

Controllable Bubbles

古屋 匠[†] 菊池 司[‡]

[†]東京工科大学メディア学部

[‡]東京工科大学

1. はじめに

水のCGアニメーションにおいて写実性を高めるためには、水中の泡や、波による水しぶきなどを表現することは重要な要素である。CGにおける視覚効果としての泡の研究、モデル化はこれまでも行われてきた。炭酸水をグラスに注いだ時に発生する気泡現象のビジュアルシミュレーション法を提案したClearyら[1]は、計算速度の問題で課題を抱えており、Doyubら[2]の研究も気泡の大規模なシミュレーションの効率的なフレームワークを提案したが、写実的な表現での課題が残されている。本研究では、物体が水中に落下した衝撃で発生する気泡を制御可能とするビジュアルシミュレーション法を提案する。

2. 提案手法の概要

沸騰現象や炭酸水中など、水中で気泡を生成し水面へ離脱する気泡現象のビジュアルシミュレーション法の研究は数多く行われてきたが、水中に物体が落下した衝撃で気泡が発生し、衝突や拡張を繰り返して水面へ離脱していく気泡現象に焦点を当てた研究は見当たらない。そこで本研究では、激しい挙動を示す水中の気泡現象と、気泡を制御可能とするビジュアルシミュレーション法を提案する。提案法では、水中に物体が落下した際に生じる物体後流によって水面付近から取り込まれる気体をモデル化する。さらに、物体にあらかじめ付着していた気体が落下の際に生じた衝撃と水中での抗力、および浮力により分離することで気泡の生成が行われる様子をモデル化する。気泡の生成点は物体の材質等で変わることが考えられる。これにより、発生する気泡の量や挙動の違いなどを表現できるようになり、それぞれに応じて制御することでエンターテインメント分野で利用しやすい手法となっていることを示す。

3. 気泡のシミュレーション法

本研究における気泡のシミュレーション手法は、物体が水面に落下した際に物体後流によって取り込まれる水面付近の気体と、物体にあらかじめ付着していた気体をパーティクルによってモデル化する。

パーティクルの運動は、流体方程式であるNavier-stoke方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

をSPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いて計算する。ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 ρ は流体の密度を表す定数、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 \mathbf{f} は外力 (落下物体の引力) を表す。

また、気泡現象を制御可能とするために以下の手順によってシミュレーションを行う。

1. 水中と気泡の各パーティクルの初期配置
2. 物体落下と水中への気泡パーティクルの流入
3. 気泡パーティクルの上昇計算と衝突、膨張 (成長) 計算
4. Shape Matching 法[3]による気泡の運動制御

ここで、気泡同士の衝突、膨張では西川らの研究[4]から気泡粒子の衝突判定を行うシミュレーション手法を拡張する。

3.1 気泡発生メカニズム

本研究で提案する水中に物体が落下した衝撃で発生する気泡のビジュアルシミュレーション法は、以下の通りである。

水面に当たる場所に、液体と水中に取り込まれる気体となるパーティクルの2種類を初期状態として配置する。また、落下する物体の側面にも水中で分離し気泡となるパーティクルを配置する。この状態で物体を落下させ、水中にぶつかった衝撃で発生する気泡現象を再現する。

