斜交型圧電モータステータの動力学モデル

小 木 曾 敏 夫* 森 健 次* 岡 田 祐 子*

Dynamic Model of Stator of Inclined-Type Piezoelectric Motor

Toshio OGISO Kenji MORI Yuko OKADA

In order to achieve a fast and powerful motion of a robot, the development of an actuator with high output energy/weight ratio is indispensable. Output energy/weight ratio of piezoelectric motor is higher than that of magnetic motor. So, piezoelectric motors have a possibility to realize the actuator with high output energy/weight ratio. But its driving mechanism is not perfectly clarified.

In this report, we proposed a dynamic modeling method for the stator of an inclined-type piezoelectric motor which we had developed before. This model describes the mechanical characteristics (vibration mode, amount of heat) and electric characteristics (electric impedance) of the motor well and the validity of this modeling method was confirmed by experiment.

Key Words : Piezoelectric Motor, Equivalent Circuit, Mechanical Impedance, Electric Impedance, Heat

1. は じ め に

ロボットの関節駆動用モータとして、電磁モータと比べて、高い出力・自重比を有する圧電モータが注目されている。

圧電モータは、ステータに装着された圧電素子に高周波数の交流電圧印加時のその微小振幅振動エネルギーをモータ移動部に摩擦動力伝達することにより、その移動方向の力学エネルギーに交換させるものである。

従来の圧電モータとしては、傾斜振動片の長手方向共振を利用して移動部を突き動かす振動片型圧電モータ¹⁾、円環状圧電素子を用い、それと接触した環状回転部材に弾性進行波を伝えることにより動力を発生する進行波型圧電モータ²⁾などがある。

しかるに、振動片型圧電モータは双方向駆動に難があり、進行波型圧電モータは、大トルクを得るのが難しいという問題がある。そこで、筆者らは先に移動部に対して斜交配置された2枚の厚み方向振動型圧電素子の変位を合成して得られる楕円運動を利用し、移動部を摩擦接

触駆動する斜交型圧電モータを提案し、その性能実験結果について報告した³⁾。

本報告では、前報³⁾で述べた斜交型圧電モータの動力発生メカニズムを明らかにするため、圧電素子と機械構造部材により構成されるモータステータの動力学モデルの検討を行い、無負荷条件において、実験結果と合致する特性予測が可能なことを示す。従来、圧電モータの動特性検討としては、進行波型圧電モータステータについて、有限要素法を用いた振動解析^{4,5)}が行われている。本報告では、圧電モータが通常その低次の共振周波数で駆動されるため、簡易な集中定数モデルでモデル化を試みた結果について述べる。

2. 主 な 記 号

C_d : 制動静電容量	[F]
F : 力	[N]
h : 圧電素子長さ	[m]
k : 剛性	[N/m]
k_{33} : 電気機械結合定数	
P : 圧電素子発熱量	[W]
R : 抵抗	[Ω]

原稿受付 1991 年 7 月 18 日

* (株)日立製作所 機械研究所

t : 圧電素子1層厚み	[m]
m : 質量	[kg]
u : 振動変位	[m]
$\dot{u}$: 振動速度	[m/s]
V_0 : 印加電圧	[V]
v : 弾性波の伝搬速度	[m/s]
Y_f : 自由アドミタンス	[S]
Z_f : 自由インピーダンス	[Ω]
z_0 : 機械特性インピーダンス	[kg/s]
ϕ : 力係数	[N/V]
η : 波長定数 ($=\omega/v$)	[m^{-1}]
ω : 角振動数	[rad/s]

3. 斜交型圧電モータの構造及び動作原理

試作した斜交型圧電モータの構造を Fig. 1 に示す。ステータ上に一対の圧電素子を含む駆動部（以下圧電駆動ユニットと呼ぶ）が取り付けられており、圧電駆動ユ

Fig. 1 Sideview of the inclined-type piezoelectric motor

Fig. 2 Structure of the piezoelectric driving unit

ニットの端部がディスク状ロータに押しつけられている。モータは、圧電駆動ユニットをステータ上の円周方向もしくは、ロータの両側に複数個設置することにより、ほぼユニット数倍の駆動トルクを得ることができる。

