

## 収束超音波音場における微小気泡の挙動 Behavior of Micro Bubbles in Ultrasound Field

吉澤 晋, 東大・院, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: shin@fel.t.u-tokyo.ac.jp  
池田 貞一郎, 東大・院, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: teichiro@fel.t.u-tokyo.ac.jp  
松本 洋一郎, 東大・工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: ymats@mech.t.u-tokyo.ac.jp  
Shin YOSHIZAWA, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656  
Teiichiro IKEDA, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656  
Yoichiro MATSUMOTO, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656

Contrast-enhanced ultrasonography attracts much attention in recent years. This treatment uses micro-bubble contrast agents, for example Levovist. So it is essential to understand the behavior of micro bubbles in ultrasound field. We numerically simulate the spherical micro-bubble cluster in consideration of the thermal phenomena inside bubbles. The maximum pressure inside a bubble at the center of cluster reaches no less than 500[MPa] in case that amplitude of ultrasound is 100[kPa] and its frequency is resonant frequency of cluster.

### 1. 緒言

超音波は、人体という媒質に対して減衰係数と波長が適切である。よって、超音波を生体内において収束させることにより、体外より体内の狭い領域に高いエネルギーを集中することができる。現在収束超音波は様々な治療法が研究され、実際に臨床の現場において応用されている。

例として、毛細血管径よりも小さい、直径  $1[\mu\text{m}] \sim 8[\mu\text{m}]$  程度の微小気泡造影剤を用いる超音波画像診断がある。Levovist<sup>®</sup>は、現在日本で医薬品として承認(1999年)されている唯一の超音波造影剤であるが、その気泡径については、平均値が  $1.3[\mu\text{m}]$  で 99[%]以上が  $8[\mu\text{m}]$ 以下であることがわかっている。このような造影剤を静注し、診断部に超音波を照射すると、気泡界面では音響インピーダンスに大きな差ができるため、血管などの気泡が存在している部位から強いエコーがかえってくる。このとき、気泡からのエコーには、その強い非線形性から多量の高調波成分が含まれるが、それに対して、体組織からのエコーは基本波成分がほとんどである。このため、エコーの高調波成分を選択的に抽出して可視化することで、血管などをより鮮明に可視化することができる。現在ではこの手法で肝臓癌の診断、その治療効果判定などが行えるようになってきている<sup>(1)</sup>。

そのほかにも、圧電方式による体外衝撃波結石破砕術(ESWL: Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy)、体内に誘導した音響活性を持つ化学物質を、超音波照射により活性化し腫瘍を治療する音響化学療法<sup>(2)</sup>、超音波収束によって発生する熱エネルギーにより組織を加熱凝固させる HIFU(High Intensity Focused Ultrasound)<sup>(3)</sup>がある。

これらの医療応用では微小気泡の運動が大きく関係しており、超音波音場における微小気泡の挙動を理解することが必要不可欠となる。しかしながら、気泡の挙動はその内部の熱現象に大きく影響を受ける<sup>(1)</sup>。したがって本研究では、そのような現象を考慮したモデルを用い、それらの微小気泡がクラスタリングした場合を仮定して微小気泡群のシミュレーションを行った。

### 2. 主な記号

本論文で用いる主な記号を以下に示す。

$L$  : 凝縮潜熱  
 $M$  : 気泡内における質量  
 $R$  : 半径  
 $S$  : 気泡表面積  
 $T$  : 温度

$c$  : 音速  
 $h$  : エンタルピー  
 $m$  : 質量流速  
 $p$  : 圧力  
 $r$  : 半径方向座標  
 $t$  : 時間  
 $u$  : 速度  
 $\alpha$  : ボイド率  
 $\lambda$  : 熱伝導率  
 $\mu$  : 粘性係数  
 $\rho$  : 密度  
 $\sigma$  : 表面張力係数  
添字  
 $b$  : 気泡  
 $c$  : 気泡クラウド  
 $g$  : 不凝縮性ガス  
 $l$  : 液体  
 $0$  : 初期状態

