

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 1 年	鈴木由希 安河内健人
学校法人常葉大学	参加機関	教授 学部 4 年 学部 4 年 学部 3 年 学部 3 年 学部 3 年 学部 3 年	嶋野岳人 佐橋麗奈 太田美琴 土岐一創 佐々木萌 鈴木治親 稻垣沙南
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 PD	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 PD PD	中村美千彦 無尽真弓 新谷直己 藤田和果奈 黄 永勝
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 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隨時取り出して再利用可能とする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・解析プラットホーム」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

まりの状態、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・解析プラットホ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ま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ま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とした。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、分析手順の整備をおこなった。加えて、蒸着装置を更新し分析精度の向上をはかった。項目（イ）に対しては、前年度に引き続き解析プログラムの整備をおこなった。項目（ウ）に対しては、前年度に引き続き画像データベースの拡充と利用環境の整備をおこなった。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、マグマシステムの類型化をおこなうとともに、噴火事象分岐予測の鍵となる観測項目の整理を試みた。引き続き、11 火山に加えて噴火発生中の火山の試料の分析を継続し、マグマ供給系の精密化や噴火推移を迅速に把握する手法の開発をおこなった。項目（オ）に対しては、装置の利用者環境の整備はしたものの、Covid-19 影響で、研究組織外からの分析・解析プラットホーム利用の受け入れはかなり限定されたものになり、東京大学地震研究所内の課題 C2 関係者のみにとどまった。

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、研究組織外からの分析・解析プラットホーム利用を受け入れの促進をはかる。

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、噴火の特徴を一覧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・解析プラットホ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・解析プラットホ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・解析プラットホーム利用を受け入れる。

(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法

1) 国立大学法人東京大学

a) プロジェクト（課題 C-1）の総合推進

課題 C-1 分担者と連絡を密にし、課題 C-1 の総合推進を図る。課題 C-2 事業責任者及び C-3 分担責任者と連絡を密にし、課題 C の総合推進を図る。また、課題 A、B、D、B2-2 の事業責任者と連携し「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト次世代火山研究推進事業」全体の推進を図る。

b) 分析・解析プラットホームの整備、運用

FE-EPMA の利用環境を整備し、プロジェクト関係者の利用をサポートする。前年度に引き続き解析機能の強化とデータベース連携プログラムの整備を行う。分析・解析プラットホームで取得したデータの部分的な公開を課題 A の JVDN システムを通じて開始する。

c) 研究集会の調整・開催

令和 3 年冬に課題 C-2 及び C-3 と連携し、課題 C 全体研究集会を実施する。また、令和 4 年 3 月に課題 C-1 の研究集会を開催し成果の公開を促進する。

d) 火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、雲仙火山、富士火山、西之島において火山噴出物についての研究を実施する。富士火山については、協力機関の富士山科学研究所と共同して業務を遂行する。

2) 学校法人早稲田大学

火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、榛名火山や霧島火山において地質調査や火山噴出物についての研究を実施する。また、随時、分析・解析プラットホームのシステム構築に関する助言を行う。

3) 学校法人常葉大学

火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、桜島火山、諏訪之瀬島火山、富士火山、霧島火山の火山噴出物についての研究を実施する。また、分析・解析プラットホームのシステム構築に関する助言や、噴出物分析の迅速な特徴把握に関する技術開発を行う。

4) 国立大学法人静岡大学

火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、富士火山、伊豆大島の火山噴出物についての研究を実施する。また、随時、分析・解析プラットホームのシステム構築に関する助言を行う。

5) 国立大学法人熊本大学

火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、阿蘇火山の火山噴出物についての研究を実施する。前年度に引き続き、先カルデラ期からカルデラ形成期への移行過程でのマグマ供給系の変化について明らかにする。また、随時、分析・解析プラットホームのシステム構築に関する助言を行う。

6) 国立大学法人東北大学

火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、前年度に引き続き桜島火山の噴火についての検討を進める。同じ安山岩質マグマの同規模の噴火である課題 C-2 の浅間火山天明噴火について、噴火直前のマグマ定置深度や火道上昇過程を、噴出物の斑晶メルト包有物の分析などにより岩石学的に検討し、桜島火山との比較を行う。また、随時、分析・解析プラットホームのシステム構築に関する助言を行う。

7) 国立研究開発法人産業技術総合研究所

a) 火山噴出物の分析・解析

噴火事象分岐予測手法の開発のため、有珠火山において火山噴出物についての研究を実施する。

b) 熱力学解析に関わる研究開発

熱力学解析に関わる計算結果をよりコンパクトに集計する方法を検討するとともに、新たな化学組成のマグマについて、熱力学計算を追加実行する。加えて、計算結果の一部を公開する。

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、前記の 1)から 7)で実施する現地調査について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

(2) 令和3年度の成果

(a) 業務の要約

分析・解析プラットホームの構築については、リモート分析補助ツールの装備を継続するとともに、データ解析用のツールの追加をおこなった。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集積しつつある。例えば、有珠山や阿蘇山では元素拡散の研究から噴火に先立つマグマの挙動の詳細なタイムスケールが検討された。富士山では実験的に求められた石基組織を用いた新たな相図によってマグマの破碎深度が明らかにされるとともに、シミュレーションを併用してマグマの上昇経路の形状が制約された。榛名山では、異なる噴火形態が噴火に先立つマグマの混合の違いによることが示された。諏訪之瀬島では、噴火推移に伴うガラス・鉱物組成変化が明らかになり、噴火の推移予測で注目すべき指標が明らかにされた。伊豆大島では新たな実験によって、マグマ溜まりの深度が制約された。噴火に先立つマグマ溜まりの状態や挙動についても、比較的単純な系（珪長質の浅部マグマ溜まり単独、苦鉄質の深部マグマ溜まり単独）について検討された。さらに、マグマ供給系の類型化が行われ、それらに基づく噴火事象分岐予測に有効な観測事象のリスト化など、これまでC-1で得られてきた噴出物の解析結果を観測との連携を意識しつつ取りまとめる作業が着手された。

(b) 業務の成果

1) プロジェクト（課題C-1）の総合推進（東京大学）

課題C-1参加機関の担当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の影響で東京大学地震研究所に来所して分析を行うことができない業務参加者のために、依頼分析を受け付けた。

噴火事象分岐予測のための作業としては、3)で後述する各参加機関の噴出物の解析結果を統合してマグマ供給系の類型化を試みるとともに、単純化したマグマ供給系像に基づく噴火事象分岐予測に有効な観測事象のリストアップをおこなった（内容は3)-m)に記載）。

課題C内および他の課題との連携のための伊豆大島研究集会実施に向けた意見交換会を課題C-2主導のもと2021年11月22日におこなった。2022年3月22日には課題C-1研究集会をオンライン開催し、課題C-1外からも含め26名の参加があった。

2) 分析・解析プラットホームの整備、運用（東京大学）

分析精度の向上を目的に炭素蒸着装置を更新し、一定膜厚での蒸着が容易に行えるようにした。加えて、解析用PC上で動かす様々な解析用スクリプトの整備を継続した。具体的には、R1年度に作成した「反射電子線画像の自動解析による火山灰粒子の分類機能」について、より適切な分類が行えるように改良した。また、物理観測と対比がおこないやすいように、熱力学計算プログラムMELTS (Gualda *et al.*, 2012)¹⁾の出力から粘性や破碎深度などの物性情報を検索する機能を作成した。これまでに分析・解析プラットホームで取得した4万枚ほどの画像データは、JVDNシステムで公開するために、メタ情報（火山名、噴火名、画像種別、撮影枚数、データ保有者名等）の整理を行っている。

a) 火山灰粒子の自動解析によるクラス分類（常葉大学、東京大学）

分類の結果出力を目視で確認して、分類に使う項目の変更や分類の閾値の変更をほどこしてから再分類ができる機能を設けるとともに、時系列データのグラフ化などの機能を追加した（図1）。

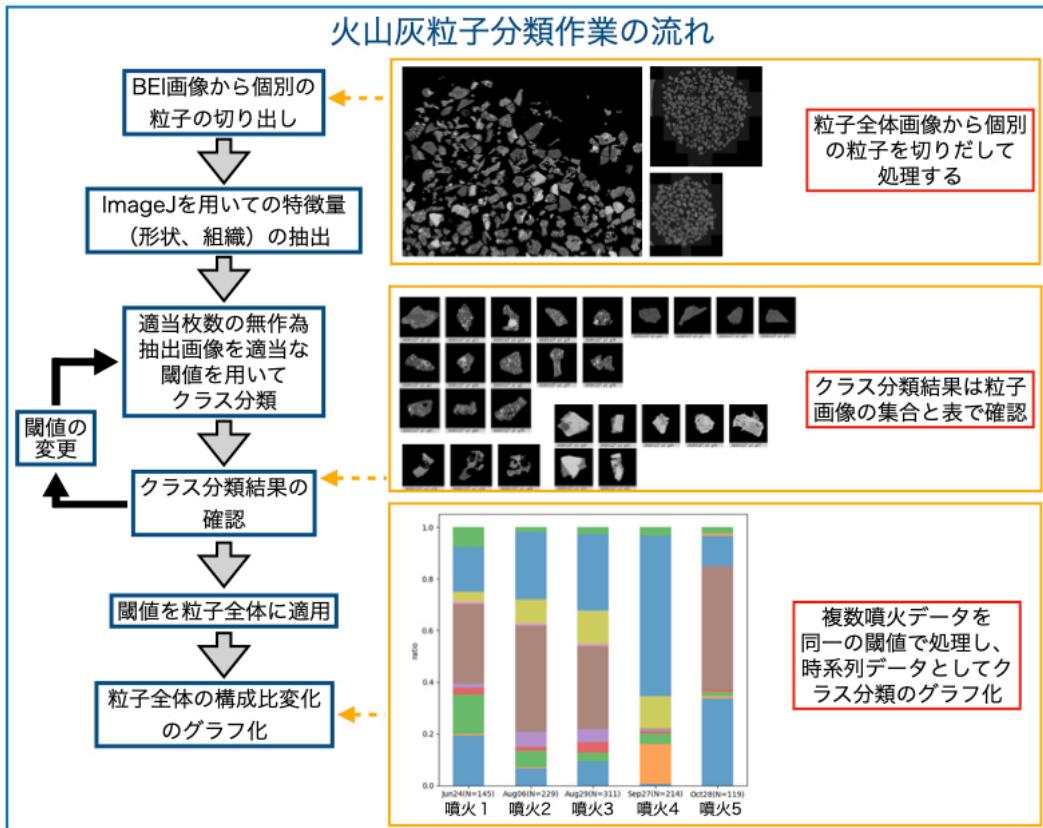


図1 火山灰の自動分類の流れ：分類結果を確認して必要に応じて閾値を変更して再処理が行える。

さらに、分類が適切かどうかを評価するために、python の scikit-learn ライブライリ²⁾を用いての PCA 主成分分析や scipy ライブライリ³⁾を用いて教師なし分類（計測結果のユークリッド距離による dendrogram の作成）をおこない、前述の閾値を用いたクラス分類との比較ができるようにした（図2）。このクラス分類のシステムについては、概要を JDR 誌に投稿中である。

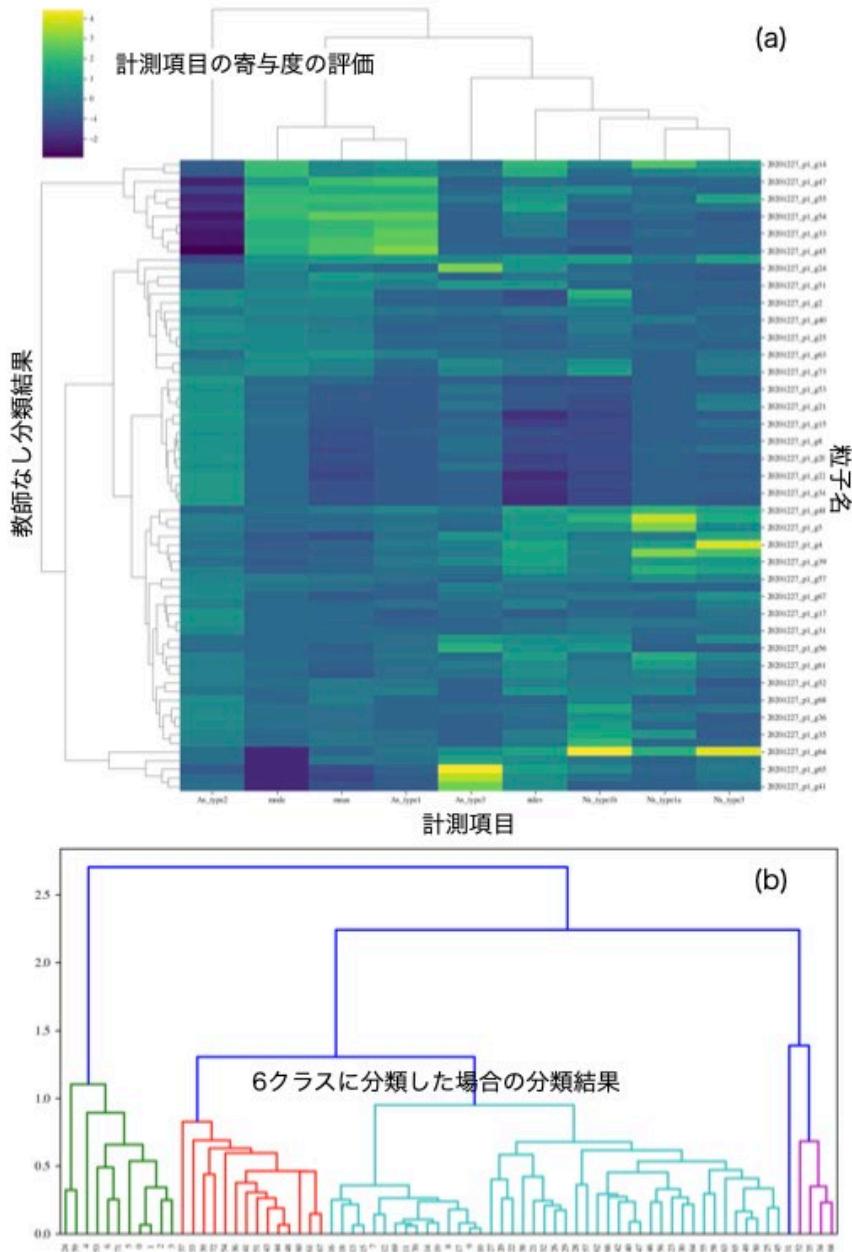


図 2 Python scipy ライブライリ³⁾を用いた自動分類の例: どのような計測項目が分類に影響を与えていたかを知ることができるため、閾値による演繹的分類へのフィードバックが期待できる。

b) 热力学計算プログラム MELTS の出力と検索機能の強化 (東京大学)

通常、热力学計算プログラム MELTS (Gualda *et al.*, 2012)¹⁾は、計算した液组成や結晶组成を噴出物での计測值と比較することによって、喷出物が最终的に平衡におかれた环境の推定に用いられることが多い。しかしながら、MELTS 自体は密度や粘性なども同時に计算しており、これらの物性值を利用することで、喷火の発生条件を絞り

込める可能性がある。例えば、噴火時には破碎によってマグマ中での結晶分化が停止すると考えると、気泡量や結晶量の増加によってマグマの粘性が急増する条件を MELTS で探して、観察量とそれらとを比較することによって、最終的にどのような条件下でマグマが破碎したかが検討できる。

例えば、気泡量/結晶量比に着目すると、図 3 (a) のように同じ温度のマグマで含水量だけが異なる場合には、上昇して噴火時に破碎した試料の気泡量/結晶量比は、マグマ中の初期含水量が高いほど大きくなる傾向がある。また、図 3 (b) のように、初期含水量が等しく温度が異なる場合には、高温のマグマほど気泡量/結晶量比が高い。つまり、試料の気泡量/結晶量比の観察値も MELTS と組み合わせることによって噴火前のマグマの状態推定には有効な情報となりうる。

そこで、MELTS で初期温度と初期含水量を変えて、破碎時の液組成や結晶量、気泡量などがどのような範囲の値をとりうるかを調べた。液の SiO_2 組成は初期含水量に対する依存性が弱く、噴出物との比較からは初期含水量を制約できないのに対して、気泡量は初期含水量に対する依存性が強いので、両者を組み合わせることによって、初期含水量と初期温度をかなり絞り込むことが可能である（図 4）。さらに TiO_2 組成や Al_2O_3 組成、結晶量なども組み合わせることによって、噴火前のマグマの温度と含水量、 dP/dT （上昇時の温度降下率）、最終的な破碎時の温度と圧力といった値について、マグマの挙動を議論するのに十分な精度での絞り込みができることがわかった。そこで、MELTS の出力の物性についての情報も加えて、噴出物の分析結果との一致程度を評価できるスクリプトを作成した。このスクリプトは、富士山の噴出物解析に適用され、噴火の発生条件の検討に利用されている（3) c) iii) 富士山東山麓のスコリア連続堆積物の分析を参照）。

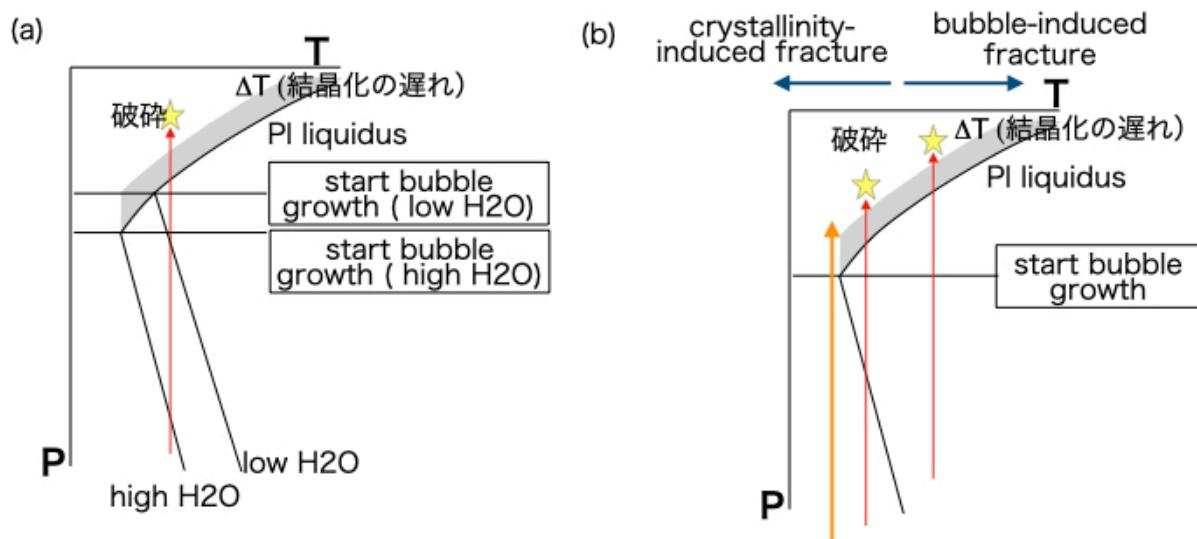


図 3 上昇するマグマでの破碎発生時の結晶量と気泡量の検討: (a) マグマの温度は等しく、含水量のみが異なる場合、(b) マグマの含水量は等しく、温度のみが異なる場合。

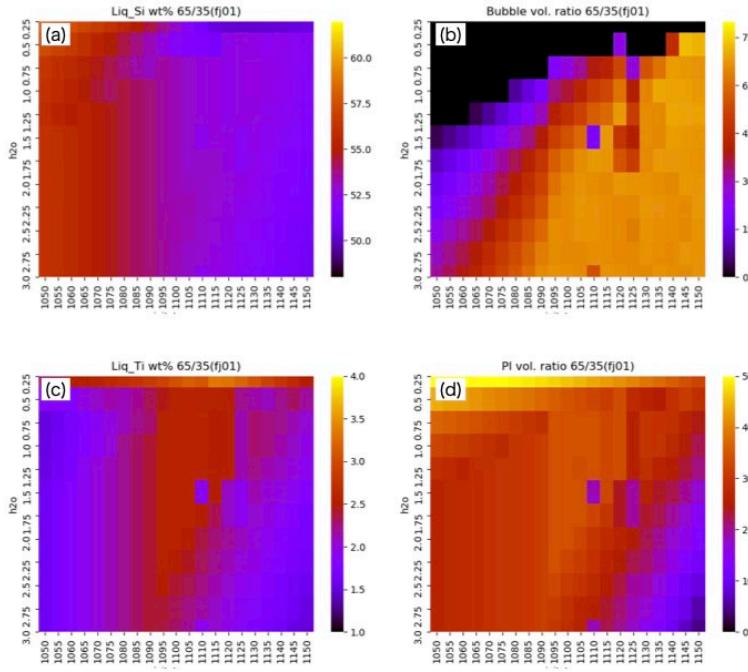


図4 MELTS を用いた噴火時（マグマ破碎時）の状態：初期温度と初期含水量を変えて $0.05^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$ の温度低下率で減圧結晶化の計算をおこなった場合の例。(a) メルトの SiO_2 量、(b) 気泡量、(c) メルトの TiO_2 量、(d) 斜長石の結晶量。

3) 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, 2007)⁴⁾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行っている。

令和3年度も引き続き、有珠火山の噴火では最新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年軽石（Us-2000pm；東宮・他, 2001；東宮・宮城, 2002）^{5), 6)}中の鉱物、特に元素拡散の速い磁鉄鉱に着目して、その累帯構造の分析データの取得を進めた。

前年度までの分析結果により、Us-2000pm中の磁鉄鉱の累帯構造には結晶の周縁部（リム）でMg濃度が顕著に低下するという特徴が見出されている。そして、Mg濃度の空間分布は元素拡散プロファイルで説明されること、Mg濃度の低下は噴火直前にマグマ温度が低下する何らかのイベントがあったことが原因であることが推定されている。令和3年度は、このイベントがどのようなものであったかを推定するため、分析事例を多数追加し、累帯構造の詳細やバリエーションの有無を調べた。

今回得られた分析結果により、リム付近でのTiやAlの増減パターン、メルト包有物の有無やサイズ、アパタイトの共存の有無、などに基づき、磁鉄鉱がいくつかのタイプに分けられることが判明した。図5は、石基中に単独粒子として存在する磁鉄鉱に典型的に見られるタイプ（ここではtype-1と呼ぶ）の例で、結晶は自形性が良く直線的な外形を示し、比較的大きなメルト包有物や湾入部を持ち、しばしばアパタイトを伴う。リムでTiが低いが、この低Ti部分は噴火直前に結晶成長し、かつTiの元素

