

NAIST-IS-MT0551093

修士論文

気泡運動を反映した液体の CG と効果音のリアルタイム生成

仲野 嘉信

2007年2月1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。

仲野 嘉信

審査委員：

千原 國宏 教授 (主指導教員)

横矢 直和 教授 (副指導教員)

眞鍋 佳嗣 助教授 (副指導教員)

気泡運動を反映した液体の CG と効果音のリアルタイム生成*

仲野 嘉信

内容梗概

近年，コンピュータの飛躍的な性能向上に伴う大域照明計算や物理シミュレーション計算の高速化によって，多様に变化する液体のCGをリアルタイムにレンダリングすることが可能となっている．しかし，液体のリアルタイムCGに対する効果音の作成は，多様に变化する液体の全ての振る舞いに対応した効果音を事前に作成しておく必要があり，全ての効果音を手作業で再現性高く作成するのは困難である．液体では，液中に含まれる気泡の運動により音が発生しており，その音は液中の気泡半径に従う．そのため，液体の効果音は液中の気泡半径に従い生成する必要がある．

本論文では，粒子法的一种である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) を拡張し，液体と気体を構成する2種類の粒子を導入することで気泡運動を反映した液体を表現する手法を提案する．さらに，液体のCGに対する効果音をCGの描画と同期させて出力する手法について提案する．本手法は，SPHの近傍探索用格子を用いて，生成されている気泡数を判別し，さらに，その気泡サイズから固有振動周波数を求めることで，液体のCGに対する効果音を自動的に生成することが可能である．提案手法は，気泡運動を反映した液体のアニメーションと効果音を実時間で生成することを可能としている．

キーワード

効果音生成, 流体, 液体, 気泡, リアルタイムCG, 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-MT0551093, 2007年2月1日.

Real-time Generation of CG and Sound of Liquid with Bubbles*

Yoshinobu Nakano

Abstract

Recently, we can render Real-time CG of liquid which change variously by a rapid global lighting and the physical simulation according to the improvement of the computer. But, the effect sound for Real-time CG of the liquid should make corresponding to all the behavior of the liquid beforehand. So, it is difficult for high reproducibility to be made for all sounds by the hand work. In the liquid, the sound is generated according to the radius of the moving bubble. Therefore, making the effect sound of the liquid should apply to the bubble radius.

This thesis proposes the technique for enhancing Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), expressing the liquid with bubbles by introducing the particle that composes the liquid and the gas. And, the technique for outputting the effect sound by synchronizing with drawing of CG is proposed. This technique distinguishes the number of bubbles spatially generated by using the proximity-area search lattice of SPH. In addition, this technique can automatically generate the effect sound for Real-time CG of the liquid by obtaining the character frequency from the bubble size. The proposal technique enables to generate animation and the effect sound of the liquid with bubbles in real time.

Keywords:

sound generation, fluid, liquid, air bubble, realtime CG, physical simulation

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0551093, February 1, 2007.

目次

第1章 序論	1
第2章 液体表現の関連研究	3
2.1. 液体が発生させる音	3
2.1.1 原理	3
2.1.2 気泡の発する音	5
2.1.3 周波数計算	6
2.2. 気液二相流のシミュレーション	8
2.2.1 流体シミュレーション	8
2.2.2 気液二相流のCG表現	9
2.3. CGに対する効果音の生成	15
2.3.1 サウンドレンダリング	15
2.3.2 サウンドモデリング	16
第3章 気泡運動を反映した液体表現	20
3.1. 液体の表現	20
3.1.1 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)	21
3.1.2 SPHによる流体のシミュレーション	22
3.1.3 近傍粒子の探索	23
3.2. 気体と液体の相互作用	25
3.2.1 SPHの拡張	25
3.2.2 気体粒子の振る舞い	26
3.2.3 表面張力	28
3.2.4 浮力	30

3.3.	気泡を含む液体の描画	32
3.3.1	液面の生成	32
3.3.2	液面の光学現象表現	32
3.3.3	液中の気泡の描画	34
第4章	液体の効果音の自動生成	37
4.1.	気泡が発する音の計測実験	37
4.2.	提案システム	40
4.2.1	気泡のクラスタリング	41
4.2.2	気泡半径の計算	45
4.2.3	サウンドレンダリング部	47
第5章	実装と考察	51
5.1.	実装環境	51
5.2.	気泡を含む液体表現の描画結果	56
5.3.	効果音の生成結果	60
5.4.	考察	62
5.4.1	気泡運動を反映した液体表現の再現性	62
5.4.2	液体の音の再現性	64
5.4.3	計算時間と遅延時間	65
5.4.4	提案手法の限界	65
5.4.5	将来への展望	66
第6章	結論	67
	謝辞	69
	参考文献	70

目次

2.1	液中の気泡	4
2.2	気泡生成に伴う音の発生 [7]	4
2.3	生成された気泡の拡大図 [7]	4
2.4	フルード数・ウェーバー数と生成される気泡数の関係 [7]	5
2.5	Practical Animation of Liquids [16]	9
2.6	Animation of Bubbles in Liquid [18]	10
2.7	Animation and Rendering of Complex Water Surfaces [19]	10
2.8	Better with Bubbles [20]	11
2.9	Multiple Interacting Liquids [21]	11
2.10	Physics-Based Boiling Simulation [23]	12
2.11	複数流体間の相互作用のシミュレーション [25]	13
2.12	液体粒子と気体粒子による気泡運動のシミュレーション [25]	14
2.13	液体粒子の気体粒子への状態変化による沸騰表現 [25]	14
2.14	A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments [27]	15
2.15	Synthesizing Sounds from Physically Based Motion [1]	16
2.16	Synthesizing Sounds from Rigid-Body Simulations [30]	17
2.17	Foley Automatic: Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation [2]	17
2.18	Real-time Rendering of Aerodynamic Sound using Sound Textures based on Computational Fluid Dynamics [3]	18
2.19	Synthesizing Sound From Turbulent Field Using Sound Textures for Interactive Fluid Simulation [4]	19

3.1	注目格子と 26 近傍格子	23
3.2	カーネル有効範囲と近傍粒子	24
3.3	液体粒子と気体粒子 (左), 自由に運動する気体粒子 (右)	26
3.4	注目粒子が液体の場合の相互作用	27
3.5	注目粒子が気体の場合の相互作用	27
3.6	表面張力	28
3.7	気泡の形成 (左), 気体粒子表示 (右)	29
3.8	陰曲面のポリゴン表示	33
3.9	フレネル効果を考慮した環境マッピング	33
3.10	気泡テクスチャ	34
3.11	液面の屈折光計算における気泡テクスチャの対応	35
3.12	気泡テクスチャを用いた気泡と液面の描画	36
3.13	全反射面を考慮した気泡と液面の描画	36
4.1	気泡の運動と音の計測の様子	38
4.2	気泡の運動と音の計測結果	39
4.3	共有メモリによるプロセス間の情報共有	40
4.4	注目格子と 6 近傍格子	41
4.5	格子へのグループ割り当て	42
4.6	格子への再グループ割り当て	42
4.7	格子グループの区別	43
4.8	気体粒子を含む格子のグルーピング結果	44
4.9	気泡クラスターの割り当て	44
4.10	気泡クラスターの実装結果 (気泡表示 (左), 粒子表示 (右))	45
4.11	気泡の半径と位置	46
4.12	気泡半径の計算結果の表示	46
4.13	サウンドモデリング部	47
4.14	波形テーブルにおける音源ソースの配置	48
5.1	サウンドスペクトログラム (気泡生成音)	54

5.2	サウンドスペクトログラム（気泡破裂音）	55
5.3	シーン1：液面への1つの液滴の落下に伴う気泡の発生の様子	57
5.4	シーン2：液面への複数の液滴の落下に伴う気泡の発生の様子	58
5.5	シーン3：容器の操作によって発生した波による気泡の取り込みの様子	59
5.6	シーン1の効果音の生成結果	60
5.7	シーン2の効果音の生成結果	61
5.8	シーン3の効果音の生成結果	61
5.9	液中の2つの気泡の合体の様子	63
5.10	全反射する液面と液中の気泡の光学的整合	63
5.11	気泡生成音と破裂音の生成順	64

表 目 次

3.1	気液二相流の相互作用で考慮する力	31
4.1	計測条件	38
4.2	高速度カメラの設定	38
5.1	実装環境	51
5.2	液体粒子パラメータ	52
5.3	気体粒子パラメータ	52
5.4	固有振動周波数	53
5.5	フレームレート (効果音生成なし)	56
5.6	フレームレート (効果音生成あり)	56

第1章 序論

自然界において、液体は雨のように1つの水滴となることもあれば、海のように膨大な体積を連続して占めることもあり、小川のように穏やかな流れとなることもあれば、滝のように激しい流れとなることもある。このように、液体は状況に応じて多様な変化を見せながら、私たちが暮らす生活環境の中で非常に身近なものとして存在している。そのため、コンピュータ・グラフィクス（CG）の世界においても、液体を表現する事は重要な課題の1つとなっている。近年、コンピュータの飛躍的な性能向上に伴う大域照明計算や物理シミュレーション計算の高速化によって、このように多様に变化する液体のCGをリアルタイムにレンダリングすることが可能となってきている。

しかし、液体のCGに対する効果音を作成する際、この液体の変化の多様性のために、その作成作業は困難を極める。プレレンダリングCGであれば、それぞれの状況に対応する音を後から手作業で入れることもできるが、多くの労力・時間がかかり、その効果音の妥当性は音入れを行った個人の音感に依存してしまう。リアルタイムレンダリングCGにおいては、インタラクティブな変化に対応するために、多様に变化する液体の全ての振る舞いに対する効果音を事前に作成しておく必要があり、それら全ての効果音を手作業で再現性高く作成するのは困難である。そのため、液体の多様な変化に対応した効果音を自動的に生成する手法が必要とされている。

CGに対する効果音を自動的に生成する研究として、CG作成時の物理シミュレータの出力結果に基づき、物体の材質（金属、木、コンクリートなど）等の物理特性を反映した音を生成し、衝突・接触情報を用いてCGの表示と同時に発生させることを目指した研究がなされている。O'Brienらによる研究[1]やDoelらによる研究[2]では、剛体シミュレーションを用いたCGに対する効果音を自動

的に作成する手法を提案している．しかし，上記の手法は剛体力学を基にした手法であるため，流体シミュレーションを用いた CG に対する効果音作成に用いることは出来ない．

流体シミュレーションを用いた CG に対する効果音をリアルタイムに自動的に生成する手法として，土橋らによって空気力学に基づく手法 [3][4] が提案されている．これらの手法では，数値流体解析に Curle モデルを適用することで，剣や棒のような剛体が気体を切る際や，炎などによって発生する様々な形状の渦流の音を表現できる．しかし，この手法は気体における渦流を基にした手法であるため，液体と気体のような異なる 2 流体間で発生する音を生成することは出来ない．液体では，液中に含まれる気泡の運動により音が発生しており，その音は液中の気泡の半径に従う [5]．そのため，液体を対象にしたシミュレーションの場合，液体要素の接触・衝突情報ではなく，液中の気泡の半径に従って効果音を生成・発生させる必要がある．

本論文では，粒子法的一种である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)[6] を用いて液体を構成する粒子と気体を構成する粒子との相互作用をシミュレートすることにより，気泡運動を反映した液体の CG をリアルタイムにレンダリングする手法について提案する．そして，液体の CG に対する効果音を，気液粒子間の相互作用を計算する際に求めた物理パラメータに基づき生成し，CG の描画と同期させて発生させる手法について提案する．本手法では，SPH の近傍探索用格子を用いて，気体粒子が含まれる格子をグルーピングすることで生成されている気泡数を判別し，その気泡サイズを計算することによって気泡の固有振動周波数を求め，液体の CG に対する効果音を自動的に生成する．

本論文の構成は，2 章で液体の音が発生する原理について述べ、それに関連する研究を紹介するとともに，CG に対する効果音の生成を行った従来研究について紹介する．3 章では，気泡運動を反映した液体の振る舞いをシミュレートし描画を行なう手法について述べる．4 章では，生成された気泡のクラスタリングを行ない，その気泡の半径を調べることで，液体の効果音を自動的に生成する手法について述べる．そして，5 章で提案手法の実装についてを述べるとともに実験・考察を行い，最後に 6 章にて総括を行う．

第2章 液体表現の関連研究

液体のCGに対する効果音を生成するには、液体の音の音源が何であるか、その周波数はどう決定されるのかといった要素を知ることが重要である。本章では、液体が音を発生させる原理について述べ、音源である気泡の運動について解説する。そして、気泡運動を考慮した液体のシミュレーションについての先行研究を紹介する。また、CGに対する効果音の生成に関する先行研究について紹介する。

2.1. 液体が発生させる音

2.1.1 原理

私たちが想像する液体の音には、水滴落下時の音、雨が降る音、滝が流れる音、波のしぶきの音などがある。全く違う音に聞こえるこれらの音は、液滴が液中に貫入した際にできた気泡(図2.1)の運動が主な音源となっている(図2.2, 図2.3) [7]。つまり、気泡生成、気泡破裂、気泡分裂・合体などにより発生した圧力波が音源となる。また、これら事象の発生頻度が、液体の音の低周波領域に關与する。そして、圧力波を伝える媒質によって、圧力波の屈折・回折・散乱・反射が起こり、発生した圧力波の振幅・振動数に変化を加えている。特に、共鳴が発生する場合には、媒質の気体と流体の混合割合(ボイド率)や幾何学形状によって特定の振動数(固有振動周波数)が増幅される。このように液体の音は、その発生から耳に到達するまでの様々な要因によって固有振動周波数が決定されており、その周波数を数学的に記述することは困難である。しかし、気泡の振動周波数は、条件を限定した環境であれば様々な方法によって計測できるため、気泡および環境の物理量に基づいてその周波数を計算する式が規定されている [7][8]。



図 2.1 液中の気泡

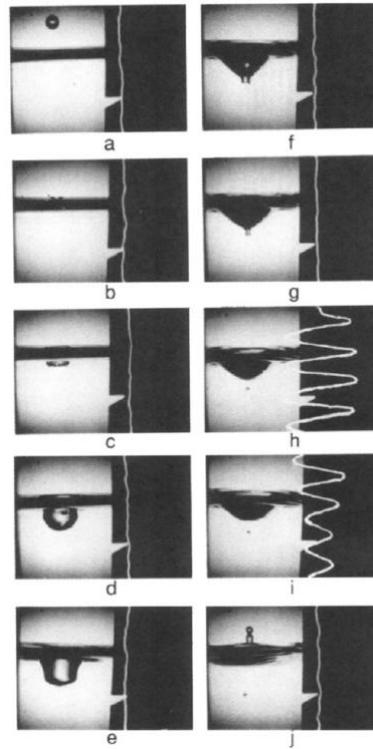


図 2.2 気泡生成に伴う音の発生 [7]

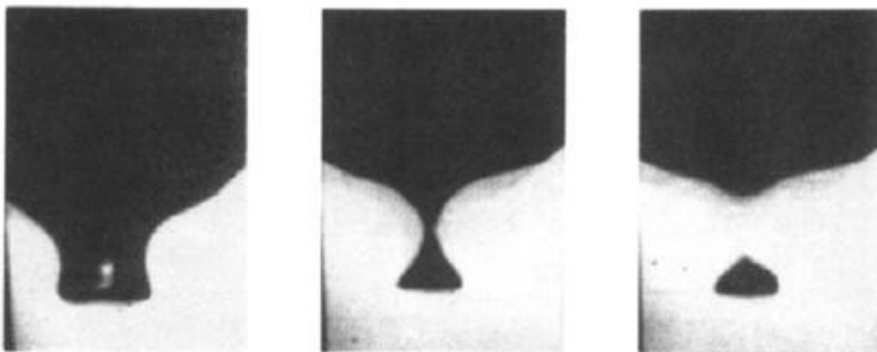


図 2.3 生成された気泡の拡大図 [7]

2.1.2 気泡の発する音

液滴が液面に落下した際の音は、液中に取り込まれた気泡の固有振動周波数によって決定され、その固有振動周波数は液滴の半径および液面への衝突速度によって変化する [9]。このとき、液滴の大きさ・速度と生成される気泡の大きさの間には、フルード数 Fr 、ウェーバー数 We と呼ばれる無次元数を考えると、規則的な関係が存在することが知られている (図 2.4)[7]。

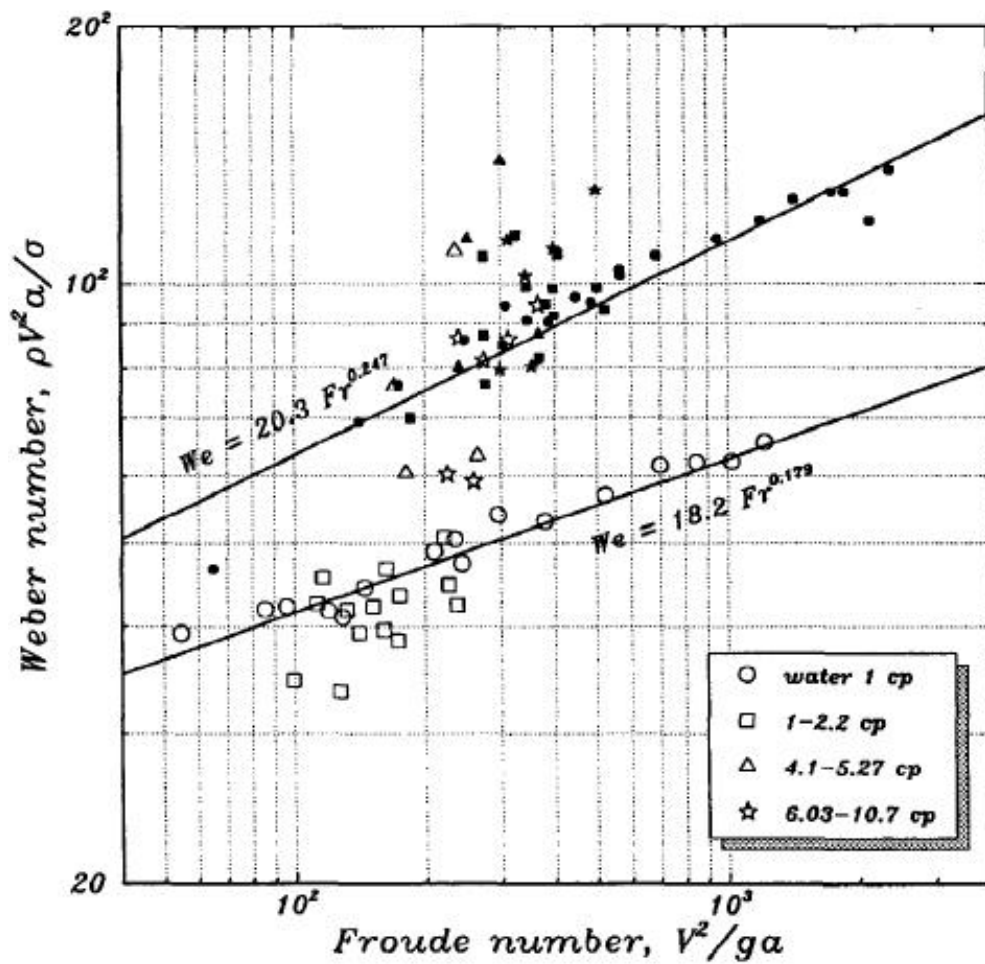


図 2.4 フルード数・ウェーバー数と生成される気泡数の関係 [7]

