

溶岩流の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション

小田 泰行 藤本 忠博⁺ 村岡 一信⁺⁺ 千葉 則茂⁺

⁺岩手大学工学部 ⁺⁺東北工業大学

Particle-based Visual Simulation of Lava Flows

Yasuyuki Oda, Tadahiro Fujimoto⁺, Kazunobu Muraoka⁺⁺ and Norishige Chiba⁺

⁺Iwate University, Faculty of Engineering, ⁺⁺Tohoku Institute of Technology

アブストラクト

本論文では、粒子ベースの溶岩流のビジュアルシミュレーション法を提案する。本手法では、粘性流体と熱移動のシミュレーションを基本として、溶岩流の特徴である、流れが扇状に広がる、温度によって粘性率が変化し冷却によって固化する、温度によって色が変化し溶岩流表面にクラストと呼ばれる黒く固化した部分が生じる、クラストが崩壊し明るい溶岩流が流出する、などの現象の表現を可能としている。

Abstract

In this paper, we present a particle-based method for visually simulating lava flows. Employing our developed particle-based simulation models of viscous fluid dynamics and heat transfer, this method realizes the visual features of lava flows: lava flows broaden like a fan form; the viscosity of lava changes according to its temperature; cool downed lava gets hard (hard lava is called crust); the color of lava changes according to its temperature; crust is dark; lava of high temperature run out by breaking crust; etc.

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス（CG）技術は、景観シミュレーション、映画、アニメーション、マルチメディアコンテンツ、サイエントフィック・ビジュアライゼーションおよびバーチャルリアリティ等、幅広い分野で用いられている。中でも映像コンテンツの制作においてはCGによる自然物・現象の表現は必要不可欠なものとなりつつあり、その技術開発がますます重要なテーマとなっている。これまで、自然物・現象のビジュアルシミュレーションに関する表現法の1つとして、粒子群を用いた運動シミュレーションにより、動物の群や粉体などの離散的な現象から、水流や炎・煙などの流体

現象を表現する方法が開発されてきている。

本論文では、流体现象として火山の噴火に見られる溶岩流を取り上げ、そのビジュアルシミュレーション法として粒子ベースのシミュレーション手法を提案する。これまで、自然物・現象のビジュアルシミュレーションに関する研究は盛んに行われてきているが、溶岩流に関するものは少ない。以下では、溶岩流の特徴[4-7]と、これまでの研究例[1,2]と本論文で提案する手法についてまとめる。

溶岩流は、火口から溶岩が粘性流体として流出する現象であり、重力に従い地形の低い方へ流れるという基本的な性質がある。さらに、溶岩流を特徴づける性質として、粘性率の変化が

ある。溶岩の粘性率は、その成分によって異なるが、温度によっても変化する。すなわち、温度が高いと粘性率は減少し、低いと増大する。また、冷えると固まるという性質をもつ。溶岩流は、溶岩の成分の違いや冷却の過程の違いにより、様々な地形を形成する。また、溶岩流の視覚的な特徴としては、低い方へ流れて行く他、平らな地形では扇状に広がるという性質がある。また、温度による色や明るさの変化があり、溶岩流の表面には、高温で明るい部分と冷えて黒く見える部分が混在して見られる。黒く固まった部分（クラスト）が崩壊し、内部から明るい溶岩流が現れることもある。また、溶岩流先端部分では、柔らかいクラストが押し寄せて出きる波打った皺状の表面形状が観察される。

これらの特徴をまとめると以下のようである。

- (1)粘性流体であり地形の低い方へ流れ、平らなところでは扇状に広がる。
- (2)粘性率は溶岩の成分によって異なる他、温度によっても変化する。
- (3)溶岩流は冷却により固まり、新たな地形を形成する。
- (4)温度に依存して色と明るさが増減する。
- (5)溶岩流の表面には、高温で明るい部分と冷えて黒く見える部分（クラスト）が混在して見られる。
- (6)クラストが崩壊し、明るい溶岩流が表面に現れたり、流れ出したりする。
- (7)柔らかいクラストが作る、波打った皺状の表面形状が溶岩流先端に見られる。

これまでの溶岩流の研究例としては、Storaら[1]のものを除いて見あたらない。彼らの手法の特徴は以下のようである。

- (a)粒子ベースである。
- (b)粘性流体として、圧力、粘性力、外力（重力）を考慮している。
- (c)温度伝達を考慮し、温度と粘性率の関係を

考慮している。

- (d)レンダリングにおいては、表面の明るいところと暗いところを表現するためのテクスチャをマッピングしている。

この手法の効果を論文と Web で公開されているCG画像とムービー[2]から判断すると、上記の溶岩流の特徴のうち(1)は表現可能であることが示されているが、(2)の温度による粘性率の変化や、その他の特徴については確認できない。このモデルでは、(3)(6)については考慮されていない。また、(4)と(5)については、一様なテクスチャをマッピングしているため、温度を考慮した効果が出ていないと思われる。

