

## LiNbO<sub>3</sub> 超音波モータに用いる結合モード振動特性の電極パターンによる改善検討

その他（別言語等）のタイトル	Electrode Patterning to Improve Characteristics of Mode-coupling Vibration for An Ultrasonic Motor Using LiNbO <sub>3</sub> Plate
著者	田中 謙太郎, 田村 英樹, 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	2009年春季
ページ	1331-1334
発行年	2009-03
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1679">http://hdl.handle.net/10258/1679</a>

## LiNbO<sub>3</sub> 超音波モータに用いる結合モード振動特性の電極パターンによる改善検討

その他（別言語等）のタイトル	Electrode Patterning to Improve Characteristics of Mode-coupling Vibration for An Ultrasonic Motor Using LiNbO <sub>3</sub> Plate
著者	田中 謙太郎, 田村 英樹, 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	2009年春季
ページ	1331-1334
発行年	2009-03
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1679">http://hdl.handle.net/10258/1679</a>

# LiNbO<sub>3</sub>超音波モータに用いる結合モード振動特性の電極パターンによる改善検討\*

◎田中謙太郎, 田村英樹, 山吉康弘, 青柳学<sup>†</sup>, 高野剛浩<sup>‡</sup>, 広瀬精二  
(山形大・工、<sup>†</sup>室蘭工大、<sup>‡</sup>東北工大)

## 1. まえがき

非鉛圧電材料による超音波モータの一種として、筆者らは圧電単結晶 LiNbO<sub>3</sub> を用いた回転モータに関して特に小形で簡素な構成の為にモード結合を利用した単相駆動モータに取り組んでいる<sup>1-3)</sup>。

圧電単結晶の異方性を用いてモード結合を引きおこし、周波数の切り替えによって左右逆転動作を得る方式であるが、しかしながら現時点では左右回転に用いる二つの結合モードの諸特性差に関して課題を有している。本報告では、駆動電極のパターニングによって両モードの結合係数の均等化に加えて共振周波数の離調を増大させて駆動周波数の選択を容易にする効果も確認されたので報告する。

## 2. 結晶異方性によるモード結合

矩形板の面内縦1次と屈曲2次共振モードを基本とする為、横効果結合係数が高いX135度回転Y板を採用した。更に Fig.1 に示すように y' 軸で  $\Phi$  度回転させる事でモード結合が生じる。櫛引らが提示した材料定数<sup>4)</sup>を用いて弾性コンプライアンス  $s_{15}^E$ ,  $s_{25}^E$ ,  $s_{35}^E$  の  $\Phi$  依存性を計算した結果が Fig.2 である。 $\Phi=0, 90$  度以外で  $s_{15}^E$ ,  $s_{25}^E$ ,  $s_{35}^E$  が非ゼロ値になると、Fig.3 に示すように面内縦1次の軸方向と屈曲2次の面内せん断による応力と歪みが結合する。Fig.2 から強い結合は第2回転角  $\Phi$  が12から30度付近で得られると考えられる。ただし現時点で最適条件は定まっておらず、本報告ではこれまでの試作評価条件と同じ  $\Phi=14$  度とする<sup>2)</sup>。

縦と屈曲成分が結合して生じる二つのモードを周波数の高低により upper および lower mode と呼び、これらが Fig.4 に示すように変位が対称となり、また駆動点変位の面垂直  $u_v$  と水平成分  $u_h$  が同程度となるように辺比を設計する。この際モーダル解析によれば面内長手方向への軸応力も Fig.5 に示すように upper と lower mode の強度分布と極性はほぼ対称となる。

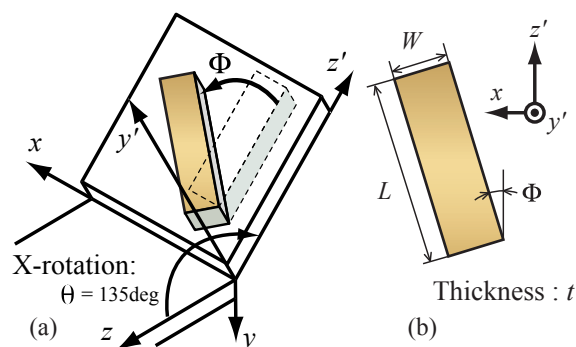


Fig.1 Cut-angle definition of LiNbO<sub>3</sub> resonator.

