

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

桜島火山における火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測のための総合的観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山性流体の貫入・噴出の量やその時間変化率などに着目し、噴火先行現象、噴火発生、噴火規模・様式の変化など、先行現象から噴火終息までの一連の活動推移をモデル化する。現在のデータや試料だけでなく、過去のデータや資料・試料を解析・分析することで、大正噴火クラスの大規模噴火の事象分岐条件も含めた火山活動推移モデルの構築を進め、火山噴火予測手法の高度化をする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

桜島の火山活動推移モデルを構築し、事象分岐条件に各観測および調査から得られるパラメータを付与し、そして予測につなげるために、前計画研究課題「桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究」実施の観測の継続をする。5か年通じて以下の連続観測および調査を実施する。

- ・ 桜島および南九州における稠密連続地震観測
- ・ 桜島および南九州における稠密連続GNSS観測
- ・ 桜島における地殻変動連続観測

- ・MT連続観測
- ・絶対重力計もしくは超伝導重力計による重力連続観測
- ・光学式ディストロメータを用いた火山灰連続観測
- ・温泉ガス連続観測
- ・土壌二酸化炭素放出率観測
- ・火山灰の現地サンプリング調査と岩石組成および付着ガス成分分析
- ・二酸化硫黄放出率観測

また、5か年通じて以下の繰り返し観測を実施する。

- ・重力測定（毎年10月実施）
- ・水準測量（毎年11月実施）
- ・稠密GNSS観測（毎年11月実施）

そのほか、年度毎に以下の観測を実施する。

- ・令和元年（2019年）度においては、人工地震探査を12月第一週に実施する。桜島北部において2014年と2016年実施と同じ測線（爆破6カ所）にて、南側において2013年実施と同じ測線（爆破4カ所）にて探査を実施する。
- ・令和2年（2020年）度においては、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。
- ・令和3年（2021年）度においては、これまで継続してきた絶対重力連続観測から超伝導重力連続観測へ移行する。また、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。
- ・令和4年（2022年）度においては、2019年度実施の人工地震探査と同じ測線と爆破点に人工地震探査を行い、時間変化の検出を試みる。新しく開発する小型拡散放出二酸化炭素率測定装置の設置を行う。
- ・令和5年（2023年）度においては、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。拡散放出二酸化炭素率観測を実施する。

上記は観測実施項目であるが、1980年代からの過去データおよび、大正噴火および昭和噴火の当時の資料・試料を活用して、桜島の火山活動推移モデルを構築と事象分岐条件へのパラメータを付与に役立てる。

(8) 令和4年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

桜島南岳のブルカノ式噴火に伴う岩塊の最大到達距離について、空気振動観測によって評価を試みた。岩塊が火口から3.3kmにまで到達した2020年6月4日のイベントに代表されるように、岩塊到達距離の長いイベントの空振記録には最大振幅だけでなく増圧相の長周期化という特徴がある。この観測事実に基づいて、空振一回積分波形の最大値（ I_{max} ）と、岩塊最大到達距離から期待される最大鉛直初速度（ V_{max} ）の関係を調べた。 V_{max} が大きいイベントほど、 V_{max} / I_{max} の分布上限が低下するという特徴が見られる（図1）。この V_{max} / I_{max} の V_{max} に対する依存性について岩塊の運動方程式に基づいて検討すると、 V_{max} / I_{max} の減少は爆発深度の増加を示唆する。つまり、 V_{max} が大きいイベントは爆発深度が深い可能性がある。また V_{max} / I_{max} と V_{max} の分布の特徴によって、到達する最大岩塊距離を評価できる可能性がある。

