

火山噴火の予測技術の開発

【事業責任者】国立大学法人北海道大学大学院理学研究院 特任教授 中川 光弘

課題の概要

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火山噴火の予測技術を開発します。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います。

本課題は、C-1:「火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発」、C-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」、C-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つのサブテーマからなり、互いに密に連携しながら進めていきます(図1)。

各サブテーマの概要

C-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、国内の代表的な活火山を対象に、噴火の過程が記録されている噴火について、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噴出物の解析から明らかにするとともに、実際の噴火現象との対比を行います。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考して、火山噴出物から噴火事象分岐予測を行う基準を検討します。計画期間内に11火山について研究を行うとともに、C-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います。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役立てるため、分析・解析プラットホームを整備し、広く火山研究者や学生に開放するための利用環境を整えます。

C-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

本サブテーマでは、国内の活火山のうち、活動的であるとともに噴火した際の社会的影響が大きい火山を重点火山として選定し、主として地質学的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します。また特に重要な火山を最重点火山とし、ボーリング掘削やトレーンチ調査を集中的に実施して、より高精度に噴火履歴を解明します。そして、各対象火山について高精度のマグマ噴出量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、および分岐確率の入った噴火事象系統樹の作成を目指します。

C-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、数値シミュレーションにより事象分岐判断手法の開発を行います。本事業の7年目までは、個別の事象(例えは地下のマグマの移動など)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しました。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

