

### 3. 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

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画
- (e) 令和元年度業務目的

##### (2) 令和元年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 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
  - 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
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

##### (3) 令和2年度の業務計画案

## (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	役職	氏名	メールアドレス
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 火山研究推進センター	副センター長	藤田英輔	fujita@bosai.go.jp
	主任研究員	三輪学央	miwao@bosai.go.jp
	契約研究員	黒川愛香	kurokawa@bosai.go.jp
	契約研究員	長井雅史	mnagai@bosai.go.jp
	契約研究員	志水宏行	s-hiro@bosai.go.jp
国立大学法人東北大学 大学院理学研究科	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	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	室長	小久保一哉	
	室長	新堀敏基	
	主任研究官	鬼澤真也	
	主任研究官	佐藤英一	
	研究官	石井憲介	
	研究官	川口亮平	
	准教授	石橋秀巳	
国立大学法人静岡大学理学部地球科学科	准教授		
国立大学法人山形大学理学部	准教授	常松佳恵	
国立大学法人神戸大学先端融合研究環	講師	清杉孝司	

### (c) 業務の目的

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

本委託業務では、サブテーマ①火山噴火予知・推移予測に資する「地下におけるマグマ移動シミュレーション」及びサブテーマ②火山災害軽減のための「噴火ハザードシミュレ

ーションの開発・高度化」を実施する。

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

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

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

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

(d) 10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：

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) 令和元年度業務目的

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、「c. マグマ物性モデルの構築」、課題 C-1 の「火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発」と連携し、これらの課題で蓄積されている常時観測火山のうち安山岩質マグマ火山に関連するマグマ物性パラメータをこれまでに構築した火道流数値モデルに入力し、非爆発的噴火から爆発的噴火への事象分岐に関する解析を実施する。さらに、火道流の変動過程がもたらす山体変形を、火山の地形効果を考慮したうえで計算し、地殻変動観測による事象分岐の検知可能性を評価する。本年度は、噴火が頻発し観測点が充実している桜島火山を主な対象として解析を進める。

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、個別要素法を適用し、岩脈進展に伴う地表面での地殻変動量を提示し、観測量と対応する手法を開発し、観測データに照らし合わせて、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を検討する。また、伊豆大島における観測データをもとにしたマグマ移動過程と地殻変動のシミュレーション手法開発を進め、地殻変動データから変動源の時空間変化を調べる。

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の構築の実験を引き続き行う。また、火山性流体のレオロジーモデル構築の予備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 年噴火噴出物を対象に発泡・結晶化実験を行う。初期条件 730°C130MPa から大気圧まで 0.01, 0.1, 1MPa/s の減圧速度で減圧実験を行い、結晶化モデルを構築、火道流モデルへの適用を検討する。

マグマ粘性測定については、1986 年伊豆大島噴火の溶岩サンプルを具体例として、引き続きモデル化に必要な結晶とメルトの混合物レオロジーの速度、温度、時間依存性を調べる。固液二相領域にある温度条件(約 1130°C)を中心に実験を進める。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。

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降灰シミュレーション・モデル(JMA-RATM)の新しい移流拡

散モデル (JMA-ATM) への改良を始める。また、「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル」による噴煙放出の初期条件を取り込み、降灰評価を高度化する手法の開発に着手する。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、導入に着手する。具体的には、首都圏を対象とした噴煙評価、各火山の火口周辺を対象とした噴石被害評価のシステム化について、計算実施や結果表示の体系化を進める。噴石被害評価のシステムについては、その数値計算部分を改良し、その内容をカナダで開催される IUGG で発表する。

また、溶岩流シミュレーションについて高速化を進めるとともに、新たなコード開発を検討する。新たに、火砕流・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始める。山形大学・神戸大学・東京大学地震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を代えて実施することを可能とする。

## (2) 令和元年度の成果

### (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、桜島を代表とする安山岩質の火山を対象として、火道内における気液固混相流マグマの上昇過程 (火道流) がもたらす地殻変動観測の数値シミュレーションを実施し、観測による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噴火未遂事例について観測データとシミュレーションから解釈を行った。また、岩脈成長について、マイクロモデルの計算手法の改善を進めるとともに、マクロモデルでの噴火・噴火未遂条件の検討と地表での地殻変動の定量化を行った。

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) の開発着手、気象レーダーデータを噴火ハザード予測シ

システムに利用する方法の検討，噴煙柱から放出される火砕物の鉛直濃度分布に基づく同化の検討，噴煙シミュレーションと噴煙柱ダイナミクス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の構築を実施した．また，噴石・溶岩流・火砕流シミュレーションの高度化と，定量的なリスク評価およびその確率表現に向けての整備を行った．また，火山ハザード評価システムの実装に着手した．

## (b) 業務の成果

### 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<sup>1)</sup>から事象分岐を支配するパラメータを抽出することを目的とした研究について，本年度は常時観測火山のうち安山岩質マグマ火山，特に桜島火山を対象とした解析を実施した．桜島火山噴火のマグマ物性・地質条件を考慮した火道流数値モデルに基づき，火道流の定常解および噴出率の急増を伴う火道流の時間発展変動を計算し，さらにその火道流の変動過程がもたらす山体変形を計算することで，桜島における大正噴火級の爆発的噴火の検知可能性を検証した．以下ではその詳細を説明する．

火道流モデルの解析においては，桜島の1914年大正噴火に関するマグマ物性・地質条件の推定データを参照してパラメータ設定を行った．重要なマグマ物性の一つであるマグマ粘性については，これまで用いてきた珪長質マグマの一般化モデルとは異なる，メルト組成の岩石学的観測データに基づくより定量的な粘性モデルを適用した．結晶化成長のモデルを規定するパラメータである結晶成長速度に関しては，「c. マグマ物性モデルの構築」において組成依存性が指摘されていることから，その知見に基づき幅広いパラメータ領域のもとで解析を行った．また，マグマ溜まりの深さは地球物理学的観測に基づき固定した一方で，体積については火道流の変動に影響を与え得ることからその依存性を調べた．まず，火道流モデルに基づき，火道流ダイナミクスを規定する定常火道流におけるマグマ溜まり圧力  $P$  と噴出率  $Q$  の関係を求めた（図1の実線）．その結果，低・高噴出率側に  $dP/dQ > 0$  となる安定領域が存在するS字型の曲線が幅広い結晶成長速度のもとで得られた．一方で，低噴出率側の安定領域が，珪長質マグマの場合に比べて相対的に狭くなることがわかった．これは，マグマ粘性の増加で鉛直方向脱ガスが効率的になって火道流が安定化する効果が抑えられることが要因となっていると考えられる．さらに，噴出率側の安定領域における火道流を初期条件として，マグマ溜まりへのマグマ流入率を  $dP/dQ < 0$  の不安定領域に設定した場合の火道流の時間発展変動を計算し，噴出率の急増を伴う火道流の遷移過程を再現した（図1の破線）．この遷移過程はマグマ溜まりの体積に依存して変化し，体積が大きいほどマグマ溜まり圧力の変化量は小さくなり，また遷移の時間スケールは長くなることがわかった．この遷移過程においては，火道内でのマグマ発泡度と過剰圧が急増し，特に過剰圧についてはマグマ溜まり過剰圧が増加して減少に転じた後，火道浅部の過剰圧が局所的に増加する特徴がある（図2）．また，流動するマグマによって火道壁にもたらされるせん断応力も，浅部でマグマが加速する効果によって遷移中に急増する（図2d）．これらの過剰圧およびせん断応力の増加は噴出率急増の直前に生じる．

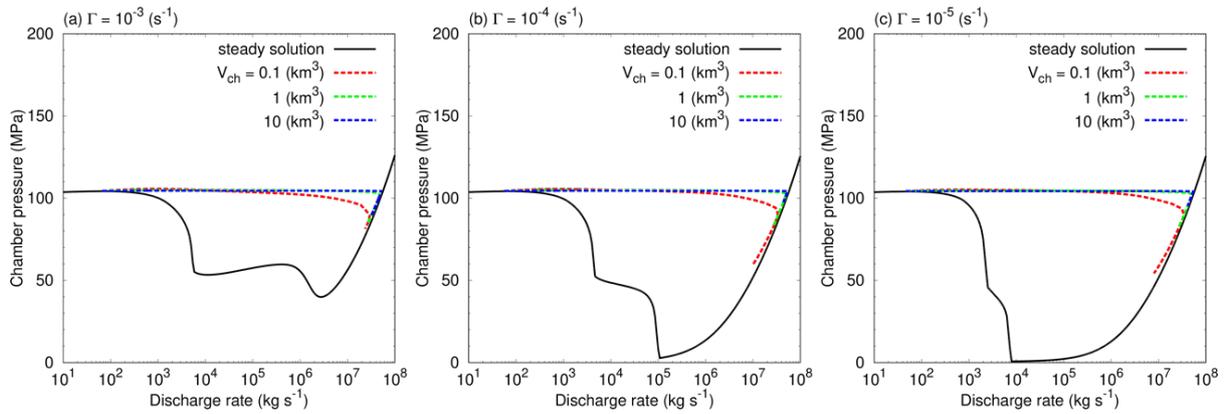


図1 桜島噴火のパラメータに基づく、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力と噴出率の関係（実線）と、噴出率の急増を伴う火道流の時間発展変動（破線）の解析結果。 $\Gamma$ ：結晶成長速度， $V_{ch}$ ：マグマ溜まり体積。

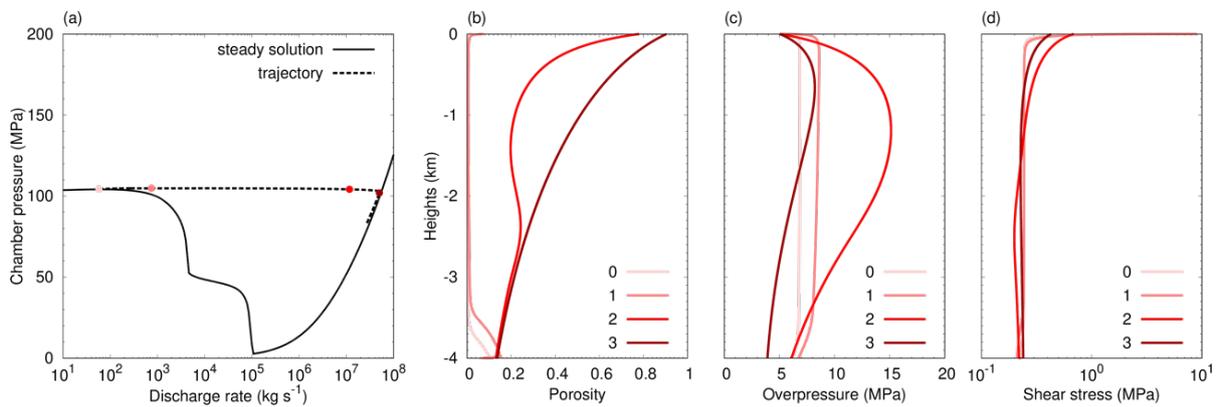


図2 火道流の遷移過程における火道内流動分布の変化。(a)の各点におけるマグマ発泡度(b)、マグマ過剰圧(c)、火道壁にはたらくせん断応力(d)の分布を示している。 $\Gamma = 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ， $V_{ch} = 1 \text{ (km}^3\text{)}$ 。

火道流がもたらす山体変形の計算として、本研究ではまず昨年度までに開発した二次元軸対称の弾性体を考慮した有限要素法に基づくモデルの解析を行った。桜島の山体地形を単純化した高さ1 km、半径5 kmの円錐形山体を仮定し、弾性体内部に設定した火道およびマグマ溜まりの壁に火道流解析から得られた圧力（垂直応力）あるいはせん断応力を境界条件として入力することで、地表変位とそれに基づき計算される傾斜・歪を出力した。山体変形の特徴を系統的に調べるため、マグマ溜まり過剰圧が最大値をとってから噴出率が最大値になるまでの時間で規格化した時間のもとで傾斜および歪の変化量を調べた。昨年度の成果と同様に、桜島噴火を対象とした場合においても、火口からの距離が約1500 mまでの範囲においてのみ、火道浅部の過剰圧増加とマグマ加速に由来する噴出率急増直前の傾斜及び歪の増加が検知されることがわかった（図3 e-h）。一方で、マグマ溜まりの減圧と火道浅部の増圧の競合効果によって、噴出率急増の直前ではないが微小な傾斜・歪の増加がより広範な領域で確認された。また、せん断応力による山体変形の影響を調べるために、垂直応力とせん断応力をどちらも入力した場合（図3 e-h）と垂直応力のみを入力した場合（図3 a-d）の計算を実施し、系統的な比較を行った。その結果、特に傾斜についてはせん断応力の影響を強く受けて大きく変化することが確認された。さらに、傾斜・歪変化の結

晶成長速度・マグマ溜まり体積依存性を調べた結果、変化の定性的な特徴は共通している一方で、結晶成長速度が大きい、またマグマ溜まり体積が大きいほど傾斜・歪の変化量が大きくなることが明らかになった (図4)。これは、結晶成長速度が大きいほど浅部のマグマ粘性が高くなることで浅部過剰圧が大きくなる効果と、マグマ溜まり体積が大きいほどマグマ溜まり過剰圧の減少量が小さくなり、浅部過剰圧増加を相殺する影響が小さくなる効果に起因している。以上のように、爆発的噴火への遷移検知に有効な傾斜・歪の特徴的变化量は、結晶成長速度とマグマ溜まり体積というマグマ物性や地質条件に強く依存して変化し得ることが明らかになった。