拡散を経なかった部分と考えられる。これらの組織・組成の特徴は結晶の急成長を示しており、高い過冷却度を受けたものと推定される。一方、図6は、斜長石や輝石などとの結晶集合体（クリスタル・クロット）の中に含まれる磁鉄鉱に典型的に見られるタイプ（ここでは type-2 と呼ぶ）の例で、結晶は自形性が悪く丸っこい外形を示し、大きなメルト包有物は含まず、リムに低 Ti 部分が見られない。type-2 は type-1 に比べて高い過冷却度を受けなかったと推定される。type-1 や 2 とはまた異なるタイプの磁鉄鉱も見られるが、まだ解析途中であるためここでは論じない。

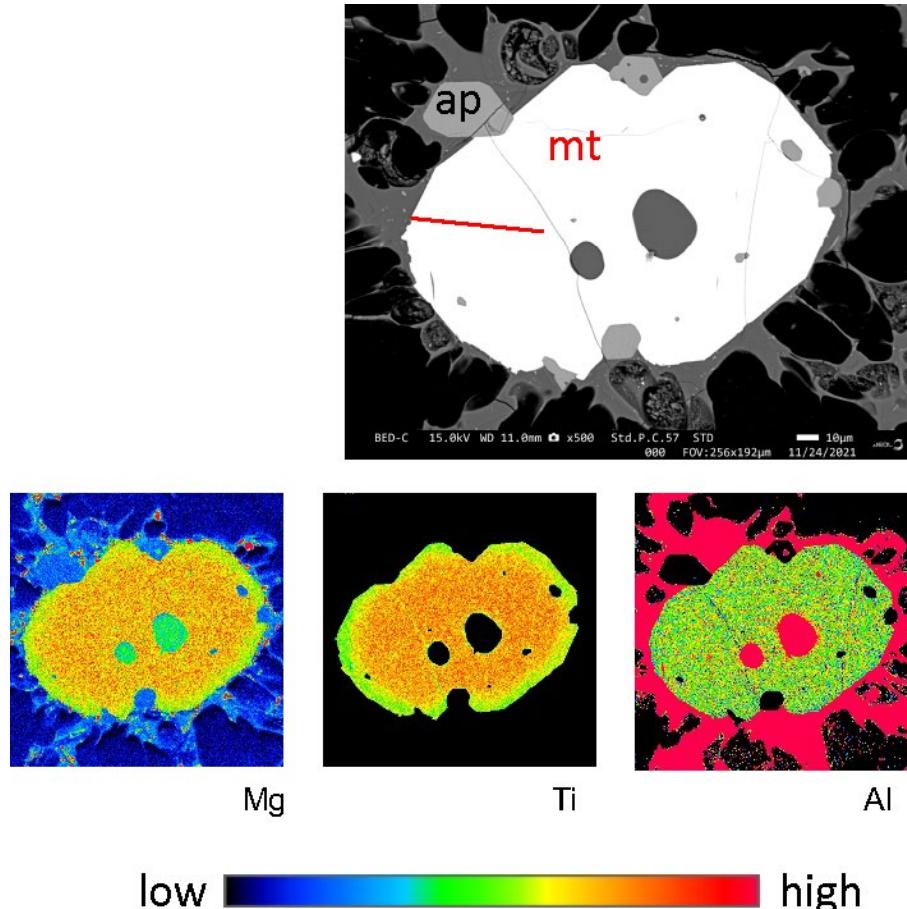


図5 有珠2000年軽石中のtype-1磁鉄鉱単独粒子：自形性が良く直線的な外形を示し、比較的大きなメルト包有物や湾入部を持ち、アパタイトを伴う。リムでTiが低い。（上）反射電子像。赤い線は図7のzoning profileの位置。mt=磁鉄鉱、ap=アパタイト。（左下）Mg元素マップ。（中）Ti元素マップ。（右下）Al元素マップ。（下）各元素マップのカラーバー。赤いほど高濃度。

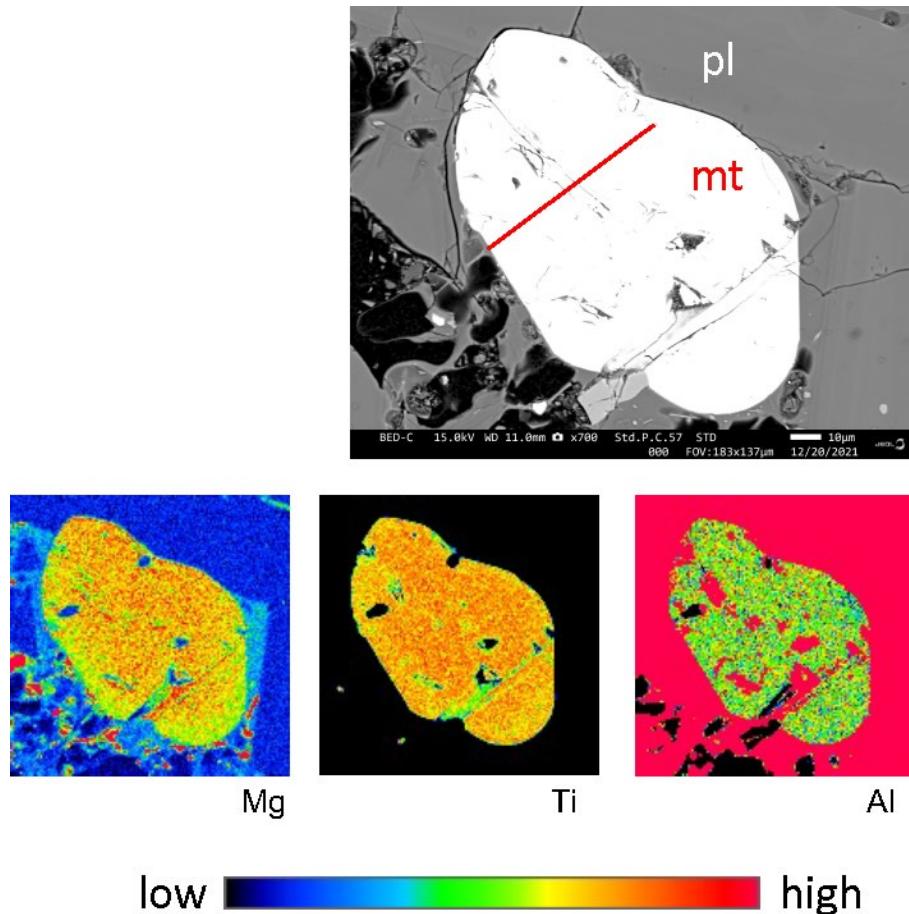


図6 有珠2000年軽石中のtype-2磁鉄鉱: クリスタル・クロットの中に含まれる。自形性が悪く丸っこい外形を示し、大きなメルト包有物は含まず、リムに低Ti部分が見られない。(上) 反射電子像。赤い線は図7のzoning profileの位置。mt=磁鉄鉱、pl=斜長石。(左下) Mg元素マップ。(中) Ti元素マップ。(右下) Al元素マップ。(下) 各元素マップのカラーバー。赤いほど高濃度。

このように組織や起源の異なる複数タイプの磁鉄鉱が共存するにもかかわらず、Mg濃度の低下という特徴については全タイプで共通に見られることが今回分かった(図7)。また、十分な大きさ(直径およそ70μm以上)を持つ磁鉄鉱では、Mg濃度が均質なコア部分を持ち、Mg濃度がコアで1.7 wt.%、リムで1.3 wt.%、濃度低下の範囲は20-30μm程度とこれもほぼ共通していた。このことは、Mg濃度の低下をもたらしたイベントが、マグマ上昇の後期(浅部)で起きたことを示唆する。

Mg濃度低下プロファイルを生じた元素拡散の所要時間は数時間~1日以下程度と算出される。このタイムスケールは、地表付近での地下水との接触による冷却を考えるにはやや長すぎる。Suzuki *et al.* (2007)⁷は、マグマの減圧結晶化実験や地震・地殻変動観測結果を組み合わせ、有珠2000年噴火直前には深さ2km程度においてマグマの上昇(減圧)が24時間程度停滞しており、これが山頂直下から西山山麓火口域へのマグマの水平移動期間に対応する、と推定している。これを考慮すると、マグマの温度低下イベントはこの水平移動期間に対応する可能性が挙げられるだろう。今後は

更に解析を進め、マグマ温度低下イベントの詳細やそれが噴火事象分岐に与えた影響を評価していく必要があるだろう。

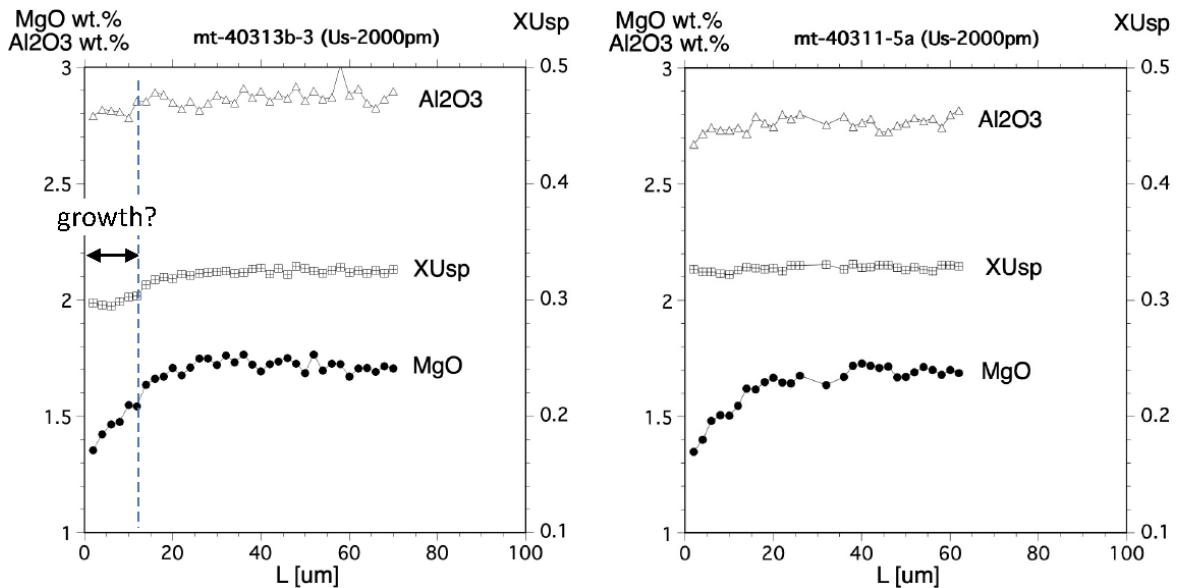


図 7 有珠 2000 年軽石中の磁鉄鉱のゾーニングプロファイル: タイプは異なっても MgO のプロファイルは共通。(左) 図 5 の粒子のプロファイル。(右) 図 6 の粒子のプロファイル。

b) 榛名山 (早稲田大学)

本プロジェクトにおいて、榛名火山の新期活動を研究対象としてきた。今年度は特に 45~10ka の 4 つの溶岩ドーム噴火 (榛名富士・蛇ヶ岳・相馬山・水沢山) と 6 世紀後半~7 世紀初頭の二ツ岳伊香保噴火の比較に焦点を当て、その成果を論文投稿した (Suzuki *et al.*, *in review*)⁸⁾。比較により、新期活動の複数噴火について、マグマ供給系や噴火誘発過程の共通点や噴火年代による差異を明らかにすることを試みた。45~10 ka の 4 噴火は溶岩ドームのみを形成したが、二ツ岳伊香保噴火ではプリニ式噴火と溶岩ドーム形成 (噴火終期) が起きている。このような噴火様式の違いが、マグマ溜まりの段階で、どう決定されているかを知ることも重要な課題であった。

研究方法: 45~10ka の古い 4 噴火の溶岩には暗色包有物が含まれることがある。暗色包有物以外の部分をホストとする。暗色包有物を含む全サンプルについて全岩組成分析 (図 8) を実施した。斑晶のモード分析と組成分析は、代表について実施した (図 8, 9, 10)。ホストと暗色包有物に認められる斑晶鉱物相 (斜方輝石 + 角閃石 + 斜長石 + 石英 + Fe-Ti 酸化物 + かんらん石) のうち、石英と Fe-Ti 酸化物以外の分析を実施した。角閃石は脱水分解反応縁を持つためコアのみ分析した。二ツ岳伊香保噴火については、Suzuki and Nakada (2007)⁹⁾ として論文を報告している。本研究では二ツ岳溶岩の 1 サンプル ($\text{SiO}_2 = 59.8 \text{ wt. \%}$) について、斑晶組成の分析を再度おこなった (図 8, 10)。マグマ温度の推定は、5 噴火の全てについて Putirka (2016)¹⁰⁾ の角閃石温度計によりおこなった。

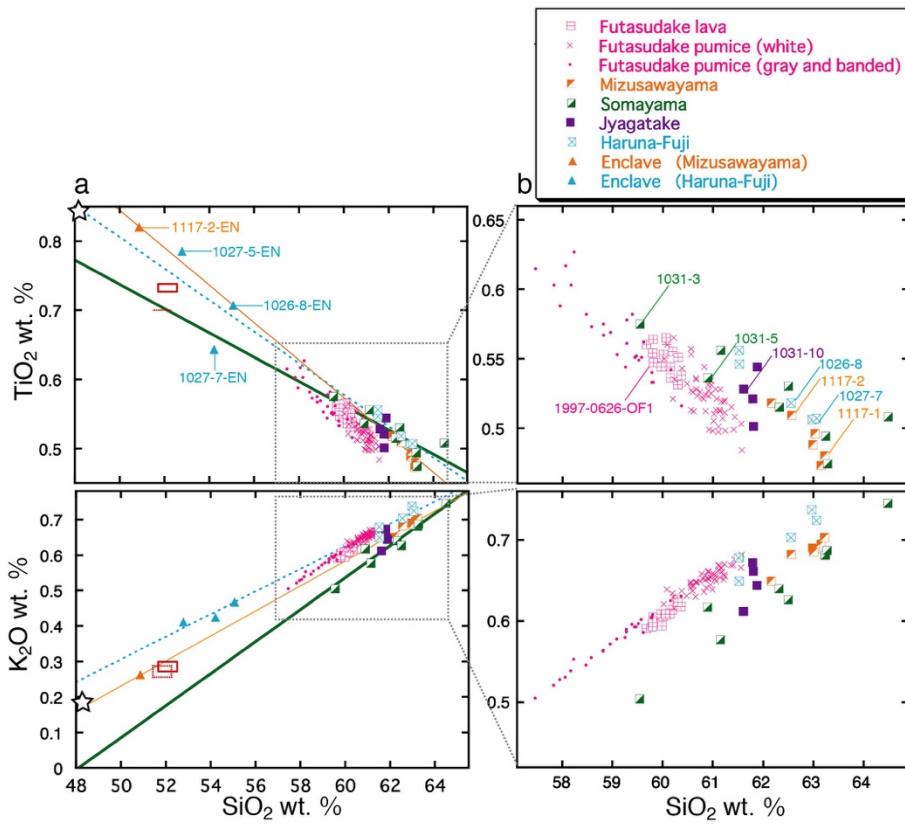


図8 全岩組成ハーカー図: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 図では斑晶組成分析を実施したサンプルにサンプル名を付けています。二ツ岳伊香保噴火の高温端成分の範囲を赤い実線（無斑晶質）と赤い点線（斑晶質）で示す。二ツ岳を除く古い4噴火については噴火毎に回帰直線を示す。4噴火の平均的な高温端成分組成を星で示す。

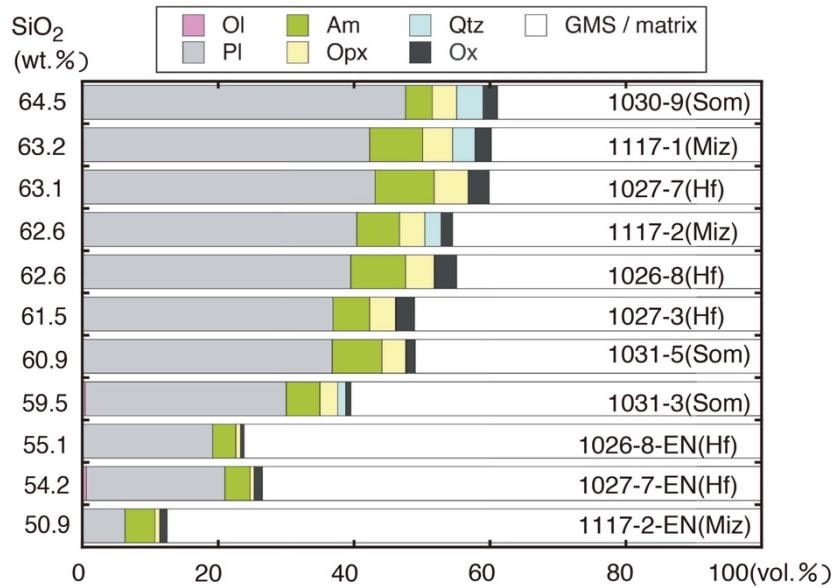


図9 古い4噴火の斑晶モード組成: 棒グラフの右端にサンプル名(ENがあるのは暗色包有物)や全岩 SiO_2 含有量を示す。Hf, 榛名富士; Som, 相馬山; Miz, 水沢山; 01, かんらん石; PI, 斜長石; Am, 角閃石; Opx, 斜方輝石; Qtz, 石英; Ox, Fe-Ti 酸化物; GMS, 石基。

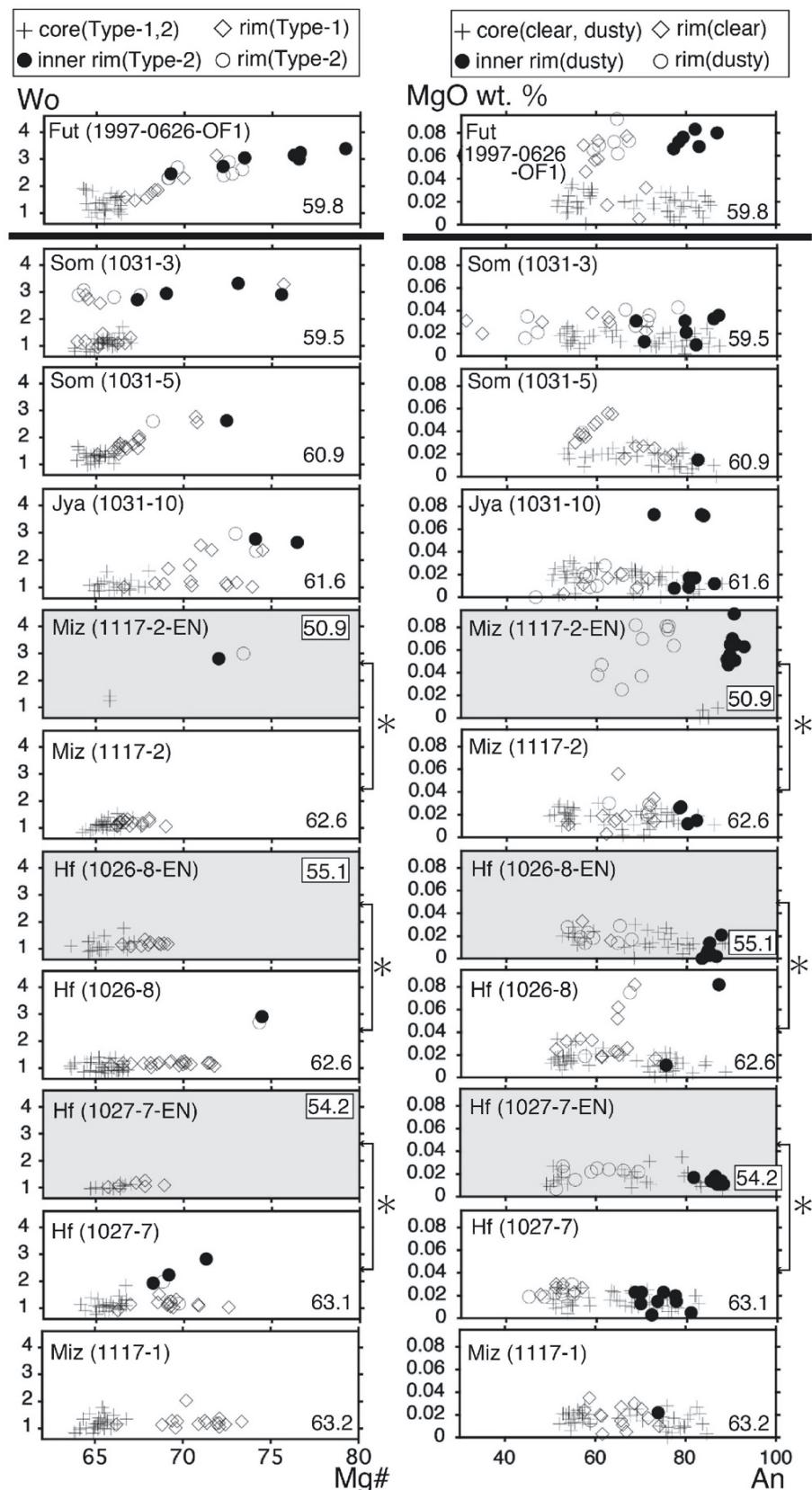


図 10 斑晶鉱物組成: 左は斜方輝石、右は斜長石。サンプル名と全岩 SiO_2 wt. %が各図に示される。二ツ岳(Fut)、榛名富士(Hf)、蛇ヶ岳(Jya)、相馬山(Som)、水沢山(Miz)。斜方輝石はリムにおける Mg# と Wo 値の上昇の顕著さによって、斜長石は汚濁帶の有無によって、各々 2 タイプに分類しているが、全て珪長質端成分に由來した結晶である。

i) 古い4つの溶岩ドーム噴火（榛名富士・蛇ヶ岳・相馬山・水沢山）

暗色包有物 (SiO_2 50.9–55.1 wt.% ; N=4) は、ホスト部分 (SiO_2 59.5–64.5 wt.% ; N=24) よりも SiO_2 に乏しい（図8）。記載岩石学的特徴や斑晶組成分析の結果（図10）に基づき、ホスト・暗色包有物の両方は2端成分マグマの混合産物であると考える。斜方輝石・角閃石・斜長石・石英・Fe-Ti酸化物は珪長質端成分由来の、かんらん石は苦鉄質端成分由来の斑晶である。珪長質端成分のバルク組成、含有鉱物の種類・組成・量は、各々の噴火の中だけではなく、4噴火で同様と考える。斑晶のコア組成が類似している（図10）。この他、全岩組成と斑晶量の関係図（図9）において噴火間の系統差を認めないためである。かんらん石斑晶は、 SiO_2 量の乏しいホストサンプルと暗色包有物のサンプルのみに確認される（図9）。かんらん石のFo値はどのサンプルでも78~80の間にあることから、苦鉄質端成分マグマのメルト部分の組成差は、サンプル間・噴火間でないものと判断する。

