

(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5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年2月8日に約5年ぶりに桜島の昭和火口において噴火が再開し、その後、時折噴火したが、2023年8月4日の噴火が直近で最後の昭和火口の噴火であった。昭和火口の噴火再開に前駆して、昭和火口からの噴気の増加と火山性微動の発生と振幅の増加が2023年1月から噴火再開の直前において見られた。噴火の前駆現象は火山活動推移の事象分岐判断において重要である。そこで、昭和火口の再噴火に先行した微動についてアレイ解析とスペクトル解析を行った。アレイ解析から微動は火口近傍の極浅部（海拔1.5 kmよりも浅い震源）からのS波か、表面波であり、微動源の位置は安定していることが分かった（図1）。そして、スペクトル解析から、(A) 短時間のうちに、モノクロ微動、複数の周波数ピークを持つ非モノクロ微動が独立に発生したこと。(B) 2023年1月15日から再噴火まで微動のピーク周波数は消長を繰り返しながらも約1.0, 1.3, 1.7 Hzで安定して継続した（図2）ことが分かった。Girona et al. (2019) のモデルを適用することで、火道の平均放出ガスフラックスの微小な変化によって特徴(A)を説明できることが分かった。また、それぞれのピーク周波数を励起する個別のガス透過キャップとガスポケットの組み合わせが3組存在し、それらが同時または個別に振動することで、特徴(B)が説明される。昭和火口の再噴火でこれらの組み合わせは消失し、一連の火山性微動は発生しなくなったと考えられる。

2014年8月から鹿児島湾奥部にて毎年の繰り返し海底地震観測を行ってきた。若尊カルデラ域の地震検知能力の向上し、若尊カルデラ域で年に2～3回前後の不規則かつ短時間の顕著なバースト活動とバックグラウンドの地震活動の存在が明らかになった。2022年6月～2023年8月においてバースト活動に比べて地震数は少ないがバックグラウンドよりも地震活動度が高かった（図3）。GEONETデータから当該領域の面積歪の変化は、始良カルデラ域の膨張を示すが、若尊カルデラ域の地震活動の変化に伴った面積歪の変化は見られなかった。若尊カルデラ域の地震のメカニズム解は、正断層型が卓越している（図4）。

噴火前傾斜変動の網羅的検知を昨年度から継続し、先行時間や継続時間が長い傾斜変動ほど振幅が

大きい傾向にあること、桜島火山においてはボアホールの観測点の方が地表の観測点よりも傾斜変動の検知率が高いこと明らかにした(図5)。

2017年11月13日南岳の爆発に伴う傾斜ひずみ変化について、開口割れ目モデルを用いた検討を昨年度から行っている。22:07~24:00の高免観測坑道を除く一連の傾斜ひずみ変化に対して2つの開口割れ目モデルを適用したところ、南岳直下から細長く火道状に伸びる割れ目と、深さ1.5 km付近に水平に北岳から南岳にまたがって広がるシル状の構造が得られ、前者が開口、後者が閉口となった。このモデルは高免観測坑道のひずみ変化は説明できないものの傾斜変化は説明することができる(図6)。

2023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、2022年11月(前回測量)~2023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、桜島北岸に近い北岳路線の水準点において、地盤隆起(桜島西岸のS.17を基準として最大約5.8 mm)が生じていることが確認された(図7)。この期間、桜島北部あるいは始良カルデラ地下のマグマ溜まりにおいてマグマの貯留が進行していることを示していると考えられる。一方で、桜島中央部に比較的近い水準点においては、僅かに地盤沈降であることが確認された。南岳直下のマグマ溜りにおいては、この期間、減圧傾向ではあるもののその減圧量はそれほど大きくはないことが示唆される。

2023年10月30日~11月8日に桜島火山およびその周辺でキャンペーン相対重力測定を実施した。今年度は重力変化の空間パターンをより詳細に把握するため、従来の測定点(19点)よりも多い計27点で測定を実施した。本測定で得られた重力値を1998年以降の重力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経年的に増加していることが分かった(図8)。この重力増加は、桜島中央部の海拔下2500 mにおける 6.0×10^9 kg/年の質量増加で説明できる(図9)。桜島南麓の有村観測坑道において10月に絶対重力観測を行い、前年同時期との比較で+5.4マイクロガルの重力増加が検出された(図10)。

