



Title	水滴表現のための粒子ベース液体シミュレーション
Author(s)	安部, 拓也; 井村, 誠孝; 池田, 聖 他
Citation	映像情報メディア学会誌. 2009, 63(7), p. 951-956
Version Type	AM
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/3409">https://hdl.handle.net/11094/3409</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 水滴表現のための粒子ベース液体シミュレーション

## Particle-Based Liquid Simulation for Animation of Waterdrops

正会員 安部拓也<sup>†</sup>, 井村誠孝<sup>†</sup>, 池田 聖<sup>†</sup>,  
眞鍋佳嗣<sup>†</sup>, 千原國宏<sup>†</sup>Takuya Abe<sup>†</sup>, Masataka Imura<sup>†</sup>, Sei Ikeda<sup>†</sup>, Yoshitsugu Manabe<sup>†</sup> and Kunihiro Chihara<sup>†</sup>

**Abstract** There is higher and higher demand for realistic computer-generated animation of natural phenomena based on the physical computation. The simulation for depicting realistic liquid motion requires high computational cost, and no versatile method is available. Waterdrops, which we can find out around us in various scenes, are not able to be depicted realistically by simulation in real time because of its specific physical feature and high computational cost. This paper proposes extended Smoothed Particle Hydrodynamics which simulate liquid motion with particles, and the method of depicting waterdrops through interfacial tension model. The proposed method enables to simulate waterdrops with different contact angle and with flat shape.

キーワード：コンピュータグラフィクス，粒子法，水滴，界面張力，毛管長，物理シミュレーション

## 1. ま え が き

物理法則を反映させたシミュレーションは、コンピュータグラフィクス (CG) において自然現象を表現する上で効果的な手法の一つである。CG での自然現象の表現は、映画やゲーム、テレビ番組、広告など、幅広い分野で取り入れられてきており、物理シミュレーションへの要求は日に日に高まっている。その中でも、液体の写実的な表現は CG 分野において重要な課題とされてきた。写実的な液体の流れを表現するには計算流体力学の手法を用いることが有効であるが、計算コストが非常に高く、また、あらゆる液体の表現を扱う汎用的なシミュレーション手法は確立されていない。

本論文では、ゲームなどインタラクティブな処理を必要とする環境で用いられることを前提とした、水滴の CG 表現に着目する。水滴はスケールの小さな水の形態の一つであり、草の葉のつゆ、結露したガラス、涙、汗など我々の日常生活においてよく見られるものである。水滴よりも大きなスケールの水においては、これまでに多くのシミュレーション手法が提案されている。しかし、水滴のスケールでは界面張力が重力よりも大きな影響を及ぼす。そのため、接触角や毛管長など、スケールの大きな水では無視できるこ

とが多かった要因が水滴の形状表現では重要な位置を占めることになり、これらを考慮したシミュレーション手法が必要となる。

本論文では、水滴をインタラクティブに描画するため、粒子法である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) を拡張し、水滴の接触角を表現するための界面張力モデルを用いたシミュレーション手法を提案する。本手法では、固体との界面付近にある粒子の近傍粒子の数が接触線からの距離と関係づけられることに着目し、接触線からの距離に応じた力を粒子に界面張力として与える界面張力モデルにより、接触角の異なる水滴形状や、体積の大きい水滴の扁平形状の表現を可能とする。

## 2. 関 連 研 究

コンピュータで液体の移流をシミュレートする場合、流体としての液体の振るまいを計算する必要がある。流体の運動を数値的に解く計算流体力学の分野において、流体を記述する手法には、液体が存在する空間上の各位置における液体の挙動を時系列に従って記述する Euler 式記述と、液体を粒子群に分割し、粒子ごとの挙動を時系列に従って追跡する Lagrange 式記述とがある。前者によって液体の振るまいをシミュレートする手法は格子法、後者による手法は粒子法と呼ばれている。

格子法では、液体の存在する範囲を小さな単位格子で区切り、その格子内の流れを計算することによって液体の移流をシミュレートする。Foster らは Marker-And-Cell (MAC) 法<sup>1)</sup>を写実的な液体のアニメーションへ適用した<sup>2)</sup>。また、

映像情報メディア学会 2007 年冬季大会にて発表

† 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

(〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, TEL 0743-72-5270)

† Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

(8916-5, Takayama, Ikoma, Nara 630-0192, Japan)

