

NAGARE

ISSN 0286-3154

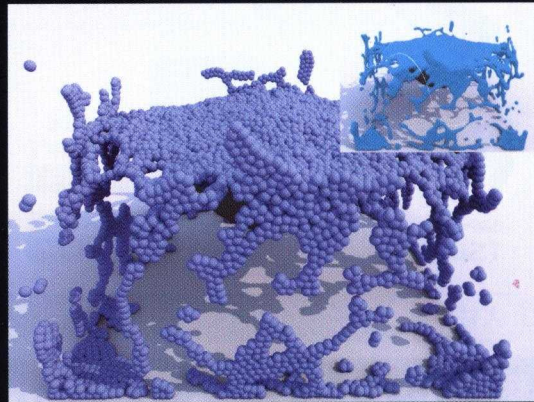
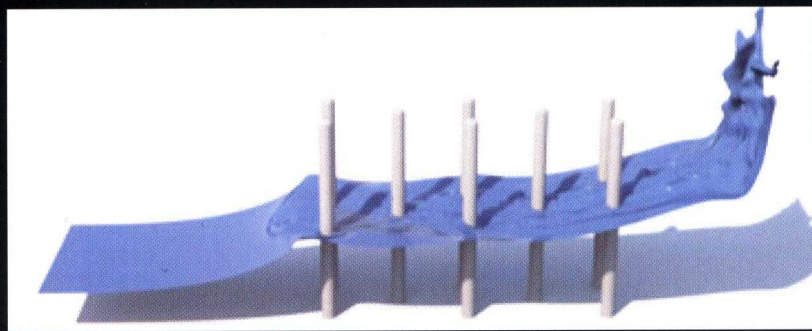
Journal of Japan Society of Fluid Mechanics

ながれ

2018 AUG. 第37巻
No.4

巻頭言 第11回FDR賞
特集 集 CGと流体力学

特集の企画にあたって／流体力学のCG応用／コンピューターグラフィックス流体力学ことはじめ／粒子法による物理ベースコンピューターグラフィックス／Mixed RealityによるCFD可視化システム



日本流体力学会誌

<http://www.nagare.or.jp/>

[特集] CG と流体力学

流体力学のCG応用

広島修道大学 経済科学部 / ドワンゴ CG リサーチ

西田友是

Fluid Dynamics for Computer Graphics Applications

Tomoyuki Nishita, Hiroshima Shudo University / Dwango CG research

*E-mail : nishita@shudo-u.ac.jp / tomoyuki_nishita@dwango.co.jp

1 はじめに

コンピュータグラフィックス (以下 CG) の研究は 1960 年代初頭に始まり, 著者は 1970 年からほぼ半世紀 CG 研究に関わってきました。1990 年代の後半に流体が CG 分野に取り入れられ, 急速に進歩し映画に利用できるほどのリアルな流体が表現できるようになった。本稿では, CG 分野における流体計算の進展および著者の流体計算の CG 応用について紹介する。

流体シミュレーションを使えば, 水, 煙, 火炎, 雲, 台風, 火山の噴火や爆発などの流体の動きを表現することができ, 最近では, ハリケーン, 津波, 土砂崩れ, 洪水などを使う映画も多い。特に, 流体は私達の日常生活に深くなじみのある自然現象で, 研究者間で最近集中的に研究されてきた結果, CG 流体シミュレーションは実用レベルになり映画の特撮現場で実用化されるようになった。

CG 流体シミュレーションのルーツは, CFD (数値流体力学, Computational Fluid Dynamics) とよばれる学術分野にある。CFD では, すでに 1960 年代から 3D のナビエ・ストークスの方程式を解いて流体の動きを視覚化する研究が進められてきた。その研究成果は, 気象学・海洋学・航空工学などの分野で応用されている。だが, これらの分野における流体シミュレーションの目的は, あくまで流体の特定の物理的特長を表すデータを視覚化することであり, 決して流体の見え方をリアルに描画しようとするものではなかった。CG 流体シミュレーションでは, まさにリアルな表現を達成する必要があった。そのため 1990 年代半ばから後半にかけて, CFD で培われてきた技術が, CG の分野へ導入されていった。理論の考案と実用化が, ほぼ同時に行われてきたといっても過言ではない。その理由は, 映画のビジュアル・エフェクツ (VFX) などの産業分野では, 水・煙・爆発・炎などを CG でリア

ルに描き出すことへの需要が非常に高かったことがある。CG での流体シミュレーション理論の基礎は 2002 年あたりまでに確立され, 現在はそれを受け継いだ成熟期にあたるといえる。近年は確からしい流体の挙動の実現に加えてさらに, アニメーターが意図するように流体の動きをより制御しやすくなるようにする技術も盛んに追求されている。

流体計算法を分類すると, 「格子法」や「粒子法」および両者を組み合わせた「FLIP 法」に分類できる。

流体の物質で分類すると「煙のような気体状」, 「水の流れるような液体」, 「ねばねばしたものの粘性体」(磁性体も), 「音や力覚など力に影響するもの」(気体や液体が媒介) など広分野である。

CG 分野には多くの学会誌や国際会議があるが, 中でも SIGGRAPH (1974 年発足), EUROGRAPHICS (1981 年発足) などのトップコンファレンスで発表された論文が歴史上多大に貢献している。よって, これらの学会での流体計算の論文を中心に紹介します。参考に, SIGGRAPH 論文に関しては, 学会の進展にとまない, Proc. of SIGGRAPH, Computer Graphics, Tug (Transaction of Graphics) と表記されるが, 同じ国際会議 (あるいはその学会誌名) である。なお紹介する手法による CG 画像を使用するのが好ましいが, 使用許諾の問題があり, 特に映画関連の映像の許諾は無理なので, 著者関連の論文の画像を主に掲載させて頂いた。

