

1. まえがき

チタン酸ジルコニア酸鉛(PZT)などのセラミックスや水晶, LiNbO_3 などの単結晶は圧電効果を有しており, それらを利用した圧電振動子はフィルタやセンサ, アクチュエータなどの広い分野に応用・実用化されている。超音波周波数帯の振動子は周囲の空気を圧縮・膨張させることで空気中に超音波を放射する。筆者は, 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によって発生する音響流によって, ロータが非接触回転する超音波モータの研究を行っており[1], 最近, 定在波振動を利用した新しい方式の非接触超音波モータを実現した[2,3]。本報告では, 圧電体—構造体—音響要素の相互作用を考慮した有限要素法(FEM)を用いて, 定在波屈曲振動円板を用いた非接触超音波モータ[2,3]におけるギャップ内の音場解析を行い, 回転速度特性の実験結果との関係を検討した結果を報告する。

2. 定在波型非接触超音波モータの特性

筆者が検討を行っている非接触超音波モータは, ロータがステータと非接触で回転動作し, 摩擦がなく, 高速回転が可能で, 長寿命な小型モータとして期待できる。従来の非接触超音波モータは, 同形縮退振動モードを二相駆動することでステータ振動子に屈曲進行波を励振し, それに伴ってエアギャップ内に生じる音響流によってロータの非接触回転を実現していた[1]。従って, ステータには, 同形縮退振動モードを有する円板や円筒形の構造であること, 2つの振動を励振する必要があること, また, 支持固定位置が限定

されるなどのいくつかの制約があった。筆者は最近, それらの問題を克服できる新しい非接触超音波モータを実現した[2,3]。図1に, 定在波型非接触超音波モータの構造を示す。円板形のロータの上下にギャップを設け, 同じ構造の2つのステータを配置した構造であり, ステータとロータは接触していない。ロータに接着した回転シャフトの針状の下端を支え, ギャップ長を一定に保っている。ステータの内径はシャフトの外径よりも大きく, シャフトとステータは回転時にも接触しない。図2にステータの構造を示す。定在波屈曲振動の節線の位置で6本の細い連結棒で繋がった, 屈曲振動円板と支持リングをアルミニウム板から一体成形し, 厚さ方向に分極処理された PZT 円板を屈曲振動円板に接着した構造である。PZT 円板の表面には, フォトリソグラフィとウェットエッチングによって, 6つの扇形の電極が形成してある。裏面を全面接地電極とし, 表面の隣り合う電極に交互に逆極性の電圧を印加すると, 振動節線が3本, 振動節円が1つ

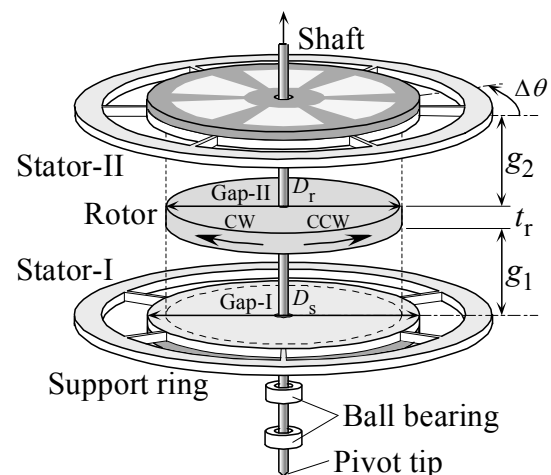


図1. 定在波屈曲振動円板を用いた非接触超音波モータの構造

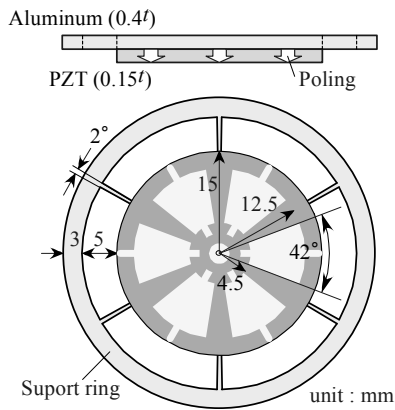


図2. ステータの構造

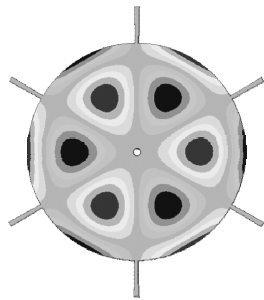


図3. 有限要素法による振動変位の解析結果

生じる定在波屈曲振動が励振される。図3は、FEMの固有値解析によって求めた振動変位分布である。ステータは定在波振動の6箇所の節の位置で繋がった支持リングを堅固に固定できる。円板の直径 30 mm, アルミニウム板の厚さ 0.4 mm, PZT 円板の厚さ 0.15 mm の場合の共振周波数は約 26.78 kHz である。

