

非線形音場校正を目的とした音響導波路型高出力音源の開発

— 音場シミュレーションによる音響導波路の基礎検討 —

Development of High Power Ultrasound Source using Acoustic Waveguides for Nonlinear Calibration of Hydrophone

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 電子情報専攻

(2014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ッ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。

一方、超音波計量標準は、国際的には国際度量衡委員会 (International Committee for Weights and Measures) の下に音響・超音波・振動諮問委員会 (CCAUUV: Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration) が1999年に発足し、「超音波パワー」は、ドイツ物理工学研究所 (PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt) をパイロット (幹事所) として1999年から2002年にかけて、さらに「ハイドロホン受波感

度」は、イギリス国立物理学研究所 (NPL: National Physical Laboratory) をパイロットとして1999年から2003年にかけて、それぞれ国際基幹比較が実施された^[1]。

これを受け国内では、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) が²、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80 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^[1]。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。

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予想される。そのため、強力な超音波音場の空間

Shigeru IGARASHI^{1,2} and Shinichi TAKEUCHI¹: ¹Department of Biomedical Engineering, Graduate school of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502 Japan

²Department of Electronic and Information, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-nishimachi, Kodaira-city, Tokyo, 187-0035 Japan

分布を「受波」できる堅牢なハイドロホンの開発²⁾と同時に、強力な超音波パワーを「送波」できる高出力音源の開発を行う必要がある。

そこで、音響導波路型高出力音源システムを提案し、シミュレーションによってその可能性の検討を行ったので報告する。

2. 音響導波路型高出力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。

本研究で提案する音響導波路型高出力音源システムのモデルを図1に示す。これは、多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音圧を上げ、送波開口面から点音源の超音波を出力し、ホイヘンスの原理によって再びビーム形成をするという原理である。こうすることにより、単一振動子の高出力化だけに頼らず高出力音源が構築できるのではないかと考えられる。

しかし、点音源によるビーム形成となるので、それぞれの振動子から発生する超音波の振幅、周波数、位相の制御が重要となる。また、振動子は単一周波数駆動なので狭帯域のものが使用できるが、振動子にばらつきがあると送波の周波数や振幅にズレを発生する恐れがあるので、それに対応できるよう振動子自体にもある程度の広帯域化が必要となる。

3. 2次元音場シミュレーション

図2に音響導波路を用いた音源のシミュレーション2次元モデルを示す。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。したがって、

以降、変位分布データはすべて絶対値表示である。

シミュレーションで送波する超音波は、周波数1 MHz、振幅 ± 1 の縦波連続波で、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、4つの振動子(12 mm幅)を円弧状にならべ、音響導波路は0.2 mm厚の空気(20℃、音速344.0 m/s、固有音響インピーダンス427 Rayl)によって境界を設定し、50 mm前方に集束させた。音響導波路の屈曲部は波長の1.5 mmまで絞ることで音波が曲がり、単一振動子(12 mm幅)との比較のため、開口部を3 mmに拡げ、4つで12 mm開口とした。また、4つの音響導波路のうち、外側と内側の行路長差は、外側の送信を0.4 μ s遅らせることにより補正した。

図3に単一振動子による2次元変位分布、図4に4組の振動子と音響導波路による2次元変位分布を示す。これらの中心軸音圧分布を比較するため、後者のデータは65 mm未満のデータを削除して、送波面が一致するよう重ねて表示すると図5となる。これらの音圧分布は、0.3 mm幅の受信素子を距離方向にならべ音圧波形のピーク・ピーク値を求めプロットした。

次に、なるべく平面波となる遠距離音場で評価すべきであるので、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、両者を重ねて表示すると図6および図7となる。それぞれ図の(a)はピーク音圧の比較を、(b)は音圧を正規化してビーム幅の比較をすることができる。

それぞれのグラフから読み取り、ピーク音圧の増加率と-6dBビーム幅について分析した結果を表1に示す。送波面から60 mm、80 mmにおいて、ピーク音圧の増加はどちらもほぼ1.4倍となり、-6dBビーム幅はほぼ等しい結果となった。

