

固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析

Contact Analysis of Traveling Wave type Ultrasonic Motor considering Stick/Slip Condition

前野 隆司

要旨：超音波モータの性能や耐摩耗性の向上のためには、振動子（ステータ）・移動子（ロータ・スライダ）間の接触状態を明らかにする必要がある。本研究では、振動子・移動子間の接触状態を、固着(stick)・滑り(slip)を考慮して解析する簡便な計算手法を提案する。また、本手法に基づいて物理パラメータを変化させた場合の計算を行う。この結果、接触部の接線方向剛性が小さくなると接触部の固着領域が増大すること、最大速度・最大負荷が減少すること、滑りが減少するため摺動損失は減少し、摩擦駆動部効率は増大することを明らかにする。

キーワード

超音波モータ, 接触解析, 速度負荷特性, 効率

Ultrasonic motor, Contact analysis, T-N curve, Efficiency

Abstract: Contact condition including stick and slip between the rotor (or slider) and stator should be clarified to obtain the optimized design of the ultrasonic motors. If the stick/slip condition is well controlled, the performance of the motor is maximized and the wear at the contact interface is minimized. However, the stick/slip condition between the rotor/stator is not easily calculated because the analysis is usually made neglecting the stick condition. In this study, a simple method for solving the contact problem including stick and slip condition between the rotor/stator is proposed. By calculating the contact condition for some design parameters, the following results are obtained: When the tangential stiffness of the contact spring decrease, the stick region in the contact area increases, maximum velocity and torque of the rotor decrease, frictional loss power decrease, and the efficiency at the contact interface increase. Results are in good agreement with the detailed calculation of the stick/slip of the ultrasonic motor using finite element analysis.

1. 緒論

超音波モータは、1980年代に考案¹⁾されて以来、低速高トルク、高保持トルク、高制御性、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きた。しかし、摩擦駆動ゆえの低耐久性、入力パワーと振動パワーの間の非線形性など、解決されるべき課題も残されているため、カメラのオートフォーカス用²⁾などの特定用途を除く多くの場合において、マシプロダクションの対象となり得ていない。超音波モータの耐摩耗性向上、接触振動の非線形性に基づく設計困難性の克服のためには、振動子（ステータ）と移動子（ロータ、スライダ）の間の接触状態を定量的に把握するとともに、速度負荷特性、損失、効率などの基本性能把握法を確立する必要がある。

このため、進行波型超音波モータの移動子に設けられた金属製つばばねまたは樹脂摩擦材などの弾性要素を線形弾性要素にモデル化し、振動子と移動子の接触状態を電気等価回路で記述する^{3),4)}、あるいは機械的な力の釣り合い式で記述する⁵⁾ことによって、超音波モータの基本特性を把握する試みが行われてきた。これらの解析により、超音波モータの振動状態と駆動トルク、移動子速度、摺動損失パワー、効率などの関係を把握することが可能になった。しかし、これらの解析では、振動子と移動子の接触面は常にいずれかの方向に滑る(slip)と仮定されている。実際には接触面の一部には固着(stick)が生じており、この効果はモータの速度負荷特性や効率に大きく影響していると考えられる。このため、上述の解析^{3),4),5)}はモータの基本特性の定性的な理解のためには有効であるが、固着・すべりを含む実際の摩擦接触部の設計論を明らかにしたものではなかった。そこで、筆者ら^{6),7)}は、リング型超音波モータの動的接触状態を有限要素法を用いて詳細にモデル化し、接触面の固着・すべり、移動子つばばねの連続体としての特性、および移動子つばばねの慣性力を考慮した動的接触解析を行っ

た。この結果、超音波モータの動的接触状態を明らかにするとともに、駆動トルク、移動子速度、摺動損失パワー、摩擦駆動効率などのモータの基本特性を定量的に把握することができた。しかし、上述の解析は、モデルが複雑となるためモデルの構築に多大な時間を要する。また、接触状態を収束演算により求めるため、計算時間が多大であり、解析パラメータによっては解が発散することも多い。このため、この解析手法は、超音波モータの設計者が容易に使用できる簡便なツールとはなり得なかった。

