

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	藤田英輔
		主任研究員	三輪学央
		契約研究員	黒川愛香
		契約研究員	長井雅史
		契約研究員	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	西村太志
		准教授	小園誠史
		准教授	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	鈴木雄治郎
		准教授	前野 深
気象庁気象研究所火山研究部	協力機関	室長	鬼澤真也
		主任研究官	川口亮平
		室長	新堀敏基
		主任研究官	佐藤英一
		研究官	石井憲介
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
山梨県富士山科学研究所	協力機関	主任研究員	石峯康浩

(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:

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イ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イクスモデル検討・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（令和元年度）：
- 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イクスモデル検討・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3年度における成果の目標及び業務の方法

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。

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、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。

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。

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。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。

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。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。

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となる緊急観測の実施あるいは緊急観測への協力を代えて実施することを可能とする。

(2) 令和3年度の成果

(a) 業務の要約

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、桜島で発生するブルカノ式噴火前の準備過程に関する火道流の解析に基づき、噴火開始検知に関連する地殻変動の特徴を評価した。また、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年サブプリニー式噴火が発生し得る火道形状条件を火道流解析により明らかにした。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と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、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基づく、桜島などで発生するブルカノ式噴火前の準備過程に関する解析、課題C内の連携テーマとして設定されている伊豆大島における1986年サブプリニー式噴火を対象とした火道流解析を実施した。以下ではその業務の成果について詳細を説明する。

桜島で発生するブルカノ式噴火前の準備過程においては、火口直下に固体プラグが形成されていることが、ミュオン観測や測地学的・地震学的観測によって示されている。これまでの殆どの火道流モデルでは、火道内の流れを全て粘性流体として仮定していたが、セントヘレンズ火山2004年噴火における溶岩岩尖の成長をモデル化するために、火道内で粘性流体から固体プラグに遷移するようなモデルが提案されている¹⁾。本研究ではこのモデルの定式化を参照して固体プラグを考慮した1次元火道流モデルを構築し、噴火の準備過程における火道流の時間発展変動を再現することを試みた。また、その変動が山体変形に与える影響を弾性変形モデルによって計算し、噴火の準備過程における地殻変動の特徴を明らかにすることを目的とした。

解析においては、まず定常火道流におけるマグマ溜まり圧力 p_{ch} とマグマ流量 Q の関係を調べた。その結果、 p_{ch} と Q の間に正の相関があり ($dp_{ch}/dQ > 0$) 火道流が安定

となる領域が低流量、高流量側に存在し、その中間領域で $dp_{ch}/dQ < 0$ となり火道流が不安定になる特徴が見られた (図1)。また、本研究では、上昇速度を粘性流体の速度と固体プラグの摩擦運動による速度の和として表現し、摩擦速度が粘性流体速度より大きくなった場合に粘性流から固体プラグへの遷移が生じると仮定した。その結果、低流量側の安定な火道流では火道浅部にプラグが形成されている一方で、高流量側ではプラグが消滅していることがわかった (図1)。

次に、図1で示された低・高流量側の火道流間で生じる遷移過程を時間発展火道流モデルによって調べた。その結果、浅部に固体プラグが存在する低流量側の火道流から、マグマ流量の急増に伴い高流量側の火道流に遷移する間に、プラグ厚さが徐々に薄くなり、最後に消滅する特徴が見られた (図2)。これを噴火前の準備過程から噴火開始までの遷移過程として見なすことができる。またその遷移中には、マグマ溜まりの過剰圧は、増加した後減少に転じている一方で、火道内の過剰圧最大値は、加速的に増加を続けていることがわかった (図2)。

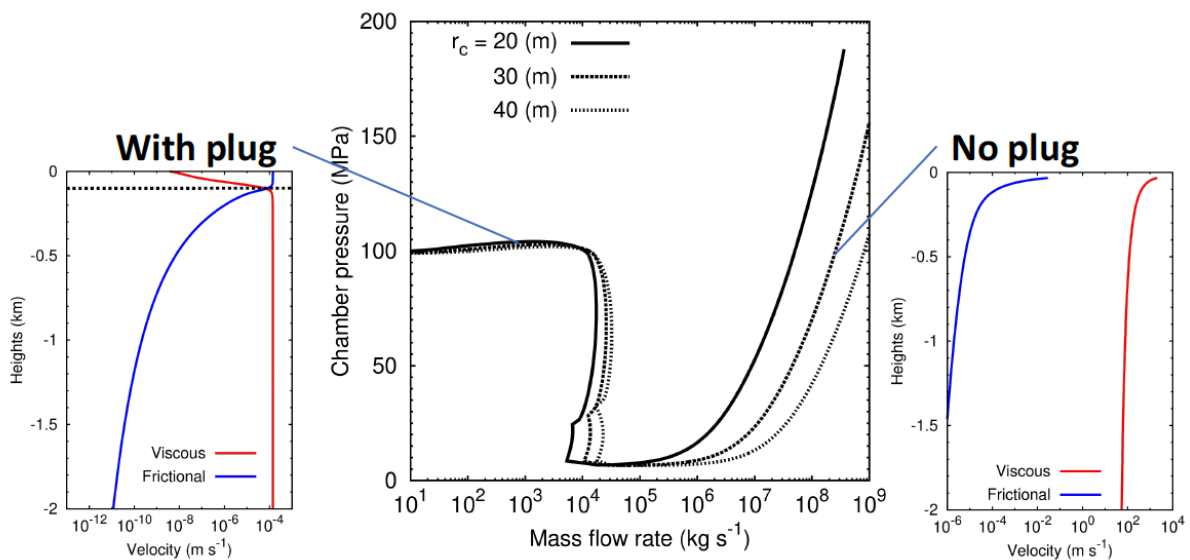


図1 定常火道流におけるマグマ溜まり圧力 p_{ch} とマグマ流量 Q の関係と、低・高流量側の $dp_{ch}/dQ > 0$ の領域における火道流内の速度分布 (赤: 粘性流体速度、青: 固体プラグの摩擦運動速度)。

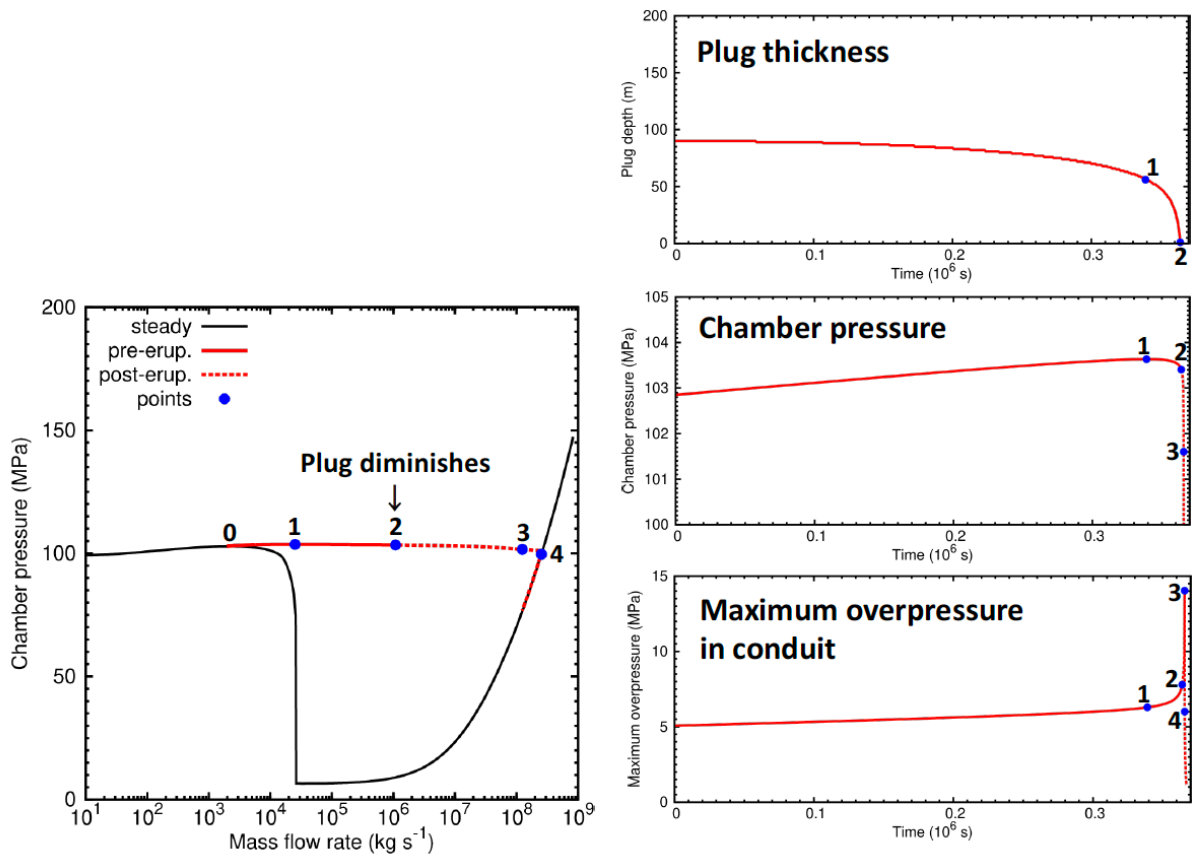


図2 低流量側から高流量側への火道流の遷移過程（左）における、プラグ厚さ、マグマ溜まり圧力、火道内マグマ過剰圧最大値の時間変化（右）。

さらに、図2の火道流の時間発展によって生じる火道及びマグマ溜まり内の圧力変化と火道壁に働く剪断応力変化がもたらす山体変化を二次元軸対称の有限要素法によって調べた。図3には、火口からの距離1、2、3 kmにおける傾斜と火口直交方向歪の時間変化を示しており、長い時間スケールで広域的な膨張が見られる一方で、プラグ消滅直前において、加速的な膨張が火口近傍のみにおいて局所的に生じていることがわかった。また、火道における圧力変化と剪断応力変化の効果は、マグマ溜まりの圧力変化の効果の5割程度で地殻変動量に寄与しており、特にプラグ消滅直前の加速的な膨張については剪断応力変化の効果が顕著であることが明らかになった。

以上の結果を踏まえて、2020年6月に桜島のブルカノ式噴火前後に発生した顕著な地殻変動の観測データ²⁾（図4左）との予察的な比較を行った。南岳火口と有村、ハルタ山、高免観測点の距離を考慮して、本研究のモデルによって傾斜と歪の変化を計算したところ、線形的な膨張や、観測項目間の相対的な関係、3-4.5 kmの観測点距離では噴火前の加速的な膨張が捉えられないなどの、いくつかの共通した特徴が見られることがわかった（図4右）。今後、地殻変動の量と時間スケールについて系統的な比較を行っていく予定である。

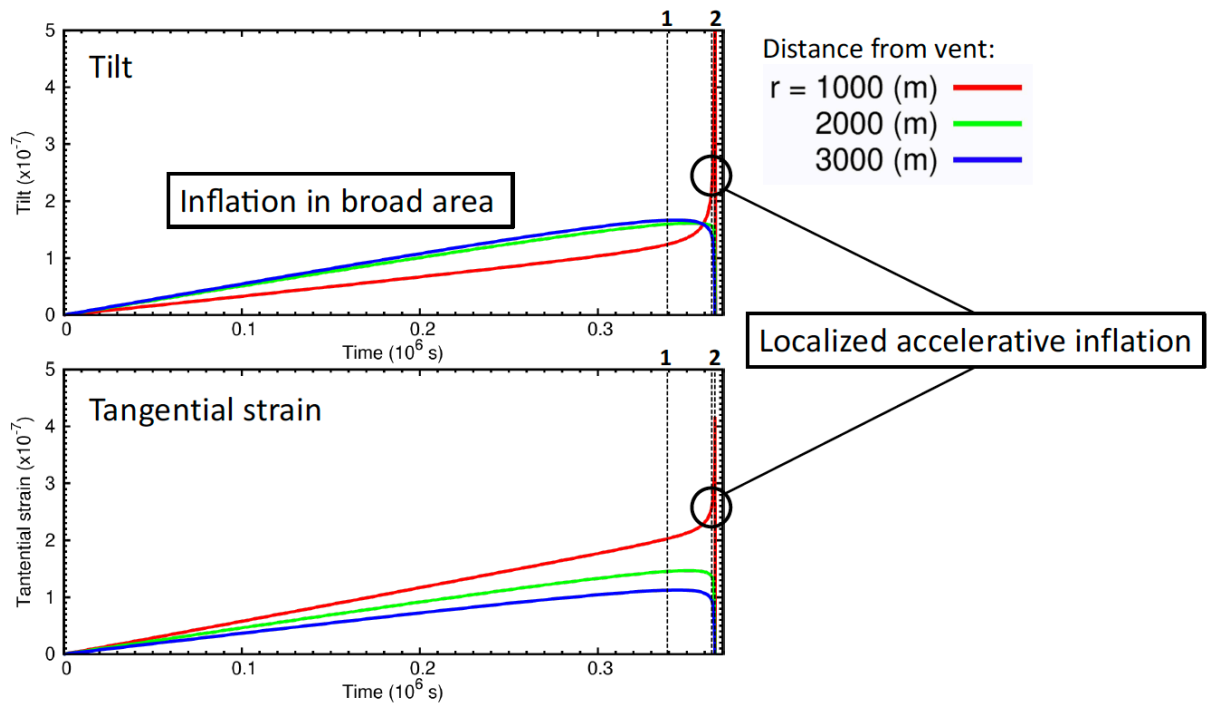


図3 火道流の時間発展(図2)によって生じる火口からの距離1、2、3 kmにおける傾斜(上)及び火口直交方向歪(下)。

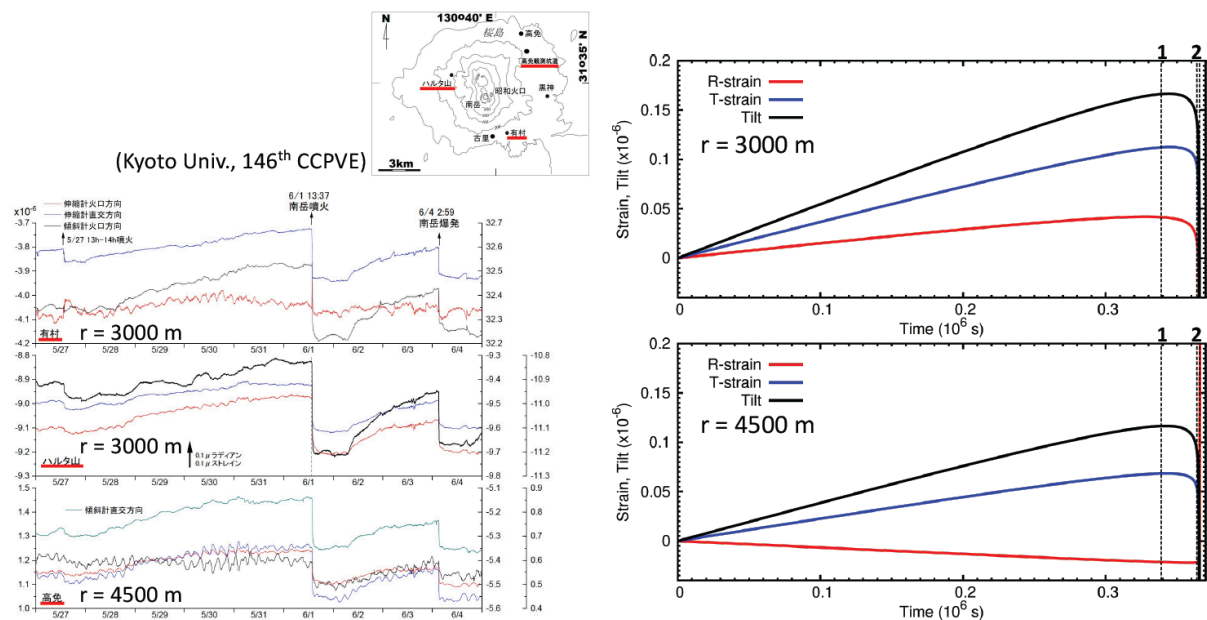


図4 2020年6月に桜島のブルカノ式噴火前後に発生した地殻変動²⁾と、モデル計算による再現(右)。

次に、課題C内の連携テーマとして設定されている伊豆大島を対象とした火道流解析の結果について報告する。本年度は、連続的なマグマ噴出を伴い、物質科学的・地球物理学的観測データが多く収集されている1986年サブプリニー式噴火についての