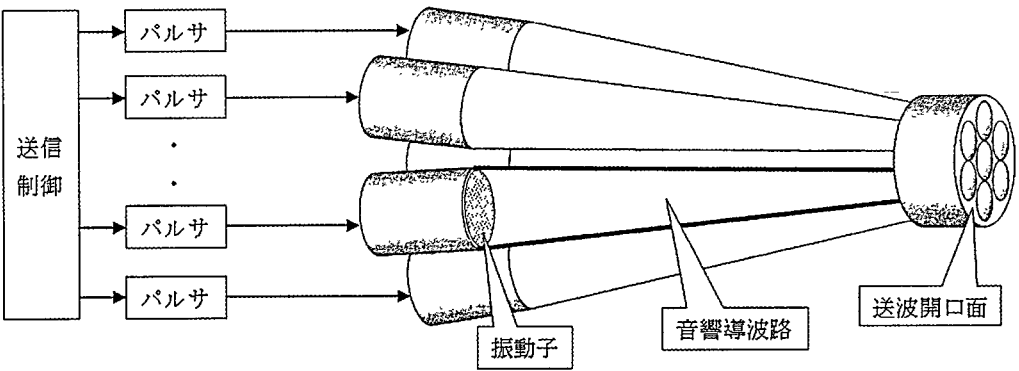


図1 音響導波路型高出力音源システム

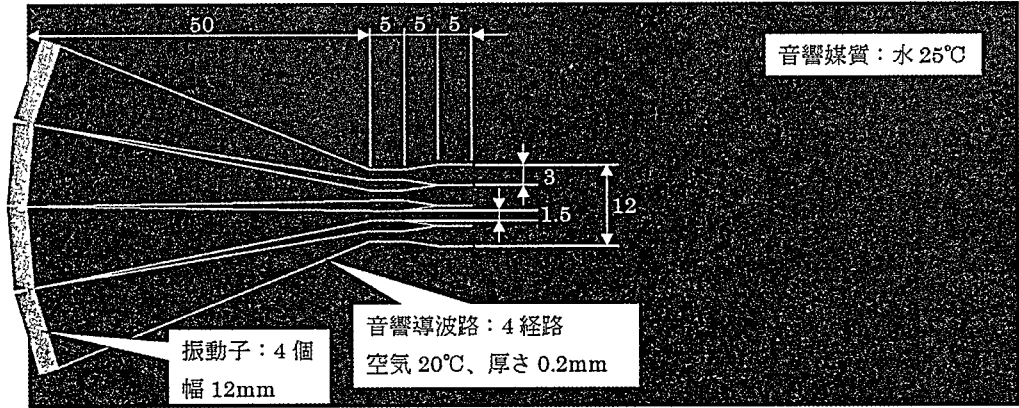


図2 シミュレーション2次元モデル

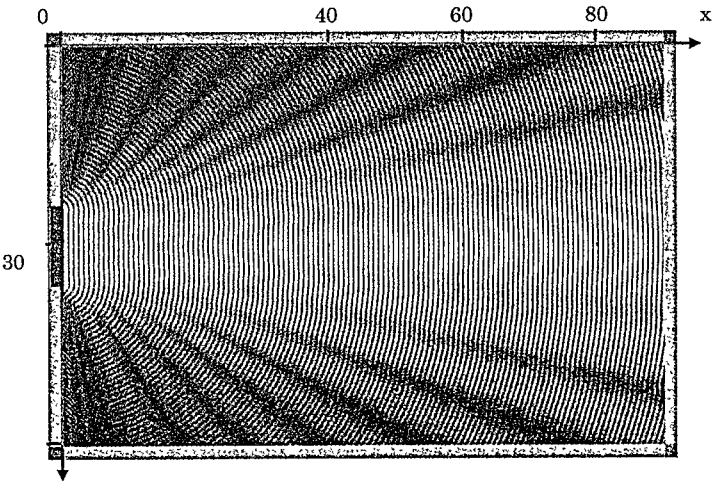


図3 単一振動子による2次元変位分布

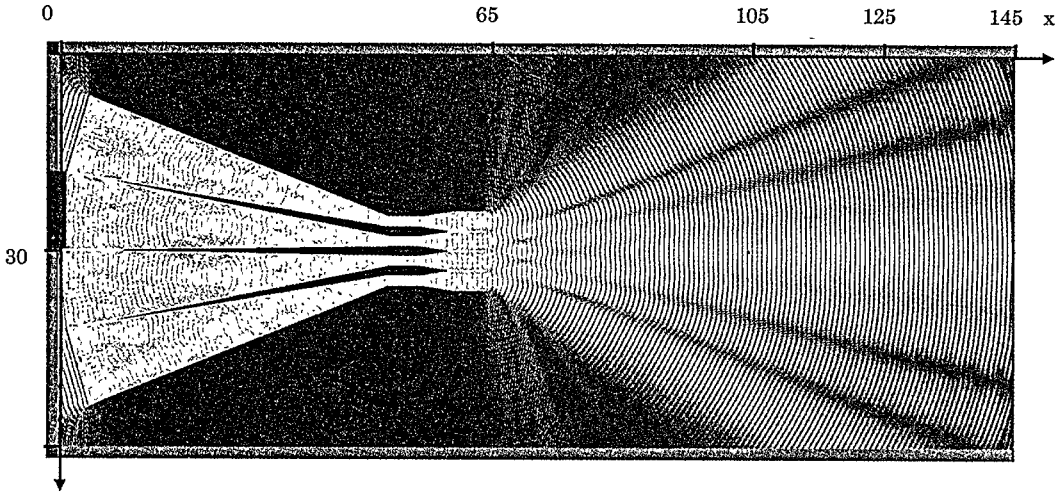


図4 音響導波路による2次元変位分布

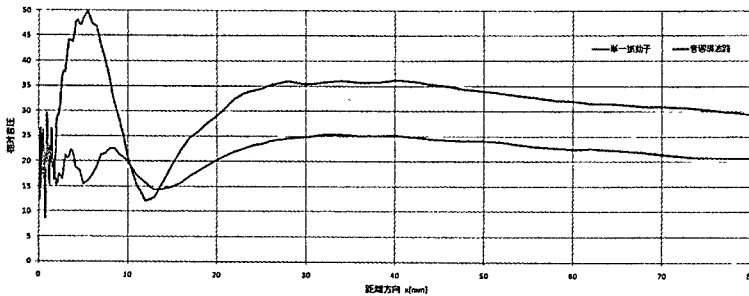


図5 中心軸の音圧分布

4. 探触子の設計シミュレーション

次に、本システムで使用する探触子は、それ自体で高出力化するだけでなく、圧電素子のバラツキによる周波数変化や振幅変化を事前に抑える必要がある。そこで、Masonの等価回路によって、探触子の送波感度および電気的な入力インピーダンスの周波数特性や整合層の効果などをシミュレーションによって検証した。

