

NAIST-IS-MT0651004

## 修士論文

# 粒子ベース液体シミュレーションによる 水滴のアニメーション

安部 拓也

2008年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

安部 拓也

審査委員：

千原 國宏 教授 (主指導教員)

加藤 博一 教授 (副指導教員)

眞鍋 佳嗣 准教授 (副指導教員)

池田 聖 助教 (副指導教員)

# 粒子ベース液体シミュレーションによる 水滴のアニメーション\*

安部 拓也

## 内容梗概

物理計算に基づいた写実的な自然現象のコンピュータグラフィクスによる表現への要求は，エンターテイメントなどの分野でますます高まってきている．特にゲームなどにおいて，ユーザの入力に対してインタラクティブな表現を行うためには，実時間処理で物理現象がシミュレーション可能であることが求められる．我々の生活で身近な存在である水滴は，その計算コストの高さと水滴特有の物理特性から，実時間で違和感のないシミュレーション手法が確立されていないものの一つである．本論文では，粒子を用いた液体シミュレーション手法である Smoothed Particle Hydrodynamics を拡張し，接触角の違いを表現可能な界面張力モデルを用いて水滴を表現する手法を提案する．提案手法は，接触線からの距離に応じた力を界面張力として各粒子に与える界面張力モデルにより，接触角の異なる水滴の表現および水滴の毛管長の表現を可能とする．また，陰曲面を生成するための密度ボリュームを平滑化することにより，滑らかな水面の表現を可能とする．本論文では，提案手法を用いて実験を行い，粒子群による，接触角の異なる，毛管長を反映した水滴形状の生成を確認した．

## 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

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文，NAIST-IS-MT0651004, 2008年2月7日.

# Animation of Waterdrops with Particle-Based Liquid Simulation\*

Takuya Abe

## Abstract

There is higher and higher demand for realistic computer-generated animation of natural phenomena based on the physical computation. Especially for interactive applications, e.g. video games, computation of physical phenomena needs to be completed in real-time frame rate. 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. Interfacial tension model gives particles the force dependent on the distance from contact line as interfacial tension. The proposed method enables to simulate waterdrops with different contact angle and with flat shape. Besides, smoothing density volume enables to render smoother water surface. The proposed method was implemented and succeeded to generate figure of waterdrops with different contact angles and reflected capillary length feature with particles.

## Keywords:

computer graphics, particle-based simulation, waterdrop, interfacial tension, capillary length, physical simulation

---

\*Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0651004, February 7, 2008.

# 目次

第1章 序論	1
第2章 研究背景	4
2.1. 液体のアニメーション生成における先行研究	4
2.2. 水滴のアニメーション生成における先行研究	8
2.3. 本研究の位置づけ	10
第3章 水滴のシミュレーション	11
3.1. シミュレーションの流れ	11
3.2. Smoothed Particle Hydrodynamics	11
3.3. SPHによる液体シミュレーション	12
3.3.1 粒子シミュレーションの流れ	12
3.3.2 圧力	14
3.3.3 近傍圧力	14
3.3.4 粘性	15
3.3.5 界面張力	15
3.3.6 近傍粒子探索	15
3.3.7 実装	16
3.4. 接触角の違いと毛管長の表現	18
3.4.1 接触角と界面張力	18
3.4.2 毛管長	18
3.4.3 界面張力モデル	20
3.5. レンダリング	21
3.5.1 水面の生成	21

3.5.2	水面の反射，屈折表現 . . . . .	22
<b>第4章</b>	<b>実験</b>	<b>23</b>
4.1.	実験条件 . . . . .	23
4.2.	実験と結果 . . . . .	25
4.2.1	接触角の違い . . . . .	25
4.2.2	毛管長 . . . . .	27
4.2.3	水面の生成 . . . . .	29
4.2.4	タイムステップによる違い . . . . .	31
4.2.5	アニメーション . . . . .	33
4.2.6	実水滴との比較 . . . . .	36
4.3.	考察 . . . . .	39
4.4.	将来への展望 . . . . .	40
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>41</b>
	謝辞	42
	参考文献	43

# 目次

1.1	水滴の例 . . . . .	2
2.1	Dynamic Simulation of Splashing Fluids . . . . .	5
2.2	Euler 式記述による液体表現の例 . . . . .	6
2.3	Lagrangian 式記述による液体表現の例 . . . . .	6
2.4	Animation and Rendering of Complex Water Surfaces . . . . .	7
2.5	Adaptively Sampled Particle Fluids . . . . .	8
2.6	Animation of Water Droplet Flow on Structured Surfaces . . . . .	9
2.7	Simulating the Flow of Liquid Droplets . . . . .	9
2.8	Water Drops on Surfaces . . . . .	10
3.1	シミュレーションの流れ . . . . .	12
3.2	粒子シミュレーションの流れ . . . . .	13
3.3	Young-Dupré の法則 . . . . .	19
3.4	扁平形状の水滴と毛管長 . . . . .	19
3.5	界面張力の例 (左: 界面張力が小さい場合 右: 界面張力が強い場合)	20
3.6	$N_i^{\text{neighbor}}$ の例 . . . . .	21
4.1	接触角の違い (上から $k^{\text{ift}}=0.0, 1.0, 2.0, 6.0$ ) . . . . .	26
4.2	毛管長の違い (上から $c=10, 20, 80$ ) . . . . .	28
4.3	平滑化フィルタサイズの違い (左は粒子表示, 右は水面表示で上からフィルタなし, フィルタサイズ 3, フィルタサイズ 5) . . . . .	30
4.4	タイムステップによる違い (上から 3ms, 0.3ms, 0.03ms) . . . . .	32
4.5	シーン 1: 2 つの水滴のかたまりが融合する様子 . . . . .	34
4.6	シーン 2: 球状の容器内でのアニメーションの様子 . . . . .	35

4.7	実水滴との比較 (小さい接触角の場合; 上から体積が0.5mL , 1.0mL , 2.0mL の場合) . . . . .	37
4.8	実水滴との比較 (大きい接触角の場合; 上から体積が0.5mL , 1.0mL , 2.0mL の場合) . . . . .	38

# 表 目 次

4.1	実行環境 . . . . .	24
4.2	シミュレーションパラメータ . . . . .	24
4.3	タイムステップによる違い . . . . .	31

# 第1章 序論

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．現実世界により忠実な表現をするためには，より厳密なシミュレーションを行う必要がある．しかし，緻密なシミュレーションと計算時間はトレードオフの関係にあり，シミュレーションの種類によっては，厳密な物理法則の計算式をそのまま適用したのでは実用に耐えないものも多い．計算コストの高いシミュレーションとしては，煙や水などの流れのシミュレーション，あるいは布の破れなど剛体の分裂・破壊のシミュレーションなどが知られており，表現する対象やプラットフォームに応じた様々な手法が検討されてきている．

映画は最先端の CG 研究の成果が頻繁に応用される分野である．映画では，最終的にある決まった映像を出力することが目的である．従って，オフライン計算が可能であり，高品質な CG アニメーションを生成するために，膨大な計算コストのかかる手法を用いることができる．一方，ゲームにおいて，プレイヤーの入力に対してインタラクティブにシミュレーションを行うためには，そのゲーム機において実時間で計算できることが必要不可欠である．そのため，計算コストの高い自然現象のシミュレーションを用いて画像を出力する場合，あらかじめ計算した結果を選択的に用いるか，あるいは計算式を大幅に近似する手法を用いることにより，インタラクティブ性を確保している．

我々の周りに存在する物質は気体，液体，固体のいずれかの形態をとる．液体はその中の一つであり，その写実的な表現は 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．

本研究では，ゲームなど実時間計算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，洗い立てのコップについた水滴，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（図 1.1）．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．