より滑らかな水面生成のために Foster らが Level Set 法を導入した<sup>3)</sup>のに続き, Enright らは移流計算に格子法, 界面計算に空気粒子を考慮した Particle Level Set 法を導入し, 写実的な水面の生成に成功した<sup>4)</sup>. これら格子法においては高品質なアニメーションを得ることが可能であり, コンピュータグラフィクスの分野で広く用いられている. しかし, 詳細な水面の表現のためには大量の格子が必要であるため計算量が膨大になり, 実時間処理に向かない. また, 格子の解像度を高くすると, 複数の格子を一度にまたぐような水しぶきなどの急激な移流時の移動量に限界が生じるため, インタラクティブな処理に向かない.

粒子法では, 液体そのものの構成要素を表す粒子の相互作用を計算することにより, 液体の移流をシミュレートする. 粒子を用いた主な手法として Moving Particle Semi-implicit(MPS)法<sup>5)</sup>と, SPH法<sup>6)</sup>が挙げられる. Premoze らは, MPS を用いた非圧縮流体のシミュレーション手法を提案した<sup>7)</sup>. MPS では非圧縮条件と運動量保存則を半陰的に解くことで液体の移流を解析する. SPH は宇宙物理学の分野で様々な現象をシミュレートするために開発され, Monaghan によって流体力学の分野に導入された<sup>6)</sup>. Desbrun らは, SPH を用いて, 剛性, 粘性の異なる非弾性体のアニメーションを生成した<sup>8)</sup>. Müller らは, Desbrun らの手法を拡張し, 液体のアニメーションを実時間で生成した<sup>9)</sup>. さらに最近では, 粒子シミュレーションの計算を GPU 上でを行い, 剛体との相互作用を含めた流体シミュレーションの並列計算を可能とする手法<sup>10)</sup>や, 視覚的な重要度に応じて粒子の大きさを変化させる手法<sup>11)</sup>など, SPH を改良, 拡張する様々な手法が提案されている. 粒子法では, 粒子そのものを動かすことにより流体の移流を計算するため, 液体の急激な移流を表現しやすく, インタラクティブな処理に向いている. しかし, 水滴のような小さなスケールの液体の表現についてはほとんど検討がなされておらず, 水滴の接触角による形状の違いは考慮されていない.

これまで CG 分野における水滴のシミュレーションにおいては, 水滴の流れる軌跡に重点をおいた研究が多くなされてきている<sup>12)13)14)</sup>. これらは水滴の軌跡を表現するという点で一定の成果を上げているものの, 計算流体力学に基づいておらず, 形状や挙動という点において液体としての水滴の性質がほとんど表現されていない. 物理学ベースの水滴シミュレーションにおいて接触角を表現した例としては, Wang らの Virtual Surface 法<sup>15)</sup>が挙げられる. Wang らは, 気液界面に生じる表面張力, および液固界面に生じる界面張力を反映させた接触角を生成することにより, 写実的な水滴の表現に一定の成果を上げている. しかし移流計算を格子法で行っており, インタラクティブな処理は困難である.

これまで, 写実性という点において申し分ない水滴のアニメーションをインタラクティブに生成する手法は確立されていない. また, 既存の粒子を用いた手法では, 水滴の

接触角の違いを描画しわけすることはほとんど考慮されていない. 本論文では, 水滴の接触角の違いを表現可能な, 写実的な水滴のアニメーションをインタラクティブに生成するための, SPH を用いた液体のシミュレーション手法を提案する.

### 3. シミュレーション

提案手法では, 移流計算を粒子法である SPH によって行う. SPH により 3 次元 Navier-Stokes 方程式を離散化し, 粒子間の相互作用を計算することにより, 粒子の挙動をシミュレートする<sup>16)</sup>.

#### 3.1 Smoothed Particle Hydrodynamics

提案手法では, 液体の移流計算に粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)を用いる. SPH では, Lagrange 式記述により流体の運動を記述する. SPH では粒子ごとに物理値を持たせるが, 液体は本来連続して存在しているため, 粒子間のすき間となる位置の物理値を直接求めることができない. 液体が存在している範囲内で粒子間のすき間となる位置については, 周囲の粒子の物理値からの補間によって物理値を計算する.