下部ステータ-Iを基準として、上部ステータ-IIの円周方向の位置角度差 $\Delta\theta$ とステータ-IIの印加電圧の位相差 $\Delta\phi$ を変えて、ロータの回転速度を測定した。直径 $D_r = 25$ mm, 厚さ $t_r = 2$ mmのアクリル製ロータを用い、ギャップ長 g_1, g_2 は0.25 mmとした。図4は、 $\Delta\phi = 90^\circ$ 一定とし、 $\Delta\theta$ に対する回転速度を測定した結果である。ステータ-Iとステータ-IIをそれぞれ単独で駆動した場合、ロータはほとんど回転しないが、同時に駆動すると、振動モードの円周方向周期の1/4の角度である $\Delta\theta = \pm 30^\circ$ で正逆方向に最大となるほぼ正弦波状の回転速度特性になった。図5は、 $\Delta\theta = -30^\circ$

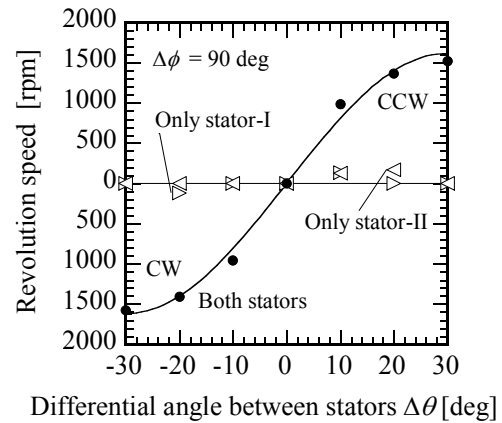


図4. ステータの位置角度差に対する回転速度特性の測定結果

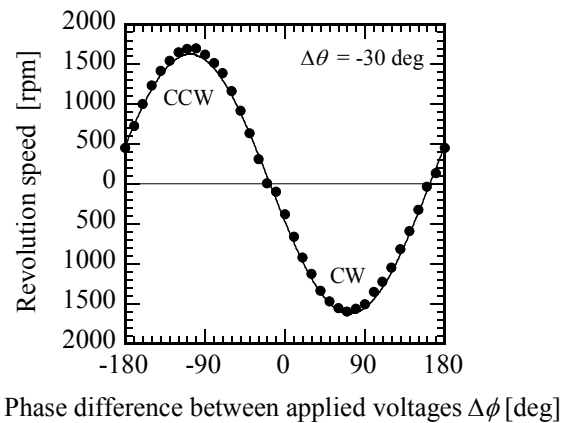


図5. 印加電圧の位相差に対する回転速度特性の測定結果

一定とし、 $\Delta\phi$ に対する回転速度を測定した結果である。回転速度は、 $\Delta\phi$ が -20° と 160° でほぼ零、 -110° と 70° で正逆方向に最大となる正弦波状の特性を示した。以上の回転速度特性は、定在波振動する2つのステータの位置角度差や印加電圧の位相差によって、2つのギャップ内の音場の状態が変化するために生じると考えられる。

3. FEMによる圧電－構造－音響連成解析

2つのステータの定在波振動によって発生する音場を解析するために、FEMを用いて圧電－構造－音響連成解析を行った。図6に解析モデルを示す。ロータとステータの周りに空気の音響要素を配置し、その最外周面を空気の特性イン

ピーダンスをもつ完全吸収壁面に定義することで、壁面からの音響反射の影響を排除した。また、振動モードの周期性を考慮して、 $\theta = 0^\circ$ と 120° の面に属する節点に周期境界条件を定義し、円筒形の $1/3$ のモデルで解析した。ステータとロータの構造は実験と同じにしたが、簡略化のために、ステータの支持リングや連結棒、およびロータのシャフトは省略し、ロータの節点の変位は拘束した。また、ステータ-I に対するステータ-II の位置角度差 $\Delta\theta$ は -30° 、2つのギャップ長 g_1, g_2 は共に 0.5 mm とした。図7(a)(b)は、ステータ-I とステータ-II の z 軸方向変位の振動パターンである。ステータ-I とステータ-II の振動変位分布は、振動モードの $1/4$ 周期の角度である 30° だけ円周方向にずれている。なお、使用したFEM(ANSYS 11.0)では、圧電体-構造体-音響要素の相互作用は考慮できるが、空気の粘性は考慮されない。

