

CGcontents

「流体シミュレーションの新しい動向」(2)

倉地 紀子

前回に引き続き、Siggraph2003にみられる流体シミュレーションの新しい動向として、今回はファイヤーボールの生成方法を紹介する。

炎の表現

Siggraph2002では、炎のシミュレーションが話題となった。たとえば、スタンフォード大学が発表した方法は、気体燃料が酸素と結合し、発火、燃焼、鎮火するまでの過程を、酸素と化学反応を起こす前と後の2種類の流体の運動方程式を解くことによって算出していた。この手法は、これまで不可能とされてきた本格的な炎のシミュレーションを達成したという大きな意味をもっていたが、表現的には大きな制限もあった。ここでは2種類の流体の境界面における計算を単純化するため、炎は1方向に成長すると仮定されており、このため、方向性を持った比較的厚みのない炎の表現には適しているものの、ボリュームのある炎を表現することは難しかった。

一方、PDIが発表した手法では、まず炎の表面をモデリングし、その表面上に配置されたパーティクルの動きを、炎の周りの大気を表す流体の動きに沿って作り出していた。ただし、この流体では炎の本質となっている物理的な特徴が考慮されていないため、個々のパーティクルのローカルな動きやテクスチャに、複数のノイズ関数を独立させて導入することによって、「炎」らしさが付加されていた。この方法は、実用性に重点を置き、幅広い表現に適用できるものとなっていたが、リアリティにはやはり限界があった。

爆発のデザイン

Siggraph2003では、上記の両手法の欠点をカバーしたともいえる、物理的な正

確さと幅広い表現力を兼ね備えたファイヤーボールの生成方法が発表される。ここでは、ファイヤーボールを爆発という現象が引き起こす2次現象と考え、爆発の物理的な特徴をモデル化した流体と、ファイヤーボールの実体となるパーティクルとの双方向のインタラクションによって、ファイヤーボールの動きが作り出される。

この方法の最大の特徴は、塊となった炎の動きを、自然現象として完全にシミュレートするのではなく、その本質だけを抽出して物理法則に忠実にモデル化し、見た目の動きを決定するその他の要素は、ルールによっていかようにもデザインできる点にある。もともと、映画のSFXなどで爆発や炎を専門に作り出す技術者は、様々な燃料の装置を組み合わせて、現実の自然界では起こり得ないような爆発をデザインしており、この論文の手法は、そのようなアプローチを意識して生み出されたようだ。

爆発は、圧力や密度が著しく上昇した大気の一部と周りの大気との境界面が、外に向かって広がっていく現象と考えられており、その物理的な特徴は、大気中の各点の密度や圧力が時間の経過とともにどのように変化するかによって表される。このため、爆発をモデル化した流体でも、各点の密度は時間の経過とともに著しく変化すると考えられ、その密度の変化は、流体の質量保存の法則によって決定される。

流体における質量保存とは、流体内のどの領域をとっても、その境界面から流入する流体と流出する流体の収支がゼロになることを意味しており、この収支を表す物理量としては、ディバージェンス(divergence)というものが用いられる。ベクトル場のディバージェンスとは、境界

面を通過するすべてのベクトルに対して、境界面の法線方向成分を取り出して足し合わせたもので、その値は符号付きのスカラー値となる。

一般的に、流体では速度ベクトル場に各点の密度で重み付けをしたベクトル場を考え、このベクトル場のディバージェンスが、時間による密度の変化に等しくなることを質量保存の定義としている。したがって、爆発という現象の根源は、爆発をモデル化した流体のディバージェンスの変化によって支配されているといえる。

この爆発をシミュレートするモデルは、Siggraph2000で“Animating Explosions”(注1)という論文によって発表された。一般的に気体の場合は、密度や粘性が一定の流体と仮定することによって運動方程式を単純化し、セミ・ラグランジアン法によって高速に方程式を解くというアプローチがとられる。ところが爆風を現す流体の場合には、このような仮定が成り立たない。このため式の記述が非常に複雑になる。

