

1 (3) 火山

「火山」計画推進部会長 大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）

副部会長 野上健治（東京工業大学理学院）

火山の噴火災害を軽減するためには、火山噴火の発生の場所・規模・時期を予測することおよび火山噴火現象の発展段階に応じた災害の推移を予測することが重要である。またこれらの予測のためには、火山噴火現象の解明もまた非常に重要である。「火山」計画推進部会では、「火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、噴火事象系統樹を高度化することで、発災の原因である火山噴火を予測すること」を上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山噴火現象の解明、噴火発生場の解明、噴火のモデル化、観測手法の開発および体制の整備に関する研究を推進している。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

火山現象とそれに伴う災害を長い時間スケールにわたって正確に把握するためには、岩石資料や地質調査データなどの分析をおこなうことが重要である。この目的のため、東京大学地震研究所〔課題番号：1502〕は、顕微赤外反射法を用いてマグマ中の揮発性成分定量分析とメルトの含水量を考慮した鉱物温度圧力計によるマグマ溜まり深度の精密決定を遂行してきた。本年度は、浅間山・西之島・諏訪瀬島の試料分析が実施され、浅間山の1783年天明噴火のマグマに関しては、3つのマグマが関与したことが、マグマの混合が海拔0m付近で起こったことおよび混合から噴火までの時間が短かったことを示唆する結果が得られた。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

低頻度で大規模な火山現象の発生過程や噴火現象を理解するためには、現在の火山学の知見と対比しながら、近代的観測データの解析、岩石・地質データの分析を行なうことが必要である。火山部会では、低頻度大規模火山現象としてカルデラ形成噴火と大規模山体崩壊とをターゲットとした研究が実施されている。

鬼界火山のカルデラ形成噴火（K-Ah噴火，7.3 ka）の地質学的・物質科学的研究からは、単純に1回の大規模火砕物密度流が発生したのではなく、プリニー式噴火で始まった噴火が噴煙柱崩壊後にやや静穏化し、その後段階的に火道の形成・拡大が進行して終盤に幸屋火砕流の噴出及びカルデラ崩壊に至ったことが推定された（北海道大学〔課題番号：1001〕）。また、摩周火山でもカルデラ形成噴火（7.6 ka）の地質学的・物質科学的研究（北海道大学〔課題番号：1001〕）とそれに先行する噴火の推移およびマグマ供給系に関する岩石学的な研究北海道教育大（〔課題番号：2940〕）が実施されている。

一方、山体崩壊については、雲仙岳1792年噴火時の眉山崩壊と1888年磐梯山噴火による

山体崩壊に関する資料分析や地質調査が実施された。そのうちの眉山崩壊については、崩壊の原因の諸説のうちの火山爆裂説や地震説を支持する噴出物や資料を新たに見いだす事はできなかった。現時点では、眉山を構成している岩石中の間隙水圧上昇による地すべりが山体崩壊を引き起こしたとする説が有力であるが、決定的な裏付けデータを示すには未だ至っていない（北海道大学 [課題番号：1001]）。

また、桜島大正噴火時（1914年）における桜島地震の震源要素再決定に関する研究も実施され、この地震の震源は鹿児島測候所から南南東方向約6 kmの鹿児島市街地沖の極浅部に位置することが明らかになった（京都大学防災研究所 [課題番号：1902]）。

（3） 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ． 内陸地震と火山噴火

マグマ溜まりや火道などの構造や物質科学的特性、火山周辺の応力・ひずみの時空間分布を明らかにし、火山噴火現象のモデル化の研究を進めるため、地震・地殻変動観測や電磁気探査などを実施することが重要である。

この目的のため、2011年の東北地方太平洋沖地震以降に活動の活発化がみられる蔵王山周辺において、地震・地殻変動観測、重力観測、地磁気観測などからなる総合観測が実施されている。同火山では2018年1月28日から2月4日にかけて地殻変動をともなう火山性微動が観測され、1月30日には噴火警戒レベルが2に引き上げられた。この地殻変動源は、山体下浅部に位置する開口断層であることが明らかになっている（東北大学 [課題番号：1202]）。今後は、この断層と長周期地震発生源の関連やこれらと浅部熱水系の関係を明らかにしていくことが、水蒸気噴火の発生場解明のためにも重要である。

（5） 火山現象のモデル化

大規模な災害を引き起こす可能性があるマグマ噴火を主体とする火山、および噴火規模は小さいものの災害を引き起こす可能性が高い水蒸気噴火を主体とする火山それぞれに対し、火口近傍や火山周辺における多項目の観測や火山噴出物の解析から、先行現象とそれに続く噴火現象を把握し、それら諸現象のモデル化を行なうことを目的とした研究が実施されている。

ア． マグマ噴火を主体とする火山

2006年に58年ぶりに噴火が発生した桜島昭和火口では、2009年後半から2015年前半までブルカノ式噴火が頻発した。そして、2015年8月15日にマグマ貫入イベントが発生した後は噴火活動が低下した状態にあった。しかし、2017年4月26日以降同年6月中旬まで昭和火口において噴火が頻発した。また、8月22日夜から23日の午前中まで昭和火口から溶岩噴泉活動が発生し、その後8月28日からはブルカノ式噴火が頻発するようになった。これらの噴火様式の変遷は、新鮮なマグマが地表に到達した後、脱ガスしながら結晶化が進行した結果、火道上部の閉塞が進んだことによると考えられている（京都大学防災研究所 [課題番号：1908]、産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。その後2017年10月31日から、噴火活動は昭和火口から南岳山頂火口に移った。2017年4月以降の様式の異なる噴火現象のいずれにも、先行する南岳下のマグマ溜まりでの膨張が捉えられた。桜島火山においては前年度までの研究により、マグマ溜まりの膨張速度（マグマ貫入速度）が噴火様式に

より異なることが明らかになっている。今回の活動で特徴的であった溶岩噴泉活動の前のマグマ貫入レートはこれまでのマグマ貫入速度とは異なり、桜島においてはマグマ貫入レートが噴火様式を支配していることを裏付けている。

また産業技術総合研究所は、桜島の噴出物の構成粒子解析を継続して実施し、昭和火口および南岳山頂火口の噴出物は活動が継続するにつれて結晶度が低下し発泡度が増加したことを明らかにした。8月に顕著な溶岩噴泉活動が発生した昭和火口では、この活動に先立つ8月11日ごろから低結晶度の粒子が顕著に増加したことを把握した。また南岳山頂火口の噴出物も9月から11月にかけて低結晶度の粒子が増加した。これらから、昭和火口・南岳山頂火口へのマグマの上昇が連動していたことが明らかになった（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

一方、上述の活動の元となるマグマは始良カルデラ下のマグマ溜まりから桜島北岳下へと移動していると考えられている。国土地理院のGNSS観測による基線長変化の解析から、始良カルデラ下のマグマ溜まりは膨張収縮を繰り返しながらも体積増加が継続していることが明らかになっている（国土地理院 [課題番号：6002]）。しかし、その体積増加率は2017年以降小さくなってきていることが、桜島島内のGNSS観測や水準測量の結果により示された（京都大学防災研究所 [課題番号：1908]）。

マグマ噴火のモデル化のためには、地球物理学、地球化学および岩石学的手法を用いた多項目の観測を桜島以外でも推進し、噴火にともなう諸現象の一般性を抽出することが非常に重要となる。東京大学地震研究所は、霧島新燃岳、浅間山、伊豆大島において多項目高精度観測を継続し、そのうち2017年10月に6年ぶりに噴火の発生した霧島新燃岳では、この噴火に先行して火山性微動を伴う傾斜変動が広帯域地震観測網により捉えられた。この傾斜変動は新燃岳火口直下深さ1km付近における 10^4m^3 の膨張源によって良く説明されることから、火山性微動は噴火に先行して流体が新燃岳の浅部に移動したことに伴い発生したと解釈された（東京大学地震研究所 [課題番号：1508]）。また、浅間山では火山ガス組成の変化を把握するためMulti-GASによる火山ガス組成繰り返し観測も実施された（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。伊豆大島では、非線形の時間依存インバージョンが地殻変動データに適用され、圧力源の深さの時間変化が2012年以降殆どないことが明らかになった（国土地理院 [課題番号：6002]）。また、気象研究所は伊豆大島において、光波測距と多成分歪み計による地殻変動観測、繰り返し重力測定を実施している（気象庁 [課題番号：7003]）。