図8(a)(b)は、ステータ-I にのみ電圧を印加し、単独で駆動した場合の音場の時間変化である。ステータ-II の印加電圧は零とし、かつ、その変位は全て拘束した。同図(a)(b)はそれぞれロータの下面および上面と同じ z 座標位置における音圧分布であり、 T を時間周期として $T/8$ の時間ごとに示した。また、ステータとロータの外周位置をそれぞれ実線と破線で示した。図8(a)に示したように、

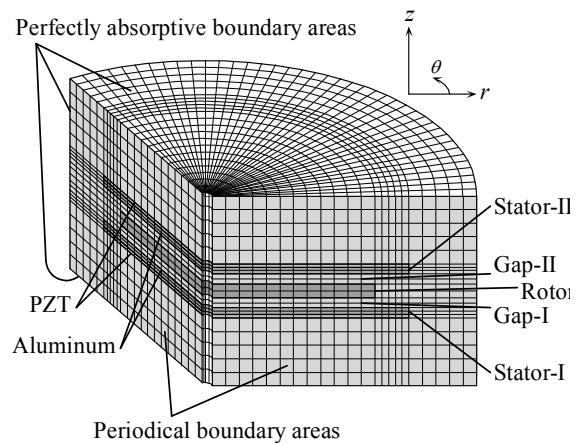


図6. 有限要素法解析モデル

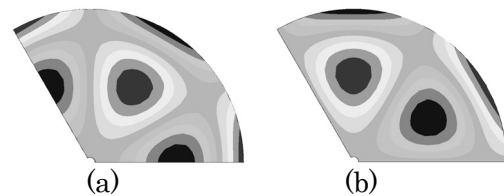


図7. (a)ステータ-I と(b)ステータ-II の振動変位分布

電圧を印加したステータ-I に直接面したギャップ-Iの内部に、図7(a)に示したステータの振動変位の節線と音圧の節が一致する定在波音場が発生している。一方、図8(b)に示したように、電圧を印加していないステータ-II に面したギャップ-IIの内部にもギャップ-I に発生した音場と同じ位置に音圧の節をもつ定在波音場が発生している。このとき、2つのギャップ内の音場は、音圧の絶対