ブルカノ式噴火に伴う岩塊最大到達距離から推定される放出初速度(V_{\max} m/s)と、空振増圧相の一回積分最大値(I_{\max} Pa·s)の関係を、次元衝撃波管問題を応用した岩塊射出モデル(Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2010)に基づいて検討した。図11aの分布は、 V_{\max} の増加には噴火前の過剰圧P(Pa)と岩塊射出時定数を反映する爆発深度d(m)双方の増大が対応することを表す。 I_{\max} に対する V_{\max} の上限式($V_{\max}=31I_{\max}^{0.14}$)は、岩塊射出モデルの運動方程式に基づく $V_{\max}=2.47P^{0.28}$ と換算される。この式の性質をWilson(1980)による P - V_{\max} の関係式によって検討すると、 V_{\max} の増加にはPと揮発性成分量(nは揮発性成分体積分率)の双方の増大に対応する(図11b)。つまり、 V_{\max} が大きいイベントでは、Pだけでなく揮発性成分による岩塊加速の寄与が大きいことを強く示唆する。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

火山噴火に先行する傾斜変動を機械的に検知するアルゴリズムを開発した。同アルゴリズムに基づいて桜島を含む全国の活火山を対象に噴火前傾斜変動の有無を網羅的に調査した。その結果、多くの火山において半数程度の噴火に傾斜変動が先行することが明らかになった。桜島火山においては爆発的噴火の方が非爆発的噴火よりも傾斜変動の先行率がやや高いことを見出した。

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検討を行ってきた。球状変動源に基づいた解析を行ったところ、南岳下だけでなく中長期的に膨張と収縮を繰り返すとされてきた北岳下の変動源も変動を引き起こしていることが分かった。しかしながら、球状変動源では説明しきれていない傾斜変化もあることから、開口割れ目モデルについても検討を行った。その結果、南岳直下から細長く火道状に伸びる割れ目と、深さ1.5 km付近に水平なシル状の構造が得られた。

桜島火山およびその周辺において、年2~3回の頻度でキャンペーン相対重力測定を実施した。従来の重力測定点は19点であったが、重力変化の空間パターンをより詳細に把握するため、2023年度からは計27点で測定を実施した。また、1990年代以降に測定されていた重力データを整理することで、1998年~2023年の長期にわたる重力時空間変化を把握できるようになった。その結果、この期間には桜島島内の重力値が最大+4.3 microGal/年の速度で経年的に増加していることが分かった。この重力増加は、桜島中央部の海拔下2500 mにおける 6.0×10^9 kg/年の質量増加で再現できる。

桜島有村観測坑道において1年ごとに絶対重力観測を実行した。また、2018-2019年には連続観測を行い、豪雨時の降水に伴う重力変動の傾向を把握することに成功した。噴火回数が低調であった本課題期間(2018年以降)においては、重力値は約3.4 microGal/年のペースで増加を続けていること

が分かった。マグマだまりの膨張・収縮といった力学的過程を考慮するだけではこの重力増を説明することはできない。そのため、重力観測はマグマの脱ガスに伴う密度増加などの物性的過程を捉えている可能性があることが分かった。

・「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、ここ数年の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。

したがって、全体として噴火活動は低調で、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。また、2023年2月から8月の昭和火口噴火の活動に前駆した2023年1月からの火口からの活発な噴気活動と顕著な火山性は火道浅部への新しいマグマ上昇と、ガスだまりの形成と振動を示唆し、そして噴火開始後に微動が止まったことからガス溜まりが破壊されたと解釈され、噴火事象分岐の理解が進んだ。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5年度の成果に関連の深いもので、令和5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,2023,桜島火山における繰り返し相対重力測定(2022年10月および2023年2~3月),京都大学防災研究所年報,66B,67-75,査読無,謝辞有

Maeda, Y.,2023,A systematic survey for precursory tilt changes at all monitored eruptions in Japan,J. Volcanol. Geotherm. Res.,439,107831,doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107831,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

八木原 寛・仲谷幸浩・平野舟一郎・為栗 健・中道治久・井口正人,2023,繰り返し海底地震観測による桜島北方海域下の微小VT地震活動,日本火山学会2023年秋季大会,P14

(10) 令和5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。

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：2023/11/20-2023/12/21

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：

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：2023/11/6-2023/11/17

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

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：2023/10/30-2023/11/8

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：絶対重力観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市有村 31.56006 130.67217

調査・観測期間：昨年度より継続-2023/10/31

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) 次期計画における課題名：

火山噴出物による災害の軽減のための総合的研究

(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科）、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

