

# CGにおいて物理シミュレーションを 思い通りに操作する

金井 崇

## 1. はじめに

近年では、映画やテレビ、CM、ゲーム等においてCG（コンピュータグラフィックス）による映像を利用することが一般的になっている。中でも、より現実に近い映像を得るために、物理法則にもとづくシミュレーション技術を利用してアニメーションを作成することが多くなっている。例えば、物体が落下していく様子を得るための剛体シミュレーションや、水や煙の動きを表現するための流体シミュレーションなどは、すでに商用のCGソフトウェア上で実装され、利用できるようになっている。

しかしながら、一般的にシミュレーションの知識を持たない映像制作者の観点から見ると、これらのソフトウェアは必ずしも扱い易いとは限らないのが現状である。物理法則シミュレーションを利用する場合、まずは初期の物体の位置や姿勢を決め、物理パラメータを設定した後、シミュレーション計算を行うことで、物体の動きを決定する。このとき、制作者が思い通りの映像を作成したい場合には、物体の位置や姿勢を修正するか、あるいは、物理パラメータを調節するしかない。さらに、これらの調整

は、すべてシミュレーション計算の前段階で行う必要がある。一般的には、高精度なシミュレーション計算をするには計算時間がかかる。よって、制作者によるこれらの物理パラメータの調整とシミュレーションの再計算の繰り返しによる試行錯誤を行う必要があり、このことが、映像制作に莫大な時間がかかる一つの要因となっている。

このような問題に対処するために、筆者らは、物理シミュレーションを思い通りに操作する、すなわち、物理シミュレーションを手軽に編集できるようにするための手法の開発を行っている。ただし、ここで紹介するのはあくまでCGでの利用に限った話である。物理シミュレーションを思い通りに操作する、ということは、それによって物理的な正確さとはかけ離れた非現実的な動きになってしまう可能性もある。ここでは、見た目のそれらしさ（物理的な正確さでなく）と編集のし易さをどのようにして両立するか、ということが研究のポイントとなる。

## 2. 研究概要

### 2.1 物理モデルを考慮した爆発のモデリング

爆発現象は高速と低速の側面を持ち、化学反応による圧縮膨張を伴う流体、すなわち流れとしての火炎の密度（フロー）の伝播として定義される。高速の側面では爆発源で起爆し流体が急激に膨張して伝播し、その後の低速の側面では流体が徐々に減速しながら伝播し、そして伝播が収束する（この位置を到達点とする）。爆発はその過程を通して、渦を巻き、流れて移動するフローの挙動を特性として持つ。また、起爆により爆発源からの圧力が伝播し（これを衝撃波と呼ぶ）、この圧力が爆発の物理特性を決定づける。爆発の到達後の比較的フローが低速である側面を扱う方法については、制御を含めて既存手法が存在するため、ここでは爆発の到達までの側面について扱っている。

爆発の挙動は極めて複雑なものであり、特に高速なフローや乱流などの大きな渦を表現する必要がある。よって、爆発を単純な形状や起爆の物理パラメータの設定のみで定義して表現することは難しい。さらに、非線形の移流項を含む格子シミュレーションで実現するには、格子を細かくとる必要がある。しかし、その場合計算時間や計算の安定性に問題が生じるだけでなく、今度はフローの高速性を実現することが困難となる。

これに対し、一般的な流体現象に対する手法として、パスに沿って速度場を発生させて密度を誘導することで、流体を制御する方法があ

る。しかしながら、爆発に関して言えば、他の流体現象のシミュレーションとは違い、大小の渦やフローの複雑な挙動を速度場だけで誘導することは容易ではない。また、格子シミュレーションを直接制御する手法が提案されているものの、これらの制御により、爆発特有の高速なフローに対する詳細な制御を行ったり、大きく曲がるようなフローを生成することは極めて難しいと言える。

そこで筆者らは、物理モデルを考慮した爆発現象のモデリング手法を開発した。本手法では、ユーザが設定する制御パスに基づき、爆発のフローを制御するだけでなく、格子シミュレーションを同時に実行することで、爆発現象の持つ高速と低速のフローへの移行をスムーズに行うことができる。ここでは、物理モデルから導出される爆発曲線に基づき、密度・速度・圧力・温度場を順次生成することで、大きな渦などを含む複雑な爆発の挙動を表現できる。さらに、圧力の劇的な変化をもたらす爆轟現象や、燃料による燃焼も考慮した。

