

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13895

研究課題名(和文)任意波形制御可能な強力超音波発生システム

研究課題名(英文)Driving wave-shape control for high-power ultrasonic transducer

研究代表者

森田 剛 (MORITA, Takeshi)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60344735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：強力超音波トランスデューサの駆動では、正弦波以外の振動波形が必要となる場合がある。例えば、共振駆動型SIDMアクチュエータでは、鋸歯状の振動波形が必須で、共振周波数の変化によって特性低下が生じる。このような問題に対して、本研究では、MOSFETを共振周波数制御用の圧電部分に接続し、共振周波数を動的に制御するシステムを提案した。圧電体は電氣的短絡状態と開放状態で圧電効果により機械的ステイフネスが変化し、短絡状態で共振周波数が低くなる。そこで、電氣的境界条件を間欠的にMOSFETで変化させ、そのデューティー比を制御パラメータとすることで共振周波数を制御することに成功した。

研究成果の概要(英文)：For the high-power ultrasonic transducers operation, it is often required to control the resonant frequency to realize non-sinusoidal wave. For example, ultrasonic motors which are driven with saw-shaped vibration, the shift of resonant frequency results in the performance degradation. To overcome this problem, this study proposes a dynamic control system of the resonant frequency modification by connecting MOSFETs to the additional piezoelectric parts. By switching on and off of the MOSFETs, the electric boundary condition for the additional piezoelectric parts changes between shorten and open. Generally, the resonant frequencies under these condition have the relationship of $f(\text{shorten}) < f(\text{open})$ because of the piezoelectric effect. By switching the MOSFETs as the same frequency to the driving frequency and changing the switching duty ratio, the resonant frequency could be modified as a function of the duty ratio.

研究分野：強誘電体デバイス応用

キーワード：強力超音波 共振周波数 圧電現象

1. 研究開始当初の背景

超音波モータなどの強力超音波デバイスの駆動では、複数のモード形状やモード次数の共振周波数を一致させる、またはその比を制御するなどの必要が生じる場合が多い。例えば、長手振動の基本振動と高次振動の比を 1:2 に制御して用いる共振駆動型 SIDM アクチュエータがある。この場合、振動子先端変位は、正弦波ではなく鋸波形にしなければならず、これを効率よく実現するためには共振周波数制御方法を確立しなくてはならない。

従来、共振周波数の制御は機械的な設計によって行われていたが、工作誤差や組み立て誤差等が問題となる。さらに駆動時の振動子の境界条件の変化や、非線形現象によって共振周波数の変化を設計段階で考慮するのは困難である。本研究では、強力超音波振動子の電気端の境界条件を制御することにより共振周波数を制御する手法を用いて任意波形を実現可能な手法を創成する。

2. 研究の目的

2.1 超音波振動子の共振周波数の静的制御

中鉢らは、Fig.1 左図のように圧電振動子に駆動用の圧電部とは別に共振周波数制御用の受動圧電部を設け、インダクタを接続することで共振周波数の制御が可能となることを報告している。振動子が長手方向に励振される場合、等価回路は Fig. 2 のように 2 つの電気端を持つので、Terminal 2 に接続したインピーダンスを変化させることで、Terminal 1 から見た系の共振周波数を制御できる。しかしながら、この手法では共振周波数を静的にしか制御できず、非線形現象等による振動子駆動時の共振周波数の変化を補償できない。

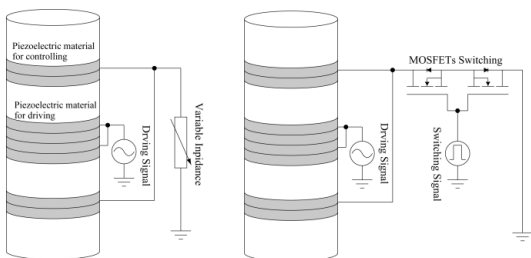


Fig. 1 電気端を 2 つ有する振動子の等価回路 (左：従来方法 右：提案方法)

