状況について整理することができた。

e)蔵王山における機動観測

蔵王山では、平成 30 年 1 月 30 日に噴火警戒レベルが 2 に引き上げられるなど火山活動の活発化の兆しが見られたため、平成 32～33 年度に実施予定であった機動観測計画の一部を前倒しして実施した。

これまでの研究により、蔵王山で断続的に観測される長周期地震は、火口湖御釜のやや東側の浅部における東北東－西南西走向の破砕帯での振動によって生じており、その上端にあたる領域で全磁力繰り返し観測から熱消磁が生じていることが推定されている。同様の浅部熱水系の様子は阿蘇山などでも見られており、その実体と詳細を明らかにし、時間変動を捉えることは水蒸気噴火に対する切迫性を評価するために極めて重要である。

一方、この活動域（浅部熱水系）の東側には既存の地震・地殻変動の観測点が少ないため、本事業では既存の観測点が手薄な領域での観測の強化を予定している。当初計画では、活動域東側に傾斜観測点を設置する予定であったが、平成 30 年 7 月以降顕著な地盤変動が見られた吾妻山の観測を優先するため、蔵王山では傾斜計による観測を断念し、その代替として広帯域地震計及び空振計の設置を行った。広帯域地震計は、長周期地震の地震動の観測に適していることに加え、精度では傾斜計に劣るものの数千秒程度以下の時定数の傾斜変化は捉えることができる。新設した広帯域地震計は、ハンドホール内に設置し、携帯電話を介した VPN を利用してリアルタイムでのデータ伝送を行っている。なお、本テレメータシステムは、本事業における地震波動場連続解析システムの開発の一環として試験を行っているものを活用した。図 26 に代替観測点で記録された長周期地震の波形例を示す。この観測結果は、これまでの解析結果と調和的であり、御釜のやや東側に重心をもつ開口亀裂の振動を示していると考えられる。今後、本観測点における高感度・高精度の観測記録を蓄積することで、蔵王山の噴火切迫性に必要な情報が取得できると期待できる。なお、この観測点の設置にあわせて、平成 32 年度以降に実施する広帯域地震計を用いた機動観測の観測点配置の机上で検討するとともに現地におけるノイズの調査も実施した。

本年度実施を見送った傾斜計観測は平成 31 年度に実施予定であるため、その事前検討として既存の観測データを用いた解析も進めた。まず、2015 年 1 月～6 月に蔵王山周辺で GNSS によって捉えられた山体膨張現象の再調査を行った。蔵王周辺では、2011 年東北地方太平洋地震の余効変動が大きく、この影響の除去が重要である。この期間後の火山活動の静穏期における変位場を用いて余効変動を除去し、逆解析に使用できる観測点を増やし、より信頼性の高い推定を試みた。推定された点圧力源の位置は、火口湖御釜の約 800m 東側、深さ 5.6km、体積増加量は 5.6×10^{6} m^{3} であった（図 27)。また、2018 年 3 月までの気象庁のカタログに掲載されている 58 回の火山性微動イベントを調査し、そのうち 26 回で明瞭な静的傾斜変動を伴っていることを見出した。気象庁坊平観測点における傾斜方向は、ほぼ全てのイベントで概ね N60W と一定であった。この傾斜変動は、微動の発生に 2～12 分程度先行して始まるが、その先行時間と変動量との関係性は見いだせなかった。

さらに、傾斜変動源の推定をより高度化して、その発生機構について検討を行うために、傾斜変動に対する地形の効果の検証を始めた。噴火発生切迫度の評価のためには、地震・傾斜・全磁力の変動源の相対的な位置関係の理解が重要であるが、これまでの解析では、地震・全磁力の解析においては地表面形状を取り入れた解析を行っていたのに対し、傾斜の解析においては半無限媒質を仮定した解析を行ってきた。そこで、地形効果の評価を行うため、有限要素法によるモデリングを実施した。図 28 に、点圧力源の場合の傾斜ベクトルの計算例を黒矢印で示す。簡便に地形効果を取り入れる方法として、観測点の平均標高等の基準標高面を仮定する Reference elevation model や観測点毎に圧力源との相対的深さを用いる Varying-depth model が広く用いられるが、それぞれのモデルによる傾斜ベクトルも水色・赤色の矢印で示して比較した。蔵王山は比較的地形勾配が緩いため、傾斜ベクトルの向きに対する地形の影響は

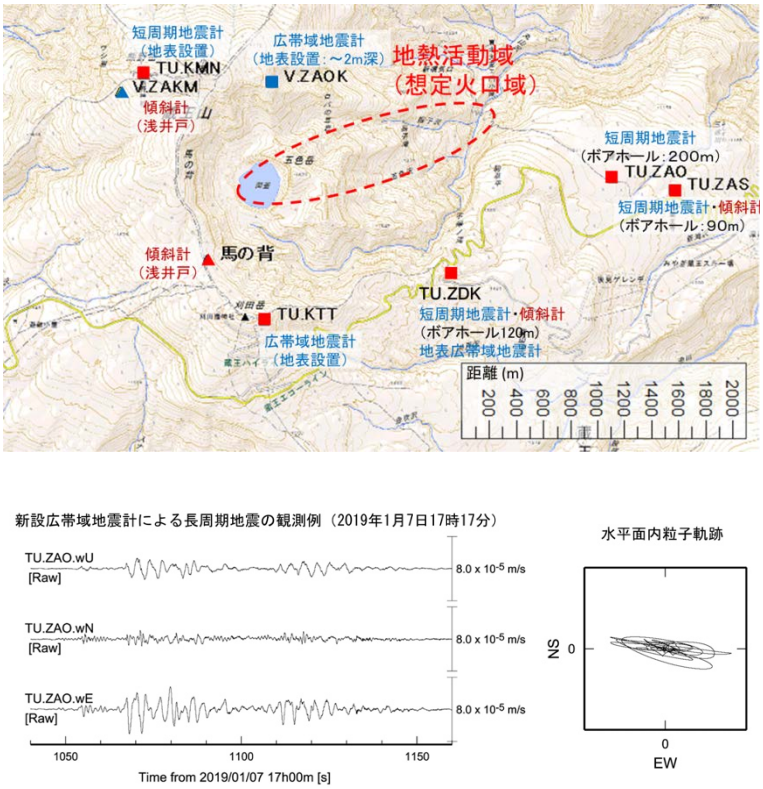


図 26. 蔵王山想定火口域周辺の観測点配置及び新設広帯域地震観測点における長周期地震の観測例。本事業で平成 30 年 11 月に TU.ZAO 観測点に併設して広帯域地震計及び空振計を設置した。震動軌跡は想定火口方向を向いている。

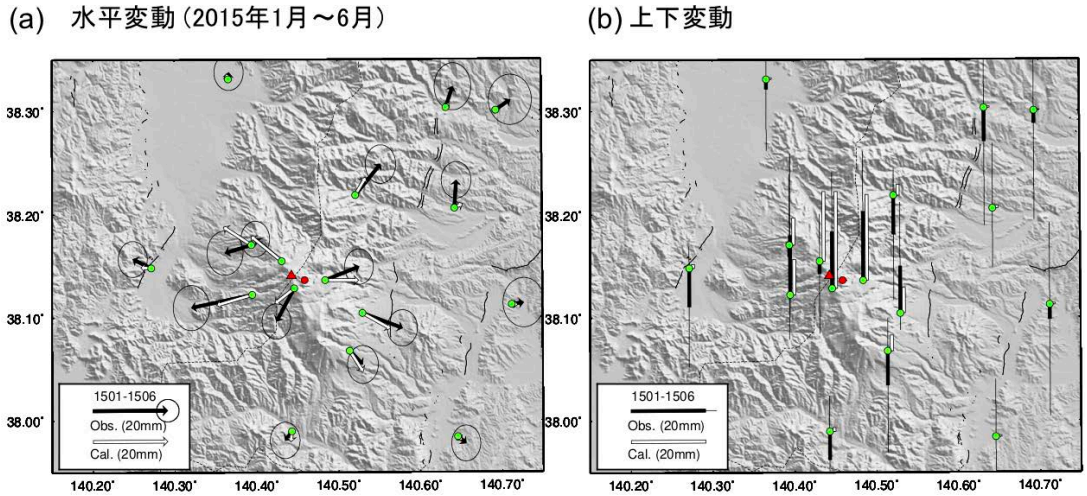


図 27. 蔵王山周辺の地盤変動（2015 年 1 月～6 月）の再解析の結果。
黒矢印及び黒棒は観測された水平・上下変動を、白矢印及び白棒は推定モデルにより計算された水平・上下変動を示す．赤丸は推定された点圧力源の位置を示し（火口湖御釜の約 800m 東側）、深さ 5.6km、体積増加量は $5.6\times10^{6}m^{3}$ であった。

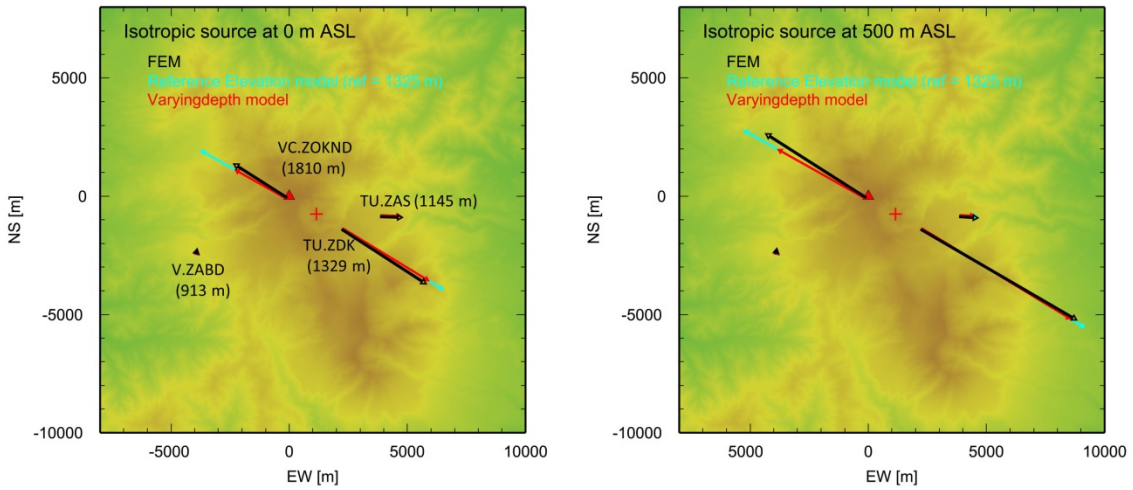


図 28. 傾斜観測に対する地形の影響の検討例。
基盤地図情報数値標高モデル（10 m メッシュ）を用いて有限要素法による数値モデルを行った。五色岳直下（赤＋）の海抜 0m 及び 500m に等方圧力源を想定し、周辺の傾斜計定常観測点 4 点における傾斜変動を計算した。図中の観測点コードの数値は観測点の標高を表す。黒矢印が計算結果、水色及び赤色の矢印が近似モデルによる傾斜ベクトルを表す。

小さいが、観測点の標高差が傾斜の大きさに大きな影響を与えることが明らかになった。今後、開口亀裂などの異なる形状・大きさを持つ圧力源について計算事例を蓄積することで、傾斜変動源推定の高度化が期待できる。

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

ｉ) システムの基本設計

平成 28 年度に霧島山のえびの高原（硫黄山）周辺に設置した地震計と空振計からなるアレイ観測点を維持して観測を継続した。また、平成 28 年度に製作し、平成 29 年度に公開した地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプをユーザーからの意見を参考に、以下の改善をおこなった。

・時刻、数値型式の入力ファイルを解析して表示するプラグインを追加した。
・数値が羅列された型式の入力ファイルを解析し、与えられた開始時刻とサンプリング間隔（秒）により時系列データとしてデータ生成して表示できるようにした。
・時系列データ（WinPlot プラグイン、T-Y-Image プラグイン、及び今回追加されるプラグイン）において、パッシブ指定された場合、他のデータと同期して表示するオプションを選択出来る機能を追加した。
・アクティブである時系列データ（WinPlot プラグイン、T-Y-Image プラグイン、及び今回追加されるプラグイン）において、表示する範囲をドラッグ型式もしくは 2 点設定型式で時間軸を拡大して表示する機能を追加した。

