

2 非鉛圧電単結晶 LiNbO_3 を利用した非接触型超音波モータの検討

山形大学工学部 技術部
計測技術室 山吉康弘

1. まえがき

最近, RoHS 適合と謳う電子機器や電子部品が目立つようになってきている。RoHS とは, 2006 年 7 月に施行された, 電子・電気機器における特定有害物質の使用制限についての欧州連合 (EU) による指令であり, 鉛や水銀などの物質が指定値を超えて含まれた電子・電気機器は EU 加盟国に出荷できない。圧電材料として利用されているチタン酸ジルコニア酸鉛 (PZT) などの, 鉛を含んでいる圧電セラミックスは, 性能や価格の面でそれに代わる有力な代替材料がまだないため, 現在は RoSH 指令の適応外になっている。しかし, 人体への影響や環境問題に配慮するとともに, 近い将来, PZT にも RoSH 指令が適応されることに備えて, 鉛を含まない圧電デバイスを検討しておく必要がある。

筆者が研究を行っている, 非接触型超音波モータ[1-5]も, これまで専ら PZT を用いて構成してきたが, 今回, 非鉛の圧電材料である LiNbO_3 単結晶を利用した非接触型超音波モータ[6]を検討したので報告する。

2. 非接触型超音波モータの構造

非接触型超音波モータは, 圧電超音波振動子から放射された空中超音波の非線形効果で発生する音響流によって, ロータがステータと非接触で回転する超音波モータであり, 摩擦がないため長寿命で高速回転が可能である。

図 1 に, 今回検討した非接触型超音波モータの構造を示す[6]。直径 D_r の円板ロータの上下にギャップを設けて, 同じ構造の 2 つの正方形のステータを円周方向に 45° ずらして

配置した構成である。ステータに, 図 2 に示すような定在波屈曲振動を励振すると, ステータとロータとの間の空気層に図 3 に示すような定在波音場が発生する。ロータの上下の 2 つのギャップ空間 (Gap-I と Gap-II) は, ある程度のギャップ長を設けると音響的に結合し, 一方のステータの屈曲振動によって 2 つ

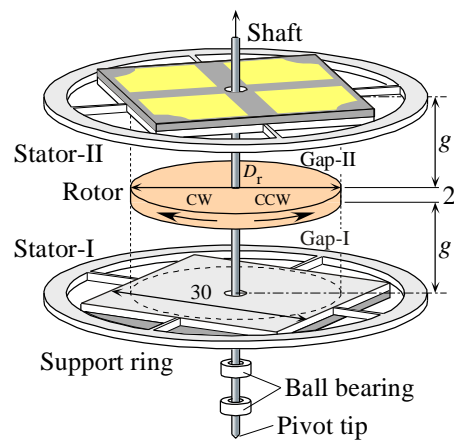


図 1. 正方形屈曲振動板を用いた非接触型超音波モータの構造

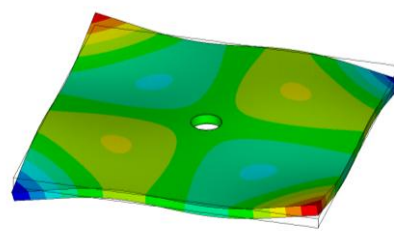


図 2. ステータの振動モードの FEM による解析結果 ($f = 26.762 \text{ kHz}$)

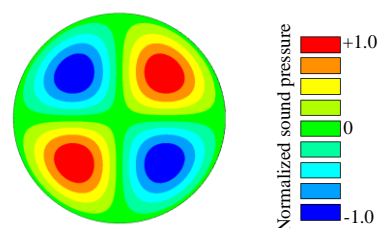


図 3. ギャップ内の音場分布の FEM 解析結果

のギャップ内に同時に音場が発生する。2つのステータを90°位相が異なる電圧で同時に駆動すると、2つのステータの屈曲振動によって発生する定在波音場の合成によって、2つのギャップ空間には円周方向に進む進行波音場が発生し[3]、それに伴う音響流によってロータはステータと非接触で回転する。一方の電圧の位相を反転させると、進行波音場の進行方向が逆転するため、ロータも逆回転する。この方式の非接触型超音波モータ[2]のステータは、縮退振動を必要としないため、円板や円筒形以外の構造にすることができ、また弾性定数や圧電定数などの材料特性に異方性のある材料を利用することができる。今回、大振幅励振特性に優れ、鉛を含まない圧電材料であるLiNbO₃単結晶を用いることにした。

