

論文

渦場と粒子による煙や炎の2次元CGシミュレーション

正員 村岡 一信[†] 正員 千葉 則茂^{††}
 非会員 高橋 宏道^{††} 正員 三浦 守^{††}

2D CG Simulation of Smoke and Flames Using Vortex Fields and Particles

Kazunobu MURAOKA[†], Norishige CHIBA^{††}, *Members*, Hiromichi TAKAHASHI^{††},
Nonmember and Mamoru MIURA^{††}, Member

あらまし 煙や炎の形や動きのシミュレーションは、コンピュータグラフィックス (CG) による自然現象のシミュレーションの中でもとりわけ興味深い課題である。このため、これまで煙や炎のCGシミュレーションのための手法がいくつか提案されているが、障害物が配置されていても容易にリアルなシミュレーションができ、形や揺らぎの制御が容易であるような手法としては、いずれも完成されているとは言えず、更に新たな試みが期待されている。本研究では、煙や炎を基本的には「煙や炎の粒子」による気流の可視化像であるにとらえ、その形や動きをシミュレーションする手法について2次元に限って検討を行ってきた。本論文では、まず煙や炎の粒子の流れをシミュレーションする渦場による手法について述べ、次に粒子の移動軌跡から画像を生成する手法について述べる。更に、これらに基づく煙や炎のシミュレーション例により手法の有効性を示し、最後に渦や粒子の行動規則について詳細に検討を加えその意味を明らかにする。

キーワード コンピュータグラフィックス, アニメーション, 炎, 煙, 粒子

1. まえがき

これまで、湯気、霧、雲、煙および炎などのガス状物体の表現に関する研究例は多くあり、これらは以下のように分類できる。

- (1) 照明モデルなどレンダリング技法の開発を中心としたもの^{(1)~(5)}
- (2) 密度分布などのモデリング技法の開発を伴うもの^{(6)~(12)}
- (3) アニメーション技法の開発を伴うもの^{(13)~(19)}

これらの研究のうち、特に炎のシミュレーションに関するものとしては、particle systemによる花火のような炎のシミュレーション⁽¹³⁾、炎の燃焼過程を考慮したモデリングとボリュームレンダリングによるろうそ

くやブンゼンバーナーのような炎のシミュレーション⁽¹²⁾、渦運動する大量の粒子を用いた紙が燃えるような炎のシミュレーション⁽¹⁴⁾、2次元テクスチャと種々の加工操作を用いたたき火やろうそくのような炎のシミュレーション⁽¹⁶⁾、簡単な遷移規則をもつセル・オートマトンによるアルコールを燃やしたような炎のシミュレーション⁽¹⁷⁾ およびスペクトル乱流理論に基づく関数ベースのモデリング法による勢いよく燃え上がるような炎のシミュレーション⁽¹⁹⁾などが行われている。一方、煙のシミュレーションに関して明確に記述されている論文は少ないが、フーリエ級数で表された煙を表示する手法が提案されている⁽¹¹⁾。また、煙や炎の表現についてのアニメーション⁽²⁰⁾も作成されているが、論文として報告されていないので手法の詳細は不明である。

一方、使いやすい煙や炎のシミュレーション手法には、さまざまな種類の煙や炎のシミュレーションが可能であることや種々の環境のもとでそれらしい形と動きが容易に生成できることが望まれる。すなわち、上の(3)の手法に属し、かつ

[†] 岩手県立盛岡短期大学, 盛岡市
Iwate Prefectural Morioka Junior College, Morioka-shi, 020
Japan

^{††} 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市
Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

(a) 形や動きの揺らぎの程度の制御が容易に可能であること、

(b) なべや他の燃焼物体などの障害物との衝突・回避の(自動的な)シミュレーションが可能であること、

(c) 煙の流れる経路の制御が容易に可能であること、

(d) 風に揺れる他の物体と共存し(同一の気流の場に存在するように)自然に揺れるシミュレーションが可能であること、

などが要求される。このような観点からは、いずれの手法も現時点では不十分である。上述の手法の中にも、乱流の場を考慮しこれらの要求を満足するように拡張可能であろうと思われるものもあるが^{(14),(19)}、これまでそのような拡張は提案されていない。

本研究では、煙や炎を基本的には「煙や炎の粒子による」気流の可視化像であるととらえ、上の要求を満足するようなシミュレーション手法について2次元に限って検討を行ってきた。この手法は、障害物を避けるような煙や炎、煙草の煙のようにくゆる煙や煙突のそれのようなたなびく煙および強風にあおられて燃え盛る炎のシミュレーションなどに適し、揺らぎの制御が容易でシナリオに従った動きをつくり出すこともできるという特徴をもつ。また、気流の場とその中を移動する粒子によりシミュレーションするため、気流の力を受けて運動する他の物体との共存するシミュレーションにも適するという特徴をもつ。

なお、本手法は粒子(パーティクル)ベースのシミュレーション法に属するが、気流(乱流)の場を相互に影響し合い運動する渦の合成で生成し、更にその気流の場で相互に影響し合い運動する粒子でシミュレーションしようという点でこれまでの粒子ベースのシミュレーション法⁽²¹⁾とは異なることを断っておく。更に、本手法の3次元版への拡張にアルゴリズム上の隘路はないが、もちろんこのままでは2次元版であるので、視点移動ができないなどの欠点が存在することを断っておく。

2. 渦場によるシミュレーション法

流れには、層流と呼ばれる時間的にあまり変動しない比較的単純な流れと、乱流と呼ばれる時間的にも空間的にも極めて不規則に変動する複雑な流れがある。自然現象に現れる流れの多くはこの乱流であり、ここでは煙や炎は基本的にはその構成要素である粒子により乱流である気流の一部の形や動きが可視化されたものとする。渦場によるシミュレーション手法は、こ

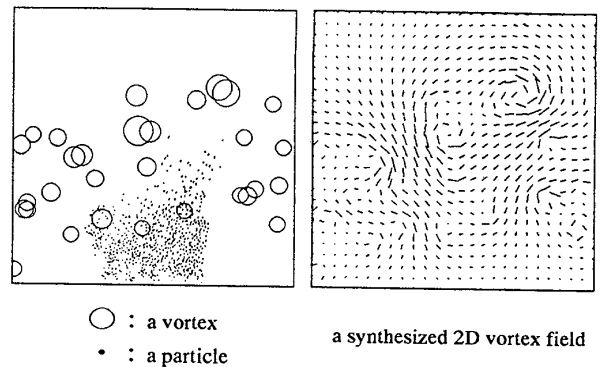


図1 渦場
Fig. 1 A 2D vortex field.