詳細な解析を実施した。火道流モデルについては、昨年度までに開発した、熱力学的結晶作用シミュレーションに基づくマグマ上昇中の結晶量やマグマ粘性の変化の設定、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弾性変形する火道の設定（図5左）を考慮した一次元定常火道流モデルを使用した。

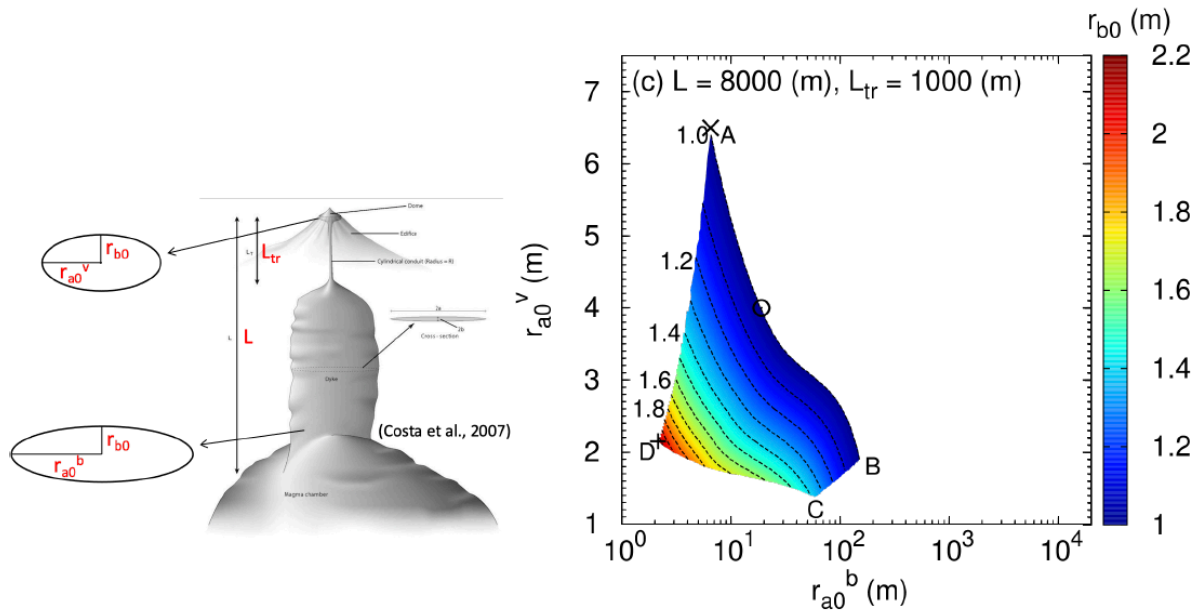


図5 火道形状の設定の概念図（左）及び1986年伊豆大島サブプリニー式噴火に相当する火道流の定常解が存在する火道形状の条件（右）。

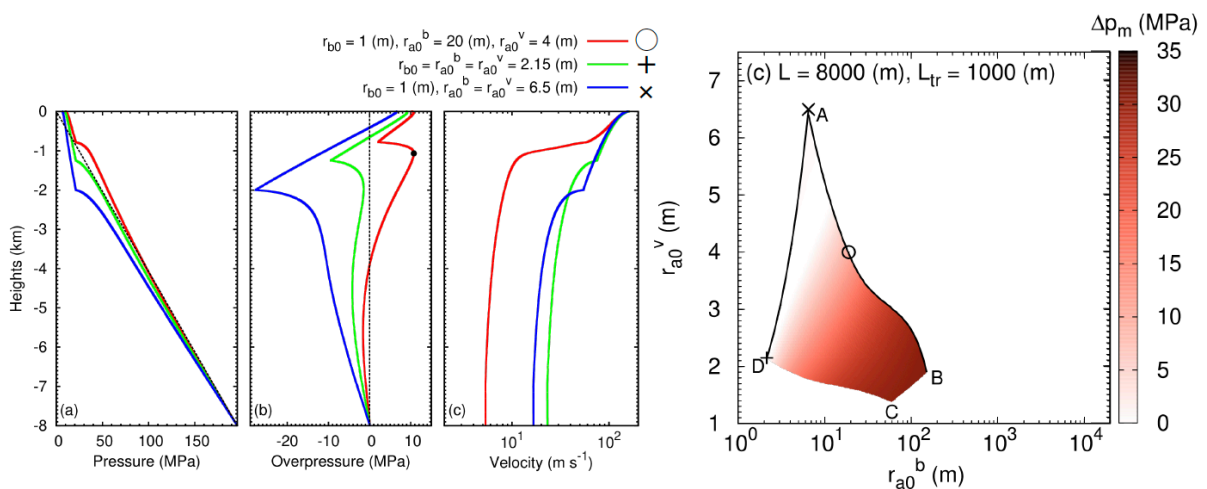


図6（左）図5の代表点に相当する定常解における火道内の圧力、過剰圧、上昇速度の分布。（右）図5で示された火道形状のパラメータ領域における、各火道流内の過剰圧最大値。

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、マグマの流れ、隣接する岩石の弾性変形、冷却によるマグマの温度と粘性率の変化、マグマ先端部の破壊が複合する複雑な現象であり、これらの過程を統合して貫入過程を解析する方法は、貫入過程のシミュレーションを実行する計算プログラムとともに、昨年度までの作業で開発を進めた。しかし、この解析手法には地表に到達したマグマが噴出する噴火現象は含まれていなかった。噴火現象はマグマの貫入過程を解析する上で重要な最終目的であるが、現行の解析手法では、マグマ先端の破壊速度を高精度に見積もるために割れ目の理論解の重ね合わせを基礎に組み上げられている。しかし、マグマが地表に到達すると割れ目の先端は解消し、計算手法の基盤が失われ、現行の手法に噴火現象を組み込むために解析方法の抜本的な改訂が必要になる。今年度は現行の貫入過程の解析手法に噴火現象を組み込む方法を見出すことを目的に2つの課題において検討を行った。

これまで開発したプログラムから下記機能を追加して、噴出過程の計算を可能にした。

- (1) 上昇過程の最終状態を受け取って噴出過程の計算を始める。
- (2) 地表を割れ目の上端としてマグマの状態や流れを計算する。
- (3) 地表まで広がる割れ目によって岩石内部に生ずる弾性変形を計算する。
- (4) 地表からの噴出流量を計算する。
- (5) マグマの噴出やそれを支える地下の流れを出力する。

計算結果の例を図7に示す。ここで t は時間、 h は割れ目先端の高さ、 c は割れ目の拡大速度、 A はマグマ上昇流の比例定数、 ϕ はマグマに含まれる気体成分の体積の割合である。計算結果によると割れ目の拡大は最初ゆっくりと始まる。マグマの流速に比例する変数 A がほぼ一定の状態を保って割れ目をゆっくりと拡大させる。割れ目は一度拡大を始めると先端が加速しながら一挙に地表まで進展する。この時期になると A も次第に増加する。マグマが発泡して内部に気体成分が生じるのは、割れ目の先端がかなり地表に近づいてからである。この段階にはマグマ先端は気体成分がかなり大きな体積をもつ噴霧流になっており、噴出過程で噴出するのも噴霧流である。噴出の直前には割れ目先端の破壊機構は腐食破壊から脆性破壊に移行している。

図8は割れ目の幅の分布の時間変化である。上昇の初期には、割れ目は先端部にゆったりとした応力集中をつくるが、上昇の加速が始まると先端部の形状は険しくなり、割れ目は先端部がほぼ同じような形状を保ちながら加速的に進展して地表に達する。

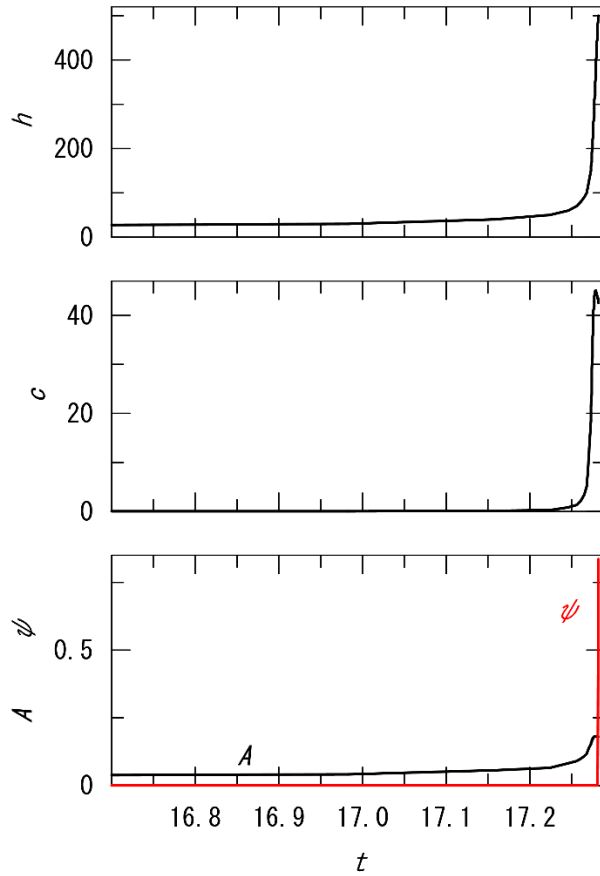


図7 マグマ上昇過程の計算結果。割れ目の先端の高さ h 、先端の拡大速度 c 、マグマの流速に比例する A 、気相がしめる体積の割合 ψ が時間 t とともにどう変わるかを示す。この最終状態が噴出過程の計算の初期条件となる。

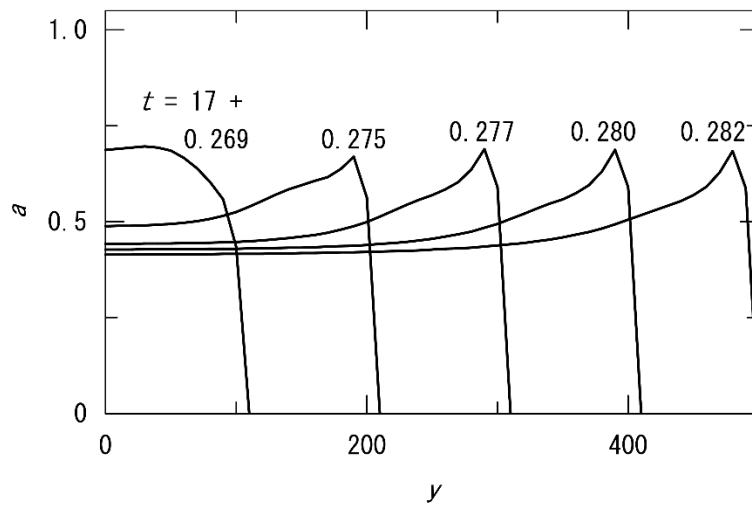


図8 割れ目の幅 a の分布。分布の生ずる時間 t を数値で示す。 y は鉛直上向きにとった座標である。

割れ目の先端が地表に達してからマグマがどう噴出するのか、試行で開発されたプログラムを用いてシミュレーションを実行した。その計算結果を図9に示す。この図で Q は割れ目の水平方向の単位長さあたりに単位時間に噴出するマグマの質量である。割れ目の状態は最上部（地表に接する部分）と最下部（マグマだまりとの接続部）の幅 a で示す。時間 t は割れ目が地表に到達した時間（ $t = 17.282$ ）を基準に、それ以降に経過した時間である。

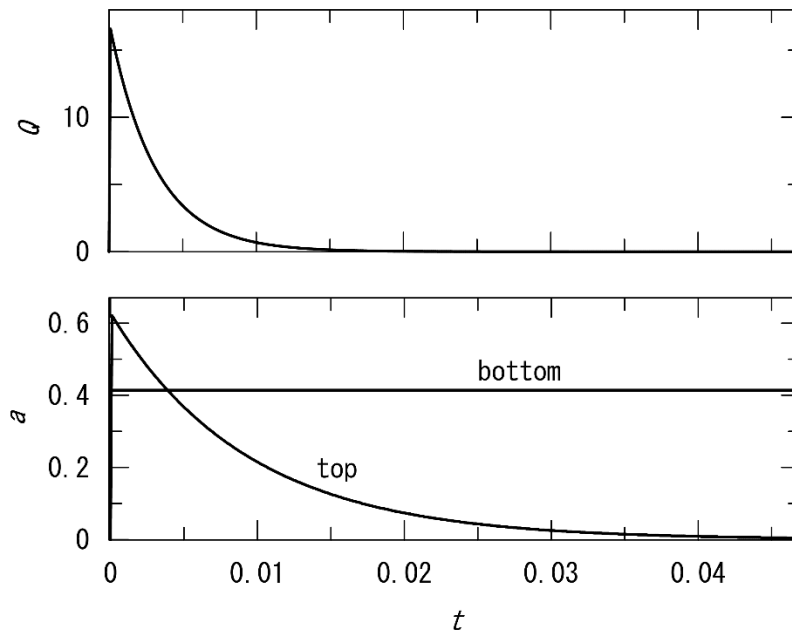


図9 マグマの噴出率 Q と割れ目の幅 a の時間変化。 a は割れ目の最上部（地表）と最下部（底）について示す。

計算結果によれば、割れ目の先端が地表に達するとすぐに大きな流量をもつ噴出が始まる。しかし、噴出量はその後急速に減少し、噴出は実質的には間もなく停止する。噴出が実質的に生じている時間の長さはマグマが急速に上昇して地表に達するのに要する時間と同じ程度である。噴出量の変化に対応して、地表での割れ目の幅は、一挙に開いてから短時間で閉じる。割れ目は底では幅がほとんど変化していないため、噴出状態の変化に対応する割れ目の開閉は浅い場所でのみ起きている。このシミュレーション結果によれば、割れ目噴火は比較的短時間で完結し、流出量は噴火の開始直後が最も大きいことがわかった。また、噴出が継続する時間はマグマの上昇にかかるのと同じ程度の長さである。

