

〔技術報告〕

## 電気機械結合係数の高い正方板呼吸モードを用いた 単相駆動型超音波モータに関する研究

田村 英樹<sup>1)</sup>・増田健太郎<sup>2)</sup>・高野 剛浩<sup>3)</sup>

### Study on single-phase drive ultrasonic motor using breathing modes of square plate resonator with high electromechanical coupling factor

Hideki TAMURA<sup>1)</sup>, Kentaro MASUDA<sup>2)</sup>, Takehiro TAKANO<sup>3)</sup>

#### Abstract

To downsize vibrational devices, one of the problems is the driving efficiency. Small and divided electrodes provide high input impedance and make the downsizing difficult. Additionally, driving and control circuits must be compact. Therefore, we noticed that the breathing mode of square plate resonator. The breathing mode has a high electromechanical coupling factor and small input impedance value.

In this report, we proposed a single-phase drive ultrasonic motor using the breathing mode. To rotate both the clockwise and counter-clockwise, two square plates are used connected by crank link structures. Electrodes of one of the square part are applied by resonant frequency, and electrodes of another passive part are opened electrically. As the result, the passive part does not markedly vibrate; finally, the passive part operates to support the crank link, and the center of link moves in slant direction to rotate the shaft. The device construction are decided using finite element method analysis, and we measured fundamental characteristics of trial devices.

#### 1. まえがき

圧電共振子を用いた超音波モータとして小型化指向のデバイス設計を考える際に、小型化に伴う駆動インピーダンスの増大による励振困難が問題となる事がある。これは特に多相駆動やモニタ用のために圧電素子の電極を分割する設計では電極間ギャップのロスの為に顕著となる。加えて電磁モータと比べて駆動回路が一般的となっていない現状では回路方式の単純さも競争力の点から求められる。このため筆者らは一般的な二相駆動方式に対して単相駆動の超音波モータとして斜対称形振動子やLiNbO<sub>3</sub>単結晶を用いた構成を報告してきた[1-2]。それらは縦振動と屈曲振動の異形モードを結合させる方式であり、周

---

1) 東北工業大学 工学部 情報通信工学科准教授

Associate Professor, Dept. of Information and communication engineering, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology.

2) スミダ電機株式会社 グローバル研究開発 アドバンス R & D メンバー

Member, Advanced-R&D, Global-R&D, Sumida Electric co., Ltd.

3) 東北工業大学 工学部名誉教授

Emeritus Professor, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology.

波数を，即ちモードを切り替えてロータの回転方向を反転させる原理であった。異種モードの結合振動子は，元となる基本モードの励振特性が異なるために，解析等によって二つの結合モードの振動姿勢がほぼ対称となるように設計しても，その結合モード間の電気的特性や予圧および駆動負荷特性には差が生じてしまい，左右回転特性が均等なモータを得るのは困難であった。これは特に屈曲振動の圧電的励振効率ならびに機械的剛性いずれもが縦振動と比較して弱い事が要因の一つである。

本研究では基本的には単一モードを用いて，さらに回転方向を反転させてもそれぞれの特性が等しくなる単相駆動モータの提案を試みた。また小型化の際に駆動インピーダンスが低下しない事にも留意し，ここで電気と機械変換の能率を表す指標の一つである電気機械結合係数に着目した。圧電体は異方性材料であり，このうち多結晶の圧電セラミックスは $z$ 軸方向を分極軸（3軸）とした際に， $x$ - $y$ 軸方向の面内（1-2軸）に関しては等方的な性質を有する。また分極方向 $P$ と同軸に電界 $E_3$ を印加した際に，図1（a）に示すような主となる機械的歪み方向が同じく $S_3$ となる縦効果の圧電定数 $d_{33}$ やこのときの電気機械結合係数 $k_{33}$ は大きい，平板形構成などでシンプルな構造を考えると使い難い。これに対して縦-屈曲型などで良く用いられる図1（c）の印加電界 $E_3$ に対して歪みが直交方向に生じる $S_1$ や $S_2$ となる横効果は屈曲系モードの組合せも幾通りか考えられ扱いやすい。しかしながら図1（c）のように一方向に伸縮する際にポアソン効果によって直交軸の歪み極性は逆になるにもかかわらず，圧電の面内等方性により一方の軸に対しては打ち消し作用となり，従ってこの場合の $k_{31}$ は小さくなる。同じく横効果でも，図1（b）に示すのは $x$ - $y$ 軸方向の伸縮の極性が等しくなる呼吸モードあるいは面積振動と呼ばれる振動モードで，この $k_p$ は $k_{33} > k_p > k_{31}$ となる。後述の材料を例にとると $k_{33}=70.1$ ， $k_p=57.9$ ， $k_{31}=33.3\%$ である。この面積振動は図2に示すように中央点の変位ゼロの節点となり，頂点部で対角方向への変位が大きくなる振動モードである。

