

LiNbO₃矩形板振動子を用いた単相駆動型超音波モータの駆動特性

その他（別言語等）のタイトル	Rotation Characteristic of Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using Coupled-mode in LiNbO ₃ Rectangular Plate
著者	石崎 雅人, 田村 英樹, 青柳 学, 高野 剛浩, 富川 義朗, 広瀬 精二
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2008年春季
ページ	1347-1350
発行年	2008-03
URL	http://hdl.handle.net/10258/1675

LiNbO₃矩形板振動子を用いた単相駆動型超音波モータの駆動特性

その他（別言語等）のタイトル	Rotation Characteristic of Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using Coupled-mode in LiNbO ₃ Rectangular Plate
著者	石崎 雅人, 田村 英樹, 青柳 学, 高野 剛浩, 富川 義朗, 広瀬 精二
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2008年春季
ページ	1347-1350
発行年	2008-03
URL	http://hdl.handle.net/10258/1675

LiNbO₃矩形板振動子を用いた単相駆動型超音波モータの駆動特性*

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

1 まえがき

RoHS 指令などにより非鉛圧電材料への注目が高まり、超音波モータへの応用も研究が進められている^[1,2]。筆者らもこれまで圧電単結晶 LiNbO₃を用いた回転モータを検討している^[3-5]。ここで小形化に適切な単相駆動方式とするために結合モード振動子として斜対称形振動子、ならびに結晶の二回軸回転矩形板振動子を用いた構成で動作検証を行ってきた。特に矩形板の結合モード振動子は斜対称形に比べて加圧が容易で左右両方向回転が得やすいと考えている。これまでに、FEM 解析によりモード結合を実現する適切な形状を定め、試作したモータにより回転を確認している^[6-7]。本紙では作成したモータの周波数特性ならびに負荷特性を示し、駆動周波数による始動条件や動作特性の違いについて検討を行った。

2 モータの構成と測定システム

振動子はFig.1に示すようにX軸で θ 度回転させた後に、新たなY'軸で Φ 度回転させる。さらに振動子の長さとの幅の比を解析より求めた $W/L=0.255$ としている。これにより全面電極でありながら縦一次と屈曲二次の結合モードが励振される。この際、共振周波数の異なる二つの結合モードが生じる。共振周波数の高低によってそれぞれupper mode, lower modeと称する。駆動周波数を変更しupper modeとlower modeを切り替えることでシャフトの回転方向を逆転することが可能である。

実験で用いたステータ振動子の構成をFig.2に示す。今回は寸法が $10 \times 2.55 \times 0.5\text{mm}$ 、 $\theta=135$ 度、 $\Phi=14$ 度の振動子を用いた。LiNbO₃振動子は $\pm Y'$ 面全面にCr+Au電極を蒸着してある。振動子の固定と給電を兼ねた構成として、ノードとなる振動子中心部上下に直径0.5mmの金属ピンを導電性接着剤で取り付け

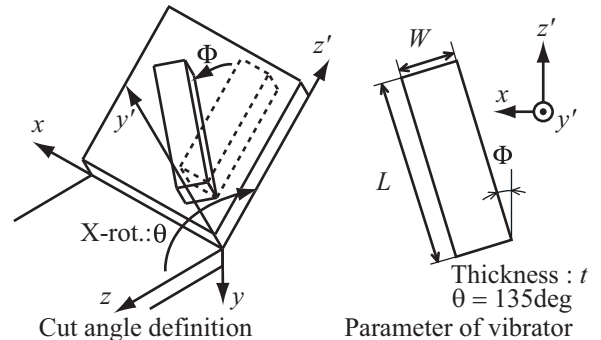


Fig.1 Design parameter of vibrator

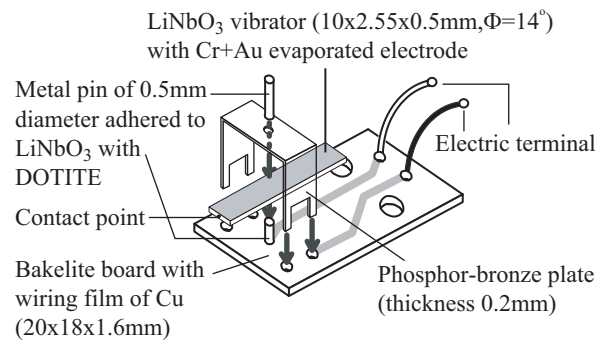


Fig.2 Support configuration of stator vibrator.

