

超音波モータにおける副振動片の最適設計*

青柳 誠司** 神谷 好承** 岡部 佐規一**

Optimum Design Method of a Sub-Reed of an Ultrasonic Motor

Seiji Aoyagi, Yoshitugu Kamiya and Sakiichi Okabe

In order to increase the rotational speed of an ultrasonic motor using a flexural traveling wave, slits made on the surface of the stator are very effective. In this paper the projections made by the slits are called "sub-reeds" for convenience. Though the sub-reeds play important roles in an ultrasonic motor, their dimensions are generally decided through trial and error. This paper presents the optimum design method of a sub-reed by using elastic vibration analysis. This method calculates the dimensions of the sub-reed of which resonant frequency is same as that of the basic disc. This paper also presents that the resonance of the sub-reed mainly causes the magnification of the amplitude by using finite element analysis. The optimum design method and the mechanism of the magnification mentioned above are confirmed by experiments.

Key words: ultrasonic motor, sub-reed, basic disc, elastic vibration analysis, finite element analysis, resonant frequency, rotational speed

1. はじめに

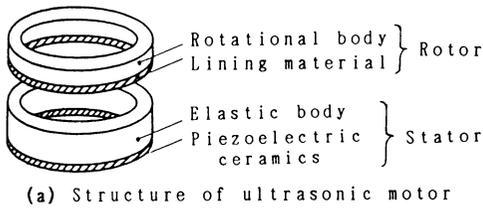
超音波モータは、超音波領域周波数の機械振動を利用した摩擦駆動のモータであり、低速・高トルク、小型・軽量などの特長を持つため、これらの利点を生かした新しい用途の開発が期待されている。超音波モータにはさまざまな駆動原理のものが開発されているが、本報告で取り扱う進行波型超音波モータ¹⁾は、時間的に進行する弾性屈曲波をステータ表面に励振させ、ステータに押し付けられたロータを回転させるものである。図1(a)にモータの概形、図1(b)に駆動原理を示す。圧電体を駆動してステータに正弦的なたわみ振動である進行波を生じさせる。進行波の各表面質点は楕円運動を行う。このときステータの上に進行波の1波長以上の長さを持つロータを乗せたならば、ロータは進行波頂点で支えられ、なおかつ表面の楕円振動によ

って移動する。

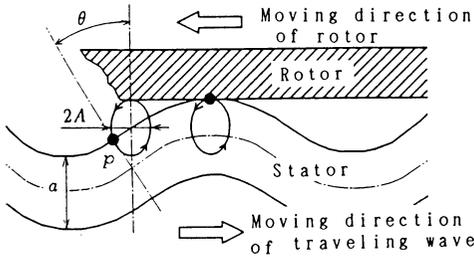
進行波型超音波モータではロータの回転速度を増大させるために、図1(c)に示すようにステータ表面に切欠きを入れることが行われている²⁾。本論文では都合上、切欠きを入れることによってステータ上にできる凸状体のことを副振動片と呼ぶことにする。副振動片は、ステータの曲げ剛性を高めることなく、ステータの等価の厚みを大きくして、振動振幅を増幅する有効な方法であると考えられる。副振動片の運動を解析し、最適設計を行うことはモータの高速化・高効率化にとって重要であるが、副振動片の寸法は試行錯誤で決められているのが現状であり、その最適設計法は解析的に明らかにされていない³⁾。また副振動片の寸法を様々に変化させてモータの特性を調べた報告もない。

本論文ではステータの円環部分と副振動片の振動モードに着目し、近似的に最適な副振動片の設計を行う方法を提唱するとともに、有限要素法を用いてステータの共振モードについて解明した。さらに実際のモータで最適設計法の妥当性、および副振動片自身の共振による変位拡大効果が大きいことを確認した。

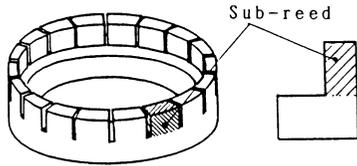
*原稿受付 平成2年6月27日。1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月28日)にて発表
**正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)



