

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) 平成 30 年度業務目的

(2) 平成 30 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
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 令和元年度業務計画案

(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	入山 宙	iriyama@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 気象庁気象研究所火山研究部	准教授	鈴木雄治郎	
	部長	山本哲也	
	室長	徳本哲男	
	主任研究官	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	
	准教授	常松佳恵	
国立大学法人静岡大学理学部地球科学科			
国立大学法人山形大学理学部	助教	清杉孝司	
国立大学法人神戸大学先端融合研究環			

(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) 平成 30 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研究を進める。

具体的には、玄武岩質マグマ噴火を対象とした火道流数値モデルを開発する。「c. マグマ物性モデルの構築」と連携し、玄武岩質マグマ特有の物性や素過程を考慮して構築した火道流数値モデルを用いて、これまでの珪長質マグマ噴火を対象とした解析結果と比較して火道流の物理過程がどのように変化するかを系統的に調べる。さらに、玄武岩質マグマ噴火における火道流の変動過程が観測可能量である周囲地殻変動に与える影響を評価する。

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る。

具体的には、マグマ移動過程シミュレーションについて、マイクロモデル（岩脈進展）の高度化・安定化を行う。また、マイクロモデルとマクロモデル（個別要素法による地殻変動シミュレーション）を境界条件で結合して評価する手法を検討する。これらにより岩脈貫入に伴う地震発生と地殻変動について、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。さらに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シミュレーション手法開発を進める。イタリアで開催される CoV10 に出席し、マグマ移動過程シミュレーションに関する成果発表及び情報収集を行う。

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の構築のための環境整備を引き続き行う。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。前年度までに決定された岩石組織のアニール時間を参考にマグマ溜りでの温度圧力条件を再現後、その温度圧力条件から 30MPa まで 0.01, 0.1, 1MPa/s の減圧速度で減圧実験を行う。そして得られた実験産物と天然の噴出物を比較することで、神津島 838 年噴火におけるマグマ上昇過程を推定する。

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、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。実験は一度 1250℃でサンプルを熔融させた後、固液二相が共存する 1130℃付近で行う。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する。

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 JMA-RATM による降灰シミュレーションの予備計算結果の点検を行う。平成 31 年度に向け、「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル」との連携のための設計を行う。

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る。

具体的には、大型計算機を用い様々な噴火タイプ・規模を対象とした大規模数値シミュレーションを行う。特に、ピナツボ級の噴火に伴う噴煙柱と降灰のシミュレーション結果をもとに堆積物分布のデータ解析に着手する。また、ブルカニアン噴火について、桜島を対象とする課題 D2 との連携を踏まえながら検討を行う。さらに、噴煙柱・火砕流ダイナミクスモデルのモデルによる不確定性評価の研究を、イタリア地球物理火山研究所（INGV）協力のもと継続する。

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について検討する。

具体的には、ハザード評価システムでは、富士山噴煙シミュレーションの首都圏降灰評価に対し、人流データの取り込みに着手する。また、溶岩流シミュレーション・噴石シミュレーションについて、予備調査の結果をもとに高度化を図るとともに、フォーミュレーションの見直しを実施し、新たなシミュレーションコードの作成の検討を行う。山形大学・神戸大学の協力を得てこれを実施する。

(2) 平成 30 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、噴火機構について、火道内における気液固混相流マグマの上昇過程（火道流）に関する数値シミュレーションを実施し、地殻変動観測で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う方向性を定めるとともに、伊豆大島傾斜観測データの解析を行った。また、岩脈成長について、マイクロモデルの安定化を進めるとともに、マクロモデルでの噴火・噴火未遂条件の検討を行い、初期のマグマ溜まり過剰圧が静岩圧の約 10 倍程度が閾値であることなどが分かった。マグマ物性モデルの構築においては、結晶化モデル構築のための発泡・結晶化実験を行い、得られたマグマ減圧速度と石基結晶度が神津島 838 年噴火のマグマ上昇過程を再現することが分かった。また、マグマ粘性実験では非定常状態でのレオロジー特性について静置時間に応じて最大応力（オーバーシュートストレス）の違いがあることが分かった。

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、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の継続案件として、前年度までに行った JMA-RATM

による降灰シミュレーションの予備計算結果の点検を行った。また、噴煙柱ダイナミクスモデルのシミュレーション結果から降灰シミュレーションの初期条件取得に着手し、噴煙から粒子が離脱する位置を抽出した。また、噴煙柱のシミュレーションコードの高度化を進めるとともに、それを用いた様々なタイプ・規模の大規模シミュレーションを実施した。モデルの高度化と計算結果の蓄積により、降灰モデルとの連携準備を進めた。さらに、ハザード評価システム設計のため、溶岩流シミュレーションコード LavaSIM の高速化を検討した。また、噴石シミュレーションコード Ballista と人流データを統合した評価システムを開発するとともに、ハザード評価システムの基本設計を行った。

(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から事象分岐を支配するパラメータの抽出に関する研究を実施した。

研究手法として、マグマ上昇中の発泡、結晶化、脱ガス、粘性増加などの物理過程について、玄武岩質・安山岩質マグマ特有の物性や素過程を考慮した一次元非定常火道流数値モデルを有限差分法によって構築し、噴火遷移過程を計算した（図 1 a）。さらに噴火遷移中の火道流によって生じる火道内の圧力・応力変化およびマグマ溜まり内の圧力変化がもたらす周囲の地殻変動・地表変位（山体変形）を、有限要素法によって計算した（図 1 b）。これによって、火道流の変動過程が地殻変動観測データに与える効果を評価することが可能となる。

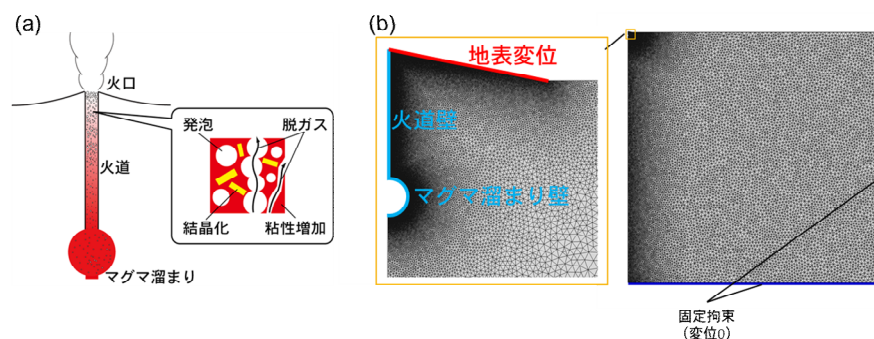


図 1 (a)火道流モデルの概念図。(b)火道・マグマ溜まり周囲の弾性モデリング。有限要素法を適用。火道流モデルによるマグマ溜まり壁，火道壁の応力を境界条件として地表の変位・傾斜・ひずみを計算。

本年度は、上述の火道流および地殻変動のモデリング研究において、特に日本の常時観測火山を想定したパラメータ解析を実施した。そのために、まずモデル計算に必要な山体地形およびマグマ溜まり深さなどの、地質条件の適切な設定を行った。山体地形については、常時観測火山 50 火山の主火口を中心とした地形断面データ（国土地理院提供）をコンパイルした（図 2 a）。現状の地殻変動計算では二次元軸対称の山体地形を考慮しており、地形データを参照して代表的な山体地形を設定した。マグマ溜まりの深さについては、気象研技術報告（2013）による日本における火山活動時の膨張イベントの深さのコンパイルデータに基づき、海拔深さ 3 km を代表的な条件として設定した（図 2 b）。また、マグマ含水量や温度、粘性、結晶量、結晶成長率、ガス浸透率な

どのマグマ物性に関しても、これまでは主に珪長質マグマを対象としていたものを、常時観測火山でも噴火を多くもたしている玄武岩質・安山岩質マグマまで対象を広げ、そのパラメータ設定を行った。当初の計画では玄武岩質マグマ噴火の解析に特化していたが、研究を実施するなかで安山岩質マグマによる最新の噴火事例である霧島山新燃岳噴火を対象とした研究が本研究プロジェクト内も含めて進展したため、安山岩質マグマ噴火を対象としたモデル構築にも着手し、新燃岳、桜島のマグマ物性を考慮した数値解析を実施した。また、以後に示す噴火遷移に伴う特徴的な地殻変動パターンは、安山岩質・珪長質マグマを対象とした解析で特に顕著に見られたことから、本報告では主にこれらのマグマを対象とした解析結果について説明する。

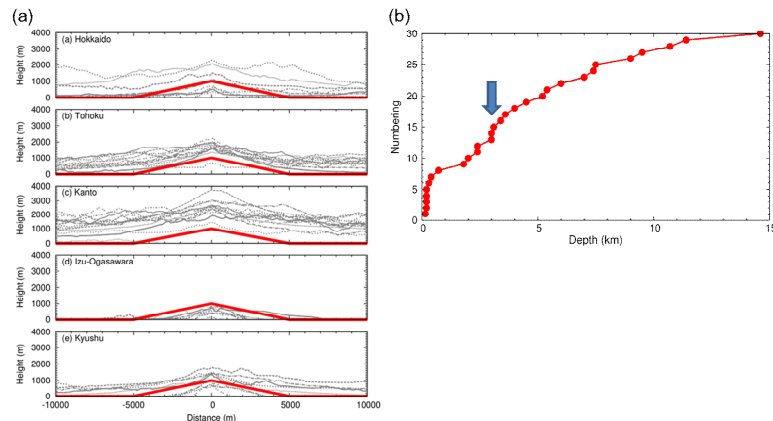


図2 (a)常時観測火山の地形断面図（国土地理院よりデータ提供）と、計算に設定した地形の一例（赤）. (b)日本における火山活動時の膨張イベントの深さのコンパイル（気象研技術報告，2013）と、計算に用いたマグマ溜まり深さ（青矢印）.

本研究では、定常火道流においてマグマ溜まりの圧力と噴出率の関係に負性抵抗がある場合、火道流の力学系が不安定になることに着目し、この不安定化によってマグマ噴出率や火道内の発泡度、過剰圧が急増する過程が爆発的噴火への遷移に相当すると考え、その過程を対象とした火道流解析を実施している。昨年度の成果では、この爆発的噴火への遷移中に、マグマ溜まり圧力がまず最大となってピーク値をとり、その後火道内の浅部における過剰圧がピーク値となり、最後に噴出率が急増してピーク値をとるという特徴的な時系列変化があること示し、またその変化に対応した特徴的な地殻変動が生じ得ることを明らかにした。本年度は、この地殻変動の特徴のパラメータ依存性を整理するために、マグマ溜まり圧力が最大値となるタイミングと噴出率が最大値となるタイミングの間の時間を対象として、火口からの距離に依存して歪や傾斜の時間変化のパターンがどのように変化するのかを系統的に調べた（図3）。その結果、火口近傍域では、噴出率急増直前の火道浅部における過剰圧増加に対応して火口直交方向の歪が増加することがわかった。また、傾斜に関しても、火道内の過剰圧のみを考慮した場合には顕著な変化が見られなかったものの、火道流によるずり応力の効果を考慮した場合には鉛直変位の増加に対応して顕著な傾斜変動が生じることが明らかになった。

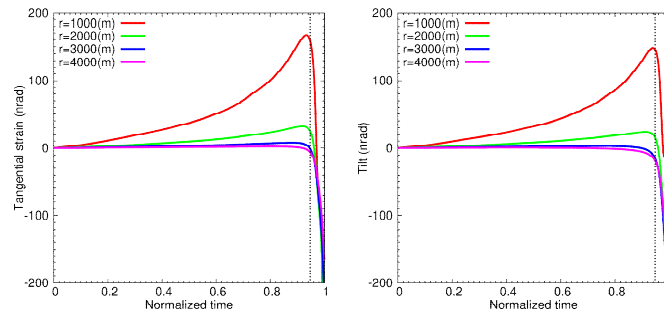


図3 火道・マグマ溜まり周囲の弾性モデリングによる地殻変動（歪および傾斜）の例．マグマ溜まりの圧力，火道のNormal stressおよびshear stressを考慮．時間軸はマグマ溜まり圧力が最大値となるタイミングと噴出率が最大値となるタイミングの間で規格化してある．

本研究ではさらに，歪および傾斜パターンが検知できる観測点位置の条件に制約を与えるために，図4のように規格化時間と火口からの観測点距離の関係における歪・傾斜量の大きさを示したレジームマップを新たに導入した．その結果，噴出率急増直前の歪・傾斜量増加は，火口からの距離が約1500 m以内の観測点で検知が可能であることが明らかになった．さらに，このマップを使用することによって，火道流で設定する物性パラメータが地殻変動パターンに与える影響を系統的に調べた．その結果，特にマグマ溜まりにおけるマグマ含水量が，地殻変動のパターンを大きく変化させる重要なパラメータであることが明らかになった．具体的には，含水量が高い場合，噴出率急増直前において歪・傾斜量の増加が火口近傍域で顕著に見られる一方で，低含水量の場合は減少が卓越し，増加パターンが消失してしまう（図4）．この原因を調べるために付加的な解析を実施したところ，低含水量の場合，マグマ溜まり内のマグマ圧縮率が低くなる効果によって圧力減少量が大きくなり，これが歪・傾斜変動量の急激な減少をもたらしていることが明らかになった．本研究で求められた噴出率急増直前の歪・傾斜変化は，爆発的噴火への遷移の直前検知において有効であることを示しており，この検知可能性が含水量というマグマ溜まりにおける蓄積条件に依存している，という新しい知見が得られた．

