

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04341

研究課題名（和文）圧電素子の機械共振点近傍での「跳躍・降下現象」の機構解明とその技術的問題の解決

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism of the "jumping and dropping effect near the mechanical resonance of a piezoelectric element and the solutions to its technical problems

研究代表者

足立 和成 (Adachi, Kazunari)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00212514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ハード系圧電セラミック素子の「跳躍・降下現象」の支配的機構が、その機械共振周波数近傍で生じる電界分布の著しい乱れに伴う局所的な電界集中によって、それが抗電界を超えることで生じる結晶ドメイン単位での分極反転であるとの仮説の妥当性を、数値シミュレーション並びに実験結果から間接的に確かめた。またそのことにより、圧電セラミックの三次の弾性的非線形性の効果が同現象の原因であるとの従来の説には全く説得力がないことも明らかになった。ただ、機械損失が大きいソフト系圧電セラミック素子に関しては、同現象の顕著な発現自体が確認できず、圧電セラミック素子全体に適用可能な機構解明の説明には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くに強力超音波の工業的応用においては、大振幅の超音波振動を高効率に発生させるため、圧電セラミック振動子を共振状態で駆動しなければならないが、最も効率が良いはずのその機械共振周波数で駆動しようとする、「跳躍・降下現象」と呼ばれる不安定現象が起き、動作が安定しなくなる。そのため多くの実用強力超音波応用機器では、出力インピーダンスが非常に高い定電流源とみなせる駆動回路を使って、効率と安全性を犠牲にして、高電圧での駆動をせざるを得ない。本研究の成果は、そうした問題を解決する知見を与えることで、強力超音波応用技術の適用範囲を医学的治療の領域などでより拡大させることに寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The peculiar events called the "jumping and dropping" phenomena of piezoelectric ceramic vibrators in high amplitude operation have widely been known. The phenomena, which occur solely in the vicinity of the mechanical resonance frequencies of the vibrators, are the emergence of hysteresis in frequency domain with abrupt increase and decrease of the vibratory amplitude. It has long been believed that the third-order elastic nonlinearity of the piezoelectric materials is the dominant cause of the unstable vibratory behaviors. Nevertheless, in this research, it has been found that they can be attributed to the local piezoelectric polarization reversals due to the electric field concentration caused by its conspicuous distortion inside the vibrators in mechanical resonance. The validity of this hypothesis has been verified by numerical and experimental investigations for hard-type piezoelectric ceramics, but regrettably it has not for soft-type piezoelectric ceramics yet.

研究分野：超音波工学

キーワード：圧電セラミック 「跳躍・降下現象」 不安定現象 機械共振周波数 電気機械振動変換器 非線形振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

圧電セラミックなどの圧電素子は、高効率の電気機械振動変換器として、大振幅超音波振動の発生に広く用いられている。この大振幅超音波振動の工業的利用、即ち強力超音波技術は、自動車のヘッドライトのカバー等の様々なプラスチック部品の接合や金属加工、半導体の部品洗浄、外科手術等に用いられている極めて重要な要素生産技術である。だが、圧電素子を定電圧源で駆動すると、駆動電圧の増大に伴って、本来最も高効率・大振幅で駆動できるはずの機械共振(アドミタンス共振)周波数 f_{0s} 付近で図1のように、共振峰の形が低周波側に傾くように歪んでゆき、さらに駆動電圧を増大させると、周波数領域での履歴現象までが現れ、動作が極めて不安定になると同時に急激に損失が増加する、所謂「跳躍・降下現象」が生じることが知られている。

従来この現象は、圧電材料の3次以上の弾性的非線形性によるものと明確な物理的根拠なく信じられてきた^{1,2)}。ところが、最大瞬時歪が僅か 10^{-4} 未満でもこの現象は起きる。また同じ圧電素子とその電気共振(インピーダンス共振)周波数 f_{0o} 近傍で定電流源駆動(厳密には定電流駆動)すると、機械共振周波数の時と全く同様な固有振動モードで同じ大振幅で振動させてもこの現象は全く生じない^{1,3)}。その上、その原因とされる顕著な高次の弾性的非線形性自体が、静的には、いささかも観察されていない。こうしたことから、圧電材料の弾性的非線形性に、この現象を帰することには本質的に無理があり、その発生の機構は、本研究以前には全く明らかになっていなかった。

