

火山研究への貢献が期待される 多様なコンピュータシミュレーション

石 峯 康 浩*

(2007年1月4日受付, 2007年7月18日受理)

Overview of Diverse Computer Simulations and their Potential Contribution to Volcanology

Yasuhiro ISHIMINE*

This paper presents an overview of diverse computer simulations, such as those based on the finite difference method, lattice Boltzmann method and molecular dynamics, to discuss their potential contribution to volcanology. The general features of several numerical methods are described to provide information for finding appropriate approaches to investigate various volcanic processes on a wide range of time and space scales. This paper also outlines previous numerical studies of some volcanic phenomena, including the generation of magma deep underground, the ground deformation due to magma injection into the Earth's crust, and the evolution of giant eruption columns penetrating into the stratosphere. Fundamental issues on conducting computer simulations of volcanic phenomena are then discussed with the aim of promoting effective numerical studies in volcanology.

Key words: simulation, numerical procedure, modeling, multiphysics

1. はじめに

近年, 計算機環境が急速に発展し, コンピュータシミュレーションは実験や観測による実測データの蓄積, 基本原理に基づく理論の構築に次ぐ第三の手法として, あらゆる研究分野で大きな役割を演じるようになっていく。計算機性能は継続的に向上し続けており, それに合わせてバラエティに富む計算手法の開発・改良も進んでいる。既に, 森羅万象の物理現象を探究する手段として, コンピュータシミュレーションが不可欠になっており, その適用範囲は, 量子力学に基づいて原子・分子の挙動を予測する微視的なスケールから, 星どうしの相互作用を計算して銀河の成長過程を解析する天文学的スケールまで多岐にわたる(上村・他, 1993; 上田, 2003; 矢川, 2001)。

コンピュータシミュレーションは, 従来, 単純な繰り返し計算が必要な現象を主な対象として発展してきた。しかし, 最近では, 複雑な物理プロセスが絡み合う現象についても精緻なシミュレーションが可能になり, 有用な情報が得られるようになった。このため, これまでは

数値解析が困難だった多様な現象の研究に, シミュレーションが利用され始めている(戦略的基盤ソフトウェア産業応用推進協議会, 2005; 数値流体力学編集委員会, 1995a; The Earth Simulator Center, 2005)。

火山噴火に関連するコンピュータシミュレーションは海外では比較的盛んだが, 日本国内では少数に限られていた。このような状況を打破するため, 火山研究者が, 数値計算の経験が豊富な他分野の研究者と共同して火山シミュレーションに取り組む試みがなされるようになっていく。例えば, 科学技術振興機構の計算科学技術活用型特定研究開発推進事業では, 火山研究者と原子力工学の研究者が協力した「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」というプロジェクトが2001年から2004年まで実施され, 溶岩流や火道内流れなどのシミュレーションが行われた(例えば, 藤田, 2004; Hidaka *et al.*, 2005)。文部科学省の科学研究費補助金特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」(2002-2006年度)でも, 他分野の研究者から数多くの協力を得て, 斬新な切り口

* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1
防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention

3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan.

Corresponding author: Yasuhiro Ishimine
e-mail: ishimine@bosai.go.jp

で多様な噴火現象をシミュレーションする取り組みが行われた(例えば、伊藤・福土, 2005; 高田・他, 2005; 高木・他, 2005)。

これらの活動を通して、火山研究においてもコンピュータシミュレーションの有用性が認識されつつある。コンピュータ技術を統合した「噴火シミュレータ」や「リアルタイムハザードマップ」など、火山災害に対応するための実用的なアプリケーションへの期待も高い(井田, 2005; 国土交通省, 2004, p. 211)。自治体の防災担当者からは「シミュレーションをハザードマップと併用すべき」という意見が既に出されていることも、アンケート調査で示されている(小山・坂本, 2004)。しかし、火山現象のシミュレーションは緒に就いたばかりである。信頼性の高い計算結果を生み出すには、噴火現象の特徴を適切に表現できるように数値モデルを高度化していくことが不可欠である。この作業を効率的に行うには、火山研究者が複雑な噴火現象の本質をより深く理解するとともに、利用可能な計算技術に関する情報を広く集める必要がある。

このように方向性を指摘するのは簡単だが、具体的な解決策を実践していくには、対処すべき課題が山積している(石峯, 2005; 小屋口, 2001)。火山噴火は、基本的な素過程ですら理解されていない部分が多いからである。火山噴火は発生頻度が低い上、関連するプロセスのほとんどは、人間が直接アクセスできない状況で進行する。火山学では、それらのプロセスの物理的描像を、数少ない噴火事例における間接的な観測から少しずつ明らかにしてきた。しかし、現象全体の包括的かつ定量的な理解からは程遠いというのが現状である。

その上、火山噴火に含まれる物理過程は多様かつ複雑で、それぞれが特徴的な長さスケールを持って独自の時間スケールで進展する。すなわち、火山噴火はマルチスケール・マルチフィジックスという特徴が極めて顕著な地球物理現象である。例えば、マグマの発生には、年数センチの速度で移動する水平スケール数千キロのプレートの運動が深く関与している。地上に向かって上昇したマグマが火山直下数キロの深さに達すると、ミクロンサイズの気泡が発生し、その気泡の振る舞いが噴火様式に大きな影響を与える。また、高さ十キロ以上に達する火山噴煙の運動では、乱流混合によって大気を熱膨張させる1ミリ程度の火山灰が、重要な役割を演じている。

火山噴火そのものの複雑さ・多様さを反映して、これまでの火山シミュレーションでも多種多様な計算方法が利用されている。しかし、シミュレーション技法の詳細が、学会講演などで説明されることは少ない。一方で、多くの火山研究者は数値計算になじみが薄く、手法によ

る制約条件や適用限界に関する知識が乏しい。そのため、シミュレーションで得られた最終的な図や動画の印象だけに基づいて議論をせざるを得ない、という状況が生じている。

また、火山関連のシミュレーションを総括した日本語の著述がほとんどなく、シミュレーションに関心がある火山研究者や学生が情報を集める場合には、関係しそうな他分野の文献を大量に読みあさる必要がある。その結果、自分でシミュレーションを実行するまでには、多大な時間を費やさなければならない。このような現状が、多くの火山研究者がシミュレーションに取り組むのを躊躇する要因となっており、火山学会に主軸を置きながらシミュレーションを継続的に行う研究者が、ほとんど育たない状況となっている。

本論文は上のような状況を少しでも改善することを目的として、それぞれのコンピュータシミュレーションで用いられている数値計算手法の基本概念や特徴、対象としている現象への適用妥当性などの概要を紹介する。学会発表などでは説明がないまま使われることが多い数値計算関連の基礎用語についても、できるだけ一般的な言葉で説明を加える。併せて、火山噴火に関連するシミュレーションの代表的な文献を紹介しながら、火山の数値的研究の現状を概観する。

本論文は、コンピュータシミュレーションに有用な文献への橋渡しという立場を保ち、具体的な計算手法の詳細には言及しない。火山研究の分野では、比較的計算負荷が小さい一次元常微分方程式で構成される力学モデルの数値積分もシミュレーションと表現することがあるが、本論文では、これらの研究は対象外とする。これらを網羅するには大量の紙面を割く必要がある半面、一次元モデルは多くの火山研究者にとって既に一般的な知識になっていると考えられるからである。

次章でまず、数値解析に利用される代表的な計算手法を紹介し、コンピュータシミュレーションの全体像を把握する。その後、3章で、火山現象において重要な役割を担っている物理過程の概要を説明するとともに、その物理過程に関するシミュレーション研究を紹介する。最後の章で、シミュレーションを利用した火山研究を活発にするための課題を指摘して、今後の研究の方向性を議論する。2章で紹介する計算手法は基本的なものばかりなので、シミュレーションの予備知識を持っていて火山研究の現状が知りたいという読者は、直接3章に進んで差し支えない。また、著者の限られた知識に基づく記述であるため、取り上げるトピックが著者の専門に近い流体計算に偏っていることを、あらかじめお断りしておく。

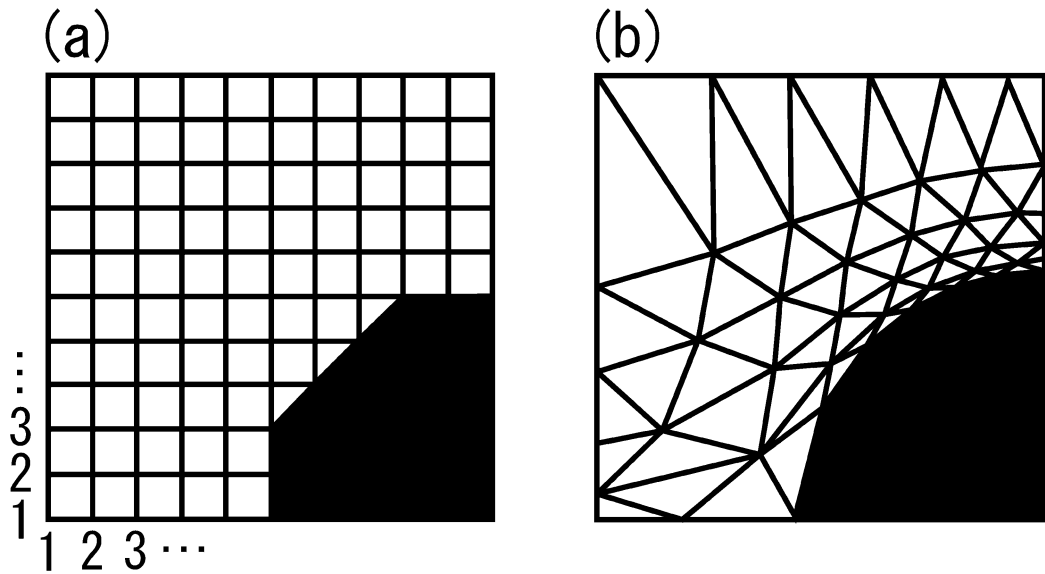


図 1. 2次元計算格子の例. 右下の黒塗り部分は、計算する必要がない領域（流体中の障害物など）. (a) 有限差分法で用いられる直交格子の例. 一樣な大きさの格子で全領域を分割することが多い. (b) 有限要素法で用いられる非構造格子の例. 物体表面に沿った領域での分解能を上げるように、物体の近くにだけ細かい格子を配置することができる.

Fig. 1. Examples of two-dimensional calculation grids. The black polygon in the lower right corner is an obstacle at which calculations are not required. (a) An example of rectangular grids used in finite difference method. (b) An example of unstructured grids used in finite element method.

2. 代表的な数値計算手法

2-1 基本概念

初めに本節で、コンピュータを使って自然現象を表現するための一般的な手順の概略を説明する. 次いで、次節で計算誤差の基礎を紹介した後、2-3節以降で各計算手法の説明を行う.

