

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20700418  
 研究課題名（和文）MRIを用いた生体内超音波音場可視化技術の開発  
 研究課題名（英文）Development of a MRI-based Technique for Visualizing Ultrasound Field in Biological Tissue

## 研究代表者

新田 尚隆（NITTA NAOTAKA）

独立行政法人産業技術総合研究所・人間福祉医工学研究部門・研究員

研究者番号：60392643

## 研究成果の概要（和文）：

これまで超音波音場の計測はハイドロホンや光学的手法を用いた水中計測に限られ、超音波診断及び治療技術の高精度化にとって重要な生体内での超音波音場の計測方法としては、有効な手段がなかった。そこで本研究では、MRIを用い無侵襲で生体内超音波音場を可視化するための技術開発を行った。音場可視化のために音響放射力による微小変位をMRIにて計測することとし、鮮明な音場分布が得られるようMRI撮像パルスシーケンスやMR信号処理方式を検討した。計算機シミュレーション及びファントム実験を行った結果、MR画像上で媒体中の超音波音場が可視化できることが示された。

## 研究成果の概要（英文）：

So far, ultrasound field measurements have been conducted by using a hydrophone or optical method in only water. Although the measurement of ultrasound field in a biological tissue is important for improving accuracy in the ultrasound diagnosis and therapy, there was no effective method for such measurement technique. Therefore, a MRI-based technique for visualizing the ultrasound field in the biological tissue was developed in this study. In order to visualize the ultrasound field, minute displacements in a medium, which is induced by applying the acoustic radiation force with safety ultrasound intensity, were measured by using a MR imager. In order to obtain clear images of ultrasound field, pulse sequence for acquiring MR images and signal processing method of MR signals were investigated. Results of numerical simulation and phantom experiment revealed that the ultrasound field in the medium can be visualized on the acquired and processed MR images.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：医用生体工学

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：超音波，音場，可視化，磁気共鳴イメージング

### 1. 研究開始当初の背景

超音波医学分野において、探触子により形成される音場を把握することは、アレイ探触子の設計や、超音波画像の空間分解能評価及びアーチファクトの理解にとって非常に重要である。従来、超音波音場の計測は理想的な環境下に限られ、水中でハイドロホンや光学的手法などが用いられてきた。しかしながら、ハイドロホンは無侵襲的な体内使用が難しく、また経皮的な入射光は生体深部まで到達しないため、生体内音場の無侵襲的観察は非常に困難であった。

### 2. 研究の目的

生体内では、回折や屈折、組織の音速差などの影響により、水中計測で予見された超音波音場とは異なる分布を呈する。従って、生体内での超音波音場が無侵襲で捉えられれば、それをフィードバックして開口合成時の位相歪み補正や、集束超音波治療における焼灼域の高精度化、アーチファクトの影響を除去した超音波イメージングの高精細化など、超音波医学全般に寄与することが期待される。そこで本研究では、ハイドロホンや光学的手法に代わってMRIを用い、生体組織内部における超音波音場の可視化技術確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

これまでの音響放射力変位のMR検出法（平成18-19年度科学研究費補助金若手研究(B)、課題番号：18700450、研究課題名：超音波加振によるMRマイクロエラストグラフィ技術の開発）の成果を応用し、局所的な音響放射力変位を捉えて超音波音場を可視化するためのMRI撮像におけるパルスシーケンス及びデータ処理方法を検討する。超音波音場可視化の基礎となる音響放射力による微小変位をMRIで計測するためには、微弱なMR信号の変化が高感度で捉えられることを確認する必要がある。検出可能な微小変位の大きさについても見積もり、超音波強度調整により有効音場内全てを検出可能変位にするための基礎データを得るため、まず実際のMRI撮像におけるパルスシーケンスを忠実に模擬した計算機シミュレーションを行い、本手法の実現可能性を検証する。さらにファントム（生体擬似材料）を対象として、超音波音場可視化の可能性について実験的検証を行う。MRI装置としては現有の動

物実験用MRI装置を用いる。計算機シミュレーション及びファントム実験結果をもとに、MRI撮像におけるパルスシーケンスやMR信号処理方式の改善を行うことで音場分布画像の鮮明化が図れるかどうかについて検討を行い、最適な超音波音場可視化アルゴリズムを構築する。

