CGによる物体の燃焼と変形・変色の表現

Computer Graphics Representation of Deformation and Color Change in Objects during Combustion

正会員 佐藤 吉将^{†*}, 正会員 島田 英之[†], 正会員 塩野 充[†], 正会員 宮垣 嘉也[†]Yoshimasa Satou^{†*}, Hideyuki Shimada[†], Mitsuru Shiono[†] and Yoshiya Miyagaki[†]

Abstract Research into the representation of flames using CG has focused on flame representation. There has been little research into the relation between the flame and the burning object. The burning object has been interpreted as the fuel resource, that is, the combustion root, or as an obstruction to the flame's motion. In this paper, we interpret combustion as deformation of both the flame and the objects and propose a CG representation method. The representation subject is the object which occurred the shrinking deformation. Before our experiments, we observed actual scenes of combustion, then based on these observations, we represented the deformation and the color change. In this method, the burning object is modeled using 3D volume data, and the control parameters are set to these. The deformation and color change are represented by changing the parameters with cellular-automata and a heat equation. Our experiments showed that our method more realistically represents combustion and deformation, particularly of wood.

キーワード: CG, 炎, 燃焼, 燃焼物体の変化

1. ま え が き

自然界の情景をコンピュータグラフィックスにより表現する試みは以前から行われており、その中でも炎はその身近さと、表現手法の複雑さから、これまでに多くの研究が行われてきた^{1)~10)}。しかし、炎の表現方法については多くの研究例があるものの、炎と物体との係わりについてはほとんど研究例がなく、文献¹¹⁾¹²⁾などがあるのみである。これらのモデルでも、物体は燃焼経路の指定のための燃料源として考えているか、あるいは、炎の動きを制限する障害物としてのみ捉えている。しかし、物体が燃焼する際には、そこから炎が発生するというだけでなく、燃焼に伴って物体の変色や変形という現象が存在するのが普通である。このことについての具体的な考察はこれまであまり行われていない。

そこで本論文では、燃焼に伴う物体の変形や変色の過程に着目し、これをCGにより表現する一手法について提案する¹³⁾。

燃焼に伴う物体の変形や変色の仕組みについて直ちに応用できる物理的な考察を行った研究例を見出すことができなかったため、本論文では、実際の物体を燃焼させ、その変形と変色の様子を観察し、そこから変形と変色の規則を仮定して、CGにより表現する方法をとった。

この論文の手法により、炎が物体に燃え移り、そこから発生した炎がまた別の物体へと燃え移っていく様子が表現可能となり、また、物体の変形と変色の様子の表現についても、主観的には目的とするシーンを得ることができたと考えられる。なお、本研究のアルゴリズムは、木のような収縮変形する物体の燃焼と変形の表現を目的としており、薄い紙のように非常に大きく変形するような物体については対象としていない。

本研究を更に発展させれば、建造物の火災シミュレーション¹⁴⁾¹⁵⁾や、映像の特殊効果など、仮想空間内での燃焼・延焼の表現へ応用することができる。

2. 観察による燃焼規則の設定

実験を始める前に、燃焼の規則を設定するため、実際の物体に火を付け、外観的な燃焼の過程を繰り返し観察した。実際の燃焼の様子の一例として、図1が得られ、これらの結果から、最小限以下の燃焼規則を抽出し設定する。

・物体は、外側から内側に向かって収縮するように変形する。

2000年12月21日受付, 2001年4月4日再受付, 2001年5月8日採録
[†]岡山理科大学 工学部

(〒700-0005 岡山市理大町 1-1 Tel(086)256-9507)

* 現在, 株式会社ケイ・ジー・ティー 〒160-0022 東京都新宿区新宿 2-8-8
 とみん新宿ビル Tel(03)3225-0741

[†] Faculty of Engineering, Okayama University of Science
 (1-1, Ridai-cho, Okayama-shi, 700-0005 Japan)

* KGT Inc., Tomin Shinjuku Bldg., 2-8-8, Shinjuku, Shinjuku-ku,
 Tokyo, 160-0022 Japan

図 1 実際の物体の燃焼結果の例.
Some examples of the real combusted objects.