### 3. 支配方程式

#### 3.1. 気泡クラウドに関する仮定

気泡クラウドのモデルは島田らが提唱したモデル<sup>(5)</sup>を用いた。そのモデルの構築するにあたって用いた仮定を以下に示す。

- (1) 気泡クラウドは球対称を保って運動する。
- (2) クラウド内の気泡流は連続体として扱う。また、気泡はクラウド半径に比べ十分小さいとし、気泡の質量、運動量は無視する。
- (3) 気泡の合体及び分裂は起こらないとする。
- (4) クラウド内の気泡流は非粘性とする。
- (5) クラウド内の液体の温度は一定であるとする。
- (6) 気液間のスリップはないとする。

#### 3.2. 気泡クラウドに関する支配方程式

気泡クラウド界面の運動方程式として以下に示す Keller の式<sup>(6)</sup>を用いた。

$$R_c \left( 1 - \frac{\dot{R}_c}{c} \right) \ddot{R}_c + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{\dot{R}_c}{3c} \right) \dot{R}_c^2 \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\rho_l} \left( 1 + \frac{\dot{R}_c}{c} + \frac{R_c}{c} \frac{d}{dt} \right) \left( p_w - p_\infty - 4\mu_l \frac{\dot{R}_c}{R_c} \right)$$

クラウド内気泡流における質量保存式, 運動量保存式は以下の(2)式と(3)式を用い, 水の状態方程式として(6)式の Tait 式を用いた.

$$\frac{\partial(1-\alpha)\rho_l}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \{r^2(1-\alpha)\rho_l u_r\} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(1-\alpha)\rho_l u_r}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \{r^2(1-\alpha)\rho_l u_r^2\} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{p+B}{\rho_\infty+B} = \left(\frac{\rho}{\rho_\infty}\right)^n \quad (4)$$

### 3.3. 気泡に関する仮定

気泡のモデルは松本が提唱したモデル<sup>(4)</sup>を島田らが一部改良したもの<sup>(5)</sup>を用いた. そのモデルの構築するにあたって用いた仮定を以下に示す.

- (1) 気泡は球対称を保って運動する.
- (2) 気泡内の圧力, 温度は気泡壁のごく近傍を除いて一様であるとする.
- (3) 気泡内の気体は van der Waals 気体とする.
- (4) 気泡の界面の温度は液体の温度に等しいとする.
- (5) 気泡界面での不凝縮ガスの移動は無視する.
- (6) 気泡内に生じる液滴の合体, 分裂は起こらないとする.

### 3.4. 気泡に関する支配方程式

気泡界面の運動方程式として以下に示す Fujikawa & Akamatsu の式<sup>(7)</sup>を用いた.

$$R_b \ddot{R}_b \left(1 - 2 \frac{\dot{R}_b}{c} + \frac{\ddot{m}}{\rho_l c}\right) + \frac{3}{2} \dot{R}_b^2 \left(1 + \frac{4}{3} \frac{\dot{m}}{\rho_l c} - \frac{4 \dot{R}_b}{3 c}\right) - \frac{\dot{m} R_b}{\rho_l} \left(1 - 2 \frac{\dot{R}_b}{c} + \frac{\dot{m}}{\rho_l c}\right) - \frac{\dot{m}}{\rho_l} \left(\dot{R}_b + \frac{\dot{m}}{2 \rho_l}\right) + \frac{p - p_r}{\rho_l} - \frac{R_b \dot{p}_r}{\rho_l c} = 0 \quad (5)$$

ただし,

$$p_r = p_v + p_g - \frac{\dot{m}^2 (\rho_{vr} + \rho_{gr} - \rho_l)}{\rho_l (\rho_{vr} + \rho_{gr})} - 2 \frac{\sigma}{R_b} - 4 \frac{\mu_l}{R_b} \left(\dot{R}_b - \frac{\dot{m}}{\rho_l}\right) \quad (6)$$

また, 気泡内の温度を一様とすれば, 気泡内混合物に対するエネルギー保存式は以下ようになる.

$$\left(C_{vg} M_g + C_{vv} M_v + C_{vl} M_c\right) \frac{dT}{dt} - \frac{p_g M_g}{\rho_g^2} \frac{d\rho_g}{dt} - \frac{p_v M_v}{\rho_v^2} \frac{d\rho_v}{dt} - L \frac{dM_c}{dt} - S \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} + \Delta h_g \frac{dM_g}{dt} + \Delta h_v \left(\frac{dM_v}{dt} + \frac{dM_c}{dt}\right) + \Delta h_l \frac{dM_c}{dt} = 0 \quad (7)$$

ここで,  $C_v$  は定容比熱,  $M_v, M_g, M_c$  は気泡中の蒸気, 不凝縮ガス, 凝縮液滴の質量である.

