

# C

## 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した。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した。

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した（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した。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を行う基準を検討しました。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した。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を整えました。

#### 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した。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した。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した。

#### 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した。本事業の7年目までは、個別の事象（例えば地下のマグマの移動など）についてのモデル

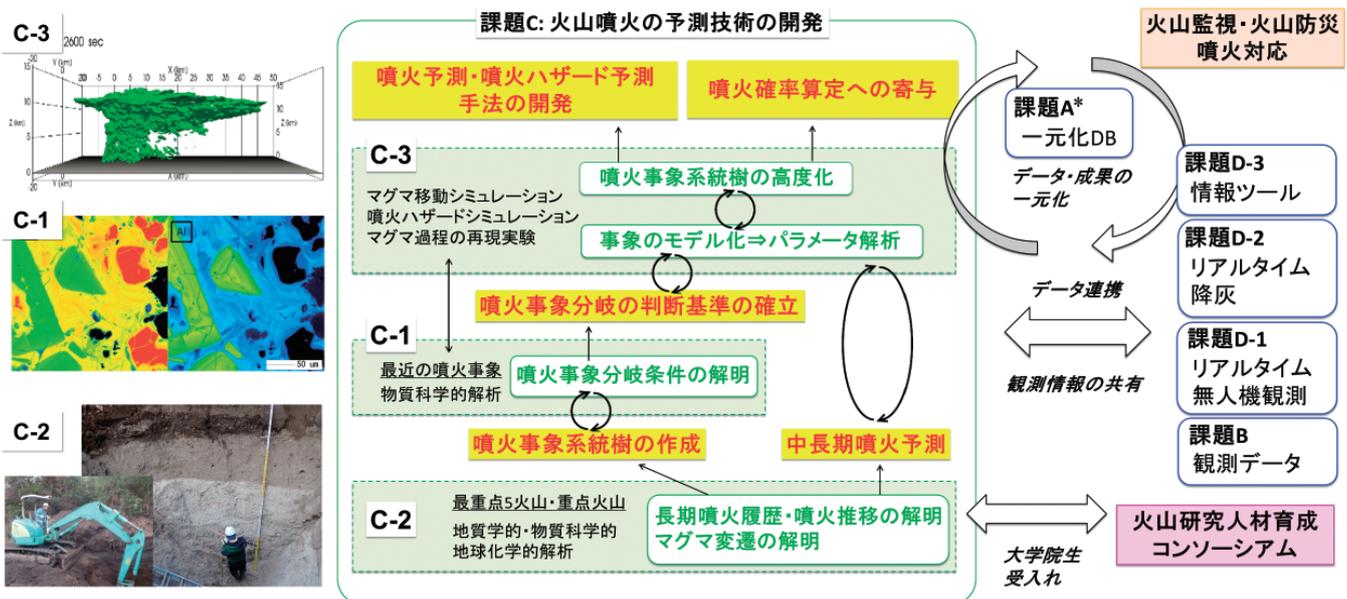


図1 課題Cの実施内容の相関関係と他課題・火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との関係

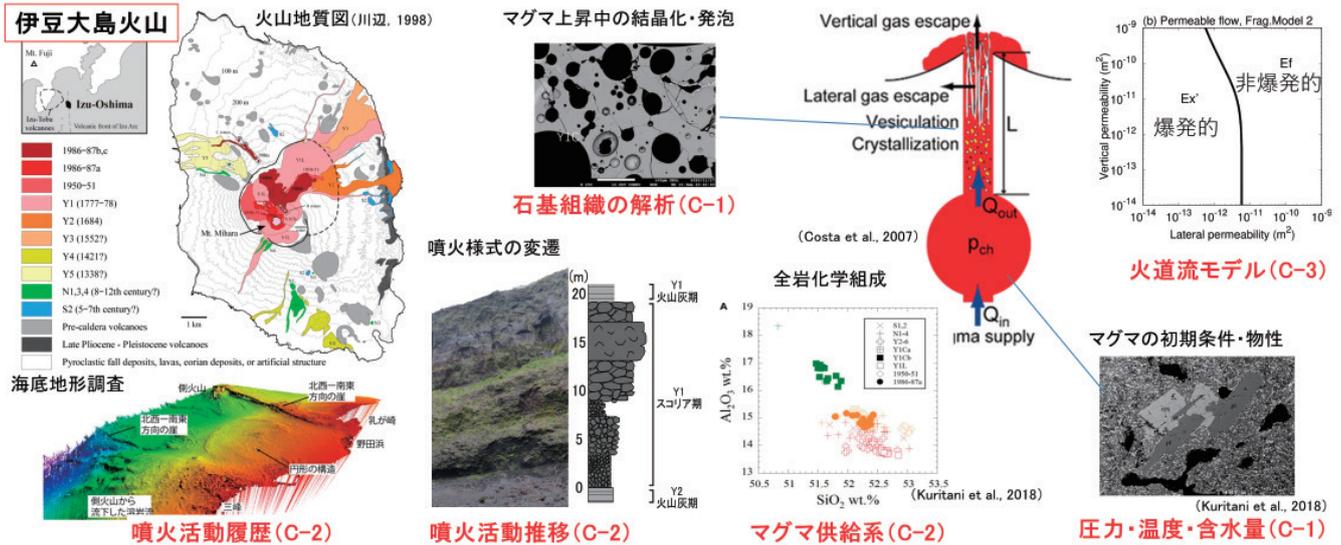


図2 課題C内連携研究の概要

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した。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した。

