



LiNbO₃矩形板の結合モードを利用した单相駆動超音波モータ

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本音響学会 公開日: 2012-09-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 柴田, 恭佑, 田村, 英樹, 広瀬, 精二, 青柳, 学, 富川, 義朗, 高野, 剛浩 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1670

LiNbO₃矩形板の結合モードを利用した単相駆動超音波モータ

その他（別言語等） のタイトル	Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using Coupled-mode of a LiNbO ₃ Rectangular Plate
著者	柴田 恭佑, 田村 英樹, 広瀬 精二, 青柳 学, 富川 義朗, 高野 剛浩
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2007年秋季
ページ	1209-1212
発行年	2007-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/1670

LiNbO₃矩形板の結合モードを利用した単相駆動超音波モータ*

柴田恭佑, 田村英樹, 広瀬精二, 青柳学[†], 富川義朗, 高野剛浩[‡]
(山形大・工, [†]室蘭工大, [‡]東北工大)

1 まえがき

RoHS 指令等を機に圧電材料においても非鉛化の研究が盛んに為され、超音波モータに関しても非鉛圧電セラミックスの応用が検討されている^[1]。著者らはLiNbO₃の平板バルク振動子を用いた幾つかのモータを提案している^[2-4]。広瀬らが示したようにLiNbO₃は代表的なPZT系圧電セラミックスと比較して大きな振動速度においても低発熱で特性劣化が少なく^[5]、さらに電気機械結合係数の大きさや低損失であると言った特長を持ちハイパワーアプリケーションにも適した素材と考えられる。

本紙では小形化に向けた単相駆動方式の簡素な平板形超音波モータに関して、従来の圧電セラミックスの方式を発展させて矩形板でありながらLiNbO₃の異方性によりモード結合を実現する構成を提案し、試作・測定結果と合わせて報告する。

2 LiNbO₃を用いたモータの構成

LiNbO₃のX回転Y板から振動子を切り出す際、Fig.1に示すように結晶の x, z' 方向に軸を合わせると縦1次-屈曲2次モードはそれぞれ独立であり、縮退設計にて二相駆動方式のモータが得られる^[2]。これは、圧電セラミックスを用いた場合と全く同様であり、従って振動子を斜対称形状としてモード結合を引き起こし^[6]単相駆動モータを構成する方式も試み報告した^[4]。しかし斜対称形振動子は与圧時にシャフトとのずれが生じやすい。ここで、面内方向においても異方性を有するLiNbO₃では幾何的に対称であってもFig.2(b)に示すような結晶方向の選定によりモード結合が得られる。

本研究では、そのようなモード結合矩形板振動子を用いて、単相駆動で左右反転動作可能な単結晶モータの実現を目的として、適切なモード結合が得られる結晶方位をFEM解析により定めてモータの設計と試作評価を行った。

矩形板振動子を厚み方向電界による面内振動で利用する為、横効果圧電定数 e_{23} の大きな

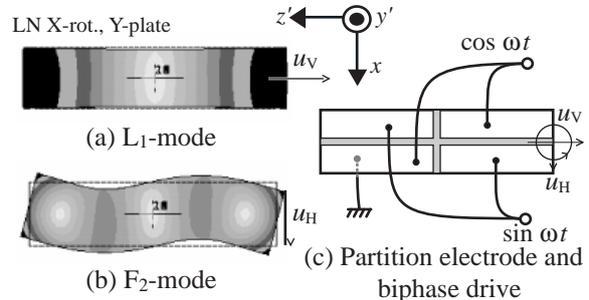


Fig.1 Biphase drive motor using 1st longitudinal and 2nd flexural modes.

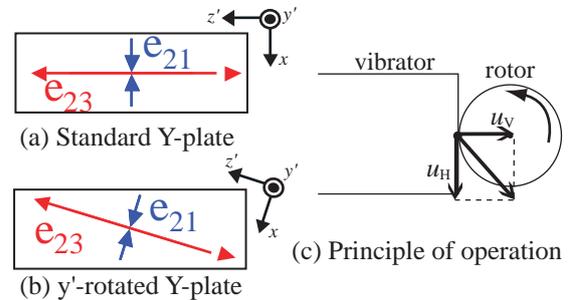


Fig.2 Piezo-effect of LiNbO₃ Y-plate for single phase drive motor.

