

### 3.1.3 押し付け圧調節機構

押し付け力の調節は、一方のステータを支える部分がスライド機構になっている。ネジによってスライダを動かすことにより、皿バネを介してステータをロータに押し付ける方法である。押し付け力の測定は、小型荷重変換器（ロードセル）で測定し、センサ インタフェース ボードによりコンピュータに取り込む。

小型加重変換器 (ロードセル)	製造元	共和電業
	形式	LM-50KA
	定格負荷	50kgf
	出力電圧	0.965mV/V
センサ インタフェース ボード	製造元	共和電業
	形式	PCD-100A

### 3.1.4 トルク測定装置

本実験においてトルクの測定は、バネばかりを使用して、中心軸からある距離の力を測定する。その距離と力を掛けてトルクを求める。以下にバネばかりの概略を示す。

バネばかり	名称	丸型バネ式テンションゲージ
1	製造元 許容範囲	YAWATA 0 g ~ 500 g
2	製造元 許容範囲	YAWATA 200 g ~ 2 kg
3	製造元 許容範囲	YAWATA 2 kg ~ 5 kg

### 3.1.5 電力系

ステータに加える電圧は、波形信号発生器から出される2つの波形を、アンプにより増幅させて得られる。

波形発生器は、ファンクションモードで周波数が最高12.8MHzの任意の波形を出力できる。Fig.3.9に無負荷電流をなくためのステータと、アンプのマッチング回路を示す。

以下に、機器の概略を示す。

波形発生器	製造元	東亜電波工業
	名称	任意波形発生器
	形式	FS-2121
	出力電圧	最大5V <sub>p-p</sub>
	出力周波数	サンプルレート 0.01kHz~25.6MHz
	位相差	0±360°
アンプ	製造元	エヌエフ回路設計ブロック
	名称	高速電力増幅器
	形式	4020
	最大電圧	±150V
	最大電流	2Arms, 5.66Ap-p (40Hz~200kHz)
	利得	×20、×40、×100 ×200

