

円環状振動体により励振される回転音場のシミュレーション

里信 純*・高橋 周平*

(令和元年10月31日受付)

Simulation of rotating sound field excited by flexural vibration rings

Jun SATONOBU and Syuhei TAKAHASHI

(Received Oct. 31, 2019)

Abstract

Rotating sound field excited by flexural vibration rings is used for some high power ultrasonic applications. To produce the traveling wave in the ring as the sound source, two standing waves excited both spatially and temporally orthogonal to each other should be superimposed in the ring using two or more transducers. However, excitation of the ideal distribution of the standing wave with multiple transducers, identical to the natural vibration mode of the ring, is difficult. This paper presents a numerical simulation of rotating sound field excited by flexural vibration rings, in particular, methods using two vibration rings, each with the standing wave, is discussed.

Key Words: sound field, traveling wave, flexural vibration, ultrasonic vibration

1. 緒 言

媒質中に励振された回転音場を利用する強力超音波応用が報告されており⁽¹⁾、その音源として周方向に回転するたわみ振動の進行波が励振された円環状振動体が用いられている。円環に進行波を励振するためには、空間的、時間的位相が互いに $\pi/2$ 異なる2つの定在波を円環上に重ね合わせる必要があり、通常2つ以上の駆動源(振動子)を円環に取り付けたシステム構成となる。そのためある振動子によって円環に励振される定在波の振動分布は、もう一方の振動子の影響を受けるため、円環単体の固有振動モードと同じ理想的な振動分布で円環を振動させることが難しい⁽²⁾。特に強力な超音波振動を発生させるためにボルト締めランジュバン型振動子などを駆動源として用いるシステムでは、振動子自身の大きさが円環の大きさに比べて小さいため影響も大きく、システム設計上の問題となっている。

本論文ではこの問題を解決する一方法として、たわみ振動の定在波が励振された円環状振動体を複数組み合わせ、空間に回転音場を形成する方法を数値シミュレーションにより検討する。

2. 振動系の構成例

図1に2つのランジュバン型縦振動子を駆動源とし、円環にたわみ振動を励振する構成例を示す。この様に円環を底面から駆動することで、図1に示すような軸方向たわみ振動モード(軸方向変位と回転を伴う振動モード)の定在波もしくは進行波を励振し、円環上面から音波を放射させる。振動系の設計は円環の振動モードと駆動源となる振動子の共振周波数が一致するように行う。

1つの振動子を配置し円環に定在波を励振する場合は、円環の振動分布は図1に示すような固有振動モードに近いものとなるが、2つ目の振動子を取り付け、進行波を励振

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

したときの円環の振動分布は大きく変化してしまう。理想的な分布の定在波が励振された音源を複数用いることでも、進行波が励振された音源を用いる場合と同様な回転音場が励振できれば問題を解決できる可能性がある。

