

気泡の成長を考慮した超音波キャビテーション気泡の安定性と

運動挙動の調査

服部冠志

大阪公立大学大学院工学研究科

1 緒言

液体中に高強度の超音波を照射すると、音響キャビテーションと呼ばれる現象が生じる。音波によって局所的にほぼ真空状態になることで気泡核が生成し、音波の振動によって駆動された気泡振動が要因となって気泡が成長し、十分大きくなった気泡は非線形に振動する[1]。超音波振動の減圧時に気泡は膨張するが、超音波による加圧が始まったとしても、流体の慣性によって膨張が継続し、非常に大きく成長した気泡が急激に圧縮する。この圧縮時には、気泡内温度が 5000 度、100 気圧を優に超え、気泡内に存在する分子は熱分解される。この熱分解で生じたラジカルが液体中の化学種と反応することで、多種の化学反応が発生する。

この反応場で、ある一定以上の出力で気泡発生数が大きく減少する[2-4]が、その理由は明確ではない。実験による計測[3,4]では、超音波の波形歪みが大きくなる条件で気泡発生数が抑制されたため、波形歪みと何らかの因子により気泡発生数が抑制されると考えられるが、その因子は明らかになっていない。

本研究では、気泡の安定性、気泡の成長速度に着目し、波形歪みが気泡の安定性、気泡の成長速度に及ぼす波形歪みの影響を数値的に評価した。

2 数値解析手法

超音波環境下での気泡振動は、以下の Keller-Miksis 式[5]に支配されるとする。

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c_s}\right) R \ddot{R} + \frac{3\dot{R}^2}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c_s}\right) = \frac{1}{\rho_{L,\infty}} \left(1 + \frac{\dot{R}}{c_s}\right) [p_B - p_s(t) - p_0] + \frac{R}{c_s \rho_{L,\infty}} \frac{dp_B}{dt} \quad (1)$$

ここで、 R は気泡半径、 c_s は液中での音速、 p_B は気泡壁近傍での液体圧力、 $\rho_{L,\infty}$ は液体密度、 p_s は超音波圧力、 p_0 は雰囲気圧力、 t は時間である。

超音波は、以下のように基本波と第二高調波との合成波であるとした。

$$p_s(t) = \alpha_1 P \sin(-\omega_1 t) + \alpha_2 P \sin(-\omega_2 t + \theta) \quad (2)$$

ここで、 P は圧力振幅、 ω_1 は基本波の角周波数、 ω_2 は第二高調波の角周波数、 θ は位相差、 α_1 は基本波の含有割合を表す定数、 α_2 は第二高調波の含有割合を表す定数である。ここでは、実験と同様の 154 kHz の周波数、基本波の割合は 0.6~1.0 でシミュレーションを実施した。

上記の方程式に加え、波形が歪んだ超音波環境下での気泡の安定性も評価した。ここでは、Hilgenfeldt らが提唱したモデル[6]を採用し、球面調和関数状の擾乱を気泡に与え、気泡振動と共に以下の擾乱振幅の時間発展方程式を解いた。

$$\ddot{a}_n + B_n(t) \dot{a}_n - A_n(t) a_n = 0 \quad (3)$$

ここで、 A_n 及び B_n はモデルパラメータ、 a_n は擾乱振幅であり、添え字 n は球面調和関数の次数である。この擾乱振幅が超音波 1 周期で成長する条件を不安定、減衰する条件を安定である条件として求めた。最も不安定な次数は 2 であったため、以後次数 2 の結果のみ示す。

気泡の安定性に加えて、気泡の成長速度も調査した。気泡周囲の溶存ガスの質量濃度の時空間の発展を以下の移流拡散方程式によって解いた。

$$r^2 \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) + R^2 \dot{R} \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right) = D \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (4)$$

ここで、 D は拡散係数、 C は溶存ガスの質量濃度である。気泡壁ではヘンリー則、気泡の無限遠方ではバルク溶存ガス濃度であるとし、Keller-Miksis 方程式と一緒に解くことで、超音波 1 周期での気泡成長速度を求めた。

