

燃焼過程を考慮した炎の高速なシミュレーション

藤澤 誠[†](正会員) 佐々木 浩幸[†] 三河 正彦[†][†]筑波大学

Fast Flame Simulation Considering Combustion Process

Makoto FUJISAWA[†](Member), Hiroyuki SASAKI[†], Masahiko MIKAWA[†][†]University of Tsukuba

〈あらまし〉 炎はコンピュータグラフィックス (CG) 分野においてエフェクトとして多用される自然現象の 1 つである。しかし、その複雑性から燃焼過程を考慮しない単純なモデルが用いられることが多い。中でもこの現象を扱うために重要な“酸素との反応”はこれまでの研究ではほとんど考慮されていない。そのため、酸素供給で燃焼が激しくなる挙動や、不完全燃焼による温度のゆらぎなど炎が持つ独特な挙動を扱うことができない。そこで本論文では“酸素との反応”の概念とその過程に生じる化学的な現象をモデル化し、それらを用いた新しい炎のシミュレーション手法を提案する。提案手法では、炎を粒子法、酸素を格子法で独立にシミュレーションし、2つのシミュレーション間で物理量をやりとりすることで、化学反応を考慮した燃焼を扱う。また、高速に並列計算ができる GPU で実装を行い、提案手法の有効性を検証した結果、空気中の酸素を含む燃焼過程を考慮した炎のシミュレーションを 10 ~ 20fps で実行できることを確認した。

キーワード：炎シミュレーション, 燃焼過程, 粒子法, 格子法

〈Summary〉 Flame is one of the most frequently used natural phenomena in the field of computer graphics (CG). However, due to its complexity, a simple model without considering combustion process has been frequently used. A reaction with oxygen, which is one of important phenomenon for flame, has not been considered in the previous researches, while a flame in real-world would be intensified by supplying a oxygen. Also, the unique fluctuation of the flame such as the temperature fluctuation due to the incomplete combustion has not realized. In this research, we model the concept of reaction with oxygen and the chemical phenomena that occur in the combustion process, and propose a new flame simulation method using it. The flame and oxygen are simulated independently by both the particle method and the lattice method, and the physical quantity is exchanged between the two simulations to handle the combustion considering the chemical reaction. We realized the fast simulation by using a GPU parallel computation. As a result, we confirmed that the simulation of a flame with combustion process including the oxygen can be performed at 10 ~ 20 fps.

Keywords: flame simulation, combustion process, particle method, lattice method

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) の分野において、物理シミュレーションを用いることでより現実に則した自然現象のアニメーションを扱おうとする試みがなされており、それらは災害予測などの学術的な用途のものから映画やゲームなどのエンターテインメントな用途まで幅広く利用される。その中でも、炎は我々にとって非常に身近な自然現象であり、その魅力から演出などに多用されることが多い現象である。

炎とは一般に物質が酸素によって急激に酸化することによって光と熱を放出する現象として考えられている。化学反応や状態変化、流体の挙動を伴う非線形な現象のため、シミュレーションを行う対象としては非常に複雑で計算時間が莫大なものとなる。そのため、化学的現象まで考慮した炎のシミュレーションはほとんど研究されていない。特に、炎という現象を扱うにあたって一番重要な“酸素との反応”はこれまでの研究では考慮されず、多くの研究では境界条件として高温の流体を噴出することにより炎を表現する。しかしながら、この

方式では“酸素との反応”によってもたらされる現象、例えば、風による酸素供給で燃焼が激しくなる挙動や不完全燃焼による温度のゆらぎを扱うことができない。これらの挙動は視覚的な影響に留まらず、着火や延焼、消火といったインタラクティブな要素にも大きく影響を与えるため、より現実的な炎を再現するにはこの現象を考慮することが非常に重要である。

本論文では、粒子法ベースの炎シミュレーションと格子法ベースの空気シミュレーションを組み合わせ、2つのシミュレータ間で相互にやりとりを行うことで、従来手法には存在しなかった“酸素との反応”という概念を炎シミュレーションに組み込む手法を提案する。また、周囲空気への熱の逃散や燃焼速度など燃焼過程に生ずる現象も導入する。さらに提案手法をGPUを用いて並列計算することで、リアルタイムに近い速度で炎のシミュレーションが可能になることを示す。

2. 関連研究

CGにおいて、炎をシミュレーションするための様々な方法が開発されてきた。炎を表現するために、経験的によく利用される手法としてパーティクルシステムがある。この方法はパーティクルを炎の形になるように手作業で配置し、速度やライフタイムを設定するといった、とても単純な方法である。単純な仕組みゆえに、アーティストの力量によって炎の見た目や挙動が大きく異なることが特徴である。Stamら¹⁾はパーティクルシステムに対して、火炎モデルに基づいた拡散の概念を導入することで炎の表現をより扱いやすい形にしたが、この方法では乱流が炎の見た目に与える影響を考慮できない。この欠点を補うために、Fullerら²⁾は炎を扱うためのプロシージャルな手法として、あらかじめテクスチャとして定義された炎の形状を、スプライン曲線に沿って変形させることによって、炎を表現する方法を提案した。変形したテクスチャに対してノイズを付加することで、炎が持つ乱流を擬似的に表現することも可能である。しかしながら、プロシージャルな手法であるため、動的な固体などとのインタラクションは難しい。Zhangら³⁾は有向グラフを用いることで、プロシージャルな手法による炎に対して、物理的一貫性を持たせた手法を提案した。この方法はあらかじめ炎を流体として正確にシミュレーションしておき、その結果を用いて流体の流れや物理量を記録した有向グラフを作成する。さらに、生成した有向グラフを記録された物理量に合わせて変形することで炎が表現される。計算コストは非常に低く、風などによる炎の変形が発生しても物理的に良く近似された炎を可視化することができる。ただし、あらかじめシミュレーションをして得られた結果から有向グラフを生成しているため、前計算したシミュレーションに含まれない流体や固体との相互作用を扱うことはできない。

