

二重放物面を利用した超音波集束デバイスの構造最適化

東京大学 ○家入 匠生, 東京大学 ◎森田剛

Abstract 本研究は2つの放物面を経由させて超音波を集束させる, 高周波振動デバイス(DPLUS)に関するものである. 弾性波は光波ほどの直進性をもたず拡散されることから, 従来のDPLUSの放物面は最適形状ではない可能性が高いため, その構造最適化を行った. 応力の計算にFEM等ではなく幾何応力解析を用いることで, 計算量の削減や, 経路毎の応力の算出を可能にした. 最適化の結果, 従来の3.3倍の応力出力を持つ構造を得た.

1. 研究目的

2019年に発表されたDPLUS((Double Parabolic reflectors wave-guided Ultrasonic transducers)^[1])は, 図1のように, 焦点を共有する二つの放物面構造でリング型圧電素子によって励振した縦振動を集束させた後, 細棒導波路へ高効率で導入するデバイスである. 導波路先端から対象物に対して放射することにより, MHz帯域で数MPaの高出力超音波を生成できることが報告されている.

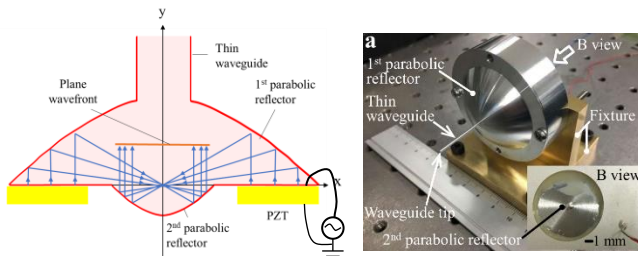


図1 DPLUSの概略図^[1]

強力超音波応用で広く使われているランジュバン振動子は数十kHzから高々100kHz程度の帯域で一つの駆動周波数を持つのに対し, DPLUSは数十kHzから数MHzの広い帯域で非常に多くのモードを持つため, MHz帯域の強力超音波応用という新領域を開拓しつつある. 応用例として, DPLUSを利用した超音波ピンセットを実現した研究がある.^[2]

DPLUSの構造を一部変形させた応用研究を2つ紹介する. チューブ型DPLUS^[3]はDPLUSでは細棒先端での温度や音圧のセンシングができない問題を解決するために, 中心を中空構造にして温度センサや超音波探触子を導入することを可能にした. 二重放物面ではなく一つの放物面を使用して超音波の集束を行うSPLUS^[4]があり, これを用いた溶血処理の研究も行われている.^[4]

このような超音波集束デバイスを設計する際, 用途に応じて反射面の構造を最適化する必要があるが, その手法は確立されておらず有限要素法等の結果を見て手探りで設計を行っているのが現状である. しかし, 有限要素法は計算量が多い上に, 結果だけではその形状の良し悪ししかわからず, 結果の原因となったメカニズムを解明するのが困難である. また, そもそも波の拡散が起こるためにDPLUSのリング型圧電素子から出力された波は直進する平面波とはならず, 現在の反射面形状には改善の余地があると考えられる.

そこで本研究では, レイトレーシングで拡張したレイリー積分による応力計算を用いて構造最適化を行った. この計算方法は, 有限要素法等よりも計算量が少なく済み, かつ波の経路ごとの応力が求められる. レイリー積分を行うことで, 最適構造を求めると同時にその構造が最適となるメカニズムを明らかにすることを目指した. 上記の様々な用途についての最適化を行う一般的な計算手法を確立するため, 従来のDPLUS^[1]を対象として反射面の構造最適化を

行った.

2 研究の方法

2.1 レイリー積分

ここでは, 応力計算の手法であるレイリー積分について述べる. 図2(a)において, 振動速度 $v_0 e^{j\omega t}$ で振動する境界面がある時, ある観測面における垂直応力 T_n を求めることを考える. なお, 図2における灰色の部分は弾性固体とし, ここでは振動境界面から入射する縦波のみを考える.