この現象は、無負荷の圧電素子を比較的低い電圧で駆動した場合でも生じることが、強力超音波機器の開発現場では以前から周知の経験的事実となっている。そのため、この特異な現象を避けるべく殆どの当該機器メーカーは、定電流源と見做せる駆動電源(出力インピーダンス大)によって圧電振動子とその電気共振周波数(インピーダンスが極大となる周波数) f_{0o} 近傍で励振する方式を採用してきている。だが、電気共振時の駆動電圧は非常に大きくなり、電極間の縁面放電や感電事故の防止のために機械的損失の大きい絶縁用シリコンゴム等で圧電素子を覆うなどの対策が必要になる。さらに、振動子の制動容量 C_d に流れ込む大きな無効電流による誘電損失も無視できなくなってしまう。このため現状では、高効率の電気機械振動変換という圧電振動子の利点を十分活かしきれず、強力超音波技術の応用範囲が狭められてしまっている。

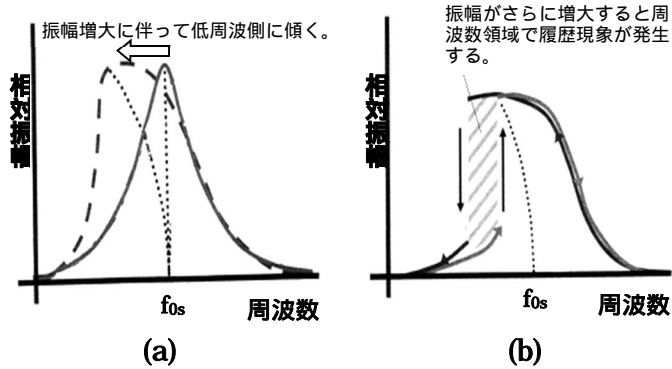


図1 圧電素子の機械共振周波数近傍での「跳躍・降下現象」

2. 研究の目的

本研究の主目的は、圧電振動子の「跳躍・降下現象」の機構を世界で最初に明らかにし、その機械共振周波数付近での等価回路の見直しなども含めた、強力超音波技術における圧電振動子の高効率・高安定な駆動手法を見出し、その応用範囲を飛躍的に広げることにある。特に、半世紀以上にわたって強力超音波技術の分野で広範に用いられて続けてきた圧電振動子であるボルト締めランジュバン型振動子における「跳躍・降下現象」への技術的対策の考案を、当初は目指していた。

3. 研究の方法

新型コロナウイルス感染症蔓延による不織布マスク増産需要増加や感染防止策の影響を受け、強力超音波用のボルト締めランジュバン型振動子の調達に時間がかかったことや、技術経験者の助言・指導を受けることが極めて困難となったため、当初の研究計画を大幅に見直した。具体的には、最初は圧電セラミック振動子単体についての「跳躍・降下現象」の機構解明に集中し、その後で、強力超音波技術における高効率・高安定な駆動手法の考案に進む方針に転換した。

圧電性を考慮した有限要素法により、圧電素子円盤の平行な上下面に設けた電極に正弦波交流電圧を印加した場合の振動解析を行うと、図2のように、軸対称の半径方向呼吸振動モードの形状は殆ど同じであるにも関わらず、その機械共振周波数付近に限り内部電界の著しい乱れが生じ、電気共振周波数を含むそれ

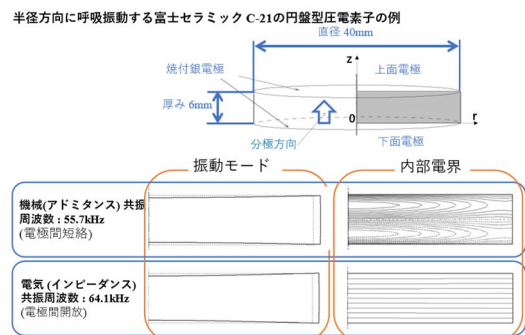


図2

以外の周波数では、均一な内部電界になっていることが、既に過去の文献から明らかになっていた⁴⁾。圧電素子内部の電界と歪の関係は、一般的には図3のようなバタフライ曲線で表されることから、上述のような電界の乱れによって電界集中が生じている箇所、電界が抗電界を超えることで分極反転が生じ、これに起因する不安定現象が発生している可能性が考えられた。そこで、跳躍・降下現象は圧電素子の機械共振周波数付近で生じる内部電界の乱れに伴う電界集中に起因する局所的な分極反転によるものではないか、との独自の仮説⁵⁾(「電界集中起因説」)に基づくその機構解明を当初の構想通りにまず進めた。具体的には、電界集中による局所的な分極反転に着目した有限要素シミュレーションによってこの現象を定性的に再現することを試み、その結果を受けて、跳躍・降下現象の発現を実験的に検証し、この仮説を裏付けることにした。