繰り返し海底地震観測点は1点のみであるが、陸上の地震観測点データ（鹿児島大学、京都大学、気象庁、Hi-net）と併合処理することにより、若尊カルデラ域、桜島東方の黒神周辺、鹿児島湾北岸に近い国分付近の微小地震の検知能力が向上し、特に桜島の主マグマ溜まりに近接する若尊カルデラ域の初動メカニズム解の決定に効果がある。令和4年度も引き続き海底観測を行い、これらの活動域の中期的なモニタリングを継続した。そして、次のことが明らかになった。若尊カルデラ域はバックグラウンドの極微小地震活動にバースト活動が重畳する特徴をもつ。一方で国分付近では数は少ないものの、微小な構造的な地震が時折発生する。黒神周辺では震源決定される地震が無かった。桜島北方の主マグマ溜まりへのマグマ蓄積を反映すると考えられるGEONET観測点の組み合わせによる面積ひずみの時間変化と地震回数積算の時間変化は、いずれの領域も明瞭な相関は認められない（図2）。ただし、若尊カルデラ域のバースト活動を除いた中期的な地震数の増減は、面積ひずみ変化と相関する可能性も示唆された。また、地震のメカニズム解の特徴は次のとおりである。国分付近の解は、九州南部の内陸地震で求められる解と類似し、T軸の方位が安定している。九州南部の広域応力場と調和的である。P軸の方位の変化により strike slip, normal fault type が混在する。若尊カルデラ域は、normal fault

type が卓越し、P軸はほぼ上下方向を向き、T軸は水平に近い解が多い。M3程度の有感地震に相当する規模の地震の前後等、起震応力軸方位が短時間で明瞭に変化する場合がある。黒神周辺は、P・T軸の方位が安定し、時間変化がほとんど無い。P軸の方位はほぼ北を向き、北方に圧力源が存在することで説明可能と考えられる（図3）。

2022年6月にハルタ山観測室周辺において地震計アレイを展開して観測を開始した。また、2022年11月11日から12月9日に桜島の道路沿い光ファイバーを利用してDistributed Acoustic Sensingによる観測を実施した（図4）。これらの観測実施期間の12月8日に桜島の北東部と北西部にて薬量120 kgの発破を実施して、人工地震の観測に成功した。

火山噴火に数分程度先行する傾斜変動について、桜島を含む全国の活火山を対象に網羅的な調査を行った。傾斜変動の自動検知アルゴリズムを考案した。多くの火山で噴火の半数程度について先行する傾斜変動が検知された。桜島での結果を表1に示す。昭和火口と南岳で傾斜変動が先行する割合は同程度であり、爆発と非爆発を比べても爆発の方が僅かに割合が高い程度であった。

これまで2017年11月13日22:07に発生した南岳爆発に伴う傾斜ひずみ変化について、球状変動源に基づいた解析を行ってきた（Hotta and Iguchi, 2021, EPS）。しかしながら、球状変動源では説明しきれない傾斜変化もある。このことから、開口割れ目モデルについても検討を行った。噴火直後の22:07~22:10の傾斜ひずみ変化に関しては開口割れ目モデルのほうが妥当であり、南岳直下から細長く火道状に伸びる割れ目が14.6 cm閉口するものであった（図5）。

2022年11月に桜島内の水準測量路線（桜島西部山腹のハルタ山登山路線および北部山腹の北岳路線の2路線）において一等水準測量の繰返し観測を実施した。また、2021年度に新設した路線である鹿児島湾西部の大崎鼻GNSS点付設の水準点まで、および桜島北部の割石崎GNSS点付設の水準点までのそれぞれの枝線区間においても測量を行った。測量結果から、2021年11月~2022年11月の期間における地盤上下変動量を見積もった。得られた結果から、桜島中央部付近において、変動量は小さいものの地盤沈降（桜島西岸のS.17を基準として最大約-3.6mm）が生じていることが確認された（図6）。この期間、南岳直下のマグマ溜りにおいては減圧傾向であったと考えられる。また、桜島北岸に比較的近い北岳路線の水準点においてはほとんど地盤上下変動が認められなかった。この期間に、始良カルデラ地下のマグマ溜まりにおいて増圧があったとしてもそれほど顕著ではないことを示唆する。

2022年10月に桜島およびその周辺の重力点20点において相対重力のキャンペーン観測を実施した。この観測データを1998年以降の観測データとともに解析したところ、桜島島内の多くの重力点で重力値が増加していることが分かった（図7）。この重力増加は、桜島中央部の海拔下3500 mにおける 8.0×10^9 kg/yrの質量増加で再現できる（図8）。