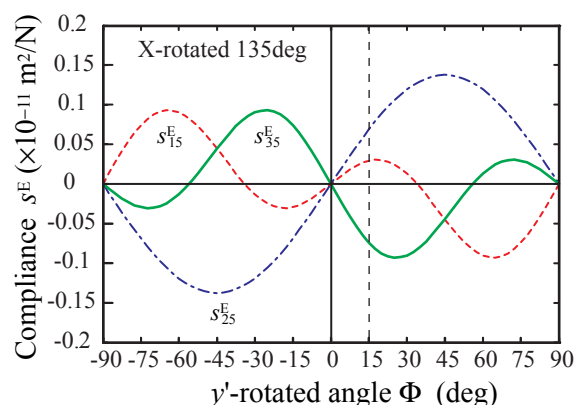
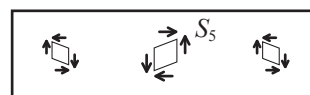


Fig.2 Elastic compliances  $s_{35}^E$ ,  $s_{15}^E$  and  $s_{25}^E$  as functions of second rotation angle  $\Phi$ .



(a) Tensile strains  $S_1$  and  $S_3$  in  $L_1$ -mode



(b) In-plane shear strain  $S_5$  in  $F_2$ -mode

Fig.3 Strains which contribute to coupling.

## 3. ステータ振動子の構造

ステータ振動子は板中央の上下面を支持し、更に Fig.6 のように直径 0.5mm の金属ピンで導電性接着剤により固定して給電機構も兼ねる。また駆動点には深さ 0.25mm の半円柱状に研削した溝に、振動子の厚みと同じ直径 0.5mm のジルコニア

\* Electrode Patterning to Improve Characteristics of Mode-coupling Vibration for An Ultrasonic Motor Using LiNbO<sub>3</sub> Plate, by TANAKA Kentaro, TAMURA Hideki, YAMAYOSHI Yasuhiro, AOYAGI Manabu<sup>†</sup>, TAKANO Takehiro<sup>‡</sup> and HIROSE Seiji (Yamagata Univ.,<sup>†</sup> Muroran Inst. of Tech. and<sup>‡</sup> Tohoku Inst. of Tech.)

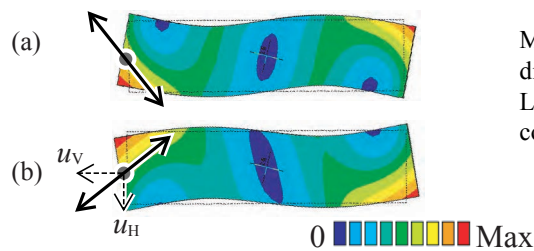


Fig.4 Total displacement of the coupling mode.  
(a) upper mode, (b) lower mode.

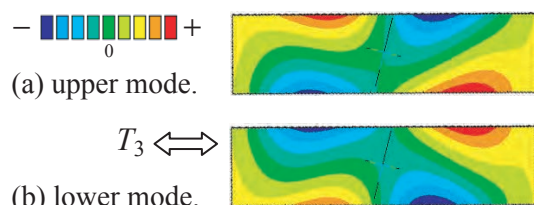


Fig.5 Tensile stress  $T_3$  in the coupling modes.

