基応般

自然現象のビジュアルシミュレーション

土橋 宜典
北海道大学大学院情報科学研究科

CG における自然現象のシミュレーション

自然現象のビジュアルシミュレーションに関する研究は，古くから行われており，常に研究者の注目を集めてきた．初期の頃は，計算機の性能も低かったため，いわゆる手続き的アプローチによる手法が盛んに開発された．手続き的アプローチとは，実際の物理現象をシミュレーションすることなく，結果としてそれらしい映像を生成する方法のことを指す．フラクタルや 1/f ノイズを利用した手法が代表的である．CG 分野においては，Ken Perlin 氏によって考案された Perlin ノイズと呼ばれるものが広く利用されている．Perlin ノイズは，異なる周波数のノイズを組み合わせたもので，自然界に見られるランダム性を持った複雑な形状の表現に適している．雲や煙，炎，山岳地形などのリアルな画像を作成することができる．手続き的アプローチの最大の利点は，計算コストが低いことである．基本的には，単に乱数を生成するのみで，さまざまな現象を再現できる．しかし，リアルな結果を得るには，乱数の種類やそのパラメータを注意深く選択しなければならない．また，対象とする現象を“うまく”表現できるアルゴリズムをヒューリスティックに開発しなければならない．

一方，物理ベースアプローチでは，実際の物理現象を手がかりとしてアルゴリズムを構築することで，リアルな映像表現を試みる．物理ベースアプローチに分類できる最も古いものの 1 つは，パーティクルシステムと呼ばれる方法であり，煙や炎，爆発などのガス状の物体を表現するために考案された．ガス状物体を大量の粒子の集合で表現し，各粒子の動きを物理法則に基づいて計算する．ただし，物理法則といっても非常に簡単なもので，重力や与えられた外力に従って各粒子が移動するのみで，粒子間の衝突や相互作用も考慮されない．そのため，今日の CG 映像に見られるような複雑な煙や炎の動きを表現することは不可能であった．そこで，物理現象をより忠実にシミュレーションすることで，より複雑な動きを再現する試みが多く行われている．

現在，多くの研究者の注目を集めているのは，水や炎，煙，雲などの流体に関する現象のリアルな表現である．流体現象は，Perlin ノイズやパーティクルシステムを用いてもある程度の表現は可能だが，実写レベルのリアリティを表現するには至らない．特に，動きの表現が十分ではない．流体の動きは Navier-Stokes 方程式と呼ばれる偏微分方程式によって記述される．これを解けばリアルな動きを表現できるが，計算コストの高さから敬遠される傾向にあった．しかし，1990 年代後半，計算機性能が飛躍的に向上したため，Navier- Stokes 方程式を基にした数値流体解析を利用した研究が現れ始めた．以降，さまざまな手法が開発され，現在では数値流体解析を利用したアプローチが主流となり，CG における 1 つの研究分野を形成するまでに至っている．

ところで，数値流体解析はそれ自体が研究分野として古くから存在する．そこでは，さまざまな現象の物理過程の解明を目指し，きわめて高精度な解析手法が数多く開発されている．それと比較すると，

CG 分野ではごく初歩的な手法が用いられているに過ぎず，精度的には必ずしも十分とは言えない．しかし，CG 分野における第一の目的は，リアルな映像を作成することであり，初歩的な手法でも十分にこの目的は果たすことができる．CG においては，正確性よりも計算結果のリアリティや効率性，あるいは，目的映像を生成するための制御性が重要視される場合が多い．この目的の違いによって，CG ならではの新しいアイディアが創出され，数値流体解析の分野では思いもつかないような興味深い手法が次々と開発されている．以下では，数値流体解析の基本的な考え方を解説した後，そのような研究事例を紹介する．