これらの背景に鑑み、本研究では、まず、簡単なアルゴリズムで超音波モータ接触部の固着・すべりを考慮した接触解析を行う手法を提案する。表1に従来の解析法と本研究の特徴を示す。表より明らかなように、本手法は、移動子接触ばねの連続体としての特性および慣性の影響は考慮していないが、接触部の固着・すべり状態を把握できる簡便な手法である。次に、提案した手法を用いて設計変数を変えた場合の解析を行い、本手法の妥当性を示すとともに、接触部の設計法に関する考察を行う。

2. 解析手法

従来の、力の釣り合い式に基づく振動子・移動子の接触解析モデル⁵⁾を図-1に示す。振動子に励起された弾性進行波は - x 方向に進行するものとし、進行波一波長分を図示した。移動子表面の樹脂摩擦材や金属製つばばねは、法線方向（接触面に垂直な方向）には線形ばね特性を有し、接線方向（接触面に平行な方向）には変形しないと仮定する。移動子の法線方向に荷重を加えると、移動子は法線方向に正弦波状に変位した振動子の波頭部(x_1 x x_4)に沈み込むように接触（図(a)）する。単位長さ当たりの法線反力はその点の沈み込み量に比例（図(c)）するものとする。また、振動子の接線方向速度は正弦波状に変化し、移動子は一定の接線方向速度で x 方向に移動（図(b)）する。図(b)におい

て、 $x_2 < x < x_3$ なる位置では振動子の速度が移動子の速度よりも速いため、移動子は正方向に滑り、法線反力に動摩擦係数を掛けた値の接線反力が生じる。接触部両端 ($x_1 < x < x_2$, $x_3 < x < x_4$) では移動子の速度の方が速いため、移動子は負方向に滑り、負の接線反力が生じる。図(c)には動摩擦係数が0.5の場合を示した。単位長さ当たり接線反力を接触領域全体に渡って積分したものがモータの負荷(推力)である。したがって、振動子の振幅、移動子ばねのばね定数、移動子の速度を与えれば、振動子・移動子の接触状態および移動子の負荷(推力)が求められる。また、モータの速度負荷特性、摺動損失パワー、摩擦駆動効率(出力パワー/(摺動損失パワー+出力パワー))などを求めることができる。

以上の解析では、移動子の接線方向の剛性が無限大であると仮定されていたため、振動子と移動子の接触部は必ず滑る。しかし、接触部接線方向剛性が無限大であることはあり得ず、実際には接触部には局所滑り領域と固着領域が存在する⁹⁾。

本解析では、上記の解析手法を拡張するとともに、筆者らが提案した接触解析手法⁹⁾を修正することによって、振動子と移動子の接触部における固着を考慮した解析を行う。ある時刻における固着・滑り状態は過去の時刻の接触状態に依存するので、時間を離散化して1ステップ前の状態と現在の状態との関係を定式化する必要がある。これに対応して、空間的にも離散化を行う必要がある。このため、本研究では、図-2に模式的に示したモデルに基づいて解析を行う。まず、振動子に励起された進行波一長分をN分割する。このとき、振動子の移動子との接触面におけるx方向およびy方向変位は、それぞれ、

$$x^s(i,t) = -A_x \sin[2\pi\{ft + (i-1)/(N-1)\}], \quad (i=1 \sim N) \quad (1)$$

$$y^s(i,t) = -A_y \cos[2\pi\{ft + (i-1)/(N-1)\}], \quad (i=1 \sim N) \quad (2)$$

と表される。ここで、iは節点番号、tは時刻、fは周波数である。また、 A_x および A_y はそれぞれx方向およびy方向の振幅である。また、移動子基底部のx方向およびy方向位置をX、Yとする。移動子が一定速度Vでx方向に移動するとき、移動子基底部のx方向位置Xは、