また、温度の変化に対しても、一般的な気体の場合には、流体内の対流の影響だけによって作り出されると仮定されている。そして、流体の運動方程式を用いて算出された対流(advection)の動きを、熱の対流(convection)として温度に適用することによって、気体の温度の変化が算出される。ところが、爆風を表す衝撃波では、外部に流出する熱や外部から流入する熱の影響も考慮しなければならない。

このため、ここでは運動方程式に加えて、熱力学に基いたエネルギー保存も解く必要がある。エネルギー保存の式と運動量保存の式は、非常によく似た構成をもっており、外部から流入したエネルギーの影響、流体内の熱のディフュージョ

ンや熱の対流の影響が考慮されている。これによって、外部環境との間の力やエネルギーの受け渡しも正確に記述することができ、こうして算出された物理量は、どのような2次現象にも適用することができる。

たとえば、算出された圧力を用いて物体の破壊をシミュレートすることができ、また爆風が通過する領域にパーティクルを配置し、このパーティクルに爆風を表す流体の速度や温度を与えることによって、ファイヤーボールの生成をシミュレートすることができる。このような汎用性の高さは利点となっているが、その反面、ここでは速度、圧力、密度、粘性、温度のすべてを変数とした、流体シミュレーションのフルバージョンが行われているともいえる、その計算工程はやはり複雑で、また計算負荷もかなり重くなる。

圧縮性のない流体

Siggraph2003 で発表された “Animating Suspended Particle Explosions” (注2) という論文では、やはりファイヤーボールを爆発の2次現象として定義しているが、爆発を表す流体の運動方程式を大幅に単純化して計算を効率化すると同時に、視覚的に大きな影響を与える温度によるパーティクルの物理的な特性の変化をフレキシブルにコントロールできるような工夫がなされている。

この論文でも、ファイヤーボールの実体は、パーティクルによって構成されている。パーティクルは位置、速度、温度、質量、パーティクルの属性（気体燃料、炎、煤の3種類）をデータとして持っており、それぞれのパーティクルは、外部環境とのインタラクションによって、その速度や温度の変化を生み出す。外部環境を表す流体モデルは、直接パーティクルの動きを作り出すためのものではなく、パーティクルに爆発の根源となる物理的な特徴を伝えることを意図している。このため、できる限り単純化された流体の運動方程式によって、この流体モデルを表すことが考えられた。

流体の運動方程式を単純化するために、もっともよく用いられる方法として、流体を圧縮性のない流体 (incompressible fluids) と仮定する方法がある。圧縮性のない流体とは、速度ベクトル場のディバージェンスが常にゼロとなっているような流体を指す。たとえば、密度が時間の経過によって変化しない流体は、圧縮性のない流

体といえる。圧縮性のない流体では、質量保存が常に成り立っていることになり、流体の運動方程式を解く工程を大幅に単純化することができる。

このため、前述したように、気体の動きを計算する場合、これを圧縮性のない流体と仮定して運動方程式を解き、そこで算出された対流の影響を密度や温度にも適用して、密度や温度の変化を作り出している場合が多い。

ファイヤーボールの外部環境を表す流体モデルも、基本的には圧縮性のない流体と仮定されている。前述したように、圧縮性のない流体では、流体の速度ベクトル場のディバージェンスは常にゼロとなっている。ところが、爆発という現象を流体の動きとして捉え