3 結果と考察

Fig. 1 に高調波が含まれる、もしくは含まれない超音波環境での気泡の安定性を比較した結果を示す。超音波槽内では音圧振幅や平衡気泡径は場所によって大きく変わるため、幅広い音圧振幅 P 、平衡気泡径 R_0 の範囲で気泡の安定性を評価した。また、色付きの領域は気泡が安定な、色なしの領域では気泡が不安定な領域を表す。特に音響キャビテーションの生じる 100000 Pa 以上の領域で波形歪みの小さい黒色と波形歪みの大きい赤色の領域があまり変化しない。つまり、超音波の波形が歪んだ場合であったとしても気泡の安定性はあまり変化せず、気泡の安定性は気泡発生個数変化に何も影響を及ぼさないことがわかった。

Fig. 2 に様々な平衡気泡径、様々な音圧振幅における気泡成長速度を示す。ここでは、波形歪みの全くない条件と位相差を持つ高調波を含む超音波条件での結果を比較する。また、Fig. 2 中での白線は成長速度が 0 を表すため、白線より左側の領域では気泡が溶解し、消滅する条件を表している。波形歪みのない場合には気泡が成長する領域が広く、成長する領域でもその成長速度が大きい。一方で、波形が歪む場合においては、成長する領域においても成長速度は小さくなった。また、実験[3]、シミュレーション[7]により明確になっているが、波形歪みが生じる条件では音圧振幅も低下する。このため、より図中左側の条件が実験的に生じていると考えられる。これらの結果を踏まえると、実験で気泡発生個数が低下する主要因は気泡成長速度が低減したことであると考えられる。

4 結言

本研究では、波形が歪んだ超音波条件下で、音響キャビテーションの発生個数が減少する理由を数値的に評価した。気泡の安定性は波形歪みによってあまり変化せず、気泡成長速度が波形歪みによって大幅に低下することがわかった。この結果より、波形歪みが気泡成長速度を大幅に低下させることで、気泡発生個数が低下するメカニズムが主要因であるということがわかった。

引用文献

- [1] K. Yasui, Acoustic cavitation and bubble dynamics (Springer, 2018).
- [2] Y. Asakura, K. Yasuda, Ultrason. Sonochem. **81** (2021) 105858.
- [3] R. Aoki *et al.*, Ultrason. Sonochem. **120** (2025) 107419.
- [4] R. Aoki, T. Yamamoto, Ultrason. Sonochem. **130** (2026) 107898.
- [5] J. Keller, M. Miksis, J. Acoust. Soc. Am. **68** (1980) 628-633.
- [6] S. Hilgenfeldt *et al.*, Phys. Fluids **8** (1996) 2808-2826.
- [7] R. Hayashi, T. Yamamoto, Ultrason. Sonochem. **131** (2026) 107918.

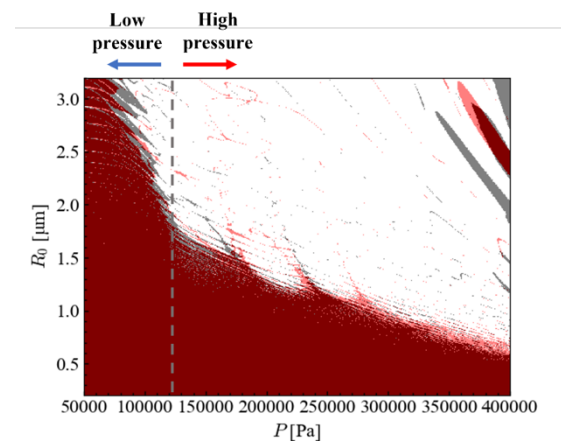


Figure 1 Stability diagram of bubble shape instability. The waveform distortion is large for red zone and small for black zone.

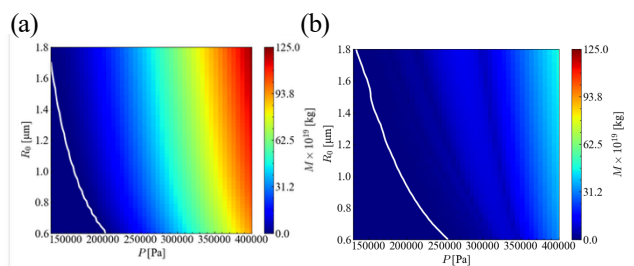


Figure 2 Distribution of the total mass change of the bubble in an ultrasonic cycle. The imposed ultrasound is (a) without harmonics, and (b) with harmonics and phase shift.