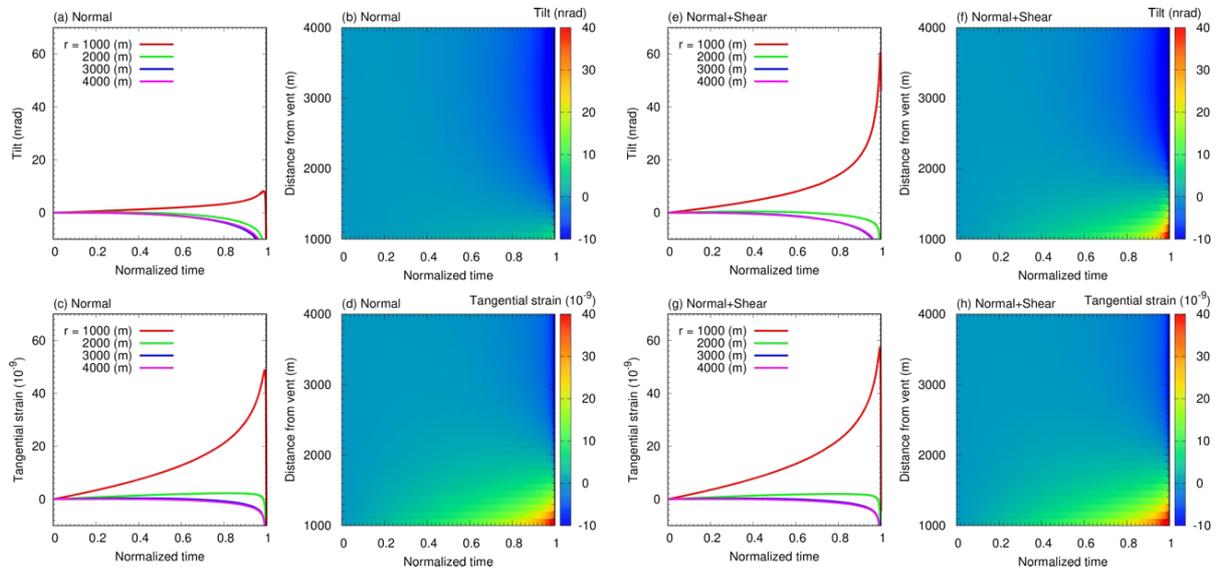


図3 二次元軸対称弾性体モデルに基づく、火道流の時間発展変動によって生じる地表における傾斜 (a, b, e, f) 及び歪 (c, d, g, h) の計算結果. (a-d) 垂直応力のみ入力; (e-f) 垂直応力とせん断応力をどちらも入力した場合.  $r$  は火口からの距離を表す.  $\Gamma = 10^{-4} (\text{s}^{-1})$ ,  $V_{\text{ch}} = 1 (\text{km}^3)$ .

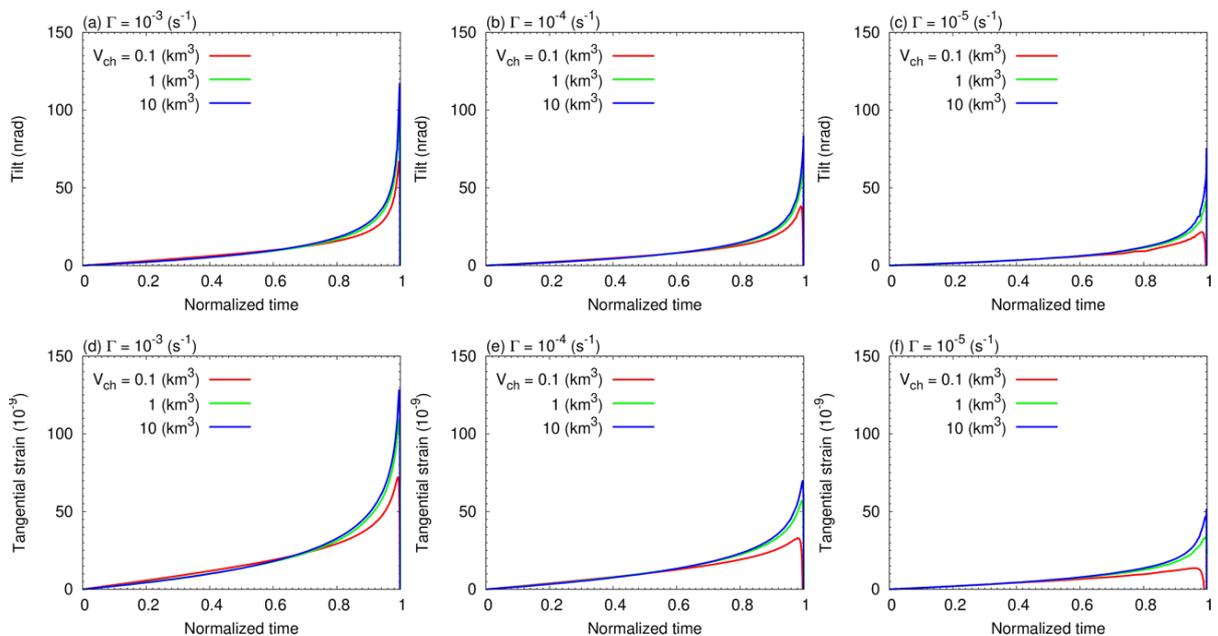


図4 二次元軸対称弾性体モデルの計算における、傾斜 (a-c) 及び歪 (d-f) 変化の結晶成長速度 ( $\Gamma$ )・マグマ溜まり体積 ( $V_{\text{ch}}$ ) 依存性。

本研究ではさらに、山体変形の計算について、従来の二次元軸対称モデルから、実際の山体地形を考慮した三次元の有限要素法モデルへの拡張を行った。国土地理院発行の5 m メッシュ数値標高モデルに基づき桜島の山体地形を考慮しつつ、計算領域境界の影響を低減するための山体サイズに対して十分に大きい弾性体モデルを作成し、南岳火口直下に火道及びマグマ溜まりを設定した(図5)。これによって、噴火遷移中の火道流の変動に伴い、既存の気象庁傾斜観測点(あみだ川 AMD, 瀬戸 SET, 横山 YOK)において観測され得る傾斜変化を計算することが可能となった。解析の結果、二次元軸対称モデルの解析から推測されたように火口から2 km 以上離れた既存の観測点では噴出率急増直前の傾斜変化を捉えることは難しいが、噴出率急増の直前ではない微小な傾斜変化が捉えられ、火口方向が隆起する傾斜変動の特徴が明らかになった(図6)。三次元モデルでは計算負荷の制約上広範なパラメータ解析まで至っていないが、二次軸対称モデルと整合的な結果が得られ、信頼度の高いモデルを構築することに成功した。今後、更なるパラメータ解析によって、既存観測点による噴火検知の実現可能性について評価することが可能となった。

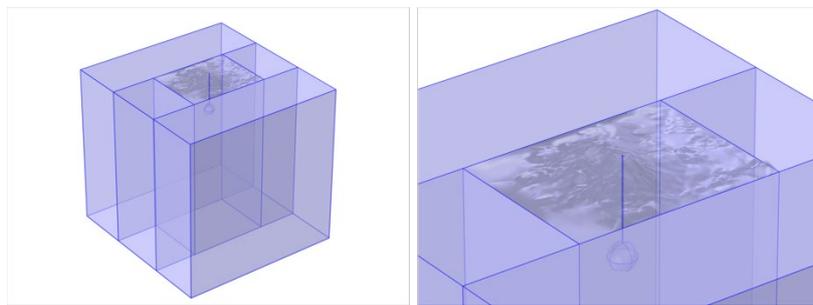


図5 桜島の山体変形計算のための三次元弾性体モデル。

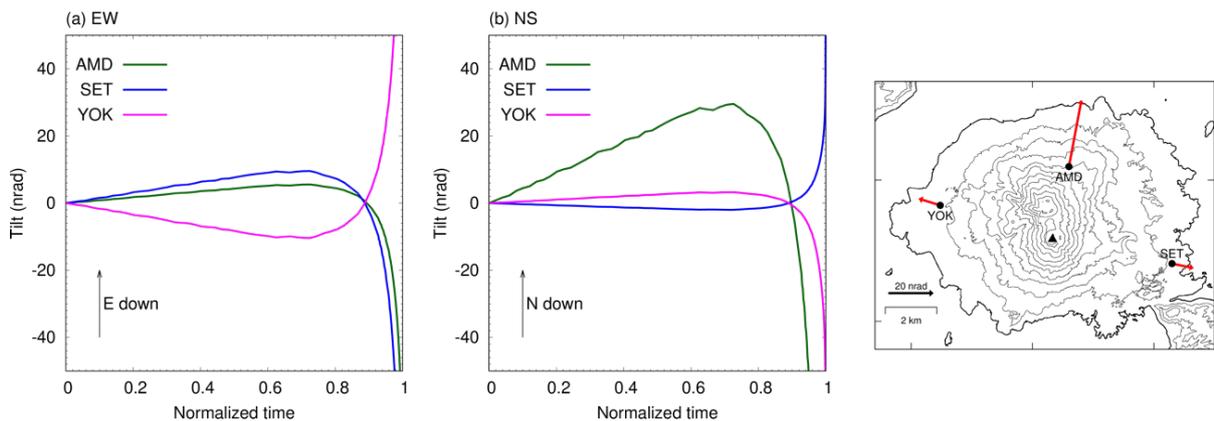


図6 三次元弾性体モデルに基づく、火道流の変動がもたらす気象庁傾斜観測点における傾斜変化の計算結果。(a) 東西成分, (b) 南北成分。右図に各観測点における傾斜ベクトルを示す。

## 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た。

具体的には、これまでに得られた破壊進展のモデルにおいて未解決であった3つの課題について検討を行った。

### (1) 岩脈先端部における解の発散の制御機能

岩脈先端部およびその上部において応力が大きくなり、これが割れ目内部の流体領域に影響を及ぼしてマグマの流れを計算するうえで不安定を生じる。これを改善するために、解析解と数値解の重ね合わせにおいて開口による貫入面での変形は解析解で表現する手法を採用した。また、数値解には貫入面以外（地表等）の境界条件を満たすように解を補正する機能を持たせ、境界条件によって貫入面で生ずる応力の変化を見積もることができるようにし、解析解と数値解を完全に分離するようにした。

### (2) 割れ目拡大速度に応じた時間刻みの可変機能

マグマの貫入によって割れ目先端で破壊が進む速度は、破壊様式やマグマの物性によって大きく変化する。この変化に追従するように、計算の時間刻みを自動的に調整する機能を付加した。この機能は、割れ目の伸びる長さがほぼ一定となるように時間刻みを変えることによって実現した。なお、腐食破壊から脆性破壊への移行、また、マグマの破碎などの急激に拡大速度が変化する時間を予め予測し、その時間で計算を打ち切り、新しい条件で計算を再開する機能を含めるものとした。

### (3) マグマの物性変化の取り込み機能

マグマの上昇過程において重要な物性変化である、減圧によるマグマ中の揮発性成分の発泡効果を取り込む機能を持つものとした。発泡によりマグマの密度が急激に減少し、上昇を加速する。また、気泡を含むマグマの実効粘性は低下する。

以上3つの課題を満たすように計算方法を改善し、その方法に基づく計算プログラムを開発して効果を検証した。

代表的な計算例を示す。この計算ではマグマの貫入口 ( $y = 0$ ) で岩石の圧力に加えて  $1 (5 \times 10^7 \text{ Pa}, 500 \text{ 気圧})$  の圧力が保持されており、それが貫入の駆動力となっている。最初 ( $t = 0$ ) に長さ  $0.5 \text{ km}$  の割れ目が存在しており、それが種になって割れ目がどう伸びるかを追跡する。

計算結果における特徴的な変数の時間変化を図7に図示する。図の上段で  $h$  は割れ目先端の位置（貫入口からの距離, km),  $a_0$  は貫入口の割れ目の幅（単位は m）である。中段は割れ目の拡大速度  $c$  と応力拡大係数  $K$  ( $K_0$  との比), 下段は流れの強さ  $A$  と気体成分の体積の割合  $\phi$  である。 $c$  と  $A$  の値がマグマの粘性率などに依存して大きく変わる。

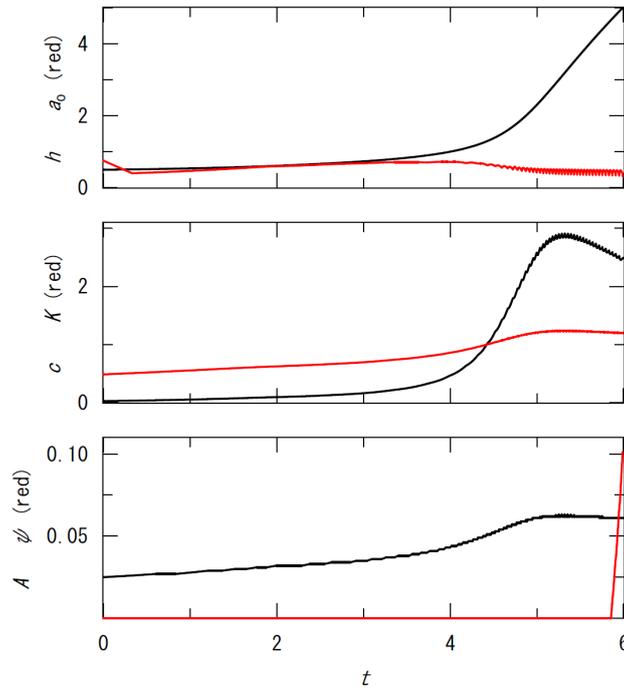


図7 マグマ先端の位置  $h$ , 貫入口の割れ目の幅  $a_0$ , 先端の拡大速度  $c$ , 応力拡大係数  $K$ , 流れの強さ  $A$ , 気体成分の体積の割合を時間  $t$  の関数として示す.

