

爆発の粒子ベースビジュアルシミュレーションにおける燃焼モデルに関する検討

竹下大樹[†]秋田工業高等専門学校電気情報工学科[†]

1. はじめに

CG では流体の表現についての研究が行われており、その一つとして、粒子ベースシミュレーションを用いた爆発の表現に関する研究がある[1]。この手法では流体粒子（空気粒子と炎粒子）を用い、ナビエ・ストークス方程式を基本として、圧力勾配を粒子間相互作用力によって近似した流体モデルを用いている。また、爆発の画像生成では、シミュレーションによって算出される流体粒子の位置と温度を元にして、ボリュームレンダリングを行っている。この手法の場合、炎粒子の数がレンダリングした画像の解像度に大きく影響するため、十分な解像度を得るためには、非常に多くの流体粒子が必要となり、多くの計算時間やメモリ量が必要となる問題があった。

文献[2]では、この問題に対応するため、文献[1]によって得られる流体粒子の速度と温度を用い、マーカー粒子を移流させることによって、改良を試みている。本研究では、文献[3]における燃焼モデルを参考として、粒子ベースの流体シミュレーションである文献[1]用の燃焼モデルを構築することを試みた。

2. マーカー粒子

レンダリングの解像度を向上させるため、マーカー粒子を用いた文献[2]の手法について述べる。文献[1]による手法の場合、レンダリングの解像度を上げるため、炎粒子数を増やす場合には、同時に空気粒子数を増やし、シミュレーションの解像度を上げる必要があった。そのため、爆発のレンダリングに貢献しない粒子数が増え、効率的にシミュレーションを行うことができない。そこで、シミュレーションによって得られる流体粒子の速度と温度を元に、加重平均を用いて、マーカー粒子の速度と温度を求め、移流させることで改善を試みている。文献[1]による手法では炎粒子を用いて、爆発のレンダリングを行っているが、この手法ではマーカー粒子のみを爆発のレンダリングに用いる。

A Study on the combustion model for particle-based visual simulation of explosion

Daiki TAKESHITA[†] Department of Electrical and Computer Engineering, Akita National College of Technology[†]

マーカー粒子 i に与える速度 $\mathbf{u}_i$ 、温度 T_i は周囲に存在する流体粒子 j の速度 $\mathbf{u}_j$ 、温度 T_j を用いて、以下の式によって計算を行っている。

$$\mathbf{u}_i = \frac{\sum_j \mathbf{u}_j \omega_j(d_r)}{\sum_j \omega_j(d_r)} \quad (1)$$

$$T_i = \frac{\sum_j T_j \omega_j(d_r)}{\sum_j \omega_j(d_r)} \quad (2)$$

$\omega_j(d_r)$ は加重関数であり、以下の式を用いている。

$$\omega_j(d_r) = \begin{cases} 0 & (d_r > 1.0) \\ \exp(-5d_r^2) & (d_r \leq 1.0) \end{cases} \quad (3)$$

$$d_r = d/r_j \quad (4)$$

d はマーカー粒子と流体粒子との距離であり、 r_j は流体粒子の半径である。

3. 燃焼モデル

爆発の表現に関して、燃焼モデルを採用した研究には文献[3]がある。これは格子を用いて流体の運動をシミュレートし、燃料粒子と煤粒子を用いた燃焼モデルを構築し、流体の運動との相互作用を考慮することによって、爆発のアニメーションを作成している。本研究では、この燃焼、相互作用のモデルを参考とし、文献[1]における粒子を用いた流体の運動をシミュレートした爆発のアニメーション作成手法において、燃焼モデルを構築した。本手法では、燃焼による熱エネルギーの生成と、流体粒子と燃料粒子との間における熱変換のモデルを考慮している。

本研究において、流体の運動は流体粒子によって、計算を行っている。燃焼モデルでは燃料粒子を用い、その位置の更新は(1)式によって得られる速度を用いる。燃料粒子の燃焼過程は計算の簡易化のため、酸素に依存せず、燃焼率は温度によって変わらないものとした。シミュレーション上では、燃焼状態にある燃料粒子をシミュレーション空間内に生成すること爆発を表

現する．燃焼状態にある燃料粒子は燃焼率 z によって，燃料粒子に設定した質量 m を消費し，質量がゼロとなった燃料粒子は消失する．また，燃焼中は以下に式によって，熱エネルギーを生成する．