### 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みました。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した。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、などを行っていました。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した。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した。一方、本課題は人材育成の場としても利用されました。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」における特に地質・物質分野の教育・訓練の大きな部分を、本課題が担ってきました。

また、課題内だけではなく他課題と連携することを目的とし、伊豆大島火山と霧島火山を対象として連携研究を企画しました。連携研究では、各火山においてこれまでの研究成果を基に構築されたマグマ供給系モデルと噴火事象系統樹(噴火シナリオ)をたたき台とし、次の噴火を念頭に議論を進め

ました。その際、静穏期・Unrest期・噴火開始期という3つのステージを想定し、それぞれについて以下の論点を検討しました。

- ・静穏期：記録や地質調査によって得られる過去の噴火様式や推移は、将来予測に有効か。
- ・Unrest期：観測や地球化学データの蓄積を踏まえ、どのように噴火シナリオを修正できるか。
- ・噴火開始期：現行の体制で、迅速にマグマ供給系を把握し、予測を更新できるか。

そして、令和4年度には伊豆大島、6年度には霧島で研究集会と現地検討会を実施し、上記の論点で活発な議論が行われ、現時点での研究の到達点と今後の課題が明確化されました。これにより、マグマ供給系モデルと噴火事象系統樹の精緻化が進み、次の噴火への備えにつながることを期待されます。

### 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。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。

## 火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発

【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」の予測をどうやって実現するかについて、物質科学の観点から検討しました。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、噴火の発生、噴火様式と規模、噴火の推移について様々な判断を迅速に行えるように、物質科学的データを集め、それらの指し示す事柄を読み出し、情報を整理・統合して、噴火予測につなげられるようにすることが本課題の目的です。

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、噴火の様式（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）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ってきました。例えば、大規模噴火の発生前には、通常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かの火山で確認されています。噴火前の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、リアルタイムでマグマの状態や位置を知ることが、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。

したがって、噴出物から迅速に情報を読み出す体制の確立も重要です。EPMA による噴出物分析の自動化と熱力学計算環境を整備によって、噴火発生時に遅滞なくマグマ供給系の情報を得られるようになりました。また、データベースを整備して過去の分析・解析の成果に素早く参照できる体制も整いつつあります。噴火発生時に噴出物の特徴を素早く分析しマグマの状態や噴火活動推移を把握するための火山灰粒子色相分析法も開発されました。

「予測」を行うためにはモデル化は欠かせません。上で述べたような噴火を特徴づける様々な要素を盛り込んだ物理モデル（図 1）を使って、どのような状態の際にはどのよう

な現象が追従するのかを計算から予測します。ただし、火山噴火は破壊を伴う現象ですから、確定的予測を行うことは困難です。それをふまえた上で、様々な不確定値について値を振ったシミュレーションを行い噴火の確率を計算するというアンサンブル予測という方法が最も予測の実現に適していると考えました。加えて、火山噴火は前駆活動から噴火発生までの間に様々な観測事象を得られるので、それらをリアルタイムに参照しながらプレアナリシスで予測された確率を時々刻々と修正していくという方法を提案するに至りました（図 2）。

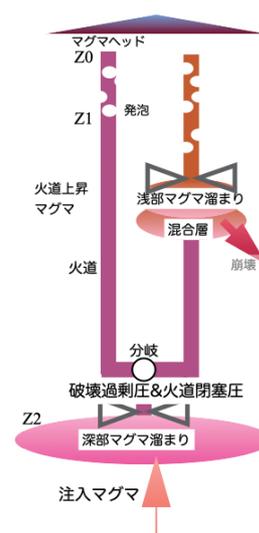


図 1 モデルの概略

マグマの注入や分化による密度変化によってマグマ溜まりの過剰圧が閾値をこえるとマグマの移動が起き、火道閉塞圧とのバランスによって噴火に到ったり途中で停止したりする。プロジェクトで得た噴火に影響する要素を入力に組み込んで時間発展計算を行い、さらに入力値を振った多数の計算を行い、それらのアンサンブル平均を使って現象発生率の確率を計算する。