これにより、以下のような利点をもたらされた。

- 本手法で得られる爆発の挙動は、正確なシミュレーションに比べると劣るものの、一つ一つの制御パスに沿ったフローは物理的な特性を考慮したものとなる。
- ユーザ入力としては制御パスのもととな

るNURBS曲線の指定と爆発曲線のパラメータであり、爆発のフローの生成は自動的に計算される。これにより、ユーザーにとって自由で予測のしやすい、より直接的なフローのモデリングができる。

- 本手法は、爆発現象特有の流体の圧縮性

から非圧縮性への状態遷移を、格子シミュレーションで統一して行っている。特に、フローの低速状態への移行後は、流体に関する様々な既存手法が適用できる。

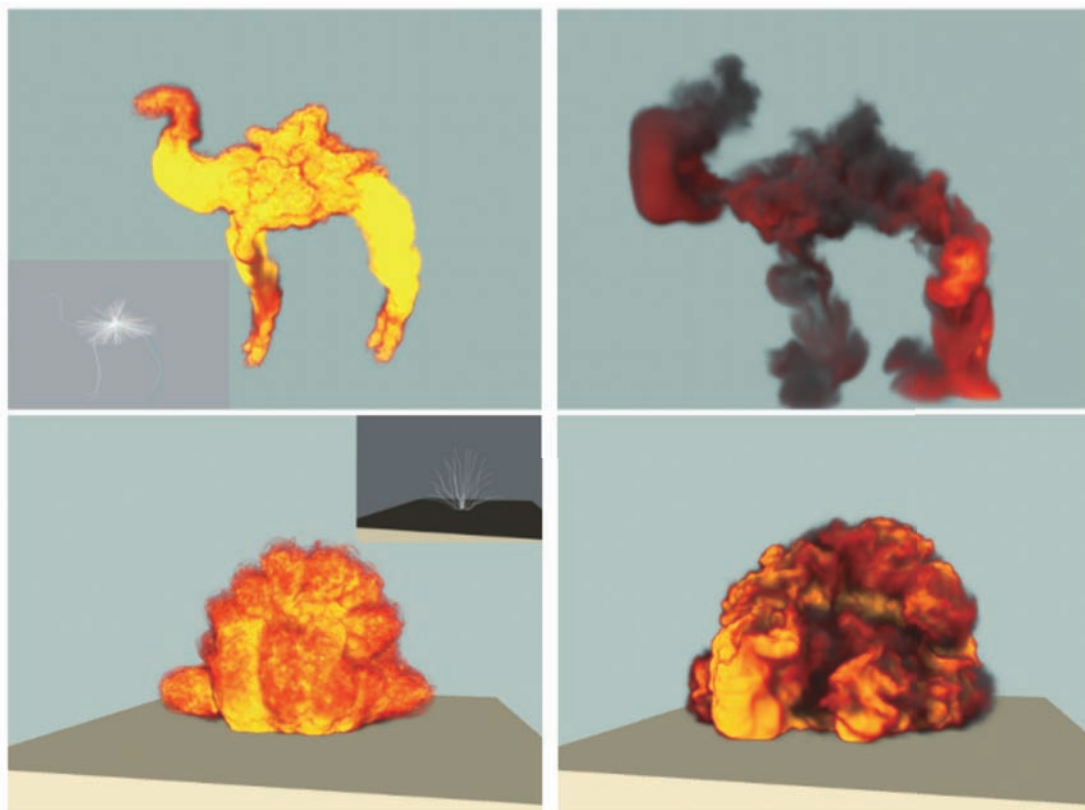


図1 爆発のモデリング手法の適用例。上段：ラクダの形状に沿って爆発をおこすように編集した結果。下段：地面での爆発を編集した結果。

## 2.2 巻き込み現象を考慮した爆発シミュレーションにおけるプルームの制御

爆発現象は、起爆後に高い圧力と共に生じた火炎が、高速で燃焼しながら伝播する圧縮性と、伝播の収束後の火炎が浮上する非圧縮のフェーズを持つと考えられる。圧縮性のフェー

ズの火炎は、起爆時の圧力により膨張することで、周りの空気よりも密度が低くなる。そして、膨張が終了して非圧縮性になる。ここで、空気との密度差が生じることになるため、火炎