個別要素法による岩脈貫入シミュレーションでは、伊豆大島における評価のため、10km x 10km x 10kmスケールの領域を粒子数 30,000,000 で取り扱う設定において、重力パッキングの計算を進め、貫入条件の検討を行った。

また、境界要素法による地形形状を考慮した地殻変動計算手法の開発を進めた。本年度は、マグマ上昇に伴う地殻変動の時間変化を求めるシミュレーションを実施した。シミュレーションでは、岩脈貫入によるマグマ上昇を想定し、入力する圧力源の位置や大きさを変えた地殻変動の計算を繰り返すことで、地上の観測点で観測される地殻変動量の時間変化を求めることとした。

まず、岩脈貫入を想定した圧力源による地殻変動の数値計算のため、圧力源のメッシュモデルの作成プログラムを改修した。数 km 程度の大きさの圧力源による地殻変動を精度よく計算するため、圧力源を表現するためのメッシュ数を大きく変化させられるようにした(図 10)。このプログラムを利用して、地殻変動の時間変化を求めるシミュレーションを実施した。シミュレーションで想定する岩脈貫入によるマグマ上昇のシナリオとして、宮下・他(2007)の富士山、宝永噴火におけるダイク貫入モデルを利用した。このモデルでは、富士山の山頂から宝永火口の方(南南東)に伸びる水平長 3km の鉛直ダイクを設定し、噴火前の地震活動の記録などに基づいて区分したステージごとにダイクの鉛直方向の大きさの時間変化を想定している。今回のシミュレーションでは、マグマ上昇が開始したステージⅡから噴火発生直前のステージⅣまでを数値計算で利用した。地殻変動の数値計算ではそれぞれのステージで、圧力源となるダイクの下端の深さを海面下 10km に固定し、ダイクの上端の深さをステージⅡでは 9km から 5km、ステージⅢでは 5km から 1km、ステージⅣでは 1km から -2km(標高 2km)まで移動するように設定した。

富士山の火山体地形を表現するメッシュモデルを国土地理院の 10m メッシュの数値標高モデルから作成し、その下にダイク貫入を想定した楕円体形状の圧力源を設定した(図 11)。宝永シナリオで設定に従って楕円体形状の圧力源の鉛直方向の長さを変えて地殻変動の計算を繰り返し行うことで、地殻変動データの時系列を作成した。地殻変動の時系列の作成において、各ステージで、ダイク上端の上昇速度は一定と仮定している。地殻変動の時系列は気象庁が富士山の火山活動の監視に利用している地殻変動観測点(図 12)ごとに作成した。

数値計算結果から作成した地殻変動観測点での変位または傾斜変化の時間変化をそれぞれ図 13 と図 14 に示す。山頂から離れた観測点(富士吉田)では、ステージごとに変位量が単調に増加する傾向がみられる。観測点が圧力源に近い場合、GNSS 観測点(太郎坊、御殿場口 8 合目)では、変位量の加速的に変化する傾向がみられる。傾斜計観測点では、ダイクの上昇に伴って傾斜変化の傾向が圧力源方向の沈降を示す傾向から隆起を示す傾向へと変化することを確認できた。このように、観測点と圧力源の位置関係による、観測点ごとの地殻変動データの時間変化の特徴の違いを求めることができた。ダイク貫入の位置や深さの違いによる、観測データの時間変化の違いを数値計算結果で把握しておくことは、実際の観測データが得られた場合の火山活動の監視に役立つと考えられる。

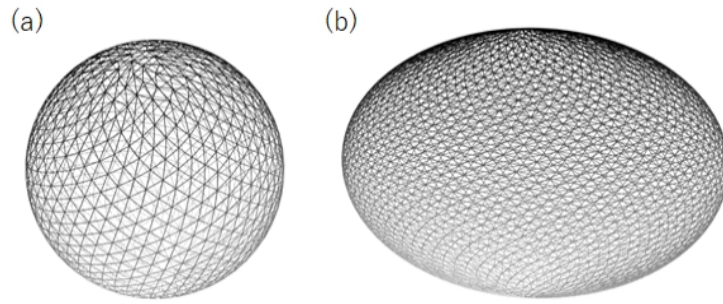


図 10 数値計算で用いる圧力源のメッシュモデルの(a)球状圧力源（節点数 1000 個）と (b)楕円体形状圧力源（節点数 3000 個）の作成例。

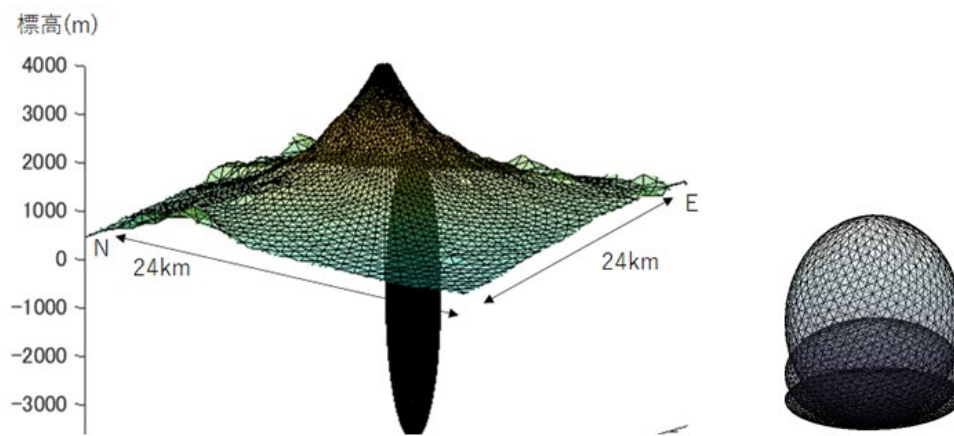


図 11 富士山の山体地形と圧力源のメッシュモデル（左図）と鉛直方向の長さを変えた楕円体圧力源のメッシュモデルの作成例（右図）。

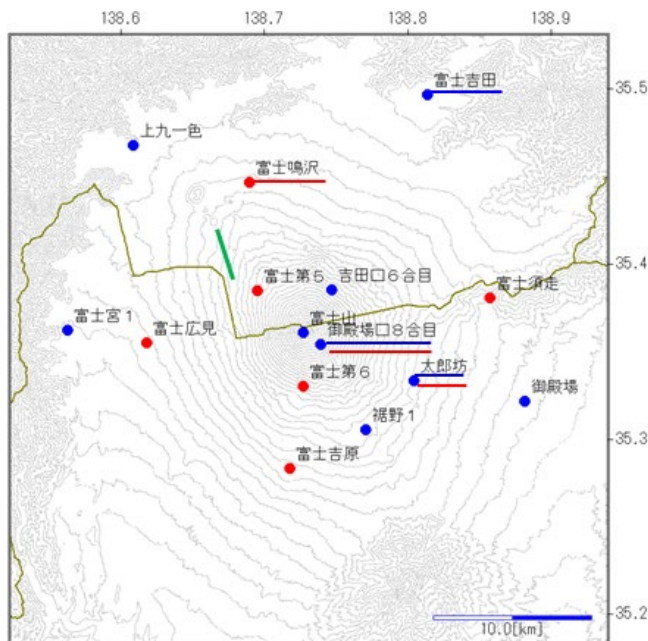


図 12 数値計算によって、ダイク上昇による地殻変動の時間変化を求めた富士山周辺の地殻変動観測点の配置図。●は GNSS、●は傾斜計の観測点を示す。青下線は図で変位の時間変化を示した観測点、赤下線は図で傾斜変化の時間変化を示した観測点。緑線は想定したダイクの位置を示す。

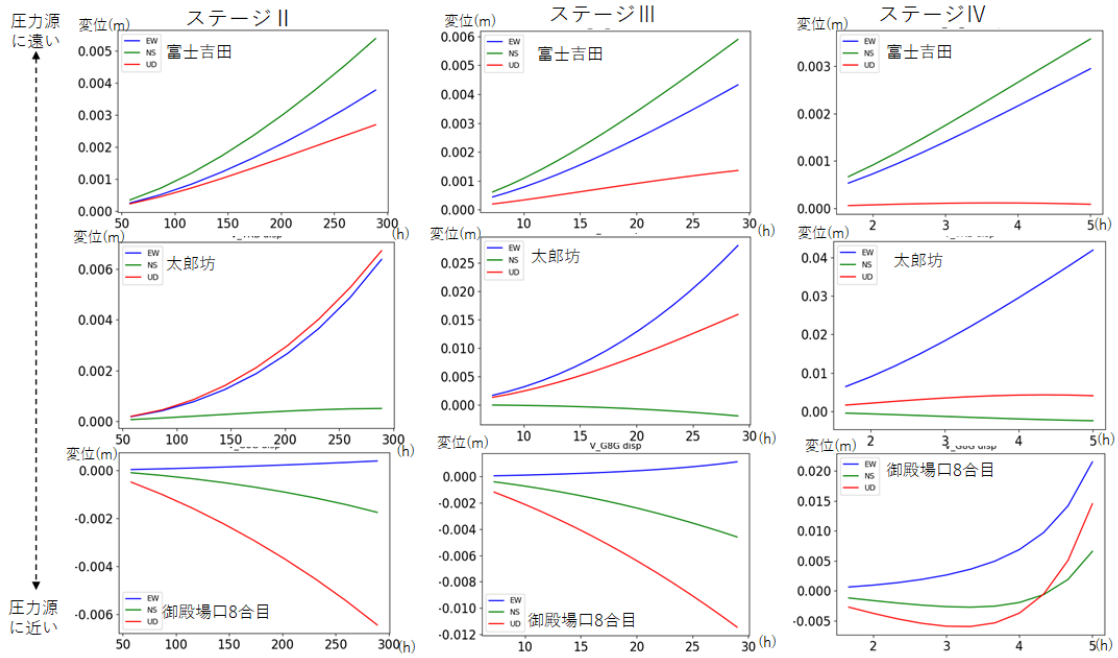


図 1 3 数値計算で求めた宝永シナリオのステージごとの地殻変動の時間変化(変位)。青線は東西変位、緑線は南北変位、赤線は上下変位をそれぞれ示す。

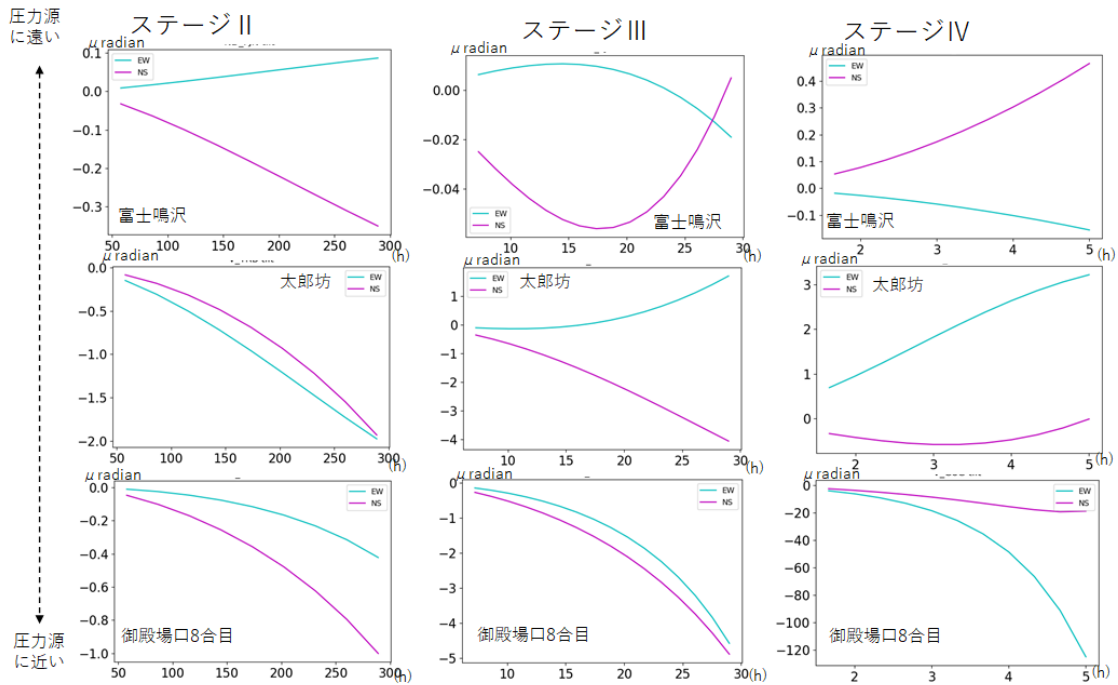


図 1 4 数値計算で求めた宝永シナリオのステージごとの地殻変動の時間変化(傾斜変化)。水色線は東西成分、紫線は南北成分をそれぞれ示す。

c) マグマ物性モデルの構築

マグマ溜りから地表に至るまでのマグマ上昇過程における結晶化モデル構築については、結晶化モデルが噴火分岐へ与える影響の検討を行なった。また、水熱合成減圧実験装置の増設と性能テストを行った。神津島 838 年噴火噴出物については、より低温条件下での減圧結晶化実験を行うべく、同じ流紋岩質である和田峠黒曜石をリファレンスとして MELTS 計算を行い、平衡温度条件を調べた。