・開始時刻及び終了時刻を設定する項目のあるプラグインについては、他の同じ項目からコピー（インポート）する機能を追加した。
・ImgViewer の設定に時刻をシフトする機能を追加した。
・WinPlot のチャネル設定において、任意の V/Unit が設定できるように修正した。
また、本ソフトウエアについてのホームページを作成した（図 29）。

ⅱ)システムの動作試験

アレイデータ解析システムのプロトタイプについて、上記の改善を行いながら動作試験を実施して、システムのバグを無くした。システムの試験運用については、今後も引き続き実施して、必要に応じて今後もシステムの改良をはかる。

図 29. 地震計アレイデータ解析システムのホームページ

b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

熱水流動シミュレーターソフトウエア TOUGH2 を用いて、比較的単純な火山浅部熱水系を模擬した数値シミュレーションを行った（図 30）。一例として、本事業によって地下浅部の比抵抗構造や微小地震活動の震源，地盤変動源等が明らかにされている霧島硫黄山（Tsukamoto et al.，2018[4]）を想定し、（低比抵抗層＝難透水性層）の地下構造を仮定した。難透水性層（シール層）の下から高温流体（計算例では液相の水）の継続的供給を与えると、シール層の直下で高温高圧領域が形成されることが確認できた（図 31）。本プロジェクトの目指す噴火切迫性評価手法の開発に向けて、圧力変化に伴う地盤変動や、温度変化に伴う地磁気変化を計算し、観測データと定量的な比較を行うことが今後の課題のひとつであり、その最初のステップを本事業で雇用した RA の協力を得て実施した。

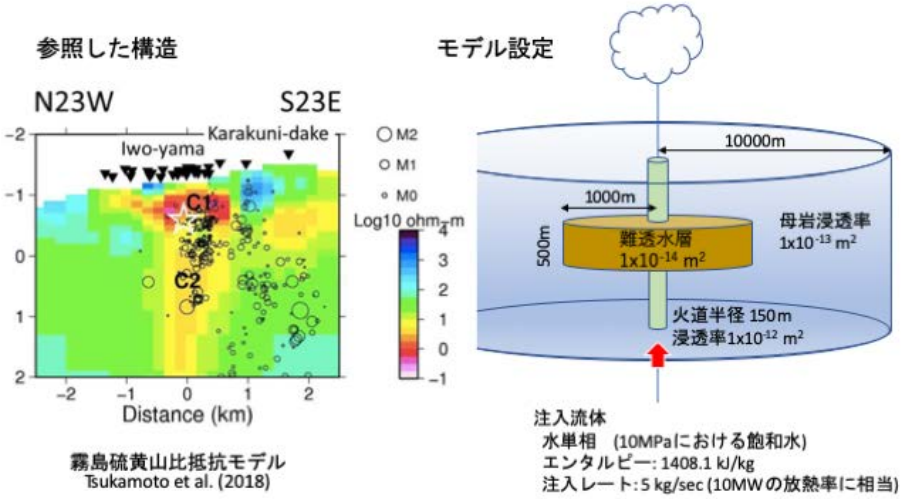


図 30.（左）熱水流動数値計算の構造モデルの参考とした、霧島硫黄山の比抵抗断面（Tsukamoto et al., 2018[4]）。（右）熱水流動数値計算で設定した浸透率構造（円筒座標２次元）と、流体の注入・放出の条件。

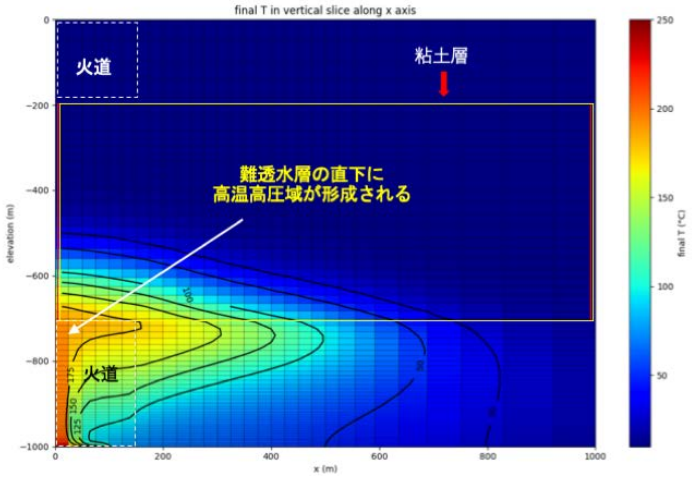


図 31．熱水流動数値計算（図 30 右の設定）で得られた火道周辺の温度分布．難透水性層の下部に高温域が形成されていることがわかる。

比抵抗構造解析の前処理支援ツールの一部として、直方体メッシュの ModEM（Egbert and Kelbert, 2012[18]）インバージョン用には、Python 言語の GUI を利用し、図 32 に示した視覚的なモデルメッシュ作成支援ツールを開発した。四面体メッシュの femtic（Usui, 2015[19]）インバージョンについても同様の支援ツールを開発した。これは、これは、図 33 に示すようにいくつかの前処理支援スクリプトからなり、これによって図 34 に示すようなメッシュの自動生成が行える。これらのツールにより、観測点配置を見ながらモデルメッシュを最適化していく作業が、従来に比べて格段に容易になった。このツールは、来年度にはマニュアルを整備して本事業内で共有し、試用してもらう計画である。本ツールを利用して、本事業で雇用した博士研究員が平成 29 年度に実施した倶多楽の MT 法比抵抗探査データの再解析（3 次元比抵抗構造インバージョン）を進めた。

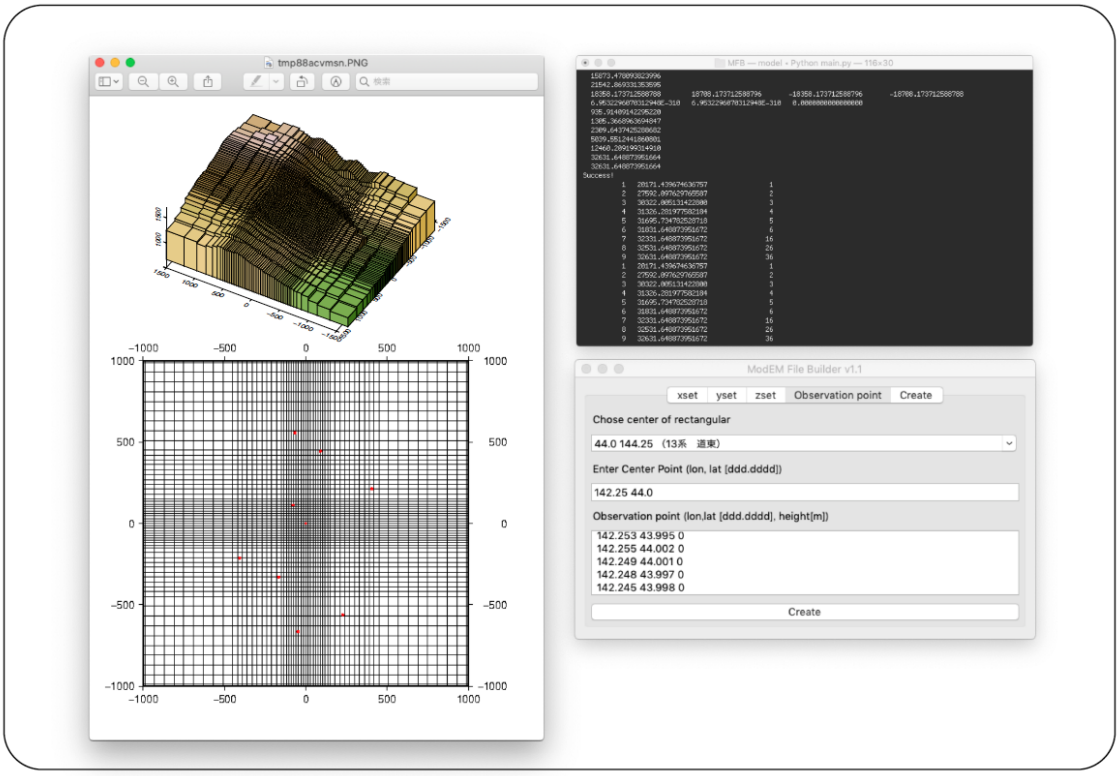


図 32. 直方体メッシュ MT インバージョンコード ModEM（Egbert and Kelbert, 2012[18]）用のモデルメッシュ作成支援ツール。右下のウインドウでモデルメッシュのサイズや分割数、海陸の地形ファイルを指定すると、左のウインドウにメッシュと観測点配置が表示される。

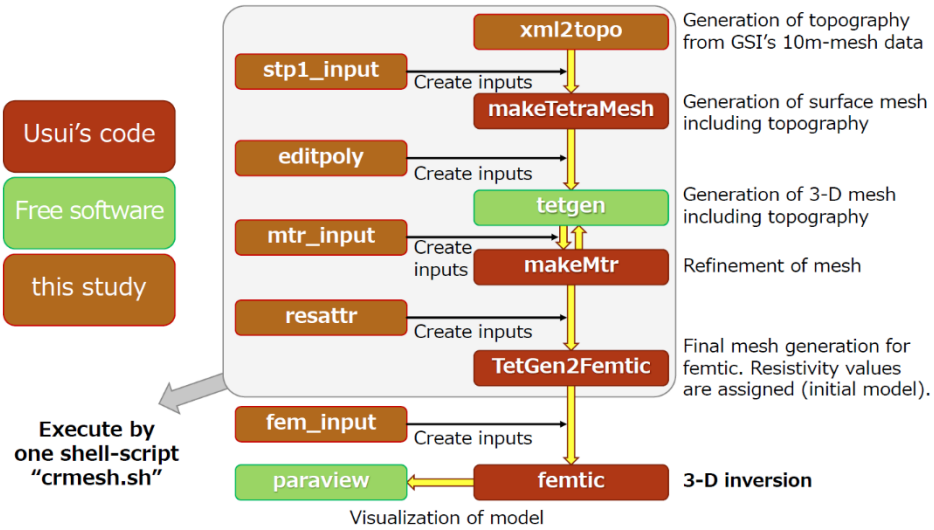


図 33. 四面体メッシュ MT インバージョンコード femtic（Usui, 2015[19]）用の前処理支援ツール（プロトタイプ）を構成するスプリプト群の概要。

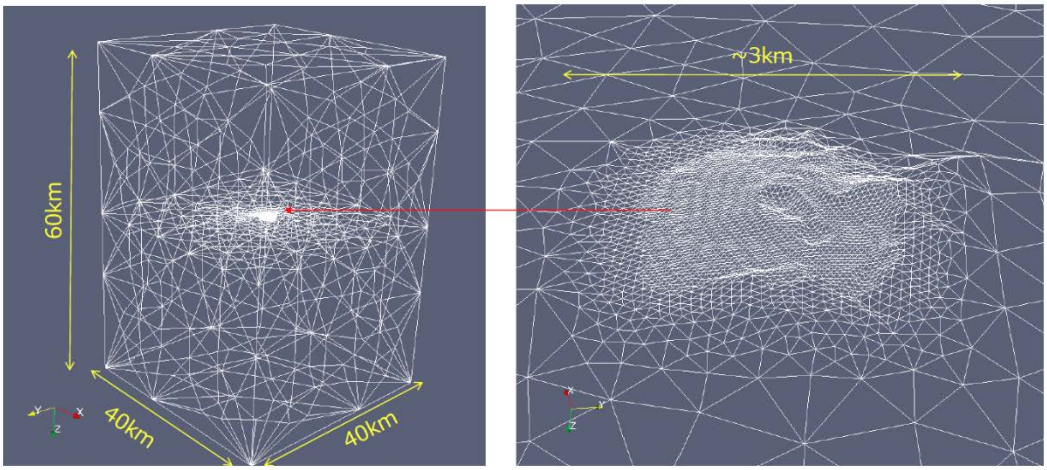


図 34. femtic 用前処理支援ツールで作成した四面体モデルメッシュの例（paraview ソフトで表示）。

さらに、倶多楽の結果と近年に行われた他の火山での研究事例をふまえて、電磁気構造探査データを水蒸気噴火の切迫性評価に活用する方策についても検討した。近年火山地域で一般的に行われるようになってきた３次元比抵抗構造解析に基づく研究事例（霧島硫黄山, Tsukamoto et al., 2018[4]、 箱根山, Yoshimura et al., 2018[20]など）によると、水蒸気噴火の火口域浅部には、傘型の形状で比抵抗が極めて低い層が共通して見られることがわかってきた。このような低比抵抗層は、スメクタイトなどの熱水変質粘土に富む難透水性のシールとなっている可能性が指摘されている。また、その直下には、熱水だまりと思われる相対的にこれよりもやや高比抵抗の領域が伴う特徴もいくつかの事例で報告されている。このように、難透水性層でシールされた熱水だまりは、水蒸気噴火の潜在的可能性がある場と考えられる。本研究で行った探査でも、倶多楽湖周辺域の比抵抗構造に同様の特徴が認められた。低比抵抗層は，必ず

