

砕波表情表現のための粒子法ポストプロセッシングの提案

後藤 仁志*・橋本 麻未**・五十里洋行***・酒井 哲郎****

粒子法に限らず、流体を対象とした Scientific Visualization においては、これまで、グラフィックスの質、すなわち写実性、が軽視される傾向にあった。一方、CG 研究では、写実性の追及は重視されてきたものの、普遍性のある流体運動の記述法に関しては、パーティクルシステムによる簡易な粒子運動規則の導入に留まっており、必ずしも充分な対応が進んでこなかった。このような現状に鑑み、本研究では、従来の Scientific Visualization の枠組みに写実性に配慮したプロセスを取り込んだポストプロセッシングの方法を提案し、砕波表情の表現を対象にその有効性の一端を明らかにする。

1. 緒 言

砕波過程・越波過程における流体運動を時間発展的に数値解析する手法 (VOF 法, C-CUP 法, 粒子法など) は、近年活発に研究され、急速に発展しつつある。これらの諸手法の中で、粒子法は、水塊分裂に単純なアルゴリズムで柔軟に対応できる特徴を有しているので、砕波・越波時の飛沫の発生などの複雑な水塊分裂に対して、連続体近似に基づく諸手法とと比較すると、視覚的な面での『写実性』(本物らしく見えること)を伴う解が得られるのが利点である。ここで言う『写実性』は言葉通りの意味ではなく、一般的な連続体型モデルに対する比較優位とでも言うべきもので、CG 研究で問題とされるようなレベルの『写実性』とは比較にならない。通常の Scientific Visualization (数値シミュレーション結果の可視化)は専門知識を有する研究者・技術者のためのものであるから、現象のメカニズムを把握するために必要な情報(物理量分布)が視覚化され、直感的把握の助けとなれば充分である。したがって、グラフィックスとしての『質』(写実性、芸術性等)の問題は重要ではなく、本来なら目に見えない物理量(例えば流速ベクトル等)を如何に直感的に把握し易い形式で表示するかに注意が向けられてきた。例えば、粒子法のシミュレーションのグラフィックスについては、計算点の存在位置にシンボル(例えば円)を描く程度のもので、粒子が分散して存在する状態がしぶきの発生に対応すると判断して、実現象(水理実験の画像)との一致を議論してきた。

一方、CG 制作の実務的面では、写実性を高めるために、物理法則に基づく結果よりも映像製作者のセンスが優先され、加筆修正に多大の時間が費やされることが多い。CG 研究の本質的な課題は、映像視聴者が実物と見紛うような映像を制作する方法論の確立である。言い換えると、一定の手続きに沿って映像を制作すれば、製作者が誰であっても同じ出来栄の CG が得られる手法を開

発することとなるが、それには、映像製作者のセンスへの依存度をできる限り小さくする必要が生じる。そのための方法論として注目されているのが、『パーティクルシステム』である。この方法では、大量の粒子を一定の運動規則(いわゆる粒子の運動方程式とは異なる簡便な規則)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、対象物体のボリュームを表現する。例えば、写実的 CG の制作が最も難しいと言われる雲・火炎・水流等の流体運動を伴う自然現象の CG 制作にも、『パーティクルシステム』が適用され、成果を挙げている(例えば、Chiba ら, 1995)。しかし、個々の粒子の運動規則が流体運動と相違していることや、境界条件の反映が不完全であることにより、物理的根拠は希薄で、状況によっては現実の流体の振る舞いとは異なったものが得られることもあるなど、問題点も指摘されている。