Nguyenら⁴⁾はCGの炎のシミュレーションに対して流体の概念を導入した。彼らは炎を高温の流体と見なし、格子法

を適用することによって炎が持つ流体の動きを再現した。また、炎の可視化に黒体放射の概念が導入されたことによって、温度に応じた炎の色構造が再現され、より写実的な可視化が行えるようになった。Ishikawaら⁵⁾はNguyenらの手法を拡張し、固体物質上で燃え広がる炎を扱う手法を提案した。彼らは物質形状をボクセルで近似することで固体を表現した。各固体ボクセルは燃料を持ち、発火温度に達すると燃料を消費しながら熱を発生し、周囲格子に炎を放出する。燃料の反応速度として新たにアレニウスの式を導入することで高温になるほど反応が激しくなる現象を表現している。この方法では、燃料や反応速度といった化学的現象が導入されるが、酸素は考慮されない。格子法による手法はどちらも写実性に優れているが、物理計算から可視化処理までにかかる計算コストは大きい。

稲垣ら⁶⁾は、従来の格子法で行われていたものを粒子法の一つであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法に置き換えることで高速にシミュレーションを行う手法を提案した。60fpsという非常に高速で写実性とインタラクティブ性を併せ持つ手法ではあるが、シミュレーションには簡易的なモデルが用いられており、Ishikawaら⁵⁾が扱ったような化学反応の概念は扱っていない。間淵ら⁷⁾はこの手法に対して物理的一貫性を持たせ、簡易的な化学反応モデルを適用した。これにより、火炎の形成及び固体からの作用による影響までを粒子法で扱うことが可能となった。しかしながら、この方法は気体の燃焼のみを対象としたものであるため、固体の燃焼は扱うことができない。さらに、酸素に関して他の手法と同様に考慮されてはいない。Melekら⁸⁾は固体を陰関数場で表現し、 20^3 程度の粗いグリッドによる流体シミュレーションと組み合わせることで固体の燃焼をインタラクティブな速度で再現した。彼らはグリッドセル内に酸素量や燃料量を格納することで燃焼過程も考慮している。しかし、酸素や燃料の消費量、燃焼による熱の発生などは直接パラメータとして設定する必要があり、化学的な法則に基づいて決定されるものではない。本研究では、燃焼による酸素や燃料の消費、発生する熱を燃焼による化学反応のモデル化して計算する。Mukaiら⁹⁾はSPH法による炎のシミュレーションに対して、燃焼状態に応じた浮力や圧力を計算することで、燃料はろうそくに限定されているが不完全燃焼、完全燃焼などの燃焼過程の相違を再現した。本研究では、化学反応を一般化することで気体燃料と固体燃料の両方に対応し、かつ、グリッド法を併用することで周囲の空気に含まれる酸素の影響もシミュレーションする。

3. 提案手法の構成

図1にレンダリングに関する処理を除いた提案手法全体の処理の流れを示す。以下の節で空気・炎・相互作用の計算に用いる具体的な手法について概要を述べる。

空気のシミュレーション (格子法) 炎のシミュレーション (粒子法)

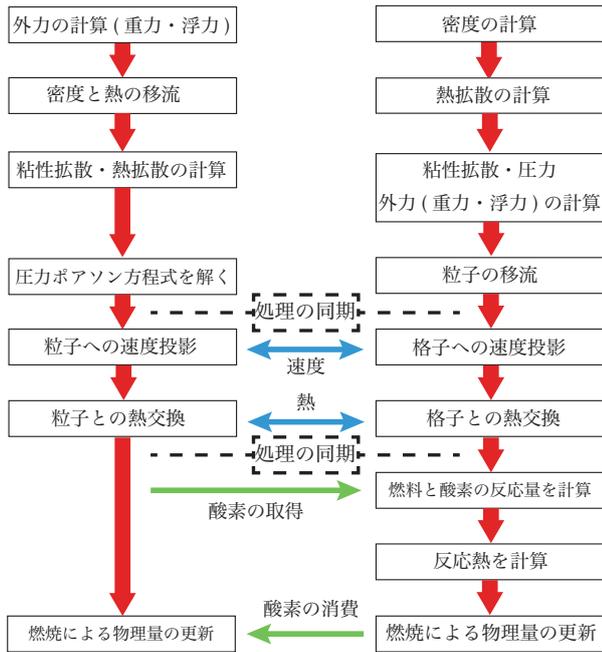


図 1 全体の処理の流れ
Fig. 1 Overview of our method

3.1 流体シミュレーション

本論文では、燃料と酸素の化学反応を扱うため、空気と炎の2種類の流体に対して流体力学計算を行い、それぞれの挙動をシミュレーションする。空気のシミュレーション (図 1 左列) には、計算領域内に均一に存在する空気を扱うため、領域全体に計算点が均一に分布し、計算点周囲の情報を高速に取得できる格子法を用いる。一方で、炎のシミュレーション (図 1 右列) には固体の燃焼など、炎と固体間の相互作用を扱いたい。格子法ではレベルセット法などによる界面追跡を行う必要があり、複数の相を扱うためには処理が複雑になりやすい¹⁰⁾。加えて、変化の激しい炎では符号付距離場が乱れやすいため、頻りにレベルセット法の再初期化処理を行うので計算コストが大きい。粒子法を用いた場合、異なる物質が混在しても、それぞれの物質を表す粒子を使うことで相互作用を容易に扱える。これらの理由から、炎のシミュレーションには粒子法を適用して流体力学計算を行う。本研究では、空気と炎を異なる手法を用いて扱うため、2つ手法間での相互作用が必要となる (図 1 中央の青矢印)。そのため、速度をやりとりする速度投影 (4.1 節) と熱をやりとりする熱交換 (4.2 節) の2つの相互作用を新たに導入する。

本論文では、格子法の流体ソルバには Stam ら¹¹⁾と同様の方法を用いる。粒子法には SPH 法を採用し、その流体ソルバには Müller ら¹²⁾の方法を用いる。さらに、SPH 法で固体を扱うために、Akinci ら¹³⁾の境界粒子計算方法を用いる。

