

ユーザーインターフェイスを改良した溶岩流シミュレーション
システムとその防災上の意義

安田 敦*・金子隆之*・新堀賢志**・藤井敏嗣**

LavafLOW Simulation with Improved User Interface and Its Significance in Disaster Prevention

Atsushi YASUDA*, Takayuki KANEKO*, Kenji NIUHORI** and Toshitsugu FUJII**

1. はじめに

火山噴火災害を軽減するための防災啓発ツールとして、溶岩流の簡易シミュレーションが実行出来る web サイトを立ち上げたので紹介する。小学校から大学までの火山教育の現場や、自治体防災関係者、火山近傍の住民の利用を想定している。URL は <http://VRSSERV.eri.u-tokyo.ac.jp/REALVOLC/lava/> で、簡単なユーザー登録を行うだけで誰でも利用することができる。公開したシステムは、シミュレーションの経験がまったく無い者でも容易に溶岩流の流下計算を実行し結果を確認することができるように、国内の主要な火山については DEM (Digital Elevation Model (数値標高モデル)) を予め用意し、計算パラメタの入力はブラウザ画面から行うとともに、計算結果は Google マップ上に投影するという仕様になっている。加えて、計算パラメタの入力から結果表示までに要する時間が短いため、リアルタイムハザードマップとしての機能も備えている。

2. システム開発の背景

火山噴火に伴う様々な現象の中で、溶岩流は比較的進行速度が遅いため現象の進行中に被害軽減対策がとれるという特徴がある。実際、溶岩流の流下にあわせて住民の避難を実施したり、堰堤の構築や溶岩への放水によって溶岩流の流動方向を変えたり停止させたりする試みが幾つかの火山噴火で行われている (e.g., Barberi *et al.*,

2003; Chirico *et al.*, 2009)。この時に重要となるのが、溶岩流の流下経路や到達時刻を予測し速やかに関係者に伝達すること、自治体関係者や住民自身が溶岩流噴火についてある程度の基礎知識を持ち、入手にした情報をきちんと理解して行動できることである。これを実現するために、活動的な幾つかの火山についてはハザードマップが整備されている (e.g., 富士山ハザードマップ検討委員会, 2004)。

これまで様々な溶岩流シミュレーションプログラムが発表されて、学術的研究だけではなく防災にも役立てられてきた (e.g., Ishihara *et al.*, 1990; Hidaka *et al.*, 2005; Favalli *et al.*, 2006)。具体的には、対象とする火山の代表的な噴火規模と噴火位置について幾つものシミュレーションを行い、被害地域の範囲や溶岩流の到達時間を計算し、それらの結果をデータベース化するという方法で危険地域を地図上に表現したハザードマップの作成である。しかしながら、火口位置や噴出率が少し変化するだけでシミュレーションの結果から推定される被害区域や到達時間が大きく変化する場合があります。加えて、噴出温度、結晶量、化学組成が噴火ごとに値が異なる可能性があり、これらの要素は溶岩の流動特性に大きく影響するため、十分に機能するハザードマップを作成するためには膨大な計算が必要であった (富士山ハザードマップ検討委員会, 2004)。さらに、ハザードマップは一度作成すれば良いというものではなく、砂防ダムや道路といった

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

** 〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22-505
特定非営利活動法人 環境防災総合政策研究機構 環境・防災研究所

Research Institute for Disaster Mitigation and Environmental Studies, Crisis & Environment Management Policy Institute, 1-22-505 Wakaba, Shinjuku-ku Tokyo 160-0011, Japan

Corresponding author: Atsushi Yasuda
e-mail: yasuda@eri.u-tokyo.ac.jp

大型の構造物が新たに構築された場合、市街地の変化で居住地域が変化した場合、あるいは地形が変化した場合などには再び作成しなおす必要が生じる。このため、限られた予算と時間の中で作成される多くのハザードマップの情報の有効性には限界があることをふまえ、これを補うための対策を考える必要があった。

