

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の解析方法—

高 塚 公 郎*

Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor

—Numerical Analysis of the Contact Behavior between a Rotor and a Stator—

Kohro Takatsuka

We discuss the numerical analysis, which investigates the contact behavior between a rotor and a stator. It is very important to examine numerically such a contact behavior that affects significantly the efficiency and the durability of an ultrasonic motor. As a result, we propose the appropriate technique that applies the finite element method. Moreover the validity of the method is also confirmed from the numerical result in case of the frictionless contact behavior. Finally, we have obtained new information about the lining material, i.e. the deformation near contact area and the contact pressure are extremely dependent on Poisson's ratio.

1. 緒 論

超音波モータとは駆動源として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^{1,2)}、従来の電磁モータとは構造および特性が大きく異なる。そのため独自性を生かした新たな分野での応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あり、改善すべき点も多く、これまでにモータ駆動時のロータとステータの接触部分に関する研究^{3~7)}など多くの努力がなされている。

超音波モータの効率を決定する駆動力は、ライニング材とステータの接触面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ニング材の摩耗は、接触面の面圧およびすべり速度に大きく依存する。このため、超音波モータの最大の課題である高効率化および長寿命化には、ライニング材とステータの接触挙動の解明が是非とも必要である。

この接触挙動の解明は、弾性体（ライニング材）と剛体（ステータ）の弾性接触問題として、今まで多くの人に研究されているが、その方法は、解析的に理論解を求める弾性接触理論によるものと有限要素法を用いる数値解析によるものとに大別される。前者には、応力関数を級数展開により近似的に求めているもの^{8,9)}や、複素数を用いて関数論により求めているもの¹⁰⁾などがあるが、いずれも多くの変数や近似を用いており、またその手順も複雑で実用的でない。後者は、

* 機械工学科

形状などにおいても近似を用いる必要がなく、実用的な方法ではある^{4,10,11)}が、接触領域の決定法などが必ずしも妥当ではなく、その解法は未だ確立されていない。

そこで、筆者らは、有限要素法を用いての数値解析による接触問題の解法を検討した結果、妥当的な解析方法の手掛かりを得ることができ、さらにこの方法を用いて摩擦がない場合について解析した結果、いくつかの知見を得たので報告する。

2. 従来の解析方法と本研究の目的

2.1 接触領域の決定法

ライニング材（弾性体）とステータ（剛体）の弾性接触問題は、既に、多くの人により有限要素法を用いて数値解析されている。しかしながら、それらはライニング材のせん断変形を無視したバネモデルにより接触領域を決定して解析しているもの^{10,11)}や、仮想線形バネ（ギャップ要素）を用いて3次元解析を行い、摩擦力をすべり速度に比例するものとして取り扱っているもの⁴⁾などであり、これらの近似や仮定を用いないでクーロン摩擦を解析した例はない。そこで、筆者らは、接触領域の妥当な決定法として、近似的に接触領域を仮定して解析し、ライニング材の変形および反力の結果が矛盾がないか否かを確認し、もし矛盾があれば接触領域を修正して再度解析を行い、矛盾のない結果が得られるまで修正を繰返す解析手法を試みた。

2.2 摩擦条件の取扱い

従来の有限要素法を用いての数値解析では、いずれも接触領域および固着点をあらかじめ仮定し、その固着点により接触領域での摩擦力の方向を決定しているが、接触領域は摩擦力に依存するため、厳密な解を得るには繰返し解析が必要である。筆者らは、接触領域決定の解析手法を確立した後の課題として、摩擦力を考慮した解析を行う予定である。

2.3 周期的境界条件の取扱い

通常、超音波モータに用いられるステータの進行波の次数 n は、 $n = 5 \sim 10$ のものが多く、接触問題の解析対象領域は、ステータリング1周の $1/n$ の領域となるが、その対象領域の両側の周期的境界条件として、円周方向の変位が零として取扱われていることが多い^{10,11)}。しかしながら、摩擦力が存在し駆動力が発生している場合には、円周方向の変位が零となる面はなく、この境界条件は必ずしも妥当ではない。筆者らは、この周期的境界条件の妥当な取扱い方法についても、今後、検討を加えていく予定である。