X140度回転Y板を用いた。ここでFig.3に示すように、さらに y' 軸について Φ 度回転させる事によって縦と屈曲の両成分が励振されて結合モードが得られる。

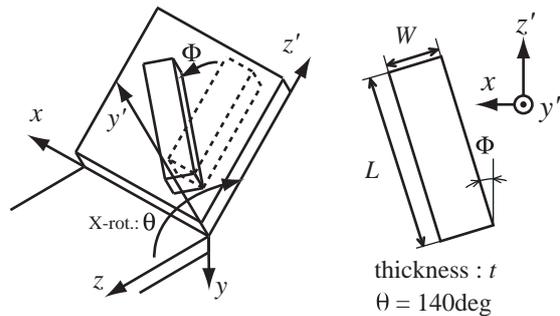
この際、共振周波数の異なる二つの結合モードが生じる。ここでは共振周波数の高低によってそれぞれUpper-modeとLower-modeと称する。この結合モードはFig.2(c)に示すようにロータに対して斜め方向、すなわち振動子の接触端面において垂直方向とこれに同期した水平方向変位を生じ、モータ動作が得られる。

Upper-modeとLower-modeの切換によってロータの回転方向を反転させるため、垂直変位 u_V に対する水平変位 u_H の位相が逆となるように振動子を設計する。

3 有限要素法による解析

モータ動作に適切な振動子形状を有限要素法により検討した。Fig.3(b)に示すパラメータを設定し振動子長 $L=10\text{mm}$ とした場合の振動

* Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using Coupled-mode of a LiNbO₃ Rectangular Plate, by SHIBATA Kyouzuke, TAMURA Hideki, HIROSE Seiji, AOYAGI Manabu[†], TOMIKAWA Yoshiro and TAKANO Takehiro[‡] (Yamagata Univ., [†]Tohoku Inst. of Tech. and [‡]Muroran Inst. of Tech.)



(a) Cut angle definition (b) parameter of vibrator
Fig.3 Design parameter of vibrator.

子幅との辺比 W/L に関する共振周波数の変化を、回転角 Φ の効果と合わせて Fig.4 に示す。 Φ が 0 deg の時はモード結合をしないので L_1 -mode、 F_2 -mode を示した。回転角 Φ を与えると Upper-mode と Lower-mode 周波数の交差は起きず、モード結合の特性が認められる。幾つかの辺比において $\Phi=15^\circ$ での Upper-mode と Lower-mode の変位状態を Fig.5 に示す。Upper、Lower-mode の共振周波数が近いほどモード結合が強くなっている。

このような結合モードは縦振動に比べて屈曲成分が弱い事から、水平方向の振動変位量 u_H の強化を目的とし、振動子端面の中央部を測定点とした解析の結果を Fig.6 に示す。なお、回転角度 Φ の符号による違いは認められなかった。この結果から Upper-mode と Lower-mode 共に $W/L=0.255$ 付近で、その際回転角度 Φ については $10\text{-}15\text{deg}$ 付近にて大きな水平変位 u_H が得られる事が分かる。垂直変位 u_V においても同様の条件で、Upper、Lower-mode 双方での変位量が同等となり、この条件を外れると一方の振動モードの変位は小さくなる。

以上より、 W/L が 0.21 から 0.30 となる範囲で適切な振動子条件を求める。変位最大となる回転角度 Φ のピーク値は辺比により異なるが、設定しやすい条件として $W/L=0.255$ 付近において結晶の z' 軸を矩形板の対角線方向に合わせる ($\Phi \approx 10\text{-}15\text{deg}$) と良好な変位が得られた。そこで各辺比において対角線が z' 軸となる角度 Φ での、振動変位と辺比の関係を解析した結果を Fig.7 に示す。