この呼吸モード振動を図3（a）のように用いると角の部分でロータに接触させる事で回転を得る事が出来る。従って単相駆動のモータが実現されるが，当然ながらこの使い方では反転動作を得る事は出来ない。そこで図3（b）に示すように右回転用と左回転用にそれぞれ正方板振動子を配置し，一方のみを駆動させる事によって左右回転特性の均等な単相駆動モータを得るのが目的となる。

## 2. 解析モデル

図3（b）の原理的構造を元に正方板要素部は試作の容易な20mm辺長として，図4に示すモデルについてCOMSOL Multiphysics V4.1を用いて有限要素法解析を行った。

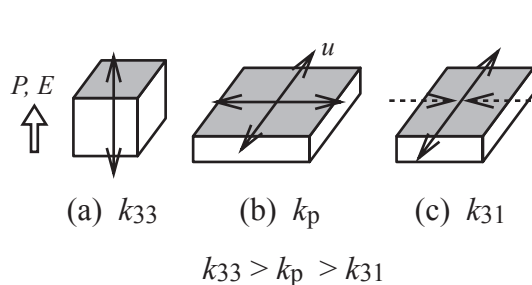


図1. 圧電振動子の電気機械結合係数

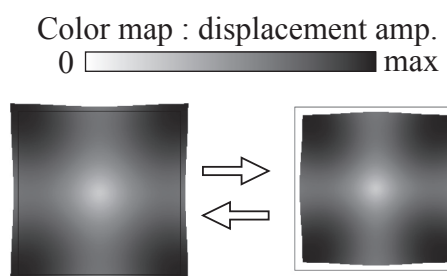


図2. 正方板振動子の面内呼吸モード

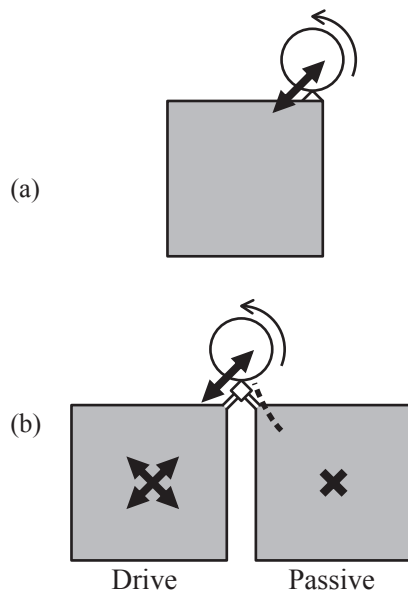


図3. 単相駆動モータの原理

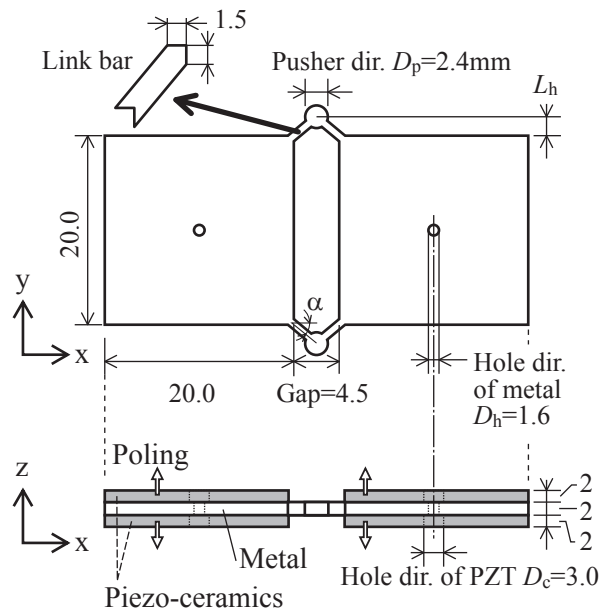


図4. ステータ振動子の設計パラメータ

二つの正方板を二箇所のV形要素で繋いだ金属プレートを中間層として、各正方板の上下に圧電セラミックスを貼り付けた構造である。V形リンクの一方は、その中間点でロータ等の負荷を駆動する。摩擦材等の適用のためリンク中央は円筒状のふくらみを持った形状としている。他方のリンクは振動の対称性と構造強度を保つために設けた。そして正方板要素の中央はほぼ不動であることから支持点として利用できる。ここには後述のように支持ピンを立てるなどして用いるが、解析では穿孔した内面を完全固定としている。またこの金属板を支持とする事から圧電セラミックス板の中央部にも逃がしの為に穴をあけている。正方板間のギャップ長4.5mmなどは予備解析の結果を踏まえているが必ずしも最適化された値では無い。ただし本解析ではこれらの値は定数として、主にリンクの成す角度 $\alpha$ をパラメータとして比較検討した。

