

爆発火炎の粒子ベースビジュアルシミュレーション法

○竹下大樹¹ 太田真² 田村真智子² 藤本忠博¹ 村岡一信³ 千葉則茂¹¹岩手大学工学部 ²(株) 岩手ソフトウェアセンター ³東北工業大学

要旨

本論文では、粒子ベースによる爆発火炎のビジュアルシミュレーション法を提案する。本手法は、粒子による離散的なラグランジュ記述による流体モデルに基づく数値シミュレーション法と、その粒子群の運動データからCG映像を生成するためのレンダリング法からなる。本流体モデルでは、炎の塊を表現する炎粒子と空気の塊を表現する空気粒子を用い、ナビエ・ストークス方程式における外力として温度差による浮力と重力を、また粘性力と圧力は粒子により離散化したモデルにより近似している。さらに、粒子間の熱伝導を考慮している。本手法によれば、爆発火炎の湧き出しを伴う上昇や、上昇気流後方に起こる気流の巻き込み現象などが表現可能である。レンダリングには、Z-バッファベースのボリュームレンダリングを適用している。

Particle-Based Visual Simulation of Explosive Flames

Daiki Takeshita¹ Shin Ota² Machiko Tamura² Tadahiro Fujimoto¹ Kazunobu Muraoka³ Norishige Chiba¹¹Graduate School of Engineering, Iwate University ²Iwate Software Center Inc. ³Tohoku Institute of Technology

Abstract

In this paper, we propose a particle-based method for visual simulation of explosive flames. This method consists of the numerical simulation method based on the fluid model by the discrete Lagrangian description using particles and the rendering method for generating a CG animation from the movement data of the particles. This fluid model uses flame particles representing the lump of flame and air particles representing the lump of air. This model calculates buoyancy caused by the difference of temperature and gravity as the external force in the Navier-Stokes equations and approximates viscous force and pressure by the discrete model using particles. In addition, the heat conduction between particles is taken into account. The proposed method realizes the representation of distinctive phenomena such as an ascending airflow with a gush of explosive flames and a swirling airflow behind the ascending airflow. CG images are rendered using a Z-buffer based volume rendering method.

1. はじめに

本論文では、映像制作で多用されている爆発火炎の一表現法を提案する。物理現象の数値シミュレーションの分野において、爆発火炎のような流体は連続的モデルに基づきその挙動を解析するという方法が一般的である。このようなアプローチで爆発を表現した例として Yngve らの文献[Yngve00]がある。この論文では、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式をもとに、圧力の算出を簡略化した数値解析を行い、有限体積法により流体量を保存するという手法をとっている。爆発を連続的モデルに基づき解析を行う際には流体の圧力の急激な変化の取り扱いと質量の保存に注意を払わなくてはならない。粒子ベースシミュレーションでは質量は常に保存され、粒子数の局所的な疎密によって圧力を表現することも容易である。また、映像生成を行わなければならないCGの分野においては、爆発火炎のような複雑な現象では流体境界面が重要な役割を果たす。この流体境界面の表現において粒子ベースシミュレーションでは特別な取り扱いを必要とせず、効率的である。そのため、数値流体力学の分野においても、粒子による離

散化のアプローチによるシミュレーション法も研究されている[越塚97]。

これまでCGの分野において、粒子ベースシミュレーションによる流体の表現に関する研究には、Reevesらによる花火のような噴出火炎の例[Reeves83]、Simsらによる滝の表現などの例[Sims90]、千葉らによる水流を表現した例[Chiba95]、高橋らによる粒子と渦場による炎・煙の表現をした例[Takahashi97]、菊池らによる積乱雲を表現した例[菊池98]、というように多数あり、RealFlowのような粒子ベースの流体表現ツールも開発されている。しかしながら、爆発火炎のモデルは提案されていない。