圧電駆動ユニットの構造を Fig. 2 に示す。圧電駆動ユニットは、電圧印加により厚み方向に変形する積層型圧電素子、素子を固定する基部、素子の変位を合成する一対の二重平行リンクの弾性ヒンジをもつ変位合成部及び耐摩耗性材料よりなる駆動端部より成っている。

圧電素子は、厚み方向に分極されたものが多層（この場合は 30 層）積層されている。また、その中央には中空孔が設けられており、基部・変位合成部間にボルトで締結されている。圧電モータは、その共振周波数の交流電圧を圧電素子に印加することにより駆動されるが、この場合は 31 kHz 付近の共振を利用して駆動される。圧電駆動ユニットの双方向駆動方法としては、①いずれか一方の圧電素子に電圧を印加する。②両圧電素子に約 90° の位相差の電圧を印加する、の 2 方式が考えられる。本モータの性能は、圧電駆動ユニットを 2 ケ用い、AC 17.5 V を印加し、方式①で駆動した場合に、最大静止トルク : 5.4 [Nm], 最高速度 : 60 [rpm] であった³⁾。

この動力発生メカニズムを明らかにするために、本報告では、ステータ単体の機械的・電気的特性を表現可能なモデルを得ることを目的とし、ロータとの摩擦接触駆動メカニズムの解明は今後の課題とする。

4. 圧電モータステータの動力学モデル

本章では、圧電駆動ユニットがロータに押しつけられていない場合の電気的・機械的特性をほぼ正確に表現可能なモデルを得ることを目的とする。ここでは、圧電駆動ユニットの動力学モデル作成に当たり、Fig. 3 (a)～(c)に示す (1) 圧電素子単体、(2) 圧電素子と基部・

Fig. 3 Element and total structure of the piezoelectric driving unit

変位合成部平板部とのボルト締結体(以下締結体と呼ぶ)、
(3) 圧電駆動ユニット(全体)、の3段階に分け、順次
検討する。ここでは、(1)は圧電素子の電気・機械結
合系としての特性を明らかにするため検討するものであ
り、(2)は、ボルト締結体のモデル化の妥当性を明ら
かにするため検討するものである。

4.1 圧電素子単体モデル

n 層積層構造の圧電素子単体の電気機械結合系として
の特性解析を行うために、下記の仮定に基づくモデル化
を行った。

- (1) 圧電現象は断熱的に行われる。
(温度変化、物性値変化は無い)
- (2) 積層形圧電素子は、 n 層分の静電容量を持つ単
一体として扱える。
- (3) 圧電素子は、中央に孔が空けられているが、そ
の形状効果(面内振動)を無視できる柱体であ
る。

Fig. 4 (a) に示す圧電素子に交流電圧を印加した時
の圧電素子単体の電気機械結合系としての連成状態は、
式(1)、式(2)の圧電方程式で示される⁶⁾。

$$T_3 = c_{33}^E S_3 - e_{33} E_3 \quad (1)$$

$$D_3 = e_{33} S_3 + \epsilon_{33}^S E_3 \quad (2)$$

ここで、添字3は z 方向を示し、 T_3 : 応力、 S_3 : 歪み、
($=\partial u_3/\partial z$)、 E_3 : 電界、 D_3 : 電気変位、 c_{33}^E : 縦弾性
定数、 e_{33} : 圧電応力定数、 ϵ_{33}^S : 誘電率、を示している。
ここで、右上添字は、添字量が一定の条件下での物性値
であることを示し、各々下記の意味を有する。(E一定:
電極短絡、D一定: 電極開放、S一定: 拘束) ここで、
式(1)、式(2)より E_3 を消去すると、式(3)が
得られる。

$$T_3 = c_{33}^D S_3 - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} D_3 \quad (3)$$