2 CG 分野における流体計算の変遷

CG 分野において, ナビエ・ストークスの解法を最初に試みたのは 1996 年に Nick Foster と Dimitris Metaxas である¹⁾。そして, 1999 年に Stable Fluids 法を Jos Stam が SIGGRAPH で発表した²⁾。彼は semi-Lagrangian advection technique や粘性の陰積分を取り入れた。これを, 2001 年

にFedkiwが発展させ³⁾, レベルセット法を使い水の表面の動きを計算した. 近年では人工知能を取り入れた流体計算や, 流体アニメーションの編集を効率よく行う方法も発表されている.

CGの流体シミュレーションで用いられる手法には, 流体を粒子表現する方法(粒子を使った表現である粒子法)と, 流体をボリューム表現する方法(格子法)の2つが代表的である. 格子法における流体シミュレーションでは, 流体の領域全体をボクセルとよばれる六面体に分割し, ナビエ・ストークス方程式を解いて各ボクセルの速度ベクトルを算出する. また粒子ベースの方法ではSPH法が著名で, 他に「MPS法」, 「DME法」, 「CML法」, 「レベルセット法」などがある.

2.1 Fosterの流体シミュレーション

CFDの分野では, すでに1960年代に3Dのナビエ・ストークス方程式を解いて流体の動きを視覚化するアルゴリズムが発表されていた. FosterらはこのようなアルゴリズムをCGという立場から見直して, CGに適したアルゴリズムを導いた. CG流体シミュレーションとCFDとの大きな違いは, 数値的精度よりもビジュアル的精度が重視されるという点にある. 何度もシミュレーションを繰り返して所望の見え方を作り出すためには, 数値的精度よりもむしろ高速なフィードバックが必要とされる. したがってCG流体シミュレーションでは, ナビエ・ストークス方程式を極力単純化し, 許容範囲内の数値的エラーは容認することで, できる限り高速にこの方程式を解くことが目標とされる. また流体の境界部分を美しく表現するといったような要素は, CFDにはなかったCG流体シミュレーションならではの重要な要求だといえる.

2.2 Stamの流体シミュレーション

映画分野に利用できる本格的な研究は, 1999年にJos Stamが発表した論文によってなされた²⁾. ナビエ・ストークス方程式を解くためには, 暫定的に与えられた初期値を時間軸に沿って, タイムステップを大きくとるほど解は速く求まることになり, シミュレーションは高速化する. しかし, 逆にタイムステップを大きくとり過ぎると, 解が求まらなくなってしまう. どのようなタイプの流体に対しても, 大きなタイムステップを用いながらも安定して解が求まるようにすることが実用化の鍵となる. Stamの論文では, ナビエ・ストークス方程式を解くプロセスを複数の段階に分け, そのなかで最も解が発散しやすいプロセスに対して粒子の概念を用いた解法(セミ・ラグランジアン法)を導入した. これは, 乱流のような極端に動きの変化が激しいケースを除いては, かなり有効

的なものである.

セミ・ラグランジアン法では, 粒子をこの速度ベクトル場に沿って動かして, その軌跡をバックトレースする. たとえば, あるタイムステップの粒子は, この粒子の軌跡をタイムステップ1つ分バックトレースした地点にあるボクセルにおいて, 1つ前のタイムステップで算出された速度ベクトルによって, 現在の地点に運ばれてきたことになる. すなわち, あるタイムステップのナビエ・ストークス方程式を解くプロセスにおいて, 1つ先のタイムステップの情報を用いることができる. このように1つ先のタイムステップの状態を予測しながら方程式を解くことができれば, 大きなタイムステップを用いても解が発散することなく, 流体計算をさせることができる. 図1はStamが国際会議において, 可搬の計算機を用いて聴衆の前で, 2Dではあるがインタラクティブにリアルタイムで動く流体計算を提示し, 大きな衝撃を与えた. そのプログラム(公開されてる)の実行例を図1に示す. またStamの論文の代表的計算例を図2に示す.

2.3 Fedkiwの流体シミュレーション

Ronald Fedkiwらは, FosterやStamのCG流体シミュレーション手法を踏まえつつ, 水・煙・炎などといった自然物の表現手法を研究し, 効率的に美しい流体の映像を作り出すことを可能にした³⁾. たとえば, 煙の動きの生成にセミ・ラグランジアン法をそのまま適用すると, 時間が経つにつれて煙の渦が消滅してしまうという不都合が起こる. セミ・ラグランジアン法は近似的な解法であるため, 数値的誤差を生みやすく, このような誤差が一定以上溜まると, 不都合が出てくる. Fedkiwらはこれを解決するために, 渦を消滅させない仮想的な力を外力として加えながらナビエ・ストークス方程式を解くという手法を提案した.