Fr , We は液体と気体のような二相流を扱う際に用いられる無次元数であり以下の式で表される．

$$Fr = \frac{V^2}{ga} \quad (2.1)$$

$$We = \frac{\rho V^2 a}{\sigma} \quad (2.2)$$

ただし， V は液滴の液面への衝突速度， g は重力加速度， a は液滴半径， ρ は液体密度， σ は表面張力係数を表す．例えば，川や海などの水面に雨粒が降り注ぐとき，水中に置いたマイクロフォンでとらえた音は特有の周波数成分（約 14kHz）を持つ．これは，雨粒の多くが落下中に一定の大きさと速度になり，水面への衝突によって一定の半径の気泡が生成される確率が高いために，14kHz 帯域周辺の周波数が増幅されることに起因する [9]．また，図 2.4 の もしくは 印で記される $Fr \cdot We$ 領域において，1 つの液滴が 1 つの気泡を生成するという規則的な関係が存在する [7]．

このような気泡生成の規則性を利用することで，気泡の生成個数を正確に知ることができるため，気泡の固有振動周波数を計測することが可能となり，計算式として表現できる [7][8]．

2.1.3 周波数計算

気体と液体が混在する流れのことを気液二相流といい，その振る舞いは非定常な界面変形を伴う複雑な流動現象である．気液二相流において，気泡は周囲液体の圧力変化に対して受動的に反応し，その半径を変化させる．

気泡表面の液体圧力は気泡内気体の圧力とほぼ等しいため，気泡半径 R の時間変化は，以下の Rayleigh-Plesset の式によって表される [10]．

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_\lambda} (p_{\lambda_w} - p_{\lambda_\infty}) \quad (2.3)$$

ρ_λ は液体の密度を， p_{λ_w} は気泡表面における液体圧力を， p_{λ_∞} は気泡から十分遠方の液体圧力をそれぞれ表す．上式より，気泡の半径変化が気泡表面と気泡遠方の液体間の圧力差に依存することが分かる．

微小半径変化は，式 (2.3) を線形化した次式に従う．

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2x = -\frac{\Delta p_{\lambda\infty}}{\rho_{\lambda}R_0^2} \quad (2.4)$$

$$x = \frac{R}{R_0} - 1 \quad (2.5)$$

$$\Delta p_{\lambda\infty} = p_{\lambda_w} - \Delta p_{\lambda_0} \quad (2.6)$$

R_0, p_{λ_0} はそれぞれ，静止状態における気泡半径，気体表面における液体圧力を表し， β, ω_0 は減衰定数，固有角振動数を表す．

ここで，気体が準静的過程にあるポリトロピックな流体であるとして

$$p_{\lambda_w} = p_{\lambda_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} \quad (2.7)$$

を仮定すると，気泡の運動の固有振動数 f_0 は，静止状態における気泡半径 R_0 に依存する式として以下のように表される [8] ．

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\kappa}{\rho_{\lambda}} \left(p_{\lambda_0} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho_{\lambda} R_0}} \quad (2.8)$$

ただし， ρ_{λ} は液体の密度， κ はポリトロピック指数（断熱変化なら比熱比，等温変化なら 1）， σ は界面の表面張力係数である．

水の場合であれば，その固有振動周波数は以下のように簡略化し定義できることが示されている [8] ．

$$f_0 = \frac{3}{R_0} \quad (2.9)$$

このように，気泡の固有振動周波数 f_0 はその半径 R_0 に反比例する．例えば，水中における気泡の場合， $R_0 = 1mm$ のときに $f_0 = \text{約 } 3kHz$ ， $R_0 = 0.5mm$ のときには $f_0 = \text{約 } 6kHz$ になる．

式 (2.3)，(2.7) から，液体が発生させる音は液中の気泡半径によって決定される固有振動周波数に依存し，その半径は気泡表面と気泡遠方の液体間の圧力差によって決定されることが分かる．

2.2. 気液二相流のシミュレーション

数値流体力学分野において，気液二相流の数値解法の研究は長年盛んに行われてきた [11]．近年，CG 分野で，数値流体力学分野で発展した数値解法を取り入れることで，より本物らしい，見た目に美しい液体のアニメーションを生成する手法が数多く報告されている．また，ゲームなどのインタラクティブな CG に対応するため，数値解法を取り入れながら実時間計算が可能な様々な手法も提案されている．その中で，気液二相流における気泡の表現が本物らしい液体の表現には重要であるとして注目されている．

2.2.1 流体シミュレーション

計算流体力学分野における流体の界面挙動の計算では，Eulerian 式記述によって記述された計算格子を用いて，界面移動を計算する格子法が主に用いられている．格子法としては，Volume of Fluid (VOF) 法 [12]，Level Set 法 [13]，Cubic Interpolated Propagation (CIP) 法 [14] などがあり多くの成果を挙げている．しかし，これらの手法では界面サイズが計算格子サイズに近くなると，数値拡散により界面が消失してしまう問題がある．そのため，気泡のような微小界面により構成される流体现象の表現を可能にするには，計算格子のサイズを小さくせざるを得ず，膨大な数の計算格子が必要となり計算コストが大きくなってしまふ．

一方，数値拡散による界面消失がない解析手法として，Lagrange 式記述によって記述された流体構成粒子を用いて流体移動を計算する粒子法がある．主な粒子法としては，Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法 [6]，Moving Particle Semi-Implicit (MPS) 法 [15] などがある．これらの手法では，計算格子の代わりに空間に配置した粒子を Lagrange 的に移動させるため，数値拡散による界面消失が無いのが特徴である．計算を行う流体の規模に比例して粒子数が増加するため，小規模な流体の計算では実時間計算も可能であるが，大規模な流体を計算するためには膨大な数の粒子が必要となり計算コストが大きくなってしまふ．

2.2.2 気液二相流のCG表現

格子法をベースにした気液二相流のCG表現としては、気液界面を追跡するLevel Set法を導入したFosterらによる研究[16](図2.5)がよく知られている。しかし、格子法の数値拡散の問題から微小界面で生成される気泡の表現は実現されていない。

この問題に対して、格子法と粒子法を統合することで、気泡表現を実現する手法が提案されている。Liuらは、差分格子にMPS法を併用した手法により、両者の欠点を補完した気液二相流のシミュレーションを実現している[17]。Hongらは、計算格子以上の大きさの気泡はVOF法を用い、計算格子以下の大きさの気泡には粒子を用いて計算を行う手法を提案している[18](図2.6)。また、Enrightらは界面追跡法であるLevel Set法を拡張したHybrid Particle Level Set (HPLS)法を提案している[19](図2.7)。HPLS法では、気液界面に散布したマーカー粒子をLagrange的に用いることで、数値拡散による界面の消失が少ない高精度な解析が可能である。

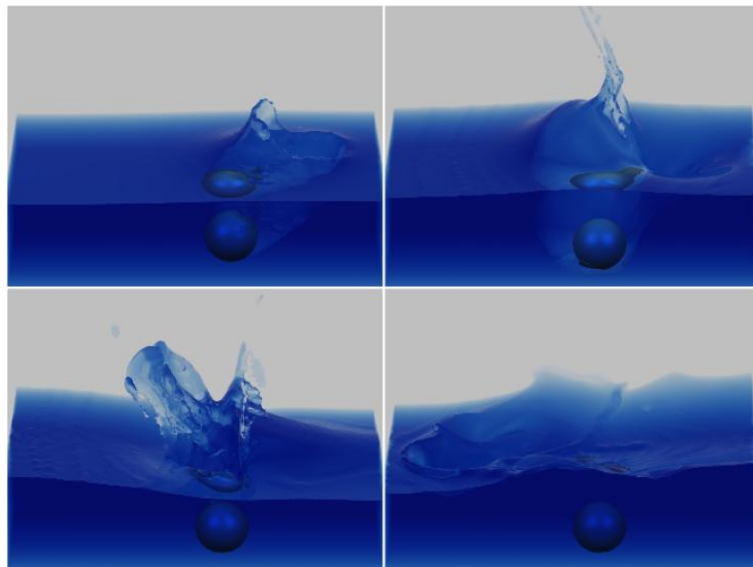
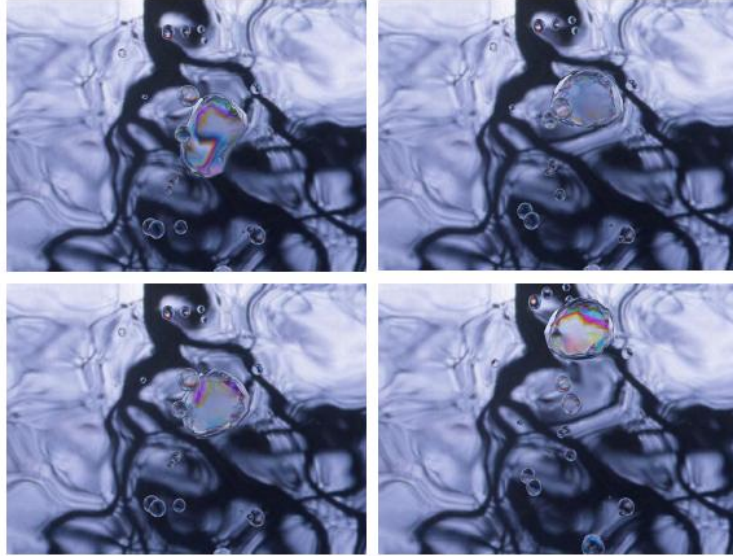
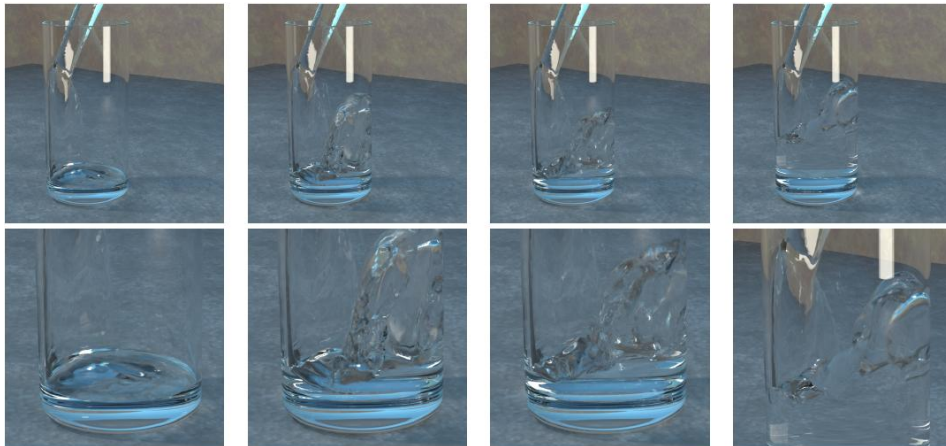


図 2.5 Practical Animation of Liquids [16]



☒ 2.6 Animation of Bubbles in Liquid [18]



☒ 2.7 Animation and Rendering of Complex Water Surfaces [19]

Greenwood らや Losasso らは，HPLS 法によって気液界面に動的に粒子を生成することで，品質の高い気泡表現を実現している [20] [21] (図 2.8，図 2.9)．これらの手法は，気体か液体のどちらかを粒子法で置き換える手法であるため，気液間の相互作用の物理的に正確な計算ができない問題がある．また，粒子自体をマーカーとして使用するため粒子サイズが計算格子サイズと同程度となり，マルチスケールの界面計算への対応が困難である．

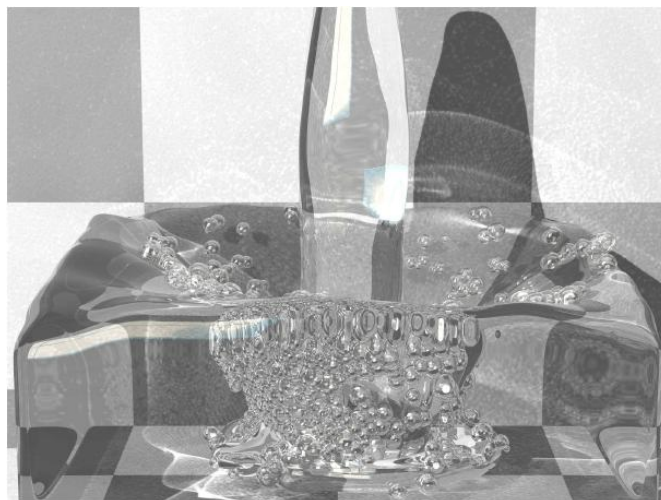


図 2.8 Better with Bubbles [20]

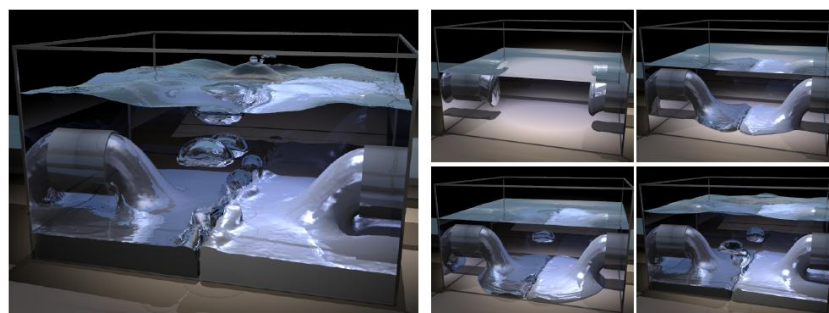


図 2.9 Multiple Interacting Liquids [21]

HPLS 法の 1 つの特徴として，Level Set 法に質量保存の関係を導入していることが挙げられるが，同様に Level Set 法に質量保存の関係を導入することを目的とした手法として Coupled Level Set and Volume Of Fluid (CLSVOF) 法 [22] がある．CLSVOF 法は，Level Set 法に質量保存の関係を持つ VOF 法を組み合わせることで，質量損失を扱うことを可能にした手法である．

Mihalef らは，CLSVOF 法を用いて温度変化に伴う質量移動をシミュレートすることで，気液界面，液固界面における温度変化によって発生する気泡表現を実現している [23] (図 2.10) ．

以上で紹介した手法は格子法をベースとしており，品質の高いシミュレーションが可能であるが，計算コストが非常に高く実時間計算は困難である．

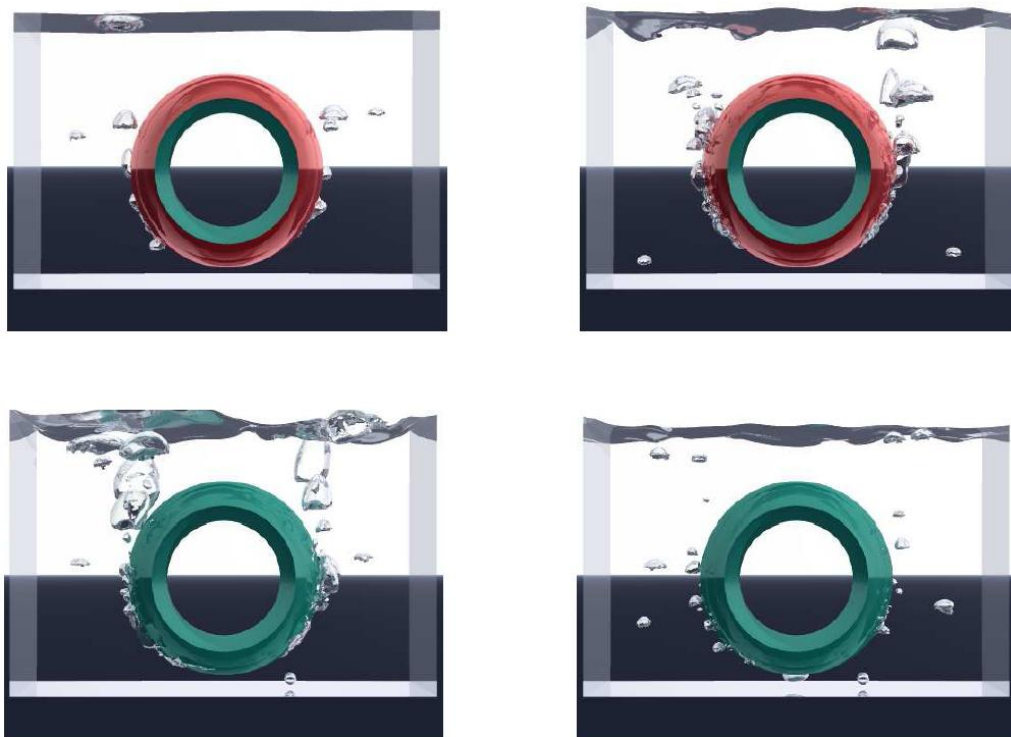


図 2.10 Physics-Based Boiling Simulation [23]

一方，粒子法をベースにした気液二相流のCG表現を可能とする手法は数少なく，Premozeら [24] が付帯的に行った複数流体のシミュレーションなどはあるが，普遍的な手法の提案は行われていない．近年，Mullerらは，複数流体の間の相互作用のシミュレートを実現する手法を提案し [25]，粒子法をベースとした気液二相流のシミュレーションを実現している（図 2.11）．Mullerらの手法では，SPH法を異なる複数流体の相互関係を扱えるように拡張し，液体粒子と気体粒子を導入することによって，気液二相流に含まれる気泡運動のシミュレーションを実現している（図 2.12）．また，粒子の温度変化に従って液体粒子を気体粒子へと変更することによって，沸騰状態における液体の気体への状態変化をシミュレートしている（図 2.13）．本手法はオフラインレンダリングを行っているためインタラクティブ性は無いが，シミュレーション自体は実時間計算を可能としている．

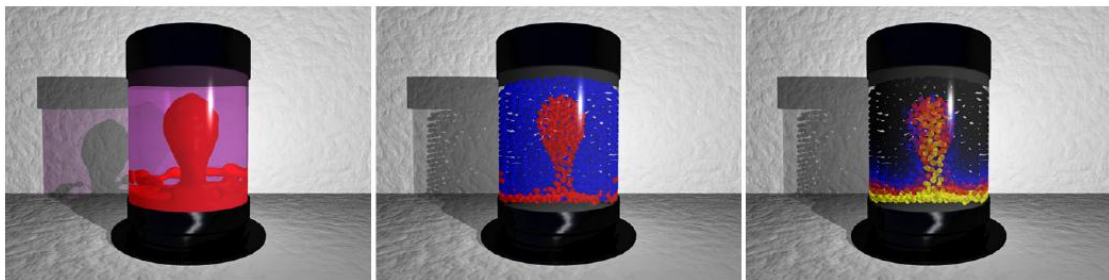


図 2.11 複数流体間の相互作用のシミュレーション [25]

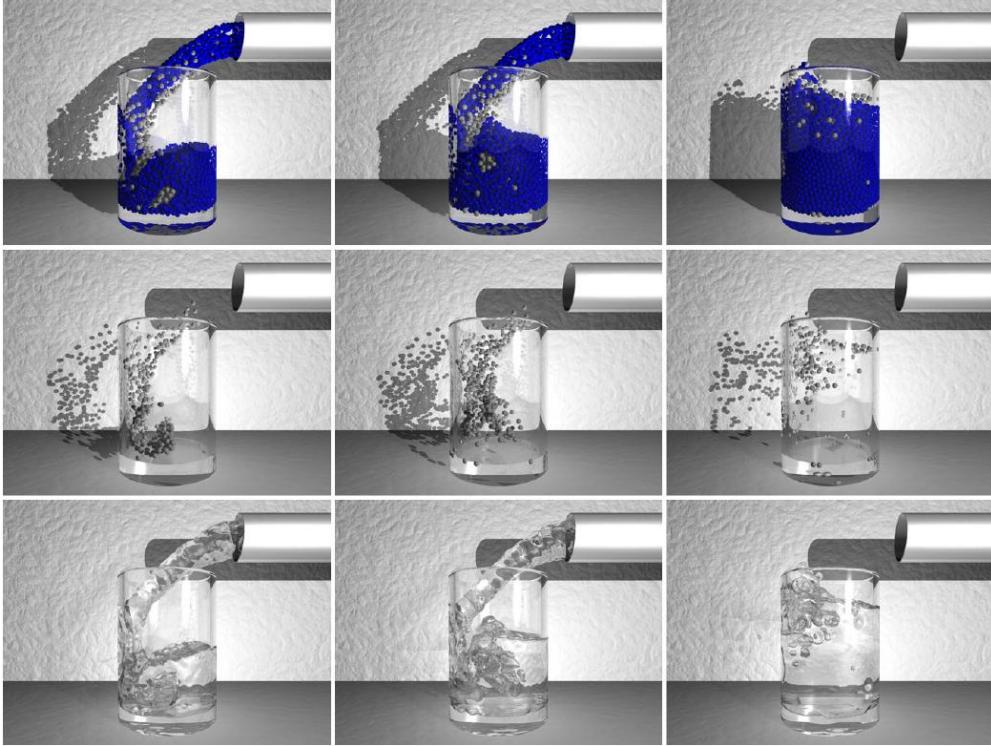


図 2.12 液体粒子と気体粒子による気泡運動のシミュレーション [25]