以上に基づくと、全岩の SiO_2 量が低いサンプルほど苦鉄質端成分の混合比が高かったということになる。このことは、全岩 SiO_2 量が低いサンプルほど、斑晶リムでのMg#やWo値の上昇（斜方輝石）やMgO量の上昇（斜長石）が顕著であったり、このような逆累帯構造を有する斑晶の比率が高いこと（図10）とも調和的である。角閃石斑晶のコア組成に基づき、珪長質端成分マグマの温度は760–860°Cと見積もられる。

全岩組成のハーカー図において各々の噴火のデータは直線トレンドを形成している。噴火毎に回帰直線を引くと、それらは高 SiO_2 側のほぼ一箇所で交差するのに対し、低 SiO_2 側では交差しない。これらのこととは、珪長質端成分マグマは4噴火で共通であるが（ SiO_2 63–64wt.%程度；図8）、苦鉄質端成分のバルク組成は噴火毎に差があることを示唆している。

斑晶モードデータ（図9）は、珪長質端成分が ≥ 60 vol.%の結晶度のマッシュであることを示している。苦鉄質端成分のバルク組成は、全岩の各元素酸化物の含有量と斑晶モード値の相関図（図11）において直線回帰を行い、（端成分が無斑晶質であるとの前提のもと）直線を斑晶量0 vol.%まで外挿することで推定した。それは $\text{SiO}_2 = 48$ wt.%程度の玄武岩質であることが分かった（図8）。最も SiO_2 含有量の低いサンプルの斑晶量を参考にすると（図9）、苦鉄質端成分の斑晶量は最大でも10 vol.%であり、無斑晶質に近いことがわかる。

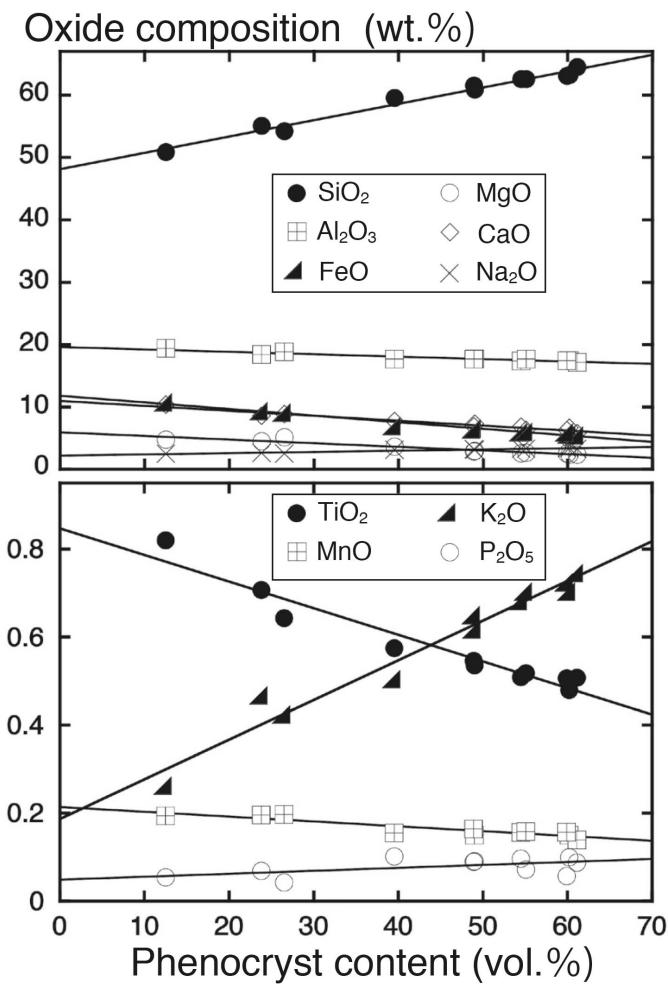


図 1-1 古い 4 噴火のサンプルの斑晶量と全岩主成分元素含有量の関係。

ii) 二ツ岳伊香保噴火との比較

噴火に関与した端成分マグマの基本的特徴は、噴火年代によらず類似している。すなわち珪長質端成分は珪長質安山岩～デイサイト組成のマッショウであり、苦鉄質端成分は玄武岩～玄武岩質安山岩組成の無斑晶質もしくはそれに近いマグマである（図 1-2）。過去 4 万 5 千年間にわたり、マグマ供給系の構造や噴火誘発過程が大きく変化していないことを示唆する。そこでは苦鉄質端成分マグマが単独で噴出物を形成することはない。さらに噴出物形成における苦鉄質端成分マグマの混合比は、（暗色包有物を除けば）、5 つのどの噴火においても低い。これは珪長質マグマが苦鉄質マグマに比べ浅所に存在することと関係する（図 1-2）。

高粘性のマッショウ状珪長質マグマが地表に到達するためには、苦鉄質マグマの注入によって元の珪長質マグマよりも低粘性のマグマが発生し、その低粘性マグマが火道・火口を開栓する必要がある。二ツ岳伊香保噴火では、混合マグマと共に加熱を受けた珪長質マグマが先行上昇し、これにより噴火が開始し、その後、（マグマ混合や加熱の影響が全くなかった）元のままの珪長質マグマが単独で噴出した（Suzuki and Nakada, 2007⁹ & 図 1-2）。一方、榛名富士・蛇ヶ岳・相馬山・水沢山の 4 噴火の溶岩は、全てマグマ混合産物であることが初めて明らかになった（図 1-2）。古い 4 噴火の

噴出物総量は、二ツ岳伊香保噴火のそれに比べ1桁程度が小さい（図12）。以上のことから、古い4噴火は二ツ岳伊香保噴火の最初期に相当する段階で、噴火がストップしてしまったものと推定する。

古い4噴火と二ツ岳伊香保噴火の間で珪長質端成分マグマを比較すると、細かな差異がある。バルク組成は二ツ岳伊香保噴火では $\text{SiO}_2=60.5\text{--}61.5\text{ wt. \%}$ である（同噴火の白色軽石の分析値）。これに対し古い4噴火については SiO_2 量が 63 wt. %程度である（図8、12）。古い4噴火と二ツ岳伊香保噴火との間で、噴出物の形成する全岩組成トレンド（マグマ混合トレンド）に明瞭な差があるのは、この珪長質端成分のバルク組成差のためである。さらに珪長質マグマで安定であった鉱物相にも差異がある。二ツ岳伊香保噴火の端成分で安定であったのは、斜方輝石・角閃石・斜長石・Fe-Ti酸化物であり（図12）、古い4噴火で安定であった石英を欠く（図12）。石英が不安定になったのは、珪長質端成分のバルク組成が相対的に未分化で、またわずかではあるが端成分マグマが高温（793–864°C）であったためであろう。

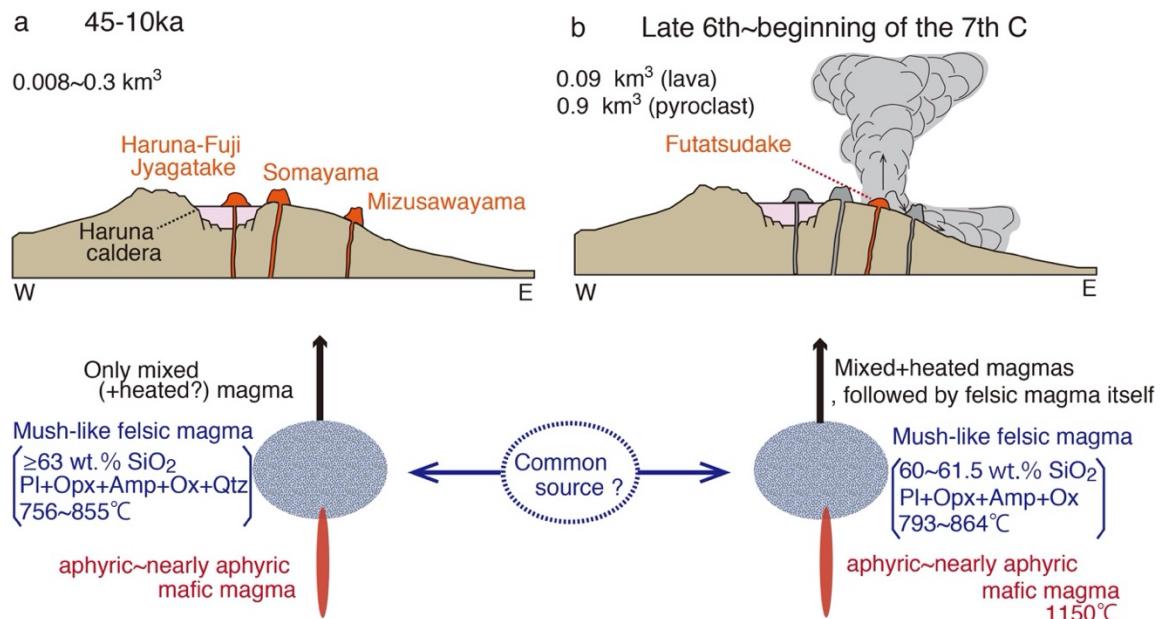


図12 古い4つの溶岩ドーム噴火（45～10 ka）と二ツ岳伊香保噴火の比較：(a) 45～10 ka, (b) 二ツ岳伊香保噴火。詳しくは本文参照。鉱物名の略称は図9と同じ。噴出物総量（DRE）は山元（2013）¹¹⁾によるもの。

二ツ岳伊香保噴火と古い4噴火の間で噴火様式や噴出物総量の差があるのは、珪長質端成分マグマのわずかなバルク組成差や温度差によるものである可能性がある。この2種類の珪長質端成分マグマは、全く異なる時代の噴火に関与したものである。しかしこれらは全く独立に発生したものではなく共通のソースから発生した可能性がある（図12）。このように考えるのは、斜長石や斜方輝石のコア組成が、過去4万5千年間にわたり、良く似ているためである（図10）。このモデルの場合、二ツ岳伊香保噴火の珪長質端成分マグマは、噴火直前のマグマ混合発生よりも前の時期に、より顕著に高温マグマの影響を受けて発生したものということになる。あいにく、このモ

ルの裏付けるような斑晶の組成累帯構造を認識するには至っていない。それはおそらく噴火直前のマグマ混合時に、その直前に成長した結晶が溶融してしまうことと関係しているのかもしれない。

c) 富士山

i) 宝永噴火のトリガーメカニズム（東北大学）

富士火山は首都東京の西北西約 100km に位置し、我が国の火山防災上、とりわけ重要な意味を持つ。特に 1707 年（宝永 4 年）に発生した宝永噴火は、富士で発生した直近の爆発的噴火であるとともに、総噴出量 $1.7 \sim 1.8 \text{ km}^3$ (DRE $\sim 0.7 \text{ km}^3$) (Miyaji *et al.*, 2011; 山元, 2014)^{12, 13)} に達する VEI=5 のプリニー式噴火であり、首都圏にも多量の軽石・スコリア・火山灰の降下をもたらした。また、①マグニチュード 8.4 の宝永地震から 49 日後に発生した点、②富士火山では珍しいデイサイト質マグマから噴火が開始した点、そして③一般には頻度の低い玄武岩質マグマのプリニー式噴火に至った点、④側火口からの大規模なプリニー式噴火である点、などの顕著な特徴がある。宝永噴火のメカニズムを解明することで、これらの宝永噴火の特徴の中に、（どのような）一般性・普遍性が存在するのか、あるいは偶然性が働いたのか、相互に因果関係はあるのかを理解することは、火山の噴火機構として興味深い問題であると同時に、日本の火山防災上も重要な課題である。とりわけ①は、東海・東南海沖でのプレート境界型大規模地震の発生が想定されている中で、富士火山噴火が誘発される可能性の評価は喫緊の課題であり、宝永噴火のトリガーメカニズムを解明することの意義は大きい。

これらの課題の解決に向けて、今年度は「宝永噴火のマグマ破碎深度の岩石学的制約に基づく噴火機構の研究」(Kim K., Kozono S., Nakamura M., Araya N., Yoshimoto M. *in prep.*) を実施した。

背景と目的：玄武岩質マグマの噴出様式には、穏やかな溶岩噴出から爆発的なストロンボリ式噴火、さらに規模の大きいプリニー式噴火まで様々なタイプがある。脆性破碎し難い玄武岩質マグマがプリニー式噴火で破碎するメカニズムは、近年活発に研究されており、石基の減圧結晶化の役割が重視されている。玄武岩質マグマの結晶化がいかに速くとも、噴霧流状態に入ってから結晶化が大きく進むことは考えにくく、スコリアであるにも拘わらず結晶度が高いことは、マグマの破碎深度がごく浅いことを示す。富士火山宝永噴火の玄武岩質スコリアも他の火山の玄武岩質スコリアと同様に結晶度が高い。そこで本研究では、噴出物の記載岩石学的解析に加え、独自の実験手法によるごく低圧での高精度な相平衡実験により、破碎前に最後に平衡化した条件を明らかにする。これまでの火道流の数値モデル研究により、破碎深度がごく浅いプリニー式噴火を発生するためには、火道が深部で岩脈状、浅部ではパイプ状の形状をとることが有効なことが示されている(Costa *et al.*, 2007)¹⁴⁾。そこで本研究では、実験から得られたマグマ温度と最終平衡圧力、宝永噴火で想定される初期条件と噴出率を満たす火道の形状を求めた。

実験方法：出発物質は、宝永火口の東方、御殿場市水土野で採取した宝永スコリアを用いた。宝永スコリアの大部分は結晶度約 50~60%で、石基鉱物組み合わせはカンラン石・普通輝石・少量のピジョン輝石・斜長石・磁鉄鉱である（図 1 3）。スコリアは局所的に結晶質の部分を含み、結晶度は高い部分では 90%程度に達するが、そのような高結晶度部分は全体の 1 割に満たないため、本研究では結晶度 50~60%がマグマの結晶度を代表すると考え、粉碎することなく 3.5~4 mm 角の立方体状に切り出して出発物質として用いた。石基のガラス・ナノライト・細粒のマイクロライト、および粗粒のマイクロライトと斑晶のリム部分のみを融解・再平衡させ、粗粒のマイクロライトと斑晶のコア部分は非平衡のまま残す実験である。既存の不均質核が高密度で存在する状態を作り、新たな核形成や結晶の急成長を促す大きな過冷却の発生を抑えることを意図した。

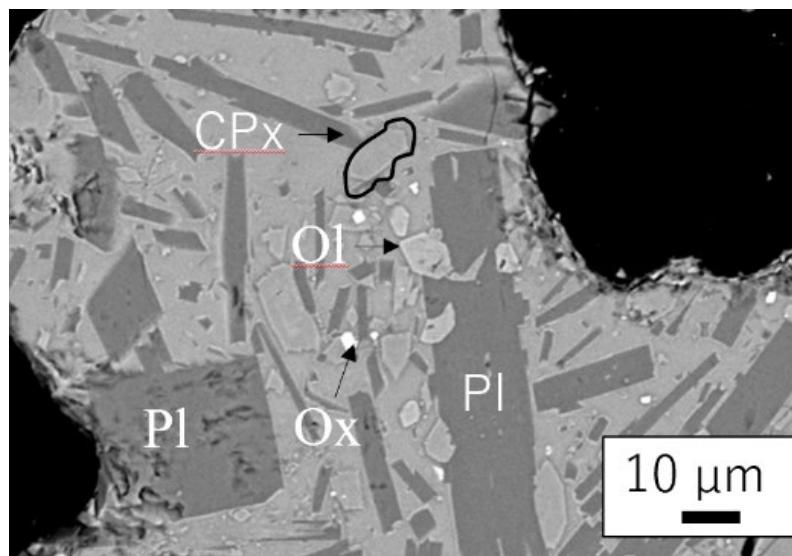


図 1 3 富士火山宝永スコリアの代表的サンプルの反射電子像: Pl = plagioclase, OL = olivine, Ox = oxide, CPx = clinopyroxene。

実験は Otsuki *et al.* (2015)¹⁵⁾に従いステンレス保護管入り石英ガラス管を用いてマッフル炉で加熱し温度・水蒸気圧・酸素分圧を変数として天然の結晶度と鉱物の固溶体組成を再現する条件を探した。ガラス管内の空間体積に基づき秤量した水酸化マグネシウム粉末を加熱時に熱分解させることで所定の水蒸気圧を発生した。また、目的とする温度まで単調に加熱し 8 時間維持する実験の他、目的温度+40°Cまで加熱し、2 時間維持したのち目的温度まで 40 分かけて冷却し 8 時間維持する Reverse 実験もおこなった。酸素分圧は固体緩衝法を用い、Ni-NiO 緩衝を基本として PT 条件を絞った後に、それより酸化的な Re-ReO 緩衝および MnO-Mn₃O₄ 緩衝を検証した。

実験結果：実験産物は宝永スコリアの組織をよく再現し、骸晶や樹脂状結晶など実験生成物に発生しがちな大過冷却下での結晶成長を示す組織はほとんど形成されなかつた（図 1 4）。まず結晶度は、低圧ほど、また低温ほど上昇するため、低圧高温と高压低温では同じ値をとる。宝永スコリアの結晶度である 50~60%に近くなる条件は、1120~1100°C・1 気圧以下から 1100°C・2MPa; 1080°C・6MPa を通り 1060°C・14MPa に至る

(図15)。10 MPa 以下において、1060°Cで結晶度は急激に増加し90%を超える。これは共融点温度が1060°C付近に存在するためと考えられる。また鉱物組み合わせは、高温・高压から結晶度が上昇するにつれて、斜長石→カンラン石→輝石→磁鉄鉱の順に晶出した。磁鉄鉱は結晶度が60%以上にならないと晶出せず、これは実験の酸素分圧が天然の条件よりも僅かに還元的であることを示す。

1080 °C 6MPa $\Phi=55.0\%$

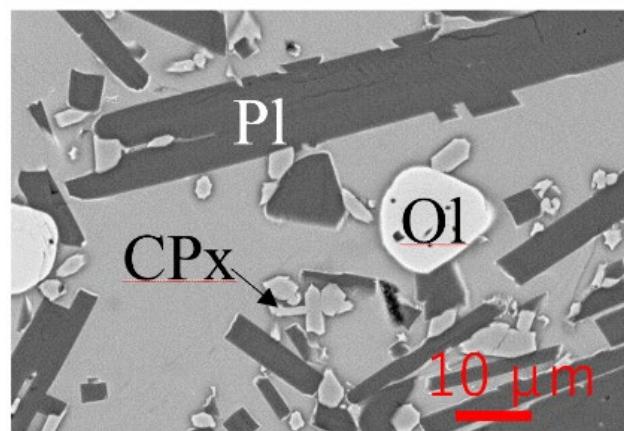


図14 溶融実験産物の反射電子像：温度1080°C、水蒸気圧6 MPa、酸素フガシティNNO緩衝。結晶度は55%。

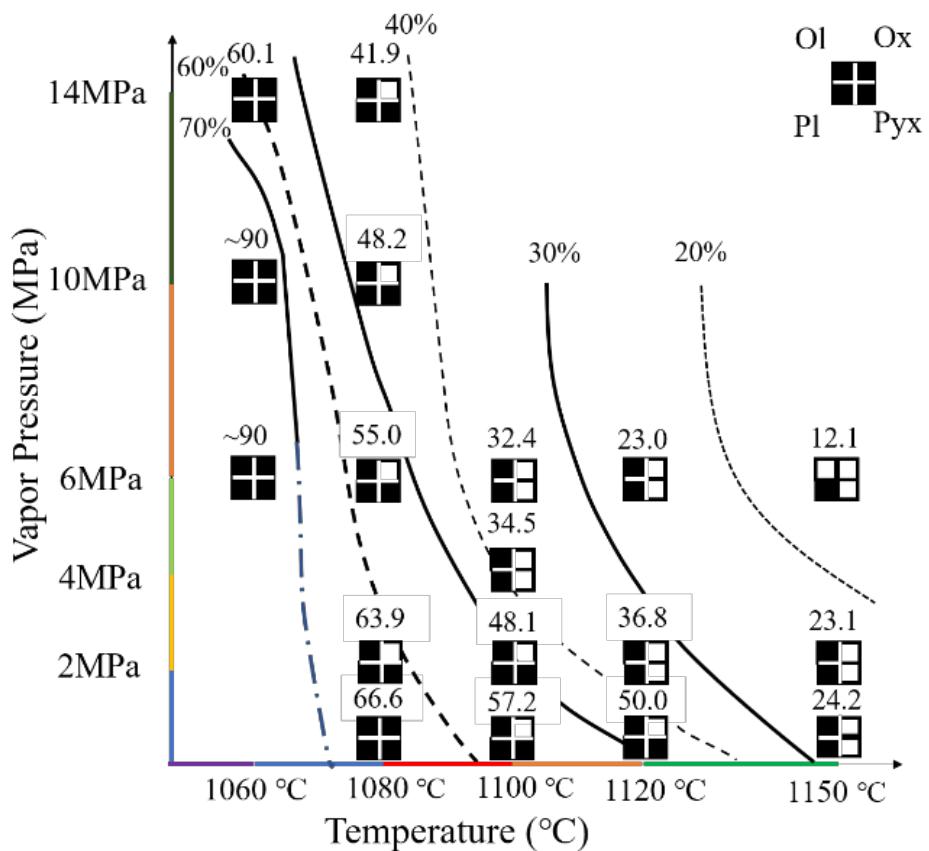


図15 溶融実験の結果（結晶度と鉱物組み合わせ）：酸素フガシティNNO緩衝。

次に、Reverse 実験（溶融－結晶化実験）の結果について述べる。6 MPaにおいて1100°Cに加熱後1060°Cまで冷却した実験では8時間維持後の結晶度は56%となり、単純な溶融実験より大幅に低結晶度となった。一方、6 MPaで1120°Cに加熱後1080°Cまで冷却した実験では、結晶度は57.5%となり、融解実験(55%)とよく一致した。Reverse 実験と融解実験の一致・不一致が、わずか20°Cの違いで大きく異なることは、上述のように、わずかな温度差で多量の結晶の溶融・晶出が起こる共融点ソリダスが1060°C付近に存在することを支持する。

