

フェムト秒レーザーを応用した鉄砲エビが生成する キャビテーションバブルの生成消滅過程の解明

福岡 寛, 山本 将也^{*1}

Investigation of Generation and Collapse Processes of Cavitation Bubble Induced by Snapping Shrimp in Comparison with Comparable Processes by Femtosecond Laser Irradiation

Hiroshi FUKUOKA, Masaya YAMAMOTO

This paper studies a simulation method for reproducing cavitation. In addition, we examined the influence that provided to cavitation by initial radius of cavitation bubble and initial pressure. The fundamental equations are the compressible Navier-Stokes equations. The interaction of the liquid and gas is handled with the Volume of Fluid method. Initial conditions were set up maximum radius and pressure based. The result was on the order of agreement with the recent results drawn from studies of Rayleigh-Plesset equation. Increasing initial radius increased radius of bubble at expanded time. And increasing initial pressure, radius of bubble shows very little changed.

1. 緒言

気泡の急激な成長・崩壊に伴う液体破壊の現象はキャビテーションとよばれる⁽¹⁾。キャビテーションはある液体が蒸気圧より圧力低下し、蒸発することで気泡となり発生する。キャビテーションは様々な分野で利用されている。例えば工業ではウォータージェットを噴射する過程で発生するキャビテーションを使い金属を加工する金属加工に利用されている⁽²⁾。医療ではタンパク質の入っている溶液にフェムト秒レーザーを集光し発生するキャビテーションにより形成されるタンパク質の結晶化⁽³⁾や水中に設置した爆薬を起爆することで発生するキャビテーションおよび衝撃波を利用した胆石破壊⁽⁴⁾に利用されている。

しかし代表的なキャビテーション生成手法であるレーザーおよび爆薬を用いた方法には課題がある。レーザーは取り扱い方を誤るとレーザー光が目当たり、失明する可能性のある点である。爆薬は取り扱いを誤ると起爆し爆発することで人に被害を与える可能性のある点である。

そこで新たなキャビテーション生成方法として本研究では鉄砲エビのハサミに着目した。鉄砲エビはハサミを閉じた瞬間にキャビテーションを発生させる⁽⁵⁾。鉄砲エビのハサミの特徴的なところは、大きさおよび形である。片方のハサミは体長の約3分の1をしめており、さらにハサミの上部および下部にそれぞれ突起およびくぼみがある。そ

して鉄砲エビは突起をくぼみにはまり込ませることで水を噴出する。さらに水の速度上昇による圧力低下の結果、キャビテーションが発生する⁽⁶⁾。また鉄砲エビはレーザーおよび爆薬と比べて取扱の容易な生き物である。

しかし鉄砲エビのハサミから発生するキャビテーションバブルを詳細に調べることは困難である。なぜならキャビテーションバブルの再現性が低いからである。さらにハサミの形状は複雑で3次元的な動きをとらえることは難しいからである。

そこで本研究では、フェムト秒レーザーを用いて鉄砲エビによるキャビテーションの生成機構を明らかにすることを考えた。フェムト秒レーザーは、実験の再現性が極めて高く、さらにフェムト秒レーザーによるキャビテーションは、熱を発生することなく水を押しつけて生成されるため、鉄砲エビの代替として期待できるからである。そのためレーザーによるキャビテーションの基礎的な圧力場、密度場、温度場および速度場を明らかにすることは重要である。

本報告では、キャビテーションバブルの基本的な物性を明らかにするために数値計算を行った。本計算では支配方程式に二次元軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式、気泡および周りの水の相互作用に Volume of Fluid 法を用いた。そして本計算手法の妥当性を評価した後に、初期半径および初期圧力のパラメータが気泡の半径に与える影響

^{*} システム創成工学専攻 機械制御システムコース 2年

に注目し、考察を行った。

2. 計算方法

本研究では汎用流体解析ソフト ANSYS Fluent 17.2 および 19.1 を用いて数値解析を行った。支配方程式は二次元軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式である。混相流のモデルおよび粘性はそれぞれ Volume of Fluid 法および $k-\epsilon$ の乱流モデルを用いた。

図 1 は気泡および周囲の液体の計算領域および境界条件を示している。本計算では水中にフェムト秒レーザーを照射することでキャビテーションが発生し、最も膨張したキャビテーションバブルである気泡を低圧空気に置き換えることでモデル化した。青色および赤色の領域はそれぞれ水および気泡である。境界条件として図 1 の水の外側および x 方向の中心軸上はそれぞれ開放条件および軸対称条件である。