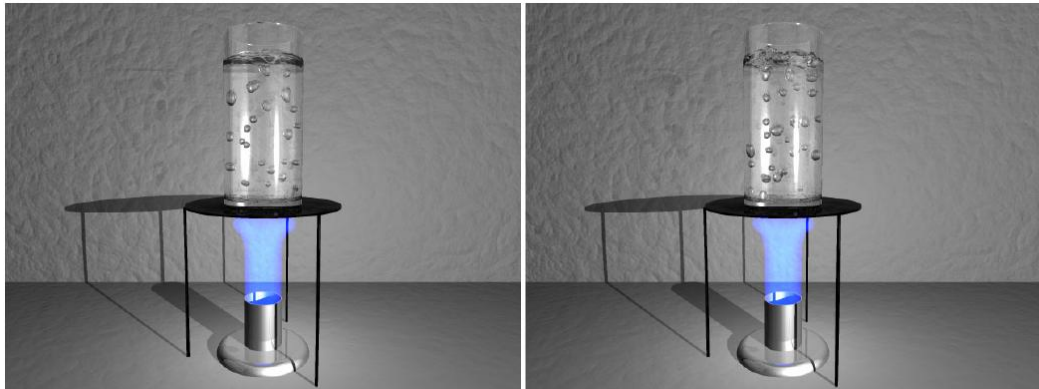


図 2.13 液体粒子の気体粒子への状態変化による沸騰表現 [25]

2.3. CG に対する効果音の生成

液体のCG に対する効果音の生成を行うにあたり，従来行われてきたCG に対する効果音の生成手法について紹介する．CG に対する効果音生成の技術は，サウンドレンダリングとサウンドモデリングに大別できる [26] ．

2.3.1 サウンドレンダリング

サウンドレンダリングは，音の伝播をシミュレートする手法を指し，仮想空間内の音源と受聴点との関係から受聴点における音の波形を計算するものである．

サウンドレンダリングに関する研究は，ビームトレーシング法 (図 2.14)[27] を用いる手法が主流であり，アバター間でのサウンドレンダリング手法 [28] ，回折を考慮した手法 [29] などが提案されている．サウンドレンダリングは，音の伝播のみに着目した手法であるため，音源の波形生成を行うことはできない．

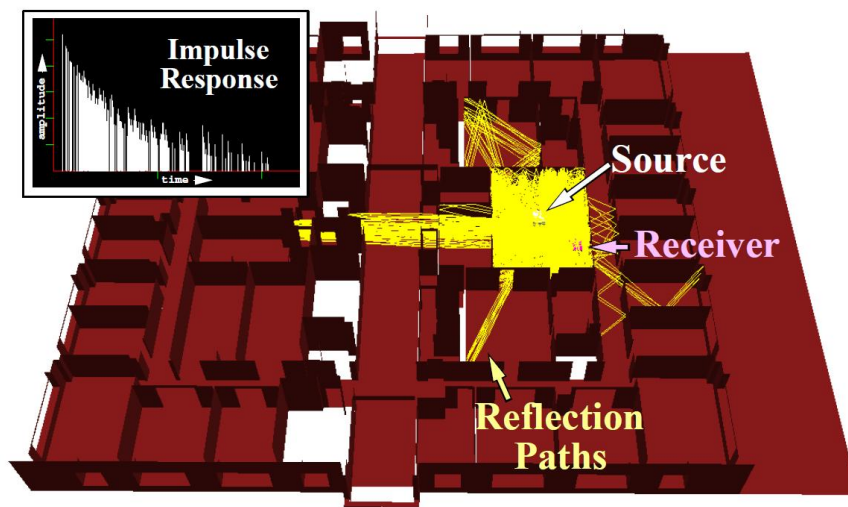


図 2.14 A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments [27]

2.3.2 サウンドモデリング

サウンドモデリングは、物体の物性（金属，木，コンクリートなど）等の物理特性を用い、その物体を音源として生成される音波形を計算するものである。

サウンドモデリングに関する研究は、O'Brien らによって、外力を受けた剛体の幾何学形状に発生する微小変化を、非線形有限要素法を用いて短いタイムステップで検知し、その変化量を利用して音波形を作成する手法（図 2.15）[1] が提案されている。さらに、音源となる剛体の変化モデルに対して、変化後の形状とその際の振動周波数とを事前計算しておくことによって、物理シミュレーションとの同期を可能とした効果音生成手法（図 2.16）[30] が提案されている。また、ウェーブレット解析を静的に行い、場所に依存した音源情報をキャラクタやテクスチャに投影することで、新たな効果音を再構成する手法 [31] も提案されている。これらは、物体の変形を考慮した物理シミュレーション結果に基づくため高精度な効果音の生成が行えるが、計算コストが非常に高く、インタラクティブな CG に対する効果音の生成には向かない。

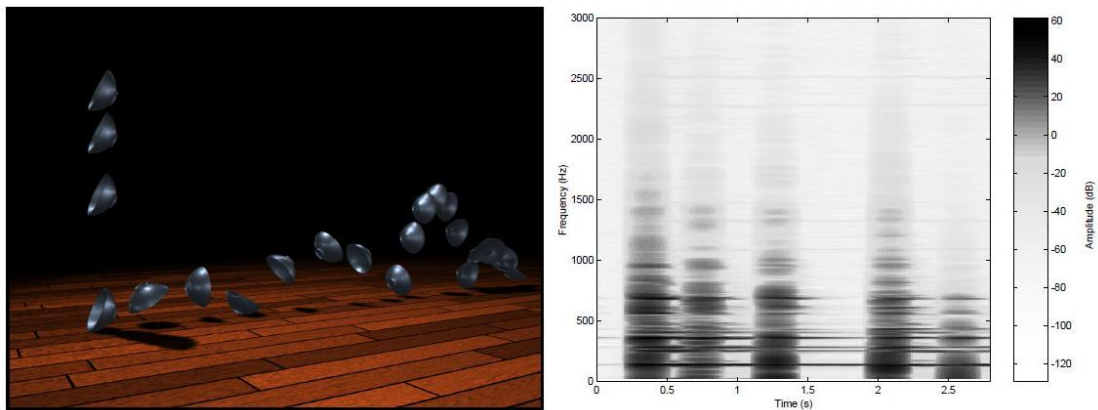


図 2.15 Synthesizing Sounds from Physically Based Motion [1]

また，Doel らは，剛体の衝突，摩擦，回転などの剛体物理現象をシミュレートし，その計算結果を用いてCGに効果音を自動的に付加する手法（図2.17）[2]を提案している．この手法は，インタラクティブかつ自動的に効果音を付加できる．この研究は，さらに，実測された現実物体の音を用いることで，より自然な効果音を作成することが可能 [32] である．

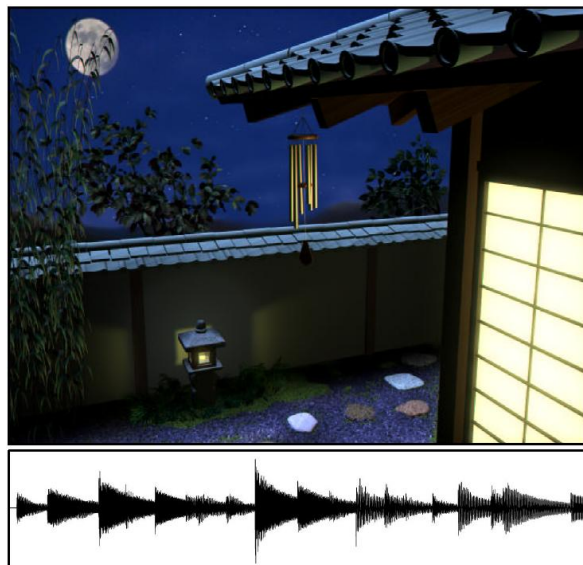


図 2.16 Synthesizing Sounds from Rigid-Body Simulations [30]

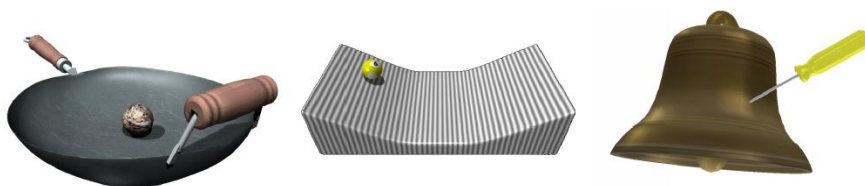


図 2.17 Foley Automatic: Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation [2]

松山らは、風による樹木の揺らぎの効果音を自動的に付加するサウンドモデリング手法を提案している [32]。この手法は、樹木の枝と葉で発生する音に限定した手法であり、樹木の枝と葉に対して揺らぎの付加と効果音の生成を独立に行い、個々に作成された効果音を合成することで、樹木全体の効果音としている。

これまでに挙げた手法は、剛体シミュレーションを用いた CG の効果音の作成には効果的である。しかし、剛体力学を基にした手法であるため、流体シミュレーションを用いた CG に対する効果音作成に用いることは出来ない。

流体シミュレーションを用いた CG に対する効果音をリアルタイムに自動的に生成する手法として、土橋らによって空気力学に基づく手法 [3][4] (図 2.18, 図 2.19) が提案されている。この手法では、数値流体解析に渦流を表現する Curle モデルを適用することで、剣や棒のような剛体が気体を切る際や、炎などによって発生する様々な形状の渦流の音を表現できる。Curle モデルでは、物体が音波長と比較して、十分に小さい領域でなければ適用できないため、物体を小領域に分割し互いに関与しない別音源として扱うことで、渦流の音のリアルタイムシミュレーションを実現している。

しかし、この手法は気体における渦流を基にした手法であるため、液体と気体のような異なる 2 流体間で発生する音を生成することは出来ない。

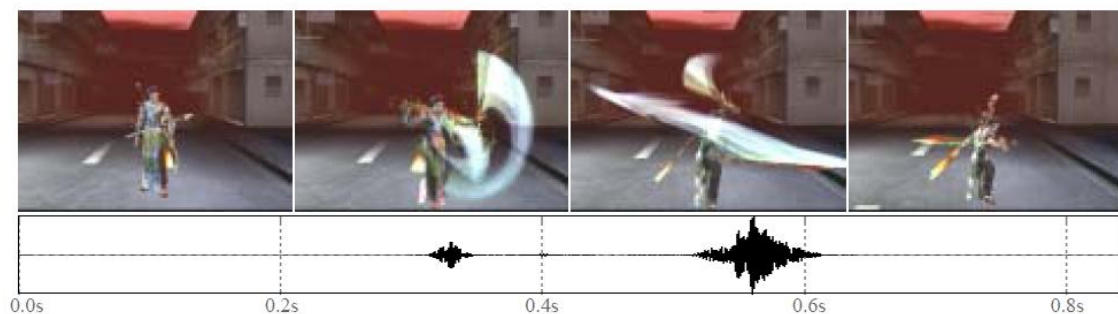
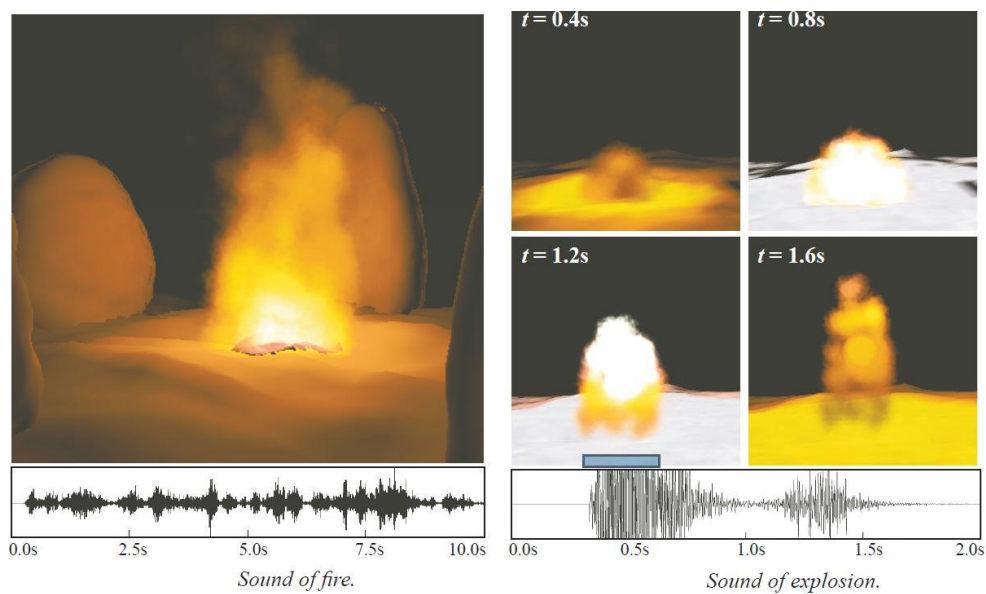


図 2.18 Real-time Rendering of Aerodynamic Sound using Sound Textures based on Computational Fluid Dynamics [3]

2.1 節で述べたように，液体では液中に含まれる気泡の運動により音が発生しており，その運動は液中の気泡の圧力変動に従う．そのため，液体を対象にしたシミュレーションの場合，液体要素の接触・衝突情報ではなく，液中の気泡の圧力変動に従って効果音を生成・発生させる必要がある．



☒ 2.19 Synthesizing Sound From Turbulent Field Using Sound Textures for Interactive Fluid Simulation [4]

第3章 気泡運動を反映した液体表現

提案手法では，物理学に基づいて気液二相流における気泡運動を反映した液体の振る舞いをリアルタイムでシミュレートする．液体や気体などの流体は，原子や分子によって構成されるが，数 cm^3 程度の空間に莫大な数の原子や分子が存在しているため，巨視的な視点から流体の物理量（質量や運動量など）をみたときに，物理量が連続的に分布している連続体として見なすことができる．物理学に基づいて気液二相流を計算するには，連続体である流体の離散化，つまり，流体の振る舞いを記述する Navier-Stokes 方程式 [11] の離散化が必要となる．また，気液二相流における気泡運動を反映した液体の振る舞いをシミュレートするためには，液体と気体との相互作用を表現するための物理モデルも必要となる．

本章では，Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [6] を用いた Navier-Stokes 方程式の離散化の方法と，気泡運動を反映した液体の振る舞いを表現するために SPH を拡張した物理モデルの提案を行なう．さらに，気泡運動を反映した液体を表現する描画手法についての提案および実装方法について述べる．

3.1. 液体の表現

視覚的にもっともらしい液体の振る舞いを実現するためには，2章で述べたように格子法に基づくシミュレーションが有効である．しかし，格子法に基づいたシミュレーションは計算コストが高く，リアルタイムで処理を行うことは困難である．Muller らは，粒子法 (SPH) を用いることで液体のリアルタイムシミュレーションを実現する手法について提案している [33] ．

3.1.1 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

SPHは粒子法の1つで、天体物理を対象とする流体力学の分野で発達した手法[6]であるが、汎用的な手法であるため様々な流体のシミュレーションに用いられている。SPHでは、Lagrange式記述で粒子を用いて流体の運動を記述する。空間上のある点 \mathbf{x} における物理量 A は以下の式で与えられる。

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

ρ_i 、 m_i は粒子 i の密度、質量である。 W は粒子間での物理量を補間するためのカーネル関数で、 h はその有効半径である。カーネル関数には一般的に、粒子間距離が大きくなるにつれて減少する関数を用いられる。提案手法では、[33]で提案されているカーネル関数を用いている。SPHでは、カーネル関数の有効半径 h 内にある粒子のみを探索し、補間関数の計算に用いることで計算量を減らすことができる。提案手法では近傍粒子の探索に、天田らによって提案されている格子を用いた高速探索アルゴリズム[34]を用いる。近傍粒子の探索については、3.1.3節で述べる。

式(3.1)を用いて空間上のある点 \mathbf{x} における密度を表現すると以下の式になる。

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \cdot \frac{\rho_j}{\rho_j} \cdot W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.2)$$

$$= \sum_j m_j \cdot W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.3)$$

密度は各粒子の位置情報のみで更新され、粒子間の相互作用の計算に用いられる。

また、SPHでは、物理量の勾配やラプラシアンをカーネル勾配やラプラシアンと物理量の積との積分によって表すことができ、計算量を削減できる。

$$\nabla A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \cdot \frac{A_j}{\rho_j} \cdot \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.4)$$

$$\nabla^2 A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \cdot \frac{A_j}{\rho_j} \cdot \nabla^2 W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.5)$$

3.1.2 SPH による流体のシミュレーション

流体の振る舞いは、質量保存の法則を表す連続の式と非圧縮性流体の運動を定義した以下の Navier-Stokes の式 [11] によって表される。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (3.7)$$

$t, \mathbf{v}, p, \mu, \mathbf{f}$ は時間, 流速, 圧力, 粘性係数, 外力である。

流体のシミュレーションで用いる粒子の圧力と粘性力は、Navie-Stokes の式の各項を SPH により離散化し、作用反作用の法則を満たすように式を対称化することで次式のように求められる [33]。

$$\mathbf{f}_i^{pressure} = -m \sum_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{f}_i^{viscosity} = \mu \cdot m \sum_j \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.9)$$

圧力項で用いる粒子圧力 p_i は、Desbrun らが提案した状態方程式に基づく式で表現できる [35]。

$$p_i = k(\rho_i - \rho_0) \quad (3.10)$$

k, ρ_0 はそれぞれ圧力の大きさを調整するパラメータ, 流体の静止状態における密度 (静止密度) である。式 (3.10) より粒子密度が ρ_0 になるように流体粒子に力が働くことになる。

最終的に、粒子 i の加速度 \mathbf{a}_i は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{a}_i = \frac{1}{\rho_i} (\mathbf{f}_i^{pressure} + \mathbf{f}_i^{viscosity} + \mathbf{f}_i^{external}) \quad (3.11)$$

ただし、外力項 $\mathbf{f}_i^{external}$ には、重力や表面張力などといった外部より与えられる力が含まれる。

3.1.3 近傍粒子の探索

SPHでは、粒子の物理量とカーネルの積の和によって物理量の補間を行っている。このとき、カーネルの有効半径内にある粒子のみで物理量の補間を行うことで高速計算を可能としている。そのため、SPHの高速計算を行うためには、事前にカーネルの有効範囲内にある粒子、つまり近傍粒子を探索しておく必要がある。提案手法では、天田らの手法 [34] に従い、次のようにして近傍粒子の探索を行う。

まず、空間を一辺の長さが全て等しい大きさ（カーネルの有効半径以上）の格子に分割し、粒子を対応する格子に割り当てる。ある粒子の近傍粒子は、その粒子が割り当てられた注目格子と26近傍の格子（図 3.1）の計27個の格子内の粒子との距離を、カーネルの有効半径と比較することにより得られる（図 3.2）。SPHで用いる式は対称であるので、粒子のペアが求められればよい。そこで、全ての粒子に対して、1) 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、最小限の比較回数で近傍粒子を探索できる。