ここで、Fig.7 中に示すように振動子端面の5点の変位を比較する。Upper、Lower-mode 共に u_V では測定点1~点5による変位量は異なる。このためロータとの接触位置が変わると、モータ特性に違いが生じるといった問題を引き起こし、更には使用する点によってはモー

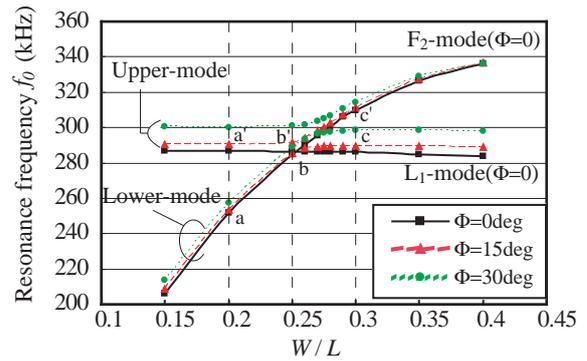
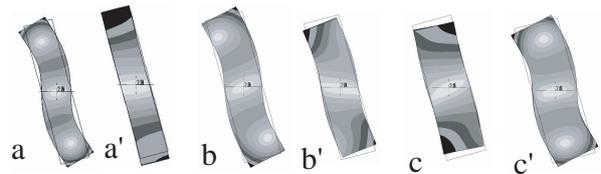


Fig.4 Analysis result of the resonance frequency correlate with width-length ratio W/L .



(a) $W/L=0.2$ (b) $W/L=0.25$ (c) $W/L=0.3$
Fig.5 Resonant vibration mode shapes at $\Phi=15^\circ$.

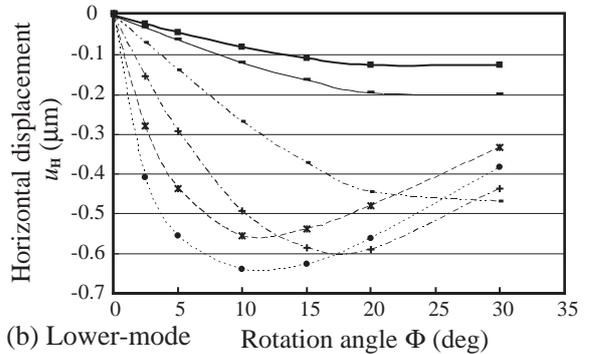
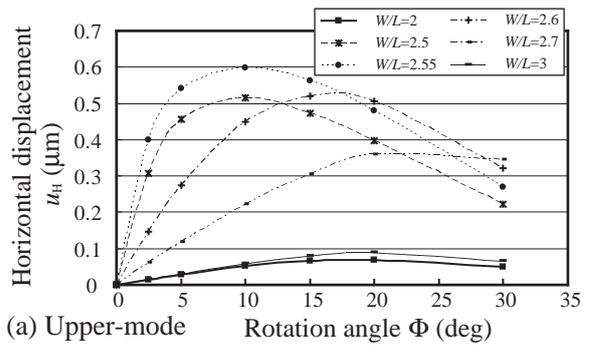
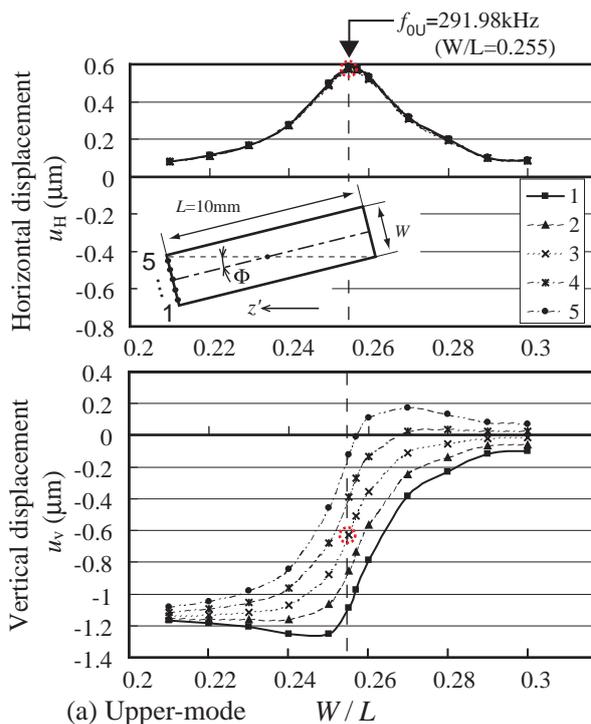
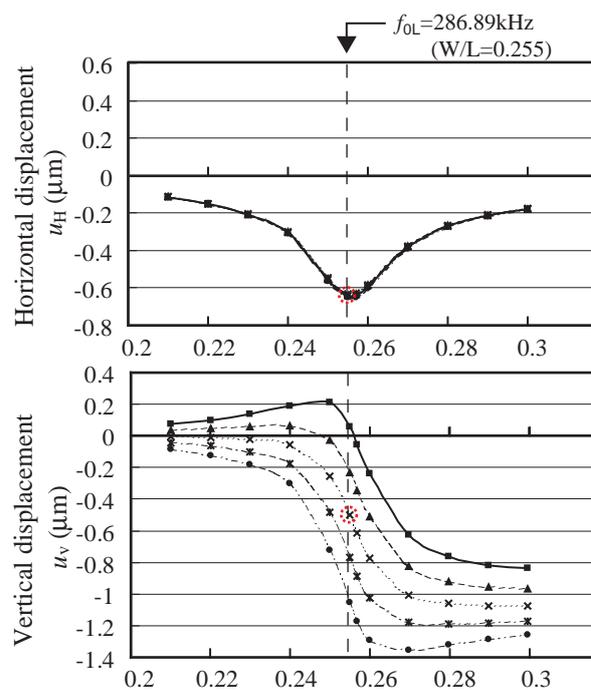