本論文では、粘性と熱伝導を考慮し、粒子間力によって圧力を近似する爆発火炎の粒子ベースシミュレーション法を提案する。

2. 粒子ベース爆発火炎モデル

2.1 爆発火炎の性質

爆発火炎の媒体は可燃性のガス、火薬、爆薬などであり、燃焼・焼失の遷移状態を有する。ひとたび媒体の一部が燃焼状態に遷移すると瞬時に媒体全体を燃焼状態に遷移させ、

その化学反応による高いエネルギーによって急激な膨張を伴い上昇する。急激な膨張は周囲の空気を圧縮させ、その圧力差による圧力勾配の影響と速度差による粘性力の影響によって、炎は内側から湧き出すように発達し、炎境界では外側からの巻き込みが発生する。爆発火炎は非常に高温であるため、周囲空気に対しての熱伝導の効果も大きい。熱伝導によって暖められた空気は上昇気流を発生させる。また炎は温度によって異なる色彩の光を発する。高温な順に、白、黄、橙、赤である。

本手法では、燃焼状態にある炎の塊を炎粒子、空気の塊を空気粒子とした二流体の解析において、浮力と重力、圧力と体積を表現する粒子間力を用い、粘性力と熱伝導の効果を検討することによって、爆発火炎特有の振る舞いである、炎粒子集団における内部からの湧き出しと炎境界での巻き込みの実現を試みている。ここで、本論文では炎と空気の間における化学反応を考慮せず、炎粒子は焼失しないものとした。また、炎粒子の色を決定する際は粒子の温度パラメータを用いる。

2. 2 粒子ベースシミュレーション法

流体の運動は、質量の保存を表す連続の式と運動量の保存を表すナビエ・ストークス方程式といった偏微分方程式で記述される。ナビエ・ストークス方程式の移流項は流速の空間1階微分で、圧力項は圧力の空間1階微分で、また粘性項は流速の空間2階微分でそれぞれ表されている。この支配方程式を格子によって差分化し、解析を行うことが従来の手法であった。これに対して、粒子ベースシミュレーション法では、対象とする流体塊を粒子で表現し、粒子群によって流体の解析を行う。つまり、空気の塊を空気粒子、炎の塊を炎粒子として、これら粒子による離散的な物理モデルに基づく数値シミュレーションを行う。粒子ベースシミュレーションで用いる粒子間力は粒子による体積と圧力を実現するための力である。これはナビエ・ストークス方程式における圧力項に対応する。移流項は粒子の持つ慣性速度が対応し、粒子を用いることで質量は完全に保存されるため、残る粘性項をモデル化することによって、本手法は支配方程式の各項に対応した近似的な離散化となっている。また爆発火炎の持つ温度における浮力の影響は大きく、周囲空気への温度の影響も無視できないので熱伝導を考慮している。

本手法では、爆発火炎のシミュレーションとして、粒子の初期パラメータは位置、速度、温度、質量をあたえ、浮力、重力、粒子間力、粘性力、熱伝導を考慮した。

2. 3 粒子に考慮される物理現象

本論文では爆発火炎の実現のために浮力、重力、粒子間力、粘性力、熱伝導を考慮した。粒子に働く合力 F は以下のように表される。

$$F = f_a + f_g + f_m + f_v \quad (1)$$

ここで f_a , f_g , f_m , f_v はそれぞれ、浮力、重力、粒子間力、粘性力である。ただし、浮力 f_a は熱伝導 T_c によって更新される温度をもとにして計算される。

$$f_a = f(T_c) \quad (2)$$

これらの力を空気粒子、炎粒子において計算する。

2. 3. 1 浮力

ここでは爆発火炎のシミュレーションにおいて大きな力を発生させる浮力の計算について説明する。浮力計算において用いられる大気圧力と空気密度は一定であるものとする。浮力は初期設定の粒子質量と熱伝導によって更新される温度によって体積を算出すること求める。

浮力計算は以下のステップで行う。

- (1) 粒子の温度 T 、質量 m について初期値を与える
- (2) 理想気体の状態方程式より粒子の体積 V を求める

$$pV = nRT \quad (3)$$

$$n = m/w \quad (4)$$

- (3) 浮力 f_a を求める

$$f_a = \rho_0 V g$$

(5)