本論文で提案する筆者らの手法では、モデルの特徴として、実現方法は以下で述べるようにStoraらのものとは異なるが、(a)(b)(c)の特徴を有し、さらに以下の特徴をもつ。

- (e)冷却による固化を考慮している。
- (f)レンダリングには個々の粒子の温度に依存した色と明るさを使用している。

そのため、実験例で示すように、溶岩流の特徴である(3)(4)(5)(6)についても、十分とは言えないが表現可能であるという結果が得られている。しかしながら、(7)については今後の検討課題である。すなわち、本論文で提案するモデルがその表現能力を持つか否かについては、粒子数の問題などさらに検討を進める必要がある。なお、本論文で提案する手法は、溶岩流の定性的な性質の表現を実現するためのものであり、溶岩流の厳密な物理的性質の解析やシミュレーションを行うためのものではないことを断っておく。

2. 粒子ベースの溶岩流モデル

本論文で提案するモデルでは、溶岩流の流れを粒子群の運動によって定義する。流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式で考慮

されている外力，圧力および粘性力，また体積保存の性質は，本論文における粒子ベースシミュレーション法では以下のように近似的に実現している．

まず，粒子は式(1)のような運動方程式に従って運動するものとする．

$$F = ma, \quad (1)$$

F : 粒子に働く力,
 m : 質量,
 a : 加速度.

ここで粒子に働く力 F は，以下の式(2)のように表されるとする．

$$F = f_d + f_v + f_o + mg, \quad (2)$$

f_d : 圧力と体積保存を実現する力,
 f_v : 粘性力 (温度に依存する),
 f_o : 地面や障害物から受ける力 (抗力, 摩擦力, 粘着力),
 mg : 重力 (g は重力加速度).

この外力 (f_o , mg) によって，溶岩が重力に従って地形表面を低い方に流れるという基本的な性質が実現できる．また，ほぼ一定の体積を維持した粘性流体の流れは粒子間の相互作用力 (f_d , f_v) によって実現される．この粒子間の相互作用力は粒子間の距離がある一定の距離 R よりも小さいときに働くものとし，粘性力については温度に依存するモデルとする．

本手法では，以上のような力のもとで運動する粒子の運動シミュレーションを行うと同時に，粒子の温度変化を熱移動シミュレーションによって求め，溶岩流のビジュアルシミュレーションを行う．

2.1 圧力と体積保存を実現する力

ナビエ・ストークス方程式における圧力項と，体積保存の性質は，粒子間距離に応じて発生する斥力と引力により近似する．

粒子間の距離に応じた相互作用力として，式

(3)で表されるような，粒子間の距離が，ある一定値 c のときには安定し，小さいときには斥力が働き，大きいときには引力が働く，というような力を定義する (図1参照)．また，距離が R より離れている粒子間には力は働かないものとする．

$$f_d = \begin{cases} k_1(c^2 - r^2) & (0 < r < c), \\ 0 & (r = c), \\ -k_2(r - c)(R - r) \left(\frac{R - r}{R - c} \right)^4 & (c < r < R), \end{cases} \quad (3)$$

r : 粒子間の距離,

k_1, k_2 : ばね定数 ($k_1, k_2 > 0$),

c, R : 任意定数 ($R > c > 0$).

式(3)におけるばね定数 k_2 は，粒子間の引力の強さ (溶岩の固化の程度) に関係するため，粒子の温度に依存するものとし，温度が低いところで粒子どうしの結合を強く，温度が高いところでは弱くなるように，式(4)で定義する．

$$k_2 = b_d \cdot \exp(-a_d T_{ij}), \quad (4)$$

T_{ij} : 粒子 i, j の温度の平方平均,

a_d, b_d : 任意定数 ($a_d, b_d > 0$).

式(4)における T_{ij} は，温度の異なる粒子間の引力の強さが，温度の高い粒子 (結合力の弱い粒子) の影響をより受けるように，平方平均で定めている．

このような相互作用力を定義することにより，隣接する粒子間の距離がほぼ一定に保たれ，したがって溶岩の体積が表現される．

2.2 粘性力

ナビエ・ストークス方程式における粘性項は，以下に示すような離散モデルにより実現する ([3]のモデルの拡張)．

すなわち，粒子 i に働く粘性力 f_v は，周囲の

粒子 j により決定され、式(5)で表される。

$$f_v = \sum_{j \neq i} (-k_v(v_i - v_j)w_{ij}), \quad (5)$$

k_v : 粘性係数 ($k_v > 0$),
 v_i, v_j : 粒子 i と j の速度,
 w_{ij} : 重み付け関数.

