有限要素法による超音波モータのステータの振動解析*

坂田 勝^{*1}, 木村 康 治^{*1}, 岸本 喜久雄^{*1}
郭 士 傑^{*2}, 箕 輪 智 夫^{*3}Vibration Analysis of Stator of Ultrasonic Motor
by Using Finite Element MethodMasaru SAKATA, Koji KIMURA, Kikuo KISHIMOTO,
Shijie GUO, and Tomoo MINOWA

A finite element program is developed for analyzing vibration of piezoelectric structures. The validity of the program is confirmed by comparing the computed results with those of an experiment conducted on a piezoelectric unimorph cantilever beam. The vibration analysis of the stator of an ultrasonic motor is carried out by employing the program, and the frequency response, the characteristics of the travelling wave, and the trajectory of a particle on the surface of the stator are computed. It is shown that the surface shape of the stator plays an important role in the efficiency of an ultrasonic motor.

Key Words: Vibration, Ultrasonic Motor, Travelling Wave, Piezoelectricity, Finite Element Method

1. 結 言

近年、ロボットやマニピュレータ等で要求される低速高トルク、小形、軽量、高制御性アクチュエータとして、超音波モータが注目されている。超音波モータは、圧電素子の高周波振動を利用した摩擦駆動形のモータで、上記のほかに、無磁化、無騒音等の利点を持っている。1973年前後、Barth⁽¹⁾とLavrinenco⁽²⁾により、超音波モータのアイデアが報告された。その後、実用化のための研究開発は急速に進められている。しかしながら、現状においては、理論的・基礎的研究が少なく、未解明な点が多く残されている。

本研究では、進行波回転形超音波モータ(以下、超音波モータと呼ぶ)の性能向上を図るとともに、超音波モータの合理的設計法を確立するための基礎的資料を提供することを目的として、圧電現象解析用有限要素プログラムを開発した。また、圧電体と弾性体からなる二層ばりの静・動的有限要素解析および実験を行い、

両者を比較して、プログラムの有効性を検証した。さらに、このプログラムを用いて、超音波モータのステータの振動解析を行い、ステータの分極数と励振振動数、摩擦表面の形状と変位特性等について検討した。

2. 超音波モータの構成と作動原理

2・1 構成 図1に超音波モータ⁽³⁾の構成の断面図を示す。超音波モータはステータとロータによって構成され、ステータは励振用の圧電体と弾性体から構成される。弾性体に接着した圧電体に高周波電圧を与え、ステータ全体に高周波の進行波を励起させると、ステータに圧着したロータは摩擦力で回転する。

2・2 作動原理 図2に超音波モータの作動原理を示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。弾性体の θ - Z 面(θ は円周方向座標、 Z は軸方向座標である)に横振動の進行波が伝ばすると、その表面粒子は Z 方向の軸 $2B$ 、 θ 方向の軸 $2A$ の円軌跡を描く。円の頂点において速度成分は θ 方向のみであり、頂点の速度は $2\pi fA$ である。ここで、 f は振動数(Hz)を表す。

弾性体の表面に動体を圧着すると、動体と弾性体の相互の摩擦力によって、動体は波の伝ば方向と逆の方向に移動する。進行波の発生については、次式

$$w = B \cos(n\theta) \cos \omega t$$

*平成元年11月10日 機械力学講演会において講演、原稿受付 平成元年5月23日。

*¹ 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*² 学生員、東京工業大学大学院。

*³ 東京工業大学大学院。

$$+ B \cos\left(n\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ = B \cos(\omega t - n\theta) \dots\dots\dots (1)$$

からわかるように、ステータ円環上に、時間的位相と空間的位相がそれぞれ $\pi/2$ ずつずれている二つの定在波を重ね合わせることによって進行波を合成することができる。ここで、 w は軸方向の変位、 n は波数、また、 $\omega = 2\pi f$ である。

3. 圧電現象の有限要素解析

3.1 圧電現象の構成方程式 圧電現象が断熱的に行われると仮定すると、圧電体の電氣的／機械的性質を次の圧電方程式により表すことができる⁽⁶⁾。

$$\begin{cases} \{T\} = [C^E]\{S\} - [e]^t\{E\} \\ \{D\} = [e]^t\{S\} + [\epsilon^S]\{E\} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T 、 S 、 D 、 E はそれぞれ応力、ひずみ、電気変位、電界を表すベクトル、また $[C^E]$ は電界一定のときの弾性定数マトリックス、 $[\epsilon^S]$ はひずみ一定のときの誘電定数マトリックス、 $[e]$ は圧電 e 定数マトリックスであり、上付添字 t は転置を表す。