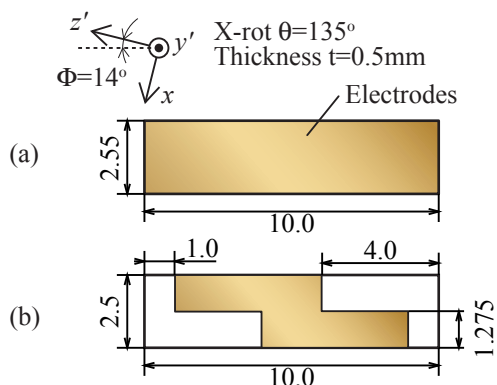


Fig.7 Dimensions and electrode patterns of measured resonators.

球をアルミナ主剤の無機系接着剤により取り付けている。ジルコニア球の摩擦材を用いる事で点接触状態は良好に保たれ、回転時間の向上が得られると共に両方向回転可能な与圧等の動作条件が緩和された。

#### 4. 電極パターンニング

従来は Fig.7(a) のように振動子矩形板の上下面全体に Cr+Au 蒸着電極を設けていたが、振動モードが対称となる設計条件においても Table I の測定例に見られるように upper と lower mode の電気機械結合係数には約 4 倍の差があった。この結合係数が同程度となるよう改良を試みた。

Fig.5 に示すように結合モードの結果的な内部応力は両モードに関して対称であるが結合係数には大きな違いが生じている。従ってモード結合の発生は縦モードと屈曲モードのうち一方の主要成分が励振されて生じた内力を元に弾性的異方性により他方のモード成分が誘起される効果が

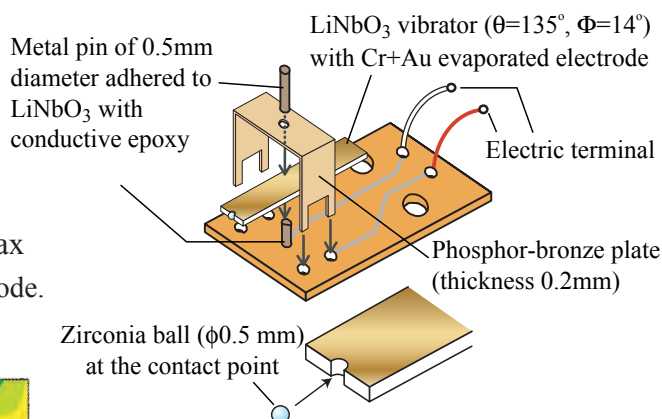
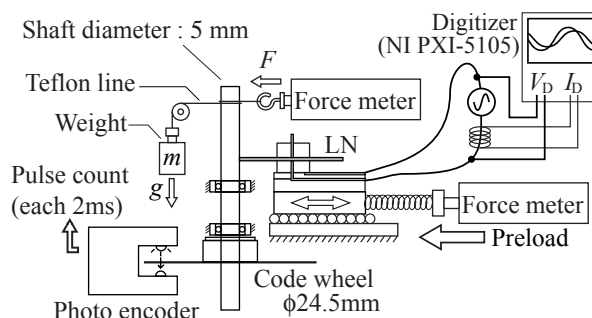


Fig.6 Composition of the stator vibrator.

Table I Equivalent circuit constants of the resonator shown in Fig.6.

Mode	[Diagram]		[Diagram]	
	lower	upper	lower	upper
$Q$	1125	612	1218	1688
$f_0$ (kHz)	281.17	286.40	280.107	298.84
$R$ ( $\Omega$ )	335.6	348.8	259.7	534.8
$L$ (mH)	213.6	118.6	179.7	480.8
$C$ (pF)	1.50	2.60	1.80	0.59
$C_d$ (pF)	30.2	30.3	18.1	18.1
$k$ (%)	11.6	40.9	30.3	30.9



$$\text{Torque : } T = (F - mg) \times r \text{ (Nm)}$$

$$F : \text{Load force (N)} \quad m : \text{Weight (kg)}$$

$$r : \text{radius of shaft (m)}$$

$$g : \text{gravitational acceleration (m/s}^2\text{)}$$

$$\text{Mechanical output : } P_{\text{out}} = T \times 2\pi\Omega / 60 \text{ (W)}$$

$$\Omega : \text{Revolution speed (rpm)}$$

Fig.8 Measurement system.