火山性流体のレオロジーモデル構築に関しては、マグマレオロジーに大きな影響を与えるエイジングの要因を探るべく、実験で使った試料の CT 観察および画像解析を行なった。CT 観察はエイジングさせなかった試料(UA)とレオロジーに顕著な変化をもたらす条件下でエイジングさせた試料(SA)の2つに対して行なった。その結果、図 15 のように UA と SA は同程度の鉄チタン酸化物を含むが、UA 中では結晶が分散している一方、SA では結晶同士が接触し合い、結晶クラスターを形成していた。図 16 に示す CT 画像解析の結果では、SA は UA に比べて粒子の体積が大きく、球形度が低くなっており、エイジングによって複雑な形状を持つ結晶クラスターが形成されたと言える。以上のことから、エイジングが進行すると流動開始時に結晶クラスターを破壊する必要があるため、レオロジーでは応力オーバーシュートが発生したと考えられる。これらの研究は、本年度も東北大学および静岡大学の協力を得て実施した。

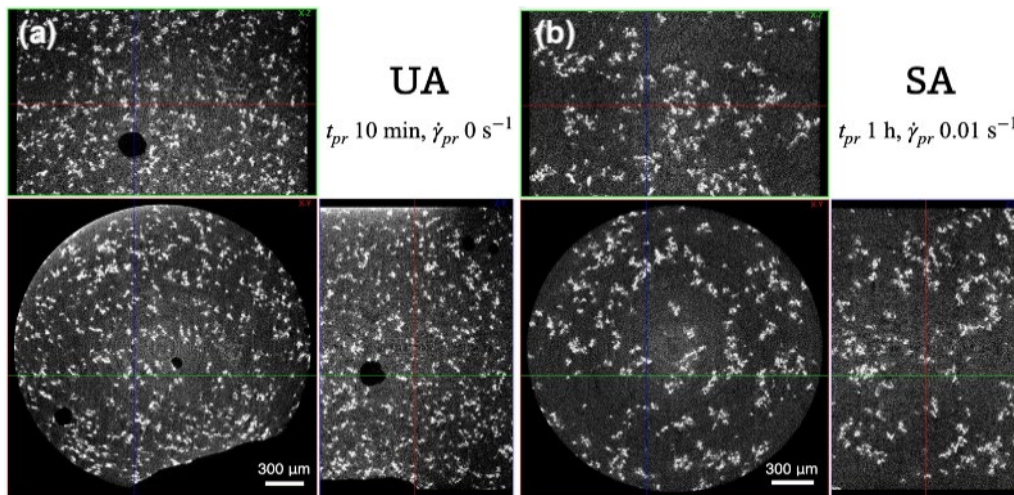


図 15 実験で使った溶岩試料の CT 断面画像。

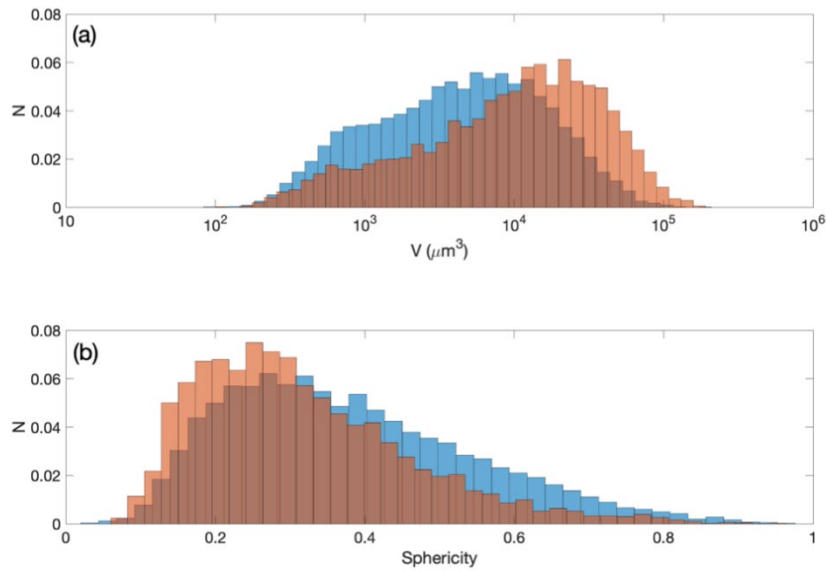


図 1 6 凝集した結晶の体積（上）および球形度（下）のヒストグラム。青が UA、赤が SA の結果を示す。

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。

今年度は新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）³⁾の初期値の精度を改善するために、季節変化する気象場との相互作用などが考慮できる 1 次元噴煙モデル（NIKS-1D）の開発を進めた。本モデルは、噴煙が火口から上昇する過程を記述する「噴煙ダイナミクスモデル」と、鉛直方向への上昇が終わった噴煙が水平方向に輸送される過程を記述する「風下重力流モデル」から構成される。さらに攪拌沈降モデルを組み合わせることで、噴煙の側面や底面から離脱する火砕物の分布が計算され、JMA-ATM の初期値として利用される。現業利用を想定して、観測された噴煙高度から噴出率を推定する機能も実装している（図 1 7）。

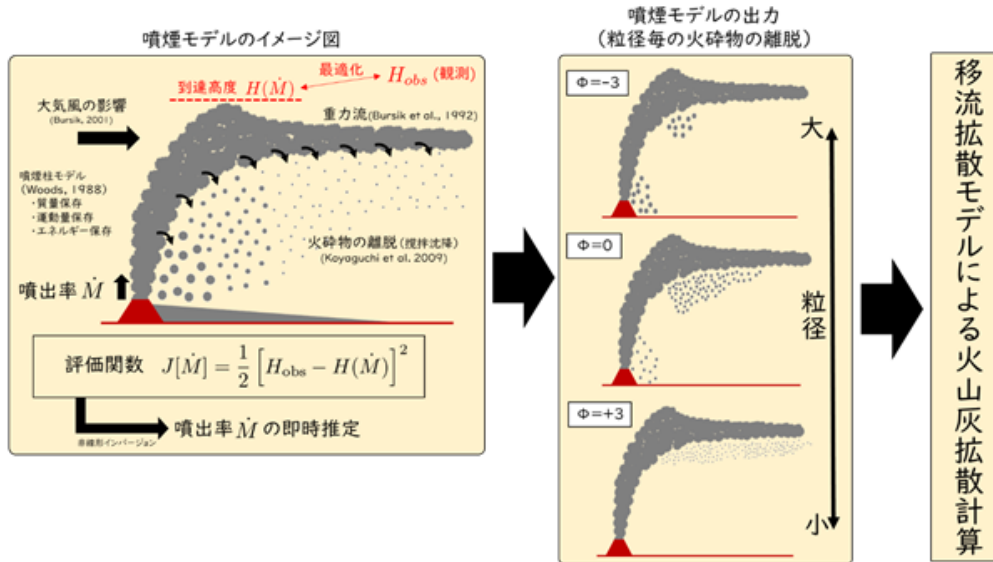


図 1 7 開発中の一次元噴煙モデルの概念図。

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について調査した。粒子の落下速度（抵抗係数）は、レイノルズ数（=速度×粒径／動粘性係数）と粒子形状に依存する（例えば、Wilson and Huang(1979) ; Suzuki(1983) ; Ganser(1993)（以下 G93））ことが知られている。G93 では、粒子形状を代表するパラメータとして球形度 ψ (Wadell(1932)) 及び直交球形度 ψ_{\perp} (Leith(1987)) を利用している。これらパラメータを二次元ビデオディストロメーターによる観測値から求め、気象レーダー等リモートセンシングによる噴煙の初期条件導出に用いることが出来る。

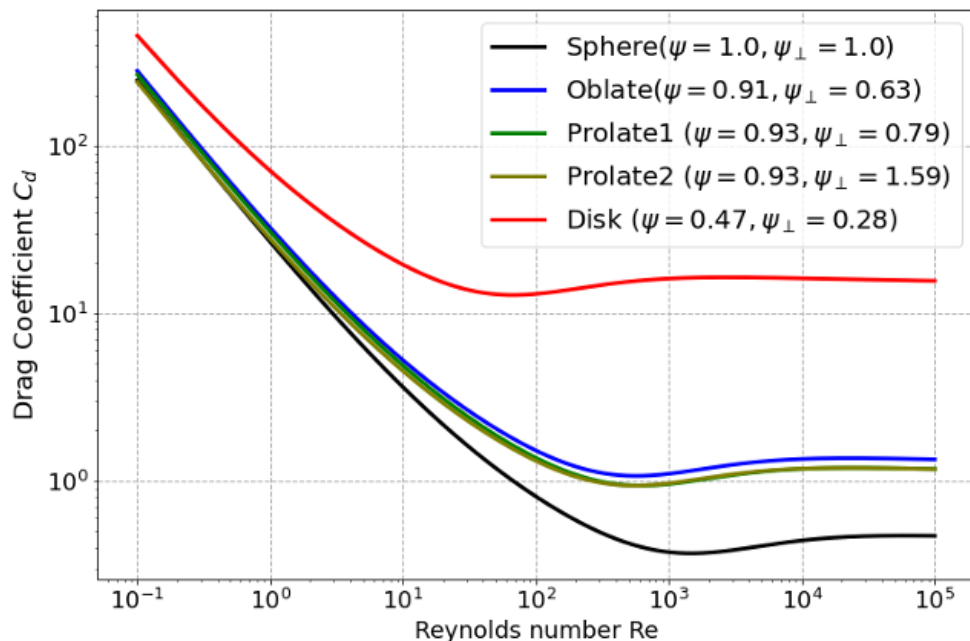


図 1 8 粒子のレイノルズ数（横軸）に対する抵抗係数（縦軸）（G93 による）。

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った。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⁴⁾を大型計算機において実行した。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った。また、噴煙柱ダイナミクスモデルの検証のため、実際に観測されたトンガ諸島フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山 2022 年 1 月 15 日噴火についての数値シミュレーションを実施した。

火山灰輸送シミュレーションでは、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 モデルを用い大規模シミュレーションを実施した。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、東京大学情報基盤センターの Oakleaf を利用した。富士山 1707 年宝永噴火、セント・ヘレンズ火山 1980 年噴火、ピナツボ火山 1991 年噴火に相当する噴火強度を境界条件として与えた。それぞれの噴火条件に対し、標準的な中緯度大気または熱帯大気を与え、大気風の強度や高さ方向のプロファイルを変化させた。

ピナツボ火山 1991 年噴火相当のシミュレーションの結果、火山灰分布に関する基礎データを取得した(図 19)。火山灰が降下を開始する地点を特定するために、火山灰粒子速度の鉛直成分が上昇から下降に転じる地点を抽出した。その降下開始粒子の空間分布が粒子サイズによって変化する様子を捉えた。 ϕ スケールで -5ϕ よりも大きな粒子では、降下開始粒子は噴煙柱中間部に分布した。 -5ϕ から -2ϕ サイズの粒子では、降下開始粒子は噴煙上部まで噴煙柱全体に分布した。 -2ϕ よりも細かな場合では、降下開始粒子は傘型噴煙に分布した。そのような細かな粒子でも、粒子サイズが細かくなるほど傘型噴煙内における水平方向に遠方まで分布した。 -3ϕ よりも小さな非常に細粒のものは傘型噴煙の先端まで達していて、傘型噴煙から分離せず噴煙内部に存在し続けていると見られる。

図 19 で得られた降下開始粒子の分布について水平方向に積算し、高さに関する分布を得た(図 20)。 -7ϕ から -3ϕ までは、粒子サイズが小さくなるほど降下開始粒子のピークが高くなっている様子が観察された。さらに粒子サイズが小さい場合にはピーク高さは傘型噴煙高度に一致するが、粒子サイズが小さくなるにつれその分布の幅は小さくなった。特に 2ϕ よりも細かな粒子の大部分は傘型噴煙内のみに存在した。

降下開始粒子は噴煙から離脱すると大気中を降下し、最終的に地表に着地した。着地点の距離と粒子サイズ分布のプロットを作成し解析した(図 21)。ピナツボ 1991 年噴火相当の噴火では、堆積粒子は火口から $10,000 \text{ km}^2$ の範囲に広く分布した(図 21c)。各距離において存在し得る粒径サイズに最大値があり、分布の包絡線をとることで最大粒径分布を取得することができた。 100 km^2 程度(火口から水平距離 10 km 程度)の地点で屈曲が見られたが、降下開始地点が噴煙柱か傘型噴煙からの切り替わりと考えられる。堆積分布は噴火強度によって変化した(図 21a-c)。噴火強度が強くなるにしたがって屈曲が顕著になり、屈曲点位置は火口から遠くなった。

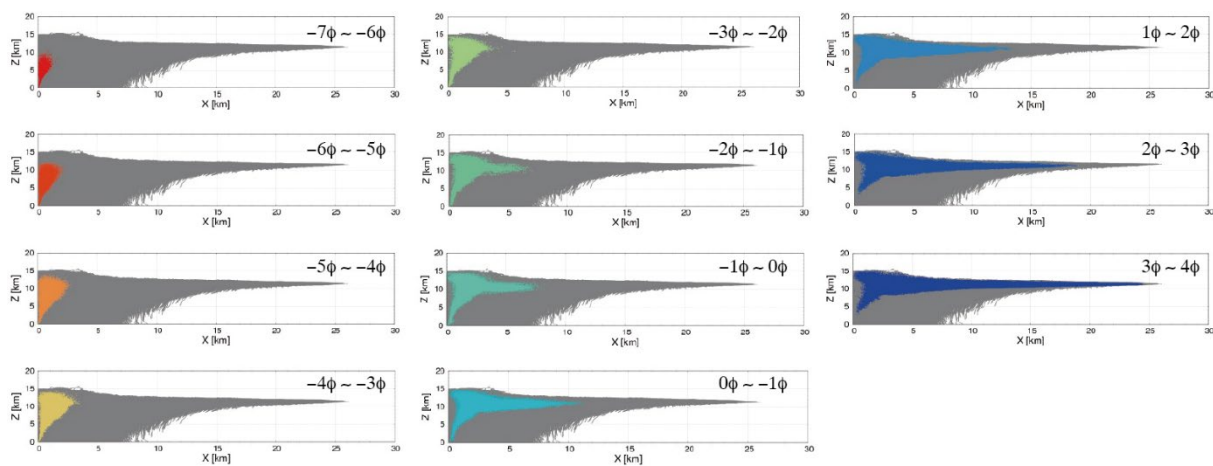


図 19 ピナツボ 1991 年噴火に相当する噴火規模の火山灰輸送の 3 次元数値シミュレーション結果。半径方向距離—高さ空間における火山灰粒子の分布を示す。グレーの点は噴煙内の全粒子分布で、色付きの点は火山灰粒子が上昇から下降に転じた停止位置。火山灰粒子サイズ (ϕ スケール) 毎に色分けしてある。