た場合、この流体内では周りの大気と比較して密度が著しく高くなっており、このため、流体は密度の高い部分から低い部分へ

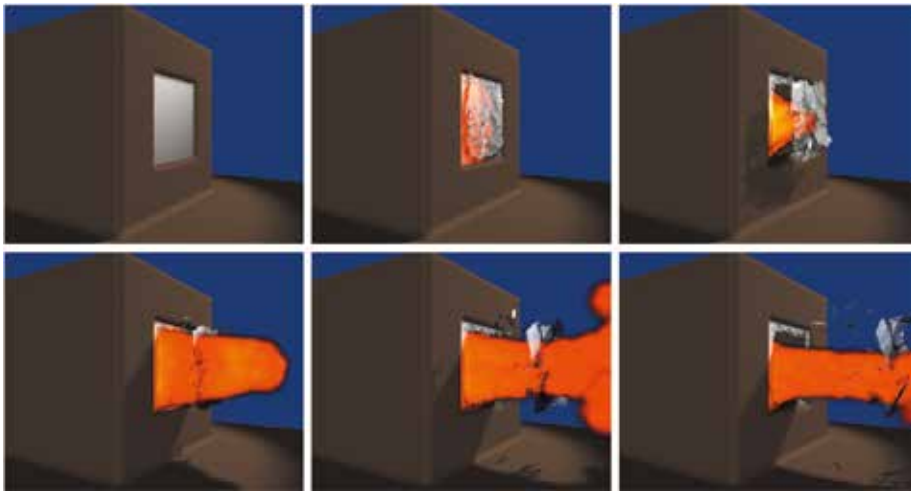


「スタンフォード大学による炎のシミュレーション」
気体燃料が酸素と結合し、発火、燃焼、鎮火するまでの過程をシミュレートした、本格的な炎のシミュレーションとして Siggraph2002 で話題となった。ただし、この手法でポリウムのある炎をつくりだすことは難しい。



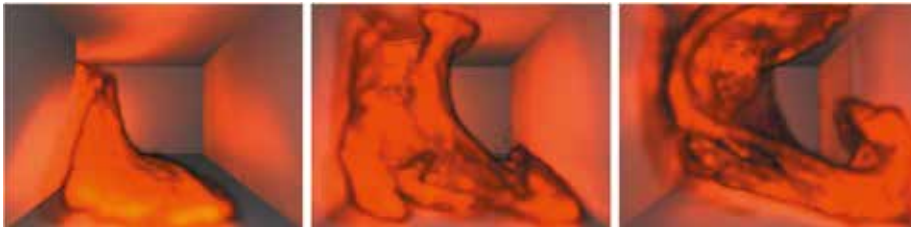
「PDI」のファイヤーボール

PDI は、映画「シュレック」で用いられた炎の生成方法を論文化して、Siggraph2002 で発表した。幅広い表現に適用できる手法だが、リアリティには限界がある。



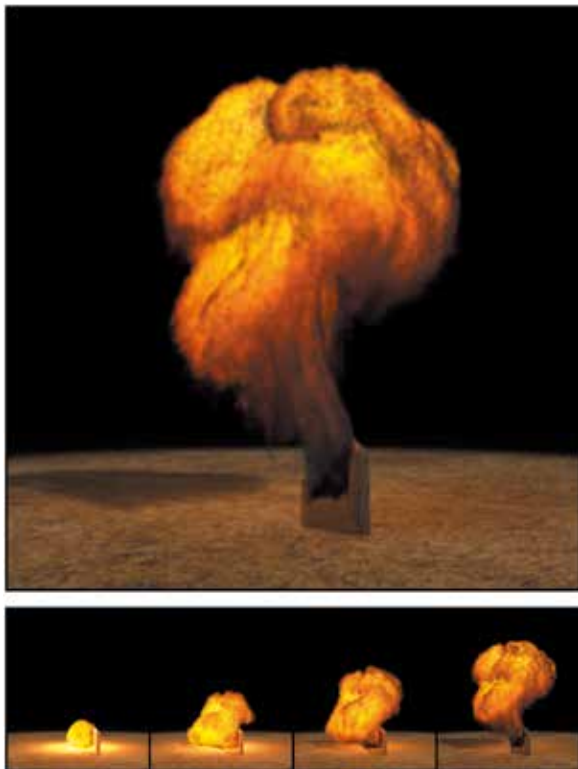
【爆発とインタラクション】

爆発を表す流体の速度や温度の変化は、質量、運動量、熱量の保存を、流体力学に基づいて算出されるため、爆発が引き起こした圧力の変化によって固体が破壊された場合、固体の形状が変わる（境界条件が変わる）ことによって、固体と干渉した（爆発を表す）流体の動きも変わる。