- (4) 粒子の温度は熱伝導の計算により更新する

ここで p , n , R , w , ρ_0 , g はそれぞれ大気圧力、モル数、気体定数、分子量、空気密度、重力加速度である。大気圧力、気体定数、空気密度、重力加速度については理科学年表の値を用いる(表1参照)。熱伝導についての詳しい記述は後に記す。

表1. 浮力計算用パラメータ

大気圧力 [p]	1.013×10^5 [kg/ms^2]
気体定数 [R]	8.315 [$\text{J/mol} \cdot \text{K}$]
空気密度 [ρ_0]	1.225 [kg/m^3]
重力加速度 [g]	9.807 [m/s^2]

2. 3. 2 重力

重力の計算は以下の通りである。

質量 m において重力 f_g を求める

$$f_g = -mg \quad (6)$$

ただし、鉛直下向きの方をマイナスとする。

2. 3. 3 粒子間力

粒子の体積を粒子間に働く斥力の存在を仮定することにより表現する(図1参照)。この体積は粒子をシミュレーション空間に均等に分布させるように働き、浮力の計算に用いられる実際の物理量とは異なるものである。また、この

粒子間力は、シミュレーション空間に満たされる十分な個数の初期配置空気粒子とシミュレーションの過程で発生させる炎粒子との相互作用により、局所的な圧力差を発生させる役割も兼ねる。なおこの圧力も浮力の計算に用いられる実際の物理量とは異なる。

本モデルにおける粒子間力は以下のである。

- ・対象となる粒子の半径の和より小さい場合は斥力が発生する。

この規則を満たすために、斥力に用いる関数は正規分布をもとに作成した以下の式を用いる。

$$f_m = \begin{cases} 0 & (d_r > 1.0) \\ 1 * \exp(-5d_r^2) & (d_r \leq 1.0) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_r = d/(r_i + r_j) \quad (8)$$

ここで、 d 、 r_i 、 l はそれぞれ粒子間距離、粒子半径、粒子間力係数である。粒子半径 r_i 以下の式を用いて求める。

$$r_i = \sqrt[3]{3V_n/4\pi} \quad (9)$$

ここで V_n 、 π はそれぞれ粒子体積と円周率である。図2に粒子間力関数の概形を示す。

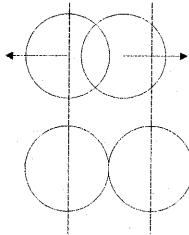


図1. 粒子間力

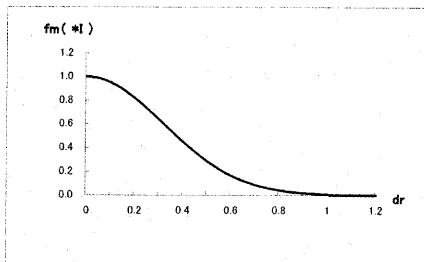


図2. 粒子間力関数の概形

2. 3. 4 粘性力

粘性力の表現には、水流のシミュレーション [Chiba95] のために筆者らの一部が提案した粒子による離散化モデルを用いる。(なお、同様の粒子による離散化が流体シミュレーションの分野で提案されており [越塚 97], 係数 α の詳細も示されている。)

ナビエ・ストークス方程式における粘性項は $\partial u / \partial t = \nu \nabla^2 u$ で表され、 u 、 t 、 ν はそれぞれ速度、時間、動粘性率である。この粘性項の計算を粒子ベースシミュレーションでは近傍粒子との距離に関する加重平均により実現する。この加重平均とは粒子間距離によって重み付けを行い、対象粒子に近い粒子ほど粒子速度に影響を及ぼしやすくする手法である。ここで加重平均に用いる加重関数は正規分布をもとに作成した以下の式を用いる。

$$\omega(d_r) = \begin{cases} 0 & (d_r > 1.0) \\ \exp(-5d_r^2) & (d_r \leq 1.0) \end{cases} \quad (10)$$

