# 燃焼過程を考慮した

## 炎のシミュレーション

佐々木 浩幸<sup>1,a)</sup> 藤澤 誠<sup>1,b)</sup> 三河 正彦<sup>1,c)</sup>

概要:炎はコンピュータグラフィックス (CG) の分野において多用される自然現象の1つである.しかし, その複雑性から化学的な現象をほとんど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全く考慮されていない.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する.

## Hybrid Fire Simulation Considering Combustion Process

Sasaki Hiroyuki<sup>1,a)</sup> Fujisawa Makoto<sup>1,b)</sup> Mikawa Masahiko<sup>1,c)</sup>

## 1. はじめに

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,多くの研究では高温の 流体の噴出により炎を表現する.しかしながら,この方式 だと"酸素との反応"によってもたらされる現象,例えば, 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出来ない.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.

## 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.初めて 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のは Nguyen ら [1] で,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 [2].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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 筑波大学

Uniersity of Tsukuba

a) s1613112@u.tsukuba.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>b)</sup> fujis@slis.tsukuba.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>c)</sup> mikawa@slis.tsukuba.ac.jp

**IPSJ SIG Technical Report** 

ながら熱を発し、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 時間は大きい.

稲垣らは、従来の格子法で行われていたものを粒子法の 一種である 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 [3]. 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 らが扱った ような化学反応の概念は扱っていない. 間淵らはこの手法 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 [4]. これにより、火炎の形成および固体からの 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出来ない. さらに、 酸素に関しても他の手法と同様に考慮されてはいない.

#### 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 算において用いる具体的な手法について概要を述べる.

## 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



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)

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い たいため,領域全体に計算点が均一に分布する格子法を用 いる, 一方で, 炎のシミュレーション (図1右列) には固体 の燃焼等,炎と固体間の相互作用を扱いたいが,格子法を 用いた場合にはレベルセット法等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 [5]. 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,頻繁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. 粒子法を用いたならば, 異なる物 質が混在しても相互作用を容易に扱えるので、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.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 [6] 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 [7] の方法を用いる. さらに, SPH 法で 固体を扱うために、Akinciら [8] の境界粒子も用いる.

#### 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通りである.

- (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) が予め混合さ 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 [9] のように, 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.粒子法で扱う炎の方が 速度が大きく,流れを支配するため,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.

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

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

$$w_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \frac{\sum_{p \in N} w_p W(\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{x}_{i,j,k+\frac{1}{2}})}{\sum_{p \in N} W(\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{x}_{i,j,k+\frac{1}{2}})}$$
(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, *x* は粒子および格子点座標, *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.

$$\boldsymbol{u}_{p} = \boldsymbol{u}_{p}^{\prime} + \frac{\sum_{c \in M} \boldsymbol{u}_{c} W(\boldsymbol{x}_{p} - \boldsymbol{x}_{c})}{\sum_{c \in M} W(\boldsymbol{x}_{p} - \boldsymbol{x}_{c})} \Delta t$$

$$\tag{4}$$

*M* は近傍格子の集合, *u*<sup>*p*</sup> 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 8 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 [10].

#### 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 [10] と同様の熱拡散を用いる.以下にその式を示す.

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{\rho_p C_p} A_p \sum_{c \in M} \frac{4k_p k_c}{k_p + k_c} (T_p - T_c) W(\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{x}_c)$$
(5)  
$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\rho_{c_0} C_c} \sum_{p \in N} \frac{4k_p k_c}{k_p + k_c} (T_c - T_p) A_p W(\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{x}_c)$$
(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, $\rho$  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 次の線形重み付け関数を用いる.

#### 5. 燃焼のモデル化

本章では化学反応を準ずる気体の燃焼と固体の燃焼をそ れぞれモデル化する.

#### 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.物質 毎に生成される化合物を正確に扱うと組み合わせが膨大に なるので,可燃物質Xの化合物は混合気Yであると仮定 し,化学反応式を単純化する(式(7)).加えて質量保存制約 と質量ベースの反応比nも導入する.

 $M_1 X + M_2 O_2 \to Y + Q \tag{7}$ 

$$m_x + m_{o_2} = m_y \tag{8}$$

$$n = \frac{M_1 M(X)}{M_2 M(O_2)} = \frac{m_x}{m_{o_2}} \tag{9}$$

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  $\chi$  のモル質量である. 反応前 後で質量保存制約 (式 (8)) は必ず満たされる. 式 (9) 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, 燃料は両方とも粒 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 か否かの違いなので,燃焼モデルとしてはどちらも同一に 扱える.以下に気体燃料の燃焼を扱う手順を示す.

#### 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、反応質量を式 (7)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 (10) で与えられる.

$$m_f = \min(f_p, n\rho_c V_c)$$
  

$$m_{o_2} = \min(\rho_c V_c, \frac{1}{n} f_p)$$
(10)

 $f_p$ は粒子燃料質量,  $\rho_c$ 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 (10)は反応比制約 (式 (9))を満たし,各粒子ごとに計算される.