Fig.6 Analysis result of horizontal displacement correlate with rotation angle .

ド切替による反転動作を得られない。Upper-mode と Lower-mode 双方での変位の大きさが同等であり、可逆回転を得る為の条件を検討する。回転速度に関わる u_H が大きい、という条件で Fig.7 を見ると振動子端面中央の点3において辺比 $W/L=0.255$ の点が両モードで同程度の u_V が得られ適当である。このときの点3は Upper-mode と Lower-mode で u_V の極性は同じだが u_H の極性は異なり、すなわちモード切



(a) Upper-mode



(b) Lower-mode

Fig.7 Horizontal and vertical displacements of each mode when the z' axis correspond to diagonal line.

替による反転動作が可能となる。Fig.5でのモード結合が強いという条件にも一致している事から振動子形状を $10 \times 2.55 \times 0.5 \text{mm}$, $\theta = 14^\circ$ と決定した。

4 モータの試作と評価

4.1 振動子支持構成

実験で用いたステータ振動子の構成を Fig.8 に示す。LiNbO₃ 振動子は $\pm Y'$ 面全面に Cr+Au

電極を蒸着し、振動子の固定と給電を兼ねた構成として振動子のノード中心部上下に金属ピンを導電性接着剤で取り付けている。Fig.9 にモータ特性の測定系を示す。ステータ振動子はリニアステージ上に固定され、フォースメーターで与圧量を確認しながらステージを押し、ロータに接触される。光学式エンコーダの出力パルスを 2ms 毎にカウントして得たモータの起動特性よりトルク等を算出した^[7]。なお、シャフト直径は 1mm であり、コードホイール、シャフトを含むロータ全体の慣性モーメントは $J = 4.1 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ である。