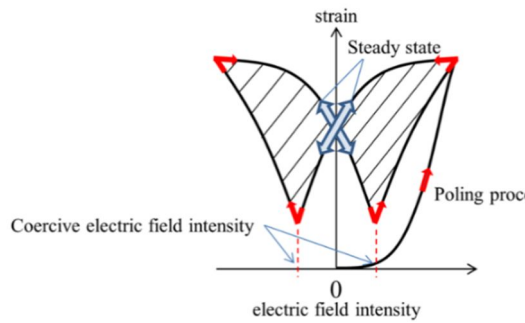


図3

3-1 数値シミュレーションによる「跳躍・降下現象」の再現

「跳躍・降下現象」を再現するシミュレーションは、山形大学の足立和成らによって開発された二次元有限要素解析システム (UNIFESP) を用いて行った。図4、図5に解析対象の一つとなった富士セラミックス製の上下面銀電極付きの2種類の円盤型圧電素子(厚さ $t=3\text{mm}, 6\text{mm}$ 、材質はハード系の富士セラミックスC-21)の外観と寸法・形状を示す。円盤は軸対象であるため、図6の灰色部分の断面を、2つの直角三角形要素からなる $0.25 \times 0.25\text{mm}$ の小さな正方形要素に有限要素分割して解析した。後述するように、これら形状の圧電素子について、周波数アドミタンス特性等を実測し、跳躍・降下現象発現の実験的検証も行っている。



図4

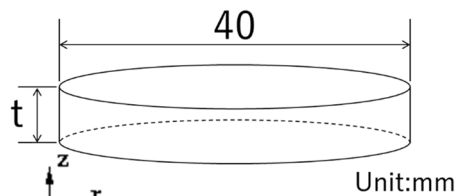


図5

このシミュレーションは以下のような手順で行った。始めに機械共振周波数よりやや高い周波数を駆動周波数とした強制振動解析を行い、圧電素子内部の要素毎の電界の値と、図6に示したその外周端面厚み中央の位置の半径方向の変位を求めた。その際、各要素において分極反転閾値を超える電界が発生した場合、その要素の分極方向を反転させ、同じ駆動周波数で強制振動解析を行い、同様に電界の値と変位を計算する。分極反転閾値を超える要素がない場合は駆動周波数を下げ、上記と同様に強制振動解析を行い、要素毎の電界の値と変位を読み取る。以上を繰り返して、これ以上駆動周波数を下げても、分極反転閾値を超える電界が生じている要素が現れないと判断されたら、次は駆動周波数を上げながら、上記と同様の手順で強制振動解析を繰り返していく。そしてこれ以上駆動周波数を上げて分極反転閾値を超える電界が印加されている要素が現れないと判断されたところで、このシミュレーションを終了する。

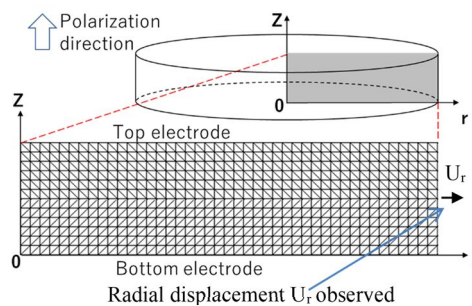


図6

分極反転閾値を 500 V/mm と仮定し、それ以上の電界が発生した要素の分極方向は必ず反転すると仮定した。そこで分極反転した要素は、圧電応力定数の符号だけを反転させ、弾性係数や誘電率は分極方向によらず一定とした。実際には、分極反転は圧電素子内の個々の微小なドメインごとに起こると考えるべきだが、そのタイミングの同定は困難なため、このシミュレーションでは、駆動周波数を 1Hz ステップで変化させながら、分極反転閾値を超えた有限要素内で一律に分極反転するものとしている。

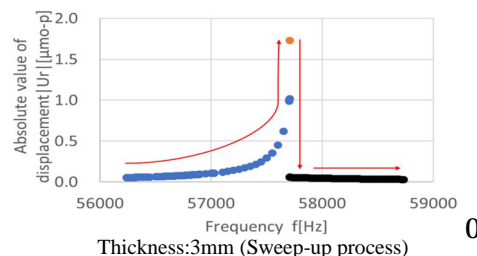
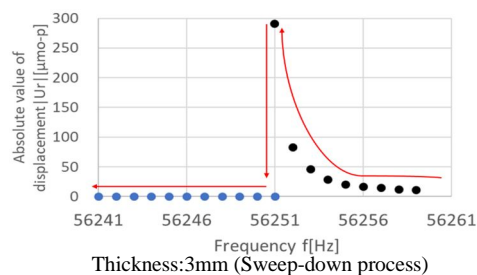


