

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 教授	藤田英輔 三輪学央 黒川愛香 長井雅史 志水宏行 西村太志
国立大学法人東北大学 大学院理学研究科	参加機関	准教授 准教授	小園誠史 奥村 聰
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 准教授	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 石橋秀巳
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	常松佳恵
国立大学法人山形大学理学部	協力機関	准教授	清杉孝司
国立大学法人神戸大学先端融合研 究環	協力機関	講師	

(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・火碎流・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・火碎流・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・火碎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（ミクロ）
 - ・物性モデルの構築：実験の環境整備と、結晶化カイネテ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・火碎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：ミクロ・マクロモデルの統合
 - ・物性モデルの構築：結晶化カイネティクスモデル検討・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・火碎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：結晶化カイネティクスモデル検討・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・火碎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・火碎流シミュレーション：既往火碎流モデル検討
- ・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・火碎流シミュレーション：噴煙・火碎流モデル高度化・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・火碎流シミュレーション：噴煙・火碎流評価システム
- ・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グ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、降下火碎物の形状・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・火碎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、水平断面が扁平な橢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。

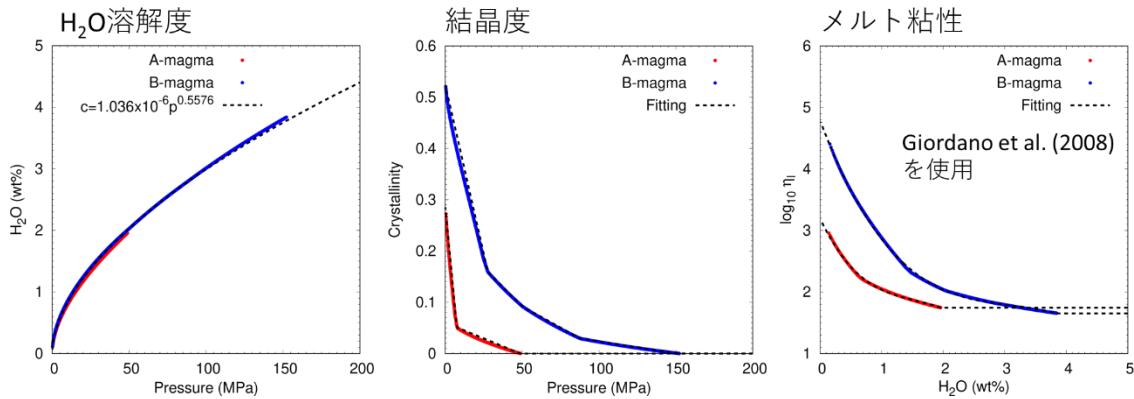


図1 Rhyolite-MELTSによる等温減压結晶作用シミュレーションの例²⁾。初期メルト組成と温度(A-magma: 1118°C, B-magma: 1078°C)を設定し、H₂O溶解度、結晶度、メルト粘性を関数でフィッティングし、火道流モデルに組み込む。

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一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、サブプリニ一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、それぞれ出現しえることがわかった。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、高粘性では歪速度增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

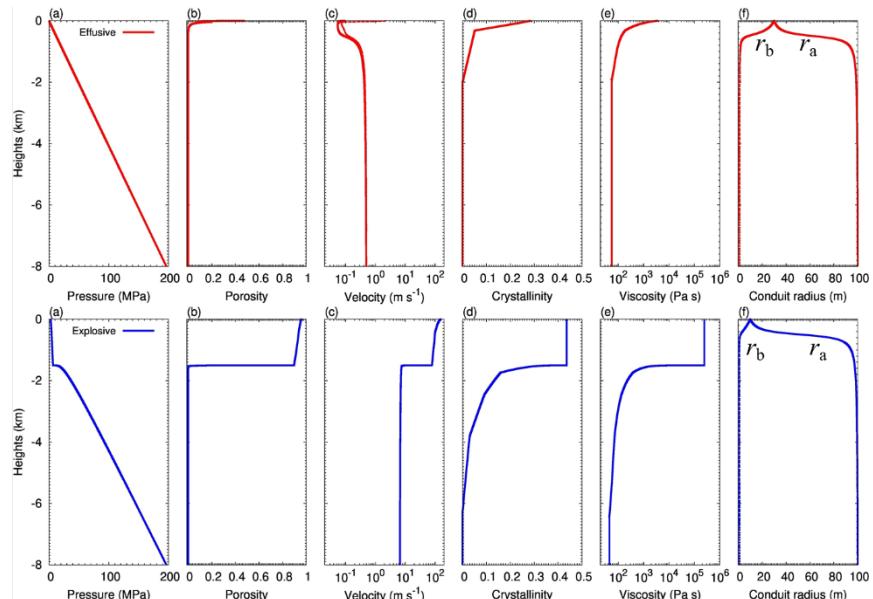


図2 異なる噴火タイプに対応する火道流における各物理量の火道内分布(圧力、発泡度、速度、結晶度、マグマ粘性、火道径)。

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 $10^4\text{--}10^6 \text{ kg s}^{-1}$ 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。

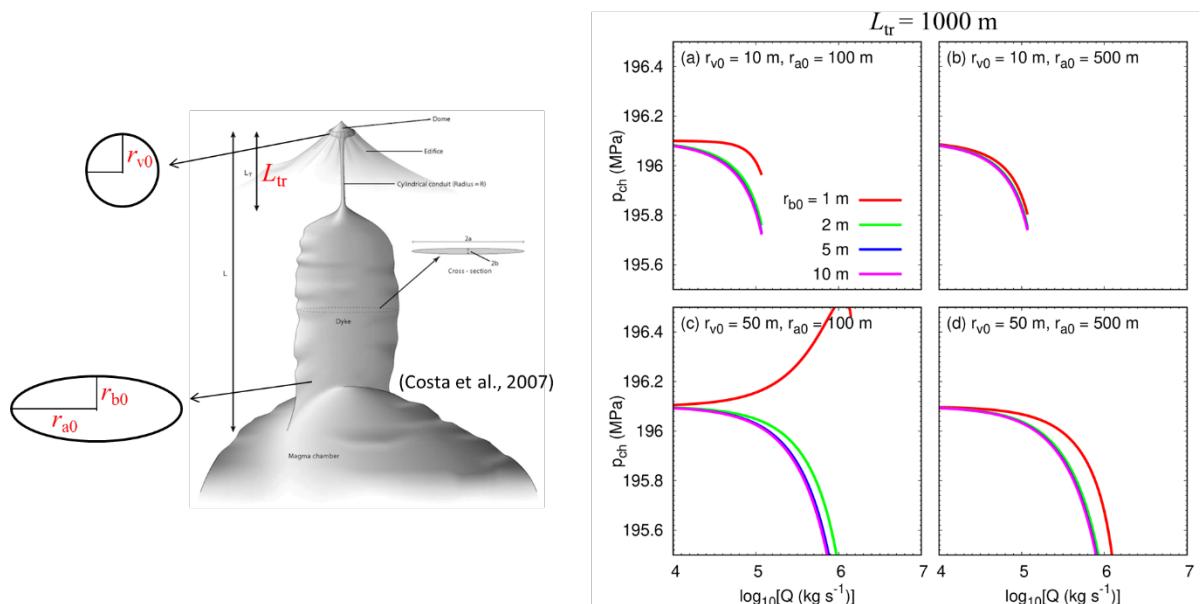


図3 火道形状の設定の概念図（左）と、A-magmaを設定した場合の非爆発的噴火に相当する火道流におけるマグマ溜まりの圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係（右）。 r_{a0} ：ダイク長軸径、 r_{b0} ：ダイク短軸径、 r_{v0} ：円筒火道径 (r_{v0})。