しも難透水性の粘土層に対応しているとは限らないことには十分注意する必要があるが、より多くの火山で探査事例を積み重ねていくことにより、比抵抗構造の特徴から水蒸気噴火の潜在的可能性がある場所を簡易的にスクリーニングすることができるようになると思われ、噴火切迫性評価の対象地域を絞ることができる。また、倶多楽では現在のところ顕著な地震活動や地盤変動は観測されていないが、将来、熱水活動や地震活動の活発化等の unrest event が発生した際には、比抵抗構造との位置関係から噴火の切迫性評価に役立てることもできると予想される。実際、気象庁が最近の約 20 年間（1997-2019 年）に観測した倶多楽火山周辺の微小地震の震央分布を 3 次元比抵抗モデルと比較したところ、登別温泉地域から深部に向かって北西側に延びる低比抵抗域の周縁部に集中していることがわかった。このことは、登別温泉地域への深部からの熱水の供給路の周辺で微小地震が起こっていることを示唆しているものと考えられる(図 35)。これらの論考をまとめて Journal of Disaster Research 誌に投稿した（Hashimoto et al., 印刷中 [21]）。

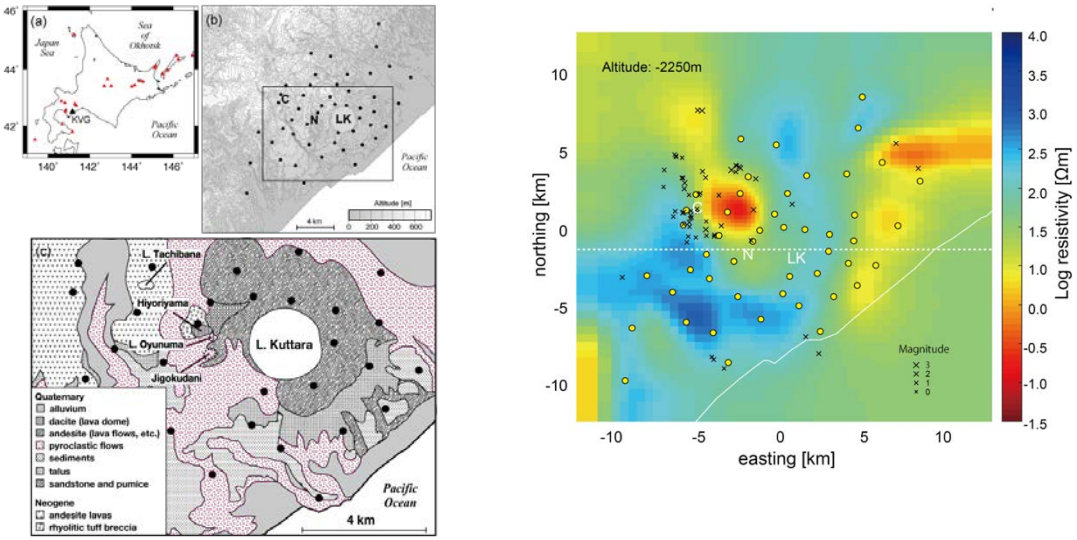


図 35. 平成 29 年度に実施した倶多楽の MT 法探査の測点分布（左上図の黒丸）、地質図（左下図）、標高-2250m でのモデル比抵抗断面（右図）。右図内の×印は微小地震の震央、○印は MT 測点を表す。LK、N、C はそれぞれ倶多楽湖、登別温泉、カルルス温泉の位置を示す。本図は Hashimoto et al. (2019) [21]から引用.

噴火切迫性を評価する際には、地下比抵抗構造に基づいて熱水の流動を数値シミュレーションで推定し、地震、地盤変動、噴気活動等と比較して、火山の内部状態の把握することが極めて需要である。熱水流動シミュレーションからより現実に近い内部状態を推定する基礎資料とするために、既存のボーリングのデータ（新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），1991[22]）から得られる物性値と昨年度実施した地下比抵抗構造の推定結果の比較検討を行った。公開されている NEDO の報告書には、熱流量調査用の坑井 2 本（掘削深度 500m）と、試錐調査用の坑井 6 本（掘削深度 1000～1500m）の検層データ，コア物性試験データが示されている。坑井はカルルス温泉

周辺に限られているため、倶多楽火山全体を代表しているという保証はないが、地下の物性値を得る直接的な観測データという点で貴重な情報である。ただし、デジタルデータの形では公開されていないため、ここでは報告書中のグラフや表から数値を読み取って以下のように整理した。

まず、電気検層（ロングノルマル）による比抵抗値と、コア物性試験による有効空隙率の関係を確認した（図 36 左図）。空隙率が 2%以上の範囲では、空隙率が高くなるほど比抵抗は低くなる傾向が認められる。このことは、この範囲では空隙がほぼ水で満たされており、Archie の法則が成り立っていることを示唆している。バルクの比抵抗を ρ、間隙水の比抵抗を ρ_w、空隙率を ϕ で表すと、Archie 則は$\rho = a\phi^{-m}\rho_w$と書くことができる（a、m は定数）。両対数グラフでの傾きは m 値を表しており、この場合ではおよそ m=1 であることがわかる。一方、空隙率が 2%以下の領域については、それとは逆に低空隙率ほど低比抵抗の傾向がある。このように空隙率の低い領域で Archie 則を適用すると、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導電性物質が圧密を受けて、電気的に連結した状態になっていると考えるのが妥当だと思われる。また、孔内温度と比抵抗の間には明瞭な相関は見られない（図 36 右図）。このことは、本データの範囲では、温度による比抵抗のバリエーションよりも、空隙率や変質の効果の方が大きいことを意味している。

次に、変質鉱物と比抵抗の関係を調べてみた（図 37）。スメクタイト（モンモリロナイト）は少量でも比抵抗を下げる効果が大きいとされているが、本データで見る限りでは、1 桁程度の比抵抗の下がりがあるものの、相関は必ずしも明瞭ではなかった。また、緑泥石やセリサイトについても明瞭な相関は見えなかった。黄鉄鉱については、比抵抗の下限値に着目するとやや強い相関が認められた。なお、図 36 左図において、1%以下の低空隙率領域にプロットされたデータは、モンモリロナイト帯ではなく、主に緑泥石帯の変質である。

空隙率と比抵抗の散布図において、空隙率数%付近にピークが見られることは、電磁気探査による比抵抗モデルから水理的な構造を推定する上で注意すべき重要な点を示唆している。例えば、10Ωm という比抵抗値から推定される空隙率の候補としては、1%未満の低空隙率（おそらく透水係数も小さい）である可能性と、数 10%以上の高空隙率（おそらく透水係数も大きい）である可能性の全く異なる 2 つのケースが考えられることになる。さらに比抵抗が低い場合には、極低空隙率で不透水性の層に候補が絞られてくるのではないかと考えられる。今後、他の地域のボーリングデータの整理を行う必要があるが、このような物性値と推定される比抵抗の関係を調査することが重要である。

最後に、本事業で得られた 3 次元比抵抗モデルと NEDO (1991)[18] のボーリングの電気検層の結果を比較した（図 38）。NB-1、NB-2、NB-3、NB-6 では、両者の傾向は比較的良く一致しているが、NB-4、NB-5 では傾向が一致していない。MT の測点密度がこのエリアでは不十分であることや、測点分布の周縁部にあたることなどが不一致の原因として考えられる。限られた測点数の MT データからインバージョンによる

モデリングを行う以上、これは避けられない問題であるが、地下構造の解釈をする上では十分留意しなければならない。

上記のように、水蒸気噴火を発生する場所の地下比抵抗構造には地表近くに傘型の低比抵抗層が存在するという共通の特徴があり、その特徴も熱変成された難透水性の粘土鉱物の存在の可能性を強く示唆し、その直下で高圧の熱水溜まりが存在することも合理的に説明することができる。しかしながら、低比抵抗層はそれ以外の理由でも存在する可能性が示されており、必ずしも一意に説明できない。今年度から本格的に取り組み始めた熱水流動シミュレーション等の手法を用いて、地下浅部での温度構造や増圧を定量的に見積もり、観測データと比較することで、より信頼できる噴火切迫性評価ができる可能性がある。今後も地下比抵抗構造の定量的な評価を目指した研究開発を、継続する必要がある。

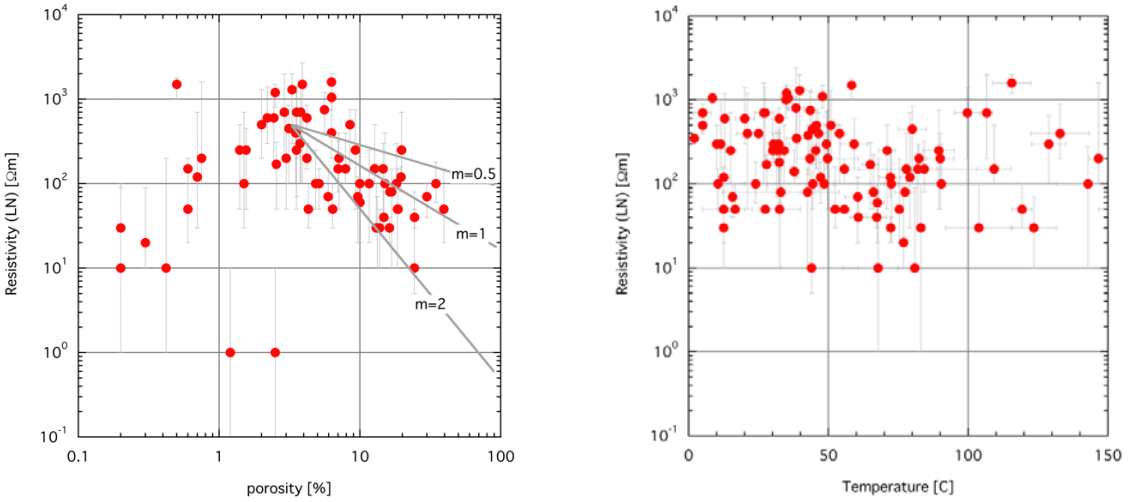


図 36. 右図：電気検層による比抵抗測定値と有効空隙率の関係（両対数グラフ）。比抵抗のエラーバーは、読み取り範囲での最大値と最小値を表す。　左図：比抵抗値と孔内温度の関係（片対数グラフ）。原データは NEDO（1991）[22]。