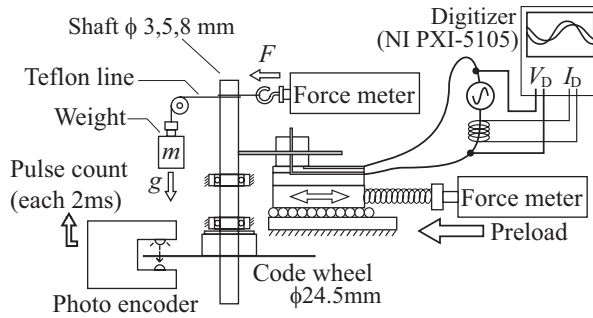
ている。上部ピンはさらに導電性接着剤でリン青銅の保持枠に固定される。この保持枠と下部ピンは厚さ1.6mmのベークライトのプリント基板にハンダ付けされている。作成したサンプルの基本特性を代表して二つTable 1に示す。以降、この二つの振動子の結果を用いて説明・検討を行う。

Fig.3にモータ特性の測定システムを示す。ステータ振動子はリニアステージ上に固定し、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てロータに接触させる。光学式エンコーダの出力パルスをも2ms毎にカウントして回転数を求めている。結果に示す回転数は5秒間の平均値である。シャフトは直径3,5,8mmの三種類、長さは50mmのものを使用した。母材はマルテンサイト系ステンレス、表面は硬質クロムめっきが施されている。ト

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

Table1 Measurement results of Equivalent circuit constants by ImpedanceAnalyzer

Mode	Sample-A		Sample-B	
	lower	upper	lower	upper
Q	4108.7	854.4	1815.5	780.1
f_0 (kHz)	283.50	288.80	283.22	288.62
R (Ω)	74.7	322.7	181.7	408.8
L (mH)	172.2	151.9	185.3	175.9
C (pF)	1.83	2.00	1.70	1.73
C_d (pF)	27.7	27.7	27.9	28.0
k (%)	12.9	40.5	12.3	40.7



Torque : $T = (F - mg) \times r$ (Nm)
 F : Load force (N)
 m : Weight (kg)
 r : radius of shaft (m)
 g : gravitational acceleration (m/s^2)
 Mechanical output : $P_{out} = T \times 2\pi\Omega / 60$ (W)
 Ω : Revolution speed (rpm)

Fig.3 Measurement system.

トルクは糸巻き法によって測定した。テフロン糸をシャフトに一回巻いて先端に重りをぶら下げる。この状態でシャフトを回転させるともう一方の端につけたフォースゲージで重りの質量とシャフトが糸を引く力の合計が測定できる。ここから重りの質量分を引くことによりFig.3中に示した式を用いてトルクと機械的出力を算出した。糸にぶら下げる重りを変えて負荷特性を求めた。

3 周波数特性

本モータは駆動時に周波数に対してFig. 4のようなヒステリシス特性を示す。停止状態から電圧を印加することで回転する始動可能域と、起動後に周波数を変化させることにより初めて回転させることができる領域を含めた回転可能域を有する。この範囲は与圧や電圧に依存し、印加電圧を高くすると広がる傾向にある。