図7

今回使用した有限要素解析システムでは損失が考慮されていないので、上述の強制振動解析において得られる圧電素子内部の電界分布自体も実際とは多少異なるものと考えられる。しかしこのシミュレーションにおいては、跳躍・降下現象の定性的な再現を目的としており、上述のような実際との相違は無視している。

3 - 2 「跳躍・降下現象」の数値シミュレーションの結果

印加電圧を $5.1V_{o-p}$ として、厚さ 3mm の円盤型圧電素子について前述のシミュレーションを行った結果を図 7 に示す。図中のプロット点の色は、それぞれ図 8 各図に示す分極方向の変化に対応している。図 8 (a) には、圧電素子の初期分極方向を示し、図 8 (b)、(c) には、特定の駆動周波数において、印加電界が分極反転閾値を超えたために、その分極方向が通常とは逆方向になったと判定された要素を図 7 のグラフの対応するプロットと同じ色で塗り、表示した。

機械共振周波数より高い周波数から駆動周波数を徐々に下げていくと、56251 Hz で図 8 (b) に示す要素群において分極反転が生じて、図 7 (a) に示すように振動変位が急激に低下した。そこから下の駆動周波数では、分極反転する要素は現れなかった。

そこで図 8 (b) の状態のまま、今度は駆動周波数を上げていくと、57705 Hz で分極反転が生じて図 8 (c) に示す要素群の分極が反転した状態となって振動変位が急激に上昇し、同じ周波数で分極反転域が図 8 (a) のような元の状態に戻り、振動変位が急激に低下した。それ以上の周波数では分極反転する要素は現れなかった。このシミュレーションでは、最終的に分極状態が完全に初期分極状態に戻っている。同材質 (C-21) の直径 40mm、厚さ 6mm の円盤型圧電素子や同じ形状のソフト系圧セラミック素子についても、同様の解析を行ったが、同じような結果が得られている。

以上のように、分極反転閾値を超える電界が生じている有限要素の分極を反転させることで、降下現象だけでなく、跳躍現象についても再現することができた。ただ損失を考慮していなかったため、駆動周波数下降掃引時の降下現象に比して、上昇掃引時の跳躍現象がささやかなものになっている。実際には、下降掃引時の共振点付近での最大値は損失によって抑圧されるため、降下現象における振幅の変化の程度は、上昇掃引時の跳躍現象と同程度になると考えられるから、電界集中による局所的な分極反転のシミュレーションによって跳躍・降下現象を一定の水準で定性的に再現できたと考えている。

3 - 3 実験的検証の方法とその結果

厚さが異なる円盤型圧電素子を対象に周波数アドミタンス特性を測定した。可能な限り機械的支持の影響を減らすことで、大振幅駆動時でも安定した測定ができるように、MISUMI 製コンタクトプローブ NP45-AS と NP76-H を採用し、軸対称半径方向呼吸振動モードの振動の節の位置を保持するようにした。支持による影響を考え、低印加電圧 ($0.1V_{(0-p)}$) 時に 1100 以上の共振先鋭度 Q が得られる支持状態にしてから測定した。測定系を図 9 に示す。

印加電圧が 0.75 、 1.0 、 $1.5V_{(0-p)}$ の時に各周波数掃引方向毎に 5 回測定した結果を図 10 に示す。図中のプロットは測定されたアドミタンスの平均値であり、誤差棒は ± 1 標準偏差の幅を示している。このグラフからわかるように、圧電素子の厚さ (電極間隔) が小さい方がより顕著に「跳躍・降下現象」が現れている。

ただ、本来の「跳躍・降下現象」を観察するためには振動変位の周波数応答を見る必要がある。そのため、厚さが 3mm と 6mm の円盤型圧電素子を測定対象として、図 11 に示す測定系を使用して、印加電圧 $V[V_{(0-p)}]$ を変化させたときの振動変位 $U_r[\mu m]_{(0-p)}$ の周波数特性も測定した。