### 3.1.6 その他の計測機器

オシロスコープ	製造元	日立電子株式会社
	形式	VC-6045
テスター	製造元	横川電気
	形式	DIGITAL MULTIMETER 7533

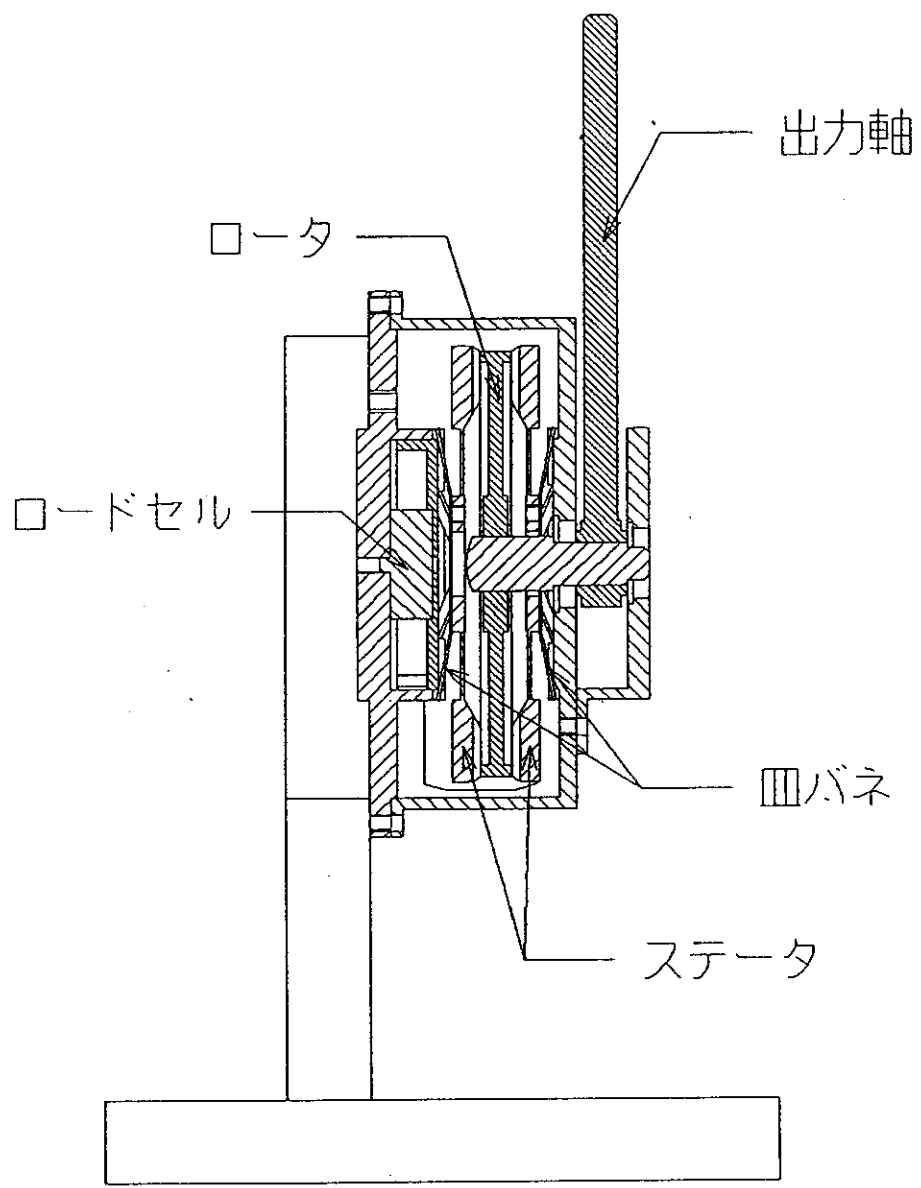


Fig.3.1 実験装置概略図

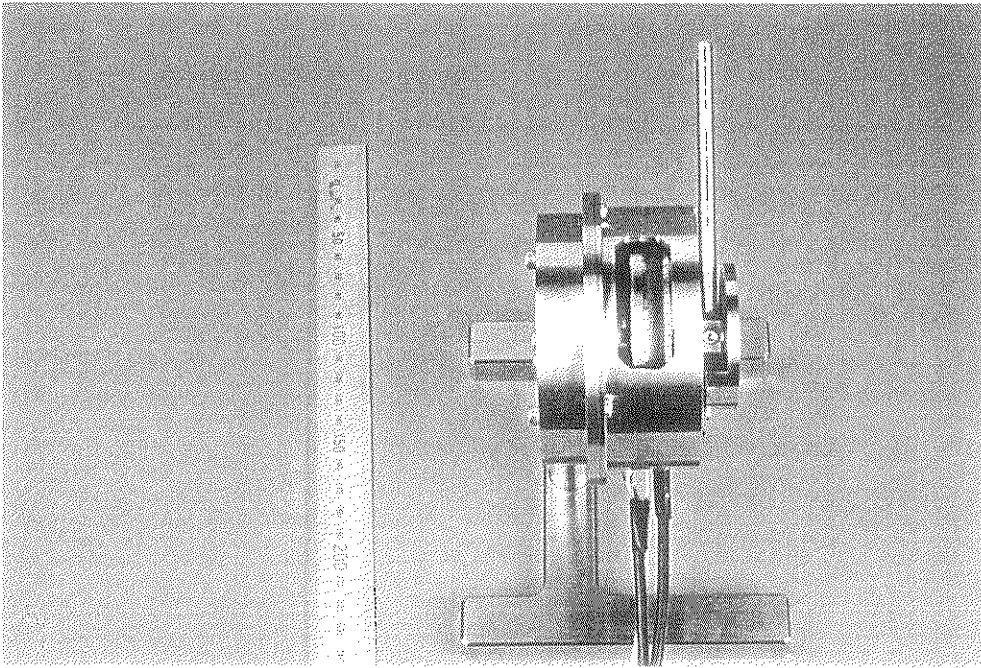
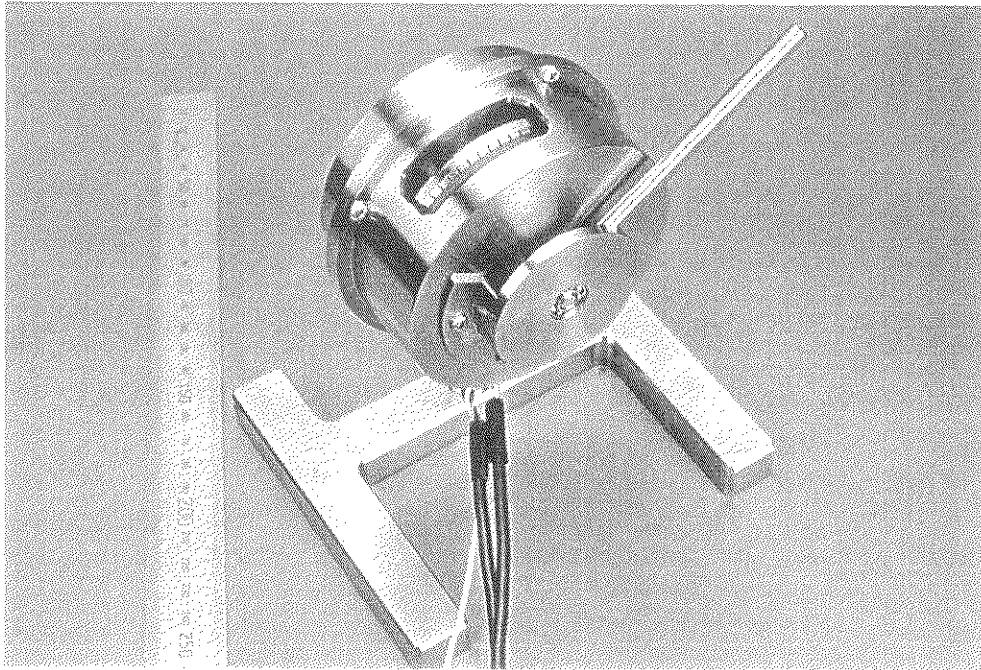