上記の安山岩質・珪長質マグマを対象とした解析に加え，本年度は玄武岩質マグマに特化したモデル化および数値計算にも取り組んだ．その結果，噴出率が増加する間に火道内が急激に減圧する特徴が明らかとなり，これがこれまでの珪長質マグマ噴火のシミュレーションには見られない特徴的な地殻変動パターンをもたらすことがわかった．

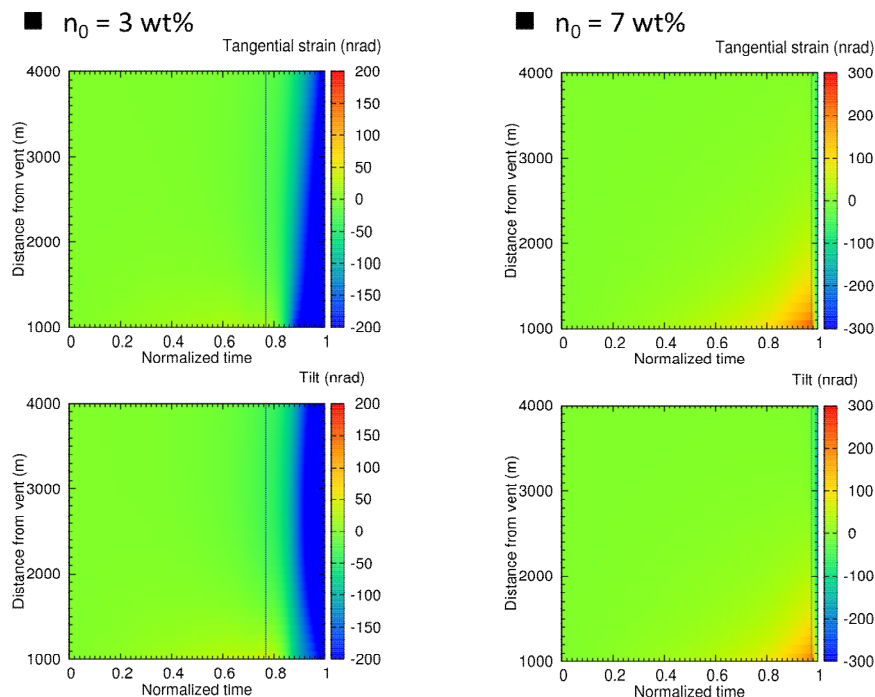


図4 規格化時間と火口からの観測点距離の関係における歪・傾斜量の大きさを示したレジームマップ地殻変動パターンと、その含水量依存性（左側が3wt%，右側が7wt%）。高含水量の場合、火口近傍域で噴出率急増前の顕著な歪・傾斜量の増加が観測される一方で、低含水量の場合は減少が卓越していることがわかる。

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た。

具体的には、マグマ移動過程シミュレーションについて、マイクロモデル（岩脈進展）の高度化・安定化を行った。また、マイクロモデルとマクロモデル（個別要素法による地殻変動シミュレーション）を境界条件で結合して評価する手法を検討した。これらにより岩脈貫入に伴う地震発生と地殻変動について、観測データに照らし合わせて、分岐判断の定量化を進めた。さらに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シミュレーション手法開発を進めた。イタリアで開催される CoV10 に出席し、マグマ移動過程シミュレーションに関する成果発表及び情報収集を行った。

岩脈進展シミュレーション（マイクロモデル）について、今年度はマグマのまわりの弾性変形を割れ目の解析解で表現することを基本方針に掲げて、（1）マグマの流れと調和する弾性変形を計算する方法の高度化、および、（2）岩脈の成長過程を時間とともに追跡する計算方法の改良を実施した（図5）。本作業で改良された解析方法では、マグマの流れを表現するために、ポアズイユ流を拡張した新しい解を用いた。

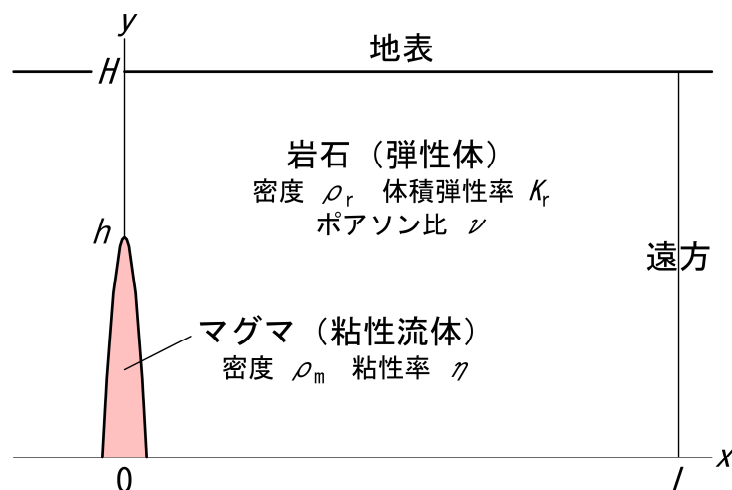


図5 2次元のマグマの貫入を計算するシステム

また、開口割れ目を表現する解析解を活用し、それを重ね合わせて割れ目の形状を表現した(図6)。その結果として、マグマの流れが岩石の弾性変形と円滑に結合され、応力拡大係数と割れ目の拡大速度が解析的に見積もられるようになった。これらの改良によって、岩脈の成長過程が不安定を起こさずに高精度で追跡できるようになった。

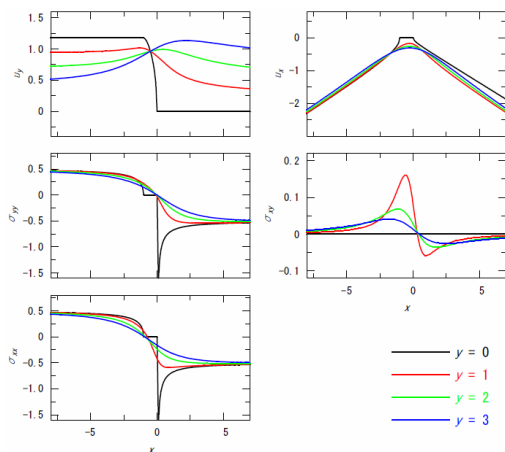


図6 マグマのまわりの弾性変形を記述する解析解. 変位(u_y, u_x)と応力($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$)の分布を割れ目の面上とその近傍で示す. 割れ目に沿って x 軸, それと垂直に y 軸をとっており、 $y=0,1,2,3$ での分布を示している。

計算は、各時間ステップでマグマの流れを岩石の変形と調和させるように決め、その結果を用いて次の時間ステップの条件を準備して、時間ステップを更新する。このステップを繰り返すことで、マグマの貫入過程を時間とともに追跡する。これを実現する計算ステップは下記の通りとなる。

- (1) 弾性、粘性、拡大速度などの物理定数、計算の領域 L と H 、その分割数 m と n ,

割れ目の初期形状，計算の時間刻みなどを入力ファイルから読み込む．

(2) マグマの貫入を追跡する関数に入って，時間 t ，割れ目先端の位置 h ，割れ目の幅 a などの変数を初期化する．このときに，割れ目の初期形状は解析解ひとつで表現することにする．初期化を終えたら，時間ステップのループに入る．

(3) 時間ステップのループでは，割れ目の形状のデータを使って割れ目の形状を表す係数 k および応力拡大係数 K を求める．腐食破壊と脆性破壊の条件から 2 つの拡大速度 c を計算し，その大きい方を採用する．さらに，マグマの鉛直流速に比例する定数 A を計算して，マグマから岩石に加わる応力 σ_{xy} の境界値を設定する．岩石に加える変位 u_x はマグマと接触する境界条件を用いて割れ目の幅 a の半分として設定する．

(4) マグマが岩石に加える変位 u_x と応力 σ_{xy} の分布を境界条件として，岩石の弾性変形を計算する．このときに，マグマとの接触面以外の境界条件を用いる．弾性変形の計算によって，岩石からマグマに加わる応力 σ_{xx} が求まる．

(5) 応力 σ_{xx} の分布を用いて，マグマの水平流速の定数 B の分布を求める．この分布を用い，割れ目の幅を記述する解析解の各々について，振幅 C の時間微分を計算する．

(6) 時間ステップのループから抜けて，時間 t を時間刻みの設定量 Δt だけ増やし， c から割れ目先端の位置 h を更新する．

(7) 割れ目先端の位置 h が地表に達したら計算を打ち切る．また， t があらかじめ設定された時間だけ経過したら，入力された jt の値に応じて，計算を終えたり，制御をコンソールに戻したり，そのまま計算を継続したりする．この条件で止められない場合や，コンソールから継続の指示が出された場合は，解析解の振幅 C を更新し，必要に応じて h に合うだけ解析解の数を増やして，(3)にもどる．

本手法を用いた計算プログラムを開発した．マグマが割れ目をつくりながら上昇する過程は，2 つ物理的な原因で駆動される．ひとつは貫入するマグマに加わる圧力であり，もうひとつはマグマと岩石の密度差に起因する浮力である．流入するマグマの圧力が貫入を駆動する場合である．マグマと岩石の間には密度差がなく，マグマには岩石より高い圧力が貫入口 ($x = y = 0$ の点) で加わるものとする．岩石との圧力差は無次元量で 1 の一定値 ($= 10^{-3} K_b : K_b$ は体積弾性率) とする．システムの大きさは $L = 10 \text{ km}$, $H = 5 \text{ km}$ であり，離散化の格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.1 \text{ km}$ に設定する．計算の時間刻みは無次元単位で 0.01 である．岩石のポアソン比は 0.25，マグマの粘性率は 1 とする．割れ目先端では腐食破壊のみを考え，定数は $cs = 1$, $Ks = 1$, $ns = 5$ とする．計算例を図 7，8 に示す．

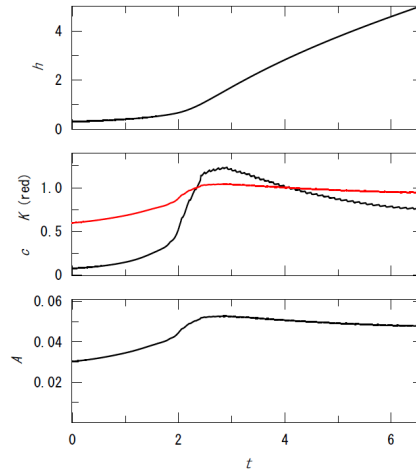


図7 貫入するマグマに一定の圧力差 1 を加えたときの割れ目の拡大過程. 時間 t とともに, 上段に先端の高さ h , 中段に拡大速度 c と応力拡大係数 K (赤の曲線), 下段に流れの振幅 A がどう変化するかを示す. これらの変数の大きさは規格化されている.

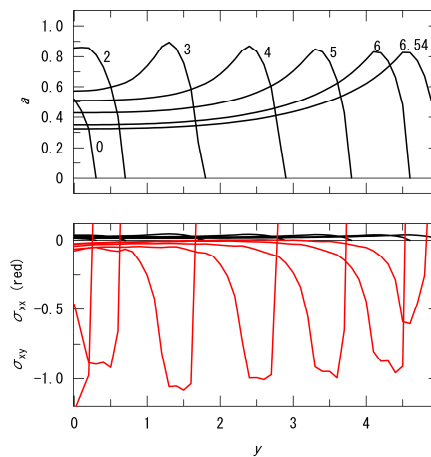


図8 割れ目の状態の時間的推移. 割れ目の拡大は貫入口でマグマに加わる圧力差 1 によって駆動される. 上段は割れ目の形状の時間変化 (a は割れ目の幅), 下段は各々の時間に働く応力 σ_{xy} (黒) と σ_{xx} (赤) の分布の時間変化を示す. 上段の図に付した数値は時間である. 変数は規格化されている.

