

2. 研究成果の説明

2. 1 火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山噴火の予測技術の開発

「火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	共同実施機関	准教授 技術専門職員	安田 敦 外西奈津美
学校法人早稲田大学	参加機関	准教授 修士 2 年 修士 2 年 修士 2 年 学部 6 年 学部 4 年 学部 4 年 学部 4 年	鈴木由希 岡野百花 木谷悟郎 丸山照頼 小野貴史 小峯麻由 鈴木康平 安河内健人
学校法人常葉大学	参加機関	教授 学部 3 年 学部 3 年 学部 2 年 学部 2 年 学部 2 年 学部 2 年	嶋野岳人 佐橋麗奈 太田美琴 土岐一創 佐々木萌 入月音羽 山岸寛弥
国立大学法人静岡大学	参加機関	准教授	石橋秀巳
国立大学法人熊本大学	参加機関	教授 博士 3 年	長谷中利昭 川口允孝
国立大学法人東北大学	参加機関	教授 助教 助教 博士 3 年 修士 2 年 修士 2 年 修士 2 年 修士 1 年	中村美千彦 無尽真弓 新谷直己 藤田和果奈 安川宙葵 荒尾眞成 津島直哉 阿部俊輔

		修士 1 年	多田峻真
国立研究開発法人産業技術総合研究所	参加機関	主任研究員 主任研究員	東宮昭彦 宮城磯治
山梨県富士山科学研究所	協力機関	主任研究員	吉本充宏

(c) 業務の目的

火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発のために、以下の 5 項目を 10 カ年で実施する。(ア) 効率良くかつ正確に火山噴出物を分析できる分析装置環境を整備する。

(イ) 分析データから様々な物理量を迅速に取り出すためのデータ解析環境を整備する。

(ウ) 分析データや解析結果を随時取り出して再利用可能とするようなデータ保存環境を整備し、データの有効利用を促進する。加えて、主要な火山噴火については噴出物や噴火の特徴を一覧できるカタログ機能を付加する。上記の分析及び解析環境（以下、「分析・解析プラットフォーム」という。）を使って、(エ) 噴火の過程が既知である歴史時代の噴火の噴出物の解析を 11 火山についておこない、深度（圧力）・温度・含水量といったマグマ溜りの状態、噴火に先立つマグマ混合から噴火までのタイムスケール、マグマの上昇開始から噴火開始までのタイムスケールを明らかにするとともに、噴出物の特徴や噴出物から推定される噴火の特徴を概観できるカタログを作成し公開する。得られたデータを整理し、噴火事象分岐を判断する可能性の検討をおこなう。(オ) 分析・解析プラットフォームを広く火山研究者や学生に開放するための利用環境の整備をおこなう。

(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：成果目標項目（ア）に対応して、火山噴出物の分析にすぐれた、迅速・高精度・高分解能のフィールドエミッション型電子線マイクロプローブ装置を設置し、装置の立ち上げ作業を実施した。項目（イ）に対して、解析用 PC に整備する解析プログラムの選定と解析用 PC の立ち上げをおこなった。項目（ウ）に対して、データサーバーの仕様について課題参加者間で協議をおこなった。項目（エ）に対して、噴火の鍵となる要素の抽出に適した 11 火山を選び、先行研究を参照しつつそれら火山についての現状での理解を整理し、今後必要となる作業の検討をおこなった。いくつかの火山については、試料採取と分析を開始した。

2) 平成 29 年度：成果目標項目（ア）に対しては、分析効率の向上のためエネルギー分散型（EDS）検出器を EPMA 装置に追加した。前年度に引き続き、最適な分析条件と分析手順の確立について作業し、12 kV および 15 kV の加速電圧で標準的な ZAF 補正法定量分析がおこなえるようにした。項目（イ）に対しては、相同定、グラフの自動作成、反射電子線像の自動処理等の解析用プログラムを作成し、分析から解析までを連続して実行できる PC 環境を構築した。項目（ウ）に対しては、分析データから公開するデータの仕様を満たすような必要項目を、自動的に抽出する環境を構築する作業をおこなった。項目（エ）に対しては、有珠山、榛名山、富士山、伊豆大島、阿蘇山、桜島、霧島山、諏訪之瀬島につ

いて火山噴出物の解析に着手し、噴火事象分岐の鍵となる要素として着目しているマグマ溜り環境やマグマの上昇速度についてデータを集めるとともに、解析方法についての検討もおこなった。

3) 平成 30 年度：成果目標項目（ア）に対しては、分析効率の向上のため分光器 1 台を EPMA 装置に追加した。前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努めた。項目（イ）と（ウ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなった。項目（エ）に対しては、該当する火山について、主としてマグマの上昇速度を明らかにするためにマグマ溜り環境やマグマの上昇速度についてのデータを収集した。加えて、噴火の特徴を噴火発生時に迅速に把握するための手法開発を継続し、桜島と霧島新燃岳での試験を実施した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：成果目標項目（ア）に対して、分析効率の向上のため分光器 1 台を EPMA 装置に追加した。前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立のための作業をおこない、定量分析データの安定性向上をはかった。項目（イ）と（ウ）に対しては、画像データの解析プログラムの作成と取得した画像のデータベース化を進めた。ウェブブラウザによって、これまでに取得した画像データを一覧することができるようにした。項目（エ）に対しては、該当する火山について、主にマグマ混合から噴火に際の上昇速度を記録している石基組織を解析するとともに、前年度に引き続きマグマ供給系の全体像把握と精密化のための研究をおこなった。

5) 令和 2 年度：成果目標項目（ア）に対しては、分析効率の向上のため分光器 1 台を EPMA 装置に追加した。前年度に引き続き、最適な分析条件と分析手順の確立のための作業をおこなった。COVID-19 対応としてリモート分析のための手順書と作成するとともに、補助のためのツールを作成した。項目（イ）に対しては、前年度に引き続き画像解析プログラムの拡充をおこなった。項目（ウ）に対しては、定量分析データのデータベースへの受け入れを開始した。また、インターネット経由で画像データベースにアクセスできるように整備した。項目（エ）に対しては、各火山について、マグマ供給系の描像を精密化するためのデータを拡充するとともに、4 年次までに得られた分析・解析結果を統合して整理し、噴火事象分岐予測をする基準について検討した。また、噴火事象分岐予測に資するデータ取得方法や解析方法の開発をおこなった。項目（オ）に対しては、装置の利用規約を整備した。

6) 令和 3 年度：成果目標項目（ア）に対しては、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（ウ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなうとともに、データベースにデータの受け入れをおこなう。利用規約に基づき、データベースのデータ公開を開始する。項目（エ）に対しては、5 年次までに得られた分析・解析結果を統合して整理し、噴火事象分岐予測をする基準について検討する。初年度に選定した 11 火山の中で、計画前半で取り扱わなかった火山噴火の試料や課題 C サブテーマ 2 による採取試料の分析を開始する。項目（オ）に対しては、装置の利用者環境を整備する。研究組織外からの分析・解析ブラッ

トホーム利用の受け入れを開始する。

7) 令和4年度：成果目標項目（ア）に対しては、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）と（ウ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（エ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなうとともに、6年次までに得られた分析・解析結果を統合して整理し、噴火事象分岐予測をする基準について検討する。データベースに設けたカタログ機能を用いて、噴火の特徴を概観できるカタログを作成する。本事業で研究対象とした火山噴火のうち、少なくとも5つの火山の代表的な噴火についてカタログを完成させる。項目（オ）に対しては、前年度に引き続き研究組織外からの分析・解析プラットフォーム利用を受け入れる。

8) 令和5年度：成果目標項目（ア）に対しては、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（ウ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなうとともに、噴火の特徴を一瞥できるカタログのフォーマットを検討し、カタログを自動作成する機能を付加する。項目（エ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（オ）に対しては、前年度に引き続き研究組織外からの分析・解析プラットフォーム利用を受け入れる。

9) 令和6年度：成果目標項目（ア）に対しては、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）（ウ）（エ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（オ）に対しては、前年度に引き続き研究組織外からの分析・解析プラットフォーム利用を受け入れる。前年度の利用者の意見を取り入れ、より使いやすい装置環境の構築に努める。

10) 令和7年度：成果目標項目（ア）に対しては、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）（ウ）に対しては、前年度に引き続き作業をおこなう。項目（エ）に対しては、本事業で選定した11の火山については代表的な噴火の火山噴出物の特徴や噴出物から推定される噴火の特徴を概観できるカタログを完成させ、成果のとりまとめをおこなう。項目（オ）に対しては、前年度に引き続き研究組織外からの分析・解析プラットフォーム利用を受け入れる。

（e）令和2年度業務目的

火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法を開発するには、分岐の鍵となる要素を理解し、対象とする火山の大量の火山噴出物の分析を通じて、それらの要素を読み出す作業が必要となる。このための業務として、成果到達目標（ア）に対しては、平成28年度に東京大学地震研究所に設置されたフィールドエミッション型電子線マイクロプローブ装置に対して、分析効率の向上のため分光器1台を追加し、前年度に引き続き、最適な分析条件、分析手順の確立に努める。項目（イ）に対しては、データ解析用のプログラムの整備を継続する。前年度に引き続き、マグマの上昇過程を記録している石基組織を定量的に理解するための解析環境の整備を継続する。項目（ウ）に対しては、電子線マイクロプローブ装

置で撮影した画像データについて、インターネット経由でアクセスしてデータの処理や確認ができるような仕組みを構築する。項目（エ）に対しては、前年度に引き続き、有珠山、榛名山、富士山、伊豆大島、伊豆東部火山群、雲仙普賢岳、阿蘇山、桜島、霧島山、諏訪之瀬島について、適当な火山噴出物について分析をおこない、マグマ溜りの環境（温度、圧力、酸素雰囲気、含水量）の精密化をはかるとともに、これらの火山でのマグマの上昇速度やマグマ混合から噴火に至る時間間隔についての解析を進め、噴火に至る過程の理解に努める。さらに必要に応じて、噴火事象分岐予測に資するデータの取得方法や解析方法の開発をおこなう。また、情報共有のために、研究集会を実施する。項目（オ）に関しては、外部からの利用者のために操作手引書や利用規定を整備する。

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、必要に応じてその火山噴出物の分析・解析も実施する。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

分析・解析プラットフォームの構築については、リモート分析補助ツールを装備し、データ取得の環境が整えられた。噴出物の解析については、各火山でマグマ供給系像が精密化されるとともに、噴火直前のマグマの挙動についての知見が得られており、噴火事象分岐予測に役立つデータが集まりつつある。例えば、有珠山 2000 年噴火では噴火直前に高温マグマの混入は起きていないことが確認された。一方、榛名山では大規模な 2 つの噴火が、結晶に富むマッシュ状珪長質マグマが苦鉄質マグマにより再流動化されて発生したことがわかった。諏訪之瀬島では、1813 年噴出物の細分層序試料の分析により、噴火推移に伴うガラス・鉱物組成変化を明らかになり、今後の噴火の推移予測の参考になるデータが得られた。富士山、伊豆大室山、雲仙、阿蘇、桜島、西之島では、噴火直前のマグマの存在場所がかなり明確に推定されるとともに、火道上昇過程が検討されている。解析方法についても、高濃度火山ガスの到達範囲をマッピングする手法の開発がおこなわれたり、カルデラ噴火を引き起こす珪長質マグマの起源が熱力学計算と観測とを組み合わせた新しい手法で議論されるなど、噴火の予測や推移把握のための道具立てが揃いつつある。

(b) 業務の成果

1) プロジェクト（課題 C-1）の総合推進

課題 C-1 分担者と適宜意見交換をして、計画の推進と進行管理をおこなった。特に COVID-19 の影響で分析作業の停滞が生じたためこれを緩和する目的で分析・解析プラットフォームへの機能追加をおこなった。課題 C 内、他の課題との連携のための意見交換をおこなった。課題 A の JVDN システムへの課題 C-1 成果の登録方法について、課題 A 事業責任者との協議を開始した（東京大学）。

2) 分析・解析プラットフォームの立ち上げ

平成 28 年度に設置したフィールドエミッション型電子線マイクロプローブに、L 型波長分散型検出器 1 台を追加し、より迅速な分析がおこなえるようにした。また、解析用 PC 上で動かす様々な解析用スクリプトおよびデータ保存用スクリプトの作成をおこない、効率的にデータ解析をおこなうとともに、ウェブブラウザによるデータ管理等、適切にデータ保存がおこなえる環境を構築した。特に COVID-19 による移動制限対策として、リモートでの分析・解析環境を追加した。具体的には、次の a)-c) の作業をおこなった（東京大学）。

a) 標準的な定量分析ルーチンの最適化と作業環境の整備

新たに波長分散型検出器を追加したことに対応して、標準的な定量分析ルーチンの最適化をおこなった。具体的には、12 kV の加速電圧で標準的な ZAF 補正法定量分析がおこなえるように分光結晶配置と分析時間を決定し、標準試料の強度測定をおこなった。加えて、ブラウザによるデータ処理インターフェイスの構築をおこなった。すなわち、分析・解析プラットフォームで取得した画像のデータベース化や解析についてこれまで作成してきたスクリプトを整理し、ウェブブラウザから操作できるように改良した。このユーザーインターフェイスの改良により、画像のインデックスマップや画像連結が容易におこなえるよう

になった（図 1）。



EPMA_data_access MENU

MENU

- new user 新規ユーザーの登録
- map convert COMPO/SEMのMAP像の変換
- panorama 40 x40画像のパノラマ連結
- panorama 100 x100画像のパノラマ連結
- x-ray map convert X線像の変換（変換のみ）
- x-ray map analysis X線像の変換（Phasemapの作成まで）
- assemble photos 個別写真のアルバム化
- refresh index indexファイルの更新

Map Convert

Input Map directory at FE-EPMA using drag drop:

submit

図 1 画像処理用のインターフェイス。

b) リモート分析依頼用補助ツールの作成と画像データの部分公開

COVID-19 による移動制限のため、地震研究所研究所外からの分析・解析プラットフォーム利用が非常に困難な状況が継続している。このため、所外からの利用者の便のため、利用手順書を策定して配布するとともに、分析依頼を引き受け始めた。具体的には、まず、所外のユーザーからは試料の薄片を地震研究所に送付してもらい、その試料の全面の二次電子・反射電子線マップを分析・解析プラットフォームで撮影する。次に、得られた画像はウェブブラウザでアクセス可能な形でデータベース上に配置し、その画像に所外ユーザーはインターネット経由でアクセスして、その後の定量分析や詳細な元素マップ分析の依頼をおこなう。所外ユーザーは、二次電子線像と反射電子線像の両方から分析目標物の組成累帯の存在や傷などを確認しながら次の作業依頼がおこなえること、及び、画像上のマーカーステージ座標とで正確な分析位置データの受け渡しができるというメリットがある。作業画面を図 2 に示す。

これまでに分析・解析プラットフォームを用いて取得された試料全面の二次電子・反射電子線像の一部は、上記のウェブインターフェースを通じて、アクセス制限付きで試験的に公開されている (<http://magma.eri.u-tokyo.ac.jp/EPMA/index.html>)。現在は、分析・解析プラットフォームで取得されたすべての画像をデータベースにとりまとめるため、新たに作成したデータベース連携プログラムで画像の再処理を行っており、処理が終わり次第、順次公開していく予定である。

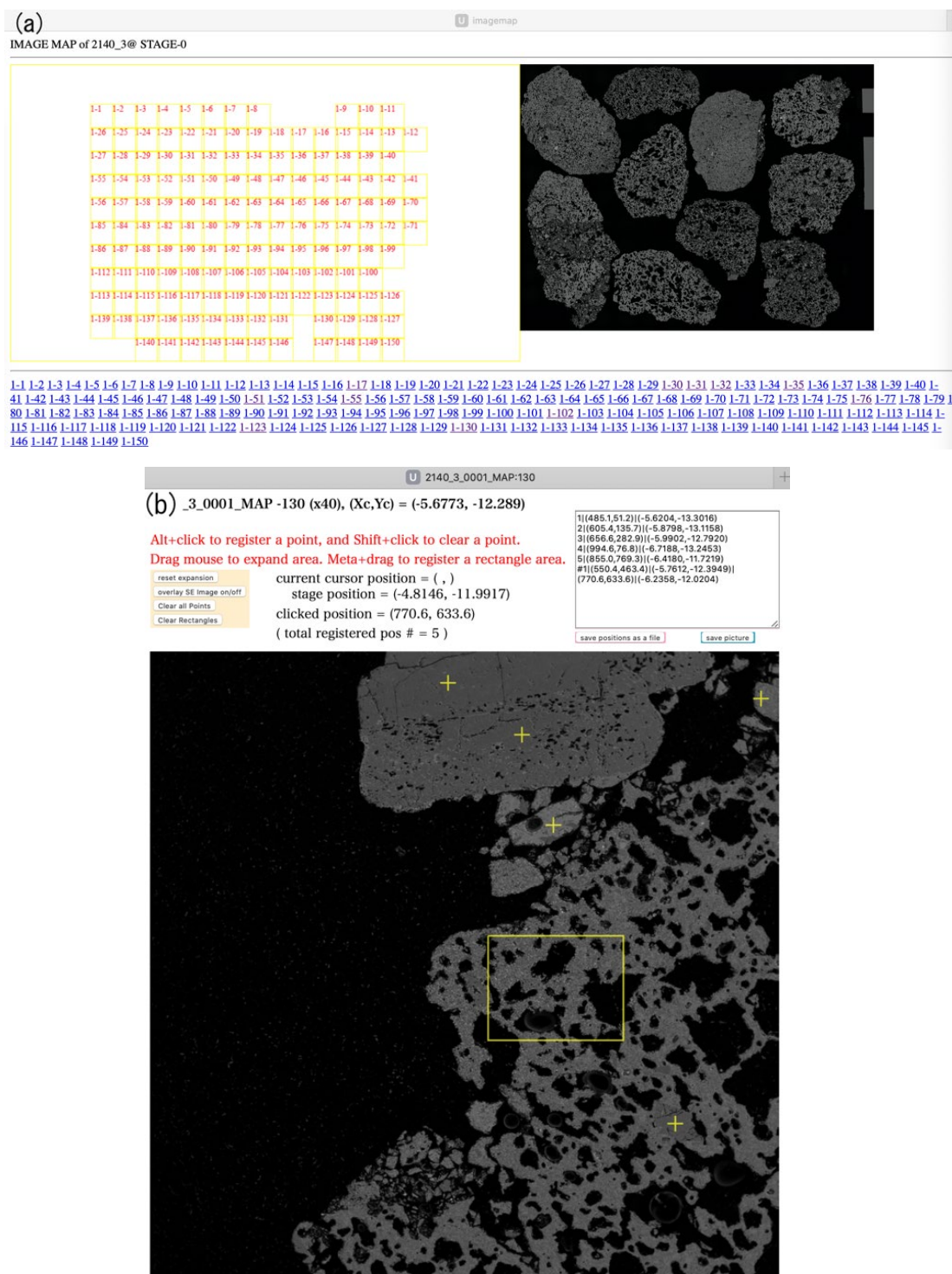


図2 作業画面の例。(a) 複数枚の画像を連結して試料薄片全体を観察できるようにしたもの。ブラウザ上で全体像と個別の撮影画像位置を確認でき、スクリーン下部の写真番号をクリックすると (b)の個別画像が開く。(b) 個別写真表示用のページ。ベースとなる写真は反射電子線像で、キー操作によって二次電子線像を重ね書きできる。マウスでの操作で、分析したい場所のステージ座標の読み取りやファイルへの出力がおこなえるので、この画面を利用して、リモートでの分析依頼の補助ツールとして用いることができる。

c) 熱力学計算プログラム MELTS の簡易型実行環境の構築

火山噴火時の迅速な噴出物の特徴把握の一環として、試料の化学組成分析と連動する幾つかの熱力学温度計や圧力計を分析・解析プラットフォームには組み込んでいるが、その一つのツールとして、熱力学計算プログラム MELTS をウェブブラウザ経由で容易に利用できる環境を整えた、これは火山噴出物が経過した温度圧力環境の概要を短時間に得るためのもので、後述する本課題で産業技術総合研究所が主体となって整備している高精度な MELTS のデータベースを補完するものである。

