

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500429

研究課題名（和文） カテーテル型超音波プローブ開発のための複合音響レンズの開発

研究課題名（英文） Development of acoustical lens for catheter ultrasonic probe

研究代表者

遠藤 信行 (ENDO H NOBUYUKI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：20016801

研究成果の概要（和文）：

診断用だけでなく治療に応用するためのカテーテル型超音波医用装置を開発するためには、広帯域な周波数特性を持つ音波を効率よく放射・収束する音響レンズを開発する必要がある。そこでサイズを大きくした複合型音響レンズを試作し、レンズ収束特性と理論値を比べた結果、高画質の映像が得られる見通しを得た。次に実現時の10倍の大きさ（スケールファクター10： $f=10\text{MH}$ , 4mm 径）の単レンズを設計試作し、音場特性を精密に測定した。この結果、微小カテーテル型超音波プローブ開発のための資料を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Acoustic lens has the possibility of improvement of acoustic characteristic of transducer not only in underwater application but also in medical application. The authors researched about the development of suitable acoustic designing method for catheter ultrasonic lens. A large acoustic lens composed of three-elements was firstly fabricated for underwater application. Specified acoustic lenses were basically designed by commercial available optical lens designing program. A 2D or 3D Finite Differential Time Domain (FDTD) method was used for wave-theoretical verification of acoustic characteristic of lenses in advance of fabrication. We can obtain fine images in water. In the second phase, the single midsize lens of 40mm whose scale factor was 10 was fabricated for catheter probe. The acoustic property was measured not only on normal incidence but also on oblique incidence. Calculated results agreed well with experimental results. We could obtain the acknowledges about lens designing method for catheter ultrasonic probe lens.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：超音波応用計測

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：超音波医科学、音響レンズ、超音波、数値計算、カテーテル

## 1. 研究開始当初の背景

超音波は生体に悪影響を及ぼさないクリーンな手法として医療診断によく用いられる

ようになった。さらに、「超音波造影断層像方法」や「ハーモニックイメージング法」ばかりでなく、超音波エネルギーによる癌細胞

の焼滅を目的とした「超音波ハイパーサーミア」や薬液を含んだマイクロバブルを使用する「超音波による選択的ドラッグデリバリー」など続々新しい診断・治療技術が開発されている。

一方、医用技術の精細化・微細化に伴い、超音波医学分野でも微小病変部位を精度良く観測あるいは治療するための新技術が必要とされている。そこで、微細なカテーテル型超音波プローブを用いる診断・治療用装置が開発されれば大変有益であると考えた。このような微細な診断・治療用超音波装置を開発するためには、効率よく超音波を送受信する微細プローブの開発が一番重要となる。それというのも送受信信号を扱う各種電子回路、ならびに電子信号処理等は、現在の技術でほぼ対応できるからである。

## 2. 研究の目的

### (1) 治療応用

微小面積のカテーテル型プローブの音響パワーを音響レンズで収束すれば、目的とする微小部位の組織内温度を上昇させることが出来る。昨年度までに申請者らの開発した **FDTD-HCE** 法によるシミュレーション法によれば、音響レンズを接着した微小プローブにより組織内温度を 40 度程度上げることが簡単にできることが予測された。さらに、人体とほぼ同じ吸収係数を持つ寒天ファントムを用いた比較実験により、ほぼシミュレーションと一致する実験結果を確認した。

しかしながら、生体組織内部で音波を収束させる場合には、複数の音響レンズが必要となることが予測された。すなわち、音響レンズ・電子走査の複合システムにおいて、1 枚の音響レンズだけでは、あらゆる状況において所望の特性を得ることが難しく、複数枚のレンズから構成されたプローブが必要となる。もしこのような微細プローブが構成できれば、電子回路を簡素化でき大変安価にシステムを構築出来る。

### (2) 診断応用

現在の 3 次元超音波診断装置は、2 次元アレー型プローブのビームを電子走査して 3 次元像を構成している。このために、解像度を通常の診断装置と同じにするには 16,000 チャネル程度のプローブが必要である。このような大型のプローブは、カテーテル型には到底適用できない。その上、画面のチラツキを無くすためにはパルス繰り返し周波数を高くする必要があり、音響学的なパワーの増大に伴う温度上昇による組織障害が懸念される。そこで、一回の送波で全空間からの反射データを収束し、再生像を合成する方法が報告されている。遠藤らもアレー型受波器を使用した開口合成超音波映像法によるスポン