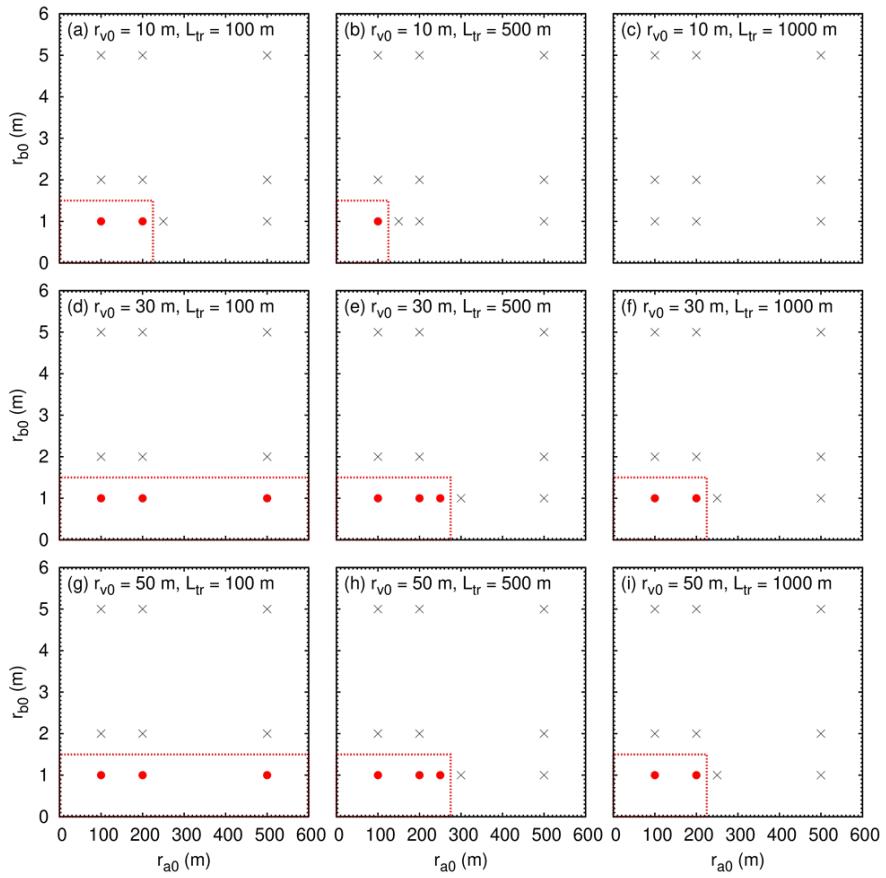


図4 A-magmaにおける非爆発的噴火定常解の存在条件。ダイク短軸径 (r_{b0}) 小 (< 1 m)、ダイク長軸径 (r_{a0}) 大、円筒火道長さ (L_{tr}) 小、円筒火道径 (r_{v0}) 大の時に定常解が存在。

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、 $d\mu_{ch}/dQ > 0$ 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、 $d\mu_{ch}/dQ > 0$ 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。

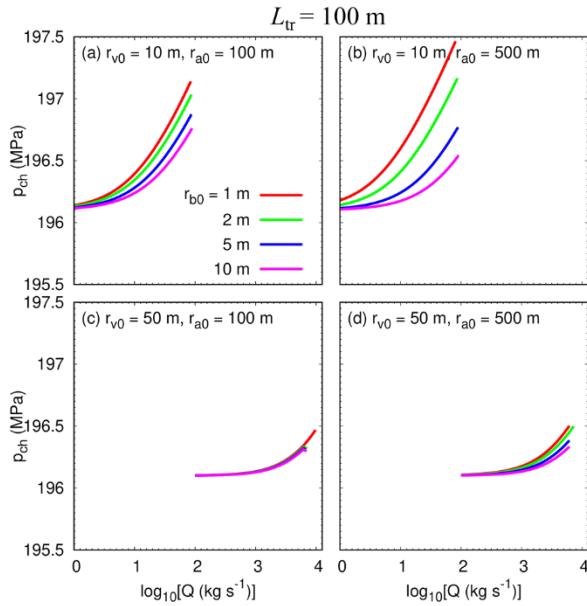


図5 B-magmaを設定した場合の非爆発的噴火に相当する火道流におけるマグマ溜まり圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係。 r_{a0} : ダイク長軸径、 r_{b0} : ダイク短軸径、 r_{v0} : 円筒火道径 (r_{v0})。

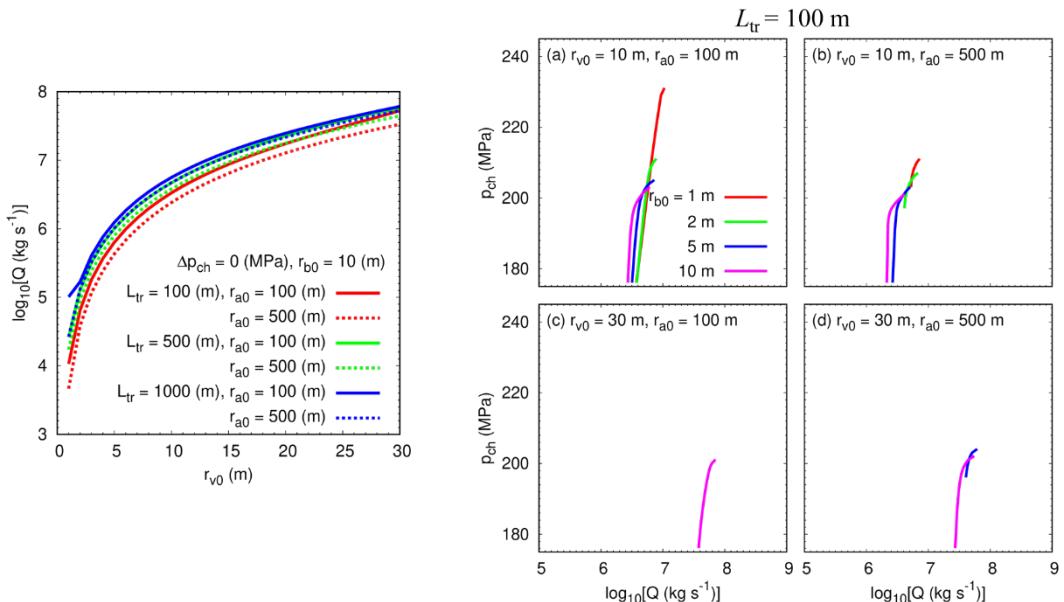


図6 B-magmaを設定した場合の爆発的噴火におけるマグマ溜まり圧力(p_{ch})と噴出率(Q)の関係(右)と、マグマ溜まりがリソスタティック圧の場合の定常解における噴出率と円筒化導径の関係(左)。

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関係を整理することで、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。

