

複数の音響導波路を用いた超音波音源の 2次元音場シミュレーションによる基礎検討

Consideration by 2D Acoustic Field Simulation for
Ultrasound Source System using Multiple Acoustic Waveguides

五十嵐 茂^{1), 2)}、竹内 真一¹⁾

¹⁾ 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科 医用工学専攻

²⁾ 職業能力開発総合大学校 電子回路ユニット

(2015年3月20日 受理)

1. はじめに

近年、医療分野では、がん治療を目的とした高密度焦点式超音波（HIFU：High Intensity Focused Ultrasound）、遺伝子導入のためのソノポレーション（Sonoporation）、音響化学療法（SDT：Sono-Dynamic Therapy）による超音波治療法、音響放射圧による臓器や軟部組織の硬さを画像化する超音波エラストグラフィ、高調波を利用するハーモニクイメージング診断法など、また産業分野では、超音波洗浄機、超音波分散器などの高強度超音波の使用が増えている。

医療分野、産業分野における超音波の高強度化が進む中で、これらの音場では線形理論が成り立たない非線形の領域となり、その非線形音場の校正や評価の要求が増えると予想される。そのため、強力な超音波音場の空間分布を「受波」できる堅牢なハイドロホンの開発^[1]と同時に、強力な超音波パワーを「送

波」できる高強度音源の開発を行う必要がある。

産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ：National Metrology Institute of Japan）は、2002年前後から超音波計量標準の整備を開始し、「超音波パワー」では、天秤法による超音波パワー計測で15 Wまでが整備済みで、さらにカロリーメトリ法による計測で100 Wまでの開発を行っている。「ハイドロホン受波感度」では、0.5 MHz～20 MHzが整備済みで、さらに0.5 MHz以下と20 MHz以上の開発を行っている^[2]。特に「超音波パワー」では、100 Wクラスあるいはこれ以上で、かつ数MHz帯の超音波を発生するための音源が必要となってくる。

現在、計量標準総合センターにおけるハイドロホンの感度校正は、送波音源の遠距離音場にPET薄膜を置きレーザ干渉計によって超音波音圧の絶対測定を行っている^[2]。高強度な超音波音場が測定可能なハイドロホン

Shigeru IGARASHI^{1), 2)}, Shinichi TAKEUCHI¹⁾

¹⁾ Department of Biomedical Engineering, Graduate school of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502 Japan

²⁾ Electronic Circuit Engineering Unit, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-nishimachi, Kodaira-city, Tokyo, 187-0035 Japan

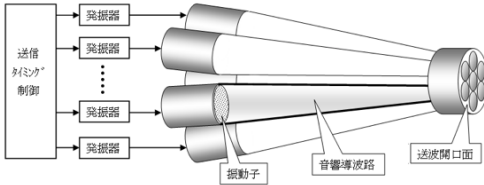


図1 複数の音響導波路を用いた超音波音源システム

校正するには、このPET 薄膜を振動させる高音圧でかつ平面波に近い超音波音場が必要となる^[3]。

そこで高強度音源の開発の第1ステップとして、振動子の高耐圧化や印加電圧の高電圧化だけでなく、音響的に高強度化ができないかと考え、複数の音響導波路を用いた超音波音源システムを検討している。

本稿では、まず、シンプルな音響導波路のモデルを使った2次元音場シミュレーションを行い、それぞれの音響導波路から出力される音圧により基本特性を調べた後、5組の送波振動子と音響導波路による超音波音源システムを提案し、単一振動子との比較による評価について述べる。

2. 音響導波路を用いた超音波音源システムの概要

単一振動子による強力超音波の発生は、圧電素子の電極により高い電圧を印加することで出力超音波のパワーが増加していくと考えられるが、高電圧や温度上昇等の影響により素子の劣化や破壊の恐れがある。また、振動子を集束化すれば焦点位置での超音波パワーは強力になるが、平面波ではなくなるので定量的な評価が困難となる。

本研究で提案する複数の音響導波路を用いた超音波音源システムのモデルを図1に示す。これは複数の振動子から超音波を発生し、それぞれの超音波を音響導波路によって集束し、送波開口面から点音源の超音波を出力して、ホイヘンスの原理によって再びビームを形成する。点音源によるビーム形成は、それぞれの振動子から送波開口までの行路長を補正し、

