

## 1 はじめに

ロータの上下にエアギャップを設け、振動モードの  $1/4$  周期だけ円周方向にずらして配置した2つのステータを、 $90^\circ$  の位相差で定在波屈曲振動させると、ロータがステータと非接触で回転する非接触型超音波モータが実現できる[1-3]。ステータに屈曲進行波を励振する非接触型超音波モータ[4]と比較して、縮退振動を必要としないため、円形以外の構造や異方性材料を使用したステータを用いることができる特徴がある。これまでに、円板構造や正方形板構造のステータを利用した非接触型超音波モータの特性を報告してきた[1-3]が、屈曲進行波を用いた非接触型超音波モータよりも比較的広いギャップ長で良好なモータ特性を示した。この要因を明らかにするために、本報告では、空気の粘性と音響漏れの影響を同時に考慮できる音場解析方法[5]を用いて、2つの正方形板屈曲振動子を用いた非接触型超音波モータのエアギャップの音場特性の解析を行った。

## 2 モータの構造

Fig. 1 に、2つの正方形板屈曲振動子を用いた非接触型超音波モータの構造を示す[2,3]。直径  $D_r$  の円板ロータの上下にギャップ長  $g$  を設けて、同じ構造の2つのステータを円周方向に  $45^\circ$  ずらして配置している。位相が  $90^\circ$  異なる電圧で2つのステータを同時に駆動すると、ロータ上下の2つのエアギャップ内に音響流が発生し、ロータが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ロータは逆回転する。この方式の非接触型超音波モータのステータは、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。

Fig. 2(a)に非鉛圧電単結晶  $\text{LiNbO}_3$  を用いて作製したステータの構造を示す[3]。正方形の屈曲振動部は  $30\text{ mm}$  角で厚さ  $0.6\text{ mm}$ 、中心部貫通穴・径  $3\text{ mm}$  のステンレス板と  $30\text{ mm}$  角で厚さ  $0.35\text{ mm}$ 、中心部貫通穴・径  $3\text{ mm}$  の  $X36^\circ$  回転 Y 板の  $\text{LiNbO}_3$  をエポキシ系接着剤で接着

した構造であり、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  $0.5\text{ mm}$  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。Fig. 2(b)はレーザドップラ式スキャニング振動速度計 (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である ( $f_a = 19.4\text{ kHz}$ )。直径  $D_r$  が  $27\text{ mm}$  のロータを用いて回転速度のギャップ長依存性を測定した結果、 $1.3\text{ mm}$  のギャップ長で最大回転速度が得られた[3]。このギャップ長は、屈曲進行波を用いた非接触型超音波モータが最大回転速度を示すギャップ長である  $0.3\text{ mm}$  よりも広い[4]。本方式の非接触型超音波モータでは、2つのステータ

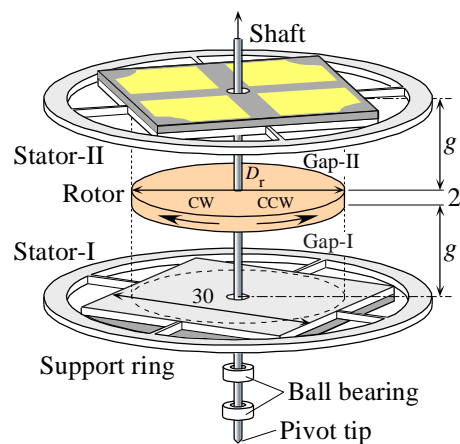


Fig. 1 Construction of noncontact ultrasonic motor using two square bending vibrators.

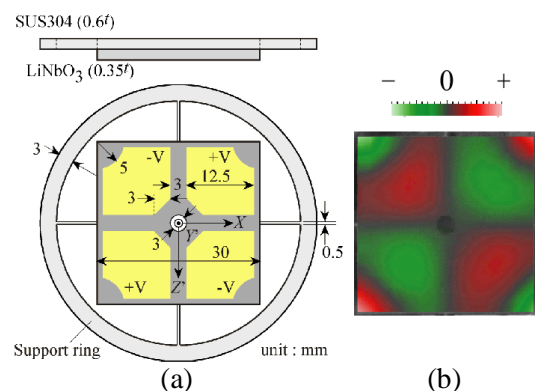


Fig. 2 (a) construction and (b) measured vibration velocity pattern of stator.