3. 解析方法

本研究では、三角形線形平面ひずみ要素を用いた有限要素法のプログラムを作成し、ライニング材とステータの弾性接触問題を数値解析した。接触領域の決定法としては、2.1節で述べたように、近似的に接触領域を仮定して解析し、矛盾のない結果が得られるまで接触領域を修正する

解析手法を試みた。その具体的な手順をFig.1 に示すようなステータが下からライナーに接触する場合の例により説明する。

図1の変形前のライニング材の位置A, B, ..., Iは、ステータに押されて変形した後、a, b, ..., iに変位するものと推定すれば、接触領域はC～Gである。このように接触領域を

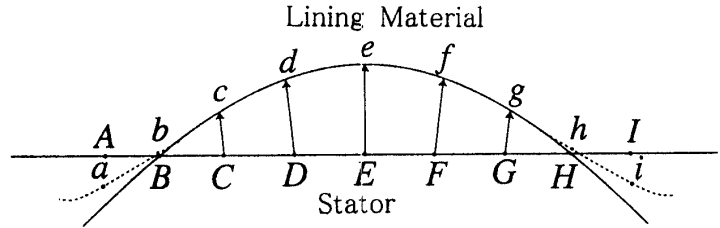


Fig.1 Determination Method of Contact Area

C～Gとして、位置C～Gの垂直方向の変位をc～gとして解析する（水平方向の変位は未知数であり、摩擦係数が零の場合には水平方向の外力を零として、零でない場合には摩擦条件を考慮して解析する）。接触領域の反力は、常に圧縮力でなければならないから、解析結果において、接触領域と仮定したC～Gの位置のうち、垂直方向の反力が引張力となっている点があれば、その点是非接触領域として、再度解析する必要がある。また、非接触領域A, B, H, Iなどの位置の垂直方向変位a, b, h, iは、常にステータの垂直方向位置より上にななければならないから、解析結果において、下になっている点があれば、その点は接触領域として、再度解析する必要がある。このような解析を矛盾のない結果となるまで繰返す解析方法を試みた。

4. 解析条件

4.1 材料定数

本研究のライニング材とステータの弾性接触問題では、ステータは材質が金属であるため剛体と考えられるから、ライニング材のみの変形を解析すればよい。本研究の数値解析に用いたライニング材の材料定数は、高分子材料を想定した以下に示す値である。

ヤング率 : $E = 0.886 \text{ GPa}$ ポアソン比 : $\nu = 0.42 \sim 0.48$

4.2 解析対象領域

ライニング材の平均半径 r を $r = 30 \text{ mm}$ とし、モータ駆動時に発生するステータの振動波の次数 n が $n = 9$ の場合を解析した。また、今回の数値解析の主目的は解析方法の妥当性を確認することであるため、摩擦係数 μ が $\mu = 0$ の簡単な場合を取り上げた。ステータの振動波形を4.4節で述べるように三角関数で表示し、波形の周期性および $\mu = 0$ による対称性を考慮すれば、解析の対象とすべきライニング材の円周方向(x 方向)長さ L_A は

$$L_A = \frac{1}{2} \times \frac{2\pi r}{n} = \frac{2\pi \times 30}{2 \times 9} = 10.47 \text{ mm} \quad (1)$$

となる。本研究ではライニング材の y 方向厚さ h を $h = 0.2 \text{ mm}$ 、半径方向(z 方向)の厚さを単位厚さ($t = 1 \text{ mm}$)とし

円周方向 $L_A = 0.47 \text{ mm}$ 、 厚さ方向 $h = 0.20 \text{ mm}$ 、 半径方向 $t = 1 \text{ mm}$

