

粒子と渦場による炎・煙の2次元CGシミュレーション —延焼と運動する燃焼領域を伴う場合—

高橋宏道+

村岡一信++

千葉則茂+

+岩手大学工学部

++盛岡短期大学

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、いくつかの手法が提案されているが、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。筆者らは、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ており、すでに、基本的な手法を提案している。本論文では、炎の燃え広がり、揺れる物体の燃焼、および煙の発生を伴う炎の表現を可能とした拡張版について報告する。

2D CG Simulation of Flames and Smoke Using Particles and a Vortex Field:
Simulation of the Spread of Fire and the Emission of Fire from Moving Objects.

Hiromichi Takahashi+, Kazunobu Muraoka++ and Norishige Chiba+

+Faculty of Engineering, Iwate University

++Morioka Junior College

It is especially interesting to produce the realistic images and the animations of flames and smoke, on account of their complicated patterns of behavior. Although several useful representation methods have been proposed so far, simulating flames and smoke still remains a challenging problem. In this paper, we first outline our basic 2D visual simulation method based on particle-based simulation. Next, we present an improved method for simulating the spread of fire, the fire emitted from moving objects, and the appearance of smoke produced in an incomplete combustion. Simultaneously, we show several examples of the simulation.

1 はじめに

これまでに、湯気、霧、雲、煙、および炎などのガス状物体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]。

これらの研究の中、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、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[12]、2次元テクスチャと種々の加工操作を用いた焚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]もいくつか作成されているが、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も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

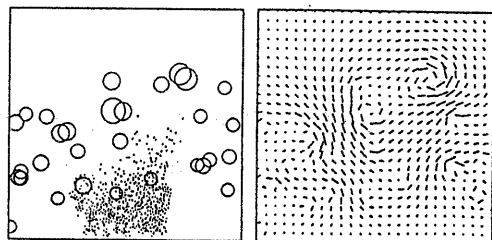
(a) 形や動きの揺らぎの程度の制御が容易に可能であること、

(b) 鍋や他の障害物などの衝突・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。



○：渦、・：粒子

(a)生成された渦

(b)渦により生成された
気流の速度ベクトル場

図1 渦場

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考え、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超えるような煙や炎、煙草の煙のようにくゆる煙や煙突のそ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作り出すこともできるという特徴を持つ。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[21][22]。

本稿では、より表現力を高めるために延焼アルゴリズムの改良、煙を伴う炎への拡張、運動する障害物または燃焼領域を伴う場合への拡張について検討を行ってきたので、これらについて報告する。

2 渦場によるシミュレーション法

本手法では、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ものである(図1参照。円が渦を表し、黒点が粒子を表す。円の大きさは渦の大きさを表す)。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。渦の形としてはランキン渦を用いた。ランキン渦とは、渦の速度分布が、剛体回転させたときの剛体中の速度分布と、回転する剛体の回りにできるポテンシャル渦の速度分布をあわせ

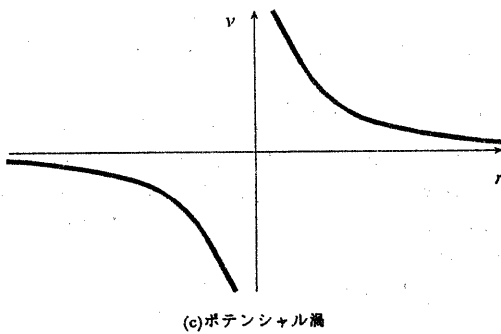
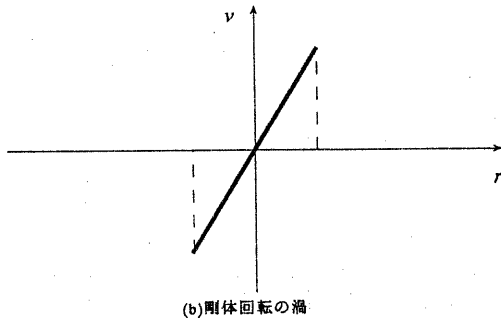
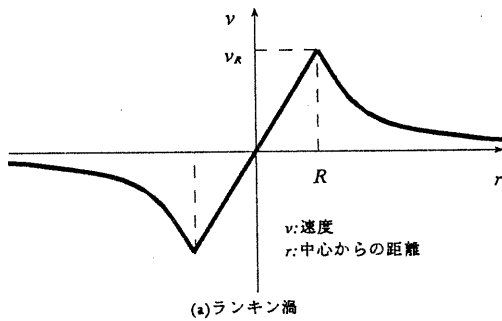


