

トポロジー最適化で設計し金属 3D プリンターにより造形した超音波振動工具の振動測定

Vibration measurement of large ultrasonic tools designed by topology optimization and fabricated by metal 3D printer

和田 有司¹⁾, 中村 健太郎¹⁾

Yuji Wada and Kentaro Nakamura

¹⁾東京科学大学 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@first.iir.isct.ac.jp)

Uniform vibration of ultrasonic welding tools is discussed and designed using topology optimization, and we are considering a metal 3D printer as a fabrication method. It is known that a small number of voids are generated in the modeled object, and it is not certain whether the elastic constants are the same as those of the base metal or not. In this study, a SUS316L test piece is formed using 3D printer and the elastic modulus is calculated from the frequency of length resonance excited by electromagnetic acoustic transducer (EMAT) and compared with that of the machine cut material. In addition, the vibration distribution of the tool when the optimization result is formed is compared with that of the wire electrical discharge machining.

Key Words : metal 3D printer, high-power ultrasound, ultrasonic transducer, topology optimization, electromagnetic acoustic transducer

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]が広く知られているが、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。

著者ら^[9]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について検討している。前報^[10]では、工具の出力面の振動分布の平坦化をする目的において、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と商用有限要素プログラムを利用して最適化を進行するフレームワークの構築を行った。最適化で得られた工具を実際に作製し振動分布の測定を行った結果、十分な平坦度を有する工具を設計することができた。しかしながら、前報のような二次元的な形状を有する工具については切削加工が可能であるが、将来的に期待される三次元的な工具設計では切削加工は利用できない。

複雑な三次元形状を有するトポロジー最適化の結果を造形する方法の一つとして、金属 3D プリンター^[11]が注目されている。代表的な造形手法である粉末床熔融結合法^[12,13]は金属粉に対してレーザ光を照射した後押し固めたものを積層して形成するが、造形条件次第で造形物中に少なからず空隙が発生することが知ら

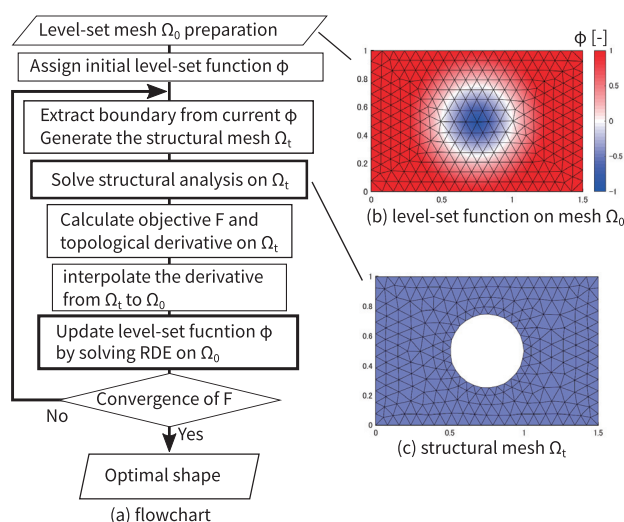


Fig.1 Flowchart of the topology optimization.

れており、母材金属との弾性率の相違は造形条件に左右されると予想される。造形物の強度については試験体^[11,14,15]やトポロジー最適化^[16]により得られた形状について多くの報告がなされているが、ヤング率や機械的損失(Q値)については報告が限定される。粉末床熔融結合法で使用可能材料はチタン合金(Ti6Al4V)やアルミニウムシリコン合金が知られているが、本研究では多くの金属 3D プリンターで利用可能かつ、母材金属の入手が容易であり、ステンレス鋼(SUS316L)について検討を行う。ステンレス鋼自体はジュラルミンをはじめとするアルミニウム合金に次いで超音波振動子によく使用される材料である^[17]。ヤング率およびQ値を同時に測定する手法には、外部磁界による電磁超音

波 (EMAT^[18]) を与え非接触的に縦振動を励振し、それぞれ共振周波数と振幅の半値幅から算出する方法が知られている^[19]。

本稿では SUS316L ステンレス鋼について切削材と金属 3D プリンターによる造形物について、はじめに直方体状の金属棒について EMAT により測定し算出したヤング率を比較する。次に、トポロジー最適化により設計した一様振動する大型工具^[1,9]を両者の方法で加工したうえで、出力面振動特性を測定し平坦度を比較する。