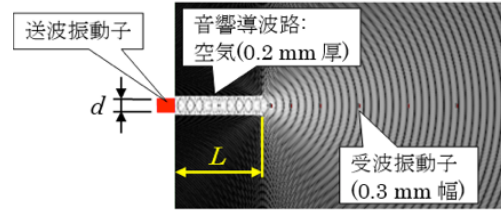


図2 音響導波路の長さに関するシミュレーションモデル

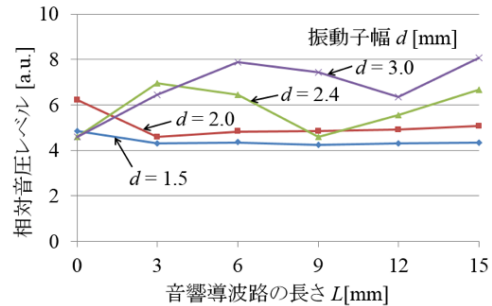


図3 音響導波路の長さによる音圧特性 ($x = 30 \text{ mm}$)

送波開口面で位相を揃えて出力するように送信タイミングを制御する。こうすることにより、単一振動子のみによる高強度化だけに頼らず高強度音源が構築できるのではないかと考えた。

3. 音響導波路の基本特性

シミュレーションはWave2000 (Cyberlogic 社製) を使用した。これは有限差分法による2次元シミュレータ^[4]であり、2次元変位分布は正負の変位を絶対値にして輝度表示される。

シミュレーションの基本条件として、送波する超音波は、周波数1 MHz、振幅 ± 1 [a.u.]の縦波連続波とし、音響媒質は水 (25℃、音速1497 m/s、固有音響インピーダンス1.497 MRayl) とした。したがって、この媒質内での超音波の波長は1.5 mmとなる。また、音響導波路は厚さ0.2 mmの空気 (温度20℃、音速344.0 m/s、固有音響インピーダンス0.000427 MRayl) の層によって境界を設定することとした。また、音圧分布を

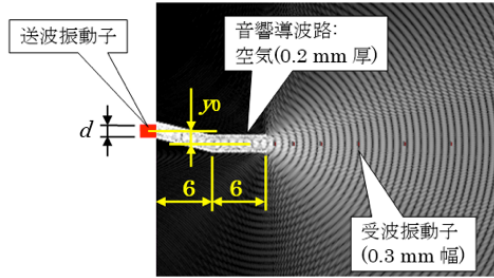


図4 音響導波路の屈曲に関するシミュレーションモデル

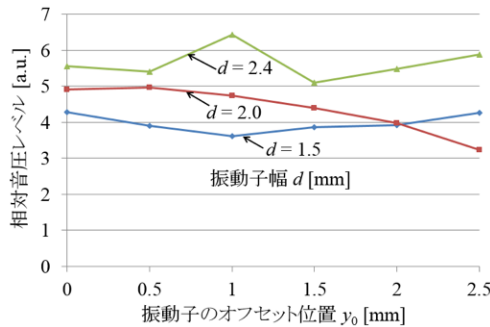


図5 音響導波路の屈曲による音圧特性 ($x = 30$ mm)

調べるためには、幅 0.3 mm の受波振動子を配置し、それぞれの音圧波形からピークピークを求め、その地点の音圧値を得ることとした。

3.1 音響導波路の長さによる音圧特性

本音源システムでは、送波開口付近の音響導波路の径をなるべく点音源とみなせるような開口幅の 1.5 ~ 3 mm 程度にする必要がある。そこで図2のようなシミュレーションモデルにより、送波振動子幅を決めた時の音響導波路の長さによる音圧の変化を調べたところ図3のような音圧特性になった。これは送波開口面から中心軸上 $x = 30$ mm 離れた地点の音圧を示す。音響導波路の幅が波長に相当する 1.5 mm では、音圧は低いものの音響導波路の長さによらず音圧はほぼ一定となったが、1.5 mm より大きいと音響導波路の長さによって音圧が変化することがわかった。