$$X(t) = X_0 + Vt \quad (3)$$

と表される。ここで X_0 は移動子基底部の初期位置である。移動子には、長さが0で弾性定数がそれぞれ k_x および k_y の接線方向および法線方向ばねが直列に取り付けられているものとする。また、ばねのx方向およびy方向変形を $x(i,t)$ および $y(i,t)$ と置く。このとき、移動子接触ばね先端のx方向位置 $x^R(i,t)$ およびy方向位置 $y^R(i,t)$ は、

$$x^R(i,t) = X(t) + x(i,t) = X_0 + Vt + x(i,t) \quad (4)$$

$$y^R(i,t) = Y + y(i,t) \quad (5)$$

と表される。摩擦力はクーロンの法則に従うものとし、簡単のため動摩擦係数と静摩擦係数は等しい値 μ とする。

以上のような変数に対し、図-3に示したアルゴリズムに従って接触解析を行う。まず、時刻0(図-3a)における移動子ばねの変位を0と置くとともに振動子の変位を計算する

(b)。次に、時間ステップを t だけ進め(c)、その時刻における振動子の変位を計算する(d)。ここで、振動子と移動子が接触したか否かの判定を行う(e)。振動子の位置が移動子基底部の位置よりも上にある場合には、両者は接触すべきであるので、移動子ばねの法線方向変位 $y(i,t)$ および法線反力 $f_y(i,t)$ を求める(f)。非接触の場合には、移動子ばねの法線方向変位 $y(i,t)$ および法線反力 $f_y(i,t)$ は0である(g)。次に、接触した節点において振動子と移動子が固着しているか否かの判定を行う。まず、振動子上の節点と移動子上の節点が1ステップ前と同じ相対位置にあると仮定する(h)。すなわち、すべての接触する節点が固着していると仮定する。また、固着条件下で、移動子ばねの接線方向変位 $x(i,t)$ および接線反力 $f_x(i,t)$ を求める(h)。次に、計算した接線反力 $f_x(i,t)$ が固着条件を満たしているか否かを判定する(i)。すなわち、接線反力の絶対値が、法線反力に摩擦係数を掛けたものの絶対値を越えた場合には、クーロンの法則を満たすように接線反力を修正する(j)。また、移動子ばねの変位量も修正する(j)。接線反力の絶対値が法線反力に摩擦係数を掛けたものの絶対値よりも小さい場合には、その節点は滑らないので、最初の仮定(h)通り、振動子と移動子は固着する。以上で接触・非接触、固着・滑りの状態が求められたので、接線方向の合力(推力) $F_x(t)$ 、法線方向の合力(加圧力または荷重) $F_y(t)$ 、摺動損失パワー W_{fric} 、出力パワー W_{out} 、摩擦駆動効率 を求める。なお、 V_{rel} はある節点における振動子と移動子の相対速度である。最後に、接触振動がリミットサイクルに落ちついた定常状態に収束したか否かを判定する(m)。定常振動状態になっていなければ(c)に戻り計算を繰り返す。定常振動状態になった場合は計算を終了する。

本解析手法の特徴は以下の通りである。まず、時間と空間を離散化したことにより、固着・滑り状態を容易に計算できる。また、一般の接触問題⁹⁾と異なり、ある点の変形が他の点の変形に影響を及ぼさないため、接触・非接触、固着・滑り状態の収束演算が不要であり、計算時間が短い。このため、振動子の振幅、移動子のばね特性などが把握できれば、容易に超音波モータの接触特性を計算することができる。

