

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

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

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

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

本事業で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を開始した。平成 28 年度は、上記のうち、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して進めた。

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

2) 平成 29 年度 :

前年度に準備を開始して予備調査も実施した倶多楽の地下比抵抗構造の探査を実施する。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 km、南北約 10 km の範囲で、約 50 地点で探査を実施する。得られたデータを解析し、この地域の地下比抵抗構造を推定する。

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する。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。

3) 平成 30 年度 :

三宅島では 2000 年噴火から 16 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、次回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る。三宅島において機動的な観測を実施し、長周期地震活動、全磁力分布等のデータを取得し、長周期地震・微動活動の有無を確認する。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る。

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する。また、次年度以降予定されている草津白根山での機動観測の準備を進める。

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。

4) 平成 31 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) 平成 32 年度 :

蔵王山では、約 3 万年前に馬の背カルデラが形成され、その後カルデラ内に発達した火口湖御釜および近傍の地熱地帯において断続的な火山活動が現在まで継続している。有史以降も数十年間隔で水蒸気噴火や泥流が発生しており、降灰や酸性水による土壤汚染等の災害を引き起こしてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震以後、マグマ活動を示唆する深さ 20~35km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013 年以降は浅部における火山性地震・火山性微動や熱消磁の発生が認められている。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) 平成 33 年度 :

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

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

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

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

7) 平成 34 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) 平成 35 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) 平成 36 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) 平成 37 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 28 年度業務目的

2011 年 1 月に準プリニー式のマグマ噴火が発生した霧島山では、現在も深部マグマ溜まりでは膨張と停滞が繰り返して起こり、今後、再活発化するか否かは防災上重要な情報である。霧島山硫黄山付近の浅部では、地盤変動を伴う火山性微動が時々観測されていて、今後、水蒸気噴火が発生する可能性もある。一旦噴火した火山が再活動を行う過程は解明されておらず、噴火終息の予測にはこのような状況にある火山での活動の現況を知り、火山活動の変化を精度良く捉えることが重要である。そのため、霧島山において、地震および地殻変動の機動的な観測を実施して、震源や地下圧力源の時間的空間的变化を明らかにするほか、地下の電気比抵抗構造などを明らかにして、水蒸気噴火の発生場である浅部熱水系の状態を把握する。更に、火山性微動の発生が時々見られることから、地震計アレイ観測を実施する。

倶多楽では、約 4 万年前に形成されたカルデラ（倶多楽湖）の西麓部に地熱地帯が発達している。この地熱地帯では、約 1 万 5 千年前の潜在ドームの形成後、少なくとも 12 回の水蒸気噴火が平均 700 年間隔で発生したことが確認されており、最後の水蒸気噴火は数百年前に起こっている。現在のところ、ただちに噴火につながる兆候は認められないものの、従来から噴気や熱水湧出は活発であり、地熱活動は消長を繰り返していることから、小規模な噴火に至る可能性が十分想定される。倶多楽は登別温泉に隣接しているため、小規模な水蒸気噴火であっても大きな被害が生じるおそれがある。しかし、水蒸気噴火の引き金となる地下流体供給系が明らかでないため、どこでどのような水蒸気噴火が切迫しているかを見通せない。地下流体供給系を明らかにするため、地下比抵抗構造探査等を平成 29 年度の前半（降雪期前）に実施する。そのため、28 年度中に観測実施予定点を選定し、借地手続き等を実施し、地下比抵抗構造探査の準備を行う。

2015 年 6 月に水蒸気噴火した箱根山では、今後も同様の火山活動を繰り返す可能性がある。今後も熱水やガスの噴出による災害が最も懸念されることから、箱根山周辺の広い領域で地震活動の推移を調査し、地震波速度構造や異方性構造等の地殻構造の情報を高分解能に得て、マグマ溜まりや熱水溜まりの位置を詳細に知ることが重要である。そのため、多点での機動的な地震観測

を開始する。

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、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開発する。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。平成 28 年度は、MT 観測装置用コイル、広帯域地震計、同記録装置、遠隔熱情報解析システムで用いるドローンを整備する。

(2) 平成28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の活動や地下構造の調査を、霧島山及び箱根山において開始した。霧島山硫黄山では、平成27年以降噴気が活発になっており、水蒸気噴火の可能性・切迫性の評価を目的として、既存の観測を継続するとともに、えびの高原周辺で地震計アレイ観測に着手し、水準測量およびMT連続観測などを実施した。平成27年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山で、マグマや熱水の供給系を明らかにする目的で、詳細な地下構造の推定を目的にした多点の地震機動観測を開始した。更に、次年度以降に実施予定の倶多楽、三宅島、草津白根山での機動観測の準備を行った。

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、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システム等のツールの開発に着手した。

(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) 霧島山における機動観測

近年、熱活動が活発化している霧島山硫黄山における水蒸気噴火の可能性・切迫性を研究するために、えびの高原周辺に5点のオンライン3成分地震観測点により構成される地震計アレイを設置し、観測を開始した(図1)。

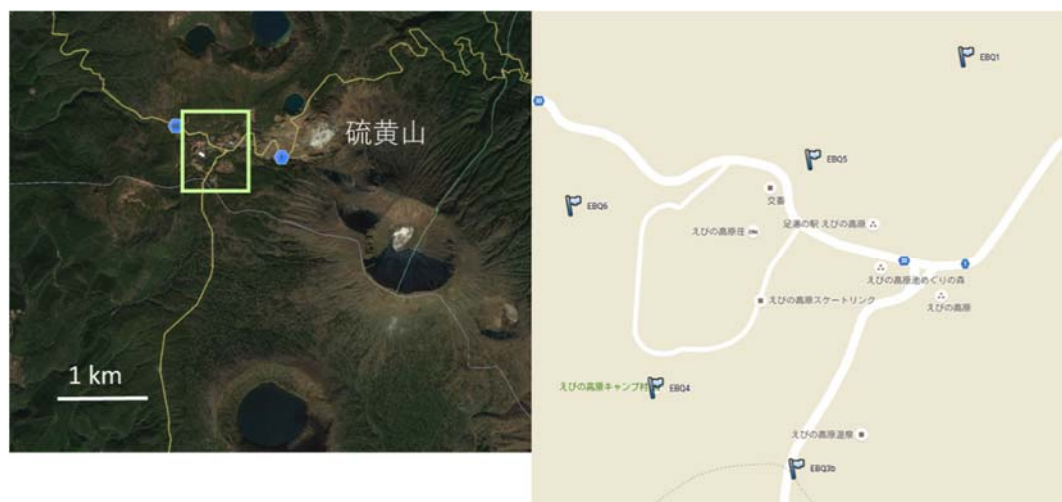


図1. えびの地震計アレイ配置図。

これらの地震観測に加え、えびの高原周辺において水準測量を実施した。この地域における水準測量は、1968年に東京大学地震研究所によって水準点が設置され、その後、東京大学や北海道大学により繰り返し測量が行われてきた。2015年6月には、九州大学・北海道大学・日本大学・京都大学が水準路線を増設して測量を継続している。2015年12月に硫黄山の噴

気が復活以降も、本課題の事業開始までに 4 回の測量が実施され、硫黄山を中心とした地盤の隆起が捉えられている。本課題では、この水準路線における測量を引き継ぎ、平成 28 年度は 2016 年 11 月、2017 年 2 月、2017 年 3 月の計 3 回の測量を実施した。図 2 に水準測量の路線を示す。特に、2017 年 3 月の測量では、火山研究人材育成コンソーシアムと連携し、火山研究人材育成コンソーシアムの受講者を対象とした野外実習も兼ねて水準測量を実施した（写真 1、2）。



図 2. 霧島山えびの高原（硫黄山）周辺における水準測量路線。赤丸の点が測点。



写真 1. 火山研究人材育成コンソーシアムの実施した霧島山硫黄山周辺での水準測量実習の様子（1）



写真 2. 火山研究人材育成コンソーシアムで実施した霧島山硫黄山付近での水準測量実習の様子（2）

さらに、電磁気構造探査による火山体内部構造・内部状態の把握のために、硫黄山の北北西 400m に設置した広帯域 MT 連続観測を継続するとともに、硫黄山周辺 27 点（電場と磁場 5 成分計測：7 点、電場 2 成分計測：20 点）で広帯域 MT 観測を行い、比抵抗構造を推定した。得られたデータから Ssq impedance¹⁾ を計算し、これを入力データとする Occam inversion²⁾ を行い 1 次元の比抵抗構造を推定した。更に、詳細な構造を推定するためには、MT 観測を強化する必要があるとあり、それを平成 29 年度に予定している。そのため、約 50 ヶ所の新たな観測点の用地選定および使用許可等の交渉を行った。