2022年10月26日から28日にかけて、有村観測坑道において絶対重力観測を実行した。有村での絶対重力観測値は2010年から2015年頃まではおおむね一定値を取る傾向にあったが、2017年以降については年周変化に加えて有意な重力増の傾向があることが分かりつつあった。2022年の新たな測定値を加えても、この増加傾向（約+3.6マイクロガル/年）は変わらないことが確認された（図9）。この増加率は、地殻変動による効果では説明できないため、山体下で質量増加が生じている可能性を示唆する。

気象庁の観測によれば、噴火活動が比較的低調だった2022年6月まではSO₂放出率も1000 t/dと2012年頃の非常に活発な時期に比べて1/4程度と低い状態で推移していた。噴火活動が低調だったため、降灰は1月28日の1試料のみであるが、火山灰付着水溶性成分のCl/SO₄モル比は0.49と比較低い値であった（図10）。これらの結果は、この時期にはマグマが深部で停滞した状態であったことを示しており、噴火活動が低調だったことと整合している。7月頃からは噴火活動も活発な状態になり、SO₂放出率も2000 t/dまで上昇し11月まではこの状態が維持されていた。水溶性成分のCl/SO₄モル比は6月末には1.12, 1.29と活動の活発化に先行して上昇しており、マグマの上昇を捉えている（図10）。9月には0.5まで一旦低下したが、10月になると再び1.48, 1.12に上昇しており、再びマグマの上昇が起きたとみられる。12月にはSO₂放出率も1500 t/dと僅かに低下したが、水溶性成分のCl/SO₄モル比は顕著に低下した（図10）。特に、6日と7日ではわずか24時間でこの比が0.7程度から0.4まで半減していることは注目すべきである。ガス放出率と水溶性成分の分析結果からHClの放出率を求めると1月は概ね280 t/d程度であったが、噴火活動が活発だった7月や10月には1000 t/dを超えた。この期間にはマグマの上昇が起きたと考えられるが、SO₂放出率の上昇は顕著ではなく、上昇したマグマは少なかったとみられる。水溶性成分のCl/SO₄モル比は放出されるガスの“質”の変化であるが、SO₂放出率と組み合わせることで“量”の変化も捉えることができ、従って上昇するマグマの“量”の変化も地球物理学的観測と結びつけることで精度をあげることができる可能性がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

噴火災害誘因である火山岩塊の最大到達距離を空気振動から評価できる可能性を見出したことから、災害誘因予測への貢献している。始良カルデラおよび桜島の起震応力場の時間変化がみられないことから、この1年における桜島へのマグマ供給率はほぼ一定であったと推察される。桜島直下の圧力源は減圧傾向に引き続きあり、その一方で質量増加が継続していることから、噴火活動は昨年を引き続き脱ガス卓越が継続していることが明らかになった。一方、火山灰付着水溶性成分のCl/SO₄モル比の変化から、ここ1年の全体としてマグマが深部で停滞しているが、10月にマグマの上昇が示唆される変化が明らかになった。したがって、全体としては噴火活動は低調で、安定したマグマ供給、深部マグマ停滞と脱ガスが卓越する一方で、間欠的なマグマ上昇があったと推察される。このことから、火山活動推移モデルの構築と予測に対する重要な知見が得られたと言える。

(9) 令和4年度の成果に関連の深いもので、令和4年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

風間卓仁・大柳諒・山本圭吾・岡田和見・大島弘光・竹中悠亮・井口正人,2022,桜島火山における繰り返し相対重力測定(2021年10月および2022年3月),京都大学防災研究所年報,65B,67-76,査読無,謝辞有

風間卓仁・大柳諒・山本圭吾・岡田和見・大島弘光,2022,LaCoste & Romberg型相対重力計のリードアウト感度設定の標準化(2021年12月),北海道大学地球物理学研究報告,85,11-24,doi:10.14943/gbhu.85.11,査読無,謝辞有

宮町宏樹・小林励司・八木原寛,2022,2020年8月の若尊カルデラ海域の短時間群発地震活動,火山,67,471-478,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

