

2005年度 卒業論文

3DCG における  
複雑形状物体の燃焼表現

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0102287

中島 良恵

2005年度 卒業論文概要

論文題目

3DCG における  
複雑形状物体の燃焼表現

メディア学部

学籍番号：M0102287

氏名

中島 良恵

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

コンピュータグラフィックス、燃焼現象、  
熱伝導、熱伝達、パーティクル、テクスチャ

自然現象の表現はコンピュータグラフィックスの分野で大変興味を持たれ研究が進んできた。近年では映画やゲームなど多くのコンテンツでコンピュータグラフィックスで制作された火や海の波、水の渦などを見ることが出来る。特に燃焼という現象のコンピュータグラフィックス表現では炎や煙、熱に関しては多く研究が行われてきた。燃焼によって発生する炎や煙等については自動的に生成、表現する手法が幾つか提案され、利用されている。一方、炎の発生位置の変化や、燃やされている物体の変化については、その様子を自動的に生成、表現する手法がまだ存在しない。

本研究では燃焼している物体の状態に焦点を置き、燃焼している物体の状態変化などの表現を実現した。燃焼する物体は3角形メッシュによる閉面によって表現し、燃焼によって発生する熱はパーティクルによって表現した。固体を構成するメッシュの各頂点毎に熱の情報を管理し、固体内部の熱伝導、熱流による熱伝達による温度変化を計算した。メッシュの各3角形は燃焼前、燃焼中、燃焼後の3つの状態をとるようにし、属する頂点の温度によって、各状態を遷移させた。このようにして、固体表面に炎が燃え広がっていく様子を自動的に生成した。これにより、位置や形状によって熱が伝わりにくい部分など火の広がり方に偏りが出ること表現する事が出来た。本研究では固体に火が着き、燃え広がり、燃え尽きるまでの固体燃焼の一連のプロセスの表現を実現した。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究目的	1
1.2	章構成	3
第2章	燃焼現象	4
2.1	燃焼とは	4
2.2	燃え広がり	6
第3章	燃焼モデルの制作	8
3.1	燃焼の段階・状態	9
3.2	熱の制御	10
3.2.1	固体内熱伝導	10
3.2.2	外気との熱伝達	11
3.2.3	パーティクルから受ける熱伝達	11
3.3	固体の描画手法	16
第4章	評価	19
4.1	実装	19
4.2	考察	26
4.3	問題点	26
第5章	まとめ	27
	謝辞	28
	参考文献	29

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究目的

コンピュータグラフィックスの分野では自然現象を題材とした表現に多くの人が関心を持ち研究が進んできた。その中で水・炎・煙など無形物を表現する取り組みも数多く行われてきている。それらの研究やコンピュータの進化に伴い、三次元コンピュータグラフィックス (3DCG) で生成する自然現象はリアルな表現が可能になってきた。

燃焼に関するコンピュータグラフィックス表現では炎や煙の動き、熱の伝わり方などはよく扱われてきた。特に燃焼現象の中でも 3DCG における炎の表現手法はリアルな炎を表現する事を中心に研究が多く行われている。炎の表現で代表的なものがパーティクルを用いる手法である。パーティクルの位置情報に基づき炎の画像を生成したり、パーティクルの位置にそれに応じたテクスチャを張る方法 [1][2][3] が提案されている。また、二次元画像を直接三次元空間に配置する手法もある。二次元で描かれた炎の静止画像を三次元空間に配置し、その画像を歪ませる事で炎のゆらぎを表現する方法 [4] が提案されている。しかし、この手法は歪みの計算にコストがかかってしまう。また、二次元の動画である炎映像を三次元空間上に配置する手法 [5] もある。この手法は二次元画像を三次元空間に配置する手法でありながら歪み計算を行わないため、比較的短かい計算時間で実現可能である。

これらは炎単独のリアルな表現を目的としており、燃料が表現されているものではなく、固体物体に火が燃え広がっている様子を表現する事は出来なかった。今までの3DCGアニメーションでは炎が燃え広がる様子を表すために炎が存在する領域を広げるように設定する作業を人がやらなければならなかった。それでは手間がかかってしまう上、制作者の感覚によって自然に見えなかった可能性がある。固形燃料、木材など燃焼をしている対象で起こっている燃焼プロセスを考慮した研究がまだ少なく、燃やされている素材の上で炎が燃え広がっていく様子を表現する手法がまだ確立されていないのが現状である。また複数の物体が存在して1つの物体で発生した炎が他の物体に移っていく現象を扱ったものもない。

炎の燃え広がり研究が最も頻繁に扱われているのは火災シミュレーション [6] である。しかし火災シミュレーションで使用される延焼シミュレーションは、コンピュータ上で建物や道路などの市街地のデータをもとに火災が発生した場合の延焼の拡大状況を計算処理し予測する為のものである [7]。これは、まず建物を直方体のような1つの単純な形状とみなしたりして、それらに素材の燃えやすさなどのパラメーターを設定し火災が広がっていく結果を示すものである。計算精度の高さを求めるものであって、表現が目的ではなく燃焼対象が大規模であるので、単独の物体上で広がっていく炎など固体における燃焼現象を細かく表現する事が出来ない。

また過去に表現が目的の燃焼表現の研究 [8] も存在してはいたが、球や直方体など単純な幾何図形の燃焼対象のみ扱ったものだった。燃焼表現に関しては物体の存在を前もって定義しなければならなかった。その為、どんな図形に対しても自動的に燃焼の様子を表現する事は出来ず、手間もかかった。

そこで、本研究では任意の形状のものが任意の個数、どんな位置関係にあっても常に熱の伝わりを計算し、自動的に燃焼プロセスの実行が出来る事を目的とする。燃焼アニメーション制作時に自動的に燃え広がりが実現できるなどCGアニメーションの表現向上につながるものである。3DCGソフト上で作ったポリゴンモデルに燃焼プロセスをかけるなど燃焼表現を容易に制作する事が出来る。

## 1.2 章構成

本論文の構成は5章からなり、その内訳は以下の通りである。2章では、燃焼という現象について述べる。3章ではモデルの構築手法について述べる。4章では、本手法の実行結果と評価について述べ、今後の課題について考察する。最後に5章では、本論文のまとめと実行結果を踏まえた手法についての今後の展望を行う。