3. 解析結果

まず、以下の考察に基づいて、移動子の接線方向および法線方向接触ばね定数 k_x 、 k_y の値を決定する。移動子に金属製つばばねを設ける場合には $k_x > k_y$ であり、円環型超音波モータの場合⁶⁾には k_x / k_y の値は1.0程度となる。一方、半無限平板に法線集中荷重を加えた場合の法線変位分布と接線集中荷重を加えた場合の接線変位分布とは等しい⁹⁾ のので、この場合には k_x / k_y は1であると考えられる。また、任意の等方性弾性体に垂直応力またはせん断応力を加えた場合の垂直ひずみとせん断ひずみの比は $1/(2(1+\nu))$ である。ここで ν はポアソン比であり、例えば $\nu = 0.3$ のとき、垂直ひずみとせん断ひずみの比は0.385となる。これら

より、移動子表面に樹脂摩擦材などの弾性部材を設ける場合には、 k_x / k_y は0.385 ~ 1 程度の値になると考えられる。以上の議論に鑑み、 k_x / k_y の値を0.1, 1, 10, 100 とした場合の解析を行った。また、超音波モータの基本特性を調べるために、移動子基底部の法線方向位置 Y および接線方向速度 V を変えた場合の計算を行った。なお、一般化のため結果は無次元化して示す。すなわち、変位を振動子の法線方向振幅 A_x で割った値、速度を振動子の接線方向速度振幅 $2 f A_x$ で割った値、反力を法線方向反力の最大値 $(f_y)_{max}$ で割った値、摺動損失パワーを振動子の接線方向速度振幅と最大負荷の積 $2 f A_x \mu F_y$ で割った値を、それぞれ用いる。

図-4に、 $Y=0$ のときの振動子・移動子の法線方向変位を示す。振動子と移動子は $y^s(i,t)$ ($Y=0$)となる位置 $(0.25 x / 0.75)$ で接触している。なお、振動子・移動子の法線方向変位分布は、 k_x / k_y および V の値を変えても変化しない。

図-5には $Y=0$, $N=100$ として k_x / k_y および V の値を変えたときの振動子と移動子の固着・滑り分布の変化を示す。図中-は非接触、 \square は滑り、 \square は固着を、それぞれ表す。図(a)を見ると、 k_x / k_y が大きいときには、固着領域が小さいことがわかる。また、固着・滑り分布は $x / = 0.5$ を境にほぼ左右対称に分布している。振動子の速度の方が移動子の速度より早い領域 (図中、2つの固着領域で区切られた中央の滑り領域) は、移動子の速度 V の増加とともに減少している。これは、 k_x / k_y が無限大であると仮定したことに相当する従来の解析の結果^{3),4),5)}と類似している。一方、図(b)では、固着領域の幅が多少増加するとともに、固着・滑り分布は左右非対称となっている。この結果は、振動子と移動子の固着およびある点の変位の他の点への伝播を考慮した有限要素解析結果^{6),7)}あるいは弾性係数の異なる2つのローラの接触解析結果⁸⁾と類似している。この場合にも、滑り領域は2つの固着領域によって分割されており、振動子の速度の方が移動子の速度より早い領域は移動子の速度 V の増加とともに減少している。図cのようにさらに k_x / k_y の値が小さくなると、固着領域はさらに増大し、接触開始側 ($0.25 x /$) ではほぼ全面が固着している。また、図dでは接触領域のほぼ全面が固着している。

以上のように、 k_x / k_y の値が異なると振動子・移動子の固着・滑り分布が大きく異なること、振動子・移動子の固着・滑り分布は移動子速度の変化とともに変化してゆくことが明らかになった。したがって、振動子・移動子の接触状態を解析する場合には、両者の固着を考慮した解析が不可欠であると言える。

次に、固着・滑り状態をより詳細に考察するために、 k_x / k_y および V の値が異なる場合の振動子・移動子の接線方向速度分布、法線・接線方向反力分布を見てゆく。

図-6には、 $k_x / k_y = 10$, $Y=0$, $F_x=0$ のときの法線・接線方向反力分布および振動子・移動子の接線方向速度分布を示す。図-5に示した結果と同様、接触開始側 ((i) ~ (ii))