3. ステータの構造と特性

図4に、ステータの構造を示す。正形状の屈曲振動部は、30 mm角で厚さ0.6 mm、中心部貫通穴・径3 mmのステンレス板と30 mm角で厚さ0.35 mm、中心部貫通穴・径3 mmのLiNbO₃をエポキシ系接着剤で接着した構造である。ステンレス板には屈曲振動部の振動モードの振動節線位置から幅0.5 mmの4本の細棒で連結した支持リングが一体成形されており、支持リング部を堅固に固定できる。

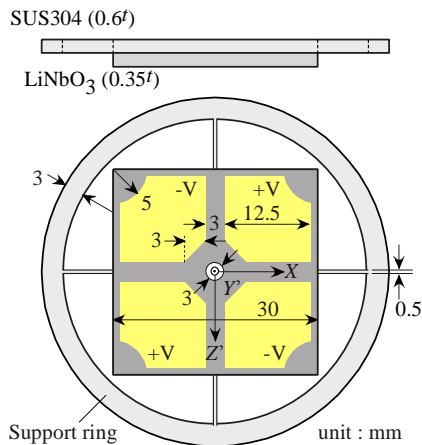


図4. ステータの構造

LiNbO₃は圧電材料定数の結晶方位異方性が強いので、図2の振動モードを強く励振するためには最適な結晶方位角を使用する必要がある。図5に、LiNbO₃・Y板のX軸周りの結晶方位角 θ_x を変えて、図2に示した振動モードにおける容量比 γ を有限要素法(FEM)により解析した結果を示す。容量比は制動容量と等価容量の比であり、値が小さいほど振動の励振に対する圧電性が強い。構造と振動モードの対称性を考慮して図4に示した正方形振動部の1/4区間を解析の対象とし、LiNbO₃は両面全面電極として解析を行った。 θ_x が約30°のときに最小の容量比 $\gamma = 19.0$ が得られることがわかった。本研究では入手の容易さからX36°回転Y板のLiNbO₃(山寿セラミックス社)を用いることにした。なお、 $\theta_x = 36^\circ$ の場合の γ は19.7である。

図6に、 $\theta_x = 36^\circ$ の場合について、図2の振動モードにおけるLiNbO₃表面の電荷分布をFEMで解析した結果を示す。この解析も1/4区間両面全面電極モデルで行った。振動子の中央部(図6左上)やコーナー部(図6右下)および振動節線付近(図6上辺部および左辺部)の表面電荷は小さく、振動モードの励振への寄与は小さい。実験に用いたステータでは、図6の電荷分布を考慮して容量比が最小となるLiNbO₃の電極形状をFEM解

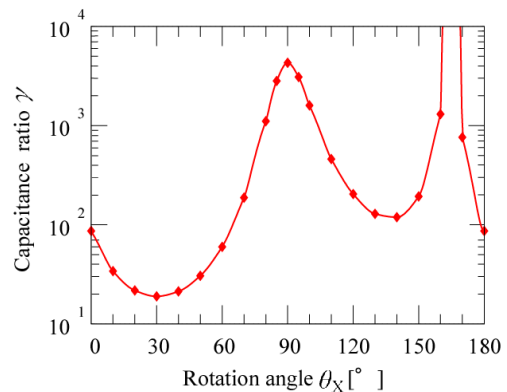


図5. LiNbO₃の結晶方位角に対する容量比のFEMによる解析結果

析によって求め、 LiNbO_3 の片側表面に図4に示したような形状の電極をフォトリソグラフィとウェットエッチングによって形成した。全面電極とした LiNbO_3 裏面の接地電極に対して、表面の4つの電極に正相(+V)と逆相(-V)の電圧を印加して、図2の屈曲振動モードを励振する。図4に示した形状の電極を用いた場合の容量比のFEM解析結果は16.2であり、全面電極の場合よりも約18%改善できた。表1に、作製した2つのステータ振動子の共振回路定数の一部の測定結果を示す。アルミニウムとPZT(富士セラミックス社C-213)を