3.2 有限要素法

3.2.1 仮想仕事の原理 圧電現象における仮想仕事密度は次式によって定義される⁽⁷⁾。

$$\delta w = \{\delta u\}^t \{f\} - \delta \phi \cdot q \dots\dots\dots (3)$$

図 1 超音波モータの構成の断面図

図 2 超音波モータの作動原理

ここで、 $\{u\}$ は変位、 ϕ は電気ポテンシャル、 $\{f\}$ は力密度、 q は電荷密度を表す。式(3)は圧電現象の有限要素解析の基礎となる。また、電気量と力学量の間には表1に示す対応関係があるので、変位と電気ポテンシャルを一般化変位、応力と電気変位を一般化応力と定義することによって、簡便な有限要素法定式化を行うことができる。

一般化変位と一般化力密度：

$$\{\tilde{\phi}\} = \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix}, \{\tilde{f}\} = \begin{Bmatrix} f \\ -q \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

一般化ひずみと一般化応力：

$$\{\tilde{S}\} = \begin{Bmatrix} S \\ -E \end{Bmatrix}, \{\tilde{T}\} = \begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

式(4)より式(3)を次のように一般化できる。

$$\delta w = \{\delta \tilde{\phi}\}^t \{\tilde{f}\} \dots\dots\dots (6)$$

また、式(5)より式(2)を

$$\{\tilde{T}\} = [\tilde{C}]\{\tilde{S}\} \dots\dots\dots (7)$$

と一般化できる。ここで、 $[\tilde{C}]$ は一般化定数マトリックスで、次式で与えられる。

$$[\tilde{C}] = \begin{bmatrix} [C]^E & [e]^t \\ [e] & -[\epsilon^S] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

減衰を無視し、圧電体の内部には体積電荷と集中心電荷がなく、体積力と集中力も存在しないと仮定すると、仮想仕事の原理より

$$\int_v \{\delta \tilde{S}\}^t \{\tilde{T}\} dv + \int_v \rho \{\delta \tilde{\phi}\}^t [L] \{\dot{\tilde{\phi}}\} dv \\ - \int_{s_f} \{\delta \tilde{\phi}\}^t \{\tilde{f}_s\} ds = 0 \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。ここで、 ρ は質量密度、 $[L]$ は一般化変位のうち変位に関する対角成分が1で他の成分は零の正方マトリックス、 $\{\tilde{f}_s\}$ は一般化表面力である、 s_f は物体の表面上で一般化表面力の指定された領域、また“ $\cdot$ ”は時間に対する微分を表す。

3.2.2 運動方程式 有限要素法の定式化より、系の運動方程式が得られる。

$$[\tilde{M}]\{\dot{\tilde{\delta}}\} + [\tilde{K}]\{\tilde{\delta}\} = \{\tilde{F}\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $[\tilde{M}]$ と $[\tilde{K}]$ は一般化質量と剛性マトリックスである。また、 $\{\tilde{\delta}\}$ と $\{\tilde{F}\}$ は一般化節点変位と一般化等

表 1 電気量と力学量の対応

Mechanical	Electrical
Force density f	Charge density q
Displacement u	Potential ϕ
Stress T	Flux D
Strain S	Electric field E

価節点力を表す。電気量を無視すれば、式(10)は弾性体の運動方程式でもある。

3・2・3 平面三角形要素 本研究では、図3に示す平面三角形定ひずみ要素を用いた。図中、 u_i, w_i と ϕ_i はそれぞれ節点 i の X, Z 方向の変位と電気ポテンシャル、 F_i^x, F_i^z と Q_i はそれぞれ節点 i の X, Z 方向の等価節点力と等価節点電荷を表す。要素 e の一般化節点変位ベクトルと一般化等価節点力ベクトルは次式で与えられる。

$$\{\tilde{\delta}\}_e = \{u_i, w_i, \phi_i, \dots, u_k, w_k, \phi_k\}^t \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\{\tilde{F}\}_e = \{F_i^x, F_i^z, -Q_i, \dots, F_k^x, F_k^z, -Q_k\}^t \quad (12)$$

