

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）（令和3（2021）採択分）

研究期間：2021～2023

課題番号：21KK0065

研究課題名（和文）DPLUS型多重モード超音波振動子によるMHz帯域の非正弦波形強力超音波の創成

研究課題名（英文）Non-sinusoidal strong ultrasonic waves in MHz band by DPLUS

研究代表者

森田 剛（MORITA, Takeshi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：60344735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,700,000円

研究成果の概要（和文）：強力超音波技術は理工学分野で広く応用されているが、一般的には数10kHzで単一周波数である。しかし、キャビテーション生成や超音波浮上などの応用では、超音波照射対象の非線形性を利用することとなるため、必ずしも正弦波波形が最適であるとは限らない。一方、我々は従来の強力超音波振動子とは異なり、二重放物反射面により数MHz帯域での集束超音波を生成するDPLUSを提案している。この新型振動子の利用を図るため、本研究では、二つの共振周波数モードの周波数比を1:2に制御して位相制御させて重畳させることで、ノコギリ波や台形波などの非正弦波形を生成する技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の強力超音波技術では、数10kHzの周波数帯における共振振動を使って正弦波形を利用することが常識であった。これに対して、本研究では、MHz帯域の新型振動子を利用して、二つの共振振動波形を重ね合わせることを提案した。圧電素子の厚さや外部電気素子の接続により共振周波数比を1:2にする技術によって非正弦波形を実現した本研究成果は、新しい科学技術に貢献することが期待されるものであり、当該研究分野において有意義なものである。

研究成果の概要（英文）：Powerful ultrasound technology is widely applied in various research fields. However, typical ultrasound is utilized as a single frequency of several tens of kHz. For applications such as cavitation generation and ultrasonic levitation, a sinusoidal waveform is not always optimal because these applications utilize nonlinearity of the target medium. On the other hand, we proposed DPLUS, which uses a double parabolic reflection surface to generate focused ultrasound in the several MHz band. In order to utilize this DPLUS, we design the resonance frequency ratio of the two resonance modes to be 1:2 and generate non-sinusoidal waves such as sawtooth waves and trapezoidal waves by superimposing with phase control.

研究分野：強力超音波

キーワード：集束超音波 非正弦波形 MHz帯強力超音波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

二重放物面反射を利用した超音波集束機構 (DPLUS) は、集束した超音波を細棒導波路から出力する振動子で、熱アブレーション応用などが報告されている。DPLUS は、従来の強力超音波振動子として利用されてきたランジュバン振動子とは異なり、MHz 帯域で複数モードを同時に共振駆動させることができるという特長を有する。一方、我々はランジュバン振動子の基本モードと高次モードの共振周波数を 1:2 に設計し、共振周波数制御用の圧電素子の電気的境界条件をスイッチングする事によって、この共振周波数比を精確に制御する方法を提案している。この手法により非正弦波形の強力超音波が出力可能となり、超音波近接浮揚実験において一般的な正弦波形出力と比較して大きな出力ができることを確認している。

2. 研究の目的

本研究では、DPLUS の共振周波数比設計を行うことで、ノコギリ波や台形波といった非正弦波形の超音波を MHz 帯域でも出力することを目的とした。これにより、キャビテーション出力や近接場浮揚、化学反応促進といった強力超音波応用技術として重要なものに対して、MHz 帯の高周波数かつ任意波形出力が利用できることとなり、当該研究領域において大きな貢献が期待できる。

3. 研究の方法

DPLUS は、超音波出力源となる圧電セラミックリングと二重放物面反射金属及び細棒導波路から構成される。この構成において、特に圧電セラミックリングの厚さによって、入力される超音波の共振周波数が決定されることになる。本研究では、二つの共振周波数モードを励振し、その周波数比を 1:2 にする必要があるので、圧電セラミックリングを内側と外側の二つに分割し、それぞれの厚さを異なるものとする設計を行った。また、このような設計のみでは、製造誤差や物性値のバラツキに起因した共振周波数比の変化が生じてしまうため、圧電セラミックリングにインダクタを直列に接続することで、共振周波数を変化させることを試みた。

