超音波モータの動的接触挙動に関する研究

(駆動特性に及ぼす各種パラメータの影響)

A Fundamental Study on Dynamic Contact Behavior of Ultrasonic Motor

(Effects of Parameters on the Driving Characteristics)

○ 正 中山 智了 (福井工大) 大西 隆文 (福井工大)
 正 山下 清隆 (福井工大) 高塚 公郎 (福井工大)
 阿久戸 庸夫 (ミツバ)

Tomoaki NAKAYAMA, Fukui University of Technology, Fukui 910-8505

Key Words: Contact Problem, Finite Element Method, Rotary Machinery, Ultrasonic Motor, Incremental Theory.

1. はじめに

超音波モータは摩擦を利用した駆動機構をもつアクチュエータであり、低速高トルク、高制御性、高保持トルク、静粛性など優れた特徴を有するが、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、ロータ下面に接着されたライナーとそれに接触するステータとの間の摩擦力によるものであり、超音波モータの耐久性に大きな影響を及ぼすライナーの摩耗は、接触面の面圧およびすべり速度に大きく依存すると考えられる。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[1, 2, 3]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。

著者らは、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た[4]。さらに、この手法に弾塑性解析の一般的な手法である増分理論[5]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の解析手法を開発した。また、この新たに開発した手法を用いて、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円周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[4]。

本研究は、この手法に再び増分理論を適用し、超音波モータの動的接触挙動の解析手法を提案するとともに、ステータとロータ間の接触率および最大摩擦係数などの各種パラメータがその駆動特性に及ぼす影響を明らかにした。

2. 解析モデルと解析手順

2.1 解析モデル

図1に示すように、剛体として取り扱うステータ上面に接触し弾性変形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。

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

ここで、 y_0 はライナー下面とステータ上面間の平均距離である。また、 a 、 k 、 x 、 ω および t は、それぞれ、ステータの振幅、定数($k = 2\pi/\lambda$ 、ここで λ はステータ中立面の進行波の1波長 $\lambda = 2\pi r/n$ 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)、円周方向(x 方向)の座標、ステータの角振動数および時間である。本研究では、 $a = 2 \mu\text{m}$ 、 $r = 30\text{mm}$ 、 $n = 9$ とした。

Fig. 1: Positions of a liner and a stator

Fig. 2: Dimensions and element division of a liner

本研究では、ライナーのヤング率 E が $E = 900\text{MPa}$ 、ポアソン比 ν が $\nu = 0.45$ の場合について解析した。本解析は前報[4]の解析を拡張したロータが回転している場合の解析であるため、ライナー変形の y 軸に関する対称性は成立しない。したがって、ライナーの解析対象領域としては、 x 方向長さ L_x を前報の2倍の1波長($L_x = \lambda = 2\pi r/n = 20.94\text{mm}$)、 y 方向長さ L_y を前報と同じくライナーの厚さ($L_y = t_l = 0.2\text{mm}$)とした。図2に示すようにこの対象領域を、 x 方向および y 方向にそれぞれ100等分および4等分し、全節点数が505個である400個の四角形領域に分割した。全体の剛性マトリックスの組立てには、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、これらの平均の剛性マトリックスを用いた。

2.2 解析手順

本研究のロータ回転時の解析における初期値には、前報[4]のステータの y 方向各位置 y_0 に対する非回転時の接触状態の解析結果を用いた。この初期値から、時間の経過と共に変化する

るステータの変形過程を，増分理論を適用した有限要素法により以下の手順で解析した．

図 1 に示すように，ステータ中立面の進行波 y_s は次式で表すことができる．

$$y_s = a \cos(kx - \omega t) - y_0 - \frac{h_s}{2} \quad (2)$$

ここで， h_s はステータの厚さであり，本研究では $h_s = 6.2\text{mm}$ とした．上式より，進行波が要素の x 方向長さ Δx だけ進む時間 Δt はつぎのように求められる．

$$\Delta t = k\Delta x / \omega \quad (3)$$

本研究では，ステータの振動数 f を $f=40\text{kHz}$ としたため，角振動数 ω には $\omega = 8\pi \times 10^4 \text{rad/s}$ ，式 (3) の k は $k = 2\pi/\lambda = 0.3\text{mm}^{-1}$ である．

