

砕波 CG の写実性向上のための粒子法 SPS 表情モデルの構築

後藤 仁志*・橋本 麻未**・酒井 哲郎***

本稿では、飛沫表情の表現を高度化することを主目的に据えて、飛沫粒子（水滴）が微細液滴粒子（mist）に分裂する過程を SPS (sub-particle scale) 表情と定義して、その表現方法を詳細に検討した。開発された SPS 表情モデルを直立堤前面の砕波・越波過程に適用し、飛沫の空間分布における mist 分布の偏在化に対する再現性が、従来型の等方拡散モデルと比較して顕著に改善されることが明らかとなった。SPS 表情モデルを用いた砕波過程の時間発展的 CG を製作し、水理実験のビデオ画像と比較して、飛沫表情のディテール再現におけるモデルの性能について検証した。

1. はじめに

数値流体力学 (CFD) の方法論による砕波のシミュレーションが、近年活発に展開されており、従来の計測では必ずしも充分にとらえることのできなかった砕波帯の力学的内部構造を解明するためのツールとしての有用性に対する認識が広まりつつある。これらのシミュレーションに共通しているのは、時間発展的な解が得られることであり、適切なグラフィックスを導入すれば、実際の現象を可視化すると同じような印象の解の表示が可能なことである。その一方で、シミュレーションコードの構成は複雑化し、コードの部分的改良によって何が進歩したのかを分かり易く示すことは、解析解主体の方法論と比較して、容易ではない。

CFD 的方法論を取り巻くこのような状況によって、ポストプロセッシング (計算の後処理) としての CG の導入が活発化したが、このことは、流体計算のエキスパートたちに、精緻な物理モデルの解の写実性が ad hoc 的な CG に遙に及ばないという現状を強く認識させる契機となった。流体計算を専門とする以上、物理が主体であることは言うまでもないが、物理モデルでは必ずしも充分に表現できない『水の表情』のディテールを表現する何らかの方法論の必要性には強い異議を唱える人はないだろう。著者ら (後藤ら, 2003b) は、このような認識から、粒子法に基づく CFD とパーティクルシステム型レイトラシングに基づく CG を Lagrange 的コンセプトで融合し、力学的合理性と水の表情表現の両者を合わせ持った物理 CG を『粒子法ポストプロセッシング』として昨年度に提案した。

商業ベースの CG は、ハリウッド映画に代表される娯楽の分野を中心に用いられてきたが、CG の写実性がプレゼンテーションにおいて果たす重要性に対する認識は、広く共有されていると言えるだろう。例えば、津波・高潮災害時の氾濫・浸水の CG は、想定される災害の驚異

を人々に実感させ、災害への備えの重要性を認識させるツールとして極めて有効である。また、防災面以外にも、流水表情のシミュレーションはウォーターフロントの景観設計に重要な役割を演じる (後藤, 2004)。

海岸工学に関連する具体例として防波堤を取り上げてみよう。防波堤整備の重要性は、市民一般にはあまり充分に認識されているとは言い難い現状であろうが、時化の際の風浪の凄まじさを目の当たりにすれば、防波堤整備の重要性に対する市民の理解は一挙に高まるだろう。例えば、高波浪来襲時の沿岸道路では、越波に起因する飛沫によってドライバーの視界が制限されるが、越波低減を目的とした護岸断面の改良によって如何に視界が確保できるかといった問題は、地域の住民の関心を惹くテーマとなるだろう。数値シミュレーションによってこの要請に応えたとすれば、砕波・越波のシミュレーション結果を如何に写実的に示すかが課題となる。著者ら (後藤ら, 2003b) は昨年、開発したポストプロセッサを用いて直立堤前面の砕波・越波過程の CG を作成したが、飛沫水滴群の表情の表現に関しては固定点源からの単純拡散モデルを使用したため、現実の飛沫表情を充分に再現するには至らなかった。

