

## 第3章 超音波モータについて

### 3.1 超音波モータの特徴

次に、超音波モータの特徴について説明する。超音波モータとは、超音波領域の機械的振動を駆動源とするアクチュエータである。その機械的振動は、ステータに貼付けた圧電セラミックスに超音波領域の交流電圧を印加し、ステータに共振振動を起こすことにより得られる。そして、このステータの振動振幅のエネルギーは摩擦力により、ロータへと伝達される。このような機構により、超音波モータは次のような優れた特徴を有している。

- ・低速回転で高トルクを発生する。
- ・応答速度性能が良い。
- ・摩擦駆動であるため、非駆動時の保持トルクが高く、ブレーキ機構を必要としない。
- ・構造が簡単であり、小型・軽量化が容易である。
- ・電磁力を用いたモータと違い、磁界の影響を受けにくく、また磁界を発生しない。

といった特徴を持ち、このことから、膝サポータに組込むアクチュエータとして、超音波モータは有用である。

## 3.2 進行波

進行波型超音波モータは、弾性体である金属の円環に圧電セラミックスを貼付けたものである。Fig.3.1 に進行波がロータに伝播される状態を示す。圧電素子は Fig.3.2 のように、+の部分と-の部分交互に分極されており、圧電体から弾性方向に向かって+に電圧がかかると+に分極された部分は膨張し、-に分極された部分は収縮する (Fig.3.3)。従って、圧電体に連続して交流電圧を印加することにより、ステータ上に振動を起こすことが可能となる。

波には、腹・節の位置を変えない定在波と、振動媒体中を伝播する進行波の二つがある。本研究では、位置的・時間的に1/4波長ずらした二つの定在波を弾性体上で合成することで進行波を得ている。数学的に表すと、以下のようになる。

振幅が $A$ の定在波1の波形が $\sin$ 関数で表すことができ、その時間的变化が $\cos$ 関数に依存するとするならば、定在波1は

$$y = A \cdot \sin(X) \cdot \cos(T) \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} A = \text{振幅} \\ X = \text{位置}x\text{の関数} \\ T = \text{時間}t\text{の関数} \end{cases}$$

のように表すことができる。これに対し、位置的・時間的に1/4波長ずれている定在波2は

$$y = A \cdot \cos(X) \cdot \sin(T) \quad (3.2)$$

となる。式(3.1)と式(3.2)をたし合わせ、三角関数の加法定理より、

$$y = A \cdot \sin(X + T) \quad (3.3)$$

となる。この式(3.3)で表される波は、波形を崩さずに一定速度で進行する波、つまり進行波を表している。

次に、実際のステータでの進行波の発生の様子を示す。

実際に用いた圧電体の分極配置は Fig.3.4 のようになっている。これは、4波長分の定在波を発生する部分を2ヶ所設け、それらが互いに1/4波長ずらして配置してある。まず、これによって、位置的に90°位相のずれた2つの定在波を得る。そして、この2つの部分に位相をずらせた正弦波電圧を加える。これによって、位置的・時間的に位相のずれた2つの定在波を得る。こうすることによって、前述の原理により、弾性体であるステータの円周方向に進行する進行波を発生させることができる。

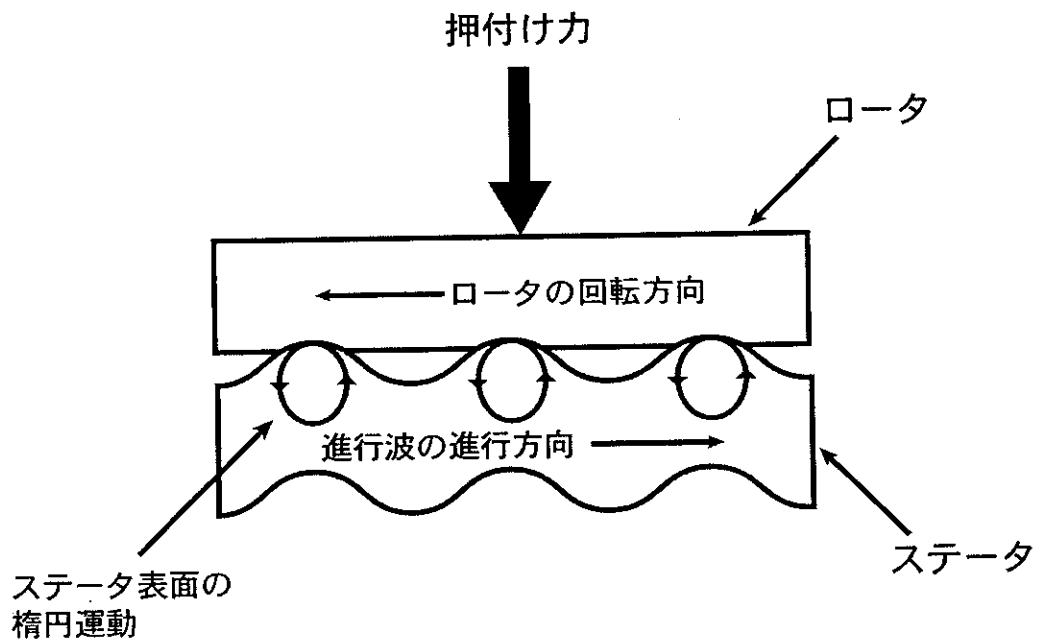


Fig.3.1 進行波の伝播の様子

### 3.3 ステータ表面の運動

次に進行波によって生じるステータの表面の運動を Fig.3.5 に示すような弾性体の部分的なモデルを用いて考える。ここで、座標はたわみのない状態で、中立軸を  $x$  軸、厚み方向にロータとの接触面を正の方向とした  $y$  軸を取った。尚、中立軸上の点は  $x$  軸方向には動かないとし、たわみのない状態で中立軸に垂直な断面は、中立軸に対し常に垂直であると仮定する。