火山現象・噴火のモデル化を行なう際には、マグマの挙動についての理論的及び実験的研究の成果を取り入れることも重要である。東北大学は、火道浅部での噴火様式の分岐条件を明らかにするため、阿蘇火山中岳の灰噴火火山灰中のナノライト・ウルトラナノライトの記載的研究を実施した。その結果、含水玄武岩質安山岩の低圧下での脱水結晶作用によりメルトフォームが急激に脆性化することが、空振を伴わない灰噴火を引き起こす要因であることが示唆された（東北大学 [課題番号：1205]）。

その他、明神礁や西之島など海域火山の観測も継続されている（海上保安庁 [課題番号：8003]）

イ. 熱水系の卓越する火山

熱水系の卓越した火山で発生する水蒸気噴火や小規模なマグマ水蒸気噴火の準備過程に関連する先行現象の事例を多数集め、それらの現象の理解を深めるため、十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島を対象とし、地球物理的観測、電磁気や熱観測、地質調査と噴出物分析を調査項目とする全国連携の比較研究が継続されている（北海道大学 [課題番号：1003]）。これら5火山のうち、2014年に噴火が発生した阿蘇山と口永良部島については、H27年度から別課題でも観測研究が実施されている（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。

前述の全国連携研究では、火山活動に伴う地震波速度の時間変化検出を目的とした地震波干渉法解析が実施されているが、火山活動との明瞭な対応のある速度構造変化は検出されていない。また、霧島山新燃岳（2010年5月27日：気象庁・防災科研データ）・御嶽山（2014年9月27日）・阿蘇山（2015年9月14日）・草津白根山（2018年1月23日）・口永良部島（2014年8月3日）について水蒸気噴火前後の地震動・傾斜変動を比較した。草津白根山では、噴火の3分前から火山性微動と同期した傾斜変動がとらえられており、これは御嶽山と口永良部島での噴火前の傾斜変動と同じ特徴を持つことがわかった（北海道大学 [課題番号：1003]）。これは水蒸気噴火のメカニズムに共通性があることを強く示唆する観測結果である。

十勝岳において、AMT法比抵抗探査データ（北海道立総合研究機構地質研究所 [課題番号：9102] と共同実施）を用いて、火口周辺域の地表から深さ500m程度までについて3次元比抵抗構造解析を行った。その結果、表層の溶岩やスコリアに対応する高比抵抗層の下に噴気変質または熱水に対応する低比抵抗層が火口域に広く分布しており、62火口群や大正火口に向かってその低比抵抗が伸びていることが推定された。また、吾妻山周辺域では広帯域MT観測データから3次元比抵抗構造推定を実施した。その結果、比抵抗構造として以下が新たに分かった（北海道大学 [課題番号：1003]）。(1) 30 Ω m以下の領域は大穴クレーターの海拔下5 kmを中心に南北25 km、東西15 km、鉛直10 kmの3軸楕円体状に広がっている。(2) 大穴火口と安達太良山の北、土湯峠から箕輪山にかけての2か所には、火道を示唆するような直径2-3 kmの管状の低比抵抗体が上記の楕円体領域から延伸すると推定される。これらが吾妻山と安達太良山への熱水やマグマ経路と仮定すると、吾妻山と安達太良山の熱水・マグマ溜りは一体であると解釈できる。(3) 吾妻小富士より東側の領域は全般的に高比抵抗（300 Ω m以上）となっている。吾妻小富士の東側に深さ20 kmを上限として深部低周波地震が観測されているが、この地震は高比抵抗領域で発生している。

また、十勝岳の水蒸気噴火堆積物の分析から、同火山では酸性流体により生じたシリカ鉱物やミョウバン石が変質物の主体であり、カオリン鉱物を伴うことが明らかになった。これらの鉱物は著しい溶脱反応を示しつつも不完全な変質であり、火山ガスに由来する酸性流体と既存岩石が短時間反応した結果生じたと解釈できる。大規模で安定した熱水系に由来する変質火山灰が認められた御嶽山とは異なり、十勝岳では浅所の不安定な熱水系に由来する変質物のみが認められる。マグマ貫入頻度が低い御嶽山と、貫入頻度が高い十勝岳における熱水系の発達様式の違いによる相違であると解釈される（北海道大学 [課題番号：1003]）。

吾妻火山での地質調査及び試料分析が実施され、約5000年前の吾妻小富士形成噴火における噴火様式とマグマ組成に関する地質学的検討の結果、この噴火はマグマ水蒸気噴火→ストロンボリ式噴火→ブルカノ式噴火→ストロンボリ式噴火→水蒸気爆発と推移したことが、マグマ水蒸気噴火噴出物はブルカノ式噴火の噴出物と同程度のSiO₂量（59-61%）をもつが、その斑晶量はブルカノ式噴火よりやや低いことが明らかになった。噴火様式の分岐条件の判断材料となりうる研究成果である（北海道大学〔課題番号：1003〕）。

草津白根山の湯釜火口周辺では、2014年3月から地震活動が活発となり、山体が膨張するとともに、火山ガス中のH₂S成分が減少した。さらに2ヶ月後に湯釜火口湖の温度上昇と湯釜直下の熱消磁が観測された。この山体膨張は2015年8月まで継続したが、その後活動が終息した。そして、これらの一連の活動は、湯釜を取り囲む粘土キャップへの高温の火山ガス・熱水流入によるものと解釈された。2017年には熱活動の縮退に対応する地磁気変化や噴気ガスの成分変化が観測されていた（東京工業大学〔課題番号：1601〕）。ただし、本白根火砕丘では、近年の地質調査により、最新のマグマ噴火が1500年前に発生したことが判明していた（富山大学〔課題番号：2942〕）。このような状況下で、2018年1月23日10時02分に本白根山鏡池北火口から噴火が発生し、死者1名を含む人的な被害が生じた。東京工業大学が湯釜火口周辺5カ所に設置していた傾斜計では、23日09:58:58頃から湯釜南方が隆起する傾斜変動が観測され、10:02:08 - 12 前後に反転した。GNSS連続観測では、噴火に先行する地盤変動は不明瞭である。本白根火砕丘では、群発地震活動が年に2-3回程度の割合で観測されていたが、噴火直前の地震活動の活発化は認められていない。また、噴火の3か月前に実施した空中赤外観測でも北鏡池火砕丘周辺の地表面温度に異常は認められなかった（東京工業大学〔課題番号：1601〕）。

一方、御嶽山では、GNSS観測や水準測量が実施され、活動の沈静化を示す山体収縮が観測された（京都大学理学研究科〔課題番号：1802〕）。また、口永良部島でもGNSS観測や水準測量が実施され、顕著な地殻変動は観測されず、前年度に観測された火山活動の低下が継続していることが示唆された。ただし、二酸化硫黄放出量は100-500トン/日の高いレベルを保っている（東京大学大学院理学研究科〔課題番号：1403〕）ことから小規模な水蒸気噴火のポテンシャルは有していると判断された（京都大学理学研究科〔課題番号：1802〕）。阿蘇火山では、阿蘇中岳火口周辺で行われたACTIVE観測の解析手法の高度化に取り組み、三次元有限要素法を用いたインバージョンコードを開発し、2014年11月のマグマ噴火前後の比抵抗構造の変化を推定した。その結果、火口底標高付近の地下水層の消失および粘土キャップ層の含水率低下に対応する比抵抗構造の時間変化を検出できることがわかった（京都大学理学研究科〔課題番号：1802〕）。これは噴火様式の予測につながりうる解析結果である。

他の熱水系卓越火山でも観測研究が進められた。京都大学防災研究所は、焼岳火山の観測網を強化し、2017年8月9日から10日にかけて発生した黒谷火口の噴気発生に伴う低周波地震を捉えた（京都大学防災研究所〔課題番号：1909〕）。また、富山大学は、弥陀ヶ原火山・地獄谷において水準測量、レーザースキャナによる高精度地形測量および地中温度測定を実施した。噴気活動の活発な領域で、2016年9月から1年間で1cmを超える局

地的な隆起が観測された（富山大学〔課題番号：2941〕）。気象庁は雌阿寒岳などで全磁力の連続観測および繰返し観測を実施した。そして、雌阿寒岳においてMT法による比抵抗構造探査を実施し、全磁力から推定される熱消磁域と比抵抗構造との関連性を見いだした（気象庁〔課題番号：7005〕）。また、北海道立総合研究機構地質研究所は雌阿寒岳および十勝岳でGPS連続観測と火山口域での地温連続観測、噴気および温泉水の地球化学的観測、地下水位連続観測を行った。また、熱水流動系のモデルに基づいて、十勝岳周辺での30年以上にわたる温泉水の地球化学的な観測の結果を検証することによって、吹上温泉地域での温泉水の変化が十勝岳の火山活動の変化に対応していることが明らかになった（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：9102〕）。