2. 振動工具のトポロジー最適化

(1) レベルセット法によるトポロジー最適化

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^[20]は、対象表面に複数点 ($k = 1 \sim N$) の観測用荷重 $\mathbf{f}_k$ 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。

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

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

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

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

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, 21]。

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

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

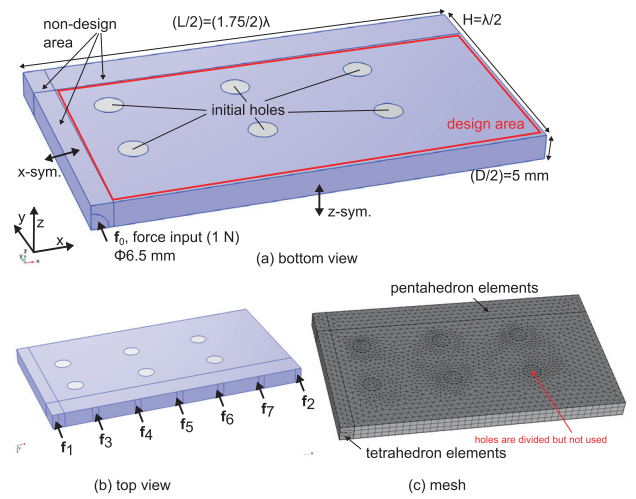


Fig.2 Target model design area from (a) bottom and (b) top view, and (c) its mesh division.

$\mathbf{M}$ 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算すればよい。

Fig.1 に今回の最適化におけるフローチャートを示す^[9, 10]。本研究において、有限要素法解析部分とその制御には COMSOL Multiphysics 6.2 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。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。

(2) 最適化モデルと最適化結果

Fig.2 に手順 3 で作成された三次元有限要素モデルと設計領域、境界条件を示す。足立ら^[2]の工具形状からスリットとトラップホーンを除いた工具部分を想定し、これを周波数 50 kHz で駆動するように相似的に縮小したモデルを想定する。構造は x, y 方向に対称であるので 1/4 モデルでの解析と最適化を行う。母材材料は SUS316L を想定し、文献値^[22, 23]よりヤング率 $E=193$ GPa、ポアソン比 0.29、材料密度 $\rho_m = 7980$ kg/m³ を使用した。波長 λ は細棒の縦波音速 $c = \sqrt{E/\rho_m}$ から算出するものとする。工具の幅は足立らと同じ 1.75 波長、高さは半波長、奥行きは 10 mm とする。工具下面中央部に出力面直径 6.5 mm のホーン付きランジュバン振動子からの振動入力 $\mathbf{f}$ を供給したときに、工具上面での振

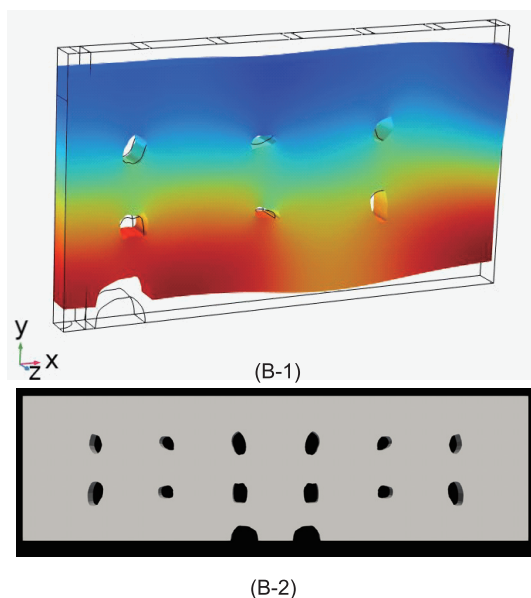


Fig.3 Optimal shape and nearest eigenmode with initial hole of setting A: (3,2,λ/36).