山本圭吾・松島健・吉川慎・内田和也・井上寛之・園田忠臣・竹中悠亮・岡田和見・大柳諒・上土井歩佳・野辰之介・河野太亮・塚口正臣・満永大輔・田町勇氣・井上温史・西條祥・久保武史・大倉敬宏,2023,精密水準測量による桜島火山の地盤上下変動(2022年11月測量の結果),令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会,P08

若林環・風間卓仁,2022,相対重力計のスケールファクター検定における陸水重力擾乱補正の重要性,日本測地学会第138回講演会,53

大柳諒・風間卓仁・山本圭吾・風早竜之介・宮城磯治・井口正人,2022,1975年~1992年の相対重力データで明らかになった桜島火山直下の質量増加:火山ガス観測データに基づく考察,日本測地学会第138回講演会,58

Maeda, Y.,2022,A Systematic search for slow-to-fast inflation before volcanic eruptions: Examples from Japan and Alaska,AGU Fall Meeting

(10) 令和4年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：地震：DAS観測

概要：桜島一周ルートにてDistributed Acoustic Sensingによる地震観測を行った。実施者：東北大学、京都大学、九州大学

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.567 130.6176

調査・観測期間：2022/11/11-2022/12/9

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：構造：微動探査・弾性波探査・速度検層

概要：薬量120kgの発破を桜島の2箇所にて実施した。実施者：京都大学、気象庁

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.6182 130.6774

調査・観測期間：2022/12/8-2022/12/8

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：水準測量

概要：実施者：京都大学・九州大学・北海道大学・気象庁

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.58983 130.60127

調査・観測期間：2022/11/7-2022/11/18

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

項目：火山：地殻変動：重力測定

概要：キャンペーン相対重力観測。実施者：京都大学、北海道大学

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.58983 130.60127

調査・観測期間：2022/10/24-2022/10/29

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

(11) 令和5年度実施計画の概要：

海底地震繰り返し観測を継続し、蓄積された観測データから海域の地震波速度構造を改善し、地震活動の解析を行う。火山噴火に数分程度先行する傾斜変動について、桜島を含む国内火山での解析結果を論文にまとめる。2017年11月13日南岳爆発全体で生じた一連の傾斜ひずみ変化に対して変動源の再検討を行う。ほかの噴火事例についても検討する。2023年11月に桜島において水準測量を行う予定である。2023年10月と2024年3月に相対重力のキャンペーン観測を実施し、桜島島内の重力時間変化を監視する。相対重力観測時に絶対重力観測を行い、両観測の整合性や地殻変動現象との対応を調査し、重力増加傾向と桜島のマグマ供給系との対応関係を理解する。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中道治久（京都大学防災研究所）、井口正人（京都大学防災研究所）、為栗健（京都大学防災研究所）、山本圭吾（京都大学防災研究所）、大見士朗（京都大学防災研究所）、山田大志（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学大学院理学研究院）、西村太志（東北大学大学院理学研究科）、山本希（東北大学大学院理学研究科）、太田雄策（東北大学大学院理学研究科）、森俊哉（東京大学大学院理学系研究科）、今西祐一（東京大学地震研究所）、大湊隆雄（東京大学地震研究所）、西山竜一（東京大学地震研究所）、野上健治（東京工業大学理学院）、神田径（東京工業大学理学院）、堀田耕平（富山大学都市デザイン学部）、前田裕太（名古屋大学大学院環境学研究所）、大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）、横尾亮彦（京都大学大学院理学研究科）、風間卓仁（京都大学大学院理学研究科）、松島健（九州大学大学院理学研究院）、相澤広記（九州大学大学院理学研究院）、中尾茂（鹿児島大学地震火山地域防災センター）、八木原寛（鹿児島大学地震火山地域防災センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/svo/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中道治久