### 4. 研究成果

超音波音場可視化技術の開発にあたり、音響放射力による微小変位をMRIで捉えるためには、微弱なMR信号の変化が高感度で捉えられる必要がある。実際のMR信号にはノイズが含まれるため、捕捉されるMR信号のSNRを変化させ、計算機シミュレーションにより本手法の実現可能性を検討した。図1にシミュレーションモデルを示す。直径20mm、長さ60mmの円筒形モデル底面に直径5mmの円筒型超音波プローブ（中心周波数5MHz）を配置し、音響放射力を生じ得る強度で連続波送信を行いながらSE法による冠状断面撮像を行う状況を想定した（ $f_c: 42.58 \text{ MHz/T}$ 、 $B_0: 2.0 \text{ T}$ 、 $G_x: 100 \text{ mT/m}$ 、 $FOV: 80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 、 $\text{matrix}: 128 \times 128$ 、 $1 \text{ pixel} = 0.625 \text{ mm}$ ）。微小変位に対する検出能を評価するため、モデル内部に加わる音響放射力変位はプローブ表面で $0.1 \mu\text{m}$ 、深部ほど線形に減少して底面で $0 \mu\text{m}$ になるように設定した（図2）。さらにシミュレーションにより得られたエコー信号に対して $\text{SNR}=40 \text{ dB}$ 及び $30 \text{ dB}$ となるノイズを加えた。

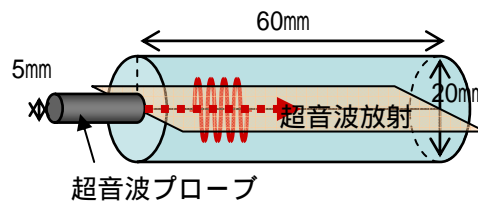


図1：シミュレーションモデル

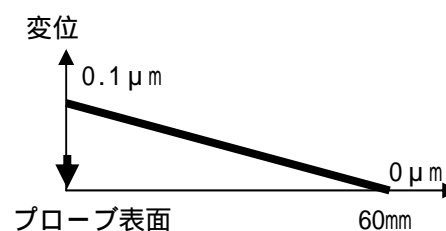


図2：変位プロファイル

このようなノイズを抑制するためには、通常 MR 画像において加算平均処理がなされるが、その分撮像時間が長時間となってしまふ。本法の場合、撮像中に超音波照射を続けて行うため、長時間の撮像時間は避ける必要がある。そのため、SNR を向上させるための MR 信号処理法として以下のような手段を採用した。まず音響放射力印加前後の 2 枚の MRI 画像を得た。次に音響放射力印加前後の MR 画像間において複素相関関数を算出し、その実部と虚部各々に対して局所平滑化処理を施した後、位相成分を算出してこれを変位に換算した。カーネルサイズ 0x0(局所平滑化なし) 3x3、5x5 pixel 各々に対する変位検出を行った結果を図 3 に示す。図 3(a) は SNR=40 dB のとき、図 3(b) は SNR=30 dB のときの結果である。SNR が低く、音場を確認できない図 3(b) の 0x0 の場合でもカーネルサイズを大きくすることで微小変位の検出が可能であることが示された。