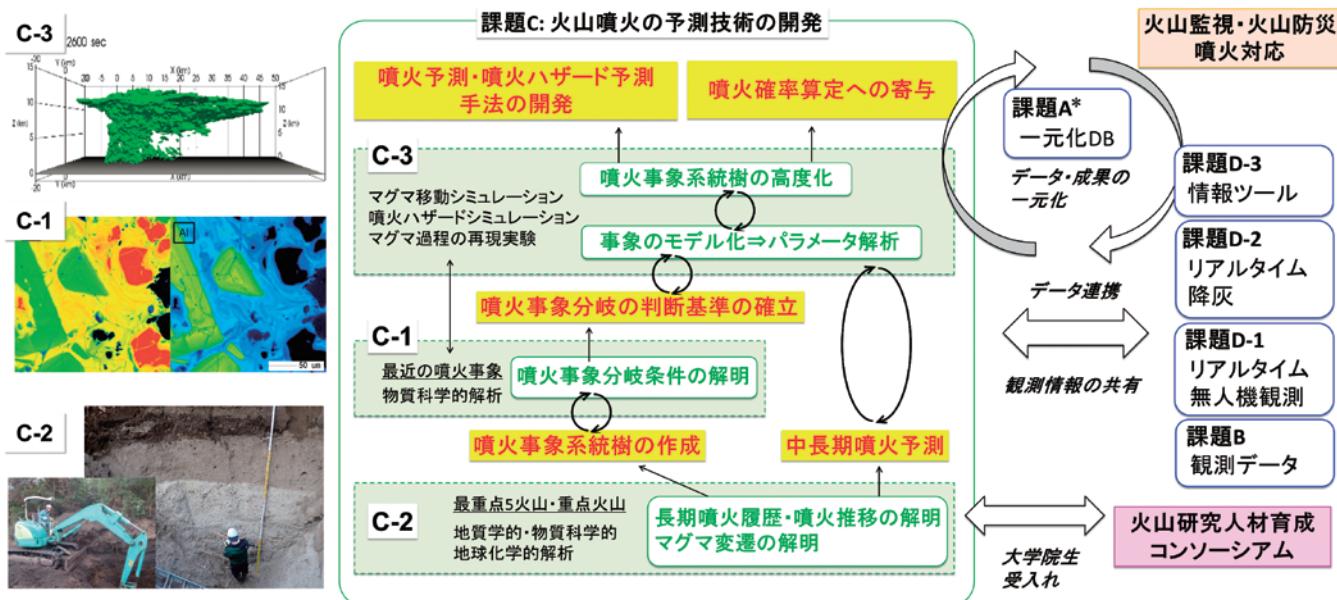


図1 課題Cの実施内容の相関関係と他課題・火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との関係

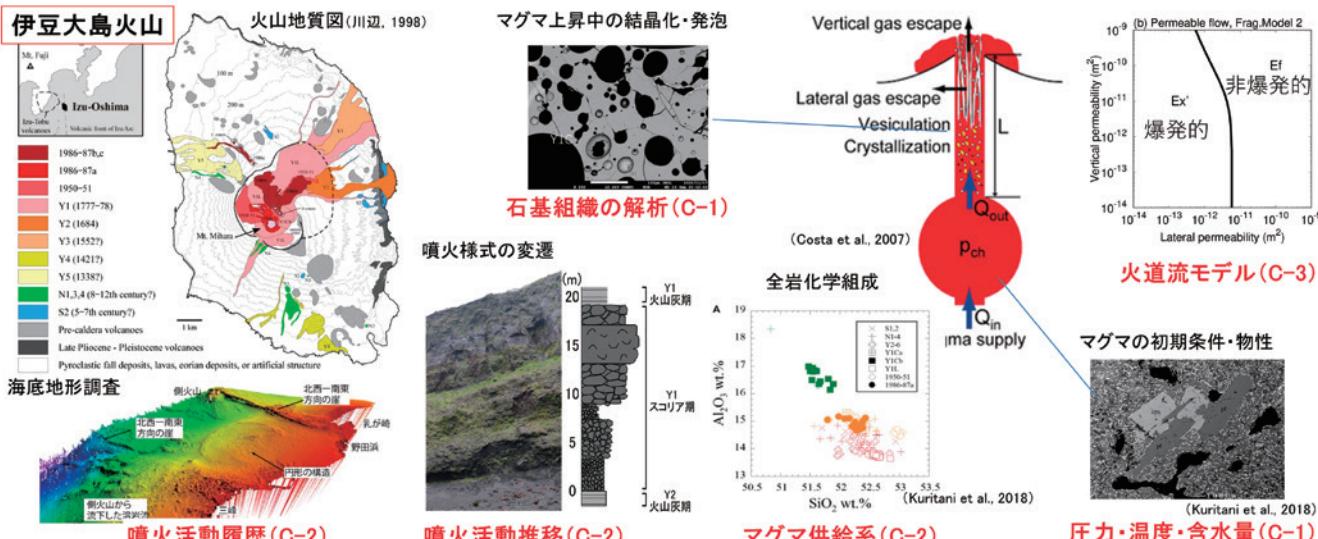


図2 課題C 内連携研究の概要

析を行いました。これには実験的手法による物性モデルの開発を併せて進め、その成果を数値シミュレーションに取り込み、高度化を図りました。本事業の8～10年目では、各事象の発生・分岐条件を踏まえた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します。また、多パターンの数値シミュレーションを実施し、それに基づき事象分岐確率を提示することを目指します。

課題内連携研究や他課題等との連携

課題Cでは、他課題との連携にも取り組んでいます。例えば、課題A*にはJVDNシステムのデータベースに様々なデータを提供します。課題Dとは、リアルタイムハザード予測に必要な観測情報について課題D-1との共有、メソスケールでの降灰予測技術について課題D-2との連携、ハザード情報の表現手法の取り扱いや噴火発生確率などについて課題D-3との連携、などを行っています。またC-3では特に国内外の他分野との連携・融合を重視しています。例えば計算科学分野から最新のアルゴリズムの知見を、さらに物性モデルや破壊過程などの知見を材料工学・物性物理学から導入します。一方、本課題は人材育成の場としても利用されます。特にC-1やC-2で行う地質調査や物質科学的解析は、地質・物質科学分野の大学院生の研究課題として適しています。その意味で「人材育成事業」において特に地質・物質分野の教育・訓練の大きな部分を、本課題が担うことになるでしょう。

また、令和元年度より課題内連携研究を開始しています。まずは玄武岩質マグマの噴火活動に焦点をあて、伊豆大島火山をターゲットにしています。C-2では伊豆大島の陸域から海域まで含めた調査を行うとともに、特に歴史時代の大規模噴火の活動推移を詳細に明らかにし、1986年噴火と比較検討します。その活動推移に従って採取された試料について、C-1で火山深部におけるマグマに関する情報とその時間変化につ

いて明らかにし、伊豆大島の噴火事象系統樹の分岐条件の検討を行います。そして、C-1から提供されるマグマ溜り深度や上昇速度の情報、C-2から提供される噴出量、噴出率、火口位置などの地質データは、C-3で実施される火道流数値モデルシミュレーションに活かされ、過去の噴火の再現、時間発展変動解析そして地殻変動計算を実施します（図2）。また課題内だけではなく、他の課題や外部の研究機関と深く連携しながら研究を発展させます。伊豆大島の連携研究では、課題Bの観測成果と物質科学的モデル、そして数値モデルシミュレーションの統合を図るために、令和4年度に研究集会と現地検討会を開催し、伊豆大島研究の現状と今後の課題について議論しました。このような連携研究は、霧島火山に代表される安山岩質マグマ噴火活動に関しても展開し、令和5年度より開始しました。