の解析対象領域を平面ひずみ条件で数値解析した。

4.3 要素分割

本研究の主目的は、接触領域の決定方法を確認することであるから、解析対象領域を接触面に沿う円周方向（x方向）は細かい分割とし（105分割）、±0.1mmの精度で接触領域が得られるようにした。また、厚さ方向（y方向）には、応力変化が小さいと推定されるので、あまり細かい分割とせず、4および8分割とした。数値解析に用いた要素分割は、図2に示すように、全要素数は840および1,680個、全節点数は530および954個である。

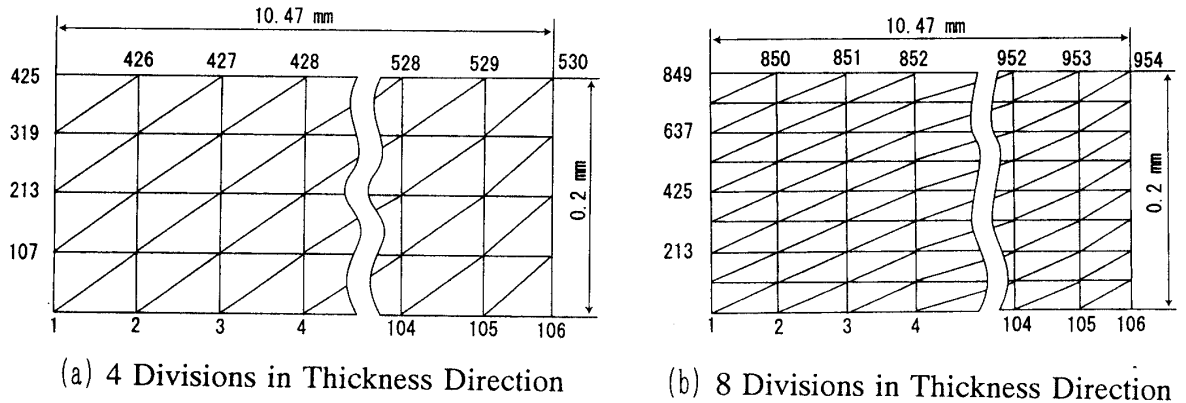


Fig.2 Element Division of Lining Material

4.4 境界条件

4.2節で述べたように、ステータの振動波形が円周方向に9次の三角関数で表示される場合のステータとライニング材の接触問題を数値解析する。ステータの9次の振動波形 y は以下の式で表示することができる。

$$y = a \cos\left(\frac{n x}{r}\right) + y_0 = a \cos\left(\frac{3 x}{10}\right) + y_0 \quad (2)$$

ここで、 a はステータの振動波形の振幅であり、 y_0 は図3に示すように、ステータ上面の中心線とライナー下面との相対位置である。

本研究では、 $a = 2 \mu\text{m}$ とし、 $y_0 = -0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲に対して、式(2)で表示されるステータ上面が、ライニング材下面に摩擦係数 $\mu = 0$ で下から接触する場合を数値解析した。ライニング材の上面はロータに接着されているため、すべての位置でx方向およびy方向の変位を零とした。また、ライニング材の解析対象領域の左端および右端は周期性および $\mu = 0$ による対称性より、x方向変位を零とした。

なお、ステータの上面は、式(2)で示される曲線であるため、変位の境界条件としては、水平方向に対して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 θ_{\max} は

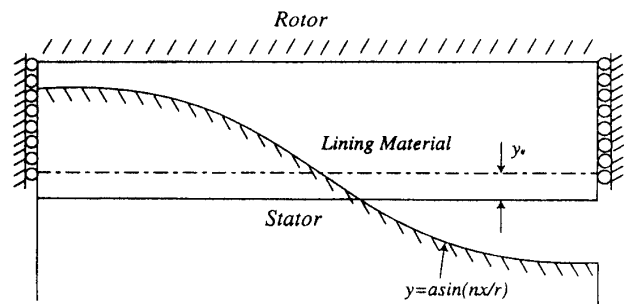


Fig.3 Position of Lining Material and Stator

$$\tan \theta_{\max} = \left| \frac{dy}{dx} \right|_{\max} = \left| -\frac{a n}{r} \sin \frac{n x}{r} \right|_{\max} = \frac{a n}{r} = \frac{0.002 \times 9}{30} = 6 \times 10^{-4} \quad (3)$$