4. 研究成果

本研究で提案する非正弦波形励振用 DPLUS の設計概念図と試作したものの写真を図 1 に示す。入力する縦波振動の共振周波数を 1 MHz および 2 MHz 付近として周波数比を 1:2 とするため、有限要素法シミュレーションを用いて設計パラメータを決定した。圧電リングの材質は MT18K(日本特殊陶業製)で金属部分をジュラルミンとし、外側の圧電セラミックリングの外径、内径、厚さはそれぞれ 41 mm、24 mm、厚さ 1.1mm、内側の外径、内径、厚さを 23 mm、5 mm、2.05 mm、導波路の直径は 3 mm で長さは 7 mm とした。ジュラルミンに接着する前の圧電セラミックリング単体の厚みモード周波数はそれぞれ 1.851 MHz と 0.993 MHz であった。

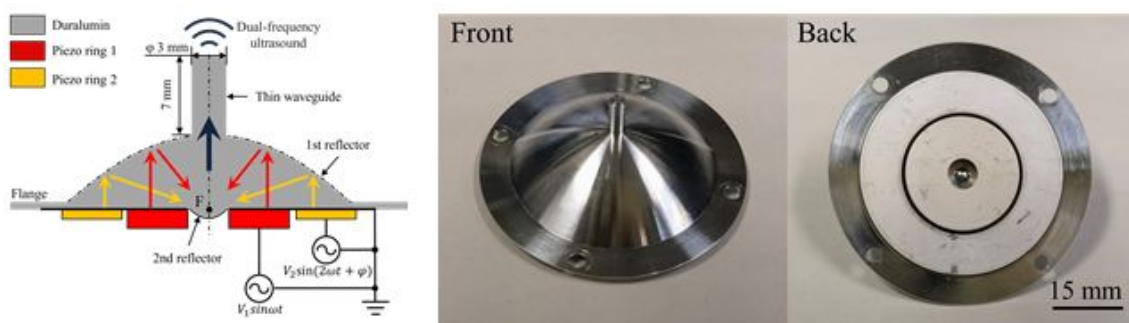


図 1 非正弦波形励振用 DPLUS の設計概念図と試作写真

試作した振動子の共振周波数特性を確認するためにレーザードップラー振動計と周波数応答測定器を利用して、0.5 V_{pp} の電圧における DPLUS の励振で、内側と外側のそれぞれの圧電セラミックリングを駆動したときの導波路先端における振動速度を測定した。その結果、試作した振動子の共振周波数は、それぞれ 1.084 MHz と 2.084 MHz で、周波数比は 1.923 であった。従って、特に Q 値が高い強力超音波振動子の場合、このような 2 つの共振モードを重畳するのは難しく、この周波数比を 1/2 にする必要があるので、一方、このような微調整を行うために、圧電セラミックリングの付け替えや、機械加工を繰り返し行うのは非現実的であることから、本研究では、圧電セラミックリングにインダクタを直列接続することによって共振周波数を調整することを試みた。圧電振動子の等価回路を考えると、インダクタは等価質量となるために、実質的に共振周波数を下げる効果を有する。

インダクタンスを内側の圧電セラミックリングに直列に接続することで、図 2 に示すように、基本モードの周波数を低下させることができた。インダクタンス値が $11.82 \mu\text{H}$ のとき、共振周波数が 1.084 MHz から 1.048 MHz へと低下し、さらに $15.70 \mu\text{H}$ とすることで、2 次高調波モードの共振周波数の半分となる 1.042 MHz で大きな振動速度を得ることができた。