本検討での金属体はセラミックス材と周波数定数の近い真鍮（C2600）として用いた材料定数は密度  $8500 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率  $110 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $0.35$ 、機械的  $Q=3000$  とした。圧電材料は富士セラミックス社のハード系PZTであるC-213相当の値を用いた。

### 3. 解析結果

はじめに固有値解析による共振周波数での変位姿勢を図5－6に示す。左右の正方板のうち一方を駆動、他方は受動的に使用するが、受動側電極を接地短絡した条件では図5の固有モードが得られる。これは駆動していない側の正方板要素も駆動側と同様の特性を有する事から、発現するモードは左右要素が同相で動いてリンク部先端がy方向に変位する同相モード、あるいは左右要素が逆相となりリンク部がx方向に振動する逆相モードとなる。この二つの振動モードでは単相駆動モータとして使用する事は出来ない。

これに対して、受動側を開放した場合には図6のモードが得られる。これは駆動側のみが呼吸モードを示し、受動側はほとんど振動しない。このようになる理由は、圧電セラミックスの弾性は反電界の影響を受け[3]、電極短絡時には弾性コンプライアンス $s^E$ 、また

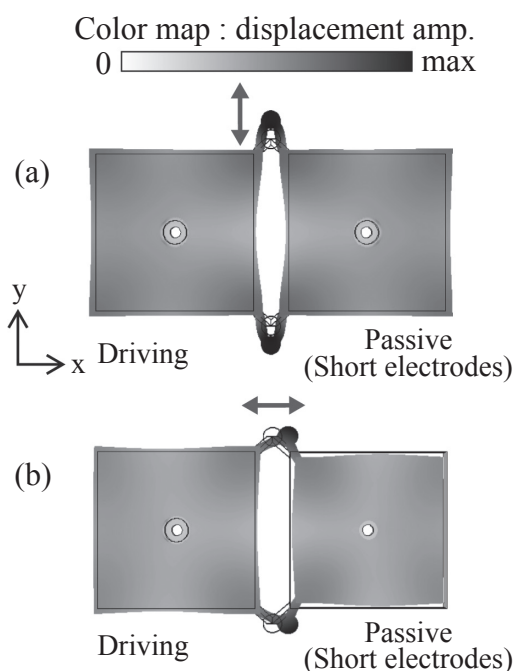


図5. 両電極短絡時の共振モード

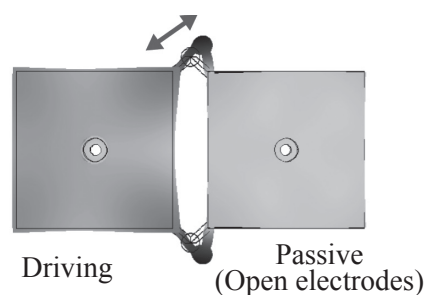


図6. 受動側電極開放時の共振モード

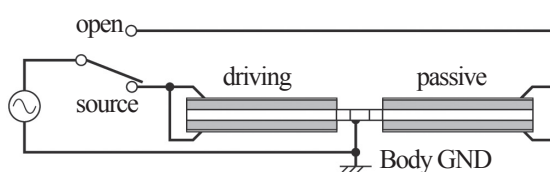


図7. 反転動作を含む単相駆動方式の概要

電極開放時には $s^D$ と見なせ、さらに $s^D = s^E (1 - k^2)$ の関係により、すなわち開放電極部は短絡部に比べて固く見え共振周波数が高くなる。従って短絡すなわち駆動部の共振で使用する場合には、他方の開放側受動部は強制駆動状態となりリンクを支持する構造として作用する。結果的にリンク部端が斜め方向に変位するモードが得られる。これより図7のように駆動と開放を切り替える単純な方法でモータの回転方向を反転できる。

