

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

課題C：火山噴火の予測技術の開発

令和2年度
成果報告書

令和3年5月

文部科学省研究開発局
国立大学法人北海道大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究
委託事業による委託業務として、国立大学法人
北海道大学が実施した令和２年度「課題Ｃ：火
山噴火の予測技術の開発」の成果を取りまとめ
たものです。

グラビア

サブテーマ 1：火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発

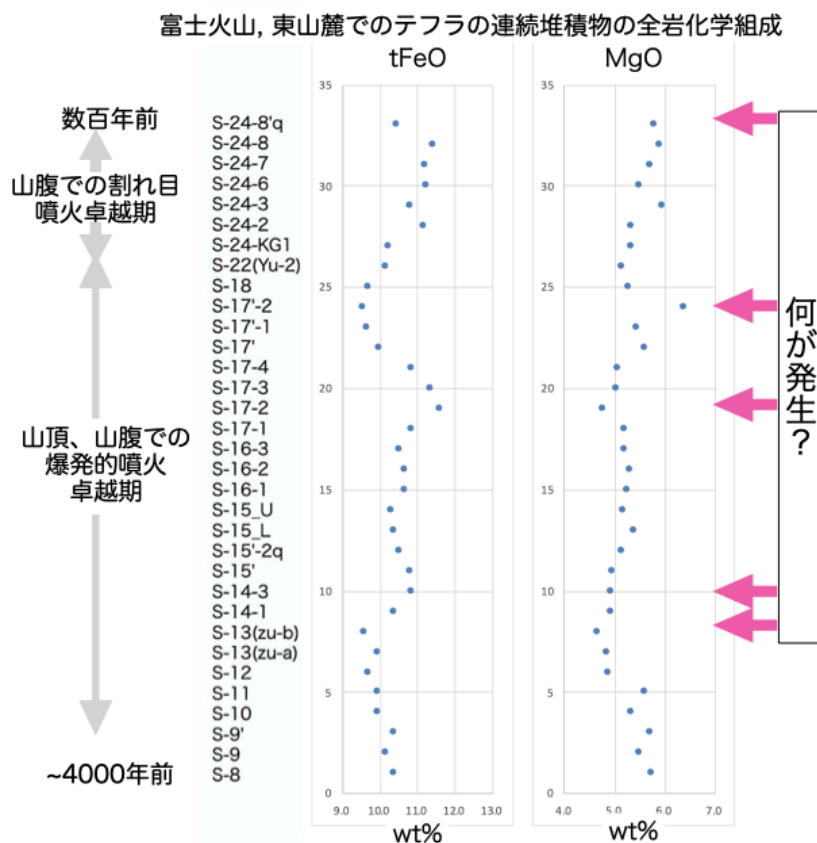


図 1. 連続サンプリングされた試料の全岩化学組成時間変化図（富士山の例）。

火山噴出物の解析によって火山の噴火様式や噴火推移の予測がうまく行えるためには、マグマ溜まりや火道が 1 回 1 回の噴火でリセットされることがなく、前回の噴火の特徴が次の噴火にもある程度反映するということが必要である。課題 C-1 では、これまで対象の火山について過去の噴火を連続的に調べており、ある特徴を持った噴火をある期間に渡って繰り返すことが多くの火山で明らかになってきた。そこでさらに一歩進め、どんな状況が発生すると噴火の類似性が破られるのかを理解することを、次の重要な課題と位置付けている。

この図は、富士山東山麓の 1 露頭で採取された約 3,500 年間の爆発的な噴火によるテフラの化学組成の変化である。化学組成が連続的に一方向に変化している部分と、変化方向が変わる部分がいくつか観察できる。このような「変化の方向が変わる」要因はいったい何なのだろうか？富士火山では、「深部でのマグマの注入」、「浅所でのマグマの混合」、「火道の状態変化」の 3 つの要因が検討されている ((b)4)c iv 参照)。また、諏訪之瀬島火山でもタイムスパンは異なるが連続的な噴出物の分析が行われ、噴火現象の変化に先立って、MgO の増加が観察されており、新たなマグマの供給が変化のトリガーになったことが示唆されている ((b)4)f 参照)。このような情報の集積をそれぞれの火山について行い、変化の主要な要因を特定していくことが、噴火様式や噴火推移の予測の確度を高めるためには必要である。

サブテーマ2：噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成

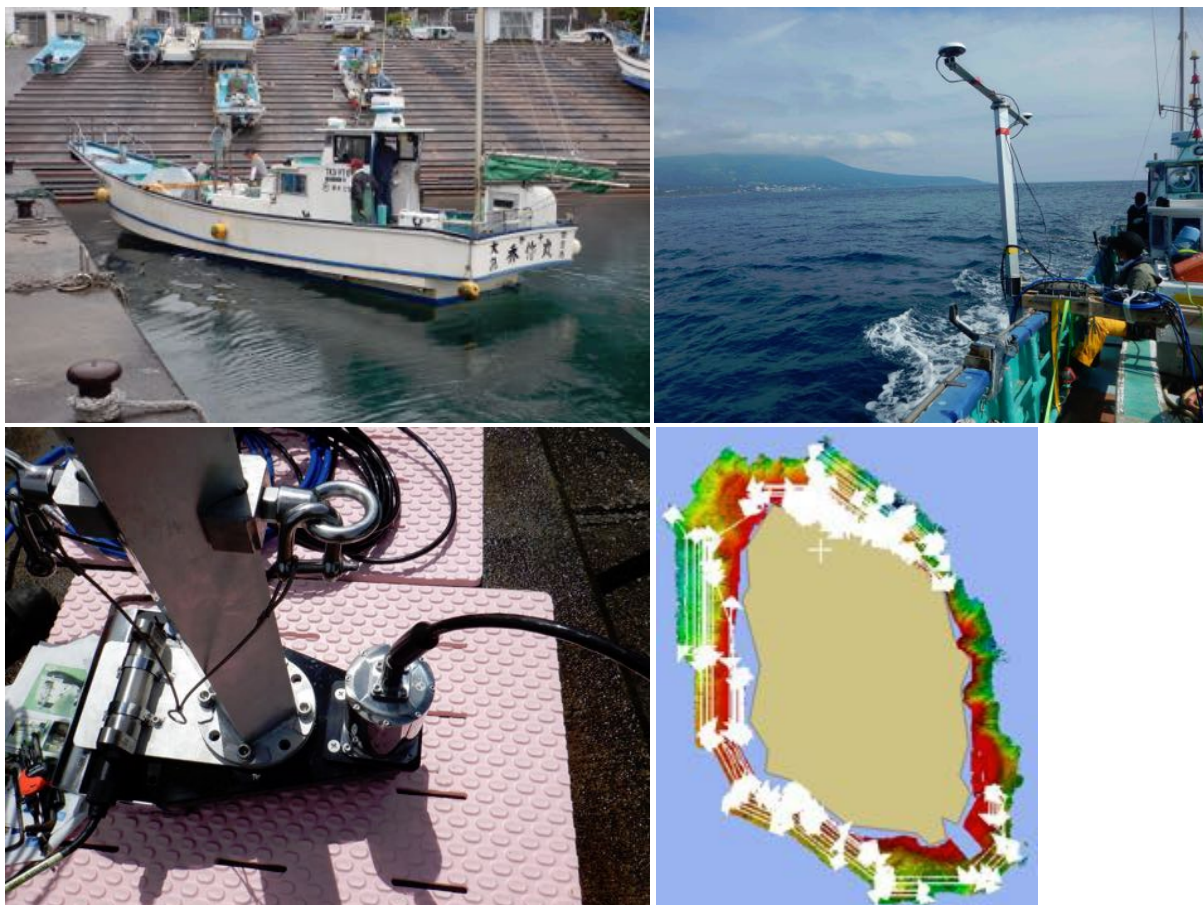


写真1．伊豆大島沿岸域における海底地形調査の様子。13日間の傭船調査により大島全周の精密地形探査を行った。

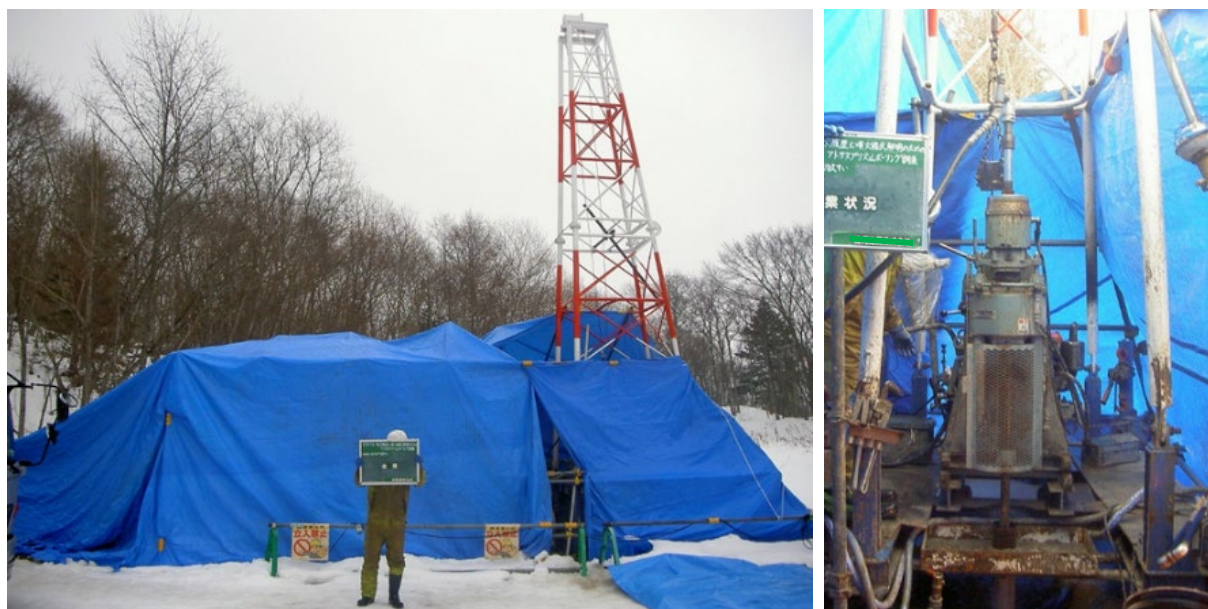


写真2．アトサヌプリにおけるボーリング掘削調査の様子。

サブテーマ3：シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発

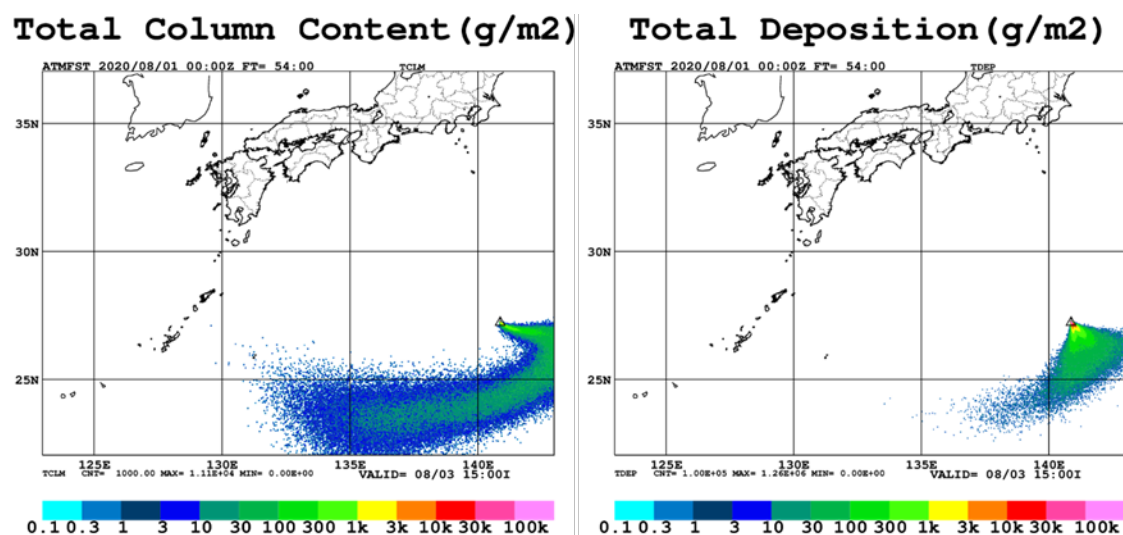
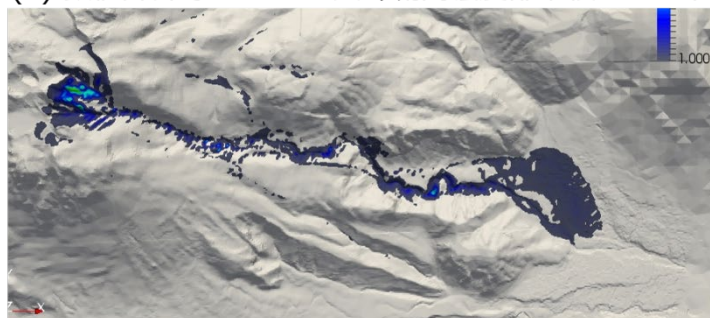


図1．開発中の降灰ハザード予測モデルの西之島火山連続噴火への適用例。開発中の JMA-ATM（フルモデル）による気柱積算（左図）と降灰シミュレーション（右図）の動作確認結果。

(a) 数値計算で再現された火砕流高濃度部堆積物の分布



(b) 観測された1991年6月3日火砕流堆積物分布
(Modified from Fig. 8 of Yamamoto et al., 1993)

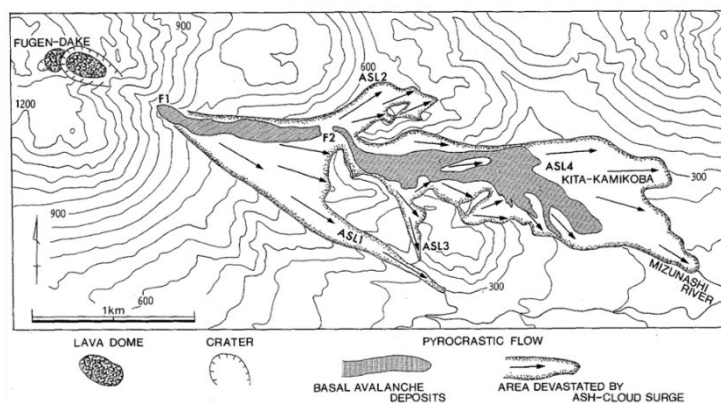


図2．溶岩ドーム崩壊型火砕流モデルの検証（雲仙普賢岳1991年6月3日火砕流の例）。

(a) faSavageHutterFOAM による数値計算結果。(b) 観測結果。

はじめに

火山列島である日本には、全国各地に 110 の活火山があり、ほぼ毎年、複数の火山で噴火が起こっている。これらの火山噴火による災害を軽減するには、個々の火山について、将来の噴火や噴火推移を予測することが必要である。そしてこの噴火予測手法を確立することが、現在の火山研究の重要課題の 1 つであり、同時に国民から期待されていることでもある。短期的に火山噴火を予測するためには、地球物理学的観測により噴火直前の前兆現象を捉えることが有効である。いくつかの火山では、噴火前の様々な前駆現象を捉えることができおり、火山噴火の短期的な予測についてはある程度の実績があると言えるであろう。一方で、噴火活動が開始し、その活動がどのように推移するのかという、噴火推移予測のための研究については、まだ多くの課題が山積している状態である。それに加えて、個々の火山での数年から数十年間、あるいはそれ以上の期間における活動予測、いわゆる中長期予測については科学的な検討がほとんどの火山で行われていない。

火山観測・研究の歴史は火山活動の時間スケールに比べると明らかに短く、多くの火山での噴火事例の観測データが不足しているのが現状である。そのため個々の火山において、将来の噴火やその推移を予測することは難しい。さらに地球物理学的観測では、現在のマグマの蓄積や移動についての情報を得る事はできるが、中長期的な活動予測については無力である。噴火推移や火山活動の中長期予測を行うためには、個々の火山に対して、過去の噴火堆積物の層序を読み解き、過去にどのような噴火が起きたのか、それぞれの噴火はどのような推移を辿ったのか、そしてその噴火活動の推移・変遷は何が原因となっているのか、について明らかにする必要がある。このような地質学的・物質科学的アプローチによる過去の噴火活動の解析をもとに、個々の火山での将来の噴火の可能性やその噴火様式・推移、そして可能性のある噴火災害についてシミュレーションに基づく予測を行うことが重要である。そのことによって、将来の噴火確率の提示に結びつく基礎を築くことができるであろう。

本課題「課題 C：火山噴火の予測技術の開発」では、地質学的手法を用いて個々の火山の長期噴火履歴を明らかにし、それらに基づき採取した地質学的情報を有する噴出物の物質科学的解析によって、マグマ長期変遷を解明する。その結果を基に「中長期噴火予測」を実施するとともに、事象分岐確率の入った「噴火事象系統樹」を作成する（サブテーマ 2）。そして、代表的な噴火について、詳細な物質科学的解析を行い噴火事象の分岐判断基準を明確にすることで、「火山噴火の分岐予測手法」を開発する（サブテーマ 1）。さらに、これらの成果および他課題の地球物理学的観測データを踏まえ、地下のマグマ移動から噴火に至るまで、そして噴火災害に対するシミュレーションを実施し、噴火予測・噴火ハザード予測手法を開発・提案する（サブテーマ 3）。本課題の成果は、火山の監視、噴火対応等で活用されるだけでなく、噴火シナリオの検討や避難計画などの防災対策の基礎資料になることが期待される。また、噴火確率算定手法の確立に向けての、基礎的な研究と位置づけられる。また研究の進展と並行して、地元住民への普及講演や防災教育を実施することで、火山研究への理解と火山防災への意識の向上に繋がることが期待できる。

この報告書では、研究開始から 5 年目にあたる令和 2 年度の成果を報告する。令和 2 年度は新型コロナウイルス拡大の影響を受け、フィールドワーク・研究集会等の見送りや大学院生の研究活動制限など、研究計画の遂行に一部支障が出たものの、その中で可能な範囲

で精力的に研究を進めてきた。その結果、全体としては順調に研究が進んでいると判断している。これらの令和 2 年度の研究成果をもとに、本課題・本事業が社会へ資する役割を念頭において、令和 3 年度以降も研究課題の達成に向けて、研究を確実に推進していきたいと考える次第である。

目 次

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	2
(2) 研究実施日程	9
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	11
(2) 令和2年度の成果	16
(3) 令和3年度の業務計画案	53
2. 2 噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系 統樹の作成	
(1) 業務の内容	55
(2) 令和2年度の成果	61
(3) 令和3年度の業務計画案	164
2. 3 シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発	
(1) 業務の内容	167
(2) 令和2年度の成果	173
(3) 令和3年度の業務計画案	202
3. 会議録	205
4. むすび	206

別添1 学会等発表実績（サブテーマ1）

別添2 学会等発表実績（サブテーマ2）

別添3 学会等発表実績（サブテーマ3）

1. 研究概要の説明

課題 C では国内の主要な活火山を対象に噴火履歴の解明と噴火事象の解析を行い、得られた情報を数値シミュレーションで解析することによって噴火の予測技術を開発する。そして事象分岐判断基準が伴った噴火事象系統樹を整備するとともに、噴火発生確率の算出に向けた検討を行う。本課題は、サブテーマ 1:「火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発」、サブテーマ 2:「噴火履歴調査による中長期噴火予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成」、サブテーマ 3:「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」の 3 つのサブテーマの研究が並行して、かつ密に連携しながら実施される。

(1) サブテーマ 1: 火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発

本サブテーマでは、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行い、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時間スケール、マグマの上昇開始から噴火開始までの時間スケールを明らかにする。この際、本研究で新たに得るデータに加えて、既存の研究成果も適宜参照して、火山噴出物から噴火事象分岐予測判断を行う基準を検討する。プロジェクト期間中に 10 火山について研究を行うとともに、それ以外に課題 C サブテーマ 2 と連携して噴火履歴調査で収集した試料の一部の解析も行う。さらに、より多くの火山噴出物の分析データを収集し噴火事象分岐予測に資するため、分析・解析プラットフォームを整備し、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行う。

(2) サブテーマ 2: 噴火履歴調査による中長期噴火予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成

本サブテーマでは、活動的であることや噴火した際の社会的影響が大きいこと等を考慮して選定した 26 の重点火山を中心に、主として地質学のおよび物質科学的手法に基づいて長期的な噴火履歴を明らかにし、さらに個々の噴火の様式とその推移を可能な限り詳細に解明する。また最重点火山として 5 火山を選定し、ボーリング掘削やトレンチ調査を集地的に実施して、より高精度の噴火履歴を解明する。このような作業を経て各対象火山について高精度の時間-噴出物量図(階段図)を作成するとともに、噴火履歴に対応する噴出物の物質科学的解析に基づいたマグマプロセスの解明を行い、個々の火山で中長期噴火予測、および事象分岐確率の入った噴火事象系統樹の作成を目指す。

(3) サブテーマ 3: シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発

本サブテーマでは、火山噴火発生確率の定量化に向けて、演繹的(決定論的)手法による確率計算手法の開発を行う。本事業の 7 年目までは、火山噴火予知・火山災害評価のための個別の事象についてのモデル化と数値シミュレーション技術を開発する。その際、それぞれの事象を支配するパラメータの洗い出しと、その感度解析を行う。なお、特に火山現象を直接的に支配する物性パラメータの把握が不十分であるため、実験的手法を用いて物性モデルの開発も実施し、その成果を数値シミュレーションに取り込む。本事業の 8~10 年目では、各事象の発生条件について、感度解析の結果を踏まえて、もっともらしいパラメータ範囲での事象発生条件を抽出し、火山ハザード評価システムおよびマグマ移動過程評価システムを開発する。また、多パターンの数値シミュレーションの実施を踏まえた、事象分岐確率の提示を行い、一元化システムでの運用に移行する。

(1) 研究者別の概要

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	間接 経費
国立大学法人東京 大学地震研究 所・准教授	安田 敦	【サブテーマ1】 <分析解析プラットフォーム の構築> 分析補助ツールや解析ツ ールを整備した。取得したデ ータについて一部の公開を 開始した。 <噴出物の解析> 富士山、雲仙、西之島の試 料分析をおこないマグマ供 給系について検討した。	R2.4.1～ R3.3.31	15,960, 460	4,788,1 38
学校法人早稲田 大学・准教授	鈴木 由希	【サブテーマ1】 <噴出物の解析> 榛名火山におけるカルデラ 噴火（45ka）と二ツ岳渋 川噴火（5C 末～6 C 初 頭）の双方が、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 化され発生したことを明ら かにした。	R2.4.1～ R3.3.31	500,00 0	150,00 0
学校法人常葉大 学・教授	嶋野 岳人	【サブテーマ1】 <噴出物の解析> 諏訪之瀬島火山 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 かにした。また、桜島にお ける連続採取試料解析によ るデータ蓄積を進めた。	R2.4.1～ R3.3.31	500,00 0	150,00 0
国立大学法人静 岡大学・准教授	石橋 秀巳	【サブテーマ1】 <噴出物の解析> 宝永噴火の深成岩捕獲岩の 分析から、富士山地下の 様々な深さに複数のケイ長 質マグマだまりが存在する ことがわかった。伊豆大室 山噴火の噴出物の石基組織 解析から、同噴火の火道浅 部過程を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31	499,34 5	149,80 3
国立大学法人熊 本大学・特任教 授	長谷中 利 昭	【サブテーマ1】 <噴出物の解析> 先阿蘇火山岩類について立 野、新所地区において詳し い層序を確立した。また、 完新世後期の玄武岩質マグ マの揮発性成分含有量を決 定し、存在深度および脱ガ ス深度を推定した。加え て、阿蘇カルデラ形成噴火 の給源情報、およびマグマ の特徴を探るため予察的調 査をおこなった。	R2.4.1～ R3.3.31	500,00 0	150,00 0

国立大学法人東北大学・教授	中村 美千彦	【サブテーマ1】 <噴出物解析手法開発> 桜島火山大正噴火軽石を用いた石基微結晶の晶出条件を決定する実験をおこなった。 噴火休止期に火口から放出される高濃度火山ガスの到達範囲をマッピングする手法を開発した。	R2.4.1～ R3.3.31	200,000	60,000
国立研究開発法人産業技術総合研究所・主任研究員	東宮 昭彦	【サブテーマ1】 <噴出物の解析> 有珠火山 2000 年噴出物中の鉱物、特に元素拡散の速い磁鉄鉱に着目し、その累帯構造の分析・解析をおこなった。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た。	R2.4.1～ R3.3.31	1,006,614	221,455
同・主任研究員	宮城 磯治	【サブテーマ1】 <噴出物解析手法開発> 阿蘇の噴出物の分析値(他予算)と熱力学計算結果を比較し、阿蘇 4 の珪長質マグマ生成に必要な量の水に乏しい玄武岩マグマが、中岳程度の脱ガス活動が数万年継続すると生じうることを示した。	R2.4.1～ R3.3.31		
北海道大学 大学院理学研究院 教授	中川 光弘	【サブテーマ2】 サブテーマ2の研究課題の総合推進および課題 C 全体のとりまとめを行った。また、ボーリング掘削調査をとりまとめ、アトサヌプリ・有珠山・阿蘇山で実施した。さらに、摩周・アトサヌプリ・羊蹄山・有珠山・秋田駒ヶ岳について噴火活動履歴の研究を行い、その詳細を明らかにした。そして、ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築を行い、コア試料の集約を開始した。	R2.4.1～ R3.3.31	42,725,365	12,817,614
同 准教授	栗谷 豪	【サブテーマ2】 マグマ変遷解析センターの統括および分析技術開発を行い、U-Th 放射非平衡法を確立した。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 助教	吉村 俊平	【サブテーマ2】 マグマ変遷解析センターにおける技術開発を行い、樽前山について FT-IR を用いた揮発性成分組成に基づくマグマシステムの構築を行	R2.4.1～ R3.3.31		

		った。			
同 技術専門職員	松本 亜希子	【サブテーマ2】 十勝岳・有珠山について噴火活動履歴の研究を行い、その詳細を明らかにした。また、マグマ変遷解析センターのユーザー受入れを行った。	R2.4.1～ R3.3.31		
秋田大学 大学院国際資源 学研究科 教授 教育文化学部 教授	大場 司 林 信太郎	【サブテーマ2】 鳥海山・栗駒山のトレンチ調査による噴火事象分岐の研究を行い、火山活動史について精度の高い結果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	1,923,077	576,923
山形大学 理学部 教授	伴 雅雄	【サブテーマ2】 蔵王山・鳥海山の噴火履歴及びマグマ供給系解明の研究を行い、蔵王山のテフラ層序とマグマ供給系、西鳥海山の形成史とマグマ供給系に関する結果を得た。	R2.4.1～ R3.3.31	2,692,308	807,692
同 准教授	常松 佳恵	【サブテーマ2】 蔵王山・吾妻山の噴火履歴解明の研究を行い、蔵王山1895年噴火の投出岩塊の分布と噴出条件についての結果等を得た。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 助教	井村 匠	【サブテーマ2】 鳥海山・蔵王山・吾妻山の噴火履歴解明の研究を行い、蔵王山の1895年噴火等の水蒸気噴火噴出物の試料採取を進めた。	R2.4.1～ R3.3.31		
茨城大学 大学院理工学研究科 准教授	長谷川 健	【サブテーマ2】 摩周・那須岳・三宅島の長期噴火履歴およびマグマ変遷に関する基礎研究を行い、各火山の詳細な噴火史やマグマ系に関する有益な研究成果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	769,231	230,769
東京大学 地震研究所 准教授	前野 深	【サブテーマ2】 鬼界・伊豆大島・霧島山における地質学的研究を進め、従来よりも精度の高い噴火履歴や噴火推移に関する知見を得た。	R2.4.1～ R3.3.31	3,230,770	969,231
日本大学 文理学部地球科学科 教授	安井 真也	【サブテーマ2】 浅間山の噴火史の研究を行い、トレンチ掘削などの地質調査と年代測定に基づき高分解能での噴火履歴復元の結果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	1,692,308	507,692
同 特任教授	高橋 正樹	【サブテーマ2】 浅間山の噴火史の研究を行い、階段図および噴火事象	R2.4.1～ R3.3.31		

		系統樹の試作とその評価をすすめる結果が得られた。			
同 准教授	金丸 龍夫	【サブテーマ2】 浅間山の噴火史の研究を行い、トレンチ掘削などの地質調査と年代測定に基づき高分解能での噴火履歴復元の結果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31		
富山大学 学術研究部都市 デザイン学系 教授 同 准教授	石崎 泰男 川崎 一雄	【サブテーマ2】 中部日本・北関東の活火山の噴火履歴に関する調査を行い、研究対象である白山火山・妙高火山群・鷺羽池火山・志賀火山・草津白根火山において噴火履歴の見直しにつながる研究成果が得られた。特に、これまで活火山とされていなかった鷺羽池火山と志賀火山が、それぞれ2,700年前頃と500年前頃に噴火を起こした活火山であるという重要な結果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	2,307,6 93	692,30 7
熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育センター 教授	宮縁 育夫	【サブテーマ2】 阿蘇山の火山活動と噴火履歴に関する研究を行い、最新の噴火活動の推移が明らかになり、またボーリング掘削・トレンチ掘削調査によって噴火活動史についての知見が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	1,846,1 54	553,84 6
産業技術総合研究所 主任研究員 同 主任研究員 同 研究グループ長 同 研究員	石塚 治 川邊 禎久 井上 卓彦 有元 純	【サブテーマ2】 伊豆大島の研究を行い、沿岸部水深400m程度までの範囲で精密海底地形調査を13日間漁船傭船にて実施し、これまで未知の海底部における側火山体や溶岩流の分布を解明した。また沿岸陸上部の噴火年代の結果を得た。	R2.4.1～ R3.3.31	7,377,0 51	1,622,9 51
同 主任研究員 同 主任研究員	及川 輝樹 山崎 誠子	【サブテーマ2】 御嶽山の研究を行い、採取してある溶岩試料についてK-Ar及びAr/Ar年代測定を進め、完新世の噴火活動評価に資する年代測定データを得た。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 研究部門長 同 研究グループ長 同 研究員	伊藤 順一 石塚 吉浩 南 裕介	【サブテーマ2】 秋田焼山の研究を行い、山頂近傍の4地点で人力掘削調査を実施し、最近6,000年間の活動による少なくとも9枚の噴火堆積物を認識し、噴火履歴および活動推移に関するデータを得た。	R2.4.1～ R3.3.31		

同 研究グループ長 同 上級主任研究員 同 主任研究員 同 主任研究員 同 研究員	下司 信夫 宝田 晋治 古川 竜太 山崎 雅 松本 恵子	【サブテーマ2】 大規模噴火データベースの研究を行い、国内外の歴史時代に発生した VEI(火山爆発指数) > 5 クラスの大規模噴火推移に関する詳細データの収集を行うと共に、カルデラ形成を伴うクラスの大規模噴火の前駆活動と噴火推移を取りまとめ、閲覧可能なデータベースとして整備した。	R2.4.1～ R3.3.31		
筑波大学 大学院生命環境 科学研究科 教授	荒川 洋二	【サブテーマ2】 新島火山の噴火長期予測のための物質科学的研究（主に元素・同位体分析）を行い、過去に噴火したマグマに関する長期変化が明らかになった。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
山口大学 大学院創成科学 研究科 教授 同 助教	太田 岳洋 辻 智大	【サブテーマ2】 九重山に関する噴火履歴調査、噴火推移調査を行い、54 ka 噴火の前駆的噴火の存在と噴火時の噴出中心の移動に関する結果が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
北海道教育大学 旭川校 准教授	佐藤 鋭一	【サブテーマ2】 雌阿寒岳の噴火履歴を明らかにする研究を行い、詳細な噴火履歴を構築することができた。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
信州大学 理学部地球学コ ース 准教授	斎藤 武士	【サブテーマ2】 焼岳・横岳・由布鶴見岳について、次年度以降の噴火履歴調査の事前準備を行った。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
電力中央研究所 主任研究員	上澤 真平	【サブテーマ2】 羊蹄山についての噴火履歴に関する研究を行い、新たな知見が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
防災科学技術研 究所 特別研究員	長井 雅史	【サブテーマ2】 ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築を行い、コア試料の集約を開始した。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
株式会社エンバ イオ・エンジニア リング 技術部長	和知 剛	【サブテーマ2】 秋田駒ヶ岳の噴火履歴調査を行い、新たな見解が得られた。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
国立研究開発法 人防災科学技術 研究所火山研究 推進センター 副センター長	藤田 英輔	【サブテーマ3】 サブテーマ3全体の取りまとめを実施した。 ①b. マグマ移動過程シミュレーション技術開発で熱過程の導入、 ②c. ハザード評価システムの検討でグランドデザイン	R2.4.1～ R3.3.31	33,051, 401	7,627,2 46

		の検討を行った。			
同 主任研究員	三輪 学央	【サブテーマ3】 ①c. マグマ物性モデルの構築で結晶化モデル構築のための室内実験と火道流モデルへの適用の検討を行った。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 契約研究員	黒川 愛香	【サブテーマ3】 ①c. マグマ物性モデルの構築火山性流体のレオロジーモデル構築のための実験を実施した。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 契約研究員	長井 雅史	【サブテーマ3】 ①c. マグマ物性モデルの構築で結晶化モデル構築のための室内実験を実施した。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 契約研究員	志水 宏行	【サブテーマ3】 ②c. ハザード評価システムの検討で火砕流シミュレーションの開発、火山ハザード評価システムの開発を実施した。	R2.4.1～ R3.3.31		
国立大学法人東北大学大学院理学研究科 教授	西村 太志	【サブテーマ3】 ①a. 噴火機構シミュレーション技術開発で、事象分岐の検知可能性評価を行った。	R2.4.1～ R3.3.31	2,260,677	521,694
同 准教授	小園 誠史	【サブテーマ3】 ①a. 噴火機構シミュレーション技術開発で、火道流モデルによるシミュレーションを実施し、事象分岐を支配するパラメータ依存性を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 准教授	奥村 聡	【サブテーマ3】 ①a. 噴火機構シミュレーション技術開発および①c. マグマ物性モデルの構築で、結晶化実験と火道流モデルの結合を検討した。	R2.4.1～ R3.3.31		
国立大学法人東京大学 地震研究所火山噴火予知研究センター 准教授	鈴木 雄治郎	【サブテーマ3】 ②b. 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発で噴煙ダイナミクスと火山灰輸送をカップリングした SK-3D モデルによる大規模シミュレーションを実施した。	R2.4.1～ R3.3.31	2,789,602	643,754
同 准教授	前野 深	【サブテーマ3】 ②c. ハザード評価システムの検討で各シミュレーターの導入の検討を行った。	R2.4.1～ R3.3.31		
気象庁気象研究所火山研究部 室長	小久保 一哉	【サブテーマ3】 ①b. マグマ移動過程シミュレーション技術開発で地震・地殻変動データによる評価を行った。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—

同 室長	新堀 敏基	【サブテーマ3】 ②a. 降灰ハザード予測モデルの開発で新しい移流拡散モデル(JMA-ATM)を開発し、運用レベルに到達した。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 主任研究官	鬼澤 真也	【サブテーマ3】 ①b. マグマ移動過程シミュレーション技術開発で地震・地殻変動データによる評価を行った。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 主任研究官	佐藤 英一	【サブテーマ3】 ②a. 降灰ハザード予測モデルの開発で、JMA-ATMの初期条件を適切に与えることを目的として、降下火砕物の形状・密度の粒径依存性を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 研究官	石井 憲介	【サブテーマ3】 ②a. 降灰ハザード予測モデルの開発で、移流拡散系の数理解析し、逆解の不確実性である解像度や観測誤差に伴う推定誤差を定量化できることを示した。	R2.4.1～ R3.3.31		
同 研究官	川口 亮平	【サブテーマ3】 ①b. マグマ移動過程シミュレーション技術開発で境界要素法により地形を考慮した火山周辺の地殻変動計算システムの開発を進めた。	R2.4.1～ R3.3.31		
国立大学法人静岡大学理学部地球科学科 准教授	石橋 秀巳	【サブテーマ3】 ①c. マグマ物性モデルの構築火山性流体のレオロジーモデル構築のための実験結果による構成則のシミュレーションへの適用の方向性を検討した。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
国立大学法人山形大学理学部 准教授	常松 佳恵	【サブテーマ3】 ②c. ハザード評価システムの検討で、火山ハザード評価システムの開発を実施した。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—
国立大学法人神戸大学先端融合研究環 講師	清杉 孝司	【サブテーマ3】 ②c. ハザード評価システムの検討で、火山ハザード評価システムの開発を実施した。	R2.4.1～ R3.3.31	—	—

(2) 研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
【サブテーマ1】												
① 国立大学法人東京大学												
a. プロジェクトの総合推進	←											→
b. 分析・解析プラットフォームの立ち上げ	←											→
c. 研究集会の調整・開催							←→					
d. 火山噴出物の分析・解析	←											→
② 学校法人早稲田大学												
火山噴出物の分析・解析	←											→
③ 学校法人常葉大学												
火山噴出物の分析・解析	←											→
④ 国立大学法人静岡大学												
火山噴出物の分析・解析	←											→
⑤ 国立大学法人熊本大学												
火山噴出物の分析・解析	←											→
⑥ 国立大学法人東北大学												
火山噴出物の分析・解析	←											→
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	←											→
b. 熱力学解析に関する研究開発	←											→

【サブテーマ2】 火山の噴火履歴及びマ グマ長期変遷に関する 研究	←												→
マグマ変遷解析センタ ーの整備と分析技術開 発(北海道大学)	←												→
大規模噴火データベー スの整備 (産業技術総合研究所)	←												→
ボーリングコア試料の 保管・管理システムの 構築(防災科学技術研 究所・北海道大学)	←												→
課題C-2の総合推進お よび課題C全体のとり まとめと研究成果の発 信(北海道大学)	←												→
【サブテーマ3】 ①地下におけるマグマ 移動シミュレーション a. 噴火機構シミュレ ーション技術開発 b. マグマ移動過程シ ミュレーション技術開 発 c. マグマ物性モデル の構築	←												→
②噴火ハザードシミュ レーションの開発・高 度化 a. 降灰ハザード予測 モデルの開発 b. 噴煙柱ダイナミク スモデルの開発 c. ハザード評価シス テムの検討	←												→

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し、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이스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이스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。

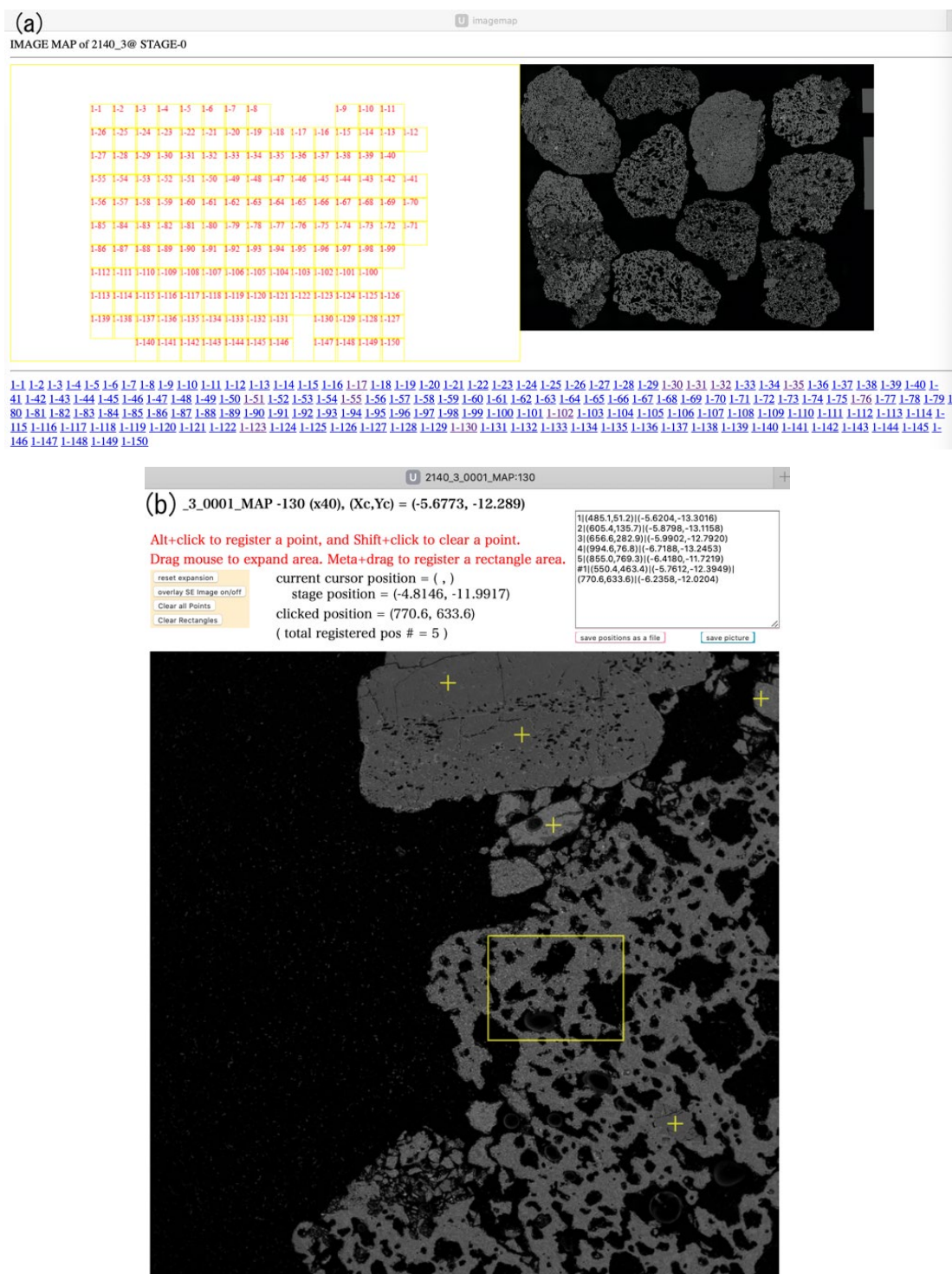


図2 作業画面の例。(a) 複数枚の画像を連結して試料薄片全体を観察できるようにしたもの。ブラウザ上で全体像と個別の撮影画像位置を確認でき、スクリーン下部の写真番号をクリックすると (b)の個別画像が開く。(b) 個別写真表示用のページ。ベースとなる写真は反射電子線像で、キー操作によって二次電子線像を重ね書きできる。マウスでの操作で、分析したい場所のステージ座標の読み取りやファイルへの出力がおこなえるので、この画面を利用して、リモートでの分析依頼の補助ツールとして用いることができる。

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。

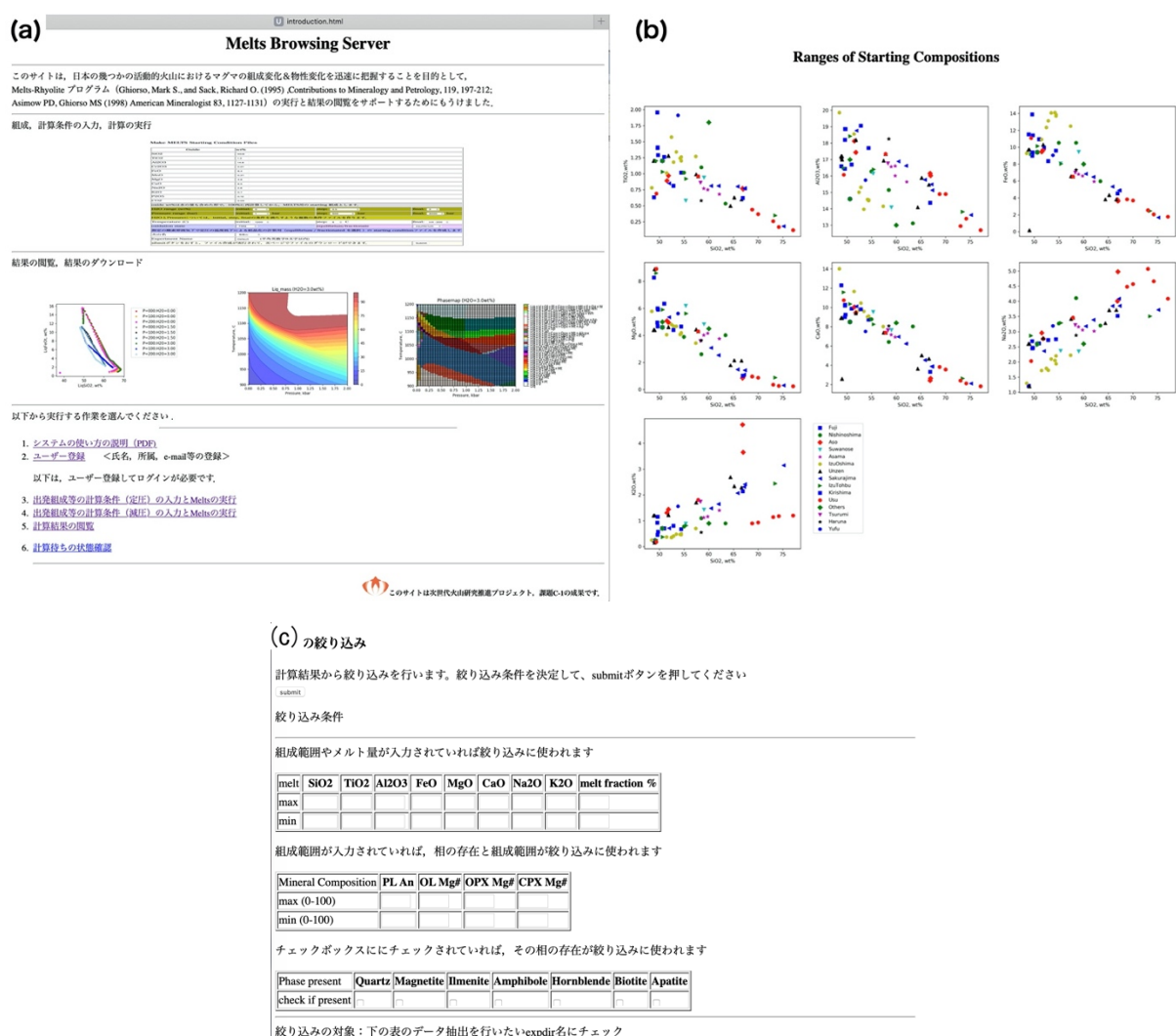


図 3 MELTS の簡易型実行環境。(a)ブラウザでのトップ画面。計算実行や計算結果の図化等がおこなえる。(b)これまでに計算をおこなった火山噴出物の組成。(c)結果の絞り込み画面。液組成や共存する鉱物組成から、出発物質の組成範囲や温度圧力条件の絞り込みがおこなえる。

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。

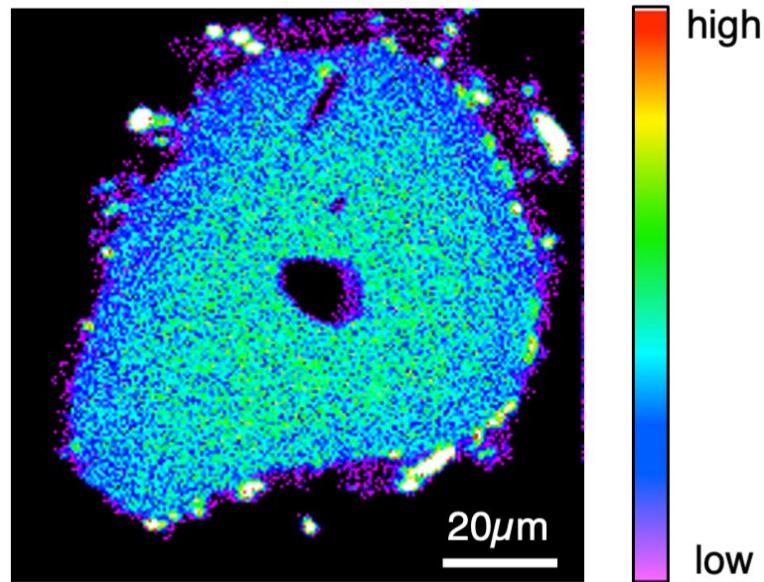


図 4 有珠火山 2000 年輕石中の磁鉄鉱の Mg 元素濃度マップの例。濃度を擬似カラーで表示。結晶の周縁部（リム）で Mg 濃度が顕著に低下している。

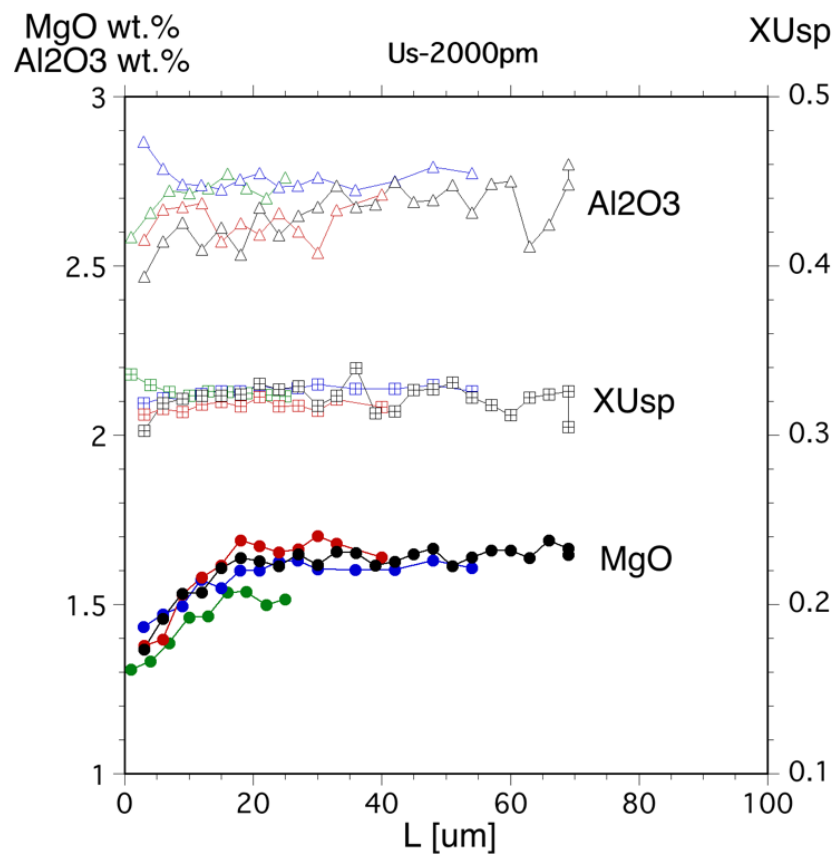


図 5 有珠火山 2000 年輕石中の磁鉄鉱の累帯構造。横軸は結晶のリムからの距離。XUsP や Al には明瞭なゾーニングが見られないのに対し、Mg はリム付近の約 $20 \mu\text{m}$ で濃度が顕著に低下している。同じ色のシンボルは同じ結晶に対応する。

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くことが必要である。

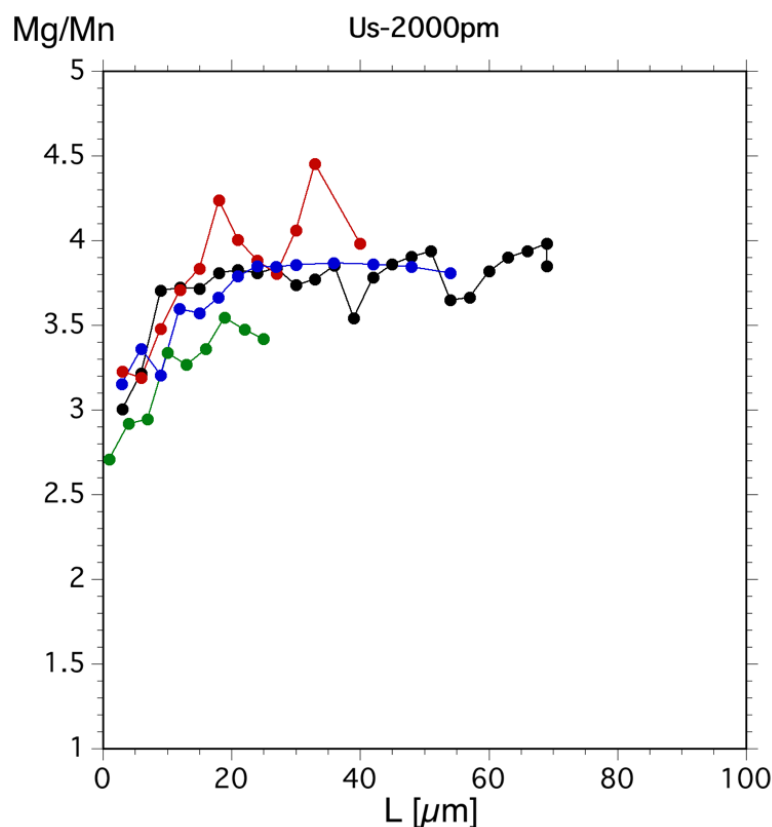


図 6 有珠火山 2000 年軽石中の磁鉄鉱の Mg/Mn のプロファイル。Mg/Mn とマグマ温度との相関関係から、結晶のコアからリムに向けてマグマ温度が 50～100 °C 程度低下したことが推定される。

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する。

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する。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。

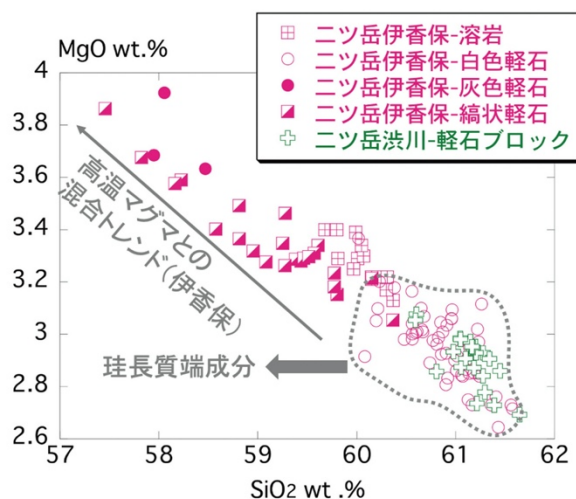


図 7 榛名火山、二ツ岳の 2 噴火の噴出物の全岩化学組成。二ツ岳伊香保噴火のデータは Suzuki and Nakada (2007)2) によるもの。灰色の文字や矢印は解釈。

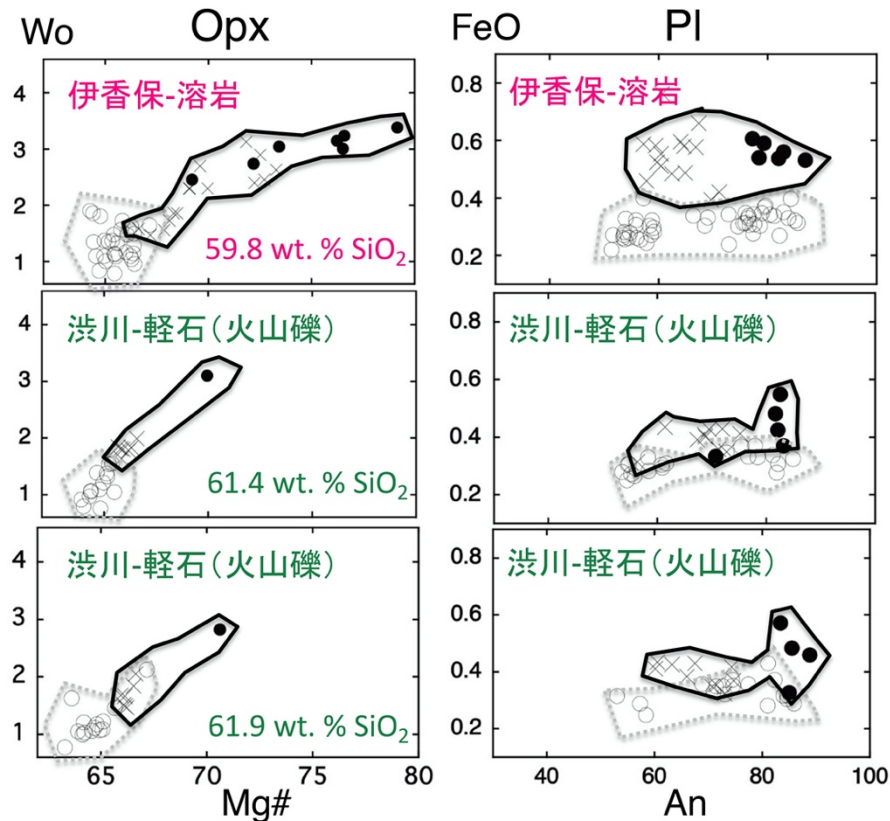


図 8 榛名火山、二ツ岳の 2 噴火の斑晶鉱物組成。Opx は斜方輝石、Pl は斜長石。○はコア、●はインナーリム、×はリム。左右に並ぶ図は同じサンプルのもの。SiO₂ 含有量は全岩のもの。インナーリムは、斜方輝石ではリム近傍の Mg# の急増部、斜長石では汚濁帯の直ぐ外側。

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。

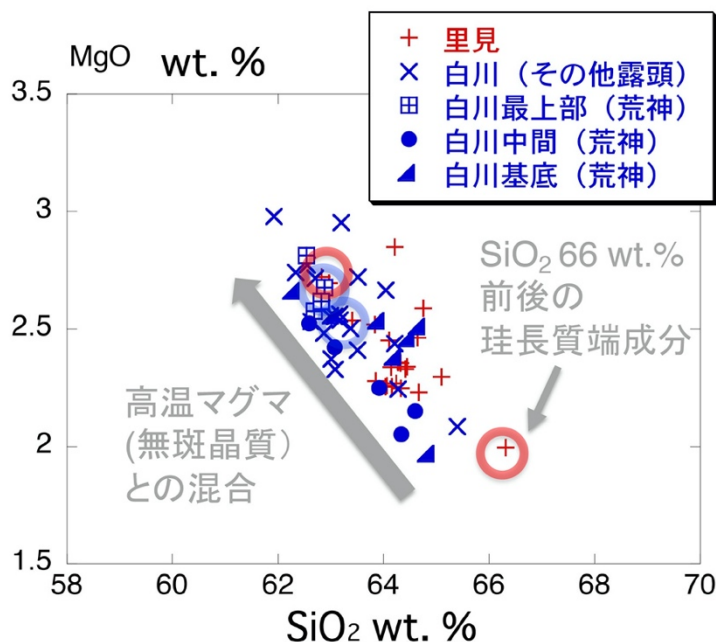


図 9 榛名火山で 45ka に発生したカルデラ噴火の火砕流堆積物（白川・里見）中の軽石の全岩化学組成。灰色の文字や矢印は解釈。赤丸・青丸をつけた合計 4 サンプルについて斑晶の EPMA 分析を実施した。

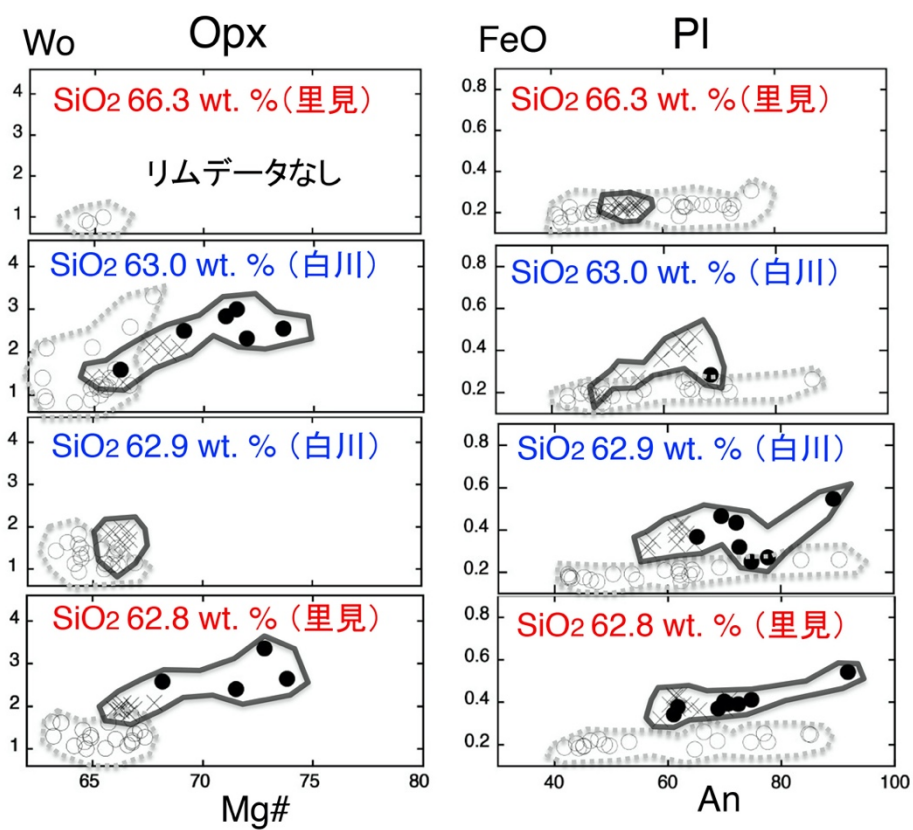


図 10 榛名火山 45ka の白川火砕流と里見火砕流の本質軽石の斑晶鉱物組成。略称やプロットのマークは、図 8 と同じ。図中にはサンプルの全岩 SiO_2 含有量も示す。

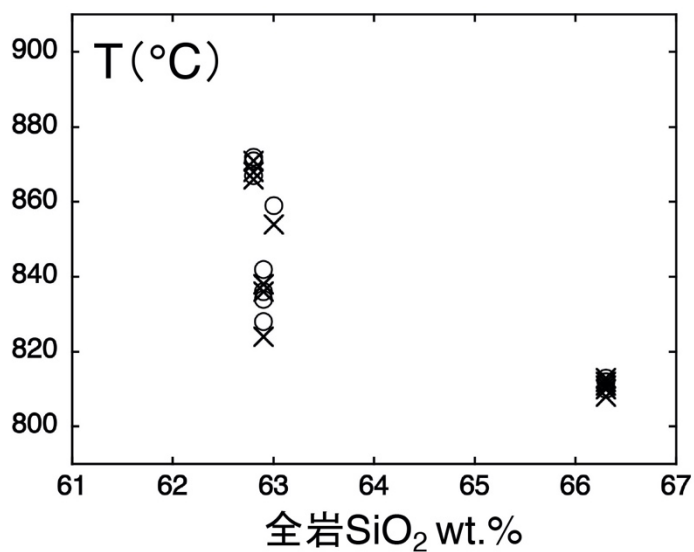


図 11 榛名火山 45ka のカルデラ噴火の火砕流堆積物の本質軽石の記録するマグマ温度 (Fe-Ti 酸化物温度計)。図 10 と同じ 4 サンプルのデータ。○はコア、×はリムから計算された温度。

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。

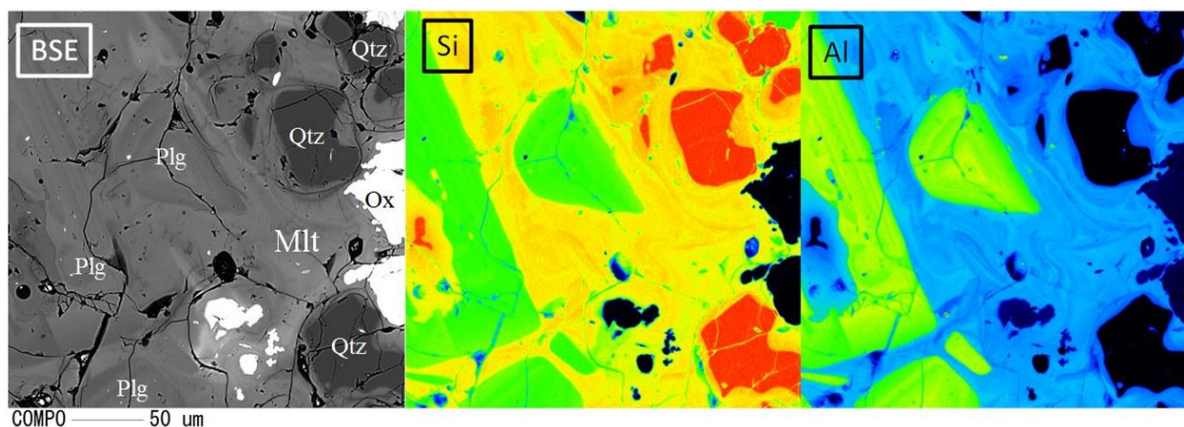


図 12 粒間ガラスに見られた組成縞模様。

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。

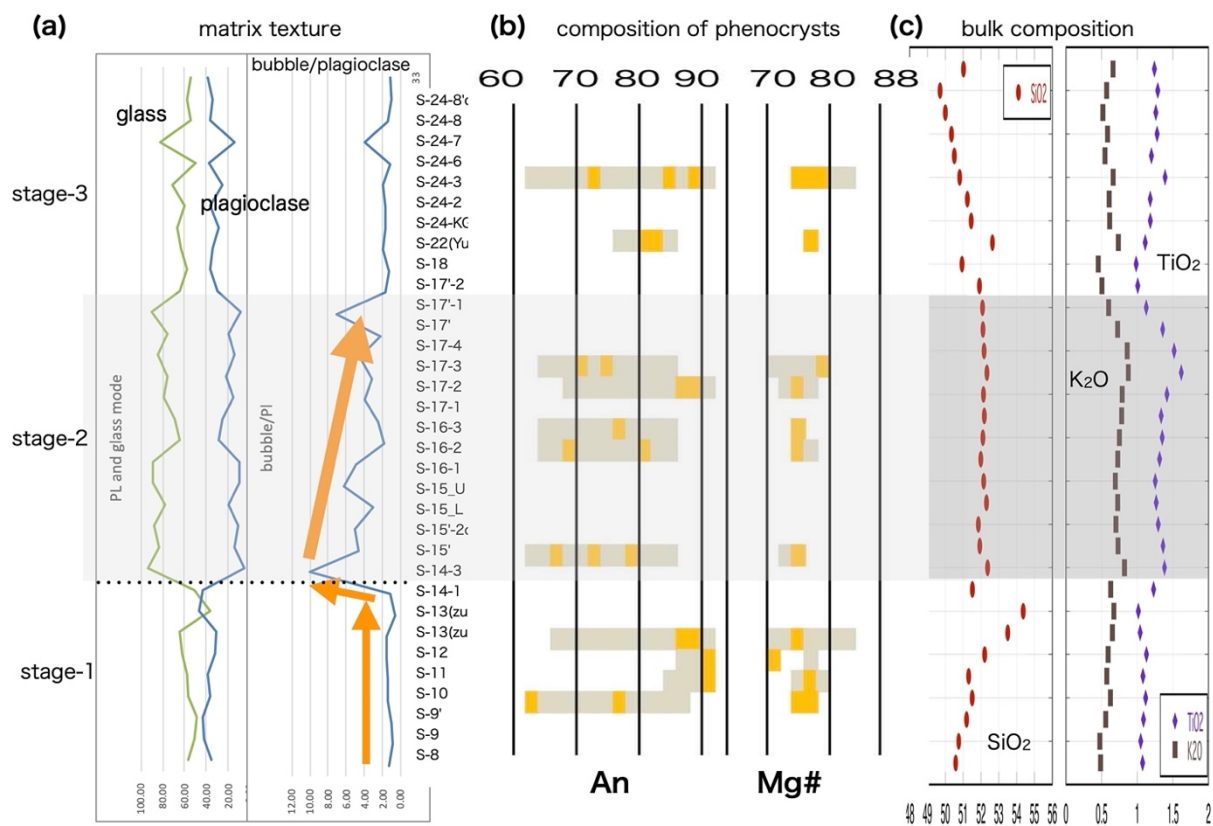


図 13 約 4000 年前からの爆発的噴火の火山灰の連続露頭で観察された時代変化。(a) 石基のガラス、斜長石量と気泡量の変化。Stage-1 と Stage-2 の境で御殿場山体崩壊が発生している。(b) 斑晶（斜長石、かんらん石）組成の時間変化。(c) 全岩組成の時間変化。

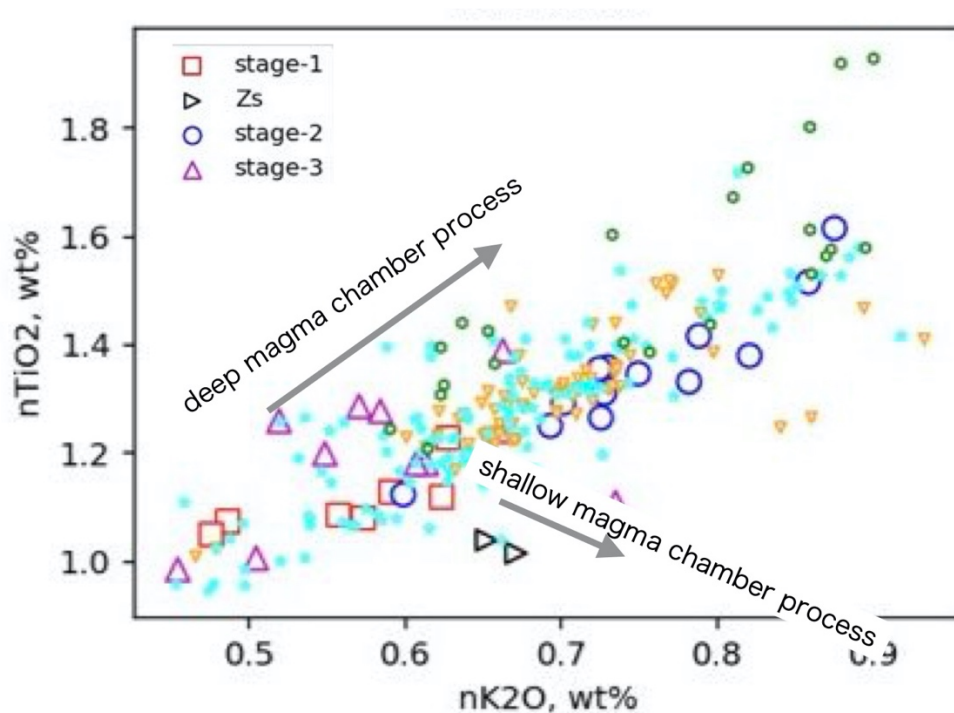


図 14 全岩組成, K_2O , TiO_2 の組成分布。深部でのマグマの結晶分化では、 K_2O の増加に伴い TiO_2 が増加する。一方、浅所での結晶分化では、磁鉄鉱の晶出のため、 K_2O の増加にともなって TiO_2 は減少する。Stage-2 では、組成分布は右上がりであり、富士山の他の時期と同様に、深部での結晶分化が支配的であったことがわかる。左下に伸びる分布を示す▷印は砂沢噴火。

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 万年前から活動が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。

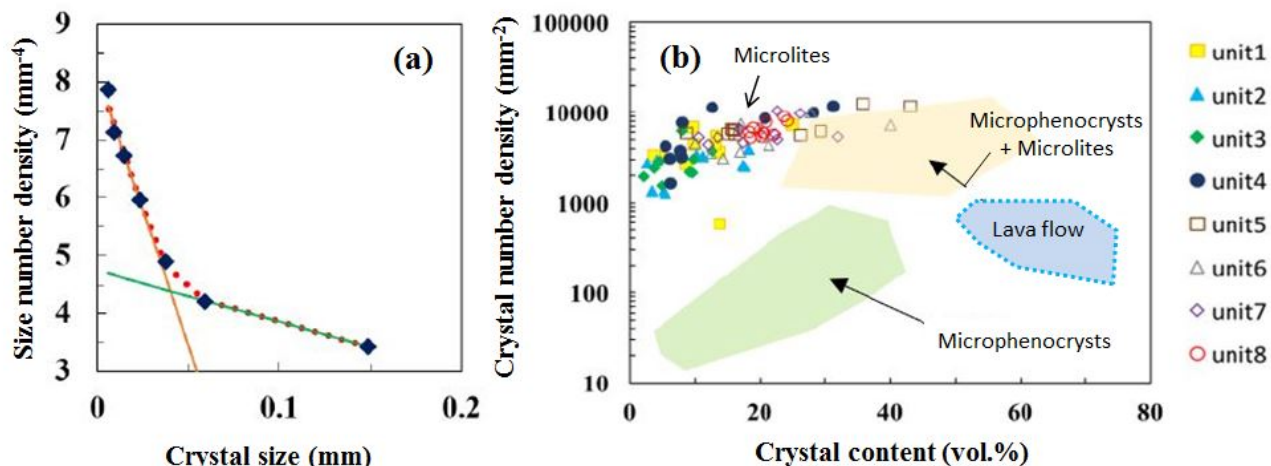


図 15 大室山スコリアの石基斜長石。(a)結晶数密度サイズ分布 (CSD) の例。本研究では、CSD の屈曲点より粗粒の結晶を微斑晶、細粒の結晶をマイクロライトとそれぞれ呼ぶ。(b) 石基斜長石の結晶量と数密度の関係。

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⁾。

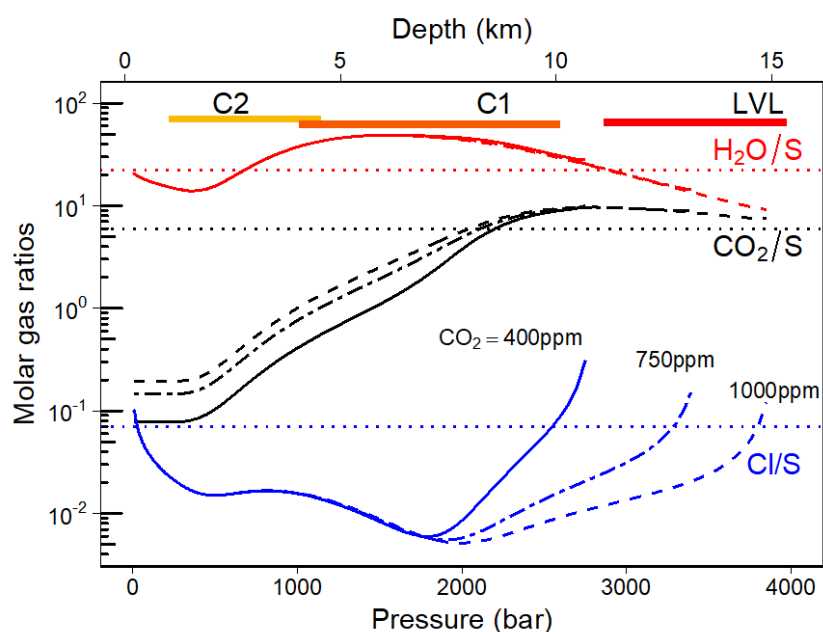


図 16 玄武岩質端成分マグマと平衡な火山ガス組成の圧力変化 (Kawaguchi et al., 2021)²⁵⁾。400 - 1000 ppm CO_2 の場合について求めた。点線は火山ガスの報告値で、高圧成分 A に相当する (Shinohara, 2013²⁶⁾; Shinohara et al., 2018²⁷⁾)。上部のバーは浅部マグマ溜まり (C1, C2) と深部マグマ溜まり (LVL) の圧力範囲を示す。

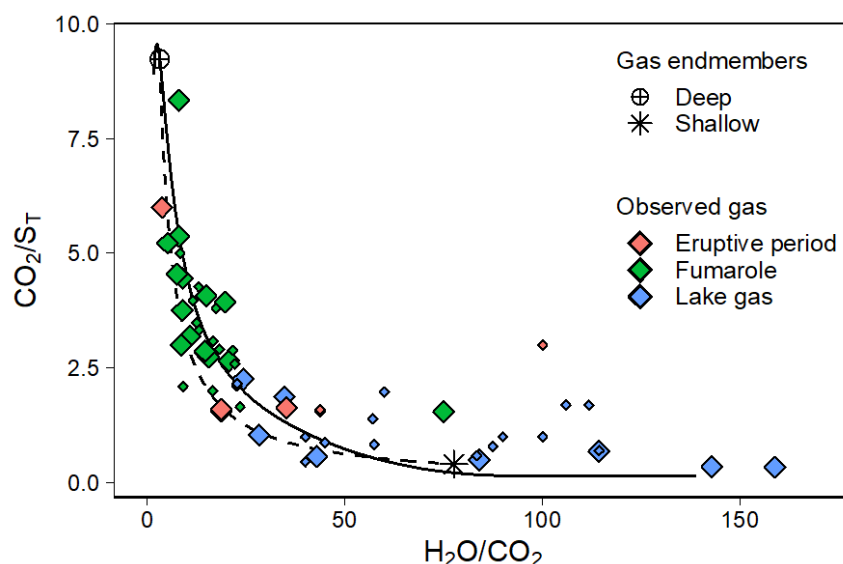


図 17 脱ガスモデルで得られた火山ガスの組成変化（実線および破線）と阿蘇火山における観測結果との比較（Kawaguchi et al., 2021）²⁵⁾。火山ガスの観測データは Shinohara et al. (2018)²⁷⁾ から引用した。実線は閉鎖系での脱ガストレンド（図 16 の 750 ppm CO₂）、破線は深部由来の CO₂ に富むガスと浅部由来ガスの混合線を示す。

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。

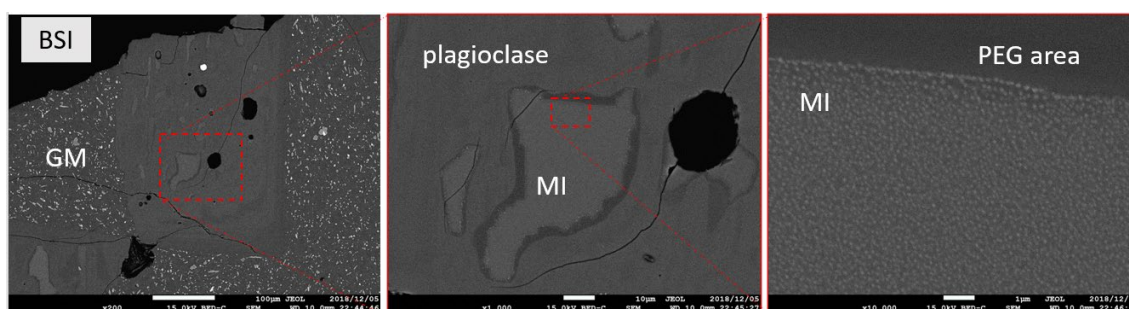


図 18 桜島火山の溶岩質のブルカノ式噴火噴出物に含まれる斜長石斑晶(左)のメルト包有物(中)に見られるナノライト(右)。スケールはそれぞれ 100、10、1 ミクロン

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)。

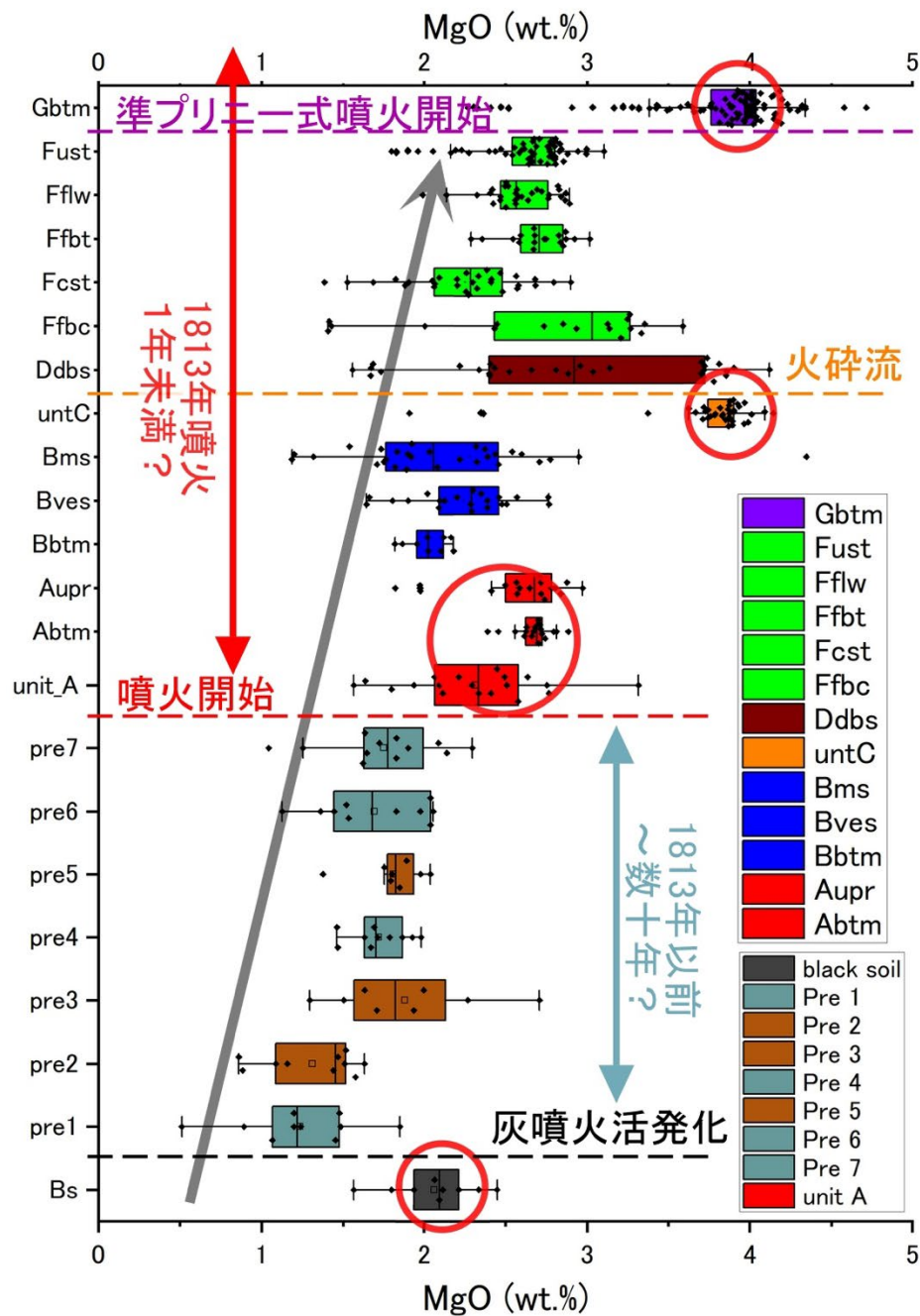


図 19 諏訪之瀬島火山 1813 年噴火前から最盛期までの細分採取噴出物試料の石基ガラス組成変化。期間を通した連続的 MgO 増加だけでなく、噴火現象の変遷に伴って短期間でのパルス的な MgO 上昇が認められる（赤丸）。これらのことは、比較的マフィックなマグマが既存のやや珪長質なマグマにパルス的に注入したこと、長期的には徐々に苦鉄質化が進む中で、注入から注入の間では、浅部での上昇過程の違いによって結晶度の異なる噴出をおこなったことが推察される。