3.2 燃焼シミュレーション

燃焼シミュレーションでは、空気と炎の流体シミュレーションに対して、燃焼過程を考慮した燃焼モデルを導入する。本

研究で扱う燃焼過程は以下のとおりである。

1. 拡散火炎
燃料ガスや酸素が濃度差に起因して拡散することによって、燃え広がっていく燃焼過程。
2. 燻焼
空気中の酸素と固形燃料の間で起こり、比較的ゆっくりと反応していく、炎を生じない燃焼過程。
3. 予混合火炎
燃焼が起こる前に燃料ガスと空気 (酸素) があらかじめ混合されているときに発生する燃焼過程。
上記の燃焼過程を考慮しつつ、燃焼として、燃料が酸素と結びつく化学反応を取り扱う。化学反応で用いる酸素は空気のシミュレーションで扱われるものを用いるものとし、炎のシミュレーションとの間で酸素のやりとり (図 1 中央の緑矢印) を行う。燃料として、気体燃料と固体燃料の2つを扱い、それぞれに対して酸素との化学反応による燃焼モデルを導入する (5 章)。

4. 手法間の相互作用

本章では格子法と SPH 法間の相互作用について述べる。

4.1 速度投影

格子法による空気と SPH 法による炎は独立してシミュレーションされているため、互いの流れに影響を及ぼさない。これらの相互作用を実現するためには、両手法の流体速度を互いの状態をもとに更新する必要がある。本論文では、Harlow らが提案した PIC (Particle In Cell) 法¹⁴⁾と同様に、速度を投影する形で相互作用を扱う。以降、格子上で定義される変量には添え字 i, j, k もしくは c を用い、粒子には添え字 p, q を用いる。

粒子から格子への速度の投影は、格子の物理量が格納されている代表点を中心に近傍粒子を探索し、その点での粒子法流体が持つ速度を用いて行う。本研究での設定では炎に用いる粒子の方が格子よりも詳細にその動きを計算しているため、粒子近傍の格子速度を以下の式により粒子の速度で上書きする。

$$u_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{\sum_{p \in N} u_p W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i+\frac{1}{2},j,k})}{\sum_{p \in N} W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i+\frac{1}{2},j,k})} \quad (1)$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2},k} = \frac{\sum_{p \in N} v_p W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i,j+\frac{1}{2},k})}{\sum_{p \in N} W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i,j+\frac{1}{2},k})} \quad (2)$$

$$w_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \frac{\sum_{p \in N} w_p W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i,j,k+\frac{1}{2}})}{\sum_{p \in N} W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{i,j,k+\frac{1}{2}})} \quad (3)$$

ここで、 N は近傍粒子の集合、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度、 \mathbf{x} は粒子及び格子点座標、 W はカーネル関数である。スタガード格子を用いているので、速度の投影式は x, y, z 方向で異なる。

格子から粒子への速度の投影は粒子から格子への速度の投影と同様に近傍格子を用いて行うが、速度の上書きではなく、速度の合成を用いる。

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{u}'_p + \frac{\sum_{c \in M} \mathbf{u}_c W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_c)}{\sum_{c \in M} W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_c)} \Delta t \quad (4)$$

M は近傍格子の集合、 \mathbf{u}'_p は速度を合成する前の粒子速度である。近傍格子とは粒子が重なる格子とその格子の 26 近傍格子を指す。式 (1) - (4) におけるカーネル関数には 3 次の線形重み関数を用いる¹⁵⁾。

4.2 熱交換

両手法間で熱のやり取りを行う手法には Hochstetter らの手法¹⁵⁾と同様の熱拡散を用いる。以下にその式を示す。

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{\rho_p C_p} A_p \sum_{c \in M} \frac{4k_p k_c}{k_p + k_c} (T_p - T_c) W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_c) \quad (5)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\rho_c C_c} \sum_{p \in N} \frac{4k_p k_c}{k_p + k_c} (T_c - T_p) A_p W(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_c) \quad (6)$$

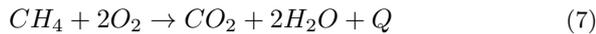
式 (5) が格子から粒子への、式 (6) が粒子から格子への熱拡散である。ここで、 ρ は密度、 T は温度、 k は熱伝導率、 C は熱容量であり、 M は粒子の近傍格子の集合、 N は格子の近傍粒子の集合、 A は接触面積である。接触面積には粒子の表面積 $4\pi r^2$ を用いる。カーネル関数には速度投影と同様に 3 次の線形重み関数を用いる。

5. 燃焼のモデル化

本研究では、燃焼過程として、拡散火炎と燻焼、予混合火炎を扱う。ただし、予混合火炎のうち、圧力が急激に高まることによる爆轟現象が発生するような燃焼は扱わない。これは本研究では炎を非圧縮流体としてシミュレーションするため、極端に圧力差が大きくなる流体のシミュレーションが不安定になるためである。本章では燃焼における化学反応を気体の燃焼と固体の燃焼をそれぞれモデル化する方法を述べる。

5.1 燃焼における化学反応式の一般化

燃焼は可燃物質が発火温度に達することで、酸素と結びつき化合物と反応熱 Q を発生させる化学反応である。例えば、メタン CH_4 の燃焼であれば、以下の化学反応式ようになる。



この反応のように、多くの燃焼では 1 種類の可燃物質が酸素と結びつくことによって、二酸化炭素や水といった化合物と反応熱 Q を発生させる。燃焼を扱う際は、このような化学反応式を導入していくことになるが、物質ごとに生成される化合物を正しく扱おうとすると、組み合わせが膨大になり、数値計算としては導入しづらい。そこで、可燃物質 X の化合物は混合気 Y であると仮定し、次のように化学反応式を単純化する。