$$d_r = d/(r_i + r_j) \quad (11)$$

ここで、 d 、 r_i はそれぞれ粒子間距離、粒子半径である。図3にこの関数の概形を示す。

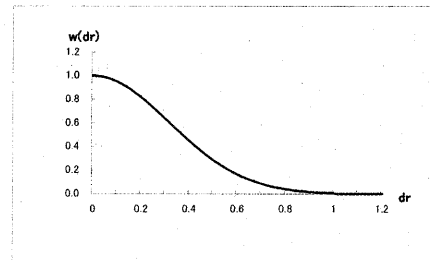


図3. 加重関数の概形

この加重関数を用いて粘性項をモデル化すると以下のように書ける。

$$\nu \langle \nabla^2 u \rangle_i \Rightarrow f_v = \nu(T) \alpha \sum_{j \neq i} [(u_j - u_i) \omega(d_{ij})] \quad (12)$$

ここで、 α は粘性の調整係数であり、 $\nu(T)$ は温度より定まる動粘性率である。

2. 3. 5 熱伝導

ここでは熱伝導のモデル化について述べる。本モデルにおける熱伝導は炎粒子を空気粒子によって冷却し、また温度の上昇した空気粒子によって上昇気流を発生させることを目的として導入される。

熱伝導の方程式は $\partial T / \partial t = a \nabla^2 T$ で表され、 T 、 t 、 a はそれぞれ温度、時間、温度伝達率である。これは温度の2階偏微分で表され、粘性項と同様の手法でモデル化することができる。熱伝導をモデル化すると以下のように書ける。

$$a \langle \nabla^2 T \rangle_i \Rightarrow T_r = a \alpha \sum_{j \neq i} [(T_j - T_i) \omega(d_{ij})] \quad (13)$$

この式は近傍粒子 j と粒子 i との温度差に加重関数を乗じた

ものの和に対して、係数 α と温度伝達率を乗じることで粒子 i への温度への影響を求めるものである。

2. 4 ボクセルによる粒子探索法

粒子間力、粘性力、熱伝導といった計算では、対象粒子の近傍の粒子を探索するといった処理が行われる。ここではボクセルを用いた以下のような粒子の探索法を用いた。

ボクセルによる粒子探索法は以下のステップによって実現する。

- (1) シミュレーション空間をボクセルで区切り、全ての粒子をその座標に対応するボクセルに登録する。
- (2) 対象となる粒子が含まれるボクセルの $3 \times 3 \times 3$ 近傍のボクセルにおける粒子に対し、解析を行う。

2. 5 境界条件

流体の解析のためにシミュレーション空間に以下の2種類の境界条件が与えられる。

- ・固定境界条件
- ・周期境界条件

固定境界条件は壁や物体等と粒子との間の境界条件として与えられる。周期境界条件は周囲に遮蔽物が存在しない屋外のような境界条件として与えられ、シミュレーション空間があたかも無限に広がりを持つかのようにするための条件である。

2. 5. 1 固定境界条件

固定境界条件は壁や物体等と粒子との間の境界条件として与えられる(図4参照)。その規則は以下である。

- ・全ての粒子は境界上において弾性衝突をする。
- ・境界上には壁粒子が配置され、粒子間力、粘性力、熱伝導が考慮される。

2. 5. 2 周期境界条件

周期境界条件は周囲に遮蔽物が存在しない屋外のような境界条件として与えられ、且つ粒子間力による圧力を実現するため、シミュレーション空間内の粒子数を減少させないように定められる。その規則は以下である。

- ・粒子数が不足した領域において、空気粒子が境界上に配置される。
- ・境界を飛び出した粒子は消滅する。

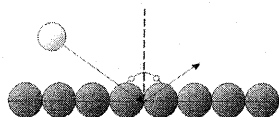


図4. 固定境界条件

3. シミュレーション

3. 1 シミュレーション空間

シミュレーション空間には初期配置として、粒子間力に

よって、圧力を実現するために、粒子間力が互いに働く距離で粒子を配置する。シミュレーション空間の外側境界上には自由境界条件が適用され、シミュレーション空間底部には地面があるものとし、固定境界条件が適用される。