式(5)における粘性係数 k_v は、溶岩の粘性率が温度によって変化するという性質を実現するために、式(6)で表されるような、粒子の温度に依存するものとして定義する。また、溶岩の粘性は低温で急激に変化し、高温では変化が少なくなるといった性質があるので、指数関数を用いることで、その変化を表現している。

$$k_v = b_v \cdot \exp(-a_v T_{ij}), \quad (6)$$

T_{ij} : 粒子 i, j の温度の平方平均,
 a_v, b_v : 任意定数 ($a_v, b_v > 0$).

式(6)における T_{ij} は、式(4)と同様に、温度の異なる粒子間の粘性力の強さが、温度の高い粒子の影響をより受けるように、平方平均で定めている。

式(5)における重み付け関数 w_{ij} は、粒子 i, j 間の距離による影響力の違いを考慮するためのものであり、式(7)によって定義する。

$$w_{ij} = b_w \cdot \exp(-a_w r_{ij}), \quad (7)$$

r_{ij} : 粒子 i, j 間の距離,
 a_w, b_w : 任意定数 ($a_w, b_w > 0$).

2.3 粒子の温度変化

本モデルにおける熱の移動は、

- ・隣接する粒子間,
- ・大気に触れている粒子と大気との間,
- ・接地している粒子と地面との間,

で生じるものとする。

まず、距離が一定の距離 R よりも小さいような2つの粒子 i, j を隣接しているとみなし、粒

子 i, j 間で熱の移動が生じるものとする。このときの粒子 j から粒子 i への熱の移動による温度変化 ΔT_{ij} を、式(8)によって定義する。

$$\Delta T_{ij} = k_h (T_j - T_i) w_{ij}, \quad (8)$$

k_h : 熱伝導率 ($k_h > 0$),
 T_i, T_j : 粒子 i と j の温度,
 w_{ij} : 重み付け関数.

ここで、 w_{ij} は式(7)で示される重み付け関数である。

次に、大気に触れている粒子と大気との間の熱の移動による温度変化 ΔT_a は、大気のを温度を 0 とみなしたときの熱の放出によるものとし、式(9)で定義する。

$$\Delta T_a = -s k_{ha} T, \quad (9)$$

s : 大気に触れている面積の割合,
 k_{ha} : 熱伝導率 ($k_{ha} > 0$),
 T : 粒子の温度.

ここで、粒子が空気に触れているかどうかという判定、および、大気に触れている面積の割合 s の計算は、次のように行う。まず、粒子を中心とする半径 R の近傍領域を考え、この領域をさらに8つの領域に分割する(図2参照)。そして、これらの領域内に他の粒子および地面が存在するかどうかを調べる。このとき、他の粒子および地面のどちらも存在しないような領域が1つ以上ある場合には、その粒子は大気に触れているものとする。大気に触れている面積の割合 s は、他の粒子および地面のどちらも存在しないような領域の個数を n とし、 $s = n/8$ と定義する。

さらに、接地している粒子と地面との間の熱の移動による温度変化 ΔT_g は、地面の温度を 0 とみなしたときの熱の放出量とし、式(10)で定義する。このとき、粒子が地面に触れている面積の割合は、ほぼ一定であるとみなすことにする。

$$\Delta T_g = -k_{hg}T, \quad (10)$$

k_{hg} : 熱伝導率 ($k_{hg} > 0$),

T : 粒子の温度.

以上のような温度変化の総和が粒子の温度変化となる.

2. 4 地面や障害物から受ける力

地面や障害物からの抗力, 摩擦力および粘着力は, 地面や障害物に, 溶岩流のための粒子と類似した相互作用力が働く粒子を配置して表現する. 異なる点は以下のようなものである.

まず, c を除くパラメータは溶岩流のための粒子におけるパラメータとは別に設定する. さらに, 引力の大きさについては, 式(3)の代わりに式(11)で定義する. これは地面と接触した部分の溶岩流は地面からの影響を強く受けるが, そのわずかに内側(溶岩流の内部)では急激に影響が無くなることから, 地面から引力を受ける範囲を狭く限定するためである.

$$f_{d0} = -k_{20}(r-c)(R_0-r) \quad (c < r < R_0 < R). \quad (11)$$

地面からの粘性力や粒子から地面への熱の移動については, 一定の距離 R_g よりも小さい範囲内に, 地面に配置した粒子が1つ以上存在するような粒子を地面に接触している粒子とみなし, 地面からの粘性力, 地面(温度 0)への熱の放出量は, 実際に接触している地面の粒子との距離やその個数に関係なく, 接地面積はほぼ一定とみなして計算を行う. これは, 地面に粒子が均等に密に配置されている理想的な状態を仮定して, 計算を効率的に行うためである.