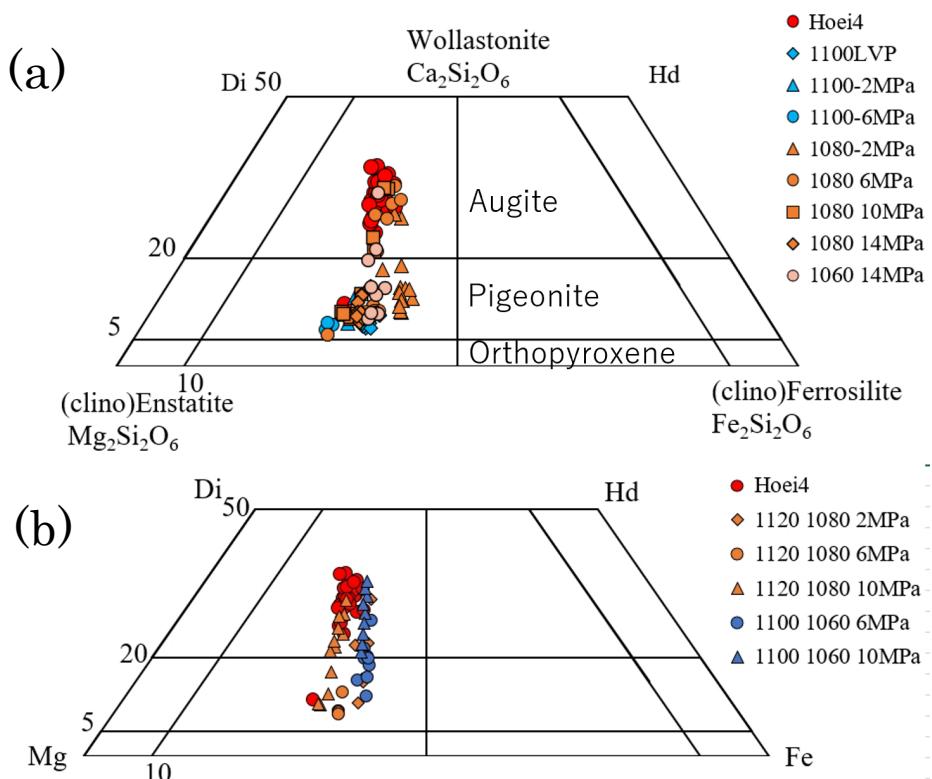


図1-6 宝永スコリアおよび様々な温度・圧力・酸素フガシティ条件での実験産物の輝石組成: (a)溶融実験 (b)Reverse(溶融・結晶化)実験。

溶融実験産物の輝石固溶体組成を図1-6 (a)に示す。1100°Cではピジョン輝石のみが晶出している。1080°C以下では、ほぼMg値の等しい普通輝石－ピジョン輝石のタイライン上に分布した。これは本実験時間内ではWo成分が十分に平衡に達していないことを示す。本溶融実験産物に含まれる鉱物は、(a)溶け残り鉱物 (b)その再平衡が様々な程度に進んだもの (c)新たにオストワルドライピニング成長したものが考えられる。(a)は出発物質に含まれていた普通輝石と同一の組成を示す。図1-6において、多くの測定点が出発物質に含まれていた普通輝石組成からずれていることは、(a)の頻度は限定的であり、(b)や(c)がかなりの程度進行していることを示す。(b)では、結晶内の元素拡散がMg-Fe相互拡散に比べて遅い、珪灰石やヒスイ輝石成分では平衡に達しにくいと考えられる。また(c)で形成された輝石結晶は、溶融度が上がるほど、Mg値が上昇するはずである。温度が1080°C一定の下で水蒸気圧が2MPaから6、10MPaに

上昇すると、(b)の速度はほぼ一定のまま、(c)がより進行すると予想される。結晶度の特に高い2MPaに比べ、6MPa、10MPa実験の輝石がややMgに富んでいることはこの予想と一致する。1060°C・2MPaの実験と同様に結晶度の高い1060°C・14MPaの輝石がFeに富んでいないのは、磁鉄鉱が共存するためと解釈できる。なおReverse実験(図16(b))では、ピジョン輝石の割合が減り普通輝石の割合が増加する。これは宝永スコリアに近く、いったん+40°Cの高温で溶融したこと、輝石組成が、より化学平衡に近づいていることを示す。

磁鉄鉱のリキダスと、輝石よりも拡散による平衡化が速いカンラン石のMg値に対する酸素分圧の効果を調べるため、Re-ReO(RR0, NNO+2.0 log unit)およびMnO-Mn₃O₄(MNO, NNO+3.5 log unit)緩衝での対照実験を1080°Cでおこなった。NNOでは2および6MPaでは磁鉄鉱は晶出せず<0.1MPaで晶出したのに対し、RR0では安定領域が広がり、2MPa以上の水蒸気圧で晶出することがわかった。またカンラン石はRR0では最外縁部で輝石+磁鉄鉱に分解し、さらに酸化的なMNO条件では分解反応は全体に進行する。また酸素分圧が上昇すると磁鉄鉱の晶出とともに全結晶度もやや増加する。1080°C・10MPaではRR0条件では実験を行っていないが、NNOに比べて結晶度がやや上昇し、50%の結晶度を超える可能性がある。

カンラン石のFo値は、磁鉄鉱が晶出しないNNOの実験では、いずれも宝永スコリア中のカンラン石の値69~70mol%よりも低い53~67mol%であったが、RR0緩衝では、最外縁部では局所的に斜方輝石と磁鉄鉱のシンプレクタイトに分解が始まり、反応し残りの部分では宝永スコリアの値を再現した。

以上から、宝永の玄武岩質マグマが(輝石のWo、Jd成分を除き)最後に最も浅部で平衡に達した条件は、1080°C, 6MPa, $f_{O_2}=NNO+1.5$ 程度(RR0より僅かに還元的)と見積もられた。

火道流物理モデルへの適用：本研究のモデル計算では、1080°Cにおける水の飽和圧力を79MPa、宝永マグマ組成中の水分量を2.7wt% (Ishibashi and Amano, 2017)¹⁶⁾として計算を開始した。初期深度は静岩圧を仮定して3400mとし、マグマの流出速度は火口でのチョーキング(音速)または大気圧(0.1MPa)を満足するように決定した。また気泡(Pg)とマグマ(Pm)の圧力差を考慮した。マグマ中の蒸気圧(Pvp)は、マグマの平衡飽和圧力と定義した。1080°Cにおける平衡結晶度とメルトの含水量は、宝永マグマの化学組成と温度1080°Cを固定してMELTS計算(Gualda *et al.*, 2012)¹⁷⁾から多項式フィッティングで求めた。本モデルでは非平衡結晶化を考慮し、結晶化速度は平衡結晶化度に達するまでの時間である特性時間で表現した(La Spina *et al.*, 2016)¹⁷⁾。マグマ粘性は結晶度・メルト粘性のほか歪速度・気泡体積依存性を考慮し(Moitra and Gonnermann, 2015)¹⁸⁾、破碎条件は気泡過剰圧条件または歪速度条件とした。

本研究では、岩脈状と岩脈一円筒火道への遷移形状をCosta *et al.*(2007)¹⁴⁾に従い検証した。マグマは最初、岩脈状の火道を上昇し、深さwT=1000mで半径r=15mの円筒状火道に変化すると仮定して、境界条件を満たす岩脈形状を検討した。岩脈から管状火道に遷移すると、断面積の急激な低下からマグマ流速が増す。一方、火道半径が

岩脈幅に対して大きければ、同じマグマ流速に対する歪速度は低下する。そこで、マグマ粘性に歪速度依存性を加えると、火道形状によって粘性が大きく変化することになる。

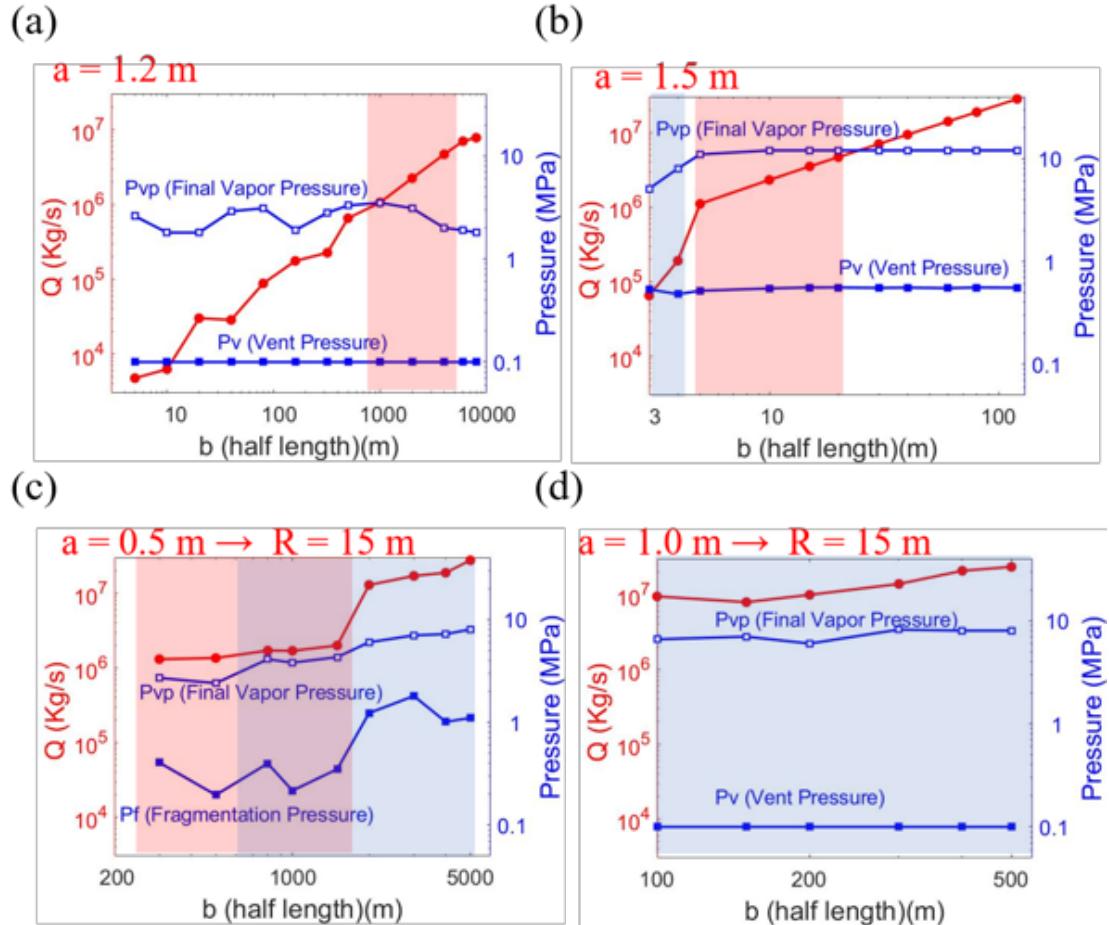


図1-7 火道形状を変えた場合の最終平衡蒸気圧 (MPa) と噴出量 (Kg/s) の計算例: 赤い影の部分は宝永噴火の噴出量 ($9 \times 10^5 \text{ Kg/s}$) の範囲、青い影の部分は最終蒸気圧が 4~10 MPa の範囲であり、実験で求めた 6MPa とほぼ同じである。岩脈から管状火道への遷移深度 $wT=1000\text{m}$ 。 (c)の場合に境界条件を満たす。

岩脈形状を変化させると、マグマの噴出速度と最終平衡圧力が変化することがわかった（図1-7）。岩脈幅の $1/2$: $a = 1.2 \text{ m}$ のとき、いずれの条件も破碎基準を満たさず、最終平衡圧力は $2 \sim 4 \text{ MPa}$ であった。それよりやや厚い岩脈 ($a = 1.5 \text{ m}$) 場合は、岩脈の長さ $5 \sim 20 \text{ m}$ のとき、宝永噴火のマグマ噴出率 ($9 \times 10^5 \text{ Kg/s} \sim 6 \times 10^6 \text{ Kg/s}$) を満たした。しかし、最終的な平衡圧力 (10 MPa 以上) は実験で制約された圧力より高くなつた。この圧力では破碎が起こらず、マグマの流速が音速に達して火道内でチョーキングしてしまう。

薄い岩脈 ($a = 0.5 \text{ m}$) では、破碎圧力 0.2 MPa から 2 MPa 、最終平衡圧力 $3 \text{ MPa} \sim 10 \text{ MPa}$ で解が存在した。これらの範囲は、実験により制約された最終平衡圧を含む。さらに

噴出率も、岩脈の半長 b が $500 \text{ m} < b < 2000 \text{ m}$ の場合に満たされる。 $a = 1.0 \text{ m}$ の岩脈では、噴出率が高くなりすぎる ($> 10^7 \text{ Kg/s}$)。

以上から、実験岩石学的に制約された、宝永スコリアのごく低い破碎圧力（およびマグマの温度や含水量、マグマ噴出率）は、岩脈状から管状に遷移するような火道形状を想定した物理モデルにおいて解が存在する（岩脈の厚さ 1 m , $a = 0.5 \text{ m}$; 管状部分の半径 15 m ; 遷移深度 1 km ）ことが明らかとなった。玄武岩質マグマのプリニー式噴火において、マグマの破碎条件が満たされるためには、マイクロライトの高結晶度が必要とされるが、そのような高結晶度まで破碎せずにマグマが上昇するためには、玄武岩質マグマが、このような岩脈状から管状に遷移する火道形状をとることが条件となっている可能性がある。

ii) 大沢スコリアと大淵スコリアの分析（常葉大学）

富士火山大沢火碎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および不明確だった部層ごとの対比をおこなった。また、大淵降下スコリアについては分布域での遺跡調査をおこなったほか、既に採取した試料について鉱物組成分析をおこなった。

iii) 東山麓のスコリア連續堆積物の分析（東京大学）

令和2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、東山麓に連續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。前年度までの研究で、約2900年前に発生した御殿場山体崩壊の前後で噴出物の組織や組成に大きな変化があることが見出されている。すなわち、山体崩壊直後の十数回の噴火では、全岩組成の変化方向が他の時期とは異なるとともに石基ガラスの量比が高くなっている。このため、浅部マグマ溜まりの影響をほとんど受けずに深部マグマ溜まりから直接噴火に至ったと解釈された。

図18に示すように、御殿場山体崩壊直後の時期 (period-2a, b, c) は全岩化学組成の変化の方向が他の時期とは明確に異なる。これは、 TiO_2 や Al_2O_3 量の変化として顕著である。その一方で、全岩化学組成の時間変化はこの期間内は連續的であり、単一のマグマ溜まりが関わった連續的なプロセスが関与していることを示唆している。そこで、令和3年度は熱力学プログラム MELTS を用いて、噴火に至る過程についてさらに検討をおこなった。まず period-2 の時期の組成の端成分から他の組成が結晶分化によって作ること可能か、温度・圧力・含水量・酸素雰囲気を様々に変化させて計算したところ、 $300\text{--}400 \text{ MPa}$ の圧力下で $0.5\text{--}1.0 \text{ wt\%}$ の水を含むマグマを結晶分化させると組成変化が再現できることがわかった。しかしながら、最も SiO_2 と TiO_2 量が高い分化側の端成分を再現するためには 33%以上が結晶化する必要があり、深部でこのような結晶分化をしたマグマを噴出させることは現実的ではない。加えて、石基ガラスに富むという period-2 の特徴とも矛盾してしまう。

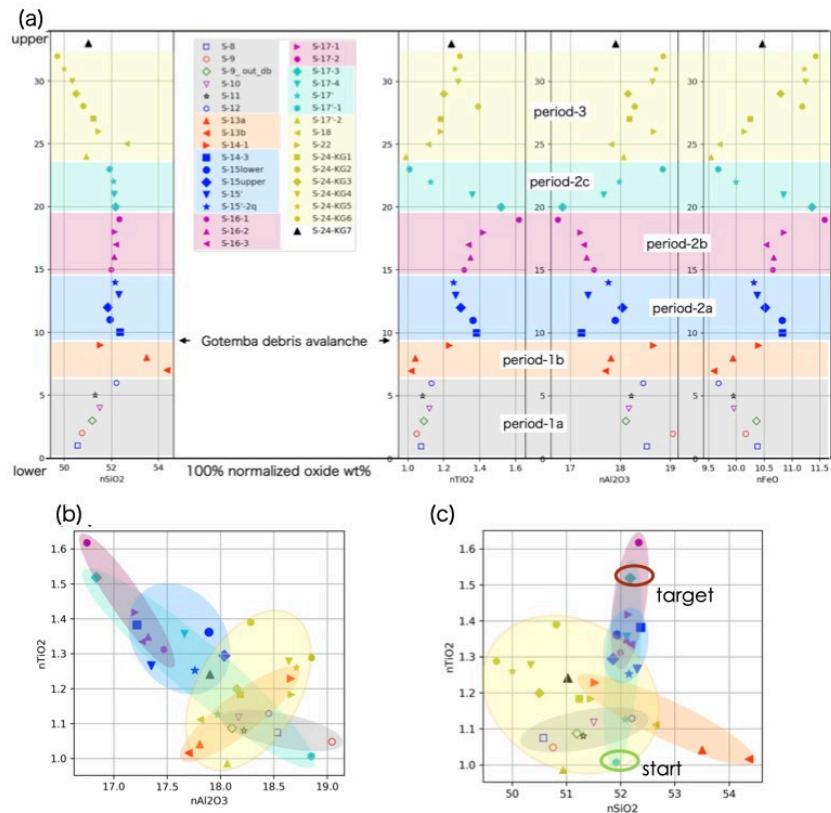


図18 富士山の東山麓で採取された火山灰の全岩化学組成: (a)約2000年間の降下火砕物の連続層(33枚)の全岩化学組成の時代変化、(b) Al_2O_3 - TiO_2 、(c) SiO_2 - TiO_2 、MELTSによる組成変化計算の出発物質組成と目標組成も併せて表示。

そこで、次に、減圧しながらの結晶分化を検討した。減圧させながら結晶分化させることは、実際の噴火ではマグマ上昇中に火道中に結晶分化をすることに対応する。結晶化した鉱物は火道壁に付着して取り去られることが予想されるため、晶出する結晶総量が大きくてもマグマ自体に留まる結晶量は増加せず、ガラス質の石基が実現するとともに、マグマは流動性を保つことができると考えられる。マグマの初期圧力を富士山に想定されている深部マグマ溜まりの圧力に相当する400MPaとして、様々な初期温度と初期含水量の組み合わせについて、一定の dT/dP で減圧させながら温度を下げて結晶分化をさせる計算をおこなった。噴火時の組成や組織との一致程度を評価する目的のため、マグマの粘性が高まるか気泡分率が高くなってマグマの破碎条件に達したところで計算を終了させた。その結果、低含水量(0.5 wt%)のマグマを出発物質として、温度低下率が小さい(0.05 °C/MPa)場合に、目標とする組成が再現できることがわかった(図19)。組成がよく再現できるのは数MPaの低い圧力まで達した段階であり、このようなマグマは容易に噴火可能であると考えられる。

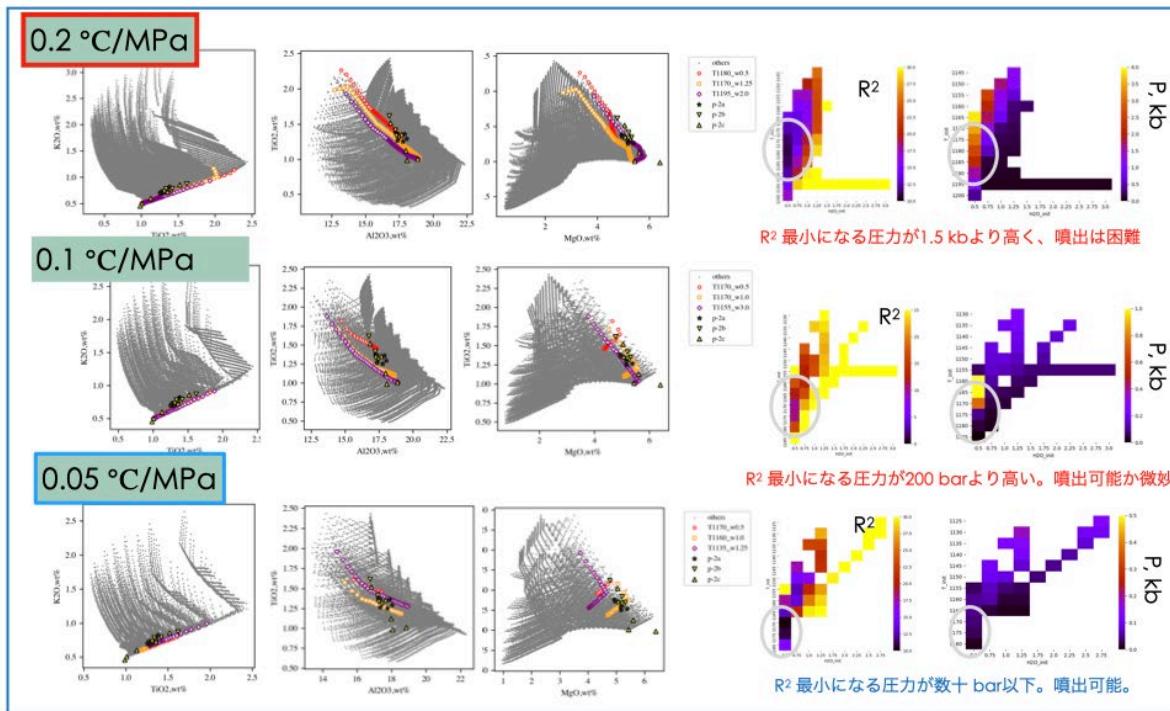


図 19 減圧結晶分化による組成変化計算例: 目標組成に対する一致度を残差の二乗和 (R^2) で表現している。 R^2 が小さいほどマグマが破碎する条件下で目標組成が再現できている。右端の図にその際の圧力を示した。

これまでの検討から、富士山では御殿場山体崩壊直後の十数回の噴火にわたって、浅部マグマ溜まりの影響を受けることなく深部マグマ溜まりから直接噴火が発生していたことが明らかになった。これは 2 つの点で重要である。まず、御殿場山体崩壊の崩壊量は 1 km^3 程度であり、富士山の山体自体の大きさと比較すると大きな崩壊量ではない。それにもかかわらず、噴火の様式が長期間にわたって変化したということは、浅部の火道周辺の荷重変化が噴火に大きな影響を与えることを示唆している。火山の浅部の密度構造や応力の状態については予測のためにデータが十分に得られておらず、今後の観測の充実に期待する。