この化学反応における質量変化は以下の式ようになる。

$$m_x + m_{o_2} = m_y \quad (9)$$

$$n = \frac{M_1 M(X)}{M_2 M(O_2)} = \frac{m_x}{m_{o_2}} \quad (10)$$

ここで、 M_1, M_2 は反応物質の mol 量、 m_x, m_{o_2}, m_y は各物質の総質量、 $M(\chi)$ は分子 χ のモル質量である。反応前後で質量保存制約 (式 (9)) は必ず満たされる。式 (10) は反応の制約式でもあり、この比を満たさない反応は発生しない。以降の節では、これらの制約を満たすように気体、固体燃料の燃焼をモデル化していく。また、燃料は気体・液体両方も粒子で表現し、各粒子で発生する反応熱を求めることで、燃焼の影響を計算する。

5.2 気体燃料の燃焼モデル

気体燃料の燃焼をモデル化する。気体燃料の燃焼で適用する燃焼過程は拡散火炎と予混合火炎である。この 2 つの燃焼過程の違いは酸素があらかじめ十分に混合されているか否かの違いであり、燃焼モデルとしてはどちらも同一に扱える。本節では気体燃料の燃焼を扱う手順について順番に説明する。

5.2.1 反応質量の導出

化学反応での反応質量が既知であれば、反応質量を化学反応式に与えることで、その化学反応の前後での質量の変化量と熱量の変化量を求めることができる。気体燃料と酸素、それぞれの反応質量 m_f, m_{o_2} は反応比 n を用いることで、式 (11) で与えられる。

$$\begin{cases} m_f = \min(f_p, n\rho_c V_c) \\ m_{o_2} = \min(\rho_c V_c, \frac{1}{n} f_p) \end{cases} \quad (11)$$

f_p は粒子燃料質量、 ρ_c は酸素格子密度で粒子に重なる酸素格子の値を用いる。 V_c は酸素格子体積である。式 (11) は反応比制約 (式 (10)) を満たし、各粒子ごとに計算される。燃料質量 f_p は各粒子が持つ値であり、純粋な気体燃料の粒子であるならば、その初期値として粒子の初期質量を与える。

5.2.2 反応熱の導出

反応熱 Q は反応質量を用いると式 (12) で与えられる。

$$Q = \Delta H_c m_f \quad (12)$$

ここで、 ΔH_c は有効燃焼熱である。有効燃焼熱とは反応した燃料質量辺りに放出する熱量を表した値で、化学実験によって求められる値である。本論文では、文献 16) を参考にして有効燃焼熱 ΔH_c を設定する。

5.2.3 物理量の更新

ここまで得られた値を用いて粒子と格子の物理量を更新する。反応によって気体燃料粒子は生成された化合物 Y を含む混合気粒子に変化したと考えると、粒子質量 m_p に反応し

た酸素質量 m_{o_2} を加えるだけで、質量保存制約 (式 (9)) を満たすことができる。質量変化に関する物理量の更新式は次のとおりとなる。

$$\begin{cases} f_p^{n+1} = f_p^n - m_f \\ \rho_c^{n+1} = \rho_c^n - m_{o_2}/V_c \\ m_p^{n+1} = m_p^n + m_{o_2} \end{cases} \quad (13)$$

また、粒子の温度は式 (12) で得られた反応熱 Q を次の式 (14) に代入して更新する。

$$T_p^{n+1} = T_p^n + \frac{Q}{\rho_p C_p} \quad (14)$$

5.3 固体燃料の燃焼モデル

固体燃料の燃焼をモデル化する。固体燃料の燃焼で扱う燃焼過程は拡散火災と燻焼である。燃焼をモデル化する手順としては、前節で扱った気体燃料の燃焼モデルと同様に反応質量、反応熱を求め、粒子と格子の物理量を更新していく形で行う。ただし、固体燃料の燃焼は固体表面で発生する点と、熱分解と燃料の気化を含めた反応速度を考慮する必要がある。そのため、気体燃料の燃焼とは異なり、固体表面追跡と反応速度の概念を新たに導入する。本節では固体燃料の燃焼を扱う手順について順番に説明する。

5.3.1 固体の表面追跡

固体燃料の燃焼は固体表面でのみ発生するので、最初に燃焼点となる固体表面粒子を求める必要がある。提案法では、固体を粒子の集合で近似しているため、ある粒子 p とその近傍粒子 q との距離ベクトルの総和 \mathbf{r}_{pq} から固体表面粒子と法線ベクトルを求める。単位法線ベクトル $\hat{\mathbf{n}}$ は式 (15) で求め、求めた法線ベクトルがある一定値以上の大きさをもつ粒子を固体表面粒子と判定する。ただし、粒子が一列に並んでいる場合や他の粒子から孤立している場合に距離ベクトルの総和が 0 となり、それらの粒子が内部粒子と判定されるため、近傍粒子の個数が一定数以下の場合も表面粒子とする。この場合の法線方向は、法線が炎粒子の放出方向の決定に用いられることを考慮して、鉛直上向き ($-\hat{\mathbf{g}}$) に設定する。

$$\hat{\mathbf{n}} = \begin{cases} \frac{\sum_q \mathbf{r}_{pq}}{|\sum_q \mathbf{r}_{pq}|} & (|\sum_q \mathbf{r}_{pq}| \geq \kappa) \\ -\hat{\mathbf{g}} & ((0 \leq n_p \leq \kappa_n) \\ & \& |\sum_q \mathbf{r}_{pq}| < \kappa) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 n_p は近傍粒子数であり、 κ, κ_n は内部判定用の閾値である。閾値 κ には粒子半径 r と等しい値を設定し、 κ_n は設定した有効半径内の粒子数に基づいて設定する。

5.3.2 反応質量の導出

固体燃料の燃焼は多くの場合、固体燃料そのものが燃焼するのではなく、熱分解によって放出された気体燃料や固体燃料が気化して気体燃料となったものが燃焼している。そのため、厳密に固体燃料の燃焼を扱うには、熱分解や相変化、気化