・物体は初期の頃は燃焼箇所に沿って、変形・変色するが、燃焼が進むにつれ、変形は行われなくなり、燃焼と変色のみが進行するようになる。

・薄い板状の物体の中央から火を付けた場合、燃焼の進行に伴い、そこに穴が開く。

・炎は上昇する性質があるため、上方向への燃焼は進行しやすく、下方向には燃焼はほとんど進行しない。

本論文での物体の燃焼による変形・変色は以上の規則を表現することを目的とする。

3. 粒子と渦場を用いた炎のモデリング

炎そのものをモデリングする手法についてはすでに多くの研究がなされている。ここでは粒子と渦場を用いた炎のモデリング手法を用いた。詳細については文献³⁾にあるので、ここでは要点を列記する。

- (1) シミュレーション空間中に炎を表す点(粒子)を多数発生させる。
- (2) 発生した粒子に上昇力を表すベクトルと、炎をゆらめかせるための3次元の渦場を用いた乱流のベクトルを加える。また、炎の火先を表現するため、互いの粒子間に引力のベクトルを持たせる。これら3つのベクトルの和を速度ベクトルとする。
- (3) シミュレーションの各タイムステップごとに先ほど定めた速度ベクトルによって粒子を移動させる。なおタイムステップ内での粒子の運動は直線運動のみとする。
- (4) 粒子には熱量 T が設定されており、この熱量はシミュレーションのタイムステップごとに一定値 ΔT ずつ減少させる。熱量が0になった時点で、粒子をシミュレーション空間から消失させる。なお、本シミュレーションでは T の初期値を1と設定しているため、実際には粒子の寿命は $1/\Delta T$ となる。

炎の色と粒子間の補間方法については、4.1のボクセル空間を用いるため、後章で説明する。

4. 燃焼物体の表現方法

4.1 燃焼物体の構成

シミュレーション空間は、3次元空間を格子状に区切った立方体型ボクセルの3次元配列により構成される。燃焼物体はボクセルを最小単位として構成され、物体のない領域は空間領域となる。物体の燃焼を表現するパラメータとしては、表1に示す1つの物体に共通したパラメータと、表2に示す各ボクセルごとに設定されるパラメータがある。1つの物体に共通したパラメータは、その物体の燃焼の様子をコントロールするためのパラメータであり、シミュレーション開始前に設定した後は更新されることはない。一方、ボクセルのパラメータはそのセルの現在の状態を示しており、燃焼の進行に伴い変化する。

各パラメータの詳細については、それぞれ4.3から4.6の記述の中で説明する。

4.2 炎と物体との衝突判定

シミュレーション空間中を移動する炎の粒子が物体と衝突した時、粒子の持つ熱を衝突したボクセルに与え、また衝突後、物体を通り抜けないように移動方向の修正を行う必要がある。そこで以下の手順により炎の粒子と物体を構成するボクセルとの衝突判定を行い、熱の受け渡しと、粒子の移動方向の変更を行った。

- (1) 炎の粒子は1タイムステップ内では、直線運動のみとしているので、3DDDA¹⁶⁾を用いて、炎の粒子が通るボクセルを求め、最初に炎と物体が衝突したセルを決定する。
- (2) 衝突したセルに炎の粒子が持つ熱を伝達し、粒子の持つ熱を減少させる。本手法では、計算の簡略化のため、粒子が単位タイムステップあたりに減少する熱量をボクセルに与え、粒子の熱量を同じ量だけ減少させることとする。これにより、粒子の存在時間は1タイムステップ分短くなることになる。
- (3) 衝突後の炎の粒子の移動方向を衝突面に沿うように変化させる。
- (4) もし、計算結果の粒子の移動先が物体のボクセル内に入るのであれば、計算の簡略化のため、その粒子は面に沿って移動しなかったものとして、粒子が衝突する1手前のボクセル内でランダムに移動先を設定し、その位置に移動させる。

4.3 熱伝導規則

1つの物体に火がついて燃え広がる様子を表現するために物体内の熱伝導の計算を行う必要がある。本手法では、3次元非定常熱伝導式¹⁷⁾を元に、熱伝導を単調増加させるように修正を加えた式を用いた。

また、外側から内側へと燃焼を進行させるために、タイムステップごとに各ボクセルごとに空間ボクセルから

表 1 1つの燃焼物体に共通したパラメータ。
Common parameters of a combustible object.

発火点 (T_{ig})	物体の発火温度。温度がこの値以上になれば発火する。
体積変化度の減少量 (V_{cc})	タイムステップあたりの物体の体積変化度の減少量。
初期燃料 (F_0)	物体の燃料の初期値。物体の変色に用いる。
熱伝達度 (C)	物体固有の熱の伝達度。
内外の熱伝達変化係数 (C_i)	物体内外での熱の伝達に差をつけるための係数。
上下方向への熱の伝達変化係数 (C_{ud})	熱伝達に上下方向の差をつけるために用いる。
色相 (H)	物体の色相情報。

表 2 各ボクセルが持つパラメータ。
Parameters of each voxel.