3. 溶岩流のシミュレーション例

3. 1 レンダリング法

本論文では, 各々の粒子に微小な円盤を割り当て, その法線を常に視点側に向けるようにし,

OpenGLによりレンダリングしている. 粒子は発光体であるとみなし, その温度とそれに対応する微小な円盤の色との関係は以下の式(12)のようである.

$$r = \frac{T}{T_{\max}}, g = \left(\frac{T}{T_{\max}}\right)^7, b = \left(\frac{T}{T_{\max}}\right)^{100}, \quad (12)$$

r, g, b : RGB 値,

T : 粒子の温度,

T_{\max} : 粒子の温度の最大値.

3. 2 ビジュアルシミュレーション例

溶岩流のビジュアルシミュレーション例をムービーから抜粋した静止画像列(時系列)を図4に示す. また, 図3に使用した地形の上面図, 側面図, 正面図および鳥瞰図を示す. この地形の中央に粒子を発生させるための火口を設け, 火口付近から裾野にかけて浅い谷を設定した. また, 地形の表面には仮想的な粒子を隙間なく配置し, 溶岩粒子と地面との接触判定および溶岩粒子が地面から受ける力の計算に用いた. 溶岩流のシミュレーションは, 火口から一定数の粒子を一定ステップ間隔で発生させることによつて行った. なお, 図5に, 図4(j)の上面図, 側面図および正面図を示す.

以下, 溶岩流の特徴が顕著に観察される部分をそれぞれの特徴にしたがって示す.(添付のムービー lava.avi も参照されたい.)

- (1)粘性流体であり地形の低い方へ流れ, 平らなところでは扇状に広がる: 図4(c)-(e)など溶岩流先端部分の速度が低下することにより, 流れが広く広がる.
- (2)粘性率は溶岩の成分によって異なる他, 温度によつても変化する: 図4(a), (d)など温度が高く明るい溶岩は滑らかに流れ, 先端部分は冷えて流れが遅くなっている.
- (3)溶岩流は冷却により固まり, 新たな地形を形成する: 図4(o), (p)において先行する

溶岩流は固化して、新たに噴出した溶岩流は固化した溶岩を避けるように流れている。

- (4)温度に依存して色と明るさが変化する：すべての図で、噴出したばかりの溶岩流は明るく、先行して噴出し冷えた溶岩流は黒くなっている。
- (5)溶岩流の表面には、高温で明るい部分と冷えて黒く見える部分が混在して見られる：すべての図で観察されるが、特に図4(l)-(n)で観察できる。
- (6)クラストが崩壊し、明るい溶岩流が表面に現れたり、流れ出したりする：図4(f), (g), (i)-(k)において観察できる。

以下に、シミュレーションに用いた環境や条件を示す。

- ・使用計算機： HPC-Alpha DP264
(Alpha 21264 500MHz ×2).
- ・地形に配置した粒子数： 200×200 個.
- ・放出粒子数：25 個 (250 ステップ間隔).
- ・全ステップ数： 1,006,000 ステップ.
- ・総シミュレーション時間： 約 330 時間.
- ・溶岩流の粒子に関するパラメタ値：
 $g=0.005$, $m=1.0$, $c=1.0$, $R=1.5$, $k_1=1.0$,
 $a_d=0.0055$, $b_d=4.0$, $a_v=0.0055$, $b_v=0.5$,
 $a_w=0.25$, $b_w=\exp(0.25)$, $k_h=1.0 \times 10^{-6}$,
 $k_{ha}=8.0 \times 10^{-5}$, $T_{max}=1.0 \times 10^{-3}$.
- ・地面に配置した粒子に関するパラメタ値：
 $R=1.15$, $k_1=1.0$, $a_d=0.00275$, $b_d=12.0$,
 $a_v=0.0045$, $b_v=10.0$, $k_h=1.0 \times 10^{-6}$,
 $T=0.0$ (粒子の温度).

図6に、図4の溶岩流と比べ、同じ温度において地面からの引力は弱く働くが、地面への熱の放出量の割合を大きくした例(画像列)を示す(図4の例と異なるパラメタ値: $a_{dg}=0.0055$, $k_{hg}=5.0 \times 10^{-6}$). この例では、冷却が速く起こるため、地面と接している部分からの固化がおきやすく、溶岩流が遠くへ流れずに広く扇状に広

がる様子が観察される。

レンダリングに用いた環境、レンダリング時間およびムービーに使用したフレーム数は、以下のものである。

- ・使用計算機： DOS/V (Intel Pentium III 600MHz.)
- ・レンダリング時間：
 図4(a)：約0.2秒(粒子数:255個),
 図4(p):約1.5秒(粒子数:100,625個),
 (地形に用いたポリゴン数:79,202枚).
- ・ムービーに使用したフレーム数：503枚.