# 第 2 章

## 燃焼現象

### 2.1 燃焼とは

燃焼とは一般的に「物が燃える」という言葉で表現される状態である。本研究では燃焼現象を再現するために化学の燃焼の知識を利用して進めるので、ここでは燃焼現象についての化学における基礎知識 [9][10][11] を述べることにする。化学において燃焼とは「物質が酸素と化合して光や熱を出す激しい酸化現象」を指す。火とは、「燃焼によって発光と発熱が起こる状態や現象。発光を伴う燃焼現象」である。また炎は「気体が酸化反応をして光りながら上昇している部分」の事である。炎内部では、主に炭素や水素などの気体状になった物質が空気中の酸素と激しく化合している。温度は 1000 ~ 3000 である。線香の火のような炎が無い火も存在し、無炎燃焼と呼ばれる。

燃焼が起こるためには 3 つの条件が同時に成り立つ事が必要である。

1. 燃える物質がある
2. 酸素の供給がある
3. 物質の温度が発火点以上である

固体における燃焼プロセスは、まず火がつく温度となるように他の発火源から熱が移ることから始まる。固体燃料に発火源を近づける事によって固体燃料の温

度が上がる。温度が上がった固体燃料から燃料ガスが発生し、燃料ガスの温度が発火点になると燃焼を始める。火がつき物が燃え出すことを発火するという。燃焼しているガスの温度によってさらに固体燃料からガスが発生し炎にガスが供給され続ける。熱の伝わりによって燃焼ガス発生箇所は拡大していく。ガスがなくなった部分から炎が消え、炭となり反応が終了していく。燃料が燃えつきると燃焼が起こるための3つの条件のうち1つが欠けることになり燃焼プロセスの終了となる。

木材の燃焼の特徴 [12] も述べておく。木材は熱伝導率が低く大量の熱を加えて初めて気化が起こり、600 あたりで発火が始まる。固体における温度による色の变化は、1000 のとき赤い光を放射する。2000 ~3000 と高温になるといろいろな色が混じって白色光線となる。図 2.1 は温度の高さによる炎の色と木材の色を带状に表した物である。

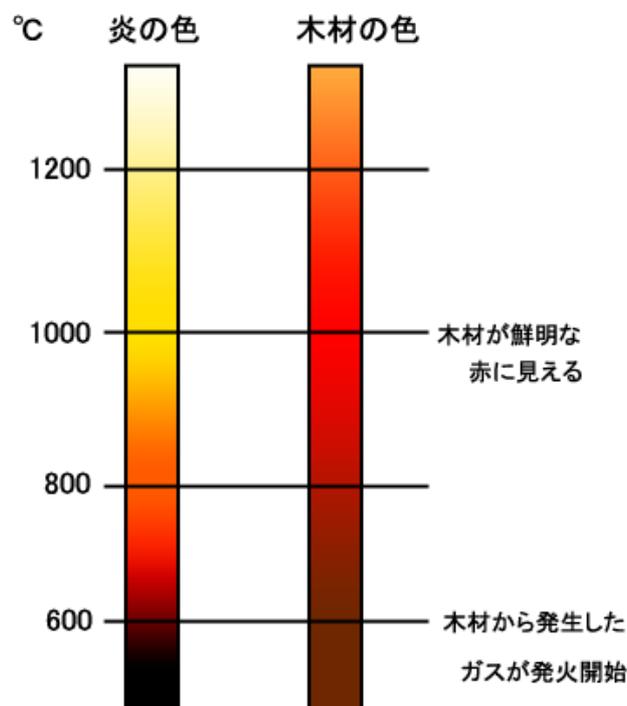


図 2.1: 温度と色

## 2.2 燃え広がり

ここでは燃焼部分の拡大についての基礎知識 [13][14] を述べる。燃焼部分の広がりは熱の伝わりによっておこる。熱の伝わりには伝導、対流、輻射の3つの方法がある。伝導は流れのない気体、液体、および固体の動かない物体での熱の伝わりのである。対流は流れのある気体、液体で起こり、それによって流体から固体へ熱が伝わることを熱伝達という。輻射は伝えるものと伝えられるものとの間に媒介が無くても熱が伝わる事、温度が高くなった物質が電磁波の形でエネルギーを放出する事をいう。太陽の熱の伝わりは輻射である。すべての物体は温度に応じて電磁波によるエネルギーを放射または吸収している。そのエネルギーによる熱交換現象が熱放射、または熱輻射である。燃焼時にも化学反応によって固体から輻射エネルギーが放出され、炎は発生時に高温を持つ。

熱は全体が同じ温度になる平衡の状態に向かって、物体内にエネルギーを移動させていく [15][16]。熱は高温部から低温部に伝えられる。

動かない物体における熱伝導はフーリエの法則が成り立つ。この法則は気体、液体、固体でも共通である。式(2.1)はフーリエの法則に従う熱伝導の関係式である。熱移動量を  $q$ 、温度を  $T$ 、距離を  $x$ 、熱伝導率を  $\lambda$  とする。 $\lambda$  は正であり、熱は温度が高い方から低い方へ伝わることを表している。図2.2はフーリエの法則の関係を図で表した物である。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

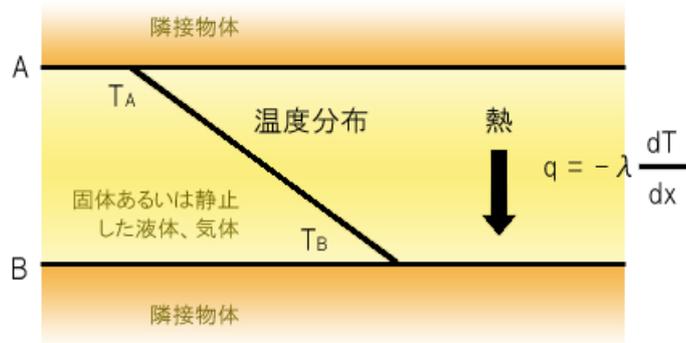


図 2.2: フーリエの法則

流れのある物体における熱伝達はニュートンの法則が成り立つ。式(2.2)はニュートンの法則に従う熱伝達の関係式である。熱移動量を  $q$ 、温度を  $T$ 、距離を  $x$ 、熱伝導率を  $h$  とする。フーリエの法則と比例定数が違うだけで、温度勾配に比例しており表現は同じになる。 $h$  は流体の熱伝導率だけでなく、密度、比熱、粘性などの物質特性、さらに流れの速度、圧力などにも依存する。図 2.3 はニュートンの法則の関係を図で表した物である。