図2 渦の型

る台風の渦が、マクロ的にみてランキン渦と酷似していることから[23]、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。

ここでは時刻 t における、ランキン渦の回転速度 $v(r, t)$ を、次式のように定義する(図2参照)。

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

ここで、 r は渦の中心からの距離、 $R(t)$ は時刻 t における渦の半径、 $v_R(t)$ は時刻 t における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。

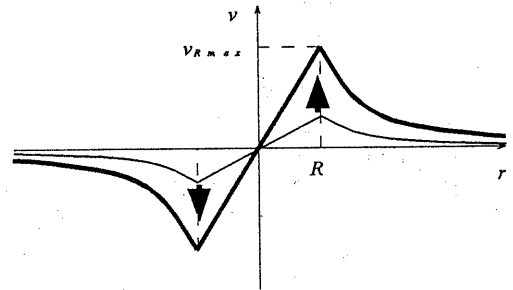


図3 渦の成長

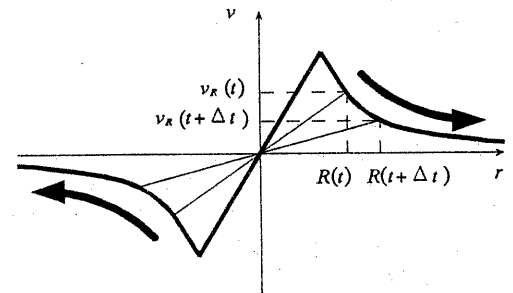


図4 渦の衰退

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)。ただし、渦の存在が認識されにくい複雑な乱流場を作るために次式で示すように、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 は渦の半径、 $n(R)$ は半径 R の渦の個数、 N は渦の個数を決定するための比例定数である。

(2)成長： 渦の発生後、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)。

$$\begin{cases} v_R(t + \Delta t) = v_R(t) + a_G \cdot \Delta t & (t_0 \leq t < t_0 + T_G) \\ v_R(t_0) = 0 \\ a_G = v_{Rmax} / T_G \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 Δt は1計算ステップでの経過時間(単位計算時間)、 v_{Rmax} は渦の半径上における渦の速度の最大値、 t_0 は渦の発生した時間、 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、渦の回転速度は単位計算時間ごとに減衰し、半径が大きくなると仮定する(図4参照)。式(1)より、渦は次式で示すように衰退させる。

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

ただし、 $v_s(t)$ は渦の増大速度で、 $v_s(t) > 0$ 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らその渦は消滅させる。

(5)移動： 渦は、その中心での渦場から受ける力 f_s 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。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節で述べる。

(6)障害物回避： 粒子と同様に渦も障害物を避けて移動させるものとする。これを簡便に実現させるため、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持つ。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、単に粒子という場合は、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中に任意に設定される発生源から、単位計算時間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ようである。

$$f(t) = M \cdot a(t) \quad (5)$$

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

$$= f_s(t) + f_i(t) + f_h(t) - C v(t)$$

$f_s(t)$: 渦場から受ける力

$f_i(t)$: 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、もっと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、

$$v(t+\Delta t) = v(t) + f(t)/M \cdot \Delta t$$

$$x(t+\Delta t) = x(t) + v(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

ここで、 $M=1, C=1/\Delta t$ とすると、第1式は

$$v(t+\Delta t) = (f_s(t) + f_i(t) + f_h(t)) \cdot \Delta t \quad (7)$$

となる。ここで、 $f_s(t) \cdot \Delta t$ 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)。