ジ像について、1979 年の WFUMB で報告している (M.Okujima and N.Endoh, "Acoustic imaging using impulsive sound", *Ultrasound in Medicine and Biology* (Excerpta Medica, Amsterdam) pp.19-24 (1980) 最近、奈良先端科技大学の千原らも同様なアイデアの映像法を報告しているが、ノイズの影響が深刻となり、これを克服する画期的な方法は報告されていない。

一方、携帯電話内臓カメラに代表されるように、空気中のカメラは劇的に小型化されている。そこで光学系の長所を取り入れた、音響レンズと簡単な電子走査型プローブを用いる実時間映像法を考えた。良く知られたようにレンズは優秀なフーリエ変換素子であり、ビームを走査する必要がないから、音響レンズと簡単な 2 次元アレー型感圧素子のみを用いて高速 3 次元映像装置が実現できる。このような音響レンズの研究もいくつか報告されているが、レンズ径が波長の 10 倍程度の口径の微小音響レンズを複数枚用いたシステムの研究はない。

### (3) 共通項目

波長の 10,000 倍程度の大口徑である光学レンズで用いられる Ray 理論が厳密に適用できない小口径音響レンズ領域では、波動理論による厳密な解析が必要となる。遠藤らはこのような波動論的音波伝搬解析法について多数報告している。例えば、PE 法を用いた音波伝搬解析に関する論文の新規性・正確性に関し、海洋音響学会論文賞を受賞した。(土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行; "ダグラス・スキームを用いた方物型方程式法による浅海音波伝搬数値解析" 海洋音響学会誌, 27 巻 3 号, pp.39-45, (2000)

このような厳密な理論解析により設計された、音響レンズを用いた微細カテーテル型診断・治療用装置の研究は報告されていない。

## 3. 研究の方法

診断用だけでなく治療に応用するためのカテーテル型超音波医用装置を開発するためには、短いパルスを効率よく収束することが可能な微細超音波送受信用探触子を開発する必要がある。この目的のために、広帯域な周波数特性を持つ音波を効率よく収束する音響レンズを設計し、その特性を計測する。

治療応用では焼結に必要な温度上昇が必要であるから、距離方向の収差を消して、焦点での音響パワーを高くして大きな温度上昇を実現する設計を行う。さらに、生体臓器面との接触が良くなるような外形が必要となるので、接着の良い音響レンズ表面を開発する。

これらの設計計算に、筆者らの開発してい

る並列型計算処理の最適化を行う。

最適設計した音響レンズをアクリル材で製作する。まず1枚の単レンズ構成とし、そ複合レンズ設計のためのノウハウを得る。なお設計した音響レンズの試作に関しては、レンズメーカーとの共同制作の約束が成立している。この際、超音波の中心周波数を1MHzとして、レンズ直径を40mmとする。このレンズを恒温水槽中に設置し、現有する任意波形発振器と広帯域パワーアンプ、さらに広帯域ハイドロフォンや測定精度50ミクロンの3次元精密移動装置により精密音場測定を行う。

#### 4. 研究成果

平成 20 年度は、

##### (1) 中型複合音響レンズの設計製作

従来の経験から、すぐに高性能の微小複合型音響レンズを設計・製作することは困難と予想される。そこで基礎研究として、すでに設計試作してあった3枚構成で直径30cmの中型超音波複合音響レンズの音響特性の検討をおこなった。試作レンズを構成する各レンズ素子の音響特性を水槽中で測定し、シミュレーション計算との比較検討を行った。この際、音場のシミュレーション計算を行うために、下記の計算法の開発をした。