中立軸上の点  $O(x_o, y_o)$  と、ロータの接触面上にある点  $R(x_r, y_r)$  について考えると、式(3.3)のようになるが、位置  $x$  の関数  $X(x)$  と時間  $t$  の関数  $T(t)$  がそれぞれ

$$x = 0 \rightarrow X(x) = 0$$

$$t = 0 \rightarrow T(t) = 0$$

である初期値をとるとするならば、中立軸上の点の運動は式(3.3)より次のようになる。

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \omega t\right) \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \lambda = \text{波長} \\ \omega = \text{振動角速度} \end{cases}$$

次に、点  $R$  の運動について考える。Fig.3.6 において、たわみ角は

$$\theta_o = \left[ \frac{\partial y}{\partial x} \right]_{x=x_o} = A \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x_o + \omega t\right) \quad (3.5)$$

また、 $x_r$  は、点  $O$  と点  $R$  の距離  $H$  と、 $\theta_o$  をもちいて

$$x_r = x_o - H \cdot \sin\theta_o \approx x_o - H \cdot \theta_o \quad (3.6)$$

と表せる。同様に、 $y_r$  は

$$y_r = y_o + H \cdot \cos \theta_o \approx y_o + H_o \quad (3.7)$$

よって、式(3.4), 式(3.5), 式(3.6), 式(3.7)より,  $x_r$  と  $y_r$  は

$$x_r = x_o - H \cdot A \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_o + \omega t\right) \quad (3.8)$$

$$y_r = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_o + \omega t\right) + H \quad (3.9)$$

となる.

次に, 点  $R$  の変位について考えてみる.  $x_r$  と  $y_r$  の変位をそれぞれ  $X_r, Y_r$  とし,  $(2\pi/\lambda \cdot x_o + \omega t)$  を時間の関数  $Q$  とし,  $H \cdot 2\pi/\lambda = N$  とすると

$$X_r = -N \cdot A \cdot \cos Q \quad (3.10)$$

$$Y_r = A \cdot \sin Q \quad (3.11)$$

となる. またさらに,

$$\frac{X_r^2}{(-N \cdot A)^2} + \frac{Y_r^2}{A^2} = 1 \quad (3.12)$$

と書ける.

式(3.12)は, 点  $R$  が横振幅  $H \cdot 2\pi/\lambda \cdot A$ , 縦振幅  $A$  の楕円運動をしていることを表している. また, この楕円運動は, Fig.3.1 の様に, ロータとの接触面において, 進行波の進行方向と逆向きである. つまり, 進行波型超音波モータのロータの回転方向は, ステータに起こっている進行波の進行方向とは逆である.

また, モータの回転速度は, ステータの振動の波頭だけでロータと接していると考えられる場所, 以下のようなになる.

波頭の位置は式(3.4)より,

$$X_{top} = \left( I + \frac{1}{4} - \frac{\omega t}{2\pi} \right) \lambda \quad (3.13)$$

となり、(Iは整数) 式(3.8)を時間で微分したものに式(3.13)を代入することにより波頭の速度 $V_s$ が得られる。

$$\frac{x_r}{dt} = H \cdot A \cdot \omega \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \omega t\right) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} V_s &= H \cdot A \cdot \omega \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_{top} + \omega t\right) \\ &= H \cdot A \cdot \omega \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \quad (3.15)$$

となり、位置的・時間的に $2\pi/\lambda$ 位相をずらせた定常波を重ね合わせて、進行波を作ると、波頭の速度は一定となる。また速度は、ステータの振動振幅に比例している。

### 3.4 駆動原理

進行波型超音波モータは、ステータと呼ばれる、弾性体である金属の円環に圧電素子を張付けた物の表面に、前述したような進行波を発生させ、ステータに回転体であるロータを押付けることにより、摩擦力でロータを回転させるものである。