SPH では位置  $\mathbf{x}$  における物理量  $A$  は以下の式で補間される.

$$A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (1)$$

ただし,  $m_j, \rho_j$  は粒子  $j$  の質量, 密度を表す.  $W$  はカーネル関数で, 位置  $\mathbf{x}$  と粒子  $j$  の位置  $\mathbf{x}_j$  との距離の関数であり, 近傍粒子  $j$  の影響をどの程度重み付けするかを表す.  $h$  はカーネルの有効半径を表す. 一つの粒子の有効半径内にある粒子を近傍粒子として探索し, 近傍粒子の影響のみを考慮することにより, 計算を効率化し, シミュレーションの高速化を図る<sup>9)</sup>. 以降, 全ての粒子の質量は同じものとし,  $m_j = 1(\forall j)$  とする.

#### 3.2 シミュレーションの流れ

一般的な SPH においては, 1) 粒子にかかる圧力, 粘性力, 重力, 表面張力などを計算, 合成, 2) 合成された力より, 粒子の速度, 位置を更新, という順でシミュレーションが行われる<sup>9)</sup>. しかしこの手順では, 比較的小さなスケールの水のシミュレーションにおいて粒子の挙動が不安定になりやすく, 水滴のシミュレーションには向かないという欠点がある<sup>17)</sup>. 一方 Clavet らは, 重力と粘性は粒子の速度を更新することで表現し, 圧力, 界面張力, その他の外力は粒子の位置を更新することで表現する手法を提案している<sup>16)</sup>. Clavet らはこの手法により, 水滴のような小さなスケールにおける粘弾性流体のシミュレーションにおいて安定したシミュレーション結果を得ている.

提案手法における粒子シミュレーションの流れは次の通りである. 1) 粒子ごとに 1 サイクル前の位置と現在の位置との差のベクトルを求め, 各粒子の新たな速度とする. 2)

粒子に重力，粘性を適用し，速度を更新する．そしてその速度に従って各粒子の位置を更新する．3) 物体との衝突などの外力により，粒子位置を修正する．4) 圧力，近傍圧力，界面張力により，粒子位置を修正する．また，以上の流れを一定回数サイクルさせるごとに近傍粒子探索を行う．近傍粒子探索は天田らの手法を用いる<sup>18)</sup>．

### 3.3 圧力

液体の非圧縮性を表現するため，粒子密度の差を小さくする力となる圧力を各粒子に適用する．粒子位置における液体の密度を計算し，その密度と静止密度  $\rho_0$  との差をとり，圧力の強度を調節する定数  $k^{\text{pressure}}$  を掛けたものを圧力  $P$  とする．密度  $\rho_i$ ，圧力  $P_i$  および圧力による粒子の移動を表すベクトル  $\mathbf{D}_{ij}^{\text{pressure}}$  は以下の式で表される．なお， $(1 - x_{ij}/h)^2$  はカーネル関数， $\Delta t$  はタイムステップ， $\hat{\mathbf{x}}_{ij}$  は粒子  $i$  から近傍粒子  $j$  へ向かう単位ベクトルである．

$$\rho_i = \sum_{j \in N(i)} (1 - x_{ij}/h)^2 \quad (2)$$

$$P_i = k^{\text{pressure}}(\rho_i - \rho_0) \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_{ij}^{\text{pressure}} = \Delta t^2 P_i (1 - x_{ij}/h) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (4)$$

### 3.4 近傍圧力

3.3節で述べた圧力では，粒子間に強い引力が働くことにより，粒子が凝集しいくつかの塊が形成され，人工物のような違和感のある挙動をみせる．そこで提案手法では，粒子の圧力による凝集性を解消するために粒子に与える力として，近傍圧力を導入する<sup>16)</sup>．近傍圧力では密度計算において，3.3節の圧力よりも，距離  $x_{ij}$  に対して重み値  $W$  が急峻に変化するようなカーネル関数を適用する．近傍圧力を求めるための近傍密度  $\rho_i^{\text{near}}$ ，近傍圧力  $P_i^{\text{near}}$  および近傍圧力による粒子の移動を表すベクトル  $\mathbf{D}_{ij}^{\text{near}}$  は以下の式で表される． $k^{\text{near}}$  は近傍圧力の強度を調節する定数である．

$$\rho_i^{\text{near}} = \sum_{j \in N(i)} (1 - x_{ij})^3 \quad (5)$$

$$P_i^{\text{near}} = k^{\text{near}} \rho_i^{\text{near}} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_{ij}^{\text{near}} = \Delta t^2 P_i^{\text{near}} (1 - x_{ij}/h) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (7)$$