社会的意義

課題Cの目標である噴火予測技術は、火山の監視、防災対策、噴火対応等で必要とされ、広く社会で活用されることが期待されます。このうち主要な成果である各対象火山の「中長期噴火予測」および「噴火事象系統樹」は、気象庁や火山防災協議会での噴火シナリオの検討、避難計画などの防災対策、令和6年4月に設置された火山調査研究推進本部が行う火山活動の総合的な評価に不可欠な基礎資料となるはずです。また、地元住民を対象とした各火山の研究成果や中長期噴火予測についての普及講演を毎年行うことを計画しており、火山研究への理解と火山防災への意識の向上を図っていきます。さらに火山ハザード評価システムの実現は、噴火時の対応だけでなく、火山防災対策への活用も期待されます。

課題Cホームページ：<https://www.kadai-c.com/>

*課題Aは、令和6年度から火山調査研究推進本部に関する取組として移管されましたが、JVDNシステムは本プロジェクトのプラットフォームとして引き続き開発を行っています。

【分担責任者】国立大学法人東京大学地震研究所 教授 安田 敦

本課題では、「噴火事象」がどのような推移をたどるかを「予測」する手法の開発を目指し、火山噴出物の解析を実施しています。火山体の地下で何らかの異常が観測された際に、それが実際の火山噴火に到るのか、それとも噴火未遂で終わるのか。あるいは、噴火は穏やかな溶岩流噴火として開始するのか、それとも火砕物を広範囲に飛散させる爆発的噴火で始まるのか。噴火は短期で収束するのか、それとも長期間にわたって継続するのか。こうした判断をおこなうことが「噴火事象分岐予測」です。ひとたび噴火の発生を予想させるような事象が観測された際に、その後の噴火推移について様々な判断を迅速におこなえるように、物質科学的データを集めていつでも使えるように情報を整理することが、本課題の主旨です。

火山噴出物を解析して得られるデータは多種多様ですが、私たちは事業期間内に11座の火山についての最近の火山噴出物分析を通じて、噴火事象予測に重要と思われる要素を検討してきており、その結果、以下のようなことが明らかになってきました。まず、噴火が爆発的か非爆発的かを決める主要因はマグマの組成（とりわけ含水量）とマグマの温度、および、マグマの噴出量（流量）ということです。このうち、マグマの組成や温度は、過去の噴出物から将来を類推することができます。マグマの流量についても、過去の噴火事例、特にマグマ上昇速度などを集めるとともに火道形状などの個々の火山に固有な制約要素をある程度絞り込むことで、範囲の予想が可能になるでしょう。次に、噴火推移の推定には、噴火直前にマグマがどのような状態や場にあったかということが、非常に重要ということもわかつてきました。例えば、大規模な噴火が発生する前には、通常のマグマ溜まりよりも浅い場所にマグマの蓄積が起きていた事例が見つかっています。また、深部からのマグマの供給によって浅部マグマ溜まりが流動化して噴火発生に至った事例がいくつもの火山で確認されており、噴火前の浅部マグマ溜まりの状態、とりわけ温度と結晶量や深部マグマとの混合量の違いによって、噴火様式が変わることも明らかになってきました。これらの知見は、過去の噴火事例や噴出物を丹念に調べるとともに、リアルタイムで深部のマグマの状態を知ることが、噴火様式や噴火推移の予測には必要なことを示しています。

課題 C-1 では、過去の噴火噴出物からのこうした知見を活かす噴火事象分岐予測の枠組みの構築にも取り組んでいます。マグマ供給系で発生するさまざまな事象の発生場所やタイミングを過去の噴火事例をベースとした物質科学的研究か

ら予測し、それらをシミュレーション結果やリアルタイムの物理観測結果と照合することで、予測の評価や修正をおこなおうというものです。このような枠組みが推移予測において有効に機能するためには、噴火発生時には火山噴出物の特徴を素早く把握して、そのデータから予測に使われていたマグマの状態を修正した上で、あらためてシミュレーションや過去の事例との比較によって噴火事象分岐条件を再評価することが欠かせません。この目的のために開発された手法の一つに火山灰粒子色相分析法があります。これは、採取した火山灰の色味と明るさを計測することによって準リアルタイムで噴出物の特徴を把握しマグマ混合や火道の状態変化を推定するというもので(図1、図2)、手法の実用化が急がれています。