ここで、式(4)が成り立つ。

$$c_{33}^D = c_{33}^E \left(1 + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S c_{33}^E} \right) \quad (4)$$

また、歪み $S_3 = \partial u_3/\partial z$ と記されることから、圧電素子
の弾性振動の運動方程式は式(5)で示される。

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = \frac{\partial T_3}{\partial z} = c_{33}^D \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \frac{\partial D_3}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、電気変位は z 方向に一樣($\partial D_3/\partial z = 0$)のため、
式(5)は式(6)のように書き換えられる。

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = c_{33}^D \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} \quad (6)$$

また、電界 $E_3 = -\partial \phi/\partial z$ と記されるので、式(2)は
式(7)のように書き換えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \cdot \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} \quad (7)$$

Fig. 4 Dynamic model of the piezoelectric cell

これから、式(6)、式(7)を下記境界条件(両端自
由)のもとで解くと、式(8)が得られる。

(境界条件)

$$z = \pm \frac{h}{2} \quad T_3 = 0, \quad \phi = \pm \frac{V_0}{2} e^{j\omega t}$$

(振動変位)

$$u_3 = \frac{-e_{33} V_0 \sin(\eta^D z) e^{j\omega t}}{c_{33}^D \eta^D h \cos\left(\frac{\eta^D h}{2}\right) \left\{ 1 - \frac{e_{33}^2 \tan(\eta^D h/2)}{\epsilon_{33}^S c_{33}^D \eta^D h/2} \right\}} \quad (8)$$

さらに、電気端子の電流 I と入力アドミタンス $Y_f (= I/-V_0)$ は、式(9)、式(10)で示される。

$$I = j\omega \iint D_3 dx dy \quad (9)$$

$$Y_f = j\omega C_d + \frac{1}{\frac{-1}{j\omega C_d} + \frac{\eta^D h/2}{j\omega C_d k_{33}^2 \tan(\eta^D h/2)} + R} \quad (10)$$

ここで、 $C_d = \epsilon_{33}^S ab/h$ 、 $k_{33}^2 = \eta^D h/2 / \tan(\eta^D h/2)$ 、であ
り Y_f は抵抗 R を考慮した。式(10)において、右辺
第2項分母第2項は式(11)のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\eta^D h/2}{j\omega C_d k_{33}^2 \tan(\eta^D h/2)} \\ &= \frac{1}{\phi^2} \cdot \left\{ \frac{-jz_0^D}{\sin(\eta^D h)} + \frac{jz_0^D \tan(\eta^D h/2)}{2} \right\} \\ &\triangleq \frac{1}{\phi^2} \cdot \left\{ \frac{k}{j\omega} + \frac{j\omega m}{2} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、 k, m は圧電素子を Fig. 4(b) に示すような自
由状態2自由度集中定数系でモデル化する際の等価剛性、
等価質量を示している(式(12)参照)。

$$k = \frac{\omega z_0^D}{\sin(\eta^D h)}, \quad m = \frac{z_0^D}{\omega} \tan\left(\frac{\eta^D h}{2}\right) \quad (12)$$

また、 ϕ は力係数と呼ばれる量であり、 $\phi = e_{33} ab/t$ と記
され、電気系と機械系を結合する変成比を示す⁶⁾。以上

から、式 (10) で示される電気機械結合系としての特性を表現可能な等価回路モデルは Fig. 4 (c) のように記される。Fig. 4(b) における圧電素子の粘性減衰係数 c は、等価電気抵抗 ($=c/\phi^2$) に変換され、圧電素子の電気抵抗成分と共に抵抗 R として等価回路中に示されている。

