

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	АМ	
URL	https://hdl.handle.net/11094/3409	
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,	井村誠孝†,	池田	聖†
	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

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)

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,液体が存在しう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,液体の存在しう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,

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 Semiimplicit(MPS)法<sup>5)</sup>と,SPH法<sup>6)</sup>が挙げられる.Premože 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>77</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 10) 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 x における物理量 A は以下の式で補間される.

$$A(\mathbf{x}) = \sum_{j} m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$
(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 x と粒子jの位置 x<sub>j</sub> 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.

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

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

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

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 $\mathbf{x}_{ij}$ 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.

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

$$P_i^{\text{near}} = k^{\text{near}} \rho_i^{\text{near}} \tag{6}$$

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

# 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 I は以 下の式で表される.*u* は粒子*i*,*j*の相対速度,σ,β は粘 性の強度を調節する定数である.

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

$$\cos\theta_{\rm E} = \frac{\gamma_{\rm sa} - \gamma_{\rm ls}}{\gamma_{\rm la}} \tag{9}$$

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、水滴と固体との間に 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 では水滴と固体と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.

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma_{\rm la}}{\rho g}} \tag{10}$$

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



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ことが分かる.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 $\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}}$ とし,固体表面付近 の各粒子に $\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}}$ 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 リ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.

 $\mathbf{F}_{ii}^{\text{ift}}$ は以下の式で表される.

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

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  $\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}}$ 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 $\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}}$ 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.

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

$$\mathbf{D}_i^{\text{ift}} = \Delta t \mathbf{F}_{ii}^{\text{ift}}$$
(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.

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

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<sup>ift</sup> 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<sup>ift</sup> が増加するにつれて,水滴の接触角が大きくなっていることが分かる.

### 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 らず扁平な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

4 (4)





c = 10

c = 80

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		

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<sup>ift</sup> 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



図 6 シーン 1:2 つの水滴のかたまりが融合する様子



図 7 シーン 2: 球面状の床でのアニメーションの様子

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

c=20 図 4 毛管長の違い

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〕

- 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, bf 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 Reveiw of Astronomy and Astrophysics, **30**, pp.543-574 (1992)
- 7) S. Premože, 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/Eurograpics Symposium on Computer animation, pp.154-159 (2003)
- 10)原田,田中,越塚,河口: "粒子ペースシミュレーションの並列化",情 処学論,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 年映情学冬季大,p.7-2 (2007)
- 20) ドゥジェンヌ, プロシャール・ビィアール, 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". 内田老鶴圃 (2007)



<sup>あ</sup> ベ 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.



井村 読孝 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

107 た 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)



# Ø

167 回宏 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,同助教授.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.パーチャルリア リティの応用研究に従事.工学博士.