

京都大学工学部 学生員 ○橋本 麻未
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志
 学生員 五十里 洋行
 フェロー 酒井 哲郎

1. 研究の目的 近年、数値流体力学の急速な発展とともに砕波過程・越波過程などの自由水面における流体運動を時間発展的に解析する手法が急速に発展しつつあり、VOF法、C-CUP法、粒子法など、多くの手法が適用されている。これらCFDの諸手法の中で粒子法は、水塊分裂に対して、視覚的写実性（本物らしさ）を伴う解が得られるのが利点である。一方、自然界の複雑な造形を表現するための、フォトリアリステック・ビジュアリゼーションをコンセプトとしたCGの研究も活発に行われ、雲・火炎・水流等の流体運動を伴う諸現象に対しても種々の方法が提案されている。その中の代表格と言えるのが、『パーティクルシステム』である。この方法は、大量の粒子を一定の運動法則（ニュートンの運動方程式、あるいはより単純な運動法則）にしたがって移動させて得られる粒子群をレンダリングして粒子のボリュームを表現するもので、物体を面として表現するのが難しく、形状が時間とともに変化するものをモデリングするのに適している。しかし、この方法は、個々の粒子を独立的に扱うものであり、一定の条件下では個々の粒子はまったく同じ挙動を示すため、水流などのように個々の粒子の運動が独立していない場合、粒子の大きさや運動などに乱れを適当に加えて試行錯誤的に調節して表現せざるを得ず、現実の流体の振る舞いとは異なったものとなる。このような問題点を改善するために物理CG（レンダリング対象となるボクセルが物理規則に従って挙動するモデルを基礎としたCG）の開発が始められつつあるが、粒子法とCGの融合は端緒に着いたばかりである。本研究では、Navier-Stokes式を物理システムとして有するパーティクルシステムを構築して、Lagrange的コンセプトでCFDとCGを融合させた物理CGを提案する。

2. 研究の内容 本研究のCGの骨格は、粒子法の一つであるMPS法により得られた粒子（計算点）の座標データである。MPS法では粒子の周囲に想定した影響圏内にある他の粒子との相互作用としてNavier-Stokes式

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \mathbf{n} \quad (1)$$

の諸項（圧力項・粘性項）が離散化され、移流慣性項は粒子の移動を追跡することにより自動的に計算されるので数値拡散が生じない。式(1)において、 ρ :密度、 $\mathbf{u}$:流速、 p :圧力、 μ :粘性係数、 $\mathbf{g}$:重力加速度、 σ :表面張力係数（水・空気の時 $\sigma=0.0728[\text{N/m}]$ ）、 κ :表面曲率、 δ :デルタ関数、 $\mathbf{n}$:表面に垂直な方向の単位ベクトルである。MPS法では、質量保存則と非圧縮性を満足するためにであるために、全ての粒子の粒子数密度 n_i を一定値 n^0 に保つことが必要となるが、水表面の外側には粒子は配置されていないため、粒子数密度は水表面では低下する。標準型のMPS法では水表面は n_i が βn^0 (β :パラメータ、 $\beta=0.97$) を下回ることにより定義されるが、表面張力については、体積力に換算して水面粒子に与えるルーチンを追加して、砕波・飛沫の発生における水面の追跡を高精度化した。

特に飛沫の描画においては、MPS法の粒子スケール以下の微細粒子の拡散過程を記述するサブモデルが必要となるが、本研究では、初期状態において液滴の中心に集中分布した多数の微細粒子が、等方的な気流の乱れによって周辺に拡散していく状態を想定して、拡散係数一定化の拡散方程式の解と等価な正規（ガウス）分布に従う乱数群によって粒子群の分布を推定する予備計算を行った。MPS法により得られた各瞬間における粒子の座標データから対象粒子周辺の粒子数密度のレベルとその空間的偏在傾向を掘り所に、流体・水面・

孤立（飛沫）の3つの範疇に粒子を分類し、個々の範疇に対して3D テクスチャー（飛沫粒子については、3次元ランダムウォークモデルで得られた拡散パターン、水面粒子については、屈折率が1.33の水の質感を持った球体）をマッピングしたボリュームデータを、レイトレーシング法でレンダリングして画像化した。なお、流体粒子に関しては、外縁を構成する粒子の座標（水表面粒子及び壁面に接している水粒子の座標）を連結して一体化することにより生成した2次元のポリゴンに、粒径の40倍の奥行きをもたせて3次元化し、屈折率を1.33に設定して水の質感を表現した。さらに、直立堤および底面壁を、単一のオブジェクトで設定し、処理効率の向上を図った。