これまでに課題 C-1 で取り扱う 12 の火山の代表的な噴出物組成についての計算をおこない、結果を保存しており、図化したものの閲覧や絞り込み検索が可能になっており、噴火の発生時には、迅速にマグマ供給系の特徴を推定することができる。

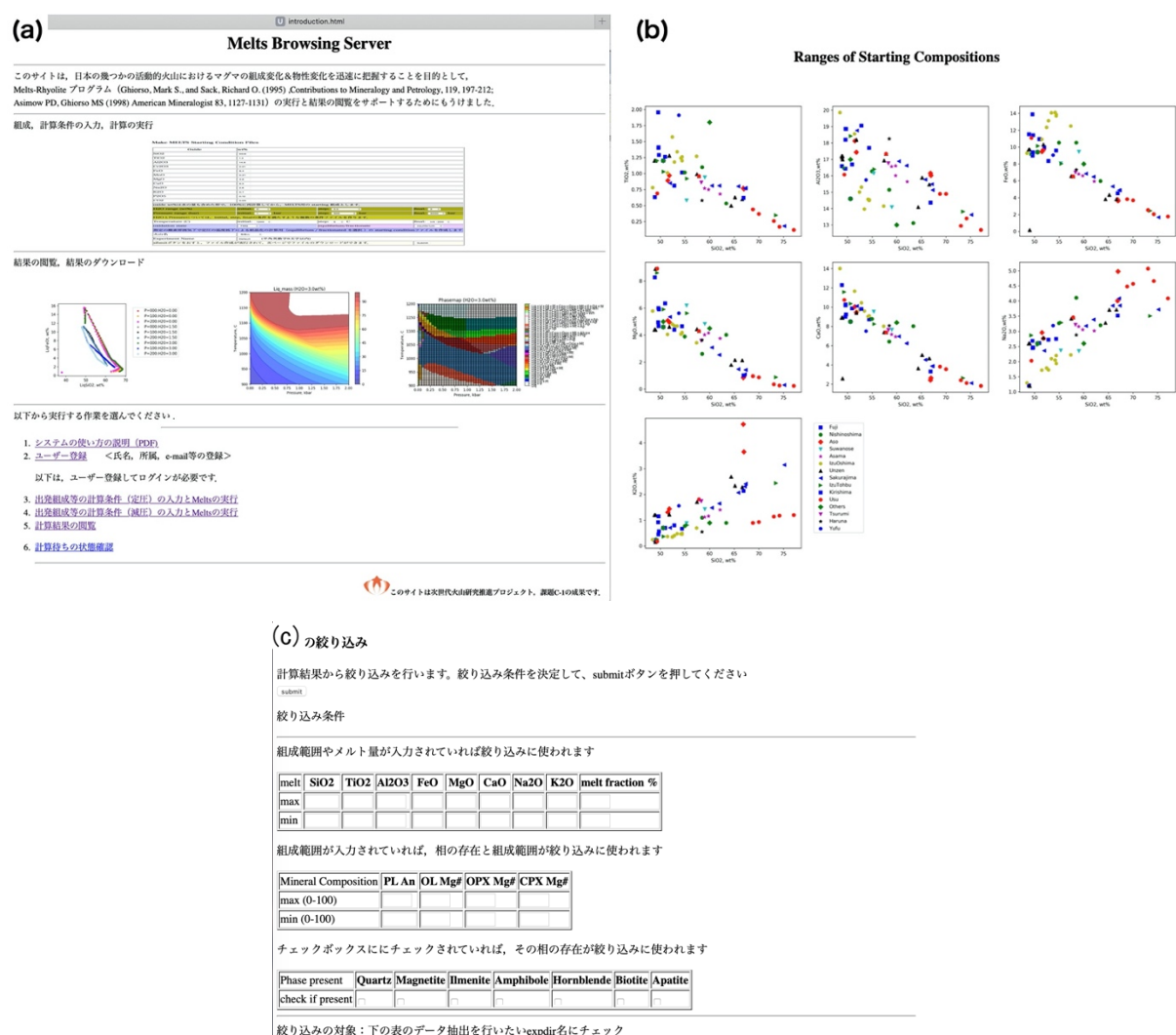


図 3 MELTS の簡易型実行環境。(a)ブラウザでのトップ画面。計算実行や計算結果の図化等がおこなえる。(b)これまでに計算をおこなった火山噴出物の組成。(c)結果の絞り込み画面。液組成や共存する鉱物組成から、出発物質の組成範囲や温度圧力条件の絞り込みがおこなえる。

このシステムを使って、2020 年の西之島噴火で採取された噴出物（火山灰）の石基ガラス組成から、噴火前のマグマの状態（温度、圧力、含水量）の絞り込みをおこなっている（結果は 4) i) 西之島、の項に後述）。

3) 研究集会の調整・開催

令和 2 年 10 月に予定されていた伊豆大島での研究集会は COVID-19 の移動制限の影響で中止となり、代わりにメールでの意見交換をおこなった。令和 2 年 12 月 14 日には課題 C-1 の意見交換会をオンラインで開催し、研究の現状や来年度にむけた取り組みについて課題参加者間で話し合った（課題 C-1 全体）。令和 2 年 12 月 25 日（金）と 12 月 26 日（土）には、課題 C-3 および課題 C-2 の研究集会がそれぞれオンラインで開催された。課題 C-1 の担当者らもこれらの集会にオンラインで加わり、課題 C 全体の進捗状況について把握するとともに、研究の方向性についての議論に参加した。

4) 火山噴出物の分析・解析

a) 有珠山（産業技術総合研究所）

噴火事象分岐判断手法の開発に向け、噴火前のマグマ過程やそのタイムスケールを明らかにするため、日本有数の活火山である有珠火山（曾屋・他，2007¹⁾）を対象として、噴火過程が既知である歴史時代の噴出物の解析をおこなっている。

2020 年度は、有珠火山最新の噴火であり各種観測データも充実している 2000 年噴火を例として、その噴出物である有珠 2000 年輕石（Us-2000pm）中の磁鉄鉱の累帯構造の分析・解析をおこなった。特に、元素拡散の速い磁鉄鉱に着目し、これまでに得られているデータ（e. g., 東宮・他，2001²⁾；東宮・宮城，2002³⁾；Tomiya and Takahashi, 2005⁴⁾）の再解析、および新たな分析データの取得をおこなった。その結果、噴火をトリガーし得る高温マグマ混入の証拠は見られず、むしろ上昇中の冷却を示唆する結果が得られた。

図 4 は、EPMA 分析によって得られた、Us-2000pm 中の磁鉄鉱の Mg 元素濃度分布マップの例である（東宮・宮城（2002）³⁾ の再解析）。結晶の周縁部（リム）で Mg 濃度が顕著に低下している。図 5 は、Us-2000pm 中のいくつかの磁鉄鉱について、EPMA によって累帯構造を分析した例である（東宮・宮城（2002）³⁾ の再解析および今年度の新分析）。磁鉄鉱の主成分であるウルボスピネル成分（XUsp；ほぼ Ti 濃度を反映）については、明瞭なゾーニングが見られない。また、Al 濃度についても、バラ付きを超える明瞭なゾーニングは見られない。一方、Mg 濃度は、リムから 20 μ m 程度の範囲で明瞭に低下している。これは、図 4 に見られる濃度分布と整合的である。

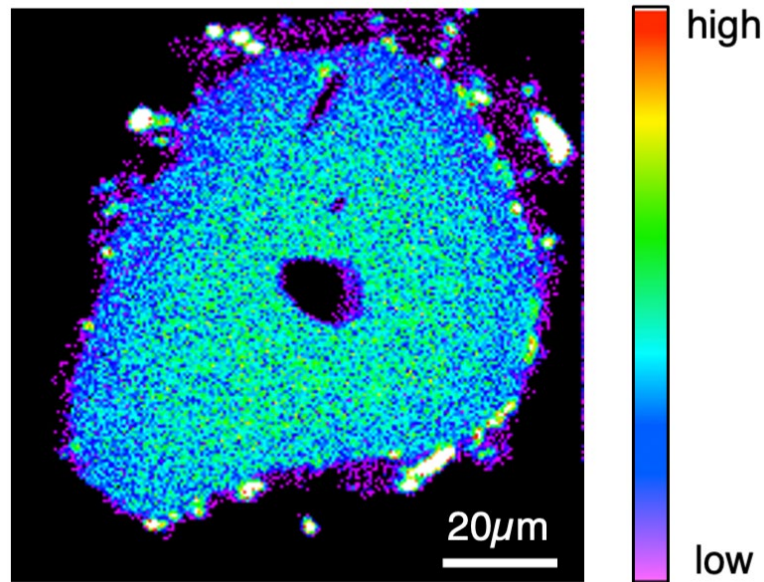


図 4 有珠火山 2000 年輕石中の磁鉄鉱の Mg 元素濃度マップの例。濃度を擬似カラーで表示。結晶の周縁部（リム）で Mg 濃度が顕著に低下している。

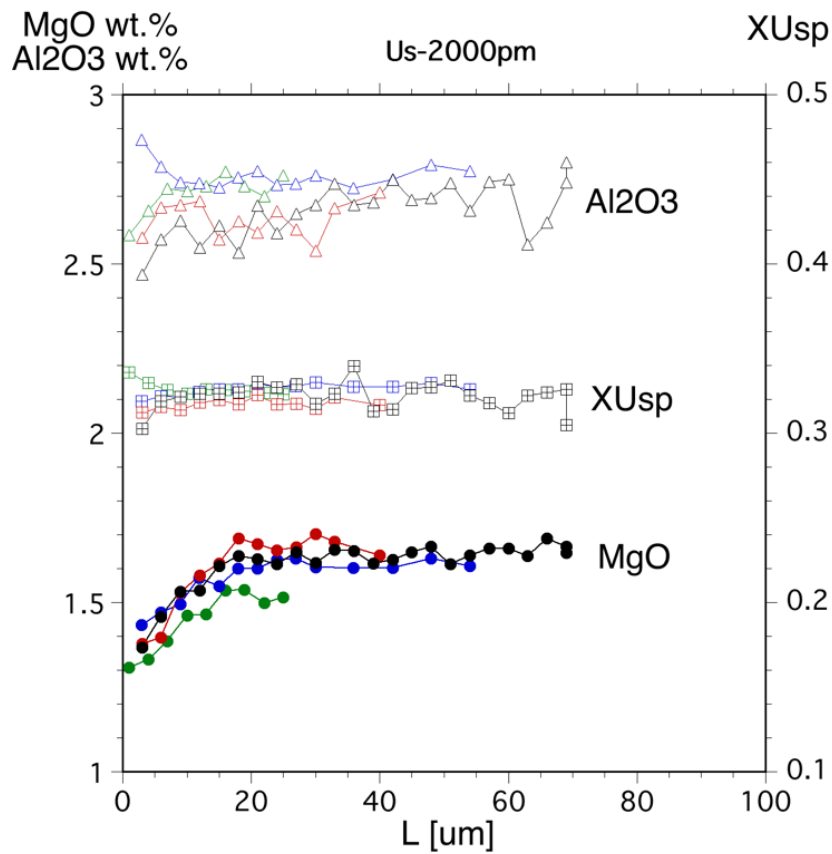


図 5 有珠火山 2000 年輕石中の磁鉄鉱の累帯構造。横軸は結晶のリムからの距離。XUsP や Al には明瞭なゾーニングが見られないのに対し、Mg はリム付近の約 $20 \mu\text{m}$ で濃度が顕著に低下している。同じ色のシンボルは同じ結晶に対応する。

磁鉄鉱のリム付近にみられる Mg 濃度の低下は、結晶成長に伴う場合と、元素拡散に伴う場合のいずれかが考えられる。しかし、Ti や Al 濃度が Mg 濃度と連動して変化していないこと、Mg の元素拡散は Ti や Al より一桁ほど速いと推定されること (Tomiya et al., 2013)⁵⁾ から、この Mg 濃度のゾーニングは元素拡散が原因であると考えられる。

そこで、半径 $a=70\ \mu\text{m}$ の磁鉄鉱のリムに拡散によって $20\ \mu\text{m}$ ほど顕著なゾーニング (図 5) ができる時間 t を、球対称の単純な拡散モデル (Crank (1975)⁶⁾ の Fig. 6.1) でフィッティングすることによって求めた。無次元時間 $\tau = Dt/a^2$ とすると、 $\tau \sim 0.01$ 程度でフィッティングできる。ここで、 D は磁鉄鉱中の Mg の元素拡散係数である。 D は一般に温度依存性を持つ。有珠 2000 年マグマの噴火直前 (マグマ溜まり条件) の温度は、これまでの実験岩石学的研究により $900\sim 930\ ^\circ\text{C}$ と推定されている (大西・東宮, 2018)⁷⁾。 $900\ ^\circ\text{C}$ における磁鉄鉱中の Mg の元素拡散係数は $D = 6.6 \times 10^{-15}\ \text{m}^2/\text{s}$ と見積もられている (Tomiya et al., 2013)⁵⁾。この値を利用すると、時間 t は 2 時間程度となる。実際には D の誤差が 2~3 倍程度ありうるが、いずれにせよ、数時間といった短いタイムスケールでこの Mg ゾーニングができた と推定された。

次に、この Mg 濃度の変化の原因について考える。たとえば高温の苦鉄質マグマが噴火直前に注入して噴火をトリガーしたといった場合は、Mg 濃度はリムでむしろ上昇する。今回のゾーニングはその逆であることから、高温マグマ注入が原因とは考えられない。高温マグマ注入の証拠がないことは、他の岩石学的観察事実からも支持される (e.g., 東宮・他, 2001)²⁾。図 6 には、図 5 と同じ磁鉄鉱について、Mg/Mn (モル比) のプロファイルを示した。磁鉄鉱の Mg/Mn は、メルトの Mg/Mn とともに、温度と強い相関を持つことが知られている (Bacon and Hirschmann, 1988)⁸⁾。また、有珠マグマについて、磁鉄鉱の Mg/Mn とマグマ温度との相関も調べられている (Tomiya and Takahashi, 2005⁴⁾; 大西・東宮, 2018⁷⁾)。この結果を利用すると、Mg/Mn の値が 3.8 程度から 2.8 程度に低下することは、温度にして $50\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 程度低下することに対応する。有珠 2000 年噴火が、外来水の関与が強いマグマ水蒸気噴火 (ないし弱い水蒸気プリニー式噴火) であった (e.g., 東宮・他, 2001)²⁾ ことを考えると、上昇中のマグマが噴火直前に外来水によって急速に冷却されるようなことがあったのかもしれない。

今後は、2000 年噴火当時に得られた地球物理学的観測データ (e.g., Murakami et al., 2001⁹⁾; Onizawa et al., 2007¹⁰⁾) や、2000 年噴出物に関しておこなわれた減圧実験結果 (Suzuki et al., 2007¹¹⁾) などとも比較し、これら多種のデータを整合的に説明できる上昇過程を推定していうことが必要である。

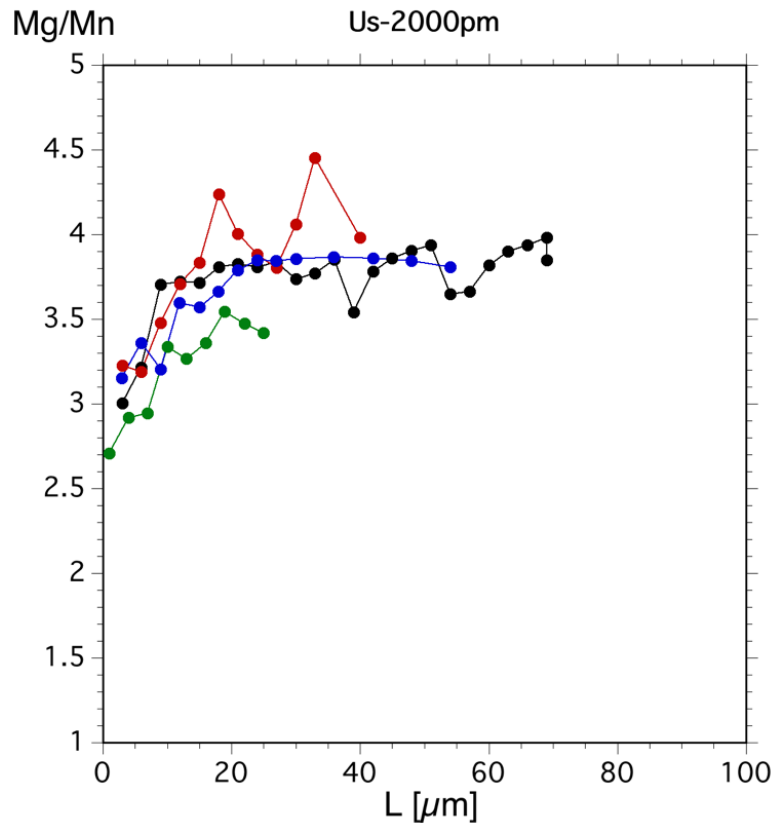


図 6 有珠火山 2000 年軽石中の磁鉄鉱の Mg/Mn のプロファイル。Mg/Mn とマグマ温度との相関関係から、結晶のコアからリムに向けてマグマ温度が 50～100 °C 程度低下したことが推定される。

b) 榛名山 （早稲田大学）

榛名火山の新期活動（45ka～）には爆発的噴火から非爆発的噴火までの多様性がある。しかし活動しているマグマや噴火誘発過程に共通性があることが分かってきた。それは結晶に富むマッシュ状珪長質マグマ（珪長質安山岩～デイサイト質）に苦鉄質マグマが注入し、噴火が誘発されているということである。今年度は次の 2 噴火の研究を進めた。

i) 二ツ岳渋川噴火

渋川噴火（5 世紀末～6 世紀初頭）は、その 50～100 年後に発生した二ツ岳伊香保噴火と並び、榛名火山の最新の噴火活動として重要である。渋川噴火は、水蒸気爆発と火砕流の発生を主体とする活動であった（早田，1989）¹²⁾。流走する火砕流本体から側方に向かい火砕サージが広がったため、河谷に近い地点では主に無層理の厚い堆積物（火山岩塊サイズまでの軽石ブロック含有）、河谷から遠い地点では層理のある薄い堆積物（火山礫サイズまでの軽石含有）、という岩相変化がある。本研究ではどちらの岩相についても複数露頭を検討している。前者の岩相の露頭では火山岩塊サイズの軽石を、後者の岩相の露頭では火山礫サイズの軽石を使用している。昨年度までの研究では、軽石の全岩組成分析（図 7）、ならびに、火山礫サイズの軽石（10 サンプル）の薄片作成による岩石記載を進めていた。今年度は外部委託により作成頂いた軽石（火山岩塊ブロック；19 サンプル）の薄片も活用し、火山岩塊ブロックと火山礫の記載岩石学的特徴の比較（含、斑晶モード分析）を実施

