

レベルセット法による振動分布の平坦化を目的とする超音波振動工具のトポロジー最適化

Level-set topology optimization of large ultrasonic tools for uniform vibration distribution

和田 有司¹⁾, 中村 健太郎¹⁾
Yuji Wada and Kentaro Nakamura

¹⁾東京工業大学 未来産業技術研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-26, E-mail:ywada@sonic.pi.titech.ac.jp)

Uniform vibration of ultrasonic bonding tools is important for industrial applications, but its design requires a great deal of expertise due to wave effects. Topology optimization using level-set functions progresses with a clear interface rather than grayscale density, so that when the optimization results are actually fabricated, there is little error in terms of resonance frequency and other optimization performance. In this study, we perform an optimization to obtain an uniform vibration distribution by using a commercial finite element software to create a three-dimensional model by extruding a shape obtained from a level-set function in two-dimensional space. The tool obtained from the optimization is actually fabricated and the transducer performance and vibration distribution are measured.

Key Words : high-power ultrasound, ultrasonic transducer, topology optimization, level-set method, structural optimization

1. まえがき

超音波接合等を目的とする振動工具の振動分布を平坦にすることは産業応用上重要であるが、波動性によりその設計は困難であったり多くのノウハウを必要とする^[1,2]。一方、トポロジー最適化^[3-6]は、許容された設計空間の中で目的関数を最大または最小となるよう部材・材料の配置を空隙を含めて決定する構造最適化手法のひとつで、設計者に有効な示唆をもたらし、上記の試行錯誤の回数を大幅に低減するものとして近年産業応用が進んでいる。トポロジー最適化においては密度モデル^[5]を使用するのが一般的な手法であるが、明瞭な境界を有するレベルセット法を利用したトポロジー最適化^[6-8]が提案されている。

本研究の目的はトポロジー最適化を用いて振動工具を設計する際の設計手法を確立することである。著者はこれまでの密度モデルによる最適化^[9,10]にかわり、再メッシュを使用する手段で実装されたレベルセット法最適化を利用して二次元モデル上で平坦な振動分布を得る手段について検討している^[11]。実際の超音波振動工具においては、厚みを有し入力面はボルト締めランジュバン振動子で駆動されるため三次元モデルでの最適化が必要になる。そこで本稿では、商用有限要素プログラムを利用し、二次元空間上のレベルセット関数から得られた形状を押し出しすることで三次元モデルを作成し、これを解析、最適化することで振動分布の平坦化をする手法について検討する。最適化で得られた工具を実際に作製し、振動子性能と振動分布の測定を行った。

2. レベルセットトポロジー最適化について

レベルセット法は空隙を有する物体領域を記述する手法として利用されており、多くの場合は空間格子や有限要素法の節点 $\mathbf{x}$ 上にレベルセット関数 ϕ を設計変数として定義した上で、下式のように形状表現する。

$$\begin{cases} 0 < \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \forall \mathbf{x} \in \Omega \setminus \partial\Omega \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \forall \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (1)$$

D は設計領域全体, Ω は構造体が存在する領域, ∂ は後に続く領域の境界, 演算子 $\setminus$ は前の領域から後の領域の差集合を示す。

レベルセット法の最適化進展はレベルセット関数を、目的関数 F の感度に相当するトポロジー導関数 F' を用いた反応拡散方程式を時間発展させることで実施する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -K(\phi) [F' - \tau \nabla^2 \phi] \quad (2)$$

ここで、 t は構造進展に関する擬似的な時間変数, $K(\phi)$ は進展速度と体積制約に関する関数, τ は構造の部材サイズに関するパラメータである。

振動体表面の振動分布を平坦にする目的関数^[10]は、対象表面に複数点 ($k = 1 \sim N$) の観測用荷重 f_k を配置した上で、これらのコンプライアンス Q_k の実効パワーに相当するもののうち、最低のものを最大化するよう

