

## 物体表面に付着する泡を考慮した

### 炭酸水の気泡ビジュアルシミュレーション

西川 武志<sup>†</sup> Yonghao Yue<sup>†</sup> 金森 由博<sup>‡</sup> 西田 友是<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東京大学 <sup>‡</sup>筑波大学

#### 1 はじめに

水の CG アニメーションにおいて、水中や水面に浮かぶ気泡など、泡は写実性を高めるために重要な要素である。これまで計算コストの面から多くの場合無視されてきたが、近年になって気泡のシミュレーションが行われるようになってきた [1,2]。ビールや清涼飲料などでよく見られる炭酸水中の気泡については、Cleary ら [2] がシミュレーション手法を提案したが、計算コストや写実性の面で課題が残っている。そこで本研究では計算コストを抑えながら、炭酸水における気泡の写実的なアニメーション生成を行う。

#### 2 本研究の概要

炭酸水中の気泡が物体表面上で発生して離脱するまでの挙動について、実際の物理的原理は我々の知る限り明らかになっていない。本稿では、このような気泡の発生時の挙動を、気泡の物体表面への付着力を導入することでモデル化する。提案モデルでは、気泡は微小な空気孔(以下、生成点)で生成された後、付着力と浮力が釣り合うまで生成点に留まって成長を続ける。物体に応じて付着力や生成点の個数などを変更することで、生じる気泡の発生量や大きさなどの違いを表現できる。さらに、プラスチックの表面など、物体表面が滑らかな場合に気泡が物体表面上を滑りながら上昇する、といった現象も扱うことができる。提案法は気泡を粒子、水を格子法で表現し双方の力の相互作用を計算することで、大量の泡が上昇することで生じる水の流れや、またその流れに流される泡の動きを表現できる。これらの現象を、計算コストを抑えて再現した。

#### 3 提案法

本節では炭酸水中の気泡の挙動のシミュレーション手順について述べる。以下、気泡の物体

表面への生成から離脱までの挙動、水流と気泡の相互作用および泡同士の衝突・融合について述べ、最後に泡の運動方程式を示す。

#### 3.1 気泡の物体表面への生成から離脱までの挙動

気泡の生成点は物体表面上にランダムに配置される。生成点で発生した気泡は、物体表面によって付着している時間や成長する大きさが異なる。この現象を表現するため本稿では、気泡の物体表面への付着力を導入する。気泡に加わる外力についての考察からモデル化を行う(図 1)。

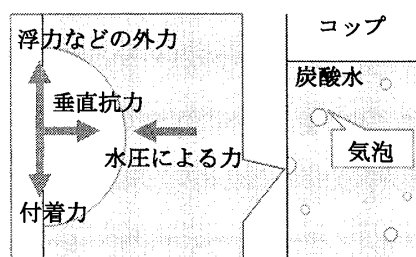


図 1. 付着力と気泡に加わる外力の関係

気泡が物体表面に付着し続けるには、気泡に静止摩擦力に類する力が働いているものと考えられる。そこで静止摩擦力との類推から、提案法では付着力を、外力に対する垂直抗力の大きさに線形比例した力として表現する。特に、静止状態のときに働く付着力を、本稿では静止付着力と呼ぶことにする。気泡が生成点に付着し続けるか生成点から離れるかどうかの判定は、シミュレーションの各タイムステップにおいて静止付着力と他の外力の大きさを比較することで実現する。

さらに生成点を離れた気泡について、物体表面の材質によっては物体表面上を泡が滑るように動く、という現象がみられる。しかもその動き方は材質によって異なる。この違いを再現するために提案モデルでは、物体表面から気泡が受ける垂直抗力の大きさに線形比例した、動摩擦力に類する付着力を導入する。静止付着力との兼ね合いから、動いている気泡に働く付着力を本稿では動付着力と呼ぶことにする。

#### 3.2 水の流れと気泡の相互作用

気泡と炭酸水の流れの相互作用についての説

Visual simulation of Bubbles in Carbonated Water

Takeshi Nishikawa<sup>†</sup>, Yonghao Yue<sup>†</sup>, Yoshihiro Kanamori<sup>‡</sup> and Tomoyuki Nishita<sup>†</sup>

<sup>†</sup>The University of Tokyo <sup>‡</sup>University of Tsukuba

明の前に、炭酸水の流れのシミュレーションについて簡単に説明する。流体の運動を記述した Navier-Stokes 方程式

$$\mathbf{u}_i + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla \frac{p}{\rho} = \mathbf{f} \quad (1)$$

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

に基づいて水の流れを表現する。ここで、 $\mathbf{u}$  は速度ベクトル、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\nu$  は動粘性係数、 $\mathbf{f}$  は外力ベクトルを表している。具体的な計算には、格子法のひとつである Stable Fluids[3]を用いる。