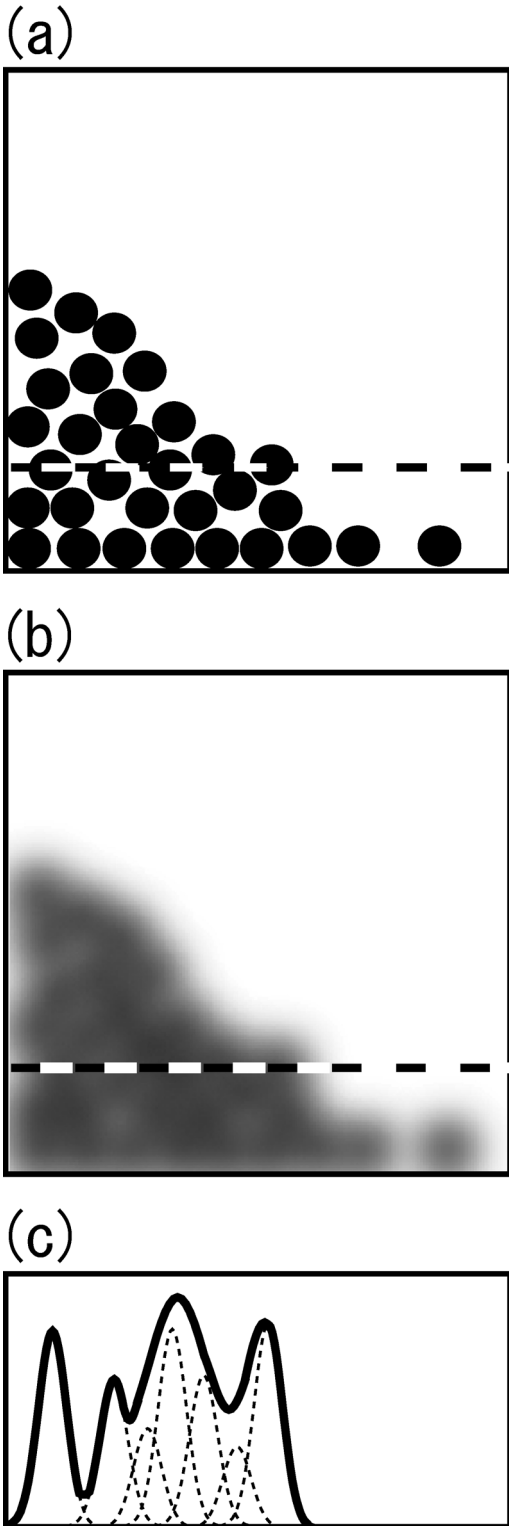
コンピュータは既に様々な用途で利用されているが、実際にコンピュータ内部で処理できるのは、具体的な数値どうしの計算だけである. そのため、コンピュータを用いて自然現象を表現するには、まず、対象とする現象を数式で表す必要がある. しかも、多くの場合、その数式をコンピュータが扱いやすい近似式に書き直さなければならない. その上で、数式に数値を代入して、数値どうしの計算を行う. 得られる結果（答え）も、数値の集まりである. この特徴を強調する場合、コンピュータシミュレーションは「数値計算」と呼ばれることもある. 数値計算手法は、このような計算を行うためのテクニックの総称と言える.

物理的に興味深い高解像度のシミュレーションをするには、大量の数値を用いて計算を繰り返す必要がある. このため、高速で大容量のコンピュータへの要求が高く

なる. また、大量のデータを扱いやすくするため、関連する一連のデータを「配列」と呼ぶひとかたまりの集合として処理することが多く、配列に属するデータのの一つ一つは「要素」と呼ばれる.

物理現象に関するコンピュータシミュレーションは、おおまかに分けて2つのグループに分類できる. 一つは、計算対象とする空間に「計算格子」と呼ばれる網目状の構造を対応させて、その計算格子上で物理量を計算するグループである（図1）. もう一つは、対象とする系を粒子もしくはそれに準ずるものの集合とみなして、その集合の要素どうしの相互作用を計算するグループである（図2）.

計算格子を利用するグループでは、計算格子とデータ配列を対応させる. 例えば、図1(a)では、縦線に左から順に1, 2, 3, ..., 横線に下から順に1, 2, 3, ...と番号を付け、その交点（格子点または節点と呼ばれる）での変数の値をデータとして $f(1, 1), f(1, 2), f(1, 3), \dots$ などと割り当てる. この方法は、連続場における物理量の分布を把握したいときに使われることが多い. 流体計算では格子点を空間上で固定させるのが一般的である. 一方、弾性体の計算では、物体の変形に応じて計算格子も



伸び縮みさせる手法を用いる場合が多い。ただし、この場合でも、格子点どうしの前後関係が変化しない小さな変形だけを対象とするのが基本である。2-3節の有限差分法から2-6節の境界要素法までが、このグループに含まれる主なものである。2-7節で紹介するスペクトル法は、フーリエ変換の考え方を利用して変数の空間分布を表現するものである。

計算対象を粒子の集合とみなしてシミュレーションを行うグループでは、粒子に番号をふって、それぞれの粒子の位置情報をデータ配列に保存する。そして、それぞれの粒子に対応する物理量を計算する。容易に予想されるように、このタイプの計算手法は、星の集まりである銀河や、多数の原子から構成されるたんぱく質など、粒子の集合とみなされる物質の計算に頻繁に利用される。2-8節の重力多体シミュレーションから2-10節の個別要素法までがこのような計算手法の例である。このアプローチは連続体である流体の計算にも拡張可能であり、その例として2-11節にSPH法を紹介してある。

2-12節の粒子-流体カップリングモデルは、上の2つのグループに属する計算手法を組み合わせたものである。2-13節の格子ボルツマン法も、2つのグループの考え方を組み合わせたものと言えなくもないが、統計力学的な概念も利用しており、どちらにも属さない特殊な手法と考える方が妥当かも知れない。2-14節では、計算格子を利用して界面計算を行うときに、補足的に用いる手法を紹介する。やや特殊だが、今後、火山シミュレーションへの適用が期待されるからである。

図 2. 物質を粒子の集合として表した概念図。(a) 多数の剛体粒子によって引き起こされる重力流。このような剛体粒子の集合に適切な衝突側を適用して計算するのが個別要素法（柔軟粒子モデル）である。(b) 流体による重力流を、SPH法で用いられる Smoothed Particle の集合として表現した例。(a) に示した剛体粒子をガウス分布で置き換えてある。(c) Smoothed Particle で表現された密度分布の例。(b) の破線上での密度の値を示している。Smoothed Particle に相当するそれぞれの分布関数が重なり合うことで連続的な流体全体を表現する。

Fig. 2. Schematic illustrations of a substance represented by a set of particles. (a) A gravity current consisting of numerous rigid particles. (b) A gravity current consisting of a continuous fluid, which is described by smoothed particles used in SPH method. (c) Fluid concentration on the dashed line in (b), which is described by the superposition of Gaussian distributions to have continuous values.

2-2 計算誤差

どのような計算手法でシミュレーションを行う場合でも、計算誤差には十分な注意を払う必要がある。ここでは、信頼性の高いシミュレーションを実施するために不可欠な計算誤差の基礎事項を、簡単に紹介する。

物理現象をシミュレーションする場合、時間変化の再現を試みることが多い。そのため、時間発展式を時間軸に沿って数値積分するのが、コンピュータシミュレーションのオーソドックスなスタイルの一つとなっている。時間発展式は、例えば、

$$\frac{df}{dt} = g \quad (1)$$

のような微分方程式で表される。ここで、 f, g は、どちらも任意の関数である。(1)式を直接、計算できればよいが、現在の一般的なコンピュータ（デジタルコンピュータ）では微分方程式の変数となる連続量を直接、扱うことはできない。そこで、連続量である変数を不連続な数値の並びに変換する必要がある（この作業は離散化と呼ばれる）。そして、微分方程式を有限の変化量で近似して計算を行う。例えば、(1)式左辺については、

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=t_0} \approx \frac{f(t_0 + \Delta t) - f(t_0)}{\Delta t} \quad (2)$$

と近似する。(2)式は時刻 t_0 における時間微分の近似を表しており、 Δt は有限の大きさを持つ時間間隔である。

(1)、(2)式のような式を使ってシミュレーションを実行すると、様々な要因で誤差、すなわち現実との“ずれ”が生じる。最悪の場合、シミュレーションで表現したい現象の本質が、誤差によって生み出された無意味な数値に埋没して、計算自体がまったく無意味なものになってしまう。このような計算誤差をいかにして抑制するかが、実際にシミュレーションを進めるに当たって、大きな課題となる。

計算誤差を生み出す第一の要因は、シミュレーションに使う方程式系そのものが、必要な精度で現象を表現できていないことである。すなわち、(1)式の右辺が不適切な場合である。どのような物理モデルも、ある程度の近似は用いているが、現象に係る素過程が多くなるほど、この段階での近似の影響が大きくなる傾向がある。したがって、火山噴火のような複雑な現象をシミュレーションする場合には、この段階での“ずれ”が致命的になる可能性がある。しかし、これは物理的本質に関する問題であり、計算テクニックでは解決できない。そのため、この点については、これ以上は議論しない。

誤差が生じる第2の要因として、コンピュータで計算する数値が有限の桁数だけで表されていることが挙げら

れる。このために生じる誤差は「丸め誤差」(roundoff error)と呼ばれる。丸め誤差に関しては、付随して「桁落ち」という問題が生じることが多い。これは、有限の桁数で表した2つの数値の差が必要な有効数字を持たないために、正しい答えからずれる現象である。(2)式のような微分方程式の近似計算をする場合などに注意が必要となる。丸め誤差はコンピュータを使う場合に特有の“ずれ”ではあるが、ハードウェア（機械そのもの）の仕様に起因するもので、できあいのコンピュータでプログラムを組む人々（すなわち、シミュレーションが専門だとみなされているほとんどの研究者が含まれる）ができる対策は、あまり多くない。

誤差が生じるもう一つの要因が「打ち切り誤差」(truncation error)である。打ち切り誤差は、計算すべき方程式を離散化変数で近似することが原因で生じる“ずれ”である。この“ずれ”によるシミュレーション結果の悪化は、計算方法（すなわち、計算コードの書き方）を工夫することである程度、回避できる。例えば、(1)式左辺は、

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=t_0} \approx \frac{f(t_0 + \Delta t/2) - f(t_0 - \Delta t/2)}{\Delta t} \quad (3)$$

と近似する方が(2)式よりも近似精度が高くなり、計算結果の改善が期待できる。(3)式はリープフロッグ法と呼ばれる計算手法などで、実際に広く使われている。ルンゲ・クッタ法と呼ばれる手法でさらに精度を上げることも多い。

どのような近似が最適かは、計算する現象や必要とされる精度などによって異なる上、精度を上げようとするれば、一般にアルゴリズム（具体的な問題処理の手順、コンピュータ上での作業順序に沿った一連の計算の枠組みを意味する場合が多い）が複雑になり、計算時間も長くなる。シミュレーション研究では、これらの点を総合的に判断しつつ、限られたコンピュータ能力で最善の結果を出すように、長年にわたって様々な工夫が施されてきた。そのため、次節以降で紹介するような、多種多様な数値計算手法が存在するのである。

2-3 有限差分法

多様な数値計算手法のうち、最も基本的なものとして「有限差分法」(Finite Difference Method または略してFDM)が挙げられる。簡単に差分法と呼ばれることも多い。有限差分法では、図1(a)のような計算格子を使って、空間上に連続的に分布する物理量を計算する。既に説明した時間微分の場合と同様に、(2)、(3)式のような近似式で空間微分を表現する（この近似を行う作業が、差分化である）。2次元や3次元空間の計算でも基本的には直交座標に対応した等間隔の格子にデータを配置す

るだけなので拡張が容易である。直感的に理解しやすく、プログラミング（計算コードの作成）も簡単である。最も歴史の古い計算手法の一つであり、単純な形状をした計算領域全体の流れ場を解析する場合などに向いている。

気象のシミュレーションなどでは現在でも広く利用されているが、局所的に解像度を上げたい場合には、次に挙げる「有限要素法」に比べて、やや不便である。そのため、物体と流体の境界で発生する乱流や、複雑形状の物体が変形して発生する応力などを解析する場合には、あまり用いられない。

有限差分法の考え方そのものは明快だが、実際の計算手順は多様である。多様化する要因の一つとして、高次の空間微分を組み込んで、アルゴリズムがあまり複雑にならない点が挙げられる。このため、テイラー級数を利用して精度を上げる手法が数多く考案されている。その上、やっかいなことに、精度さえ上げれば、より良い結果が得られるとは限らないという事情が、計算手法の種類を増大させている。注意深く差分化をしなければ、計算を繰り返すにしたがって誤差が増幅して、正しい答えとかけ離れた計算結果になってしまうからである。このような誤差の増幅は、数値不安定と呼ばれている。特に、流体現象を特徴付ける非線形効果の計算で発生しやすく、この問題に特化した様々な対処方法が編み出されている。