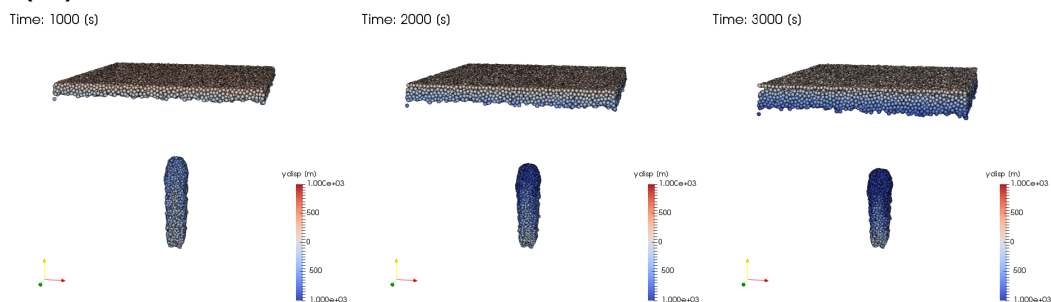
岩脈貫入シミュレーション (マクロモデル) では, 上記ミクロモデルによる岩脈と弾性体の境界における応力分布を初期値として, 粒子 (個別要素) で表した山体内の岩脈進展と地殻変動についての計算を実施した. ミクロモデルで用いた有限要素法では, 予め設定されたメッシュに破壊の方向が支配されるが, 個別要素法では要素を粘弾性バネで結合し, 各時間ステップでの応力および破壊条件を考えることにより破壊の方向をランダムに進展させることができる. $10\text{km} \times 10\text{km} \times 10\text{km}$ の立方体状の領域に $1,000,000$ 個の球形の要素を生成する. 粒径は乱数で与えるが, それぞれおおよそ 100m 程度のサイズである. これらの粒子は normal および shear 方向に弾性および粘性バネで結合されており, 応力が伝達される. その結合が離れる閾値を設定し, これを脆性破壊とみなす. 粒子は定義空間内で位置が重ならないように乱数で生成する. 地殻を粒子の集

合体として表すため、重力下において静置している状態とすることが必要である。このため、ランダムに生成された粒子に対して、まず重力パッキングを実施し、その後、初期条件・境界条件を設定する。領域の中央部分に周囲と異なる密度やバネ定数を設定した領域を設定し、マグマ領域とする。これらの粒子に先に有限要素法で求められた応力分布を初期の過剰圧状態として設定する。マグマ領域は、計算領域の中心の下方、すなわち、先端が楕円状の深さ 5km 以深の矩形領域とする。なお、先の有限要素法の空間スケールと本個別要素法の空間スケールの相違があるが、有限要素法で進展したクラックのサイズが数 100m 程度となった段階の応力パターンを個別要素法のマグマ粒子に適用する。また、水平方向の境界粒子には広域応力を設定する。本例では X 方向および Z 方向にそれぞれ張力場・圧縮場とした。

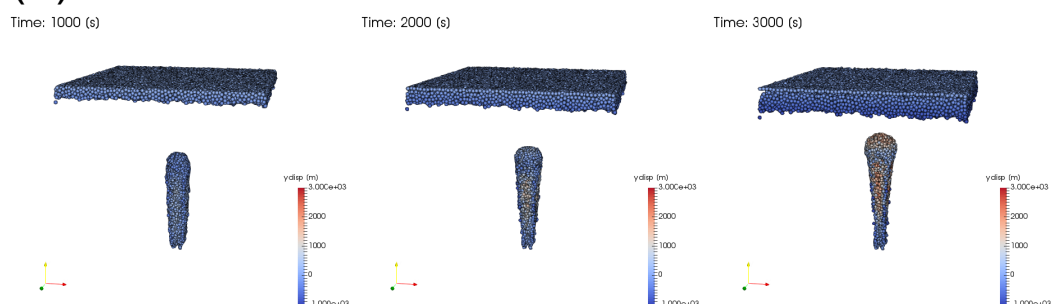
シミュレーション結果の例を図 9 に示す。岩脈が上昇するにつれて矩形状からダイアピル状に変形することがわかる。ある程度上昇したところで一度やや滞留したのちにさらに上昇して表面に到達し噴火に至る場合、また、滞留した状態からそれ以上上昇することなく停止し、噴火未遂となる場合があることがわかる。噴火と噴火未遂の分岐を支配する要因は、岩盤の物性などの static なパラメータや初期条件・境界条件などの dynamic なパラメータがあるが、最も支配的なものは岩脈内マグマの過剰圧である。

岩脈先端での応力集中の度合い、および、これにともなうき裂の進展の可否がマグマの移動を制御している。先端の応力集中の値を幾つか変えて、計算を行った。岩脈先端が地下 5km であると仮定すると、この深さの静岩圧(lithostatic pressure)は約 125MPa となる。これを基準として、初期の過剰圧が静岩圧の 8 倍 (1000MPa)、16 倍 (2000MPa)、32 倍 (4000MPa) とした計算結果を示す。8 倍のケースでは、岩脈進展が始まるものの 1000s 程度でほぼ停止するとともに、逆に周辺岩盤から押され、下方に戻る傾向が見られる。32 倍のケースでは約 2000s でマグマ粒子は地表に到達し、噴火に至る。16 倍のケースでは、32 倍のケースよりは遅いものの 3000s でもさらに上昇を続ける傾向が見られているため、今後噴火に向かう結果となっている。今回得られた結果から、岩脈先端での応力集中の値によって、岩脈が地表に到達する、すなわち、噴火に至るか、あるいは、噴火未遂で終わるという閾値があることが示されている。この例からは、岩脈貫入が開始する過剰圧は開始点が深さ 5km の場合、その静岩圧の 125MPa の 10 倍程度であることがわかった。なお、この閾値は過大である可能性がある。今回の個別要素法によるシミュレーションでは、1 粒子の大きさが 100m 程度と大きいため、このサイズでの応力集中しか取り扱うことができない。そのため過剰な見積もりとなっている可能性がある。実際には数 10cm～数 m スケールでの応力集中がおこると考えられるため、より小さい過剰圧によってき裂進展が開始し、その後、加速的に破壊が進むものと推測される。現時点では計算資源の制約があるが、今後、1m～10m オーダーでの小さな粒子の集合体による数値シミュレーションを実施し、き裂進展の閾値を求める必要がある。平成 29 年度より解析を行っている 2015 年桜島噴火未遂、2000 年三宅島噴火未遂（初期の活動）の観測事例を対象として、今後、初期過剰圧を地殻変動データから推定し比較検討を行う。

(a) 8 倍



(b) 16 倍



(c) 32 倍

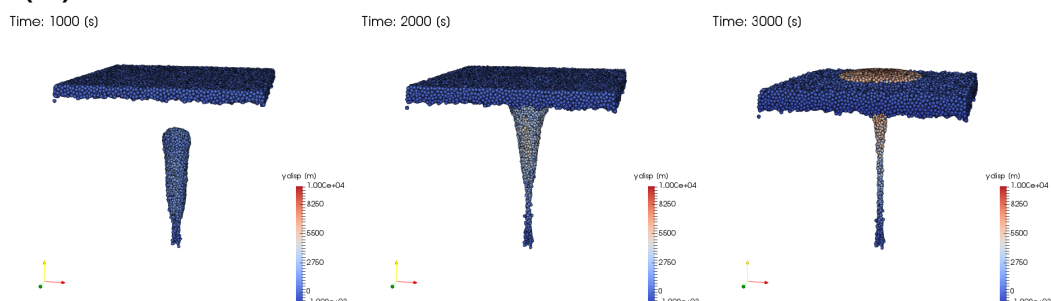


図9 個別要素法による岩脈貫入シミュレーション(マクロモデル)の例. 初期過剰圧として, 静岩圧比が(a)8倍, (b)16倍, (c)32倍としたもの. およそ10倍以下では噴火未遂, 10倍以上で噴火に至ることが分かった.

また, 水平方向の広域応力場と初期過剰圧が同程度のオーダーの場合の一例を図10に示す. 初期状態に等方的に分布していたマグマ粒子が, 差応力の影響を受けてマグマ貫入の走向が決まることがわかる. また, 各応力の比に応じて貫入する走向が系統的にずれることがわかる. 特徴的なのは, 単に斜行するだけではなくバイモーダルな貫入となる点である. これがさらに上昇すると, 地表に到達して2ヶ所から噴火が始まることになる. このような応力場の影響評価は, 3次元でのシミュレーションにより実現可能となったものである.

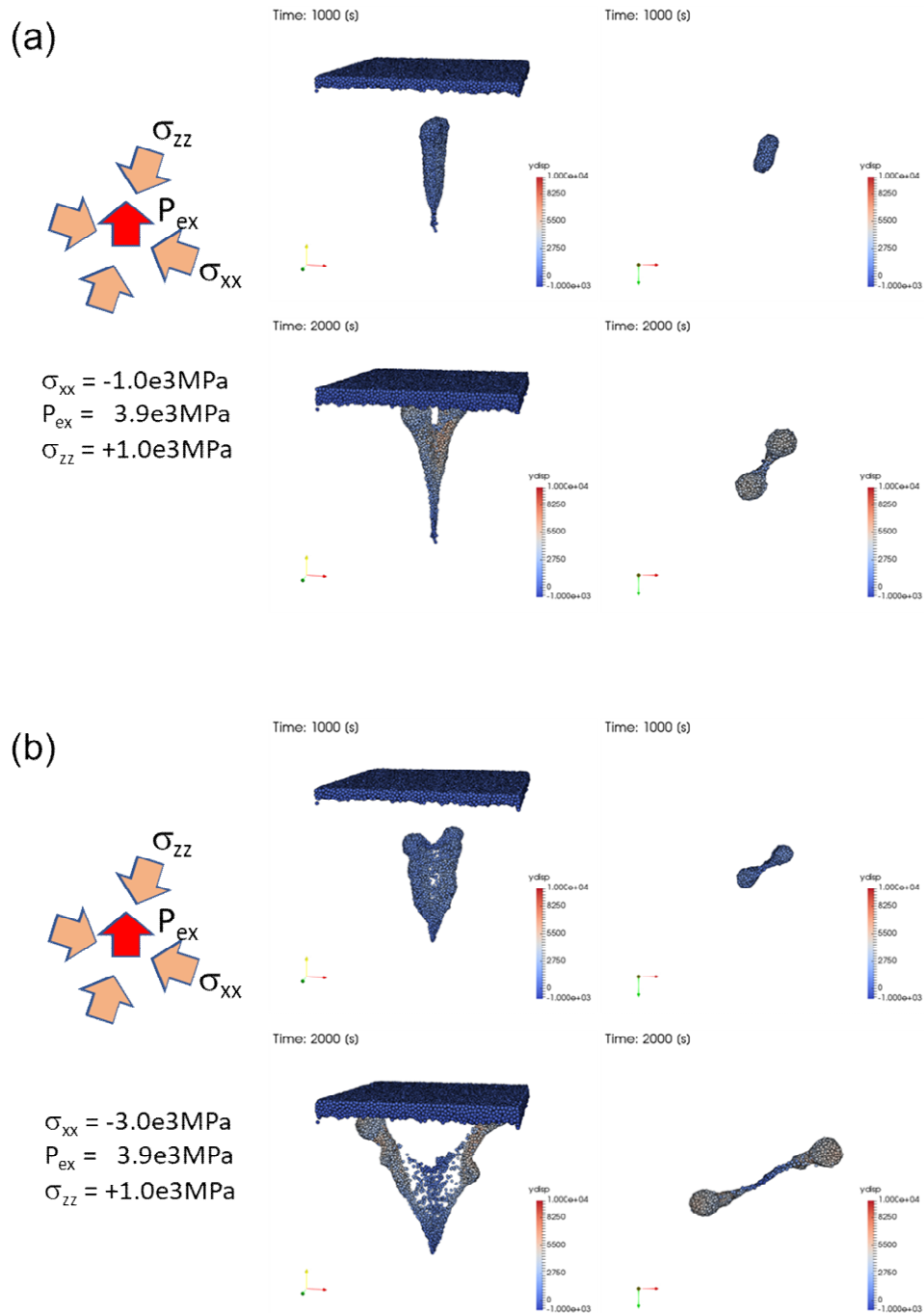


図 1 0 水平方向の差応力の違いによる岩脈貫入の影響例

2018 年 1 月 23 日に草津白根山の本白根山で水蒸気噴火が発生した．本白根山の近傍に気象庁が設置していた逢ノ峰南東の GNSS 観測点では噴火の前後に北向き約 15cm，鉛直上向きに約 7cm の変位が観測された（図 1 1）．一方，本白根山からおよそ 2km 離れた青葉山西の GNSS 観測点では，噴火に伴う地殻変動は検出できなかった．これらの観測データから，境界要素法により山体地形を考慮してフォワードモデリングによりの地殻変動源を求めた．その結果，逢ノ峰南東で観測された水平変位と上下変位の比を説明するには，本白根山の火口列の直下に仮定した鉛直ダイ

クでは深さが海拔 700m または、1750m になる必要があることが分かった。さらに、海拔 700m に仮定したダイクでは、逢ノ峰南東と青葉山西の観測点で同程度の大きさの変位が予想されるため、海拔 1750m の鉛直ダイクの方が観測データをより説明できることが分かった(図 1 2)。この地殻変動源の位置は地表からの深さが 300m 程度のごく浅い場所になる。このとき、ダイクの体積変化量は $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ であった。

伊豆大島では、予備傾斜観測で得られたデータの整理を進めるとともに、観測データをもとにしたマグマ移動過程と地殻変動シミュレーション手法開発を進めた。伊豆大島の約 1 年の周期的な地殻変動に関する、渡辺 (2012) の概念モデル (浅部マグマ溜まりに濃縮した気泡の間欠的な外部への流出による減圧と深部から上昇してきたマグマの発泡による増圧) の一部分について、物理過程をモデル化して数値計算を試みた。

浅部マグマだまりの玄武岩質マグマの中で生じる気泡の上昇と、それで生じる体積膨張と圧力変化に伴う間欠的な気泡の流出過程を、①マグマ溜りからの間欠的な気泡の流出、②減圧したマグマ溜り内部の発泡、③気泡の上昇によるマグマ溜りの体積膨張、④マグマ溜り上部への気泡の濃集というサイクルでモデル化して数値シミュレーションを行い、初期気泡半径、体積分率、気泡の上昇距離に適切な値を仮定した計算により、体積増加量と膨張の持続時間が、概ね観測と同程度の値に再現された。

