

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2011

課題番号：23656162

研究課題名（和文） 多重モード型振動子による超音波出力限界の打破

研究課題名（英文） Breakthrough ultrasonic output power using multi-mode transducer

研究代表者

森田 剛（MORITA TAKESHI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60344735

研究成果の概要（和文）：

強力超音波技術の応用範囲を拡大していくためには、超音波デバイスの振動速度限界の要因と言われている振動モードの節部での応力集中を緩和する必要がある。そこで、本研究では、従来の単一振動モード型振動子における超音波出力限界を打破するため、新たに多重モード型振動子を用いてハイパワー出力時に励起される非線形振動を打ち消すことで、応力集中を軽減させると同時に分極反転現象を抑制することを提案、実証した。

研究成果の概要（英文）：

In order to realize the higher-power ultrasonic transducers, the stress concentration at the nodal part of the vibration mode should be reduced because the ultrasonic output power is limited this concentrated stress. In this research, by replacing the conventional single mode vibration transducer to the multi-mode transducer the concentrated stress was distributed. And as a result much larger saturated vibration velocity was successfully demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・音響エネルギー

キーワード：超音波工学・ハイパワー振動子・ランジュバン振動子・振動限界

1. 研究開始当初の背景

胆石粉碎などの超音波医療や、超音波加工、化学反応促進、化学的滅菌、半導体デバイス表面洗浄などへの応用に対して、強力超音波振動子の性能向上は極めて重要な要素技術である。また、圧電トランスや、強力超音波アクチュエータ等、小型でハイパワー出力の超音波デバイスへの期待は大きい。これらの技術を抜本的に展開させるには、超音波エネルギー出力限界を打破する必要がある。現在の常識では、入力電界の上昇に伴い超音波エネルギー出力は向上していくが、ある閾値を超えると圧電素子部分の応力集中や圧電素子内部の分極反転が起り、駆動効率が著しく低下し、それ以上の入力エネルギーは全て

熱となるものと理解されてきた。ただし、その主原因が応力集中によるのか、分極反転によるのか等のメカニズムは不明である。さらに、この効率低下の現象を克服する唯一の方法は、材料開発であると考えられてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超音波振動子の出力パワー限界付近で、駆動周波数に対する非線形振動が誘起されることに着目し、これを抑制して超音波の出力限界を打破することにある。この目的のため、多重振動モード振動子を有効的に用いることにより、従来の一次モードのみの振動子では振動ノード点における応力範囲が限定していたことを解消し、振動限界を向上させることを目指した。多重振

動モード振動子は、申請者が独自開発したものであり、振動子の基本モードと高次モードの共振周波数が 1:2 になるように設計したものである。図 1 に示すように、多重モード型振動子における応力分布を考えると、従来の単一モード振動子においてはノード点に集中して固定されていた応力値が、3 次モードの応力を重畳させることで制御することができるようになる。本研究では、この提案によって、応力集中を緩和させて振動限界の向上を目指すこととした。

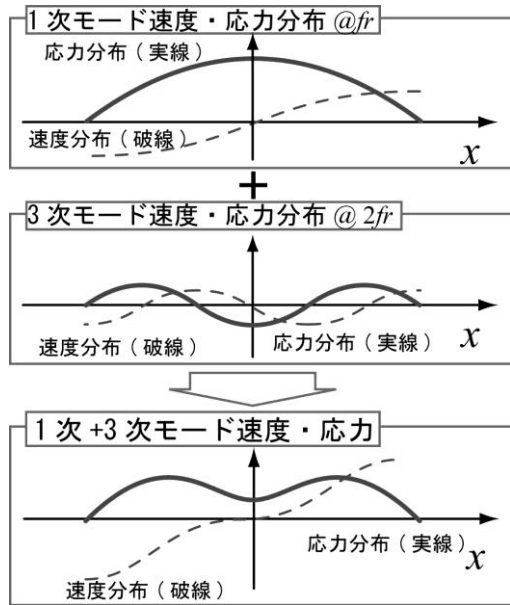


図 1 多重モード超音波振動子による応力分布制御

3. 研究の方法

超音波振動子の振動限界は、振動モードのノード点における応力限界によってもたらされる。しかし、通常は応力を直接計測するのは困難であるため、振動子端面における振動速度がノード点における応力に比例することを用いて、振動速度限界を基準として超音波振動子の振動限界を評価する。例えば、

提案する多重モード振動子では、縦振動モードにおける 1 次と 3 次の共振周波数が正確に 1:2 となっていないなくてはならない。しかし、何の考慮もしないと、中心拘束時の共振波長から計算されるように、周波数比は約 1:3 となる。これに対して、振動子先端の断面積を S_2 から S_1 と小さくしていくと、1 次の共振周波数 f_1 と 3 次の共振周波数 f_3 の比は

$$\frac{f_3}{f_1} = \frac{\arctan\left(-\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} + \pi\right)}{\arctan\left(\sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\right)}$$