3. 2 各係数の違いによる効果

ここでは各係数の違いによる効果について検討を行い、パラメータ決定の指針とする。対象となる係数は以下である。

- ・動粘性率
- ・温度伝達率
- ・粒子間力係数

動粘性率は流体がどの程度の粘性をもって運動しているかを示す係数であり、粘性が低いならば、その流体の挙動は乱れやすく、粒子集団としてはまとまりにくくなる。粘性が無い場合は、粒子のもつ慣性速度と粒子間力による圧力によってのみ運動するため、粒子速度は衰えにくく、爆発火炎としての印象が薄れる。

本モデルにおける温度伝達率は、粒子の燃焼則を考慮していないため、表現力を調整するための係数として用いる。よって、観測される実在の値とは必ずしも一致しない。温度伝達率は粒子間における熱の移動しやすさを示し、炎粒子の温度の冷えやすさを示す係数である。温度伝達率が低い場合、炎粒子は冷えにくく、温度伝達率が高い場合、炎粒子は冷えやすい。

粒子間力係数は斥力の強さを調整するための係数である。粒子間力係数が高いほど、炎粒子の急激な拡散を押さえ込み、粒子数の多い領域から少ない領域へと運動する力を発生させる。

よって、係数の違いによるシミュレーションを試み、爆発火炎のシミュレーションにおけるパラメータ決定の指針とする。粒子のパラメータとシミュレーションの基本となるパラメータを表2に示す。画像は粒子を円によって簡易表示したものであり、炎粒子のみ表示した。粒子の色は温度が高い順に、明るい黄、黄、橙、赤で表示している。

表2. 粒子パラメータ

空気粒子質量 [m]	0.060[kg]
炎粒子質量 [m]	0.060[kg]
空気粒子分子量 [w]	28.80×10^{-3} [kg/mol]
炎粒子分子量 [w]	44.10×10^{-3} [kg/mol]
空気粒子初期温度 [T]	288.150 [K]
炎粒子初期温度 [T]	2173.150 [K]

3. 2. 1 動粘性率

図5の上図は粘性を考慮しないもの、下図は粘性を極端に強く効かせた際のシミュレーションである。粘性を考慮しない場合、炎粒子は湧き出しや巻き込みを伴い激しく運

動するが、炎粒子集団は乱れ、まとまりに欠ける。粘性を極端に強く効かせた場合、炎粒子集団は丸みを帯びるが、炎粒子の湧き出しや巻き込みといった運動も阻害される。

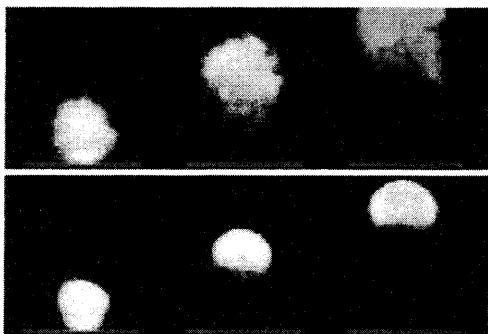


図5. 粘性の考慮についてのシミュレーション

3. 2. 2 温度伝達率

先に述べたように、本モデルにおける温度伝達率は表現力調整のための係数として用いるので、計測される実際の温度伝達率とは異なる値を用いる。図6は上図から温度伝達率を0.001, 0.01, 0.1とした際のシミュレーションである。温度伝達率を強くするほど、上昇気流後方において、取り残される炎粒子数が増えていく。