の考えに基づき、まず時間的に変化する乱流の速度場(これを「渦場」と呼ぶことにする)を大小さまざまな渦の速度場の合成として発生させ、次にこの「渦場」に従い煙や炎の構成要素である粒子を移動させ、煙や炎の形や動きをシミュレーションするというものである(図1参照。円が渦を、円の大きさが渦の大きさを、および黒点が粒子を表す)。ここで、渦場を構成する渦の配置や発生時期は意図的に制御することも可能であるため、シナリオに基づいた煙や炎の形や動きも作れることを注意しておく。粒子は基本的には気流の運動を忠実に追跡するトレーサであるが、いくつかの行動規則をもっている。ここでは、まず「渦場」の更新規則を述べ、次に粒子の行動規則について述べる。

2.1 渦場の更新規則

個々の渦は、固定した状態ではなく、絶えず発生・移動・消滅を繰り返している。渦の型としてはランキン渦を用いた⁽²²⁾。ランキン渦とは、渦の速度分布が、剛体を回転させたときの剛体中の速度分布と、回転する剛体のまわりにできるポテンシャル渦の速度分布を併せもつものである(図2参照)。気流の代表的な渦と思われる台風の渦が、マクロ的に見てランキン渦と酷似していることから⁽²²⁾、ここでは渦場は大小さまざまなランキン渦からなると仮定した。なお、乱れても連続的に変化する乱流の自然な印象を得るための離散的なシミュレーションにもランキン渦は剛体回転する渦やポテンシャル渦に比べて適する。例えば、剛体回転する渦のみによる渦場では、渦部とそうでないところの速度変化が急激であり、ポテンシャル渦のみによる渦場では渦の中心部に向かい速度が急激に大きくなるので、離散的なシミュレーションにおいて微小時間 Δt 後にこれらの部分に飛び込んだ粒子が急激に渦の外へ飛ばされてしまうなど、自然な乱流の印象を得るため

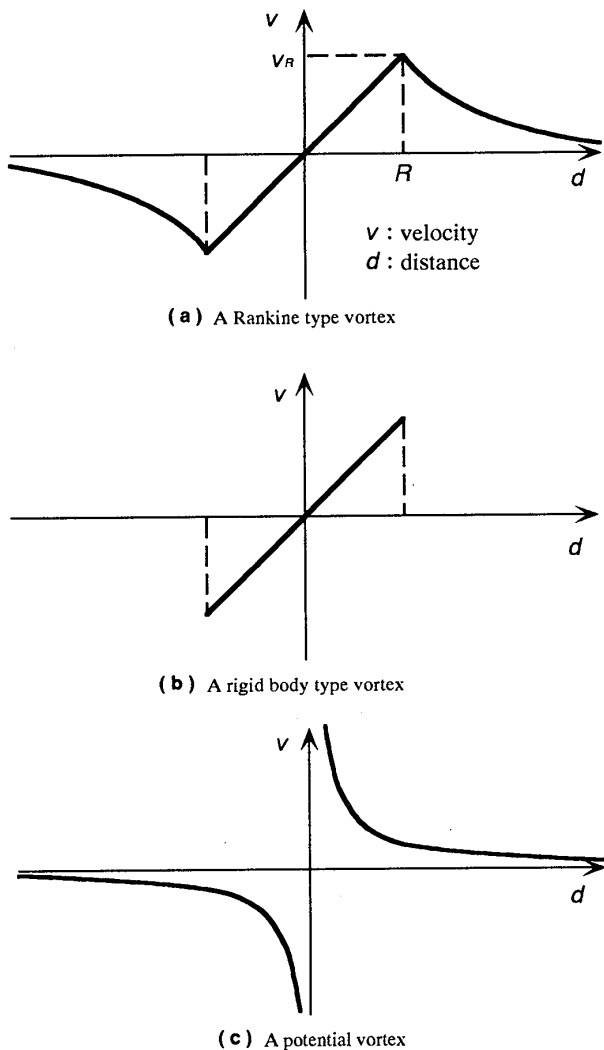


図2 渦の型
Fig. 2 Types of vortices.

のシミュレーションにとっては使いづらいと言える。ランキン渦はこれらの二つのタイプの渦の中間の性質をもった渦であり、不自然さが現れにくく使いやすい。

ここではランキン渦の回転速度 $v(d)$ は、

$$v(d) = \begin{cases} v_R \cdot d / R & (d \leq R) \\ v_R \cdot R / d & (d > R) \end{cases} \quad (1)$$

としている(図2参照)。ここで、 d は渦の中心からの距離、 R は渦の半径、 v_R は渦の半径における速度である。なお、ランキン渦の半径は、剛体回転の渦とポテンシャル渦の境界としている。

このようなランキン渦から構成される渦場を、次の更新規則に従い、時々刻々変化させている。

〈渦場の更新規則〉

(1) 発生 渦の発生は、その中心位置、半径、回転速度、回転方向をランダムに与えることで行う(意図的な渦はこの限りではない)。但し、渦の存在が認識

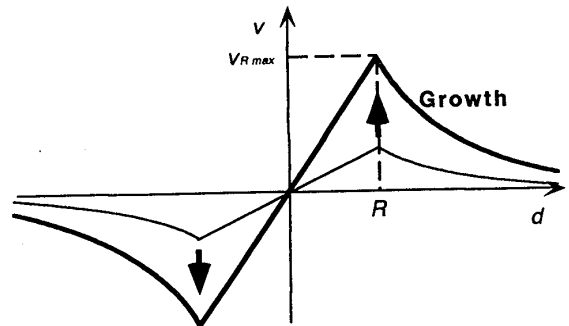


図3 渦の成長
Fig. 3 The Growth of a vortex.

