

## 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非線形接触挙動—

中山智了\*・大西隆文\*\*・山下清隆\*・高塚公郎\*

### Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor —Nonlinear Contact Behavior between a Rotor and a Stator—

Tomoaki Nakayama, Takafumi Ohnishi,  
Kiyotaka Yamashita and Kohro Takatsuka

We discuss the contact behavior between a stator and a liner that sticks to a rotor of an ultrasonic motor. It is very important to examine the mechanism of the contact behavior to improve the energy efficiency and durability of an ultrasonic motor. We already proposed a numerical technique with use of Finite Element Method for linear contact behavior which contains non-contact, slip contact and stick contact. In this paper, we expand this technique to nonlinear behavior on the basis of the incremental theory because the actual contact behavior is nonlinear. And we obtain some pieces of new knowledge about the nonlinear contact behavior between the stator and the liner.

Keywords: Contact Problem, Ultrasonic Motor, Finite Element Method, Incremental Theory

#### 1. 緒言

超音波モータとは、駆動源に超音波領域の機械的振動を利用したアクチュエータであり<sup>(1),(2)</sup>、従来の電磁モータとは構造、特性ともに大きく異なる。そのため、独自性を活かした新たな分野での利用が期待されているが、摩擦駆動のメカニズムや振動現象が複雑で改善すべき点も多く、多くの分野で十分に利用されているとは言えない。

超音波モータの駆動力は、ロータ下面に貼り付けられたライナーとステータ間の摩擦力によるものであり、また、寿命に大きな影響を及ぼすライナーの摩耗は、両者の接触面の面圧および滑り速度に大きく依存する。したがって、超音波モータの最大の課題であるエネルギー変換効率およびライナーの耐久性の向上には、ライナーとステータ間の接触挙動の解明が是非とも必要であり、これまでに多くの研究<sup>(3)~(8)</sup>がなされているが、いずれも多くは仮定を用いた粗い近似の解析であり、未だ、十分には解明されていない。

---

\* 機械工学科      \*\* 機械工学専攻院生

筆者らは、滑り領域に対してクーロン摩擦を前提とし、ライナーのせん断変形を考慮した有限要素法による解析手法を開発し、超音波モータの動的な駆動解析の前段階として、ロータが回転していない場合にはあるが、ライナーとステータ間の弾性接触挙動(線形接触挙動)を解析した。その結果、今までに解明されていなかった非接触領域、滑り接触領域および固着接触領域の3領域が共存する接触挙動を明らかにした<sup>(9),(10)</sup>。

しかしながら、ライナーとステータ間の接触状態は接触領域の拡大とともに変化し、最終的な接触領域だけでは一義的に定まらない非線形挙動である。そこで、本研究ではこの解析手法に有限要素法による弾塑性変形解析の一般的な解析手法である増分理論<sup>(11)</sup>を適用して、同じくロータが回転していない場合にはあるが、非接触領域、滑り接触領域および固着接触領域の3領域が共存するライナーとステータ間の非線形接触メカニズムを解析した。その結果、従来知られていなかった幾つかの知見を得るとともに、ロータが回転中の動的な接触メカニズムを解析する手法の足掛かりを得たので報告する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析プログラム

三角形1次要素による有限要素法の解析プログラムを作成し、ライナーとステータの非線形接触挙動を解析した。本研究では、解析対象であるライナーの厚さ $t_l$ を $t_l = 0.2\text{mm}$ 、半径方向長さ $L_r$ を $L_r = 2\text{mm}$ とした。したがって、 $t_l$ は $L_r$ に比べ非常に薄いため半径方向のひずみは零(平面ひずみ場)と仮定し、ライナーの円周方向と厚さ方向の2次元問題として解析した。なお、本研究で作成した解析プログラムでは、演算時間を短縮させるために剛性マトリックスの非零成分のみを記憶して解析する縮小バンドマトリックス法を適用した。また、この剛性方程式の解法には、収束性に優れる共役傾斜法(Conjugate Gradient Method)を適用した。