これらを用いて、要素中の任意の一点における一般化変位と一般化力密度を次のように表す。

$$\{\tilde{\phi}\}_e = [H]\{\tilde{\delta}\}_e \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\{\tilde{f}\}_e = [H]\{\tilde{F}\}_e \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $[H]$ は次式で表される内挿関数である。

$$H = [h_i, h_j, h_k] \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、

$$h_i = (a_i + b_i x + c_i z) / (2\Delta) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$a_i = x_j z_k - x_k z_j$$

$$b_i = z_j - z_k$$

$$c_i = x_k - x_j$$

他の係数は添字 i, j, k の循環的置換によって得られる。また、 I は 3×3 の単位マトリックス、 Δ は三角形要素の面積を表す。

図3 平面三角形要素

図4 実験装置の概略

4. はりモデルにおける有限要素解と実験との比較

超音波モータは複雑な構造を有するもので、実験が困難である。ここでは、プログラムの有効性を確かめるために、弾性体に圧電体を接着した二層ばりの有限要素解析を行い、実験と比較した。実際、このような二層ばりは工業的に超音波の発射源、圧電アクチュエータの素子などとして広く使われている。

4・1 モデルおよび実験 図4に実験装置の概略を示す。圧電体はあらかじめ厚み方向に分極されており、その両面に電極としてアルミニウムを蒸着してある。弾性体には黄銅を用い、接着剤には導電性接着剤を使用した。圧電体と弾性体の定数をそれぞれ表2と表3に示す。はりモデルを片持支持とするために、アクリル板を介してバイスで固定した。アクリル板ははりの両面の短絡を防ぐための絶縁の目的をも果たしている。また、入力電圧を印加するために、はりの固定端近くにリード線を接続した。

はりの静的曲げ変位、自由振動および変位の周波数応答を渦電流式非接触変位計を用いて測定した。さらに、自由振動波形から、はりの固有振動数と減衰比を求めた。

4・2 有限要素解析の結果と実験値の比較 本節では、はりの静的たわみ変位、固有振動数および周波数応答について有限要素解と実験値を比較する。なお、有限要素解析には平面ひずみを仮定した。要素数は

表2 圧電体の定数

	Polarization direction	Normal to polarization direction
Young's modulus	52 GPa	59 GPa
Poisson's ratio	0.34	0.34
Shear modulus	21 GPa	
Piezoelectric e constants	$e_{31} = -9.96 \text{ C/m}^2$, $e_{33} = 20.39 \text{ C/m}^2$ $e_{16} = 15.75 \text{ C/m}^2$	
Dielectric constants	$\epsilon_{11}^S = 1762 \epsilon_0$, $\epsilon_{33}^S = 1571 \epsilon_0$	
Mass density	7400 Kg/m ³	

表3 黄銅の定数

Young's modulus	Poisson's ratio	mass density
100.6 GPa	0.35	8560 Kg/m ³

3 000である。

4・2・1 静的たわみ変位 図5に15 Vの直流電圧を印加したときの静的たわみ変位のX軸(長さ)方向変化を示す。●印は実験値、実線は有限要素解、破線ははり理論による近似解である⁽⁸⁾。実験値と有限要素解はほぼ一致している。はり理論による近似解はやや低めである。これは、はりの厚み方向の圧電効果を考えていないためである。

4・2・2 固有振動数 はりは電圧で励振されるので、強制振動の共振振動数は電極短絡の場合の固有振動数と一致する。表4に、電極を短絡したときの3次までの固有振動数の実験値と有限要素解を示す。両者は7%前後の誤差で一致する。

4・2・3 周波数応答 図6に、片振幅5V_pの正弦波電圧で励振するときの一次共振点近傍の曲げ変位の周波数応答を示す。横軸は一次固有振動数によって無次元化された振動数である。ただし、固有振動数の実験値と計算値とは7%程度の誤差があるので、振動数の無次元化に際しては、それぞれ固有振動数の実験値と計算値を用いた。また、縦軸ははりの固定端より45 mmの点の曲げ変位の振幅値であり、実線は有限要素解、○印は実験値を表す。

図中の減衰比 $\zeta=0.0085$ は、図7に示す自由振動波形から同定した値である。周波数応答を測定する際、はりは外部電源で励振されるので、減衰比に対する励振電源の内部抵抗の影響を考慮する必要がある。図7