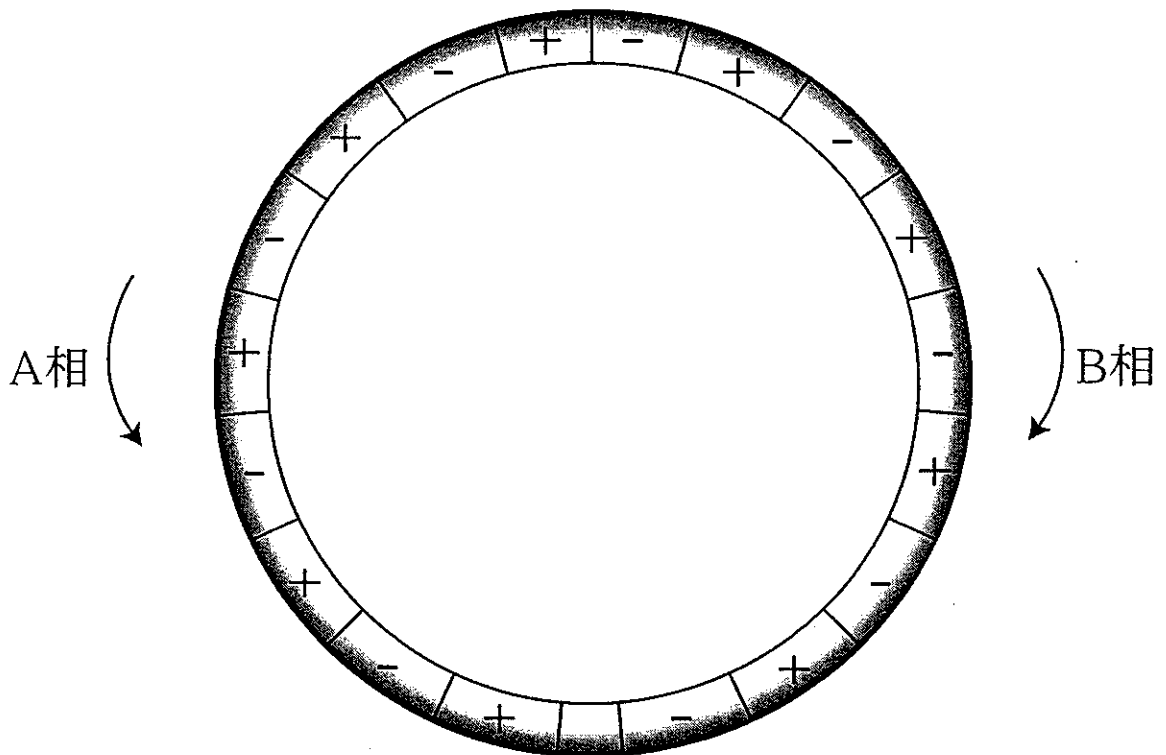


Fig.3.2 圧電素子分極配置図