有限差分法に関する文献は多数あるが、利用頻度の高い計算手法の多くを、計算コードとともに紹介している Press *et al.* (1994) の引用率が高い。初歩的な手法の説明は矢部・井門 (1988) が丁寧である。von Neumann 解析と呼ばれる手法を用いた数値不安定の議論や、流体計算で多用される TVD 法の解説は藤井 (1994) が分かりやすい。有限差分法を用いた流体解析は、この後述べる有限要素法や境界要素法とともに数値流体力学編集委員会 (1995b, c) などでも詳しく説明されている。

2-4 有限要素法

次に「有限要素法」(Finite Element Method または FEM) を説明する。計算格子を利用する手法として、有限差分法と並んで広く用いられている。有限要素法の特徴は、計算する空間を任意の形状（計算要素）に分割して計算を行うことである。2次元計算では三角形や四角形、3次元では四面体や六面体に分割するのが一般的である（図 1b）。計算要素として使う三角形や四面体の辺の長さを、一つの計算の中で自由に変えて配置することができるので、不規則な形状の計算領域を用いる場合や、物体境界付近だけ解像度を上げたい場合などに便利である。半面、不規則に配置する計算格子の初期設定に時間や手間がかかるという不利な点もある。計算手法も

煩雑で、やや分かりにくい。煩雑になるのは、大きさが著しく異なる計算要素を組み合わせる場合でも、近似解の整合性が領域全体として高くなるように、重み付き残差法や変分法などの、やや高度な数学操作を用いるためである。

工学分野では有限要素法が多用されており、膨大なノウハウが蓄積されている。最近では使いやすい商用ソフトウェアの普及も進んでいるため、上に挙げた欠点はあまり気にする必要がなくなっている。飛行機や船舶の周り、エンジン内部の流れなど実用性の高い流体計算の多くは、有限要素法で行われている。自動車が衝突した場合の変形や原子炉の強度計算などの構造解析にも広く利用されている。

有限要素法の文献も多い。ただし、有限差分法に比べて専門性が高いため、教科書的な書籍でも特定の応用計算を想定したものが多く、数学的な基礎から知りたい場合は菊地 (1999) が分かりやすい。流れの解析については Connor and Brebbia (1978) や矢川・他 (1998)、弾性変形や破壊を扱うものでは三好・他 (1976) が入門的な教科書として知られている。また、計算格子の作成方法に特化した文献としては数値流体力学編集委員会 (1995d) や Thompson *et al.* (1994) などがある。

2-5 有限体積法

シンプルなタイプの有限差分法や有限要素法では「連続の式」とも呼ばれる「質量保存の式」は、その微分表現:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \text{grad})\rho = -\rho \text{div} \mathbf{v} \quad (4)$$

を直接、差分化して計算する。ここで、 ρ は計算する物質の密度、 \mathbf{v} は着目している場所における速度である。このような差分化を行うと、現実には一定に保たれるはずの質量が数値誤差によって増減することがある。質量に関する誤差はわずかであっても、非現実的な計算結果をもたらす危険性がある。例えば、密度がマイナスの値になって想定していない向きに力が作用し、計算が破綻してしまうことがある。このような問題を回避するために考案された手法が「有限体積法」(Finite Volume Method または FVM) である。

有限体積法では、各計算要素境界でのフラックス（流入・流出量）を使って保存量を計算することで、計算誤差を抑制する。すなわち、ある点を取り囲む体積 V_0 の計算要素における保存量 f の時間発展式を

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0} f dV = - \oint_{S_0} f \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

と表して差分化する。ただし、 dV は体積素片、 $d\mathbf{S}$ は外

向き正の面積素片ベクトルである。左辺の体積積分は体積 V_0 にわたって行い、右辺の積分は体積 V_0 を囲む閉曲面 S_0 上で行う。また、(5) 式では保存量の生成や消滅が起きないと仮定してある。 f が密度を表す場合、(5) 式は (4) 式を数学公式に従って変形しただけのものである。(5) 式に従うと、ある計算要素から流出したフラックスと厳密に同じ値が、隣接する計算要素へ流入するという計算をすることになるので、丸め誤差の範囲で系全体の保存量を一定にすることができる。そのため、物理的な矛盾を引き起こす可能性が少なく、より安定に計算を続けることができる。

物理解析では質量や運動量、エネルギーなどの基本的な物理量が保存するということが理論の根幹をなしており、シミュレーションにおいても保存則の成立は重要視される。そのため、有限差分法または有限要素法と文献中で記述してあるシミュレーションでも、実際には (5) 式を満たす近似式を使っているモデルが多い。したがって、有限差分法ならびに有限要素法を解説している文献の多くで、有限体積法についても紹介している。それらの文献以外で、有限体積法の考え方を強調したものとしては、荒川 (1994) がある。

2-6 境界要素法

(5) 式の積分を計算領域全体で実行することで、計算効率を高める手法もある。「境界要素法」(Boundary Element Method または BEM) である。アルゴリズムはやや煩雑になるが、着目している領域の境界に配置した節点だけで計算を行えばよいので、少ない計算で結果を得ることができる。波動伝播の計算に適しており、音響評価や電磁場解析などに利用されている。一方、非線形性の強い流れの解析には不向きである。参考文献には Brebbia and Dominguez (1993) や小林・他 (2000) などがある。

2-7 スペクトル法

乱流計算や気象の全球シミュレーションなどの大規模計算では、「スペクトル法」と呼ばれる数値解法を用いることもある。スペクトル法は、境界条件を満たす滑らかな直交関数系の重ね合わせで解を近似する手法である。直交関数系としてフーリエ級数を用いることが多く、この場合、実空間での現象を波数空間に変換して計算を行うことに対応している。適用できる問題が周期的境界を持つ系に限られるなどの難点はあるが、適切な関数系で近似すれば収束が速く、高精度の解が得られる。石岡 (2004) に詳しく説明されている。

2-8 重力多体シミュレーション

物理現象には、物質を粒子の集合とみなして、その粒子どうしの相互作用を定式化すると理解が容易になるも

のが多い。特に、構成粒子が着目する系に比べて十分小さく、粒子どうしが遠く離れたままお互いに力を及ぼす現象では、精度の良い近似計算が可能で、系の大局的な運動を解釈するのにコンピュータシミュレーションが威力を発揮する。典型的な例が、この節で紹介する天文現象 (万有引力に支配される運動) や、次節の対象となる荷電粒子どうしの相互作用 (クーロン力による運動) などである。

星どうしの相互作用のように、多数の物体が重力によって影響を及ぼし合いながら運動する現象は「重力多体問題」(Gravitational Many-body problems; N 体問題とも) と呼ばれ、力学の基礎問題として非常に長い研究の歴史がある。コンピュータで現象の時間発展を計算する研究事例も多い。例えば、銀河どうしの衝突 (Ebisuzaki *et al.*, 1991) や、「ジャイアントインパクト仮説」に基づく月の形成過程 (井田, 1998) などのシミュレーションが行われている。

重力多体シミュレーションは、高速多重展開法などの効率的なアルゴリズムを利用して計算を高速化しているのと同時に、多体計算に特化した専用計算機を開発して、汎用的なスパコンの性能を超える大規模シミュレーションを可能にしている点でも注目に値する (杉本, 1994; Hut and Makino, 1999)。

2-9 分子動力学シミュレーション

天文現象と対極的な微小な分子運動も代表的な多体問題であり、コンピュータシミュレーションが精力的に行われている。このような計算は「分子動力学シミュレーション」(Molecular Dynamics Simulation) と呼ばれている。簡単にエムディー (MD) と呼ばれることも多い。比較的手軽に使えるソフトウェア (例えば Amber や Gaussian) が普及していて、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーの分野で活発に利用されている。最高性能の計算機では、1000 万以上の原子の相互作用を計算して、生体分子をシミュレーションできる段階にまで達している (Narumi *et al.* 2006)。

分子動力学シミュレーションでは、計算負荷を小さくするため、原子の周りのポテンシャル場を単純な関数形で近似する場合が多い。代表的なものとして、原子間距離の 12 乗に反比例する斥力と 6 乗に反比例する引力を重ね合わせた Lennard-Jones ポテンシャルがある。このような近似を行わずに量子力学的な効果まで考慮する手法として「第一原理的分子動力学計算」(または第一原理計算) があり、詳細な原子配置や物性を求める場合に使用されている。分子動力学シミュレーションの入門書には Hoover (1998) や岡崎 (2000) などがある。

2-10 個別要素法

身の回りには、食品や薬、洗剤など粉状のものが多数ある。これらの「粉体」も粒子の集合体であり、これらを扱う工学分野でも数値シミュレーションへの取り組みが進められている。粉体のシミュレーションでは、粒子の衝突や接触を適切に計算することが、現象を的確に表現する鍵となる。このために開発された計算手法が「個別要素法」(Distinct Element Method または DEM)である。「離散要素法」(Discrete Element Method: DEM)もしくは「粒子要素法」(Particle Element Method: PEM)と呼ばれることもある。

個別要素法では、計算する各時間ステップの最初に粒子どうしの位置関係を判断して、その時間ステップ内に衝突または接触する粒子どうしの相互作用だけを計算する。一方、重力多体シミュレーションや分子動力学シミュレーションでは、全時間ステップで、一つの粒子に対する他の全粒子からの遠隔作用を計算する。そのため、個別要素法の計算手順は、直前の2節で説明した手法と相違点が多い。

個別要素法には“衝突”を模擬することが主目的の剛体粒子モデル(Hard Particle Model または Hard Sphere Model)と、“接触”を主対象とする柔軟粒子モデル(Soft Particle Model または Soft Sphere Model)の2種類がある。剛体粒子モデルは、1対1の粒子衝突しか起きないと近似できるような、希薄で粒子速度が大きい系を計算する場合に使われる。他方、柔軟粒子モデルは、各粒子が常に他の多数の粒子と接触しているような系を計算する場合に使われることが多い。すなわち、粒子濃度が高く、比較的速度が小さい流れを計算するために開発されたモデルである。柔軟粒子モデルは、粒子どうしが固着する効果を組み込むことで、破壊現象のシミュレーションにも適用できる(伯野, 1997)。個別要素法の代表的な入門書には粉体工学会(1998)がある。

2-11 SPH 法

多体シミュレーションの手法は、流体計算への拡張も進められている。その代表例が「SPH法」(Smoothed Particle Hydrodynamics 法)である。SPH法では、空間的な広がりを持つ密度分布関数(ガウス分布を用いるのが一般的)を Smoothed Particle と呼んで、その時間発展を多体シミュレーションと同様の方法で計算する。すなわち、境界がぼんやりした粒子がたくさん集まることで、連続相全体が構成されるとみなすのである(図2b)。通常の粒子と違って Smoothed Particle どうしは、お互いに重なり合うことができ、空間上のある点における物理量は、重なり合った分布関数から得られる期待値として表現される。

SPH法は天文現象への適用例が多い。なぜなら、天文シミュレーションでは、注目している星間ガスなどが存在する領域以外は真空とみなせる系を考察することが多いからである。SPH法では、多数の Smoothed Particle が分布する領域の分解能が自然と高くなるので、このような天文現象を効率よく計算できる。SPH法の基本概念は長澤(1991)に説明されている。矢部・他(1992)の解説も分かりやすい。

2-12 粒子—流体カップリングモデル

粒子とその周囲の流体との相互作用が重要な現象も多い。粒子が流体中に浮遊しながら高速で運動している場合、粒子はクラスター(多数の粒子が群れのように寄り集まった状態)を作ったり、粒子の集団の中に大きな空隙を作ったりすることがある。そのため、単相の流体とはまったく性質が異なる流れを引き起こす可能性がある。このような現象では、粒子が一様に分布するという単純な近似は不適切である。そこで、これらの現象を解析する場合には、粒子周辺の流体成分を有限差分法などで計算して、個別要素法で計算した粒子運動と結合(カップリング)させる手法が取られる。