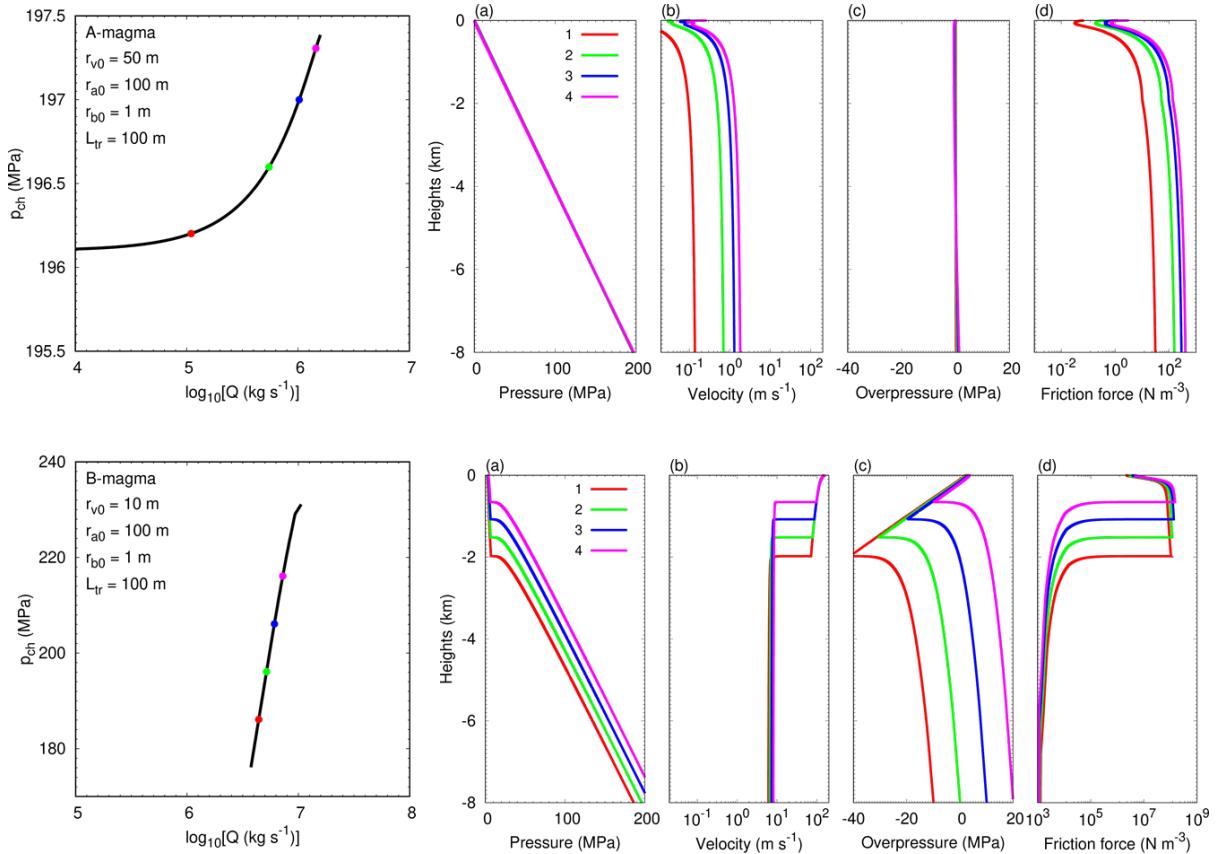


図 7 地殻変動への影響評価。A-magmaによる非爆発的噴火に相当する火道流（上）、及びB-magmaによる爆発的噴火に相当する火道流（下）の変化を想定した場合の、火道内の物理量（圧力、速度、過剰圧、粘性抵抗力）の空間分布。

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) 热過程を組み込むための方法の検討

(2) 热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。

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

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。

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

(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（ラグランジエ流の微分）を表す。これを y の位置に固定した立場で見る時間変化（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。

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

(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 $t + \Delta t$ に変わるために(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_a と活性化エネルギーに対応する活性化温度 T_a 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 5.5×10^4 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に、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ので、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。

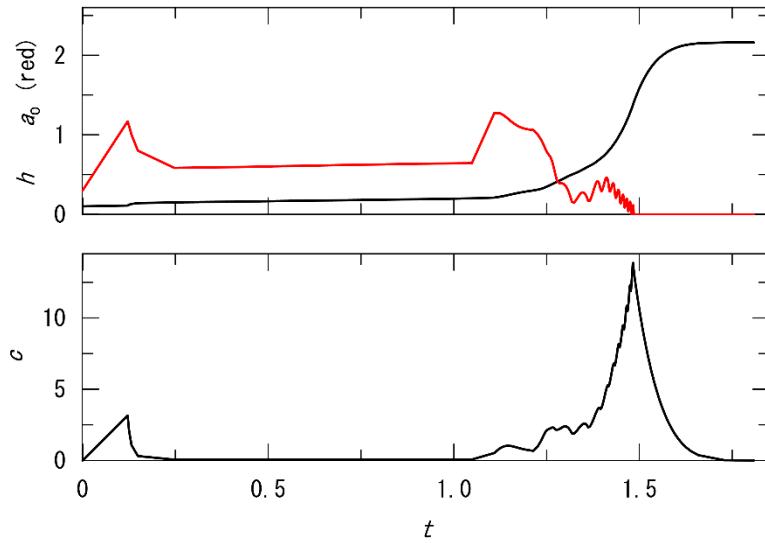


図8 割れ目の先端の位置 h 、入口 $y = 0$ での幅 a_0 (赤線)、拡大速度 c の時間 t への依存性。貫入するマグマの圧力は $p_0 = 1.3$ である。

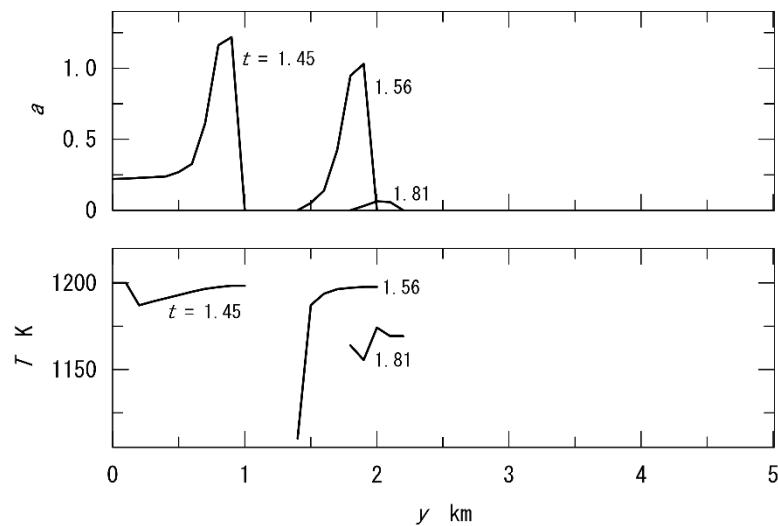


図9 割れ目の幅 a とマグマの温度 T の分布。割れ目先端の位置が $h = 1$ ($t = 1.45$)、 $h = 2$ ($t = 1.56$) に達したときと、拡大が止まったとき ($t = 1.81$) について示す。図8と同じ $p_0 = 1.3$ に対する計算結果である。

定数 po に着目する。この計算では $po = 1.3$ と設定されている。 po 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 po を 1.5 まで増やした場合の計算結果を図 10 と 11 でみる。 po の増加量は余り大きくなないが、計算結果には顕著な違いがみられる。

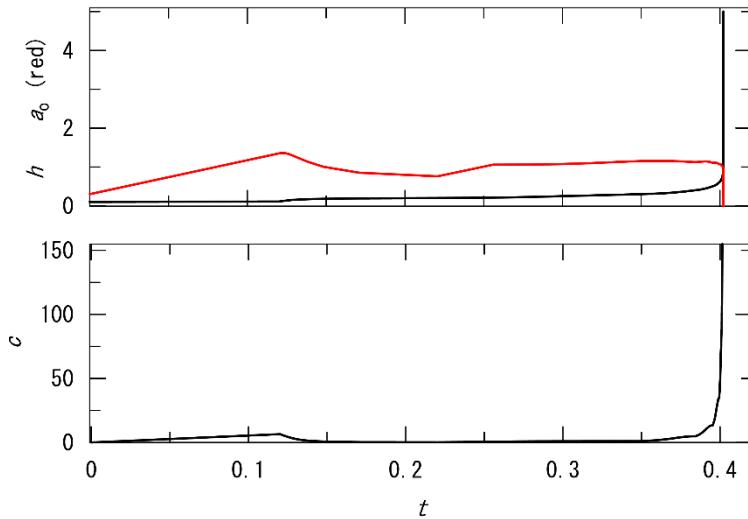


図 10 割れ目の先端の位置 h 、入口 $y = 0$ での幅 a_0 (赤線)、拡大速度 c の時間 t への依存性。入力される定数は入口の圧力を $po = 1.5$ とする以外は図 9、10 と同じである。

図 10 によると、 $po = 1.3$ 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11)。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。

