

位相共役法による集束超音波音源の振動解析：ラム波の影響
Vibration Analysis of High Intensity Focused Ultrasound Source using Time Reversal:
Effects of Lamb Waves

金島泰浩[‡], 吉澤晋, 梅村晋一郎 (東北大)
Yasuhiro Kaneshima[‡], Shin Yoshizawa and Shin-ichiro Umemura (Tohoku Univ.)

In HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) therapy, ultrasound is focused on target tissue for coagulation. This method is attracting attention as noninvasive therapeutic modality, and being researched widely from basic study to clinical application. Accurate measurement of the ultrasound pressure field is very important in the research areas of HIFU such as biological effects and ultrasound devices. In this study, we reconstructed the distribution of sound source vibration using Time Reversal and investigated the effects of Lamb waves. In the two-dimensional Fourier transform of the sound source vibration in both time and space domain, we found a peak with a finite phase velocity, which may corresponds to Lamb waves propagating from the edge toward the center of the circular transducer.

1. はじめに

強力集束超音波 (High Intensity Focused Ultrasound; HIFU)による治療法は、対象部位に超音波エネルギーを集束させ、患部の生体組織を加熱凝固し壊死させる。この治療法は低侵襲な治療法として着目されており、基礎から臨床応用まで幅広く研究されている^[1]。HIFUに関する研究のうち、音源が作る超音波音場の正確な測定は、生体作用の研究や装置の性能評価の基本的事項として極めて重要である。

本研究では、超音波音源である球面状圧電トランスデューサの振動分布を1次元音場分布のTime Reversalによって再現し(音響ホログラフィ^[2])、振動分布におけるLamb波伝搬モード^[3]の影響についての解析を行った。

2. 実験手法

2.1 実験系

本研究において、音場は各点音源が発生する音圧の重ね合わせにより表現できると仮定する。音場分布の測定は、水中のトランスデューサから超音波を発生させ、伝搬方向に対して垂直方向の焦点近傍±10.0 mmの範囲をハイドロフォン (HGL-0085 (ONDA 社)) で走査することにより行った。測定時の幾何条件についてFig. 1に、測定時のパラメータについてTable 1、Table 2に示す。なお、このとき測定した音圧の最大値は0.38 MPa_{p-p}であった。

2.2 位相共役法による音源振動の算出

2.1の実験により得られた、ある測定点(焦点からの距離 r)における音圧の時系列データを共振周波数でフーリエ積分することにより、送信号との位相差、および振幅値を算出した。このときの複素データ $p(r,t)$ は式(1)のように表わされる。

次に、式(2)のように $p(r,t)$ を位相反転し、測定平面から音源方向に再放射させることによって凹面トランスデューサ半径方向 (y 方向)

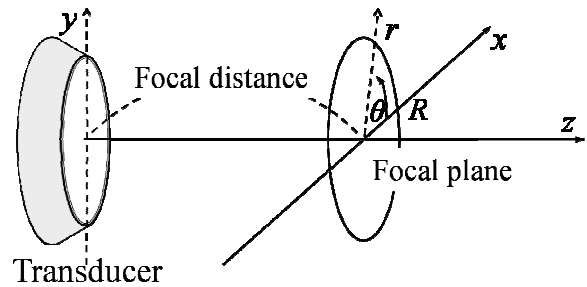


Fig. 1 Geometry of experiment

Table 1 Parameters of transducer

Resonant frequency	3.46 MHz
Aperture	24.6 mm
Electrode diameter	20 mm
Focal distance	24 mm

Table 2 Parameters of measurement

Scanning width (vertical direction)	50 μm
Measurement number	401

の振動分布 $v(y,t)$ を算出した。ここで $d(x,y,z)$ はトランスデューサ表面上の任意の点から測定点までの距離である。

$$p(r,t) = A(r)e^{i\{\omega t + \phi(r)\}} \quad (1)$$

$$v(y,t) = \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{A(r)}{d(x,y,z)} e^{i\{\omega(t - \frac{d(x,y,z)}{c}) - \phi(r)\}} r dr d\theta \quad (2)$$

2.3 二次元フーリエ変換による振動解析

前項で求めた音源振動分布 $v(y,t)$ の時系列データについて、式(3)に示すように二次元フーリエ変換を行い、これにより音源振動分布の時間、空間方向の周波数領域でのスペクトル解析を行った。ここで k 、 n はそれぞれ空間方向、時間方向の周波数に対応する。

$$V(k,n) = \int_0^Y \int_{-T/2}^{T/2} v(y,t) e^{-j\omega_k y} e^{-j\omega_n t} dy dt \quad (3)$$