このような問題点を改善するため物理 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. 流体解析の概要

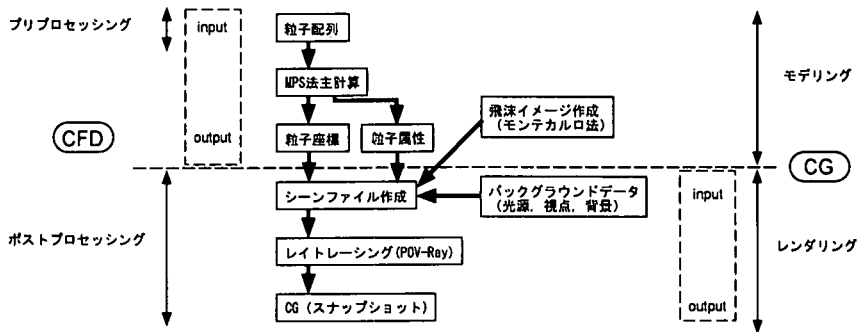
本研究では、CG の骨格を MPS 法 (Koshizuka・Oka, 1996)によって計算する。MPS 法では、計算領域に配置された多数の粒子(計算点)間の相互作用として基礎式の各項が離散化されるため、計算格子が不要である。まず、均一で質量が変化しない粒子を用い、粒子数を一定に保つことで、質量保存(連続式)は厳密に満足され、粒子数密度(単位体積あたりの粒子数)を一定値 n_0 に保つことにより、非圧縮条件が満足される。

一方、運動方程式 (Navier-Stokes 式)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{\sigma \kappa \delta}{\rho} \mathbf{n} \dots \dots (1)$$

($\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p : 圧力, ρ : 流体の密度, $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル, ν : 渦動粘性係数, σ : 表面張力係数,

* 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻
**** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻



る。座標については MPS 法の粒子の座標を与えればよいが、属性に関しては特別の対応を要する。通常の MPS 法では、粒子は 2 つのカテゴリ（流体粒子、水表面粒子）に分類される。これは、水表面での圧力の境界条件を指定する都合上必要な分類であるが、水塊の表情に着目すると、流体粒子・水表面粒子に加えて第 3 のカテゴリとして飛沫粒子が必要となる。ここでは、前章の表面張力計算の際に述べたように、粒子数密度レベルと粒子数密度の空間的偏在性を指標とする新たな水面粒子の判定基準（後藤ら, 2003 a）を導入し、流体・水表面・飛沫（孤立）の 3 つのカテゴリに粒子を分類した。流体に関しては外周を構成する粒子を連結して一体化することによりポリゴンを形成し、屈折率を 1.33 に設定して水の質感を表現した。水表面に関しては、球体（いわゆる水玉、屈折率 1.33）として扱った。水の質感表現に必要な設定は、POV-Ray の標準的 include file として提供されているが、飛沫に関しては既存の質感データが存在しない。そこで、次節で述べる方法で飛沫イメージ（ボリュームデータ）の生成を行った。

（3）飛沫イメージの生成

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『飛沫雲』（微細液滴群）の中心（重心）に集中分布した多数の小粒子が 3 次元ランダムウォークによって移動して、『雲』状の広がりを呈する状況を想定する。飛沫小粒子の運動は、単純モンテカルロ法で追跡する。追跡ステップ $j+1$ における飛沫小粒子の位置は、

$$\mathbf{x}_{ps}^{j+1} = \mathbf{x}_{ps}^j + \mathcal{E} \Delta \mathbf{x}_{ps} \dots \dots \dots (6)$$

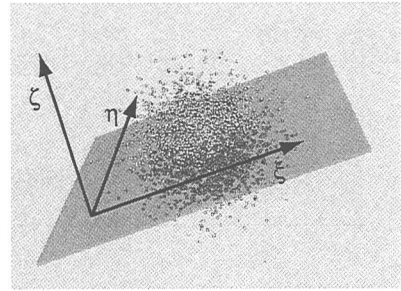
と記述される。ここに、 $\mathbf{x}_{ps}^j$ ：飛沫小粒子 i のステップ j における位置ベクトル、 $\Delta \mathbf{x}_{ps} = (\Delta x_{ps}, \Delta y_{ps}, \Delta z_{ps})$ ：飛沫小粒子の 1 ステップあたりの変位ベクトル（最大移動距離相当）であり、1 ステップあたりの座標変動強度 $\mathcal{E}(\xi, \eta, \zeta)$ については、Box-Müller 法で発生させた 3 次元正規乱数を用いた。簡単のため、各成分は無相関で、各成分の分散は一定であるとの条件を課して、分布形を

$$f(\xi, \eta, \zeta) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{3/2} \frac{1}{\sigma_\xi} \exp \left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_\eta} \exp \left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_\zeta} \exp \left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2} \right) \dots \dots \dots (7)$$