4. おわりに

本論文では、粒子ベースによる溶岩流のビジュアルシミュレーション法を提案した。本手法によるシミュレーション例により、溶岩流先端に見られる柔らかいクラストが作る、波打った皺状の表面形状を除いて、溶岩流の視覚的特徴の基本的なものについては表現可能であることを示した。

今後の課題としては、上記皺状表面の表現能力に関する詳しい検討、シミュレーションの高速化、よりリアルな溶岩の質感表現のためのレンダリング法の開発や、冷却後の溶岩の形状定義法、溶岩流のシミュレーションによる複雑な火山地形の自動生成、および山岳地形の形状変形法の開発などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、通信・放送機構「地域提案型研究制度」に係わる研究開発課題による。

参考文献

- [1]D. Stora, P. O. Agliati, M. P. Cani, F. Neyret and J. D. Gascuel, Animating Lava Flows, Graphics Interface' 99, pp.203-210, 1999
- [2]D. Stora, P. O. Agliati, M. P. Cani, F. Neyret and J. D. Gascuel, Animating Lava Flows, <http://>

//w3imagis.imag.fr/LAVA/index-eng.html

[3]小田 泰行, 村岡 一信, 千葉 則茂, 仮想粘土の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション, 情報処理学会論文誌 Vol. 42, No. 5, pp. 1142

-1150, 2001

[4]日本火山学会編, Q & A火山噴火, 講談社ブルーバックス

[5]守屋以智雄, 火山を読む, 岩波書店, 1992

[6]溶岩流に関する記述のある Web サイト(沢山あるので解説や用語に関する説明のあるところ

の一部を示す.):

(1)群馬大学教育学部 早川由紀夫研究室:

(a)火山, <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/volcanology/content.html> (火山に関する解説)

(b)フィールド火山学, <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/fieldguide/book/index.html> (火山に関する解説)

(2)Japan Speleo Page, 火山・火山洞窟基礎知識, <http://www.cob.jp/jsp/lava-abc.html> (用語解説)

(3)千葉達朗, 火山における災害現象, http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/civil/p2/volcanic_disaster.html (火山の解説)

(4)HotWeb Contents, 駒ヶ岳火山噴火ミニ用語辞典, <http://www.hotweb.or.jp/komagatake/00mt08.html> (用語解説)

(5)駒ヶ岳火山防災会議協議会, 駒ヶ岳火山防災ハンドブック, <http://www.town.nanae.hokkaido.jp/bousai/book/09.htm> (用語解説)

[7]溶岩流に関するビデオ:

(1)地球大紀行, 引き裂かれる大地[2], NHK

(2)地球を学ぶ~大自然博物館~ 火山

Volcano, SPE Visual Works Inc.