(a) Structure of ultrasonic motor



(b) Driving mechanism of motor



(c) Sub-reed

Fig. 1 Ultrasonic motor

2. 弾性振動論を用いたステータの運動解析

2.1 ステータの分割設計手法

副振動片まで含めたステータ全体を一体のものとして扱い弾性振動論を適用するのは、形状が複雑であるため困難である。そこでステータを図2に示すように副振動片と基礎円環部に分割したモデルを考える。基礎円環部が共振して最大の変位で副振動片を励振する時、副振動片も共振していれば、ロータとの接触面でのステータの表面質点速度は最大になると考える。従って、副振動片と等価的基礎円環部の共振周波数を別々に計算し、それらが一致するような設計を行う。

2.2 副振動片の振動解析⁴⁾

副振動片を図3に示すように片側がローラ端、もう一方を自由端とするはりでモデル化し、その一端に基礎円環部表面の楕円振動のx方向成分として $A \cos \omega t$ なる変位による強制振動が与えられるとする。基礎円環部表面はたわみ振動を行っているので変位に応じて θ なる傾き角をローラ端は持つ。このとき副振動片の先端の振幅 U_x ははりのたわみ振動の運動方程式を解くことにより次式で与えられる。

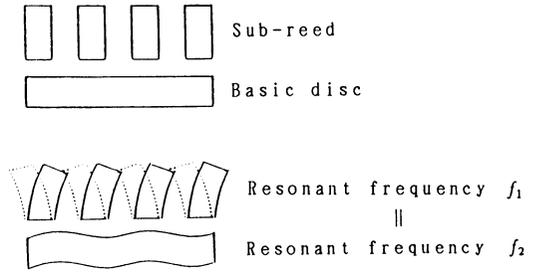
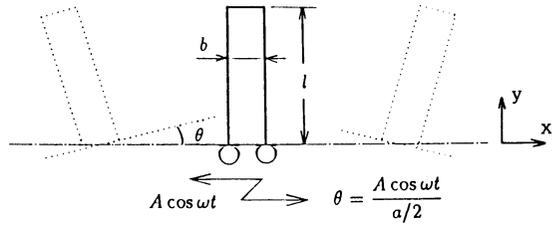


Fig. 2 Divided model of stator



a : Thickness of basic disc

Fig. 3 Model of sub-reed

$$U_x = \frac{\cos \lambda l + \cosh \lambda l + 2(\sin \lambda l + \sinh \lambda l) / \lambda a}{1 + \cos \lambda l \cdot \cosh \lambda l} A \quad (1)$$

ここで、 l は副振動片の長さ、 λ は周波数基準定数であり、

$$\lambda^4 = \frac{12\rho\omega^2}{Eb^2} \quad (2)$$

但し、 E :材料のヤング率、 ρ :密度、 b :副振動片の幅

で与えられる。式(1)より U_x は分母がゼロになる $\lambda l = 1.88, 4.70$ で無限大となり共振する。 ω の小さい $\lambda l = 1.88$ を採用すれば、式(2)より副振動片の1次の共振周波数 f_1 は次式で与えられる。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1.88}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{Eb^2}{12\rho}} \quad (3)$$

2.3 基礎円環部の振動解析⁵⁾

図4(a)に示す円環について考える。 z 方向の弾性的な変位を w とすれば、 n 次ベッセル関数 J_n, Y_n, I_n, K_n 及び係数 A_n, B_n, C_n, D_n を用いて、

$$w(r, \theta, t) = \{ A_n J_n(\lambda r) + B_n I_n(\lambda r) + C_n Y_n(\lambda r) + D_n K_n(\lambda r) \} e^{jn\theta} e^{-j\omega t} \quad (4)$$

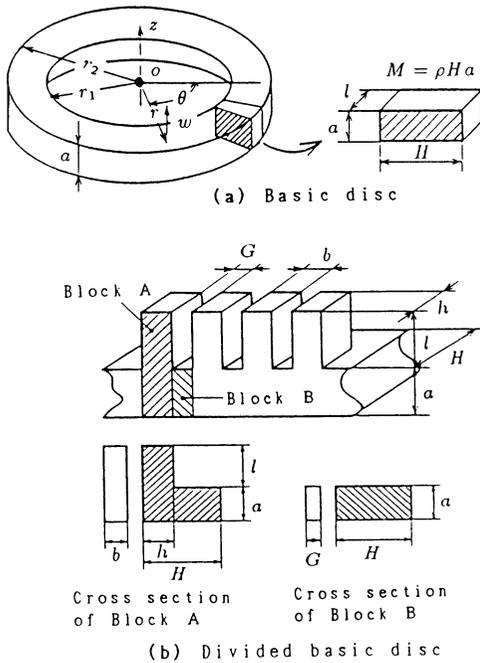


Fig. 4 Model of basic disc

で与えられる。ここで、 λ は周波数基準定数であり、

$$\lambda^2 = \omega \sqrt{\frac{M(1-\nu^2)}{EI}} \tag{5}$$

但し、 E :材料のヤング率、 ρ :密度、 ν :ポアソン比、 M :単位幅あたりの質量(= ρHa)、 I :断面2次モーメント(= $Ha^3/12$)