所属：京都大学防災研究所火山活動研究センター

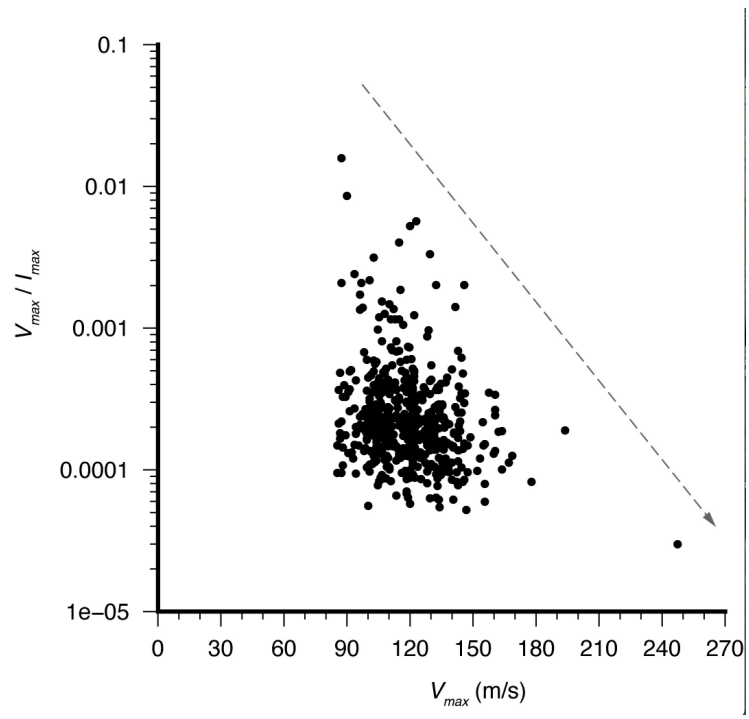


図1
 V_{max} / I_{max} と V_{max} の関係