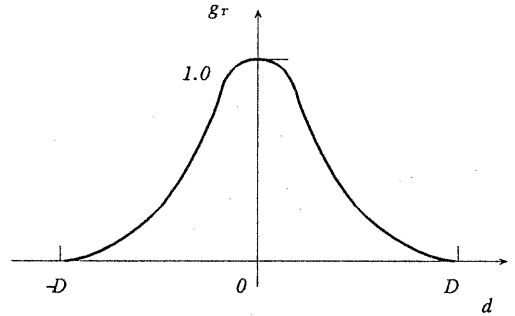


図5 関数 g_r

(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する。

(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 を持つ。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の上昇するという過程を簡便に計算するために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”漸加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(ここでいう“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)。

$$T_i(t+\Delta t) = \alpha \cdot T_i(t) + \beta \cdot \sum_{j=1}^N g_r(d_{ij}) T_j(t) \quad (8)$$

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 は温度の伝搬係数、 d_{ij} は粒子 i と粒子 j の間の距離、 g_r は次式で表される距離の関数である(図5参照)。

$$g_r(d) = \begin{cases} (1-d^2/D^2) \cdot \exp(-d^2/(D/2)^2) & (d \leq D) \\ 0 & (d > D) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 D は影響範囲を表す定数である。

上昇力 f_h の大きさは次式で表される。

$$f_h(t) = H \cdot T(t) \quad (10)$$

ここで 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節で述べたように、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と同様の上昇力を受ける。

(b)粒子間に働く力 f_i について： 粒子間に働く力 f_i 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_i は次式に従うものとする。

$$f_i = S \cdot \sum f_0(d_{ij}) \quad (11)$$

ここで、 S は力の大きさと引力、斥力を決めるための

定数で、引力の場合は正で、斥力の場合は負である。 $f_i(d)$ は粒子間の距離 d についての関数であり、 g_r と同様に次式で表す。

$$f_i(d) = \begin{cases} (1-d^2/D_1^2) \cdot \exp(-d^2/(D_1/2)^2) & (d \leq D_1) \\ 0 & (d > D_1) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 d は粒子の中心からの距離、 D_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”が閾値以下になるか、決められた時間が経過したとき、シミュレーション空間から消去し、消滅させる。これにより、炎の先端の形状が形成される。煙粒子の場合は、粒子がシミュレーション空間の外へでない限り消滅させないこととする。

2.3 燃料域の状態遷移規則

物から物へと燃え広がる延焼は、延焼物である物の発火、延焼、消火という状態の推移である。発火は、燃料が熱せられ気化させられた可燃性ガスを生成し、このガスと酸素が適度に混合し、そこに発火に十分な熱を与えられることにより起きる。発火の条件を以下に示す。

- ・可燃性であること（燃料があること）。
- ・酸素があること。
- ・発火に十分な熱があること。

つまり、この条件が満たされた場合、その物は発火、燃焼することになり、この条件のいずれかが満たされなくなった場合、消火するものとなる。

また、熱の伝わり方には、熱伝導、熱伝達、熱放射といった形態がある。熱伝導は同一物体どうしで温度の高いものから低いものへ熱が伝わる形態、熱伝達は性質の異なる物体どうしでの形態、熱放射は赤外線や可視光線などの熱線により伝わる形態である。炎で可燃物が燃えるのは、空気などを媒体とした熱伝達と熱放射によって可燃物に熱が伝わるためと考えられる。隣接する可燃物には熱伝導で熱が伝わる。

本手法では、粒子はその形、動きを表現するためのトレーサであり、炎についていえば、粒子は燃焼中の可燃性ガスを意味する。ただし、酸素の粒子は定義していない。粒子の発生域において可燃性ガスと酸素とが混合しているものと仮定し、燃焼した可燃性ガスを粒子として発生域に生成させている。つまり、発生域は可燃性ガスと酸素の混在域である。さらに、延焼のシミュレーションにおいては、新たに可燃性ガスが固化した物（以後燃料域と呼ぶ）を与える。

燃料域は燃焼前及び燃焼時において固形物としての形を持ち、障害物と同様に、粒子や渦はその表面において弾性衝突するものとする。燃料域はシミュレーション空間を格子状に細分化したピクセルを単位とし、その集合として定義するものとする。個々の燃料域は、

