

7X-02

# 熱気流を考慮した火の粉のビジュアルシミュレーション

吉田 千夏 藤代 一成  
慶應義塾大学 理工学部情報工学科

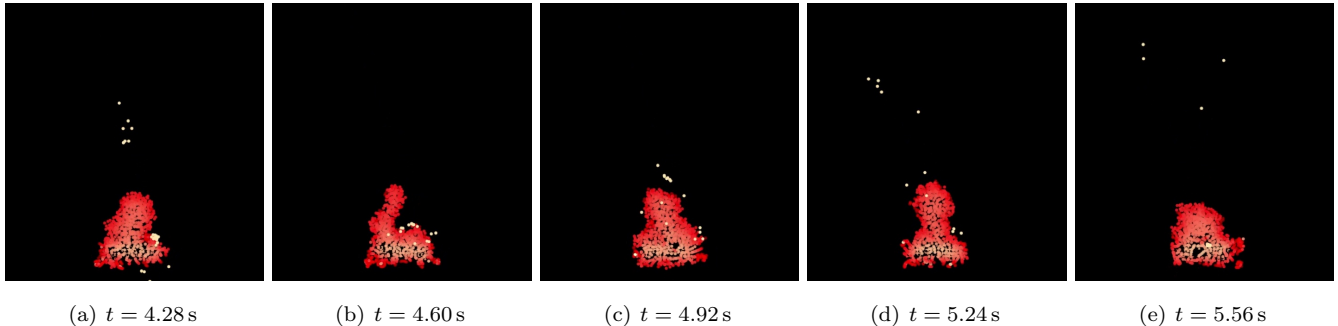


図 1: 発生した火の粉が消滅するまでを、本手法を用いてシミュレーションした結果。時刻  $t = 4.28\text{s}$  から  $t = 5.56\text{s}$  における火の粉の位置を黄色の点群で示した

## 1 背景と目的

燃焼現象は映画やゲームにおいて重要な表現対象のひとつであり、火炎に加えて、煤や煙、火の粉など複数の要素からなる。火炎のビジュアルシミュレーションは間瀬ら [1] の手法など多々提案されているが、火炎以外の要素については、アーティストによる後付けのエフェクトによってそれらしく見せているものが多い。しかし、こうした映像では迫真性が欠ける場合がある。この問題に対処するため、煙や煤のシミュレーション [2] が研究されているが、燃焼の迫真性を高めるうえで重要な火の粉に関するビジュアルシミュレーションの研究は殆ど知られていない。

そこで本研究では、焚火のような木材の燃焼を対象とした火の粉の物理的ビジュアルシミュレーション手法を提案する。粒子法と格子法を組み合わせることで燃焼をシミュレーションし、熱気流による抗力や重力を考慮した運動方程式に基づいて火の粉のダイナミクスを計算する。その結果の一例を図 1 に示す。

## 2 火の粉の計算モデル

火の粉の発生原理とシミュレーションの概要を説明する。

### 2.1 火の粉の発生原理

火の粉の発生は燃焼に起因している。燃焼とは発熱と発光を伴った酸化反応で、その過程で煙や煤、灰が生じる。一方で火の粉は、燃焼により固体燃料の構造が崩れることで発生する固体燃料の欠片である。発生した固体燃料の欠片が燃焼しながら熱気流によって浮遊することで、火の粉特有の動きが生まれる。

### 2.2 計算の流れ

計算の流れを図 2 に示す。本研究では火炎による熱気流を扱うため、火炎と空気を別々にシミュレーションする。火炎のシミュレーションには異なる相間の相互作用を扱いやすい粒子法を用いた。また空気のシミュレーションでは空間全体を計算する必要があるため、粒子法よりも空間計算量の比較的小さい格子法を用いた。火炎と空気のシミュレーションから得られた熱気流の速度を考慮して、火の粉の運動方程式を解く。

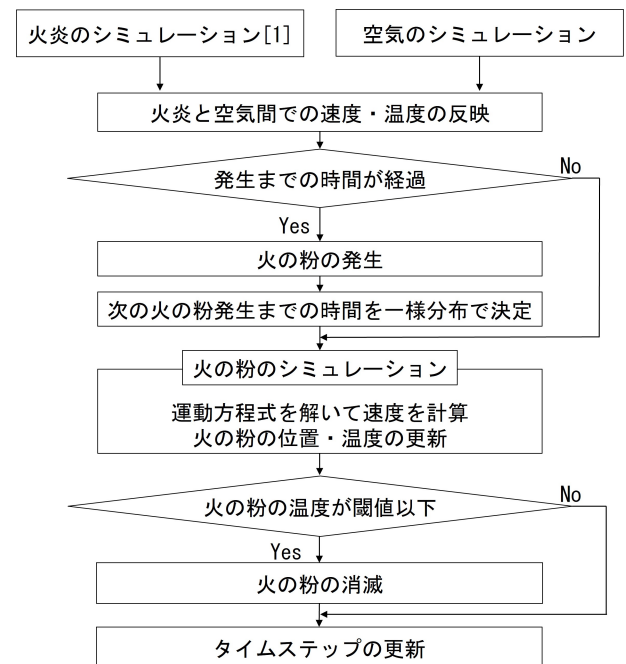


図 2: 提案手法の概要。火炎と空気のシミュレーションから熱気流の速度場を取得し、火の粉のダイナミクスを計算するまで、1 タイムステップ間の計算の流れを示す

### 3 提案手法

熱気流の速度場の計算方法と、火の粉の運動方程式に基づいたダイナミクスの計算について説明する。

#### 3.1 火炎と空気のシミュレーション

火炎のシミュレーションには、間淵ら [1] の SPH 法を用いた。木材は固体燃料であるが熱分解によって気化してから化学反応が起こるため、熱分解の過程を考慮せずに気体燃料を前提とした。また焚火は本来拡散燃焼であるが、予混合燃焼と拡散燃焼は視覚的に区別が付きにくいことを考え、計算を簡単にするため予混合燃焼として扱う。