我々はこの問題への対応として、(1) 簡易シミュレーションを用いて自治体防災関係者や住民の溶岩流噴火に対する啓発を行うこと、(2) リアルタイムでハザードマップを作成すること、が有効であろうと考え、それらを実現するためのシステム作成を目指した。(1) はシミュレーションを自ら試行することによって、既存のハザードマップに表示された情報についての理解が深まるとともに、ハザードマップが示しきれなかった事態の発生にも対処できるよう溶岩流噴火への基礎知識を高めることを狙っており、(2) は火山噴火の発生後の計算ならば火口位置や噴出率などは実測値が使えるため、噴火発生前のハザードマップ作成時の不確定要素を大幅に減らしてより精度の高い予想が可能となるためである。

非専門家でも容易に使える溶岩流シミュレーションであるためには、特別なハードウェアを必要としないだけでなく、パラメタの入力から結果の表示までを総合的に支援したシステムである必要がある。Web の利用が一般的である現在の社会環境においては、使用者がクライアントとして web サーバーにアクセスしてパラメタの入力とシミュレーションの実行を行い、結果も web ページの Google マップ上に投影されるというシステムが適当であろう。クライアント側では結果を可視化するための特別なアプリケーションを必要とせず、web ブラウザだけがあれば良い。火山災害の数値シミュレーションを総合的に支援する同種のものとしては、Felpeto *et al.* (2007) による GIS ソフトウェアをフレームワークとして動作するシステムが発表されているが、Arc View という専門性が高くやや高価な GIS ソフトウェアの使用を前提としており、専門家以外が使うにはややハードルが高かった。非専門家を対象として web 上でパラメタを設定して計算できるシステムとしては、火砕流についてはすでに公開されているが（例えば、東京大学地震研究所 <http://vrsserv.eri.u-tokyo.ac.jp/REALVOLC/enecon/index.html>；産業技術総合研究所 <http://volcano.geogrid.org/applications/EnergyCone/>）、溶岩流についてのこうしたものは存在していなかった。

近年のパーソナルコンピューター (PC) の性能の向上や Google マップを初めとする情報可視化手段の広がりによって、高価な大型計算機を使わなくても、シミュレーションを実行しその結果を可視化できる環境ができてつ

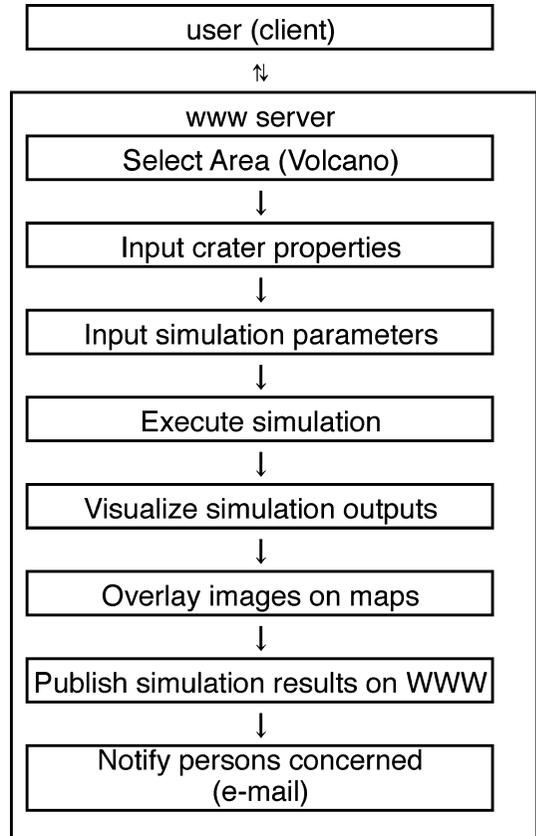


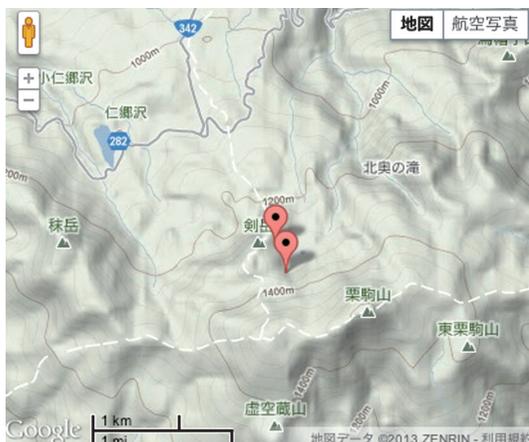
Fig. 1. Flow chart of the system.