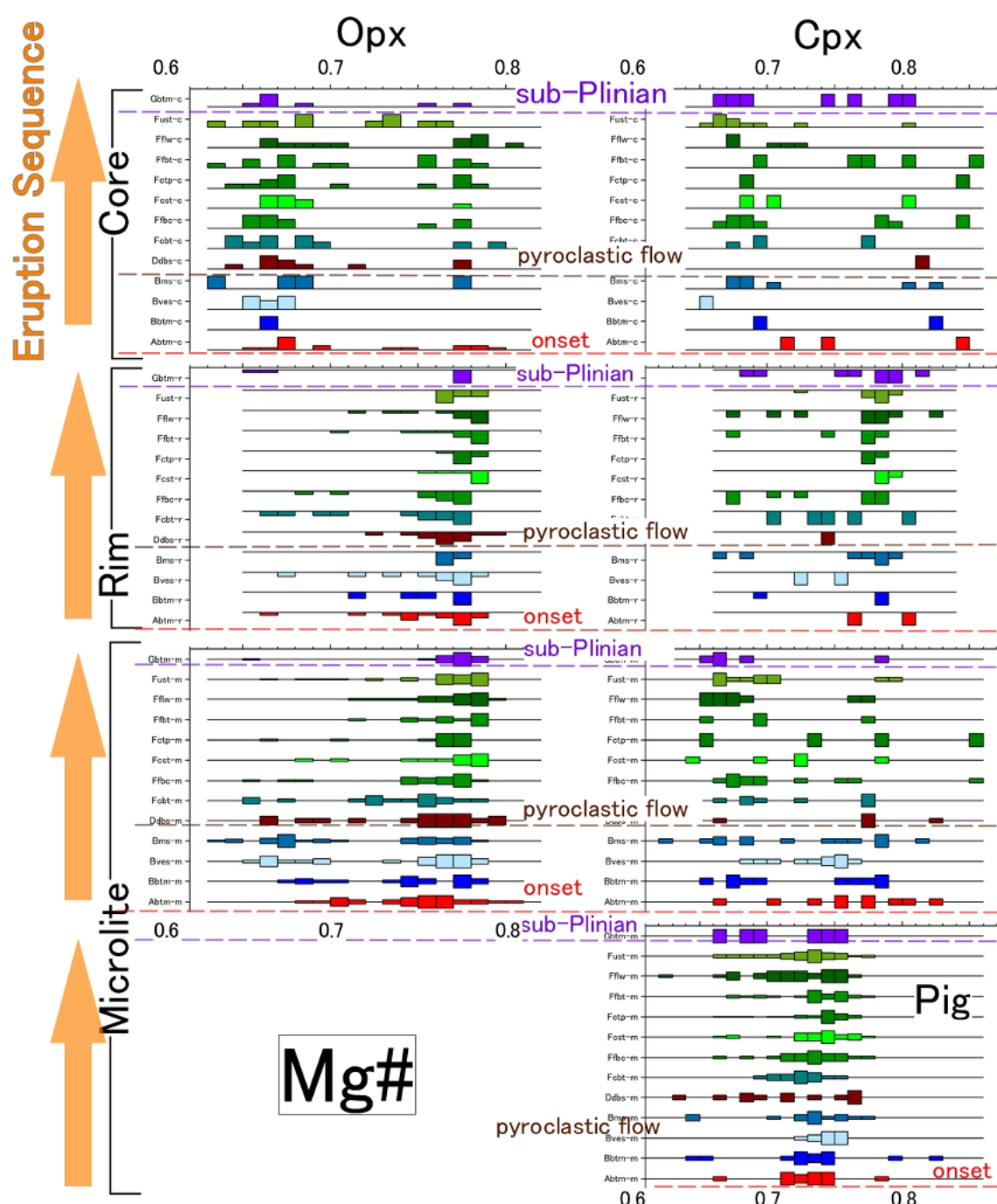


図 20 諏訪之瀬島火山 1813 年噴火開始から最盛期までの細分採取噴出物試料の輝石組成 (Mg #) の変化。両輝石ともコア組成では後半で、リムや石基結晶の組成は前半でバイモーダルな傾向を示す。噴火最盛期に向けて (矢印) 単斜輝石の逆累帯が顕著になっている。直方輝石は期間を通して逆累帯を示すが、最盛期に向けてコアもより Mg # に富む組成の斑晶が増加している。石基結晶も上位に向けて Mg に富む傾向がみられる。噴火の進行に従ってマフィックマグマの珪長質側マグマへの注入が進むと同時に、後半に向かって混合・均質化が進んだことが推察される。

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。

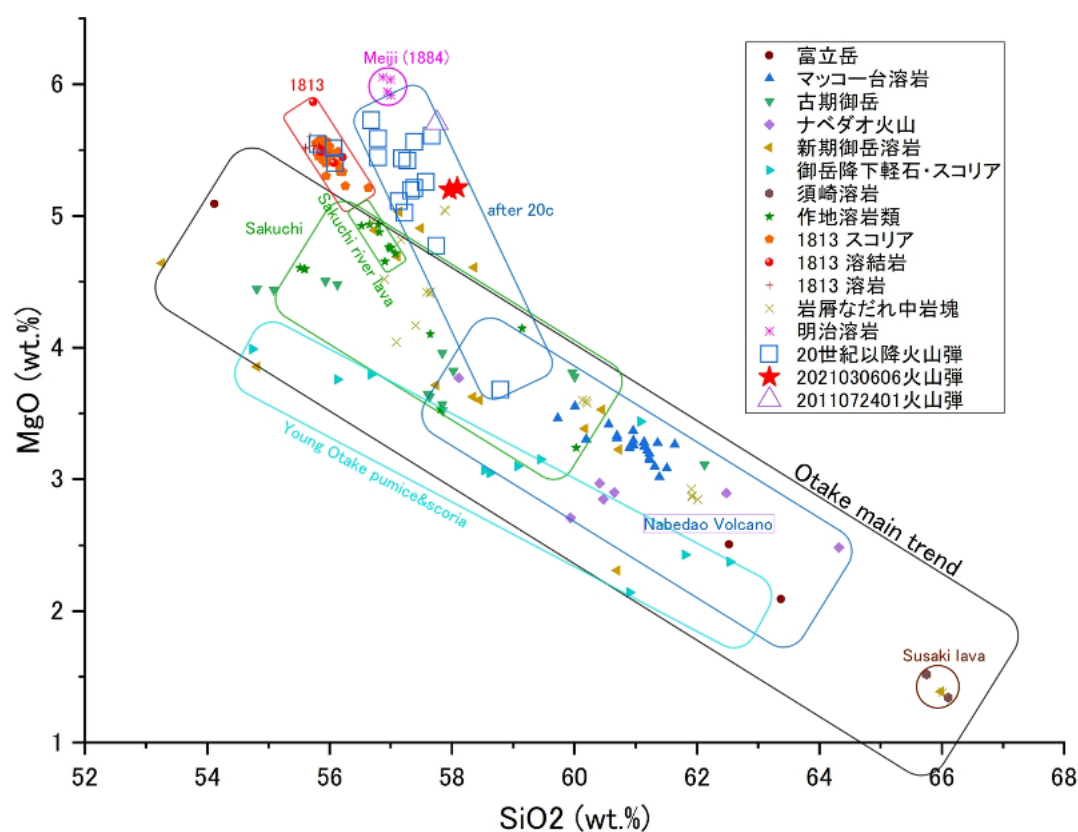


図 21 諏訪之瀬島火山 2020 年 3 月の火山弾全岩化学組成 [★；嶋野, 他(2013)²⁹⁾に加筆修正]。若干 SiO₂ 増加の傾向があるが、概ね 20 世紀以降の噴出物と同様の組成を示している。

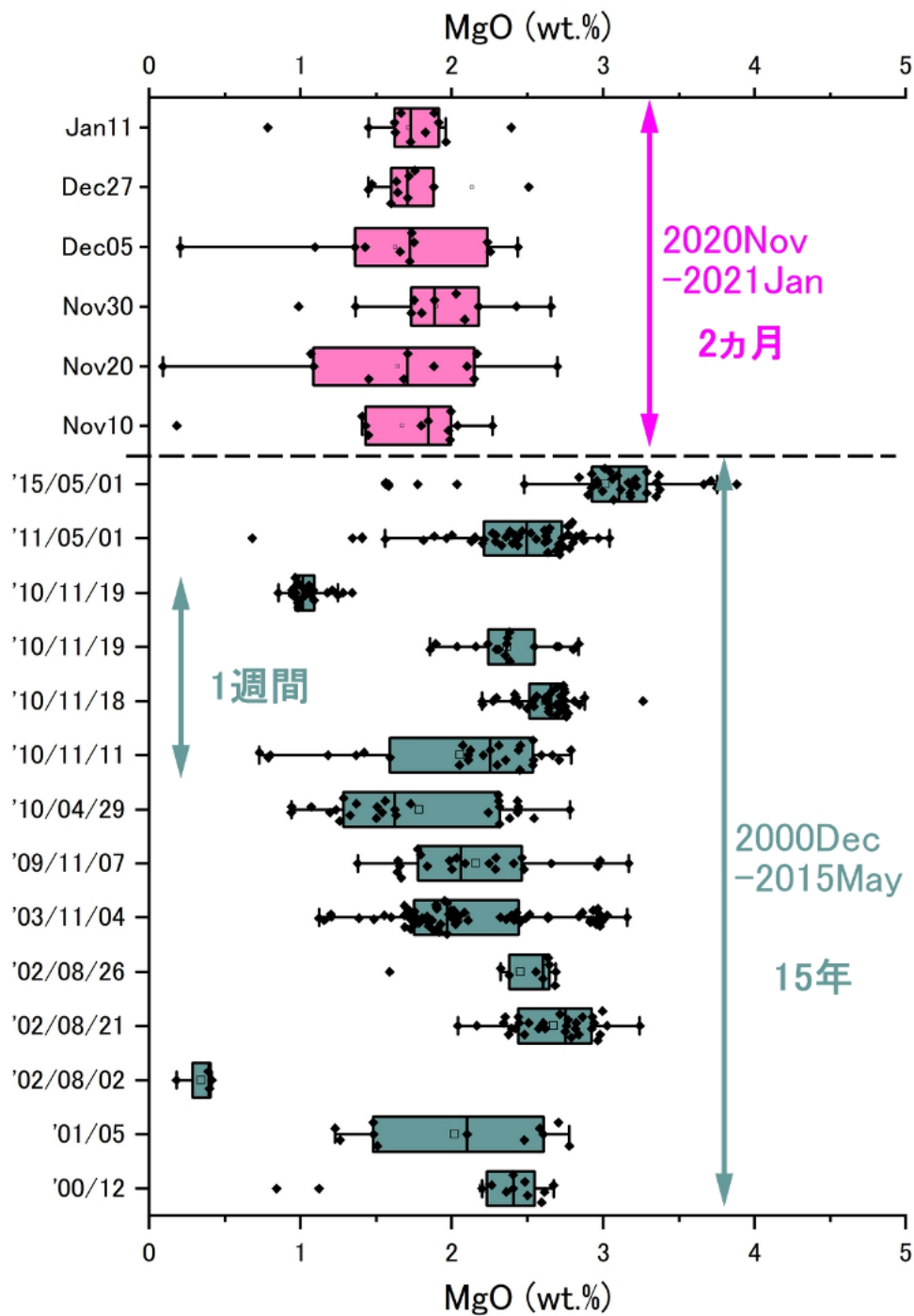


図 22 諏訪之瀬島火山 2020 年末以降および 2000 年以降の噴出物試料（連続試料ではない点留意）の石基ガラス組成の変化。図 19 の 1813 年噴火と比較して系統的または顕著な MgO 増加は認められていない。

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°C 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。

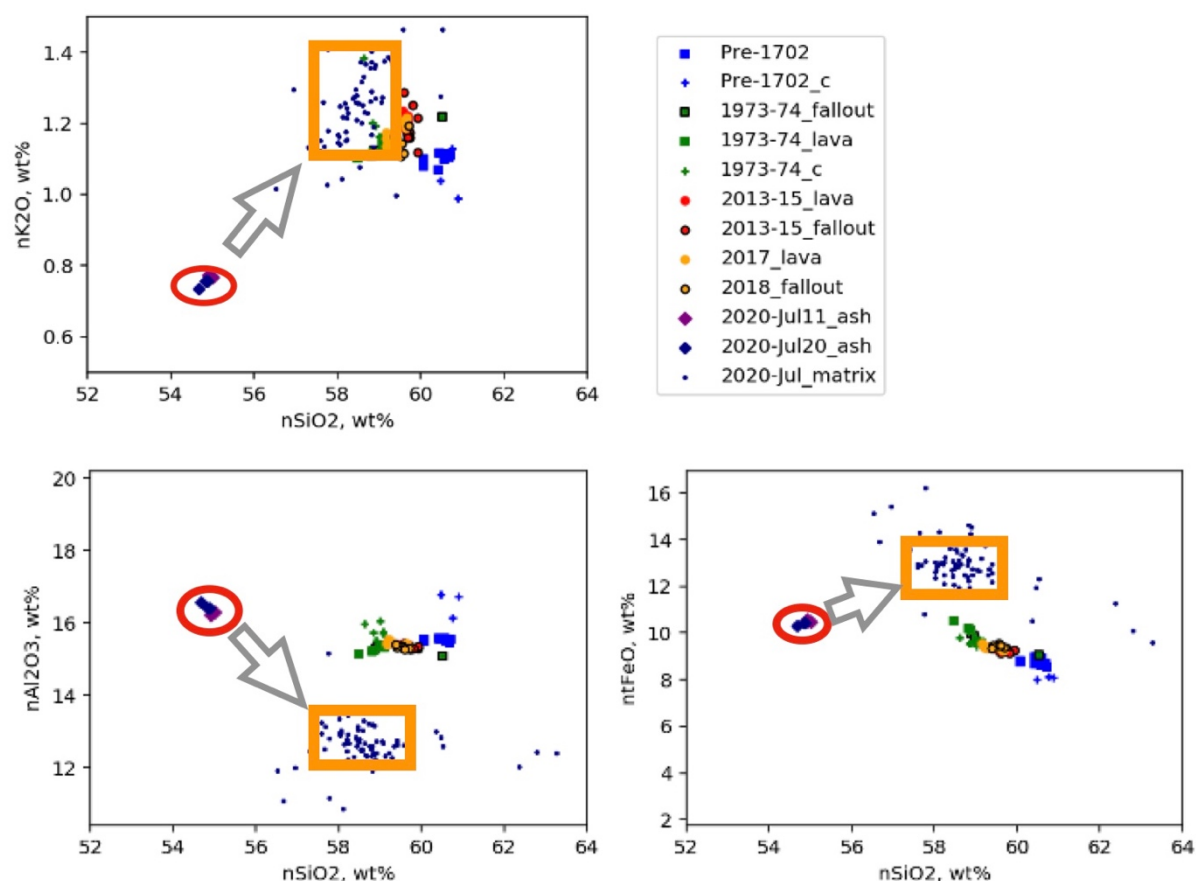


図 23 2020 年西之島噴火の全岩化学組成と石基ガラス組成の比較。2020 年噴火の全岩化学組成は赤丸の範囲であり、これまでの時期の噴出物組成とは大きく異なっている。青小点は 2020 年噴出物の石基ガラス組成で、このような組成範囲（橙色四角）を全岩組成から導ける結晶分化条件を MELTS で検討した。

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。

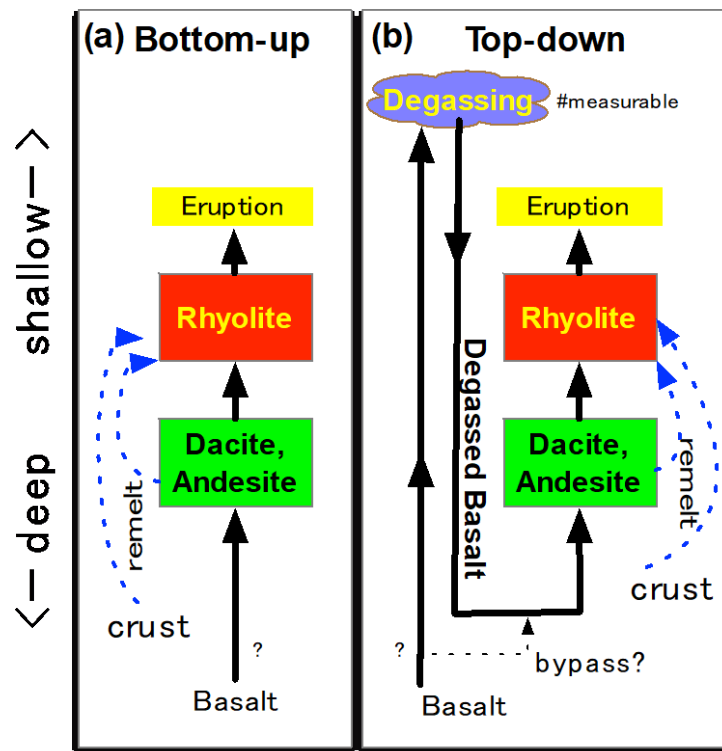


図 24 カルデラ火山の珪長質マグマの起源の概念図 (Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。(a) Bottom-up: 従来の考え方では、マントルから上昇した玄武岩マグマが地殻内で結晶分化するか、周囲の地殻を部分溶融して、珪長質メルトが生ずる。玄武岩マグマは観測者から最も遠いマグマ供給系の底部に注入されるため、量の推定は困難である。(b) Top-down: 新しいアイデアでは、揮発成分に富む玄武岩マグマが地表近くで脱ガスし、地下深くに戻り、結晶分別や地殻の部分溶融によって珪長質メルトを生成する。このアイデアの特徴は、火山ガス放出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

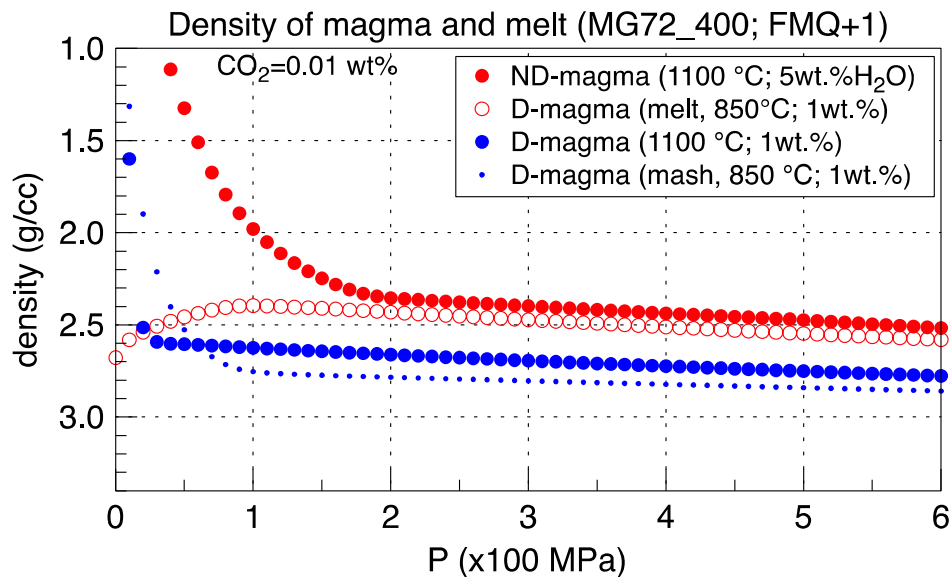


図 25 Rhyolite-MELTS で計算したマグマの密度(Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。別予算でおこなった噴出物の化学分析により、阿蘇カルデラのマグマは 6 つ(A, B, C, D, E, F)に分類された。分類「B」はマントルから供給された高温・高含水量マグマ。分類「D」は B が地表付近で脱ガスして生じる高温・低含水量マグマ。分類「F」は B が脱ガスせずに冷却されて生じる比較的 K₂O に乏しいより珪長質なマグマ。「E」は D が分化して生じる安山岩質なマグマ。「A」は E が更に分化して生じる比較的 K₂O 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。K₂O 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)。

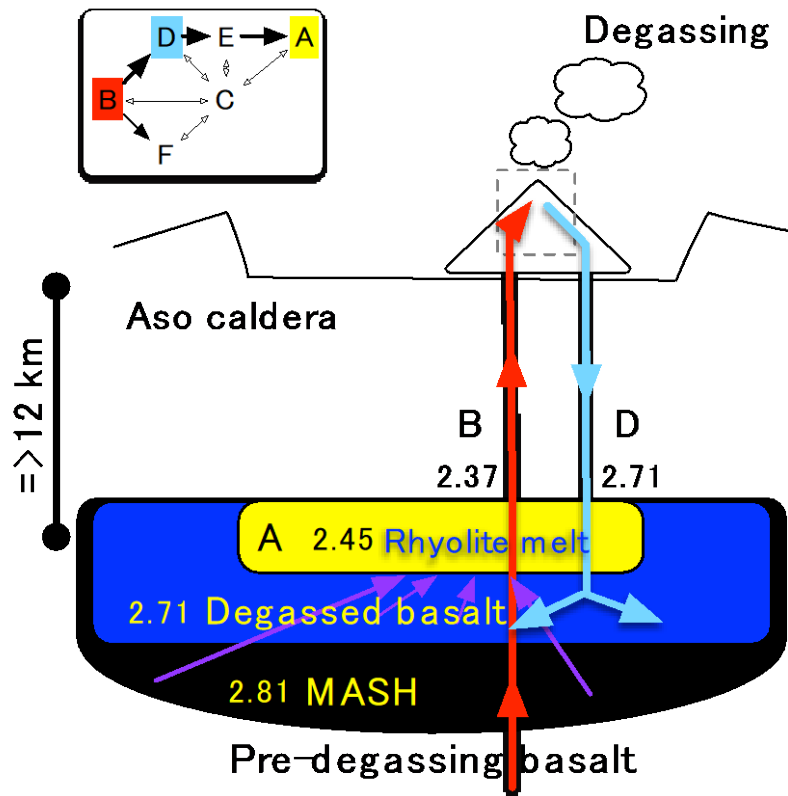


図 26 大規模火砕流噴火前における阿蘇カルデラ下のマグマ供給系の概略図(Miyagi et al., submitted to Journal of Petrology)。「B」は、密度 2.37 g/cc の未脱ガス玄武岩質マグマ(図 25)。「D」は、B から作られた密度 2.71 g/cc の脱ガス玄武岩質マグマ(図 25)。阿蘇 4 で放出された珪長質マグマ「A」を生成するのに必要な脱ガスマグマ「D」は約 2500 立方 km である。この量の脱ガスマグマは、現在の阿蘇中岳で見られるような脱ガス活動が数万年継続することで生じうる。マグマが浅所まで上昇・脱ガス後地下深くに戻るモデルは「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。

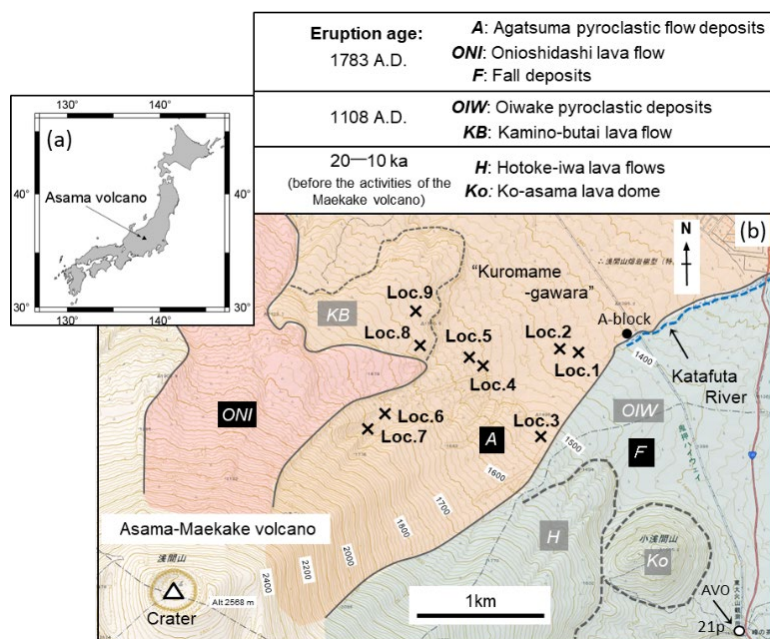


図 27 浅間火山の位置図 (b)前掛山北東部の試料採取地点 (Loc. 1～9)。

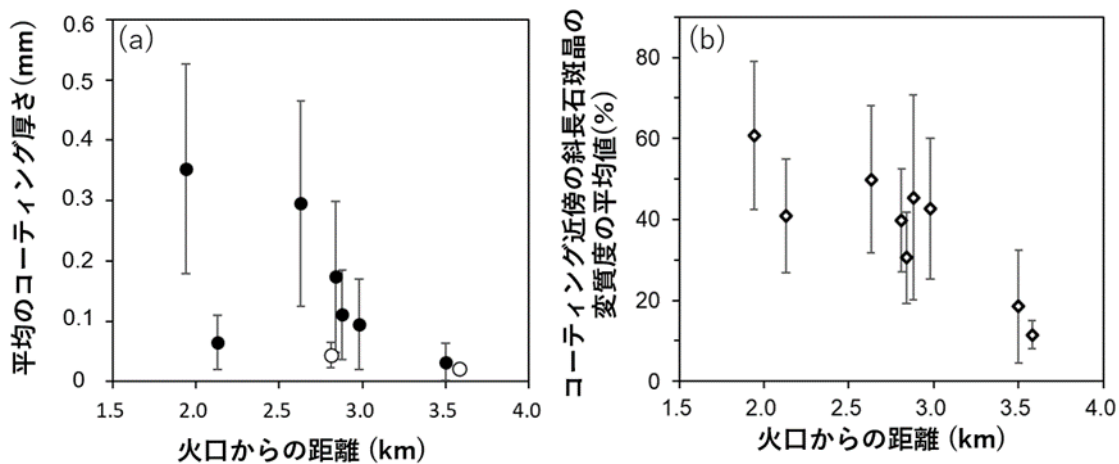


図 28 各試料採取地点における火口からの距離と、シリカコーティングの厚さの平均値 (a)、近傍の斜長石斑晶の変質度の平均値 (b) との関係。火口から遠ざかるにつれてコーティングの厚さや斜長石の変質度が減少し、高濃度火山ガスが約 4 km 東方まで達していたことがわかる。

(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。

2.2 噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

「噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
北海道大学大学院理学研究院	課題責任機関	教授 准教授 助教 技術専門職員	中川 光弘 栗谷 豪 吉村 俊平 松本 亜希子
秋田大学大学院国際資源科学研究科	参加機関	教授	大場 司
秋田大学教育文化学部	参加機関	教授	林 信太郎
山形大学理学部	参加機関	教授 准教授 助教	伴 雅雄 常松 佳恵 井村 匠
茨城大学大学院理工学研究科	参加機関	准教授	長谷川 健
東京大学地震研究所	参加機関	准教授	前野 深
日本大学文理学部地球科学科	参加機関	教授 特任教授 准教授	安井 真也 高橋 正樹 金丸 龍夫
富山大学学術研究部都市デザイン学系	参加機関	教授 准教授	石崎 靖男 川崎 一雄
法人熊本大学くまもと水循環・現在研究教育センター	参加機関	教授	宮縁 育夫
産業技術総合研究所	参加機関	研究部門長 研究グループ長 研究グループ長 研究グループ長 上級主任研	伊藤 順一 石塚 吉浩 下司 信夫 井上 卓彦 宝田 晋治

		究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 研究員 研究員 研究員	石塚 治 川邊 禎久 及川 輝樹 山崎 誠子 古川 竜太 山崎 雅 松本 恵子 南 裕介 有元 純
筑波大学大学院生命環境科学研究科	協力機関	教授	荒川 洋二
山口大学大学院創成科学研究科	協力機関	教授 助教	太田 岳洋 辻 智大
北海道教育大学旭川校	協力機関	准教授	佐藤 鋭一
信州大学理学部地球学コース	協力機関	准教授	斎藤 武士
電力中央研究所	協力機関	主任研究員	上澤 真平
防災科学技術研究所	協力機関	特別研究員	長井 雅史
株式会社エンバイオ・エンジニアリング	協力機関	技術部長	和知 剛

(c) 業務の目的

課題 C の最終目標である「火山噴火予測技術開発」のために、本サブテーマでは、複数の火山について、特に過去の噴火活動を対象とし、以下を実施する。(1) 主として地質学および物質科学的手法により、個々の火山における長期間かつ高精度の噴火履歴を復元する。(2) その成果に基づき高精度の時間－噴出物量図を作成する。(3) 噴出物の物質科学的解析を詳細に行うことで、個々の噴火のマグマの挙動、および長期にわたるマグマ変遷・進化について解明する。そして(2) 時間－噴出物量図と(3) マグマ長期変遷をもとに中長期噴火予測手法の開発を行い、実際に個々の火山で中長期噴火予測を行う。また、個々の噴火についても噴火推移を詳細に明らかにし、個々の火山でできるだけ多くの事例を蓄積することで、事象分岐確率の入った噴火事象系統樹の作成を目指す。さらに、最終的には噴火事象の火山毎の特徴と、共通する事象を明らかにして、火山噴火事象のモデル化に必要なパラメータ、例えば噴出量、噴火推移（噴出率変化）、マグマ物性（組成、斑晶量、温度）などを連携する課題、特に課題 C-1 や課題 C-3 に提供する。また、社会科学などの分野も巻き込み、噴火発生確率の社会への提示方法や活用方法について、検討を行っていく。

(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：

全国各地にある重点火山・最重点火山について、これまでの研究成果の取りまとめと基礎的な地質調査を行い、浅間山についてはトレンチ掘削調査を、南西北海道において浅深度のボーリング掘削を実施した。また、6 火山において次年度のボーリング掘削・トレンチ掘削地点を選定した。そして、気象庁コアをベースとした全国各地の火山の噴火履歴の解明を行った。さらに、大規模噴火データベースの構築に向けて、国内で過去約 15 万年間に発生した「大規模噴火」の噴火推移や噴出物の分布に関する情報を収集した。また、北海道大学では、防災科学技術研究所とともにボーリングコア試料の保管・管理システムの構築準備を行った。さらに、北海道大学の既存施設にフーリエ変換赤外分光光度計を導入し、「マグマ変遷解析センター」を立ち上げ、整備した。

2) 平成 29 年度：

最重点火山の鬼界および浅間山での調査を本格的に開始した。まず鬼界において深深度のボーリング掘削を 2 ヶ年計画で行う予定で、平成 30 年 1 月より掘削を開始した。また、浅間山では山体周辺 10 ヶ所でのトレンチ掘削集中調査を実施した。また、最重点・重点火山を中心とした 4 火山（鳥海山・蔵王山・日光白根山・恵山）について、予察的にトレンチ掘削調査を実施した。その他の最重点・重点火山については、引き続き野外調査を行い、ボーリング掘削およびトレンチ掘削の調査地点を選定した。また重点火山に見落としがないかの検討を全国で実施し、次年度計画に組み込んだ。さらに、海外での噴火事例および噴火事象系統樹との比較研究として、ロシア・カムチャツカのアバチンスキー火山の地質調査を開始した。これら地質調査により得られた高精度噴火履歴に基づいて噴出物を採取し、物質科学的解析を開始する。「マグマ変遷解析センター」では、他機関の研究者・大学院生の利用受け入れを開始した（3 機関 9 名）。また、前年度に導入したフーリエ変換赤外分光光度計に、真空顕微システムを導入して揮発性成分分析システムを完成させた。さらに複数の対象火山の地元において、啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催した。

3) 平成 30 年度：

平成 30 年度は、平成 29 年度までに行った調査結果をもとに、雌阿寒岳・蔵王山・浅間山・阿蘇山においてトレンチ掘削調査を実施し、噴火履歴を詳細に明らかにした。さらに、平成 29 年度でより解析が進んだ浅間山では、東南東麓でのボーリング掘削調査も実施し、テフラの主軸においてトレンチ掘削調査では確認できないより古い堆積物について層序を確立した。鬼界ではボーリング掘削を継続して 330m まで掘削し、先行活動を含めたカルデラ形成噴火全体の履歴を明らかにした。また、有珠山では噴火開始時期および山体崩壊発生時期特定のためにボーリング調査を実施した。その他重点火山については、引き続き地表踏査を中心とした調査を行うとともに、重点火山に見落としがないかの検討を全国で実施した。個々の火山において、噴火履歴や噴火様式の明確な試料について基礎的な物質科学的データを収集するとともに、代表的で重要な試料を選択し、「マグマ変遷解析センター」でより高度な物質科学的データを取得した。また、噴火系統樹の作成に用いる噴火履歴調査として、大規模噴火の活動推移に関するデータを得るために、特に国内外の VEI>5 クラスの噴火の活動推移についてデータ収集を行った。さらに、対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会やトレンチ掘削調査の説明会を開催した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

平成 31 年度（令和元年度）は、平成 30 年度に行った調査結果をもとに、雌阿寒岳・羊蹄山・鳥海山・秋田焼山・蔵王山・新潟焼山・浅間山・日光白根山・草津白根山・白山・御嶽山・阿蘇山において重機またはトレンチ掘削調査を実施し、噴火履歴を詳細に明らかにした。さらに、摩周およびアトサヌプリでは、ボーリング掘削調査を実施し、過去数万年間の噴火履歴解明に着手した。その他の重点火山については、引き続き地表踏査を中心とした調査を行った。また、4 年間の成果を踏まえ、最重点火山・重点火山の見直しを行った。個々の火山において、確立された噴火履歴・噴火推移に基づいて採取された噴出物の基礎的な物質科学的データを取得するとともに、「マグマ変遷解析センター」でより高精度な物質科学的解析を実施した。それらデータより長期マグマ変遷を明らかにし、噴火履歴との関連の検討も進めた。得られた噴火履歴、噴火様式およびマグマの物質科学的性質とその時間変遷についてデータベース化をはかり、可能な火山については時間－噴出量階段図の作成にも着手し始めた。さらに、中長期噴火予測手法および噴火事象系統樹の作成手法について、より研究の進んでいる複数の火山を対象に、試作を通して手法を検討した。また、噴火事象系統樹の作成に用いる噴火履歴調査として、大規模噴火の活動推移に関するデータを得るために、特に国内外の VEI>5 クラスの噴火の活動推移についてデータを収集した。さらに、対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催した。

5) 令和 2 年度：

令和 2 年度は、雌阿寒岳・羊蹄山・秋田焼山・鳥海山・蔵王山・栗駒山・浅間山・草津白根山および志賀火山・白山・阿蘇山において人力トレンチまたは重機トレンチ掘削調査を実施し、噴火履歴および噴火推移を明らかにした。伊豆大島については、沿岸域の地形地質調査も実施し、未知の側火山体の存在などを新たに発見した。アトサヌプリ・有珠山・阿蘇山については、ボーリング掘削調査を行い、長期の噴火履歴と噴火推移を明らかにした。その他の火山についても、引き続き地表踏査を中心とした調査を行った。これら地質調査により得られた高精度噴火履歴に基づいて噴出物を採取し、物質科学的解析を実施した。特に、高精度解析については北海道大学の「マグマ変遷解析センター」で行った。また個々の火山について、これまでの噴火履歴・噴火活動推移履歴をとりまとめ、可能な火山については時間－噴出量階段図の試作を行った。さらに、中長期噴火予測手法および噴火事象系統樹の作成手法について、より研究の進んでいる複数の火山を対象に、試作を通して手法の検討を行った。また、大規模噴火データベースの整備として、歴史時代噴火の推移と、カルデラ形成を伴うクラスの大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめた。そして、大規模噴火データベースの閲覧検索システムのプロトタイプを作成し、主要噴火降下テフラの分布データの GIS 化を進めた。さらに、ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築準備を進め、既存コアの集約を開始した。一方で、対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会の実施は大幅に制限されたが、可能な範囲で開催した。

6) 令和 3 年度：

令和 3 年度は、アトサヌプリ・羊蹄山・十和田・秋田焼山・蔵王山・栗駒山・吾妻山・那須岳・浅間山・伊豆大島・九重山・阿蘇山において人力トレンチまたは重機トレンチ掘

削調査を実施し、噴火履歴および噴火推移を明らかにする。伊豆大島については、沿岸域の地形地質調査も実施し、長期噴火履歴解明を目指す。秋田駒ヶ岳・阿蘇山については、ボーリング掘削調査を行い、火山全体の噴火履歴を明らかにする。その他の火山についても、引き続き地表踏査を中心とした調査を行う。研究の進んでいる火山においては、中長期噴火予測を試行し、噴火事象系統樹の試作を行う。また重点火山に見落としがないかの検討は引き続き全国で実施する。これら地質調査により得られた高精度噴火履歴に基づいて噴出物を採取し、物質科学的解析も実施する。高精度解析を必要とした場合は、北海道大学の「マグマ変遷解析センター」で行う。また個々の火山について、これまでの噴火履歴・噴火活動推移履歴をとりまとめ、可能な火山については時間－噴出量階段図を作成する。さらに、中長期噴火予測手法および噴火事象系統樹の作成手法について、より研究の進んでいる複数の火山を対象に、試作を通して手法の確立を目指す。また、噴火事象系統樹の作成に用いる噴火履歴調査として、大規模噴火について噴火推移文献データの収集を行い、コンパイルした情報から公開用データベースを作成する。国内事例については、先史時代の噴火についての噴火推移解析手法を開発するとともにデータベースへの収録を行う。さらに、対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催する。

7) 令和4年度：

最重点火山では、地表踏査、トレンチ掘削およびボーリング掘削を実施して、噴火履歴および噴火推移を明らかにする。重点火山については、地表踏査を中心とした調査を行い、必要があればトレンチ掘削およびボーリング掘削も実施する。重点火山に見落としがないかの検討は引き続き全国で実施する。さらに、海外での噴火事例および噴火事象系統樹との比較研究を行う。個々の火山において基礎的な物質科学的データを収集するとともに、代表的で重要な試料を選択し、「マグマ変遷解析センター」でより高度な物質科学的データを求める。得られた噴火履歴、噴火様式およびマグマの物質科学的性質とその時間変遷についてデータベース化をはかる。重点火山で研究が進展した火山において、中長期噴火予測を行い、結果を公表する。また噴火事象系統樹の試作を行う。試作した中長期噴火予測と噴火事象系統樹は関係機関や各火山の火山防災協議会に示し、評価を受けて改善点を探る。対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催する。

8) 令和5年度：

最終的に最重点火山および重点火山の見直しを行う。最重点火山では、地表踏査、トレンチ掘削およびボーリング掘削を実施し、噴火履歴および噴火推移を明らかにする。重点火山については、地表踏査を中心とした調査を行い、必要があればトレンチ掘削およびボーリング掘削も実施する。個々の火山において基礎的な物質科学的データを収集するとともに、代表的で重要な試料を選択し、「マグマ変遷解析センター」でより高度な物質科学的データを求める。得られた噴火履歴、噴火様式およびマグマの物質科学的性質とその時間変遷についてデータベース化をはかる。研究が進展した重点火山において、中長期噴火予測を行い、結果を公表する。また噴火事象系統樹の試作を行う。試作した中長期噴火予測と噴火事象系統樹は関係機関や各火山の火山防災協議会に示し、評価を受けて改善点を探る。対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催する。

9) 令和6年度：

最重点火山では、地表踏査に加えてトレンチ掘削およびボーリング掘削を実施し、噴火

履歴および噴火推移を明らかにする。重点火山については、地表踏査を中心とした調査を行い、必要があればトレンチ掘削およびボーリング掘削も実施する。個々の火山において基礎的な物質科学的データを収集するとともに、代表的で重要な試料を選択し、「マグマ変遷解析センター」でより高度な物質科学的データを求める。得られた噴火履歴、噴火様式およびマグマの物質科学的性質とその時間変遷についてデータベース化をはかる。研究が進展した重点火山において、中長期噴火予測を行い、結果を公表する。また噴火事象系統樹の試作を行う。対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を開催する。

10) 令和 7 年度：

研究成果のとりまとめと追加調査および分析を行い、研究成果と、中長期噴火予測と噴火事象系統樹を公表する。参加機関および協力機関の研究者により研究集会を開催し、特に個々の火山の中長期噴火予測と噴火事象系統樹について総括的な議論を行う。そして北海道、東北、関東、中部日本および九州で、中長期噴火予測および噴火事象系統樹に関する公開講演会を行う。また成果物は各火山防災協議会に提供する。

(e) 令和 2 年度業務目的

引き続き、中長期噴火予測および噴火事象系統樹作成のための基礎的データ収集に努める。まず最重点火山および重点火山の摩周・アトサヌプリにおいてボーリング掘削調査により、隣接する両火山の長期噴火履歴と噴火推移を明らかにする。また有珠山では、ボーリング掘削調査により、先歴史時代噴火活動履歴の解明を目指す。そして、阿蘇山でボーリング掘削調査を実施し、中小規模噴火を含めた阿蘇山の最近の噴火活動履歴の詳細を明らかにする。さらに、課題 C 連携研究の対象である伊豆大島については沿岸域の備船調査により海底地形の詳細を明らかにし、山頂噴火だけではなく側噴火を含めた噴火活動履歴の詳細解明を目指す。そして、雌阿寒岳・鳥海山をはじめとする 10 の最重点火山・重点火山について、トレンチ掘削調査を実施し、噴火履歴の解明を目指す。その他の重点火山については次年度以降の重点調査に向けて、引き続き野外調査を行うと共に、ボーリング掘削およびトレンチ掘削の調査地点を選定する。一方、いわゆる見落とし火山の解消のために、特に中部日本の更新世火山について検討を行う。これら地質調査により得られた高精度噴火履歴に基づいて噴出物を採取し、物質科学的解析を行うことで、長期マグマ変遷の解明を目指す。研究が進んでいる対象火山については、噴火事象系統樹の試作や時間一積算噴出量階段図を用いた中長期噴火予測の試行について検討する。「マグマ変遷解析センター」では、引き続き既存装置を整備し、分析ルーチン手法の確立を行うとともに、参加・協力機関の研究者・大学院生の利用を受け入れる。産業技術総合研究所では、大規模噴火の活動推移に関するデータを得るために、海外事例を中心に噴火推移文献データの収集を行い、コンパイルした情報から噴火推移データ集の作成を進める。また、桜島・北海道駒ヶ岳・樽前山などの国内のプリニー式噴火が発生した火山において、噴出物と噴火推移との対応を調査し、先史時代の噴火についての噴火推移とりまとめ方法を検討する。さらに、課題責任機関である北海道大学は、防災科学技術研究所（協力機関）とともに、ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築準備を進める。そして、対象火山の地元において啓蒙および研究成果普及のための講演会を随時開催する。

(2) 令和2年度の成果

(a) 業務の要約

最重点火山および重点火山である摩周・アトサヌプリにおいて、数万年間のテフラ層序の情報を得るためにボーリング掘削を実施し、新たなテフラ層を複数発見した。また、野外調査により約 6,500 年前以降の活動の詳細を明らかにすることができた。阿蘇山では、2019 年以降の噴火対応に加え、ボーリング掘削調査・トレンチ掘削調査を実施し最近の噴火活動履歴の詳細を明らかにした。伊豆大島では、海底地形調査によりこれまでに知られていない海底部の側火山体や溶岩地形を確認することができた。また鳥海山では、野外調査とトレンチ掘削調査を実施し、東鳥海山および西鳥海山の完新世の活動履歴を明らかにするとともに、東鳥海山については噴火事象系統樹に向けた検討を開始した。さらに、活火山として認定されていなかった鷲羽池火山については、完新世のテフラ層を認識し、活火山であることを確認した。その他の重点火山を中心とした活火山についても、トレンチ掘削調査や基礎的な地質調査を行い、噴火活動履歴の詳細を明らかにすることができた。そして、13 火山において次年度のボーリング掘削・トレンチ掘削地点を選定した。また、大規模噴火データベースの整備として、歴史時代の大規模噴火の噴火推移をとりまとめた。そしてカルデラ形成を伴うクラスの大規模噴火については、前駆活動と噴火推移をとりまとめた。さらに大規模噴火データベースの閲覧検索システムの構築を進め、プロトタイプを作成するとともに、90 以上の主要噴火降下テフラの分布データの GIS 化を進めた。また北海道大学の「マグマ変遷解析センター」では、引き続き既存装置の整備および分析手法の確立を行うとともに、参加・協力機関の研究者を受け入れた。さらに北海道大学では、防災科学技術研究所とともにボーリングコア試料の保管・管理システムの構築準備を進め、コア試料の集約を開始した。

(b) 業務の成果

次に今年度の業務の成果について、4 つの研究・検討項目毎に報告する。それらの項目は以下のとおりである。

- 1) 火山の噴火履歴及びマグマ長期変遷に関する研究（大学連合・産業技術総合研究所）
- 2) マグマ変遷解析センターの整備と分析技術開発（北海道大学）
- 3) 大規模噴火データベースの整備（産業技術総合研究所）
- 4) ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築（防災科学技術研究所・北海道大学）
- 5) 課題 C-2 の総合推進および課題 C 全体のとりまとめと研究成果の発信（北海道大学）

1) 火山の噴火履歴及びマグマ長期変遷に関する研究

令和2年度は、最重点火山・重点火山を中心とした全国の活火山において、野外調査、ボーリング掘削・トレンチ掘削調査を実施し、詳細な噴火履歴・噴火活動推移を明らかにした。また、噴火履歴の解明が進んでいる火山については、物質科学的解析も実施し、長期マグマ変遷についても検討した。さらに、次年度掘削調査対象として、13 火山を選定した。以下に、主な成果のあった火山について、その概要を述べる。

a) 摩周・アトサヌプリ火山：ボーリング掘削調査および野外調査による長期噴火活動履歴およびカルデラ形成噴火推移の解明（北海道大学・茨城大学）

i) 野外調査に基づく 7.6 ka 摩周カルデラ形成噴火の噴火活動推移の解明（茨城大学）

○はじめに

北海道東部の摩周火山は、九州の鬼界カルデラに並び、国内の完新世で VEI6 以上の噴火を発生したカルデラ火山である（図 1）。本研究では、摩周カルデラを形成した 7.6 ka の主カルデラ形成噴出物¹⁾の中でも、とくに火砕流堆積物である Ma-f²⁾について地質調査を行い、その分布、層序、および層相変化などを明らかにした。そして、粒度組成や構成物量比などのデータや、含まれる軽石・石質岩片の岩石学のおよび古地磁気学的データを得ることで、高解像度の噴火推移およびカルデラ形成機構を復元した。以下に成果の概要を記す。

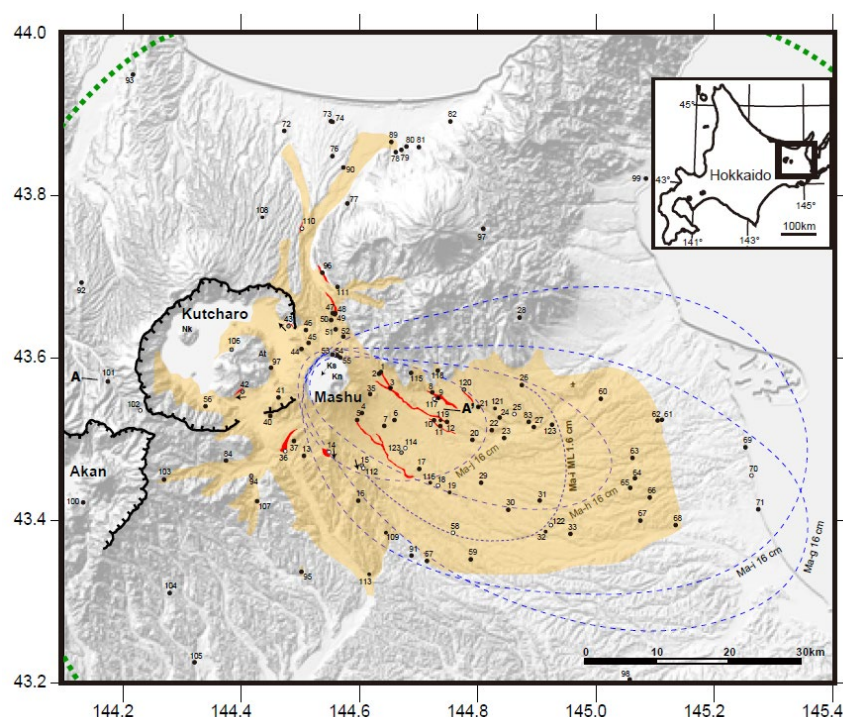


図 1．7.6 ka 主カルデラ形成噴出物の分布。青点線：Ma-i~Ma-g、赤：Ma-f3b、橙：Ma-f3a、緑点線：Ma-f1/2。

○Ma-f の層序と層相

Ma-f について、なるべく従来の名称を踏襲しながら、3つのサブユニット（Ma-f3b・Ma-f3a・Ma-f1/2）に区分した（図 2）。最下位の Ma-f3b は、先行する降下火砕物（下位から Ma-j~Ma-g）を覆う、軽石に富む火砕流堆積物で、摩周カルデラ周囲で谷埋め状に狭く分布する。その上位の Ma-f3a は、デイサイト質の石質岩片を多く含む火砕流堆積物で、地形的な低所で厚く、高所では細粒部を欠き石質岩片に非常に富む比較的薄い層として観察できる（図 3 (a)）。Ma-f1/2 は、北海道東部全域を薄く覆う Low aspect ratio ignimbrite³⁾（以下、LARI）である。弱く成層し上部に向かって軽石／石質岩片の量比が増す Ma-f2 と、それを漸移的に覆う軽石混じりの橙褐色火山灰層 Ma-f1 のセットが Ma-

f1/2 である。Ma-f3a と Ma-f1/2 の間には、火山豆石を伴うシルト質火山灰層 (Ma-Ac) が挟在する場合がある。Ma-j~Ma-g と Ma-f を合わせた総体積は 22.2 km³ と見積もられる。

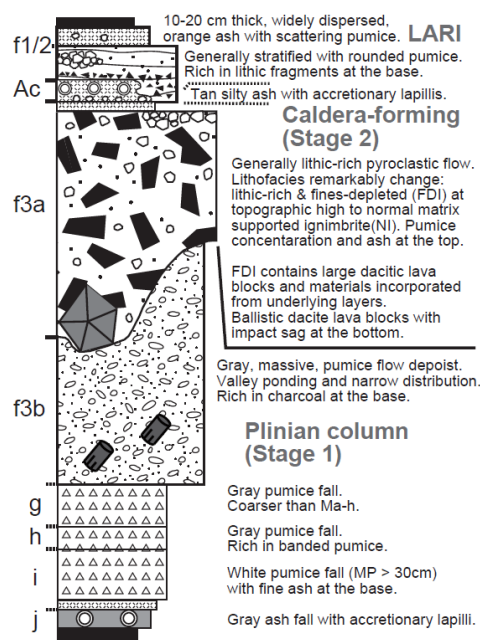


図 2. 7.6 ka 主カルデラ形成噴出物の模式柱状図。

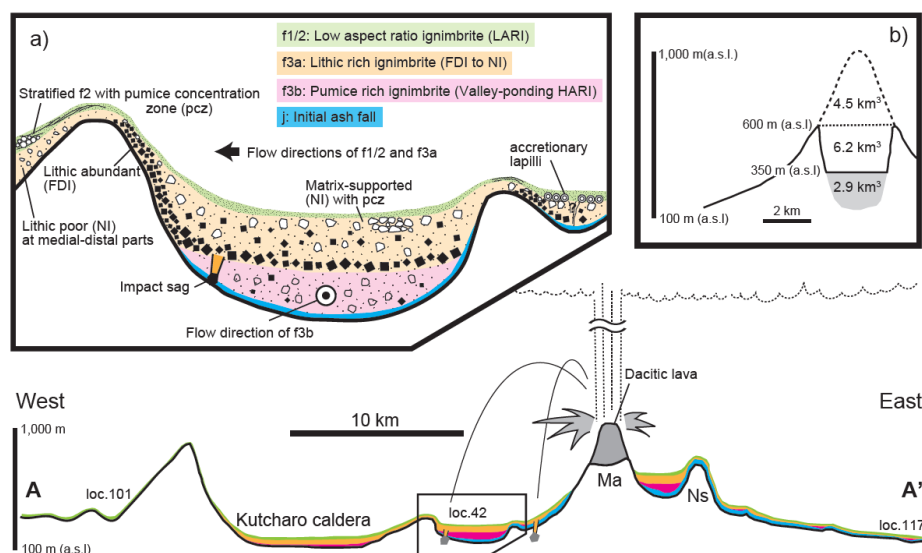


図 3. (a) 7.6 ka 主カルデラ形成噴出物の模式断面図、(b) 山体復元図。

○カルデラ形成機構

7.6 ka 主カルデラ形成噴出物を通して認められる石質岩片はデイサイト質溶岩片であり、全石質岩片の半分以上を占める。これらは、同時に含まれる本質物質である軽石と同じ斑晶鉱物組み合わせを持つが、全岩化学組成が異なる。デイサイト質溶岩片は、特に Ma-f3a 以降で増えるが、その岩石学的特徴は、それより下位の降下軽石 (Ma-i・Ma-g) や火砕流 (Ma-f3b) に含まれるものと区別できない。また、Ma-f3a 基底部に認められる大型のデイサイト質溶岩片の段階熱消磁実験の結果からは、これらが高温定置した証拠は認められ

ない。以上から、デイサイト質溶岩片は、7.6 ka 主カルデラ形成噴火の本質物質ではなく、より前に山体を構成し、噴火時に取り込まれた類質岩片と判断できる。

ユニットごとの構成物量比から、石質岩片の体積を見積もった結果、その総計は 7.8 km^3 であった。石質岩片種の半分がデイサイト質溶岩片であるとする、その体積は 3.9 km^3 となり、そのような大規模なデイサイト溶岩が、カルデラ形成噴火より前に、摩周火山の山体を構成していたことになる。

摩周カルデラの湖底地形は典型的な鍋底状であり、カルデラ床のブロック陥没がカルデラ形成に寄与したことは間違いない。湖水の影響を排除した重力分布から、負の重力異常は認められず、火砕物のフォールバックや火砕流の充填物（カルデラ・フィル）もほとんどないと考えられている⁴⁾。ここで、山体体積と噴出物との収支計算を行う。現在の摩周湖（湖面標高 350 m）の体積は約 2.9 km^3 、カルデラリムをつないだ面（約 30 km^2 、平均標高 600 m）から湖面までの積分体積は約 6.2 km^3 、カルデラリムをつないだ面を底面として標高 1,050 m の円錐形を想定するとその体積は約 4.5 km^3 となり、欠損した総体積はおおよそ 13.6 km^3 となる（図 3 (b)）。一方、噴出物を見ると、前述の通り石質岩片は約 7.8 km^3 （うちデイサイト質岩片が 3.9 km^3 ）である。本質物質の見かけ体積は 14.5 km^3 であり、これを DRE 換算すると 5.8 km^3 となる（見かけ密度 1 g/cm^3 、マグマ密度 2.5 g/cm^3 と仮定）。石質岩片とマグマ（DRE）の体積を合計した 13.6 km^3 は欠損体積と同じ値となる。以上のことから、摩周カルデラの形成では、ブロック陥没も寄与したが、カルデラ形成前に大きな山体があり、これが激しい爆発により吹き飛ばされ、ほとんどの噴出物がカルデラ外に広がった、という特異な過程を経たと結論できる。

ii) ボーリング掘削調査による摩周・アトサヌプリ火山の長期噴火活動履歴の解明（北海道大学・茨城大学）

令和 2 年度は、これまでの野外調査結果およびボーリング掘削調査結果を踏まえ、アトサヌプリ溶岩ドーム群の南麓において、150 m 深のボーリング掘削調査を実施した（図 4）。ここでは、約 5,000 年前に活動したとされるリシリ溶岩ドームを形成した一連の活動の噴出物が最上位に堆積しており、下位の噴出物の保存状態の良いことが期待される地点である。掘削は 2020 年 12 月～1 月にかけて行われた。ボーリングコア試料の詳細な層相記載や地質対比、岩石学的検討については今後作業予定であるが、現時点でのコアの概要を以下に述べる。

深度 0.7～9.4 m は火砕堆積物であり、含まれる軽石や石質岩片の特徴からリシリ火砕流堆積物に対比できる。深度 9.7～39.3 m は主に砂礫からなり、一部に泥流堆積物や火砕堆積物が狭在する。火砕堆積物に含まれる軽石は灰白色～白色を呈し、無斑晶質でスポンジ状に発泡していること等の特徴から、摩周火山起源の可能性がある。深度 40.8～52.1 m は火砕堆積物（降下火砕物及び火砕流堆積物）であり、軽石は灰白色・無斑晶質で、下部にはやや粒径の大きな石質岩片が含まれている（図 5 (a)）。深度 54.7～57.5 m は火砕堆積物の二次堆積物であるが、含まれる軽石は白色でやや斑晶量が多いこと等、その上位（深度 40.8～52.1 m）の火砕堆積物の本質物質の特徴とは異なっている。深度 57.5～104.9 m は主に湖成層または火砕堆積物の二次堆積物からなり、一部に火砕堆積物や砂礫層が狭在する。深度 104.9～150 m は複数の火砕堆積物からなり、層相から火砕堆積物が水中に流

入しで堆積したものと考えられる。特に深度 104.9～110.9 m には粒径が 15 cm をこえる軽石が含まれることから、給源火口近傍であったことが推定される（図 5 (b)・5 (c)）。

コア観察からの予察ではあるが、深度 40.8～52.1 m の火砕堆積物は層相及び記載岩石学的特徴から摩周火山が給源と考えられる。また、深度 104.9～150 m の火砕堆積物は、その特徴からアトサヌプリ火山が給源と考えられ、約 2～3 万年前に噴出したアトサヌプリ火砕流堆積物に対比される可能性がある。

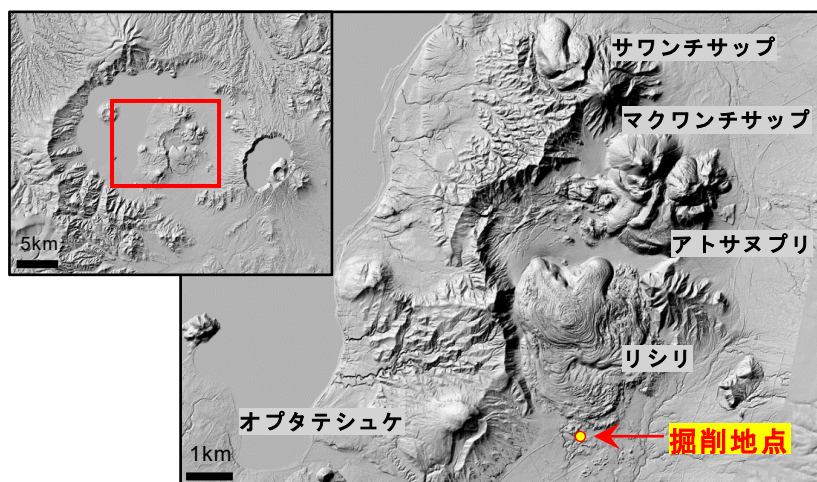


図 4．ボーリング掘削調査地点（ベースマップは国土地理院の陰影起伏図を使用）。

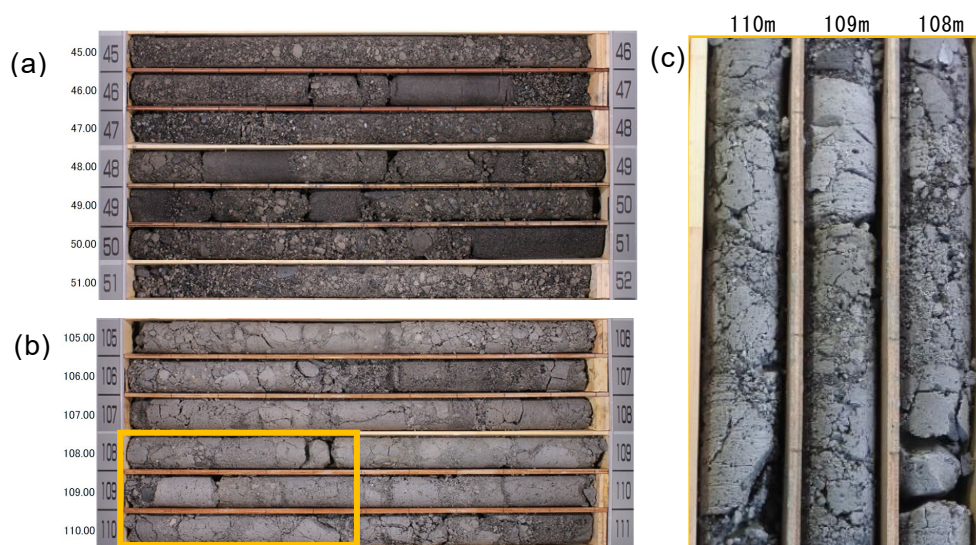


図 5．代表的なコア写真。(a)深度 45～52 m、(b)深度 105～111 m、(c) (b)の拡大写真。

iii) 野外調査に基づくアトサヌプリ過去 6,500 年間の噴火活動の再検討（北海道大学） ○はじめに

アトサヌプリ火山は北海道東部にある活火山であり（図 6）、気象庁の常時監視火山に指定され、地元の火山防災に関する意識も高まっている。一方で、本火山の形成史に関しては古くから研究が行われているが⁵⁾⁶⁾⁷⁾、特に完新世の噴火履歴や噴火様式に関する研究はそれほど行われていない。そこで、我々はアトサヌプリ火山を重点火山として研究を開始した。ここでは 2020 年度の成果として、最近 6,500 年間の噴火履歴に関して新たな知見を得たので、その成果を報告する。

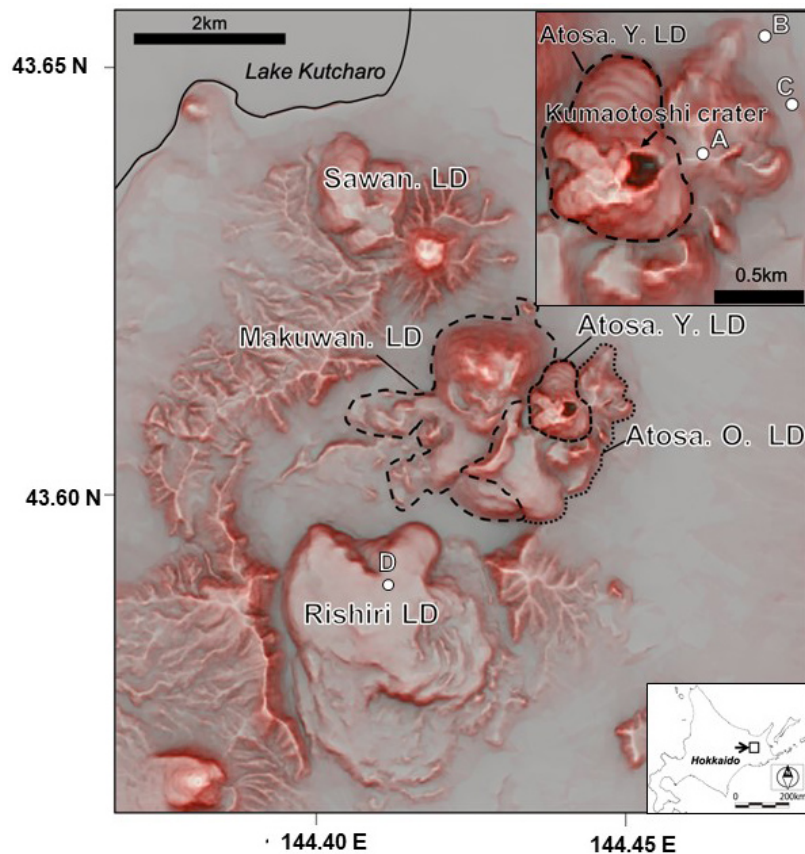


図 6．アトサヌプリ火山の位置と火山体主要部の赤色立体地図（地理院地図 HP より）。右上の地図は新期アトサヌプリ溶岩ドーム（Atosa. Y. LD）の拡大図で、山頂部には熊落とし火口が形成されている。図中の A～D は図 10 の柱状図の場所を示す。

○過去 6,500 年間の噴火履歴の問題点

この火山で、最も新しい溶岩ドームである新期アトサヌプリ溶岩ドームでは、約 1,200 年前に比較的規模の大きな水蒸気噴火が起こり（At-b テフラを放出）、さらに約 400 年前にはドームに径 250 m の熊落とし火口（図 6）を形成した（At-a テフラを放出）、と考えられている⁶⁾⁸⁾⁹⁾。これらの従来の研究に基づく、6,500 年前のリシリ溶岩ドーム形成以降のアトサヌプリ火山の形成史を図 7 に、また At-a と At-b のテフラの等層厚線¹⁰⁾を図 8 に示した。熊落とし火口を形成したとされる At-a テフラの分布は火口周辺に限定されているのに対して、At-b は火口から 10 km 近くまで分布が確認されている。そのことから同じ水蒸気爆発の 2 つのテフラを比較した場合、At-b の方が遥かに大規模である。従って、At-b テフラを放出した噴火では、熊落とし火口よりも大きな火口が形成されたと考えられるが、アトサヌプリ新期溶岩ドームおよびその周辺ドームにはそのような火口地形は認められない（図 6）。上記の事から、At-b で形成された火口は、その後の新期アトサヌプリ溶岩ドーム等で被覆され、その後に 400 年前に熊落とし火口が形成されたと考えられる。

つまり、少なくとも新期アトサヌプリ溶岩ドームは 1,200 年前から 400 年前までの間に形成されたことになる。この期間の溶岩ドーム形成噴火については、これまで特に指摘されていなかったが¹⁰⁾、最近 1,000 年間で比較的高い噴出率でマグマ噴火が起こっていたこ

とになり、防災上も重要な事象となる可能性がある。以上のことから、At-b テフラとその給源火口については検討が必要であると考えられる。

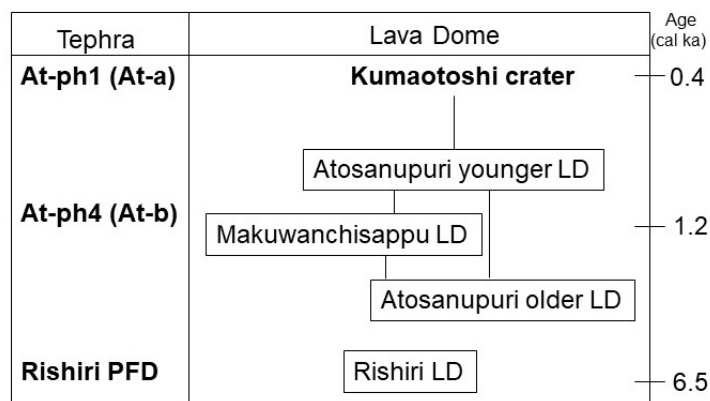


図 7. 従来の研究に基づく、過去 6,500 年間のアトサヌプリの噴火履歴。過去 6,500 年間で最大の At-b については、給源火口が明らかになっていない。テフラ名については長谷川・他⁹⁾による。

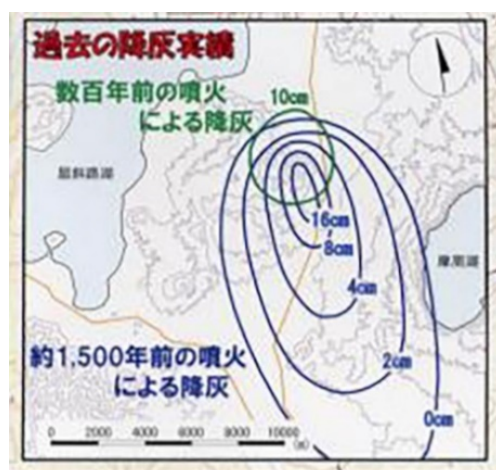


図 8. アトサヌプリハザードマップ¹⁰⁾にある At-b (青線) と At-a (緑線) のアイソパック・マップ。

○熊落とし火口形成時期の再検討

図 9 には代表的な露頭の写真、図 10 には対比柱状図を示した。熊落とし火口から約 300 m の火口近傍の A 地点では、At-b (At-ph4) は、層厚 50 cm 以上となり、最大で径 20 cm に達する岩片を多く含む凝灰角礫岩層となる。そして火口の北東の約 1 km 前後の B および C 地点でも (図 10)、その層厚は 40 cm 以上ある火山礫凝灰岩層となる。一方、At-a (At-ph1) は B・C 地点での層厚は 10 cm 以下であり、熊落とし火口に近い A 地点でも明瞭なテフラ層とは認識することは困難で、表層の土壌層中で白色火山灰まじりの土壌層として認識される程度である (図 10)。この 2 つのテフラの層厚と構成物の粒径の変化を考えると、At-b は熊落とし火口を起源とすると考えられるが、それに対して At-a は熊落とし火口を形成したテフラとは考えられず、ごく小規模のテフラであり、給源火口は不明である。

さらに A 地点での At-b 中の岩片の鏡下観察および全岩化学組成の検討から、溶岩ドームとの対比を行った。新期アトサヌプリ溶岩ドームは、それに先行する古期アトサヌプリ溶岩ドームやマクワンチサップ溶岩ドームと比べると、石英斑晶を含む点と全岩 SiO_2 含有量が多い点で区別される。At-b (At-ph4) 中の岩片は石英斑晶を含み、またその全岩組成は新期アトサヌプリ溶岩ドームと一致する (図 11)。従って、At-b は新期アトサヌプリ溶岩ドームに火口を形成する噴火の産物と判断でき、熊落とし火口を形成したとの結論と調和的である。

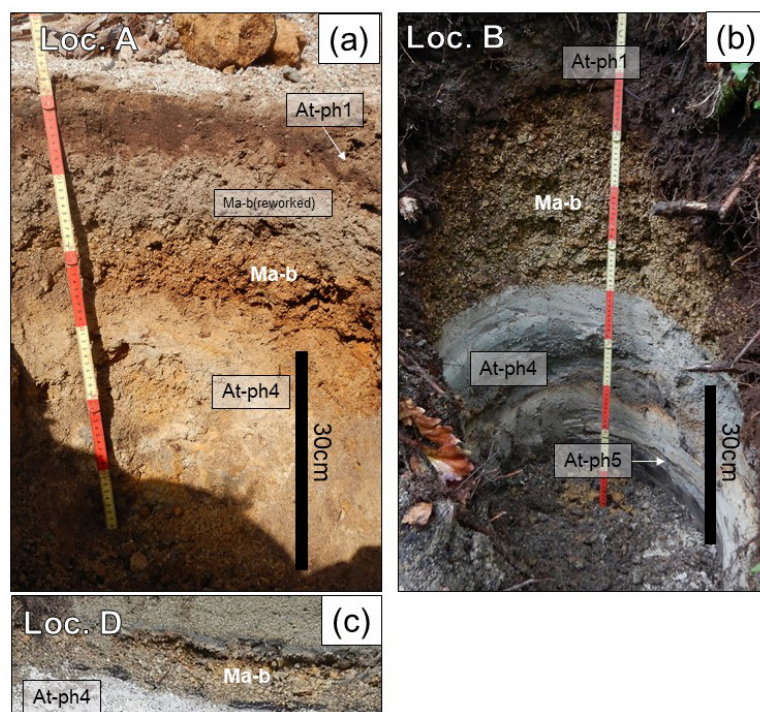


図 9. Loc. A、B および D (図 6) の露頭写真。

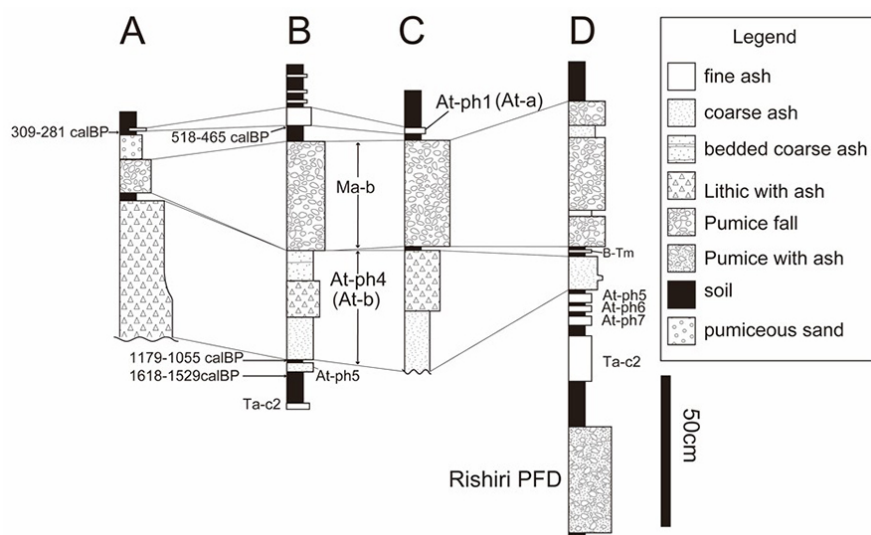


図 10. 新期アトサヌプリ溶岩ドーム周辺地域でのテフラ対比柱状図。A～D 地点は図 6 に示す。

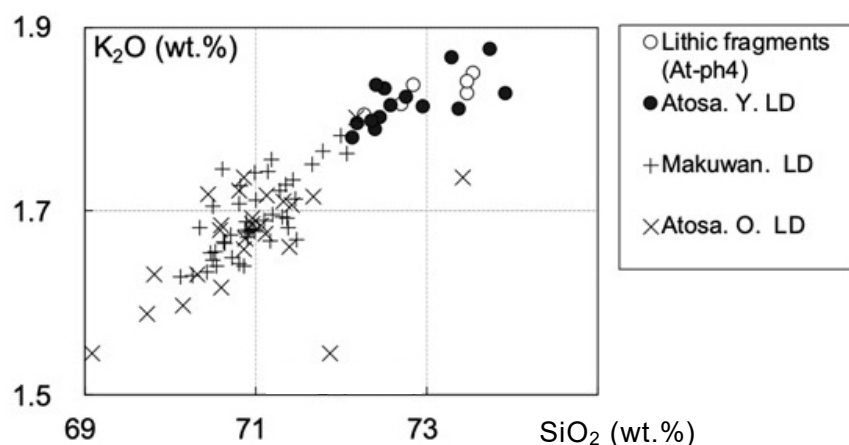


図 1 1 . リシリ溶岩ドームより新しい溶岩ドームと At-b (At-ph4) テフラ中の岩片の SiO_2 - K_2O 図。

○過去 6,500 年間の噴火履歴

今回の検討によって明らかになった、約 6,500 年前のリシリ溶岩ドーム形成以降の活動史を図 1 2 に示した。それによると約 1,200 年前までの 5,000 年間に、古期アトサヌプリ、マクワンチサップそして新期アトサヌプリの 3 つの溶岩ドームが形成されている。その後半の約 2,500 年前からは水蒸気噴火も並行して発生するようになったようで、Atph7~5 の 3 層のテフラが確認されている⁹⁾。そして最大の水蒸気噴火によって熊落とし火口が形成された。その後は At-a を含めて 3 層のテフラが報告されているが、いずれも小規模な水蒸気噴火である。これらは新期アトサヌプリ溶岩ドームでの噴気活動として現在も継続していると考えられる。

今回の検討によって、過去 6,500 年間の噴火活動の変遷は以下のようにまとめられる。まず前半では非爆発的なマグマ噴火により溶岩ドームを形成し、約 2,500 年前からは水蒸気噴火も起こるようになり、1,200 年前に水蒸気噴火としては最大規模の噴火が起こり、熊落とし火口が形成された。その後は、マグマ噴火は発生せず、ごく小規模な水蒸気噴火が散発している。

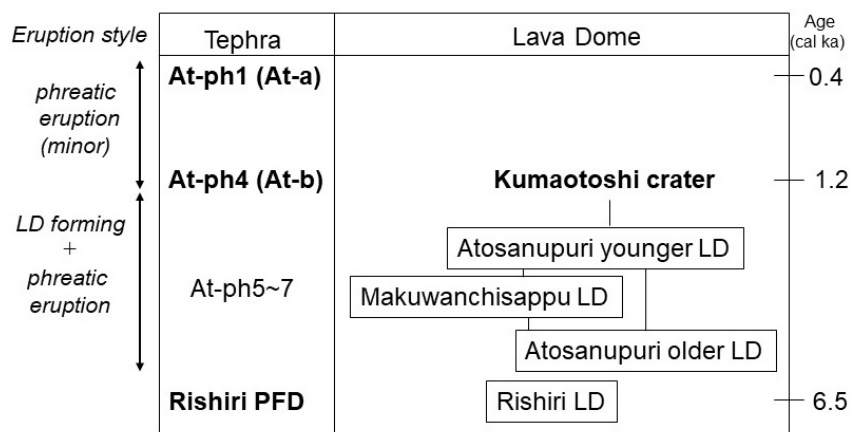


図 1 2 . 本研究による過去 6,500 年間の噴火履歴と噴火様式の変遷。

b) 雌阿寒岳：トレンチ掘削調査および野外調査に基づく噴火活動履歴の解明（北海道教育大学旭川校・産業技術総合研究所・北海道大学）

○はじめに

雌阿寒岳は北海道東部の阿寒火山地域にある活火山である。雌阿寒岳の噴火活動は数万年から開始したと考えられており、その後、少なくとも8箇所の噴出中心から噴火を繰り返し、現在の姿に至った。雌阿寒岳14,000年前以降の噴火史については、地質学的見地からステージⅠ～Ⅲに区分された¹¹⁾。しかし、各ステージを特徴付ける堆積物について、山頂部と山麓部での対比が十分ではなく、また分布についても十分には明らかになっていない。我々は2018年度から通常の地質調査に加え、人力トレンチおよび重機トレンチ調査を行い、¹⁴C年代値を基に14,000年前以降の噴火活動の再検討を行っている。2020年度は通常の地質調査に加え、重機トレンチ調査（2地点）を行った（図1-3）。2020年度に新たに出した¹⁴C年代値を追加し、噴火活動の再検討を行ったので報告する。

○調査結果

2020年度調査では堆積物に挟在する土壌および炭化木片の合計6試料から¹⁴C年代値を得た（表1）。また、重機トレンチ調査で得られた地質柱状図に¹⁴C年代値を含めたものを図1-4に示す。噴出物の層序は、これまで得られたとほぼ同じだが、20ME-1地点（図1-3(b)）では、これまで認識していなかった土石流堆積物を確認することができた。

○調査結果から推定される噴火活動

2020年度の調査結果から特に中マチネシリⅠと最近1,000年間の噴火活動について新たな知見が得られたので以下に記す。

中マチネシリⅠの噴火活動 中マチネシリⅠは火砕流堆積物と降下火砕物からなっている。2019年度の調査では、和田・他¹¹⁾と対比できる露頭の下部の火砕流堆積物中の炭化木片から13,991 calBP-13,745 calBPの¹⁴C年代値が得られており、中マチネシリⅠの活動は約14,000年前に生じた結論づけた。今年度、中マチネシリⅠと対比できる露頭で土壌を挟んで異なる火砕堆積物を認識した。その土壌の¹⁴C年代値は12,485 calBP-12,096 calBPであり（表1の20091601CH2）、土壌より上部の火砕堆積物は約12,000年前の噴火イベントによって堆積したことが分かった。

最近1,000年間の噴火活動 阿寒富士の堆積物の上に数枚の火山灰層が存在し、それらはポンマチネシリ起源の堆積物だと判断できた。それらは3層に分けられ、下部からPon-1・Pon-2・Pon-3とした。Pon-1には広域火山灰Ma-bが含まれることから約1,000年前の噴火であり、Pon-2・Pon-3はそれぞれの堆積物の直下の土壌の¹⁴C年代値から、約700年前、約400年前の噴火と判断した¹²⁾。2019年度の調査で、火口から北西5 kmの山麓で、地上から比較的浅いところに火砕流堆積物を見出し、その直下の土壌から693 calBP-660 calBPの年代値を得た。年代値としては、Pon-2に対比でき、その時期に北西方向に火砕流を流下した可能性が示された¹³⁾。また、今年度の重機トレンチ調査の20ME-1地点（図1-3）で、約400年前を示す土石流堆積物を確認できた（表1・図1-4）。この年代値はPon-3に対応しており、火山活動に誘発される土石流であった可能性もあり、防災上も

重要な知見となった。

○まとめ

2020 年度調査では、2 地点で新たに重機トレンチ調査を行った。これまで認識していた層序とほぼ同じであるが、20ME-1 地点からは約 400 年前の土石流堆積物を認識することができた。雌阿寒岳全体の噴火史については、今後岩石学的検討を加え、さらに詳細に検討する予定である。

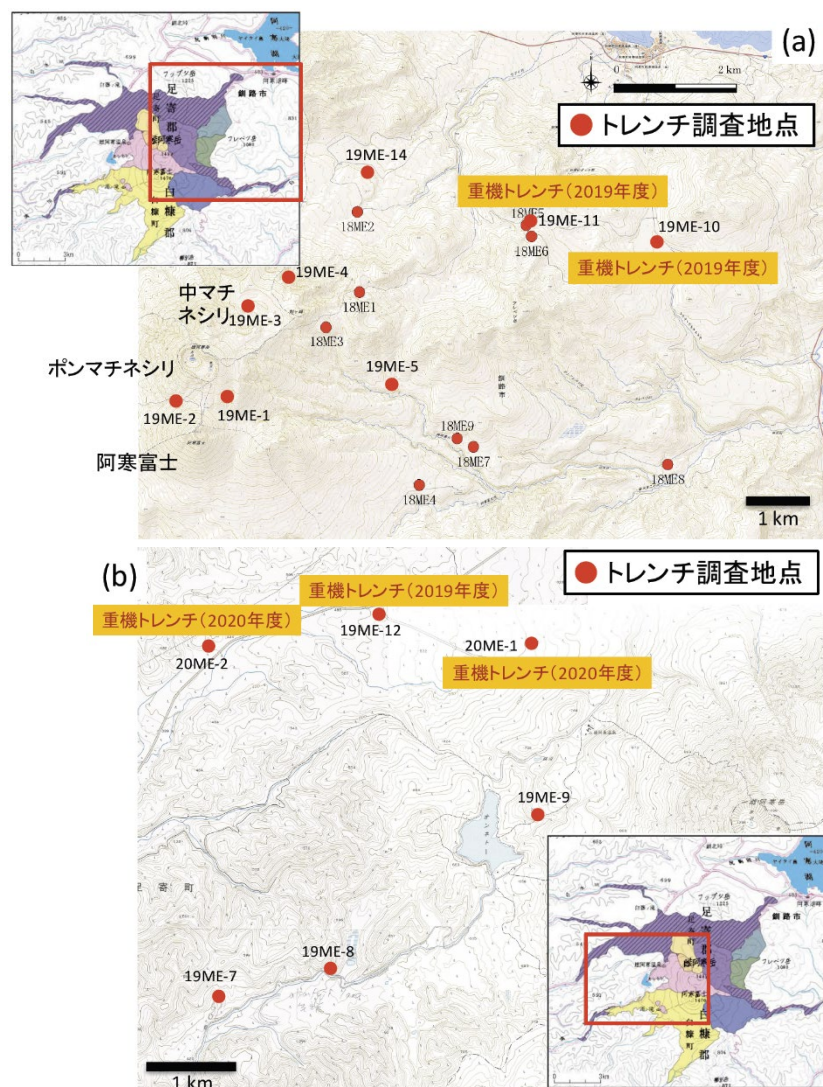


図 1 3. 2018 年度 (18ME～)、2019 年度 (19ME～) および 2020 年度 (20ME～) の人力および重機トレンチ調査地点。(a) 山頂部および東山麓、(b) 西山麓。