数値流体解析

流体の動きは Navier-Stokes 方程式（以下，NS 方程式）と呼ばれる偏微分方程式を解くことによって計算することができる．CG においてよく用いられる非圧縮性を仮定した場合の NS 方程式とその意味を図 -1 に示す．運動方程式に加え，非圧縮性を満足するために必要な連続の式からなる．これらの式において，速度 **u** と圧力 p が未知変数である．運動方程式の左辺は，流体中の 1 点の微小時間での速度の変化を表す．右辺第 1 項は，流体自身の速度場によって流体が移動する効果を表し，移流項と呼ばれている．第 2 項は，圧力の高い領域から低い領域へと流体が移動する効果を表し，圧力項と呼ばれる．そして，第 3 項は，粘性項と呼ばれ，流体の粘性により速度が周囲に拡散しながら減衰する効果を表している．連続の式はある領域に流入する流体と流出する流体の量が等しいことを表している．計算機シミュレーションでは，解析空間を格子に分割し，差分法などを用いて，各格子点の速度 **u** および圧力 p の時間変化を逐次的に計算する．NS 方程式の数値解析については，文献 1）に詳しく書かれているので，興味ある読者は参照していただきたい．なお，最近では，格子に分割するのではなく，粒子の集合によって流体を表現する粒子法[2] と呼ばれる方法も多用されているが，本稿では扱わない．

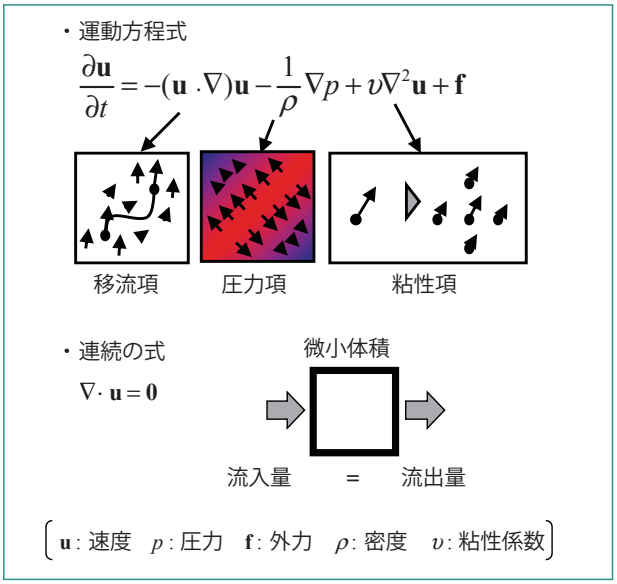

図 -1　非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とその意味

NS 方程式の数値解析は，比較的難易度が高く，計算条件を適切に設定しなければ，計算を安定して行うことができない．また，計算コストが高いこともあって，CG 分野においてはあまり利用されることはなかった．しかし，1999 年に NS 方程式を高速かつ安定に解くことを可能とする手法が発表された．この手法をきっかけに流体解析を応用した数多くの研究が盛んに行われるようになった．この手法の考案者である Stam 氏の Web サイト☆1 では，サンプルコードが公開されているので，興味のある読者は試してみていただきたい．2 次元シミュレーションではあるものの，シミュレーション部分そのものはわずか 100 行程度の C プログラムであり，誰もが簡単に利用できる．

流体現象のビジュアルシミュレーション

NS 方程式の数値解析によって得られるのは速度 **u** および圧力 p の時間変化のみである．炎や煙などの流体現象をシミュレーションするためには，煙の密度や炎の温度などの物理量の時間変化も同時に計算する必要がある．基本的には，流体の動き（すなわち，速度場）を NS 方程式により計算し，得られた速度場に沿って他の物理量を移動させるという過

☆1　http://www.dgp.toronto.edu/people/stam/reality/Research/pub.html

程を計算する．以下，煙・炎・雲・水のシミュレーション法を簡単に紹介する．この順にシミュレーションの難易度は上がる．なお，各手法のより詳細な部分を知りたい場合には，文献 3）に詳しく説明されているので参照いただきたい．

