



## 流体シミュレーションの新しい扉 ～映画「ポセイドン」のVFX～

倉地 紀子

映画VFXにおける水の表現はこの数年の間に大きく進歩した。流体シミュレーションを導入することも、今では当たり前になったといえる。だが、現在公開中の映画「ポセイドン」では、これまでのCG流体シミュレーションの枠を大きく越える高度なシミュレーション技術を導入し、実写を越える神秘的なリアリズムを表現することに成功した。今回はこの技術の詳細を、VFXを担当したILMのスーパーバイザーとのインタビューを交えて紹介する。

映画「ポセイドン」は、70年代の名作「ポセイドン・アドベンチャー」のリメイク版とされている。「ポセイドン・アドベンチャー」は「ローグ・ウェーブ(異常波浪)」という現象を題材にしたものだったが、ストーリーそのものは転覆した豪華客船からの脱出に焦点が当てられていた。だが、それから約30年を経て制作された「ポセイドン」では、この魔物のような波も一人のヒーローとして重要な役割を果たしている。

「ポセイドン・アドベンチャー」のリメイク版とされているが、そのストーリーや映像には、海の表現と得意とするウォルフガング・ペーターゼン監督ならではの工夫がこらされている



この数年間に、VFXにおける流体シミュレーション技術は著しく進歩し、大波などのような大きな水の塊の動きを流体シミュレーションで作りに出すことは当たり前になってきた。しかしながら、「ポセイドン」で最も重要視されたのは、大きな波の形を作り出すというよりは、船を襲った波が大きく飛び散る様子や、デッキに流れ込んだ水が周りの物体を次々になぎ倒していく様子などを、いかに真に迫った情景として描き出すかということだった。そのためには、水と物体とが干渉する様子を非常に正確にシミュレートする必要がある。だが、これまでVFXに導入されてきた流体シミュレーションだけでは、このような表現は不可能だった。そこで、ILMはパーティクル・レベルセット(PLS)という手法を導入した(注1)。

流体シミュレーションでは、水の塊を小さな立方体(ボクセル)に分割し、ボクセルごとに運動方程式を記述する。そして、これらの連立方程式を解いて、各

ボクセルの速度を算出する。PLSのパーティクルは、水面付近にあるボクセル内に配置する。水面より下の領域(正の領域)にあるパーティクルは正のパーティクル、水面より上の領域(負の領域)にあるパーティクルは負のパーティクルとする。その一方で、PLSでは、水面をレベルセット・ファンクションという関数によって定義する。レベルセット・ファンクションとは、位置を変数とする関数で、その値は、水面上ではゼロ、水面より下では正、水面より上では負となる。

パーティクルの速度は、このパーティクルを含むボクセルの速度をもとに計算されるが、ボクセルの動きと全く同じではない。このため、最初のうちはほとんどのパーティクルが水の塊に接して動いているが、時間が経つにつれて一部のパーティクルは水の塊を離れて空中や水中へと進んでいく。

一方、レベルセット・ファンクションの各点の値も、その点を含むボクセルの速度によって決定される。つまり、流体の運動方程式は大きな時間幅で解き、その各時間幅をさらに細かく分割して、大きな時間幅で算出されたボクセルの速度を用いて細かい時間幅でレベルセット・ファンクションをアップデートすることになる。

上記のようなレベルセット・ファンク

映画のストーリーでは、父と年頃の娘、母と幼い息子といった、親子の関係もクローズアップされている





船を飲み込むローブ・ウェーブ。このシーンでは、大波の形はアーティストの指示で作られ、波と船とのインタラクション(しぶきを挙げている部分)がPLSの手法を用いて作成された © 2006 Warner Bros. Entertainment Inc.



CGによって表現されたローブ・ウェーブ。ILMは映画「パーフェクト・ストーム」でも大波を表現したが、このときは2D流体シミュレーションが用いられた。今回は3D流体シミュレーションが用いられている。ILMが初めて3D流体シミュレーションを映画で用いたのは、「ターミネーター3」だとされている



船のレンダリングにおいても、ILMでは初めてレイを用いたより正確なグローバル・イルミネーションの計算が行われた。ただし計算負荷を軽くするため、1次レイの計算は正確に行うが、2次レイの計算は簡略化した。簡略化の方法としては、ラジオシティ法の考え方を導入して、あらかじめどのパッチ同士が影響を及ぼし合うかを調べておき、あるパッチ上の点から2次レイを飛ばす場合には、そのパッチに影響を及ぼすパッチの方向に向かってだけ2次レイを飛ばす。これによって2次レイの数を制限して、計算を効率化できる

シヨンのアップデートは、細かい時間幅で流体の運動方程式を解いてその度にレベルセット・ファンクションをアップデートするよりも、明らかに効率は良いのだが、そのぶん精度には欠ける。そこで、パーティクルのうちで、水の塊から一定距離内にあるパーティクルを用いて、レベルセット・ファンクションを補正する。