となり、非常に小さいので、本研究では傾きを無視して、水平面に接触する条件で解析を行った。

5. 解析結果および考察

5.1 解析手法の確認と要素分割の影響

ライニング材の厚さ方向の分割粗さの解析精度に及ぼす影響を調査するため、図2に示すように、この方向の要素分割数が4分割と8分割の両方の場合について解析を行った。これらの解析における接触領域の決定には、3章で述べた方法を用いたが、どちらの場合にも接触領域は簡単に決定され、矛盾のない接触領域であることが容易に確認された。以下に述べる本章のすべての結果は、接触領域の決定に、いずれも3章の解析方法を用いて解析したものである。

表1にポアソン比 $\nu = 0.45$ 、ステータの相対位置 $y_0 = 0 \mu\text{m}$ の場合の接触長さ L および接触面各位置における面圧 σ_y の解析結果を示す。表1より、接触長さ L は目標精度の $\pm 0.1\text{mm}$ の範囲内で良く一致しており、また、接触面圧 σ_y もいずれの位置においても $\pm 0.01 \text{MPa}$ の範囲内で一致していることがわかる。したがって、ライナーの厚さ方向の分割数は、4分割で十分な精度が得られることが明らかとなった。以上の結果より、以後の解析はすべて図2(a)に示す4分割の要素分割で行った。

Table 1 Contact Length L and Pressure σ_y

		4 Divisions	8 Divisions
Contact Length	$L [\text{mm}]$	5.5	5.5
Contact Pressure $\sigma_y [\text{MPa}]$	$x = 1 \text{ mm}$	15.66	15.65
	$x = 2 \text{ mm}$	13.69	13.68
	$x = 3 \text{ mm}$	10.52	10.51
	$x = 4 \text{ mm}$	6.50	6.50
	$x = 5 \text{ mm}$	2.22	2.22

5.2 ライニング材の変形

図4に、ステータの相対位置 $y_0 = 0 \mu\text{m}$ の場合のライニング材下面全域の変形の解析結果を示す。また、同図の接触領域と非接触領域の境界近傍を拡大して図5に示す。これらの図より、ポアソン比 ν が変化しても、接触長さ L は $5.5 \sim 6.0 \text{ mm}$ の範囲でありあまり変わらない。しかしながら、境界近傍の非接触領域の変形はポアソン比 ν の影響を大きく受け、非接触領域の下方への変形は、 0.45

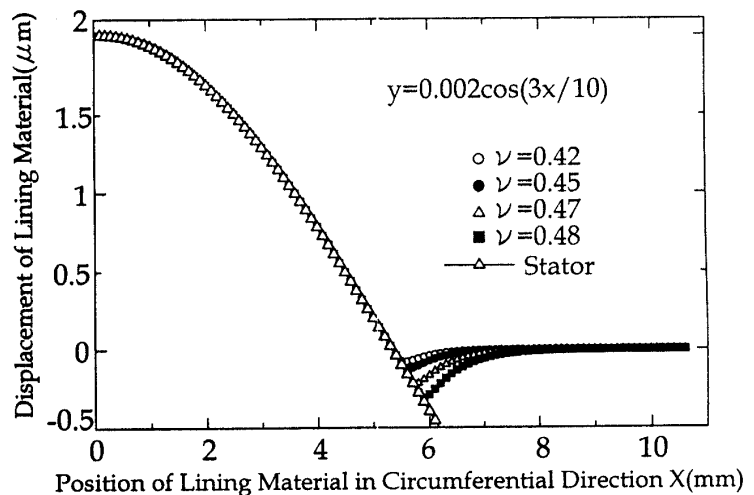


Fig.4 Displacement of Lining Material [Overall]