Fig.3.2 実験装置

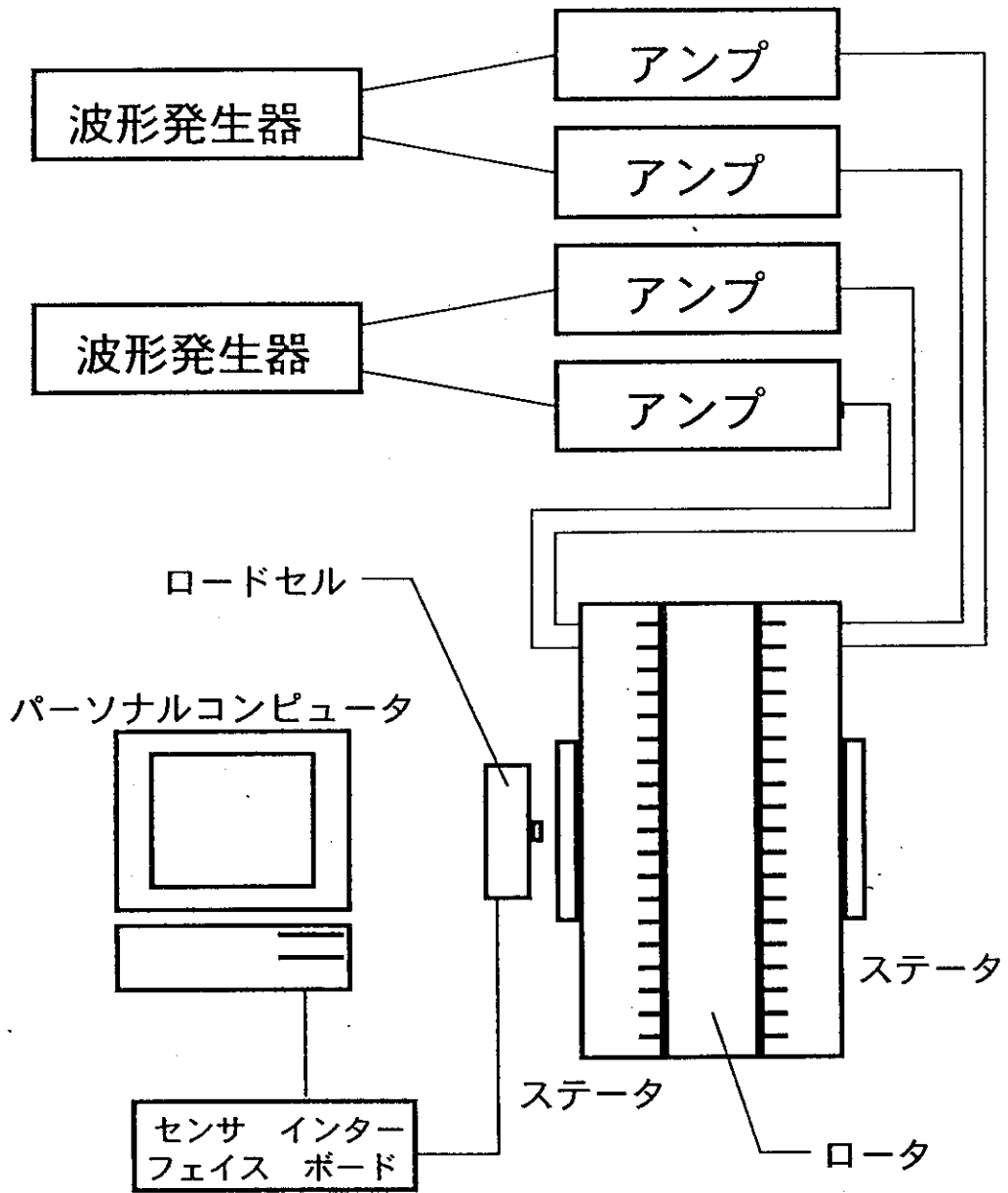


Fig.3.3 実験装置システム概略図

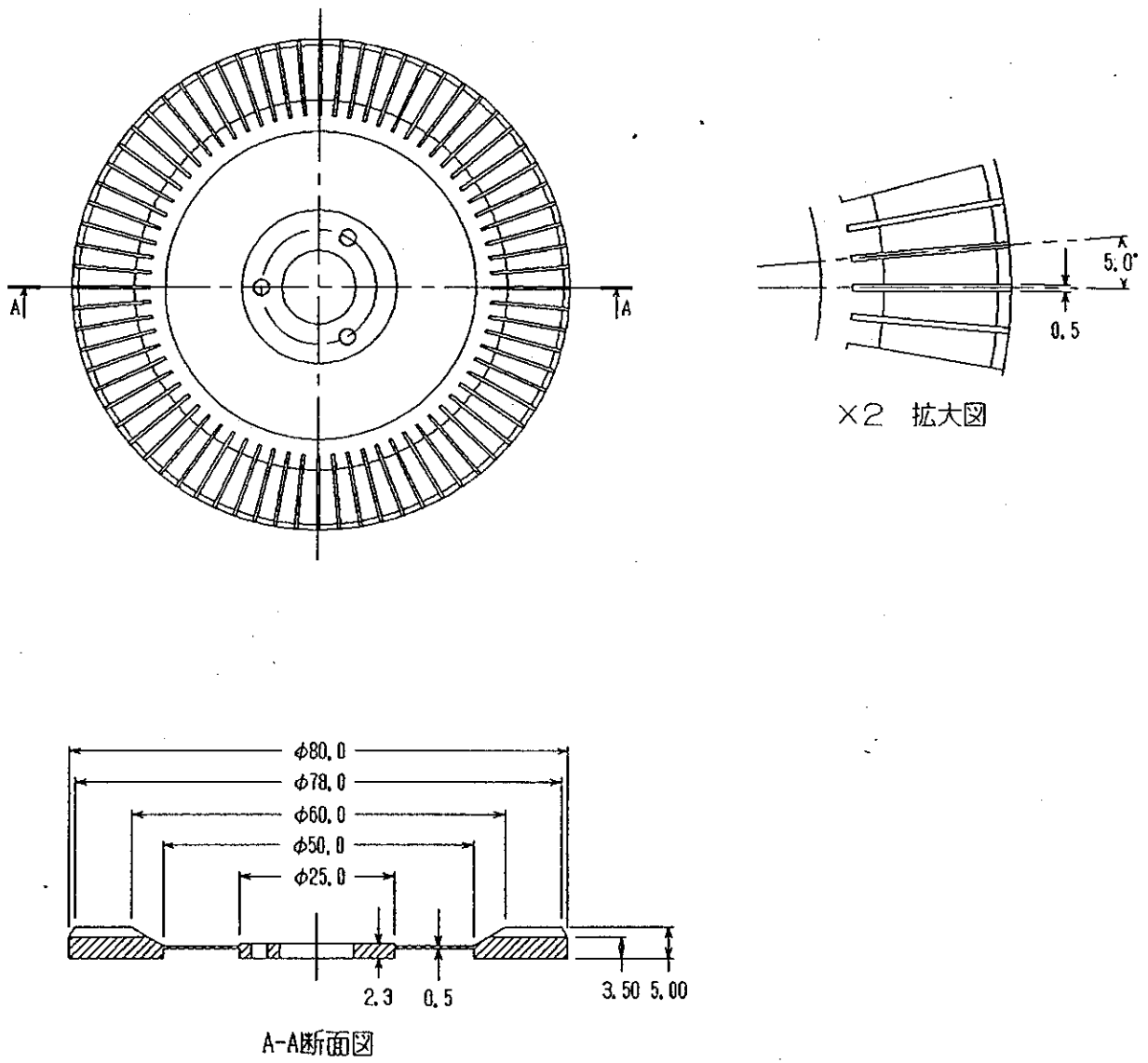


Fig.3.4 ステータ設計図



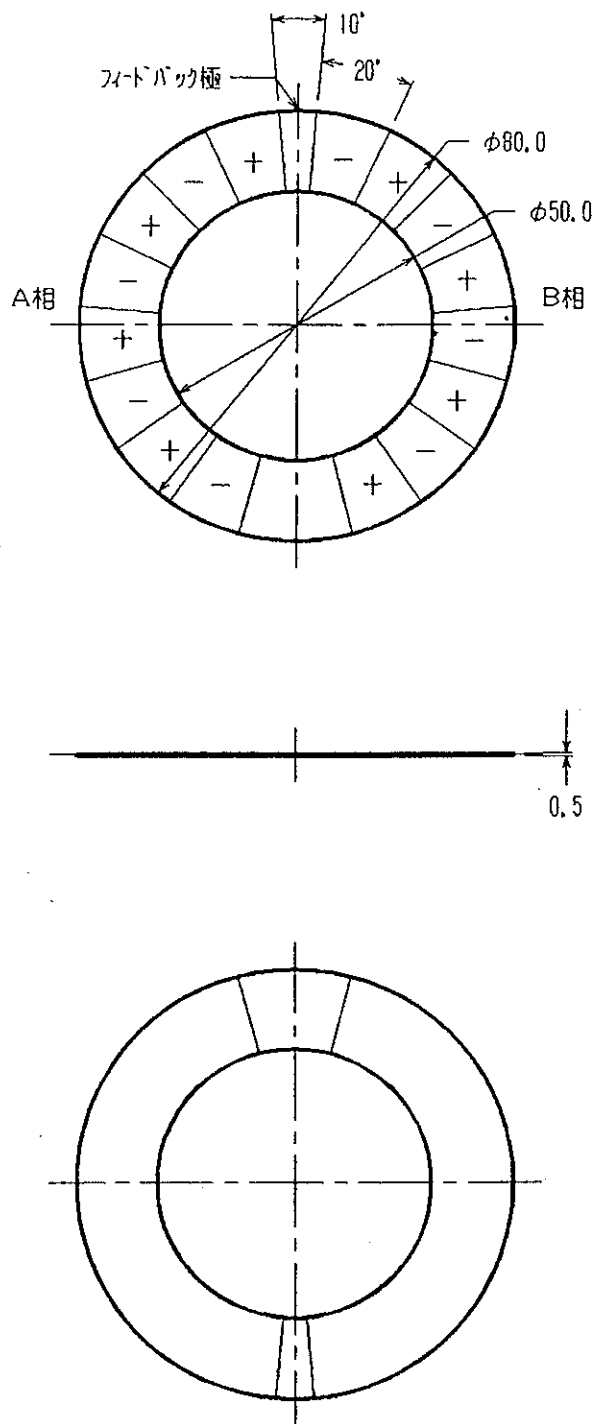


Fig.3.5 圧電素子設計図

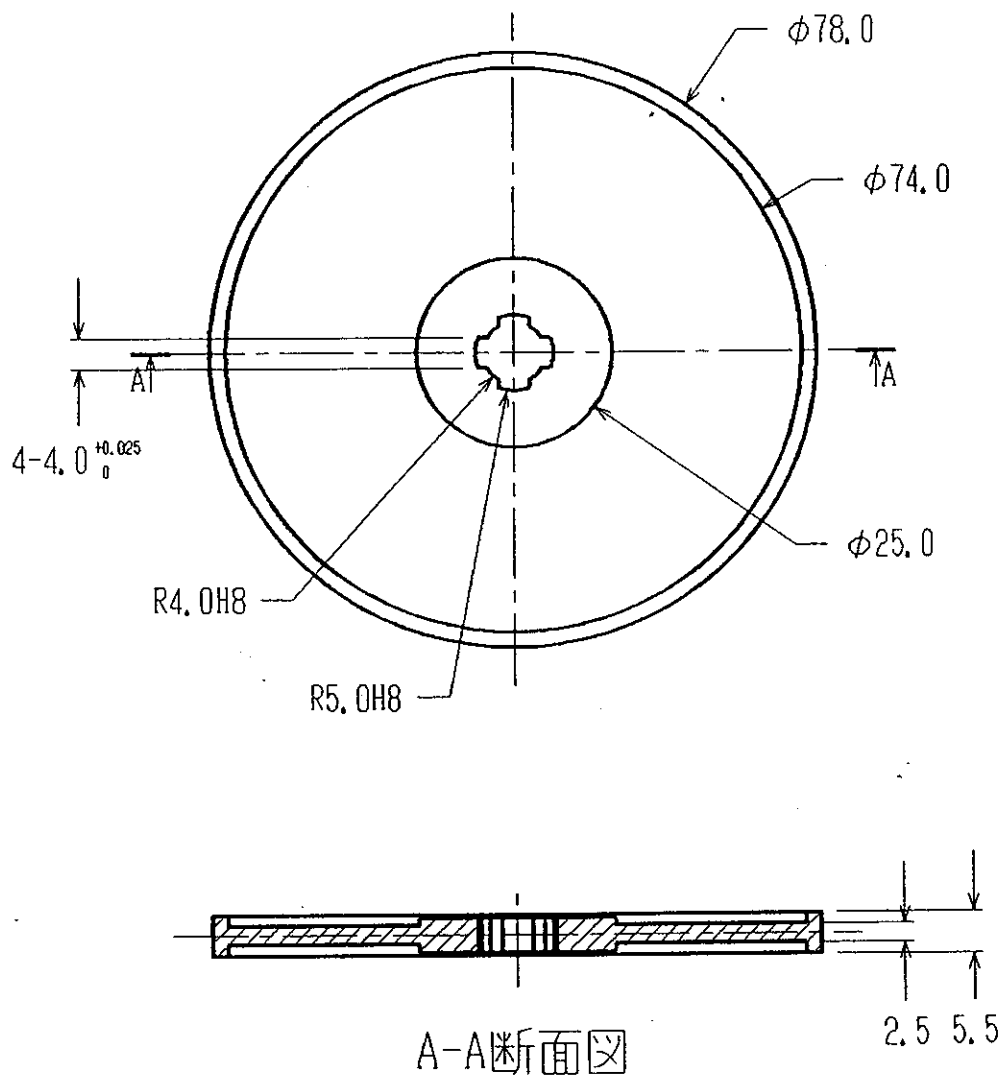


Fig.3.6 ロータ設計図

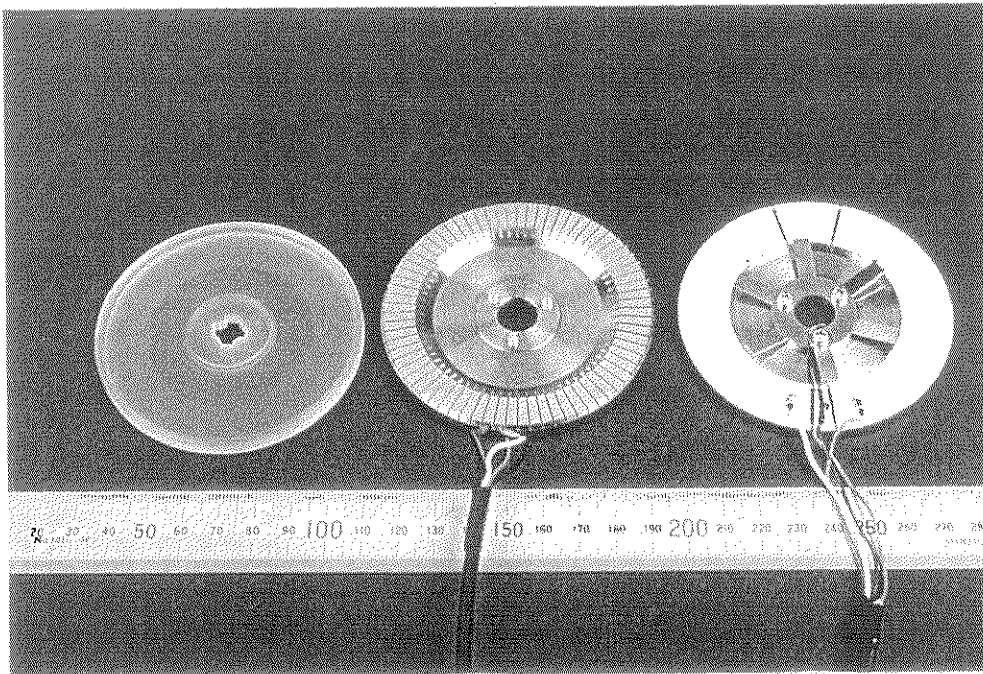


Fig.3.7 ステータ・ロータ写真

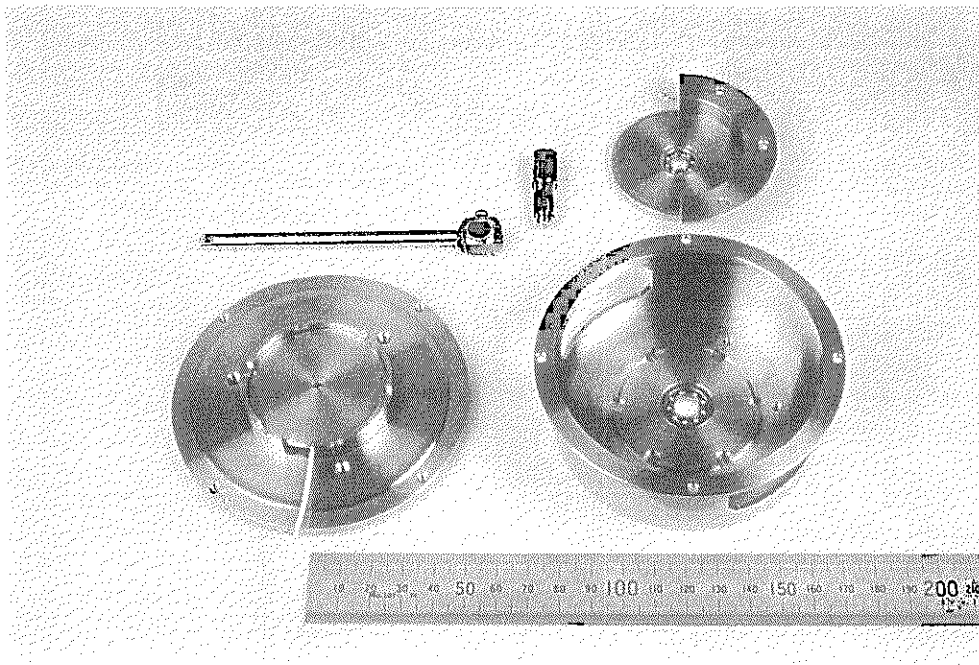


Fig.3.8 部品写真