補正方法は、符号が逆転する領域に突入したパーティクル(水面上に突入した負のパーティクルや水面下に突入した負

のパーティクル)を用いて行う。具体的には、これらのパーティクルの球の表面の曲率が、レベルセット・ファンクションが表す水面の曲率より大きくなっている場合には、レベルセット・ファンクションが表す水面をパーティクルの球の表面で置き換える。

水の塊から一定以上離れたパーティクルは、水面の補正には用いずに、空中のしぶきや水中の泡を作り出すために用いられる。上記のように補正された水面とこれらのパーティクルとを結びつけることによ

て、水面が少し持ち上がってそこから水の粒子が飛び散っていく様子や、飛び散った水の粒子が再び水面と融合して1つの流れになっていく様子、水中に空気が入り込んで泡が発生する様子なども正確にシミュレートできるようになった。

ただし、上記の方法で水面を補正する場合、パーティクルが非常に密に配置されていないと滑らかな水面を作り出すことができない。1つのボクセル内のパーティクルの動きは、すべてそのボクセルの速度をベースに算出されるため、比較的似通っている。したがって、効果的に補正を行うためには、ボクセル内のパーティクルの密度を上げるよりも、ボクセルの密度を上げる必要がある。ところが、ボクセルへの分割を細かくすれば方程式の数も増え、シミュレーションにかかる時間は著しく増大する。そこで、スタンフォード大学は、水の塊全体を幾つかの領域に分け、各領域に1台のプロセッサを割り当て、複数のプロセッサで並列に



「ローブ・ウェーブ(異常波浪)」は地震や天候などによって引き起こされるものではなく、海洋のエネルギーが時間的空間的に局所的に集中することによって、通常の3倍以上の大波となって現れる現象を指す。そのメカニズムは正確には解明されておらず、現在でも予測不可能とされている。映画のシーンでは自殺を試みようとした初老の紳士が突然これを発見する

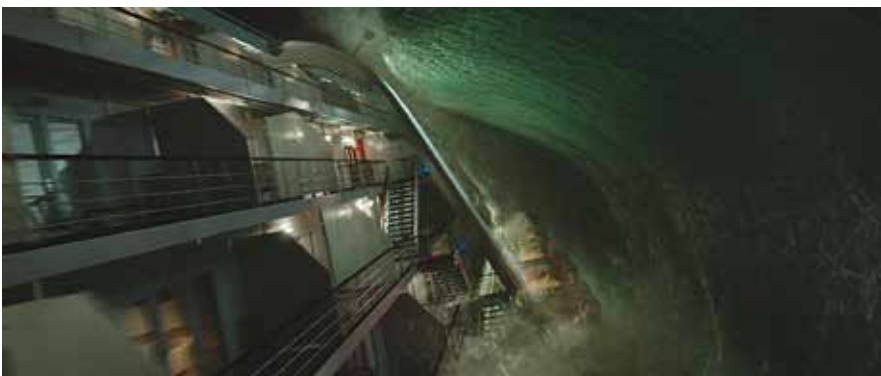
計算する方法を提案した。その結果、1フレームに2日から3日かかっていたシミュレーションの計算が、数時間で終わるまでに短縮されたという。

「ポセイドン」では、水と物体とのインタラクションを正確に表現する上で、レ

ンダリングにおいても、新しいアプローチが取り入れられた。PLS を用いた表現では、同じ種類のパーティクルが、水面の補正・水面上のしびき・水面下の泡などの違った目的で用いられる。これらをよくうまく差別化するためには、それぞれの

パーティクルに適切な質感の特徴(アトリビュート)を与える必要がある。このため、たとえば水面下のパーティクルに関しては、ポリリニアメトリックな計算に適したアトリビュートが、水面上のパーティクルに関しては内部散乱(マルチ・スキャタリング)の計算に適したアトリビュートが与えられた。水面に関しては、レベルセット・ファンクションがゼロとなる点を抽出し、これらをパッチに変化して、レイ・トレーシングによってレンダリングを行った。

PLS を用いた船と波とのインタラクションがもっとも効果的に表されているシーン。実写を越えるリアルなしびきの表現は圧巻だ。また、今回用いられた PLS では、水面の下だけでなく水面上にもパーティクルを設置することによって、水面下に空気が入り込んで泡が発生する様子も、物理的に正確にシミュレートされている



マルチ・スキャタリングの計算に関しては、ILM が皮膚の質感を作り出すために考案した質感モデルが導入された。パーティクルの中心を通る円の上に光の入射点をサンプリングし、それぞれの入射点の上下に仮想的な負の点光源と正の点光源を配置する。各点光源が出射点(球の中心)に作り出す光の合計が、そのパーティクルがもつマルチ・スキャタリングのアトリビュートとなる。映画に登場する水の表現において、マルチ・スキャタリングまで考慮したレンダリングが行われたのも、今回が初めてだった。

