

強力集束超音波治療ビーム可視化技術における 焦点の視認性の向上に関する実験的検討

Experimental Study on Enhancement of Visibility on Focal Point of High Intensity Focused Ultrasound Beam

○松井和洋¹, 東隆¹, 藤原圭祐², 射谷和徳², 竹内秀樹¹, 高木周^{1,4},
佐々木明¹, 葭仲潔³, 安藤岳洋¹, 小林英津子¹, 佐久間一郎¹
(¹東大院 工, ²日立アロカメディカル, ³産総研, ⁴理研)

○Kazuhiro Matsui¹, Takashi Azuma¹, Keisuke Fujiwara², Kazunori Itani², Hideki Takeuchi¹,
Shu Takagi^{1,4}, Akira Sasaki¹, Kiyoshi Yoshinaka³, Takehiro Ando¹, Etsuko Kobayashi¹, Ichiro Sakuma¹
(¹School of Eng., The Univ. of Tokyo; ²Hitachi Aloka Medical, Ltd.; ³AIST; ⁴RIKEN)

Abstract: HIFU Beam Imaging (HBI) to visualize focal point and beam path of High Intensity Focused Ultrasound (HIFU) is described. For an accurate detection and control of HIFU beam, we developed novel HBI method to minimize the risk of bio-effect during the beam visualization process. In this method, a HIFU transducer irradiates microsecond pulsed HIFU beam and an imaging probe detects scattered HIFU beam signal. After scanning of receiving beam, an intensity profile of HIFU beam is visualized. To enhance the visibility of HIFU beam, we considered HIFU beam profile in elevation direction at the focal point because receiving beam is wider than HIFU beam in elevation direction. Therefore, we proposed to narrow output aperture width of HIFU transducer in elevation direction. We evaluated our method in experiments by using homogeneous scattering phantom and found that focal point of HIFU beam was visualized more clearly by this method.

Key Words: High Intensity focused ultrasound (HIFU), HIFU Beam Imaging (HBI), visibility of HIFU beam, receiving beam, widen HIFU beam in elevation direction

1. 研究背景

近年、物理的エネルギーを用いた低侵襲かつ低コストながん治療法として盛んに研究されているのが、強力集束超音波 (High Intensity Focused Ultrasound: HIFU) を用いた治療法である。HIFU 治療とは、体外から強力な超音波を一点に集束するように照射し、焦点近傍の腫瘍を加熱凝固することで、組織壊死させる治療法である。焦点では、波長サイズ (mm オーダ) のビーム幅範囲で熱凝固作用が及ぶが、ビーム幅より大きな腫瘍や早期がん (cm オーダ) を対象にする場合には、腫瘍全体に対してビームを走査することで低侵襲かつ選択的な治療を可能にする。HIFU 治療装置は、前立腺肥大や子宮筋腫、乳がん等に対して実用化され、市場導入されている。

治療対象を観測する技術では、治療を正確にかつ安全に実施するため、ターゲット位置に超音波を正しく集束させることが重要である。市場の装置では、幾何学的焦点、送信ビームパスを画像上に表示する機能を有する場合がある。しかし、組織の音響特性の影響により、実際の照射ポイントが治療ナビゲーション画面上の治療用超音波の送信フォーカス点・送信ビームパスの位置からずれ、治療計画上の照射位置と異なる場所を照射する恐れがある。そのため、余分に正常組織を焼灼してしまう可能性や、治療対象範囲を焼灼しきれない可能性がある。この超音波の生体相互作用特性に由来する治療領域の不確かさが、HIFU 治療の課題の一つとされている⁽¹⁾。

そこで、本研究グループでは、HIFU 治療の精度と安全性を向上させるため、HIFU の送信ビームの焦点およびビーム経路を可視化する技術である HIFU Beam Imaging 手法 (HBI) を開発した⁽²⁾。HBI では、HIFU 治療用振動子から焦点に照射された超音波バースト波に対する生体中からの後方