$$q = -h \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

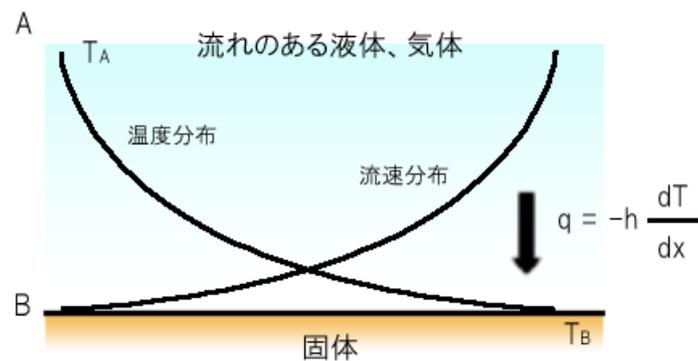


図 2.3: ニュートンの法則

## 第 3 章

# 燃焼モデルの制作

固体物体は頂点をつないだメッシュ構造で、熱の流れは粒子で制御する。

固体は頂点のデータの集合として扱い、3角メッシュで表す。図 3.1 で見られる赤い点がそれぞれ位置、熱量の情報を持っている。面は3つの頂点で構成されるため、3角形テクスチャで描画する。

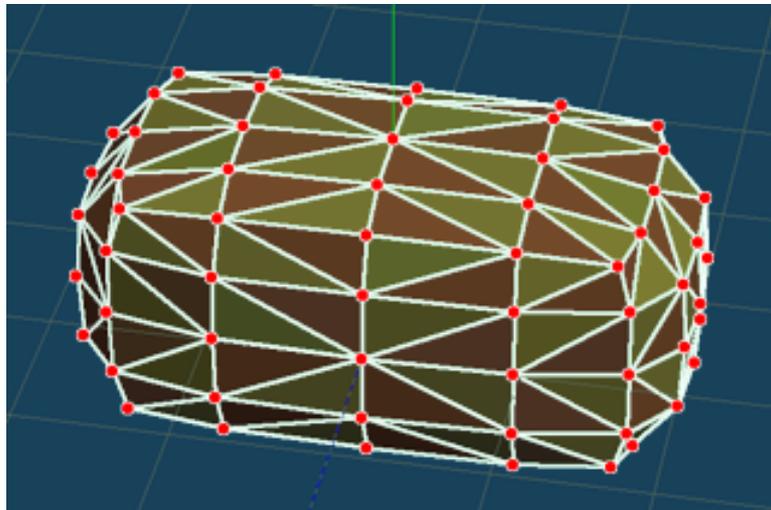


図 3.1: 固体情報

## 3.1 燃焼の段階・状態

まず頂点は発火点とその他の点に分けられる。頂点は属する面に熱情報を渡し、面は「燃焼前」「燃焼中」「燃焼後」の3つの状態をとる。温度の高さや燃焼時間経過によって面の状態が変わる。

### 頂点の温度

発火点とされた頂点にはしばらくの間、高温が与えられ続ける。それはマッチやライターのような他の物から熱を与えられている状態を再現している。発火点以外の各頂点には初期値として20度が設定されている。

### 燃焼前の面

燃焼前の面に属する頂点は他頂点から伝わってくる熱と外気と熱パーティクルによって伝わる熱を受ける。

### 燃焼中の面

燃焼状態であるかないかの判定は3つの頂点を結んだ面ごとに決定される。面に属する3つの頂点全てが600度以上の時、燃焼状態にある面として設定される。燃焼状態の面からは熱パーティクルが発生する。燃焼中の面に属する頂点も他頂点から伝わってくる熱とパーティクルによって運ばれる熱を受ける。高温の発熱があるので外気の影響は受けないとする。

### 燃焼後の面

燃焼状態に入って一定時間経過した面は燃料を消費したとして燃焼状態から抜け、炭となったとする。燃焼後の面に属する頂点は他頂点から伝わってくる熱とパーティクルによって運ばれる熱によって温度が上昇する事は無い。また外気温との温度差にしたがって熱を下げていく。

## 3.2 熱の制御

第2章で述べたように燃え広がり熱の伝わりによっておこる。熱の伝わりは固体を伝わってくる熱伝導と外気、炎パーティクルから受ける熱伝達を考慮する。これらの熱の伝わりを計算して、頂点を持つ熱情報を変化させていく。現在の頂点の温度  $h_n$  に固体内熱伝導  $\Delta h_c$ 、外気との熱伝達  $\Delta h_a$ 、パーティクルから受ける熱伝達  $\Delta h_p$  を加算したものをその頂点の1ステップ後の温度  $h_{n+1}$  とする。つまり、 $h_{n+1}$  は次式で与えられる。

$$h_{n+1} = h_n + \Delta h_c + \Delta h_a + \Delta h_p \quad (3.1)$$

### 3.2.1 固体内熱伝導

頂点は隣接しあったもの同士で熱の受け渡しを行い、熱を広げていく。第2章の式(2.1)で示したように固体物体での移動する熱の量は距離と温度にしたがって変わる。各頂点ごとに隣接頂点との温度格差を算出し、距離に応じて近ければ大きく影響するようにする。周囲全ての頂点との温度差を調べて合計値を隣接頂点数で割り、その値で温度を変化させる。

熱の算出方法を式(3.2)で定義する。 $R_i$  は対象頂点と隣接頂点との距離、 $T_i$  は対象頂点と隣接頂点との温度差、 $v$  は隣接頂点個数である。隣接頂点は各頂点ごとに4~8個存在する。 $\Delta h_c$  は温度差と距離をかけた値を隣接頂点個数分合計したものであり、これを固体内熱伝導による温度変化とする。

$$\Delta h_c = \frac{1}{v} \sum_{i=0}^v \frac{T_i}{R_i} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 外気との熱伝達

燃焼前、燃焼後の面は外気との温度差に比例し、熱を失っていく。熱が外気に奪われていく温度変化を式(3.4)で定義する。 $h_n$ は現在の頂点の温度、20は外気温、 $k$ は熱伝達率である。 $\Delta h_a$ を外気との熱伝達による温度変化とする。

$$\Delta h_a = k(20 - h_n) \quad (3.3)$$

### 3.2.3 パーティクルから受ける熱伝達

炎の情報は熱のデータを持ったパーティクルとして扱う。空気の熱量は炎の熱量と比べ微小であるため、熱パーティクルは炎だけを表す。パーティクルは燃焼状態にある面から発生し、発生後はさまざまな力を受け移動しながら近くに存在する頂点に熱情報を与える。距離とパーティクルの持つ熱量に応じ頂点に熱を加えていく。