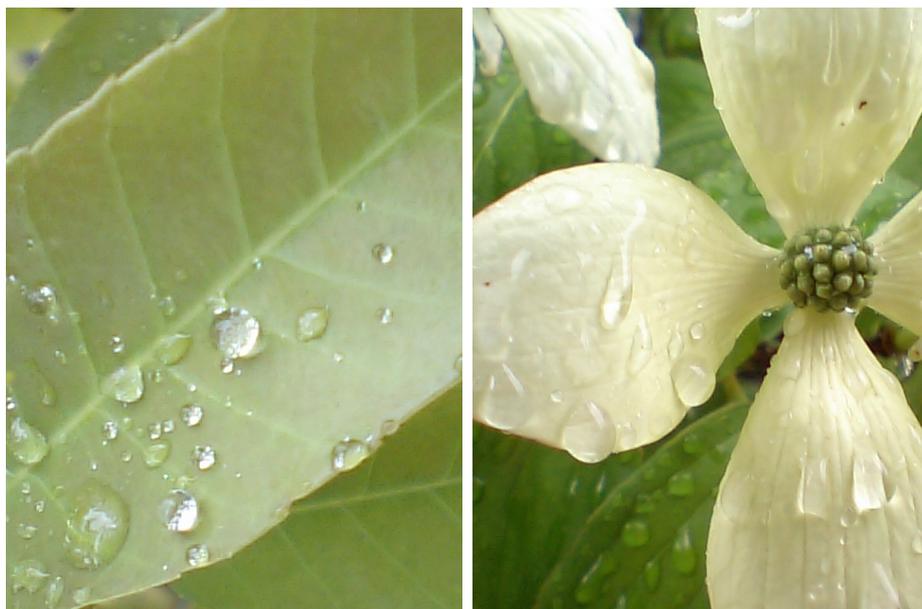


図 1.1 水滴の例

本論文では，水滴を実時間で描画するため，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。さらに、粒子法を用いた水のシミュレーションに顕著に見られる水面付近の粒子による不自然な凹凸を減らすため、陰曲面を生成するための密度ボリュームに平滑化フィルタをかける。

本論文の構成は、2章で液体のシミュレーションにおける先行研究を紹介するとともに本研究の位置づけを述べる。3章では接触角の異なる水滴をシミュレートし、レンダリングを行うための手法について述べる。4章では提案手法の有効性を検証するために行った実験とその結果を述べるとともに結果について考察し、5章で総括を行う。

## 第2章 研究背景

### 2.1. 液体のアニメーション生成における先行研究

液体の移流を物理学的に厳密にシミュレートするためには、複雑な方程式の解を数値的に求める必要があり、膨大な計算を行わなければならない。一方、CGアニメーションにおいては見た目が重要であり、シーンを描画できれば物理学的な厳密性は重要ではない。そのため、これまでに液体の移流をCGで表現するために様々な簡単化手法が提案されてきた。

高さフィールドは詳細な移流シミュレーションの不要な箇所の計算を簡易化する手法としてよく用いられる。Kassらは高さフィールドを用いて水面の波の動きのアニメーションを生成する手法を提案した [1]。O'Brienらは波面を表す高さフィールドと独立した粒子を用いることにより、物体が波面と衝突したときの波面の動きとしぶきを表現する手法を提案した [2](図 2.1)。Irvingらは、後に述べる格子法を用いて大量の水のアニメーションを生成する際に、水面などの表現において重要な領域以外を高さフィールドのような格子で表現することにより、高品質なアニメーションを効率的に生成する手法を提案した [3]。また、Yukselらは水面付近を粒子で表現し、それ以外に高さフィールドを用いることにより、波面のアニメーション生成を実時間で行った [4]。

上記の手法は、主として水面のアニメーションを生成する場合に有効である。一方、波面だけでなく液体全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。物理学の分野においては、液体の振るまいを記述する式として3次元 Navier-Stokes 方程式が知られており、これを解くことで液体の振るまいを計算することができる。コンピュータ上ではこれを離散化した式を用いて数値的に解く、計算流体力学を用いた手法が広く研究されている。

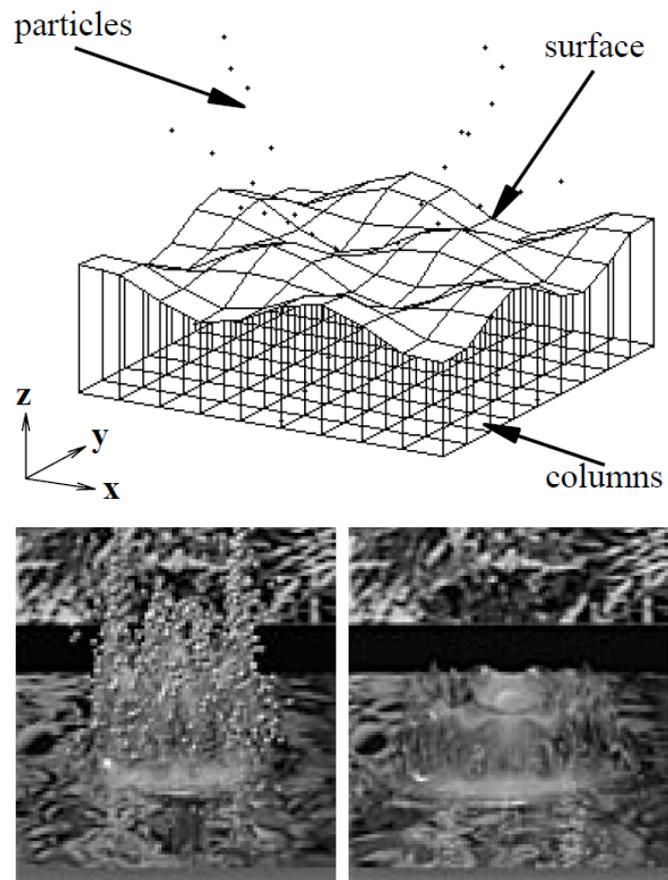


图 2.1 Dynamic Simulation of Splashing Fluids

計算流体力学における流体の記述手法には、液体が存在する空間上の、ある位置に注目し、その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 (図 2.2) と、液体を粒子群に分割し、ある粒子に注目し、その粒子の挙動を時系列に従って追跡する Lagrange 式記述 (図 2.3) 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。

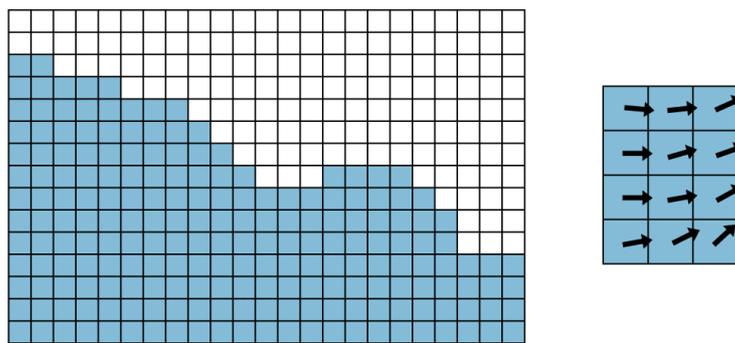


図 2.2 Euler 式記述による液体表現の例

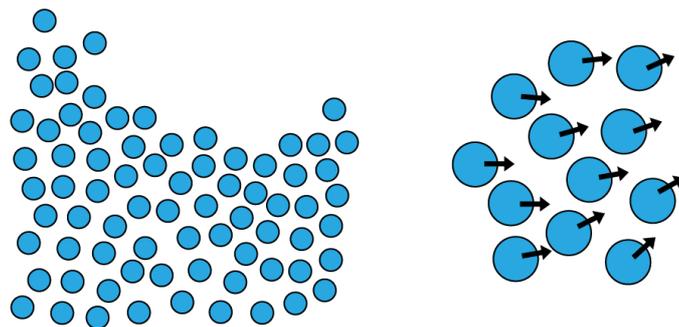


図 2.3 Lagrangian 式記述による液体表現の例

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Markar-And-Cell(MAC)法 [5] を写実的な液体のアニメーションへ適用した [6]．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 [7] 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 [8](図 2.4)．格子法では MAC 法を用いた手法の他にも，Cubic Interpolated Propagation(CIP)法 [9] を始め，多くの成果が挙げられている．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ッ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という欠点がある．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．

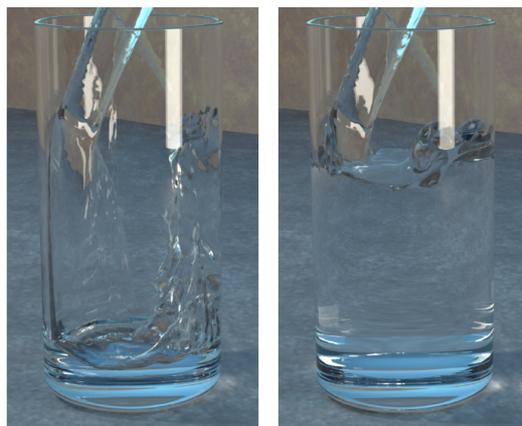


図 2.4 Animation and Rendering of Complex Water Surfaces

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 [10] と，SPH法 [11] 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 [12]．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

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 [11]。Desburn 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 [13]。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 [14]。原田らは、粒子シミュレーションの計算を GPU 上で行う手法を提案し、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した [15]。さらに、SPH で液体に溶けている気体から発生する気泡を扱う手法 [16] 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 [17](図 2.5) など、SPH を改良、拡張する様々な手法が提案されている。