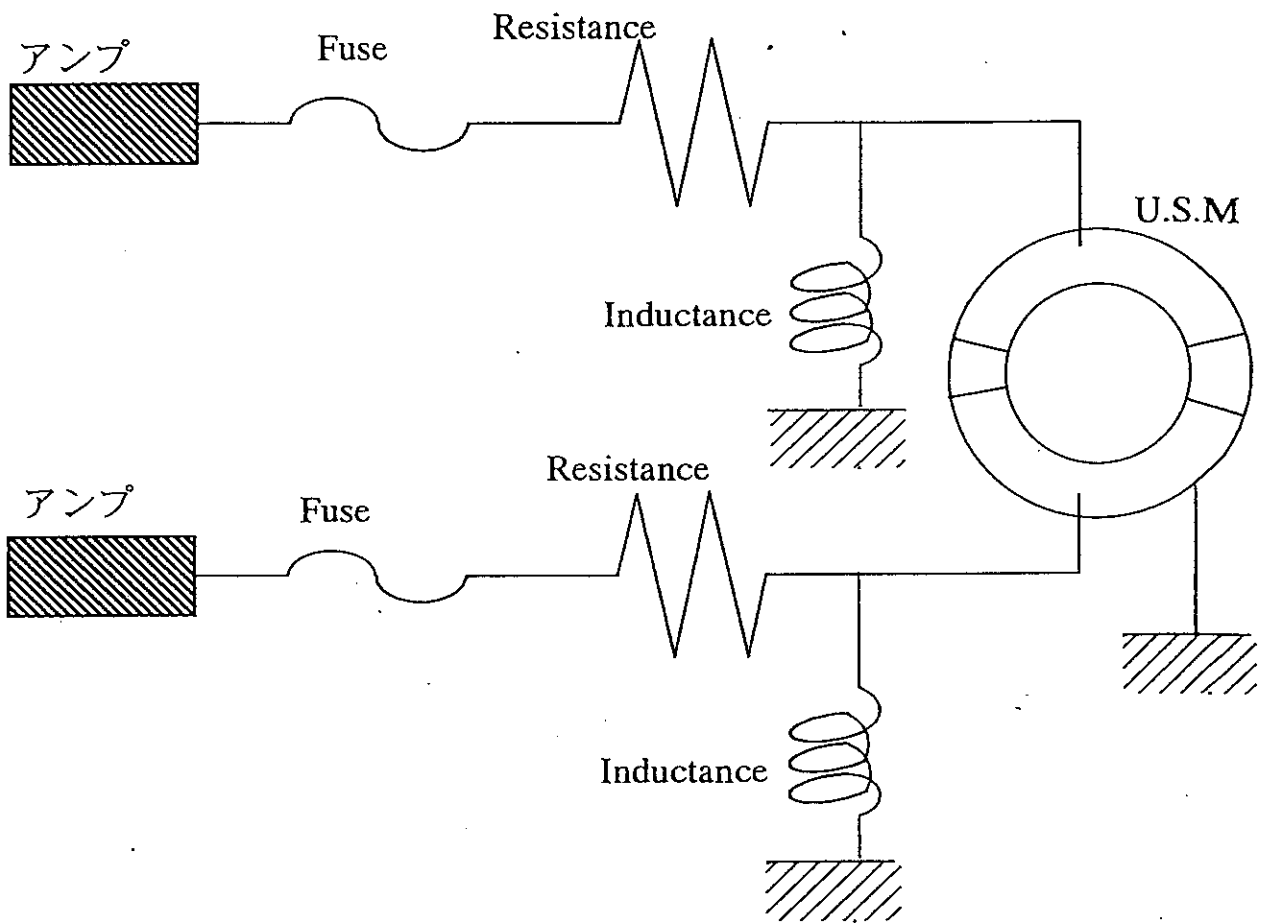


Fig 3.9 マッチング回路

## 3.2 実験内容

### 3.2.1 周波数特性

本実験では、ステータは2枚用い、ロータを挟む格好になっている。そこで、2枚のステータへの入力周波数の違いにより、モータがどのような動作をするか調べる実験を行った。また、本実験でのトルクは、すべて、回転速度が0のときの駆動トルクである。回転速度は、すべて無負荷状態での速度である。

2枚のステータへの入力周波数が、全く同じときのトルクを測定した。次に、異なる入力周波数のときのトルクを測定した。

入力周波数が異なるとき、モータは、回転・静止・回転・静止…というようなことを周期的に起こした。そこで、その回転・静止の周期を求めた。

また、入力周波数が異なるとき、ステータのフィードバック電圧をオシロスコープを使用して測定した。

