

LiNbO3 矩形板単相駆動モータの結晶第二回転角による特性 差

メタデータ	言語: jpn
	出版者:日本音響学会
	公開日: 2012-10-02
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 田村, 英樹, 諸岡, 孝憲, 山吉, 康弘, 青柳, 学, 高野,
	剛浩, 広瀬, 精二
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1690



LiNb03 矩形板単相駆動モータの結晶第二回転角に よる特性差

その他(別言語等)	A Study on Characteristics of A Single Phase
のタイトル	Drive USM Using LiNbO3 Plate Depended on the
	Second Rotation Angle
著者	田村 英樹,諸岡 孝憲,山吉 康弘,青柳 学,
	高野 剛浩,広瀬 精二
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2010年春季
ページ	1383-1386
発行年	2010-03
URL	http://hdl.handle.net/10258/1690

LiNbO₃矩形板単相駆動モータの 結晶第二回転角による特性差*

○田村英樹,諸岡孝憲,山吉康弘,青柳学[†],高野剛浩^{*},広瀬精二
(山形大院・理工、[†]室蘭工大、^{*}東北工大)

1. まえがき

圧電単結晶 LiNbO₃を用いた矩形板ス テータの超音波モータに関して、筆者ら は結晶異方性によるモード結合を用いて 単相駆動モータを提案してきた。この際 に結晶カット角は FEM によるパラメー タ解析で決定して実験的に検証を行って きた¹⁾。それらの結果からモード結合振 動子の挙動が次第に明らかになってきた。

本稿では結合メカニズムと、その場合 に適当とされる結晶カット角について弾 性異方性と圧電性の面から検討し、また それに基づいて異なるカット角で試作さ れたモータ特性の実験結果について述べる。

2. 結晶異方性によるモード結合

対象とする矩形板二重モード振動子は 面内縦1次(L₁)と屈曲2次共振(F₂)モー ドの使用を基本とする。この矩形板振動 子の長さ*L、幅Wと*した場合の辺比*W/L* が二つの条件で縮退する事はよく知られ ており²⁾、*W/L* \rightleftharpoons 0.27の縮退条件で用い られるモータの例は多く、最近では*W/L* \rightleftharpoons 0.63の縮退を利用した構成も報告され ている³⁾。異方性 LiNbO₃のX135 度回転 Y 板では Fig.1 に示すように辺比 0.255 あ るいは 0.85 付近において縮退が得られる。

単相駆動モータとするためには上記の 縦波モードと横波モードを結合させる必 要があるが、Fig.2のように二回の結晶回 転を施す事で矩形板でのモード結合が実 現される。筆者らも始めに W/L ≒ 0.255 の結合条件で単相モータの設計を行って 来たが種々の課題が存在しており、最近 になって W/L ≒ 0.85 の条件で構成したモ ータの方が比較的良好な特性を示す事が 明らかになってきた4)。この時の振動変 位は非結合時にはFig.1に示されるよう に横振動モードは1次のせん断変形に近 づいている。また結合状態では例えば X135 度 Y'14 度回転 Y 板では W/L=0.84 に おいてFig.3に示す変位姿勢となる。周 波数の違いで二つの結合共振モードが存



Fig.1 Resonant frequencies of L_1 and F_2 modes depended on the width to length ratio W/L.



Fig.2 Resonant frequencies as functions of W/L with respect to the second rotation angle Φ .

在し、その先端変位方向の違いによりモ ータの回転方向を切り替える事が出来る。 適切に設計された振動子のモード形状は ほぼ対称となる事もあり区別が困難であ るので、周波数の高低によってそれぞれ upper あるいは lower モードと称する。

さて、このような結合モード振動子設 計において、適切なカット角を定める事

A Study on Characteristics of A Single Phase Drive USM Using LiNbO₃ Plate Depended on the Second Rotation Angle, by TAMURA Hideki, MOROOKA Takanori, YAMAYOSHI Yasuhiro, AOYAGI Manabu[†], TAKANO Takehiro[‡] and HIROSE Seiji (Yamagata Univ., [†]Muroran Inst. of Tech. and [‡]Tohoku Inst. of Tech.)

が重要である。まず第一回転角については、 厚み方向電界印加による面内振動に関す る結合係数 k23 の最大となる条件である事 から θ=135 度が適切と考えている。第二 回転角についてはモードの結合メカニズ ムを検討する必要がある。

ここで第二回転角を与えた際の弾性コ ンプライアンス $s^{E_{15}}$, $s^{E_{25}}$, $s^{E_{35}}$ ならびに、 厚み方向電界 E2 に関する圧電定数 e23, e25, e21 について文献値⁵⁾を用いて計算し た結果をFig.4に示す。特に注目すべきは s^E₃₅である。そのような異方性がなければ、 矩形板の長さ方向に伝播して粒子変位方 向も長さ方向である縦波と、同じ伝播方 向でも粒子変位方向が幅方向の横波は互 いに直交する波であり独立に存在する。 しかしながら、**Φ=0**, 90 度以外で s^E₃₅が非 ゼロ値になると縦波はその伝播に伴って 面内のせん断成分を生じて、近傍に横波 モードがあった場合に励振源となる。横 波伝搬時も同様に縦波を励振し、従って それぞれの振動モードは結合する。