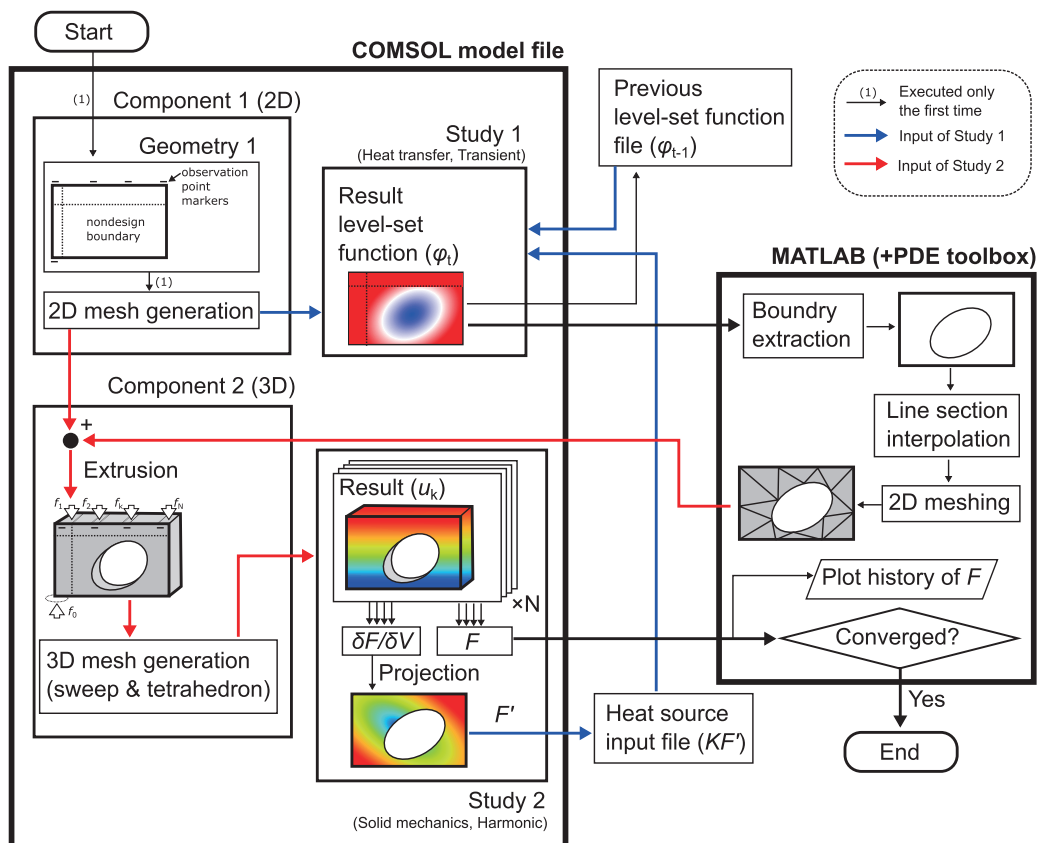


Fig.1 Flowchart of the topology optimization using commercial finite element software.

に設定する.

$$F = \left(\sum_{k=1}^N \tilde{\theta}_k^p \right)^{(1/p)} \quad (3)$$

$$\tilde{\theta}_k = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(-\frac{\theta_k}{\theta_0} \right) \right] \quad (4)$$

$$\theta_k = \text{Re} \left[Q_0^* Q_k \right] \quad (5)$$

$$Q_k = \mathbf{u}_0^T \mathbf{f}_k \quad (6)$$

ただし, $\mathbf{f}_0$ は工具への本来の荷重入力とし, $\mathbf{u}_0$ はこのときの変位場である. θ_0 は空隙のない条件下での θ_k の二乗平均平方根である.

三次元空間上で微小な空隙体積 δV が発生したときの目的関数 F の変化 ($\delta F / \delta V_s$) については, 微分の連鎖律から最終的に上記の ($\delta Q_k / \delta V_s$) の関数として表現される [8, 12].

$$\frac{\delta Q_k}{\delta V_s} = -\omega^2 \mathbf{u}_k^T [\mathbf{M}] \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_k^T [\mathbf{A}] \mathbf{u}_0 \quad (7)$$

$$\left(-\omega^2 [\mathbf{M}] - j\omega [\mathbf{C}] + [\mathbf{K}] \right) \mathbf{u}_k = \mathbf{f}_k \quad (8)$$

$\mathbf{M}$ は質量行列, $\mathbf{C}$ は減衰行列, ω は駆動角周波数, $\mathbf{A}$ は剛性行列 $\mathbf{K}$ と同じ階数のトポロジー導関数用の剛性行列である.