3.2 音響導波路の屈曲による音圧特性

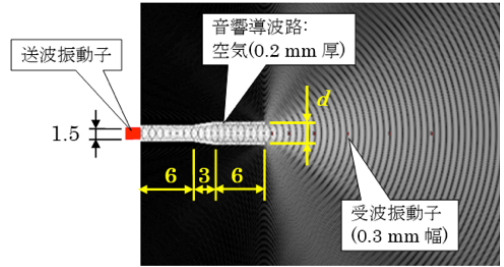


図6 音響導波路の出力開口幅に関するシミュレーションモデル

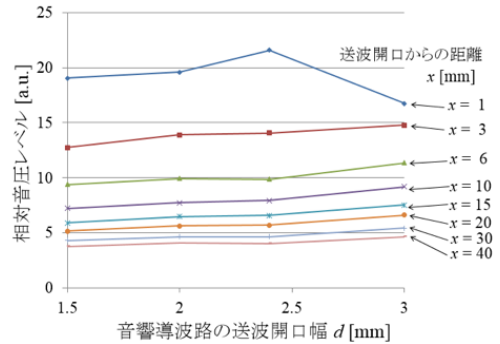


図7 音響導波路の送波開口幅による音圧特性

複数の送波振動子によって音源システムを構築する際には、音響導波路を屈曲させる必要がある。そこで図4のシミュレーションモデルのように長さ 6 mm (4λ) の音響導波路を2本接続し、送波振動子の幅 $d = 1.5$ 、2.0、2.4 mm の各々について、送波振動子の配置を中心からのオフセット位置 $y_0 = 0.0 \sim 2.5$ mm を与えることにより音響導波路を屈曲させ、送波開口面から中心軸上 $x = 30$ mm 離れた地点の音圧を調べたところ図5のような音圧特性になった。波長相当の 1.5 mm に音響導波路の幅を絞ることにより、音響導波路内での超音波の屈曲が可能になると考えられる。

3.3 音響導波路の出力開口幅による音圧特性

音響導波路の幅を 1.5 mm に絞ったのち、再び幅を広げて出力した時の音圧特性を知る必要がある。そこで図6のようなシミュレーションモデルにより、送波振動子の幅 1.5 mm から、長さ 6 mm の音響導波路の後、

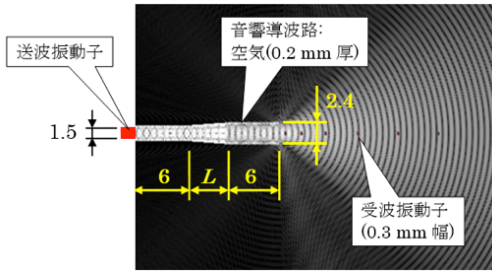


図8 音響導波路の内幅拡張長さに関するシミュレーションモデル

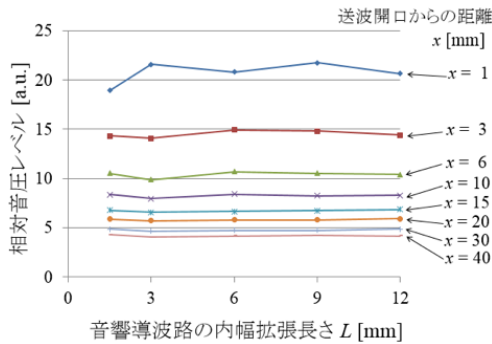


図9 音響導波路の内幅拡張長さによる音圧特性

長さ3 mmの区間で送波開口幅を d mmに広げ、長さ6 mmの音響導波路を経由し出力させた。その送波開口面から中心軸上 $x = 1 \sim 40$ mm離れた地点の音圧を調べたところ図7のような音圧特性になった。送波開口面から $x = 10$ mm以上離れば、送波開口面の幅によらずほぼ一定となり、5組の振動子と音響導波路を用いて送波開口面の合計幅を12 mmにする場合、各々の送波開口面の幅は2.4 mmとすることになる。