### 2.2 解析モデル

ステータ上面に接触するライナー下面の厚さ方向( $y$ 方向)変位 $v$ はFig.1に示すように次式で表わすことができる。

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

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 $\lambda = 2\pi r/n$ はステータ中立面の進行波の1波長であり、 $r$ および $n$ はステータの平均半径および振動次数である)および円周方向( $x$ 方向)の座標である。本研究では、 $r = 30\text{mm}$ 、 $n = 9$ 、ライナーのヤング率 $E$ が $E = 900\text{MPa}$ およびポアソン比 $\nu$ が $\nu = 0.45$ の場合について解析した。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( $L_x = \lambda/2 =$

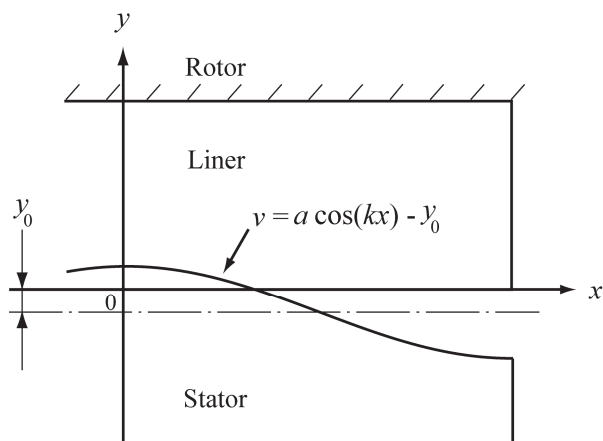


Fig.1 Positions of a Liner and a Stator

$\pi r/n = \pi \times 30\text{mm}/9 = 10.47\text{mm}$ ),  $y$  方向長さ  $L_y$  をライナーの厚さ ( $L_y = t_l = 0.2\text{mm}$ ) とした。このように、ライナー厚さ  $t_l$  が接触領域の長さ方向に比べて非常に薄い場合、厚さ方向の分割数は少なくても高精度の解が得られることは、既に筆者らによって確認されている<sup>(9),(10)</sup>。したがって、本研究では Fig.1 のライナーの対象領域を Fig.2 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 等分し、全節点数が 255 個である 200 個の四角形領域に分割した。さらに、要素分割の方向による誤差を少なくするため、各四角形領域を 2 通りの三角形要素に分割し、全体の剛性マトリックスの組立てにはこれらの平均の剛性マトリックスを用いた。

なお、ステータ上面は、式(1)で示される曲線であるため、滑り接触の節点における変位の境界条件には、傾いた面に接触する条件を用いるべきであるが、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水平面に接触する条件で解析を行った。

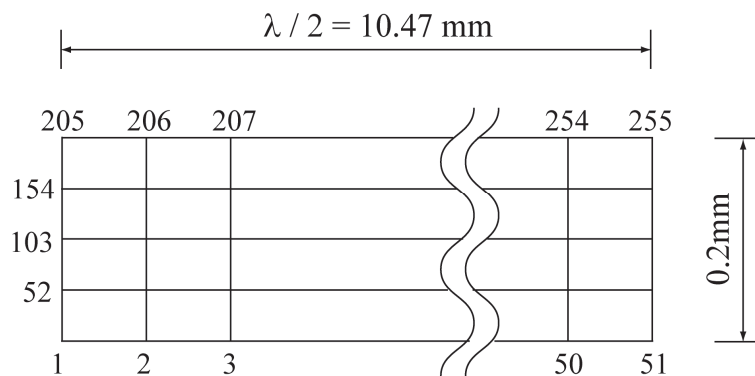


Fig.2 Dimensions and Element Division of a Liner

## 2.3 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。以下に、この非線形接触挙動に対する増分理論による解析手法を述べる。

はじめに、Fig.3 に示すように、Fig.2 の節点 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  $\Delta y_0$  ( $\Delta y_0 < 0$ ) を仮定して解析する。その結果より、Fig.2 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。

つぎに、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、水平方向の節点外力すなわち摩擦力  $X$  は、最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  から求められる最大摩擦力  $\mu_{\max} Y$  以下でなければならない ( $X/Y < \mu_{\max}$ ) から、 $\mu_{\max} Y$  より大きくなっていれば、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  $X$  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 ( $\Delta u \cdot X < 0$ ) 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