また, 流体と空気, あるいは異なった物理的特性をもった流体どうしの中の美しい境界面を作り出すことも, 流体の映像を作り出すための重要なポイントとなる. 水であれば水面, 炎であれば青色・オレンジ色・赤色といった異なる色の領域の境目が, この境界面にあたる. ナビエ・ストークス方程式はタイムステップごとに格子(ボクセル)単位で速度ベクトルを算出するため, 滑らかな境界面の動きを作り出すためには, タイムステップの幅も, 領域全体の格子への分割数も, かなり細かい設定にしなければならない. だが, このような細かい設定にすると方程式を解くための計算時間は著しく増大する. この問題を解決するために導入されたのが, レベルセット法である. この手法では, 境界面からの符号付の距離を値とする連続した関数を設定し, この関数を用いて境界面付近の流体の細かい動きを解析する. 連続した関数に

よって表される境界面の形状は滑らかで、なおかつレベル・ゼロの関数をアップデートする計算はナビエ・ストークス方程式を解く計算よりもはるかに計算負荷が軽い。そのため、より細かいタイムステップで実行することができる。その結果として、境界面の形状も、動きも滑らかにできるというのがこの手法の利点である。液体表面などを生成するためには、極めて有効な手法といえる。

2.4 Bridson らの FLIP 法

FLIP (Fluid-Implicit-Particle) 法そのものは、1980 年代の CFD において、主に密度が変化するようなダイナミクな流体の動きを算出する方法として活用されていた。Bridson らは、従来の FLIP 解法を導入して、粒子ベースの CG 流体シミュレーションの解法を確立した。この方法は、2005 年に “Animating Sand as a Fluid” という論文において発表された⁴⁾。この論文の目的は、流体シミュレーションを用いてリアルな砂の動きを作り出すところにあったが、実質的には FLIP の考え方を導入した粒子ベースの解法の利点をアピールしたものとなっていた。以後、この解法は CG 流体シミュレーションの研究分野に浸透した。

基本的に、計算精度を重視する CFD での FLIP は、密度が大きく変化するような激しい流体の動きの場合には、解が発散してしまうケースが多い。ナビエ・ストークス方程式を解くプロセスのなかでも、最も解が発散しやすいのが、移流とよばれる流体らしい動きを作り出す工程だ。そこで FLIP では、移流以外のプロセスは格子ベースで方程式を解き、その結果算出された格子の速度の変化量を、あらかじめ格子内に配置しておいた粒子に割り振る。そして、割り振られた速度で粒子を動かすことによって、丁度移流の処理を解いて算出されるような流体らしい動きを作り出せるようになった。

しかし、これらの方法は、基本的に流体シミュレーションの基盤となっているナビエ・ストークス方程式を解く処理と、粒子シミュレーションの処理とが別々のプロセスになっていたため、粒子を扱う処理が煩雑になりがちだった。これに対して FLIP では、ナビエ・ストークス方程式を解く処理が、格子と粒子の両者を用いて構築されているため、粒子を扱うための別処理を加えずとも、流体シミュレーションそのものを実行するだけで、粒子がもつ利点をより物理的に正確に生かすことができる。

これまで映画 VFX で用いられてきた流体シミュレーションの解法にはないものがあった。中でも、密度が変化するような流体にも物理的に正確に対応できた。通常 VFX が対象とする流体の表現(水・煙・霧など)では、流体の密度が変化しないと仮定してシミュレーションを実行し、その結果として十分にリアルな映像を作り出すこ

とができた。それゆえに、これまで使われてきた CG 流体シミュレーションの解法のほとんどは、密度が変化しない流体に限定して構築されていた。これに対して、FLIP はもともと密度が変化する流体を対象にしており、Bridson 氏の FLIP 法は、それを密度が変化しない流体にも対応できるように改良したものでした。流体シミュレーションによる表現のもう 1 つの代表例が、爆発現象である。爆発も、気体の密度が瞬時に著しく変化することによって引き起こされる。密度の変化する流体にも対応できる FLIP 法は、この爆発という現象に関しても、物理的に正確にシミュレートすることを可能にした。

2.5 微細液面の計算や AI 利用など最近の方法

水面を対象とした場合、液面のみでなくしぶきなど微細動きが重要である。これを解決する方法が提案された。水しぶきや乱流が発生している箇所では細かな粒子を多用されます。この現象に対応するため、安東らは、流体を四面体格子を用いてアダプティブに計算する手法を提案した⁵⁾。例えば、動きが緩やかな部分で、大きな粒子を使用し、結果として、制限された計算量で大規模な流体のアニメーションが可能になった(図 3 参照)。

液体シミュレーションで空気と水といった 2 層流体を計算するには、密度が大きく異なる空気と水の同時計算が必要ですが、従来手法では数値不安定性があり、難しい問題でした。安東らは、流れ関数を用いた新しい数学的アプローチにより、水と空気の 2 層流体を安定して計算できる手法を提案した⁶⁾。

近年はあらゆる研究に機械学習 (AI) の応用が試みられており、CG でも同様である。人工知能分野で Regression Forest というシステムに注目が集まっている。これを、粒子法による流体シミュレーションの回帰モデルで近似的に行い高速化する方法が、L. Ladický らにより提案された⁷⁾。入力には各粒子の位置と速度で、ナビエ・ストークス方程式を基に作られたモデルによって、各粒子の位置と速度から特徴量(圧力、表面張力、粘性)を生成し、これを Regression Forest に入力し各粒子の加速度の推定を行い、時間ステップ毎の数値積分をして、次ステップの粒子位置と速度を計算する方法である。