では滑りが生じ、(ii) ~ (iii)では固着、(iii) ~ (iv)では滑り、(iv) ~ (v)では固着、(v) ~ (vi)では滑りが、順に生じている。 f_x の分布は、有限要素解析結果^{6),7)}と非常に良く似ている。このことより、本解析ではある点の変形の他の点への伝播を考慮していないけれども、接触部の固着・滑り分布を定量的に把握できているといえる。また、負荷 F_x は0であるので、接線方向反力 f_x の総和は0となる。移動子の速度分布は、移動子基底部の速度を中心に、接線方向反力に応じて変化している。

図-7には、 $k_x / k_y = 10$, $Y=0$ で、負荷が加わり移動子の速度が小さくなった場合の結果を示す。負荷が0の場合と同様に固着・滑りが交互に生じる分布となっていることがわかる。ただし、図-6よりも移動子の速度 V が減少しているため、振動子の速度の方が移動子の速度より早い中央の滑り領域が増大している。また、負荷が加わっているため、接線方向反力の総和が負荷に一致する。言い換えれば、移動子を送る方向の動摩擦力が増大することによって、移動子を駆動している。

図-8には、 $k_x / k_y = 1$, $Y=0$, $F_x=0$ のときの法線・接線方向反力分布および振動子・移動子の接線方向速度分布を示す。 k_x が小さいため、接触面上のすべての点の摩擦力は最大静止摩擦力 (図中波線) に到達せず、すべての点が固着している。

図-9には、 $k_x / k_y = 1$, $Y=0$ で、移動子の速度が小さく負荷が加わっている場合の結果を示す。負荷が0の場合とは異なり、接触開始側では固着が、接触終了側では滑りが生じている。移動子の速度分布は、接線方向反力分布に応じて変化している。

以上のように、法線・接線方向反力分布および振動子・移動子の接線方向速度分布は、移動子の接線方向弾性 k_x の変化に応じて大きく変化することが明らかになった。

次に、 k_x / k_y を変えた場合のモータの基本性能を図-10に示す。 $Y=0$ とする。(a)の速度負荷特性を見ると、 k_x が小さくなってゆくに連れて、最大速度および最大負荷が減少して行くことがわかる。特に $k_x / k_y = 0.1$ の場合には最大負荷が非常に小さくなっている。このことは、移動子接触部に k_x の大きい金属製つばねまたは k_x の小さい樹脂摩擦材を用いた実際の超音波モータの性能を比較すると、 k_y が等しくなるように設計されていても、金属製つばねを用いたモータの方が最大速度および最大負荷が大きくなることに対応している。以上のように、接線方向剛性 k_x を考慮していなかった従来の解析では得られなかった新たな知見を、本解析では得ることができた。

(b)の摺動損失も、 k_x / k_y の変化とともに大きく変化してゆく。(c)の摩擦駆動効率は、 $k_x / k_y = 1$ のときには F_x が小さくなるに連れて1に漸近し、 $k_x / k_y = 0.1$ のときには F_x が小さいと1になっている。このことから、 k_x / k_y が小さいほど効率が向上すると考えて良いわけではない。確かに k_x / k_y が小さいときには滑り領域が減少し、摺動損失が減少して摩擦駆動部効率は1に近づくけれども、一

般には樹脂などの k_x / k_y が小さい物体では内部摩擦による内部減衰が大きく、内部摩擦損失が生じるため、トータルの効率が向上するとは限らないからである。したがって、接線方向剛性 k_x 、速度負荷特性、効率、内部摩擦などを考慮して、最適な接触部構造を考える必要のあることがわかる。

次に、移動子の振動子波頭への沈み込み量を変えた場合の結果を示す。図-11は沈み込み量が小さい ($Y=0.5$) 場合の結果である。従来の解析結果³⁾⁻⁷⁾と同様、沈み込み量が減少すると、速度および効率が増大し、摺動損失は減少している。この現象は実際の超音波モータの挙動と一致している。また、 $Y=0$ の場合と同様、 k_x / k_y が小さいほど、最大速度、最大負荷は減少し、 F_x が小さいときの摩擦駆動効率は増大している。