本研究における初期条件、物性値および格子は Koukouvinis ら⁽⁶⁾ を参考に設定した。水および気泡の粘度および初期圧力はそれぞれ $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ および 100000Pa および $1.7894 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ および 6801Pa である。さらに気泡の初期半径は $r_{ini} = 10\mu\text{m}$ である。ただし、気泡周りの水領域の大きさは 100 倍とした。また水および気泡に共通する条件として、表面張力および密度指数はそれぞれ 0.07N/m および 0.88 である。そして計算格子は非構造格子を採用した。格子の形状は円周に沿う O-grid 型である。さらに格子数は気泡の直径に対して 90 格子とした。

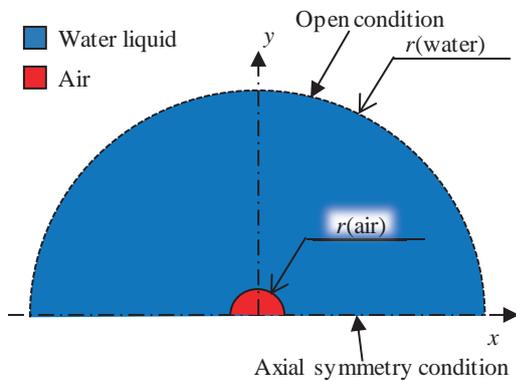


Fig.1 Flow field for computation

3. 結果および考察

3.1 数値計算の妥当性

図 2 に本計算および一般的に数値計算の確かさを評価するために用いられるレイリー・プレセット方程式⁽⁶⁾を算出した結果を示す。図 2 は時間経過するにつれて変化する気泡の挙動を示している。黒および赤のプロットはそれぞれ本計算結果およびレイリー・プレセット方程式から算出した計算結果である。図 2 より、本計算結果は $t = 1.0\mu\text{s}$ において $r = 2.2\mu\text{m}$ まで収縮し、 $t = 1.8\mu\text{s}$ において $r = 8.9\mu\text{m}$ まで膨張し、 $t = 2.9\mu\text{s}$ において $r = 2.7\mu\text{m}$ まで収縮している。一方、レイリー・プレセット方程式から算出

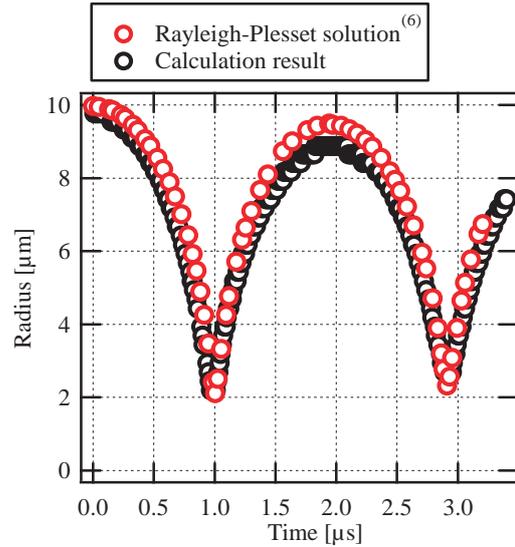


Fig.2 Bubble collapse evolution; comparison between Rayleigh-Plesset solution and calculation result

した結果は $t = 1.0\mu\text{s}$ において $r = 2.1\mu\text{m}$ まで収縮し、 $t = 1.9\mu\text{s}$ において $r = 9.5\mu\text{m}$ まで膨張し、 $t = 2.9\mu\text{s}$ において $r = 2.3\mu\text{m}$ まで収縮している。さらにレイリー・プレセット方程式から算出した結果を理論値としたときの、本計算結果の気泡の大きさの相対誤差は収縮から膨張に切りかわる瞬間および膨張から収縮に切りかわる瞬間において経過時間の短い順でそれぞれ 4.76%、6.32% および 17.4% である。このことから本計算はレイリー・プレセット方程式とおおよそ一致していることから本計算方法に大きな誤りがないと思われる。