はじめに，この Δt 間に対する節点力（接触面の押し付け力および摩擦力）の増分と節点変位（ライナーの変形）の増分を有限要素法により解析する．つぎに，これらの結果を $t = t_0 = 0$ （前報 [4] で求めたステータの y 方向各位置 y_0 に対する非回転時の接触状態）における節点外力および節点変位に加えて， Δt 後（ $t = t_1 = t_0 + \Delta t = \Delta t$ ）の節点外力および節点変位を求める．このようにして Δt 後の節点外力および節点変位を求め時間 $t = t_j$ における節点外力および節点変位が時間 $t = t_{j-1}$ における同じステータ位置に対する値と同じになるまでこの手順を繰り返し，非接触領域，滑り接触領域および固着接触領域が共存する領域の定常状態の動的接触挙動を解析した．ステータ表面の x 方向速度 V_s は，式 (2) よりつぎのように求められる．

$$V_s = -\frac{h_s k a \omega}{2} \cos kx \quad (4)$$

ライナー下面の x 方向速度 V_l は，ライナーがロータに貼り付けられているため，ロータの速度 V_r と同じであり， $V_l = V_r = \pi r N_r / 30$ と与えられる．ここで， N_r はロータの回転数である．固着接触節点 i に対する Δt 間における x 方向変位増分 Δu_i は，上式の V_l および固着接触節点 i に対応するステータ表面の x 方向速度を $V_{s,i}$ を用いて，つぎのように求められる．

$$\Delta u_i = (V_{s,i} - V_l) \Delta t \quad (5)$$

解析において固着節点 i に対する Δt 間の x 方向変位増分 Δu_i には，上式で求められる値を用いた．ただし，解析の結果，固着と仮定した節点の Δt 後の摩擦力に矛盾を生じる（節点 i における x 方向および y 方向外力を X_i および Y_i とすると，摩擦力 $|X_i|$ が最大摩擦係数 μ_{max} より求められる最大摩擦力 $|\mu_{max} Y_i|$ より大きくなる）場合には， Δu_i を未知とする滑り接触節点の条件（ $X_i = \pm \mu_{max} Y_i$ ）を用いて再度解析した．

接触節点 i に対する Δt 間の y 方向変位増分 Δv_i は，節点 i および節点 $i+1$ の 2 節点に対応するステータ上面の y 方向の位置の差とした．ただし， Δt 後に非接触となる節点 i に対しては， Δv_i を未知とし， Δt 後に $Y_i = 0$ となる y 方向外力増分 ΔY_i を与えて解析した．

3. 数値計算例

図 3 にステータとライナな接触率 r_c が $r_c=25\%$ で最大摩擦係数 μ_{max} が $\mu_{max}=0.1$ および 0.2 の場合についての駆動特性を示す．同図より $\mu_{max}=0.1$ の場合には， N_r の低下に伴い接触節点が全て滑り接触節点となるため駆動トルクはやがて一定となる． $\mu_{max}=0.2$ の場合には， N_r の低下に伴い滑り接触節点は増加するが $N_r=0$ でも固着となる接触節点が存在し N_r の減少に伴い駆動トルクは増加する．

図 4 に μ_{max} が $\mu_{max}=0.2$ で r_c が $r_c=25$ および 50% の場合について駆動特性を示す．同図より， r_c が増加すると最大駆動トルクが増加していることが分かる．

Fig. 3: Driving characteristics ($r_c=25\%$, $\Delta: \mu_{max}=0.1$
○: $\mu_{max}=0.2$)

Fig. 4: Driving characteristics ($\mu_{max}=0.2\%$, $\Delta: r_c=50\%$
○: $r_c=25\%$)

4. おわりに

本研究では，従来の静的接触挙動に対する解析手法を拡張して，超音波モータの駆動メカニズムの解析手法を開発した．また，この手法により最大摩擦係数およびステータとロータの接触率の影響を調べた．

- (1) 接触領域が全領域の半分の場合では，ロータの回転数の変化に対する駆動トルクの変化はかなり直線的になる．
- (2) 低速回転でも高トルクが必要なときは接触率の大きな超音波モータを，低トルクでも高速回転が必要なときは接触率の小さな超音波モータを用いることが好ましい．

参考文献

1. 黒沢実，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.
2. 前野隆司，“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）.
3. Zharii.O.H., “Adhesive Contact between the Surface Wave and a Rigid Strip”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.62, No.2（1995），pp.368-372.
4. 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非線形接触挙動”，福井工業大学研究紀要，No.42(2012)，pp.180-187.
5. 例えば，高塚公郎，“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.