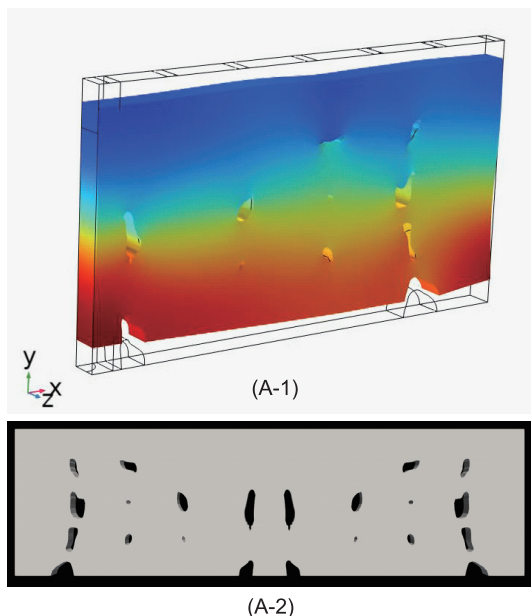


Fig.4 Optimal shape and nearest eigenmode with initial hole of setting B: (4,3,λ/48).

動出力を平坦にする材料配置について検討する。

振動入出力に関する上面の $\lambda/12$ および中央部 $\lambda/24$ の部分については、レベルセット関数が常に $\phi = 1$ とする非設計領域とする。幅と高さ方向の二次元領域を要素サイズ $\lambda/96$ の三角形で分割した後、設計領域は厚み方向に3要素分押し出すことで五面体要素としてモデル化し、非設計要素は円形の入力面と整合するように四面体・五面体要素の混合でモデル化する。検出用の荷重 f_k は上面の出力面のうち中央 g_1 と端部 g_2 に加えて、おおよそ $\lambda/6$ 間隔となるように $L = 1.75\lambda$ のときは追加で5点、合計で7点を配置した。検出荷重はいずれも幅 $\lambda/12$ 、奥行方向は工具幅の領域で均等に

荷重が入力されるものとする。また、初期のレベルセット関数は下式の通り、半径 $r_h = \lambda$, $D_r = 36$ または 48 の円形穴がレベルセット関数領域に格子状に、高さ方向に $H=1-3$ 個、幅方向には $W=3-5$ 個配置される場合の合計18ケースについて最適化を実施し、平坦モードが駆動周波数に十分近く平坦度が大きい上位2ケースを試作するものとする。以降、初期形状ケースについて幅個数 W 、高さ個数 H 、初期半径 r_h のとき (H, W, r_h) 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.3,4に共振周波数と平坦度が上記の基準に適した形状である(A): $(H, W, r_h)=(3,2,\lambda/36)$ および(B): $(4,3,\lambda/48)$ について最適形状と駆動周波数最近傍の振動モードを示す。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様な振動分布が得られており、形状(A)は周波数 50.09 kHz、平坦度が 70.3%、(B)は周波数 49.93 kHz、平坦度が 82.5%であった。

3. 振動工具および試験片の造形と測定

(1) 切削および造形条件

最適化で得られた振動工具形状と長さ 100 mm、幅 15 mm、厚み 10 mm の試験片について、切削加工および金属 3D プリンターで作製する。振動工具の切削加工は東京科学大学オープンファシリティーセンター所有のフライス盤およびワイヤー放電加工機により実施した。金属 3D プリンターは東京都立産業技術研究センター所有の ProX300(3D Systems) により実施した。振動工具は工具の奥行き(z)方向に積層するように造形し、試験片は幅方向および長さ方向に積層する2パターンの方法で造形を行った。いずれの造形においてもレーザーの出力 131W、操作速度 1200 mm/s、ハッチ間隔 60 μm 、ヘキサゴン外接半径 15 mm、積層ピッチを 40 μm とした。

(2) 試験片の共振特性

Fig.5に切削・造形した長さ 100 mm、幅 15 mm、奥行 10mm の金属棒を示す。母材および金属粉の母材はステンレス材(SUS316L)である。Fig.6(a)にEMATによる共振特性の測定系を示す。非磁性材料を対象とする場合には永久磁石を利用してローレンツ力による振動励振を使用することが多い^[19]が、今回は直流磁界を併用することで振動の励振を行う。試験片を6 mm厚のアクリルスポンジで覆い、断面が幅 27 mm、高さ 18 mmのPLA製の治具に巻いた銅線を300回程度巻き付けたコイルにより磁界を与える。空芯状態のインダクタンスは 744 μH であった。コイルに0-6.24 Vのバイアス付き正弦波を一次および二次の縦振動モード周波数近傍で周波数を 0.5 Hz/s の速度で掃引し、底面の振動をレーザードップラー振動計(CLV1000, Polytec)により測定し、ロックインアンプ(5560, NF)により振幅値を得る。一次および二次の縦振動モードの測定時は