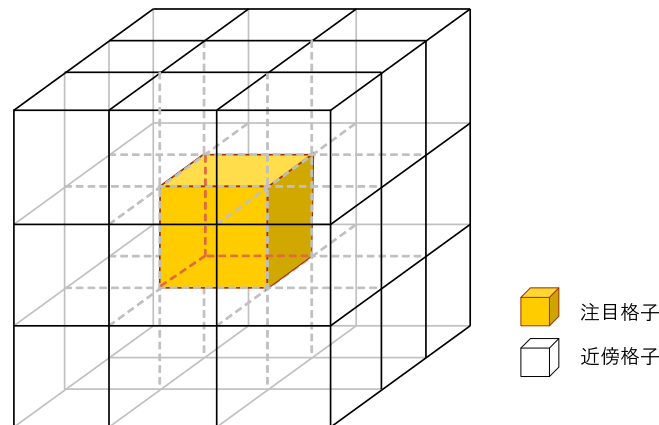


図 3.1 注目格子と26近傍格子

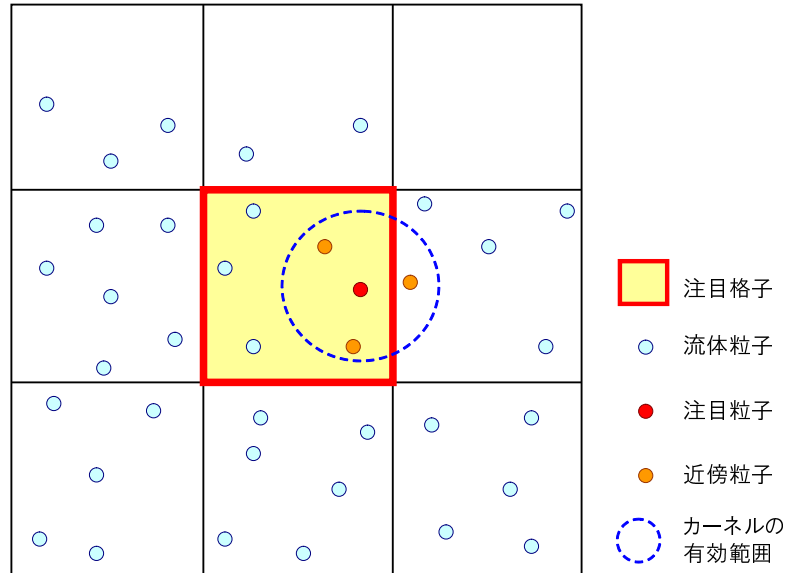


図 3.2 カーネル有効範囲と近傍粒子

近傍粒子の探索において計算された粒子間の距離を、以後のカーネルの計算で再利用することで、計算時間を短縮できる。また、近傍粒子の探索は、現在の時刻と次の時刻での粒子の分布がほとんど変化しないことから、数ステップごとに1回の実行にとどめることが可能であり、計算量を減らすことができる。

3.2. 気体と液体の相互作用

一般的な SPH では，単一の流体を扱うため，各々の粒子属性の多くは同じ値を持つものとして定義されている．例えば，重量，静止密度，粘性係数などの属性値に関しては，全ての粒子が同じ値を持つ．

提案手法では，一般的な SPH を拡張し，異なる種類の粒子が各々に固有の属性値を持つものとして定義する．このようにして，異なる種類の粒子間での相互作用の計算を行うことで，複数の異なる種類の流体を扱うことができる．つまり，気体と液体の相互作用表現は，異なる種類の粒子の属性値として液体と気体の属性値を持たせることで可能となる．

3.2.1 SPH の拡張

一般的な SPH では，式 (3.8) で定義される圧力項 $\mathbf{f}_i^{pressure}$ において，すでに各々の粒子が固有の質量を持つことができるように定義されている．提案手法では，圧力項として粒子ごとの固有の質量 m_i を用いた以下の式を用いる．

$$\mathbf{f}_i^{pressure} = - \sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.12)$$

式 (3.9) で定義される粘性力項 $\mathbf{f}_i^{viscosity}$ においては，全ての粒子が同一の粘性係数を持つように定義されているために，粘性係数が異なる粒子を同時に扱うことができない．そこで提案手法では，粒子間の粘性を計算する際に各々の粒子の粘性係数の平均値を用いることで，異なる 2 種類の粘性係数を扱えるように拡張する．

$$\mathbf{f}_i^{viscosity} = \sum_j \frac{\mu_i + \mu_j}{2} m_j \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.13)$$

式 (3.13) を用いることで，液体と気体のような粘性係数が異なる 2 種類の流体を扱うことができる．また，二相流界面においては各々の粘性係数の平均値を利用することで界面における粘度摩擦を表現できる．

3.2.2 気体粒子の振る舞い

提案手法では、液体粒子と気体粒子の異なる2種類の粒子を導入することによって、二相流間相互作用による気泡表現を実現する。

その際、液体粒子同士、気体粒子同士、気体粒子と液体粒子間において相互作用計算を行う必要があるが、気体は液体に比べて質量が非常に小さいため、気体粒子同士の相互作用は無視できる。このように、気体粒子同士は互いに無相関な粒子として見なされるため、気体粒子は粒子の存在可能範囲内を自由に運動する粒子となる（図3.3）。

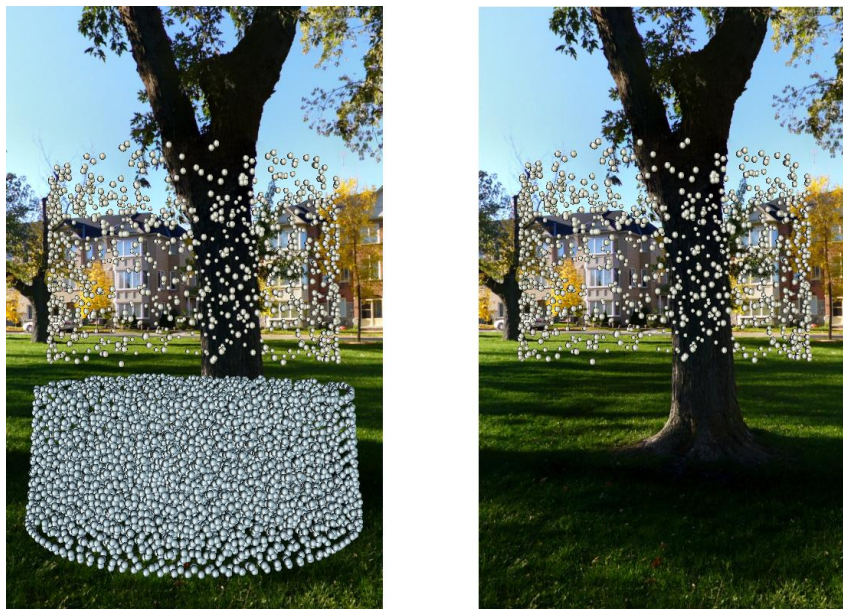


図 3.3 液体粒子と気体粒子 (左), 自由に運動する気体粒子 (右)

液体粒子は近傍探索範囲内の液体粒子、気体粒子と相互作用し、気体粒子は近傍探索範囲内の液体粒子とのみ相互作用するため（図3.4, 図3.5）、気体粒子は液滴の落下や波などによって液体粒子が気体粒子の近傍探索範囲内へ侵入することによって始めて力を受ける。そのため、落下中の液体粒子によって力を受けた気体粒子は液体粒子とともに落下し、液中に貫入する。

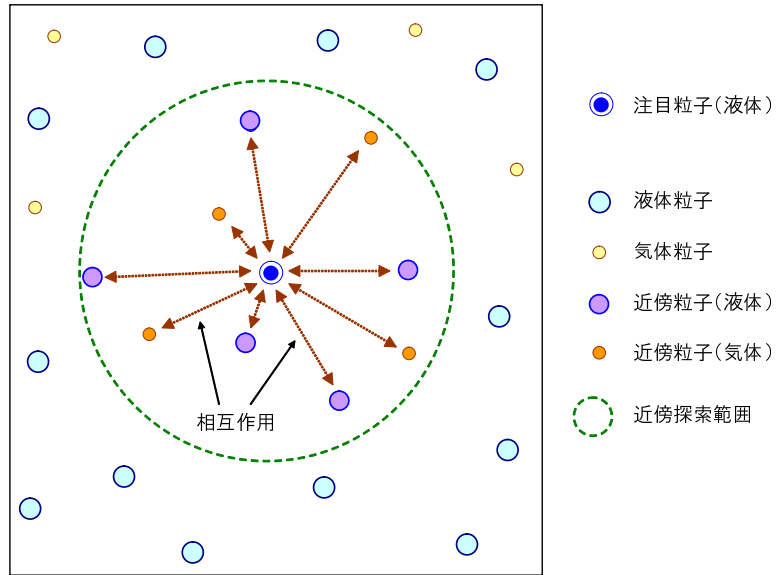


図 3.4 注目粒子が液体の場合の相互作用

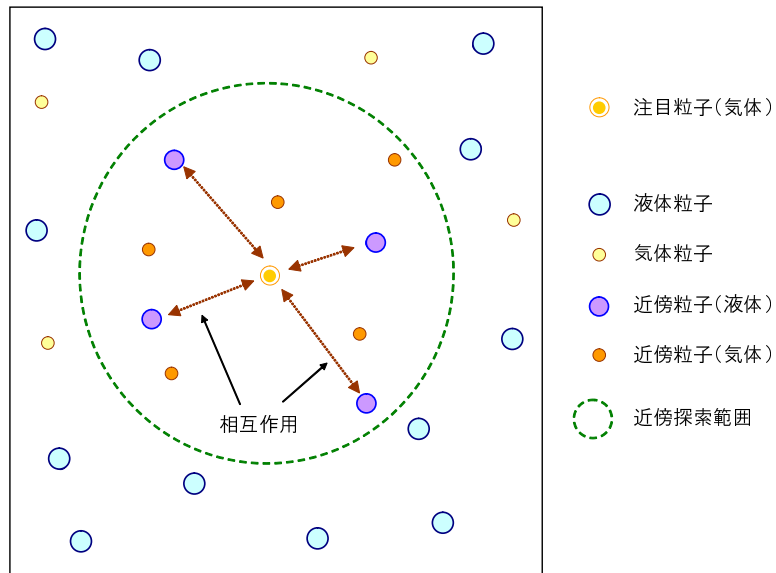


図 3.5 注目粒子が気体の場合の相互作用

3.2.3 表面張力

気液二相流では，液体の持つ表面張力によって気液界面が形成される．表面張力は液体分子間に働く分子間力によって気液界面法線の液体方向に働く力(図 3.6)で，この力によって液体は表面積ができるだけ小さくなる形状(球形)をとろうとする．

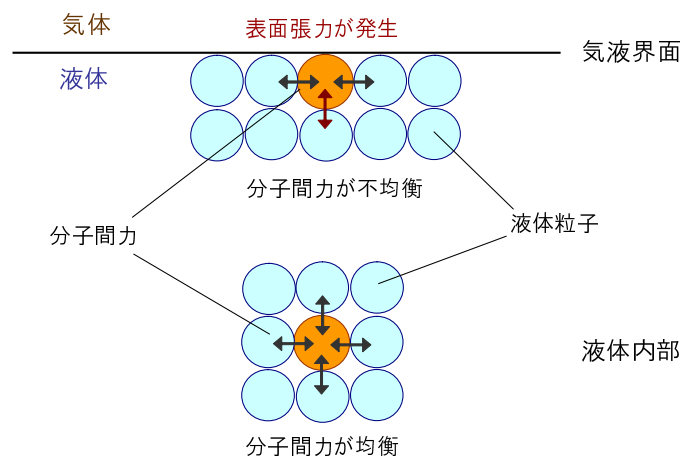


図 3.6 表面張力

しかし，SPH で離散化をおこなう Navier-Stokes の式では気液界面で発生する表面張力は考慮されていない．そこで，Morris らによって提案されているカラーフィールド [36] を用いて表面張力を表現する．

提案手法では，カラーフィールドを式 (3.1) を用いた以下の式で表す．

$$c_s(\mathbf{x}) = \sum_j a \cdot \frac{m_j}{\rho_j} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (3.14)$$

パラメータ a は，液体粒子の場合は 1，気体粒子の場合は 0 の値を持つ．

$$a = \begin{cases} 1 & \text{liquid} \\ 0 & \text{air} \end{cases} \quad (3.15)$$

このとき，気液界面のある場所における法線は，カラーフィールド勾配を用いて

$$\mathbf{n} = \nabla c_s \quad (3.16)$$

となる．また，曲率 κ は

$$\kappa = \frac{-\nabla^2 c_s}{|\mathbf{n}|} \quad (3.17)$$

となる．表面張力は気液界面の法線の液体方向に働く力（図 3.6）で，その強さは界面の曲率に比例する．したがって，表面張力は次式のように定義することができる．

$$\mathbf{f}^{surface} = -\sigma \nabla^2 c_s \frac{\nabla c_s}{|\nabla c_s|} \quad (3.18)$$

ただし， σ は表面張力の強さを調整する係数である．

液中における気体粒子は，気液界面に働く表面張力によって集められることになり気泡を形成する（図 3.7）．

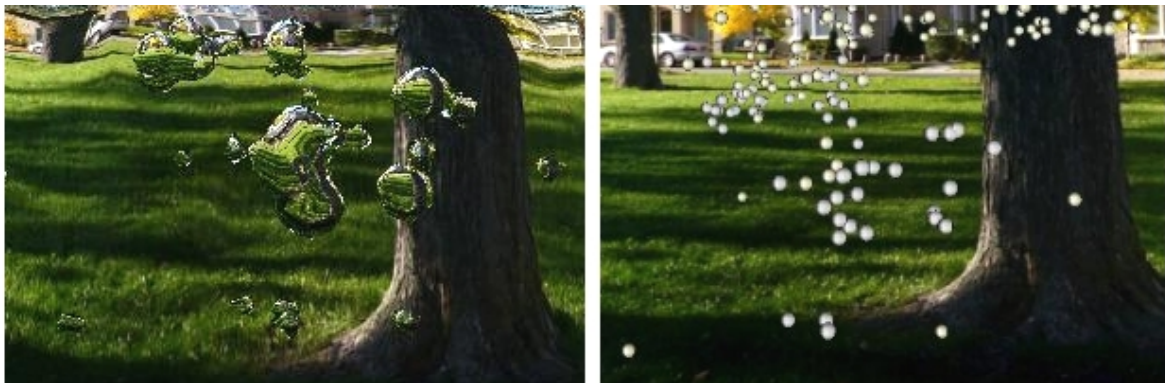


図 3.7 気泡の形成（左），気体粒子表示（右）

3.2.4 浮力

浮力は、各々の粒子に固有の静止密度を持たせることで表現可能となる．異なる静止密度を持つ流体が混合する状況では、異なる種類の流体間の界面に密度勾配、すなわち圧力勾配が発生する．この圧力勾配によって、静止密度が大きい粒子は下降し、静止密度が小さい粒子は上昇するように力が働くことになる．

自然界では水の静止密度は $1.00g/cm^3$ 、空気の静止密度は $0.00129g/cm^3$ である．液中に発生した気泡には、この液体と気体の静止密度差による浮力が発生する．液体における圧力は式 (3.10) により、

$$p^{liquid} = k^{liquid}(\rho - \rho_0^{liquid}) \quad (3.19)$$

で与えられる．ここで、 k^{liquid} は圧力の大きさを調整するパラメータ、 ρ_0^{liquid} は液体の静止密度である．同様に気体における圧力は、

$$p^{air} = k^{air}(\rho - \rho_0^{air}) \quad (3.20)$$

で与えられる．ここで、 k^{air} は圧力の大きさを調整するパラメータ、 ρ_0^{air} は気体の静止密度である．通常、同じ水深では $p^{air} < p^{liquid}$ となるため、式 (3.19)、式 (3.20) を式 (3.12) の圧力項の計算に用いると、液体粒子と気体粒子の間に圧力差が生まれ、気体粒子にかかる浮力となる．しかし、SPH の圧力項の計算式は、少数の粒子から構成される小さな気泡の圧力計算にうまく働かないという問題が存在する [25]．例えば、液中で 1 つだけ遊離した気体粒子は、その周囲を液体粒子に囲まれるために式 (3.12) においてカーネル関数のオーバーラップが発生する．そのため通常よりも密度が高くなりすぎてしまい、液中における上昇速度が極端に落ち、動けなくなってしまう．

そこで提案手法では、Muller らによって提案されている浮力項 $f^{buoyancy}$ [25] を導入することによって、この問題を解決する．浮力項は、気体粒子の密度と静止密度の差に比例する力をモデル化した以下の式で表される．

$$f^{buoyancy} = b \cdot (\rho^{air} - \rho_0^{air})g \quad (3.21)$$

ただし， ρ^{air} ， ρ_0^{air} は，気体粒子の密度，静止密度を表し， b は浮力効果を調整するパラメータである．浮力項を導入することで，液中において遊離し，圧力が上がりすぎてしまった気体粒子に対して強制的に浮力を与えることができ，気体粒子の上昇速度の減少や停止を防止することが可能となる．このように，最終的に気体粒子にかかる浮力は，圧力項によって計算された圧力に，浮力項で計算される付加的な浮力を加えることで計算される．

最後に，気液二相流において，液体粒子と気体粒子に対して考慮する力について表 3.1 にまとめる．

表 3.1 気液二相流の相互作用で考慮する力

	液体粒子同士	気体粒子同士	気液界面
圧力	$f^{pressure}$	0	$f^{pressure}$
粘性力	$f^{viscosity}$	0	$f^{viscosity}$
表面張力	0	0	$f^{surface}$
浮力	0	0	$f^{buoyancy}$

3.3. 気泡を含む液体の描画

液面で起こる光学現象の表現には光線追跡法が最適であるが，計算コストが高く実時間処理は困難である．そのため，描画される面のみで反射・屈折が起こると仮定し，ラスタライズ処理を行う GPU を有効に活用することで光学現象の計算を高速化する．

3.3.1 液面の生成

提案手法では，Muller らの手法 [33] に基づき流体粒子の密度分布より陰曲面を生成し，Marching Cubes [38] を用いて陰曲面をポリゴン化することで液面を形成する (図 3.8)．陰曲面の法線 \mathbf{n} は式 (3.3) を用いた以下の式で表される．

$$\mathbf{n} = \nabla \left(\sum_j m_j \cdot W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) - \rho^{iso} \right) \quad (3.22)$$

ただし， ρ^{iso} は陰曲面生成のための閾値である．

3.3.2 液面の光学現象表現

液面で発生する反射や屈折といった光学現象は，入射光の参照先としてキューブマップテクスチャ [39][40] による環境マップ [41] を用いて反射光と屈折光を計算することで表現する (図 3.9)．反射光と屈折光の強度の計算には，以下のフレネル効果の近似式 [42] を用いる．

$$R(\theta_i) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos(\theta_i))^5 \quad (3.23)$$

$$T(\theta_i) = 1 - R(\theta_i) \quad (3.24)$$

$$R_0 = \frac{(\eta_1 - \eta_2)^2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \quad (3.25)$$

ただし， θ_i は入射角， $R(\theta_i)$ ， $T(\theta_i)$ は入射角 θ_i における反射光の強度，屈折光の強度， η_1 ， η_2 は 2 つの媒質の屈折率を示す．



図 3.8 陰曲面のポリゴン表示



図 3.9 フレネル効果を考慮した環境マッピング

3.3.3 液中の気泡の描画

液中に含まれる気泡の光学現象を厳密に表現するためには、先に述べた光線追跡法が最適であるが、実時間での描画を行うことは困難である。

提案手法では、液面の反射・屈折表現手法を気泡表面にも適用することで液中の気泡の描画を行う。その際、液面の光学現象の表現と気泡の光学現象の表現の整合性を取るために、シェーダを用いて屈折光と反射光の計算を行う。

液中の気泡の描画を行なう際、まず気泡のレンダリング結果を格納するための気泡テクスチャを用意し、レンダリングを行う前に全てのテクセルのアルファ値を0に初期化しておく。次に、気泡を構成する陰曲面ポリゴンに対して屈折と反射の計算を行い、気泡表面のレンダリングを行う。そして、現在の描画フレーム内における気泡のレンダリング結果を、気泡が描画されているテクセル位置のアルファ値のみを1として気泡テクスチャに格納する（図3.10）。