燃料と温度を状態変数として持つ。

また、熱の伝わり方には上記の3つの形態があるが、熱放射は無視することにする。熱伝導では隣接する燃料域に単位計算時間ごとに熱を与える。熱伝達では媒体とするものがないので粒子の衝突によって熱が伝わると考える。

燃料域の状態遷移規則

(1)燃料域の状態：燃料域は、不燃焼、燃焼、消火の3つのいずれかの状態を持つ。それぞれ、燃料があり温度が発火温度に達していない状態を不燃焼、燃料があり温度が発火温度に達した状態を燃焼、燃料がなくなった状態を消火という。

(2)熱伝達：燃料域は、単位計算時間ごとにその燃料域に衝突した炎粒子より熱を伝えられるものとする。また、他の燃料域が接していない辺がある場合、そこから外部に熱を伝える。

(3)熱伝導：燃料域は隣接する燃料域より温度が高い場合、その燃料域に熱を伝え、温度が低い場合は熱を伝えられる。

(4)可燃性成分の減少：燃料域が燃焼の状態の場合、発生した粒子数分、燃料を減少させる。

以上の規則より、燃料域 i の時刻 t における温度 $T_i(t)$ は次式のように定義される。ただし、計算を簡単にするため各燃料域の中心の温度をその燃料域の温度とし、その中心同士を結ぶ線に平行に1次元定常熱伝導が起こるものとする。

$$\begin{cases} T_i(t+\Delta t) = T_i(t) + (Q_r(t) + Q_c(t)) / (C_i \cdot V_i) \\ Q_r(t) = C_i \sum_{j=1}^{N_s} T_{r,j}(t) - h \cdot B \cdot T_i(t) \cdot \Delta t \\ Q_c(t) = \sum_{j=1}^{N_c} \lambda \cdot A/d \cdot (T_i(t) - T_j(t)) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 C_i は粒子の伝達係数、 N_s は衝突した粒子の数、

$T_{r,j}(t)$ は燃料域に衝突した炎粒子 j の温度、 h は空気の熱伝達率、 B は燃料域と隣接していない燃料域の境界

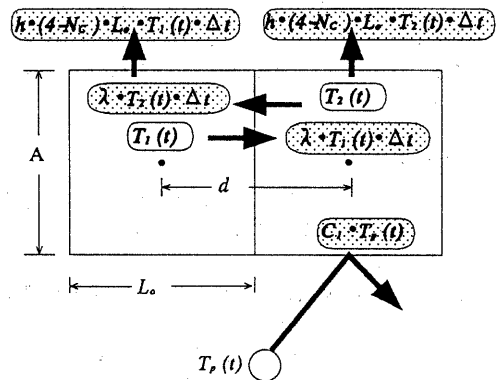


図6 粒子と燃料域の熱移動

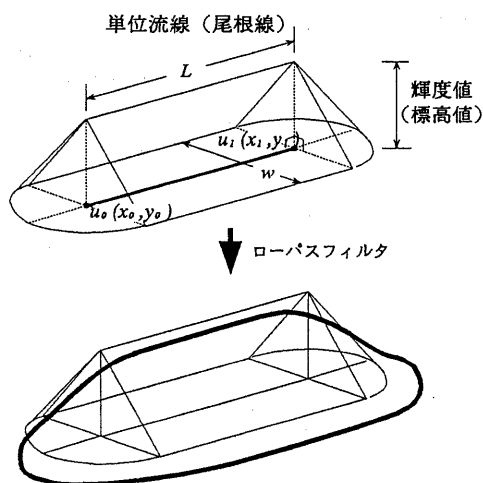


図7 画像生成法

の長さ、 N_c は隣接している燃料域の数、 λ は燃料域の熱伝導率、 A は隣接する燃料域との隣接している長さ、 d は隣接する燃料域の中心どうしの距離、 $T_k(t)$ は隣接する燃料域 k の温度、 V_f は燃料域の面積、 C_f は燃料域の比熱である。