2 番目に、深部マグマの含水量が 0.5 wt% 程度と低いにもかかわらず、何回もの噴火が発生していたことが重要である。図 20 は富士山のマグマ組成で結晶分化をおこなった際のマグマの密度変化を計算したもので、初期含水量を変えていくつかの場合を計算している。

マグマ溜まりの温度低下にしたがって、マグマ溜まり全体の密度（青）は上昇、つまり体積収縮しており、自発的なマグマ溜まりの破壊を発生させるような過剰圧は生じていない。マグマの温度が $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下になると、液体部分（紫）や液体+斜長石（オレンジ）の密度は低下し始めるが、密度低下の程度は大きくない。密度差によってマグマ溜まりの天井部分を破壊するためには理論的には十数 MPa 以上の圧力差が必要とされるが (Lister and Kerr, 1991)¹⁹⁾、計算で示されたようなわずかな密度低下では、マグマ溜まりの天井の破壊には膨大な量の分化したマグマ（少なくとも数 km 厚）が必要となる。しかしながら、実際に噴火したマグマの量は数百万 m^3 程度と非常に少なく、

また、噴火したマグマ組成に明確な時間変化が観察されることから、大量の軽いマグマが噴火前に蓄積していたとは考えられない。したがって、こうした結晶分化による浮力の獲得がトリガーとなってマグマ上昇が開始した可能性は低い。また、富士山のマグマに想定される CO_2 量を考慮しても 10 km 程度よりも深いマグマ溜まりは揮発性成分には飽和しておらず (Iida, 2007)²⁰⁾、浮力の獲得によってマグマ上昇の開始するような自発的な噴火の発生はおこらないと思われる。

ではどのようにマグマの上昇が始まるのだろうか。唯一の解は、より深部から上昇してきたマグマが、深部マグマ溜まりに注入することによって過剰圧が発生することである。つまり富士山ではマグマの注入による過剰圧の発生が噴火のトリガーである可能性が高く、深部マグマ溜まりへのマグマの注入を深部低周波地震の観測等で検知できれば、噴火の発生予測に役立つものと思われる。また、深部マグマ溜まりへのマグマの注入を起点とする噴火のシナリオを事前に検討しておくことが必要であろう。富士山で観察されたこうした深部マグマ溜まりの挙動や特徴は、後述の、3)ー1)噴火の推移・様式予測の仕組みの検討、につながっている。

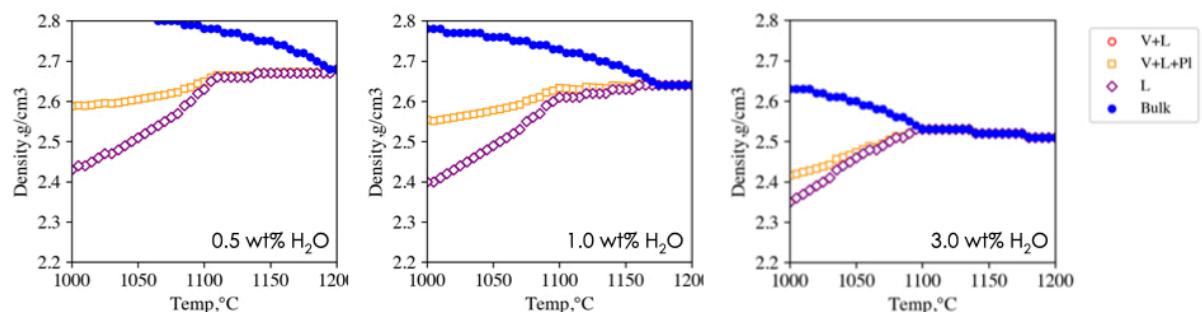


図 20 深部マグマ溜まりでの温度低下による結晶分化に伴う密度変化。

iv) 珪長質マグマ溜まりの検討（静岡大学）

前年度に引き続き、宝永噴火の斑レイ岩捕獲岩の研究をおこなった。斑レイ岩には、ガラスを粒間に含むマッシュ状のものが存在し、この粒間ガラス、メルト包有物、構成鉱物の化学組成分析をおこない、斑レイ岩の存在する深度や形成過程について検討した。この内容は、日本火山学会 2021 秋季大会で発表した。

d) 伊豆大島（静岡大学）

i) 伊豆大島 1986 年 B マグマの H_2O 飽和斜長石リキダスの実験的制約

伊豆大島 1986 年噴火では、新しい火口列 (B・C 火口列) が開口し、主に $\text{SiO}_2 \sim 54.5\text{wt\%}$ の玄武岩質安山岩マグマ（以後、B マグマとよぶ）を噴出した。特に、B 火口列では高度 16000m まで 噴煙柱を上げるサブプリニー式噴火が発生し、全体の 65vol% を占めるマグマを噴出した (e. g., 遠藤・他, 1988)²¹⁾。B マグマは、同火山の過去の噴出物の大部分を占める玄武岩とはやや化学組成が異なるため、主要なマグマ供給系とは分離した浅部マグマだまりに由来すると考えられてきた (e. g., 藤井・他, 1988)²²⁾。しかし、B マグマを供給したマグマだまりの深さや噴火準備過程の詳細については未だ理解不十分である。B マグマはほぼ無斑晶質であるが、わずかに含まれる斜長石斑

晶中のメルト包有物は B マグマと似た化学組成を示すことから、斜長石に飽和していたと考えられる。また、伊豆大島では、深さ 10km より浅部においてマグマは H_2O に飽和していたと考えられる (Hamada *et al.*, 2011)²³⁾。このため、B マグマのプレ噴火 P-T 条件は、 H_2O 飽和斜長石リキダス (以下、HSPL と略す) 上にあると考えられる。そこで、1 気圧～196MPa の圧力範囲で H_2O 飽和条件下での B マグマの溶融・結晶化実験を行い、B マグマの HSPL を検討した。

本研究では、1986 年 B 噴火の玄武岩質安山岩溶岩の粉末を、実験の初期物質とした。1 気圧および高圧での実験はいずれも、産総研地質調査総合センターの装置を用いて実施した。1 気圧の実験は CO_2-H_2 ガスで fO_2 を制御可能な縦型環状電気炉を用いて実施し、島弧マグマに一般的な Ni-NiO バッファーの fO_2 条件の下、実験温度で試料を 3 時間加熱した後、Cu 板上に落下させて急冷した。一方で高圧の実験は内熱式ガス圧装置 (KOBELCO Dr. HIP HARM-200) を実施し、49MPa・98MPa・196MPa の圧力でそれぞれ、 H_2O 飽和条件の下で試料を 3 時間加熱した後、急冷した。この際、試料カプセルには $Ag_{50}Pd_{50}$ を用いた。高圧での実験においては、 fO_2 条件は制御していない。回収した実験試料から研磨薄片を作製し、東大地震研の FE-EPMA (JEOL JXA-8530F Plus) を用いて観察を行うとともに、EPMA (JEOL 8800R) を用いてガラスの化学組成を分析した。

1 気圧では斜長石が初相鉱物であり、1165°C では晶出を確認できたが、1180°C の試料には含まれなかった。一方で高圧実験では磁鉄鉱が初相として晶出した。斜長石は、49MPa では 1130-1100°C、98MPa では 1080-1065°C、196MPa では 1050-1010°C の温度範囲でそれぞれ晶出した。ケイ酸塩メルトの斜長石リキダスは、メルト組成・含水量・圧力の関数として定式化されている (斜長石リキダス温度計; Putirka (2008)²⁴⁾)。メルトが H_2O に飽和している場合、メルトの含水量は主に圧力によって決まるため、適当な H_2O 溶解度モデル (例えば VolatileCalc; Newmann and Lowerstern (2002)²⁵⁾) と斜長石リキダス温度計を組み合わせることで、 H_2O 飽和斜長石リキダスを計算できる (この方法で計算した HSPL を T_{LP} と表記する)。一方、熱力学相平衡計算プログラム rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012)¹⁾ を用いても、HSPL を計算できる (この方法で計算した HSPL を T_{LM} と表記する)。今回の実験結果を T_{LP} 、 T_{LM} と比較すると、1 気圧ではどちらの計算値も実験結果と整合的であったが、高圧では T_{LP} が実験結果と整合的であったのに対し、 T_{LM} は実験結果よりも低い温度を示すことがわかった (図 2-1)。高圧実験では fO_2 が制御できていないため、斜長石より先に磁鉄鉱が晶出してしまい、メルトの化学組成が初期物質の組成から逸脱する。そこで、 fO_2 の変化と磁鉄鉱の早期晶出が H_2O 飽和斜長石リキダスの見積もりに及ぼす影響を検討するために、斜長石を含む実験試料中のガラス組成を用いて T_{LP} を計算した。その結果、計算された T_{LP} は実験温度とよく一致した。したがって、 T_{LP} は fO_2 によらず、B マグマに近い組成のメルトの HSPL をうまく計算できると考えられる。そこで T_{LP} 曲線を用いて、藤井・他 (1988)²²⁾ で見積もられたプレ噴火温度～1100°C を仮定したときの B マグマのプレ噴火深度を見積もったところ、およそ 2km の値を得た。この深さは、従来考えられてきたマグマだまり深度～3-5km よりやや浅く、伊豆大島を NW-SE 方向に貫く浅部ダイク領域底部の深さと概ね一致する。ただし、この見積もりは温度の仮定に強く依存するた

め、今後、B マグマのプレ噴火温度の精密な再検討が必要と考えられる。以上の内容は既に論文にまとめて投稿し、現在査読中である (Oida *et al.*, JDR under review)²⁶⁾。

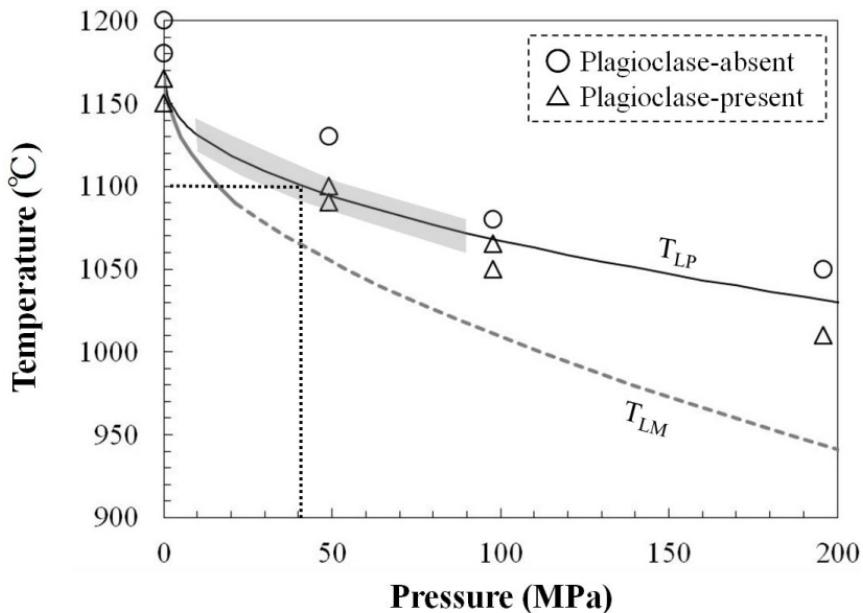


図 2-1 1 気圧および高圧における B マグマの溶融・結晶化実験の結果と、既存のモデルとの比較 (Oida *et al.*, JDR 査読中)²⁶⁾: ○は斜長石を含まない Run、△は斜長石を含む Run、 T_{LP} および T_{LM} は、Putirka (2008)²⁴⁾ の斜長石リキダス温度計および rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012)¹⁾ でそれぞれ計算した HSPL 曲線。 T_{LM} の破線は、斜長石が初相でないことを示す。グレーで塗った領域は、B マグマのプレ噴火温度圧力条件の見積もり範囲を示す。

ii) 伊豆大島 1986 年 B 噴火の深成岩捕獲岩の岩石学的特徴

伊豆大島 1986 年 B 噴火の噴出物中には稀に、粒間ガラスを含む深成岩を捕獲岩として含む。このような捕獲岩はマグマだまりを構成するクリスタルマッシュの欠片と考えられ、マグマだまりの状態やプレ噴火過程を検討するための情報源として重要である。そこで本研究では、B マグマの由来するマグマだまりについて情報を得ることを目的とし、粒間ガラスを含む深成岩捕獲岩について岩石学的記載と鉱物・ガラスの化学分析をおこなった (吉田, 2022)²⁷⁾。

本研究では B 噴火の噴出物中より採取された 12 個の深成岩捕獲岩を研究試料とした。これらはいずれも鉱物粒間にガラスを含む。これらの捕獲岩は、鉱物の組み合わせと組織的特徴に基づき、FeTi 酸化物を含まない Gr-A、FeTi 酸化物を含み、鉱物が粗粒で清澄な Gr-B、FeTi 酸化物を含み、鉱物が細粒で、輝石が粒間ガラスとの間に反応縁を形成している Gr-C の 3 グループに分類できる。オリビンは Gr-A のみに含まれる。粒間メルトの量は Gr-A から C にかけて減少する。そして、Gr-C の捕獲岩の中から、石英を含むものを発見した。伊豆大島の火山噴出物からの石英の報告は、B 噴火のデイサイト質噴出物 (藤井・他, 1988)²²⁾ 以来 2 例目である。そこで、この石英を含む捕獲岩 (OSNXe-3B) について詳細に分析した。

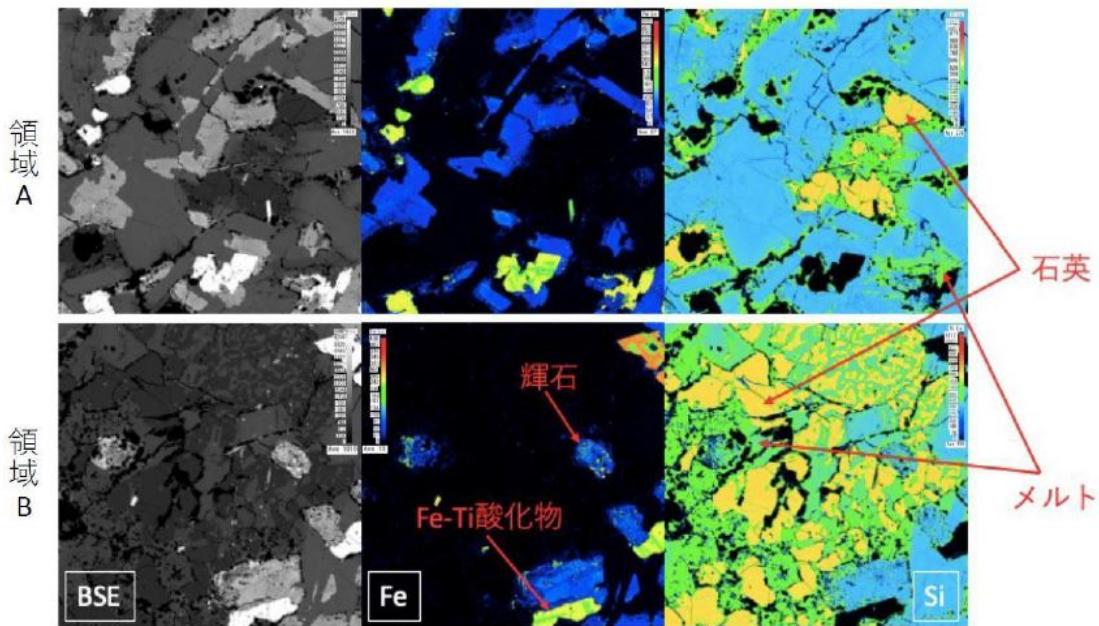


図 2-2 OSNXe-3B の領域 A および B の BSE 像と Fe・Si 濃度マップ (吉田, 2022)²⁷⁾。

OSNXe-3B は、輝石と磁鉄鉱に富む斑構岩質マッシュ部分（領域 A）と、輝石・FeTi酸化物をほとんど含まず、斜長石と石英に富むトーナライト質マッシュ部分（領域 B）から構成される。B 領域は A 領域中にパッチ状に分散している。粒間ガラスは両領域で見られ、さらに A 領域中の粒間ガラス中にも石英が晶出している（図 2-2）。斜長石の An# [=100Ca/(Ca+Na)] は領域 A では >60、領域 B では <50 の異なる範囲を示し、両領域の境界で急速に An# が変化する。また、領域 A 中でも粒間ガラスと接する斜長石では、その境界付近で急激に An# が低下する。輝石と FeTi 酸化物には離溶構造が著しく発達しており、晶出後に比較的緩慢な冷却を経験したと考えられる。粒間ガラスはデイサイト～流紋岩質で不均質であり、領域 A と B の間で組成範囲に大差ない。粒間ガラスの化学組成範囲は、1986B 噴火で噴出したマグマの組成バリエーションの延長上にあり、藤井・他 (1988)²²⁾で報告されたデイサイトの組成は粒間ガラスの組成範囲に含まれる。以上より OSNXe-3B は、苦鉄鉱質マグマから沈積してきた斑レイ岩質マッシュに珪長質マグマが流入し、その後に冷却・石英が晶出してできたと考えられる。粒間ガラスと B 噴火噴出物の化学組成の類似性および石英を含むという共通点から、この深成岩捕獲岩は B マグマの給源に関するクリスタルマッシュに由来すると考えられる。以上の内容は JpGU2022 で発表予定である。今後、OSNXe-3B を含む一連の深成岩捕獲岩試料について鉱物・ガラスの化学分析を進め、B マグマのマグマだまりの状態・プレ噴火過程に関する情報を検討していく予定である。

e) 伊豆東部火山群: 伊豆東部火山群の斜長石斑晶が指し示す隠れた珪長質マグマ（静岡大学）

伊豆東部火山群はおよそ 15 万年前から活動を継続する単成火山群である。この火山群では、約 3150 年前のカワゴ平噴火以前にデイサイト～流紋岩質のマグマを噴出したことがなかった。しかし、Hatada *et al.* (2020)²⁸⁾ は約 4000 年前に発生した大室

山噴火の噴出物を分析したところ、流紋岩質メルト包有物およびこれと平衡共存できる化学組成の斜長石斑晶が多く含まれることを発見した。この結果から Hatada *et al.* (2020)²⁸⁾は、カワゴ平噴火より 800 年以上前に大室山の地下に流紋岩質メルトを含むマグマだまりが存在していたと議論した。ところで大室山周辺では、比較的狭い領域内におよそ 10 万年前から 2700 年前までに噴火した単成火山が複数存在する。これらの火山の噴出物中に含まれる斜長石斑晶およびそれらに含まれるメルト包有物の化学組成を検討することで、伊豆東部火山群地下のマグマ供給系の発達過程およびその状態について情報が得られると期待できる。そこで本研究では、大室山周辺に位置する伊雄山、小室山、赤窪、茶野、門野の各単成火山の噴出物について、珪長質マグマと共存できる斜長石が含まれるかを検討した(野澤, 2022)²⁹⁾。BSE 像観察は東大地震研の FE-EPMA (JEOL JXA-8530F Plus)、化学分析は EPMA (JEOL 8800R) を用いてそれぞれおこなった。また、EPMA で分析した斜長石の An# と BSE 像の明度の関係を定量定式化し、BSE 像の明度から斜長石斑晶の An# を定量した。

An#についてキャリブレーションした BSE 像の解析の結果、伊雄山、小室山、赤窪、茶野、門野のすべての噴出物中で、An# が 30–50 の低い値を示す部分を含む斜長石斑晶が見つかった。これらの低 An# の斜長石は、大室山で報告された流紋岩質メルトと共存する斜長石と An#、Fe、K 含有量の範囲が一致する。さらに伊雄山の溶岩では、斜長石中に流紋岩質のメルト包有物が多数発見された。ただし、全斜長石斑晶に占める低 An# 領域を含む斜長石の割合は火山ごとに大きく変動し、この割合は溶岩の全岩 SiO₂ 含有量や噴火年代とは相関を示さなかった。以上の結果より、伊豆東部火山群の大室山周辺の地下では、10 万年以前から流紋岩質メルトを含むマグマだまり（おそらくはクリスタルマッシュ）が存在し、より深部から供給される苦鉄質マグマに様々な割合で取り込まれて噴火していたと考えられる。しかし、その取り込まれる割合を決めるメカニズムや、流紋岩質メルトの起源については今後に検討する予定である。

f) 雲仙 (東京大学)

1663 年と 1792 年噴火の噴出物の分析をおこない、マグマ供給系やプレ噴火過程について、平成噴火との違いを検討した。いずれの噴火でも低温マグマに高温マグマが作用して噴火が発生しているが、低温マグマの噴火前の状態や高温マグマとの混合比の違いが噴火様式の違いを生じた可能性が明らかになってきており、今後さらに検討を進める予定である。

g) 阿蘇 (熊本大学)

i) 阿蘇火山、先カルデラ期噴出物の層序と年代の検討およびマグマ噴出率の試算

阿蘇火山のカルデラ噴火の可能性評価のために先カルデラ期の火山活動を調査し、カルデラ期、後カルデラ期と呼ばれる現在の活動との比較をおこなった。本年度は先カルデラ期～カルデラ期の移行時期に着目して、カルデラ西部の立野地区の層序と年代の検討をおこなった(図 2-3)。

得られた層厚、分布範囲、出版されているデータを元に試行的にマグマ噴出率を求めた。豊肥火山地域では 5~4 Ma で 3 km³/ky のマグマ噴出率が、1~0 Ma に 0.2 km³/ky

にまで減少し、溶岩流主体の活動からカルデラ噴火に移行したことが求められているが(高橋, 1995)³⁰⁾、阿蘇では先カルデラ期は $1 \text{ km}^3/\text{ky}$ 、カルデラ期は $3 \text{ km}^3/\text{ky}$ と逆の結果が得られた。カルデラ噴火の要因を探る上で重要な制限事項になると思われる。