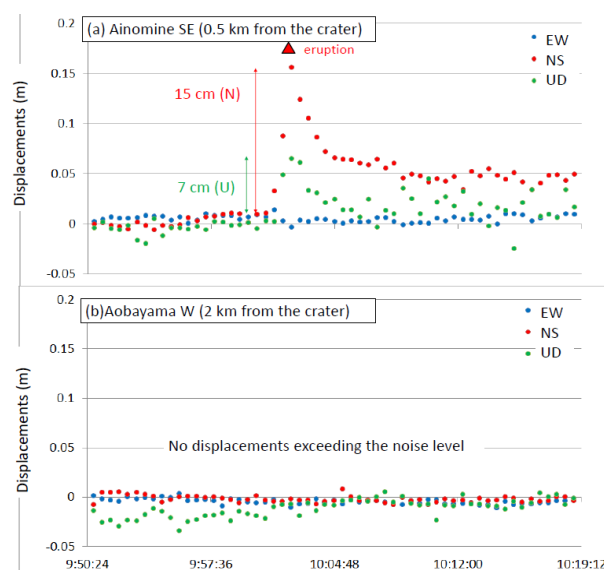


図 1 1 GNSS キネマティック解析による 2018 年 1 月 23 日の本白根山の噴火前後の逢ノ峰南東観測点と青葉山西観測点の 30 秒ごとの 3 成分変位の時系列。

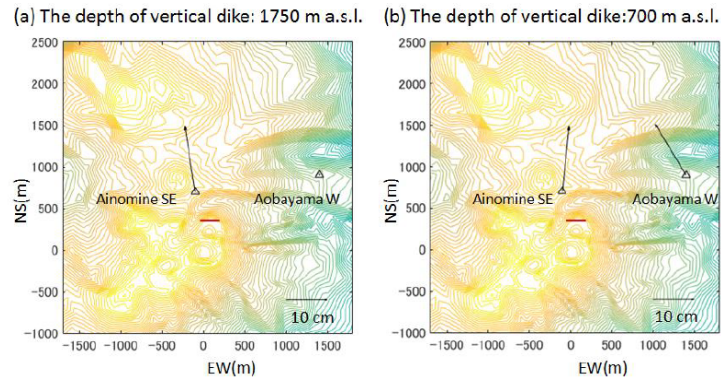


図 1 2 本白根山の火口列の直下に鉛直ダイクを仮定したフォワードモデリングで求めた逢ノ峰南東観測点と青葉山西観測点の変位量. ダイクの体積変化量は逢ノ峰南東で観測された北向きの変位を説明できるような値をそれぞれ用いた.

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.

具体的には, 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(図 1 3). 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)を参考にマグマ溜ま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 30MPa まで 0.01, 0.1, 1MPa/s の一定減圧速度で減圧実験を行った. その結果, 0.01, 0.1, 1MPa/s の減圧速度に対して, 石基結晶度(石英+長石)はそれぞれ 18, 5, 6 vol.%となった. 天然の噴出物に含まれる石基結晶度は 4.8-15.1 vol.%であるため(Noguchi et al., 2006), 本研究のマグマ減圧速度は神津島 838 年噴火のマグマ上昇過程を再現していると考えられる.

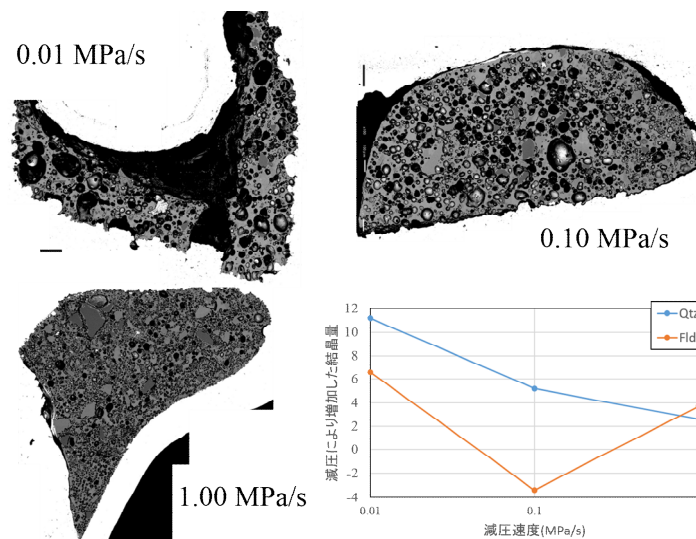


図 1 3 実験産物の薄片に関する電子顕微鏡写真と, 減圧速度と結晶量(Qtz は石英, Fld は長石)の関係. 電子顕微鏡写真横の数字は減圧速度. スケールは 200 μ m.

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、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、時間依存性を調べた。実験は一度 1250℃でサンプルを溶融させた後、固液二相が共存する 1130℃付近で行った。東北大学及び静岡大学の協力を得てこれらを実施した。

レオロジーモデルでは、伊豆大島 1986 年噴火の B1 溶岩を例として非定常状態のレオロジーの調査を進めた（図 1 4）。実験には平成 29 年度中に整備した粘性測定システムを用いた。電気炉中で作成した溶岩にロッドを差し込み、それを回転させることで応力やその時間変化を測定する。この実験は、剪断応力を掛けた試料について静置時間を与えた後にもう一度剪断応力をかける。実験の結果、静置時間とともに最大の応力（オーバーシュートストレス）が大きくなり、その一方で、時間が十分に立てば静置時間に関わらず同じ応力状態になることが分かった。また、実験後の試料を急冷回収してその組織を見ると、静置時間を取った実験では、鉄チタン酸化物の微結晶がクラスタを形成し、長軸方向がランダムになっていることが分かった。

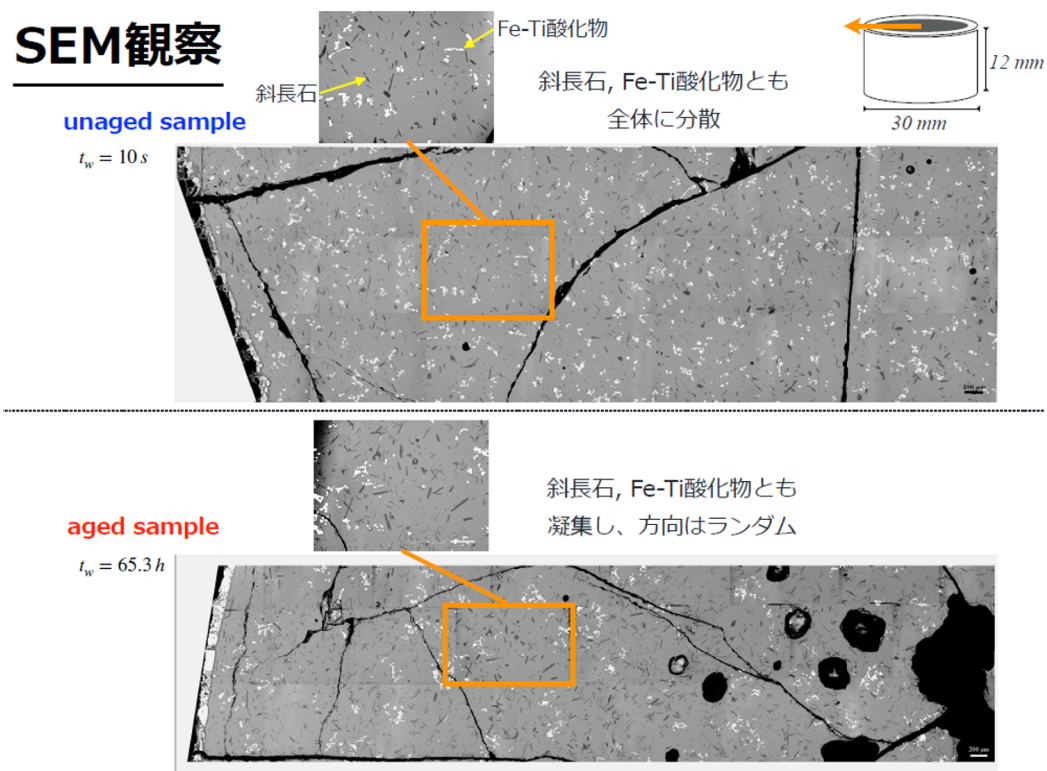


図 1 4 静置時間を取った場合(Unaged sample)と取らなかった場合(Aged sample)の実験産物の電子顕微鏡写真。

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、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 JMA-RATM²⁾による降灰シミュレーションの予

備計算結果の点検を行った。点検においては、堆積過程のモデル化・システムへのレーダーデータ利用の検討・首都圏降灰シミュレーションのデータ同化手法の検討を含む。イタリアで開催された CoV10 に出席し、噴火ハザードシミュレーションに関する成果発表及び情報収集を行った。平成 31 年度に向け、「b. 噴煙柱ダイナミクスモデル」との連携のための設計を行った。

JMA-RATM を用いた富士山宝永山噴火級降灰シミュレーションでは、2015～2017 年の気象場 1096 事例を適用し、それぞれ 398 時間後の火山灰拡散・降灰の予測を行った。この 3 年間における予想最大降灰量分布を図 1 5 に示す。また、これをもとに東京・大手町（富士山の東北東約 100km）における降灰確率を試算した（図 1 6）。

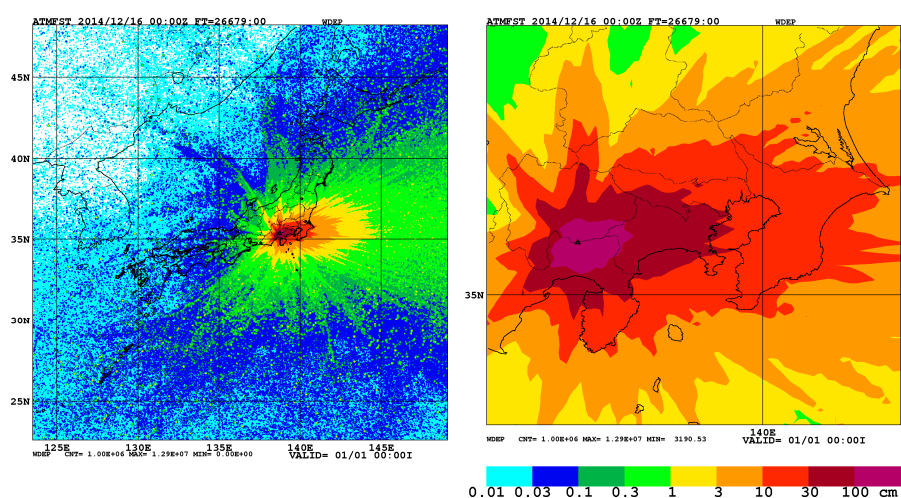


図 1 5 富士山宝永噴火級降灰シミュレーションによる予想最大降灰量分布(2015-2017 年)．右図は拡大図

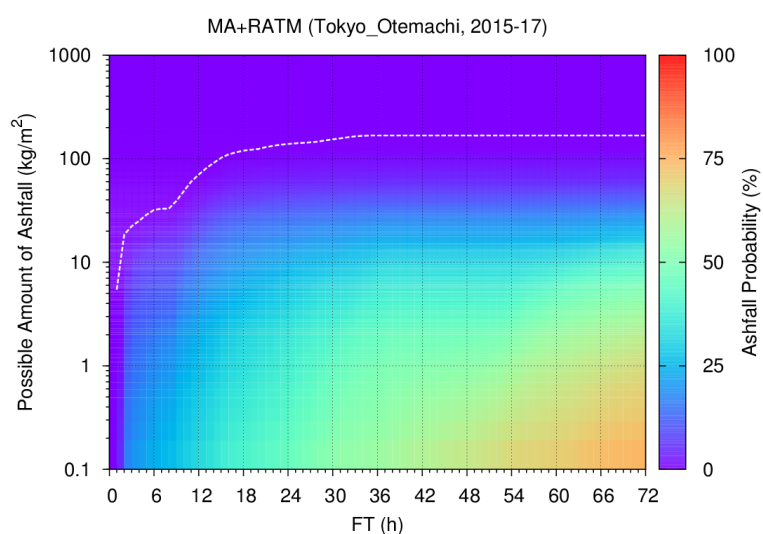


図 1 6 東京・大手町における降灰確率。噴火発生から 72 時間まで。点線は予想最大降灰量

また、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進めた。レーダーデータを直接システムに入力する「直接的」な手法と、レーダーデータを降灰シミュレーションの初期値として利用し、その予測結果をシステムに入力する「間接的」な手法の2通りに分類し、「直接的」手法を火口周辺に落下する粒径の粗い粒子の予測に、「間接的」手法を広域における降灰や大気中の火山灰（細粒）の予測にそれぞれ適用する方向性を定めた（図17）。本内容をCoV10にて発表した。