ある。そこで、計算パラメタの入力や DEM の設定等の計算の前処理部分やシミュレーションの結果を可視化する部分を整備することによって、簡便かつ、安価なシミュレーションシステムの構築を試みることにした。

3. システムの仕様とユーザーインターフェイス

多くの人々の利用を念頭においた場合、簡易シミュレーションとはいえ 1 台の web サーバーでは実行出来る計算量には限りがある。そこで、興味のある者がわずかの手間と予算で自分自身の計算環境を立ち上げて様々なパラメタを変化させた多量の計算を実行することもできるよう、システムの移植性について特に留意したシステム開発を行った。具体的には、オープンソースの溶岩流シミュレーションプログラム (Ishihara *et al.*, 1990) を用いて計算し、広く流通しているフリーウェアのソフトウェアを用いて計算結果を図化して web 表示をする。このため、Unix, Windows, Mac のいずれにもシステム構築が可能である。

本システムが行う内容を Fig.1 にまとめた。Web サー



緯度, 経度	<input type="text" value="38.966749, 140.77503"/>	地図上でクリック
噴出量	<input type="text" value="100"/> m ³ /s	<input type="button" value="送信"/>

Fig. 2. Example of graphical user interface (GUI) of the system. Input screen for crater positions.

パー (Apache ver. 2.2) を通じてクライアントから入力された情報 (計算パラメータや出力のリクエスト) は perl 言語 (ver. 5) で記述した CGI (common gateway interface) スクリプトを経由して計算や図化のためのアプリケーション (Imagemagick ver. 6 と Gnuplot ver. 4) に引き渡される。クライアントは背後にあるアプリケーション群を意識せずに計算結果を web ブラウザで確認出来る。マウスクリックによる火口位置選択やパラメータのデフォルト値を準備するなど、計算に必要な情報の入力もできるだけ簡単に行えるよう工夫してある。

国内の主要な 55 活火山について山体の大部分をカバーする範囲の DEM (10m メッシュ) を準備した。シミュレーションが可能な領域は、Google マップ上に矩形で示され、火口位置の入力は、Google マップ上で対象点をクリックするか、あるいは、緯度、経度の値をテキストボックス内に直接入力することによって行う。火口は複数 (最大 100 カ所) 設定可能で、先に入力した火口位置を地図上で確認しながら次の火口位置の入力ができる (Fig. 2)。また、複数のセルにまたがって直線状に火口が配列する場合などは、一括して火口情報の入力が行える。位置情報の他に、噴出率、噴出開始時間、噴出終了時間、溶岩の温度の入力が火口情報として必要である。同じ火口位置で噴出開始時間、噴出終了時間を変えた火口を設定することによって、噴出率の時間変化にも対応可能である。

シミュレーションプログラムとして採用した Ishihara

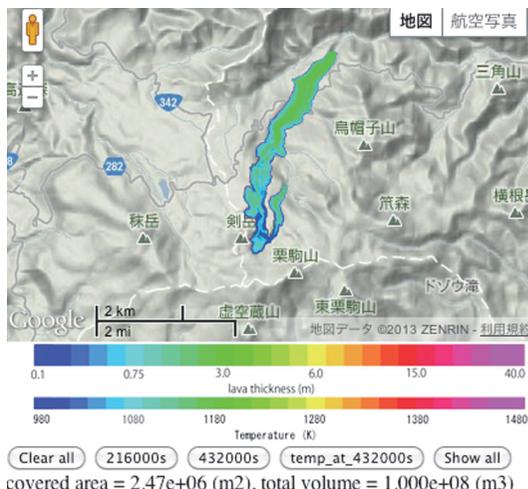


Fig. 3. Example of simulation results. Lava thickness and covered areas are projected on Google Maps.