した。また火山礫について斑晶の予察的分析を進めた。

この噴火の軽石の全岩化学組成は、軽石サイズ・堆積物の岩相・同一地点の層準により変化することはない。斑晶組み合わせ・斑晶量・斑晶組織についても同様である。斑晶組み合わせは、斜方輝石+角閃石+斜長石+Fe-Ti 酸化物であり総量は概ね 40~55 vol.%(N=16) の範囲にある。全ての鉱物種が集斑晶を構成することと、斜長石に汚濁帯が観察されることから、全ての鉱物種を含む珪長質マグマが、苦鉄質マグマと混合もしくは苦鉄質マグマにより加熱され、噴出したものと推測された。角閃石の脱水分解反応縁は石基結晶の観察される軽石のみで観察されるので、反応縁の有無は混合・加熱の有無ではなく、噴火時にマグマが地表に移動する際の、火道での存在時間の長短を反映しているものと考えられる。

二ツ岳伊香保噴火の噴出物の岩石学的特徴 (Suzuki and Nakada, 2007)¹³⁾を考慮すると、前述の「マグマ混合モデル」と「加熱モデル」のうち、後者が妥当と判断される。なぜならば二ツ岳渋川噴火の軽石は、二ツ岳伊香保噴火における「珪長質端成分マグマ (白色軽石)」と同様の記載岩石学特徴と全岩組成 (図 7) を有しているためである。火山礫サイズの軽石 2 サンプルの斜方輝石・斜長石・Fe-Ti 酸化物斑晶を分析したところ、「加熱モデル」と調和的な結果を得た。斑晶コアからリムに向かい、斜方輝石では Mg# の上昇、斜長石では (汚濁帯を有する結晶で) FeO や MgO 量の上昇が確認されることがあった (図 8)。Fe-Ti 酸化物については組成累帯が全く観察されないが、これは加熱イベントの後に一定時間を経て噴火が起きたため、鉱物内元素拡散の速い Fe-Ti 酸化物については均質化が起こり、加熱の記録が消されたものと考えられる。磁鉄鉱-イルメナイト温度計により 845-868 °C (N=12) が算出された。さらに斜方輝石・斜長石斑晶のコア組成は、渋川噴火の軽石 (火山礫) と二ツ岳伊香保噴火の溶岩とで互いに類似しており (図 8)、2 噴火の珪長質マグマが同じマグマ溜りに由来する可能性があるといえる。今回の議論は、わずか 2 サンプルの分析によるものであり、今後、分析サンプル数を大幅に増やしていくことが不可欠である。

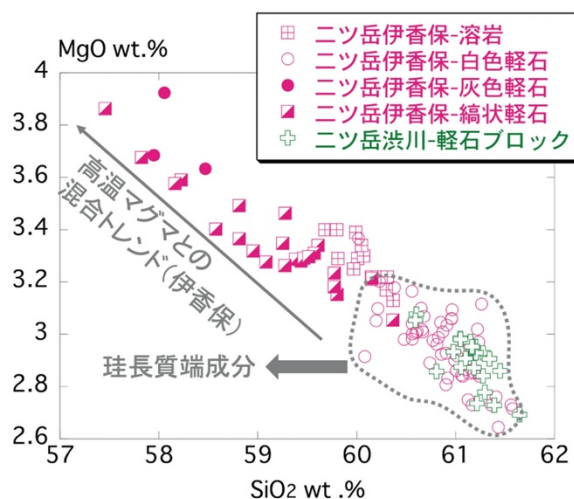


図 7 榛名火山、二ツ岳の 2 噴火の噴出物の全岩化学組成。二ツ岳伊香保噴火のデータは Suzuki and Nakada (2007)2) によるもの。灰色の文字や矢印は解釈。

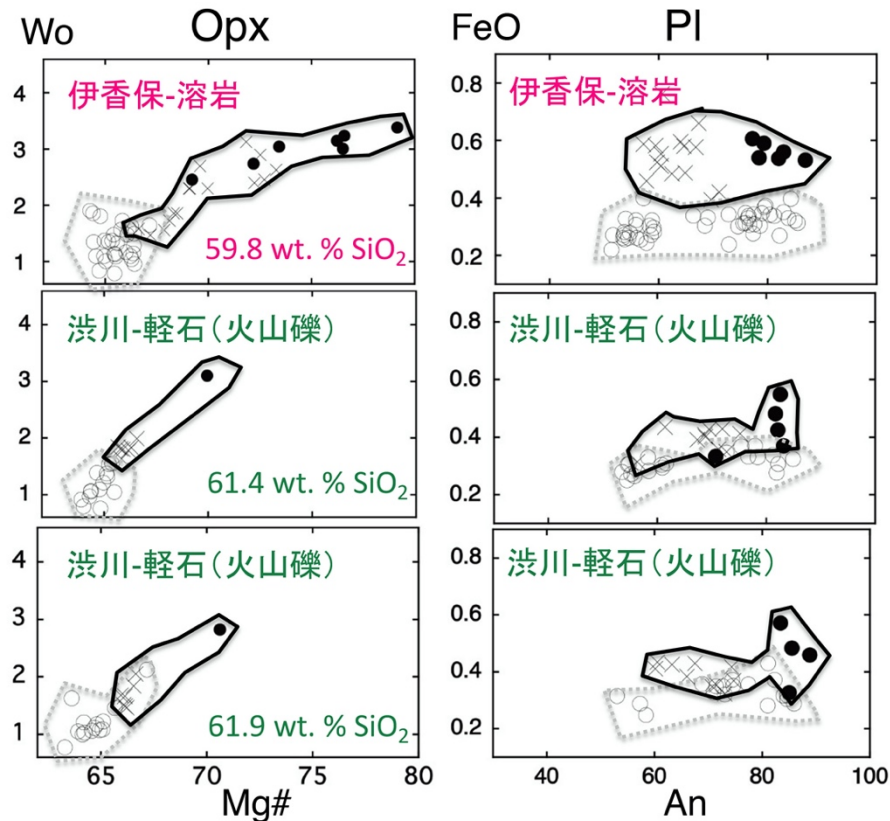


図 8 榛名火山、二ツ岳の 2 噴火の斑晶鉱物組成。Opx は斜方輝石、Pl は斜長石。○はコア、●はインナーリム、×はリム。左右に並ぶ図は同じサンプルのもの。SiO₂ 含有量は全岩のもの。インナーリムは、斜方輝石ではリム近傍の Mg# の急増部、斜長石では汚濁帯の直ぐ外側。

ii) 45ka のカルデラ噴火

この噴火は榛名火山新期活動の開始に相当し、これにより火砕流堆積物（白川・里見）と八崎降下軽石が生成した（大石，他，2011）¹⁴⁾。昨年度末より、八崎降下軽石の野外調査や薄片観察を開始したが、予想よりも変質が顕著で、岩石学的検討をおこなう上でサンプル選別が重要であることが分かってきた。ここでは軽石が新鮮であった白川・里見火砕流堆積物に絞って報告する。合計 9 露頭で岩石学的検討をおこなっているが、多くの地点で堆積物の基底部や最上部の確認ができない。例外は白川火砕流堆積物の荒神露頭であり、標高差 20m ほどの谷で、基底部・中間部・最上部が断続的に観察できる（図 9）。前年度までの研究により、軽石の全岩化学組成や記載岩石学的特徴には、露頭・露頭内の層準による顕著な系統差がないこと、また白川・里見の 2 つの堆積物を岩石学的に区別できないことも判明していた（図 9）。また記載岩石学的特徴により、斜方輝石＋角閃石＋斜長石＋Fe-Ti 酸化物＋カミングトン閃石＋石英を含む珪長質マグマが、苦鉄質マグマと相互作用して、噴出するに至ったものと推定していた。

今年度は、まず斑晶モードデータを増加させた。概ね 45-65vol.% (N=15) であることを確認した。全岩 SiO₂ 量が最大のサンプルでは高値を示した。さらに斑晶鉱物組成について予察的検討をおこなった。白川火砕流堆積物については荒神の基底部と最上部の 2 サン

プル、里見火砕流堆積物については全岩 SiO_2 量が低いものと最大の 2 試料を選別した。図 9 や図 11 に示すように 4 サンプル中 1 サンプルを除き、全岩組成は類似している。4 試料について斜長石と斜方輝石のコア組成に差異はない（図 10）。全岩 SiO_2 量最大の 1 サンプルを除き、コアからリムに向かい斜方輝石には $\text{Mg}\#$ の上昇、斜長石では（汚濁帯を有するもので） FeO や MgO 量の上昇が確認された。磁鉄鉱・イルメナイトのコア組成は全岩 SiO_2 量に応じて変化するが、どのサンプルでも組成累帯が全く確認されない。以上は、次のモデルで説明される可能性がある。1) 軽石は共通の珪長質マグマに由来する。2) 全岩 SiO_2 量最大のサンプルは苦鉄質マグマの影響を受けずに噴出した。つまり元の珪長質マグマの全岩組成を保持している。3) 全岩 SiO_2 量が低い軽石は、前述の珪長質マグマと苦鉄質マグマとの混合産物である。マグマ混合の産物でありながら Fe-Ti 酸化物に組成累帯がないのは、加熱イベントの後に一定時間を経て噴火が起きたためである。 Fe-Ti 酸化物温度計から算出された温度と全岩 SiO_2 量との間に見られる相関（図 11）も、モデルを支持する。

今回の議論は、わずか 4 サンプルの分析に基づくものである。今後、鉱物組成分析をおこなうサンプル数を大幅に増やしモデルを強固なものとする必要がある。特に次が重要。1) 全岩 SiO_2 量の高い軽石の分析数を増やし、この噴火に関与した珪長質端成分マグマの全岩組成の範囲を特定する。2) 基底部から最上部が観察される荒神露頭の分析を徹底しておこない、噴火の始まりから終わりまでの噴出物の変化を明確にする。

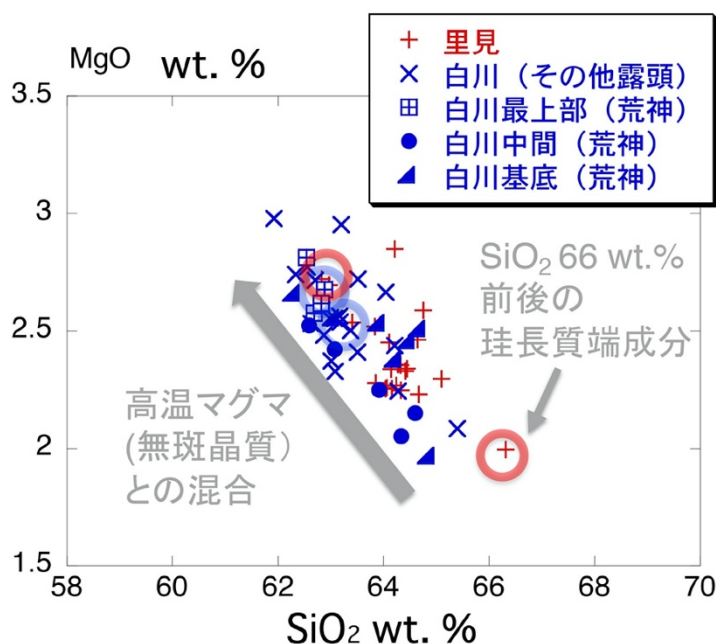


図 9 榛名火山で 45ka に発生したカルデラ噴火の火砕流堆積物（白川・里見）中の軽石の全岩化学組成。灰色の文字や矢印は解釈。赤丸・青丸をつけた合計 4 サンプルについて斑晶の EPMA 分析を実施した。

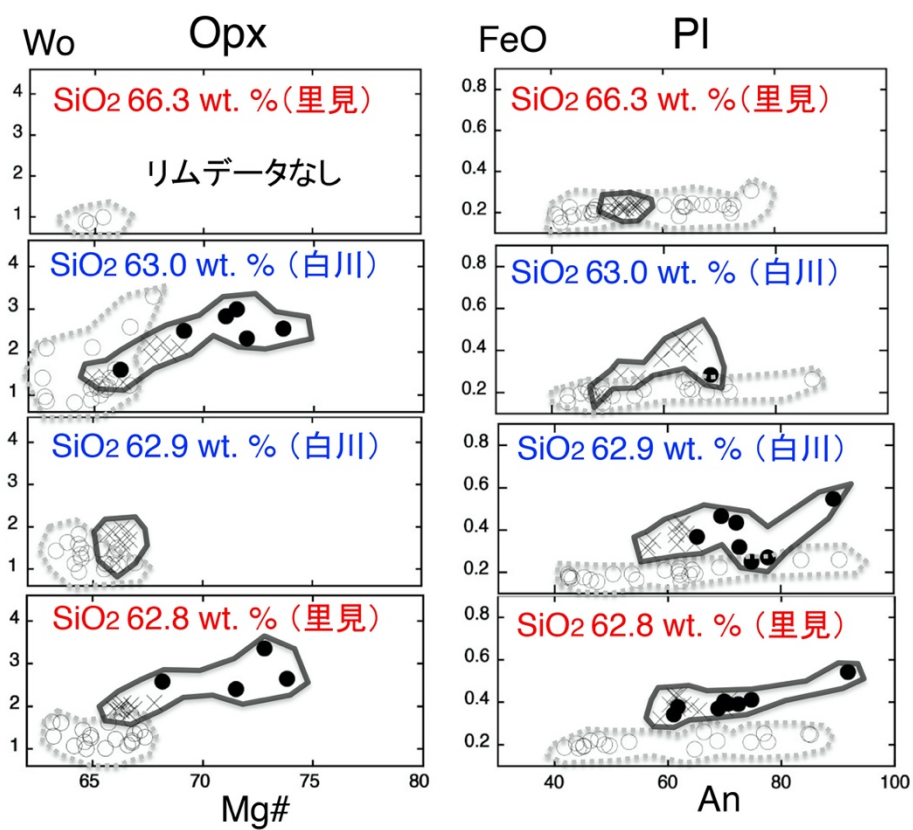


図 10 榛名火山 45ka の白川火砕流と里見火砕流の本質軽石の斑晶鉱物組成。略称やプロットのマークは、図 8 と同じ。図中にはサンプルの全岩 SiO_2 含有量も示す。

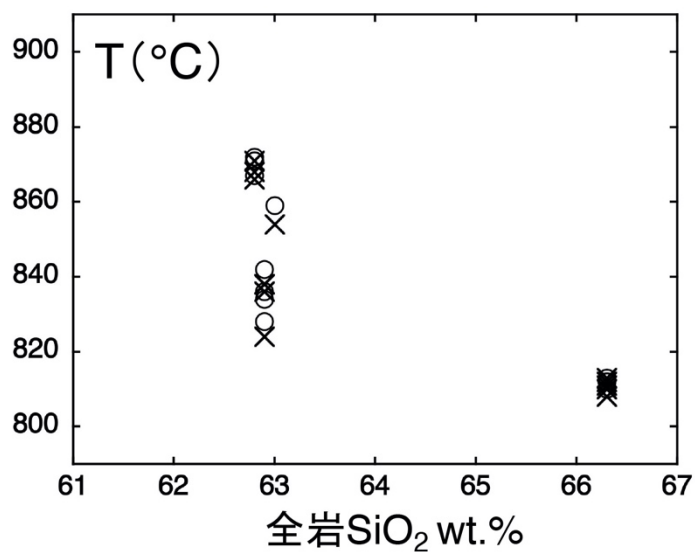


図 11 榛名火山 45ka のカルデラ噴火の火砕流堆積物の本質軽石の記録するマグマ温度 (Fe-Ti 酸化物温度計)。図 10 と同じ 4 サンプルのデータ。○はコア、×はリムから計算された温度。

c) 富士山

i) 富士山地下のケイ長質マグマだまり（静岡大学）

富士山宝永噴火の噴出物中には斑レイ岩の捕獲岩が含まれることが知られている。これらの斑レイ岩の中には、粒間にガラスを含むクリスタルマッシュ状のものが見られ、富士山地下に存在する“生きたマグマだまり”の破片であると考えられる。令和元年度には、この斑レイ岩に含まれる粒間ガラスおよび斜長石中のメルト包有物の化学分析を実施し、斑レイ岩捕獲岩の中には、比較的均質で Al_2O_3 にやや乏しい流紋岩質粒間ガラスを含むもの（グループ A）と、玄武岩質安山岩～ Al_2O_3 に富むデイサイト質の組成範囲を示す不均質な粒間ガラスを含むもの（グループ B）の、少なくとも 2 グループが存在することを明らかにした。そこで令和 2 年度は、これら 2 グループの斑レイ岩が宝永噴火のマグマに取り込まれる前に置かれていた温度・深さ条件の検討をおこなった。

斑レイ岩の温度は、共存するマグネタイトとイルメナイトの化学組成から見積もった。また、由来深度は、粒間ガラスおよびこれと共存する斜長石の化学組成から見積もったメルト含水量から推定した。グループ A の粒間ガラスは流紋岩質で比較的均質であったことから、その平均組成を代表値とした（メルト A）。一方でグループ B の粒間ガラスは幅広い化学組成バリエーションを示すが、ガラス中に組成縞模様（ミングリング組織）が確認できることから、 Al_2O_3 に富むケイ長質メルトと苦鉄質メルトの混合で形成されたと考えられる。そこで、斑レイ岩を構成する斜長石に含まれるメルト包有物と粒間ガラスとの化学組成の比較から、ケイ長質混合端成分メルトの化学組成を決定し、その値をグループ B の代表値とした（メルト B）。斑レイ岩の由来圧力は、メルト A および B が H_2O に飽和していると仮定して、それぞれの含水量から見積もった。更に、地殻の密度を 2700 kg/m^3 と仮定し、リソスタティックな深さ-圧力関係に基づいて、圧力の見積もり値から由来深度を決定した。