大きいと予想される。この場合、全面電極では縦 1 次モードは強勢に励振出来るが、他方の屈曲 2 次モードは効果的に励振する事は出来ない。従って屈曲 2 次モードから生じる方は結合係数が低くなると考えられる。これより屈曲 2 次モードの励振の妨げとなる、応力極性が異なる領域の電極を除去する方法を試みた。FEM 解

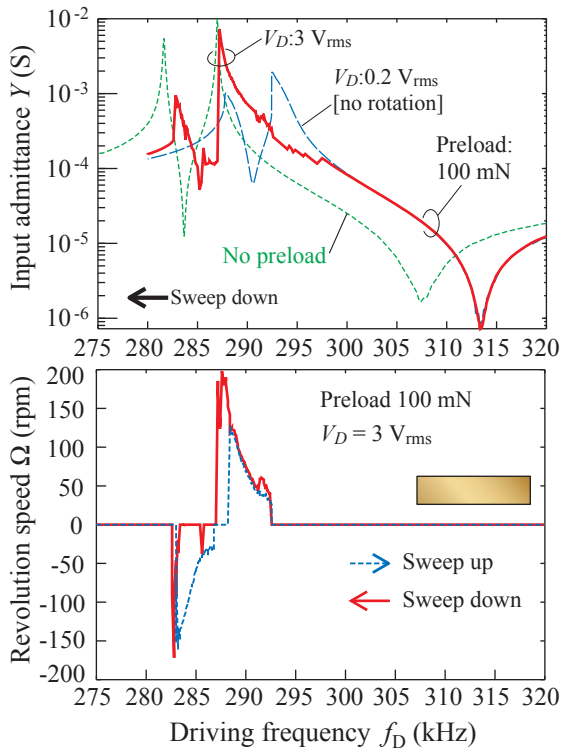


Fig.9 Frequency sweep characteristics of the vibrator with whole part electrode .

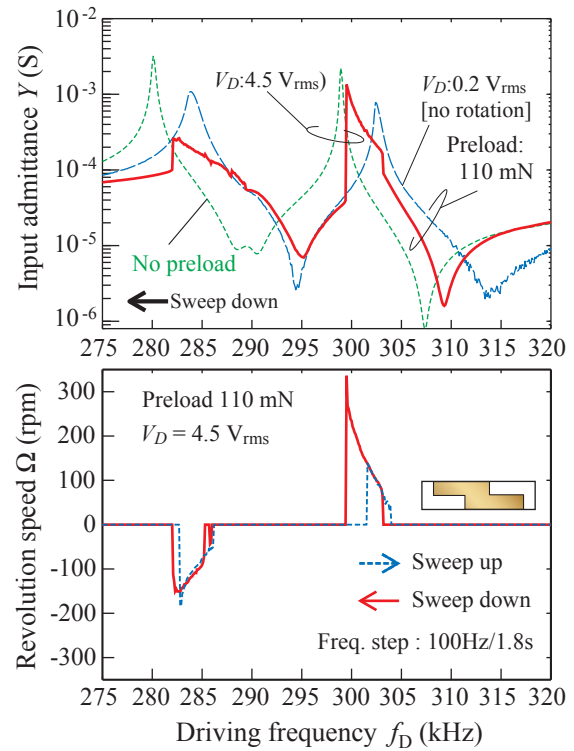


Fig.10 Frequency sweep characteristics of the vibrator with patterned electrode.