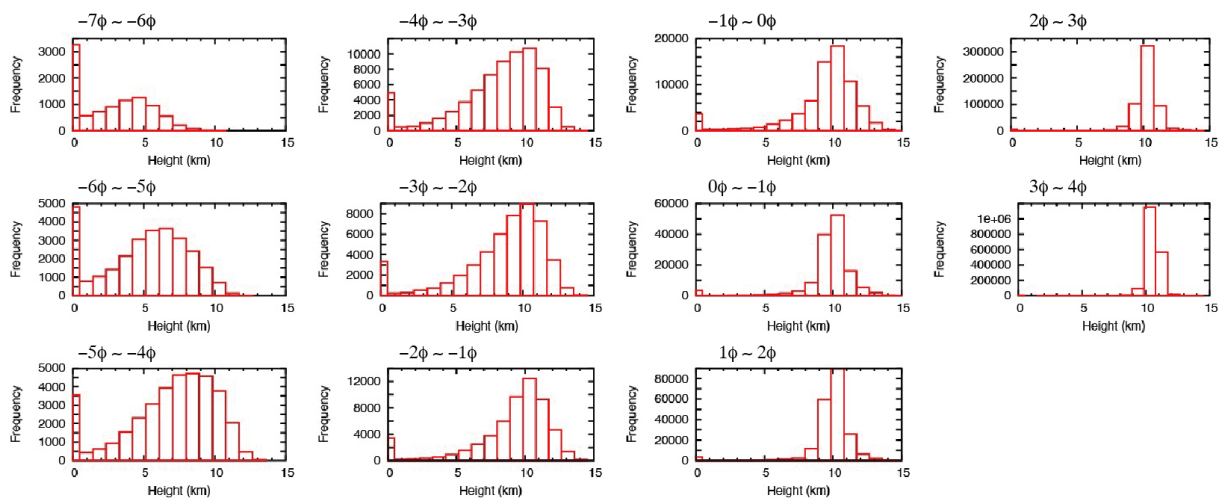


図 20 ピナツボ 1991 年噴火に相当する噴火規模の停止火山灰の高さ分布。火山灰粒子サイズ (ϕ スケール) 毎に分類した。

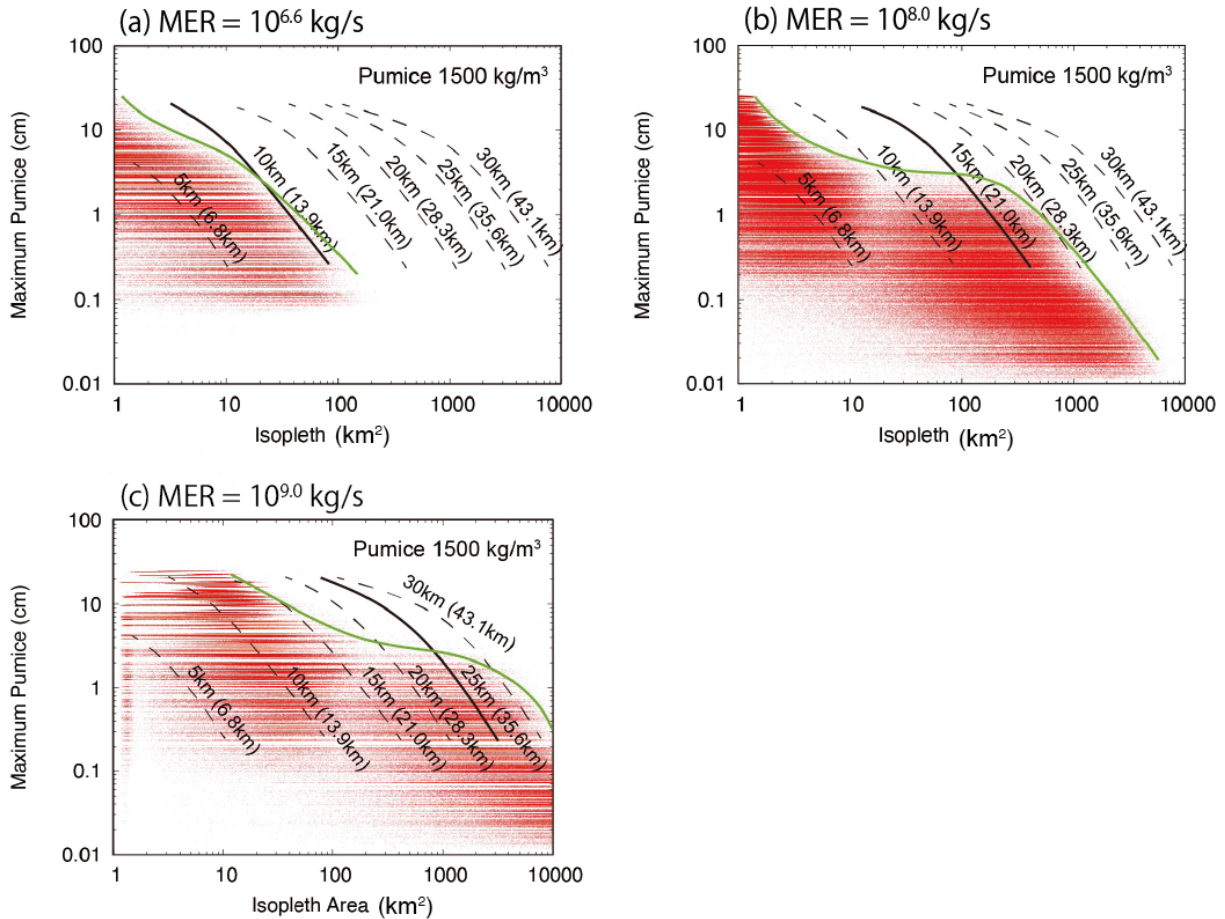


図 2.1 火山灰輸送の 3 次元数値シミュレーションから得られた堆積火山灰粒子の水平分布 (赤点)。火口を中心とし堆積地点を通る円を作成し、その面積 (Isopleth Area) を横軸にした。縦軸は粒子サイズを示す。赤点の包絡線が Isopleth Area における最大粒径となる。黒線は Carey and Sparks (1986) の単純モデルで予測された最大粒径分布で、黒線の数値は傘型噴煙高度と噴煙最高高度 (括弧内数値) を示す。計算条件として与えた噴出率は (a) $10^{6.6}$ kg/s、(b) $10^{8.0}$ kg/s、(c) $10^{9.0}$ kg/s で、計算から得られた傘型噴煙高度 (噴煙最高高度) は、(a) 11km (14km)、(b) 15km (25km)、(c) 25km (35km) であった。

2022 年 1 月 15 日にトンガ王国フンガ・トンガーフンガハアパイ火山で大規模な爆発的噴火が発生した。人工衛星からの画像を含め様々な観測がされていて、本プロジェクトで開発している噴煙柱モデルの検証に適しているため、試験的な再現シミュレーションを実施した。

標準的な熱帯大気条件を与え、初期風速をゼロに仮定した。噴出物は海水混合の影響を無視し、マグマ噴火と仮定した。マグマ温度や含水量は一般的な珪長質マグマのものを使用した。その結果、このような大規模な噴火の場合について噴煙内部の質量分率分布や圧力分布データを取得した (図 2.2)。噴煙高度や傘型噴煙半径は観測データに近い値となったが、実際には多量の海水と接触した可能性があるため、さらなるシミュレーションとその解析が必要となる。

トンガ噴火では噴火に伴う大きな潮位変動が特徴的であった。これまでのところ、噴火によって励起された大気振動が海水面変動につながったと推定されている。そのため、噴煙放出による圧力変動の空間分布が重要となる。高精度の3次元シミュレーションを実施することで、水平空間での圧力データの取得にも成功した(図23)。圧力データの解析まで至らなかったが、重要な基礎データを取得することができた。

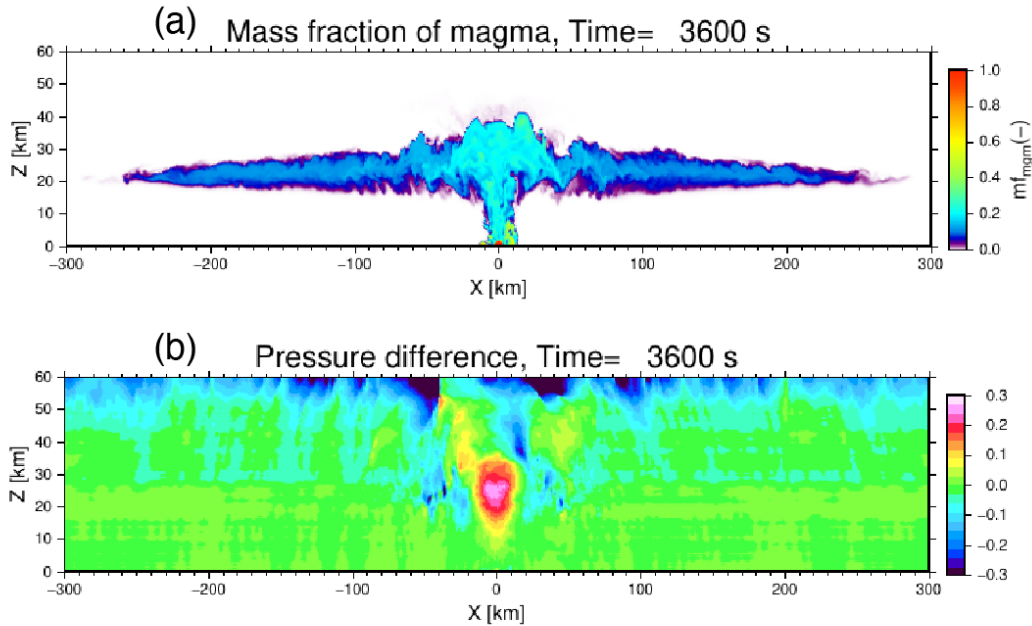


図22 フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山 2022年噴火の3次元数値シミュレーション結果。火口を含む鉛直断面における(a)噴出物質量分率分布と(b)各高さにおける大気圧からの圧力差分布 ($\log P/P_{atm}$)。

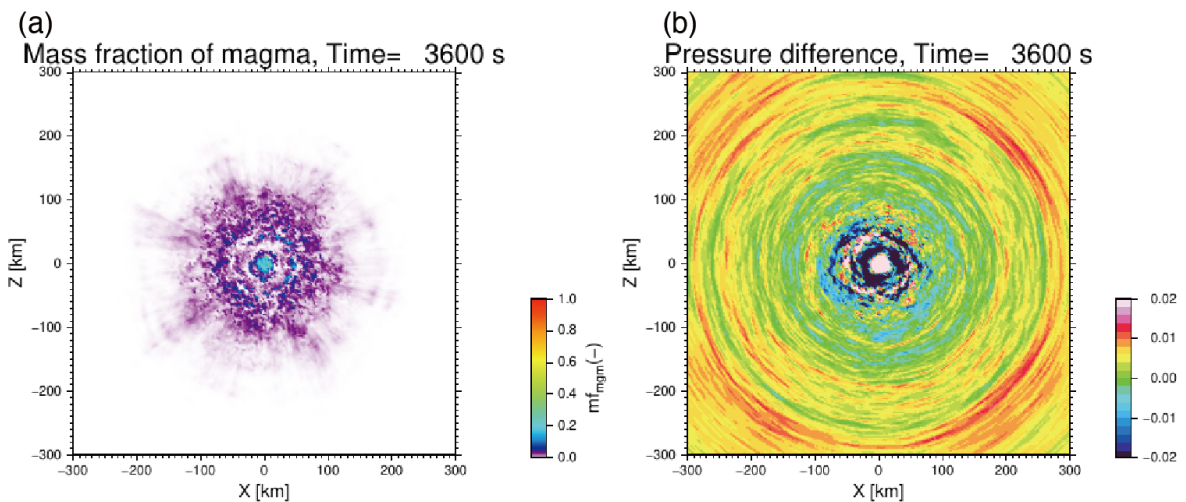


図23 フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山 2022年噴火の3次元数値シミュレーション結果。圏界面高度(17 km)の水平断面における(a)噴出物質量分率分布と(b)各高さにおける大気圧からの圧力差分布 ($P-P_{atm}$)。

c) ハザード評価システムの検討

個別シミュレーションモジュールの開発・高度化では、火砕流の確率的ハザードマッピング手法の提案・新たな火砕流数値モデルの開発、溶岩流シミュレーションにおける最適な空間メッシュサイズの同定とドリルマップの試作を行った。

噴煙柱崩壊型火砕流および溶岩ドーム崩壊型火砕流の両方に適用可能な数値シミュレーションモデルの開発・高度化に向け、本年度は、噴煙柱崩壊型火砕流の数値シミュレーションモデルの開発・高度化に着手した。火砕流の到達距離を予測するためには、火砕流ダイナミクスに対する成層構造(上部低濃度流と下部高濃度流)の効果と地形の効果の評価することが重要となる。それらの効果の評価するために、現有の2次元非定常高濃度粒子流モデル(faSavageHutterFOAM^{5), 6)}と1次元軸対称定常低濃度乱流サスペンション流モデル(1次元非定常二層火砕流モデル^{7), 8)}の上部低濃度層の定常解)をカップリングする2次元二層火砕流モデルを開発した(図2.4)。この2次元二層火砕流モデルは、上部低濃度流の地形効果や時間変化については評価できないためにまだ試作版ではあるが、大規模火砕流(つまり、地形起伏の影響を強く受ける下部高濃度流と地形起伏の影響をあまり受けず火口から継続供給される上部低濃度流から成る火砕流)に対しては適用可能といえる。ピナツボ1991年6月15日噴火で生じた大規模火砕流と同程度の噴火条件を設定しテスト計算を実施した。ピナツボ地形データ(2006-2011年観測)の地形メッシュによる計算結果と水平地形メッシュによる計算結果を比較し、下部高濃度流の到達距離に対する地形効果を評価した(図2.5)。ピナツボ地形を考慮した場合、高濃度流は主に地形起伏間の谷筋に沿って流動し、最大到達距離が伸びることが示された。この到達距離の増加は、谷筋において、移動距離に対する進行方向の高濃度層の質量フラックスの減少率が小さくなるために生じる。