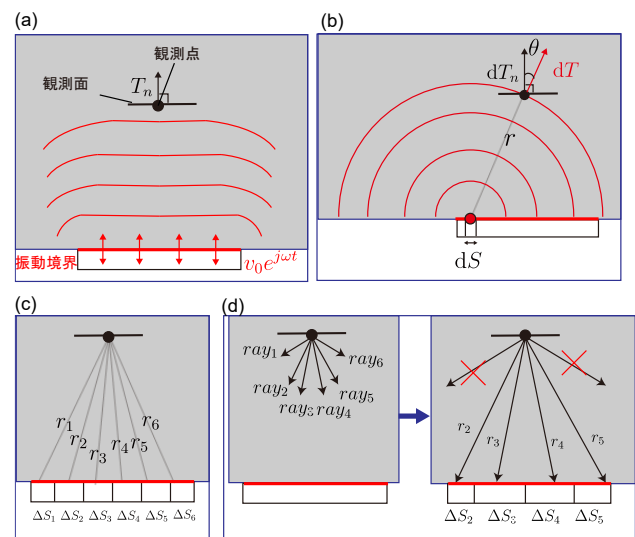


図2 レイリー積分のレイトレーシングによる拡張

ホイヘンスの原理より, 生じる波は振動境界を微小領域に分割し, 各微小領域から出る球面波を重ね合わせたものに等しい. 図2(b)のように, 面積 dS の微小領域から生じた球面波が距離 r だけ離れた観測面に与える応力 dT と垂直応力 dT_n は

$$dT = \frac{j\omega\rho v_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} dS \quad (1)$$

$$dT_n = dT \cos \theta \quad (2)$$

となる. ただし, 媒質の密度を ρ , 波数を k とした. これを振動境界全体で積分すると, 垂直応力 T_n は式(3)のようなレイリー積分となる.

$$T_n = \int_S \frac{j\omega\rho v_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \cos \theta dS \quad (3)$$

計算機で計算するために, 図2(c)のように離散化した式(4)を導入する.

$$T_n = \sum_i \frac{j\omega\rho v_0}{2\pi r_i} e^{j(\omega t - kr_i)} \cos \theta_i \Delta S_i \quad (4)$$

2.2 レイトレーシングによるレイリー積分の拡張

図 2 (a)のような単純な系ではなく、反射等があり系が複雑で、図 2(c) のような $r_i, \Delta S_i$ の全列挙ができない場合に図 2(d)のようにレイトレーシングでレイリー積分を拡張することを考える。レイトレーシングとは、光線(レイ)を媒質中に伝搬させることで波や粒子の経路を計算し、対象となる物理現象を計算する手法である。ここでは音線法とは逆に、観測点からレイを射出し、もし振動境界に当たったら ΔS_i を求め、経路長 r_i とともに式 (4)に代入し、観測点における垂直応力を求めることとした。

2.3 最適化方法

上記の考え方に基づいて、ハイパーパラメータ自動最適化フレームワーク Optuna⁶⁾を用いて DPLUS の形状最適化を行った。形状の制御は表 1, 図 3(a) に示す 4 つのパラメータを用いた。なお、関数 $f_1(x), f_2(x)$ はそれぞれ第一反射面、第二反射面の関数であり、 R_{const} は第一反射面の外縁の半径である。 a は第一反射面の 2 次の係数、 b は第二反射面の 2 次の係数、 c は第一反射面の端の高さ、 d は第二反射面の半径に対応する。なお、探索範囲は従来の DPLUS の値¹⁾の近傍に設定した。応力計算については DPLUS の細棒導波路接続部を観測面に設定し、垂直応力の時間応答を求めた。この面内での各観測点について平均をとり、最適化における目的関数を面平均の時間応答における最大値とした。また、媒質はジュラルミンを用いた。

表 1 形状パラメータの探索範囲

	a [1/mm ²]	b [1/mm ²]	c [mm]	d [mm]
最小値	0.015	0.25	0.0	0.25
最大値	0.03	1.0	6.0	2.0
従来の DPLUS の値 ¹⁾	0.025	0.5	0.0	1.0