計算を簡単にするため、燃料域を一辺の長さが L_o の正方形とすると式(13)は次式のようになる。

$$\begin{cases} T_i(t+\Delta t) = T_i(t) + (Q_r(t) + Q_c(t)) / (C_f \cdot L_o^2) \\ Q_r(t) = C_f \sum_{j=1}^{N_c} T_{r,j}(t) - h \cdot (4 - N_c) \cdot L_o \cdot T_i(t) \cdot \Delta t \\ Q_c(t) = \sum_{j=1}^{N_c} \lambda \cdot (T_i(t) - T_j(t)) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (14)$$

(図6参照)。

式(14)よりわかるように、 λ を大きくすれば周りの燃料域へも速く熱が伝わり、 C_f を大きくすれば、炎により多くの熱が物体に伝わることになる。また、 h が大きいと周りの空間に熱を放出し、 h が0の時炎から与えられた熱を100%温度上昇に変えることができる。 C_f が大きいと温度を上げるためにたくさんの熱を必要とする。すなわち、 C_f を大きくすると物体が発火しにくくなる。

3 画像生成法

炎や煙の写真は、それらを構成する粒子の微小時間における移動軌跡を写しだしている。また、このことが時間軸方向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画像を生成することが有効であると思われる。また、シミュレーションに使用する粒子の数は、処理時間などの観点から画像の解像度に対してより少なく済むほうが望ましい。したがって、なんらかの補間法を開発することが

重要である。ここでは、尾根線による山岳地形の定義法[24]の一部を用いて、次のようにして1枚のCG画像を生成した。

粒子の移動データからCG画像を生成する手法：

単位計算時間に移動した粒子の最初の点 $u_0(x_0, y_0)$ および最後の点 $u_1(x_1, y_1)$ を結んだ線分を単位流線と呼ぶことにし、この長さを L とする。また、単位流線の温度を u_1 における粒子の温度 T_{p_1} とする。

- (1) CG画像の輝度値 ic を格納するために2次元配列 T を用意する。
- (2) 単位流線を入力単位として、数計算時間の単位流線の端点 u_0, u_1 の座標および温度 T_{p_1} を入力する。
- (3) T_{p_1} および L に応じ、単位流線の輝度値 ic を定める。単位流線の温度 T_{p_1} が高ければ輝度値 ic を大きく、単位流線の長さ L が長ければ(粒子の移動速度が速ければ)、輝度値を小さく設定した。
- (4) 単位流線およびその輝度値 ic を、それぞれ山岳地形における“尾根線”および“標高値”に対応させ、単位流線を構成する各線分に対し、幅 w の“裾野”を構成する四角形を2枚生成する。さらに、両四角形がつくる水平面に垂直な三角形の隙間を埋めるための円錐も生成する(図7参照)。
- (5) Z-バッファ法により、(4)で生成した四角形と円錐すべてに対して輝度値 ic の大きい部分が T に残るように ic を T に書き込む。
- (6) T にたとえば画像処理で使われる 3×3 空間フィルタなどのローパスフィルタをかけ平滑化する。
- (7) 輝度値の応じてビクセルの色を定め、炎や煙の色とする。輝度値の大きい順に、炎の場合は白色、黄色、赤色と変化する階調を、煙草の煙の場合は青白色の階調を、煙突の煙の場合は白色の階調を割り当てる。

4 煙が伴う炎への拡張

実際の炎は煙を伴ったものが多い。そこで自然な景観を得るためには、炎と煙を同時にシミュレーションすることが重要な課題と考えられる。ここでは、煙が伴う炎を渦場によるシミュレーション手法で実現する一例として、炎から煙への遷移規則と、炎と煙をあわせた画像生成法を示す。