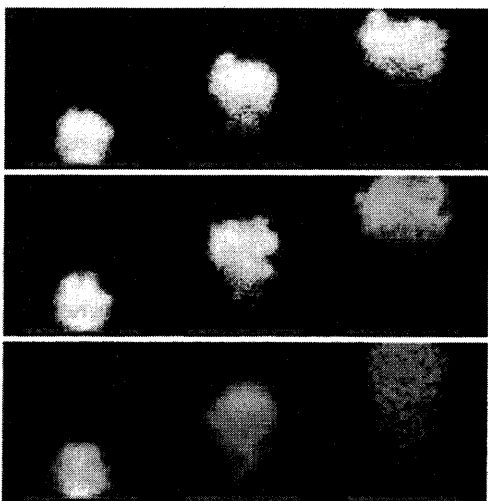


図6. 温度伝達率の違いによるシミュレーション

3. 2. 3 粒子間力係数

図7は上図から粒子間力を5.0, 15.0, 50.0とした際のシミュレーションである。本モデルでは炎粒子数に対して空気粒子数が非常に多数であるため、粒子間力係数を強くするほど炎粒子の拡散を押さえ込む働きをする。値を5.0とした場合、斥力が弱すぎるため、炎粒子の挙動を押さえ込むことができず、散乱する。また値を50.0とした場合、斥力が強すぎるため、炎粒子集団はつぶれ、炎粒子の上昇が弱まると、シミュレーション空間内の全ての粒子におい

て強い乱れが生じた。粒子間力係数を大きくする場合、1ステップごとの時間幅をより小さく取る必要がある。

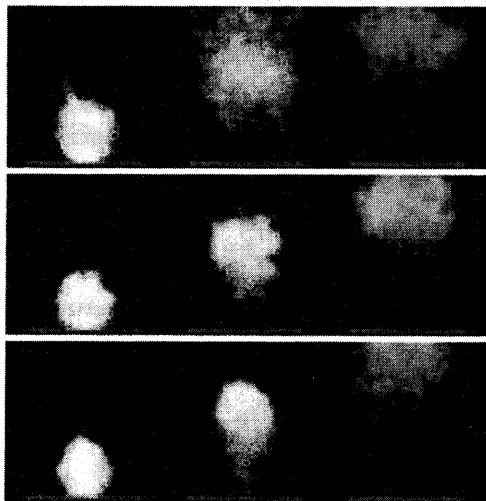


図7. 粒子間力係数の違いによるシミュレーション

3. 3 シミュレーション例

ここではシミュレーション例を示す。粒子のパラメータは表2に示した値を用いる。またシミュレーションに用いた温度伝達率、粒子間力の値を表3に示す。今回、粘性力と熱伝導の調整用係数である α は33.4とした。なお、レンダラには太田らによる高速ボリウムレンダラ[太田02]を用いた。これは粒子の温度に応じたボリウムデータによって、Zバッファを用いて高速にレンダリングするものである。

図8に示すシミュレーション1は炎粒子の初速度を鉛直上向きに $10[m/s]$ としてシミュレーションを行い、壁を2つ互い違いに配置した。

図9に示すシミュレーション2は炎粒子の発生箇所を3箇所設定し、初期配置粒子数と発生粒子数を異なる数値を与えた。

シミュレーション終了時の各粒子の個数、総フレーム数、計算時間を表4に示す。

表3. 爆発火炎の計算パラメータ

シミュレーション	温度伝達率	粒子間力係数
1	0.01	25.0
2	0.01	30.0

表4. 粒子個数と計算時間

シミュレーション	炎粒子数	空気粒子数	総フレーム数	計算時間
1	1010	249998	300	21716 (秒)
2	5780	255476	300	23264 (秒)

(CPU Pentium4 1.7 GHz, メモリ 768 Mbyte)