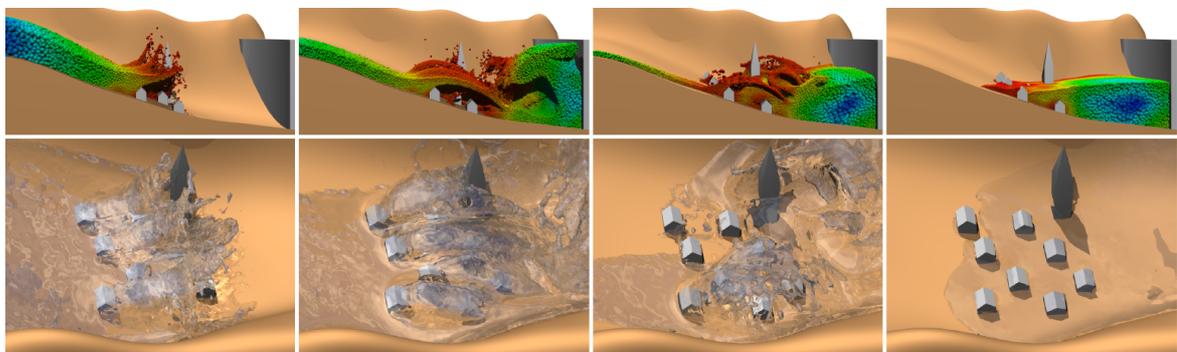


図 2.5 Adaptively Sampled Particle Fluids

## 2.2. 水滴のアニメーション生成における先行研究

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。Kaneda らは曲面上での水滴の流れを、Jonsson は構造化された表面上での水滴の流れを表現した [18][19](図 2.6)。また、Fournier らは水滴の形状と動きを分離し、描画される水滴の写実性を改善した [20](図 2.7)。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。

水滴の形状を表現する場合は，水滴が接する固体と水との間に形成される接触角がその外観に大きく作用する．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，WangらのVirtual Surface法[21]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(図2.8)．しかし移流計算を格子法で行っており，実時間での処理は困難である．



図 2.6 Animation of Water Droplet Flow on Structured Surfaces



図 2.7 Simulating the Flow of Liquid Droplets

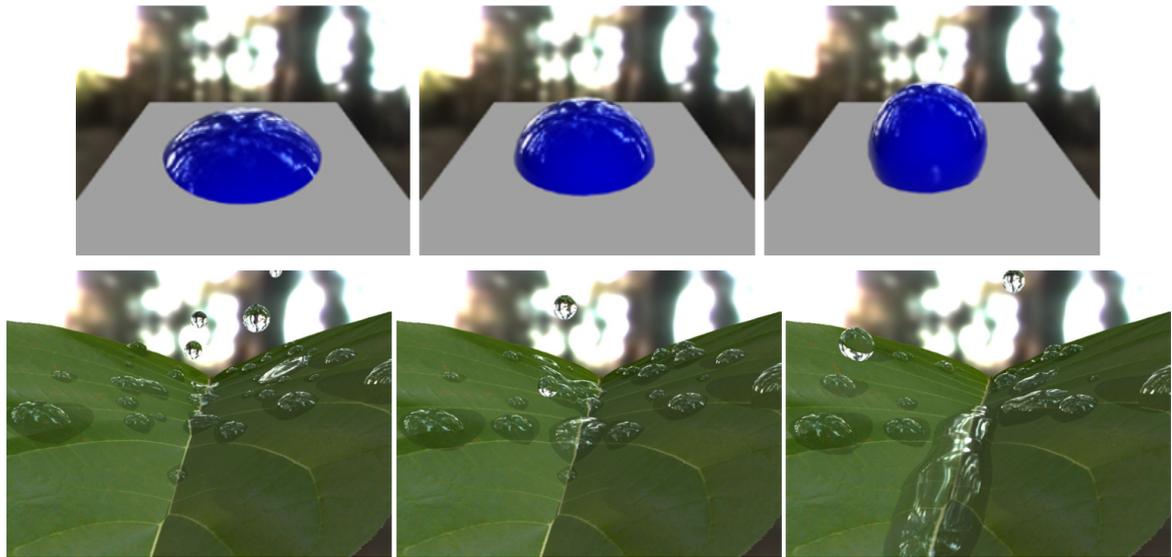


図 2.8 Water Drops on Surfaces

### 2.3. 本研究の位置づけ

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実時間で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。そこで本論文では、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実時間で生成するための、SPHを用いた液体のシミュレーション手法を提案する。

## 第3章 水滴のシミュレーション

CGにおいて，写実的な液体を表現するには，計算流体力学に基づいたシミュレーションが効果的である．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 [22]．

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 [23] を導入する．

水面の描画の際には，粒子シミュレーションにより得られた密度ボリュームから，水面を表す陰曲面を生成する．このとき，水面付近の粒子による不自然な凹凸を減らすため，密度ボリュームに平滑化フィルタをかける．

### 3.1. シミュレーションの流れ

シミュレーションでは，粒子シミュレーションにて物理計算を行い，粒子の挙動をシミュレートする．さらに，粒子シミュレーションにより得られた密度ボリュームより陰曲面を生成し，水面を描画する．提案手法では， $N\_STEP$  回粒子シミュレーションを行うごとに水面を描画することで，計算量の削減を図り，描画速度を調節する．シミュレーションの流れを図 3.1 に示す．

### 3.2. 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

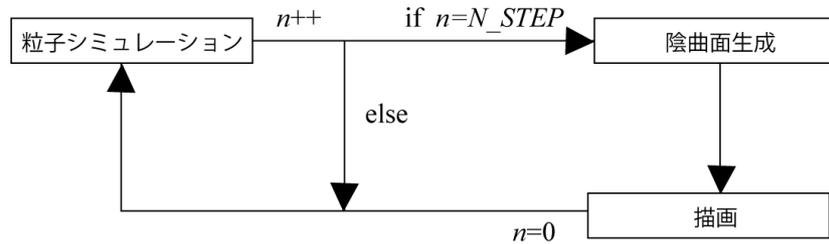


図 3.1 シミュレーションの流れ

述する．SPH では粒子ごとに物理値を持たせるが，液体は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．粒子間の本来液体が存在してい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  $\mathbf{x}$  における物理値  $A$  は以下の式で補間される．

$$A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.1)$$

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，粒子間の距離に応じた重みづけを表す． $h$  はカーネルの有効半径を表す．一つの粒子の一定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 [14]．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．

### 3.3. SPH による液体シミュレーション

#### 3.3.1 粒子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 [14] . しかしこの手法では , 比較的小さなスケール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 [24] .

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 [22] . このとき , 外力により位置を更新したのち密度などを計算し , 圧力 , 界面張力を適用する . 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 .

粒子シミュレーションの1サイクルを図3.2に示す . まず , 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 . 次に粒子に重力 , 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 . 圧力 , 界面張力 , 物体との衝突などの外力により , 粒子位置を修正する . また , 一定回数サイクルさせるごとに近傍粒子探索を行う .

### 3.3.2 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 .

$$\rho_i = \sum_{j \in N(i)} (1 - x_{ij}/h)^2 \quad (3.2)$$

$$P_i = k^{\text{pressure}}(\rho_i - \rho_0) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{D}_{ij}^{\text{pressure}} = \Delta t^2 P_i (1 - x_{ij}/h) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (3.4)$$