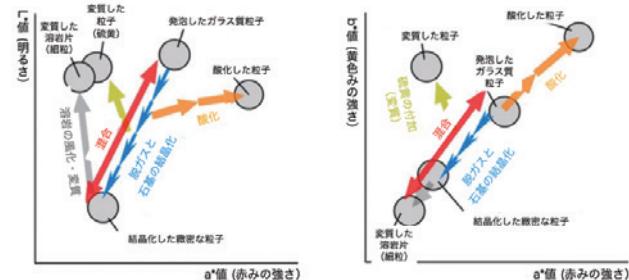


図1 火山灰粒子色相分析による火山灰粒子の特徴分類 (Shimano et al. (2024) を改変)

L, a, b^* による粒子分類は、それら粒子の生成プロセスを反映しており、それぞれの特徴を持つ粒子の多寡の変化を調べることでマグマ混合や火道の状態変化を捉えることができる。

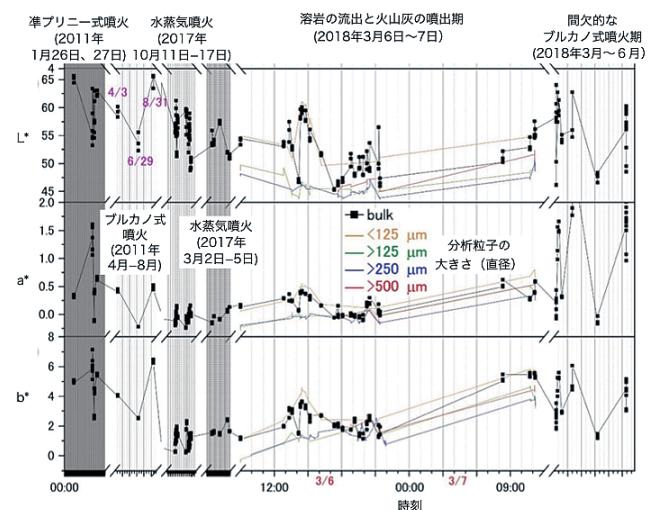


図2 新燃岳 2011年噴火と2017-2018年噴火における火山灰粒子色相の時系列変化 (Shimano et al. (2024) を改変)

火山灰粒子の色相変化 (Yamamoto et al., 2021) と致し、
火山灰粒子の色相変化が噴火様式の変化に対応していることが見
てとれる。

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

【分担責任者】国立大学法人北海道大学大学院理学研究院 教授 栗谷 豪

「火山噴火の予測技術の開発」を行うためには、噴火の準備過程から噴火の開始～終了までの種々の観測データが必要なことはもちろんですが、個々の火山の噴火履歴や個々の噴火の推移などの地質学的情報、そして過去の噴火における火山内部のプロセスを記録した物質科学的情報を得ることが重要です。これらのデータが得られると、噴火準備の場とプロセス、噴火様式の変化の要因、噴火終了に至った条件などが解明される可能性があります。このような事例研究を多数蓄積することにより、火山噴火予測技術が確立されると期待されます。

本サブテーマでの研究対象として、活動的であること、噴火した際の社会的影響が大きいこと等を考慮し 26 の重点火山を、さらにボーリングやトレーンチ調査を集中的に実施する最重点火山として、摩周・雌阿寒・鳥海山・伊豆大島・阿蘇山の 5 火山を選定しました。これらの火山の他に、2018 年の本白根噴火のようなノーマークの噴火を防ぐために、活動的ではないと考えられている火山や活動域も研究対象としました。本サブテーマでは時間と手間のかかる地質調査や噴出物の物質科学的解析を基盤とするため、多くの機関からの専門家を結集しています。また、高度な物質科学的解析を行う場として「マグマ変遷解析センター」を北海道大学に設け、参加機関の研究者・大学院生に開放し、高精度かつ多種類のデータの蓄積を図ってきました(図 1)。

各対象火山においては、主として地質学的・物質科学的手法

に基づいて、個々の火山における高精度な噴火履歴の解明、個々の噴火における噴火推移の復元を行ってきました。地質調査においては、従来の地表踏査に加え、人力・重機によるトレーンチ掘削調査やボーリング掘削調査を重視しました。それらの結果を踏まえ、個々の噴火において時系列で採取された噴出物を対象に物質科学的解析を行うことで、各噴火ステージのマグマプロセスと長期のマグマ変遷を解明してきました。そして、これらの手法を用いて研究対象の各火山について、過去数万年間あるいはそれ以上の時間軸でマグマ噴出量階段図を作成し、それに対応したマグマ変遷の情報も完備させてきました。これらの情報をもとに中長期噴火予測手法を開発し、噴火活動の中長期予測を作成・公表するとともに、活動履歴をもとにした噴火事象系統樹を整備してきました。さらに火山毎の噴火の特徴やその共通点を明らかにして、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、マグマ物性(組成、斑晶量、温度)などを、特に C1 や C3 課題に提供し連携研究を展開してきました。