4.1 炎粒子から煙粒子への遷移規則

ものが燃えるためにはさまざまな条件が必要となるが、ここでは燃焼に充分な温度があるとき燃えるものとする。

この条件に沿って粒子の行動規則(3)を次のように拡張する。

- (3)' 炎粒子から煙粒子への遷移：炎を表す炎粒子は

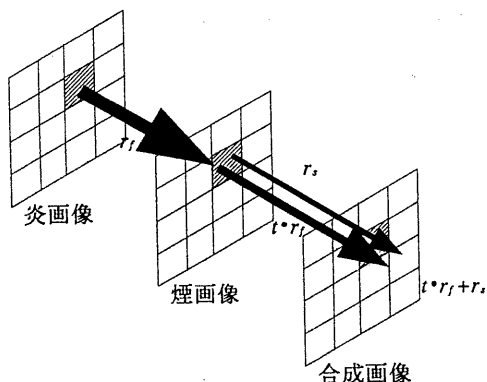


図8 炎画像と煙画像の合成法

“温度”がある閾値以下になったら煙を表す煙粒子に状態遷移する。

この規則から明らかなように、閾値を下げると煙になりにくく、閾値を上げると煙になりやすい。

4.2 画像生成法

ここでは、2次元空間でシミュレーションしているので、煙と炎の前後関係が決まっていない。そこで、炎の後ろの煙は、見えないものとし、また、炎の手前の煙は、透過性を持ち後ろにある炎の光を通すものと仮定する。

画像生成の手順を示す。

- (1) 炎、煙それぞれの独立して3章で説明した画像生成を行う。
- (2) 3章で述べている“標高値” H をもとに煙の透明度 t ($0 \leq t \leq 1$) を求め、それをもとに次式に従って、各画素のRGB値（色を赤、緑、青の三原色に分解した値）を求める（図8参照）。

$$\begin{cases} t = (1 - k \cdot H) \\ r_c = t \cdot r_f + r_s \\ g_c = t \cdot g_f + g_s \\ b_c = t \cdot b_f + b_s \end{cases} \quad (k \text{は定数}) \quad (15)$$

ここで、 (r_f, g_f, b_f) は炎画像のRGB値、 (r_s, g_s, b_s) は煙画像のRGB値、 (r_c, g_c, b_c) は炎画像と煙画像の合成画像のRGB値である。

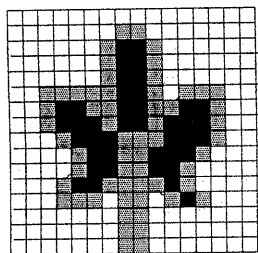


図9 基本版での定義法

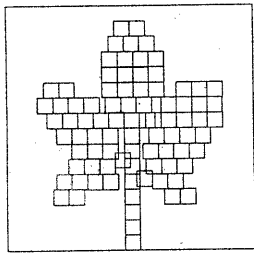


図10 拡張版での定義法

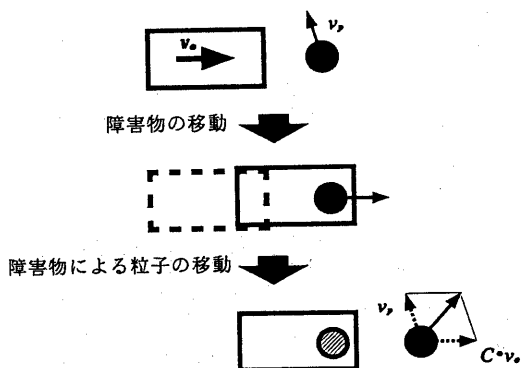


図11 障害物の移動

5 移動物体の実現への拡張

実際は、炎や煙が固定した場所からのみ発生するわけではない。ロケットの噴射や、たいまつをもって歩く場合のように発生源が移動する場合もある。また、鍋を火にかざしながら動かす場合などのように、障害物が移動する場合もある。これらの現象をシミュレーションする為の、渦場による手法の拡張例を示す。

5.1 燃料域の定義法

これまでの燃料域は、燃焼物体のスクリーンへの投影を2次元配列を用いた格子セルで表現している（図9参照）。しかしながら、燃料域が移動する場合に適用すると、移動前後での格子セルどうしの対応づけが困難となる。したがって、ここでは初期状態の投影の適当な標本点にセルを割当て、それをノードとし、さらに隣接関係を接続辺とするグラフ構造で表現することとした（図10参照）。