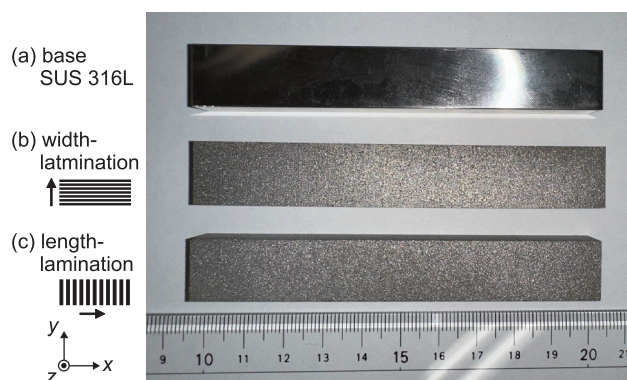


Fig.5 Photograph of (a) machined, (b) width, and (c) length laminated SUS316L block.

それぞれ Fig.6(b)(c) のように、振動モードにおいてひずみが大きくなるような振動の節の位置にコイルを配置し、二次モードではバランスをとるためにもう片側にコイルを配置し、もう片側にはコイルのないスポンジ付き治具を配置した。試験片は3サンプルずつの計9個の測定をした。

Fig. 7に各試験片の振動速度の周波数特性を示す。Fig. 8に算出した見かけの密度, ヤング率, 共振の Q 値の結果を示す。誤差棒は各3サンプルの平均値, 最大値, 最小値を示す。密度およびヤング率における点線は文献値を示す。見掛けの密度は試験片の重量を電子天秤 (FR-200 MKII, AANDD) で測定し, 寸法体積から算出した。試験片は概ね細棒とみなせるが, 有限要素法より一次と二次モードは理論的な縦波速度 $\sqrt{E/\rho_m}$ より 0.1%, 0.4% だけ異なるため, ヤング率についてはこの分の補正を考慮している。共振の Q 値は振幅周波数特性の半値幅から算出した。

切削材と比較して, 見かけの密度については幅方向積層は 0.66%, 長さ方向積層は 3.2% の低下であり, ヤング率については幅方向積層は 0.75%, 長さ方向積層は 11% の低下であった。切削材のヤング率が文献値より 4% 程度大きい点については, ステンレス鋼については加工硬化の影響が考えられ, 同種の縦振動測定によるヤング率の推定^[19, 24]においても同様の傾向が見られる。

共振の Q 値については切削材が一次モードで 9400, 二次モードで 6600 であるのに対して, 造形材は 2500–2700 程度に留まる結果となった。後述する工具を取り付けた振動子 (Table 1) においても, 切削材で Q 値が 9000 近く, 造形材でも 3000 程度の値が得られている。低振動振幅におけるステンレス鋼の Q 値は SUS303 材で 3600 (30 kHz) および 3000 (60 kHz)^[25], SUS304 材で 1880 (32 kHz)^[19] が報告されているが, 今回の結果はこれらの結果よりやや高い。文献^[17, 25]によると, ステンレス鋼は振幅が増加したときに急激に Q 値が低下する傾向にあり, 今回の測定はいずれは極めて小さな振動振幅で実施するためこのような差異が現れたものと予想される。