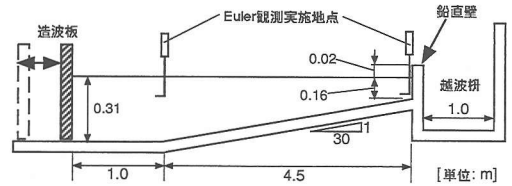
$$\sigma_\xi = \sigma_\eta = \sigma_\zeta = \frac{1}{3} \dots \dots \dots (8)$$

で与えた。飛沫小粒子の 1 ステップあたりの変位については、飛沫の拡散幅（『飛沫雲』の最大直径に相当） $\mathcal{A}_{sc}$ および『飛沫雲』の寿命時間 T_{sc} を用いて、

$$\Delta \mathbf{x}_{ps} = \Delta y_{ps} = \Delta z_{ps} = \mathcal{A}_{sc} \frac{\Delta t_{sc}}{T_{sc}} \dots \dots \dots (9)$$



図—2 飛沫粒子のボリュームデータ



図—3 数値造波水槽

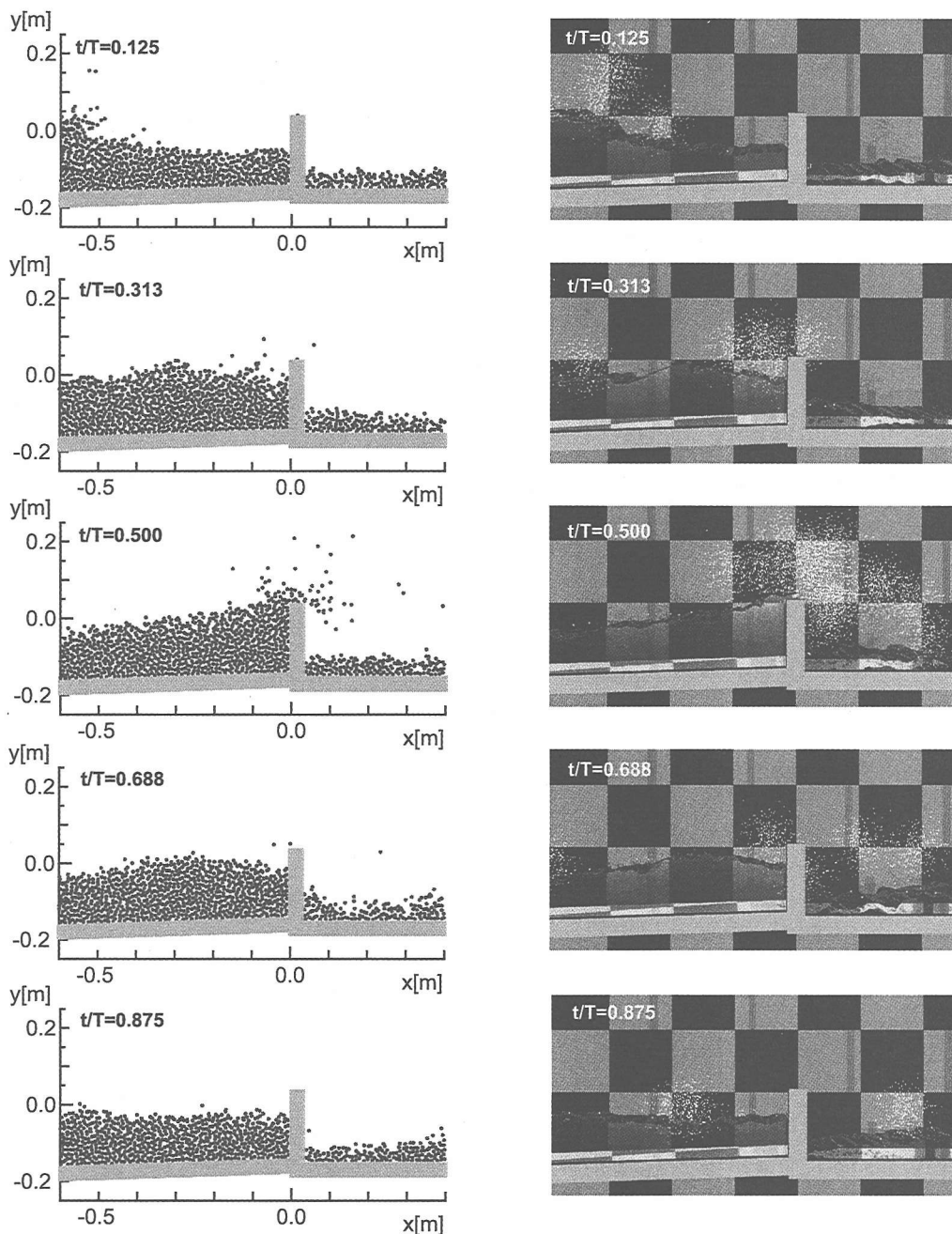
と与えた。ここに、 Δt_{sc} ：飛沫小粒子の追跡時間スケールである。

以上のようにして得られた飛沫小粒子の拡散パターンを図—2 に示す。なお、図中では、小粒子群の 3 次元的広がりを分かり易くするために、 (ξ, η) 平面に半透明板を配置している。このような小粒子群分布をマッピングしたボリュームデータをレンダリングの際の飛沫属性として用いた。飛沫の拡散は言うまでもなく時間発展の現象であるから、飛沫の表情も時間的に変化する。これを陽に表現するには、個々の飛沫小粒子が移動拡散源としての飛沫粒子（飛沫小粒子の初期の重心）から拡散する過程を時間発展的に追跡して、飛沫粒子ごとに異なったボリュームデータをマッピングする必要が生じる。