変数の変化は図7では時間  $t$  の関数として表現されているが、実際の数値計算は先端の位置  $h$  が一定の刻みで増えるように進められている。計算のステップを  $h$  の刻みで制御する機能は、今年度の作業で加えられた。この計算では、割れ目は腐食破壊の進行とともに拡大を続け、拡大機構は最後まで脆性破壊に移行しない。拡大はある時点から急速に加速する。しかし、その後拡大速度は減少に転じて地表に達する。拡大速度の変化に合わせて、貫入口の割れ目の幅や流れの大きさもゆっくりと増減する。また、今年度はマグマ中の気体成分の役割が考慮されており、それが貫入の最終段階に効果をみせる。図7によれば、気体成分の発泡は時間  $t$  が 5.8 を超える（割れ目の高さ  $h$  が 4.6 を超える）あたりから始まる。発泡の影響で拡大が急に加速する傾向はみられない。同じ計算で、マグマの先端が貫入口から 4 km（地表からの深さ 1 km）の位置と、地表に達したときを取り出して、 $a$ ,  $\sigma_{xx}$ ,  $\phi$  の空間分布を図8と図9に示す。ここで  $\sigma_{xx}$  は岩石からマグマに垂直に働く応力の成分（応力の水平成分）である。

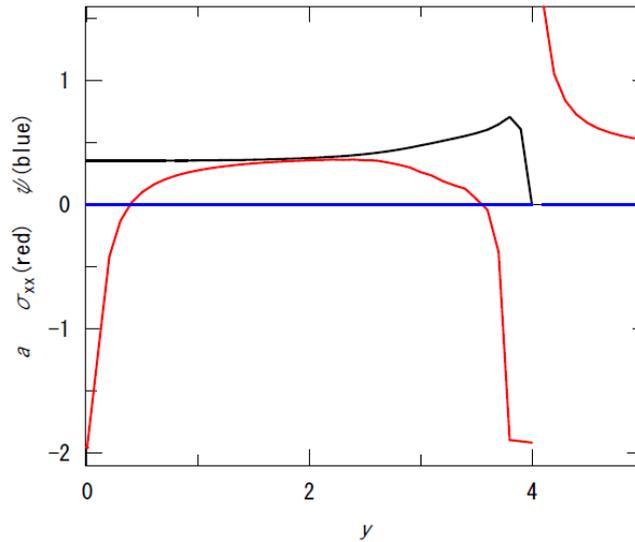


図8 マグマの先端が  $h = 4$  の位置に達したとき ( $t = 5.61$ ) の割れ目の厚さ  $a$  (黒), マグマに岩石から垂直にはたらく応力  $\sigma_{xx}$  (赤), マグマ中の気体成分の体積の割合  $\phi$  (青) の分布.

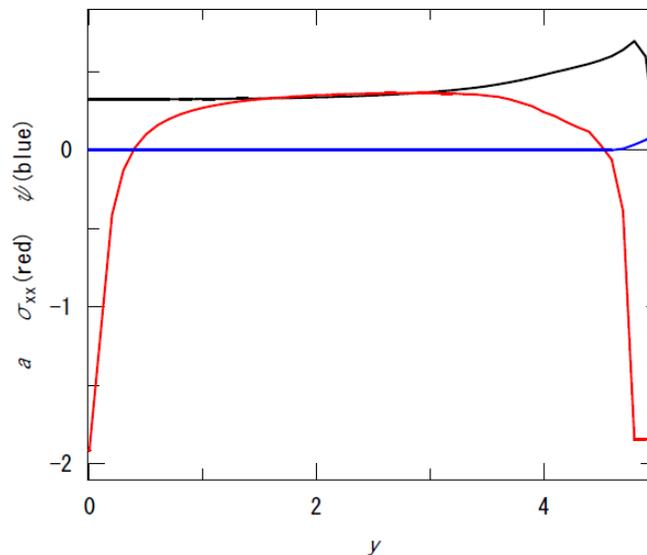


図9 マグマの先端が地表 ( $h = 5$ ) に達したとき ( $t = 5.99$ ) の割れ目の厚さ  $a$  (黒), マグマに岩石から垂直にはたらく応力  $\sigma_{xx}$  (赤), マグマ中の気体成分の体積の割合  $\phi$  (青) の分布.

図8と図9によれば, 割れ目の幅は先端付近ではふくらんでいるが, それ以外ではほぼ平坦である. マグマから岩石に働く応力は, ほとんどの場所で張力であるが, 貫入口と先端部では圧縮力になっている. 貫入口付近の圧縮は貫入するマグマに加えた圧力に対応する. 先端部の圧縮力は先端部でマグマに強い圧力がはたらいていることを意味し, それが割れ目をふくらませ, 割れ目の拡大を駆動するものと理解できる. 割れ目の外側の未破壊領域 ( $y$ が  $h$ より大きい範囲) では岩石に強い張力が働いており, その大きさが応力拡大係数で表現される. この張力のために先端部が破壊され, 割れ目が拡大するのである. 図8によると, 割れ目の外側ではたらく張力は内部の圧縮力と明確に切り離されており, 内部に染み出していない. 図7の  $\phi$  の変化にみられるように, 割れ目の先端が地表に近づくとき, 気体成分が発泡する. 図9によれば, 発泡は深さが  $0.5 \text{ km}$

程度より浅い場所で生じている。しかし、通常の想定で 1 気圧の圧力から予想されるのは破碎が起こるほど高い  $\phi$  の値であり、計算結果はそれよりずっと小さい。先端部の付近では岩石からマグマに強い圧力がかかっており、それが発泡を抑制し、気相の膨張も抑えると推測される。

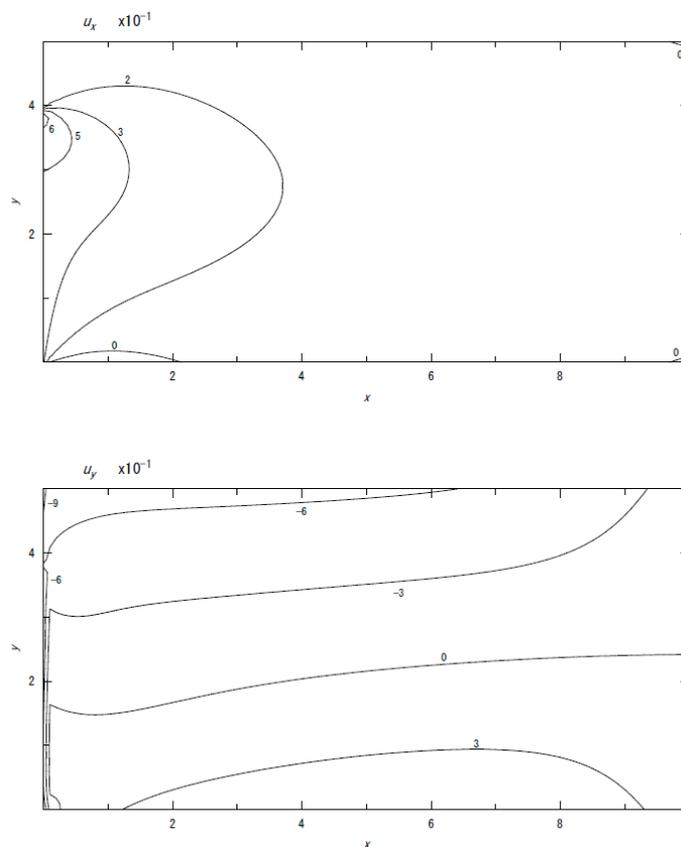


図 10 マグマの先端が  $h = 4$  の位置に達したとき ( $t = 5.61$ ; 図 8 に対応する時点) の水平変位  $u_x$  (上) と鉛直変位  $u_y$  (下) の分布。

図 8 と同じく  $h$  が 4 の位置にあるときに、岩石の内部で変位 ( $u_x$ ,  $u_y$ ) がどう分布するかを図 10 に示す。マグマの貫入のために、先端付近には岩石を押し出す方向に変位が生じている (上)。鉛直方向の変位 (下) は、地表付近では沈降、下面では隆起傾向である。

これらの結果をもとに、下記のことが分かった。

- ・ マグマの貫入は、割れ目の拡大が始まると急速に加速するが、地表に近づくと減速に転ずる。
- ・ 割れ目の拡大は、先端部にふくらみができるとう加速を始め、拡大速度はふくらみの状態に制御される。
- ・ 貫入過程で気体成分の発泡が始まっても、貫入に伴う岩石からの圧力で発泡が抑えられ、破碎は起こりにくい。
- ・ 拡大機構が腐食破壊から脆性破壊に移ると、拡大速度は一息に急増するが、地表に達する前に振動を伴いながら減少する。これらの知見はあくまでも計算の試行段階で得られたものであり、その妥当性についてはさらに詳しく究明する必要がある。

岩脈貫入シミュレーション（マクロモデル）では，上記マイクロモデルによる岩脈と弾性体の境界における応力分布を初期値として，粒子（個別要素）で表した山体内の岩脈進展と地殻変動についての計算を引き続き実施した．個別要素法における地下のマグマ進展にともなう地表面の地殻変動について H30 年度に得られた結果，すなわち噴火・噴火未遂における初期増圧依存性に対応する地表粒子の変位分布の可視化を行った（図 1 1）．地下でのマグマ上昇・岩脈貫入に対応する地表粒子の移動パターンは複雑な様相を呈するが，実際の地形モデルや観測点との位置関係に対応する粒子を特定して比較することが可能である．ただし，現在は粒子数が最大 1,000,000 個であり，さらに桁数をあげたうえで評価を行うことが，より精密な比較をするために必要である．

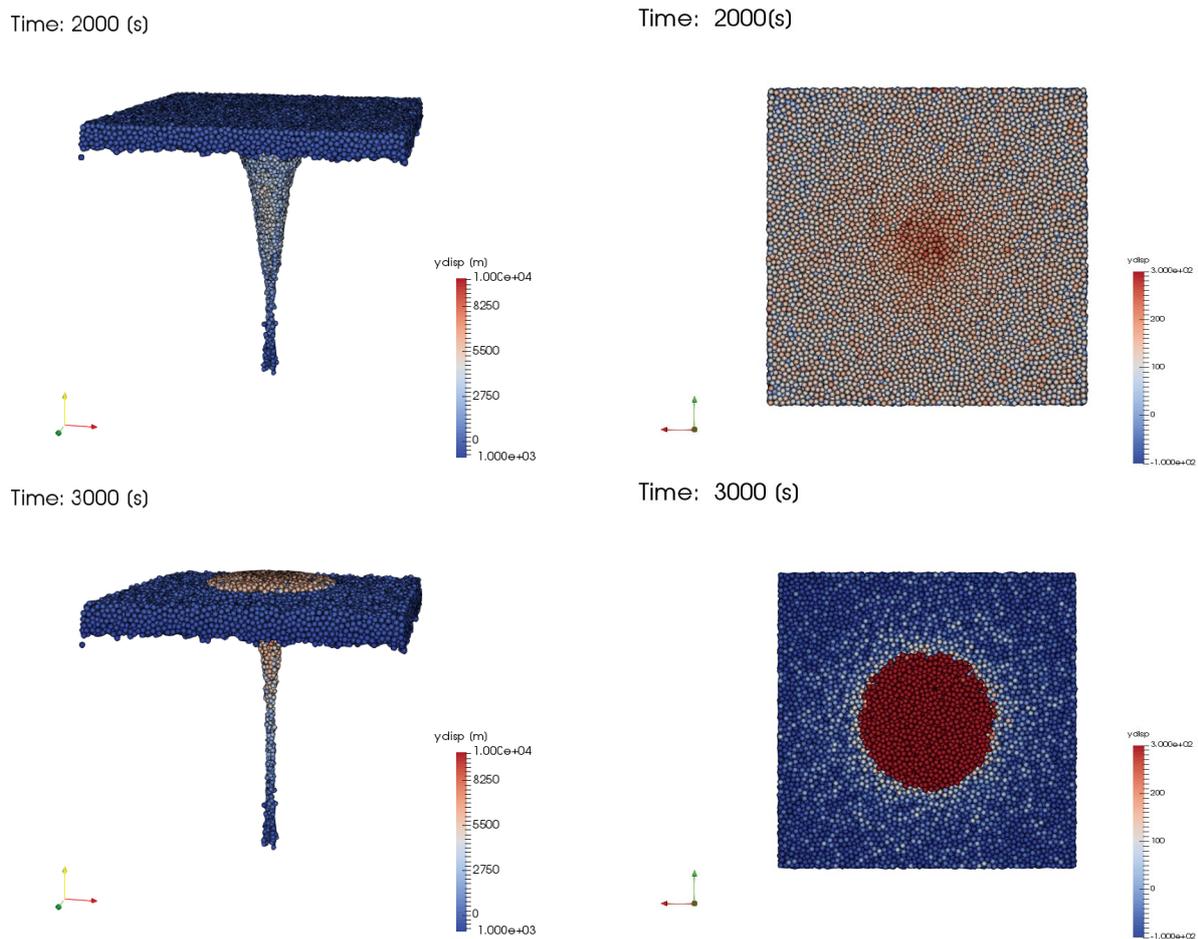


図 1 1 個別要素法による地下におけるマグマ進展シミュレーションにより推定される地表の変位パターン例（鉛直方向変位）．3000s は噴火後．

伊豆大島における観測データをもとにしたマグマ移動過程と地殻変動のシミュレーション手法の開発を進めた．境界要素法により山体地形を考慮した地殻変動を求めるプログラムの開発進め，ボアホール内に設置された観測点の変化量を計算できる機能を加えた．また，伊豆大島の 10m メッシュの数値標高データ（DEM）に基づいて，境界要素法で地殻変動の計算を行うための地形モデルを作成した．地形の効果，観測される傾斜計データに与える影響を，観測点間の標高差の大きい御嶽山を対象として，調べた結果を火山学会で発表した．