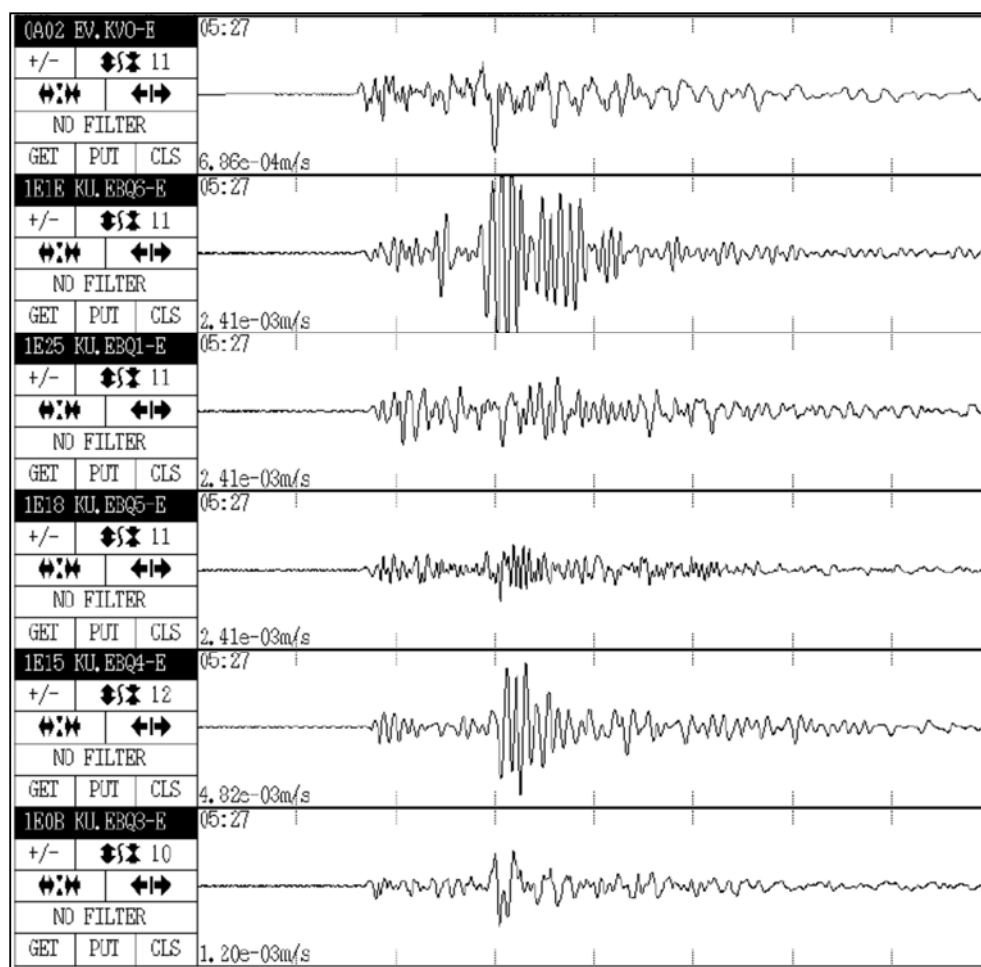


図 3. えびの高原の北、およそ 10km で 2017 年 3 月 22 日に発生した地震の波形例。最上段が東京大学地震研究所霧島山観測所での波形。二段目以降に、えびの高原アレイの波形（東西動成分）を示す。地震波形の枠の縦線は 1 秒毎の目盛り。S - P 時間が 1 秒程度で、震源が浅いことが判る。

これらにより、平成 28 年度は以下の成果が得られた。

地震計アレイ観測については、従来のアレイ観測では現地収録が一般的であり、データ回収と処理に時間を要するため、火山活動の即時評価にはそれほど役立たなかったが、オンライン化することにより迅速な処理・解析を行うための環境が整った。この地震計アレイで得られた霧島山近傍の自然地震波形を近接した東京大学地震研究所の地震観測点とともに図 3 に示す。今後は、地震計アレイデータ解析システムの開発により、データ処理のオンライン化をめざす。

水準測量に関しては、硫黄山を中心とした地盤の隆起が観測されており（図 4）、この隆起を引き起こした地下圧力源の位置と体積変化量が推定できた。圧力源は硫黄山噴気領域の東 150m、標高 600m（地表から 700m 深）の地点に推定され、後述の MT 観測から推定される地下の低比抵抗層（難透水層）の下面に一致している。主な水準点における隆起量の時間変化（図 5）を見ると、2016 年 3 月以降の隆起速度は鈍化しているが、同年 11 月の測定では若干の隆起が観測され、2017 年 3 月には噴湯現象が観測され、地熱領域の拡大も確認された。しかしながら、精密水準測量の結果では 2017 年 2～3 月に隆起は見られず、硫黄山に近い水準点（3040 および 3050）だけ 2mm ほど沈降している。これは地下の浅い所に貯まっていた熱水が地上に噴き出して沈降したもので、地下深部約 700m の難透水層下の圧力源は変化していないことを示していると考えられる。

電磁気観測に関しては、広帯域 MT 観測から予察的に 1 次元の比抵抗構造を推定した結果、硫黄山地下深さ約 200～600 m に顕著な低比抵抗層が見られ、その水平方向の広がり地震発生領域と一致していた（図 6）。低比抵抗体の底の深さは、水準測量から推定された圧力源の深さ³⁾とおおよそ一致していた。地震の発生領域はこの低比抵抗体の下部に位置している。また、広帯域 MT の連続観測からは 2016 年以降降雨に対する比抵抗変動が弱くなっていることが明らかになった。2015 年 12 月の噴気出現により、硫黄山近に地下水を貯め込み難しくなっていると解釈できる。