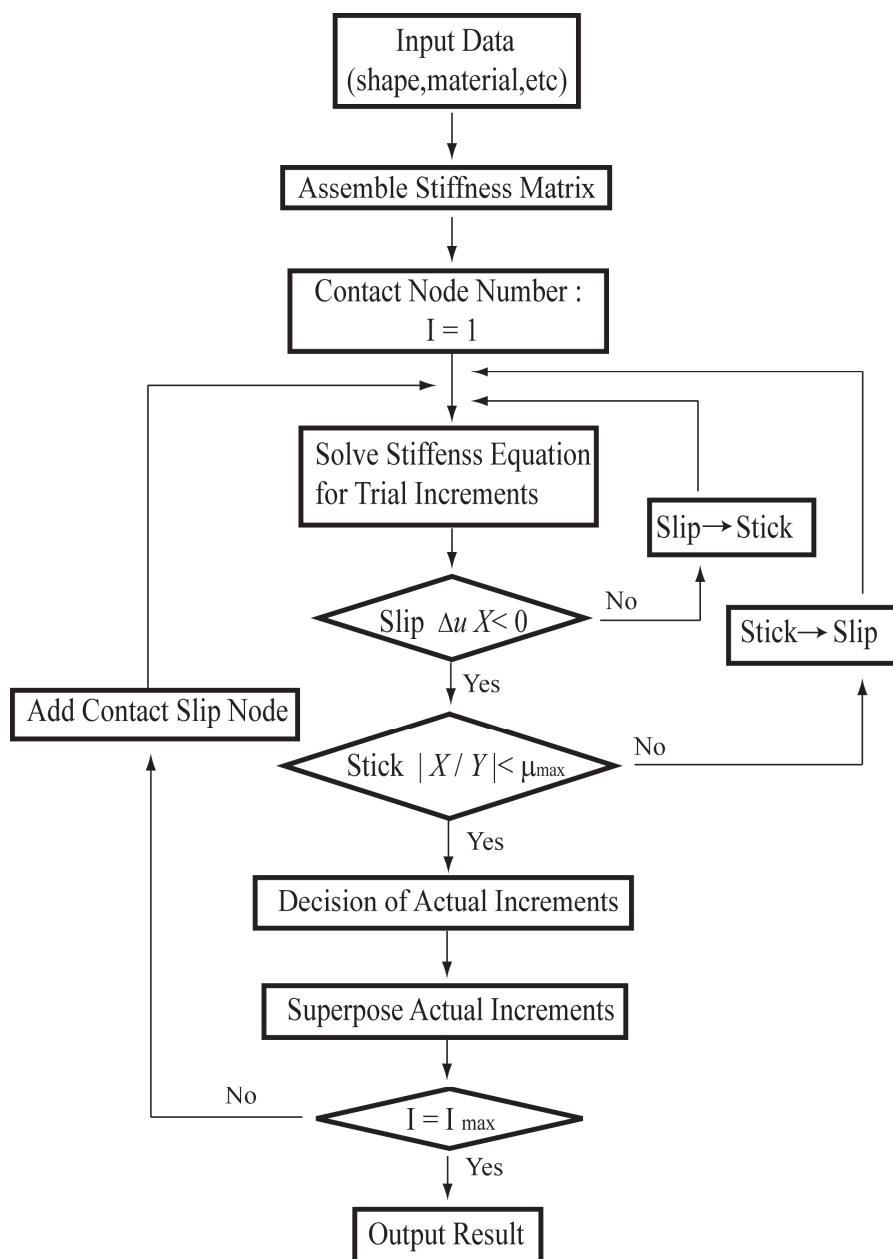


Fig.3 Flow Chart of Static Analysis

接触節点をさらに1つ増加させて、接触接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。

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1 接触メカニズムの特徴

最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  が  $\mu_{\max} = 0.05 \sim 0.2$ 、ライナーとステータの接触率  $r_c$  が  $r_c = 30 \sim 70 \%$  (接触節点数  $N_c$  が  $N_c = 16 \sim 36$ ) の範囲の解析を行った。接触率 50 % ( $N_c = 26$ )、 $\mu_{\max} = 0.1$  の場合のライナー下面の変形状態および接触領域の接触状態を Fig.4 に示す。同図より明らかなように、線形解析の結果と同様<sup>(9),(10)</sup>、接触領域の大部分の領域は固着接触領域であり、滑り接触領域は非常に少ない。また、参考のため、同図の右上には接触領域近傍の非接触領域のライナーの変形状態を拡大して示したが、ライナーは接触領域近傍の非接触領域で僅かに下方に膨らんでいる。この場合の接触領域の面圧を Fig.5 に示すが、この結果も線形解析の結果と同様<sup>(9),(10)</sup>、ステータの上面形状に似た分布となっており、ステータの接触により生じた  $y$  方向変位にほぼ比例した面圧分布となっている。