4.2 比較サンプルと振動子特性

今回の測定では FEM 解析で決定した形状 (A) $10 \times 2.55 \times 0.5 \text{mm}$, $\theta = 14^\circ$ の他に、消費電力低下を狙い厚みを半分にした (B) $10 \times 2.55 \times 0.25 \text{mm}$ 、小型化検討のための (C) $5 \times 1.275 \times 0.25 \text{mm}$ の振動子サンプルで比較測定した。

支持構成後の振動子の Q 値はサンプル (A)、(B) 共に Lower-mode で約 800、Upper-mode で約 2000 に対して、サンプル (C) では支持中点のずれ等の影響を受けやすく Lower-mode で 200 と非常に低い程度であった。

4.3 測定結果

各サンプルの回転特性を Fig.10-12 に示す。トルクを算出し、また駆動電圧、電流とその位相差による実効電力を用いて効率を求めた。ただし、高速回転では軸ブレによる負荷変動が生じて電流波形も大きく揺らぐ。電流変化の大きい条件では振幅と位相の評価が難しい為、その条件では効率は求めていない。振動子サンプル (A) と (B) ではロータの反転動作が得られ、

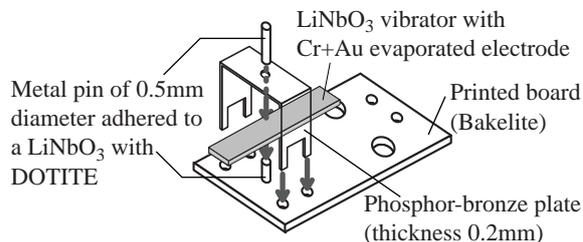


Fig.8 Support configuration of stator vibrator.

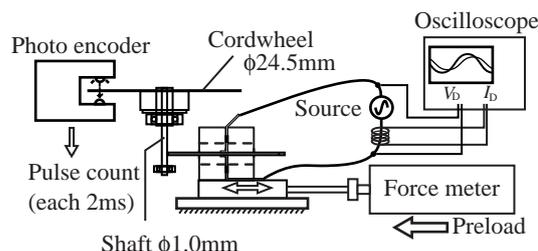
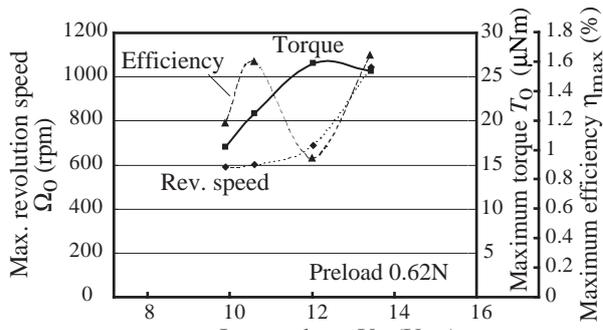
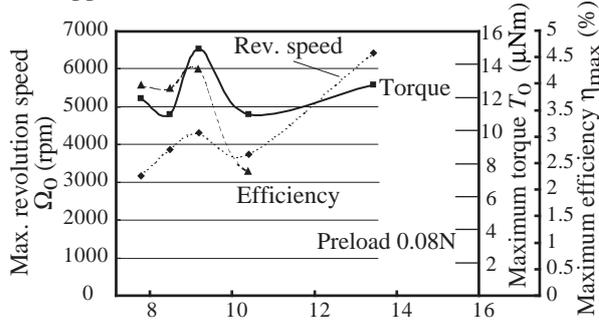


Fig.9 Measurement system.