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。

水熱合成減圧実験装置を用い神津島 838 年噴火噴出物を対象に発泡・結晶化実験を行った。前年度までに決定された岩石組織のアニール時間(72 時間)を参考にマグマ溜りでの温度圧力条件(730°C, 130MPa)を再現後、その温度圧力条件から大気圧付近(約 0.2MPa)まで一定減圧速度で減圧したところ、実験産物の発泡度が 80%を越え崩壊し、結晶組織解析が難しいことが分かった。そこで、昨年度までで得られた最終圧力 30MPa の実験結果を用いて、神津島マグマの平衡結晶度  $\beta_{eq}$  と結晶成長率  $\Gamma$  を調べ、先行研究の減圧結晶化実験から見積もった値と比較した(図 1 2)。その結果、珪長質マグマの圧力による平衡結晶度変化は  $\beta_{eq}=0.552\exp(-0.021P)$  と表され、一方、苦鉄質マグマでは  $\beta_{eq}=0.6373\exp(-0.008P)$  と平衡結晶度が系統的に高くなることが分かった(図 1 2a)。また、結晶成長率  $\Gamma$  は、一般的にマグマ温度の低下と SiO<sub>2</sub> 量の増加とともに減少するが、最も低温な神津島マグマのみ高くなることが分かった(図 1 2b)。このことは、神津島マグマの実験では、リキダス以下の低温条件でのアニールにより結晶の種が形成され結晶成長が比較的容易に起きたことを示唆する。Kozono and Koyaguchi (2012)の火道流モデルによると、平衡結晶度  $\beta_{eq}$  と結晶成長率  $\Gamma$  が高いと、マグマ溜り圧力一定条件で非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移に関する臨界マグマ供給率が大きくなる。以上から、珪長質マグマの方が苦鉄質マグマよりも非爆発的噴火から爆発的噴火への臨界マグマ供給率が小さく、噴火遷移が起こりやすいと考えられる。

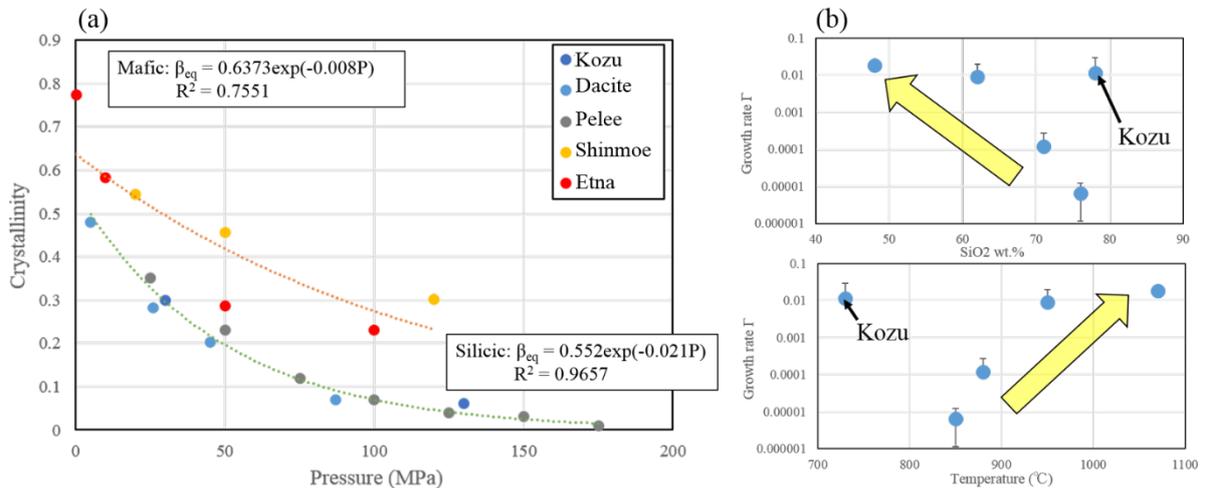


図 1 2 (a)平衡結晶度の圧力変化。寒色系が珪長質マグマ，暖色系が苦鉄質マグマによる減圧実験を示す，(b)結晶成長率の SiO<sub>2</sub> 及び温度変化。神津島マグマは高い結晶成長率を示す。

マグマ粘性測定については、引き続き 1986 年伊豆大島噴火の B1 溶岩サンプルを用いて行った。より安定した高温状態を実現するため、実験システムは SiC 発熱体を搭載したマッフル炉を導入して改良した。平成 30 年度の研究からマグマレオロジーは測定前の状態によって異なる挙動を示す結果が得られたので、本年度は実験前にサンプルを静置させるプロセス（静置時間）での条件が後続する本実験に与える影響について主に調べた。

実験はサンプルを 1300°C で完全熔融させた後、固液二相が共存する 1180°C で行った。完全熔融後、電気炉上部の穴からロッドを炉内のサンプルに挿入し、一定のせん断速度で回転させて応力値を測定した。図 1 3 に静置条件が本実験に与える影響を示す。1 時間静置すると、完全静止

の場合だけでなく有限のせん断を加えた場合でも応力にオーバーシュートや変動が出現した。せん断速度が大きくなるとこれらは不明瞭になるが、長い静置時間(18時間)を置くことでオーバーシュートと応力変動は出現した。従って静置時間と静置中のせん断速度が、マグマのレオロジーを決める要因であると言える。このことは、実際のマグマや溶岩も完全に停止していない状態でも内部で流れを妨げるプロセスが進行する可能性を示唆しており、モデルを構築する上で重要な特徴だと考えている。本年度もこれらの研究は東北大学及び静岡大学の協力を得て実施した。

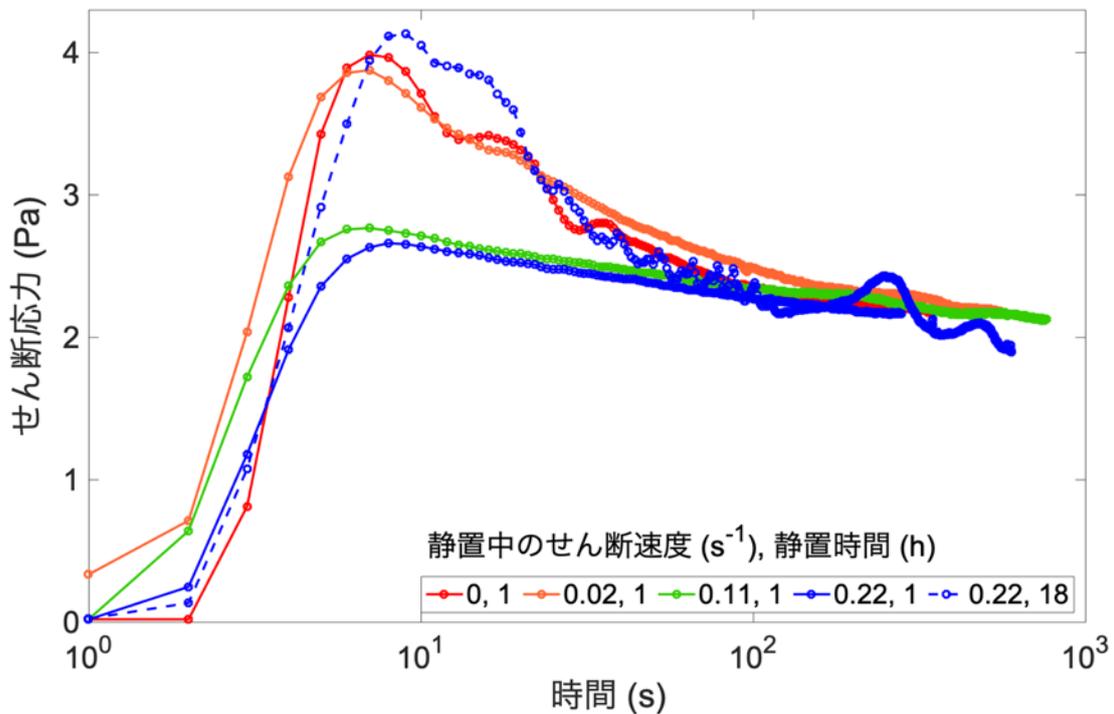


図 1.3 様々な静置条件（静置中のせん断速度と静置時間）でのせん断応力の時間変化。本実験はせん断速度  $0.11s^{-1}$  で行った。

## 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

### 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。

具体的には前年度まで降灰シミュレーションの予備計算に使用してきたプロトタイプ（JMA-RATM）<sup>2)</sup>を更新するために、新しい移流拡散モデル（JMA-ATM）の開発に着手した。また前年度に着手した「b. 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発」との連携について、SK-3Dモデルの計算結果を初期条件として、開発中のJMA-ATM（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。

富士山宝永噴火の最初のステージを想定して、従来のSuzuki1983とSK-3Dモデルに基づく初期条件（図14）でATM計算を比較した結果、火山礫より大きな粒子の落下範囲と落下時刻に大きな違いが出ることで、予想降灰量は、風の鉛直シアが小さい本事例では大局的には変わらないが、降灰分布の主軸方向とそれに直交する方向で特徴的な差異があること（図15）を確認した。

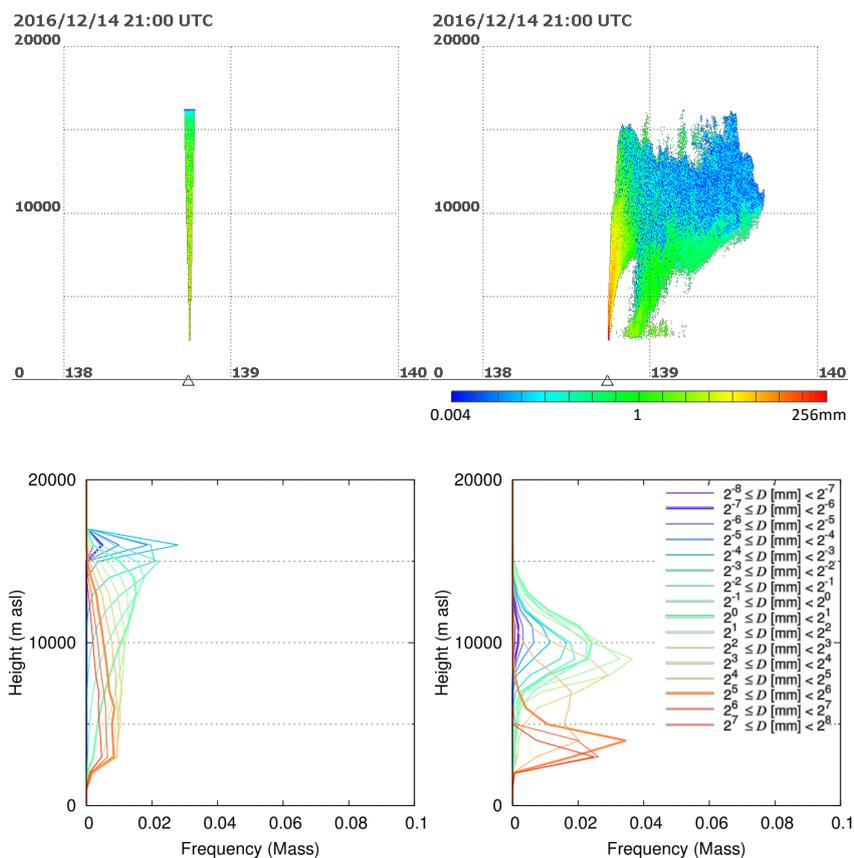


図14 初期分布（東西断面）と質量供給率（鉛直分布）の比較．（左）Suzuki1983，（右）SK-3Dモデルによる．粒径に関する質量分布として対数正規分布を仮定した場合．いずれも最高噴煙高度は合わせており，頻度は総噴出量で規格化した．