東海大学は箱根山の大涌谷と上湯場の二か所で噴気の採取・分析を一月に一回の割合で実施した。その結果、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 、 CO_2/CH_4 、 He/CH_4 について、2017年の1～4月頃に底を打ち、その後年末に向けて緩やかな上昇を示す変化が観測された。地震活動は2017年5月～10月にかけて、やや活発化しており、地震活動がマグマからの脱ガスと対応している可能性がある（東海大学〔課題番号：2949〕）。この箱根火山においては東京大学大気海洋研究所も2ヶ所における継続的に噴気ガスを採取しHeの同位体比を測定している（東京大学大気海洋研究所〔課題番号：2802〕）。

海底火山の活動は、その周囲が大量の海水に囲まれていることから大規模な熱水活動を伴うことが特徴であり、陸上の火山活動とは全く異なった様相を呈する。火山体から放出される熱水の生成過程を明らかにするため、海水に酸を添加して酸性化したものと岩石を反応させ、Fe・Al・Siが岩石から溶脱する過程を実験的に調べたところ、pHのより低い酸性海水と反応させた場合にFeの溶脱が著しく、Alの溶脱は促進されることが明らかになった。これに対して、pHの高い酸性海水と反応させた場合にはFe、Alの溶脱は促進されず、Siの溶脱が促進する結果が得られた。この実験から、火山活動が極めて活発な状態においてFeの割合が高い沈殿物が生成される原因が明らかになった（東京工業大学〔課題番号：1602〕）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

火山活動の推移を俯瞰的に理解してその予測を目指すためには、史料・考古データ、地質調査、火山噴出物の解析、地球物理観測の研究成果を多角的に取り入れ、可能性のある火山活動や噴火現象を網羅してその時系列を整理した噴火事象系統樹を作成することが重要である。また、作成された噴火事象系統樹も最新の研究成果により更新されていく必要がある。

北海道大学は、十勝岳北西火山口群の活動について事象系統樹作成のための噴火履歴の整理と確率の算出を試みた。確率算出にあたっては、完新世の活動、特に過去5,000年間程度の噴火活動履歴から火山口、噴火タイプを、また、過去100年の活動については、噴火未遂も含めた上で熱活動レベルの上昇や火山性地震の増加などの前兆現象がまとめられた。そして、地震活動が活発化したのちに、噴火開始するか噴火未遂でおわるかの確率、噴火開始後水蒸気噴火で終息するかマグマ噴火に至るかの確率、マグマ噴火が起こった後準プリニー式噴火かマール形成噴火に移行する

確率，準プリニー式噴火がそのまま終息するか溶岩流出に移行するかの確率，山体崩壊・岩屑なだれ堆積物の発生確率がそれぞれ算出された（北海道大学〔課題番号：1004〕）。

また，蔵王山では，五色岳の最新活動を対象にテフラを用いた研究が進められ，この活動フェーズは，水蒸気噴火からマグマ噴火に移行，マグマ噴火のみ，水蒸気噴火のみの3種類に分けられることが明らかになった。また，噴火の原動力となった高温マグマの活動タイミングについても知見が得られた。そこで，これらの成果を噴火事象系統樹に反映させることが試みられた（山形大学，〔課題番号：2932〕）。また富士山では，高精度の噴火事象系統樹作成もため，詳細な噴火履歴と噴火推移解明のため，文献調査と既存資料のデータベース化が継続されるとともに，滝沢標高 1600m 付近と与兵衛流標高 1450m 付近の 2ヶ所でトレンチ調査が実施された。与兵衛流でのトレンチで確認された火砕流と溶岩の噴出年代は古地磁気方位により，各々AD600-650年頃，AD550-600年頃であると推定された（山梨県富士山科学研究所〔課題番号：9202〕）。

一方，火山活動の活発化や噴火の発生，噴火発生後の噴火規模や様式の急激な変化の予測を行うためには，これまでの火山学的知見や本計画の成果をもとに，観測データの特徴や火山噴出物の解析などから，事象分岐の条件や論理を導き出すことも不可欠である。

地球物理学的多項目観測が行なわれている阿蘇山，桜島，口永良部島，霧島山，十勝岳，吾妻山，草津白根山において，地震回数や火山性地震の波形特性の時間変化，測地測量にもとづく地下の体積変化量の時空間変化，熱的活動や地磁気変化の各種観測量が詳細に調べられた。噴火が発生した火山に対しては，噴火時期が近づくにつれて，次第に多くの項目の観測量に活発化を示すシグナルが現れることが見いだされた。一方，ひとつの観測指標にもとづく火山活動や噴火活動推移の調査も行われた。世界の地震・噴火のデータベースから，噴火前後に中規模地震の発生頻度が高まることが明らかとなった。また，国内9火山で発生した噴火発生事例に対して，2000年頃から整備されたGNSSの長期データに基づきの中率が調べられた。その結果，約4割が的中，約5割が噴火未遂，残りが空振りとなることがわかった。また，測量の分岐現象と地下火山性流体の活動変化の関係をつなげるモデル化も行われた。山体近傍で発生する火山性地震数の変化から山体膨張／収縮による活動変化を差し引くことで，火山活動に重要な役割を果たす火山性流体による地下の間隙圧上昇を検知する方法が伊豆大島・御嶽山・箱根山に適用され，噴火活動との関係が調べられた（東北大学〔課題番号：1208〕）。

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

防災・減災に観測研究の成果が役立てられるためには，行政機関等の関連機関との連携の下に，適切な計画推進体制を整備する必要がある。気象庁は3回の火山噴火予知連絡会定例会を開催し，全国の火山活動の状況についての検討を行った。検討結果は定例会終了後に報道発表し，気象庁の「火山の状況に関する解説情報」で発表するとともに気象庁のホームページでも公表されている。また，草津の本白根山噴火に対応して，火山活動の検討と総合判断，およびそのために必要な観測体制の検討を行うため，火山噴火予知連絡会の下に草津白根山部会を設置した（気象庁〔課題番号：7013〕）。

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

長い時間スケールをもつ火山現象の理解とその予測には、その基盤となる観測網の維持・拡充を進めるとともに、データの継続的取得と膨大なデータの効率的利用が重要である。また、海域における観測体制の強化、各種観測を火口近傍で安全に実施する技術の開発、人工衛星を利用したリアルタイム火山観測システムの高度化、航空機搭載型センサーを用いた観測技術の開発も必要である。

山梨県富士山科学研究所では、火山活動の予兆現象として地下水の変動状態を監視することを目的に、富士北麓の4箇所に観測点を設けて地下水変動の連続観測を継続している（山梨県富士山科学研究所 [課題番号：9201]）。海上保安庁は、海域火山基礎情報図調査を「利島至三宅」、「若尊」で実施した（海上保安庁 [課題番号：8003]）。

東京大学大学院理学研究科は、二酸化硫黄簡易型トラバース測定装置の解析方法の改良を行ない、観測スペクトルのダウンロード、スペクトル解析、解析結果の福岡管区気象台への送付、という作業の自動化を行った。これにより、フェリーでの測定終了から45分以内に解析結果が送信されるようになった。また、二酸化硫黄可視化モニタリング装置の構成を一新し、桜島で可視化測定を実施した（東京大学大学院理学研究科 [課題番号：1403]）。

北海道大学は、Lバンド航空機SARを用いた火山性地殻変動の検出にむけ、火山性地殻変動が実際に進行している火山を対象とした新規の観測を行った。そして、霧島火山硫黄山における地殻変動検出のため、2014年8月7日、2016年8月4日、2017年9月6日に取得した3方向からのデータを用いて、航空機SAR干渉解析を実施した。その結果、飛行速度の不均一さに由来する干渉性悪化の影響を完全には取り除けなかったものの、硫黄山周辺では、期間を通じて膨張を示唆する膨張性の地殻変動が検出された（北海道大学 [課題番号：1008]）。