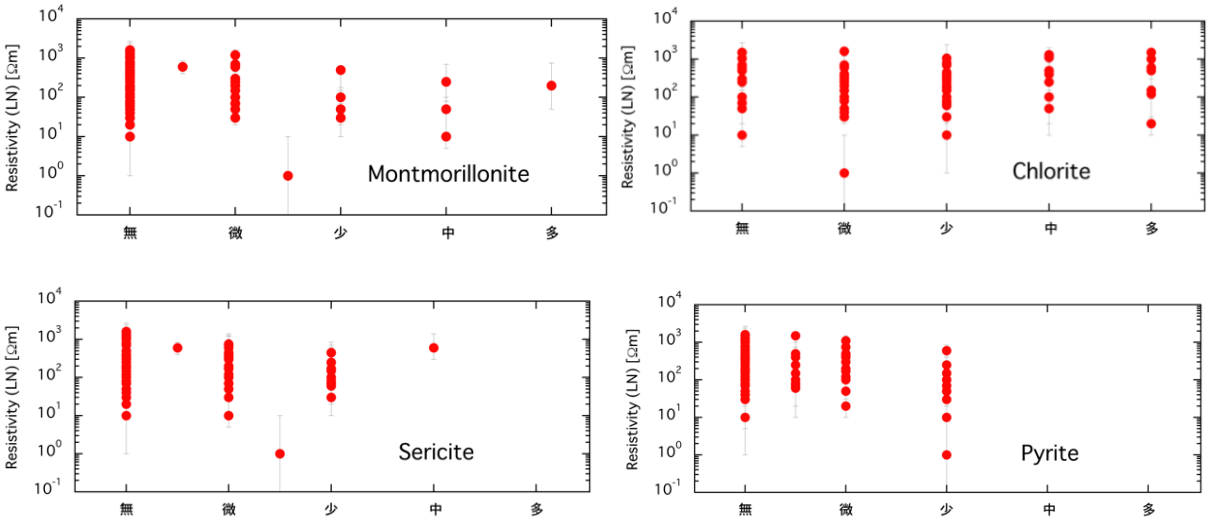


図 37. 変質鉱物の多寡と電気検層比抵抗値との比較。左上：スメクタイト（モンモリロナイト）、左下：セリサイト、右上：緑泥石、右下：黄鉄鉱。原データは NEDO（1991）[22]。

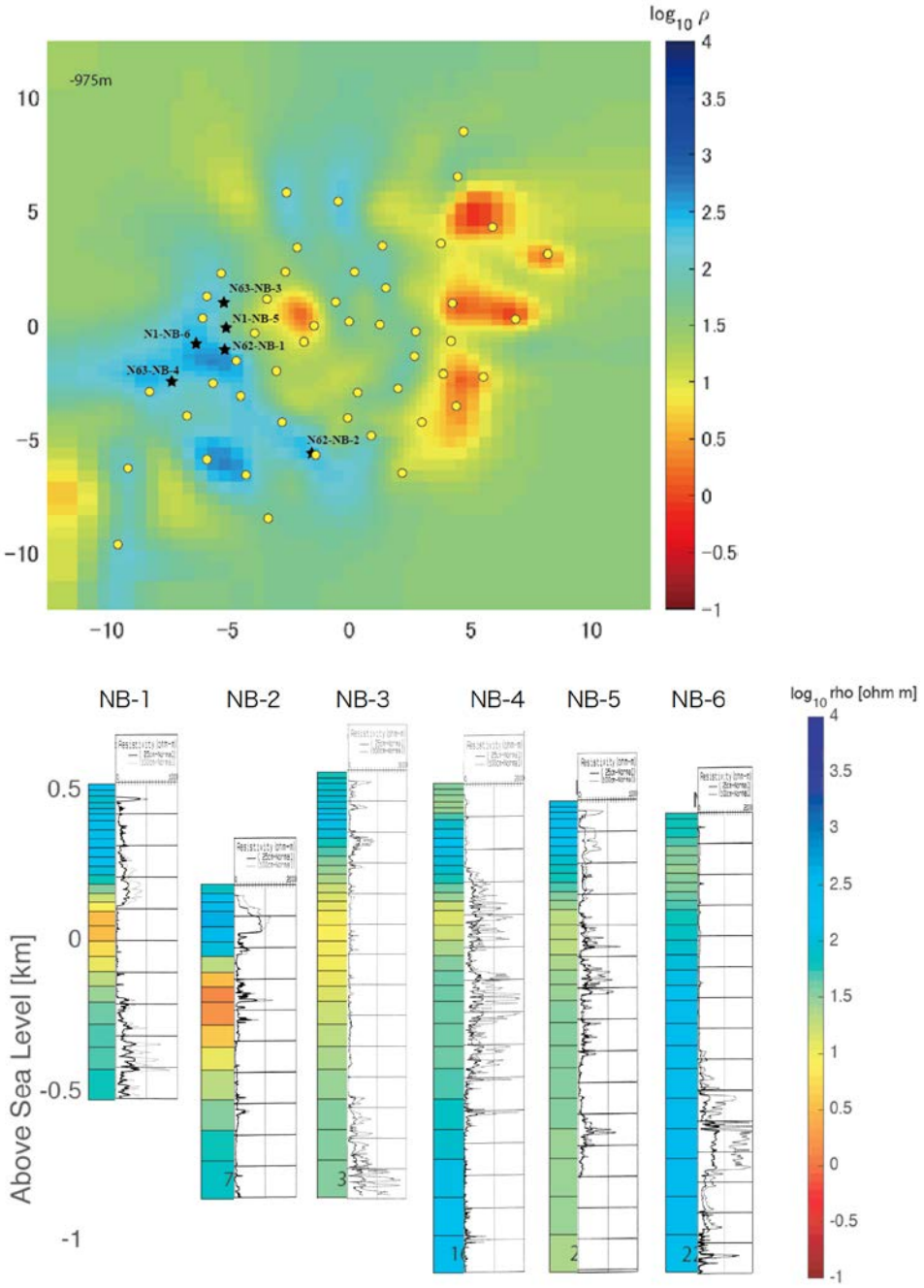


図 38.　MT 探査による３次元比抵抗モデル（本研究）と電気検層（NEDO, 1991[22]）の比較。上：標高-975m での３次元比抵抗モデルと試錐調査ボーリングの位置関係（★はボーリング坑、○は MT 測点）、下：ボーリング坑の位置での MT 比抵抗モデルと電気検層比抵抗の比較。

c)火山性地震活動総合解析システムの開発

2015 年以来、活発な熱活動を継続していた霧島硫黄山では、2018 年 4 月 19 日に小規模な水蒸気噴火が発生した。この地域では、本課題で詳細な地下比抵抗構造が推定され、また地震アレイ観測や地盤変動観測が行われてきた。それらの結果から、浅部に不透水層が広がり、その直下に熱水溜まりを形成していたモデルが提唱され、周辺の地震活動と比抵抗構造の関連も研究されている（Tsukamoto et al., 2018[4]）。このような水蒸気噴火を引き起こす構造と熱水活動の関係については、本報告書の前節の b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発の箇所で詳しく述べられているので、ここでは割愛する。

霧島山硫黄山において水蒸気噴火発生の必要条件である熱水が地下に蓄積している状態から、実際の噴火に至るまでに地震活動がどのように変化したかを知り、それを噴火切迫性評価に活かすことが可能であるかを検証することは極めて重要である。ここでは、どのような地震活動の特徴変化を経て 2018 年４月の噴火に至ったかを調査した。図 39 は 2018 年 4 月 19 日に発生する水蒸気噴火の約５ヶ月前の 2017 年 12 月 1 日からの霧島硫黄山近傍の浅部で発生していた火山性地震を、その波形の特徴から A 型地震、BL 型地震、N 型地震と判別し、それぞれの日別頻度分布を示したものである。地震の大多数を占める A 型地震は活動の増減の変化が大きく、水蒸気噴火直前にも活動が高まったが、同程度の活動の高まりはそれ以外の期間にも見られている。硫黄山噴火の約 50 日前の３月初旬に隣接する新燃岳で噴火が発生したため、その影響で A 型地震が増えていることも考えられ、A 型地震の活動度だけでは切迫性評価と言う意味ではその有効性に限度があることが判った。

一方、水蒸気噴火前には硫黄山近傍の観測点で火山性微動の振幅が大きくなり、極めて浅部で発生する BL 型地震が増えていた。更に、噴火直前には N 型地震が急激に増えている。このように、発生する地震の種別によって活動のパターンが異なっていることがわかった。つまり、それぞれの地震の種別ごとに活動度の変化を調査することが有効であり、噴火切迫性の評価に有用である可能性が高い。特に、N 型地震は、他の多くの火山での観測事例やその解析から、浅部にできた亀裂にマグマや熱水が侵入し、それが振動することにより発生していると考えられている。そのため、継続時間が長く、卓越周波数が時間とともに変化せず、振幅がゆっくり減衰する特異な振動をすることが明らかにされている（Chouet, 1986[23]）。また、その卓越周波数や減衰の様子は、クラック内部の火山性流体の状態を反映していると考えられており、単一のクラックを仮定すれば、卓越周期と減衰の様子の時間変化から内部状態の変化を捉えられる可能性が指摘されている（Kumagai and Chouet, 2000[24]）。巨視的に見れば、熱水やマグマから発生した火山性流体が浅部に集積している場合には、浅部にある多くの既存の亀裂内の過剰圧が高まることで開口し、N 型地震が多発すると考えられる。実際、Narvaez et al.(1997)[25] は、1992～1993 年にコロンビアの Galeras 火山で発生した４回の噴火すべてで、噴火前に N 型地震が多数発生したことから、N 型地震（原著論文では“Tornillo-type”）の活動は噴火予測の有力な手段であるとしている。

このように単に地震活動度だけでなく、地震の種別も考慮した活動度の変化をモニ

ターすることが重要であると思われるが、噴火前は一般に地震が多発するため、地震種別の判断を験測担当者が行うことには限界があり、地震種別の判定が自動で行えるシステムを作ることが重要である。そこで今年度は、N 型地震の自動判別を目指して、どのような手法で波形の特徴を抽出することが有効であるかを検証した。

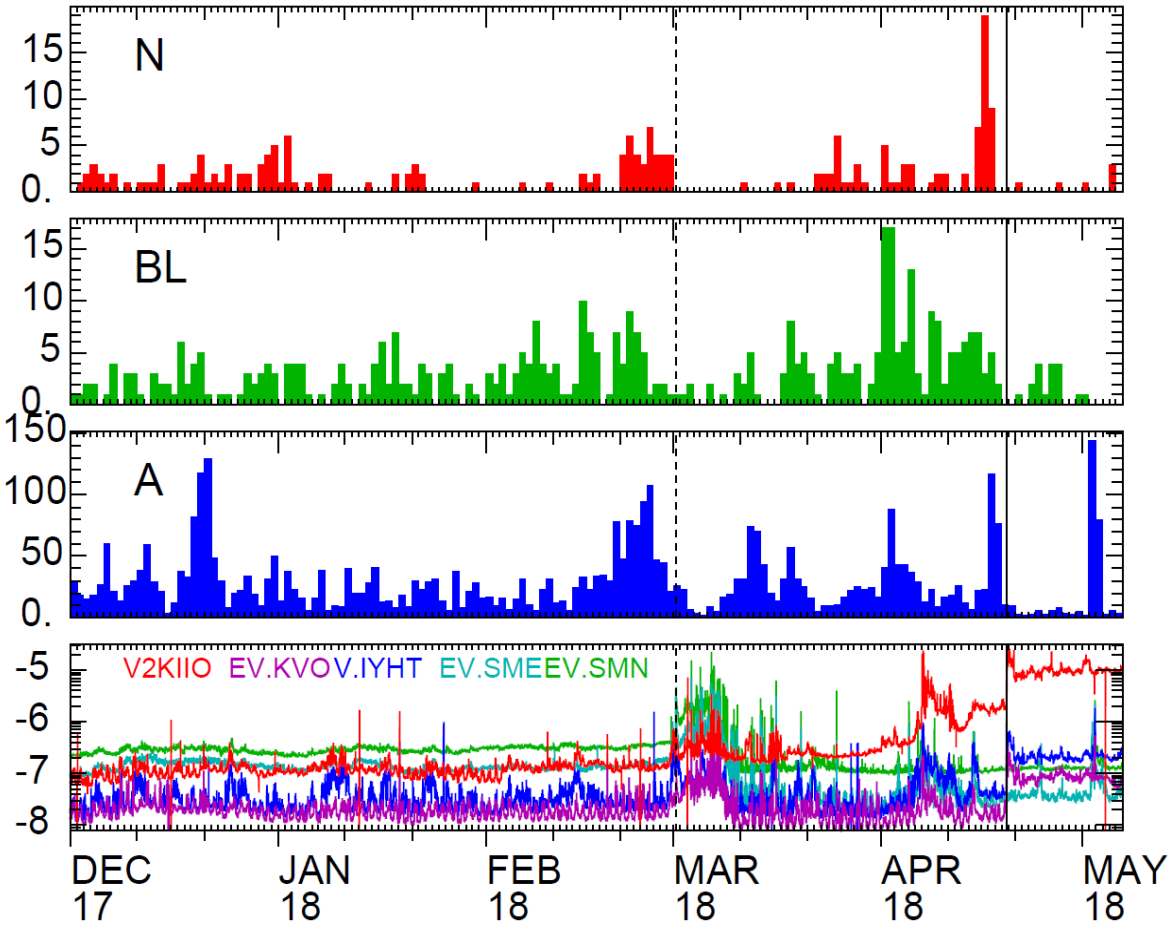


図 39.　2018 年 4 月 19 日噴火前後の霧島硫黄山周辺の地震種別ごとの日頻度分布と硫黄山周辺時観測点の RMS 振幅（最下図）の変化。水蒸気噴火直前に N 型地震の増加が顕著である。