このような縦振動と横振動が結晶内部 で結合する振動子の等価回路モデルを Fig.4 に示す。例えば Fig.1 に示されるよ うな純粋な屈曲モードは、全面一様な電 極では圧電的に駆動する事が出来ないが、 縦振動モードが励振されるならば Fig.5 の 1:n で示される内部結合を介して屈曲側の モードも引きおこされて機械端子の垂直 変位速度成分wのみならず水平成分whも 生じる事になる。Fig.6(a)は振動子辺比を 変えて一定電圧で駆動する場合の FEM に よる周波数応答解析の結果であり、upper と lower の両モードが接近する時に縦振 動による面垂直変位 uv(upper, W/L<0.255), uv(lower, W/L>0.255) は減少して水平成分 変位unに変換されている状況が理解される。 しかしながら、W/L ≒ 0.255 において直 接屈曲振動を励振する効果は僅かと考え られ、従って u_Hは両モードの乖離により 急激に減少する。

以上より、内部結合効果のみを考える とFig.4(a) に示される s^{E}_{35} が最大となる第 二回転角 Φ が 25 度付近は一つの選択肢で あるが、縦振動を励振するのに必要な圧 電定数 e_{23} は Fig.4(b) に示されるように $\Phi=0$ で最大値をとり、 Φ の回転と共に大 きさが減少する。従って、これまでの FEM 解析などの結果¹¹から示されるよう にこの辺比の振動子では Φ は 12~14 度程



Fig.3 Displacement forms of the coupling modes of the rectangular plate of W/L=0.84 with second rotation angle $\Phi=14^{\circ}$.







Fig.5 Equivalent circuit of a double mode resonator with an internal coupling.

度の比較的小さな値が適当という事になる。 この事は Fig.7(a) の解析結果において第 二回転角が大きいほど振動子の電気機械 結合係数が低下する事にも表れている。 結果は割愛するが、Fig.6(a) の変位につい ても ϕ が 14 度程度を越えると減少する。







Fig.7 Analyzed results of electromechanical coupling factor *k* calculated using resonance-antiresonance method.

この結果に対して、もう一つのモード 結合条件である $W/L \doteq 0.85$ では状況が異 なる。Figs.6(b),7(b) を $W/L \doteq 0.255$ の場 合と比較すると、両モードの周波数が多 少離れる条件であっても $u_{\rm H}$ の変化は緩や かであり、また電気機械結合係数は広い 範囲で両モードの値が接近している。

これは純粋な屈曲モードをFig.8のよ うに面内せん断で見た場合に、W/L≒ 0.255 では異極性領域が大きいために一 様電極で駆動した場合に打ち消し効果が 大きいのに対して、W/L ≒ 0.85 では極性 反転領域が少なく、従ってせん断による 駆動が効果的である事が一因である。こ こで、Fig.4(b)から、面内せん断を励振 する圧電定数 e₂₅はΦの回転と共に増大 する。これにより、Fig.7(b) に示される ようにΦの回転によって両モードの結合 係数の近接状態を調整する事が可能となる。 ただしΦが22度程度を越えると結合係 数は乖離する傾向となるため、W/L≒ 0.85 において Φは 16~20 度程度が適当と 考えられる。



Fig.8 In-plane shear stress T_{xz} of the pure bending modes.

3. 試作モータ特性の比較

これまでの報告⁴⁾と同様にFig.9のステ ータ振動子を用いて、Fig.10のモータ計 測系による第二回転角の異なる二種類の モータの負荷特性をFigs.11, 12に示す。 ここでは、次の式

Torque: $T = (F - mg) \times r$ (Nm) Mechanical output: $P_{out} = T \times 2\pi\Omega / 60$ (W) F: Load force (N) m: Weight (kg) r: Radius of shaft (m) Ω : Rotation speed (rpm) によって機械的出力 P_{out} を求めた上で、 これを振動子体積と駆動電圧によって規 格化した指標を用いた。



Fig.9 Construction of the stator vibrator.



振動子形状はいずれもL=4.10、W=3.48 の辺比 W/L=0.849 であり Φは 14 度と 18 度である。Φ=14度, W/L=0.255の従来形 状ステータのモータ特性と比べて左右回 転特性の均等性が大きく改善されている。 特に Fig.11 の Φ=14 度のステータにおい て左右回転特性が近づくように実験的に 得られた辺比条件である。他方 Fig.12 の **Φ=18** 度のステータは左右回転特性を等し くするためには更に辺比調整を施す必要 がある。しかしながら上記実験結果の比 較では、主に回転速度増加による規格化 機械出力の向上によりΦ=18度のステー タを用いたモータの方が良好である。こ れは前掲の考察で示されたようにこれま でのΦ=12~14 度よりも大きな回転カット 角の方が W/L ≒ 0.85 のステータ振動子で は適している事を支持する結果と言える。



Fig.10 Measurement system.



4. まとめ

二重モード振動子の弾性異方性と圧電 性からモード結合メカニズムならびに励 振効果を考慮し、結晶カット角について 検討した。特に矩形板振動子辺比 $W/L \Rightarrow$ 0.85 の条件においてはこれまでの第二回 転角よりも大きな $\Phi=18$ 度程度でモータ 特性の向上が見込まれる事が実験的にも 認められる結果となった。

参考文献

- H. Tamura *et. al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No.5B, pp. 4015-4020, 2008
- 十文字, 尾上, 信学論Vol. 51-A No.3, pp.110-117, 1968
- 3) 福永他, 超音波TECHNO 2009.7-8., pp.71-73
- 4) 田村 他, 信学技報Vol. 109, No.213 US2009-39, pp.7-12, 2009
- 5) J. Kushibiki *et. al.*, IEEE Trans. UFFC., Vol.46, No.5, pp.1315-1323, 1999