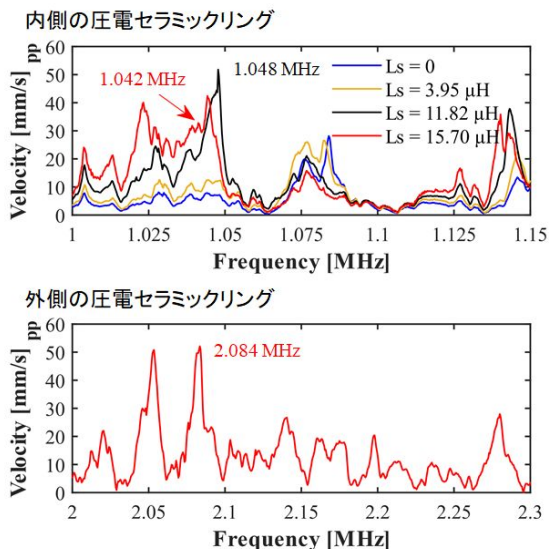


図 2 インダクタによる共振周波数制御

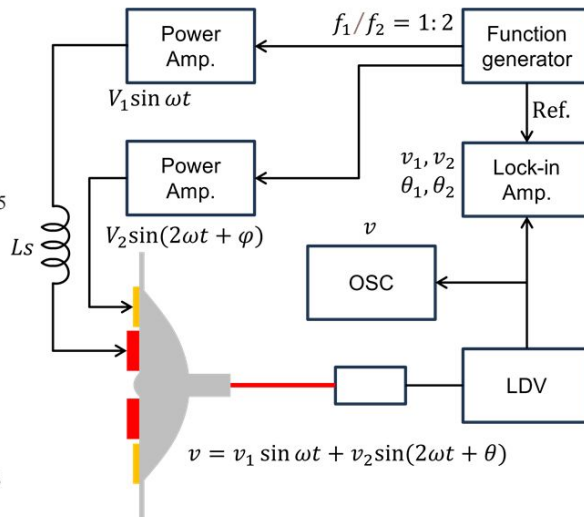


図 3 二つの共振モードを重畳するシステム

このように共振周波数比を精確に 1:2 に制御した DPLUS によって、非正弦波形の超音波出力が可能であるかを確認するため、図 3 のようなセットアップを構築した。ここでは、波形生成器(NF WF1968) から 2 つの正弦波形駆動信号を出力し、これらの周波数比を 1:2 に固定し、それぞれの駆動電圧を高速アンプ (NF HSA4011) で増幅して、内側と外側の圧電セラミックリングに印加した。この際、内側の圧電セラミックリングと直列にインダクタを接続している。振動速度測定には LDV を使用し、オシロスコープで波形を確認して、ロックインアンプ(NF, LI5660)により、基本波成分と第 2 高調波成分の振動振幅を計測した。このようにして励振した非正弦波形の超音波振動の結果を図 4 に示す。

$15.70 \mu\text{H}$ の直列インダクタを接続することにより、二つの共振周波数が 1:2 に調整されていることが振動速度と駆動電圧の位相差により確認された。この結果、振動モードを重畳することが可能となった。二つの入力電圧振幅を調整することで、両者の速度振動振幅を $100 \text{ mm}_{\text{pp}}/\text{s}$ とした。また、高調波駆動信号の位相を変更することで、全体の音波波形を制御した結果を図 4 に示す。このように両者の位相を変化させることによって、ノコギリ波や台形波といった非正弦波形を自由に生成することが可能となった。

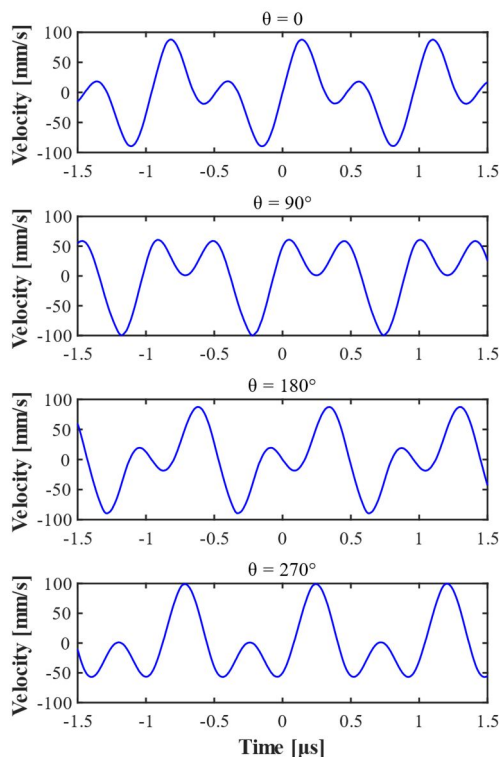


図 4 提案手法により実現した非正弦波形超音波振動測定結果

従来用いられてきたランジュバン振動子に代わり、本研究では、MHz 帯においてマルチモード出力できる DPLUS を研究対象とした。この DPLUS を利用し、周波数比が 1:2 になる二つの共振モードを重ね合わせて非正弦波形を創成する概念を適応することで、MHz 帯で非線形振動波形の励振に成功した。このような振動子は、超音波浮揚やキャビテーション生成などの超音波照射媒体の非線形性を利用するものに対して有効であると期待できる。