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、ギャップ内に進行波音場を形成させる[1]が、ギャップ長によって進行波音場の状態が異なるものと考えられる。

### 3 音場の解析方法[5]

狭小空間の音場には空気の粘性の影響を考慮する必要があるため、音場の解析には、それが可能な大規模音響解析境界要素法ソフトウェアWAON(サイバネットシステム(株))を用いた。Fig. 3に境界要素モデルを示す。Fig. 2(a)に示した正方形板ステータを、直径27 mm、厚さ2 mmのロータの上下にギャップ長 $g$ を設けて配置した構造について解析を行った。但し、支持棒や支持リングは未考慮とした。予め有限要素法解析で得た第50次までのステータのモーダル解析結果を境界要素モデルのステータ部にマッピングし、構造体の周囲の空気には広い空間にお

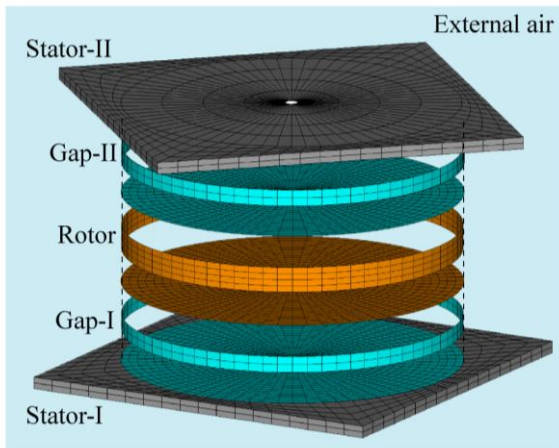


Fig. 3 Model for boundary element method.

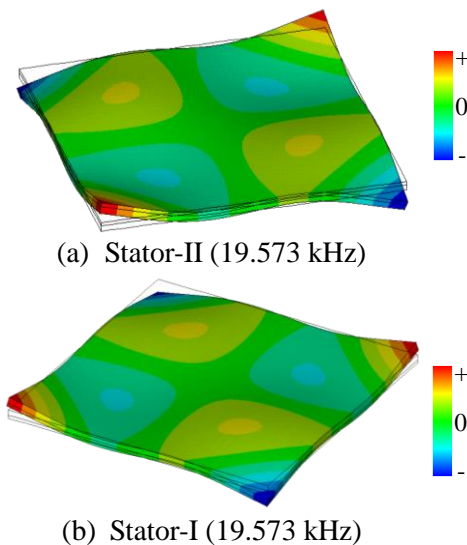


Fig. 4 One of vibration modes of two stators calculated by finite element method.

ける通常の音速と密度、また、ギャップ内の空気にはギャップ長や周波数に依存する複素量の密度と音速を定義して、ステータやロータの構造体とギャップ内や外部空間の音響媒質との境界面において構造-音響連成解析を行うと同時に、ギャップ空間と外部空間との境界面において音響-音響連成解析を行う。Fig. 4に、共振周波数19.573 kHzのStator-IとIIの固有振動モードのFEM解析結果を示した。

### 4 解析結果

#### 4.1 ステータ-Iのみを駆動した場合

Stator-Iにのみ電圧を印加して駆動した場合の解析を行った。Fig. 5は、ギャップ長 $g$ を1.3 mmとして解析した、Gap-IおよびGap-II内の最大音圧 $p_{\max}$ 、Stator-Iのコーナー部における最大振動速度 $v_0$ 、およびギャップの音響特性を表す