① FDTD 法における3次元音場並列型計算処理演算法の開発

② PE 法による3次元音場ならびに実波形計算法の開発

③ 本科研費で購入したPCクラスターを使用した数値計算

これらの結果から、波動理論による数値シミュレーションと実測値は良く一致することがわかり、微小複合音響レンズの設計に関する基礎資料を得ることができた。

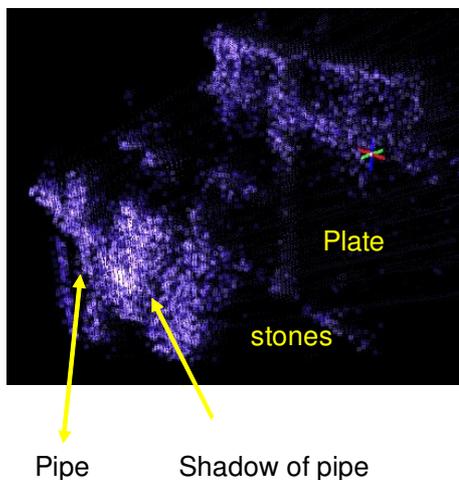


図1 大複合音響レンズによる水中物体像

また、この中型複合レンズ設計法に基づいて、“大複合型音響レンズを用いる水中映像装置開発の共同研究”を行っている研究協力が者がアクリル材で大型レンズを試作した。さらに、水槽実験による映像取得を行った。図1に示す水中実験時の映像写真のように、高精度の画像を習得できることが分かった。

平成 21 年度は、高精度の複合レンズを設計するために、光学設計ソフトで設計した1枚構成の音響レンズに関し検討した

(1) 中心周波数1MHz、直径40mm(実際使用時の1/10程度)の音響レンズを試作した。



図2 試作単レンズと音響遮蔽板

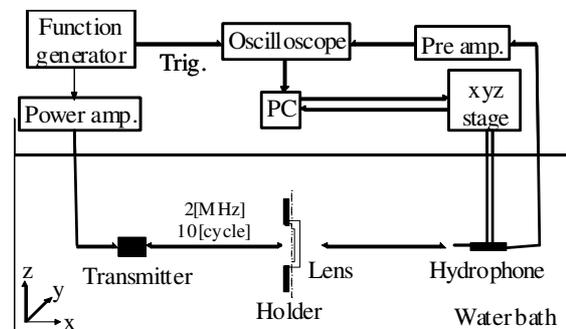


図3 音響特性測定のための実験装置のブロック

(2) このレンズの波動理論による精密音場解析を行った。

(3) 広帯域ハイドロフォンと測定精度50ミクロンの3次元精密移動装置を使用して、試作レンズの精密音場測定を行った。これらの結果から、波動理論と実測値は良く一致することがわかった。

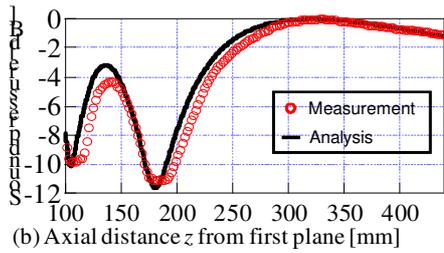


図 4 レンズ中心軸上の音圧分布

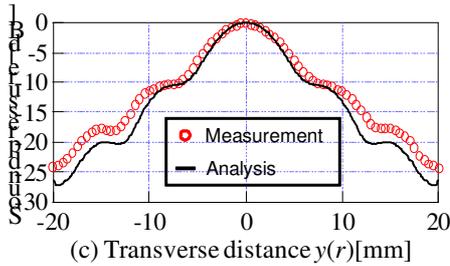


図 5 焦点でのレンズに平行な面内の音圧分布

(4) 計算量低減のための新しい音場の音圧分布シミュレーション法の開発

1枚のレンズの音場を計算する場合でも、3次元計算を行うと、計算時間が大変長くなる。そこで音響レンズの対称性に着目し、対称円筒座標系による新しい計算アルゴリズムを開発し、計算時間の大幅なる短縮を実現した。さらに、入射音波を実測し、この音波がレンズに入射するとした「仮想音源の考え」を導入し、2次元計算でも3次元計算法と同じ精度となる計算法を開発した。

さらに、試作した単レンズを恒温水槽中に設置し、任意波形発振器と広帯域パワーアンプ、さらに広帯域ハイドロフォンや測定精度50ミクロンの3次元精密移動装置により、精密音場測定を行った。音場分布の数値シミュレーション結果は、実測値とよく一致した。

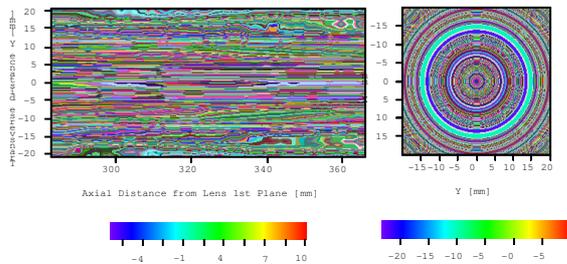


図 6 対称円筒座標系を用いた音響レンズの音場分布の計算結果

平成22年度の研究成果を以下に示す。

(1) ファントム内温度上昇の精密測定

複合型音響レンズを用いるプローブを診断だけでなく、治療に応用する場合、超音波照射による生体内温度上昇を予測することは重要である。そこで、生体軟部組織を模擬した寒天ファントム (JIS 規格) 内の温度分布のシミュレーション予測とファントム以内に設置した熱電対ならびに、サーモメーターによる実測値との比較検討を行った。実測値は推定値とほぼ一致した。