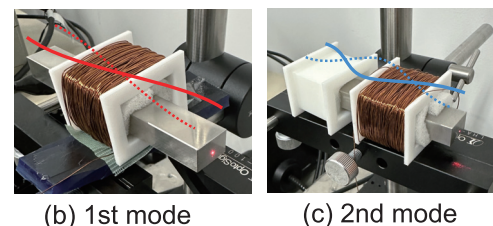
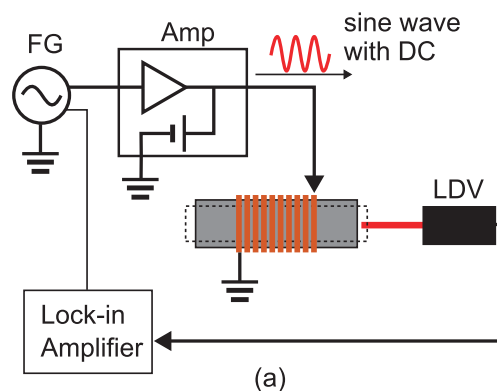


Fig.6 Measurement setup of the resonant characteristics.

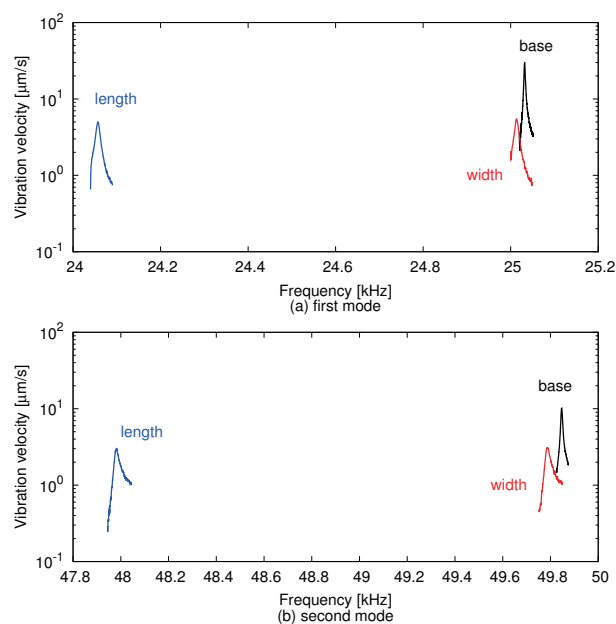


Fig.7 Measured vibration velocity vs. frequency.

(3) 作製した工具の振動特性

Fig.9 にトポロジー最適化を用いて設計した, 出力面が一樣振動する振動工具を, (A-1)(B-1) ワイヤ放電加工による切削加工, (A-2)(B-2) 3D プリントにより造形した結果を示す。切削および造形した工具に対して市販の 50 kHz のボルト締めランジュバン振動子 (FBL50152H-FC, Fuji Ceramics) を工具底面に瞬間接着剤により接合している。

Table 1 作製した工具の共振性能を示す。共振周波数, Q 値, およびアドミタンスはインピーダンスアナライザ (4294A, Agilent) で測定した。力係数は工具中央における振動速度と注入電流から算出した。文献値 193 GPa

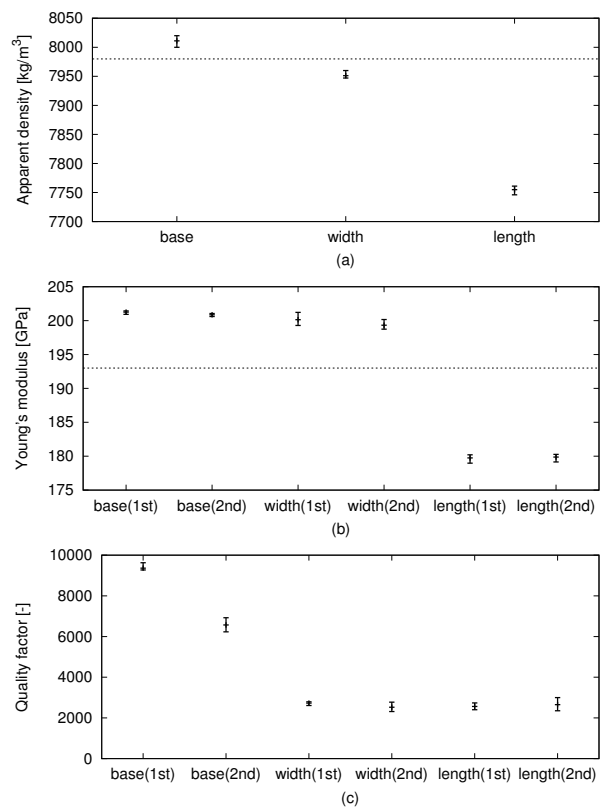


Fig.8 Measured apparent density, young’s modulus, and quality factor for each three samples. Error bar indicates maximum, average, and minimum value.