表4 固有振動数の実験値と計算値

Mode	Natural Frequency (Hz)		Error
	Experiment	FEM	
1	312.5	336.99	7.3%
2	1935.0	2101.70	7.9%
3	5350.0	5838.11	8.4%

図5 静的たわみ変位のX軸方向変化

は、励振電源の内部抵抗と同量の抵抗を付加したはりを軽く打撃して得られる一次自由振動波形である。

図6より、実験値と有限要素解はよく一致することがわかる。共振点において、実験値は計算値よりやや小さいが、これは非線形による影響と考えられる。以上、実験値と有限要素解が良く一致することを示し、本研究で開発したプログラムの有効性を明らかにした。

5. 超音波モータのステータの振動解析

本章では、前章において有効性を検証した有限要素プログラムを用いて、超音波モータのステータの振動解析を行う。

5・1 ステータの解析モデル 図8に、超音波モータのステータのモデルを示す。弾性体と圧電体の材料をそれぞれ黄銅、PZTと想定した。その定数を表3と表5に示す。圧電体は予め厚み方向に分極されている。分極数は8対である。図中、“+”と“-”は分極の方向を表す。このような分極配置で、圧電体の左と右側をそれぞれ正弦波と余弦波の電圧で励振することにより、ステータ全体に進行波が励起されることは既に第2章で述べた。弾性体の表面に切込みが作成されて

図6 一次共振点近傍の周波数応答

図7 一次自由振動波形

おり、解析モデルの切込み数は 64 である。また、ステータは圧電体側で均一にばねで支持されていると仮定した(図 2 を参照)。単位長さ当たりの軸および円周方向のばね定数を、それぞれ、 $1 \times 10^6 (\text{N/m}^2)$ 、 $2 \times 10^6 (\text{N/m}^2)$ と想定した。

一方、有限要素解析では、円環状のステータの曲率を無視し、はりのように展開して二次元解析(平面ひずみ)を行った。ただし、はりの両端の変位および電気ポテンシャルが同一となる境界条件を与えた。曲率を無視することによる誤差は、低次モードに対して大きい。モードの次数が高くなるにつれて小さくなる。超音波モータは高次モードを利用するので、この近似は合理的と考えられる⁽⁴⁾⁽⁹⁾。

5.2 ステータの振動のシミュレーション 有限要素解析における要素分割の一部を図 9 に示す。総要素数は 2816 である。以下に結果を示すとともに検討を行う。

5.2.1 自由振動 表 6 に、電極短絡の場合の 9 次までの固有振動数を示す。また、図 10 に、一例として、8 次の固有モードを示す。固有モードは対称モードと反対称モードからなり、対称モードと反対称モードは位相的に波長/4 ($\pi/2$ に相当)ずれている。このことは、円環上に進行波を励起できることを意味する。

図 8 ステータの形状と圧電体の分極配置

5.2.2 周波数応答 現状では減衰特性を同定するのは困難なので、他の実験結果等を参照して減衰比を 0.01 と仮定する。

図 11 に、電極間の動アドミタンスの周波数応答を示す。横軸は振動数、縦軸は動アドミタンスの振幅値である。動アドミタンスは 8 次モードで最大値をとる。これは、8 次の固有振動数 f_8 で励振すると、超音波モータの電気機械変換効率が最も良いことを意味する。

図 12 に、ステータの表面変位の周波数応答を示す。横軸は振動数、縦軸は変位を表す。実線と破線はそれぞれステータの円周方向と軸方向の変位を表す。両方向ともに変位は、ステータの平均半径 R (内半径と外半径の平均値) および入力電圧の片振幅値 V_p によって、次式のように規格化されている。

$$\bar{A} = A / (R \cdot V_p) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\bar{B} = B / (R \cdot V_p) \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 A 、 B はそれぞれ円周方向と軸方向の変位の振幅値である。 $\bar{A}$ と $\bar{B}$ は入力に無関係で、ステータの形状、寸法および材質のみに依存する。また変位の周波数応答は 7 次と 8 次モードで大きな値を示す。

5.2.3 ステータ表面変位に関する考察 ステータの表面粒子の軌跡を調べるために、8 次の固有振動数 f_8 で励振したときのステータ全体の変形の時間的变化を半周期(周期 3.521×10^{-5} 秒)にわたって計算した。図 13 にステータの変形を、図 14 にステータ表面上にある一点の軌跡を示す。進行波の伝ばとステータの表面粒子のだ円運動が確認できる。だ円の水平方向の半軸と上下方向の半軸はそれぞれステータの表面粒子の円周方向と軸方向の変位の振幅値である。