et al. (1990) のプログラムは、溶岩流を二次元のペンガム流体として扱い、ナビエ・ストークスの方程式を差分法で解くことによって溶岩流の流動を計算する。粘性率、降伏応力を温度の関数として与え、系の温度低下は表面からの熱放射を考えている。近年発表されている幾つかの三次元溶岩流シミュレーション (Harris and Rowland, 2001; Hidaka et al., 2005) と比較すると、計算量が圧倒的に少ないので高度な計算機環境ではなくても実行できるという特徴がある。計算量が少ないとはいっても、溶岩の被覆域、到達時間などは、幾つかの火山噴火において実際の噴火データと比較検証されており、実用的な精度を持っていることが確認されている (石原・他 (1984, 1985), Ishihara et al. (1990))。また、これまで多くの火山のハザードマップの作成に利用されているという実績もある (国土庁防災局, 1992)。このプログラムは Fortran 言語で記述されているが、これを PC で実行しやすいように C 言語 (gcc ver. 4.2) に移植するとともに、計算の安定性と実行時の利便性のために幾つかの機能追加を行った。具体的には、(1) 地図への重ね合わせ処理のための位置と時間マーカーの出力、(2) 火口湖形成時の計算安定性のために隣のセルへ移動できる最大流量の制限、(3) DEM の差分ファイルの読み込みである。差分ファイルの読み込み機能によって、DEM とは地形が異なる場合 (噴火直前の地殻変動や人工的構造物) の影響も計算時に考慮できる。

シミュレーションプログラムで必要とするパラメータは、計算時間、時間ステップ、溶岩の密度、比熱、放射冷却の効率、クリンカ形成温度、クリンカ形成時の放射

温度低下量, 粘性の定数項, 粘性の温度依存項, 降伏応力の定数項, 降伏応力の温度依存項である。これらの入力項目に対しては, 入力の簡便化のため火山ごとのデフォルト値をあらかじめ与えることができる設計になっているが, 今のところ個々の火山についての最適値は未整備である。上記の項目に加えて計算終了を通知するための e-mail アドレス入力欄も用意した。

Web ブラウザ上で必要なパラメータの入力を終えてスタートボタンを押せば, シミュレーション計算を行い, 結果の溶岩流の被覆域と最終温度を Google マップ上に重ねて表示した HTML ページが自動的に作成され, 上述の e-mail アドレスに計算結果を示す URL アドレスが通知される。Fig. 3 は実行結果の一例 (抜粋) である。最終結果 (厚さと温度) だけではなく, 途中の溶岩流の厚さについても, Google マップ上に重ねて見ることができる。特定の時間の溶岩流の厚さについてボタン操作で表示 / 非表示の切替が可能なので, 時間とともに被覆域がどのように変化していったのかが一目でわかる。溶岩流の厚さ情報は 26 階調のカラー画像で表現しているが, より詳しい情報を得たい場合のために, 地形および溶岩流断面図を任意の位置で作成できる機能を設けている。

これらの基本的な結果表示機能に加えて, ユーザー側が独自の解析や図化を行う場合を想定し, シミュレーション結果の溶岩流厚さと温度の情報はテキストファイルとして個別にダウンロードできる仕様になっている。

4. 設定時間と計算時間

噴火開始からある時間後 (以後, 「設定時間」と表記) の溶岩流の状態を計算するのに要する時間 (以後, 「計算時間」と表記) は, 使用する PC の性能に大きく依存する。Fig. 4 (a) は 4 つの異なるプラットフォームを用いて同一条件 (火口位置: 開聞岳山頂, 噴出率: 毎秒 200 m^3) で計算を行った場合の, 設定時間と計算時間の関係である。使用する PC の性能 (CPU の占有状態の違いを含む) によって 4 倍程度の実行速度の違いが生じている。注目すべきは, 使用したいずれの PC でも, 計算時間が設定時間よりも大幅に短くなっていることである。設定時間 10 時間の計算が, 20 分から 70 分弱で完了している。

総噴出量が多い場合や, 地形が急峻な場合には, 流下距離が長く被覆面積が大きくなるため, より長い計算時間が必要となる。そこで, 様々な地形勾配をもつ幾つかの火山において, その火山で典型的な組成の溶岩 (玄武岩~デイサイト) に対応する粘性を与えとともに, 噴出率を $100\sim 300\text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で変化させて試行を行い, 設定時間と計算時間の関係を調べた (Fig. 4 (b)). 国内の火山噴火で起りえるほとんどの場合を網羅するような条