5.2 障害物と粒子の関係

障害物の移動先に粒子が存在すれば、当然その粒子は影響を受けるべきである。この状態をシミュレーションする為粒子の行動規則(4)に以下の規則も導入する。

障害物移動規則： 障害物の移動先に粒子が存在した場合は障害物と粒子を弾性衝突させる。ただし、障害物の質量は粒子と比べて非常に大きいものとする。つまり、障害物は粒子の影響によって速度変化を起こさないものとする（図11参照）。

シミュレーション結果を図12、13に示す。

6 むすび

本報告では、渦場によるシミュレーション法に改良・拡張を加え、煙が伴う炎を扱う上での手法の拡張、移動する障害物、可燃物を扱う上での手法の拡張について説明した。

今後の課題として、3次元への拡張および本モデル

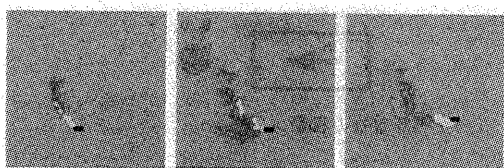


図12 燃料域が移動する例



図13 障害物が移動する例

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み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。

参考文献

- [1] J.Blinn: Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces, Computer Graphics 16,3,pp.21-29, 1982
- [2] R.V.Klassen: Modeling the Effect of the Atmosphere on Light, ACM Transation on Graphics 6,3,pp.215-237,1987
- [3] T.Nishita, Y.Miyawaki, E.Nakamae: A Shading Model for Atmospheirc Scattering Considering Luminous Intensity Distriburion of Light Sources, Computer Graphics 21,4, pp.303-310,1987
- [4] H.Rushmeter,K.Torrance: The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium, Computer Graphics 21, 4, pp.293-302,1987
- [5] K.Kaneda, T.Okamoto,E.Nakamae,T.Nishita: Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under variout atmospheric conditions, The Visual Computer 7, pp.247-258,1991
- [6] J.Kajiya, B.V.Herzen: Ray Tracing Volume Densities, Computer Graphics 18,3,pp.165-174,1984
- [7] N.Max: Light Diffusion Through Clouds and Haze, Computer Vision, Graphics and Image Procsssing 33, pp.280-292, 1986
- [8] G.Gardner: Visual Simulation of Clouds, Computer Graphics 19,3, pp.297-303,1985
- [9] R.F.Voss: Random Fractal Forgeries, Fundamental Algorithms for Computer Graphics, pp.805-835,1985
- [10] K.Perlin: An Image Synthesizer, Computer Graphics 19,3,pp.287-296, 1985
- [11] 西田,中前: 大気中の不均質微粒子の表示法,情報処理学会第35回論文集, pp.2307-2308,1987
- [12] M.Inakage: A Simple Model of Flames, CGI90, pp.71-81,1990
- [13] W.T.Reeves: Particle System - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, Computer Graphics Volume 17, Number 3,pp.359-376, 1983
- [14] K.Sims: Paticle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation, Computer Graphics 24,4, pp.405-413,1990
- [15] D.Ebert, R.Parent: 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,板橋: 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, Vol.32, No.4, pp.435-447,1991
- [17] 安居院,河野,中嶋: 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,電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D- II, No.2, pp.184-189,1991
- [18] G.Sakas, M.Gerth: Sampling and Anti-Aliasing of Discrete 3-D Volume Density Textures, EUROGRAPHICS'91, pp.87-102,1991
- [19] G.Sakasu, W.Rudiger: A Functional Approach to the Visual Simulation of Gaseous Turbulence, EUROGRAPHICS'92, pp.107-117,1992
- [20] G.Y.Gardner: Fractal Ellipsoid Fire, SIGGRAPH'92, Electronic Theater,1992
- [21] 守田,村岡,千葉: 渦場による炎や煙のCGシミュレーション,第6回NICOGRAPH,論文コンテスト論文集, pp.109-117,1990
- [22] 村岡,千葉,高橋,三浦: 渦場による煙や炎の2次元CGシミュレーション,電子情報通信学会論文集, 1993
- [23] 大橋,山口: 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)
- [24] 千葉,村岡,八重樫,三浦: 尾根線の再起生成による浸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, Vol.45, No.10, pp.1240-1248,1991