

火山熱流体シミュレーションと環境影響予測手法の開発

独立行政法人 防災科学技術研究所 主任研究員 ○藤田 英輔

Simulations for volcanic thermal fluid dynamics and its application to
the evaluation and prediction of the effects on environments

Eisuke Fujita, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Abstract:

We performed multi-phase flow simulations to understand the behavior of volcanic thermal fluids such as magma, hot water, and volcanic gases, comparing our research results to observational data, the real-time prediction system for influence on living environment was investigated. VTFS (volcanic thermal fluid simulation)-project focuses on some volcanic phenomena, related to volcanic thermal fluid dynamics, i.e., 1) volcanic crustal deformation and volcanic tremor, 2) lava flow and 3) eruption mechanism. The first theme is formulated by some kinds of two-phase flow instabilities. For the second theme, in VTFS project, the new lava flow simulation code “LavaSIM.” was developed. The third theme is investigated by the formulation of the de-pressurization of high-pressurized fluid. The results of our project are useful for protecting our lives and properties from the damage by volcanic activities.

1. はじめに

本プロジェクトは、火山活動の原因であるマグマ・熱水・火山ガスなどの火山熱流体の挙動を把握するため混相流シミュレーションを行い、観測データとの比較を通して生活環境へ与える影響をリアルタイムで予測する手法開発を目的とするものである。火山熱流体は、気相（火山ガスや水蒸気）と液相（液体マグマ・水）の混相流であり、その複雑な挙動の解明が火山活動の把握に重要である。しかし、従来は弾性体としてあるいは熱的挙動を含まない流体としての理論を元としたシミュレーションがほとんどであり、高度計算技術を必要とする熱流体としての取り扱いは不十分であった。今回のプロジェクトでは、火山学的な理論をベースに機械・原子力工学分野で開発されてきた計算技術を火山といった大規模システムに応用・発展させる試みを行った。火山熱流体を扱うためには、岩石の物性、ガスの物性、熱水の物性、場の圧力、熱流量、温度、弾性波速度などの他変数についてより実際の状況に近い状態で詳細に再現したシミュレーションを行った。

2. 研究開発項目とその成果概要

2.1 火山で発生する地殻変動・火山性地震・微動モデルの構築

気液二相流による火山性地殻変動モデルの基礎的なケーススタディとして、2000年三宅島噴火時に観測された地殻変動現象について、火山ガスと液体マグマからなる気液二相系の不安定性より理論モデルを構築した。観測された現象は、火山体が12時間から60時間周期で、瞬間的な膨張を繰り返すというものであった。この現象について、気液二相系の不安定流動（圧力降下振動）での説明を試みた。傾斜・地震データの解析から推定された三宅島のマグマ供給システムは、山頂方向へ向かう火道と南東部のマグマ溜まり、およびここから北西へと伸びるシル状のマグマ溜まりからなっていると考えられる（図1）。火道の上部

にはガス溜まりが存在し、圧縮性の空間となっている。マグマ溜まりおよびシル状マグマ溜まりではマグマ自らのガス成分の離脱が継続的に進み、ガス溜まりに蓄積する。ガスたまりの圧力とシル内を流れるマグマの量の状態は、周期的な軌跡をたどる：1. 流量が小さくマグマヘッドは次第に上昇するとともにガスたまりの圧力が上昇する、2. システムの差圧が臨界値に達するため、急激にもう一つの安定状態へ遷移するために急速に流量が増加する。このとき急激にシルの開口がおこり、火山体が急激に膨張する、3. ゆっくりと流量が小さくなりガスたまりの圧力は次第に解消される、4. ガスたまりの圧力の最小値に到達し、急速に流量が減少して1の状態に戻る。これらのモデリングとシミュレーションにより、地下に置けるマグマの流量や、マグマヘッドの深さの推定法などを把握するためのモデル化がシミュレーションを通して明らかになった。

この他、火山活動の様々な段階で観測される火山性微動のモデルとして、気液二相系の不安定現象である密度波振動を検討し、シミュレーションによる振動発生条件の検証を行った（図2）。また、3次元岩脈貫入のモデルとして、亀裂性岩盤にマグマが貫入したときのマグマの圧力・応力変化による弾性体の応答・亀裂伸張について簡易シミュレーションを行った。