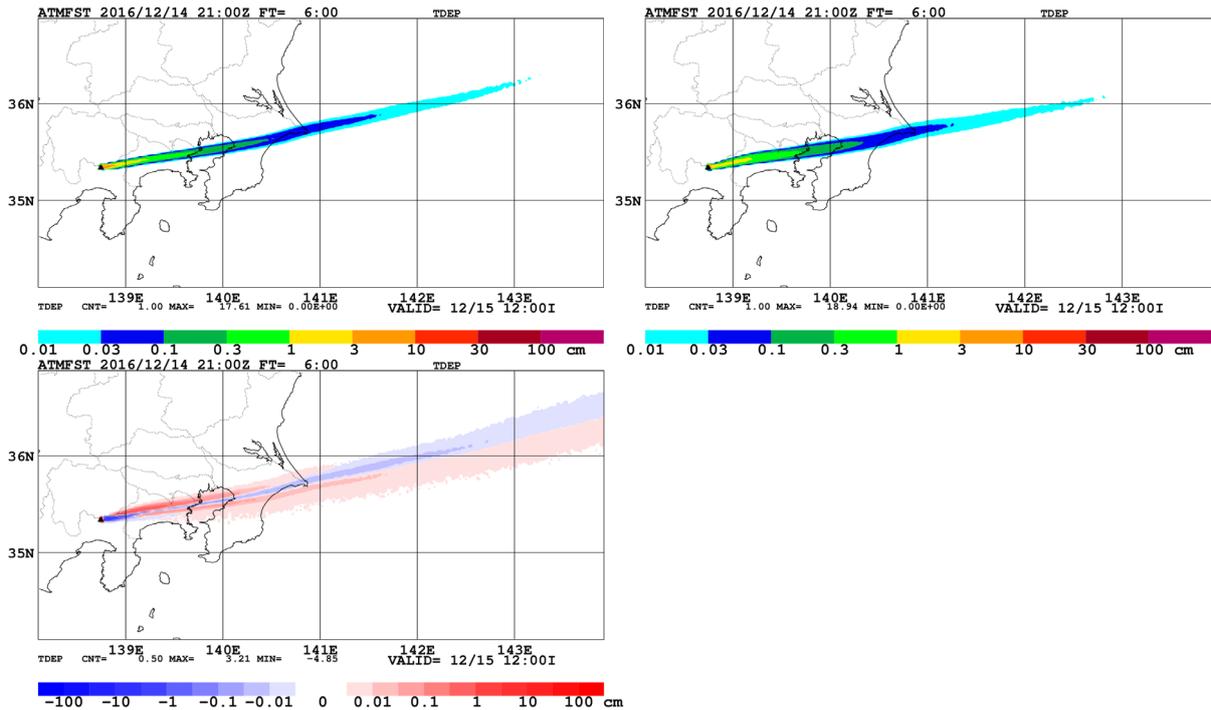


図 1 5 予想降灰量の比較. (左) Suzuki1983, (右) SK-3D モデルによる初期条件 (図 1 3) からの JMA-ATM (地形なしのドライモデル) による降灰シミュレーションの試行結果とその差分 (下: SK3D-Suzuki1983). 噴火開始時刻: 2016 年 12 月 15 日 06 時, 噴出率:  $1.0 \times 10^7$  kg/s, 噴火継続時間 961 s を仮定した 6 時間後の予測. 大気場は気象庁メソ析値を使用. 出力格子間隔は 2 km.

また, 引き続き, 気象レーダーデータを噴火ハザード予測システムに利用する方法の検討を行った. 具体的には, 気象研究所で観測・解析しているデータを例に, 特にリトリーブ部分とパラメータ推定部分について, 検討を進めた (図 1 6). 検討の結果, 気象レーダーデータを“直接的に”噴火ハザード予測システムへと利用する方法については, リトリーブ結果の検証が重要であるとの結論に至った. 本内容を IUGG2019 にて発表した.

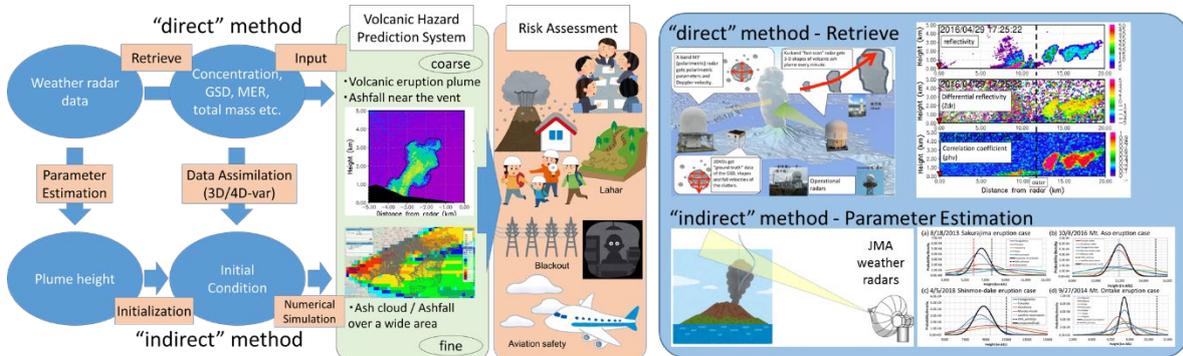


図 1 6 気象レーダーデータの取り込みにおける直接的・間接的手法の概念図と実例

データ同化手法の検討では, 降下火砕物観測を用いて, 噴煙柱から放出される火砕物の鉛直濃度分布に同化する問題について取り組んだ. この問題は移流拡散堆積系の逆問題として線形の逆問題で近似でき, 線形逆解析手法の一つである特異値解析を用いると, 逆解

を求めると同時に解の不確実性についても定量化できる。そこで、本課題では、特異値解析を用いて本逆問題の数理構造を調べた。

本逆問題における逆解の不確実性は、正則化に伴う（真値に対する）解像度の低下と観測誤差の伝搬に起因するものである。前者はモデル解像度行列を用いて定量化することができ、後者はモデル共分散行列を用いて定量化することができる。図 1 7 に本逆問題の解析結果の例を示す。

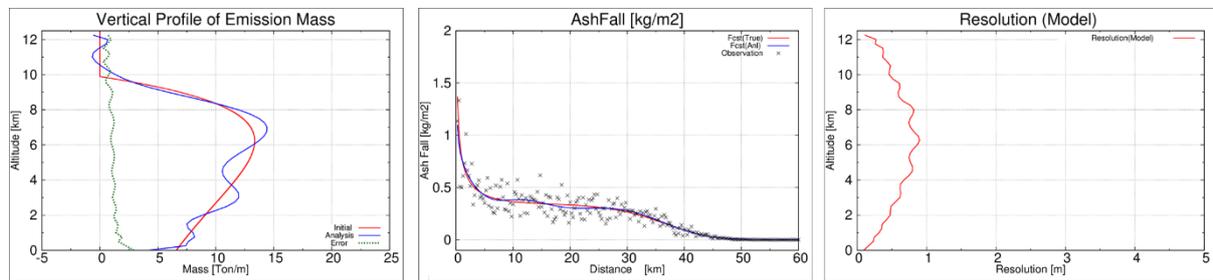


図 1 7 理想実験の結果の例。左図は、噴煙柱から放出される火砕物の鉛直濃度分布を示す；真値（赤線）、逆解（青線）、モデル共分散行列の対角成分（緑点線）。中図は、真値から計算された降下火砕物分布（赤線）及びそれにランダムな誤差を加えた仮想的な観測値（×）、逆解から計算された降下火砕物分布（青線）を示す。右図は、逆解の解像度を示す。

## 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 SK-3D<sup>3)</sup> と、システム化への検討を行った。そのために、SK-3D を用いた大規模シミュレーションを実施し、モデルの高度化と計算結果の解析を進めた。

システムに掲載するデータ取得のため、富士山 1707 年宝永噴火と同程度の火山噴火シミュレーションを実行した。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 ITO と海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用した。空間を 2~3 億グリッドで分割し流体計算を行うと同時に、火山灰に模した数百万個のトレーサー粒子計算を行った。大型計算機においては MPI を用いて 500~1,000 並列で実行した。火山灰輸送と堆積は噴火規模に加え大気の流れに強く依存するため、風速を変化させた計算を行った。その結果、噴火条件が同じでも風速が異なると、噴煙高度・噴煙形状・火山灰放出高度・堆積分布に違いが生じることを捉えた。

風速が弱い場合、噴煙は最高高度が 15km 程度まで達した(図 1 8)。高度 10km 程度で噴煙は水平方向に傘型噴煙として拡大した。傘型噴煙の拡大の勢いは大気風よりも強く、風上も含め全方向に拡大した。図 1 8 の色付きプロットで示されるように、粒子サイズによって噴煙内部での存在領域は異なった。粒径が  $-5 \sim -6 \phi$  ( $32 \sim 64 \text{mm}$ ) のような粗い粒子は、噴煙の最上部に達することなく噴煙柱の途中までしか存在しなかった(図 1 8 a, b)。火山灰粒子は噴煙柱から離脱し、火口付近へと降下した。粒径が  $-3 \sim -4 \phi$  ( $8 \sim 16 \text{mm}$ ) の場合、火山灰粒子は噴煙最上部に達した(図 1 8 c, d)。風上側の傘型噴煙へは進入せず、風下側に広がった。噴煙柱から離脱した火山灰は、風下側に流されて火口から 10km 程度の地表面に堆積した。粒径が  $3 \sim -2 \phi$  ( $0.125 \sim 4 \text{mm}$ ) の場合、火山灰は噴煙最上部に達した後に風上・風下両方の傘型噴煙に進入した(図 1 8 e-j)。この場合、傘型噴煙の

広い領域から火山灰が離脱し、風下側に堆積した。さらに細かい  $4\phi$  ( $< 0.0625\text{mm}$ ) の火山灰粒子は噴煙柱・傘型噴煙の全領域に存在した(図 1 8 k)。噴煙から離脱することなく噴煙内に滞留した。

風速が大きい場合、図 1 8 の場合とは噴煙挙動が異なった(図 1 9, 2 0)。噴煙柱は風によって風下側に傾き、風上側への傘型噴煙は形成しなかった。風速が  $10\text{m/s}$  の場合は噴煙高度が  $15\text{km}$  程度だったが、風速が  $20\text{m/s}$  の場合は  $13\text{km}$ 、 $30\text{m/s}$  の場合は  $10\text{km}$  と、風速が増すにしたがって噴煙高度が低下した。火山灰粒子の存在領域も風速によって変化した。風速が  $20\text{m/s}$  の場合、 $-4\sim-6\phi$  の粒子は噴煙上部に達することなく、噴煙柱の途中から離脱して降下した(図 1 9 a-c)。 $-1\sim-3\phi$  の粒子は、噴煙上部まで達するものの、そこから噴煙内部を風下側に降下し、そのまま噴煙から離脱した(図 1 9 d-f)。 $3\sim 0\phi$  と呼ぶ細かな粒子になると、風下側への傘型噴煙内を輸送され、火口から  $20\text{km}$  以上の遠方で噴煙から離脱した(図 1 8 g-j)。非常に細かい粒子になると噴煙の全領域に滞留し存在した(図 1 9 k)。これらの変化は連続的であった。さらに風速  $30\text{m/s}$  と大きい場合も  $20\text{m/s}$  と似たような傾向が示された(図 2 0)。

以上のように、火山灰粒子が噴煙内のどこに存在し、どの高度から離脱して降下するかの情報を取得することができ、システムに載せるための基礎データとなる。加えて、高度によって風速が変化する場合のシミュレーションも実施した。また、これらの連続噴火シミュレーションの他に、ブルカノ式噴火を模擬した瞬間的爆発噴火シミュレーションを実施し、グループ D2 と連携した。瞬間的爆発噴火シミュレーションの結果からは、噴火継続時間と噴煙高度の関係において、ブルカノ式・プリニー式のスケーリングの他に、遷移状態が存在することを捉えた。

