

# 三次元境界要素法を用いた弾性壁近傍での気泡崩壊に関する数値シミュレーション

## Numerical Simulation of Bubble Collapse near a Compliant Wall with the Three-dimensional Boundary Element Method

○神保 佳典, 大阪府大院, 大阪府堺市中区学園町 1-1, jinbo06@fluid.me.osakafu-u.ac.jp:

高比良 裕之, 大阪府大, 大阪府堺市中区学園町 1-1, takahira@me.osakafu-u.ac.jp

Yoshinori JINBO, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531

Hiroyuki TAKAHIRA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531

The three-dimensional boundary element method was improved to simulate the collapse and rebound of a bubble near a compliant wall. The compliant wall was modeled with mass-spring systems. The present method was applied to the growth and collapse of multiple bubbles near a compliant boundary. A typical single bubble behavior near the boundary such as neutral bubble collapse was simulated successfully with the present method. The results show that the bubble behavior was much dependent on both the bubble-bubble and bubble-wall interactions. Wavy surface was formed on the compliant boundary due to the collapse of interacting two bubbles.

### 1. 緒言

医学分野において、超音波造影剤や Drug Delivery System における薬剤のキャリアとして、生体内でのマイクロバブルの利用が注目されている。マイクロバブルの崩壊を利用して、薬剤を細胞内に注入する際には、生体と気泡との相互干渉が問題となる。本研究では、マイクロバブルが生体に及ぼす影響を明らかにする目的で、生体を模擬した弾性境界近傍での気泡の成長・崩壊を扱う。弾性壁近傍での単一気泡の挙動は、これまでもいくつかの解析がなされてきているが、多数の気泡が複雑に干渉しあいながら成長・崩壊を繰り返している壁面近傍での気泡群の挙動を予測するためには、気泡間の相互干渉を考慮した上で、気泡と弾性壁との干渉を扱う必要がある。そこで、本研究では、三次元境界要素法を用いて、複数の気泡とバネ-質量系で模擬された弾性壁との相互干渉を扱い、気泡ならびに弾性壁の変形挙動を解析する。

### 2. 数値解析手法

気泡周囲の液体は非圧縮非粘性の渦なし流れを仮定する。そのため、周囲液体には速度ポテンシャル  $\phi$  が存在し、Laplace 方程式を満たす。また、気泡内部気体は非凝縮性の理想気体とし、ポリトロープ変化するものとする。本解析では、Laplace 方程式を境界積分方程式に変換し、三次元境界要素法を用いて解く。弾性壁は、バネ-質量系(単位面積あたりの質量  $m$ , 単位面積あたりのバネ定数  $k$ ) でモデル化し、壁は気泡の運動により誘起される圧力により変位する。

### 3. 解析例

本報では、壁面近傍に置かれた高圧の気泡が成長・崩壊する問題を解析した。図 1 は生体を模擬した弾性壁近傍に配置された 2 個の気泡の成長・崩壊の様子の一例である。初期状態において気泡内気体の圧力が無限遠方液体圧力よりも高く設定されているため、気泡は成長し、最大体積に達した後、収縮する。また、図 1 では、弾性壁の質量が軽く設定されているため、単一気泡がこの壁面近傍で成長・崩壊する際には、気泡は壁面から遠ざかる方向に並進運動をしながら、壁面と反対方向に気泡から液体ジェットが発生する。

図 1 からわかるように、弾性壁とそれぞれの気泡中心との距離が異なるため、2 個の気泡の運動には位相差が生じ、弾性壁から遠い気泡が先に最大体積に達し、その後わずかに遅れて弾性壁に近い気泡が最大体積に達する。その際、気泡半径が大きく

なるにつれて、弾性壁にくぼみが生じる。気泡が収縮に転じると、気泡間の相互作用により、他方の気泡に対向する側の気泡壁が平らになり、その後、2 個の気泡とも斜め方向にジェットが発生している。

図 1 における弾性壁の無次元変位  $\eta^* = \eta/R_c$  ( $R_c$  は基準半径) の時間変化を図 2 に示す。図 2 からわかるように、気泡膨張時の弾性壁の最大変位の位置は  $x^* = 0.832$  にあり、右側の気泡の影響が大きいことが見てとれる。気泡が収縮に転じると弾性壁のくぼみは回復していくが、弾性壁上の  $x^* = 2$  付近の位置が、気泡により誘起される吸い込み流れにより上方に引っ張られ、その結果、ジェットが発生する時点では、弾性壁上には波面(凹凸)が形成されている。

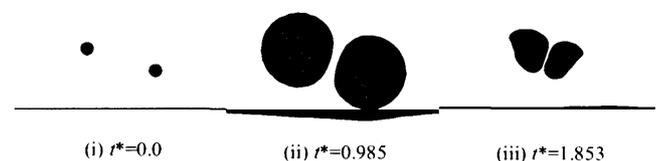


Fig. 1 Growth and collapse of two bubbles near a compliant boundary

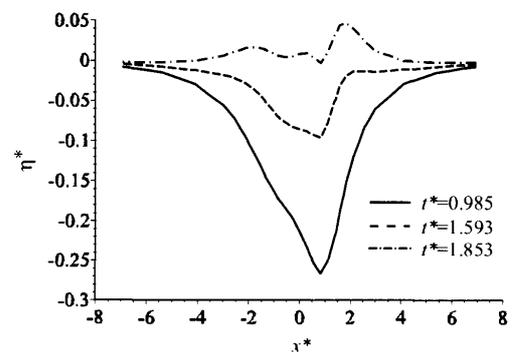


Fig. 2 Displacement of a compliant boundary

### 4. 結言

三次元境界要素法を用いて、バネ-質量系で模擬された生体壁(弾性壁)と複数気泡との相互干渉問題を解析した。その結果、気泡の挙動は気泡間相互作用に強く依存すること、また、2 個の気泡に位相差が生じる気泡配置の場合には、気泡の膨張・収縮による波面が弾性壁上に形成されることが示された。