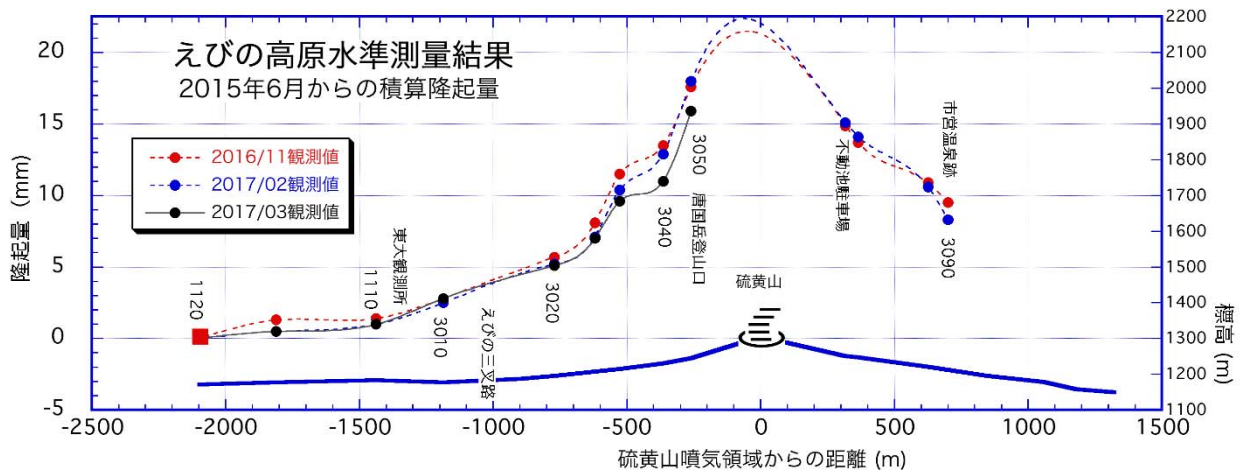


図 4. えびの高原における水準測量結果。図 2 に示す水準路線に沿った 2015 年 6 月以降の積算隆起量を示す。

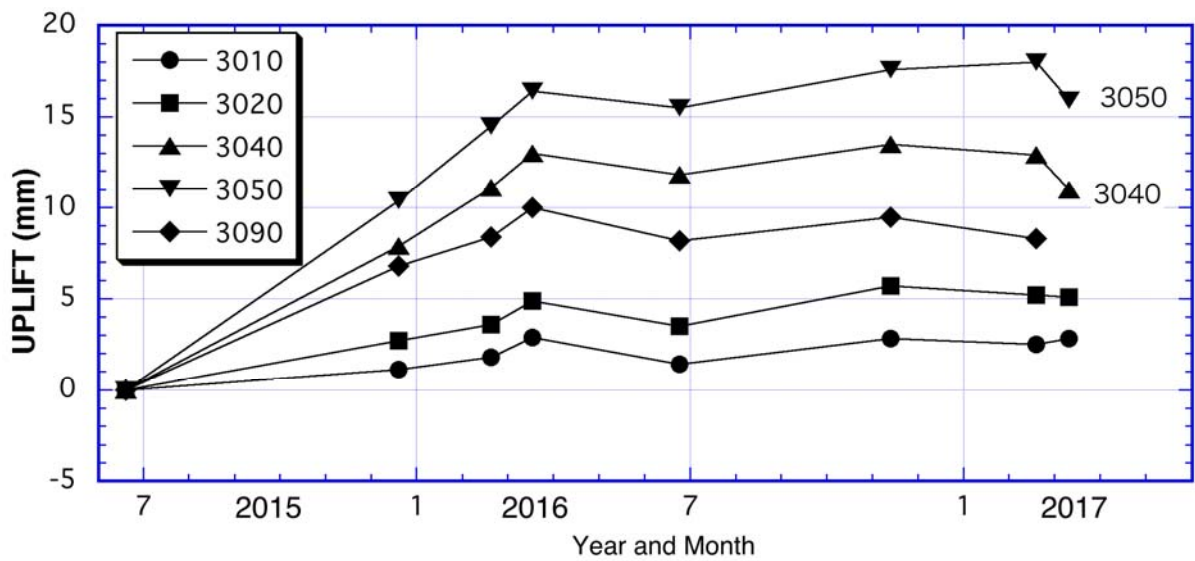


図5. 主な水準点における2015年6月以降の隆起量の時間変化。

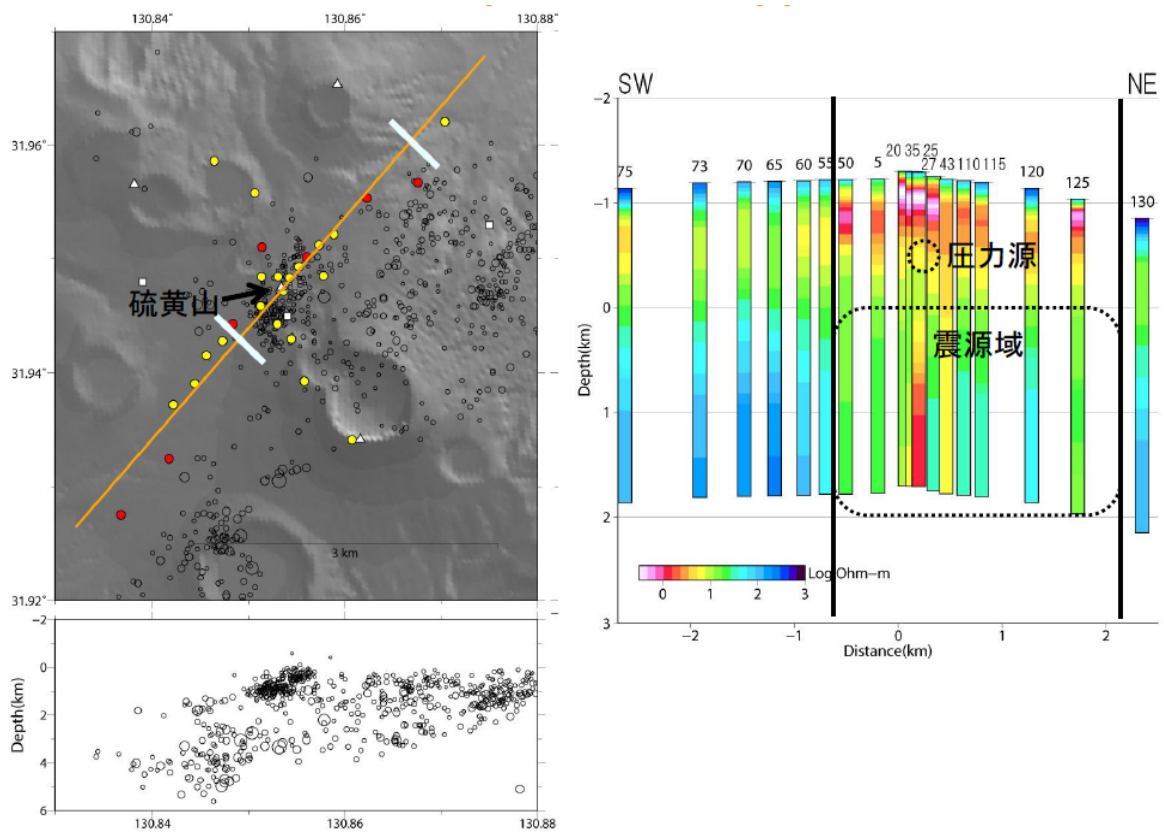


図6. 硫黄山周辺の広帯域MT観測点分布図(赤:電磁場5成分、黄色:電場2成分)と、硫黄山を北東-南西方向に横切る測線沿いの比抵抗構造。推定圧力源³⁾と地震震源は、浅部低比抵抗層の下部に位置する。震源データ(2013年12月~2017年1月)は気象庁福岡管区気象台より提供を受けた。

b) 倶多楽における機動観測

倶多楽では、水蒸気噴火の発生に大きな影響を与える地下水分布を調査するため、平成 29 年度に広帯域 MT 探査の実施を予定している。その測定候補地について、約 50 箇所を選定し、現地確認ならびに用地交渉等を行った (図 7)。電磁ノイズ環境が劣悪であることが想定される人口密集地、鉄道沿線、高速道路そばの 3 箇所を選び、実際に電場・磁場の測定を行ってノイズの状況を把握した (図 8)。

ノイズ調査地点で取得した電場磁場データの簡易解析した結果、深部での地下構造を反映する周期 10 秒以上の長周期帯 (0.1Hz 以下の低周波数帯) で人工ノイズの影響が顕著であることがわかった。特に、登別温泉の近傍 (KT - C050) では、短期間の観測では地下構造に関わる電磁場応答が得られないが明らかとなった。ノイズは昼夜を問わず発生しており避けることができない。この状況をできるだけ改善するために、平成 29 年度調査では測定期間を長く設定して S/N 比の向上を図る予定である。



図 7. 平成 29 年度実施予定の倶多楽地下比抵抗構造観測候補点。予備観測点を含め、平成 28 年度は地点の選定、用地交渉等を実施した。候補点のうち、電磁ノイズが劣悪であると予想される青四角で囲んだ点で、予備的な観測を実施してノイズ環境を調査した。

