

溶岩流の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション*

1E-02

小田 泰行†

藤本 忠博

村岡 一信

千葉 則茂‡

岩手大学大学院工学研究科§

岩手大学工学部情報システム工学科¶

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, サイエンティフィック・ビジュアリ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.

本報告では, 流体現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. Stora ら[1]は, 溶岩流のアニメーションを生成する手法を提案しているが, “アア溶岩” と呼ばれる特定の種類の溶岩に関するものであり, 溶岩流に見られる様々な現象の表現を可能とするものではない.

2. 溶岩流の特徴

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.

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.

3. 粒子ベースの溶岩流モデル

ここで, 溶岩流の特徴である,

- ・重力に従い地形の低い方に流れる,
- ・温度によって粘性率が変化する,

という性質を実現する粒子ベースの溶岩流モデルを提案する. 本モデルでは, 溶岩流の流れを粒子群の運動によって定義する.

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.

$$F = m a, \quad (1)$$

F : 粒子に働く力,

m : 質量,

a : 加速度.

粒子には, 以下のような力が働くものと仮定する.

* Particle-based Visual Simulation of Lava Flows

† Yasuyuki Oda

‡ Tadahiro Fujimoto, Kazunobu Muraoka and Norishige Chiba

§ Graduate School of Engineering, Iwate University

¶ Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University

- ・重力,
- ・粒子間の相互作用力,
- ・地面や障害物などから受ける力.

ここで, 溶岩が重力に従って地形の低い方に流れるという基本的な性質は, 重力および地面などから受ける力によって実現することができる.

また, 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, このとき粒子間には以下の2種類の相互作用力が働くものとする.

- ・粒子間の距離に応じた相互作用力,
- ・粒子の温度に依存する粘性力.

本モデルでは, 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, 溶岩流のシミュレーションを行う.

3. 1 距離に応じた相互作用力

粒子間の距離に応じた相互作用力としては, 式(2)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).

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

r : 粒子間の距離,

k_1, k_2 : ばね定数 ($k_1, k_2 > 0$),

c : 任意定数 ($c > 0$).

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.

3. 2 温度に依存する粘性力

粘性力としては, 式(3)で表されるような, 粒

子間の相対速度を減少させるような力を定義する.

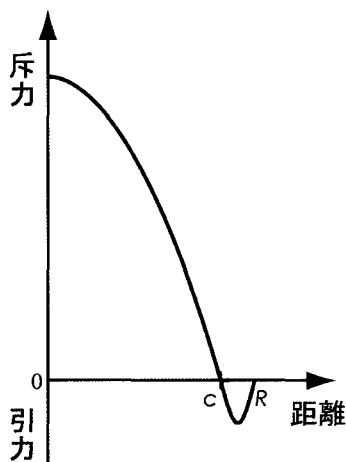


図1. 距離に応じた相互作用力

$$f_v = \sum_{i \neq j} (-k_v(v_i - v_j)w_{ij}) \quad (3)$$

k_v : 粘性係数 ($k_v > 0$),

v : 粒子の速度,

w_{ij} : 重み付け関数.

式(3)における粘性係数は, 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(4)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.

$$k_v = b_k \cdot \exp(-a_k T_{ij}), \quad (4)$$

T_{ij} : 粒子 i, j の温度の平均値,

a_k, b_k : 任意定数 ($a_k, b_k > 0$).

式(3)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(5)によって定義する.

$$w_{ij} = b_w \cdot \exp(-a_w r_{ij}) \quad (5)$$

r_{ij} : 粒子 i, j 間の距離,

a_w, b_w : 任意定数 ($a_w, b_w > 0$)

3. 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(6)によって定義する.

$$\Delta T_{ij} = k_l (T_j - T_i) w_{ij} \quad (6)$$

k_l : 熱伝導率 ($k_l > 0$),

T : 粒子の温度,

w_{ij} : 重み付け関数.

ここで, w_{ij} は式(5)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, 大気の温度を 0 とみなしたときの熱の放出によるものとし, 式(7)で定義する.

$$\Delta T_a = -s k_a T, \quad (7)$$

s : 大気に触れている面積の割合,

k_a : 熱伝導率 ($k_a > 0$),

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(8)で定義する.

$$\Delta T_g = -k_g T, \quad (8)$$

k_g : 熱伝導率 ($k_g > 0$),

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.