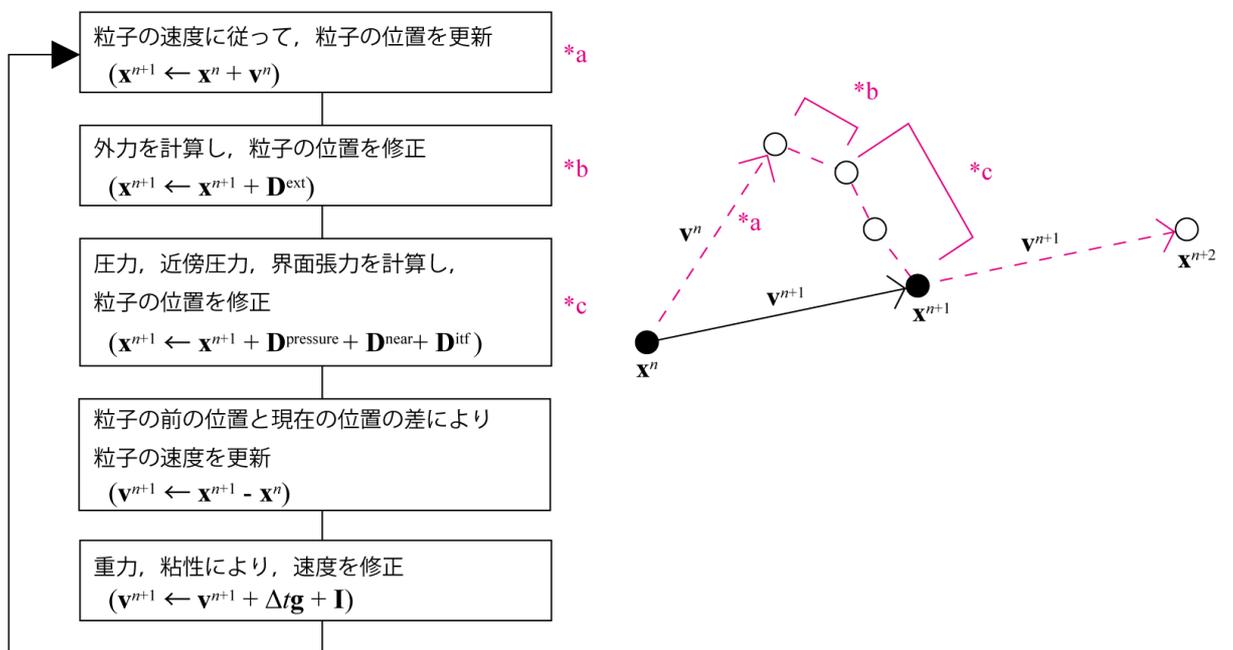


図 3.2 粒子シミュレーションの流れ

### 3.3.3 近傍圧力

3.3.2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 [22]．近傍圧力では密度計算において，3.3.2節の圧力よりも鋭い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．

$$\rho_i^{\text{near}} = \sum_{j \in N(i)} (1 - x_{ij})^3 \quad (3.5)$$

$$P_i^{\text{near}} = k^{\text{near}} \rho_i^{\text{near}} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D}_{ij}^{\text{near}} = \Delta t^2 P_i^{\text{near}} (1 - x_{ij}/h) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (3.7)$$

### 3.3.4 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．

$$\mathbf{I}_{ij} = \Delta t (1 - x_{ij}/h) (\sigma u + \beta u^2) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (3.8)$$

### 3.3.5 界面張力

界面張力は，水滴の接触線にかかる，界面に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．本研究では，節 3.4 で述べる界面張力モデルにより界面張力を計算し，各粒子に与えることで，水滴の接触角の違いと毛管長を表現する．

### 3.3.6 近傍粒子探索

SPHでは物理値を周囲の粒子から補間する際、計算を効率化するためにカーネルの有効半径内にある粒子、すなわち近傍粒子の影響のみを考慮する。そのためには、物理値の補間を行う前に、あらかじめ近傍粒子を探索しておくことが必要である。提案手法では以下のようにして近傍粒子を探索する [25]。

水滴が存在する空間を、一辺の長さが全て等しい立方体格子群によって分割し、粒子を格子へ割り当てる。ただし立方体格子の一辺の長さはカーネルの有効半径以上とする。ある注目粒子の近傍粒子は、注目粒子が割り当てられた注目格子およびその26近傍にある格子、合わせて27の格子に割り当てられた粒子と注目粒子との距離をそれぞれ計算し、カーネルの有効半径と比較することにより得られる。

ある注目粒子  $i$  の近傍粒子  $j$  を考えるとき、注目粒子  $i$  は粒子  $j$  から見た近傍粒子でもある。このことから提案手法では、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全て対称化している(次節参照)。よって、粒子と近傍粒子のペアが求められればよいことになる。そこで全ての粒子に対して、1) 近傍格子内にある近傍粒子の探索、2) 粒子の格子への割り当て、という順で処理を行うことで、近傍粒子探索時の比較回数を最小限にできる。

シミュレーションにおける現在の時刻と、次の時刻で粒子分布が急激に変化することはないため、一回近傍粒子を探索したのち数サイクルにおいて近傍粒子探索を省略し、計算量を減らすことができる。また、近傍粒子探索の際に求めた粒子間の距離を保持しておき、保持した値を以降のカーネル計算などでそのまま利用することにより、計算時間をさらに短縮することができる。

### 3.3.7 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。例として、圧力により位置を修正する擬似コードを以下に示す。

```
add_pressure(){
```

```

foreach particle i
  vector_dx = 0
  foreach neighboring_particle_of_i j
    q = distance[i][j] / h
    // 圧力による移動ベクトルを計算する
    vector_D = timestep^2 * pressure[i] * (1 - q)
              * vector_x_ij_normalized
    // 移動ベクトルの1/2だけ、近傍粒子の位置を修正する
    vector_x[j] = vector_x[j] + vector_D / 2
    // 移動ベクトルの-1/2だけ、注目粒子の位置を修正する
    vector_dx = vector_dx - vector_D / 2
  vector_x[i] = vector_x[i] + vector_dx
}

```

圧力，近傍圧力，界面張力は，それぞれ異なるカーネル形状の密度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それらの密度を求め，同時に位置を修正する [22]．粒子シミュレーションの擬似コードを以下に示す．

```

while simulation
{
  //全ての粒子について近傍粒子を探索する
  search_neighbor_particles()
  // 全ての粒子に重力加速度を付加
  add_gravity()
  // 全ての粒子に粘性を付加
  add_viscosity()
  // 全ての粒子について，各々の持つ速度に従って位置を更新
  advance_position()
  // 全ての粒子について，外力に従って位置を修正
  add_external_force()
  // 全ての粒子について，界面張力計算のための近傍粒子数を計算

```

```

compute_num_neighbor()
// 全ての粒子について，密度，近傍密度を計算
compute_density_near_density()
// 全ての粒子について，圧力，近傍圧力計算
compute_pressure_near_pressure()
// 全ての粒子について，圧力，近傍圧力，界面張力に従って位置修正
relaxation()
// 前の位置と現在の位置から速度を更新
update_velocity()
}

```

### 3.4. 接触角の違いと毛管長の表現

より写実的な水滴を表現するために，水滴表面と水滴が接する固体表面とがなす角である，接触角による水滴形状の差を表現するモデルを適用する．本研究では，接触角が形成される要因の一つである界面張力のモデルを SPH に導入することによって形状の差を表現する．

#### 3.4.1 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 [27](図 3.3)．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．

$$\cos\theta_E = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{ls}}{\gamma_{la}} \quad (3.9)$$

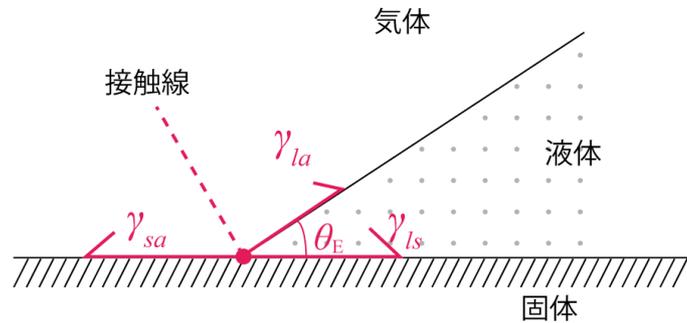


図 3.3 Young-Dupré の法則

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。

### 3.4.2 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。

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma_{la}}{\rho g}} \quad (3.10)$$

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

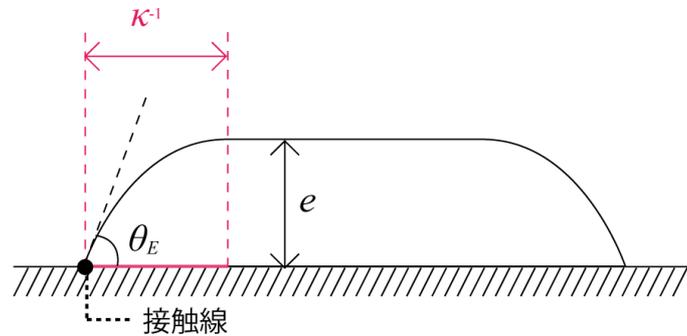


図 3.4 扁平形状の水滴と毛管長

れより内側では一定となる (図 3.4) . 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 [27] .

### 3.4.3 界面張力モデル

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 . 水滴の場合 , 水滴の接触線にかかる , 水滴の内側へ向かう力であると言える . 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 (図 3.5) . また , 節 3.4.2 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 .