3.4 音響導波路の内幅拡張長さによる音圧特性

音響導波路の幅を1.5 mmから2.4 mmに拡張する際の長さの影響を調べるために、図8のようなシミュレーションモデルを考え、拡張部の長さを $L = 1.5 \sim 12$ mmとして音圧を調べたところ図9のような音圧特性となった。送波開口から $x = 10$ mm以上離れば、送波開口幅によらずほぼ一定となるので、本提案システムでは内幅拡張部の長さを6 mmとすることにした。

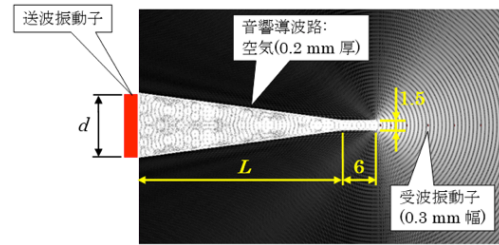


図10 音響導波路の集束に関するシミュレーションモデル

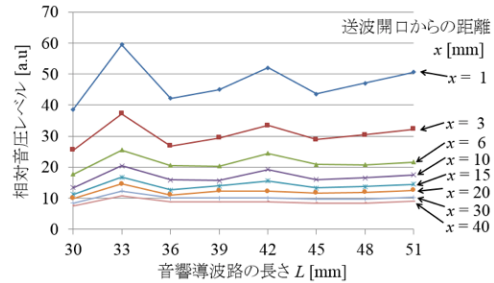


図11 音響導波路の集束による音圧特性

3.5 音響導波路の集束による音圧特性

次に、音響導波路による超音波の集束について、図10のシミュレーションモデルのような幅12 mmの送波振動子から直線形状の音響導波路によって集束させ、先端には長さ6 mm、幅1.5 mmの音響導波路を接続し出力させた。集束させる音響導波路の長さを $L = 30 \sim 51$ mmとし、送波開口面から中心軸上 $x = 1 \sim 40$ mm離れた地点の音圧を調べたところ図11のような音圧特性になった。これによると33 mm、42 mmにおいて近距離から音圧が高くなるので、本提案システムでは集束部の音響導波路の長さを42 mmとすることにした。

3.6 音響導波路の入力開口幅による音圧特性

送波振動子から音響導波路への入力する際に、音響導波路の入力開口幅の影響について、図12のシミュレーションモデルによって、入力開口幅を $d = 12 \sim 16$ mmと変化して送波開口面から中心軸上 $x = 1 \sim 40$ mm離れた地点の音圧を調べたところ図13のような音圧特性になった。送波振動子の幅に対して

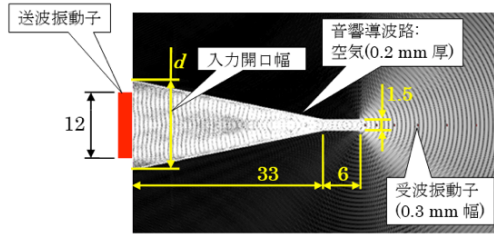


図12 音響導波路の入力開口幅に関するシミュレーションモデル

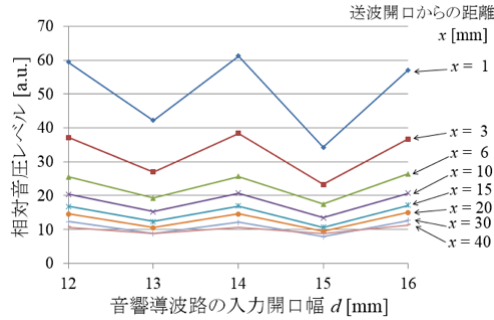


図13 音響導波路の入力開口幅による音圧特性

音響導波路の入力開口幅によって近距離の音圧レベルが激しく変動することがわかり、振動子幅と入力開口幅を同じにして隙間を空けないことにした。

4. 音響導波路を用いた超音波音源システム

以上のシンプルな音響導波路のモデルによるシミュレーション結果を基に、複数の音響導波路を用いた超音波音源システムの2次元シミュレーションモデルを図14に示す。

これは5組の送波振動子と音響導波路により構成され、音響導波路の集束部は、長さ42 mmの間に幅12 mmから幅1.5 mmに絞り、幅12 mmの単一振動子との比較のため、それぞれの送波開口部を幅2.4 mmに広げ、5つを並べることで幅12 mmの送波開口とした。また、5つの音響導波路のうち、中心の行路長に比べ外側の行路長の方が短いため、その行路長差を補正するために、送信タイミング時間を中心から外側へ遅らせることにより送波開口面での位相が一致するように制御