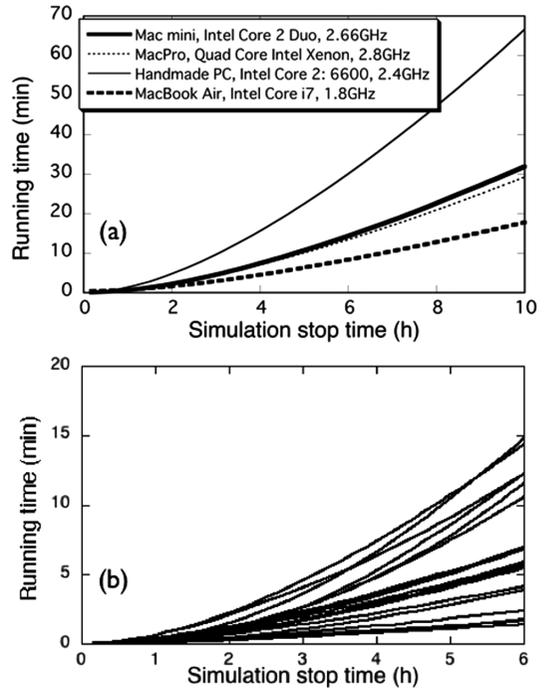


Fig. 4. Time needed to simulate lavaflow at given conditions: (a) comparison of different platform's performance (vent position: summit crater of Kaimondake: effusion rate = $200\text{ m}^3/\text{s}$), (b) difference of run time caused by calculation conditions on platform 1 (see text for detail).

件範囲になっている。シミュレーションの時間ステップは 0.05 秒 (玄武岩質溶岩の場合) と 0.1 秒 (安山岩~デイサイト質溶岩の場合) に固定した。この条件での計算の安定性は確認してある。条件によって巾があるが, 計算時間は設定時間よりも有意に短く, 設定時間 3 時間の現象は 5 分以内, 設定時間 6 時間の現象は 2 分から 15 分で完了した。

もっと大規模な溶岩流の計算に関して言えば, 計算ルーチンの改良か, あるいはより高性能の PC で実行するのが望ましい。浅間山山頂から総量 1.7 億 m^3 ($200\text{ m}^3/\text{s}$ の噴出率で 10 日間) の溶岩流流下を試行した場合には, 計算時間は設定時間よりもはるかに短いものの, ほぼ 1 日半もの時間を要した。

5. リアルタイムハザードマップとしての実用性

リアルタイムハザードマップとして役に立つためには, シミュレーション結果の開示が現象の進行よりも早くなければならない。これは単に計算速度が速いだけでは実現せず, システム全体としての効率が必要になる。

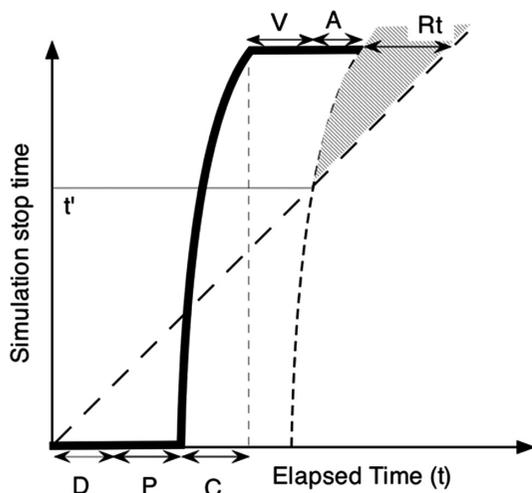


Fig. 5. A schematic concept drawing for the relationship between simulation stop time and elapsed time. “Realtime efficiency (R)” of the system is defined as $R = 1 - (D + P + C + V + A)/t$, where t is elapsed time (real time), and time needed to detect eruption (D), to prepare calculation (P), to calculate (C), to visualize results (V), to send alert messages to clients (A). Shaded area ($R \cdot t$) represents the time to spend for measures. See text for detail.