ここでは、最も簡便な取り扱いとして、十分に発達した『飛沫雲』の飛沫小粒子の拡散パターンを全ての MPS 法の飛沫粒子に対して適用した。飛沫の運動特性（発生位置、発生時の速度等）をどの程度、飛沫表情モデルに取り込むべきかは、今後も継続して検討すべき事項であると考えている。

4. 直立堤越波のポストプロセッシング

（1）計算条件

MPS 法の主計算は、図—3 に示す数値造波水槽で行った。一樣勾配 1/30 の斜面上で、直立壁（初期水面からの天端高さ 2.0 cm）を設置し、直立壁の背後には越波量計測用の集水枠を配置した。直立壁前面部の水深 $h=15.0$ cm となるように初期水面の高さを設定し、沖側造波壁（反射波吸収式）を移動させて、周期 $T=1.6$ s、沖波波高



図—4 砕波・越波過程のグラフィックス (左：粒子プロット；右：ポストプロセッシング)

$H_0=11.6$ cm の正弦波形の規則波を発生させた。なお、この計算条件下では、同一勾配斜面上の水利実験における水位変動時系列との一致を確認している (後藤ら, 2003b)。

(2) ポストプロセッシングの効果

図—4 に本手法で描いた直立堤の越波過程の CG を、

従来の粒子プロットと比較しつつ示す。カラー画像をグレースケールで表示しているため、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。なお、レイトレーシングは 3 次元に対応しているため、粒径の 40 倍の奥行きを有する