そこで、本研究では、飛沫表情の表現を高度化することを主目的に据えて、飛沫粒子（水滴）が微細液滴粒子（mist）に分裂する過程を SPS (sub-particle scale) 表情と定義して、その表現方法を詳細に検討する。昨年と同様に直立堤前面の砕波・越波過程を対象にして、飛沫分布における mist 分布の偏在化に対する再現性を軸とした検討を通じて、SPS 表情モデル付きの粒子法ポストプロセッシングの表現力を明らかにする。

2. PS モデル

(1) PS と SPS

粒子法の分解能は粒子スケール (PS) に規定され、粒子スケールより小さいスケール (SPS) の現象を直接的に追跡することができない。砕波によって発生した液滴 (数 mm 粒径) は次第に分裂して、0.1 mm 程度の mist 粒子となって水煙状に拡散するが、砕波表情の特徴を成す

* 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
*** 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

mist 粒子自体を PS で記述することが不可能なのは自明である。そこで、PS とは異なる計算負荷の小さい物理モデルを SPS に導入して、Navier-Stokes 式を基礎とした追跡が実行できない SPS の mist の挙動を記述する必要がある。

(2) PS モデルとしての粒子法

PS の物理モデルは代表的な粒子法の一つである Koshizuka・Oka (1996) の MPS (moving particle semi-implicit) 法であり、支配方程式は Navier-Stokes 式

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

である ($\mathbf{u}$: 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, κ : 表面曲率, δ : デルタ関数, $\mathbf{n}$: 法線方向の単位ベクトル)。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。均一で質量が変化しない粒子を用い、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。

粒子 i の圧力項 (gradient) および粘性項 (Laplacian) は、

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \right\} \dots (2)$$

$$\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(|\mathbf{r}_{ij}|) \dots (3)$$

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \dots (4)$$

のように、粒子周囲の影響円内の他の粒子との相互作用としてモデル化される (D_0 : 次元数, λ : モデル定数)。粒子間相互作用が生じる範囲 (影響円) は、重み関数

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \dots (5)$$

により規定される。また、粒子数密度は重み関数を用いて

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \dots (6)$$

と定義される。

MPS 法では、粒子数密度の条件式

$$n_i < \beta n_0 \dots (7)$$

を満足する粒子を自由表面粒子と判定し、圧力 $p=0$ を与える。表面張力項の評価には、表面近傍の粒子に体積力として表面張力を付与する Nomura ら (2001) のモデルを用い、表面粒子の解像度の確保には、表面粒子周囲の粒子数密度分布の偏在化を補助指標とする後藤ら (2003a) の方法を用いた。

MPS 法の粒子は、水中粒子、水面粒子、孤立 (飛沫) 粒子の 3 種に分類され、CG 作成の骨格データとなる。孤

立 (飛沫) 粒子の抽出に関しても、後藤ら (2003a) の方法に基づいて、表面粒子とは異なる閾値を用いて偏在化度が大きい粒子を抽出した。これら 3 つのカテゴリーの内で、水中粒子と水面粒子は、水塊表面抽出によりポリゴンとして PS 表情をレンダリングし、孤立 (飛沫) 粒子については、mist への分裂・拡散過程を次章に述べる SPS 表情モデルを用いて記述する。

3. SPS 表情モデル

(1) 液滴および mist の運動方程式

MPS 法の粒子スケール以下の mist の挙動を記述することの主旨は、砕波表情のディテールの再現にあるので、サブ粒子スケールのモデルを SPS 表情モデルと呼ぶ。ここでは、液滴 (PS スケール程度) の運動過程と液滴粒子を生成源とする mist の拡散過程から成る 2 段階モデルを導入する。液滴粒子は、MPS 法での孤立粒子 (粒径 1.0 cm) の発生時の速度を初期条件として、mist (粒径 0.1 mm) を発生しながら気相中を落下する可変粒径粒子であり、乱流中の球の運動方程式