試作形状を決定する為、図4の構造においてリンク部中央の接触子の高さ $L_h$  すなわちリンク角度 $\alpha$ を決定する為の解析結果を図8に示す。図8(a)はリンク角により接触子のx方向およびy方向の変位比が調整できる事を示しており、双方が同等となる交差条件の存在が確認される。図8(b)は駆動電圧 $V_1$ に対して受動側電気端子に生じる電圧 $V_2$ の比 $V_2/V_1$ を求めた結果である。受動側の振動が少なければ $V_2$ は小さいと考えられ、またそれによって実際の使用時に周辺素子への高電圧影響や、自身の浮遊容量による影響が低減されると期待される。最小ではほぼ1倍程度の出力に抑えられる事が分かるが、逆にリンク角によっては数十倍の出力電圧が生じる。従ってリンク角を変位比の調整として用いる場合に調整範囲には制約がある。なお、この出力電圧 $V_2$ は実験の結果、概ね入力電流と同様の振幅・位相特性を示す事が確認されており、従ってモニタ電圧として使用出来ると考えている。この際に出力電圧が入力電圧程度であるならば減衰器や高圧対応のバッファ回路は不要となる。結果的に駆動電極の分割が不要となる。以上により、今回検討した条件では $L_h = 1.9$ から2.0程度が適当と考えられる。

#### 4. 試作構造と実験結果

解析結果を基に試作を行った。ただし圧電セラミックスは解析と異なり堿化学のHQ材を使用する事となり、材料定数の違いにより解析とは若干の違いが生じる。

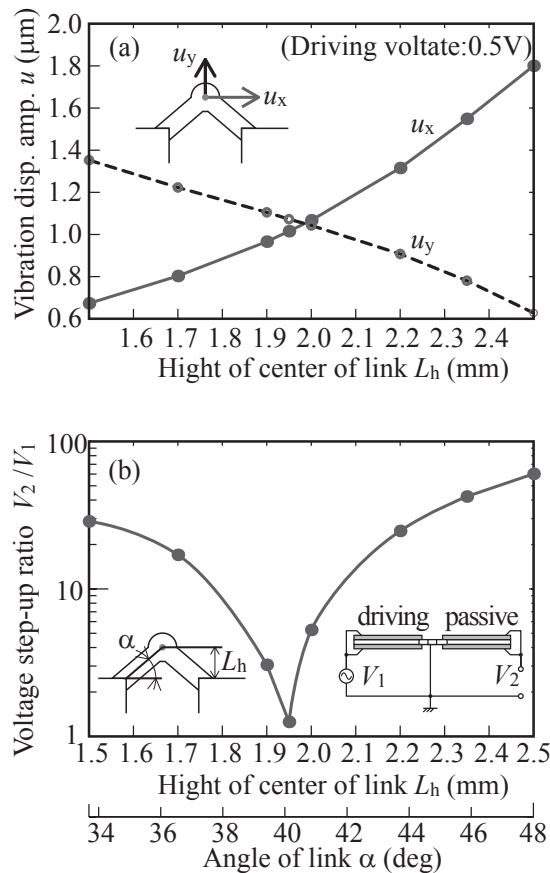


図8. リンク角度による変位及び開放電圧昇圧

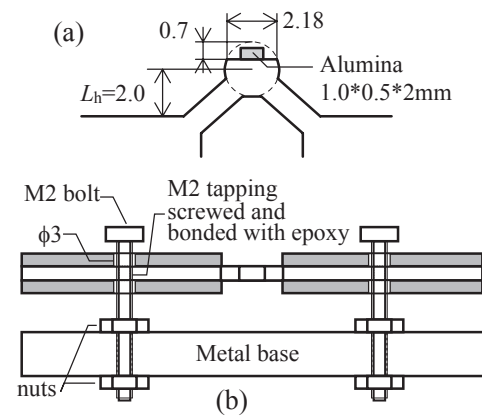


図9. ステータの駆動部及び支持構造

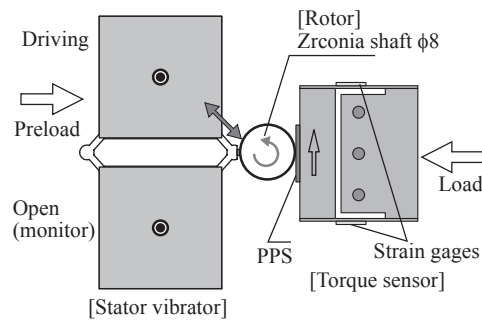


図10. 試作モータの評価試験法

シャフトに接触する部位は図9 (a) に示すように耐摩耗性を考慮して金属端部を0.7mm 削り落とした面にアルミナチップをエポキシ系接着剤で固定した。また支持については図9 (b) の側面図に示すように金属の $\phi 1.6$ の下穴にM2のねじタップを切り、ここにM2ボルトを通した上でさらに接着剤で固定している。この状態で金属のベース部にナットで固定した。この金属ベースはリニアスライダに取り付けられておりスプリングを用いてロータに予圧接触するようになっている。

