

## 進行波型超音波モータの駆動メカニズム —ライナーの慣性力の影響—

中山智了\*・大西隆文\*\*・山下清隆\*・高塚公郎\*

### Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor — Effect of the Liner Inertial Force —

Tomoaki Nakayama, Takafumi Ohnishi,  
Kiyotaka Yamashita and Kohro Takatsuka

Theoretical investigations are conducted on the complex dynamic contact behavior between a stator and a liner which sticks to the surface of a rotor of an ultrasonic motor. In the previous study, we proposed a numerical technique using the Finite Element Method on the basis of incremental theory to examine the nonlinear contact behavior for a non-rotating rotor. In this paper, we proposed the expanded numerical technique for a rotating rotor to analyze the complex dynamic contact behavior. Moreover, we estimate the order of the liner inertial force of the ultrasonic motor.

Keywords: Contact Problem, Vibration of Continuous System, Ultrasonic Motor, Finite Element Method

#### 1. はじめに

超音波モータは、摩擦を利用した駆動機構を持つアクチュエータであり<sup>(1)</sup>、高制御性、低速高トルク、高保持トルク、静粛性などの優れた特徴を有するアクチュエータとして注目を集めている。しかし、摩擦駆動ゆえの低耐久性、低エネルギー変換効率などの短所も有しており、これらの改善に必要なステータ（振動子）とロータ（回転子）下面に貼り付けられたライナーの接触挙動の解明が必要となっている。この接触メカニズムの解明のため、これまでも多くの研究<sup>(2)~(7)</sup>がなされてきたが、このステータとライナーの接触挙動は、未だ十分に解明されていない。

筆者らは、接触状態が固着、滑り、非接触の間で刻々と変化する、このステータ、ライナー間の非線形接触メカニズムを弾塑性解析の一般的な手法であるひずみ増分理論<sup>(8)</sup>を適用した有限要素法による解析手法を開発した。さらに、この手法を用い超音波モータの動的接触挙動の解析を行い、接触率や最大摩擦係数が駆動特性に及ぼす影響も明らかにした<sup>(9)</sup>。

---

\* 機械工学科

\*\* 機械工学専攻院生

しかしながら，この解析には弾性体であるライナーの慣性力は考慮されていない．そこで本研究では，超音波振動により変形するライナーの慣性力が超音波モータの駆動特性に及ぼす影響を考慮する前段階として，増分理論を適用する有限要素法に慣性力を考慮する方法および面圧に対する慣性力の大きさについて検討した．

## 2. 進行波型超音波モータの駆動メカニズム

超音波モータの振動子であるステータ裏面には，図 1 に示すように，永久分極され位相が  $1/4$  波長ずれた 2 相の圧電セラミックスが貼り付けられており，これら 2 相の圧電セラミックスに位相が  $1/4$  波長分ずれた超音波領域の高周波交流電圧を負荷すると，ステータの中立面には図 2 に示す進行波  $Y_s$  が発生する．この進行波  $Y_s$  は，ステータ中立面の円周方向座標を  $x$  とすると 式 (1) のように表わすことができる．