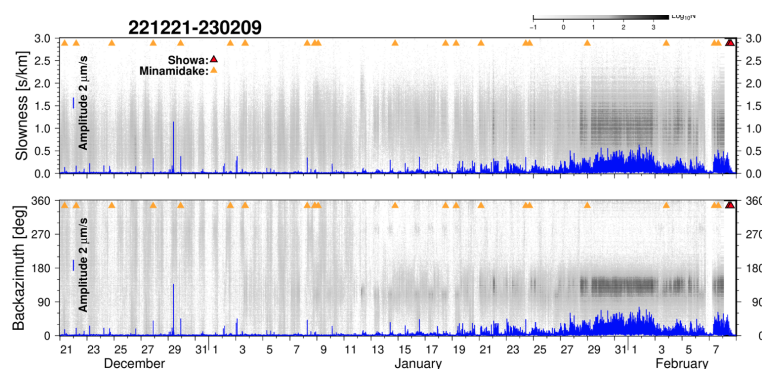


図 1

2022年12月21日から2023年2月7日までの地震計アレイ解析結果。センブランス値が0.45以上の時間窓の時間、スローネス、到来方向の頻度分布。昭和火口の噴火は2023年2月8日に開始。北から120°東の方向がアレイから火口の方向である。

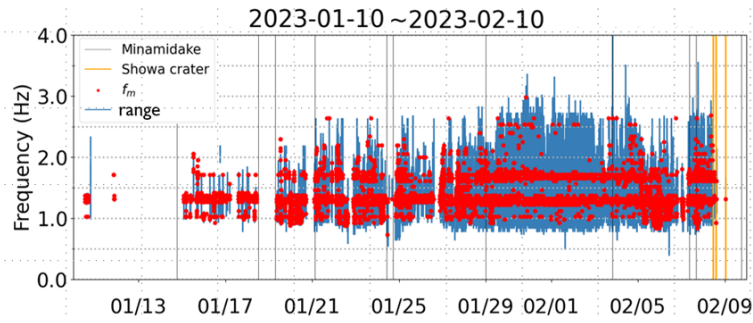


図 2

2023年1月10日から2月10日までのモノクロ微動のピーク周波数(f_m)と非モノクロ微動の周波数幅(range)の変化。●は f_m 、青い実線はrangeを示す。黒色、オレンジ色の縦実線はそれぞれ南岳山頂火口、昭和火口での噴火・爆発の日時を示す。

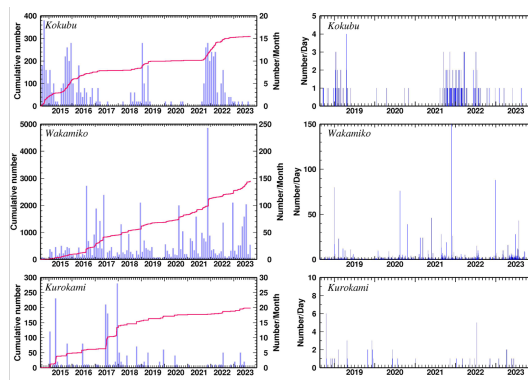


図 3

国分、若尊、黒神領域における地震の発生頻度

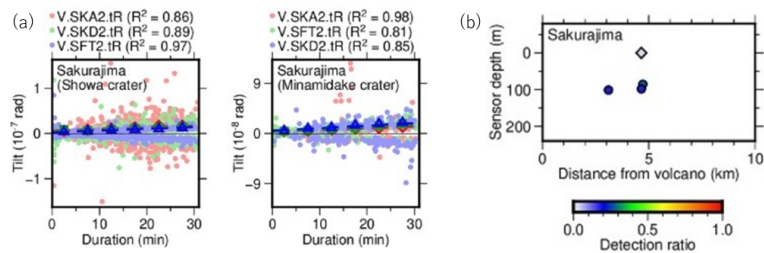


図 5

(a)傾斜変動の継続時間と振幅の関係、(b)観測点別の傾斜変動検知率 (Maeda, 2023)。

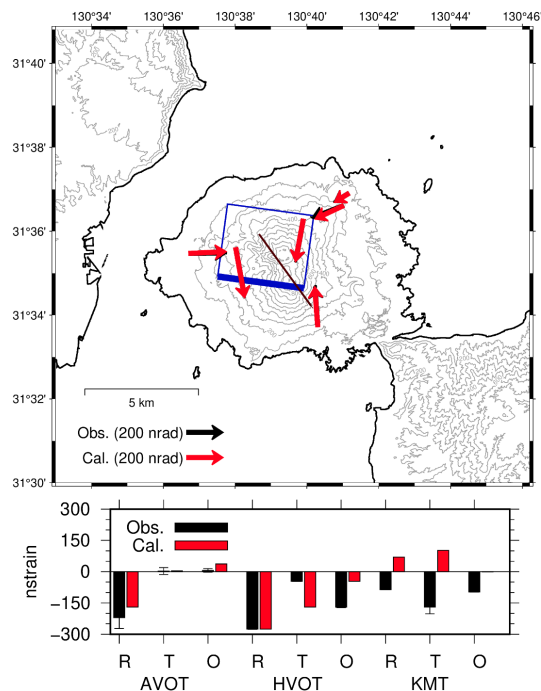


図 6

(上) 2017年11月13日22:07~24:00の傾斜ひずみ変化に対して得られた割れ目(茶色の線, 下側が上端)とシル(青色の長方形, 太線が上端)。ベクトルは黒が傾斜(沈降方向)の観測値、赤が計算値を示す。
 (下) ひずみの観測値(黒)と計算値(赤)の比較。