トルクの測定方法は、出力軸先端にバネばかりを取付け、回転が止まったときの負荷をバネばかりにより測定し、その値とロータ中心から出力軸先端までの距離を掛けたものである。(Fig.3.10)

周期の測定方法は、数回の回転・静止の時間をストップウォッチにより計測し、その時間を回数で割ったものである。また、フィードバック電圧は、オシロスコープで観測して求めた。

### 3.2.2 基本特性

モータの基本特性を知る為に、次の実験を行った。

- ・押し付け力ートルク特性
- ・押し付け力ー回転速度特性
- ・電圧ートルク特性
- ・電圧ー回転速度特性
- ・位相差ートルク特性
- ・位相差ー回転速度特性
- ・駆動トルクー回転速度特性

押し付け力をパラメータにした実験は、ステータが2枚のときと、1枚のときとで実験をした。電圧、位相差をパラメータにした実験は、ステータが2枚のときのみ実験した。

ここでは、入力周波数は、前述の共振特性での結果から、全く同じ周波数では回転が安定しなかったため、比較的回転が安定していた、周波数を200Hzずらした状態で実験をした。

入力電圧の位相差は、2枚のステータが向き合っているため、ロータの回転方向が同じになるように、正負をきめ、位相差の絶対値は同じである。位相差をパラメータにした実験以外は、位相差は90°にした。回転速度の測定は、出力軸が何回転かするのをストップウォッチにより測定し、測定時間を回転数で割ることにより、回転速度を算出した。

駆動トルクー回転速度の測定は、Fig.3.11に示すように、出力軸の先端に重りを取付け、その状態での回転速度を測定した。ここで求めた回転速度は、重りを下から上に持ち上げるときの回転速度である。