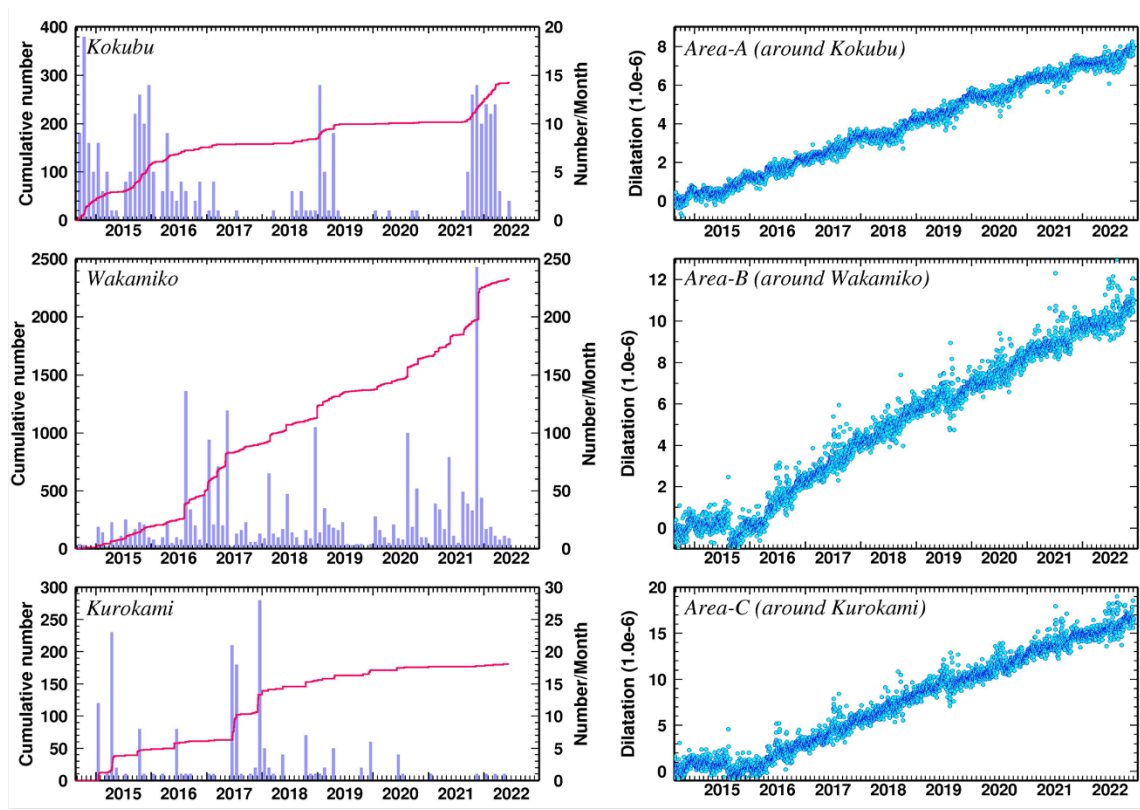
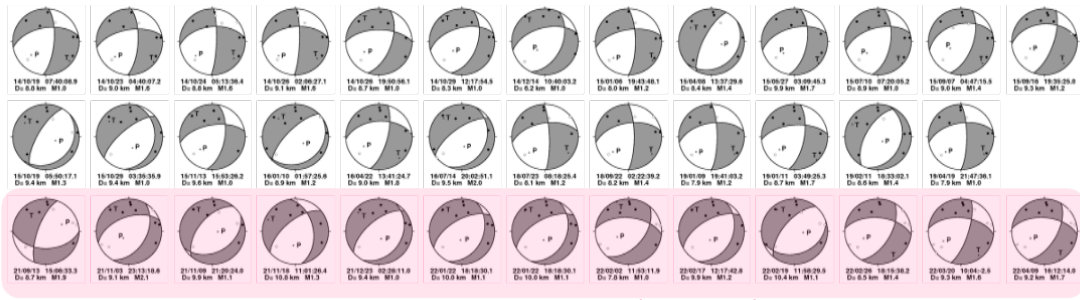