### 3.5 粘性

粘性は速度場を平滑化する性質である．本研究では粒子  $i, j$  の相対速度に依存した力を粘性力とし，各粒子の速度に適用する．粘性による速度の修正を表すベクトル  $\mathbf{I}$  は以下の式で表される． $u$  は粒子  $i, j$  の相対速度， $\sigma, \beta$  は粘性の強度を調節する定数である．

$$\mathbf{I}_{ij} = \Delta t (1 - x_{ij}/h) (\sigma u + \beta u^2) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (8)$$

### 3.6 界面張力

界面張力とは，液体が固体との接触面積を小さくしようとする力である．提案手法では，4章で述べる界面張力モデルにより，界面張力を計算する．

### 3.7 実装

実装においては，粘性，圧力，近傍圧力，界面張力といった，一方の粒子から他方の近傍粒子への影響を表すベクトルを対称化することにより，計算コストを削減する．圧力，近傍圧力，界面張力は粒子の位置分布から計算されるため，他の外力によって位置を修正したのちに同時に計算する<sup>16)</sup>．

## 4. 接触角の違いと毛管長の表現

水滴は，他の大きなスケールの水の形態とは異なり，接触角と毛管長がその形状決定に大きな影響を及ぼす．提案手法では SPH を拡張し，これらを考慮した水滴形状を表現するための，界面張力モデル<sup>19)</sup>を導入する．

### 4.1 接触角と界面張力

接触角とは，水滴と，水滴が接する固体表面とがなす角のことである．固体表面が滑らかである場合，接触角の大きさ  $\theta_E$  は，Young-Dupré の法則により，空気，水滴，水滴が接する固体，それぞれ 2 相の間における界面張力の大きさにより一意に決まる<sup>20)</sup>．Young-Dupré の法則は以下の式で表される．ただし， $\gamma_{sa}, \gamma_{ls}, \gamma_{la}$  はそれぞれ，固体と気体，液体と固体，液体と気体との間の界面張力である．

$$\cos \theta_E = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{ls}}{\gamma_{la}} \quad (9)$$

水滴が接している面の違いによる接触角の変化を考えると，水滴と空気の間にはたらく界面張力(表面張力)は一定であるため，無視できる．また，残る 2 つの界面張力も，水滴が接する固体が決まれば一意に決まる．以上のことから，水滴の接触角は，水滴が接する固体により一意に決められると考えられる．よって，本手法では，接触角の違いを表現するために界面張力をモデル化し，SPH に適用する．気体と固体との間の界面張力の影響は，水滴と固体の間にはたらく界面張力の影響に比べて極めて小さいため，以降では水滴と固体の間にはたらく界面張力のみを考慮する．

### 4.2 毛管長

液体において，界面張力の影響が重力よりも支配的となる範囲のことを毛管長といい， $\kappa^{-1}$  で表す． $\kappa^{-1}$  は以下の式で計算できる．ただし， $\rho$  は液体の密度， $g$  は重力加速度である．

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma_{la}}{\rho g}} \quad (10)$$

水滴の境界面のうち，水滴，気体，固体が同時に接する箇所を接触線という(図 1 の  $C$ )．水滴の高さは，接触線から毛管長  $\kappa^{-1}$  の範囲まで徐々に変化する．また，体積の大きな水滴の場合，水滴の高さは，接触線から毛管長  $\kappa^{-1}$  の範囲まで増大し，それより内側では一定となる(図 1)．水の場合， $\kappa^{-1}$  はおよそ 2.7mm であり，それを超える半径の水滴は扁平な形状をとる<sup>20)</sup>．

### 4.3 界面張力モデル

節 4.1 で述べたとおり，界面張力は，水滴の接触線にか

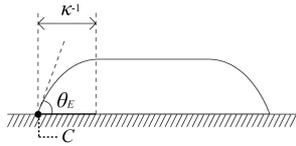


図 1 扁平形状の水滴と毛管長

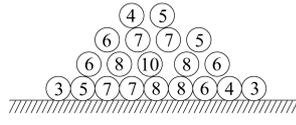


図 2  $N_i^{\text{neighbor}}$  の例

CPU	Intel Core2 Duo E6600 2.40GHz
メモリ	1.00GB RAM
GPU	NVIDIA GeForce 7900 GTX
OS	Microsoft Windows XP
プログラミング言語	C 言語
コンパイラ	Microsoft Visual Studio .NET 2003
Graphics API	OpenGL