機械学習においては、デープラーニング技術の成功が話題となっている。流体においてもデープラーニング、中でも有用な方法の畳み込みニューラルネットワーク (CNN と略) を利用する方法が発表された⁸⁾。この方法は多数の流体画像を入力し、流体の特徴を学習させておき、低解像度の流体形状を入力すると高解像度の流体を出力するものである。事前の学習には時間をかける必要があるが、低解像度の流体画像を短時間で作成すれば、それから高解像度高速に得られるので映像作成に有効な

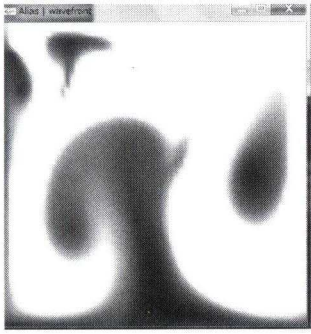


図1 リアルタイムの2D 流体シミュレーション

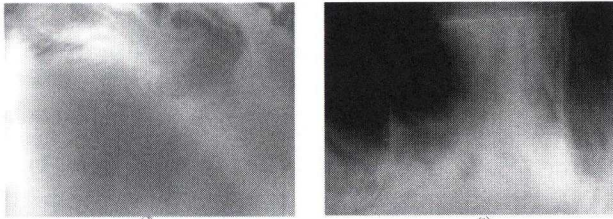


図2 Stable Fluids 法による気体状の流体

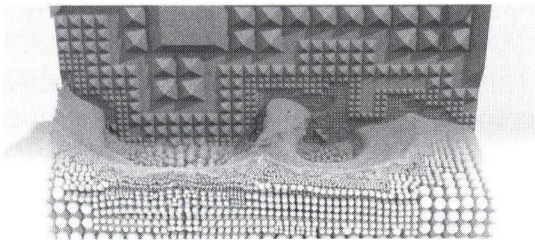


図3 適応的4面体格子分割の流体シミュレーション

方法である。

3. 著者の研究室での流体計算のCG応用

著者は1970年からほぼ半世紀CGの研究を行っている。照明効果、自然現象、形状処理、インタラクティブ、絵画風の非写実表現、3Dプリンター利用による制作物など多方面の研究を行っている。中でも煙、雲などの流体関連の論文は45以上発表しています⁹⁾。本稿では評価の高い学会に採択された代表的なものを紹介します。

3.1 雲の表現

従来CG分野では、雲は静止画で十分で形状のみの作成に着目されていた。雲の生成には、i) 手続的な方法(例えばフラクタルを利用)で生成、ii) 写真などの雲形状に基づき3次元の雲を生成、あるいはiii) 流体計算の結果として雲生成する方法などある。ただ、1990年代以後は雲の動きも重視されるようになりCFDが利用されるようになった。1990年代にはイメージベース・モデリングという概念が普及しはじめていたので、土橋らは1998年にはいくつかの衛星画像中の雲画像から3次元雲を再現し、雲のオプティカルフローから補間で動画を生成したが、観

測データによるもので流体計算まではしてなかった。2000年にはセルオートマトンを使用して雲のダイナミックスを解決する方法を発表した¹⁰⁾。セルには雲密度、湿度、風ベクトルが記憶され物理則にしたがって変移させた。すなわち空気中の動的な湿度分布も考慮した方法で、ある程度物理則にそったものである。なお散乱計算で雲の色や大気中の光跡を計算した。

物理則に従うように上昇する雲のシミュレーション法を発表した¹¹⁾。この方法では、上昇気流と湿度との関係を利用し、雲の生成過程をCFDを用いてシミュレートした(図5参照)。

空にある雲や煙は、雲の範囲は限られてるので局所的な解析が有効であり、山や飛行機などの障害物の周辺は計算精度を高めるようである。そこで解析用の格子を重ねる(障害物の周辺は高解像格子)ことによる計算の効率化を図る方法を提案した¹²⁾(図6参照;左図は格子)。

雲の表示の場合、所望の形状が映画などでは必要である。従来の方法で試行錯誤して目的の形状にするには、パラメータの設定が難しい上、何度も再計算するようである。指定した形状の雲に成長するように各種パラメータをフィードバック制御で調整し、物理則を極力保ちながら、雲が変形する手法を提案した¹³⁾(図7参照、ピンクで指定した形状の雲に成長させる)。