図2
 国分、若尊、黒神領域における地震の発生頻度（左）と面積歪み（右）



2021/06 – 2022/05

Kokubu

Wakamiko



2021/06 – 2022/05

Kurokami

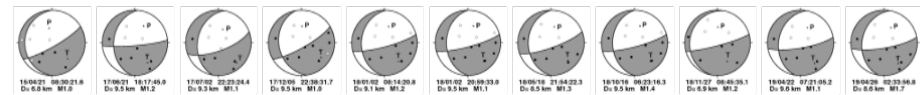


図3

国分、若尊、黒神領域における地震のメカニズム解



図4
地震計アレイ、Distributed Acoustic Sensingの光ファイバーのルート、発破実施の位置

	解析した噴火数	先行する傾斜変動が検知された噴火数	傾斜変動の先行割合
昭和火口(爆発)	3045	1577	52%
昭和火口(非爆発)	1330	599	45%
南岳(爆発)	717	385	54%
南岳(非爆発)	498	223	45%
南岳A火口	64	28	44%
南岳B火口	285	145	51%

表1
解析した噴火数、先行する傾斜変動が検知された噴火数、その割合。波形入手可能かつ前の噴火からの経過時間が1時間以上のものを対象にした。

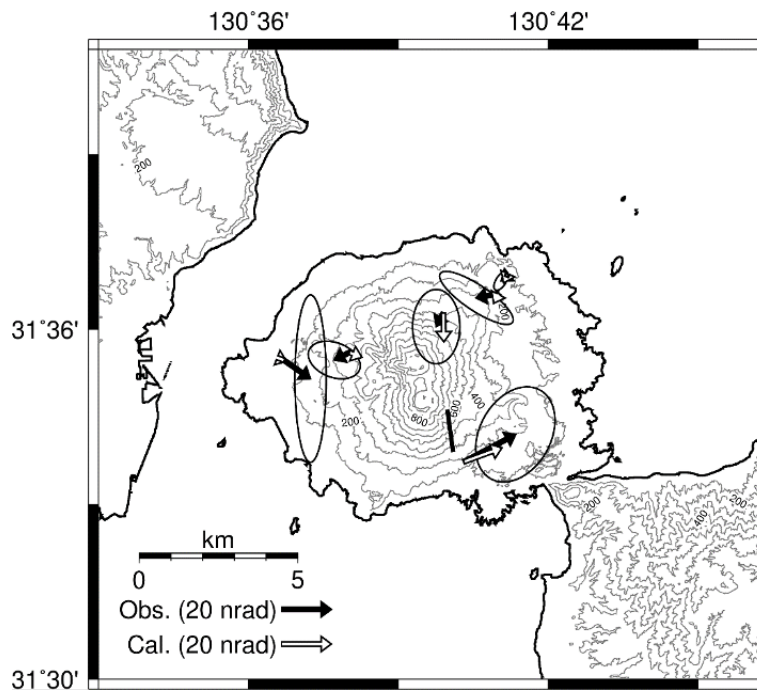


図5

2017年11月13日南岳爆発直後（22:07～22:10）の傾斜ひずみ変化に対して得られた開口割れ目（太線；下側が上端）。長さ5.5 m，幅2720 m，傾斜角60°，走向N262°Eであり，14.6 cmの閉口であった。ベクトルは黒が傾斜（沈降方向）の観測値，白が計算値を示す。

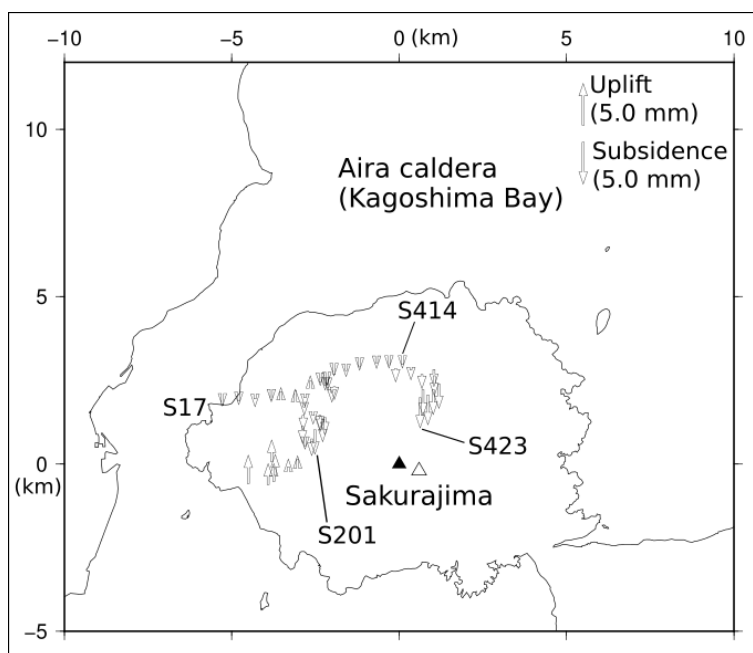


図6

桜島西岸のS.17を基準点とした、2021年11月～2022年11月の期間の各水準点における地盤上下変動量。黒三角および白三角は、それぞれ南岳火口および昭和火口の位置を示す。