表 1 実行環境

かる，液体が固体との接触面積を小さくしようとする力である．よって，固体付近の粒子に作用し，水滴の接触線に近い位置から水滴の内側へ向かう力であると考えられることができる．また，節 4.2 より，水滴の高さの変化は接触線から水滴の内側に向かって徐々に小さくなるのが分かる．この形状は，接触線からの距離が遠くなるにつれて各粒子にかかる界面張力の大きさを小さくすることで表現できると考えられる．

提案する界面張力モデルでは，粒子  $i$  の一定範囲内にある粒子の数  $N_i^{\text{neighbor}}$  の逆数に，界面張力の強度を調節する定数  $k^{\text{ift}}$  をかけたものを界面張力  $F_{ij}^{\text{ift}}$  とし，固体表面付近の各粒子に  $F_{ij}^{\text{ift}}$  を与える．図 2 のように， $N_i^{\text{neighbor}}$  は接触線付近の粒子で最も小さな値をとり，水滴の内側にある粒子ほど大きな値をとる．よってこの逆数である  $1/N_i^{\text{neighbor}}$  は接触線付近の粒子で最も大きな値をとり，水滴の内側にある粒子ほど小さな値をとることから，これを固体付近にある粒子に界面張力として与える．さらに，定数  $k^{\text{ift}}$  により界面張力の強度を調節することによって，接触角の違いによる水滴の形状の差を表現する．

$F_{ij}^{\text{ift}}$  は以下の式で表される．

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} = (k^{\text{ift}}/N_i^{\text{neighbor}}) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (11)$$

水滴の毛管長による扁平形状を表現するため， $N_i^{\text{neighbor}}$  がある閾値  $c$  以上の値をもつ粒子の界面張力  $F_{ij}^{\text{ift}}$  を 0 とすることで，界面張力を与える粒子を接触線付近の粒子に限定する．

以上から，粒子  $i$  とその近傍粒子  $j$  との間にかかる界面張力  $F_{ij}^{\text{ift}}$  と，粒子  $i$  にかかる界面張力の合計  $\mathbf{D}_i^{\text{ift}}$  を表現する式は以下のように表される．

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} = \begin{cases} (k^{\text{ift}}/N_i^{\text{neighbor}}) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} & (N_i^{\text{neighbor}} < c) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{D}_i^{\text{ift}} = \Delta t \mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} \quad (13)$$

## 5. 実験

本章では，提案手法を実装したシミュレーションによる実験の結果を示し，結果について考察するとともに今後の展望について述べる．

### 5.1 実験条件

実験を行ったコンピュータ環境およびソフトウェア環境を表 1 に示す．

シミュレーションを 3 回更新するごとに近傍粒子探索を 1 回行った．また，近傍粒子探索を 4 回行うごとに描画を 1 回行った．すなわち描画 1 回につきシミュレーションを 12 回更新している．粒子の解像度は，1 粒子の水の重さを 0.25mg とした．この場合，毛管長  $\kappa^{-1}$  を半径とする半球の体積分に相当する粒子数を閾値  $c$  と仮定し，毛管長  $\kappa^{-1}$  を 2.7mm とすると，閾値  $c$  の値はおおよそ 80 となる．全てのシミュレーションにおいて，初期状態で粒子群は床から数 cm 程度上にあり，シミュレーション開始とともに落下し床の上に落ちた．以下の節で示す図は，床に落ちたのちほぼ安定した状態の水滴の描画結果を表す．上段は粒子の状態で，下段はレンダリング例である．また，図は全て水滴を真横の視点から見て描画したものである．

### 5.2 接触角の違い

提案手法により，接触角の異なる水滴が表現されるか検証した．いずれも粒子数は 400，毛管長を表現する閾値  $c$  は 80，シミュレーションのタイムステップは 0.03ms であり，界面張力の強度を調整する定数  $k^{\text{ift}}$  がそれぞれ 0.0, 1.0, 6.0 である場合の水滴形状の変化について調べた．図 3 を見ると， $k^{\text{ift}}$  が増加するにつれて，水滴の接触角が大きくなっているのが分かる．

