

# 容器内の液体へのHIFU照射により生じる キャビテーション気泡の超音波イメージングに関する基礎検討\*

○矢口遥太, 森翔平, 吉澤晋 (東北大)

## 1 研究背景・目的

強力集束超音波 (HIFU : high-intensity focused ultrasound) 治療は、強力な超音波エネルギーを体外から対象組織に集束させることで、温度上昇によりがん組織を加熱凝固させて壊死させる治療法である。この HIFU 治療は切開が不要で低侵襲であるが、焦点領域が治療対象領域に比べて非常に小さく治療に時間がかかってしまうことや、治療中に体内を目視で確認することができないことなどの課題がある。そのため、治療の安全性及び有効性を確保するには、治療効率を向上させる手法の検討や、リアルタイムでの体内のモニタリングが必要となってくる。

そこで、我々の研究グループではキャビテーション気泡の活用を目指している。キャビテーション気泡とは、負圧によって生じる気泡のことで、超音波照射によって体積振動し、圧壊することによって化学的効果、機械的効果、熱的効果を得ることができ、これらの効果を利用することで治療効率を向上できる。また、この気泡を超音波イメージングすることで治療領域の可視化が可能になる。

しかし、このキャビテーション気泡は通常の治療用 HIFU よりも 1 桁程度高い強度で発生するため制御が難しく、生成の再現性に欠けるなどの特徴がある。一方で超音波診断における超音波造影剤としてはマイクロバブルが一般的に用いられている<sup>[1]</sup>。これは人為的に生成される気泡で、キャビテーション気泡と比較し安定して液体中に存在できる特徴がある。そこで本研究では、マイクロバブルの治療応用を最終目的とし、本稿では気泡核の存在する領域に対して HIFU を照射した際に、キャビテーション気泡がどのような挙動をするかについて、超音波イメージングを用いて

実験的に検討した。

## 2 原理・実験方法

### 2.1 超音波イメージング手法

気泡を超音波イメージングする際に、Active イメージングと Passive イメージングの二つの手法を用いた。主にイメージングをする対象物に対し、プローブからイメージングパルスを送信するか否かという違いがある。Active イメージングは、イメージングプローブから対象物に対してパルス波を送信し、対象物からの反射波をイメージングプローブで受信することで画像化を行う手法である。また、Passive イメージングは、イメージングプローブから対象物に対してパルスを送信することはなく、対象物から放出される超音波をイメージングプローブで受信することで画像化を行う手法である。本研究では、HIFU 照射中の気泡をイメージングする場合に Passive イメージングを用い、HIFU 照射前後の気泡の変化をイメージングする場合に Active イメージングを用いている。

### 2.2 実験方法

Fig. 1 に本研究で用いた実験系を示す。駆動周波数 1.123 MHz のシングルトランスデューサーを用いて、薄膜で仕切りを付けた容器内の液体に対して HIFU を照射し、容器の真上からリニアプローブで超音波イメージングを行った。

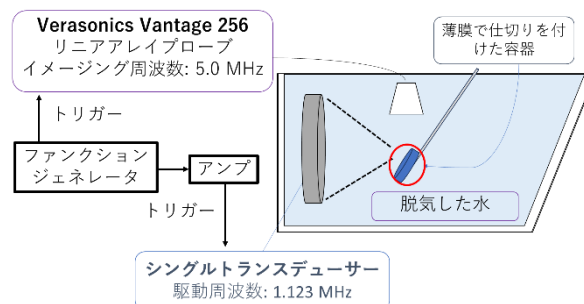


Fig. 1 Experimental setup

\* Basic study on ultrasound imaging of cavitation bubbles produced by HIFU exposure of liquid in a container, by YAGUCHI, Yota (Tohoku University) MORI, Shohei (Tohoku University) and YOSHIZAWA, Shin (Tohoku University/ SONIRE Therapeutics).

