

## 進行波型超音波モータの駆動メカニズム (摩擦条件の検討)

中山 智了<sup>\*1</sup>, 山下 清隆<sup>\*1</sup>

### Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor (Examination of the Frictional Condition)

Tomoaki NAKAYAMA <sup>\*1</sup>and Kiyotaka YAMASHITA <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>Department of Mechanical Engineering

We discuss the contact behavior between a stator and a liner that sticks to a rotor of an ultrasonic motor. It is well known that this contact behavior greatly influences the driving mechanism of the ultrasonic motor. We propose a numerical technique which is based on Finite Element Method using an incremental theory. This technique enables us to consider the contact processes. In this paper, we analyze it in consideration of the frictional condition along the tangential incline of the deformed liner surface and obtain some pieces of new knowledge about the nonlinear contact behavior between the stator and liner.

**Key Words** : Ultrasonic Motor, Finite Element Method, Contact Problem, Incremental theory

#### 1. はじめに

進行波型超音波モータは、超音波領域の機械的振動を駆動源としたアクチュエータであり<sup>(1)</sup>、高制御性や低速高トルクなどの特徴を活かし、カメラのオートフォーカス機構やロボットの関節機構等の分野への応用が試みられている。しかし、このモータは超音波振動するステータ表面に回転体であるロータ下面に貼り付けられたライナーを押し付け、その接触面に生じる摩擦を利用したアクチュエータであるため、従来の電磁モータと比較するとエネルギー変換効率や耐久性等に問題を抱えている。これらの解決のためには、ステータとライナー間の接触メカニズムのより深い解明が必要であり、これまでも数多くの研究<sup>(2)(3)</sup>がなされている。これらは、接触領域を全域滑り接触と仮定した弾性接触理論による厳密解と、固着接触および滑り接触が共存する実機の接触状態を有限要素法により解析して求める数値解とに大別される。

前者には、応力関数を級数展開により求めているものや、複素数を用いて関数論により求めているものなどがあり、これらはライナー表面の応力分布の特性などを知る上では有用であるが、半無限弾性体を前提とするなど、実機の接触状態に対する解析手法としては適切とはいえない。後者には、ライナーの縦方向変位のみから求めた駆動伝達モデルや接触領域に仮想線形ばねモデルを用いた有限要素法による解析方法などがある。これらの解析手法はライナーの厚さを考慮できるため実用的な方法ではあるが、ライナーのせん断変形が考慮されていないなど、厳密な接触メカニズムの解明には適していない。

筆者らは、有限要素法による解析手法に、滑り領域に対してクーロン摩擦を前提としライナーのせん断を考慮し、さらに増分理論を用い接触過程を区分的に線形化し計算することで、超音波モータの駆動メカニズムおよびその特性を明らかにした。

本研究に用いた解析モデルを Fig. 1 に示す。また同図にあるステータ上面に接するライナー下面の厚さ方向 ( $y$  方向) 変位  $v$  は次式で表わすことができる。

\* 原稿受付 2014年02月28日

<sup>\*1</sup> 機械工学科

E-mail: t-nakayama@fukui-ut.ac.jp

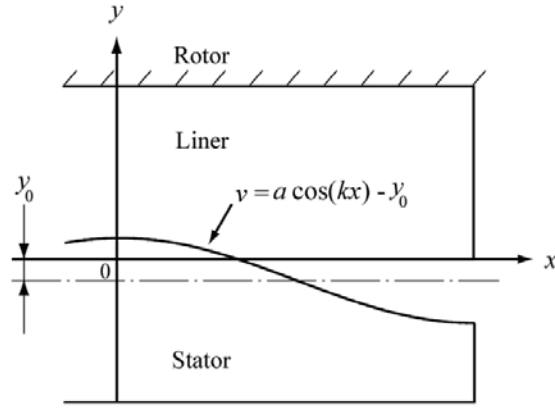


Fig.1 Positions of a liner and a stator

$$v = a \cos(kx) - y_0 \quad (1)$$

ここで  $a$  および  $y_0$  は、それぞれ、ステータの振幅およびライナー下面とステータ上面間の平均距離である。また、 $k$  および  $x$  は、それぞれ、定数 ( $k = 2\pi/\lambda$  , ここで  $\lambda$  はステータ中立面の進行波の1波長  $\lambda = 2\pi r/n$  あり、 $r$  および  $n$  はステータの平均半径および振動次数) および円周方向 ( $x$  方向) の座標である。各数値は実機の超音波モータを参考にして、 $a = 2 \mu\text{m}$  ,  $r = 30 \text{ mm}$  ,  $n = 9$  とした。