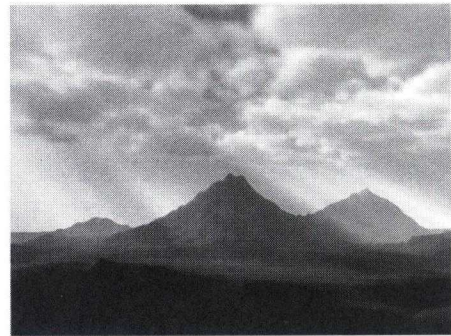


図4 セルオートマトンによる雲の動き計算

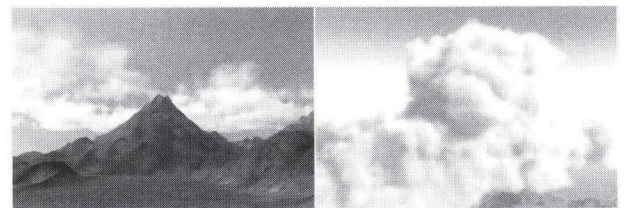


図5 上昇気流とCFDを用いた雲の生成

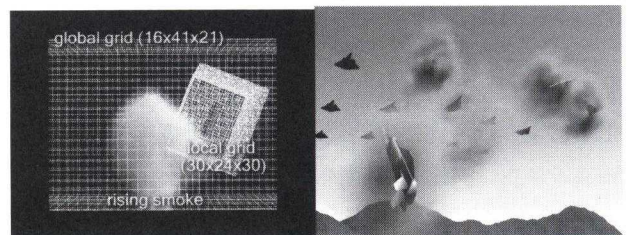


図6 多重格子法による雲や煙のアニメーション



図7 フィードバック制御による指定形状の雲生成

3.2 液体の流体シミュレーション

液体の場合、水の流れ、海面（表面）の変化、水滴の流れなどがある。

物体表面での流れの研究はある程度なされてきたが、氷の表面での流れはされていない。岩崎らは、氷の表面の水の流れや溶解・凝結について、SPH法に基づいた方法を提案した¹⁴⁾。この方法では、氷と水の温度の伝搬、水と氷の位相変異、水滴の表面からの分離などを計算し、ハードウェアGPUによるリアルタイムを実現した(図8参照)。

水面を表現するにはSPH法が便利であるが、このSPHのカーネルのサイズを複数用意することで液体（と空気や物体）と境界条件を満足して効率いい方法を、高橋らが提案した¹⁵⁾（図9参照、左図は色で異なるサイズのSPHを示す）。境界条件としてはDirichlet境界およびNeumann境界に対応することができる。

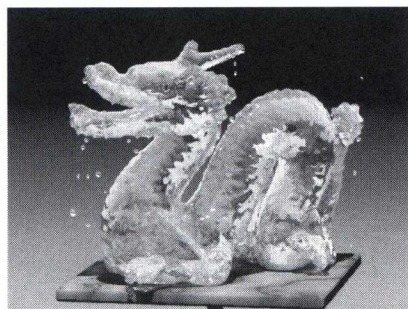


図8 SPH法に基づく氷表面の溶解・凝結のアニメーション

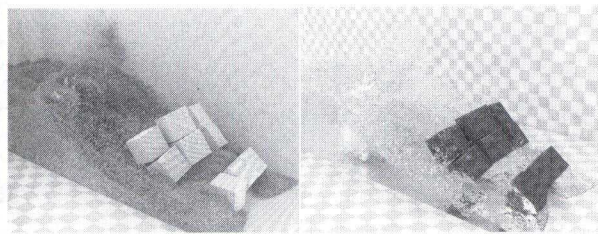


図9 多重のSPHサイズで境界条件を満たす流体

3.3 気体・液体以外の流体のシミュレーション

雲、煙のような気体状の流体、水のような液体のみでなく、チョコレートのような粘性体、さらに磁性流体、プラズマ流体もある。まず後者のものから紹介する。多様な流体のCG応用を示すため、磁場の影響を受ける流体である電磁流体を述べる。電磁流体には自由境界面が定義されないプラズマと、境界面をもつ磁性流体に分類される。プラズマは電荷を帯びてる流体で、自然界では

太陽プロミネンスで、地球上ではオーロラ現象である。

太陽のプロミネンスをプラズマの効果から計算することができる。電流と磁場の相互作用としてプラズマに外力を与える。この現象は電磁流体の基礎方程式MHD方程式で記述できる。磁場の時間発展を求めるのが主であり、磁力線をナビエ・ストークス方程式に基づいて計算(格子法を利用)した速度場で更新する方法を用いた¹⁶⁾。図10に太陽のプロミネンスの例を示す。

磁性流体は磁場との相互作用によりスパイクが生じる特徴を利用したアート作品に利用されている。このアートのシミュレーションを試みた。外部からの磁場によりスパイクを生ずる現象をシミュレーションする方法を開発した¹⁷⁾。磁性流体表面はSPH法で表現した。磁場の変化を計算し、磁場により粒子が磁化される相互作用を計算し、SPH法による表面形状の変形シミュレーションを行った(図11参照)。



図10 プラズマ流体(プロミネンス)のシミュレーション

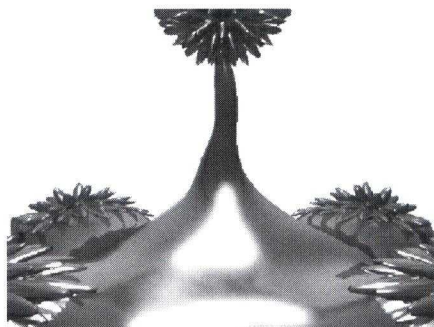


図11 磁性流体のシミュレーションによるアート

粘性流体の計算を以下に紹介する。粘性流体の変形に関して、従来から変形時の体積保存が問題とされていた。粒子法に基づき大きな変形でも体積保存できる方法を提案した¹⁸⁾。この方法ではSPH法とPBD法(Position-based Dynamics)を組み合すことで実現した。この方法では流体同士や流体と物体が粘着する効果も表現できる(図12参照)。

SPH法に基づき粘性流体を高精度でシミュレーションできる¹⁹⁾。従来法では高粘性の場合発散するが、陰解法により大きいタイムステップでも安定に解ける方法であり、流体の落下の際のバックリング、コイリングなどの現象も再現できる手法である(図13参照)。