Fig. 4 (c) において、電気系、機械系変成部前後の (電流 i , 電位差 V) と、(振動速度 $\dot{u}$, 発生力 F) の間には式 (13) の関係が成立する。

$$\begin{bmatrix} F \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi & 0 \\ 0 & 1/\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ i \end{bmatrix} \quad (13)$$

次に、機械インピーダンス Z_m を機械系入力端子よりみたそれより下流側のインピーダンスとすると、それは、式 (14) で示される。

$$Z_m = \frac{F}{\dot{u}} = \frac{k}{j\omega} + \frac{j\omega m}{2} \quad (14)$$

式 (13) は、式 (15) のように変形されることから、機械インピーダンス Z_m の等価電気インピーダンス Z_{em} は、式 (16) のように記される。

$$\begin{bmatrix} V \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi & 0 \\ 0 & 1/\phi \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_m \dot{u} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_m \dot{u}/\phi \\ \phi \dot{u} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Z_{em} = \frac{V}{i} = \frac{Z_m}{\phi^2} \quad (16)$$

以上から、電気入力端子からみた電気インピーダンス $Z_f (=1/Y_f)$ は、式 (17) のように記され、電気機械結合系としての特性を等価回路で表現することにより、式 (10) の理解を容易にできた。

$$Z_f = \frac{1}{j\omega C_d} \left(\frac{Z_m}{\phi^2} + R - \frac{1}{j\omega C_d} \right) \quad (17)$$

Table 1 Material property of the piezoelectric cell

parameter	notation	value
length	$a \times b \times h$	$20 \times 20 \times 13$ ($\phi 6$ hole) (mm)
thickness of one layer	t	0.3 (mm)
number of layers	n	30
capacitance	C_d	1.46 (μF)
coupling factor	k_{33}	0.50
force coefficient	ϕ	15.2 (N/V)
resistance	R	0.18 (Ω)
velocity	v^D	1963 (m/s)

特に、共振点 (Z_f 最小) 及び反共振点 (Z_f 最大) におけるインピーダンス Z_{fR}, Z_{fA} は、 $\omega_{R,A}^2 C_d^2 R^2 \ll 1$ であるから、式 (18) ではほぼ近似できる。

$$Z_{fR} \doteq R, \quad Z_{fA} \doteq \frac{1}{\omega_A^2 C_d^2 R} \quad (18)$$

従って、共振点では、ほぼ純抵抗となる。

次に、等価回路の表記法を用いた一端における振動変位片振幅 u は、式 (19) で示される。

$$u = \frac{i}{2j\omega\phi} = \frac{V_0 \frac{1}{j\omega C_d}}{2j\omega\phi Z_f \left(\frac{Z_m}{\phi^2} + R \right)} \quad (19)$$

さらに、圧電素子の発熱量 P を圧電素子の各部の電流の二乗平均をとることにより算出すると、式 (20) のように求められる。

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{R}{h} \int_0^{2\pi/\omega} \int_0^h i(z)^2 \cos^2 \omega t dz dt$$

$$= \frac{\omega^2 \phi^2 u^2 R \{ \eta^D h - \sin(\eta^D h) \}}{\eta^D h \sin^2(\eta^D h/2)} \quad (20)$$

実験データからの同定値を含む Table 1 に示す圧電素子物性値に対する圧電素子両端自由時のインピーダンス、振動変位片振幅、発熱量の計算結果を Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示した。

ここで、図中に実験値を併記したが、振動変位、発熱量の測定は、圧電素子の一端をテープで固定することにより行ったため、計算時にもテープの粘性を考慮した。これから、計算により実験結果と良く合致する特性予測が可能であることが明らかになった。

4.2 締結体モデル

Fig. 3(b) に示した圧電素子・ボルト締結体を 4.1 節で得られた圧電素子単体モデルを基にモデル化する。

圧電素子を締結する基が圧電素子からみて、全接触面でも均一な剛性をもたないことから、圧電素子の厚み方向振動と回転方向振動を考慮できる Fig. 8(a) に示すモデルを用いた。ここで、モデル化に当っては Fig. 8(b) に示すように各部位の材質及び断面積から合成機械インピーダンスを求める方法を用いた。