メルト A とメルト B の温度は～830 °C および～850 °C、含水量は～7.0 wt.% および～9.3 wt.% とそれぞれ見積もられた。また、由来深度の見積もり値はメルト A で～9.5 km、メルト B で～14 km であった。これらの見積もり深度はいずれも、富士山地下で低周波地震の発生する領域に含まれる。この深さ領域では、2008-2010 年にも～0.01 km³ のオーダーの体積移動があったことが GNSS 観測から見出されており、その原因としてマグマ貫入が考えられている（Mitsui and Kato, 2019）¹⁵⁾。この深さ領域に貫入したマグマが、様々な深さで小規模なマグマだまりを形成し、冷却に伴う結晶作用によってクリスタルマッシュを生産するとともに、残液メルトはケイ長質組成へと分化したと考えられる。

グループ B の斑レイ岩中では粒間メルト量が 15 vol.% 以下と少なかったことから、このマグマだまりには噴火可能なメルトは残っていないかもしれない。しかし、結晶量が 90 vol.% に達する試料中でも、粒間メルトにミングリングの痕跡が認められることから、浸透流によるメルトの流入・流出があったと考えられる。一方でグループ A の斑レイ岩は、粒間メルト量が～24-35 vol.% と多いことから、噴火可能な流紋岩質メルトだまり直下に形成したクリスタルマッシュであった可能性がある。また、メルト A の化学組成が宝永噴火の安山岩質-デイサイト質マグマの混合トレンドの延長線上に一致することから、メルト A がこのマグマ混合のケイ長質端成分であった可能性が高い。以上の内容は、JpGU-AGU Joint meeting 2020 で発表した。

ii) 富士山での石英に富むクリスタルマッシュ岩の発見(静岡大学)

宝永噴火の斑レイ岩捕獲岩について観察を進める過程で、石英を多量に含むクリスタルマッシュ状の捕獲岩 (FjGB18) を発見した。この捕獲岩は、ガラス+斜長石+石英+輝石+Fe-Ti 酸化物から主に構成され、その体積のおよそ 49 vol.%がガラスからなるクリスタルマッシュ状の組織を示す。FjGB18 は、斜長石を~39 vol.%、石英を 10 vol.%占め、鉱物相のみの割合に基づくトータル岩に分類される。富士山において、石英に富む火成岩は今まで見つかっておらず、本研究の報告が初である。この捕獲岩にはホスト火山岩が付着しており、その岩石組織的特徴から宝永噴火の噴出物である可能性が高いと考えられる。また、捕獲岩とホストマグマの境界は比較的シャープであり、捕獲岩に全岩での流動変形の痕跡がみられないことから、FjGB18 はマグマの捕獲されたタイミングで固体的にふるまっていたと考えられる。

元素濃度マッピングの結果、FjGB18 の粒間ガラスには明瞭な組成縞模様が見つかった (図 12)。これは、クリスタルマッシュの粒間でメルトの浸透流とミングリング・混合がおこっていることを支持する、天然からの証拠といえる。類似の構造は、富士山や伊豆大島のクリスタルマッシュ状捕獲岩でも見られることから (大塚, 他, 2020¹⁶⁾; 石橋, 他, 2017¹⁷⁾)、クリスタルマッシュ中において、粒間メルトの浸透流とミングリング・混合は普遍的な現象であると考えられる。

FjGB18 の粒間ガラスの化学組成を分析したところ、 SiO_2 が~68-78 wt.%の流紋岩質組成を示した。また、ハーカー図上でいずれの元素についても、 SiO_2 ~78 wt.%をひとつの頂点とする面的な組成分布が見られた。粒間ガラスの組成縞模様の存在と合わせると、この組成バリエーションは3成分以上のメルトの混合によるものであり、そのケイ長質端成分が SiO_2 ~78 wt.%の流紋岩質メルトであったと考えられる。富士山では、デイサイト質~流紋岩質のガラスはこれまでに、1707 年宝永噴火の Ho-I 噴出物および斑レイ岩捕獲岩のみから報告されている。これらのケイ長質ガラスと比較すると、FjGB18 に含まれるガラスは系統的に K_2O に富み、 CaO に乏しく、両者の間には明瞭な組成ギャップが存在する。このことから、FjGB18 は宝永噴火 Ho-I マグマや斑レイ岩捕獲岩とは空間的に隔てられたマグマだまりに由来すると考えられる。このことは、FjGB18 に含まれる斜長石の $\text{An}\#$ $[=100\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})]$ が、富士山の火山岩や斑レイ岩に含まれる斜長石に比べて系統的に低い値を示し、明瞭な組成ギャップが見られることから支持される。

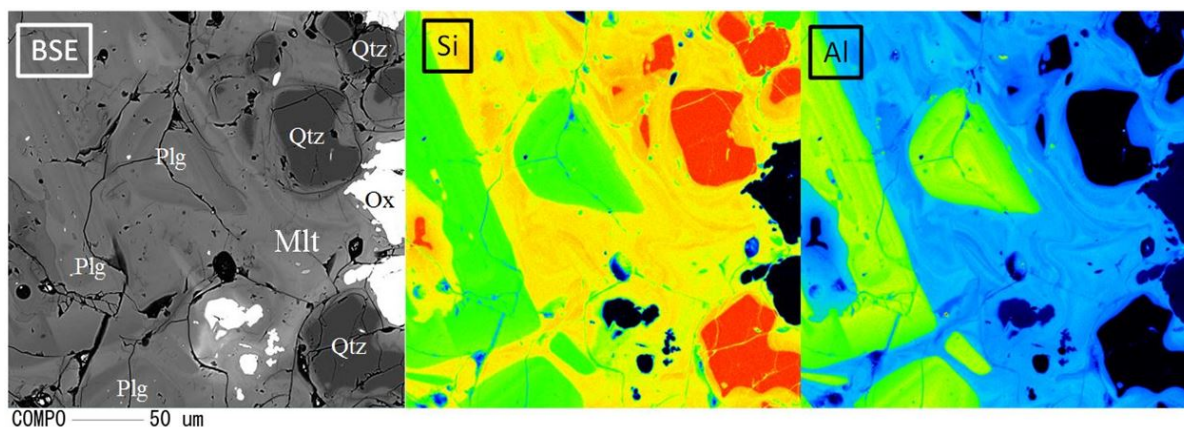


図 12 粒間ガラスに見られた組成縞模様。

Fe-Ti 酸化物鉱物と斜長石およびケイ長質端成分メルトの化学組成から温度とメルト含水量を見積もったところ、いずれについても斑レイ岩中の粒間ガラスに比べてやや低い値を得た。この結果は、メルトが H_2O に飽和していたと仮定すると、FjGB18 のマグマだまりが斑レイ岩のそれよりも浅部に位置していたことを示唆する。見積もられメルトの H_2O 飽和深度は、富士山地下で低周波地震の発生する深度よりやや浅く、2011 年静岡県東部地震断層の余震域の最浅部と概ね一致する。このことから、断層による破碎領域の天井にマグマが蓄積した、もしくはここで地殻の岩石を熔融して、このマグマだまりを形成した可能性が考えられる。今後、ガラスの微量元素組成の局所分析などによって、この流紋岩質ガラスの成因（結晶分化によるものか、地殻の熔融によるものか）を検討する必要がある。以上の内容は、日本火山学会 2020 年秋季大会で発表した。

iii) 大沢スコリアと大淵スコリアの分析（常葉大学）

富士火山大沢火砕流の噴出物と対比するため、同時期の噴出物である大沢スコリアの層序細分試料の特徴抽出をおこなったほか、同様の解析を大淵降下スコリアについてもおこなった。また、形状と噴火様式との関連について考察した。

iv) 東山麓のスコリア連続堆積物の分析（東京大学）

令和 1 年度に引き続き、協力機関である山梨県富士山科学研究所との共同研究として、東山麓に連続して堆積した新富士期の爆発的噴火による堆積物についての分析をおこなった。令和 1 年度には、約 2900 年前に発生した御殿場山体崩壊の前後で噴出物の石基組織に大きな変化があることを見出した。すなわち、山体崩壊の前後を比較すると、石基のガラス量、気泡量が増加する一方で斜長石微結晶量が大きく減少しており、爆発性が高い噴火によって急激に冷却されたことが示唆された。このため、令和 2 年度は、そのようなマグマシステムの変化の原因について検討するため斑晶組成や全岩化学組成を分析した。斜長石斑晶とかんらん石斑晶の組成は山体崩壊の前後ではほとんど変化しておらず、また、全岩化学組成は山体崩壊の前から富士山としては比較的分化した組成であり、その傾向は崩壊後も変化していない（図 13、図 14）。これらのことから、噴火の爆発性が急激に高まった要因として、マグマの温度上昇やマグマの含水量増加は除外される。一方、山体崩壊による火道浅部での荷重現象の影響を評価すると、爆発性が高まりや噴出物の急冷を説明できることがわかった。この結果は、たとえ山体崩壊量は火山体の体積と比較すると非常に小さくても、山体崩壊の発生は後続する噴火に長期にわたって影響を与えることを示唆しており、噴火推移の推定に重要な要素を見出すことができた。

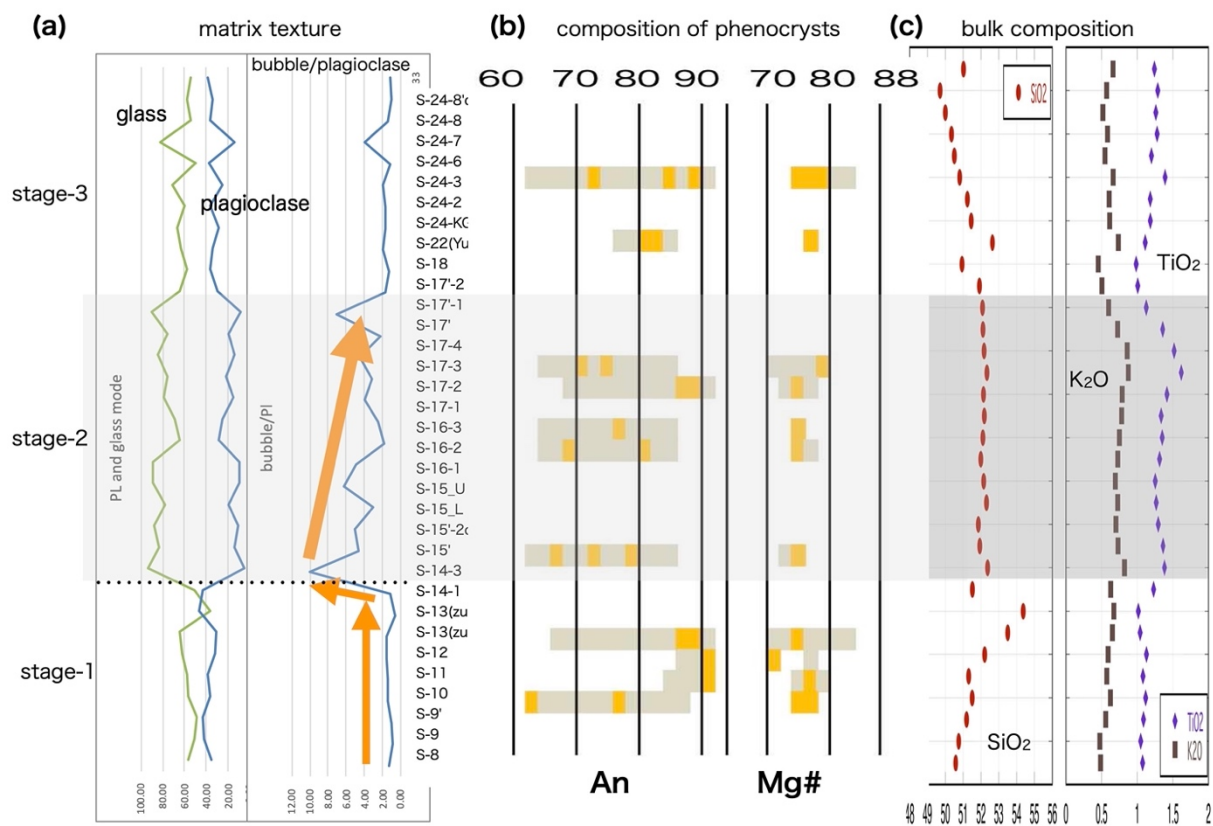


図 13 約 4000 年前からの爆発的噴火の火山灰の連続露頭で観察された時代変化。(a) 石基のガラス、斜長石量と気泡量の変化。Stage-1 と Stage-2 の境で御殿場山体崩壊が発生している。(b) 斑晶（斜長石、かんらん石）組成の時間変化。(c) 全岩組成の時間変化。

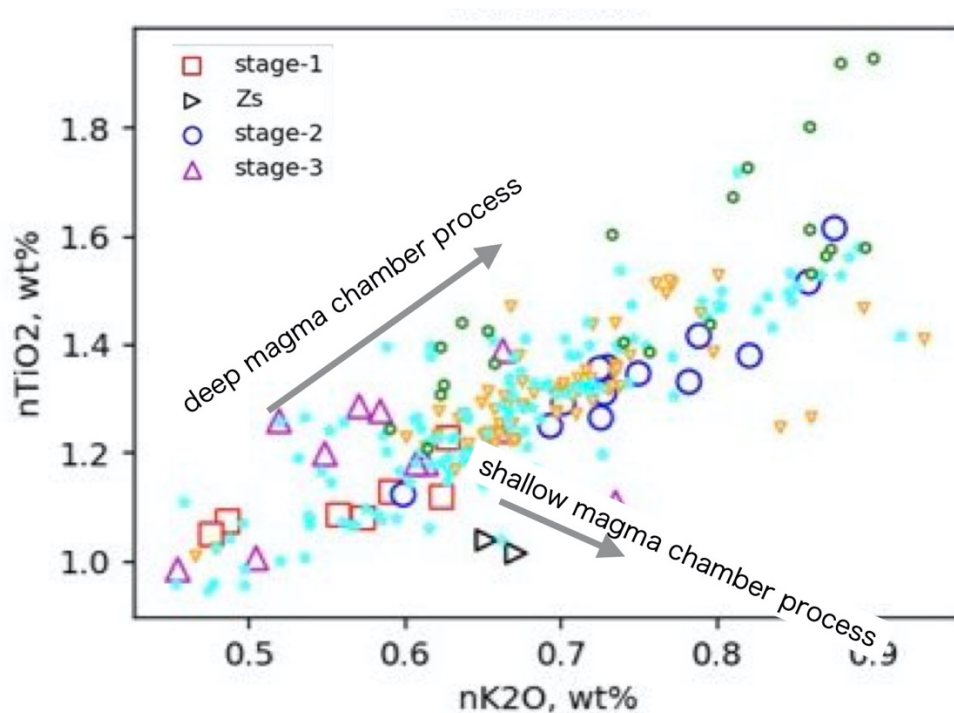


図 14 全岩組成, K_2O , TiO_2 の組成分布。深部でのマグマの結晶分化では、 K_2O の増加に伴い TiO_2 が増加する。一方、浅所での結晶分化では、磁鉄鉱の晶出のため、 K_2O の増加にともなって TiO_2 は減少する。Stage-2 では、組成分布は右上がりであり、富士山の他の時期と同様に、深部での結晶分化が支配的であったことがわかる。左下に伸びる分布を示す▷印は砂沢噴火。

d) 伊豆東部火山群（静岡大学）

伊豆大室山噴火の火道浅部過程を調べた。伊豆大室山は、約 15 万年前から活動を続ける伊豆東部火山群の単成火山のひとつで、約 4000 年前に噴火を発生し、全岩 $SiO_2 \sim 55$ wt.% の玄武岩質安山岩マグマを噴出した。この噴火では、ストロンボリ式噴火によって伊豆東部火山群最大の火砕丘である大室山を形成するとともに、火砕丘の麓の火口から多量の溶岩流を流出したことが知られている（古谷野, 他, 1996)¹⁸⁾。本研究では、火砕丘形成期に噴出したスコリアとその後に流出した溶岩流について、石基中の斜長石の定量組織解析をおこない、同噴火の火道浅部過程について検討した。

スコリア中の石基斜長石について結晶数密度サイズ分布（CSD）を調べたところ、結晶サイズとサイズ数密度の間に明瞭な屈曲が見られた（図 15）。そこで、この CSD 屈曲サイズよりも粗粒な結晶を微斑晶、細粒な結晶をマイクロライトと区別した。石基の元素濃度マッピングの結果、斜長石微斑晶では高 An# のコアの外側に厚さ 10 μm 程度で低 An# のリムが見られた。これに対し、マイクロライトの化学組成は一粒子内ではほぼ均質であり、An# は微斑晶のリムとほぼ同じであった。これらの結果から、大室山スコリアの石基は 2 段階の結晶作用によって形成したと考えられる。微斑晶とマイクロライトを区別しない場合、石基斜長石の結晶量と数密度の間には明瞭な相関が見られなかったが、CSD に基づいて微

斑晶とマイクロライトを区別したところ、それぞれについて結晶量と数密度の間に正の相関が見られた。微斑晶については、層序の下位から上位に向かって結晶量と数密度が徐々に増加する傾向が見られたのに対し、マイクロライトでは結晶量と数密度が徐々に減少した。一方で、溶岩流の石基にはマイクロライトサイズの斜長石が見られなかった。石基斜長石には 10 μm よりも厚い低 An# のリムが見られ、その結晶数密度は層序の上位のスコリアに含まれる微斑晶と同程度であった。

スコリアの石基ガラスの化学組成を分析したところ、MgO が 2.5-3.9 wt.% の範囲で変動し、MgO の減少に伴って SiO_2 が 58-60 wt.% の範囲で増加した。この組成バリエーションを rhyolite-MELTS (Gualda et al., 2012)¹⁹⁾ を用いた H_2O 飽和条件下での冷却結晶作用シミュレーションの結果と比較したところ、10 MPa 以下の圧力条件でうまく説明できた。このことから、スコリアを形成したマグマ中では、10 MPa より低圧条件でマイクロライトの結晶作用がおこったと考えられる。