N型地震が持つ波形の特徴として、以下の 3 点が挙げられる。1)最初の励起相の後にクラック内の火山性流体とその周辺岩体との境界で起こる振動が、少しずつ周辺岩体にエネルギーが散逸して減衰しながら継続する。そのため、観測波形はcoda 部の長い単調な減衰振動となる。2)震動は基本モードとその高次モードからなる固有振動となる。そのため、観測波形のスペクトルはいくつかの固有周波数で鋭いピークを持つ。3)N 型地震は、同一クラック内の体積変化による振動から伝播されてくるので、構造性地震のように観測点によって卓越周波数が異なることや時間の経過とともに周波数スペクトルが変化するという特徴はない。つまり、観測点間の波形の差異は小さく、同じ卓越周波数でゆっくりした減衰振動の波形となる。これらの特徴を効率的に

表現する方法として、時系列の自己回帰（AR）過程による表現を導入して、適切なパラメータで波形の特徴を抽出できるかを検討した。

AR過程は、時系列y_kが以下の式にように自己の過去の値と係数a_iと白色ノイズv_k（そのパワーを$\hat{\sigma}^2$とする）の線形和で表現できる。つまり，

$$y_k = \sum_{i=1}^{m} a_i y_{k-i} + v_k \qquad (1)。$$

このとき、パワースペクトルは、

$$P(z) = \frac{2\hat{\sigma}^2}{|1-a_1 z - a_2 z^2 \cdots - a_m z^m|^2} \qquad (2)、$$

となる。ここで、$z = e^{-2\pi i f}$ であり、スペクトル振幅の周波数変化は、z が複素平面上の単位円上を移動することに相当する。つまり、パワースペクトルのピーク値は(2)式を複素関数として、その分母の根の位置で表現できる。そこで、(2)式の多項式の分母の根を求め、その複素空間での位置（偏角が周波数、動径の単位円からの距離がスペクトルの鋭さ）から、地震波形の周波数空間における特徴を抽出することにした。図40に霧島硫黄山付近の浅部を震源とするN型地震、A型地震、BL型地震を近傍の観測波形を用いて、このような手法で解析した例を示す。具体的には、地震波形連続データを２秒の時間窓で0.5秒ごとに区切り、それぞれの区間でAR係数を推定し、各時間窓でのピーク周波数、そのピークの鋭さ、周期的な信号（つまり、ピーク周波数で表現できる成分）とそれ以外の信号のパワーの比を特徴量として、各タイプの地震が振動の開始から終了までどのような時間経過をたどるかを調べた。赤丸の位置がピーク周波数、丸の大きさがピークの鋭さを示している。この図で示すように、N型地震の波形はどの観測点においても、先に述べたピーク周波数が一定で、ピークが鋭いという性質を表現できている。この例では、2Hzと4Hz付近に大きな丸が振動継続時間中ほぼ一定で横一線に並んでいる。A型地震では振幅の大きな時間帯では鋭いピークを示す大きな丸は見えず、広い周波数帯域で振幅が大きくなっている特徴を示している。また、BL型地震では、振幅の大きな主要動の部分では鋭いピークは目立たないが、コーダ部では低周波数帯域にピークが連続して見られる。これは、浅部で発生した地震によって励起された表面波を観測しているものと考えられる。BL型地震のコーダ部では、N型地震と同様に鋭いピークが連続するが、複数の観測点で同じ周波数であるという点や主要動よりもコーダ部でピーク周波数が一定であるということから、N型地震との判別はそれほど困難でない。

このように、本年度は地震種別の自動判定と言う明確な目標を設定し、それを判別するための手法を見出し、その特徴も抽出した。2018年４月18日の噴火前の約５か月間で約1200イベント（内、N型地震は約200イベント）に対して、上記のようにAR過程を適用した特徴抽出を行った。ここで抽出した特性は、それぞれの地震の起源に基づくものであるため、多くの経験的な判別関数と異なり、他の火山や他の活動においても基本的に応用可能であると思われる。来年度以降、この特徴について地震種別によるクラスタ分析を系統的に行い、非線形区分法であるニューラルネットワークを用いた機械学習のアルゴリズムを考案することを目指して開発を進める予定である。

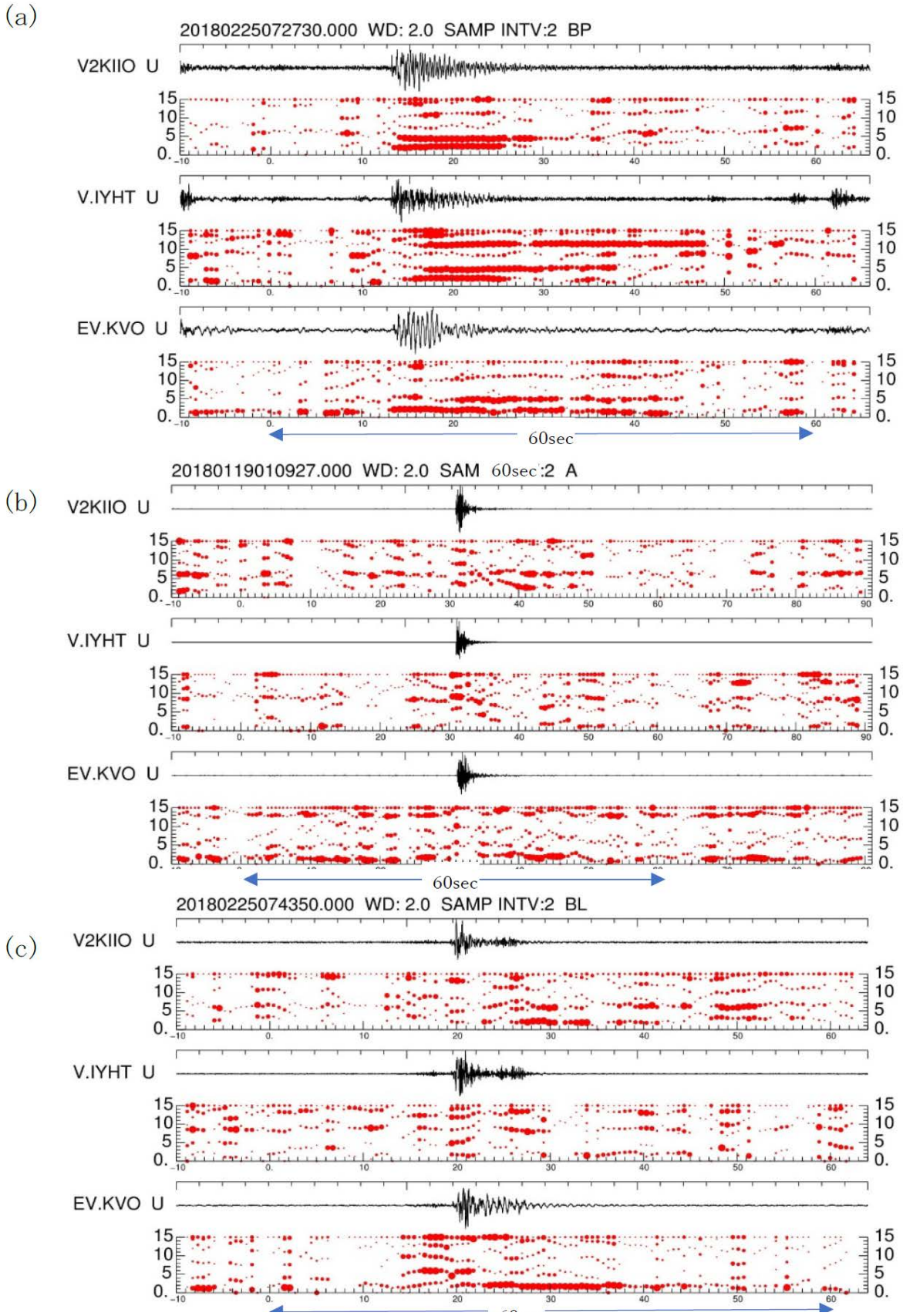


図 40.　AR 過程を適用して、波形の特徴を抽出した例。硫黄山に近い 3 観測点の上下動成分を例示した。（a）N 型地震、(b)A 型地震、(c)BL 型地震。

d)遠隔熱情報解析システムの開発

本事業で導入したドローンを用いて、2018 年 1 月の本白根噴火[26]により火山灰や噴石が降下した領域を繰り返し空撮し、得られた映像や画像に基づき、噴石降下密度を計測した[27]（図 41）。また、現地での地上地質調査のための事前検討資料、および事前安全確認などの調査支援に活用した。同年 4 月以降活発化した白根山においては、飛行習熟および撮影を目的として繰り返しドローンを飛行させた。この結果、湯釜火口湖内で約 30 年ぶりとなる黒灰色変色を確認し、その推移が上空から記録できた[28-31]（図 42）。この変色は火山性微動発生直後に始まっており、既存の物理観測から得られるデータを理解するうえで、ドローンが有効であることが示せた。また、群発地震や噴気異常に関する通報に対応して、随時、ドローンを飛行させて映像として記録するなど、研究者自身が操縦する即時的なドローンを用いた火山観測を実現した。

安全性および技術向上を目的として、国土交通省指定の専門業者による技術指導会を開催し、各大学から 10 名が参加した。また、機体に赤外線カメラを搭載するための防振機構を製作し、草津白根火山において試験飛行を行った。火山ガス組成比を測定するため、4 成分を測定する軽量の簡易装置を導入した。測定中にセンサへ当たる風がガス組成比の推定に与える影響を室内実験により評価し、風の影響を補正する簡単な式を導出した[32]。

本システムは、2019 年 3 月に霧島火山で実施された次世代火山研究者育成プログラムの野外実習において使用された。実習生 14 名のうち、地球化学班 2 班の 8 名が実際にドローンを操縦して熱・火山ガス観測を行ったほか、および Terada et al.(2018)[31]の方法を用いて火口湖から採水を行った(図 43)。得られたデータに基づき、硫黄山の火山活動や熱活動の背景について考察、プレゼンテーションを行い、各自がレポートにまとめた[33]。

図 41. 草津白根火山・本白根噴火の被災建屋におけるドローンを用いた噴石衝突痕調査.

図 42. 草津白根火山・湯釜火口湖において約 30 年ぶりに観察された黒灰色変色の発見と経過の観察.