$$\begin{aligned} \rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_a} + C_M \right) A_3 d_D^3 \frac{d\mathbf{u}_{DP}}{dt} \\ = \frac{1}{2} \rho_a A_2 d_D^3 C_{DD} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{DP}| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{DP}) \\ + \rho_a (1 + C_M) A_3 d_D^3 \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_e} - 1 \right) A_3 d_D^3 \mathbf{g} \dots (8) \end{aligned}$$

$$C_{DD} = \frac{24}{Re_D} (1 + 0.15 Re_D^{0.687}); Re_D = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{DP}| d_D}{\nu} \dots (9)$$

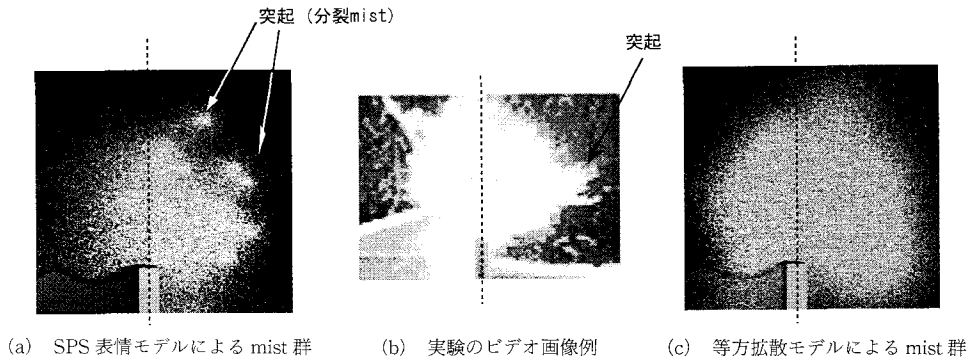
によって軌道が計算される。ここに、 ρ_a : 空気密度, C_M : 付加質量係数 (=0.5), A_2, A_3 : 粒子の 2 次元および 3 次元形状係数 (液滴, mist ともに球を仮定して, $A_2 = \pi/4, A_3 = \pi/6$), $\mathbf{u}$: 粒子近傍風速, $\mathbf{u}_{DP}$: 液滴粒子速度, d_D : 液滴粒子径, C_{DD} : 液滴粒子の抗力係数, ν : 動粘性係数である。

液滴が表面積に比例する数の mist を発生させつつ徐々に縮小するとすれば、液滴粒子径 d_D は、

$$d_D(t) = d_{D0} \left(1 - \frac{t}{t_{life}} \right) \dots (10)$$

と書ける。ここに、 d_{D0} : 分裂直後の液滴径, t_{life} : 液滴の寿命時間 (発生から消滅までの経過時間) である。一方、mist は粒径一定の粒子と仮定して、運動方程式

$$\begin{aligned} \rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_a} + C_M \right) A_3 d_m^3 \frac{d\mathbf{u}_{mp}}{dt} \\ = \frac{1}{2} \rho_a A_2 d_m^3 C_{Dm} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{mp}| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{mp}) \\ + \rho_a (1 + C_M) A_3 d_m^3 \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_e} - 1 \right) A_3 d_m^3 \mathbf{g} \dots (11) \end{aligned}$$



図一1 mist 群の拡散過程

$$C_{Dm} = \frac{24}{R_{em}} (1 + 0.15 R_{em}^{0.687}); R_{em} = \frac{|u - u_{mp}| d_m}{\nu} \quad \dots\dots\dots (12)$$