ライナーの解析対象領域としては、ロータが非回転であるためステータ上面形状の対称性を利用して、 $x$  方向長さ  $L_x$  を  $1/2$  波長 ( $L_x = \lambda/2 = \pi r/n$ ) ,  $y$  方向長さ  $L_y$  をライナー厚さ ( $L_y = t_1$ ) とした。

なお、ステータ上面は式(1)で示される曲線であり、その最大傾き角  $\theta_{\max}$  は

$$\theta_{\max} = \left| \frac{dv}{dx} \right|_{\max} = \left| -\frac{an}{r} \sin\left(\frac{nx}{r}\right) \right|_{\max} = \frac{an}{r} = 6 \times 10^{-4} \quad (2)$$

であり、非常に小さいため、この傾き角を無視して解析を行っている<sup>(6)</sup>。

しかしながら、実機の超音波モータでは曲線であるステータ上面がライナーに接触していることから、より精度の高い解析を行うには傾いた面に接触する条件を用いるべきである。そこで本研究では、この接触条件に進行波の傾き角を考慮に入れロータが回転していない状態での解析を行い、その結果を、傾き角を無視した結果と比較することで、今後この傾き角を考慮すべきか検討した。

## 2. 解析方法

### 2.1 接触挙動の解析方法

ライナーとステータ間の接触領域では、摩擦係数が零でない一般の場合、滑り接触領域と固着接触領域が共存し、それらは接触領域の拡大とともに変化するため接触挙動は非線形となる。本研究ではステータの位置を徐々にライナーに近づけて解析する方法を用いた。すなわち各位置におけるライナーとの相対距離  $y_0^{(i)}$  の変化量  $\Delta y_0^{(i)}$  に対するライナーの変形を求め、それらの重ね合わせにより接触挙動を解析する増分理論を用いた。ここで各位置  $y_0^{(i)}$  に対する変化量、すなわち増分量  $\Delta y_0^{(i)}$  の決め方を述べる。

Fig. 2 に示すように、ライナーにステータが下から近づき、節点  $i$  より左側まで接触している状態の解析が終了している場合を例にとり説明する。節点  $i$  より右側はステータと接触していないので、ライナーはステータの上部にある。次に接触する節点は  $i+1$  であるから、この状態 ( $y_0 = y_0^{(i)}$ ) からの変化量、すなわち増分量  $\Delta y_0^{(i)}$  を節点  $i+1$  が接触するまでの量となるように、以下の手順により求めた。

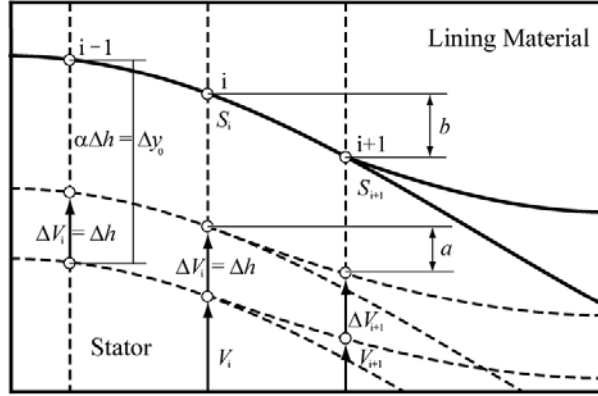


Fig.2 Determination of actual increment

まず、ステータを任意の量  $\Delta h$  だけ増加させた場合を考え、節点  $i$  より左側の接触しているすべての節点の  $y$  方向変位を  $\Delta h$  として、この増加量、すなわち試増分  $\Delta h$  に対する解析を行い、節点  $i+1$  の  $y$  方向変位増分  $\Delta V_{i+1}^{(0)}$  を求める。  $\Delta V_{i+1}^{(0)}$  が求められると、この場合の節点  $i$  の  $y$  方向変位  $\Delta V_{i+1}^{(0)} + \Delta h$  と節点  $i+1$  の  $y$  方向変位  $\Delta V_{i+1}^{(0)} + \Delta V_{i+1}^{(0)}$  の差  $a$  は次のように求めることができる。

$$a = (V_i + \Delta h) - (V_{i+1} + \Delta V_{i+1}^{(0)}) \quad (3)$$

節点  $i+1$  がステータと接触するときの増分量、すなわち実増分量を試増分量の  $\alpha$  倍とすると、このときの節点  $i$  と  $i+1$  の  $y$  方向変位差  $a$  は上式より

$$a = V_i^{(j)} + \alpha \Delta h - (V_{i+1}^{(j)} + \alpha V_{i+1}^{(j)}) \quad (4)$$