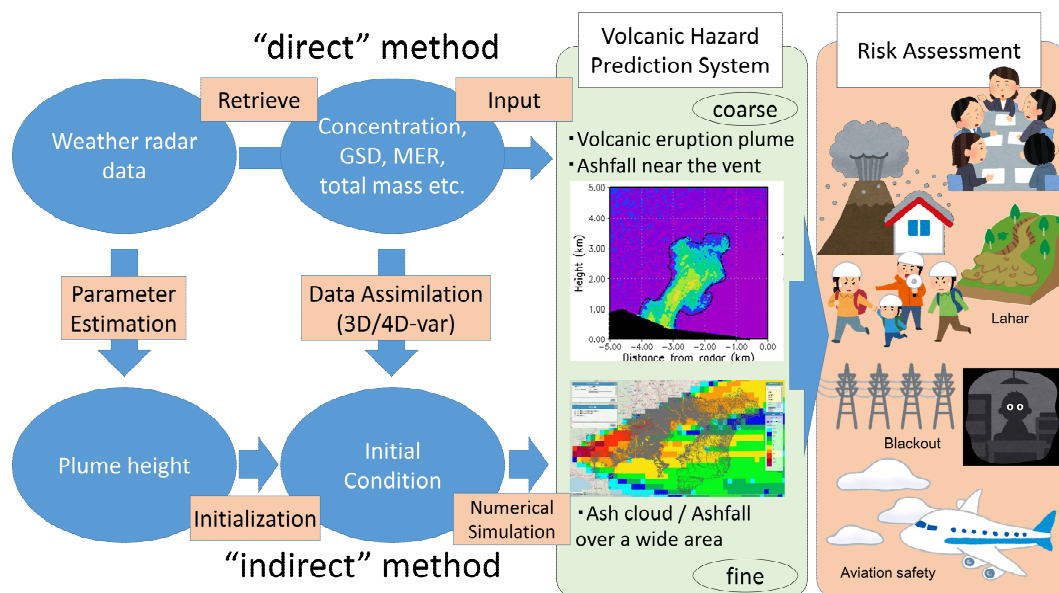


図17 気象レーダーデータの取り込みにおける直接的・間接的手法の概念図

データ同化手法の検討では、3次元変分法について仮想的な観測値を用いた性能評価を実施するとともに、4次元変分法を、阿蘇山2016年10月08日の噴火における降灰事例を対象として、降灰観測を用いて噴煙柱から放出される火山灰の鉛直分布を推定することで、降灰予測の精度が向上することを確認した（図18）。

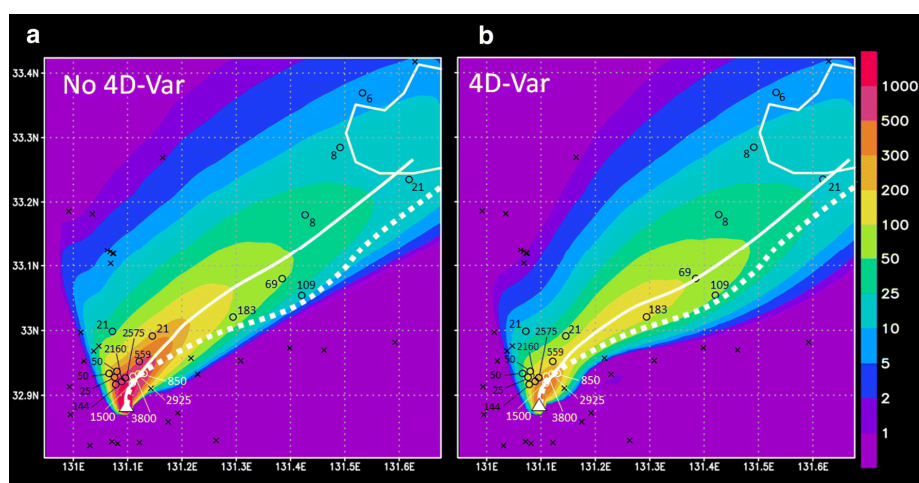


図18：阿蘇山2016/10/08噴火のデータ同化例

降灰シミュレーションの高度化に向け、噴煙柱ダイナミクスモデルのシミュレーション結果から降灰シミュレーションの初期条件取得に着手した。具体的には、噴煙柱ダイナミクスモデルのSK-3D モデル³⁾で計算されるマーカー粒子の軌跡を解析し、噴煙から粒子が離脱する位置（落下を開始する位置）を抽出した。今回は、富士山宝永噴火級のシミュレーション 1 事例に対し、解析を実施した。

図 19 に、推定された粒子放出位置を示す。噴煙ダイナミクスおよび粒径に依存して、5 つの放出領域に分類されることがわかった。具体的には、弾道放出、噴煙柱放出、噴煙頂放出、傘型領域放出、傘型領域滞在である。降灰シミュレーションで多く利用されている従来の供給源モデル（Suzuki, 1983）と比較すると、従来は粗粒粒子が様々な高度から放出されるように与えられていたのに対し、本解析では、特定の高度から放出されるという明瞭な違いが得られた（図 20）。降灰シミュレーションにおいて、このような粗粒粒子にみられる供給源の改良は、火口近傍での降灰量推定が増大するように改善されることが予想される。

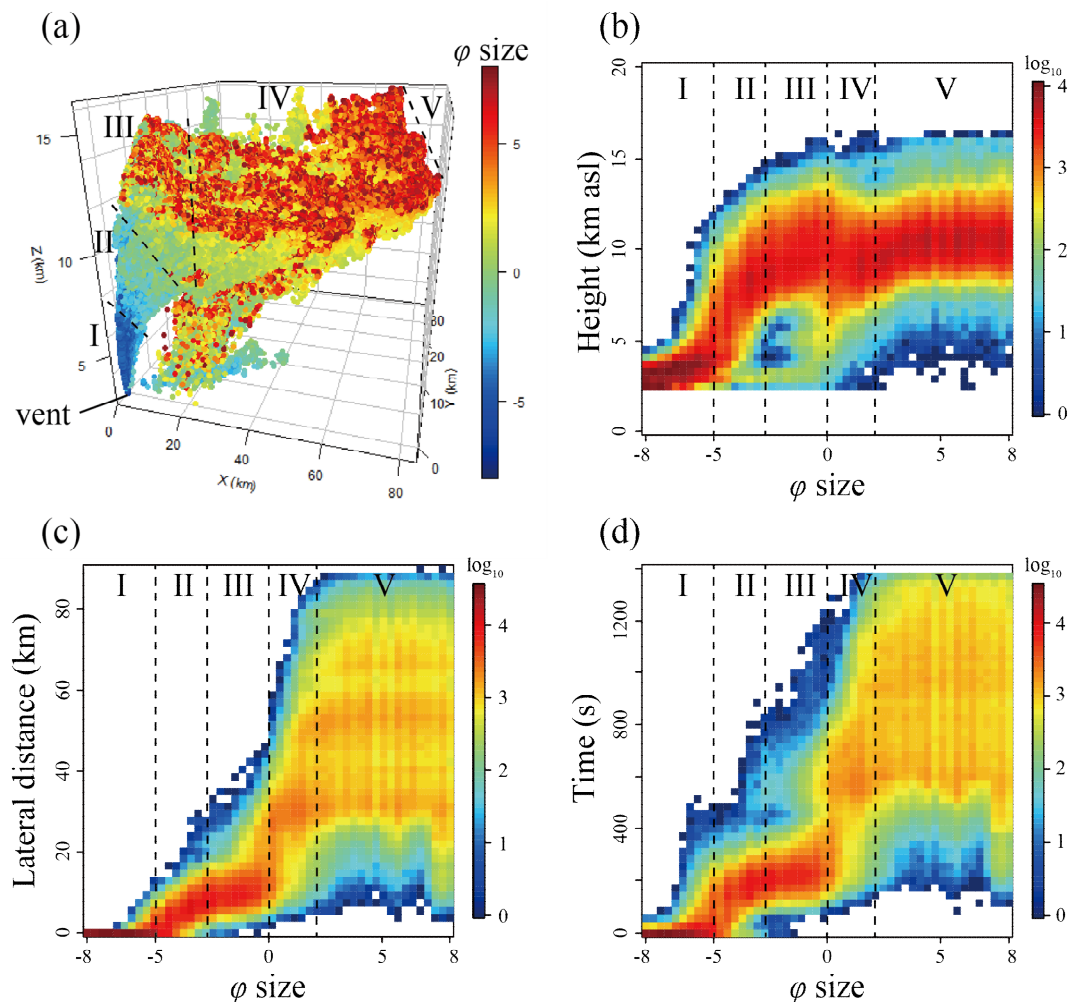


図 19. 推定された粒子放出位置. (a) 粒子放出位置と粒径の関係. (b)–(d) は、粒子放出の密度分布を表す. (b) 粒径と高度の関係. (c) 粒径と水平距離の関係. (d) 粒径と噴出から放出までに要した時間の関係. 図中の I–V は、それぞれ弾道放出、噴煙柱放出、噴煙頂放出、傘型領域放出、傘型領域滞在の放出領域を表す. ϕ は粒径を表す ($\phi = -\log_2(d/d_0)$; $d_0=1\text{mm}$).

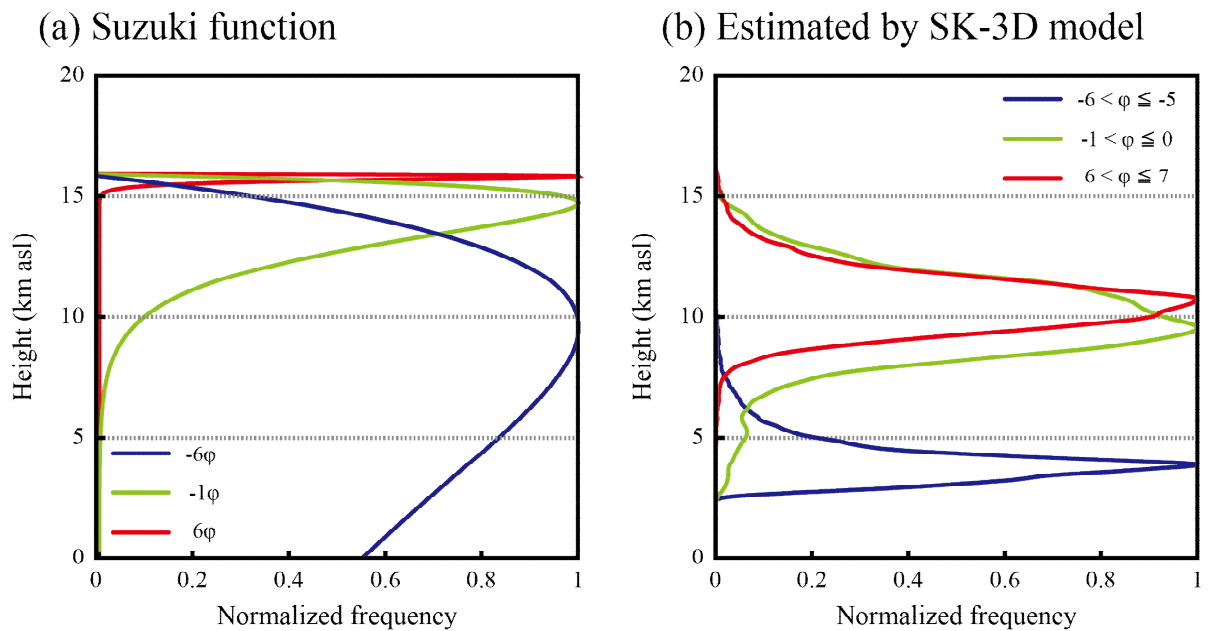


図 20. 粒子放出高度の頻度関係. (a) Suzuki (1983) の関数から得られる粒子放出の確率分布. 計算におけるパラメータは, 新堀・他 (2014) を参考に, $\lambda=1$, $\beta=0.017$, $\rho_{pm}=1000$ (kg m⁻³), $\rho_a=1$ (kg m⁻³), $\eta_a=10^{-5}$ (Pa s), $g=9.8$ (m s⁻²), $F=1$, $\lambda_0=0.0662$, $a=1.257$, $b=0.400$, $c=1.100$, $H=16000$ (m) を与えた. (b) SK-3D モデルのシミュレーションにより得られた粒子放出の頻度分布. 頻度はそれぞれ, ピーク値で規格化した. なお, 粒径は ϕ スケールとする.

b. 噴煙柱ダイナミクスモデルの開発

火山噴煙数値モデル SK-3D³⁾ の高度化と, それを用いた様々なタイプ・規模の大規模シミュレーションを実施した. モデルの高度化と計算結果の蓄積により, 降灰モデルとの連携準備を進めた.

モデルの高度化に向け, モデルの不確定性評価を目的としたベンチマーク研究をイタリア INGV グループと共同で進めた. 各国で開発されている噴煙ダイナミクスモデルでシミュレーションを行いその計算結果を比較するためには, 境界条件の影響を極力少なく安定した計算条件が必要となる. そのため, 噴火強度, グリッドサイズ, 計算領域を変えた計算を SK-3D によって複数行い, 適切な計算条件を検討した.