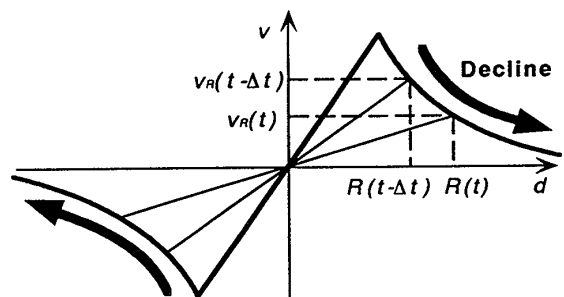


図4 渦の衰退
Fig. 4 The decline of a vortex.

されにくい複雑な乱流場をつくるため次式で示すように、半径が小さい渦が、大きい渦より多く発生するようにしている。

$$n(R) = N \cdot R^{-2} \quad (2)$$

ここで、 R は半径、 $n(R)$ は半径 R の渦の個数、 N は渦の数を決定するための比例定数である。

(2) 成長 渦は発生後、次式で示すように、半径一定で半径上の速度を一定の割合で時間 T_G の間増加すると仮定する(図3参照)。

$$\begin{cases} v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + v_{Rmax} \frac{\Delta t}{T_G} \\ v_R(0) = 0 \end{cases} \quad 0 \leq t < T_G \quad (3)$$

ここで、 v_{Rmax} は半径上における渦の速度の最大値、 t は渦が発生した時刻からの経過時間、 $v_R(t)$ は経過時間 t の渦の半径上における渦の速度、 T_G は成長に要する時間である。

(3) 衰退 渦の半径上の速度が最大値に達したら、その後、渦の回転速度は計算ステップごとに減衰し、半径が大きくなると仮定する(図4参照)。渦は次の漸化式で衰退させる。

$$\begin{cases} R(t + \Delta t) = R(t) \cdot D \\ v_R(t + \Delta t) = v_R(t) / D \end{cases} \quad (4)$$

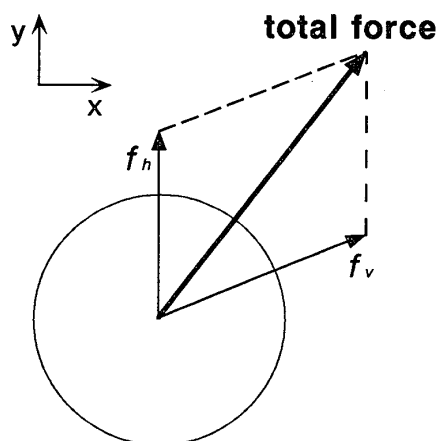


図5 渦に働く力
Fig. 5 Effective force on a vortex.

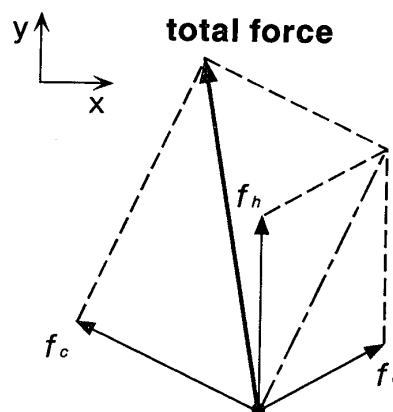


図6 粒子に働く力
Fig. 6 Effective force on a particle.

但し、 $R(t)$ は減衰を始めてからの経過時間 t における渦の半径、 $v_R(t)$ は半径上の渦の速度、 D は衰退係数で、 $D > 1$ である。

(4) 消滅 渦の半径上の速度 v_R がある値以下となった渦は消滅させる。

(5) 移動 渦は、その中心での渦場から受ける力 f_v および粒子が作り出す仮想的な上昇気流の影響 f_h を受け、それに応じて移動する(図5参照)。なお、粒子が作り出す仮想的な上昇気流に関する計算法は2.2で述べる。

(6) 障害物回避 粒子と同様に渦も障害物を避けて移動するものとする。これを簡単に実現するため、障害物に対しては渦の中心で弾性衝突させる。

また、風や大規模な対流などのスケールの大きな渦については、その一部の速度場を層流成分として渦場に加えている。

2.2 粒子の行動規則

粒子は基本的には渦場により作られる気流のトレーサであるが、単純なトレーサではなく、次のような行動規則をもつ。なお、以下では煙を表す粒子を煙粒子、炎を表す粒子を炎粒子と呼び、単に粒子と言う場合は、煙粒子と炎粒子の両方を指すものとする。

<粒子の行動規則>

(1) 発生 粒子はシミュレーション空間(渦を生成する領域)中に任意に設定される発生源から、1計算ステップごとに一定数ずつ発生する。

(2) 移動 粒子の運動方程式は以下のものである。

$$Ma(t) = f(t) \quad (5)$$

M : 質量

- $a(t)$: 加速度 $d^2x(t)/dt^2$
- $x(t)$: 時刻 t での粒子の位置
- $f(t)$: 時刻 t での粒子に働く力
 $= f_v(t) + f_c(t) + f_h(t) - Cv(t)$
- $f_v(t)$: 渦場から受ける力
- $f_c(t)$: 粒子間に働く力(引力・斥力)
- $f_h(t)$: 「温度」による上昇気流から受ける力
- C : 減衰定数
- $v(t)$: 速度 $dx(t)/dt$

この微分方程式に対する、最も単純な数値解法であるオイラー法による差分方程式は、

$$\begin{aligned} v(t + \Delta t) &= v(t) + \Delta t \cdot f(t) / M \\ x(t + \Delta t) &= x(t) + \Delta t \cdot v(t) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 $M=1$ とすると、第1式は

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t (f_v(t) + f_c(t) + f_h(t) - Cv(t)) \quad (7)$$