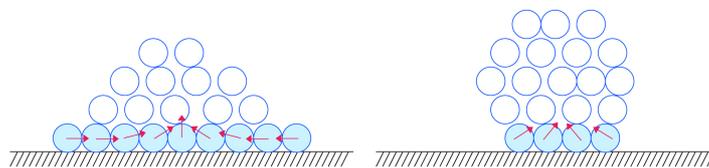


図 3.5 界面張力の例 (左: 界面張力が小さい場合 右: 界面張力が強い場合)

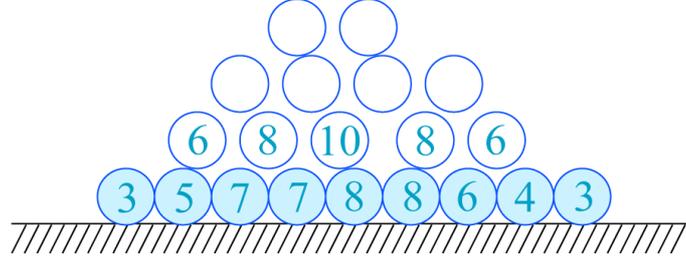


図 3.6  $N_i^{\text{neighbor}}$  の例

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 3.6 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．

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} = (k^{\text{ift}}/N_i^{\text{neighbor}}) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} \quad (3.11)$$

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．なお，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，1 粒子で表現される水の質量を 0.25mg とした場合，閾値  $c$  の値はおよそ 80 となる．

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  $D_i^{\text{ift}}$  を表現する式は以下のように表される．

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} = \begin{cases} (k_i^{\text{ift}}/N_i^{\text{neighbor}}) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij} & (N_i^{\text{neighbor}} < c) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{D}_i^{\text{ift}} = \Delta t \mathbf{F}_{ij}^{\text{ift}} \quad (3.13)$$

## 3.5. レンダリング

### 3.5.1 水面の生成

水面のレンダリングは、粒子の密度分布を表す密度ボリュームより陰曲面を生成することで実現する [14]。本研究では密度ボリューム  $\phi(\mathbf{x})=0$  の生成に以下の式を用いた。なお、 $k^{\text{iso}}$ 、 $\rho^{\text{iso}}$  はそれぞれ密度ボリューム生成のための定数である。

$$\phi(\mathbf{x}) = k^{\text{iso}} \sum_{j \in N(i)} (1 - x_{ij}/h)^2 - \rho^{\text{iso}} \quad (3.14)$$

また、陰曲面の法線  $\mathbf{n}$  は以下の式で得られる。

$$\mathbf{n} = \nabla \phi(\mathbf{x}) \quad (3.15)$$

密度ボリュームからそのままポリゴンを生成すると、水面付近に飛び出した粒子により現れる不自然な凹凸が水面に見られることがある。これを軽減するため、密度ボリュームに3次元のガウシアンフィルタをかけ、密度ボリュームを平滑化する。平滑化した密度ボリュームを Marching Cubes [28] によってポリゴン化し、水面を生成する。

### 3.5.2 水面の反射，屈折表現

写実的な水滴を描写する際に，水面で発生する反射および屈折のような光学現象の表現は重要な要素であるといえる．これらを厳密に表現する手法としては光線追跡法が非常に効果的であると考えられるが，計算コストが非常に高いため実時間計算は困難である．よって本研究では描画される面でのみ反射および屈折が発生すると仮定し，入射光の参照先としてキューブマップテクスチャ[29]による環境マップ[30]を用いて反射光および屈折光を計算する[25][26]．反射光の強度  $R(\theta_i)$ ，屈折光の強度  $T(\theta_i)$  は以下のフレネル効果の近似式で求める[31]．なお， $\theta_i$  は入射角， $\eta_1$ ， $\eta_2$  は2つの媒質の屈折率である．

$$R(\theta_i) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos\theta_i)^5 \quad (3.16)$$

$$T(\theta_i) = 1 - R(\theta_i) \quad (3.17)$$

$$R_0 = \frac{(\eta_1 - \eta_2)^2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \quad (3.18)$$

## 第4章 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．

### 4.1. 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 4.1 に示す．

また，各実験で共通して用いたシミュレーションパラメータを表 4.2 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．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．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．水面における光学現象はシェーダにより実装した．キューブマップテクスチャは，Persson らが作成したテクスチャ[32]を用いた．

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
シェーダ言語	Cg 言語

表 4.1 実行環境

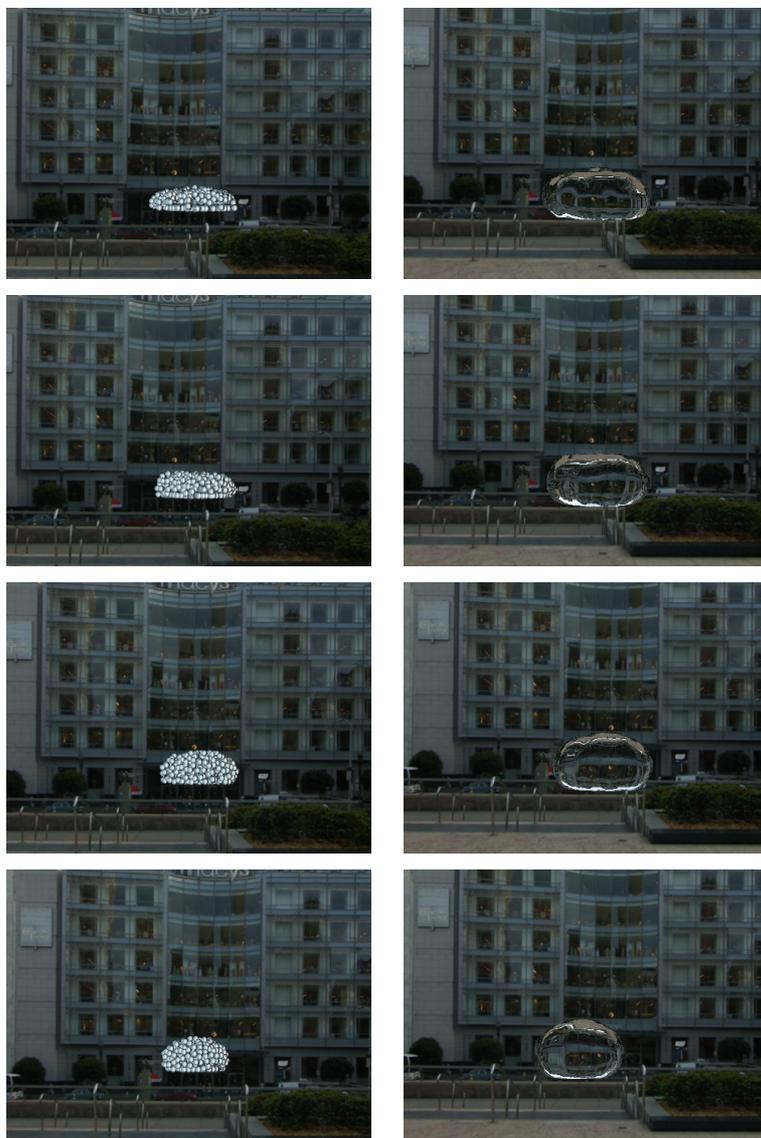
静止密度 $\rho_0$	30.0
圧力強度係数 $k^{\text{pressure}}$	0.04
近傍圧力強度係数 $k^{\text{near}}$	0.1
粘性強度係数 $\beta$	8.0
粘性強度係数 $\sigma$	4.0
カーネル半径 $h$	0.0118
格子サイズ	0.0118

表 4.2 シミュレーションパラメータ

## 4.2. 実験と結果

### 4.2.1 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，水面をレンダリングする際のガウシアンフィルタのサイズは 3 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, 2.0, 6.0 である場合の水滴形状の変化について調べた．図 4.1 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ことが分かる．



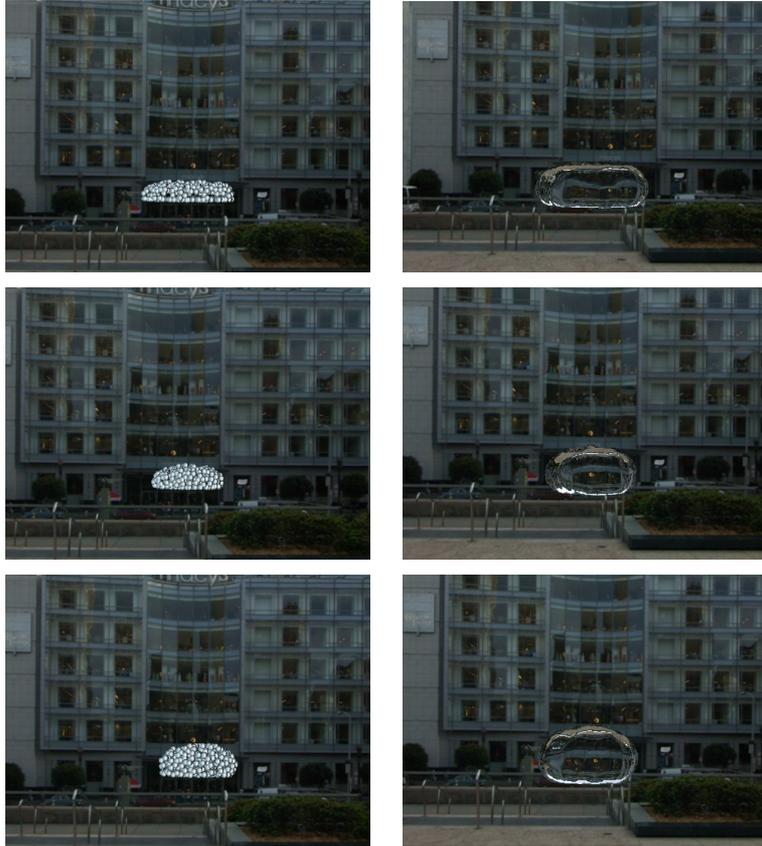
粒子表示

水面表示

図 4.1 接触角の違い (上から  $k^{\text{ift}}=0.0, 1.0, 2.0, 6.0$ )