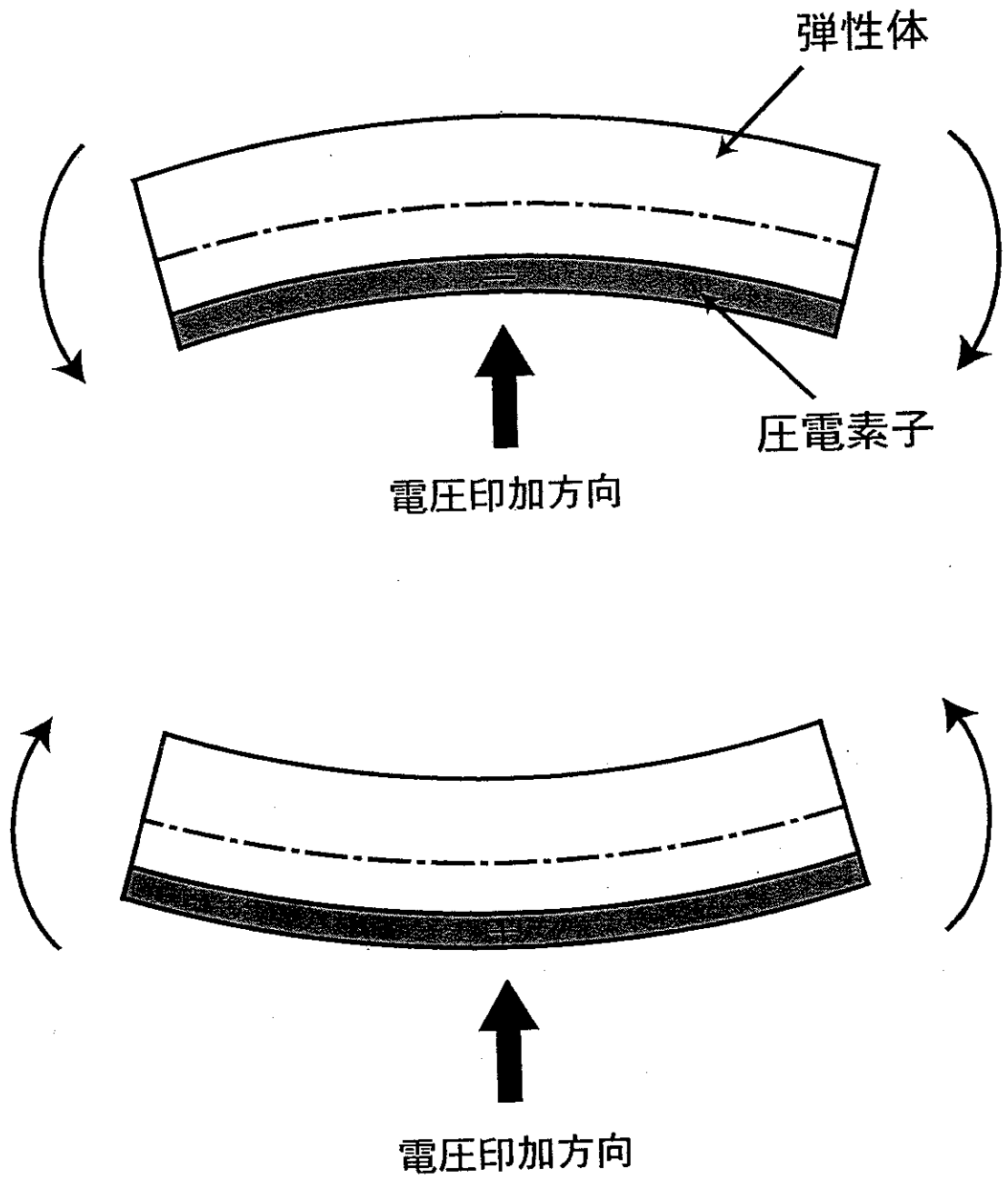
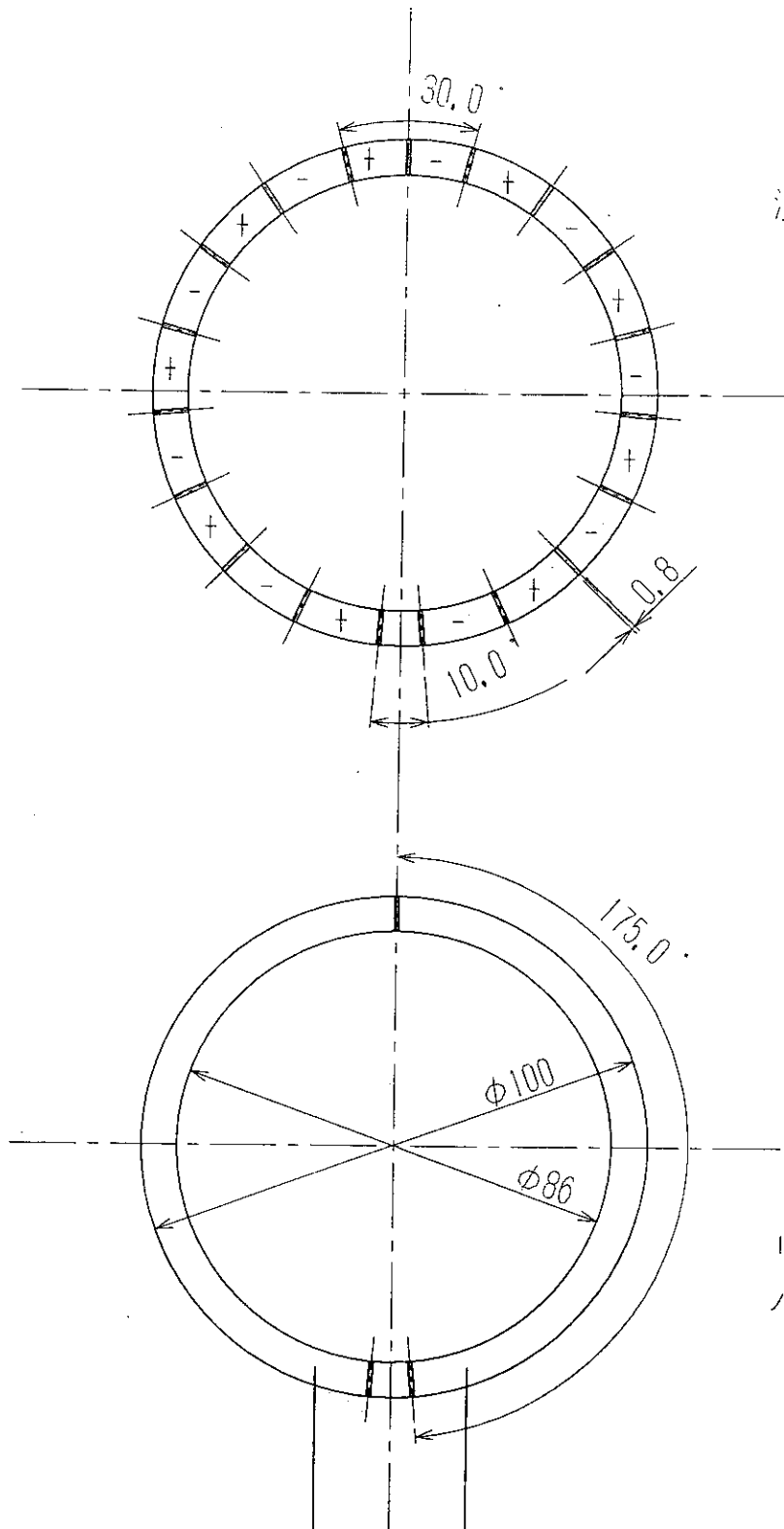