### 2.3 HIFU 照射シーケンス

Fig. 2 に HIFU 照射およびイメージングシーケンスを示す。Active イメージングの場合は HIFU パルス照射前後にイメージングパルスの送受信を行っており、Passive イメージングの場合は HIFU パルス照射中に受信を行っている。

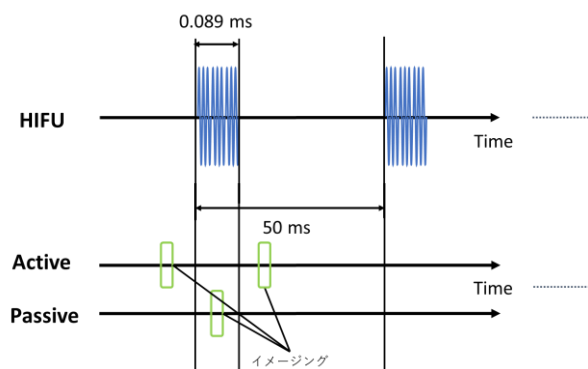


Fig. 2 HIFU exposure sequence and timing of imaging with liner probe

## 3 結果

### 3.1 Active イメージング

Fig. 3 に Active イメージングで得られた画像を示す。HIFU は左側から照射しており、深さはリニアプローブからの距離になっている。色の線で示しているところに薄膜が存在しており、この間に気泡を含んだ水道水が満たされている。そして、赤丸で示している深さ 40 mm の位置に HIFU 焦点を合わせている。容器内の高輝度領域の時間変化が観測され、気泡の挙動を確認することができた。

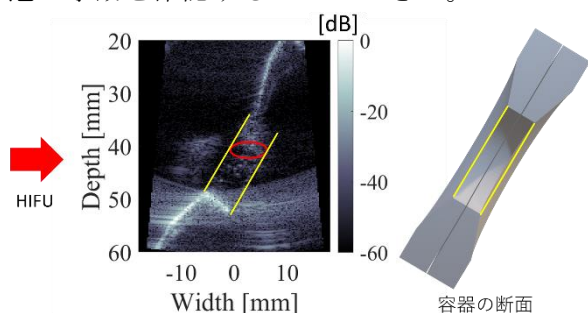


Fig. 3 Active imaging result and cross-sectional view of container

### 3.2 Passive イメージング

Fig. 4 に Passive イメージングで得られた画像を示す。Active と同様に HIFU は左側から照射しており、容器の断面も同様に位置している。そして Fig. 4 のそれぞれの画像の周波数スペクトルを確認したものが Fig. 5 である。キャビテーション気泡からの散乱波は非線形

を示すため高調波成分が強くなり、また気泡圧壊時には急激な圧力変化が起こることからブロードバンドノイズが起こる特徴がある。気泡が確認できなかった場合のスペクトルを基準にすると、気泡が確認できた場合のスペクトルでは高調波成分が強く見られ、ブロードバンドノイズも見られるため、気泡の発生を確認できたことがわかる。

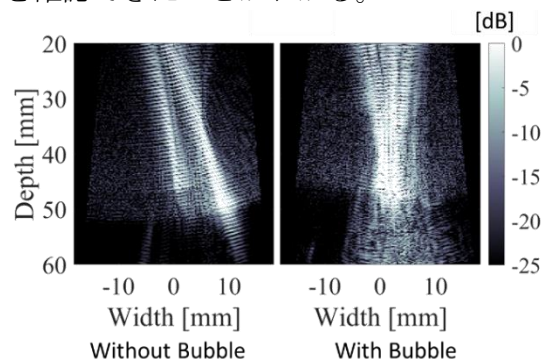


Fig. 4 Passive imaging result

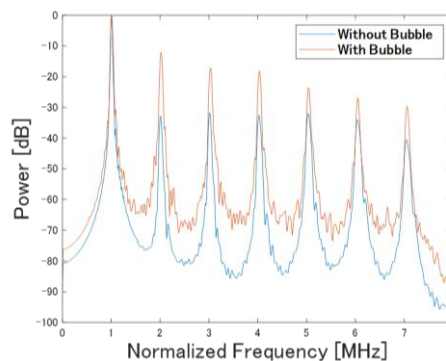


Fig. 5 Frequency spectrum

## 4 まとめ

本研究では、容器内に封入した液体に対して HIFU を照射した際に生じるキャビテーション気泡の挙動を、超音波イメージングを用いて実験的に検討した。その結果、Active と Passive イメージングともに気泡の挙動をとらえることができた。これにより、実際にマイクロバブルに対して HIFU を照射した際の気泡の挙動もイメージングできると考える。今後は、一つのシーケンスで Active と Passive イメージングをもちいて気泡の挙動をより詳細に確認できる手法を検討したい。  
参考文献

- [1] Michalakis A, Averkiou, Matthew F. Bruce, Jeffrey E. Powers, Paul S. Sheeran and Peter N. Burns, *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol 46 Issue.3, 498-517, March 2020.