次に、ステータの表面変位(だ円運動)と、モータの回転速度および効率との関係について検討する。

表 5 PZT の定数

	Polarization direction	Normal to polarization direction
Young's modulus	64.1 GPa	81.2 GPa
Poisson's ratio	0.34	0.33
Shear modulus	25.6 GPa	
Piezoelectric e constants	$e_{31} = -5.2 \text{ C/m}^2$, $e_{33} = 15.1 \text{ C/m}^2$ $e_{16} = 12.7 \text{ C/m}^2$	
Dielectric constants	$\epsilon_{11}^S = 730 \epsilon_0$, $\epsilon_{33}^S = 635 \epsilon_0$	
Mass density	7600 kg/m ³	
Young's modulus in unpolarized area : 79.0 GPa Poisson's ratio in unpolarized area : 0.32		

(1) 回転速度 超音波モータの無滑り回転速度 Ω (rpm)は、規格化された円周方向変位 $\bar{A}$ と入力電圧の片振幅値 V_p によって次式で表される。

$$\Omega = 60 \cdot f \cdot \bar{A} \cdot V_p \quad \dots\dots\dots (19)$$

図12より、8次モードの $\bar{A}$ は最も大きな値を示す。また、明らかに8次の固有振動数 f_8 は7次の固有振動数 f_7 より高い。したがって、式(19)より、本ステータモデルについては、8次の固有振動数 f_8 で励振することによって最も高い回転速度が得られる。

(2) ステータとロータの間の摩擦効率 超音波

モータは摩擦駆動形のモータで、そのステータとロータの間の摩擦効率は、電気機械変換効率が100%、軸受の損失を無視するときの超音波モータの出力と入力との比で定義する。摩擦効率は定性的に $\bar{A}$ と $\bar{B}$ の比

$$x = \bar{A}/\bar{B} \quad \dots\dots\dots (20)$$

に依存すると考えられる。図15に $x=1$ と $x=1/3$ のときのステータとロータの接触状況を示す。 x の小さいモータは、ステータとロータの接触が始まる領域で、粒子速度の垂直成分が大きく、両者の間に滑りが多く生じるため、モータの効率は低い。これに対して、 x の大きいモータは摩擦効率は高い。

図12に示した周波数応答において、8次モードの x は7次モードの x より大きいので、8次の固有振動数 f_8 で励振したときの方が、ステータとロータの間で、より高い摩擦効率が得られる。

表6 ステータの9次までの固有振動数

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
0	28.96	5	11.77×10^3
0	40.95	6	16.66×10^3
1	491.79	7	22.22×10^3
2	1.95×10^3	8	28.40×10^3
3	4.36×10^3	9	35.12×10^3
4	7.65×10^3

図9 要素分割の一部

図10 ステータの8次固有振動モード

図11 動アドミタンスの周波数応答

図12 変位の周波数応答

図13 進行波の伝ば

図14 ステータ表面粒子の軌跡

以上の結果から、励振振動数がステータの分極数(8)と同じ次数の固有振動数と一致するとき、より高い電気機械変換効率と摩擦効率が得られることが明らかになった。

5.3 ステータの表面形状と変位特性の関係 本節では、ステータの切込み形状、特に切込み深さがステータの振動特性およびモータの特性に及ぼす影響を検討する。

5.3.1 切込み状ステータと平坦状ステータの比較 両者を比較するために、図16に示す三つのステータのモデルについて解析を行った。モデルIは切込みのあるステータ、モデルII, IIIは平坦なステータで、厚さはそれぞれモデルIの切込み頂部と底部に相当する。有限要素解析に用いる要素数はそれぞれ2816, 3072, 2304である。8次の固有振動数を表7に示す。図17に、三つのモデルの8次共振点近傍の変位の周波数応答を示す。横軸はそれぞれの8次の固有振動数で無次元化された振動数、縦軸は $\bar{A}$ と $\bar{B}$ である。また、 κ

の値を図中に記した。ただし、8次モード以外のモードの影響を考えていない。

図17より、 $\bar{B}$ はモデルIII, I, IIの順に小さくなるのがわかる。これはステータの剛性がモデルIII, I, IIの順に大きくなるためである。また、 $\bar{A}$ はモデルI, III, IIの順に小さくなる。これは切込みによる影響と考えられる。モータの特性を考えると、 κ の大きいモデルIのステータに対する摩擦効率が最も高いことがわかる。よって、切込み状ステータが有利なことがわかる。