Hatada et al. (2020)²⁰⁾ は、微斑晶の結晶作用がおこった深さをおよそ 3 km と見積もっている。一方で石基ガラス組成と MELTS シミュレーションの比較結果は、マイクロライトの結晶作用がおこった深さが ~ 400 m より浅部であったことを示唆する。溶岩中の石基中の斜長石数密度が、スコリア中の微斑晶の値と同等であったことから、マイクロライト形成深度よりも深部において、溶岩流の流出した側火口への火道の分岐がおこったと考えられる。スコリア中の石基結晶量は、微斑晶のみでは粘性 - 脆性遷移のおこる 40 vol.% に到達しないが、マイクロライトが形成すると 40 vol.% を大きく超える。このことから、溶岩流はマイクロライト結晶作用を経験しなかったために噴出後も液体としてふるまうことができ、地表を流れ下ることができた。一方でスコリアを形成したマグマは、マイクロライトを形成したことで粘性 - 脆性遷移をおこしたため、破碎して爆発することができた。溶岩流が地表を流動中にマイクロライトを形成していないことから、マイクロライト結晶作用の駆動力は脱ガスではなく、冷却であった可能性が高い。冷却結晶作用をおこし、マイクロライトを形成して高粘性化したマグマは、火道浅部でプラグを形成した。このプラグは、深部より供給されるガスによって破碎されて噴き飛ばされ、その後に供給されたマグマによって修復されるというサイクルを繰り返した。

火砕丘形成期のスコリアにみられた、層序の下位から上位にかけてのマイクロライトの量・数密度の減少は、時間とともに火道浅部でのマグマの過冷却度が減少したことを示唆している。この過冷却度の減少は、深さ 3 km より深部からのマグマ供給率が増加したためと考えられる。このマグマ供給率の増加によって、深さ 3 km のマグマだまりに沈積していた微斑晶が巻き上げられたため、層序の下位から上位にかけて微斑晶量が増加した。そして、山頂火口下でのプラグの形成とマグマ供給量の増加によって火道内の過剰圧が上昇したため、火砕丘の麓に新たな火口が開き、溶岩流が溢流した。以上の仮説が正しければ、本研究の結果は、噴出するスコリア中のマイクロライト量の変化が、マグマ供給率の変化や溶岩流溢流の開始を予想するうえでの手がかりになり得ることを示している。

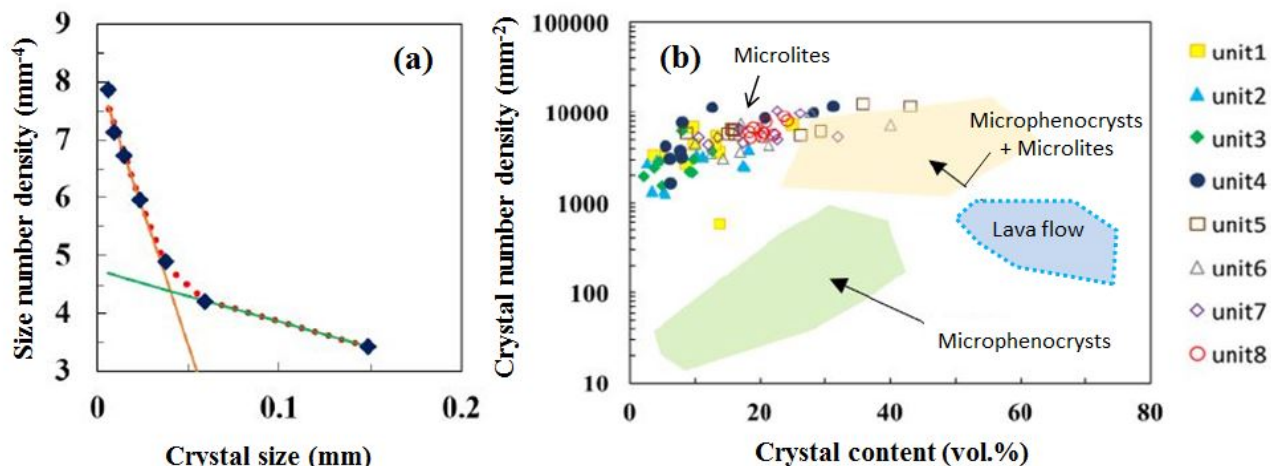


図 15 大室山スコリアの石基斜長石。(a)結晶数密度サイズ分布 (CSD) の例。本研究では、CSDの屈曲点より粗粒の結晶を微斑晶、細粒の結晶をマイクロライトとそれぞれ呼ぶ。(b) 石基斜長石の結晶量と数密度の関係。

e) 雲仙 (東京大学)

前年度に続き平成噴火試料を分析するとともに、1792 年噴火 (新焼溶岩) の試料分析に着手した。平成噴火と 1792 年噴火では噴火様式が異なっている。このため、両者のマグマ供給系の違いとマグマ供給系の時代変遷についての検討をおこなっている。

f) 阿蘇 (熊本大学)

完新世玄武岩質マグマの存在深度および脱ガス深度の推定をおこなった。これまでに解析した完新世後期の玄武岩質噴出物 (中岳、上米塚、往生岳、杵島岳火山噴出物) の情報を総括し、苦鉄質端成分マグマの揮発性成分含有量を決定した。また得られた情報に基づき、苦鉄質端成分マグマの存在深度および脱ガス深度の推定をおこなった。火山の脱ガス現象はマグマの分化過程や噴火様式と密接に関係しており、かつ平穏期および噴火初期においても観察される現象であるため、それらに関する物質科学的制約は噴火事象分岐予測に役立つと期待できる。

まずかんらん石のメルト包有物および斑晶鉱物の化学組成から、玄武岩質端成分マグマの揮発性成分含有量の情報を得ることができた (>4.68 wt.% H_2O , 3750 ppm S, 716 ppm Cl, 324 ppm F)。これまでに報告されている阿蘇の最も高い CO_2 量 (340 ppm, Saito et al., 2018)²¹⁾を仮定すると飽和圧力は 2.7 kbar となり、地表下約 10 km の深さに相当する。メルト包有物には収縮気泡が観察されることから、包有物内の CO_2 の多くは気相に分配されていると考えられる (e.g., Moore et al., 2015)²²⁾。つまりメルト CO_2 量による推定深度は最小見積もりであり、実際のメルト捕獲深度はより深所であると考えられる。Abe et al. (2010)²³⁾ は地表下約 11 - 25 km に低速度層の存在を報告しており、今回得られた結果とよく一致している。

次に噴出物の解析により得られた情報に基づき、玄武岩質マグマの脱ガス深度について検討をおこなった。以下の理由から、脱ガスモデルの計算には苦鉄質端成分マグマを対象

とした：1) 報告されている CO_2 および SO_2 ガスの放出量は中岳マグマの噴出物量および揮発性成分量から予想されるガス放出量と比べて著しく多い（過剰脱ガス）、2) CO_2 の過剰脱ガスは SO_2 よりも一桁大きく、火山ガスはより深所のマグマ由来であることが示唆される、3) 2008 年以降のマグマ溜まりの収縮鈍化、および 2014 年の膨張イベントは、中岳マグマ溜まりへのマグマ供給を示唆する。脱ガスモデルの計算には SolEx (Witham et al., 2012)²⁴⁾ を使用し、メルト包有物の解析で得られた 1090°C 、QFM+1.4 を仮定した。脱ガスモデルの計算結果を図 16 に示す。閉鎖系において、上昇するマグマと平衡な火山ガスの CO_2/S 比は圧力の低下に伴って減少し、報告されている CO_2 に富んだガスは地表下約 10 - 13 km (約 2.6 - 3.3 kbar) の深さでマグマと平衡であることがわかる。報告されている火山ガス組成のバリエーションは約 10 km で分離した深部由来ガスと中岳マグマから放出される浅部由来ガスの混合で説明することができる (図 17)。本成果をまとめた論文は既に受理され、出版済みである²⁵⁾。

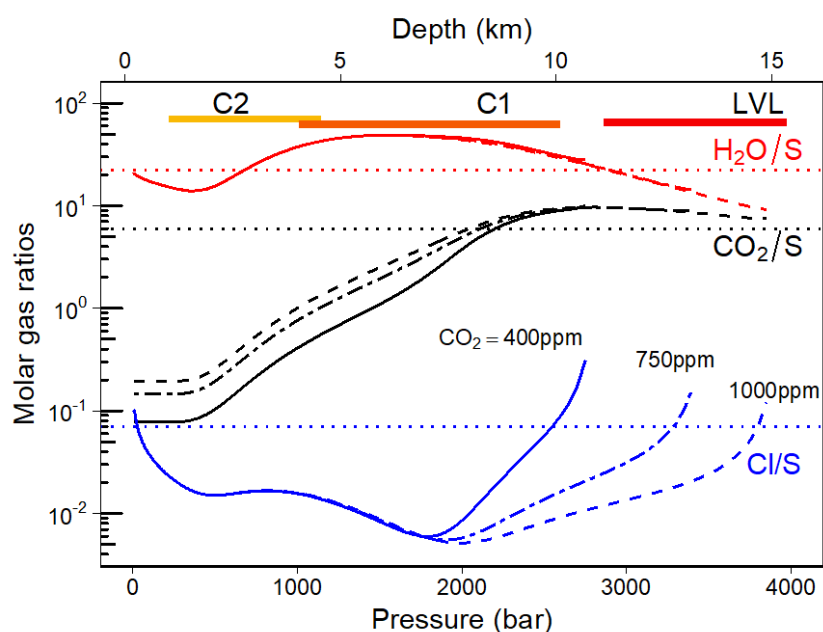


図 16 玄武岩質端成分マグマと平衡な火山ガス組成の圧力変化 (Kawaguchi et al., 2021)²⁵⁾。400 - 1000 ppm CO_2 の場合について求めた。点線は火山ガスの報告値で、高圧成分 A に相当する (Shinohara, 2013²⁶⁾; Shinohara et al., 2018²⁷⁾)。上部のバーは浅部マグマ溜まり (C1, C2) と深部マグマ溜まり (LVL) の圧力範囲を示す。

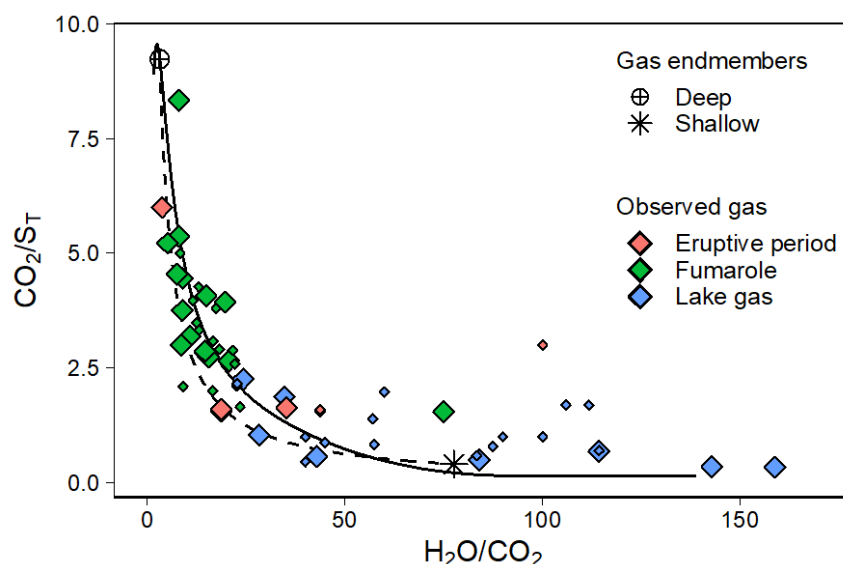


図 17 脱ガスモデルで得られた火山ガスの組成変化（実線および破線）と阿蘇火山における観測結果との比較（Kawaguchi et al., 2021）²⁵⁾。火山ガスの観測データは Shinohara et al. (2018)²⁷⁾ から引用した。実線は閉鎖系での脱ガストレンド（図 16 の 750 ppm CO₂）、破線は深部由来の CO₂ に富むガスと浅部由来ガスの混合線を示す。

g) 桜島

i) ブルカノ式噴火噴出物の斑晶メルト包有物分析に基づく噴火直前のマグマ挙動の研究（東北大学）

令和元年度に引き続き、桜島火山の 1955 年以降のブルカノ式噴火噴出物中の斑晶メルト包有物の解析を行った。分析した。その結果、以下のことが明らかになった。

① メルト包有物（MI）を含む斜長石の篩状組織は、粗いものと細かいものに区別される。これらは、それぞれ異なる環境（圧力・化学組成など）で形成されたと考えられる。これらの篩状組織に含まれるメルト包有物の組成には、相異が見られ、粗いものの方がより苦鉄質であり、最大含水量は高い。このことは、粗い篩状組織の MI は、マグマ供給系のより深部で形成されたと考えられる。

② 溶岩質の試料において、輝石に含まれる MI の方が、斜長石に含まれる MI よりも、高い含水量を持つものが多い。一方、軽石質の試料ではこのような系統的な差はみられない。これは、輝石の方が斜長石よりも MI の脱水に関与する水・水素の拡散速度が低く、かつ、輝石からの脱水の時間スケールは、溶岩質のマグマが火道浅部で形成されてから破碎・急冷される時間スケールと同程度であることを示す。斜長石中の MI の脱水の時間スケールは、これよりも短い。

③ Johnson and Rossmann (2013)²⁸⁾ による斜長石中 MI の脱水速度を用いると、爆発日時と軽石質噴出物中の MI の含水量から、マグマの浅部貫入日時を推定することができる。1 気圧、半径 1 mm の球状結晶を仮定した場合、温度 800、900、1000 °C において、それぞれ含水量が 1/2 に低下する時間は 34 日、1.3 日、6 時間となった。今後この推定をより定量的にするは、(ア) 比較的深部で定置し完全に再平衡化するまでの時間と、浅部で定置し再平衡化が途中まで進行する時間の比較 (イ) Single step decompression と multi-step

decompression の比較 を計算によっておこなうとともに、斜長石リムの組成などからこれらを区別することを考える必要がある。

④ 溶岩質の噴出物に含まれる MI には、ナノライトが晶出しているものが見られた(図 18)。ナノライトが晶出していても含水量が定量可能な場合があり、その値はいずれも 1.5wt.% 以下であった。この濃度はブルカノ式噴火の溶岩質噴出物に含まれる MI の含水量として一般的であり、MI が火道浅部で脱水したのちにナノライトが晶出していることを意味する。現在、ナノライトの晶出条件を決定する実験をおこなっており、ナノライト晶出に必要な時間と温度・圧力の関係が得られつつある。この実験結果と、③の斜長石脱水速度の見積りを併せることにより、マグマが浅部まで上昇してから噴火急冷までの時間を見積もることができると考えられる。また、噴出物の採取されたブルカノ式爆発の発生日時と、それに先立つマグマ貫入の推定日時、および BL 地震の発生回数記録を比較し、BL 型地震の発生とマグマの貫入との関係について考察をおこなうことができるようになる。

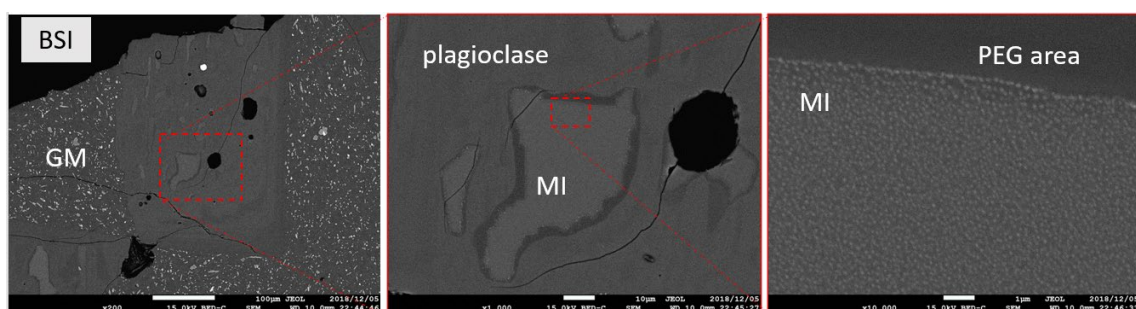


図 18 桜島火山の溶岩質のブルカノ式噴火噴出物に含まれる斜長石斑晶(左)のメルト包有物(中)に見られるナノライト(右)。スケールはそれぞれ 100、10、1 ミクロン

ii) 火山灰モニタリング手法の開発 (常葉大学)

前年度までに引き続き、桜島では火山灰試料の連続採取を継続するとともに、測色データ解析をおこなった。霧島新燃岳の試料も併せ、分級試料の測色時系列データの導出も継続しておこなった。FE-EPMA の反射電子像の画像解析システムを用いた粒子分類については、粒径サイズ、形状、輝度分布など、分類基準について検討を継続した。

h) 諏訪之瀬島 (常葉大学)

諏訪之瀬島火山におけるマグマ供給系と噴火・休止様式の変遷のメカニズムを理解するため、前年に引き続き、3 万年前以降の大規模・中規模噴火による噴出物の斑晶鉱物組成、石基ガラス組成の測定をおこなった。また今年度は、特に前年までに高時間分解で採取した試料の 1813 年噴火およびその直前の連続火山灰土の試料について、分析を進めた結果、石基ガラス組成が噴火の最盛期である準プリニー式噴火に向かって系統的により苦鉄質になったこと、特に噴火現象が変化するのに同期して急激な MgO 増加が認められることが明らかとなった(図 19)。また、輝石組成についても、最盛期に向かって逆累帯構造を示す斑晶から正累帯構造を示す斑晶が増加することが明らかになった(図 20)。