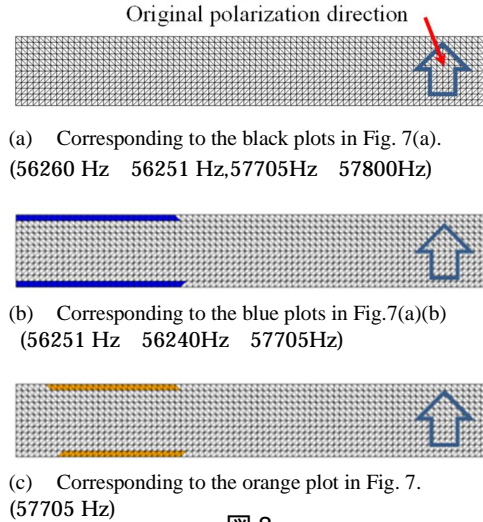


図 8

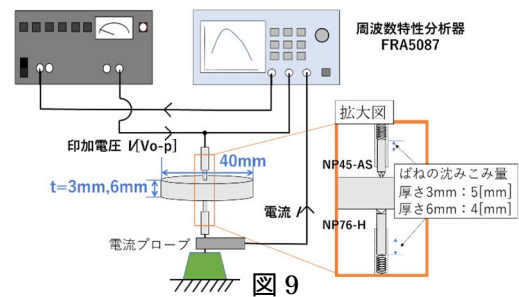


図 9

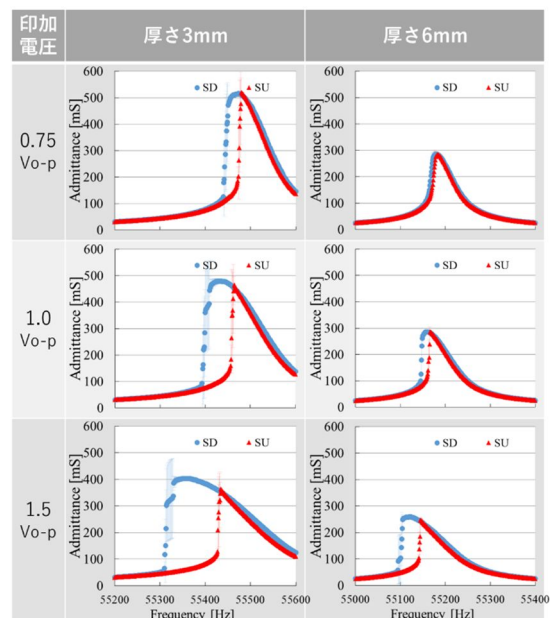


図 10

振動変位については、解析で着目した点と同じ圧電円盤振動子の外周部厚み中央における半径方向の振動変位 U_r をレーザードップラー振動計を用いて測定している。円盤型圧電素子の振動機械的支持は、図9と同じ手法で行っている。印加電圧を $0.75, 1.0, 1.5 [V_{(0-p)}]$ と変化させたときの円盤型圧電素子の外周部厚み中央における半径方向の振動変位とその周波数特性の実測値を、図12に示す。これより、振動変位における「跳躍・降下現象」の測定においても薄い振動子のほうが周波数領域での履歴が大きくなることから、電極間距離が短く平均電界が大きいほうが、この現象が顕著に表れることがわかった。

さらに上の結果に基づいて、従来の説において跳躍・降下現象の原因とされてきた圧電材料の弾性的非線形性の影響の検討を行った。「跳躍・降下現象」が生じている圧電セラミックスの内部における最大歪みの値を求め、その値が弾性的非線形の影響を考慮しなければならない程のものであるか否かを検討した。ただ圧電セラミックスの内部の歪みはその内部電界と同様に直接計測することは不可能である。そこで有限要素法による固有振動解析で、外周端面厚み中央部分で実測した振動変位の値を設定して、最も応力がかかる要素を対象にその要素の歪みを計算し、与えた変位と導出した歪みの関係から、機械共振時における圧電素子の最大瞬時歪みを推定した。各印加電圧に対する厚さ3mmと6mmの振動子の最大振動変位振幅と最大瞬時歪をプロットしたグラフを、図13に示す。最大瞬時歪はいずれも 10^{-4} 未満と極めて小さく、弾性的非線形性が顕著になるような大きさではない。他の同型の圧電セラミック素子でも、同様な結果を得たが、ソフト系圧電セラミックの同形状の素子では、駆動電圧の上昇に伴う周波数領域での履歴現象は見出されたものの、「跳躍・降下現象」自体の発現は明確でなかった。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」のところで、ハード系圧電セラミック C-21 の円盤型圧電素子を例にとって数値シミュレーションや実験の結果を示したが、他の同形状のハード系圧電セラミック（富士セラミックス製 C-204）では同様の結果が得られたものの、同形状ではあっても、ソフト系圧電セラミック（富士セラミック C-6）素子では、駆動電圧の上昇に伴う周波数領域での履歴現象は見出されたが、「跳躍・降下現象」自体の発現が明確ではなかった。この問題の解明のために様々な試みを行ったが、研究期間内には首尾一貫した明確な説明ができる状況には至らなかった。そのため当初予定していた、圧電素子の機械共振周波数付近での等価回路の見直すことなどにより強力超音波技術における圧電振動子の高効率・高安定な駆動手法を考案することは、できなかった。また、研究期間内には研究成果を原著論文の形で公表することも出来なかった（2024年4月には日本応用物理学会欧文誌 JJAP に投稿）。