3.2 代表的な流れ場

図 3(a)-(i) に気泡の初期圧力 6801Pa および初期半径 $10\mu\text{m}$ における気泡部分を拡大した領域の流れ場を示す。これは体積分率を示した図であり、青色および赤色はそれぞれ水および気泡である。本計算ではキャビテーションが発生してから最も膨張した気泡を低圧空気に置き換えることでモデル化しており、その瞬間を $t = 0\mu\text{s}$ とする。図 3(a) に示す $t = 0.01\mu\text{s}$ において水および気泡の存在が確認できる。ここで気泡の半径は $r = 9.8\mu\text{m}$ である。図 3(a)-(c) に示す $t = 0.01\mu\text{s} - 0.97\mu\text{s}$ において気泡が $r = 2.2\mu\text{m}$ まで半径方向に収縮している。そして図 3(c)-(e) に示す $t = 0.97\mu\text{s} - 1.83\mu\text{s}$ において気泡が $r = 8.9\mu\text{m}$ まで半径方向に膨張している。さらに図 3(e)-(g) に示す $t = 1.83\mu\text{s} - 2.89\mu\text{s}$ において気泡が $r = 2.7\mu\text{m}$ まで半径方向に収縮している。そして図 3(g)-(i) に示す $t = 2.89\mu\text{s} - 3.40\mu\text{s}$ において気泡が半径方向に膨張している。このことから、気泡が短時間で収縮膨張を繰り返しているため、気泡の挙動はキャビテーションだと考えられる。

上述より気泡はほぼ円形を保った状態で収縮膨張することがわかった。次に気泡の挙動をより詳細に調べるために図 4 に気泡の半径の時間変化を示す。気泡の初期圧力および初期半径はそれぞれ 6801Pa および $10\mu\text{m}$ である。気泡は計算開始と同時に初期半径 $10\mu\text{m}$ から収縮し $t =$

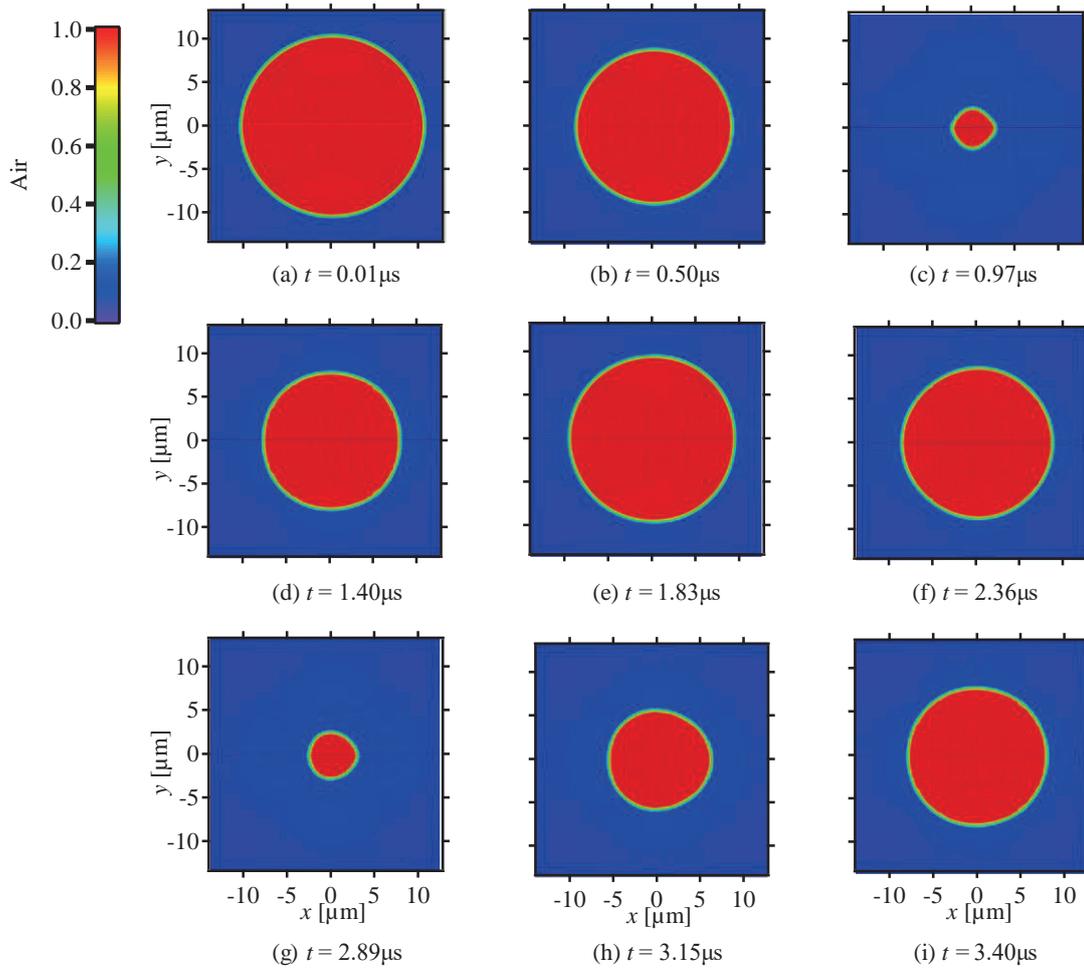


Fig.3 Air volume fraction for $P_{ini} = 6801\text{Pa}$ and $r_{ini} = 10\mu\text{m}$