となる。一方、節点  $i$  および  $i+1$  に対するステータの  $y$  方向位置を  $S_i$  および  $S_{i+1}$  とすれば、それらの差  $b$  は

$$b = S_i - S_{i+1} \quad (5)$$

となる。節点  $i+1$  がステータと接触するとき、式(4)の  $a$  が上式の  $b$  と等しくなることであることから

$$\alpha = \frac{(S_i - S_{i+1}) - (V_i^{(j)} - V_{i+1}^{(j)})}{\Delta h - \Delta V_{i+1}^{(j)}} \quad (6)$$

となり、上式で求められる  $\alpha$  を試増分  $\Delta h$  に掛けることにより、節点  $i+1$  がステータに接触するときまでの実増分  $\alpha \Delta h$  を求めることができる。

したがって、まず、ステータを任意の試増分  $\Delta h$  だけ変化させた場合を解析し、その結果である節点  $i+1$  の  $y$  方向変位増分  $\Delta V_{i+1}^{(0)}$  を用いて式(6)より  $\alpha$  を求めて、節点  $i+1$  が接触するときの実増分  $\alpha \Delta h$  を求める。次に  $\Delta h$  に対する各節点変位増分を  $\alpha$  倍して、 $j$  に対する各節点変位に加えれば、節点  $i$  より左側のすべての節点が接触している  $j$  における状態から、節点  $i+1$  が接触するときの状態を求めることができる。

本研究ではこの手順を一つの節点のみが、 $y$  方向外力零で接触した状態から全節点が接触するまで繰り返すことにより、ステータとライナーの接触挙動を解析した。

## 2.2 要素分割

本研究では Fig. 1 のライナーの対象領域を Fig. 3 に示すように、 $x$  方向および  $y$  方向をそれぞれ 50 等分および 4 等分、全節点数 255 個に分割した有限要素モデルを用いて解析を行った。また、ライナーのヤング率  $E$  が  $E = 900$  MPa、ポアソン比  $\nu$  が  $\nu = 0.45$ 、 $x$  方向長さ  $L_x$  を  $\pi \times 30 \text{ mm} / 9 = 10.47 \text{ mm}$ 、 $y$  方向長さ  $L_y$  を  $0.2 \text{ mm}$  とした。

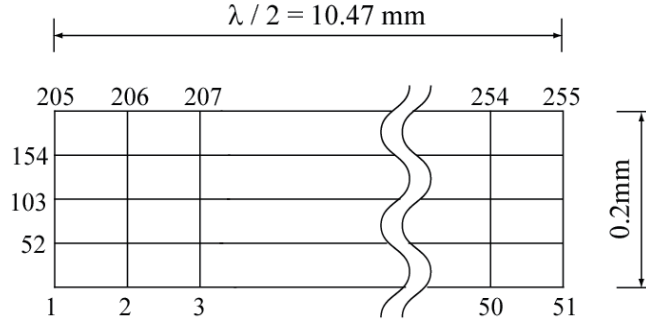


Fig.3 Dimensions and element division of a liner

## 2.3 解析手順

2.1 で説明したように、Fig. 3 に示す節点 1 のみが固着接触する条件で、ステータの相対位置  $y_0 = a$  から任意の増分  $\Delta y_0$  ( $\Delta y_0 < a$ ) を仮定して解析する。その結果より、Fig. 3 の非接触側の隣の節点 2 が接触力零で接触するときの増分  $\Delta y_0$  を求める。この第一段階では、唯一の接触節点 1 は対称性により滑りが生じないため、固着接触として解析したことに矛盾は生じない。

次に接触節点を 1 つ増加させ、非接触側の隣の節点 3 が接触力零で接触するときの増分  $\Delta y_0$  を同様の手順により求める。この第 2 段階では、実質的に接触している節点が 2 つあるが、これらの節点に対し接触条件に矛盾がないことを確認し、もしこの段階で矛盾が生じていれば、次のように接触条件を修正して、再度解析を行う。