しかしながら、少なくともハード系圧電セラミック素子については、数値シミュレーション並びに上述の各種実験によって、「電界集中起因説」に基づく「跳躍・降下現象」の機構の首尾一貫した形での説明ができることが明らかになった。特に、従来の説では全く説明できなかった、定電流源による圧電素子のインピーダンス共振（電気共振）周波数での駆動方式（実用的に広く採用されている）では大振幅駆動時でも同現象が全く生じない理由が、圧電素子内部で局所的電界集中が起きないことにあることを、世界で初めて明確に説明できるようになったことは、斯界における学術的・技術的知見として極めて大きな意義を持つものである。

参考文献

- 1) Sadayuki Takahashi and Seiji Hirose : Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31 (1992) pp.3055-3057
- 2) Kenji Uchino et al.: J. Electroceramics (Kluwer Academic Publishers) 2:1 (1998) pp.33-40
- 3) Mikio Umeda et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol.39 (2000) pp.5623-5628
- 4) 山淵龍夫、加川幸雄、高橋貞行 : 日本音響学会誌 37 巻 7 号 (1981) pp.307-315
- 5) 足立和成他, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.31-32, 2019年3月

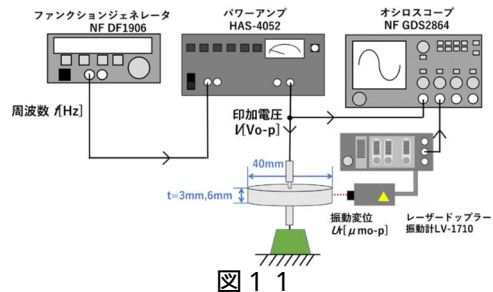


図 1 1

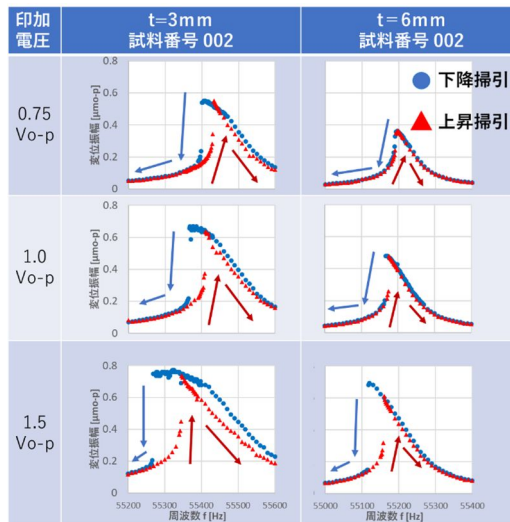


図 1 2

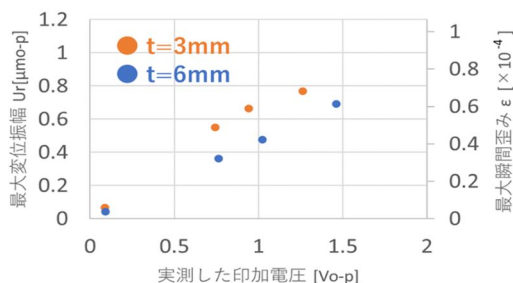


図 1 3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 足立和成, 山吉康弘, 岸銀之条, 宮川侑也
2. 発表標題 圧電素子の「跳躍・降下現象」の機構解明 (ソフト系セラミックC-6について)
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 海老原 拓矢、足立 和成、山吉 康弘
2. 発表標題 圧電素子の「跳躍・降下現象」の機構解明
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田 幸平、足立 和成
2. 発表標題 超音波振動工具の能動的振動モード制御に関する研究
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------