3. 研究の方法

3.1 共振周波数の動的制御のための提案手法

本研究では、Fig. 1 右図のように、Terminal 2 に接続した MOSFET のスイッチングを用いて開放と短絡の状態間を駆動周波数と等しい周波数で遷移させ、そのデューティ比により振動子の共振周波数の制御を試みる。

この図において、Terminal 2 を開放させた際のアドミッタンスは

$$Y = j\omega C_1 + \left(\frac{1}{-j\omega C_1} + \frac{j\omega L_m}{\Phi_1^2} + \frac{1}{j\omega \Phi_1^2 C_m} + \frac{R}{\Phi_1^2} \right)^{-1}$$

となる一方で Terminal 2 を短絡させた際のアドミッタンスは

$$Y = j\omega C_1 + \left(\frac{1}{-j\omega C_1} + \frac{j\omega L_m}{\Phi_1^2} + \frac{1}{j\omega \Phi_1^2 C_m} + \frac{R}{\Phi_1^2} + \frac{\Phi_2}{-j\omega \Phi_1^2 C_2} \right)^{-1}$$

と計算することができ、開放-短絡間で制動容量 C_2 により共振周波数を制御できる。本研究では状態をこれらの中で MOSFET を用いたスイッチングにより変化させ、そのデューティ比によって共振周波数を制御する。

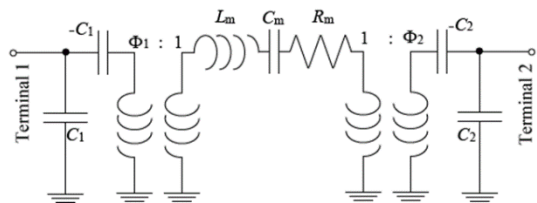


Fig. 2 電気端を 2 つ持つ振動子の等価回路

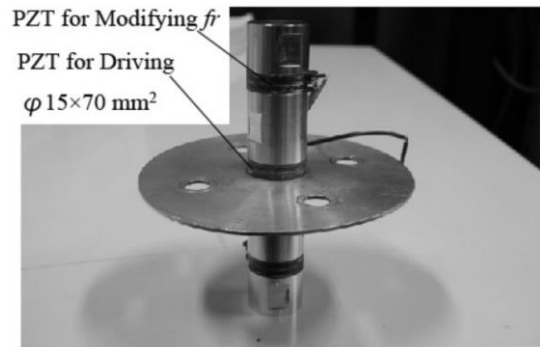


Fig. 3 電気端を 2 つ持つランジュバン振動子

4. 研究成果

4.1 シミュレーションによる原理確認

本研究で設計した、共振周波数制御用の圧電体を組み込んだ振動子を Fig. 3 に示す。中心の圧電部を駆動用圧電部として、外側の 2 箇所の圧電部を受動圧電部として用いた。はじめに、Fig. 2 に示した等価回路のパラメータをカーブフィッティングにより求めるため、他方の電極を開放した状態で、Terminal 1 と Terminal 2 のアドミッタンス曲線をインピーダンスアナライザにより測定した。計測結果とフィッティングした曲線を Fig. 4 に、求めたパラメータを Table I に示す。

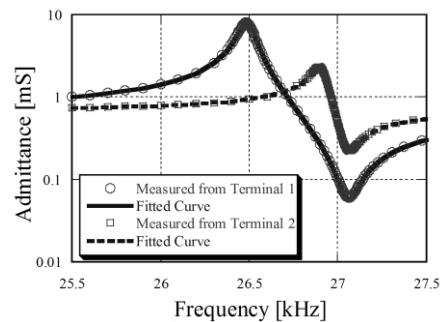


Fig. 4 電気的特性(実測と計算結果)

Table I 計測した等価回路定数

L_m	C_m	R_m	C_1	C_2	Φ_1/Φ_2
791	43.8	483	3.96	4.18	1.94
[mH]	[pF]	[Ω]	[nF]	[nF]	