### 5.3 毛管長

提案手法により，水滴の毛管長，およびそれに伴う扁平形状が表現されるか検証した．いずれも粒子数は 400，界面張力係数  $k^{\text{ift}}$  は 2.0，シミュレーションのタイムステップは 0.03ms であり，毛管長を表現する閾値  $c$  がそれぞれ 10, 20, 80 である場合の水滴形状の変化について調べた．図 4 を見ると， $c$  が 10 の場合は， $k^{\text{ift}}$  が 2.0 であるにもかかわらず扁平形状が生成されたのに対し，80 の場合ではより球形に近い水滴が生成されている．

### 5.4 タイムステップによる違い

シミュレーションの異なるタイムステップにおける粒子の挙動の違いについて調べた．いずれも粒子数は 400，界面張力係数  $k^{\text{ift}}$  は 2.0，毛管長を表現する閾値  $c$  は 80 であった．シミュレーションのタイムステップ  $\Delta t$  は 3ms, 0.3ms, 0.03ms の場合を調べた．図 5 を見ると， $\Delta t$  が 3ms の場合では粒子が広がり，水滴の形状を形成できていないことが分かる．また， $\Delta t$  が 3ms および 0.3ms の場合では，粒子が激しく動き，形状が安定しなかったが，0.03ms の場合では比較的安定して形状を維持できていた．さらに表 2 を見ると，いずれの場合もインタラクティブなフレームレートで計算できていることが分かるが， $\Delta t$  が 0.03ms の場合で