3. 主要な結論 図-1に本手法で描いた直立堤を越波する瞬間のCGと、CGの骨格データ（粒子法の計算結果）を単純にプロットしたグラフを併示する。カラー画像をグレースケールで表示しているの、レイトレーシングによる光彩の表現が十分に読み取れないのが残念であるが、従来の粒子法のプロットでは表現できなかった飛沫の分布が明瞭に示されている。また紙面の都合上示せないが、計算条件と同一の水理条件での越波実験のビデオ画像との対応も良好である。なお、飛沫分布は3D テクスチャーとして処理しており、外縁粒子の判別についてもプログラム化により対応しているの、時間の設定をするだけで、データの読み込みから画像作成、さらにはアニメーションの作成までがオートマティックである。また、図-1はCG作者の直感的な判断を一切排除して描かれたものと言えるため、既存の表現において必要とされる絵画的センスや3次元CG作成ツールへの熟練は不必要である。粒子法の計算負荷上の制約から、現状では骨格データが鉛直2次元に制限されている（図-1は仮想3D画像である）が、粒子法の3D対応が進めば、本法を用いて物理的背景の明白な（実際の水の挙動を忠実に再現した）3Dグラフィックスが直ちに作成できる。

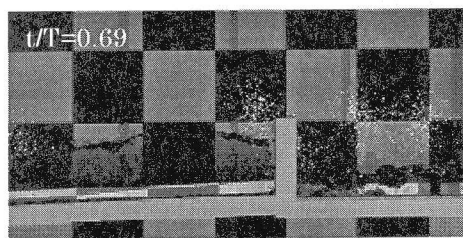
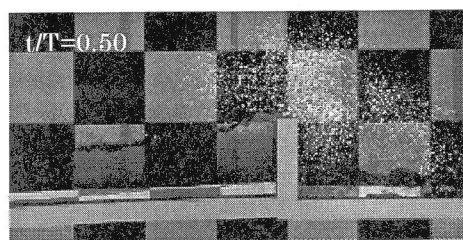
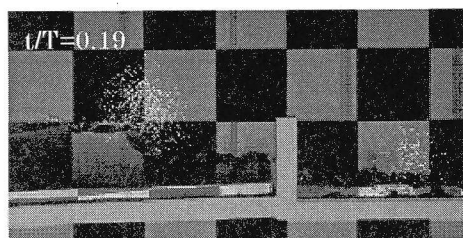
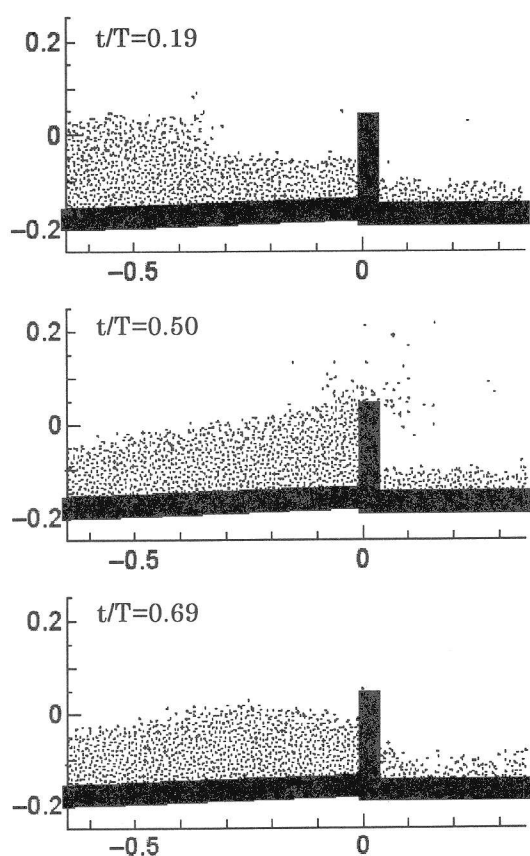


図-1 越波と飛沫のグラフィックス（従来の表現と本研究のポストプロセッシングの比較）