を使用して最適化がなされたため、作成された振動子は想定の 50 kHz より 0.5–1 kHz 高い共振周波数を有する結果となった。事前に試験片により測定をしたうえで適合するヤング率を用いて最適化がなされれば共振周波数の誤差は低減され则认为られる。

Fig.10 に工具上面の面外方向振動分布をレーザードップラー振動計 (CLV1000, Polytec) により測定した結果を示す。いずれの結果も振動の節を持たないほぼ一様振動する分布が得られたが、切削材は計算結果とよく一致した振動分布が得られているのに対して、造形材では (A-2) については設計とやや異なるモード形状で振動していると考えられ、(B-2) については右側の特性は概ね似ているが左側では特性に乱れがあることから何らかの非対称モードが励起されたと予想される。

4. 結論

トポロジー最適化を用いて設計した工具を金属 3D プリンターで造形する場合の性能について検討を行った。試験片を用いて EMAT によりヤング率および Q 値を測定した結果、ヤング率は積層方向によって 0.75% または 11% の低下が見られ、Q 値は積層方向によらず 1/3–1/5 程度に低下した。大型工具については 3D プリンターを用いた場合も振動の節を持たない一様振動する分布が得られたが、振動モードの変化や工具の左右で振動分布が異なる結果が得られた。

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。3D プリンターによる工具の造

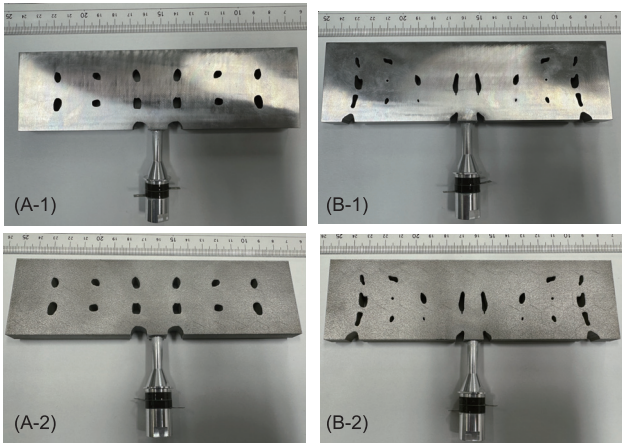


Fig.9 Photograph of large ultrasonic tools for uniform vibration. (A-1) and (B-1) are fabricated by wire electrical discharge machining, and (A-2) and (B-1) are fabricated by metal 3D printer with thickness lamination.

Table1 Resonant frequency f_0 [kHz], quality factor Q , admittance Y [mS], force factor A [A/(m/s)], measured flatness U [%], and phase deviation $\delta\theta$ [deg] of the fabricated tools.

tools	(A-1)	(A-2)	(B-1)	(B-2)
	machined	printed	machined	printed
f_0	51.09	50.54	50.89	50.51
Q	9270	3063	8663	2916
Y	0.578	0.270	0.809	0.344
A	0.235	0.182	0.171	0.175
U	67.56	61.37	80.44	67.51
$\delta\theta$	3.6	1.4	5.8	2.9

形にご協力いただいた、東京都立産業技術研究センター研究開発本部物理応用技術部 機械技術グループの千葉浩行氏に感謝する。また、切削による振動工具の製作を行っていただいた、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) の村田俊介氏、大森翔氏に感謝する。

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 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.