Fig.5にSample-Aを、与圧を300mN、印加電圧を2.70V_{rms}一定とし周波数のみを変化させて駆動したときのシャフトの回転数を示す。

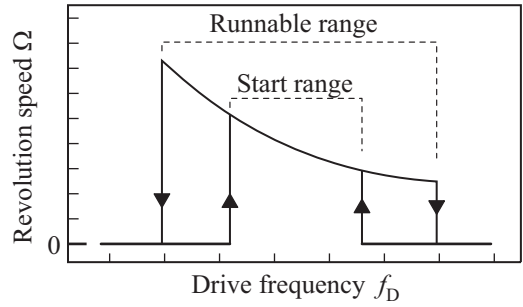


Fig.4 Hysteretic characteristics at operation

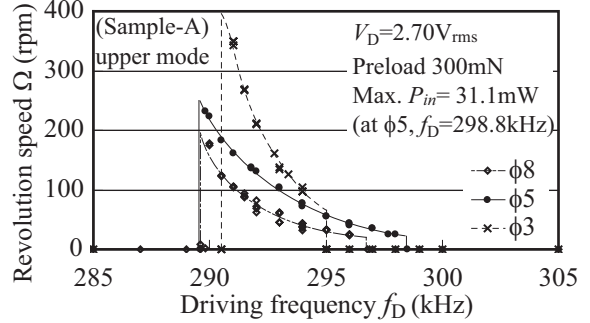


Fig.5 No-load revolution speed of upper mode

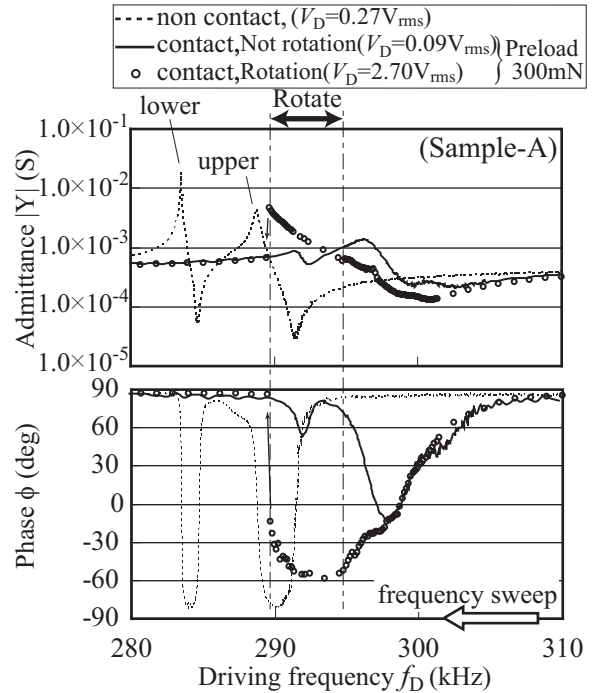


Fig.6 Characteristics of sample-A with frequency sweep

この時、糸や重りはつけておらず無負荷状態である。周波数が低いほど回転数は高くなるがある点を境に急に停止した。φ3シャフトはトルクが小さいためか回転可能な範囲が狭かった。シャフト径が細いほど回転数が高いがシャフトの周速度はほぼ同等である。また入力パワーもシャフト径による違いはほとんどなく、回転状態で駆動周波数を低くするほど大きくなる。最も低い周波数で回転したφ5シャフトの駆動周波数298.8kHzで31.1mWで

あった。

Fig.6に駆動周波数を高周波側からスイープしたときのアドミタンスと位相差を示す。点線は振動子をシャフトに接触させずに駆動電圧 $V_D=2.70V_{rms}$ を印加したときの特性である。実線は振動子中央部に $\phi 5$ のシャフトを与圧量300mNで接触させ、シャフトが回転しないような低い電圧 $V_D=0.09V_{rms}$ を印加したときの特性である。この時、共振周波数がupper,lower両モード共に高周波側にシフトしている事が見て取れる。またupper modeに比べてlower modeの減衰が著しい。次に、白丸点は接触状態を変えずに駆動電圧を $2.7V_{rms}$ と大きくしたときの特性を示している。294.75kHzから289.65kHzの間で実際にシャフトが回転している。高周波領域では接触・ $V_D=0.09V_{rms}$ の状態の特性と同じだが、回転領域付近では非接触状態の共振点へ近づくように変化している。289.65kHzでシャフトの停止と共に不連続的に変化した後は再び接触・ $V_D=0.09V_{rms}$ の特性と一致している。

Fig.6で回転時に接触・低電圧のlower modeの共振周波数を横切っているが回転方向はupper modeによる方向のみで回転しており逆転はしていない。lower modeはupper modeに比べて回転可能な与圧が75mN程度と低く、与圧300mNでは回転させることができない。なお与圧が75mNのときlower modeは286kHz程度で回転する。

Fig.7にsample-Bの先端中央に $\phi 5$ のシャフトを接触させ無負荷状態で駆動した際のヒステリシス特性を示す。本来であればsample-Aを用いて計測を行いたかったのだが、シャフト接触部の磨耗などにより特性が劣化したため新しいサンプルを用いて計測した。回転数や入力電力の大きさは異なるがその傾向は一致している。