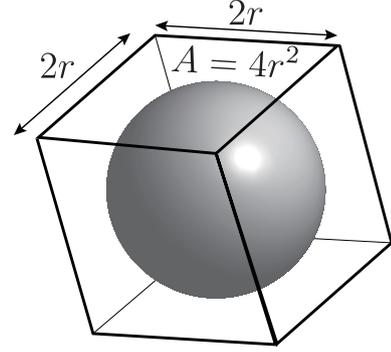


図 2 固体表面積の近似
Fig. 2 Approximate surface area

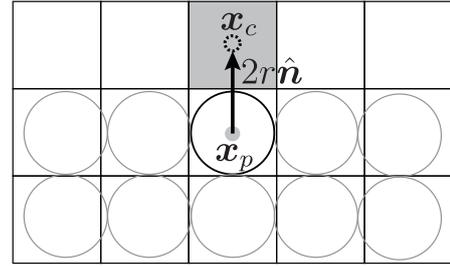


図 3 酸素格子位置
Fig. 3 Position of oxygen cell

熱による熱収支などの影響を考慮する必要がある。これらの現象は複雑ですべてを考慮するのは難しいため、火災の研究分野で燃料の放出速度を推定するのによく使用される最大燃焼速度¹⁶⁾を用いる。最大燃焼速度とは微小時間あたりに単位面積上で反応する質量を表したものであり、化学実験で測定することによって得られる。反応比 n と最大燃焼速度を用いて、固体燃料を構成する各表面粒子で反応質量 m_f と酸素の反応質量 m_{o_2} を以下の式で求める。

$$\begin{cases} m_f = \min(f_p, \dot{m}_f A \Delta t, n \rho_c V_c) \\ m_{o_2} = \min(\rho_c V_c, \frac{1}{n} f_p, \frac{1}{n} \dot{m}_f A \Delta t) \end{cases} \quad (16)$$

ここで \dot{m}_f は固体燃料の最大燃焼速度であり、本論文では、文献 16) を参考に設定した。 A は反応面の面積である。半径 r の固体粒子が格子状に配置されていると仮定し、この面積には、粒子をボクセルに近似して得られる 1 つの面を反応面として、その面積 $4r^2$ を設定する (図 2)。固体燃料の燃焼で用いる酸素密度 ρ_c は、法線方向 $\hat{\mathbf{n}}$ に粒子直径 $2r$ だけ移動した点を含む格子点 \mathbf{x}_c の値を用いる (図 3)。

5.3.3 反応熱の導出

反応熱は気体燃料の場合と同様に、反応質量 m_f と有効燃焼熱 ΔH_c を用いることで算出できる。ただし、固体燃料の場合、炎を伴う発熱 Q_{fire} と固体表面が炭化することで発生する炎を伴わない発熱 Q_{solid} の 2 種類があるため、それぞれに熱量を分配する。

$$\begin{cases} Q_{fire} = (1 - \beta) \Delta H_c m_f \\ Q_{solid} = \beta \Delta H_c m_f \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 $\beta \in [0, 1]$ は熱分配係数である。 β が 1 に近づくほど、燃焼の挙動は燻焼の形になる。 $\beta = 1$ にした場合は、木炭などの炎を放出しない表面燃焼となる。

5.3.4 炎粒子の放出

固体燃料の燃焼が拡散火炎ならば、固体燃料から炎が放出される。ゆえに、固体燃料の燃焼に合わせて、新たに炎粒子を計算領域に追加する必要がある。炎粒子を追加する位置 \mathbf{x}_f は固体燃料粒子の位置 \mathbf{x}_p から法線ベクトル $\hat{\mathbf{n}}$ を γ 倍した分だけ移動した位置とする。

$$\mathbf{x}_f = \mathbf{x}_p + \gamma \hat{\mathbf{n}} \quad (18)$$

本論文の実験では、固体燃料粒子からの圧力によって炎が吹き飛ばされないように、倍率 γ は有効半径 h と等しい値を用いている。

炎粒子に持たせる物性に関して、炎粒子そのものは、固体燃料から放出された気体であり、放出過程で周囲空気と混ざり合った混合気である。反応質量の導出のところで述べたように、固体燃料の気化を正確に考慮することは難しいため、炎粒子の組成はほぼ空気であると仮定し、炎粒子には空気と同じ物性を与える。

初期温度は次の式により求める。

$$T_{fire} = \frac{Q_{fire}}{\rho_{fire_0} C_{fire}} \quad (19)$$

ここで、 ρ_{fire_0} は炎粒子の初期密度、 C_{fire} は炎粒子の熱容量である。最後に、質量保存制約 (式 (9)) を満たす必要があるので、前項で求めた反応質量 m_f 、 m_{o_2} を初期値として与えられている粒子質量に対して加える。

6. 物理量の更新

燃焼によって消費された燃料や酸素の値を気体燃料の燃焼と同様に更新する。同時に、固体燃料の燃焼の場合は、気体として固体燃料の質量を放出していくので、消費した燃料の分だけ固体粒子質量 m_p を小さくする (式 (20))。

$$m_p^{n+1} = m_p^n - m_f \quad (20)$$

境界粒子温度の更新に関しても、気体燃料と同様で、反応熱 Q_{solid} を式 (14) に代入して粒子温度を更新する。

7. レンダリング

粒子法でシミュレーションされた炎を可視化するために、レイキャスティングによるボリュームレンダリングを行う。炎粒子の密度場と温度場を格納した 3D テクスチャをまず生成し、その情報をもとに炎の色と透過値 α を求めていく。炎の色は Nguyen ら⁴⁾の方法と同様にして求める。透過値 α は炎粒子の密度の値をもとに決定する。密度値から透過値への変換式には坂本ら¹⁷⁾が提案した式を用いた。

$$\alpha = 1 - e^{-\rho \frac{1}{R_z}} \quad (21)$$

表 1 空気及び粒子の物性値

Table 1 Parameters for air and fire/solid particles

物質種類	空気	気体燃料	固体燃料	固体火炎
初期密度 [kg/m ³]	0.281	0.717	38×10^4	1.205
初期燃料 [kg]	-	6.007×10^{-2}	0.1	-
熱容量 [J/(kg·K)]	1.005	2.206	10^{-4}	1.005
熱伝導率 [J/(s·m·K)]	5.243	5.301	10.29	5.243
動粘性係数	10^{-3}	40	-	10
浮力係数	0.65	2×10^{-2}	-	0.1
反応比	-	0.251	0.1667	-
発火温度 [K]	-	773.15	673.15	-
有向燃焼熱 [K/kg]	-	50×10^7	33×10^6	-
最大燃焼速度 [kg/(m ² ·s)]	-	-	11	-
熱分配係数	-	-	0.3	-