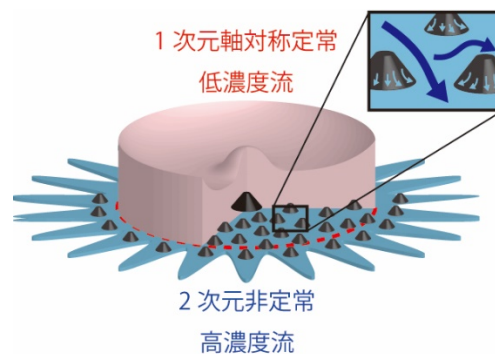


図2.4 2次元二層火砕流モデル[試作版]の概念図。

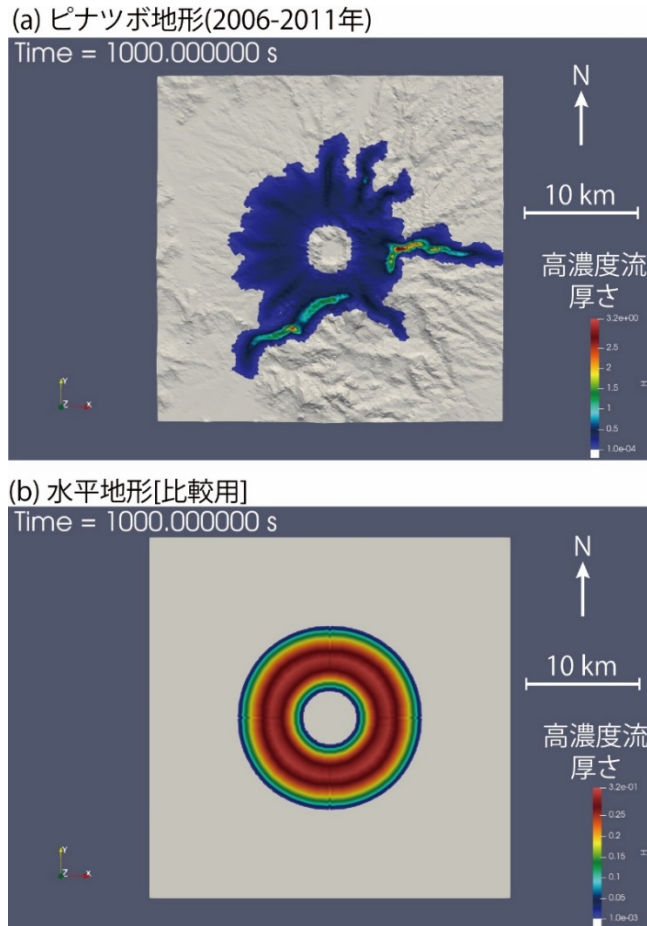


図 25 2次元二層火砕流モデル[試作版]の下部高濃度流の厚さの数値計算結果(噴火開始から 1000 秒後)。(a)ピナツボ地形(2006-2011 年観測)使用。(b)水平地形[比較用]使用。

火砕流の到達距離や到達範囲は噴火条件(特に噴火規模 $M = \log_{10}$ (噴出マグマ質量 [kg]) - 7⁹⁾)に強く依存し、噴火規模 M は、同じ火山における噴火であってもイベントによって 0 から 8 程度まで大きく異なる。火砕流数値シミュレーションモデルを用いたハザードマッピングの際に、噴火規模 M の取り扱いに対する恣意性を排除しその不確定性の影響を評価するために、噴火規模 M に対する任意の頻度分布 $N(M)$ を火砕流数値シミュレーション結果と組み合わせる確率論的ハザードマッピング手法を提案した。提案する確率論的ハザードマッピング手法は、以下の 4 つの手続きから成る。

[手続き 1] 考察の対象とする噴火規模 M の下限と上限を設定し、その範囲内において M の値を M_i として任意の間隔 $dM_{i\pm 1/2} (\equiv |M_i - M_{i\pm 1}|)$ でサンプリングする。

[手続き 2] サンプリングした M_i に対する火砕流の数値シミュレーションを行い、各 M_i に対する火砕流到達範囲の予測結果を得る(到達範囲内の地点を 1、それ以外を 0 とスコア付けする)。

[手続き 3] 各 M_i に対する到達範囲結果の各地点のスコアに M_i に対する確率分布 $(N_i / \sum_i(N_i))$ を掛けることにより、到達範囲結果のスコアに重みを付ける。ここでは $N_i = 0.25\{N(M_i) + N(M_i - 0.5dM_{i-1/2})\}dM_{i-1/2} + 0.25\{N(M_i) + N(M_i + 0.5dM_{i+1/2})\}dM_{i+1/2}$ とする。

[手続き 4] 各 M_i に対して得られた重みづけられたスコアを全ての M_i に対して足し合わせ、その結果を地図上で可視化する。

これらの手続きにより、噴火規模 M の頻度分布 $N(M)$ と火砕流到達範囲の数値計算結果を組み合わせた確率論的ハザードマップが作成される。既存手法(Monte Carlo型サンプリングに基づく手法など)と比べた本手法の特色としては、頻度分布 $N(M)$ を変えたハザードマッピングを行う際に[手続き 3]から再実施すれば良いという利点が挙げられる。これにより、頻度分布 $N(M)$ を変えたハザードマッピングの度に[手続き 2]の数値シミュレーションをやり直す必要がないため時間を大幅に節約できる。一例として桜島昭和火口からの噴火を想定した火砕流到達範囲の確率論的ハザードマップを作成した(図 2 6)。ここでは、噴火規模 M の下限を 1、上限を 4 に設定し、0.5 の等間隔で M の値をサンプリングした。数値シミュレーションでは、火砕流下部の高粒子濃度領域のみの振る舞いを記述する高濃度粒子流モデル(faSavageHutterFOAM^{5), 6)}を使用し、メッシュ作成には NHK から提供された高精細地形データまたは国土地理院が提供する地形データを使用した。噴火規模 M の頻度分布 $N(M)$ については地質学的時間スケールかつ広範囲空間で成り立つ経験的べき乗則($\log_{10} N \propto -0.75M^{10}$)を与えた(図 2 6 a)。また比較のために、単純な一様分布($N = \text{const}$)を与えた解析も行った(図 2 6 b)。これらの結果は、桜島昭和火口にて火砕流が発生した場合にその周辺地域のどこが到達範囲になり得るかについての確率(「火砕流の到達確率」と呼ぶ)を地図上に示している。給源近傍の狭い範囲は小規模な火砕流と大規模な火砕流の両方の到達範囲によって覆われるため到達確率が高く、給源遠方の広い範囲は大規模な火砕流のみの到達範囲によって覆われるため到達確率が低いという結果が得られる。単純な一様分布を与えたハザードマップ(図 2 6 b)では、経験的べき乗則を与えた場合と比べ(図 2 6 a)、遠方まで到達する大規模火砕流の到達確率を 30-300 倍程度過大評価することが示された。

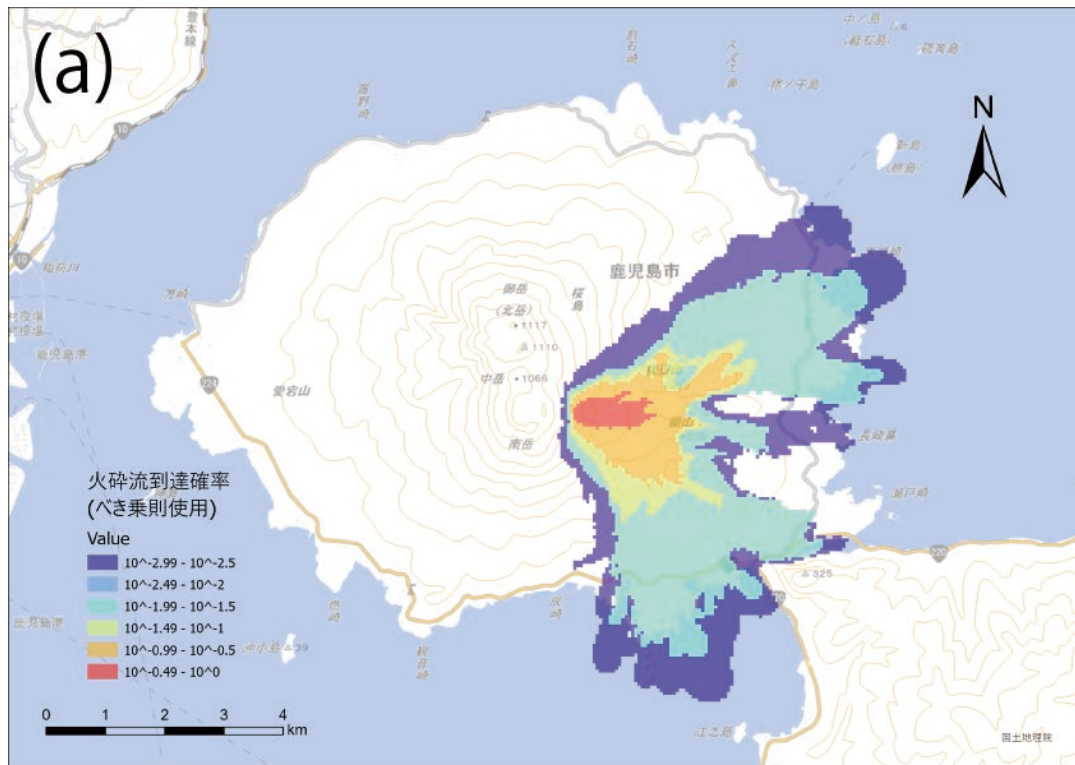


図 2 6 火砕流の到達確率を示す確率論的ハザードマップ。噴火規模 M の頻度分布 $N(M)$ に経験的べき乗則($\log_{10} N \propto -0.75M^{10}$)を与えた場合(a)と単純な一様分布($N = \text{const}$)を与えた場合(b)。

溶岩流シミュレーションにおいては、その計算結果は地形データの精度に依存する。溶岩流そのものの物理的な現象を体現する空間スケールを鑑み、熱流体としての振舞いを適切に評価する空間・時間スケールを把握し、実施することが重要である。メッシュの空間スケールでは、より詳細なメッシュを使用することで、より精細な溶岩流到達範囲の評価が可能となる。一方で、メッシュサイズを細かくすることにより、メモリサイズや計算時間といった計算リソースが多く必要となるといったデメリットがある。今回、NHK 8K ドローンプロジェクトにより提供された高精度 DEM データ (50cm, 1m) から 1-3m メッシュデータを活用し、従来の国土地理院数値地図 (10m メッシュデータ) と比較して、その有効性について検証した。

高精度メッシュで計算を実施したケーススタディとして実施した対象範囲を図 2 7 に示す。噴出レートとして、大正噴火による溶岩総量を 10 か所から 2 日間で出す場合を想定して $3.1 \times 10^3 \text{m}^3/\text{s}$ と大規模な場合を仮定したものであり、そのうちの 1 か所分 ($3.1 \times 10^2 \text{m}^3/\text{s}$) を示している。黒神方面に流下するケース (Case 1, 2m メッシュ)、南岳南側に流下するケース (Case 2, 3m メッシュ) の事例をそれぞれ図 2 8、図 2 9 に示す。いずれも詳細な谷筋を流下し、多数のブランチがあることが確認できる。図 2 9 b で示す拡大図を見ると、砂防ダム沿いに流下し、その堤防の効果が見て取れる。