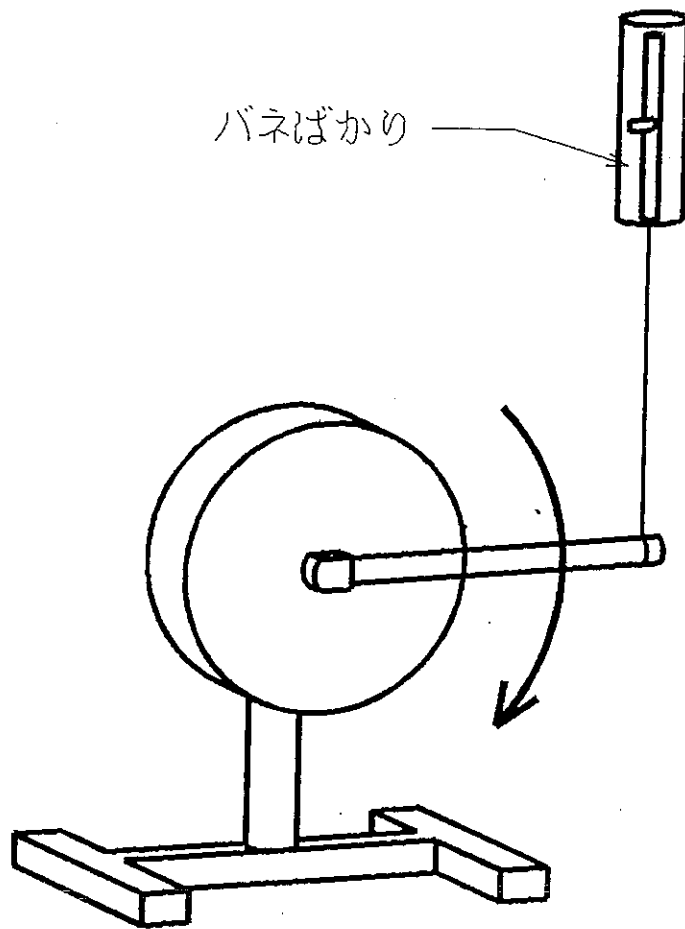


Fig.3.10 トルク測定方法

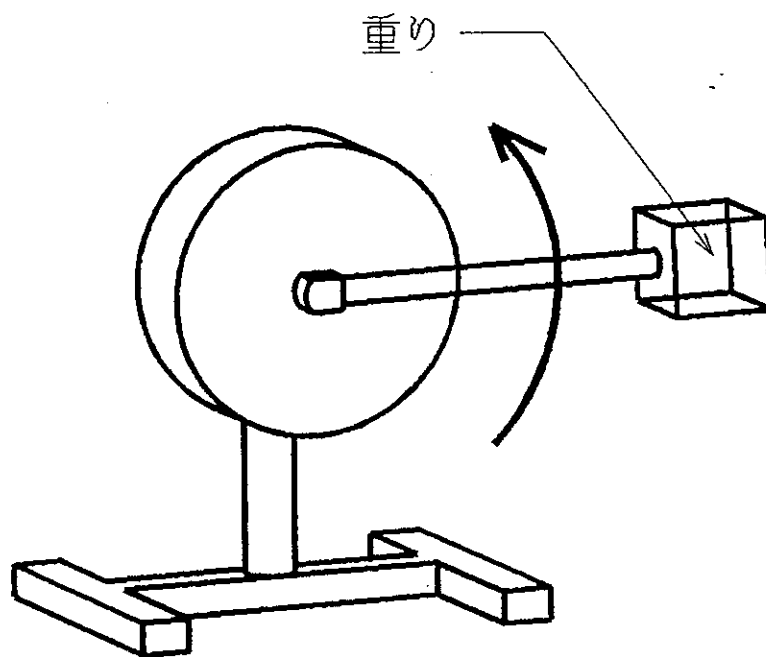


Fig.3.11 駆動トルク測定方法

## C. 研究結果

### 4.1 周波数特性

結果をFig.4.1～Fig.4.4に示す。

Fig.4.1は、サンドイッチ構造で、ステータ 2 枚で駆動しているとき、入力周波数をそれぞれ32.7kHz、33.1kHzにして、一方のステータのフィードバック電圧を測定したものである。Fig.4.2はステータが 1 枚のときの、ステータのフィードバック電圧の様子である。

Fig.4.3はステータ 2 枚で駆動したとき、2 枚のステータの入力周波数の差による、うなりの周期の変化である。この実験は、一方のステータの周波数を33.1kHzにして、もう一方はその値から増やしていった。

Fig.4.4はステータ 2 枚で駆動したとき、2 枚のステータの入力周波数の差による、モータのトルクの変化である。

#### 4.1.1 フィードバック電圧測定実験

Fig.4.1を見ると異なる周波数で駆動しているとき、ステータはうなり現象を起こしていることが分かる。原因としては、一方のステータの振動がロータを介して、片方のステータに振動が伝わることである。このことにより、ステータは異なる周波数の振動が合成されて、うなりの形をした進行波が発生する。これは、2 枚のステータ両方に発生していた。



うなりが発生すると、モータは、うなりの波形が山のときは回転するが、谷のときステータの振動は非常に小さいので回転しない。それゆえ、入力周波数が異なるとき、モータは回転・静止…という現象を起こす。(Fig.4.5)

Fig.4.2はステータが1枚のときのもので、振幅がほぼ一定の正弦波になっている。通常の超音波モータでは、フィードバック電圧はこのような波形である。

#### 4.1.2 うなりの周期測定実験

うなりの現象について、2つの振動の合成を考える。

$$x_1 = A \sin \omega_1 t \quad (4.1)$$

$$x_2 = A \sin \omega_2 t \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} A & = \text{振幅} \\ \omega_1, \omega_2 & = \text{振動角速度} \end{cases}$$

この2式を加えると

$$x = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right) \quad (4.3)$$

となる。式(4.3)において、 $|\omega_1 - \omega_2| \ll |\omega_1 + \omega_2|$ が成立するとき、 $\cos\{(\omega_1 + \omega_2)t/2\}$ は速い振動因子であり、 $\cos\{(\omega_1 - \omega_2)t/2\}$ がうなりの振動である。よって、うなりの式は次式で表せる。

$$X = \pm 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \quad (4.4)$$

うなりの周期は、式(4.4)で示される周期の半分、すなわち $2\pi/|\omega_1 - \omega_2|$ であり、周波数で表すと次式のようなになる。(Fig.4.6)

$$T = \frac{1}{|f_1 - f_2|} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} T & = \text{うなりの周期} \\ f_1, f_2 & = \text{周波数} \end{cases}$$

Fig.4.3を見ると、うなりの周期は式(4.5)と一致することが分かる。また、うなりの周期は、位相差には関係なく、周波数にのみにより決まることが分かる。

Fig.4.3から、モータの回転を連続的にするには、入力周波数差を100Hz以上にするのが良い。100Hzより下では、モータの回転は不連続で、デジタル的である。しかし、100Hz以上であっても、うなりが発生すると、モータ全体が、うなりの周期で振動してしまう。これは大きな問題点である。

#### 4.1.3 周波数差一トルク測定実験

この実験では、まず2枚のステータに全く同じ周波数を入力してトルクを測定した。しかし、同じ周波数ではモータは、回転するときと、しないときがあった。10回測定をして1回程度の割合でしか回転しなかった。回転時は、ステータにはうなりは発生せず、スムーズに回転する。しかしながら、その回転は非常に不安定な場合があり、途中で停止したり、負荷をかけると停止したりすることがある。これらの原因はFig.4.7に示す様に、2枚のステータの振動の山と谷の位置であると考えられる。山と山が一致している場合、ステータとロータの接触は、力を伝える山の部分であり、ロータは通常のように回転すると考えられる。これに対して、山と山が一致せず、ずれている場合、ステータとロータの接触は、山の部分以外でも接触していて、谷の部分での接触がある。谷の部分での接触は、力を伝える向きが山の部分とは反対方向であるので、回転を邪魔することになる。それにより回転しないと考えられる。よって、入力周波数が同じとき、入力電圧のスイッチのタイミングや、ステータのセッティングなどにより、回転するときと、しないときがあり、モータとしては非常に不安定である。