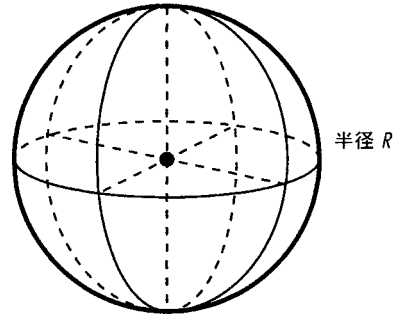


図 2. 近傍領域の分割

4. 溶岩流のシミュレーション例

溶岩流のシミュレーションを行った結果を図 3 および図 4 に示す. これらの図は, 同一のシミュレーション結果を上 (図 3) と正面 (図 4) から表示したものであり, シミュレーションの経過時間に沿って (a) ~ (f) の順に, 初期状態, 10000, 20000, 40000, 80000, 160000 ステップ後の状態を示している. 溶岩を流すための地形としては, 火山状の単純な形状を用いた. 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. なお, 溶岩を表す粒子は, 粒子の温度が高い場合明るく, 低い場合暗く表示させた.

溶岩流のシミュレーションは, 火口から一定数の粒子を毎ステップ発生させることによって行った.

図 3, 4 のシミュレーション結果より, 頂上付近から流出した溶岩が谷に沿って流れ, 山の