Fig.3.3 圧電素子変形モデル

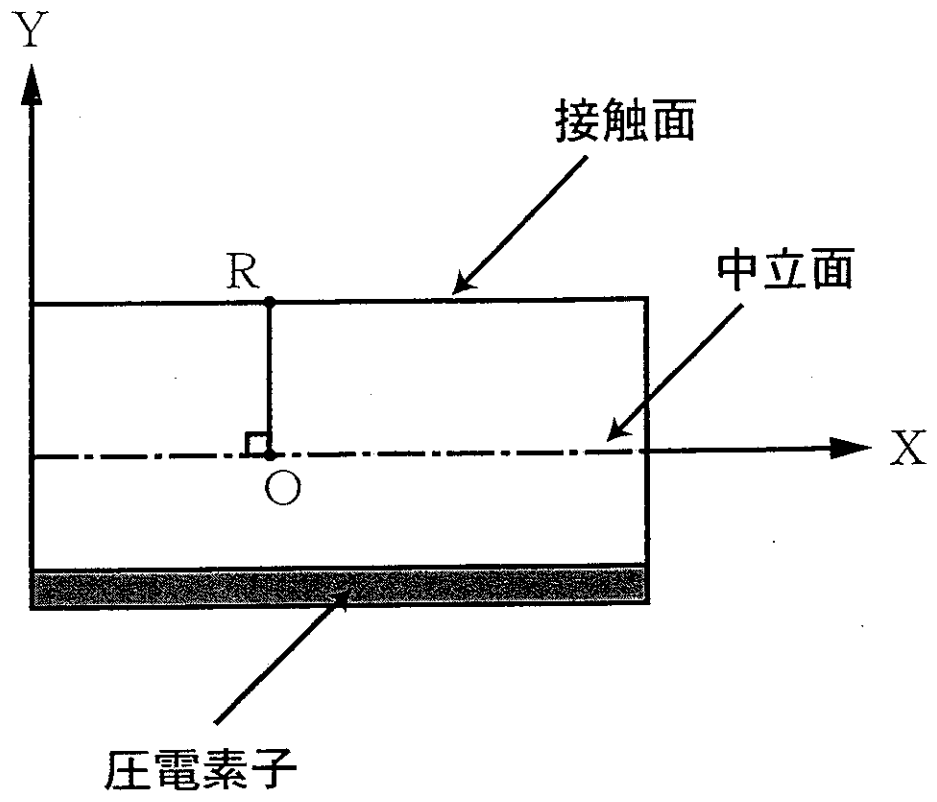




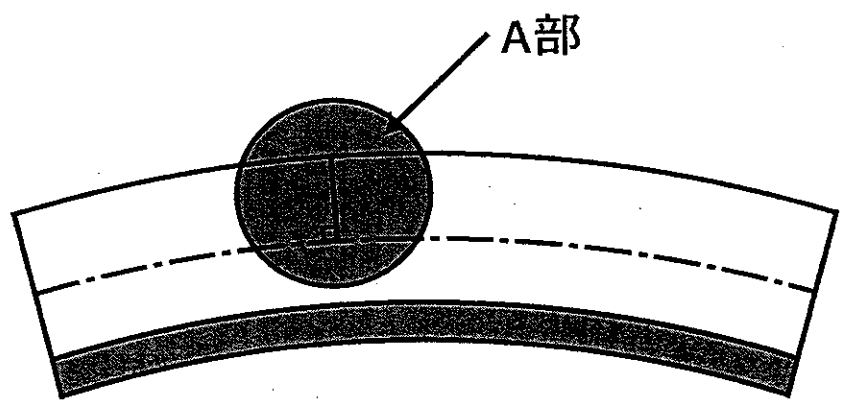
注：各電極ノ成ス角度ハ  
20°トスル

リード線長サ200  
ハンダ付ケ後接着剤デ固定

Fig.3.4 圧電素子の設計図



たわむ前



たわみ後

Fig.3.5 ステータの部分的な弾性体モデル

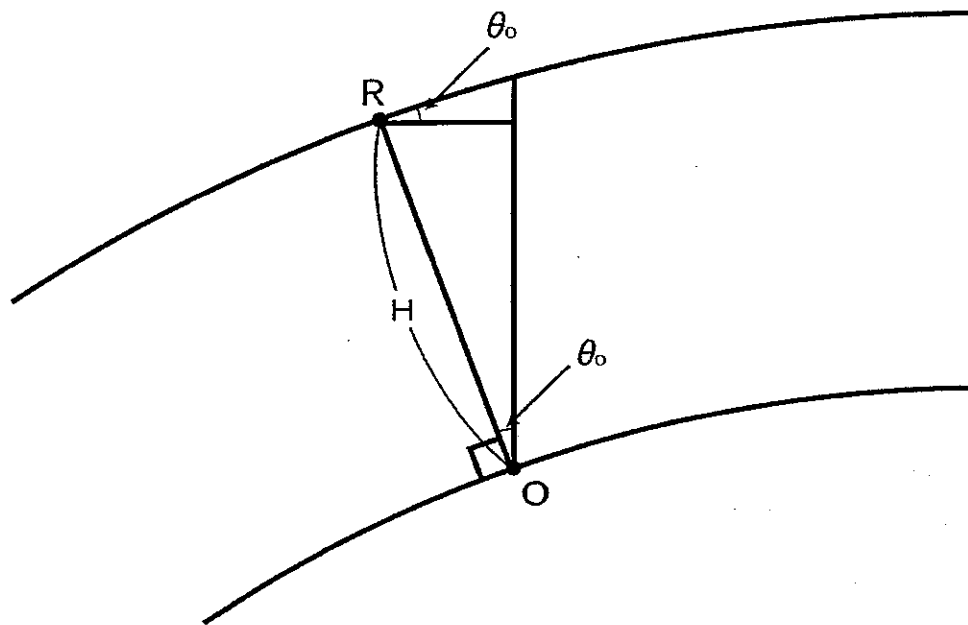


Fig.3.6 弾性体モデルの部分拡大図 (A 部)

## 第4章 ステータの性能向上

超音波モータは、その最大出力がモータの直径の2乗に比例することが知られている。また、起動トルクは直径の3乗に比例する。起動トルクに一定の比率を乗じたものを定格トルクとすると、これもモータの直径の3乗に比例すると考えることができる。

以上のことから、できる限り圧電素子を外周部に持っていき、総面積を大きくすることが、モータの出力向上に適しており、出力が向上することにより、低電圧での使用が可能となる。これを実現するためには、両面貼付けのステータが有効であると考えられる。

### 4.1 両面張付けステータ

本研究室がこれまで研究してきた平面型超音波モータは、ステータが金属の弾性体に一枚の圧電素子を貼付けた構造になっていた。しかしながら、実用トルクを取り出すためには、 $\phi 100$  [mm]のステータで $200$  [ $V_{p-p}$ ]近くの電圧を必要とした。ここで、人体へ装着して使用することから、重大な感電事故などを防ぐために安全性を考えると、電圧を下げる必要がある。その解決法として、両面貼付けのステータを検討した。両面貼付けのステータとは、金属の弾性体に二枚の圧電素子を張付けることにより、圧電素子の総面積を増やすことによ

るトルクの増加を目的としたものである。これによりトルクが増大すれば、電圧を下げてでも実用トルクを得ることができる。

そこで、新たに両面貼付けのステータを試作することとした。しかし、実際に超音波モータのステータを試作するためには、非常に多くの時間と費用がかかる。そのため、様々な寸法形状のステータを試作することは、非常に困難である。ここで、新たに両面貼付けのステータを設計するにあたり、試作するステータの挙動を把握するために、有限要素解析ソフトウェアを用いたステータの共振解析を行うこととした。この有限要素解析により、ステータの挙動を把握することができ、設計を行なう時の参考にし、ステータの試作に要する時間と費用を大幅に削減することが可能となる。

## 4.2 共振解析

有限要素法 (Finite Element Method : FEM)とは、物体を仮想的に有限の大きさの要素 (有限要素) に分割して、物体をそのような要素の集合体として解析する方法である。連続体を要素でモデル化し、その要素間の剛性方程式を解くことによって解析結果がもとめられる。本研究では、有限要素解析ソフトウェアとして MSC/NASTRAN Version70, 有限要素解析プリ・ポストプロセッサとして MSC/PATRAN Version7.0 を用いて有限要素解析を行った。

解析内容としては、静解析を用いてステータ上に9波の振動モードが発生する共振周波数をもとめ、静解析より得られた共振周波数を用いて動解析を行なうことにより、櫛歯状に加工した駆動部の変位をもとめた。