によって追跡する。ここに、 u_{mp} : mist 粒子速度、 d_m : mist 粒子径、 C_{Dm} : mist 粒子の抗力係数である。

(2) 風速場

砕波時の気流乱流に関しては、厳密には気液二相流計算を行って評価すべきであるが、本稿の MPS 法は单相流計算であるため、簡便な方法で気流の乱れを評価し、mist のランダムウォークの駆動力とした。気相の乱れは、気液界面での気相・液相の速度差に起因する速度せん断層の存在に規定される。ここでは、連続的に来襲する波列を想定し、単一の波を移動粗度と考えることとして、せん断速度を大略的には波速と同一視した。速度せん断層の風速分布は対数則型で与えて、摩擦速度を算定し、指数減衰型の普遍関数表示(瀬津, 1977)で乱れ強度分布を与えた。個々の液滴粒子・mist 粒子周囲の風速の変動成分の時系列は、単純モンテカルロ法で模擬した。

(3) 粒子追跡の手順

MPS 法の孤立粒子は SPS 表情モデル側では液滴として扱われる。液滴が発生すると MPS 法の孤立粒子の速度と座標を液滴の初期条件とする。液滴の表面積を計算すると、その時点で発生する mist 粒子数が算定できるので、運動方程式に基づく mist 粒子の追跡計算を開始する。mist 粒子の追跡では、複数の mist 粒子の拡散過程を同時に追跡する。全ての mist 粒子が着水するか、予め設定した寿命時間(後述の計算では 1.0 s と設定)が経過するか、何れかの条件が成立すれば、mist 粒子の追跡を終了して、液滴の計算に復帰する。

mist の発生に伴って液滴の体積が減少していることを考慮して液滴径を更新し、運動方程式を解いて、液滴の速度と座標を更新する。液滴の追跡は液滴が消滅するか着水するまで継続する。この間、液滴は徐々に質量を減じつつ、その軌跡上に mist 粒子を散布しつつ落下す

る。このプロセスを発生する全ての液滴に対して反復すると、レンダリングに必要な mist 粒子の座標データが得られる。レンダリングにはレイトレーシングソフトウェア・POV-Ray (persistence of vision ray-tracer) (POV-Team, 2002; 小室, 1999) を用いた。

4. 砕波過程の物理 CG

図一1に本稿の SPS 表情モデル(2段階モデル)で描いた mist 群の分布を固定拡散源からの等方的 mist 拡散を前提とする従来型の mist 表情モデル(後藤ら, 2003b)による分布と併示した。なお、図中には、水理実験(周期 1.6 s, 沖波波高 11.6 cm の正弦波型規則波を無反射式造波装置で発生, 直立堤前面水深 15.0 cm, 静水深からの天端高さ 2.0 cm; 詳細は後藤ら(2003b)参照)の飛沫発生瞬間の画像も併せて示した。

水理実験では、直立堤前後の mist 分布の非対称性が顕著に見られるが、同様の特性が本稿の SPS 表情モデルにより良好に再現されている。これに対して、等方拡散モデルでは分布の非対称性はそれほど明瞭ではない。さらに、実験に見られる分裂 mist 群(角状の突起)は、等方拡散モデルでは全く再現されていないが、本稿の SPS 表情モデルでは mist 雲の前縁に分裂 mist (mist 濃度の極大値)の存在が示されている。

図一2に本稿の SPS 表情モデルで描いた直立堤を越波する瞬間の CG を示す。主波峰の直立堤との衝突の直後($t/T=7/16$)から、水塊分裂が活発に生じて mist が生成されるプロセスが良好に再現されている。mist 粒子の序盤の拡散過程では水塊からの分裂直後であるため慣性の作用が支配的であり、その後次第にランダムウォーク的な挙動が支配的となる。更に時間が経過すると平均風速による移流の影響が蓄積され、一部の mist は相当の遠方まで飛散する。本稿の SPS 表情モデルでは、分裂直後の慣性およびランダムウォークを陽に記述できるが、風速場の取り扱いを簡便なものとしているので、移流の