機械インピーダンスの算出は、等価送電線理論に基づき行った⁷⁾。等価送電線理論によれば、Fig. 9(a) に示す二端子回路網で記した長さ l 、断面積 A 、縦弾性定数 c の弾性棒の一端に力を加えたときの力・振動速度の伝達特性は、式 (21) で示される。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \dot{u}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta l) & jz \sin(\eta l) \\ j \sin(\eta l)/z & \cos(\eta l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_2 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで、 z は機械特性インピーダンスであり、 $z = \rho v A$ と記される。 v は、弾性波伝搬速度 ($=\sqrt{c/\rho}$) であり、波長定数 $\eta = \omega/v$ 、である。

Fig. 5 Electric impedance of the piezoelectric cell (both ends free)

従って、入力端の力 F_1 、振動速度 $\dot{u}_1$ としたとき、他端自由 (Fig. 9(b) 参照, $F_2=0$)、他端固定 (Fig. 9(c) 参照, $\dot{u}_2=0$) の場合の機械インピーダンス $Z_m (= F_1/\dot{u}_1)$ は式 (22) で示される。

$$\left. \begin{aligned} \text{(他端自由)} \quad Z_m &= jz \tan(\eta l) \\ \text{(他端固定)} \quad Z_m &= -jz \cot(\eta l) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

従って、直列もしくは並列に連結されている各部 (Fig. 8(b) 参照) の各定数をもとに合成機械インピーダンスを求めることができる。

ボルト部のモデル化に当って、次の点を考慮した。

- (1) ボルトの縦剛性は縦弾性定数、断面積、長さから求め、圧電素子と並列配置されるものとした。
- (2) ボルトのかみあい剛性 k_s は、ボルトのおねじ部、めねじ部の弾性変位 δ_b , δ_n と、ボルトに働く引張力 F_b から式 (23) に基づき求めた⁹⁾。

$$k_s = \frac{F_b}{\delta_b + \delta_n} \quad (23)$$

- (3) ボルトの締め付け力による圧電材料の物性値の変化については、従来行われている実験結果⁹⁾から本締結体で用いている締結圧 (約 20 [MPa]) では、圧電材料の物性値変化は微小のため前節で述べた値をそのまま用いた。

以上の点を考慮すると、締結体の等価回路は Fig. 8(c) のように求められる。剛性 K 、質量 m_p' , m_p'' は、式 (24) で与えられる。Fig. 8(c) において、 Z_{m3} は基部の剛性不均一による回転振動を表現する要素であり、その詳細を Fig. 8(d) に示した。

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{\omega z_0^D}{\sin(\eta^D h)} + \frac{\omega z_3 k_s / \sin(\eta_3 l_3)}{\omega z_3 / \sin(\eta_3 l_3) + k_s} \\ m_p' &= \frac{z_0^D \tan(\eta^D h/2) + z_1 \tan(\eta_1 l_1)}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Fig. 6 Vibration displacement of the piezoelectric cell (supply AC 2.5(V), one end fixed)

Fig. 7 Amount of heat in the piezoelectric cell (supply AC 2.5(V))

$$m_p'' = \frac{z_0^D \tan(\eta^D h/2) + \sum_{i=2}^5 z_i \tan(\eta_i l_i)}{\omega}$$

ここで、共振点がモデルと実験結果とが一致することを確認した後、実験結果と合致するように粘性減衰係数を決めた。粘性減衰要素は、Fig. 8(a) の各パネ部に併設される形でモデル化されるべきものであるが、個別の同定は難しいため、Fig. 8(c) のように機械系入口部に c としてまとめて考慮した。