(3)National Geographic Video, 火山!, 東和ビデオ

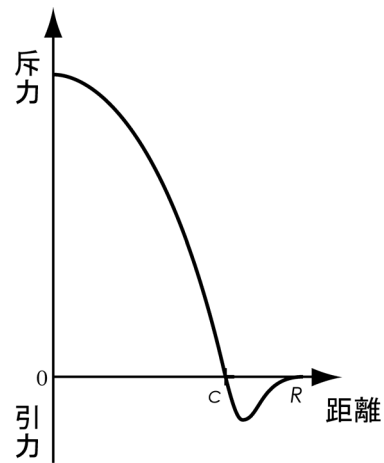


図1 距離に応じた相互作用力

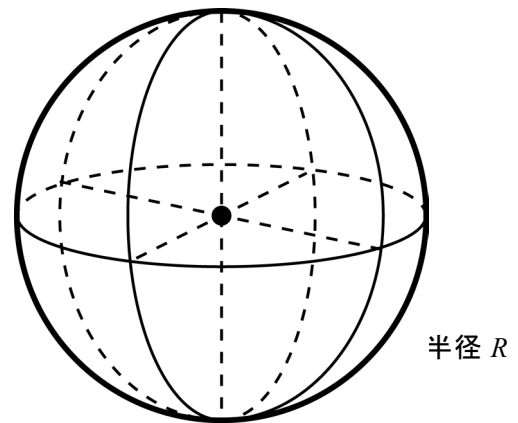


図2 近傍領域の分割

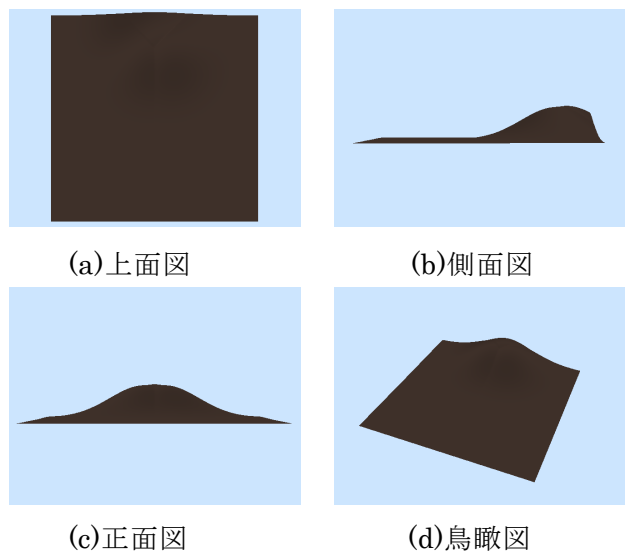


図3 シミュレーションに用いた地形

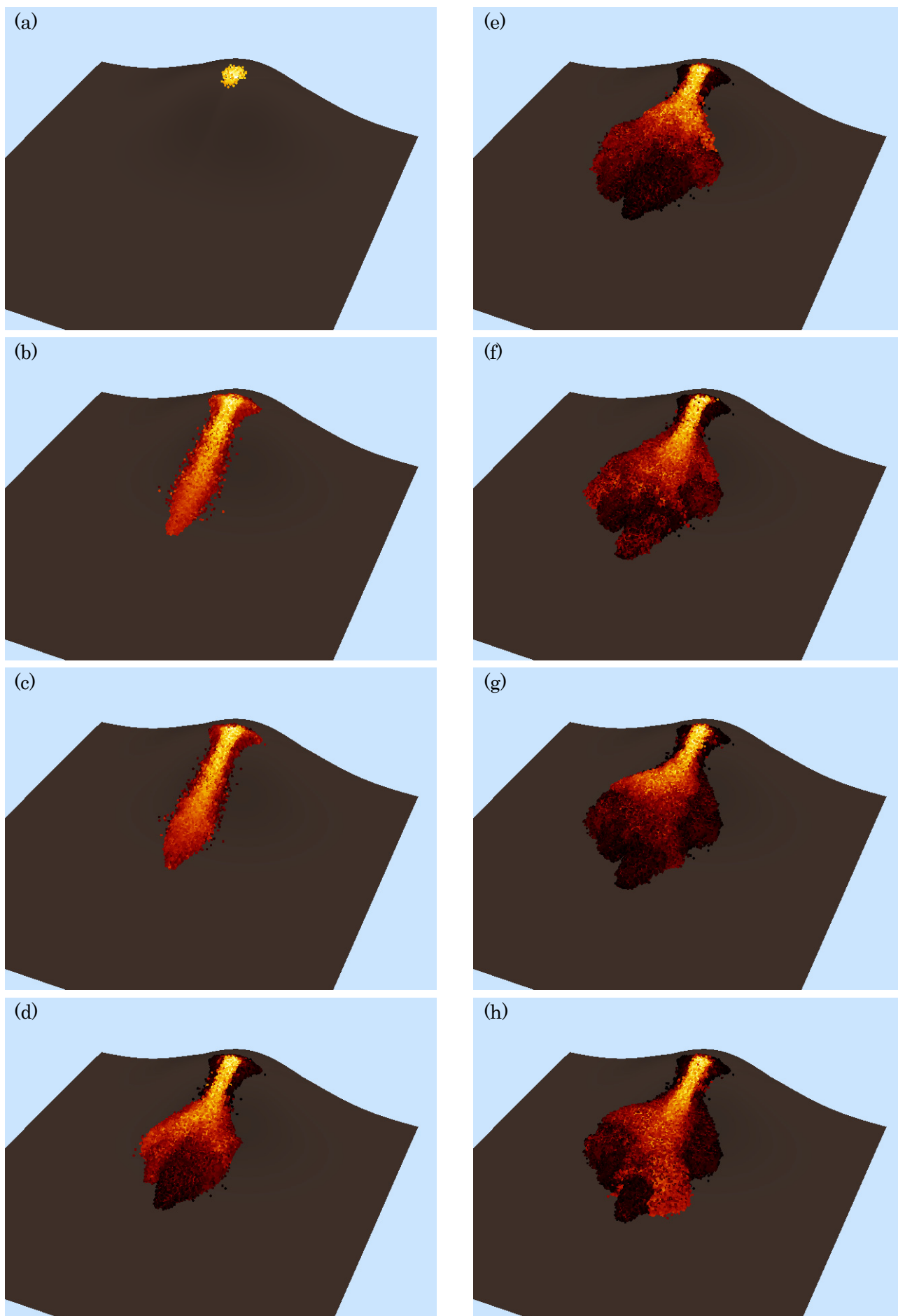


図4 溶岩流のビジュアルシミュレーション例1 (続く)