となり図 2 のようになる。すなわち、先端直径を最適化することにより、多重モード振動子を製作することができる。試作した多重モードランジュバン振動子の構造を図 3 に示す。

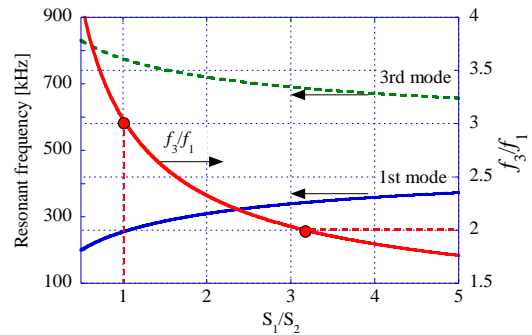


図 2 振動子の断面積比と共振周波数比

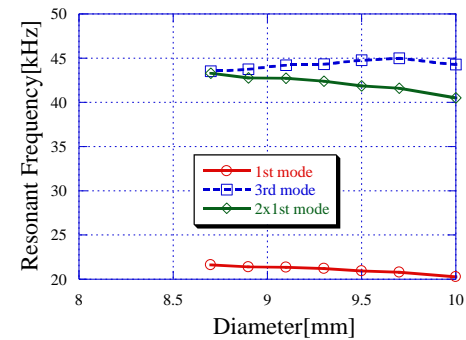
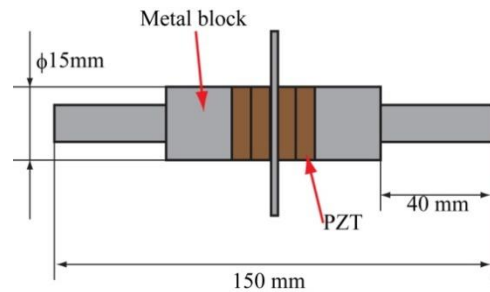


図 3 多重モードランジュバン振動子

図 4 先端直径による共振周波数微調整

実際には、共振周波数比を微調整するために、先端直径は有限要素法計算で得られた最適値よりも予め太く加工しておき、その直径を徐々に小さくしていった。その様子を図 3 に示す。また、試作した多重モードランジュバン振動子の写真を図 5 に示す。21.64kHz と 43.53kHz と共振周波数比が 2.01 となる振動子を実現した。

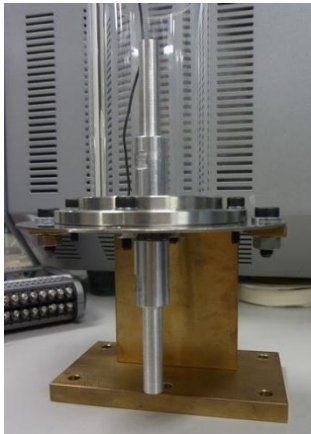


図5 多重モード型ランジュバン振動子

まず、この振動子の基本特性を評価するため、1 次の共振周波数のみの駆動による振動振幅の測定を行った。ファンクションジェネレータ(NF WF1974)からアンプ(NF HSA4052)を介して振動子に入力電圧を与え、振動子先端の速度をレーザードップラ速度計(Polytech NLV-2500)により測定した。この実験において、駆動電圧は1 次の共振周波数で行ったが、入力電圧を向上させていくに従って、3 次モードに対応する周波数の振幅も計測された。すなわち、入力電圧を向上させていくと、圧電振動に非線形性が生じ、もともと機械インピーダンスが低い3次モードも励振されることで振動波形が歪んだ形となったので、振動振幅として歪んだ波形の全振幅を振動速度として計測した。また、3 次モードの振幅は入力交流電圧の周波数の2倍に相当する電圧を参照信号としてロックイン検波した(NF 5610B)。

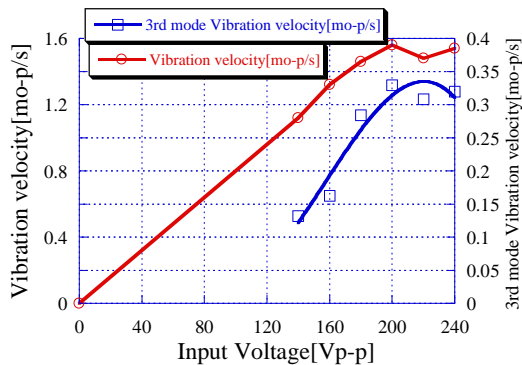


図6 基本周波数駆動における振動速度限界

図6に示す結果から、この振動子の振動速度限界として1.5m/sが得られた。また、これに比べて約半分の振動速度において、すでに非線形振動が励振されていることが確認できた。そこで次に、二つの振動モードを位相を変化させながら励振させ、この振動速度限界がどのように変化するかを調べた。