Fig.6 および Fig.7 には、それぞれ、接触領域の摩擦応力  $\tau_{xy}$  および摩擦係数  $\mu$  を示す。Fig.6 より明らかなように、摩擦応力  $\tau_{xy}$  は固着接触領域では滑り接触領域に近づくとも増加していくが、その増加率は徐々に小さくなり、ある程度近づくとも減少し始める。また、滑り接触節点は、僅か1節点のみである。Fig.7 より明らかなように、固着接触領域の摩擦係数  $\mu$  は滑り接触領域に近づくとも急激に大きくなり、接触領域の右端の1節点のみで最大静止摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.1$  となった。また、当然ながら滑り接触節点の摩擦係数  $\mu$  は、 $\mu = \mu_{\max} = 0.1$  の滑り接触の条件を満たしている。

以上の結果より、ライナーとステータ間の接触領域の殆どの部分は固着接触領域であり、固着接触領域の摩擦係数  $\mu$  は滑り接触領域に近づくにつれて大きくなり、一定値  $\mu_{\max}$  に達した後に滑り始めるなど、従来の接触領域全域を滑り接触領域と仮定して導かれた結果とは全く異なる接触メカニズムであることが明らかとなった。

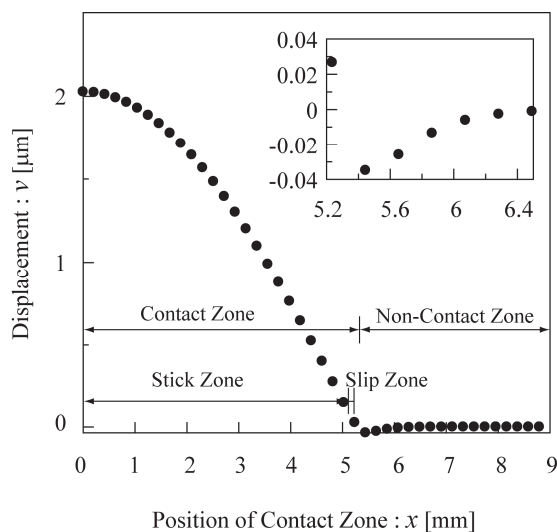


Fig.4 Displacement of Liner Lower Surface  
( $r_c = 50 \%$  ,  $\mu_{\max} = 0.1$ )

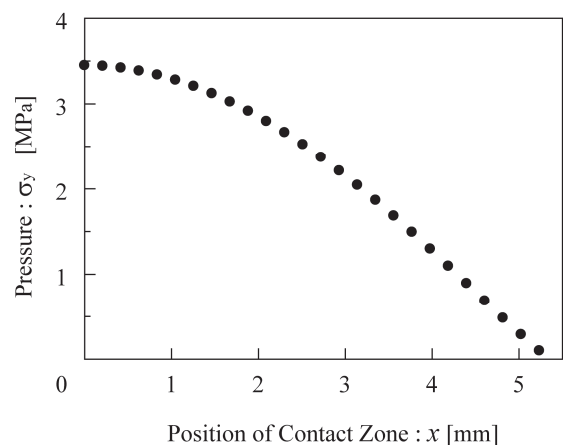


Fig.5 Pressure Distribution of Contact Zone  
( $r_c = 50 \%$  ,  $\mu_{\max} = 0.1$ )