図 43. 次世代火山研究者育成プログラム（霧島火山）で実施された本システムを用いた火山実習. ドローン操縦と観測は実習生全員が体験した. 写真は 2019 年 3 月 6 日撮影.

e)地震波動場連続解析システムの開発

この解析システムは、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[34)35)]、地震波逆伝播解析[36)37)]など複数の解析手法を組み合わせたものである。

平成30年度は、このうち、地震波動場の周波数解析を行う部分のプロトタイプを作成し、個々の観測点におけるスペクトログラム及び複数観測点におけるスペクトログラムの相関を準リアルタイムで出力するプログラムを試作した。また、平成28年度・29年度にプロトタイプ作成を進めた地震波逆伝播解析・地震波干渉法解析部分について、計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを進めるとともに、ユーザーインターフェースの仕様を検討し、GUI のプロトタイプの作成を行った。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処理し、解析結果をデータベースに格納を行っているが、このデータベース上の解析結果を効率的に表示・確認するための表示ソフトウエアの試作を行った。また、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の検証のため、既存の火山観測点において通信回線の冗長化及びそのために必要な電源システムの試験等を行った。

この結果、観測点から受信した連続地震波形データを準リアルタイムに処理し、周波数解析を行うプログラムのプロトタイプを構築することができた。このプロトタイプの試験運用中に草津白根山の湯釜北東浅部で発生した長周期イベントを検出したことは、本解析の有用性を示す事例と言える。また、平成28年度から着手した地震波干渉法解析部分については、準リアルタイムでの連続処理を引き続き実施し、プログラムの動作安定性の確認・解析結果の蓄積を進めることができた。図44に試作した地震波干渉法解析結果表示ソフトウエアの表示例を示す。本表示ソフトウエアでは、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、本表示ソフトウエアはJavaによる実装であるため、WindowsやLinux等のOSで稼働するクライアントで実行可能である。

また、平成28年度・29年度に蔵王山及び吾妻山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を、本プロジェクトによる本白根山緊急観測に際し活用することで、臨時観測点設置完了当日から全国地震観測データ流通ネットワークJDXnetに配信し、1月31日からは気象庁における監視業務にも活用されるなど、迅速なオンライン観測点の展開を行うことができた。このデータ通信システムを用いた地震観測は、草津白根山・本白根山周辺において現在まで継続しており、長期の動作安定性についても現在のところ大きな問題がないことを確認した。

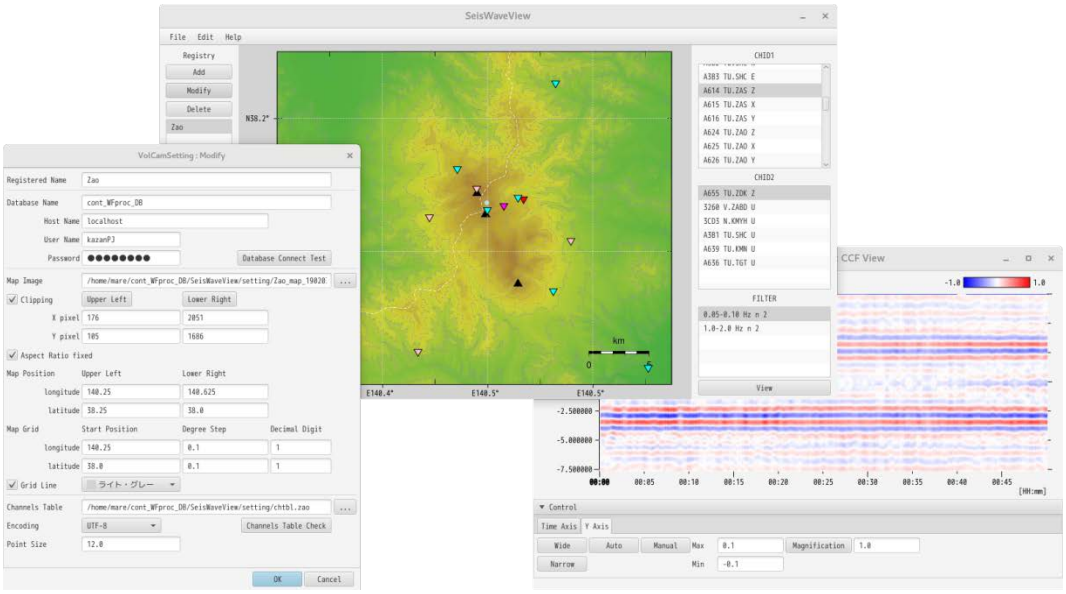


図 44.　地震波干渉法解析結果表示ソフトウエアの表示例。本表示ソフトウエアでは、画面上で表示する観測点ペアや解析条件などを指定することにより、連続地震観測データを準リアルタイムに処理し逐次格納を行っている地震波干渉法解析結果のデータベースから解析結果の抽出・表示を行うことを効率的に行うことができる。

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平成 31 年 1 月 10 日 14 時～17 時に開催した。そこで、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。平成 30 年度より、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。来年度も人材育成コンソーシアムから課題 B 全体で４名の 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。

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」を平成 30 年 1 月 26 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、総合協議会からのコメントにあった気象庁のとの連携を強化するため、気象庁から２名、仙台管区気象台、福岡管区気象台から各１名が出席して頂き、協力体制を取ることを確認した。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。

広帯域地震計　　３台

広帯域地震計用記録計　３台

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）データ一元化への協力

本事業の課題Ａ火山観測データの一元化事業に協力するため、課題Ａの代表者である上田英樹氏に、平成 31 年１月 26 日に開催した本サブテーマ推進委員会に出席してもらい、システムの開発状況について説明を受け、具体的な協力方法について意見交換を行った。

(c) 結論ならびに今後の課題

機動観測による火山体内部構造・内部状態把握では、三宅島において、山頂火口近傍に広帯域地震観測点を３地点設置した。このうち２地点においては、携帯電話回線を用いてデータ伝送を始めた。これらの観測点のノイズレベルを調査したところ、１点を除き、既存の観測点と遜色なく、品質の堅い観測データが得られていることがわかった。１点については、季節風による影響が大きいため、来年度以降に何らかの対策を講じたい。新たに設置した観測点のデータと他機関の既存の観測点のデータを併せて解析したところ、三宅島火口内の噴気地帯直下から深さ約 2 kmまでの極めて限られた領域で、極めて小さな地震が多く発生していることが明らかになった。このような地震活動の推移を精度よく調査することが今後の火山活動評価の基準となることから、次年度以降も観測を継続し、解析手法も高度化して、データの蓄積に努めたい。また、前回の 2000 年噴火で火道を含む浅部の構造が大きく変化したことが予測されることから､地下構造の時間変化の抽出を目指して、2019 年度に MT 探査を実施し、そのデータから地下比抵抗構造の推定を目指している。それと比較するために、2012 年に実施した MT 探査もデータを解析した。その結果、高比抵抗の第１層、低比抵抗の第２層、高比抵抗の第３層と言う大局的な比抵抗構造が推定できた。低比抵抗層と、先ほど述べた火口内噴気孔直下の浅部の微小な地震の発生域との関連が注目される。2019 年度に実施する MT 観測の解析も含めて、現在の三宅島の浅部活動についての理解を深め、今後の活動の切迫性評価に利用できる情報を集めることが次年度以降の課題である。

霧島硫黄山では、MT 探査による地下比抵抗構造、地震アレイ観測、地盤変動観測等により、水蒸気噴火を起こす場の理解が飛躍的に進んだ。特に、高精度・高分解能の地下比抵抗構造と、高精度な震源分布、精密水準測量から、観測データを統一的に説明できるモデルが構築され、水蒸気噴火に対する切迫性評価に役立つ知見が得られた。今後の課題として、浅部の熱水活動と深さ約 10 kmの深部マグマ溜まりをつなぐメカニズムの解明が浮かび上がった。この課題の解明は困難で時間を要するものと予想されるが、水蒸気噴火の中期的な切迫性評価と言う点において極めて重要な課題である。例えば、基礎研究の枠組み

を利用して着実に研究を進め、将来の課題解決研究に結び付けることが期待できる。

箱根火山では、これまでの地震機動観測のデータを解析し、箱根火山の直下深さ 10km 程度まで分解能 2km の地震波速度構造の推定を行った。それによると、活動の活発化と同期して膨張する圧力源の存在が推定されている深さ約 9km から地震活動の下限である深さ 6 kmまでの領域で低速度域の存在が明らかになった。詳しく見ると、深さ 9 kmでは Vp/Vs が大きく、深さ 6 kmでは Vp/Vs が小さい。前者がメルトによる低速度と考えられるのに対して、後者はメルトでは説明できず、水か火山ガスによると考えるのが妥当であることが明らかになった。今後は、マグマの供給過程の理解のため、より深部までの構造の把握も必要と考えられる。そこで、深さ 10km 以深の地下構造を推定する為、レシーバー関数による S 波速度構造の解析も検討していく。

来年度以降予定されている草津白根山と蔵王山での機動観測については、その準備が順調に進められた。特に草津白根山では、2018 年 1 月に本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生したことから、計画を前倒しして、地震観測網の整備を進め、現時点での地震活動等の情報を得た。

火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発では、霧島山の機動観測と併せて、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して始めた。今年度はユーザー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、ユーザー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、主に比抵抗構造解析支援ツールの開発に取り組み、海陸地形を組み込んだモデルメッシュ作成ツールの作成が進んだ。次年度以降、公開する予定である。また、色々な火山で比抵抗構造が明らかになることを踏まえて、水蒸気噴火の切迫性評価を念頭に、地下比抵抗と透水性の関係を仮定して、熱水流動シミュレーションの試行を開始した。将来的には、このようなシミュレーションと地震活動や地盤変動の観測データと併せて、切迫性評価を行うことが目標である。色々な火山で地下比抵抗構造が明らかになることを踏まえて、比抵抗値と岩石の物性との関連を見出す必要がある。昨年度実施した MT 探査から推定された倶多楽火山の地下比抵抗構造とボーリングの検層データの比較を行い、いくつかの興味深い結果を得た。一般化するには、更に多くの地域で、このような比較が必要である。今後も、このような比較を可能な限り継続したい。

火山性地震活動総合解析システムでは、霧島山噴火の際の観測データを参照に、システム設計を継続した。霧島硫黄山の水蒸気噴火に先立ち、N 型地震が多発したことが明らかになったことから、自動判別に利用が可能と思われる N 型地震の波形の特徴を抽出する方向を検討した。今後は、A 型地震、BL 型地震と N 型地震の判別を自動化する手法の開発を目指す。

遠隔熱情報解析システムでは、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。人材育成コンソーシアムの実習においてもデモンストレーションを行った。

地震波動場連続解析システムは実装予定の解析プログラムのうち、スペクトルグラムと複数観測点におけるスペクトルグラムの相関を準リアルタイムで出力する部分が完成した。

また、地震波逆伝搬解析・地震波干渉法解析の GUI のプロトタイプが完成した。今後は、実データによる検証を進める。

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、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。「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平成 30 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、課題 A「火山データ一元化」の代表者と意見交換を行った。

(d) 引用文献

1) Chave, A.D., and Thomson, D.J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int., 157, 988-1006, 2004.

2) Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote reference, Geophysics, 44, 53-68, 1979.

3) Siripunvaraporn, W., and Egbert, G.: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, Phys. Earth Planet. Int., 173, 317-329, 2009.

4) Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T. (2018), 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, 12,821-12,828. https://doi.org/10.1029/2018GL080202.

5) Morita, K., Matsushima, T., Yokoo, K., Miyamachi, R., Teguri, Y., Fujita, S., et al.. (2017), Vertical ground deformation of Iwoyama, Kirishima volcanoes measured by precise leveling survey (during June.2015-Feb.2017), IAVCEI2017, Portland, USA.

6) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2017), Report of Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruption No138, 104-105.

7) 相澤広記・塚本果織・A. Triahadini・村松弾・林田祐人・湯浅雄平・A. Luthfian・手操佳子・武石貢佑・神田径・木下貴裕・関香織・宇津木充・小山崇夫・上嶋誠, 霧島火山での広帯域 MT 観測, 火山学会秋季大会, 秋田, 2018.9.

8) Nakao, S., Y. Morita, H. Yakiwara, J. Oikawa, H. Ueda, H. Takahashi, Y., et al. (2013), Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption-Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements, Earth Planets Space, 65, 505-515.

9) Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Arai, R., and Matsubara, M., A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures, J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, 3293-3308, doi:10.1002/2014JB011856, 2015.
10) Zhang, H., and C. H. Thurber, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 93(5), 1875-1889, doi:10.1785/0120020190, 2003.
11) Takei, Y., Effect of pore geometry onVP/VS: From equilibrium geometry to crack, J. Geophys. Res., 107(B2), doi:10.1029/2001JB000522, 2002.
12) Harada, M., R. Doke, K. Mannen, K. Itadera and M. Satomura, Temporal changes in inflation sources during the 2015 unrest and eruption of Hakone volcano, Japan, Earth, Planets and Space, 70:152, 2018.
13) Doke R, M., Harada, K., Mannen,K., Itadera and J., Takenaka, InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. Earth Planets Space, 70:63, 2018.
14) Honda R., Y., Yukutake, Y., Morita, S., Sakai, I., Kazuhiro and K., Kokubo, Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, Earth, Planets and Space, 70:117, 2018.
15) Matsunaga et al.: Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, in preparation.
16) Zumberge et al.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102(B3), 5005-501, 1997.
17) Fukui, Y. et al.: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013 Abstract, 4W 2C-P8. 2013.
18) G. D. Egbert and A. Kelbert, Computational Recipes for Electromagnetic Inverse Problems, Geophys. J. Int., Vol.189, pp. 251-267, 2012.
19) Y. Usui, 3-D Inversion of Magnetotelluric Data Using Unstructured Tetrahedral Elements: Applicability to Data Affected by Topography, Geophys. J. Int., Vol.202, pp. 828-849, 2015.
20) R. Yoshimura, Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kamo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani, and Y. Usui, Resistivity Characterisation of Hakone Volcano, Central Japan, by Three-dimensional Magnetotelluric Inversion, Earth Planets Space, Vol.70:66, doi:10.1186/s40623-018-0848-y, 2018.
21) T. Hashimoto, W. Kanda, Y. Morita, M. Hayakawa, R. Tanaka, H. Aoyama, and M. Uyeshima, Significance of Electromagnetic Surveys at Active Volcanoes: Toward

Evaluation of the Imminence of Wet Eruptions, J. Disast. Res., 14, in press.
22) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，地熱開発促進調査報告書，No. 22，登別地域，pp. 845，1991.
23) Couet, B., 1986, Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, J. Geophys. Res., 91, 13967-13992.
24) Kumagai, H. and Chouet, B.A., 2000, Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. J. Geophys. Res., 98, 6511-6522
25) Narvaez M., C. Torres R. A., M. Gomez D. M., j. Cortes G. P., V. Cepera H. and J. Stix, 1997, 'Tornillo'-type seismic signals at Galeras volcano, Colombia, 1992-1993, J. Vocanolo. Geotherm. Res., 77, 159-171.
26) 寺田暁彦（2018）水蒸気噴火発生場としての草津白根火山，地質学雑誌，124，251-270，DOI: 10.5575/geosoc.2017.0060
27) 草津白根山降灰・噴石合同調査班（2018）本白根 2018 年 1 月 23 日噴火の口及びその近傍での降灰・噴石調査，第 141 回火山噴火予知連絡会資料（その 2　草津白根山），87-11
28) 東京工業大学，草津白根火山における空中観測（セスナ機・ドローン），第 141 回火山噴火予知連絡会資料（その 2　草津白根山），60-64
29) 東京工業大学，草津白根火山・湯釜火口湖の変色，第 142 回火山噴火予知連絡会資料（その 3　草津白根山），55-56
30) 東京工業大学，表万座・2014 年噴気周辺の空撮，第 142 回火山噴火予知連絡会資料（その 3　草津白根山），59-60
31) Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori. T., Ohba. T., Yaguchi, M. and Kanda, W. (2018) 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
32) 松浦弘毅（2019）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，36p
33) REPORT vol.11 「霧島山でフィールド実習を実施しました（平成 31 年 3 月 3 日～8 日）」 http://www.kazan-edu.jp/report-vol11.php
34) Campillo, M., and A. Paul: Long-range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551, 2003.
35) 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.
36) Fink, M.: Time reversal in acoustics, Contemp. Phys., 37, 95-109,doi: 10.1080/00107519608230338, 1996.
37) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, Geophy. 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	発表年月日
Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T.	Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption	Geophysical Research Letters, 45, 12,821-12,828.	平成 30 年 12 月
R. Tanaka, T. Hashimoto, N. Matsushima, and T. Ishido	Contention between Supply of Hydrothermal Fluid and Conduit Obstruction: Inferences from Numerical Simulations	Earth, Planets and Space, 70:72	平成 30 年 5 月
W. Kanda, 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 and Space 71:37	平成 31 年 4 月
Honda R, Y. Yukutake, Y. Morita, S. Sakai, K. Itadera, K. Kokubo	Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model	Earth, Planets Space, 70:117. doi: 10.1186/s40623-018-0887-4	平成 30 年 7 月
Mannen K, Y. Yukutake, G. Kikugawa, M. Harada, K. Itadera, J. Takenaka	Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan: geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures	Earth, Planets and Space 70:68 doi:10.1186/s40623-018-0844-2	平成 30 年 5 月

	during the crisis		
Yoshimura, R., Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T.-n. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kamo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani and Y. Usui	Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion	Earth, Planets and Space 70:66 doi:10.1186/s40623-018-0848-y	平成 30 年 4 月
Yukutake Y, M. Ichihara, R. Honda	Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption	Earth, Planets and Space 70:53 doi:10.1186/s40623-018-0820-x	平成 30 年 4 月
Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yahuchi, W. Kanda	Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu- Shirane volcano, Japan	Earth Planets Space, 70:64, doi:10.1186/s40623-018-0835-3	平成 30 年 4 月
寺田暁彦	水蒸気噴火発生場としての草津白根火山	地質学雑誌，第 124 巻，251-270,	平成 30 年 4 月
T. Hashimoto, W. Kanda, M. Hayakawa, Y. Morita, R. Tanaka, H. Aoyama, and M. Uyeshima	Significance of electromagnetic surveys at active volcanoes: Toward evaluation of the imminence of wet eruptions	Journal of Disaster Research, Vol.14	印刷中
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	Journal Disaster Reserch, Vol.14	受理済み
神田　径・関　香織・木下貴裕	コンダクタンスを用いた熱水系構造の比較	Conductivity Anomaly 研究会論文集 2019, 51-54	平成 31 年 3 月

Yukutake Y., R. Honda, M. Harada, R. Doke, T. Saito, T. Ueno, S. Sakai and Y. Morita.	Analyzing the continuous volcanic tremors detected during the 2015 phreatic eruption of the Hakone volcano	AOGS2018, SE24-29-A008, Honolulu, Hawai	平成 30 年 6 月
Yohei Yukutake	Earthquake swarms and their relation to crustal fluid as revealed by dense seismic observation in Hakone volcano, central Japan	AOGS2018, SE36-A006, Honolulu, Hawai	平成 30 年 6 月
Marceau,G., M. Uyeshima, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, T.Koyama, M. Hata	Preliminary report on Three-dimensuional electrical structure in Miyakejima, Japan	26th Hubbert Quorum, Reston, VA, U.S.A.	平成 30 年 12 月
Ishimine, Y., Yochimoto, M. and Terada, A.	Preliminary report on the ground-hugging flow generated from the ash-clouds of Kusatsu-Shirane 2018 eruption	Cities on Volcanoes 10, Italy	平成 30 年 9 月
Yoshimoto, M., Honda, R., Yasuda, T., Ishimine, Y., Yamada, H., Komori, J., Terada, A., Hirabayashi, J. and Fujii, T.	Preliminary report on damage caused by the ballistic block of the 2018 phreatic eruption of Kusatsu-Shirane volcano	Cities on Volcanoes 10, Italy	平成 30 年 9 月
Terada, A. and Kuwahara, T.	Active magmatic-hydrothermal system beneath Yugama crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Temporal variations in subaqueous fumarolic activities	IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 2019, New Zealand	平成 31 年 9 月

Yaguchi M., Ohba T. and Terada A.	The major chemical composition of lake water in Yugama crater at Kusatsu-Shirane volcano (Japan) and its changes in response to volcanic activity	IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 2019, New Zealand	平成 31 年３月
三浦哲、山本希、市來雅啓、出町知嗣、立花憲司、西村太志	蔵王山で繰り返し発生する長周期地震に伴って観測される傾斜変化	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
池谷拓馬、山本希	蔵王山直下の深部低周波地震: Matched Filter 法による解析	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
行竹洋平	稠密地震観測から明らかになった箱根火山における群発地震と地殻流体との関係	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
行竹洋平、安部祐希	箱根火山深部低周波地震と火山活動との関係	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
寺田暁彦・神田 径・小川康雄・青山 裕・山本 希・筒井智樹・大倉敬宏・野口里奈	草津白根火山・本白根山で 2018 年 1 月 23 日に発生した噴火 －地球物理学的観測からの示唆－	日本地球惑星科学連合 2018 年大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
山本 希・青山 裕・筒井智樹・寺田暁彦・神田 径・小川康雄	草津白根火山における臨時地震観測	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
寺田暁彦・森田裕一・橋本武志・森 俊哉・大場 武・谷口無我・神田 径	ドローンを用いた草津白根火山・湯釜火口湖からの採水	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
関 香織・神田 径・萬年一剛・高倉伸一・小山崇夫・野口里奈・行竹洋平・石川将暉・深	箱根大涌谷の３次元比抵抗構造	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月

井雅斗・原田昌武・安部祐希			
香取　慧．寺田暁彦・西野佳奈・沼波　望・大場　武	水安定同位体比と塩化物イオン濃度に基づく草津白根火山の熱水系の再検討	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
早川美土里・橋本武志・茂木　透・青山裕・田中　良・上嶋誠・森田裕一	３次元比抵抗構造から推定される倶多楽火山の熱水系	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
橋本武志・宇津木充・大倉敬宏・神田径・寺田暁彦・市來雅啓・三浦　哲・井口正人	非噴火期の地盤膨張源および消磁源の特徴について	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張 地球惑星科学連合大会 2018	平成 30 年 5 月
香取　慧．寺田暁彦・西野佳奈・沼波　望・大場　武	水安定同位体比と塩化物イオン濃度に基づく草津白根火山の熱水系の再検討	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
Sumino, H., Kawana, K. Yamane, K., Akiyama, Y., Ohba, T., Yaguchi, M. and Terada, A.	Helium isotope ratios of fumaroles and hot-spring gases at Kusatsu-Shirane volcano,	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
相澤 広記、上嶋 誠、小山 崇夫、長谷 英彰、山谷 祐介、宇津木 充、神田 径、橋本武志、塚本 果織、村松 弾	桜島・霧島・富士山・九重山での広帯域 MT 連続観測により推定される比抵抗構造時間変化	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
塚本 果織、相澤 広記、千葉 慶太、神田 径、上嶋 誠、小山 崇夫、宇津木 充、関 香織、木下貴裕、手操佳子、村松 弾、Agnis Triahadini、湯淺 雄平、岩佐 優一、林田祐人、Alutsyah Luthfian	霧島硫黄山の三次元比抵抗構造と 2013 年ごろからの火山活動について	日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 30 年 5 月