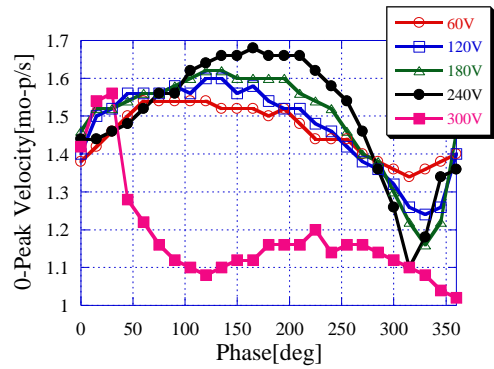


図7 基本モード入力電圧を180Vとして3次モードを加えた場合の振動速度振幅の変化

まず、1 次モードに対応する共振周波数の入力電圧を180Vと固定し、これに3次モードの駆動電圧を振幅と位相を変化させながら振動振幅を測定した結果を図7に示す。このグラフにおいて、振動振幅とは、3次モードの振動が加わり歪んだ波形となった形状のピーク幅をとっている。図6に示すように、3次モードの励振がない場合には、振動振幅として1.4m/s程度であったが、240Vの3次モード励振電圧を位相差150度程度で加えることにより、1.7m/sの振動速度が得られている。これは、基本周波数の駆動における振動速度限界を上回る値であり、提案手法により振動速度限界が向上できたことを示すものと言える。

さらに、基本モードの入力電圧を240Vとした場合の結果を図8に示す。この場合に置いても、3次モードの励振により、振動速度振幅が変化しており、1.7m/s程度の最大値が適切な入力電圧と位相によって実現できていることがわかる。

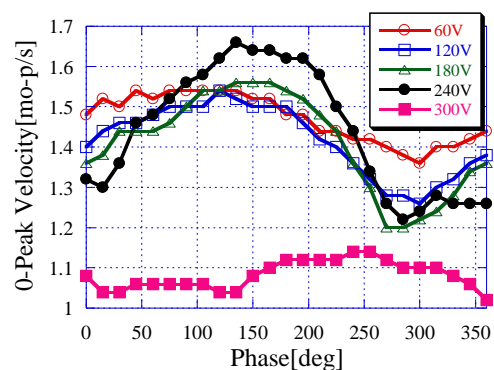


図8 基本モード入力電圧を180Vとして3次モードを加えた場合の振動速度振幅の変化

4. 研究成果

強力超音波技術は、医療・加工・化学における超音波応用や、圧電トランスや小型アクチュエータ等の電子デバイスへの応用に大

大きく貢献している。これらの応用範囲を拡大していくためには、超音波デバイスの振動速度限界の要因と言われている振動モードの節部での応力集中を緩和する必要がある。そこで、本研究では、従来の単一振動モード型振動子における超音波出力限界を打破するため、新たに多重モード型振動子を提案し、ハイパワー出力時に励起される非線形振動を打ち消すことで、応力集中を軽減させると同時に分極反転現象を抑制することを目指した。

まず、通常のランジュバン振動子の両端部分を段付構造にすることにより、1次と3次の共振周波数が1:2になるように、有限要素法解析を用いて設計した。この設計を基に振動子を試作し、21.64kHzと43.53kHzと共振周波数比が2.01となる振動子を実現した。振動モードの節点における応力は、先端部分の振動速度に比例するので、試作した振動子における振動速度限界速度について実験を行った。その結果、1次モードに対応する駆動電圧のみを入力した場合、1.5 m/sの振動速度で飽和する現象が見られ、それ以上の入力電圧を加えても振動速度は上昇しなかった。次に、3次モードに対応する駆動電圧を、1次モード駆動電圧に対する位相と振動振幅比を変化させながら入力していった。その結果、例えば1次と3次の入力電圧を共に240Vとして、位相差を140度にした場合、1.7 m/sの振動速度を得ることができた。この結果から、提案手法のように多重モード型振動子によって振動モード制御を行って応力集中を避けることで、飽和振動速度が上昇することが明らかとなった。この技術を発展させることにより、現在用いられている超音波応用技術のさらなるハイパワー化が可能になると期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 森田 剛、西村卓真、鈴木宗佑、保坂 寛、
”多重モード型ランジュバン振動子とその
応用”, 圧電材料・デバイスシンポジウム
2012(仙台) 2012.1.30

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 剛 (MORITA TAKESHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
准教授

研究者番号：60344735