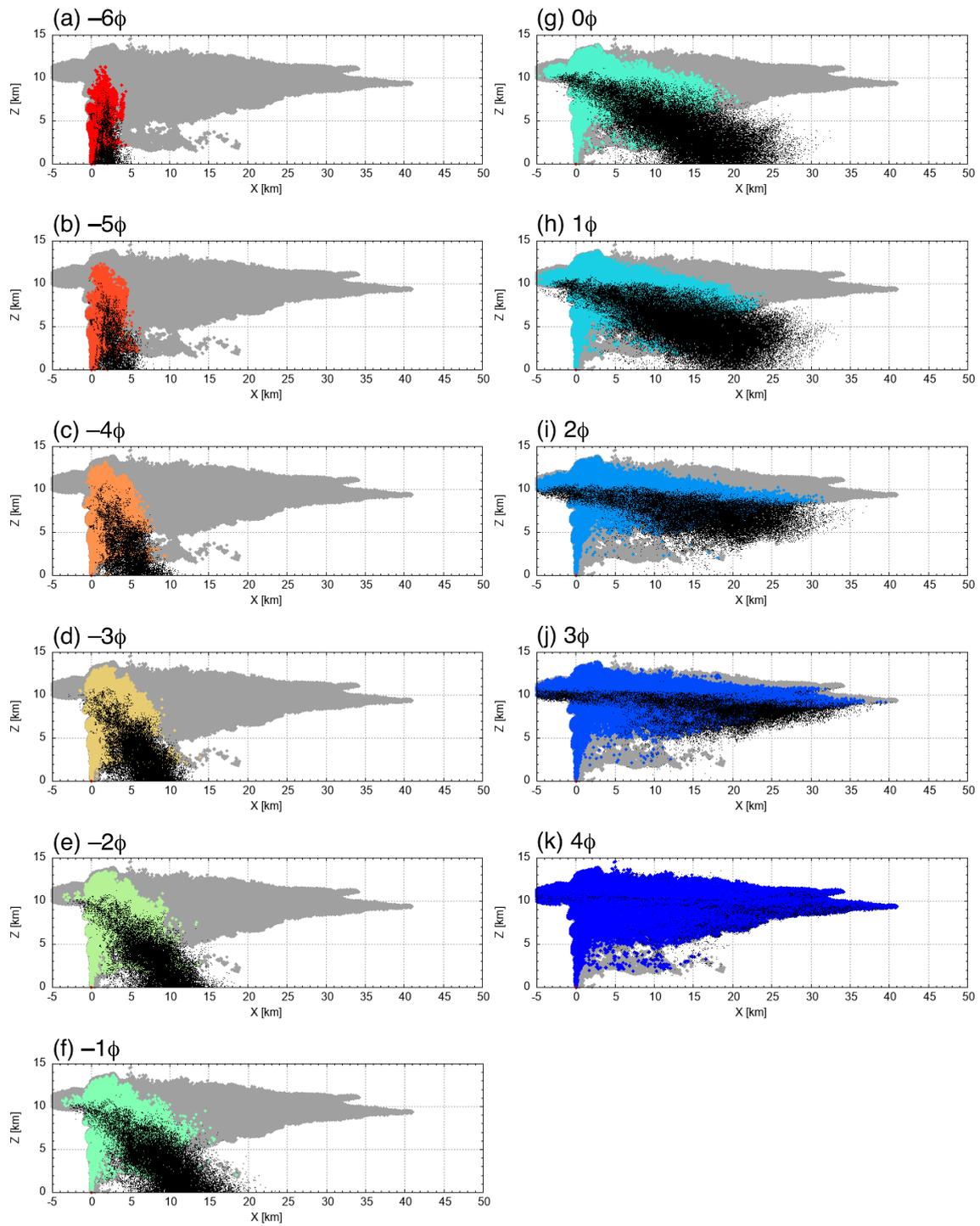


図 18 風速 10m/s の大気場における火山灰輸送シミュレーション. 噴火開始後 40 分後での、噴煙断面におけるサイズ毎の火山灰粒子分布を示す. 色付きプロットは噴煙内部の火山灰粒子で、黒点は噴煙から離脱した粒子を表す.

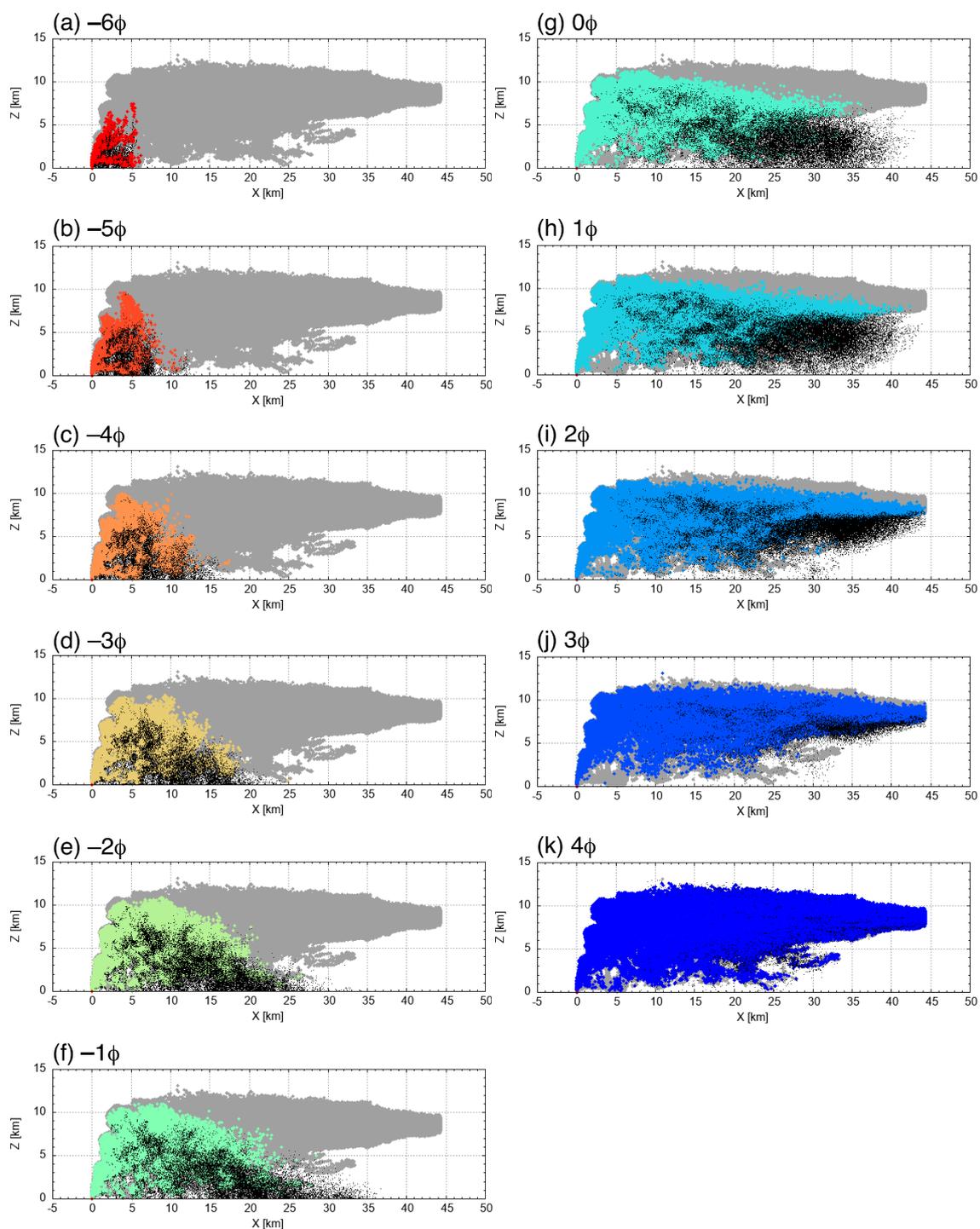


図 19 風速 20m/s の大気場における火山灰輸送シミュレーション。噴火開始後 30 分後での、噴煙断面におけるサイズ毎の火山灰粒子分布を示す。色付きプロットは噴煙内部の火山灰粒子で、黒点は噴煙から離脱した粒子を表す。

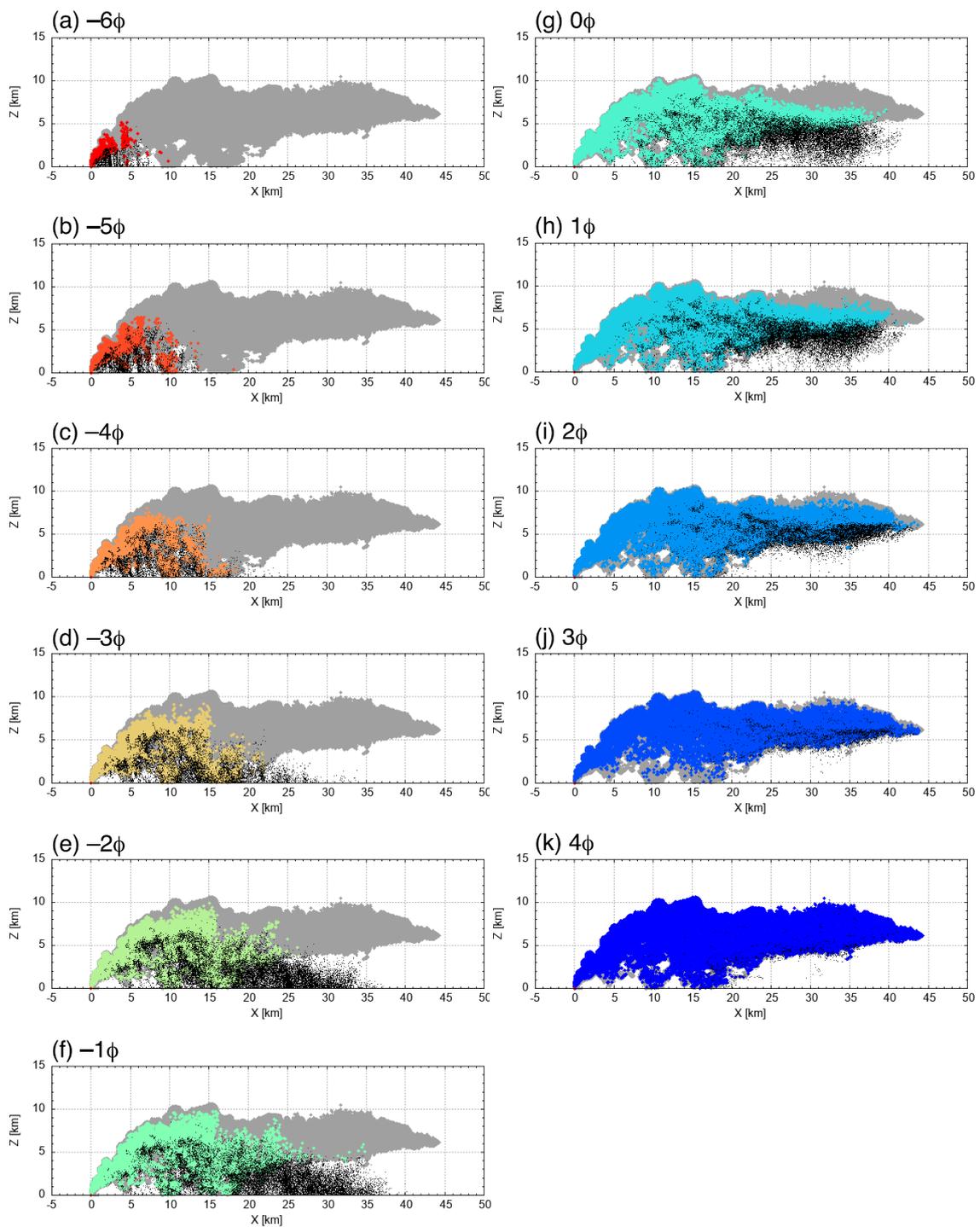


図 20 風速 30m/s の大気場における火山灰輸送シミュレーション。噴火開始後 20 分後での、噴煙断面におけるサイズ毎の火山灰粒子分布を示す。色付きプロットは噴煙内部の火山灰粒子で、黒点は噴煙から離脱した粒子を表す。

### c. ハザード評価システムの検討

#### ○噴石シミュレーション

噴石被害評価のシステムについては、入力および出力のフォーマットを Moving Feature 形式に変更し、出力されたシミュレーション結果を別途得られた人流データと合わせて、どの時点・地点で被害が出るかを推定するシステムを開発した。このような現象予測のシミュレーションと人流データを合わせて被害推定を行うシステムは世界的にも珍しいため、国際学会(IUGG2019)でそのシステムの使用方法や意義などをポスターにて発表した。

#### ○溶岩流シミュレーション

溶岩流シミュレーションでは、3次元溶岩流シミュレーションコード LavaSIM<sup>5)</sup>において、粘性関数の速度依存性効果の導入、および、溶岩トンネル計算のためのクラスト形成・移動効果導入のため、プログラムの高速化のため性能調査を実施した。特に防災科研において新たに導入された防災情報イノベーションプラットフォーム（スーパーコンピューター）における計算の高速化について方向性を得た。富士山での溶岩流および冷却効果の検証を行った。その成果は富士山火山防災対策協議会 富士山ハザードマップ検討委員会（改訂版）の検討で活用された。キラウエア火山で2018年6月に発生した大規模溶岩流について、現地調査を実施し、溶岩流を噴出した火口調査、米国地質調査所ハワイ火山観測所、ハワイ郡およびハワイ州の危機管理局を訪問し、溶岩流対策についての知見も取得した。

#### ○火砕流シミュレーション

火砕流シミュレーション手法の開発に向けて、溶岩ドーム崩壊型火砕流の既存数値モデル、および、噴煙柱崩壊型火砕流の既存数値モデルを検証・改良について検討した。

溶岩ドーム崩壊型火砕流のシミュレーションについては、火砕流底部に形成される高粒子濃度領域の振る舞いを再現するために、高濃度粒子流のオープンソースコード TITAN2D<sup>6)</sup>が多くの先行研究で使用されている。TITAN2D がどのような噴火・地形条件のハザード予測に適用できるのかについて検証すること、さらに、その条件以外でも適用可能な TITAN2D の改良モデルを開発するため、本年度は TITAN2D の上位互換モデルに相当するオープンソースコード faSavageHutterFOAM<sup>7)</sup> のインストールおよびテスト計算に着手した。