温度 (T)	要素の現時点での温度。
体積 (V)	ボクセル内を物体がどのくらい占めているかを表す。
燃料 (F)	発生させることのできる炎の粒子の残量。変形可能な時間も表す。
彩度 (S) , 輝度 (I)	ボクセル固有の色情報。これらと物体の色相によりボクセルの色が決定される。
体積変化度 (V_c)	単位タイムステップあたりの体積減少量。
街区画距離 (d)	単位タイムステップごとに求める。熱伝達、変形に用いる。
街区画距離の初期値 (d_o)	シミュレーション開始前にのみ設定される。変形度の減少に用いる。
発火フラグ	そのセルが発火状態であるかどうかのフラグ。

の街区画距離¹⁸⁾を計算し、同じ街区画距離を持つボクセル間での熱伝達に比べ、異なる街区画距離を持つボクセル間での熱伝達を低くする。これにより、通常の熱伝導とは異なり、火点から遠い箇所であっても物体の外側のほうが内側よりも速く熱が伝わることとなり、外側から内側に向けて燃焼が進行することになる。

また、燃焼が上方向へと進行しやすく、下方向へは進行しにくい様子を表現するため、下のセルからは多くの熱量を受け取るが、上のセルからはほとんど熱を受け取らないように係数を設定する。

これらの規則を導入した熱伝導の概念図を図2に示し、そのアルゴリズムを以下に記述する。ここで、 T はセルの温度、 d はセルの街区画距離、 C は熱の伝達係数を表す。また、温度計算における更新前後の温度の混在を防ぐために、温度を一時的に保存するための一時領域 T_{temp} を設けてある。また、 C_i は異なる街区画距離間での熱伝達を減少させるための係数であり、 $0 < C_i \leq 1$ とする。 $C_i = 1$ のときは、通常の熱伝達と同じ進行過程となる。 C_{ud} は上下方向に熱の進行状態を変化させるための係数であり、 $0 \leq C_{ud} < 1$ とする。 $C_{ud} = 0$ のときは、上下方向への熱の進行の違いは発生しない。このアルゴリズムでは、熱伝導の境界条件として温度計算は、炎の粒子から熱を受け取っていないセルについてのみ行い、粒子から熱を受け取ったセルについては、このアルゴリズムによる温度変化はないものとする。

図 2 街区画距離を用いた熱伝導の変化の様子。
The transition of heat conduction using city-block-distance.

ここで、 x, i はシーンの横方向 (右を正)、 y, j はシーンの縦方向 (上を正)、 z, k はシーンの奥行き方向 (手前を正) のボクセルの座標を表している。

```

procedure heat.conduction();
function conduct(x, y, z, i, j, k);
begin
  { 街区画距離が異なる場合は、 $C_i$  により熱の伝達を小さくする。 }
  if  $d[x][y][z] \neq d[i][j][k]$  then
     $cd := C_i$ ;
  else
     $cd := 1.0$ ;
   $conduct := C * cd * (T[x][y][z] - T[i][j][k]);$ 
  { 負の温度伝達をなくすことで、
    温度は単調増加する。 }
  if  $conduct < 0.0$  then  $conduct := 0.0$ ;

```

```

return conduct
end;

begin
{ 温度を一時保存領域にコピー. }
for each_voxel do begin
    Ttemp[i][j][k] := T[i][j][k]
end;

{ 上下方向の温度伝達に差をつけながら、
  温度の伝達を行う. }
for each_voxel do begin
    { 炎の粒子から熱を受け取っていない
      セルのみ計算する. }
    if( voxel[i][j][k] is no_heated_object_cell ) then
    begin
        sum := 0.0;
        sum := sum + conduct(i-1, j, k, i, j, k);
        sum := sum + conduct(i+1, j, k, i, j, k);
        sum := sum + (1 + Cud)conduct(i, j-1, k, i, j, k);
        sum := sum + (1 - Cud)conduct(i, j+1, k, i, j, k);
        sum := sum + conduct(i, j, k-1, i, j, k);
        sum := sum + conduct(i, j, k+1, i, j, k);
        Ttemp[i][j][k] := T[i][j][k] + sum;
    end
end;

{ 更新された値を元の配列に戻す. }
for each_voxel do begin
    T[i][j][k] := Ttemp[i][j][k]
end
end;

```

4.4 物体の発火と変色

炎から物体への熱の授与と熱伝導により、最外殻ボクセル ($d=1$) の温度が発火点以上になった時、そのボクセルは発火状態に達したものとし、ボクセルの発火フラグを立てる。発火フラグの立ったボクセルの周囲の空間領域のボクセルから一定個数の炎の粒子を発生させる。なお、物体内部のセルは、温度が発火点以上になったとしても、周囲のセルは全て物体であることから炎の粒子を発生させることはできないと考え、発火状態にはしないものとする。ボクセルが発火状態になった場合、ボクセルが持つ燃料を1ターンに1単位ずつ減らす。燃料が無くなったセルについては発火できなくなったセルであると見なし、炎の発生を停止することで、鎮火を表現する。