表 1. 雌阿寒岳における ^{14}C 年代測定結果。主な試料採取層序は図 1 3 参照。

Sample No.	Sample type	Libby Age (yrBP)	pMC (%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Calendar age (2 σ)
20ME01-C0	charcoal	160 \pm 20	98.03 \pm 0.27	-25.60 \pm 0.22	284calBP-251calBP (16.4%) 229calBP-167calBP (35.1%) 155calBP-136calBP (9.8%) 116calBP-65calBP (13.0%) 41calBP-... (21.2%)
20ME01-C1	charcoal	310 \pm 20	96.18 \pm 0.25	-30.12 \pm 0.21	452calBP-350calBP (75.4%) 336calBP-306calBP (20.1%)
20ME01-C2-1	charcoal	330 \pm 20	95.92 \pm 0.26	-26.81 \pm 0.19	465calBP-313calBP (95.4%)
201890301X1	charcoal	12260 \pm 40	21.73 \pm 0.11	-24.50 \pm 0.22	14781calBP-14730calBP (4.1%) 14330calBP-14065calBP (91.4%)
20091601CH2	soil	10410 \pm 40	27.37 \pm 0.13	-27.11 \pm 0.20	12585calBP-12549calBP (3.4%) 12485calBP-12096calBP (89.8%) 12085calBP-12058calBP (2.2%)
KW71201X	charcoal	9970 \pm 30	28.90 \pm 0.12	-25.03 \pm 0.15	11682calBP-11677calBP (0.4%) 11614calBP-11524calBP (17.5%) 11507calBP-11263calBP (77.5%)

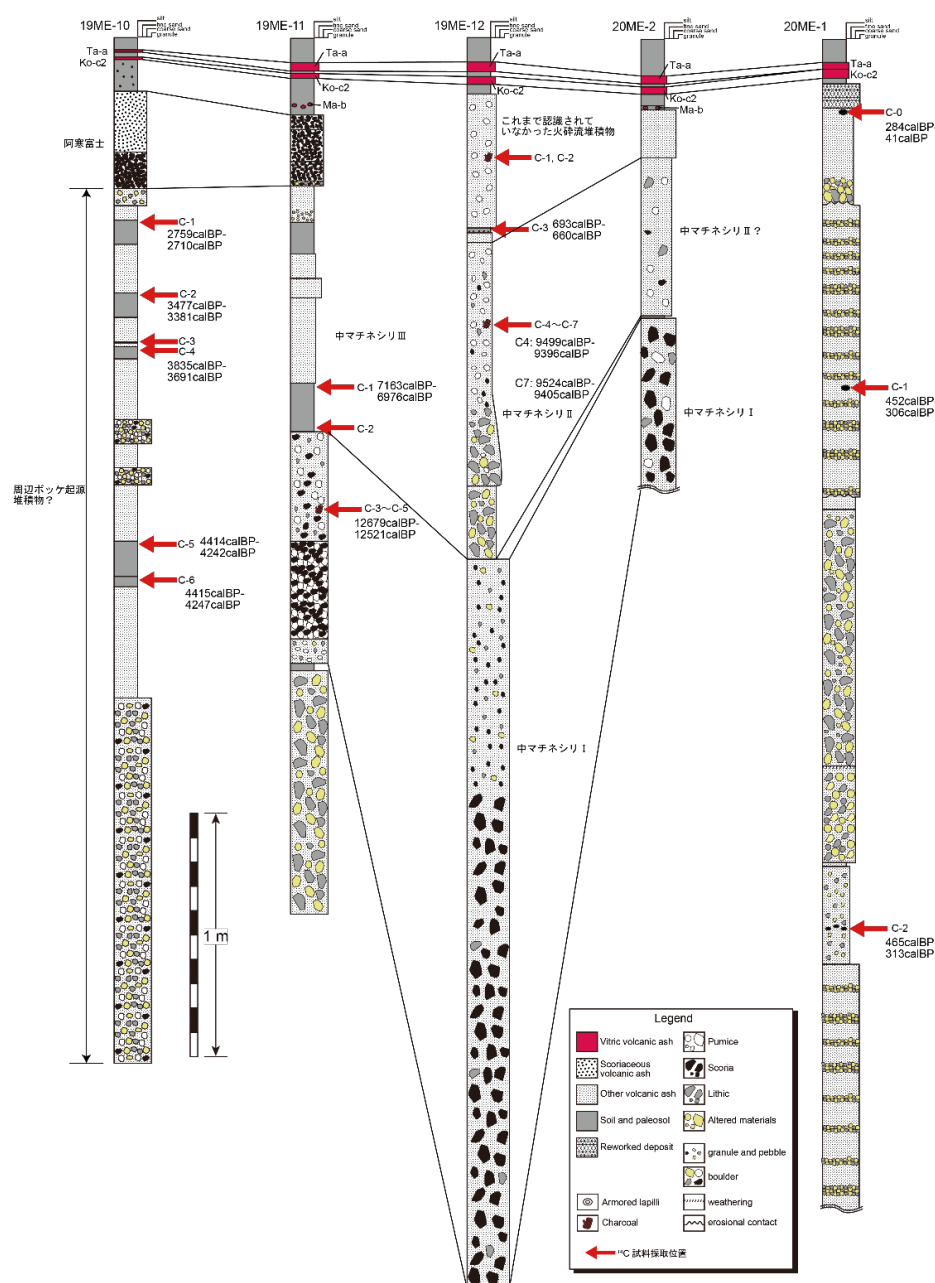


図 1 4. 重機トレンチ調査地点の地質柱状図。

c) 十勝岳：野外調査に基づくヌッカクシ火口域の完新世噴火履歴の解明 （北海道大学）

○はじめに

北海道中央部に位置する十勝岳火山群は、標高 1,400-2,000m の複数の成層火山体および溶岩ドームからなる火山群である。最近 5,000 年間は十勝岳の北西火口域において活動が継続し¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾、20 世紀に 3 回のマグマ噴火を起こしていることから将来噴火が懸念されている。一方でその十勝岳の南部には「ヌッカクシ火口」¹⁶⁾が存在する（図 1 5）。この火口の活動履歴については、過去数千年間に水蒸気噴火があったことが指摘されている¹⁷⁾¹⁸⁾以外は不明な点が多く、今後の課題とされている¹⁶⁾。そこで我々は、ヌッカクシ火口周辺の活動履歴を明らかにするために、赤色立体地図による地形観察および野外調査を実施し、ヌッカクシ火口域全体の活動履歴を明らかにしたので、報告する。

○ヌッカクシ火口域周辺の地形

ヌッカクシ火口は、十勝岳北西火口域のような明瞭な火口地形は示さず、崩壊・侵食が進んでいる（図 1 5）。ヌッカクシ火口の周辺には、崩壊地形と思われる三峰山北火口および振子沢火口が隣接している。被覆関係をみると、この三峰山北火口を覆うように三段山溶岩類が分布し、それらを切るようにヌッカクシ火口および振子沢火口が存在している。これら火口内では、崩壊に伴う斜面地形が主体である。また、ヌッカクシ火口の西側のヌッカクシ富良野川沿いおよび三段山北斜面には明らかに新鮮な崩壊地形が認められる。さらに、三段山西山麓および上富良野岳山頂付近に明瞭な噴火口地形も確認できる。

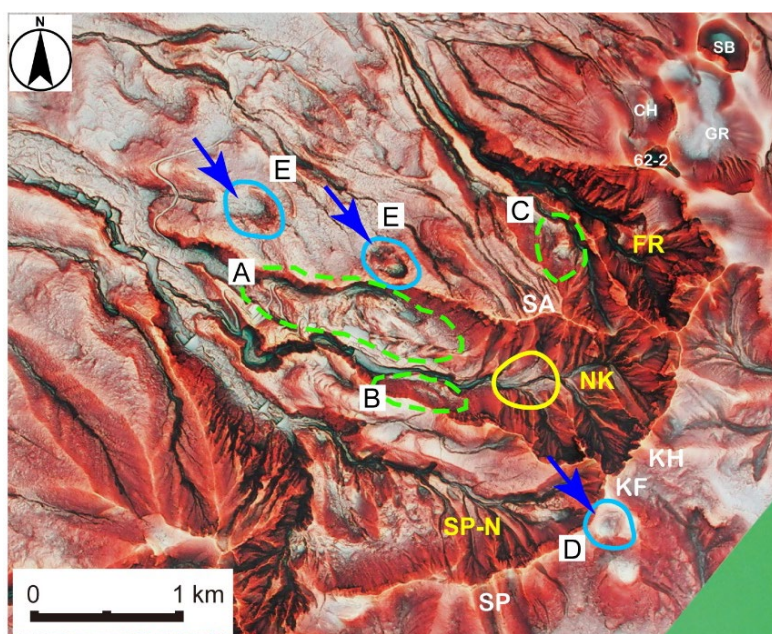


図 1 5．ヌッカクシ火口域の赤色立体地図（アジア航測株式会社制作・国土交通省北海道開発局旭川開発建設部治水課提供）。SA：三段山、KH：上ホロカメットク山、KF：上富良野岳、SP：三峰山、FR：振子沢火口、NK：ヌッカクシ火口、SP-N：三峰山北火口、GR：グラウンド火口、CH：中央火口、SB：播鉢火口、62-2：62-2 火口。矢印は火口地形を、緑（破線）は流れ山地すべり地形を、黄色（実線）は現在のヌッカクシ火口内の噴気地帯の中心部を示す。

○テフラ層序

ヌッカクシ富良野川沿い、三段山登山道沿いおよび上ホロカメットク山登山道沿いについて、野外調査を実施した。その結果、完新世のテフラを 11 層確認することができた（図 1 6）。それらのうち、ヌッカクシ火口域由来と判断されたものは 8 層である。この 8 層について、下位から NK-1 から NK-8 と命名し、下位よりその概要を記述する。

NK-1（模式地：地点 15） 上ホロカメットク山登山道沿いに分布しており、模式地の地点 15 においては、層厚約 60 cm 以上の降下火砕物および火砕流堆積物の互層として観察される（図 1 7(a)）。NK-1 は岩相や粒径の違いから、下位より降下火砕物ユニット・火砕流堆積物ユニット・降下火砕物ユニットの 3 つのサブユニットに区分される。全てのユニットでスコリア（および軽石）が確認できるが、火砕流堆積物ユニットにはこぶし大サイズで含まれる特徴がある。直上の土壌から、6,655-6,486 calBP（暦年較正年代 2σ ：以下同じ）の放射性炭素年代値が得られていることから、完新世の活動（約 7,000 年前程度）であると考えられる。本層は新鮮なマグマ物質が比較的多く含まれることから、マグマ噴火またはマグマ水蒸気噴火による降下火砕物および火砕流堆積物であると考えられる。本層に含まれるスコリア・軽石は、直方輝石単斜輝石かんらん石玄武岩～安山岩であり、全岩化学組成は十勝岳北西火口域のマグマ物質のいずれとも一致しない。分布および推定噴出年代を考えると、本層の給源はヌッカクシ火口域の南部（ヌッカクシ火口または上富良野岳火口）である可能性が高い。

NK-2（模式地：地点 17） 上ホロカメットク山登山道沿いに分布しており、模式地の地点 17 において、NK-1 の再堆積層の上位に約 25 cm の土壌を挟んで約 40 cm の厚さで堆積している白色～褐色の火山灰層および火山礫層の互層である。NK-2 は粒径および構成物の違いより、4 枚のサブユニットに区分される。下位より白色粘土質火山灰層、側方向への層厚変化や斜交層理が認められる灰色火山灰層、粘土質火山灰が粒間を埋める 2 層の褐色火山礫層である。構成物は、上位になるほど変質岩片が減少し黒色弱変質岩片およびスコリアが増加する。このスコリアは、直方輝石単斜輝石かんらん石玄武岩質安山岩であり、NK-1 中のスコリアと類似している。直下の土壌の放射性炭素年代値は、3,830-3,642 calBP である。粘土質火山灰が粒間を埋めていること、少量のスコリアが含まれることから、マグマ水蒸気噴火による降下火砕物および火砕サージ堆積物であると判断される。ヌッカクシ火口に近い方が厚くなっており、ヌッカクシ火口が給源であると考えられる。

NK-3（模式地：地点 2） 三段山登山道沿いの標高 1,100 m より低い地点で認められた白色火山礫凝灰岩層である。本層は、基質支持構造を示し、模式地では粒径の違いにより 5 枚のサブユニットに区分される。構成物は、亜角礫の白色変質岩片が大半を占めており、新鮮な岩片やガラス片は認められない。基質は白色～黄褐色粘土質シルトからなる。地点 1・2 において、直下の土壌より 2,850-2,755 calBP および 2,935-2,780 calBP の放射性炭素年代値が得られている。白色変質岩片を主体とする基質支持の堆積物であることから、水蒸気噴火によるラハール堆積物（火山泥流堆積物）であると考えられる。噴火年代は約 2,810 年前と推定され、既知の北西火口域由来の堆積物に該当するものは報告されていない。振子沢火口に近い地点で層厚が厚くなることから、振子沢火口付近を起源とする堆積物であると推測される。

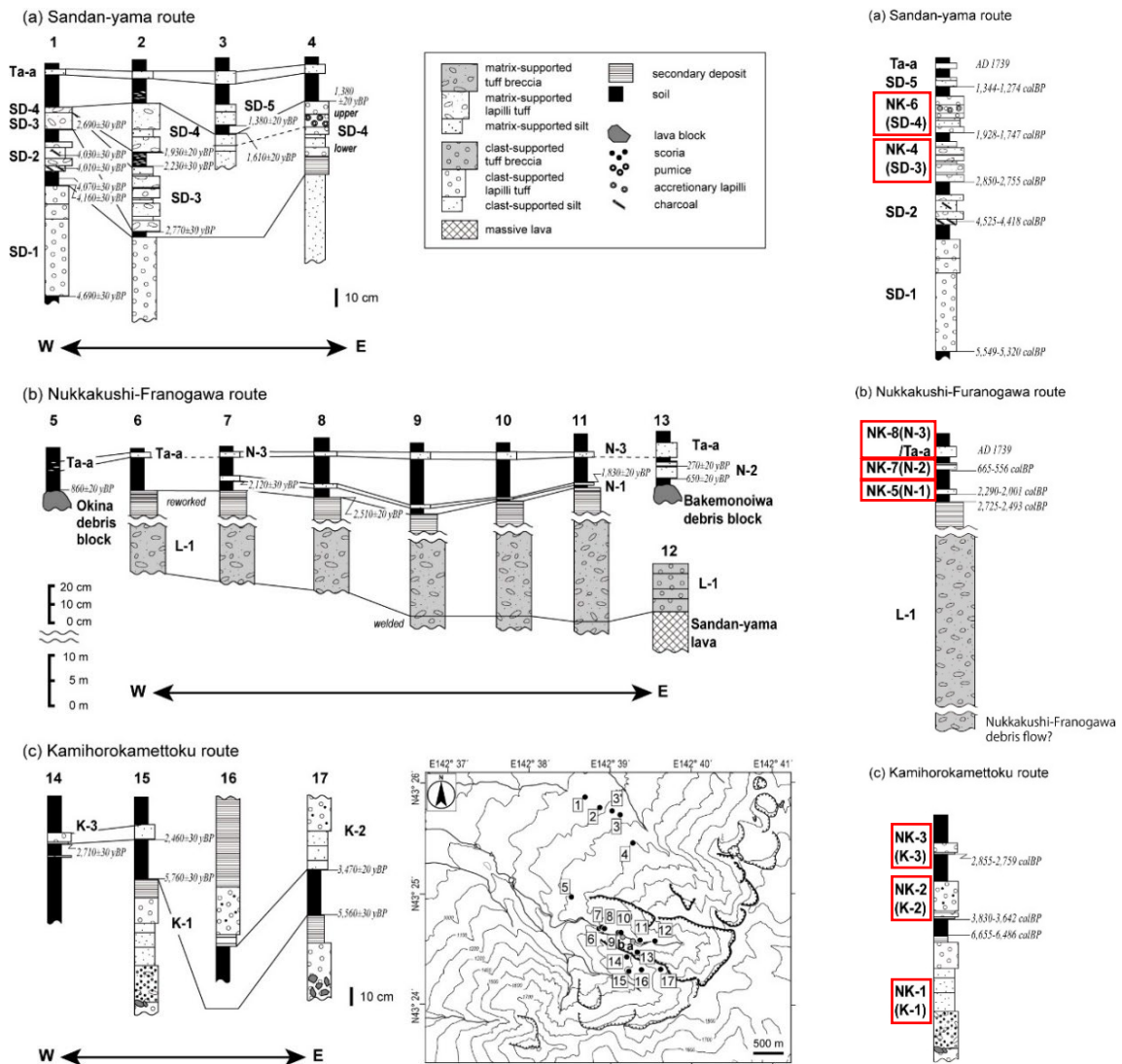


図 16. 本研究によるヌッカキシ火口域周辺のテフラの対比柱状図(左)と総合柱状図(右)。

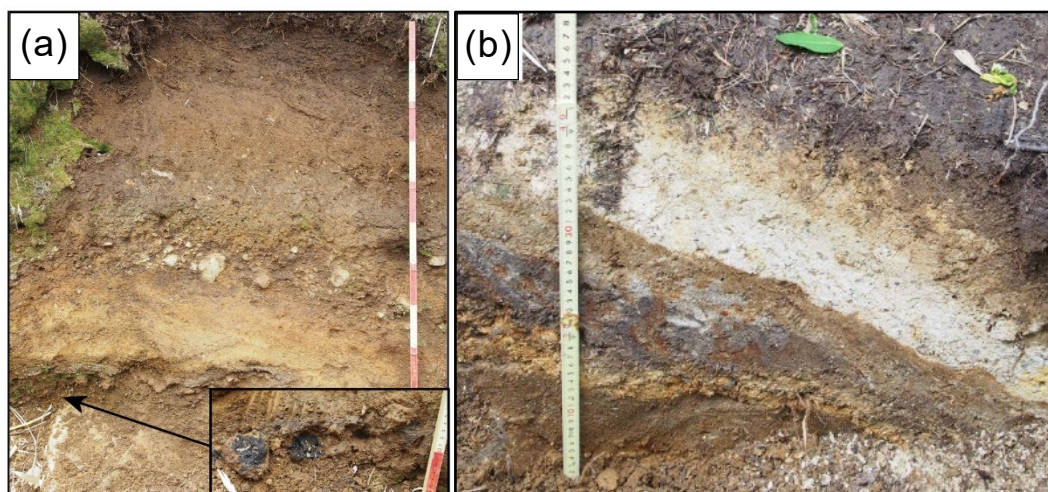


図 17. 代表的なテフラの露頭写真。(a) NK-1 テフラ (約 7 千年前)、(b) NK-6 テフラ (約 1.8 千年前)。

NK-4 (模式地：地点 14) 上ホロカメットク山登山道沿いで、表層から約 20 cm 下位に認められる火山灰層である。本層は、下位の白色粘土質火山灰層と上位の褐色～灰色粘土質火山灰層からなる。いずれも淘汰がよく、白色～褐色変質岩片主体で粘土質火山灰にコーティングされている。直下の土壌から 2,855-2,759 calBP および 2,705-2,367 calBP の放射性炭素年代値が得られた。新鮮なマグマ物質を含まないことから水蒸気噴火による降下火山灰堆積物であると考えられる。給源は不明であるが、規模が小さいことから産出地点に近いヌッカクシ火口と考えるのが妥当である。

NK-5 (模式地：地点 7) ヌッカクシ火口遊歩道沿いに認められる白色粘土質火山灰層である。水平方向の連続性は悪く、レンズ状に連なる産状が多い。模式地の地点 7 では層厚 3 cm で、ヌッカクシ火口に近づくにつれ、薄くなる傾向がある。構成物は白色変質岩片が主体で、マグマ物質は含まれない。直下および直上の土壌から、それぞれ 2,154-2,004 calBP および 1,824-1,708 calBP の放射性炭素年代値が得られている。これらの産状より、NK-5 は水蒸気噴火による降下火山灰堆積物であると考えられる。地点 7 付近で粗粒になり層厚も大きくなること、三段山西麓には明瞭な噴火口地形が確認できることから、この火口が給源である可能性は高い。

NK-6 (模式地：地点 4) 三段山登山道沿いで確認される色調の異なる火山礫凝灰岩層および火山灰層の互層であり、模式地（地点 4）では累層厚約 30 cm で堆積している（図 17 (b)）。本層は火山灰層の色調から大きく 2 つのユニットに区分できる。下部ユニットは、下位より黄褐色火山礫層、灰色火山礫層、灰色シルト質火山灰層、そして褐色火山灰層の 4 層から構成され、いずれも礫支持構造を示す。上部ユニットは、下位の白色火山礫凝灰岩層と上位の褐色火山礫凝灰岩層の 2 層からなり、下位層には火山豆石が特徴的に含まれる。振子沢火口に近い地点 3・4 では、下部および上部ユニットの各層は淘汰が良く、礫支持構造を持つ。一方、振子沢火口から離れた地点 1・2 においては、上部ユニットのみ観察され、基質支持の白色～褐色火山礫凝灰岩層に変化する。下部ユニットは、最下層の黄褐色火山礫層ではごく僅かにスコリアが認められる程度であるが、その上位の灰色火山礫層ではスコリアの割合が増加する。上部ユニットでは、下位の白色火山礫凝灰岩層は白色変質岩片が殆どでありスコリアやガラス片は認められないが、上位の褐色火山礫凝灰岩層になると、ごく僅かにスコリアが含まれる。直上の土壌から、1,535-1,412 calBP および 1,343-1,277 calBP、直下の土壌から 1,928-1,747 calBP の放射性炭素年代値が得られている。これらの特徴から、下部ユニットはマグマ水蒸気噴火による降下火砕物、上部ユニットは水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発へと推移した活動による降下火砕物であると判断され、地点 1・2 では上部ユニットがラハール堆積物へ変化していると解釈される。本層は、東になるほど層厚が厚くなることから、振子沢火口付近ないし北西火口域に由来する堆積物であると考えられる。噴火年代を考慮すると、藤原・他¹⁴⁾によって東山麓のみで確認された水蒸気噴火による火山灰層 Tk-3（白色火山灰層）に相当する可能性がある。この場合、Tk-3 は NK-4 の上部ユニットの白色火山礫凝灰岩層に対比されると考えられる。Tk-3 は北西火口域の近傍堆積物が観察されていない¹⁴⁾。従って、NK-4 は振子沢火口およびその周辺を給源とする水蒸気噴火およびマグマ水蒸気噴火のテフラであり、その遠方層が Tk-3 であると考えると矛盾はない。

NK-7 (模式地：地点 13) ヌッカクシ火口遊歩道から上ホロカメットク山へ向かう登山

道沿いで確認された土壤混じりの淡灰色火山灰層である。ここでは、厚さ 5 cm の土壤を挟んで地すべり堆積物の上位に認められる。構成物は、亜角礫の白色～褐色変質岩片主体であり、マグマ物質は認められない。直下の土壤およびサブユニット間に介在する土壤から、それぞれ 601-559 calBP および 322-284 calBP の放射性炭素年代値が得られている。また、NK-4 の上位には層厚 2 cm の土壤を挟んで Ta-a テフラが堆積する。これらの特徴から、NK-7 は水蒸気噴火による降下火砕物であると考えられる。給源は不明であるが、規模が小さいことからヌッカクシ火口域由来と推測される。

NK-8 (模式地：地点 9) ヌッカクシ火口遊歩道沿いで表層から約 5-10 cm の位置に認められる白色～淡褐色火山灰層である。水平方向の連続性が良く、NK-5 とセットで観察されることが多い。模式地の地点 9 において、厚さ 25 cm の土壤を挟んで NK-5 の上位に堆積する。最大層厚は 4 cm で、模式地から離れるにつれ細粒になり薄くなる。構成物は、主に無色ガラスが付着した遊離結晶と無色ガラス片からなり、その他に白色・褐色・灰色変質岩片が含まれる。なお、この火山ガラス片の化学組成は Ta-a テフラと一致する。これらのことから、NK-8 は水蒸気噴火による降下火山灰であると考えられる。その層厚変化より、NK-5 と同様に模式地近くの三段山西麓火口由来と推定される。

○十勝岳北西火口域の活動との比較

本研究で明らかになったヌッカクシ火口域の噴火活動履歴を図 18 にまとめる。ほぼ同時期にマグマ噴火を頻発させていた十勝岳北西火口域と比較すると、ヌッカクシ火口域の噴火時期は、ずれているようである。NK-1 (>6,570 calBP) と NK-2 (3,760 calBP) の噴火時期は、北西火口域のうちのグラウンド火口群の 2 回の噴火活動期 (4,610-4,840 calBP と 2,970-3,570 calBP) のちょうど間の時期にあたる。北西火口域では、グラウンド火口の活動の後 (約 3,000 calBP)、擂鉢・北向火口でのマグマ噴火活動 (本研究の対比に従うと、約 1,310 calBP) まで 1,000 年以上の間隙が想定されている。藤原・他¹⁴⁾が北西火口域起源とした Tk-3 が、本研究で推定したようにヌッカクシ火口域で発生した NK-6 と対比できるとすれば、北西火口域でマグマ噴火が低調あるいは発生していない時期に、ヌッカクシ火口域では 2,810-1,840 calBP の時期に水蒸気噴火とマグマ水蒸気噴火が起こっていたことになる。以上のように、北西火口域でのマグマの活動が低調な時期にヌッカクシ火口域でマグマ噴火が発生するという、交互に活動してきた関連性を指摘できる。

またヌッカクシ火口域では、約 1,800 年前の NK-6 の噴火の後、1,000 年以上の静穏な時期が続いた後に、約 600 年前にヌッカクシ火口 (NK-7) で、約 200 年前に三段山西麓火口 (NK-8) で小規模な水蒸気噴火が起きている。これらの水蒸気噴火に先駆けて、ヌッカクシ富良野川沿いで 2 回の地すべりが発生し (直上の土壤の炭素年代より推定)、約 200 年前には三段山北斜面でも発生した¹⁹⁾²⁰⁾。18 世紀に NK-8 噴火と岩屑なだれが発生したことから、ヌッカクシ火口が「安政火口」という別名をもつようになったのかもしれない。

○まとめ

十勝岳火山群、ヌッカクシ火口域周辺の野外調査を実施した結果、ヌッカクシ火口域では、完新世に少なくとも 8 回の噴火が起きたことが明らかになった。その活動は、約 1,800 年前まではマグマを伴う活動であったが、その後はごく小規模な水蒸気噴火が 2 回起きて

いるのみである。このことから、ヌッカクシ火口域では火山活動度としては低下してきているといえるかもしれない。しかしながら、約 1,800 年前以降に少なくとも 3 回の小規模な斜面崩壊・地すべりが発生している。前回の十勝岳のマグマ噴火の際にヌッカクシ火口域の温泉水に影響があったことを考慮すると²¹⁾、噴火活動が低調な時期であっても、熱水変質により山体が脆くなっており、山体・斜面崩壊を繰り返す特徴があると考えられる。

○謝辞

本調査を行うにあたり、現地自然保護官事務所、教育委員会、営林署の皆様にご協力いただいた。また、アジア航測株式会社および国土交通省北海道開発局旭川開発建設部治水課からは赤色立体地図をご提供頂いた。これらの方々に深く感謝いたします。

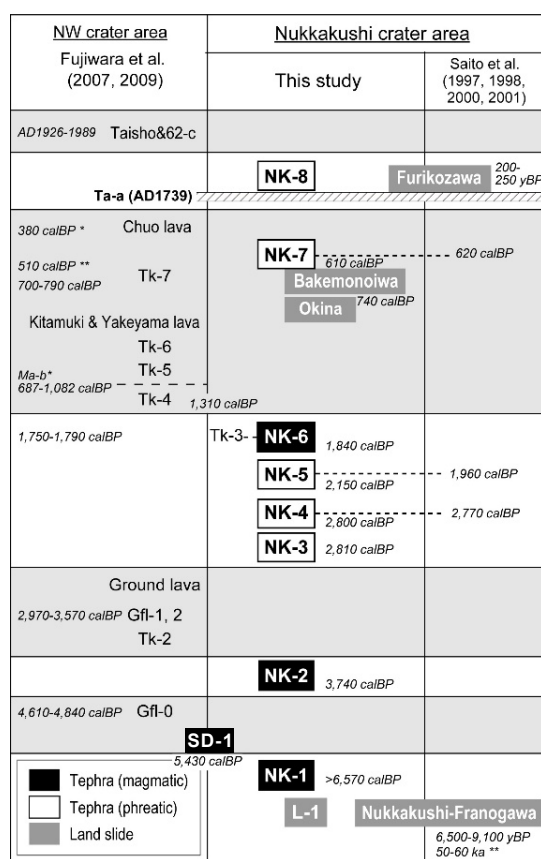


図 18. ヌッカクシ火口域の完新世の噴火活動履歴のまとめ。十勝岳火山北西火口域の活動履歴と、従来の研究によるヌッカクシ火口域のテフラおよび岩屑なだれ堆積物も示している。*: Katsui et al.²²⁾、**: 北海道防災会議²³⁾。

d) 樽前山:揮発性成分組成からみる樽前山 1667 年噴火のマグマ溜まりの脱ガス現象 (北海道大学)

○はじめに

樽前火山は、本プロジェクトにおいて重点火山に指定されている活火山である。これまで 4 回の大規模な噴火活動があり (9,000 年前の Ta-d、2,500~2,700 年前の Ta-c、1667 年

の Ta-b、1739 年の Ta-a)、各噴火では $0.1\sim 1\text{ km}^3$ のマグマを噴出した²⁴⁾。そのうち、1667 年の噴火は最大規模のプリニー式噴火であった。現在、樽前の活動は火山性地震および噴気の活動にとどまっているが、地下にはまだなお高温のマグマが控えており、今後、1667 年噴火と同規模の噴火が再来する可能性が危惧されている。

昨年度は、1667 年噴火を対象とし、噴火前のマグマ溜まりの化学組成は均一組成であったことを明らかにした。本年度は、同噴火の噴火直前の揮発性成分の状態を明らかにすることを旨し、 H_2O と CO_2 の分析を行った。

○手法

樽前山の東南東 18 km の地点において、Ta-b 噴火の初期～後期までの噴出物を系統的に採取した。そして、斜長石斑晶中のメルト包有物を上下面に露出させた両面研磨薄片を作製し、マグマ変遷解析センターに導入されている顕微 FT-IR (JASCO IRT-5200VC) を用いてガラス中の H_2O および CO_2 を分析した。

○結果

約 50 個のメルト包有物を分析した結果、 H_2O 濃度の値は $0.6\sim 4.5\text{ wt}\%$ 、 CO_2 濃度は $0\sim 150\text{ ppm}$ であった (図 1 9)。気液平衡を仮定した際の飽和圧力は、 $10\sim 130\text{ MPa}$ であった (Liu et al.²⁵⁾ の溶解度則から推定)。

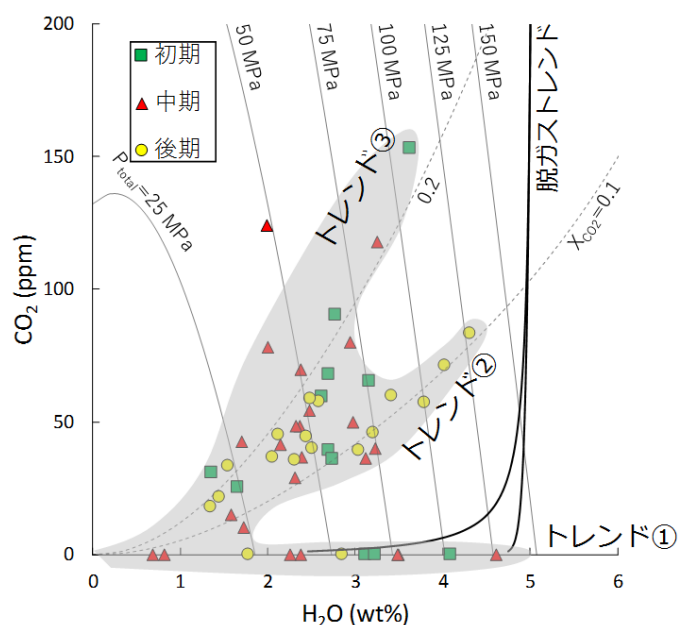


図 1 9．樽前火山 1667 年噴火のメルト包有物中の H_2O - CO_2 濃度。

図 1 9 において、データは 3 つの特徴的なトレンドを形成している。1 つ目は CO_2 を含まず、 H_2O のみを含むもの (トレンド①)、2 つ目はデータが $X_{\text{CO}_2}=0.1$ の等組成線上におおよそ載るもの (トレンド②)、3 つ目は $X_{\text{CO}_2}=0.2$ の等組成線上に載るもの (トレンド③)、である。トレンド①はマグマ溜まりの単純な脱ガス曲線 (図中の曲線) におおむね一致する。トレンド②と③は、脱ガス曲線に比べ $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比が高く、マグマ溜まりの中で自然に作ることができない。このようなトレンドは、深部から CO_2 に富むガス (X_{CO_2} が高いガ

ス) がやってきて浅部マグマ内を連続的に流れる現象 (CO₂ フラクシング) が起きたことを反映するものと考えられている²⁶⁾。そのため、トレンド②と③は、それぞれ $X_{CO_2}=0.1$ と 0.2 のガスのフラクシングが起きていたことを示唆する。以上から、1667 年噴火のマグマ溜まりでは、脱ガス現象が不均一に起きており、単純な脱ガスが起きていた部分、 $X_{CO_2}=0.1$ のガスのフラクシングが起きていた部分、 $X_{CO_2}=0.2$ のフラクシングが起きていた部分があったと考えられる (図 20)。

今後は、マグマ溜まりに注入されたガス量および、それによるマグマ溜まりの増圧の程度を推定し、1667 年噴火と CO₂ フラクシングの関係を解明する。

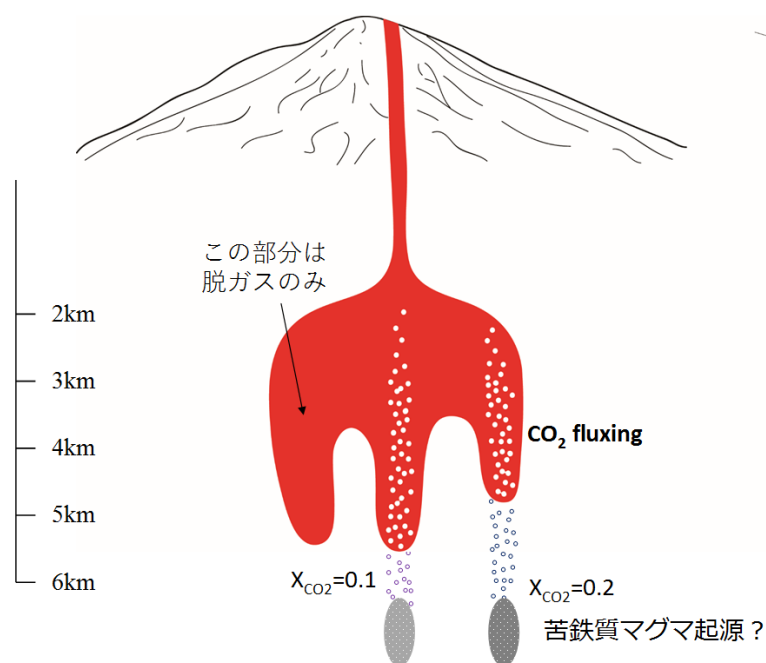


図 20. 樽前火山 1667 年噴火のマグマ溜まりの脱ガスモデル。

e) 羊蹄山：野外調査および山麓におけるトレンチ掘削調査による噴火史の再検討 (北海道大学・電力中央研究所)

○はじめに

羊蹄火山は、南西北海道中央部に位置する第四紀の成層火山 (標高 1,898 m) である。本火山の火山活動は、これまでに山頂周辺の噴出物や山麓のテフラ層序・年代の研究により、少なくとも約 5 万年前～数千年前まで活動したことが明らかにされてきた²⁷⁾²⁸⁾。その後、Amma-Miyasaka et al.²⁹⁾により、羊蹄火山起源と考えられる 7～8 万年前の火山灰層が東部石狩低地帯に存在することが報告されたため、山麓の火山灰層で対応するテフラ層の存在を検討し、羊蹄火山の爆発的噴火がいつから始まったのかを確かめる必要が生じた。そこで、2019 年度に羊蹄火山東麓で掘削調査を実施した結果、新たに羊蹄火山起源と考えられる複数枚の火山灰層が発見され、より下位にもテフラ層が存在しそうであった。2020 年度はさらに掘削を進めるとともに、新規に出現した露頭やこれまでアクセスが困難であった尻別川沿いの露頭調査を行った (図 21)。露頭調査に加え、記載岩石学的検討と

EPMA によるガラス組成分析を行った結果、最初期と考えられる羊蹄火山起源テフラを発見したので以下にその詳細を報告する。

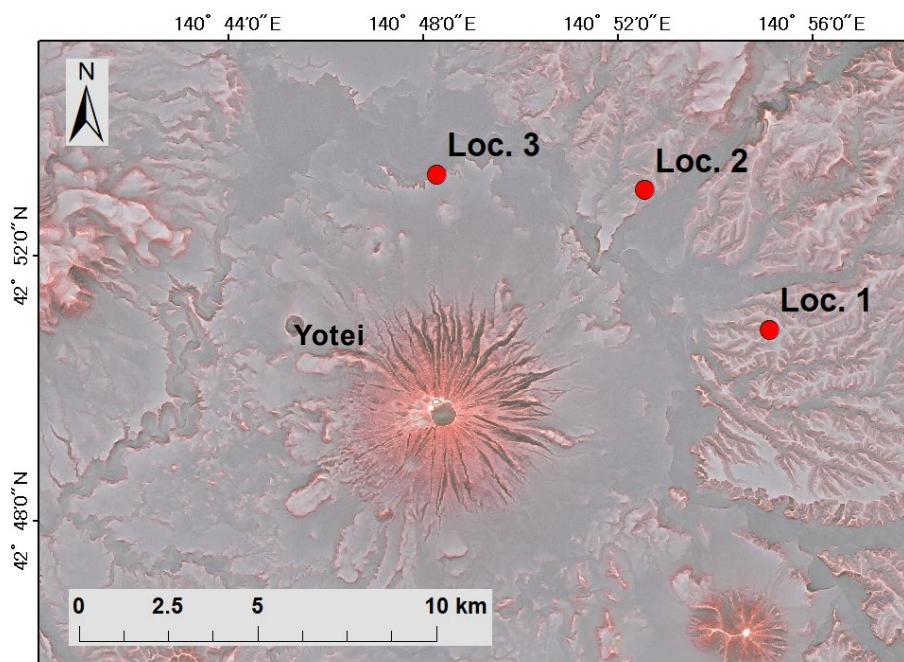


図 2 1．掘削地点の位置。ベースマップの赤色立体地図は、国土地理院提供の 10 m DEM を用いてアジア航測（株）により作成された。

○羊蹄火山東麓における掘削

地点 1 では、約 5～2 万年前までのテフラ層が露頭で観察される（図 2 2）。そこで、露頭の下部を掘削し、既知のテフラである Y43 より下位の噴出物を発見した。幅約 2 m、深さ約 5.5 m の掘削を行った結果、新たに明灰色～灰褐色の 8 枚の降下火砕物を認識した。最下位の YO19-3-15 の下位は厚い土壌層で、火山灰層との境界から湧水があったため、これ以上の掘削は困難であった。記載岩石学的特徴（表 2）と EPMA によるガラス組成分析（図 2 3）により、このうち 6 枚が羊蹄火山起源（YO19-3-10～15）、2 枚が尻別火山起源（YO19-3-8, -9）²⁹⁾³⁰⁾と推定された（図 2 2・2 3）。

表 2．地点 1 で見出されたテフラ層の記載岩石学的特徴。fa: 降下テフラ。pm: 軽石、opx: 直方輝石、cpx: 単斜輝石、qz: 石英、bt: 黒雲母、hb: 角閃石、CR: 高結晶含有量、CP: 低結晶含有量。全てのテフラは斜長石を含む。

サンプル番号	層相	含有鉱物
YO19-3-8	ash fa	opx,hb,qz>cpx,bt
YO19-3-9	CR? white pm fa	hb,opx>cpx,qz（粗粒）
YO19-3-10	ash fa	(px>cpx>>qz
YO19-3-11	CP-CR? white pm fa	hb>cpx>>qz
YO19-3-12	CP gray, white pm fa	opx>>qz
YO19-3-13	CP-CR white, band pm fa	opx
YO19-3-14	CP gray pm fa	opx
YO19-3-15	CP-CR white pm fa	hb>opx,cpx

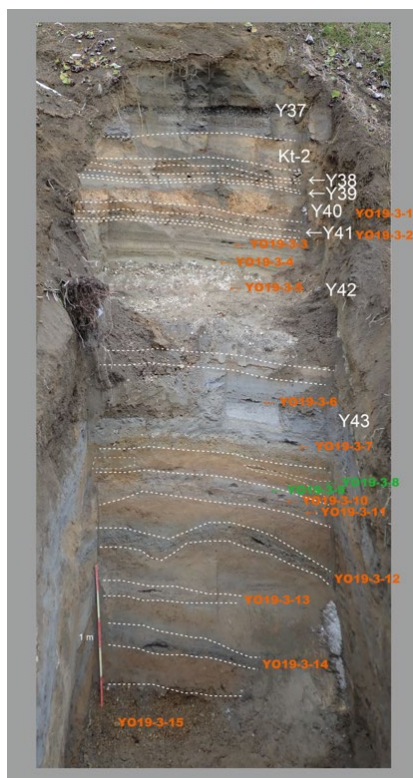


図 2 2 . 掘削地点 1 の写真。Y39~Y43 は既知テフラ²⁸⁾。YO19-3-1~15 が採取したテフラのサンプル番号を示しており、オレンジで示したテフラが羊蹄火山起源、緑で示したテフラが尻別火山起源と考えられる。

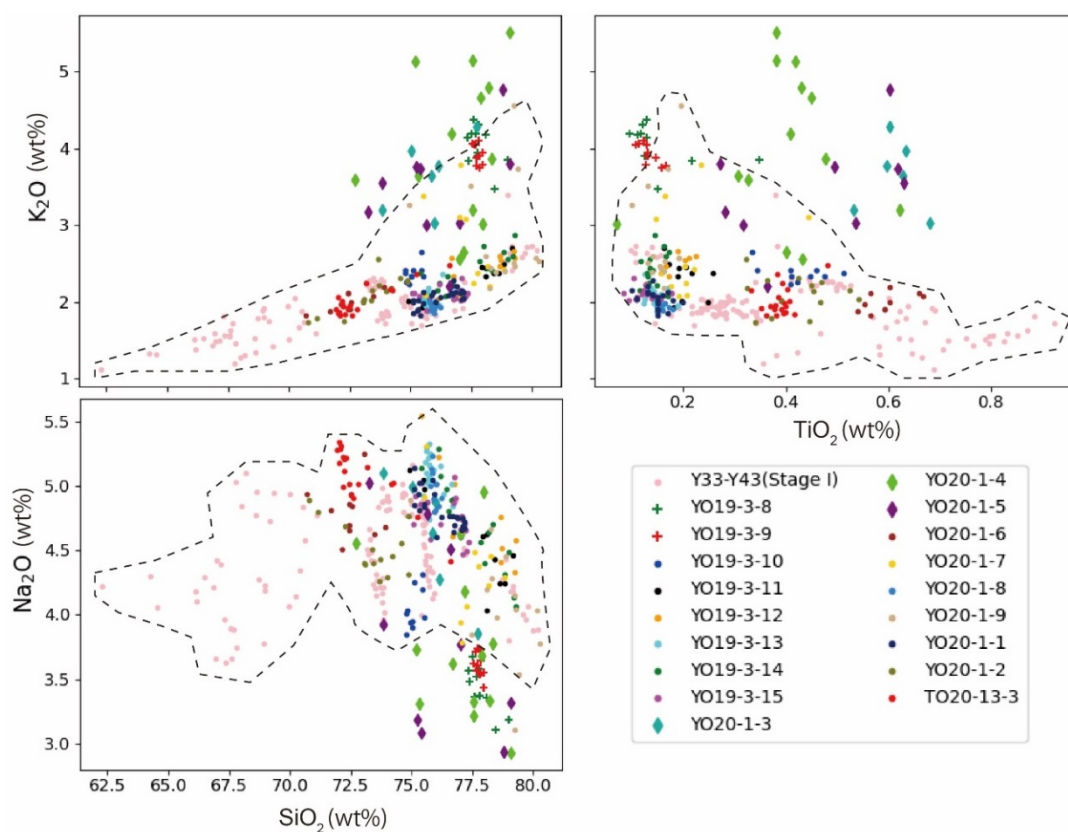


図 2 3 . 代表的なガラス組成のハーカー図。尻別火山起源と考えられるテフラ (+) は、 K_2O に富み、 Na_2O に乏しい。また、◇で示した他火山起源テフラと尻別火山起源テフラでは、組成領域が異なる。Y33~Y43 のガラス組成は、Uesawa et al.²⁸⁾より引用した。黒破線で囲った部分が羊蹄火山起源テフラのガラス組成領域である。

○羊蹄火山北～北東麓における露頭調査

地点 2 では、30 層以上の降下火山灰層が確認された（図 2 4）。本報告では、このうち Y38 より下位の火山灰層について報告する。この層準では、少なくとも 12 層の降下火山灰層が認められ、このうち 9 層が新発見のテフラである。ガラス組成分析の結果、YO20-1-3~5 は他火山起源、YO20-1-6~9・YO20-1-1~2 が羊蹄火山起源であると推定された。

地点 3 では、最下位に洞爺火砕流堆積物（約 10.9 万年前³¹⁾）が露出し、凝灰質土壌を挟んでこれを最大粒径 4~5cm、層厚約 60cm の発砲の良い白色軽石からなる降下軽石層（TO20-13-3）が覆う。さらに、細粒で青灰色を呈する砂質火山灰の再堆積層が白色降下軽石層を覆っており、最上位には、支笏火砕流堆積物（Spfl）起源の軽石の再堆積層²⁸⁾が露出している（図 2 5）。洞爺火砕流堆積物を覆う軽石層は、斑晶にやや富み、斜長石、角閃石、直方輝石を含む。層相、記載岩石学的特徴およびガラス組成から、羊蹄火山起源と推定される。

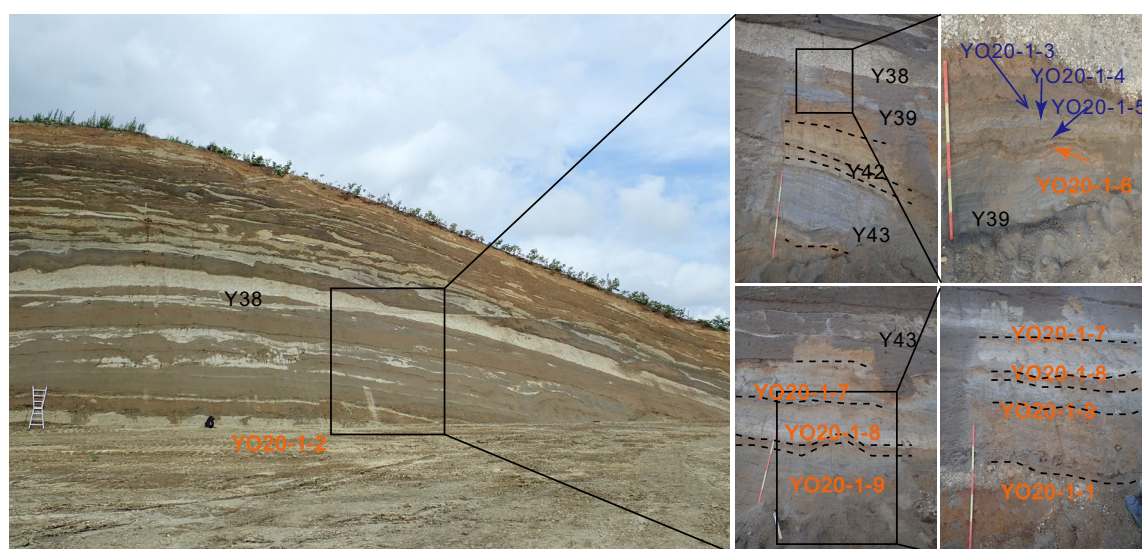


図 2 4．地点 2 の露頭写真。黒文字が既知羊蹄火山起源テフラ、オレンジが羊蹄山起源テフラ、青が他火山起源テフラ。

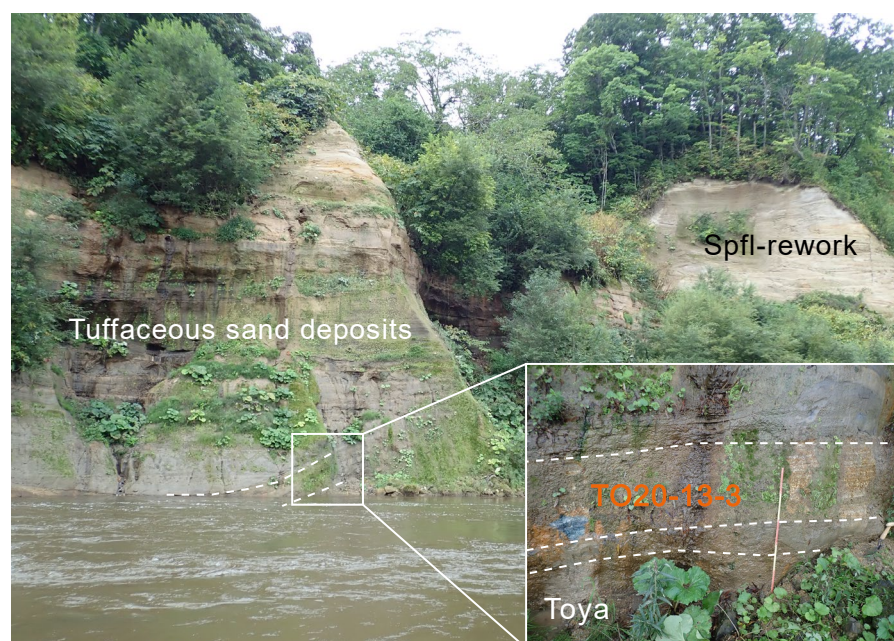


図 2 5．地点 3 の露頭写真。オレンジが羊蹄火山起源テフラ。Toya: 洞爺火砕流堆積物。

○ガラス組成による露頭間の火山灰対比

既知テフラとの層位関係とガラス組成から、YO19-3-15 と YO20-1-1、YO19-3-14 と YO20-1-9、YO19-3-13 と YO20-1-8、YO19-3-12 と YO20-1-7 は矛盾なく対比できる。一方で、YO19-3-10 と YO19-3-11 は、いずれも YO20-1-6 と組成が大きく異なり対比できない。また、YO20-1-2 は、尻別川沿いの TO20-13-3 と組成領域が一致し、対比できる可能性がある。以上を整理すると、今回発見された羊蹄火山起源の降下火山灰は、Y43 より下位の層準で少なくとも 8 層存在することが分かった。

○噴出年代の検討

地点 1 において、Y43 の下位に尻別火山起源のテフラ層が少なくとも 2 層確認された。尻別火山起源の火山噴出物は、ジルコンのフィッシュ・トラック年代測定によって、Km-2 が約 13 万年前、Km-1 が約 7 万年前、山体が約 5~6 万年前と報告されている³⁰⁾。羊蹄火山起源テフラ層の間に洞爺火砕流起源テフラが挟まれていないことから、YO19-3-8 と YO19-3-9 は Km-1 か尻別火山体形成に由来するテフラと考えられ、これらのテフラが存在する層位は、約 5~7 万年前と推定される。このことは、Y43 の約 5 万 4 千年前の噴火年代²⁸⁾と矛盾しない。また、羊蹄火山近傍層において、大きな浸食間隙を挟まずに約 5~7 万年前の層準の下位にさらに羊蹄火山起源のテフラ層が存在することは、東部石狩低地帯において約 7~8 万年前の層準に羊蹄火山起源テフラ層が存在すること²⁹⁾と整合的である。

○まとめ

2019 年度・2020 年度の羊蹄火山麓における掘削調査から、新たに少なくとも 7 層の羊蹄火山起源テフラと、3 層の他火山起源テフラ、2 層の尻別火山起源テフラを発見した。発見されたテフラ層の噴出年代は、既存文献値から約 5~10 万年前と推定される。今後は、さらに追加で地質調査を行うとともに、構成物や記載岩石学的特徴、化学組成分析を進め、詳細を検討していく予定である。

f) 有珠山：ボーリング掘削調査および野外調査に基づく有珠山の善光寺岩屑なだれの発生年代の再検討（北海道大学）

有珠山は、約 2 万年前に活動を開始し成層火山体が形成された後に、山体崩壊が発生して長い休止期に入り、その後に西暦 1663 年から歴史時代活動期に移行した³²⁾³³⁾³⁴⁾。歴史時代活動期については、噴火履歴や噴火様式に関して、最近も詳細な研究が行われ新たな知見が得られている³⁵⁾³⁶⁾。一方、それ以前の成層火山体形成期の詳細および山体崩壊の発生時期に関しては未だ不明な点が多い。その中でも山体崩壊の発生時期については、横山・他³²⁾によって 7,000~8,000 年前と推定されて以来、多くの研究が行われている。最近では、Miyabuchi et al.³⁷⁾ および藤根・他³⁸⁾が、岩屑なだれ堆積物上位にあたる湖沼堆積物の解析から、有珠山の山体崩壊の発生時期が 3-2 万年前である可能性を示した。また Goto et al.³⁹⁾では、岩屑なだれ堆積物中の炭化木片の年代および直上に濁川カルデラ由来のテフラ (15 ka) が堆積している産状から、山体崩壊の発生時期は 16 ka であるとした。この

ように、これまでに多くの見解が示され混乱しているのが現状である。

本サブ課題では、有珠山の活動履歴、特に先歴史時代について明らかにするために、有珠山周辺の地表踏査および山麓でのボーリング掘削調査を実施してきた。令和2年度の成果を以下に報告する。

i) 野外調査に基づく再検討

○はじめに

上述のように、有珠成層火山体の崩壊によって発生した善光寺岩屑なだれについては論争中であり、その年代は 30 ka から 16 ka までに及ぶ³⁷⁾³⁸⁾³⁹⁾。これら最近の研究は岩屑なだれを覆うテフラ層の検討によるものであるが、そのテフラ対比は火山ガラスの屈折率に基づいており、再検討が必要と考えられる。

本研究では、善光寺岩屑なだれ分布域および周辺地域の地表踏査を行い、分布するテフラを記載した(図26)。そしてテフラを含む土壌の年代測定と、テフラの火山ガラスの化学組成を決定した。ここでは特に重要な露頭として、伊達市のアルトリ岬(A地点)の岩屑なだれを覆う土壌層と上館山のB地点における検討結果について報告する。

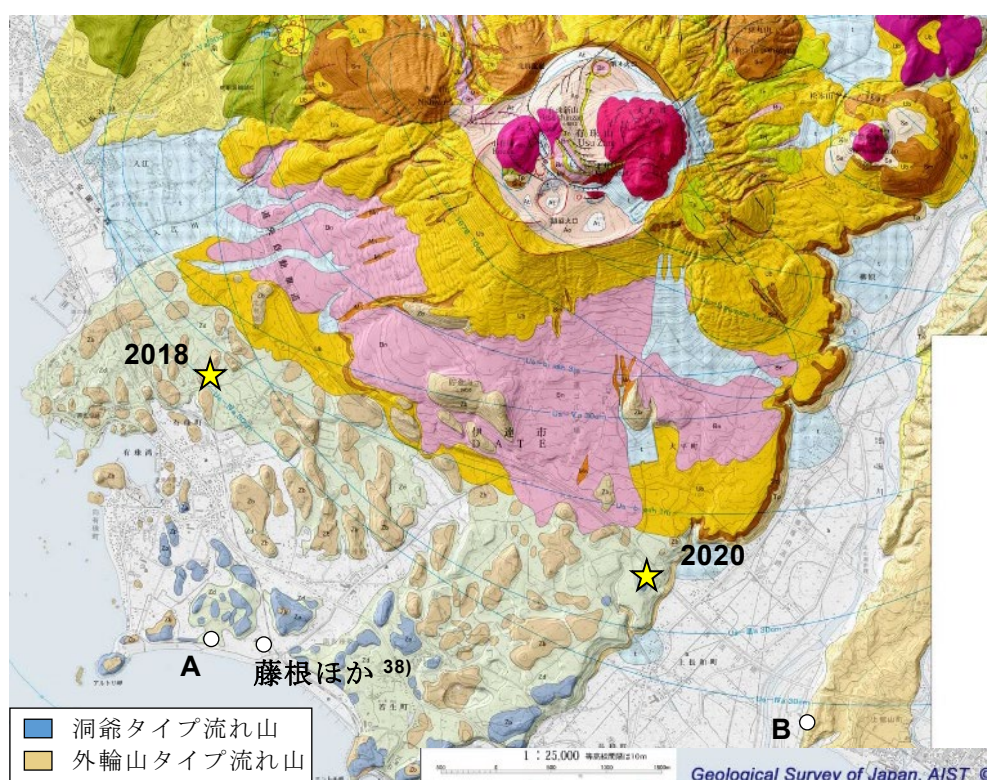


図26. 有珠山周辺の代表的な調査地点(○)とボーリング掘削地点(☆)。地図は曾屋・他³⁴⁾の火山地質図。A地点：アルトリ岬、B地点：上館山。山体南西部には善光寺岩屑なだれが分布する。流山は成層火山体の破片(外輪山タイプ)と基盤の洞爺火砕流の露頭の破片からなり、後者はB地点に近い地域に分布する。

○アルトリ岬(A地点)：岩屑なだれを覆う土壌層の検討

この地点は Goto et al.³⁹⁾で岩屑なだれの発生年代を推定した重要な露頭である。ここで

は岩屑なだれの流山を覆うクロボク層が発達しており、その中に複数のテフラ層が認められる（図 2 7）。そのテフラは上位から、有珠山の Us-b（AD1663）、北海道駒ヶ岳の Ko-d（AD1640）、白頭山の B-Tm（10 世紀）、そして北海道駒ヶ岳の Ko-g（6.5 -6.6 cal ka）⁴⁰⁾に関しては火山ガラスの化学組成と土壌の年代によって確認した。Goto et al. ³⁹⁾では岩屑なだれ直上に、濁川火山由来の Ng-a テフラ（15 cal ka）⁴¹⁾を報告しているが、我々は同じ層準から明瞭なテフラ層を認識できなかった。その中で、やや火山灰交じりの土壌と判断が可能な部分が Goto et al. ³⁹⁾による Ng-a であろうと考え試料を採取した（A_5 層：図 2 7）。同時に Ko-g 直下と岩屑なだれ直上の土壌、およびその間の土壌を 5 等分して試料を採取した。

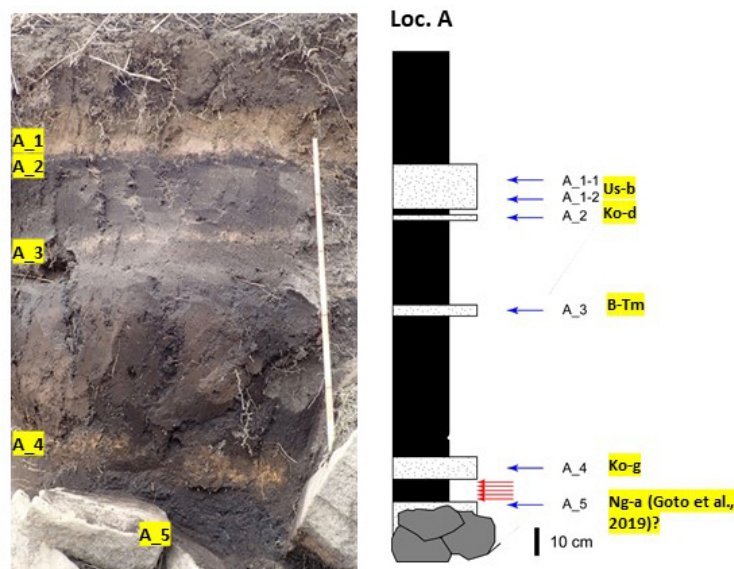


図 2 7. 伊達市アルトリ岬（図 2 6 の A 地点）での流山を覆う土壌の写真と柱状図。

A_5 層に含まれている火山ガラスの組成を図 2 8 に示す。図には洞爺火砕流、Ng-a および北海道駒ヶ岳の先歴史時代噴火の近傍相のガラス組成を示した。A_5 層のガラスは、 $\text{SiO}_2 > 77\%$ のものが大部分であり、 $\text{SiO}_2\text{-FeO}$ 図では、洞爺火砕流および Ng-a の一部と一致する。また、低 SiO_2 量のガラスも認められ、それらは北海道駒ヶ岳テフラの範囲に図示される。 $\text{TiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 図においても、A_5 層中のガラスのかなりの分析値は、洞爺火砕流および Ng-a の一部と一致しており、北海道駒ヶ岳テフラの組成を示すものも含まれる。これらのことから、A_5 層は洞爺火砕流・Ng-a・北海道駒ヶ岳の 3 火山のガラスの混合層であり、Ng-a テフラとは考えにくい。明瞭なテフラ層でない産状も踏まえると（図 2 7）、再堆積の火山灰まじりの土壌であることが示唆される。

A_5 層が Ng-a テフラではないことは、年代測定の結果からも支持される（図 2 9）。A_4 層の Ko-g 直下の土壌からは 6.5 cal ka の年代が得られ、岩屑なだれの直上に向けて、深度と調和的に年代値は古くなり、流山直上では 7.8 cal ka の年代となっている。この年代値からは、流山を覆っている土壌は安定して成長したことを示しており、これらの年代は信頼できるデータであると考えられる。さらに流山直上の土壌の年代を得るために、同じ露頭において図 2 7 とは異なる場所の 4 試料について年代測定を行い、6.8 – 8.4 cal ka の年代が得られた。この結果からも、流山直上に Ng-a が存在するとは考えられず Goto et al.

39)の議論は否定できる。この A 地点での検討結果から、善光寺岩屑なだれの年代は 8.4 cal ka より古いと結論できる。

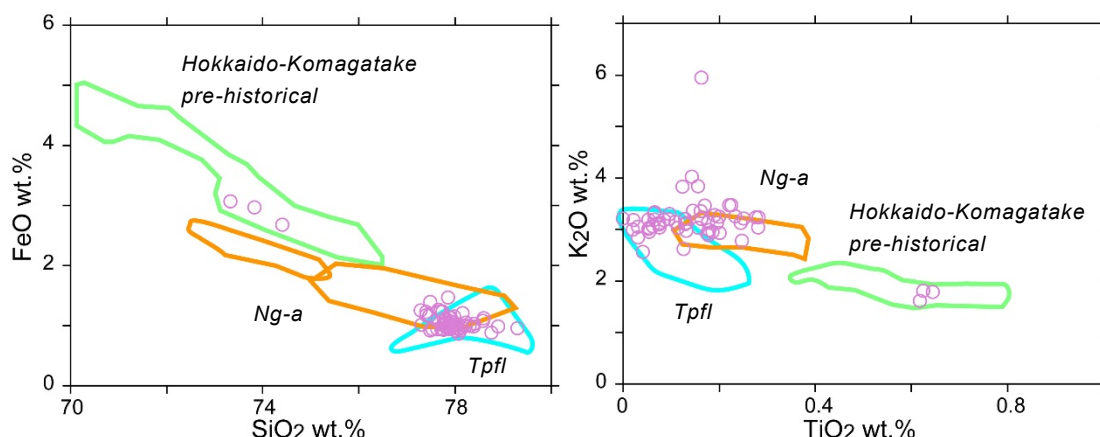


図 2 8 . A_5 層 (図 2 7) に含まれている火山ガラスの化学組成。洞爺火砕流 (Tpfl)、北海道よび濁川 (Ng-a) の組成範囲も示す。

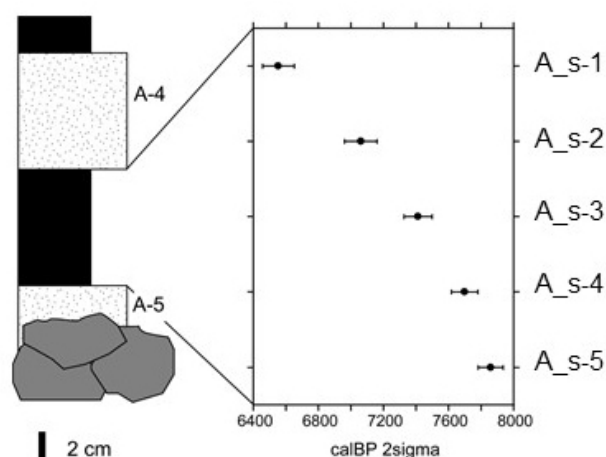


図 2 9 . A 地点の A_4 と A_5 層の間の土壌層の ^{14}C 年代の深さ方向の変化。

○上館山 (B 地点) : 岩屑なだれの流下・浸食・運搬による再堆積火山灰層

B 地点では下位に洞爺火砕流およびその再堆積層があり、その上位にクッタラ火山起源の Kt-2、有珠-長和テフラ (Us-Ka)、そして有珠成層火山形成期の噴出物 (Us-somma) と考えられる降下スコリア層が存在する。その上位は浸食間隙を挟んで、厚さ 30~50 cm の再堆積灰層、そして厚さ 40~60 cm の給源不明の、淡いピンク色を呈する白色火山灰層 (white ash layer) が特徴的に認められる。さらにその上位には、再堆積層と土壌層を挟んで Us-b およびその上位の有珠歴史時代噴出物のテフラが存在する (図 3 0)。

今回、有珠の成層火山体形成期の堆積部物の上部に近い部分で、土壌層を見出した。そしてこの土壌から 11,000 calBP の年代値を得た。さらにこの土壌層は有珠の成層火山体形成期の火山灰層が覆っている。このことから有珠成層火山体は、19 ka の Us-Ka テフラの噴出から活動が始まり、少なくとも 11 ka 頃までは活動を続けていたことが明らかになった。この結果から、善光寺岩屑なだれの年代、つまり有珠成層火山体の崩壊は 11 ka より新しいことになる。

B 地点での白色火山灰層に関しては（図 3 0）、ガラス組成を検討したところ、洞爺火砕流起源の火山灰のほぼ純層であることが明らかになった（図 3 1）。上下のテフラを考えると、この火山灰層は再堆積層になるが、厚さ 20 cm に達することから、通常の風成層のような成因ではない。またこのような厚い再堆積の洞爺火山灰層はこの周辺では報告されていない。よって何らかのプロセスで、限られた地域に洞爺火山灰が再堆積したと考えられる。この火山灰層の再堆積層に含まれる土壌からは、7,900～8,400 calBP の年代が得られた。従ってこの厚い再堆積層を生じさせた事件は 7,900 年前より新しいことになり、これは A 地点で得た善光寺岩屑なだれの 8,400 年前より古いという年代と接近している。

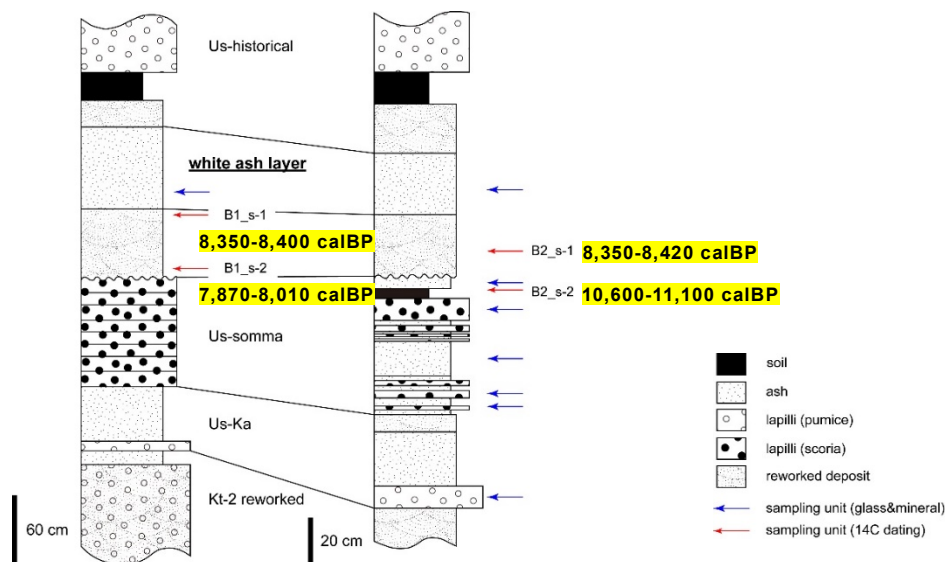


図 3 0. 上館山（図 2 6 の B 地点）での露頭における約 60 m 離れた 2 地点での柱状図。矢印は試料採取地点。赤矢印は年代測定試料で、暦年補正年代も示した。

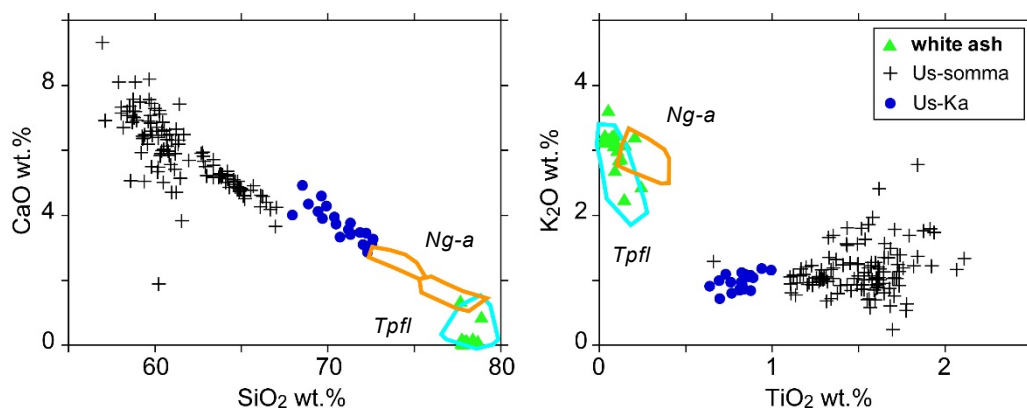


図 3 1. 図 3 0 の柱状図でのテフラ等の試料の火山ガラス組成。Us-somma：有珠成火山体形成期テフラ、Us-Ka：有珠-上長和テフラ、white ash：白色火山灰層。白色火山灰層中の火山ガラスは洞爺火砕流のガラス組成と同じである。

○まとめ：有珠山山体崩壊の年代と流下プロセス

有珠山の場合、岩屑なだれの流路となった南山麓には非溶結から弱溶結の洞爺火砕流堆積物が厚さ 100～200 m の厚さで広範囲に堆積している。そこに高密度の有珠成層火山体が崩壊して、岩屑なだれが流下した際の想像図を図 3 2 に示した。高密度の溶岩主体の有

珠成層火山体が崩壊して流下すると、基盤である洞爺火砕流や未固結の凝灰岩質の堆積岩からなる上長和層を削り取って、ブロックとして取り込んで岩屑なだれと一体化して流走すると考えられる。実際に洞爺火砕流などの基盤岩からなる流山が、岩屑なだれの南～南東部に多く分布する（図 2 6）。この際に洞爺火砕流や上長和層は非溶結または未固結であるので破砕されやすく、細粒物（火山灰）の生産が効率的に行われると考えられる。生産された細粒火山灰は、岩屑なだれ流走時に舞い上がって周辺に堆積する（図 3 2）。ただし低温であるので、細粒物は灰神楽として広範囲に拡散することではなく、周辺の風下側の狭い範囲に限定して堆積するであろう。

上館山（B 地点）で見出された厚い、再堆積した洞爺火砕流由来の白色火山灰層は、上記のようなプロセスで生じた、いわば *co-debris avalanche ash* というべきものであろう。このような事例は、他の岩屑なだれ堆積物でも起こりうるものである。

今回の検討からは、善光寺岩屑なだれの年代つまり山体崩壊の年代は、流山を覆う土壌の年代から 8,400 年前より古い時期、*co-debris avalanche ash* の解釈が正しいとすると 7,900 年前頃より新しい時期ということになった。二通りの指標からの年代がほぼ同じであるので、善光寺岩屑なだれの年代は約 7,900～8,400 年前頃と考えてよいであろう。この結論は横山・他³²⁾の推定に近く、藤根・他³⁸⁾によって議論されてきた年代からは大幅に若返ることとなった。



図 3 2．有珠成層火山体の崩壊で生じた善光寺岩屑なだれ流下時による *co-debris avalanche ash* 生成の想像図。

ii) ボーリング掘削調査の概要

令和 2 年 11 月に有珠山の南麓の約 3 km の地点（標高約 80 m）において、50 m 深のボーリング掘削調査を実施した（図 2 6）。この地点は洞爺タイプの岩屑なだれ堆積物が分布している場所である。図 3 3 に代表的なコア写真を示す。

表層から 4.0 m 深までは人工の盛り土であり、それより下位約 21.8 m 深まで淡褐色を呈する火山礫凝灰岩層が認められる（図 3 3 (a)）。無淘汰で明瞭な堆積構造は認められない。火山礫の構成物は、灰色岩片・黒色岩片が主体であるが、斑晶に乏しい白色軽石も少量含まれる。21.8-22.7 m 深には淡褐色の細粒火山灰層があり、下部では白色軽石が散在している。その下位に 50 cm ほどの風化層を挟んで、淡褐色の凝灰角礫岩層が堆積する。23.3-27.0 m 深は灰色・縞状軽石主体であるが（図 3 3 (b)）、27.0 m 深から灰色岩片の割合が増え、29.0-34.9 m 深は径 5-20 cm の角礫を多く含む岩相に変化する（図 3 3 (c)）。34.9 m 以深は淡褐色を呈する火山礫凝灰岩層であり、～数 cm サイズの白色軽石および灰色岩片、深成岩片を含む。目立った堆積構造は認められないが、42.5 m 深に岩片濃集部が認められる。

以上の岩相の特徴より、本ボーリング調査のコア試料のうち 23.3 m 以深は、洞爺火砕流堆積物と考えられる。軽石の構成量比から、23.3-27.0 m 深はユニット 6⁴²⁾、27.0-34.9 m 深はラグ角礫岩層、34.9 m 以深はユニット 5⁴²⁾に相当すると考えられる。～21.8 m 深については、洞爺火砕流の再堆積層の可能性があるが、単調な岩相であり堆積構造もないことから、現時点では岩屑なだけによるものであるかどうかの判断は難しい。今後更なる解析が必要である。



図 3 3. 代表的なコア試料の写真（各写真の左側・上側が上位）。(a) 深度 16.0-18.0 m。凝灰角礫岩層。斑晶に乏しい白色軽石を含む。(b) 深度 24.0-27.0 m。凝灰角礫岩層。洞爺火砕流堆積物ユニット 6⁴²⁾に相当する。灰色軽石・縞状軽石が目立つ。(c) 深度 29.0-32.0 m。洞爺火砕流堆積物ユニット 5-6 間のラグ角礫岩層。

g) 秋田焼山：野外調査およびトレンチ掘削調査に基づく噴火活動履歴の解明（産業技術総合研究所）

○目的と調査位置

秋田焼山火山では、これまでの予察的な報告⁴³⁾⁴⁴⁾から、有史時代にすくなくとも 3 回の噴火が発生したことが示されているものの、詳細な活動履歴は検討されていない。完新世

の噴火履歴を解明するため、昨年度おこなった山体近傍の登山道や林道沿い 21 地点の調査結果に基づき、本年度は山体近傍の 4 地点で人力トレンチ調査を実施した。調査地点を図 3 4 に示す。

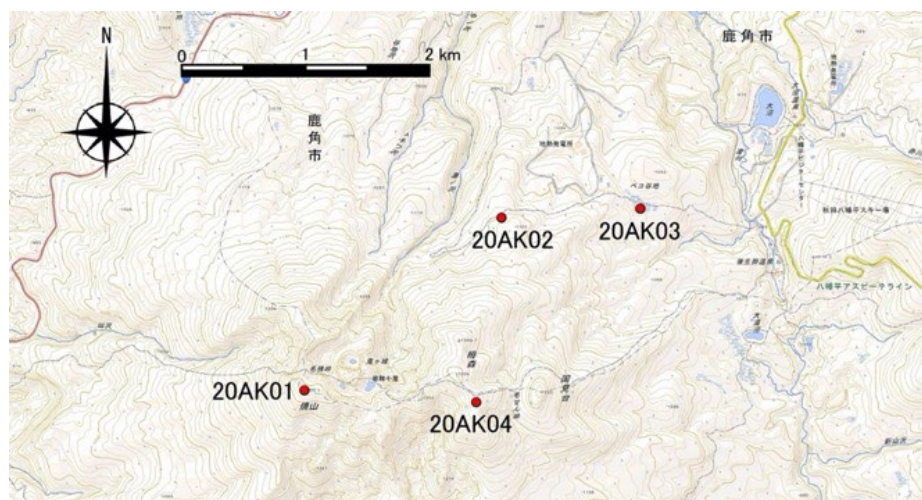


図 3 4 . 秋田焼山火山の人力トレンチ調査地点(赤丸)。地点番号は図 3 7 の柱状図に対応。国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図「八幡平」および「玉川温泉」を使用。

○トレンチ掘削地点における層序、対比

人力トレンチ調査地点の代表的である秋田焼山山頂で行った写真を図 3 5 に、そのトレンチ断面図の層相を図 3 6 に示す。秋田焼山山頂で行った 20AK01 のトレンチ調査では、秋田焼山火山由来の 6 枚の降下火砕堆積物、1 枚の広域テフラを確認した。秋田焼山火山由来の降下火砕堆積物は、層序、層相、層厚及び本年度の新たな炭素年代値の関係から、上位より AKY-2、AKY-3、AKY-5、AKY-7、AKY-8 に対比した。また本年度の調査により AKY-5 の下位に変質物主体とする火山灰層 2 枚と層厚 15 cm 以上の降下スコリア堆積物が認められた。4 ケ所の人力トレンチ調査を行った地点 20AK01～20AK04 の対比柱状図を図 3 7 に示す。これらの層序を整理すると、秋田焼山火山では 1997 年水蒸気噴火と降下スコリアの発生を含めて 9 回の噴火が地層記録から読み取れる。確認された火山灰層の中で最下位に相当する降下スコリア堆積物の上位の土壌からは、約 6,000 年前の炭素年代が得られ、従って秋田焼山火山は、およそ 700 年に 1 回程度の頻度で、地層記録として保蔵されうる規模の噴火してきた傾向が認められる。

これらの火山灰層は構成物から、変質物を主体とするもの（6 層）、変質物を主体とし軽石が含まれるもの（2 層）、スコリアを主体とするもの（1 層）の 3 種類に区分できる。このうち、軽石を含む火山灰層中の軽石岩片について、ガラスビード法を用いて蛍光 X 線分析装置で全岩化学組成を測定したところ、 $\text{SiO}_2 = 69 \text{ wt.}\%$ のデイサイト組成を示した。また 1 層のみ確認された降下スコリア堆積物の全岩化学組成を同様に測定したところ、 $\text{SiO}_2 = 59\text{--}61 \text{ wt.}\%$ の安山岩組成を示した。

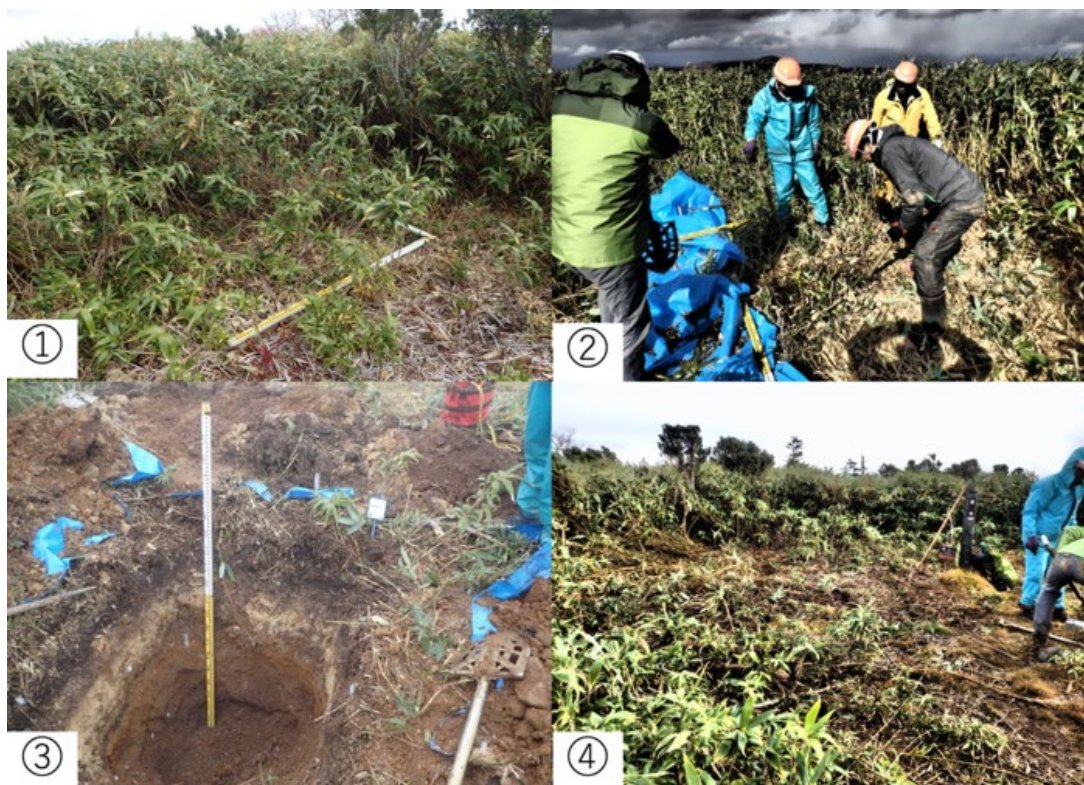


図 3 5．秋田焼山火山の山頂（地点 20AK01）における人力トレンチ調査写真。2020 年 10 月 15 日実施。開始前、②作業中、③深度 1.5 m のトレンチ、④終了後。調査地点は図 3 4 参照。