### 4. 計算結果および考察

計算条件を Table 1 に示す. クラスタの最大半径の周波数応答を Fig. 1 に, クラスタ中心に位置する気泡における, 内部圧力の最大値の周波数応答を Fig. 2 に示す. Fig. 1 を見ると, クラスタ半径はほとんど変化しないことがわかる. これは, クラスタの体積変化は, 主として初期ボイド率 0.1 [%] の気泡の体積変化によってもたらされるためである. Fig. 2 では圧力振幅が増えると, 気泡内部圧力のピーク値は急激に増加し, 圧力振幅が 100 [kPa], 周波数が 110 [kHz] のときに実に 500 [MPa] にも達している. また, 圧力振幅が増えるにつれ, 気泡内部圧力の変動が大きくなる周波数領域が広がっていることがわかる. これらは全て, 気泡クラスタ

の非常に強い非線形性によっている.

Table 1 Computational parameters

Initial cluster radius, $R_{c0}$	0.75 [mm]
Initial bubble radius, $R_{b0}$	1.0 [ $\mu$ m]
Initial ambient pressure, $p_0$	101.3 [kPa]
Initial temperature	293 [K]
Initial void fraction	0.1 [%]
Amplitude of ambient pressure	10, 50, 100 [kPa]
Frequency of ambient pressure	1 [kHz] ~ 10 [MHz]

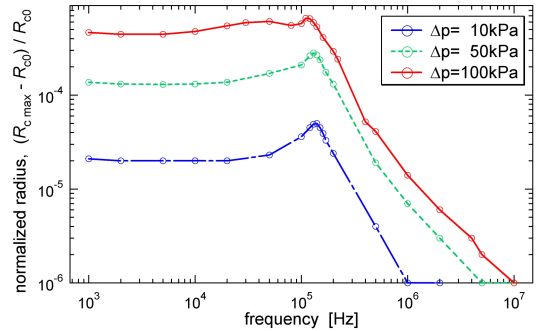


Fig. 1 Response curves of maximum cluster radius

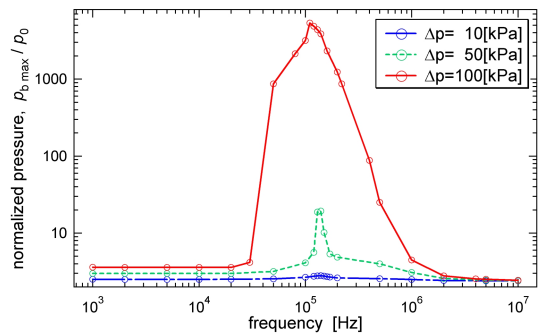


Fig. 2 Response curves of maximum pressure inside a bubble at the center of cluster

### 5. 結言

気泡内部の熱現象を考慮したモデルを用いて, 微小気泡によるクラスタの挙動について調べた. その内部では局所的ではあるものの, 周囲圧力の振幅が 100 [kPa] であっても 500 [MPa] という非常に高い圧力が発生することがわかった.

### 参考文献

- (1) 平井, 徳野, 大石, "レボピスト造影 US による肝腫瘍の鑑別診断", J Med Ultrasonics, Vol. 28, No. 3, 1(2001), p.343.
- (2) 梅村, 弓田, "音響化学効果による癌治療へのアプローチ", 日本物理学会誌, Vol. 51, No. 16, 1(1996), pp. 835-838.
- (3) L. Crum, et al., "Acoustic Hemostasis," 15<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics, 1(1999), pp. 13-22.
- (4) 松本洋一郎, "気泡運動における不凝縮ガスの影響," 機械学会論文集 B 編, 52-475, 1(1986), pp. 1168-1174.
- (5) 島田, 松本, 小林, "クラウドキャピテーションの動力学とキャピテーションエロージョン," 機械学会論文集 B 編, 65-634, 1(1999), pp. 1934-1941.
- (6) Keller, J. B. and Kolodner, I. I., "Damping of underwater explosion bubble oscillation," J.Appl.Phys., 27, 1(1956), pp. 1152-1161.
- (7) Fujikawa, S. and Akamatsu, T., "Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid," J. Fluid Mech., 97-3, 1(1980), pp. 481-512.