また、物体の変色過程を表現するため、物体の色を初期に設定されている色から黒色へと変色させていく。具体的には、タイムステップごとに以下の式 (1) を用いることで変色の表現を行う。

$$\begin{aligned}
 H_{t+1} &= H_t \\
 S_{t+1} &= S_t - \frac{1}{F_0} \\
 I_{t+1} &= I_t - \frac{R}{F_0}
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 F_0 は、シミュレーション開始時に各物体に設定されている初期の燃料を示す。また、 H_t, S_t, I_t は現時点でのボクセルの HSI 系の色を表している ($0 \leq H < 360, 0 \leq S, I \leq 1$)。H は物体固有の色情報であるため、シミュレーション開始から終了まで変化しないものとする。S, I のパラメータを変化させることにより、物体の変色を実現する。輝度 I については燃焼後の物体の色が単調にならないようにするため、乱数項 R により変化させてある。計算された色をこのボクセルの色として、後述のレンダリングの際に使用する。

4.5 物体のレンダリング

各ボクセルが現在保存しているパラメータを元に、物体のレンダリングを行う。ここでは、体積値 V をボリュームデータとして物体の描画を行う。体積値は物体によるボクセルの占有度を表しており、 $V=1$ はボクセルが完全に物体で満たされている状態であり、値が小さくなるに従い、ボクセル内には物体が存在していないという状態を表す。初期状態では、物体には1の体積値を、空間領域には0の体積値を与えておく。

本研究では燃焼する物体の内部が見える必要はなく、また、ボクセルに設定されたパラメータから複雑な計算を介することなく形状を決定したいという点から、マーチキューブ法による描画方法を採用した¹⁹⁾。ボクセルの持つ体積値をボリュームデータとして、等値面を作成することにより、物体のレンダリングを行った。

4.6 物体の変形アルゴリズム

セルが発火状態になった場合、タイムステップごとに物体の体積値から各セルにあらかじめ設定してある体積変化度を引き、セルの体積を減少させることで物体の収縮変形を表現する。物体の変形は、セルが発火している間のみ行われ、未発火状態あるいは鎮火している状態では変形は行われぬものとする。4.3 により、温度の進行過程が外側から内側に進行するようになっているので、基本的には物体の変形過程も外側から内側へと進行していくことになる。

体積変化度はシミュレーション開始前には、各ボクセルごとに同じ値が設定されているので、このままでは値によっては、途中で収縮が止まることはなく、物体の要素が全て消えることになってしまう。そこで、タイムステップごとに以下の規則を適用することにより、体積変化度を小さくしていくことで、徐々に変形量を小さくし、燃焼の進行に伴い、物体の変形が行われにくくなるような処理を行う。ここで、 d_0 とは、シミュレーション開始前に設定される各ボクセルにおける街区画距離であり、 d のように、単位タイムステップごとに変化することは

ない。

アルゴリズムを以下に示す。

```
procedure change_Vc();
begin
  { ボクセルデータを一時保存領域にコピーする }
  for a ∈ each_voxel do begin
     $V_{c(temp)_a} := V_{c_a}$ 
  end;

  for a ∈ each_voxel do begin
    { 隣接要素が発火しているのなら実行 }
    if some_neighbor_voxel is ignitte then begin
      min :=  $V_{c_a}$ ;
      { 隣接するセルのうち、注目セルよりも
        温度が高く、かつ、距離  $d$  が低いセルの
        なかで、最小の変形度を求める }
      for l ∈ 6neighbors do begin
        if  $T_l > T_a$  and  $d_l < d_a$  and
           $V_{c_l} \leq min$  then min :=  $V_{c_l}$ 
      end;

      { 初期の街区画距離によって
        変形の大きさを変える }
      min := min -  $V_{cc}(d_{o_a} - 1)$ ;

      { 現在の  $V_{c_a}$  よりも小さい値に更新する }
      if min <  $V_{c_a}$  then
         $V_{c(temp)_a} := min$ 
      end
    end;
  end;

  { 計算されたデータをもとの変数領域にもどす }
  for a ∈ each_voxel do begin
     $V_{c_a} := V_{c(temp)_a}$ 
  end;
end;
```

ここで、 $V_c\{0 \leq V_c \leq 1\}$ は、物体の体積変化度を表し、 $V_{cc}\{0 \leq V_{cc} \leq 1\}$ は単位タイムステップあたりの体積変化度の減少量を表している。初期距離 $d_o = 1$ のセルについては、開始前に設定された体積変化度のままでセルの体積値が減少することとなるが、変形が進行するに従い、内側のセルでは小さな変化度で収縮するようになり、やがて、変形が止まることとなる。