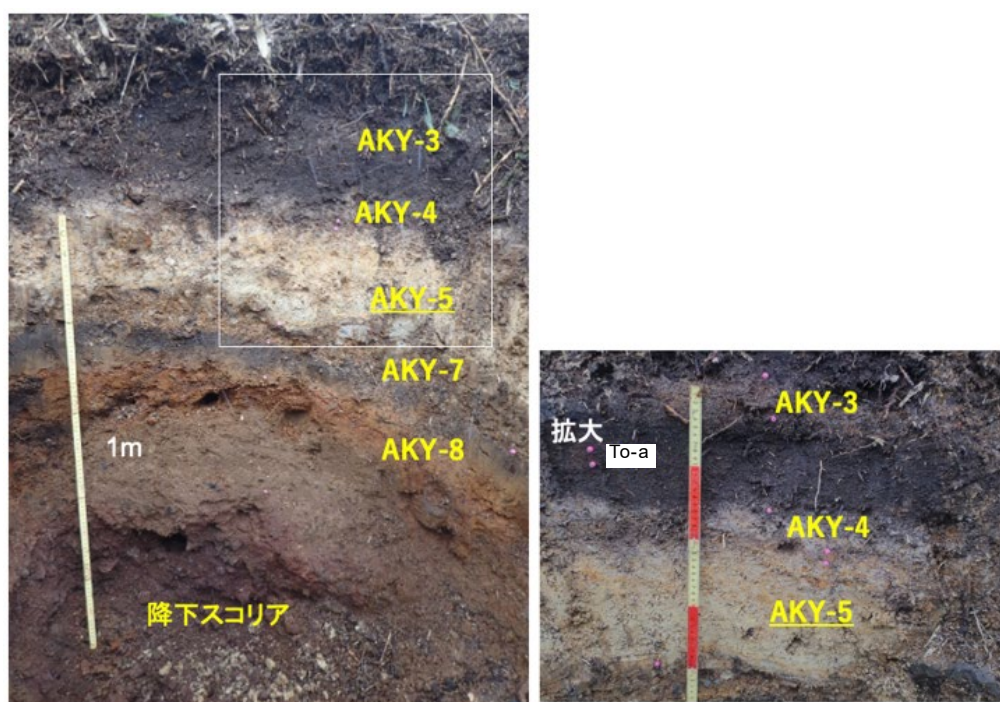


図 3 6．秋田焼山火山の地点 20AK01 における降下火山灰層の層相。調査地点は図 3 4 参照。(左) 全景、スケールは 1 m。(右) 左の白線枠を拡大。スケールは 10 cm 間隔で塗色。

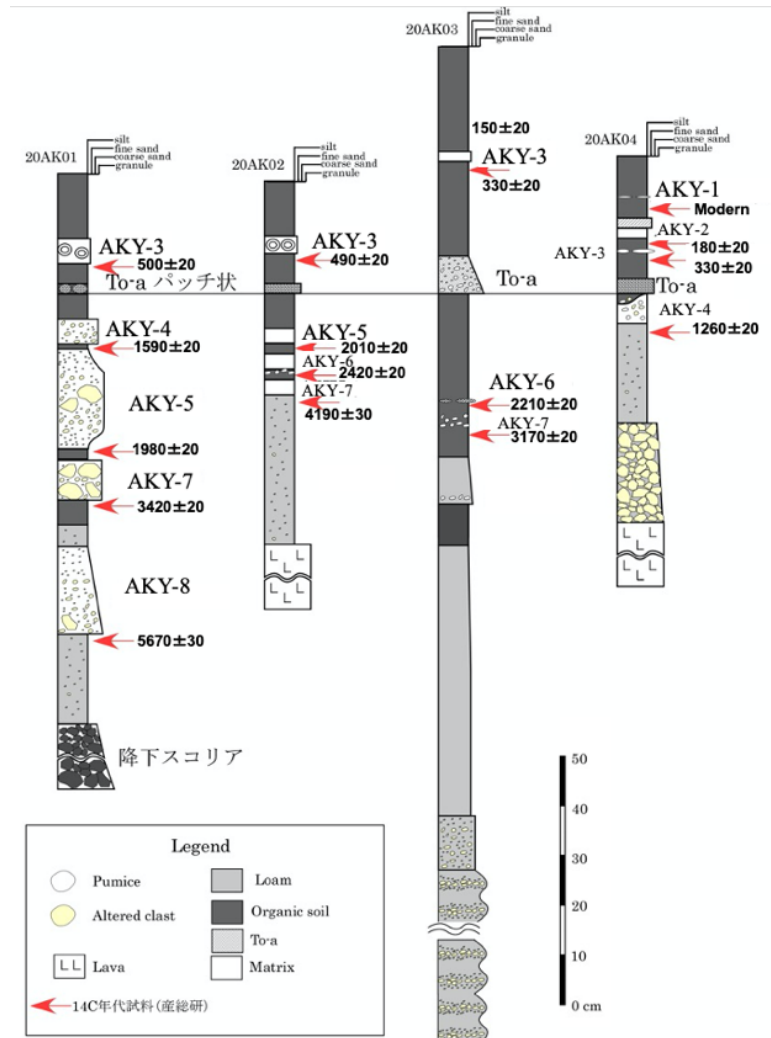


図 3 7．秋田焼山火山の人力トレンチ調査地点で認められた火砕物の対比柱状図。調査地点は図 3 4 参照。図中の数値は ^{14}C 年代で、Libby age (yBP)を表す。

○まとめ

秋田焼山で山頂近傍の 4 地点において人力掘削調査を実施した。これまで記載されていない火山灰層を含め、最近 6,000 年間の活動による少なくとも 9 枚の噴火堆積物を認識し、噴火履歴および活動推移に関するデータを得た。

h) 秋田駒ヶ岳：更新世末期から完新世の噴火履歴と噴火様式の解明（北海道大学・株式会社エンバイオ・エンジニアリング）

○はじめに

秋田駒ヶ岳は秋田県と岩手県の県境に位置する、東北地方では最も活動的火山のひとつであり、山頂部に小型のカルデラ（南部カルデラ）を有している（図 3 8）。その活動は主成層火山形成期、カルデラ形成期そして後カルデラ活動期の 3 つに大別でき、さらに後カ

ルデラ活動期は、北部火山体形成期および南部火山体形成期に細分できる⁴⁵⁾⁴⁶⁾。なお北部カルデラ（図3 8）については、現在では土井・他⁴⁷⁾によって山体崩壊壁であると考えられている。

我々は2019年度から本火山を重点火山に指定して研究を開始した。その際の課題として以下の3点を挙げた。1) 10世紀初頭から約1,000年間の静穏期は事実か、2) カルデラ形成噴火の推移と様式が明らかになっていない、3) 後カルデラ活動期の噴火履歴・噴火様式および噴出量が明らかになっていない。今年度は、2番目の課題であるカルデラ形成期噴火について、その成果を報告する。

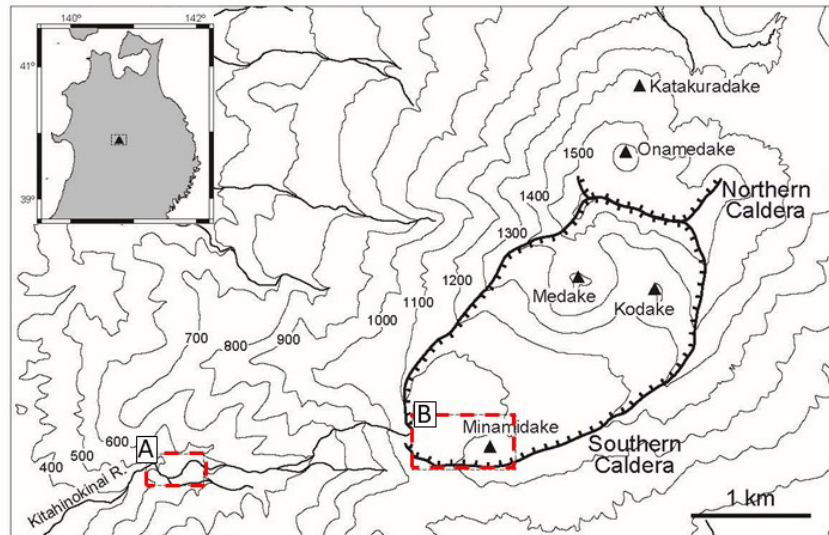


図3 8．秋田駒ヶ岳の位置と山体中心部の地形図。

○カルデラ形成期噴出物の再検討

南部カルデラ形成噴火に関与した堆積物としては、2つの大規模なテフラ層（AK13 と AK12）と山麓に分布する生保内火砕流が相当すると考えられている⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁸⁾。我々は地表踏査と堆積物の物質科学的解析によって、その詳細を再検討した。

生保内火砕流の調査において、これまで噴出時期に議論があった「桧木内溶岩」⁴⁵⁾と、生保内火砕流の関係を明らかにした。図3 8のAに示す領域では、桧木内溶岩を生保内火砕流が覆っていることを露頭で確認でき、また陰影起伏図でも両者の関係が示されている（図3 9）。よって「桧木内溶岩」は主成層火山形成期の噴出物であることが確定した。また南部カルデラ内においては未知の火砕流堆積物を見出した（図4 0）。この火砕流堆積物の本質物は秋田駒ヶ岳では稀な軽石であり、風化がやや進んだ特徴的な黄白色を呈する。この火砕流は南部カルデラ底南部にある南岳火砕丘をアバットしていることも確認できた（図4 0）。この火砕流について国見火砕流と命名した。

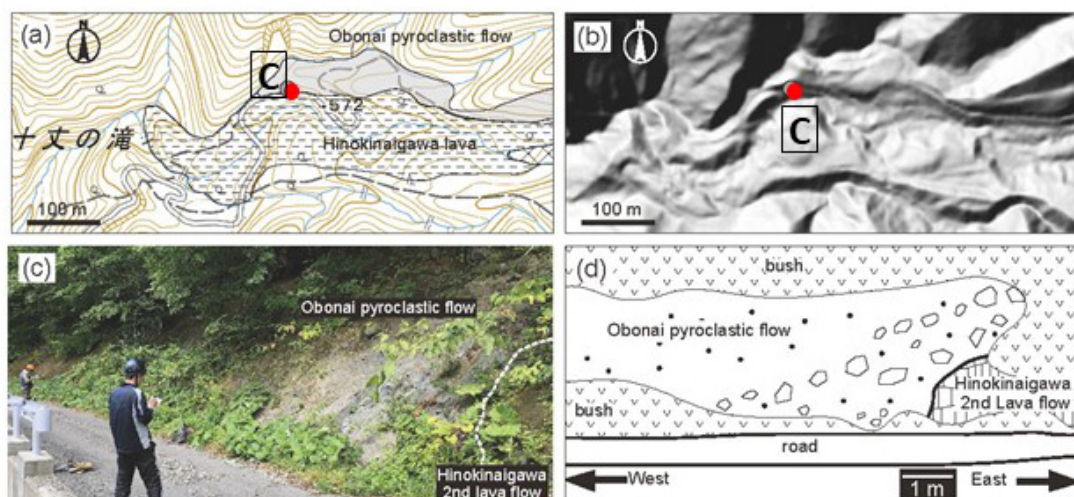


図 3 9 . 桧木内川上流部 (図 3 8 の A 地域) における桧木内川溶岩と生保内火砕流の関係。(a)および(b)図中の地点Cの状況を、写真とスケッチで(c)と(d)に示した。

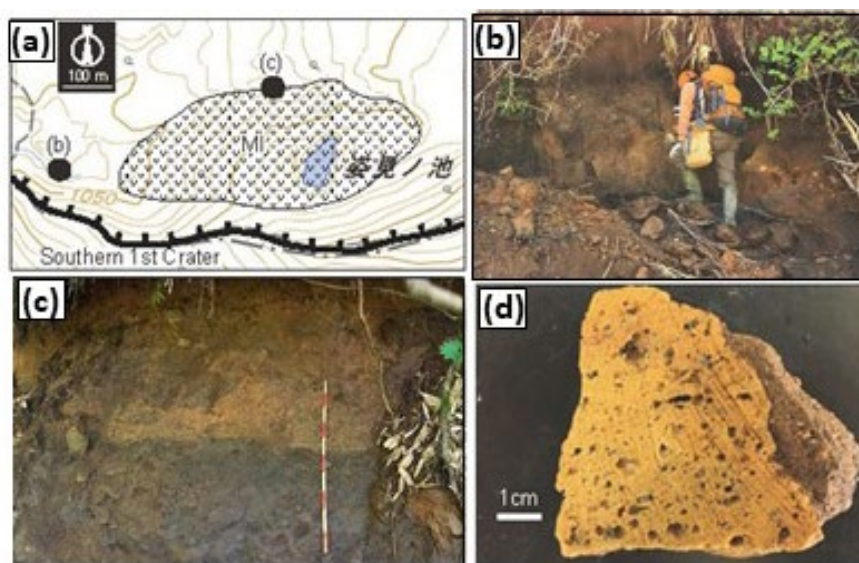


図 4 0 . 国見火砕流と南岳火砕丘の関係。(a) 図 3 8 の B 地域拡大図。ハッチが南岳火砕丘で(b)(c)は露頭位置を示す。(b) 国見火砕流の露頭写真。(c) 南岳火砕丘 (下) と国見火砕流 (上) の直接の被覆関係。(d) 国見火砕流中の軽石。

これらの2つの火砕流と AK13 と AK12 のテフラ、そして南岳火砕丘の噴出物の岩石学的特徴を検討して対比を行った。AK13 の本質物はスコリアで、 $\text{SiO}_2 = 55 \sim 58\%$ のかんらん石含有直方輝石単斜輝石安山岩、AK12 の本質物は軽石、スコリアおよび縞状軽石で、 $\text{SiO}_2 = 54 \sim 64\%$ の単斜輝石直方輝石デイサイトおよびかんらん石直方輝石単斜輝石安山岩である。両者は全岩化学組成で区別でき、例えば $\text{SiO}_2 - \text{MgO}$ 図において、AK12 の方が同じ SiO_2 量において MgO に富む (図 4 1)。生保内火砕流の本質物はスコリアであり、その化学組成は AK13 と一致する。一方で、国見火砕流の本質物は軽石であるが、風化が進んで灼熱減量が 4% 以上であり、全岩化学組成では他の噴出物との比較が困難である。しかし特徴的な色調の軽石であること、また SiO_2 量が AK12 の軽石と同じであることが

ら AK12 に対比できる。よって AK13 と AK12 のテフラを噴出した噴火では、それぞれ生保内火砕流と国見火砕流を噴出したことが明らかになった。

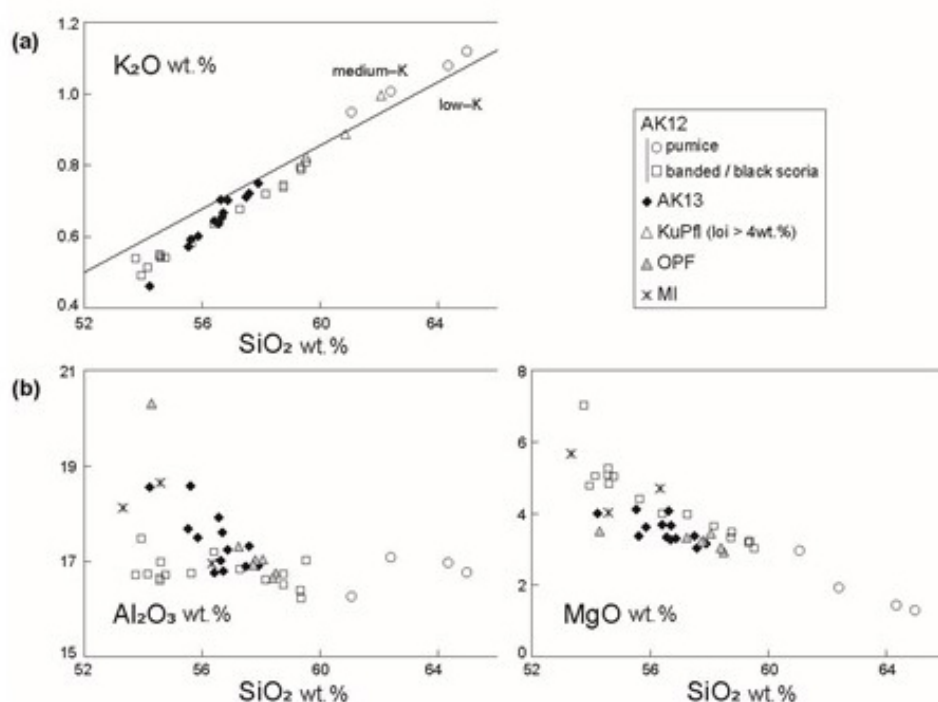


図 4 1．南部カルデラ形成期の噴出物の全岩化学組成 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$ のハーカー図。凡例：Kupfl：国見火砕流、OPF：生保内火砕流、MI：南岳火砕丘。国見火砕流は灼熱減量が 4%を超えるので K_2O のみ示した。

○南部カルデラ形成噴火推移

図 4 2 に和知・他⁴⁸⁾と本研究によって確認した AK13 と AK12 の模式柱状図を示す。AK13 のテフラは発砲度の悪いスコリアに富む K3P ユニットから始まり、その後に発砲度の良いスコリアからなる K2P で最盛期を迎え、最後に発砲度の悪いスコリアに富む K1P で終わっている。生保内火砕流の流下時期については、火砕流と AK13 のスコリアの岩石学的性質から検討した。K3P の本質物は、微斑晶サイズのかんらん石をごくわずかに含むが、K2P と K1P ではかんらん石のサイズも大きくなり、モードも増加する違いがある。この本質物の記載岩石学的特徴が、生保内火砕流と K3P と類似しており、この時期に火砕流が発生したと考えられる。この噴火は 15,500～15,300 calBP に起こった（和知・他⁴⁸⁾を暦年補正、以下同じ）。

AK12 も含まれる本質物のタイプと層相によって、複数のサブユニットに分けることができる（図 4 2）。国見火砕流は軽石が本質物ということで、軽石を含む Y3P か Y2P-L のいずれか、あるいは両方に対比できる。Y3P は細粒火山灰にとみ火山豆石を含んでおり、マグマ水蒸気爆発による噴火であるのに対して、Y2P-L は降下軽石層であるので噴煙柱が立ち上ったサブプリニー式噴火と考えられる。両者を比較すると、噴煙柱が安定していない Y3P の時期に国見火砕流が発生したと考えるのが妥当である。この噴火は 15,200～

12,900 calBP に起こった。

南岳火砕丘はこれまでは後カルデラ期の山体と考えられていたが⁴⁵⁾⁴⁶⁾、国見火砕流に覆われていることから AK12 の前に南部カルデラ内に存在していたことが明らかになった。従って、AK13 によって南部カルデラが形成された後で、かつ AK12 噴火前にカルデラ内の南端に南岳火砕丘が形成されたことになる。南岳火砕丘は山体が爆発によって破壊されたような形状を示さないこと、また国見火砕流に覆われることから、AK12 の噴火は南岳火砕丘の北方に活動中心であったことが推定される。実際に南部カルデラの形状を見ると単純な楕円形ではなく、2～3つの火口が接合しているように見える（図38）。したがって、南部カルデラはAK13によってカルデラの南部が形成され、その後のAK12の噴火によってカルデラの北部が拡大した、複合カルデラであることが明らかになった。

南岳火砕丘の本質物は玄武岩質安山岩であり、AK13 テフラと類似するが、全岩化学組成では両者は区別でき、異なる噴火で生成されたと考えられる。つまり AK13 のテフラ噴出後、AK12 の活動の前に、南岳火砕丘は活動したことになる。そのことからカルデラ形成噴火はステージ1～3の3つに分けて考えることができる（図42）。

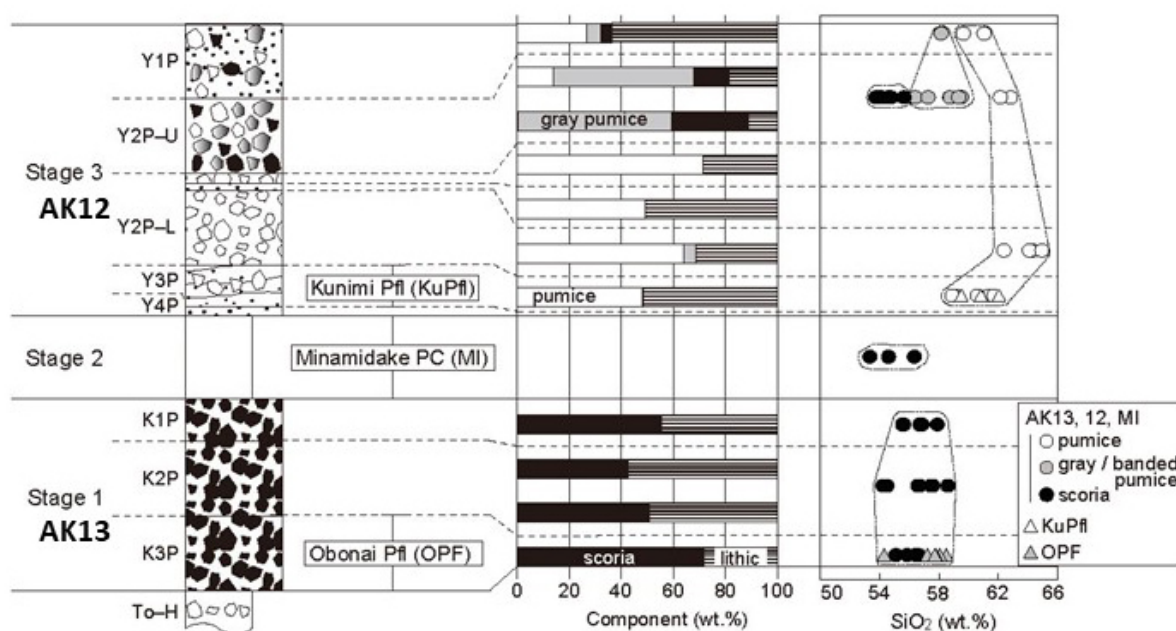


図42. カルデラ形成噴火の推移をテフラの模式柱状図で示した図。南岳火砕丘と火砕流の発生時期も示している。本質物のタイプ（スコリア、軽石、灰色軽石）に分けて、構成物分析および全岩組成の時間変化を示した。

i) 鳥海山：トレンチ掘削調査および野外調査による鳥海山の完新世噴火活動史の解明（秋田大学・山形大学・産業技術総合研究所）

i) トレンチ掘削による鳥海山の完新世噴火活動史の解明と事象分岐シナリオ

○はじめに

テフラ露頭の露出条件が貧弱な火山においても、トレンチ調査により任意の場所でテフ

ラ調査を実施できる。鳥海火山起源のテフラ層は、本プロジェクト開始の数年前にようやく認識されるようになったが⁴⁹⁾⁵⁰⁾、その観察地点もごく限られていた。鳥海火山では爆発的噴火による火砕物の到達範囲が山頂周辺に限られ、火山体中腹より標高の低い場所まで到達していないこと、また山頂周辺でもテフラが露出する露頭が極わずかであることが、調査が進んでいない理由である。

鳥海山は東西 20 km、南北 15 km の大型成層火山であり、その山体表面には明瞭な溶岩地形がよく残されている。本火山は現在の山頂を中心とする東鳥海火山、鳥ノ海湖を山体中心とする西鳥海火山から構成される。東鳥海火山の北側斜面には 2,500 年前の山体崩壊による馬蹄形カルデラが山頂から北側に向かって開き、この崩壊による象潟岩屑なだれ堆積物が北麓に広がっている。馬蹄形カルデラ内にも多数の明瞭な溶岩地形が認められ、山体崩壊後の溶岩流の流出によりカルデラ内が埋積されている。現在の山頂である新山溶岩ドームは 1801 年の噴火により形成されたものである。2,500 年前以降の噴火に伴い、繰り返しラハールが発生し、山麓に堆積することもあった⁵¹⁾。東鳥海火山由来のテフラ層が複数堆積しているのは山頂から 2 km 以内に限られ、概ね東鳥海火山では約 4,500 年前以降の活動がテフラ層として保存されていることが報告されているものの、限られた露頭での観察であることが問題であった。そのために完新世後期の噴火活動史、噴火規模、噴火様式、現象推移等について不明な点が残されていた。そこで、本プロジェクトでは鳥海火山を最重点火山に指定し、トレンチ調査により火山活動の詳細を解明することとした。2017 年度からトレンチ調査を繰り返し実施し、鳥海火山の火山活動の詳細が解明されつつある。ここでは 2020 年度実施内容とこれまでに解明された点をまとめて報告する。

○調査および分析方法

2020 年度は山体上部と山麓部においてトレンチ調査を複数実施した。東斜面百宅口登山道唐獅子平避難小屋付近、西側斜面ミナミノコマイ、東麓の百宅登山道入り口大清水小屋付近、北東麓の奥山林道である。前年度までの実施地点も合わせ、図 4-3 にトレンチ調査の位置を示す。トレンチ調査では、2 m² の範囲をスコップとハンマードリルを使って掘り下げ、壁面にて観察と試料採取を行った。なお、硬質層に到達する等、条件によって掘削できた深度にはばらつきがあるものの、概ね 1~1.5 m 深である。なお、ミナミノコマイ掘削地点では、近傍で発見した小露頭の記載も行い、試料採取を行った。

採取した火山灰試料は、水洗の後、ふるい分けにより 125~250 μm の粒子を抽出し、双眼実体顕微鏡にて検鏡を行った。火山灰を色調・形態・光沢等を基に分類し、その量比を基に火山灰の特徴付けを行い、対比の手がかりとした。

有機物を含む土壌試料を用い、山形大学高感度加速器質量分析センターにて加速器質量分析法 (AMS 法) による放射性炭素年代測定を行った。12 試料について測定を実施し、10 試料より良好な結果が得られた。

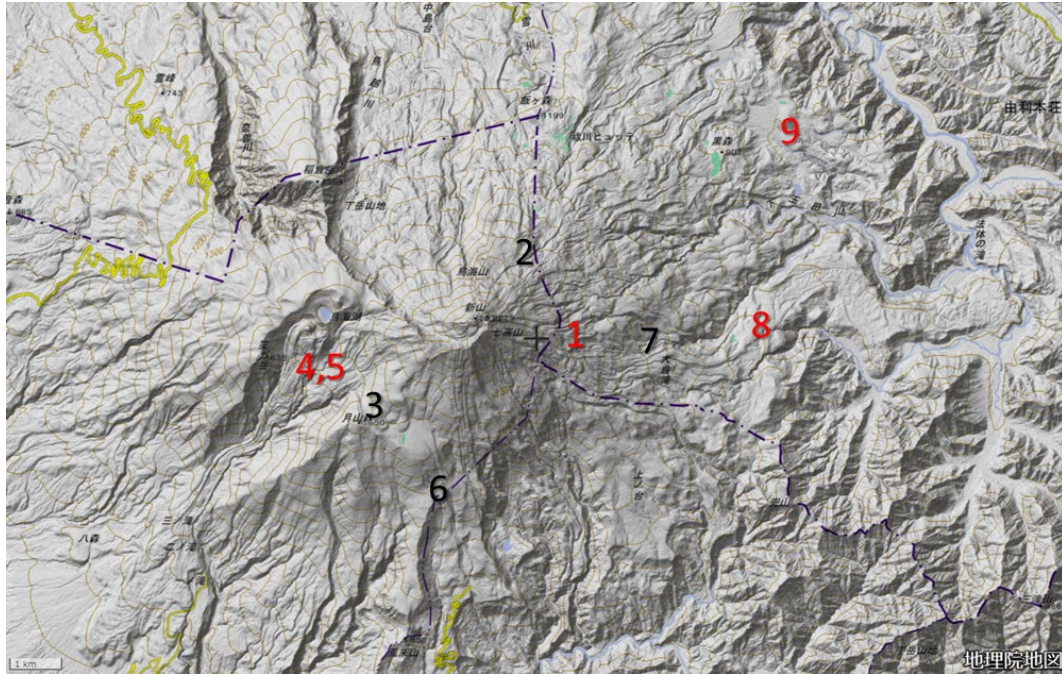


図 4 3. トレンチ調査実施地点。黒数字は 2019 年度以前の掘削実施地点。赤数字は 2020 年度トレンチ及び近傍の小露頭の地点を示す。1：百宅登山道唐獅子小屋地点、2：セツ釜滝地点、3：月山森地点、4：ミナミノコマイ地点、5：ミナミノコマイ露頭、6：滝ノ小屋地点、7：百宅口登山道地点、8：百宅口大清水山荘地点、9：百宅奥山林道。

○結果

百宅登山道唐獅子小屋地点では 6 ユニット 10 層、ミナミノコマイ地点では 6 ユニット 8 層、百宅口大清水山荘付近では 1 ユニット 1 層のテフラ層を見いだした。百宅奥山林道のトレンチではテフラ層を認識することはできなかった。百宅登山道唐獅子小屋トレンチでは、ラピリ層（第 3 ユニット中央部と第 6 ユニット）と細粒～粗粒火山灰が認められる。第 2 ユニット直下の土壌から $1,641 \pm 20$ yBP、第 3 ユニット直下の土壌から $1,838 \pm 20$ yBP、第 5 ユニット直下の土壌から $2,140 \pm 20$ yBP の年代が得られた。ミナミノコマイのトレンチでは、上位 4 層は細粒～中粒火山灰の薄層、下部のテフラ層は粗粒な降下スコリア堆積物（鳥ノ海スコリア）からなる。第 1 層、第 2 層、第 4 層直下の土壌試料より、それぞれ 295 ± 20 、 $1,342 \pm 20$ 、 $2,140 \pm 20$ yBP の年代値が得られた。トレンチ地点ごく近傍の登山道沿いの露頭では、鳥ノ海スコリアの上位に 3 層のテフラ薄層が認められた。第 3 層と鳥ノ海スコリアの間の土壌より、 $5,792 \pm 20$ yBP の年代が得られた。大清水山荘付近では、20 cm 程の黒色土壌の下に厚さ計 80 cm 程の含スコリア層がある。この層は淘汰が悪く、基質は土壌化した細粒火山灰からなる。再堆積物と考えられる。その下位に、薄い土壌層を挟んで厚さ 40 cm 以上の比較的淘汰の良いスコリア層が認められる。スコリア層上位の土壌層より $5,390 \pm 25$ yBP の年代が得られた。百宅奥山林道ではテフラ層が認められず、トレンチ上部 25 cm は暗色土壌、下部 70 cm は明褐色土壌であった。暗色土壌下部の試料より $1,042 \pm 23$ yBP、明褐色土壌下部の試料より $6,330 \pm 27$ yBP の年代が得られた。

テフラ層を全て採取し、顕微鏡観察を行った。いずれの試料も複数種の火山灰粒子が含まれており、暗色光沢火山灰（不規則形態またはブロック状）、明色石質火山灰、変質火山

灰、結晶片、赤褐色火山豆石からなる。これらの量比はテフラ層によって異なると考えられ、対比の指標になるが、多くのテフラ層の火山灰成分比は似通っており、区別が難しい。しかし、数層のテフラは極端に赤褐色火山豆石に富んでおり、対比の鍵となる。

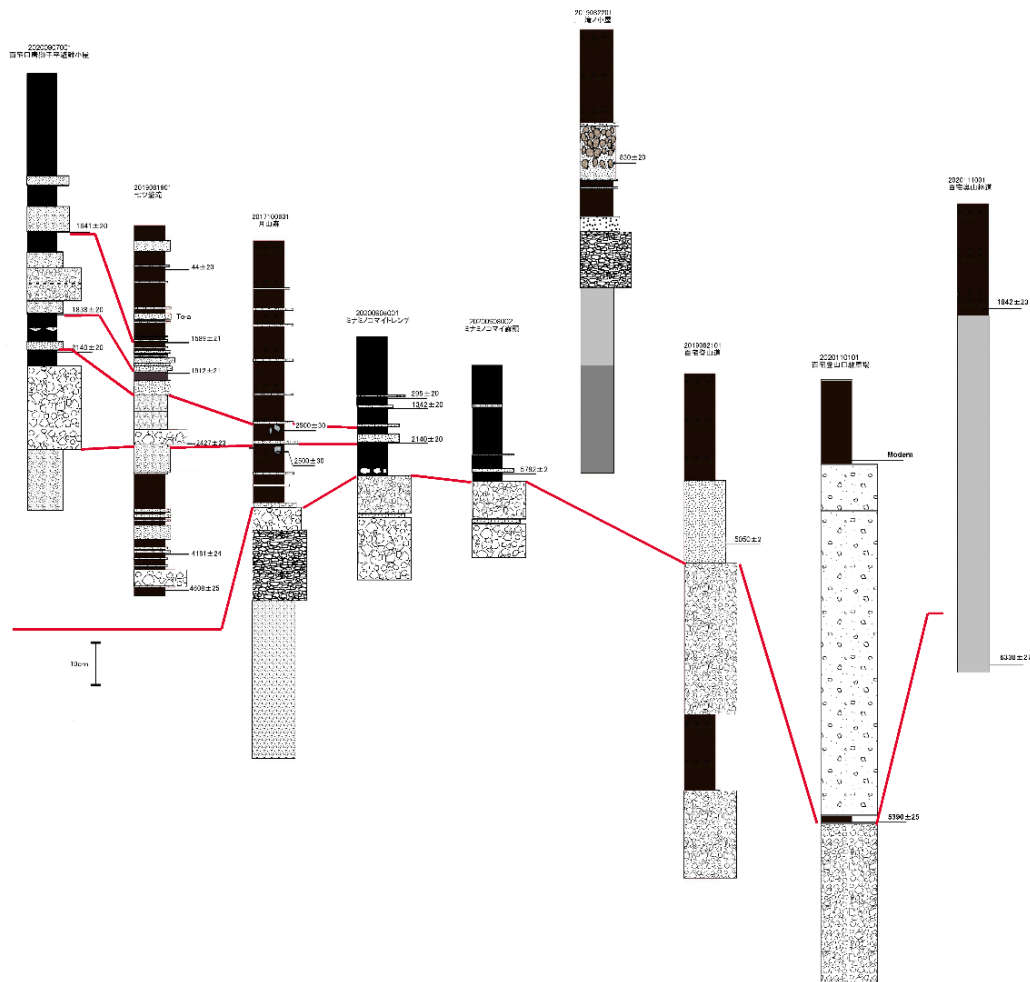


図 4 4．本調査による柱状図対比。

これまでの層相観察・年代測定・検鏡により、トレンチ間で数枚のテフラが対比された。その結果を図 4 4 に示す。とりわけ山頂火口から近い七ツ釜滝地点（2019 年度掘削）と本年度掘削の唐獅子小屋地点の間で良く対比できた。対比されたテフラ層について詳細を記す。

鳥ノ海スコリア 鳥ノ海スコリアが幾つかのトレンチの基底部に露出し、対比された。直上の土壌からは 5,000～6,000 年の年代値が得られているが、西鳥海では鳥ノ海スコリア直上に古い年代のテフラが認められるため、鳥ノ海スコリア 6,000 年よりは大幅に古いものと考えられる。

2.5ka サージ堆積物 2,500 年前の年代を示す赤褐色火山豆石を多く含む火山礫～火山砂層も広く分布し、対比された。構成物からは、マグマ水蒸気噴火噴出物と考えられ、木片の含有、不均一な層厚などの産状から、この堆積物は降下火山灰ではなく、サージ堆積物と考えられる。ところにより赤褐色火山礫層の基底に暗色火山砂を含む白色粘土質火山灰を伴い、上位に土壌を挟まずに暗色火山灰が被覆する。暗色火山灰の下部はスコリア質火

山灰に富む一方、上部は石質～ブロック状火山灰からなり、最上部に向かって土壌化する。

2.1ka テフラ 砂質火山灰からなり、変質物に乏しい。セツ釜滝地点では上部が赤色砂質火山灰、下部が灰色砂質火山灰からなる。一方、唐獅子小屋地点では灰色砂質火山灰中に赤色火山灰の塊が混じった産状を示す。酸化度等の条件で異なった色調の火山灰が噴出したと考えられるが、いずれもマグマ噴火による火山灰である。

1.8ka テフラ 基底部は粘土質～極細粒な明色火山灰からなり、灰色砂質火山灰～火山礫層が覆う。セツ釜滝地点では上方粗粒化が顕著である。火山礫層を明灰色細粒火山灰が直接被覆する。基底と上部の細粒火山灰は変質物とともに新鮮なガラス質暗色火山灰を含み、マグマ水蒸気噴火噴出物である。中央の粗粒部はマグマ噴火による火山灰である。

1.6ka テフラ 粘土質細粒火山灰層からなり、新鮮なガラス質ないし暗色石質火山灰を含む。層内変化に乏しい。マグマ水蒸気噴火噴出物と考えられる。

○減災への応用－鳥海山の事象分岐シナリオ構築に向けて

テフラ層の構成粒子や層相から、噴火様式を決定できることが多い。とりわけ層内での層相・構成物の連続的変化が認められる場合は、一連の噴火の推移が地層中に記録されているものと判断できる。上記の柱状図対比されたテフラの中では、**2.5 ka** および **1.8 ka** のテフラに層相変化が認められ、噴火推移の解析が可能である。**2.5 ka** テフラの層変化から、基底の粘土質火山灰を生じたマグマ水蒸気噴火から、倒木や豆石の生成を生じたマグマ水蒸気噴火による火砕サージに推移し、最後にマグマ噴火（ストロンボリ式→ブルカノ式）に変化することがわかる。**1.8 ka** のテフラからは、マグマ水蒸気噴火からマグマ噴火（ブルカノ式噴火）へ推移したことがわかる。

2.5 ka にはラハールが繰り返し発生し、**1.6 ka** にも大規模ラハールが発生している⁵¹⁾。それぞれテフラ層と対応でき、噴火に伴ってラハールが発生したこともわかる。文書記録によると山麓に到達するラハールは**1801**年噴火の際にも発生しており⁵²⁾、小規模なものは**1974**年にも発生している⁵³⁾。噴火に伴うラハール発生は、鳥海山では一般的であると言えそうである。また、マグマ噴火が発生した場合は、溶岩を伴うと考えるのも自然である。**1801**年噴火では溶岩ドームが生成している⁵⁴⁾。また、**2,500**年前の山体崩壊後に馬蹄形カルデラを繰り返し溶岩流が埋積していることから、**2,500**年前以降の噴火に伴う溶岩流の流出も一般的であることが明白である。

過去の噴火の古記録や観測結果からは、一般に鳥海山の噴火活動は噴気あるいは弱い噴煙から開始することが解っている⁵⁵⁾。噴気、弱い噴煙、地熱異常は地層に残らないイベントだが、先史時代の噴火でもこれらの事象から始まっていたと考えるのが自然である。多くの噴火で水蒸気噴火（例えば**1800**年噴火⁵⁴⁾）あるいはマグマ水蒸気噴火から始まっていることがテフラ層の観察や記録からわかる。火山灰成分の観察からは、山体内部の熱水系に由来する噴火であることが解る。すなわち、噴火に先立ち、火山体内部にて新たなマグマによって熱水系が加熱され、噴気や地熱異常として現れる可能性が高い。

以上から、鳥海山では噴火イベントにより異なった噴火様式や推移が認められるものの、ある程度噴火シナリオの一般化ができそうである。噴火の前駆現象として、マグマによる加熱によって地熱異常・噴気異常が生じる。この熱水系の加熱により、水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火から噴火が開始するのが一般的だろう。**1974**年噴火はマグマ貫入の

後に水蒸気噴火が発生し、この段階で活動が停止したようである⁵³⁾。一方、1800-1804 年噴火では、水蒸気噴火からマグマ噴火・溶岩流出まで発展したようである⁵⁴⁾。

このような情報から、鳥海山が噴火の危機に際した場合、どのような前兆現象があるのか（地熱異常、噴気）、噴火がどのような推移をたどるのか（水蒸気噴火・マグマ水蒸気噴火→マグマ噴火・溶岩）、どんな事象を伴うのか（ラハール）といったことが分かる。また、本年度の調査や既往研究⁵¹⁾により、降灰範囲やラハールの到達範囲も推定できる。以上の結果は、火山防災避難計画策定の上で重要な情報であり、今後の防災政策に生かされることが期待される。

○まとめ

2020 年度に鳥海火山山腹～山麓において複数のトレンチ調査を実施した。火山灰の検鏡と放射性炭素年代測定により、2017～2019 年度のトレンチ調査の結果を合わせて柱状図対比を行った。その結果、>6,000 年（鳥ノ海スコリア）、2,500 年前（山体崩壊に伴う噴火）、2,100 年前、1,800 年前、1,600 年前の噴火噴出物が対比できた。2,500 年前の噴火はマグマ水蒸気噴火→サージを伴うマグマ水蒸気噴火→ストロンボリ式噴火→ブルカノ式噴火の順に推移したと考えられる。1,800 年前の噴火マグマ水蒸気噴火からマグマ噴火に推移した。噴火記録や既往研究から、噴火は地熱異常・噴気等で開始すること、噴火の際にはラハールが発生すること、マグマ噴火の際には溶岩流出を伴う可能性が高いことがわかる。火山活動は噴気等から水蒸気噴火またはマグマ水蒸気噴火に推移し、そのまま終わることもあれば、マグマ噴火へ推移することもある。爆発的噴火によるテフラは山麓まで到達することはまれである。このような鳥海山の火山活動の傾向は、火山防災政策に対する重要な知見である。

ii) 鳥海山、西鳥海カルデラの活動履歴の解明

鳥海山の西鳥海カルデラ内噴出物は約 2 万年前より前に形成されたと考えられてきた⁵⁶⁾が、最近になって少なくともその一部は完新世のものである可能性が考えられるようになり再検討を進めてきた。2017 年度に調査に着手し、2018 年度は噴出物の層序の概要を明らかにした。2019 年度に層序を確定させ、本年度は岩石学的研究を進め、岩石学的特徴の時間変遷を明らかにした。また鍋森湿原で発見された約 1 万年前以降のテフラ層の特徴もまとめた。以下にその概要を記す。

図 4 5 に西鳥海カルデラ内の噴出物の分布と層序を示す。噴出物は下位から、中ノ沢下部溶岩類（溶岩流主体でブロックアンドアッシュフロー堆積物も含む）、扇子森溶岩ドーム、鳥ノ海スコリア（降下スコリア）、中ノ沢上部溶岩類、鍋森湿原アグルチネート、その上位の万助道溶岩、鍋森山溶岩ドーム、前鍋森山溶岩ドームに分類できる。万助道溶岩、鍋森山溶岩ドーム、前鍋森山溶岩ドームの新旧関係は不明である。噴出物の総体積は約 8 km³ である。このうち中ノ沢上部溶岩類の溶岩地形は非常に明瞭に保存されており、完新世に形成されたものであると推定される。よってそれより上位の層は全て完新世に形成されたものと考えられる。

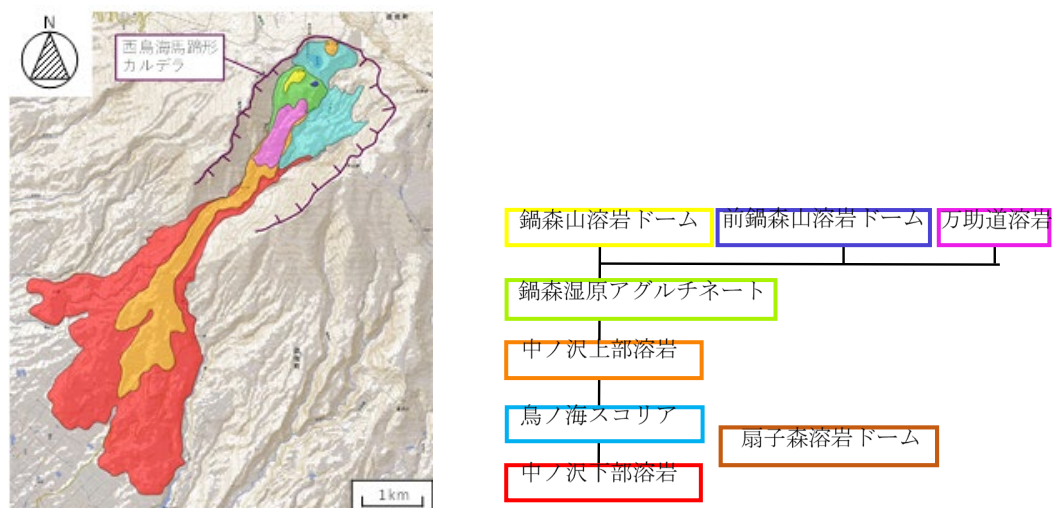


図 4 5 . 西鳥海カルデラ内噴出物の地質図と層序図。林 57)を基にし、大幅に改定したもの。

岩石は暗灰色～灰色の溶岩または黒色のスコリアからなる。斜長石、単斜輝石、直方輝石、かんらん石、普通角閃石斑晶は全ての噴出物に含まれる。鳥ノ海スコリア・中ノ沢上部溶岩類・扇子森溶岩ドームは、かんらん石斑晶に、また、鍋森山溶岩ドーム・前鍋森山溶岩ドーム・万助道溶岩は普通角閃石斑晶に富む。ディクチタキシチック組織を示す苦鉄質包有物がほとんどの溶岩に認められ、またスコリアの一部のものは縞状組織を示す。苦鉄質包有物は、かんらん石と普通角閃石斑晶を含むもの（タイプ A）と含まないもの（タイプ B）がある。

全岩化学組成：母岩はハーカー図上で大局的に一連のトレンドを描き、高カリウム、カルクアルカリ系列に属する。SiO₂量は、中ノ沢下部溶岩類は 57-59%、扇子森溶岩ドーム・鳥ノ海スコリア・中ノ沢上部溶岩類は 54-57%、鍋森湿原アグルチネートは 57-60%、鍋森山溶岩ドーム・前鍋森山溶岩ドーム・万助道溶岩は 59-61%である。詳しく見ると、中ノ沢下部溶岩類と扇子森溶岩ドームからなるトレンド（トレンド L）と鳥ノ海スコリア・中ノ沢上部溶岩類・鍋森湿原アグルチネート・万助道溶岩からなるトレンド（トレンド U）が認識できる。K₂O・Rb・Sr・MgO・Cr・Ni 図でトレンド L はトレンド U より低めであり、FeO*・TiO₂・V 図ではその逆の傾向がある。鍋森山・前鍋森山両溶岩ドームはトレンド L・U のどちらの延長上にも乗らない場合が多い傾向にある。苦鉄質包有物のタイプ A は、母岩と同様の系列に属す一方で、タイプ B は中間カリウム、ソレイト系列に属す。タイプ A はトレンド U の苦鉄質側延長上に乗る。タイプ B は母岩とは異なるトレンドを示す。

全噴出物約 9 割を占める初期の溶岩は、トレンド L を示すマグマによるものである。その後の全噴出物の約 1 割に相当する噴出物をもたらした、溶岩→火砕丘→小山体形成→溶岩にかけての活動は一部を除きトレンド U を示すマグマによるものである（図 4 6）。この活動では組成は珪長質方向へ順次変化した。再末期に形成された 2 つのドームはトレンド L・トレンド U から組成的に外れている場合が多い。これらの体積は全噴出物の約 1% 以下と少量で、上記の主要な 2 つのトレンドのマグマから副次的に派生したマグマ由来である可能性が考えられる。

鍋森湿原で発見された約 1 万年前以降の 17 枚のテフラ層については、最下位が約 1 万年前、最上位が約 4 千年前のものであった。下から 2 枚目と上部の 3 層は石質岩片を特徴

的に含み、下から 5 枚目・9 枚目のものはスコリアが卓越し、その他のものは細粒物主体であることが判明した。

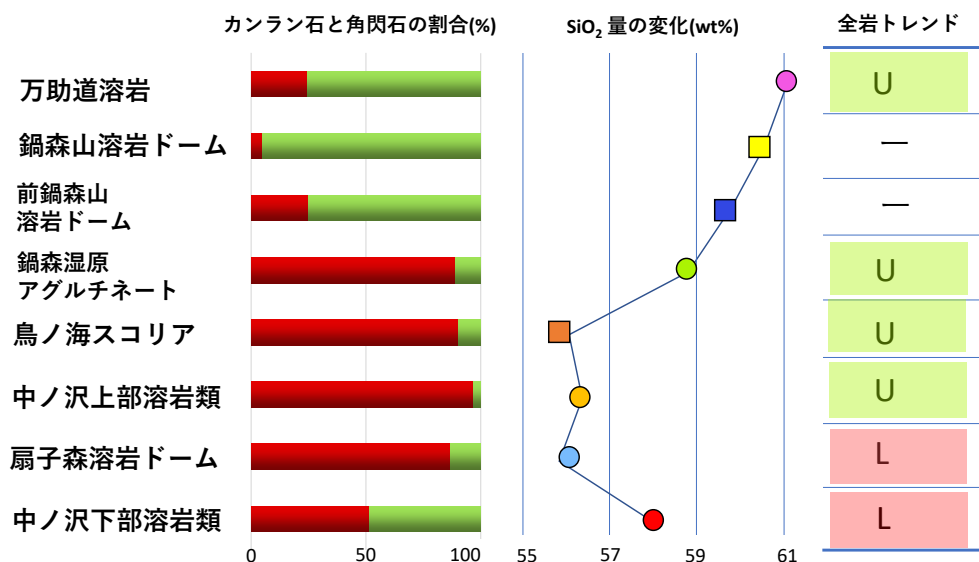


図 4-6. 西鳥海カルデラ内噴出物の岩石学的特徴の時間変化まとめ。

j) 栗駒山：トレンチ掘削調査による栗駒山の完新世噴火活動史の予察的調査（秋田大学）

○はじめに

栗駒山は秋田県、岩手県、宮城県の 3 県にまたがる活火山であり、3 県の県境が交わる地点の約 1 km 東方に山頂がある。完新世に活発な噴火活動があるのは、山頂の北側から須川高原までの間であり、とりわけ昭和火口で活発な噴火活動があったことが分かっている。ここでは 1944 年にも水蒸気噴火が生じている。水蒸気噴火が完新世における主要な噴火様式であるが、剣岳溶岩等のマグマ噴火も確認されている。令和 2 年度は、須川高原温泉に近いイワカガミ平湿原において掘削調査を実施し、採取試料の年代測定を行った。年代測定は山形大学高感度加速器質量分析センターにて加速器質量分析法（AMS 法）による放射性炭素年代測定を行った。2 試料について測定を実施し、いずれも良好な結果が得られた。

○結果

このトレンチでは土壌が最上部にのみ発達し、上部黒色土壌から $1,240 \pm 22$ yBP、その下位の褐色土壌から $1,425 \pm 23$ yBP の年代値が得られた（図 4-7）。その下位には 9 層の淘汰の良い層が認められ、その多くはテフラ層であると考えられる。とりわけ粗粒なスコリア層が 4 層認められ、完新世にマグマ噴火が繰り返し発生したことを示している可能性がある。これらのスコリア層は、明色粘土層、シルト層と互層しており、少なくとも一部は水蒸気噴火由来のテフラの可能性はある。

○考察

イワカガミ平湿原にて完新世噴出物と思われるマグマ噴火テフラ（スコリア層）が複数見いだされたが、現状では既往研究と直接対比できない。水蒸気噴火が主体とされている本火山でのマグマの活動の変遷を解明するため、この後も調査が必要である。露頭調査は既往研究⁵⁸⁾にて丁寧に行われているが、テフラ層の露出は限られているために、トレンチ調査が今後とも必要となる。

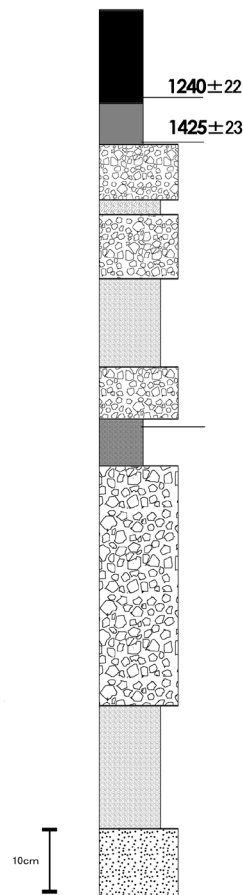


図 4 7．イワカガミ平湿原トレンチの柱状図。図中の数値は ^{14}C 年代値を示す。

k) 蔵王山：トレンチ掘削調査および野外調査に基づく蔵王山の噴火活動履歴の高精度化（山形大学）

蔵王山最新の活動期は、約 3.5～1.3 万年前、約 9～3 千年前、約 2 千年前以降に分けられる⁵⁹⁾⁶⁰⁾。これら 3 つの活動期について実施したことを活動フェーズ毎に以下に記す。

○蔵王山約 3.5～1.3 万年前の活動フェーズ

前年度までに模式地（青根温泉から東南東約 5 km 地点の私有地内：図 4 8 に柱状図を示す）を設定し、約 3.5～1.3 万年前の活動フェーズに属する 4 枚のテフラ層（Za-To1～4）を認識した。なお、Za-To3 に対比されるテフラの下方には薄い 2 枚のテフラ層が認識されている（上位より Za-To3b,3c とし、従来の Za-To3 を Za-To3a とした）。

これまでに Za-To1~4 の空間分布を解明するため多くの地点での観察を行ってきたが、特に Za-To3 と Za-To4 は岩相が良く似ているため露頭間での対比に困難が生じていた。そこで、今年度は可能な限り多くの地点において各テフラ直下の古土壌や炭化木片を採取し ^{14}C 年代測定を行うことによって対比を試みた。

その結果以下のことが判明した。まず、山頂から東方約 7~15 km の地域では Za-To1 と Za-To2 は 3 つの地点で確認され、何れも地表から約 3~4 m 下方に産出していることが分かった。他の地点では 3~4 m の高さあるいは深度の情報は得られていない。この地域において Za-To1 と Za-To2 をさらに別の地点で観察するには約 3~4 m の深度のトレンチを行う必要がある。山頂から東北東 20 km 前後の地域では地表から約 1 m 下方に Za-To1 と Za-To2 に対比可能と考えられるテフラが認められた。しかし古土壌試料の炭素含有量が低く、年代測定が行えていない。対比の根拠を強いものにするためには上下の古土壌から広域テフラを見出すなどの方法が必要である。山頂から東方約 20 km 前後の地域では、これまでの研究で Za-To2 相当層とされてきたものは、確認したもの全てが約 1 万年前より新しい年代のものであることが判明した。

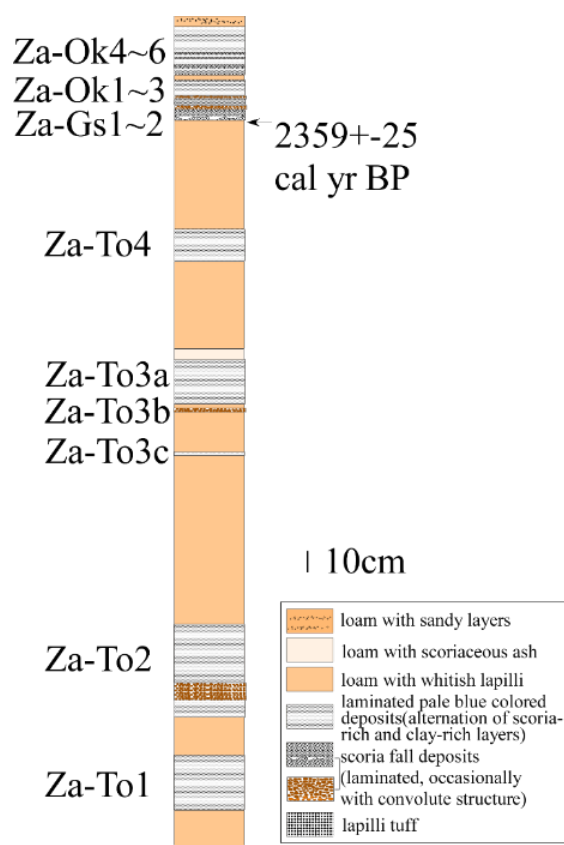


図 4-8. 東麓の模式地における柱状図。
これまで Za-To3・Za-To4 としてきたものは、東北東とそれ以外に分布するもので異なることが判明した。模式地の Za-To3 と Za-To4 は全て約 1 万年前より新しい。

Za-To3 と Za-To4 については、東北東部に分布するものと、それ以外に分布するものが異なる年代のものであることが判明した。東北東部では 1 地点においての直下の古土壌の年代値から Za-To3 および Za-To4 の年代は 27 ka および 13 ka とされてきた。今年度の調査で北方の 1 地点において直下の古土壌から約 10 ka の年代値が得られたテフラが認められた。これが Za-To4 に対比される可能性がある。山麓のその他の地点では 27 ka または 13 ka に近い年代のテフラは発見されていない。なお、山頂周辺のトレンチ調査の結果、

13 ka に近い年代のテフラが認められた。これについては次項で述べる。

東北東部以外に分布し、Za-To3 と Za-To4 に対比されてきたテフラ層はこれまで年代推定が系統的に行われてなかったものである。今回それを行った結果、全て約 1 万年前より新しいものであることが判明した。これらについては次項で述べる。

○蔵王山約 9～3 千年前の活動フェーズ

約 9～3 千年前の噴出物について、地表での調査を進めると共に、山頂から西方約 1.8 km（御田の神）付近と東方約 4.8 km 付近の 2 地点においてトレンチ調査を実施した。

前項で記したように東麓に分布する従来 Za-To3 および Za-To4 と考えられていたものの多くはこの活動フェーズに属するものとなった。また、これまで認識されていなかった層も確認された。本年度の調査結果をまとめると、東麓に分布するこの活動フェーズに属するテフラは、7.1-7.7 ka・5.8-5.9 ka・5.4-5.8 ka・4.0-4.9 ka の主に 4 層となった。図 4 8 の Za-To3 と Za-To4 は従来のもとは別のテフラとして扱わなければならない。

一方で、山頂付近の昨年度と今年度のトレンチ調査によって、5.5 ka 前後と 4.9-5.0 ka 程度の年代の 2 層が認められた他に、約 6～12 ka の間にローム層を挟在しながら少なくとも 5 枚の水蒸気噴火テフラ層と少なくとも 5 枚の黒色火山灰層が認められた（図 4 9）。また、山頂から西方約 1.8 km 付近の地点において、約 12 ka の年代値が得られた古土壌の下位に約 40 cm の厚さの黒色火山灰層が認められた。これは前項で述べた Za-To4 に対比される可能性が高い。

○蔵王山約 2 千年間の活動フェーズ

テフラ層序は前年度までに完成したが、今年度に他のフェーズのテフラ調査中に東麓の複数箇所の地点において約 2 千年前以降のテフラが新たに発見された。今後、それらを細分し、各々がこれまでに認定してきたどの層に対比されるかを検討する必要がある。

この間の噴出物については、それらをもたらしたマグマ供給系の構成と噴火に至るプロセスについて解明を続けており、既に地下約 6 km 付近に位置する安山岩質マグマ溜りに深部由来の玄武岩質マグマが注入を続け、噴火に至ったと推定してきた。本年度は安山岩質、玄武岩質マグマの温度、含水量条件についての推定を精密化した。また、玄武岩質マグマの注入から噴火に至るタイムスケールについて、本年度は斜長石の組成累帯構造を基に推定を行い、前年度までに行ってきた輝石の組成累帯構造を基にした推定と整合的な結果を得た。すなわち、噴火に直結する注入は数か月前以内から程度が増し、それ以前の～30 年前頃にも注入は継続していたと考えられる。

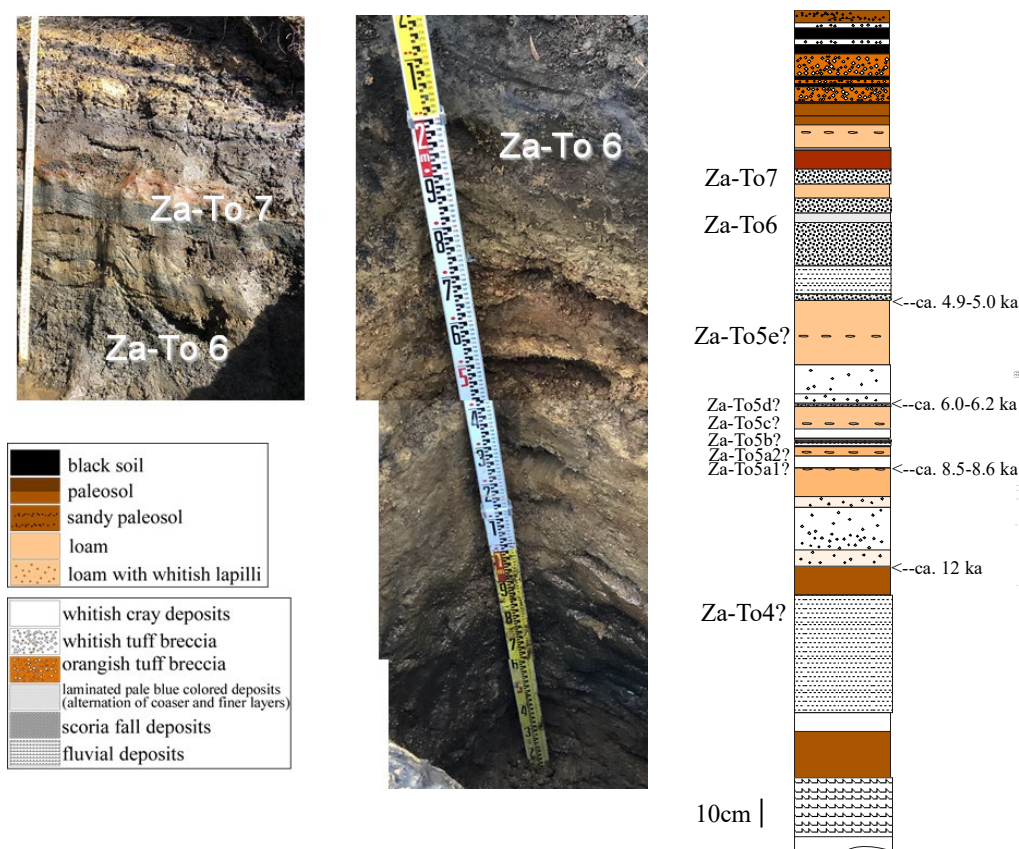


図 4 9．御田の神でのトレンチ調査写真と柱状図。テフラの名称は暫定的なもの。年代値は ^{14}C 年代を基にしたもの。

1) 吾妻山:物質科学的解析による西暦 1331 年噴火のマグマシステムの解明 (山形大学)

吾妻山の最新のマグマ噴火は西暦 1331 年に起こったと推定されている⁶¹⁾。その噴出物の現地観察を行い、火山弾試料を多量に採取し、分類・鏡下観察・全岩化学組成分析を行った。

火山弾を、色調から暗灰色安山岩 (D)、灰白色安山岩 (W)、安山岩暗灰色部 (BD)、同灰白色部 (BW) の 4 タイプに分類した。何れも斑晶鉱物として斜長石、直方輝石、単斜輝石、カンラン石、磁鉄鉱を含む安山岩である。斜長石は汚濁帯や蜂の巣状構造のような融食形を示すものが多く、単斜輝石や直方輝石の一部も融食形を示す。カンラン石は他の斑晶に比べて大きく最大径 10 mm のものもある。反応縁を持つものもある。D・BD では単斜輝石の方が直方輝石より多く、W・BW では逆である。W・BW は D・BD よりもカンラン石に乏しい。D と BD、W と BW は斑晶量について違いは認められない。石基は全てハイアロオフィティック組織を示す。なお、D・BD は W・BW よりマイクロライトが多く、W・BW は気泡が多い。

全岩化学組成は、主要・微量元素共に SiO_2 組成変化図上で全ての試料が同じトレンドに乗り (図 5 0)、medium-K・calc-alkaline 系列に属する。 SiO_2 量の増加に伴い $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{Ba} \cdot \text{Nb} \cdot \text{Rb} \cdot \text{Y} \cdot \text{Zr}$ 量は増加し、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{FeO}^* \cdot \text{MnO} \cdot \text{Cr} \cdot$

Ni・Sr・V・Zn 量は減少する。SiO₂量の増加に伴いカンラン石量は減少し、斜長石と輝石量は増加する。SiO₂量は D・BD は約 58～59 wt%であるのに対し、W・BW は 60～63wt%と明瞭に高い。

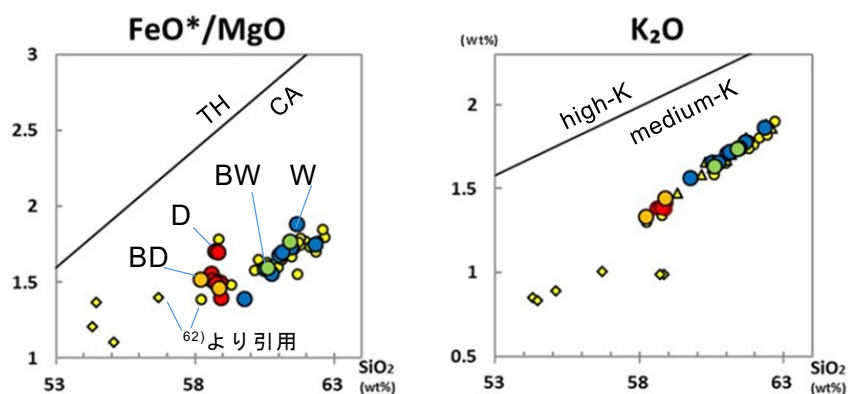


図 50. 吾妻山西暦 1331 年噴火噴出物の FeO*/MgO および K₂O ハーカー図。TH(tholeiite) と CA(calc-alkaline)、high-K と medium-K の境界線は ⁶³⁾⁶⁴⁾による。

m) 那須岳: 古地磁気学的手法を用いた火砕噴火と溶岩流出の同時性の検証 (茨城大学)

○はじめに

那須火山群の茶臼岳 (1,951m) は、約 16,000 年前から活動を開始し、有史時代にも複数の噴火記録を持ち、現在も活発な噴気を上げる活火山である ⁶⁵⁾。本火山のマグマ噴火は、6 つのユニットから構成され、下位から、約 16,000 年前の CH1、11,000 年前の CH2、8000 年前の CH3、6,000 年前の CH4、2,600 年前の CH5、そして西暦 1408-1410 年の CH6 である ⁶⁶⁾。これらマグマ噴火ユニットの間には、水蒸気噴火のみからなる堆積物も挟在する。マグマ噴火ユニットでは、水蒸気噴火ではじまり、ブルカノ式噴火による降下火砕物や火砕流を発生した後、溶岩流出で収束するパターンが共通して認められるが、火砕流堆積物と溶岩流の直接の層序関係は必ずしも確認されていない場合が多い。また、CH1～CH6 を通して、2 端成分マグマ混合モデルが提唱されているが ⁶⁷⁾、特に苦鉄質側の情報に不足があった。本研究では、古地磁気方位測定により CH3 の火砕流堆積物と溶岩流の同時性を検証した。また鉍物化学組成から、CH3～CH6 の苦鉄質端成分の推移を検討した。

○試料採取

本研究では、茶臼岳火山東北東麓の旧登山道沿い (Loc.1) に連続的に露出し、上下関係が確実に確認できる CH3～CH6 の一連の火砕堆積物について、記載・試料採取を行った (図 51)。各ユニットの識別・同定には、沼沢・沼沢湖テフラ (Nm-NK: 5.0 ka) や榛名・二ツ岳伊香保テフラ (Hr-FP: 1.4 ka) などの広域テフラを指標とした。CH3 の火砕流堆積物からは、6 つの本質物質 (礫) について定方位サンプリングを行った。また、本火山南部 (Loc.10) に分布する CH3 の溶岩流についても定方位サンプリングを行った。

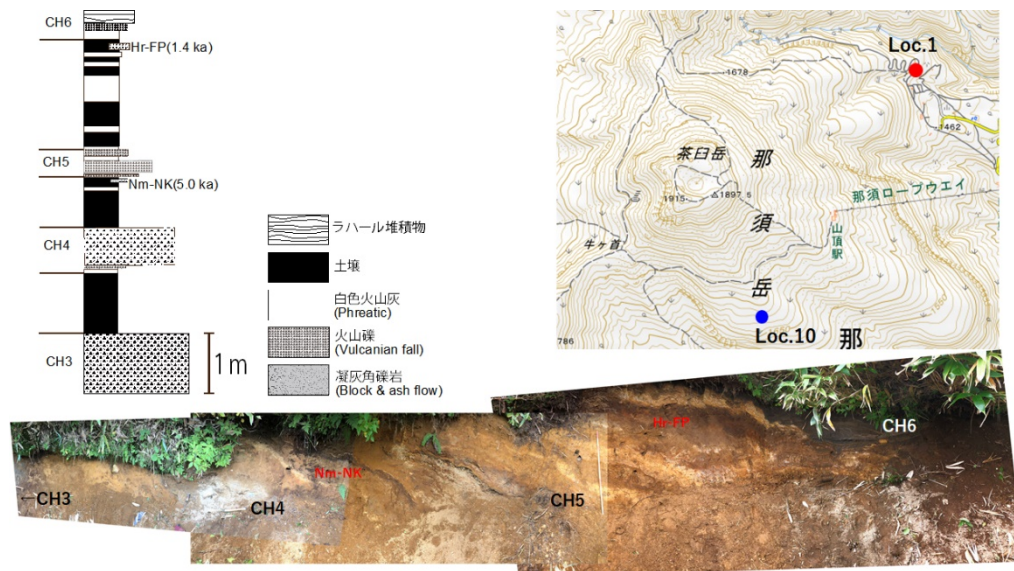


図 5 1 . 茶臼岳の露頭位置図と Loc.1 の柱状図および露頭写真。

○古地磁気方位測定の結果

段階熱消磁実験の結果、CH3 の火砕流堆積物の消磁曲線は、400～450 °C を境に、高温成分と低温成分に別れ、低温成分の特徴的残留磁化方位は複数の礫間で同様の方向（平均方位の偏角 Dec : 346.04°、同伏角 Inc : 63.1°、 $\alpha_{95}=5.7^\circ$ ）を示した。この平均方位は、現在の本地域の地軸双極子磁場方位（Dec=7.7°、Inc=51°）とも異なる。以上のことから、試料採取地の CH3 の火砕流堆積物は、400-450 °C 以下で定置した可能性が高い。一方 CH3 の溶岩流の平均方位は Dec=359.01°、Inc=51.86°、 $\alpha_{95}=4.4^\circ$ と、誤差（95%信頼限界）を超えて火砕流堆積物のそれと異なる（図 5 2）。このことから、同じ CH3 とされる火砕流堆積物と溶岩流であっても、定置・冷却した時期が有意に（現在の地磁気永年変化率を考慮すると数十年は）異なることが判明し、今後も層序の見直しが必要であることが指摘できた。

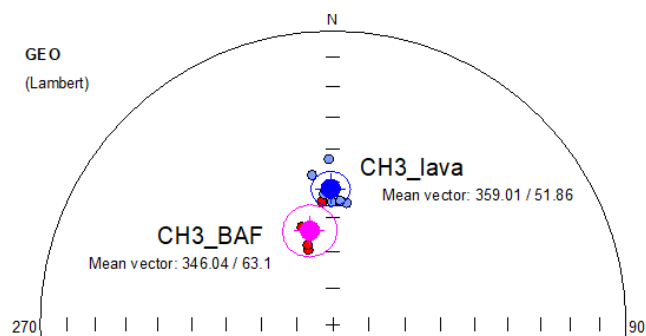


図 5 2 . CH3 の火砕流堆積物（BAF）と溶岩（lava）の等積投影図。95%信頼限界を楕円で示す。

n) 草津白根山：テフラの物質科学的解析による熱水供給系の描像（富山大学）

○はじめに

草津白根火山は、群馬県北西部に位置する活火山である。本火山では有史以降降水蒸気噴火が繰り返し発生しており、2018 年にも水蒸気噴火が起きている⁶⁸⁾。本火山における噴火事象系統樹の作成のためには、小規模噴火を含む詳細な噴火履歴を解明することが必要である。一方、本火山の完新世の噴火は、白根火砕丘群、本白根火砕丘群、これら 2 つの火砕丘群の間にある逢ノ峰火砕丘・弓池マールなど多地点で発生している。マグマ噴火のテフラでは、本質物について物質科学的解析を行い、給源となった火砕丘やマールの火口近傍噴出物と比較することで、給源火口を特定することができる⁶⁹⁾。一方、水蒸気噴火のテフラでは、物質科学的データをもとに給源火口を特定した例は少ない⁷⁰⁾。

本年度は、水蒸気噴火のテフラの物質科学的データをもとに、給源火口の推定を試みたので、その結果を以下で述べる。

○本研究で得られた新たな知見

山麓テフラの調査地点を図 5 3 に示す。本研究で分析に供した試料は A～G 地点採取したものである。



図 5 3．テフラの調査地点。黄色い丸印が自然露頭および手掘りトレンチ調査地点、白抜きの四角は重機を使ったトレンチ調査地点⁷¹⁾を示す。地図は国土地理院の航空写真を Photoscan で合成した。

水蒸気噴火で形成されたと推測される粘土質テフラについて、粉末 X 線回折法により熱水変質鉱物を同定した。分析にはバルク試料を用い、試料を 40 °C の恒温槽で乾燥させたのち、メノウ乳鉢で粉末にしたものを用いた。同定された鉱物は、スメクタイト、パイロフィライト、カオリン鉱物、石膏、ミョウバン石、トリディマイト、クリストバライト、石英である。これらの鉱物は水蒸気噴火の堆積物に特徴的なものであり、特にシリカ鉱物、

ミョウバン石、カオリン鉱物は珪化変質や高度粘土化変質作用に特徴的であり、酸性流体による変質作用を示すとされる⁷²⁾。クリストバライトと石英は全ての分析試料に含まれ、他の鉱物は含まれるものと含まれないものがある。偏光顕微鏡観察により、テフラに含まれる石英は細粒な石英粒子の集合体（モザイク状石英）として産するものであり、マグマ由来の高温型石英（単一の結晶）はほぼ含まれないことが確認できたため、XRD 分析で同定された石英のピークは熱水性石英を示している。

本研究では、全ての試料に含まれる石英とクリストバライトに注目し、これらのバックグラウンド除去後のピーク強度の比（Qtz/Crs）を水蒸気噴火のテフラの特徴を示す指標とした（図 5 4）。白根火砕丘群近傍の地点 D のテフラ層は Qtz/Crs 比が 0.2~4.0 であるのに対し、本白根火砕丘群近傍の地点 G のテフラ層は Qtz/Crs 比が 1.4~9.0 である。このことから、白根火砕丘群起源のテフラの特徴は Qtz/Crs 比が低いのに対し、本白根火砕丘群起源のテフラは Qtz/Crs 比が高いという特徴をもつと言える。こうした差異は、熱水変質帯における石英とクリストバライトの存在度が火砕丘群ごとに異なること、あるいは石英とクリストバライトの分布深度が異なっていて水蒸気噴火の発生深度が異なることが考えられる。

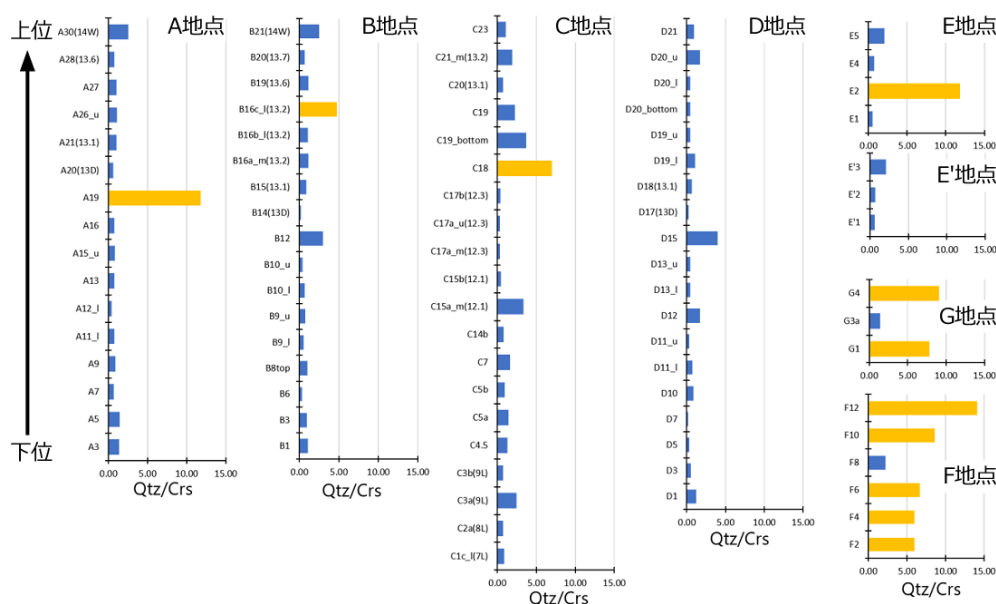


図 5 4．地点 A～G で採取した粘土質テフラの Qtz/Crs 強度比。

o) 志賀火山：地表調査、噴出物の年代測定・物質科学的解析による噴火履歴の解明（富山大学）

○はじめに

志賀火山は、長野県東部に位置する第四紀火山であり、志賀山とその南方 1 km に位置する鉢山火砕丘から構成される。また、南側に隣接する草津白根火山とともに火山群（草津白根火山群）を構成している。昨年度までの調査により、①志賀火山の活動が現在の鉢

山付近からの旭山溶岩と鉢山火砕堆積物/溶岩の噴出期（旧期）と、現在の志賀山付近からのおたの申す平溶岩と志賀山溶岩の噴出期（新期）に区分されること、②志賀山溶岩から構成される現在の志賀山山頂域に複数の爆裂火口列が見られ、その周囲に水蒸気噴火によるものと推測される粘土質テフラ（志賀山テフラ）が分布すること（図 5 5）、③旭山溶岩・鉢山火砕堆積物/溶岩とおたの申す平溶岩・志賀溶岩がそれぞれ固有の組成変化傾向をもつことがわかっている（図 5 6）。

本年度の研究では、志賀火山の最新の噴火年代を明らかにするため、志賀山テフラの追跡調査と物質科学的解析、テフラ層直下の土壌の放射性炭素年代測定を行った。なお、放射性炭素（ ^{14}C ）年代は、暦年較正曲線 IntCal20⁷³⁾を用い、OxCalv4.4 較正プログラム⁷⁴⁾を使用して暦年（単位は cal BP）を求めた。

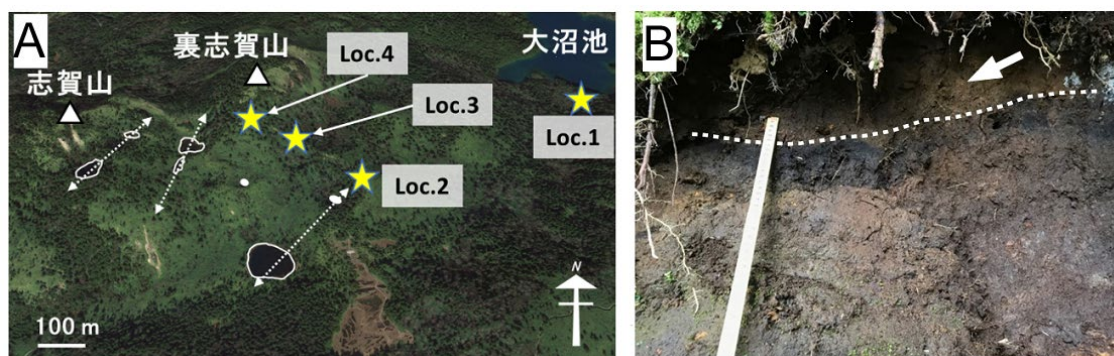


図 5 5 . (A) 志賀山山頂域の爆裂火口列と志賀山テフラの採取地点（基図は Google Earth）。(B) Loc.1 で見られる志賀山テフラ（白矢印）。破線はテフラの下面を示す。

○本研究で得られた新たな知見

志賀山山頂域に存在する爆裂火口群を取り囲むように志賀山テフラ層が確認できる。山頂域の本テフラ層は、火山岩塊サイズの新鮮な安山岩片を含む白色粘土質火山灰層であり、基底を確認できないほど層厚が厚い（層厚 2 m 以上）。本年度の調査で、山頂から東方約 1 km の大沼池近傍の露頭（Loc.1）において同質のテフラ層（層厚 15 cm）を確認した（図 5 5 (B)）。志賀山山頂から大沼池近傍までの計 4 地点でテフラ試料を採取し、分析に供した（図 5 5 (A)）。なお、Loc.2 の東方で手掘りトレンチ調査を実施したが、テフラ層は確認できなかった。

テフラ層の XRD 分析の結果、ピーク位置や強度にわずかな違いが見られるものの、全ての地点のテフラから石英、クリストバライト、ミョウバン石、カオリン鉱物、スメクタイト、パイロフィライトが同定された。これらの鉱物は水蒸気噴火の堆積物に特徴的なものであり、特にシリカ鉱物、ミョウバン石、カオリン鉱物は珪化変質や高度粘土化変質作用に特徴的で、酸性流体による変質作用を示すとされる⁷²⁾。すなわち志賀火山の地下には、本火山と近接する草津白根火山と類似した酸性熱水系の存在が示唆される。また、実体顕微鏡下では珪化岩片や変質岩片が多量に見られ、本質物が認められない。テフラ層中の安山岩岩塊の全岩化学組成を分析したところ、組成がおたの申す平溶岩・志賀溶岩の組成変化トレンド上に点示されることが明らかになった（図 5 6）。

以上の結果から、志賀山テフラ層は志賀山において発生した水蒸気噴火によるテフラで

あり、志賀溶岩を吹き飛ばして形成したと考えられる。志賀山テフラの形成年代は、Loc.1のテフラ層の直下の土壌の暦年（約 530～490 cal BP）から約 500 年前頃と推測される。

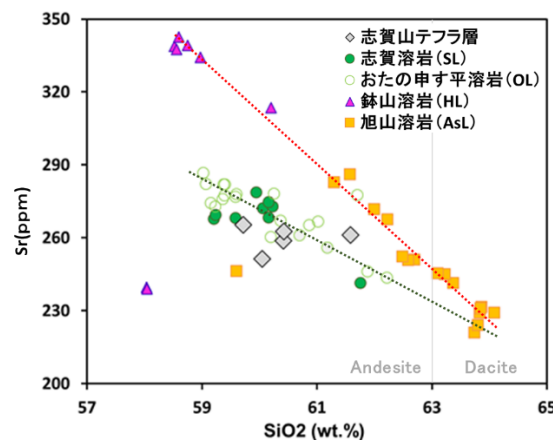


図 5 6．志賀山テフラ中の安山岩岩片（灰色ダイヤ）の全岩化学組成。

p) 浅間山：トレンチ掘削調査による浅間火山の高精度噴火履歴復元（日本大学）

○はじめに

浅間火山では、約 1 万年前より現在まで活動が続ける浅間前掛火山の噴火履歴復元のため、多数地点でのトレンチ掘削調査による地質記載と、降下火砕堆積物直下の土壌の放射性炭素年代測定を組み合わせた手法を継続している（図 5 7）。令和 2 年度の野外調査は、浅間前掛火山の前に活動した仏岩火山と黒斑火山の実態解明の目的も含めて、令和元年度に引き続き南麓の地質に注目して、重機トレンチ 3 か所、人力トレンチ 2 か所の掘削調査を行った。重機トレンチ 2 か所（長野県北佐久郡御代田町および軽井沢町）においては地元住民（計約 30 名）への見学説明を実施した（図 5 8）。また小諸市での浅間山火山防災講演会（リモート収録）の際に、本プロジェクトの成果の紹介を含めることで啓蒙および研究成果普及を行った。以下では令和 2 年度の重機トレンチ地点 19～21 および地点 M108 と M110 での人力掘削調査について報告する。

○調査結果

重機トレンチ 19 (地点 M109 御代田町長坂地区) 最上部は厚さ約 70 cm の黒色土壌で、地表下 30 cm 付近に黄褐色の軽石が極少量散る（NG1：図 5 8）。NG1 の下方の土壌（地表から 50～60 cm の区間）からバブルウォール型の火山ガラスが検出された（図 5 9 (a)）。黒色土壌の下位には、褐色土壌を挟んで黄橙色火山灰と円磨された軽石から成る軽石流あるいはその 2 次堆積物、さらに基質が不均質で多様な岩片を含む岩屑なだれ堆積物や数枚の軽石層、風化火山灰層が認められる（図 6 0）。岩屑なだれ堆積物のブロックは最大径 1 メートルに達し、斑晶の大きさや量、石基の結晶度・色調、発泡の程度の異なる多様な岩片種がみられる（図 6 1）。軽石層の下位（地表下約 350 cm）には厚さ 10 cm 前後の淡褐色の火山灰層が見出された。この層は 66 重量パーセントが泥サイズときわめて細粒で、