表 2 各シーンの 1 フレームあたりの計算時間

Table 2 Computational time per frame of each scene

シーン	ガスバーナ	固体燃焼
Δt (格子法) [s]	0.02	
Δt (SPH 法) [s]	0.002	
3D テクスチャ解像度	$256 \times 256 \times 128$	
格子法解像度	$64 \times 64 \times 64$	
粒子数	最大 [個]	2001 9617
	平均 [個]	1436.7 4149.4
計算時間	最小 [s]	0.047 0.023
	最大 [s]	0.121 0.078
	平均 [s]	0.082 0.054

ここで、 R_z は 3D テクスチャの奥行き解像度である。この式で得られた透過値をそのまま用いると、炎の先端で粒子形状や霧のようなアーティファクトが生ずる。炎の場合、描画すべき領域は燃焼が発生している密度が高い領域であるため、密度の低い領域のピクセルは破棄するようにする。ただし、単純に破棄するとエイリアスやブロックノイズが生ずるため、密度が低い領域の影響を抑え、炎の形状とアーティファクトの境目を滑らかに繋ぐように透過値 α を補正した上で、ピクセルを破棄するようにする。透過値 α の補正には、ステップ関数のような性質を持ち、さらにその間を滑らかに繋ぐことができる特徴を持ったシグモイド関数を用いた (式 (22))。

$$\alpha' = \frac{\tanh\left(\frac{a(\alpha+b)}{2}\right) + 1}{2} \quad (22)$$

α' は補正後の透過値であり、 a 、 b は制御変数である。 a が大きいほど変化が極端になり、 b が小さいほど小さな密度の影響を抑えられる。この制御変数は対象とする炎の気体密度によって適宜設定する。本論文では $a = 15.5$ 、 $b = -0.3$ と設定した。また、 $\alpha < 0.025$ となるピクセルを破棄するようにした。ピクセル破棄によるエイリアスは完全に除去されないため、最後に 3×3 のガウシアンフィルタを適用することでエイリアスを取り除いた。

8. 結果と考察

8.1 実験設定

提案手法の有効性を確認するために、2つのシーンを作成し、実験を行なった。実験を行うにあたって CPU に Intel Core i7-6700K 4.00GHz を、GPU に NVIDIA GeForce GTX 1070

を用いた。実行結果はすべて NVIDIA CUDA を用いて GPU 上で並列計算されたものである。実験で設定した空気及び粒子の物性値を表 1 に示す。空気格子及び粒子の初期温度は環境温度 20°C に設定し、気体の圧力定数は 9.8×10^{-4} 、固体の圧力定数は 8.0 とした。

1. ガスバーナシーン (シーン A)

気体燃料による燃焼として、ガスバーナによる燃焼をシミュレーションする。ガスバーナが供給する気体燃料と酸素の混合気は、気体燃料粒子を $5 \times 3 \times 5$ の格子状に供給し、供給された気体燃料粒子に重なる空気格子に対して酸素を供給することで表現する。さらに、供給する粒子及び酸素には鉛直上向きに 10m/s の速度を与える。気体燃料への着火には 10^6 K の熱を供給された粒子に対して与えることを行う。

2. 固体燃焼シーン (シーン B)

固体の発火、延焼、鎮火までの流れをシミュレーションする。固体は境界粒子を密に並べて表現する。固体形状には、水平及び垂直方向の炎の延焼を確認するために T 字形状を採用した。固体燃料への着火には固体端にガスバーナによる炎を当てることによって行う。

8.2 結果と考察

本節では各シーンのシミュレーション結果とその考察を述べる。各シーンの計算時間については表 2 に示す。

8.2.1 ガスバーナシーン (シーン A)

シーン A の実行結果を図 4 に示す。図 4(a) が着火直後の状態であり、着火された燃料が熱を周囲の燃料に対して放出し、連鎖的に反応することで炎が大きくなり (図 4(b))、ある程度の大きさまで炎が成長するとその大きさを保ちながら燃料供給を止めるまで燃焼し続ける (図 4(c))。図 4 の結果から、提案法を用いることで、供給される気体燃料に対して熱を加えることで、気体燃料が空気中の酸素と反応・燃焼し、炎を形成するという燃焼による炎の変化を再現できていることが確認できる。

燃料粒子の量はそのままに、供給される酸素の量を変化させた時の炎が図 5(a)~(c) である。化学反応モデルによって、酸素量が少ないほど、燃料の反応量が少なくなり、反応熱が小さくなっていることが確認できる。図 6 は図 5(b) に示される炎に対し、左から右へと風を加えたとき結果である。風そのものは全ての空気格子に右方向の速度を設定することで扱った。図 6 より、手法間の速度投影によって炎が風の影響を受けていることがわかる。

シーン A における 1 フレームあたりの計算時間は平均で約 0.082 秒 (約 12fps) であり、CG アニメーションでのフレームレートである 20~30fps には達していないが、気体燃料の燃焼をリアルタイムに近い速度で扱うことができている。

8.2.2 固体燃焼シーン (シーン B)

シーン B の実行結果を図 7 に示す。図 7 では、T 字形状の固体燃料にバーナーで着火し (図 7(a),(b))、その炎が伝播していき (図 7(c),(d))、最終的に燃料が燃え尽きることによる炎の鎮火する (図 7(e))、といった固体燃焼の一連の流れを扱うことができている。シーン B に対して、左から右へと流れる風を付与した結果が図 8 である。風は空気格子左端の境界格子に 16m/s の右向き速度と 0.4215kg/m^3 の酸素密度を設定して扱った。風を伴わないもの (図 7) よりも延焼速度も速くなっており、炎色の変化から反応熱が増加することも確認できる。以上より、提案モデルは風による影響が考慮されており、燃焼速度及び延焼速度を風による酸素の供給によって制御可能であるとわかる。