体積値が一定値以下になったセルについては、物体を構成していないセルであると判断し、これを空間セルに置き換える。これにより、物体の外周にあったセルは、燃焼の進行に伴って、消えて行くことになる。体積変化度の値によっては、セルの燃料が尽きていない場合であっても、そのセルを空間セルに置き換える。

外側のセルが空間セルに置き換えられた時、内側のセルの温度が発火点に達していない場合もあり、そのままでは発火もしておらず、まったく変色していないセルが表示されてしまうこととなる。熱伝達速度と変形度のパラメータを調整することにより、内側のセルが見え始めるのと同時にそのセルを発火のようにすることは可能ではあるが、適切なパラメータを設定することは困難である。そこで、街区画距離 $d = 2$ のセルについて、周囲の発火しているセルの S, I それぞれを平均した値を、そのセルの色情報として常に設定しておく。これにより、外側のセルが消失した時点の色が内側のセルにセットされていることになり、この色を初期値として、式 (1) による変色を行なう。

また、セルを空間セルに置き換えるときには、強制的にその周囲の物体セルの発火フラグを立てる。

これらにより、温度が発火点未満でも発火していることとなるが、見た目としては内部方向に収縮しながら燃焼しているように燃焼過程が進行することになる。

5. 炎の補間方法

5.1 ドロネー図を用いた炎のレンダリング

3 でモデリングされた炎をそのままレンダリングすると粒子間の隙間が目立つため、多数の粒子を用いて隙間が目立たないようにするか、なんらかの補間手法を用いて隙間を埋める必要がある。本手法ではドロネー図²⁰⁾を用いて粒子間をポリゴンにより補間し、炎をサーフェイスモデルとして表現する¹⁰⁾。これにより少ない粒子で複雑な形状をした炎を表現することが可能となる。

5.2 ドロネー図

ドロネー図とは、実数空間中にある頂点集合を三角形により補間したものである。これらの三角形は互いに交差することがなく、またできるだけ細長い三角形を持たないという特徴がある。このため、頂点間の接続関係をあらかじめ定義できない物体をポリゴンにより表現するのに適したアルゴリズムであると言える。本手法では炎の粒子をドロネー図の頂点と見立て、3 次元のドロネー図作成アルゴリズムを適用することにより炎をサーフェイスモデルで表現する。

5.3 透明粒子を用いた炎の表現

通常のドロネー図は凸包しか構成できないという特徴があるため、このままでは炎の持つ凹みを表現することはできない。そこで本論文では、以下の手法により、炎の粒子の周囲に透明な粒子を配置し、それを含めてドロネー図の計算を行うことで、物体の凹みを表現した。この時の概念図を図 3 に示す。

- (1) 各タイムステップごとに、物体を構成しているボクセル空間において、炎の粒子が存在しているボクセルに印を付ける。
- (2) 印をつけたセルとその 26 近傍のセルについて、

図 3 ドロネー図と透明粒子を用いた炎の構成。
The structure of flame with Delaunay
Triangulation and transparency particles.

ある一定個数になるまで透明な粒子をセル内にランダムに配置する。もし炎の粒子が閾値以上あれば、そのセルには透明粒子は配置されない。逆に炎の粒子が存在していない周囲のセルには閾値個の透明な粒子が配置される。

これにより、炎の凹みを表現することができ、また、炎の境界をばやけさせるような炎を構成することができる。

各ポリゴンの頂点は粒子の持つ熱量に応じて透明度が設定され、火先に近付くにつれて透明度は高くなる。これにより、後ろの炎や景色が透過するようになり、炎の持つ半透明感を表現することが可能となる。炎の色ならびに透明度は、炎の粒子が持つ熱量により、式(2)により表される。炎の色は、発生箇所に近い場所は黄色がかった白色とし、火先に近付くにしたがって、黄色から赤色へと変化させるものとする。

$$\begin{aligned} H &= 60T \\ S &= -0.4T + 1 \\ I &= 0.2T + 0.1 \\ A &= -\sqrt{1-T} + 1 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 T は粒子が持つ熱量であり、1から0へと変化するものである。また、 H, S, I はそれぞれ、頂点のHSI値を表し、 A は粒子の不透明度を表す($0 \leq H \leq 60, 0 \leq S, I, A \leq 1$)。なお、ときおり透明粒子がうまく炎の粒子の外縁部に存在せず、大きなポリゴンが描画されてしまうこともあるので、粒子間の距離がある一定値以上になったポリゴンは描画しないようにする。