構成粒子の大部分はバブルウォール型の火山ガラス（屈折率範囲は 1.4958～1.4982）である（図 5 9 (b)）。この層は層位、ガラスの形態、および屈折率範囲から始良 Tn 火山灰 (AT) に対比される。また地表直下の黒色土壌中から検出された火山ガラスは、層位から鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah) に対比される。同じスケールで泡壁の厚さを比べると AT の方が若干厚い（図 5 9）。

重機トレンチ 20（地点 M112 御代田町塩野山） 黒斑火山の剣ヶ峰の南方の尾根上に位置する地点 M112 では、約 5m の掘削面に、褐色の風化火山灰層を挟んで非溶結～弱溶結の火砕流堆積物が複数枚認められた。表層の黒色土壌は約 17 cm と薄く、前掛火山の時代の軽石層は確認できない。また付近の谷では谷埋めの産状の仏岩火山の軽石流堆積物が濃褐色の土壌を挟んで 2 枚認められた。

重機トレンチ 21（地点 M107 軽井沢町大日向地区） 大日向地区東縁の崖面を掘削した。掘削面には追分火砕流堆積物は認められず、まず As-B が確認された。As-B の基底の下 10 cm 付近の黒色土壌よりバブルウォール型の火山ガラスが検出された。黒色土壌の下位には褐色火山灰の基質と円磨された軽石から成る基質支持の層 (OH1) が認められ、OH1 直下の土壌の ^{14}C 年代は約 7,900 年前を示す。OH1 の下位には黒色土壌を挟んで厚さ 2 m 以上の黄橙色火山灰と円磨された軽石から成る軽石流あるいはその 2 次堆積物、さらに黒斑火山の時期の岩屑なだれ堆積物が認められる（図 6 2）。岩屑なだれ堆積物には緻密な溶岩塊が多く含まれ、大きいものは 40 cm に及ぶ。巨視的に斑晶の量や大きさ、石基の色調・結晶度、発泡の程度の異なる多様な岩片があり、溶結構造を持つ岩片も認められた。

人力掘削調査（地点 M110 軽井沢町千ヶ滝別荘地北方） 大窪沢右岸の高さ約 43 m の谷壁を掘削し、最上部の黒色土壌に挟在する 2 枚の軽石層を確認した。上位の軽石層の基底から 10～20 cm 区間の土壌よりバブルウォール型の火山ガラスを検出した。下位の軽石層の下は黒色土壌には少量の軽石が散る。黒色土壌の下位は黄橙色の火山灰層や軽石層、火砕流堆積物など仏岩火山の時期の堆積物が谷底まで認められる（図 6 3）。

人力掘削調査（地点 M108 大日向地区） 本地点は地点 M107 の南西 700 m の畑地で、耕作土の下に緻密な岩片に富む黒色土壌を挟んで軽石層と火山灰層が確認された。さらに下位に追分火砕流堆積物の上面が認められた。図 6 4 には穴底から掘り出された 33 cm 大のスコリア質ブロックが見られる。

○結果のまとめと考察

今年度は浅間前掛火山の南東麓～南西麓での地質調査がすすんだ。南麓の表層は天仁噴火の追分火砕流堆積物とその 2 次堆積物に厚く覆われるが、地点 M107 と M108 の掘削から、火砕流と As-B の層位関係を知る上で火砕流堆積物縁辺部での掘削が有効であることが示された。地点を増やして層位関係を検討するのが今後の課題である。図 5 7 で最西部の地点 M112 は、釜山火口の南南西の黒斑火山の尾根上に位置し、浅間前掛火山の時代の土壌が 20 cm 以下と薄い。また地点 M109 ではアカホヤ火山灰 (K-Ah) を含む前掛火山の時代の黒色土壌の基底が地表から 70 cm と、より東部の地点に比べ非常に浅く、軽石粒子が散るレベル (NG1) が確認されるのみだった。地点 M112 と M109 では過去 1 万年間に前掛火山の活動の影響をほとんど受けていないといえる。NG1 については地点 P92 や P103 で記載された D-SSW⁷⁵⁾ に対比可能で、地点 M109 西方の広畑遺跡で土壌中に見出

された軽石⁷⁶⁾と同様に D-SSW の縁辺相らしい。南東麓の地点 M110 でも K-Ah より上位に軽石層が見出され、D グループ⁷⁵⁾をもたらしした縄文時代の活動の痕跡の一部と認識される。また地点 M109 では地表下約 3.5m に約 3 万年前の始良丹沢火山灰(AT)が確認されたが、層厚や粒度組成から AT4 層⁷⁷⁾に対比可能とみられる。AT の降下後、山体崩壊までの間に南麓にもたらされた軽石層(BP の一部)が複数あったことがわかった。過年度に調査した北東麓の地点 D62 (トレンチ 13) も同様であるが、南南西の地点 M112 (トレンチ 19) や M109 (トレンチ 21) では東麓に比べ前掛火山の時代の黒色土壌も含めた堆積量が小さいため、約 5 メートルの掘削面からより古い仏岩、黒斑火山の時代の地質情報が得られることもわかった。

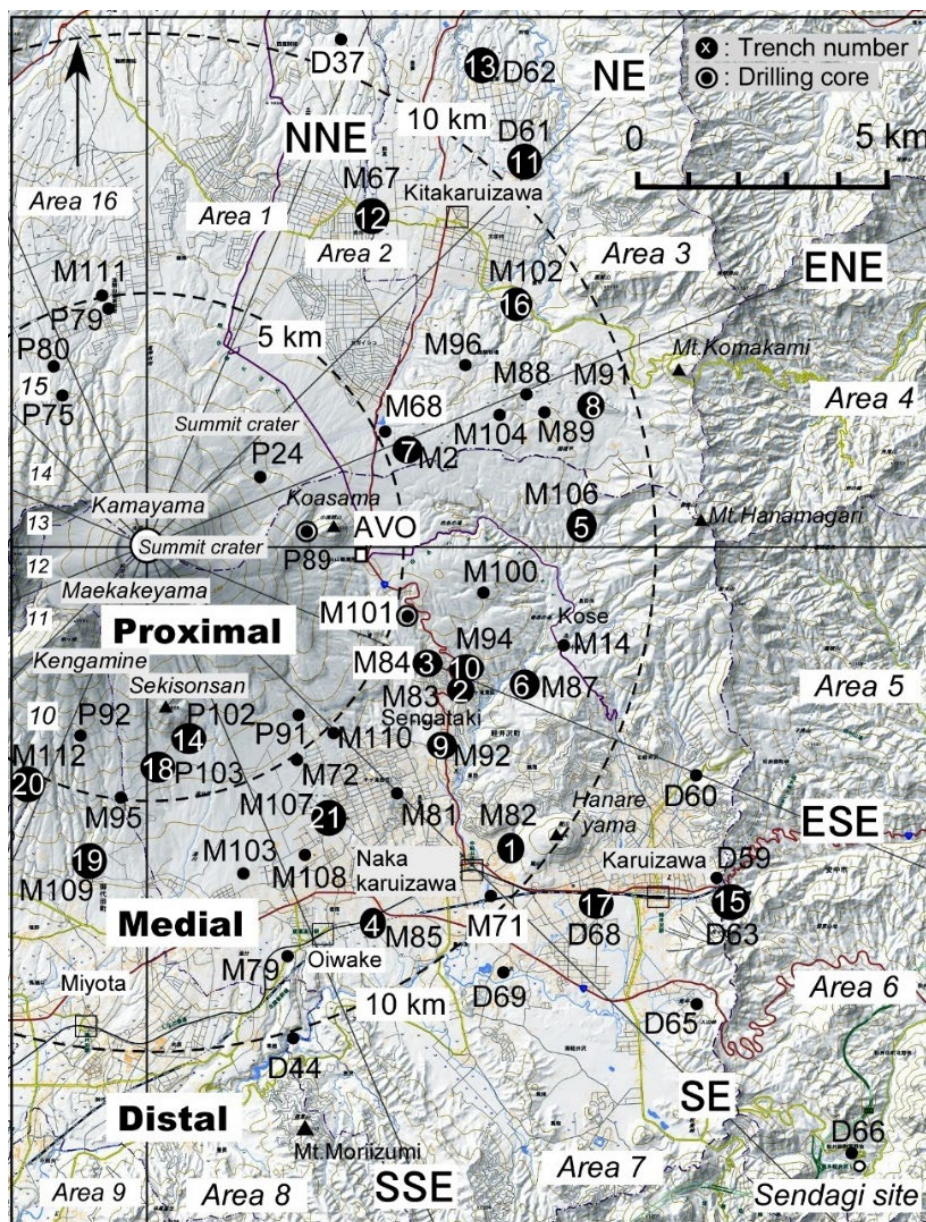


図 57. 本プロジェクトによる掘削調査地点（地理院地図使用）。



図 5 8．地点 M109（トレンチ 19）と住民説明の様子。最上部の黒色土壌中の矢印は軽石粒子の散在するレベル（NG1）。

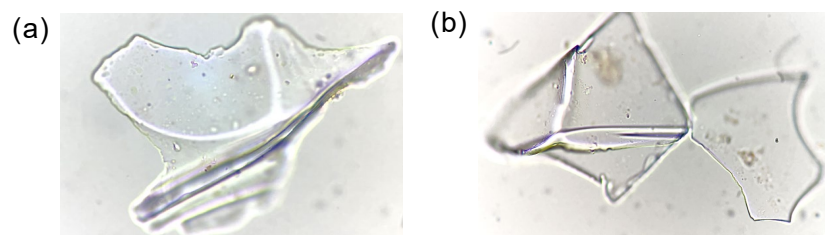


図 5 9．地点 M109 で検出された火山ガラス（粒径範囲 0.125～0.063 mm）。(a) K-Ah、(b) AT。



図 6 0．地点 M109（トレンチ 19）の掘削面の全景、スケール 5 m。矢印は AT 火山灰層を示す。



図 6 1．地点 M109 の岩屑なだれ堆積物に含まれる岩片。



図 6 2．地点 M107 の掘削面全景。スケール 5 m。



図 6 3. (a) 地点 M110 の様子 (スケール 1 m)。火砕流堆積物に挟在する軽石層が認められる。(b) 地点 M110 最上部の様子 ((a)の白枠)。人物の腰付近より上位が浅間前掛火山の堆積物。



図 6 4. 地点 M108 の全景 (スケール 1 m)。矢印は火砕流堆積物より上位の軽石層。

q) 新島：伊豆弧、新島火山における噴火の変遷と長期予測のための物質科学的研究（筑波大学）

伊豆弧北部、新島、式根島および神津島の流紋岩を主体とする火山について、噴火区分等を元に、噴火の時系列（概略）と地域的なマグマの比較、また斑晶鉱物の化学組成や全岩組成などを元にマグマの時代変化等について岩石学的・地球化学的検討を行ってきた。今年度の成果を以下に述べる。

○流紋岩の噴火区分（再検討）

噴火ユニット区分は、昨年の報告書記載にもすでに述べているが、地内島の噴火（～100 ka）に始まり、いくつかの噴火を経て、式根島、（若郷玄武岩）、阿土山火山（856 y）、向山火山（886-887 y）まで断続的な噴火により形成されてきたと推測される。流紋岩の斑晶鉱物は主に、斜長石、石英、斜方輝石、カミングトン閃石、普通角閃石、黒雲母から成り、それらの組み合わせから、4つのタイプに区分した：斜方輝石－カミングトン閃石タイプ（Opx-Cum-type）、カミングトン閃石タイプ（Cum-type）、カミングトン閃石－黒雲母タイプ（Cum-Bt-type）、黒雲母タイプ（Bt-type）。これらの噴火ユニットの多くにはカミングトンナイトが含まれることが特徴であり、他の伊豆弧火山とは異なっている。

○斑晶鉱物の化学組成、および全岩化学組成の特徴

斜長石のコア－リムの An mol.%は、地内島火山（Opx-Cum-type）で 30-45%にピークを持ち、噴出の時代と共に An mol.%は下がり、向山火山（Bt-type）で、17-22%となる。同様な傾向はカミングトン閃石と黒雲母の Mg#にも現れ、噴出の順序（あるいは組み合わせる鉱物種）と共に、減少傾向を示す⁷⁸⁾。これらの減少傾向は、生成されるマグマ温度・圧力の時系列での減少に対応していると考えられる。これらの結果は新たに分析を追加した試料でも同様な結果となり、今までの傾向と一致した。

ここ2～3年の研究成果を加えると、流紋岩では、合計13ユニットの火山の全岩化学組成が明らかにされている。その結果、流紋岩類は $\text{SiO}_2 = 73 \sim 78\%$ （多くは $75 \sim 78\%$ ）と高く、また全体的に組成幅が狭い結果となった（図65）。流紋岩をユニットごとに元素－元素濃度図では、狭いデータ範囲ではあるが、それぞれのユニットが異なったデータ分布を示す⁷⁸⁾。全体的には Opx-Cum-type・Cum-type では Bt-type と比較し、 $\text{MgO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{CaO}$ に富み、 $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{O}$ に乏しい傾向があるが、同じタイプごとでも、データ列が異なることが明らかにされている。同様な傾向は微量元素組成等でも見られることが多かった。

令和2年度は、上記結果をさらに検証するため、全岩化学組成分析値が限られていた、新島南東部の式根島（EPMA 分析結果は報告済み）、また新島本島に隣接した地内島、および試料は少ないが神津島の流紋岩の元素組成分析の追加も試みた。これらの分析結果からは、各流紋岩のタイプ、および同じタイプでもユニットにより元素組成に違いがあることがわかった。これらの結果を総合すると、ある限定された地域の流紋岩質マグマでも、噴火ユニットごとに組成のわずかに異なる親マグマから結晶分化等で形成されたという可能性が示唆された。この考えは伊豆弧における隣接した噴火ユニットでもその生成や分化が異なるという研究例（例えば、東伊豆単成火山の岩石⁷⁹⁾⁸⁰⁾）とも調和的である。

同様に、希土類元素(REE)は、全体的には類似のパターンを示し、大きな違いはないように見える。追加分析結果からは、以前の分析結果とほぼ一致する傾向が読み取れるが、それぞれわずかな違いがあるように見える。地内島のユニットは、以前の分析結果と同様、Eu の負異常がみられないなだらかな右下がり（軽希土類元素から重希土類元素）のパターンを示している（昨年の報告書に記載済み）。また、詳細には、地内島のデータは他のタイプの流紋岩に比べ、Eu を除く他の元素にやや乏しいことがわかる。式根島の追加試料は他の黒雲母流紋岩のデータとほぼ一致している。神津島の追加試料(Opx-Cum-type)は、他の新島周辺のユニットに比べ、わずかに高い REE 量を示し、Eu の負異常も大きいことがわかった。神津島の結果は、新島における REE パターンと岩石タイプの比較において違いが確認できたことは新しい結果である。これらの REE 分析結果から、全体的なパターンの類似性を考えると、研究を行った地域の流紋岩の起源物質、およびその後の生成・分化のプロセスの類似性を示していると考えることができる。一方で元素濃度分析の結果の違いはそれぞれの噴火ユニットのわずかな起源や生成過程（生成条件）の違いを反映しており、火山および各噴火ユニット独自の生成プロセスが存在するという考えと調和的である。

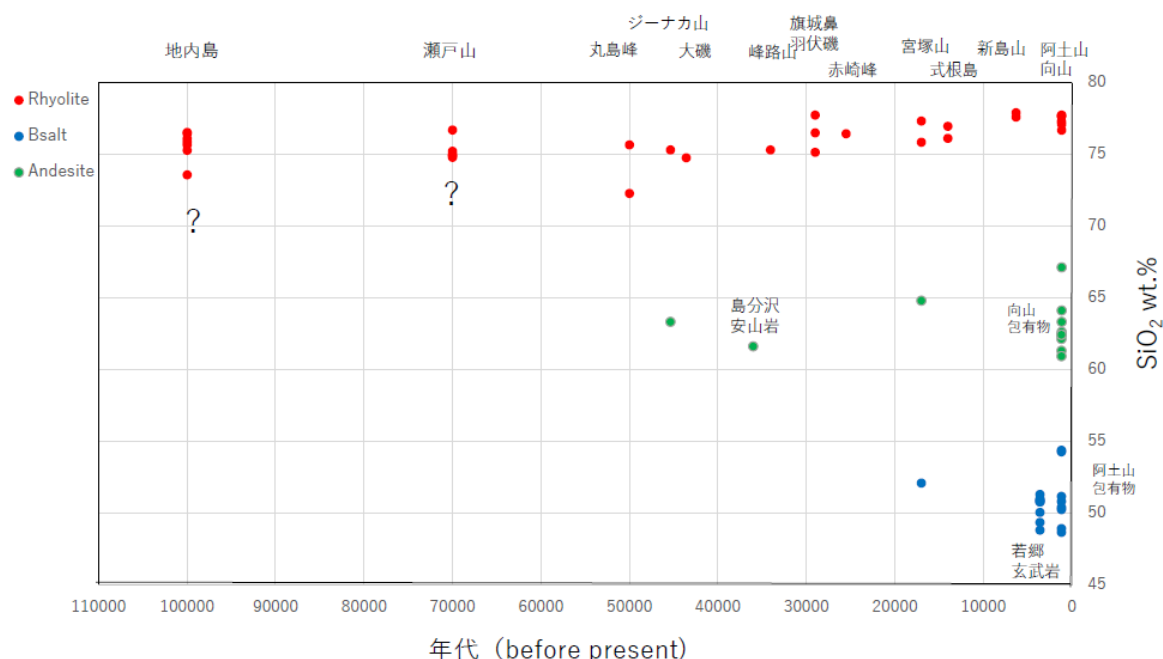


図 6 5. 新島、式根島の火山岩の年代－SiO₂ (wt.%) 図（従来の研究⁷⁸⁾⁸¹⁾⁸²⁾および本研究結果に基づく）。

○マグマの長期的な変動など

今までに得られた試料分析結果等を考慮すると、この地域のマグマの活動が、少なくとも 50 ka 以前には始まっており、それ以降、断続的に噴火を続けてきたこと、特に 10 ka 以降には時間軸が明確になった部分もあり、噴出物の噴出率 (190×10^9 kg/ka)などもすでに提示されている（図 6 6）。本研究では、それを大きく改変する結果ではない。新島、式根島、神津島などにおける斑晶鉱物の組み合わせや平衡温度の推定からは、他地域の流紋岩（特に Opx-Cpx 主体の流紋岩など）に比べ低温（および低压）の条件で生成され、浅所

のマグマ溜りからの噴出が推定される。これは、調査地域の流紋岩質マグマの組成変化とも密接に関連し、時代と共に、わずかずつ浅所で低温のマグマの生成・噴出が生じたものと考えられる。

また、一方で、玄武岩（若郷玄武岩）や玄武岩・安山岩の包有物の流紋岩ユニット中に多くみられ、地下における玄武岩質～安山岩質マグマの活動がより盛んになってきたように推測される。もちろん、過去の噴火ユニットは被覆されている場合が多いので、厳密には比較はできないことは確かであるが、その傾向は下記図等からも推測できる。今後の噴火推移の傾向は必ずしも明確ではないが、低温のマグマの噴火が続くのか、あるいは、長期サイクルとして深部由来のマグマ、あるいは単斜輝石などを含む珪長質マグなどの噴火に変化するのかなど現時点ではまだ不明瞭である。

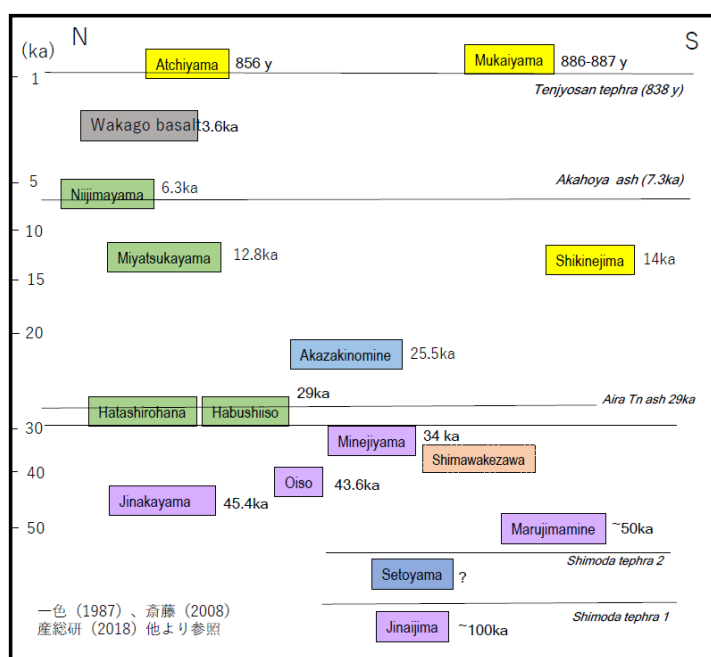


図 6 6 . 各噴火ユニットの年代と分布（年代は、一色⁸²⁾等参照）。流紋岩類（紫：Opx-Cum type；青：Cum type；緑：Cum-Bt type；黄：Bt type）、安山岩（オレンジ）、玄武岩（灰色）。

r) 三宅島：野外調査および物質科学的解析に基づく坪田期（4-2.5 ka）の噴火活動推移とマグマ供給系の解明（茨城大学）

○はじめに

三宅島火山において地質学的・岩石学的データが比較的少ない約 4,000 年前～2,500 年前の噴出物（坪田期）を対象に野外調査と試料の採取・室内分析を行った。坪田期は、本火山が長期の静穏期を終えて活動期に移行した時期にあたり、特徴的に安山岩を噴出するなど⁸³⁾、中長期的噴火推移やマグマ変遷を理解する上で重要である。

○地質調査の結果

坪田期噴出物は、南部沿岸域の海食崖にほぼ連続的に露出しており、得られた複数の放射性炭素年代値と組み合わせることで精緻な層序を構築できた。この時期には少なくとも28層の噴火堆積物が認識でき、その噴火頻度は約1.9回/100年と見積もられる。この値は、従来の報告⁸³⁾よりも大きく、本火山では、静穏期直後から高い頻度で活動していたことが明らかになった。また、3.4 kaを境に、噴出物に含まれる本質物質の特徴が異なることが分かった。ステージ1 (4.0–3.4 ka)の本質物質は、結晶質で(10–35 vol.%)、斑レイ岩質の捕獲岩および捕獲結晶(巨晶)をごく普通に含む(図6 7)。一方、ステージ2 (3.4–2.5 ka)はほとんどが無斑晶質(0.3–5.7 vol.%)な本質物質で特徴づけられる。

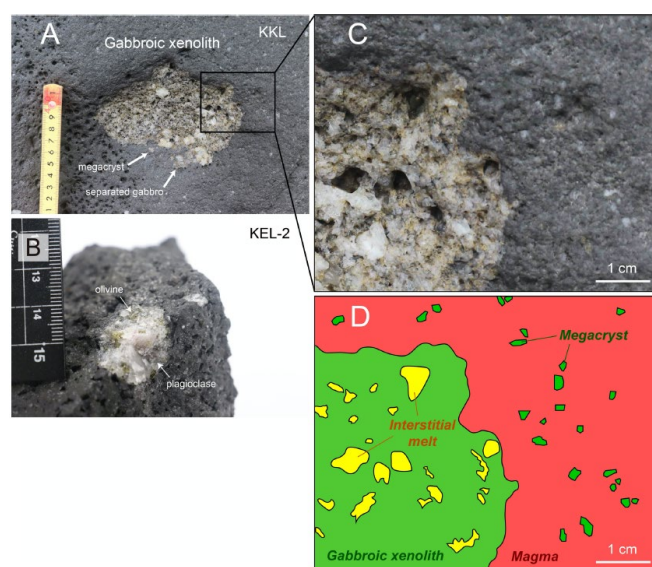


図6 7. ステージ1 噴出物中の斑レイ岩質捕獲岩。

○岩石学的検討の結果

坪田期噴出物は、 $\text{SiO}_2 = 52.9\text{--}60.5 \text{ wt.}\%$ で、低カリウム岩系、ソレライト系列に属する(図6 8)。2つのステージ間で SiO_2 量の幅に違いはなく玄武岩質安山岩～安山岩の組成を示す。同様の SiO_2 量で比較すると、ステージ1は、より $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ に富み、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}^* \cdot \text{MnO}$ に乏しい組成トレンドを示す。ステージ2噴出物は、ほとんどが無斑晶質(< 6 vol.%)であるが、一部に斜長石斑晶質(>26 vol.%)な試料があり、これらは特徴的に高い Al_2O_3 値(>16%)を示す(図6 8)。この組成変化は、同じく伊豆小笠原弧に位置する伊豆大島火山⁸⁴⁾、八丈島西山火山⁸⁵⁾、伊豆鳥島火山⁸⁶⁾などの玄武岩質火山で報告されているように、玄武岩質メルトへの斜長石の濃集で説明可能であり、マグマ溜まり中での斜長石の選択的な浮上によるものと考えられる⁸⁷⁾。

以上の地質学的・岩石学的データから、坪田期の初期(ステージ1)は、静穏期に発達した結晶質(マッシュ状)マグマ溜まりに新しいマグマが貫入し、マッシュ状の鉱物ネットワークを解体・捕獲しながら開始し、後半(ステージ2)では、メルトが発達したマグマ溜まりで斜長石の分別作用が起こったと考えられる。

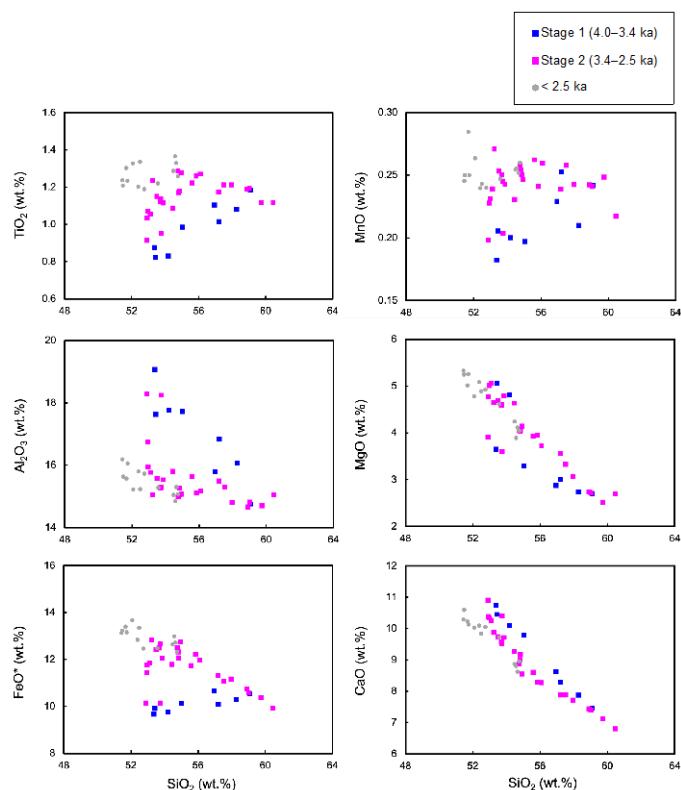


図 6 8 . 三宅島火山坪田期噴出物の全岩化学組成ハーカー図。

s) 妙高火山群：地表調査及び噴出物の物質科学的解析による噴火履歴・マグマ供給系の解明（富山大学）

○はじめに

妙高火山は新潟・長野県境に位置する複式成層火山であり、隣接する新潟焼山火山などとともに妙高火山群を構成している。本火山の山頂部には東方に開いた馬蹄形凹地があり、その中に中央火口丘が形成されている。本火山は約 30 万年前から活動を始め、活動史は第 I ～第 IV 期に大別される⁸⁸⁾。本火山の最新の活動期は、第 IV 期後半の中央火口丘期である。中央火口丘期には溶岩流と block-and-ash flow (BAF) がそれぞれ 2 ユニット噴出しているが、①山頂部に分布する溶岩流と山麓に主に分布する BAF の層序関係が不明である、②馬蹄形カルデラ内に複数存在する小規模爆裂火口の活動年代が不明である、など、検討すべき問題点が残っている。

本研究では、中央火口丘期のマグマ噴火噴出物について噴出物層序の見直しと噴出物の物質科学的解析を行った。なお、放射性炭素 (^{14}C) 年代は、暦年較正曲線 IntCal20⁷³⁾を用い、OxCalv4.4 較正プログラム⁷⁴⁾を使用して暦年（単位は cal BP）を求めた。

○新たに得られた知見

中央火口丘期の噴出物は、妙高山火砕岩層 (MPR)、赤倉火砕流堆積物 (APFD)、燕溶岩流 (TL)、大田切川火砕流堆積物 (OPFD)、妙高山溶岩流 (ML) である (図 6 9)。MPR は中央火口丘北側の北地獄谷内に凝灰角礫岩として産し、TL と ML に覆われる。APFD は

凝灰角礫岩層として産し、山麓で OPFD に覆われ、境界には土壌層を挟む。TL は中央火口丘東斜面に緻密な溶岩として産し、白色の包有岩を多く含む。OPFD は馬蹄形凹地北側の谷から北東山麓へかけて分布し、一部は TL を覆う。ML は中央火口丘上部を覆うように分布し、北側では OPFD を覆う。

中央火口丘期噴出物の斑晶組合せは、斜長石＋角閃石＋単斜輝石＋直方輝石±カンラン石 (Ol) ±石英 (Qtz) ＋不透明鉱物である。全噴出物に Ol と Qtz の共存などマグマ混合を示す組織が見られる。全岩化学組成分析から、中央火口丘期噴出物は、多くの組成変化図では同一のトレンドに載る。一方、Sr-SiO₂ 図では苦鉄質側で Sr 量が発散して珪長質成分で収束しており、低 Sr (MPR・APFD・TL) のトレンドと高 Sr (OPFD・ML) のトレンドに分かれる (図 6 9)。

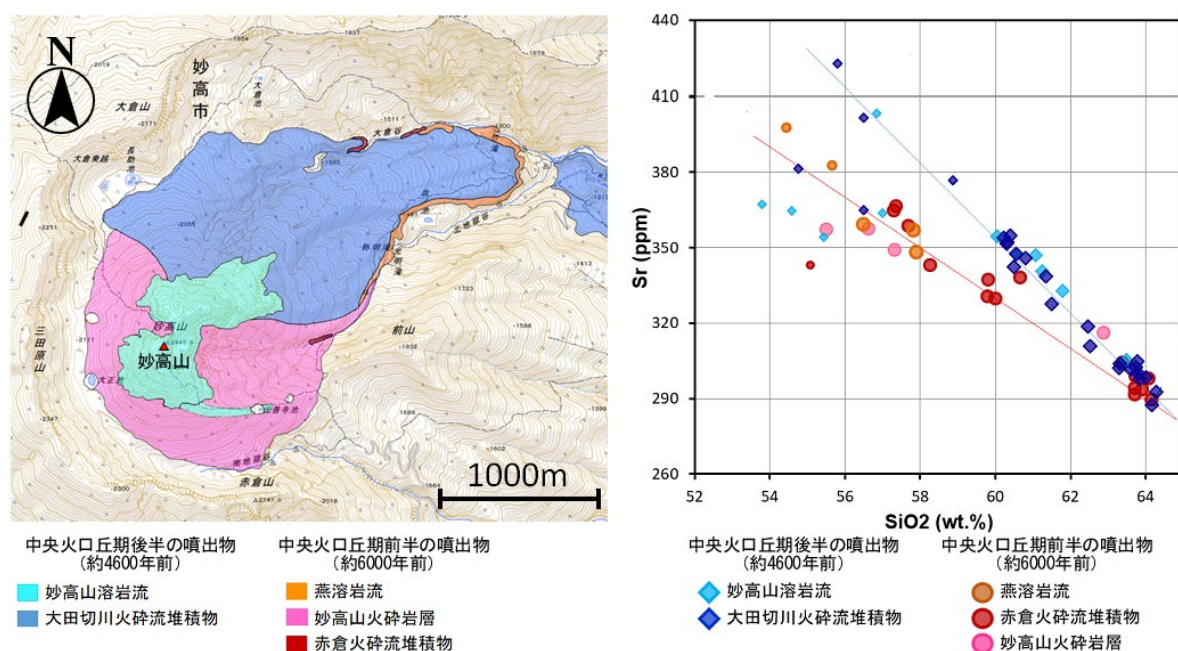


図 6 9 . 馬蹄形凹地内における中央火口丘期の噴出物の分布(左)と噴出物の全岩組成(右)。

噴出物層序と年代及び全岩化学組成の類似性から、中央火口丘期は、休止期を境に前半の活動 (APFD・MPR・TL) と後半の活動 (OPFD・ML) に分けられる。前半の活動は APFD 中の炭化木の暦年 (5,993-5,914 cal BP) から約 6,000 年前、後半の活動は OPFD の炭化木の暦年 (4,574-4,260 cal BP) から約 4,500 年前と推測される。これらの活動期では、珪長質端成分マグマの組成はほぼ同一であるものの、苦鉄質端成分では Sr 量に変化している。

中央火口丘期の前・後半にはそれぞれ BAF が発生しているが、その分布は谷域に限定されておらず、妙高火山の東麓に極めて広く分布している。また、一般的な BAF (例えば、雲仙普賢岳の BAF 堆積物) では主要構成物が緻密な溶岩片であるのに対し、中央火口丘期の 2 層の BAF には特徴的に多孔質の軽石状岩片が多産する。そのため、中央火口丘期の BAF は、溶岩ドームや溶岩流の重力崩壊 (メラピ型) によるものではなく、爆発的破壊 (プレー型) により発生したものである可能性が高いと考えられる。

t) 鷲羽池火山：地表調査による噴出物の分布・噴火出年代の解明 - 活火山の検証 -
(富山大学)

○はじめに

鷲羽池火山は、北アルプスの最深部に位置する火山であり、隣接する雲ノ平火山や岩苔小谷火山などとともに鷲羽・雲ノ平火山⁸⁹⁾を構成する。鷲羽池火山では、火口（鷲羽池火口：図70）が原地形を明瞭に保存しており、その周囲にスコリアや爆発角礫層が分布することが報告されている⁸⁹⁾。また、鷲羽池火口周辺の泥炭中には広範囲に砂礫混じりの粘土質テフラ（鷲羽池テフラ）が見られることが以前からナチュラリストの間では知られていたが（関谷克己、私信）、年代や噴出源、噴火様式はわかっていなかった。

本年度は鷲羽池テフラの分布調査、放射性炭素（ ^{14}C ）年代測定、テフラの物質科学的解析を行ったので、その結果を以下に述べる。なお、 ^{14}C 年代は、暦年校正曲線 IntCal20⁷³⁾を用い、OxCalv4.4 校正プログラム⁷⁴⁾で算出した暦年（単位は cal BP）で示した。



図70．鷲羽岳山頂（標高 2,924 m）から見た鷲羽池火口。鷲羽岳の山体は主に花崗岩から構成されており、鷲羽池火山の火口と噴出物は鷲羽岳の南斜面に分布する。

○本研究で得られた新たな知見

本調査地域においては、稜線上の緩斜面や鞍部等に最大層厚約 30 cm の泥炭が発達しており、泥炭中に 2 層のテフラ層が認められる。泥炭層の下限付近に挟まれるテフラ層は、層厚 5~15 mm の白褐色の細粒火山灰層であり、その色調やバブルウォール型火山灰が多産するという特徴及びガラスの化学組成から、7,300 cal BP⁹⁰⁾に堆積した鬼界アカホヤ火山灰に対比される。その上位、数 cm~10 cm 厚の泥炭層を挟み産出するのが、淡黄色~橙色の鷲羽池テフラである（図71(A)）。本層の層厚は調査地域内で 2~30 cm まで変化し、鷲羽池火口近傍の三俣蓮華岳~双六岳周辺で最も厚い。本層は粗粒砂~中礫サイズの花崗岩の異質岩片を多く含み、本質物を含まないため、水蒸気噴火のテフラと考えられる。

三俣山荘裏のキャンプ指定地では本層の直下に赤褐色の火砕サージ堆積物（層厚約 30 cm）も見られる（図 7 1 (B)）。



図 7 1. (A) Loc.1 で見られる驚羽池テフラ（層厚 9 cm）。(B) 三俣山荘西のキャンプ指定地で見られる火砕サージ堆積物。

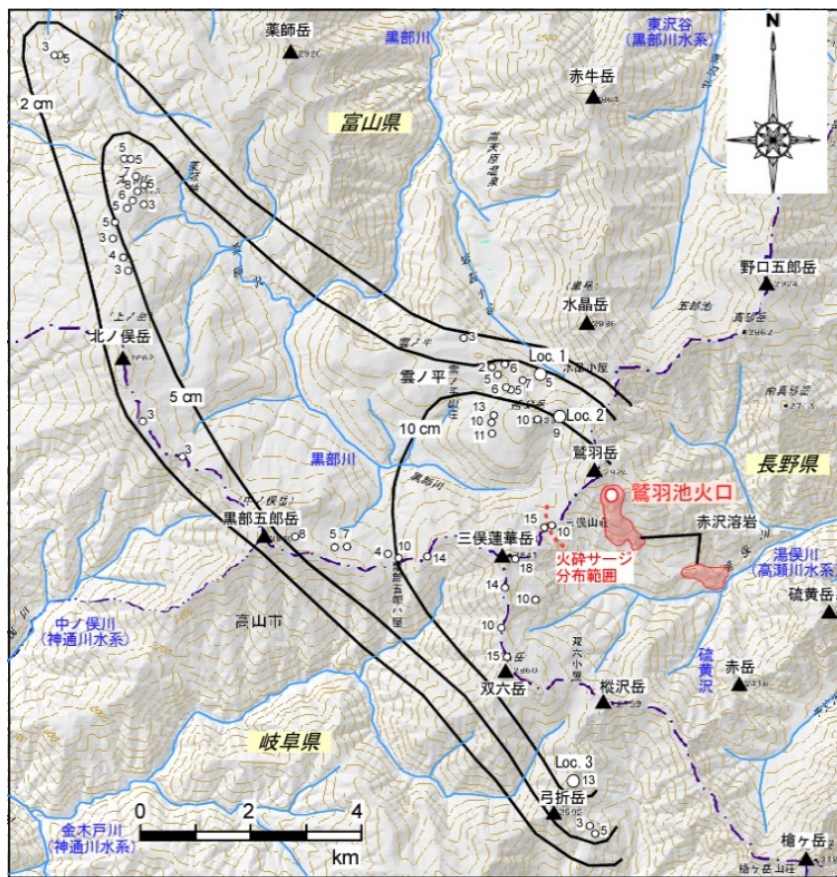


図 7 2. 驚羽池テフラのアイソパック・マップ。火砕サージ堆積物と赤沢溶岩の分布も併せて示した。

鷺羽池テフラ直下の泥炭を 3 地点で採取し、その ^{14}C 年代を測定した。泥炭の暦年は、地点 1 が 3,619-3,461 cal BP、地点 2 が 2,935-2,782 cal BP、地点 3 が 2,758-2,724 cal BP である。地点 1 の泥炭から他の 2 地点に比べやや古い年代が得られたが、地点 2 と地点 3 の年代値はほぼ同じであり、鷺羽池テフラが約 2,700 cal BP 頃に堆積したことが示唆される。

本年度の調査では、鷺羽池テフラの分布は鷺羽池火口の西域しか調査できていないものの、本テフラの層厚が鷺羽池火口付近で最も厚くなることから、噴出源が鷺羽池火口とするのが自然である（図 7 2）。また、本年度作成した等層厚線図を基に、Hayakawa⁹¹⁾の簡便式を用いて算出した噴出量は $2\sim 3\times 10^7 \text{ km}^3$ である。

u) 白山火山群：手掘りトレンチ調査による噴火履歴の解明 （富山大学）

○はじめに

白山火山群は、石川・岐阜県境に位置する活火山である。史料に残る本火山群の最後の噴火は 1659 年の水蒸気噴火であり、表面的には 350 年以上静穏期を続けている。これまでのテフラ層序調査により、本火山の山頂域には下位から順に Hm-1～Hm-18 のテフラ層が確認されており、このうち広域テフラである Hm-2（鬱陵隠岐テフラ）と Hm-6（鬼界アカホヤ火山灰）を除く 16 枚が白山火山起源のテフラとされている⁹²⁾。

本年度の調査では、白山火山群を構成する 3 つの火山体のうち最も活動年代が新しい新白山火山の山頂域 3 地点で手掘りトレンチを行い、噴出物層序解明、放射性炭素 (^{14}C) 年代測定及び本質物の物質科学的解析を行い、既知のテフラ層と対比した。 ^{14}C 年代は、暦年校正曲線 IntCal20⁷³⁾を用い、OxCalv4.4 校正プログラム⁷⁴⁾で算出した暦年（単位は cal BP）で示した。

○本研究で得られた新たな知見

大汝峰南西の地点 A、室堂平西方の地点 B、室堂平東方の 2,489 m 峰の地点 C で手掘りトレンチ調査を行った（図 7 3）。

地点 A では黒土を挟んで 2 回の噴火イベントの堆積物を確認した。上位の噴火堆積物は、1 層の火砕流堆積物と 3 層の粘土質火山灰層、3 層の粗粒火山灰～ラピリ層からなる。噴火堆積物直下の黒土の暦年（392-318 calBP）から、本堆積物は最新の噴火（1659 年噴火）で形成されたものと推測される。1659 年噴火は記録には残っているものの、堆積物はこれまで確認されていなかった。本研究により、この噴火では火砕流も発生したことが明らかになった。下位の噴火堆積物は、少なくとも 2 層の火砕流堆積物と 1 層の火砕サージ堆積物から構成される。火砕流堆積物は、最大径約 20 cm の急冷割れ目をもつ本質安山岩岩塊と同質の粗粒火山灰～細粒ラピリの基質から構成される。最上位の火砕流堆積物には炭化材も見られる。炭化材の暦年（506-438 calBP）から、火砕流堆積物と火砕サージ堆積物は、1554～1556 年の噴火で形成された翠ヶ池火砕流堆積物⁹³⁾に対比できる。

地点 B では、黒土を挟んで 2 回の噴火イベントの堆積物を確認した。上位の噴火堆積物は、白色～橙色粘土質火山灰層と、それを覆う火砕サージ堆積物からなる。後者は、急冷

割れ目をもった安山岩質火山岩塊～ラピリと同質の褐色火山灰からなる。噴火堆積物直下の黒土の暦年（1,536-1,467 calBP）から、本噴火堆積物は Hm-13（1,604-1,305 calBP）⁹²⁾に対比される。下位の噴火堆積物は、複数枚の白色～黄色の粘土質火山灰層（安山岩質火山岩塊～ラピリを伴う）、2層の暗灰色～茶色の火山灰～ラピリ層（急冷割れ目をもつ安山岩質火山岩塊を伴う）、1層の火砕サージ堆積物からなる。岩相の類似性から、本噴火堆積物は、Hm-12（3,076-2,355 calBP）⁹²⁾もしくは Hm-11（年代は不明）に対比されると推測される。

地点 C では、1 回の噴火イベントの堆積物が確認できた。本堆積物は複数枚の灰色～橙色粘土質火山灰層、スコリアや緻密な安山岩片を伴う降下ラピリ層、1 層の火砕サージ堆積物などから構成される。本堆積物直下の黒土の暦年（2,491-2,348 calBP）、岩相・岩質及び既知年代（2,494-2,349 calBP）⁹⁴⁾との類似性から、本堆積物は Hm-10（南竜火山灰層）⁹²⁾に対比され、その火口近傍層と考えられる。

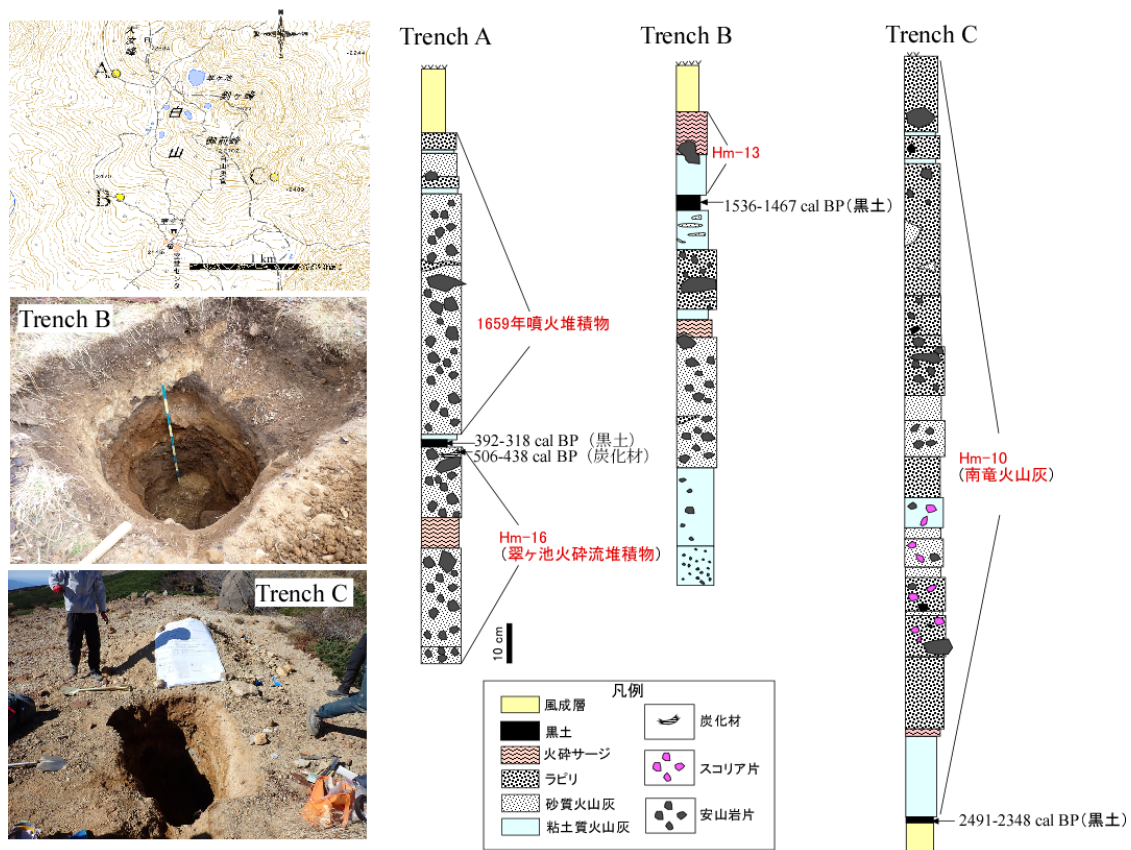


図 7 3. 手掘りトレンチ地点とその写真及び各トレンチの柱状図。

v) 御嶽山：精密年代測定法に基づく噴火活動履歴の解明 （産業技術総合研究所）

○目的と調査位置

中部地方の長野・岐阜県境に位置する御嶽山を構成する御嶽（御岳）火山は、直径 20 km あまり、標高 3,057 m（剣ヶ峰）の大型の成層火山である。

その御嶽火山は、約 78 万年前から活動を開始し、約 78～42 万年前に活動した古期と約

11 万年前以前に活動した新期の活動に大別される。そのうち新期御嶽火山の活動は、現在も続いており、完新世にも複数回のマグマ噴火を含む活動を行っている⁹⁵⁾⁹⁶⁾。近年では、1979・1990・2007・2014 年に水蒸気噴火を行っており、1979・2014 年の噴火は VEI : 2 の規模の噴火であった。そのため、近い将来も同程度の噴火活動を行う可能性が高く、活動履歴を基に火山活動のリスク評価を行う必要がある。本研究では、御嶽火山の今後の活動評価に資するデータを得るために、火口近傍の山体上部において最近数万年間の活動を対象とした地質調査を行うとともに年代測定を行う。その結果をもとに、完新世を含んだ最近数万年間の火山発達史を構築したうえで、完新世の噴火史を明らかにするとともに、完新世の活動がそれ以前の御嶽火山の活動と比べて活動的か否かを検討する。

一般的に火山は、万年オーダーのスケールで多段階に成長することが知られている⁹⁷⁾⁹⁸⁾。また、それより細かい千年オーダーのスケールでも、噴火頻度や長期的マグマ噴出率の高い活動期と相対的に低い休止期を繰り返して成長することが知られている。そのため、現在の火山活動が、活動期であるか休止期であるかを判断することは、噴火ポテンシャルの評価につながり、防災上重要である。

本年度は、新型コロナウイルス感染症拡大のため、当初予定していた野外調査は実施できなかったが、火山層序の整理やすでに採取済の試料を使用して年代測定の実施を行った。その結果、予察的ではあるが、新期御嶽火山の形成史の大枠が明らかとなり完新世の活動評価に関する資料が得られた。

○新期御嶽火山の形成史

既往研究⁹⁹⁾¹⁰⁰⁾¹⁰¹⁾の間で大きく分布が異なる山頂部の地質ユニットについて、地表調査およびヘリなどから観察結果を基に、新たに地質ユニットの区分を予察的に行った。地質ユニットの区分は、噴出中心の変化や浸食間隙によるものと考えられる溶岩や火砕層の傾斜不整合やアバット不整合を目安に大きく区分した。その区分に従って、Matsumoto and Kobayashi¹⁰²⁾および松本・小林¹⁰³⁾の感度法 K-Ar 年代値を整理した。また、既存の年代値が得られていない北麓と東麓を中心に、新たに感度法 K-Ar 年代測定を 6 試料、Ar/Ar 年代測定を 6 試料行った(図 7 4 中の赤字: 表 3)。年代値と新たに区分した地質ユニット区分を図 7 4 に示す。なお、山麓の地質ユニット区分に関しては、山頂部で新たに区分した地質ユニット区分を基に、山田・小林⁹⁹⁾および竹内・他¹⁰¹⁾の層序を再整理して示したものである。

その結果、約 10 (または 11) ～8 万年前の間に、現在の継母岳を中心とするデイサイトから流紋岩火山体を形成した後、約 8～5 万年前に山体の南側を噴出中心とする火山体を形成し、さらに約 4～3 万年前に北側の継子岳および四ノ池付近を中心とする火山体、約 3 万年前前後に今の剣ヶ峰および一ノ池付近を中心とする火山体を形成したことが明らかとなった。また高い噴出率を示唆する長大な溶岩の流出時期は、約 6.5 万年前(西側の厳立溶岩)と約 3.5 万年前(北側の溶岩)の二回の時期発生したことが明らかとなった。このように明らかとなった活動史によると、完新世の火山活動は、三ノ池溶岩の流出はあるものの、それ以前より低調であることを示唆する。ただし、剣ヶ峰および一ノ池付近を中心とする火山体から得られている年代値は一つしかないので、過去 3～2 万年前の活動史はまだはっきりしない。

今後は、過去 3～2 万年前の年代測定値を充実させると共に、地質ユニットの分布や層序を確定して、時期ごとのマグマ噴出率を定量的に評価し、完新世の火山活動の活発度の評価を行う。

○まとめ

- (1) 御嶽火山の山体の地質ユニット区分・分布の見直しを行い、それに対応した地質ユニットごとに K-Ar 年代測定、Ar/Ar 年代測定を行った。
- (2) 御嶽火山で噴出率が高いことが推察される、長い溶岩の形成時期は、約 6.5 万年前と、約 3.5 万年前であることが明らかとなった。

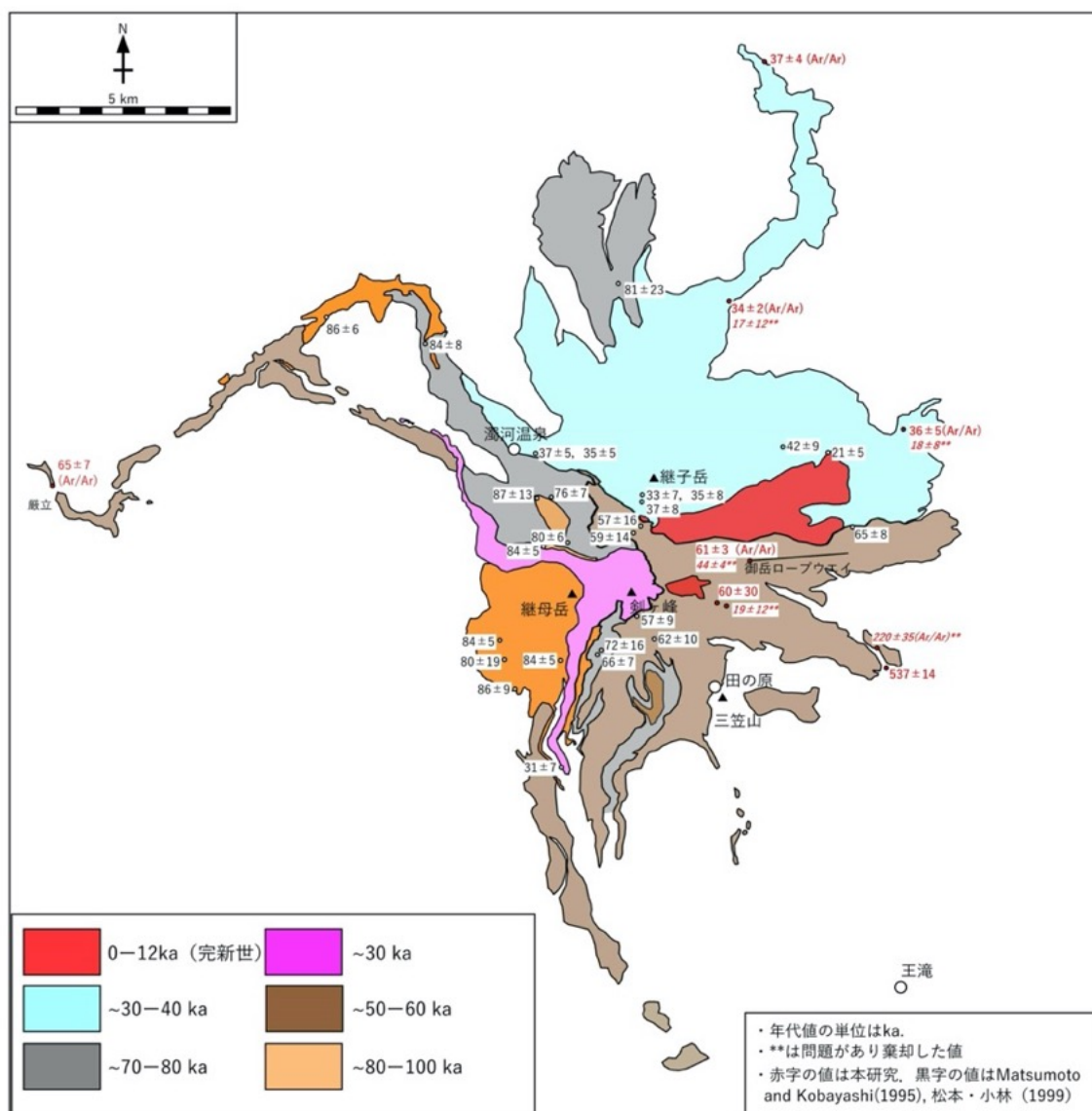


図 7 4. 新期御嶽火山の予察的な地質ユニット区分と年代値。

表 3. 御嶽火山噴出物試料の K-Ar および Ar/Ar 年代測定結果。

Sample ID	Dating Method	K (wt.%)	Sample wt (g)	40Ar rad. (10 ⁻⁹ cc/g)	1 σ	No rad. Ar (%)	Corrected age (ka)	1 σ	39Ar (%)	Plateau age (ka)	1 σ
Y-1	K-Ar	4.86	0.5018	6.6 \pm	0.7	87.4	44 \pm	4			
	Ar/Ar								100	61 \pm	3
O16060101	K-Ar	2.82	0.4846	47.1 \pm	1.2	66.3	537 \pm	14			
O16060102-01	K-Ar	3.80	0.4908	2.2 \pm	1.0	96.6	18 \pm	8			
	Ar/Ar								96	36 \pm	5
O16060104	K-Ar	2.65	0.4965	1.4 \pm	0.9	97.7	17 \pm	12			
	Ar/Ar								90	34 \pm	2
O16060105	Ar/Ar								92	37 \pm	4
O16060205	K-Ar	3.49	0.4952	7.0 \pm	3.9	98.9	60 \pm	30			
O16060206	K-Ar	3.55	0.4833	2.7 \pm	1.7	98.6	19 \pm	12			
O16060301	Ar/Ar								55	220 \pm	35
O18070402	Ar/Ar								67	65 \pm	7

w) 九重山: 九重火山における九重 D 層下位の未確認テフラ層と 54 ka 噴火活動 の関係性の検討 (山口大学)

○はじめに

約 54 ka に発生した九重火山最大規模の噴火活動 (54 ka 噴火) ¹⁰⁴⁾¹⁰⁵⁾による噴出物として、下位から九重 D 降下火山灰層(Kj-D)、飯田火砕流堆積物(Kj-Hd)、九重第一降下軽石層(Kj-P1)が確認され ¹⁰⁶⁾、さらに Kj-D は下部と上部に細分される ¹⁰⁷⁾。今回新たに Kj-D 下部の直下に未報告の火山灰層を確認し、この火山灰層を柚子降下火山灰層(Kj-Y) と命名した。Kj-Y は前述の通り Kj-D 下部の直下に堆積するため、54 ka 噴火と一連の噴出物と考えられる。一方、54 ka 噴火前に噴出率が増大し、54 ka 後に噴出率が著しく低下している ¹⁰⁵⁾。しかし、九重火山における 15 ka 以降の噴出率は 54 ka 噴火前の噴出率と同程度以上にまで増大している ¹⁰⁵⁾。このことから、Kj-Y を含めて 54 ka の噴火過程を明らかにし、その前後の活動履歴、マグマの変化を明確にすることは、九重火山における将来の 54 ka 規模の噴火の可能性を検討するうえで重要である。

そこで本研究では、地表踏査、鏡下観察及び火山ガラスの EPMA 分析を行い、Kj-Y の特徴と分布及び噴出中心を明らかにし、これらの結果から 54 ka 噴火の関係性を検討した。

○結果・考察

九重柚子降下火山灰層(Kj-Y)の特徴と噴火様式 本火山灰層の模式地は、図 7 5 の地点 4 である。模式地における本層は色調が黄白色から明褐色を呈し、極粗粒砂の粒間をシルトから粘土サイズの基質が充填する基質支持のテフラ層であり、一部 3 層に区分できる (図 7 6)。また、模式地では特徴的に火山豆石様の粒子を含有する (図 7 6 右)。この火山豆石様の粒子は、中央部に粒径数 mm 程度の核をもち同心円状の構造を有する。これらの特徴は水蒸気噴火の噴出物の特徴 ¹⁰⁸⁾と一致する。

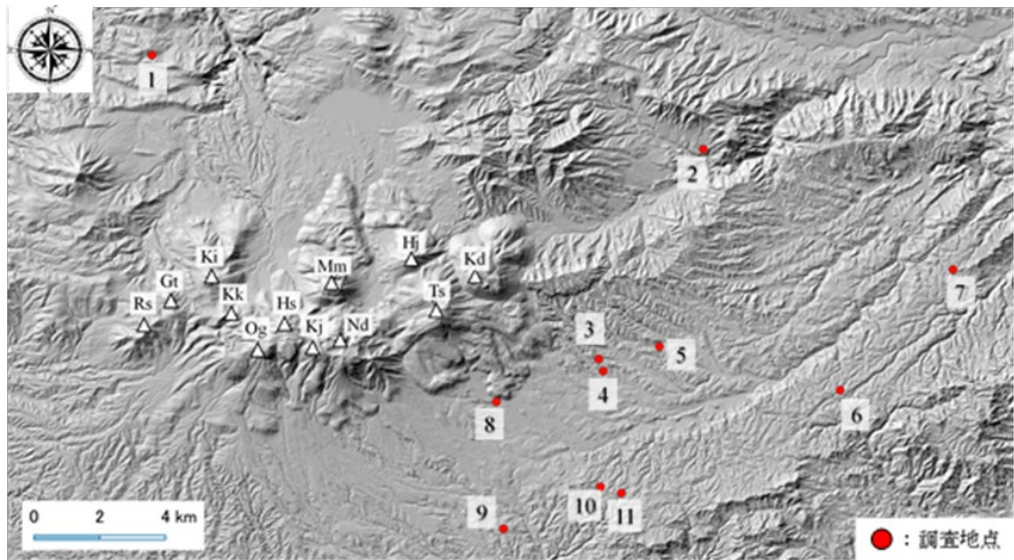


図 7 5 . 調査地点位置図。

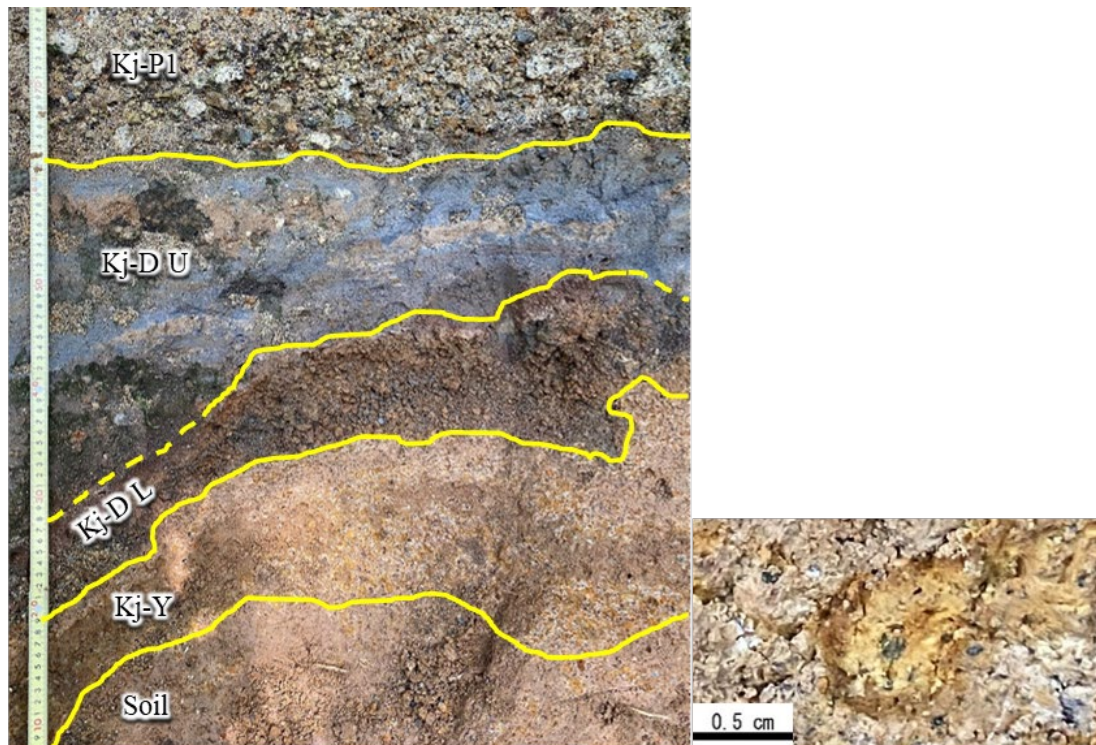


図 7 6 . 地点 4 における Kf-Y より上位のテフラ層の露頭写真（左）と Kf-Y 中の火山豆石様粒子（右）。

一方、鏡下観察より Kf-Y 層に含まれる有色鉱物は普通角閃石、単斜輝石、直方輝石、黒雲母であり、無色鉱物は斜長石、石英である（図 7 7 ・ 表 4）。また、本層は無色透明で軽石型あるいはバブルウォール型を呈する火山ガラスを含有する。

以上より、Kf-Y 層は水蒸気噴火の噴出物の特徴を示すとともに、本質物質である火山ガラスや鉱物を含有することから、Kf-Y の噴火様式はマグマ水蒸気噴火と考えられる。

表 4. Kj-Y および 54 ka 噴火噴出物の鉱物組成。

テフラ名称	年代(長岡・奥野, 2015)	鉱物組成	既存研究(長岡・奥野, 2014)
Kj-P1	54 kBP	Hbl, Bt, Qz	Hbl, Opx, (Bt, Qz)
Kj-Hd	54 kBP	—	Hbl, Opx, (Bt, Qz)
Kj-D 上部(青灰色火山灰層)	54 kBP	Hbl, Qz, Cpx, Opx, Bt	Hbl, Opx, Cpx, Bt
Kj-D 下部(褐色火山礫層)	54 kBP	Hbl, Cpx, Opx, Bt, Qz	Hbl, Cpx, (Qz)
Kj-Y	—	Hbl, Cpx, Opx, Qz, Bt	—

() : 少量を示す — : 記載なし
Hbl : 普通角閃石 Cpx : 単斜輝石 Opx : 直方輝石 Bt : 黒雲母 Qz : 石英

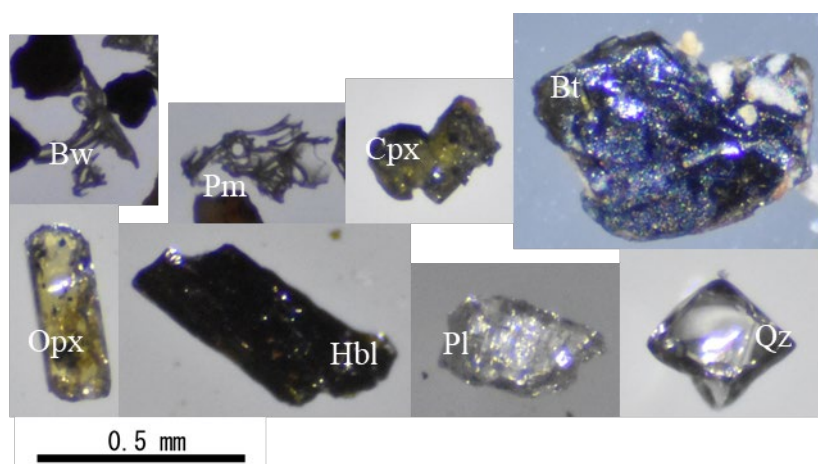


図 7.7. Kj-Y に含有される鉱物および火山ガラス。

Kj-Y と 54 ka 噴火の関係 Kj-Y の直上に土壌層を挟在することなく Kj-D 下部が堆積することから (図 7.6)、Kj-Y と Kj-D 下部の噴火活動に時間間隙がないと考えられる。また鏡下観察では、Kj-Y と Kj-D 下部・上部とではほぼ類似した鉱物組合せが認められた (表 4)。また、EPMA 分析結果から、Kj-Y と Kj-D 下部、Kj-P1 の火山ガラスは類似した組成を有する (表 5・図 7.8)。

以上の鉱物組合せと火山ガラスの組成から、Kj-Y と Kj-D 下部は同一のマグマであると推定される。以上より、Kj-Y は 54 ka 噴火の初期活動 または前駆的な活動と考えられる。

表 5. Kj-Y および 54Ka 噴火噴出物中の火山ガラスの化学組成。

Unit name	Locality		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	FeO	CaO	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	Total	n
Kj-P1 Pm片	4	平均	75.22	11.74	1.38	2.81	0.16	0.82	0.86	0.14	0.06	0.01	93.20	117
		dev.	0.94	0.20	0.25	0.26	0.01	0.04	0.03	0.06	0.03	0.01	1.13	
Kj-D U(B)	4	平均	76.07	11.69	1.69	3.71	0.14	0.84	0.74	0.18	0.04	0.01	95.10	97
		dev.	0.77	0.37	0.24	0.53	0.04	0.14	0.26	0.10	0.03	0.01	0.91	
Kj-D L(BR)	4	平均	75.26	11.81	1.46	2.96	0.20	1.01	1.00	0.18	0.05	0.01	93.93	93
		dev.	1.18	0.53	0.30	0.27	0.10	0.19	0.26	0.07	0.03	0.01	1.00	
Kj-Y	4	平均	75.19	11.85	1.56	2.97	0.19	0.98	0.93	0.17	0.04	0.01	93.89	42
		dev.	1.09	0.57	0.31	0.40	0.03	0.13	0.12	0.07	0.02	0.01	1.76	

各試料の平均値、及び標準偏差(dev.)を示す。n は測定数を示す。

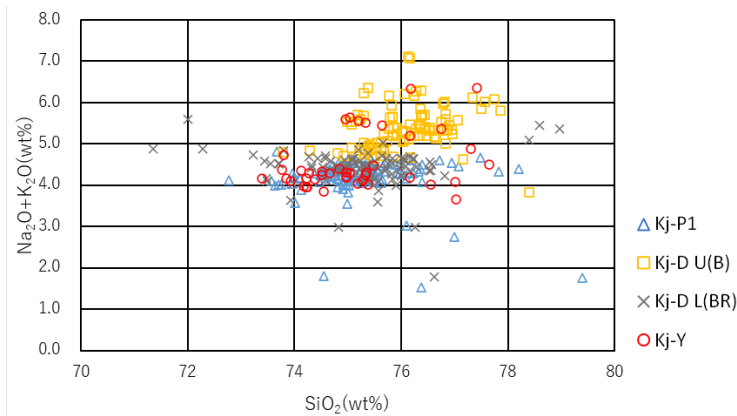


図 7 8 . Kj-Y および 54 ka 噴火噴出物中の火山ガラスの SiO_2 -alkali 量図。

Kj-Y と 54 ka 噴火の給源 観察した露頭における Kj-Y 層の層厚からアイソパック・マップを作成した (図 7 9)。図 7 9 より、Kj-Y の噴出中心は現在の九重火山東部域と推定される。一方で、Kj-D の噴出中心は中部～東部域¹⁰⁹⁾、Kj-Hd と Kj-P1 の噴出中心は中部域¹⁰⁹⁾¹¹⁰⁾と考えられていることから、54 ka 噴火の給源は東部域から中部域へと推移したと考えられる。

54 ka 噴火の推移 以上の観察結果から、九重火山の 54 ka 噴火は以下の様に推移したと考えられる。

- (1) 東部域でマグマ水蒸気噴火が生じ、Kj-Y が堆積した。
- (2) 中部～東部域でブルカノ式噴火活動が生じ、Kj-D が堆積した。
- (3) 中部域でプリニー式噴火活動が生じ、Kj-Hd と Kj-P1 が堆積した。

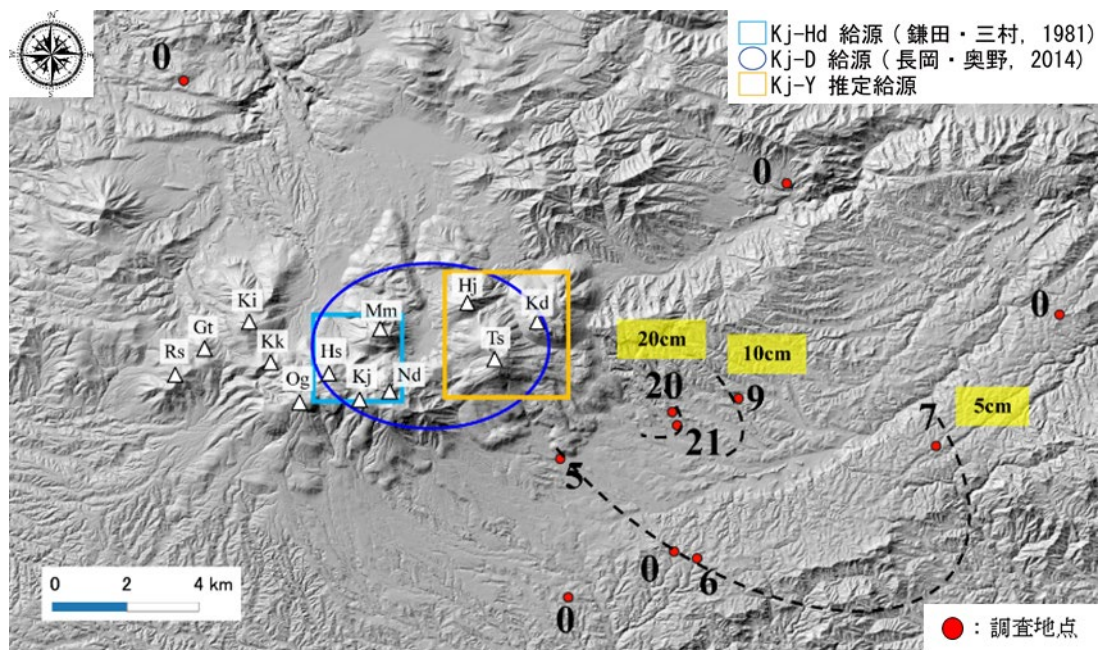


図 7 9 . Kj-Y のアイソパック・マップと推定噴出中心。

x) 阿蘇山：2019-2020 年噴火調査およびボーリング掘削およびトレンチ掘削調査による噴火活動履歴の解明 （熊本大学）

i) 阿蘇火山中岳 2019～2020 年噴火に伴う火山灰噴出量の時間変化

阿蘇火山中央火口丘群の中で唯一活動が続ける中岳はわが国を代表する活火山であり、近年では 2014 年 11 月～2015 年 5 月にかけてマグマ噴火¹¹¹⁾ や 2015 年 9 月～2016 年 10 月には複数回の爆発的噴火が発生している¹¹²⁾。令和 2 年度は、中岳第 1 火口における 2019～2020 年の火山活動に焦点を当て、小規模な噴火活動に伴う噴出物量の時間変化について明らかにしたので、その結果を報告する。

阿蘇火山中岳第 1 火口では 2019 年 7 月下旬に噴火活動が開始し、その後複数回の停止を挟むものの、ほぼ連続的な噴火がみられ、2020 年 6 月中旬まで継続した。今回の活動によって阿蘇カルデラ周辺域では長期間にわたる降灰に見舞われた。熊本大学では 2019 年 7 月の噴火開始直後から噴出物に関する現地調査を行ってきた。まず活動初期にあたる 7 月 29 日頃までの時期には、建物や道路などの人工物上に堆積した火山灰の定面積試料を採取した。それ以降の時期については、以前に噴出した火山灰と区別するために、火山灰採取容器（直径約 25 cm、深さ約 24 cm のバケツ）を設置して降灰観測を実施した（図 80）。その後、観測地点数を徐々に増やし、11 月 22 日には 20 地点となった。観測地点は 1 地点を除き、他はすべて阿蘇カルデラ内に位置している。噴出源に最も近い地点は中岳第 1 火口西南西約 1 km の阿蘇山上広場付近で、最遠は北北東約 9 km の地点（阿蘇市中通）である。火山灰の採取間隔は 1 日～21 日で、平均は 8 日間隔であった。採取容器に被せたビニール袋を回収して持ち帰り（雨水や雪が入っている際にはそれらごと）、乾燥後に火山灰の質量を測定して単位面積当たりの質量（ g/m^2 ）に換算した。そうしたデータをも



図 80．阿蘇火山中岳第 1 火口からの噴煙と火山灰採取容器（同火口西方約 2 km 地点で 2019 年 8 月 5 日撮影）。

とに、各期間の噴出物分布図 39 枚を作成して、火山灰の各等質量線が囲む面積と質量との関係から噴出物量の計算を行った。

2019 年の一連の活動が開始した 7 月 26 日の噴出物量は 400 トン/日と少ない量であったが、7 月 28 日～29 日は約 8,000 トン/日と増加した。その後は 11 月下旬頃までおおむね 1,000～5,000 トン/日の間で噴出物量が増減を繰り返した。

しかし、11 月 22 日～12 月 6 日の期間に火山灰噴出量は急増し、10,000 トン/日程度に達した。この期間においては中岳北東山麓で 1 kg/m^2 程度、南東山麓で 500 g/m^2 を超える降灰が認められた。それに続く 12 月上旬から下旬は 2,000～3,000 トン/日程度に減少した。

2020 年 1 月に入っても火山灰噴出量は 2,000 トン/日程度で推移したが、1 月 20 日～2 月 10 日に約 17,000 トン/日と今回の観測期間での最大値を記録した。このときは観測期間が 21 日間と長く、中岳第 1 火口から北東 2 km と南東 4 km の地点では 4 kg/m^2 を超える降灰が確認された (図 8 1)。その後は 3 月中旬まで火山灰噴出量は 1,000～7,000 トン/日で推移し、3 月中旬以降は数 100 トン/日程度まで減少するようになった。

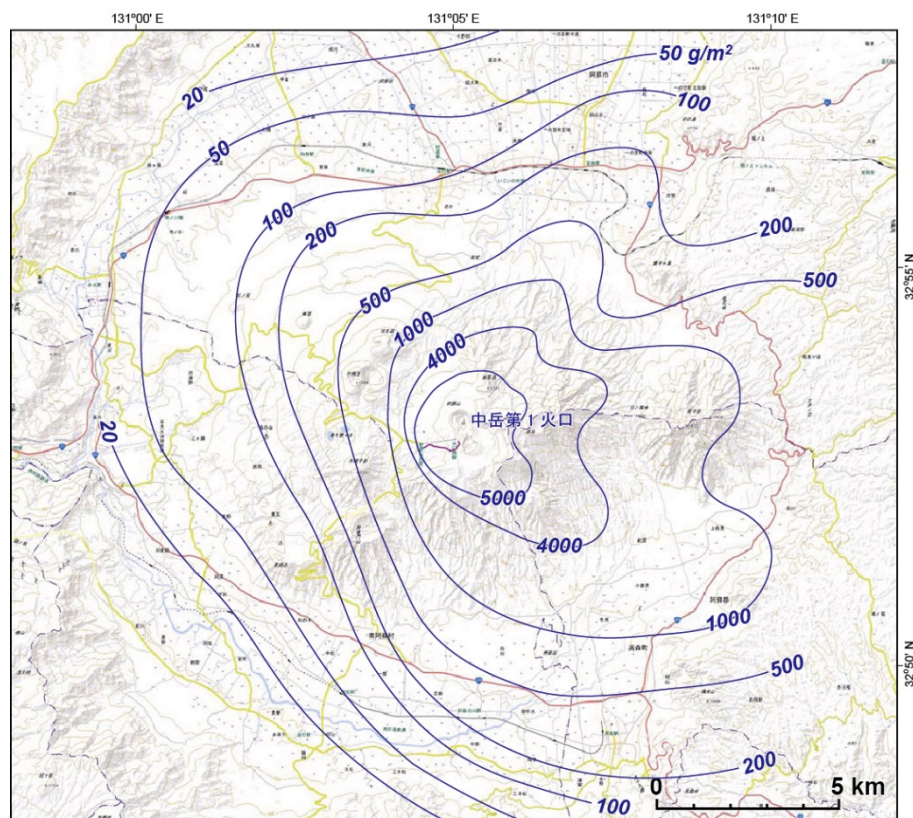


図 8 1. 阿蘇火山中岳における 2020 年 1 月 20 日～2 月 10 日火山灰の分布 (単位 g/m^2)。地理院地図レベル 14 を使用。

2019 年 7 月下旬の一連の噴火活動開始から 2020 年 6 月中旬までの約 11 か月間に噴出した火山灰の総量 (積算値) は 110 万トン程度であった。前回のマグマ活動である 2014 年 11 月～2015 年 5 月において、噴火開始から約 6 か月間における火山灰噴出総量は約 200 万トンであった¹¹⁾。それに比べると 2019～2020 年の噴火活動は約 2 倍の期間継続

しているが、噴出物量は 2014～2015 年活動の半分程度であり、全体的に小規模な活動といえる。ただ、前回の活動では噴火開始から 3 か月目以降は噴出レートが減少しているが、今回の活動においては後半 3 か月に噴出レートが低下したものの（数 100 トン/日）、前半 7 か月はほぼ一定の噴出レート（3,000～4,000 トン/日程度）で活動が推移している。また、火山灰噴出量が 1 万トン/日以上に急増する期間が少なくとも 2 回認められた。

なお、今回の降灰調査では中岳火口近傍域での降灰量観測データが得られていないので、110 万トンという噴出物量は実際の噴出物量より少ない可能性がある。1 km より遠方域の降灰データだけから近傍域を含む噴出物量を推定する経験式（遠方域データから得られた降灰量を 1.4 倍する）¹¹¹⁾ を使用すると、噴出物総量は 150 万トン程度となる。

ii) トレンチ掘削調査による噴火活動履歴の解明

阿蘇山の噴火履歴を明らかにするため、竹田市荻町馬場において、噴火堆積物層序を観察するトレンチ調査を実施した。

今回掘削を行った地点は、阿蘇カルデラの中心から東北東約 21 km 地点に位置している。阿蘇カルデラ形成後に活動を開始した中央火口丘群から噴出したテフラはカルデラ東方域に厚く堆積しており¹¹³⁾、Aso-4 噴火（約 9 万年前）以降の全層厚は東側カルデラ縁で 100 m 程度に達している¹¹⁴⁾。本年度のトレンチ調査は、中央火口丘群初期の噴火史解明のために実施したが、その時期の噴出物はカルデラ壁に近い熊本県内にはほとんど露出していない。一方で、降下テフラ全体が薄くなる大分県竹田市荻町付近ではトレンチ調査によって中央火口丘群初期のテフラを観察できる可能性が考えられた。

本年度に調査を行った地点では、地表から約 2.5 m 上位の壁面に約 6.7～6.8 万年前に噴出したと推定されている山崎第 1～第 5 軽石¹¹⁵⁾ が観察された。トレンチは地表面から 2 m 程度の深さまで掘削したが、Aso-4 火砕流堆積物（約 9 万年前）は観察できなかった。ただ、トレンチ断面最下部付近は非常に硬く固結しており、掘削終了後すぐに水が湧出し始めた（図 8 2）。このことから、トレンチ底面直下には溶結した Aso-4 火砕流堆積物が存在する可能性が高く、今回の調査では高さ約 4.5 m の断面に中央火口丘群初期にあたる 7～9 万年前の噴出物が観察できたと考えられる。

調査断面には 3 枚の降下スコリア層、1 枚の軽石が多量に混在する火山灰層、1 枚の降下軽石層が認められた（図 8 2）。最も厚い降下スコリア層と軽石層はトレンチ断面下部に観察され、それぞれの層厚は約 30 cm と約 40 cm であった。こうしたテフラ層はカルデラ縁から 15 km 以上離れた地点で数 cm～40 cm の厚さを有することから、いずれもプリニー式噴火による産物と推定される。今回のトレンチ調査により、阿蘇火山中央火口丘群の活動初期の 2 万年間に少なくとも 5 回のプリニー式噴火が発生したことが明らかとなった。今後は噴出物層序の詳細と噴火史について検討する予定である。