モデルの諸定数を Table 2 に示し、電気インピーダンス、振動変位、共振点における振動モードを Fig. 10～Fig. 12 に示した。

これから、実験と計算でほぼ合致する結果が得られた。

4.3 圧電駆動ユニット全体モデル

Fig. 3(c) に示した圧電駆動ユニット全体のモデルについて、本節で説明する。

Fig. 13 に圧電駆動ユニットの詳細動力学モデルを示した。

ここでは、下記仮定の下にモデル化を行った。

- (1) 変位合成部の剛性としては断面積の小さい弾性ヒンジ部の縦剛性、及び横剛性のみを考慮する。

Fig. 11 Vibration displacement of the cell bolted to the unit base (supply AC 2.5(V))

微小のため、被駆動側圧電素子は固定体として扱う。

(2) 駆動端部の重心G、弾性中心Eのずれは微小のため、一致すると考え、G点まわりの回転は考慮しない。簡略モデルの等価回路を Fig. 15(b) に示した。

その機械系の機械インピーダンス Z_m を式 (25) に示した。また電気インピーダンス Z_f 及び圧電素子振動変位 $u+u_0$ を式 (26), 式 (27) に示した。

$$Z_m = \frac{-\omega^2 m_p' Z_{m3}' (k_{f1} + k_{fA} - \omega^2 m_1) + \omega^4 m_p' m_p'' (c_1 + c_2) - j[\omega^3 m_p' m_p'' (k_{f1} + k_{fA} - \omega^2 m_1) + \omega^3 m_p' Z_{m3}' (c_1 + c_2)]}{-\omega^2 Z_{m3}' (c_1 + c_2) - \omega^2 m_p'' (k_{f1} + k_{fA} - \omega^2 m_1) - \omega^2 m_p' (k_{f1} + k_{fA} - \omega^2 m_1) + j[\omega Z_{m3}' (k_{f1} + k_{fA} - \omega^2 m_1) - \omega^3 m_p'' (c_1 + c_2) - \omega^3 m_p' (c_1 + c_2)]} + R\phi^2 + C + \frac{K}{j\omega} \triangleq Z_x + jZ_y \quad (25)$$

$$Z_f = \frac{Z_y + \phi^2 [\omega C_d - jZ_x]}{\omega C_d (Z_x + jZ_y)} \quad (26)$$

$$u + u_0 = \frac{V_0}{Z_f} \cdot \frac{\phi^2}{j\omega C_d Z_m} \cdot \frac{1}{j\omega\phi} \quad (27)$$

簡略モデル、詳細モデルを併用した解析手順を Fig. 16 に示した。

- (手順1) 圧電特性値算出
- (手順2) 形状データ、印加電圧入力
- (手順3) 簡略モデルより式 (25), 式 (27) に基づき機械インピーダンス Z_m と、圧電素子振動変位 $u+u_0$ を算出する。
- (手順4) 簡略モデルに基づく加振力 $F(=j\omega(u+u_0)Z_m)$ を算出する。
- (手順5) 詳細モデルに手順4で求めた加振力を加え振動変位 u, u_0 を計算する。

Fig. 12 Vibration mode of the cell bolted to the unit base at resonant frequency

(手順6) 手順4, 5で求めた量の商 ($=F/(\dot{u} + \dot{u}_0)$) として機械インピーダンス Z_m' を算出する。

(手順7) 手順3, 6の機械インピーダンスの差が微小であるか否かを判定し、微小であれば手順8に進み、微小でなければ手順3に戻り機械インピーダンスを $Z_m' \rightarrow Z_m$ と修正し、手順3～7を繰り返す。