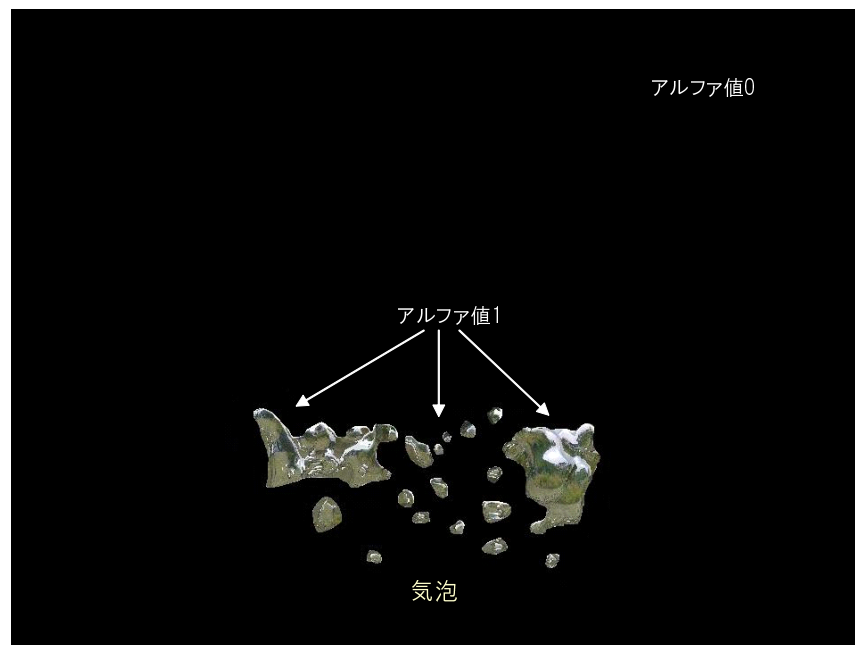


図 3.10 気泡テクスチャ

液面を描画する際は、液面の描画を行うテクセル位置に対応する気泡テクスチャのアルファ値を参照しながら光学現象の計算を行う。図 3.11 のように、あるテクセル位置の気泡テクスチャのアルファ値が 0 である場合、その位置には気泡が存在しないため、液面に対する屈折光の計算を行う。気泡テクスチャのアルファ値が 1 である場合は、そのテクセル位置には気泡が存在するため、その位置の屈折光の色を気泡テクスチャの色に置き換える。このように液面の描画を行うテクセル位置に気泡を書き込むことで、液中に存在する気泡の表現が可能となる（図 3.12）。

しかし、このままでは液面において全反射が発生する場合であっても、液中の気泡が液面から透過して見えてしまう。そのため、液面において全反射が発生する場合は、気泡テクスチャを参照せずに液面の反射光の計算のみを行い、液中に存在する気泡と液面における反射との整合性を保つ（図 3.13）。

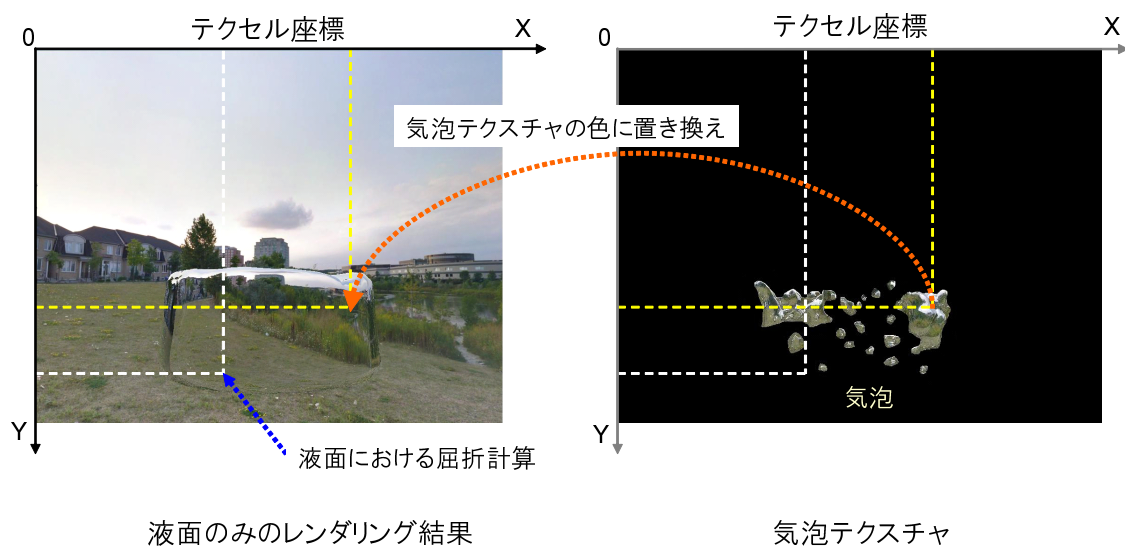


図 3.11 液面の屈折光計算における気泡テクスチャの対応



図 3.12 気泡テクスチャを用いた気泡と液面の描画



図 3.13 全反射面を考慮した気泡と液面の描画

第4章 液体の効果音の自動生成

本章では，液体のCGに対する効果音を，物理シミュレーション結果に基づき自動的に生成し，CG描画と同期してインタラクティブに出力する手法について提案する．提案手法では，液体のシミュレーションに用いたSPHの計算結果を効果音生成に用いることで，液滴の落下時に発生するような複雑な音をオーディオレートで生成し，CGの描画と同期して出力することを可能にする．

4.1. 気泡が発する音の計測実験

2章で述べたとおり，液体の音は液滴が液中に貫入した際にできる気泡の運動が音源になっている．液体の音をシミュレートするにあたり，実際に気泡の音の発生現象の計測を行った．実験では，水面に水滴を落下させ，水中の気泡の運動の様子と発する音の計測を行った．また，気泡の生成・破裂と音の発生の関連性を調べるため，高速度カメラを用いて液体中の気泡運動の計測を同時に行った．計測条件，高速度カメラの設定は表4.1, 表4.2のとおりである．計測の様子，計測結果を図4.1, 図4.2に示す．

表 4.1 計測条件

対象	落下位置の水面からの高さ (m)	水滴の容量 (ml)
水	2.0	2.0

表 4.2 高速度カメラの設定

解像度 (ピクセル)	速度 (frame/s)	計測範囲 (cm)
640 × 480	1000	8.0 × 6.0

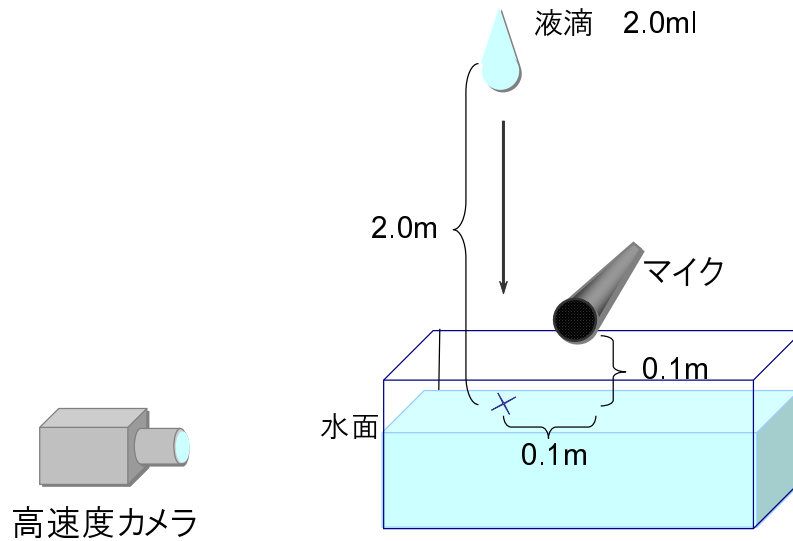


図 4.1 気泡の運動と音の計測の様子

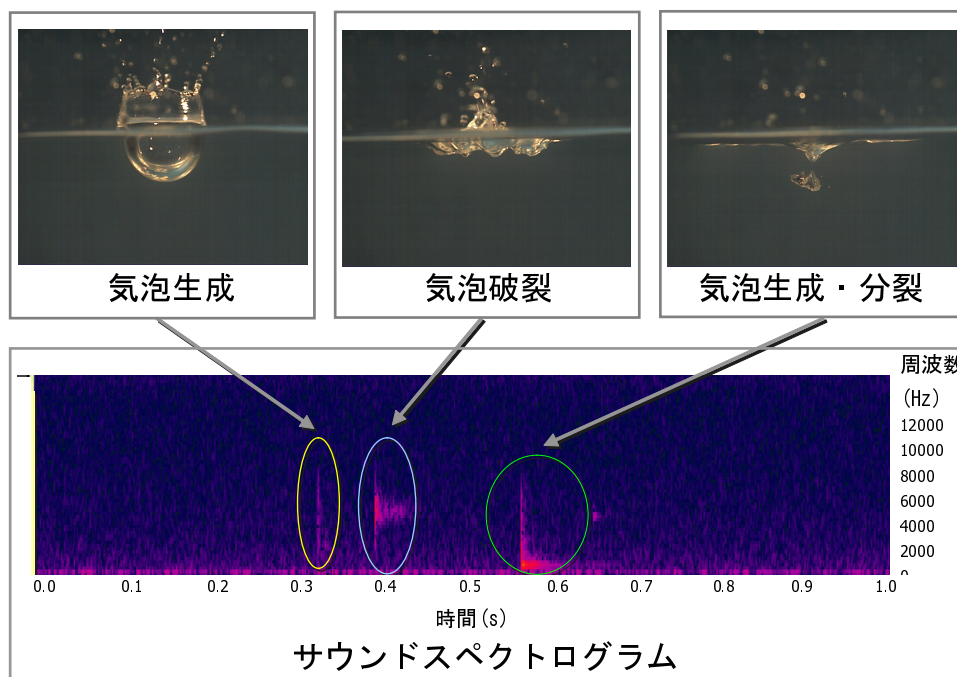


図 4.2 気泡の運動と音の計測結果

計測された高速度カメラの映像とサウンドスペクトログラムから、気泡が生成・破裂などの運動を行なう際に音が発生していることが分かる。以下の実装では、このとき計測された気泡生成音と破裂音を波形テーブル用の基本波形として用いる。

4.2. 提案システム

一般に人間の感覚系は、目に光が届いてから 20 ミリ秒 ~ 30 ミリ秒以上の音の遅延を認識できる。そのため、CG に対する効果音のシミュレーションをリアルタイムで行うためには、CG の描画と効果音の出力の同期を実現する必要がある。

提案手法では、物理演算を行う物理シミュレータ部と CG の描画を行うグラフィックレンダリング部の組と、効果音を生成・出力するサウンドモデリング部をマルチプロセスにより実装する。プロセス間の情報のやり取りは、図 4.3 のように、プロセス 1 の物理シミュレータが音生成に必要な情報を共有メモリに書き込み、プロセス 2 のサウンドモデリング部がその情報を読み込むことで行なわれる。共有メモリを利用することによって、マルチプロセスで並列して動くグラフィックレンダリング部とサウンドモデリング部が物理シミュレータからの情報を同時に受け取ることができ、CG の描画と効果音の発生同期を可能としている。

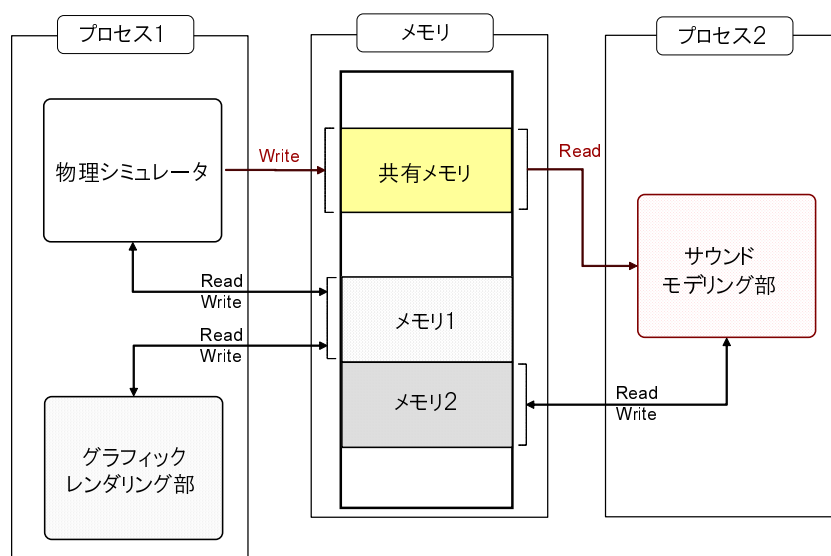


図 4.3 共有メモリによるプロセス間の情報共有

4.2.1 気泡のクラスタリング

液体の音は液滴が液中に貫入した際にできた気泡の運動が音源になっているため、シミュレーション上で生成されている気泡の数を知る必要がある。

提案手法では、3.3.1節で述べたSPHの近傍探索用格子を用いて、気体粒子が含まれる格子をグルーピングすることによって、生成されている気泡数を判別する。SPHの近傍探索で用いた格子は、一辺の長さがカーネルの有効範囲以上で全て等しくなるように空間を分割したもので、各々の格子に対応する粒子が割り当てられている。

提案手法では、まず、気泡形成に用いられている気体粒子が含まれている格子をリストアップする。その際、ある閾値以上の圧力を持つ気体粒子が気泡形成に用いられているとして判断する。そして、ある気体粒子が割り当てられている格子(注目格子)の6近傍の格子(図4.4)に含まれる粒子を探索する。このとき、近傍格子内に気体粒子が含まれていれば、それらの格子は注目格子と同じグループに属していると判断し、同じグループ番号を割り当てる(図4.5)。

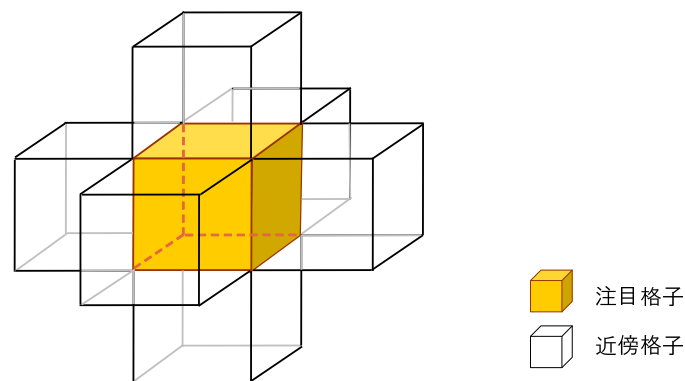


図 4.4 注目格子と6近傍格子

次に、注目格子の近傍格子のさらに6近傍の格子を探索し、同様に気体粒子が含まれていれば同じグループ番号を割り当てる(図4.6)。グループ番号は、気体粒子が含まれる近傍格子が無くなるまで同じ番号を割り当て、気体粒子が含まれる近傍格子が無くなった時点で番号を増やす。

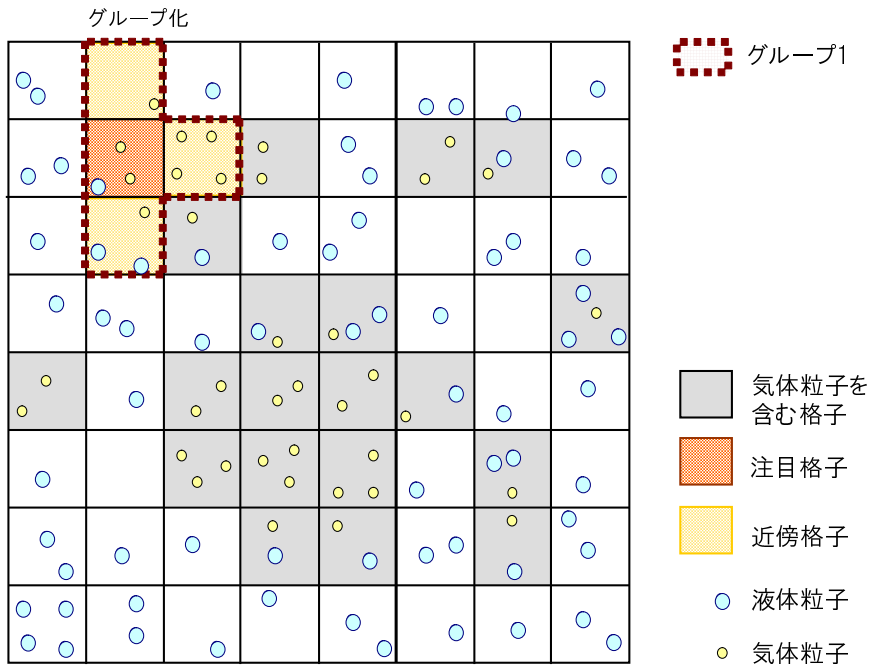


図 4.5 格子へのグループ割り当て

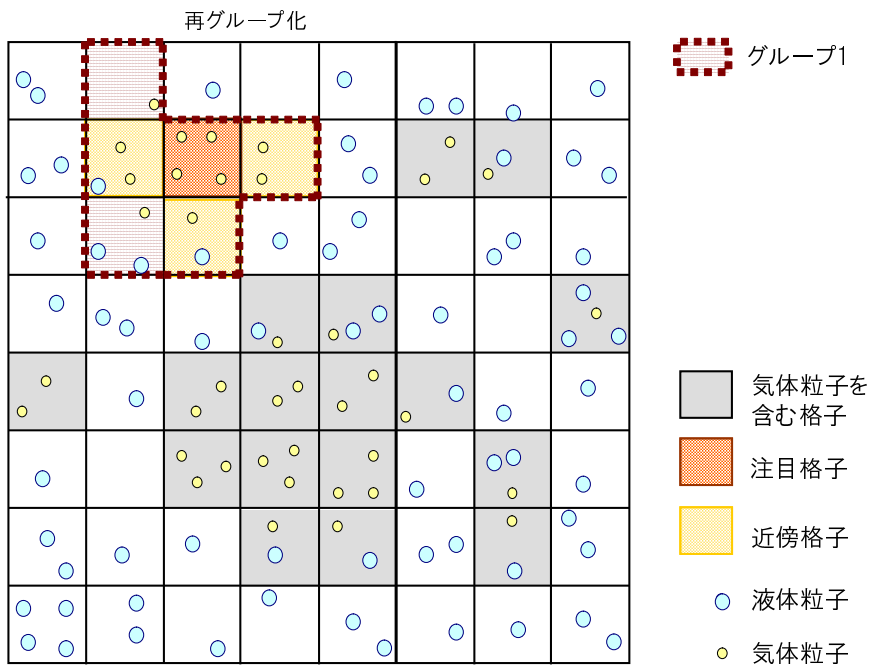


図 4.6 格子への再グループ割り当て

そして、新たに気体粒子が割り当てられている格子に対して、その6近傍の格子に含まれる粒子を探索し、グループ番号を割り当てる(図4.7)。このようにして、粒子が割り当てられている格子全てにグループ番号を付ける(図4.8)。

気泡のクラスタリングは、格子内に含まれている気体粒子にその格子のグループ番号を与え、それら粒子が同じクラスターを形成していると考えられることを行う(図4.9)。つまり、同じ格子のグループに属する気体粒子によって、1つの気泡(気泡クラスター)が生成されていると判断する。このように、気体粒子を含む格子のグループ数の数が生成されている気泡クラスター数となる。

以上のように提案手法では、粒子間距離などを用いて粒子のクラスタリングを行うのではなく、まず粒子が含まれる格子をグループ分けし、その結果を粒子のクラスタリングに用いることで、気泡内圧力の計算を高速化している。これらの計算は物理シミュレータで行われ、クラスタリングの結果はグラフィックレンダリング部で描画することで確認できる。