空気のシミュレーションにはスタガード格子を用い、浮力を考慮した非圧縮性ナビエ-ストークス方程式を解くことで温度場と速度場を計算した。両場間の相互作用については、藤澤ら [3] の方法を用いた。

#### 3.2 火の粉の発生

本稿では木材をモデリングしていない。そのため、火の粉の発生タイミングと固体燃料表面のどこを発生位置とするか、一様な確率分布に従って決定した。

#### 3.3 火の粉の物理モデル

火の粉が発生したのち浮遊する際の物理モデルを示す。本研究では火の粉を球形の固体として扱い、体積変化は起こらないものと仮定して運動方程式を解いた。火の粉の運動方程式は抗力、重力、浮力を考慮して次のように表せる：

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho_p A_p |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p) + \rho_p V_p g - \rho_a V_p g, \quad (1)$$

ここで、 $m_p$ 、 $\rho_p$ 、 $A_p$ 、 $V_p$ 、 $\mathbf{u}_p$  は順に火の粉の質量、密度、断面積、体積、速度、 $\rho_a$ 、 $\mathbf{u}_a$  は熱気流の密度、速度、 $C_d$  は抗力係数、 $g$  は重力加速度である。 $\mathbf{u}_a$  に関して、火の粉の位置に対応する格子上的速度を補間したものを熱気流の速度とした。また、抗力係数  $C_d$  は次に示す黄ら [4] の式で計算できる：

$$C_d = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15Re^{0.687})}{Re} & (Re \leq 10^3) \\ 0.44 & (Re > 10^3) \end{cases},$$

ここで  $Re$  はレイノルズ数であり、火の粉の直径  $d_p$  と粘性係数  $\mu$  を用いて次式で計算できる：

$$Re = \frac{\rho_a |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p| d_p}{\mu}.$$

火の粉の初速を 0 m/s とし、式 (1) をタイムステップごとに解くことで、火の粉の位置を更新した。

#### 3.4 火の粉の消滅

火の粉の光の波長は温度に依存する。そのため、空気による冷却を考慮して次のタイムステップにおける火の粉の温度  $T_p^{n+1}$  を計算した：

表 1: 実行パラメタ

表記	単位	値
$\Delta t$	s	$1.0 \times 10^{-3}$
$A_p$	m <sup>2</sup>	$5.0 \times 10^{-4}$
$\rho_p$	kg/m <sup>3</sup>	$5.0 \times 10^2$
$\rho_a$	kg/m <sup>3</sup>	1.0
$\mu$	Pa·s	$2.1 \times 10^{-5}$

$$T_p^{n+1} = (1 - k)(T_p^n - T_s) + T_s,$$

ここで、 $k$  はタイムステップの間に損失する熱量の割合を示す係数、 $T_p$  は火の粉の温度、 $T_s$  は空気の環境温度である。本稿では、発生時の温度  $T_p^0$  を範囲 1, 100 K から 1, 200 K のランダムな値とし、 $k = 1.5 \times 10^{-4}$ 、 $T_s = 300$  K とした。1, 000 K 以下の場合には消滅とする。

### 4 実行結果

本稿で示す結果は、全て二次元空間内でシミュレーションした結果である。表 1 に示すパラメタ値を用いてシミュレーションした結果を図 1 に示す。熱気流の抗力の影響によって火の粉が浮遊する様子が確認できる。

### 5 結論と今後の課題

本稿では、熱気流による抗力や火の粉の重力を考慮した運動方程式に基づき、火の粉を物理的にシミュレーションする手法を提案した。本手法により、粒子をランダムに動かして火の粉らしく見せるのではなく、火炎のシミュレーションに追従して火の粉の動きを求められるようになった。

計算の簡単のため、本稿では燃焼に伴う火の粉の体積変化や火の粉どうしの衝突、回転の表現ができていない。また木材の内部をモデリングすることで、組成に基づいて火の粉を発生させたい。加えて、本稿では火の粉の動きの計算だけに取り組んだが、三次元空間への拡張、写実的なレンダリングにより、リアリティを追求したい。

### 謝辞

本研究を進めるにあたって、プログラム資料の提供と助言を頂いた株式会社プレミアムグラフィクス 代表取締役 間淵 聡 氏 に感謝する。また、所属研究室の 横田 壮真 からの多くの助力に感謝する。本研究の一部は、令和 4 年度科研費基盤研究 (A) 21H04916 の支援により実施された。

### 参考文献

- [1] 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, 52 巻, 10 号, 2965–2972 頁, 2011 年 10 月.
- [2] 池田 英貴, 楽 詠こう, 西田 友是: “すすの物理的機構と光学特性を考慮した拡散燃焼のビジュアルシミュレーション”, 第 74 回全国大会講演論文集, 2012 巻, 1 号, 113–114 頁, 2012 年 3 月.
- [3] 藤澤 誠, 佐々木 浩幸, 三河 正彦: “燃焼過程を考慮した炎のリアルタイムシミュレーション”, 画像電子学会誌, 49 巻, 4 号, 284–292 頁, 2020 年 10 月.
- [4] 黄 弘, 大岡 龍三, 加藤 信介, 大竹 宏, 林 吉彦: “市街地火災における火の粉の飛散の CFD 解析”, 日本建築学会環境系論文集, 70 巻, 593 号, 1–8 頁, 2005 年 7 月.