粒子が希薄で、粒子の運動が周囲流体の流れにほとんど影響を与えないことが分かっている場合は、流体成分から粒子への作用だけを計算して、粒子から流体成分への影響は無視するという近似が利用される。このアプローチはワンウェイカップリングと呼ばれる。計算負荷が大きくなりすぎることを防ぎながら、粒子運動の概要を把握するためには有効な手段である。しかし、実際の流れでは、流体の流れで粒子が影響を受けるだけでなく、粒子の運動によって流体の流れも変化し、この効果は無視できない場合が多い。このような相互作用を忠実に計算するアプローチは、トゥーウェイカップリングと呼ばれる。入門的な内容は、個別要素法と併せて粉体工学会(1998)に説明がある。最近の文献を探す糸口としては、「流れと粒子」を特集している日本流体力学学会の機関誌「ながれ」2002年21巻3号が便利である。

2-13 格子ボルツマン法

「格子ボルツマン法」は、セルオートマトンと呼ばれる数理モデルから発展した流体計算手法である。セルオートマトンでは、あらかじめ設定された計算格子上だけを移動できる粒子の集合を考える。そして、それらの粒子の移動ならびに衝突に簡単な規則性を持たせて計算を繰り返す。この規則性を適切に設定すれば、化学反応や生命現象などに現れる複雑な形状やその時間発展を、比較的少ない計算量で模擬できるのが、セルオートマトンの特徴である。

セルオートマトンの考え方に基づいて、マクロな流体

運動と整合性のある数値モデルにしたものが、格子ボルツマン法である。この手法では、ある分布関数を持つ仮想粒子の集合体として流体を表現する。そして、それぞれの仮想粒子を、空間にはりめぐらした計算格子上で移動させることで流れを模擬する。このため、これまで2つのグループに大別して説明してきた計算手法(図1, 図2参照)を組み合わせたものと考えることが可能である。しかし、統計力学的な考え方も利用しているので、どちらとも異なる特殊な計算手法とも言える。

格子ボルツマン法では、異種の仮想粒子どうしの衝突則を適切に与えれば、物性が異なる流体間の相分離を忠実に再現することができる。このため、水中で合体・成長していく気泡の振る舞いなど、不混和な2流体が共存して複雑な界面を作りながら運動する流れの特徴を、うまくシミュレーションできる。この利点を活かして、混相流の計算に利用されることが多い。格子ボルツマン法の解説書には葛原・他(1999)がある。混相流への拡張方法は高田(2001)に紹介されている。

2-14 界面シミュレーション

最後に、界面計算の手法を簡単に紹介する。火山現象では、マグマ中の気泡が合体・成長しながら相分離を起こす過程や、縄状溶岩のような複雑な表面形状を持つ地表面流れなど、界面の振る舞いを理解することが不可欠な事象が多いからである。火山以外でも、例えば、船の推進力に影響を与えるスクリュー周りの気泡や、エンジンの燃焼効率を左右する液体燃料と空気の混合プロセスなど、界面の作用が重要な現象は数多い。そのため、界面計算は、シミュレーションでも重要なトピックとなっている。

界面形状が非常に複雑な場合には、前節で取り上げた格子ボルツマン法を用いることが多い。しかし、流体界面が比較的シンプルな形状をしている場合には、流体力学の基礎方程式であるナビエ-ストークス方程式に基づくシミュレーションも数多く試みられている。このような例としては、水中の単一気泡や、比較的粘性の効果が大きい流体表面での砕波などが挙げられる。これらの現象の計算では、界面を精度良く捕獲するVOF法(Volume Of Fluid法; Hirt and Nichols, 1981)やレベルセット法(Sussman *et al.*, 1994)などを組み合わせることが多い。表面張力を計算する手法としては、CSF法(Continuum Surface Force法; Brackbill *et al.*, 1992)がよく知られている。

界面を持つ流れの入門書としては数値流体力学編集委員会(1995e)がある。この文献以降の数値手法の主な発展は高木(2003)が簡潔にレビューしている。個々の数値手法の詳細が知りたい場合には、Journal of Computa-

tional Physics 2001年のVol. 169, Issue 2(混相流シミュレーション特集号)が参考になる。

3. 火山噴火現象とその数値的研究

3-1 本章のねらい

本章では、火山噴火に関係する物理現象のいくつかを、それらに関するシミュレーション研究事例とともに概観する。火山噴火と一言と言っても、地球内部で溶融した岩石(マグマ)が地表まで上昇し、地表や大気中へと広がっていく間には、多様で複雑な物理過程が次々と発生する。そのいくつかは比較的、精度良く数値計算を行うことが可能になっている半面、どのような方程式系で表現するのが最適なのかさえ十分な理解が進んでいない現象もある。ここでは、それらのうち、シミュレーション研究が盛んなトピックを中心に、マグマが地下深部から地表へと移動する順を追って概要を紹介する。

3-2 マグマ生成プロセス

まず、マグマが生成される過程を考える。地下の岩石はほとんどが固体だが、その一部が溶融して液体になる領域がある。プレートテクトニクスなどの大局的な運動によって地下の岩石の熱力学的な状態が変化し、岩石が溶ける条件を満たすからである。岩石は不均質であるため、融点が低い部分から虫食い状に溶け始める。溶融が進むと、疎らに分布していた溶融部分どうしが網目状につながり、水に浸したスポンジのような状態になる。このとき、マグマの密度は、一般に周囲の固体岩石の密度よりも小さい。そのため、網目状につながった溶融部分に浮力が作用して、一種の浸透流として上向きの流れが生じる。

マグマの浸透流的な振る舞いは、格子ボルツマン法(2-13節)を用いてHersum *et al.* (2005)やNiimura (2000)などが考察を行っている。このアプローチを用いると複雑な形状を持つ微細な界面の効果を直接、考慮することができる。一方、有限差分法(2-3節)を用いて、より大局的なスケールでの現象に着目して解析する研究も進められている(Aharonov *et al.*, 1997; Iwamori, 1998; Spiegelman *et al.*, 2001など)。これらの研究では、ミクロな構造の効果は「ダルシーの法則」という多孔質媒体中の浸透流を記述する経験則で表現されている。

3-3 マグマの物性と時間発展

浸透流によって周囲から分離したマグマは、次第に集積しながら上昇を続ける。しかし、多くの場合、火山直下数キロでいったん上昇をやめると考えられている。地表近くの岩石は固体でもマグマより平均密度が小さく、マグマは周囲の岩石と密度が釣り合う深さに停滞するからである。

マグマはこの深さで冷やされる。このため、マグマ中では融点の低い鉱物から選択的に結晶化して、マグマの組成が変化していく。結晶化に伴ってマグマの密度も変化するため、この深さのマグマ内で対流的な運動が生じる可能性も指摘されている。すなわち、地下浅部におけるマグマの化学的・物理的な時間変化を理解するには、相変化を含む固液二相流としての振る舞いを考察する必要がある。このような現象を解析する試みとしては有限差分法(2-3節)を用いた Kuritani (2004) などの研究例がある。

マグマの多成分高温融体としての物質科学的な性質については、分子動力学シミュレーション(2-9節)を用いた解析が行なわれている(河村・澤口, 1997など)。地球深部まで視野を広げると、下部マントルの構成要素として最近、注目を集めているポストペロプスカイトの物性を第一原理計算(2-9節)によって予測する研究なども行われている(Iitaka *et al.* 2004)。

3-4 地下浅部におけるマグマ移動

地下浅部では、マグマの運動に伴って周囲の岩石が脆性的に破壊されて、マグマは平面状の割れ目を作りながら上昇、もしくは水平拡大していくと考えられている。このような現象の解析には、有限要素法(2-4節; 伊藤・福士, 2005)や境界要素法(2-6節; Dahm, 2000; Mériaux and Lister, 2002)が利用されている。また、割れ目の進展の結果生じる地表の地殻変動の解析にも、有限要素法(Ryan, 1988; Saunders, 2005)や境界要素法(Cayol and Cornet, 1997; Gudmundsson and Brenner, 2005)の適用が試みられている。

地下浅部では、マグマは気液二相流としての性質も示す。地下深部のマグマには、水や二酸化炭素などが溶け込んでおり、マグマに作用する圧力がそれらの飽和蒸気圧を下回ると気泡として析出するからである(Carroll and Holloway, 1994; Tait *et al.*, 1989)。火山噴火が穏やかなものになるか爆発的になるかは、この析出したガス成分の振る舞いが鍵を握ると考えられている。もし、ガス成分が液相から効率的に分離すれば、液相部分はガス成分が抜けた状態で地表に到達する。この場合には、溶岩流または溶岩ドームの形成という比較的穏やかなスタイルの噴火になる。液相中に気泡が閉じ込められたまま成長を続けると、マグマを粉々に破碎する現象(フラグメンテーション)が生じる。この結果、粉々になったマグマがガス成分とともに火口から噴出するのが爆発的な噴火である。

発泡現象については Kinjo *et al.* (1999)や高木・他(2005)などが Lennard-Jones ポテンシャルを使った分子動力学シミュレーション(2-9節)を試みており、マグマ

内での振る舞いに言及している(図3)。大量の気泡が成長・合体しながらマグマ中を移動する流れの計算は、界面シミュレーション(2-14節)の興味深い応用例となり得るが、実際の火山現象と比較できるような系は計算量が莫大になるため、現段階ではまだ行われていないようである。マグマが破碎する条件やその物理過程なども火山研究の重要なテーマだが、多次元の数値モデルを構築する段階に達していないというのが一般的な認識のようで、一次元モデルによる現象理解の努力が続けられている。

3-5 火山噴煙・火山ガス

爆発的な火山噴火の多くでは、マグマのほとんどが火山灰に分類されるサイズ(2ミリメートル以下)に破碎される。これらのマグマの破片は終端速度が小さく、乱流的なガス成分の運動に追従するため、粒子とガスが渾然一体となった状態になる。

上の固気混相流体が火口から噴出したのが、火山噴煙である。火山噴煙に関しては、有限差分法(2-3節)に基づいた数値シミュレーションが数多く試みられている。噴煙シミュレーションは、その目的によって、大きく2種類に分けられる。一つは、比較的小さい計算領域(水平方向に数キロから100キロ程度)を設定して噴煙の内部構造を詳細に再現し、噴煙の基本的なダイナミックスの理解を深めることを目的とするものである(図4)。もう一つは、堆積物分布などの実測データとの対応を重視して、噴煙が周囲の風に流されながら拡散していく過程を、比較的単純な経験則を組み込んだモデルで計算するタイプである。

前者のタイプでは、乱流運動をしている気相(火山ガスと大気の混合気体)中に高温の火山灰が大量に浮遊している影響などを、精緻にモデル化しようとする傾向が強い。すなわち、火山灰が持つ熱エネルギーによって大気が熱膨張を起し、その結果、浮力が生じて大規模な上昇流が発達するという一連のプロセスを、できるだけ忠実に再現することを意図している。

先駆的な研究として、Wohletz *et al.* (1984)がよく知られている。このモデルは、火山灰粒子とガス成分それぞれに関する方程式系を構築して、そこに両者の相互作用を組み込んでいる。すなわち、一種の粒子-流体カップリングモデル(2-12節)である。この数値モデルを発展させた研究が多数、発表されている(Clarke *et al.*, 2002; Neri and Dobran, 1994; Valentine and Wohletz, 1989など)。これらの多くでは、噴煙内部で浮力が十分に発生して安定な噴煙柱になるか、噴煙柱崩壊と呼ばれる現象が起きて大気よりも重たい固気混相流体が火砕流となって地面に沿って流れ広がるかの分岐条件が議論の中心となっている。

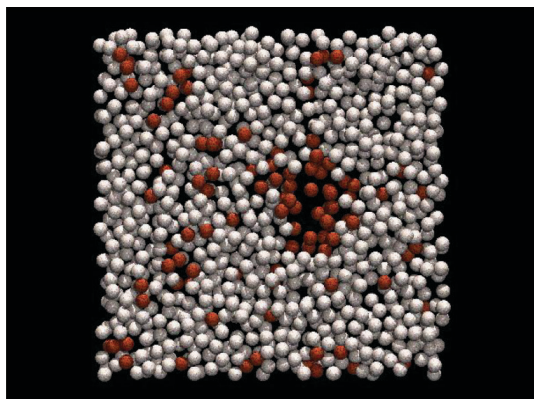


図 3. 分子動力学シミュレーションによる気泡生成の計算例 (金城友之氏提供). 2成分系の瞬間膨張による気泡の生成過程を計算したもので, 溶媒を表す白い粒子中に不純物を表す赤い粒子が析出して, 気泡となっている様子を示している.