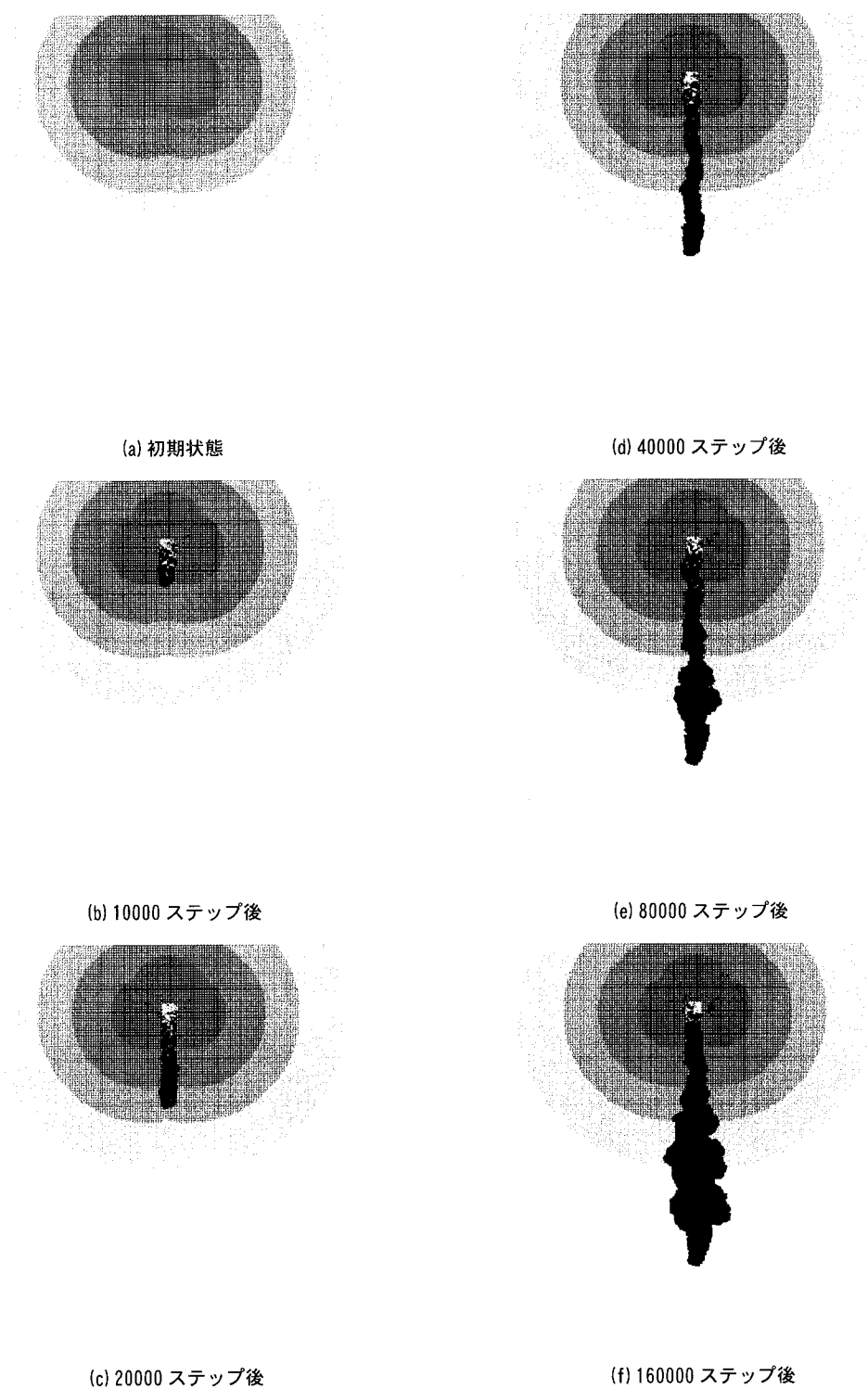


図3 溶岩流のシミュレーション（上面図）

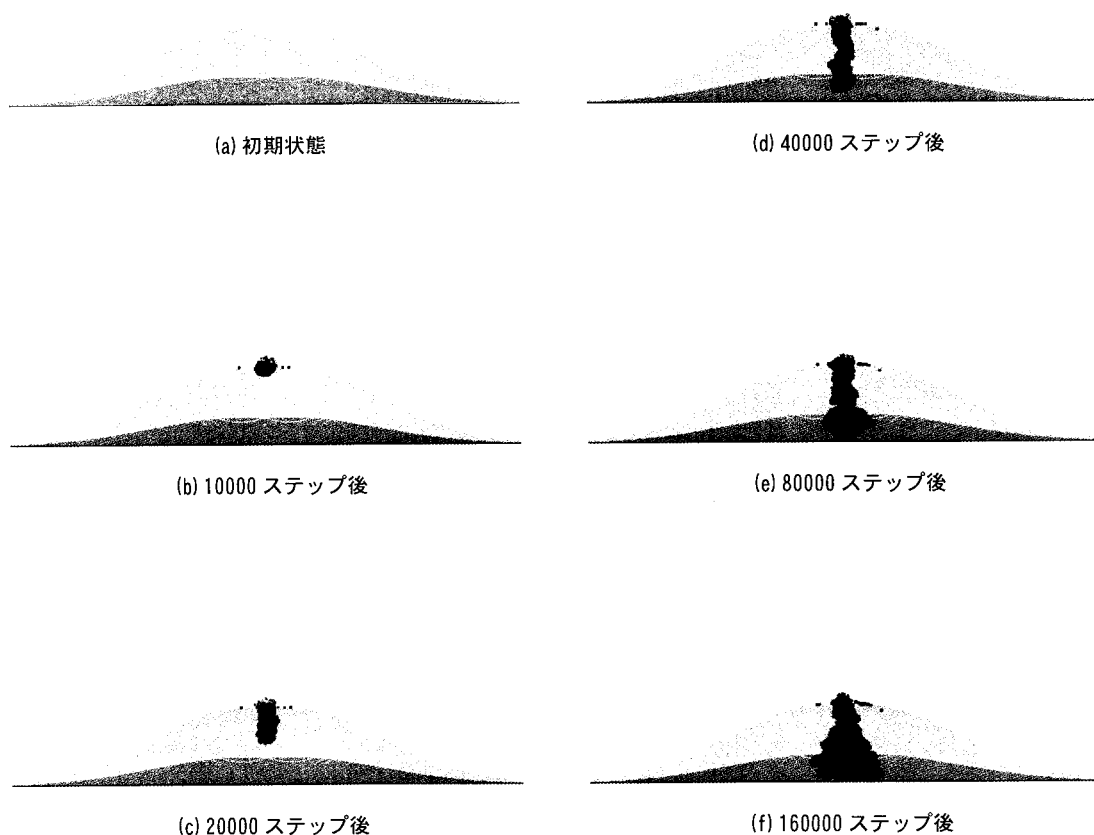


図4 溶岩流のシミュレーション（正面図）

裾野の傾斜のなだらかな領域で徐々に扇形に広がっていることがわかる。これらより、実際の溶岩流の基本的な性質が表現されているといえよう。

5. おわりに

本報告では、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って、溶岩流の基本的な性質が表現できることを示した。

今後の課題としては、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、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「地域提案型研究開発制度」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