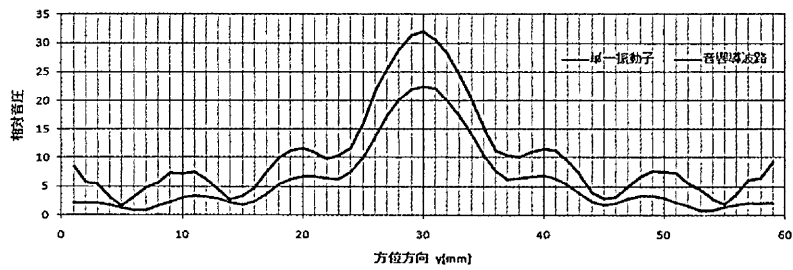
設計する探触子のモデルを図8に示す。振

動子は PZT-Pb(Zr・Ti)O₃ 系ハード材、高 Qm タイプの C-213 材(富士セラミックス製)を選定し、反共振周波数 $f_a=1$ MHz とし、バックリングは空気、 $\lambda/4$ 整合層を設け、前面の媒質は水、電極は無視とした。

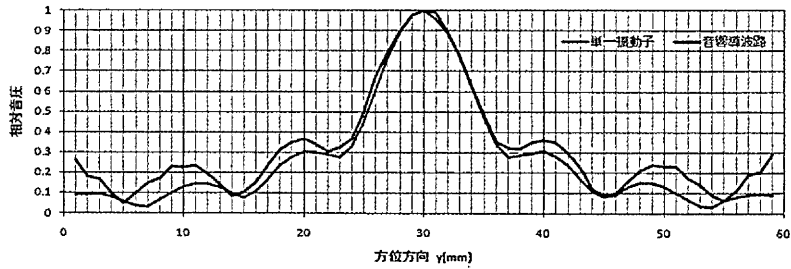
Mason 等価回路から導かれる4端子網等価回路は図9に示され、その F パラメータ(A,B,C,D)によって送波感度および電気的な入力インピーダンスは次式から求められる^[3]。

$$\frac{F_W}{E_S} = \frac{V_S}{E_S} \cdot \frac{F_S}{V_S} \cdot \frac{F_W}{F_S} = \frac{Z_W}{A \cdot Z_W + B + Z_S(C \cdot Z_W + D)} \quad \dots (1)$$