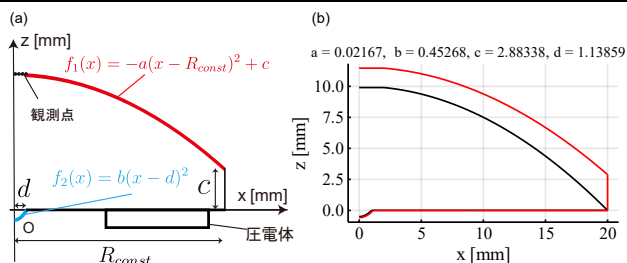


図 3 DPLUS の形状パラメータ(左) と最適形状(右)

表 2 使用した計算機の性能

パーツ名	製品名
CPU	Xenon E5-1620v4 4core/8thread 3.5GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080Ti 11GB × 2
MEMORY	64GB(8GB×8) DDR4-2133 Quad-Channel

4. 計算結果

形状最適化は図 4 のように進んだ。結果、求めた最適形状は図 3(b)の赤線で示される形となり、この構造により従来の DPLUS に比べ約 3.3 倍の応力出力を得られることがわかった。最適構造では第一反射面、第二反射面ともに放物面が浅くなったかわりに、 c, d がそれぞれ大きくなっており、結果としてより多くの振動エネルギーがより集束されたと考えられる。また、構造を得るのに要する計算時間は、表 2 の計算機を用いた場合長くても 3 時間程度で

あり、計算コストが小さいことによる利点を確認することができた。

5. 結論

本論文では、レイトレーシングにより拡張されたレイリー積分を用いた DPLUS の構造最適化を行った。曲面を利用した超音波デバイスの構造最適化手法を確立したことで、今後幅広い応用が期待できる。この計算手法は有限要素法等と比べて精度は劣るものの、その分計算量が少なく、さらにレイの経路を考慮した最適化を行ったり、実際にどのような経路をたどって波が到達するのかを逐一確認したりすることができるという特長を有する。

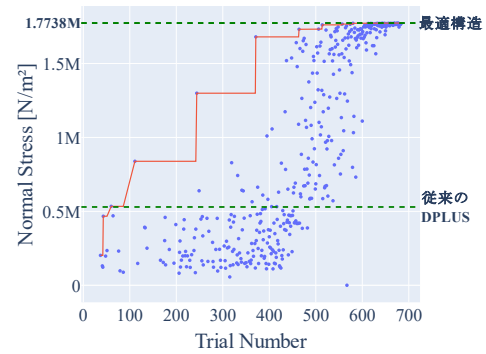


図 4 最適化の様子

さらに、レイを音線法等のように振動源から射出するのではなく、観測点から射出することで計算を効率的かつ精度良く行えるように工夫を行った。その結果として、シミュレーション上の数値ではあるものの、従来の DPLUS の約 3.3 倍の出力を持つと期待される新しい構造を見出すことができた。

今後の展望としては、まずは今回見つかった構造を実験や他の数値シミュレーションで確認する。また、今回提案した幾何応力解析法を用いて、DPLUS の導波路接続部における応力分布を自由に設計するために、圧電体における電圧印可分布の最適化を行う。DPLUS の導波路接続部の応力分布が設計可能になれば細棒導波路の高効率励振が可能となり、更なる応用につながると考えている。

参考文献

- [1] K. Chen, T. Irie, T. Iijima, and T. Morita: "Acoustic focusing to the waveguides utilizing double parabolic reflectors," *Appl. Phys. Lett.* vol. 114, 072902, 2019
- [2] Q. Liu, K. Chen, J. Hu and T. Morita: "Double parabolic reflectors wave-guided high-power ultrasonic transducer (DPLUS) based ultrasonic tweezers for micro/nano manipulation," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 59, SKKD12, 2020
- [3] 山田恭平, 陳康, 入江喬介, 飯島高志, 森田剛: "円筒型導波路への二重反射面型強力超音波集束機構 (チューブ型 DPLUS)," 精密工学会学術講演会講演論文集, vol. 2021S, pp. 442-443, 2021.
- [4] X. Wu, K. Chen, Y. Hoshijima, T. Hariu, H. Yamazai, S. Miyake and T. Morita: "High-power ultrasonic transducer for effective hemolysis," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021
- [5] T. Akiba, S. Sano, T. Yanase, T. Ohta, M. Koyama: "Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework," *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, pp. 2623-2631, 2021