本サブテーマは多数の火山を研究対象とするために、研究成果を火山の地元に還元することが重要になります。本研究で期待される成果を地元の自治体、火山防災協議会、そして住民と共有し、それらが長期のインフラ整備計画、火山防災および住民教育に活用されることを最終的な目標としています。



図1 課題C-2 の対象火山と主な取り組み事例

シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発

【分担責任者】国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山防災研究部門長 藤田 英輔

本サブテーマでは、火山活動や火山災害の予測の評価のために「噴火事象系統樹」を作成します。これは、火山活動が平常な状態から、活発化が認められ、噴火に至る過程において、その切迫性、噴火様式、可能性のあるハザードの種別、我々の生活や社会活動に与える危険性など、多くの可能性を体系化してツリー状に示したものです。活動の今後の推移には複数の可能性がありますが、そのいずれの分岐に向かうのかを判断し、火山の状況を把握できれば対策をとることが可能となります。この分岐判断の基準をシミュレーションにより検討します。

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し、その現象は、溶岩流、火碎流、噴煙・降灰、噴石など多岐にわたります。また、噴火予知のために地下におけるマグマの動きを把握することも重要です。このような複雑な現象のメカニズムを明らかにし、火山災害の発生を予測するため、火山観測データや実験データから得られる情報と理論を踏まえ、より高度で精度の高いモデルをつくり、数値シミュレーションを行い予測につなげていきます。

本サブテーマでは、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、および、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・高度化を実施します。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します。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することにより、数値モデルを高度化します。2) では噴火発生時における溶岩流・降灰・噴煙・火碎流・噴石などの多様な火山現象に対してまとめて評価ができるように整理し、噴火ハザードを高精度で評価可能なシステムを作成します。特に降灰については、3次元噴煙シミュレーションの数値計算結果(図1)を降灰モデルの初期条件として利用することにより、降灰シミュレーションの高度化を実施しています。さらに、降灰シミュレーションと脆弱性データベース(課題D3より提供)の融合によるリスクの定量評価にまで踏み込んだ取り組みを実施しており、防災対策への活用が期待されます。1) と2) の成果により、火山活動から火山災害発生までの事象系統樹の分岐を評価するパラメータを与えることを目指しています。

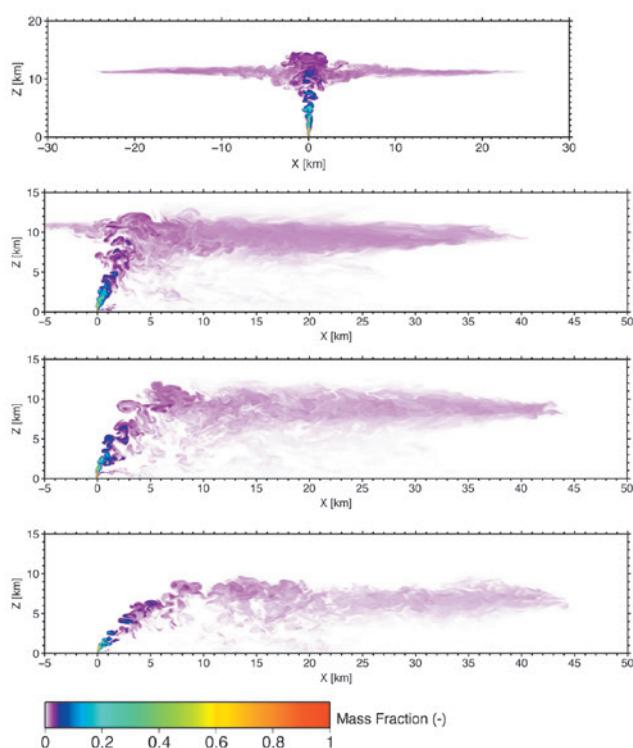


図1 富士山1707年宝永噴火に相当する噴火規模の数値シミュレーション結果。上から風速が0、10、20、30 m/sと変えた場合について、(左列) 噴煙濃度分布と(右列) 火山灰粒子分布を示す。右列の色の違いは火山灰粒子の粒径を表す。