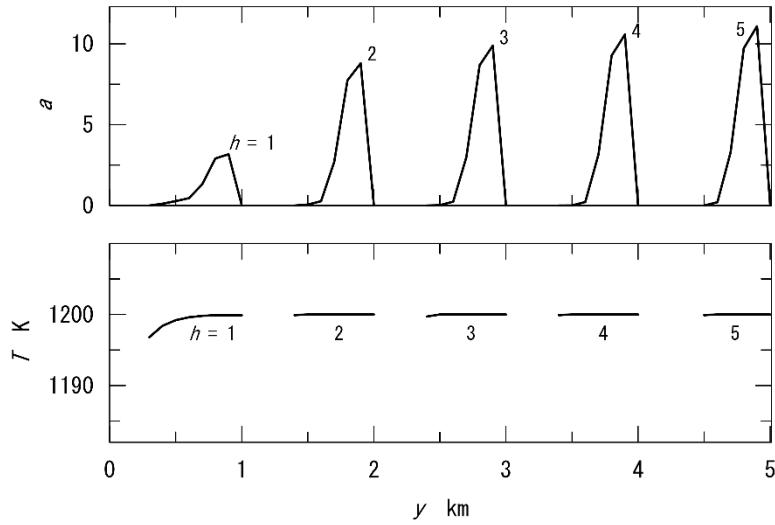


図11 割れ目の幅 a とマグマの温度 T の分布。 $p_0 = 1.5$ に対する図3.3と同じ計算の結果である。

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12）。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13）。

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14）。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。

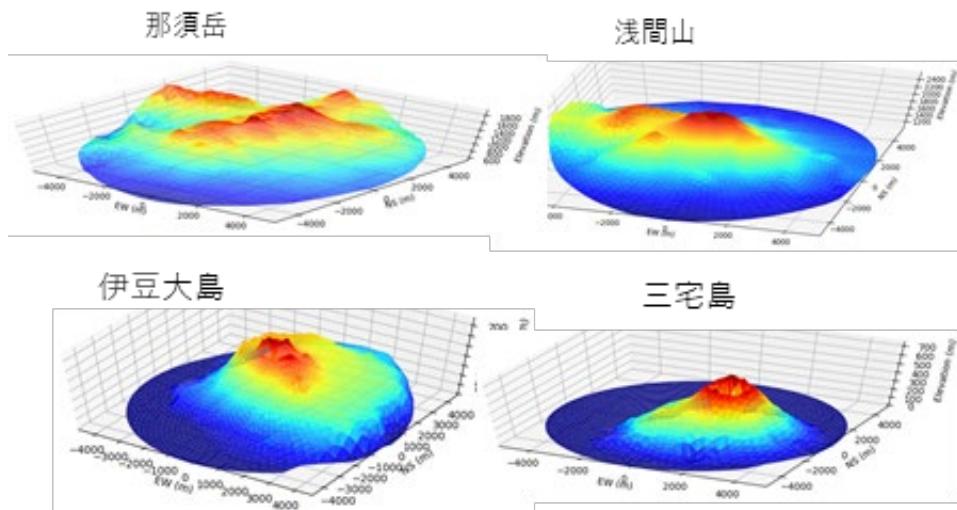


図12 作成した山体地形のメッシュモデルの例。

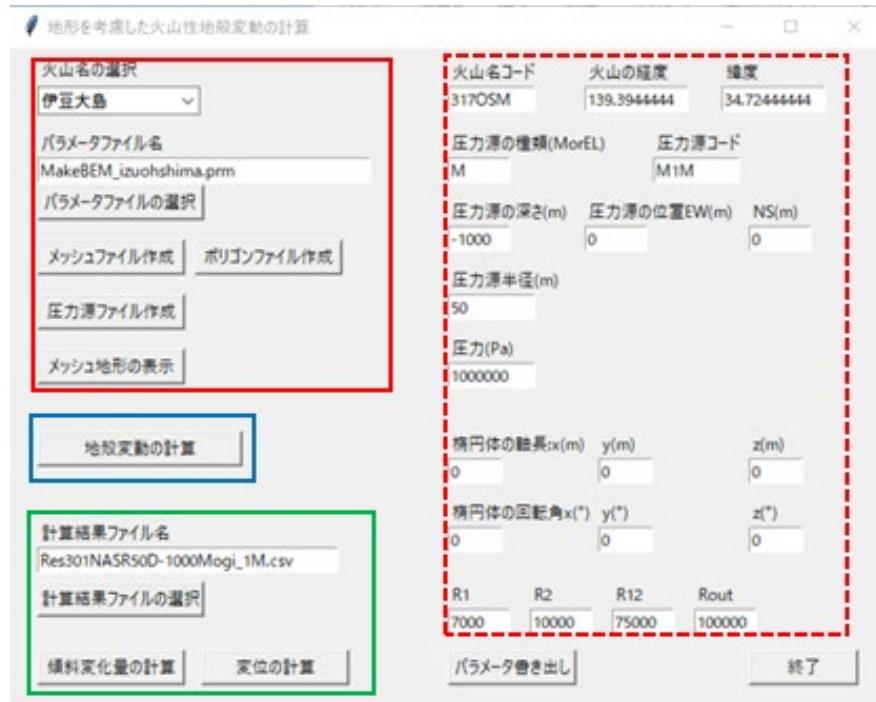


図13 火山周辺の地殻変動計算システムの操作用GUIの画面。赤枠は山体地形や圧力源のメッシュを作成するための機能、青枠は地殻変動の計算を行う機能、緑枠は計算結果を観測点ごとの観測量に変換する機能の部分をそれぞれ示している。赤点線枠内は必要なパラメータの設定を行う部分を示している。

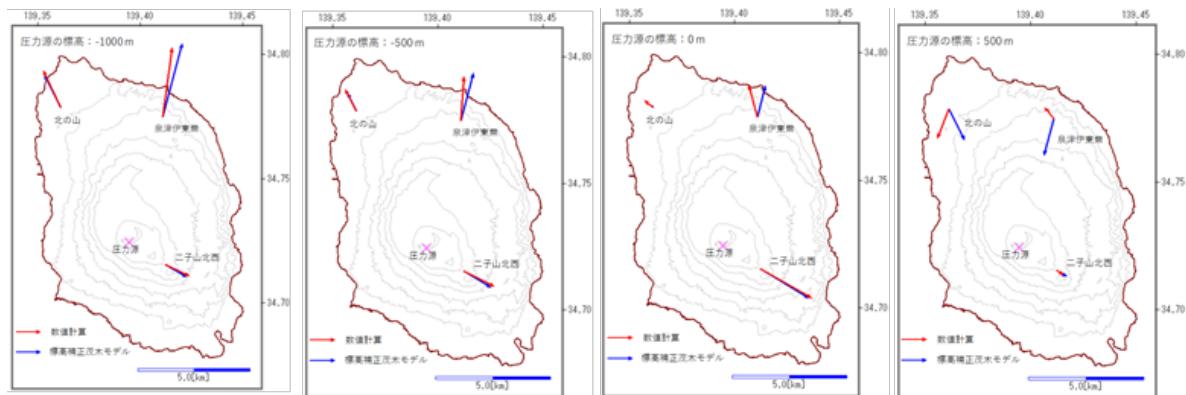


図14 球状圧力源を三原山直下に設定し、深さを変えた場合の観測点ごとの傾斜変化ベクトル。圧力源に近い二子山北西観測点の傾斜変化量は0.01倍して表示している。観測点の標高はそれぞれ北の山41m、泉津伊東無231m、二子山北西602mである。

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°C 120MPa から 920°C 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。

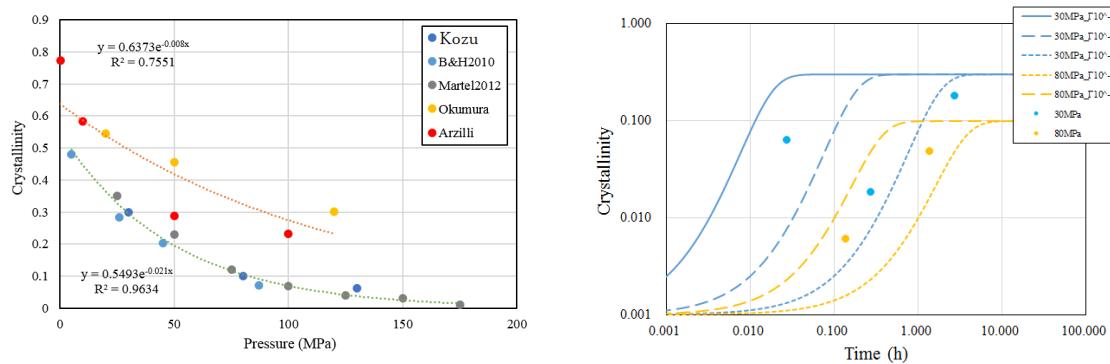


図 1 5 結晶化実験（左：平衡結晶度、右：結晶度の時間変化と結晶化速度 Γ の推定）。

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 γ_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°C 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き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 (γ_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）。