#### パーティクルの発生

燃焼状態にあると判断された面からパーティクルが発生する。発生箇所は面上になるよう面を構成する3つの頂点から初期位置を算出する。発生したパーティクルの初期進行方向は発生した面の法線ベクトルの向きとする。図3.2は面の法線ベクトルとパーティクルの初期進行方向を示したものである。

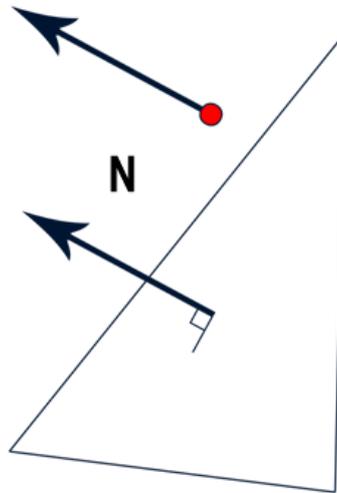


図 3.2: 法線ベクトルと初期速度ベクトル

固体を構成する面は法線ベクトルがすべて外側を向いているように設定されているため、まずは固体から離れるように移動を始める。図 3.3 は固体モデルの法線を視覚化したものである。

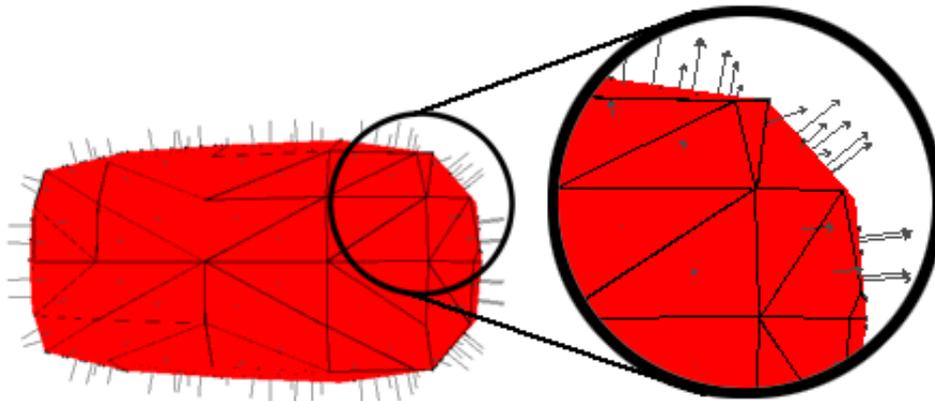


図 3.3: 法線ベクトルを表示した固体モデル

## パーティクルの持つ熱

個々のパーティクルは熱のデータを持つ。発生したパーティクルの初期温度は1000度とする。1000度は木材が赤熱した時の温度であり、炎が黄色に見える温度でもあるため、木材を燃やした時に発生する炎の初期温度と仮定できる。パーティクルの持つ熱は時間経過とともに失われ、徐々に減少していく。持つ温度が常温の20度以下になった時、パーティクルは消滅する。パーティクルの持つ熱は固体に熱を受け渡す事でも減少する。パーティクルの一定距離内に個体を構成する頂点が存在した場合、その頂点の温度を上げ、パーティクルの熱を減らす。第2章の式(2.2)で示したように熱気であるパーティクルから固体へ移動する熱の量は距離と温度にしたがって変わる。 $p$ をパーティクルの温度、 $d$ をパーティクルとの距離、 $h_n$ を現在の頂点の温度、 $\lambda$ を熱伝達率とし、パーティクルからの熱伝達による固体頂点の上昇温度 $\Delta h_p$ は次式で与えられるものとする。

$$\Delta h_p = \frac{\lambda p}{3d} \quad (3.4)$$

## パーティクルにかかる力

発生した個々のパーティクルには3つの力を加え、熱気の流れのように移動させる。図3.4はパーティクルに働く力を示している。1つ目は自身が持つ熱による浮力であり、これにより上昇する。2つ目は固体面に対する斥力である。これによって物体を回避し流れるように動く。3つ目は炎の拡散を表現するために各パーティクルにはランダムな方向への力が与えられ、パーティクルは散らばっていく。式(3.5)は $F_b$ は浮力、 $F_r$ は斥力、 $F_d$ は拡散させるように働く力を示している。それらを合計したベクトル $F$ がそれぞれのパーティクルにかかる力である。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_d \quad (3.5)$$

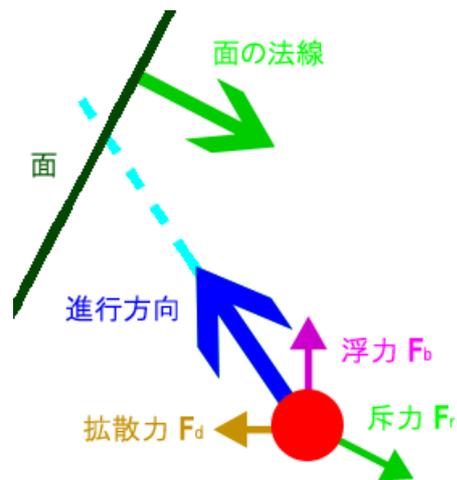


図 3.4: 力

### 浮力

浮力は熱気の上昇気流の動きを模範するためパーティクルに与えた力である。熱せられた空気は膨張して周りの気体より密度が小さくなり、密度が大きく重い周りの空気に押しのけられて上昇していく。この動きを持たせるためにパーティクルに温度に比例した浮力を与える。式 (3.6) に浮力を決める式を示す。温度が高いパーティクルに大きく上昇する力がかかるようにする。B は上昇方向、コンピューター領域内では (0.0, 1.0, 0.0) のベクトルである。u を浮力の大きさを調節する上昇率とする。この数値を大きくすると浮力が大きくなる。20.0 は本プログラムで設定されている常温である。パーティクルの温度  $t$  から常温の値を引いた値に比例させた B が浮力  $F_b$  となる。

$$F_b = u(t - 20)B \quad (3.6)$$

### 斥力

固体の面に衝突しないようにするため斥力を働かせる。現実には熱気に固体から反発させられるような力は働いていないが、流体のゆるやかな固体回避の動き

を表現するためにパーティクルに斥力を与える方法を導入した。斥力の大きさは、面との距離に反比例するように決めた。これにより、流れるような滑らかな運動で固体面を回避する。そのまま進行すると衝突してしまう面が存在したら、面の法線方向に斥力をパーティクルに働かせる。斥力の大きさは現在位置と交点の距離にしたがって変え、ゆとりを持って回避をするようにする。図 3.5 は衝突判定と斥力を表した図である。