また、噴煙柱崩壊型火砕流を対象として、低濃度領域と高濃度領域の両者のダイナミクスと相互作用を考慮した既存の SKS-1D モデル<sup>8)</sup>について改良を始めた。火砕流の大規模実験<sup>9)</sup>との比較による数値モデルの検証に着手し、数値計算結果が実験結果に非常に良く一致することを確認した。

#### ○ハザード評価システム

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り、本年度実装を開始した。これまでに整備した溶岩流・噴煙および噴石の各ハザードについての入力・計算実施・可視化・出力およびデータベースを統合的に行

うためのインターフェースを作成し、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インストールした。本システムでは、(1) 受信機能・(2) 計算機能・(3) 可視化機能から構成される(図2 1)。Input メニューからは、それぞれのシミュレーションコードの実行に必要な地形などの各種データ、計算の初期条件などのアップロードを実施する(図2 2)。Analysis メニューからは、各設定によるシミュレーションの実行スクリプトを防災情報イノベーションプラットフォームに投入する。その計算結果は、Tools メニューによるデータベース操作による将来的な確率評価の基礎データとなる。また、Viewer メニューにより、GIS 上での投影などによるハザード評価の定量的な情報を可視化することができる(図2 3-2 5)。

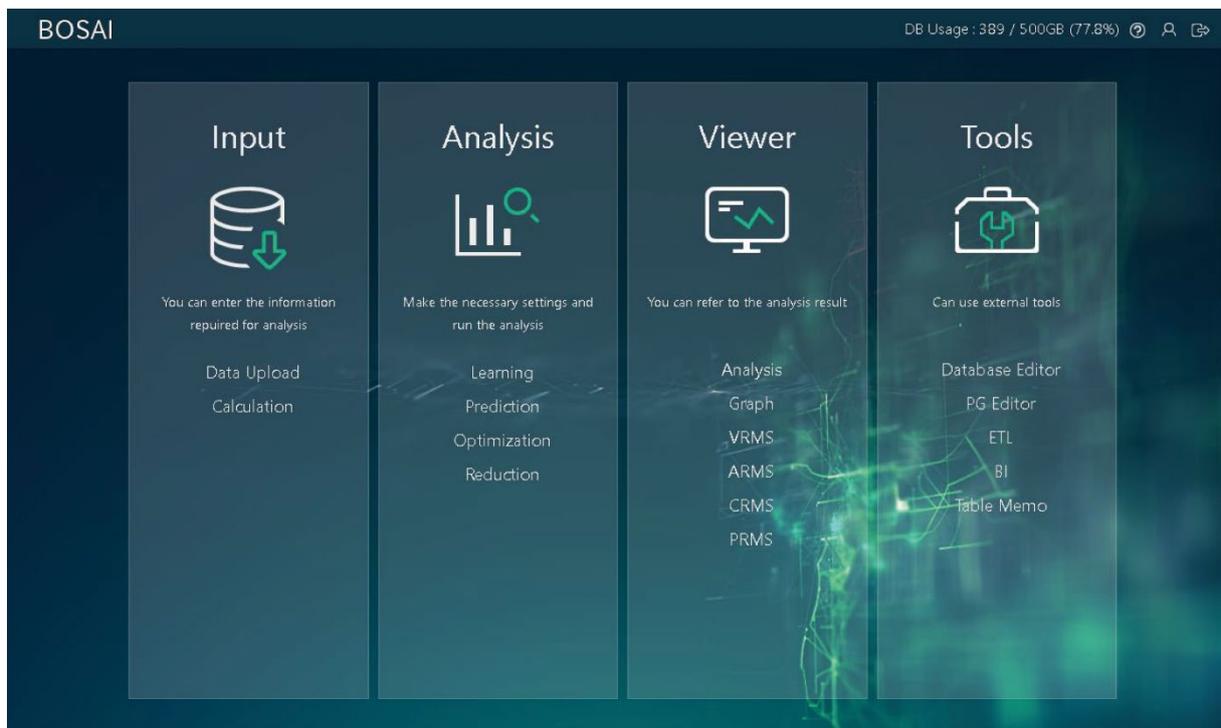


図 2 1 ハザード評価システムのトップ画面

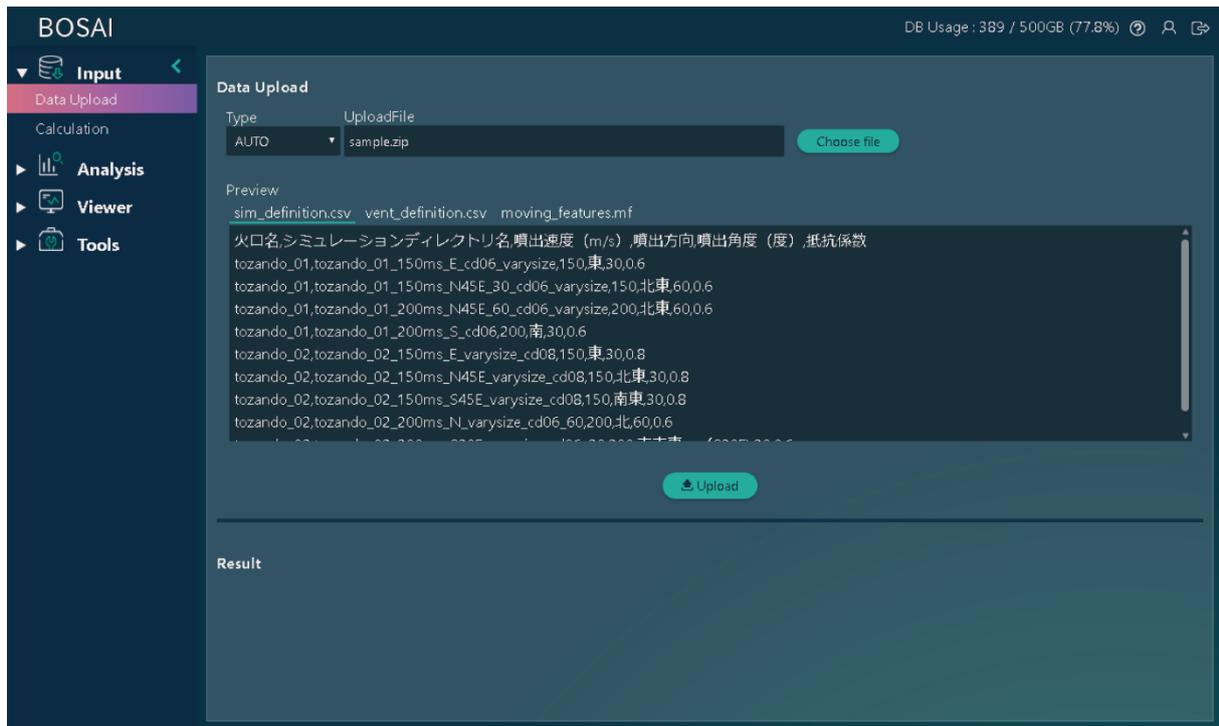


図 2 2 ハザード評価システム データアップロード画面

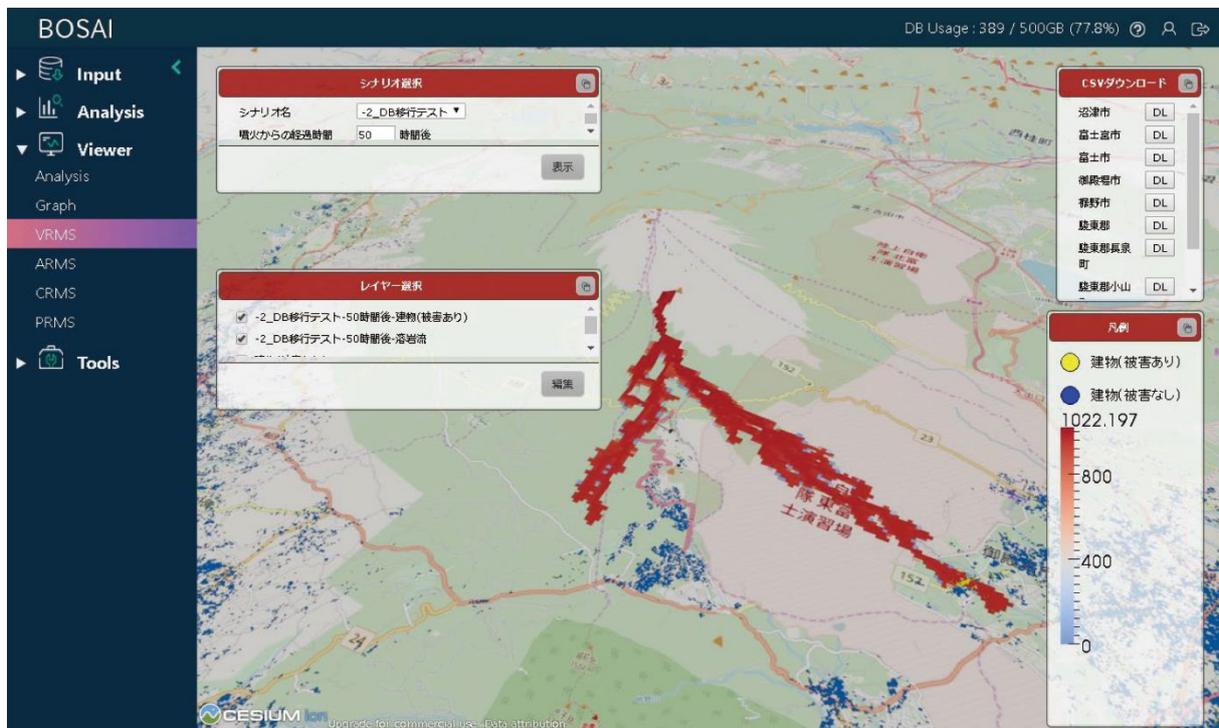


図 2 3 ハザード評価システム (溶岩流)