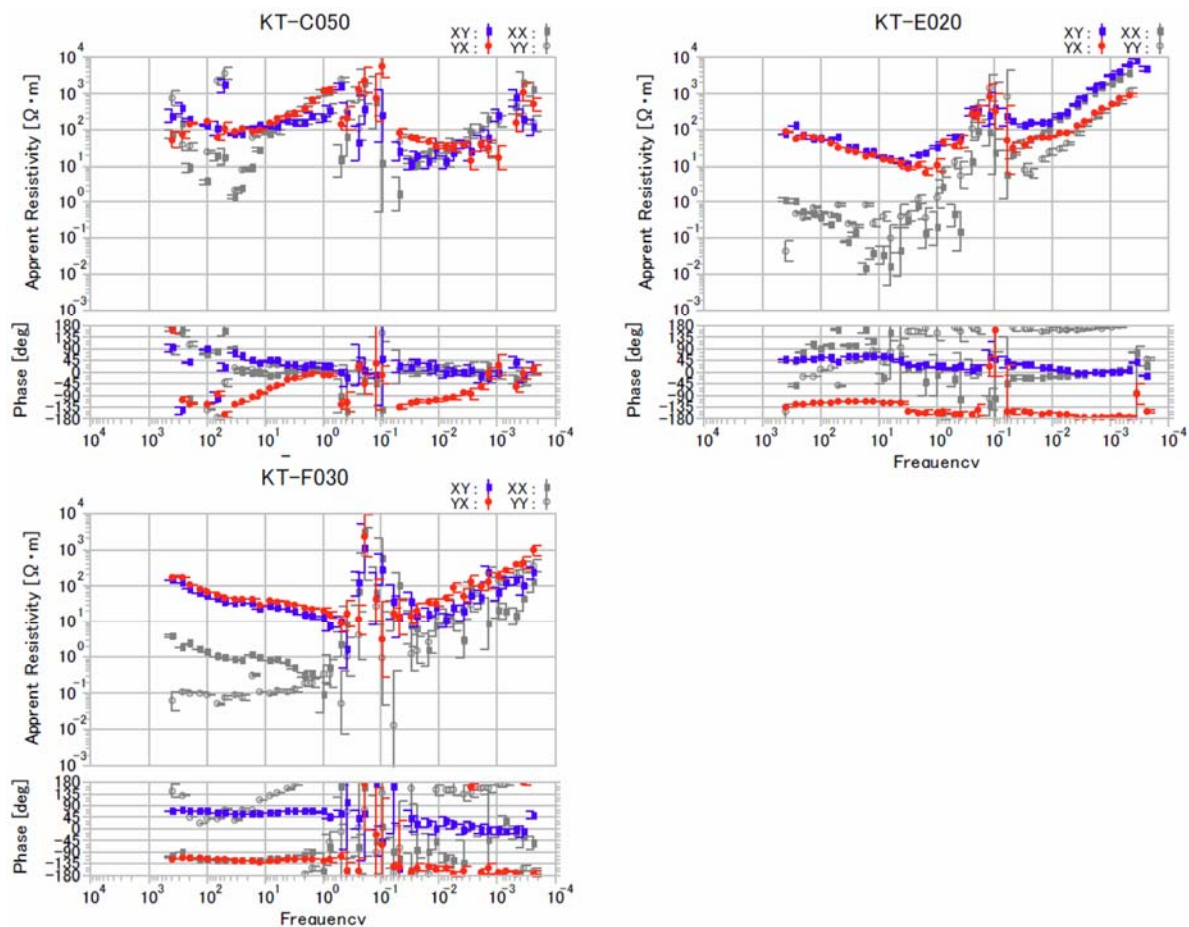


図8. 電磁ノイズ環境が悪いと予想された KT-C050 (左上)、KT-E020 (右上)、KT-F020 (左下) の電磁レスポンス。これら3観測点では、周波数 0.1Hz 以下での見かけ比抵抗、位相の測定誤差が大きく、良好なデータが取得できていないことが判る。特に、KT-C050 では 0.001Hz 付近に見かけ比抵抗、位相の値にトビがあり、観測環境が悪いことが判る。

平成 29 年度の地下比抵抗構造探査の実施の前に、現状での火山活動の把握を目的として、ALOS2 衛星のデータを用いて干渉 SAR 解析を行った。この解析からは、ノイズレベルを超える地盤変動は検出されず、上述の有感地震に先行する異常は認められなかった。また、気象庁の観測した広帯域地震計記録を精査し、2016 年 2 月に登別地域で発生した有感地震後の長周期地震イベント群の振動軌跡を解析した。長周期地震イベントを調べたところ、主要相の振動周期は 15~30 秒程度であり、火山性流体の関与する現象が登別温泉地域周辺で起こっていたと推測された。

c) 箱根山における機動観測

箱根山では、これまでも地震波速度構造調査が行われ、空間分解能が 4km 程度での地震波速度構造は推定されている⁴⁾。しかし、2015 年に発生したような小規模な水蒸気噴火は将来にも発生する可能性があり、噴火切迫性を評価するためには、より詳細な地下構造の推定が必要である。箱根山周辺にはすでに地震観測点が展開されているが、箱根山のマグマや熱水の供

給系を明らかにするため、従来よりも高分解能での地震波速度の推定を目指して、機動的に地震観測点の増設を行った。全体の観測点分布を図9に示す。増設した観測点の機材構成としては、主としてサーセル社製2Hz 短周期地震計と現地収録型のロガーを用いた。

この観測網の有効性を確認するために、比較的地震活動が静穏であった2010(平成22)年1年間の地震活動をもとに Synthetic data を作成し、チェッカーボード分解能テストを実施した(図10)。その結果、箱根山カルデラ内の深さ10km以浅については、空間分解能2kmで速度構造が推定できることが分かった。これは、過去の研究に対して構造の空間分解能が4倍に向上することになる。こうして得られた速度構造からマグマ溜りの詳細な位置やその物質的な性質及びマグマ起源の浅部熱水分布が明らかになることが期待される。

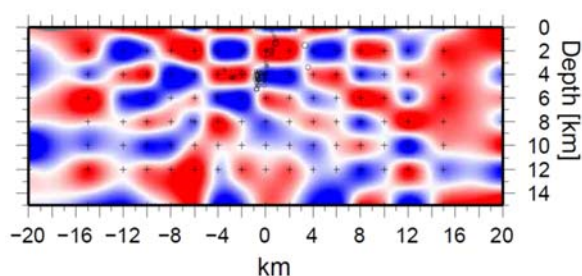
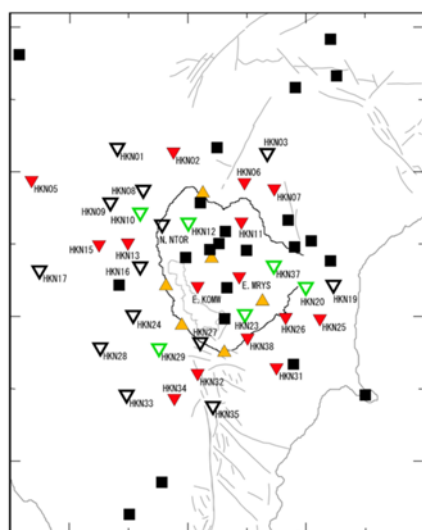


図9(左): 機動観測点分布。■が常設点、▽が機動観測点の位置を示す。

図10(上): チェッカーボードテストの結果。箱根山付近では、2kmの空間分解能が期待できる。

d) 三宅島における機動観測の準備

三宅島は、2000年噴火では山頂直下にあった大量のマグマが北西方向にダイク状に移動し、それによって山頂に大きな陥没ができたと考えられている。その後、深部にあったマグマが循環することにより、多量の火山ガスが長期にわたり火口から発生されるようになった。このような噴火の形態は有史以来初めてで、噴火の様子が観測から良く知られている20世紀以降の噴火とは大きく異なっている。現在も大きくなった火口から継続的に噴気が出ているなど、過去の観測事例をもとに次回の三宅島の噴火を事前に予測することが難しくなっている。本課題で機動観測を実施して、次回の活動の際の噴火切迫性評価のために現時点での活動の詳細を把握しておくことが必要である。

三宅島では2000年の噴火以降、火山活動が徐々に低調になってきているが、現在でも火口内南側から継続的に噴気が出て、火口直下浅部で多数の微小地震が発生している。その多くは非常に規模が小さいため、震源が推定できる地震の数は少ないが、連続波形記録から地震と判定したトリガー数の月別頻度分布を見ると、2006年後半よりそれまでと比べて明らかに

増加し、月 1000 回～5000 回にまでになっている。また、このトリガー回数は約 1 年の周期で消長を繰り返している様子が見られる (図 11)。このような浅部の地震活動度は、熱水活動と相関のあることが他の火山でも報告されており⁵⁾、気象条件で視界が遮られることの多い火口カメラの機能を補完する上で、地震活動度を正確に把握して熱水活動との関連を調査することは、噴火切迫性を評価する上で重要である。また、浅部の熱水活動の際に、流体移動に伴う長周期変動が見られることが多くの火山で報告されている。三宅島では火口近傍には広帯域地震計が設置されておらず、最近の活動では長周期振動の検出例は少ない。熱水活動を反映していると思われる長周期振動の活動を捉えることも重要である。上記の目的で、平成 30～31 年度に火口周辺に機動的に広帯域地震計を設置することを計画している。