$$Z_i = \frac{A \cdot Z_W + B}{C \cdot Z_W + D} \quad \dots (2)$$

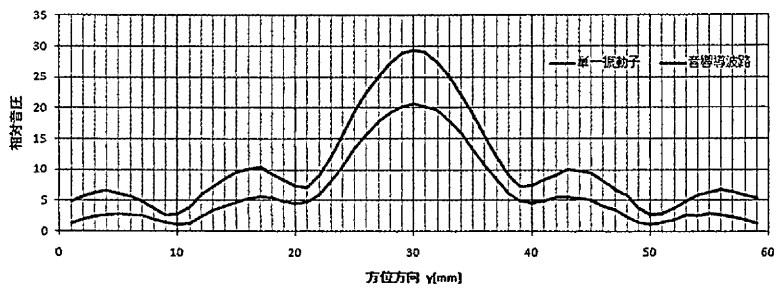


(a) ピーク音圧の比較

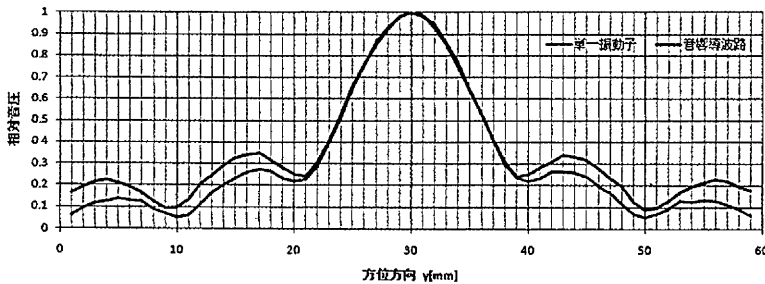


(b) 正規化によるビーム幅の比較

図6 送波面から60mmにおける方位方向の音圧分布



a) ピーク音圧の比較



(b) 正規化によるビーム幅の比較

図7 送波面から80mmにおける方位方向の音圧分布

表1 方位方向の音圧分布の評価

送波面からの距離	方式	ピーク音圧	増加率	-6dB クロス点		-6dB ビーム幅
60mm	音響導波路	31.99	1.42 倍	25.0mm	34.9mm	9.9mm
	単一振動子	22.46		25.2mm	34.8mm	9.6mm
80mm	音響導波路	29.42	1.43 倍	23.7mm	36.3mm	12.6mm
	単一振動子	20.64		23.9mm	36.2mm	12.3mm

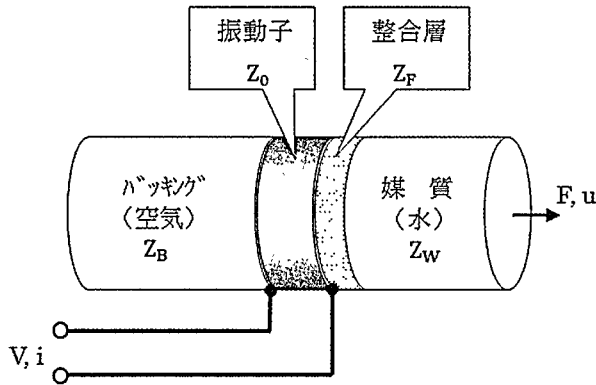


図 8 設計探触子のモデル

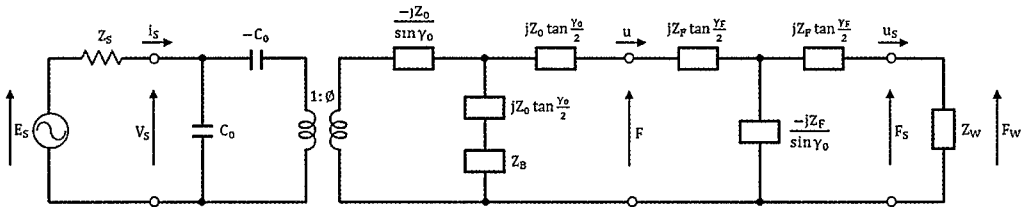


図 9 4 端子網による等価回路

表 2 シミュレーションに使用したパラメータ

パラメータ	数値	備考
周波数定数 Nt	2090 [mm・kHz]	※1
反共振周波数 f_a	1.0 [MHz]	
振動子直径 d	12.7 [mm]	
密度 ρ	7.8 [kg/m ³]	※1
電気機械結合係数 kt	0.48	※1
比誘電率 $\epsilon_{33^T}/\epsilon_0$	1470	※1
送信回路の出力インピーダンス Z_s	50 [Ω]	
媒質 (水) の固有音響インピーダンス Z_W	1.5 [MRayl]	
バッキング (空気) の固有音響インピーダンス Z_B	442 [Rayl]	
整合層の音速 V_F	2643 [m/s]	※2
整合層の密度 ρ_F	1.6 [kg/m ³]	※2