二次元空間上に存在するレベルセット関数から得られた二次元形状を z 方向に押し出して三次元形状を得たとき, 二次元反応拡散方程式に入力すべきトポロジー

導関数 F' は, 二次元空間上の微小な空隙面積 S_c が z 方向に押し出された円筒状の空隙体積が発生したときの F の変化に相当する.

$$F' = \frac{\delta F}{\delta S_c} = \int \frac{\delta F}{\delta V_s} dz \quad (9)$$

つまり, 一般的な三次元レベルセットトポロジー最適化のトポロジー導関数を押し出し方向に積分すればよい.

3. 市販有限要素法ソフトを用いた実装方法

本稿では有限要素法解析部分とその制御には COMSOL Multiphysics 6.1 および LiveLink for MATLAB モジュールを使用し, 形状の抽出と要素の一時分割には MATLAB(R2022a, Mathworks) の Partial Differential Equation (PDE) Toolbox を使用した.

Fig.1 に今回の最適化におけるフローチャートを示す. ルーチン全体は LiveLink 環境下で起動した MATLAB スクリプトで制御される. また, 反応拡散方程式のソルバーとして COMSOL 内の熱伝導ソルバーを利用する.

1. Component 1 でレベルセット関数が存在する二次元形状を作成し, 二次元メッシュ分割を行う. 形状作成の際には, 荷重や観測点入力部分および非設計領域の定義のために線分等で領域分割をしておく.
2. Study 1 で初期レベルセット関数かつ熱源がゼロのソルバーを実行する. レベルセット関数の結果をメッシュデータと共にファイルに保存する. デー

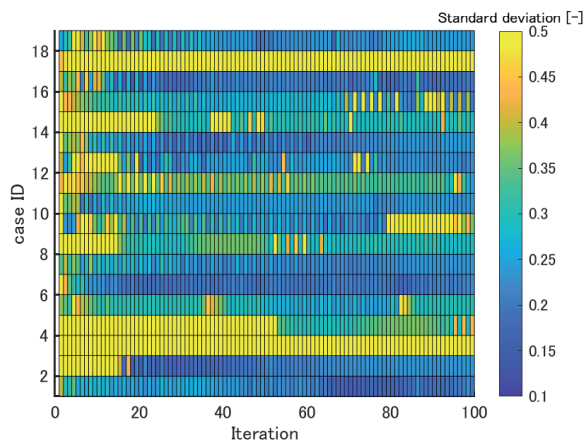


Fig.4 Amplitude deviation history for various initial level-set function cases.

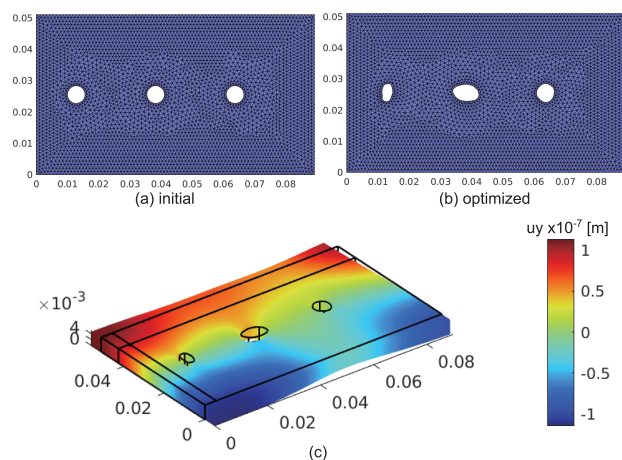


Fig.5 (a) Initial shape of (1,3,λ/36), (b) optimal shape, and (c) vibration distribution at 50 kHz.