Fig. 3. An example of Molecular Dynamics Simulation for bubble nucleation (Courtesy of T. Kinjo). The time evolution of bubble nucleation due to instantaneous expansion was investigated numerically. A bubble with several solute molecules (red) appeared in the surrounding solvent molecules (white).

この他, 水蒸気の効果モデルを組み込んだ Oberhuber *et al.* (1998) や火山灰粒子どうしの衝突の効果を精緻化した Darteville *et al.* (2004), 高解像度のモデルで乱流混合の効果を検討した鈴木・小屋口 (2006) など, 独自の工夫を加えた数値モデルも多い. 火山噴火に伴って発生する爆風を有限要素法 (2-4 節) でシミュレーションした谷口・他 (1994) のような事例もある.

上空の風によって噴煙が移流・拡散していく過程を計算するタイプでは, 水平方向に数十~数百キロメートルの領域を取り, 広域へ水平拡大する噴煙の時間発展を追跡できるようにデザインされている. その半面, 鉛直方向の構造に関しては単純な初期分布を仮定して, 粒径に応じた一定の終端速度で落下するという定式化を用いているものが多い. 気象学で用いられる数値モデルを改良して, 実際の噴火事例に適用した研究が多数あり, 衛星観測などと良く一致する結果が得られている (Armiienti *et al.*, 1988; Heffter and Stunder, 1993; Tanaka, 1994).

このタイプの計算は, 既に現業的に利用されている点で注目に値する (Hurst and Turner 1999; 澤田, 1997). すなわち, 火山灰分布の予測は, 航空機が安全に飛行するために重要であるという観点から, 航空路火山灰情報センター (Volcanic Ash Advisory Center=VAAC) という国際ネットワークが組織され, そこが数値シミュレーションに基づく情報を提供している.

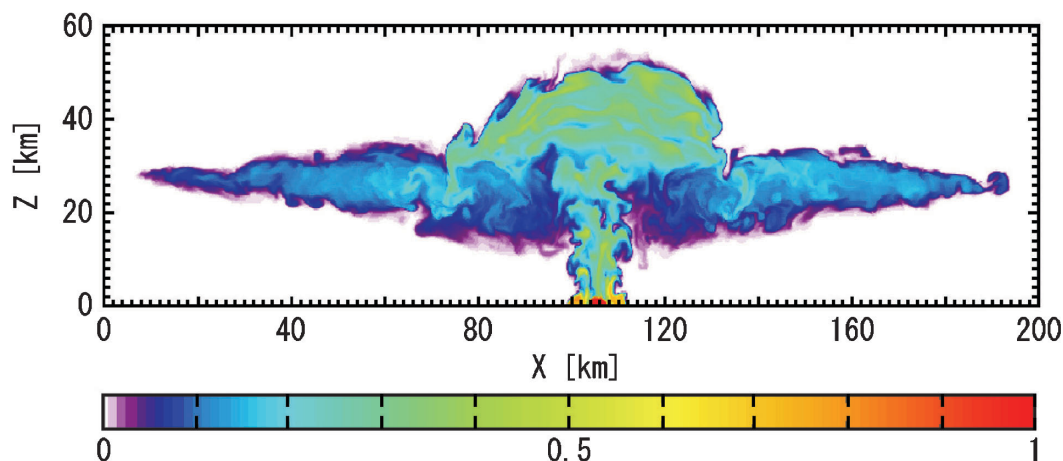


図 4. 傘型噴煙のシミュレーション例 (鈴木雄治郎氏提供). ピナツボ 1991 年噴火と同程度である約 8 億 kg/s の噴出率で計算した噴煙の鉛直断面を示したもので, 噴火開始 1400 秒後の様子を噴出物の質量分率 ([噴出物]/[噴出物+大気]) に応じて色分けしてある.

Fig. 4. An example of numerical simulations of a volcanic eruption column accompanying a horizontally spreading umbrella cloud (Courtesy of Y.J. Suzuki). The calculation was carried out with the discharge rate of 8.0×10^8 kg/s, which is comparable to that of the Pinatubo 1991 eruption. A vertical cross-section of the mass fraction of the discharged gas-particle mixture at 1400 s is depicted.

火山ガスの拡散に関しても、火山噴煙と同様、気象モデルを利用してシミュレーションを行った例がいくつか知られている。例えば、古野・他(2002)やSeino *et al.*(2004)が、2000年以降、三宅島から放出されている二酸化硫黄ガスの広域拡散を解析している。近藤・他(1999)は、窪地に滞留した火山ガスによる中毒事故の発生要因を調べるため、室内実験と併せてコンピュータシミュレーションを実施している。

3-6 火山岩塊

上に挙げた噴煙モデルの多くは、噴煙には十分に小さい粒子(すなわち、細粒火山灰)だけが含まれていると仮定している。極端な場合、火山灰が周囲の気相から分離・沈降する過程を無視して、気相と全く同じ運動をするというモデル化を行っている。したがって、弾道的な運動をする大きな粒子(火山岩塊)を含む現象の解析には利用できない。

火山岩塊の個々の飛跡については、空気抵抗を受けながら重力場中を運動する質点の運動とみなした理論解析が古くから試みられており(Minakami, 1942など)、最近では同様の手法で軌道計算をするプログラムが公開されている(Mastin, 2001)。しかし、大きな粒子の割合が大きいと考えられる「ストロンボリ式噴火」のような現象に関して、粒子と気相の相互作用を適切に評価できるような数値モデルはまだ発表されていないようである。同様に、液状のマグマがしぶきとなって噴出する「ハワイ式噴火」または「溶岩噴泉」と呼ばれるスタイルの数値的研究も知られていない。このような火山岩塊などの粒子を含む現象の解析には、SPH法(2-11節)を用いた数値シミュレーションが有効である。例えば、高田・他(2005)が行った火山爆発によって岩片が飛散するシミュレーションに、重力と空気抵抗の効果を適切に組み込めば、有用な情報が得られると期待される。

3-7 溶岩流

マグマが破碎されないまま地表に達すると、溶岩流となって地表をゆっくりと流れ広がる。溶岩流では粘性の効果が大きく、乱流的な運動は抑制される。そのため、コンピュータシミュレーションも容易だとみなされがちである。しかし、実際には、溶岩流に特有な振る舞いのほとんどは、定性的にできさえシミュレーションで再現できる段階に至っていない。

溶岩流のシミュレーションが困難である最大の要因は、冷却や結晶成長に伴って溶岩の粘性が大きく変化することである。このため、溶岩トンネルや縄状構造などの溶岩流に特徴的な複雑な形態が発生する。その上、粘性の変化に伴って溶岩流の流動特性自体が大きく変化し、バホイホイ溶岩、アア溶岩、塊状溶岩という全くス

タイルが異なる流れを引き起こす(Griffiths, 2000; Manga and Ventura, 2005)。これらの流動スタイルに関する研究は非常に盛んだが、その多くは、観測や実験の結果を簡単な解析モデルと組み合わせて議論したものである(Hon *et al.*, 1994; Kilburn, 2004)。

現状では、溶岩流に関するシミュレーションのほとんどは、最大到達範囲の再現または予測を目的としたものである。上に述べたように、流動スタイルに関する微細構造はモデル化が困難なため、このタイプのモデルには比較的シンプルな経験則が組み込まれている。様々なアプローチでのモデル化が試みられているが、多くの場合、流れを鉛直方向に平均化して層厚や水平速度などを計算する2次元モデルを採用している。

研究例が多いのは、有限差分法(2-3節)または有限体積法(2-5節)に基づく2次元モデルである。これらの2次元モデルは、利用している方程式系によって、さらに2つに大別される。一つは、水平速度をその場での流れの厚さや地形勾配の関数として与える運動学的な定式化のもの(キネマティックモデル)である。もう一つは、水平速度が移流や圧力勾配に応じて変化する効果を考慮した力学的なモデル(ダイナミックモデル)である。前者には、石原・他(1984)、Miyamoto and Sasaki(1998)、Young and Wadge(1990)などがある。後者には、深さに比べて水平方向の変化が小さいという長波近似を利用した浅水波方程式に基づくものが多い(Costa and Macedonio, 2005; 山下・他, 1990)。このほか、確率論に基づくもの(Favalli *et al.* 2005)や、セルオートマトン法(2-13節)の適用を試みた例(Crisci *et al.*, 1999)もある。最近では、溶岩流が表面から冷却・固化して流れにくくなるプロセスを組み込んだ3次元の差分モデルも開発されている(Hidaka *et al.*, 2005; 図5)。

複雑な地形上を流れ広がる現象という観点から見ると、溶岩流と、次節以降で説明する土石流、火砕流は、いくつかの共通する性質を持っている。そのため、数値モデルの定式化にも類似点が多い。特に、不規則な地形が大きな数値誤差を生じさせる傾向が強い点を考慮して、有限体積法(2-5節)を用いたモデルが多いのが共通した特徴である。この点は、雪崩や洪水など、火山以外の要因による地形上の流れも同様である。そのため、これらの現象をまとめて議論している文献もある(Denlinger and Iverson, 2001; Takahashi, 2001)。Beven(2001)、日野・他(1989)などの水文学の入門書も参考になる。

3-8 土石流・岩屑なだれ・火山性津波

土石流に関する研究では、前節で紹介した浅水波方程式を有限差分法(2-3節)でモデル化した事例が多い(Laigle and Coussot, 1997; 宮本・山下, 2000; 高橋・辻

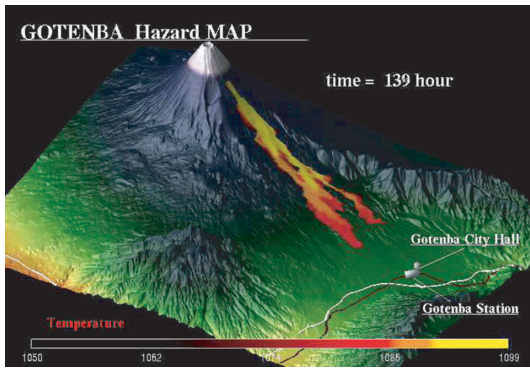


図 5. 溶岩流のシミュレーション例 (藤田英輔氏提供). 富士山南東斜面の火口から $200 \text{ m}^3/\text{s}$ で溶岩が流出すると想定して計算した結果で, 地表の傾斜や起伏の影響を受けながら御殿場駅方面へ流下する様子を表現している.

Fig. 5. An example of lava flow simulations (Courtesy of E. Fujita). The lava is assumed to flow from a vent on the southeastern flank of Mt. Fuji with a rate of $200 \text{ m}^3/\text{s}$. The lava spreads towards Gotenba Station under the influence of topographic heterogeneity.

本, 1984 など). 観測と良く合う計算結果を示している文献が多いが, 利用している方程式には研究事例ごとに違いが見られる. 特に, 応力と変形の大きさの関係を記述する構成則に差異が大きい. すなわち, 統一的なモデルで, すべての土石流を精度良く予測できるレベルには達していないようである.