※1 圧電セラミックスの材料特性^[4]より

※2 整合層はアラルダイト AT103+HY956+TiO₂ (フィラ 40%) による実測値

シミュレーションはMATLABによって行い、シミュレーションに使用したパラメータを表2に示す。図10に送波感度の周波数特性のシミュレーション結果を示す。これは整合層の厚さ変化による送波感度の変化を示し、0 μm は整合層なしを意味する。これによると整合層なしの送波感度と比べてピークは0.7倍となるが、整合層の厚さが740 μm の時、送波感度のピークが平坦となり最適となる。また送波感度の-6 dB帯域幅は、整合層なしの160 kHz (900 kHz \pm 80 kHz) から整合層が追加されて460 kHz (900 kHz \pm 230 kHz) となり、約2.8倍に広がる事がわかる。

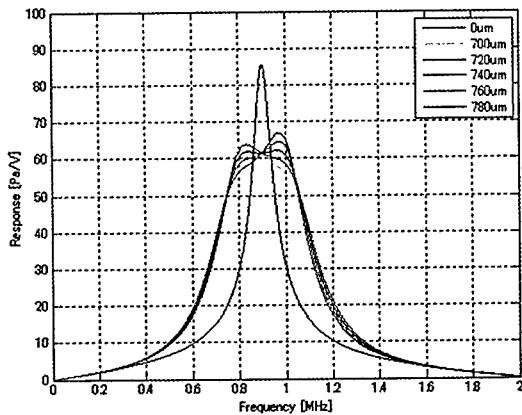
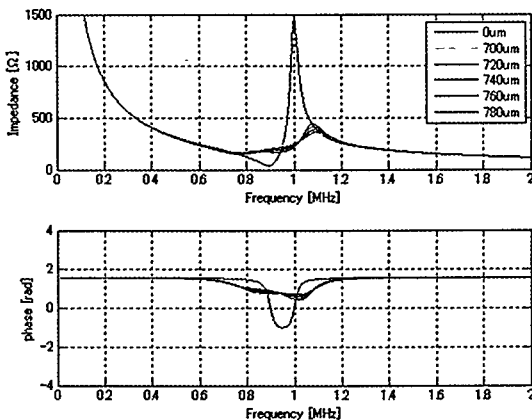


図10 整合層厚さ変化による送波感度の周波数特性



上：大きさ、下：位相

図11 整合層厚さ変化による電気的入力インピーダンスの周波数特性

図11に電気的な入力インピーダンスの周波数特性のシミュレーション結果を示す。図の上側は入力インピーダンスの大きさ、下側は位相を示す。整合層なしでは、反共振周波数 $f_a=1$ MHz の設定に対して、共振周波数 $f_r=0.9$ MHz となっており、送信出力インピーダンス 50 Ω の時にはこの付近で送波感度は最大となる。これに整合層が追加されると振動子にとって整合層が負荷となりこの入力インピーダンスの変化はなだらかになる。これは送信感度の帯域幅の範囲内で、送信周波数がある程度任意に選択できることを意味している。

5. まとめ

音響導波路型高出力音源システムの開発について、2次元音場シミュレーションによって、単一振動子より4つの音響導波路による方式の方が、同じビーム幅において約1.4倍の変位増加が確認された。また、探触子のシミュレーションにより、 $\lambda/4$ 整合層の最適厚さは740 μm であり、送波感度の-6 dB帯域幅が約2.8倍に広がる事が確認できた。

今後は、2次元音場シミュレーションにより、音響導波路数の増加、形状や開口幅などによって音場変位のさらなる増加を検討し、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たい。さらに、探触子、音響導波路、バルサなどを順次構築し、実験的な検証にも進みたい。

【参考文献】

- [1] 菊池恒男：Jpn J Med Ultrasonics, Vol.36, No.6 (2009)
- [2] 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)
- [3] ERHARD K.SITTIG：IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS, VOL. SU-16, NO.1(1969)
- [4] 圧電セラミックス カタログ (株)富士セラミックス