【爆発と炎の表現】

爆発を表す流体の動きや温度の算出では、熱力学的なエネルギーの保存も考慮されているため、大気中の粒子が引火して燃焼する過程も、これらの方程式を解いて算出された速度や温度をそのままパーティクルに適用して正確に表現できる。



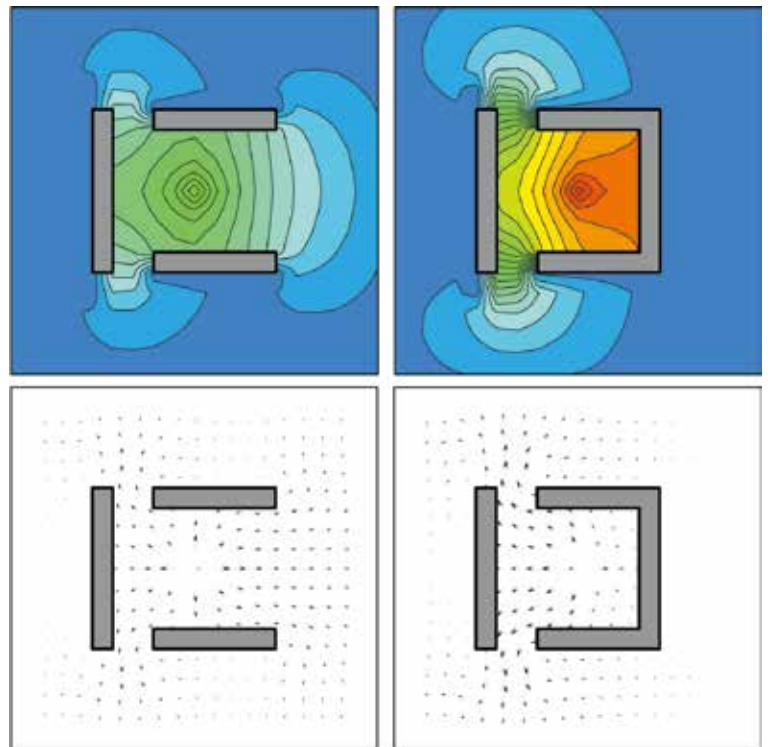
【爆発とファイヤーボール】

ファイヤーボールは、爆発が引き起こす2次現象と考えられている。映像は、壁に接した部分で起こった爆発が壁の一部を壊し、その破片が引火してファイヤーボールが生成される過程を示している。

と移動し、その結果、境界部分から流体の質量の一部が、周りの大気に向かって一方的に流出する現象と考えられる。

この現象は、流体内のディバージェンスの値が大きい部分から小さい部分へと、一方的に流体が流出することによって引き起こされる。たとえば、ディバージェンスをスカラー関数と考えて、爆発が発生したと想定される点の近傍ではディバージェンスに正の値を設定し、その他のすべての点に対してはディバージェンスにゼロを設定すると、爆発が発生した点から周りに向かって流体が流れ出す現象を作り出すことができる。

そこで、ここでは外部環境を表す流体を圧縮性のない流体と仮定して方程式を記述し、式の中に現れるディバージェンスの値を、爆発が起こった地点を中心に変化させることによって、仮想的に爆発の根源となる物理的な特徴を作り出す方法をとっている。この方法を用いると、流体の運動方程式を単純化して高速に解を求めることができるだけでなく、ディバージェンスの値の設定を変えることによって、物理的な正確さを保ちながらも爆発の根本的な特徴をデザインすることもできる。



【Divergence をもちいた爆発の生成】

爆発を想定する地点の周辺で流体の divergence の値の設定を変えたり、仮想的な障害物を配置することによって、爆発の生成をデザインできる。図は、中心のひとつのボクセルだけに正の divergence を設定し、障害物の配置を変えて、流体の計算をおこなったもの。上が密度の分布、下が流体の速度ベクトル場をあらわしている。