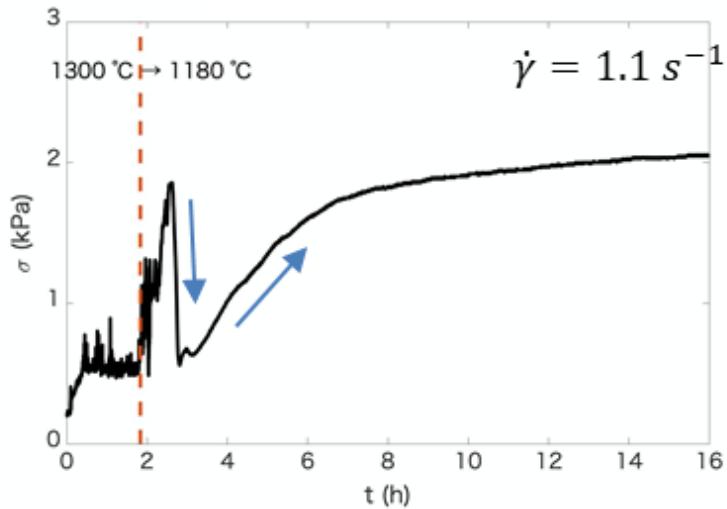


図 1-6 結晶過程での応力変化。

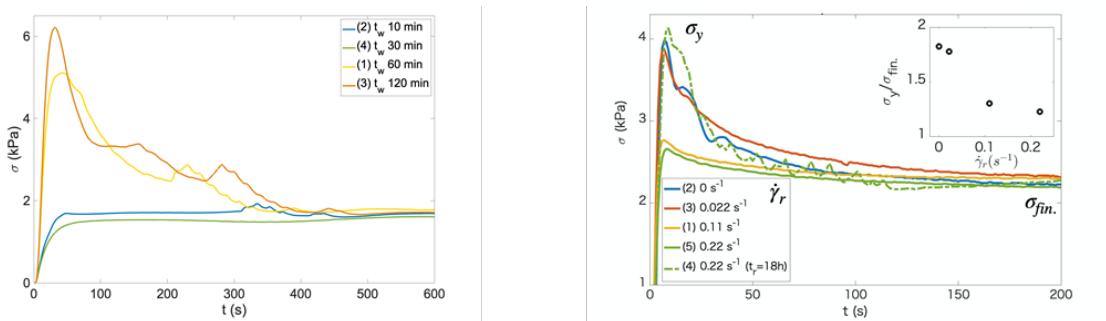


図 1-7 静置条件（左：静置時間 t_w 、右：せん断速度 γ_w ）による応力変化への影響。

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

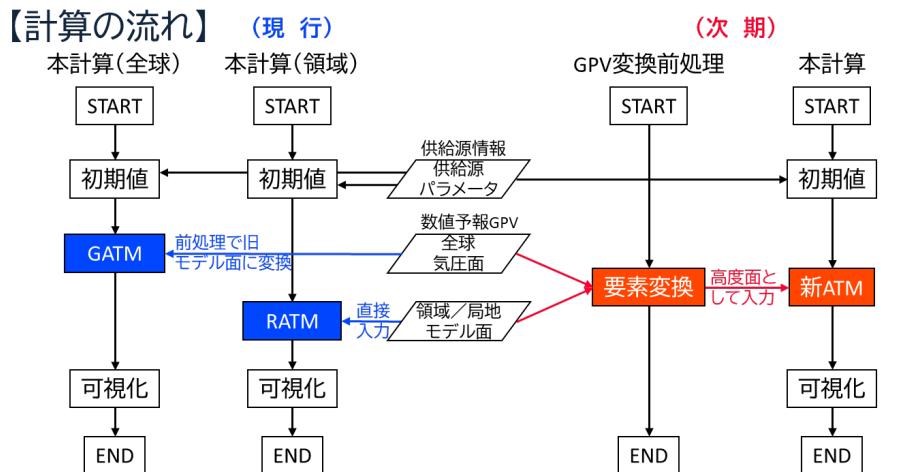
a) 降灰ハザード予測モデルの開発

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



- 【鉛直座標系】
 - 現GATM/RATMは数値モデルと同じ
 - GATM: 地形に沿う気圧座標
 - RATM: 地形に沿う高度座標
 - 新ATMは高度座標で統一
 - 前処理で、計算に必要な物理量(鉛直拡散係数、空気力学的抵抗など)を算出し、ATM入力用GPVIに変換

図18 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 19、図 20)。

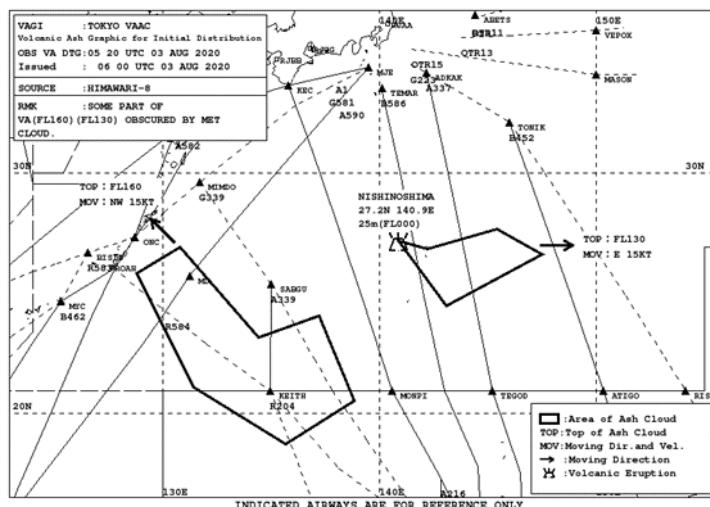


図 19 東京 VAAC による火山灰実況図。

(解析時刻：2020年8月3日14時20分)

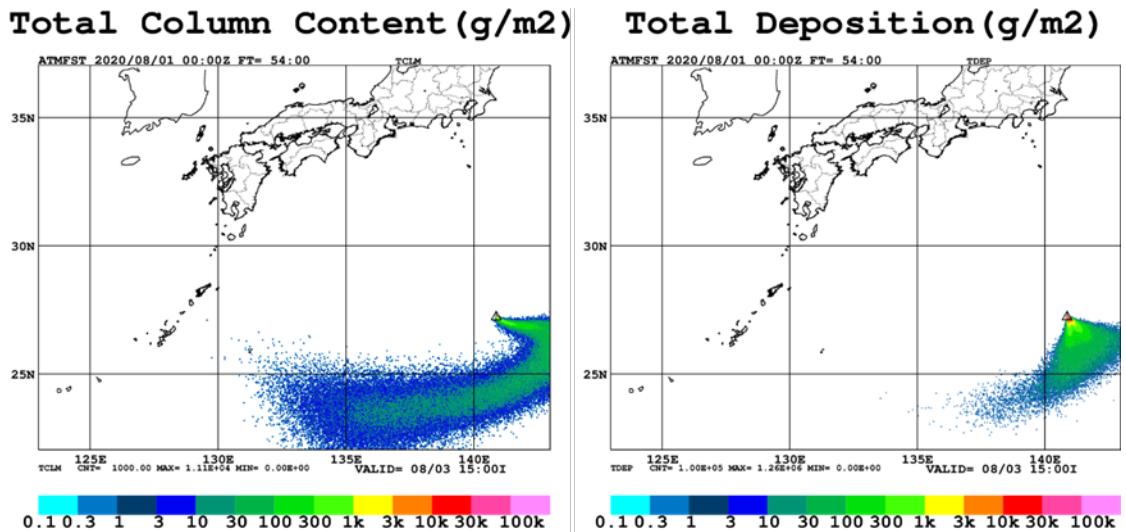


図 20 開発中の JMA-ATM（フルモデル）による気柱積算（左図）と降灰シミュレーション（右図）の動作確認結果。初期条件は Suzuki1983 による、西之島の連続噴火（噴煙高度：2020 年 8 月 1 日 09 時～2 日 03 時 19000 ft、2 日 03 時～5 日 03 時 16000 ft、5 日 03 時～6 日 21 時 13000 ft）を仮定。大気場は気象庁全球予報値（初期時刻：1 日 00 UTC、予報時間：5.5 日）を使用。