本研究を遂行中、DPLUS 励振のシミュレーションを実施し、第一反射面で縦波入力波がモード変換されて反射した横波が細棒導波路に導入される現象を見出した。この波動伝搬過程を利用することで、更に強力な超音波を出力できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hachisuka Satori, Yokozawa Hiroki, Wang Fangyi, Miyake Susumu, Twiefel Jens, Morita Takeshi	4. 巻 332
2. 論文標題 Dynamic resonant frequency control system of ultrasonic transducer for non-sinusoidal waveform excitation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113124 ~ 113124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2021.113124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Kang, Irie Takasuke, Iijima Takashi, Kasashima Takashi, Yokoyama Kota, Miyake Susumu, Morita Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Hard-Type Piezoelectric Materials Based Double-Parabolic-Reflectors Ultrasonic Transducer (DPLUS) for High-Power Ultrasound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 26117 ~ 26126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3156609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wang Fangyi, Sasamura Tatsuki, Jiang Yukun, Miyake Susumu, Twiefel Jens, Morita Takeshi	4. 巻 359
2. 論文標題 Dynamic resonance frequency control for a resonant-type smooth impact drive mechanism actuator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114462 ~ 114462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2023.114462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamada Kyohei, Ieiri Shoki, Itoh Shinsuke, Kasashima Takashi, Morita Takeshi	4. 巻 370
2. 論文標題 Rayleigh wave excitation with an elliptical reflector for high-power ultrasound	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 115253 ~ 115253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2024.115253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Fangyi Wang Tatsuki Sasamura, Yukun Jiang, Susumu Miyake, Jens Twiefel, Takeshi Morita
2. 発表標題 Dynamic Resonant Frequency Ratio Control for a Resonant-type Smooth Impact Drive Mechanism Actuator
3. 学会等名 IWPMA2022, Web Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王方一, 山田恭平, 三宅奏, 森田剛
2. 発表標題 二周波超音波用のマルチモーダル二重放物面反射器トランスデューサ
3. 学会等名 第43回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, USE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王方一, 三宅奏, 森田剛
2. 発表標題 Dynamic resonant frequency ratio control for multimodal piezoelectricactuators
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fangyi Wang and Takeshi Morita
2. 発表標題 Temperature Compensation for Multimodal Ultrasonic Transducer 's Frequency Ratio
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Morita
2. 発表標題 Non-Sinusoidal Waveform Generation of High-Power Ultrasonics using Resonant Frequency Control System
3. 学会等名 IUMRS-ICA2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fangyi Wang, Satori Hachisuka, Hiroki Yokozawa, Susumu Miyake and Takeshi Morita
2. 発表標題 Dynamic Resonant Frequency Control Of Ultrasonic Transducer Using Dual Vibration Modes
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyohei Yamada, Kang Chen, Takasuke Irie, Takashi Iijima, Susumu Miyake and Takeshi Morita
2. 発表標題 Fundamental Characteristics of Tube-Type Double-parabolic-reflectors ultrasonic transducer (Tube-Type DPLUS)
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kang Chen, Takasuke Irie, Takashi Iijima, Takashi Kasashima, Kota Yokoyama, Susumu Miyake and Takeshi Morita
2. 発表標題 Multimode Excitation by a Double-Parabolic-Reflectors Ultrasonic Transducer (DPLUS) with hard type piezoelectric materials
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fangyi WANG, Jens TWIEFEL, and Takeshi MORITA
2. 発表標題 R-SIDM (Resonant-type Smooth Impact Drive Mechanism) operation by using dynamic resonant frequency control system
3. 学会等名 International Conference on Functional Materials and Devices 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学精密工学専攻 超音波デバイス研究室 https://usdev.t.u-tokyo.ac.jp 新駆動原理アクチュエータ(R-SIDM)/共振周波数制御 http://usdev.t.u-tokyo.ac.jp/contents/research.html</p>
--

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
研究分担者	三宅 奏 (MIYAKE Susumu) (40910956)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 (12601)	
研究分担者	今城 哉裕 (IMASHIRO Chikahiro) (10866635)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任研究員 (12601)	
研究分担者	畑中 信一 (HATANAKA Shinichi) (40334578)	宇都宮大学・大学教育推進機構・特任准教授 (12201)	

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			
ドイツ	ハノーファー大学			