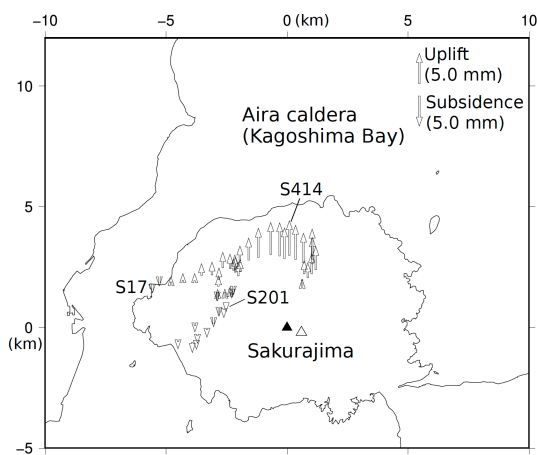


図 7

桜島西岸のS.17を基準点とした、2022年11月~2023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。

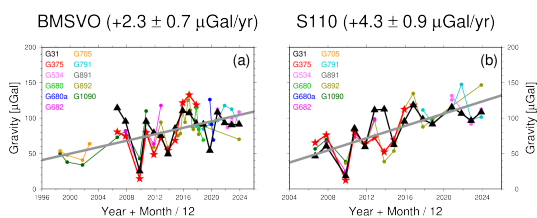


図 8

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。

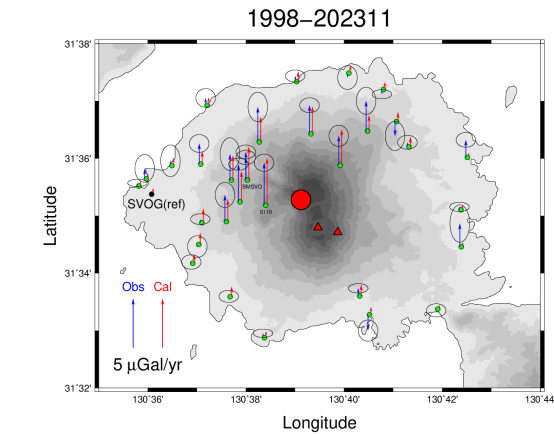


図 9

桜島島内の重力点における重力変化速度の空間分布、および推定された質量変動源の位置。

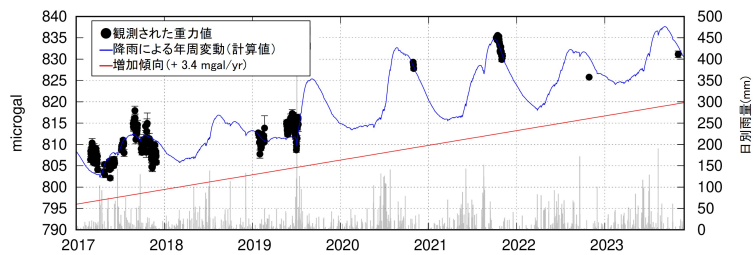


図 1 0

2017年から2023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、+3.4 microGal/年の重力増加傾向が見られた。

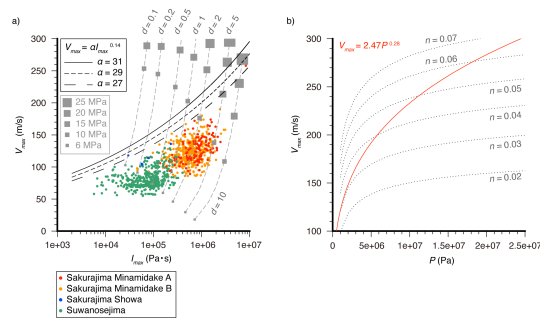


図 1 1

(a) 岩塊最大到達距離から換算される V_{max} と I_{max} の分布。灰色破線は岩塊射出モデル (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2010) から期待されるd毎の V_{max} と圧力積分の関係。(b) Wilson (1980)による岩塊放出モデル (点線) と (a)における I_{max} に対する V_{max} の上限式から期待される P と V_{max} の関係 (赤線)。