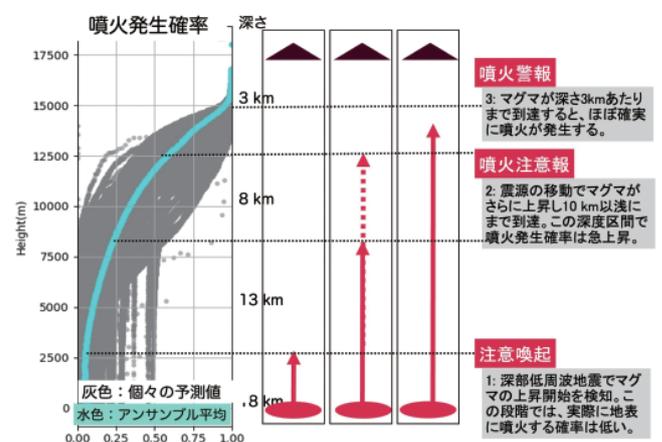


図 2 計算結果の応用例

マグマヘッドがある深度まで上昇した際に、最終的に噴火に至るかどうかを確率の形で表現した例。マグマが上昇するにつれ噴火に至る確率が急速に高まる。マグマヘッドの動きを観測で捉えることによって、注意報や警報の発令にもつながれる可能性がある。

# 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 C-1 や C-3 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戻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の分岐判断の指標の作成に取り組んでまいりました。観測量から物理モデルを介在し、いろいろな要素を予測することになります。火山活動評価では、地震活動度やガスなど観測量に対し、火道流モデル、岩脈貫入モデル、地殻変動モデルを支配するパラメータで再現性を定量化し、噴火・噴火未遂などの予測につなげます。火山ハザード評価では、観測量に対し、降灰・噴煙柱モデルなどのハザードモデルを介して、ハザードの時空間情報を予測し、対策につなげる情報を提供します。活動の今後の推移には複数の可能性があります、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。

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、火砕流、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、予測につなげる技術開発を実施しました。

1) 地下におけるマグマ移動シミュレーションでは、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した。火道流モデルでは火道の形状や浅部におけるプラグの形成も含めてモデル化し、これらから期待される物理観測量を提示しました。岩脈貫入シミュレーションでは噴火・噴火未遂の分岐の判断指標が提供できました。2) 噴火ハザードシミュレーションの開発・高度化では噴火発生時における溶岩流・降灰・噴煙・火砕流・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した。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ました。さらに、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、防災対策への活用へ発展できる情報を提供しています。

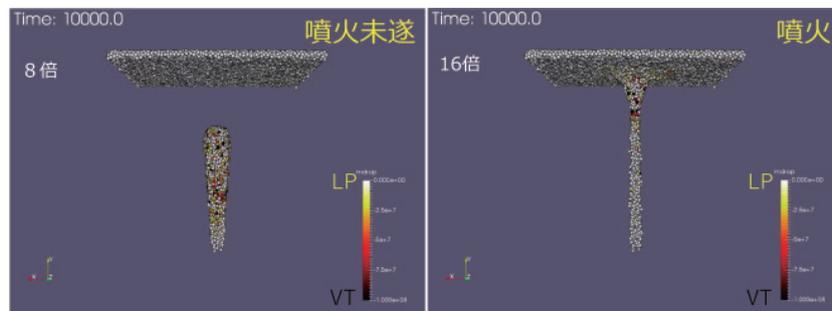


図1 岩脈貫入シミュレーションの例。噴火未遂では低周波地震がある一定の深さで継続的に起こるが、噴火に至る場合は火山性地震が浅いところに移動して発生する。

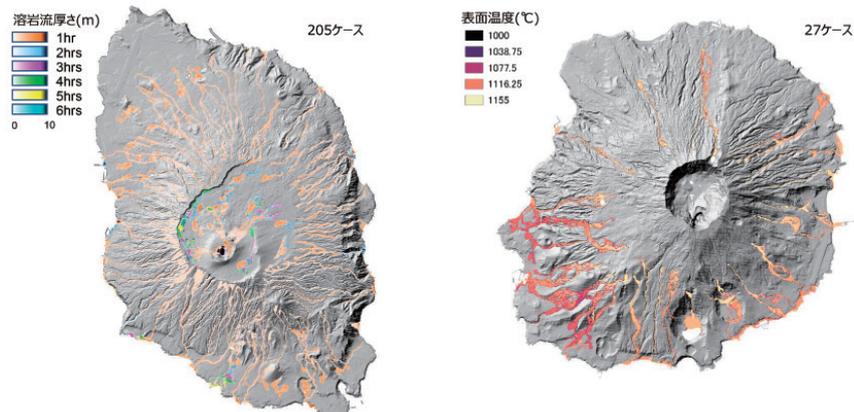


図2 溶岩流シミュレーションの事例。伊豆大島(左)・三宅島(右)の高精度(5mメッシュ)シミュレーションにより、溶岩流の厚さ、表面温度を表現。GISで利用できるデータとして提供。