目的とした9波の振動モードの発生しているステータの共振状態を Fig.4.1 に示す。

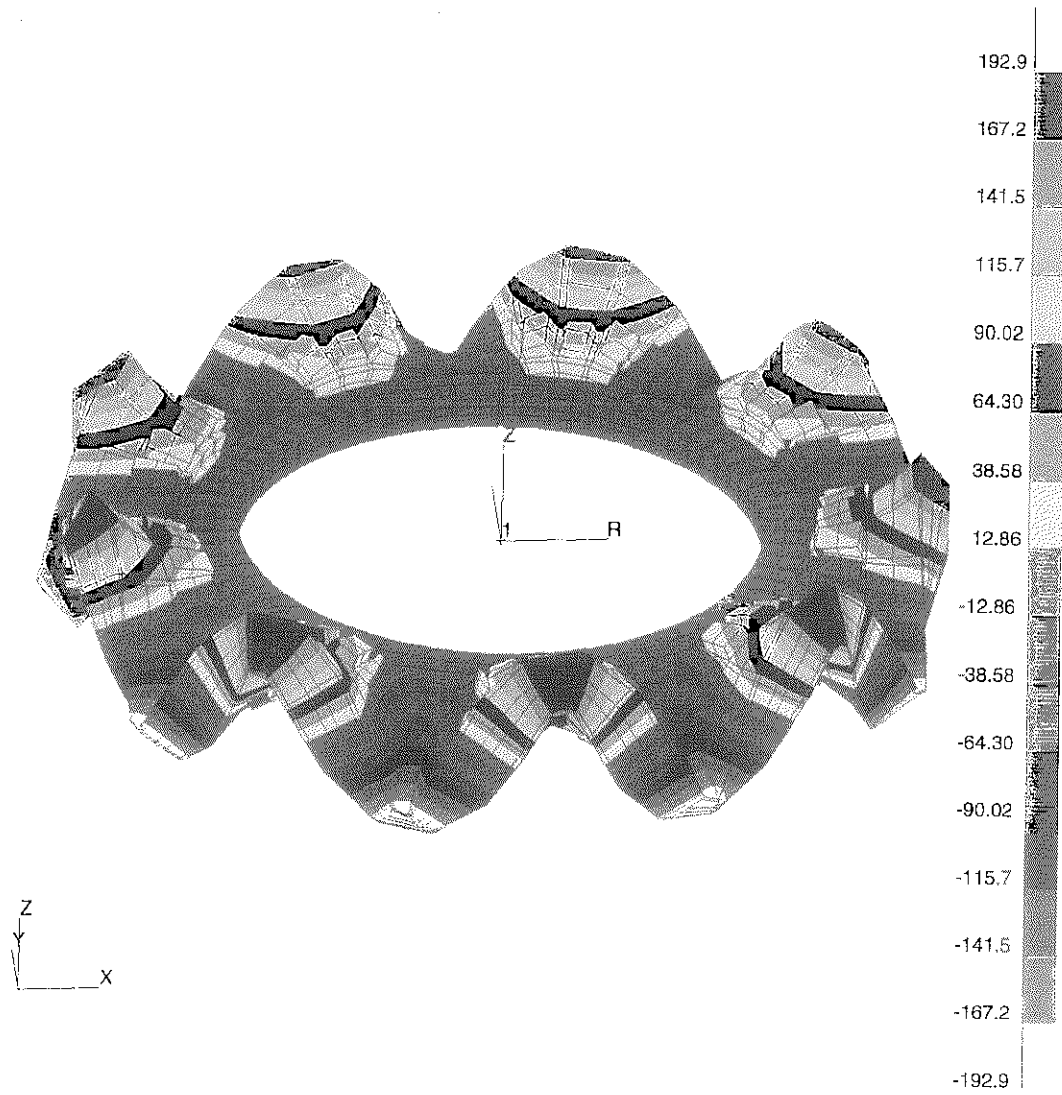


Fig.4.1 9波の振動モード

### 4.2.1 ステータの厚さの影響

共振解析を用いて、ステータの厚さが共振状態に与える影響を検討してみた。ステータの寸法は厚さ以外をすべて一定とし、厚さを4段階に変更し、9波の振動モードが発生する共振周波数を、静解析を用いてもとめた。その後、もとめた共振周波数での動解析を行い、ステータの櫛歯部上の任意の一点での変位を解析した。解析に用いたステータのモデルを Fig.4.2 に示す。

解析に用いたステータモデルの厚さ  $H$  は、2[mm]、3[mm]、4[mm]、5[mm]である。

次に、動解析により得られた駆動部の高さ方向変位の時間変化と、円周方向変位と高さ方向変位からなる、駆動部の楕円運動の軌跡を Fig.4.3～Fig.4.10 に示す。