4.2 MOSFET を含む等価回路の計算

Fig. 1 右図のように Terminal 2 に MOSFET を接続して共振周波数制御した場合の計算結果を Fig. 5 に、そのときの周波数応答の共振周波数とアドミッタンスのピーク値を Fig. 6 に示す。このとき、振動子を駆動する正弦波形電圧とスイッチングを行う矩形波形電圧の位相差を 0 としてしまうと、Fig. 6 のように共振時のアドミッタンス値が大きく減少してしまう。これは、MOSFET をスイッチオフとしたときに共振周波数調整用圧電部に充電された電荷が、MOSFET をオンとしたときに接地点に流れ込み、その分のエネルギーが失われてしまっているためであると考えられる。

そこで駆動電圧と矩形波形電圧の間の位相差を -180° から 180° まで 9° ずつ変化させ再度計算した。それぞれのデューティ比について共振周波数でのアドミッタンスのピーク値が最大となるような位相差をとった際のアドミッタンスの周波数応答を Fig. 7 に示す。このとき、Fig. 8 のようにピーク値をほとんど減少させずに共振周波数を制御できることを見出した。このとき、デューティ比と駆動電圧-矩形波形電圧間の位相差の関係は Fig. 9 のようになった。

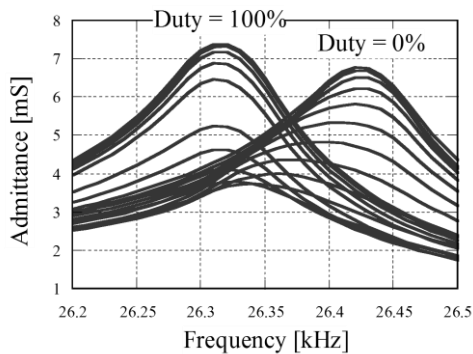


Fig. 5 位相差を 0 としたときのアドミッタンスの変化

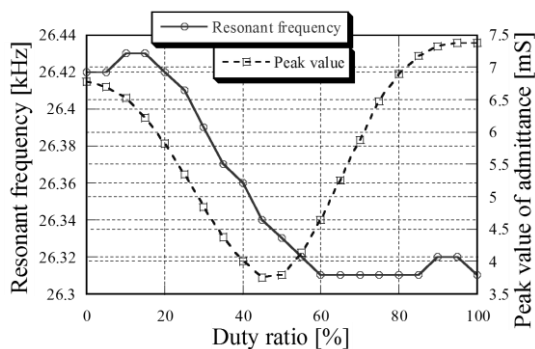


Fig. 6 位相差を 0 としたときの共振特性変化 (計算結果)

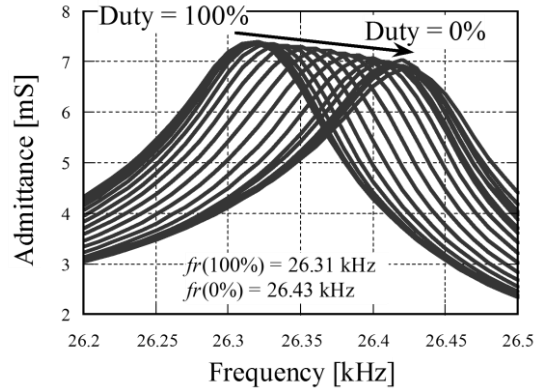


Fig. 7 最適な位相差でスイッチングしたときの共振特性変化 (計算結果)

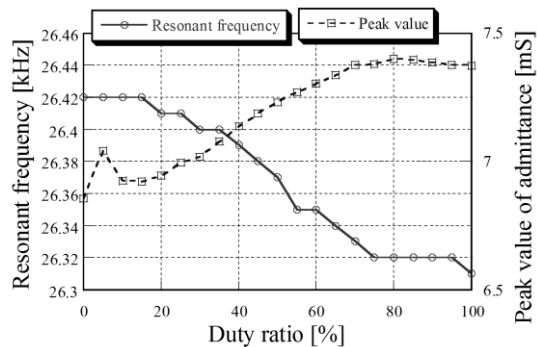


Fig. 8 最適な位相差での共振特性変化 (計算結果)