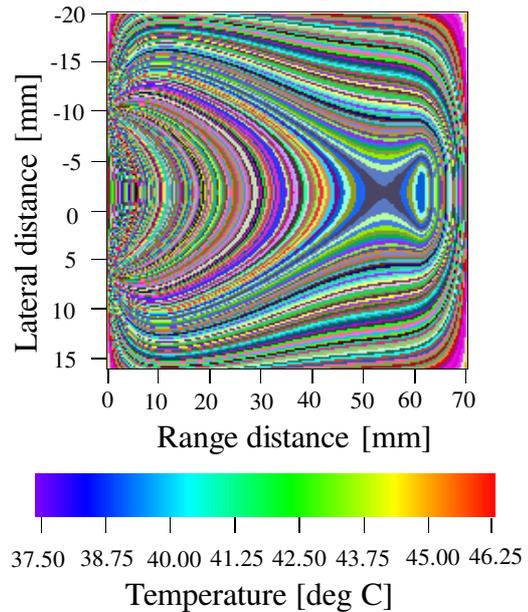


図 7 軟部生体ファントム内の温度上昇シミュレーション結果

(2) 研究経過の海外学会発表

日本における超音波研究者の集まりである「日本超音波医学会」や「超音波の基礎と応用に関するシンポジウム」等において研究成果を発表した。さらに、日本国内では当該領域の研究者が少ないため、前年度結果を含めた研究経過を海外学会で発表し、同じ専門分野の研究者と討論した。

## 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 5 件)

- ① S.Matsumoto, N.Takeyama, T.Tsuchiya, and N.Endoh, “Imaging Performance Evaluation Method of Wide-View Underwater Acoustic Lens by Geometrical Skew Ray Analysis,” Jpn.J.Apl.Phys., 査読有, 49-7B-07HG02, 2010, (4pages)
- ② T.Tsuchiya, S.Matsumoto, T.Anada and N.Endoh, “Numerical Analysis of Pulse Wave Propagation in Lutzow-Holm Bay of the Antarctic Ocean Calculated by the Parabolic Equation Method”, Jpn.J.Apl.Phys., 査読有, 49-7B-07HG14, 2010, (4pages)
- ③ K.Mori, H.Ogasawara, T.Nakamura, T.Tsuchiya, and N.Endoh, “Numerical Simulation of Target Range Estimation Using Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens,” Jpn.J.Apl.Phys., 査読有, 49-7B-07HG1, 2010, (8pages)
- ③ T. Tsuchiya, S. Matsumoto, F. Naitou, Mari Takahashi, and N. Endoh, “Comparison of Sound Pressure Distribution Determined by Numerical Analysis and Scaled-Up Experiment for Small Ultrasonic Probe with Lens”, Jpn.J.Apl.Phys., 査読有, 48-7B-07GK10, 2009, (5pages)
- ④ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Y. Sato, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Evaluating Directional Resolution of Aplanatic Acoustic Lens for Designing Ambient Noise Imaging System”, Jpn.J.Apl.Phys., 査読有, 48-7B-07GL5, 2009, (5Pages)
- ⑤ 土屋健伸, 松本さゆり, 高橋茉里, 穴田哲夫, 遠藤信行, “放物型方程式法に基づく海洋音波伝搬解析手法の開発”, 海洋音響学会誌, 査読有, **35**(4), 2008, PP.255-267

[学会発表] (計 16 件)

- ① N.Endoh, T.Tsuchiya, and K.Mori, “Acoustic Lens Designing for Underwater and Medical Application, Proc. of Joint Conference on Acoustics 2011 (Acoust. Soc.of Korea Yongunan Chapter/Acoust. Soc.of Japan Kyushu Chapter), 22 Jan. 2011, Kumamoto University, Kumamoto, Japan
- ② T.Tsuchiya, and N.Endoh, “Underwater Sound Propagation near Showa-Base in Antarctic Ocean, Proc. of Joint Conference on Acoustics 2011 (Acoust. Soc.of Korea Yongunan Chapter/Acoust. Soc.of Japan Kyushu Chapter), 22 Jan. 2011, Kumamoto University, Kumamoto, Japan
- ③ N.Endoh, T.Tsuchiya, & K.Mori, “Sound pressure analysis and experiment of small

ultrasonic lens, Proc. of 20th International Congress on Acoustics, 25 Aug. 2010, Sydney, Australia