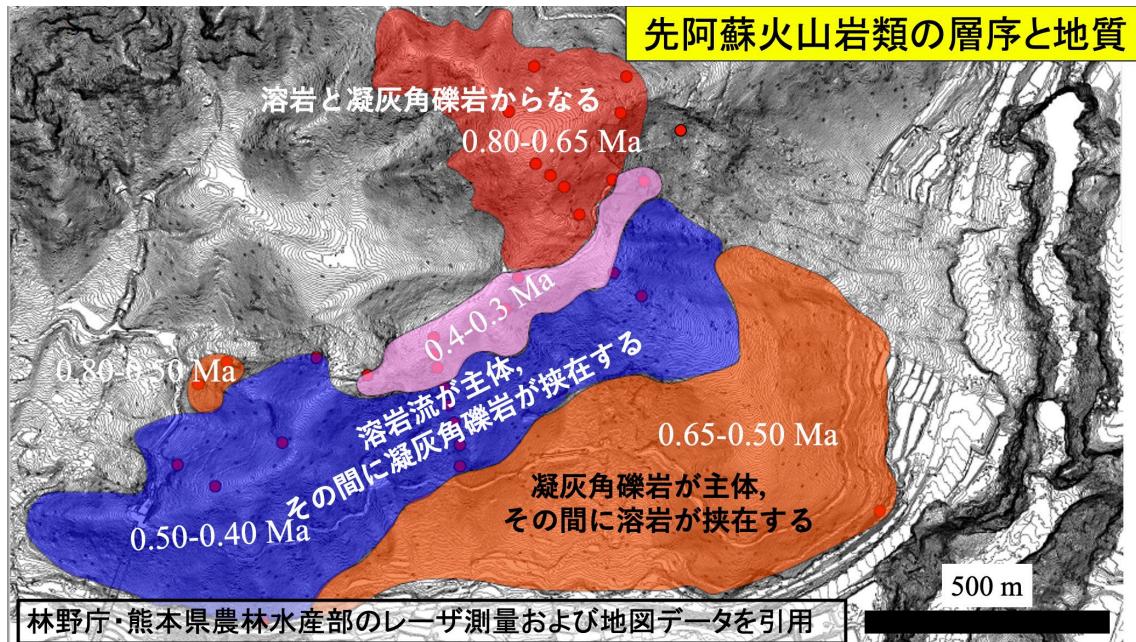


図 2 3 阿蘇カルデラ西部、立野地区の先阿蘇火山岩類の層序、地質と年代 (十川・他, 2019³¹⁾を改変)。

ii) 後カルデラ期完新世玄武岩の斑晶鉱物の組成累帯パターンおよび元素拡散プロファイルの解析

完新世に活動した杵島岳火山、往生岳火山の噴出物を対象に、斑晶鉱物の組成累帯パターンおよび元素拡散プロファイルの解析をおこなった。両噴出物の斑晶には逆累帯したものが多く含まれ、少なくとも 2 種類のマグマが混合し噴火に至ったことが明らかにされている (Kawaguchi *et al.*, 2021)³²⁾。本年度は単斜輝石斑晶に注目して元素拡散プロファイルの解析を行ない、マグマ混合の発生時期について検討をおこなった (図 2 4)。単斜輝石は阿蘇火山の玄武岩質マグマから流紋岩質マグマまで普遍的にみられる鉱物であること (三好・他, 2005)³³⁾、また数ヶ月以下から数千年オーダーの拡散時間を見積もることができる鉱物であること (e. g., Allan *et al.*, 2013; Singer *et al.*, 2016)^{34), 35)} から、中長期的な高温マグマの供給頻度を検討する上で最適である。

拡散時間の見積りは輝石斑晶内の Fe-Mg 相互拡散に基づき Petrone *et al.* (2016)³⁶⁾ の Non-isothermal diffusion incremental step (NIDIS) モデルを用いておこなった。元素拡散プロファイルの解析には、空間分解能を上げるために高解像度の反射電子像を用いた。解析は結晶軸が明らかな短軸方向のみに限定し、連続した組成境界をもつ組成バンドのみを対象とした。拡散係数は低 Mg#部分と高 Mg#部分それぞれについて計算し、それぞれ $1025\text{--}1027 (\pm 13)^\circ\text{C}$ と $1027\text{--}1033 (\pm 23)^\circ\text{C}$ の平衡温度を用いた (Kawaguchi *et al.*, 2021)³²⁾。解析にあたっては、組成変化が元素拡散によるものかど

うか確認するために、予め拡散の遅い元素(e.g., Al, Ca; Cherniak and Dimanov, 2010)³⁷⁾を用いてプロファイルの初期条件をチェックした。

本年度は任意に選択した单斜輝石 23 個の組成境界 27 個を分析し、0.1 年～105 年の拡散時間データを得ることができた(図 2 5)。それぞれのケースにおいて、約 20 年以上の拡散時間を示すデータは全体のわずか 13-18% だが、得られた時間幅の約 80% に相当する。得られた拡散時間のカーネル密度推定では、両試料ともにデータ密度が約 20 年前付近で減少し始める。このことは、長い拡散時間のデータが少ない理由が単にサンプリングのバイアスでなく、岩石学的に有意な違いであることを意味している。拡散時間累積度数の増加率は約 15-20 年前を境に急増し、この時期から高温マグマの供給量が増加したことが示唆される。

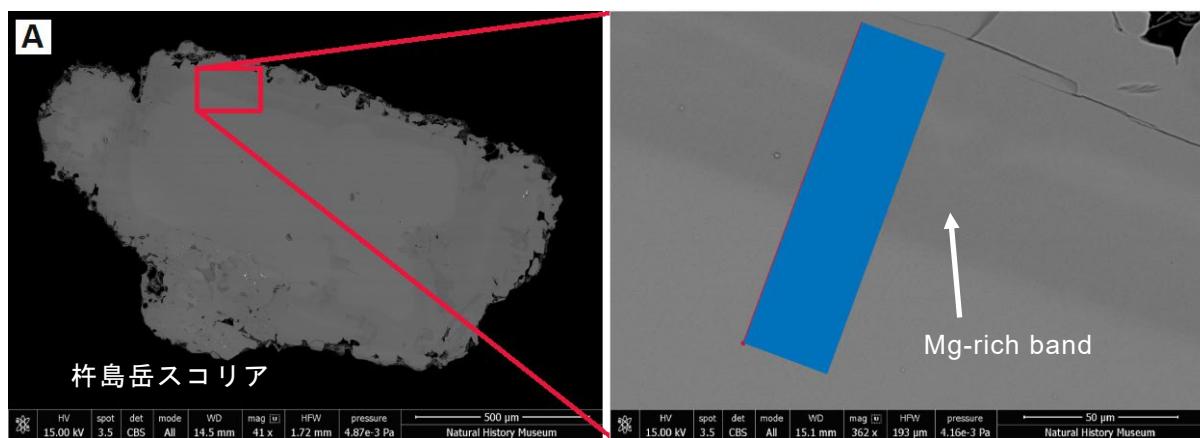


図 2-4 杣島岳スコリアに含まれる单斜輝石斑晶の反射電子像: 本研究では、右図に青のバンドで示した部分を対象に拡散プロファイルの解析をおこなった。

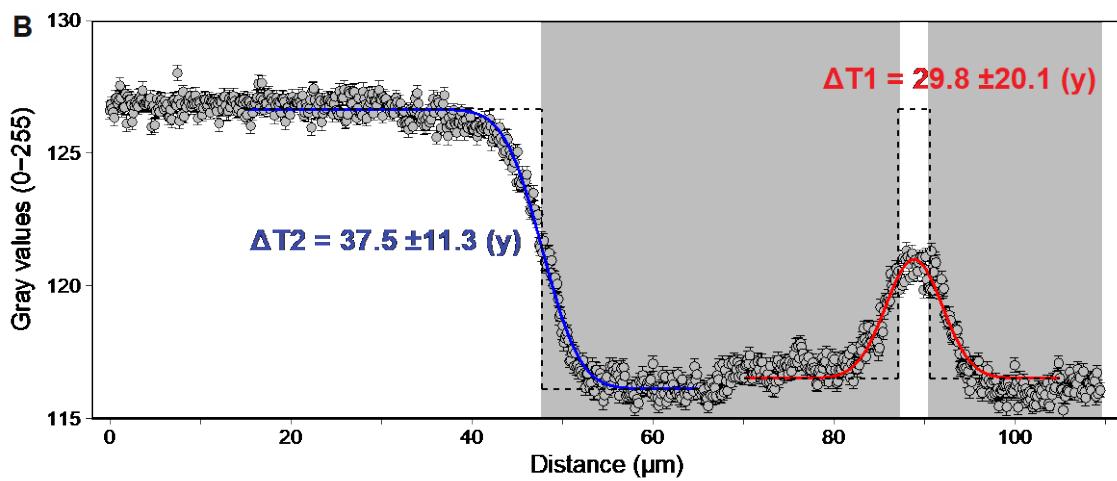


図 2-5 元素拡散プロファイルの解析例: 灰色の丸は実際に読み取った輝度で、輝石の Mg# に対応する。高 Mg# の部分を灰色の領域で示した。赤色と青色の実線はそれぞれの組成境界における拡散プロファイルのフィッティングカーブ。波線は組成境界における初期の状態を示す。拡散時間の誤差は計算に用いた温度の誤差を含む。

iii) 阿蘇カルデラ東部に分布する Aso-4 火碎流堆積物中の石質岩片の岩石学的特徴と起源

大分県竹田市野鹿・次倉に分布する Aso-4 火碎流堆積物の非溶結部 (Aso-4A, 星住・他, 2022)³⁸⁾ から火山岩の石質岩片を 58 試料採取し、偏光顕微鏡観察および蛍光 X 線分析装置を用いた全岩化学組成分析をおこなった。

石質岩片は、 SiO_2 含有量と斑晶モード組成に基づいて以下の 9 タイプに分類される。
 (A) : かんらん石単斜輝石玄武岩、(B) : かんらん石単斜輝石安山岩、(C) : かんらん石両輝石安山岩、(D) : 両輝石安山岩、(E) : 普通角閃石安山岩、(F) : 普通角閃石両輝石安山岩、(G) : 両輝石デイサイト、(H) : 両輝石普通角閃石流紋岩、(I) : 普通角閃石流紋岩 (図 26)。

SiO_2 vs. K_2O 図 (図 27) の分化トレンドと斑晶モード組成を用いた考察により、石質岩片試料のうち、A, C, D, F の 4 タイプは先阿蘇火山岩類の岩石タイプ (三好・他, 2009)³⁹⁾ と一部対比可能であった。対比された先阿蘇火山岩類の岩石タイプはカルデラ壁全域に点在しており、特にカルデラ壁の南西部に比較的多くみられる。このことから Aso-4A 火碎流は、カルデラ壁の南西部を中心に、カルデラ壁全体の先阿蘇火山岩類を石質岩片として取り込んだと考えられる。また、D, G の 2 タイプの岩質は、カルデラ形成期以降の溶岩類 (三好・他, 2005)³⁹⁾ と一部対比可能であった。さらに図 27 上では、石質岩片の約半数がカルデラ形成期以降の噴出物 (Hunter, 1998; 三好・他, 2005)^{40), 33)} の分化トレンド上にプロットされる。これらの石質岩片は、Aso-3、4 間にカルデラ内に存在した溶岩類に由来するのかもしれない。

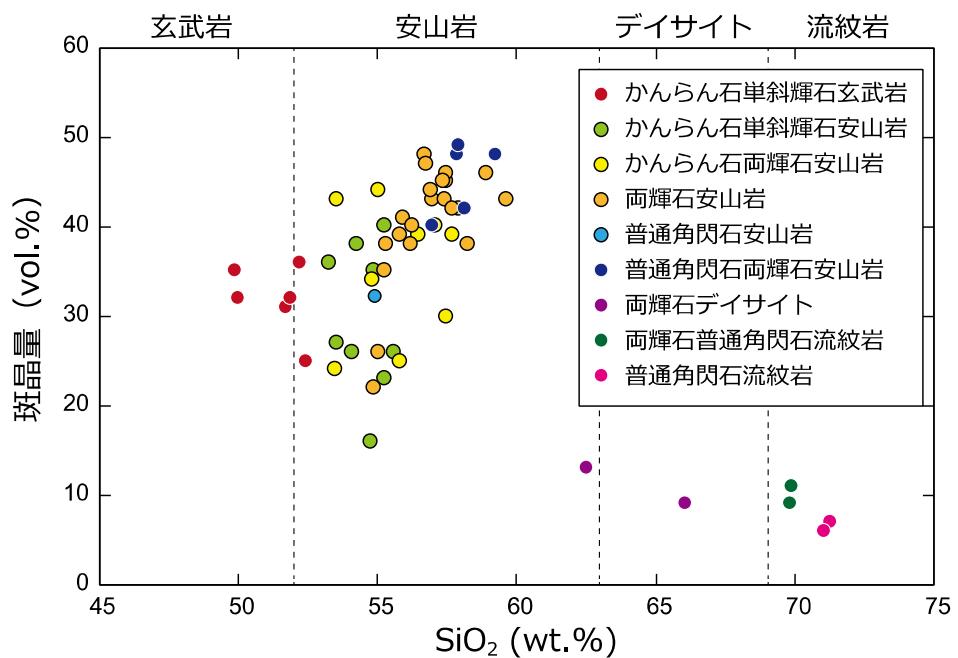


図 26 Aso-4 火碎流堆積物中の石質岩片の SiO_2 含有量 (wt.%) vs. 斑晶量 (vol. %) 図。

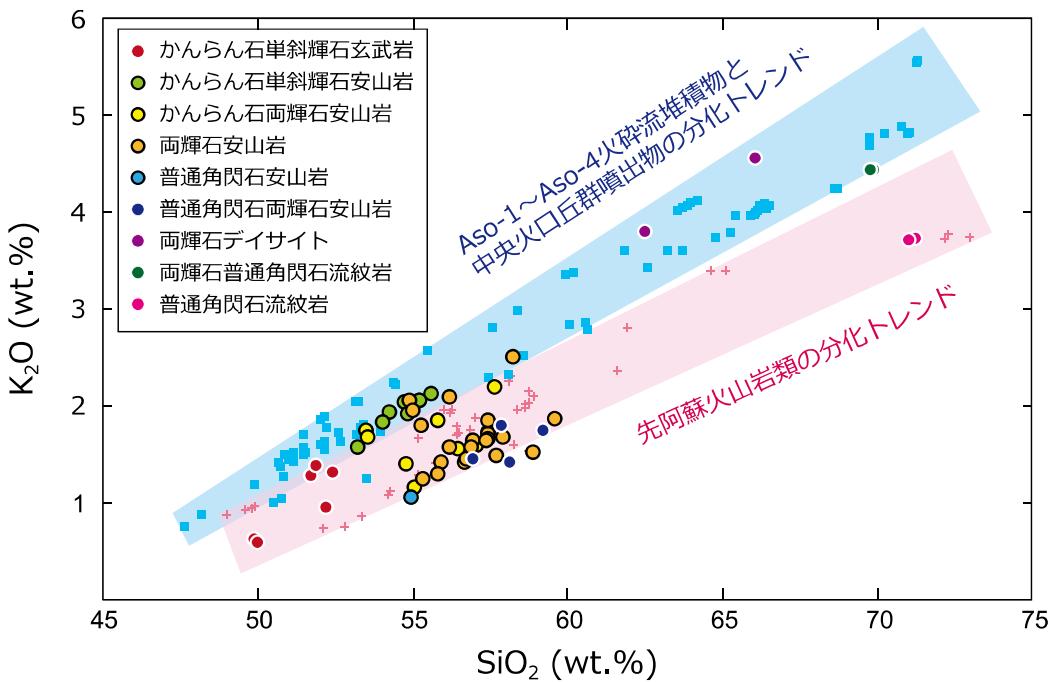


図 2 7 Aso-4 火碎流堆積物中の石質岩片の SiO_2 vs. K_2O 含有量 (wt.%) 図。

h) 霧島 (東京大学、早稲田大学、常葉大学、静岡大学)

霧島火山系のいくつかの火山について採取した試料の分析を継続するとともに、これまでの研究で得られたデータの整理をおこなっている。噴出物の全岩組成の変動からは、霧島火山系では、浅部には個々の火山に対応して分離している浅部マグマ溜まりがある一方で、地下深部ではそれらは連結して一つのマグマ溜まりが形成されているよう思われる。こうした複合的なマグマ供給系は国内の他の火山にも存在することが予想されるため、連結したマグマ供給系の挙動を理解するために霧島火山系をモデルケースとして引き続き解析をすすめてく。

i) 桜島

i) 噴火直前のマグマ挙動の研究 (東北大学)

前年度に引き続き、ブルカノ式噴火噴出物の斑晶メルト包有物分析に基づきマグマ定置深度や火道上昇過程といった噴火直前のマグマ挙動の研究を継続した。課題 C-2との連携で実施している浅間火山との比較においては、浅間天明噴火の噴出物の石基ガラス、斜長石マイクロライト、斜長石斑晶の分析をおこなった。噴火中に火道内部でマグマ混合がおきており、それがマイクロライトの結晶化に影響を与え、爆発的な噴火がおこりやすくなった可能性を指摘した。この内容は、日本火山学会 2021 秋季大会で発表した。

ii) 火山灰モニタリング手法の開発 (常葉大学)

前年度に引き続き、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。分析・解析プラットホーム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。

j) 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（データ蓄積）。また今年度は、これまでに高時間分解で採取・分析した1813年噴火およびその直前の連續火山灰試料と同様の分析を2020年末以降の活動活発化後の試料について進めた。噴火活動に際しては、昨年度末、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ったが、今年度も島民の協力を得て降灰試料を継続的に採取した。それらの試料について分析を進めた結果、石基ガラス組成は活発化に伴って短期的にやや未分化になる傾向はあるものの、最近20年間を通じて、1813年噴火時あるいは直前のような急激かつ大幅な苦鉄質化は認められなかった（図28）。また、輝石・斜長石組成についても、1813年噴火時あるいは直前と比較して、顕著な逆累帯構造を示す斑晶が少なく、バイモーダル性の強い組成頻度も示さないことが明らかになった（図29）。

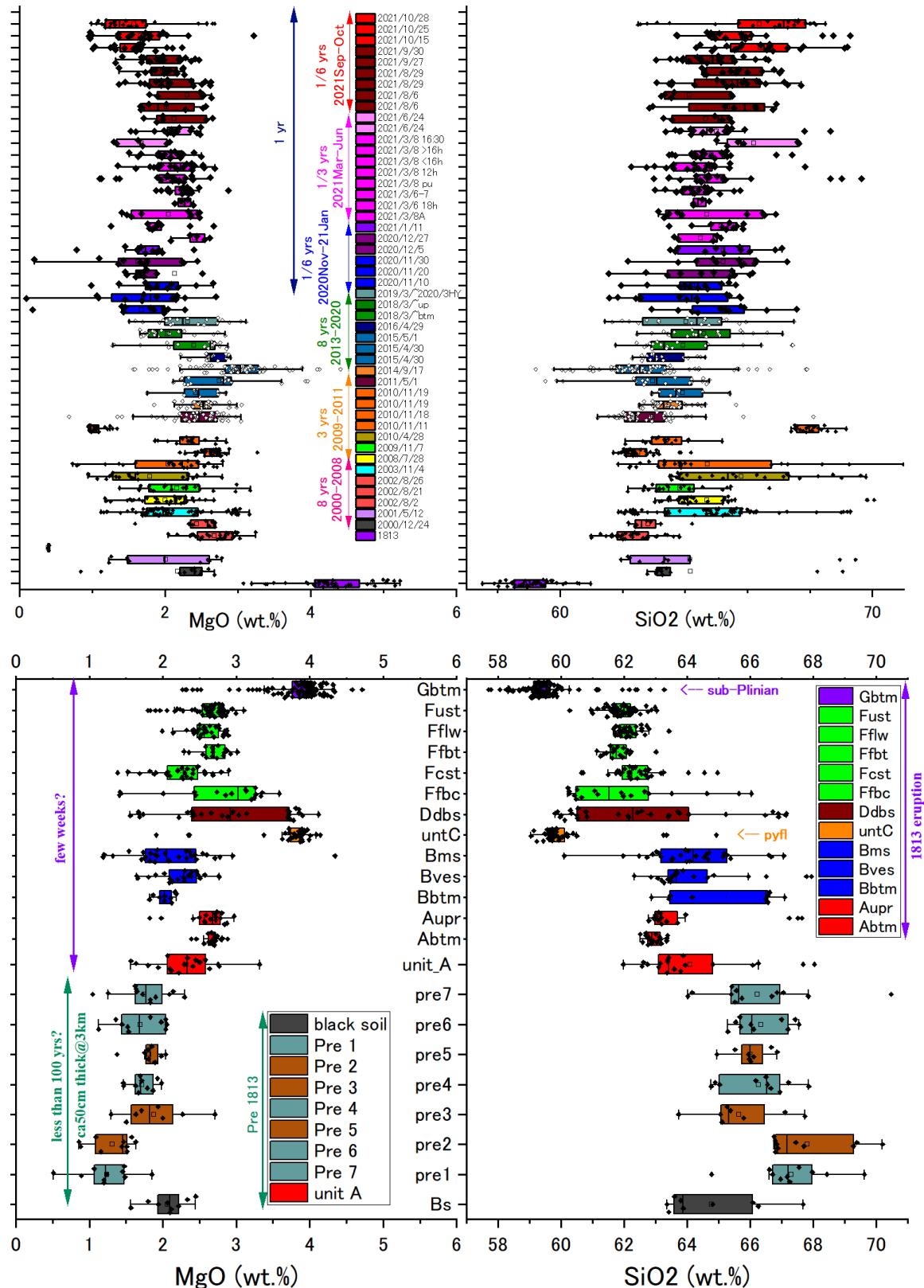


図2-8 諏訪之瀬島火山の石基ガラス組成の時間・時代変化: 2020年末以降および2000年以降の噴出物試料(連続試料ではない点留意)の組成の変化(上)は、1813年噴火前(下)と比較して系統的または顕著なMgO増加は認められず、むしろよりSiO₂増の傾向が認められる。1813年噴火の層序については、嶋野・他(2013)⁴¹⁾参照。