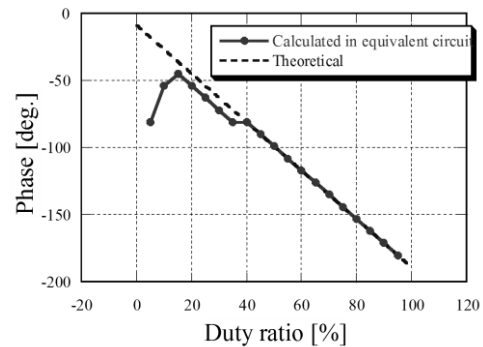


Fig. 9 入力電圧とスイッチングの最適位相差

この計算の中で、Fig. 8 のようにアドミッタンスのピーク値が減少しないときの駆動周波数と矩形波形電圧の位相差 ϕ は、Fig. 10 のように矩形波が MOSFET に流れる電流が 0 になる点に対して対称になる点であった。このようにスイッチングを行うことで、MOSFET をスイッチオンとするときに共振周波数調整用の圧電部に電荷が 0 となっている状態を実現することができる。ここで ϕ は、振動子共振時の電源電圧と MOSFET に流れる電流の位相差を θ として、Fig. 10 において

$$\phi = \theta - \pi \times \text{duty}$$

として求めることができ、Fig. 9 点線プロットのような直線的な関係になる。デューティ比が 5% や 10% と小さいとき、Fig. 9 点線プロ

ットに示した回路シミュレータにより求められた位相差は直線からは外れていることが分かる。これは、MOSFETのスイッチオン、オフに伴うサージ電流によって正弦波であった電流波形が歪み、理論式どおりにスイッチングを行っても共振周波数調整用圧電部の電荷が0とならないためである。

しかしながら、Fig. 11に示したように、デューティ比が5%や10%と小さいときには50%のときと比べ、位相差の変化に対するアドミッタンスのピーク値の減少が小さい。これは、デューティ比が小さいときには共振周波数調整用圧電部の電荷が接地点に流れ込む時間が短く、エネルギーの損失が比較的小さいためである。また、アドミッタンスのピーク値の減少が受動圧電部に蓄えられた電荷の接地点への流出のみによるならば、その量はFig. 11において0°に対し対称となるはずであるが、この図のように対称性を欠いている。この理由として、スイッチング損失等の電荷流出以外の損失が考えられる。

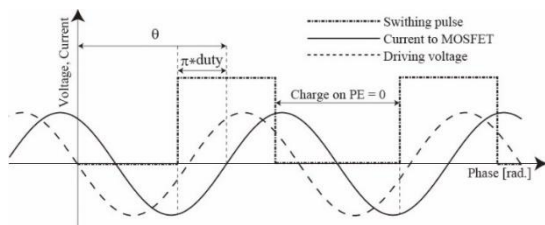


Fig. 10 駆動電圧波形とスイッチング位相差

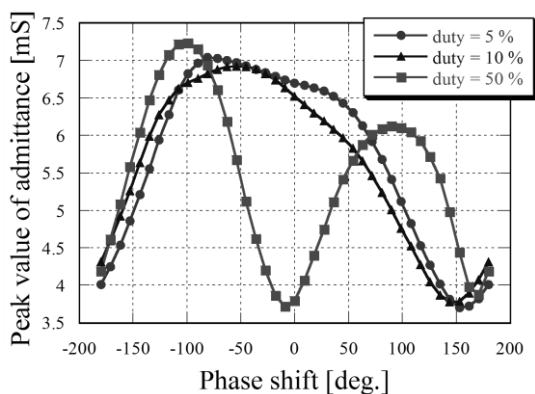


Fig. 11 アドミッタンスピーク値と位相差の関係

これらのシミュレーション結果により、共振周波数の連続的な制御が可能であり、矩形波電圧のデューティ比により最大で110 Hz程度変化させることが可能であることが計算によって求められた。