で与えられる。 λ 、 A_n 、 B_n 、 C_n 、 D_n は内径 r_1 、外径 r_2 をパラメータとする係数で、境界条件より決定される。 n に対して λ は λ_{n0} 、 λ_{n1} 、 λ_{n2} ...と存在し、その次数に対応する節円を半径方向に持つ。ここでは節円を持たない0次の λ_{n0} のみを考え、これを λ_n で表すと式(5)より円環の共振周波数 f_2 は次式で与えられる。

$$f_2 = \frac{\lambda_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{M(1-\nu^2)}} \tag{6}$$

λ_n に対応する共振モードは円周方向に $2n$ 本の節半径が生じる。

2.4 基礎円環部の共振周波数の補正

基礎円環部は、本来副振動片と一体のものである。従って、副振動片の基礎円環部への影響を考慮して基礎円環部の共振周波数を補正してやる必要がある。

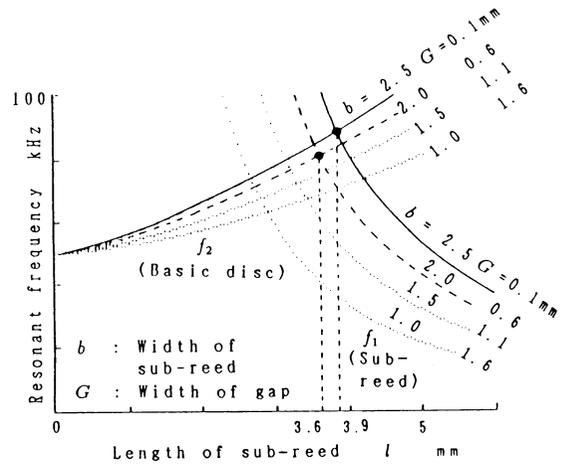


Fig. 5 Optimum design of sub-reed

式(6)において基礎円環部の単位幅あたりの質量 M は副振動片が付加質量として効くため増加し、

$$M = \rho(Ha + hl \frac{b}{b+G}) \tag{7}$$

で与えられる。断面2次モーメント I も増加する。**図4(b)**に示すように副振動片がある部分とない部分の2つのブロックに分け、以下のように等価的に I を求める。

$$I_A = \frac{Ha^3 + hl^3}{3} - \frac{(Ha^2 - hl^2)^2}{4(Ha + hl)}$$

$$I_B = \frac{Ha^3}{12}$$

$$I = \frac{b \cdot I_A + G \cdot I_B}{b + G} \tag{8}$$

2.5 副振動片の最適設計

ここでは**図7**に示されるような寸法形状をもつモータ1のステータを最適設計の対象として取り上げる。このステータに接着されている圧電体は基礎円環部に $n=9$ のモードの進行波を励振するように分極されているので、以下 $n=9$ のモードについてのみ考える。実際の基礎円環部には弾性体と圧電体が含まれるが、**図7**に示すように圧電体の厚みが弾性体のそれに比べて小さいこと、また圧電体のヤング率、密度が弾性体のそれらに近いことから、すべて弾性体として取り扱い、前節の式を適用する。正確を期すため圧電体を考慮して基礎円環部を組合せはりとして計算した場合の最適長さとして、本節で近似的に計算した最適長さの誤差は、