5.3.2 切込みの深さの影響 以上、切込み状ステータの利点を明らかにしたが、ここではさらに、切込みの深さについて検討を行う。図18に解析モデルを示す。切込みの深さを次のように無次元化する。

$$\bar{h} = h/H \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 h は切込みの深さ、 H は弾性体中の切込みのない部分の厚さを表す。本計算では、 $H=2\text{ mm}$ 、圧電体の厚さを 0.8 mm とした。有限要素解析に用いる要素数は3584である。

図19に、8次の固有振動数 f_8 の $\bar{h}$ による変化を示す。横軸は $\bar{h}$ 、縦軸は固有振動数である。ステータの固有振動数は、 $\bar{h}=0.15$ で最大となり、 $\bar{h}>0.15$ においては、低下する傾向がある。図20に、8次の共振状態における $\bar{A}$ と $\bar{B}$ の $\bar{h}$ による変化を示す。ただし、計算において、8次モード以外のモードの影響を考えていない。横軸は $\bar{h}$ 、縦軸は $\bar{A}$ と $\bar{B}$ である。 $\bar{h}$ の変化につれて $\bar{A}$ の変化は大きい、 $\bar{B}$ はそれほど変化しな

図15 ステータとロータの接触状況を表すモデル

図16 三つのステータモデルの断面形状

表7 8次モードの固有振動数 f_8 (kHz)

Model I	Model II	Model III
28.40	39.09	29.76

図17 8次共振点近傍の周波数応答

図 18 ステータの一部分の断面図

図 19 8 次の固有振動数

い。これは、切込みの深さがステータの曲げ剛性に与える影響が小さいことに起因する。また、両曲線の交差する点に対応する $\bar{h}$ を $\bar{h}_c$ で表すと、粒子の軌跡は、 $\bar{h} < \bar{h}_c$ の範囲で縦のだ円、 $\bar{h} = \bar{h}_c$ で、円、 $\bar{h} > \bar{h}_c$ の範囲では横のだ円となる。すなわち、 x は $\bar{h}$ の増加につれて大きくなる。よって、モータの効率は高くなる。しかし、切込みの“歯”の部分の剛性は低くなるので、モータの駆動力は小さくなる。さらに、モータの無負荷最大回転速度の変化を図 21 に示す。 $\bar{h}$ の増加につれて、モータの回転速度は速くなる。

6. 結 論

圧電現象を解析するための有限要素プログラムを開発した。圧電体と弾性体からなる二層ばりについて静・動的有限要素解析および実験を行い、解析値と実験値が良く一致することを示して、本プログラムの有効性を検証した。さらに、進行波回転形超音波モータのステータの振動解析を行い、ステータの励振振動数、アドミタンス特性、表面形状と変位特性等について検討した結果、以下の点が明らかになった。

(1) 励振振動数がステータの分極数と同じ次数の固有振動数と一致するとき、モータの電気機械変換効率は高い。

(2) 切込み状のステータの摩擦効率より平坦状のステータの摩擦効率より高い。

図 20 円周、軸両方向の変位の振幅値

図 21 超音波モータの回転速度

(3) ステータ表面粒子の軌跡は、切込みの深さの増加につれて、縦のだ円から横のだ円へ変化する。

(4) ステータの切込みの深さが深くなるにつれて、モータの摩擦効率は高くなるが、駆動力は小さくなる。

終わりに、本研究を進めるに当たり、多大なご援助をいただいた日本放送協会技術研究所記録・機構研究部の皆様に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Barth, H. V., *IBM Tech. Disclosure Bull.*, **16**(1973), 7.
- (2) Lavrinenko, V. V., Vishnevski, V. S. and Kartash-v, I. A., *Bulletin of Kiev Polytechnical Institute Series: Radio-Electron*, **13**(1973), 57.
- (3) 正岡, 日経メカニカル, (1986), 95.
- (4) 指田(秋山監修), 超音波モータ・アクチュエータ, (1986), 4章, トリケックス.
- (5) 内野, 日電一電素子アクチュエータ, (1986), 180, 森北.
- (6) 山本, 超音波基礎工学, (1981), 102, 日刊工業新聞社.
- (7) Henno Allik and Thomas J. R. Hughes, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **2**(1970), 151.
- (8) 池田, 日本音科学会誌, **23**(1967), 300.
- (9) 山崎・加川, 第8回電気・電子工学への有限要素法(応用シンポジウム), (1987), 151.