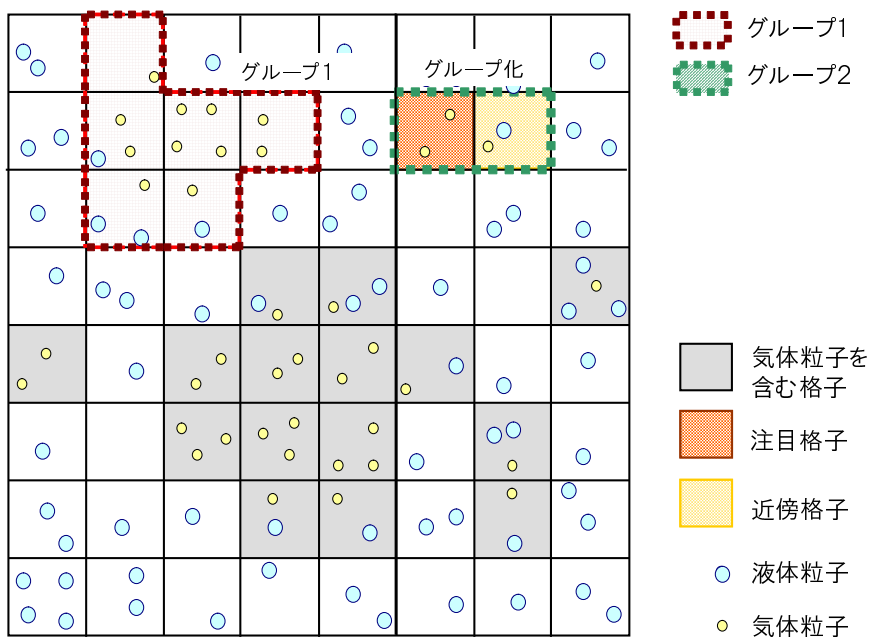


図 4.7 格子グループの区別

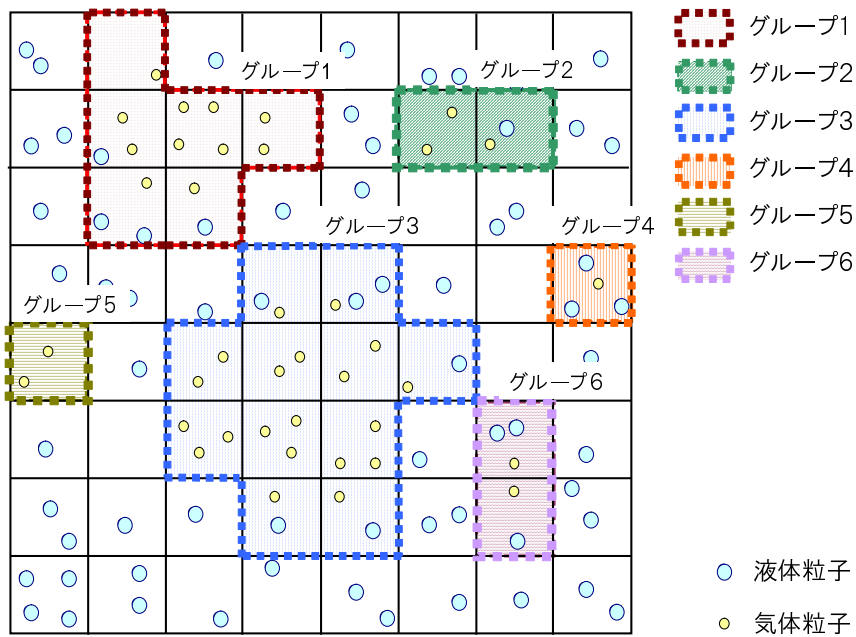


図 4.8 気体粒子を含む格子のグループング結果

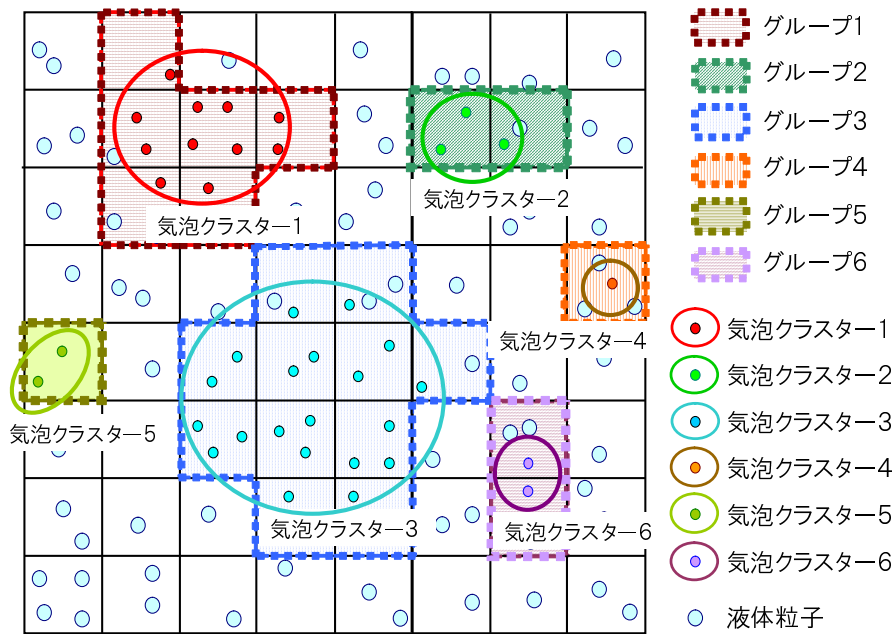


図 4.9 気泡クラスターの割り当て

気泡のクラスタリングの実装結果を図 4.10 に示す。図 4.10 の結果表示において、各々の気体粒子の色が気泡クラスターを表す。なお、白色の気体粒子は、圧力が気泡生成の閾値より低いためクラスタリングされなかった粒子である。

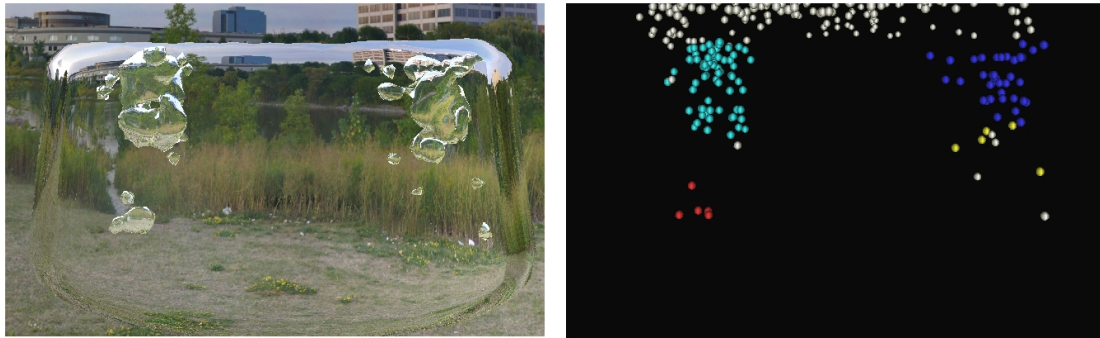


図 4.10 気泡クラスターの実装結果（気泡表示（左），粒子表示（右））

4.2.2 気泡半径の計算

提案手法では式 (2.8) に従い、発生した気泡の固有振動周波数を計算する。そのため、効果音の周波数計算の際に各々の気泡の半径が必要となる。

気泡半径は図 4.11 のように、気泡クラスター中に含まれる全ての気体粒子間の距離を調べ、最も離れた 2 粒子間の距離がその気泡クラスターの直径であると近似することで求める。また、気泡の発生位置は最も離れた 2 粒子間の中央であると定義する。気泡半径の計算結果の表示を図 4.12 に示す。図 4.12 の表示において、各々の気泡クラスターの直径を同色のワイヤフレームで表す。

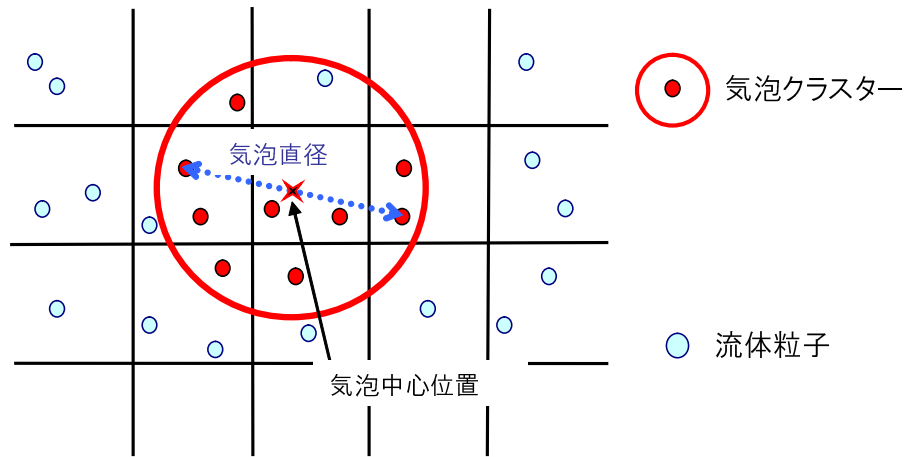


図 4.11 気泡の半径と位置



図 4.12 気泡半径の計算結果の表示

4.2.3 サウンドレンダリング部

提案手法におけるサウンドモデリング部は、波形テーブル、音発生判定モジュール、変調モジュール、Sound API から構成される [43][44]。サウンドモデリング部の構成を図 4.13 に示す。

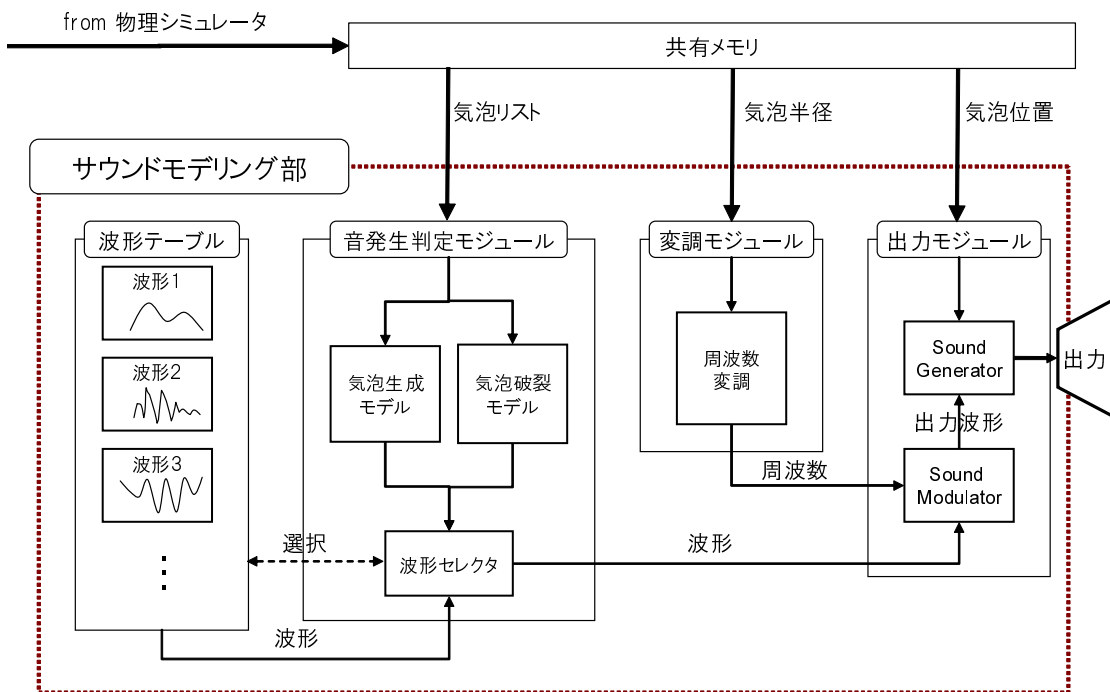


図 4.13 サウンドモデリング部

波形テーブル

提案手法では、波形テーブルに事前にサンプリングしたもの、もしくは物理法則に基づいて作成した波形を複数保持する。波形テーブルは、図 4.14 に示すようにメモリ上の音源をまずバッファに読み込み、そのバッファを音源波形ソースとして複数コピーしたものによって構築される。

提案手法では、波形テーブルに 4.1 節において計測された気泡の生成音と破裂音を用いている。

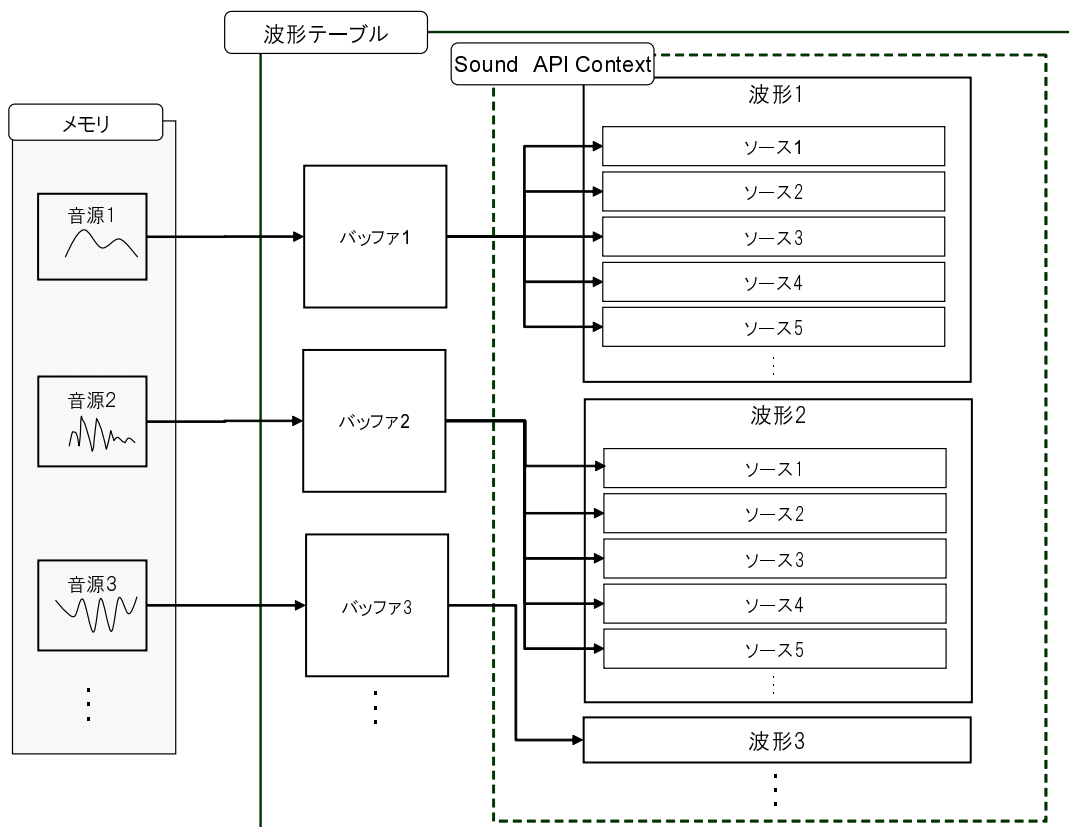


図 4.14 波形テーブルにおける音源ソースの配置

音発生判定モジュール

音発生判定モジュールは、物理シミュレータから渡される気泡クラスターのリストをもとに音の発生判定を行う。音発生判定モジュールは、気泡生成モデルと気泡破裂モデルの判定モジュールと波形セレクトタにより構成される。

気泡クラスターのリストが渡されると、気泡生成モデルは、前ステップと比較して気泡クラスターが生成された際に生成フラグを立てる。気泡破裂モデルは、生成フラグが立っている場合で、かつ前ステップと比較して気泡クラスターが破裂した際に破裂フラグを立てる。これらのフラグにより、必ず気泡生成音が発生してから、気泡破裂音が発生するようにモジュールを制御する。

波形セレクトタは、生成モデルと破裂モデルのフラグ情報を常にチェックし、フラグが立った場合には、波形テーブルからそれぞれのモデルに合った波形を選択し Sound API に渡す。波形を選択する際は、効果音の出力に使用中のソースからは読み込みを行わず、出力に使用されていないソースから順に読み込みを行う。このように使用するソースを選択することで、気泡生成が多数連続して発生した際であっても、音切れのない効果音の連続再生を可能としている。

変調モジュール

変調モジュールは、式 (2.8) を用いて気泡が発する音の周波数 f_0 を決定する。気泡半径 R_0 は、4.2.2 節で求められた気泡クラスター半径を用い、式 (2.8) を以下のように近似する。

$$f_0 = \frac{1}{R_0} \cdot \alpha \quad (4.1)$$

係数 α は、波形テーブルに使用する音源の周波数ごとに経験的に決定する。求められた周波数は、波形セレクトタによって選択された波形と同時に Sound API に渡される。

出力モジュール

出力モジュールは，波形セレクトから渡された波形情報と，変調モジュールによって計算された周波数により波形の変調を行い，出力波形を生成する．そして，気泡クラスターの中心位置情報を用いて，気泡のある位置から効果音を発生させる．提案手法では，Sound API として OpenAL[37] を用いる．

第5章 実装と考察

前章までに気泡運動を反映した液体の表現手法と液体の効果音の自動生成手法について提案した。本章では，気泡運動を反映した液体の表現手法の実装結果とそれに伴う効果音の出力結果を示し，それらの結果に対する考察を述べる。

5.1. 実装環境

提案手法の実装は，表 5.1 に示す環境の下で行なった。

表 5.1 実装環境

OS	Microsoft Windows XP
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo E6600 2.40 GHz
メモリ	1.00 GB RAM
GPU	Nvidia GeForce 7900 GTX
Sound Device	ANALOG DEVICES SoundMAX HD Audio
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 [45]
Sound API	OpenAL[37]

気液二相流のシミュレーションに用いた液体粒子と気体粒子の各パラメータを表 5.2, 表 5.3 にまとめる。各パラメータは, 自然界における 20 の水と空気の物理量に基づき設定した。描画において屈折と反射の入射光の参照先に用いるキューブマップテクスチャには, Persson らが作成したテクスチャ[39] を用いた。SPH の更新頻度と描画の更新頻度は 3:1 の割合で行なった。SPH の近傍探索のタイムステップは 3ms とした。

効果音の自動生成手法は, 描画とは別のプロセスで実装を行なった。効果音の生成に用いた音源は, 第 4 章で行なった実験により計測された気泡生成音を 2 種類, 気泡破裂音を 2 種類用いた。波形テーブルに音源を格納する際, 使用している Sound Device 上で確保できる音源ソース数が最大 30 個であるため, 各々の音源を 7 個の音源ソースにコピーすることで, 音源ソース数が合計 28 個となるように格納を行なった。

表 5.2 液体粒子パラメータ

粒子数 (個)	6750
粒子質量 (g)	2.00
粘性係数 (P)	1.00×10^{-2}
静止密度 (g/cm^3)	1.00
表面張力係数 (N/m)	7.28×10^{-2}

表 5.3 気体粒子パラメータ

粒子数 (個)	1000
粒子質量 (g)	2.58×10^{-3}
粘性係数 (P)	1.80×10^{-4}
静止密度 (g/cm^3)	1.29×10^{-3}