#### 4.2.2 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，水面をレンダリングする際のガウシアンフィルタのサイズは3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4.2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．



粒子表示

水面表示

図 4.2 毛管長の違い (上から  $c=10, 20, 80$ )

### 4.2.3 水面の生成

密度ボリュームの平滑化により，レンダリングされる水面がどのように変化するか調べた．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，シミュレーションのタイムステップは0.03msであった．平滑化を行わない場合，フィルタサイズ3で平滑化を行う場合，フィルタサイズ5で平滑化を行う場合について調べた．図4.3を見ると，平滑化を行わずに水面をレンダリングした場合に生じている水面の不自然な凹凸が，平滑化を行った場合には改善されていることが分かる．

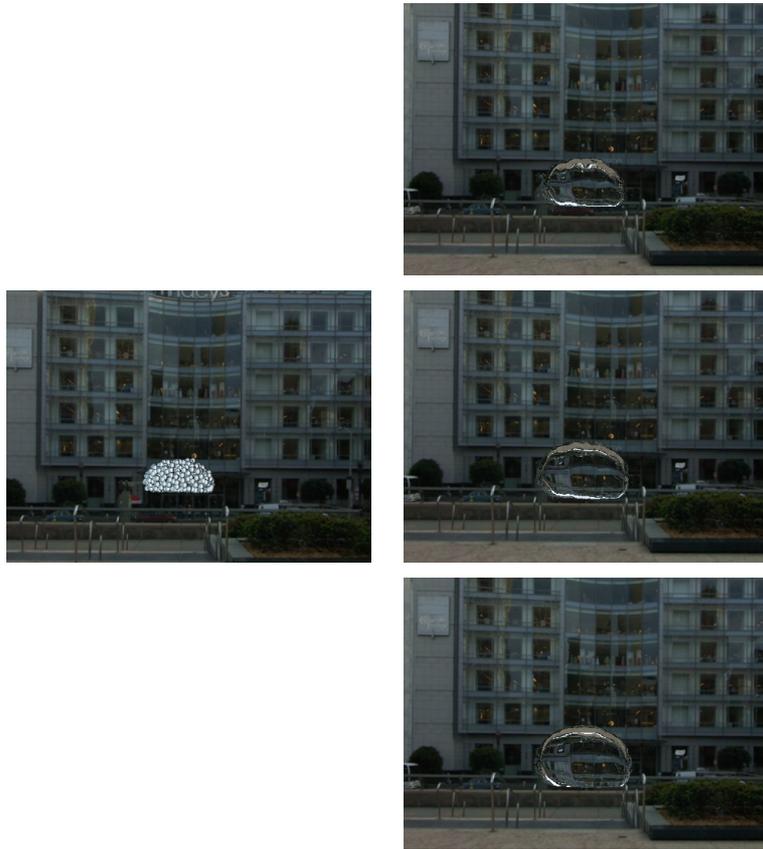


図 4.3 平滑化フィルタサイズの違い(左は粒子表示, 右は水面表示で上からフィルタなし, フィルタサイズ3, フィルタサイズ5)

#### 4.2.4 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，水面をレンダリングする際のガウシアンフィルタのサイズは3であった。シミュレーションのタイムステップは3ms, 0.3ms, 0.03ms の場合を調べた。図4.4を見ると，タイムステップが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，タイムステップが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4.3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，タイムステップが0.03ms の場合で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。

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 4.3 タイムステップによる違い



粒子表示

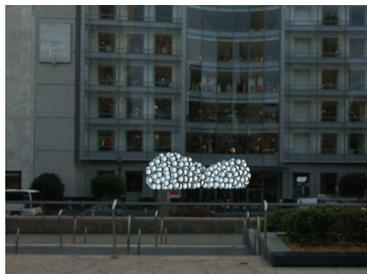
水面表示

図 4.4 タイムステップによる違い (上から 3ms , 0.3ms , 0.03ms)

#### 4.2.5 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,球状の容器内での水滴の挙動(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  $k^{\text{ift}}$  は2.0,毛管長を表現する閾値  $c$  は80,水面をレンダリングする際のガウシアンフィルタのサイズは3,シミュレーションのタイムステップは0.03msであった.

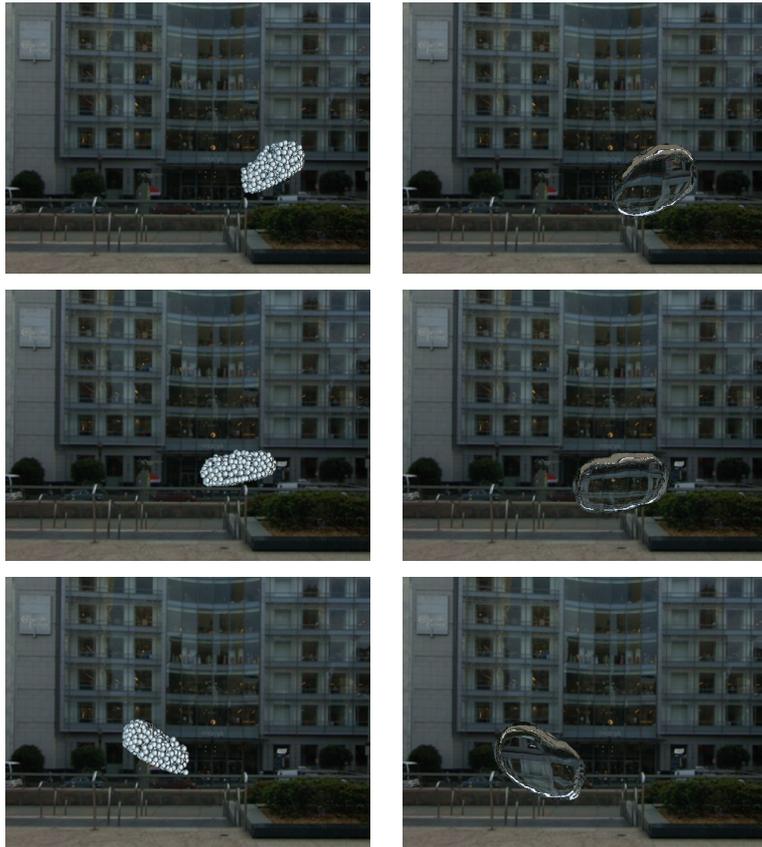
シーン1の結果(図4.5)では,2つの水滴が自然に融合する様子が見られた.2つの水滴が接着し1つの水滴となり,時間が経つと1つの水滴形状として適切な形状となった.シーン2の結果(図4.6)では,球状の容器内の水滴として自然な動きであった.いずれのシーンもフレームレートは17fps前後であり,全体的にシミュレーション内での時間経過がやや遅く感じられた.それ以外の点について,大きな違和感は見られなかった.