高周波数側から周波数を下げてくると約296.5kHzで回転を始める(a)。さらに周波数を下げると291kHz付近で回転は停止する(b)。この状態から周波数をあげていくと292kHz付近で回転を始め、そのときの特性は先ほど周波数を下げてきたときのものとはほぼ一致する(c)。このまま周波数をあげていくと始めに回転を始めた(a)の周波数より高い299.5kHz程度まで回転して停止し、初期の状態となる(d)。

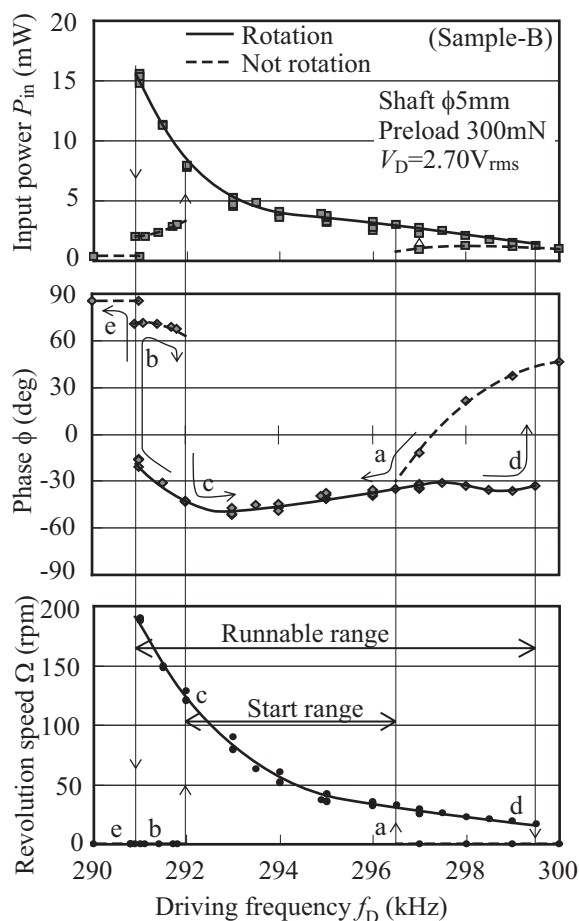


Fig.7 Hysteretic characteristics under no-load

回転可能域の下限で回転が停止した場合、位相差と入力電力の状態が(b)と(e)のように2種類存在している。これは、(b)の方は回転してはいないがシャフトと振動子が滑っており回りやすい状態、(e)は固着が生じ完全に停止した状態の違いではないかと考えられる。このとき位相差は回転状態では-15～-60度間にあり、特に回転可能域の下限では-50度程度から0度の方へと近づいていく。停止した際は一気に+数十度へと変化する。このため位相差を用いた制御が有効ではないかと考えられる。

4 負荷特性

upper modeを用いた負荷特性をFigs.8,9に示す。Fig.7において始動可能領域の中央付近の $f_D=294kHz$ と、回転可能域下限より若干高く安定して回転する $f_D=292kHz$ の2つの駆動周波数で測定を行った。いずれも効率は3～4%であり、また最大トルクとその際の回転数の大きさにも大差はない。

$f_D=294kHz$ の駆動条件では高負荷側で高効率と言えるが、トルクが $45\mu Nm$ を超えると回

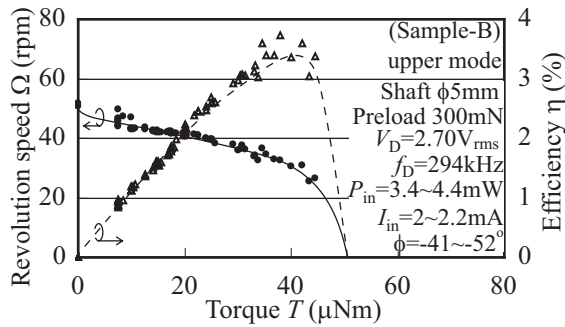


Fig.8 Rotation characteristics of upper mode ($f_D=294\text{kHz}$)