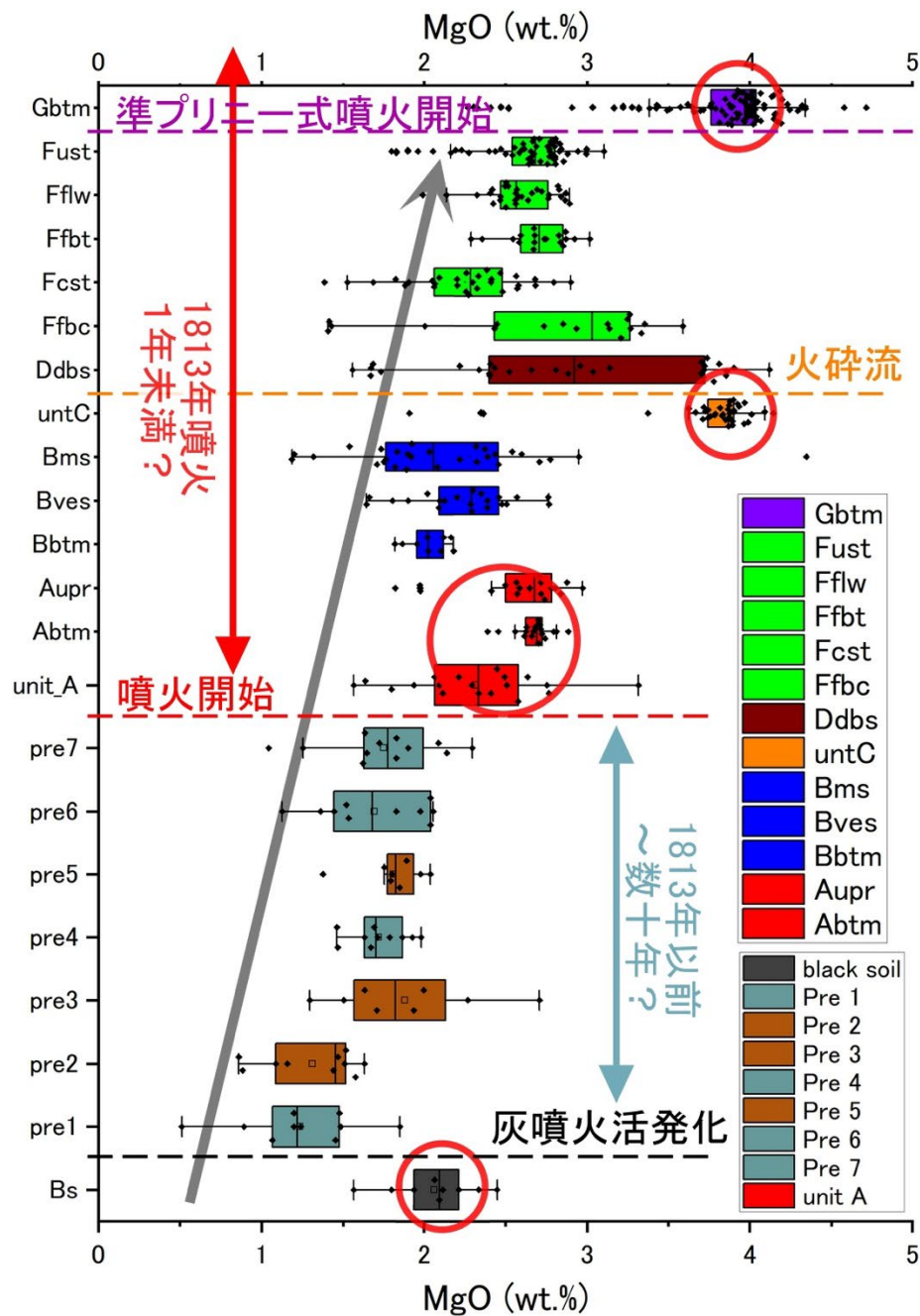


図 19 諏訪之瀬島火山 1813 年噴火前から最盛期までの細分採取噴出物試料の石基ガラス組成変化。期間を通した連続的 MgO 増加だけでなく、噴火現象の変遷に伴って短期間でのパルス的な MgO 上昇が認められる (赤丸)。これらのことは、比較的マフィックなマグマが既存のやや珪長質なマグマにパルス的に注入したこと、長期的には徐々に苦鉄質化が進む中で、注入から注入の間では、浅部での上昇過程の違いによって結晶度の異なる噴出をおこなったことが推察される。

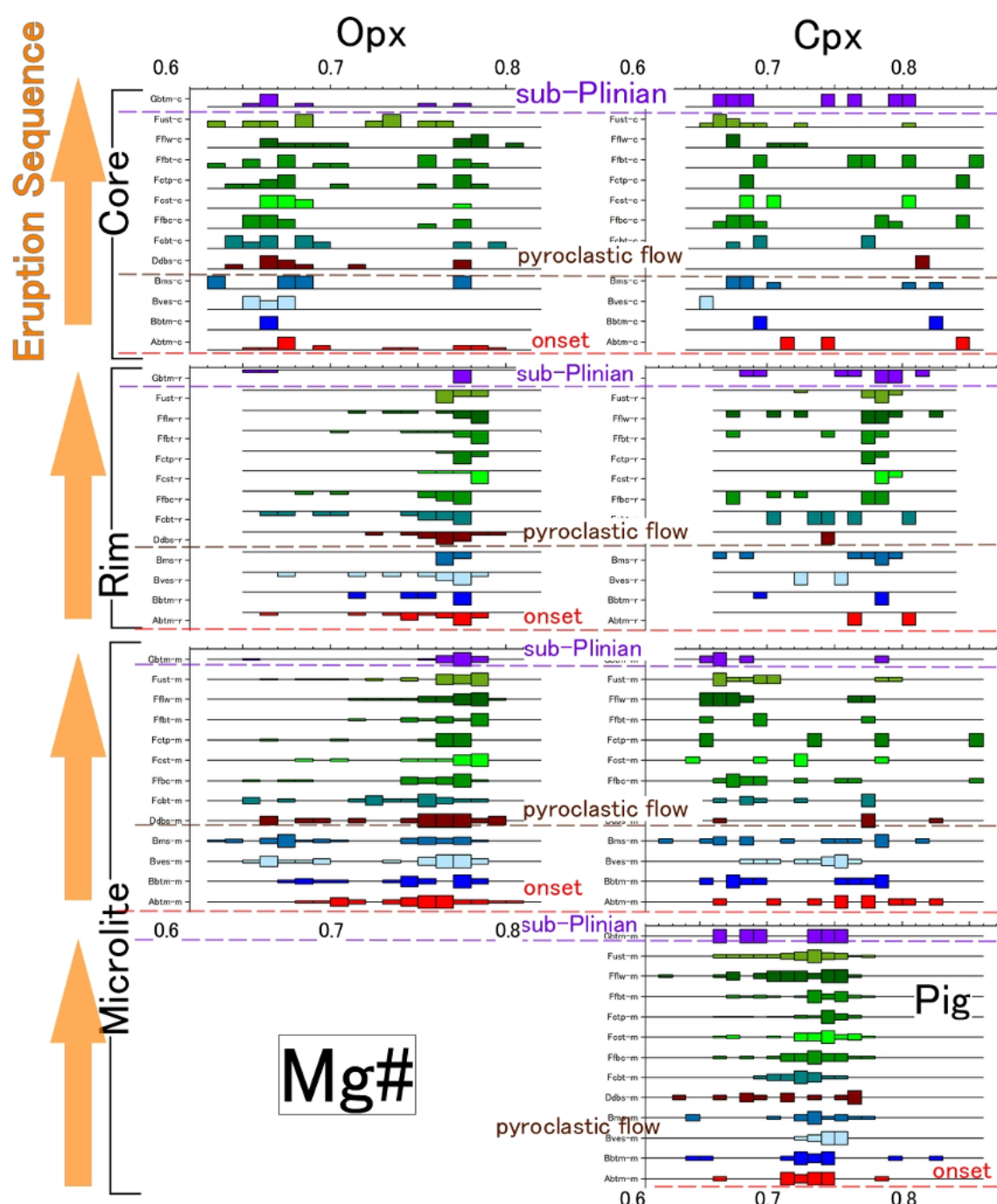


図 20 諏訪之瀬島火山 1813 年噴火開始から最盛期までの細分採取噴出物試料の輝石組成 (Mg #) の変化。両輝石ともコア組成では後半で、リムや石基結晶の組成は前半でバイモーダルな傾向を示す。噴火最盛期に向けて (矢印) 単斜輝石の逆累帯が顕著になっている。直方輝石は期間を通して逆累帯を示すが、最盛期に向けてコアもより Mg # に富む組成の斑晶が増加している。石基結晶も上位に向けて Mg に富む傾向がみられる。噴火の進行に従ってマフィックマグマの珪長質側マグマへの注入が進むと同時に、後半に向かって混合・均質化が進んだことが推察される。

2020 年末から活発化した噴火活動に際しては、京都大学防災研等と連携して現地緊急調査による火山弾・火山灰試料の採取をおこなうとともに、噴出物の分析をおこなった。火山弾の全岩化学組成は 20 世紀以降の活動とほぼ同様の玄武岩質安山岩組成であった(図 21)。石基ガラス組成は、比較的分化の進んだ MgO に乏しく、2000 年以降の活動による噴出物の大部分と同様の組成範囲であった。1813 年噴火以前の火山灰土と同様の組成範囲であるものの、現時点で、1813 年噴火最盛期のような MgO \sim 4 wt.%レベルの苦鉄質化は認められていない(図 22)。一連の活発化は継続中であり、試料採取・分析についても継続中である。

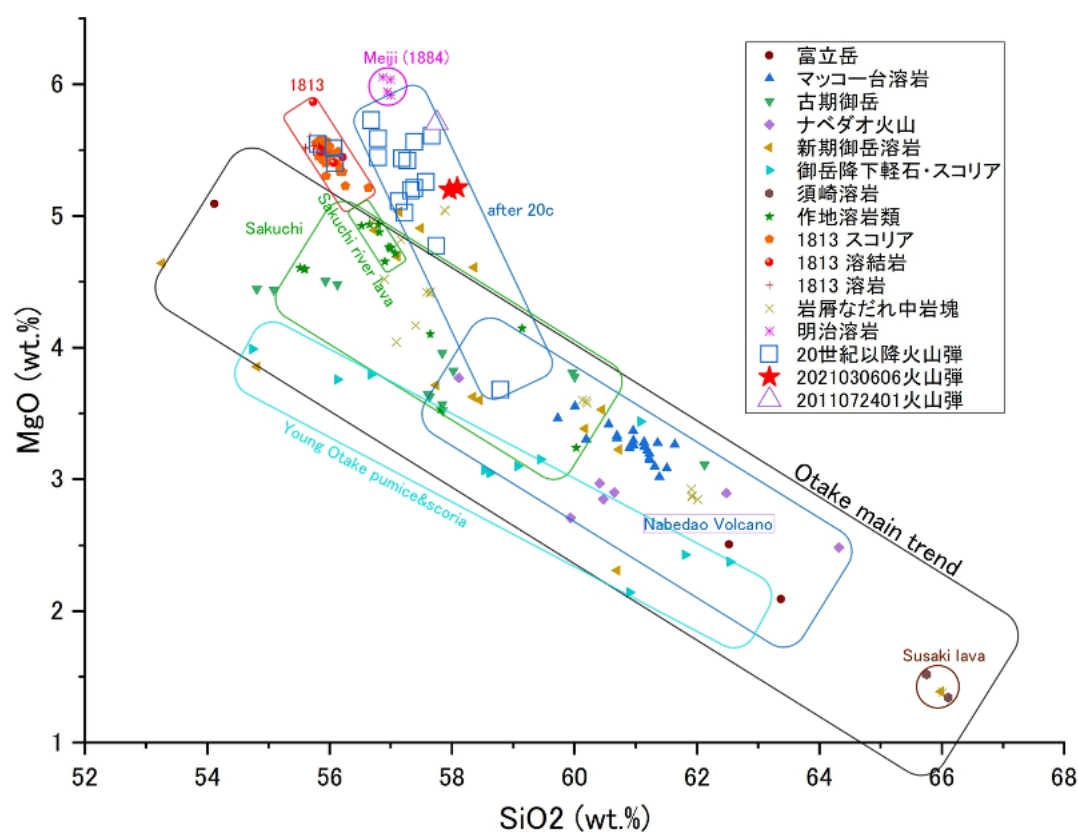


図 21 諏訪之瀬島火山 2020 年 3 月の火山弾全岩化学組成 [★；嶋野, 他(2013)²⁹⁾に加筆修正]。若干 SiO₂ 増加の傾向があるが、概ね 20 世紀以降の噴出物と同様の組成を示している。

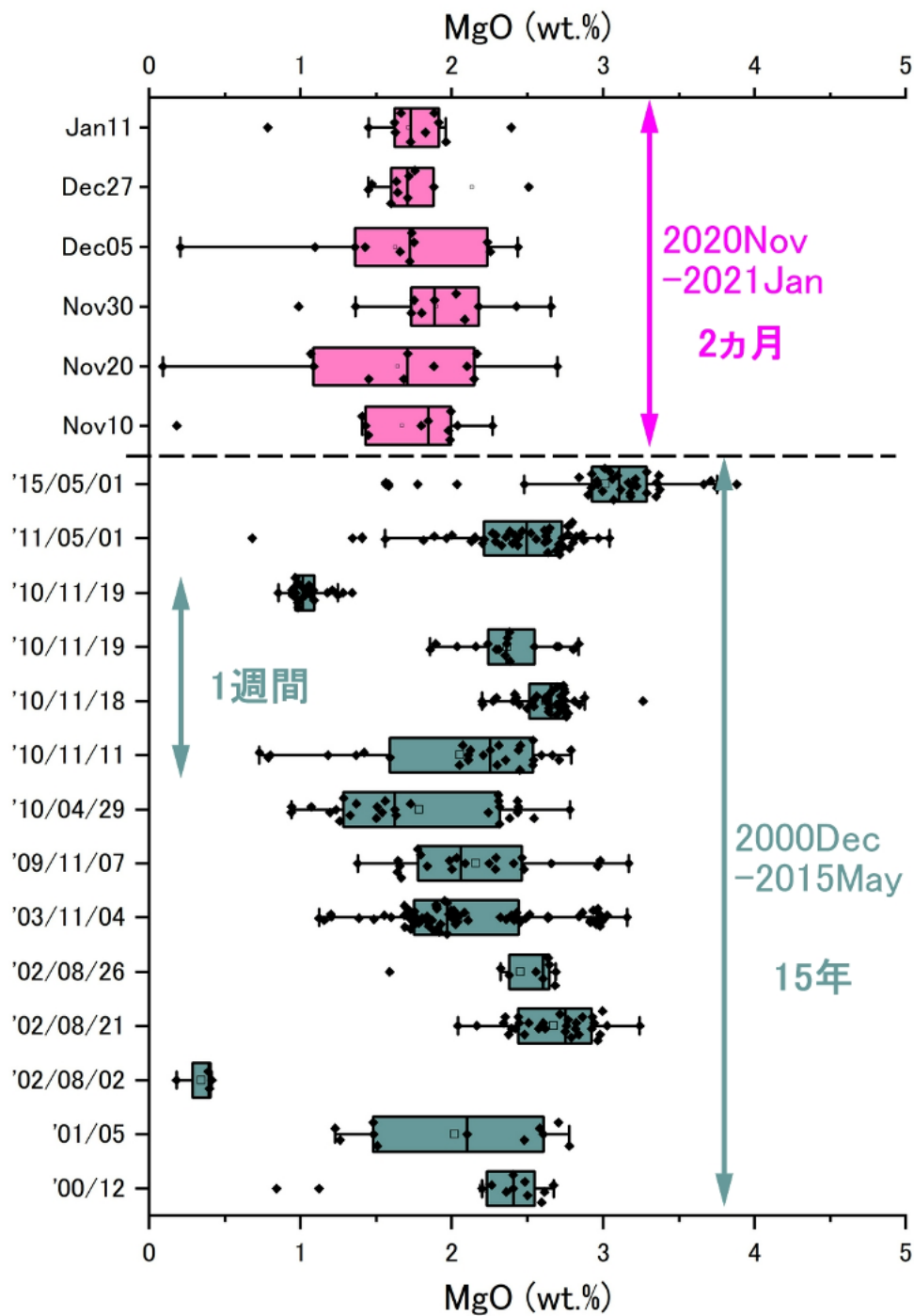


図 22 諏訪之瀬島火山 2020 年末以降および 2000 年以降の噴出物試料（連続試料ではない点留意）の石基ガラス組成の変化。図 19 の 1813 年噴火と比較して系統的または顕著な MgO 増加は認められていない。

i) 西之島 （東京大学）

噴火対応として 2020 年噴火試料の分析をおこなった。この最新の噴火では、溶岩の噴出率が急増するとともに、噴火の後期ではこれまでの溶岩流主体の噴火から火山灰放出に噴火様式が変化した。採取された火山灰は玄武岩質安山岩で、これまで知られているいずれの西之島の火山噴出物よりも全岩組成で SiO_2 に乏しく、深部で新しいマグマが関与したことを示唆している。火山灰の全岩組成と石基ガラス組成に基づき、2)c) で報告した MELTS データベースを用いて、火山灰の全岩組成から石基ガラス組成を導ける条件の絞り込みをおこなった（図 23）。酸素雰囲気については、QMF、QMF+1、QMF+2 の 3 通り、含水量は 0.5 wt% 刻みで 0.5–6.0 wt.% の 12 通り、圧力は 1 bar から 4000 bar まで 250 bar 刻みで 17 通りに条件を変化させて、平衡結晶化作用での液組成変化を追跡したところ、噴出物の石基ガラスを再現できる条件は、酸素雰囲気 QMF、含水量 0.5 wt.%、温度 1075–1090℃ と、かなり限定された範囲に絞り込むことができた。現在は、斑晶組成の分析結果を併せることで、上述のマグマの分化条件の妥当性についての検討を継続している。

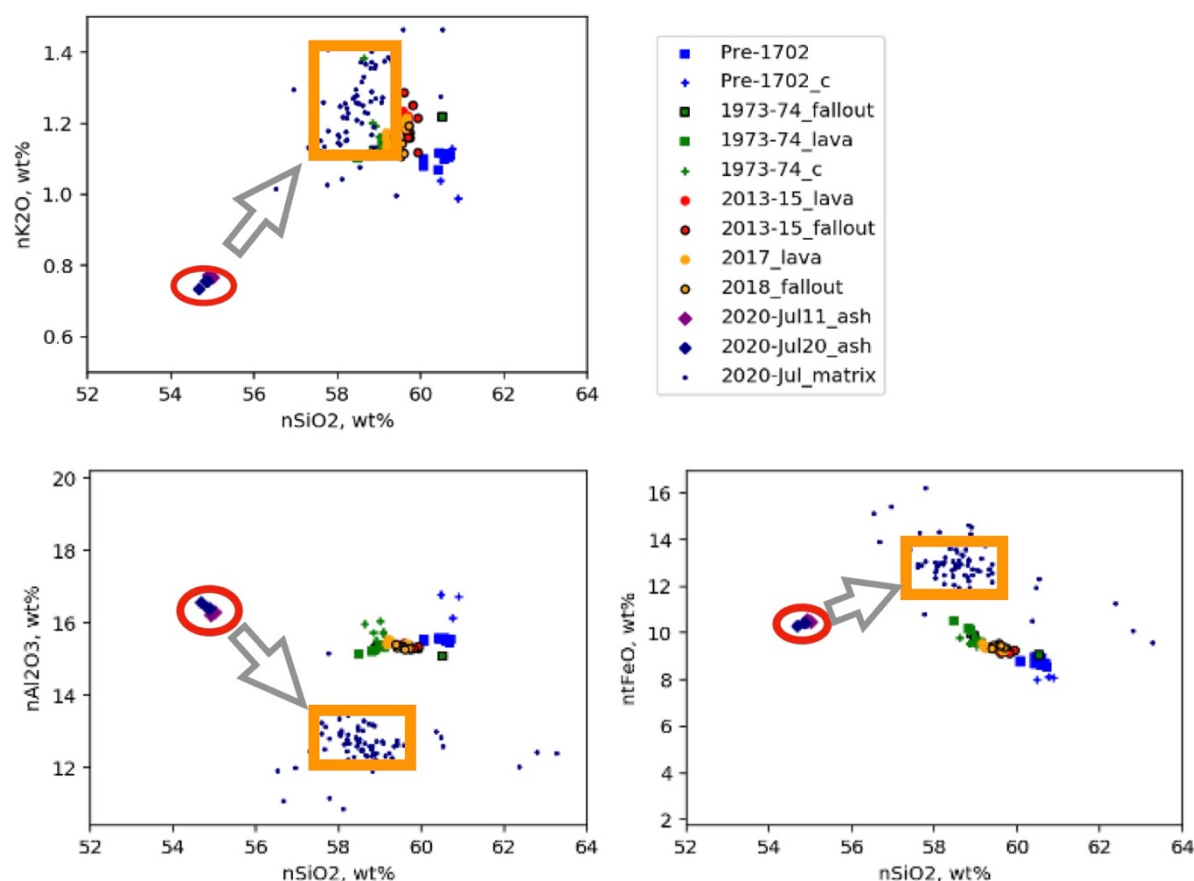


図 23 2020 年西之島噴火の全岩化学組成と石基ガラス組成の比較。2020 年噴火の全岩化学組成は赤丸の範囲であり、これまでの時期の噴出物組成とは大きく異なっている。青小点は 2020 年噴出物の石基ガラス組成で、このような組成範囲（橙色四角）を全岩組成から導ける結晶分化条件を MELTS で検討した。

j) 解析手法の検討

i) MELTS の活用方法の改良と応用（産業技術総合研究所）

本研究は、噴火事象分岐判断手法の開発に向け、噴火前のマグマの温度・圧力・含水量を明らかにするための手法開発として、マグマの熱力学計算ソフトウェア（Rhyolite-MELTS ; Gualda et al., 2012）¹⁹⁾の活用方法を継続して改良するとともに、天然試料への応用を実施する。2018年度は、rhyolite-MELTS v. 1.2.0のソースコードに若干手を加えることによって、x-window版のMELTSの問題点が回避され、高性能なPCマルチコアCPUを駆使した効率的な計算が可能となった。2019年度は前年度に開発した計算技術を御岳山の噴出物に応用し、多数の犠牲者をだした2014年噴火が、その7年前の2007年山体直下に貫入したマグマの熱源によってひきおこされた可能性があることを明らかにした(Miyagi et al., 2020)³⁰⁾。この成果は、非常に難しいとされる水蒸気噴火の予測が、中長期的な地球物理観測によってある程度可能になることを示したという点で、噴火事象分岐判断に貢献するものである。