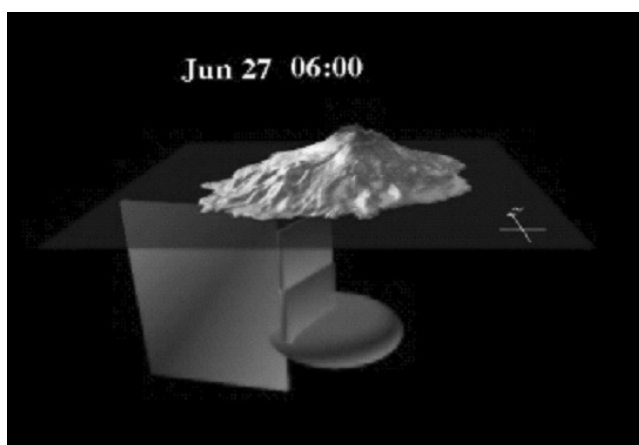


図1 三宅島のマグマシステム

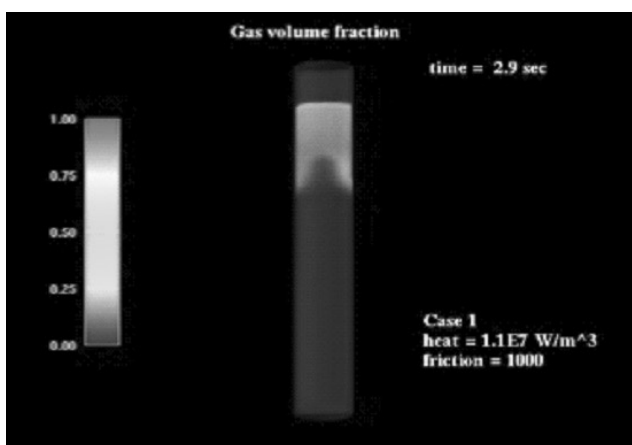


図2 火山性微動の発生モデル

2.2 溶岩流シミュレーションコード開発

火口から放出された溶岩流について、推移予測のためのシミュレーションコード LavaSIMを開発した。3次元の体系において溶岩流をニュートン流体として扱い、ナビエ・ストークス方程式により熱流動を解析する。溶岩流特有の拡がりや凝固の連成挙動を解析するために、解析メッシュに自然対流メッシュと自由液面メッシュの2種の属性を与えている。自然対流メッシュでは、SMAC法による流動計算を、自由液面メッシュでは高さ関数を応用した流動計算を行っている。解析上の仮定は以下の2点である。1) 溶岩流の拡がり挙動が重力に支配され、空中への飛散・気相の巻き込みは未考慮、2) クラスト（凝固状態の溶岩）の移動は鉛直方向のみ。融点で0、凝固点で1となる変数（固相率 b ）を導入し、溶融凝固を判定する指標とする。固相率が流動限界固相率を超えた解析メッシュでは溶岩流が凝固したとみなして流速を0とし、この境界条件を各計算ステップで圧力計算に適用することにより固液界面の取り扱いを可能とした。自然対流メッシュ内部の熱流動と自由液面メッシュ内の液面高さを分離して解析し、両メッシュの境界における質量、エネルギーの流出入を計算している。また、自然対流メッシュの流動解析にはSMAC法を用い、離散化は質量・運動量保存式について時間について前進差分、空間についてスタッガードメッシュにおいて2次精度の上流差分としている。圧力ポアソン方程式は、ICCG法により解いている。溶岩流

の停止条件として、これまではフィールドによる実測値をベースとした厚さを先見的に与えていたが、物理的にマグマの温度、組成、結晶状態などに依存した物性値や、傾斜角の効果を検討した結果としての最小拮がり厚さを導入するべきと考えられ、この視点を元に理論モデルを作成し導入した。シミュレーションは、1986年伊豆大島噴火に伴う溶岩流でその検証を行い、流域分布と時間変化などについて、妥当性を確認している。また、そのプロトタイプを元に、富士山において想定される溶岩流の評価（図3）と次世代型ハザードマップ（被害予測図）作成へと発展を続けている。本シミュレーション例は、御殿場市作成の「富士山火山防災マップ」の表紙および内容へ掲載されるとともに、御殿場市ホームページへも掲載されている（図4）。

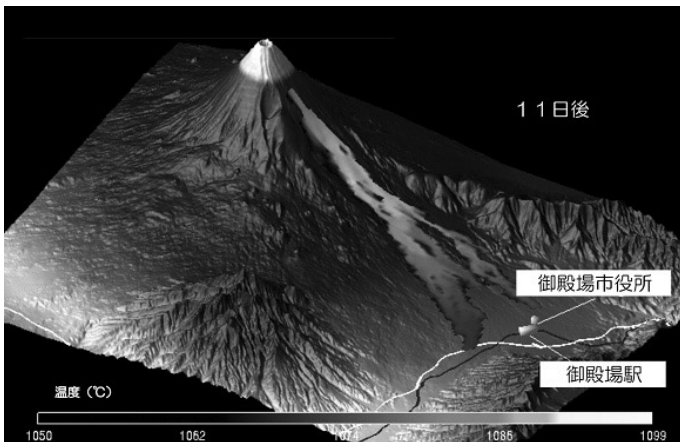


図3 富士山南東斜面の溶岩流流下の計算結果（鳥瞰図）



図4 富士山火山防災マップ（御殿場市）

2.3 混相流基礎シミュレーション

火山噴火は、火道のマグマに溶存する火山性ガスと水蒸気が地表付近で減圧などにより急激に析出・膨張することによって生じると考えられている。また、地下水とマグマの接触によって生じる急激で大規模な沸騰（水蒸気爆発）も大規模な爆発を生じる。これらの現象は圧縮性の顕著な気液二相流として捉えることができる。マグマが地表付近まで上昇し、減圧によってマグマ内に多数の高圧気泡が析出して膨張する流動現象のシミュレーションを単純化して行った（図5）。二相媒質の膨張により液面が上昇し、気泡同士が連結することによって液塊に分散され飛散するいわゆる破碎現象が計算されている。噴火全体の解析