を越えると非常に大きくなることが明らかになった。

5.3 接触面圧 σ_y

図6にステータの相対位置 $y_0 = 0 \mu\text{m}$ の場合の接触領域の面圧 σ_y の解析結果を示す。非接触領域の変形の結果と同様、接触面圧はポアソン比 ν の影響を大きく受け、0.42 から 0.48 にかわると、 $x = 0.0\text{mm}$ の位置に発生する最大面圧は、約3倍にもなる。このように 0.5 に近づくと、面圧が非常に大きくなる原因は次のように推定される。

材料の体積弾性係数 K は、 $1 - 2\nu$ に反比例するため、 ν が 0.42 から 0.48 になると、4倍になる。 K が大きくなると、ライニング材の体積変化は少なくなる（非接触領域で下方に変位してくる体積が多くなる）が、 K の増加率の方が大きいため、面圧の増加率は多少減少するが、全体として面圧が約3倍に大きくなったと推定される。

5.4 押付け力 F

図7に、1波長当たりの押付け力 F （図6の面圧を1波長分の面積で積分したもの）とステータの相対位置 y_0 の関係を示す。本解析では、ライニング材の半径方向接触幅を 2mm とした。

ステータとの相対位置 y_0 が大きくなるにしたがい、押付け力 F は直線的に大きくなるが、その変化率はポアソン比 ν が大きいほど大きいことが明らかになった。

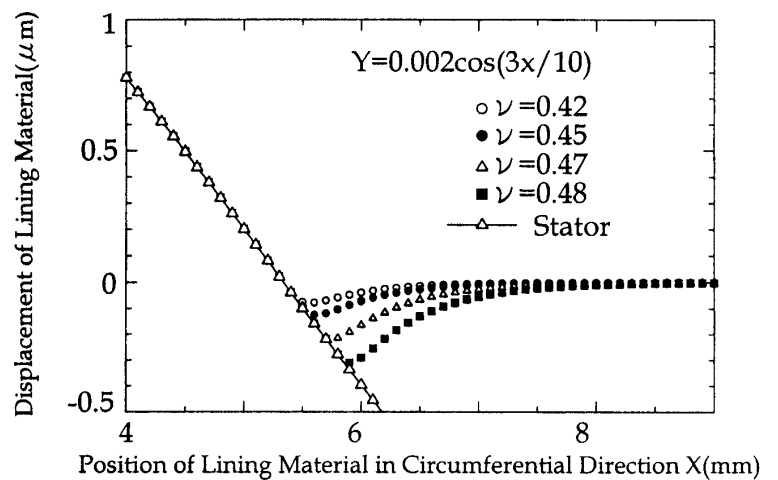


Fig.5 Displacement of Lining Material [near Boundary]