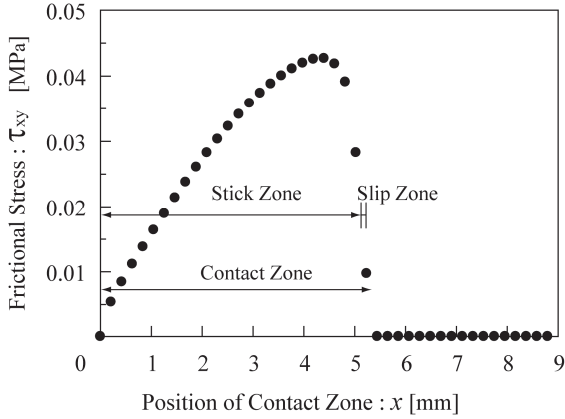


Fig.6 Frictional Stress of Contact Zone

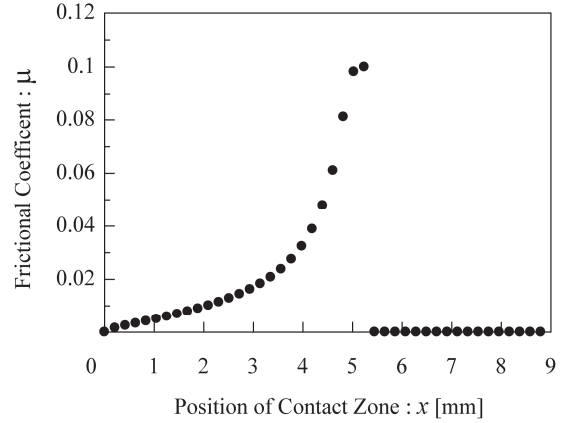


Fig.7 Frictional Coefficient of Contact Zone

なお、超音波モータの最も重要な因子である駆動トルクは、摩擦応力  $\tau_{xy}$  から求めることができる。そこで、摩擦応力に及ぼすライナーとステータの接触率  $r_c$  および最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  の影響について、以下に述べる。

### 3.2 接触率 $r_c$ の影響

ライナーとステータの接触率  $r_c$  が  $r_c = 30\%$  および  $70\%$ （接触節点数  $N_c$  が  $N_c = 16$  および  $36$ ）、最大摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.1$  の場合の摩擦応力  $\tau_{xy}$  の結果を Fig.8 に、摩擦係数  $\mu$  の結果を Fig.9 に示す。参考のため、これらの図には接触率  $r_c = 50\%$ （ $N_c = 26$ ）の場合の結果も併記した。これらの結果より、接触率  $r_c$  が変化しても摩擦応力  $\tau_{xy}$  および摩擦係数  $\mu$  の分布パターンはあまり変化せず、滑り接触領域に近い固着接触領域で急激に増加して固着接触に至ることがわかる。

### 3.3 最大摩擦係数 $\mu_{\max}$ の影響

最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  が  $\mu_{\max} = 0.05$  および  $0.2$  の場合の摩擦応力  $\tau_{xy}$  の結果を Fig.10 に、摩擦係数  $\mu$  の結果を Fig.11 に示す。参考のため、これらの図には最大摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.1$  の場合の結果も併記した。これらの結果より、いずれの場合も接触領域は固着領域が支配的で滑り領域は非常に少な

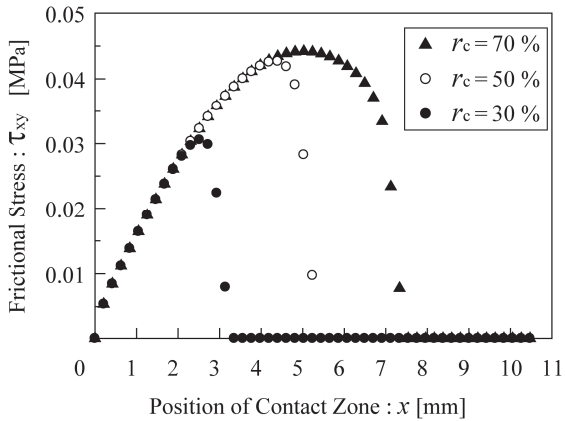


Fig.8 Effect of Contact Ratio on Frictional Stress ( $\mu_{\max} = 0.1$ )