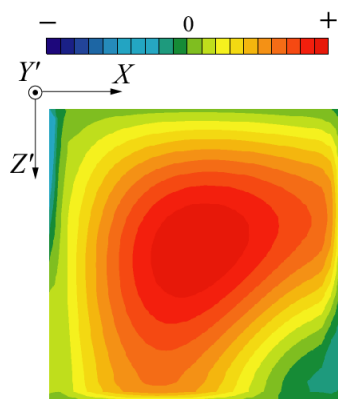


図6. 表面電荷分布のFEM解析結果
(1/4区間)

表1. ステータの特性の実測結果

| Stator | f_r [kHz] | Q | Capacitance ratio γ |
|--------|----------------|-----|-------------------------------|
| I | 19.402 | 425 | 20.6 |
| II | 19.408 | 376 | 20.3 |

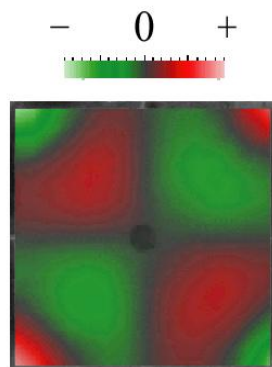


図7. レーザドップラー振動速度計による
振動モードの測定結果

用いて作製したステータ[5]に比べて、 γ は約20%増加したが、損失の小ささを表す共振尖鋭度 Q は約2倍高い値になった。 γ の実測値が解析値よりも大きくなったのは接着層の影響と考えられる。図7にレーザドップラ式スキヤニング振動速度計(Polytec PSV-300)を用いて測定した、ステータの面垂直方向の振動速度分布を示す($f_d = 19.4$ kHz)。本装置は、ドップラー効果によるレーザ反射光の波長変化から振動速度を計測する装置であり、面内の複数点をスキヤニングして計測し、マッピングすることによって振動速度の面内分布を比較的短時間で計測できる。作製したステータは、図2に示したFEM解析結果と同じ振動分布の屈曲振動モードが励振できていることがわかる。

4. 実験結果

図8に、直径 $D_r = 27$ mmのロータを用いて測定した回転速度の駆動周波数特性を示す。厚さ2 mmのアクリル製ロータを用い、ロータ上下のギャップ長 g が同じになるように調整した。ギャップ長が1.0, 1.3, 1.5 mmの場合の測定結果を示したが、それぞれ、回転速度が極大になる駆動周波数において、各ステータの正相・逆相電極への最大入力電力が60 mWになる条件で測定した。いずれも、ステータの共振周波数である19.4 kHz近傍で回転

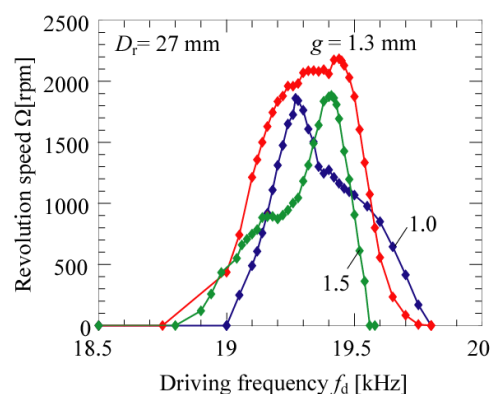


図8. 回転速度の周波数特性の測定結果

速度が極大になったが、 $g = 1.3 \text{ mm}$ では比較的広い周波数範囲で 2000 rpm 以上の回転速度が得られた。これは、ステータの共振にギャップ空間の音響的な共振がほぼ一致したためと考えられる。図 9 に、ロータ径 D_r とギャップ長 g を変化させたときの回転速度の測定結果を示す。各測定結果は、回転速度が極大になる駆動周波数において、各ステータの正相・逆相電極への最大入力電力が 60 mW になる条件での値をプロットした。 D_r が 28, 27, 26 mm のロータは、それぞれ、ギャップ長が 0.7, 1.3, 2.0 mm のときに極大の回転速度を示した。 $D_r = 27 \text{ mm}$, $g = 1.3 \text{ mm}$ のときの最大回転速度 2184 rpm は、アルミニウムと PZT (富士セラミックス社 C-213) を用いたステータと $D_r = 25 \text{ mm}$, $g = 1.3 \text{ mm}$ のときの同一入力電力条件における最大回転速度に比べて、約

