

キャビテーション気泡の生成領域拡大を目的とした 強力集束超音波焦点走査における走査方向の影響

○森中直也, 高橋和希, 森翔平, 吉澤晋 (東北大学)

1 はじめに

HIFU (強力集束超音波) は, 非侵襲的ながん治療法の一つである. この治療法では, 体外で発生させた超音波を体内の標的組織に集束させる. HIFU 照射中に強い負圧によって発生したキャビテーション気泡が体積振動し, 周囲に熱的作用, 化学的作用, 機械的作用をもたらす. Histotripsy はこの機械的作用を利用した治療技術であり, デューティ比が低く, 音圧が極めて高い HIFU パルスを用いる. HIFU 照射により, キャビテーション気泡の圧壊に起因して発生する衝撃波, 流体力学的変動, せん断応力が組織を機械的に破壊する. 1 回の HIFU 照射で Histotripsy が処理する領域の大きさは小さく, 一般的には mm オーダーである. このため, 治療の空間的選択性は高いが, 治療する組織がそれよりはるかに大きい場合には, 治療時間が長くなる. したがって, 治療時間を短縮するためには, 治療領域を拡大することが重要である. 一般的に, Histotripsy では, 治療を完了させるために同じ部位に HIFU 照射を数十サイクル繰り返す. 臨床においては, スループットを高めるためにサイクル時間を短縮することが望まれる. そのため, 先行研究¹⁾では, 後述する HIFU 焦点走査により治療領域を拡大し, 入力音響エネルギーに対する治療効率を高めることを示した. そこで本研究では, より気泡の生成領域が拡大するような HIFU 焦点走査を検討し, 治療効率の向上を目指す.

本稿では, 3 種類の HIFU 焦点走査を行い, 水中における高速度撮影実験により, 定性的に照射シーケンスについて検討する.

2 実験方法

図 1 に各装置のパラメータを記載した高速度撮影の実験図を示す. 実験手順としては, 128ch アレイトランスデューサ(ジャパンプローブ社製)で焦点を電子的に設定し, 水中に対して焦点走査しながら超音波を照射する.

これにより生成されるキャビテーション気泡を, 高速度カメラを用いてレーザを光源としたバックライト撮影をする. 本稿では, 3 種類の焦点走査を行い, 高速度撮影により気泡の生成領域を確認する. ここで, 設定した 3 種類の焦点走査は次節に説明する.

3 照射シーケンス

図 2 に実験で検証した 3 種類の照射シーケンスにおける焦点走査位置を示す. 図 2 より, 超音波の伝搬方向に対して, 緑点は①水平方

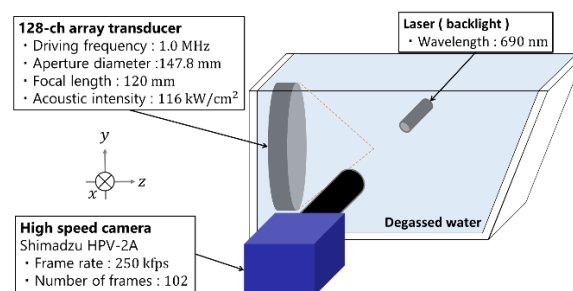


図 1. 高速度撮影における実験図

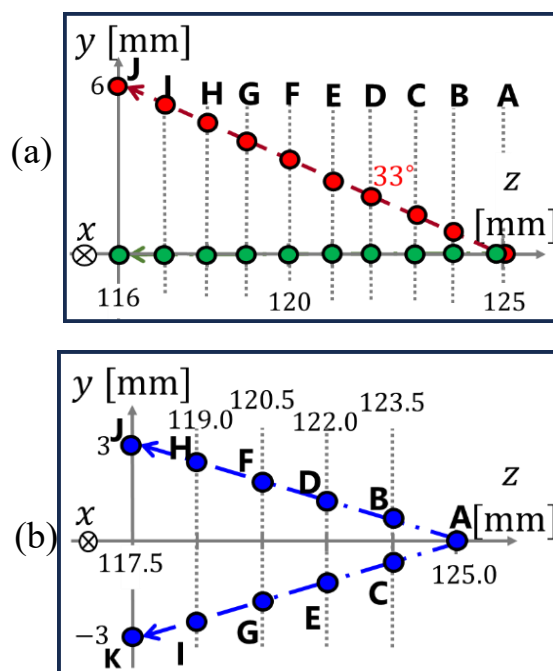


図 2. 焦点走査位置. (a)10 点照射法(水平および斜め方向). (b)V 型照射法.

向の10点照射法, 赤点は②斜め方向の10点照射法, 青点は③双方向のV型照射法を示している. ここで, 照射の順番は図2に示すアルファベット順とする.