このような現状は, 土石流の性質を特徴付ける素過程が, 解析対象とする実現象ごとに異なっていることを反映しているのかも知れない. 例えば, 大きな岩塊どうしが激しく衝突しながら斜面を落下するプロセスが重要な場合や, ほとんどの土砂が微細で水に浮遊したまま流れる泥流的な性質が顕著な場合があるなどのことが考えられる.

火山噴火に伴う地殻変動や地震で生じる大規模な山崩れ (岩屑なだれ) にも, 土石流のシミュレーションとほぼ同様の計算技法が利用されている (Heinrich *et al.*, 2001; Kelfoun and Druitt, 2005; Pitman *et al.*, 2003). ただし, 土石流では, 降雨や融雪などで供給される水によって流動性がもたらされる一方, 岩屑なだれでは運動機構に水が寄与しないと考えられている点でモデル化に違いが生じる. また, 岩屑なだれが流れ山を作るような大きな塊ごとにまとまって運動するという特徴に着目して, 個別要素法 (2-10 節) を用いて現象を再現する試みも行われている (Campbell *et al.*, 1995; 内田・伯野, 1990 など).

岩屑なだれが海や湖に流入して発生する津波をシミュレーションした事例も多い (相田, 1975; Nomanbhoj and Satake, 1995; Tinti *et al.*, 1999). 最近では, 火山噴火の危険性が高くなってから緊急対応的にシミュレーションを試みる例 (佐竹, 2001) や, 山体の崩壊と津波を連動させた計算例 (笹原, 2004) などもある.

3-9 火砕流

火砕流は, 岩屑なだれと同様に, 固気混相流体が地面に沿って高速で流れ広がる現象である. 大きな火山岩塊が地面や他の岩塊と衝突しながら流れ下る “本体部分” と, 細粒火砕物が舞い上がって火山ガスや大気と混合しながら激しい乱流運動をする “サージ部分” から構成されている点が特徴である. 高温であることも現象を複雑にしていると考えられている.

火砕流は, 発生中に近づくのが非常に危険なため, 定量的かつ系統的な物理観測はほとんど行われていない. そのため, 火砕流の流動特性の実態は未知の部分が多い. “本体部分” だけを考えても, 大きな運動エネルギーを伴う「粒子流」 (granular flow; Duran 2002; Jaeger *et al.*, 1996) であり, その解釈は非常に難しい. “本体部分” と “サージ部分” との相互作用に関しては, モデル化の手がかりとなる基礎情報ですら, 皆無に等しい (Branney and Kokelaar, 2002). その結果, 他の現象からの類推などに基づく様々なモデル化がなされている. そして, 多くの場合, “本体” と “サージ” を切り分けて, どちらか一方だけの計算を行っている.

火砕サージの数値シミュレーションを最も精力的に行っているのは, Neri らイタリアのグループである (Dobran *et al.*, 1994; Giordano and Dobran, 1994; Todesco *et al.*, 2002). 彼らは, ベスビオ火山周辺の都市における災害リスクを評価するため, 現実的な地形が火砕サージの到達範囲にどのような影響を及ぼすかなどの具体的な条件について, 様々な角度から検証を進めている. その他, 火砕サージから上昇流が発達する温度条件を議論した Ishimine (2005) やコロンビア・ガレラス火山での噴火事例への適用を試みた Córdoba (2005) などがある.

日本国内では, 土石流などと同様の浅水波方程式に基づく 2 次元の数値モデルで, 本体部分を解析する研究が盛んである (Itoh *et al.*, 2000; 高橋・他, 1997). 同様のモデルを用いた海外での研究事例もある (Wadge *et al.*, 1998). 石川・山田 (1994) では, 本体とサージの運動を組み合わせたモデルを提唱しているが, 彼ら自身が論文で述べているようにサージ部分の運動については実現象をあまりうまく再現できていない.

この他にも, よりシンプルなエネルギー・コンモデル (火砕流が初期に持つ位置エネルギーと, 流下に伴う摩

擦で消費されるエネルギーのバランスで火砕流の到達範囲を見積もるモデル)を実地形データと組み合わせた事例 (Malin and Sheridan, 1982; 宝田・他, 1993) や、個別要素法 (2-10 節) を利用して本体部分の堆積構造を解析した事例 (Mitani *et al.*, 2004), SPH 法 (2-11 節) を利用した事例 (Nagasawa and Kuwahara, 1993) などもある。

3-10 水蒸気爆発・その他

火山噴火では、マグマと外来水の相互作用も重要である。このような例としては、マグマが地下深くにあるときに、熱が地表近くに伝わって地下水を加熱・沸騰させることで起こる「水蒸気爆発」や、比較的穏やかに噴出した溶岩流が海や湖に突入するなどの要因で、マグマと水が直接接触して水蒸気を激しく発生させる「マグマ-水蒸気爆発」などがある (高島・飯田, 1998; White *et al.*, 2003)。溶岩流や火砕流が、山腹に積もった雪や氷を溶かして、泥流を発生させるような事例もある (安養寺・嶋, 2003)。しかし、これらの現象は、相変化や激しい体積膨張を伴い、高度な計算技術と大規模な計算機資源を必要とするなどの理由で、シミュレーション研究はあまり進んでいない。

また、本論文では、物理法則に基づいて自然現象の時間発展を計算する研究事例だけを取り上げたが、コンピュータの利用方法はそれだけに留まらない。例えば、社会科学の分野においては、文化の伝播・継承や商取引に基づく経済ネットワークの成長などに関して、人間の行動パターンを単純なルールで表現してコンピュータでシミュレーションする試みが幅広く行われている (Epstein and Axtell, 1999)。本論文では触れなかったモンテカルロ法 (コンピュータで発生させた乱数を用いて統計的に現象を近似する手法) や、遺伝的アルゴリズム (観測結果などの既知のデータを的確に説明するモデルを効率的に探索する手法) などを用いたシミュレーションも多い。

防災関連の分野では、複数のデータを地図と関連付けてコンピュータ上で表示する地理情報システム (GIS: Geographic Information System) を利用した研究事例も多い。例えば、災害時の人々の避難様式や、地震で倒壊した建物による道路の閉塞状況を予測するシミュレーションなどが進められている (文部科学省研究開発局・防災科学技術研究所, 2006)。火山学分野でも、海外における研究で、物理シミュレーションの枠を超えた興味深い例がいくつかある。例えば、Aspinall *et al.* (2006) は、火山性微動や火山ガスの放出量などの観測データを用いて噴火の逼迫度を確率で表現し、最適な警戒レベルを探索するモデルを提案している。Guidazzoli *et al.* (2006) は、噴火シミュレーションの結果を考古学的な研究成果と組み合わせて、古代ローマ時代にポンペイで起きた災

害を再現するバーチャルリアリティー体験システムの構築を試みている。

4. 今後の課題

コンピュータシミュレーションは、今後、火山研究に大きな貢献をするポテンシャルを備えていることは明らかである。3章で取り上げた多くの研究事例は、火山シミュレーションが新しい観点から火山現象を描き出す効果的な手段となり得ることを示している。溶岩流が流下する経路や噴煙の分布域など、目的に応じて適切な計算を実行すれば、ある程度、実用に耐えうる情報を提供できるレベルに達している事例もある。しかし、これらは、多様な火山現象と比べると、ごく一握りに過ぎない。火山シミュレーションのほとんどは試験的な段階にあり、今後のさらなる改善が不可欠である。火山研究にコンピュータシミュレーションを十分に活用していくためには、多くの課題を解決していかなければならない。

現状での最大の課題は、コンピュータシミュレーションに取り組む火山研究者の数が絶対的に少ないということである。日本火山学会の機関誌である本誌「火山」に掲載されるシミュレーション関係の論文が極めて少ないという事実が、この現状を端的に示している。火山研究においては、基礎的な理論・実験研究に加えて、地震や地殻変動などの物理観測、地質学や岩石学・地球化学に基づく調査・分析、さらには噴火時の行政への助言まで、数少ない研究者ですべて網羅しなければならない。この現実を考慮すると、シミュレーション研究に人員を割く余裕がないという状況はしばらく続かざるを得ない。

一方で、火山シミュレーションは火山防災の現場で高い実用性を求められている。コンピュータ技術は、あらゆる分野で情報伝達手段に革命的な変化をもたらしている。そのような時代認識を持つ一般市民や防災担当者が、どのようなタイプの噴火がどの程度の規模で発生するのかについても天気予報と同レベルでシミュレーション可能だと思い込んで、その結果に基づいた噴火情報を噴火前に伝えてもらえるものと期待していても不思議ではない。このような期待と火山シミュレーションの現状とのギャップは著しく大きい。

本論文でも概観したように、火山噴火で発生する現象の多くは混相流的特徴が顕著で、現象そのものが複雑である。そのため、火山噴火では、気象学や機械工学などの分野では想定していない多くの特殊な状況が生じる。他分野で蓄積されてきた様々なシミュレーション技術は参考にするべき点が多いとはいえ、それらの分野で開発された数値モデルのほとんどは、そのままでは火山現象に転用できない。火山噴火の特性を的確に反映した計

算を行うためには、状況に応じて独自の創意工夫を加え、数値モデルを改良していく必要がある。すなわち、各素過程をシミュレーションするだけでも、現象に関する深い理解と高いシミュレーション技術が要求される。その上、火山現象は多様であり、一つの計算手法だけを習得しても、噴火のほんの一部しかシミュレーションできない。

火山噴火では、観測で得られる情報が著しく限定されていることも、シミュレーションを難しくしている。火山噴火は発生頻度が低く、噴火時には危険で近づくことすら難しい。そのため、数値モデルに含まれるパラメータの多くは、観測で直接、値を特定することができない。シミュレーションを行うには、限られた情報に基づいて大胆なモデル化を行い、あらゆるデータに不確定要素が含まれることを承知の上で、計算を実行せざるを得ない。計算結果がどのくらい信用できるのかを検証する手段も乏しい。そのような計算結果の中から、物理的に確かで、防災情報としても有用な示唆を導き出していかなければならない。このように、火山のシミュレーションが置かれている状況は、極めて厳しい。

以上のような状況を考えると、すべての噴火現象にリアルタイムに対応できるシミュレーション技術を確立するには、かなりの時間を要すると判断せざるを得ない。戦略的に優先順位を決めて、シミュレーション技術を蓄積していくしかない。したがって、シミュレーションの技術を持つ数少ない研究者どうしが緊密に情報交換を行い、どのような問題に取り組みれば火山研究全体への波及効果が大きいのかを、よく吟味していく必要がある。

また、既に述べたように、シミュレーションに精通した他分野の研究者が、火山関連のプロジェクト研究に参加する機会は比較的、多くなっている。火山噴火が発生した際に、気象学や環境学分野の研究者が噴煙や火山ガスの拡散シミュレーションを行う事例も多い (An *et al.*, 2003; Tanaka and Yamamoto, 2002; 常松・他, 2006; 内田・大屋, 2005)。このような経験を持つ研究者間の連携に工夫を凝らし、少しでも多くの研究者が継続的に火山シミュレーションに取り組める環境を整備していくことが望まれる。

本論文で概観したような課題の多い火山シミュレーションの状況は、大学院レベルの若い世代が参入するには、むしろ好都合である。初学者でもモデル化や計算手法に工夫を凝らせば、インパクトの強い研究ができる余地が大きいからである。重要な研究成果を出すには必ずしも大規模計算をする必要はなく、柔軟な発想で現象の本質を抽出すれば、一般的なパソコンで革新的なシミュレーションを実行できる可能性も高い。斬新な数値モデ

ルや意外な計算手法を使って、積極的に火山シミュレーションを推進する若手が次々と現れるように、火山研究の魅力を伝えていくことも、我々にとって極めて大きな課題である。