首都圏の降灰予測に向け, 富士山宝永級噴火の長時間シミュレーションを SK-3D を用いて行った. 冬型気圧配置が特徴的な実際の気象条件を用い計算を実行した. 平成 29 年度には噴火から 30 分後までの再現であったが, 平成 30 年度は噴火から 60 分後までの長時間に渡る火山灰輸送を再現した. 計算結果より, 大気中に滞留する火山灰の空間分布と, 地表での降灰分布の時間変化を求めた (図 21). 計算結果を整理・解析することにより, 堆積物の最大粒径分布図を作成した

(図 22). 数値計算結果で得られた最大粒径分布と宝永噴火堆積物の野外観察で得られた分布を予備的に比較したところ, 数値計算結果は野外観察データに比べ, ある地点における最大粒径が系統的に小さいことが判明した. このことは, これまでに推定されていた噴火強度より実際の宝永噴火は大きかったことを示唆しており, 初期条件と大気条件の更なる検討が必要となる.

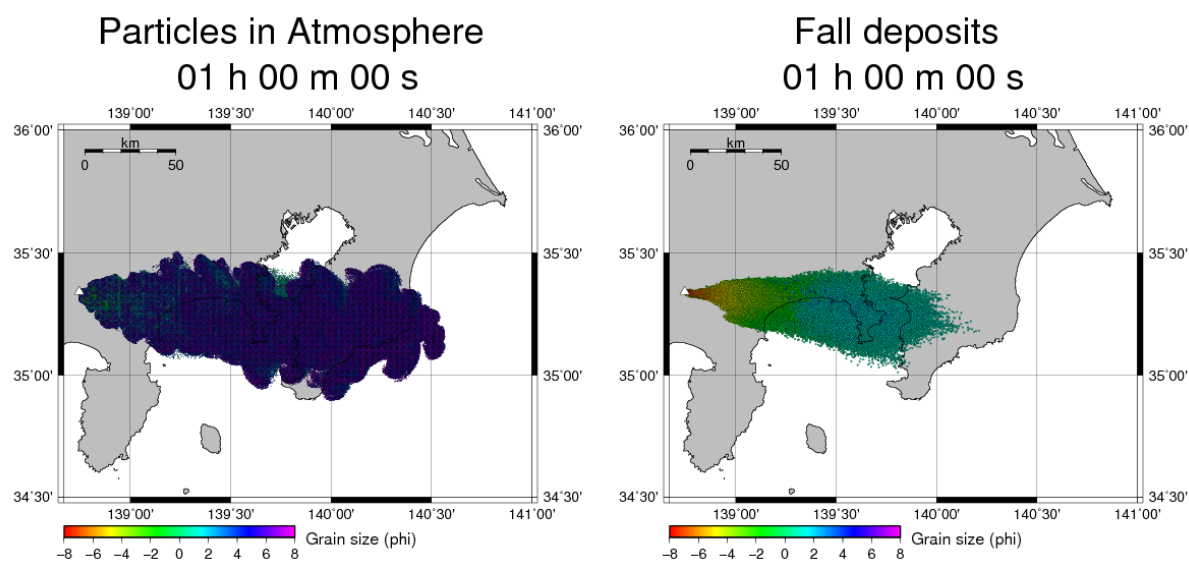


図 2 1 富士山宝永級噴火シミュレーションによる大気中の火山灰分布と地表における降灰分布（1 時間後）.

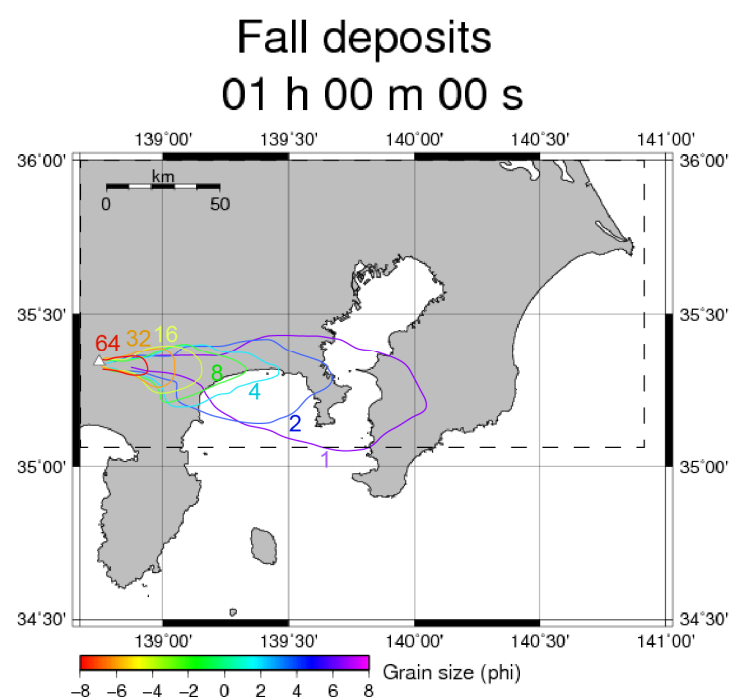


図 2 2 シミュレーションによる降灰分布（図 2 1）を基にした最大粒径分布図（単位は mm）.

降灰モデルとの連携準備として、実際の気象条件よりも単純なものを初期条件とした噴煙ダイナミクス・火山灰輸送シミュレーションを実行した。風速を 30 m/s, 20 m/s 一定に与え、噴火開始から 1 時間後までの火山灰挙動を計算し、火山灰の大気中分布と降灰分布について時間発展を求めた（図 2 3）。高度によって風速と風向が変化する場合（図 2 1）に比べ、火山灰分布は単純で解析しやすい。したがって、降灰モデルに受け渡しやすい粒子データのセッ

トを蓄積できたことになる。

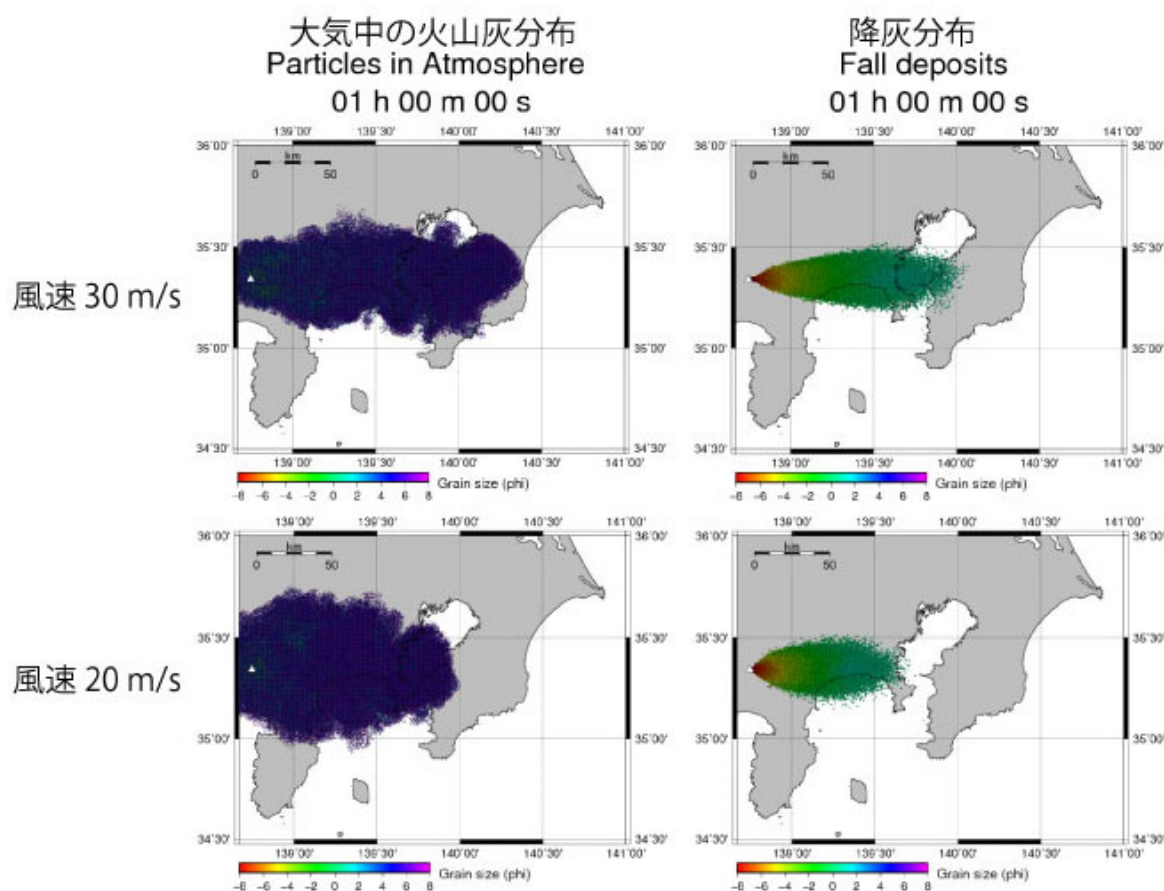


図 2 3 単純な気象場を用いた富士山宝永級噴火シミュレーション。

富士山宝永級噴火に加え、水蒸気噴火・大規模噴火・ブルカノ式噴火の大規模シミュレーションをSK-3Dを用いて実施した。特に、御嶽山2014年水蒸気爆発の事象再現のため、温度を変えた大規模シミュレーションを複数行った。その結果、噴出温度による火砕流の有無・噴煙高度に違いが生じることを確認した(図2-4)。また、大規模噴火事例としてピナツボ噴火1991年噴火の噴煙拡大・火山灰輸送シミュレーションを行い、大気中に拡がる火山灰粒子、および、地表に堆積した火山灰粒子分布を求めた。さらに、グループD2と連携し、ブルカニアン噴火シミュレーションの桜島噴火への適用を進め、短時間に放出する火山灰粒子の挙動を解析した。

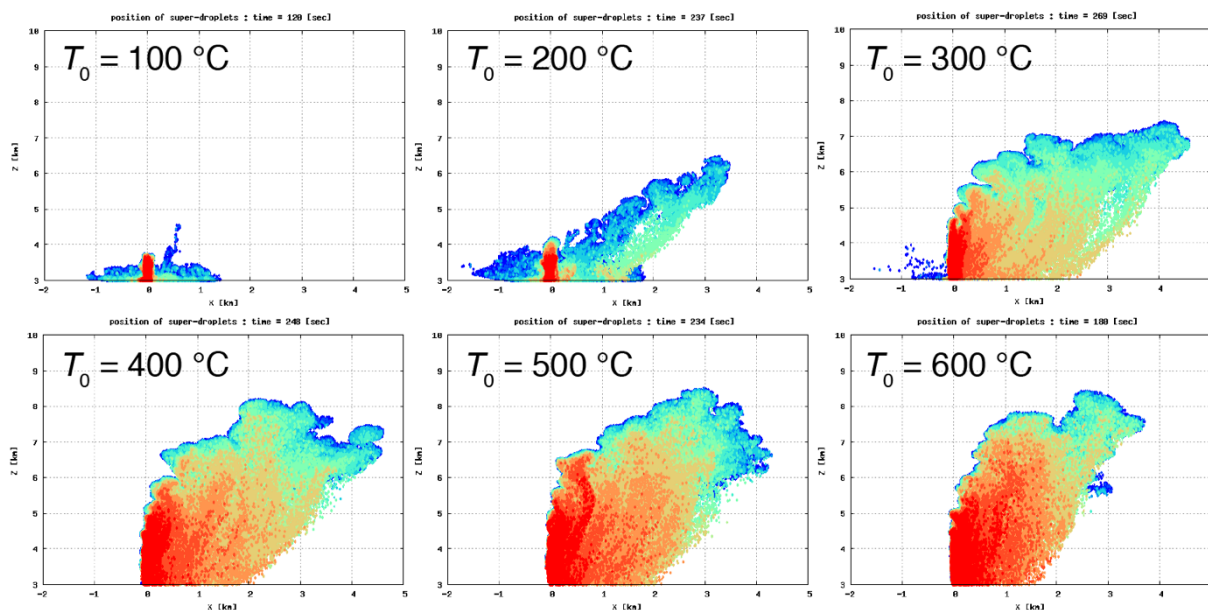


図 2 4 噴出温度を変えた御嶽山 2014 年噴火シミュレーションによる大気中の大気分布.

c. ハザード評価システムの検討

○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 LavaSIM⁴⁾ 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・移動効果導入の前段階として、プログラムの高速化を行うための性能調査を実施した。富士山での想定溶岩流およびキラウエア火山で 2018 年 6 月に発生した大規模溶岩流をケーススタディとして、性能評価を実施し、プログラム中における計算不安定の原因を突き止め、改善策を得た。

○噴石シミュレーション

噴石シミュレーションでは、オープンソースの火山岩塊シミュレータプログラム Ballista⁵⁾ の高度化を行った。1) メモリーエラーハンドリング、2) 入力パラメータの編集機能、3) GIS 機能を用いたデータの入力と出力等について実施した。整備したプログラムは次年度以降のハザード予測システムへ実装する。

○ハザード評価システム

1) 噴石シミュレーション機能追加

防災科研で整備している火山リスクマネジメントシステムにおいて、これまで実施してきた溶岩流シミュレーション・噴煙シミュレーションに加え、噴石シミュレーションの評価機能を追加した。火山ハザードのデータに噴石シミュレーション BALLISTA の出力データ(以下、噴石シミュレーションデータという)を用いる。暴露度・脆弱性のデータとして、課題 D3 より提供された富士山チャレンジ⁶⁾による登山者のビーコンから取得した人流位置情報データを用いた。