以上のように、筆者らが以前行った有限要素解析^{6),7)}よりも遙かに単純なアルゴリズムによって超音波モータ接触部の固着・滑りを考慮した接触解析を行うことができた。また、解析の結果、接触部の接線方向剛性 k_x や他の物理パラメータは接触部の固着・滑り分布および超音波モータの性能に大きく影響することを明らかにした。

本論文では示さなかったが、本解析によれば、静止摩擦係数と動摩擦係数の値が異なる場合、移動子の剛性に局所的な大小がある場合、振動子の振動波形が変化した場合、定在波型超音波モータの場合など、設計パラメータをさらに変化させた解析も行うことができる。一方、本解析手法を、ある点の変位が他の点の変位に影響する連続体特性を考慮した解析、弾性体の慣性や内部減衰の影響を考慮した解析に拡張することも可能であると考えられる。これらの拡張は今後の課題である。

4. 結論

時間・空間を離散化することにより超音波モータ接触部の固着・滑りを考慮した接触解析を行う簡便な方法を提案した。また、本手法に基づいて物理パラメータを変化させた場合の計算を行った。この結果、接触部の接線方向剛性が小さくなると接触部の固着領域が増大すること、最大速度・最大負荷が減少すること、滑りが減少するため摺動損失は減少し、摩擦駆動部効率は増大することを明らかにした。

本研究により、移動子の接線方向剛性が超音波モータの基本特性に及ぼす影響は明らかになった。本手法を用いて実際のモータの接触部構造を設計し、モータの性能を最適化することは今後の課題である。

文 献

- 1) 指田年生, "超音波振動を利用したモーター装置," 特開昭55-125052, (1980)
- 2) 細江三弥, "超音波モータの自動焦点レンズへの応用," 東北大通研シンポジウム資料, pp.117 (1989)
- 3) 黒澤実, "超音波モータの基礎的研究," 東京工業大学

学位論文 (1989)

- 4) 平田拓, "進行波型超音波モータの設計に関する研究," 東京工業大学学位論文 (1993)
- 5) 前野隆司, "超音波モータに関する基礎的研究," 東京工業大学学位論文 (1993)
- 6) T. Maeno, T. Tsukimoto and A. Miyake, "Finite Element Analysis of the Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, No. 6, 668-674 (1992)
- 7) T. Maeno and D. B. Bogy, "FE Analysis and LDA Measurement of the Dynamic Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor," Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol. 115, No. 4, 625-631 (1993)
- 8) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1985)
- 9) 前野隆司, 山崎信寿, 立川忠則, "波動伝播に基づく移動機構の研究(第一報、ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション)," 日本機械学会論文集62-603, C, pp. 4264-4271 (1996).

前野隆司

1984年東工大機械卒。1986年東工大大学院修士課程修了、同年キャノン(株)入社、1991年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員、1995年慶大機械工学科専任講師、現在に至る。博士(工学)。主にアクチュエータ、センサ、ロボットの研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会などの会員。

図表:

表-1 超音波モータの接触特性の解析法

図-1 従来の振動子・移動子接触解析モデル

図-2 固着・滑りを考慮した解析モデルの模式図

図-3 接触解析のフローチャート

図-4 振動子・移動子の法線方向変位

図-5 接触/非接触, 固着/滑りの分布 ($Y=0, N=100$)

図-6 振動子・移動子の接触特性 ($k_x/k_y=10, Y=0, 0, F_x=0$)

図-7 振動子・移動子の接触特性 ($k_x/k_y=10, Y=0, V / 2p f Ax=0.4$)

図-8 振動子・移動子の接触特性 ($k_x/k_y=1, Y=0, F_x=0$)

図-9 振動子・移動子の接触特性 ($k_x/k_y=1, Y=0, V / 2p f Ax=0.4$)

図-10 モータの基本特性 ($Y=0$)

図-11 モータの基本特性 ($Y=0.5$)