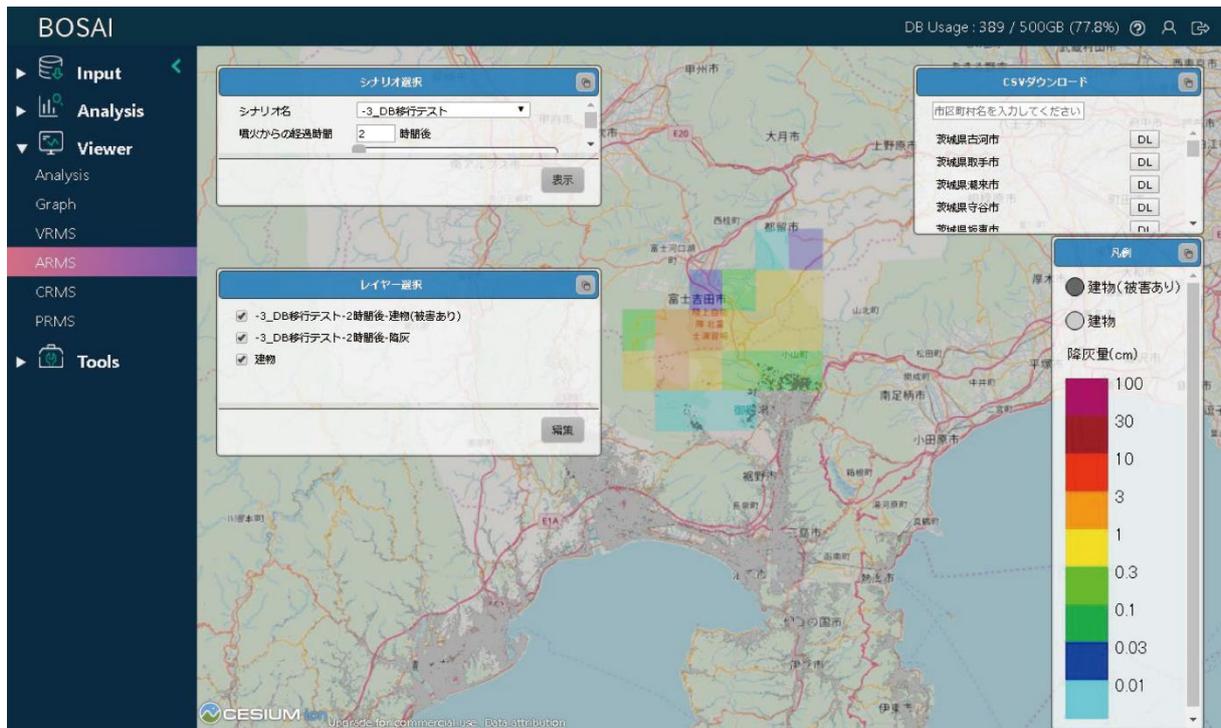


図 2 4 ハザード評価システム（噴煙・降灰）

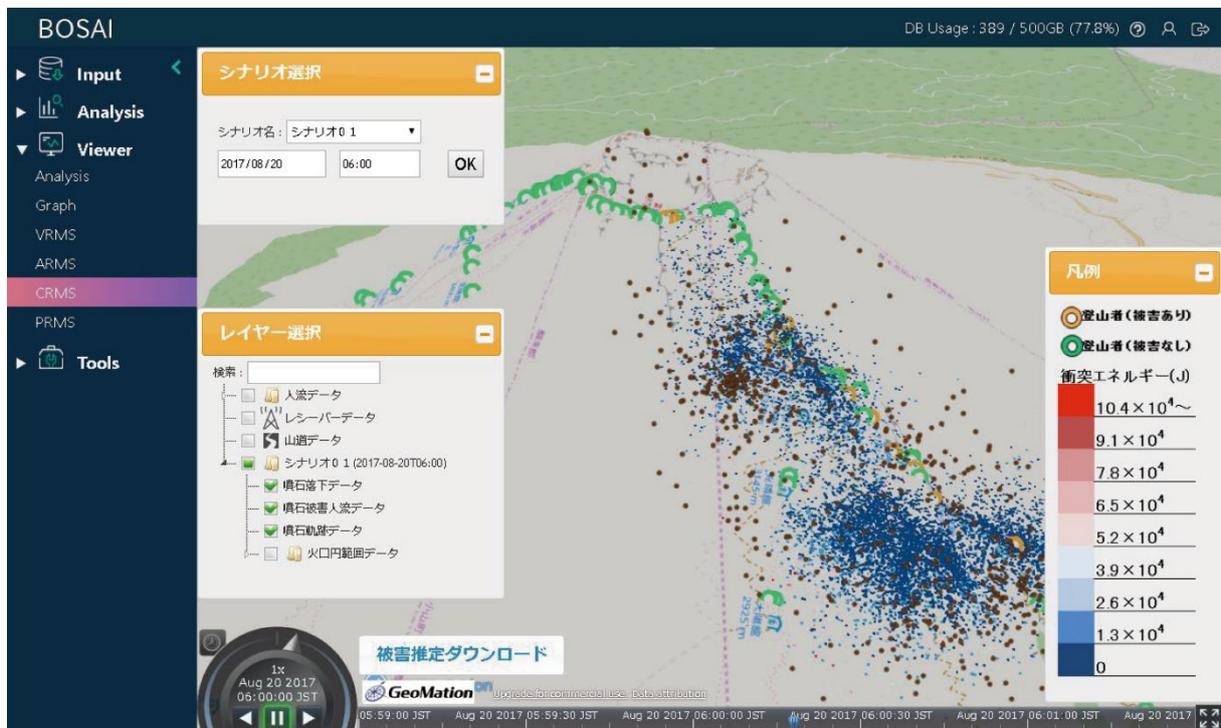


図 2 5 ハザード評価システム（噴石）

(d) 結論ならびに今後の課題

事業開始の中間年度(4年度)に入り，要素技術の統合とハザード評価システムの実装を開始した．地下におけるマグマ移動シミュレーションでは，噴火様火道流モデルによる火道およびマグマ溜まりの圧力から周辺の地殻変動量を有限要素法によるシミュレーション

を安山岩質マグマの火山に適用した。マグマ移動過程シミュレーション技術開発では、ミクロ・マクロスケールでの岩脈貫入に関するシミュレーションの連携をもとに、地殻変動観測データとの比較に着手し、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) の開発着手、気象レーダーデータを噴火ハザード予測システムに利用する方法の検討、噴煙柱から放出される火砕物の鉛直濃度分布に基づく同化の検討、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、噴石・溶岩流・火砕流シミュレーションの高度化と、定量的なリスク評価およびその確率表現に向けての整備を行った。

#### (e) 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) 新堀敏基, 火山灰輸送: モデルと予測, *火山*, 61, 399-427, doi:10.18940/kazan.61.2\_399, 2016.
- 3) 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.
- 4) Tsunematsu, K., Chopard B., Falcone, J., Bonadonna, C., A numerical model of ballistic transport with collisions in a volcanic setting. *Comput Geosci* 63:62-69, 2014.
- 5) Hidaka, M., Goto A., Umino, S. Fuijta E., VTFS project: Development of the lava flow simulation code LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading and solidification, *Geochem., Geophys. Geosystems*, Vol.6: DOI: 10.1029/2004GC000869, 2014.
- 6) Patra, A.K., Bauer A.C., Nichita, C.C., Pitman, E.B., Sheridan, M.F., Bursik, M., Rupp, B., Webber A., Stinton, A.J., Namikawa, L.M., Renschler, J. *Volcanol. Geotherm. Res.*, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014>, 2005.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.*

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表した時期	国内・外の別
<u>Kondo, G.,</u> <u>Aoyama, H.,</u> <u>Nishimura, T.,</u> <u>Ripepe, M.,</u> <u>Lacanna, G.,</u> <u>Genco, R.,</u> <u>Kawaguchi, R.,</u> <u>Yamada, T.,</u> <u>Miwa, T., and</u> <u>Fujita, E</u>	Gas flux cyclic regime at an open vent magmatic column inferred from seismic and acoustic records (論文)	Scientific Reports, 9, 5678.	2019年4月	国外
<u>Tsunematsu, K.,</u> <u>Ishii, K., and</u> <u>Yokoo, A.</u>	Transport of ballistic projectiles during the 2015 Aso Strombolian eruptions (論文)	Earth Planets Space 71, 49	2019年4月	国外
<u>Wallece, P.,</u> <u>Kendrick, J.,</u> <u>Miwa, T.,</u> <u>Ashworth, J.,</u> <u>Coats, R.,</u> <u>Utley, J., De</u> <u>Angelis, S.,</u> <u>Mariani, E.,</u> <u>Biggin, A.,</u> <u>Kendrick, R.,</u> <u>Nakada, S.,</u> <u>Matsushima, T.,</u> and Lavallée, Y.	Petrological Architecture of a Magmatic Shear Zone: A Multidisciplinary Investigation of Strain Localisation During Magma Ascent at Unzen Volcano, Japan (論文)	Journal of Petrology, 60, 791-826.	2019年4月	国外
<u>Fujita, E.,</u> <u>Iriyama, Y.,</u> <u>Shimbori, T.,</u> <u>Sato, E., Ishii,</u> <u>K., Suzuki, Y.,</u> <u>Tsunematsu, K.,</u>	Evaluating Volcanic Hazard Risk Through Numerical Simulations (論文)	Journal of Disaster Research, 14, 604-615	2019年6月	国外

<u>and Kiyosugi, K.</u>				
<u>Kozono, T.,</u> <u>Iguchi, M.,</u> <u>Miwa, T., Maki,</u> <u>M., Maesaka, T.,</u> <u>and Miki, D</u>	Characteristics of tephra fall from eruptions at Sakurajima volcano, revealed by optical disdrometer measurements (論文)	Bulletin of Volcanology, 81, 41.	2019年6月	国外
<u>Kurokawa, A. K.,</u> <u>Miwa, T. and</u> <u>Ishibashi, H.</u>	A Simple Procedure for Measuring Magma Rheology (論文)	Journal of Disaster Research, 14, 616-622.	2019年6月	国外
<u>Ueda, H.,</u> <u>Yamada, T.,</u> <u>Miwa, T., Nagai,</u> <u>M., and</u> <u>Matsuzawa, T</u>	Development of a Data Sharing System for Japan Volcanological Data Network (論文)	Journal of Disaster Research, 14, 571-579.	2019年6月	国外
<u>Miwa, T</u>	Measurement of H <sub>2</sub> O molecule and hydroxyl concentrations in hydrous rhyolitic glass by UV-Vis-NIR dispersive micro-spectrophotometry (論文)	Journal of Disaster Research, 14, 780-785.	2019年8月	国外
<u>Shimizu, H. A.,</u> <u>Koyaguchi, T.,</u> <u>and Suzuki, Y.</u> <u>J.</u>	The run-out distance of large-scale pyroclastic density currents: A two-layer depth-averaged model (論文)	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 381, 168-184	2019年9月	国外
<u>Suzuki, Y. J.</u> <u>and Iguchi, M.</u>	Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 382, 42-49	2019年9月	国外

<u>Miwa, T.,</u> <u>Iriyama, Y.,</u> <u>Nagai, M., and</u> <u>Nanayama, F.</u>	Sedimentation process of ashfall during a Vulcanian eruption as revealed by high-temporal-resolution grain size analysis and high-speed camera imaging (論文)	Progress in Earth and Planetary Science, 7, 1-16.	2020年1月	国外
<u>Suzuki, Y. J.,</u> <u>Costa, A. and</u> <u>Koyaguchi, T.</u>	The control of vent geometry on the dynamics of volcanic plumes (ポスター)	EGU General Assembly 2019	2019年4月	国外
<u>Miwa, T., and</u> <u>Geshi, N.</u>	Magmatic aggregate of basaltic ash particles (ポスター)	JpGU Meeting 2019	2019年5月	国内
<u>Fujita, E.</u>	Subsurface Magma Migration Simulation by 3D Discrete Element Method (ポスター)	27th IUGG General Assembly	2019年7月	国外
<u>Miwa, T.,</u> <u>Okumura, S., and</u> <u>Shimano, T.</u>	Decompression-induced crystallization of rhyolitic magma during the 838 eruption at Koze Island, Japan (ポスター)	27th IUGG General Assembly	2019年7月	国外
<u>Suzuki, Y. J.,</u> <u>Costa, A., and</u> <u>Koyaguchi, T.</u>	Simulating dynamics of explosive very large eruptions (ポスター)	27th IUGG General Assembly	2019年7月	国外
<u>Tsunematsu, K.,</u> <u>Fujita, E.,</u> <u>Kubo, T.,</u> <u>Miyagi, Y.,</u> <u>Yoshimoto, M.,</u> <u>Honda, R., and</u> <u>Tanaka, Y.</u>	Ballistic risk assessment of climber movement on mountains	27th IUGG General Assembly	2019年7月	国外

<u>Kozono, T., Iguchi, M., Miwa, T., Maki, M., Maesaka, T., and Miki, D</u>	Characteristics of tephra fall from eruptions at Sakurajima volcano, revealed by optical disdrometer measurements (口頭)	AGU fall meeting 2019	2019年12月	国外
<u>Shimizu, H. A., Koyaguchi, T., and Suzuki, Y. J.</u>	The run-out distance of a two-layer model for large-scale pyroclastic density currents (口頭) (招待講演)	AGU fall meeting 2019	2019年12月	国外
<u>石川歩・西村太志・青山裕・川口亮平・藤田英輔・三輪学央・山田大志・リペペ マウリツィオ・ゲンコリカルド</u>	ストロンボリ火山の山頂小爆発に伴う傾斜変動の圧力源推定 (口頭)	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内
<u>川口亮平・斎藤直子・鬼澤真也</u>	水位変動・地震観測に基づく立山カルデラ新湯の地下構造の推定 (ポスター)	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内
<u>小園誠史・井口正人・三輪学央・真木雅之・前坂剛・味喜大介・西村太志</u>	光学式ディストロメータによる降灰測定：噴煙観測におけるレーダーパラメータへの制約 (口頭)	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内
<u>長井雅史・中川正二郎・入山 宙・三輪学央・棚田俊收・上田英樹・中田節也</u>	口永良部島火山 2018-19年噴火降下火砕物の産状と分布 (ポスター)	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内
<u>西條祥・小屋口剛博・鈴木雄治郎</u>	降下火砕物インバージョンに向けた火砕物供給源モデルの開発 (ポスター)	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内

<u>志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎</u>	大規模火砕流の到達距離に対する温度の影響：二層重力流モデルによる数値シミュレーション（口頭）	日本地球惑星科学連合大会 2019	2019年5月	国内
<u>藤田英輔・吉本充弘</u>	富士山溶岩流シミュレーション—河口湖・山中湖への流入効果—（口頭）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>川口亮平</u>	境界要素法に基づく火山周辺の気象庁傾斜計データの評価の検討（ポスター）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>小園誠史・上田英樹・小澤拓・小屋口剛博・山崎雅</u>	霧島山新燃岳における2011, 2018年噴火間のマグマ蓄積条件の変化（口頭）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>松野千裕・小園誠史</u>	玄武岩マグマ噴火の準備過程に関する1次元火道流モデルの数値的研究（ポスター）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>三輪学央・下司信夫・伊藤順一・棚田俊收・井口正人</u>	VOLCATによる降灰その場自動観察（口頭）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>長井雅史・小澤拓・上田英樹・入山宙・山田大志・棚田俊收・三輪学央・小林哲夫</u>	小笠原硫黄島火山 2018年9月12日の噴火イベントと再生ドーム形成活動（口頭）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>新堀敏基・鈴木雄治郎・入山宙・石井憲介・佐藤英一・藤田英輔</u>	移流拡散モデルによる大規模噴火を想定した降下火砕物予測の課題（その3）噴煙ダイナミクスモデルに基づく初期条件（ポスター）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内
<u>常松佳恵・瀬尾和哉</u>	火山岩塊の空力学的特性と飛翔メカニズムの研究（口頭）	日本火山学会秋季大会 2019	2019年9月	国内

(g) 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 2 年度業務計画案

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，その内容についてIAVCEI2021で発表を行う。

### c. マグマ物性モデルの構築

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

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

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

## ②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し、その内容をIAVCEI2021で発表を行う。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．また，これらの成果についてIAVCEI2021で発表する．

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．