析を用いてロータ駆動端部の変位比  $u_V/u_H$  ならびに電気機械結合係数が upper と lower mode で同等になるように電極パターンと外形状の辺比を調整した。例えば Fig.7(b) の条件で試作測定した結果は Table I の通りほぼ同程度の結合係数が得られている。ただし元々結合係数の高かった upper mode では駆動面積の減少により結合係数の低下となる。図示の鍵形電極以外にも検討の余地がある。

## 5. 測定結果と検討

**5.1. 測定方法：** 試作モータの基本特性を Fig.8 に示す測定系を用いて評価した。ここでモータのシャフトは直径 5mm の SUS440C 材であり、これに直径約 0.3mm のテフロン撚糸を一巻きして糸端に荷重を加え、摩擦力により生じたトルクの変動をフォースメータを用いて読み取る。回転数は光学式エンコーダにより計測した。トルクならびに機械的出力は Fig.8 中の式により求める。駆動電圧  $V_D$  と駆動電流は波形データより振幅と位相差を得ている。これより入力パワーは位相差を考慮した実効電力を計算し、機械出力との比として効率を求めた。

**5.2. 無負荷時周波数特性：** 全面電極振動子 Fig.7(a) によるステータ振動子を用いたモータにおいて、駆動周波数をスイ

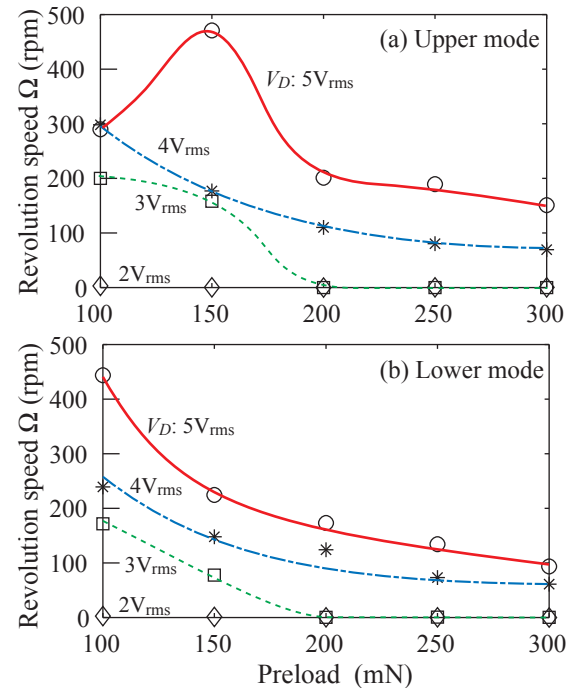


Fig.11 Maximum revolution speed as functions of the preload for the patterned vibrator.

ープした場合の入力アドミッタンスと回転速度の測定例を Fig.9 に示す。ロータを取り付けず振動子単体で測定した駆動アドミッタンス特性に対して、ロータを接触させると周波数特性は全体に高域側にシフトする。ここで駆動電圧 0.2V でロータが回転しない条件では周波数のシフト