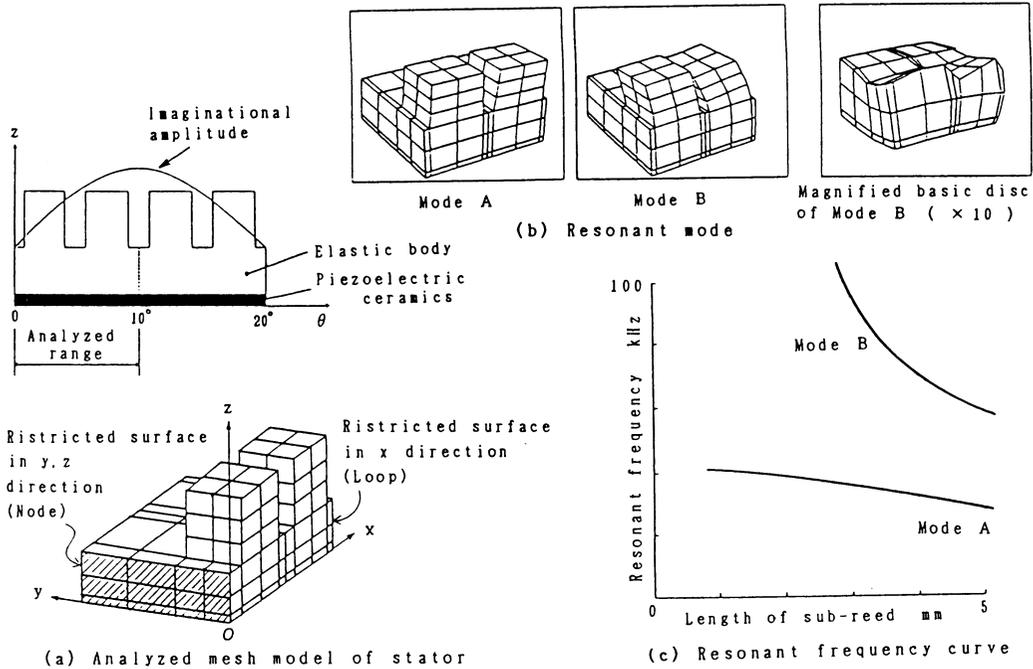


Fig. 6 Finite element analysis of stator

本装置の条件のもとでは1%以下である。具体的な数値を用い式(3), (6), (7), (8)より副振動片の長さ l 、幅 b を変化させて共振周波数を計算した結果を図5に示す。 f_1 と f_2 のグラフが交わるときの副振動片の長さが最適な値である。

3. 有限要素法を用いたステータの運動解析

3.1 有限要素法を用いた解析の意義

本節では実際のステータの共振周波数および共振モードを有限要素法を用いて解析する。有限要素法で共振点での振幅の値を計算するためには減衰に関する情報が必要であるが、実際のモータで減衰を評価するのは困難である。従って本節では副振動片の最適長さは計算できないが、共振モードを計算することで前節の設計法の妥当性を確認することと、次節の実験結果の解析に必要なステータの正確な共振周波数を計算することを目的とする。

ここでは、前節と同様図7に示されるステータを解析の対象とする。計算機の容量の制限およびメッシュ作成の容易さを考慮し、図6(a)に示す1/4波長分の直線近似モデルを考える。この場合解析範囲が微小(10°)であるから円弧を直線で近似しても解析に影響がないと考える。

3.2 副振動片の長さステータ共振周波数の関係

副振動片の長さを1mmから5mmまで1mmずつ変化させたモデルを作り、有限要素法解析により各々のモデルから得られた様々な共振モードを観察する。モータの回転に関与すると思われる図6(b)に示す2つの共振モードに注目して、その共振モードをモデルごと抽出すると、図6(c)のような副振動片の長さに対する共振周波数の特性図が得られる。

図6(b)よりモードAでは副振動片は前節で計算したモードでは共振しておらず、ステータ全体は基礎円環部表面の変位を副振動片がてこの働きで拡大するような共振モードを呈する。一方モードBでは副振動片自身が前節で計算した1次のたわみ振動モードで共振して基礎円環部表面の変位を拡大している。モードBにおいて基礎円環部のみを取り出し、10倍に拡大した図を図6(b)に示す。基礎円環部は副振動片に引きずられるようにして変形しており、モードBで支配的なのは副振動片であることがわかる。従って、副振動片の1次の共振モードを計算する前節の手法は、次節の実験より有効性が確認されるモードBを扱い、そのなかでも基礎円環部も同時に共振するような副振動片の形状を最適としていることがわかる。