防災科学技術研究所は地上設置型レーダー干渉計による火山活動把握に関する研究の一環として、浅間山に設置された干渉計で得られたデータから大気遅延ノイズを軽減するための手法開発をおこなった（防災科学技術研究所 [課題番号：3003, 3005]）。また、小型単発機に搭載可能なセンサー：ARTS-SEのカメラ型センサデータの処理手法を開発し、その手法により箱根山大涌谷付近のDSMを作成した。その精度は、地理院の数値標高モデル10mメッシュ（標高）に対して10m以内であった（防災科学技術研究所 [課題番号：3003, 3005]）。

人工衛星を利用した研究では、東京大学地震研究所がひまわり8号と2017年12月23日に打ち上げられたJAXAの気候変動観測衛星「しきさい」の画像データを活用するシステムを開発し、解析結果をWeb上で公開するシステムが完成した（東京大学地震研究所 [課題番号：1520]）。「しきさい」にはSGLI（Second Generation Global Imager）と呼ばれる、短波長赤外の1.6 μm、熱赤外の11 μm、12 μmに分解能250mのチャンネルをもつセンサーが搭載されており、夜間画像の観測頻度が2-3日毎であり、リアルタイム性も比較的高い。こ

のことから、溶岩流や火砕流の分布状況等を適度な頻度で捉えるのに適したスペックとなっており、今後、アジア太平洋域の火山活動状況の把握や避難計画策定等に活用されることが期待される。

また、小型絶対重力計網によるマグマ活動等の火山観測手法を確立を目指して絶対重力値の系統誤差を生み出す原因の究明がなされ、その影響の除去・補正手法の確立がはかられた。また、実際に蔵王火山において観測が実施され、地面震動の影響が設計通りに補正されていることが確認された（東京大学地震研究所 [課題番号：1506]）。

また、火山噴火事象の分岐条件や論理の構築のために分岐前に現れる物理量の変化を検出するための機器開発のみならず、宇宙線（ミュオン）を利用した火山浅部透視技術においては前年度に桜島に設置したカロリメータ方式の観測で得られたデータを用いて、桜島B火口及び昭和火口下の密度構造を第3世代方式を用いて透視可視化することに成功した。その結果B火口直下の低密度領域が昭和火口直下の低密度領域より大きなことを確認することができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1523]）。

一方、噴火活動時に噴出物に含まれる結晶量を短時間で簡便に評価し、その時間変化をモニタリングする手法を開発するため、マイクロライト・ナノライトを含む試料の初期帯磁率分析が行なわれた。最小1ccの火山灰で測定できる帯磁率計（Bartington社 MS2B）により、現在、最速でも数日を要している粒子構成比の時間変化の検出が、試料採取とほぼ同時に行えるようになる可能性があることが明らかになった（東北大学 [課題番号：1205]）。

また、気象庁は火山活動監視・評価の高度化に資するために火山監視情報システムを更新し、傾斜データ降水補正機能の導入、GNSSデータ解析の高品位化、だいち2号（ALOS-2）のSAR解析をおこなった（気象庁 [課題番号：7004]）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会では、火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、事象系統樹の高度化することで、発災の原因である火山噴火を予測する（東北大学 [課題番号：1208]）ことを上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山噴火現象および発生場の解明、噴火のモデル化、観測手法の開発および体制の整備に関する研究等を推進している。そして本部会では、火口近傍を含む火山体周辺における地震観測、地番変動観測や地球電磁気観測、物質科学的分析により、熱水系の卓越した5火山（十勝岳、吾妻山、草津白根山、阿蘇山、口永良部島）の比較研究（北海道大学 [課題番号：1003]）を全国連携で実施している。このような状況のもと、本課題の対象火山である草津白根山の本白根山で、2018年1月23日に水蒸気噴火が発生し、1名の方が亡くなられ、多数の方々が負傷された。亡くなられた方のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々、ご遺族に心よりお見舞い申し上げる。この噴火は、観測網が充実していた湯釜火口以外で発生したとはいえ、水蒸気噴火の予測の困難さを改めて我々に突きつけることとなった。しかし、現状では水蒸気噴火や小規模なマグマ水蒸気噴火の予測は困難であり、噴火の準備過程に関連する先行現象の事例をできるだけ多く集めて現象の理解を深めるべきである。本白根山では、噴火の3分前から火山性微動と同期した傾斜変動がとらえられていた。これは2014年の御嶽山噴火と口永良部島での噴火前の傾斜変動と同じ特徴を持つ（北海道大学

[課題番号：1003])。このことは、水蒸気噴火のメカニズムに共通性があることを示唆する観測結果であり、得られたデータをもとに水蒸気噴火のモデル化に関する研究を進めるべきであろう。そうすることにより、噴火の3分～10分前にとらえられた地殻変動や微動に基づき、緊急噴火速報のような情報を発信することも将来的には可能になるかもしれない。一方、口永良部、御嶽山、本白根山の噴火はいずれも気象庁による噴火警戒レベルが1の時期に発生した。これらの火山がどのような準備過程を経て噴火に至ったかを明らかにして、他火山の活動推移予測に役立てることも重要な課題である。

成果リスト

- Ahmadi, P., M. R. Ghorbani, M. Coltorti, T. Kuritani, Y. Cai, A. M. Fioretti, E. Braschi, P. P. Giacomoni, F. Aghabazaz, S. Babazadeh, and S. Conticelli, 2018, High-Nb hawaiiite-mugearite and high-Mg calc-alkaline lavas from northeastern Iran: Oligo-Miocene melts from modified mantle wedge. *International Geology Review*, doi:10.1080/00206814.2017.1416502.
- 安藤忍, 2017, だいち2号により観測された西之島の山体変形. 気象研究所技術報告, 78, 34-52.
- 新谷昌人, 2017, 光ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 23, 202-2
- 代田寧・大場武・谷口無我 (2017) 箱根火山における活動活発化に連動した噴気組成 (C/S 比) の変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, 49, 29-38.
- Geshi, N., F. Maeno, S. Nakagawa, H. Naruo, and T. Kobayashi, 2017, Tsunami deposits associated with the 7.3 ka caldera-forming eruption of the Kikai Caldera, insights for tsunami generation during submarine caldera-forming eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 347, 221-233.
- 長谷川健・中川光弘・宮城磯治 (2017) 北海道東部, アトサヌプリ火山における水蒸気噴火の発生履歴. 地質学雑誌, 123, 269-281. 橋本武志・青山 裕・小山 寛・森井敦司・三嶋 渉・荻野 激・高橋 良・岡崎紀俊, 2018, 非噴火時における多項目観測の重要性 (樽前山の事例), 月刊地球, 月刊地球, 40-3, 163-169
- 橋本武志・寺田暁彦・森 俊哉, 2018, ドローンによる火山観測, 月刊地理, 63(2), 29-35
- Hata M., M. Uyeshima, S. Handa, M. Shimoizumi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, T. Kagiya, H. Utada, H. Munekane, M. Ichiki, K. Fuji-ta, 2017, 3-D electrical resistivity structure based on geomagnetic transfer functions exploring the features of arc magmatism beneath Kyushu, Southwest Japan Arc, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 172-190, DOI:10.1002/2016JB013179.
- 北海道立総合研究機構地質研究所・北海道大学地震火山研究観測センター・札幌管区気象台, 2017, 火山内部構造・熱水流動系のモデル化と火山活動度評価手法の高度化 (十勝岳). 北海道地質研究所調査研究報告, 44, 194pp.
- Hotta, K., Iguchi, M. (2017) Ground deformation source model at Kuchinoerabu-jima volcano during 2006-2014 as revealed by campaign GPS observation, *Earth*,