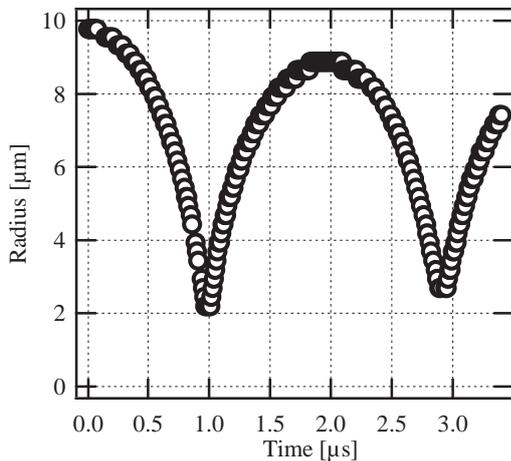


Fig.4 Relation between radius and time for $P_{ini} = 6801\text{Pa}$ and $r_{ini} = 10\mu\text{m}$

1.0 μs において最小半径 $r = 2.2\mu\text{m}$ となる。その後気泡は $t = 1.0\mu\text{s} - 1.8\mu\text{s}$ において膨張する。さらに時間が経過すると気泡は $t = 1.8\mu\text{s} - 2.9\mu\text{s}$ において再び収縮する。次に収縮から膨張に切りかわる瞬間の気泡の大きさの変化に注目すると、 $t = 1.8\mu\text{s}$ における気泡は初期半径の0.8倍である。このことは、一度収縮した後、膨張する過程において気泡内のエネルギーが外に流出したことで、元の大きさより小さくなったと考えられる。一方、膨張、収縮の切りかわ

りの場合、1回目より2回目の半径が大きく1.23倍となった。また、1回目の収縮、膨張および2回目の収縮の切りかわりまでの経過時間はそれぞれ1.0 μs 、0.8 μs および1.1 μs である。このことから、1回目の収縮、膨張の場合、収縮より膨張にかかる時間は短い。さらに、収縮にかかる時間は、1回目より2回目の方が長いことがわかる。

3.3 気泡の初期半径がキャビテーションに与える影響

前節より、気泡は計算開始と同時に収縮し、ある程度まで収縮後は、膨張し、ほぼ初期半径まで膨らむことがわかった。次に気泡の初期半径がキャビテーションに与える影響を調べるために図5に初期半径を変えた場合の気泡の半径の時間変化を示す。図中の緑、赤および黄色のプロットはそれぞれ20 μm 、35 μm および50 μm を示している。図5より3つの初期半径において、気泡は収縮、膨張を繰り返すことがわかった。一方、収縮、膨張後の気泡の大きさに注目すると、 $r_{ini} = 50\mu\text{m}$ において最も大きく $r = 47.5\mu\text{m}$ 、 $r_{ini} = 20\mu\text{m}$ において最も小さく $r = 4.8\mu\text{m}$ になった。このことは初期半径が大きいほど膨張後の気泡も大きくなると考えられる。また、1回目の収縮後の気泡の大きさも同様に、初期半径が大きいほど大きい。