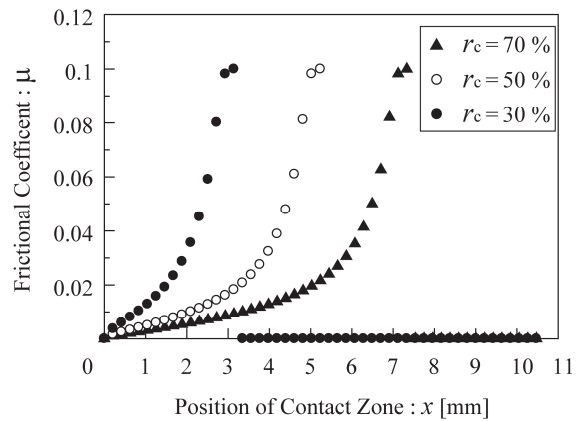


Fig.9 Effect of Contact Ratio on Frictional Coefficient ( $\mu_{\max} = 0.1$ )

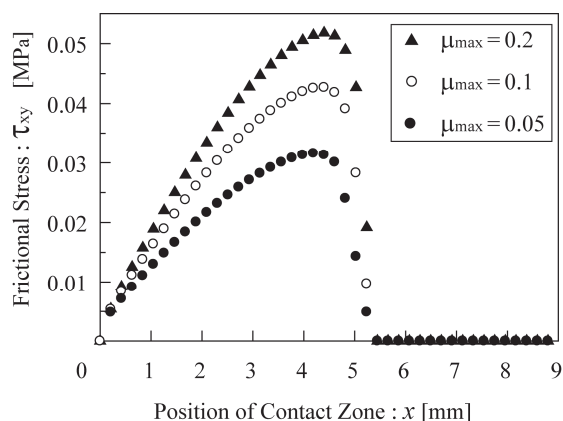


Fig.10 Effect of Maximum Frictional Coefficient  
on Frictional Stress ( $r_c = 50\%$ )

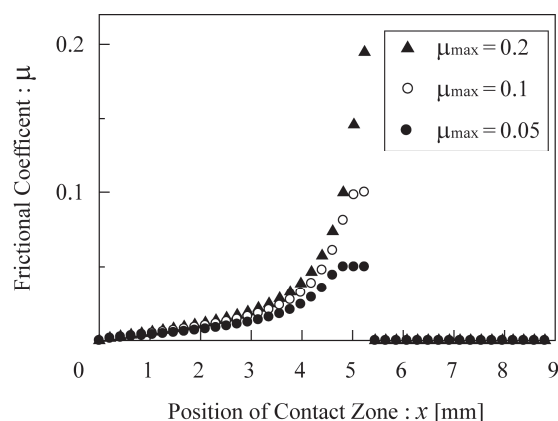


Fig.11 Effect of Maximum Frictional Coefficient  
on Frictional Coefficient ( $r_c = 50\%$ )

いため、摩擦応力  $\tau_{xy}$  から求められる超音波モータの駆動トルクは、最大摩擦係数  $\mu_{\max}$  の値から予想されるほど大きな影響を受けないことが推定される。

### 3.4 接触領域一定の接触メカニズム

以上の解析は、形状が一定のステータが下から上昇してライナーの接触領域が少しずつ増加していく非線形変形過程を想定した場合であったが、参考として、ステータとの接触領域が変化せず、ステータ形状が直線から振幅のみ大きくなる線形変形過程に対する解析を行った。Fig.12 に示す摩擦応力  $\tau_{xy}$  の解析結果から明らかなように、この変形過程では固着接触領域と滑り接触領域の境界付近に摩擦応力  $\tau_{xy}$  の急峻なピークが発生しており、この傾向は L. T. Campos らの結果<sup>(12)</sup> とよく一致している。また、Fig.6 と Fig.12 の比較により、ライナーに発生する応力状態は、その接触過程に大きく依存することがわかる。