シーン B における 1 フレームあたりの計算時間は平均で約 0.054 秒 (約 18.5fps) であり、粒子が広い空間に渡って分布しているため、粒子が特定の分割空間に集中せず、並列化の恩恵を十分に受けられるので、粒子数が増加しているにも関わらず、シーン A より高速に動作している。

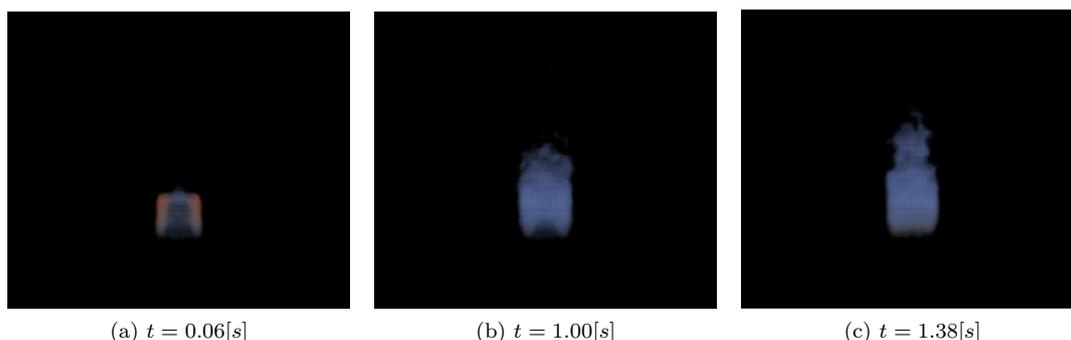
9. むすび

本論文では、酸素や燃焼過程を考慮した燃焼の化学反応モデルを提案し、そのモデルで用いる空気と炎、2つの性質が異なる流体を高速に扱うために、格子法と粒子法の両方を同時に用いた新たな炎シミュレーション手法も提案した。実験では、気体燃料と固体燃料で着火から延焼、鎮火までの燃焼の流れを再現可能であることが確認できた。また、燃焼点周囲の酸素濃度を風などで増減させることで炎の激しさが変わることも確認でき、燃焼の原理に基づいて炎の形状と色を高速に制御することができた。

提案手法では、相変化を考慮していないため、ロウソクなどの熱で変化する固体燃料やガソリンなどの液体燃料は扱うことができない。そのため、相変化の概念を導入し、燃焼モデルをさらに拡張することが今後の課題である。また、乱流が正確には考慮されておらず、ほとんどの炎は層流火炎になっているため、乱流を考慮する必要もある。さらに、提案手法の結果の評価はすべて定性的なものであり、現実の炎での計測結果の比較などの定量的な評価も今後の課題である。

参考文献

- 1) J. Stam, E. Fiume: "Depicting Fire and Other Gaseous Phenomena Using Diffusion Processes", Proc. of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.129-136 (1995).
- 2) A. R. Fuller, H. Krishnan, K. Mahrous, B. Hamann, K. I. Joy: "Real-time Procedural Volumetric Fire", Proc. of the 2007 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, pp.175-180 (2007).
- 3) Y. Zhang, C. D. Correa, K.-L. Ma: "Graph-Based Fire Synthesis", Proc. of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.187-194 (2011).
- 4) D. Q. Nguyen, R. Fedkiw, H. W. Jensen: "Physically Based