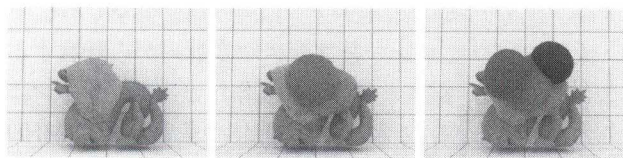


図12 体積保存の流体のシミュレーション

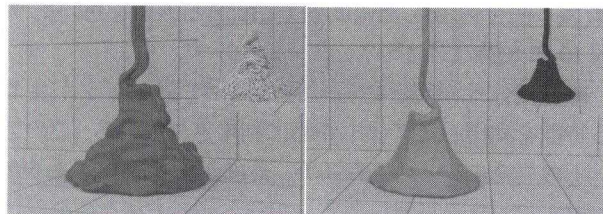


図13 粘性流体の落下シミュレーション (バックリングとコイリング)

3.4 音や力覚の流体シミュレーション

映画やゲームでは映像のみでなく音も無視できない。CGや音響シミュレーション技術を用いたリアルな映像と音の合成により、臨場感のある仮想空間の提示が可能となりつつある。流体による乱流(渦)の現象は、圧力変化により音を生成したり、力を生じる。こうした効果のCGの応用を紹介する。

物体を高速に動かすとその後方にカルマン渦が生じ、それは風切音となる。流体計算により乱流で発生する音(風切音)のシミュレーションできる²⁰⁾。この風切音は物体が高速で移動する場合や窓などの隙間に生じる渦により生じる。また、渦による生成音は計算できるので、移動物体や隙間による音声は生成できる。この場合物体の形状と移動速度で渦の状態は異なるが、予め計算して、表として記憶させておけば、条件に応じてリアルタイムに再現できるから、ゲームなどのインタラクティブなものにも適用できる。図14は剣士のもつ棒状物体の毛状や速度に応じて、リアルタイムにサウンドを生成する例である。

仮想空間への没入感をより向上させるためには、仮想空間との能動的かつ自然なインタラクションを実現する方法が必要となる。そのような手段の一つとして、従来、力覚の提示に関する研究が進められている。多くの力覚提示手法では、仮想空間内における仮想物体にかかる力を計算し、これを力覚提示装置により提示され、これをユーザが感じ取ることで、仮想空間とのインタラクションが実現される。剛体や弾性物体以外にも重要な要素の一つとして、水などの流体が考えられる。流体、特に、水と剛体とのインタラクションにおける力覚提示を行う手法の開発を目指す。物体が水中を移動する場合、浮力と抵抗力が生じる。この抵抗力は、水と物体表面との摩擦による摩擦抵抗と物体表面にかかる圧力による圧力抵抗に分けられる。本論文では、実験式を利用して、近似的

に抵抗力を計算する。これにより、リアルタイムに流体抵抗の提示を行うことが可能となる。移動物体の後方の乱流は音の発生のみでなく力も発生する。とくに液体の場合は効果が大きい。そこで、カヌーのオールで水面をこぐVRシステムを作成した²¹⁾(図15参照)。水をかき混ぜると流体による反発力を生成し、その力が手に伝わる(図15参照)。なお力覚提示装置としては、東京工大で開発されたSPIDARといわれる力覚提示装置を利用し、オールの動きと反発力の力覚をえた。



図14 流体計算に基づき風切音のリアルタイム生成

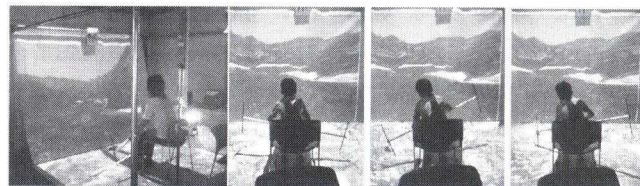


図15 力学提示装置による物体と流体の相互作用のVRシステム

3.5 流体アニメーションの編集

流体アニメーションを効率よく作成/編集する。所望の形状・動きのアニメを作成するにはパラメータの選定に時間がかかり、試行錯誤が必要であり、かつ目的の形状になるとは限らない。ここでは、格子法に基づく方法を2例紹介する。既存の流体アニメを編集することにより、計算時間を短縮できる。単に格子形状を変形することで流れる方向を変形すると物理則が保てない。佐藤らはナビエ・ストークスの式をベクトルポテンシャルに変換して変形を行うことで、非圧縮性を保って変形できる方法を提案した²²⁾。この方法では、低解像度の流体シミュレーションを行い所望の形状を得て、それに高解像度成分を加えてリアルな流体アニメーションを合成する方法とした。この場合どのように見えるかが予測しにくい。そこで、解析領域は小さくていいので高解像度のシミュレーションを行い、見え方を確認した後に、全体形状の流体にそのスタイルを転写するという方法を開発した。この方法だと、流体の外形と詳細(高周波成分をもつ乱流パターン)ともに所望のアニメーションが実現できる。すなわち高解像度の流れ(乱流)を例示として、それを全体の流体アニメーションに適用できる。なおこの際物理

則に従った流体運動となる。この方法だと、障害物を移動させるアニメーションについても安易に実現できる(図16参照、概略形状のターゲットに高解像度のソース画像を転写)。

佐藤らは、流体の重要な物理的性質を保持したまま、複数の流れのカット&ペースト編集を実現するための新しい数学的フレームワークを提案した²³⁾。このシステムでは、ユーザは一つの流れから所望の領域をクロップ(コピー)し、他の流れにペーストする。そしてそれらはクロップした領域の境界において流れを補間することでシームレスに統合される。2つの項を持つエネルギー関数の最小化問題としてこの補間を定式化する。2つの項は、速度場の curl の差分と速度場の divergence である。これらの項は流体の動きを記述する非圧縮性のナビエ・ストークス方程式を満たすように設計する。図17の上段に示すように、入力の流れの一部を同じ流れの中の別の領域にコピーした。下段は上段の操作に対応する結果を示す。