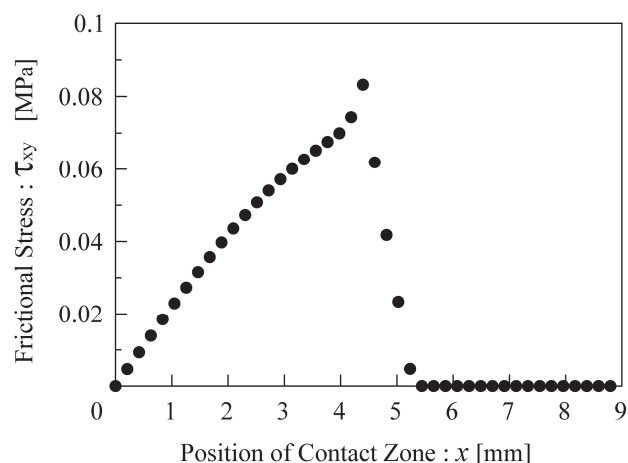


Fig.12 Frictional Stress of Contact Zone  
(Linear Behavior:  $r_c = 50\%$ ,  
 $\mu_{\max} = 0.1$ )

## 4. 結言

本研究では、クーロンの摩擦力を前提としライナーのせん断変形を考慮した有限要素法による解析手法<sup>(9), (10)</sup>に増分理論を適用して、非接触領域、滑り接触領域および固着接触領域の3領域が共存する超音波モータの非線形接触メカニズムを解析した。その結果、従来知られていなかった以下の知見を得た。



- (1) 接触率  $r_c = 30 \sim 70 \%$ 、最大摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.05 \sim 0.2$  の範囲では、接触領域は固着接触領域が殆どであり、摩擦応力  $\tau_{xy}$  および摩擦係数  $\mu$  の分布パターンはあまり変化しない。
- (2) 最大摩擦係数  $\mu_{\max} = 0.05 \sim 0.2$  の範囲での超音波モータの駆動トルクは、 $\mu_{\max}$  の値から予想されるほど大きな影響を受けない。
- (3) ライナーに発生する摩擦応力  $\tau_{xy}$  はステータとの接触過程に大きく依存するため、接触領域が徐々に変化する接触過程を考慮した解析が必要である。

本研究では、超音波モータの駆動メカニズム解析の前段階として、ステータの  $x$  方向運動を無視した場合、すなわち、ロータが回転していない場合の非線形接触挙動を明らかにした。本解析手法にステータの  $x$  方向運動を  $y$  方向運動と同様に考慮することにより、ロータが回転している動的な非線形接触挙動の解析が可能となる。種々の条件に対するこれらの解析により超音波モータの駆動メカニズムを明らかにして、超音波モータの最大の課題であるエネルギー変換効率やライナーの耐久性の向上を図ることが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 見城・指田, 超音波モータ入門, (1991), pp.7-15, 総合電子出版.
- 2) P. Hagedorn and J. Wallaschek, Travelling Wave Ultrasonic Motors, Part 1: Working Principle and Mathematical Modeling of the Stator, Journal of Sound and Vibration, Vol.155, No.1 (1992), pp.31-46.
- 3) 黒沢・上羽, 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.
- 4) 前野, 超音波モータに関する基礎研究, 東京工業大学博士論文(1993)
- 5) M. H. Aliabadi and C. A. Brebbia, Computational Methods in Contact Mechanics, Elsevier (1993), pp.265-301.
- 6) O. Y. Zharii, Adhesive Contact between the Surface Wave and a Rigid Strip, Journal of Applied Mechanics, Vol.62, No.2(1995), pp.368-372.
- 7) 高塚・相原・津久井・阿久戸, 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, 1999 年度年次大会講演論文集(Ⅱ), No99-1(1999), pp.137-138.
- 8) 高塚, 進行波型超音波モータの駆動メカニズム—反転挙動の解明—, 福井工業大学研究紀要, No.30(2000), pp.113-120.
- 9) 高塚・中島・吉野・玖野・阿久戸, 超音波モータの駆動メカニズムの解明(第1報: ステータとロータの接触挙動の解析方法の検討), 日本機械学会, D&D 2000(2000), CD-ROM 論文集, No.212.
- 10) 高塚, 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接触挙動—, 福井工業大学研究紀要, No.32(2002), pp.107-114.
- 11) 例えば、高塚, 棒および柱の弾塑性変形解析に関する研究, 東京大学博士論文(1973), pp.37-45.
- 12) L. T. Campos, A Numerical Analysis of a Class of Contact Problem with Friction in Elastostatics, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol.34, No.1(1982), pp.821-845.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)