2E-04 CML を用いた火山噴煙のシミュレーションと可視化

水野 良一† 吉田 暁† 土橋 宜典‡ *東京大学 :北海道大学

1 はじめに

火山噴煙のシミュレーションと可視化は災害時のシ ミュレーションなどに有用である。本研究では、CML

(Coupled Map Lattice) を用いて効率の良い計算を 行った。また、火山噴煙の概形は一般的には円錐型(図 1 参照)をしており、噴出物の密度・温度、噴出の速 度などにより多様性を呈する。このことを満足するた めに、高度の関数として定義された2つのパラメータ を導入し、火山噴煙の形状を表現した。



図 1: 一般的な火山噴煙の形状

2 提案法

大気流体は厳密には圧縮性・粘性であるが、圧縮性・ 粘性は小さいので、非圧縮性・非粘性の流体であると 仮定した。この仮定により、質量とモーメントの保存 則から、次の非圧縮性・非粘性流体のオイラー方程式 が導出される。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \quad , \tag{1-a}$$

$$\partial \boldsymbol{u}/\partial t = -(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u} - \nabla p$$
. (1-b)

ここで、**u**は速度ベクトル、pは圧力である。式(1-a) と式(1-b)をSemi-Lagrangian Advection Scheme [1] とCML [2]を用いて逐次的に解くことで速度場を更新 する。火山噴煙の密度 ρ は単純に大気流体の速度場に よって運ばれるものと仮定することで、密度の時間発 展の方程式は次式のようになる。

$$\partial \rho / \partial t = -(\boldsymbol{u} \cdot \nabla) \rho$$
 (2)

また、高度2の関数として定義された2つのパラメー

Simulation and Visualization of Volcanic Smoke using CML Ryoichi Mizuno† Satoru Yoshida† Yoshinori Dobashi‡ Tomoyuki Nishita†

† The University of Tokyo ^{*} Hokkaido University

西田 友是†

タ(後述)を調節することで、多様な噴煙の形状を生 成することができる。

2.1 オイラー方程式の逐次的な解法

以下の2つの操作でオイラー方程式を逐次的に解き、 速度場を更新する。

操作1 Semi-Lagrangian Advection Scheme を用い て、式(1-b)右辺第1項の移流の効果を導入する。 図2に示すように、点xを時刻tにおける速度場 u_0 に 沿って逆上って、速度場の部分的な流れに対応する経 路 *p*(*x*,*s*) を定義する。即ち、*p*(*x*,*s*) は位置*x* に時 刻tにおいて存在する粒子が時間(-s)前に存在して いた位置を意味する。そして、位置 \boldsymbol{x} 、時刻 $(t + \Delta t)$ における速度 $u_1(x)$ は位置 $p(x, -\Delta t)$ での速度を用 いて次式で表わされる。

$$\boldsymbol{u}_1(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{u}_0(\boldsymbol{p}(\boldsymbol{x}, -\Delta t)) \ . \tag{3}$$



2: Semi-Lagrangian Advection Scheme

操作2式(1-a)の質量の保存と、式(1-b)右辺第2 項の圧力の効果を導入するために CML を利用した次 式を用い、更新後の速度u,を求める。

$$\boldsymbol{u}_{2} = \boldsymbol{u}_{1} + \boldsymbol{\eta}(z)\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{u}_{1}) . \tag{4}$$

ここで、 $\eta(z)$ は高度zにおける「拡散係数」である。 式(4)右辺第2項の離散形は次式で表される。なお、 簡単のため2次元 (xz 断面) でx 成分の式のみを記 す。

$$\left(\eta(z)\nabla(\nabla u_1) \right)_{x} = \eta(z) \left[\left(u_1(x+1,z) + u_1(x-1,z) \right) -2u_1(x,z) \right) / 2 + \left(w_1(x+1,z+1) + w_1(x-1,z-1) \right) - w_1(x+1,z-1) - w_1(x-1,z+1) \right) / 4 \right].$$

$$(5)$$

ここで、 $u_1 \equiv (u_1, w_1)$ とした。CML を質量の保存と圧 力の効果の計算に用いることで、隣接したボクセルと の相互作用のみを考慮した高速な圧力の効果の計算が 可能になる。

2.2 噴煙の形状の調整

火山噴煙の形状は一般的に円錐型であり、条件によ って多様性を呈する。このことを満足するために、高 度zの関数として定義された「拡散係数」 $\eta(z)$ と「消 滅密度」 $\varepsilon(z)$ という2つのパラメータを導入する。 $\eta(z)$ は高度 *z* での拡散の度合いであり、 $\varepsilon(z)$ は高 度zで密度 ρ が $\varepsilon(z)$ 未満であると密度を0に近似す るという閾値である。具体的には、円錐型の形状の火 山噴煙を生成するために、 $\eta(z)$ は高度zが大きくな るにしたがって大きく設定されるべきである。そして、 鉛直上方が大きく広がっている火山噴煙(図4a参照) を生成したいのであれば、 $\mathcal{E}(z)$ は高度 z の大きい部 分で小さく設定されるべきである。一方、鉛直上方が 比較的広がっていない火山噴煙(図 4b 参照)を生成 したいのであれば、 $\mathcal{E}(z)$ は高度zの大きい部分で大 きく設定されるべきである。各パラメータはグラフィ カルユーザインターフェース (GUI) (図 3 参照) を 通して設定することができる。左上のウィンドウは火 山噴煙中央のxz 断面の密度分布を表示する。右上のウ ィンドウでは 3 次ベジエ曲線を用いて $\eta(z)$ と $\varepsilon(z)$ を任意に設定することができる。ここで、横軸は各値 の強度、縦軸は高度である。下のウィンドウではタイ ムステップ、噴出物の密度、噴出の速度と角度を設定 することができる。



図 3: パラメータ設定のための GUI

3 結果

提案法による結果画像を図4に示す。レンダリング には土橋らの手法 [3]を用いた。シミュレーション時 間は Pentium III 1GHz, 256MB RAM マシンで、ボ クセル数が60×60×80の場合(図4a 左、図4b 左参 照)とボクセル数が120×120×160の場合(図4a 右、 図4b 右参照)で、1 フレームあたりそれぞれ、約1 秒と約8秒であった。



(a) 鉛直上方が大きく広がっている噴煙



(b) 鉛直上方が比較的広がっていない火山噴煙図 4: 結果画像

4 まとめと今後の課題

圧力の効果の計算に CML を用いたことで、効率よ くシミュレーションを行うことができた。また、「拡散 係数」 $\eta(z)$ と「消滅密度」 $\varepsilon(z)$ を高度zの関数と し、調節することにより多様な形状の噴煙を生成する ことができた。

今後の課題としては、風の考慮、障害物(山肌など) との衝突の考慮、より火山噴煙のダイナミクスに基づいたシミュレーションのアルゴリズムの開発などが挙 げられる。

謝辞 本研究の一部は三菱電機株式会社の協力を得て 行っている。関係各位の支援と助言に感謝します。

参考文献

[1] J. Stam. Stable Fluids. *SIGGRAPH 99 Conference Proceedings*, pages 121-128, 1999.

[2] T. Yanagida and K. Kaneko. Rayleigh-Benard Convection; Patterns, Chaos, Spatiotemporal Chaos and Turblent. *Physica D*, Vol. 82, pages 288-313, 1995.

[3] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita and T. Nishita. A Simple, Efficient Method for Realstic Animation of Clouds, *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*, pages 19-28, 2000.