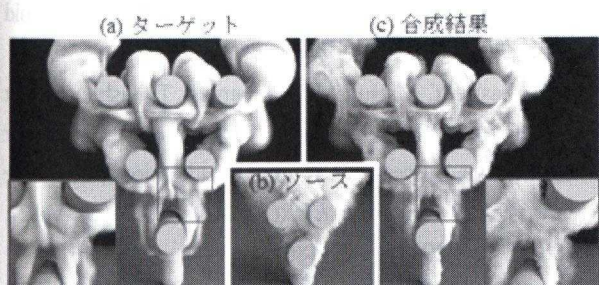


図16 例示ベースによる流体アニメーションの効率化(複数の円柱とインタラクションする煙の例)

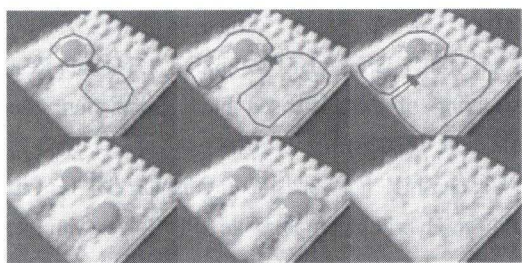


図17 流れの補間を用いた流体アニメーションの編集

4 映画産業への応用

Fedkiw の功績は前述のような理論面だけにとどまらず、研究室で考案された新たな手法の数々を自らの手で映画プロジェクトにおける実用化に結び付けていったところにもある。Foster 氏は前述の論文¹⁹⁾を発表した後に PDI/DreamWorks 社に参画し、映画『アンツ』(1998)の洪水シーンで、映画史上初めて CG 流体シミュレーションの手法を導入した。また、映画『シュレック』(2001)

に登場する泥や炎の動きの作成にも、彼の手法が反映された。

世界で最初に海面の流体シミュレーションを導入した映画は『パーフェクト・ストーム』(2000)で、その偉業は VFX を担当した Industrial Light & Magic 社に海洋学の分野の研究者が加わることによって成し遂げられた。彼はその後も ILM 社が手がけた映画プロジェクトに流体シミュレーションや変形シミュレーションといった物理的に正確なシミュレーション技術を導入していった。

これまでの映画では、爆発を流体シミュレーションで表現しようとは誰も考えなかった。だが、『天使と悪魔』(2009)のクライマックスシーンには、大爆発が登場した。この“爆発”表現に従来のパーティクルシステムなどを用いるのではなく、流体シミュレーションが用いられた。この爆発では光の表現も非常に重要で、爆発が放射した光が、周りの環境を照らし出す様子もリアルに描き出す必要があった。FLIP 法はパーティクルを出力するので、これらのパーティクルを光源に変換し、その光源によってシーンのライティングが行われた。このように、密度が変化する流体にも、密度が変化しない流体にも対応できる手法は、映画 VFX における CG 流体シミュレーションを用いた表現の幅を大きく広げることに繋がっていった。

炎の表現の試みは、それまでの映画 VFX でも行われてきたが、物理的に正確な表現という点では、不完全なものであった。炎らしい表情を物理的に正確に作り出すためには、発火のプロセスをシミュレートする必要がある。しかしこの発火という現象は、炎の温度が一定値以上になり、密度が急激に変化することによって引き起こされる。したがって、これまでの CG 流体シミュレーションを用いて発火を表現することは不可能だったため、燃えるという現象は 3D ノイズ関数などを用いて近似されていた。『ヘルボーイ/ゴールデン・アーミー』では、ヒロインの身体を包む炎をフル CG で作成する必要があった。FLIP 法は発火のプロセスまでシミュレートすることを可能にし、リアリティをもつ炎が作り出された。

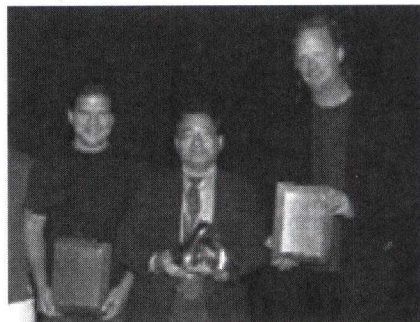


図18 ACM SIGGRAPH2005において流体研究者が名誉ある賞を受賞。左から Fedekiew, 著者, Stam 氏

5 おわりに

本稿では従来からの流体力学の計算法がCG分野に導入され、雲、煙、水などのリアルな表現技術が急速に進展したことを紹介した。流体力学は単に映像表現のみでなく、アート作品への応用、音の生成、力覚や視覚を伴うVRの応用も示した。この20年は主要なCG国際会議では流体のセッションがあるのが一般化してきているほど、流体研究はCG分野で不可欠なものと言えます。

Fosterは、映画史上初めてCG流体シミュレーションの手法を導入した功績により、1999年にアカデミー科学技術賞を受賞した。またStam(2008)やFedkiw(2015)も同様にアカデミー科学技術賞を受賞しました。また、学会ACM SIGGRAPHにおいて、2015年にRon FedkiwはSignificant New Researcher Awardを、Jos StamはComputer Graphics Achievement awardを、さらに著者は自然物の表示法などの生涯の貢献でSteven A. Coons awardを受賞しました(アジアでは唯一)(図18参照)。これらの受賞のようにCG分野で流体関係の研究者は多大に貢献し、評価されたといえます。さらに著者は日本のCGのパイオニアとして2017年秋に紫綬褒章を受章したことで、CG研究が科学技術分野で重要な研究の一つと日本でも評価されたことに感謝します。