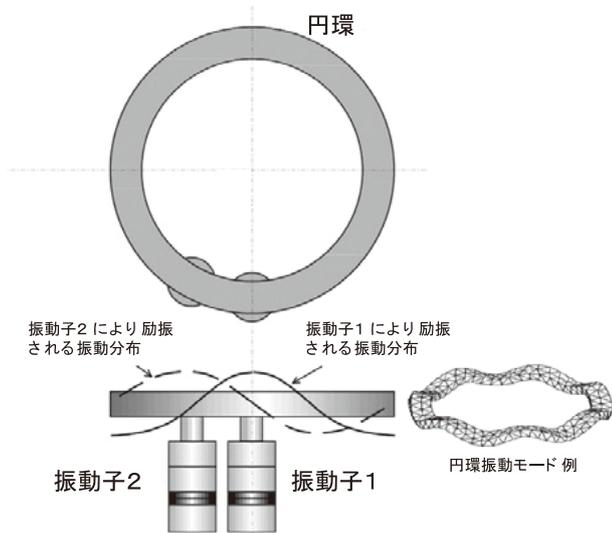


図1 ランジュバン型縦振動子で駆動する構成例

3. 計算モデル

検討する円環配置の概念図を図2に示す。それぞれ (a) 1つの円環に定在波または進行波を励振した場合、(b) 2つの円環を中心軸を共通として同一軸上に配置し、空間的、時間的位相が互いに $\pi/2$ 異なる定在波を励振した場合、(c) 2つの径が異なる円環を同一平面内に配置し、空間的、時間的位相が互いに $\pi/2$ 異なる定在波を励振した場合、の3つの配置について空間に励振される音場をシミュレーションする。(b)(c)の検討が本論文の目的であるが、(a)の場合も比較のために行う。

図3に計算モデルの座標系を示す。 i 番目の振動子によって励振される円環の軸方向たわみ振動の定在波の変位分布を、

$$u_i(r, \phi, t) = U_i(r) \cos M_i(\phi + \phi'_i) \sin \omega(t + t'_i) \quad (1)$$

とする。ここで半径位置 r での振動変位振幅 $U_i(r)$ 、モードの次数 M_i 、円振動数 ω 、空間的ずれ ϕ'_i 、時間的ずれ t'_i とする。次数および径方向振幅分布が等しい2つの定在波を重ね合わせるとし、2つ目の定在波に時間的、空間的 $\pm \pi/2$ の位相差 ($M_2\phi'_2 = \pm \pi/2$, $\omega t'_2 = \pm \pi/2$ など) を仮定すると、

$$u_1 + u_2 = U(r) \sin(\omega t \pm M\phi) \quad (2)$$

の形となり、位相が円周方向位置 ϕ とともに直線的に変化する進行波を表す式となる⁽³⁾。

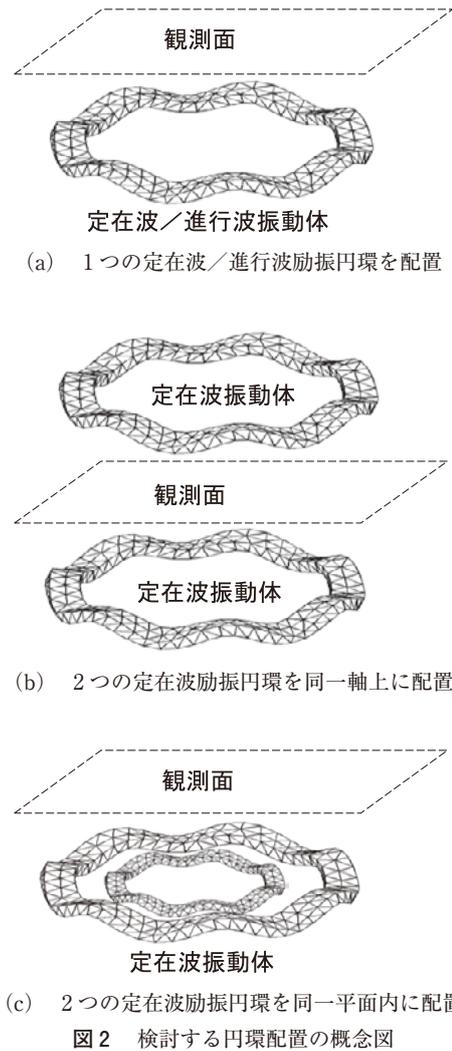


図2 検討する円環配置の概念図

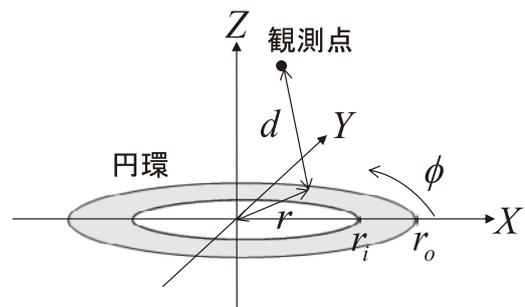


図3 計算モデルの座標系

円環が無限大剛平面内にあるとし、半無限空間への放射を仮定すると、その振動面上の微小面積 dS による空間観測点における音圧 dp は、

$$dp = \frac{j\rho ckV}{2\pi d} e^{j(\omega t - kd + \phi)} dS \quad (3)$$

で表される⁽⁴⁾。ここで V , ϕ はそれぞれ円環の振動速度振幅、位相、 k , c , ρ はそれぞれ空間媒質での波数、音速、密度である。式(3)を円環の放射面全体で積分することで観測点における音圧が計算できる。