■ 煙のシミュレーション

煙は比較的簡単な方法によって表現できる．NS 方程式によって得られた速度 **u** に沿って煙の密度を移流させればよい．これは，煙の密度を q とすると，次式によって計算される．

$$\frac{\partial q}{\partial t}=(\mathbf{u}\cdot\nabla)q+S$$

ここで，S は煙の発生源における煙の発生量である．右辺第 1 項が煙の移流を表している．ユーザは煙の発生源の配置と発生量および初期速度を指定する．発生源の初期速度は NS 方程式の外力 **f** に反映される．図 -2 に煙のシミュレーション例を示す．

■ 炎のシミュレーション

炎を表現する場合，燃焼とそれによる熱浮力を考慮しなくてはならない．そのため，NS 方程式と合わせて温度場と燃焼物の時間変化を計算する．炎のシミュレーション方法は以下のようになる．まず，炎の発生源に指定された量の燃焼物を与える．次に，燃焼物の燃焼による温度上昇を計算する．この温度上昇は燃焼物の量に比例するという簡単なモデルでもよい．その後，各点の温度に従い，熱浮力を計算する．熱浮力は，各点の温度に比例する鉛直上向きの力として計算する．熱浮力を外力として NS 方程式を数値解析し，速度場および圧力場を計算する．そして，得られた速度場に従って，温度や燃焼物を移流させる．以上の処理を繰り返し行うことで炎の動きを再現できる．図 -3 はこの方法による炎のシミュレーション例である．

■ 雲のシミュレーション

雲の形成過程をシミュレーションする場合，大気流体の数値シミュレーションが必要となる．さまざまな雲の種類が存在するが，ここでは積雲や積乱雲などの積雲系の雲の形成過程について説明する．積雲系の雲は以下のように形成される（図 -4）．まず，地面によって温められた空気塊が浮力を得て上昇を始める．これにより，地上付近の水蒸気が上空に運ばれる．また，空気塊は上昇に伴ってその温度が低下する．そのため，一定の高度に達すると，空気塊に含まれる水蒸気が相転移を起こして水滴に変化する．この水滴が雲である．このとき，相転移に伴って潜熱と呼ばれる熱が放出される．これにより，新たな浮力が発生し，雲がさらに上方へと発達する．

上記の過程をシミュレーションするためには，大気の速度，圧力，水蒸気，水滴（雲），温度という 5 つの物理量の時間変化を計算する必要がある．これらは 5 つの偏微分方程式として表すことができる．そのうちの 2 つは NS 方程式であり，速度と圧力を計算するために用いる．ただし，熱浮力および水滴の落下による周辺空気の引きずりを考慮した外力が作用する．熱浮力は炎と同様に計算する．水滴の落下による外力は水滴の質量に比例した下向きの力として与える．

水滴と水蒸気については，NS 方程式から得られた速度場に従って移流させる．同時に，各点の温度に応じて決ま

図 -2　煙のシミュレーション例

図 -3　炎のシミュレーション例

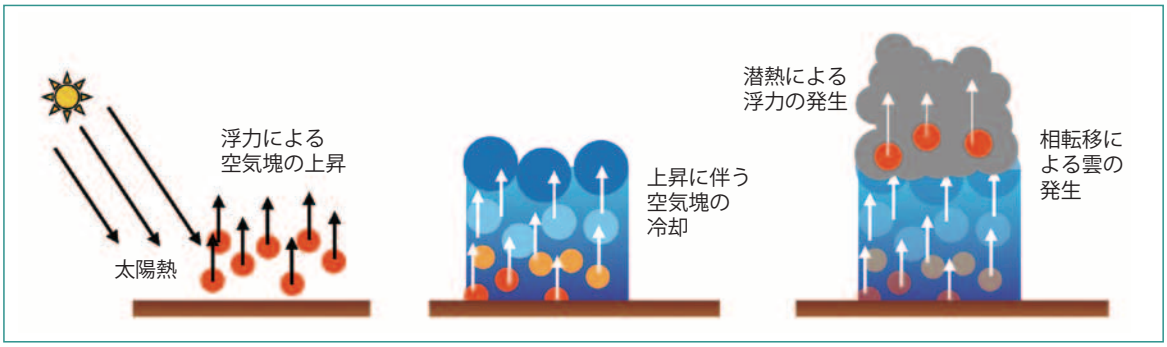

図 -4　雲の発生原理

る飽和水蒸気量と実際の水蒸気量との差に比例した量だけ水蒸気から水滴へと相転移を生じさせる．これによって雲が発生する．温度についても速度場によって移流させる．空気塊の上昇に伴う温度の低下については，各点の速度の鉛直成分に比例して温度を低下させることで表現する．潜熱については，相転移により発生した水滴量に比例して温度を上昇させる．