#### 2. 反応熱の導出

反応熱 Q は反応質量を用いると式 (11) で与えられる.

$$Q = \Delta H_c m_f \tag{11}$$

ここで、 $\Delta H_c$ 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 [11] を参考にして有効燃焼熱  $\Delta H_c$ を設定する.

#### 3. 物理量の更新

ここまでに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 mp に反応した酸素質量 mo2 を加えるだけで,質 量保存制約 (式 (8)) 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以下の通りとなる.

$$f_p^{n+1} = f_p^n - m_f 
 \rho_c^{n+1} = \rho_c^n - m_{o_2}/V_c 
 m_n^{n+1} = m_n^n + m_{o_2}$$
(12)

粒子の温度は、反応熱 Q を式 (13) に代入して更新する.

$$T_p^{n+1} = T_p^n + \frac{Q}{\rho_p C_p} \tag{13}$$

#### 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 燃焼過程は拡散火炎と燻焼である.以下に固体燃料の燃焼 を扱う手順を示す.

#### 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, 燃焼 点となる固体表面粒子を求める.本論文では, ある粒 子 p とその近傍粒子 q との距離ベクトルの総和から固 体表面粒子と法線ベクトルを求める.法線ベクトル  $\hat{n}$ は式 (14) で求め, 法線ベクトルが 0 でない粒子が固体 表面粒子となる.

$$\hat{\boldsymbol{n}} = \begin{cases} \frac{\sum_{q} \boldsymbol{r}_{pq}}{|\sum_{q} \boldsymbol{r}_{pq}|} & (|\sum_{q} \boldsymbol{r}_{pq}| \ge \kappa) \\ -\hat{\boldsymbol{g}} & ((n_{p} = 0 \mid n_{p} = 2) \\ & \& \mid \sum_{q} \boldsymbol{r}_{pq} \mid < \kappa) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$
(14)

ここで、 $n_p$  は近傍粒子数であり、 $\kappa$  は内部判定用の閾 値である. 閾値には粒子半径 r と等しい値を設定した.

### 2. 反応質量の導出

固体燃料の燃焼は多くの場合,熱分解や相変化,気化熱 による熱収支などの影響を考える必要がある.これら の現象は複雑で扱うのは難しいため,式(15)のように 最大燃焼速度で近似する[11].

$$m_f = \min\left(f_p, \dot{m}_f A \Delta t, n \rho_c V_c\right)$$
  

$$m_{o_2} = \min\left(\rho_c V_c, \frac{1}{n} f_p, \frac{1}{n} \dot{m}_f A \Delta t\right)$$
(15)

 $\dot{m}_f$ は固体燃料の最大燃焼速度であり、本論文では、文 献 [11] を参考に設定した. Aは反応面の面積である. 固体粒子が格子状に配置されているとき、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

© 2018 Information Processing Society of Japan

応面として, その面積  $4r^2$  を設定できる (図 2). 固体燃料の燃焼で用いる酸素は, 固体表面に接している格子 点  $\boldsymbol{x}_c$  の値を用いる (図 3).





図 2: 固体表面積の導出

図 3: 酸素格子位置

#### 3. 反応熱の導出

固体燃料の場合,炎を伴う発熱 *Q*<sub>fire</sub> 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*<sub>solid</sub> の2種 類があるため,それぞれに熱量を分配する.

$$Q_{fire} = (1 - \alpha)\Delta H_c m_f$$

$$Q_{solid} = \alpha \Delta H_c m_f$$
(16)

ここで,  $\alpha \in [0,1]$  は熱分配係数である.  $\alpha$  が 1 に近づ くほど, 燃焼の挙動は燻焼の形になる.  $\alpha = 1$  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.

#### 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  $x_f$  は固体燃料粒子の位置  $x_p$  から法線 ベクトル  $\hat{n} \epsilon_{\gamma}$  倍した分だけ移動した位置とする. 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.反応で消費される燃 料質量は 1g にも満たないため、放出される気体はごく 少量であると言える.ゆえに、炎粒子の組成はほぼ空 気であると考えて問題無い.このことから、炎粒子に は空気と同じ物性を与える.初期温度は以下の式によ り求める.

$$T_{fire} = \frac{Q_{fire}}{\rho_{fire_0} C_{fire}} \tag{17}$$

ここで、 $\rho_{fire_0}$  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(8))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.

#### 5. 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<sub>p</sub>を小さくする (式 (18)).

$$m_p^{n+1} = m_p^n - m_f (18)$$

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<sub>solid</sub> を式 (13) に代入して粒子温度を更新する.