- Planets and Space, 69, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0763-7>
- Ichihara, M. and S. Matsumoto, 2017, Relative source locations of continuous tremor before and after the subplinian events at Shinmoe-dake, in 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 44 (21) doi:10.1002/2017GL075293.
- Iguchi, M., H. Nakamichi, T. Tameguri, K. Yamamoto, T. Mori, T. Ohminato, E. Saito, 2017, Contribution of monitoring data to decision making for evacuation from the 2014 and 2015 eruptions of Kuchinoerabujima Volcano, *Journal of Natural Disaster Science*, 38, 31-47.
- Iguchi, M., 2018, Volcanic activity of Sakurajima monitored using GNSS, *Jour. Disast. Res.*, Vol.13 No.3 (accepted)
- 石毛康介・中川光弘, 2017, 北海道中央部, 大雪火山群旭岳グループの後期更新世～完新世火山活動史. *地質学雑誌*, 123, 73-91.
- Kuvikas, O.B., M. Nakagawa, T. Kuritani, Y. Muravyev, N. Malik, E. Klimenko, M. Amma-Miyasaka, A. Matsumoto, and S. Shimada, 2017, A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172, doi: 10.1007/s00410-017-1347-z
- 海上保安庁, 2017, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 127
- 海上保安庁, 2017, 西之島における火山活動の概況, 火山噴火予知連絡会会報, 127
- 海上保安庁, 2017, 明神礁における火山活動の概況, 火山噴火予知連絡会会報, 127
- 海上保安庁, 2017, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 128
- 海上保安庁, 2017, 西之島における火山活動の概況, 火山噴火予知連絡会会報, 128
- Kameda, M., M. Ichihara, S. Maruyama, N. Kurokawa, Y. Aoki, S. Okumura, and K. Uesugi, 2017, Advancement of magma fragmentation by inhomogeneous bubble distribution, *Scientific Reports*, 7, doi:10.1038/s41598-017-16941-x.
- 川井陽太, 2018, 海底火山活動に伴う変色海水生成過程の実験的研究, 東京工業大学修士論文
- 小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志, 2018, 無人ヘリ繰り返し空中磁気測量による磁場時間変化の検出, 2018年 Conductivity Anomaly研究会論文集, 59-66.
- Kuritani, T., T. Sakuyama, N. Kamada, T. Yokoyama, and M. Nakagawa, 2017, Fluid-fluxed melting of mantle versus decompression melting of hydrous mantle plume as the cause of intraplate magmatism over a stagnant slab: implications from Fukue Volcano Group, SW Japan. *Lithos*, 282-283, 98-110.
- Lee, H., N. Takahata, Y. Sano, et al., 2017, Incipient rifting accompanied by the release of subcontinental lithospheric mantle volatiles in the Magadi and Natron basin, East Africa. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 346, 118-133.
- Liu, J., Q.-K. Xia, T. Kuritani, E. Hanski, and H.-R. Yu, 2017, Mantle hydration and the role of water in the generation of large igneous provinces. *Nature Communications* 8: 1824, doi:10.1038/s41467-017-01940-3.
- Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, and

- M. Iguchi, in press, A sequence of a plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 前野深・中野俊・吉本充宏・大湊隆雄・渡邊篤志・川上和人・千田智基・武尾実 (2017) 新火山島の初上陸調査—西之島 (東京都小笠原村) — (日本の露頭・景観100選). *地学雑誌*, 126, N1-N13.
- Matsushima, N., Y. Nishi, S. Onizawa, S. Takakura, H. Hase, and T. Ishido, 2017, Self-potential characteristics of the dormant period of Izu-Oshima volcano, *Bull. Volcanol.*, 79:86.
- Miyabuchi, Y., Iizuka, Y., Hara, C., Yokoo, A., Ohkura, T. (2018) The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan: Eruption sequence inferred from ballistic, pyroclastic density current and fallout deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 351, 41-56.
- Mori T., M. Morita, M. Iguchi, and Fukuoka Regional Headquarters, 2017, Sulfur dioxide flux monitoring using a public ferry after the 2014 eruption of Kuchinoerabujima Volcano, Japan. *Journal of Natural Disaster Science*, 38, 105-118.
- Mujin, M., M. Nakamura and A. Miyake, 2017, Eruption style and crystal size distributions: Crystallization of groundmass nanolites in the 2011 Shinmoedake eruption, *American Mineralogist*, 102, 2367-2380.
- Nakada, S., A. Zaennudin, M. Yoshimoto, F. Maeno, Y. Suzuki, N. Hokanishi, H. Sasaki, M. Iguchi, T. Ohkura, H. Gunawan, and H. Triastuty, in press, Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013-2016. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Nakamichi, H., Iguchi, M., Tameguri, T. and Sonoda, T. (2017) Quantification of seismic and acoustic waves to characterize the 2014 and 2015 eruptions of Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, 38, 65-83.
- 中道治久・井口正人・為栗健, 2017, 2015年8月桜島群発地震の振幅を用いた震源推定, 京都大学防災研究所年報, 60B, 396-401.
- 七山太・中川正二郎・前野深・成尾英仁 (2017) 南九州, 屋久島において記載された過去の巨大地震津波を示唆する幾つかの証拠. *月刊地球号外*, 67, 99-106.
- 日本大学, 名古屋大学, 九州大学, 京都大学, 東濃地震科学研究所, 気象庁, 2017, 精密水準測量による御嶽山における上下変動 (2016年9月~2017年4月), 火山噴火予知連絡会会報, 138
- Nishimura, T., 2017, Triggering volcanic eruptions by large earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 7750-7756, doi: 10.1002/2017GL074579.
- 大見士朗, 2017, 飛騨山脈南部脊梁部で発生する地震による震源域近傍での震度について ~2014年5月飛騨山脈南部の地震活動の例~, *地震* 2, 69, 113-118, DOI:10.4294/zisin.69.113.

- Ohminato, T., T. Kaneko, T. Koyama, A. Watanabe, W. Kanda, T. Tameguri, and R. Kazahaya, 2017, Observations using an unmanned aerial vehicle in an area in danger of volcanic eruptions at Kuchinoerabu-jima Volcano, southern Kyushu, Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, 38, 85-104.
- 大湊隆雄・金子隆之・小山崇夫・渡邊篤志・安田敦・武尾実・青木陽介・柳澤孝寿・本多嘉明・梶原康司・神田径・為栗健・風早竜之介・篠原宏志, 2018, 無人ヘリによる火口近傍観測の進展, 2018年 Conductivity Anomaly研究会論文集, 43-58
- Olah, L., H. K.M. Tanaka, T. Ohminato, D., 2018 Varga, High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, *Scientific Reports*, 8, 3207.
- Rouilleau, E., Y. Sano, N. Takahata, et al., 2017, Structural controls on fluid circulation at the Cavihue-Copahue Volcanic Complex (CCVC) geothermal area (Chile-Argentina), revealed by soil CO₂ and temperature, self-potential, and helium isotopes. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 341, 104-118.
- Shinohara, M., M. Ichihara, S. Sakai, T. Yamada, M. Takeo, H. Sugioka, Y. Nagaoka, A. Takagi, T. Morishita, T. Ono and A. Nishizawa, 2017, Continuous seismic monitoring of Nishinoshima volcano, Izu-Ogasawara, by using long-term ocean bottom seismometers. *Earth, Planets and Space*, 69:159.
- 高木朗充, 長岡優, 福井敬一, 安藤忍, 木村一洋, 土山博昭, 2017, 2013-2015年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告, 78, 72pp.
- 高木朗充, 宮城洋介, 小澤拓, 本多亮, 高橋浩晃, 2018, CG-5重力計の登山を伴う野外調査時における重力値安定性の基礎調査, 北海道大学地球物理学研究報告, 81., 1-10
- Takahashi, R., Yahata, M. (2018) Effects of subvolcanic hydrothermal systems on edifice collapses and phreatic eruptions at Tokachidake volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 352, 117-129.
- 高橋 良・岡崎紀俊・村山泰司・田村 慎・荻野 激・秋田藤夫, 2018, 十勝岳における温泉水の温度・化学成分の変化に基づいた火山活動評価, 月刊地球, 40-3, 156-162
- Takano, T., T. Nishimura, H. Nakahara, 2017, Seismic velocity changes concentrated at the shallow structure as inferred from correlation analyses of ambient noise during volcano deformation at Izu-Oshima, Japan. *J. Geophys. Res.*, 122, 6721-6736, DOI: 10.1002/2017JB014340.
- Takano, T., T. Nishimura, H. Nakahara, 2017, Seismic velocity changes concentrated at the shallow structure as inferred from correlation analyses of ambient noise during volcano deformation at Izu-Oshima, Japan. *J. Geophys. Res.*, 122, 6721-6736, DOI: 10.1002/2017JB014340.
- Tanaka, R., T. Hashimoto, N. Matsushima, and T. Ishido, 2017, Permeability-Control on Volcanic Hydrothermal System: Case Study for Mt. Tokachidake, Japan, Based on Numerical Simulation and Field Observation, *Earth, Planets and Space*, 69:39, DOI:10.1186/s40623-017-0623-5.
- Terada A. and T. Hashimoto, 2017, Variety and sustainability of volcanic lakes:

- Response to subaqueous thermal activity predicted by a numerical model, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2017JB014387.
- Toki, T., Y. Sano, N. Takahata, et al., 2017, Formation of gas discharging from Taketomi submarine hot spring off Ishigaki Island in the southern Ryukyu Islands, Japan. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 330, 24-35.
- Toki, T., N. Takahata, Y. Sano, et al., 2016, Geochemical characteristics of hydrothermal fluids at Hatoma Knoll in the southern Okinawa Trough. *Geochem. J.*, 50, 493-525.
- 内山高・山本真也・笠井明穂・野澤すみれ, 2017, 富士北東麓における地下水涵養機構と深部地下水流動系の解明, 山梨県富士山科学研究所年報, 20, 29-30.
- 内山高・吉本充宏・山本真也・常松佳恵・馬場章・笠井明穂・野澤すみれ, 2017, 富士山火山防災のための火山学的研究山梨県富士山科学研究所年報, 20, 31-33.
- 上嶋誠・相澤広記・塚本果織・神田径・関香織・木下貴裕・大湊隆雄・渡邊篤志, 2018, 2016熊本地震活動に伴ってえびのにおいて観測された電磁気変動について, 2018年 Conductivity Anomaly研究会論文集, 67-68
- Xu W., M. J. Wooster, T. Kaneko, J. He, T. Zhang, D. Fisher (2017): Major advances in geostationary fire radiative power (FRP) retrieval over Asia and Australia stemming from use of Himawari-8 AHI. *Remote Sensing of Environment*, 193, 138-149.
- 山本真也・中村高志・内山高, 2017, 富士山北麓, 河口湖で新たに見つかった湖底湧水, 日本水文科学会誌, 47, 49-59.
- Yoshimura, S., M. Nakamura, and H. Yurimoto, 2017, Presence of carbonate ions in high-SiO₂ rhyolite observed in fluid-melt equilibrium experiments, *Geochemical Journal*, 51, 251-262.

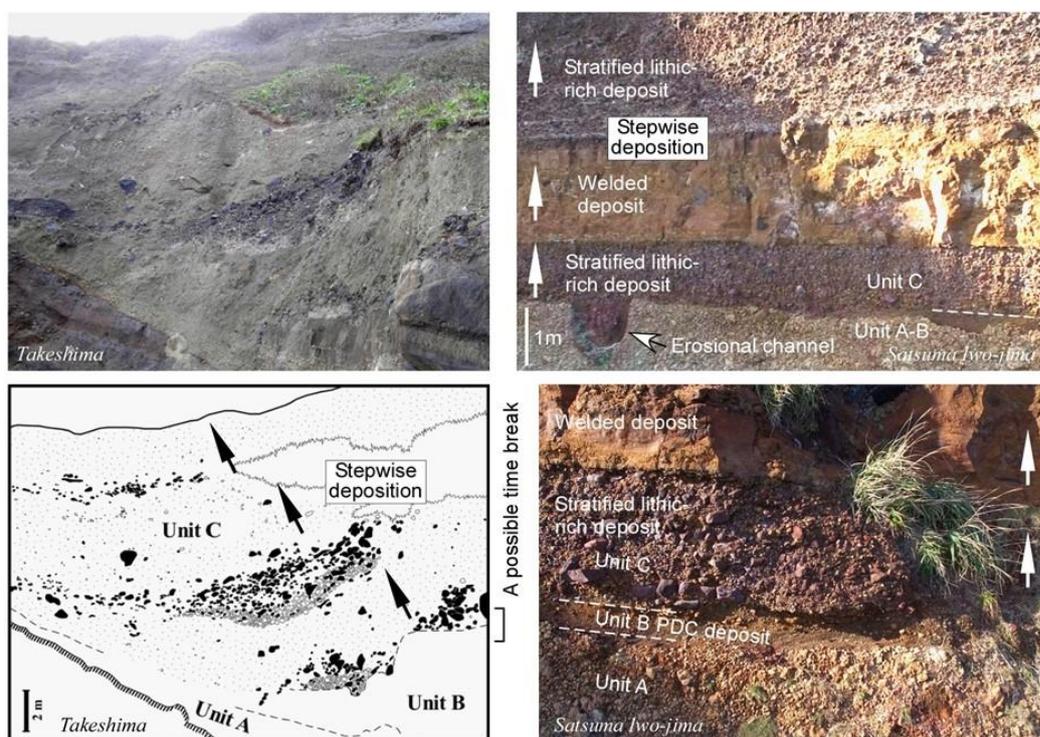


図1. 鬼界アカホヤ噴火噴出源近傍域における堆積物の状況（左：竹島，右：薩摩硫黄島）（北海道大学 [課題番号：1001]）

K-Ah噴火のステージ1（プリニー式噴火：Unit A-B）とステージ2（大規模火砕流：Unit C）の間に存在する時間間隙を示唆する地質痕跡の調査・解析を進めた。地表踏査及びドローンにより、Unit Bの溶結ブロックがUnit C基底部に取り込まれている構造や、非溶結のUnit B上面に発達した明瞭なチャンネル構造など、時間間隙を示す証拠の詳細が明らかになった。一方近傍のUnit Cは、礫質及び軽石質堆積物の互層からなる複数の堆積ユニットに区分でき、最上位の軽石質層が最も厚いことがわかった。このことから、単純に1回の大規模火砕物密度流が発生したわけではなく、段階的に火道の形成・拡大が進行し、その中で最大のものが鹿児島島本土や種子島・屋久島に到達したと考えられる。

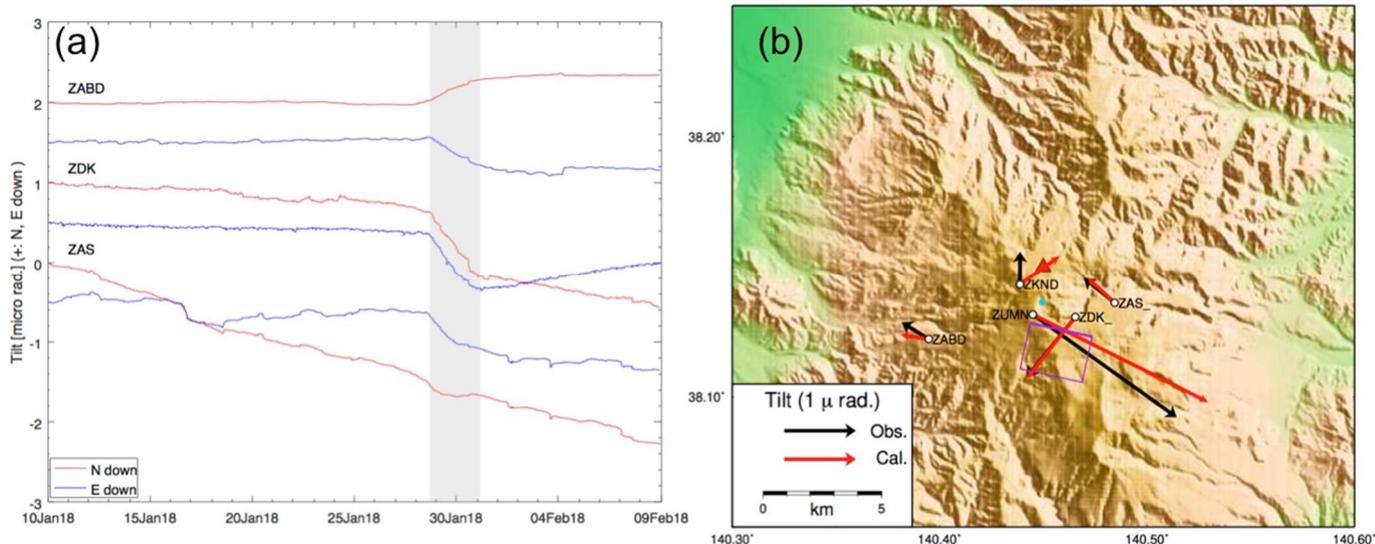


図2. (a) 蔵王山周辺の傾斜観測点における2018年1月10日～2月9日までの傾斜変化。赤が北下がり，青が東下がり成分を示す。(b) 1月28日から1月30日までの期間の傾斜変化（黒矢印）を用いて非線型逆解析によって推定された開口断層モデル（紫矩形，太線が上端）及びモデルから計算された傾斜変化（赤矢印）。開口断層の上端の深さは0.05 km，長さは2.7 km，幅は3.0 km，傾斜角は 49° ，開口量は0.14 mと推定された。ただし，推定には開口矩形断層1枚のみを仮定し，地形効果も考慮されておらず，暫定的な結果である。水色の丸印は御釜の位置を示す〔解析には気象庁坊平，熊野岳の傾斜データを使用した〕（東北大学〔課題番号：1202〕）。