以上の過程を数値的に計算することで，積乱雲の形成をシミュレーションできる（図 -5）．

■ 水のシミュレーション

水はこれまでに説明したものと根本的に異なった性質を持つ．それは，液体と気体との境界である水面が存在することである．水面の時間変化を計算する手法の 1 つとして，レベルセット法と呼ばれる方法が広く用いられている．レベルセット法では，水面からの符号付きの垂直な距離を表す関数 ϕ を定義する（図 -6 左）．この関数 ϕ はレベルセット関数と呼ばれる．そして，速度場に応じてこのレベルセット関数 ϕ の値を移流させることで水面を追跡する．レベルセット関数 ϕ の正負に対応して気体と液体を区別する．$\phi=0$ となる等値面が水面となる．

レベルセット法によって水面を追跡する際，レベルセット関数 ϕ の移流に伴い，水面からの垂直な距離関数としての性質が失われてしまう．その性質とは，レベルセット関数の勾配の大きさ $|\nabla\phi|$ が常

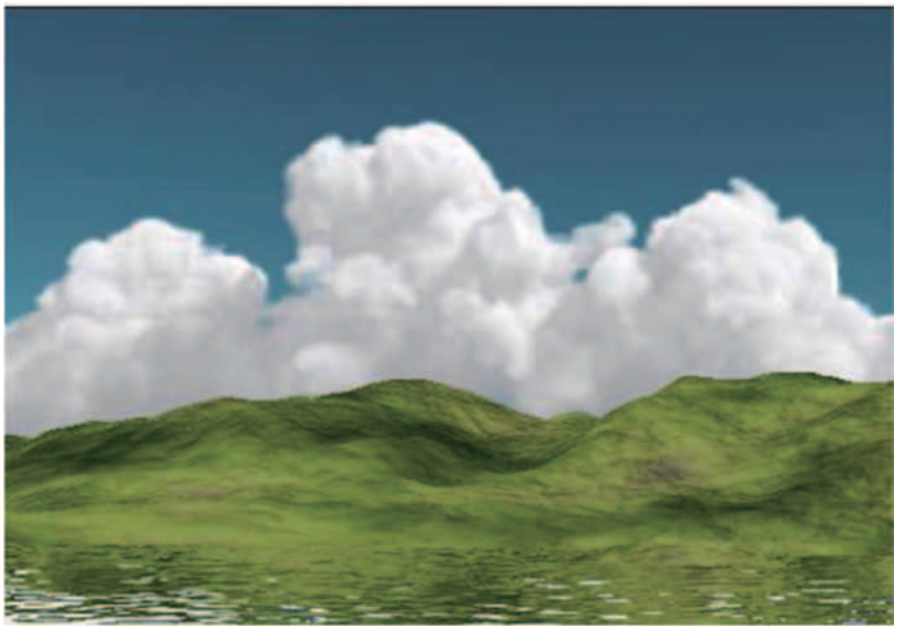

図 -5　積乱雲のシミュレーション

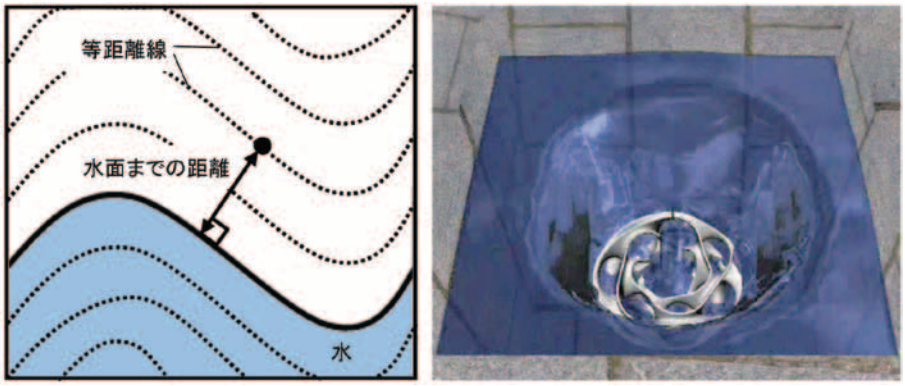

図 -6　レベルセット法による水面の表現

に1となるということである．この性質を保つため，シミュレーションの各タイムステップにおいて，$(1-|\nabla\phi|)$ を誤差として，これに比例した量を ϕ に加えることで ϕ の値を補正する．この処理は再初期化処理と呼ばれている．これにより，複雑に変化する水面形状を追跡することが可能となる．

図-6右はこの方法を用いて水面に物体が落下した際の水面形状の変化をシミュレーションした例である．

面白い使い方

前章で紹介した方法は，物理現象に沿った計算方法であり，複雑な物理過程を簡略化したモデルといえる．以下では，もっと大胆な簡略化やCGならではの応用，画像生成以外への応用を行った例を紹介する．