パーティクルと流体の相互作用のしくみ

ファイヤーボールの実体となるパーティクルと、その外部環境を表す流体との相互作用には、2通りのしくみがある。1種類目は直接的な相互作用で、これは同じ地点に位置するパーティクルと流体が、お互いに速度や温度の差を縮めるような力やエネルギーを与え合うことを意味している。パーティクルと流体の間のカやエネルギーの受け渡しを表す式は、ちょうど電荷をもった微粒子間の引力や斥力を表す式と同じものとなっている。

もう1種類目は間接的な相互作用で、これはパーティクルが燃焼する過程で放出するエネルギーが、高温のガスが流体のエネルギーや質量の増分となることを意味している。パーティクルが単位時間に放出するエネルギーは、流体の温度を算出する式に、外部から流入したエネルギーとして加えられる。そして、パーティクルから単位時間に放出したガスの量は、流体の質量保存を表す式に、ディバージェンスの変化率として加えられる。

ただし、パーティクルの動きは、上記のような流体との相互作用だけでは決定できない。パーティクルは、その温度が一定値を超えると発火を起こし、エネルギーや高温のガスを放出し始める。このようなパーティクルの変化を、流体との相互作用だけによって作り出すには、流体の動きが熱力学的なエネルギーの保存に基いて算出されていなければならない。

ところが、前述したように、流体の温度の算出では計算を単純化するため、熱力学的なエネルギーの保存は考えられていない。このため、パーティクルが発火を起こして燃焼し煤になるまでの過程のおおまかなアウトラインは、ルールとして与えられる。ここでは、パーティクルはその質量がゼロになるまで一定の割合で燃焼すると仮定し、燃焼の過程でパーティクルが単位時間あたりに放出するエネルギー



「ファイヤーボール：実写との比較」
パーティクルと流体モデルとのインタラクションによって作り出したファイヤーボール(左)と実写のファイヤーボール(右)。

やガスの量を、パーティクルが単位時間あたりに燃焼する割合に比例したスカラー値として算出している。これらのエネルギーやガスの量は、前述したように、流体がもつエネルギーや質量の増分になる。

また、燃焼の過程でパーティクルの質量の一部は煤に変化し、この煤の量が一定値を超えると、煤パーティクル (soot particle) が生成される。ガスや煤を放出することによって、パーティクルの質量は減少し、その質量がゼロとなった時点でパーティクルは消滅する。もっとも、パーティクルがその質量がゼロになるまで一定の割合で燃焼するという仮定は、1つのルールの例にすぎず、このルールは視覚的な要望に応じて、いかようにもデザインすることができる。

このようにして、発火を起こしたのちのパーティクルは、自主的にその速度や温度を作り出しているともいえるが、パーティクルの最終的な速度や温度は、あくまでパーティクルが放出したエネルギーやガスを受け取った流体との相互作用を経ることによって決定され、これによって爆発がもつ物理的な特徴が受け継がれていく。

この手法では、ファイヤーボールを生み出す爆発の設定から、ファイヤーボールの成長過



「爆発と炎の表現」

ノズルから一方に、引火する性質をもったパーティクルを噴射して作成された炎。ノズルの方向によって表情が変わってくる。manyBig: 少しずつ時間をずらして、複数の爆発を起こすことによって生成された炎。それぞれの爆発には固有の流体モデルが設定されており、それらの間のインタラクションも考えられている。

程を決定する燃焼の特徴にいたるまでを、単純なルールによってデザインし、爆発の根源となる物理的な特徴だけをシミュレートすることによって、その完成形を仕上げている。このため、すべてをシミュレーションで算出する場合と比較すると、表現の幅やコントロールの自由度が高く、計算負荷も遥かに軽くなっている。ルールの設定を、より直感的に行えるようにすることが、今後の課題とされている。

Noriko Kurachi



注1) “Animating Explosions”
(Proceedings of Siggraph2000,
Gray Yngve, James O'Brien,
Jessica Hodgins)

注2) “Animating Suspended
Particle Explosions”
(Proceedings of Siggraph2003,
Bryan Feldman, James O'Brien,
Okan Arıkan)

James O'Brian 氏