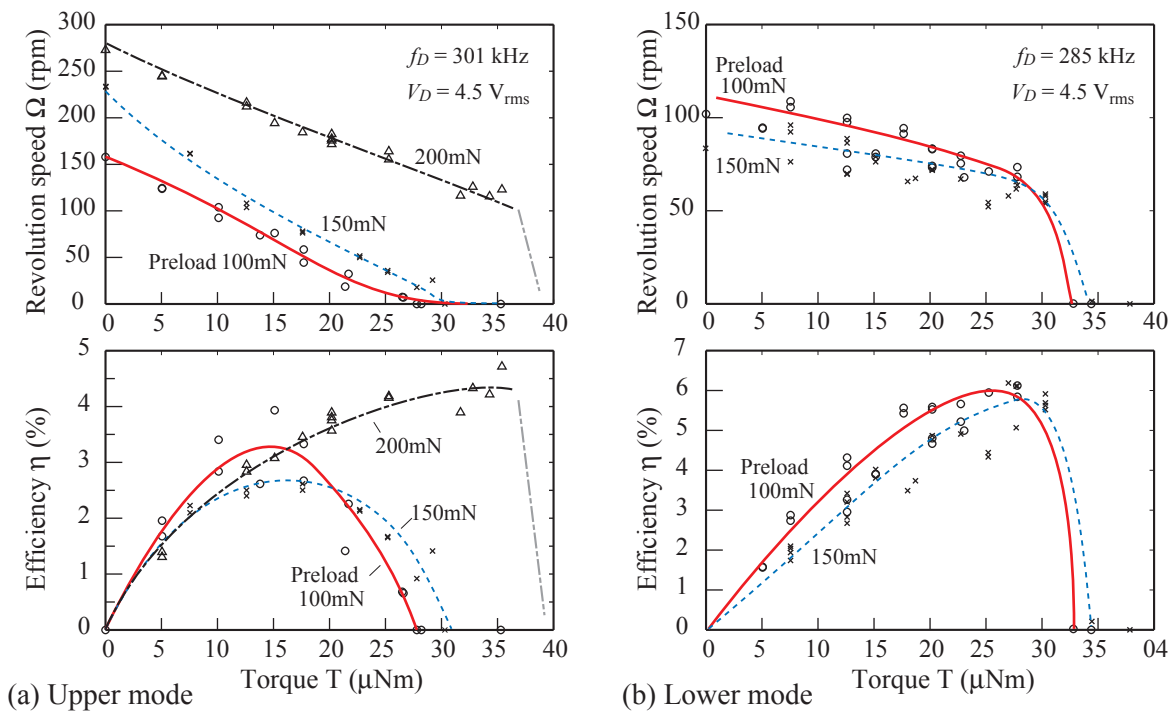


Fig.12 Load characteristics of the vibrator with patterned electrode.

量は大きく、特にその際のlower modeのピークは元のupper mode共振周波数を飛び越している。また同じ与圧量で3Vを加えるとロータは回転するが、その際の周波数特性は振動子単体での特性に接近する。すなわち同じ与圧条件でも駆動電圧、回転・非回転の違いによってupperとlower modeの共振ピークが重なる周波数が存在する。従って意図しない方の動作に引き込まれる恐れがある。周波数スイープで回転特性を測定した結果からも、左右回転の切り替え付近の周波数余裕が非常に狭く、駆動制御の困難さが伺える。

これに対して電極のパターニングを行って二つの結合モードの電気機械結合係数を概ね一致させた場合、Fig.10に示すように周波数特性に顕著な違いを生じる。lower modeの結合係数を改善した事で反共振周波数が高域側に移動し、これに伴って両モードの共振周波数の間隔が広がっている。これにより接触・非回転条件で周波数特性がシフトした際にもlower modeの共振が無負荷（あるいは回転時）のupper mode共振を越える事は無い。結果的に左右回転動作に関する周波数の余裕間隔が広がっており、切り替えに関して扱いやすくなっている事が分かる。

また与圧による無負荷回転特性については、初期の全面電極の設計ではlower modeの動作可能な与圧上限が低いために、

upper modeの適当な条件で使用することが困難であった。これに対してFig.11に示すように部分電極振動子ではlower modeの動作可能範囲が広がっており、両モードの特性が近づいている。

**5.3. 負荷特性：** 無負荷回転特性と共に、負荷特性についてもFig.12に示すようにupperとlower mode双方の特性もある程度近づいた。特にlower modeにおける動作の不安定性も若干解消されているが、それでも高負荷には弱い。また両モードの特性をさらに均等化する為にはカット角や電極パターンなど改善の余地は多い。

## 6. まとめ

モータ特性均等化の最適条件は更に検討を要するが、電極パターニングは改善手法の一つとして確認され、特にモード間の周波数余裕を拡大する効果が大きい。

## 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)の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- 1) H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 7B, pp.4698-4703, 2007
- 2) H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No.5B, pp. 4015-4020, 2008
- 3) 石崎 雅人他, 第51回自動制御連合講演会, pp.888-893, 2008
- 4) J. Kushibiki *et al.*, IEEE Trans. UFFC., Vol.46, No.5, pp.1315-1323, 1999