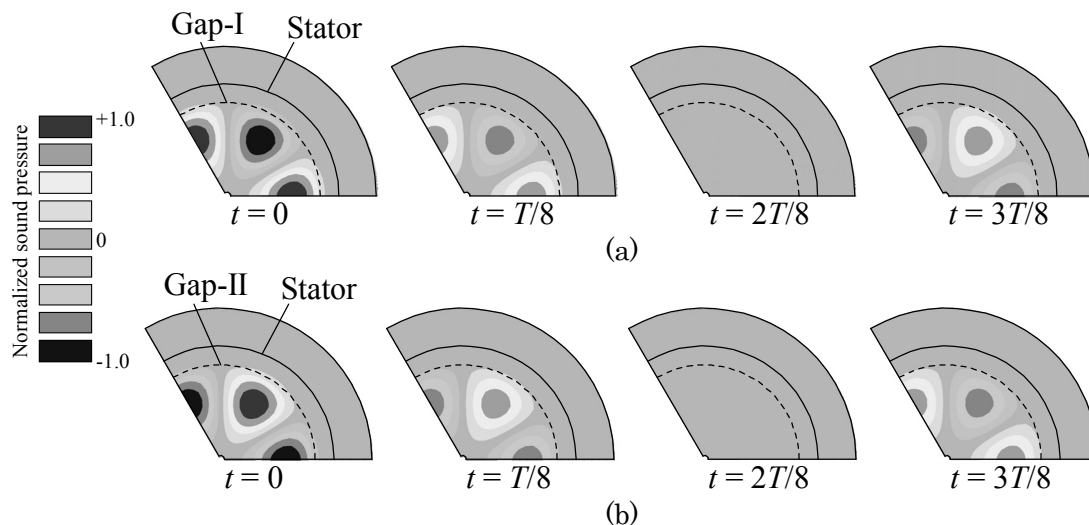


図8. ステータ-IIにのみ電圧を印加した場合のギャップ-Iとギャップ-IIの音場の時間変化

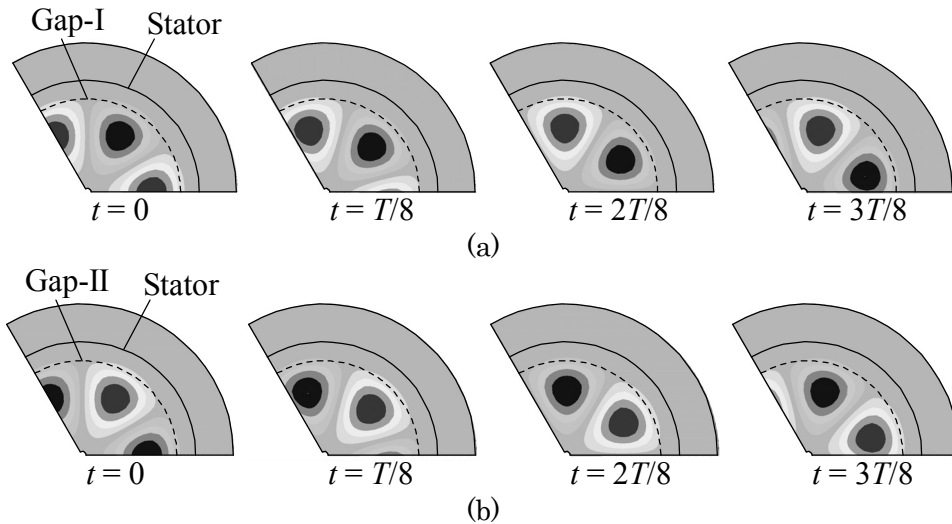


図9. ステータ-Iとステータ-IIに電圧を印加した場合のギャップ-Iとギャップ-IIの音場の時間変化 ($\Delta\theta = -30^\circ$, $\Delta\phi = 90^\circ$)

値振幅や分布はほぼ同じであるが、位相は約 180° 異なっている。以上の結果から、ステータを単独で駆動した場合、2つのギャップに、ステータの振動変位の節線と同じ位置に音圧の節を持ち、位相が互いに約 180° 異なる定在波音場が発生することがわかった。

図9(a)(b)は、ステータ-I とステータ-II に $\Delta\phi = 90^\circ$ の電圧を印加し、同時に駆動した場合の音場の時間変化である。ギャップ-I とギャップ-II の内部に、共に CW 方向の進行波音場が発生している。この音場の進行方向は、図4および図5に示したロータの回転方向と一致している。なお、ギャップ内の音場は、ステータに $\Delta\phi = -90^\circ$ の電圧を印加した場合、図9と逆方向に進む進行波となり、同位相 ($\Delta\phi = 0^\circ$) の電圧を印加した場合、定在波になった。ギャップ内の音場は定在波振動する2つのステータによって発生する定在波音場の合成となり、それが定在波音場の場合にはロータは回転せず、進行波音場の場合には、その進行方向にロータが回転することがわかった。

4. まとめ

定在波屈曲振動円板を用いた非接触型超音波モータにおけるギャップ内の音場を、FEM を用いて解析し、回転速度特性の実験結果との関

係を検討した。1/4周期分円周方向にずらして配置したステータに、 90° の位相差をもつ電圧を印加すると、ロータの上下のギャップ内に同一円周方向に回転する進行波音場が発生した。一方の印加電圧の位相を反転させると進行波音場の回転方向が逆転し、同位相の電圧を印加すると定在波音場となった。音場の進行方向は実験で観測されたロータの回転方向と一致した。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会 平成 21 年度科学研究費補助金(奨励研究 21920022)の交付を受けて行った。また、日頃ご指導頂いている電気電子工学分野 広瀬精二 教授と田村英樹 助教に感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Yamayoshi, H. Tamura, and S. Hirose, "Optimum design for noncontact ultrasonic motor with flexurally vibrating disk using an equivalent circuit considering viscosity of air," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, 07GM08, 2009.
- [2] 山吉康弘, 椎名潤, 田村英樹, 広瀬精二, "定在波屈曲振動円板を用いた非接触型超音波モータ," 第26回強誘電体応用会議, 29-P-8, pp. 101-102, 2009.
- [3] Y. Yamayoshi, J. Shiina, H. Tamura, and S. Hirose, "Noncontact ultrasonic motor with two flexural standing wave vibration disks," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 9B, 2009 (in press).