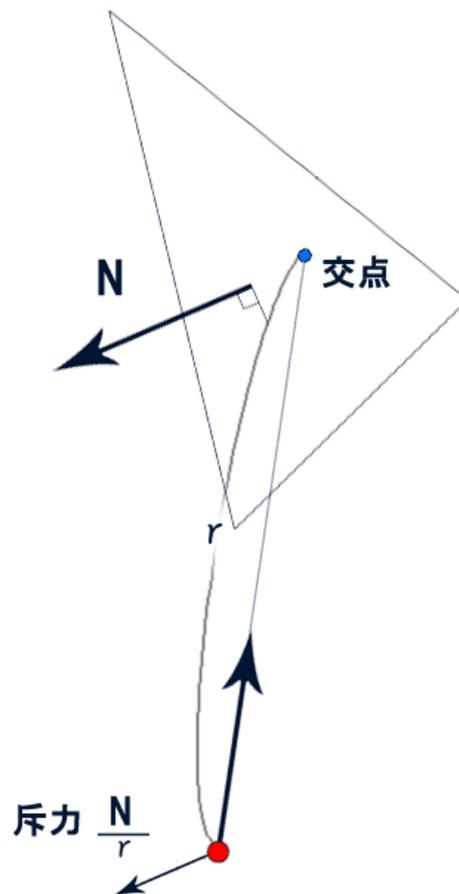


図 3.5: 衝突判定

$N$  をパーティクルの進行方向と衝突すると判定された面の法線ベクトル、 $r$  を

パーティクルと面との距離としたとき、斥力  $F_r$  は式 (3.7) で求める。

$$F_r = \frac{N}{r} \quad (3.7)$$

拡散させるように働く力

熱気の拡散を表現するために各パーティクルにはランダムな方向への力が与えられ、パーティクルは散らばっていく。拡散させる力は熱が空気中に広がり薄まっていく様を熱パーティクルの拡散によって模範したものである。式 (3.8) にその式を示す。  $dif$  を拡散率とする。拡散率を大きくするとより散らばるようになる。  $xRand$ 、  $yRand$ 、  $zRand$  はそれぞれ、  $-0.5 \sim 0.5$  までの乱数である。

$$F_d = dif(xRand, yRand, zRand) \quad (3.8)$$

### 3.3 固体の描画手法

固体のモデルは3つの頂点を結んだ3角形面に3角テクスチャを貼る事によって、視覚化する。3角テクスチャをタイルのようにして連続して並べて、固体の形状を表現する。テクスチャは属する3つの頂点の熱情報に応じて色を変え、燃焼状態にある箇所や燃焼段階を擬似的に表す。燃焼前はこげ茶色、燃焼中は赤、燃焼後の灰状態は灰色で表示する。

3角テクスチャは事前に用意した図 3.6 のようなグラデーション画像から頂点の温度によって判定された3点を切り出す事によって生成する。A の画像は燃焼前と燃焼中、B の画像は燃焼後の面に使用する画像である。図 3.7 は切り出しの例である。例えば温度が 1000 度以上だと右端の赤の位置が指定される。

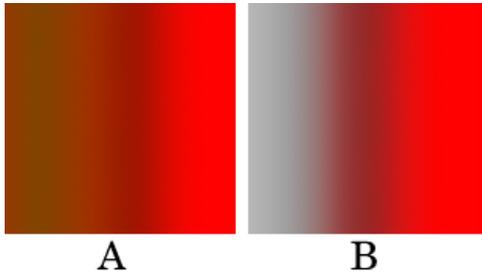


図 3.6: グラデーション画像

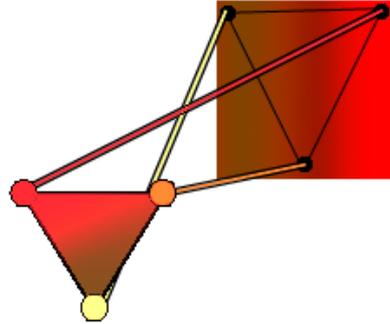


図 3.7: 切り出し方法

3角テクスチャの一部のサンプルを図 3.8 に示す。上の6つは燃焼前と燃焼中の面に張られるテクスチャ、下の3つは燃焼後の面に張られるテクスチャである。

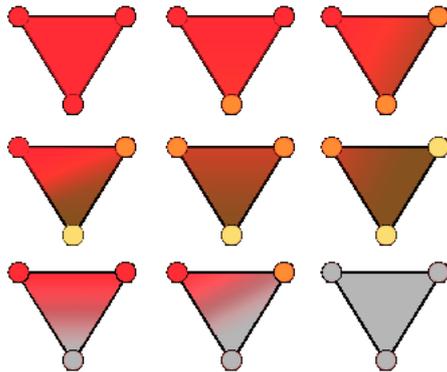


図 3.8: テクスチャサンプル

頂点温度に基づく配置の例を図 3.9 に示す。

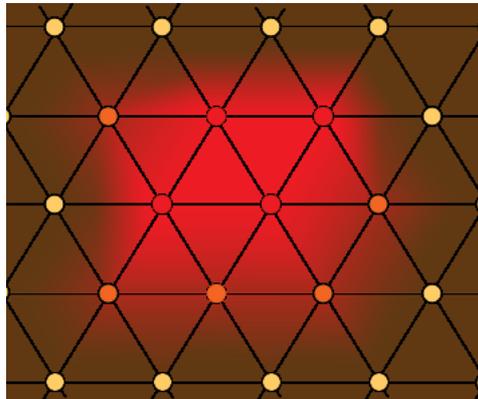


図 3.9: 配置されたテクスチャ

# 第 4 章

## 評価

### 4.1 実装

本研究では、3次元グラフィックツールキットである「FK Toolkit System」[17]を使用し、実装を行った。実行したマシンの動作環境は以下の通りである。