噴火の様式に強い影響を与える地下水位・地下水状態の時間変化についても、調査しておく必要がある。これまで、三宅島を北東―南西に切る測線で、2000 年噴火を挟んで 2 回の地電位計測を実施している。この間の地電位分布変化を見ると、1995 年と 2012 年では大きく変化しており (図 12)、2000 年噴火により火口が大きくなったことと地下水の状態変化により、地電位分布が変化していると考えられる。地下水分布は水蒸気噴火の際に大きな影響を及ぼすので、2012 年以降の地下水の状態の時間変化を把握するため、平成 30～31 年度に再度、同じ測線で地電位を計測する予定である。この他、可能であれば地震計アレイ観測、全磁力分布、MT 観測等も予定している。

平成 28 年度は、平成 30～31 年度三宅島機動観測を実施するため、観測予定点の下見を行った。三宅島においては気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院が地震観測、全磁力観測、GNSS の定常観測網を設置しているが、それらの観測点を補完し、より成果が上げられるように観測網を構築する必要がある。現地の状況を把握し、この機動観測の準備として、広帯域地震観測に用いる太陽電池電源装置を購入するとともに、三宅島火山防災連絡事務所に詰める気象庁職員と連絡をとり、現地で具体的な観測予定点の調査の一部を行った。



図 11. 三宅島に設置された地震観測網での月毎のトリガー回数。一般的にトリガー回数は地震の発生回数と相関がある。2006 年後半からトリガー数が増加していることから、この頃より浅部での地震活動が活発になったと想像される。

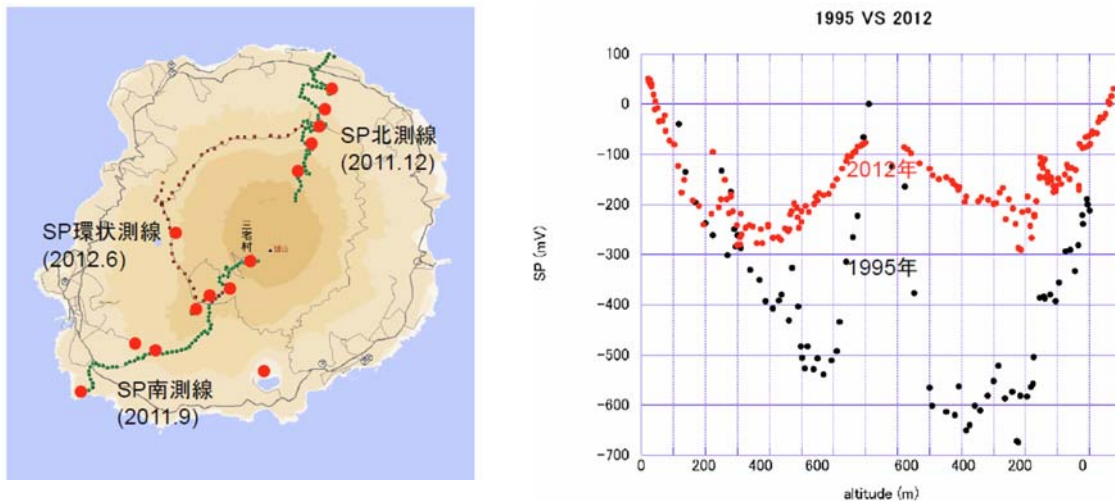


図 12. 三宅島の地電位変化。左図：測線。右図：地電位分布。黒：1995 年の測定。赤：2012 年の測定。右図の左端は南東端（阿古）、右端は北西端（神着）。噴火を挟み、地下水面の形状が変化によって、地電位分布が変化していると考えられる。

e) 草津白根山における機動観測の準備

草津白根山機動観測の観測点候補地の選定のため、地震・電磁気等の既存データを解析し、観測のノイズレベルの確認等の今後計画している機動観測の問題点を明らかにした。また、マグマ溜まりに相当すると考えられる深部の変動源を探るため、湯釜を中心とする直径 5km 圏内に限られている現在の地殻変動観測網を広げ、GNSS 繰り返し観測が実施可能かどうか、このプロジェクトで雇用した PD を交えて検討した。

地震の既存データを再解析したところ、東京工業大学の既設観測点は湯釜から 1km 圏内にしかないため、本白根火砕丘の震源分布が精度良く決まらないことが明らかになった。また、気象庁によれば、白根火砕丘の北側のやや深い場所にも地震活動が認められるが、現状の東京工業大学の観測網では震源をほとんど決定できないことがわかった。更に、既存の MT 観測データを解析したところ、山頂から草津温泉側では、数秒以上の周期にノイズの影響が見られることがわかった。この影響を除去するには、1 週間程度の長期間の MT 観測データがあれば S/N 比が改善し、良好な結果が得られることが判明した。

既存の GNSS 観測点は、草津白根山の山頂を中心とする直径 5km 程度の狭い範囲に集中しているため、深部膨張源の位置やその時間変化を捉えることができない。そこで、観測点を新たに整備し、GNSS 繰り返し観測を行うための効果的な配置について検討した。検討対象とした変動源は、湯釜火口または本白根火砕丘の海水準～深さ数 km 程度に位置するとし、そこで 10^7m^3 程度の体積変化があった場合の地表での変位を、茂木モデルを用いて調べた。その結果、山頂から 5～15km 圏内に 8 点程度観測点を分布させると、変動源の位置が推定できることがわかった。この結果を基に、29 年度には観測点の選定および 1 回目の観測を行う予定である。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システムの開発

霧島山における機動観測の一環として、えびの高原（霧島山硫黄山）周辺に地震計と空振計からなるアレイ観測点を設置して観測を開始した。この観測網を念頭に、アレイ観測で得られる波形データをオンラインで処理するためのシステムの基本設計を行った。この設計に基づきデータ処理ソフトウェアの開発に着手した。

図 13 にシステムのブロックダイアグラムを示す。このシステムは地震計や空振計の波形、震源分布、解析結果などの数値データ、地図データ、画像データ等異なるデータフォーマットを持つデータを、同時に表示する表示ソフトウェアをコアとし、各種データを変換するプログラムを個別に作成して、構造化することで、将来の拡張性も考慮に入れている。平成 28 年度は、そのプロトタイプを作成した。その画面イメージを図 14 に示す。このシステムは火山のモニタリングに必要な多種の情報を複合的・有機的に表示することで、観測現場で現在何が起きているかを判断することを支援する目的で作成される。

データ処理解析表示ソフトウェア (地震計アレイデータおよび調査観測データ統合表示システムの開発)