4.3 制御実験

スイッチング回路を設計し共振周波数を変化させる実験を行った。駆動電圧と矩形波の位相差をFig. 10のように制御し、矩形波電圧のデューティ比を変化させたところ、Fig. 12のように共振周波数を変化させることがで

きた。この実験により、スイッチングのデューティ比によって、共振周波数が28.23 kHzから28.37 kHzまで140 Hzの範囲で連続的に制御できることが確認できた。

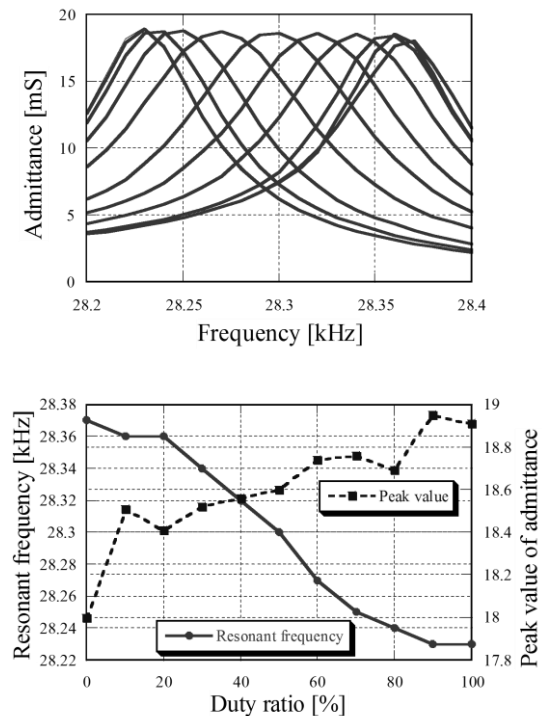


Fig. 12 最適位相差によるスイッチング制御による共振周波数制御(実験結果)

4.4 結言

本研究では、振動子に駆動用圧電体のほかに制御用圧電体を組み込んだ振動子を試作し実験を行った。MOSFETにより、制御用圧電体における電気端の開放-短絡間でスイッチングを行ったところ、共振周波数を140 Hzの範囲で連続的に制御することができた。この研究成果により、基本振動モードと高調波振動モードを整数比で厳格に設計した場合において、製作誤差や非線形現象に伴う共振周波数比のずれを補正することが可能な基本的問題の克服が可能であることが実証された。

今後は、制御範囲の拡大のため、インダクタをTerminal 2に接続した状態でのスイッチングを試みる。また、三次モードについても同様に解析と実験を行い、一次モードとの共振周波数比を一定に保つような動的制御システムの構築を目指す。さらにFig. 11が0°に対し対称性を欠くことから、受動圧電部の電荷の流出以外の損失があると考えられ、これについての検討も行う。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 横澤宏紀, Jens Twiefel, Michael Weinstein, 森田 剛, "超音波振動子の共振周波数の動的制御", 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, アブストラク

- ト集 pp.66-69 (2016.5.18) 慶応大学,日吉
- ② 横澤宏紀, Jens Twiefel, Michael Weinstein, 森田 剛, "受動圧電部を用いた超音波振動子による共振周波数の動的制御" 圧電材料・デバイスシンポジウム 2016, pp.51-54 (2016.2.8) 東北大学, 仙台
 - ③ 横澤宏紀, Jens Twiefel, Michael Weinstein, 森田 剛, "圧電体の電気端制御を用いた超音波振動子の共振周波数制御", 2016年度精密工学会春季大会 pp.29 (2016.3.15)東京理科大学, 野田

[その他]

ホームページ <http://www.ems.k.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

- (1)研究代表者 森田 剛 (Takeshi MORITA)
東京大学・新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：60344735