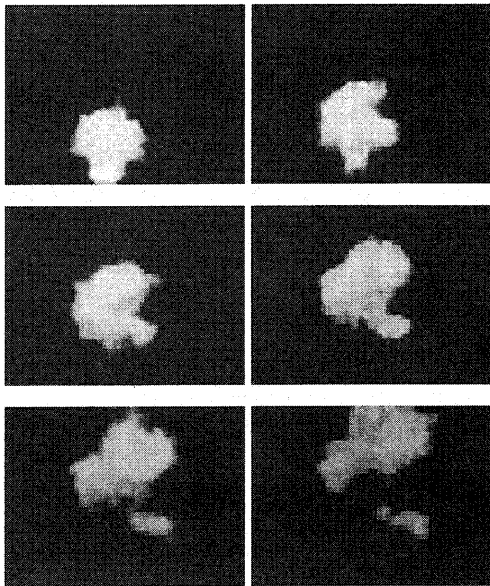


図8. シミュレーション1

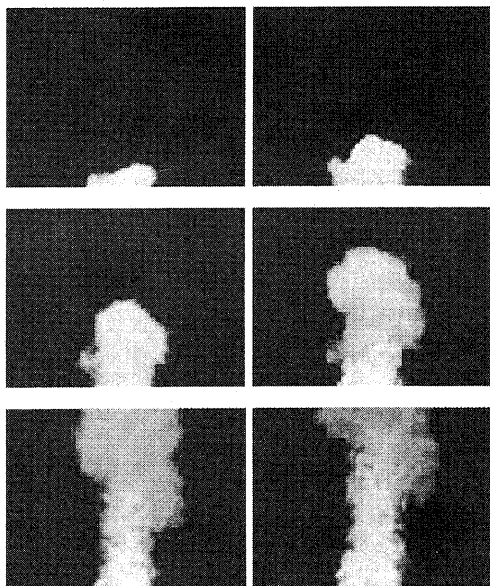


図9. シミュレーション2

4. おわりに

本論文では爆発火炎の粒子ベースビジュアルシミュレーション手法の開発として、粒子に対し、浮力、重力、粘性力、熱伝導の効果を考慮し、粒子間力によって体積と圧力勾配を表現することを試みた。これにより、爆発火炎の湧き出しを伴う上昇や、上昇気流後方に起こる気流の巻き込み現象、複雑な流体境界面の表現が可能であることを示した。また境界条件を設定することで、障害物に対して圧力

の低い方向へ回避することも確認された。しかしながら、粒子半径が極端に異なる値を持つ場合、例えば空気粒子数を減らすため、空気粒子1つあたりの半径を大きく取ろうとすると、炎粒子数に対して空気粒子数が少ないため、粒子の挙動を押さえ込むことができず、散乱するといった現象が起こる。粒子半径が近い値を持たなくてはならない現在のモデルでは炎粒子に対して、可視化に貢献しない非常に多数の空気粒子を使用しなければならないという問題がある。これより、今後の課題としては、

- ・斥力モデルの改良
- ・より大規模な爆発火炎の表現法の開発

などが挙げられる。

謝辞

粒子による流体シミュレーション法の開発において、東京大学越塚先生の粒子法に関するご研究に激励されるところが大きい。なお、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

- [太田02] 太田真, 田村真智子, 藤田邦彦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂, 天候景観のためのZ-バッファベース高速3Dテクスチャレンダリング法, 電気関係学会東北支部連合大会, 2002 発表予定
- [菊池98] 菊池司, 村岡一信, 千葉 則茂, 積乱雲のビジュアルシミュレーション, 画像電子学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 317-326, 1998
- [越塚97] 越塚誠一著 数値流体力学 培風館 1997
- [Chiba95] N. Chiba, S. Sanakanishi, K. Yokoyama, I. Ootawara, K. Muraoka and N. Saito, Visual Simulation of Water Currents Using a Particle-based Behavioural Model, The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 6, pp. 155-171, 1995
- [Reeves83] Reeves W.T. : "Particle System - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", Computer Graphics, 17, 3, pp. 359-376, 1983
- [Sims90] Sims K. : "Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation", Computer Graphics, 24, 4, pp. 405-413, 1990
- [Takahashi97] J. Takahashi, H. Takahashi and N. Chiba, Image Synthesis of Flickering Scenes Including Simulated Flames, IEICE Transactions on Information Systems, Vol. E80-D, No. 11, pp. 1102-1108, 1997
- [Yngve00] Gary D. Yngve, Jessica K. Hodgins: Animating Explosion SIGGRAPH 2000, p. 29-36