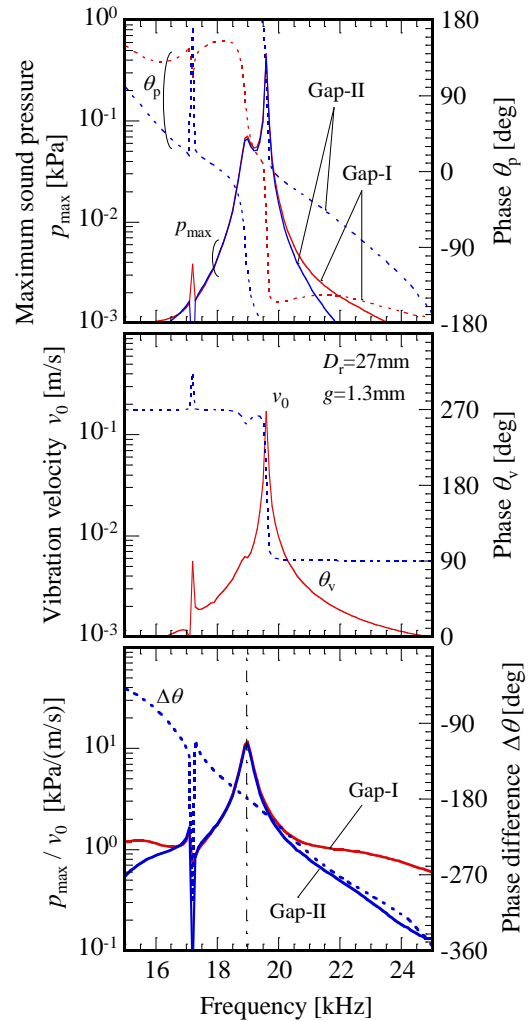


Fig. 5 Calculated frequency characteristics of sound pressure in two air gaps when only stator-I is driving.

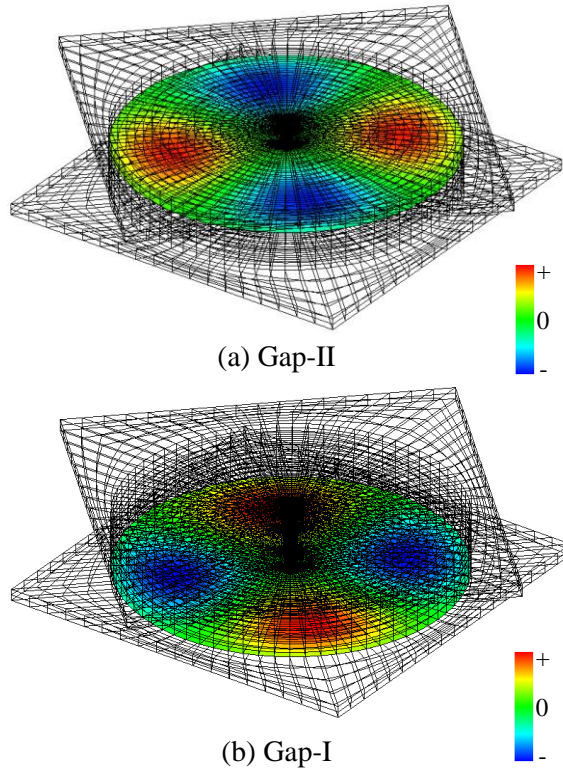


Fig. 6 Calculated sound pressure pattern in air gaps when only stator-I is driving with 19.0 kHz. ( $g = 1.3$  mm)

$p_{\max}/v_0$  の周波数特性である。Gap-I と Gap-II の  $p_{\max}/v_0$  は、いずれも約 19.0 kHz で極大を示し、ほぼ同じ周波数で共振特性を示すことがわかる。 $\Delta\theta$  は Gap-I の最大音圧の位相に対する Gap-II の最大音圧の位相差であるが、19.0 kHz のとき約  $180^\circ$  を示している。Fig. 6 に 19.0 kHz における Gap-I と Gap-II の音圧分布を示す。Stator-I に面している Gap-I と、直接面していない Gap-II にはほぼ同強度の定在波音場が発生しており、また、Gap-II の音圧の位相は Gap-I に対してほぼ逆位相になっている。Fig. 7 に、ギャップ長  $g$  が 0.3 mm の場合の Gap-I および Gap-II の音圧分布を示す。Gap-I の  $p_{\max}/v_0$  の周波数特性が極大になる 20.0 kHz における音圧を示した。Fig. 6 と比較すると Gap-II の音場が弱いことがわかる。Fig. 8 に、Gap-I の  $p_{\max}/v_0$  が極大になる周波数における、Gap-I および Gap-II の  $p_{\max}/v_0$  のギャップ長依存性を示す。振動している Stator-I と面した Gap-I の音圧は、ギャップ長が狭い程大きい、Gap-II の音圧は 1 mm 以下のギャップ長では低下する。ギャップ長が狭い 2 つのエアギャップ間の音響結合は弱く、振動しているステータと面していないギャップ内には音場が発生しにくいことがわかった。