また、JMA-ATM の初期条件を適切に与えることを目的として、降下火碎物の形状・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クロメーター（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。

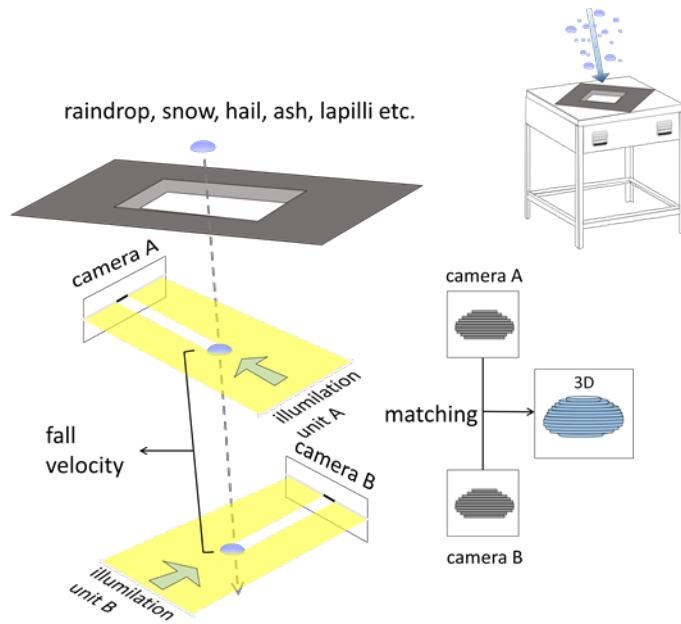


図 2 1 2DVD の外観と観測原理。

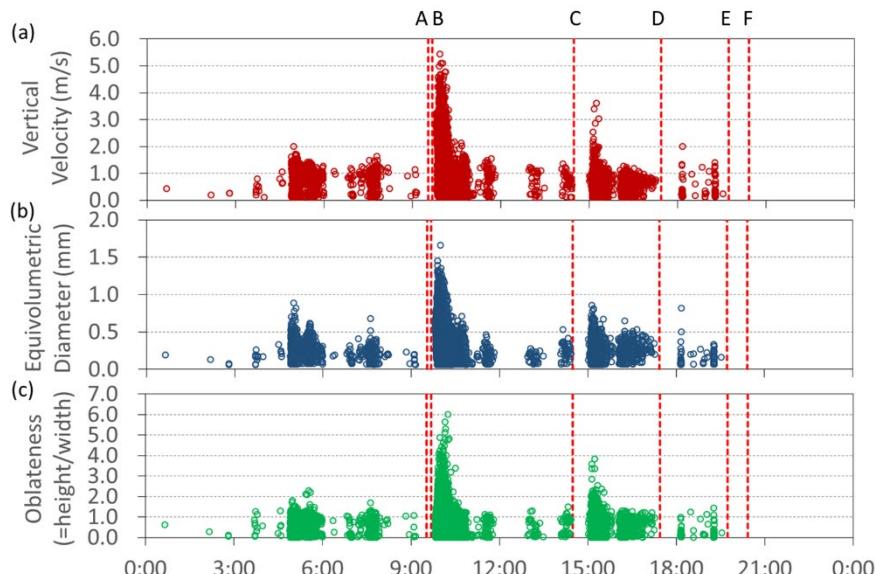


図 2 2 2019 年 10 月 14 日黒神における降灰の(a)落下速度、(b)等価体積直径、(c)扁平率 (=高さ ÷ 幅)。A～F は鹿児島地方気象台で記録された噴火 (火口上 1,000m 以上相当)。各噴火に対応する降灰の初期フェーズで落下速度と粒径が大きくなり、その後、扁平率が高まっていることが分かる。

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23）。

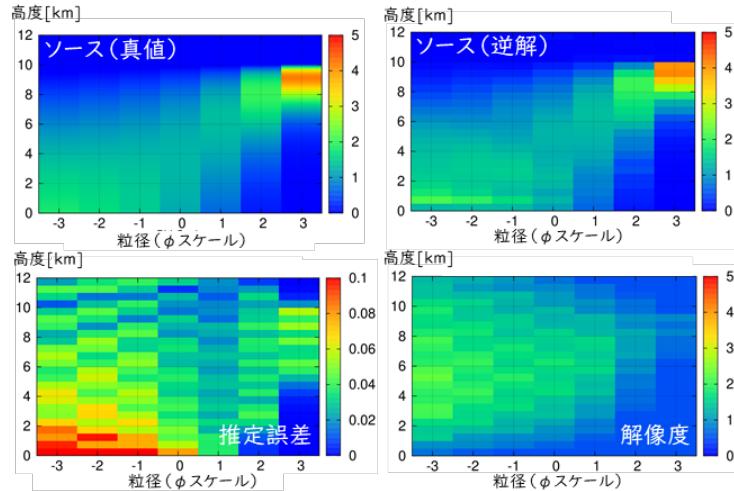


図23 双子実験を用いた逆解析の例。左上：双子実験に用いた真値。右上：真値から計算した降灰量にランダムノイズを加えて作成した降灰量を観測値としたときの逆解。左下：逆解の推定誤差。右下：逆解の解像度。ソースと推定誤差は各粒径の放出量で規格化している。

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24）。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ITO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。

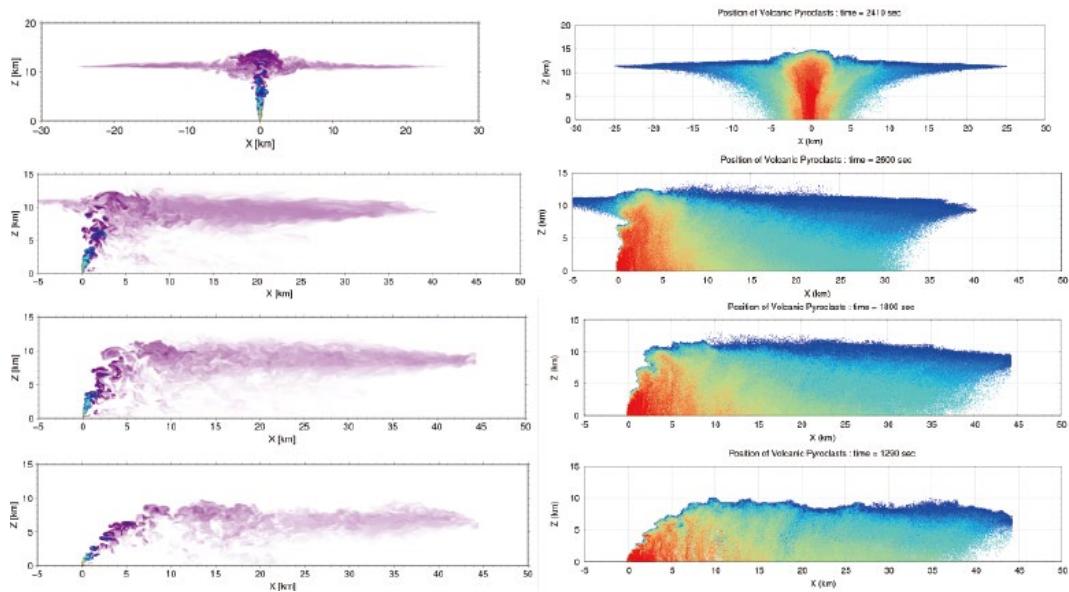


図 2.4 富士山 1707 年宝永噴火に相当する噴火規模の数値シミュレーション結果。上から風速が 0, 10, 20, 30 m/s と変えた場合について、(左列) 噴煙濃度分布と (右列) 火山灰粒子分布を示す。右列の色の違いは火山灰粒子の粒径を表す。