複数の円環を用いる場合は、それぞれの円環を配置した位置を基準とした座標系に対して観測点の位置を座標変換し、式(3)で計算される音圧を重ね合わせる。この計算モデルでは、円環振動分布が軸対称でない場合も有限要素法などに比べ容易に計算が行えるが、図2(b)のような場合には円環からの反射が考慮されない。

4. 1つの円環により励振される音場

音場のシミュレーションはMatlabを用いて行った。表1に計算に用いたパラメータを示す。円環を図2(a)に示すように一か所に配置し、進行波を励振した場合の計算結果を図4に示す。ここでは回転音場を評価するため、軸方向Zの位置を変えたX-Y平面内の振動分布を計算し、振幅と位相をコンター図で示した。今回は円環外周部、内周部の振幅を仮定し、振動の径方向分布 $U_r(r)$ は直線的とした。図5に比較のため同じく円環を一か所に配置し、定在波を励振した場合の計算結果を示す。

円環振動が定在波の場合は円環中心から外部に向かって円環振動の腹位置付近から音波が放射する様子が確認できる。この指向性は円環からの軸方向位置Zが変化しても類似の傾向がある。音波が径方向に伝搬していくため、位相の径方向分布は直線的に変化するが、周方向分布は π の位相差でステップ状に変化し、回転の無い完全に定在的な音場となっている。円環振動が進行波の場合は、音場の周方向分布は振幅が一定で位相が直線的に変化している。音波が径方向にも伝搬し位相の径方向分布も直線的になるため、全体的には位相変化が渦巻き状に見える回転音場の特徴を示している。

表1 計算に用いたパラメータ

音響パラメータ	
空気の密度	1.3 kg/m ³
空気の音速	344 m/s
駆動周波数	27000 Hz
円環パラメータ	
外径	0.05 m
内径	0.04 m
モード次数	5
振動振幅 (外周部)	1.0 × 10 ⁻⁶ m
振動振幅 (内周部)	0.8 × 10 ⁻⁶ m