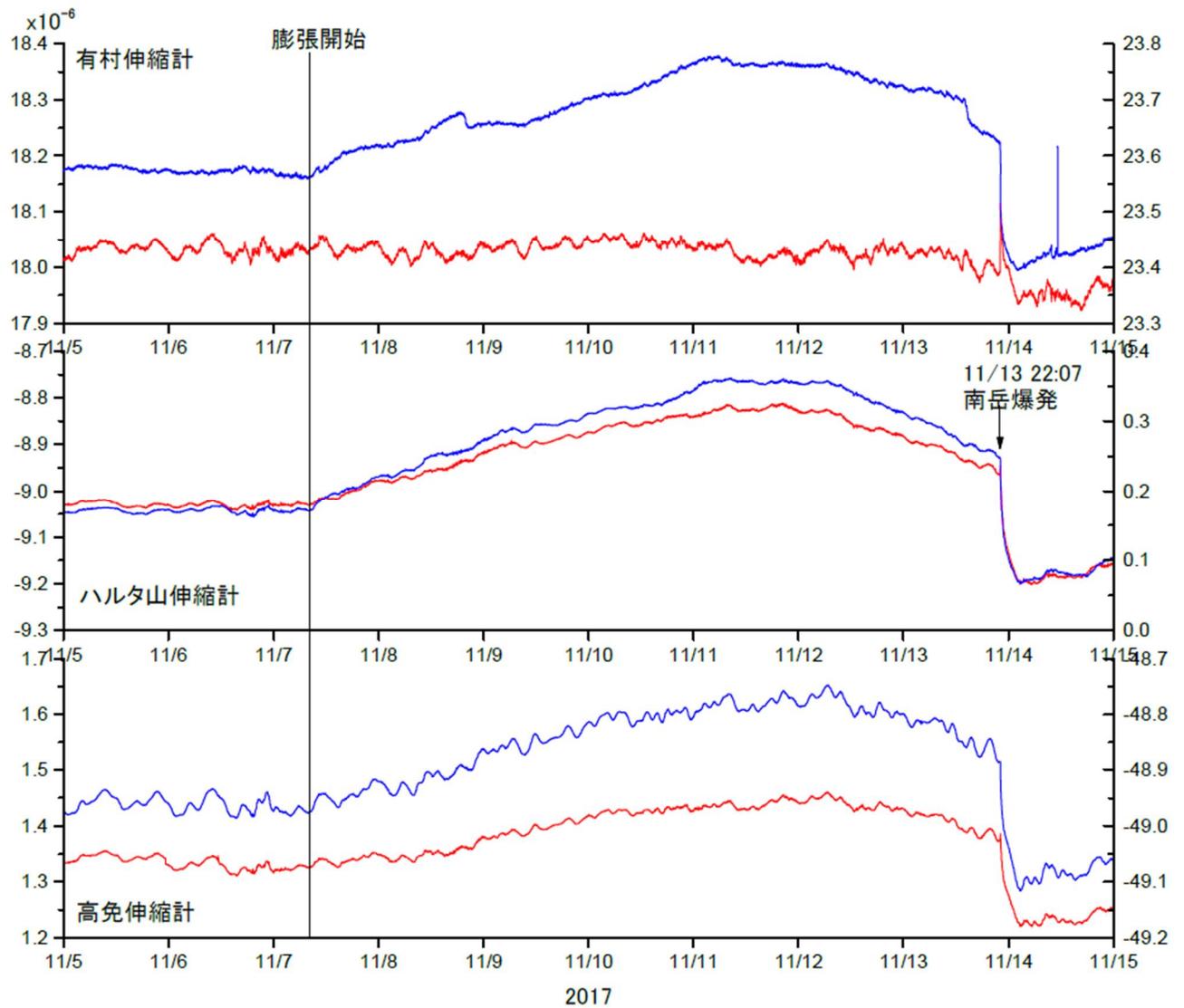


図3. 2017年11月13日の桜島南岳爆発に前後するひずみ変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1908]）。