に浮力が生じて上昇を始める。この非圧縮性のフェーズの上昇する火炎，およびそれが煙に変化したものはプルームと呼ばれる。

爆発現象におけるプルームは、映画などにおいて非常に重要な要素である。しかしながら、物理モデルに基づいて、プルームのアニメーションを制御する方法が存在しなかった。したがって、演出意図を反映する際には、プルームの物理的なリアリズムを維持することが困難になる。プルームが上昇する過程で、周囲の空気をプルームがその表面全体で取り込む物理現象は、巻き込みと呼ばれる。この巻き込み現象は、プルームの物理的な挙動を強く特徴付ける。筆者らは、このような巻き込みによって生じる挙動に基づいて、プルームの形状や動きを制御するための手法を開発した。

本手法における主な貢献は以下の通りである。

- 巻き込みにより生じる様々な挙動を表現するような数式や物理的な特徴を、コンピュータグラフィックスにおける流体シミュレーションの分野に特化させる形で導入した。これにより、プルームの様々な物理的な特徴を表現するモデルに基づいて、プルームを生成できるようになった。
- 浮上，膨張，循環といった巻き込みによって生じる各挙動を、個別に表現する方法を新たに提案した。これにより、各挙動に対応する上昇速度や渦巻く動きといった制御要素を個別に調整できるようになる。図2 上段のように、小さい空間から上昇を始め、そして、大きくなるようにプルームの大きさが制御される。また、図2下段のように渦を巻きながら狭い空間を上昇するプルームが生成されるようになった。

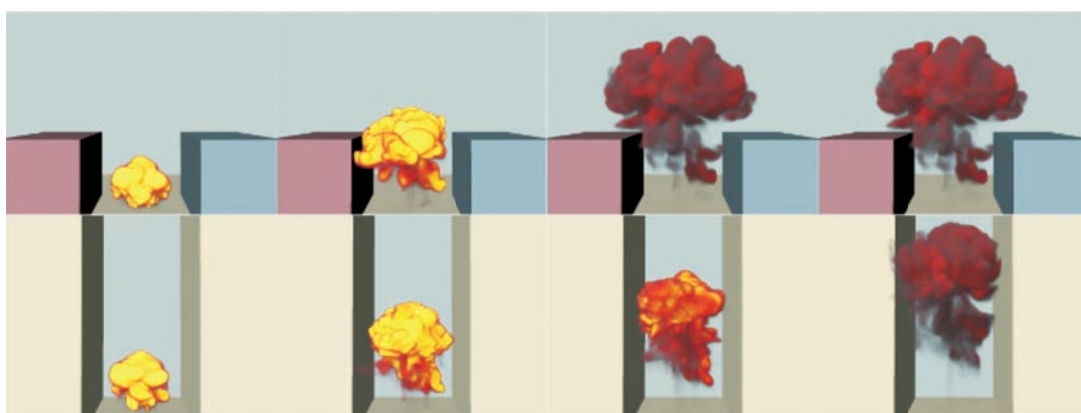


図2 プルームの制御手法の応用例。上段：プルームの大きさを時空間的に制御する様子。  
下段：渦を継続的に維持させるように制御する様子。

### 3. おわりに

物理シミュレーションを思い通りに操作するための手法を二つ紹介した。いずれも爆発のシミュレーションに対する編集手法であるが、このような流体现象の他に、CGで使われる物理

現象は数多く存在する。今後は、他の様々な物理現象に関する手軽な操作・編集方法を追求していきたい。



金井 崇 (かない たかし)

[生年月日] 1969年12月27日生

[専門領域] コンピュータグラフィックス、物理法則アニメーション、幾何形状モデリング、CAD/CAM

[著書・論文]

- ・ Genichi Kawada, Takashi Kanai: "Controlling the Shape and Motion of Plumes in Explosion Simulations", Proc. 11th Workshop on Virtual Reality Interaction and Physical Simulation (VRIPHYS 2014), pp.69-78, 2014.
- ・ Shuchen Du, Takashi Kanai: "GPU-based Adaptive Surface Reconstruction for Real-time SPH Fluids", Proc. WSCG 2014, pp.141-150, 2014.
- ・ Genichi Kawada, Takashi Kanai: "Procedural Fluid Modeling of Explosion Phenomena Based on Physical Properties", Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation 2011, pp.167-175, 2011.
- ・ Kenji Takamatsu, Takashi Kanai: "A Fast and Practical Method for Animating Particle-Based Viscoelastic Fluids", The International Journal of Virtual Reality, 10 (1), pp.29-35, 2011.

[現在の所属] 情報学環 先端表現情報学コース

[所属学会] 画像電子学会、情報処理学会、精密工学会、日本図学会