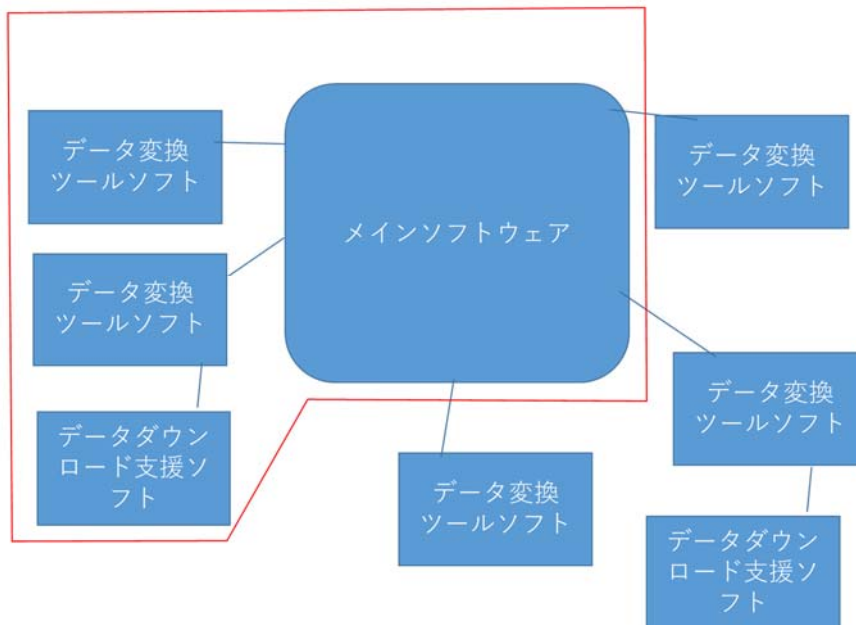


図 13. 地震計アレイデータ解析システムのソフトウェア構成。

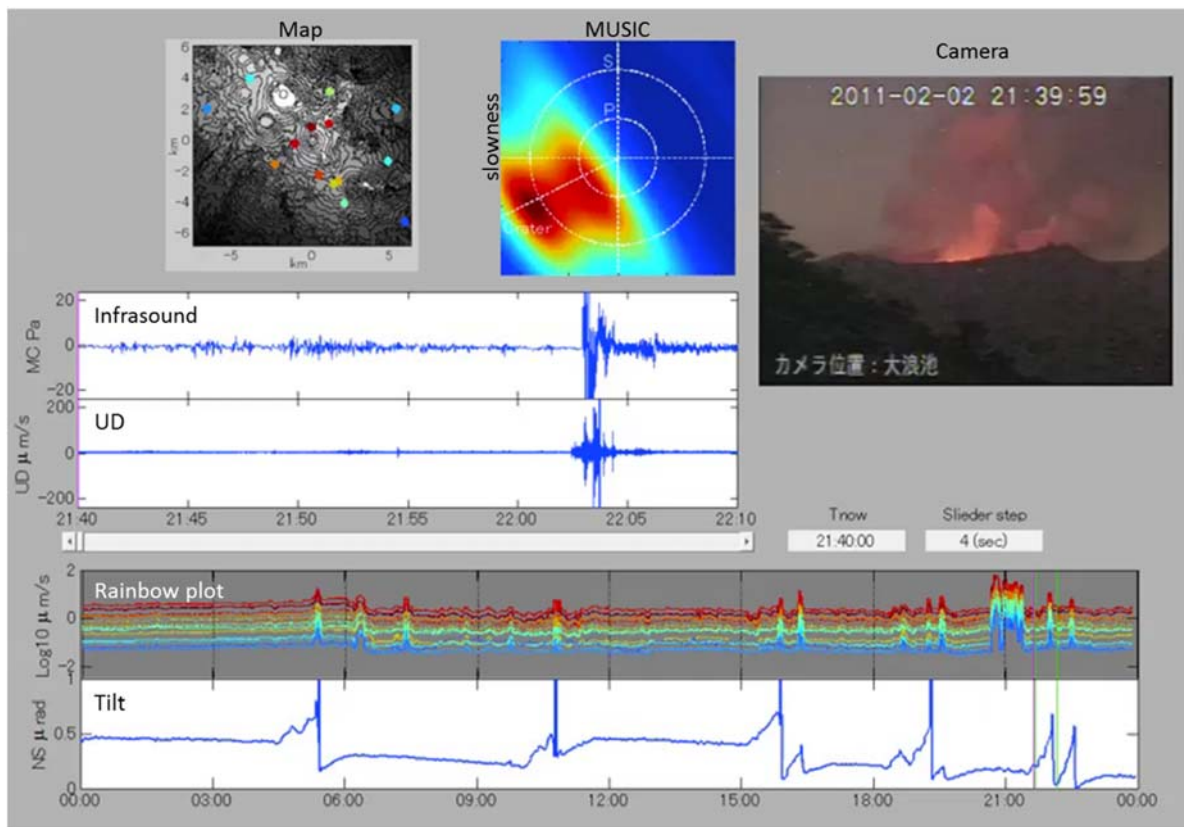


図 14. 表示システムプロトタイプ画面出力。観測点分布、波形、振幅情報、画像などを解析者のニーズに合わせて表示することができる。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発は、地下比抵抗 3 次元構造を推定する部分とその結果から水蒸気噴火切迫度を評価するため基本となる物理量である地下透水率と比抵抗の関係性を推定するためツール部分に分けて開発を行っている。

本年度から 3 次元比抵抗構造解析プログラムの整備に着手した。草津白根山機動観測の準備も兼ね、草津白根山で取得された既存データを用いて 3 次元比抵抗構造を推定するために必要なメモリ量や計算時間等を調べ、地形データの組み込みについて検討した。検討の結果、メモリと計算時間の制約のため、今回使用した有限差分法によるコード⁶⁾では、山頂付近でも水平方向は 250m×250m メッシュにしか切れず（鉛直方向は 25～50m の階段状地形）、地形を正確に表現できないため、高周波側のデータがうまく説明できていないことがわかった。来年度以降、東京工業大学で開発した四面体要素を用いた有限要素法によるコード⁷⁾の使用を検討する予定である。

比抵抗構造と地下透水率とを関連付けるツールの作成については、その基礎となる地下比抵抗と透水率の関係についての理論・実験の文献調査を中心に行った。文献調査の成果として、比抵抗と浸透率の関係は、未変質の多孔質岩石に対してはいくつか調べられていることがわかった^{8) 9) 10)}。この種の岩石の比抵抗は、間隙流体の比抵抗値と空隙率のべき乗に比例

する関係にある (Archie の法則)。浸透率も、空隙率に比例する関係式が知られている (Kozeny-Carman の式) ことから、比抵抗から空隙率というパラメータを通じて浸透率に焼き直すことが可能である。しかし、変質岩石の場合は、古典的な Archie 則が成り立たないため、さらなる調査が必要である。砂岩や頁岩に対しては表面伝導の効果を入れた関係式が提案されていることがわかった^{11) 12)}。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

多くの場合、火山噴火の前に火山性地震が多発することと同時に地震発生のパターンが変化することが知られ、地震活動度 (発生頻度) と地震の発生の仕方の両者をモニターすることが火山噴火切迫性の評価につながる。そのため、システムの基本部分として、火山性地震を準リアルタイムで自動的に検出して P 波及び S 波初動を検出して震源やマグニチュードの推定する部分 (地震検出部) と、そこで得られた地震の活動度と地殻変動との関係、潮汐との関係、規模別頻度分布等の火山体内部の状態を反映するパラメータを推定する部分 (地震活動評価部) に分けて構築することが適切である。本年度はそれぞれの基本部分の考え方を整理した。

火山性地震検出部の設計においては、すでに多くの手法が提案されている。そこで、既存の解析手法についての文献による調査を行い、その特性について分析した。1 観測点の地震波形データから P 波、S 波の初動を検出する方法は、大きく①地震波形振幅が非定常に変化したことを検出する手法と②波形の周波数領域での特徴が変化したことを検出する手法の 2 つに分けられる。一般に、前者の方がアルゴリズムは単純であり、リアルタイム性に優れている。しかしながら、その精度においては、後者が優れている。これらは通常それぞれ単独では利用されず、第 1 段階として①の手法を用いてある程度の精度で初動を検出し、その情報をもとに②の手法でより精度の高い初動の検出が行われている。これまでの火山性地震の自動処理で行われてきたのは、①は LTA/STA 比がある閾値を越えたときに初動とする手法¹³⁾¹⁴⁾を用いる例が多い。更に、単に振幅を使うのではなく、振幅の 4 乗を用いて非定常性を強調するような工夫¹⁵⁾も行われている。②では①の結果を用いて、ある程度の時間窓の中で、どの時点で地震波形の周波数成分が変化するかを AIC 基準で判定する手法¹⁶⁾を用いて行われている。その後、各観測点の初動時刻から震源を推定し、震源推定に大きな誤差が出る観測点の読み取りを再検出する、無視する等の処理により、最終的な震源の推定が行われている。この手法はある程度完成されており、火山近傍で地震が多発する際に有効に働くと考えられる次に説明する処理と、どのように結びつけるかの改造が重要なステップになることが明らかになった。