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。

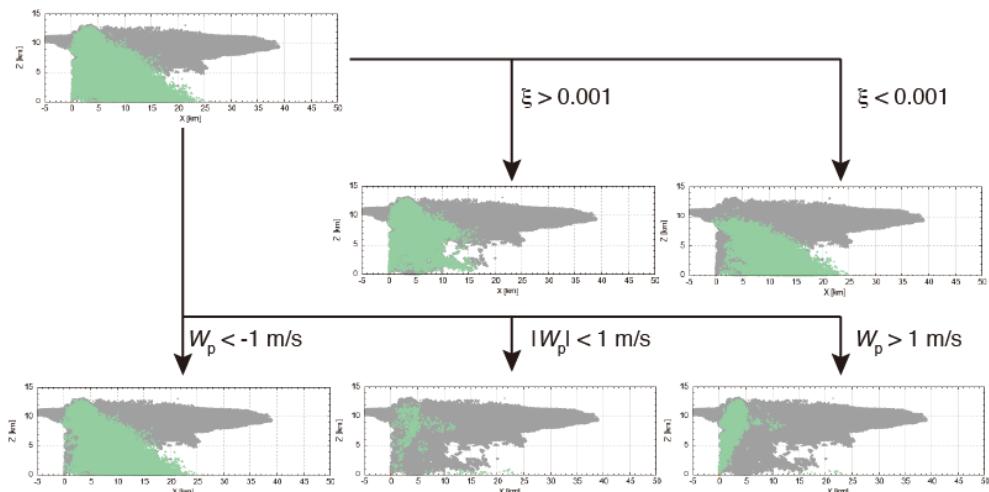


図 2.5 粒径が 2 ~ 4 mm の火山灰粒子分布の分類。全粒子分布(上段)は、噴煙の質量分率 0.001 を閾値に噴煙内部・外部に分類した(中段)。また、上昇速度によって、上昇粒子・停止粒子・下降粒子に分類した(下段)。

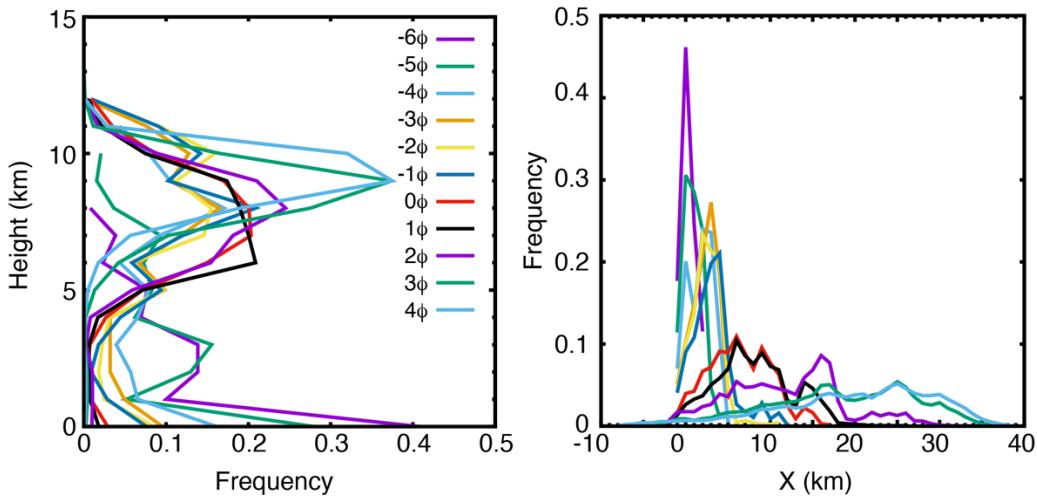


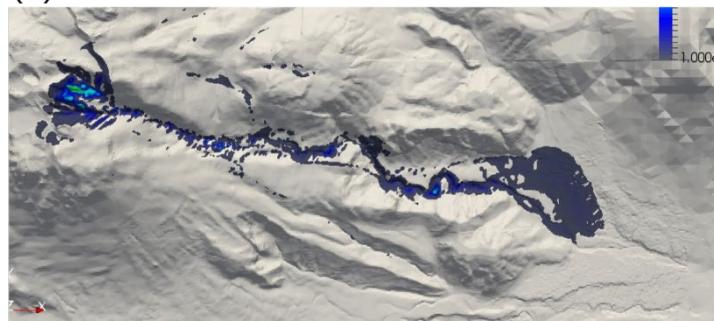
図 2-6 風速 10 m/s 中での噴煙内における降下開始粒子の存在分布。左図は高さ、右図は火口から風下方向への距離に対する粒径毎の存在分布を示す。

c) ハザード評価システムの検討

火碎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碎流の既存数値モデル、および、噴煙柱崩壊型火碎流の既存数値モデルを検証した。

溶岩ドーム崩壊型火碎流については、火碎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 faSavageHutterFOAM⁵⁾が実際の火碎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 日火碎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碎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碎流高濃度部堆積物の分布



(b) 観測された1991年6月3日火碎流堆積物分布

(Modified from Fig. 8 of Yamamoto et al., 1993)

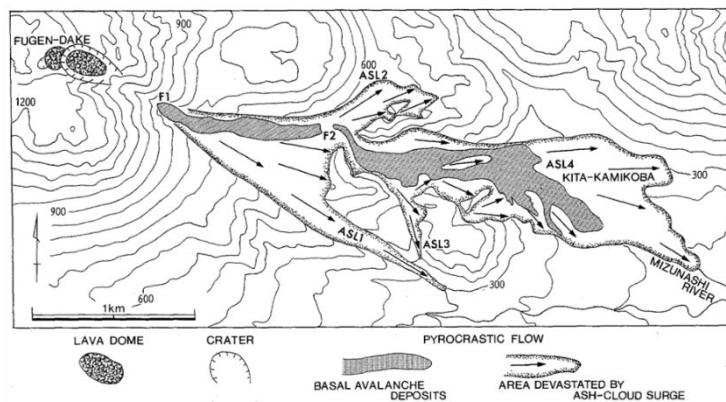


図27 (a) faSavageHutterFOAM⁵⁾による溶岩ドーム崩壊型火碎流シミュレーションの数値計算結果。(b)雲仙普賢岳で生じた溶岩ドーム崩壊型火碎流の観測結果。

噴煙柱崩壊型火碎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、火碎流の大規模実験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28a)と流れの厚さの時間変化(図28b, 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 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 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28d, e)と最終堆積物の質量分布(図28f)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碎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碎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。