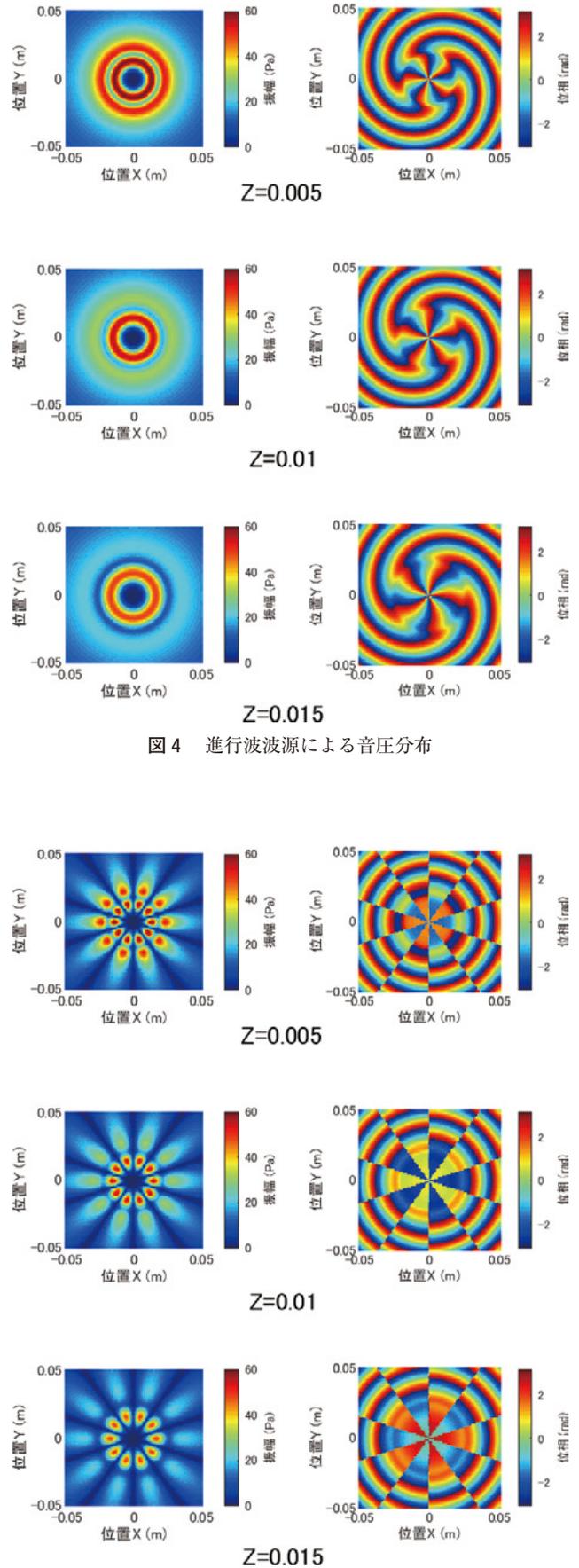


図4 進行波波源による音圧分布

図5 定在波波源による音圧分布

5. 2つの円環により励振される音場

図6に2つの円環を0.02 mの間隔で同一軸上に配置し、それぞれに定在波を励振した時の計算結果を示す。0.02 mの位置に配置された円環の定在波は、時間的、空間的位相差 $\pi/2$ で励振されている。計算位置が2つの円環から等しい距離である場合は2つの音場が同じ大きさで重なるため、1つの進行波波源の時と同じように回転音場が形成される。これに対して計算位置がどちらか一方の円環に偏った場合、完全な回転音場にはならないが、斜めに放射される指向性が確認でき、位相も図4と図5に示す結果の中間的なものとなっている。

図7は2つの円環を同一平面内に配置し、時間的、空間的位相差 $\pi/2$ でそれぞれに定在波を励振した時の計算結果である。内部に配置された円環は外径0.04 m、内径0.03 m、モード次数5次としている。この場合も斜めに放射される指向性と、図4と図5に示す結果の中間的な位相変化が確認できる。