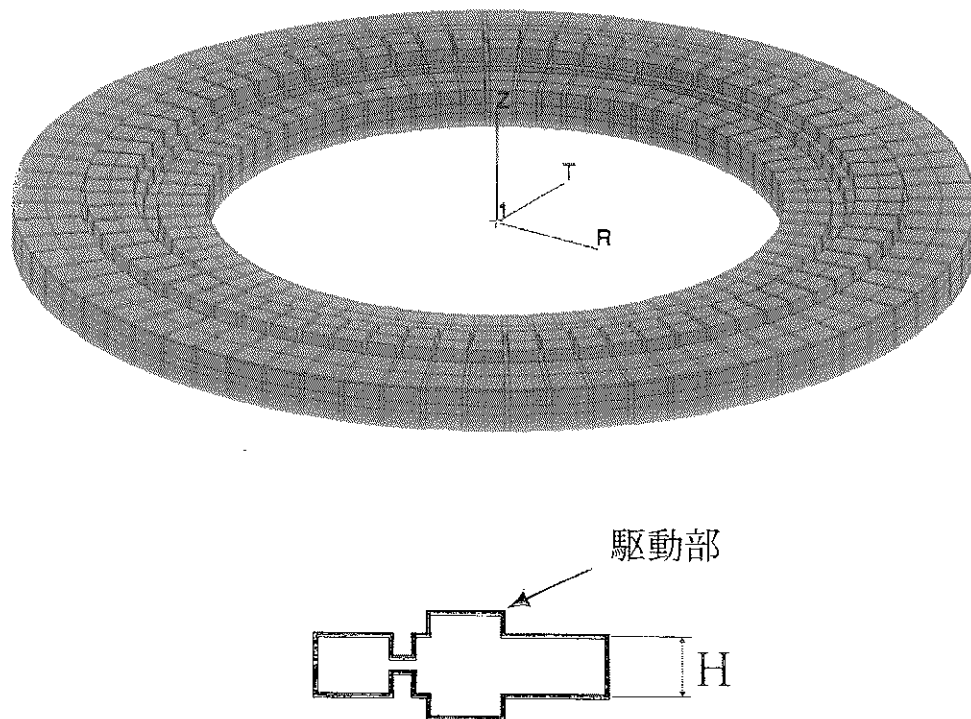


Fig.4.2 ステータの解析モデル 1



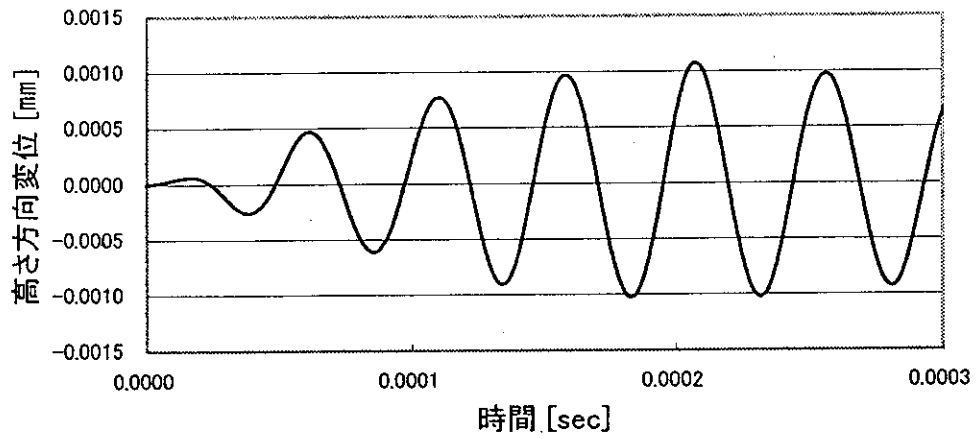


Fig.4.3 駆動部の高さ方向変位の時間変化（ステータ厚さ：2 mm）

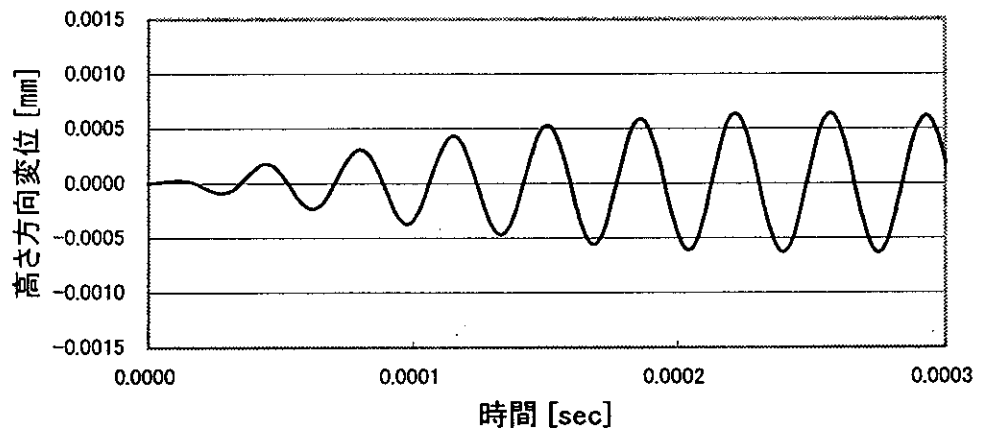


Fig.4.4 駆動部の高さ方向変位の時間変化（ステータ厚さ：3 mm）

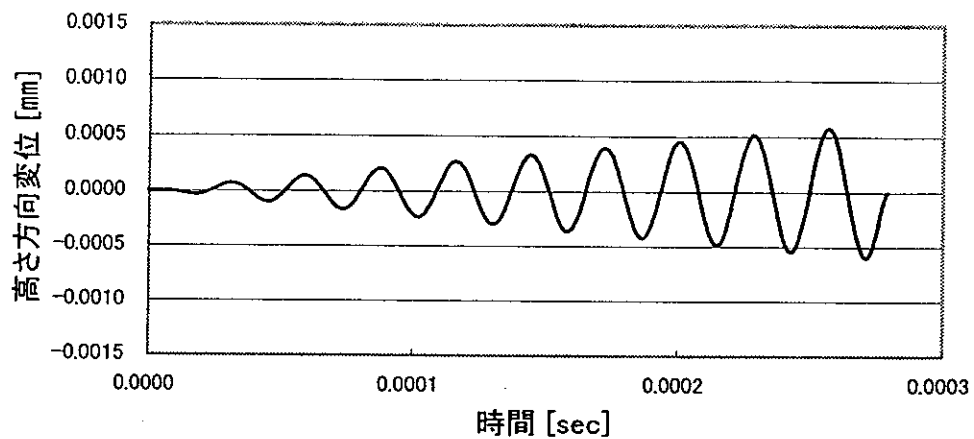


Fig.4.5 駆動部の高さ方向変位の時間変化 (ステータ厚さ : 4 mm)

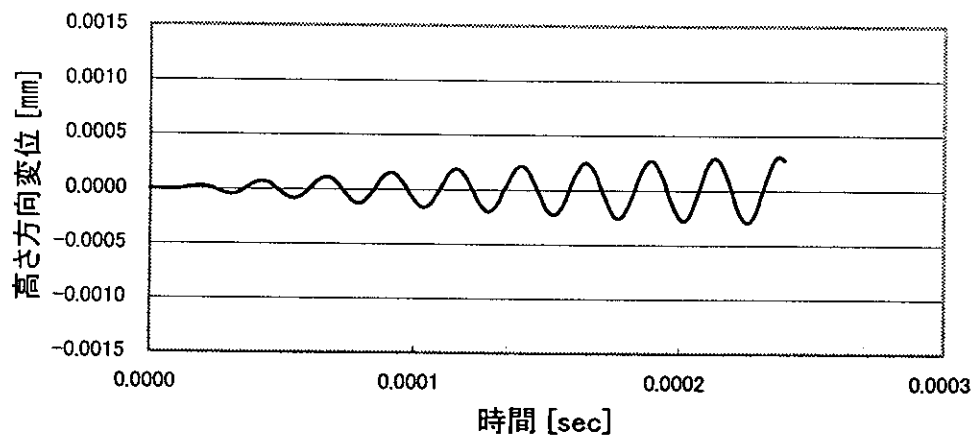


Fig.4.6 駆動部の高さ方向変位の時間変化 (ステータ厚さ : 5 mm)