(手順8) 電気インピーダンス Z_f 、駆動端部振動変位 u_1 、圧電素子発熱量 P を算出する。

以上の手順を経て求められた電気インピーダンス Z_f 、駆動端部振動変位 u_1 、振動モード、圧電素子発熱量 P を Fig. 17～Fig. 20 に示した。また、計算に用いた部材の定数を Table 3 に示した。これらから、併記した実験結果とくらべても計算によりほぼ正確な電気的特性及び機械的特性を表現できることがわかった。また、Fig. 19 に示した結果から、30.8(kHz) の2次共振が最も駆動端部の振動変位が大きくモータ駆動に適していることが明らかとなった。

また、Fig. 17 に詳細モデルと、簡略モデルの電気インピーダンス計算結果の比較を示したが、ほぼ合致しており、特に2次共振特性は簡略モデルでも十分表現されていることが確認された。

なお、Fig. 16 に示したフローの手順7における収束反復回数は2回程度であった。

5. 実験方法

4章において、本報告の動力学モデルに基づく計算結果に対する実験結果も併記し、その妥当性の検討を行った。本章では、その実験方法について説明する。

(1) 電気インピーダンスの測定

圧電素子両端子をインピーダンス測定器と接続し、微小電圧 (10mA 定電流、共振点 1mV) を印加して測定した。

(2) 振動変位の測定

測定部に渦電流式非接触変位センサを設けることにより測定した。

ただし、センサアンプの 50(kHz) 以上における伝達特性が不明のため、50(kHz) 以下の特性を外挿して校正を行った。

(3) 圧電素子発熱量の測定

圧電素子表面に銅-コンスタンタン熱電対を接着し、温度上昇を測定し、その勾配より式 (28) を用いて求めた。

$$P(\tau, T) = mC_P \frac{dT}{d\tau} + US(T - T_a) \quad (28)$$

ここで、 T : 圧電素子表面温度、 τ : 経過時間、 T_a : 大気温度、 m : 圧電素子質量、 C_P : 定圧比熱、 US : 放熱係数、を示している。

G: gravity center, E: elastic center

Fig. 13 Exact model of the piezoelectric driving unit

(a) Model

(b) Equivalent circuit

(c) Equivalent circuit of Z_{m3}'

Fig. 15 Simplified model of the piezoelectric driving unit

Fig. 14 Equivalent circuit of the exact model of the piezoelectric driving unit

Fig. 16 Flowchart of the analysis process of the piezoelectric driving unit

Table 3 Parameters' value of the piezoelectric driving unit

parameter	value
axial stiffness of flexure hinge k_{fA}	1.42×10^9 (N/m)
lateral stiffness of flexure hinge k_{fL}	8.04×10^7 (N/m)
axial damping coefficient of flexure hinge c_1	130 (Ns/m)
lateral damping coefficient of flexure hinge c_2	130 (Ns/m)
driving tip mass m_1	0.019 (kg)
driving tip inertia J	2.28×10^{-7} (kgm ²)
driving tip distance l_1	0.96×10^{-3} (kgm ²)
driving tip distance l_2	4.04×10^{-3} (m)

Fig. 17 Electric impedance of the piezoelectric cell installed in the piezoelectric driving unit

右辺第1項は、圧電素子に貯えられる熱量を示し、右辺第2項は、放熱量を示す。放熱係数 US は、電圧印加を止めたときの温度下降特性より式 (29) により求めた。

$$\ln \frac{T - T_a}{T_i - T_a} = -\frac{US}{mC_p} \tau \quad (29)$$

(4) ボルトの締付力⁸⁾

締結体の締付トルクは、使用するボルトの強度区分を考慮し、3.9 [Nm] を目標値とした。ちなみに締付トルクを変えた場合の共振点の変化を Table 4 に示した。これから、締付トルクを増すと、共振点が高くなり減衰効果が大きくなる (Z_{fA} が小さくなる) ことがわかった。これは、式 (23) に示したボルトのかみあい剛性 k_S が、ボルトに働く引張力 F_b とねじ部の弾性変位 δ_b , δ_n の間に非線形な関係があるため変化し、またその減衰効果も変化したためと考えられる。