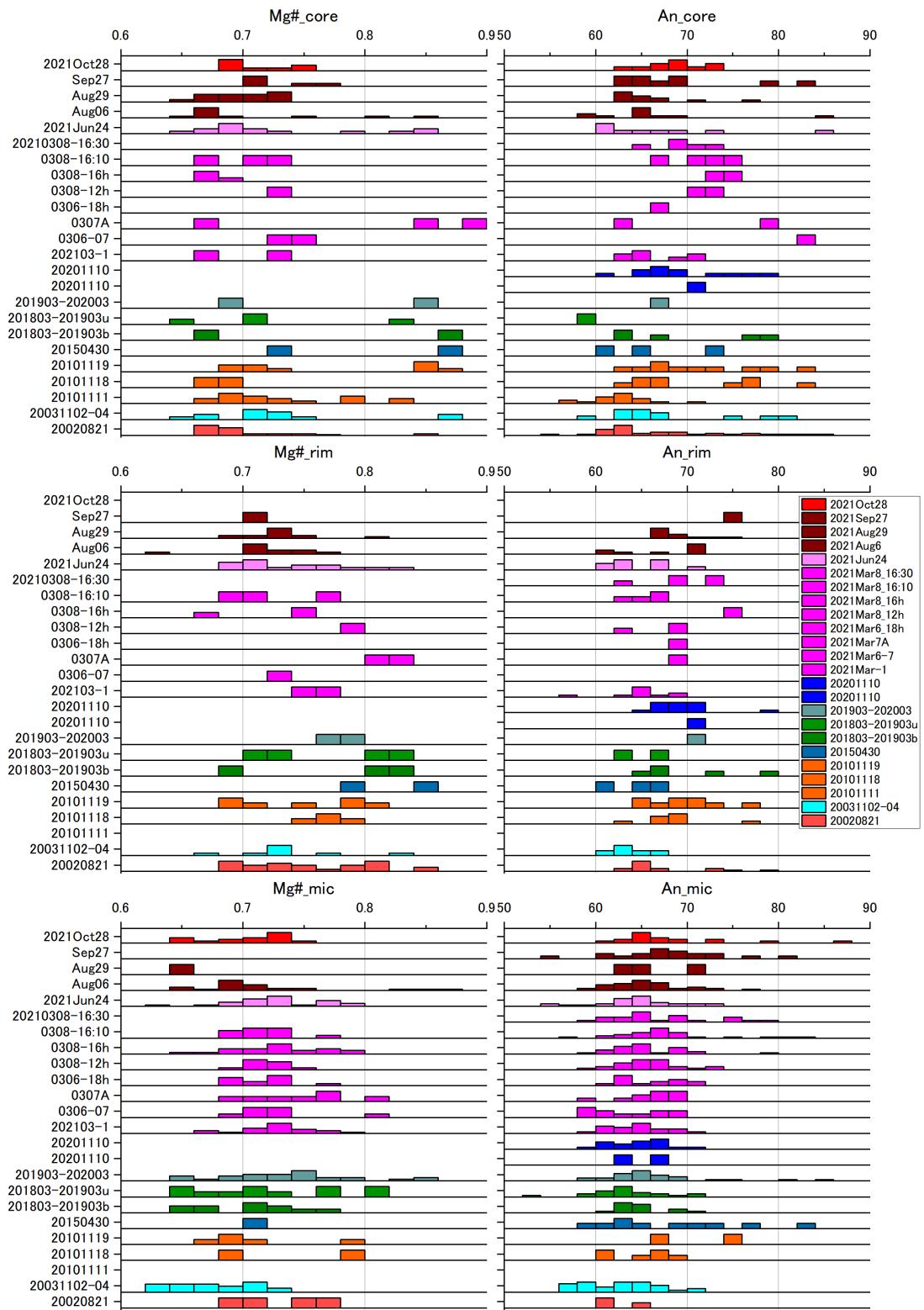


図29 諏訪之瀬島火山の輝石組成および斜長石組成の時間・時代変化: 2020年末以降および2000年以降の噴出物試料（連続試料ではない点留意）の輝石組成（Mg#:左）および斜長石組成（An:右）の変化（上:コア、中:リム、下:石基）を示す。両鉱物とも全体としてバイモーダルな傾向を示すが、系統的かつ顕著な時間変化は認められない。1813年噴火では、噴火進行に従ってマフィックマグマの珪長質側マグマへの注入が進むと同時に、後半に向かって混合・均質化が進んだことが推察された。

k) 西之島（東京大学）

噴火対応として課題 C-2 と連携して引き続き 2020 年噴火試料の分析をおこない、EPMA による鉱物や石基ガラスの分析データを追加した。2020 年 12 月の噴火において新たなマグマの関与があったことが、追加分析によってより明確になった。

1) 解析手法の検討: MELTS の活用方法の改良と応用（産業総合研究所）

本研究では、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)¹⁾の活用方法の改良と、天然事象への応用を、継続している。2018 年度は、rhyolite-MELTS v. 1.2.0 のソースコードに手を加えることにより、x-window 版の MELTS のボトルネックが回避され、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 年度はこの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 年噴火の熱源が、地球物理観測によって捉えられていた 7 年前に貫入したマグマである可能性を示し (Miyagi *et al.*, 2020)⁴²⁾、非常に難しいとされる水蒸気噴火の噴火事象分岐判断において、中長期的な地球物理観測が道を開く可能性があると論じた。2020 年度は上記の計算技術を阿蘇の火山噴出物に応用し、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。2021 年度はこれらの成果のとりまとめをおこない、現在投稿中である, (Miyagi *et al.*, under revision; Journal of Petrology)。

2021 年度は MELTS が吐き出す膨大な量の計算結果をデータベースソフトウェア (sqlite3) に取り込むことにより、更なる効率化を図った。さらに天然への応用として、大規模な噴火における噴火事象の分岐判断に必要な知見である「噴火前のマグマ溜まりの密度(マグマの比体積)の含水量・圧力依存性」が、マグマが地殻内をストーピングによって上昇する間にどのように変化するかを、MELTS を用いて調べた。その結果、マグマの密度(結晶+メルト+気泡)は、圧力と全岩含水量によって大きく変化することが明らかになった(図 30)。すなわち、無水マグマの密度は比較的高く圧力変化は顕著でないのに対し、含水マグマでは、含水量が高いものほど密度が低く、かつ、ある値よりも低圧力側においては、圧力の低下とともに密度が顕著に低下することがわかった。このことは、地殻(岩盤)とマグマの密度差によってひきおこされるストーピングが起きるか否かが、マグマの含水量によって左右されることと、その程度は特に地殻浅部で顕著であることを示している。また、計算されたマグマの比体積は、マグマがストーピングによって地殻内を上昇すると増大することが示された。例えば、300MPa を基準としたマグマの比体積は(図 31)、含水量 5 重量%、圧力 200~300MPa のマグマがストーピング等によってマグマが地殻内を上昇し、マグマにかかる静岩圧が 100MPa になると、マグマの体積は 300MPa の時の約 1.2 倍になる。このことは、巨大なマグマ溜まりが噴火前にストーピングで上昇すると、マグマ溜まりの体積が膨張して顕著な地殻変動(隆起)をひきおこすか、あるいは、膨張した分が、大規模噴火に先行する比較的小規模な噴火として噴出することを示唆する。具体的には、含水量 5 重量%、500 立方 km のマグマがストーピングで地下 8~12km(200~300MPa) から地下 4km(100MPa) に

上昇すると、マグマの体積は膨張して 600 立方 km になる。もし差分の 100 立方 km を地殻の変形で解消しない場合には、83 立方 km のマグマが噴火する（膨張前の体積に換算）（図 3 2；姶良カルデラの条件での計算例）。一方、マグマが含水量 2% の場合には、100MPa まで減圧した時点におけるマグマの膨張は僅かである（図 3 0）（図 3 3；肘折カルデラの条件での計算例）。まとめると、ストーピングに伴うマグマの体積膨張は、含水量によって大きく異なる。今年度得られた成果は、（1）大規模カルデラ噴火前の地殻変動の予測や、（2）大規模噴火に先行する中小規模噴火の意味、（3）カルデラを伴う噴火と伴わない噴火の違い、を理解するうえで、マグマの含水量とストーピングの様式が重要であることを意味する。

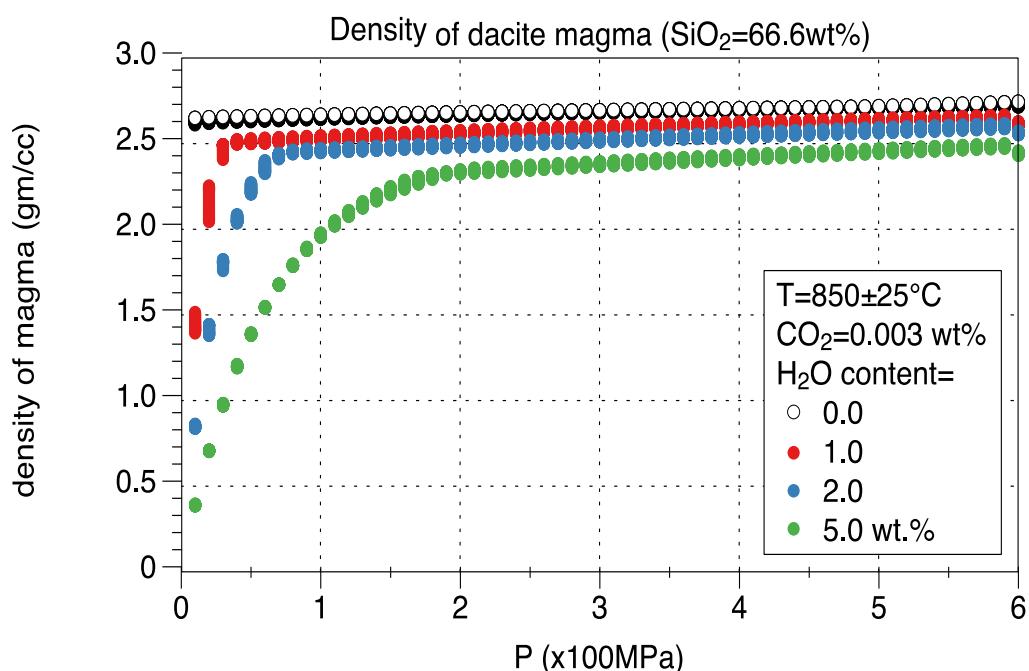


図 3.0 マグマの密度：ディサイトの例。圧力 0～6kbar、含水量 0～5 重量%、温度 $850\pm25^\circ\text{C}$ 。Rhyolite-MELTS で計算。

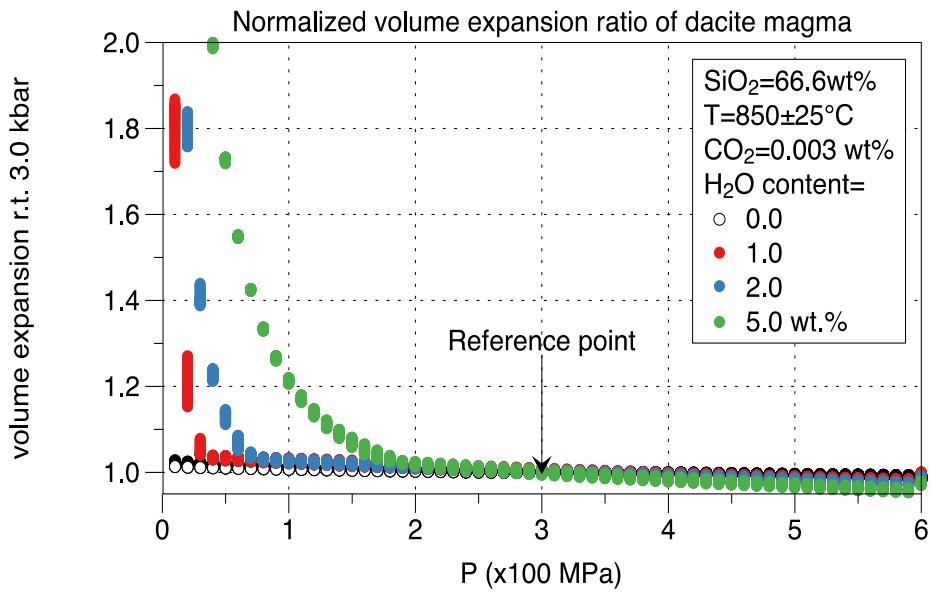


図 3.1 マグマの比体積: デイサイトの例。圧力 3kbar における体積を基準とした。
Rhyolite-MELTS で計算。

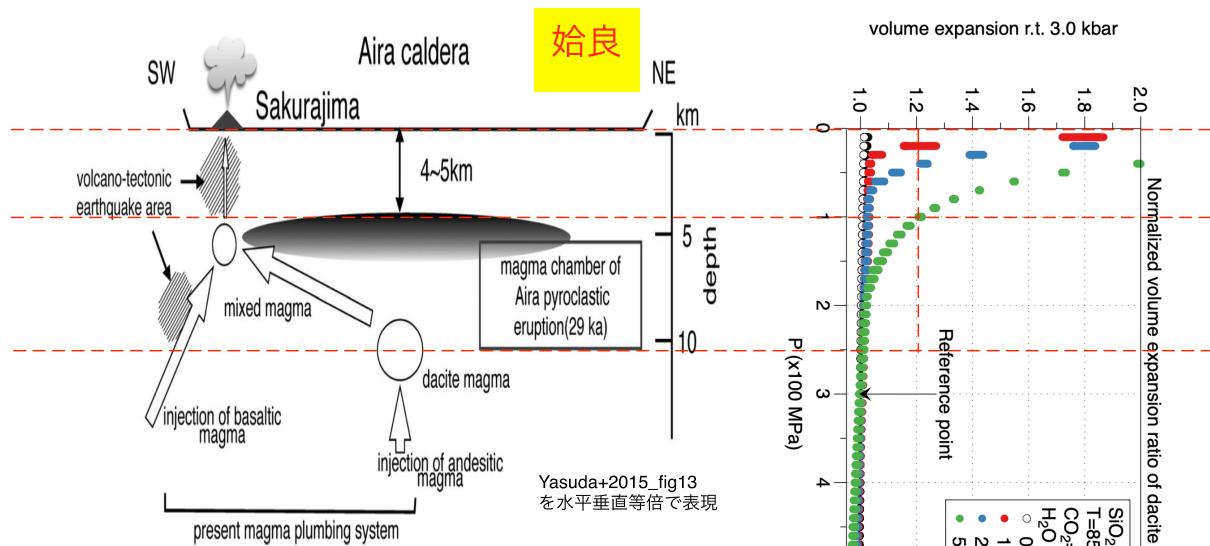


図 3.2 始良カルデラのマグマ溜まりがストーピングした場合の計算結果: 含水量 5% のマグマが 2~3kbar から 1kbar に減圧すると、体積が約 2 割増加する。地殻が変形しない場合には、地殻には 1~2kbar の過剰圧がかかる。地殻が過剰圧に耐えない場合には、2 割分のマグマが噴火しうる。大隅降下軽石 98 立方キロ (Kobayashi *et al.*, 1983)⁴³⁾ は、AT+入戸火碎流 ≈ 1000 立方キロ (Takarada *et al.*, 2022)⁴⁴⁾ の 9.8%に相当する。

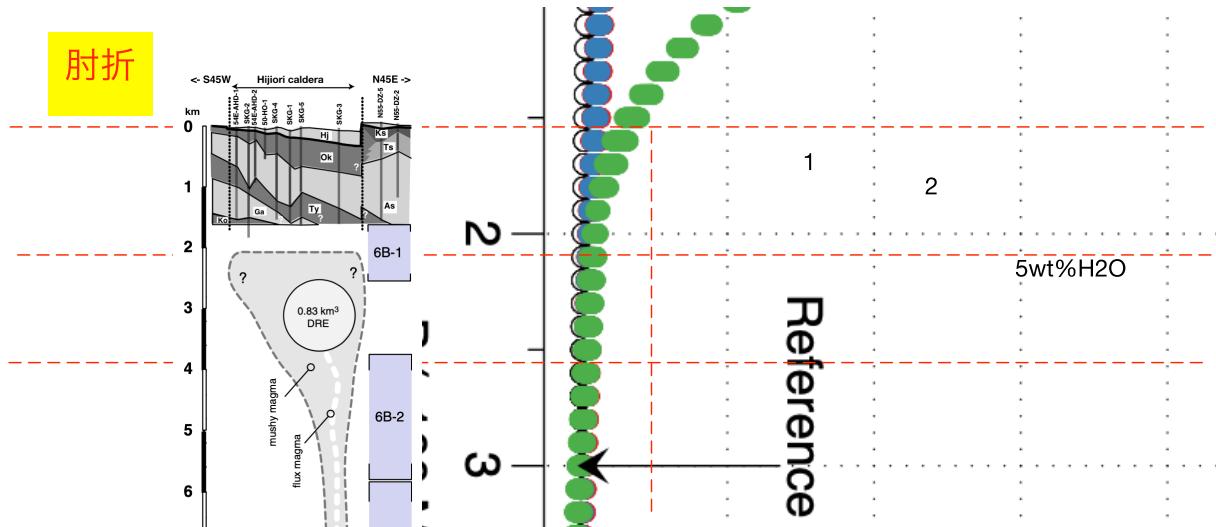


図3-3 肘折カルデラのマグマ溜まりがストーピングした場合の計算結果: 含水量2%のマグマが2kbarから0.75kbarに減圧すると、体積が4-5%増加する。地殻が変形しない場合、地殻には1kbarを越える過剰圧がかかる。地殻が過剰圧に耐えない場合、1割分のマグマが噴火しうる。肘折ステージ1+2=0.075km³は、ステージ3=1.7km³の4.4%（宮城, 2007）⁴⁵⁾に相当する。

m) 噴火の推移・様式予測の仕組みの検討（東京大学）

個別の火山の研究からそれぞれの火山のマグマ供給系像の精密化がはかられる一方で、「類型化」と「単純化」も噴火の推移や様式の予測の武器になりうる。すべての火山において十分な量の過去の噴火事例を集めることは困難であるゆえに、現在の観測から得られている「場」の情報をもとに用いて噴火の推移・様式予測をおこなわざるをえない。このため、類型化と単純化によって推移や様式の変化を支配する要因を抽出し、それらの要因に着目して観測との比較を行うことが重要となる。そこで、令和3年度はプロジェクトの総合推進も兼ねてマグマ供給系の類型化に着手した。図3-4は課題C-1が研究対象としている10火山において物質科学的に推定されたマグマ溜まりの深度と火山深部の地震波（P波）速度構造とを比較したものである。P波速度構造の鉛直断面は、防災科研Hi-net日本列島三次元地震波速度構造表示ソフトを使用して作成した。P波速度から物質の密度を推定する方法はいくつも提案されており、P波速度の深さ方向の構造は密度構造に置き換えることができる（e.g., Brocher, 2005; Onizawa *et al.*, 2002）^{46), 47)}。図3-4から明らかなように、深部マグマ溜まりは概ねP波速度6.5-6kmの領域に存在し、これは玄武岩質マグマの密度に対応している。一方、浅部マグマ溜まりは概ねP波速度6-5.5kmの領域に存在し、やや分化したマグマ（安山岩、デイサイト質）の密度に対応する。6km層が浅所にまで広がっている富士山では浅部マグマ溜まりがあまり発達していない。一方、密度成層構造が明確で、マグマの供給率がそれほど高くない霧島、雲仙、榛名火山では浅部にマッシュ状マグマ溜まりが発達していることが明らかになっている。これらの比較と類型化の結果から、地殻密度構造とマグマの密度（組成+含水量）と温度履歴（長期的なマグマの活動量）について知ることが噴火の予測には重要であることが示唆される。さらに、

富士山のように深部に存在するマグマ溜まりは水に飽和する可能性は低いため、噴火のトリガーはより深部からのマグマの注入による過剰圧の獲得と思われる。一方、浅部マグマ溜まりでは、状況次第で水に飽和するため、噴火のトリガーとしては2つの可能性（分化による浮力の獲得とマグマ注入による過剰圧獲得）を考慮して予測手法を考える必要がある。

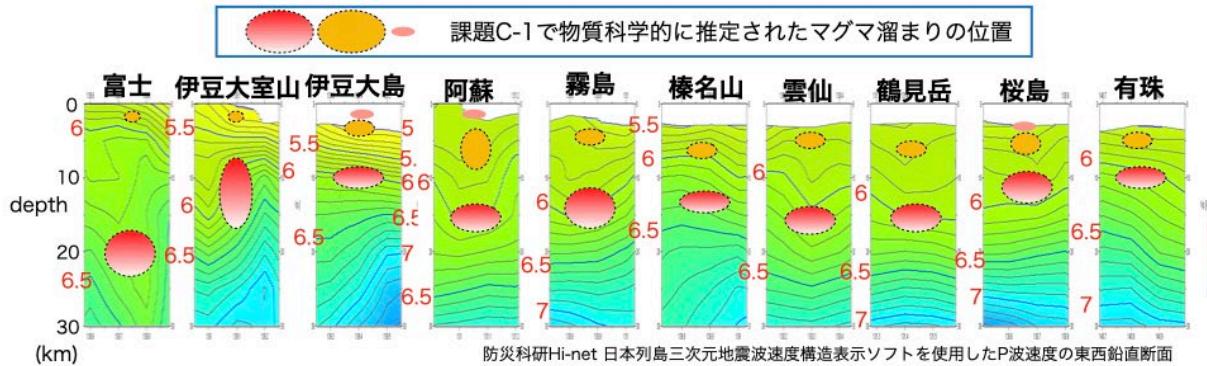


図3-4 マグマ溜まりの深度とP波鉛直構造との比較。

情報を整理するために、単純化したマグマ供給系モデルを作成し、噴火予測のために重要な事項を列記した（図3-5）。第1のポイントとして、マグマ溜まり（深部、浅部）の形成深度は基本的には浮力中立に支配され、マグマの組成と周辺物質（地殻）の密度で決まる。地殻密度構造は、地震波速度から推定可能であるとともに、精密な重力測定を実施すれば浅部の密度構造をより詳細に決めることは可能である（e.g., Linde *et al.*, 2014）⁴⁸⁾。第2のポイントとして、噴火の発生については、深部マグマ溜まりでは揮発性成分の発泡が起きないため自力噴火のための十分な浮力を得られず、マグマ上昇はより深部からのマグマ注入にトリガーされる。注入を受けたマグマ溜まりが噴火に至るかどうかは、マグマ中の揮発性成分量と温度、経路上部の状態、マグマの注入量で決まる。したがって、過去の噴出物の解析からマグマ中の揮発性成分量とマグマの温度を予想しておくとともに、地震観測から注入イベントの発生と注入量を推定できれば予測につなげられるかもしれない。第3のポイントとして、火山体の地下の浅部には、浅部マグマ溜まりが発達することが多いが、これは地殻物質の急激な空隙率の増加の影響である。この浅部マグマ溜まりはマッシュ状の形態をとることが多いが、その流動性や揮発性成分量は、過去の履歴によって大きく変わりうる。特に温度と組成が重要で、過去噴出物の分析と時間変化についての計算によってマグマ溜まりの現在の状態をあらかじめ推測しておくことが必要である。第4のポイントは、マグマが上昇中にどこで停滞したかという情報の重要性である。この停滞位置情報は、地震の震源移動や地殻変動から得られる可能性があるが、地殻密度の情報を介して噴火前にマグマの含水量と温度を推測することにつなげられるため、噴火分岐予測をおこなうためには不可欠である。

