

超音波伝播における非線形性が造影剤の挙動に与える影響

日大生産工 (院) ○丸山 義人 日大生産工 沖田 浩平

1. 緒言

マイクロバブル超音波造影剤を用いた超音波診断装置において画像の高画質化が求められており、このためには、超音波の伝播過程で生じる非線形性や超音波造影剤の非線形振動を考慮した高度な超音波伝播シミュレーションが必要不可欠である。超音波診断で使用されるSonazoidは肝腫瘍疾患や様々ながんの診断で有効な超音波造影剤であり、適応症の拡大が望まれている¹⁾。本研究では、診断装置から送信される超音波の伝播過程における非線形性がマイクロバブル超音波造影剤の挙動に及ぼす影響について、線形伝播によって得られる結果と比較検討した。

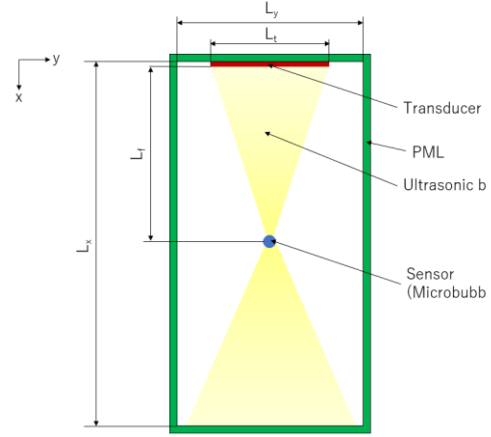


Fig.1 集束超音波の解析モデル

2. 解析手法

超音波伝播シミュレーションにMATLABおよびC++で利用可能なオープンソースの音響ツールボックスであるk-Wave²⁾を用いた。k-Waveでは以下のような支配方程式によって音響不均一性や伝播過程における音の減衰などを考慮してシミュレーションを行う事が可能である。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(2\rho + \rho_0) \nabla \cdot \mathbf{u} - \mathbf{u} \cdot \nabla \rho_0 \quad (2)$$

$$p = c_0^2 \left(\rho + \mathbf{d} \cdot \nabla \rho_0 + \frac{B}{2A} \frac{\rho^2}{\rho_0} - L\rho \right) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は音響粒子速度、 p は音圧、 ρ は音響密度、 ρ_0 は平衡密度、 c_0 は等方性音速、 $\mathbf{d}$ は音響粒子の変位を表す。質量保存を表す式(2)の粒子速度が波の速度に影響することを考慮した $-2\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$ の項と、式(3)の非線形パラメータ B/A を含む項が非線形性を表す。また、 L はべき乗則に従う音の減衰 $\alpha = \alpha_0 \omega^y$ をモデル化するための演算子であり、次式で表される。

$$L = \tau \frac{\partial}{\partial t} (-\nabla^2)^{\frac{y}{2}-1} + \eta (-\nabla^2)^{\frac{y+1}{2}-1} \quad (4)$$

ここで、 τ と η はそれぞれ吸収と分散の比例係数である。

$$\tau = -2\alpha_0 c_0^{y-1} \quad (5)$$

$$\eta = 2\alpha_0 c_0^y \tan\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

3. 解析モデル

焦点に向けて集束超音波を発信する解析モデルをFig.1に示す。計算領域のサイズは $L_x = 40.3\text{mm}$ 、 $L_y = 20.4\text{mm}$ であり、領域を分割する格子の大きさは $d_x = 3.2 \times 10^{-2}\text{mm}$ 、 $d_y = 5.0 \times 10^{-2}\text{mm}$ である。領域の上部に配置した $L_t = 15\text{mm}$ の音源から発信された超音波が下方向に伝播し、音源から焦点までの距離 $L_f = 20\text{mm}$ の位置に集束する。音圧を計測するためのセンサは焦点位置に配置した。境界条件については超音波の反射を防ぐために、全ての境界面で20格子分の完全吸収境界(PML)を領域の外側に配置した。伝播媒質の音速は $c_0 = 1540\text{m/s}$ 、密度は $\rho_0 = 1070\text{kg/m}^3$ であり、診断で使用される値である。肝臓の音響特性から減衰係数 $\alpha = 0.399\text{dB/cm} \cdot \text{MHz}^y$ 、 $y = 1.139$ 、非線形パラメータ $B/A = 6.75$ とした³⁾。また、超音波造影剤としてSonazoidを想定し、気泡半径 $R = 1.4\mu\text{m}$ とした¹⁾。

4. 結果及び考察

集束超音波の音圧データを焦点で取得し、取得したデータをもとに気泡の挙動を計算した⁴⁾。超音波によってキャビテーションが発生しな

い安全な診断を行うため、メカニカルインデックス (MI) の値が1.0以下になるように音圧を設定した。音圧 $p_0 = 0.5\text{MPa}$ と $p_0 = 1.0\text{MPa}$ の場合でMIはそれぞれ0.37, 0.73となる。