6. 燃焼シーンの構成

6.1 シーン全体の処理の流れ

以上述べた各技法を組み合わせた燃焼のアニメーションシーンを構成する。その手順は以下の通りである。

- (1) シミュレーション空間中に物体を表すボクセル領域を設定し、各物体、ボクセルにパラメータを設定する。また、この時、街区画距離の初期値を

計算し、各ボクセルに保持する。

- (2) シミュレーション空間中に乱流場を形成するため、ランキン渦³⁾を複数個発生させる。渦は他の渦の影響を受けて移動し、また寿命の尽きた渦はシミュレーション領域から削除する。
 - (3) 空間中の任意の箇所から炎の粒子と透明粒子を発生させ、移動させる。寿命の尽きた粒子はシミュレーション領域から削除する。
 - (4) 炎の粒子が単位タイムステップ当たりを通るボクセル列を3DDDAを用いて求める。
 - (5) 炎の粒子と物体との衝突判定を行う。もし衝突すれば、物体面に沿うように粒子の移動方向を変化させ、粒子の持つ熱の一部を衝突箇所のボクセルに与える。また、同量の熱量を粒子から差し引く。
 - (6) 物体を構成する各ボクセルに対し、温度伝達のアロリズムを適用し、温度の伝搬を行う。
 - (7) 要素の温度が発火点以上である場合、そのセルに発火フラグを立てる。
 - (8) 発火フラグが立っており、かつ燃料があれば、そのセルから炎の粒子を発生させ、燃料を減少させてゆく。物体の色は燃料の減少に伴い、初期の色から徐々に黒色に変色させていく。このとき、内側のセルについても、同じ色を設定する。
 - (9) 燃焼中は、各セルに設定されている変形度を体積から引くことで、物体の収縮変形を表現する。
 - (10) 変形の結果、ボクセルが物体の外側であると判定された場合には、そのセルを空間セルに置き換える。また、そのセルの周囲の物体のセルに、発火フラグを設定する。
 - (11) 変形を途中で終了するために、体積変化度を減少させる計算を行う。
 - (12) 体積値を元に、マーチンキューブ法により、物体の境界面を表示することで、物体の描画を行う。
 - (13) シーン中のすべての炎の粒子と透明粒子をドロネー図を用いて結合し、ポリゴンデータを生成する。生成されたデータを元に、炎の描画を行う。
- 以上の過程の内、(2)～(13)をシミュレーション中に繰り返し実行する。

7. 検証実験

7.1 実験環境

各種パラメータを変化させた場合のシーンへの影響を調べるため、以下にいくつかの実験例を示す。実験にはPentiumIII, 500MHz, メモリー搭載量 360MB の計算機を使用し、描画には一般に市販されている3次元画像処理ボードを用いた。シーンの実装にはOpenGL APIを用いている。

7.2 収縮変形の実例

棒状の物体を燃焼させ、収縮変形を行なう様子を示した1例を図5に示す。物体の大きさは60x10x10である。物体のパラメータとして、図5-(a)の物体には、 $T_{ig} = 0.6, V_{cc} = 0.003, F_0 = 15, C = 0.5, C_i = 0.00001, C_{ud} = 0.9$ 、初期の $V_c = 0.1$ を設定している。図5-(b)の物体については、 $C_i = 1.0$ 以外については(a)の物体と同じである。結果画像より、燃焼が進行するに従い、収縮変形が行なわれている様子がわかる。また、温度伝達に内外差がある場合には、外側から内側への変形が行なわれるため、芯が残るように変形しているが、温度伝達の内外差が少なくなると、端から順に燃焼するようになり、芯が残りにくくなることがわかる。

7.3 発火場所の違いによる燃焼の変化

同じ物体で、火を付ける場所を変更することによる変形の違いを調べるため、図6に示すように、中央から火を付ける場合(a)と、端から火を付ける場合(b)の2つの例を実行した。各物体は50x50x4の大きさである。また、制御パラメータについては、 $T_{ig} = 0.6, V_{cc} = 0.007, F_0 = 10, C = 0.3, C_i = 0.00001, C_{ud} = 0.9$ 、初期の $V_c = 0.15$ としている。

図より、中央から火を付けた場合には、そこから穴が開くという変形が表現されていることが分かる。また、同じ物体であっても、火を付ける箇所が異なれば、燃焼後の形状が変わるということが表現されている。

7.4 上下の熱伝達の違い

次に、「ト」の文字の形の物体を燃焼させ、上下方向への熱の伝達差の確認を行った。その時の様子を図7に示す。左側の物体のパラメータは $T_{ig} = 0.6, V_{cc} = 0.004, C = 0.5, C_i = 0.00001, C_{ud} = 0.9$ 、初期の $V_c = 0.06$ 、右側の物体のパラメータは $C_{ud} = 0.2$ 以外は左側の物体と同じパラメータである。