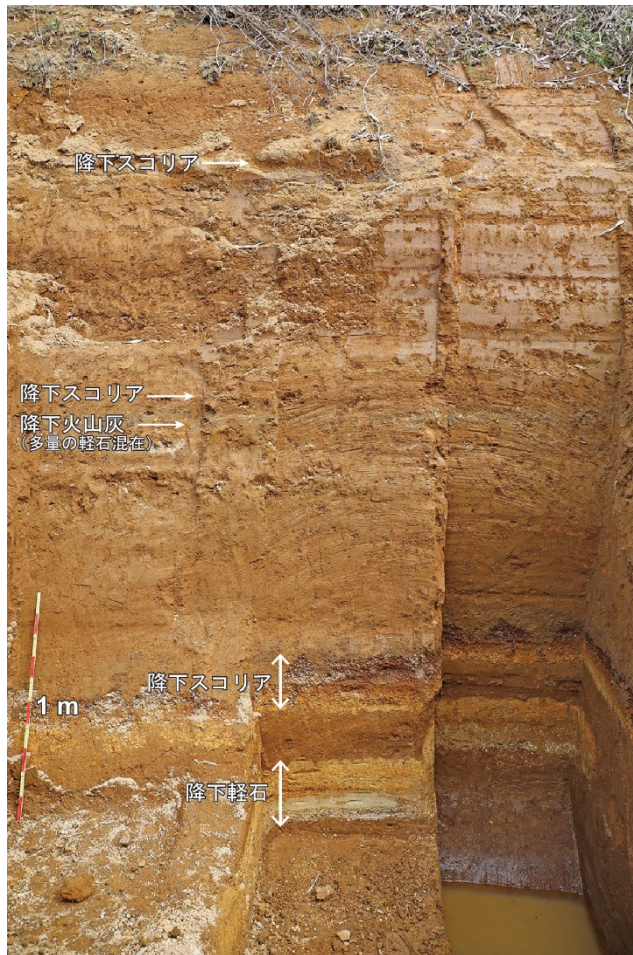


図 8 2．竹田市荻町馬場におけるトレンチ断面。

iii) 阿蘇山における令和 2 年度ボーリング調査報告

阿蘇カルデラのほぼ中央部に位置する中岳は、西暦 553 年以來の噴火記録が存在する、わが国で最も活発な火山の一つであるが、噴火活動史の詳細は不明な点が多い。そこで、本年度は、最近数千年間の噴出物が比較的良好な状態で保存されていると考えられた、中岳第 1 火口西方約 1 km 地点においてボーリング調査を実施した（図 8 3）。

今回の掘削深度は 43 m で、地表から 13.4 m 深までは土壌層を含む火山碎屑物の互層で、13.4～43 m は溶岩であった。上部の火山碎屑物互層中には 7.1～8.0 m 深に黒色のスコリア層があり、約 4,000 年前に噴出した杵島岳スコリア¹¹³⁾と考えられる。13.4 m 以深の溶岩は赤褐色～紫色の破碎部と灰色～暗灰色を呈する塊状部からなる玄武岩質安山岩溶岩であった。この溶岩中には火山灰層や土壌層は挟在していないため、比較的短い時期に流下した中岳起源の溶岩流と推定される。今回の掘削地点から南南西約 4 km 離れた地点で 2009 年に掘削された気象庁ボーリングコアの層序と対比すると、13.4 m 以深の溶岩は 5,000～8,000 年前頃に噴出した中岳新期山体溶岩である可能性が高い。しかし、気象庁ボーリングコアでは同溶岩は火山灰層や土石流堆積を挟んで 3 つのユニットからなっていたが、今回の掘削では 1 つのユニットの溶岩が認められただけであり、気象庁コアのどのユニットの溶岩に相当するのかなど、今後詳細な検討をしなければならない。



図 8 3. 中岳第 1 火口西方約 1 km に位置する令和 2 年度のボーリング調査地点（写真中央のやぐら）の状況。背後には中岳第 1 火口からの白色噴煙が見える。

y) 霧島山：野外調査に基づく噴火活動履歴および噴火活動推移履歴の解明 （東京大学地震研究所）

九州南部に位置する霧島火山は、新燃岳・御鉢・韓国岳といった複数の山体からなる火山群である。2011 年には新燃岳においてサブプリニー式噴火が起き、その後も 2017 年・2018 年に新燃岳で小噴火が、そしてえびの高原硫黄山でも水蒸気噴火が起きている。このような状況であることから、霧島火山の噴火活動履歴および噴火活動推移履歴を詳細に明らかにすることは、将来活動について検討する上で非常に重要である。そこで、本サブテーマでは、霧島火山の噴火履歴解明のための研究を重要課題の 1 つとして遂行している。

既往研究のレビューの結果、過去の大規模噴火の推移や噴火様式の詳細、マグマ蓄積・上昇過程が十分に理解されていないこと、また噴火規模についても検討の余地があることがわかった。そこで本年度は、13 世紀の御鉢文暦噴火を対象とし、噴火推移の再構築を行い噴出物の変遷を明らかにするとともに、噴出量を再検討することにした。地質調査により、堆積物を新たに詳細に区分し直し（図 8 4）、構成物の粒子物性基礎データ（粒径、密度、粒子形状等）を取得し、岩石組織の定量解析を進めた。さらに、新たなデータを加味して代表的な 3 つのテフラ層（ThT-a・ThT-b・ThT-c）について等厚線を引き直し、Weibull 法により体積を推定した結果、新たな見積もりではトータルで 0.33 km^3 となり、文暦噴火が従来 of 推定 (0.089 km^3)¹¹⁶⁾ よりも大規模な噴火の可能性があることがわかった。また、文暦噴火前後の噴出物（主にサブプリニー式噴火）についても地質調査を行い、層序や年代再検討のための調査も行った。

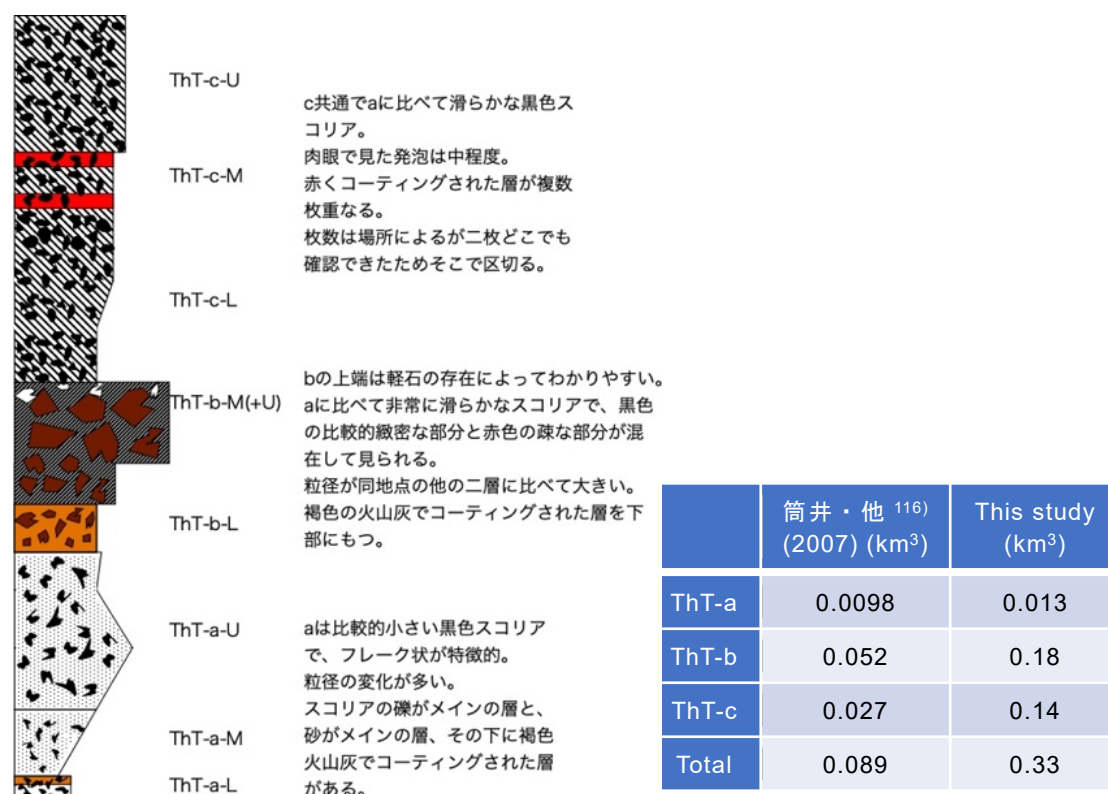


図 8 4．霧島御鉢文暦噴火堆積物の模式柱状図および代表的な 3 ユニットのテフラ噴出量推定値。

z) 鬼界：鬼界カルデラ火山の長期的噴火活動履歴の解明（東京大学地震研究所・北海道大学）

南九州の鬼界火山において、長期的な噴火活動の履歴を明らかにするために、地質学的、物質科学的研究を進めている（図 8 5）。とくに、7.3 kaに発生した超巨大噴火（鬼界アカホヤ噴火）とそれに至るまでのプロセスについて、東京大学地震研究所と北海道大学の共同で重点的に取り組んでいる。今年度は、平成30年度に実施したボーリング掘削により得られた試料（306.6 m）の分析・解析を引き続き進めた。7.3 ka鬼界アカホヤ噴火に先行する流紋岩溶岩（長浜溶岩）の直下及びより深部の海成砂層に含まれる貝殻についてはすでに¹⁴C年代を測定しそれらの堆積年代の大枠を明らかにしていたが（昨年度報告）、未測定試料について¹⁴C年代測定を行い、より詳細な年代学的検討を行った。その結果、長浜溶岩直下の砂層については7.3 kaに近い年代値が得られ信頼度が上がったほか、下位の海成砂層についてもこれまでより深度方向に高い密度で年代値を決定することができた（図 8 6）。また、長浜溶岩については、深度方向の化学組成バリエーションや同位体組成の特徴（図 8 7・8 8）をもとに、アカホヤ噴火のマグマと極めてよく似た特徴を有しほとんど同じ起源であること、しかし、やや分化したマグマが混合しており、浅部ほどその寄与が大きくなることなどが分かった。長浜溶岩に関する以上の成果について、論文投稿の準備を進めている。

一方、ボーリングコアの12-15 ka頃の層順には、8枚の軽石層が挟在することが明かなり、これらの軽石層の記載岩石学的特徴を調べたところ、陸上で見出されている籠港テフラ群(9-13 ka)に含まれる軽石と極めてよく似ていること(鉱物組み合わせや斑晶サイズ、斜長石斑晶に特徴的な蜂の巣状の構造を有することなど)がわかった。これらの噴出物はアカホヤ噴火や長浜溶岩の直前活動を理解する上で重要な制約となる可能性があり、今後、鉱物・ガラス組成の対比を行うほか、カルデラ形成噴火との関係も含めて起源について検討する。

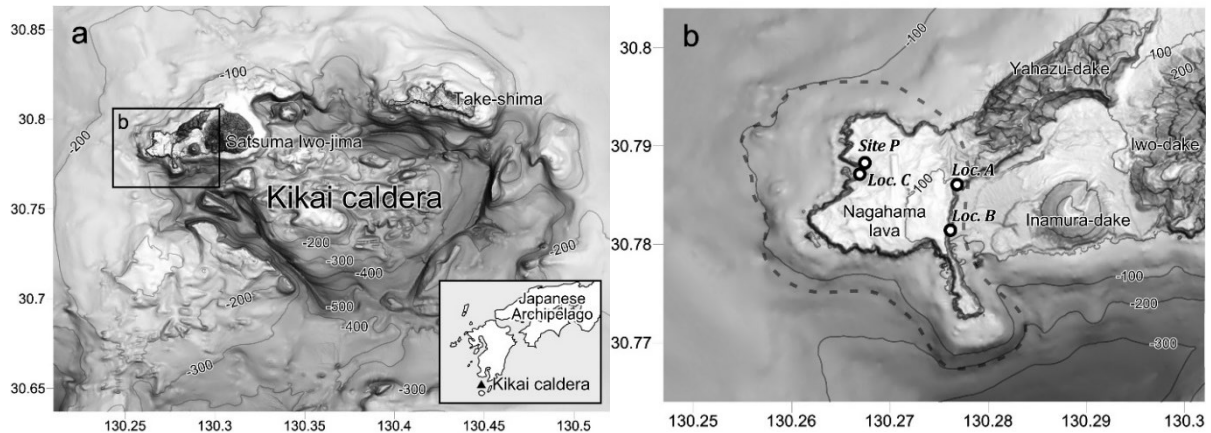


図 8 5. 鬼界カルデラおよび長浜溶岩の位置。図 b 中の点線は長浜溶岩の分布。P: ボーリング掘削サイト、Loc. A-C: 露頭調査地点。海底地形は海洋情報研究センターの M7008A ver. 2.3、陸上地形は国土地理院の基盤地図情報データをもとに作成。

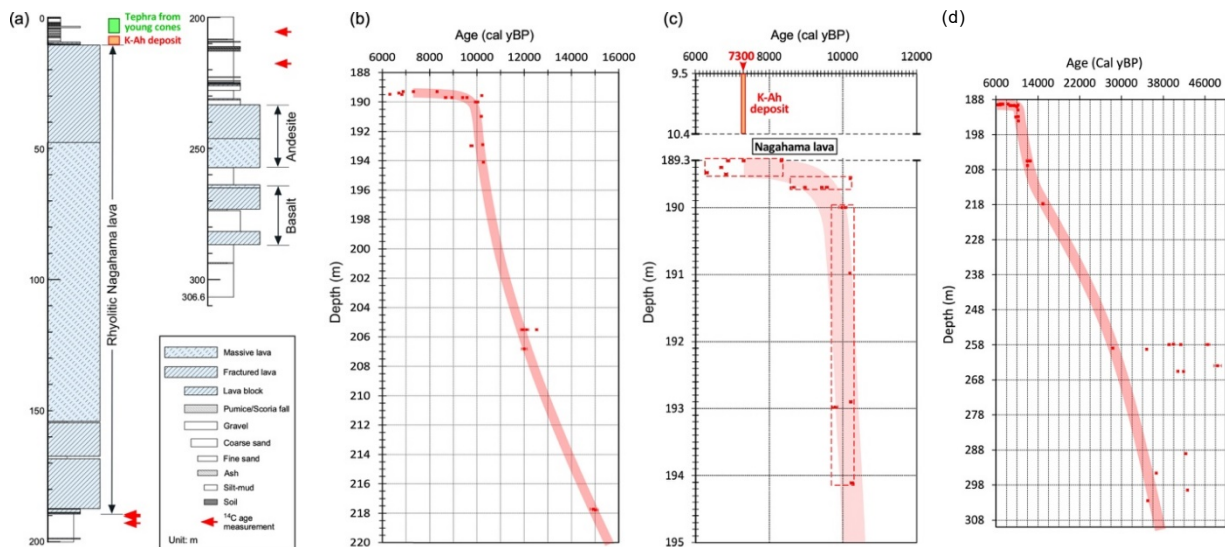


図 8 6. (a) 鬼界カルデラ薩摩硫黄島西端におけるボーリングコア柱状図。(b, c) 220 m 深まで、および(d) コア全体の堆積物中の貝殻の ^{14}C 年代 (2σ 値)。赤線は推定される深度と年代の関係。250 m 以深については、年代値のばらつきが再堆積の影響を反映している可能性があるため、若い年代を採用して曲線を引いている。

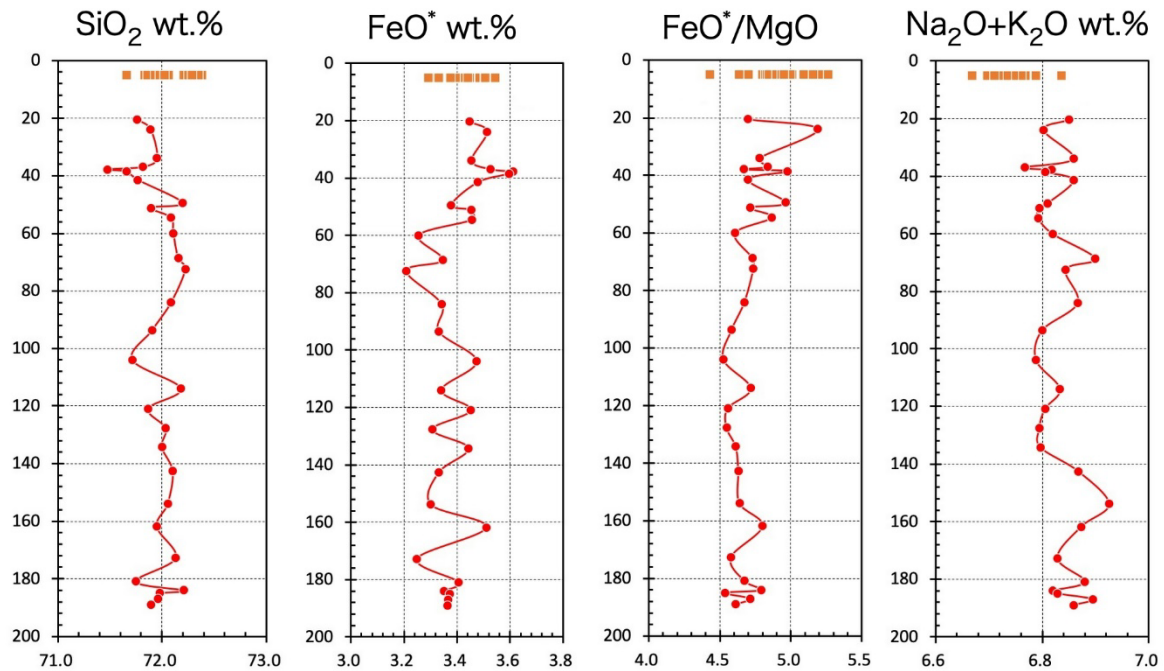


図 8-7. 長浜溶岩の全岩主要元素組成の深度方向のバリエーション。赤：ボーリングコア試料、橙：陸上露頭から得た試料（表層から深度100 m程度の浅部に相当する）。

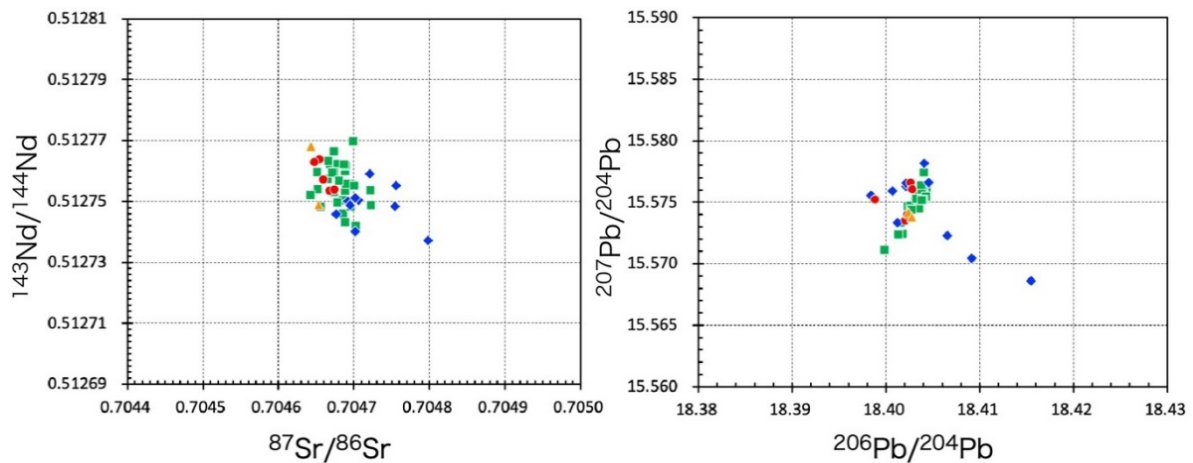


図 8-8. 長浜溶岩および他の鬼界カルデラ噴出物の全岩同位体組成比。赤：長浜溶岩、緑：アカホヤ噴火噴出物、青・橙：アカホヤ噴火後（硫黄岳、稲村岳）の噴出物。

aa) 【課題 C 連携研究】伊豆大島：

野外調査および物質科学的解析に基づく噴火活動推移履歴の解明と沿岸域調査による噴火活動履歴の解明（東京大学地震研究所・産業技術総合研究所）

昨年度より本格的に開始した課題 C 内の連携研究（伊豆大島）は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、課題 C 全体の現地検討会は中止となった。そのような中でも、個々のサブ課題ではできる範囲で研究を進めた。その結果、サブ課題 C-2 では、大きく 2 つ成果を得ることができた。

i) 野外調査および物質科学的解析に基づく噴火活動推移履歴の解明（東京大学地震研究所）

課題C連携研究対象である伊豆大島について、百数十年おきに繰り返す大規模噴火（Yシリーズ）の研究を昨年度から引き続き進めた。18世紀（Y1）噴火や15世紀（Y4）噴火については、露頭観察地点を増やし、テフラの空間分布の特徴をより明確にした。Y4噴火堆積物を詳細に調べたところ、Y1と同様に初期に低斑晶量マグマが噴出し、噴火末期に斜長石斑晶に富むという推移の特徴があることがわかった。Y2・Y6についても同様の視点での検討を始めている。また、Y1テフラのユニット区分や斑晶量の変化については昨年度明らかにしたが、さらに密度（発泡度）測定、FE-EPMAによる石基・発泡組織の分析を行った。その結果、これらの特徴が噴火推移に対応して変化し、とくに噴火強度が高いステージ（Y1C）ほど高密度かつ石基結晶度が低くなり、マグマ上昇過程に大きな違いがあることがわかった（図89）。他のYシリーズ噴火や、噴火様式がわかっている1986年噴火との比較も行ったところ、Y1Cの火砕粒子は最も密度が高く、石基結晶度は最も低いことがわかった（図89）。これらの違いは、伊豆大島の大規模噴火の推移やマグマ供給系を明らかにする上で重要な制約となる可能性があり、来年度にかけてデータを充実させ、考察を進める予定である。トレンチ調査については、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により現地での地点選定や手続きを十分に進めることができなかったため、次年度実施する予定である。

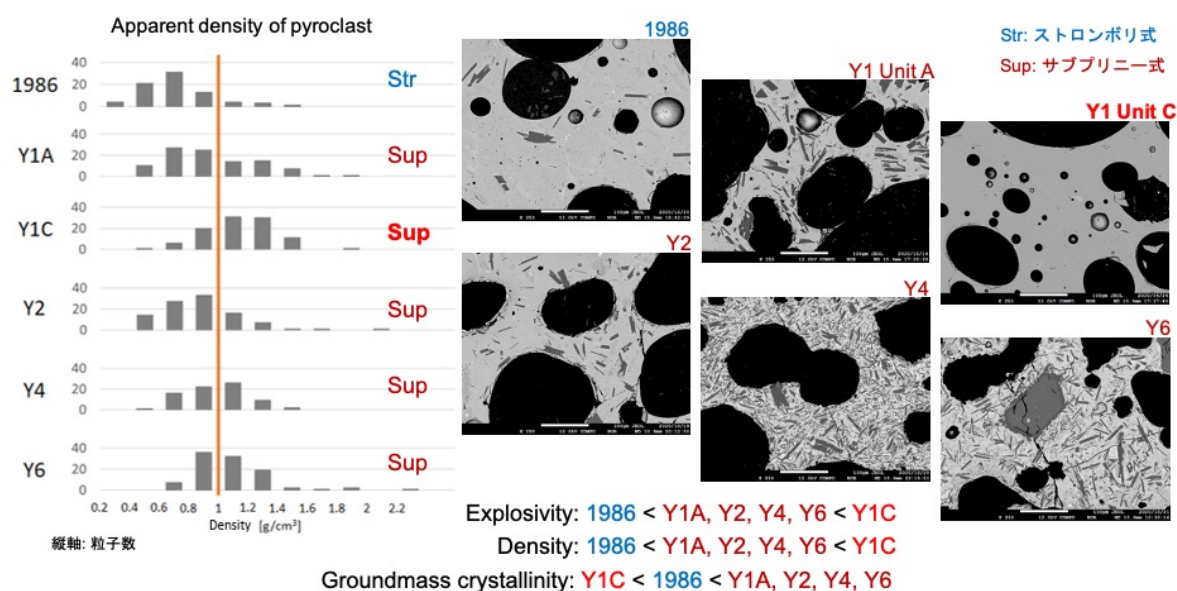


図89．伊豆大島 Y シリーズ噴火・1986 年噴火の火砕粒子の見かけ密度（左）と岩石組織（右）の特徴およびそれらの比較。

ii) 伊豆大島沿岸域における精密海底地形調査（産業技術総合研究所）

○目的と調査位置

伊豆大島火山は、伊豆諸島最北部、東京の南南西約 100 km に位置する火山であり、中央部に標高 764 m の三原山を擁する。過去数多くの噴火記録が残され、火山災害も繰り返されて来っており、1986 年 11 月の噴火では全島民避難という事態にいたった。

伊豆大島火山では、これまでその火山活動史や岩石学的特徴に関する多くの研究が行われてきた。本調査では、伊豆大島沿岸海底部と海岸域を中心に地形、地質、火山噴出物調査を行うことを計画している。それは、島嶼部では、海岸、沿岸域に生活や経済的基盤が存在するため、この地域での火山活動履歴の把握は重要と考えるためである。このため、(1) 沿岸域の火山噴出物の分布と給源の特定、(2) 沿岸域における火山噴火活動の頻度と様式の把握を行い、海底部分の火山体および噴出物の分布、体積等を明らかにし、沿岸海底部分の火山活動評価を行う。これを通じて陸上、海底部分を合わせた伊豆大島火山全体の噴火活動履歴の把握と特に側火山に注目した伊豆大島火山のマグマ供給系の理解を目指す。

今年度は、調査船でデータ取得できない沿岸域の地形データ空白域（概ね岸から約 2 km 以内）において、精密海底地形調査を行った（図 9 0）。また取得した地形データと陸上沿岸部に分布する噴出物の対比を目的とする噴出物の分布、組成、 ^{14}C 年代測定による活動時期の把握のための調査を実施した。

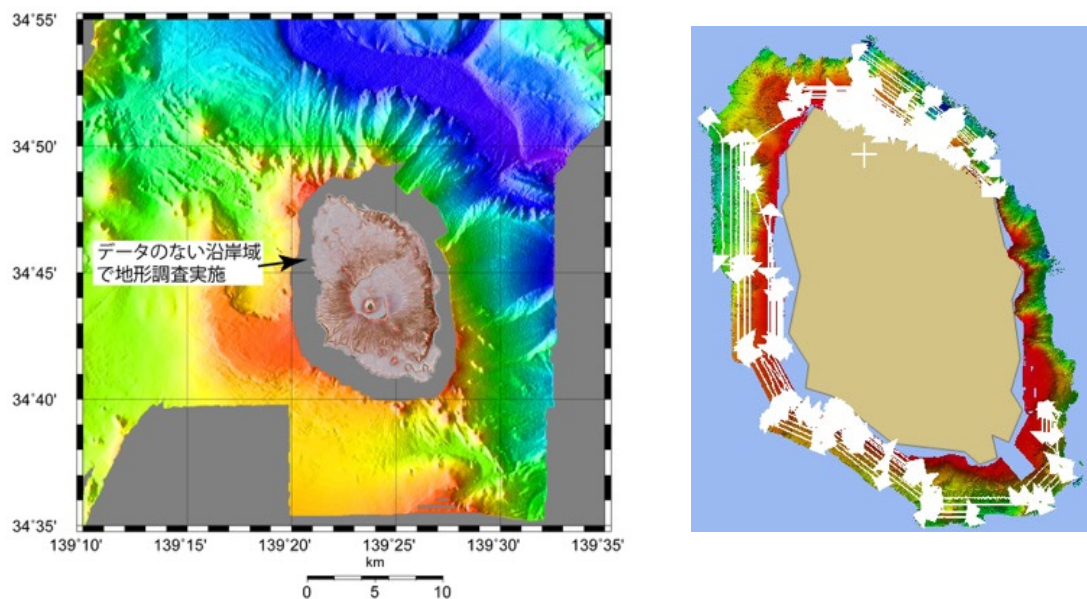


図 9 0．伊豆大島周辺の海底地形。左図は調査船により取得された地形図と沿岸のデータ空白域（Ishizuka et al. ¹¹⁷⁾に加筆）。右図は今年度取得部を含む沿岸海底地形データ。今年度測線を白線で示す。

○沿岸域の精密海底地形調査

海底地形データ取得には、産総研所有のTeledyne Reson社Seabat T-20型測深機（使用周波数200-300 kHz、ビーム数512本、スワス幅140°）を使用した。概ね水深200 m程度より浅い海域では300 kHzで、それより深い海域は、200-250 kHzの音を使用して観測した。測位には、2つのGPSと動揺センサーを使用したGNSSジャイロを用い、音速データは1日1-2回音速度計により取得した。上記システムを漁船の舷側に艀装した。測線間隔は、海底の深度に合わせて概ね30-60 mとし、速力は3-4ノット程度で観測した。取得データは、各種補正、ノイズ除去を行ったのち、水深200 m程度以浅の海域で1-1.5 mメッシュ、それより深い部分では4 mメッシュのグリッドデータを作成した。

図 9 1 に示すのは伊豆大島北西部沿岸海底地形図である。特徴は溶岩流の表面の縄状の構造が広範囲で見える一方、多数の西北西-東南東方向の断層と思われる線状構造が発達していることである。

まず溶岩流に注目すると、北西部陸上部にはカルデラ形成期以前に形成された側火山が分布しているが、そのうちの一つ三峰のすぐ海側で顕著な溶岩流がみられた。岸から 1.5 km 程度の位置まで流れている。浅い部分で縄状構造をみせるが、斜面を下ると複数のローブを発生し、そのうちの幅の広いものが谷の中を下ったようにみえる。先端部に近い部分で幅約 70 m、高さ 12-13 m 程度である。

斜面の傾斜が急になることに溶岩流の形状が変化していることが起因する可能性があり、斜面の平均斜度は上部で 3.7 度、下部で 5.5 度である。

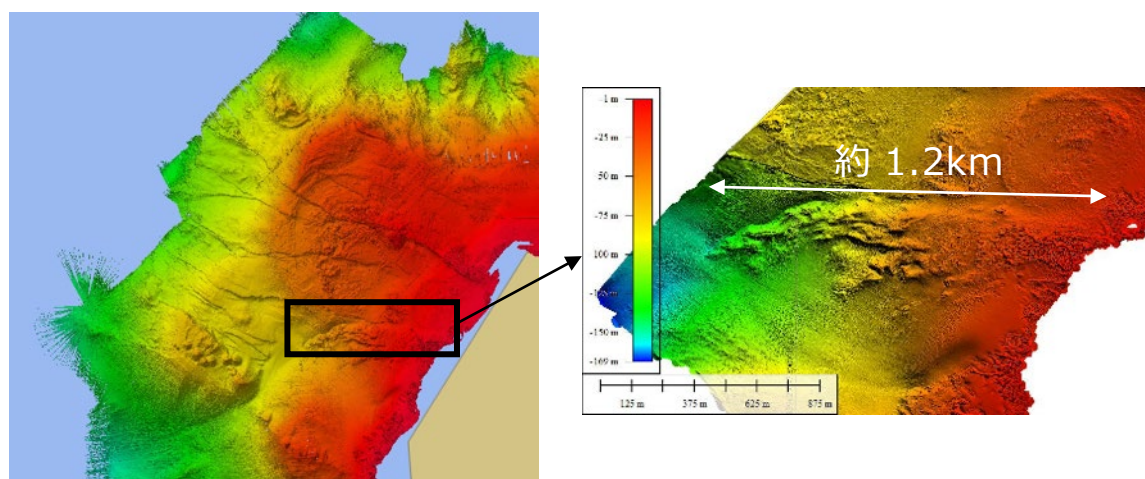


図 9 1．伊豆大島北西部沿岸海底地形。

一方、南西部では異なった特徴の海底地形がみられた(図 9 2)。千波岬から南西に伸びる高さ約 15-20 m、幅 70-80 m、の細長い高まりである。この地形の特徴として溶岩流にもみられる表面のしわ、ひだが今回得られている溶岩流の特徴と異なり、地形の伸びの方向に沿っているようにみえることがあげられる。海岸から 1.4 km 程度沖まで連続している。

千波岬付近に露出する噴出物は、火口近傍相の特徴を示しており、割れ目火口からの噴出物である可能性が高い。この噴出物により構成される尾根状の高まりが南西方向にむけて海中伸びていることが観察される。陸上部の地形のトレンド、表面の振幅もおおよそ海底部で観測されたものに近い。

このため、岬の陸上部から海底部まで連続する割れ目火口列であった可能性が高いと現段階では考えている。全岩微量成分組成の特徴から、約 1 万年前に活動した可能性が高いと考えられる。

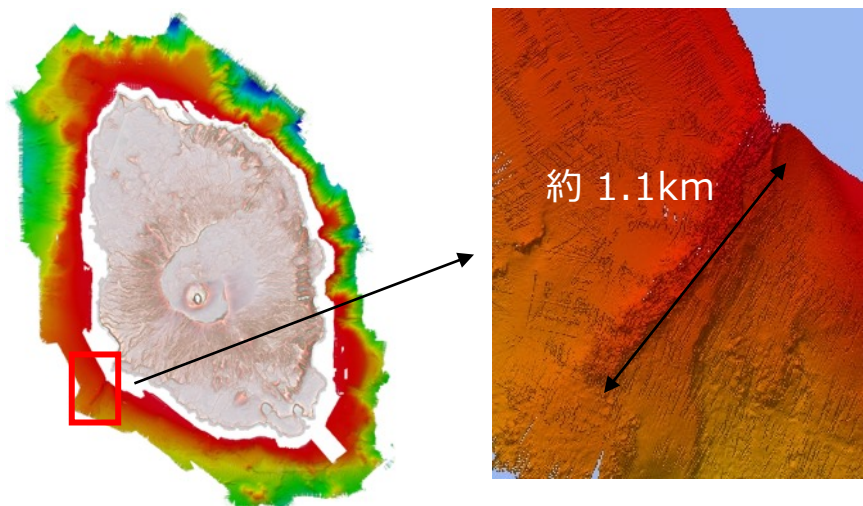


図 9 2 . 伊豆大島南西部千波岬沖沿岸海底地形。

○沿岸陸上部火山噴出物調査

沿岸海底地形調査により、溶岩流等によるものと考えられる顕著な地形が見られた地域の沿岸陸上部において、火山噴出物の調査を開始した。海底地形にみえる溶岩流等の年代決定を直接行うことは困難な場合が多い。このため、海底の噴出物に対比できる可能性のある、陸上噴出物に関する ^{14}C 年代測定を行うことで、海底に分布する噴出物の年代推定を試みる予定である。さらに、伊豆大島火山のマグマについて明らかにされた、系統的な全岩微量成分組成の時間変化¹¹⁸⁾に基づき、採取試料の化学組成分析をすることで年代推定を行い、 ^{14}C 年代から得られる制約と比較、補完する。

今年度は、伊豆大島南部沿岸域で調査を実施した。これにより沿岸部噴出物に新たな年代の制約を与えることができた (図 9 3・表 6)。

神ノ根側火山を覆う溶岩やその西側に分布する溶岩流について、約 2,200 年前の年代が得られた。層序関係から、神ノ根側火山の活動もこの時期と考えられる。一方神ノ根西方の 2 つの側火山については、上位溶岩の年代について得られた制約と化学組成の特徴から、約 4,000-5,000 年前に活動した可能性が高いことが明らかになった。さらに神ノ根側火口噴出物に覆われる溶岩が約 3,000 年前、差木地港東に露出する溶岩は、5,000 年前程度に遡ることが明らかになった。南東部トウシキの海岸の溶岩については、これを覆う噴出物の年代から約 2,000 年前程度である可能性が高い。今後、年代が明らかになった溶岩流等の噴出物と、海底地形に現れた噴出物との対比を進めていく予定である。

また伊豆大島南東部海岸、北東部海岸について予察的な地質調査を行なった。このうち波浮港の東 500~700 m の龍王崎付近の海食崖には、龍王崎を構成する龍王崎溶岩流、それを覆うアグルチネート、全体の層厚 30 m 弱に達する火砕サージ及び爆発角礫岩層が分布する。龍王崎溶岩流、アグルチネートは龍王崎北約 400 m の地点で火砕丘に遷移していることが観察され、この付近で発生した側噴火起源であることが確認された。龍王崎溶岩流、アグルチネートを覆う爆発角礫岩層は、間に通常の降下火山灰層の存在から、噴火時期が異なる 4 層に区分できる。また龍王崎溶岩流直上の火砕サージ堆積物には自生した植物痕があることから、龍王崎溶岩流噴火とは別の噴火による火砕サージ及び爆発角礫岩と

考えられる。龍王崎溶岩の年代はその層序から約 4,500 年前と考えられており、このことから龍王崎-波浮港周辺を噴出中心とするマグマ水蒸気噴火が、おそらく 3,000～4,000 年間に 4 回発生していたことを示す。このうち最上位の爆発角礫岩層は 9 世紀の N3 期噴火噴出物と考えられる。カキハラ磯付近では降下火砕物、火山豆石凝灰岩に挟まれた溶岩流が分布する。北東部も含め、今後より正確な年代決定などを行い、より詳しい沿岸域の噴火活動の解明を進めていく予定である。

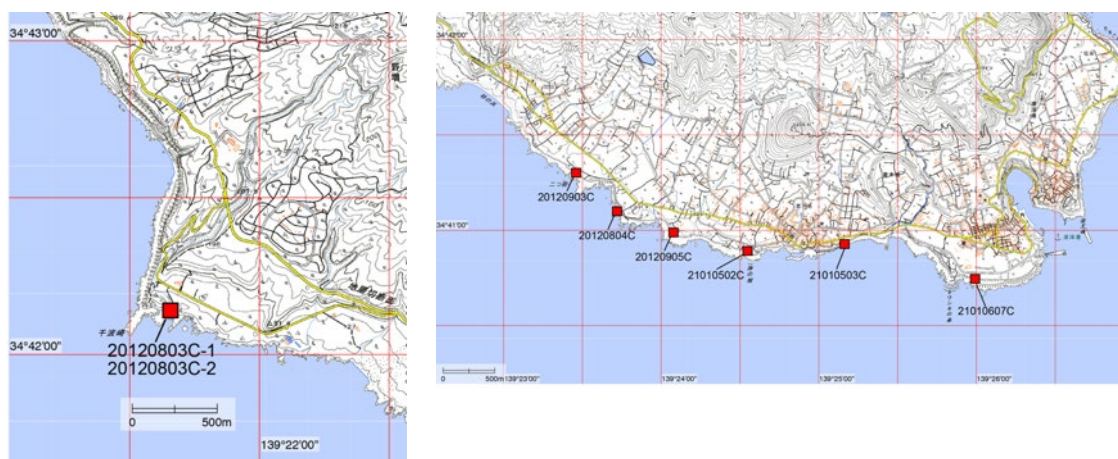


図 9 3 . 伊豆大島沿岸陸上部における ^{14}C 年代測定試料採取位置。

表 6 . 伊豆大島沿岸陸上部における ^{14}C 年代測定結果。試料採取位置は図 9 3 に示す。(株) 加速器分析研究所測定。

Analysis No.	Sample No.	sample type	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	^{14}C age (years BP)	calibration age (cal years, probability with 2 σ uncertainty)	latitude (°N)	longitude (°E)
IAAA-201456	20120803C-1	soil with charred material underlying 03-2 scoria	-19.75 \pm 0.21	3160 \pm 30	3449calBP - 3339calBP (92.1%), 3285calBP - 3272calBP (3.3%)	34.7023	139.3607
IAAA-201457	20120803C-2	sands tone with volcanic clast with woods (not charred)	-31.64 \pm 0.20	1650 \pm 20	1687calBP - 1677calBP (1.8%), 1600calBP - 1510calBP (71.9%), 1497calBP - 1471calBP (7.4%), 1455calBP - 1415calBP (14.4%)	34.7023	139.3607
IAAA-201458	20120804C	soil with charred material	-25.83 \pm 0.19	3870 \pm 30	4409calBP - 4230calBP (86.8%), 4201calBP - 4179calBP (5.7%), 4171calBP - 4158calBP (2.9%)	34.6849	139.3953
IAAA-201459	20120903C	charred material from soil	-26.15 \pm 0.20	4070 \pm 30	4796calBP - 4760calBP (8.7%), 4693calBP - 4679calBP (1.6%), 4643calBP - 4634calBP (2.9%), 4628calBP - 4503calBP (62.6%), 4494calBP - 4436calBP (21.3%), 4431calBP - 4426calBP (0.4%)	34.6881	139.3914
IAAA-201460	20120905C	soil with charred material	-22.94 \pm 0.21	2200 \pm 30	2313calBP - 2125calBP (95.4%)	34.6831	139.4013
IAAA-201530	21010502C	charred wood up to 1cm diameter, more than 2cm	-27.30 \pm 0.19	2220 \pm 20	2328calBP - 2291calBP (17.7%), 2271calBP - 2150calBP (77.8%)	34.6813	139.4090
IAAA-201531	21010503C	black soil	-15.37 \pm 0.21	4930 \pm 30	5718calBP - 5595calBP (95.4%)	34.6822	139.4194
IAAA-201532	21010607C	charred materila in soil	-28.43 \pm 0.22	1840 \pm 20	1823calBP - 1703calBP (95.4%)	34.6790	139.4334

○まとめ

- (1) 伊豆大島沿岸域の精密海底地形調査を実施、沿岸海底部の火山地形を明らかにした。
- (2) その結果、伊豆大島沿岸海底部の多くの溶岩流の分布と形態が明らかになった。さらにこれまで知られていなかった側火山や割れ目火口の存在が明らかになった。
- (3) 伊豆大島沿岸陸上部の火山噴出物の調査により、噴出年代と化学的特徴を明らかにした。これにより、沿岸海底部の噴出物について陸上部と対比することで、ある程度噴出年代が推測できる可能性を示した。

2) マグマ変遷解析センターの整備と分析技術開発 (北海道大学)

令和2年度は、昨年度に引き続き、電子顕微鏡での分析精度の向上や、質量分析装置を用いた同位体比測定法の確立、そして全真空型フーリエ変換赤外分光光度計顕微システムを用いた超低濃度揮発性成分の分析法の発展に取り組んだ。また、参加機関の研究者・大学院生の利用受入れを継続し、本年度は1機関計14名の利用があった。以下、特に成果のあったU-Th放射非平衡の測定法の確立と適用事例について報告する。

○はじめに

U-Th放射非平衡法は、適切な火山噴出物試料に対して適用することで、現在から遡って約1~40万年前のマグマプロセスに時間軸を挿入したり、噴出年代の推定を行ったりすることが可能であるため、特に課題Cの研究の遂行において非常に有用なツールとなる。そこでマグマ変遷解析センターでは、平成30年度からU-Th放射非平衡の測定法の開発に取り組み、今年度までに測定法の確立、および天然試料への適用性の確認を行った。

○U-Th放射非平衡の確立

U-Th放射非平衡を測定するためには、対象試料（鉱物や全岩）の $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比と $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 比を精密に決定する必要がある。そのためには、珪酸塩試料からのUとThの化学分離方法の確立、U/Th比の測定法の確立、Th同位体比の測定法の確立、が必要となる。岩石試料からのUとThの化学分離法についてはYokoyama et al.¹¹⁹⁾などに従い、ほぼ100%の回収率を達成した。U/Th比については、昨年度導入した誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-QMS: iCAP RQ)で測定する方法を採用し、常に1.5%以下の繰り返し再現性で測定できることが確認された。Th同位体比($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$)については、北海道大学のマルチコレクタ型質量分析計(MC-ICP-MS; Neptune-plus)にRPQフィルターを装着することによって ^{230}Th への ^{232}Th のテーリングの効果を低減し、さらにCETAC Aridus IITM desolvating nebulizer systemを使用することで強いビーム強度を得ることにより、0.5%程度の繰り返し再現性で測定できることが確認された。Th同位体比については、未知試料の測定時に同位体比がよく決まっている複数の標準試料（アメリカ地質調査所のBHVO-2とW-2）でbracketingを行うことにより補正した。その結果、モニター試料として測定したBCR-2について($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) = 0.876 ± 0.003 (n = 5, 2 σ) が得られ、推奨値(=0.874)¹²⁰⁾と有意に一致していることが確認された。

○火山岩試料への適用例

マグマ変遷解析センターで確立した U-Th 放射非平衡の分析方法の有効性を確認するため、白頭山 10 世紀噴火 (Millennium eruption) の噴出物、および下位の噴出物 (Pre-Millennium eruption ; 4-5 ka) について、分析を行った。10 世紀の噴出物は玄武岩～トラカイト～コメンダイト質と、幅広い組成範囲を示し (図 9 4)、玄武岩～トラカイト、トラカイト～コメンダイトへの主要元素の組成変化は、基本的に結晶分化作用で説明されている¹²¹⁾。一方で、4-5 ka の試料は流紋岩質 (パンテレライト) である。本研究では西本・他¹²²⁾の試料を用い、U-Th 放射非平衡の分析を行った。その結果、主要元素組成で確認されている 10 世紀噴出物の玄武岩・トラカイト・コメンダイトの端成分が、U-Th equiline 図でも明確に識別されていることが確認された (図 9 5)。また 4-5 ka の流紋岩質試料についても、10 世紀噴火の流紋岩質 (コメンダイト) 試料とは明瞭に区別されることが分かった。さらに玄武岩マグマからコメンダイトマグマの分化の時間スケールとして、モデル年代ではあるが、約 6 万年との推定値が得られた。これらのことから、U-Th 放射非平衡法は時間軸を含めたマグマプロセスを解読するためのツールとして有効であることが示された。

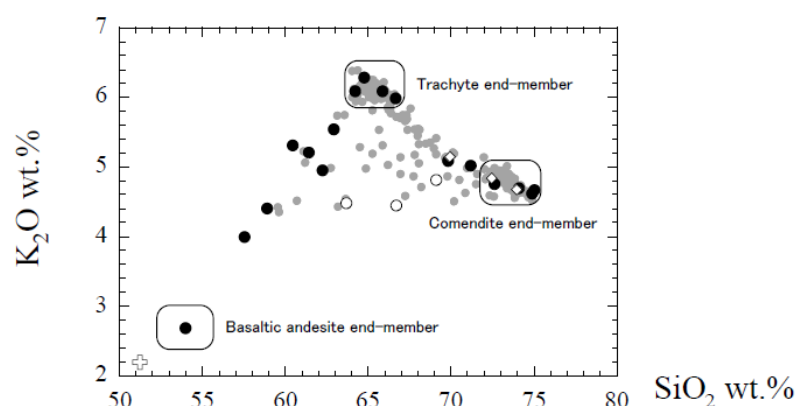


図 9 4．白頭山 10 世紀噴火の噴出物 (丸印) および下位の噴出物 (ダイヤ印) の全岩主要元素組成。データは西本・他¹²²⁾。黒丸は U-Th 放射非平衡を測定した試料を表す。

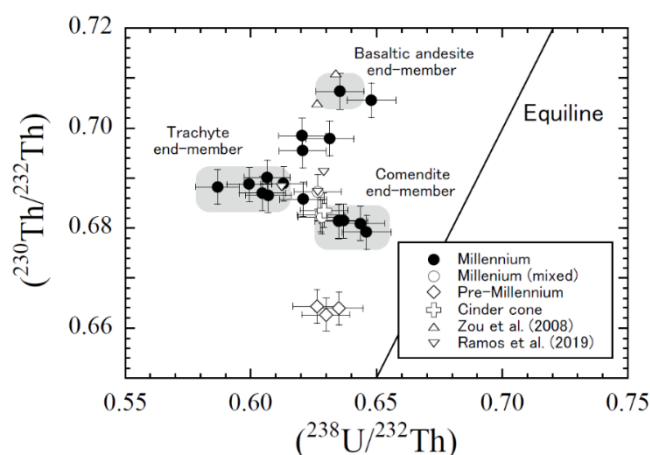


図 9 5．代表的な試料についての U-Th 放射非平衡の測定結果。

3) 大規模噴火データベースの整備 (産業技術総合研究所)

a) 大規模噴火推移データベース

近現代に発生したおおむね **VEI5** クラス以上の火砕噴火のうち詳細な噴火推移の目撃記録が残る噴火事例について、国内外の **21** 噴火の噴火事象時系列データを収集し、噴火開始前から噴火終了後までの噴火活動及び関連する活動(地震活動など)推移を取りまとめ、大規模噴火推移データベースを作成した。取りまとめにあたり、様々な噴火事象の強度をあらわす統一的な基準として火山噴火指標(**VUI**)を導入した。噴火の前後 **7** 日間~**200** 年間の火山活動の推移を、**VUI** を用いて統一的に表現する方法を開発し、これら **21** 噴火に適用した(図 9 6)。

収集した火砕噴火の推移パターンから、マグマの蓄積-上昇-噴火に至る事象の推移を示す分岐関係図を試作した。今年度考察した事象分岐の例では、新規火道の形成の有無、あるいは火道上昇中のマグマの脱ガス程度などが分岐をコントロールする場合を抽出し、それぞれの発生による噴火事象の前後関係を思考実験した(図 9 7)。これら試作した事象分岐関係図を桜島火山に適用し、桜島 1914-15 年噴火や 1935-46 年噴火の推移について検討した。その結果、これらの噴火の噴火現象(爆発性の強弱など)がマグマ上昇過程における火道形成や脱ガスの進行程度で説明できる可能性を示した(図 9 8)。

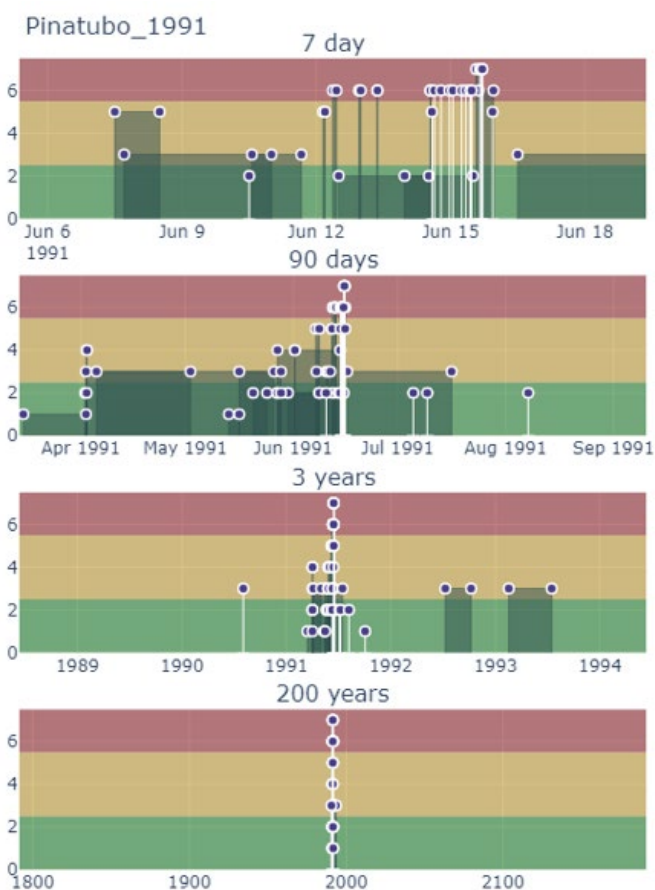


図 9 6. フィリピン・ピナツボ火山の 1991 年噴火の噴火推移。縦軸は本研究で導入した火山噴火指標 (**VUI**)。上段から、噴火クライマックスの前後 7 日間、90 日間、3 年間および 200 年間の推移を統一した基準で記載した。

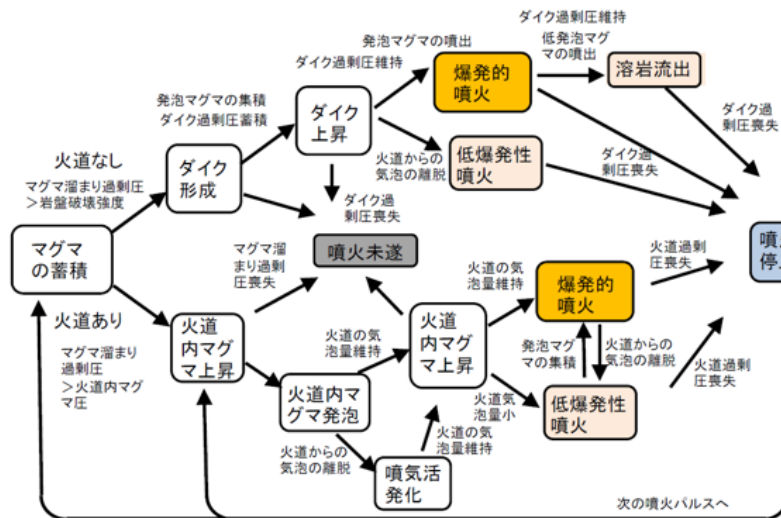


図 9.7. 桜島の事例をもとに作成した、マグマ蓄積—上昇—噴火の事象分岐関係図。 マグマの蓄積から上昇・噴火開始・噴火の停止までの過程とその分岐事象をとりまとめた。

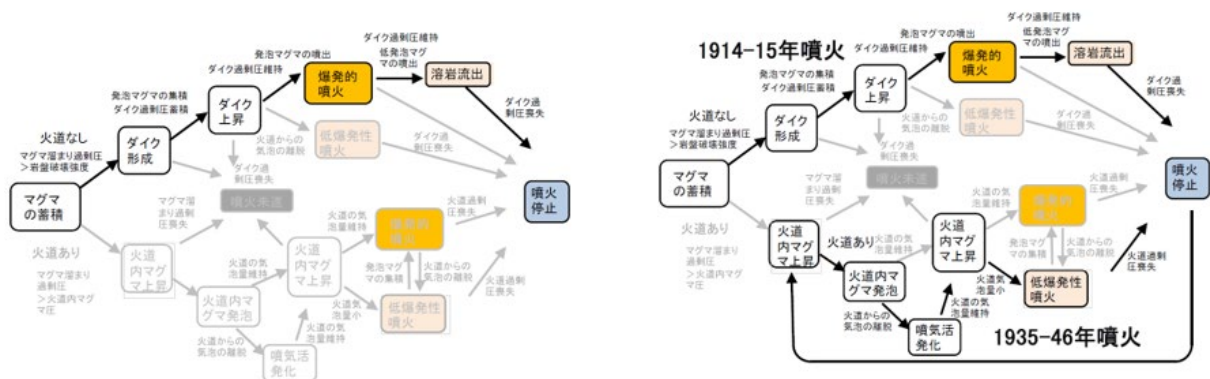


図 9.8. 左：桜島 1914-15 年噴火の推移を図 2 の噴火事象分岐関係図に示す。噴火事象分岐のうち、それぞれの噴火は特定の分岐経路をたどって時間発展すると考えられる。右：桜島における、1914-15 年噴火とそれに続く 1935-46 年噴火の事象推移。異なる事象推移をたどることにより爆発性や噴火継続期間などが異なる噴火が発生した。

b) 大規模噴火データベース

後期更新世以降に大規模噴火を発生させた、支笏、洞爺等国内 11 カルデラについて長期的活動や大規模噴火の噴火推移などを取りまとめ、大規模噴火データベースを構築した (図 9.9)。カルデラ形成噴火のみならず、先カルデラ形成期、および後カルデラ期の活動についても、噴出量や噴火年代などのデータを収集した。大規模火砕噴火の地質データとして、国内外の 90 以上の主要噴火降下テフラの分布データを収集するとともに、GIS 化を進め地図上で閲覧可能なデータとして整備した (図 10.0)。



図 9 9．大規模噴火データベースの試作版。始良カルデラの事例。長期的前駆活動、短期的前駆活動、カルデラ形成噴火の推移、後カルデラ火山活動について、噴出物毎にその噴火推移や噴出物層序、マグマ組成などの情報をとりまとめた。

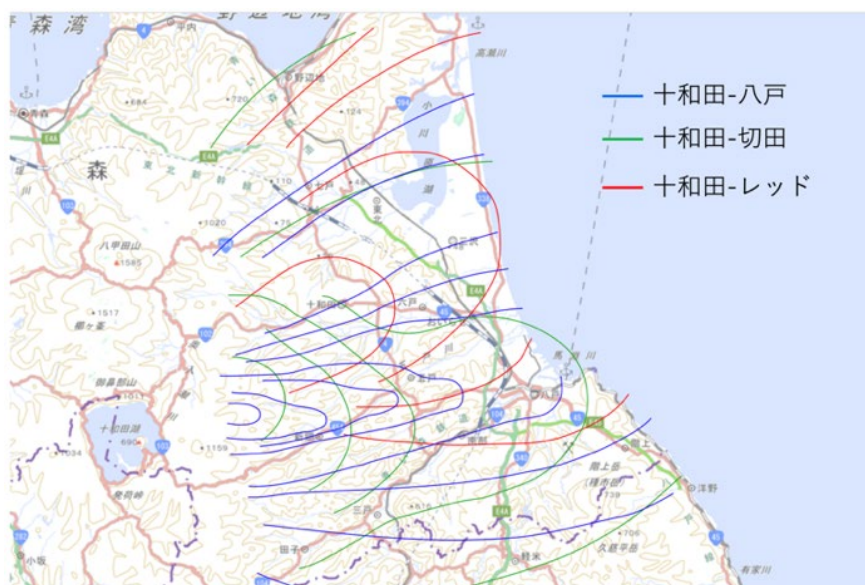


図 1 0 0．国内外の降下テフラの GIS データを整備。十和田火山起源の降下テフラの事例。既存文献から降下テフラの等層厚線を抽出し、GIS データとして掲載した。

c) まとめ

噴火目撃記録が残る国内外21噴火の噴火事象時系列データを収集し、データベースとして構築した。それをを用いて噴火事象分岐条件を火道発達と脱ガス過程に基づき整理した。また、カルデラ形成を伴うクラスの大規模噴火については、支笏、洞爺等国内の11カルデラについてカルデラ形成前後を含む噴火推移を取りまとめ、データベース化した。さらに、データベースの閲覧検索システムの構築を進め、プロトタイプを作成し、90以上の主要噴火降下テフラの分布データのGIS化を進めた。

4) ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築（防災科学技術研究所・北海道大学）

本課題の研究手法の1つであるボーリング掘削調査で採取されたコア試料を有効活用するために、国立研究開発法人防災科学技術研究所（協力機関）とともに、ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築準備を引き続き実施した。令和2年7月にボーリングコア試料保管庫（防災科学技術研究所）が完成し、既存コア試料の集約を開始した（図101）。今後は、試料データの整理と、公開に向けたポリシー等の構築を行っていく予定である。



図101. ボーリングコア試料保管庫の様子（防災科学技術研究所）(a)全景、(b)コア収納設備、(c) 収納されたコア、(d) 試料処理室。

5) 課題C-2の総合推進および課題C全体のとりまとめと研究成果の発信 (北海道大学)

実施責任機関である北海道大学では、課題 C-2 の各参加・協力機関と連絡を密に取り、研究の進捗状況や新型コロナウイルス感染症拡大の影響の状況等の把握し、できる範囲で研究が遂行されるように努めた。また、ボーリング掘削調査については、掘削地点の調整を行い、アトサヌプリ・有珠山・阿蘇山の3箇所で実施した。そして、国立研究開発法人防災科学技術研究所と協力して実施しているボーリングコア試料の保管・管理システムの構築にかかる既存コアの集約の調整を行った ((2)(b)4参照)。火山研究人材育成プログラムにおいては、引き続き参加機関の複数の研究者が講師として参画するとともに、課題 C-2 の研究課題の一部を大学院生の研究テーマとして遂行し、博士後期課程の学生については、RA として雇用することで、より実践的な教育に取り組んだ。

令和2年度から新たに取り組むことになった、伊豆大島火山を対象とした課題 C の連携研究については、コロナ禍のため現地での地質巡検および研究集会は見送りとなったが、個々のサブ課題内で研究を進めた。そして、12月に研究集会(オンライン)を開催し、それぞれの成果発表や情報交換を行い、今後の方針を議論した。

なお、課題 C および各サブ課題の取り組みや成果公表については、課題 C ホームページ上で随時公開している(<https://www.kadai-c.com/>)。

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は、コロナ感染症拡大という、これまでに経験したことのない状況が続き、各参加機関および協力機関は対応に苦慮したが、そのような混乱下においても、それぞれの研究課題について精力的に研究を行い、上記のとおり多くの成果を得ることができた。全体として、順調に研究が遂行していると考えられる。次年度以降も、まずは個々の機関の研究成果の積み重ねが必要であるが、対象火山が多く現状の研究体制ではそれぞれの火山で十分な成果を得ることは容易ではない。協力機関の追加や基礎的地質調査の外注などの検討に加えて、重点火山の見直しを行うことでの研究の集中が重要であろう。さらに人材育成コンソーシアムと連携し、地質・物質科学の博士課程大学院生を育て、RA として本サブ課題に参画させることも重要である。それに加え、今後は C-2 課題内での協力体制を更に強化し、参加機関および協力機関で、サブ課題全体の研究成果と今後の研究の方向性を共有することが重要である。そのために、サブ課題 C-1 と C-3 との連携を強化するための課題 C 全体の現地検討会を予定していたが、コロナ禍のため中止となった。次年度以降は研究集会を活発化させ、課題 C 全体の連携をさらに進展させたいと考えている。

(d) 引用文献

- 1) 岸本博志, 長谷川健, 中川光弘, 和田恵治: 最近約 1 万 4 千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式, 火山, Vol.54, pp.15-36, 2009.
- 2) Katsui, Y., Ando, S. and Inaba, K.: Formation and magmatic evolution of Mashu volcano, east Hokkaido, Japan, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Vol.16, pp.533-552,

1975.

- 3) Walker, G.P.L., Heming, R.F. and Wilson, C.J.N.: Low-aspect ratio ignimbrite, *Nature*, Vol.283, pp.386-287, 1980a.
- 4) 長谷川健, 山本明彦, 神山裕幸, 中川光弘: 阿寒カルデラとその周辺の重力構造, 北海道大学地球物理学研究報告, Vol.69, pp.97-112, 2006.
- 5) 勝井義雄: 5 万分の 1 地質図幅「屈斜路湖」および同説明書, 北海道開発庁, 42p, 1962.
- 6) 勝井義雄, 横山泉, 岡田弘, 西田泰典, 松本佳久, 川上則明: アトサヌプリ・摩周 (カムイヌプリ). 北海道における火山に関する研究報告書, 第 10 編, 北海道防災会議, 104p, 1986.
- 7) Goto, Y. and McPhie, J.: Tectonics, structure, and resurgence of the largest Quaternary caldera in Japan -Kutcharo. *Hokkaido, GSA Bull.*, Vol.130(7/8), pp.1307-1322, 2018.
- 8) 本間宏樹: 北海道東部、後屈斜路カルデラ、アトサヌプリ火山の火山活動史及び火山災害予測図, 北海道大学大学院修士論文, 2001.
- 9) 長谷川健, 中川光弘, 宮城磯治: 北海道東部, アトサヌプリ火山における水蒸気噴火の発生履歴: 炭素年代および気象庁ボーリングコアからの検討, *地質学雑誌*, Vol.123(5), pp.269-281, 2017.
- 10) 宇井忠英, 勝井義雄, 本間宏樹: アトサヌプリ火山防災マップ, 弟子屈町, 2001.
- 11) 和田恵治, 稲葉千秋, 根元靖彦: 雌阿寒岳の最近 12000 年の噴火史, *日本火山学会 1997 年度秋季大会講演予稿集*, p.100, 1997.
- 12) 南裕介, 中川光弘, 佐藤鋭一, 和田恵治, 石塚吉浩: 雌阿寒岳火山ポンマチネシリにおける過去 1000 年間の火山活動史, 火山, 投稿中.
- 13) 佐藤鋭一, 和田恵治, 南裕介, 石塚吉浩, 中川光弘: トレンチ調査による最近 14000 年間の雌阿寒岳の噴火史の再検討, *日本火山学会 2020 年度秋季大会講演予稿集*, p.26, 2020.
- 14) 藤原伸也, 中川光弘, 長谷川摂夫, 小松大祐: 北海道中央部, 十勝岳火山の最近 3,300 年間の噴火史, 火山, Vol.52, pp.253-271, 2007.
- 15) 藤原伸也, 石塚吉浩, 山崎俊嗣, 中川光弘: 十勝岳北西麓で新たに発見された 4,700 年前の火砕流堆積物と十勝岳の完新世の活動の再検討, 火山, Vol.54, pp.253-262, 2009.
- 16) 石塚吉浩, 中川光弘, 藤原伸也: 十勝岳火山地質図, 火山地質図, No.16, 産総研地質調査総合センター, 2010.
- 17) 齋藤裕子, 堀伸三郎, 市川八洲夫, 榎納智裕: 十勝火山群, 上ホロカメットク火山の最近の火山活動, *日本火山学会 1997 年度秋季大会要旨集*, p.101, 1997.
- 18) 齋藤裕子, 榎納智裕, 松尾淳, 堀伸三郎: ヌッカクシ富良野川沿いの火山活動に伴う土砂移動, 平成 10 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.310-311, 1998.
- 19) 齋藤裕子, 堀伸三郎, 榎納智裕: 十勝岳北西斜面における樽前降下 (1739) 以降の長距離土砂移動, *日本火山学会 2000 年度秋季大会要旨集*, p.155, 2000.
- 20) 齋藤裕子, 堀伸三郎, 後藤英嗣, 榎納智裕: 十勝岳火山最近 3,500 年間の長距離土砂移動履歴, *日本火山学会 2001 年度秋季大会要旨集*, p.144, 2001.
- 21) Takahashi, R., Shibata, T., Murayama, Y., Ogino, T. and Okazaki, N.: Temporal

- changes in thermal waters related to volcanic activity of Tokachidake volcano, Japan: implications for forecasting future eruptions, *Bull. Volcanol.*, Vol.77, 2015. doi: 10.1007/s00445-014-0887-6.
- 22) Katsui, Y., Ando, S., and Inaba, K.: Formation and magmatic evolution of Mashu volcano, east Hokkaido, Japan, *J. Fac. Sci. Hokkaido. Univ., Ser. IV*, Vol.16, pp.533-552, 1975.
- 23) 北海道防災会議：十勝岳,火山地質・噴火史,活動の現況および防災対策, 第Ⅱ版, 北海道防災会議, p.118, 2014.
- 24) 古川竜太, 中川光弘：樽前火山地質図 1:30,000, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2010.
- 25) Liu, Y., Zhang, Y. and Behrens, H.: Solubility of H₂O in rhyolitic melts at low pressures and a new empirical model for mixed H₂O–CO₂ solubility in rhyolitic melts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.205, pp.1-16, 2005.
- 26) Caricchi, L., Sheldrake, T.E. and Blundy, J.: Modulation of magmatic processes by CO₂ flushing, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.491, pp.160-171, 2018.
- 27) 上澤真平, 中川光弘, 江草匡倫：南西北海道,羊蹄火山の完新世噴火史の再検討, 火山, Vol.56, pp.51-63, 2011.
- 28) Uesawa, S. Nakagawa, M. and Umetsu, A.: Explosive eruptive activity and temporal magmatic changes at Yotei Volcano during the last 50,000 years, southwest Hokkaido, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.325, pp.27-44, 2016.
- 29) Amma-Miyasaka, M., Miura, D., Nakagawa, M., Uesawa, S. and Furukawa, R.: Stratigraphy and chronology of silicic tephras in the Shikotsu-Toya volcanic field, Japan: Evidence of a Late Pleistocene ignimbrite flare-up in southwestern Hokkaido, *Quaternary International*, Vol.562, pp.58-75, 2020.
- 30) Goto, Y., Miyoshi, M., Danhara, T. and Tomiya, A.: Evolution of the Quaternary silicic volcanic complex of Shiribetsu, Hokkaido, Japan, an example of ignimbrite shield volcanoes in an island arc setting, *International Journal of Earth Sciences*, Vol.109, pp.2619-2642, 2020.
- 31) 東宮昭彦, 宮城磯治：洞爺噴火の年代値, 火山, Vol.65, pp.13-18, 2020.
- 32) 横山泉, 勝井義雄, 大場与志男, 江原幸雄：有珠山—火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策, 北海道防災会議, 札幌, 254p, 1973.
- 33) 曾屋龍典, 勝井義雄, 新井田清信, 堺幾久子：有珠火山地質図（第1版）（1:25,000）, 火山地質図 2, 産総研地質調査総合センター, 9p, 1981.
- 34) 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, 産業総合技術研究所地質調査総合センター, 2007.
- 35) 中川光弘, 松本亜希子, 田近淳, 広瀬亘, 大津直：有珠火山の噴火史の再検討：寛文噴火（1663年）と明和噴火（1769年）に挟まれた17世紀末の先明和噴火の発見, 火山, Vol.50, pp.39-52, 2005.

- 36) Matsumoto, A. and Nakagawa, M.: Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephras and dome lavas, Island Arc, Vol.28, e12301, 2019.
- 37) Miyabuchi, Y., Okuno, M., Torii, M., Yoshimoto, M. and Kobayashi, T.: Tephrostratigraphy and eruptive history of post-caldera stage of Toya volcano, Hokkaido, northern Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.281, pp.34-52, 2014.
- 38) 藤根久, 遠藤邦彦, 鈴木正章, ほか 9 名: 有珠山善光寺岩屑なだれの発生年代の再検討—有珠南麓の過去 2 万年間の環境変遷との関連で—, 第四紀研究, Vol.55, pp.253-270, 2016.
- 39) Goto, Y., Danhara, T. and Tomiya, A.: Catastrophic sector collapse at Usu volcano, Hokkaido, Japan: failure of a young edifice built on soft substratum, Bull. Volcanol., Vol.81: 37, doi.org/10.1007/s00445-019-1293-x, 2019.
- 40) 中村有吾, 平川一臣: 北海道駒ヶ岳起源のテフラ, 駒ヶ岳 g テフラの分布と噴出年代, 第四紀研究, Vol.43, pp.189-200. 2004.
- 41) 雁澤好博, 紀藤典夫, 柳井清治, 貞方昇: 北海道駒ヶ岳の最初期テフラの発見と初期噴火活動史の検討, 地質学雑誌, Vol.111, pp.581-589, 2005.
- 42) Goto, Y., Suzuki, K., Shinya, T., Yamauchi, A., Miyoshi, M., Danhara, T. and Tomiya, A.: Stratigraphy and lithofacies of the Toya ignimbrite in southwestern Hokkaido, Japan: Insights into the caldera-forming eruption at Toya caldera, Journal of Geography (Chigaku Zasshi), Vol.127, pp.191-227, 2018.
- 43) 伊藤順一: 秋田焼山における水蒸気爆発の発生履歴, 日本地質学会第 105 年学術大会講演要旨, p.349, 1998.
- 44) 筒井正明, 伊藤英之, 秋田県鹿角建設事務所: 秋田焼山起源のテフラ及びその噴火年代, 日本火山学会講演予稿集, p.173, 2002.
- 45) 須藤茂, 石井武政: 雫石地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 142p, 1987.
- 46) 藤縄明彦, 巖寄正幸, 本田恭子, 長尾明美, 和知剛, 林信太郎: 秋田駒ヶ岳火山, 後カルデラ活動期における噴火史: 火山体構成物と降下テフラ層の対比, 火山, Vol.49, pp.333-354, 2004.
- 47) 土井宜夫, 菅野康隆, 東野桂一, 越谷信, 矢内桂三: 秋田駒ヶ岳起源の先達川岩屑なだれ堆積物について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, p.807, 1997.
- 48) 和知剛, 土井宜夫, 越谷信: 秋田駒ヶ岳のテフラ層序と噴火活動, 火山, Vol.42, pp.17-34, 1997.
- 49) 林信太郎, 毛利春治, 伴雅雄: 鳥海火山東部に分布する十和田 a 直下の灰色粘土質火山灰, 歴史地震, Vol.16, pp.99-106, 2000.
- 50) 大場 司, 林 信太郎, 伴 雅雄, 近藤 梓, 葛巻貴大, 鈴木真悟, 古木久美子: 最近 4500 年間の鳥海火山の噴火活動—湿原堆積物に保存された火山灰層の解析—, 火山, Vol.57, pp.65-76, 2012.
- 51) Minami, Y., Ohba, T., Hayashi, S., S. Kokubu, Y. and S. Kataoka, K.: Lahar record during the last 2500 years, Chokai Volcano, northeast Japan: Flow behavior, sourced

- volcanic activity, and hazard implications, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.387, 106661, 2019.
- 52) 林信太郎, 南裕介: 1801 年(享和元年)夏に鳥海山で発生した火山泥流, *Memoirs of the Faculty of Education and Human Studies, Akita University (Natural Science)*, Vol.72, pp.27-32, 2017.
- 53) 宇井忠英, 柴橋敬一: 鳥海山 1974 年の火山活動, 火山, vol.20, pp.51-64, 1975.
- 54) 林 信太郎, 伴 雅雄, 大場 司: 鳥海山 1800-1804 年噴火におけるマグマ性の爆発的噴火活動, 歴史地震, Vol.28, pp.85-90, 2013.
- 55) 植木貞人: 鳥海山の活動史, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, A-56-1, pp.33-37, 1981.
- 56) 伴雅雄, 林信太郎, 高岡宣雄: 東北日本弧, 鳥海火山の K-Ar 年代: 連続的に活動した 3 個の成層火山, 火山, Vol.46, pp.317-333, 2001.
- 57) 林信太郎: 鳥海火山の地質, 岩鉱, Vol.79, pp.249-265, 1984.
- 58) 土井宣夫: 栗駒山剣岳付近の火砕堆積物の層序と放射性炭素年代, 日本火山学会講演予稿集, p.36, 2012.
- 59) 伴雅雄, 及川輝樹, 山崎誠子: 蔵王火山地質図, 火山地質図 18, 産業総合研究所地質調査総合センター, 8p, 2015.
- 60) Miura, K., Ban, M. and Yagi, H.: The tephra layers distributed around the eastern foot of the Zao volcano – Ages and volumes of the Za-To1 to 4 tephras -, *Bull. Volcanol. Soc., Japan*, Vol.53, pp.151-157, 2008.
- 61) 山元孝広: 福島県, 吾妻火山の最近 7 千年間の噴火史: 吾妻—浄土平火山噴出物の層序とマグマ供給系, 地質学雑誌, Vol.111, pp.91-111, 2004.
- 62) Ban M., Matsui R., Yamamoto T., Iwata N., Fujinawa A. and Nakashima K.: Petrologic characteristics of the newest stage in Azuma volcano group, Northeast Japan, *International Journal of Eruptive History and Informatics*, Vol.1, pp.1-11, 2013.
- 63) Miyashiro, A.: Volcanic rock series in island arc and active continental margins, *American Journal of Science*, Vol.274, pp.321-355, 1974.
- 64) Gill, J. B.: *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Minerals and Rocks, 390p, 1981.
- 65) 山元孝広, 伴雅雄: 那須火山地質図, 火山地質図 9, 地質調査所, 8p, 1997.
- 66) 山元孝広: テフラ層序から見た那須茶臼岳火山の噴火史, 地質学雑誌, Vol.103, pp.676-691, 1997.
- 67) Ban, M. and Yamamoto, T.: Petrological study of Nasu-Chausudake Volcano (ca.16 ka to Present) northeastern Japan, *Bull Volcanol*, Vol.64, pp.100-116, 2002.
- 68) 寺田暁彦: 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山, 地質雑, Vol.124, pp.251-270, 2018.
- 69) 石崎泰男, 濁川暁, 亀谷伸子, 吉本充宏, 寺田暁彦: 草津白根火山, 本白根火砕丘群の地質と形成史, 地質雑, Vol.126, pp.473-491, 2020.
- 70) 伊藤順一, 濱崎聡志, 川辺禎久: 岩手火山における最近 1 万年間の爆発的噴火履歴の再検討, 水蒸気噴火とマグマ噴火の時空間的関連, 地質雑, Vol.124, pp.271-296, 2018.

- 71) 亀谷伸子, 石崎泰男, 勝岡菜々子, 吉本充宏, 寺田暁彦: 草津白根火山, 白根火砕丘群, 弓池マールおよび逢ノ峰火砕丘の岩石学的特徴, 地質雑, Vol.126, pp.157-165, 2020.
- 72) Sillitoe, R. H.: Porphyry copper systems, *Econ. Geol.*, Vol.105, pp.3-41, 2010.
- 73) Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., . . . and Talamo, S.: The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, Vol.62, No.4, pp.725-757, 2020.
- 74) Bronk Ramsey, C.: Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, Vol.51, No.1, pp.337-360, 2009.
- 75) 安井真也, 高橋正樹, 金丸龍夫: 降下火砕堆積物からみた浅間前掛火山の大規模噴火の高分解能履歴復元, 火山, (投稿中) .
- 76) 安井真也, 堤隆, 米田穰: 浅間前掛火山南麓広畑遺跡の D グループ軽石層と縄文中期編年 明治大学黒耀石研究センター紀要「資源環境と人類」, Vol.11 (印刷中) .
- 77) 河合小百合, 三宅康幸: 始良 Tn テフラの粒度・鉱物組成: 広域テフラの地域的変異の一例, 地質学雑誌, Vol.105, pp.597-608, 1999.
- 78) Arakawa, Y., Endo, D., Oshika, J., Shinmura, T. and Ikehata, K.: High-silica rhyolites of Niijima volcano in the northern Izu-Bonin arc, Japan, *Petrological and geochemical constraints on magma generation*, *Lithos*, Vol.330-331, pp.223-237, 2019.
- 79) 鈴木由希: 東伊豆単成火山群における珪長質マグマの成因, 火山, Vol.45, No.3, pp.149-171, 2000.
- 80) Nichols, A.R.L., Wysoczanski, R.J., Tani, K., Tamura, Y., Baker, J.A. and Tatsumi, Y.: Melt inclusions reveal geochemical cross-arc variations and diversity within magma chambers feeding the Higashi-Izu Monogenetic Volcanic Field, Izu Peninsula, Japan, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 2012. doi: 10.1029/2012/GC0042322.
- 81) Koyaguchi, T.: Evidence for two-stage mixing in magmatic inclusions and rhyolitic lava domes on Niijima Island, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.29, pp.71-98, 1986.
- 82) 一色直記: 新島地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 85p, 1987.
- 83) 津久井雅志, 川辺禎久, 新堀賢志: 三宅島火山地質図, 火山地質図 12, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2005.
- 84) Nakano, S. and Yamamoto, T.: Chemical variations of magmas at Izu-Oshima volcano, Japan, plagioclase-controlled and differentiated magmas, *Bull. Volcano.*, Vol.53, pp.112-120, 1991.
- 85) 中野俊, 山元孝広, 一色直記: 八丈島, 西山火山噴出物の全岩化学組成, 岩鉱, Vol.86, pp.72-81, 1991.
- 86) 杉本健, 石橋秀己, 松島健: 伊豆鳥島火山の岩石学的研究, 火山, Vol.50, pp.87-101, 2005.
- 87) 下司信夫, 嶋野岳人, 長井雅史, 中田節也: 三宅島火山 2000 年噴火のマグマ供給系, 火山, Vol.47, pp.419-434, 2002.

- 88) 早津賢二：妙高火山群—多世代火山のライフヒストリー—, 実業広報社, 東京, 424p, 2008.
- 89) 中野俊：北アルプス, 鷲羽・雲ノ平火山の地質, 火山, Vol.34, pp.197-212, 1989.
- 90) 福沢仁之：天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物, 第四紀研究, Vol.34, pp.135-149, 1995.
- 91) Hayakawa, Y.: Pyroclastic geology of Towada volcano, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol.60, pp.507-592, 1985.
- 92) 遠藤邦彦：白山火山地域の火山灰と泥炭層の形成過程, 白山高山帯自然史調査報告書, pp.11-30, 1985.
- 93) Yamasaki, M., Nakanishi, N. and Kaseno, Y.: Nuee ardente deposit of Hakusan Volcano, Sci. Rep. Kanazawa Univ., Vol.7, pp.189-201, 1964.
- 94) 酒寄淳史, 奥野充, 田島靖久, 守屋以智雄：白山火山における 1.9~2.4 cal kBP のマグマ噴火—岐阜県大倉山周辺に見られるテフラ層からの知見—, 石川県白山自然保護センター研究報告, Vol.44, pp.1-10, 2018.
- 95) 及川輝樹, 鈴木雄介, 千葉達朗：御嶽山の噴火-その歴史と 2014 年噴火, 科学, Vol.84, pp.1218-1225, 2014.
- 96) 及川輝樹, 鈴木雄介, 千葉達朗, 岸本博志, 奥野 充, 石塚 治：御嶽山の完新世の噴火史, 日本火山学会 2015 年度秋季大会講演予稿集, pp.102-102, 2015.
- 97) 早津賢二, 清水智, 板谷徹丸：妙高火山群の活動史 "多世代火山", 地学雑誌, Vol.103, pp.207-220, 1994.
- 98) 宇都浩三：火山と年代測定：K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の現状と将来, 火山, Vol.40, pp.S27-S46, 1995.
- 99) 山田直利, 小林武彦：御嶽山地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 136p, 1989.
- 100) 木村純一：後期更新世の御岳火山：火山灰層序学と火山層序学を用いた火山活動史の再検討, 地球科学, Vol.47, pp.301-321, 1993.
- 101) 竹内誠, 中野俊, 原山智, 大塚勉：木曽福島地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 94p, 1998.
- 102) Matsumoto, A. and Kobayashi, T.: K-Ar age determination of late Quaternary volcanic rocks using the "mass fractionation correction procedure": application to the Younger Ontake Volcano, central Japan, Chemical Geology, Vol.125, pp.123-135, 1995.
- 103) 松本哲一, 小林武彦：御嶽火山, 古期御嶽火山噴出物の K-Ar 年代に基づく火山活動史の再検討, 火山, Vol.44, pp.1-12, 1998.
- 104) 奥野充, 長岡信治, 國分陽子, 中村俊夫, 小林哲夫：九重火山中央部の火砕流堆積物の放射性炭素年代, 火山学会講演予稿集, p.71, 2013.
- 105) 長岡信治, 奥野充：九州中部, 九重火山群の噴火史, 地形, Vol.36, No.3, pp.141-158, 2015.
- 106) 小野晃司：5 万分の 1 地質図幅「久住」及び同説明書, 地質調査所, 124p, 1963.
- 107) 辻智大, 岸本博志, 藤田浩司, 三浦大助, 池田倫治, 西坂直樹, 大西耕造：九重山 54ka 大規模噴火による噴出物の層序および噴火パラメータの推定, 日本火山学会 2017

- 年度秋季大会講演予稿集, p.71, 2017.
- 108) 及川輝樹, 大場司, 藤縄明彦, 佐々木寿: 水蒸気噴火の地質学的研究, 地質学雑誌, Vol.124, No.4, pp.231-250, 2018.
- 109) 長岡信治, 奥野充: 九重火山のテフラ層序, 月刊地球, Vol.36, No.8, pp.281-296, 2014.
- 110) 鎌田浩毅, 三村弘二: インブリケーションから推定される九重火山飯田火砕流の流動方向, 火山, Vol.26, No.4, pp.281-292, 1981.
- 111) Miyabuchi, Y. and Hara, C.: Temporal variations in discharge rate and component characteristics of tephra-fall deposits during the 2014–2015 eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.71, No.44, 2019.
- 112) Miyabuchi, Y., Iizuka, Y., Hara, C., Yokoo, A. and Ohkura, T.: The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan: Eruption sequence inferred from ballistic, pyroclastic density current and fallout deposits, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.351, pp.41-56, 2018.
- 113) Miyabuchi, Y.: A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, *Sedimentary Geology*, Vol.220, pp.169-189.
- 114) 渡辺一徳, 藤本雅太郎: 表層地質図「阿蘇山・竹田」および説明書, 土地分類基本調査 (5 万分の 1), 熊本県, pp.15-28, 1992.
- 115) 宮縁育夫, 星住英夫, 高田英樹, 渡辺一徳, 徐勝: 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物, 火山, Vol.48, pp.195-214, 2003.
- 116) 筒井正明, 奥野充, 小林哲夫: 霧島・御鉢火山の噴火史, 火山, Vol.52, pp.1-12, 2007.
- 117) Ishizuka, O., Geshi, N., Kawanabe, Y., Ogitsu, I., Taylor, R.N., Tuzino, T., Sakamoto, I., Arai, K. and Nakano, S.: Long-distance magma transport from arc volcanoes inferred from the submarine eruptive fissures offshore Izu-Oshima volcano, Izu–Bonin arc, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 285, pp.1-17, 2014.
- 118) Ishizuka, O., Taylor, R.N., Geshi, N., Oikawa, T., Kawanabe, Y. and Ogitsu, I.: Progressive mixed-magma recharging of Izu-Oshima volcano, Japan: A guide to magma chamber volume, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.430, pp.19-29, 2015.
- 119) Yokoyama, T., Makishima, A. and Nakamura, E.: Separation of thorium and uranium from silicate rock samples using two commercial extraction chromatographic resins. *Analytical Chemistry*, Vol.71, pp.135-141, 1999.
- 120) Sims, K.W.W., Gill, J.B., Dosseto, A., Hoffmann, D.L., Lundstrom, C.C., Williams, R.W., Ball, L., Tollstrup, D., Turner, S., Prytulak, J., Glessner, J.J.G., Standish, J.J. and Elliott, T.: An inter-laboratory assessment of the thorium isotopic composition of synthetic and rock reference materials. *Geostandards and Geoanalytical Research*, Vol.32, pp.65-91, 2008.
- 121) Dunlap, C.E.: Physical, chemical, and temporal relations among products of the 11th century eruption of Baitoushan, China/North Korea, Ph.D. thesis, Santa Cruz. University of California, 104p, 1996.