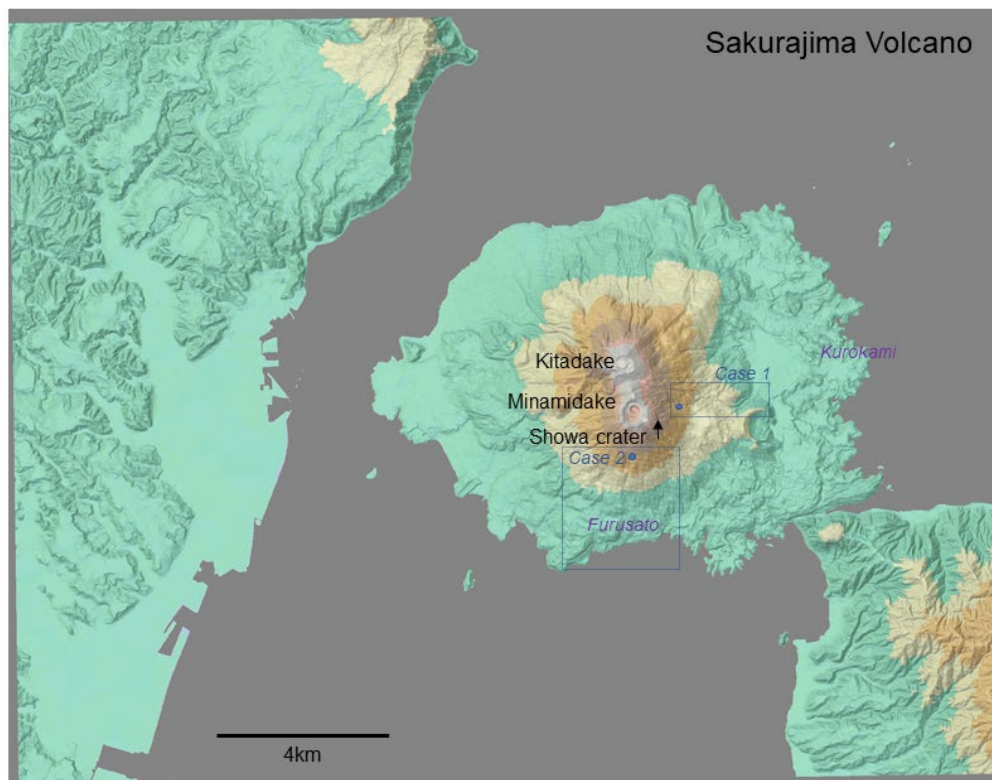


図 2 7 桜島における高精度溶岩流シミュレーションの対象範囲 (国土地理院数値地図より作成)。

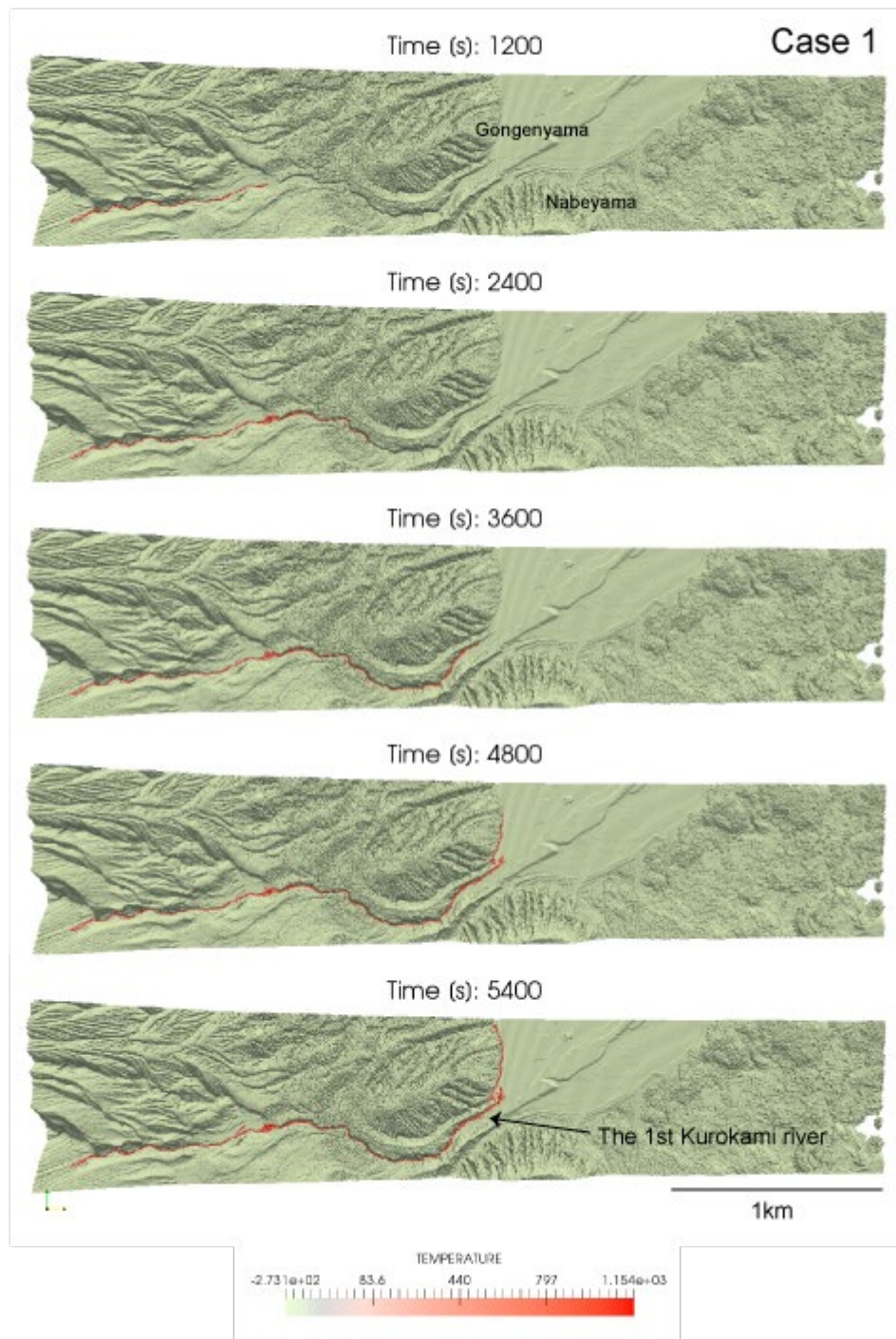


図 2 8 桜島高精度溶岩流シミュレーション (Case 1: 黒神方面流下)。

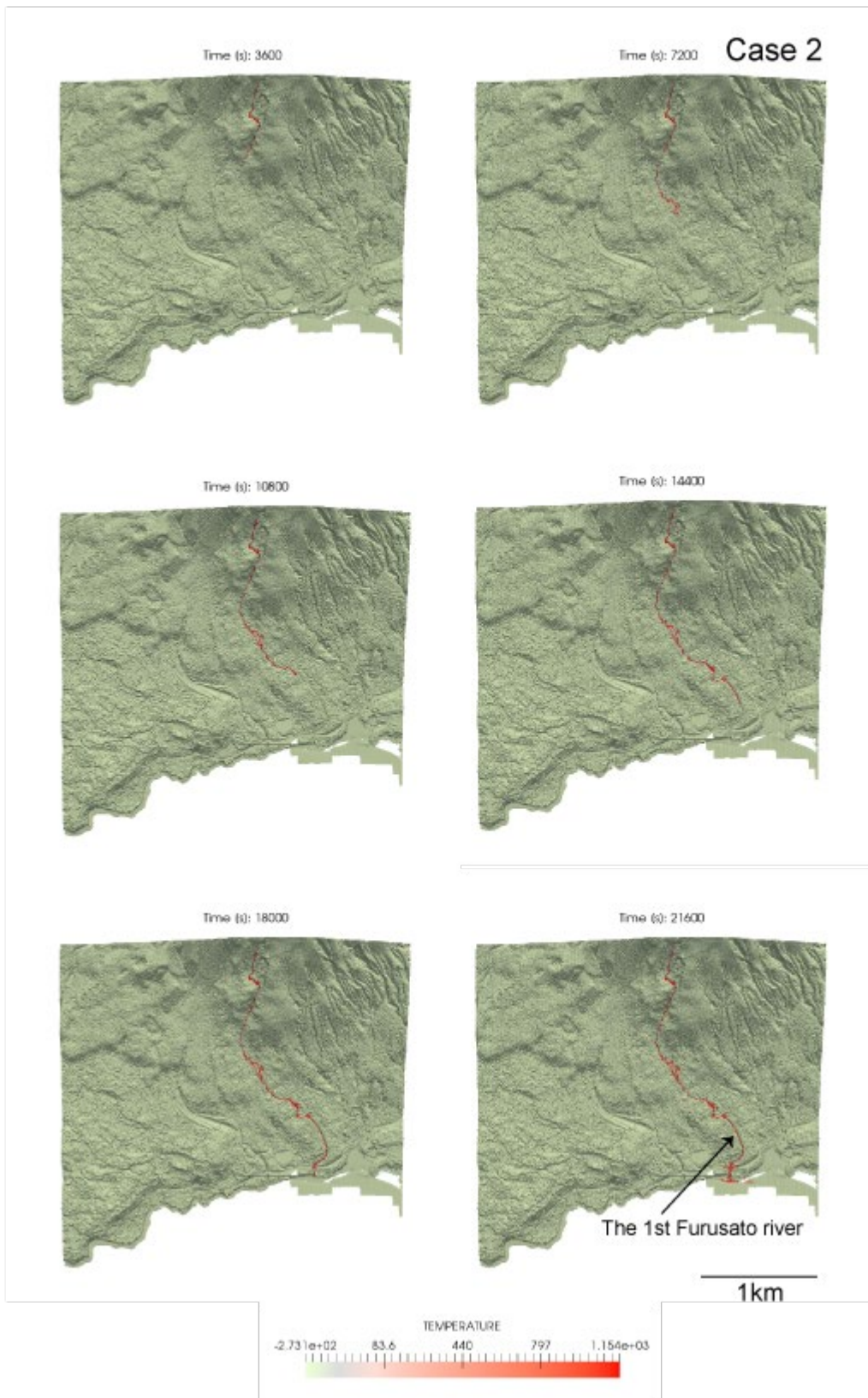


図 2 9 a 桜島高精度溶岩流シミュレーション (Case 2: 南岳南側流下)。

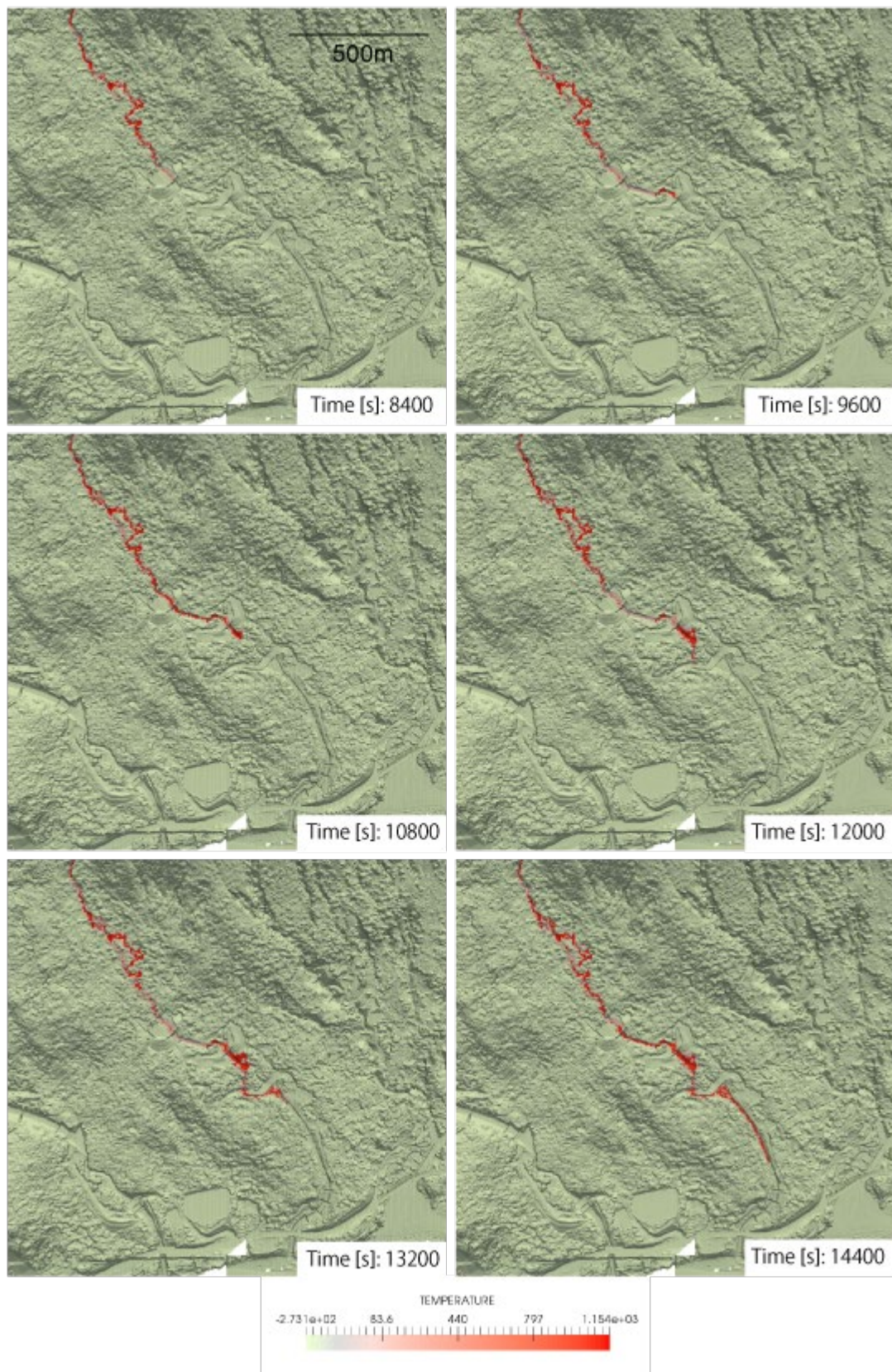


図 2 9 b 桜島高精度溶岩流シミュレーション (Case 2: 南岳南側流下) 拡大図。

また、メッシュ依存性について同じ条件で 3m と 10m の計算例について比較を行った (図 30)。メッシュサイズが小さい場合、同じ時間でも到達距離が長くなる。特にチャンネルフローとなるため、流れの側方部分で冷却によるクラスト形成がおり、その一方で流れの中央部分では熱的に安定し、流動がしやすくなるといった正のフィードバックが期待される。メッシュサイズが大きい場合、傾斜角などの地形変化がそのサイズになまらせることになること、数値計算上、大きいメッシュ全体での固液判定を行うことになるなど、現象を水平方向へ拡大解釈する傾向がある者と考えられる。ただし、高精度のメッシュデータを用いた計算では、対象範囲を細かく分割するためメッシュ数が膨大になり、大量のメモリや計算時間が必要となる。道路や建物などといったスケールでのハザード評価も含めて鑑みると、3m~5m 程度での計算が有効であると考えられる。

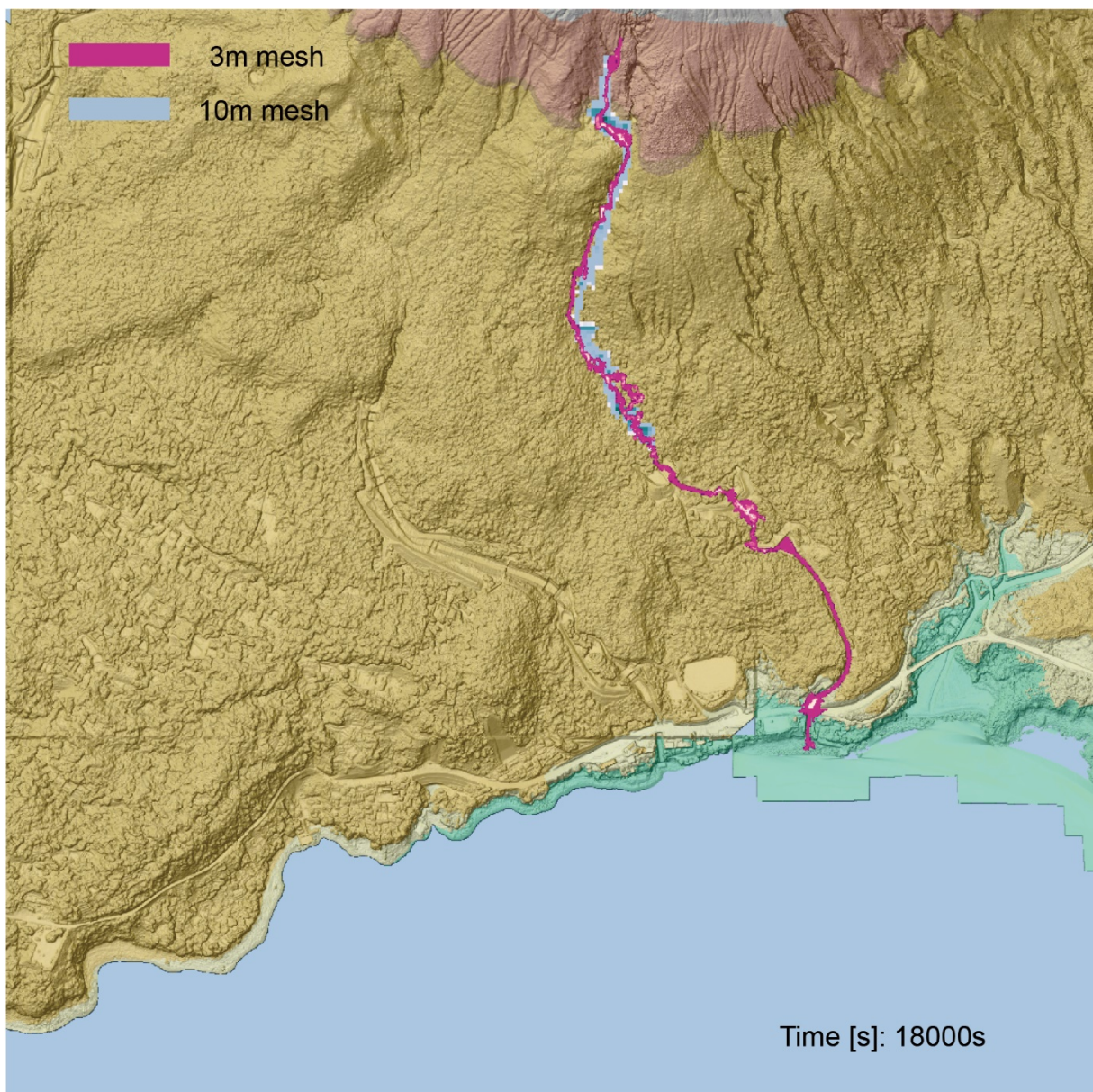


図 30 溶岩流シミュレーションのメッシュサイズ依存性 (えんじ色: 3m メッシュによる計算、水色: 10m メッシュによる計算)。流下開始 18000s 後の溶岩分布。