と表記する.

$$\phi_0 = 1 - \sum_{i=1}^6 \exp \left[1 - \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{r_h} \right] \quad (10)$$

また、体積制約は設定しないため、トポロジー導関数の正負のバランスによって空隙と構造体の体積比が決定される。

Fig. 3 に設計領域内に (a) 穴を配置しない均一モデルおよび (b) 初期配置レベルセット関数条件モデルを駆動周波数 50 kHz で加振した場合の実部の振動分布を示す。コンターは y 方向振動変位を示す。いずれの場合も出力面である上面に振動の節を有する平坦でない振動分布となっている。

5. 最適化結果

Fig.4 に初期穴の配置を変化したときの表面振動振幅分布の正規化した標準偏差の履歴を示す。正規化は Fig.3(a) の空隙のない振動分布の標準偏差を用いて算出している。全 18 ケースの最適化のうち、2 ケースは途中でメッシュ分割に失敗して最適化が不安定になっており、おおよそ半分のケースは期待しない共振モード

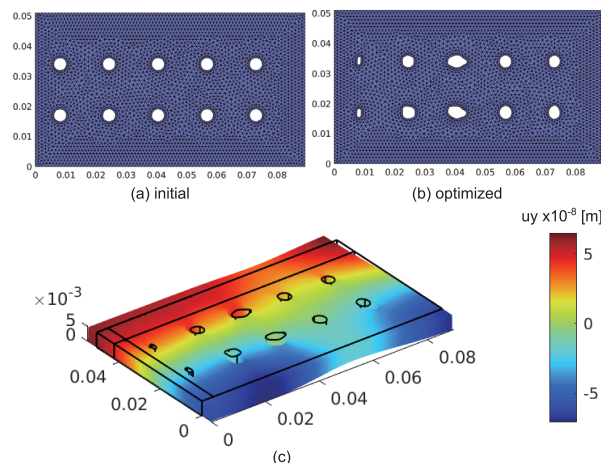


Fig.6 (a) Initial shape of (2,5,λ/48), (b) optimal shape, and (c) vibration distribution at 50 kHz.

が駆動周波数に漸近したため不十分な結果となったが、残りの半分のケースは概ね駆動周波数付近に一樣振動するモードを近づけることに成功し、最低 10 反復程度はそれを維持している。

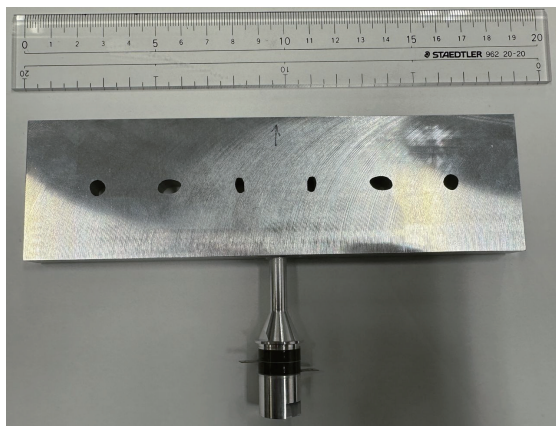
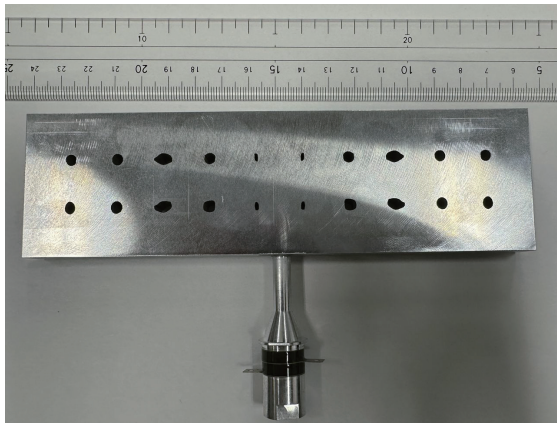
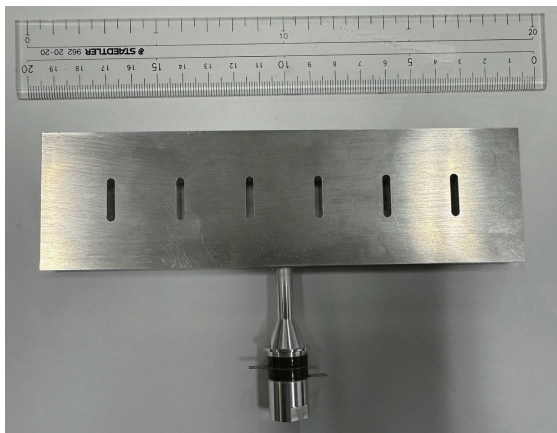
Fig.5,6 にそれぞれ 18 ケースのうち性能が良かった (I)case 1, $(H, W, r_h) = (1, 3, \lambda/36)$, および (II)case 16, $(2, 5, \lambda/48)$ について、(a) 初期形状と (b) 最適形状のメッシュと (c) 最適化後の 50 kHz における振動分布を示す。両方のケースとも上面振動分布において振動の節が存在しないほぼ一樣な振動分布が得られている。また、最適形状 (I)(II) 最適形状に対して固有値解析を行った結果、ほぼ同様の振動分布をもつ固有モードがそれぞれ 50.01 kHz, 49.94 kHz と駆動周波数 50 kHz のごく近傍に存在し、かつ (I) の前後のモードは 47.4kHz, 50.5kHz, (II) の前後のモードは 48.4 kHz, 50.4 kHz と駆動周波数より少なくとも 400 Hz 離れて存在することがわかった。