- ④ T.Tsuchiya, N.Endoh, “Numerical Analysis of Propagated Pulse Wave in Lützow-Holm Bay of the Antarctic Ocean Calculated by the Parabolic Equation Method,” Proc. of 10th European Conference on Underwater Acoustics, 7 Jul. 2010, Istanbul, Turkey
- ⑤ S.Matsumoto, T.Tsuchiya, N.Endoh et.al., “Development of four-dimension wide view imaging and surveying system”, Proc. of 10th European Conference on Underwater Acoustics 7 Jul. 2010, Istanbul, Turkey
- ⑥ K.Mori, H.Kada, H.Ogasawara, T.Nakamura, T.Tsuchiya, N.Endoh, “Preliminary results of biological transient noise observation at Hashirimizu Port in Tokyo Bay”, Proc. of 10th European Conference on Underwater Acoustics, 7 Jul. 2010, Istanbul, Turkey
- ⑦ 土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行 PE 法を用いた南極海リュツォ・ホルム湾におけるパルス波の伝搬特性, 電子情報通信学会技術研究報告, US2009-32, 2009年8月28日, pp.17-20, 海洋開発機構, 東京
- ⑧ N.Endoh, T.Tsuchiya, T.Mari and T.Anada, “Simulation and experiment on convergence characteristics of small underwater acoustic lens”, Proc. of Underwater Acoustic Measurement and Results 2009, 23 Jun 2009, pp.1361-1369, Nafplion, Greece
- ⑨ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Y. Sato, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Reduced Scale Experiment of Aplanatic Acoustic Lens for Designing Ambient Noise Imaging System”, Proc. of Underwater Acoustic Measurement and Results 2009, 23, Jun 2009, pp.1379-1384, Nafplion, Greece
- ⑩ 土屋健伸, 松本さゆり, 高橋茉里, 遠藤信行, “微小超音波プローブ用音響レンズの基礎特性の測定と解析”, 日本超音波医学会第82回学術集会, 2009年5月22日, 東京国際フォーラム, 東京
- ⑪ 進雄一, 松本さゆり(港空研), 内藤貴史, 土屋健伸, 武山芸英(ジェネシア), 遠藤信行, “水中音響レンズの収束特性の精密計測”, 日本音響学会講演論文集, 2008年9月12日, 九州大学, 福岡
- ⑫ 松本さゆり(港空研), 内藤史貴, 高橋茉里, 土屋健伸, 遠藤信行, “微小超音波プローブ開発用音響レンズの基礎研究”, 日本音響学会講演論文集, 2008年9月12日, 九州大学, 福岡
- ⑬ 土屋健伸, 松本さゆり, 内藤史貴, 進雄一, 高橋茉里, 遠藤信行, “微小超音波プローブ先端用音響レンズの収束音場特性の解析と縮尺モデル実験”, 電子情報通信学会技術

研究報告, US2008-26, 2008 年 8 月 29 日,  
海洋開発機構, 東京

⑭ N.Endoh, T.Tsuchiya and M.Takahashi, ”  
Simulation and experiment of temperature rise in  
mimic tissue irradiated by ultrasound”, 3rd  
IC-SCCE 2008, 10 Jul 2008, Athens, Greece

⑮ 内藤史貴, 松本さゆり(港空研), 進雄一,  
土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行, ”FDTD 法  
による非球面音響レンズの収束特性解析”,  
海洋音響学会講演論文集, 2008 年 5 月 29 日,  
東京工業大学, 東京

⑯ 土屋健伸, 遠藤信行, “弾性 FDTD 法  
を用いた超音波照射による骨ファントム  
内部の温度上昇の推定, 日本超音波医学  
会第 81 回学術集会, 2008 年 5 月 23 日,  
神戸国際会議場、神戸

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 信行 ( ENDOH NOBUYUKI )

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：20016801

### (2) 研究分担者

土屋 健伸 ( TSUCHIYA TAKENOBU )

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：50291745