[‡] kane@ecei.tohoku.ac.jp

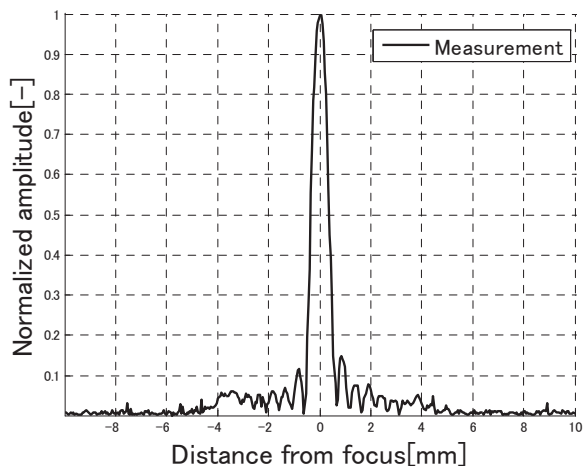


Fig. 2 Amplitude of focal plane

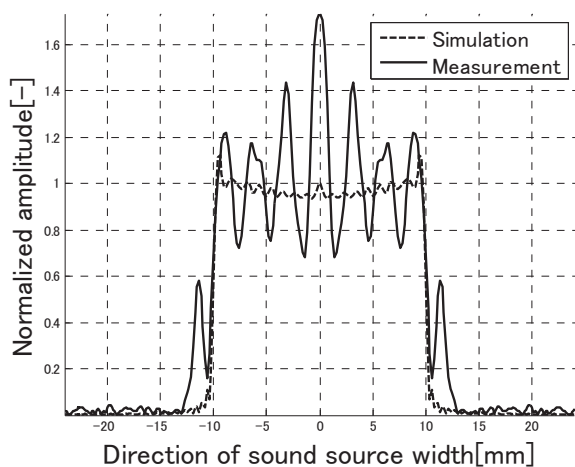


Fig. 3 Amplitude of sound source

3. 実験結果・考察

以下に実測値に基づく解析結果と線形近似に基づく数値シミュレーションとの比較結果について示す。なお、数値シミュレーションでは、音源は厚み方向に均一振動をしていると仮定して計算を行った。

まず、2.2 で得られた方位方向の音場の振幅分布を Fig. 2 に、音源振動の振幅分布を Fig. 3 に示す。また、Fig. 2、Fig. 3 とともに振幅値は正規化した。Fig. 3 において、実測値から算出した音源振動は同振幅振動をしていないことが分かる。これは振動子の半径方向を伝搬する Lamb 波などの発生に起因するものと考えられる。

次に、上述の音源振動分布の時系列データの二次元フーリエ変換の、シミュレーション、および実験結果について振幅スペクトルをとったものをそれぞれ Fig. 4、Fig. 5 に示す。Fig. 4 において、実測値による振幅スペクトルの空間方向に、シミュレーション結果に見られないピークが発生することが分かる。ピークの生じた位置が空間方向に対し非対称であることから、一方向のみに伝搬する波であることが推測でき、Lamb 波の存在を伺うことができる。

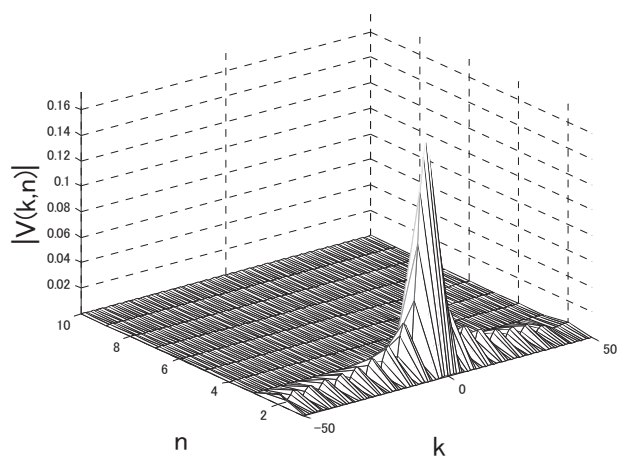


Fig. 4 FFT spectrum of simulation data

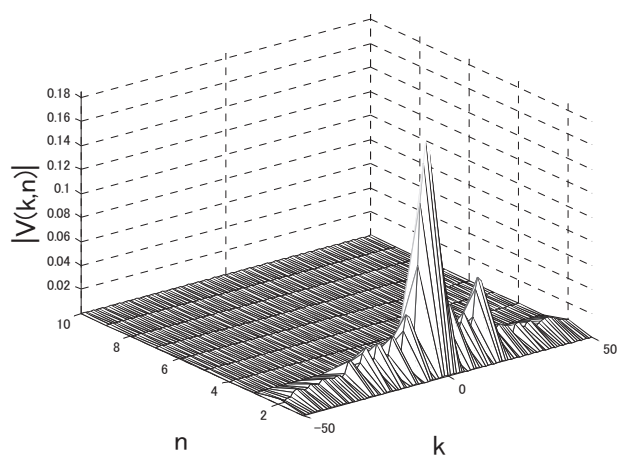


Fig. 5 FFT spectrum of experimental data

今後はこのピークのみを抽出して逆フーリエ変換を行うことによって、Lamb 波の振動分布を算出し、さらにこの Lamb 波振動モード分を差し引いた音源振動を音源の初期条件として設定し、仮想的に測定面方向に再放射を行うことにより、Lamb 波の音場分布への影響の解析を行う必要がある。

4. おわりに

HIFU の性能評価の一事例として、測定結果の位相反転による凹面音源振動分布の算出、また振動分布の時系列データの二次元フーリエ変換による伝搬モードの解析を行った。

それによって、実測値による振幅スペクトルの空間方向に、シミュレーション結果には存在しなかった、Lamb 波に起因すると考えられるピークが生じることが確認できた。

参考文献

1. Umemura *et al.*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Contro., vol. 52, 1690-1698, 2005
2. O. A. Sapozhnikov, Yu. A. Pishchal'nikov, and A. V. Morozov: Acoustical Physics **49** (2003) 354.
3. J. E. Hyslop and G. Hayward: IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM (1999) 577.