実験結果に見られるように、左側の物体は上方向へは燃焼の進行が速く、下方向へはあまり進行していないことがわかる。しかし、パラメータを変化させても上方向への進行速度にはあまり顕著な変化が見られず、下方向のみ進行速度の変化が見られた。これは熱伝達の影響を受ける以前に、発生した炎自体により上側のセルが燃焼されるためであると考えられる。

7.5 シーンへの適用例

シーンへの適用例として、図8のような部屋を作成し、部屋が燃えていくアニメーションを作成した。これより、ボクセルを最小単位とした自由なシーンの燃焼表現が可能になったと言える。

なお、各実験における1フレームあたりの平均粒子数(炎の粒子+透明粒子の平均)と平均実行時間を表3に示す。これにより、演算時間はおもに発生する粒子数に依存することがわかる。

以上の結果より、2で目標として設定した、燃焼に伴

う物体の収縮表現を表現することができたと言える。また、パラメータを変化させることにより、燃焼の進行状態を制御することもできた。

7.6 ボリュームレンダリングとの比較

炎の描画には、現在ではボリュームレンダリングが多く用いられている²¹⁾²²⁾。それらと本手法との比較を行うために、ボリュームレンダリングと本手法で同じシーンを描画し、その所要時間を調べた。計算時間を表4に示す。また、実行例を図4に示す。ここで、1particle, 2particlesとは単位タイムステップあたりに発火状態のセルの周囲のセルから発生する炎粒子の個数である。

表4より、炎の粒子数が少なければ、本手法での描画方法のほうが、ボリュームレンダリングよりも高速であると言える。本手法は計算時間が解像度に依存することではなく、粒子数にのみ依存する。また、ポリゴンにより、炎を描画しているの、画面が多少拡大されてもすき間が目立ちにくい構造になっている。現時点ではグローバルイルミネーションへの対応は行っていないが、文献⁹⁾を用いれば実現可能と考えられる。

8. む す び

本論文では物体の燃焼表現の一手法について提案した。仮想空間への応用のため、見た目の良さと計算量の削減を重視し、そのためできるだけ複雑な物理モデルを扱わず、簡単なパラメータにより燃焼の様子を表現する手法となっている。

主観的な評価としては燃焼の様子を比較的リアルに表現でき、また、燃焼物体のパラメータを変化させることにより、燃焼の様子をコントロールすることもできた。燃焼に伴う物体の変形と変色の表現方法の一資料としての価値があるものとする。

しかし、現時点のアルゴリズムでは、リアルタイムに描画することは困難であり、このままでは応用範囲が制限されることになる。炎の描画に関する処理が全計算時間のほとんどを占めているため、ドロネー図のアルゴリズムの改良や、別の高速なアルゴリズムの適用などが必要である。また、木のように収縮変形するものだけでなく、紙のように不規則かつ大きく変形するものや、それ以外の多様な材質の物体についての変形の実現も今後の重要な課題である。

[文 献]

- 1) Reeves, W.T.: "Particle systems - A technique of modelling a class of fuzzy objects", SIGGRAPH 83, Computer Graphics, 17, 3, pp.359-376 (1983).
- 2) 高倉 章, 河合直樹, 室田秀樹, 茂田本敏雄: "CGによる炎の3次元シミュレーション", グラフィックスとCAD, 65-2, pp.9-16 (1993).
- 3) 村岡一信, 千葉則茂, 高橋宏通, 三浦 守: "渦場と粒子による煙や炎の2次元CGシミュレーション", 信学論 (D-II), J76-D-II, 8, pp.1735-1745, Aug. (1993).
- 4) 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, Feb. (1991).

表 3 各実験における粒子数の平均と計算時間。
Particle average and calculation time.

	Voxel Size	Total Frame	Particle ave.(per frame)	Total Time(min)	Time ave.(min/frame)
図 5-(a)	70x60x30	131	3455.765	87.522	0.668
図 5-(b)	70x60x30	120	4211.892	98.159	0.818
図 6-(a)	60x50x60	101	3818.851	76.563	0.758
図 6-(b)	60x50x60	163	2491.902	80.708	0.495
図 7	50x70x25	182	889.890	29.799	0.164
図 8	100x80x80	509	7430.290	867.567	1.704

表 4 本手法とボリュームレンダリングでの処理時間の比較。
The competition of process time on the proposed method and volume rendering.