散乱波を撮像用振動子で受信し、画像化する。HBI 時のエネルギー強度は、音圧に対して治療時と同等であるが、パルス長において 5~6 桁程度短いため、その分生体作用リスクも小さい。したがって、治療前に安全に治療照準を合わせることが可能である。

しかしながら、従来の HBI は、焦点領域における HIFU ビームの視認性が悪いことが課題となっていた。視認性低下の要因として、焦点領域における撮像面に垂直な方向 (エレベーション方向) の受信ビーム幅に比べて送信ビーム幅が狭いため、撮像面上の受信信号強度の SN 比を低下させていることが考えられた。したがって、本研究では、HIFU 振動子の開口形状のエレベーション方向における送信出力開口幅を狭めることで、焦点での送信ビーム幅を広げ、焦点の視認性を向上する手法を提案し、その評価を行った。一般に生体組織は散乱強度分布が不均一な音響媒質であると考えられるが、本研究では、簡単な生体モデルとして散乱強度が均一なファントムを作製し、その評価を行った。

2. 提案手法

HIFU 送信は、中空型凹面レンズ形状の超音波振動子 (IMASONIC 社製特注) を用いて、2 波のバースト波の発信により行う。送信素子はリング型に配列されており、素子数は 256 個、共振周波数は 2MHz、曲率半径は 100mm である。一方、HIFU 受信には、リニア型超音波診断用プローブ (日立アロカメディカル社製特注) を用い、これを送信用振動子の中空部に配置した (図 1 左)。素子数は 128 個、共振周波数 6.5MHz である。

焦点領域でのエレベーション方向の送信ビーム幅を広げるため、エレベーション方向に出力開口幅を狭めた楕円型開口制御を行った (図 1 右)。送信開口幅は 51mm、出力素

子数は74個である。開口制御による効果を確認するため、3次元の計算モデルを構築して計算した結果を図2に示す。図2から、開口制御によって送信ビーム幅(FWHM)が0.9mmから2.3mmに広がり、受信ビーム幅3.1mmに近づくことが分かった。同様の計算で、撮像面ではビーム形状が保たれることを確認している。

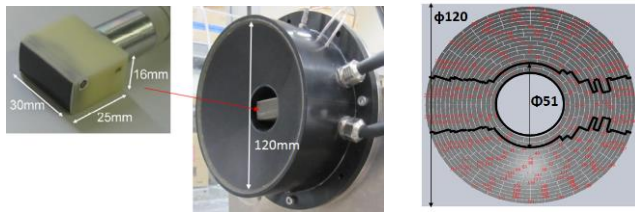


図1 HBI 撮像用振動子の概要。左: 凹面レンズ状のHIFU送信用振動子の中空部に受信用リニア型超音波プローブを挿入している。右: 黒枠部分が、HIFU送信出力開口形状である。エレベーション方向における開口幅を狭めている。

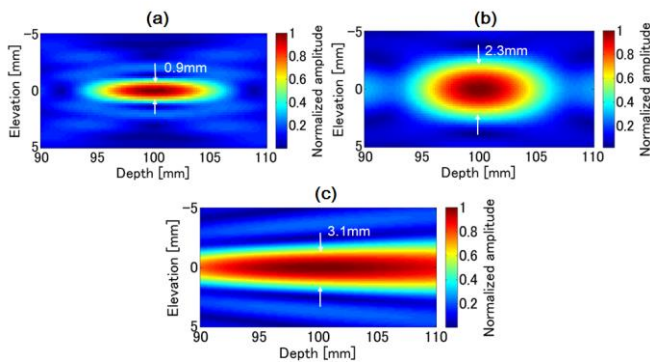


図2 焦点領域におけるエレベーション方向のビーム形状計算結果。(a)開口制御を実施しない場合の送信ビーム (b)開口制御を実施した場合の送信ビーム (c)受信ビーム

3. 実験方法

実験のセットアップを図3に示す。送信および受信タイミングを制御することで、HIFUパースト波送信毎にエコー信号データを取得可能である。超音波診断装置(F75, 日立アロカメディカル社製)を使用し、受信ビームラインごとにデータを取得した。空間分解能向上のため、受信したエコー信号にバンドパスフィルタをかけて、通過帯域をHIFUビームの非線形伝播により発生する第3次高調波成分(6MHz近傍)に制限した。