図6(c)ではモードAの共振周波数のグラフが右下がりになり、図5の基礎円環部の共振周波数のグラフ

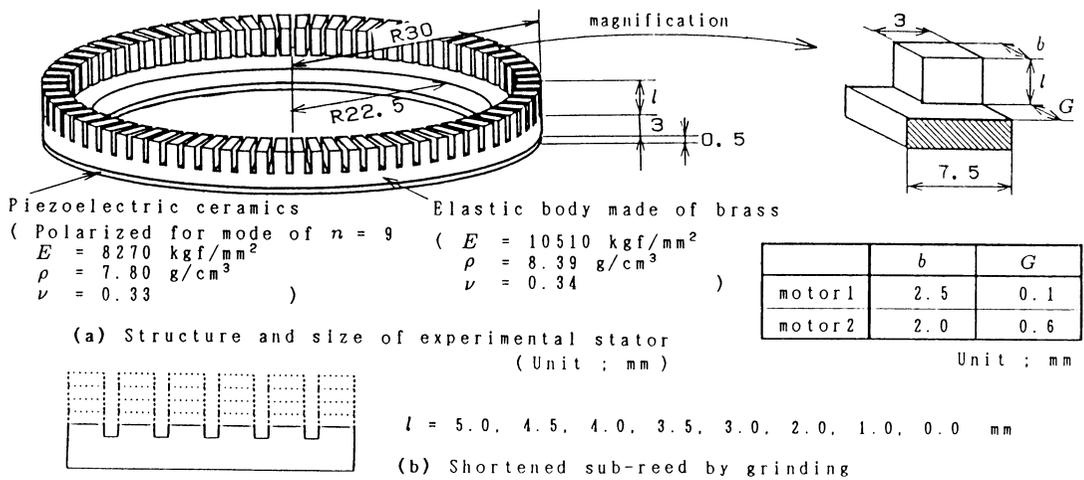


Fig.7 Experimental motor

のように右上がりにはならないが、これは図5では基礎円環部のみの共振周波数を計算しているのに対して、図6(c)では基礎円環部と副振動片が一体となったステータの共振周波数を計算しているからである。

4. 実験及び考察

4.1 実験用超音波モータの仕様

図7(a)に実験で用いた超音波モータのステータ部の概略を示す。なお、副振動片の幅 b については欄中に示すような2種類のモータについて実験を行った。圧電体とステータの接着状態によりモータの特性は非常に影響を受けるが、接着状態を各モータについて均一にするのは困難である。実際、ステータの諸寸法が同一な数種類のモータを試作してみたが、各々のモータごとに速度特性などの諸特性が異なり、相互の結果を比較することは無意味であることが判明した。従って、信頼性の高いデータを得るために、図7(b)に示すように同一のモータを用いることにより圧電体とステータの接着状態を一定にし、副振動片の長さのある一定長さから漸次切削することにより変化させた。圧電体は十分な圧力をかけて慎重に接着し、また切削の際は、接着部分が切削刀の影響を受けないよう細心の注意を払った。

4.2 共振周波数特性

図8(a)にモータ1の共振周波数特性の実験結果を示す。ステータが共振状態にあることを基礎円環部および副振動片の振幅を測定して確認することは、振幅が数 μm で周波数が超音波領域なので困難である。そ

こで駆動電圧一定のもとに駆動周波数を徐々に上げていき、ロータの回転数が極大となるときを共振状態と見なし、そのときの駆動周波数を共振周波数とした。

実験結果は有限要素法の解析結果と良く一致しており、3章で述べた基礎円環部表面の変位を副振動片がてこの働きで拡大するモードA及び副振動片自身が1次のモードで共振するモードBが実際に生じていることがわかる。

4.3 速度特性

図8(b)にモータ1, 2の速度特性の実験結果を示す。モータ1, 2の特性の差異は、各々のモータで圧電体の接着状態が異なったためと考える。モードBの方が最高回転数が高いことより、副振動片自身の共振による変位拡大効果が大きいことがわかる。

モータ1, 2ともにモードBでは、2章で述べた副振動片の最適設計法で求まる最適長さ付近で極大値を持つ。このことより、副振動片の最適設計法が妥当であることがわかる。

4.4 回転数-トルク特性

図8(c)にモータ1の回転数-トルク特性を示す。副振動片が最適設計法で求まる最適長さのときに回転数のみでなくトルクも極大値が得られることがわかる。これは副振動片により楕円振動の水平方向成分が拡大されるのに連動し、鉛直方向成分も拡大され、ステータとロータの間の摩擦力が増加するためである。