122) 西本潤平, 中川光弘, 宮本毅, 谷口宏充: 白頭山10世紀噴火のマグマ供給系システムー岩石学のおよび地球化学的手法からの検討ー, 谷口宏充編「白頭火山とその周辺地域の地球科学, 東北アジア研究センター叢書, Vol.41, pp.71-94, 2010.

(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 3 年度の業務計画案

(a) 火山の噴火履歴およびマグマ長期変遷に関する研究

令和 3 年度は前年度に行った事前調査の結果をもとに、最重点火山・重点火山を中心とした計 13 火山において、ボーリング掘削およびトレンチ掘削調査を実施する。主な火山の実施計画を以下に示す。

1) アトサヌプリ（屈斜路）・摩周（北海道大学・茨城大学）

令和 2 年度までに実施したボーリング掘削調査のコア試料についてさらに解析を進め、野外調査結果を合わせて、数万年にわたる火山全体の噴火履歴を明らかにする。また、トレンチ掘削調査を実施し、アトサヌプリの大規模火砕噴火についての詳細を明らかにする。さらに、隣接する摩周の活動との関連についても検討することで、北海道東部地域の長期活動履歴の解明を目指す。

2) 羊蹄山（北海道大学・電力中央研究所）

これまでの成果を踏まえ、北東麓でのトレンチ掘削調査および山体周辺での野外調査を行い、羊蹄山の長期噴火活動履歴を明らかにする。

3) 十和田（秋田大学）

野外調査およびトレンチ掘削調査を実施し、カルデラ内での小規模噴火の痕跡や大規模噴火の推移、湖面津波といった可能性について着目し、十和田火山の最近の噴火活動履歴を明らかにする。

4) 秋田焼山（産業技術総合研究所）

山体における手掘りトレンチ掘削調査および山体近傍の地質調査を実施し、完新世の活動履歴および噴火推移履歴を明らかにすることを目指す。

5) 秋田駒ヶ岳（北海道大学・株式会社エンバイオ・エンジニアリング）

野外調査に加え、ボーリング掘削調査を行い、長期噴火活動履歴を明らかにする。また溶岩流とテフラ層序との関係について検討し、マグマ変遷の検討も行う。

6) 蔵王山（山形大学）

最近数万年間の噴火活動履歴の詳細を明らかにするために、山体における手掘りトレンチ掘削調査を拡充する。また、物質科学的解析を進め、長期マグマ変遷についても明らかにする。

7) 栗駒山（秋田大学）

山体での手掘りトレンチ掘削調査および野外調査を実施し、栗駒山の最近の噴火履歴の詳細（噴火様式・起源・推移）を明らかにすることを目指す。

8) 吾妻山（山形大学）

山体での手掘りトレンチ掘削調査および野外調査を実施し、特に 14 世紀以降の最近の噴火履歴の詳細を明らかにすることを目指す。

9) 那須岳（茨城大学）

野外調査と山体でのトレンチ掘削調査を行い、最近 1.6 万年間の噴火活動履歴と噴火活動推移の詳細を明らかにする。

10) 浅間山（日本大学）

引き続き野外調査およびトレンチ掘削調査を行い、前掛火山の高分解能噴火史の解明お

よび黒斑火山の噴火活動履歴の解明を目指す。両者を比較し、浅間山の噴火活動の特徴を明らかにする。

11) 伊豆大島（東京大学地震研究所・産業技術総合研究所）

沿岸域で傭船により浅部地殻構造調査、また陸域の地質調査を実施し、完新世の噴火履歴および活動推移に関する地質データを入手する（産業技術総合研究所）。

また、歴史時代噴火に焦点をあて、野外調査およびトレンチ掘削調査を実施し、伊豆大島の最近の大規模噴火履歴および噴火推移履歴を明らかにする。そして 20 世紀の活動と比較することで、類似性・差異を明らかにする（東京大学地震研究所）。

12) 鷲羽池火山（富山大学）

引き続き、完新世の噴火履歴解明を目的としたテフラ層序調査を継続する。令和 2 年度の調査で見出された橙色粘土質テフラ層を給源（鷲羽池火口）の北方と東方に追跡し、アイソパック・マップを完成させ噴火規模を明らかにする。また、火口近傍堆積物の産状をもとに、このテフラを噴出した噴火の推移を明らかにする。

13) 九重山（山口大学・北海道大学）

野外調査および山体における手掘り掘削調査を実施し、九重山の長期噴火活動履歴の詳細を明らかにすることを目指す。

14) 阿蘇山（熊本大学）

引き続き、2019 年から続く噴火対応を行うとともに、最近の活動履歴を明らかにするために、阿蘇火山中央火口丘の周辺地域において、ボーリング掘削調査およびトレンチ掘削調査を実施する。

15) その他の火山

上記の重点火山に加えて、利尻山・雌阿寒岳・大雪山・十勝岳・ニセコ・支笏火山（樽前山・風不死岳・恵庭岳含む）・有珠山・八幡平・岩手山・鳥海山・新潟焼山・妙高山・草津白根山・志賀火山・榛名山・東伊豆単成火山群・八丈島・三宅島・新島・神津島・式根島・御嶽山・横岳（八ヶ岳）・焼岳・白山・阿武火山群・由布鶴見岳・霧島山・桜島・鬼界についても地表踏査を実施し、噴火履歴とマグマ変遷の解明を目指す。

また、重点火山の見落としを避けるために、他の活火山についても噴火履歴やマグマ変遷に関して検討を行う。そして、地質調査により得られた高精度噴火履歴に基づいて噴出物を採取し、物質科学的解析を進める。基礎的な解析は各参加機関で行うが、高精度解析を必要とした場合は、北海道大学の「マグマ変遷解析センター」で行う。

そして、研究が進んでいる火山については、噴火事象系統樹の試作および噴出量・マグマ積算量階段図による中長期噴火予測の試行を開始する。

(b) マグマ変遷解析センターの整備と分析技術開発（北海道大学）

北海道大学大学院理学研究院の関連した分析装置等を集中管理する分析実験室を「マグマ変遷解析センター」として引き続き整備し、分析手法の開発に取り組む。また、個々の装置のルーチン分析手法を確立し、参加機関・協力機関の研究者・大学院生を随時受け入れる。

(c) 大規模噴火データベースの整備（産業技術総合研究所）

産業技術総合研究所（再委託）では、大規模カルデラ形成噴火及びプリニー式噴火について、噴火推移文献データの収集を行い、コンパイルした情報から噴火推移データ集の作成し、ウェブサイト上で閲覧可能なデータベースとして作成する。桜島・北海道駒ヶ岳・樽前山・クッタラなどの国内のプリニー式噴火が発生した火山において、噴出物と噴火推移との対応を調査し、先史時代の噴火についての噴火推移解析手法を開発するとともにデータベースへの収録を行う。

(d) ボーリングコア試料の保管・管理システムの構築(防災科学技術研究所・北海道大学)

国立研究開発法人防災科学技術研究所と協力して、ボーリングコアの保存と管理、そして広く公開できるシステムを引き続き構築する。既存コア試料については、引き続き集約に向けた調整を進め、コアデータの整理、公開に向けたポリシー等の構築を行う。

(e) 課題全体のとりまとめと研究成果の発信（北海道大学）

実施責任機関である北海道大学は、課題 C-2 分担者と連絡を密にし、課題 C-2 プロジェクトの総合推進を行う。各分担者が担当する火山及び地域でのトレンチやボーリング調査の調整と実施を行い、分担者と共同して解析を行う。「火山研究人材育成コンソーシアム」においては、特に地質学・物質科学分野での教育に関して、課題 C-2 参加機関の参画の企画・調整を行う。

また、課題 C-1・C-3 との連携研究の対象である伊豆大島について、年度内に課題 C 全体の研究集会を開催する。サブ課題の成果を整理し、どのように連携展開していくかを議論し、今後の研究計画、成果とりまとめ、発信方法についての方針を立てる。そして、噴火事象の分岐判断や噴火ハザードシミュレーションに関しては他課題 B、D との、成果のデータ一元化については課題 A との連携を検討し、次世代火山研究推進事業全体のシンポジウム開催を呼びかけ、全課題共通の項目として検討を行うことを提案する。

2. 3 シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発

(1)業務の内容

(a) 業務題目

課題 C 火山噴火の予測技術の開発

サブテーマ 3 シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 火山研究推進センター	共同実施機関	副センター長 主任研究員 契約研究員 契約研究員 契約研究員	藤田英輔 三輪学央 黒川愛香 長井雅史 志水宏行
国立大学法人東北大学 大学院理学研究科	参加機関	教授 准教授 准教授	西村太志 小園誠史 奥村 聡
国立大学法人東京大学 地震研究所火山噴火予知研究センター	参加機関	准教授 准教授	鈴木雄治郎 前野 深
気象庁気象研究所火山研究部	協力機関	室長 室長 主任研究官 主任研究官 研究官 研究官	小久保一哉 新堀敏基 鬼澤真也 佐藤英一 石井憲介 川口亮平
国立大学法人静岡大学理学部地球 科学科	協力機関	准教授	石橋秀巳
国立大学法人山形大学理学部	協力機関	准教授	常松佳恵
国立大学法人神戸大学先端融合研 究環	協力機関	講師	清杉孝司

(c) 業務の目的

火山噴火とそれに伴う火山災害は、複雑な物理的・化学的な要素の組み合わせにより発生する現象であり、これらを総合的に評価することによって、火山噴火予知・推移予測、災害推定などについて精度の高い情報発信が可能となる。複雑な現象を総括的に解明するために、数値シミュレーションは有効な手段である。火山観測データや実験データから得られる帰納的情報と理論から導出する演繹的情報を相互にフィードバックさせて、より高度で精度の高いモデルを構築する。

本委託業務では、サブテーマ①火山噴火予知・推移予測に資する「地下におけるマグマ

移動シミュレーション」及びサブテーマ②火山災害軽減のための「噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化」を実施する。

サブテーマ①では、地下におけるマグマの移動過程、気液二相系としての流動様式と噴火様式についての解釈を行い、噴火に至るまでの事象分岐の判断基準について体系的に整理する。特に火道流のモデル化、岩脈貫入現象のシミュレーションを開発し、噴火事象分岐判断のための基準を構築する。また、室内実験を実施し、マグマ移動過程に影響を与える物性についてのモデルを構築し、シミュレーション化する数値モデルの高度化を行う。

サブテーマ②では、噴火発生時における降灰・噴煙・火砕流・溶岩流・土石流・泥流・噴石などの多様な火山現象に対して一元的に定量化を行うとともに、現象を支配するパラメータを体系化し、噴火ハザードを高精度で評価可能なシステムを作成する。降灰ハザード予測モデルの開発においては、主に大都市圏などの広域における降灰シミュレーションと脆弱性データベースの融合によるリスクの定量評価が可能なものを目指す。これは本テーマ内の噴煙柱ダイナミクスモデルの開発から降灰シミュレーションの初期条件を取得することや、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業課題 D サブテーマ 2（リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発）による、より稠密な降灰評価との連携を行うことにより精度の向上を図る。噴煙柱ダイナミクスモデルの開発では、過去の事象の検証を踏まえた上で高度化を行う。溶岩流シミュレーションでは、既存モデル(LavaSIM)を発展させ、クラスト移動の解析が可能なものを開発する。土石流・泥流・火砕流・噴石については既往モデルの検証とこれをもとにした高度化を検討する。

サブテーマ①・②を踏まえ、火山活動から火山災害発生までの事象系統樹の分岐に定量的パラメータを与え、火山噴火発生確率の算定に寄与する。事象系統樹の分岐判断については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）（平成 25 年 11 月 8 日科学技術・学術審議会決定）に基づく地震火山観測研究」で創出されている成果、特に火山ごとの分岐についての観測事例をベースにして、数値シミュレーションによる予測と定量的な比較を進めるとともに、議論を通して知見を共有する。

数値シミュレーションにより作成する判断基準は、現象を支配するパラメータの整理と現象分岐の閾値の抽出により実現する。数値シミュレーションによるパラメータと、観測・実験により得られる情報を体系化し、事象系統樹の各分岐ノードにおける判断基準として取り込むことにより実装化を図る。

(d) 10 年間の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・噴火機構シミュレーション：
- ・マグマ移動過程シミュレーション：岩脈貫入に伴う応力場把握（マクロ）
- ・物性モデルの構築：結晶実験・レオロジー実験の環境整備

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル検討（首都圏影響対象）
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：噴煙柱ダイナミクスモデル検討
- ・ハザード評価システム：噴煙評価システム検討（既往システム参照）

2) 平成29年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・噴火機構シミュレーション：
- ・マグマ移動過程シミュレーション：クラック進展シミュレーション（マイクロ）
- ・物性モデルの構築：実験の環境整備と、結晶化カインेटィクスと火山性流体レオロジーのモデル検討

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル予備計算（プロトタイプ）
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：噴煙柱ダイナミクスモデル高度化
- ・溶岩流シミュレーション：大規模・高速溶岩流技術設計
- ・噴石シミュレーション：噴石評価システム検討
- ・ハザード評価システム：首都圏降灰評価システム設計

3) 平成30年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・噴火機構シミュレーション：
- ・マグマ移動過程シミュレーション：マイクロ・マクロモデルの統合
- ・物性モデルの構築：結晶化カインेटィクスモデル検討・火山性流体レオロジーモデル検討

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル予備検証（プロトタイプ）
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：降灰モデルとの連携開始
- ・溶岩流シミュレーション：大規模・高速溶岩流技術開発
- ・噴石シミュレーション：噴石評価システム設計
- ・ハザード評価システム：首都圏降灰評価システム開発

4) 平成31年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・マグマ移動過程シミュレーション：観測データによる検証
- ・物性モデルの構築：結晶化カインेटィクスモデル検討・火山性流体レオロジーモデル検討

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル改良（噴煙モデルとの連携）
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：降灰モデルとの連携
- ・溶岩流シミュレーション：大規模・高速溶岩流技術設計
- ・噴石シミュレーション：噴石評価システム開発
- ・ハザード評価システム：首都圏降灰評価システム運用

5) 令和2年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・マグマ移動過程シミュレーション：空間分解能の高度化
- ・物性モデルの構築：観測データによる検証

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル本計算
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：既往火砕流モデル検討
- ・土石流・泥流シミュレーション：既往土石流・泥流モデル検討
- ・ハザード評価システム：噴石・溶岩流評価システム運用

6) 令和3年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・マグマ移動過程シミュレーション：パラメータ感度解析
- ・物性モデルの構築：観測データによる検証

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル本検証
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：噴煙・火砕流モデル高度化・検証
- ・土石流・泥流シミュレーション：土石流・泥流モデル高度化・検証
- ・ハザード評価システム：火山ハザード評価システム運用・高度化（首都圏降灰・噴石・溶岩流）

7) 令和4年度：

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

- ・マグマ移動過程シミュレーション：岩脈貫入・移動条件の定量化
- ・物性モデルの構築：システムへの組み込み

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

- ・降灰シミュレーション：降灰ハザード予測モデル評価
- ・噴煙・火砕流シミュレーション：噴煙・火砕流評価システム
- ・ハザード評価システム：火山ハザード評価システム運用・高度化（降灰・噴石・溶岩流）

8) 令和5年度：

- ・火山ハザード評価システム運用・高度化（全事象）
- ・マグマ移動過程評価システム開発および事象分岐評価手法の開発

9) 令和6年度：

- ・火山ハザード評価システム運用・機能評価
- ・マグマ移動過程評価システム評価および事象分岐評価手法の開発

10) 令和7年度：

- ・一元化システム統合

・情報ツールでのコンテンツ提供

(e) 令和2年度業務目的

1) サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

a) 噴火機構シミュレーション技術開発

噴火形態を支配する火道内流のメカニズムから事象分岐を支配するパラメータの抽出に関する国内の常時観測火山を対象とした研究を実施する。

具体的には、昨年度課題C内の連携テーマとして議論された伊豆大島について、1986年噴火や過去の歴史噴火を対象とし、これまでに観測されている溶岩流出や爆発的噴火などの多様な噴火様式を火道流数値モデルによって再現する。モデル構築においては、伊豆大島のマグマ供給系に関する岩石学的・地球物理学的知見に基づき、マグマ物性や地質条件に関する構成方程式のパラメータを設定する。また、火道流の変動過程がもたらす山体変形を計算し、伊豆大島における地殻変動による事象分岐の検知可能性を評価する。

b) マグマ移動過程シミュレーション技術開発

地下におけるマグマの移動に伴う破壊の進展と火山性地震・地殻変動との関連性を引き続き調べ、システム化への検討を行う。

具体的には、マグマ移動過程シミュレーションについて、個別要素法などにより、岩脈進展に伴う観測量と対応する手法を開発し、分岐判断の定量化を進める。噴火・噴火未遂分岐判断のため、各パラメータへの依存性の検討を継続して実施する。マグマ移動に伴う地殻変動のシミュレーション手法の開発として、境界要素法により地形の形状を考慮した地殻変動計算手法の開発を進める。

c) マグマ物性モデルの構築

マグマ溜りから地表までの上昇過程における結晶化モデル構築を引き続き行い、その噴火分岐への影響を検討する。また、火山性流体のレオロジーモデル構築の実験を引き続き実施する。

具体的には、水熱合成減圧実験装置と連続減圧シリンジポンプを用い神津島 838 年噴火噴出物と桜島 1914 年噴火噴出物を対象に減圧結晶化実験を行う。その結果に基づき結晶化モデルを構築、火道流モデルとの関連を整理することで、噴火分岐への影響を検討する。

マグマ粘性測定については、1986 年伊豆大島噴火の溶岩を例として、応力制御系での測定も行えるように実験系を改良し、モデル化に必要な結晶とメルトの混合物レオロジーの応力、速度、温度、時間依存性を調べる。貧酸素条件下でのレオロジー測定のための実験システムを構築する。また、得られたレオロジー則の溶岩流モデルへの適用を検討する。東北大学及び静岡大学の協力を得てこれらを実施する。

2) サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

a) 降灰ハザード予測モデルの開発

大都市圏（特に首都圏）を対象とした降灰ハザード予測の評価のためのシステム開発を継続し、システム化への検討を行う。

具体的には、大都市圏（特に首都圏）を対象とした降灰ハザード予測の評価のためのシステム

開発を継続し、前年度までに行った「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル」による噴煙放出を初期条件とする新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の開発を進める。また、JMA-ATM の初期条件を適切に与えることを目的として、降下火砕物の形状・密度の粒径依存性について調査する。気象研究所の協力を得てこれを実施する。

b) 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発

火山近傍の火山灰大気拡散と降灰を対象とした噴煙柱ダイナミクスモデルの開発を続け、システム化への検討を行う。

具体的には、噴煙柱ダイナミクスと火山灰輸送を同時に解く SK-3D モデルを大型計算機において実行する。降灰ハザード予測モデルとの連携を見据え、噴出条件と噴煙高度、火山灰放出高度、堆積物分布の関係について様々な噴火規模・大気条件のシミュレーションを行う。特に、富士山 1707 年宝永噴火規模の火山灰挙動に関して、より単純な大気風の条件を与えたシミュレーションを行い、火山灰サイズと到達距離の関係を系統的なパラメータスタディをもとに解析する。シミュレーション結果からは、降灰ハザード予測のシステム化に必要な供給関数の推定を行う。

c) ハザード評価システムの検討

多様な火山ハザード現象を評価するシステムの設計を進め、導入を進める。

具体的には、噴煙・降灰ハザード評価、噴石ハザード評価、および溶岩流ハザード評価の機能の高度化に加え、火砕流ハザード評価の機能追加に着手する。溶岩流ハザードシミュレーション開発については、粒子法の導入を検討する。火砕流ハザードシミュレーション開発について、国際ワークショップでの実験との比較によるモデル検証およびモデル間比較を通して、現有の噴煙柱崩壊型火砕流モデル、および、溶岩ドーム崩壊型火砕流モデルの問題点を、火砕流ハザード評価の観点で調査する。また、現有の噴煙柱崩壊型火砕流モデルを基に、「大規模火砕流のハザード予測システム」を開発する。さらに、現有の噴煙柱崩壊型火砕流モデルを様々な噴火条件の影響を評価できるモデルへ改良することにより、様々な噴火様式に対応できる「大規模火砕流ハザード評価システム」へ拡張する。ラハール（火山泥流）・火山性津波に関する計算手法の開発について検討を進める。

山形大学・神戸大学・東京大学地震研究所・富士山科学研究所の協力を得てこれを実施する。

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、上記①、②に示される技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てを、開発技術実装に向けた実地の場となる緊急観測の実施あるいは緊急観測への協力に代えて実施することを可能とする。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーションでは、課題 C 内の連携テーマとして挙げられている伊豆大島について、1986 年噴火などを対象とし、これまでに観測されている溶岩流出や爆発的噴火などの多様な噴火様式を火道流数値モデルによって再現し、噴火分岐の検知可能性について評価を行った。マグマ移動過程については、岩脈成長における熱過程の導入を実施するとともに、境界要素法による地殻変動計算システムを開発した。マグマ物性モデルの構築では、神津島 838 年噴火の流紋岩および桜島の安山岩マグマを用いた水熱減圧実験を進め、結晶度の時間変化を明らかにした。マグマ粘性測定については、非定常状態でのマグマレオロジー実験を実施し、静置条件の影響を把握した。

サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化では、降灰評価について、新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の開発継続、降下火砕物の形状・密度の粒径依存性の調査、降灰観測データからの噴煙柱ソース推定における誤差の定量化、噴煙シミュレーションと噴煙柱ダイナミクスの連携による降下粒子の評価など、高度な降灰・堆積評価を行う理論の構築を継続して実施した。また、噴石・溶岩流・火砕流シミュレーションの高度化と、リスク評価およびその確率表現も含めた最終的な火山ハザード評価システムのグランドデザインの検討を実施した。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ①：地下におけるマグマ移動シミュレーション

a) 噴火機構シミュレーション技術開発

火道内におけるマグマ上昇過程（火道流）の数値シミュレーションに基づく、噴火事象分岐を支配するパラメータの抽出に関する国内の常時観測火山を対象とした研究を実施した。本年度は、課題 C 内の連携テーマとして挙げられている伊豆大島について、1986 年噴火などを対象とし、これまでに観測されている溶岩流出や爆発的噴火などの多様な噴火様式を火道流数値モデルによって再現することを目的とした。以下ではその業務の成果について詳細を説明する。

火道流モデルの構築においては、多様な噴火様式の成因となるマグマ発泡、縦・横方向へのガス分離（脱ガス）、結晶化を伴う、火道内の気液固混相流を数値モデル化¹⁾し、1986 年噴火の噴出物に関する岩石学的研究から推定されたマグマ組成、温度、結晶量などをパラメータとして入力した。特に、火道流に大きな影響を与えるマグマ上昇中の結晶量やマグマ粘性の変化に関しては、熱力学的結晶作用シミュレーション（Rhyolite-MELTS）を用いて、各噴火期に対応した高精度なパラメータ設定を行った（図 1）。また、伊豆大島では噴火中にダイク貫入が生じたことが地球物理学的観測によって示唆されていることから、火道流モデルにおいても、通常の円筒形状だけではなく、水平断面が扁平な楕円形となるようなダイク形状を近似した火道形状を設定し、深部から浅部にかけてダイク形状から円筒形状に遷移する火道形状を仮定した。さらに、扁平な火道は変形しやすくなることから、火道の弾性変形の効果も考慮した。

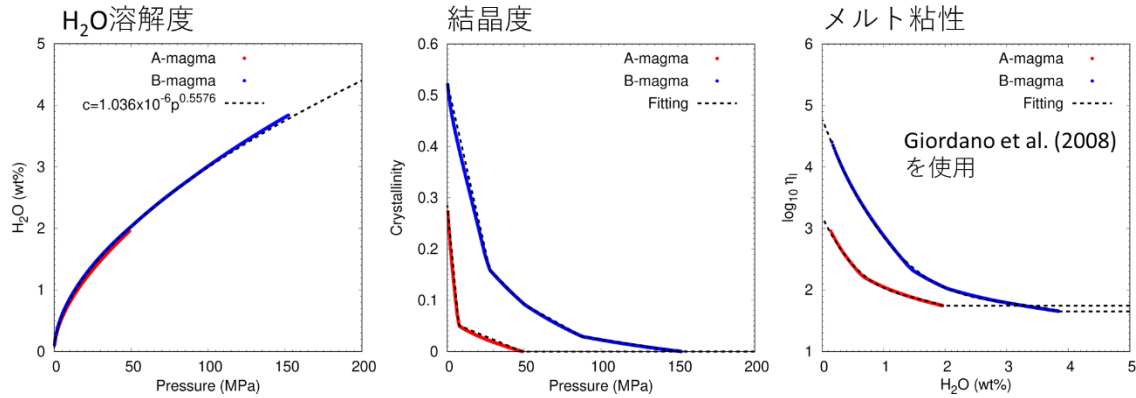


図1 Rhyolite-MELTS による等温減圧結晶作用シミュレーションの例²⁾。初期メルト組成と温度 (A-magma: 1118°C, B-magma: 1078°C) を設定し、H₂O 溶解度、結晶度、メルト粘性を関数でフィッティングし、火道流モデルに組み込む。

解析の結果、1986 年に異なる火口から生じた溶岩流出噴火とサブプリニー式噴火に対応する火道流を再現することに成功した(図2)。具体的には、これまでの岩石学的研究で指摘されていたように、溶岩流出噴火の火道流は高温・低結晶度・低粘性のマグマ (A-magma) において、サブプリニー式噴火の火道流は低温・高結晶度・高粘性のマグマ (B-magma) において、それぞれ出現し得ることがわかった。これは、低粘性では気泡分離が促進されて気相の体積分率増加が抑制される一方で、高粘性では歪速度増加あるいは気泡周囲の応力蓄積によるマグマ破碎が進行する効果があることを反映している。

■ 非爆発的噴火

- ✓ A-magma
- ✓ 破碎なし
- ✓ 浅部で気泡分離

■ 爆発的噴火

- ✓ B-magma
- ✓ 歪速度破碎
- ✓ 気泡分離なし

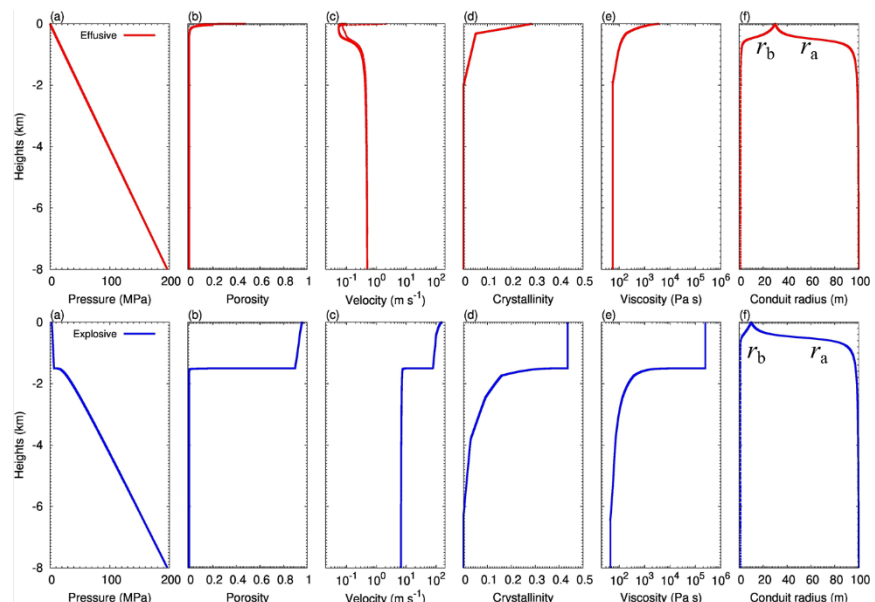


図2 異なる噴火タイプに対応する火道流における各物理量の火道内分布 (圧力、発泡度、速度、結晶度、マグマ粘性、火道径)。

さらに本研究では、各噴火タイプに対応する火道流の存在条件を幅広いパラメータ領域で網羅するために、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力 (p_{ch}) と噴出率 (Q) の関係に基づき、ある特定の噴火タイプに対応する安定な定常解を系統的に探索する解析を行った。 p_{ch} と Q が正の相関を

持つ（すなわち、 $dp_{ch}/dQ > 0$ ）場合、定常解が安定であることを考慮し、 p_{ch} と Q の関係を示す曲線（ p_{ch} - Q 曲線）において $dp_{ch}/dQ > 0$ となる条件を特定した。解析の結果、安定な定常解の存在条件は、マグマの性質だけではなく火道形状にも強く依存していることがわかった。まず A-magma の場合、噴出率が 10^4 – 10^6 kg s^{-1} という実際の溶岩流出噴火に相当する範囲で、深部ダイクの短軸・長軸径が小さく、また浅部円筒火道の径が大きいほど、非爆発的噴火に相当する火道流が $dp_{ch}/dQ > 0$ の条件で出現することがわかった（図 3）。さらに、より広範囲にパラメータ依存性を調べた結果、上記の傾向は系統的に非爆発的噴火定常解の存在条件に反映され、円筒火道への長さが短くなるほど、定常解が存在しやすくなることもわかった（図 4）。これらの結果は、ダイク短軸径が小さい効果、長軸径が小さいことで火道変形しにくくなり短軸径が小さいまま保たれる効果、円筒火道長さが短いことでダイク領域が拡大する効果によって横方向脱ガスが効率化し、また円筒火道径が大きいことで浅部における液相上昇速度が小さくなり、縦方向脱ガスが効率化する、という物理過程を反映していると考えられる。

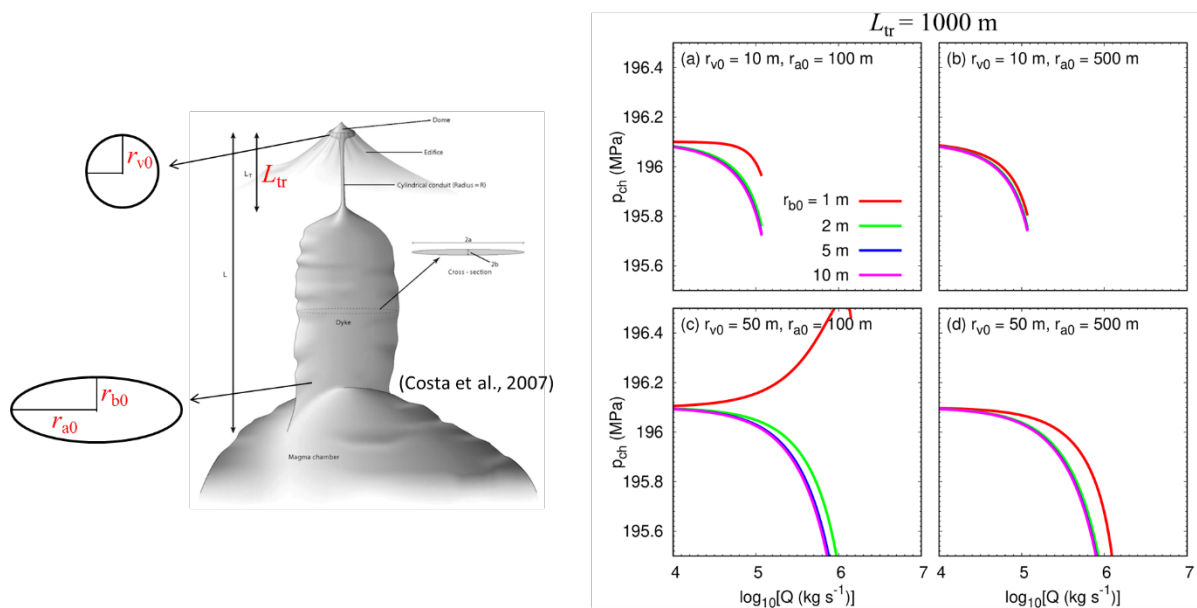


図 3 火道形状の設定の概念図（左）と、A-magmaを設定した場合の非爆発的噴火に相当する火道流におけるマグマ溜まりの圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係（右）。 r_{a0} ：ダイク長軸径、 r_{b0} ：ダイク短軸径、 r_{v0} ：円筒火道径（ r_{v0} ）。

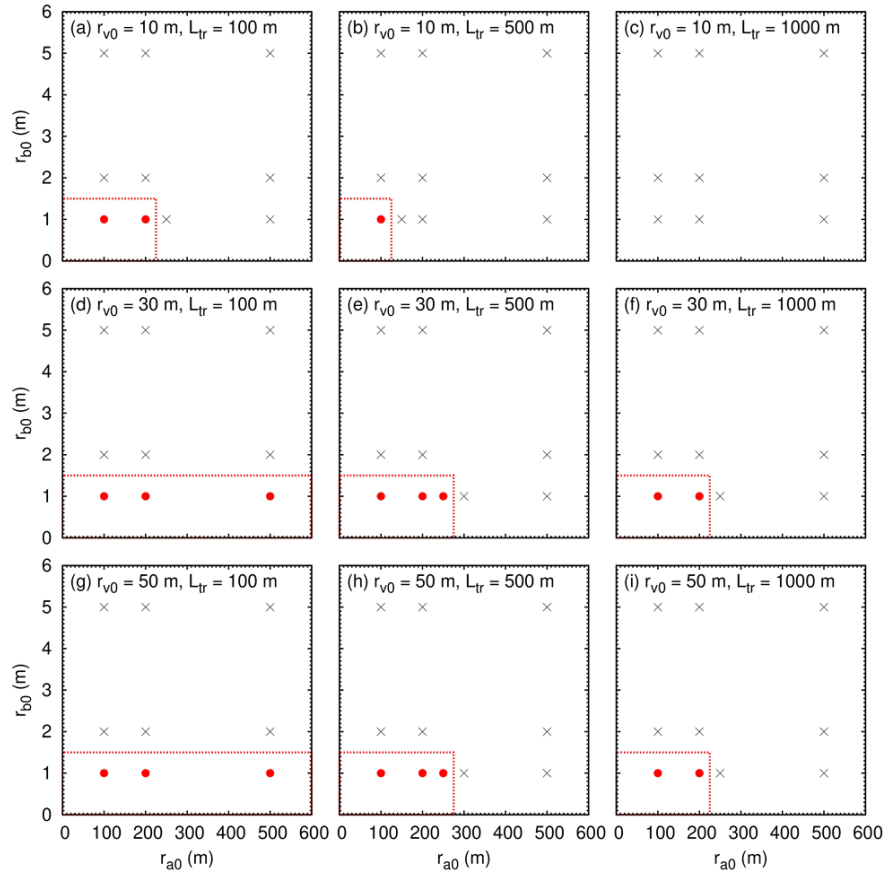


図4 A-magmaにおける非爆発的噴火定常解の存在条件。ダイク短軸径 (r_{b0}) 小 (< 1 m)、ダイク長軸径 (r_{a0}) 大、円筒火道長さ (L_{tr}) 小、円筒火道径 (r_{v0}) 大の時に定常解が存在。

次に、B-magma の場合には、非爆発的噴火に相当する定常解は、噴出率が 10^4 kg s^{-1} 以下という観測値より極端に低い範囲においてのみ、 $dp_{ch}/dQ > 0$ の条件を満たして存在し得ることがわかった (図5)。この結果は、B-magma では低温・高結晶度・高粘性の効果によってマグマ破碎が効果的に促進することで、非爆発的噴火の存在条件が限定されていることを反映している。一方、爆発的噴火に相当する定常解は、噴出率が 10^4 kg s^{-1} 以上という現実的な範囲において、 $dp_{ch}/dQ > 0$ の条件を満たして存在することがわかった (図6右)。また、噴出率と円筒火道径の関係を調べたところ、その径が 10 m 程度の場合、噴出率は 10^6 kg s^{-1} となり、実際の観測値とより整合する結果が得られた (図6左)。A-magma の場合は、円筒火道径が大きいほど非爆発的噴火の定常解の存在しやすくなるという結果を踏まえると、異なる火口から発生する噴火でその様式を支配する要因として、火道形状の違いが重要な役割を果たしていることが示唆される。

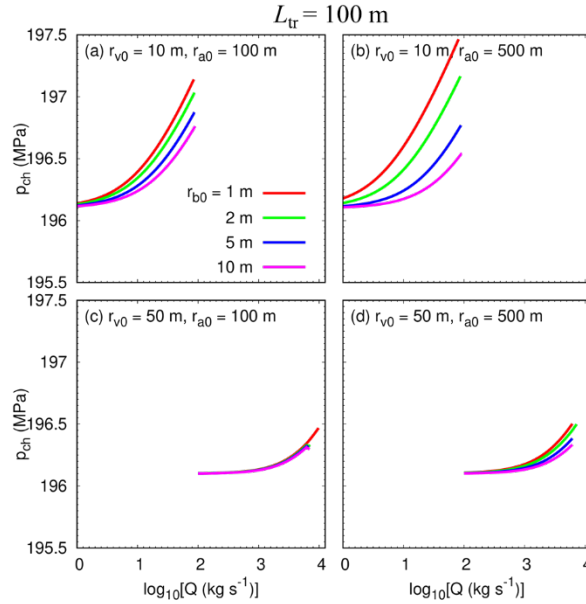


図5 B-magmaを設定した場合の非爆発的噴火に相当する火道流におけるマグマ溜まり圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係。 r_{a0} :ダイク長軸径、 r_{b0} :ダイク短軸径、 r_{v0} :円筒火道径 (r_{v0})。

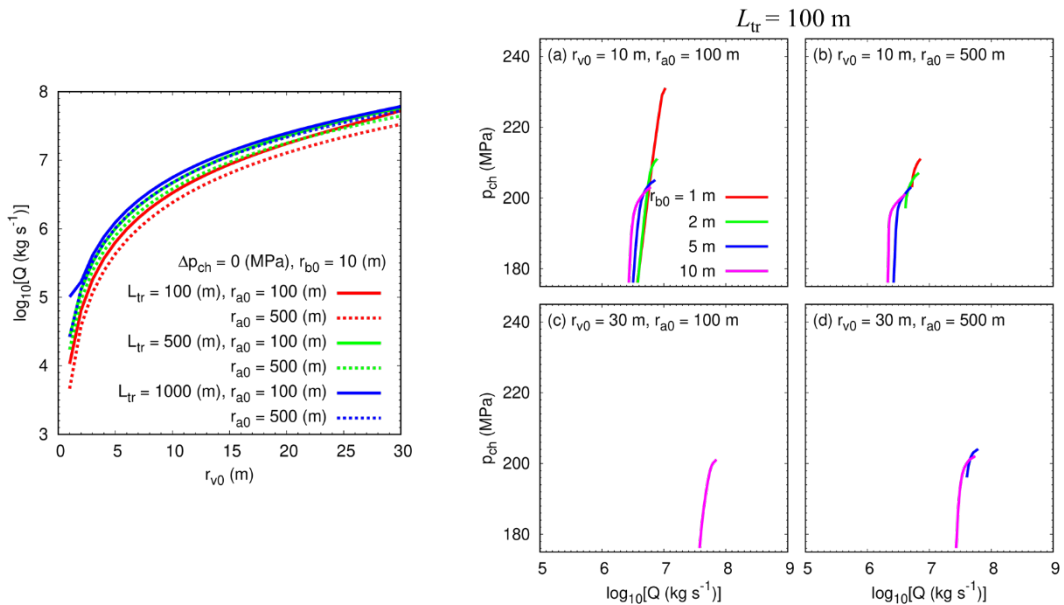


図6 B-magmaを設定した場合の爆発的噴火におけるマグマ溜まり圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係(右)と、マグマ溜まりがリソスタティック圧の場合の定常解における噴出率と円筒化導径の関係(左)。

さらに本研究では、上記で示した多様な噴火様式に対応する火道流が、噴火推移中に変化することで、周囲地殻の変動及び山体変形に与える影響を議論した。その結果、A-magmaによる非爆発的噴火に相当する火道流では、火道内の圧力変化が極めて小さい一方で、噴出率変化に伴いマグマ上昇速度は大きく変化することから、shear stressによる山体変形の効果が大きくなる可能性がある(図7上)。一方、B-magmaによる爆発的噴火に相当する火道流では、マグマ溜まりと火道内における圧力変化が大きく、また、上昇速度の空間分布も大きく変化することから、normal

stress と shear stress の両方の効果による山体変形が励起されることが予想される（図7下）。実際に、有限要素法に基づく地殻変動シミュレーションによって、爆発的噴火に相当する火道流がもたらす山体変形を計算したところ、マグマ溜まり圧力及び噴出率の減少に伴う噴火推移中の急激な山体収縮が確認された。今後、これらの火道流と山体変形の間を整理することで、地殻変動観測に基づく伊豆大島における事象分岐の検知方法を明らかにできる可能性がある。

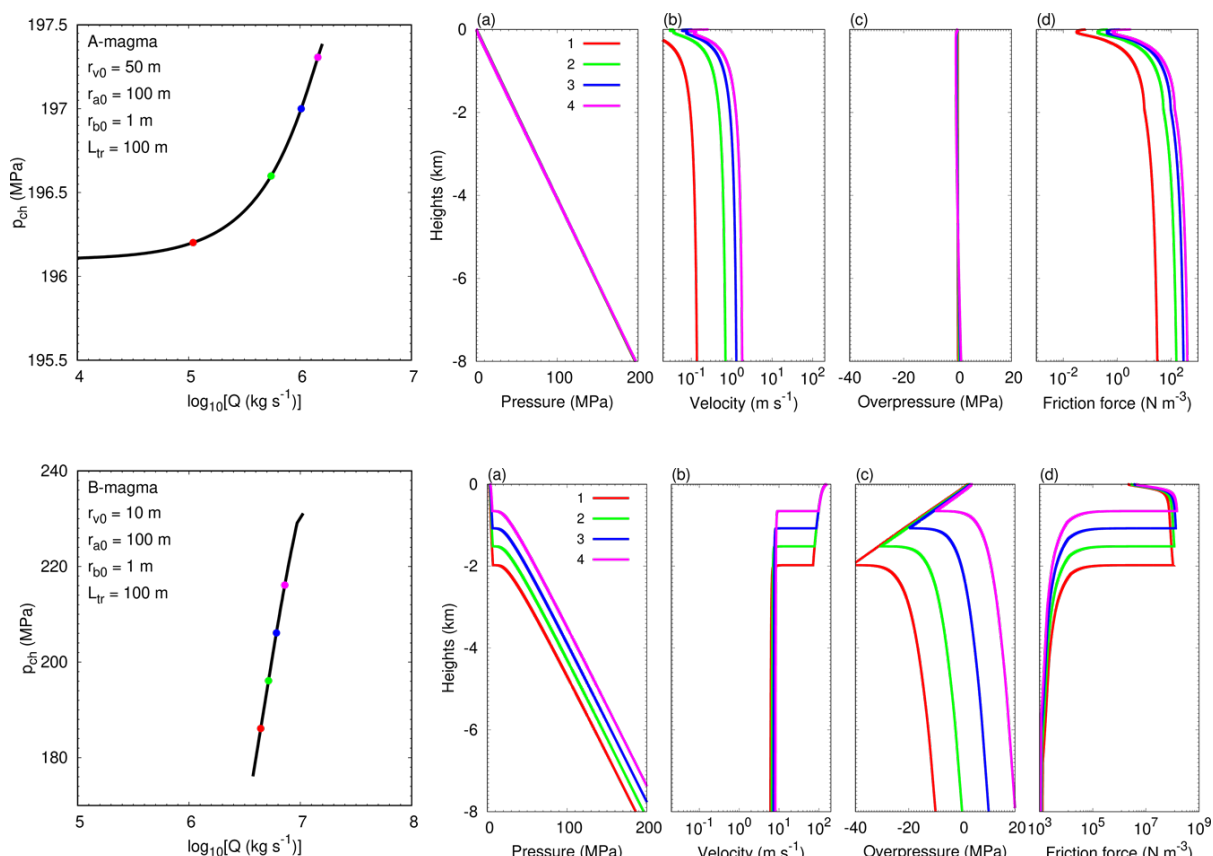


図7 地殻変動への影響評価。A-magmaによる非爆発的噴火に相当する火道流（上）、及びB-magmaによる爆発的噴火に相当する火道流（下）の変化を想定した場合の、火道内の物理量（圧力、速度、過剰圧、粘性抵抗）の空間分布。

b) マグマ移動過程シミュレーション技術開発

噴火に向けてマグマが地殻浅部に貫入する現象は、粘性流体としてのマグマの流れ、マグマに隣接する岩石の弾性変形、マグマ先端部で生じる岩石の破壊が複合する複雑な現象である。これらの力学的な過程をまとめて計算する方法は昨年度までの作業で固まった。しかし、この計算方法にはマグマが周辺から冷却されて熱を失う効果は考慮されていない。

マグマは低温の岩石に囲まれて上昇するので、熱を奪われて冷却され次第に温度が下がる。温度の降下によって密度や粘性率が変化すると、上昇過程に顕著な影響が及ぶ。冷却の効果が著しい場合には、マグマは固化して動けなくなり、上昇が停止する。冷却などの熱過程を加えると解析はさらに複雑になるが、貫入過程の理解を進めるためには極めて重要である。今年度はすでに開発された力学過程の解析に熱過程を組み

込んでシミュレーションを現実の貫入過程にさらに近づけた。

マグマの温度変化を支配する熱過程はマグマの流れ、岩石の弾性変形、マグマ先端部の破壊のいずれとも物理現象を特徴づける時間や空間のスケールが異なる。そのために、これらすべての現象を調和させるようなシミュレーションの手法を見出すことは容易でない。そこで、解析方法や計算プログラムの開発は次の2段階で遂行した。

(1) 熱過程を組み込むための方法の検討

(2) 熱過程を組み込んだプログラムの作成と計算結果の評価

この内で(1)は熱過程を組み込むための基盤強化で、その中心的な問題は異なる時間空間スケールをもつ複数の現象をどう調和させるかである。たとえば、熱過程の計算のために熱伝導の方程式を数値的に解こうとすると、力学計算とは異なるメッシュの作成が必要になり、扱いがかなり面倒になる。また、今までの力学的な過程の考察でも時間の単位は必ずしも明確に調整されてこなかったもので、この問題を改めて整理して熱過程の導入を円滑に進める必要がある。

課題(2)は(1)で得られた方法を計算プログラムとして実装することである。プログラムの作成によって具体的な問題に対してシミュレーションができるようになり、

(1)で提案された方法の妥当性が検証できる。

本作業によって、マグマの流動、周辺岩石の弾性変形、熱伝導によるマグマの冷却、岩石内の割れ目の進展の諸過程を含めて、マグマの貫入過程を総合的に計算する方法がまとめられ、計算プログラムを改良した。

割れ目に貫入するマグマは低温の岩石と接しており、熱が岩石に流れて失われる。マグマはまわりの岩石に熱を奪われながら上昇するのである。熱の輸送が熱伝導によるとして、冷却によるマグマの温度変化を計算する。マグマは幅が1m程度で長さが数kmにわたる細長い割れ目の中を移動する。また、熱伝導には時間がかかるので、熱は実質的にマグマの近傍にしか及ばない。そこで、熱は割れ目と垂直な x 方向に1次元の流れをつくり、温度 T と熱流量 q の分布は次の1次元の熱伝導方程式に支配されるとみなせる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad q = -k_t \frac{\partial T}{\partial x} \quad \kappa = \frac{k_t}{\rho_r C_r} \quad (1)$$

ここで t は時間、 k_t は岩石の熱伝導率であり、岩石の熱拡散率 κ は k_t 、岩石の密度 ρ_r と比熱 C_r から第3式のように求まる。(1)は c と c_o を定数とする次の解をもつ

$$T = c_o + \frac{2c}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa(t-t_h)}}\right) \quad \operatorname{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-u^2) du \quad (2)$$

$$q = -\frac{k_t c}{2\sqrt{\pi\kappa(t-t_h)}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa(t-t_h)}\right) \quad (3)$$

ここでerfは誤差関数、 t_h は定数である。マグマ近傍の熱の流れを(2)と(3)を使って表現する。マグマは $x = 0$ の位置にあり、そこでの T の値がマグマの温度（絶対温度を考える）を表すものとする。割れ目の幅方向についてはマグマの温度差は無視する。定数 t_h はマグマの先端が鉛直方向の座標 y の位置を通ったときの時間とみなすと、温度と熱流量は y にも依存するようになり、このことを明示して $T(x, y, t)$ 、 $q(x, y, t)$ と書く。

変数の境界での値から定数 c と c_o は次のように制約される。

$$c_o = T(0, y, t) \quad c_o + c = T_\infty \quad q(0, y, t) = -\frac{k_t c}{2\sqrt{\pi\kappa(t-t_h)}} \quad (4)$$

ここで T_∞ は x が無限大、すなわちマグマから十分に離れた場所の温度で、ここでは一定値とする。(4)から

$$q(0, y, t) = \frac{k_t(T(0, y, t) - T_\infty)}{2\sqrt{\pi\kappa(t-t_h)}} \quad (5)$$

次にマグマのエネルギーについて考察する。重力エネルギーやマグマの膨張による力学エネルギーの効果を無視すれば、エネルギー保存則は次のようになる。

$$\frac{d}{dt}(C\rho_m a T(0, y, t)) = -2q(0, y, t) \quad (6)$$

ここで a は位置 y におけるマグマの幅（割れ目の幅）である。右辺が2倍されるのは x の両側に熱が流れるためである。(6)ではマグマの比熱 C は本来の比熱に加えて、固化による潜熱の効果も含むものと理解する。(6)に(5)を代入すると、マグマの温度 $T (= T(0, y, t))$ について次の微分方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt}(C\rho_m a T) = -\frac{k_t(T - T_\infty)}{\sqrt{\pi\kappa(t-t_h)}} \quad (7)$$

(7)で左辺の時間微分はマグマと一緒に動くときの時間変化（ラグランジェ流の微分）を表す。これを y の位置に固定した立場でみる時間変化（オイラー流の微分）で置き換えると、マグマの上昇速度を v として、次の関係が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(C\rho_m a T) + v \frac{\partial}{\partial y}(C\rho_m a T) = -\frac{k_t(T - T_\infty)}{\sqrt{\pi\kappa(t-t_h)}} \quad (8)$$

(8)がマグマの温度変化を計算する微分方程式である。ここで、時間 t でマグマの先端が $y = h$ の位置にあるとして、その関係式

$$y = h(t) \quad (9)$$

から t_h を y の関数として計算する（すなわち $h(t)$ の逆関数を求める）。

マグマ貫入過程から幅 a と先端の位置 $h(t)$ が決まれば、マグマの温度 T は(8)から計算できる。 T の計算結果は粘性率などのマグマの物性を通して貫入過程に影響する。

マグマは $t = t_h$ のときに y の高さに到達し、その後(8)に従って冷却される。到達したときにマグマの先端部はすでに冷却を受けており、その温度が(8)で温度変化を計算するときの初期温度となる。

マグマ先端部はまわりを岩石に囲まれているので、冷却を x 方向の熱の流れだけでは表現できない。温度変化は先端部を円で近似してまわりに逃げる熱で近似する方がよいだろう。円筒座標系では熱伝導の方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (9)$$

ここで r は円の中心からの距離である。

マグマから岩石に流れこむ熱が実質的に境界のごく近傍にとどまるときには、(9)は次のように近似できる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (10)$$

これは 1 次元の熱伝導方程式であり、温度分布には近似解として(7)が使える。このときに(7)に含まれる割れ目の幅 a は、半円の面積を周の長さで割って $R/2$ とすればよいだろう。ここで R は円の半径である。

一方、割れ目の幅 a の変化は、先端付近では応力拡大係数に関する k を用いて次のように表される。

$$a^2 = k^2(h - y) \quad (11)$$

この係数は円で近似した半径と $R = k^2/2$ の関係にあるので、(7) 式の a は $k^2/4$ でおきかえられる。結局、マグマ先端部の温度変化は次の方程式で近似できる。

$$\frac{d}{dt}(C\rho_m k^2 T) = -\frac{2k_t(T - T_\infty)}{\sqrt{\pi\kappa(t - t_h)}} \quad (12)$$

以上のように、マグマの温度変化は(7)、(8)、(12)を用いて計算できるが、これらの微分方程式の右辺は $t = t_h$ で発散する。実際には右辺を t で積分すると有限になるので計算に支障がないが、数値計算でどう対処するかは問題になる。以下に(12)を例に対処の仕方を述べる。

時間が t から $t + \Delta t$ に変わる間に(12)に従って温度が ΔT だけ変化するものとする。この間に時間項以外の変数の変化が余り大きくないとして無視すれば、積分結果は以下のようになる。

$$\Delta T = -\frac{2k_t(T - T_\infty)}{C\rho_m k^2 \sqrt{\pi\kappa}} (\sqrt{t + \Delta t - t_h} - \sqrt{t - t_h}) \quad (13)$$

ステップ間の温度変化はこの式を用いて計算する。

冷却によるマグマの温度変化は、マグマの物性を通して上昇過程に影響する。温度変化の内で上昇過程に直接影響するのはマグマの粘性率の変化である。温度が下がるとマグマの一部が固化してマグマの総量が変わるが、この効果は近似的に見積もれる。温度変化はマグマの密度を変えて浮力にも影響するが、熱膨張の効果は小さいとしてここでは無視する。

粘性率の温度依存性は、基準値 η_0 と活性化エネルギーに対応する活性化温度 T_0 を用いて次の Arrhenius の式で近似的に表現できる。

$$\eta = \eta_a \exp\left(\frac{T_a}{T}\right) \quad (14)$$

実験データから活性化温度 T_a は $5 \cdot 10^4$ K 程度と見積もられる。

粘性率の温度依存性を表すには、標準的な温度 T_s を基準値としてその温度での粘性率を η_s として、(A4.3.1) を次のように書きかえるのが便利である。

$$\eta = \eta_s \exp\left(\frac{T_a}{T} - \frac{T_a}{T_s}\right) \quad (15)$$

温度 T_s に 1200 K などの値を設定すれば、 η_s は日常的に知られている値になる。

ここで温度の計算に必要な活性化温度以外の定数を見積もっておく。岩石の熱伝導率は $k_t = 1$ J/s.m.K 程度、熱拡散率は $\kappa = 1 \times 10^{-6}$ m²/s 程度である。マグマの比熱は $C = 10^3$ J/kg.K 程度、融解熱は $\Delta U = 0.5 \times 10^6$ J/kg 程度である。融解熱がソリダスとリキダスの温度差約 500K の間に均等に吸収されるとすれば、その効果は比熱を 10^3 J/kg.K だけ押し上げ、 C の実質的な値を本来の比熱の約 2 倍にする。遠方の温度 T_∞ は 300 K とする。

マグマの貫入過程に熱過程を組み込むときの計算方法は、上昇過程から決められたマグマの分布に対応してマグマからの熱の流れとマグマの温度変化をまず計算する。次に温度分布からマグマの密度や粘性率を計算し、その効果をマグマの上昇過程に影響として返す。

計算は時間を追ってステップ毎に進められる。あるステップで変数がすべて計算されると、時間をふやして次のステップに移る。ステップの管理は、時間の増分を一定にする操作の他に割れ目先端の位置 h の増分を一定にする操作もできる。

ステップを移行すると、まず前のステップで計算された拡大速度 c を用いて割れ目の長さ h と割れ目の形状を決める定数が計算される。割れ目の形状は割れ目のまわりの弾性変形を記述する解析解を重ね合わせて表現する。形状の定数を計算するとき、必要に応じて割れ目の長さに見合うように重ね合わせの項数を増やす。

新しい割れ目の形状が決まると、先端付近の形状から応力拡大係数を計算する。応力拡大係数から腐食破壊と脆性破壊の進展速度が得られると、2つを比較して大きい方を新しい割れ目の拡大速度 c とする。これが岩石の破壊から決まる拡大速度である。この拡大速度に追従できるように、マグマの流れの大きさ、流れに伴う圧力やせん断応力の分布を計算する。

次に岩石に流失する熱を考慮してマグマの温度を計算する。冷却による温度変化は、割れ目先端での熱の流失の効果がまず見積もられ、それを用いて各時間ステップで深さ毎に温度変化が計算される。マグマの温度分布に対応して、実験結果から得られた経験式を用いて各深さで粘性率が計算される。また、温度の計算結果からマグマの状態が計算される。特に重要なのは溶解度を考慮して気体成分の発生量を計算することである。その累積からマグマ中に気体成分がしめる体積が計算でき、マグマの密度が計算できる。さらに、マグマの状態が気泡流なのか噴霧流なのかが評価できる。

マグマの状態から岩石に作用する応力が決まるので、この作用に対応する岩石の弾

性変形が計算される。岩石の弾性変形は解析解と数値解の和で表される。弾性変形は貫入面上では解析解で正確に計算できるが、解析解は地表面などでの他の境界条件を満たさない、それを補うために数値解を重ね合わせる。数値解は差分法で計算する。プログラムの実行にかかる計算時間はほとんどが数値解の計算に費やされる。最後に、マグマの流れから要求される割れ目の形状の変化を見積もって、次のステップに移る。以上の操作を繰り返すことでマグマの貫入過程が時間とともに追跡される。

計算例を図8に示す。熱過程の導入によってマグマの貫入過程に不安定さが増した。割れ目は進展し始めても途中で拡大を停止することがよくみられるようになった。

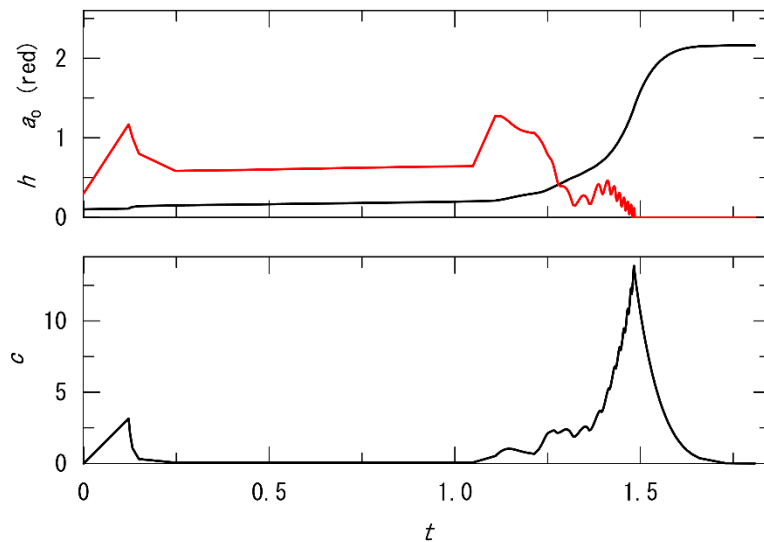


図8 割れ目の先端の位置 h 、入口 $y = 0$ での幅 a_0 (赤線)、拡大速度 c の時間 t への依存性。貫入するマグマの圧力は $p_0 = 1.3$ である。

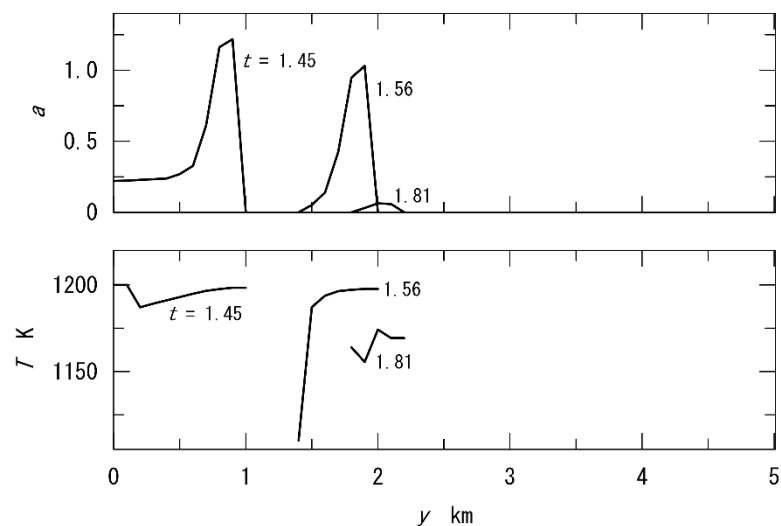


図9 割れ目の幅 a とマグマの温度 T の分布。割れ目先端の位置が $h = 1$ ($t = 1.45$)、 $h = 2$ ($t = 1.56$)に達したときと、拡大が止まったとき($t = 1.83$)について示す。図8と同じ $p_0 = 1.3$ に対する計算結果である。

定数 p_0 に着目する。この計算では $p_0 = 1.3$ と設定されている。 p_0 は割れ目の入口 ($y = 0$ の点) にマグマが貫入する圧力 (岩石の圧力との差) で、マグマが上昇する初期の駆動力となる。その単位は同じファイルの最後の行から入力される圧力の単位 su で、この場合は 3 気圧である。計算結果で図 8 は割れ目の先端の位置 h 、入口の幅 a_0 、拡大速度 c の時間変化である。 h の単位は km 、 a_0 の単位は m であるが、時間 t の単位が入力データの tu で決まるので、 c の単位も tu に依存する。図 8 をみると、割れ目の拡大速度は初期の変動がおさまった後は小さい値に落ち着き、それに対応して割れ目の先端はゆっくりと拡大する。拡大速度は $t = 1$ を過ぎた頃から顕著に増加するが、すぐに減少して 0 になる。最終的には割れ目の拡大は停止する。そのとき割れ目の入口で幅は 0 になり、入口は閉じている。

図 9 は先端の位置が $h = 1$ と 2 に達したときと、割れ目の拡大が止まったときの割れ目の幅 a と温度 T の分布である。先端の位置が $h = 1$ ($t = 1.45$) のときは、割れ目は先端部が大きくふくらみ、後方部は狭まっている。 h が 2 ($t = 1.56$) になると、後方部はほとんど閉じている。拡大が停止するとき ($t = 1.83$) は、割れ目全体が閉じかけている。マグマの温度は $h = 1$ ($t = 1.45$) のときには入口から貫入するマグマの温度 1200 K と余り変わらない。ところが、温度は次第に下がり、割れ目が閉じたときには降下量は 30 度ほどに達している。この温度差によって粘性率は約 3 倍に増加する。粘性率の増加でマグマは流動しにくくなり、割れ目の拡大が停止したものと理解できる。

次に貫入するマグマの圧力 p_0 を 1.5 まで増やした場合の計算結果を図 10 と 11 でみる。 p_0 の増加量は余り大きくないが、計算結果には顕著な違いがみられる。

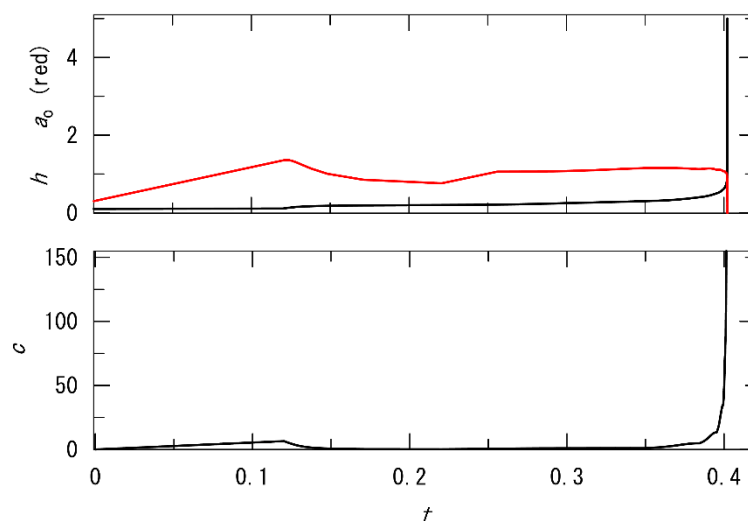


図 10 割れ目の先端の位置 h 、入口 $y = 0$ での幅 a_0 (赤線)、拡大速度 c の時間 t への依存性。入力される定数は入口の圧力を $p_0 = 1.5$ とする以外は図 9、10 と同じである。

図 10 によると、 $p_0 = 1.3$ の場合と比べて拡大速度は最初から数倍ほど大きく、割れ目は順調に拡大を続ける。さらに、時間が $t = 0.4$ を超えるあたりから拡大速度は急増して、最終的には数十万倍にもなる。割れ目はある時点で拡大を急速に加速しながら一気に地表に達するのである。拡大速度が急増するときに割れ目の入口で幅 a_0 は 0 になっており、割

れ目の入口はすでに閉じている。

割れ目の急拡大がどんな風に起こるかは、割れ目の幅と温度の分布にみられる(図 1 1)。急拡大が始まるころから割れ目の後方部は閉じており、先端部だけが分離して上昇を続ける。分離した先端部は入口や後方部からはマグマの補給を受けずに独立して上昇するのである。一方、急上昇の過程で温度にはほとんど変化がない。上昇速度が速いために冷却の暇がほとんどなく、マグマは粘性率の増加に邪魔されずに加速しながら一気に地表に到達するものと理解できる。

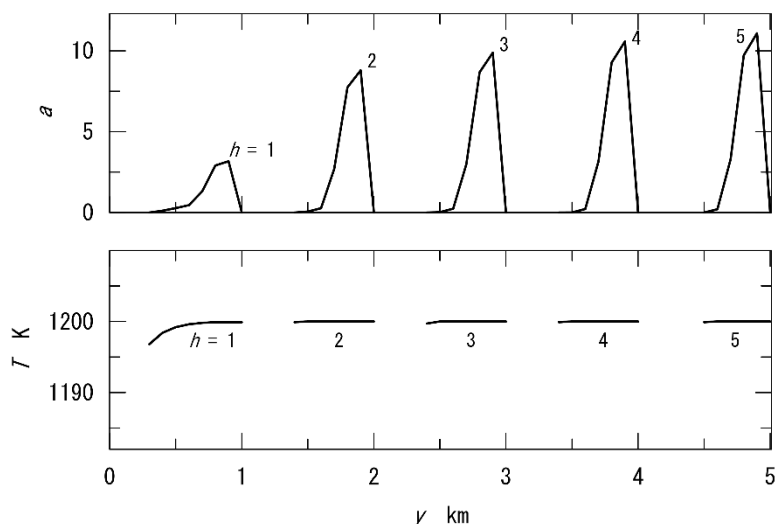


図 1 1 割れ目の幅 a とマグマの温度 T の分布。 $po = 1.5$ に対する図 3.3 と同じ計算の結果である。

個別要素法による岩脈貫入シミュレーションでは、粒子数を 30,000,000 まで増やし、重力パッキングの計算を進めた。

また、境界要素法により地形を考慮した火山周辺の地殻変動計算システムの開発を進めた。数値計算による地殻変動計算を行うためには、火山の地形や圧力源の形状を表現する地形メッシュを準備する必要がある。さらに、計算で得られた結果を観測データなどと比較するために、観測点ごとの変位や傾斜変化といった観測量に変換する必要がある。開発している地殻変動計算のプログラムを利用しやすくするため、このような山体地形モデルの作成や計算結果を作図などのために観測量に変換する機能の開発を行った。

山体地形のメッシュモデルの作成では、国土地理院の10mメッシュ数値標高モデルを利用して作成できるようにした。火山ごとに異なる山体の大きさや観測点の範囲に対応できるように、作成する地形メッシュのサイズや範囲をパラメータによって設定できるようにした。気象庁の常時監視火山のうち18火山（那須岳、日光白根山、草津白根山、浅間山、新潟焼山、弥陀ヶ原、焼岳、乗鞍岳、御嶽山、白山、富士山、箱根山、伊豆大島、新島、神津島、三宅島、八丈島、青ヶ島）について、山体地形のメッシュモデルを作成できるようにした(図 1 2)。また、圧力源の設定については、球状と回転楕円体形状の圧力源を設定できるようにし、圧力源の位置や大きさなどをパラメータに

よって設定できるようにした。数値計算による地形を考慮した地殻変動の計算結果は、地形メッシュの節点ごとの変位として出力される。この計算結果を観測点ごとに変位量や傾斜変化量といった観測量に変換する機能も作成した。開発した機能の実行や必要なパラメータの設定を行うためのGUIの作成も行った（図 1 3）。

開発したプログラムを用い、伊豆大島を対象として気象庁の傾斜計観測点（北の山、泉津伊東無、二子山北西）における傾斜変化量を求め、標高補正茂木モデルによる傾斜変化量と比較した。圧力源は三原山直下の標高-500～500mに設置した球状圧力源とした（図 1 4）。圧力源の標高がすべての観測点の標高より低い場合（標高-500m）には、各観測点で得られる傾斜変化量は標高補正茂木モデルによる傾斜変化量とほぼ同程度であること、圧力源の標高が海拔0mや500mの場合、観測点の標高が低い北の山、泉津伊東無の観測点では、標高補正茂木モデルと比べて求められる傾斜変化量の大きさには倍程度以上の違いが表れることを示した。

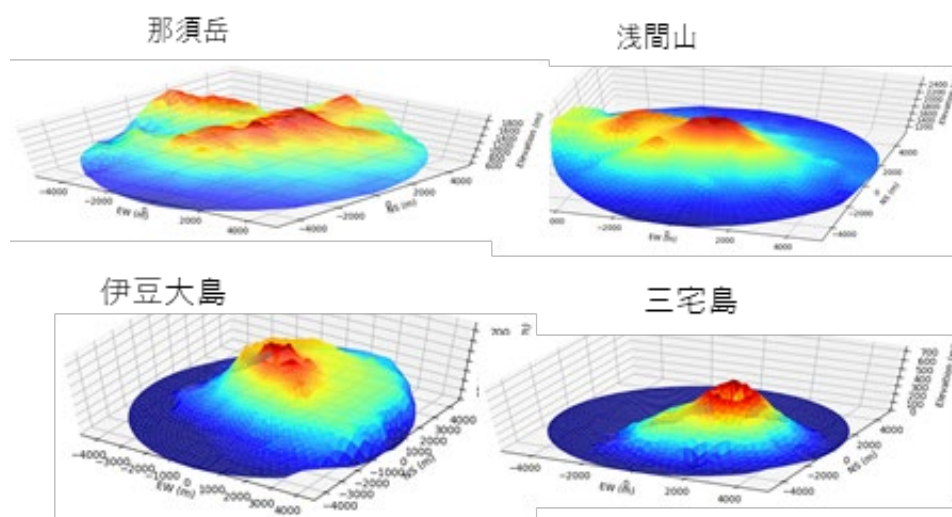


図 1 2 作成した山体地形のメッシュモデルの例。



図 1 3 火山周辺の地殻変動計算システムの操作用GUIの画面。赤枠は山体地形や圧力源のメッシュを作成するための機能、青枠は地殻変動の計算を行う機能、緑枠は計算結果を観測点ごとの観測量に変換する機能の部分それぞれ示している。赤点線枠内は必要なパラメータの設定を行う部分を示している。

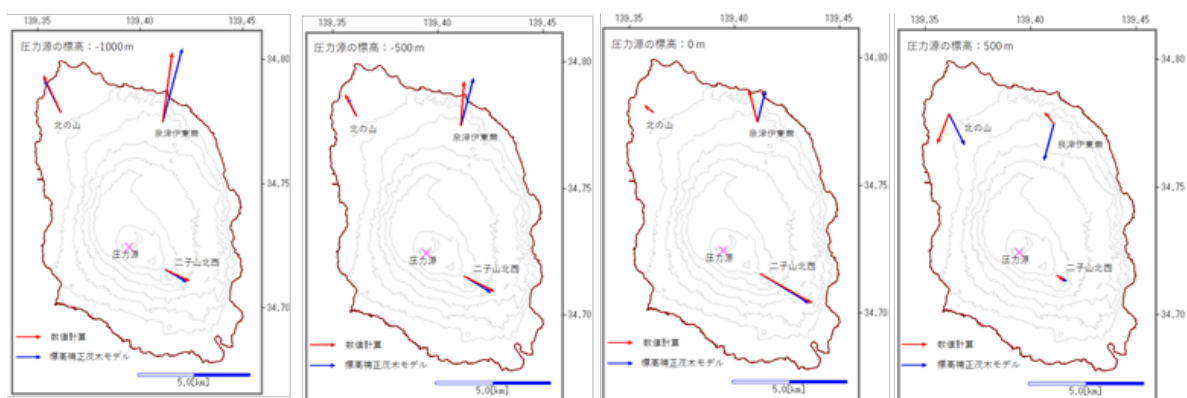


図 1 4 球状圧力源を三原山直下に設定し、深さを変えた場合の観測点ごとの傾斜変化ベクトル。圧力源に近い二子山北西観測点の傾斜変化量は0.01倍して表示している。観測点の標高はそれぞれ北の山41 m、泉津伊東無231m、二子山北西602mである。

c) マグマ物性モデルの構築

マグマ溜りから地表までの上昇過程における結晶化モデル構築のための室内実験と火道流モデルへの適用の検討を行った。また、火山性流体のレオロジーモデル構築の室内実験を実施した。

結晶化モデルの構築においては、前年度までに実施した神津島 838 年噴火の流紋岩を用いた水熱減圧実験を進めた。まずはアニール実験に基づいて 30 及び 80MPa における平衡結晶度を新たに調べ、これまでに得られた 130MPa と 30MPa の結果と組み合わせることで、平衡結晶度の圧力変化を定式化した（図 1 5）。また、初期圧力 130MPa から最終圧力 80MPa までの水熱減圧実験を実施し、結晶度の時間変化を明らかにした。その結果、結晶成長率 Γ が減圧量に依らないことが分かった（図 1 5）。加えて、桜島の安山岩マグマについても 920℃120MPa から 920℃20MPa までの一段階の減圧実験を行った。安山岩マグマにおいても、減圧後に斜長石の結晶度が大きく増加する。

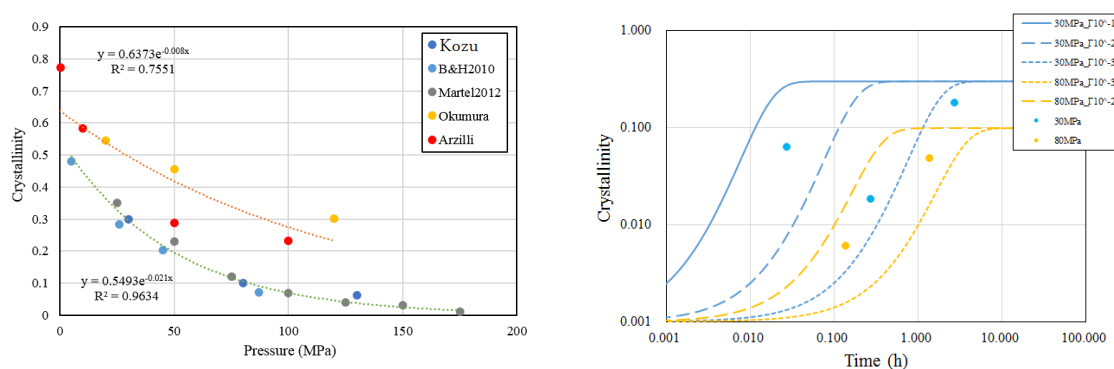


図 1 5 結晶化実験（左：平衡結晶度、右：結晶度の時間変化と結晶化速度 Γ の推定）。

マグマ粘性測定については、非定常状態でのマグマレオロジー実験を行った。測定前の静置条件（静置時間 t_w とせん断速度 $\dot{\gamma}_w$ ）がマグマに与える影響を検証した。1986 年伊豆大島割れ目噴火 B の溶岩をサンプルとし、大気圧で 1180℃の測定条件で実施した。結晶化過程での応力変化として、完全溶融後に温度を下げると一度粘性加熱によって応力が減少した後に増加して一定値に落ち着くことが分かった（図 1 6）。また、静置条件の影響として、静置時間 (t_w) が長くなると流動開始時に応力オーバーシュートが発生すること、せん断速度 ($\dot{\gamma}_w$) は完全停止時だけではなく静置時に弱いせん断を受けて流動している場合も応力オーバーシュートが発生することが分かった（図 1 7）。

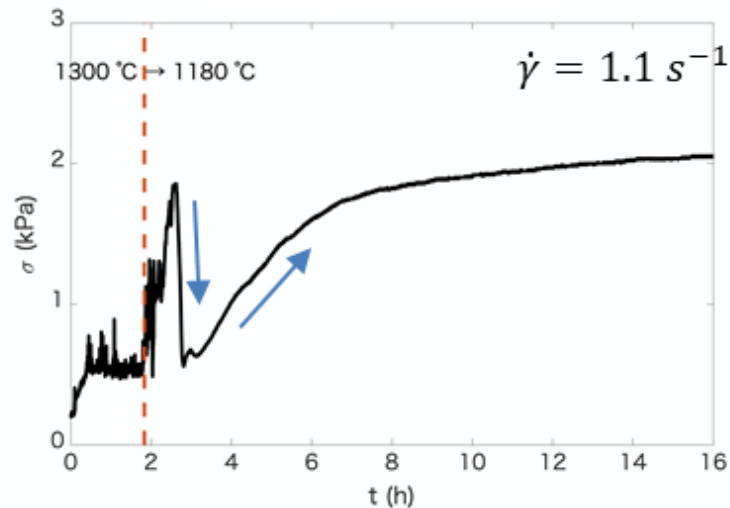


図 1 6 結晶過程での応力変化。

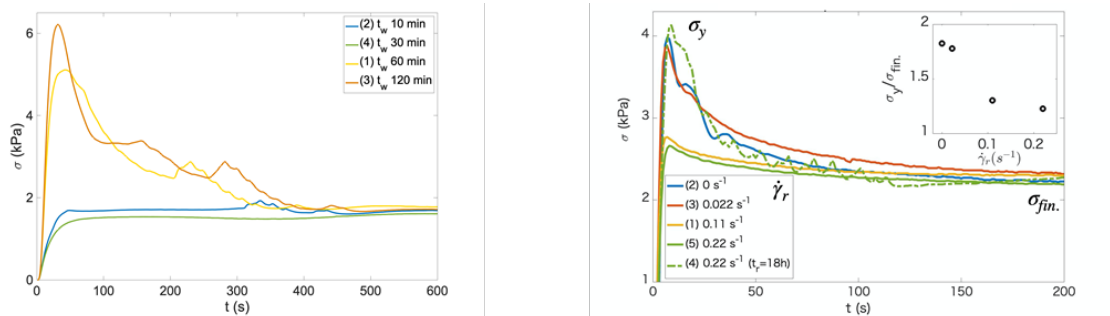


図 1 7 静置条件（左：静置時間 t_w 、右：せん断速度 $\dot{\gamma}_w$ ）による応力変化への影響。

2) サブテーマ②：噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

a) 降灰ハザード予測モデルの開発

大都市圏（特に首都圏）を対象とした降灰ハザード予測の評価のためのシステム開発を継続した。

具体的には新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）を開発し、運用レベルに到達した³⁾。前年度はモデル地形なしのドライモデルによる降灰シミュレーションを試行したが、今年度はモデル地形ありのフルモデルの開発を継続した。

JMA-ATM は、降灰を主な予測対象とした旧領域移流拡散モデル（RATM）と大気中の浮遊火山灰を主な予測対象とした旧全球移流拡散モデル（GATM）を統一しており、降灰だけでなく浮遊火山灰のシミュレーションにも資する設計となっている。このため上部成層圏の大気場を用いたシミュレーションも可能になっている（図 1 8）。

全球(GATM)・領域(RATM)の統一

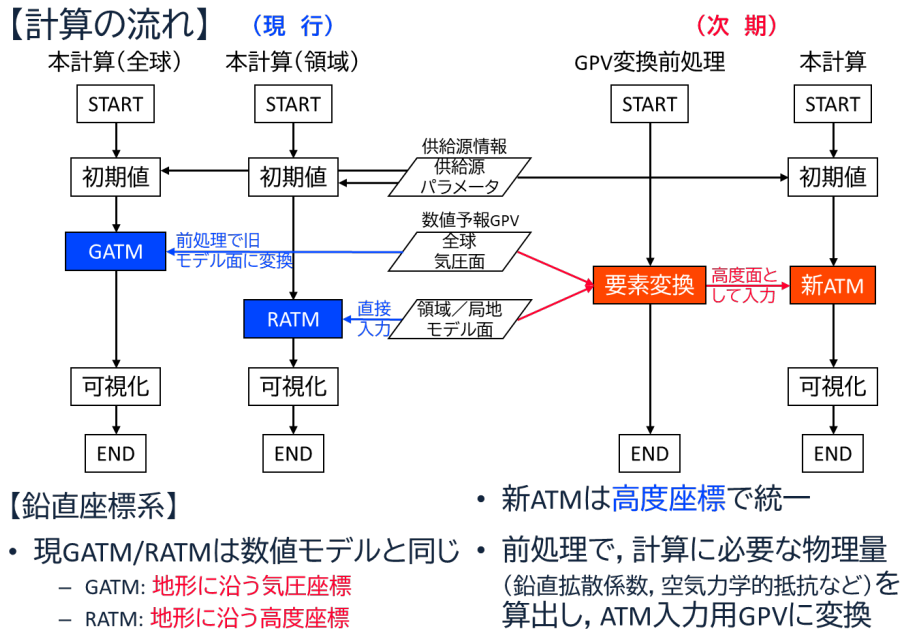


図 1 8 新しい移流拡散モデル³⁾による計算の流れ図。

今回開発した新しい移流拡散モデル(JMA-ATM)を、開発中に発生した西之島の連続噴火に適用し、浮遊火山灰と降灰シミュレーションの動作確認を行った。入力 GPV は 0.5 度格子、モデルトップ 10hPa(約 30km)の全球(対流圏)予報値を用いている(図 1 9、図 2 0)。