■ 2次元シミュレーションの利用

計算機性能の向上により，流体解析が比較的短時間に行えるようになったとはいえ，核爆発のような大規模なシミュレーションを行うことは依然として莫大な計算コストを必要とする．このような大規模な現象を表現する方法として，2次元シミュレーションを用いる方法が提案されている．たとえば，核爆発のような現象の場合，図-7左に示すように回転対象に複数の仮想平面を配置して，各仮想平面内にて2次元の流体解析を行って核爆発の断面での動きを計算する．そして，これらの断面での動きを補間することで擬似的に3次元での核爆発を表現する．仮想平面の配置方法を変更すれば，さまざまな現象を表現することも可能である．図-7右はこの方法を用いて核爆発のシミュレーションを行った例である．この方法は，もちろん正確ではないが，3次元でシミュレーションすることが不可能な規模の現象であっても映像化することを可能とする．

■ シミュレーションの制御

映画やゲームにおいては，煙や水，雲などが人や動物など現実にはない形状として表現される場合がある．このような表現を実現するため，流体シミュレーションを制御する研究が行われている．流体シミュレーションによる自然な動きを保ちつつ，流体の動きを制御してさまざまな形状を表現する．ユーザに指定された目的形状となるよう外力やシミュレーションのパラメータを最適化する方法や目的形状から計算したポテンシャル場を用いる方法が提案されている．図-8はドクロ形状となるよう雲のシミュレーションを制御した例である．

■ 音のシミュレーション

NS方程式は，画像の生成だけでなく，流体音と呼ばれる風や炎，水の音の生成にも利用することができる．一般には，音は固体の微小振動によって発生する場合が多いが，流体音の場合，流体（すなわ