となる。更に、 $C=1/\Delta t$ にとり、 $f_c(t)=0$ 、 $f_h(t)=0$ のとき、渦場の単純なトレーサとなるようにする。従って、方程式

$$v(t + \Delta t) = \Delta t (f_v(t) + f_c(t) + f_h(t)) \quad (8)$$

を考えることになる(図6参照)。ここで、 $f_v(t)\Delta t$ は粒子の存在する位置の渦場の速度となる。

(3) 消滅 粒子は、ある条件を満たすと消滅する(粒子の寿命の存在)。

(4) 障害物回避 粒子は、障害物と弾性衝突する。

次に行動規則について補足説明を行う。

(a) 上昇力 f_h について 粒子は、「温度」を持ち、それに比例した上昇力 f_h をもつ。この上昇力は粒子群の温度により上昇気流が作られ、これによって粒子自身が上昇するという過程を簡便に計算するために

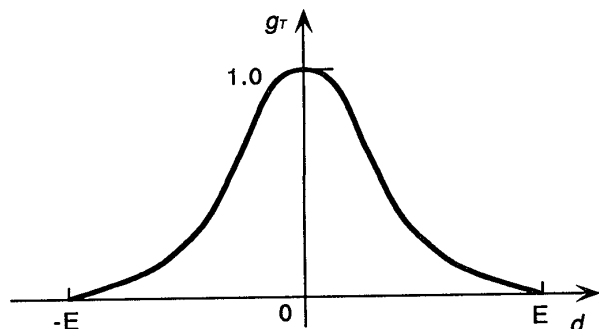


図7 関数 g_r
Fig. 7 Function g_r .

導入したものである。

粒子が発生すると一定の「温度」が与えられる。この「温度」は、次の漸化式により更新される。すなわち、密集している粒子の「温度」は高く、まばらな粒子の「温度」は低いとする(なお、ここで言う「温度」はシミュレーション上仮定したものであり、物理量の温度とは必ずしも一致しないことを断わっておく)。

$$T_i(t) = \alpha T_i(t - \Delta t) + \beta \sum_{j \neq i} g_r(d_{i,j}) T_j(t - \Delta t) \quad (9)$$

ここで、 $T_i(t)$ は粒子 i の時刻 t における温度、 α は温度の保存係数、 β は温度の伝達係数、 $d_{i,j}$ は粒子 i と粒子 j 間の距離、 g_r は次式で表される距離の関数である(図7参照)。

$$g_r(d) = \begin{cases} (1 - d^2/E^2) \cdot \exp(-d^2/(E/2)^2) & (d \leq E) \\ 0 & (d > E) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 E は影響範囲を表す定数である。

上昇力 f_h は次式で表される。

$$f_h(t) = H \cdot T(t) \quad (11)$$

ここで、 $T(t)$ は粒子の「温度」、 H は上昇力を制御するための定数である。

なお、この上昇力は2.1で述べたように、渦が上昇気流により上昇する場合の計算にも適用される。その場合は、渦中心に位置する粒子(実際に粒子が存在する必要はない)の上昇力をその渦が受ける上昇気流としている。

(b) 粒子間に働く力 f_c について 粒子間に働く力 f_c には引力と斥力があり、引力は上昇気流により炎粒子が吸引されるシミュレーションのため、また斥力は煙粒子の拡散をシミュレーションするために導入したものである。粒子間に働く力 f_c は次式に従うものとする。

$$f_c = \begin{cases} S \cdot \sum_{j \neq i} f_0(d_{i,j}) & (d_{i,j} < E_0, S > 0) \\ 0 & \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 S は力の大きさと引力、斥力を決める定数で、引力の場合は正で、斥力の場合は負である。また、 $d < E_0$ の範囲で $f_c = 0$ としているのは、引力により不必要に粒子が凝集してしまうのを防ぐためである。 $f_0(d)$ は粒子の間の距離についての関数であり、 g_r と同様に次式で表す。

$$f_0(d) = \begin{cases} (1 - d^2/E_1^2) \cdot \exp(-d^2/(E_1/2)^2) & (d \leq E_1) \\ 0 & (d > E_1) \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 d は粒子中心からの距離、 E_1 は力の影響範囲である。

(c) 粒子の消滅について 炎粒子は「温度」がしきい値以下になるか、決められた計算ステップが経過したとき、シミュレーション領域から除去し、消滅させる。これにより、炎の先端の形状が形成される。

なお、煙粒子の場合は、粒子がシミュレーション領域の外へ出ない限り消滅させないこととし、炎粒子と区別される。

3. 画像生成手法

2.で述べた手法のシミュレーション結果は粒子の移動軌跡として得られる。ここでは粒子の移動軌跡から煙や炎の画像を生成する手法について述べる。

煙や炎などの写真は、それらの粒子の微小時間における移動軌跡を写し出している(すなわち、モーショントラック)。また、それが時間軸方向でのアンタイエイリアシングとなっていることから、この移動軌跡に基づいてCG画像を作ることがアニメーションを作る上でも有効と思われる。また、シミュレーションで使用する粒子数は、画像の解像度に対してより少なく済む方が望ましい。従って、何らかの補間法を開発することが重要である。ここでは、筆者らの一部が検討した尾根線による山岳地形の定義法⁽²³⁾の一部を用いた方法により、以下のようにCG画像を生成している。紙面の都合上、概略を示す。

<CG画像を得る方法>

[ステップ0] 1計算ステップ(微小時間)で移動した粒子の最初と最後の点を結んだ線分を基本的なデータとする。これを単位流線と呼ぶことにする。

[ステップ1] 単位流線を尾根線とし、それにすそ野を表す四角形面と半円すいを生成して「山岳地形」を高

さの場合として生成する(図8参照)(あとのステップ3で示すように、それぞれの地点に標高値に応じた色を割り当て、煙や炎の2次元画像を得ようというのが基本的なアイデアである)。なお、四角形面は煙の場合は図8(a)のように単純に2枚生成するが、炎の場合は境界をシャープにするため図8(b)のように4枚生成する。尾根線端点の「標高値」は対応する粒子の温度と単位流線の長さに応じて定める。すなわち、「温度」が高ければ標高値を高く、単位流線の長さが長ければ(速度が速い)標高値を低く(色を薄く)するようにする。

[ステップ2] 低域フィルタ(例えば、画像処理で使わ

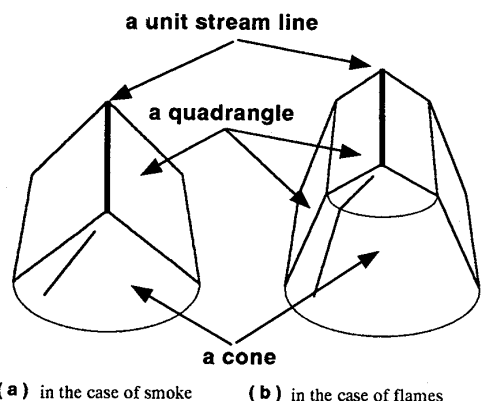


図8 単位流線を尾根線とする「山岳地形」の高さの場合
Fig. 8 A height field representing a terrain defined by a unit stream line.