単純化したマグマ供給系の概念図

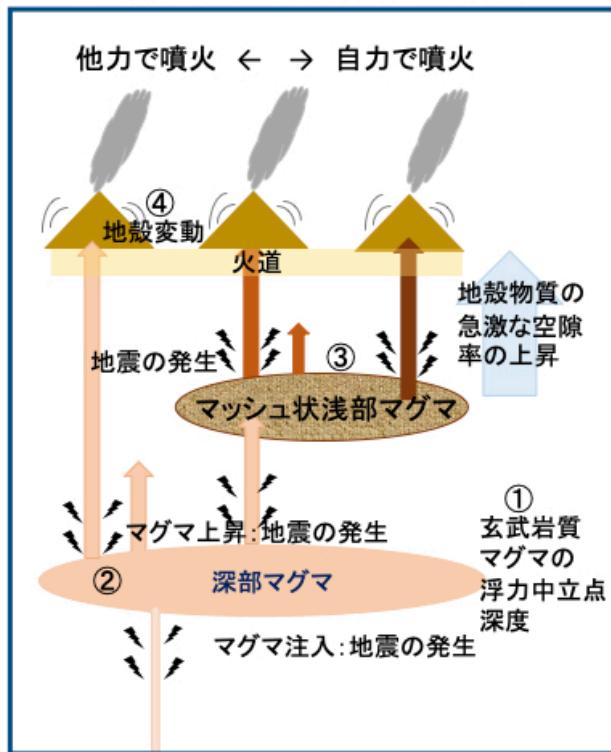


図 3 5 単純化したマグマ供給系の概念図。

さらに、マグマ供給系の端成分として、富士山のような深部マグマ溜まりを主体とする火山における噴火について、事象分岐の条件、発生事象、観測が期待される事象、それらがどのような物性の推定に利用可能か、を図 3 6 にまとめた。この図は、発生する可能性がある事象を定性的ではあるがあらかじめリストアップしており、噴火時には物理観測を適宜取り入れて予測を修正するという運用を念頭においている。ただし、浅部マグマ溜まりとの相互作用による影響、および、火道閉塞や山腹噴火など経路の環境による影響は現時点では考慮されておらず、今後の検討事項として残されている。

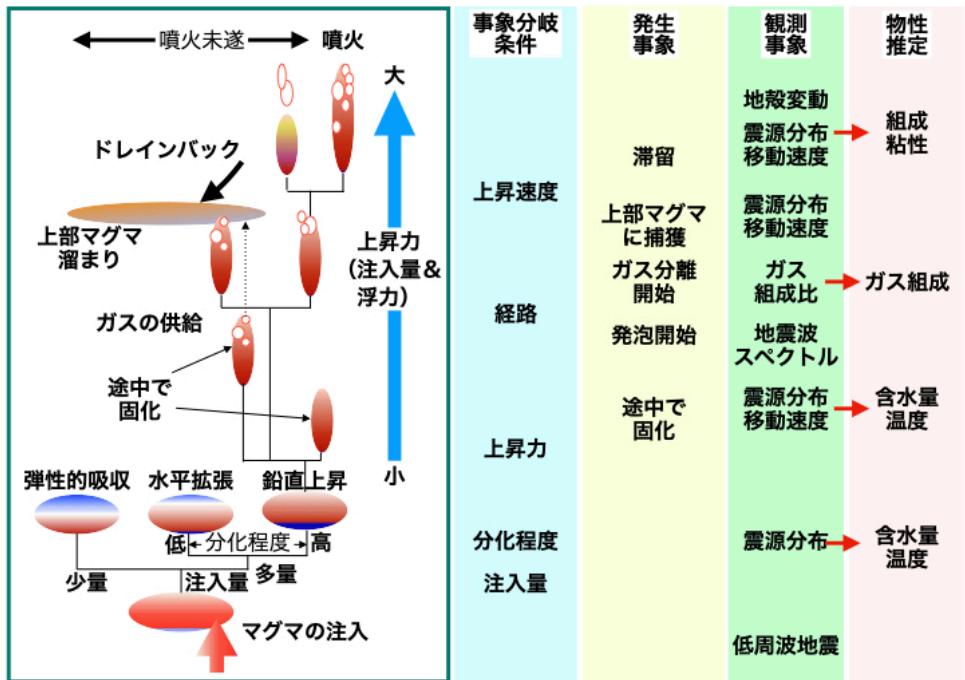


図3.6 単純化した深部マグマ溜まりモデルによる噴火の推移と様式の予測の概念図。

深部マグマ溜まりへのマグマの注入イベントの発生と注入量は、深部低周波地震の観測によって捉えられる可能性がある。深部マグマ溜まりへのマグマの注入がゆっくりであり、量も少ければ、深部マグマ溜まりが粘弾的に影響を吸収してしまい、上部にはマグマは上昇しない。注入量が多かったり注入速度が速くて、深部マグマ溜まりの破壊がおきる場合には、あらかじめそこに存在しているマグマの状態によって発生する現象が異なることが予想される。マグマの密度が周囲の地殻の密度より十分に低くはない場合には、マグマ溜まりが水平方向に拡張するような破壊がおきることが予想され、こうした現象の発生は地震の震源を注意深く監視することで捉えられる可能性がある。このような現象が観測できれば、噴火前にマグマの分化程度を推定することができる。マグマの密度が周囲の地殻の密度よりも十分に低い場合には、マグマの注入による過剰圧の獲得をトリガーとしてマグマの上昇が開始するが、多くの場合には途中で固化してしまうことが予想される。注入量が大きく十分な過剰圧を獲得した場合や、結晶分化によってマグマ中の含水量が高まっていたため上昇の途中で発泡が始まってさらなる浮力を獲得できた場合にのみ、マグマは最終的な噴火に至ることができる。上昇開始時に過剰圧をどの程度獲得していたか、および、上昇するマグマ内の揮発性成分量については、震源の移動速度や地表での火山ガスの組成比の観測から推定できるかもしれない。深部マグマ溜まりと地表を結ぶ経路上には、浅部マグマ溜まりが存在する可能性がある。周囲の地殻物質の密度が急激に減少する深度ではマグマが溜まりやすい。こうした浅部マグマ溜まりの存否は地震波の反射や震源分布、地表での火山ガス組成から検出できる可能性がある。また過去の噴出物の解析から浅部マグマ溜まりで結晶分化がおきた痕跡を見つけることも可能である。もし浅部マグマ溜まりが存在すると、深部から上昇後に途中で固化したマグマから放出される揮発

性成分を吸収したり、噴火後に揮発性成分を失って密度が高くなつて火道をドレンバックしたマグマの受け皿となりえる。したがつて、マグマの供給率がある程度高い火山では、浅部マグマ溜まりは次第に成長していくことが予想される。このような浅部マグマ溜まりの時間変化も考慮した噴火予想を設計することが必要であろう。

(c) 結論

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3年度の目標はおおむね順調に達成できている。個別の火山や噴火については、新しい解析方法の導入やデータの蓄積によって、これまでにないような精度でマグマ供給系や噴火の描像が明らかにされてきている。一方、これまで個別の火山について得られていた知見を統合して、噴火の様式や推移の予測のための類型化や単純化も開始された。単独のマグマ溜まり（深部のみ、あるいは、浅部のみ）が主体の噴火については、噴火前や噴火にともなう事象、および、予測のための鍵がある程度は整理することができたものの、複数マグマの相互作用によって噴火の規模や様式を変化させる大部分の火山噴火については、その複雑性故に、いくつかの火山の噴火事例をもとにして着目すべき要素を見出している段階であり、今後もさらに各火山のデータを集めて検討を重ねていく必要がある。ただし、必要な作業の道筋は定まっており、今後の4年間の作業で噴火事象分岐予測手法は大きく前進することが期待できる。

(d) 引用文献

- 1) 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.*, 53(5), pp. 875-890, 2012.
- 2) Pedregosa *et al.*, Scikit-learn: Machine Learning in Python, *JMLR* 12, pp. 2825-2830, <https://scikit-learn.org/stable/>, 2011.
- 3) Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, CJ Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E. A. Quintero, Charles R Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors: SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python, *Nature Methods*, 17(3), pp. 261-272, <https://scipy.org>, 2020,
- 4) 曽屋龍典, 勝井義雄, 新井田清信, 堆幾久子, 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.
- 5) 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, 地質調査研究報告, 52(4/5), pp. 215-229, 2001.

- 6) 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, 47, pp. 663-673, 2002.
- 7) 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., 69, pp. 423-444, <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0084-3>, 2007.
- 8) Suzuki, Y., Toeda, Y., Kimura, S., Tanaka, R.: Temporal changes of magmas that caused lava-dome eruptions in Haruna volcano in past 45,000 years, Jour. Disaster Research, in review.
- 9) Suzuki, Y. and Nakada, S. : Remobilization of highly crystalline felsic magma by injection of mafic magma: constraints from the middle 6th century eruption at Haruna volcano, Honshu, Japan, Jour. Petrol., 48, pp. 1543-1567, 2007.
- 10) Putirka, K. : Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes, Am. Mineral., 101, pp. 851-858, 2016.
- 11) 山元孝広 : 栃木一茨城地域における過去約 30 万年間のテフラの再記載と定量化, 地質調査研究報告, 64, pp. 251-304, 2013.
- 12) Miyaji N., Kan'no A., Kanamaru T., Mannen K. : High-resolution reconstruction of the Hoei eruption (AD 1707) of Fuji volcano, Japan. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 207(3-4), pp. 113-129, 2011.
- 13) 山元孝広: 産総研地質調査総合センター研究資料集 No.613 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図,
<https://www.gsj.jp/publications/pub/openfile/openfile2014.html>, 2014.
- 14) Costa A., Melnik O., Sparks R. S. J. : Controls of conduit geometry and wallrock elasticity on lava dome eruptions, Earth Planet. Sci. Lett., 260, pp. 137-151, 2007.
- 15) Otsuki S., Nakamura M., Okumura S., Sasaki O. : Interfacial tension - driven relaxation of magma foam: An experimental study, Jour. Geophys. Res. Solid Earth, 120(11), pp. 7403-7424, 2015.
- 16) Ishibashi H., Amano T. : The effect of pre-eruptive magmatic conditions on decompression driven crystallization: A case study of the 1707 basalt from Fuji volcano, Japan. Geosci. Rept. Shizuoka University, 44, pp. 17-29, 2017.
- 17) La Spina G., Burton M., Vitturi M. D. M., Arzilli F. : Role of syn-eruptive plagioclase disequilibrium crystallization in basaltic magma ascent dynamics, Nat. commun., 7, 13402, <https://doi.org/10.1038/ncomms13402>, 2016.
- 18) Moitra P., Gonnermann H. M. : Effects of crystal shape and size modality on magma rheology. Geochem. Geophys. Geosystem., 16(1), pp. 1-26, 2015.

- 19) Lister, J. R., Kerr, R. C. : Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes, *Jour. Geophys. Res. Solid Earth*, 96 (B6), pp. 10049-10077, 1991.
- 20) Iida, A. : Magma plumbing system of Fuji volcano inferred from melt inclusion study, Ph. D. thesis, Univ. Tokyo., 2007.
- 21) 遠藤邦彦, 千葉達朗, 谷口英嗣, 隅田まり, 太刀川茂樹, 宮原智哉, 宇野リベカ, 宮路直道: テフロクロノロジーの手法に基づく 1986~1987 年伊豆大島噴火の経緯と噴出物の特徴, *火山*, 33, S32-S51, 1988.
- 22) 藤井敏嗣, 荒牧重雄, 金子隆之, 小沢一仁, 川辺禎久, 福岡孝昭: 伊豆大島火山 1986 年噴火噴出物の岩石学的特徴, *火山*, 33, S234-S254, 1988.
- 23) Hamada, M., Kawamoto, T., Takahashi, E., Fujii, T. : Polybaric degassing of island arc low-K tholeiitic basalt magma recorded by OH concentrations in Ca-rich plagioclase, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 308, pp. 259-266, 2011
- 24) Putirka, K. : Thermometers and barometers for volcanic systems, *Rev. Mineral. Geochem.*, 69, pp. 61-120, 2008.
- 25) Newmann, S., Lowerstern, J. B. : VolatileCalc: a silicate melt-H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for Excel, *Computers Geosciences*, 28, pp. 597-604, 2002.
- 26) Oida, R., Ishibashi, H., Tomiya, A., Ushioda, M., Hokanishi, N., Yasuda, A. : Experimental constraints on the H₂O-saturated plagioclase liquidus and the storage depth of the Izu-Oshima 1986B basaltic andesite melt, *J. Disaster Res*, Under review.
- 27) 吉田那緒: 深成岩捕獲岩から探る伊豆大島火山のマッシュ状マグマ溜まりプロセス, 静岡大学理学部地球科学科卒業論文, 2022.
- 28) Hatada, R., Ishibashi, H., Suwa, Y., Suzuki, Y., Hokanishi, N., 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, *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 115, pp. 322-331, 2020.
- 29) 野澤僚真: 伊豆東部火山群のマグマ供給システム: 斜長石斑晶からの制約, 静岡大学理学部地球科学科卒業論文, 2022.
- 30) 高橋正樹: 大規模珪長質火山活動と地殻歪速度, *火山*, 40, pp. 33-42, 1995.
- 31) 十川翔太, 長谷中利昭, 鳥井真之, 森康: 南阿蘇村立野に分布する先阿蘇溶岩の層序と化学組成, 日本地球惑星科学連合大会 講演要旨, 2019.
- 32) Kawaguchi, M., Hasenaka, T., Koga, K. T., Rose-Koga, E. F., 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.*, 176, 6, <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01761-6>, 2021.
- 33) 三好雅也, 長谷中利昭, 佐野貴司 : 阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について, *火山*, 50, pp. 269-283, 2005.

- 34) Allan, A. S. R., Morgan, D. J., Wilson, C. J. N. and Millet, M.-A.: From mush to eruption in centuries: assembly of the super-sized Oruanui magma body, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 166, pp. 143-164, 2013.
- 35) Singer, B. S., Costa, F., Herrin, J. S., Hildreth, W. and Fierstein, J.: The timing of compositionally-zoned magma reservoirs and mafic “priming” weeks before the 1912 Novarupta-Katmai rhyolite eruption, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 451, pp. 125-137, 2016.
- 36) Petrone, C. M., Bugatti, G., Braschi, E. and Tommasini, S.: Pre-eruptive magmatic processes re-timed using a non-isothermal approach to magma chamber dynamics, *Nat. Commun.*, 7, 12946, 2016.
- 37) Cherniak, D. J. and Dimanov, A.: Diffusion in pyroxene, mica and amphibole, *Rev. Mineral. Geochem.*, 72, pp. 641-690, 2010.
- 38) 星住英夫, 宮縁育夫, 宮城磯治, 下司信夫, 宝田晋治: 阿蘇火山, 阿蘇4/3降下テフラ群の層序と噴火活動史—阿蘇4火碎流噴火への準備過程—, *火山*, 67, pp. 91-112, 2022.
- 39) 三好雅也, 古川邦之, 新村太郎, 下野まどか, 長谷中利昭: 阿蘇カルデラ外輪山に分布する先阿蘇火山岩類の岩石記載と全岩化学組成, *地質学雑誌*, 115, pp. 672-687, 2009.
- 40) Hunter, A. G.: Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan, *J. Petrol.*, 39, pp. 1255-1284, 1998.
- 41) 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, 2013.
- 42) Miyagi, I., Geshi, N., Hamasaki, S., Oikawa, T., and Tomiya, A.: Heat source of the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan, *Bull. Volcanol.*, 82(33), pp. 1-17, 2020.
- 43) Kobayashi, T., Hayakawa, Y. and Aramaki, S.: Thickness and grain size distribution of the Osumi pumice fall deposit from the Aira caldera, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 28, pp. 129-139, 1983.
- 44) Takarada, S., Nishihara, A., Hoshizumi, H., Yamasaki, T., Kaneda, Y., and Geshi, N.: Explanatory text of Distribution map of Ito ignimbrite and associated deposits, Aira caldera, Japan. Distribution map of large-volume ignimbrites in Japan, (1), pp. 1-32, 2022.
- 45) 宮城磯治: 肘折火山:噴出物の層序と火山活動の推移, *火山*, 52, pp. 311-333, 2007.
- 46) Brocher, T. M.: Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust, *Bull. Seismol. Soc. America*, 95(6), pp. 2081-2092, doi:10.1785/012005007, 2005.
- 47) Onizawa, S., Mikada, H., Watanabe, H., and Sakashita, S.: A method for simultaneous velocity and density inversion and its application to

- exploration of subsurface structure beneath Izu-Oshima volcano, Japan, Earth Planets Space, 54, pp. 803-817, 2002.
- 48) Linde, N., Baron, L., Ricci, T., Finizola, A., Revil, A., Muccini, F., Cocchi, L., and Carmisciano, C.: 3-D density structure and geological evolution of Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) inferred from land-based and sea-surface gravity data, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 273, pp. 58-69, doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.01.006, 2014.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和4年度の業務計画案

令和4年度も基本的には令和3年度の作業を継続し、噴火事象分岐予測手法の開発に取り組む。

(a) 分析・解析プラットホームの整備、運用

分析解析プラットホームについては、引き続き装置の利用促進に向けた取り組みに重点をおきつつ、解析プログラムの更新をはかっていく。加えて、装置の稼働状態とコロナ流行の状況を見ながら、可能ならば課題C-2や研究組織外からの分析・解析プラットホーム利用の受け入れをおこなう。(東京大学)

熱力学シミュレーションMELTSについては、計算結果をsqlite3形式で集約したデータから図表を自動生成できるようにする。加えて、MELTS計算結果を地球物理や地球化学分野の研究と連携させる試みに取り組む。例えば、桜島における重力観測や火山ガス観測の解釈にMELTSで計算したマグマ密度やガス組成結果を活用してもらうなどの働きかけをおこなう。(産総研)

マグマ供給系の理解や噴火推移把握のための新手法の開発としては、噴出物の発泡・急冷・破碎組織のX線CT解析により宝永噴火初期のマグマ破碎に対する地表水の関与を検討する。(東北大学)

加えて、石基マイクロライト自動解析ツールによる構成粒子比導出の試行を桜島、諏訪之瀬島の試料で進め、火山灰測色値によるモニタリング指標提示の実用化を目指す。(常葉大学、東京大学)

(b) 火山噴出物の分析・解析

各火山については、令和3年度までに得られた分析・解析結果を統合して整理する。その際、マグマ供給系についてできるだけ類型化を行い、噴火事象分岐の一般的法則の抽出や、物理観測結果を取り込んだ予測のための仕組みを検討する。引き続き、不足するデータについては追加の調査・分析をおこなう。(各機関)

各火山についての個別の取り組みは以下の通りである。

1) 有珠山

有珠 2000 年噴出物の岩石学的観察から得られる知見を、MELTS 計算や地球物理学的観測結果などと組み合わせるとともに、多角的な観察・観測・計算結果に基づき、噴火直前のマグマ過程の高精度化をはかる。(産総研)

2) 榛名山

二ツ岳渋川噴火噴出物 の斑晶鉱物組成分析を進める。このデータをもとに、榛名火山の 45ka～10ka の噴火と、5 世紀末～7 世紀初頭の二ツ岳の 2 噴火では、珪長質マグマに差異があることをさらに明確にする。(早稲田大学)

3) 富士山

令和 3 年度に引き続き、1707 年噴火の深成岩捕獲岩の化学分析と組織解析を行い、地下の珪長質マグマだまりの状態について検討する。(静岡大学)

宝永噴火におけるたまりマグマ溜り間相互作用を調べるため、噴火ユニットの切れ目での組成変化を詳細に分析する。(東北大学)

富士火山大沢降下スコリア、大淵降下スコリアの層序細分試料について、鉱物組成分析を進める。(常葉大学)

4) 伊豆大島

課題間連携として伊豆大島での研究集会が C-2 北大主導のもと令和 4 年夏に計画されている。現地集会においては、物理観測関係者との連携を含めた噴火発生時の対応を検討することや、多数の大学院生や大島町関係者の参加も企画されている。(各参加機関)

5) 伊豆東部火山群

令和 3 年度に引き続き、単成火山の噴出物中に含まれる鉱物の化学分析と組織解析を行い、同火山群のマグマ供給系について検討する。(静岡大学)

6) 雲仙

1663年噴火、1792年噴火の試料の分析を継続する。深部マグマとの混合時の浅部マグマの状態についてさらに検討を進める。(東京大学)

7) 阿蘇山

後カルデラ期噴出物および完新世玄武岩の試料分析・解析をおこなう。特に、草千里ヶ浜火山およびその前駆噴火の噴出物を中心にメルト包有物の分析および組織解析を進め、マグマ溜り深度や上昇速度についての情報を収集する。また、完新世の玄武岩質噴出物を中心に斑晶鉱物内の元素拡散記録の解析を進め、マグマ過程のタイムスケールについて検討する。(熊本大学)

阿蘇各ステージのマグマ供給系の変遷過程、メカニズムの解析をおこなう。岩石・地球化学的手法を用いて先阿蘇または後カルデラ期のマグマの成因に関する研究をおこなうとともに、放射年代測定によって先阿蘇または後カルデラ期火山活動史の解像度を向上させる。(熊本大学)

8) 霧島山

新燃岳享保噴火について、軽石組織に関する定量的データの収集をおこなう。また、榛名火山の二ツ岳渋川噴火との比較をおこなう。(早稲田大学)

新燃岳 2017-2018 年噴出物の石基・鉱物組成測定を継続する。これまでに測色値および粒子構成比が把握されており、2011 年噴出物との比較をおこなうとともに、噴火活動様式と噴出物の関係を噴出物(火山灰)システムティックスと活動様式の関係としてまとめる。(常葉大学)

9) 桜島

京大防災研・桜島火山観測所との共同研究により、桜島火山の昭和期の活動で特に大規模であった、1987年11月17日、1995年8月24日噴火の前駆過程（傾斜変動等）を復元するとともに、噴出物の解析と併せて、ブルカノ式噴火とサブプリニー式噴火の分岐条件を考察する。(東北大)

令和3年度に引き続き、桜島火山での連続採取試料解析を行い時系列データの蓄積を行う。特に令和4年度は（令和3年度実施できなかった），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。(常葉大学)

10) 諏訪之瀬島

令和3年度に引き続き、諏訪之瀬島火山の3万年前以降の主な噴出物の鉱物組成分析を行い、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引き続き継続する。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・分析を行うことで、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。(常葉大学)