評価対象には、均一な散乱強度分布をもつ生体ファントムを作製した。このファントムは、音響特性が生体に近い3%の均一な寒天(和光純薬工業、010-15815)中に、微小な散乱体を模擬するため粉末グラファイト(和光純薬工業、070-01325)を3%程度で均一に混ぜたものである。このグラファイト混合寒天ファントムに、HIFU送信開口制御を実施する場合と実施しない場合とでHBIの受信信号を解析し、HIFUビームの視認性の評価を行った。

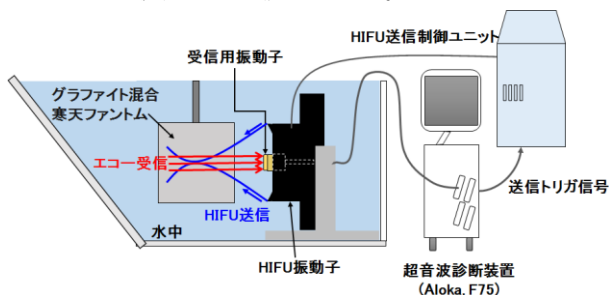


図3 実験システムの構成

4. 実験結果と考察

焦点領域における受信エコー信号からHIFUビームを描出した結果を図4に示す。但し、送信開口制御の有無で送信出力エネルギー強度が異なるため、受信信号強度は規格化して表示している。実験結果から、送信開口制御を実施しない場合(図4左)は、HIFUビームの焦点および経路が不明瞭であるが、送信開口制御を実施した場合(図4右)は、HIFUビームの焦点および経路が明瞭となった。

本研究では、散乱分布は均一であると想定していたが、実際には、散乱体の微小なスペckルパターンが確認された。これは、散乱体間隔が波長幅(~1mm)よりも小さいために生じると考えられる。さらに、撮像面内で伝播方向と垂直な方向(アジマス方向)に受信信号が1~2mm程度だけ横伸びしていることが確認された。これは、使用した受信振動子のアジマス方向の分解能が低いために生じると考えられ、今後は受信分解能を上げる工夫が必要であることが分かった。

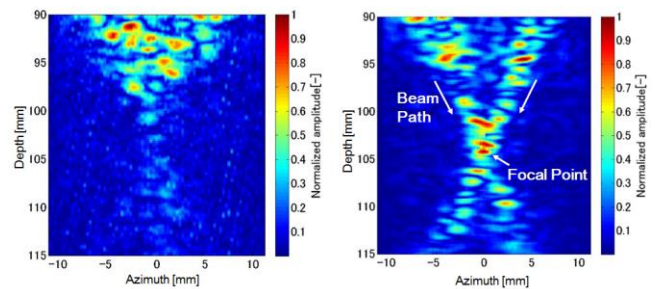


図4 焦点領域でのHBIの描出結果。左: 送信開口制御を実施しない場合。右: 送信開口制御を実施した場合。

5. 結論

本研究では、散乱均一な生体ファントムを用いて、HIFU送信出力開口幅を撮像面と垂直なエレベーション方向に狭め、焦点領域でのHIFUビーム幅を広げることで、HIFUビームの焦点の視認性が向上することを実験的に評価し、その有効性を確かめることができた。

謝辞

本研究は、文部科学省科学技術振興費によるシステム疾患生命科学による先端医療技術開発拠点(TSMBI)による御支援を賜りました。

参考文献

(1) Dubinsky, Theodore J., Carlos Cuevas, Manjiri K. Dighe, Orpheus Kolokythas, and Joo Ha Hwang. "High-intensity focused ultrasound: current potential and oncologic applications" American journal of roentgenology 190, no. 1 (2008): 191-199

(2) K. Fujiwara, H. Takeuchi, K. Itani, K. Yoshinaka, A. Sasaki, T. Azuma, I. Sakuma, Y. Matsumoto. "Real Time HIFU Beam Imaging" Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 32 (2011) pp. 583-584