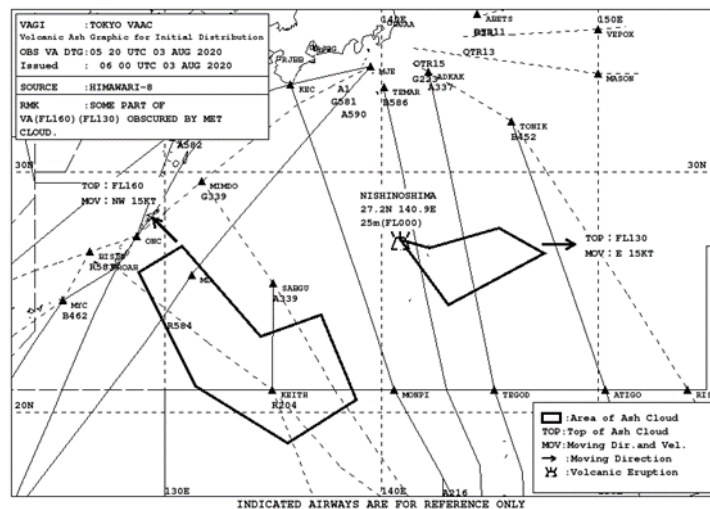


図 1 9 東京 VAAC による火山灰実況図。
(解析時刻: 2020 年 8 月 3 日 14 時 20 分)

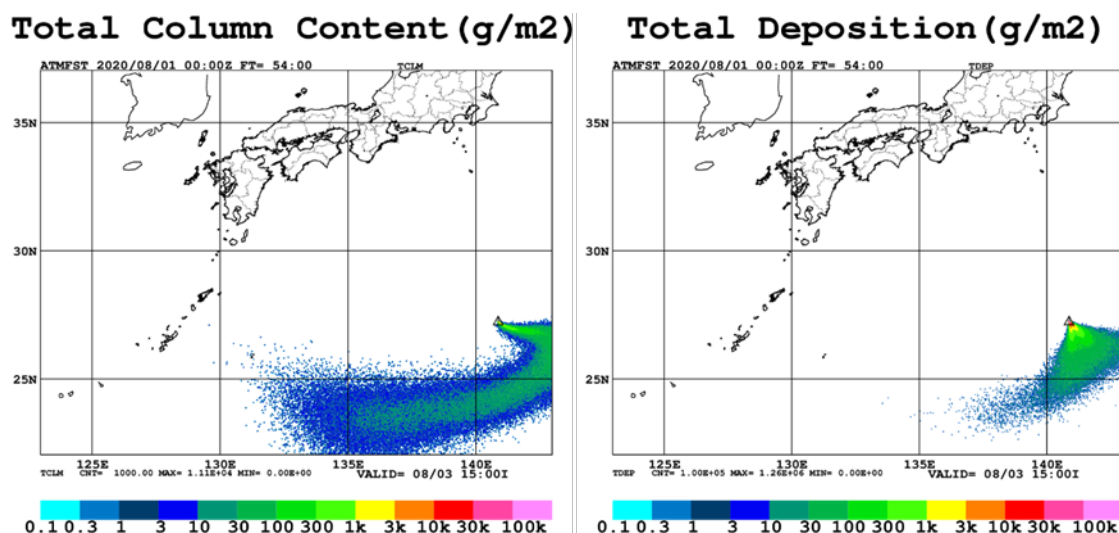


図 20 開発中の JMA-ATM（フルモデル）による気柱積算（左図）と降灰シミュレーション（右図）の動作確認結果。初期条件は Suzuki1983 による、西之島の連続噴火（噴煙高度：2020 年 8 月 1 日 09 時～2 日 03 時 19000 ft、2 日 03 時～5 日 03 時 16000 ft、5 日 03 時～6 日 21 時 13000 ft）を仮定。大気場は気象庁全球予報値（初期時刻：1 日 00 UTC、予報時間：5.5 日）を使用。

また、JMA-ATM の初期条件を適切に与えることを目的として、降下火砕物の形状・密度の粒径依存性について調査した。令和元年度から開発を開始した新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の初期条件（初期値となる供給源モデル）を適切に与えるためには、実際のデータ（降灰等）を調査する必要がある。二次元ビデオディストロメーター（2DVD：図 21）と呼ばれる機器を用いた降灰観測を行っており、その結果を解析したところ、降灰の落下速度・粒径・扁平率（＝高さ÷幅）に特徴的な変化が見られた（図 22）。また、特に粒径の小さい粒子に、扁平な粒子が数多く存在することも分かった。2DVD による観測結果を用いることで、噴煙内部の粒子形状・密度に拘束条件を与えることが可能になると期待される。

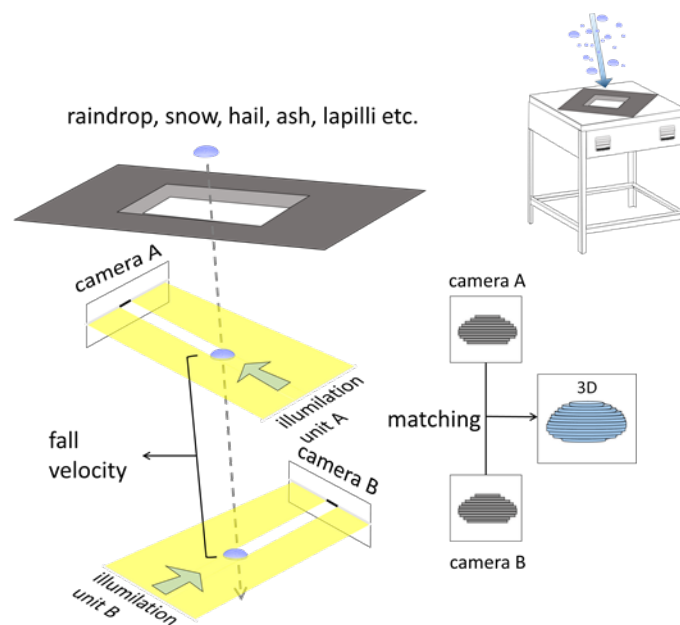


図 2 1 2DVD の外観と観測原理。

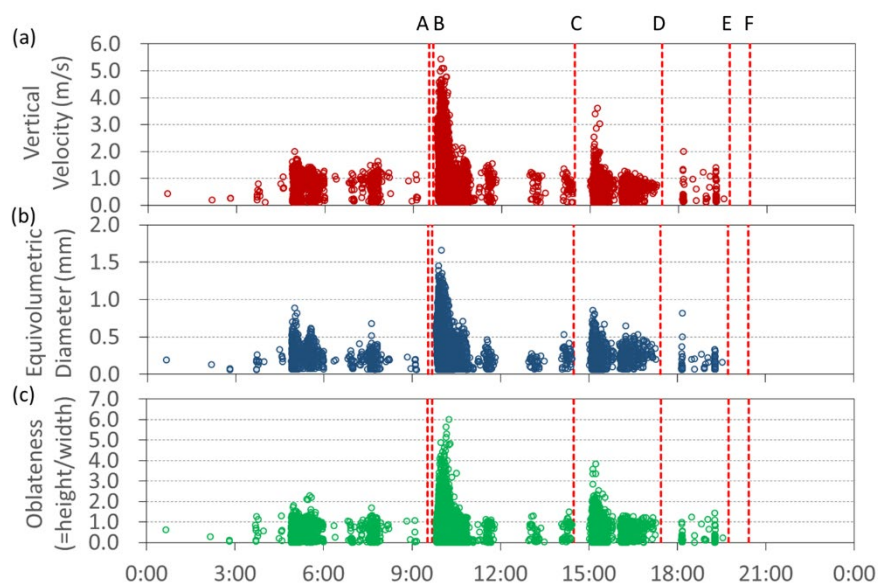


図 2 2 2019 年 10 月 14 日黒神における降灰の(a)落下速度、(b)等価体積直径、(c)扁平率 (=高さ÷幅)。A～F は鹿児島地方気象台で記録された噴火 (火口上 1,000m 以上相当)。各噴火に対応する降灰の初期フェーズで落下速度と粒径が大きくなり、その後、扁平率が高まっていることが分かる。

移流拡散モデルの初期値（ソース）としての噴煙柱モデルを改善するために、移流拡散系の数理構造を理解するための研究を進めた。降灰観測からソースを推定する逆問題に関して、単純化したモデルを用いた双子実験を行うことで、特異値解析を用いると、逆解の不確実性である解像度や観測誤差に伴う推定誤差を定量化できることを示した（図 2 3）。

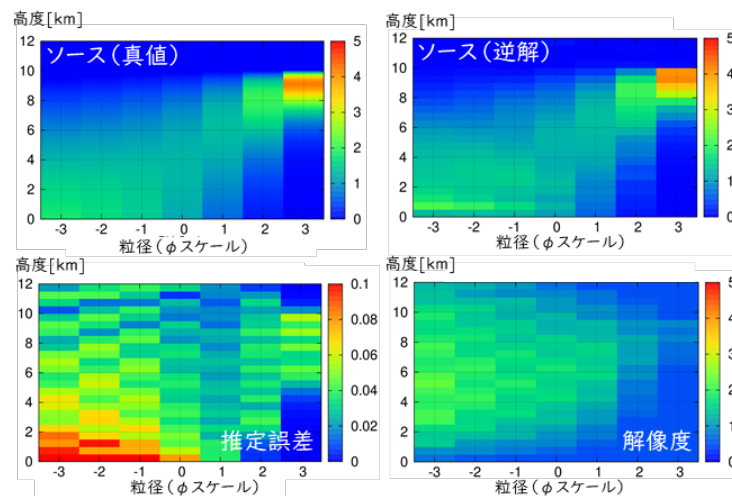


図 2 3 双子実験を用いた逆解析の例。左上：双子実験に用いた真値。右上：真値から計算した降灰量にランダムノイズを加えて作成した降灰量を観測値としたときの逆解。左下：逆解の推定誤差。右下：逆解の解像度。ソースと推定誤差は各粒径の放出量で規格化している。

b) 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発

噴煙ダイナミクスと火山灰輸送をカップリングした SK-3D モデル⁴⁾を用いた、大規模シミュレーションを実施した。それにより、モデルの高度化と計算結果の解析を進め、基礎データを作成した。

特に、富士山 1707 年宝永噴火と同程度の火山噴火について、大気条件（中緯度大気/熱帯大気）と風速を変えたパラメータスタディを実施した（図 2 4）。これらを含め約 10 ケースの計算を行った。シミュレーションには九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータシステム IT0 と海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用した。噴煙濃度・周囲大気との密度差・圧力差・温度差をプロットするとともに、粒径毎の火山灰粒子分布をプロットし、大気条件と風速に対する粒子サイズ分布パターンに違いが見られることが分かった。

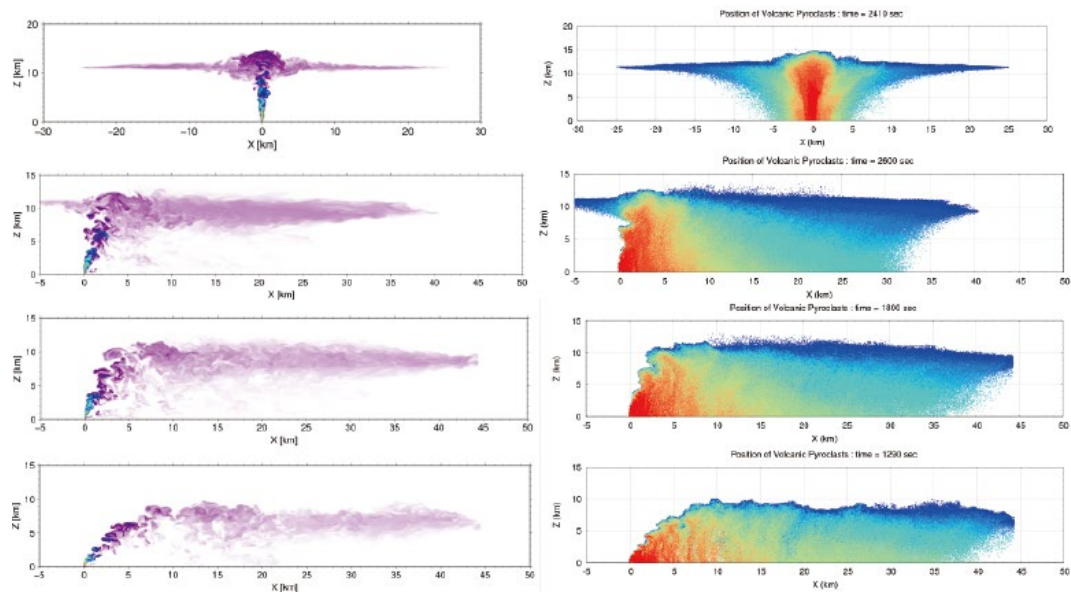


図 2 4 富士山 1707 年宝永噴火に相当する噴火規模の数値シミュレーション結果。上から風速が 0, 10, 20, 30 m/s と変えた場合について、(左列) 噴煙濃度分布と (右列) 火山灰粒子分布を示す。右列の色の違いは火山灰粒子の粒径を表す。

数値シミュレーションからは、火山灰粒子の粒径・位置・速度に加え、粒子地点での噴煙濃度のデータを取得した。それらのデータを用い、粒子が噴煙内外のどちらに存在するのか、粒子が上昇しているのか下降しているのか、について分類した (図 2 5)。さらにこれらの条件を組み合わせることによって、噴煙内で上昇から下降に転じる粒子を抽出した。このような降下を開始する粒子に関し、高さや水平距離に対する存在分布を求めた (図 2 6)。この存在分布は、火山灰移流拡散を予測するための供給関数として近似的に考えることができる。

以上より、様々な噴火シナリオに対応した、火山灰の降灰予測の基礎データを作成した。

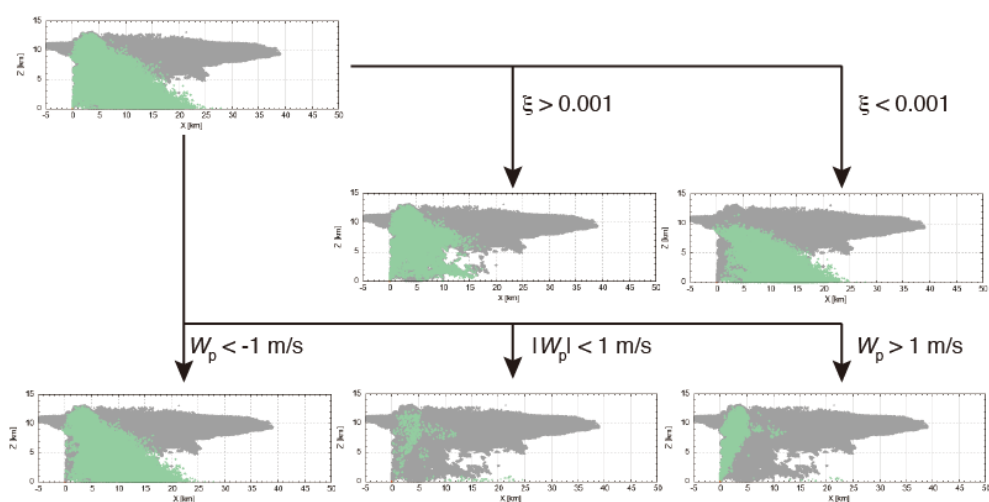


図 2 5 粒径が 2 ～ 4 mm の火山灰粒子分布の分類。全粒子分布 (上段) は、噴煙の質量分率 0.001 を閾値に噴煙内部・外部に分類した (中段)。また、上昇速度によって、上昇粒子・停止粒子・下降粒子に分類した (下段)。

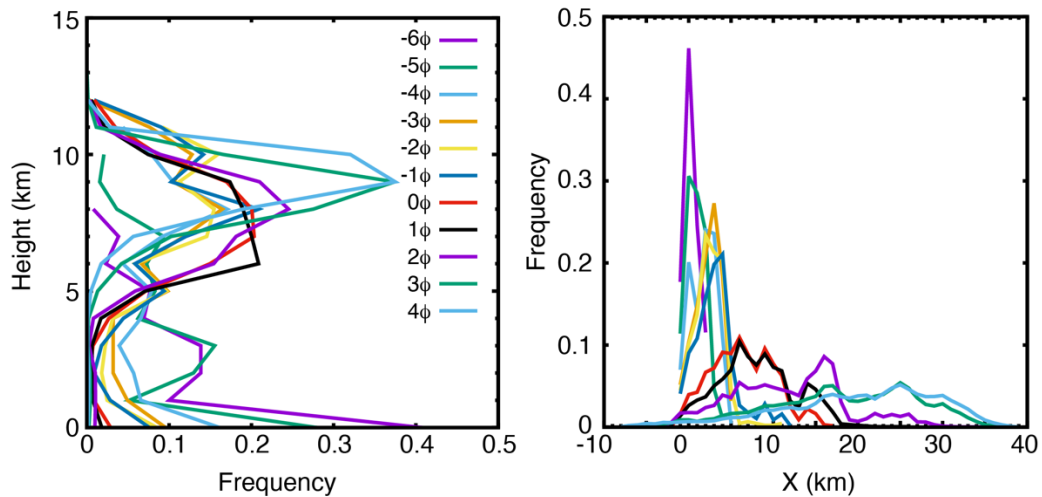


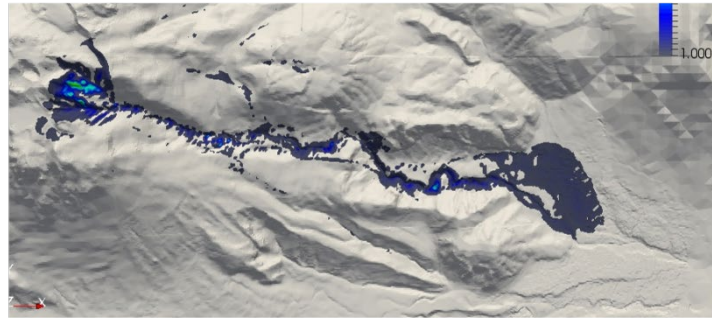
図 2.6 風速 10 m/s 中での噴煙内における降下開始粒子の存在分布。左図は高さ、右図は火口から風下方向への距離に対する粒径毎の存在分布を示す。

c) ハザード評価システムの検討

火砕流シミュレーション手法の開発・高度化に向けて、溶岩ドーム崩壊型火砕流の既存数値モデル、および、噴煙柱崩壊型火砕流の既存数値モデルを検証した。

溶岩ドーム崩壊型火砕流については、火砕流底部に形成される高粒子濃度領域を対象としたオープンソースコード `faSavageHutterFOAM`[®] が実際の火砕流の振る舞いや堆積物の分布を再現できるか検証した。ここでは、雲仙 1991 年 6 月 3 日火砕流を考察の対象とし、観測で得られた当時の流れの初期条件(質量・位置)や地形データを与えた数値シミュレーションを実施した。数値計算結果が当時の流れや堆積物の観測データと概ね一致することを確認した。具体的には、流れが主に谷筋(水無川)に沿って流動し、傾斜の緩やかな地点において多くの堆積物を形成し流動を終えるという実際の流れの定性的観察事実が再現された。数値計算における流れの流動速度は急斜面上の流れの先端部において約 100 km/h、流れの到達距離は約 3 km となり、これらも観測結果と概ね一致する。堆積物分布についても数値計算結果は観測事実と整合的であり、遠方の緩斜面上に多量の堆積物が形成されるだけでなく、給源近傍の急斜面上にも堆積物が分布する(図 2.7)。これらの観測事実の再現は 3 つのモデルパラメータのチューニングによって達成される。1 つ目のパラメータは非流動化摩擦係数であり(ここでは 0.2 に調整)、これは主に緩斜面上の速度の減少率を変え、その結果給源遠方の堆積物分布や流れの到達距離を変える。2 つ目のパラメータは乱流摩擦係数であり(ここでは $600 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-2}$ に調整)、これは主に急斜面上の速度の減少率を変える。3 つ目のパラメータは堆積開始流動速度係数であり(ここでは 100 m/s に調整)、これは主に急斜面上での堆積物分布を変える。今後、より信頼性の高い溶岩ドーム崩壊型火砕流のハザード予測を実施するためには、これらのパラメータを予測できるモデルの開発が必要である。

(a) 数値計算で再現された火砕流高濃度部堆積物の分布



(b) 観測された1991年6月3日火砕流堆積物分布
(Modified from Fig. 8 of Yamamoto et al., 1993)

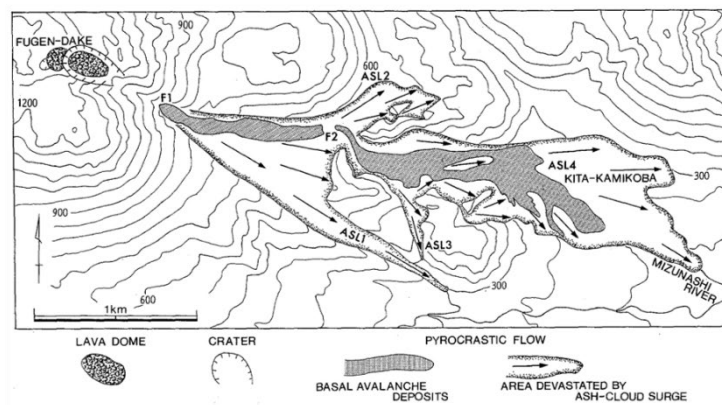


図 2 7 (a) faSavageHutterFOAM⁵⁾による溶岩ドーム崩壊型火砕流シミュレーションの数値計算結果。(b) 雲仙普賢岳で生じた溶岩ドーム崩壊型火砕流の観測結果。

噴煙柱崩壊型火砕流モデルの検証では、流れの上部低濃度領域と下部高濃度領域のダイナミクスと両者の相互作用を考慮した既存の SKS-1D モデル⁶⁾の数値計算結果を、火砕流の大規模実験⁷⁾の結果と比較した。上部低濃度領域の数値計算結果は、チューニングパラメータなしで、流れの先端の位置の時間変化(図 2 8 a)と流れの厚さの時間変化(図 2 8 b, c)の実験データを再現できる。下部高濃度領域と堆積物については、高濃度領域底部における堆積速度 D を 3.5×10^{-4} m/s にチューニングすることによって、高濃度領域の厚さの時間変化(図 2 8 d, e)と最終堆積物の質量分布(図 2 8 f)の実験データを再現できる。ここで得た堆積速度 D の推定値は、単純な粒子沈降モデル(hindered-settling model)による予測値の約 1/100 であり、堆積と侵食の組み合わせによって説明できると考えられる。この解釈は、実験での高濃度領域において粒子の跳躍・転動が生じていたという定性的観察事実と整合的である。また今回の実験との比較を通して、供給源(つまり、噴煙柱の端)における高濃度領域の供給条件が火砕流全体の振る舞いに強く影響することもわかった。今後、より信頼性の高い噴煙柱崩壊型火砕流のハザード予測を実施するためには、高濃度領域の堆積速度 D および高濃度領域の供給条件を予測するモデルを開発する必要がある。

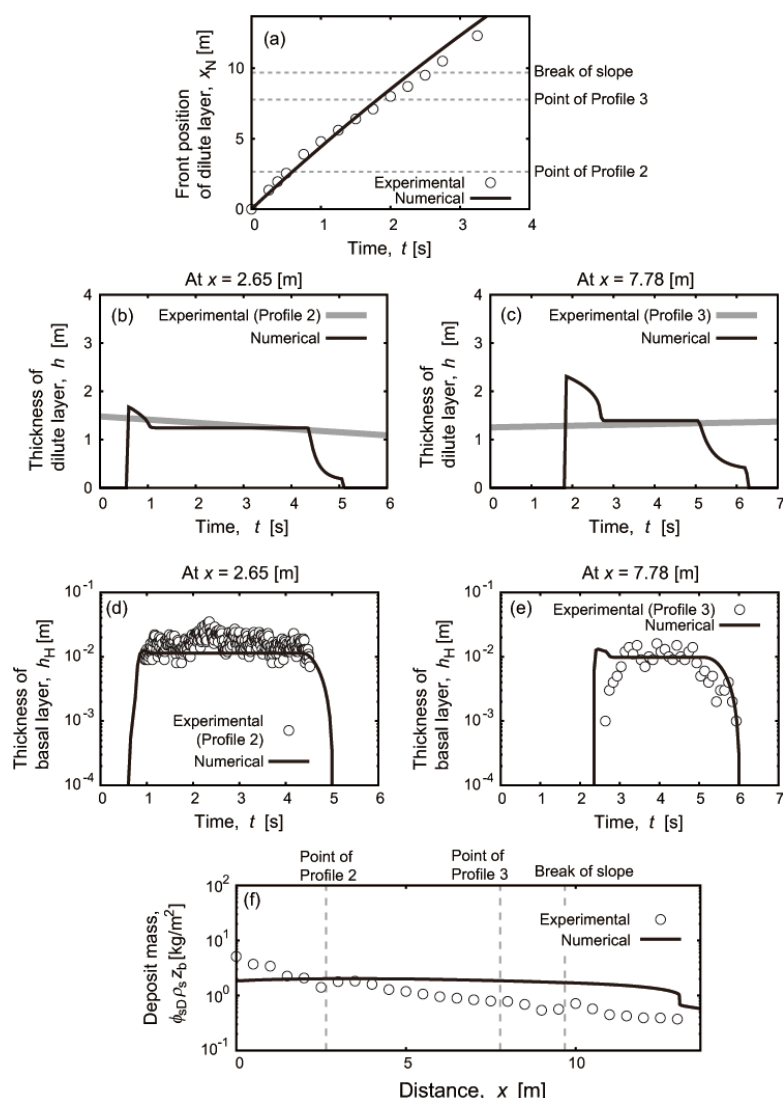


図 28 SKS-1D モデル⁶⁾の数値計算結果(黒線)と火砕流大規模実験⁷⁾の結果(丸と灰線)の比較。

今回検証した既存の SKS-1D モデル⁶⁾は、乾燥状態(つまり 100℃以上の高温)の火砕流を対象としたモデルであるが、水(液体)を含む(つまり 100℃以下の低温)火砕流の解析も可能にするために、SKS-1D モデル⁶⁾を水蒸気と水の状態変化の影響を評価できるモデルへ拡張した。この拡張により、幅広い噴火条件(特に、噴出前のマグマと混合した外来水(地下水など)の質量分率)での火砕流到達距離の予測が可能となる。外来水の質量分率を変えた数値計算を実施した結果、外来水の質量分率が増加するにしたがって、特に低濃度領域の到達距離が著しく増加することが明らかになった(図 29)。これは、温度の低下による流入大気熱膨張の抑制、および、水蒸気の凝縮による高密度な水の質量の増加によって、低濃度領域の密度低下が遅れ、その結果、低濃度領域の“離陸”が遅れるために引き起こされる。

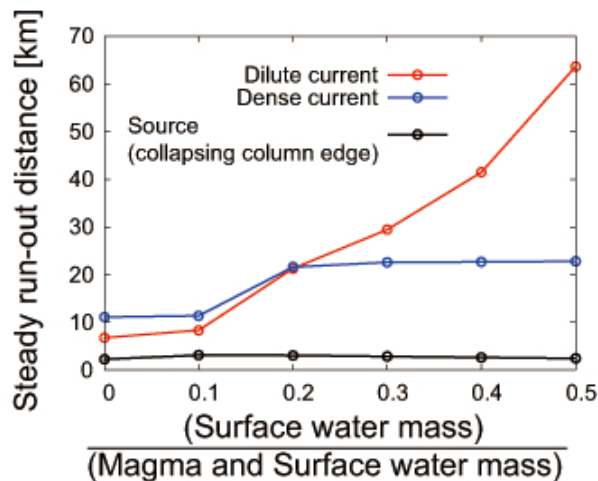


図 2.9 SKS-1D モデル⁶⁾の拡張版の数値計算結果。

ハザード評価システムは、各火山災害のハザードの評価にあたって、それぞれ扱う予測モデルが異なるものの、計算に使用するパラメータやデータ処理のフローを共通化することで統合を容易にすることを目的として開発するものである。また、シミュレーション結果をデータベース化することにより、これらのアンサンブル平均などによる確率的な評価を将来的に実現するための基盤として整備するものである。本年度は、特に、上で改良した様々な噴火条件の影響を評価できる噴煙柱崩壊型火砕流モデルをハザード評価システムへ実装することにより、大規模火砕流ハザード評価システムを開発した。また、本システムの最終形を目指して、グランドデザインの検討を行った。

火砕流シミュレーションの組み込みでは、噴煙柱崩壊型だけでなく溶岩ドーム崩壊型、それぞれの火砕流シミュレーションの計算と可視化を行う環境を整備した(図 3.0・図 3.1)。

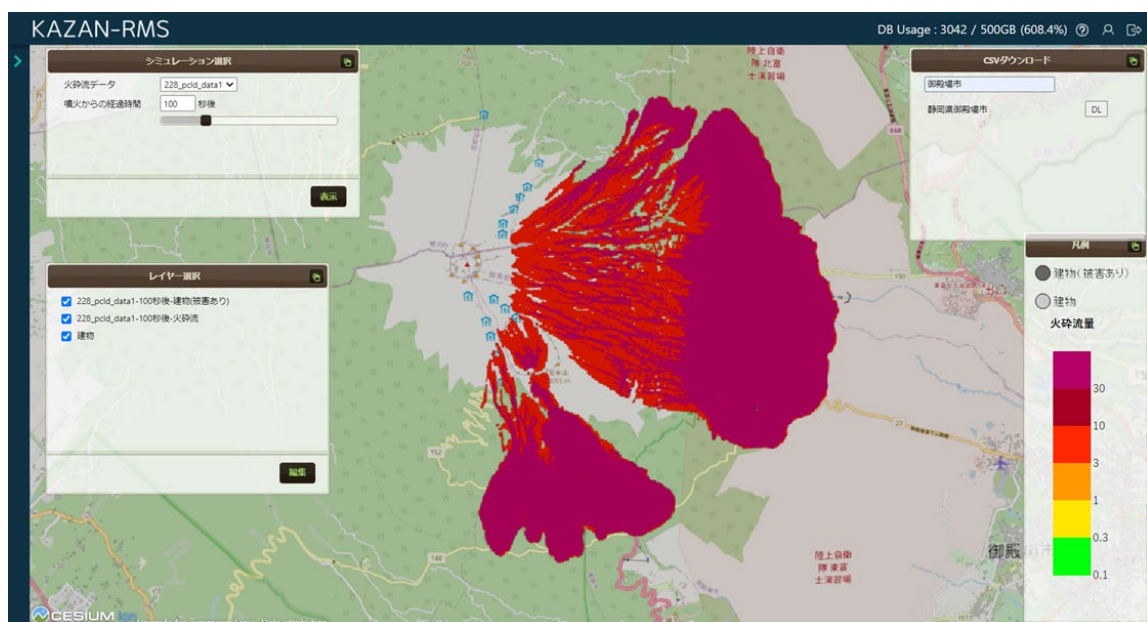


図 3.0 溶岩ドーム崩壊型火砕流シミュレーション (faSavageHutterFOAM⁵⁾) の可視化例(ここの初期条件は御殿場岩屑なだれを参考)。

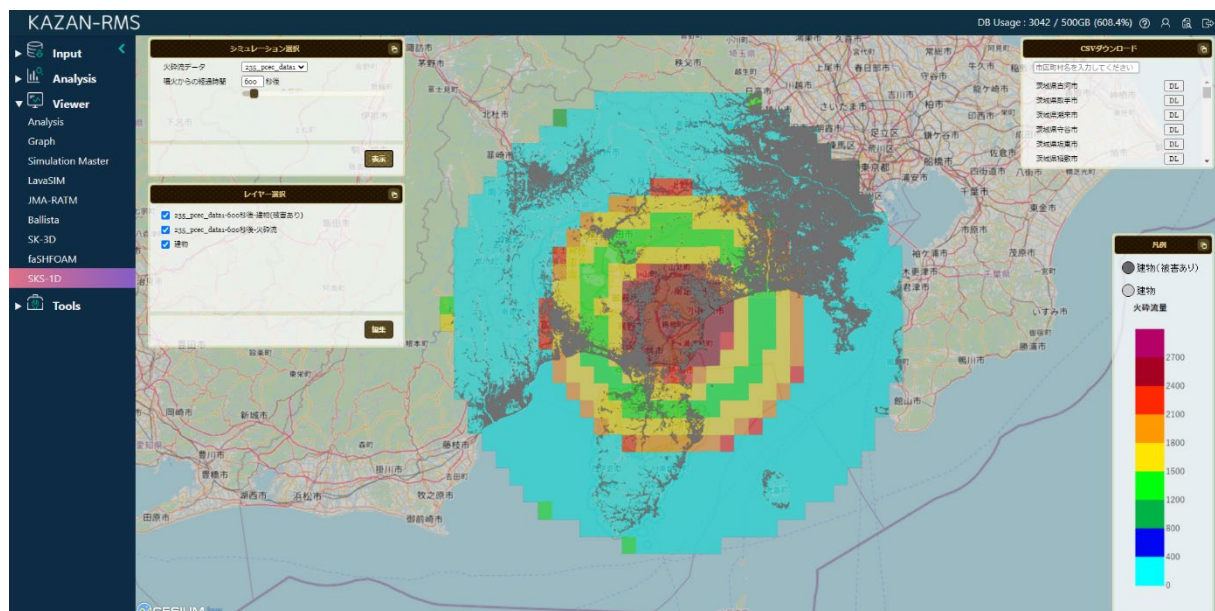


図 3 1 噴煙柱崩壊型火砕流シミュレーション (SKS-1D モデル⁶⁾) 可視化例。

グランドデザインの検討では、火山ハザード評価システムの最終的な機能に向けての課題を抽出し、対応案を検討した。ハザードシミュレーションからリスク評価に向けての脆弱性データベースについては、防災科研内で整備が進んでいることからこれを活用することとした。各データ種別のパラメータファイル（入力ファイル）が不統一であり、これらのフォーマットを統一する方向を設定した（図 3 2）。また、各シミュレーターを実行する環境が異なることも鑑み、実行スクリプトの設計を行った（図 3 3）。

データ種別	データ名	形式	備考
降灰 (JMA-RATM)	降灰データ	MF形式	計算済みファイル
	データ変換設定	Properties形式	
噴煙 (SK-3D)	噴煙データ	MF形式	計算済みファイル
	データ変換設定	Properties形式	
噴石 (Ballista)	計算設定	txt形式	Ballistaへの設定
	火口データ、シミュレーション定義	csv形式→MF形式	
	データ変換設定	Properties形式	
溶岩流 (LavaSIM)	計算設定、他	dat形式→MF形式(スクリプト)	スクリプトで変換している
	データ変換設定	Properties形式	
火砕流 (溶岩ドーム)	<次ページ参照>	独自形式	
火砕流 (噴煙柱崩壊)	<次ページ参照>	独自形式	

図 3 2 各シミュレーターのパラメータファイルの統一化。

データ種別	スクリプト名	スクリプト引数	備考
降灰(JMA-RATM)	なし		入力がMF形式
噴煙(SK-3D)	なし		
噴石 (Ballista)	ballista.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	kazan-rms サーバの以下に配置 /mnt/datadisk/KAZAN- RMS/BOSAI/current/MIAP/bin/Cinder
溶岩流 (LavaSIM)	LavaSIM_para.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	
火砕流 (溶岩ドーム)	faSHFOAM.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	
火砕流 (噴煙柱崩壊)	SKS-1D.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	

図 3 3 各シミュレーターの実行スクリプトの設計。

本火山ハザード評価システムでは、シミュレーション結果をデータベース化し、これをもとに確率表現とその可視化を行う機能を目的とする。このため、複数の計算モジュールからの確率処理機能の検討を行った。その機能において考慮すべき点は下記の 2 点である。

①出力結果が同じ時空間区切り・メッシュである場合、設計上・実装上、余分な補完処理が不要となる

②（1 が満たされない場合）確率処理について、補完処理などを検討・実装する必要がある

①においてもっとも簡単なサンプルとして、複数シミュレーション結果の単純な統計処理（平均・分散）を算出する機能について実装した。②のためには、確率処理を行うにあたって、補完を実施する必要がある。そのために GDAL など、Geo 分野の Open Source ライブラリを有効利用する方針とすることにした。

さらに、確率的ハザードマップ作成のための多数のシミュレーション結果を創出するために必要なアルゴリズムとして、PCQ（多項式カオス求積法）を導入するための検討を行った。また将来的な AI（強化学習）を取り入れ、フォワードモデルとインバージョンによる仕組みを検討した。

また、溶岩流シミュレーションコード LavaSIM を用い、富士山ハザードマップ検討委員会において湖沼への侵入による影響評価の検証などの情報を提供した。

(c) 結論ならびに今後の課題

事業開始の中間地点に差し掛かり、要素技術の統合とハザード評価システムの実装が進んだ。地下におけるマグマ移動シミュレーションでは、伊豆大島 1986 年噴火を主な対象とし、これまでに観測されている溶岩流出や爆発的噴火などの多様な噴火様式を火道流数値モデルによって再現し、具体的な噴火現象の評価につながる指針が得られた。マグマ移動過程シミュレーション技術開発では、岩脈貫入シミュレーションへ熱過程を導入することにより、さらに現実に近い評価につながる方向性を得るとともに、地殻変動シミュレーションと合わせてより定量的な噴火・噴火未遂の事象分岐の基準となるパラメータの抽出をさらに進める。マグマ物性モデルの構築では、整備した装置を活用した実験研究を進め、モデル化を推進

する。

噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化では、新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の開発が進み、この精度向上につながる気象レーダーデータの活用方法の検討、噴煙柱から放出される火砕物評価、噴煙シミュレーションと噴煙柱ダイナミクスの連携による降下粒子の評価など、高度な降灰・堆積評価を行う基礎理論が構築された。また、プロジェクト後半に向けて定量的なリスク評価およびその確率表現を行うための火山ハザード評価システムのグランドデザインについて進捗が得られた。

(d) 引用文献

- 1) Kozono, T. , Koyaguchi, T. , Effects of gas escape and crystallization on the complexity of conduit flow dynamics during lava dome eruptions, J. Geophys. Res. , 117, B08204. doi: 10. 1029/2012JB009343, 2012.
- 2) 石橋秀己, 種田凌也, 苦鉄質マグマの温度が減圧結晶作用と噴火ダイナミクスに及ぼす影響：伊豆大島 1986 年噴火の玄武岩質安山岩メルトの例, 静岡大学地球科学研究報告 (45), 55-66, 2018-07, 2018.
- 3) 新堀敏基, 石井憲介, 気象庁移流拡散モデル設計書, 気象研究所技術報告, 84, 146 p, doi: 10. 11483/mritechrepo. 84, 2021.
- 4) Suzuki, Y. J. , T. Koyaguchi, 3-D numerical simulations of eruption column collapse: Effects of vent size on pressure-balanced jet/plumes, J. Volcanol. Geotherm. Res. , 221-222, 1-13, doi:10. 1016/j. jvolgeores. 2012. 01. 013, 2012.
- 5) Rauter, M. , Kofler, A. , Huber, A. , Fellin, W. faSavageHutterFOAM 1. 0: depth-integrated simulation of dense snow avalanches on natural terrain with OpenFOAM. Geosci. Model Dev. , 11, 2923-2939, 2018.
- 6) Shimizu, H. A. , Koyaguchi, T. , Suzuki, Y. J. , The run-out distance of large-scale pyroclastic density currents: A two-layer depth-averaged model, J. Volcanol. Geotherm. Res. 381, 168-184. , 2019.
- 7) Lube, G. , Breard, E. C. P. , Cronin, S. J. , Jones, J. Synthesizing large-scale pyroclastic flows: Experimental design, scaling, and first results from PELE. J. Geophys. Res. , 120, 1487-1502, 2015.

(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

名称	機能
火山ハザード評価システム	噴石シミュレーションによる計算結果を火山リスクマネジメントシステム（VRMS）上のHADBにインポートし、人流データとの交差判定を行い、GIS上に表示す

	る。
dikelas.exe	有限要素法による岩脈成長シミュレーション計算プログラム
SK-3D.sh	噴煙柱シミュレーション SK-3D の出力データを JMA-ATM の入力条件へ変化するためのスクリプト

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和3年度業務計画案

(a) サブテーマ①地下におけるマグマ移動シミュレーション

1) 噴火機構シミュレーション技術開発

噴火形態を支配する火道内流のメカニズムについて、事象分岐をもたらすパラメータの抽出に関する国内の常時観測火山を対象としたシミュレーション研究を実施する。

具体的には、事象分岐において重要となる噴火前の準備過程について、火道浅部にプラグが形成される効果を考慮した火道流数値モデルの開発に取り組む。このモデルにより、桜島におけるブルカノ式噴火前の準備過程で示唆されている火道浅部でのマグマ蓄積・増圧過程を再現することを試みる。また、準備過程でもたらされる山体変形を有限要素法によって計算し、地殻変動観測による噴火開始の直前検知の可能性を評価する。課題C内の連携テーマとして設定されている伊豆大島噴火についても昨年度に引き続き火道流数値モデルの解析を実施し、シミュレーションにおける岩石学的・地球物理学的観測データの活用を推進する。

2) マグマ移動過程シミュレーション技術開発

地下におけるマグマの移動に伴う破壊の進展と火山性地震・地殻変動との関連性を引き続き調べ、システム化への検討を行う。

具体的には、マグマ移動過程シミュレーションについて、岩脈進展に伴う観測量と対応する手法を開発し、分岐判断の定量化を進める。噴火・噴火未遂分岐判断のため、各パラメータへの依存性の検討を継続して実施する。個別要素法では、課題C内の連携テーマである伊豆大島のスケールを対象としたシミュレーションを実施する。また、地殻変動のシミュレーション手法の開発として、境界要素法により地形の形状を考慮した地殻変動計算手法の開発を進める。時間ごとに貫入岩脈の位置や大きさを変えることで、地殻変動の時間変化を求めるシミュレーションを実施する。これらの内容についてIAVCEI2022で発表を行う。

3) マグマ物性モデルの構築

マグマ溜りから地表までの上昇過程における結晶化モデル構築を引き続き行い、その噴火分岐への影響を検討する。また、火山性流体のレオロジーモデル構

築の実験を引き続き実施する。

具体的には、水熱合成減圧実験装置と連続減圧シリンジポンプを用い神津島838年噴火噴出物と桜島1914年噴火噴出物を対象に減圧結晶化実験を行い、得られた結晶化速度及び平衡結晶速度に基づき結晶化モデルを構築、火道流モデルへ適用することで、噴火分岐への影響を検討する。

マグマレオロジーモデル構築については、1986年伊豆大島噴火の溶岩を例とした粘性測定試験による実験産物の組織解析を進め、その制御要因を明らかにすることでマグマレオロジーモデルを高度化する。また、得られたレオロジー則の溶岩流モデルへの適用を検討する。東北大学及び静岡大学の協力を得てこれらを実施する。これらの内容についてIAVCEI2022で発表を行う。

(b) サブテーマ② 噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化

1) 降灰ハザード予測モデルの開発

大都市圏（特に首都圏）を対象とした降灰ハザード予測の評価のためのシステム開発を継続し、システム化への検討を行う。

具体的には、大都市圏（特に首都圏）を対象とした降灰ハザード予測の評価のためのシステム開発を継続し、前年度までに開発した新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）を用いて、改めて「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル」による噴煙放出を初期条件として取り込み、フルモデルによる再計算を行う。また、JMA-ATMの初期条件を適切に与えることを目的として、降下火砕物の形状・密度・落下速度の粒径依存性とモデルへの適用方法について調査し、その内容をIAVCEI2022で発表を行う。気象研究所の協力を得てこれを実施する。

2) 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発

火山近傍の火山灰大気拡散と降灰を対象とした噴煙柱ダイナミクスモデルの開発を続け、システム化への検討を行う。

具体的には、噴煙柱ダイナミクスと火山灰輸送を同時に解くSK-3Dモデルを大型計算機において実行する。様々な噴火条件・大気条件における噴煙挙動や火山灰粒子挙動を再現するためのシミュレーションを行う。計算結果から火山灰の大気中における存在領域や降灰分布を抽出し、火山灰粒子挙動を解析することによって降灰ハザード予測モデル開発と連携する。特に、降灰ハザード予測のシステム化に必要な供給関数の検討を行う。火山ハザード評価システムにSK-3Dモデルでの計算結果を搭載する。

3) ハザード評価システムの検討

多様な火山ハザード現象を評価するシステムの設計を進め、導入を進める。前年度に実施した火山ハザード評価システムのグランドデザインに基づき、シミュレーション実施による確率計算評価方法についてシステム化に着手する。

具体的には、噴煙・降灰ハザード評価、噴石ハザード評価、火砕流ハザード評価、および溶岩流ハザード評価の機能の高度化を行う。溶岩流ハザードシミュ

レーション開発については、粒子法の導入を検討する。噴石のシミュレーションモデルBallistaについてはモデルの検証のために桜島において映像観測を実施し、その結果に基づいて改良を行う。噴煙柱崩壊型火砕流ハザードシミュレーションの開発については、現有の1次元二層モデルの2次元化について検討を進める。また溶岩ドーム崩壊型火砕流ハザードシミュレーションについては、現有の2次元粒子流モデルと低濃度火砕流モデルのカップリングモデルの開発について検討を開始する。ラハール（火山泥流）・火山性津波に関する計算手法の開発について検討を進める。

山形大学・神戸大学・東京大学地震研究所・富士山科学研究所の協力を得てこれを実施する。

また、これらの成果についてIAVCEI2022で発表する。

全サブテーマにおいて、課題C連携対象である伊豆大島についての研究を進め、研究集会に参加する。

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、上記①、②に示される技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てを、開発技術実装に向けた実地の場合となる緊急観測の実施あるいは緊急観測への協力に代えて実施することを可能とする。

3. 会議録

(1) サブ課題 C-1 研究集会

1. 日時：令和元年 12 月 14 日（月） 13：00-17：00
2. 場所：オンライン（東京大学地震研究所）
3. 議事：議題 1 各参加機関・協力機関の研究成果報告
議題 2 次年度計画についての総合討論

(2) サブ課題 C-3 研究集会

1. 日時：令和 2 年 12 月 25 日（金） 13：00-17：00
2. 場所：オンライン（防災科学技術研究所）
3. 議事：議題 1 各参加機関・協力機関の研究成果報告
議題 2 次年度計画についての総合討論

(3) サブ課題 C-2 研究集会

1. 日時：令和 2 年 12 月 26 日（土） 9：30-17：15
2. 場所：オンライン（北海道大学）
3. 議事：議題 1 各参加機関・協力機関の研究成果報告
議題 2 噴火事象系統樹作成・課題 C 内連携についての総合討論

4. むすび

次世代火山研究推進事業は令和2年度が5年目にあたる。この年度では新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、一部の研究遂行に影響が出たが、それぞれのサブテーマの参加機関および協力機関が、できる範囲で各々の研究を実施してきた。その研究成果を見ると、課題C全体としては着実な成果を上げていると評価できると考えられる。

サブテーマ1では、平成28年度に東大地震研に導入された主要な分析装置であるFE-EPMAでは、データ解析用プログラムの更なる整備に加え、コロナ禍での活用が見込まれるリモート分析依頼用のツール作成に取り組み、それらを試行し本格的な運用が見込まれる段階となった。一方、各参加・協力機関はそれぞれが対象とする火山の特定噴火の物質科学的解析を進めている。その中でも、有珠山では、2000年噴火の際に直前の高温マグマの注入は起きていないことが明らかになった。また、諏訪之瀬島については、1813年噴火の噴火推移に伴う噴出物の化学組成変化が明らかとなり、噴火活動推移予測に資するデータが得られた。その他の火山についても、噴火直前のマグマ溜り位置や火道上昇プロセスが検討され、噴火事象分岐の解明のための重要な成果が得られている。

サブテーマ2では多くの火山について、引き続き野外調査に加えトレンチ掘削調査とボーリング掘削調査を展開し、噴火履歴や噴火様式・推移の解明に関して多くの成果が得られている。まず最重点火山の摩周・アトサヌプリでは、ボーリング掘削調査を実施し、未知のテフラ層を複数発見し、噴火履歴の詳細が明らかになりつつある。また阿蘇山では、2019年以降の噴火対応に加え、ボーリング掘削調査・トレンチ掘削調査を実施し、最近の噴火活動履歴の詳細を明らかにした。有珠山においては、ボーリング掘削調査と野外調査から山体崩壊の発生時期を再検討し、これまでの見解とは違い完新世である可能性を指摘した。その他の火山についても各参加・協力機関が地質調査や物質科学的解析を実施し、多くの新知見が明らかになるなどの成果を積み上げている。特に活火山と認定されていなかった火山についても研究を進めており、中部日本の鷲羽池火山において完新世のテフラ層を見出し、活火山であることが確認できた。

サブテーマ3では、大きく2つの課題に取り組んでいる。まず噴火予測・推移予測に資することを目的とするマグマ移動シミュレーションでは、噴火事象分岐の判断基準について体系的に整理を行っている。それらは、岩脈成長における熱過程の導入実施および境界要素法による地殻変動計算システムの開発、流紋岩および安山岩マグマを用いた水熱減圧実験による結晶度の時間変化の解明、非定常状態でのマグマレオロジー実験による、マグマの粘性の静置条件の影響の把握などである。一方、火山災害軽減に資することを目的とする噴火ハザードシミュレーションでは、新しい移流拡散モデル(JMA-ATM)の開発および実際の降下火砕物の粒径依存性調査、降灰観測データからの噴煙柱ソース推定における誤差の定量化、噴煙シミュレーションと噴煙柱ダイナミクスの連携による降下粒子の評価などを実施した。一方で、それらに加えてリスク評価およびその確率表現も含めた最終的な火山ハザード評価システムのグランドデザインの検討も実施した。

課題C全体の連携については、令和2年度から伊豆大島火山を対象とした連携研究を開始したが、コロナ禍のために伊豆大島での現地検討会および研究集会は実施できなかった。しかしその中で、各サブ課題の個別研究を推進し、伊豆大島沿岸域での海底地形探査によ

る未知の側火山体の発見や、1986 年噴火等を対象とした異なる噴火様式についての火道流数値モデルでの再現および噴火分岐の検知可能性の評価など着実に成果が出ており、令和 3 年度以降の更なる課題連携研究が期待できる。また、人材育成コンソーシアムとの連携も順調に進めており、多くの研究者がコンソーシアムの実習や講義を担当するだけでなく、コンソーシアム修了院生を RA として雇用し、研究の推進と火山研究人材の育成も図ってきた。

以上のように、各サブテーマにおいてそれぞれの研究課題を推進し、順調に研究が進展しているだけでなく、昨年度までの課題であったサブテーマ間の連携についても開始しており、十分な成果・進捗があったと言える。令和 3 年度では、この連携研究をはじめとする各サブ課題の成果について、課題 C 全体で議論し今後の方針を検討することが重要である。そのためにも、各参加機関および協力機関のより一層の研究推進が必要不可欠であるが、これまでの進捗を見る限り、今後も十分な成果が出るであろうと期待している。

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Decoding the pre-eruptive process by crystal clots: A case study of Unzen 1991-95 eruption (ポスター)	Kurumi Iwahashi, Atsushi Yasuda, Hidemi Ishibashi	JpGU 2020	2020年7月	国内（国際）
Experimental study using aqueous suspension of volcanic ash from 2014 Ontake eruption toward an understanding of rheological characteristics of lahar (ポスター)	Aika K. Kurokawa, Hidemi Ishibashi, Takahiro Miwa	JpGU 2020	2020年7月	国内（国際）
Redox state and nanolite crystallization of erupting magma during ash forming eruption at Bromo Volcano, Indonesia (ポスター)	Takahiro Miwa, Hidemi Ishibashi, Masato Iguchi, Genji Saito, Natsumi Hokanishi, Atsushi Yasuda	JpGU 2020	2020年7月	国内（国際）
Effects of equilibrium crystallization on conduit flow dynamics during the 1986 eruption at Izu-Oshima volcano. (ポスター)	Tomofumi Kozono, Hidemi Ishibashi, Satoshi Okumura, Takahiro Miwa	JpGU 2020	2020年7月	国内（国際）
Experimental study on groundmass crystallization of Izu-Oshima 1986 basaltic andesite magma during conduit ascent (ポスター)	Ryoya Oida, Hidemi Ishibashi, Akihiko Tomiya, Masashi Ushioda, Natsumi hokanishi, Atsushi Yasuda	JpGU 2020	2020年7月	国内（国際）
メルト包有物から探る霧島・御鉢火山1235年準プリニー式噴火のプレ噴火プロセス (ポスター)	岩城吉春, 石橋秀巳, 外西奈津美, 安田敦, 石川徹	JpGU 2020	2020年7月	国内
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 (ポスター)	大塚芽久, 石橋秀巳, 外西奈津美, 安田敦	JpGU2020	2020年7月	国内
深部マグマ供給系の解明に向けた超高压ガス圧装置 (ポスター)	東宮昭彦, 鈴木敏弘, 潮田雅司, 中谷貴之, 宮城磯治, 田中明子	JpGU2020	2020年7月	国内
Experimental study on groundmass crystallization of the Izu-Oshima 1986 B basaltic andesite magma during conduit ascent (ポスター)	Ryoya Oida, Hidemi Ishibashi, Akihiko Tomiya, Masashi Ushioda, Natsumi Hokanishi, Atsushi Yasuda	JpGU2020	2020年7月	国内（国際）
Effect of superheating on decompression-induced crystallization of hydrous rhyodacite magma: An experimental study (ポスター)	Kazuhisa Matsumoto, Satoshi Okumura, Akihiko Tomiya	JpGU2020	2020年7月	国内（国際）
火山砕屑物に含まれるナノスケール磁性鉱物 (ポスター)	無盡 真弓, 中村 美千彦, 三宅 亮	JpGU2020	2020年7月	国内
榛名火山で45ka~10kaに生成した溶岩ドーム群のマグマ供給系と噴火誘発過程-5~7世紀の二ツ岳の2噴火との比較- (ポスター)	鈴木 由希・戸枝百合香・木村真也・田中怜	JpGU2020	2020年7月	国内
阿蘇カルデラ壁西縁に分布する先阿蘇火山岩類の層序 (ポスター)	十川翔太, 長谷中利昭, 鳥井真之, 大石博之, 田村智弥, 森康	JpGU2020	2020年7月	国内
Role of crystallization and conduit structure on small transitions of Strombolian eruption at Suwanosejima volcano, SW Japan, (口頭)	Taketo Shimano, Atsushi Yasuda, Masato Iguchi	JpGU2020	2020年7月	国内（国際）
噴出物の組織と粒子物性から推定されるプリニー式噴火の推移変化の要因—浅間天明噴火の例 (ポスター)	水野 樹・前野 深・安田敦	JpGU 2020	2020年7月	国内
伊豆大島火山山頂火口噴出物の発泡組織と斑晶量変化 —安永噴火と1986年噴火の比較— (ポスター)	池永 有弥・前野 深・安田敦	JpGU 2020	2020年7月	国内
霧島新燃岳2018年噴火における噴火様式の変化と噴出物の岩石組織との関係 (ポスター)	正畑沙耶香・前野 深2・鈴木由希・安田敦・外西 奈津美	JpGU 2020	2020年7月	国内
富士山での石英に富むクリスタルマッシュ状捕獲岩の発見 (口頭)	石橋秀巳, 大塚芽久, 田中佑希子, 安田 敦, 外西奈津美	日本火山学会秋季大会	2020年10月	国内
クリスタルクロットを用いたプレ噴火過程の制約と噴火様式にもたらす影響の検討: 雲仙火山の例 (口頭)	岩橋くるみ, 安田敦, 石橋秀巳	日本火山学会秋季大会	2020年10月	国内
主成分分析に基づくバク火山灰測色値変化の考察—桜島昭和火口2009-2015年活動について— (ポスター)	嶋野岳人, 安田敦, 井口正人, 上木賢太, 桑谷立	日本火山学会秋季大会	2020年10月	国内
近年の西之島噴火における噴出物の特徴とその時系列変化 (口頭)	前野深・安田敦・外西奈津美・吉本充宏・金子隆之	日本火山学会秋季大会	2020年10月	国内
富士火山の連続テフラ層で観察された石基組織の急変事象について (ポスター)	安田敦・田島靖久	日本火山学会秋季大会	2020年10月	国内
Magma Storage and Gas Source Depth Revealed by Melt Inclusion from Aso Volcano, Japan (ポスター)	Masataka Kawaguchi, Kenneth T. Koga, Estelle F. Rose-Koga, Toshiaki Hasenaka, Atsushi Yasuda, Kenji Shimizu, Takayuki Ushikubo	AGU 2020 Fall meeting	2020年12月	国外
Decoding pre-eruptive process using crystal clots:Unzen 1792 and 1991-95 eruption (口頭)	Kurumi Iwahashi, Atsushi Yasuda, Hidemi Ishibashi	AGU 2020 Fall meeting	2021年12月	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の 別
Decompression experiments for sulfur-bearing hydrous rhyolite magma: Redox evolution during magma decompression	Satoshi Okumura, Hidemi Ishibashi, Shoichi Itoh, Akimasa Suzumura, Yoshihiro Furukawa, Takahiro Miwa, Hiroyuki Kagi	American Mineralogists, 106, 216-225	2020年6月	国外
Plagioclase-hosted melt inclusions as indicators of inhibited rhyolitic melt beneath a mafic volcano: a case study of the Izu-Omuroyama monogenetic volcano, Japan	Risako Hatada, Hidemi Ishibashi, Yukiko Suwa, Yusuke Suzuki, Natsumi Hokanishi, Atsushi Yasuda	Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 115, 322-331	2020年6月	国外
火山ガラスのFe-K edge XANES分析に関する近年の研究動向	石橋秀巳	静岡大学地球科学研究報告, 47, 5-14	2020年7月	国内
Rapid migration of Unzen lava rather than flow	Akio Goto, Keiichi Fukui, Takehiko Hiraga, Yasunori Nishioda, Hidemi Ishibashi, Takeshi Matsushima, Tuyoshi Miyamoto, Osamu Sasaki	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 407, 107073	2020年10月	国外
Persistent gas emission originating from a deep basaltic magma reservoir of an active volcano: the case of Aso volcano, Japan	Masataka Kawaguchi, Toshiaki Hasenaka, Kenneth T. Koga, Estelle F. Rose-Koga, Atsushi Yasuda, Natsumi Hokanishi, Yasushi Mori, Kenji Shimizu, Takayuki Ushikubo	Contributions to Mineralogy and Petrology, 176:6, https://doi.org/10.1007/s00410-020-01761-6	2021年1月	国外
Amorphous silica coating on flank deposits of the 1783 A.D. eruption at Asama volcano	Takayuki Nakatani, Sarina Sugaya, Maya Yasui, Satoshi Okumura, Michihiko Nakamura	Journal of Volcanology and Geothermal Research 411, 107149, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107149	2021年3月	国外

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「サブテーマ2：噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成」

機関名 国立大学法人 北海道大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
The temporal variation of magma plumbing system of the Kattadake pyroclastic rocks in the Zao volcano, northeastern Japan（口頭発表）	Takebe, M., Nishi, Y., Ban, M.	Goldschmidt conference 2020, online	2020年6月25日	国際
Pre-eruptive magmatic processes of Zao volcano: timescales of multiple magma mixings revealed by orthopyroxene phenocrysts（口頭発表）	Sato, M., Ban, M.	Goldschmidt conference 2020, online	2020年6月26日	国際
Generation of mafic and felsic magmas of the Iwanoyama-Iyuzan volcanic chain in the Higashi-Izu Monogenetic Volcano field, Izu-Bonin arc, Japan（口頭発表）	Arakawa, Y., Kanai, H., Ueno, S., Shinmura, T., Ikehata, K.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月1日	国際
Paleomagnetic study of Holocene lava flow age at Nakadake volcano in Aso caldera, Kyushu Japan: Contribution to establish the eruptive history（口頭発表）	Anai, C., Mochizuki, N., Miyabuchi, Y., Utsugi, M., Shibuya, H., Ohkura, T.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日	国際
日光白根火山慶安2（西暦1649）年噴火の再検討（ポスター発表）	草野有紀・及川輝樹・石塚吉浩	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日	国内
北海道東部、屈斜路火山40 ka 噴火 (Kp I) の層序と噴火様式（ポスター発表）	柴田翔平・長谷川健	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日-15日	国内
北海道南西部、濁川火山における地質学・岩石学的研究（ポスター発表）	金田泰明・長谷川健	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日-15日	国内
三宅島火山、南部地域における坪田期（4.0～2.5 ka）の噴火層序とマグマ組成の特徴（ポスター発表）	渡部将太・長谷川健・及川輝樹・下司信夫	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日-15日	国内

古地磁気方位と永年変化を利用した大規模カルデラ噴火の継続時間の推定：始良カルデラとMamaku/Ohakuri ignimbritesの例（ポスター発表）	長谷川健・望月伸竜・Gravley Darren・楠 稚枝・岡田誠・下司信夫・Kosik Szabolcs・柴田翔平・金田泰明	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日-15日	国内
雌阿寒岳火山群、ポンマチネシリにおける最近1000年間の活動と熱水変質鉱物組み合わせの変化（口頭発表）	南裕介・中川光弘・佐藤鋭一・和田恵治・石塚吉浩	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月12日-15日	国内
Magma plumbing system at Zao volcano, NE Japan: time scales of magmatic processes revealed by chemical zoning in orthopyroxene phenocrysts（口頭発表）	Sato, M., Ban, M.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月13日	国際
伊豆大島火山 Y4噴火の噴火推移（ポスター発表）	川邊禎久	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月14日	国内
Variation of hydrothermal mineral associations and characteristics of volcanic activity at Ponmachineshiri Volcano during the last 1000 years, Meakan volcanic group, Eastern Hokkaido, Japan（ポスター発表）	Minami, Y., Nakagawa, M., Sato, E., Wada, K.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月14日	国内
伊豆大島火山山頂火口噴出物の発泡組織と斑晶量変化ー安永噴火と1986年噴火の比較ー（ポスター発表）	池永有弥・前野深・安田敦	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月14日	国内
Noble gas isotope compositions of mafic phenocrysts in the Stage 3 lavas of Kusatsu-Shirane Volcano（口頭発表）	Kametani, N., Sumino, H., Ueki, K., Hamada, M., Ishizaki, Y.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月14日	国内
The initial report of aeromagnetic studies for Nishinoshima Island（ポスター発表）	多田訓子・市原寛・小山崇夫・馬場聖至・高木朗充・前野深・武尾実	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月15日	国内
Relationship between the change of eruption style and the rock texture of ejecta during the Shinmoe-dake 2018 eruption, Kirishima, Japan（ポスター発表）	Shohata, S., Maeno, F., Suzuki, Y., Yasuda, A. and Hokanishi, N.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月16日	国際
Factors affecting the sequence of Plinian eruption inferred from rock texture and physical properties - an example of the 1783 eruption, Asama volcano, Japan（ポスター発表）	Mizuno, T., Maeno, F. and Yasuda, A.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Chiba, online	2020年7月16日	国際

スペイン、EL Hoyazo火山の岩石学的研究：深部由来マグマの証拠（口頭発表）	伴雅雄・樋渡日和・Alvarez-Valero, A.M., Kriegsman, L.・佐藤初洋	日本鉱物科学会2020年年会、オンライン	2020年9月17日	国内
モンゴル、ハンガイ山地第四紀ハルグイト火山における溶岩流の定置過程（口頭発表）	大場司・星出隆志・近藤恵太・ナツアグドルジ ムンフエルデネ・井村匠	日本鉱物科学会2020年年会、オンライン	2020年9月17日	国内
九重D層下位のテフラ層と飯田火砕流噴火の関係性に関する検討（ポスター発表）	福岡仁至・太田岳洋	日本応用地質学会令和2年度研究発表会、オンライン	2020年10月1日	国内
多変量解析による九重火山の湧水・熱水の水質形成機構の推定（ポスター発表）	久保佑佳・太田岳洋	日本応用地質学会令和2年度研究発表会、オンライン	2020年10月1日	国内
トレンチ調査による最近14000年間の雌阿寒岳の噴火史の再検討（ポスター発表）	佐藤鋭一・和田恵治・南裕介・石塚吉浩・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8日	国内
日光火山群三岳火山の完新世噴火活動（ポスター発表）	草野有紀・及川輝樹・石塚吉浩・山元孝広・中村洋一	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8日	国内
大規模噴火における斑晶量と前駆活動の推移（ポスター発表）	金田泰明・宝田晋治	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8日	国内
鳥海火山における約 2500 年前の山体崩壊を伴う噴火活動（ポスター発表）	大場司・林信太郎・近藤恵太・遠藤雅宏・原優人・河井光次郎・伴雅雄・井村匠・南裕介・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8日	国内
テフラ層序からみた5000年間の新潟焼山火山・妙高火山の噴火履歴（ポスター発表）	Faiz Wildan Mukhallad・石崎泰男	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8-10日	国内
長野県東部、志賀火山の形成史（2）（ポスター発表）	村上翔大・石崎泰男	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8-10日	国内
富士火山、大室スコリアの岩石学的研究（ポスター発表）	遠藤公喜・鈴木皐暉・石崎泰男・吉本充宏・馬場 章	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8-10日	国内
給源近傍層序からみた屈斜路火山 40 ka噴火（KpI）のカルデラ形成過程（ポスター発表）	柴田 翔平・長谷川健・渡部将太	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月8-10日	国内
富士火山北東麓に分布する最新期テフラの層序（口頭発表）	古屋海砂・吉本充宏・馬場 章・長谷川健	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
近年の西之島噴火における噴出物の特徴とその時系列変化（口頭発表）	前野深・安田 敦・外西奈津美・吉本充宏・金子隆之	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
空中ドローン磁気観測による西之島の磁化構造（ポスター発表）	多田訓子・市原寛・中野優・宇津木 充・小山崇夫・馬場聖至・高木朗充・前野深・武尾実	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内

感度法によるK-Ar年代測定結果を用いた白山火山の形成史の再検討（口頭発表）	藤原寛・山崎誠子・石崎泰男	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
トレンチ調査による最近14000年間の雌阿寒岳の噴火史の再検討（口頭発表）	佐藤鋭一・和田恵治・南裕介・石塚吉浩・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
北海道中央部、十勝岳火山群、ヌッカクシ火口域の活動履歴（口頭発表）	松本亜希子・中川光弘・小林卓也・石塚吉浩	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
北海道東部、アトサヌプリ火山の過去 2000 年間の噴火履歴－特に熊落とし火口の形成年代ついて－（口頭発表）	上野健太・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
秋田駒ヶ岳火山南部カルデラの形成史（口頭発表）	田次将太・中川光弘・和知 剛	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月9日	国内
斜長石斑晶組成・組織からさぐる蔵王火山のマグマ溜まり（口頭発表）	佐藤初洋・伴雅雄	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月10日	国内
蔵王山東麓濁川・遠刈田地域の過去8000年間のラハール堆積物（口頭発表）	川畠弘之介・伴雅雄・常松佳恵・片岡香子・井村匠	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月10日	国内
十勝岳・雌阿寒岳の苦鉄質噴出物の組織解析による噴出過程の検討（口頭発表）	藤丸航・和田恵治・佐藤鋭一	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月10日	国内
利尻火山における多様な玄武岩質初生マグマの成因（口頭発表）	谷内元・栗谷 豪・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月10日	国内
トレンチ調査による最近 14000 年間の雌阿寒岳の噴火史の再検討（口頭発表）	佐藤鋭一・和田恵治・南裕介・石塚吉浩・中川光弘	日本火山学会2020年秋季大会、名古屋、オンライン	2020年10月10日	国内
Unpredictable Hazardous Volcanic Activities in Japan, Indonesia, and Elsewhere（口頭発表）	Ohba, T.	5th International Conference of Geological Engineering Faculty Universitas Padjajaran	2020年11月16日	国際
青野山火山群の多様な地形と噴火様式（口頭発表）	岡澤大市・太田岳洋	日本応用地質学会中国四国支部令和2年度研究発表会	2020年11月30日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
--------------	-------	------------------	--------	--------

Shallow Magmatic Hydrothermal Eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama Volcano in Kirishima Volcano Group, Kyushu, Japan	Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T., Nagai, M., Funasaki, J	Geosciences, 10, 183	2020年5月14日	国外
田沢湖カルデラとその噴出物	鹿野和彦・大口健志・林信太郎・矢内桂三・石塚治・宮城磯治・石山大三	地質学雑誌, 126, 5, 233-249	2020年5月15日	国内
Simulations of tephra fall deposits from a bending eruption plume and the optimum model for particle release	Mannen, K., Hasenaka, T., Higuchi, A., Kiyosugi, K., Miyabuchi, Y	Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 125, e2019JB018902	2020年6月11日	国外
栃木県北部, 余笹川岩屑なだれ堆積物の層序・年代と運搬過程	菊地瑛彦・長谷川健	地質学雑誌, 126, 293-310	2020年6月15日	国内
支笏・洞爺・濁川・大山火山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移	金田泰明・後藤義瑛・西野佑紀・宝田晋治・下司信夫	地質調査総合センター研究資料集. no. 699, 1-79	2020年6月17日	国内
Distribution and Eruptive Volume of Aso-4 Pyroclastic Density Current and Tephra Fall Deposits, Japan: A M8 Super-Eruption.	Takarada, S., Hoshizumi, H.	Frontiers in Earth Science, 8:170. doi: 10.3389/feart.2020.00170	2020年6月23日	国外
大規模火砕噴火推移時系列データ集 その1	下司信夫・池上郁彦・西原 歩	地質調査総合センター研究資料集. no. 700, 1-60	2020年7月16日	国内
Constraints on the timing of explosive volcanism at Aso and Aira calderas (Japan) between 50 and 30 ka: New insights from the Lake Suigetsu sedimentary record (SG14 core)	McLean, D., Albert, P.G., Suzuki, T., Nakagawa, T., Kimura, J.-I., Chang, Q., Miyabuchi, Y., Manning, C.J., MacLeod, A., Blockley, S.P.E., Staff, R.A., Yamada, K., Kitaba, I., Yamasaki, A., Haraguchi, T., Kitagawa, J., SG14 Project Members, Smith, V.C.	Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21, e2019GC008874	2020年7月24日	国外

Temporal variations of petrological characteristics of Tangkil and Rajabasa volcanic rocks, Indonesia	Hasibuan, R.F., Ohba, T., Abdurrahman, M., Hoshide, T.	Indonesian Journal on Geoscience, 7(2)135–159	2020年8月1日	国外
北海道南西部, 羊蹄火山東麓に分布する緑色凝灰岩層のジルコン U-Pb 年代	上澤真平・伊藤久敏	地質学雑誌, 126, 589-595.	2020年10月1日	国内
Application of an inertia dependent flow friction model to snow avalanches: exploration of the model using ping-pong ball experiment	Tsunematsu, K., Maeno, F., Nishimura, K.	Geosciences, 10, 436	2020年11月5日	国外
Deep crustal crystallization of tholeiitic melt: Insights from Manguao Basalt, Palawan, Philippines	Cesar, J., Refran, A., Ohba, T., Arcilla, C.A., Hoshide, T., Ines, M., Balangue-Tarriela, R.	Journal of Mineralogical and Petrological Science advanced publication	2020年12月1日	国外
秋田県湯沢市, 川原毛地獄の爆裂火口と噴出物	鹿野和彦・大場司・石山大三	火山 (日本火山学会) 65 (4) 105 - 118	2020年12月1日	国内
Quantitative measurement of bubble textures in pumice clasts using a digital stereo microscope with low-angled ring illumination	Ohashi, M., Ichihara, M., Maeno, F., Kennedy, B., Gravley, D.	Earth Planets and Space, 72, 185	2020年12月1日	国外
Japan and the Korean Peninsula	Wallis, S.R., Maeno, F., Toda, S.	In: Encyclopedia of Geology (Second Edition), edited by D. Alderton and S.A. Elias, Academic Press, UK, vol. 4, pp. 526-543	2020年12月1日	国外
Repetitive duality of rhyolite compositions, timescales, and storage and extraction conditions for Pleistocene caldera-forming eruptions, Hokkaido, Japan	Pitcher, B.W., Gualda, G.A.R., Hasegawa, T.	Journal of Petrology, (印刷中)	2020年12月18日	国外
Disequilibrium phenocrystic assemblage within dacites reveals magma mixing and stratified chamber after crustal assimilation at El Hoyazo volcano, SE Spain.	Hiwatashi, H., Ban, M., Álvarez-Valero, A.M., Kriegsman, L., Sato, M.	Lithos, 380-381, 105849	2021年1月	国外

Evolution of the calc-alkaline magma feeding system of the Komakusadaira pyroclastics in Zao volcano, NE Japan	Takebe, M., Ban, M., Nishi, Y.	Bulletin of Volcanology, 83, 12	2021年2月7日	国外
Lithostratigraphy and geochemistry of Aojiki volcano and Sumiyoshiike and Yonemaru maars, Kamo Volcanic Field (Southern Kyushu), Japan	Nche, L.A, Hasegawa, T., Aka, F.T., Kobayashi, T., Nemeth, K., Asaah, A.N.E., Kaneda, Y., Nishihara, A., Etakah, B-T.E, Lebga, A.K., Tiabou, A.F., Ngwa, C.N., Suh, C.E.	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 412	2021年3月1日	国外
Amorphous silica coating on flank deposits of the 1783 A.D. eruption at Asama volcano	Nakatani, T., Sugaya, S., Yasui, M., Okumura, S., Nakamura, M.	Journal of Volcanology and Geothermal Research Vol.41	2021年3月	国外
阿蘇カルデラ西端，立野峡谷の地質と形成年代	渡辺一徳・本田圭一・原浩太郎・宮縁育夫	火山, 66(1), 21-34	2021年3月31日	国内
浅間前掛火山南麓広畑遺跡のDグループ軽石層と縄文中期編年	安井真也・堤隆・米田穰	明治大学黒耀石研究センター紀要「資源環境と人類」11	2021年3月	国内
Raman microspectroscopic study of refrence clay minerals and alteration minerals in volcanic ejecta from the 7 March 2012 phreatic eruption on Ioto Island (Iwo-jima), Izu-Bonin arc, Japan	Ikehata, K., Arakawa, Y., Ishibashi, J.	Vibration-Spectroscopy (in press)	2021年3月	国外
ヤチカンバ花粉の識別と北海道東部の西別湿原における6500年前以降の植生史	吉川昌伸・鈴木三男・佐藤雅俊・小林和貴・長谷川健・吉川純子・戸田博史	植生史研究, 39, 27-52	2021年3月	国内

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目 火山噴火の予測技術の開発「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」

機関名 防災科学技術研究所

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会名等)	発表した時期	国内・外の別
Laboratory Measurements of Damage Evolution in Dynamic Volcanic Environments: From Slow to Rapid Strain Events (ポスター)	Schaefer, L., Kennedy, B., Kendrick, J.E., Lavallée, Y. and Miwa, T.	U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, ARMA-2020-1876	2020年6月	国外
口永良部島火山2020年噴火降下火砕物の産状と分布 (ポスター)	長井雅史・中川正二郎・入山 宙・三輪学央・中田節也	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
Experimental validation of a two-layer model for pyroclastic density currents (ポスター)	Shimizu, H. A., Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J., Brosch, E., Lube, G.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
Numerical simulation of ballistic trajectories based on wind tunnel experiments(口頭)	Tsunematsu, K.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
Dynamics of ballistic projectiles based on Trashcano experiment (口頭)	Saruta S., Tsunematsu, K., Motoyama, I.,	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
Effects of equilibrium crystallization on conduit flow dynamics during the 1986 eruption at Izu-Oshima volcano (ポスター)	Kozono, T., Ishibashi, H., Okumura, S., and Miwa, T.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
Ash fall observation using 2D-Video Disdrometer (ポスター)	Sato, E. and Iguchi, M.	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
境界要素法に基づく火山周辺の気象庁傾斜計データの評価の検討(2) (ポスター)	川口亮平	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
連結する2つのマグマ溜まりにおける噴火中のマグマダイナミクス (ポスター)	小園誠史	日本火山学会秋季大会2020	2020年10月	国内
火砕物の移流拡散堆積過程の逆問題の数値構造とその応用に向けての考察(ポスター)	石井憲介・小屋口剛博	日本火山学会秋季大会2020	2020年10月	国内
faSavageHutterFOAMによる火砕流シミュレーション: 雲仙1991年噴火への適用(口頭)	志水宏行	日本火山学会秋季大会2020	2020年10月	国内
二次元ビデオディストロメーターによる降灰観測(初期解析結果) (口頭)	佐藤英一・瀧下恒星・井口正人	日本火山学会秋季大会2020	2020年10月	国内
境界要素法による火山周辺の地殻変動計算システムの開発 (ポスター)	川口亮平	日本火山学会秋季大会2020	2020年10月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Control of vent geometry on the fluid dynamics of volcanic plumes: Insights from numerical simulations (論文)	Suzuki, Y. J., Costa, A., and Koyaguchi, T.	Geophysical Research Letters	2020年4月	国外
A New Japan Volcanological Database (論文)	Fujita, E., Ueda, H. and Nakada, S.	Frontiers in Earth Science	2020年7月	国外
Application of an Inertia Dependent Flow Friction Model to Snow Avalanches: Exploration of the Model Using a Ping-Pong Ball Experiment. (論文)	Tsunematsu, K., Maeno, F., and Nishimura, K.	Geosciences 10, 436.	2020年10月	国外
Decompression experiments for sulfur-bearing hydrous rhyolite magma: Redox evolution during magma decompression(論文)	Okumura, S., Ishibashi, H., Itoh, S., Suzumura, A., Furukawa, Y., Miwa, T., and Kagi, H.	American Mineralogist 106(2) 216 - 225	2021年1月	国外
高粘性マグマによるマグマ水蒸気爆発の発生メカニズム: マグマ破壊・吸水モデルの提案 (論文)	奥村聡・三輪学央	火山 66(1) 35 - 43	2021年3月	国内
Physical and mechanical rock properties of a heterogeneous volcano: the case of Mount Unzen, Japan (論文)	Kendrick, J. E., Schaefer, L. N., Schaueroth, J., Bell, A. F., Lamb, O. D., Lamur, A., Miwa, T., Coats, R., Lavallée, Y., and Kennedy, B. M.	Solid Earth 12(3) 633 - 664	2021年3月	国外
Sedimentary system of ash deposits from long-term vulcanian activity at Sakurajima volcano, Japan (論文)	Miwa, T. and Nanayama, F.	The Journal of Geology	Accepted	国外

参考資料：その他実績

委託業務題目「サブテーマ2：噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成」

機関名 国立大学法人 北海道大学

1. マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果	対応者氏名	報道・掲載機関	発表時期	国際・国内の別
		(新聞名・TV名)		
西之島の噴火活動について	前野深	朝日新聞	2020年8月4日	国内
「安達太良山噴火120年でシンポ 福島、噴火の状況検証」取材・報道	伊藤順一	共同通信社	2020年9月12日	国内
火山総点検～金子貴俊と登る御嶽山 浅間山の防災 トレンチ調査 取材放映	安井真也	NHK長野「知るしん」	2020年9月25日	国内
浅間山の防災 トレンチ調査 取材放映	安井真也	NHKイブニング信州	2020年10月8日	国内
「日光火山群三岳の完新世噴火活動」の取材・報道	草野有紀・石塚吉浩	下野新聞社	2020年10月9日	国内
ブラタモリ「伊豆大島の火山～伊豆大島は世界に誇る火山愛ランド！？～」	川邊禎久	NHK	2020年10月10日及び10月17日	国内
蔵王山の成り立ちなどに関する情報提供	伴雅雄	世界の果てまで行ッてQ	2020年10月14日	国内
「火山総点検～金子貴俊と登る御嶽山～」再放送 浅間山の防災 トレンチ調査 取材放映	安井真也	NHKBS1 推し! 関東甲信越推し!知るしん	2020年11月1日	国内
浅間山の防災 トレンチ調査 取材放映	安井真也	NHK「おはよう日本」(関東首都圏)	2020年11月17日	国内
サイエンスZERO「阿蘇 知られざる“人と大地の絆”」取材協力	宮縁育夫	NHK	2021年1月17日	国内
日本人と災害 Part2 天明噴火 取材出演	安井真也	NHK歴史秘話ヒストリア	2021年2月3日	国内
山形における火山研究体制について情報提供	伴雅雄	NHK山形放送局	2021年3月26日	国内

2. 講演会等の普及活動

発表題目・活動内容	発表者氏名	講演会・展示名	開催時期	国際・国内の別
企画展「安達太良火山」	伊藤順一	磐梯山噴火記念館企画展、福島県北塩原村	2020年7月18日～11月8日	国内
蔵王山地質案内	伴雅雄	宮城蔵王ガイド協会勉強会	2020年9月13日	国内

国指定特別天然記念物の浅間山 熔岩樹型のトレンチ調査の現地 説明会講師	安井真也	国指定特別天然記念 物第1回浅間山熔岩 樹型トレンチ調査現 地説明会	2020年9月5日	国内
十勝岳は活火山！十勝岳につい てもっと知ろう！	佐藤鋭一	十勝岳防災学習教室 (小学校4年生対象)	2020年9月8日	国内
1900年の安達太良噴火	伊藤順一	シンポジウム「安達 太良噴火120年」福島 県立図書館	2020年9月12日	国内
国指定特別天然記念物の浅間山 熔岩樹型のトレンチ調査の現地 説明会講師	安井真也	国指定特別天然記念 物第2回浅間山熔岩樹 型トレンチ調査現地 説明会	2020年9月12日	国内
活火山十勝岳の噴火の歴史を探 る	佐藤鋭一	十勝岳ジオパークサ ポーター養成講座	2020年9月27日	国内
Phreatic and similar eruptions	大場司	バンドン工科大学オ ンライン公開講座	2020年10月13日	国際
体験教室「北秋田市の大地を 作った日本史上最大の噴火」	林信太郎	秋田大学秋田理系プ ロジェクト	2020年10月23日	国内
活火山十勝岳の噴火の歴史を探 る	佐藤鋭一	十勝岳防災学習教室 (中学校1年生対象)	2020年10月28日	国内
地球をぶらり2020	林信太郎	地学オリンピック日 本委員会	2020年11月15日	国内
海から見える伊豆大島	川邊禎久	「海から見る伊豆大 島」海ジオツアー造 成 伊豆大島ジオパー ク推進委員会	2020年11月18日	国内
蔵王山紹介（録画講義）	伴雅雄	蔵王山防災訓練	2020年11月24日	国内
令和2年度小諸市火山防災講演 会講師（リモート収録）コミュ ニティテレビこもろ放映および 小諸市YouTube	安井真也	令和2年度小諸市火山 防災講演会	2021年3月17,18日	国内
有珠火山の噴火史とマグマ変 遷：最新の研究成果からの知見	中川光弘	2000年有珠山噴火か ら20年 ―経験を未来 に生かす―	2021年3月28日	国内

3. 防災貢献

提出資料	対応者氏名	提供先	発表時期	国際・国 内の別
阿蘇火山中岳における2019年7 月～2020年4月の火山灰噴出量 および2019年7月～2020年4月 に阿蘇火山中岳から噴出した火 山灰構成物の時間変化（資料提 出、予知連内のみ公開）	熊本大学	第146回火山噴火予知 連絡会	2020年6月24日	国内

火山災害の基礎	林信太郎	十和田火山防災協議会	2020年12月2日	国内
西之島における近年の噴出物の化学組成変化（資料提出）	東大地震研	第147回火山噴火予知連絡会	2020年12月23日	国内