粒子表示

水面表示

図 4.5 シーン 1: 2つの水滴のかたまりが融合する様子



粒子表示

水面表示

図 4.6 シーン 2: 球状の容器内でのアニメーションの様子

#### 4.2.6 実水滴との比較

接触角と体積のそれぞれ異なる水滴について、実際的水滴とシミュレーションによる水滴を比較した。界面張力係数  $k^{ift}$  は、小さい接触角の場合で 1.8、大きい接触角の場合で 5.2 であった。また、毛管長を表現する閾値  $c$  は 80、水面をレンダリングする際のガウシアンフィルタのサイズは 3、シミュレーションのタイムステップは 0.03ms であった。水滴の体積は、0.5mL(粒子数 200)、1.0mL(粒子数 400)、2.0mL(粒子数 800) の場合について調べた。

図 4.7, 4.8 を見ると、粒子表示において、実際的水滴の、接触角による違いおよび体積による違いを、提案手法によってほぼシミュレートできていることが分かる。しかし、粒子数が 800 の場合に接触線の近くにある水面付近の粒子がやや盛り上がりすぎていて、実際的水滴での面の形状とは少し異なっている。

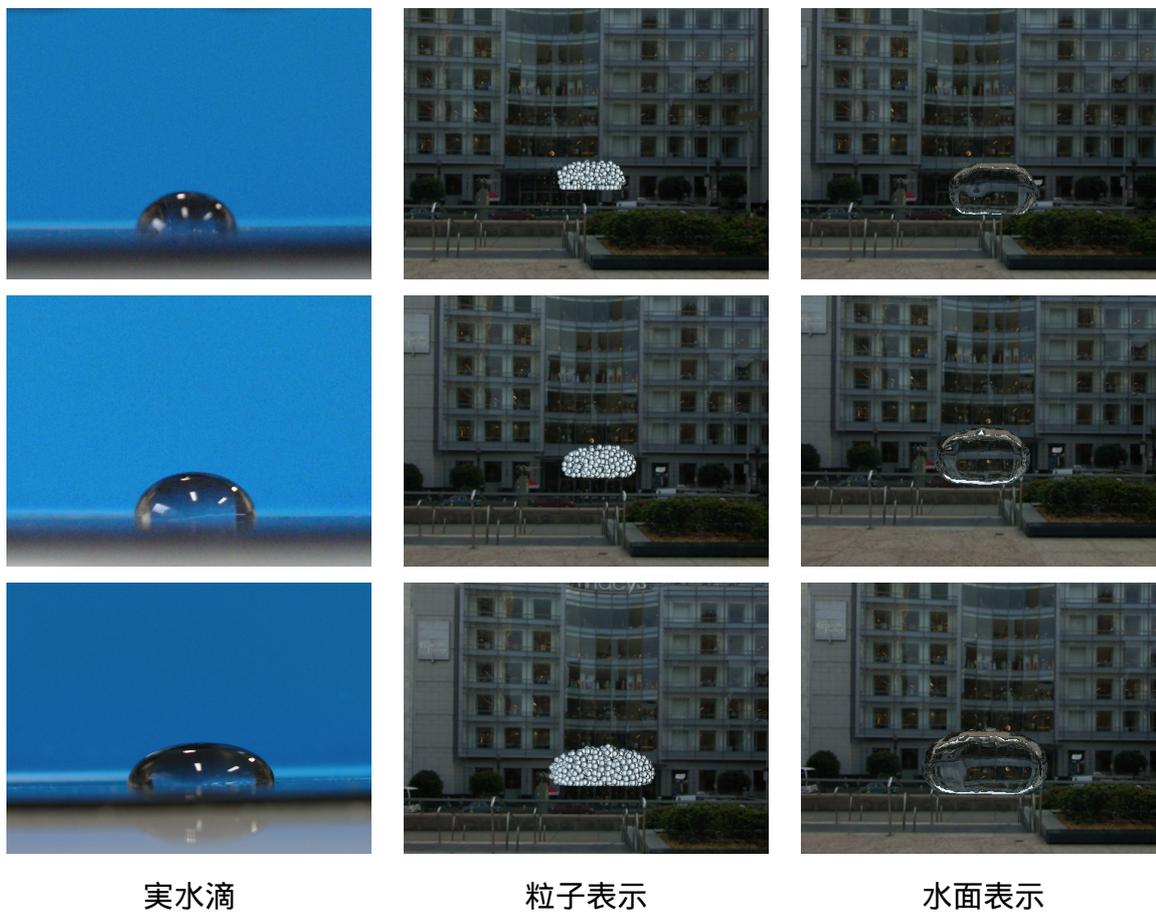


図 4.7 実水滴との比較 (小さい接触角の場合; 上から体積が 0.5mL , 1.0mL , 2.0mL の場合)

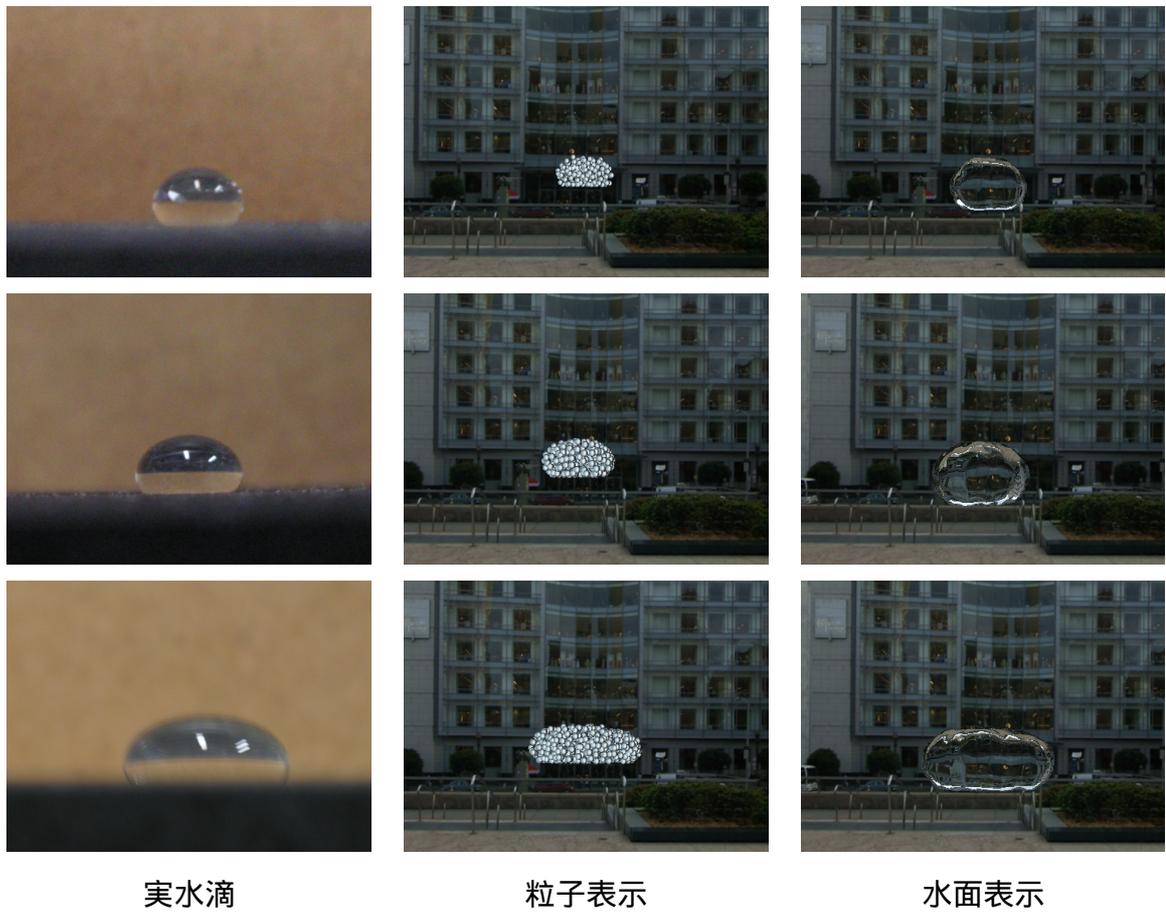


図 4.8 実水滴との比較 (大きい接触角の場合; 上から体積が 0.5mL , 1.0mL , 2.0mL の場合)

### 4.3. 考察

実験では、界面張力モデル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。

水面のレンダリング結果を見ると、密度ボリュームの平滑化により滑らかな水面は得られたものの、接触角の小さな水滴の場合に接触角の違いが表現されていないことが分かる。これはポリゴン化を行う際に用いている Marching Cubes アルゴリズムに依る影響が大きいため、密度ボリュームの局所あるいは全体において、より細かなポリゴン化を行うか、あるいは Advanced Front[33] など他のポリゴン化手法を用いるなどの処理が必要であると考えられる。

節 4.2.4 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。しかし、圧力、近傍圧力、界面張力のバランスがとれず、水滴形状が生成されなかった。また、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、シミュレーション手法そのものを改善し、より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にする必要がある。また、実装の効率化、GPU の活用 [15] などにより、さらなる計算速度の向上が望まれる。

実水滴との比較結果を見ると、シミュレーション側で仮定した粒子解像度、体積において、実水滴に近い形状が粒子によって形成されていることが分かる。また、アニメーションの生成結果では、水滴の振るまいについてシミュレーション速度以外の点で大きな違和感がなかった。

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。

## 4.4. 将来への展望

本研究の大きな課題としてシミュレーションの安定化および高速化が挙げられる。近年では我々が日常生活で使うコンピュータにおいても，マルチコア CPU を搭載した機種が普及してきている。また，GPU を利用した汎用計算技術も多く研究されており，汎用計算のための GPU 機能の改善も図られている。これらのプロセッサを最大限に活用することで，計算速度の問題は大幅に改善されることが期待される。