Fig. 18 Vibration displacement of the driving tip of the piezoelectric driving unit (supply AC 2.5(V))

Fig. 20 Amount of heat in the piezoelectric cell installed in the piezoelectric driving unit

Fig. 19 Vibration mode of the piezoelectric driving unit at resonant frequency (supply AC 2.5(V))

Table 4 Relationship between fastening torque and electric impedance

fastening torque	fastening pressure	resonant frequency	antiresonant impedance
2.9 Nm	13.2 MPa	41.0 kHz	10.7 Ω
3.9 Nm	17.6 MPa	41.4 kHz	8.6 Ω
4.9 Nm	22.0 MPa	42.2 kHz	8.3 Ω

6. む す び

本報告では、斜交型圧電モータの圧電駆動ユニットの動力発生メカニズム解明の第一段階として、その無負荷時の特性予測を可能とするモデルを集中定数モデルで表現し、計算結果と実験結果の比較を行い、下記の結論を得た。

(1) 圧電駆動ユニットを、圧電素子単体、圧電素子・ボルト締結体、圧電駆動ユニット全体、の3段階に分けてモデル化する方式を提案し、電気的特性、機械的特性をほぼ正確に表現できるモデルが得られた。

(2) 圧電駆動ユニット全体をその詳細モデルと、モ

ータ駆動に用いる該共振点に着目した簡略モデルでモデル化し、簡略モデルの計算結果を初期値として、詳細モデルの求解を行う方式を明らかにした。

(3) 圧電モータ駆動に利用する共振点における電気的特性、機械的特性は簡略モデルで表現可能であることを明らかにし、本モデルがモータの負荷作用時の特性解析にも使用可能であるとの見通しを得た。

参 考 文 献

- 1) 指田：超音波駆動モータの試作，応用物理，51-6，pp. 713-720，1982
- 2) 大トルクで低速回転する表面波モータ，日経メカニカル，2.28号，pp. 44-49，1983
- 3) 森：高トルクモータの研究（第1報，積層圧電素子を用いた圧電モータの基礎検討），日本機械学会講演論文集，No.860-7，pp. 273-274，1986
- 4) 山淵他：圧電超音波モータ特性の数値シミュレーション，日本機械学会講演論文集，No.890-26，pp. 166-171，1989
- 5) 坂田他：有限要素法による超音波モータのステータの振動解析，日本機械学会論文集（C編），56-525，pp. 37-46，1990
- 6) 尾上：固体振動論の基礎，第6章，オーム社，1982
- 7) 近野他：機械回路網とその応用（I），日本音響学会誌，35-1，pp. 36-42，1979
- 8) 山本：ねじ締結の理論と計算，養賢堂，1970
- 9) 井上他：一軸高圧力下における圧電セラミック諸定数の一測定法，日本音響学会講演論文集，1-7-2，pp. 541-542，1981
- 10) Paros, Weisbord：How to design FLEXURE HINGES, Machine Design, Nov. 25th, pp. 151-156, 1965

小木曾敏夫 (Toshio OGISO)

1958年2月10日生。1982年慶応義塾大学大学院工学研究科修士課程（機械工学専攻）修了。同年より（株）日立製作所機械研究所勤務。現在は、産業用ロボットの研究開発に従事。（日本ロボット学会正会員）

森 健次 (Kenji MORI)

1949年10月24日生。1974年東京大学大学院機械工学修士課程修了。同年（株）日立製作所機械研究所勤務。以来、産業用ロボット、メカトロ機器の研究を経て、現在磁気ディスク装置の研究開発に従事。日本機械学会、精密工学会の会員。

岡田祐子 (Yuko OKADA)

1960年12月1日生。1984年東京理科大学理工学部物理科卒業。同年より、（株）日立製作所機械研究所勤務。現在は、ロボット制御の研究に従事。

（日本ロボット学会正会員）