5. 結 言

進行波型超音波モータにおいてステータ表面の変位

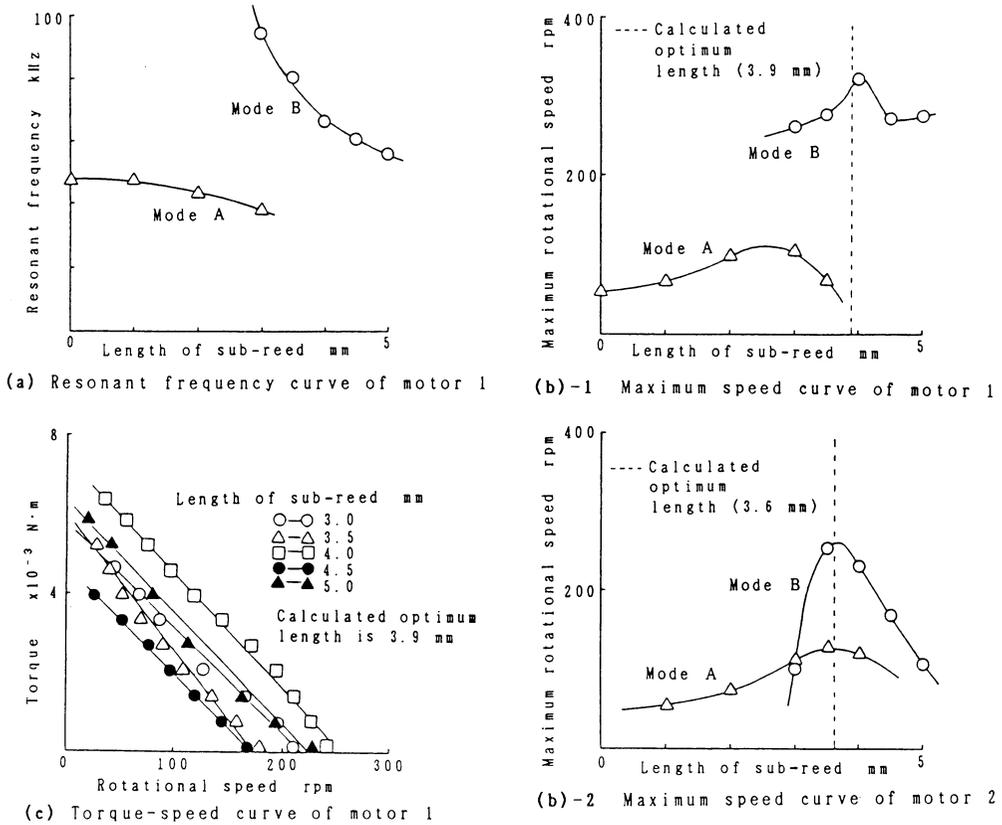


Fig. 8 Experimental results

を拡大しモータの高速化に寄与する副振動片に着目し、最適設計法を提唱した。以下に結果をまとめる。

- (1) ステータを副振動片と基礎円環部に分割したモデルを考え、それぞれの共振周波数が一致する副振動片の長さを求める最適設計法を提唱した。
- (2) 有限要素法を用いてステータ全体の共振モード及び共振周波数を求めた。モード図及び共振周波数特性より基礎円環部表面の変位を副振動片がこの働きで拡大するモードAと、副振動片自身が1次のモードで共振して変位を拡大するモードBの2つが存在することを解明した。
- (3) 圧電体の接着状態を一定にするため1つのモータを漸次切削しながら副振動片の長さを変えて実験した。共振周波数特性の実験結果は、有限要素法で求めたそれと良く一致し、有限要素法解析の妥当性が確かめられた。
- (4) モードBの方が高い回転数を得られ、副振動片自身の共振の効果が大きいことが実験により確認できた。

- (5) 2つの副振動片幅の違うモータにおいて、最適設計法による副振動片の長さの設計が妥当であることが実験により確かめられた。

謝 辞

本論文における有限要素法プログラムを提供して頂いた(株)村田製作所の井上二郎氏、岡田勉氏、ならびに実験等で協力を頂いた当研究室の卒業生である久保田敬寛氏、草山慎哉氏に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 上羽貞行：回転型超音波モータ，超音波研究会資料，US87-64，(1987) 1.
- 2) 伊勢悠紀彦：超音波モータ，日本音響学会誌，43, 3, (1987) 184.
- 3) 西倉孝弘，武田 克，川崎 修：超音波モータ，公開特許，開1-148083，(1988).
- 4) 西村源六郎：振動工学，誠文堂新光社，(1969) 344.
- 5) 中原一郎：応用弾性学，実教出版，(1978) 95.