提案手法では，水滴の接触角をシミュレーション中にインタラクティブに変化させることが可能である。よって今後，固体表面ごとに界面張力係数を設定し，水滴が接する固体によって接触角を動的に変化させるような応用例が考えられる。本論文では水滴がしたたる振るまいについては考慮していないが，これは提案する界面張力モデルを拡張し，水滴が坂を上る，あるいは下る際に現れる前進接触角と後退接触角 [34][35]，および重力に対抗するだけの表面張力を考慮に入れることで実現できると考えられる。

これまでの水の CG アニメーションにおいては，例えばコップに注がれる際に飛散した水滴などにおいては，表現が省略されるか，描写されたとしても簡易的な表現に限るものがほとんどであり，水滴特有の形状，振るまいはほとんど考慮されていなかった。提案手法はインタラクティブな水のシミュレーションにおいて多く用いられている SPH を拡張するものであり，SPH を用いたより大きなスケールの水のシミュレーションと容易に組み合わせることが可能であることから，コップやバケツに入っているようなスケールの水とそこから飛散した水滴のようなスケールの水を統合的に扱えるようになることが期待される。

## 第5章 結論

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，および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，界面張力モデル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，水滴の毛管長を反映した形状が表現された．水面のレンダリングにおいては，密度ボリュームの平滑化により滑らかな水面が得られたものの，接触角の小さな水滴の場合に接触角が表現されなかった．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．実水滴との比較結果および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，ポリゴン化手法を改善することにより，接触角の小さな水滴の場合でも接触角の違いを反映した水面をレンダリングできると考えられる，また，したたりなど水滴の他の物理特性を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．

# 謝辞

本研究の機会を与えてくださり，またその遂行において貴重な御指導，御鞭撻をいただきました情報科学研究科像情報処理学講座 千原國宏教授に深く感謝の意を表します．

副指導教官として貴重な御助言をいただきましたインタラクティブメディア設計学講座 加藤博一教授に深く感謝いたします．

本研究の問題設定の段階より本論文を執筆するに至るまで，多岐にわたりの確で本質的な御指導，御助言をいただきました像情報処理学講座 眞鍋佳嗣准教授に心より御礼申し上げます．

ミーティングや発表練習において数多くの御助言，御検討をいただきました像情報処理学講座 池田聖助教に深く感謝いたします．本研究を遂行するにあたり，あらゆる面において綿密な御指導，御指摘，御協力をいただきました像情報処理学講座 井村誠孝助教に厚く御礼申し上げます．研究を開始するにあたり貴重な御助言をいただきました像情報処理学講座 Damien Douxchamps 助教に深く感謝いたします．本研究を遂行するにあたり多くの貴重な御助言，御検討をいただきました関西大学 安室喜弘准教授，東京都老人総合研究所 坂田宗之研究員に深く感謝いたします．

日頃より研究活動を様々な形で御支援，御協力いただきました像情報処理学講座 山田真絵秘書に深く感謝いたします．研究活動や日常生活において多くの御協力をいただきました像情報処理学講座博士後期課程および前期課程のみなさま，そして諸先輩に深く感謝いたします．

最後に，大学院での研究活動を遂行するにあたり，多大な御支援をいただきました父母に心より御礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] Michael Kass and Gavin Miller. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. In *SIGGRAPH '90: Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.49-57, 1990.
- [2] James F. O'Brien and Jessica K. Hodgins. Dynamic simulation of splashing fluids. In *CA '95: Proceedings of the Computer Animation*, IEEE Computer Society, pp.198-205, 1995.
- [3] Geoffrey Irving, Eran Guendelman, Frank Losasso, and Ronald Fedkiw. Efficient simulation of large bodies of water by coupling two and three dimensional techniques. *ACM Trans. Graph.*, Vol.25, No.3, pp.805-811, 2006.
- [4] Cem Yuksel, Donald H. House, and John Keyser. Wave particles. *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3, Article 99, 2007.
- [5] Francis H. Harlow and J. Eddie Welch. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Phys. Fluids*, Vol.8, pp.2182-2189, 1965.
- [6] Nick Foster and Dimitri Metaxas. Realistic animation of liquids. *Graph. Models Image Process.*, Vol.58, No.5, pp.471-483, 1996.
- [7] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animation of liquids. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.23-30, 2001.

- [8] Douglas Enright, Stephen Marschner, and Ronald 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.
- [9] T. Yabe, T. Ishikawa, P. Y. Wang, T. Aoki, Y. Kadota and F. Ikeda. A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation II. Two- and three-dimensional solvers. *Comput.Phys.Commun.*, Vol.66, pp.219-232, 1991.
- [10] S. Koshizuka and Y. Oka. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nucl. Sci. Eng*, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- [11] J. J. Monaghan. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, Vol.30, pp.543-574, 1992.
- [12] Simon Premože, Tolga Tasdizen, James Bigler, Aaron Lefohn and Ross T. Whitaker. Particle-based simulation of fluids. *Computer Graphics Forum*, Vol.22, No.3, pp.401-410, 2003.
- [13] Mathieu Desbrun and Marie-Paule 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.
- [14] Matthias Müller, David Charypar and Markus Gross. Particle-based fluid simulation for interactive applications. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation*, pp.154-159, 2003.
- [15] 原田 隆宏 , 田中 正幸 , 越塚 誠一 , 河口 洋一郎 . 粒子ベースシミュレーションの並列化 . 情報処理学会論文誌 , Vol.48, No.11, pp.3557-3567, 2007.
- [16] Paul W. Cleary, Soon Hyoung Pyo, Mahesh Prakash and Bon Ki Koo. Bubbling and frothing liquids. *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3, Article 97,

2007.

- [17] Bart Adams, Mark Pauly, Richard Keiser and Leonidas J. Guibas. Adaptively sampled particle fluids. *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3, Article 48, 2007.
- [18] Kazufumi Kaneda, Yasuhiko Zuyama, Hideo Yamashita and Tomoyuki Nishita. Animation of water droplet flow on curved surfaces. In *Proceedings of PACIFIC GRAPHICS '96*, pp.50-65, 1996.
- [19] Malin Jonsson and Anders Hast. Animation of water droplet flow on structured surfaces. In *Linköping Electronic Conference Proceedings, SIGRAD 2002*, ISSN 1650-3686, 2002.
- [20] Patric Fournier, Arash Habibi and Piere Poulin. Simulating the flow of liquid droplets. In *Graphics Interface*, pp.133-142, 1998.
- [21] Huamin Wang, Peter J. Mucha, and Greg Turk. Water drops on surfaces. *ACM Trans.Graph.*, 24, pp.921-929, 2005.
- [22] Simon Clavet, Philippe Beaudoin and Pierre Poulin. Particle-based viscoelastic fluid simulation. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp.219-228, 2005.
- [23] 安部 拓也, 井村 誠孝, 池田 聖, 眞鍋 佳嗣, 千原國宏. 水滴表現のための粒子ベース液体シミュレーション. 映像情報メディア学会 2007 年冬季大会講演予稿集, p.7-2, 2007.
- [24] 安部 拓也, 井村 誠孝, 眞鍋 佳嗣, 千原 國宏. 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.
- [25] 天田 崇. 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.

- [26] 仲野 嘉信 . 液体のリアルタイム CG に対する効果音の自動生成 . 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文 , 2007 .
- [27] ドウジェンヌ , プロシャール・ピアール , ケレ ; 奥村 剛 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 .
- [28] W. E. Lorensen and H. E. Cline. Marching Cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. In *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press, pp.163-169, 1987.
- [29] J. F. Blinn and M. E. Newell. Texture and reflection in computer generated images. *Commun*, ACM Press, Vol.19, No.10, pp.542-547, 1976.
- [30] N. Greene. Environment mapping and other applications of world projections. *IEEE Comput. Graph.*, Vol.6, No.11, pp.21-29, 1986.
- [31] C. Schlick. A customizable reflectance model for everyday rendering. In *Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, No.Series EG 93 RW, pp.73-84, 1993.
- [32] E. Persson, aka Humus. <http://www.humus.ca>
- [33] John Schreiner, Carlos E. Scheidegger, and Cláudio T. Silva. High-quality extraction of isosurfaces from regular and irregular grids. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol.12, No.5, pp.1205-1212, 2006.
- [34] J. N. イスラエルアチヴィリ ; 近藤 保 , 大島 弘幸 訳 . 分子間力と表面力 . 朝倉書店 , 1996 .
- [35] 中島 章 . 固体表面の濡れ制御 . 内田老鶴圃 , 2007 .