具体的に開発する機能としては、噴石シミュレーションデータと人流位置データの RDBMS を構築し、交差判定により、高速で噴石災害評価を行い、その結果を地図に重畳表示できる機能を開発した。噴石シミュレーションでは富士山頂の2か所から噴出した噴石が地表への落下地点や衝突エネルギーを計算し、時間とともに変化する登山者の位置とのマッチングにより各登山客の被害の有無について 10m メッシュで算出するものである（図 2 5）。

2) ハザード評価システムの基本設計

各ハザードシミュレーションを統合的に扱うとともに、観測による入力データ、対策情報の提供を含めたハザード評価システムの基本設計を実施した。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化について、フローを検討した（図 2 6－2 9）。次年度以降本基本設計に基づき、実装を進める予定である。

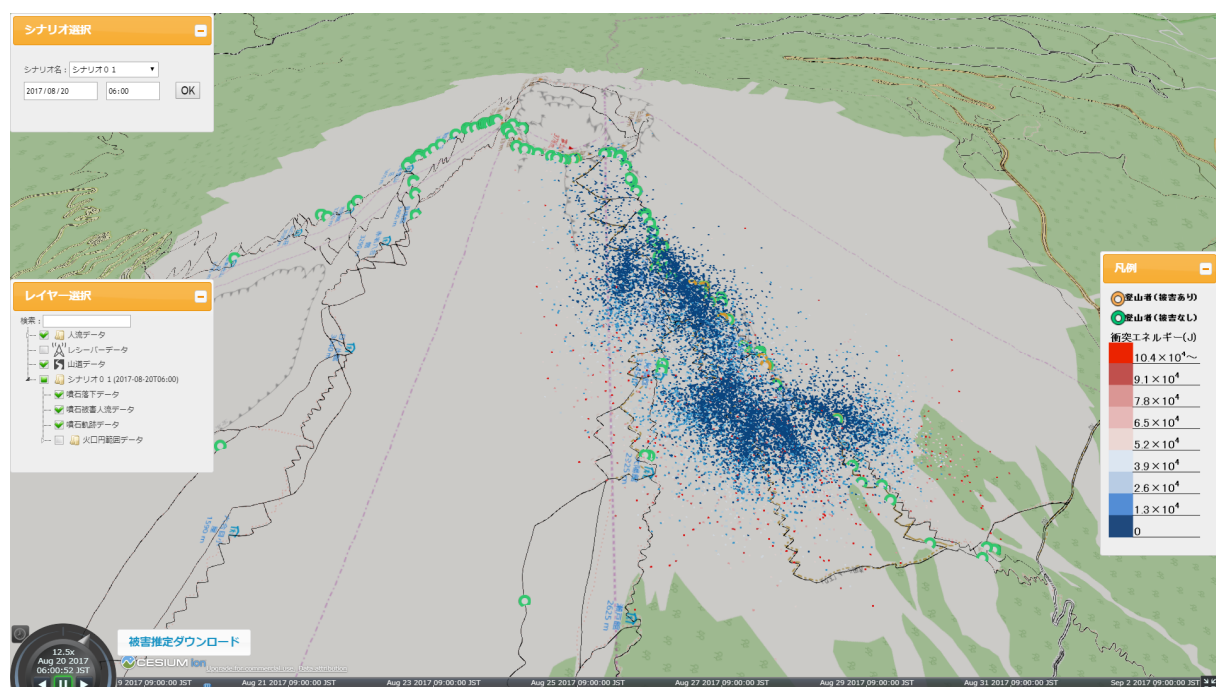


図 2 5 富士山における Ballista による仮想噴石シミュレーションデータと富士山チャレンジ⁶⁾（課題 D3 から提供）による登山者の人流データとの重ね合わせによるリスク評価事例。