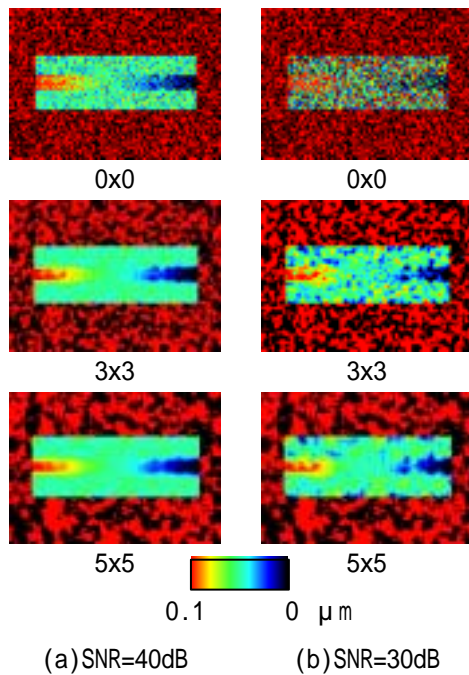


図 3：音場検出結果

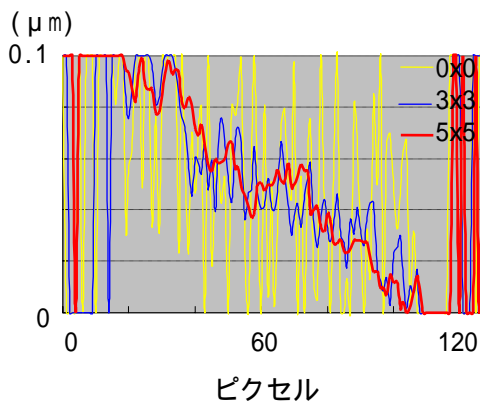


図 4：中心軸上の変位 (SNR=30dB)

図 4 は、SNR=30dB のときにおいて、音場の中心軸上プロファイルを示した結果である。5x5 のカーネルにおいて 0.1  $\mu\text{m}$  の微小変位に対しても著しい安定化が図られた。

図 5 はカーネルサイズによる誤差評価を行った結果である。SNR が低い場合においてもカーネルサイズをより大きく調整することにより変位推定分散は大幅に低下していることが確認された。RMSE による比較では 3x3 は 0x0 の 33%に、5x5 は 0x0 の 19%にそれぞれ大幅に低下し、変位検出の安定化が可能であった。

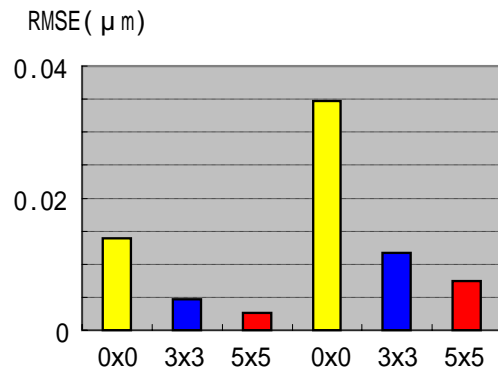


図 5：誤差評価

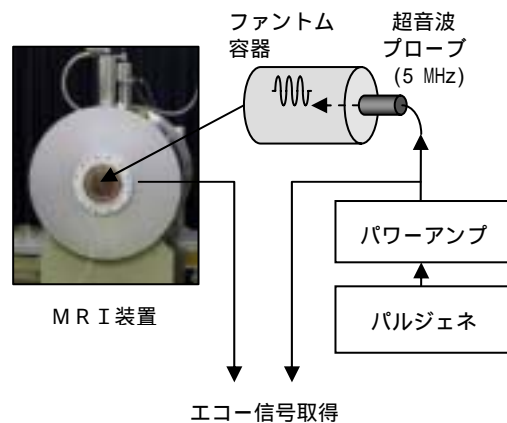


図 6：実験セットアップ

次にファントムを計測対象とした実験的検証を行った。実験セットアップを図 6 に示す。MRI 装置としては、現有の動物実験用 MRI 装置 (Bruker、BIOSPEC 20/30、2 Tesla) を用いた。MRI ガントリー内にファントム入り円筒容器 (直径 40mm、長さ 100mm、PP 製) を配置し、超音波プローブを接触させ、内部へ超音波放射を行いながら撮像を試みた。ファントムとしては、寒天ファントムや脱気済み純粋ファントムを計測対象とした。また駆動周波数は、1MHz、2.25MHz、3.5MHz、5MHz とした。この際、超音波照射タイミングはゲート

信号発生器にて調整し、超音波振動によるプロトンの空間変位を反映した MR 信号の SNR を改善には 2 位相ロックインアンプの適用を試みた。取得したエコー信号に対し、MR 画像の再構成による音場の画像化を試みた。代表的な結果を図 7 に示す。図 7 は純水中に 5MHz の超音波を連続波送信したときの MR 撮像画像である。