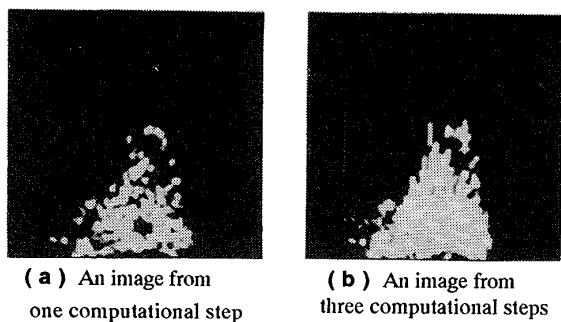


図9 炎の画像生成
Fig. 9 Simulated images of flames.

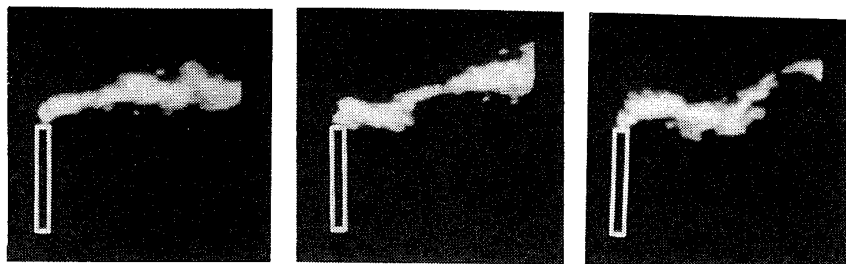


図10 煙突の煙のシミュレーション例(斥力大)
Fig. 10 Simulation of smoke from a chimney (large repulsive force).

れる5×5空間フィルタ)をかけ、山岳地形を滑らかにする。

[ステップ3] 標高値に応じて色を定め、煙や炎の色とする。例えば、炎の場合は高い方に黄色、低い方に赤を割り当てる。

なお、粒子数の少ないシミュレーションで、1計算ステップのデータのみで画像を生成すると、単位流線は短い直線であるため、生成された画像は直線的ですき間だらけになってしまう。このため、数ステップ分の流線を合成することで滑らかな曲線をもつ炎の画像を生成することができる。図9(a)が1ステップのみで生成した画像で、(b)が3ステップを合成した画像である。この処理は移動平均法による時系列データの平滑法と同様であり、時間軸方向のアンタイエイリアシングとなっている。

4. 煙や炎のシミュレーション例

本手法により、煙と炎のシミュレーションを以下のように行った。なお、使用計算機はSONY NWS-3260(R3000, 20 MHz)である。

4.1 煙のシミュレーション

煙のシミュレーションでは、煙粒子は消滅せず、また粒子間の力は斥力である。シミュレーション空間を400×400ピクセルとして煙突の煙のシミュレーションを行った結果を図10に、煙草の煙のシミュレーションを行った結果を図11に示す。

煙突の煙では左から右へ、強い風が流れているという設定で、層流の流れを加えてシミュレーションした。粒子数は300である。

煙草の煙のシミュレーションでは粒子間に働く斥力を弱くし、発生直後の煙があまり拡散しないようにした。シミュレーションに使用した粒子数は400である。

必要とした1フレーム当りのシミュレーション時間とレンダリング時間は各々表1のようであった。

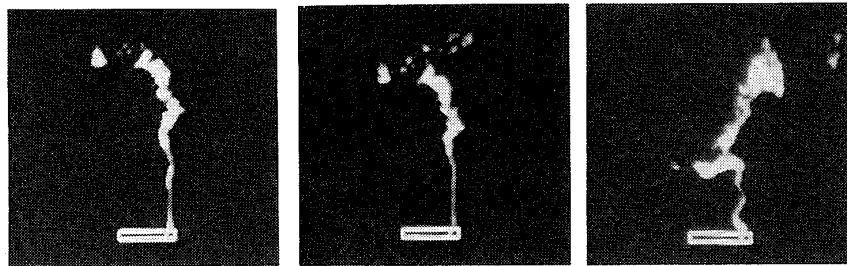


図 11 煙草の煙のシミュレーション例 (斥力小)
 Fig. 11 Simulation of smoke from a cigarette (small repulsive force).

表 1 シミュレーションおよびレンダリング時間

シミュレーション	粒子数 (個)	渦 数 (個)	1 フレーム当りの平均 シミュレーション時間 (秒)	1 フレーム当りの平均 レンダリング時間 (秒)
煙 突 の 煙	300	50	0.5	7.2
煙 草 の 煙	400	50	0.8	7.3
た き 火	500	50	1.0	7.7
障害物のある炎	500	50	1.0	7.6
樹 木 の 炎 上	3,000	150	14.0	8.3