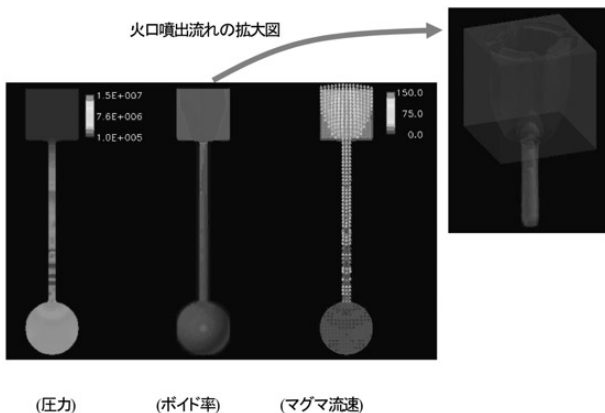


図5 単純化した火山体系の噴火シミュレーション

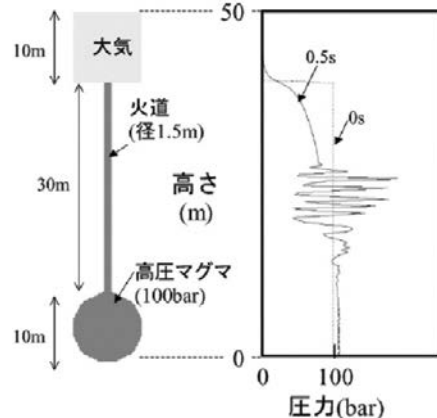


図6 火道内発泡と圧力波の発生

では個々の気泡を取り扱うことはできないが、比較的大きい計算格子内を平均化して気泡を含むマグマをほぼ均質な二相流として取り扱っている。また、火道内のマグマの発泡・噴火機構を再現するためのシミュレーションを実施した。計算結果では破碎波の速度は30m/s程度、破碎波前後に大きな圧力振動が生じることが判明した。マグマ媒質が減圧したあとも高圧気泡が閉じ込められており、気泡群が連結して液相が分散される破碎現象について、そのメカニズムのモデル化を考察し、火山性微動の発生メカニズムのモデルとしての可能性がしめされた（図6）。

3. ネットワークの活用について

本プロジェクトで開発された計算コードは基本的には単独のスーパーコンピュータの利用により活用されるように開発されている。将来的には火山観測データの取得からシミュレーションへ至る流れとして、ネットワークを活用してインプットパラメータを導入するシステムへと発展させ、リアルタイムの火山活動・環境影響予測システムへと発展していくものである。

4. まとめ

本プロジェクトで開発された熱流体シミュレーションの成果は、火山学的に普遍的なものであり、いずれの火山においても応用できるものである。特に各火山固有の地形データ・岩石の物性情報等をモジュール化・パラメータ化することにより、汎用性が確保されている。開発されたプログラムを用いることにより、火山活動のリアルタイム推移予測・環境影響予測を行い、国・地方自治体等における事前の防災行政（リスクマネジメント：ハザードマップの作成・避難体制計画の策定など）や災害発生時の対応（クライシスマネジメント：住民避難への指針提供・物流計画への対応など）の基礎データとすることが可能となり、飛躍的な効果が期待される。

5. 研究開発実施体制

代表研究者 防災科学技術研究所 主任研究員 藤田 英輔

研究分担

研究開発項目：火山熱流体挙動の理論モデルの構築

防災科学技術研究所 総括主任研究員 鷗川 元雄

防災科学技術研究所 総括主任研究員 佐藤 一雄

研究課題項目：火山熱流体シミュレーション手法の開発

日立製作所 電力・電気開発研究所 主任研究員 湊 明彦

日立製作所 電力・電気開発研究所 主任研究員 日高 政隆

研究課題項目：溶岩流流動理論の構築

静岡大学理学部 生物地球環境科学科 助教授 海野 進

研究課題項目：火山熱流体混相流の研究

九州大学大学院 理学系研究科 教授 寅丸 敦志

研究課題項目：火山熱流体の挙動に関する研究

東北大学 東北アジア研究センター 助手 後藤 章夫

東北大学大学院 理学研究科 助教授 西村 太志

東京大学 地震研究所 助手 市原 美恵