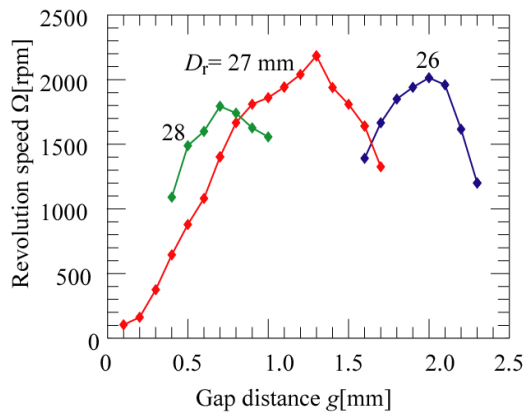


図 9. 回転速度の周波数特性の測定結果

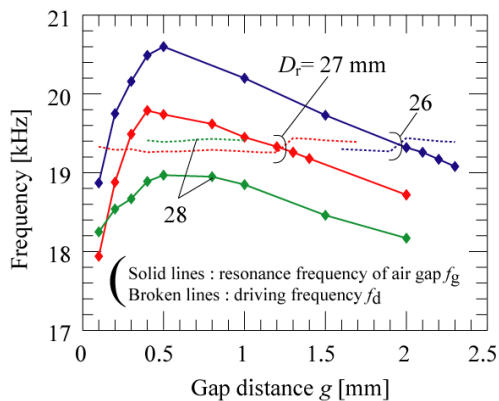


図 10. ギャップの共振周波数の測定結果

17 % 向上した。これは主に高 Q 材料である LiNbO_3 の利用によってステータの Q 値が向上し、ステータ振動子の損失が低減されたためと考えられる。図 10 にギャップの等価電気音響インピーダンスの測定結果から求めたギャップの音響的な共振周波数のギャップ長依存性を示す。同図には図 9 の回転速度を測定したときのステータの駆動周波数 f_d を破線で示した。この周波数はほぼステータの共振周波数と考えることができる。 D_r が 27 mm, 26 mm の場合は破線と実線が交わるギャップ長付近で、また、 D_r が 28 mm の場合は破線と実線が最も接近したギャップ長付近で、図 9 の回転速度が極大になっており、この結果からギャップ空間の音響的な共振周波数とステータの共振周波数を一致させることにより、高い回転速度が得られることを確認した。

5. まとめ

非鉛圧電単結晶 LiNbO_3 を利用して、RoSH に適合した非接触型超音波モータを実現した。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会 平成 24 年度科学研究費補助金 (奨励研究 24918021) の交付を受けて行っている。ステンレス板の加工にご協力頂いた、本学技術部 機器開発技術室および同技術室 和田真人 氏に御礼申し上げます。また、日頃ご指導頂いている電気電子工学分野 広瀬精二 教授に感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Yamayoshi, H. Tamura, and S. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 07GM08-1-8, 2009.
- [2] Y. Yamayoshi, J. Shiina, H. Tamura, and S. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 09KD10-1-5, 2009.
- [3] Y. Yamayoshi, J. Shiina, H. Tamura, and S. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys., **49**, 07HE16-1-7, 2010.
- [4] Y. Yamayoshi and S. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys., **50**, 07HE28-1-6, 2011.
- [5] 山吉, 広瀬, 音講論 (秋), 2-P-18, 1335-1336, 2011.
- [6] 八嶋, 山吉, 広瀬, 音講論 (秋), 2-P-a15, 2012. (発表予定)