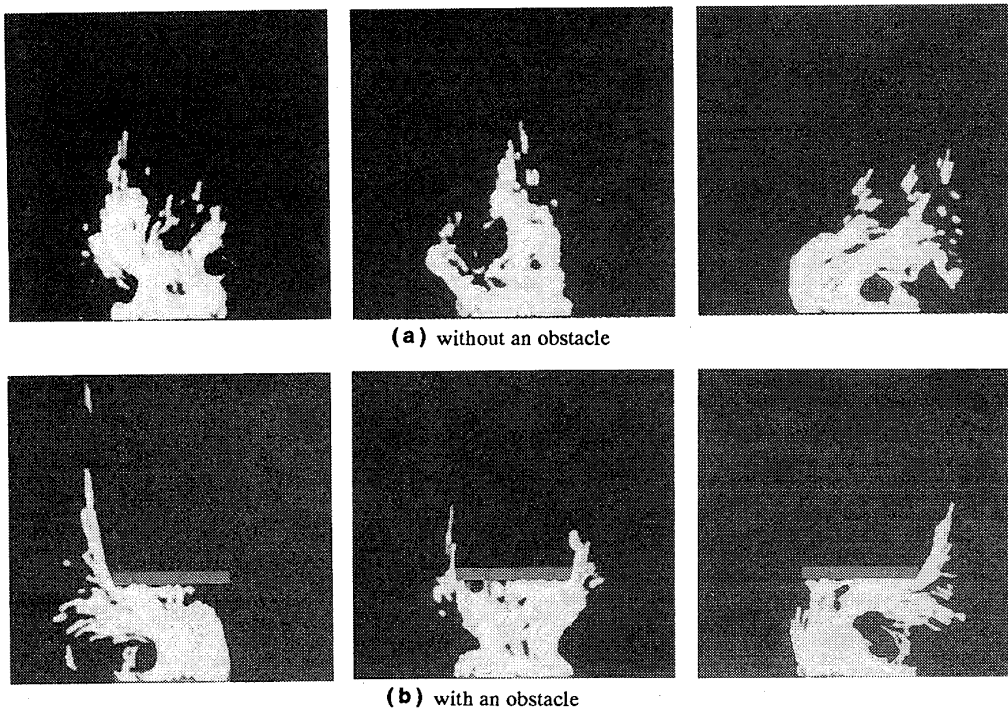


図 12 炎のシミュレーション
 Fig. 12 Simulation of a bonfire.

4.2 炎のシミュレーション

炎のシミュレーションでは、炎粒子は寿命をもち、粒子間の力は引力である。シミュレーション空間は 400 × 400 とした。図 12(a)にたき火のシミュレーション、

(b)には障害物のあるシミュレーション、図 13 には樹木の炎上のシミュレーション例を示す。

なお、図 12 のシミュレーションでは、粒子数は 500、炎粒子の寿命は「温度」により定めた。

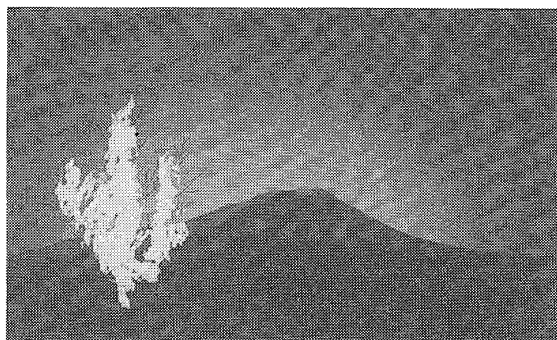


図13 樹木の炎上のシミュレーション例
Fig. 13 Simulation of a burning tree.

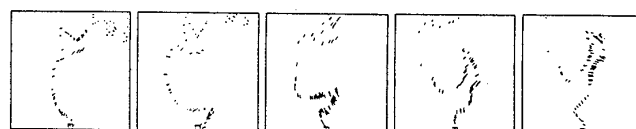
図13のシミュレーション(筆者らの作成したアニメーション⁽²⁴⁾からの1場面)では、粒子数は3,000、炎粒子の寿命は5計算ステップ固定とした。

必要とした1フレーム当りのシミュレーション時間とレンダリング時間は各々表1のようであった。

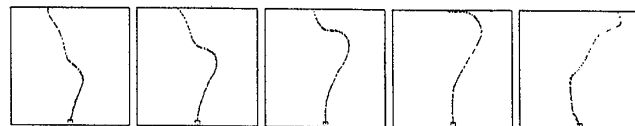
炎の寿命を計算ステップで設定すると、炎の高さのコントロールが容易であるため、高さのある程度そろえる必要のある炎の生成に適している。また、炎の寿命を「温度」とすると、高さのコントロールは難しくなるが、一度粒子が炎の本体から離れて暗くなっても、他の粒子に接近するとそこで「温度」を受け取り、再び強く光り出して、飛火のような形状を作る。このため、たき火などのような炎では寿命を「温度」とするとよい。

4.3 シミュレーションの結果の考察

静止画だけではなく、煙、炎とも300フレーム(10秒)から900フレーム(30秒)ほどのアニメーションを作成して観察した。筆者らの主観評価では、煙、炎とも実際のものと同様の形と動きになっているという印象を受けた。すなわち、煙突の煙のシミュレーションでは、強風にけちらされる煙の様子が表現されており、煙草の煙も静かに煙が立ち昇る様子が表現されている。本手法では、煙草のような小さなスケールから煙突のような比較的大きなスケールの煙まで表現可能である。



(a) short life span



(b) long life span

図14 渦の寿命
Fig. 14 The life span of a vortex.

炎のシミュレーションでは、やはり強風にかき乱され荒れ狂うように燃え上がるたき火を表現することができた。また、障害物を炎が避けるシミュレーションも自然な印象を受けた。

しかしながら、もちろん本手法では実現できそうにない煙や炎のタイプも存在する。これについては、次の章で述べる。

5. 行動規則の詳細検討

本手法では渦場と粒子の二つの行動モデルを用いている。ここでは、2.で設定した渦場や粒子の行動モデルの規則について、その意味を明確にする。

5.1 渦場の更新規則に関する検討

渦場の更新規則は次のような特徴をもつ。

- (a) 渦は発生、成長、衰退、消滅する。
- (b) 渦場に従って渦が移動する。
- (c) 渦は粒子から上昇力を受ける。

これらの特徴について実験を行い、次のような結果を得た。

(a)について 渦の寿命を変化させて煙のシミュレーションを行った。その様子を図14に示す。

このシミュレーションでは、渦の寿命を短くすると、粒子に影響を与える渦が頻繁に変わるため動きに連続性がなくなる現象が現れた。これから渦はある程度以上の寿命をもたせるとよいことがわかる。このため、前章のシミュレーションでは渦は10計算ステップ以上の寿命をもつように設定した。

(b)について 渦は渦場に従って移動するが、これを移動しないように固定して煙のシミュレーションを行った。その様子を図15に示す。

これから、渦を固定した場合は、粒子は同じ経路をたどるようになり、煙の形がほとんど変化しなくなる。このため渦の配置が明確にわかり、不自然な印象を受

ける。

(c)について 渦が粒子の作る上昇気流の影響を受けて上昇する場合と上昇しない場合についてシミュレーションを行った結果について図16に示す。

煙のシミュレーションの場合は、上昇力の有無は形の印象にはそれほど影響を与えないことがわかった。炎のシミュレーションにおいては、上昇力がある場合



図15 渦を固定した場合
Fig. 15 In the case of fixed vortices.