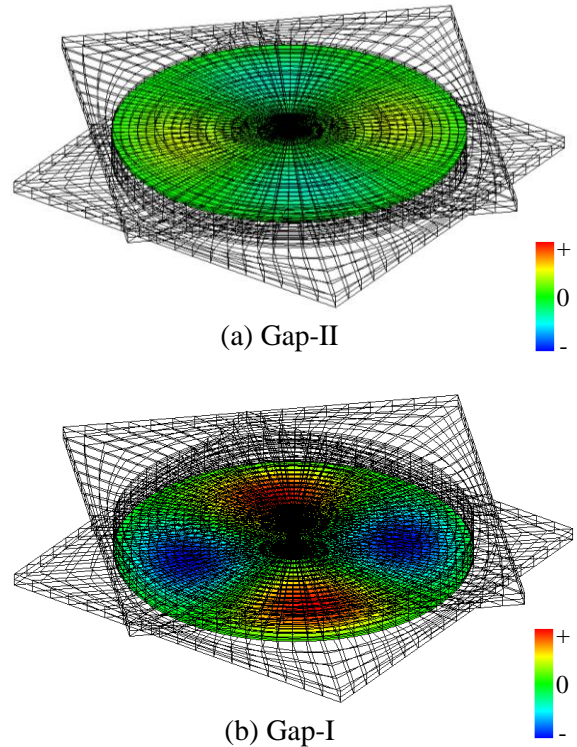


Fig. 7 Calculated sound pressure pattern in air gaps when only stator-I is driving with 20.0 kHz. ( $g = 0.3$  mm)

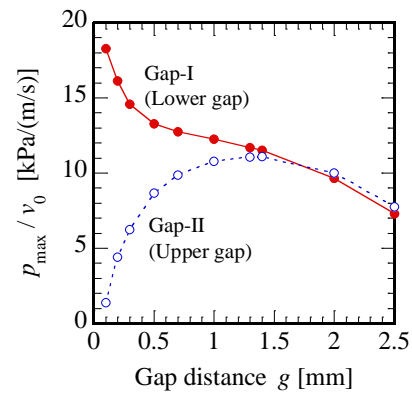


Fig. 8 Calculated maximum sound pressure in air gaps as a function of gap distance when only stator-I is driving.

#### 4.2 2つのステータを駆動した場合

円周方向に  $45^\circ$  ずらして配置した 2 つのステータを  $90^\circ$  の位相差の電圧で同時に駆動した場合の解析を行った。Fig. 9 に、ギャップ長を 1.3 mm として解析した音圧の強度分布を示す。また、Fig. 10 に最大音圧を示す 8.75 mm の半径位置での Gap-I と Gap-II の音圧とその位相の円周方向の分布を示す。音圧は Gap-I の最大音圧で規格化して示した。Gap-I と Gap-II の音場は、いずれも円周方向に対して音圧がほぼ一

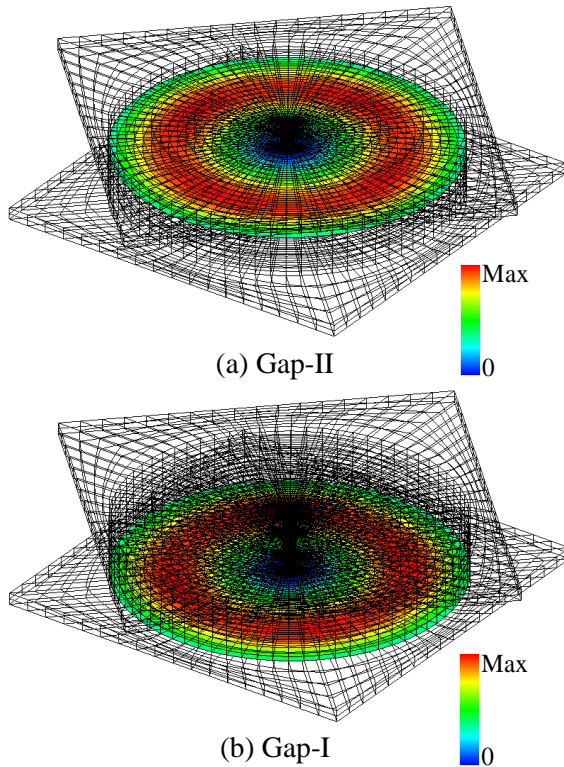


Fig. 9 Calculated sound pressure intensity in air gaps when two stators are driving with 19.0 kHz. ( $g = 1.3$  mm)