3.4 気泡の初期圧力がキャビテーションに与える影響

次に気泡の初期圧力がキャビテーションに与える影響

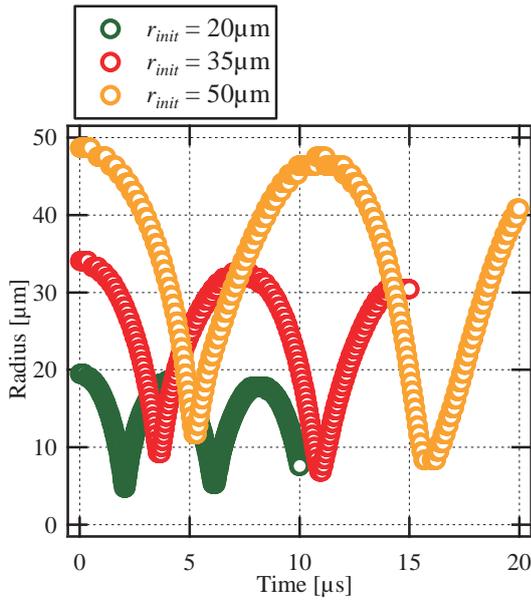


Fig.5 Relation between radius and time for $P_{init} = 6900\text{Pa}$

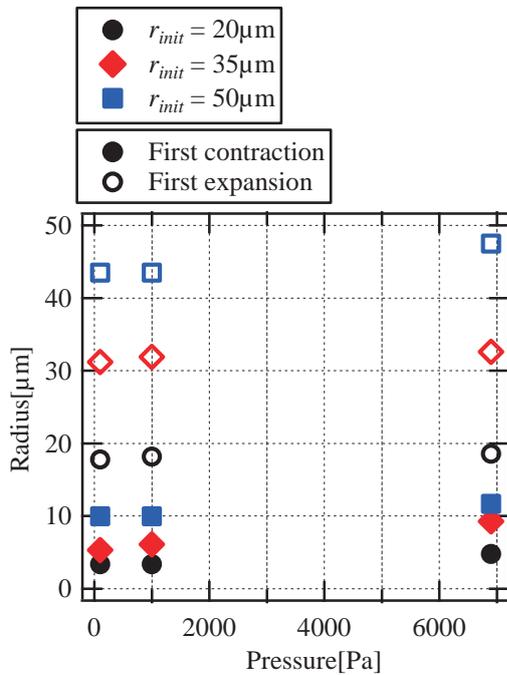


Fig.6 Relation between radius and pressure for $r_{init} = 20\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ and $50\mu\text{m}$

について調べた。図6に初期圧力を変えた場合の1回目に最も収縮および膨張した瞬間の気泡の大きさの変化を示している。図中の黒、赤および青色のプロットはそれぞれ $20\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ および $50\mu\text{m}$ を示している。また、色塗りおよび白抜きはそれぞれ1回目に最も収縮した瞬間および膨張から収縮に切りかわる瞬間の気泡の大きさを示している。図6より初期圧力を変化させることで収縮および膨張する気泡の大きさは大きく変化しないことがわかる。

4. 結言

本研究ではまずレイリー・プレセット方程式から算出し

た計算結果と比較することで本計算においてキャビテーションを再現できることを確認し、次にその計算方法をもとに気泡の初期半径および初期圧力を変化させ計算を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 気泡の初期半径および初期圧力をそれぞれ $10\mu\text{m}$ および 6801Pa に設定したときのレイリー・プレセット方程式および本計算で算出した気泡の挙動はおおよそ一致する。このことより本計算に大きな誤りがない。
- (2) 気泡の初期半径および初期圧力をそれぞれ $10\mu\text{m}$ および 6801Pa に設定したときの気泡の挙動は $t = 0.01\mu\text{s}$ から $t = 3.40\mu\text{s}$ の間に短時間で収縮膨張を繰り返している。このことより気泡の挙動はキャビテーションだと考えられる。
- (3) 気泡の初期半径を $20\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ まで変化させるにつれ、収縮および膨張した瞬間の気泡の大きさは大きくなる。
- (4) 初期圧力を 100Pa から 6900Pa に変化させることで気泡の大きさは大きく変化しない。

参考文献

- [1] 加藤洋治, 新版キャビテーション - 基礎と最近の進歩 -, 1999, p.1, 槇書店.
- [2] 日高到洋, 前原弘法, 三原敬之, 伊東繁, 水中衝撃波によるステンレス鋼板の爆発成形, 熊本県産学官技術交流会講演論文集, 22, pp.104-105, 2008.
- [3] 安達宏昭, 細川陽一郎, 増原宏, 吉村政志, 森勇介, 佐々木孝友, 短パルスレーザーを用いた蛋白質の結晶化, 一般社団法人レーザー学会, 34, pp.135-138, 2006.
- [4] 北山修, 伊勢秀雄, 新谷史明, 阿部裕, 高橋良延, 鈴木範美, 松野正紀, 高山和樹, 水中衝撃波フォーカシングによる胆石破砕法に関する基礎的実験 (第2報) - とくに臓器障害の検討 -, 日本胆道学会, 33, pp.234-241, 1989.
- [5] Michel Versluis, Barbara Schmitz, Anna von der Heydt, Detlef Lohse, "How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles", Science, 289, pp. 2114-2117, 2000.
- [6] P. Koukouvini, M. Gavaises, O. Supponen, M. Farhat, Numerical simulation of a collapsing bubble subject to gravity, Physics of Fluids, 28, p.032110, 2016.