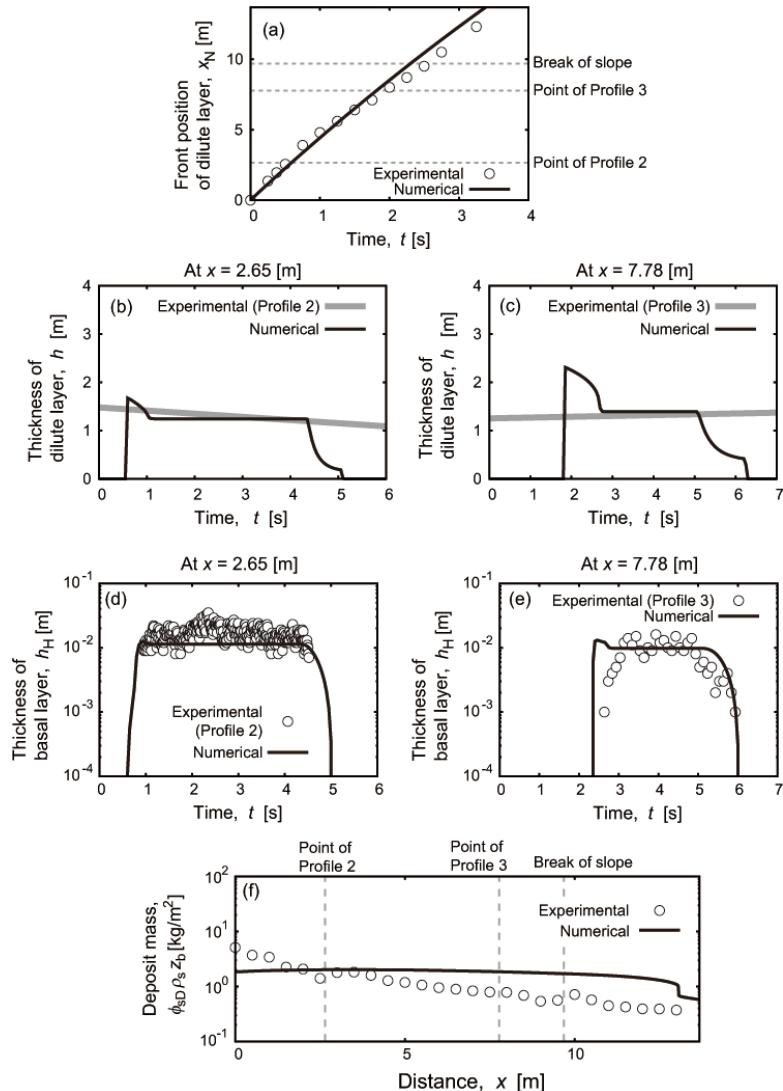


図 28 SKS-1D モデル⁶⁾の数値計算結果(黒線)と火碎流大規模実験⁷⁾の結果(丸と灰線)の比較。

今回検証した既存の SKS-1D モデル⁶⁾は、乾燥状態(つまり 100°C 以上の高温)の火碎流を対象としたモデルであるが、水(液体)を含む(つまり 100°C 以下の低温)火碎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)での火碎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の熱膨張の抑制、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。

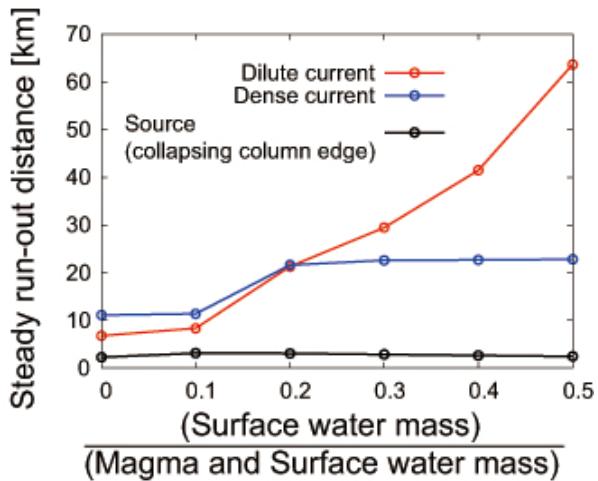


図29 SKS-1Dモデル⁶⁾の拡張版の数値計算結果。

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碎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、大規模火碎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。

火碎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、それぞれの火碎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30・図31)。

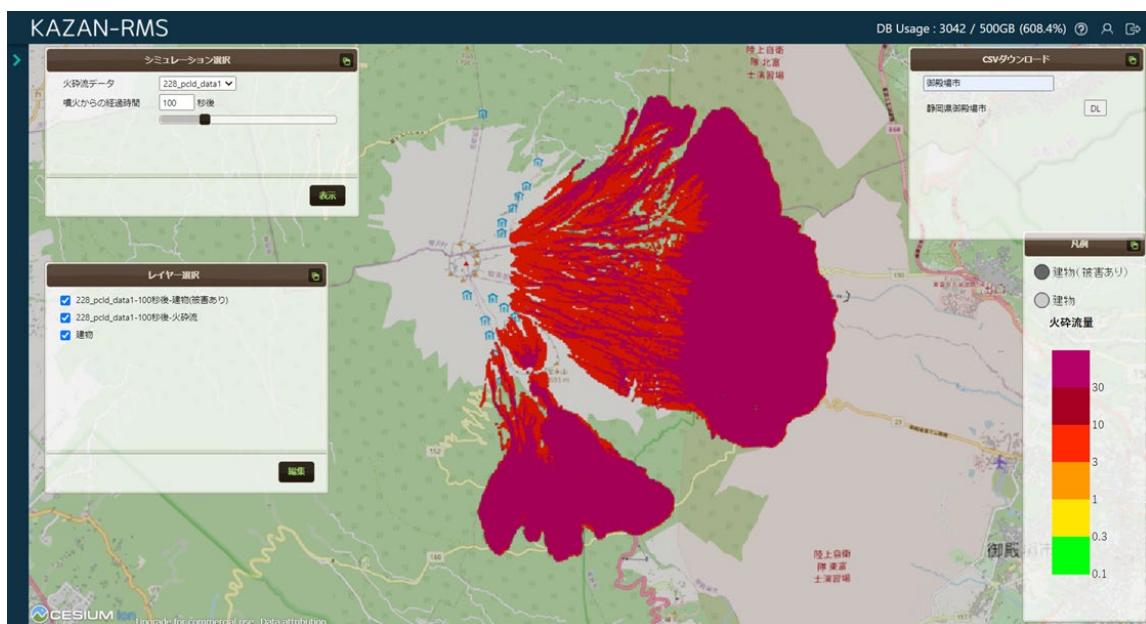


図30 溶岩ドーム崩壊型火碎流シミュレーション(faSavageHutterFOAM⁵⁾)の可視化例(ここでの初期条件は御殿場岩屑なだれを参考)。

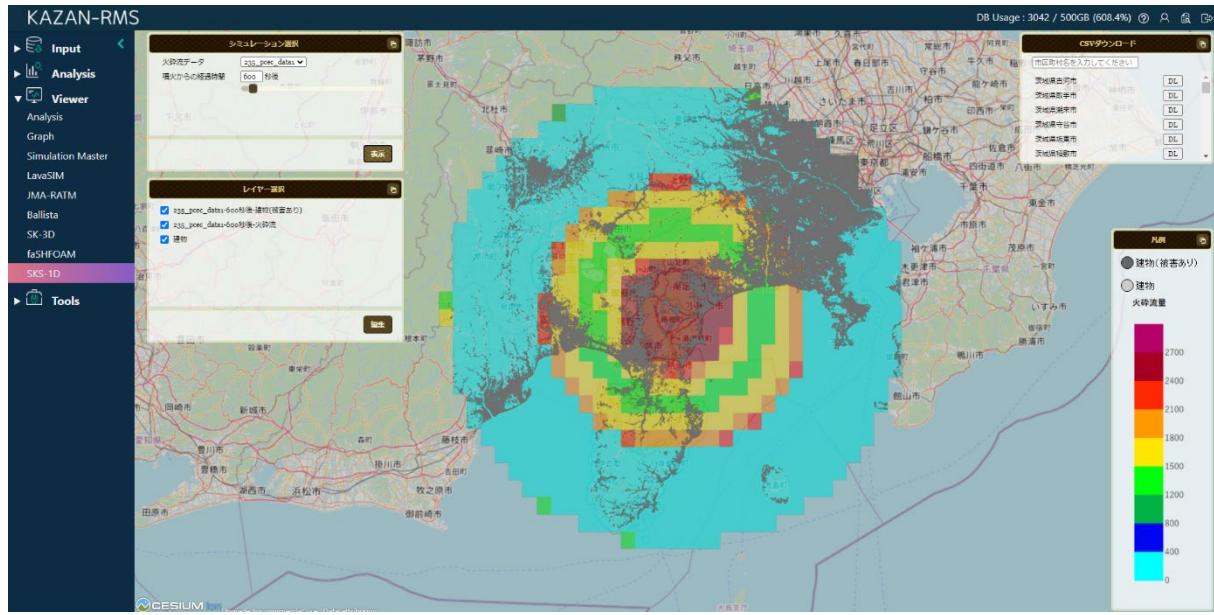


図 3 1 噴煙柱崩壊型火碎流シミュレーション(SKS-1D モデル⁶⁾)可視化例。

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	
火碎流 (溶岩ドーム)	<次ページ参照>	独自形式	
火碎流 (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]	
火碎流 (溶岩ドーム)	faSHFOAM.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	
火碎流 (噴煙柱崩壊)	SKS-1D.sh	[パラメータDir] [出力Dir]	

図33 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、これととも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な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。噴煙柱崩壊型火碎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碎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碎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。