2020年度は2018年度に開発した計算技術を若干改良たうえて、阿蘇の火山噴出物に応用し、別予算により得られた阿蘇の噴出物化学組成データを解釈した。その結果、大規模カルデラ噴火をひきおこす大量の珪長質マグマの原料とその生成プロセスに関して、世界でも例をみないモデルを提案するに至った(図24、Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。大規模カルデラ火山の根本的な駆動力は、マントルから上昇した玄武岩マグマがもたらす熱エネルギーである。カルデラ火山のマグマ供給系に注入された「玄武岩マグマの量」は、中長期的な噴火事象予測にとって重要なパラメータである。従来のモデルで玄武岩マグマは縦に長いマグマ供給系の最下部層に注入・蓄積され则认为されており、その場所は地表から遠いため、注入量の見積りは殆んど不可能であった。本研究のモデルの特徴は、玄武岩マグマが地下に貯まる前に、いったん地表浅部まで上昇・脱ガスする点である。その場合、火山ガスの放出率とマグマのガス成分濃度を比較することにより、単位時間あたりにマグマ供給系に注入される玄武岩マグマの量が推定できる。別予算によって得られた阿蘇噴出物の化学組成測定値(主要・揮発成分濃度)に対して、Rhyolite-MELTSを用いてマグマの組成や密度等を計算したところ、玄武岩マグマは上下に10数キロ以上も移動・脱ガスするのに必要な密度差をもつことと(図25)、もしも現在観察される中岳と同程度の脱ガス活動が継続すれば、阿蘇4の流紋岩質マグマをつくるのに必要な量の脱ガス玄武岩が数万年程度で生じうることを示された(図26、Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。

これらの成果に加え2020年度は、Rhyolite-MELTSの計算結果の一般公開に必要な資源や技術についても検討し、実現への目処を立てた。具体的には、MELTSの計算結果からマグマの特徴把握に有用な情報を把握しやすいよう、大量の結果データを図化と抽出によって集計する方法の検討を行った。また、データ公開に向けて計算結果の容量を圧縮する方法を検討するとともに、高速な記憶装置を導入し、ファイル転送速度の効率化を通じた研究全体の効率化に取り組んだ。これらの解析環境向上の成果をもとにして、有珠火山や屈斜路火山について、熱力学計算結果をとりまとめつつあり、屈斜路火山については今年度採取した噴出物の解析結果との比較を進めている。

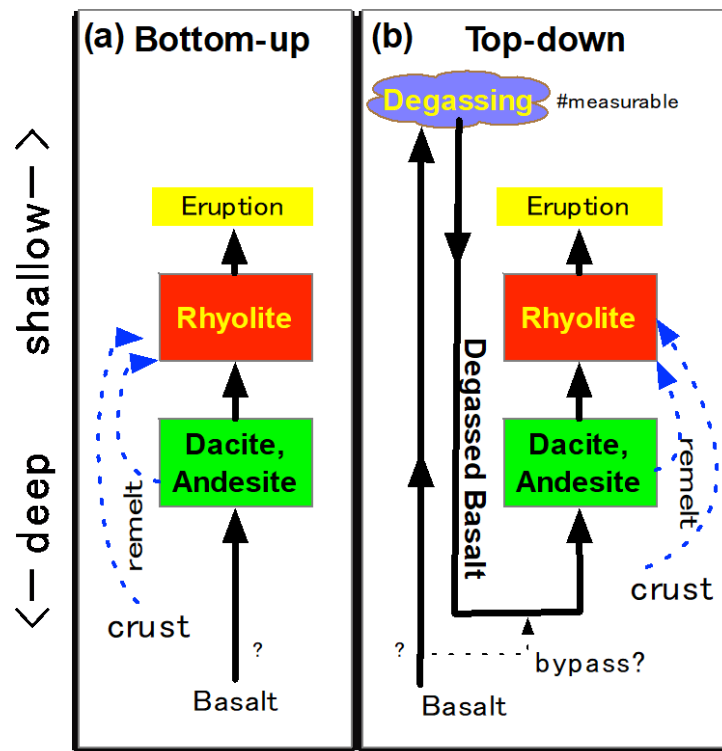


図 24 カルデラ火山の珪長質マグマの起源の概念図 (Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。(a) Bottom-up: 従来の考え方では、マントルから上昇した玄武岩マグマが地殻内で結晶分化するか、周囲の地殻を部分溶融して、珪長質メルトが生ずる。玄武岩マグマは観測者から最も遠いマグマ供給系の底部に注入されるため、量の推定は困難である。(b) Top-down: 新しいアイデアでは、揮発成分に富む玄武岩マグマが地表近くで脱ガスし、地下深くに戻り、結晶分別や地殻の部分溶融によって珪長質メルトを生成する。このアイデアの特徴は、火山ガス放出量観測値とマグマの揮発性濃度分析値の組み合わせにより、脱ガスした玄武岩の量が推定できることである。

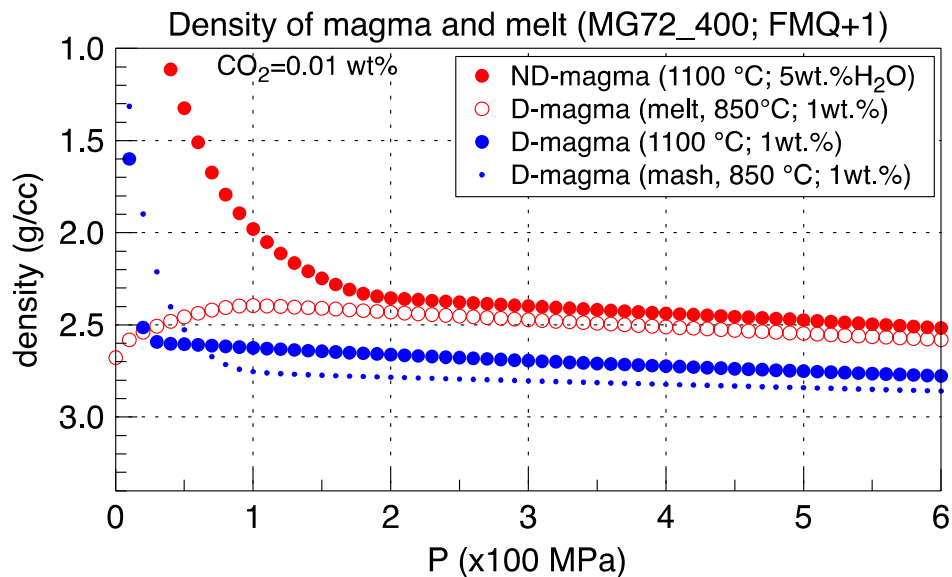


図 25 Rhyolite-MELTS で計算したマグマの密度(Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。別予算でおこなった噴出物の化学分析により、阿蘇カルデラのマグマは 6 つ(A, B, C, D, E, F)に分類された。分類「B」はマントルから供給された高温・高含水量マグマ。分類「D」は B が地表付近で脱ガスして生じる高温・低含水量マグマ。分類「F」は B が脱ガスせずに冷却されて生じる比較的 K_2O に乏しいより珪長質なマグマ。「E」は D が分化して生じる安山岩質なマグマ。「A」は E が更に分化して生じる比較的 K_2O に富む流紋岩質マグマ。分類「C」は他のグループが混合したものである。 K_2O に富む流紋岩質マグマが脱ガスした玄武岩マグマから生じるメカニズムについては、Miyagi et al. (2012)³¹⁾を参照されたい。塗りぶしの赤丸：阿蘇カルデラに供給されていると考えられる始原的かつ未脱ガスな玄武岩メルト(B マグマに相当；含水量 5 wt%；温度 1100 °C)の密度。白抜き赤丸：B マグマが地表付近で脱ガスしたことによって生じると考えられる脱ガス玄武岩マグマ(D マグマ；含水量 1wt %)が 850 °C に冷却された際に生じる珪長質メルトの密度(A マグマに相当)。塗りつぶしの青丸：温度 1100 °C における D マグマの密度(D マグマに相当)。青点：温度 850 °C における D マグマの密度(図 26 の MASH 部に相当)。

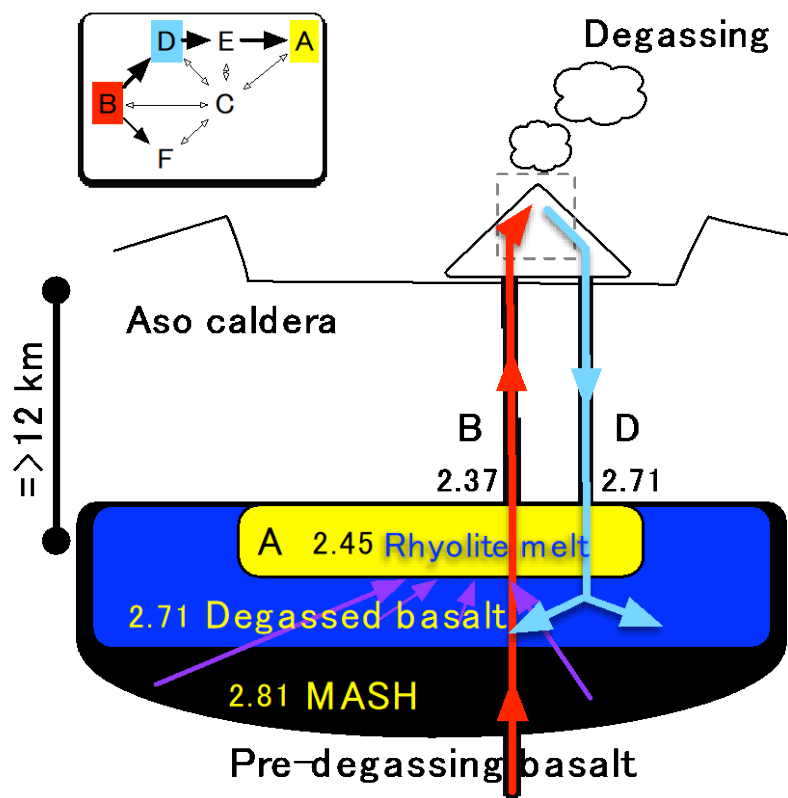


図 26 大規模火砕流噴火前における阿蘇カルデラ下のマグマ供給系の概略図(Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。「B」は、密度 2.37 g/cc の未脱ガス玄武岩質マグマ(図 25)。「D」は、B から作られた密度 2.71 g/cc の脱ガス玄武岩質マグマ(図 25)。阿蘇 4 で放出された珪長質マグマ「A」を生成するのに必要な脱ガスマグマ「D」は約 2500 立方 km である。この量の脱ガスマグマは、現在の阿蘇中岳で見られるような脱ガス活動が数万年継続することで生じうる。マグマが浅所まで上昇・脱ガス後地下深くに戻るモデルは「火道内マグマ対流脱ガス」として既に提案され、この現象は非常に長期間継続すると考えられている(例えば Kazahaya et al., 1993³²; 1994³³; 風早・篠原, 1994³⁴; Shinohara, 2008³⁵)。阿蘇周辺の火山噴出物の観察結果は、現在の阿蘇中岳で見られるような苦鉄質マグマによる噴気活動(degassing)が、阿蘇-4 と阿蘇-3 の間にも起きていたことを支持する。Aso-4 カルデラ噴火後に、降下火砕物と土壌の互層が堆積している(Miyabuchi, 2009)³⁶。この土壌の厚みは、露頭と阿蘇カルデラとの距離が増すにつれて減少する(Ono et al., 1977)³⁷。Aso-4 と Aso-3 の間、Aso-3 と Aso-2 の間で堆積した土壌も、露頭と阿蘇カルデラとの距離が増すにつれて厚みが減少する(Ono et al., 1977)³⁷。これらの観察事実は、(1) 阿蘇カルデラからの距離が遠くなるにつれて、土壌に含まれる火山灰の量が減少したことと(Ono et al., 1995a)³⁸、(2) 現在の中岳のように火山灰を断続的に放出する火山活動と噴気活動が、主要な噴火の間の期間に継続していたことを示している(Ono et al., 1995b)³⁹。別府湾で採取されたコア試料の約 7000 年前のアカホヤ火山灰層の上位には、阿蘇 N7 期-N1 期に対応する苦鉄質な一連の火山灰が発見されている(Furusawa and Umeda, 2000)⁴⁰。過去約 6300 年間のうち特に灰噴火が活発だった

時期は、3800～3600 年前と考えられている (Miyabuchi and Watanabe, 1997)⁴¹⁾。このように、灰噴火を伴う活発な阿蘇の脱ガス活動は、少なくとも最近 7000 年の間、断続的に継続したと考えられる。本研究が提示したモデルにおいて、珪長質マグマの原料は脱ガスした玄武岩マグマであるが、脱ガスマグマ地下に戻る際や貯蔵中に少量の地殻物質が取り込まれる可能性は否定しない。その際、母岩からマグマに取り込まれる地殻物質の量比はマグマ供給系の形状や温度環境等の影響を受けると考えられ、混入比率が時間変化することにより Miyoshi et al., (2012)⁴²⁾ が示したような同位体比の時間変化が生じる可能性がある。Miyoshi et al., (2011)⁴³⁾ の Sr 組成および同位体比データは、Aso-4 で噴出した大量の珪長質マグマに含まれる上部・下部地殻由来の物質は比較的少量であることを示しており、本研究の珪長質マグマ生成モデルを支持すると考えられる。

ii) 地表堆積物の非晶質シリカコーティングを用いた高濃度火山ガスの到達範囲の復元 (東北大学)

有毒な火山ガスの放出は人間の健康や産業に被害をもたらし、地域住民に長期間の避難を強いるなどの災害をもたらす。2000 年 6 月から始まった三宅島の噴火では、全島民が避難を余儀なくされ高濃度の火山ガスの放出が収まらず、2005 年初頭まで約 5 年間の避難を余儀なくされた。将来の火山災害に備えるためには、過去の活動状況を知ることが不可欠であるが、火山ガスの場合には、軽石や火山灰、溶岩のように地層の記録として残らないため、これまで有効な調査手法が存在しなかった。

火山活動が活発化すると、エアロゾルと火山ガスが混合した火山スモッグや酸性雨が発生することがある。特にハワイ島・キラウエア火山で発生するものは Vog と呼ばれ、2018 年以降の活動でもしばしば観測されている。このような酸性の水溶液が火山噴出物を濡らしては乾くことを繰り返すと、火山ガラスや鉱物の一部の成分が溶出し、粒子の空隙に非晶質シリカを再沈殿する。

本研究では、浅間山前掛火山の東斜面（六里ヶ原）に露出する 1783 年（天明）噴火時の吾妻火砕流の噴出物の表面を詳細に調べた結果、火砕流堆積物を構成する軽石の表面に、非晶質シリカによるコーティングを見出した（図 27）。コーティングの厚さは最大で 0.66 mm で、現在の火口から遠ざかるにつれて減少し、3.6 km 離れると平均 0.02 mm に低下すること（図 28(a)）、コーティングの生成と同時に進行したと考える鉱物の変質の程度も、火口からの距離と共に同様の变化を示すこと（図 28(b)）、さらに反応した鉱物や生成物の種類から、水溶液は pH3 以下の硫酸酸性であることがわかった。これらの結果は、浅間前掛火山では天明噴火以降、20 世紀前半のブルカノ式噴火活動期などに、火山ガスの放出が現在よりも活発な時期があり、東斜面の火口から少なくとも 3.6 km 程度まで、酸性の火山スモッグが到達したり、酸性雨が降雨していたことを示す。

本研究で開発した手法は、将来の火山ガス災害の対策に活用することが期待される。また、マグマ物質の噴出を伴わずに多量の火山ガスが継続的に放出されるためには、火山浅部で脱ガスしたマグマが火道内を逆流してマグマ溜りに戻る火道内対流現象が起こる必要