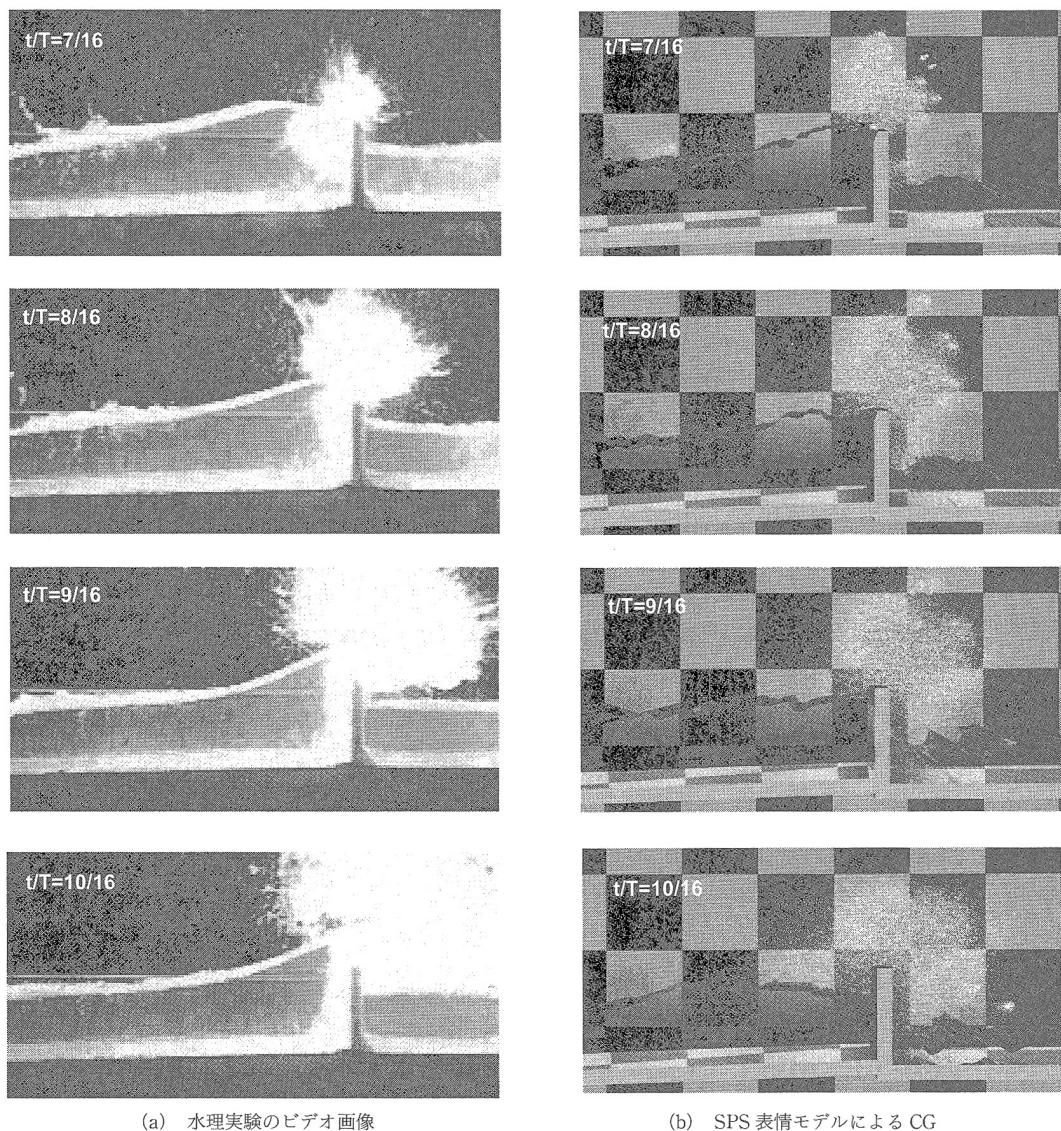


図-2 本稿の CG と実験の比較

影響を過小に評価する傾向がある。時刻 $t/T=10/16$ における mist の飛散範囲が実験と比較して狭くなっているのは、このためである。ここで言う風速場は、液相界面の運動に駆動される気相の運動を解析することで評価されるので、気液二相流モデルによる解析を必要とする。なお、この風速場の問題は、SPS 表情モデル自体の問題ではなく、その入力値の評価の妥当性の問題である。