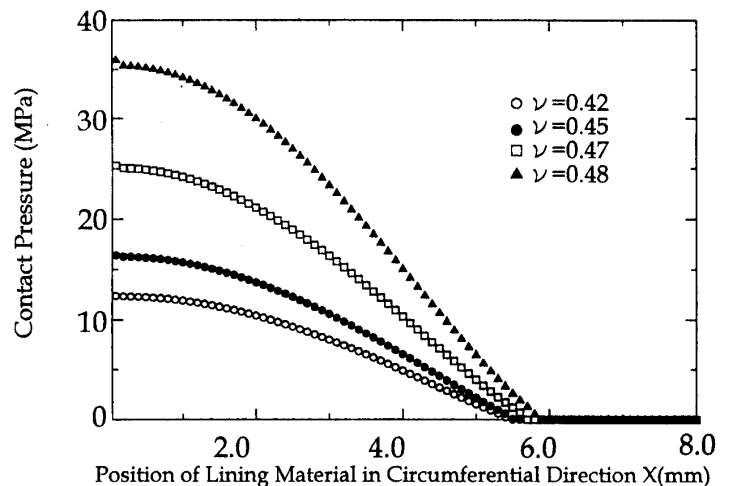


Fig.6 Pressure Distribution of Contact Zone

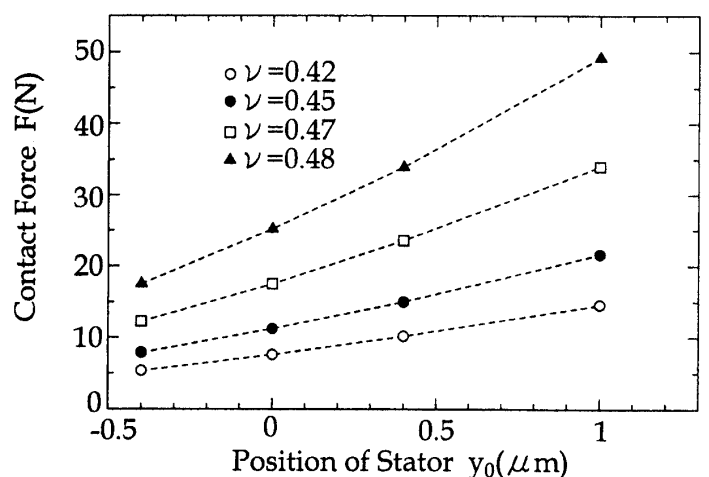


Fig.7 Effect of Stator Position on Contact Force

5.5 接触領域

図8に、ライニング材の接触長さ L とステータの相対位置 y_0 の関係を示す。4.2節で述べたように、本解析の接触長さ L の精度は±0.1 mmであるため、同図の結果は必ずしも精度良い結果とは言えないが、接触長さ L は、ステータとの相対位置 y_0 が $y_0 = -0.4 \sim 1.0$ mmの範囲で、 y_0 とほぼ比例関係にあり、また、その傾向はポアソン比 ν の影響をほとんど受けないことが明らかになった。

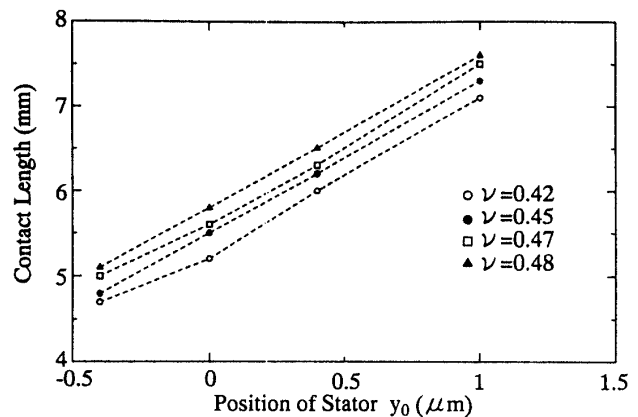


Fig.8 Effect of Stator Position on Contact Length

5.6 押付け力 F の接触長さ L に及ぼす影響

図7および図8より、押付け力 F と接触長さ L の関係を求めると図9のようになる。同図より、押付け力 F を大きくすると、接触長さ L はほぼ比例して長くなるが、その増加率はポアソン比 ν が大きいほど、小さいことがわかる。