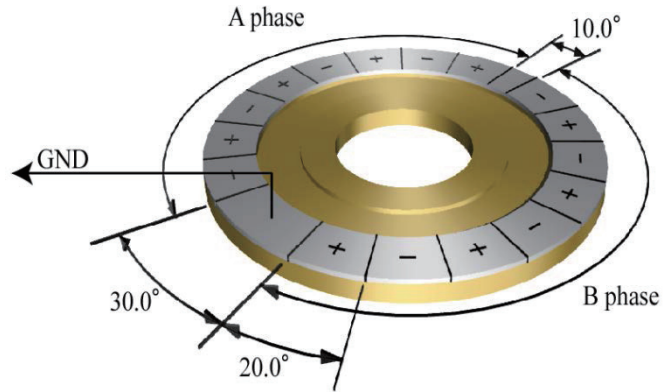


Fig.1 The bottom of a stator

$$Y_s = a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

ここで， $a$ ， $k$ ， $\omega$  および  $t$  は，それぞれステータの中立面に発生する進行波の振幅，波長定数  $2\pi/\lambda$  ( $\lambda$ ：波長)，角振動数および時間である．また図 2 に示す  $\theta$  は，ステータ中立面の接線が  $x$  軸となす角度であり， $\theta \ll 1$  であるため，ステータ中立面上の任意の点  $(x, Y_s)$  における中立面に垂直な上表面上の点  $(\alpha, \beta)$  は式 (2) および式 (3) で表わすことができる．

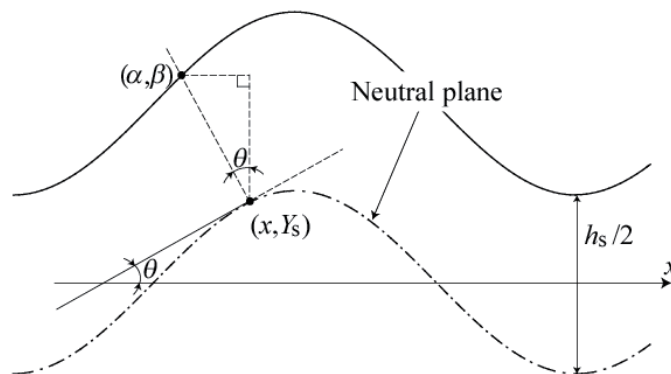


Fig.2 Configuration of stator upper surface

$$\alpha(x, t) = x + \frac{h_s}{2} ka \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

$$\beta(x, t) = \frac{h_s}{2} + a \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

ここで、 $h_s$ はステータの厚さである．

式(2)および式(3)より，中立面に式(1)で表わされる進行波が発生するステータの上面には，楕円運動が生じることが導かれる．また，式(2)および式(3)を $t$ で微分することにより，ステータ上面の $x$ 方向速度 $v_x$ および $y$ 方向速度 $v_y$ は次式のように求めることができる．

$$v_x = \dot{\alpha} = -\frac{h_s}{2} ak\omega \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$v_y = \dot{\beta} = \frac{h_s}{2} a\omega \sin(kx - \omega t) \quad (5)$$

ロータの駆動力となる $v_x$ は進行波の進む向きを正にとっているため，式(4)の符号が負となる．したがって図3に示すように，ステータ上面の $x$ 方向速度 $v_x$ は，進行波の波頭側では常に進行波の向きに対し反対方向になり，波底側では進行波の向きと同方向になる．このような楕円運動が発生しているステータ上面に，ロータ下面に貼り付けられたライナーを接触させることで，ロータは進行波とは逆の向きに回転する．

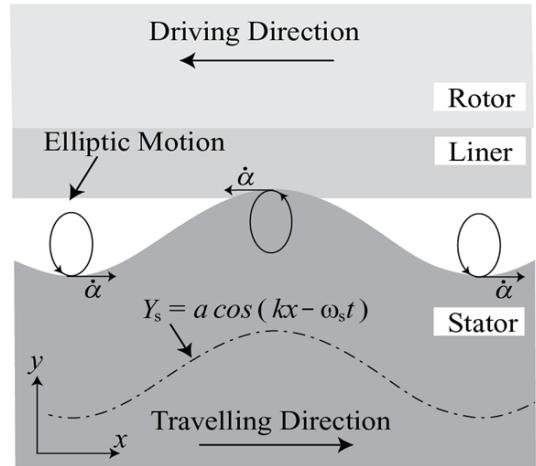


Fig.3 Elliptic motion of stator upper surface

### 3. ライナーの慣性力の影響

本研究は，筆者らが開発した，有限要素法による超音波モータの動的接触挙動に対する解析プログラム<sup>(9)</sup>に，ライナーの慣性力を考慮した場合の影響を明らかにすることを目的としており，このライナーの $x$ 方向慣性力 $F_x$ および $y$ 方向慣性力 $F_y$ は次式のように表わされる．