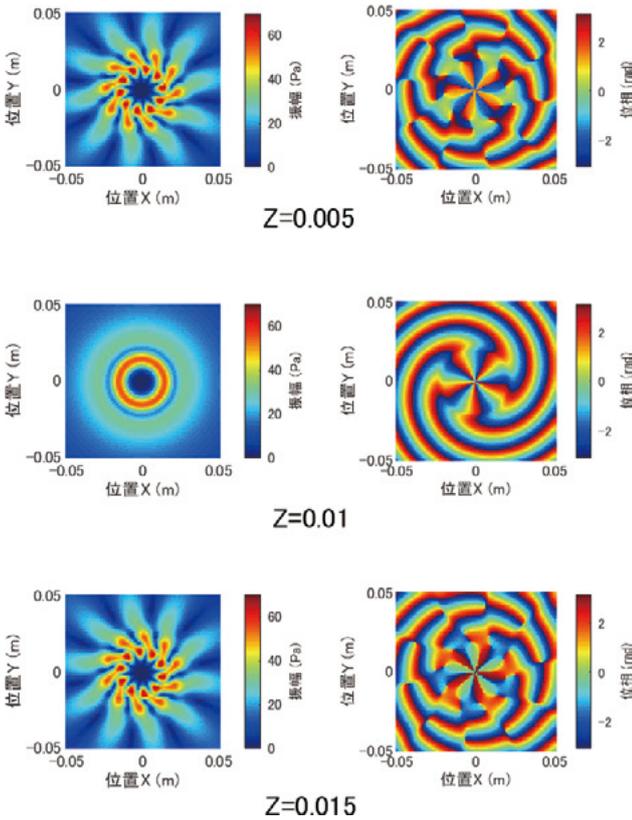


図6 2つの定在波波源による音圧分布 (同一軸)

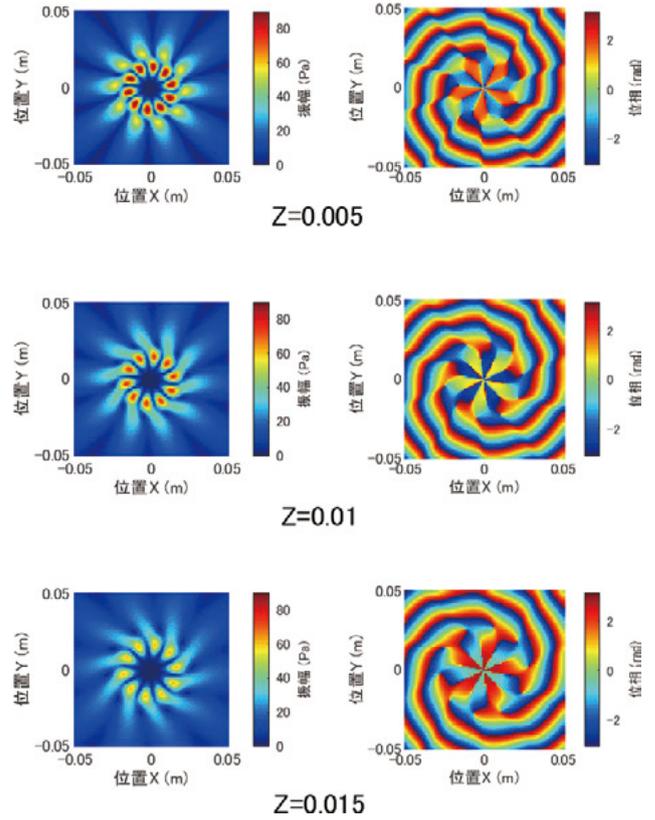


図7 2つの定在波による音圧分布 (同一平面)

回転音場のレベルを評価するために、異なる半径位置での音圧振幅の周方向分布を用いて定在波比を計算した結果を図8、図9にそれぞれ示す。定在波比が1であれば完全な回転音場となっていることを示し、値が大きくなるほど定在音場が強くなっていることを示す。また理論的には完全な定在音場であれば定在波比は無限大に大きくなる。

図8の結果は2つの円環から等距離 $Z=0.01$ の時の結果は半径位置によらず完全な回転音場となっていることを示している。また $Z=0.005$ と $Z=0.015$ の結果は全く同一であるのでグラフは重なっている。図9の結果からは全体的には回転音場が含まれており、概ね2つの円環の境目付近で回転音場が強くなっていることが確認できる。

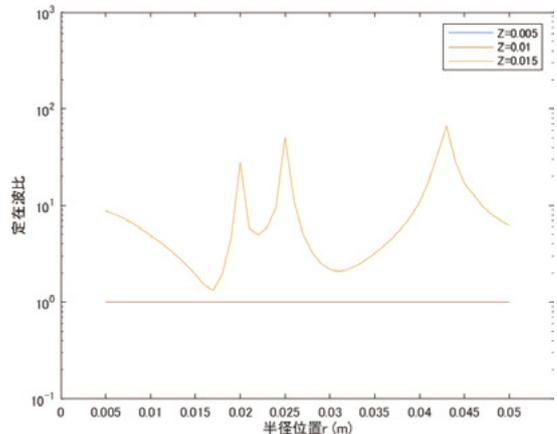


図8 定在波比 (同一軸)