まず落下する物体をポリゴンで作成し、上述のパーティクルもそれぞれ配置した状態にする (図1)。

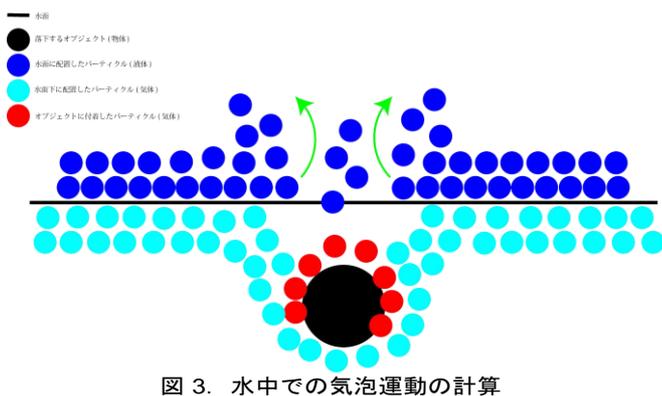
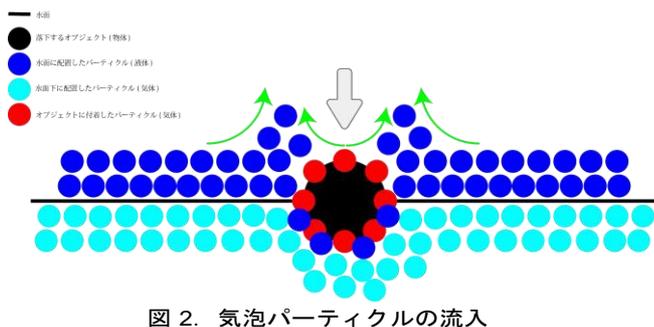
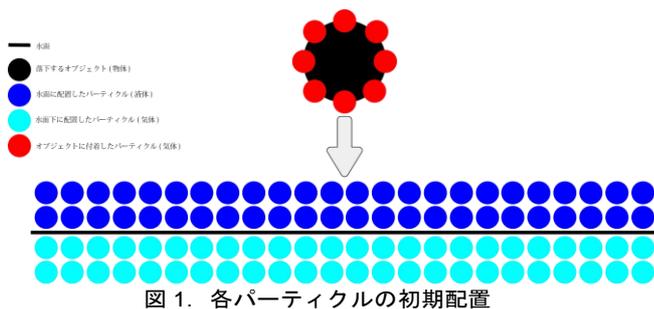
Controllable Bubbles

Takumi Furuya[†], Tsukasa Kikuchi[‡]

[†]School of Media Science, Tokyo University of Technology

[‡]Tokyo University of Technology

液体とするパーティクルは物体が落下し、水面にぶつかった衝撃で飛び散り（ミルククラウン）, その際物体の後流によって水中にできた空間に引き込まれる気体となるパーティクルが、空間を充填しながら落下物体の引力 f によって水中に取り込まれる（図2）。さらに、物体に付着させたパーティクルが水面下で水の抵抗を受け、水中の抗力と浮力によって分離することで、水中に物体が落下した衝撃で発生した気泡現象をシミュレーションする（図3）。



3.2 気泡の運動制御

発生した気泡の運動を制御可能とするため、Shape Matching 法を流体制御に応用した手法[3]を利用する。Yoshino らの手法[3]では、コントロールパーティクルによる追加の外力を加えることで、流体運動をターゲットとなる形にマッチングしている。本論文で提案する手法もターゲットとなる形をあらかじめ定義し、コントロールパーティクルを配置して引力を追加することで運動制御を可能とした。

4. シミュレーション結果

本論文で提案したビジュアルシミュレーション法によるシミュレーションの結果を図4に示す。



図 4. シミュレーション結果

図4より、本論文で提案したビジュアルシミュレーション法の有用性が確認できる。

なお、レンダリングには V-Ray を使用した。

5. まとめと今後の課題

本論文では、物体が水中に落下した衝撃で発生する気泡現象のビジュアルシミュレーション法を提案した。本手法により水中で激しく衝突し合い膨張し、複雑な挙動を取る気泡現象も再現することが可能となった。

今後の課題としては、水質の違いや落下する物体の材質違い、水流で発生する気泡の挙動や大きさ等の条件が変わる表現をすること、および落下する物体が動的なものの場合のシミュレーション手法の開発などが挙げられる。

参考文献

- [1]Paul W. Cleary,Soon Hyoung Pyo,Mahesh Prakash:”Bubbling and Frothing Liquids” ACM Transactions on Graphics, Vol.26, No.3, Article 97, Publication date: July 2007. [2]Doyub Kim,Oh-young Song,Hyeong-Seok Ko:”A Practical Simulation of Dispersed Bubble Flow”, ACM Transactions on Graphics(TDG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010, Volume 29 Issue 4, July 2010, Article No.70, (2010).
- [3]Jun Yoshino, Reiji Tsuruno : “Interactive fluid control by shape matching”, 芸術科学会論文誌 Vol.13, No.3, pp.169-176 (2014) .
- [4]西川武志,金森由博,Yonghao Yue,西田友 是:“炭酸水から生じる気泡のビジュアルシミュレーション”, 情報処理学会研究報告グラフィクスと CAD(CG) 2009-CG-137(13),pp.1-6,(2009).