謝 辞

豊田中央研究所の金城友之氏、海洋研究開発機構の鈴木雄治郎氏、防災科学技術研究所の藤田英輔氏にはシミュレーション結果の図を提供していただきました。また、豊田中央研究所の金城友之氏、東京大学総合研究博物館の宮本英昭氏、名古屋大学工学部の高橋 徹氏、ジュー・データシステムズ株式会社の新村裕昭氏をはじめ多くの方々に、それぞれが専門とする計算手法の概要や文献を教えていただきました。防災科学技術研究所の鶴川元雄氏、藤田英輔氏、中村桃絵氏には原稿を精読して建設的な助言をしていただきました。査読者である東京大学地震研究所の市原美恵氏ならびに京都大学防災研究所の福島 洋氏からの貴重かつ有益な助言のおかげで、原稿を著しく改善することができました。これらの方々に深く感謝いたします。本論文は、防災科学技術研究所で実施中の「噴火予知と火山防災に関する研究プロジェクト」のサブテーマ「火山活動及び火山災害予測のためのシミュレーション技術開発・活用」の一環として、火山シミュレーションの現状をまとめたものです。

(編集担当 古屋正人)

引用文献

- Aharonov, E., Spiegelman, M. and Kelemen, P. (1997) Three-dimensional flow and reaction in porous media: implications for the Earth's mantle and sedimentary basins. *J. Geophys. Res.*, **102B7**, 14821-14833.
- 相田 勇 (1975) 1792 年島原眉山崩壊に伴った津波の数値実験, *地震* **2**, **28**, 449-460.
- An, J., Ueda, H., Matsuda, K., Hasome, H. and Iwata, M. (2003) Simulated impacts of SO₂ emissions from the Miyake volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000. *Atmospheric Environment*, **37**, 3039-3046.
- 安養寺信夫・嶋 大尚 (2003) 融雪型火山泥流の融雪水の発生条件とピーク流量について. 平成 15 年度砂防学会研究発表会概要集, 234-235.
- 荒川忠一 (1994) 数値流体工学. 東京大学出版会, 248p.
- Armenti, P., Macedonio, G. and Pareschi, M.T. (1988) A numerical model for simulation of tephra transport and deposition: applications to May 18, 1980, Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.*, **93B6**, 6463-6476.
- Aspinall, W.P., Carniel, R., Jaquet, O., Woo, G. and Hincks, T. (2006) Using hidden multi-state Markov models with multi-parameter volcanic data to provide

- empirical evidence for alert level decision-support. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 112–124.
- Beven, K.J. (2001) Rainfall-runoff modelling, the primer. Wiley, Chichester, 360p.
- Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992) A continuum method for modeling surface tension. *J. Comput. Phys.*, **100**, 335–354.
- Branney, M.J. and Kokelaar, P. (2002) **Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites**. Geological Society Memoir **27**, London, 152p.
- Brebbia, C.A. and Dominguez J. (1993) 詳解境界要素法. 田中正隆・松本敏郎・中村正行訳, オーム社, 380p.
- Campbell, C.S., Cleary, P.W. and Hopkins, M. (1995) Large-scale landslide simulations: global deformation, velocities and basal friction. *J. Geophys. Res.*, **100B5**, 8267–8283.
- Carroll, M.R. and Holloway, J.R. (1994) Volatiles in magmas. Reviews in mineralogy **30**, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 517p.
- Cayol, V. and Cornet, F.H. (1997) 3D mixed boundary elements for elastostatic deformation field analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34**, 275–287.
- Clarke, A.B., Neri, A., Voight, B., Macedonio, G. and Druitt, T. H. (2002) Computational modelling of the transient dynamics of the August 1997 Vulcanian explosions at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: influence of initial conduit conditions on near-vent pyroclastic dispersal. In *The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T.H. and Kokelaar, B.P. eds), Memoir **21**, Geological Society, London, 319–348.
- Connor, J.J. and Brebbia, C.A. (1978) 流体解析への有限要素法への応用. 奥村敏恵・坂井藤一・岩本卓也訳, サイエンス社, 240p.
- Córdoba, G. (2005) A numerical model for the dynamics of pyroclastic flows at Galeras Volcano, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **139**, 59–71.
- Costa, A. and Macedonio, G. (2005) Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05304, doi: 10.1029/2004GL021817.
- Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Nicoletta, F., Rongo, R. and Spataro, W. (1999) Analysing lava risk for the Etnean area: simulation by cellular automata methods. *Nat. Hazards*, **20**, 215–229.
- Dahm, T. (2000) Numerical simulations of the propagation path and the arrest of fluid-filled fractures in the Earth. *Geophys. J. Int.*, **141**, 623–638.
- Dartevelle, S., Rose, W.I., Stix, J., Kelfoun, K. and Vallance, J.W. (2004) Numerical modeling of geophysical granular flows: 2. computer simulations of plinian clouds and pyroclastic flows and surges. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**, Q08004.
- Denlinger, R.P. and Iverson, R.M. (2001) Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 2. Numerical predictions and experimental tests. *J. Geophys. Res.*, **106B1**, 553–566.
- Dobran, F., Neri, A. and Todesco, M. (1994) Assessing the pyroclastic flow hazard at Vesuvius. *Nature*, **367**, 551–554.
- Duran, J. (2002) 粉粒体の物理学—砂と粉と粒子の世界への誘い—. 中西 秀・奥村 剛訳, 吉岡書店, 291p.
- Ebisuzaki, T., Makino, J. and Okumura, S.K. (1991) Merging of two galaxies with central black holes. *Nature*, **354**, 212–214.
- Epstein, J. M. and Axtell, R. (1999) 人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション—. 服部正太・木村香代子訳, 共立出版, 236p.
- Favalli, M., Pareschi, M.T., Neri, A. and Isola, I. (2005) Forecasting lava flow paths by a stochastic approach. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03305, doi: 10.1029/2004GL021718.
- 藤井孝蔵 (1994) 流体力学の数値計算法. 東京大学出版会, 248p.
- 藤田英輔 (2004) 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. 計算科学技術活用型特定研究開発推進事業平成 13 年度採択課題終了シンポジウム予稿集, 68–71.
- 粉体工学会編 (1998) 粉体シミュレーション入門. 産業図書, 208p.
- 古野朗子・永井晴康・梅山信昭・茅野政道 (2002) 三宅島火山性ガスのリアルタイム広域拡散予測と解析. 大気環境学会誌, **37**, 23–34.
- Giordano, G. and Dobran, F. (1994) Computer simulations of the Tuscolano Artemisio's second pyroclastic flow unit (Alban Hills, Latium, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **61**, 69–94.
- Griffiths, R.W. (2000) The dynamics of lava flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **32**, 477–518.
- Gudmundsson, A. and Brenner, S. L. (2005) On the conditions of sheet injections and eruptions in stratovolcanoes. *Bull. Volcanol.*, **67**, 768–782.
- Guidazzoli, A., Diamanti, T., Ponti, F. D., Neri, A., Bisson, M., Ongaro, T. E., Gori, R., Pareschi, M. T., Calori, L., Imboden, S., Cavazzoni, C., Erbacci, G. and Menconi, G. (2006) An interactive virtual environment to communicate vesuvius eruptions numerical simulations and Pompeii history. In *ACM SIGGRAPH 2006 Educators Program* (ACM special interest group on computer graphics and interactive techniques eds), SIGGRAPH '06, ACM Press, New York.
- 伯野元彦 (1997) 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う—. 森北出版, 238p.
- Heffter, J.L. and Stunder, B.J.B. (1993) Volcanic ash forecast transport and dispersion (VAFTAD) model. *Weather and Forecasting*, **8**, 533–541.
- Heinrich, Ph., Boudon, G., Komorowski, J.C., Sparks, R.S. J., Herd, R. and Voight, B. (2001) Numerical simulation of the December 1997 debris avalanche in Montserrat, Lesser Antilles. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2529–2532.
- Hersum, T., Hilpert, M. and Marsh, B. (2005) Permeability and melt flow in simulated and natural partially molten basaltic magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**, 798–814.

- Hidaka, M., Goto, A., Umino, S. and Fujita, E. (2005) VTFS project: Development of the lava flow simulation code LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading, and solidification. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **6**, Q07008.
- 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫 (1989) 洪水の数値予報—その第一歩—. 森北出版, 252p.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, **39**, 201–225.
- Hon, K., Kauahikaua, J., Denlinger, R. and Mackay, K. (1994) Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **106**, 351–370.
- Hoover, W.G. (1998) フーヴェー分子動力学入門. 田中實訳, 共立出版, 176p.
- Hurst, A.W. and Turner, R. (1999) Performance of the program ASHFALL for forecasting ashfall during the 1995 and 1996 eruptions of Ruapehu volcano. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, **42**, 615–622.
- Hut, P. and Makino, J. (1999) Astrophysics on the GRAPE family of special-purpose computers. *Science*, **283**, 501–505.
- 井田 茂 (1998) 地球・月はなぜそこにあるのか. 科学, **68**, 802–807.
- 井田喜明 (2005) 噴火シミュレータ: 何を目的にどう構築するか. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書, 449–454.
- Itaka, T., Hirose, K., Kawamura, K. and Murakami, M. (2004) The elasticity of the MgSiO₃ post-perovskite phase in the Earth's lowermost mantle. *Nature*, **430**, 442–445.
- 石岡和弘・井口正人・加茂幸介 (1984) 玄武岩質溶岩流のシミュレーション—1983 年三宅島溶岩流への適用—. 火山, **29**, S242-S252.
- 石川芳治・山田 孝 (1994) 火砕流熱風部の運動機構と数値シミュレーション. 土木技術資料, **36**, 22–27.
- Ishimine, Y. (2005) Numerical study of pyroclastic surges. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **139**, 33–57.
- 石峯康浩 (2005) 噴煙, 火砕流, 溶岩流のシミュレーションの現状と課題. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書, 455–457.
- 石岡圭一 (2004) スペクトル法による数値計算入門. 東京大学出版会, 242p.
- Itoh, H., Takahama, J., Takahashi, M. and Miyamoto, K. (2000) Hazard estimation of the possible pyroclastic flow disasters using numerical simulation related to the 1994 activity at Merapi Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **100**, 503–516.
- 伊藤高敏・福土幸治 (2005) 熱変形によるマグマき裂断面形状の変化. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書, 106–110.
- Iwamori, H. (1998) Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65–80.
- Jaeger, H.M., Nagel, S.R. and Behringer, R.P. (1996) Granular solids, liquids, and gases. *Rev. Mod. Phys.*, **68**, 1259–1273.
- 上村 洸・他 27 名 (1993) 別冊数理科学「シミュレーション」. サイエンス社, 184p.
- 河村雄行・澤口直哉 (1997) ケイ酸塩融体混合の分子動力学計算. 火山, **42**, S1-S11.
- Kelfoun, K. and Druitt, T.H. (2005) Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, **110**, B12202.
- 菊地文雄 (1999) 有限要素法概説 (新訂版) —理工学における基礎と応用—. サイエンス社, 184p.
- Kilburn, C.R.J. (2004) Fracturing as a quantitative indicator of lava flow dynamics. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **132**, 209–224.
- Kinjo, T., Ohguchi, K., Yasuoka, K. and Matsumoto, M. (1999) Computer simulation of fluid phase change: vapor nucleation and bubble formation dynamics. *Comput. Mater. Sci.*, **14**, 138–141.
- 小林昭一・福井卓雄・北原道弘・西村直志・廣瀬壯一 (2000) 波動解析と境界要素法. 京都大学学術出版会, 338p.
- 国土交通省編 (2004) 平成 16 年版国土交通白書. ぎょうせい, 398p.
- 近藤裕昭・水野建樹・劉 発華・福田 寿 (1999) 火山ガスの拡散シミュレーション. 資源と環境, **8**, 123–138.
- 小屋口剛博 (2001) 火山災害とシミュレーション. 計算工学, **6**, 320–323.
- 小山真人・坂本珠紀 (2004) 富士山ハザードマップに対する地元自治体防災担当者の意識. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 15 年度研究成果報告書, 372–398.
- Kuritani, T. (2004) Magmatic differentiation examined with a numerical model considering multicomponent thermodynamics and momentum, energy and species transport. *Lithos*, **74**, 117–130.
- Laigle, D. and Coussot, P. (1997) Numerical modeling of mudflows. *J. Hydraul. Eng.*, **123**, 617–623.
- Malin, M.C. and Sheridan, M.F. (1982) Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, **217**, 637–640.
- Manga, M. and Ventura, G. (2005) Kinematics and dynamics of lava flows. Special Paper **396**, Geological Society of America, Boulder, 218p.
- Mastin, L.G. (2001) A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions. *USGS Open-File Report* 2001–45.
- Mériaux, C. and Lister, J.R. (2002) Calculation of dike trajectories from volcanic centers. *J. Geophys. Res.*, **107B** 4, doi: 10.1029/2001JB000436.
- Minakami, T. (1942) On the distribution of volcanic ejecta. (Part I.) The distribution of volcanic bombs ejected by the recent explosions of Asama. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **20**, 65–92.
- Mitani, N.K., Matuttis, H.-G. and Kadono, T. (2004) Density and size segregation in deposits of pyroclastic