森田裕一、高橋大和、大湊隆雄	霧島硫黄山 2018 年 4 月 19 日噴火前の地震活動	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
行竹洋平、安部祐希、本多亮、酒井慎一	稠密地震観測から得られた箱根火山の地殻構造	日本火山学会 2018 年秋季大会、秋田市	平成 30 年 9 月
相澤広記・塚本果織・A. Triahadini・村松弾・林田祐人・湯浅雄平・A. Luthfian・手操佳子・武石貢佑・神田径・木下貴裕・関香織・宇津木充・小山崇夫・上嶋誠	霧島火山での広帯域 MT 観測	日本火山学会 2018 年秋季大会、 秋田市	平成 30 年 9 月
亀谷伸子・石崎泰男・石峯康浩・吉本充宏・寺田暁彦	降下堆積物からみた草津白根火山 2018 年噴火の推移と本白根火砕丘群の熱水系	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
石崎泰男・亀谷伸子・寺田暁彦・吉本充宏・本多　亮・石峯康浩・長井雅史・古川竜太・関口悠子・簗田高広・石塚吉浩・南　裕介・前野　深	草津白根山 2018 年噴火の火口近傍噴出物	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
石峯康浩・吉本充宏・石崎泰男・亀谷伸子・寺田暁彦	草津白根山 2018 年噴火における放出岩塊の初期速度の推定	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
吉本充宏・本多　亮・長井雅史・古川竜太・関口悠子・簗田高広・寺田暁彦・石峯康浩・石崎泰男・亀谷伸子・石塚吉浩・南　裕介・前野　深	草津白根山 2018 年噴火における放出岩塊の分布	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
外山浩太郎・角野浩史・川名華織・山根康平・秋山良秀・大場武・谷口無我・寺田暁彦	草津白根火山周辺の噴気及び温泉ガス中の希ガス同位体組成	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月

勝岡菜々子・石崎泰男・寺田暁彦	草津白根火山，太子砕流堆積物の岩石学的研究	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
水谷紀章・寺田暁彦	草津白根火山・白根火砕丘南側斜面における気体水銀放出域	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
香取　慧・寺田暁彦・西野佳奈・沼波　望・大場　武	草津白根火山・白根火砕丘周辺の浅部熱水系	日本火山学会 2018 年秋季大会，秋田市	平成 30 年 9 月
関 香織・神田 径・萬年一剛・高倉伸一・小山崇夫・野口里奈・行竹洋平・石川将暉・深井雅斗・原田昌武・安部祐希	箱根大涌谷の３次元比抵抗構造と熱水系	日本火山学会秋季大会（秋田大学）	2018 年 9 月
池谷拓馬、山本希	蔵王山直下の深部低周波地震活動	日本地震学会 2018 年度秋季大会、福島郡山	平成 30 年 10 月
宇津木 充・神田 径・小山崇夫	草津白根山の 3 次元磁化構造について	SGEPSS 第 144 回総会（名古屋大学）	平成 30 年 11 月
Marceau,G., M. Uyeshima, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, T.Koyama, M. Hata	Preliminary report on Three-dimensuional electrical structure in Miyakejima, Japan	平成 30 年度 CA 研究会「地球電磁気研究の災害軽減への応用」	平成 31 年 1 月 11 日
神田 径・関 香織・木下貴裕・松永康生	熱水系卓越型火山の比抵抗構造	研究集会「火山の熱水系と水蒸気噴火に関する比較研究」、 札幌市	2018 年 6 月
市來雅啓・山本希・三浦哲・他	吾妻山・蔵王山の全磁力変化と電気伝導度構造	研究集会「火山の熱水系と水蒸気噴火に関する比較研究」、 札幌市,	平成 30 年 6 月
神田 径・関 香織	箱根大涌谷の比抵抗構造と熱水系	水蒸気噴火のメカニズムと予知に関する研究集会（温泉地学研究所）	平成 31 年 1 月
関 香織・神田 径	比抵抗と化学分析から推定される火山熱水系の構造	水蒸気噴火のメカニズムと予知に関	平成 31 年 1 月

		する研究集会（温泉地学研究所）	
三浦哲	静穏火山における噴火準備過程－蔵王山総合観測の成果から	山梨県富士山科学研究所国際ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ2018-火山ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ観測と火山活動予測-報告書，47-56	平成31年3月
行竹洋平	箱根火山における群発地震と地殻流体との関係	第219回地震予知連絡会、重点検討課題「地震と水」、、東京都（国土地理院関東地方測量部）	平成30年5月
行竹洋平	箱根火山における群発地震と地殻流体との関係	地震予知連絡会会報、100，418-421.	平成30年9月
神田 径・松永康生・小山崇夫	草津白根山の地磁気変化と地下構造	草津白根山の噴火事象検討会（東京工業大学）	平成31年2月
寺田暁彦	草津白根山の地盤変動と熱活動	草津白根山の噴火事象検討会（東京工業大学）	平成31年2月
草津白根山降灰・噴石合同調査班	本白根2018年1月23日噴火の口及びその近傍での降灰・噴石調査	第141回火山噴火予知連絡会資料（その2　草津白根山）	平成30年6月
東京工業大学	草津白根火山における空中観測（セスナ機・ドローン）	第141回火山噴火予知連絡会資料（その2　草津白根山）	平成30年6月
東京工業大学	草津白根火山・湯釜火口湖の変色	第142回火山噴火予知連絡会資料（その3　草津白根山）	平成30年10月
東京工業大学	表万座・2014年噴気周辺の空撮	第142回火山噴火予知連絡会資料（その3　草津白根山）	平成30年10月
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	平成31年3月

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和元年度業務計画案

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．三宅島における機動観測

2000年噴火時の大規模な山頂部の陥没により、三宅島ではマグマ溜まりから火口までのマグマの経路である火道の状態に大きな変化があったと推定される。これにより、今後の噴火の様式が、これまでのそれと大きく異なることが予想される。現在の三宅島の活動を精度よく捉え、次の噴火に備えるため、2018年度に他機関の既存の観測点配置も考慮に入れて、広帯域地震計を３地点に設置した。これらの観測点を維持すると同時に、ここで得られた観測データと他機関の観測データをマージして解析を始める。そのため、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。

2000年噴火により、噴火様式に大きな影響を与えると考えられる山体直下の地下水の分布・構造が大きく変化したと予想される。そのため、MT観測による地下比抵抗構造の推定を行い、2012年に実施したMT観測による結果と比較し、熱水の流動に関する知見を得る。このため、博士研究員を１名雇用する。また、浅部での地熱変化を調査するため、無人ヘリコプターによる空中磁気測量を行う。

ｂ．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発生した噴火を踏まえ、2018 年度に前倒しして実施した地震観測を継続するとともに、本白根山西麓に高感度傾斜計を新規に設置することで、本白根山の震源分布と圧力変動源との関係を明らかにする。2018 年 1 月の噴火により､冬季の山上への交通手段であったスキーゴンドラリフトが廃止されるなど、積雪期のメンテナンス作業が困難な観測点が生じている。長期に安定した観測を実現するために、一部の観測点についてはデータ伝送手段を見直し、商用光回線または低消費電力の無線方式を導入する。

深部圧力変動源が存在すると考えられている草津白根山・長野県側に地震観測点を設置し、定常観測網から得られるデータや噴火直後に次世代火山研究推進事業の緊急調査により整備した臨時地震観測点のデータとともに処理することで、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、前年度に選定した観測点においてＭＴ観測を実施して順次解析を行う。既存のデータも併せて解析を行い、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。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する。本白根山の噴火を受けて前年度に強化した既存連続観測点や国土地理院の電子基準点データなどとともに解析を行い、特に深部の地盤変動の有無を調べる。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。

ｃ．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

的観点から着実に噴火の切迫度が高まっている。そのため、平成32～33（令和２～３）年度に実施予定であった蔵王火山の機動観測計画の一部を前倒しして実施する。蔵王火山直下の地殻変動圧力源・熱水系の空間分布及びその時空間変動を捉えるために、既存観測網の手薄な想定変動域東側に、平成30年度は広帯域地震計を設置して長周期地震波の観測と簡易的な傾斜観測を開始したが、今年度は高精度傾斜計も設置して水蒸気噴火に対する切迫性評価に資する情報の収集を強化する。また、広帯域地震計の観測についてもこれ以外の設置候補点の事前調査などを行い、実施計画の検討を行う。蔵王火山周辺の地下比抵抗構造探査についても、現地調査に基づいて適切な観測地点の選定を行い、用地交渉や所轄官庁に対する許認可手続き等を開始する。

ｄ．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（全磁力・広帯域ＭＴ）などの諸観測を継続実施する。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。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を雇用する。

（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。

ｅ．箱根火山における機動観測

2018年度までに実施した機動観測点のデータから地震波形の位相の読み取りを行い、神奈川県温泉地学研究所および気象庁の読み取り記録を使用して、箱根とその周辺域（丹沢や静岡県東部等）の震源再決定を実施する。再決定した震源データと読み取り値を用いて地震波速度構造の解析を実施する。得られた速度構造モデルをベースに、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、レシーバー関数解析による地下構造のイメージングを試みる。

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の開発

平成 31（令和元）年度は新たな技術開発の予定は無いが、これまでに開発したシステム試験運用を行い、ユーザーから意見を集約し、必要に応じて改善を検討する。

ｂ．地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

（１）前処理支援ツールのパッケージ化

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をパッケージ化する。本事業に関係する研究および教育のため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、要望に応じて配布する。

（２）熱水流動シミュレーション

地下比抵抗構造を参考にして、商用ソフトを用いた熱水流動シミュレーションを継続する。今年度は、将来火山活動・噴火切迫度の評価に役立てることを念頭に、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求めるスキームの構築に着手する。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。なお、現状では岩石と流体の化学反応を考慮した計算は難易度が高いことがわかったため、この部分は後年度の目標とする。

（３）比抵抗３次元インバージョン

海域に隣接した地域のＭＴ法解析では、モデル領域に海底地形を考慮することが不可欠であるが、特に四面体メッシュを用いたインバージョン（femtic）において、どの程度細かな海底地形が必要かについてはよくわかっていない。そこで、本事業でＭＴ探査を実施した倶多楽火山を例に、femtic コードにおける海底地形の影響を前年度に引き続き検討する。

ｃ．火山性地震活動総合解析システムの開発

（１）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取り組む。平成 29 年 10 月に発生した霧島山新燃岳の噴火では、噴火

前後に火山性地震（Ａ型、Ｂ型）及び火山性微動が多数発生した。地震や微動が頻発する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、改良を加える。2018 年度には、水蒸気噴火との関連が示唆されるＢ型地震の１種であるＮ型地震の特徴抽出を行った。本年度はこれをＢＬ型、Ａ型にも利用できるようにアルゴリズムの改良を進める。

（２）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、2014 年御嶽山噴火前後の地震波形連続データを引き続き編集し、火山性地震活動総合解析システムの開発に利用できるようにデータを整備する。

ｄ．遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者の操縦による無人機（ドローン）を用いた火山ガス組成比測定手法の開発を進める。そのために、2018 年度に室内実験で得たドローン搭載ガスセンサーの応答特性に基づき、ガス組成比解析手法を改良する。さらに、2018 年度までに整備した機材を用い､主として草津白根火山の噴気を観測対象としてドローンガス観測を行い、定期ガス観測が可能な飛行・解析方法の確立を目指す。併せて、ドローンを用いた地表面温度観測および湖水採取を火山研究者の操縦によって実施し、飛行方法の改良を進めるとともに、防振装置や採水器巻き上げ機構のテストを行う。

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・プロトタイプの作成を行う。この解析システムは、地震波干渉法解析、地震波逆伝播解析など複数の解析手法を組み合わせたものであり、今年度は、2016 年度以降、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アルゴリズムの改良を進めるとともに、GUI についての検討を行う。また、本プロジェクト等で取得した観測データを用いた連続解析の試行を行う。

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、火山周辺の電源・通信事情の厳しい地震観測点からでも連続記録を安定して取得することが必要である。そこで、通信回線の冗長化及びそのために必要な電源システムの試験等を行ない、システム運用に必要な観測システムの検討を行う。

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、課題 B2-1「空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発」及び課題 B2-2「位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発」との連携についての情報収集や情報交換も併せて行う。

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

2019 年度実施予定の三宅島及び草津白根火山で実施する MT 観測に利用するコイルを２観測点分購入する。昨年度までに導入した機器と、共同利用・共同研究拠点である東京大学地震研究所の保有する機材も併せて利用して事業を実施する。

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、機動的な観測や電磁気構造探査の実施に支障のないように計画的に整備する。

ｄ．課題Ａデータ一元化への協力

昨年度に引き続き、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に課題Ａに協力する。