$$F_x = a_x m \quad (6)$$

$$F_y = a_y m \quad (7)$$

ここで， $a_x$ ， $a_y$ ，および $m$ は，それぞれ $x$ 方向加速度， $y$ 方向加速度および質量である．また， $x$ 方向および $y$ 方向の加速度は式(4)および式(5)を $t$ で微分することにより，次式のように求められる．

$$a_x = \ddot{\alpha} = -\frac{h_s}{2} ak\omega^2 \sin(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$a_y = \ddot{\beta} = -a\omega^2 \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

前述したように本研究では、有限要素法による動的接触挙動の解析プログラムの拡張を目的としている。したがって、この解析プログラム同様、ライナーの円周方向と厚さ方向の2次元問題とみなし、各要素の質量 $m$ の各節点への振り分け方法について、図4に示す、節点C3を例にとり説明する。

1つの三角形要素には3つの節点が存在し、その各節点には各要素を3等分した質量が振り分けられるとする。したがって節点C3に接する要素は6個となるため、節点C3に振り分けられる質量は、1つの三角形要素の質量 $\times 1/3 \times 6$ となる。このことから各節点に振り分けられる質量は三角形要素2個分の質量、つまり四角形領域の質量である。また、C1およびC5などの端部の節点については、接する要素数は3個となるため、振り分けられる質量は三角形要素1個分とする。

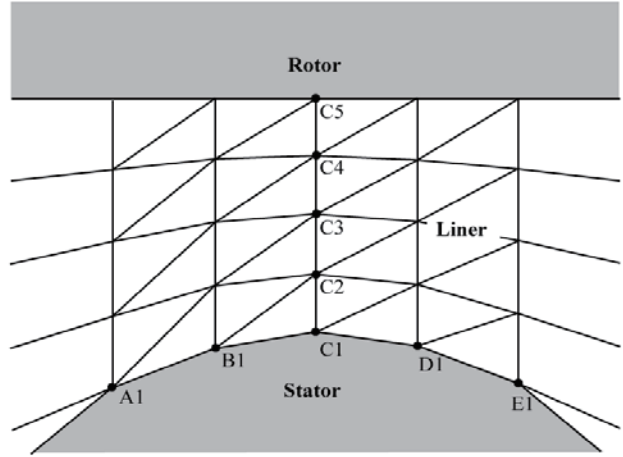


Fig.4 Relations of a panel point and the element

ここで本研究の目的としている解析プログラムでは、ステータに関する値として、振幅 $a = 2\mu\text{m}$ 、厚さ $h_s = 4.2\text{mm}$ 、半径 $r = 30\text{mm}$ 、振動次数 $n = 9$ 、振動数 $f = 40\text{kHz}$ としている。したがって、角振動数 $\omega$ は $\omega = 2\pi f = 8\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$ であり、波長定数 $k$ は $k = 2\pi/\lambda = 2\pi n/2\pi r = n/r = 9/30[\text{mm}] = 0.3\text{mm}^{-1}$ となる。

また、このプログラムのライナーの解析対象領域は、 $x$ 方向長さ $L_x$ を1波長( $L_x = \lambda = 2\pi r/n = 2\pi \times 30[\text{mm}] = 20.94[\text{mm}]$ )、 $y$ 方向長さ $L_y$ をライナー厚さ( $L_y = t_l = 0.2[\text{mm}]$ )としている。この対象領域を図5に示すように、 $x$ 方向および $y$ 方向、それぞれ210等分割および4等分割し、全節点数が1055個である840個の四角形領域に分割しており、1つの四角形領域 $x$ 方向長さ $\Delta x$ を $\Delta x = 20.94[\text{mm}]/210 = 99.71[\mu\text{m}] \approx 100[\mu\text{m}]$ 、 $y$ 方向長さ $\Delta y$ を $\Delta y = 0.2[\text{mm}]/4 = 50[\mu\text{m}]$ としている。