Fig.2に、気泡に入射する音圧の時間変化を線形伝播と非線形伝播の場合について比較して示す。伝播過程の非線形性により音圧が高い部分では音速が速くなり、音圧が低い部分では音速が遅くなっていることが確認できる。非線形伝播ではこのような波形の歪みが発生し、駆動した周波数の整数倍の周波数を持つ高調波が生じる⁵⁾。また、音圧0.5MPaと1.0MPaの結果を比較すると、音圧が高い方が非線形性による波形の歪みが大きいことが確認できる。

次に、音圧 $p_0 = 1.0\text{MPa}$ の場合の気泡半径と放射音の時間変化をそれぞれFig.3とFig.4に示す。入射音圧の負圧の影響で気泡は大きくなり、最大負圧を受けた後、気泡が最も大きくなっている。線形伝播、非線形伝播の最大気泡径はそれぞれ $4.18\mu\text{m}$, $4.07\mu\text{m}$ であった。非線形伝播の結果で気泡半径が小さくなったのは、伝播過程で生じた波形の歪みによって最大負圧が小さくなったためであると考えられる。一方、Fig.4より、気泡半径が最大まで膨張した後、急激に収縮した気泡は再び膨張が始まる際に非常に高い音圧を放出している。線形伝播と非線形伝播の最大放射音圧はそれぞれ9.62MPaと8.48MPaであった。線形伝播の場合に放射音圧のピーク値が大きくなったのは、気泡が線形伝播の方が大きく成長し、収縮速度が速くなったためであると考えられる。

5. まとめ

診断装置から送信される超音波の伝播過程における非線形性が超音波造影剤の挙動に及ぼす影響について、超音波の線形伝播と非線形伝播の影響について比較した。その結果、非線形伝播による波形の歪みによって、気泡挙動の違いを確認した。発表では、音圧や非線形パラメータ等の影響について報告する。

参考文献

- 1) 森安史典, 飯島尋子 新しい超音波造影剤 Sonazoid による肝腫瘍診断・造影の基礎, INNERVISION 別冊付録, (2007) pp.1-7.
- 2) k-Wave, <http://www.k-wave.org/>, 参照 (2022-10-11)
- 3) Francis A Duck, "Physical Properties of Tissue: A Comprehensive Reference Book", IPFM, (1990) pp.98-110.

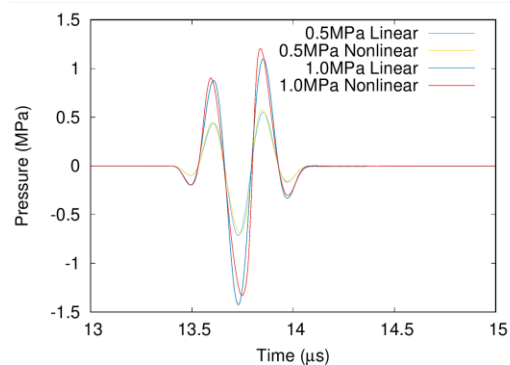


Fig.2 気泡に入射する超音波の音圧の時間変化
(中心周波数 $f_0 = 3.75\text{MHz}$)

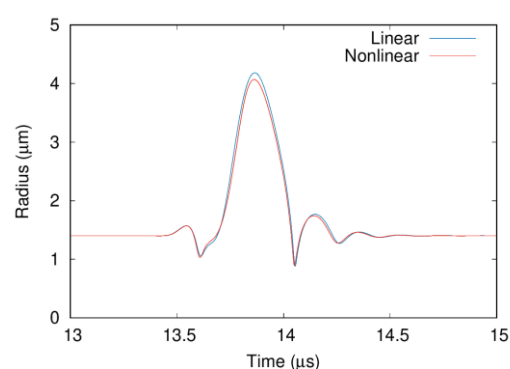


Fig.3 超音波を受信した気泡の半径の時間変化
(中心周波数 $f_0 = 3.75\text{MHz}$, 音圧 $p_0 = 1.0\text{MPa}$)

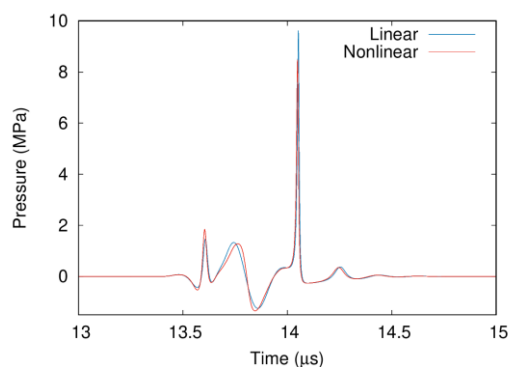


Fig.4 気泡から放出される音圧の時間変化
(中心周波数 $f_0 = 3.75\text{MHz}$, 音圧 $p_0 = 1.0\text{MPa}$)

- 4) Okita et al., "Microbubble behavior in an ultrasound field for high intensity focused ultrasound therapy enhancement", JASA 134 1576, (2013)
- 5) Atchley, A. A., "Not your ordinary sound experience: A nonlinear-acoustics-tic primer.", Acoustics Today 1(1), (2005), pp.19-24.