6. 工具作製および振動分布測定

Fig.7 に作製した超音波工具の写真を示す。得られた最適形状データを CAD データに変換した上で、ジュラルミン材をワイヤー放電加工機により加工した。工具中央下部には市販の加工機用ランジュバン振動子 (富士セラミクス, FBL50152H-FC, 50 kHz) を瞬間接着剤で接続している。形状 (III) は最適化結果との比較のために設定し、切削加工により作製した従来型のスリット付き工具である。スリット間隔を $\lambda/4$, 切削工具の都合からスリット幅を 3 mm として、スリット高さを調整することで工具部分の共振周波数が 50 kHz 周辺になるように調整したものである。

Fig. 8 に作製した振動工具のアドミッタンスループを示す。Fig. 9 には (IV) 使用したランジュバン振動子単体のアドミッタンスループを示す。アドミッタンスはインピーダンスアナライザ (Aglient 4294A) で測定した。共振周波数はそれぞれ (I)50.01, (II)49.92, (III)49.68 kHz とであった。これは既製品の共振周波数の実測値 (IV)49.4 kHz に比べて十分に想定 50 kHz と十分近い値であると考えられる。

Fig. 10 に作製した振動工具における注入電流と振動

(I) optimized (H,W,rh)= (1,3, $\lambda/36$)(II) optimized (H,W,rh)= (2,5, $\lambda/48$)

(III) conventional slit

Fig.7 Fabricated ultrasonic tools with bolt-cramped Langevin transducer.

速度の関係を示す。圧電振動子の性能を示す力係数は (I)0.115, (II)0.181, (III)0.130 A/(m/s) であり、元のランジュバン振動子の 0.150 A/(m/s) と比べて大きく性能の低下はないと考えられる。

Fig. 11 に測定した工具表面における振動分布を、比較のために Fig.12 に固有値解析で算出した振動分布を示す。測定はレーザードップラー振動計 (Polytec VibroFlex) を用いて測定した。分布は振幅最大値で規格化している。最適形状 (I)(II) の最大振動部分に対する最小部分の比はそれぞれ 47% ,54% であり、切削により形成され

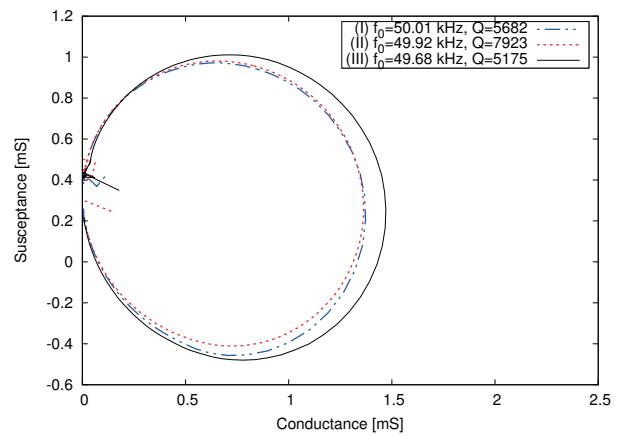


Fig.8 Measured admittance loop of the fabricated ultrasonic transducer.