固着接触節点では、Fig. 4 に示す接触点の接線方向外力すなわち摩擦力  $X_i'$  は、最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  から求められる最大摩擦係数  $\mu_{\max} Y_i'$  以下でなければならない ( $X_i Y_i < \mu_{\max}$ ) から、 $\mu_{\max} Y_i'$  より大きくなっていけば、その節点を滑り接触節点に修正して再度解析を行う。また、摩擦力  $X_i'$  は節点の  $x$  方向変位増分  $\Delta u$  と反対方向に働かなければならない ( $\Delta u X_i < 0$ ) から、これらが同方向であれば、その節点を固着節点に修正して再度解析を行う。以上の手順を繰り返し、矛盾がない結果が得られれば、次に接触節点をさらに 1 つ増加させて、接触節点数が所定の個数になるまで、すなわち所定の接触率になるまで同様の手順を繰り返した。

なお、Fig. 4 に示す  $X_i'$  および  $Y_i'$  は次式で表わすことができる。

$$X_i' = X_i \cos \theta + Y_i \sin \theta \quad (7)$$

$$Y_i' = -X_i \sin \theta + Y_i \cos \theta \quad (8)$$

ここで  $X_i'$  および  $Y_i'$  は、それぞれ節点  $i$  の接線方向外力および法線方向外力であり、 $X_i$  および  $Y_i$  は、それぞれ節点  $i$  の水平方向外力および鉛直方向外力である。

## 3. 結果および考察

前章で説明した手法を用い、最大摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.1$ 、ステータとライナーの接触率 50% として解析を行った。なお、ステータ上面に発生する進行波の振幅は傾き角の影響が明確になるよう、振幅  $a$  を  $a = 20 \mu\text{m}$  および  $40 \mu\text{m}$  として、超音波モータの駆動トルクとなる摩擦応力  $\tau_{xy}$  をステータとライナーの接触面の傾きを考慮した場合と無視した場合で比較した。

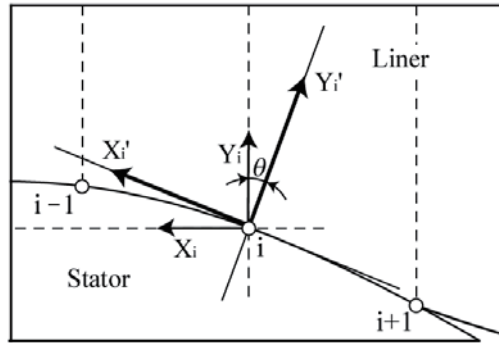


Fig.4 Tangential and normal components of the nodal force

はじめに、振幅  $a = 20 \mu\text{m}$  場合における接触領域の摩擦応力  $\tau_{xy}$  を Fig. 5 に示す。なお、図にある●は接触面の傾きを考慮した場合であり、△は傾きを無視した場合の解析結果である。Fig. 5 からわかるように、摩擦応力  $\tau_{xy}$  は傾きを考慮した場合、無視した場合のいずれも固着接触領域では滑り接触領域に近づく増加していくが、その増加率は徐々に小さくなり、ある程度近づく減少し始める。また、接触面の傾きを考慮しても摩擦応力  $\tau_{xy}$  に大きな違いは見られず、最大差は 19 kPa 程度であり、これは約 2%の精度向上しか望めないことがわかる。

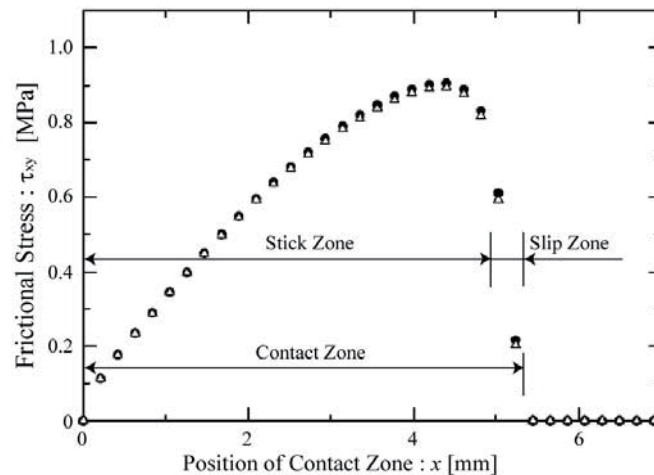


Fig.5 Effect of frictional condition on frictional stress  
( $a=20\mu\text{m}$ , ●:Considering the inclining angle, △:Ignoring the inclining angle)