11月7日から膨張が開始し、11月12日に収縮に反転したのち、11月13日22:07に爆発が南岳で発生した。

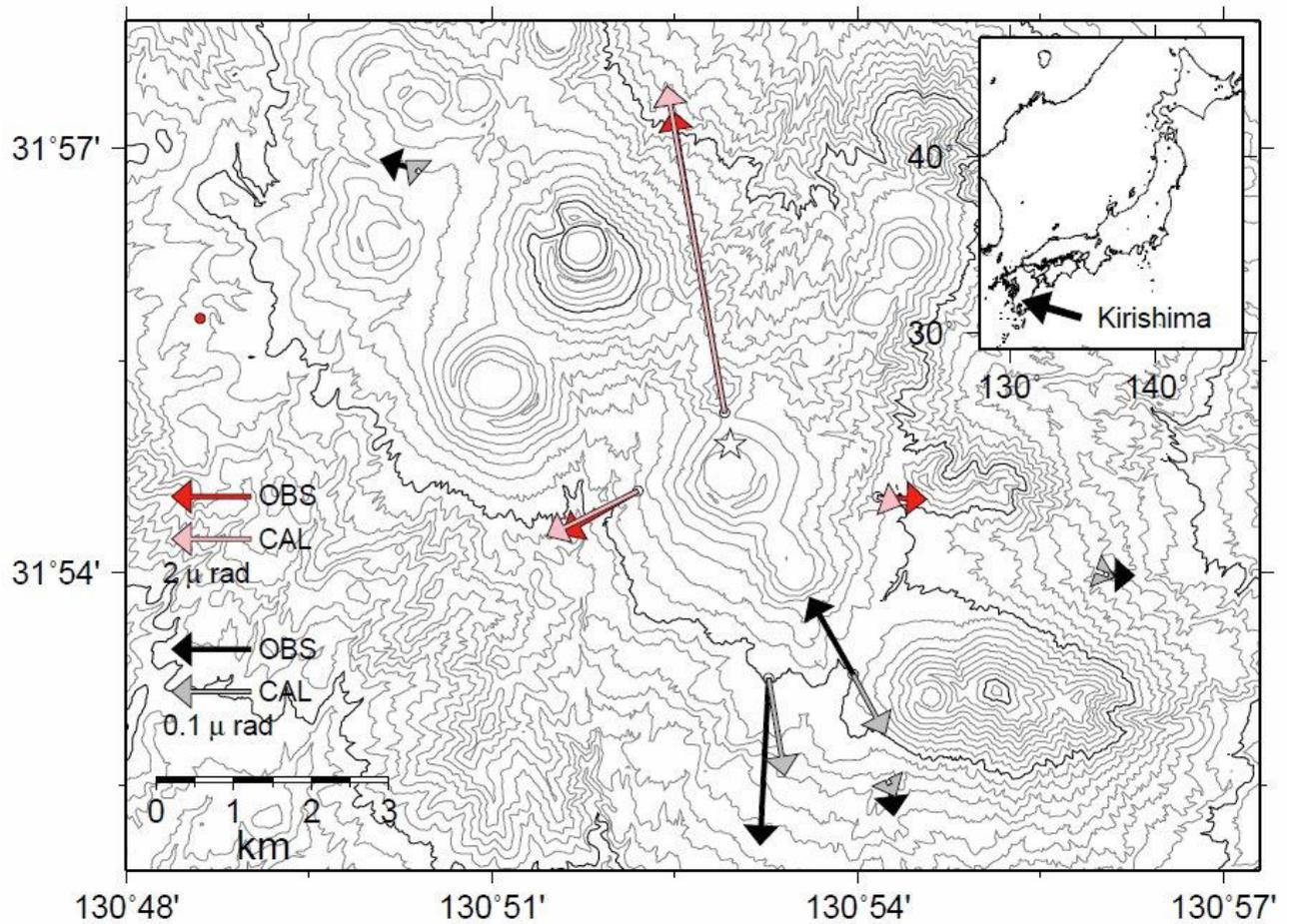


図4. 霧島新燃岳において2017年10月11日噴火に先行して観測された傾斜（東京大学地震研究所 [課題番号：1508]）。

茂木ソースを仮定すると、火口下1kmに置いた 10^4m^3 の膨張源が観測値をもっともよく説明する。星印が推定された膨張源の位置を表す。

全岩SiO₂ vs 斑晶量

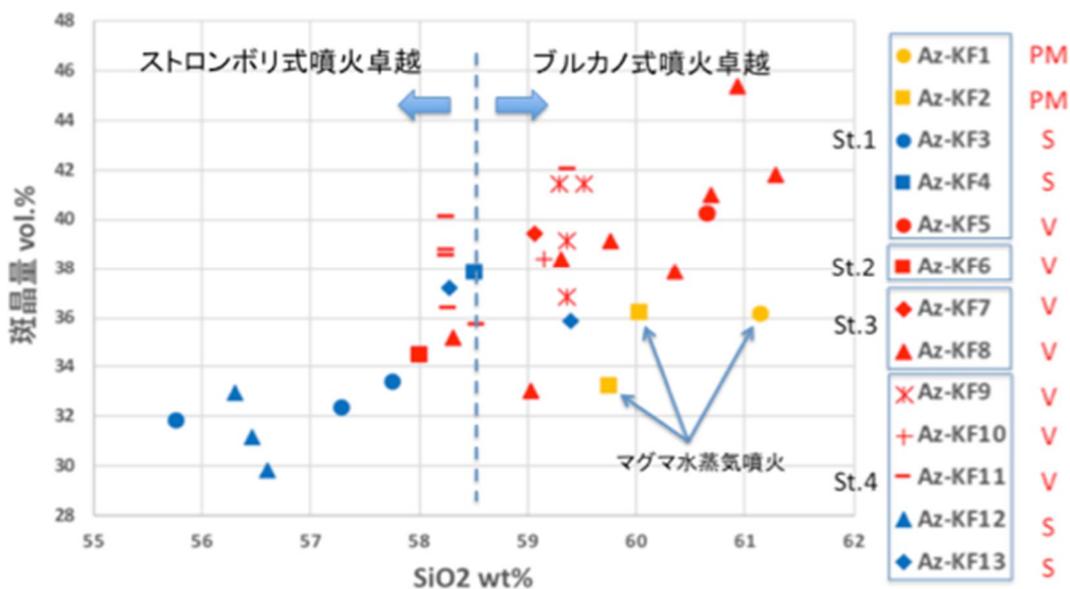


図5. 吾妻小富士形成噴火噴出物のSiO₂量と斑晶量の関係（北海道大学 [課題番号：1003]）。噴火様式との大まかな対応が認められる。

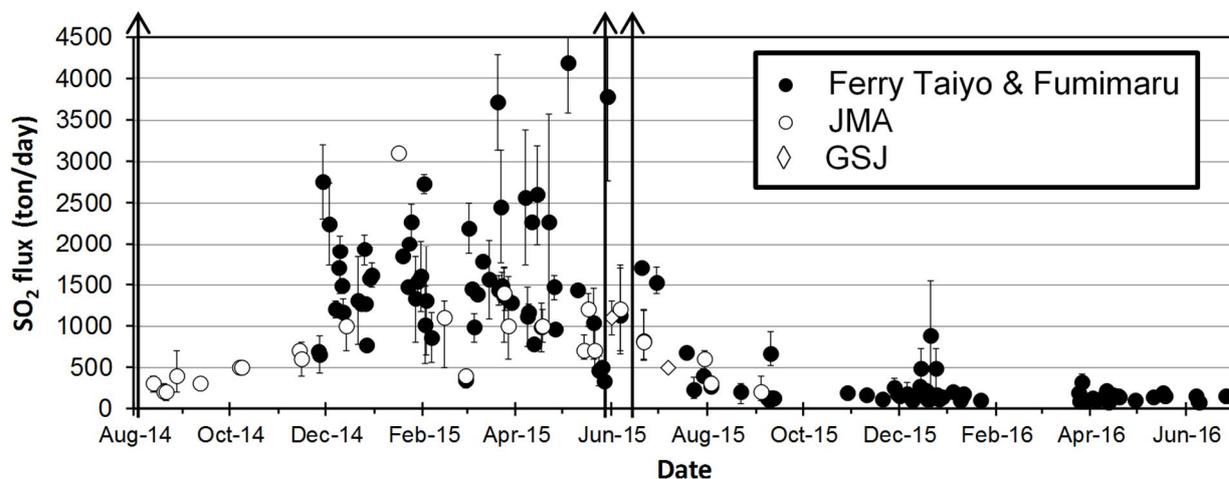


図6. 口永良部島の二酸化硫黄放出率推移(東京大学大学院理学研究科 [課題番号：1403])。

黒丸は、本計画で開発した簡易型トラバース測定装置を屋久島一口永良部島の定期船に乗せて繰り返し測定した値。3つの矢印は左から2014年8月3日，2015年5月29日，2015年6月18日の噴火を示している。

図-6 硫黄山周辺干渉図

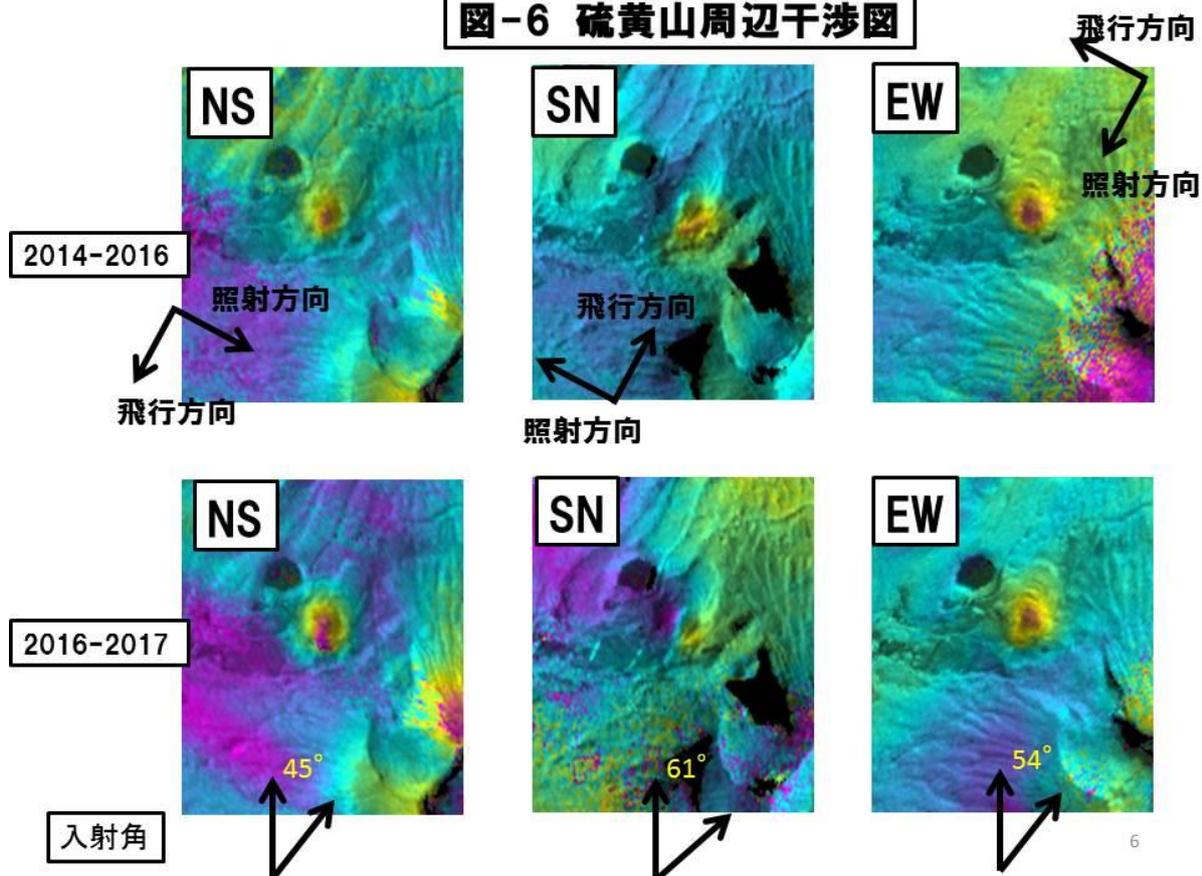


図 7. 航空機 SAR 観測でえられた硫黄山周辺干渉図（北海道大学 [課題番号：1008]）。軌道：NS,SN,EW の三方向，期間：2014-2016，2016，2017 の 2 時期）。硫黄山周辺では，期間を通じて膨張を示唆する膨張性の地殻変動が共通して現れている。