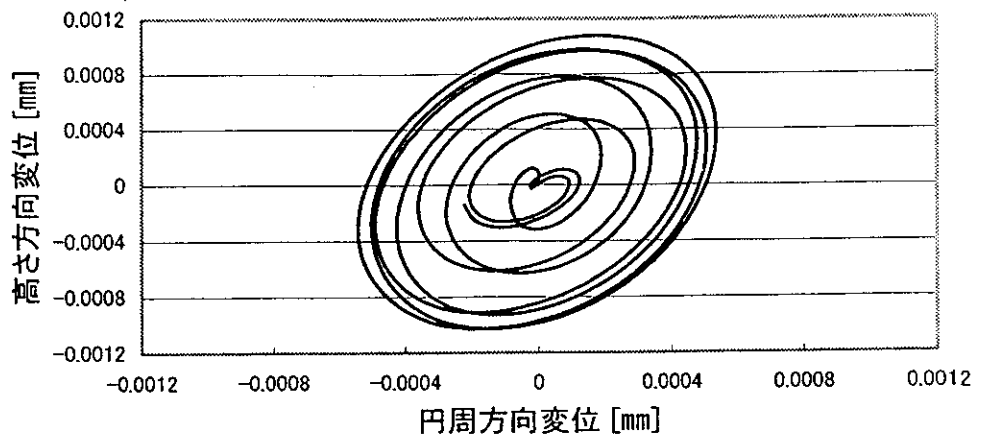


Fig.4.7 駆動部の楕円運動軌跡（ステータ厚さ：2 mm）

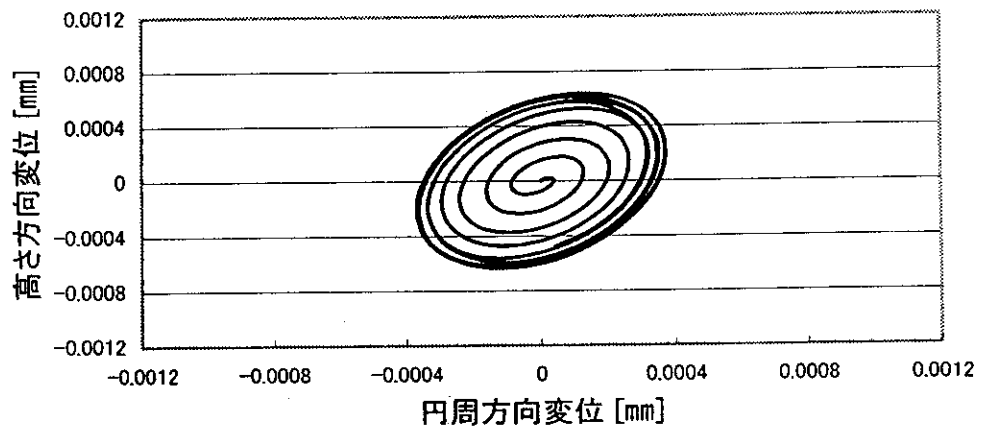


Fig.4.8 駆動部の楕円運動軌跡（ステータ厚さ：3 mm）

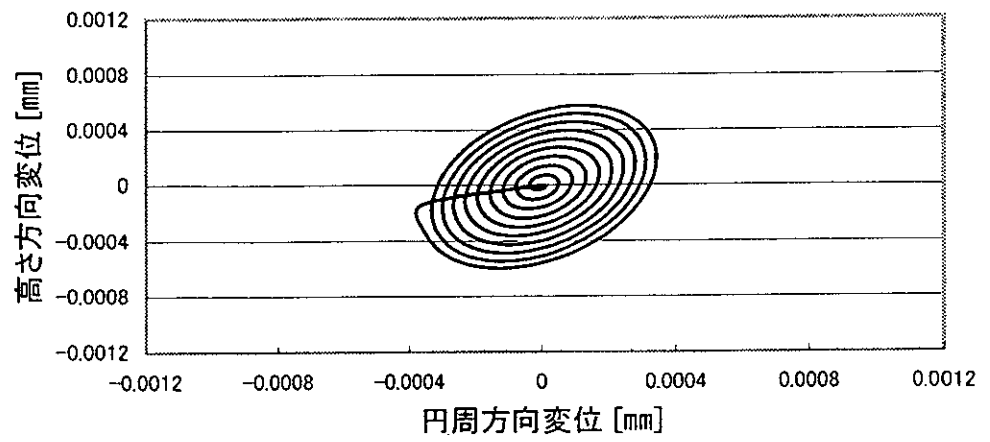


Fig.4.9 駆動部の楕円運動軌跡（ステータ厚さ：4 mm）

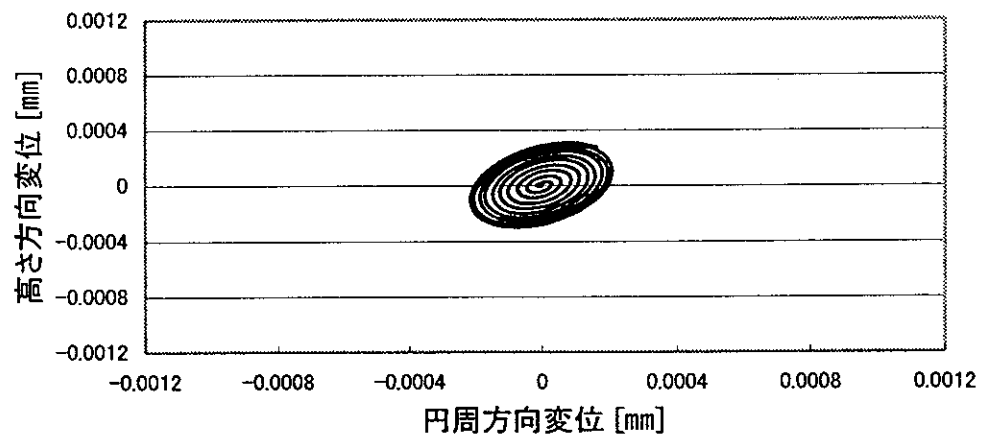


Fig.4.10 駆動部の楕円運動軌跡（ステータ厚さ：5 mm）