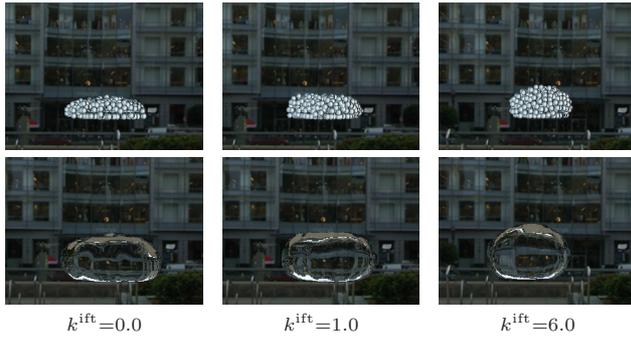


図 3 接触角の違い

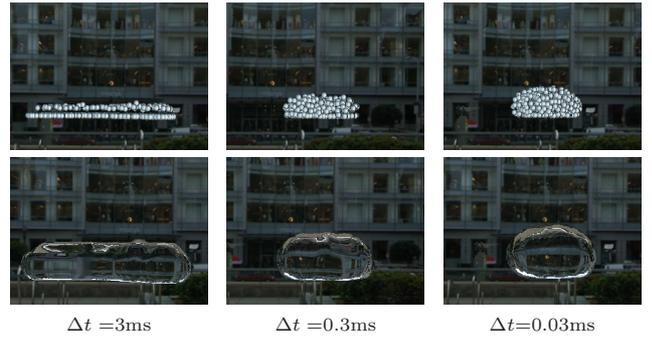


図 5 タイムステップによる違い

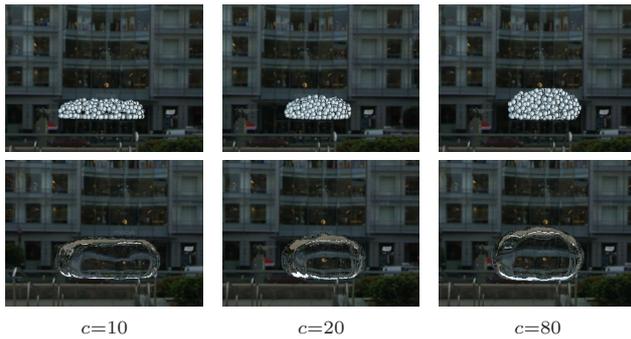


図 4 毛管長の違い

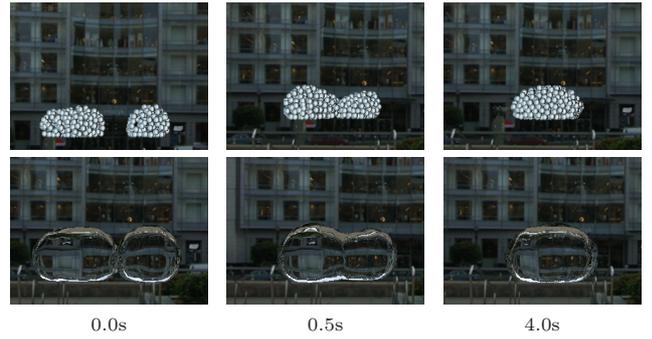


図 6 シーン 1: 2 つの水滴のかたまりが融合する様子

タイムステップ (ms)	フレームレート (fps)
3	23
0.3	19
0.03	18

表 2 タイムステップによる違い



図 7 シーン 2: 球面状の床でのアニメーションの様子

は実空間での時間が 1s 進む間にシミュレーション内の時間が 6.5ms しか進んでいないことになる。

### 5.5 アニメーション

平たい滑らかな床で 2 つの水滴のかたまりが融合するときの水滴の挙動 (シーン 1) と、床が球面状である場合の水滴の挙動 (シーン 2) について調べた。いずれも粒子数は 400 (シーン 1 は 200 粒子のかたまりが 2 つ)、界面張力係数  $k^{ift}$  は 2.0、毛管長を表現する閾値  $c$  は 80、シミュレーションのタイムステップは 0.03ms であった。

シーン 1 の結果 (図 6) では、2 つの水滴が自然に融合する様子が見られた。2 つの水滴が接着すると同時に、比較的速く 1 つの水滴となり、時間が経つと 1 つの水滴形状として適切な形状となった。シーン 2 の結果 (図 7) では、球面状の床において自然な動きであったが、水滴が坂を上る、あるいは下る際に現れる前進接触角および後退接触角<sup>?)21)</sup>は見られなかった。いずれのシーンもフレームレートは 17fps 前後であり、全体的にシミュレーション内での時間経過がやや遅く感じられた。それ以外の点について、大きな違和感は見られなかった。

## 6. 考察

実験では、提案手法により接触角の異なる水滴形状を粒子法に基づいて生成できた。また、閾値  $c$  を変化させるこ

とにより、水滴の毛管長を適切に変化させることができた。これは同じ粒子数であっても、表現する水滴の体積、すなわち粒子解像度を変化させられることを意味する。以上の点より、提案手法が粒子法を用いて水滴の形状および振るまいを表現する手法として有効に機能していると言える。

節 5.4 より、シミュレーション内の時間進行が、違和感のない程度であるタイムステップでは、シミュレーションはインタラクティブな速度で実行できた。また、形状が安定した水滴のアニメーションを得るためにはタイムステップを 0.03ms 程度まで小さくする必要があることが分かった。その場合、現実空間の時間 1s に対してシミュレーション内では 6.5ms しか進んでいないことから、本研究が目的としているゲームなどのインタラクティブなアプリケーションで用いるためには、計算速度は不十分であると言える。よって、小さなタイムステップであってもインタラクティブなフレームレートを得られるよう、シミュレーションの実装の効率化、並列化や GPU の活用<sup>10)</sup>などによって計算速度を向上する必要がある。また、大きなタイムステップで

も安定した水滴形状を維持できるよう、手法の改良が望まれる。

## 7. む す び

本論文では、粒子法である SPH を拡張し、水滴の接触角を表現するための界面張力モデルを用いたシミュレーション手法を提案した。接触線からの距離に応じた力を界面張力として粒子に与えることにより、接触角の異なる水滴形状や、体積の大きい水滴の扁平形状を表現する界面張力モデルを提案した。実験では、提案手法により接触角の異なる水滴形状が粒子によって生成された。また、水滴の毛管長による形状が適切に表現された。シミュレーションはインタラクティブなフレームレートで実行できた。しかし水滴のアニメーションを得るためには不十分な速度であり、計算速度向上のためのさらなる改善が望まれる。アニメーションの生成結果においては、提案手法の、粒子法を用いた水滴の形状および振るまいを表現する手法としての有効性が示された。

今後はシミュレーション手法を高速化し、安定化させることにより、実時間で違和感のないアニメーションを得ることが望まれる。さらに、したたりなどより水滴の特性を厳密に表現する手法への発展、および他の SPH を用いた水のシミュレーションと組み合わせ、統合的に扱う手法への応用などが期待される。