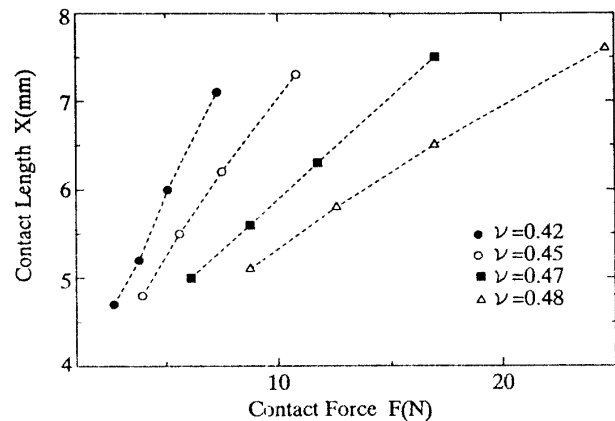


Fig.9 Effect of Contact Force on Contact Length

また、同一の接触長さ L での押付け力 F は、ポアソン比 ν が大きいほど、大きいことがわかる。これは、図7のステータの相対位置 y_0 が同じでポアソン比 ν が大きくなれば、接触長さ L がほとんど変化せず、接触面圧のみが大きくなることと同じ現象である。

6. 結 論

超音波モータのステータとライニング材の弾性接触問題を有限要素法を用いて解くための妥当的な解析手法を検討し、摩擦係数が零の場合の問題を解析して、その手法の妥当性を確認した。

さらに、同じく摩擦係数が零の場合ではあるが、ポアソン比 ν およびステータの位置 y_0 を変化させて、種々の場合の解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) ステータの位置 y_0 が同じ場合、ポアソン比 ν が0.5に近づくと、接触長さ L はあまり変わらないが、接触部に近い非接触部の変形は非常に大きくなる。
- (2) ステータの位置 y_0 が同じ場合、ポアソン比 ν が0.5に近づくと、接触面圧 σ_c が非常に大きくなる。
- (3) ステータの位置 y_0 が大きくなると、押付け力 F は大きくなるが、その変化率は

ポアソン比 ν が大きいほど激しい。

(4) ステータの位置 y_0 が大きくなると、接触長さ L は大きくなるが、その変化率はポアソン比 ν の影響をあまり受けない。

(5) 押付け力 F が大きくなると、接触長さ L は大きくなるが、ポアソン比 ν が大きいほどその変化率は少ない。

本研究の結果、弾性接触問題を解くための妥当的な解析手法が確立できたので、今後は、摩擦係数が零でない一般の解析を行い、実際の駆動中の超音波モータにおいて、どのような状態でステータとライニング材が接触し、駆動力が伝達されていくかの解明を試みる予定である。

さらに、ライニング材の円周方向の周期性の妥当的な取扱い方法についても検討していく予定である。

なお、本研究は、進行波型超音波モータの効率向上と長寿命化を目的として、(株)ミツバ、慶應義塾大学および本学が産学協同で実施している研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 見城・指田, 超音波モータ入門(1991), 187, 総合電子出版.
- 2) P.Hagedorn and J.Wallaschek, Travelling wave ultrasonic motors PART 1 : Working principle and mathematical modelling of the stator, JSV31-46(1992), 155.
- 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, 44(1988), 40.
- 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) 高塚・ほか 4 名, 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), No.99-1(1999), 137.
- 6) 中島・ほか 5 名, ロータの振動を考慮に入れた進行波型超音波モータの摩擦接触駆動機構, 第11回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集(1999), 436.
- 7) 高塚, 進行波型超音波モータの駆動メカニズムー反転挙動の解明ー, 福井工業大学研究紀要, 30(2000), 113.
- 8) O.Y.Zharii and A.F.Ulitko, Smooth Contact Between the Running Rayleigh Wave and a Rigid Strip, J. Applied Mechanics, T. of ASME 62 (1995), 362.
- 9) O.Y.Zharii, Adhesive Contact Between the Surface Wave and a Rigid trip, J.Applied Mechanics, T. of ASME 62 (1995), 368.
- 10) 田島, 剛体主動節と弾性体従動子により構成されるすべり接触駆動機構の解析, 慶應義塾大学修士論文 (1996).
- 11) 海老原, 行波型超音波モータにおける駆動力の評価 (すべり摩擦を考慮した場合), 慶應義塾大学修士論文 (1994).

(平成12年11月24日受理)