緑色が各登山者を示し、落下した噴石と同じメッシュ内にいる登山者を黄色い円で示す。青～赤の点が個々の噴石の落下地点を示す。

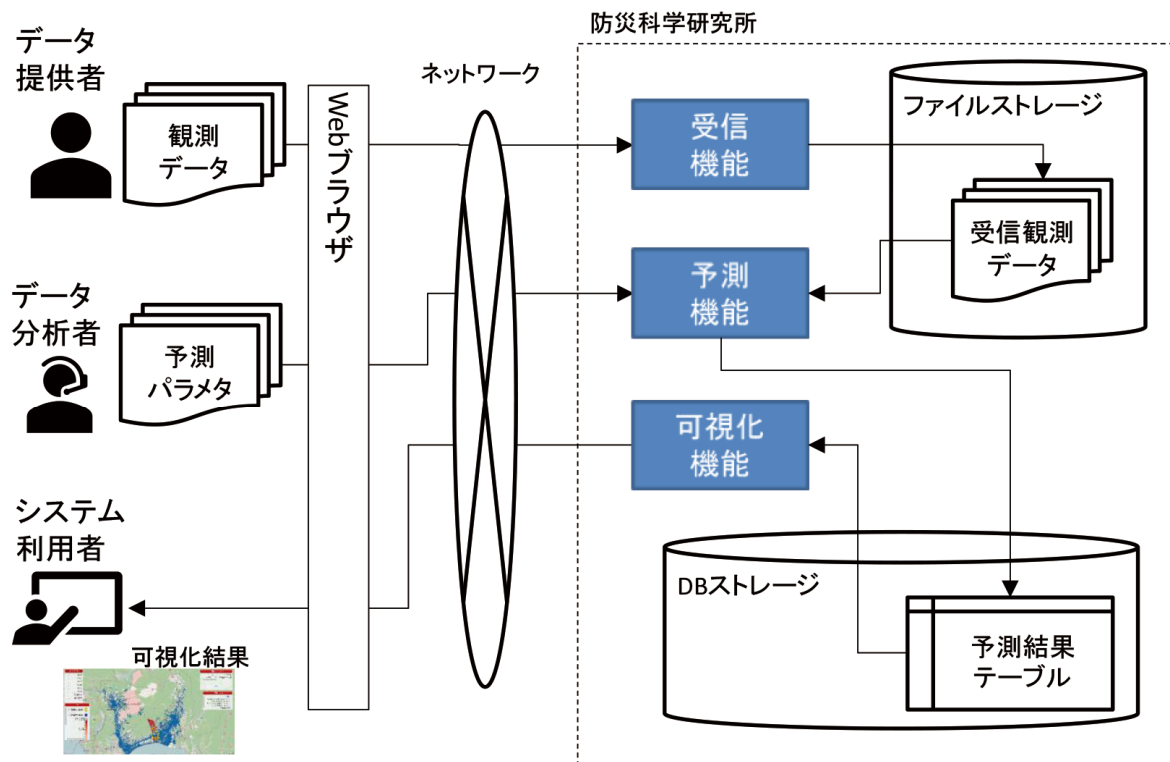


図 2 6 ハザード評価システムの基本フロー

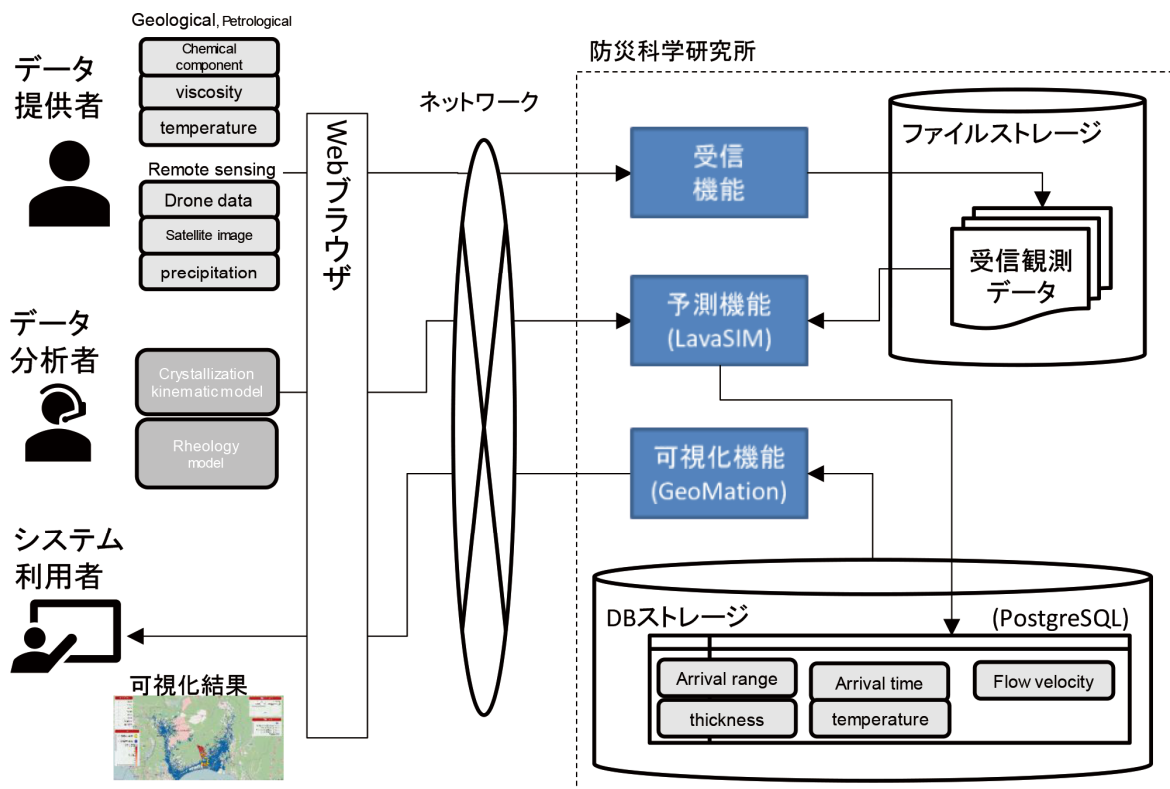


図 2 7 ハザード評価システム（溶岩流）のフロー

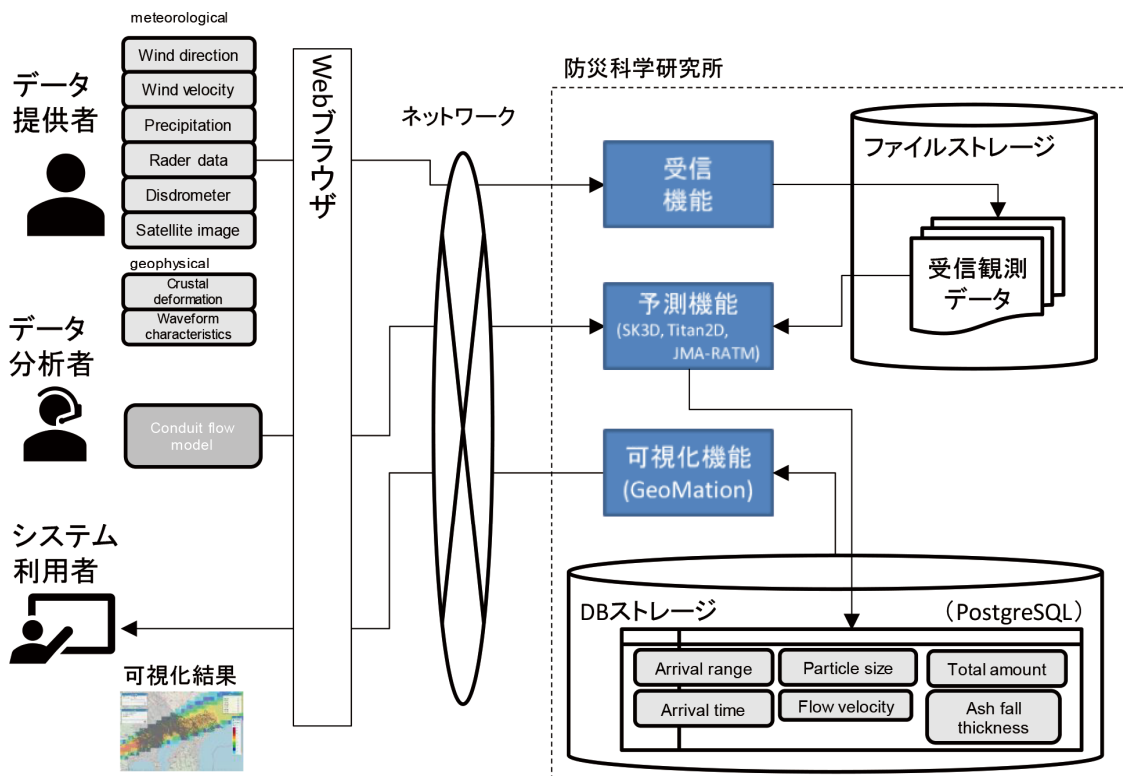


図 2 8 ハザード評価システム（噴煙・降灰）のフロー

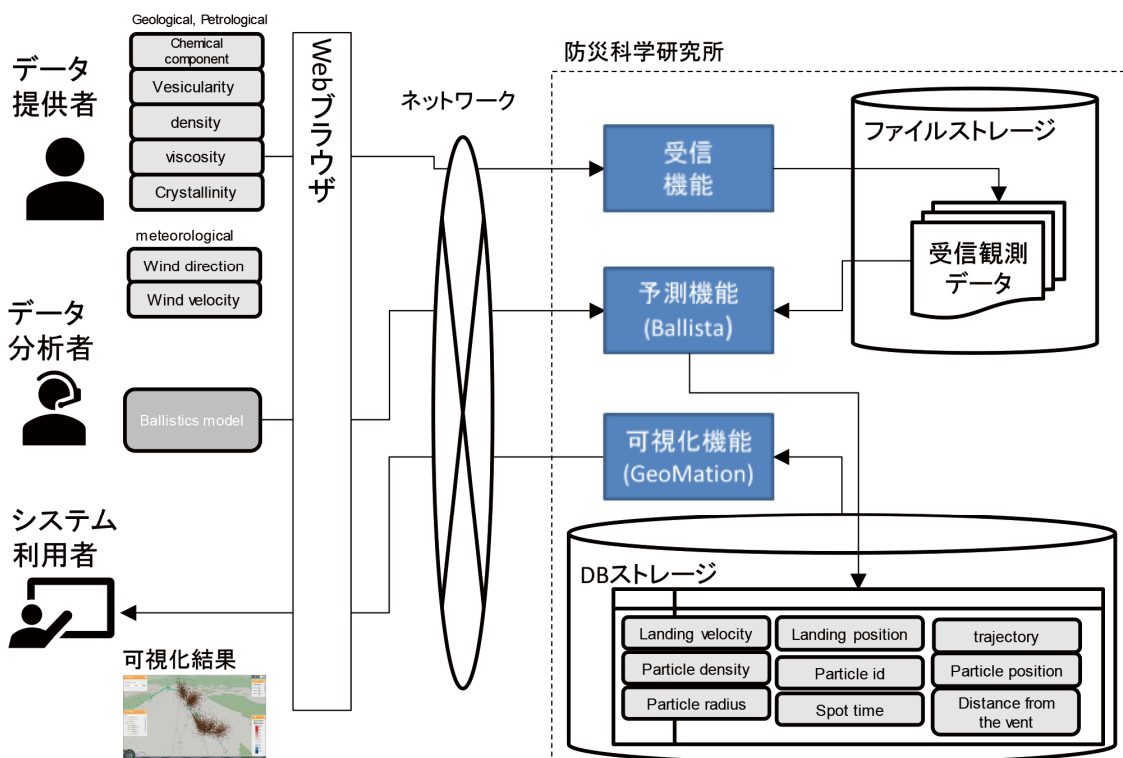


図 2 9 ハザード評価システム（噴石）のフロー

(c) 結論ならびに今後の課題

事業開始の3年目に入り、各テーマにおいて要素技術の開発が進むとともに、ハザード評価システムの設計に着手した。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実施し、マグマの物性による感度解析が実現されるとともに、実際の観測値との比較を行うことが可能となった。今後さらに課題 C1・C2 との連携を深める。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、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が進んだ。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、噴煙シミュレーションと噴煙柱ダイナミクスの連携の方向性が定まるとともに、降灰が開始する場所の時空間分布が明らかになるなど、高度な降灰・堆積評価を行う基礎理論が構築された。また、噴石シミュレーションと登山者の人流データと連携によるリスク評価のシステムが構築されるとともに、各種ハザードを評価するシステムの検討についても、順調に進捗した。

今後、地下におけるマグマ移動と地表でのハザード評価のため、各種パラメータの連携性を明確にし、システム化することが課題である。

(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) 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) 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.
- 5) 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.
- 6) Tanaka, Y., Fukuzaki, A., Yasunaga, R. Hatanaka, M., Yoshimoto, M., Honda, R., Efforts of hiker safety measures utilizing IoT in Mt. Fuji, *S02.04, Cities on Volcanoes 10*, 2018.

(e) 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>Aika K Kurokawa</u> , <u>Hidemi Ishibashi</u> , <u>Takahiro Miwa</u> , and Futoshi Nanayama	Rheological behavior of water-ash mixtures from Sakurajima and Ontake volcanoes: implications for lahar flow dynamics (論文)	Bulletin of Volcanology, 80:50	2018 年 6 月	国外
Takehiro Koyaguchi and <u>Yujiro J. Suzuki</u>	The condition of eruption column collapse: Part 1. A reference model based on analytical solutions. (論文)	Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 7461-7482	2018 年 7 月	国外
Takehiro Koyaguchi, <u>Yujiro J. Suzuki</u> , Kai Takeda, and Satoshi Inagawa	The condition of eruption column collapse: Part 2. Three-dimensional numerical simulations of eruption column dynamics. (論文)	Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 7483-7508	2018 年 7 月	国外
<u>鈴木雄治郎</u>	火山の巨大噴火シミュレーション(論文)	Annual Report of the Earth Simulator	2018 年 10 月	国内
Rebecca Coats, Jackie E Kendrick, Paul A Wallace, <u>Takahiro Miwa</u> , Adrian J Hornby, James D Ashworth, Takeshi	Failure criteria for porous dome rocks and lavas: a study of Mt. Unzen, Japan (論文)	Solid Earth, 9, 1299-1328	2018 年 11 月	国外

Matsushima, Yan Lavallée				
<u>Kensuke</u> <u>Ishii</u>	Estimation of emission mass from an eruption plume for the Aso volcano eruption, on October 8, 2016, using a four-dimensional variational method (論文)	Earth, Planets and Space, 70:202	2018 年 12 月	国外
Yujiro J. <u>Suzuki</u> , and Masato Iguchi	Numerical simulations of short-term eruption clouds (口頭)	European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna	2018 年 4 月 12 日	国外
<u>Takahiro</u> <u>Miwa</u> , <u>Yu</u> <u>Iriyama</u> , <u>Masashi</u> <u>Nagai</u> , and Futoshi Nanayama	Change of falling dynamics of ash particles during transient eruption revealed by high speed camera imaging and grain size analysis (口頭)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 21 日	国内
<u>Tomofumi</u> <u>Kozono</u> and Takehiro Koyaguchi	Effects of conduit pressurization during eruption transition on crustal deformation, S-VC39, (招待講演) (口頭)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 24 日	国内
志水宏行・小 屋口剛博・ <u>鈴</u> <u>木雄治郎</u>	二層浅水波モデルに基づく火砕流ダイナミクスの数値的研究：流れの形態と堆積構造の変化(口頭)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 24 日	国内
中村仁美・ <u>鈴</u> <u>木雄治郎</u> ・ <u>入</u> <u>山宙</u> ・中尾篤 史・岩森光	島弧における火成活動・火山噴火プロセスの統合的理解に向けて(口頭)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 24 日	国内
<u>鈴木雄治</u> <u>郎</u> ・小屋口剛 博	火砕降下物と噴煙ダイナミクスのカップリング計算：ピナツボ 1991 年噴火シミュレーション(口頭)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 24 日	国内
<u>Takahiro</u> <u>Miwa</u> , Nobuo Geshi,	VOLCAT (Visual Observation Laboratory for Capturing Ash Transition) for automatic	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 4 日	国外

Jun-ichi Ito, and Toshikazu Tanada.	remote imaging of volcanic ash particle (口頭)			
嶋野岳人, 鈴木由希, 前野深, 安田敦, <u>三輪学央</u> , <u>長井雅史</u> , 中田節也	霧島火山新燃岳 2018 年 3 月の火山灰測色値変化について (口頭)	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 26 日	国内
<u>三輪学央</u> , 下司信夫	結晶破断から始まる低粘性マグマの破砕 (口頭)	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 28 日	国内
<u>小園誠史</u> , 井口正人, <u>三輪学央</u> , 眞木雅之, 前坂 剛, 味喜大介	桜島噴火における火山灰降下過程の特徴: 光学的ディストロメータによる長期連続観測 (口頭)	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 28 日	国内
<u>入山宙・山本哲生・鈴木雄治郎・寅丸敦志</u>	定常速度場における火山噴出物の 2 次元輸送堆積理論 (口頭)	地震研究所共同利用研究集会「火山現象のダイナミクス・素過程研究」	2019 年 3 月 7 日	国内
志水宏行・小屋口剛博・ <u>鈴木雄治郎</u>	大規模火砕流の到達距離とマグマ供給率: 二層重力流モデルの数値シミュレーション(口頭)	地震研究所共同利用研究集会「火山現象のダイナミクス・素過程研究」	2019 年 3 月 7 日	国内
<u>Aika K. Kurokawa, Takahiro Miwa, and Hidemi Ishibashi</u>	Rheological changes of aphyric basaltic magma based on laboratory experiments of 1986 Izu-Oshima lava (ポスター)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 20 日	国内
<u>川口亮平</u> , 奥山哲, 木村一洋	草津白根山の 2018 年噴火に伴い GNSS 観測点で捉えられた地殻変動 (ポスター)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 22 日	国内
石川歩, <u>西村太志</u> , 青山裕, <u>川口亮平</u> , <u>藤田英輔</u> , <u>三輪学</u>	ストロンボリ火山の山頂小爆発活動に伴う傾斜変動 (ポスター)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 23 日	国内

<u>央</u> , 山田大志, Maurizio Ripepe, Riccardo Genco				
及川輝樹、前野深、宮縁育夫、 <u>長井雅史</u> 、嶋野岳人、古川竜太、成尾英仁、中田節也、池永有弥、 <u>三輪学央</u> 、 <u>入山宙</u> 、中野 俊、石塚吉浩、田島靖久	霧島火山新燃岳 2017 年噴火の降灰量 (ポスター)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 23 日	国内
種田凌也, <u>石橋秀巳</u> , <u>三輪学央</u> , 外西奈津美, 安田敦	伊豆大島火山 1986 年噴火の斜長石中のメルト包有物: プレ噴火プロセスへの示唆 (ポスター)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 24 日	国内
<u>Ryohei Kawaguchi</u> , Satoshi Okuyama, Kazuhiro Kimura	Local ground deformation observed with the 2018 eruption at Kusatsu-Shirane volcano (ポスター)	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 3 日	国外
<u>Yu Iriyama</u> , <u>Takahiro Miwa</u> , <u>Masashi Nagai</u> , and Tomohiro Kubo	In situ observation of falling ash by using PARSIVEL disdrometer during the 2018 eruptions at Shinmoe-dake volcano, Japan (ポスター)	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 4 日	国外
<u>Eiichi Sato</u> , Keiichi Fukui, <u>Toshiki</u>	Utilization of weather radar data to volcanic hazard prediction system (ポスター)	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 4 日	国外

<u>Shimbori, Kensuke</u> <u>Ishii, Tetsuo</u> <u>Tokumoto, Yu</u> <u>Iriyama, and Eisuke</u> <u>Fujita</u>				
<u>Kensuke</u> <u>Ishii, Toshiki</u> <u>Shimbori, Eiichi Sato,</u> <u>Tetsuo</u> <u>Tokumoto,</u> Akihiro Hashimoto	Volcanic Ash Data Assimilation System for Atmospheric Transport Models (ポスター)	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 4 日	国外
Yujiro J. <u>Suzuki,</u> and Susanna Jenkins	Numerical simulations of eruption clouds for assessing volcanic hazard to cities in Japan (ポスター)	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 2 日～7 日	国外
久保智弘, 宮城洋介, <u>三輪学央</u> , <u>入山 宙</u> , <u>長井雅史</u>	室内試験による SPC と PARSIVEL2 の降灰粒度計測の比較 (ポスター)	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 26 日	国内
及川輝樹, <u>長井雅史</u> , 中田節也, 宮縁育夫, 田島靖久, 嶋野岳人, 川辺禎久, 伊藤順一, 石塚 治, 前野 深, <u>三輪学央</u> , <u>入山 宙</u> , 長谷中利昭, 川口允孝	霧島火山新燃岳 2018 年噴火のテフラ量 (その 1) (ポスター)	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 26 日	国内
<u>新堀敏基</u> , <u>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	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 26 日	国内

<u>入山宙</u> , <u>石井憲介</u> , <u>佐藤英一</u> , <u>徳本哲男</u> , <u>山本哲也</u>	課題（その2）数値シミュレーションによる降灰確率の試算（ポスター）			
<u>入山 宙</u> , <u>藤田英輔</u> , <u>三輪学央</u> , <u>長井雅史</u> , <u>久保智弘</u>	PARSIVEL2 で観測した霧島山新燃岳 2018 年噴火の降下火山灰（ポスター）	日本火山学会, 秋田	2018 年 9 月 27 日	国内
<u>藤田英輔</u>	桜島における単色火山性微動 (2017 年 8 月)	JpGU Meeting 2018, 幕張	2018 年 5 月 22 日	国内
<u>Eisuke FUJITA</u> , <u>Toshiki SHIMBORI</u> , <u>Yu IRIYAMA</u> , <u>Eiichi SATO</u> , <u>Kensuke ISHII</u>	Quantitative evaluation of ashfall damage around Tokyo Metropolitan area based on the combination between numerical simulation and infrastructure database	Cities on Volcanoes 10, Napoli	2018 年 9 月 3 日	国外

(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
噴石に対する時空間データ検索システム	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-RATM 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) 平成 31 (令和元) 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、「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℃130MPa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℃)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。

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に代えて、開発技術実装に向けた実地の場となる緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。