- CPU : Xeon 3.0BGHz
- メモリー: 1.00GB
- OS : WindowsXP

以下に実行結果を示す。

固体の面は燃焼前の部分はこげ茶、燃焼中の部分は赤、燃焼後の部分は灰色で表示される。熱パーティクルは温度情報に従い温度が高いものから黄、橙、赤の点として示される。パーティクルの最大数は1500とした。灰色の立方体がある位置が発火点である。

#### 単独のブロック固体

まず、単独のモデルを用いて炎が燃え広がっていく様子が表現できるかどうかを検証した。固体は578個の頂点、1152個の三角面を持っている。図4.1は時間ごとの状態を示した結果である。

発火点の熱が周囲に拡大し、燃焼が広がっていく様子が確認できた。そして燃料を使い果たした箇所から燃焼が終了していった。実行してから固体が発火するまでしばらく時間がかかり、固体の大量の熱を加えられて初めて発火するという特徴にあっていた。また、燃焼段階と温度の2つの要素でテクスチャを決定した為、燃料がなくなり燃焼段階が終了しても熱が下がらず灰になってもまだ赤く光っている部分なども再現できていた。

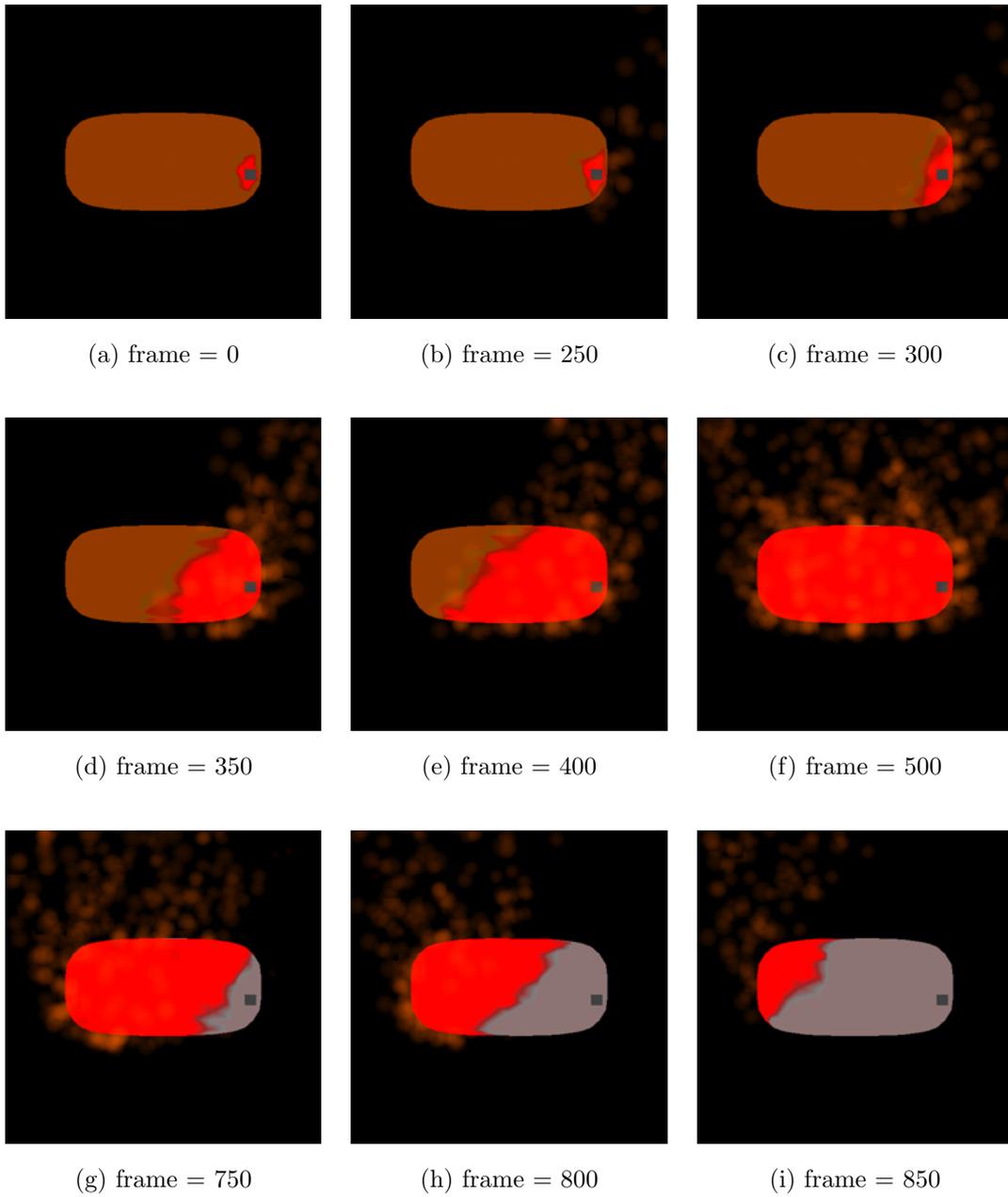


図 4.1: 単独のブロック固体の実行画面

## 複雑な形状

次に、複雑な形状のモデルを用いて炎が燃え広がっていく様子を検証した。固体は398個の頂点、792個の三角面を持っている。図4.2はそれを示した結果である。

熱の流れにより発火点より上部にある箇所へ早く炎が燃え移っていった。図4.2(e)では発火点より左下に位置する部分への熱の移動の方が遅くなっている様子が見られる。また熱パーティクルの流れがくぼみの中で渦を巻き、回転をしているのも見られた。