火山性地震は、特定の震源域に多数の地震が群発し、波形の相似性が高く、相関係数を基準として少数のグループに分けられる場合があることが知られている。特に、噴火直前の地震活動が極めて多数発生する時にこの傾向が顕著になる¹⁷⁾。これは噴火直前にはマグマが火口近傍まで上昇して火道を形成する際に特定の場所に応力が集中するため、地震が狭い領域に集中して発生するためと考えられる。波形相関を利用した震源推定は、多数の地震が群発する噴火直前ほど有効に働くと推定されるので、この手法を取り入れることは噴火切迫性評

価に極めて有効である。相似な波形を多数の地震や連続波形から抽出することは手法としてはある程度確立しているが、どの程度の波形相似のものを1つのグループとして処理するのが適切であるかについては、実データを用いて試行錯誤でパラメータをチューニングする必要がある。基本となる手法¹⁸⁾もすでに開発されており、今後はこの手法を応用することを中心にシステムの開発を進めたい。

この他注目すべきものとして、地震波初動検出に機械学習を導入する可能性を示した提案した研究¹⁹⁾がある。この手法では、初動検出は波形のエンベロープを用い、色々な場所で発生する地震時の波形とノイズ波形のデータベースを構築し、それを教師データとして、地震波形を単純なパターン認識の手法で、どのグループに近いかを判断する手法である。まずはその実力についての評価し、もし有効であると判断できれば、この手法を火山性地震向けに改良した手法が有効かもしれない。

地震活動評価部については、これまで伊豆大島において地殻変動と地震活動の関係の研究を進める際に、以下のプログラムを開発してきた。①地盤変動と地震活動の関係から、地殻変動に比べて過剰な地震活動を評価する手法、②潮汐と地震活動の関係から、地震と潮汐の相関を検定する手法、③規模別頻度分布 (b 値) の時間変化を統計的に推定する手法。これらは現在のところ、研究を行うために開発してきたものであり、一般的な利用を考慮したプログラムになっていない。これらのプログラムは、すべて地震検出部の出力と組み合わせるものである。アルゴリズムは既にある程度完成しており、自らが作成したものであるから比較的容易にシステムに導入できると思われるので、地震検出部の開発後に開発を始める予定である。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

無人機（ドローン）を用いた火山噴出物サンプリング機構開発のため、遠隔操作を実現する映像伝送テスト、機材を装着するための治具の開発、機材搭載のバランス調整などを開始した。また、第一回目の試験飛行を平成 29 年 3 月 19 日に浅間山で実施した。

可視カメラを搭載した試験飛行では、浅間火山博物館から火口方向へ長距離飛行を繰り返し、画像伝送・プロポ操作距離の確認および電池消耗度、機体負荷、飛行速度のデータを取得した。この試験飛行の主目的は無線通信状況の確認であったが、最大で比高約 1000m、水平距離 3000m まで飛ばし、十分な無線感度を得ることができた。このとき機体は、ほぼ火口付近まで到達できた。一方で、少し飛行コースを変えると 2000m 程度で感度不良となることがわかった。その原因は調査中である。安定飛行の実現に向けて、解決すべき課題として浮かび上がった。

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体内部の状態変化を評価するため、システム全体の構成を検討し、プロトタイプを作成を開始した。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る。平成 28 年度は、このうち地震波干渉法解析のプロトタイプを作成し、解析パラメータの最適化などを行った。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、電源・通信事情の厳しい火山周辺の地震観測点から連続記録を安定して伝送することが必要である。そこで、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も行ない、システム運用に必要な観測システムの検討を行った。

その結果、観測点から受信した地震波形データを共有メモリ上で周波数フィルタリングを行い、準リアルタイムに地震波干渉法解析を行うプログラムのプロトタイプが完成した。さらに、このプロトタイプを用いてバッファサイズ等の解析パラメータの検討を行った結果、共有メモリ上において複数の周波数帯に対する解析が実時間で可能であることが明らかとなった。また、蔵王山及び吾妻山の既設火山観測点の通信冗長化試験を行った結果、携帯電話回線を用いたデータ通信でも欠落のない連続地震波形データを伝送可能であることが確認できた。通信を冗長化したことによる消費電力変化をモニタリングできるようにした観測装置は、現在長期運用試験中である。

3) プログラムの総合推進

a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を平成 28 年 12 月 26 日の午後に開催した。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。また、サブテーマ間における協力体制を協議した。プロジェクトの開始からそれほど時間が経過していないことから、具体的な協力体制については、次回以降のサブテーマ代表者会議に持ち越すこととなった。

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」を平成 29 年 1 月 28 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、札幌管区气象台、仙台管区气象台、福岡管区气象台から各 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 MT 観測による地下比抵抗構造探査、機動的な広帯域地震観測、遠隔熱情報解析システムの開発に必要な以下の機材を整備した。

MT 観測装置のコイル	3 セット
電場測定装置	3 台
広帯域地震計	2 台
広帯域地震計用記録計	2 台
ドローン	1 台

(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、霧島山において地震計アレイ観測点の設置、水準測量、広帯域 MT 観測を計画どおり実施し、平成 29 年度に予定している霧島山周辺域の MT 観測の準備もほぼ予定どおり進捗した。また、霧島山えびの高原周辺におけるこれまでの観測研究結果と本サブテーマで平成 28 年度に実施した観測結果から、霧島山硫黄山の地下浅部(深さ約 200~600m)に水を通しにくい粘土層(低比抵抗層)が存在し、深部から上昇してくる火山ガス、熱水を蓄積することにより、地盤膨張、地震活動活発化を引き起こしていることが明らかになりつつある。

今後は、平成 28 年度では 1 次元構造モデルに止まっている比抵抗構造を 3 次元モデルとするなど、より詳細な比抵抗構造を明らかにして、得られた比抵抗構造の特徴と地殻変動圧力源および地震・微動震源域の広がりなどから、えびの高原(硫黄山)の火山活動活発化の要因を探ることが課題である。そのため、平成 29 年度は広帯域 MT 観測を追加して行うとともに、現状では地震の震源決定精度(特に深さ方向)が良くないため、アレイ観測を活用して震源精度の向上をはかることが必要である。さらに、水蒸気噴火の発生場に関するより多項目の観測データを取得することも課題である。これらの対策として、えびの高原(硫黄山)周辺における傾斜観測点や GNSS 繰り返し観測点、広帯域地震計および空振計の設置を検討する。

倶多楽の広帯域地下比抵抗構造探査の準備については、測定地点の現地確認、用地使用に係る各種申請の準備が整い、目標はほぼ達成できた。予備調査により、電磁ノイズ環境の調査も終わり、その対策についても考慮している。また、箱根山の機動観測では、地震観測点の設置も終わり、そこで得られるデータの有効性の検証も終わった。今後、データの蓄積をはかりつつ、解析を順次始める予定である。

来年度以降予定されている三宅島と草津白根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。今年度も計画通り準備を進める。

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。システムの基本設計を終え、そのプロトタイプの初期バージョンを作成した。今後も試験運用を続け、バージョンアップをはかる予定である。地下比抵抗・熱水流動解析システムについても開発を開始した。解析の中心となる 3 次元比抵抗構造解析プログラムの整備に着手すると同時に、噴火を支配する物理量である浸透率と比抵抗を関係付ける経験則について情報を収集して整理した。粘土鉱物の含有度や間隙水の比抵抗をどのように評価し、解析システムに組み込むかの検討が必要であり、今後も検討を続ける。遠隔熱情報解析システムの開発では、調査飛行のための搭載装置の開発を開始し、第 1 回目の試験飛行を浅間山で実施した。通信の安定化が問題であることが明らかになった。火山性地震活動総合解析システム、地震波動場連続解析システムについては、アルゴリズムの検討、プロトタイプの開発を開始した。今後、開発を進め、実データによる試験に取り組む予定である。

本課題に属する 4 つのサブテーマの相互連携を図るため、サブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間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 28 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。