つぎに、振幅  $a = 40 \mu\text{m}$  場合における解析結果を Fig. 6 に示す。こちらも Fig. 5 と同様、●は接触面の傾きを考慮した場合であり、△は傾きを無視した場合の結果である。振幅  $a$  が  $40 \mu\text{m}$  の場合でも接触領域内における摩擦応力  $\tau_{xy}$  の変化は同じ傾向になった。しかし Fig. 6 では、接触面の傾き角が大きくなる  $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$  の範囲では傾きを無視した場合と明らかな違いが確認できる。これは接触率 50%では、非接触領域に近づくほど接触面の傾き角が大きくなるため、そのことによる影響であると考えられるが、最大傾き角となり、その影響が最も大きくなると予想される接触領域と非接触領域の境界付近ではあまり大きな差は見られない。接触面の傾きを考慮した場合の影響が最も大きくなった節点は、固着接触領域内で最大傾き角となる節点であり、その差は 192kPa であった。このことから、振幅  $a = 40 \mu\text{m}$  場合では接触面の傾きを考慮し解析を行うことで、接触領域の摩擦応力  $\tau_{xy}$  に対する結果は、最大で約 10%精度向上することが明らかになった。

#### 4. おわりに

本研究では、超音波モータのステータとライナーの接触問題に、進行波による傾き角を考慮に入れ、増分理論

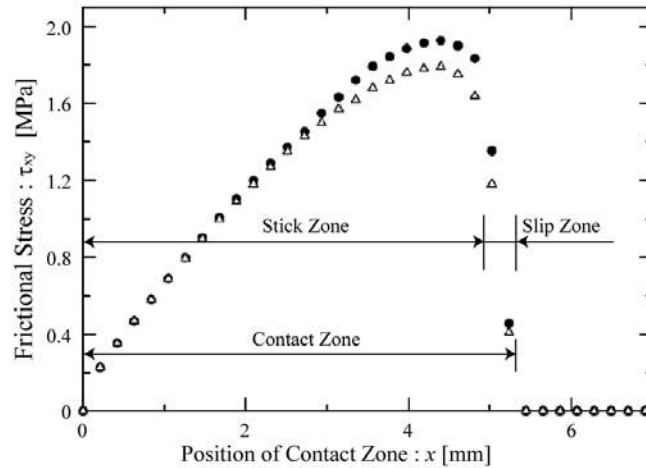


Fig.5 Effect of frictional condition on frictional stress  
( $a=40\mu\text{m}$ , ●:Considering the inclining angle, △: Ignoring the inclining angle)

を用い線形化して有限要素法により解析を行った。この解析により得られた結果と傾き角を無視した場合の解析結果を比較することで以下の知見を得た。

1. 接触面の傾き角を考慮した場合でも、接触領域における摩擦応力  $\tau_{xy}$  の分布パターンは変化しない。
2. 傾き角を考慮して解析を行った場合、固着接触領域で大きな精度向上が望める。
3. ステータ、ライナー間の接触解析では、進行波の振幅が  $20\mu\text{m}$  以下の場合、傾き角が解析結果におよぼす影響は少ないが、振幅が  $40\mu\text{m}$  以上では傾き角を考慮に入れ解析を行う必要がある。

本研究では、進行波振幅を  $20\mu\text{m}$  および  $40\mu\text{m}$  として、超音波モータの駆動トルクとなる摩擦応力  $\tau_{xy}$  の解析を行ったが、現在使用されている超音波モータの振幅は約  $2\mu\text{m}$  である。今回の結果より、現存する実機をモデルとした解析では接触面の傾きを無視しても問題はないと考えられる。しかし、今後、超音波モータの性能向上を目的として、振幅を大きくしたモデルを解析する際はステータとライナーの接触状態に、進行波による傾き角を考慮に入れていく予定である。

## 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) 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.
- (3) 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.
- (4) 三谷篤史, 秋下貞夫, "スライディングモード制御による進行波超音波モータの速度・トルク制御", 日本機械学会論文集C編, Vol.67, No.61(2001), pp.2843-2848.
- (5) 中山智了, 山下清隆, 高塚公郎, 大西隆文, 阿久戸庸夫, "進行波型超音波モータの駆動特性に及ぼすロータ振動の影響", 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.799(2013), pp.529-539.
- (6) 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.

(平成 26 年 3 月 31 日受理)