これらの値を式(8)および式(9)に代入すると、各節点の最大加速度 $(a_x)_{\max}$ および $(a_y)_{\max}$ は、それぞれ $(a_x)_{\max} = 7.959 \times 10^4 [\text{m/s}^2]$ および $(a_y)_{\max} = 1.263 \times 10^5 [\text{m/s}^2]$ と求められる。

また四角形領域の質量 $m$ については、次式のように表わすことができる。

$$m = \rho \Delta x \Delta y t \quad (10)$$

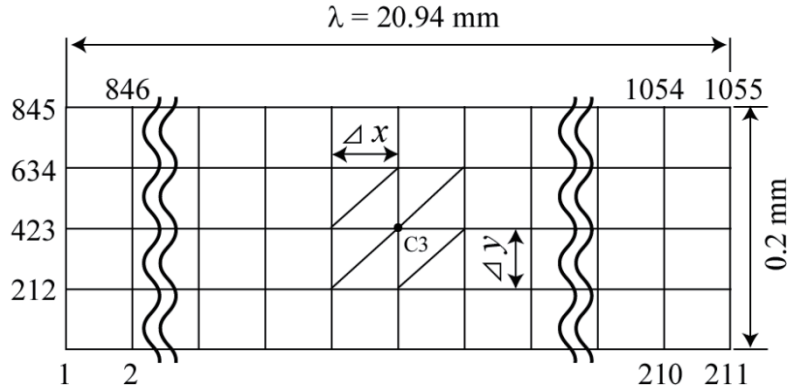


Fig.5 Dimensions and element division of a liner

ここで、半径方向に単位厚さ  $t = 1\text{mm}$ 、密度  $\rho = 1\text{ g/cm}^3$  とすれば、前述の  $\Delta x$  および  $\Delta y$  の値を式 (10) に代入することで四角形領域の質量  $m$  は、 $m = 5 \times 10^{-9} [\text{kg}]$  と求めることができる。

また、 $x$  方向最大加速度  $(a_x)_{\max}$ 、 $y$  方向最大加速度  $(a_y)_{\max}$  および四角形領域の質量  $m$  を式 (6) および式 (7) に代入することで、 $x$  方向最大慣性力  $(F_x)_{\max}$  および  $y$  方向最大慣性力  $(F_y)_{\max}$  は、 $(F_x)_{\max} = 3.98 \times 10^{-4} [\text{N}]$  および  $(F_y)_{\max} = 6.32 \times 10^{-4} [\text{N}]$  となる。この  $x$  方向最大慣性力  $(F_x)_{\max}$  および  $y$  方向最大慣性力  $(F_y)_{\max}$  が駆動特性に及ぼす影響を従来の研究<sup>(10)</sup>で明らかにされている、慣性力を無視して解析された摩擦応力  $\tau_{\max}$  と比較すると、 $x$  方向最大慣性力  $(F_x)_{\max}$  および  $y$  方向最大慣性力  $(F_y)_{\max}$  による面圧上昇  $(\Delta P_x)_{\max}$ 、 $(\Delta P_y)_{\max}$  は、以下の式で表わされる。

$$(\Delta P_x)_{\max} = \frac{(F_x)_{\max}}{S_y} \quad (11)$$

$$(\Delta P_y)_{\max} = \frac{(F_y)_{\max}}{S_x} \quad (12)$$

ここで  $S_x$  および  $S_y$  は、各節点の受け持つ  $x$  方向および  $y$  方向の面積であり、 $S_x = \Delta x t = 10^{-7} [\text{m}^2]$ 、 $S_y = \Delta y t = 5 \times 10^{-8} [\text{m}^2]$  と求められる。これらの値を式 (11) および式 (12) に代入すると、面圧上昇  $(\Delta P_x)_{\max}$  および  $(\Delta P_y)_{\max}$  は、 $(\Delta P_x)_{\max} = 7.96 [\text{kPa}]$  および  $(\Delta P_y)_{\max} = 6.32 [\text{kPa}]$  と求められる。