次に, HIFU の照射時間について説明する. ①と②の10点照射法においては同じ値に設定する. A点の照射時間を $90\ \mu\text{s}$ とし, B点以降の照射時間を $10\ \mu\text{s}$ に設定する. また, 各点間の休止時間は $4\ \mu\text{s}$ に設定する. 続いて, ③Y型照射法は, A点の照射時間および休止時間を①と②と等しい値を用いるが, B点以降の照射時間は $5\ \mu\text{s}$ に設定する.

本研究における気泡の生成原理は shock scattering の現象を用いる^[2]. これは, 気泡に入射した高強度超音波が気液界面で自由端反射し, その反射波と後続の入射波が強め合うことで気泡手前側に気泡クラウドを生成する現象である. 本手法では, 焦点で生成された多数の気泡の集まりである気泡クラウドを反射体として利用し, その手前側に焦点を走査することで, 走査側に新しい気泡クラウドを生成する. これにより, 低エネルギーかつ短時間で気泡を生成することができるため, 本シーケンスでは, A点で反射体となる気泡クラウドを生成し, B点以降で shock scattering 現象を利用した気泡を生成する.

4 結果および考察

図3に10点照射法とV型照射法における高速度撮影結果および, 音場シミュレーション結果を示す. 図3(a)から図3(c)は撮動開始から $252\ \mu\text{s}$ 後の高速度撮影結果である. また, 図3(d)は焦点走査時のピーク音圧分布シミュレーションを示しており, 幾何焦点の音圧で正規化している. 図3(a)から図3(c)より, ①水平方向の10点照射法は, 焦点走査位置の終点であるJ点の手前側の広範囲に, 気泡領域の生成が確認できる. また, ②斜め方向の10点走査は, 焦点走査した斜め方向へ気泡の進展が確認できる. 最後に, ③V型照射法は, 双方向への気泡領域の生成がみられる.

ここで, 図3(d)の結果と比較するため, 各照射シーケンスの終点におけるシミュレーション音圧に注目し, 考察する. ①水平方向の10点照射法の終点, J点における音圧は, 幾何焦点音圧とほぼ等しい, 高い音圧が発生していると考えられる. そのため, 気泡領域の拡

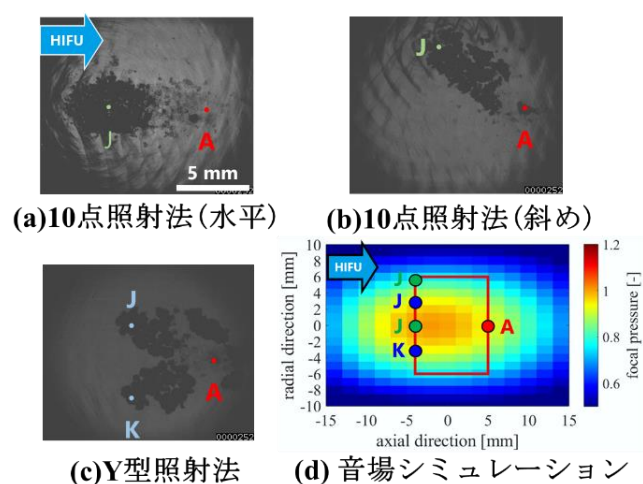


図3. 高速度撮影結果および音場解析結果

大が広範囲にできると考える. 次に, ②斜め方向の10点照射法の終点, J点における音圧は, 幾何焦点音圧の約75%であり, 音圧が比較的低い値まで下がると考える. しかし, 終点まで気泡領域の進展がみられることから, shock scattering を利用することで, 音圧が下がる領域でも気泡が生成できると考えられる. 最後に, ③V型照射法の終点, J点とK点における音圧は, 幾何焦点音圧の約95%であり, 高い値だが, 気泡の進展が小さい. これは, 照射時間が10点照射法と比較して短い値を設定したためと推測され, 今後は適切なパラメータを選定する必要があると考えられる.

5 おわりに

本稿では, 3種類の焦点走査を行い, 高速度撮影により気泡の様子を確認した. まず, 様々な方向に対する焦点走査において, 気泡の生成領域の拡大が確認できた. また, 斜め方向の10点照射法の結果から, 幾何焦点の音圧より低い領域でも, 焦点走査により気泡領域の拡大できることが示唆された. さらに, V型照射法の結果から, 2点目以降の照射時間の長さが気泡の生成領域に影響することが推測された. 今後は, 焦点走査の位置と照射時間のパラメータを検討し, 気泡の生成領域が広範囲に起こるようなシーケンスを検討する.

参考文献

- [1] K. Takahashi and Yoshizawa, Jpn. J. Appl. Physy. **63**, 04SP11 (2024).
- [2] A. D. Maxwell et., J. Acoust. Soc. Am. **130**, 1888 (2011).