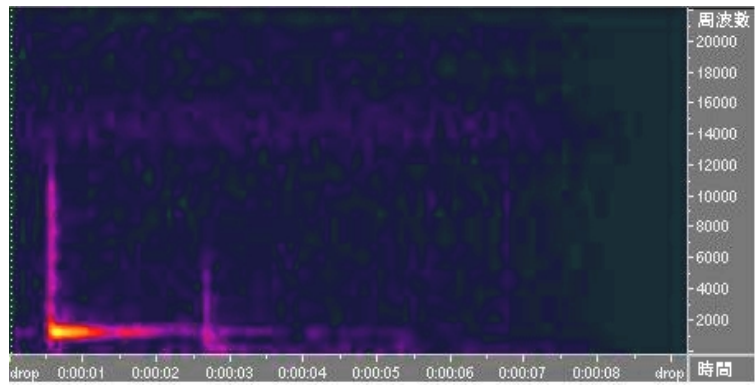
波形テーブルに用いた気泡生成音と気泡破裂音のサウンドスペクトログラムを図 5.1, 図 5.2 に示す。サウンドスペクトログラムの計測は, Syntnillium Software Corporation 製の Cool Edit 2000[46] を用いた。また, FFT を用いて求めた各々の波形の固有振動周波数を表 5.5 に示す。ただし, FFT フィルタには Welch(Gaussian) フィルタを用い, FFT サイズは 2048 とする。

周波数変換の式 (4.1) で用いる係数 α は, 式 (2.9) と固有振動周波数 f_m から以下の式を用いて求めた。

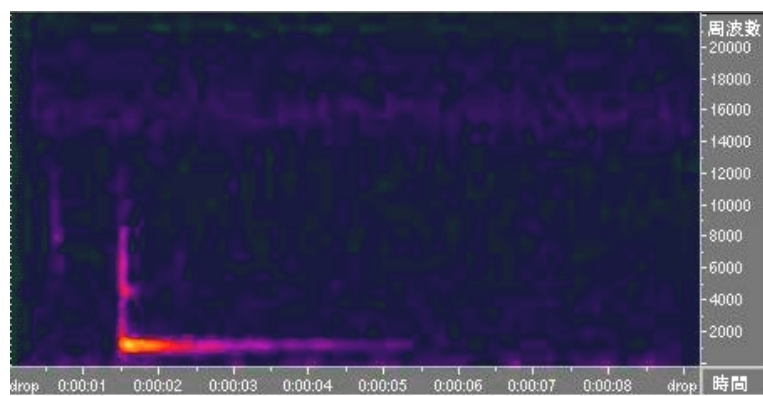
$$\alpha = 3 \cdot \frac{1000}{f_m} \quad (5.1)$$

表 5.4 固有振動周波数

気泡生成音	周波数 (Hz)		気泡破裂音	周波数 (Hz)
(1)	1302.4		(1)	1133.0
(2)	1131.3		(2)	1538.8

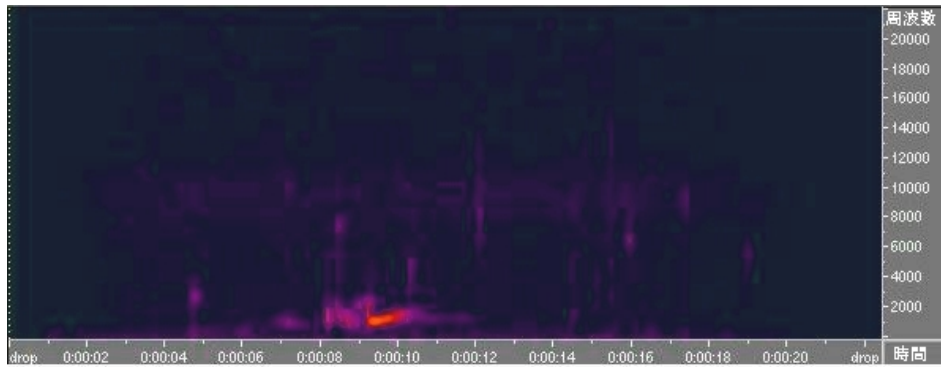


気泡生成音 (1)

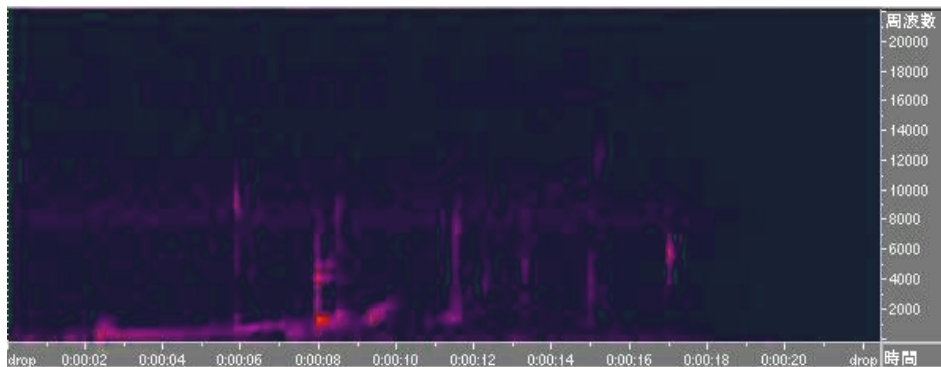


気泡生成音 (2)

図 5.1 サウンドスペクトログラム (気泡生成音)



気泡破裂音 (1)



気泡破裂音 (2)

図 5.2 サウンドスペクトログラム (気泡破裂音)

5.2. 気泡を含む液体表現の描画結果

気泡運動を反映した液体のシミュレーションと光学現象表現の結果を確かめるために、対象として以下の3つのシーンを用意した。

- シーン1：液面への1つの液滴の落下に伴う気泡の発生
- シーン2：液面への複数の液滴の落下に伴う気泡の発生
- シーン3：容器の操作によって発生した波による気泡の取り込み

シーン1、シーン2、シーン3の描画結果を図5.3、図5.4、図5.5に示す。各々のシーンにおいて容器の描画は行われていないが、液体は円筒型の容器に入っているものとする。

また、各シーンにおいて効果音の生成・出力を行なった場合と行なわなかった場合のフレームレートをそれぞれ計測した。それぞれのシーンにおける平均フレームレート (fps) は表5.5、表5.6のようになった。

表 5.5 フレームレート (効果音生成なし)

シーン	平均フレームレート (fps)
シーン1	17
シーン2	15
シーン3	14

表 5.6 フレームレート (効果音生成あり)

シーン	平均フレームレート (fps)
シーン1	16
シーン2	14
シーン3	13

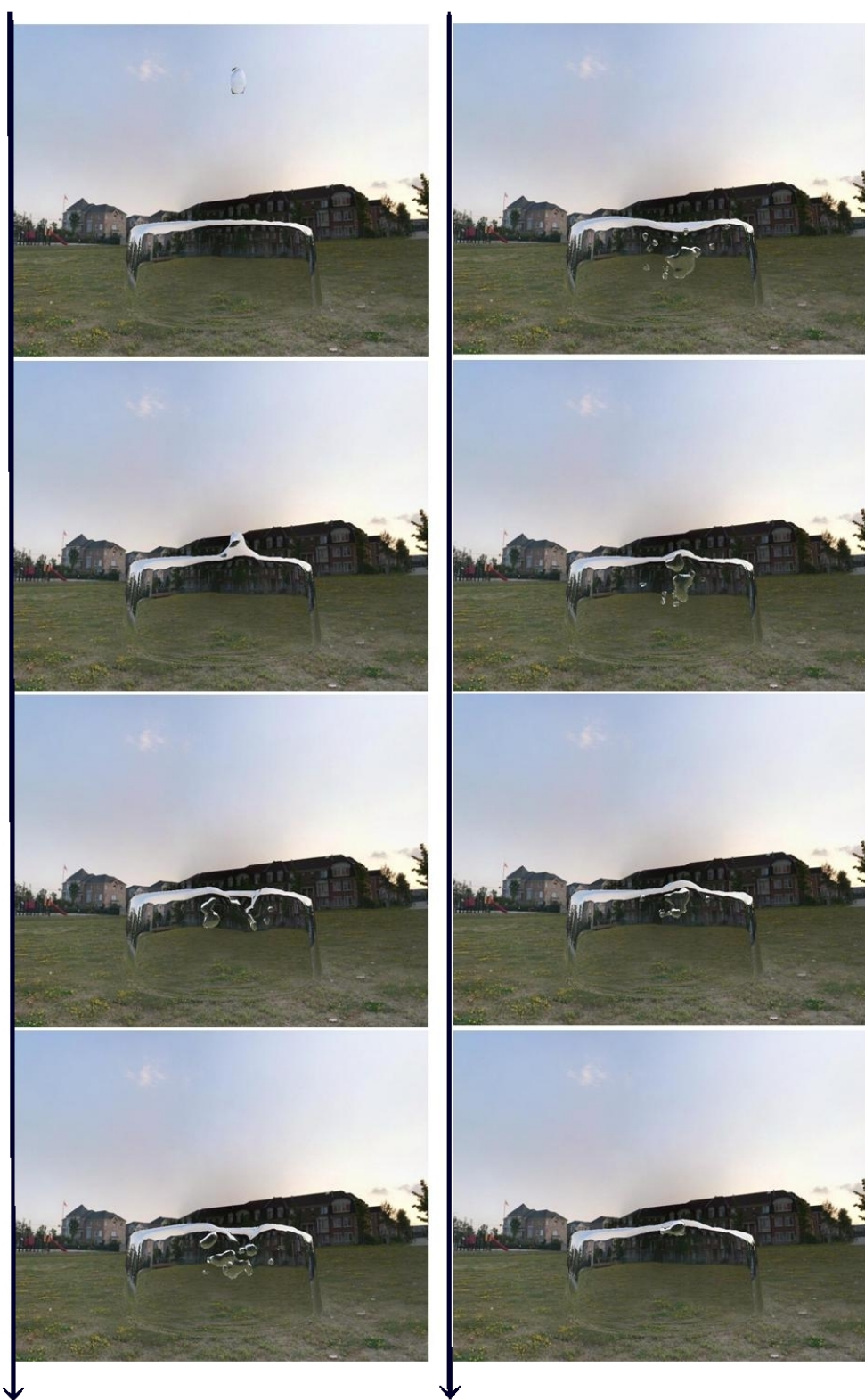


図 5.3 シーン 1 : 液面への 1 つの液滴の落下に伴う気泡の発生の様子

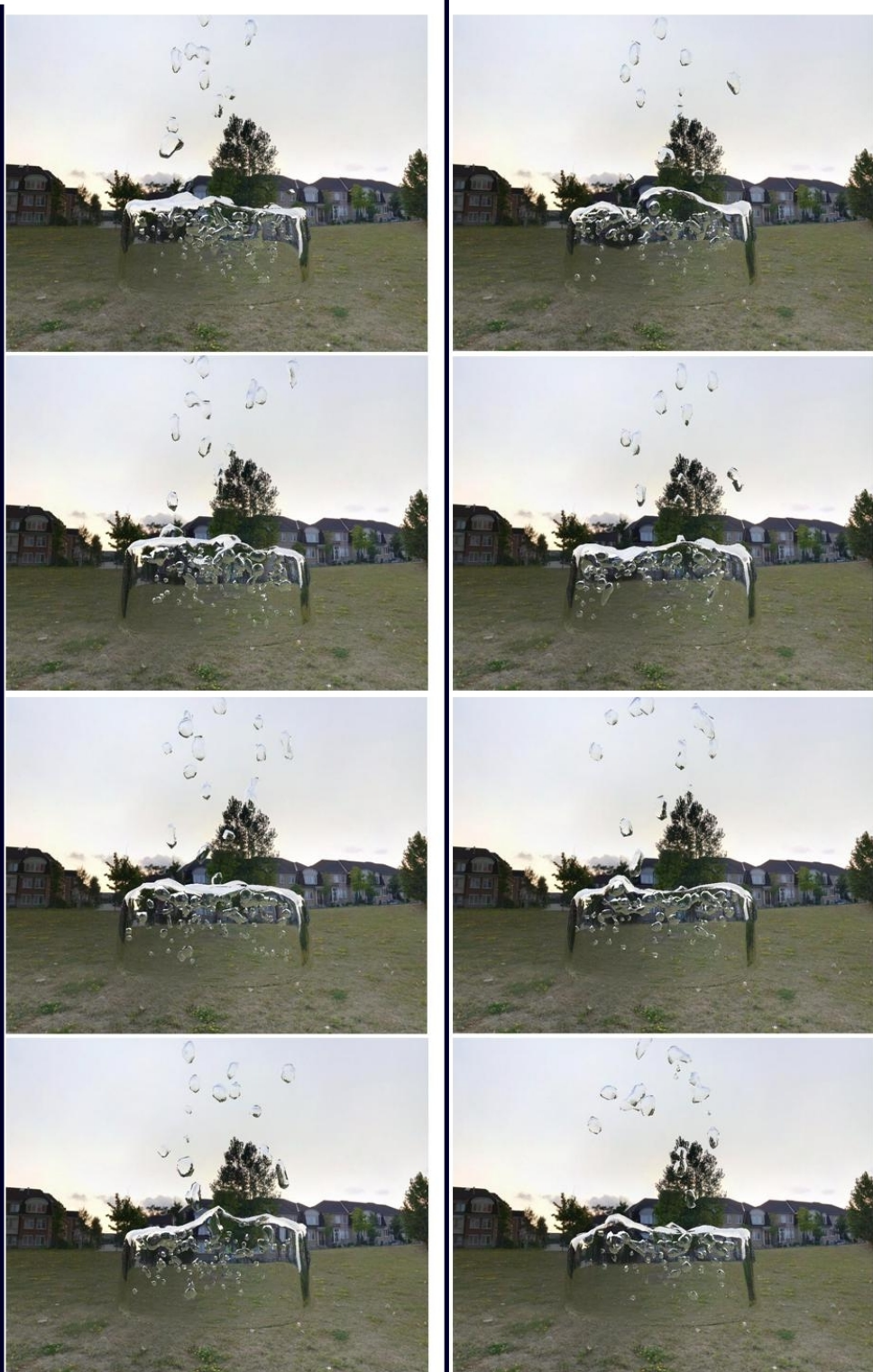


図 5.4 シーン 2 : 液面への複数の液滴の落下に伴う気泡の発生の様子

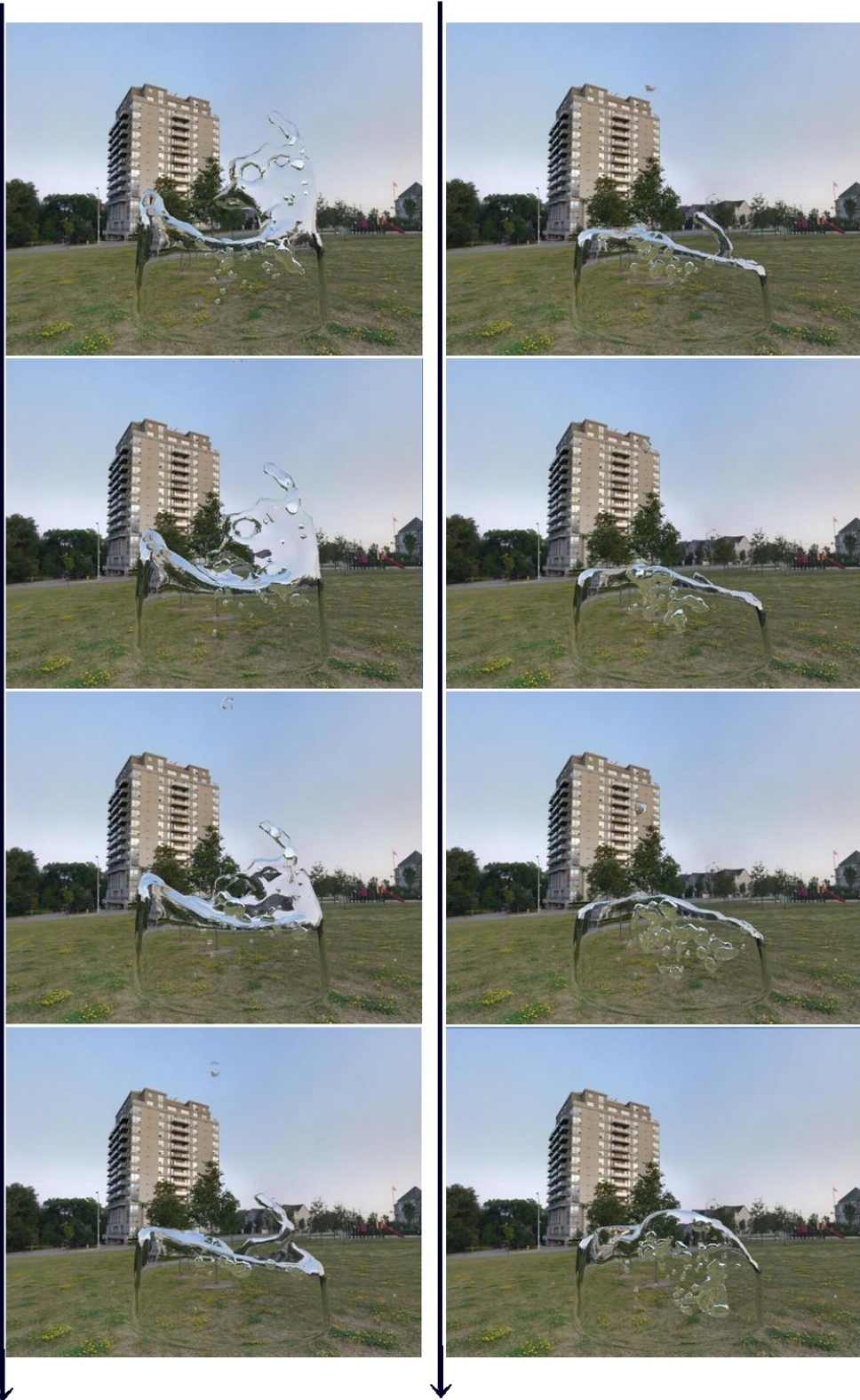


図 5.5 シーン 3 : 容器の操作によって発生した波による気泡の取り込みの様子

5.3. 効果音の生成結果

シーン1, シーン2, シーン3 に対して効果音の生成結果を図 5.6, 図 5.7, 図 5.8 に示す. なお, 効果音の録音は, 別の PC のマイク入力へ効果音を出力することで行なった. マイク入力の録音を行なうソフトには, Sony 社製の SonicStage MasteringStudio [47] を用いた.