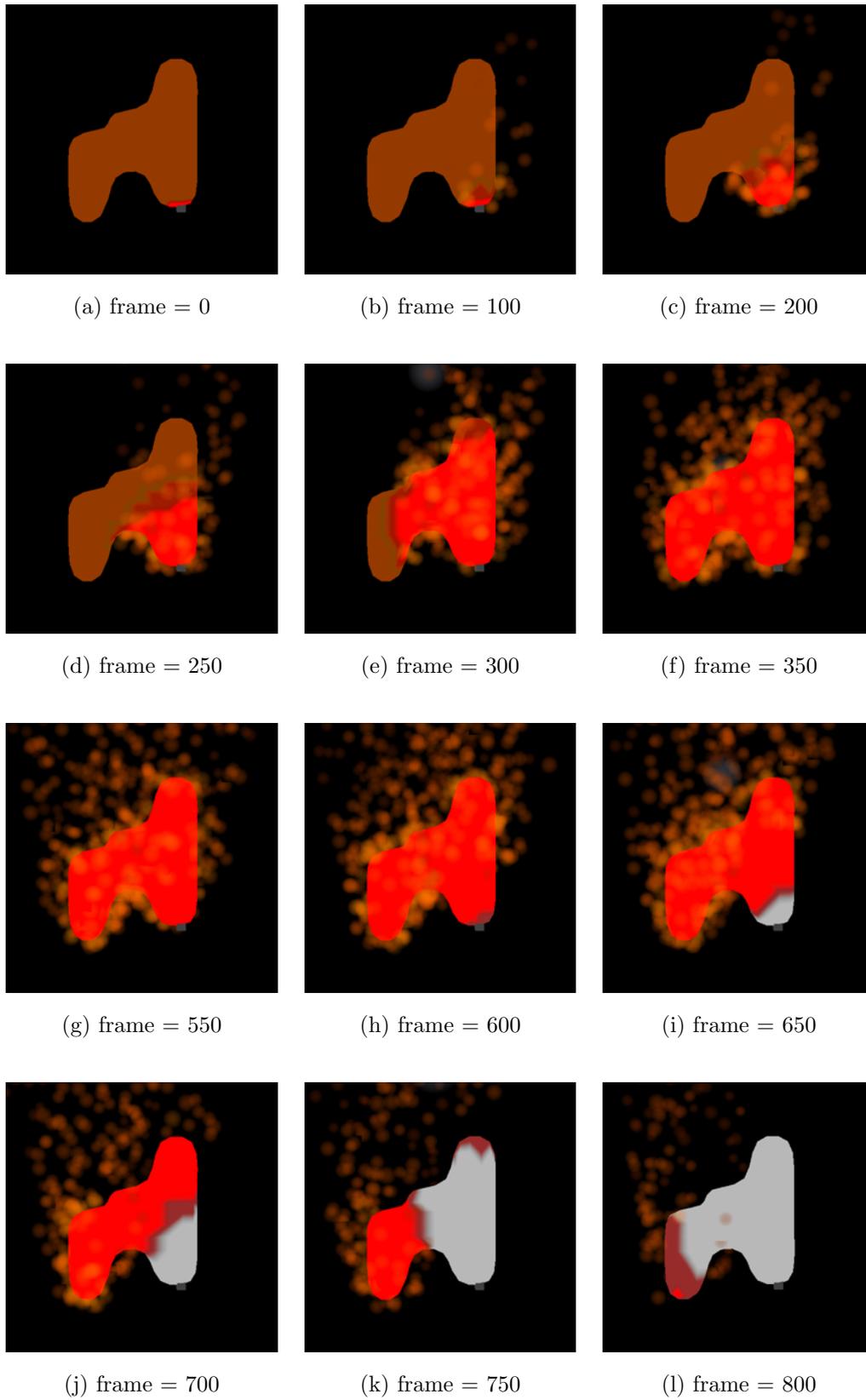


図 4.2: 複雑形状固体の実行画面

## 複数の固体

最後に、複数のモデルを用いて炎が燃え広がっていく様子が表現できるかどうかを検証した。固体は2つあわせて724個の頂点、1440個の三角面を持っている。図4.3はそれを示した結果である。

熱パーティクルによって運ばれる熱によって、発火点がある固体以外の固体にも燃焼が移っていく様子が見られた。また、パーティクルの運動に斥力を持たせたため、下方の固体から発生したパーティクルが上方にある個体を避けて流れるような動きをした。