がある。このことから、現在の火道の太さや地下のマグマ溜りの脱ガス状態などに対する制約が導かれる可能性がある。

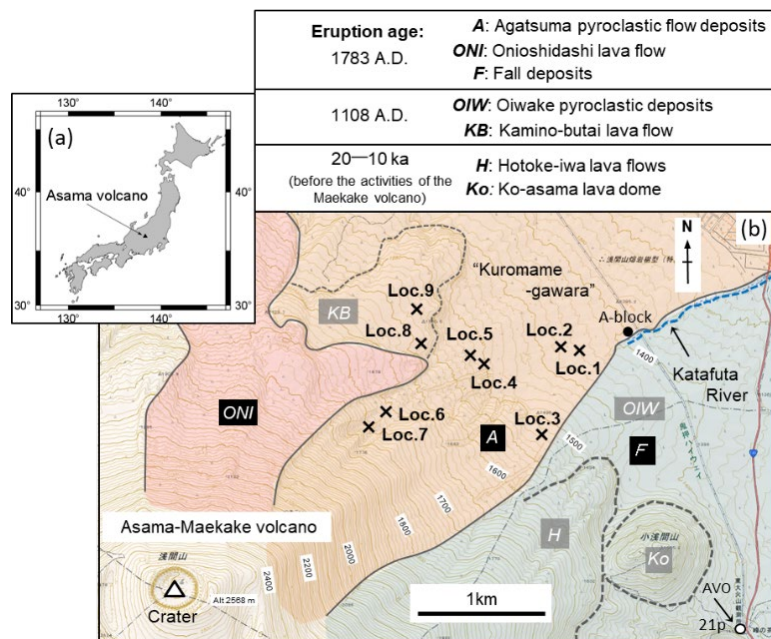


図 27 浅間火山の位置図 (b)前掛山北東部の試料採取地点 (Loc. 1～9)。

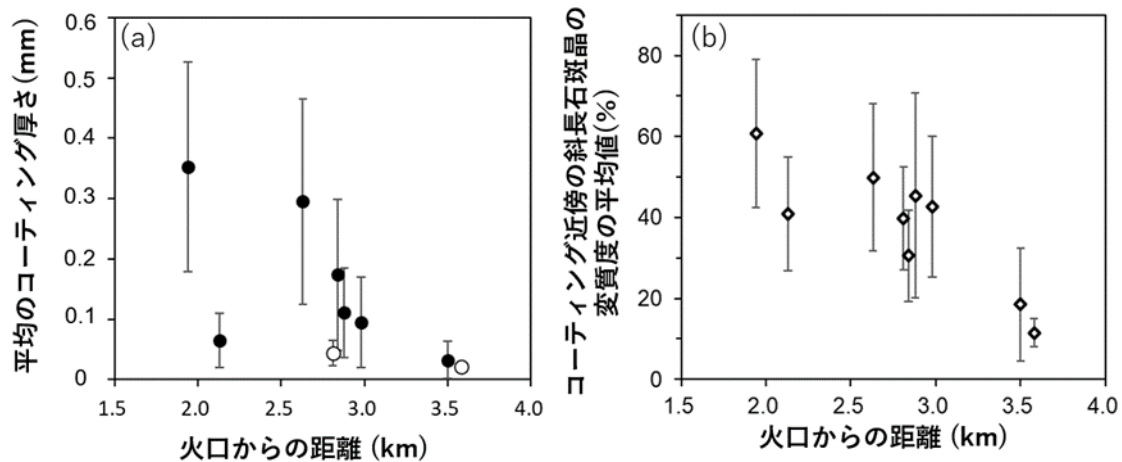


図 28 各試料採取地点における火口からの距離と、シリカコーティングの厚さの平均値 (a)、近傍の斜長石斑晶の変質度の平均値 (b) との関係。火口から遠ざかるにつれてコーティングの厚さや斜長石の変質度が減少し、高濃度火山ガスが約 4 km 東方まで達していたことがわかる。

(c) 結論ならびに今後の課題

COVID-19の影響で当初の計画とは作業方法や作業手順などに若干の変更はあったものの、令和2年度の目標はおおむね順調に達成できている。今後も、様々な分析を正確かつ効率的に実施できるように引き続き分析・解析プラットフォームの整備を進めるとともに、分析データのデータベース化を推進する。調査対象とした11火山については順調にデータが集まっており、マグマ供給系についての新たな知見が集積しつつある。また、分析・解析プラットフォームを活用した噴出物の特徴把握によって、噴火推移についての重要な知見も得られ始めた。加えて、解析手法についても検討が進んでおり、噴火の推移予測に有効な手法が確立しつつある。今後は、各火山のデータを蓄積かつ整理して火山カタログとしてとりまとめるとともに、噴火事象分岐予測手法の開発に向けた検討を継続していく。加えて、得られたデータを用いて実際に事象分岐予測を試行するなど、実用性についての検証も開始する。

(d) 引用文献

- 1) 曾屋龍典, 勝井義雄, 新井田清信, 堺幾久子, 東宮昭彦: 有珠火山地質図 (第2版) 1:25,000. 火山地質図 2, 産総研地質調査総合センター, 9p., 2007.
- 2) 東宮昭彦, 宮城磯治, 星住英夫, 山元孝広, 川辺禎久, 佐藤久夫: 有珠火山2000年3月31日噴火とその本質物, 地質調査研究報告, Vol.52, No.4/5, pp.215-229, 2001.
- 3) 東宮昭彦, 宮城磯治: 有珠火山2000年3月31日噴火の噴出物とマグマプロセス, 火山, Vol.47, pp.663-673, 2002.
- 4) Tomiya, A. and Takahashi, E.: Evolution of the magma chamber beneath Usu volcano since 1663: A natural laboratory for observing changing phenocryst compositions and textures, Jour. Petrol., Vol. 46, pp.2395-2426, 2005.
- 5) Tomiya, A., Miyagi, I., Saito, G. and Geshi, N.: Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan, Bull. Volcanol., Vol.75, No.750, <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0750-1>, 2013.
- 6) Crank, J.: The mathematics of diffusion (2nd ed.), Oxford University Press, New York, NY., 424p., 1975.
- 7) 大西里佳, 東宮昭彦: 有珠火山2000年噴火の噴火準備過程, 日本火山学会講演予稿集2018年度秋季大会, p.146, 2018.
- 8) Bacon, C. R. and Hirschmann, M. M.: Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe-Ti oxides, Am. Mineral., Vol.73, pp.57-61, 1988.
- 9) Murakami, M., Ozawa, S., Nishimura, T. and Tada, T.: A model of magma movements associated with the 2000 eruption of Usu volcano inferred by crustal deformation detected by continuous GPS and other geodetic measurements, Jour. Geograph. Survey Inst., Vol.95, pp.99-105 (in Japanese), 2001.
- 10) Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H. Y., Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H. and Okada, H. : P-wave velocity structure of Usu

- volcano: Implication to the structural controls on magma movements and eruption locations, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.160, pp.175-194, 2007.
- 11) Suzuki, Y., Gardner, J.E. and Larsen, J.F.: Experimental constraints on syneruptive magma ascent related to the phreatomagmatic phase of the 2000AD eruption of Usu volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, Vol.69, pp.423-444, <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0084-3>, 2007.
 - 12) 早田 勉:6世紀における榛名火山の2回の噴火とその災害, 第四紀研究, Vol.27, pp. 297-312, 1989.
 - 13) Suzuki, Y. and Nakada, S.: Remobilization of highly crystalline felsic magma by injection of mafic magma: constraints from the middle sixth century eruption at Haruna volcano, Honshu, Japan, *Jour. Petrol.*, Vol. 48, pp. 1543-1567, 2007.
 - 14) 大石雅之, 下司信夫, 下岡順直: 斜長石斑晶の屈折率を用いた火山噴出物の識別 -榛名火山南麓を中心に分布する噴出物を例に, 第四紀研究, Vol.50, pp. 295-308, 2011.
 - 15) Mitsui, Y. and Kato, T. : Magmatic inflation in 2008-2010 at Mt. Fuji, Japan, inferred from sparsity-promoting L1 inversion of GNSS data, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.378, pp.29-34, 2019.
 - 16) 大塚芽久, 石橋秀巳, 外西奈津美, 安田敦: 斑レイ岩捕獲岩の粒間メルトから探る富士山のケイ長質マグマだまり, 2020 JpGU 予稿, 2020.
 - 17) 石橋秀巳, 種田凌也, 千葉達朗, 外西奈津美, 安田敦: 伊豆大島 1986 年 B 火口噴火のガブロ捕獲岩にみられる粒間メルト混合, 2017 火山学会秋季大会予稿, 2017.
 - 18) 古谷野 裕, 早川 由紀夫, 町田 洋: およそ 5000 年前に東伊豆単成火山地域で起こった大室山噴火の推移と継続時間, 地学雑誌, Vol.105, No.4, pp.475-484, 1996.
 - 19) Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V. and Carley, T. L.: Rhyolite-MELTS: a Modified Calibration of MELTS Optimized for Silica-rich, Fluid-bearing Magmatic Systems, *Jour. Petrol.*, Vol.53, No.5, pp.875-890, 2012.
 - 20) Hatada, R., Ishibashi, H., Suwa, Y., Suzuki, Y., Hokanishi, N. and Yasuda, A.: Plagioclase-hosted melt inclusions as indicators of inhibited rhyolitic melt beneath a mafic volcano: a case study of the Izu-Omuroyama monogenetic volcano, Japan, *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, Vol.115, pp.322-331, 2020.
 - 21) Saito, G., Ishizuka, O., Ishizuka, Y., Hoshizumi, H. and Miyagi, I. : Petrological characteristics and volatile content of magma of the 1979, 1989, and 2014 eruptions of Nakadake, Aso volcano, Japan, *Earth Planets Space*, Vol.70, No.197, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0970-x>, 2018.
 - 22) Moore, L.R., Gazel, E., Tuohy, R., Lloyd, A.S., Esposito, R., Steele-MacInnis, M., Hauri, E.H., Wallace, P.J., Plank, T. and Bodnar, R.J. : Bubbles matter: an assessment of the contribution of vapor bubbles to melt inclusion volatile budgets, *Am Mineral*, Vol.100, pp.806-823, <https://doi.org/10.2138/am-2015-5036>, 2015.
 - 23) Abe, Y., Ohkura, T., Shibutani, T., Hirahara, K. and Kato, M.: Crustal structure beneath Aso Caldera, Southwest Japan, as derived from receiver

- function analysis, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.195, pp.1-12, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.011>, 2010.
- 24) Witham, F., Blundy, J., Kohn, S.C., Lesne, P., Dixon, J., Churakov, S.V. and Botcharnikov, R.: SolEx: a model for mixed COHSCl-volatile solubilities and exsolved gas compositions in basalt, *Comput. Geosci.*, Vol.45, pp.87-97, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.09.021>, 2012.
- 25) Kawaguchi, M., Hasenaka, T., Koga, K.T., Rose-Koga, E.T., Yasuda, A., Hokanishi, N., Mori, Y., Shimizu, K. and Ushikubo, T.: Persistent gas emission originating from a deep basaltic magma reservoir of an active volcano: the case of Aso volcano, Japan, *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol.176, No.6, <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01761-6>, 2021.
- 26) Shinohara, H.: Volatile flux from subduction zone volcanoes: insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.268, pp.46-63, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.10.007>, 2013.
- 27) Shinohara, H., Yokoo, A. and Kazahaya, R.: Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014-2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan, *Earth Planets Space*, Vol.70, No.151, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0919-0>, 2018.
- 28) Johnson, E. A. and Rossman, G. R.: The diffusion behavior of hydrogen in plagioclase feldspar at 800-1000 ° C: Implications for re-equilibration of hydroxyl in volcanic phenocrysts, *Am. Mineral.*, Vol.98, No. 10, pp.1779-1787, 2013.
- 29) 嶋野岳人, 下司信夫, 小林哲夫: 諏訪之瀬島火山地質図, 火山地質図 17, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 8p., 2013.
- 30) Miyagi, I., Geshi, N., Hamasaki, S., Oikawa, T., and Tomiya, A.: Heat source of the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan, *Bull. Volcanol.*, Vol.82, No.33, pp.1-17, 2020.
- 31) Miyagi, I., Itoh, J., Hoang, N. and Morishita, Y.: Magma systems of the Kutcharo and Mashu volcanoes (NE Hokkaido, Japan): Petrogenesis of the medium-K trend and the excess volatile problem, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.231-232, pp.50-60, 2012.
- 32) Kazahaya, K., Takahashi, M. and Ueda, A.: Discharge model of fumarolic gases during post-eruptive degassing of Izu-Oshima volcano, Japan. *Geochem. Jour.*, Vol.27, pp.261-270, 1993. Kazahaya, K., Shinohara, H. and Saito, G.: Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit, *Bull. Volcanol.*, Vol.56, pp.207-216, 1994.
- 33) 風早康平, 篠原宏志: 大規模マグマ溜りからの火山ガス, 熱水の放出モデル-火道内マグマ対流およびマグマ溜りの固化に伴う脱ガス-, *地質ニュース*, Vol.474, pp.12-17, 1994.

- 34) Shinohara, H.: Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity. *Reviews of Geophysics*, Vol.47 (RG4005), pp.1-31, 2008.
- 35) Miyabuchi, Y.: A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, *Sedimentary Geology*, Vol.220, No.3-4, pp.169-189, 2009.
- 36) Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y. and Kambe, N.: Geology of the Takeda district. *Quadrangle Series, Scale 1:50,000, Vol.15 Kagoshima, No. 23*, pp.145, 1 sheet (in Japanese with English abstract), 1977.
- 37) Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S.-i.: Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.66, pp.137-148, 1995a.
- 38) Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H., Takada, H. and Ikebe, S.-i.: Ash eruption of Nakadake volcano, Aso caldera, and its products, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol.40, No.3, pp.133-151, (in Japanese with English abstract), 1995b.
- 39) Furusawa, A. and Umeda, K.: Tephra stratigraphy of piston cores in Beppu Bay during the past 7000 years -correlation of the core tephras with Aso and Kuju Volcano-, *Jour. Geol. Soc. Japan*, Vol.106, No.1, pp.31-49, (in Japanese with English abstract), 2000.
- 40) Miyabuchi, Y. and Wabanabe, K.: Eruption ages of holocene tephras from aso volcano, southwestern japan, inferred from 14c ages of buried andisols, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol.42, No.6, pp.403-408, (in Japanese with English abstract), 1997.
- 41) Miyoshi, M., Sumino, H., Miyabuchi, Y., Shinmura, T., Mori, Y., Hasenaka, T., Furukawa, K., Uno, K. and Nagao, K.: K-Ar ages determined for post-caldera volcanic products from Aso volcano, central Kyushu, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.229, pp.64-73, 2012.
- 42) Miyoshi, M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T. and Hasenaka, T.: Genetic relationship between post-caldera and caldera-forming magmas from Aso volcano, SW Japan: Constraints from Sr isotope and trace element compositions, *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, Vol.106, No.2, pp.114-119, 2011.

(e) 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 なし
- 3) 仕様・標準等の策定 なし

(3) 令和 3 年度の業務計画案

分析解析プラットフォームを整備し、火山噴出物の分析・解析が容易に実施できるような環境を構築し維持する。また、対象火山の火山噴出物の分析を通じて噴火分岐の鍵となる要素を理解し推移予測を可能にするための情報を集積する。加えて、課題 C 全体の連携課題として、伊豆大島 1986 年噴火および安永噴火の噴出物について噴火推移に伴う石基組織の変化をもとに、地質情報との対比や物理観測との関連について調べ、噴火事象分岐の条件の検討をおこなう。

令和 3 年度の各機関の具体的な取り組みを以下に記す。

(a) 東京大学

- ・分析解析プラットフォームについては、装置の利用促進に向けた取り組みに重点をおきつつ、解析プログラムの up-to-date をはかっていく。取得したデータについては、公開可能なものは、課題 A と連携してデータ公開を開始する。
- ・火山噴出物の解析については、富士火山、雲仙火山、西之島火山の噴出物の分析を前年度に引き続きおこない、それらのマグマ供給系について情報を整理し、噴火の推移予測に役立つ情報の検討を進める。

(b) 早稲田大学

- ・榛名火山について、マグマ供給系と噴火誘発過程の研究を、主に二ツ岳渋川噴火について進める。火山灰の検鏡によって、噴火の始まりから終わりまでの噴出物の変化を追跡し、噴火誘発過程についてより詳しい情報を取得する。加えて、鉱物組成分析において、分析サンプル数の増加をはかり、また角閃石・ガラスの分析も進める。
- ・霧島火山について、新燃岳享保噴火について、SmKP 1-7 の連続観察可能な露頭を活用し、「マグマ供給系と噴火誘発過程に関わる研究」、および、「噴火時のマグマの火道でのダイナミックスに関わる研究」を進める。全岩組成や鉱物組成の揃えていくとともに、火砕物の見かけ密度データを噴火全体について揃えることを目標とする。

(c) 常葉大学

- ・桜島火山について、引き続き、連続採取試料解析をおこない時系列データの蓄積をおこなう。特に令和 3 年度は、反射電子像を用いた構成粒子種分類プログラムを用い、これまでに調整・分級した試料に対して構成粒子の分類を実施し、構成粒子比の時間変動データをより早く導出できるようにする。
- ・諏訪之瀬島火山について、引き続き、3 万年前以降の主な噴出物の鉱物組成分析をおこない、マグマの噴出温度やマグマ混合における複数端成分の関与について制約を与える。また、歴史に残る最大の噴火である文化噴火（1813 年）の細分層序試料の鉱物および石基ガラス組成の分析を継続する。一方、1813 年噴火直前および 2020 年末以降の活発化による噴出物の採取・分析をおこなうことで、現活動状況の火山史上の位置づけを明らかにするための基礎データを取得する。
- ・富士火山について、大沢降下スコリア、大淵降下スコリアの層序細分試料について、鉍

物組成分析を進める。

(d) 静岡大学

- ・伊豆大島火山について、1986 年 B 噴火の噴出物に含まれる斑レイ岩捕獲岩について分析・解析をおこない、B 噴火のプレ噴火過程について検討する。
- ・苦鉄質サブプリニー式噴火火道浅部過程について検討するため、伊豆大島・富士山・霧島御鉢火山のサブプリニー式噴火の噴出物について石基鉱物の化学分析・組織解析をおこなう。

(e) 熊本大学

- ・阿蘇火山のマグマ過程のモデルを構築し今後の大規模噴火予測を試みるために、阿蘇完新世玄武岩の追加試料採集、化学分析・データ解析をおこなう。
- ・阿蘇カルデラ形成噴火の給源の情報およびカルデラ形成噴火間に活動したマグマの特徴を探るために、阿蘇カルデラ形成噴火の試料採取、岩石記載、全岩化学組成分析をおこなう。
- ・阿蘇火山の先カルデラ期からカルデラ形成期への移行過程を明らかにするために、先阿蘇カルデラ期最新期の追加試料採集、岩石記載、全岩化学組成分析をおこなう。

(f) 東北大学

- ・桜島火山とマグマ組成や噴火様式の類似した浅間火山や、よりマグマが苦鉄質で噴火様式も異なる富士火山などの噴火ダイナミクスについて、火山噴出物を用いた比較研究をおこなう。

(g) 産業技術総合研究所

- ・有珠火山について、有珠 2000 年噴火時のマグマ上昇過程を鉱物の累帯構造から岩石学的に読み取るとともに、当時の地球物理学的観測データと照らし合わせることで、双方のデータを整合的に説明できる上昇過程を推定する。
- ・マグマの熱力学計算ソフトウェア（Rhyolite-MELTS）の有効活用方法を継続して改良する。計算結果を天然試料（阿蘇 4 あるいは屈斜路 KP1 を予定）に応用し、マグマの生成および噴火プロセスを考察する。