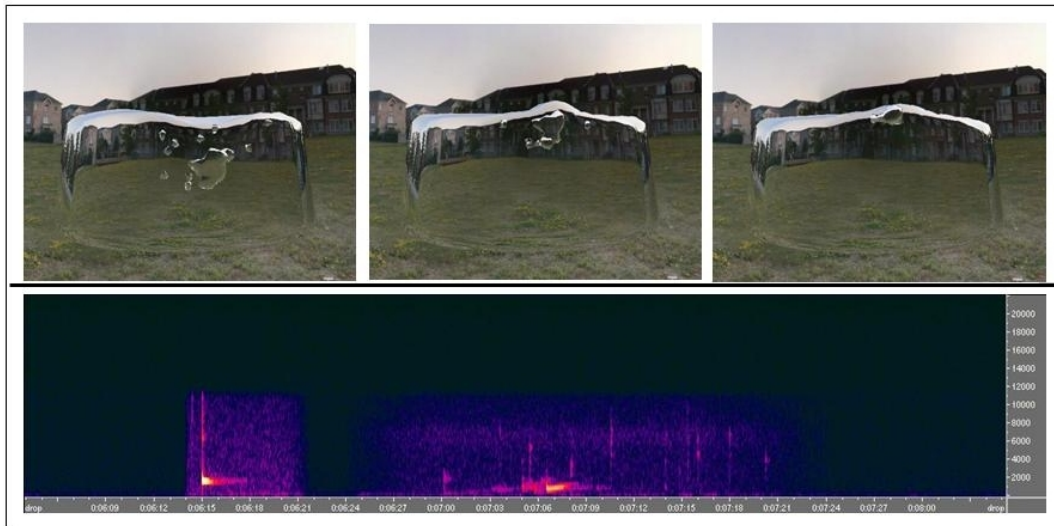


図 5.6 シーン1の効果音の生成結果

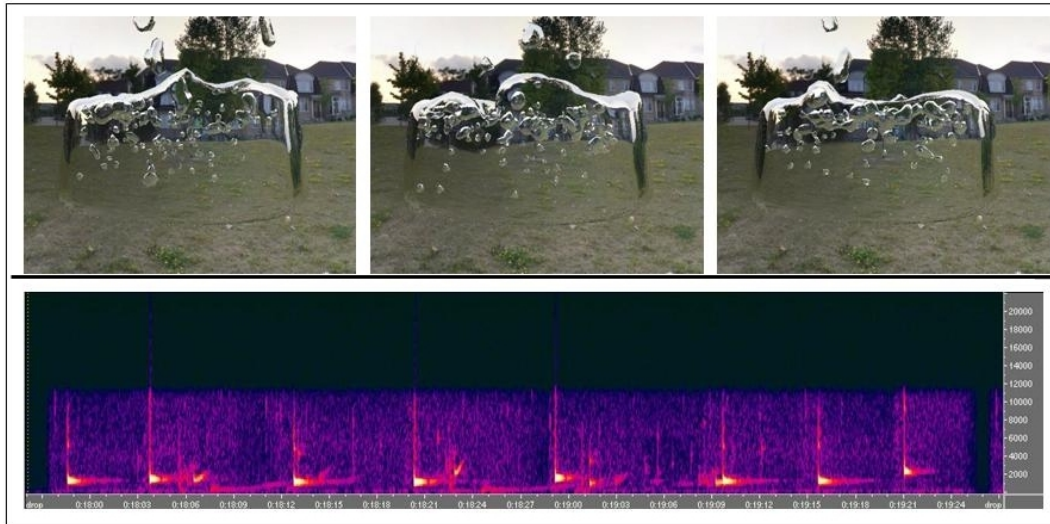


図 5.7 シーン 2 の効果音の生成結果

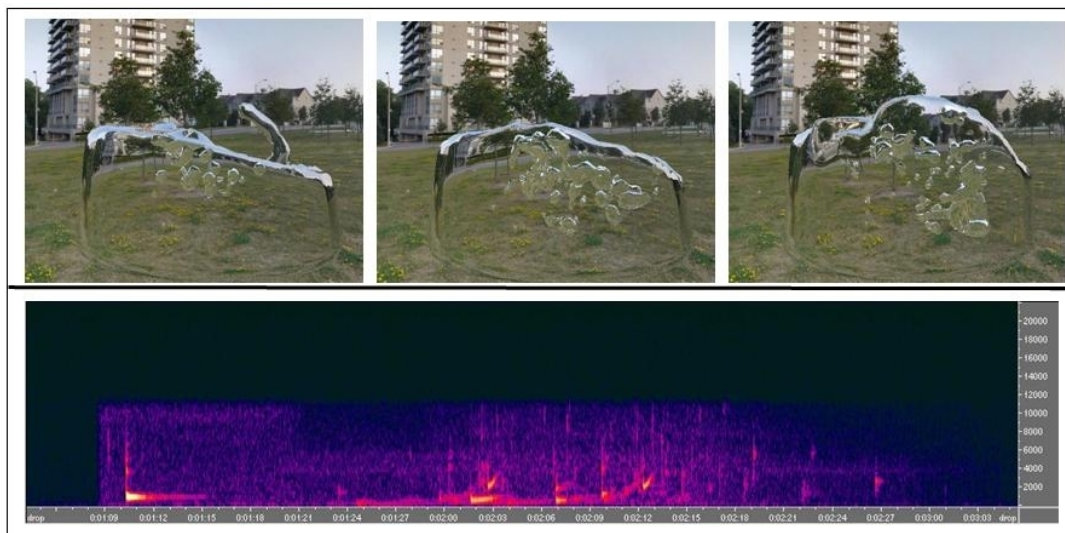


図 5.8 シーン 3 の効果音の生成結果

5.4. 考察

5.4.1 気泡運動を反映した液体表現の再現性

図 5.2 のシーン 1 の場合において、液中に貫入した気泡は、浮力によって液面に向かい、液面に達した時点で消滅している。図 5.3 のシーン 2 の場合において、液滴の落下数に比例した数の気泡が発生している。図 5.4 のシーン 3 の場合においては、容器の操作に伴い発生した波によって、液中に気泡が取りこまれているのが分かる。さらに、表面張力によって液中の気泡同士が合体している様子を見ることができる (図 5.9)。

また、実装されたシェーダによって、液面と気泡表面において、屈折によって背景が歪んで見え、反射によって周りの環境が写りこんでいる。さらに、見る角度によって発生する液面の全反射面と液中の気泡と液面との光学的整合性が保たれている (図 5.10)。

このように、液体粒子と気体粒子の相互作用計算により、気泡を含む液体の振る舞いが表現可能になり、気泡を含む液体の光学現象を再現するシェーダを実装することによって、高い写実性をもった液体のアニメーションを表現可能としている。

5.4.2 液体の音の再現性

図 5.6 のシーン 1 の場合のサウンドスペクトログラムを見ると、気泡の生成音が発生してから、気泡の破裂音が出力されている (図 5.11)。音判定モジュールの気泡生成モデルと気泡破裂モデルの判定が正しく行なわれていることが分かる。

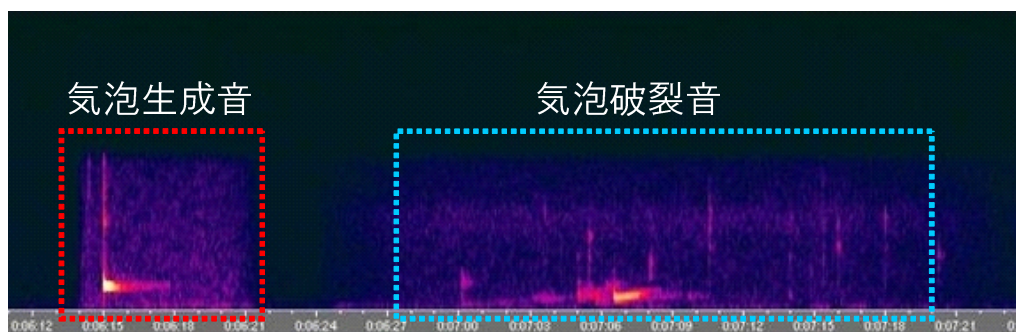


図 5.11 気泡生成音と破裂音の生成順

また、図 5.7 のシーン 2 の場合において、気泡が多数発生した場合であっても、音切れ無く効果音が出力されている。さらに、スペクトログラムの重なり具合から、気泡の生成音と気泡の破裂音が同時に出力されているのが分かる。これにより、波形テーブルの構成と波形セレクタの制御が上手く動作していると言える。

FFT によって、図 5.6 のシーン 1 における気泡生成音の固有振動周波数を求めると 1643.0Hz であるのに対し、図 5.8 のシーン 3 における気泡生成音の固有振動周波数は 937.8Hz であった。シーン 3 では、発生した波による気体粒子の取り込みによって、シーン 1 の場合に比べ大きなサイズの気泡が生成されており、生成された気泡のクラスタリングによって計算される気泡半径によって、周波数の変動を行なう提案手法が成功していると言える。

全てのシーンのスペクトログラムにおいて強いノイズ成分が見て取れるが、殆どは気泡の音の計測の際に混入してしまったノイズである。ノイズの少ない環境と機材で計測を行なった音源を用いれば改善できると考えられる。

5.4.3 計算時間と遅延時間

表 5.5 の平均フレームレートを見て分かる通り、どのシーンにおいても、十分インタラクティブな動作が可能なフレームレートで液体の描画ができていることが分かる。また、表 5.6 より効果音生成を行なった場合と行なわなかった場合で 1fps の違いしかないことが分かる。これは、マルチプロセスによる実装によって、使用しているマルチコア CPU の能力を有効に活用できたためであると考えられる。

CG の描画がなされてから効果音の出力が行なわれるまでの遅延時間については、最大でも 15 ミリ秒に抑えられており、CG の描画と十分同期した効果音の生成と出力が実現できていると言える。

5.4.4 提案手法の限界

提案手法では、元々単一流体を対象とした手法である SPH 法を拡張することで、気液二相流の相互作用表現を可能としているが、質量に代表とされるように気体粒子の属性値と液体粒子の属性値には 1000 倍程度の差がある。そのため、液体粒子から力を受けた気体粒子の移動量は液体粒子に比べて非常に多くなる。その際、気液間の相互作用が多数発生する場合に移動量が多い気体粒子に対する近傍探索が間に合わなくなり、シミュレーションが不安定になってしまう場面が存在する。SPH の近傍探索のタイムステップを短くすることである程度の安定性を得ることができるが、タイムステップを短くすると描画速度が落ちてしまうことになる。

提案手法では、単一の気泡が発する音に関する知見に基づいて構成されている。そのため、提案手法はコップの中の水のように少量の気泡しか発生しない場合の音生成を行なうことができるが、例えば川や海のように、大量の気泡を発生させる大規模な液体に対しては、正確な音生成を行なうことができない。そのため、複数の気泡が同時に多数生成される場合には、気泡の数と生成される音との関係性をを用いた、より統計的なアプローチが必要となる。また、粒子法では、大規模な液体表現をリアルタイムで扱うことが困難であるため、その音の生成を行なう

ことも困難である．効果音を伴う大規模な液体表現をリアルタイムで実現するには，大規模な液体表現を得意とする格子法と粒子法のハイブリッド化手法が必要であると考えられる．

5.4.5 将来への展望

近年，半導体製造技術の進展に応じて，マルチコア方式の CPU，浮動小数点ピクセルシェーダ対応の GPU，Cell[48]，Physics Processing Unit(PPU)[49] など，多数の浮動小数点演算ユニットを持ったハードウェアが出てきており普及の兆しを見せている．

提案手法は，物理シミュレーション，描画，効果音生成などの処理が並列化可能なアルゴリズムによって構築されているため，それぞれの処理に適したハードウェアの演算ユニットで並列計算させることによって，さらに高速な処理を行なうことが可能であると考えられる．

第6章 結論

本論文では，粒子法的一种である SPH を用いて液体を構成する粒子と気体を構成する粒子との相互作用をシミュレートすることにより，気泡運動を反映した液体の CG をリアルタイムにレンダリングする手法について提案し，実装を行った．

提案手法では一般的な SPH を拡張することで，異なる種類の粒子が各々に固有の属性値を持つものとして定義し，異なる種類の粒子間での相互作用の計算を行うことで，複数の異なる種類の流体を扱うことを可能とした．そして，異なる種類の粒子の属性値として液体と気体の属性値を持たせることで，気体と液体の相互作用表現を可能とした．また，液面と液中に含まれる気泡表面における光学現象をシェーダを用いて実装することで，実時間計算での気泡運動を反映した液体の写実的な表現を可能とした．

そして，液体の CG に対する効果音を，気液粒子間の相互作用を計算する際に求めた物理パラメータに基づき生成し，CG の描画と同期させて発生させる手法について提案し，実装を行った．

提案手法では，SPH の近傍探索用格子を用いて，気体粒子が含まれる格子をグルーピングすることで空間的に生成されている気泡数を判別し，その気泡サイズを計算することによって気泡の固有振動周波数を求め，液体の CG に対する効果音の自動生成を可能にした．

提案手法は，ゲームなどのリアルタイムでかつインタラクティブな VR アプリケーションへ応用することで，比較的容易な実装で液体のリアリティある映像とそれに伴う効果音を提供することができると考えられる．

今後の課題としては、より大規模な液体の表現、例えば海や川などの表現における音の生成が挙げられる。提案手法では、単一の気泡が発する音に関する知見に基づいて構成されているため、多数の気泡が発する場合に対応が困難である。また、現状では、ハードウェア的な問題から粒子法が大規模な液体表現をリアルタイムで扱うことが困難であるため、その音の生成も行なうことが困難である。

今後、液体の効果音生成に対するより統計的な手法の確立、大規模な液体表現を得意とする格子法と粒子法のハイブリッド化手法などによる実現が期待される。

謝辞

本研究の機会およびその環境を与えてくださり，多岐にわたり貴重な御指導・御鞭撻を賜り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いたします．副指導教官として数多くの御助言を頂きました視覚情報メディア講座横矢直和教授に深く感謝いたします．研究内容および本論文の執筆にあたり手厚く御指導を頂きました情報科学研究科眞鍋佳嗣助教授に深く感謝いたします．

ミーティングにおいて多くの有用な情報と丁寧な御指導を頂きました像情報処理学講座安室喜弘助手に厚く御礼申し上げます．研究全般にわたり様々な面で御指導を頂き，本論文の執筆にあたっては内容の推敲と多くの検討を加えて頂きました像情報処理学講座井村誠孝助手に厚く御礼申し上げます．報告会や発表練習の場において，数多くの有益な御助言を頂きました像情報処理学講座坂田宗之特任助手に深く感謝いたします．

日頃より研究室内に気を配り，暖かい御支援を頂きました像情報処理学講座秘書山田真絵さんに深く感謝いたします．研究室内で共に過ごすことができた像情報処理学講座博士後期課程，博士前期課程の皆様に対し，日常生活を含めた多くの場面で暖かい御厚情を賜りましたことを心より感謝申し上げます．

参考文献

- [1] J. F. O'Brien, P. R. Cook and G.Essl. Synthesizing Sounds from Physically Based Motion. *In Proceedings of SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 529-536, 2001.
- [2] K. V. D. Doel, P. G. Kry and D. K. Pai. Foley Automatic: Physically-based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation. *In Proceedings of SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 537-544, 2001.
- [3] Y. Dobashi, T. Yamamoto and T. Nishita. Real-time Rendering of Aerodynamic Sound Using Sound Textures Based on Computational Fluid Dynamics. *In Computer Graphics of SIGGRAPH 2003, Conference Proceedings, Annual Conference Series*, pp.732-740, 2003.
- [4] Y. Dobashi, T. Yamamoto and T. Nishita. Synthesizing Sound From Turbulent Field Using Sound Textures for Interactive Fluid Simulation. *Eurographics 2004*, Volume 23, Number 3, pp.539-546, 2004.
- [5] T. G. Leighton. The Acoustic Bubble. *Academic Press*, London, 1994.
- [6] J. J. Monaghan. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol.30, pp. 543-574, 1992.
- [7] A. Prosperetti and H. N. Oguz. The Impact of Drops on Liquid Surfaces and The Underwater Noise of Rain. *Annual Reviews, Fluid Mechanics* , Vol.25, pp.577-602, 1993.

- [8] M. Minnarert. On Musical Air-Bubbles and Sounds of Running Water. *Philos. Mag.*, Vol 16, pp.235-248, 1933.
- [9] H. C. Pumphrey, and P. A. Elmore. The Entrainment of Bubbles by Drop Impacts. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.220, pp.539-567, 1990.
- [10] M. S. Plesset and A. Prosperetti. Bubble Dynamics and Cavitation. *Annual Reviews, Fluid Mechanics*, Vol.9, pp.145-185, 1977.
- [11] 越塚誠一. 数值計算流体力学. 培風館, 1997.
- [12] C. W. Hirt and B. D. Nichols. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- [13] M. Sussman, P. Smereca, and S. Osher. A Level Set Approach for Computing Solutions for Incompressible Two-Phase Flow. *J. of Comput. Physics*, Vol.144, pp.146-159, 1994.
- [14] T. Yabe and T. Aoki. A Universal Solver for Hyperbolic Equation by Bubic-Polynomial Intrpolation. *Comput. Phys. Commun*, Vol.66, pp.219-242, 1991.
- [15] S. Koshizuka and Y. Oka. Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. *Nucl. Sci. Eng.*, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- [16] 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.
- [17] L. Liu, S. Koshizuka and Y. Oka. Computation of Multiphase Flow by coupling the MPS Method with Mesh Method. *Proceedings of Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*, J53, pp.27-29, 2003.
- [18] J. M. Hong and C. H. Kim. Animation of Bubbles in Liquid. *Eurographics 2003*, Volume22, Issue 3, pp.253-262, 2003.

- [19] 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.
- [20] S. T. Greenwood and D. H. House. Better with Bubbles: Enhancing the Visual Realism of Simulated Fluid. *In Proceedings of the 2004 Symposium of Computer Animation, ACM SIGGRAPH/Eurographics 2004*, ACM Press, pp.287-296, 2004.
- [21] F. Losasso, T. Shinar, A. Selle and R. Fedkiw. Multiple Interacting Liquids. *In Proceedings of SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.812-819, 2006.
- [22] M. Sussman. A Second Order Coupled Level Set and Volume-of-Fluid Method for Computing Growth and Collapse of Vapor Bubbles. *Journal of Computational Physics*, Vol.187, pp.110-136, 2003.
- [23] V. Mihalef, B. Unlusu, D. Metaxas, M. Sussman and M. Y. Hussaini. Physics-Based Boiling Simulation. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2006.
- [24] S. Premoze, T. tasdizen, J. Bigler, A. Lefohon and R. T. whitaker. Particle-Based Simulation of Fluids. *Eurographics 2003*, Volume22, Issue 3, PP.401-410, 2003.
- [25] M. Muller, B. Solenthaler, R. Keiser and M. Gross. Particle-Based Fluid-Fluid Interaction. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, EG Symposium on Computer Animation*, ACM Press, pp.237-244, 2005.
- [26] T. Takala and J. Hahn. Sound Rendering. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 92, Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.211-220, 1992.
- [27] T. Funkhouser, I. Carlbom, G. Elko, G. Pingali, M. Sondhi and J. West. A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Envi-

- ronments. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 98, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.21-32, 1992.
- [28] T. Funkhouser, P. Min and I. Carlbom. Real-time Acoustic Modeling for Distributed Virtual Environments. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.365-374, 1999.
- [29] N. Tsingos, T. Funkhouser, A. Ngan and I. Carlbom. Modeling Acoustics in Virtual Environments Using the Uniform Theory of Diffraction. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.545-552, 2001.
- [30] J. F. O'Brien, C. S. Christine and M. Gatchalian. Synthesizing Sounds from Rigid-Body Simulations. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002 Symposium on Computer Animation*, pp.175-182, 2002.
- [31] S. Dubnov, Z. B. Joseph, R. E. Yaniv, D. Lischinski and M. Werman. Synthesizing Sound Textures through Wavelet Tree Learning. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.22(4), pp.38-48, 2002.
- [32] D. Pai, K. Doel, D. James, J. Lang, J. Lloyd, J. Richmond and S. Yau. Scanning Physical Interaction Behavior of 3D Objects. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp.87-96, 2001.
- [33] M. Muller, D. Charypar, and M. Gross. Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications. *In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation*, Eurographics Association, pp.154-159, 2003.
- [34] 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.

- [35] 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.
- [36] J. P. Morris. Simulating surface tension with smoothed particle hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.33, pp.333-353, 2000.
- [37] OpenAL. <http://www.openal.org/>
- [38] 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.
- [39] E. Persson, aka Humus. <http://www.humus.ca>
- [40] 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.
- [41] N. Greene. Environment Mapping and Other Applications of World Projections. *IEEE Comput, Graph*, Vol.6, No.11, pp.21-29, 1986.
- [42] C. Schlick. A Customizable Reflectance Model for Everyday Rendering. *In Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, No.Series EG 93 RW, pp.73-84, 1993.
- [43] 仲野嘉信, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 物理シミュレーションを用いたリアルタイム CG に対する効果音の自動生成. 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, Vol.50, pp.645-646, 2006.
- [44] 仲野嘉信, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 流体のリアルタイム CG に対する効果音の自動生成. 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp.468-471, 2006.

- [45] Cg (C for graphics). <http://developer.nvidia.com/page/home.html>
- [46] Syntrillium Software Corp. Cool Edit 2000. <http://www.syntrillium.com>
- [47] Sony. Sonic Stage Mastering Studio. <http://www.vaio.sony.co.jp/Products>
- [48] SCE. Cell Broadband Engine. <http://cell.scei.co.jp>
- [49] AGEIA. PhysX. <http://www.ageia.com>