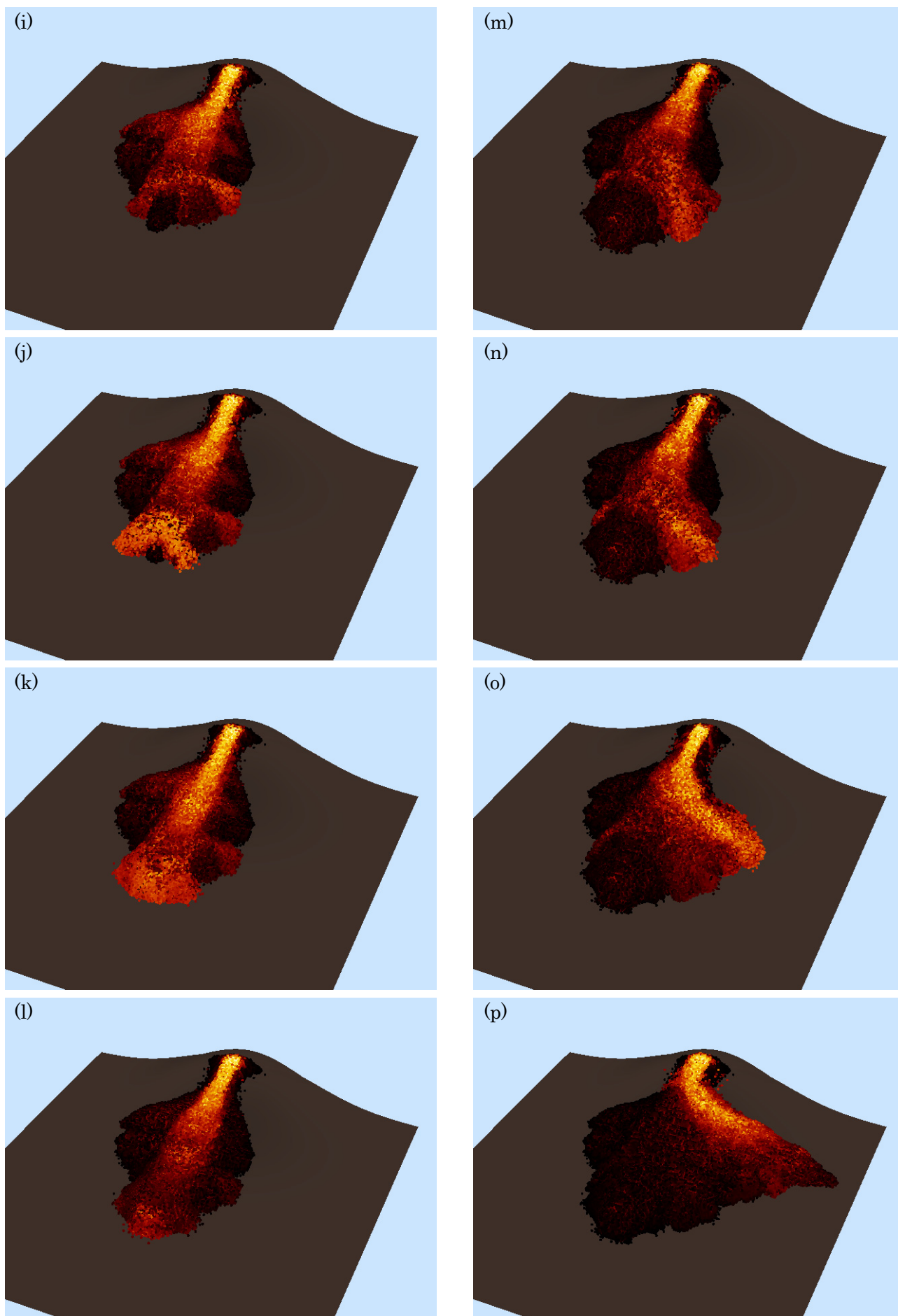
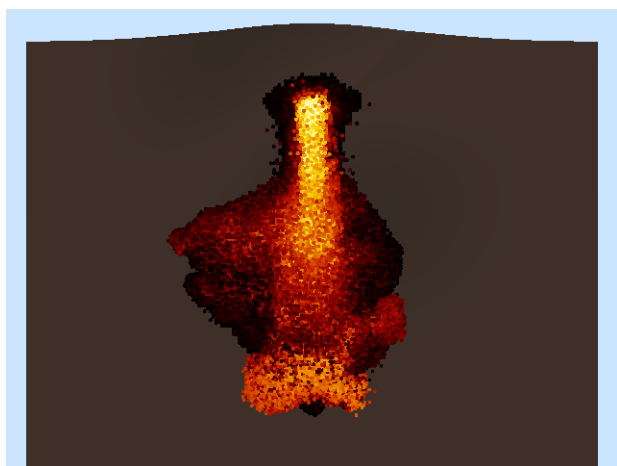