## 6. 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 [1] 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 [12] が提案した式を用いた.

$$\alpha^* = 1 - e^{-\rho \frac{1}{R_z}} \tag{19}$$

ここで, *R<sub>z</sub>*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 形状や靄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 (20)).

$$\alpha(\alpha^*, a, b) = \frac{tanh(\frac{a(\alpha^* + b)}{2}) + 1}{2}$$
(20)

a, bは制御変数であり, 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 $3 \times 3$ 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.

#### 7. 結果と考察

#### 7.1 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 定した空気および粒子の物性値を表1に示す.空気格子お よ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<sup>-4</sup>、固体の圧力定数は 8.0 とした. **A. ガスバーナ シーン** 

表 1: 空気及び粒子の物性値

物質種類	空気	気体燃料	固体燃料	固体火炎
初期密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	0.281	0.717	$38\times 10^4$	1.205
初期燃料 [kg]	-	$6.007\times 10^{-2}$	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	$2  imes 10^{-2}$	-	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]	-	$50  imes 10^7$	$33  imes 10^6$	-
最大燃焼速度 [kg/(m <sup>2</sup> ·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

シー	ーン	ガスバーナ	固体燃焼	
$\Delta t$ (格子法) [s]		0.02		
$\Delta t$ (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	

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5×3×5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<sup>6</sup>Kの熱を供給 された粒子に対して与えることで行う.

#### B. 固体燃焼 シーン

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.

#### 7.2 結果

シーン A, シーン B の結果を図 4, 図 5 にそれぞれ示す. さらに, 各シーンの計算時間をまとめたものを表 2 に示す.

#### 7.3 考察

#### 7.3.1 ガスバーナシーン

図4から,供給される気体燃料に対して熱を加えること で,気体燃料が燃焼し,炎を形成され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4(a)-4(c)である.化学反応モデルに 従って,酸素量が少ないほど,燃料の反応量が少なくなり,

#### 情報処理学会研究報告 IPSJ SIG Technical Report











(a)  $\rho_{o_2} = 0.562 [\text{kg/m}^3]$  (b)  $\rho_{o_2} = 0.3934 [\text{kg/m}^3]$  (c)  $\rho_{o_2} = 0.1124 [\text{kg/m}^3]$  (d) 風による影響 (16m/s) (e) 風による影響 (64m/s) 図 4: ガスバーナ シーンの結果



(a) t = 0.98







(d) t = 34.26



(e) t = 54.76

図 5: 固体燃焼 シーンの結果

反応熱が小さくなっていることが確認できる. 図 4(d), 4(e) は図 4(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 4(d), 4(e) より, 手法間の速 度投影に従って炎が風の影響を受けていることが分かる.

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 秒で, 気体燃料の燃焼をリアルタイムに扱うこと ができている.

## 7.3.2 固体燃焼シーン

図4より,固定燃料の着火(図4(a),4(b)),炎の伝播(図 4(c),4(d)),燃料が燃え尽きることによる炎の鎮火(図4(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こ とが分かる.シーンB対して,左から右へと流れる風を付 与した結果が図6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<sup>3</sup>の酸素密度を設定し て扱った.風を伴わないもの(図5)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.

## 8. 結論

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



(a) t = 3.8
(b) t = 16.22
(c) t = 34.26
(c) f = 34.26
(c) f = 34.26

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 状と色をインタラクティブ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,乱流を考慮することも今後の課題である.

#### 参考文献

- Nguyen, D. Q., Fedkiw, R. and Jensen, H. W.: Physically Based Modeling and Animation of Fire, ACN TOG - Proc. SIGGRAPH, Vol. 21, pp. 721–728 (2002).
- [2] Ishikawa, T., Miyazaki, R., Dobashi, Y. and Nishita, T.: Visual Simulation of Spreading Fire, In *Proceeding of NICOGRAPH International'* 05, pp. 43–48 (2005).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Losasso, F., Shinar, T., Selle, A. and Fedkiw, R.: Multiple Interacting Liquids, ACM TOG - Proc. SIG-GRAPH, Vol. 25, pp. 812–819 (2006).

- [6] Stam, J.: Stable Fluids, In Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 121–128 (1999).
- [7] Müller, M., Charypar, D. and Gross, M.: Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications, In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 154–159 (2003).
- [8] Akinci, G., Ihmsen, M., Akinci, N. and Teschner, M.: Parallel Surface Reconstruction for Particle-Based Fluids, *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, pp. 1797–1809 (2012).
- [9] Harlow, F. H.: The Particle-In-Cell Method for Numerical Solution of Problems in Fluid Dynamics, *Meth. Comput. Phys. 3*, pp. 319–343 (1962).
- [10] Hochstetter, H. and Kolb, A.: Evaporation and Condensation of SPH-Based Fluids, In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 3:1–9 (2017).
- [11] James G.Quintiere 著,大宮喜文,若月薰訳:基礎 火災 現象原論,共立出版株式会社 (2009).
- [12] 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).