謝辞：本稿を書く際にアドバイスを頂いた長年の共同研究者の北海道大学の土橋宜典准教授 および共同研究者の和歌山大学岩崎慶准教授、東洋大学石川知一准教授、CGリサーチの佐藤周平氏、高橋哲也氏に感謝します。2003年に東京大学退職後も研究の場を与えて頂いている広島修道大学、および民間の研究所ドワンゴCGリサーチへの支援(UEI社の清水亮氏、ドワンゴの川上量生氏)に感謝します。

引用文献

- 1) N. Foster, R. Fedkiw: Practical animation of liquids. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001* (2001) 23-30.
- 2) J. Stam. : Stable Fluids, *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1999* (1999) 121-128.
- 3) R. Fedkiw, J. Stam, H. Jensen.: Visual simulation of smoke. *In Proc. SIGGRAPH* (2001) 15-22.
- 4) Y. Zhu, R. Bridson: Animating Sand as a Fluid, *ACM Trans. Graph.* Volume 24, Issue 3 (2005) 965-972.
- 5) R. Ando, N. Thuerey, C. Wojtan: A Stream Function Solver for Liquid Simulations, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, Volume 34 Issue 4, Article No. 53 (2015).
- 6) R. Ando, N. Thuerey, C. Wojtan: Highly Adaptive Liquid Simulations on Tetrahedral Meshes, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, Volume 32, Issue 4, Article No. 103 (2013).
- 7) L. Ladický, S. Jeong, B. Solenthaler, M. Pollefeys, M. Gross: Data-driven fluid simulations using regression forests, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Volume 34 Issue 6, Article No. 199 (2015).
- 8) M. Chu, N. Thuerey: Data-Driven Synthesis of Smoke Flows with CNN-based Feature Descriptor, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2017)*, Vol. 36 (4), Article No. 69 (2017).
- 9) <http://nishitalab.org/user/nis/ourworks/fluid/FluidDynamics.html>
- 10) Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita: A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds, *Proc. of SIGGRAPH2000* (2000) 19-28.
- 11) R. Miyazaki, S. Yoshida, Y. Dobashi, T. Nishita.: A Method for Modeling Clouds based on Atmospheric Fluid Dynamics, *Pacific Graphics 2001*, (2001) 363-372.
- 12) Y. Dobashi, Y. Matsuda, T. Yamamoto, T. Nishita: A Fast Simulation Method Using Overlapping Grids for Interactions between Smoke and Rigid Objects, *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS 2008)*, Vol.27, ISSUE 2, (2008) 477-486.
- 13) Y. Dobashi, K. Kusumoto, T. Nishita, T. Yamamoto: Feedback Control of Cumuliform Cloud Formation based on Computational Fluid Dynamics, *ACM Transaction on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2008)*, Vol. 27, No. 3, Article 94 (2008).
- 14) K. Iwasaki, Y. Dobashi, F. Yoshimoto, T. Nishita: Real-time Rendering of Particle-based Fluid Simulation, *Proc. of CGI2006*, (2006) 102-114.
- 15) T. Takahashi, Y. Dobashi, T. Nishita, M. C. Lin: An Efficient Hybrid Incompressible SPH Solver with Interface Handling for Boundary Conditions, *Computer Graphics Forum (Eurographics 2015)*, Volume 37, Issue 1 (2015)
- 16) T. Ishikawa, T. Nishita: Visual Simulation of Solar Photosphere Based on Magneto hydrodynamics, *Proc. of IEVC2010, Vol.40, No.1* (2010) 141-150.
- 17) T. Ishikawa, Y. Yue, K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita: Visual Simulation of Magnetic Fluid Taking into Account Dynamic Deformation in Spikes, *IEVC2012*, (2012).
- 18) T. Takahashi, T. Nishita, I. Fujishiro: Volume Preserving Viscoelastic Fluids with Large Deformations Using Position-based Velocity Corrections, *The Visual Computer*,

- Volume 32, Issue 1 (2014) 57-66.
- 19) T. Takahashi, Y. Dobashi, I. Fujishiro, T. Nishita, M., C. Lin: Implicit Formulation for SPH-based Viscous Fluids, *Computer Graphics Forum*, Volume 34, Number 2, (2015).
 - 20) Y. Dobashi, T. Yamamoto, T. Nishita: Real-time Rendering of Aerodynamic Sound using Sound Textures based on Computational Fluid Dynamics, *ACM Transactions on Graphics*(Proc. SIGGRAPH2003), Vol. 23, No. 3 (2003) 732-740.
 - 21) Y. Dobashi, S. Hasegawa, M. Kato, M. Sato, T. Yamamoto, T. Nishita: A Precomputed Approach for Real-time Haptic Interaction with Fluids, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 27, No. 3 (2007) 90-92.
 - 22) S. Sato, Y. Dobashi, T. Nishita: Example-based Turbulence Style Transfer, *ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH 2018)*, Vol. 37 (4), Article No. 84 (2018).
 - 23) S. Sato, Y. Dobashi, T. Nishita: Editing Fluid Animation using Flow Interpolation, *ACM Transactions on Graphics* (to appear).