## 〔 文 献 〕

- 1) F. H. Harlow and J. E. Welch: "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous incompressible flow of fluid with free surface", *Physics of Fluids*, **8**, pp.2182-2189 (1965)
- 2) N. Foster and D. Metaxas: "Realistic Animation of liquids", *Graphical Models and Image Processing*, **58**, 5, pp.471-483 (1996)
- 3) N. Foster and R. Fedkiw: "Practical Animation of Liquids", In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.23-30 (2001)
- 4) D. Enright, S. Marschner, and R. Fedkiw: "Animation and Rendering of Complex Water Surfaces", In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.736-744 (2002)
- 5) S. Koshizuka and Y. Oka: "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", *Nuclear Science and Engineering*, **123**, pp.421-434 (1996)
- 6) J. J. Monaghan: "Smoothed Particle Hydrodynamics", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **30**, pp.543-574 (1992)
- 7) S. Premoze, T. Tasdizen, J. Bigler, A. Lefohn and R. T. Whitaker: "Particle-Based Simulation of Fluids", *Computer Graphics Forum*, **22**, 3, pp.401-410 (2003)
- 8) M. Desbrun and M. P. Gascuel: "Smoothed Particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies", In *Proceedings of the Eurographics workshop on Computer animation and simulation*, Springer-Verlag New York, Inc, pp.61-76 (1996)
- 9) M. Müller, D. Charypar and M. Gross: "Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications", *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation*, pp.154-159 (2003)
- 10) 原田, 田中, 越塚, 河口: "粒子ベースシミュレーションの並列化", *情報学論*, **48**, 11, pp.3557-3567 (2007)
- 11) B. Adams, M. Pauly, R. Keiser and L. J. Guibas: "Adaptively Sampled Particle Fluids", *ACM Transactions on Graphics*, **26**, 3, Article 48 (2007)
- 12) K. Kaneda, Y. Zuyama, H. Yamashita and T. Nishita: "Animation of Water Droplet Flow on Curved Surfaces", In *Proceedings of PACIFIC GRAPHICS '96*, pp.50-65 (1996)
- 13) M. Jonsson and A. Hast: "Animation of Water Droplet Flow on Structured Surfaces", *Linköping Electronic Conference Proceedings, SIGRAD 2002*, ISSN 1650-3686 (2002)
- 14) P. Fournier, A. Habibi and P. Poulin: "Simulating the Flow of Liquid Droplets", In *Graphics Interface*, pp.133-142 (1998)
- 15) H. Wang, P. J. Mucha, and G. Turk: "Water Drops on Surfaces", *ACM Transactions on Graphics*, **24**, pp.921-929 (2005)
- 16) S. Clavet, P. Beaudoin and P. Poulin: "Particle-based Viscoelastic Fluid Simulation" In *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp.219-228 (2005)
- 17) 安部, 井村, 眞鍋, 千原: "水滴の実時間表現" 第 51 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp.589-590, 2007.
- 18) 天田: "水の実時間アニメーション" 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, 2005.
- 19) 安部, 井村, 池田, 眞鍋, 千原: "水滴表現のための粒子ベース液体シミュレーション", 2007 年映学冬季大, p.7-2 (2007)
- 20) ドウジェンヌ, プロシャール・ビヤール, ケレ; 奥村 訳: "表面張力の物理学-しずく, あわ, みずたま, さざなみの世界-", 吉岡書店 (2003)
- 21) 中島: "固体表面の濡れ制御". 内田老鶴園 (2007)



あべ たくや  
安部 拓也 2008 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。コンピュータグラフィクスに関する研究に従事。



いむら まさたか  
井村 誠孝 2001 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年, 同研究科助手。2007 年, 同研究科助教, 現在に至る。可視化および人工現実感に関する研究に従事。博士(工学)。



いけだ せい  
池田 聖 2006 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年, 同研究科特任助手。2007 年, 同研究科助教, 現在に至る。コンピュータビジョン, 複合現実感に関する研究に従事。博士(工学)



まなべ よしつぐ  
眞鍋 佳嗣 1995 年, 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年, 同大学基礎工学部助手。1999 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2007 年, 同研究科准教授, 現在に至る。2001 年, ヨエンスー大学客員研究員。質感計測・表現の研究に従事。博士(工学)。



ちはら くにひろ  
千原 國宏 1973 年, 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年, 大阪大学基礎工学部助手。1983 年, 同助教。1992 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授, 現在に至る。バーチャルリアリティの応用研究に従事。工学博士。