討 論

〔質問〕 谷 順 二

〔東北大学流体科学研究所〕

超音波モータの振動解析を精密に行った貴重な研究に敬意を表す。次の点についてご意見をお聞かせ願いたい。

ロータとステータとの滑りは圧着力に依存し、圧着力は B の大きさに依存すると考えられる。 x が大きいだけでなく B もある程度大きい必要があるのではないか。Model I はその条件にかなっていると考えられるがどうか。

〔回答〕 ステータとロータの間の圧着力が小さく、無負荷の状態では、 $\bar{A}$ が大きいほどモータの回転速度は大きくなるが、 $\bar{B}$ はモータの回転には関係しない。逆に、 $\bar{B}$ が大きいほど、エネルギーの損失は大きくなる。したがって、 x が大きいほど効率が高くなる。しかし、トルクを発生させるためには、ご指摘のように $\bar{B}$ がある程度大きい必要がある。ただし、軸方向変位 $\bar{B}$ はロータの回転に対して仕事をしないので、 $\bar{B}$ が大きすぎても効率を低下させることになると考えている。適当な $\bar{B}$ の範囲が存在すると考えられるが、今後の課題としたいと思っている。

〔質問〕 加 川 幸 雄〔岡山大学工学部〕

(1) 二層ばりの曲げ振動が、両端に適当な境界条件を課して、曲率の大きい中あき二層板の面外曲げ振動と近似的に等価しているが、この形の振動はのび、ねじれとの結合はさけられず〔文献(9)〕、取扱いに問題がある（ただし、二層円筒の面外振動の場合は上の近似は成立）。

貴論文はしたがって、リニア形の超音波モータを対象にしたことに書き直すのが（ただし境界条件については検討が必要）よいのではないか。

(2) 高次の曲げモードを対象とするとしながら、表4の実験との比較は第3モードまで、図6は第1モードだけである。どうしてか、図9に要素分割が示してあるが、曲げ（図9では面内曲げに相当）を扱う場合、一次要素だけでは誤差が非常に大きくなることが知られている。

(3) x 〔式(20)〕は単なる回転効率なのではないか。

(4) 圧電振動の有限要素解析は文献(付1)に詳しい

付図 1 片持ばり

付図 2 断面 a-b のせん断応力分布

説明がある。参考にされてはどうか。

〔回答〕 (1) 面外振動を利用する進行波回転形超音波モータに対して、主にモータの回転に影響するのはステータの面外振動と考えられる。よって、本研究ではステータの切込みの影響を調べるために、ステータの面外振動に着目し、ねじり振動を無視して解析を行った。また、解析に当たり、円環としての境界条件を与えて解析しているので、回転形超音波モータをモデル化した近似解析になっていると考えている。

実際、本研究で取りあげたステータに対しては、高次面外モードが低次のねじれあるいは面内振動モードと連成する可能性があるが、これについては、今後の課題として研究する予定である。

(2) 本実験では1枚の圧電素子を有するユニモルフを使っており、二次以上のモードはほとんど励起されないため、低次モードのみについて実験と計算を比較し、プログラムの有効性を検証した。

また、ご指摘のように、はりの曲げ解析について、一次要素を用いる場合、十分な要素分割を行わないと、精度のよい結果が得られないことが知られている。そ

〔付1〕 加川, 有限要素法による振動・音響工学(基礎と応用, (1981), 215-228, 培風館。

こで、本文においては紙面制約のために説明を省略したが、付図1に示すような弾性片持ばりに対して解析を行い、せん断応力の分布について検討し、要素数を大きくとれば、付図2に示すような精度で解が得られることを確認している。

(3) 摩擦効率を、電気-機械変換効率とは独立に、

摩擦駆動部分のみの効率と考えている。したがって、摩擦効率は規格化された円周方向変位 $\bar{A}$ と軸方向変位 $\bar{B}$ の比 $\kappa = \bar{A}/\bar{B}$ と密接な関連があると考えられる。

(4) 紙面の都合上、初期の文献(7)のみを引用した。ご著書を教示いただき、感謝する。