ここで、リアルタイム効率という概念を導入して整理してみよう。リアルタイム効率 (R) は、 $R = 1 - S/t$ 、と定義される。ただし t はイベント発生からの経過時間、 S はイベント発生後にシミュレーションを行い、その結果が関係者に伝わるのに要する時間である。リアルタイム効率が 1 に近い程、防災的には有効であり、 $R \cdot t$ に相当する時間を防災対策に利用することができる。

S はシミュレーションシステムの総合的な性能で決まり、 S を小さくすることが、リアルタイム型ハザードマップが現実役に役立つかどうかの鍵となる。 S を個別の要素に分解すると、D: 現象の発生を検知するまでにかかる時間、P: シミュレーションの前処理に要する時間、C: シミュレーション計算にかかる時間、V: 結果の可視化に要する時間、A: 結果を関係者への伝達に要する時間、に分けられる。重要なのは、シミュレーション計算の高速化によって計算時間 (C) そのものを短くするだけではなく、総合的に時間を短縮することである。概念図を Fig. 5 に示す。横軸はイベント発生後の経過時間、縦軸はシミュレーションで計算する時間であり、実線に沿ってリアルタイムハザードマップシステムは動作してゆく。D と P の期間は何も計算が行われず、その後シミュレーションを開始して、斜め 45 度の破線部分を越

えた段階で未来を予測する領域に入る。計算終了後には、結果の伝達が完了するまでに V と A の時間を必要とする。Fig. 5 の斜線部分 ($R \cdot t$ に相当) の防災対策時間を得るためには、 t 以上のシミュレーションを行わなければならないが、D, P, V, A に要する時間を短縮することで、 t をより小さな値にすることができる。すなわち、短時間の現象にたいしてもリアルタイムで有効な予測ができることになる。

我々のシステムでは、web サーバーと組み合わせてユーザーインターフェイスを改良することによって、要素 P, V, A について合わせて数分程度と大幅に時間短縮することができた。火口位置やパラメタの入力に必要な時間 (P) は操作者のシステムへの慣れにもよるが通常は 1 分以内、結果の図化と HTML ページの作成 (V) は最大でも 30 秒程度しかかからない。また、e-mail の送受信 (A) は 1 分未満で終わる。また、要素 C は前述のように、3 時間程度の流れなら設定時間の 1/30 以下の 5 分未満で、数日の流れについても設定時間の 1/6 程度の時間で計算が行える。したがって、要素 D を小さくすることさえできれば、本システムを小規模溶岩流噴火のリアルタイムハザードマップに利用できることになる。実際の噴火の場合に、噴火現象を検知し火口位置を特定するに要する時間は、噴火発生時間帯や先行現象の有無によって大きく変化する。このため要素 D は何分以内であると限定することはできないが、仮に、先行現象があって監視カメラが動いているような状況ならば、噴火開始後 15 分から 30 分程度で火口位置を特定することも可能であろう。そうした場合には、本システムは 1 時間から 3 時間程度より先の溶岩流の状態予想に使える。また、実際の溶岩流から観測される流下速度や被覆域の情報を参照して粘性項、噴出率といったパラメタの絞り込みを行いながら、常に数時間先の溶岩流の状態を予測するという使い方もありえる。

6. 防災上の意義

これまで述べてきたように、非専門家が使えて、かつ移植性の高い本システムの特徴が、防災上どのような意義を持つか以下にまとめた。

(1) プレアナリシス型のハザードマップの作成: 2 章でふれたように地方自治体の防災関係者がハザードマップ作成の一助として使用できる。加えて、DEM の修正機能を持つので、堰堤構築や掘削工事の防災・減災効果の評価にも使える。

(2) リアルタイムハザードマップの作成: 限られたオペレーターしか動かせないシステムの場合、噴火に際しての緊急時にそのオペレーターと装置を確保することが

まず必要になる。このため、現象発生からの経過時間が短い場合には、確保に必要な時間のためにリアルタイム効率が正にならない（対策の時間がない）という問題が生じる恐れがある。この点、誰にでも容易に使えるという本システムの特性はリアルタイム効率を高める上で非常に有効であろう。また、結果を web 表示にして汎用性が高い地図に投影したことによって、対策を講ずるのに必要な情報を関係者間で短時間に容易に共有できる。避難経路の確保や減災対策を効率良く実施する上で、情報が速やかに共有されるメリットは大きいものと思われる。