トルクに関しては、入力周波数が同じときで良好に回転しているとき、29.5kgf\*cm前後であった。この値はFig.4.4を見ると、入力周波数をずらしたうなりが生じている場合と比較して、ほぼ同じである。周波数差が200Hzぐらいまではモータのトルクは、周波数差が0の場合と同じくらいである。200Hzより大きくすると、トルクは減少していき、450Hz付近で回転しなくなる。このトルク減少の原因は、2枚のステータは同じくらいの共振周波数であるので、一方のステータの周波数が、共振周波数から離れていくからだと考える。

また、周波数をずらしたとき、モータの回転は安定していて、周波数が同じときの様な現象は全く起こらない。このことより、うなりが起きているときは、ステータの振動の山と山が一致していると考えられる。

以上のことより、本実験ではモータの安定性・性能を考えて、2枚のステータに入力する周波数は200Hzずらすのが良いと思い、以後の実験は入力周波数を200Hzずらして実験した。

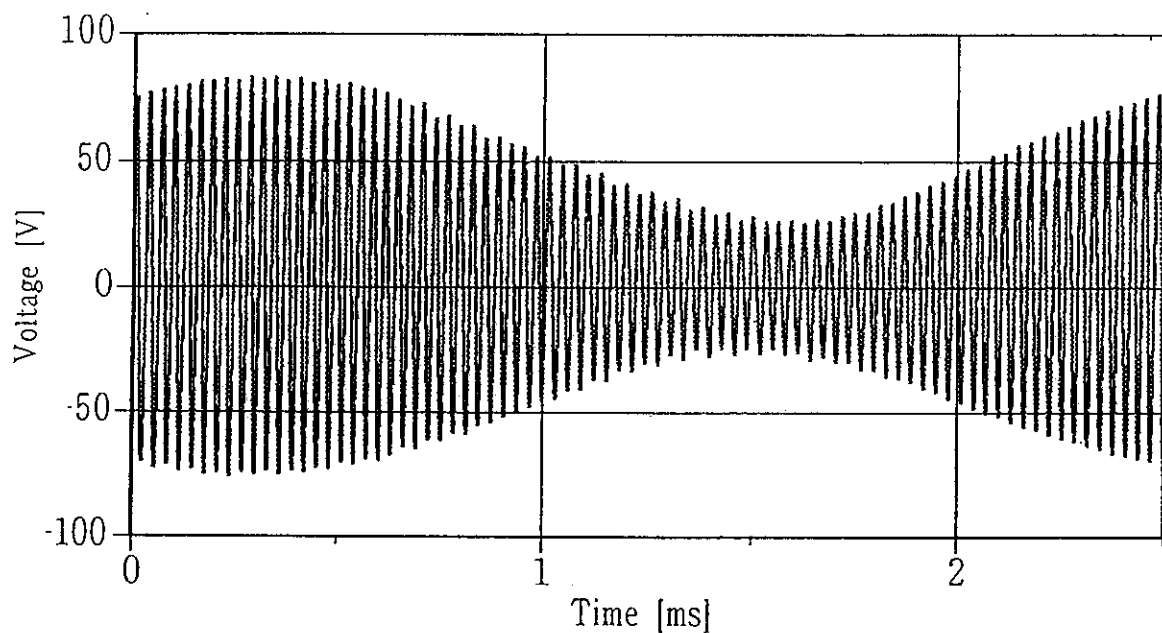


Fig.4.1 ステータ 2 枚のときのフィードバック電圧  
 (周波数33.1kHz,32.7kHz、押し付け力25kgf、印可電圧160Vp-p)

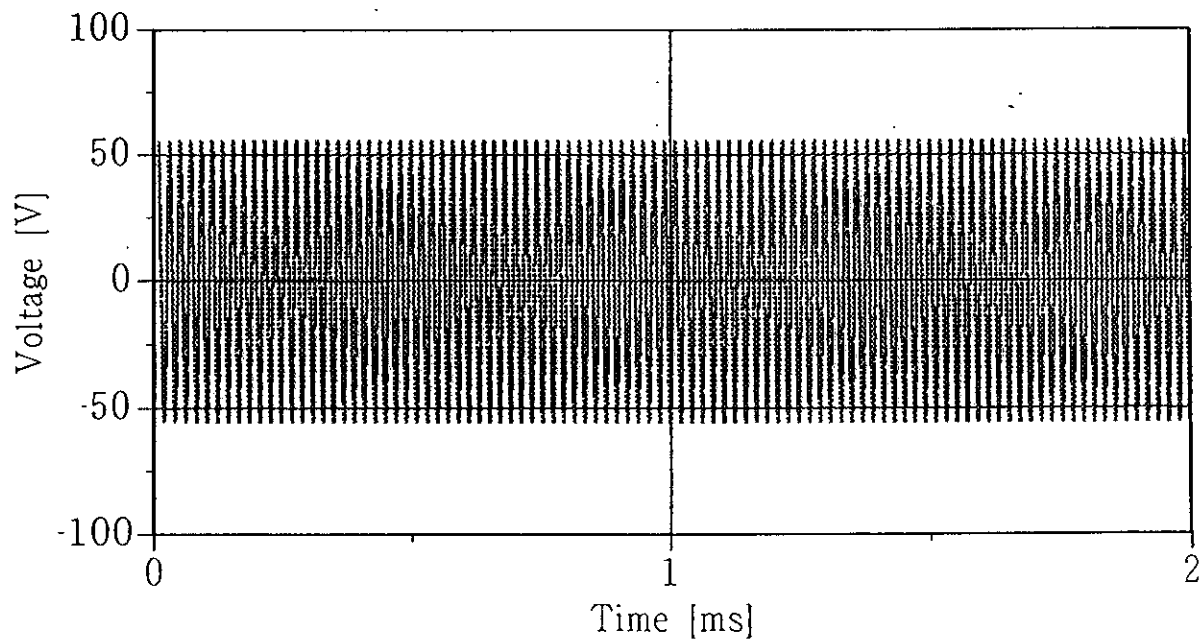


Fig.4.2 ステータ 1 枚のときのフィードバック電圧  
 (周波数32.7kHz、押し付け力25kgf、印可電圧160Vp-p)