- flow. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L15606, doi: 10.1029/2004GL020117.
- Miyamoto, H. and Sasaki, S. (1998) Numerical simulations of flood basalt lava flows: roles of parameters on lava flow morphologies. *J. Geophys. Res.*, **103B11**, 27489–27502.
- 宮本邦明・山下伸太郎 (2000) 土石流. 7. 土石流の数値シミュレーション. 土と基礎, **48** (10), 47–52.
- 三好俊郎・白鳥正樹・座古 勝・坂田信二 (1976) 有限要素法一構造要素の変形・破壊挙動の解析一. 実教出版, 247p.
- 文部科学省研究開発局・防災科学技術研究所 (2006) 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅢ被災者救助等の災害対応戦略の最適化 (平成 17 年度) 成果報告書, 633p.
- 長澤幹夫 (1991) Smoothed Particle 法による宇宙気体力学. なかれ, **10**, 229–239.
- Nagasawa, M. and Kuwahara, K. (1993) Smoothed particle simulations of the pyroclastic flow. *Int. J. Mod. Phys.*, **B 7**, 1979–1995.
- Narumi, T., Ohno, Y., Okimoto, N., Koishi, T., Suenaga, A., Futatsugi, N., Yanai, R., Himeno, R., Fujikawa, S., Taiji, M. and Ikei, M. (2006) A 55 TFLOPS simulation of amyloid-forming peptides from yeast prion Sup35 with the special-purpose computer system MDGRAPE-3. *Proc. Supercomputing 2006*.
- Neri, A. and Dobran, F. (1994) Influence of eruption parameters on the thermofluid dynamics of collapsing volcanic columns. *J. Geophys. Res.*, **99B6**, 11833–11857.
- Niimura, H. (2000) Lattice-gas model with wetness control for various deformable microstructures. *Comput. Phys. Commun.*, **129**, 145–157.
- Nomanbhoy, N. and Satake, K. (1995) Generation mechanism of tsunamis from the 1883 Krakatau eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 509–512.
- Oberhuber, J.M., Herzog, M., Graf, H.-F. and Schwanke, K. (1998) Volcanic plume simulation on large scales. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **87**, 29–53.
- 岡崎 進 (2000) コンピュータ・シミュレーションの基礎. 化学同人, 240p.
- Pitman, E.B., Nichita, C.C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M. and Bursik, M. (2003) Computing granular avalanches and landslides. *Phys. Fluid*, **15**, 3638–3646.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. (1994) Numerical Recipes in C 日本語版. 丹慶勝市・奥村晴彦・佐藤俊郎・小林 誠訳, 技術評論社, 680p.
- Ryan, M.P. (1988) The mechanics and three-dimensional internal structure of active magmatic systems: Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **93B5**, 4213–4248.
- 笹原 昇 (2004) 山体崩壊による津波シミュレーション—1792 年眉山—. 海上保安庁海洋情報部研究報告, **40**, 63–71.
- 佐竹健治 (2001) 有珠火山の山体崩壊による洞爺湖の津波シミュレーション. 地質調査研究報告, **52**, 241–244.
- Saunders, S.J. (2005) The possible contribution of circumferential fault intrusion to caldera resurgence. *Bull. Volcanol.*, **67**, 57–71.
- 澤田可洋 (1997) 航空路火山灰情報センター業務の発足. 気象, **482**, 10–15.
- Seino, N., Sasaki, H., Sato, J. and Chiba, M. (2004) High-resolution simulation of volcanic sulfur dioxide dispersion over the Miyake Island. *Atmospheric Environment*, **38**, 7073–7081.
- 戦略的基盤ソフトウェア産業応用推進協議会編 (2005) 21 世紀の産業革命コンピュータ・シミュレーション. アドバンスソフト, 159p.
- Spiegelman, M., Kelemen, P.B. and Aharonov, E. (2001) Causes and consequences of flow organization during melt transport: the reaction infiltration instability in compactible media. *J. Geophys. Res.*, **106B2**, 2061–2077.
- 杉本大一郎 (1994) 専用計算機によるシミュレーション—デスクトップ・スーパーコンピュータ入門—. 朝倉書店, 144p.
- Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S. (1994) A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *J. Comput. Phys.*, **114**, 146–159.
- 数値流体力学編集委員会編 (1995a) 燃焼・希薄流・混相流・電磁流体の解析. 東京大学出版会, 184p.
- 数値流体力学編集委員会編 (1995b) 非圧縮性流体解析. 東京大学出版会, 336p.
- 数値流体力学編集委員会編 (1995c) 圧縮性流体解析. 東京大学出版会, 312p.
- 数値流体力学編集委員会編 (1995d) 格子形成法とコンピュータグラフィックス. 東京大学出版会, 200p.
- 数値流体力学編集委員会編 (1995e) 移動境界流れ解析. 東京大学出版会, 200p.
- 鈴木雄治郎・小屋口剛博 (2006) 火口近傍の噴煙ダイナミクスに関する 3 次元数値シミュレーション. 月刊地球, **322**, 204–209.
- Tait, S., Jaupart, C. and Vergnolle, S. (1989) Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallising magma chamber. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **92**, 107–123.
- 高田尚樹 (2001) 格子ボルツマンモデルに基づく混相流数値シミュレーション. 混相流, **15**, 23–30.
- 高田淑子・後藤章夫・谷口宏充・市原美恵・前野 深 (2005) SPH による火山爆発の数値シミュレーション. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書, 294–295.
- 高木 周 (2003) 混相流の数値計算手法, 応用数理, **13**, 150–162.
- 高木 周・津田伸一・松本洋一郎 (2005) ガス不純物の影響を考慮した気泡核成長の分子動力学解析. 文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」平成 16 年度研究成果報告書, 242–245.
- Takahashi, T. (2001) Mechanics and simulation of snow avalanches, pyroclastic flows and debris flows. In *Particulate Gravity Currents* (McCaffrey, W.D., Kneller, B.C. and Peakall, J. eds), 11–43. Special Publication Number 31 of the Int. Ass. Sediment., Blackwell Science, Oxford.
- 高橋 保・辻本浩史 (1984) 土石流氾濫・堆積の数値シミュレーション. 京大防災研年報, **27B2**, 467–485.
- 高橋 保・辻本浩史・里深好文・竹内竜太 (1997) 火砕

- 流の流動・堆積シミュレーション. 砂防学会誌, **50**, 20-25.
- 宝田晋治・山元孝広・中野 司・村田泰章・風早康平・川辺禎久・阪口圭一・曾屋龍典 (1993) 雲仙岳 1991-92年噴火の火砕流のコンピュータシミュレーション. 地質調査所月報, **44**, 25-54.
- 高島武雄・飯田嘉宏 (1998) 蒸気爆発の科学—原子力安全から火山噴火まで—. 裳華房, 188p.
- Tanaka, H.L. (1994) Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska. Proc. First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety. *USGS Bull.*, **2047**, 283-291.
- Tanaka, H.L. and Yamamoto, K. (2002) Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model. *Earth Planets Space*, **54**, 743-752.
- 谷口宏充・斎藤 務・木下利博・高山和喜・藤井直之 (1994) 火山性爆風の数值シミュレーション—雲仙普賢岳 1991年6月8日の爆発—. 火山, **39**, 257-266.
- The Earth Simulator Center (2005) Annual report of the Earth Simulator Center April 2004-March 2005. The Earth Simulator Center, 352p.
- Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A. and Mastin, C.W. (1994) 数值格子生成の基礎と応用. 小国 力・河村哲也訳, 丸善, 352p.
- Tinti, S., Bortolucci, E. and Armigliato, A. (1999) Numerical simulation of the landslide-induced tsunamis of 1988 on Vulcano Island, Italy. *Bull. Volcanol.*, **61**, 121-137.
- Todesco, M., Neri, A., Ongaro, T.E., Papale, P., Macedonio, G., Santacroce, R. and Longo, A. (2002) Pyroclastic flow hazard assessment at Vesuvius (Italy) by using numerical modeling. I. Large-scale dynamics. *Bull. Volcanol.*, **64**, 155-177.
- 常松展充・永井智広・村山利幸・足立アホロ (2006) 大規模海風の逆流の影響を受けた浅間山から首都圏への火山灰輸送. 日本気象学会 2006年度春季大会講演予稿集, 211.
- 鳶原道久・高田尚樹・片岡 武 (1999) 格子気体法・格子ボルツマン法—新しい数値流体力学的手法. コロナ社, 174p.
- 内田孝紀・大屋裕二 (2005) 種々の安定成層場における三宅島火山ガス挙動の数値シミュレーション. 第19回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, 18-19
- 内田吉彦・伯野元彦 (1990) 粒状体シミュレーションによる岩屑流・土石流の解析. 震研彙報, **65**, 321-411.
- 上田 顯 (2003) 分子シミュレーション—古典系から量子系手法まで—. 裳華房, 446p.
- Valentine, G.A. and Wohletz, K.H. (1989) Numerical models of Plinian eruption columns and pyroclastic flows. *J. Geophys. Res.*, **94B2**, 1867-1887.
- Wadge, G., Jackson, P., Bower, S.M., Woods, A.W. and Calder, E. (1998) Computer simulations of pyroclastic flows from dome collapse. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3677-3680.
- White, J.D.L., Smellie, J.L. and Clague, D.A. (2003) Explosive subaqueous volcanism. *Geophysical Monograph*, **140**, American Geophysical Union, Washington DC, 379 p.
- Wohletz, K.H., McGetchin, T.R., Sandford, M.T. and Jones, E.M. (1984) Hydrodynamic aspects of caldera-forming eruptions: numerical models. *J. Geophys. Res.*, **89B10**, 8269-8285.
- 矢部 孝・井門俊治 (1988) FORTRAN & C 言語によるシミュレーション技法入門. 日刊工業新聞社, 277p.
- 矢部 孝・観山正見・椛島成治 (1992) パソコンによるシミュレーション物理. 朝倉書店, 192p.
- 矢川元基 (2001) パソコンで見る流れの科学. 講談社, 360p.
- 矢川元基・奥田洋司・中林 靖 (1998) 有限要素法流れの解析. 朝倉書店, 128p.
- 山下伸太郎・宮本邦明・大原正則・緒統英章・水山高久 (1990) 溶岩流の数値シミュレーション. 水工学論文集, **34**, 391-396.
- Young, P. and Wadge, G. (1990) FLOWFRONT: simulation of a lava flow. *Computer & Geosciences*, **16**, 1171-1191.