溶岩流シミュレーションについては、迅速性の観点からより簡便に計算ができる手法の検討を開始した。その中で、粒子法による溶岩流シミュレーションについて、既往研究の調査を行うとともに、粒子数 10,000,000 個程度で評価可能な対象を検討し、伊豆大島や三宅島での長さ数 km、幅 100m 程度を対象とする方向性を定めた。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た。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、また、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 faSavageHutterForm を用いた粒子流による取り扱いの検討を始めた。

火山ハザード評価システムの開発においては、個別シミュレーションモジュールの取り込みとして、簡易版噴煙シミュレーション (PUFF) の表示機能を追加した (図 3 1)。また、溶岩流シミュレーション LavaSIM の入力パラメータを生成する GUI インターフェースを作成し、国土地理院数値地図 (10m, 5m) を取り込み、国内火山におけるシミュレーション実施の環境を整備した (図 3 2 a)。併せて、地震・火山噴火連動性評価のための有限要素解析のための入力パラメータを生成する GUI インターフェースも作成した (図 3 2 b)。これらは今後火山ハザード評価システムへ導入予定である。

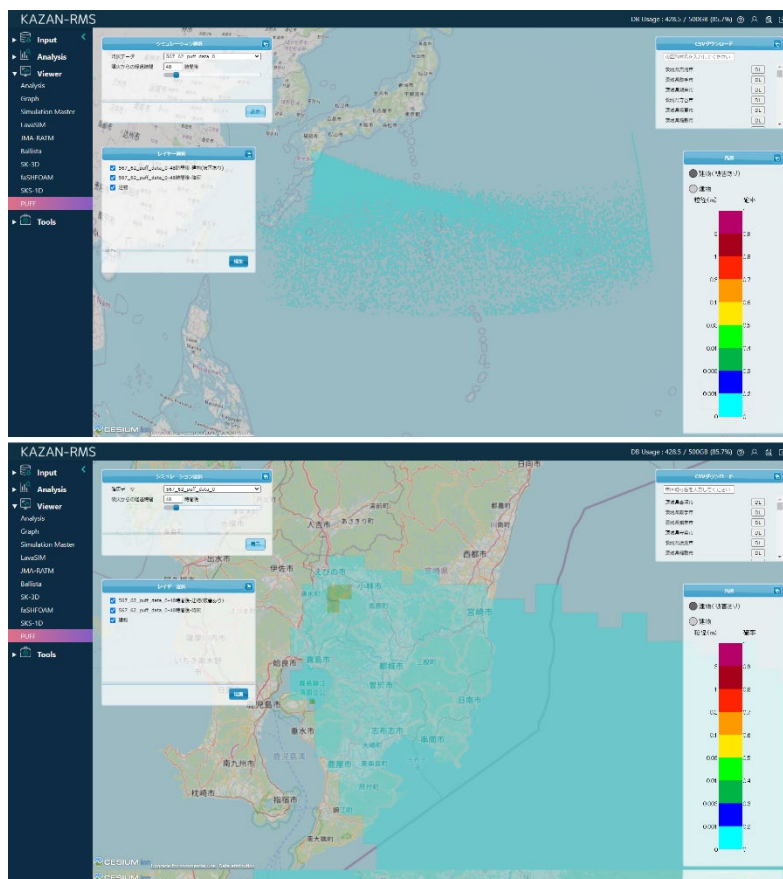


図 3 1 火山ハザード評価システムにおける簡易版降灰シミュレーション (PUFF) 計算結果表示機能。

火山ハザード評価システムは、防災科研の防災情報イノベーションプラットフォームに整備中である。インターフェースは同システムの公開系クラウド基盤上に構築している。一部の計算モジュールは大規模計算を必要とするため、データ解析基盤で計算を実行する。セキュリティを鑑みた2つのシステムの連携による計算実行環境の設計を行った(図3.3)。

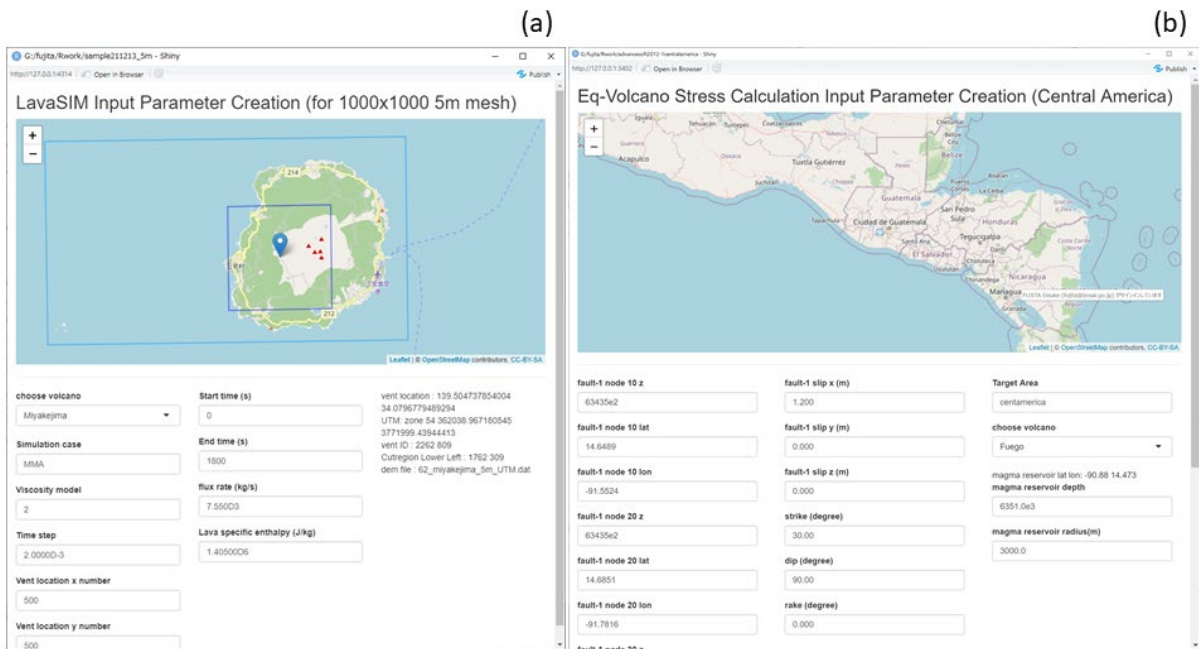


図3.2 (a) 溶岩流シミュレーション LavaSIM 入力パラメータ生成 GUI インターフェース、(b) 地震・火山噴火連動性評価のための有限要素解析のための入力パラメータ生成 GUI インターフェース。

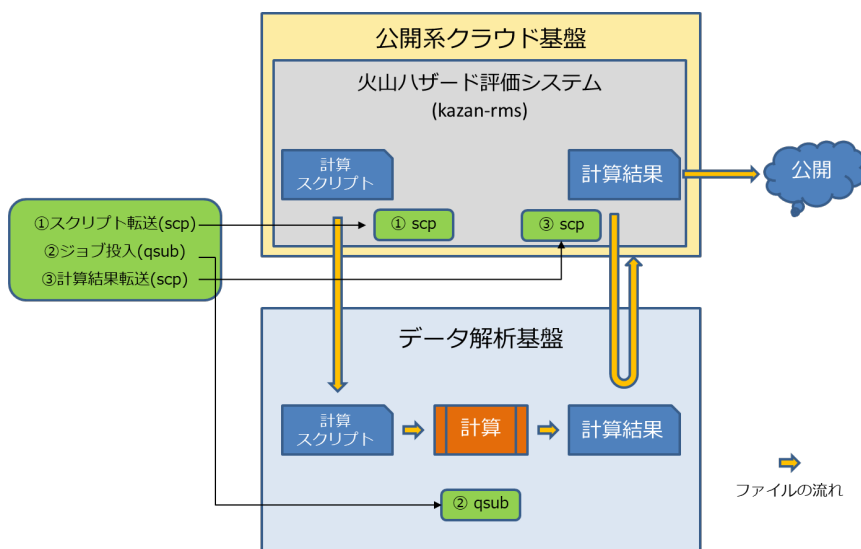


図3.3 火山ハザード評価システムにおける計算実行環境設計。

(c) 結論

個々のシミュレーション開発の高度化と、これらの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、桜島で発生するブルカノ式噴火前の準備過程に関する火道流の解析に基づき、噴火開始検知に関連する地殻変動の特徴を評価した。また、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年サブプリニー式噴火が発生し得る火道形状条件を火道流解析により明らかにした。マグマ移動過程シミュレーション技術開発では、マグマ貫入から噴出に至る効果を解析的に組み込み、シミュレーション評価を行うとともに、境界要素法による地形形状を考慮した地殻変動計算手法の開発を進めた。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、モデル化を推進した。

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) の初期値の精度改善のため、季節変化する気象場との相互作用などが考慮できる1次元噴煙モデル (NIKS-1D) の開発を進めた。また、噴煙柱ダイナミクスモデルの検証のため、実際に観測されたトンガ諸島フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山 2022年1月15日噴火についての数値シミュレーションを実施した。また、火砕流・溶岩流シミュレーションの高度化を進めるとともに、各モジュールの火山ハザード評価システムの組み込みなどを進めた。

(d) 引用文献

- 1) Wong, Y. Q., Segall, P., Numerical analysis of time-dependent conduit magma flow in dome-forming eruptions with application to Mount St. Helens 2004-2008, *J. Geophys. Res.*, 124, 11251-11273. doi: 10.1029/2019JB017585, 2019.
- 2) 京都大学防災研究所, 第146回火山噴火予知連絡会資料, 2020.
- 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) Rauter, M. Kohler, A., Constraints on entrainment and deposition models in avalanche simulations from high-resolution radar data, *geosciences*, 10, 9, 1-20, 2020.
- 7) 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.
- 8) Shimizu, H. A., Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J., Brosch, E., Lube, G., Cerminara, M. Validation of a two-layer depth-averaged model by comparison with an

experimental dilute stratified pyroclastic density current. Bull. Volcanol., 83, 73, 1-12, 2021.

9) 早川由紀夫, 噴火マグニチュードの提唱, 火山, 38, 6, 223-226, 1993.

10) 中田節也, 火山爆発指数 (VEI) から見た噴火の規則性, 火山, 60, 2, 143-150, 2015.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

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4年度の業務計画案

(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、前年度までに開発した、桜島のブルカノ式噴火前におけるマグマ蓄積・増圧過程およびそれによってもたらされる地殻変動を計算できる火道流・地殻変動数値モデルに基づくパラメータ解析を実施する。さらに、桜島の多数の噴火事例における地震・測地等の観測データとの定量的な比較を実施し、観測データを再現し得る火道内マグマ流動過程の特徴を明らかにする。また、将来発生し得るより大規模なマグマ噴火の分岐メカニズム解明を目的として、桜島大正噴火におけるプリニー式・溶岩流出噴火、伊豆大島 1986 年噴火における溶岩流出噴火を対象とした火道流数値モデルの開発および解析を実施する。

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引き続き実施する。また、地殻変動のシミュレーション手法の開発として、境界要素法による地殻変動計算手法の開発を進める。岩脈貫入を想定した地殻変動の時間変化を求めるシミュレーションを実施し、その結果と実際の観測データとの比較を検討する。これらの内容について2022年度日本火山学会秋季大会で発表を行う。

3) マグマ物性モデルの構築

マグマ上昇過程における結晶化モデル構築に向け、水熱合成減圧実験装置を用いた減圧結晶化実験を神津島 838 年噴火噴出物と桜島 1914 年噴火噴出物を対象に進める。圧力ラインを増設したことを生かし、より幅広い温度・減圧条件での実験を効率的に行い、実験結果として得られる結晶化速度と平衡結晶速度の関係に基づいたモデルの構築を進める。

マグマレオロジーモデルについては、実験装置を改造して応力制御下での 1986 年伊豆大島噴火の溶岩を用いたレオロジー実験を開始する。その結果を今まで行ってきた速度制御下での実験結果と比較し、天然系での非定常マグマ流動を把握、噴火分岐と推移に関係する火道浅部での高粘性プラグ形成過程のモデル化を進める。

これら水熱合成減圧実験に基づく減圧結晶化モデル、およびマグマレオロジー実験に基づく高粘性プラグ形成モデルについて、それぞれ火道流モデルへの適用を検討し、噴火分岐に与える影響を調査する。東北大学及び静岡大学の協力を得てこれらを実施する。

(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、新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）を用いて、「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル（SK-3D）」による初期条件からの再計算と、前年度から作成を始めた季節変化する気象場との相互作用などが考慮できる 1次元噴煙モデル（NIKS-1D）による初期条件からの計算結果の比較を行う。東京大学地震研究所・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し、噴火条件と大気条件に関するパラメータスタディを実施する。比較的頻度の高く降灰による災害につながる中規模噴火を対象に、噴煙挙動や火山灰粒子挙動の精度を向上させる。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。

具体的には、個別シミュレーションモジュールの開発として、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。特に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次元を進めるとともに、確率論的ハザードマップの検討を進める。個別機能の火山ハザード評価システムへの統合・システム化においては、溶岩流（簡易版）モジュールの追加、地殻変動（境界要素法版）の追加、計算パラメータインターフェース整備、計算スクリプトの実装を行う。また、シミュレーションデータを外部提供するためのデータ変換作業を行う。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火砕流国際ワークショップで発表する。

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。

また、自発的な研究活動等について、自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。