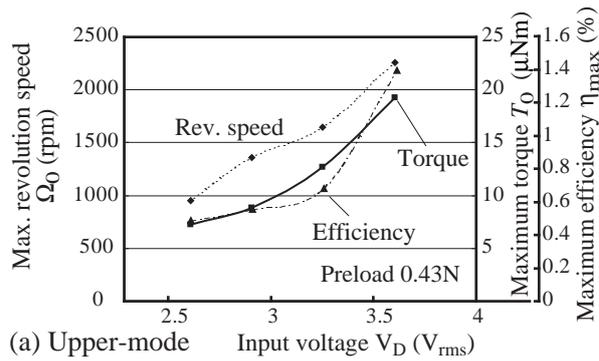


(a) Upper-mode

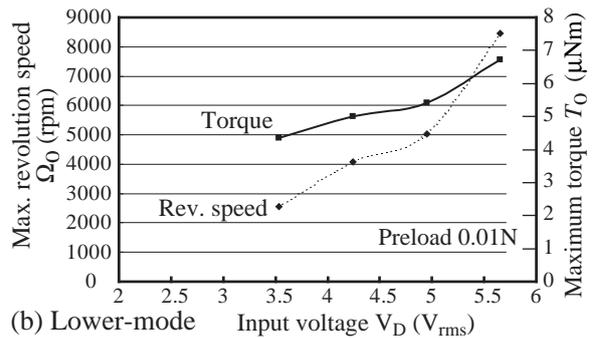


(b) Lower-mode

Fig.10 Rotation characteristic of sample-(A)



(a) Upper-mode



(b) Lower-mode

Fig.11 Rotation characteristic of sample-(B)

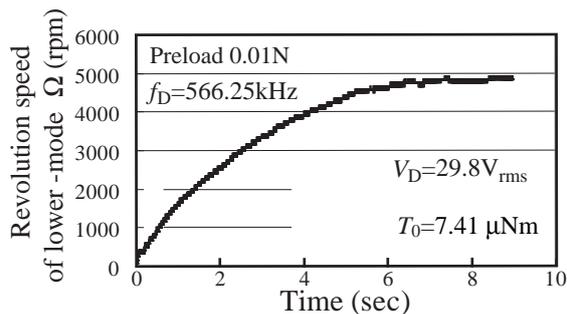


Fig.12 Start up rotation characteristic of sample-(C)

Lower-mode ではCW 方向、Upper-mode ではCCW 方向の回転であった。ただし回転動作が可能となる与圧量範囲はUpper と Lower-mode で大きく異なっており、実際に反転動作を行う場合の課題である。さらに与圧量の違いも要因となり、Upper-mode で低速高トルク、Lower-mode で高速低トルクの傾向が見られた。

また、厚みが半分のサンプル(B)を(A)と比較すると低電圧駆動の傾向は見られたが、個体ばらつきも大きい為今後の評価により詳細を明らかにしたい。

小型のサンプル(C)では一つの電圧点でしか測定できなかったため、立ち上がり特性のみ Fig.12 に示す。駆動電圧は比較的高いが Lower-mode では5000rpm の高速回転が得られている事から、数mm 長ステータ振動子を用いた単結晶モータの可能性を見いだす事が出来た。しかしながら、さらに低い駆動電圧と Upper-mode では今回動作確認に至らなかった。

5 まとめ

LiNbO₃ を用いたモード結合形の単相駆動超音波モータとして、矩形板でモード結合を生じるように結晶方位と振動子辺比の解析を行い、試作評価を行った。二つの結合モードには適切な与圧量などに大きな違いがあり検討の余地は大きい、モード切替による左右反転動作も確認された。実際に左右回転を得る為には与圧などの機械条件を一定にして電気条件の切替のみで動作させる必要があり、それら適切な設計に関して、モータ特性の詳細評価検討を継続中である。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金 - 特定領域研究 438(No.19016001) による。

参考文献

- [1] Y. Doshida *et. al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, 7B pp.4921-4925, 2007
- [2] T. Takano *et. al.*, Proc. 10th Int. Conf. Actuators, pp.453-456, 2006
- [3] 川合 他, 信学技報 US2006-42 pp.37-42
- [4] H. Tamura *et. al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, 7B pp.4698-4703, 2007
- [5] 広瀬 他, H3 秋季音響講演, pp.845-846, 1991.
- [6] 青柳 他, 信学論 C-1 Vol.11, pp.560-566, 1995.
- [7] K. Nakamura *et. al.*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 38, pp.481-485, 1991
- [8] 柴田 他, EM シンポジウム, pp.17-22, 2007