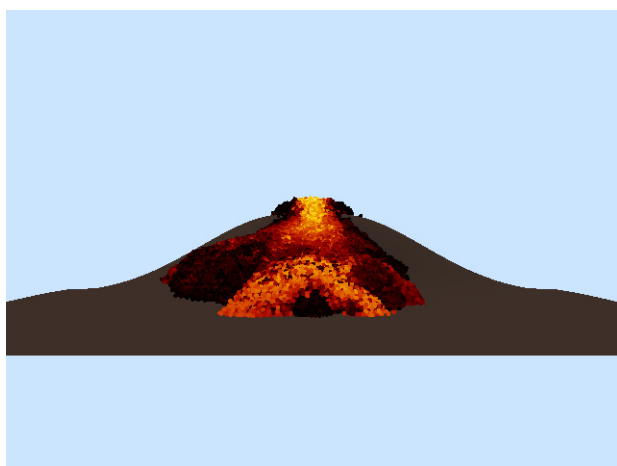
図4 溶岩流のビジュアルシミュレーション例1



(a)上面図

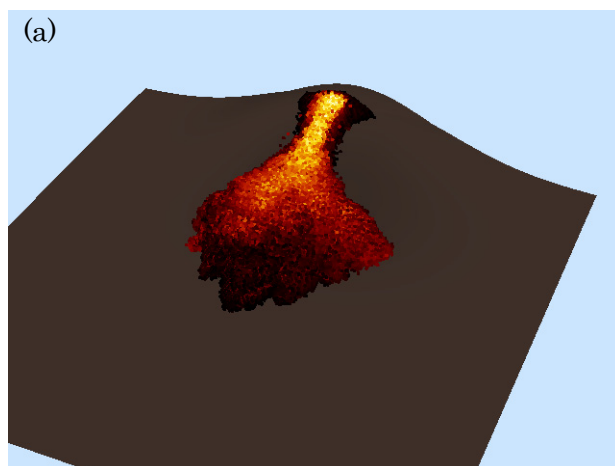


(b)側面図

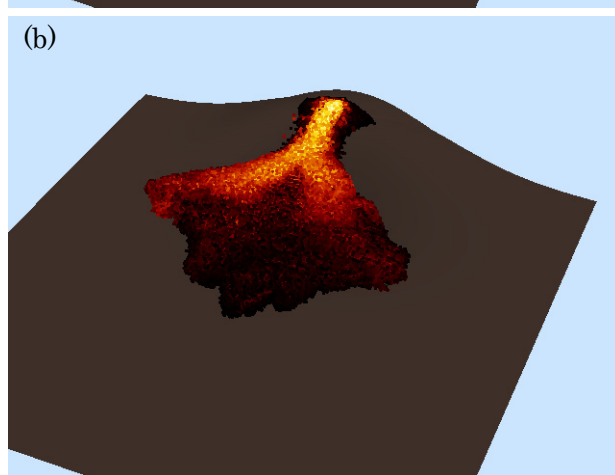


(c)正面図

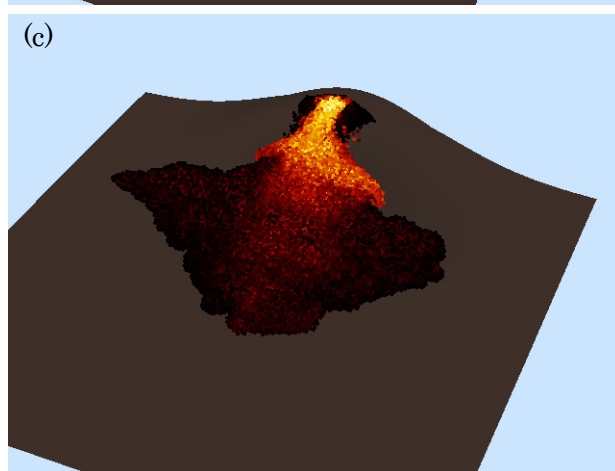
図5 溶岩流の上面図，側面図および正面図



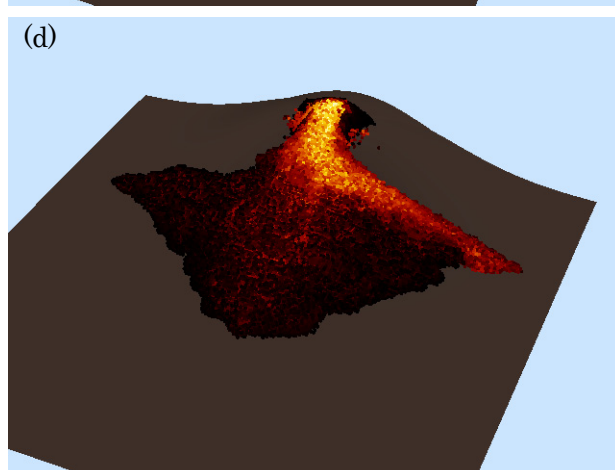
(a)



(b)



(c)



(d)

図6 溶岩流のビジュアルシミュレーション例2