(d) 引用文献

- 1) Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W. and Utada, H.: On the Berdichevsky average. *Phys Earth Planet Inter* 253:1-4. doi:10.1016/j.pepi.2016.01.006, 2016.
- 2) Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G.: Occams inversion—a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52(3):289-300. doi:10.1190/1.1442303, 1987.
- 3) 松島健・内田和也・宮町凜太：精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動, 火山噴火予知連絡会資料, 2015.
- 4) 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*, Vol. 120, No.5, pp. 3293-3308, doi:10.1002/2014jb011856, 2015.
- 5) Alparone, S., Cannata, A., Gambino, S., Gresta, S., Milluzzo, V. and Montalto, P.: Time-space variation of volcano-seismic events at La Fossa (Vulcano, Aeolian Islands, Italy): new insights into seismic sources in a hydrothermal system. *Bull. Volcanol.*, Vol. 72, pp. 803-816, doi 10.1007/s00445-010-0367-6, 2010.
- 6) Siripunvaraporn, W. and Egbert, G.: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.173, pp.317-329, 2009.
- 7) Usui, Y.: 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.
- 8) Wright, H.M.N., Cashman, K.V., Gottesfeld, E.H. and Roberts, J.J.: Pore structure of volcanic clasts: measurements of permeability and electrical conductivity, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.280, pp.93-104, 2009.
- 9) Katz, A.J. and Thompson, A.H.: Quantitative prediction of permeability in porous rock, *Phys. Rev. ser B*, Vol.34, pp.9179-9181, 1986.
- 10) Johnson, D.L., Koplik, J. and Schwartz, L.M.: New pore-size parameter characterizing transport in porous media, *Phys. Rev Lett.* Vol.57, pp.2564-2567, 1986.
- 11) Revil, A. and Cathles III, L.M.: Permeability of shaly sands, *Water Resour. Lett.*, Vol. 35, pp.651-662, 1999.
- 12) Wildenschild, D., Roberts, J.J. and Calberg, E.D.: On the relationship between

- microstructure and electrical and hydraulic properties of sand-clay mixtures, Geophys. Res. Lett., Vol.27, pp.3085-3088, 2000.
- 13) Allen, R.: Automatic earthquake recognition and timing from single trace, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 68, pp.1521-1532, 1978.
- 14) Allen, R.: Automatic phase pickers; their present use and future prospects, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 72, pp.S225-S242, 1982.
- 15) Kuperkock, L., Meier, T., Lee, J., Friederich, W. and EGELADOS working group: Automated determination of P-phase arrival times at regional and local distances using higher order statistics, Geophys. J. Int., Vol. 181, pp.1159-1170, 2010.
- 16) Takanami, T. and Kitagawa, G., Multivariate time-series model to estimate the arrival times of S-waves, Comp. Geosci., Vol.19, pp.295-301, 1993.
- 17) Buurman, H. and West, M. E.; Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine volcano, in "The 2006 eruption of Augustine volcano, Alaska: U. S. Geological Survey Professional Paper 1769" edited by Power, J. A., Coombs, M. L. and Freymueller, J. T., pp.41-57, 2010.
- 18) Rowe, C. A., Aster, R. C., Borchers, B. and Young, C. J.; An automatic, adaptive algorithm for refining phase picks in large seismic data sets, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 92, pp.1660-1674, 2002.
- 19) Rawles, C. and Thurber, C.; A non-parametric method for Automatic determination of P-wave S-wave arrival times: application to local micro earthquakes, Geophys. J. Int., Vol. 202, pp.1164-1179, 2015.

(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
塚本果織, 相澤広記, 神田径, 関香織, 木下貴裕, 上嶋誠, 宇津木充, 小山 崇夫	One-dimensional resistivity structure of Iwo-yama, Kirishima Volcanoes	地球電磁気・地球惑星圏学会	平成28年11月23日
松永康生・神田径・高倉伸一・小山崇夫・齋藤全史郎・小川康雄・関香織・鈴木惇史・木下雄介・木下貴裕	MT 法により推定される本白根山の地下比抵抗構造	平成28年度 Conductivity Anomaly 研究会	平成29年1月11日

(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

名称	機能
なし（地震計アレイ解析ソフトウェアの開発中）。	観測現場における準リアルタイムでの解析結果表示 地震計アレイ解析等

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 29 年度業務計画案

(a) 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

1) 霧島山における機動観測

霧島山において、地震・空振、水準測量、全磁力などの観測を継続し、えびの高原（硫黄山）周辺の浅部地殻変動圧力源、地震・微動活動および比抵抗構造の時間変化を把握する。また、広帯域MT観測を実施して3次元比抵抗構造を明らかにするとともに、得られた比抵抗構造の特徴と地殻変動圧力源および地震・微動震源域の広がりなどから、えびの高原（硫黄山）の火山活動活発化の要因を探る。

2) 倶多楽における地下比抵抗構造の探査

平成28年度に実施した倶多楽の予備調査結果を考慮に入れて、倶多楽と隣接する観光地である登別温泉を含む東西約15km、南北約10kmの範囲において、約40点でMT法比抵抗構造探査を実施する。得られたデータを用い、この地域の比抵抗構造解析に着手し、予察的な結果を得る。

3) 箱根山における機動観測

箱根山直下の地震波速度構造を高分解能で推定することを目指し、平成28年度に箱根山カルデラ内およびその周辺地域に構築した稠密地震観測網の観測点の維持を行い、データを蓄積する。

4) 三宅島における機動観測の準備

平成30～31年度に実施予定である三宅島での機動観測の準備を行う。2000年噴火で火口が大きく陥没し、噴火様式に大きな影響を与えたと考えられ、地下水の構造が大きく変化すると予想される。平成30～31年度に実施する予定の地下比抵抗構造探査結果を比較するため、過去に取得したMT観測データを詳細に解析する。

5) 草津白根山における機動観測の準備

平成31～32年度に実施予定の草津白根山での機動観測の観測点候補地の選定のため、前年度に引き続き地震・電磁気等の既存データの解析を通じた検討を行い、ノイズレベルの確認、観測における問題点の洗い出しを行う。本白根山も含めた草津白根山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的としてGNSS繰り返し観測網の構築に向けた観測点選定・用地交渉を行い、初回のGNSS観測を実施する。

(b) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

1) 地震計アレイデータ解析システムの開発

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する。また、平成28年度に製作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試験運用して、問題点の洗い出しと改善を行う。

2) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

比抵抗解析支援ツールの基盤となる3次元比抵抗構造解析プログラムを前年度に引き続き整備する。草津白根山等いくつかの火山で取得された実データを用いて、公開されている陸上および海底の地形（DEM）データの組み込みを行い、必要メモリ量と計算時間から最適なメッシュサイズについて検討する。

MT法比抵抗構造解析の支援ツールの仕様を検討する。また、火山噴火に結び付く地下の状態

把握のためには、3次元地下比抵抗構造から、地下の物質を結び付けて、地下の流体流動を規定する物理量のひとつである浸透率に変換する必要がある。前年度の文献調査に基づき、比抵抗-浸透率変換アルゴリズムの検討も引き続き行う。

3) 火山性地震活動総合解析システムの開発

平成28年度に検討した震源推定アルゴリズムの問題点を洗い出す。このシステムは、火山性地震が頻発する場合にも、それなりの性能で動作する必要がある。このため、伊豆大島等の火山で観測された地震が頻発するような状況の実データを用いたテストを行い、アルゴリズムの改良を行う。

4) 遠隔熱情報解析システムの開発

無人機（ドローン）搭載型の火口湖水の採取装置を開発するため、水試料の遠隔サンプリング機構を開発する。必要な治具の開発と併せて機材搭載のバランス調整などを行い遠隔熱情報解析システムとして適した機材の特性を抽出する。また、草津白根山における飛行調査を2回程度実施し、火山観測のために必要な飛行方法を研究する。

5) 地震波動場連続解析システムの開発

システム全体の構成を検討し、アルゴリズムの検証・プロトタイプを作成を行う。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る。今年度はそのうち地震波逆伝播解析のプロトタイプを作成し、解析パラメータの最適化などを行う。このシステム実用化・運用のためには、電源・通信事情の厳しい火山近傍の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。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継続して行ない、システム運用に必要な観測システムの検討を行う。

(c) プログラムの総合推進

1) 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の開発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。

2) 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、協力機関が参加する「火山内部構造・状態把握技術の開発検討会」を開催し、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する。各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。

3) 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

平成29年度実施予定の倶多楽地下比抵抗構造探査や平成30-31年度実施の三宅島機動観測に必要な観測機材を計画的に整備する。