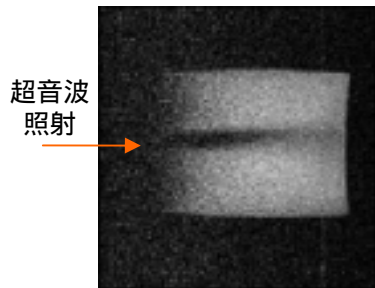
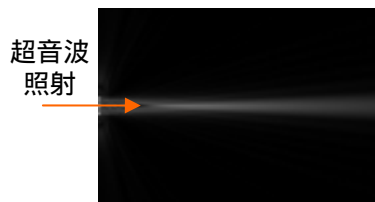
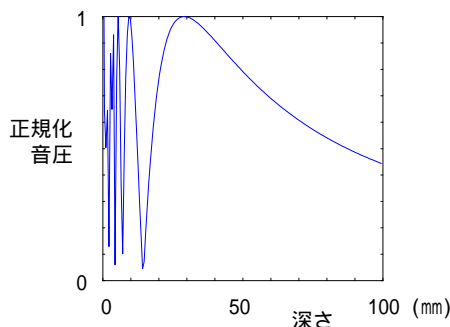


図 7：超音波照射時の MR 画像例



(a) 超音波ビーム領域



(b) 中心軸上の音場

図 8：理論的な音場分布

比較のために、計算によって求めた理論的な音場分布を図 8 に示す。図 7 と図 8(a) との比較から、濃淡については逆となるが、図 7 は理論的な音場パターンとよく相関するコントラストを持つ MR 画像が得られたことを示している。図 8(b) は中心軸上の音場を示し、深さ 30mm 付近から遠距離音場に変化していることを示すが、このときの音圧のパターンもまた図 7 の濃淡とよく相関しており、音圧が高い部分でより黒く、音圧の低下に伴い徐々に白く変化している。さらに空間的に不均質な音響特性を持つ媒体として、PVDC 薄膜を入れた純水ファントムに対する撮像実験

でも、薄膜での反射が MR 画像上において明瞭に画像化されることを確認した。以上の計算機シミュレーション及び実験の検討から、計測対象が容器内に限られており従来のハイドロホンや光学的手法の適用が困難な場合であっても、本手法は媒体内の音場分布を可視化し得ることが示された。今後は、より実際の生体条件に近い状況下で本手法の適用可能性を検証してゆく。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### 〔雑誌論文〕(計 4 件)

新田尚隆、本間一弘：MRI による超音波音場可視化に向けた音響放射力変位検出の安定化，日本磁気共鳴医学会雑誌，査読無，Vol.29，2009 年，410.

新田尚隆、本間一弘：MRI と超音波技術の融合，超音波医学，査読無，Vol.36，2009 年，121.

新田尚隆、本間一弘：MRI を用いた音響放射力変位検出に基づく超音波音場可視化の検討，日本磁気共鳴医学会雑誌，査読無，Vol.28，2008 年，389.

新田尚隆、本間一弘：MRI を用いた生体内超音波伝搬検出の基礎検討，超音波医学，査読無，Vol.35，2008 年，281.

### 〔学会発表〕(計 4 件)

新田尚隆：MRI による超音波音場可視化に向けた音響放射力変位検出の安定化，第 37 回日本磁気共鳴医学会大会，2009 年 10 月 2 日，パンパシフィック横浜ベイホテル東急（横浜）

新田尚隆：MRI と超音波技術の融合，第 82 回日本超音波医学会学術集会，2009 年 5 月 22 日，東京国際フォーラム（東京）

新田尚隆：MRI を用いた音響放射力変位検出に基づく超音波音場可視化の検討，第 36 回日本磁気共鳴医学会大会，2008 年 9 月 12 日，旭川市民文化会館（旭川）

新田尚隆：MRI を用いた生体内超音波伝搬検出の基礎検討，第 81 回日本超音波医学会学術集会，2008 年 5 月 23 日，神戸国際展示場（神戸）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新田 尚隆 (NITTA NAOTAKA)

独立行政法人産業技術総合研究所・人間福祉医工学研究部門・研究員

研究者番号：60392643

### (2) 研究分担者：なし

### (3) 連携研究者：なし