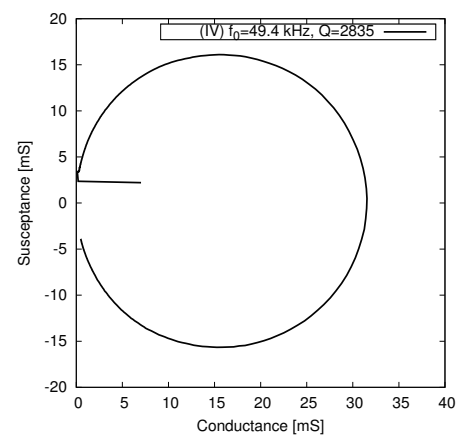


Fig.9 Measured admittance loop of the used bolt-cramped Langevin transducer.

たスリット型の 9% より一様な振幅分布を得られている。位相分布はいずれの場合においては、左端と右端で 45° 程度が差があるものもあるが、ほとんど一様であった。測定された振動分布は固有値解析のモードとよく一致しており、最大振動部分に対する最小部分の比もほぼ同様の値が得られている。

トラップホーンを利用した足立ら^[2]の工具においてこの値は 89.5% であるため、性能に関しては若干劣った結果ではあるが、振動子に対して重量な部品を配置した上に使用できる条件が限定される足立らの手法に対して、今後多様な形状に応用することができる本手法で得られる成果としては概ね満足のいく結果であると考えられる。

7. 結論

超音波振動工具の出力面の振幅分布の平準化を目的とするレベルセットポロジ最適化について、商用有限要素法プログラムを用いて三次元モデルで最適化を進行する手法の検討を行った。二次元レベルセット関数の進展を熱伝達ソルバーで代替し、抽出された形状を押し出すことで三次元モデルモデルを形成する。最適化結果としては、前報の二次元最適化と同様に明瞭

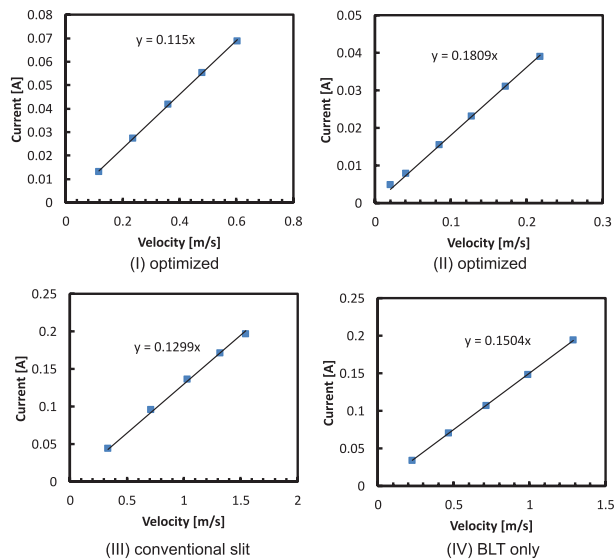


Fig.10 Measured velocity vs. input current.