また、飛沫が活発に生成される瞬間（時刻 $t/T=9/16$, $10/16$ ）における直立堤前面の水面付近では粒子の運動が激しく、粒子数密度のばらつきが生じやすい。その影響で水面付近での粒子数密度が水面判定の閾値を僅かに下回る状況が生じ、水面の位置判定が低下傾向となる。ビ

デオ画像の水面と CG の水面の位置にずれが生じるのは、このためだと考えている。この問題の改善には、ポストプロセッシング以前の MPS 法の本計算において、粒子径を小さくして解像度を確保し、粒子数密度の擾乱を低減することが必要である。

5. おわりに

本稿では、飛沫表情の表現を高度化することを主目的に据えて、飛沫粒子（水滴）が微細液滴粒子（mist）に分裂する過程を SPS (sub-particle scale) 表情と定義して、その表現方法を詳細に検討した。開発したモデルを直立堤前面の砕波・越波過程に適用して、飛沫分布における

mist 分布の偏在化に対する再現性が、従来型の等方拡散モデルと比較して顕著に改善されることを示した。本稿のモデルで作成した碎波過程のCGを通じて、SPS表情モデル付きの粒子法ポストプロセッシングの表現力を明らかにした。

今後の課題を整理する。第一には、前章で言及したように、液相界面の運動に駆動される風速場の解の導入である。この問題に対する対応は、気液二相流モデル型粒子法(五十里ら, 2004)の成果を発展させれば容易である。さらに、図-2の実験画像では、直立堤前面に水中への気泡の潜り込みが見られたが、本稿のCGでは、水中気泡の存在を表現することができない。このことも、MPS法の計算結果自体が水中気泡の存在についての情報を持たない单相流計算である現状では致し方ないが、気液二相流モデルによる計算が実行できたとしてもそれだけでは問題の解決には至らない。この問題に対応するには、水中混入気泡の表情を記述するための別のサブモデルの開発が必要である。

CGに関する技術的問題に関しても幾つか課題がある。第一は、レンダリング時間の問題である。レイトレーシングは表現力には優れているが、比較的計算負荷の高いCG作成手法であるので、サブモデルを精緻化すればするほど、CG作成の計算負荷が増大する。物理CGの推進と計算負荷はそもそもトレードオフの関係にあるが、盲目的に物理CGの高度化を追及するのではなく、CG

表現への需要に応じたモデルの適正な選択が可能のように ad hoc 的なCGの技術の導入を視野に入れる必要があるだろう。

参考文献

- 五十里洋行・後藤仁志・酒井哲郎 (2004): 気液二相流型粒子法による碎波過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 111-115.
- 小室日出樹 (1999): POV-Ray ではじめるレイトレーシング, ASCII 出版, p. 382.
- 後藤仁志・五十里洋行・八木哲生・酒井哲郎 (2003 a): MPS 法に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・橋本麻未・五十里洋行・酒井哲郎 (2003b): 碎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, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1421-1425.
- 後藤仁志 (2004): 流水表情の数値シミュレーション—親水都市デザインのためのアメニティー水理学—, ながれ Vol. 23, pp. 79-86.
- 福津家久 (1977): 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第261号, pp. 67-76.
- Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996): Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol. 123, pp. 421-434.
- Nomura, K., Koshizuka, S., Oka, Y. and Obata, H. (2001): Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method, Jour. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 38, No. 12, pp. 1057-1064.
- POV-Team (2002): Introduction to POV-Ray, for POV-Ray Version 3.6 BETA, p. 293 in pdf.