振動子の基本特性として、無負荷時の入力アドミッタンス特性を計測した結果、共振尖鋭度  $Q_m = 2058$ 、実効的電気機械結合係数  $k_{eff} = 37.5\%$  といずれも良好な値が得られている。なお前述の  $k_p$  より低い値であるが電気-機械変換に寄与しない金属部を含む複合振動子である為である。また共振から僅かに離れた周波数においても入力アドミッタンスは100mS程度と大きく、低電圧駆動並びに小型化する際の利点となる。

モータとしての負荷特性の評価には図10に示すように直径8mmのジルコニアシャフトを用いた。またトルク計測には歪みゲージによりシャフトから受ける剪断方向の力を検出する自作のトルクセンサを用いた。

予圧を5N、あるいは10Nとした場合の負荷特性の計測結果を図11に示す。ただし、計測系、主にトルクセンサの調整の問題で今回はトルク4mNmを越える負荷計測で優位な値を得る事が出来なかった。しかしながら4mNm以上の負荷トルクでも本来であれば動作可能との見込みにより図中には補助線を引いた。このとき、予圧が5Nの場合では最大



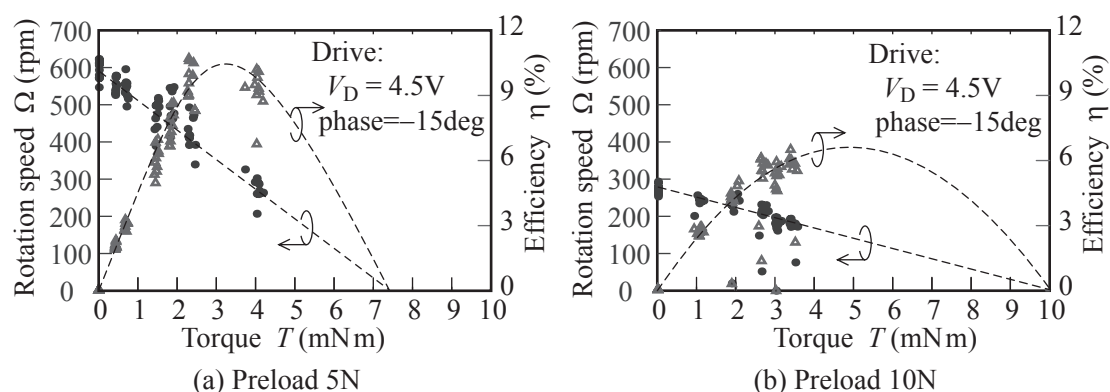


図 11. 試作モータの負荷特性

トルクは7mNm程度が見込まれる。予圧10Nでは回転数は低下するものの、最大負荷の到達予想値は約10 mNm程度が期待される。

動作原理に示したように駆動端子の切り替えによって回転方向の反転も確認され、その左右回転特性はおおよそ同等であった。また受動側出力電圧に関する昇圧比は約1倍であった。

## 5. まとめ

圧電セラミックスを用いた場合に、高い電気機械結合係数と入力アドミッタンスを備えた正方板の面内呼吸モードに着目し、この振動モードを元にした単相駆動超音波モータを提案した。正方板要素を二つ対称配置した構造に関して、受動側を電極開放とする事で駆動側と見かけの弾性が異なる効果を用いる事で左右非対称な、結果的に負荷駆動点における斜め方向変位を形成して単相動作を可能としており、単純な駆動端子の切り替えによって、同等の特性を有する逆方向回転が得られる。

受動側の振動を抑えるためのリンク部寸法条件の一例を有限要素法による解析により得て、これを元に試作実験を行い原理動作が確認された。

今回は実験系の構築が不十分であったためにモータの高負荷特性が適切に計測できなかった為これらの改善、ならびにデバイスそのものの最適化に関する検討や、小型化による特性の解明など、さらに検討を続けていきたい。

本研究の一部は東北工業大学新技術創造研究センター平成22年度地域・産学連携プロジェクト研究の援助を受けて行われた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 高野、田村、富川、青柳：「斜対称積層圧電セラミック振動子を用いた超音波モータの特性」，日本音響学会講演論文集2009年春，pp.1339-1340. (2009-3)
- [2] H. Tamura, T. Morooka, Y. Yamayoshi, M. Aoyagi, T. Takano, S. Hirose : "Design and Characteristics of Mode-Coupling LiNbO<sub>3</sub> Ultrasonic Motor Depended on Width-to-Length Ratio of the Stator Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., No.7, Vol. 49, pp. 07HE26 (2010-7)
- [3] 池田拓郎：「圧電材料科学の基礎」，オーム社，P.20 (1984)