

# パーティクルベースによるクローズアウトサイズの波のシミュレーション

## Particle-based simulation of close-out size waves

学生氏名<sup>1)</sup>：安藤怜央

指導教員 教員氏名<sup>1)</sup>：菊池司

1) 所属先：東京工科大学 メディア学部 メディア学科 菊池研究室

キーワード：CG、波、流体シミュレーション、粒子法

### 1. 3DCGと流体シミュレーション

近年、3次元コンピュータグラフィックス(以下、3DCG)は映画、ゲーム、医療関係など多くの分野で利用されている。1990年代のコンピュータの低価格化及び高性能化、従来は大企業や研究所でしか得ることのできなかった高精細で高品質な3DCGが、個人でも制作可能になった。

物理シミュレーションの一つである流体シミュレーションは、流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式の解法を導入することによって水、煙、霧などの流体の挙動を視覚化することを目的としたものである。ナビエ・ストークス方程式は次式で与えられる。

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g \quad (2)$$

ここで $v$ 、 $\nu$ 、 $\rho$ 、 $p$ 、 $g$ はそれぞれ流体速度、動粘性係数、流体の密度、圧力、外力である。式(1)は非圧縮性流体の質量保存を、式(2)は運動量保存を表している。式(2)の左辺は時間項、移流項、右辺は圧力項、粘性拡散項、外力項となっている。ナビエ・ストークス方程式を導入した手法としては、主に格子法、粒子法、その両者を組み合わせたFLIPがある。

### 2. 格子法、粒子法とFLIP

有限差分法、有限要素法、有限体積法などがある格子法は、物理量の計算のためにメッシュと呼ばれる計算格子を用い、情報はメッシュに持たせている。流体が流動する可能性のある領域にあらかじめメッシュを設定しておく必要がある。設定したメッシュ外の領域は計算することはできない。メッシュの大きさは変えられるため、注目したい解析領域内のみメッシュを細かくすることで、計算量を削減できるため、のちに説明する粒子法より計算は早くなる。SPH法、MPS法、DEM法などがある粒子法は、メッシュを用いることなく流体そのものを粒子の集まりで表し、情報は粒子が持っている。計算点はこの粒子にあり、各粒子の動きを追跡する。水しぶきのような細部の挙動や大変形にも対応できるが、粒子の大きさは解析領域内で一定にしなければならないため、計算精度を上げた場合、格子法と比べ計算効率が極めて悪くなる。FLIPは上記の格子法と粒子法を組み合わせたものである。ナビエ・ストークス方程式のうち最も解が発散しやすいのが移流項である。そのためFLIPは移流以外の工程は格子法で方程式を解き、その結果算出されたメッシュの速度の変化量を、あらかじめグリッド内に仕込んで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移流の工程を解いて算出されるような流体らしい動きを作り出す。つまり、複雑になりやすい移

流の工程を解くという計算処理を、粒子を動かす処理に置き換えるということである。

### 3. 関連研究

CGにおける流体シミュレーションは、196年代から進められてきた研究の CFD(数値流体力学: Computational Fluid Dynamics)という学術分野から、1990年代半ばから後半にかけて CGの分野へ導入されていったのが始まりである。格子法の研究は 1996 年の Foster と Metaxas によるものから始まる。この研究ではナビエ・ストークス方程式を格子法によって解き、流体表現をリアルに表現するため方法を提案している。粒子法の研究は 1996 年の Desbrun と Gascuel が発表した SPH 法から始まり、それを 3DCG に応用した Müller と Charypar によるものがある。前者は粒子を用いて高度に変形可能な物体をシミュレートするための新しい形式である SPH 法についての研究である。SPH 法とは Smoothed Particle Hydrodynamics の略で流体計算に用いられる微分方程式の一つである。SPH は単純な近似によって空間のメッシュ分割を用いないメッシュフリー近似を実現できることから、物体の大規模な変形を有するようなものに適している。後者は粒子法を CG に応用した研究で、前者の SPH 法の手法を拡張し、変形性の高い物体をアニメーション化している。格子法でのアプローチとは対照的に、粒子ベースでのアプローチでは質量保存の法則と対流項が不要となり、シミュレーションの複雑さが軽減される。

FLIP は CFD で 1986 年に Brackbill と Ruppel が発表した研究から始まり、それを Zhu と Bridson が流体シミュレーションに応用させた。前者は適応的にゾーニングされたグリッド上の完全な particle-in-cell 法を用いて、二次元の流体の流れを計算する方法を示した研究。particle-in-cell 法とは、偏微分方程式を解く方法の一つである。後者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研究である。この研究は実

質的には、FLIP の考え方を導入したパーティクルベースのソルバーの利点をアピールした研究となっていた。以後このソルバーは CG 流体シミュレーションの研究分野に浸透していった。前者は密度の変化する流体を対象としてアルゴリズムが構築されていた。これに対し後者は密度が変化しない流体にも対応できるように書き換えられている。3DCG では密度が変化しない流体がほとんどのため、後者は CG 流体シミュレーションに適したものだといえる。流体シミュレーションの計算量削減のための研究として Ferstl、Ando らの Narrow Band FLIP の研究がある。Narrow Band FLIP とは、流体表面の近くでのみ FLIP ベースの流体シミュレーションを使用し、表面から離れた場所で従来のグリッドベースの流体シミュレーションを使用するというもの。このアプローチでは粒子を必要な領域のみに集中させることができるために、メモリと計算をさらに削減できる。この研究では、FLIP 粒子と通常のグリッド間の新しい結合方法を提案している。

### 4. 提案手法

クローズアウトサイズの波のシミュレーションを行うにあたって、よりリアリティのある波を再現するにはまずその挙動を理解する必要がある。激しく動くのは流体表面や水しぶきの部分であり、流体表面以外の動きは単調なため計算量を削減できる。計算量の削減にあたっては Narrow Band FLIP を利用する。波の表面の部分、つまり空気に接している部分に FLIP を適用する。本研究で扱う波はクローズアウトサイズの波のため、大変形を必要とする。そのため FLIP を適用する幅は、緩やかな波より大きく想定しなければならない。流体の変形の大きさごとに効率の良い幅を適用することを目的とする。