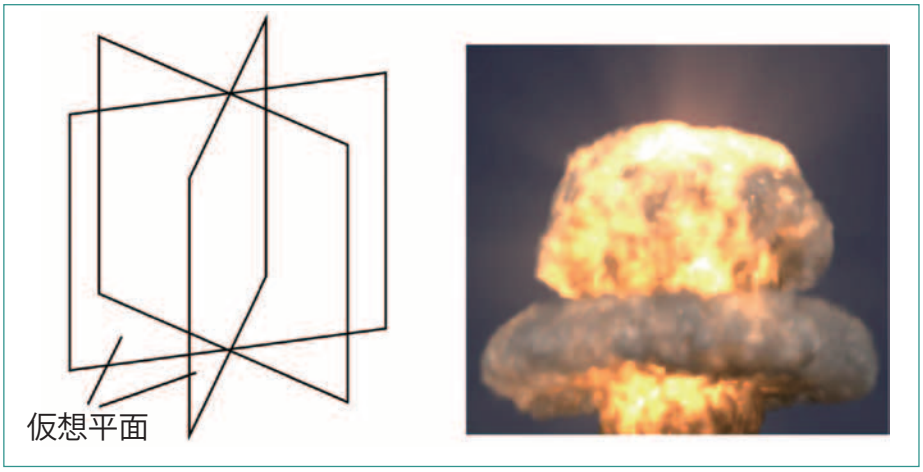

図-7　2次元シミュレーションによる擬似3次元表現

図 -8　雲のシミュレーションの制御

ち，空気や水）の動きに起因して音が発生する．以下では，風きり音の発生原理とそのシミュレーション方法について簡単に説明する．

風きり音は，剣のような棒状の物体をすばやく振りまわしたときに発せられる．この音は，空気中に発生する渦が原因である．棒状の物体が空気中を移動すると，その後方に周期的な渦が発生する．この周期的な渦の発生に伴って空気圧が周期的に微小変化を起こし，音として知覚される．これが風きり音である．風きり音は，物体表面上にかかる圧力分布の時間変化から計算することができる．この物体表面上の圧力分布の計算に非圧縮性 NS 方程式の数値解析を用いる．図 -9 に風きり音のシミュレーション例を示す．

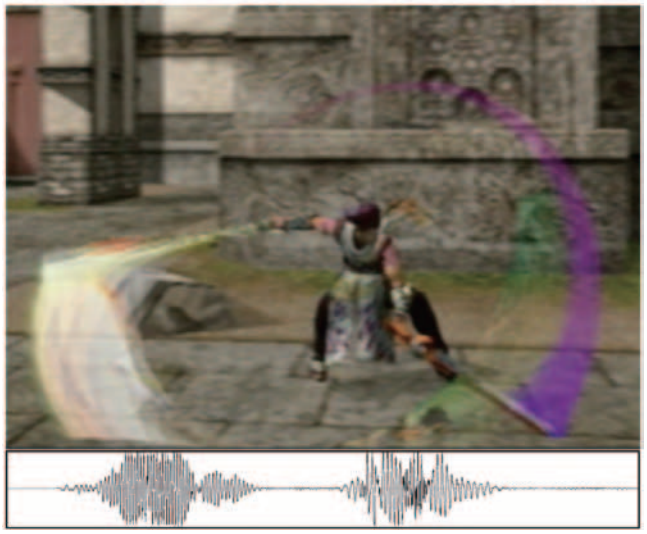

図 -9　風きり音のシミュレーション（画像は（株）タイトーより提供）

まとめと今後の展望

本稿では，自然現象のビジュアルシミュレーションに関して，数値流体解析を利用した最近の研究事例を中心に解説した．数値流体解析を使用した研究が行われるようになってからすでに 10 年以上経過しているが，いまだに多くの研究が毎年のように発表されている．これまでに行われていない新しい現象のシミュレーション研究も発表されてはいるが，最近では，高精度化や高速化を目指した研究が多い．この傾向はしばらく続いていくのではないだろうか．いずれは映画などで見られるような超高精細の映像をお手元のデスクトップパソコンを使ってリアルタイムで生成できるようになるであろう．

参考文献

1）数値流体力学編集委員会編：数値流体力学シリーズ（1）非圧縮性流体解析，東京大学出版会．
2）越塚誠一：粒子法（計算力学レクチャーシリーズ），丸善．
3）BRIDSON, R. : Fluid Simulation for Computer Graphics, AK Peters (2008).

（2012 年 2 月 21 日受付）

土橋 宜典（正会員）doba@ime.ist.hokudai.ac.jp

1992 年広島大学工学部卒業．1994 年同大学院工学研究科博士課程前期修了．1997 年同博士課程後期修了．同年広島市立大学情報科学部助手．2000 年北海道大学大学院工学研究科助教授．2004 年同大学院情報科学研究科助教授．博士（工学）．コンピュータグラフィクスに関する研究に従事．