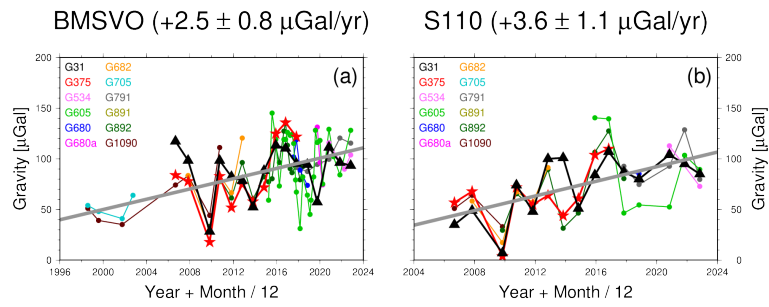


図7
桜島中央部のBMSVO重力点およびS110重力点における重力時間変化。

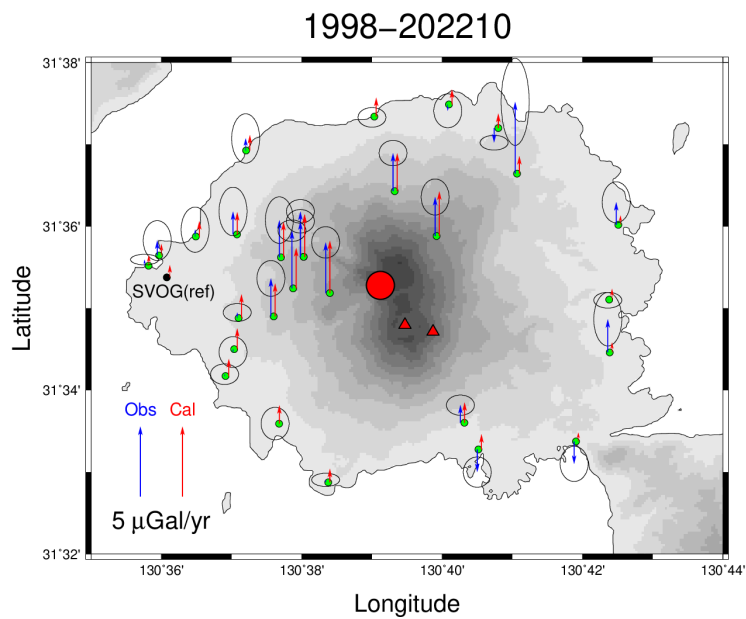


図8
桜島島内の重力点における重力変化速度の空間分布。

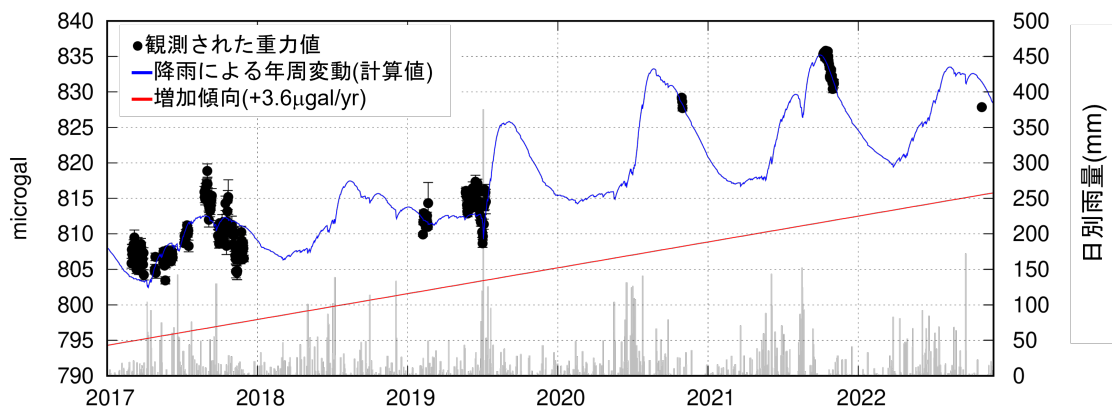


図9
2017年から2022年にかけての有村観測坑道での絶対重力値の変動。降雨による年周変動に加えて、+3.6マイクロガル／年の重力増加傾向が見られる。

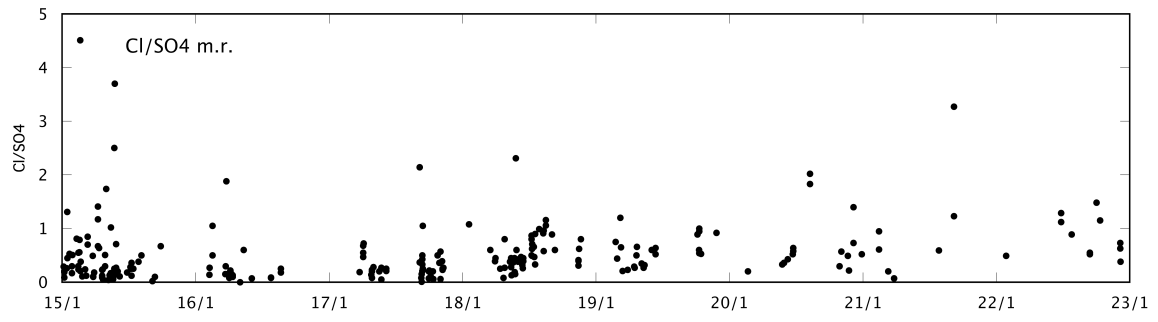


図10
2015年から2022年の火山灰付着水溶性成分のCl/SO₄モル比