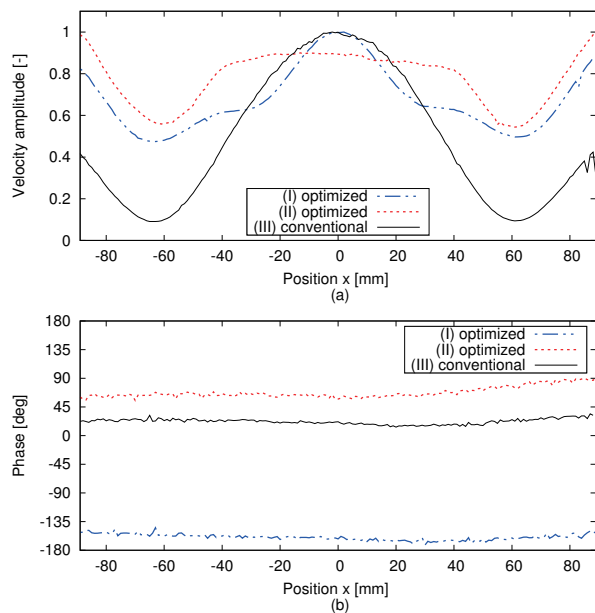


Fig.11 Measured velocity distribution of the fabricated ultrasonic transducer.

かつ平坦な出力面の振動分布をもつ形状を実際に製作することができた。

謝辞: 本研究はJSPS 科研費 基盤研究 (C)22K03994 の助成を受けて行われた。また、本研究で使用した振動工具の作製については東工大オープンファシリティセンター設計製作部門 (すずかけ台) 村田俊介氏に感謝する。

参考文献

- [1] K. Adachi, and S. Ueha, "Modal vibration control of large ultrasonic tools in high amplitude operation," Jpn. J. Appl. Phys., vol.28, no.Part 1, No. 2, pp.279-286, feb 1989.
- [2] K. Adachi, and S. Ueha, "Modal vibration control of

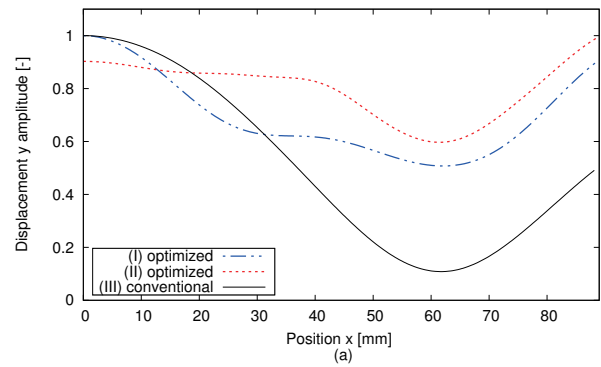


Fig.12 Calculated Vertical displacement distribution of the eigenmode nearest to 50 kHz.

large ultrasonic tools with the use of wave - trapped horns," J. Acoust. Soc. Am, vol.87, no.1, pp.208-214, 1990.

- [3] M.P. Bendsøe, and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method," Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., vol.71, no.2, pp.197-224, 1988.
- [4] 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002.
- [5] M.P. Bendsøe, Topology Optimization: "Theory, Methods, And Applications", Springer, 2003.
- [6] 西脇真二, 泉井一浩, 菊池昇, トポロジー最適化 (計算力学レクチャーコース), 一般社団法人日本計算工学会 (編), 丸善出版, 2013.
- [7] T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki, and A. Takezawa, "A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface energy," Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., vol.199, no.45, pp.2876-2891, 2010.
- [8] M. Otomori, T. Yamada, K. Izui, and S. Nishiwaki, "Matlab code for a level set-based topology optimization method using a reaction diffusion equation," Struct. Multidiscipl. Optim., vol.51, no.5, pp.1159-1172, May 2015.
- [9] 和田, 中村, "振動分布の平坦化を目的とする超音波振動工具のトポロジー最適化," 計算工学講演会論文集 Vol. 27, pp.B-03-04, june 2022.
- [10] Y. Wada, and K. Nakamura, "Topology optimization of large ultrasonic tools for uniform vibration using density model," Jpn. J. Appl. Phys., vol.62, no.SJ, p.SJ1023, mar 2023.
- [11] 和田, 中村, "レベルセット法による超音波振動工具のトポロジー最適化," 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, vol.123, no.286, pp.5-10, nov 2023.
- [12] B.B. Guzina, and M. Bonnet, "Topological derivative for the inverse scattering of elastic waves," Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol.57, no.2, pp.161-179, 2004.