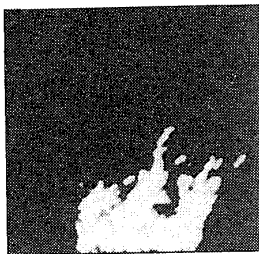


図16 渦の上昇力がない場合の炎
Fig. 16 Simulation of flames having no ascending f_n .

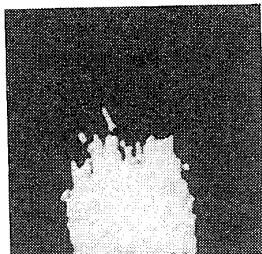


図17 炎粒子の引力がない炎
Fig. 17 Simulation of flames having no attraction f_c .

は渦が炎の上部へ上昇し、炎先端は複雑な形状になるが、下部は逆に渦が少なくなり単調となる。このため、上へまっすぐに燃え上がる比較的大きな炎の印象となった(図12(a)参照)。これに対して上昇力がない場合は、炎全体が渦でかき乱され全体の形状が複雑となり、風に乱される小さな炎の印象となることがわかった(図16参照)。

5.2 粒子の行動モデルに関する検討

粒子の行動モデルは渦場によって移動させられる力のほか、次のような力の影響を受けるという特徴をもつ。

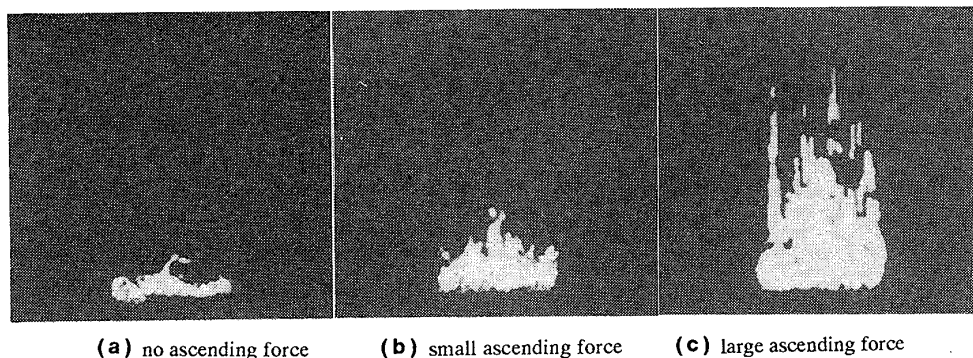
- (a) 粒子間に働く力(引力および斥力),
- (b) 粒子の「温度」による上昇力.

これらの力に関して実験を行い、次のような結果を得た。

(a)について 炎粒子の場合の引力は、引力があると、炎の先端が細くなり、火力の強い大きな火のような形が形成されるが(図12(a)参照)、引力がないと丸みを帯びた形となるため、火力の弱い小さな炎の印象となる(図17参照)。このことから、引力は炎のスケールに関する因子と言える。すなわち、引力が弱いと小さな炎、強いと大きな炎の印象となる。

煙粒子の斥力については、斥力を弱くすると煙があまり広がらず、煙草の煙のような印象を受けるものとなる(図11参照)。斥力を強くすると煙が流れるにつれて広がり、煙突の煙のような印象を受ける(図10参照)。このことから、斥力は煙のスケールに関係した因子であると言える。すなわち、斥力が弱いと小規模な煙、強いと大規模な煙の印象となる。

(b)について 粒子の上昇力について、炎のシミュレーションを行った結果を図18に示す。これから、粒子に上昇力がないと、上方に移動できなくなるため、



(a) no ascending force (b) small ascending force (c) large ascending force

図18 粒子の上昇力の効果
Fig. 18 Effects of ascending forces.

発生場所に粒子がかたまってしまう、炎のような形を形成しなくなることがわかる(図18(a)参照)。このことから、炎にとって上昇力は不可欠な要素であると言える。また、上昇力を強くすると火力が強い炎(図18(c)), 弱くすると火力が弱い炎の印象になる(図18(b))。このため、上昇力は炎の火力に関する因子であると言える。

以上の結果から、気流に形をゆだねるような煙や炎の形の生成のためには、本手法で設定した渦場や粒子の行動規則は有効であると言える。

しかしながら、これらの実験の過程で、渦場の更新規則や粒子間に働く力などの調整のみでは得られそうもない煙や炎の形があることも明らかとなった。本手法では流体が別種の流体に飛び込んだときの流体の境界がつくるような形、すなわち、ろうそくの炎のような形、蒸気機関車から出るもくもくした煙、および爆発的に燃焼する炎などは、実現できないことがわかった。

これらは煙や炎の粒子以外に、空気の粒子を仮定して、空気の粒子とこれら煙や炎の粒子とが相互に「対話」するようなシミュレーションをしなければ実現できないのではないかと考えている。

6. む す び

本論文では、まず渦場に基づく、2次元の煙や炎のシミュレーション法および粒子の移動軌跡より煙や炎の画像生成法を示した。次に、これらによるシミュレーション例を示し、気流に形をゆだねるような煙や炎のシミュレーションに有効であることを示した。更に本手法の行動規則について詳細に検討し、行動規則の意味を明らかにすると共に、本手法では現在のところ実現できない煙や炎の形があることも述べた。

今後の課題として、3次元への拡張および本モデルでは実現できていない、爆発するような炎、SLの噴煙や火山の噴火にも見られるようなもくもくした形の煙なども表現できるモデルへの拡張が挙げられる。