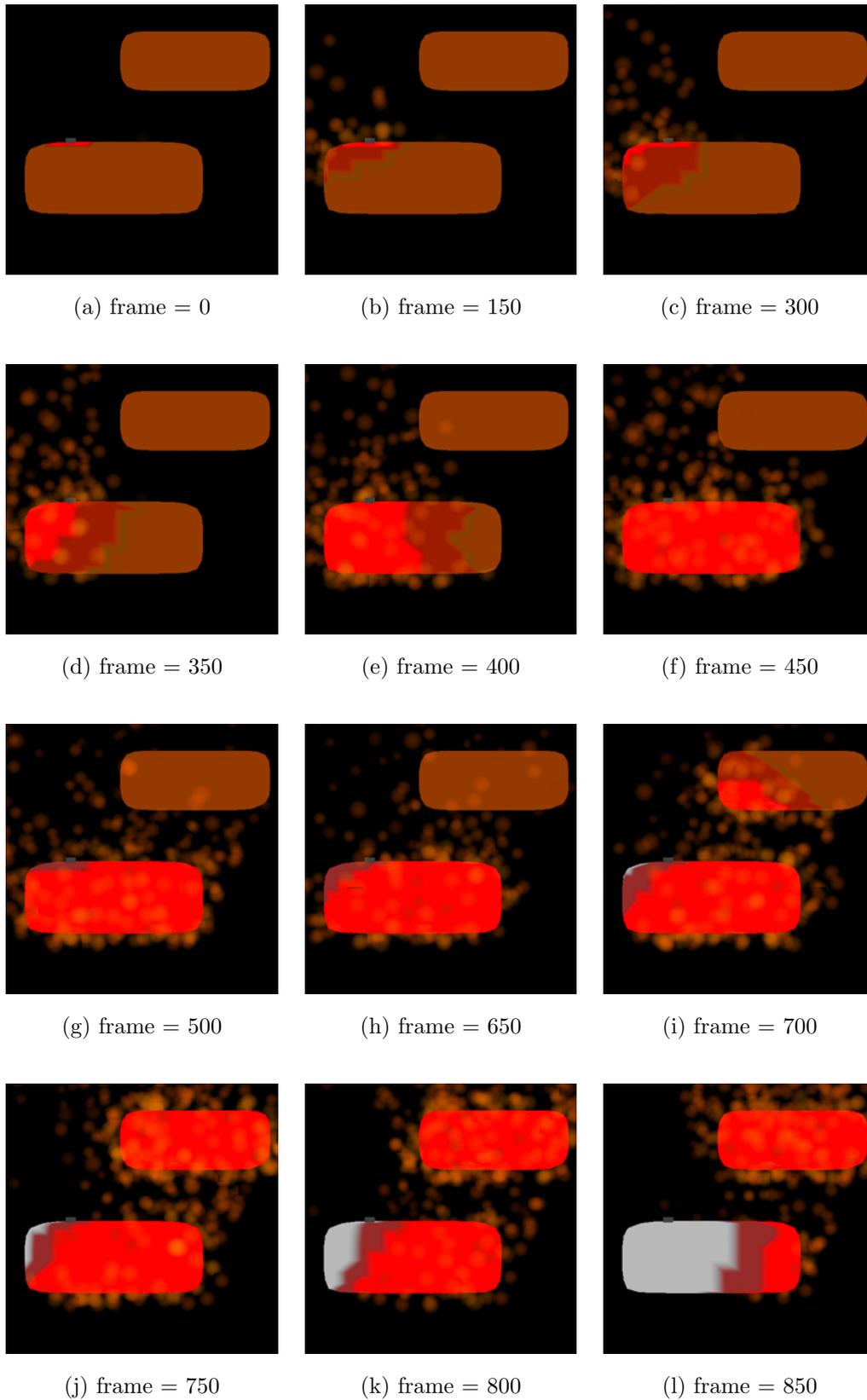


図 4.3: 複数の固体での実行画面

## 4.2 考察

本手法では物体に火がつき燃焼部分が広がっていく様子を表現する事が出来た。炎の表現も熱パーティクルの位置と熱情報から温度に従った色の半透明テクスチャをパーティクルの場所に配置する事によって炎の発生部分や挙動を表し、固体・炎を含めた燃焼現象全体を表現する事が出来た。

パーティクルが面との距離に比例して曲線的に面を回避することにより、流体らしい滑らかな動きを再現でき、また物体の周りで見られる熱の流れの様子を実装した。また、パーティクルに熱を運ばせる事で他の固体へ燃え移りや位置関係による燃焼部分の偏りを再現する事が出来た。

そして、固体は点の情報の集合として扱う事で任意の形状の物で実行する事が可能になった。三角テクスチャの配置により固体形状を表現し、テクスチャの色を変えることで状態の変化も表す事が出来た。

## 4.3 問題点

本手法ではパーティクルに加える力によって擬似的に気体の流れを表している。そのため熱パーティクルが物体を回避するには斥力の働きのみであり、現実では空気の流れによってすみやかに外へ押し出されるであろうくぼみなどに長時間パーティクルがとどまってしまう現象が見られた。

各パーティクルごとに各面との衝突判定をしているので計算コストがかかってしまっている。その為処理に時間がかかり、リアルタイムな表現に対応していないのが現状である。より高速な衝突判定法を採用することにより、リアルタイムな表現を可能とすることが期待できる。

## 第 5 章

### まとめ

本研究は熱の伝わりに注目し、燃焼の燃え広がりの様子の CG 表現を行った。固体を 3 角メッシュ構造で扱い頂点の熱情報交換で熱伝導を計算し、炎や対流による熱の伝達をパーティクルで扱う事で、それらを実現した。

本手法を用いることにより、物体上で燃焼部分が拡大していく様子を表現する事が出来た。本手法では、必要な頂点情報さえ取得できれば任意の物体で実行できる。自動的に燃焼状態の拡大の様子を作り出す事ができる事によって、CG における燃焼表現を制作するときの手間が省かれると期待できる。

今後の展望として外気温や熱伝達速度などの設定を取り入れ、環境や素材などによる燃えやすさの違いをユーザーが自由に設定できるといった利便性のある物とすることが出来ると思う。また、コンピュータの性能向上や手法の確立に伴い、燃焼現象の一連の表現と炎表現のリアリティの実現が両方とも可能になることを期待する。

# 謝辞

本研究を締めくくるにあたり、温かいご指導、適切なアドバイスをしていただいた本校メディア学部渡辺大地講師、及び電気通信大学の和田篤氏に心から感謝の意を表します。

また、研究を進めるにあたり、相談に乗ってくれて、たくさんの助言を与えてくれた研究室の仲間たち、気をやわらげてくれた友人、暖かく見守ってくれた家族に感謝します。

最後に、本研究にご協力していただいた全ての方々に厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 竹下大樹, 大田真, 田村真智子, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂, ”爆発火炎の粒子ベースシミュレーション法”, 「芸術科学会論文誌 Vol.3」, pp.159-167, 2005.
- [2] 奥澤和則, 平岩祐一, 佐藤皇太郎, 馬場哲治, ”燃焼シミュレーションに基づくパーティクルシステムによる炎の映像制作ツールの開発”, 2000.
- [3] Zeki Melek, John Keyser, ”An Interactive Simulation Framework for Burning objects”, 2005.
- [4] Arnauld Lamorlette, Nick Foster, ”Structural Modeling of Flames for a Production Environment”, SIGGRAPH, 2002 .
- [5] Hurbert Nguyen, ”「Vulcan」デモの炎”, 「GPU Gems 日本語版」, ボーンデジタル, pp.75-90, 2004.
- [6] 内閣府, ”災害から文化遺産と地域をまもる検討委員会（第3回）議事概要について”, 参考資料 3-3, 2004.
- [7] 東京都, ”防災都市づくり推進計画”, 資料 9 延焼シミュレーション, 2004.
- [8] 小倉石裕二, ”CG による燃焼の表現”, 「KOKURAISHI HOME PAGE」, <http://miso.ice.ous.ac.jp/~kokura/> .
- [9] 都筑卓司、宮本正太郎、飯田睦治郎, 「物理質問箱」, 講談社, p140-142, 1976.

- [10] 新岡嵩, 「燃える ろうそくからロケットの燃焼まで」, オーム社, 1994.
- [11] 木原寛, 今福京子, ”燃焼の科学”, <http://www3.toyama-u.ac.jp/~kihara/chem/fire/index.html>.
- [12] 地球丸, 「薪ストーブがわかる本」, 地球丸, p128-129, 2004.
- [13] 久保田浪之介, 「熱力学入門」, 日刊工業新聞社, 2003.
- [14] 物理のかぎプロジェクト, ”物理学ハンドブック”, <http://www12.plala.or.jp/ksp/formula/physFormula/html/physFormula.html>.
- [15] D, ハリディ、R, レスニック、J, ウォーカー、J,B, ホワイティン, 「演習・物理学の基礎2 波熱」, 培風館, 2004.
- [16] 松平升, 「温度と熱」, 共立出版, 2004.
- [17] 渡辺大地, ”FK Toolkit System”, <http://www.teu.ac.jp/aqua/~earth/FK/> .