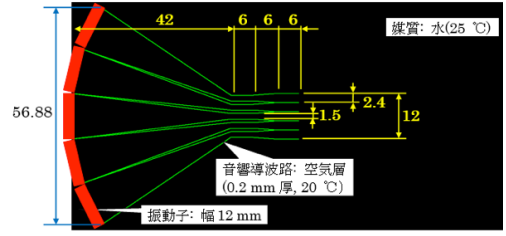


図14 本音源システムのシミュレーションモデル

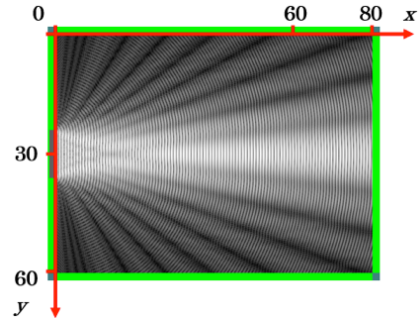


図15 単一振動子による変位分布(絶対値)

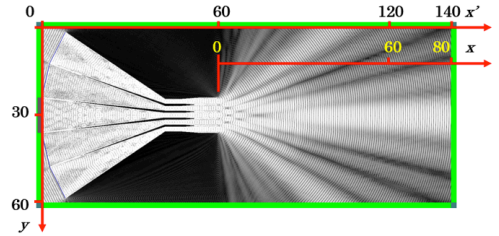


図16 本音源システムの変位分布(絶対値)

した。これらの遅延時間は、隣り合う2つの振動子によるビーム形成の中心軸上音圧が最大になるよう時間差を調整しながら求め、最終的に図の上から0.83、0.27、0.00、0.23、0.90 μ sの遅延時間の設定によりビーム形成を行った。

このモデルとこれらの送信タイミングの設定による2次元シミュレーションの結果は、比較のための幅12mmの単一振動子による2次元変位分布を図15に、本音源システムによる2次元変位分布を図16に示す。これによると後者の60 mm以降の変位分布と前者の変位分布が似ており後者の輝度が強くなっていることがわかる。

そこで、両者の比較を定量的に評価するた

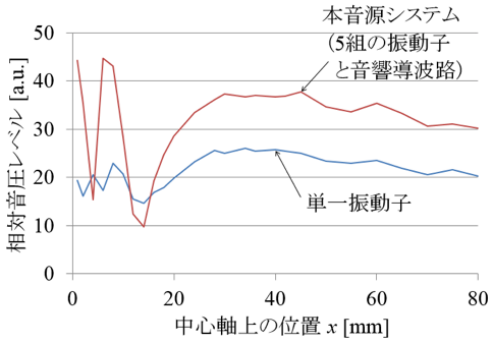


図17 中心軸音圧の比較

めに、幅 0.3 mm の受波振動子を並べることにより、前者の中心軸音圧分布と後者の 60 mm 以降の中心軸音圧分布をそれぞれ求め、送波面が一致するよう重ねて表示すると図 17 となる。

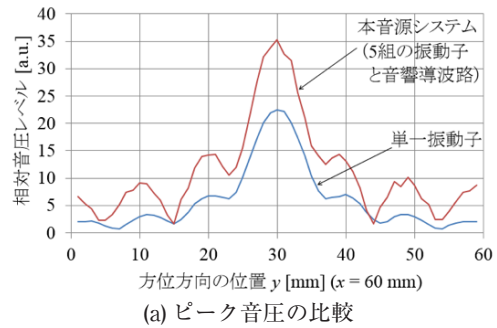
同様に、両者の送波面から 60 mm、80 mm における方位方向の音圧分布について求め、両者を重ねて表示すると図 18 および図 19 となる。それぞれ図の (a) はピーク音圧を、(b) は音圧を正規化してビーム幅をそれぞれ比較することができる。