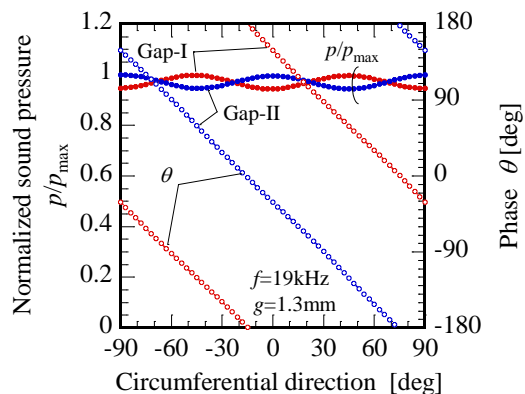


Fig. 10 Calculated circumferential distribution of sound pressure in air gaps when two stators are driving.

定強度で、位相が直線的に変化していることから、円周方向の進行波になっていることがわかる。Fig. 11 はギャップ長が 0.3 mm の場合の音圧の強度分布である。Gap-I と Gap-II の音場はいずれも、定在波に近い分布であることがわかる。Fig. 12 は円周方向の音場分布の定在波比の逆数のギャップ長依存性である。ギャップ長が 1 mm より小さい場合は、より定在波音場に近いが、1 mm 以上ではほぼ進行波音場が形成されることがわかった。

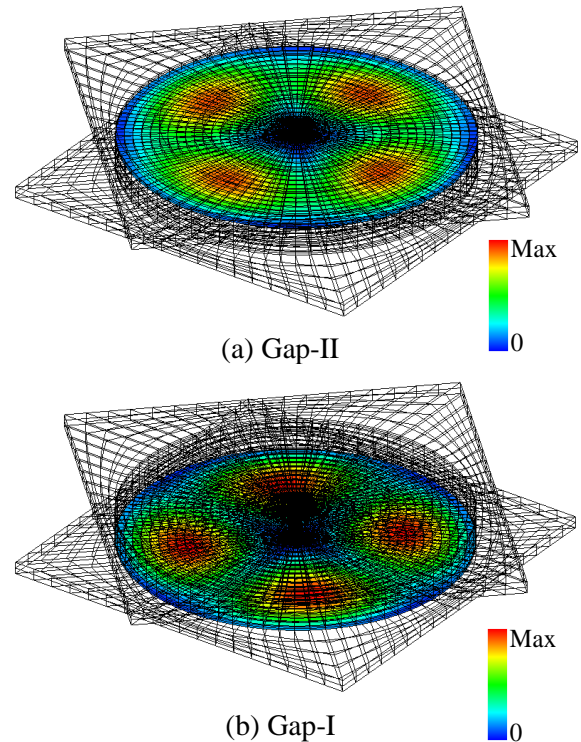


Fig. 11 Calculated sound pressure intensity in air gaps when two stators are driving with 20.0 kHz. ( $g = 0.3$  mm)

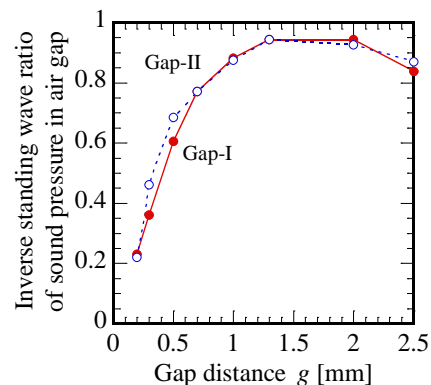


Fig. 12 Calculated inverse standing wave ratio of sound pressure in air gaps as a function of gap distance when two stators are driving.

## 5 おわりに

2つの正方形板屈曲振動子を用いた非接触型超音波モータでは、約 1 mm 以上のギャップ長でロータ上下の2つのギャップの音響結合が強くなり、進行波音場が形成される。

## 参考文献

- [1] Y. Yamayoshi et al., Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 09KD10-1-5, 2009.
- [2] 山吉, 広瀬, 音講論(秋), 2-P-18, 1335-1336, 2011.
- [3] 八嶋, 山吉, 広瀬, 音講論(秋), 2-P-a15, 1403-1406, 2012.
- [4] Y. Yamayoshi et al., Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 07GM08-1-8, 2009.
- [5] 山吉, 広瀬, 音講論(春), 1-P-15(a), 1467-1468, 2011.