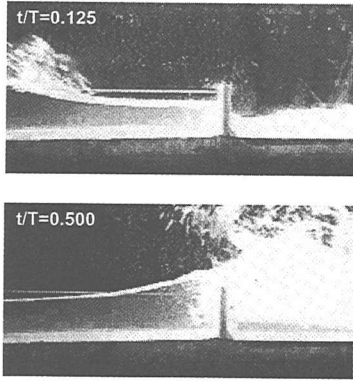


図-5 碎波・越波過程の水理実験

シリンダー群(鉛直断面が MPS 法の粒子配置に一致)を対象としてポリゴン生成し、飛沫分布は 3D テクスチャーとして処理した。

計算条件と同一の水理条件での越波実験のビデオ画像の例を図-5 に示す。水理実験では、碎波後の気泡連行と対応した領域が白色を呈している様子が確認できるが($t/T=0.500$ の直立堤左側)、言うまでもなく、MPS 法は液相のみの単相流計算であるので、気泡の挙動は追跡できない。この点を除くと、図-4 のスナップショットと水理実験のビデオ画像との対応はほぼ良好であり、本研究のポストプロセッシングの効果が示されたものと言える。

さらに、一連のスナップショットからアニメーションを作成し、ビデオムービーとの比較を行った。水塊(本法で言う流体粒子が構成する部分; ビデオ画像では透明に見える部分)の挙動に関しては、アニメーションの高いレベルの写実性が認められたが、しぶきの表現に関しては、分布域の一致にはほぼ問題がないものの、写実性に関しては、不十分な点が見られた。具体的には、飛沫小粒子の分布が、MPS 法の孤立粒子を中心として等方的であり、孤立粒子の運動履歴を考慮した飛沫の時間的発達過程が考慮されていないため、ビデオ画像では組織的な発達・減衰特性を示す飛沫分布が偏在化し、視覚的には『斑(むら)』あるいは『ちらつき』の多い画像となってしまう。先にも述べたように、飛沫の運動特性(発生位置、発生時の速度等)をどの程度、飛沫表情モデルに

取り込むべきかに関して、今後も継続的検討が必要である。

5. 結 語

本稿では、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 的の概念で CFD と CG を融合させた物理 CG のフレームワークを、直立堤前面の碎波・越波過程に適用した。得られたグラフィックスは、少なくとも静止画としては、従来の粒子プロットと比較すると、流体運動はもちろん、飛沫に関しても写実的な表現を大きく前進させるものであった。動画については、飛沫の『ちらつき』が過度に表現され、写実性の面では飛沫表現に課題が残る結果となった。飛沫表情モデルに関しては、今後も継続的に検討したい。

本研究の方法で得られたグラフィックスは 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。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 次元に制限されており、現時点では仮想 3D の画像であるが、並列化によって粒子法の 3D 対応が進めば、本法を用いて 3D のグラフィックスが直ちに作成できる。

参 考 文 献

- 越塚誠一 (1997): 数値流体力学, インテリジェントエンジニアリングシリーズ, 培風館, p. 223.
- 後藤仁志・五十里洋行・八木哲生・酒井哲郎 (2003 a): MPS 法よる碎波解析のための自由水面境界条件の改良, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 21-25.
- 後藤仁志・林 稔・目見田 哲・酒井哲郎 (2003b): 粒子法による直立堤前面碎波の数値シミュレーション, 土木学会論文集, 第 726 号/II-62, pp. 87-98.
- Chiba, N., S. Sanakanishi, K. Yokoyama, I. Ootawara, K. Muraoka and N. Saito (1995): Visual simulation of water currents using a particle-based behavioural model, Jour. Visualization and Computer Animation, Vol. 6, pp. 155-171.
- Colefax, C. (1998): The liquid spray include file for POV-Ray 3.1(data on the URL=<http://www.geocities.com/SiliconValley/Lakes/1434/spray.html>).
- Koshizuka, S. and Y. Oka (1996): Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol. 123, pp. 421-434.
- Nomura, K., S. Koshizuka, Y. Oka and H. Obata (2001): Numerical analysis of droplet breakup behavior using particle method, Jour. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 38, No. 12, pp. 1057-1064.