これらの値について、前述した中嶋らの結果と比較する。慣性力を無視した  $\tau_{\max}$  は、中嶋らの結果より  $\tau_{\max} \approx 55 [\text{kPa}]$  であり、また  $(\sigma_y)_{\max} \geq \tau_{\max} / \mu$  より  $(\sigma_y)_{\max}$  は、 $(\sigma_y)_{\max} \geq 55 [\text{kPa}] / 0.3 \approx 183 [\text{kPa}]$  である。これに対し、 $\tau_{\max}$  に相当する  $(\Delta P_x)_{\max}$  は  $(\Delta P_x)_{\max} = 7.96 [\text{kPa}]$  であり、 $(\sigma_y)_{\max}$  に相当する  $(\Delta P_y)_{\max}$  は  $(\Delta P_y)_{\max} = 6.32 [\text{kPa}]$  であるため、ライナーの慣性力をこれまでの解析プログラムに反映させることで得られる、解析結果の精度向上率は  $(\Delta P_x)_{\max} / \tau_{\max} \approx 14.5\%$ 、 $(\Delta P_y)_{\max} / (\sigma_y)_{\max} \approx 3.4\%$  と求められる。

これらの値より、面圧に比べ慣性力は無視すべき大きさではなく、慣性力を考慮した解析が必要であることがわかる。

#### 4. おわりに

本研究では、筆者らが開発した有限要素法による動的接触挙動の解析プログラムにより、ライナーの慣性力が解析結果に及ぼす影響について検討した。その結果、ライナーの慣性力を考慮すると、摩擦応力  $\tau_{\max}$  に影響を与え、超音波モータの最も重要な因子である駆動トルクが約15%程度変化することが分かった。

#### 参考文献

- (1) 見城尚志, 指田年生, 超音波モータ入門, (1991), pp.7-15, 総合電子出版.
- (2) 黒澤実, 上羽貞行, “進行波型超音波モータの効率”, 日本音響学会誌, Vol.44, No.1(1988), pp.40-46.
- (3) 前野隆司, “固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析”, 日本音響学会誌, Vol.54, No.4(1998), pp.305-311.
- (4) Hagedorn, P. and Wallaschek, J., “Travelling Wave Ultrasonic Motors, Part1: Working Principle and Mathematical Modeling of the Stator”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.155, No.1(1992), pp.31-46.
- (5) Zharri, O.Y. and Ulitko, A.F., “Smooth Contact Between the Running Rayleigh Wave and a Rigid Strip” *Journal of Applied Mechanics*, Vol.62, No.2(1995), pp.362-367.
- (6) Zharri, O.Y., “Adhesive Contact Between the Surface Wave and a Rigid Strip”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.62, No.2(1995), pp.368-372.
- (7) 中川洋祐, 斉藤彰, 前野隆司, “進行波型超音波モータの非線形動特性解析”, 日本機械学会論文集C編, Vol.73, No.727(2007), pp.708-715.
- (8) 山田嘉昭, マトリックス法材料力学, (1970), p.27, 培風館.
- (9) 中山智了, 大西隆文, 山下清隆, 高塚公郎, “進行波型超音波モータの駆動メカニズム－ロータとステータの動的接触挙動－”, 福井工業大学研究紀要, No.42(2012), pp.188-199.
- (10) 中嶋大智, 前田剛志, 小沢友亨, 津久井道夫, 高塚公郎, 吉沢正紹, “超音波モータの接触挙動に関する基礎的研究”, 日本機械学会論文集C編, Vol.72, No.717(2006), pp.1590-1597.

(平成 25 年 3 月 31 日受理)