		Proposed method		Volume rendering	
		Total frame	Total time(min)	Total frame	Total time(min)
Resolution 120x120	1particle	132	41.683	132	49.583
	2particles	139	142.716	138	51.850
Resolution 240x240	1particle	132	42.000	132	189.450
	2particles	139	143.217	138	196.517

- 5) 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”, 情報学論, **32**, 4, pp.435-447 (1991).
- 6) 加藤史也, 牧野光則, “面光源火炎モデルにおけるシェーディング手法”, 信学技報, MVE97-107(1998-03), pp.23-30.
- 7) Jun-ya TAKAHASHI, Hiromichi TAKAHASHI, Norishige CHIBA: “Image Synthesis of Flickering Scenes Including Simulated Flames”, IEICE TRANS. INF. & SYST., **E80-D**, 11 (NOV. 1997).
- 8) Holly Rushmeier, Anthony Hamins, Mun Young Choi: “Volume Rendering of Pool Fire Data”, IEEE CG&A (July 1995).
- 9) J. Stam and E. Fiume: “Depicting Fire and Other Gaseous Phenomena Using Data Diffusion Process”, Proc. of SIGGRAPH 95, pp.129-136 (1995).
- 10) 佐藤吉将, 島田英之, 塩野 充, 宮垣嘉也: “ドロネー三角形分割を用いた炎の表現方法”, 1998年映像メディアシンポジウム (IMPS98), pp.87-88 (1998).
- 11) N. Chiba, S. Ohkawa, K. Muraoka, M. Miura: “Two-dimensional Visual Simulation of Flames, Smoke and the Spread of Fire”, The Journal of Visualization and Computer Animation, **5**, pp.37-53 (Jan.-Mar. 1994).
- 12) 高橋宏道, 村岡一信, 千葉則茂: “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—”, グラフィクスとCAD, **65-1**, pp.1-8 (1993).
- 13) 佐藤吉将, 島田英之, 塩野 充, 宮垣嘉也: “CGによる物体の燃焼と変形の表現”, 映像技報, **24**, 47, AIT2000-91, pp.7-12 (2000).
- 14) David L. Tate, Linda Sibert, Tony King: “Using Virtual Environments to Train Firefighters”, IEEE Computer Graphics and Applications, pp.23-29, November/December (1997).
- 15) 島田英之, 佐藤吉将, 新濱直樹, 小倉石裕二, 塩野 充: “3次元CGによるリアルタイムな火災の表現方法”, 映像学誌, **54**, 9, pp.1359-1362 (2000).
- 16) 千葉則茂, 村岡一信共著: “レイトレーシングCG入門”, サイエンス社 (1990).
- 17) D. Kincard, W. Cheney: “Numerical Analysis”, Brooks Cole Pub.Co. (1991).
- 18) 南 敏, 中村 納共著: “画像工学”, コロナ社, pp.94-98 (1989).
- 19) W.E. Lorensen and H.E. Cline: “Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm”, Computer Graphics, **21**, 4, pp.163-169 (July 1987).
- 20) F.P. プレバラータ, M.I. シューモス著, 浅野孝夫, 浅野哲夫訳: “計算幾何学入門”, 総研出版, pp.240-242 (1992).
- 21) 中嶋正之監修, テレビジョン学会編: “先端技術の手ほどきシリーズ 3次元CG”, オーム社, pp.49-63, (1994).
- 22) 藤代一成・茅暁陽著: “ボリュームビジュアライゼーションの基本アルゴリズム”, PIXEL, No.121, pp.130-137 (1992).

図 4 本手法とボリュームレンダリングでの結果画像。
The result images on the proposed method and volume rendering.

佐藤 吉将 岡山理科大学大学院修士課程情報工学専攻了。同大学院システム科学専攻後期博士課程を経て、現在株式会社ケイ・ジー・ティーに勤務。コンピュータグラフィックスの研究・開発に従事。

島田 英之 岡山理科大学工学部電子卒業。平3同大大学院修士課程電子理学専攻了。同大学院博士課程システム科学専攻了。工博。同大・工・助手。平13同大・工・講師。パターン認識、CGに関する研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会各会員。

塩野 充 阪大・工・通信卒。同大大学院博士後期課程了。工博。岡山理科大学講師。同助教授。同教授。パターン認識および顔の画像処理、画像生成の研究に従事。

宮垣 嘉也 神戸大・工・電気卒。同大大学院修士課程了。神戸市立高専講師。岡山理科大学教授。この間、通信システム、並列計算機、画像処理の研究に従事。工博。

(a-1) frame=15

(b-1) frame=15

(a-2) frame=131

(b-2) frame=119

図 5 収縮変形の実行例.

Example of the shrinking deformation.

(a-1) frame=30

(b-1) frame=20

(a-2) frame=50

(b-2) frame=100

(a-3) frame=98

(b-3) frame=160

図 6 火元の位置による変形の違い.

The difference of the origin of the fire.

frame=20

frame=55

図 7 上下の熱伝達の違い.

The difference of up-down heat conduction rate.

frame=1

frame=20

frame=50

frame=130

frame=160

frame=200

frame=240

frame=380

frame=425

frame=509

図 8 燃焼の一例.

An example of the combustion.