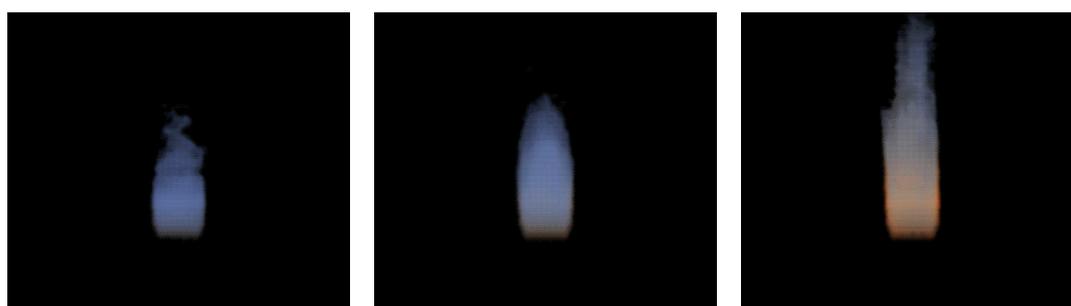
(a) $t = 0.06[s]$

(b) $t = 1.00[s]$

(c) $t = 1.38[s]$

図4 ガスバーナーシミュレーションの結果

Fig. 4 Results of gas burner simulation



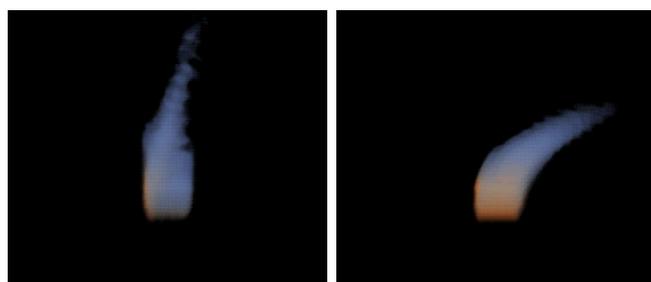
(a) $\rho_{o_2} = 0.562[kg/m^3]$

(b) $\rho_{o_2} = 0.3934[kg/m^3]$

(c) $\rho_{o_2} = 0.1124[kg/m^3]$

図5 供給酸素量を変えた結果

Fig. 5 Results with oxygen supply changing



(a) 風速 16m/s

(b) 風速 64m/s

図6 風による影響

Fig. 6 Results with wind changing

- Modeling and Animation of Fire”, ACM Trans. on Graphics, Vol.21, pp.721–728 (2002).
- 5) T. Ishikawa, R. Miyazaki, Y. Dobashi, T. Nishita : “Visual Simulation of Spreading Fire”, Proc. of NICOGRAPH International’ 05, pp.43–48 (2005).
 - 6) 板垣智, 井村誠孝, 池田聖, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: “粒子ベース流体シミュレーションを用いた炎のリアルタイムレンダリング”, 研究報告グラフィクスと CAD(CG), Vol.2010-CG-138, No.14, pp.1–6 (2010).
 - 7) 間淵聡, 藤代一成, 大野義夫: “SPH ベースリアルタイム火炎シミュレーション”, 情報処理学会論文誌, Vol.52, pp.2965–2972 (2011).
 - 8) Z. Melek, J. Keyser: “Interactive Simulation of Burning Objects”, Proc. of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp.462–466 (2003).
 - 9) N. Mukai, S. Akasaka, Y. Chang: “Candle Flame Simulation Considering Combustion States”, Proc. of the 6th IEEE International Conference on Image Electronics and Visual Computing, pp.3A-3-1-4 (2019).
 - 10) F. Losasso, T. Shinar, A. Selle, R. Fedkiw: “Multiple Interacting Liquids”, ACM Trans. on Graphics, Vol.25, pp.812–819

(2006).

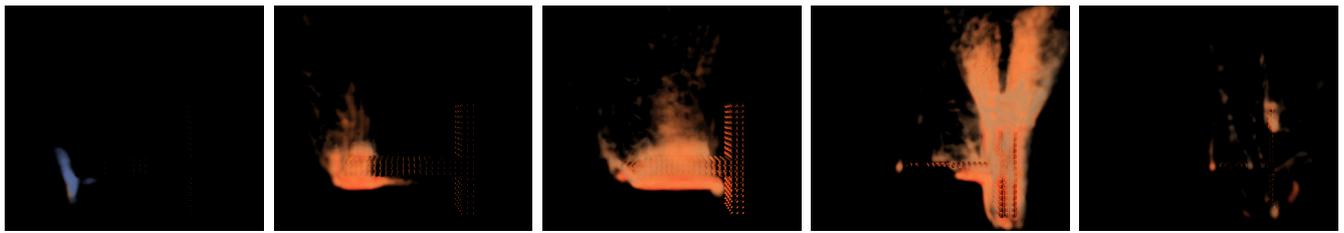
- 11) J. Stam: “Stable Fluids”, Proc. of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.121–128 (1999).
- 12) M. Müller, D. Charypar, M. Gross: “Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications”, Proc. of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.154–159 (2003).
- 13) G. Akinci, M. Ihmsen, N. Akinci, M. Teschner: “Parallel Surface Reconstruction for Particle-Based Fluids”, Computer Graphics Forum, Vol.31, pp.1797–1809 (2012).
- 14) F. H. Harlow: “The Particle-In-Cell Method for Numerical Solution of Problems in Fluid Dynamics”, Meth. Comput. Phys., Vol.3, pp.319–343 (1962).
- 15) H. Hochstetter, A. Kolb: “Evaporation and Condensation of SPH-Based Fluids”, Proc. of the ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.3:1–9 (2017).
- 16) James G.Quintiere, 大宮喜文, 若月薫, 基礎 火災現象原論, 共立出版(株) (2009).
- 17) 坂本尚久, 小山田耕二: “粒子ベースボリュームレンダリング”, 可視化情報学会論文集, Vol.27, No.2, pp.7–14 (2007).

(2020年3月23日 受付)



藤澤 誠 (正会員)

2005年 静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。2008年 同博士課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2011年 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科助教, 現在に至る。博士(工学)。CG, 物理シミュレーションなどの研究に従事。情報処理学会, 画像電子学会, 日本VR学会, ACM, IEEE CS各会員。



(a) $t = 0.98$

(b) $t = 3.8$

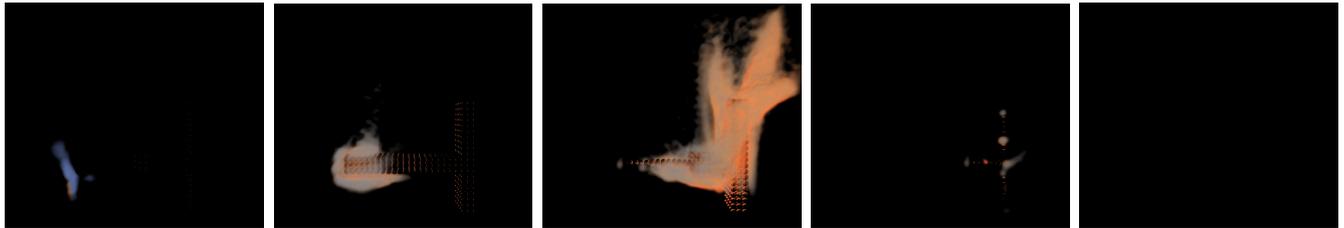
(c) $t = 16.22$

(d) $t = 34.26$

(e) $t = 54.76$

図 7 固体燃焼シーンの結果

Fig. 7 Results of solid combustion simulation



(a) $t = 0.98$

(b) $t = 3.8$

(c) $t = 16.22$

(d) $t = 34.26$

(e) $t = 42.8$

図 8 風を伴った場合の固体燃焼シーンの結果

Fig. 8 Results of solid combustion simulation with wind



佐々木 浩 幸

2018年 筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業. 学士 (情報メディア科学). 在学中, 物理シミュレーションに関する研究に従事. 現在, 任天堂株式会社に勤務.



三 河 正 彦

1994年 大阪大学大学院機械工学分野修士課程修了. 同年 NTT アクセス網研究所入所. 2003年 筑波大学図書館情報学系講師. 2006年 同大学院図書館情報メディア研究科准教授, 現在に至る. 博士 (工学). 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 日本知能情報ファジィ学会, IEEE 各会員.