(3) 啓発ツールとしての利用：火山噴火は発生頻度が低い場合、たとえ自治体の防災関係者といえども、溶岩流の挙動についての理解は十分ではない場合も多いであろう。プレアナリシス型のハザードマップの作成自体は外部の有識者にまかせるにせよ、多少でもシミュレーションを自らの手で実行して溶岩流の速度や到達範囲について評価する作業を行うことは、噴火の疑似体験として防災計画の策定のなかで生かせるのではなかろうか。また、簡単にシステムを構築できて様々なパラメータを変化させた計算が行えることから、小学校～大学といった教育機関において身近にある火山の溶岩噴火について学習する材料にも使える。粘性や噴出率の変化が溶岩流の挙動にどのように影響するか実験してみることは、火山や溶岩の特性を理解するためにも有意義であろう。加えて、防災マップとして最終的にまとめられる前の生の計算結果を目にすることは、防災マップへの理解を深めることにもつながる。

(4) 研究ツールとしての利用：どのようなシミュレーションプログラムでも、適切なパラメータを入力しなければ実際の現象を再現することは困難である。溶岩流の場合、溶岩の組成や噴火の温度、地形の違いなど、溶岩流の挙動を左右する幾つもの要因がある。このため、有効なシミュレーションを行うためのパラメータセットは火山ごとあるいは噴火ごとに異なっている可能性がある。できるだけ適切なパラメータセットを推定するには、過去の噴火による溶岩流の地形解析や噴出物分析から得られる情報が欠かせない。容易にシミュレーションが実行できる環境があれば、これらの情報を保有している火山の専門家が、パラメータセットの推定作業に参加する機会が高まる。また、シミュレーション結果と現実の溶岩流との比較事例が増えれば、シミュレーションプログラムの改良にもつながることもできよう。

7. おわりに

本稿で紹介したシステムのために著者が作成した CGI

スクリプト (perl で記述) と溶岩流シミュレーションの C コードは、二次配付を行わないという条件のもとに提供可能である。著者宛 (yasuda@eri.u-tokyo.ac.jp) にメールで直接送付希望を告げてもらえれば、システム構築時の簡単な注意事項を添えてお送りする。

個別の火山における最適なシミュレーションパラメータの吟味と、リアルタイム効率の向上のためのカメラ映像 (地上 & 衛星) との連携は今後の課題としたい。

謝 辞

DEM の作成では栗原美貴さんに手伝っていただいた。数値標高地図は、国土地理院基盤地図情報サービスを利用した。本研究の一部に平成 24 年度科研費基盤 A (23241055) を使用した。また、査読を行った吉本充宏・渡辺 了両編集委員からのご指摘・ご指示は本稿を改善するに大変有意義でした。以上、記して感謝いたします。

引用文献

- Barberi, F., Brondi, F., Carapezza, M.L., Cavarra, L. and Murgia, C. (2003) Earthen barriers to control lava flows in the 2001 eruption of Mt. Etna, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **123**, 231-243.
- Chirico, G.D., Favalli, M., Papale, P., Boschi, E., Pareschi M. T. and Mamou-Mani, A. (2009) Lava flow hazard at Nyiragongo Volcano, DRC 2. Hazard reduction in urban areas, *Bull. Volcanol.*, **71**, 375-387.
- Favalli, M., Chirico, G.D., Papale, P., Pareschi, M.T., Coltelli, M., Lucaya, N. and Boschi, E. (2006) Computer simulations of lava flow paths in the town of Goma, Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo, *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2004JB003527.
- Felpeto, A., Martí, J. and Ortiz, R. (2007) Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **166**, 106-116.
- 富士山ハザードマップ検討委員会 (2004) 富士山ハザードマップ検討委員会報告書, 145p., <http://www.bousai.go.jp/fujisan-kyougikai/report/index.html>.
- Harris, A. J. L. and Rowland, S. K. (2001) FLOWGO: A kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel, *Bull. Volcanol.*, **63**, 20-44.
- 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), doi: 10.1029/2004GC000869.
- 石原和弘・井口正人・加茂幸介 (1984) 玄武岩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.
- 石原和弘・井口正人・加茂幸介 (1985) 桜島火山の溶岩流 (II) — 大正溶岩流のシミュレーション —, *京大防災研年報*, **28B-1**, 1-11.
- Ishihara, K., Iguchi, M. and Kamo K. (1990) Numerical

simulation of lava flows on some volcanoes in Japan, in *Lava Flows and Domes* (Fink, J. H. ed), 174-207, IAVCEI Proceeding in Volcanology 2, Springer, New York.

国土庁防災局 (1992) 火山噴火災害危険区域予測図作成指針, 154p+54p.