謝辞 岩手大学在学中、本研究に関する種々のプログラム実験を試みて頂いた守田空悟(京セラ(株)), 渡邊俊臣(日立電子(株))の諸君に感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費(一般研究(B)04452315)の補助による。

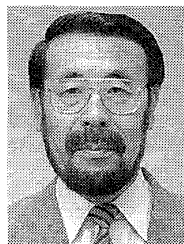
文 献

(1) Blinn J.: "Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces", *Computer Graphics*, **16**, 3,

- pp. 21-29 (1982).
- (2) Klassen R. V.: "Modeling the Effect of the Atmosphere on Light", *ACM Transaction on Graphics* **6**, 3, pp. 215-237 (1987).
- (3) Nishita T., Miyawaki Y. and Nakamae E.: "A Shading Model for Atmospheric Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources", *Computer Graphics*, **21**, 4, pp. 303-310 (1987).
- (4) Rushmeter H., Torrance K.: "The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium", *Computer Graphics*, **21**, 4, pp. 293-302 (1987).
- (5) Kaneda K., Okamoto T., Nakamae E. and Nishita T.: "Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric conditions", *The Visual Computer*, **7**, pp. 247-258 (1991).
- (6) Kajiya J. and Herzen B. V.: "Ray Tracing Volume Densities", *Computer Graphics*, **18**, 3, pp. 165-174 (1984).
- (7) Max N.: "Light Diffusion Through Clouds and Haze", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **33**, pp. 280-292 (1986).
- (8) Gardner G.: "Visual Simulation of Clouds", *Computer Graphics* **19**, 3, pp. 297-303 (1985).
- (9) Voss R. F.: "Random Fractal Forgeries", *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, pp. 805-835 (1985).
- (10) Perlin K.: "An Image Synthesizer", *Computer Graphics*, **19**, 3, pp. 287-296 (1985).
- (11) 西田友是, 中前栄八郎: "大気中の不均一微粒子の表示法", *情報処理学会第35回論文集*, pp. 2307-2308 (1987).
- (12) Inakage M.: "A Simple Model of Flames", *CGI'90*, pp. 71-81 (1990).
- (13) Reeves W. T.: "Particle System - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", *Computer Graphics*, **17**, 3, pp. 359-376 (1983).
- (14) Sims K.: "Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation", *Computer Graphics*, **24**, 4, pp. 405-413 (1990).
- (15) Ebert D. and Parent R.: "Rendering and Animation of Gaseous Phenomena by Combining Fast Volume and Scanline A-buffer Techniques", *Computer Graphics* **24**, 4, pp. 357-366 (1990).
- (16) 大島登志一, 板橋秀一: "2次元テクスチャを用いた炎の動的表現", *情報処理学会論文誌*, **32**, 4, pp. 435-447 (1991).
- (17) 安居院 猛, 河野雄三, 中嶋正之: "コンピュータグラフィックスにおける火炎の2次元画像の生成", *信学論(D-II)*, **J74-D-II**, 2, pp. 184-189 (1991-02).
- (18) Sakas G. and Gerth M.: "Sampling and Anti-aliasing of Discrete 3-D Volume Density Textures", *EUROGRAPHICS'91*, pp. 87-102 (1991).
- (19) Sakasu G. and Rudiger W.: "A Functional Approach to the Visual Simulation of Gaseous Turbulence", *EUROGRAPHICS'92*, pp. 107-117 (1992).
- (20) Gardner G. Y.: "Fractal Ellipsoid Fire", *SIGGRAPH'92, Electronic Theater* (1992).

- (21) "Particle System Modeling, Animation, and Physically Based Techniques", SIGGRAPH'92 Course Notes 16 (1992).
- (22) 大橋秀雄監訳, 山口信行訳: "渦—自然の渦と工学における渦", 朝倉書店(1988). (原著: "H. J. Lugt: Wirbelstromung in Natur und Technik, 1979)
- (23) 千葉則茂, 村岡一信, 八重樫一仁, 三浦 守: "尾根線の再帰生成による侵食作用により形成された山岳形状の定義法", テレビジョン学会誌, 45, 10, pp. 1240-1248 (1991).
- (24) Chiba N., Muraoka K. and Takahashi H.: "IWATE'92, SIGGRAPH'92 Computer Graphics Screening Room (1992).

(平成4年12月28日受付, 5年3月24日再受付)



三浦 守

昭37岩手大・工・電気卒。同年東北大・工・助手, 昭43秋田工業高専助教授。昭47岩手大・工・助教授を経て, 昭60同大教授。工博。この間, マグネティックス, デジタル信号処理方式などに関する研究に従事。平1年10月より10か月間, ウィンザ大(カナダ)およびカリフォルニア大サンタバーバラ校(米国)の客員研究員。電気学会, 計測自動制御学会, IEEE, 情報処理学会, 日本ME学会各会員。



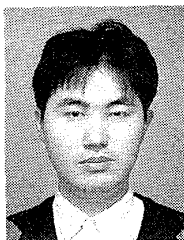
村岡 一信

昭51東北工大・電子卒。同年同大研究生。昭52仙台電子専門学校教員。平1岩手県立盛岡短期大学講師。平3同助教授, 現在に至る。コンピュータグラフィックスの研究に従事。共著書「レイトレーシングCG入門」(サイエンス社)。情報処理学会会員。



千葉 則茂

昭50岩手大・工・電気卒。同年より昭53まで(株)日本ビジネスコンサルタント(現(株)日立情報システムズ)に勤務。昭59東北大大学院博士後期課程了。工博。同年同大・工・助手。昭61仙台電波高専・助教授。昭62岩手大・工・助教授。平3同教授。アルゴリズム, コンピュータグラフィックス, 形の科学に興味をもつ。情報処理学会, 形の科学会, ACM各会員。著書: 「Planar Graphs: Theory and Algorithms」(共著, North-Holland, 1988), 「離散数学」(共著, 朝倉書店, 1989), 「レイトレーシングCG入門」(共著, サイエンス社, 1990)など。



高橋 宏道

平4岩手大・工・情報卒。現在, 同大大学院修士課程在学中。コンピュータグラフィックスの研究に従事。