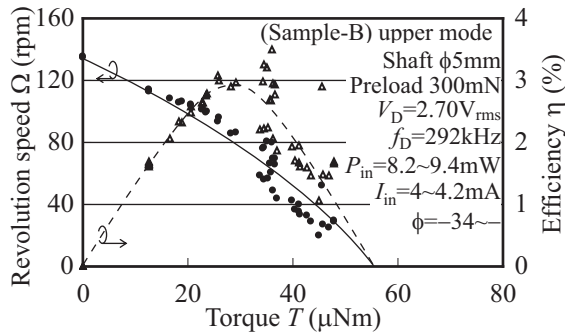


Fig.9 Rotation characteristics of upper mode ($f_D=292\text{kHz}$)

転・非回転を繰り返す不安定な状態となり測定不能のため効率曲線のピーク付近でデータが途切れている状態である。同じ駆動電圧において $f_D=292\text{kHz}$ の条件で高い回転速度と比較的対称な効率曲線が得られている。このように差が生じる理由としては、共振周波数から離れる事によって変位が減少する事の外に、結合モードの形が駆動周波数によって変化する影響も大きいと考えられる。

次に与圧量のみを75mNに変更してlower modeの特性を測定した。現在の振動子ではupper modeとlower modeでは回転を得られる与圧範囲が異なり、今後の改善の必要がある。Fig.10に無負荷時の回転数を示す。この際upper modeとは逆方向への回転が得られる。ただし290kHz付近ではupper modeの駆動状態へと入ることがあり注意を要する。このため288~290kHzではシャフトが一方向に回転せず細かく正・逆方向に振動的に動くことがあった。さらに286~288kHzでは駆動電流波形の大きさと位相差が安定しなかった。また285kHzの $\pm 0.5\text{kHz}$ より外側では摩擦騒音が発生した。Fig.7のupper modeの特性とは異なり比較的滑らかな周波数特性ではあるが、安定動作領域は狭い。

無騒音で安定的に回転した駆動周波数

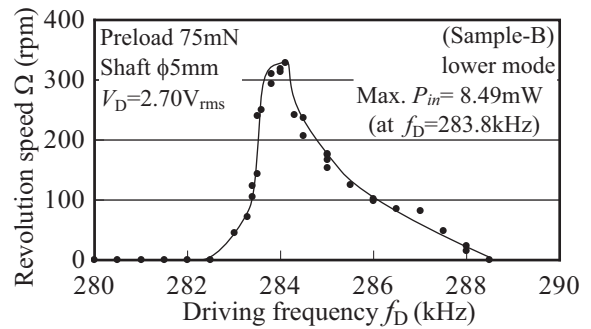


Fig.10 No-load revolution speed of lower mode

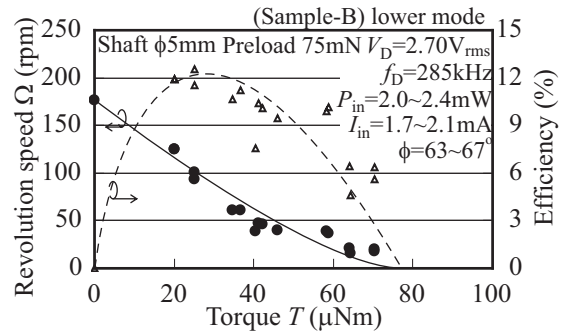


Fig.11 Rotation characteristics of lower mode ($f_D=285\text{kHz}$)

$f_D=285\text{kHz}$ における負荷特性をFig.11に示す。効率はupper modeよりも高く12%ほどで、負荷が小さく高回転領域で効率が低い傾向にある。入力電力はFig.11の測定範囲で力率が悪い事もあり2.0~2.4mWであった。

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] M. K. Kurosawa et. al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 7B, pp.4915-4920, 2007.
- [2] Y. Doshida et. al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 7B, pp.4921-4925, 2007.
- [3] T. Takano et. al., Proc. of ACTUATOR 2006, pp.453-456, June 14-16, Bremen, 2006.
- [4] 川合 孝二郎 他, 信学技報 US2006-42, pp.37-42
- [5] H. Tamura et. al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 7B, pp.4698-4703, 2007
- [6] 柴田 他, H19 秋季音響講演, pp.1209-1212, 2007.
- [7] 田村 英樹 他, 信学技報 US2007-35, pp.1-6