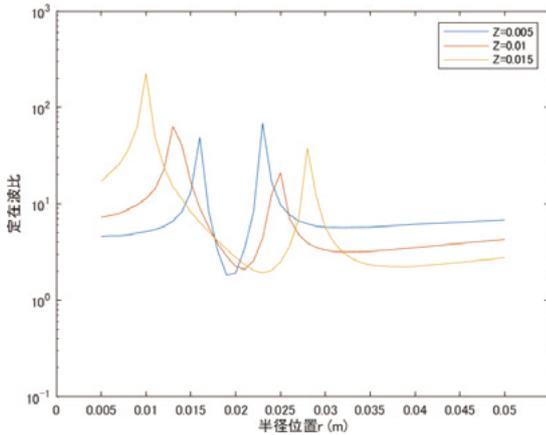
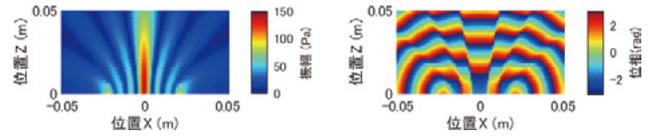
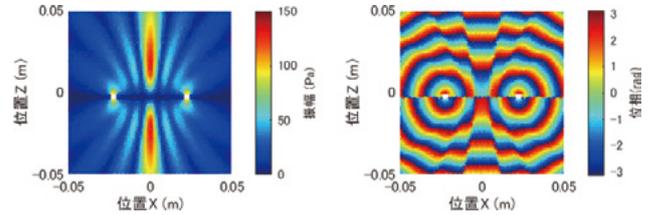


図9 定在波比 (同一平面)



(a) 無限大剛平面を仮定した場合 (図3のモデル)



(b) 円環裏面からの放射を考慮した場合 (有限要素法)

図10 ピストン振動波源による音圧分布

6. 円環裏面からの放射の影響

本研究で用いた計算モデルでは無限大剛平面内での円環振動を仮定している。そのため円環裏面から放射される逆相の音波が正負2重音源の様に働き、全体的に音を放射し難くなることは考慮されていない。ここでは今後試作実験を行う際の設計指針とするために、単純に1つの円環がピストン振動する場合を例にこの影響を考察する。

図10(a)に無限大剛平面内での振動を仮定した場合、(b)に円環裏面からの放射(円環厚さ5mmを仮定)を考慮した場合の結果をそれぞれ示す。(a)の場合は図3に示すモデルで円環振動のモード次数を0とすることでピストン振動として計算できるが、円環裏面側から生じる音波は考慮されない。(b)の計算は有限要素法による解析ソフト(Comsol Multiphysics)を用いて行い、この場合は表裏面それぞれの逆面への影響も考慮される。今回の解析では超音波領域での駆動を想定しており音波は直進性が強いいため両者の差は大きくなく、ほぼ類似の指向性が確認できる。

7. 結 言

無限大剛平面内での円環振動を仮定したモデルにおいて、2つの定在波振動する円環を用いることで空間に回転音場が形成できることをシミュレーションにより確認した。今後、試作実験によるこの現象の確認および空中や水中で物体や流体に回転力を与える応用の検討を行っていく。

文 献

- (1) 里信純ほか、円環の進行波を用いた超音波洗浄器の試作、日本音響学会秋季研究発表会、1-P-17、pp. 893-894 (1988)。
- (2) 里信純ほか、ボルト締めランジュバン型振動子を駆動源とする高トルク進行波型超音波モータ、日本機械学会論文集(C編)、67、657、1235-1240 (2001)。
- (3) S. Ueha and Y. Tomikawa, Ultrasonic Motors: Theory and Applications, Oxford Science Publications (1993)。
- (4) 大野進一ほか、機械音響工学、森北出版 (2010)。