次に、気泡と炭酸水の流れの相互作用について述べる。格子を用いて計算された水流と気泡との間の力の相互作用のために、提案法では Hong らの手法[1]を用いる。まず、格子から粒子に与える力として、格子の持つ速度に沿わせる力  $\mathbf{F}_d$  と格子の渦に沿わせる力  $\mathbf{F}_l$  を粒子に加える。

$$\mathbf{F}_d = -k_{drag} r_i^2 |\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i| (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i) \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_l = -k_{lift} V_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i) \times \boldsymbol{\omega}_i \quad (4)$$

ここで  $r_i$  は気泡粒子  $i$  の半径である。 $\mathbf{u}_i$  は気泡粒子  $i$  の位置における水流の速度ベクトルであり、その点を囲む格子点での速度から線形補間によって求める。さらに  $k_{drag}$  は  $\mathbf{F}_d$  の係数であり、 $k_{lift}$  は  $\mathbf{F}_l$  の係数である。 $\mathbf{v}_i$  は粒子の速度、 $V_i$  は体積、 $\boldsymbol{\omega}_i$  は渦度を表す。逆に気泡粒子の運動によって生じる力を水流に与える場合は、格子点近傍に存在する粒子の力の総和を求め、それを外力として式(1)に代入する。これらの計算により、大量の泡が上昇することで生じる対流や、対流に沿って流れる気泡の動きを表現できる。

### 3.3 気泡同士の衝突と融合

炭酸水中の気泡の挙動を観察すると、気泡同士が衝突、または融合する場合がある。そこで提案法では気泡粒子の衝突判定を行い、衝突した気泡粒子同士を一定の確率によって融合または反発させる。

## 4 結果

提案法により作成したシミュレーションの結果を示す。プログラムを C++ で実装し、2.13GHz Intel Core(TM)2, 2GB RAM の PC で実験を行った。

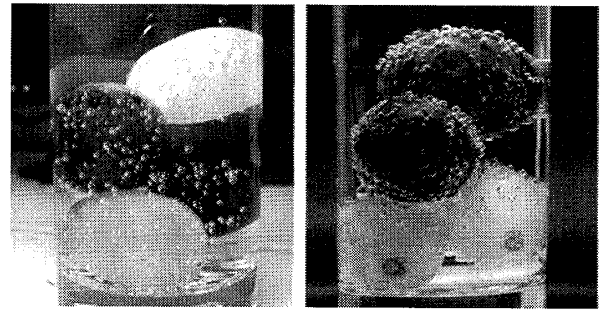


図 2. 二次元の結果

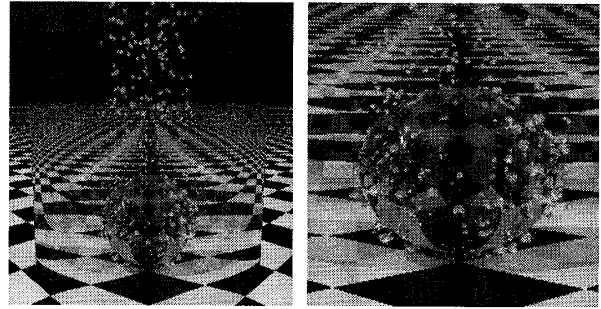


図 3. 三次元の結果

図 2 は 2 次元シミュレーションに背景画像を合成した結果 (左) と、実写画像 (右) との比較である。図 3 は炭酸水に球体を入れたときの三次元シミュレーション結果である。球体表面から気泡が生成されている様子が確認できる。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、炭酸水中の気泡の簡易なシミュレーション手法を提案した。気泡が物体表面から離脱するまでに成長するメカニズムを、気泡の物体表面への付着力を導入することで表現し、気泡の大きさや速さが異なる様子を表現できた。

今後の課題として、提案モデルの物理的妥当性を検証が挙げられる。また、実際の気泡の動きには、気泡の上昇によって生じた乱流の影響とみられる細かな動きが観察されるが、現在のシミュレーション手法では数値拡散が大きいためそのような乱流の表現が難しく、これを改善したい。

### 参考文献

- [1] Hong, J.-M., Lee, H.-Y., Yoon, J.-C. and Kim, C.-H.: Bubbles Alive. SIGGRAPH2008, Article No. 48, 2008.
- [2] Cleary, P.W., Pyo, S.H., Prakash, M. and Koo, B.K.: Bubbling and Frothing Liquids, Proceedings of the 2007 SIGGRAPH conference, Article No. 97, 2007.
- [3] J. Stam.: Stable Fluids, Proc. of SIGGRAPH99, 121-128, 1999.