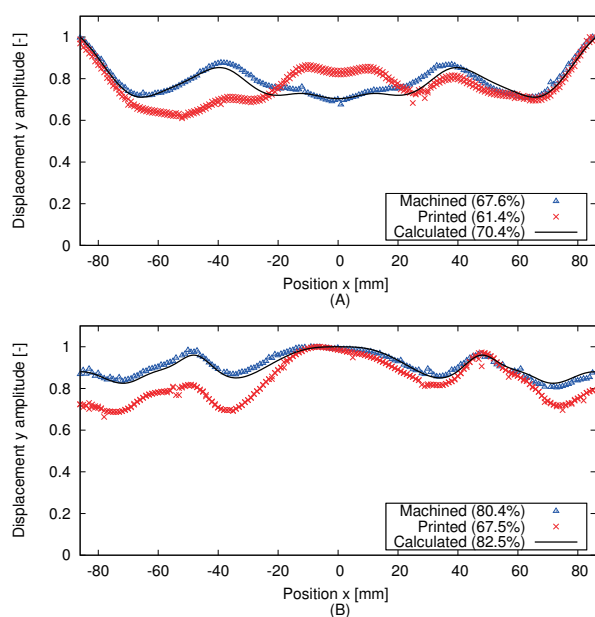


Fig.10 Measured and calculated vibration distribution of the fabricated transducers.

- [5] M.P. Bendsøe, *Topology Optimization: Theory, Methods, And Applications*, Springer, 2003.
- [6] 西脇眞二, 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] Y. Wada, and K. Nakamura, "Topology optimization of large ultrasonic tools for uniform vibration using level-set method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.64, no.3, p.03SP34, mar 2025.
- [10] 和田有司, 中村健太郎, "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," 計算工学講演会論文集 Vol. 29, pp.B-04-06, jun 2024.
- [11] 宮田淳二, 古川哲義, 三村誠一, 村上和之, "電子ビーム粉末床溶融結合法 (金属 3d プリンタ) の紹介," *軽金属*, vol.72, no.6, pp.358-363, 2022.
- [12] D. Dev Singh, T. Mahender, and A. Raji Reddy, "Powder bed fusion process: A brief review," *Mater. Today*, vol.46, pp.350-355, 2021, 2nd International Conference on Manufacturing Material Science and Engineering.
- [13] M. Grasso, and B.M. Colosimo, "Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol.28, no.4, p.044005, feb 2017.
- [14] L. Ladani, and M. Sadeghilaridjani, "Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals," *Metals*, vol.11, no.9, 2021.
- [15] V.L. Tran, S. Zhang, J.C. Kim, S.T. Hong, U. Auyeskhani, J. Choi, J.H. Lee, C.S. Kim, and D.H. Kim, "Mechanical analysis of sus316l, tool steel, ti, and alsil0mg lattice structures manufactured by laser-powder bed fusion for energy absorption design," *Journal of Manufacturing Processes*, vol.132, pp.112-121, 2024.
- [16] J. Liu, A.T. Gaynor, S. Chen, Z. Kang, K. Suresh, A. Takezawa, L. Li, J. Kato, J. Tang, C.C.L. Wang, L. Cheng, X. Liang, and A.C. To, "Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol.57, no.6, pp.2457-2483, Jun 2018.
- [17] K. Nakamura, K. Kakihara, M. Kawakami, and S. Ueha, "Measuring vibration characteristics at large amplitude region of materials for high power ultrasonic vibration system," *Ultrasonics*, vol.38, no.1, pp.122-126, 2000.
- [18] R. THOMPSON, "4 - physical principles of measurements with emat transducers," in *Ultrasonic Measurement Methods*, eds. R. THURSTON, and A.D. PIERCE, vol.19 of *Physical Acoustics*, pp.157-200, Academic Press, 1990.
- [19] M. Tsuchida, and T. Morita, "Non-contact mechanical q-factor measurement system based on electromagnetic acoustic transducer," *Precision Engineering*, vol.91, pp.390-395, 2024.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ステンレス協会編, ステンレス鋼データブック, 日刊工業新聞社, 2000.
- [23] MatWeb, "AISI Type 316L Stainless Steel, annealed bar," URL:<https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq316q>, (date accessed: 2025-04-01).
- [24] M. Tsuchida, S. Okazaki, R. Nakajima, Y. Ozawa, and T. Morita, "Non-contact precise measurement of heat treatment effect on elastic properties of metallic materials," *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2024)*, pp.3J2-3, 2024.
- [25] J. Wu, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Enhancement in mechanical quality factors of poly phenylene sulfide under high-amplitude ultrasonic vibration through thermal annealing," *Ultrasonics*, vol.91, pp.52-61, 2019.