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = b_h z \quad (5)$$

H_i は燃料粒子 i における熱エネルギーであり， b_h は燃えた燃料の単位質量あたりにおいて解放される熱量である．また，以下の式によって，燃料粒子 i は流体粒子との間で熱の変換を行う．

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \alpha_h r_i^2 (T_i - Y_i) \quad (6)$$

α_h は燃料粒子と流体粒子間の熱伝導係数， r_i は燃料粒子の半径， Y_i は燃料粒子 i の温度である． T_i は周囲に存在する流体粒子 j の温度 T_j の加重平均によって求められる温度であり，(4)式によって計算する．また，以下の式によって，燃料粒子の温度を更新する．

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{c_m} \frac{\partial H_i}{\partial t} \quad (7)$$

c_m は熱容量である．燃料粒子の温度は以下の式によって，流体粒子 j の温度 T_j に反映する．

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial H_i}{\partial t} \frac{\omega_j(d_r)}{\sum_j \omega_j(d_r)} \quad (8)$$

c_v は流体粒子の熱容量である．

4. まとめ

図1にシミュレーション結果を示す．これらは簡易的に粒子を点でレンダリングしたものである．図1(a)は文献[1]による流体モデルであり，マーカー粒子や燃料粒子を用いておらず，炎粒子をレンダリングしたものである．図1(b)は文献[2]による手法であり，マーカー粒子をレンダリングしたものである．図1(c)は本研究の燃焼モデルによるもので，燃料粒子をレンダリングしたものである．これらの粒子の色は温度を基にして決定している．表1にシミュレーションデータとして，1ステップあたりの計算時間と粒子総数を示す．これらのシミュレーション

は CPU Core i7 3.5GHz で行われた．粒子総数には流体粒子（空気粒子，炎粒子），マーカー粒子，燃料粒子の数が含まれる．シミュレーションに用いた空気粒子数は 44,694 個であり，炎粒子は 1,000 個である．図1(b)，(c)では図1(a)のシミュレーションにマーカー粒子と燃料粒子をそれぞれ 100,000 個追加して行っている．

爆発の粒子ベースビジュアルシミュレーションを基に，燃焼モデルの検討を行った．結果，シミュレーションに用いる粒子総数を抑えながら，レンダリングに用いる粒子数を増やすことが可能であることを確認した．また，燃焼モデルを採用することで，熱の生成と流体の運動との相互作用を考慮し，単純なマーカーの移流よりも実際の爆発現象に則したモデリング手法となった．今後については，流体粒子と燃料粒子との間における抗力の実現を検討していく予定である．

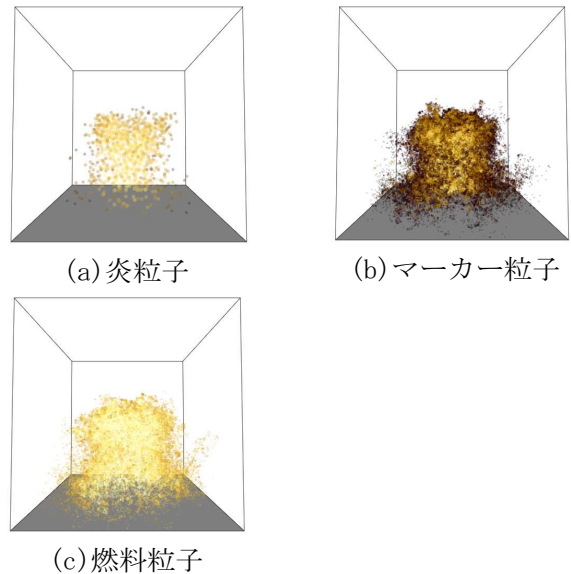


図1 シミュレーション結果

表1 計算時間

シミュレーション例	図1(a)	図1(b)	図1(c)
計算時間[秒/ステップ]	0.068	1.023	1.923
粒子総数[個]	45,694	145,694	145,694

参考文献

- [1] D. Takeshita, S. Ota, M. Tamura, T. Fujimoto, K. Muraoka, N. Chiba. Particle-based Visual Simulation of Explosive Flames, In *Proceedings of Pacific Graphics 2003*, pp. 482-486
- [2] 竹下大樹 爆発の粒子ベースビジュアルシミュレーションにおけるマーカー粒子に関する検討. 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 170.
- [3] B. E. Feldman, J. F. O'Brien and O. Arikan. Animating Suspended Particle Explosions. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003*, 708-715, 2003.