また、方位音圧分布のグラフから、ピーク音圧の増加率と -6 dB ビーム幅について評価した結果を表 1 に示す。送波面から 60 mm、80 mm において、-6 dB ビーム幅はほぼ等しく、ピーク音圧の増加率はそれぞれ 1.57 倍、1.44 倍となった。なお、ピーク強度の増加率をピーク音圧の増加率の 2 乗と考えると、ピーク強度の増加率はそれぞれ 2.46 倍、2.07 倍となる。

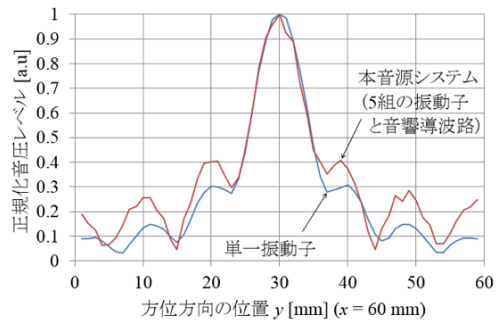
表1 方位方向の音圧分布の評価

距離 x [mm]	相対ピーク 音圧 [a.u.]	ピーク音圧の 増加率	-6 dB ビーム 幅 [mm]
60	$P_{55} = 35.34$	$P_{55} / P_{10} = 1.57$	9.4
	$P_{10} = 22.46$		9.6
80	$P_{55} = 29.82$	$P_{55} / P_{10} = 1.44$	12.0
	$P_{10} = 20.64$		12.2

P_{55} : 5組の振動子と音響導波路, P_{10} : 単一振動子 (音響導波路なし)



(a) ピーク音圧の比較



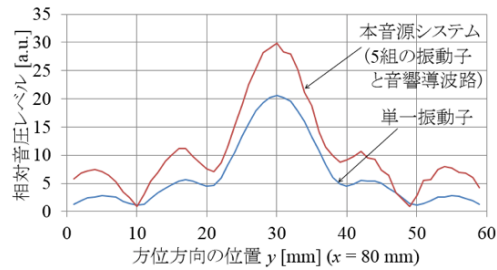
(b) 正規化によるビーム幅の比較

図18 中心軸距離 60 mm の方位音圧分布

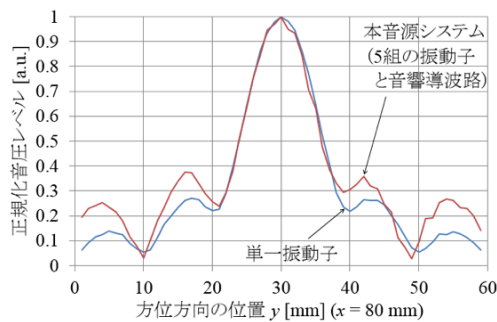
5. まとめ

複数の音響導波路を用いた超音波音源システムについて、2次元音場シミュレーションによって基礎検討を行った。シンプルな音響導波路のシミュレーションモデルにより基本特性を調べ、5組の送波振動子と音響導波路を用いた超音波音源システムを提案し、単一振動子との比較により本音源システムの方が、ほぼ同じビーム幅で、ピーク音圧の増加率が約 1.4 ~ 1.5 倍になることが確認された。

今後は、音響導波路の形状を検討し、FEM 等による 3次元音場シミュレーションへの拡張を行い、さらに実験的な検証を行いたい。



(a) ピーク音圧の比較



(b) 正規化によるビーム幅の比較

図 19 中心軸距離 80 mm の方位音圧分布

【参考文献】

- [1] 椎葉倫久, 植村友樹, 岡田長也, 内田武吉, 菊池恒男, 黒澤実, 竹内真一: 信学技法 112(387), 87-92, 2013.
- [2] 菊池恒男: Jpn J Med Ultrasonics, Vol.36, No.6, 2009.
- [3] IEC 62127-2, 2007.
- [4] R. S. Schechter, H. H. Chaskelis, R. B. Mignogna and P. P. Delsanto: Science Vol.265, no.5176, 1188-1192, 1994.