レンダリングに関していえば、船の表現に関しても新たなアプローチがみられる。「ポセイドン」では、およそ水と船とが同時に登場するシーンでは、俳優以外の全てがCGで作成されている。とりわけオープニングの2分では、水中から海面に出たカメラが、晴れた空の下で穏やかな海に浮ぶ船の全貌や船の甲板の情景を克明に描き出す。水に引けをとらない写実性で船を描くことも重要なポイントとなった。そこで、船の表現においては、間接光の影響をより正確に考慮したレンダリングが行われた。これまでILMでは、ほとんどの場合、アンビエント・オクルー



Mohen Leo(Associated VFX supervisor):「マトリックス」シリーズで炎のエフェクトを担当。その業績を認められてILMに移る。「ポセイドン」では流体シミュレーションに直結したVFXシーンのスーパーバイジングを担当。将来的な目標は、より物理的に正確な炎のシミュレーションを映画VFXにおいて達成することだという



しぶきのレンダリングでは、しぶきを構成する粒子の内部で散乱する光の効果も正確に計算された(マルチ・スキャタリング)。これによって、白いしぶきの淵のあたりで、光がグローする様子もリアルに表現することができるようになった。波の表面はレイ・トレーシングによって、波の青い部分はボリューム・レンダリングによってレンダリングされた

ジョン・マップという方法を用いて間接光の影響を大雑把に近似していたが、今回はレイを用いたグローバル・イルミネーション(GI)の計算を行っている。ただし、巨大な船を完全なGIでレンダリングしようとする、その計算負荷は非常に重くなる。そこで、ラジオシティ法のコンセプトを導入して2次レイを飛ばす方向を制限する方法がとられた。

「ポセイドン」のプロジェクトは、VFXにおける水の表現の自由度を著しく向上させたという意味で、CG技術の観点からしても大きな意味を持っていたが、ILMではさらにこの方法を改善するための試行錯誤が続けられているという。たとえば、水と物体との干渉において、今回は物体が水に及ぼす影響は正確に計算されていたが、水が物体に及ぼす影響はそれほど考慮されていなかった。そこで現在は、剛体シミュレーションやクロス・シミュレーションと流体シミュレーションとを統合して、水と物体とが相互に影響を及ぼし合う様子を正確にシミュレートすることが考えられている。また、今回のPLSを導入した流体シミュレーションは、水と物体との干渉を表現するには向いているが、逆に大きな海洋などの表現には向いていない。このため2D流体シミュレーションと3D流体シミュレーションとをうまく融合させて、海洋のような広域にわたる平面的な水の領域も、波のような大きな水の塊も、水と物体との干渉も、全てを1つのパイプライ

ンで計算できるような方法が考案されつつあるそうだ(注2)。

流体シミュレーションとしては、水の表現に続いて最後の砦となっているのが、炎のシミュレーションだ。炎の場合には、燃料が酸素と結合して青い炎となり、やがて温度の上昇によって発火し赤い炎となるというように、化学反応によってその見え方の変化が作り出される。化学反応をどのようにして直感的にわかりやすいシンプルな数式によって近似するかが大きな課題となっているようだ。ILMでも、「SW3」や「ハリーポッター4」では、炎の表現において新しいチャレンジが行われている。「ポセイドン」のローグ・ウェーブに代わる新たな映画のヒーローが誕生する日も、それほど遠い未来の話

ではなさそうだ。

(注1)PLSの考え方は映画「シュレック」における流体シミュレーションを担当したニック・フォスターによって2001年に考案されたが、この映画では用いられなかった。その後、この手法はスタンフォード大学から2002年に発表された論文によって、水面上のしぶきだけでなく水面下の泡などもシミュレートすることが可能となり、今回ILMはこの手法を導入して「ポセイドン」における水と物体との干渉を表現した。  
 "Practical Animation of Liquids" (Nick Foster\*, Ronald Fedkiw, Proceedings of Siggraph2001) "Animation and Rendering of Complex Water Surfaces" (Douglas Enright, Stephen Marschner, Ronald Fedkiw, Proceedings of Siggraph2002)

(注2) この手法の基本的な考え方に関してはSIGGRAPH2006の論文セッションでその詳細が発表される。  
 "Efficient Simulation of Large Bodies of Water by Coupling Two and Three Dimensional Techniques" (Geoffrey Irving, Eran Guendelman, Frank Losasso, Ronald Fedkiw, Proceedings of Siggraph2006)

Noriko Kurachi

2006年のSIGGRAPHでは、2D流体シミュレーションの考え方を3D流体シミュレーションと融合させて、海洋の大きな動きから海面のディテールまでを1つのパイプラインで作り出す手法が発表された。画像はこの手法を用いて作成した画像。この画像だけではよくわからないが、海底の地形のジオメトリの影響まで反映できる点が大きな特徴となっている(画像提供: Stanford University)

