

Fig.4.3 周波数差—うなりの周期
 (押し付け力25kgf、印可電圧200Vp-p)

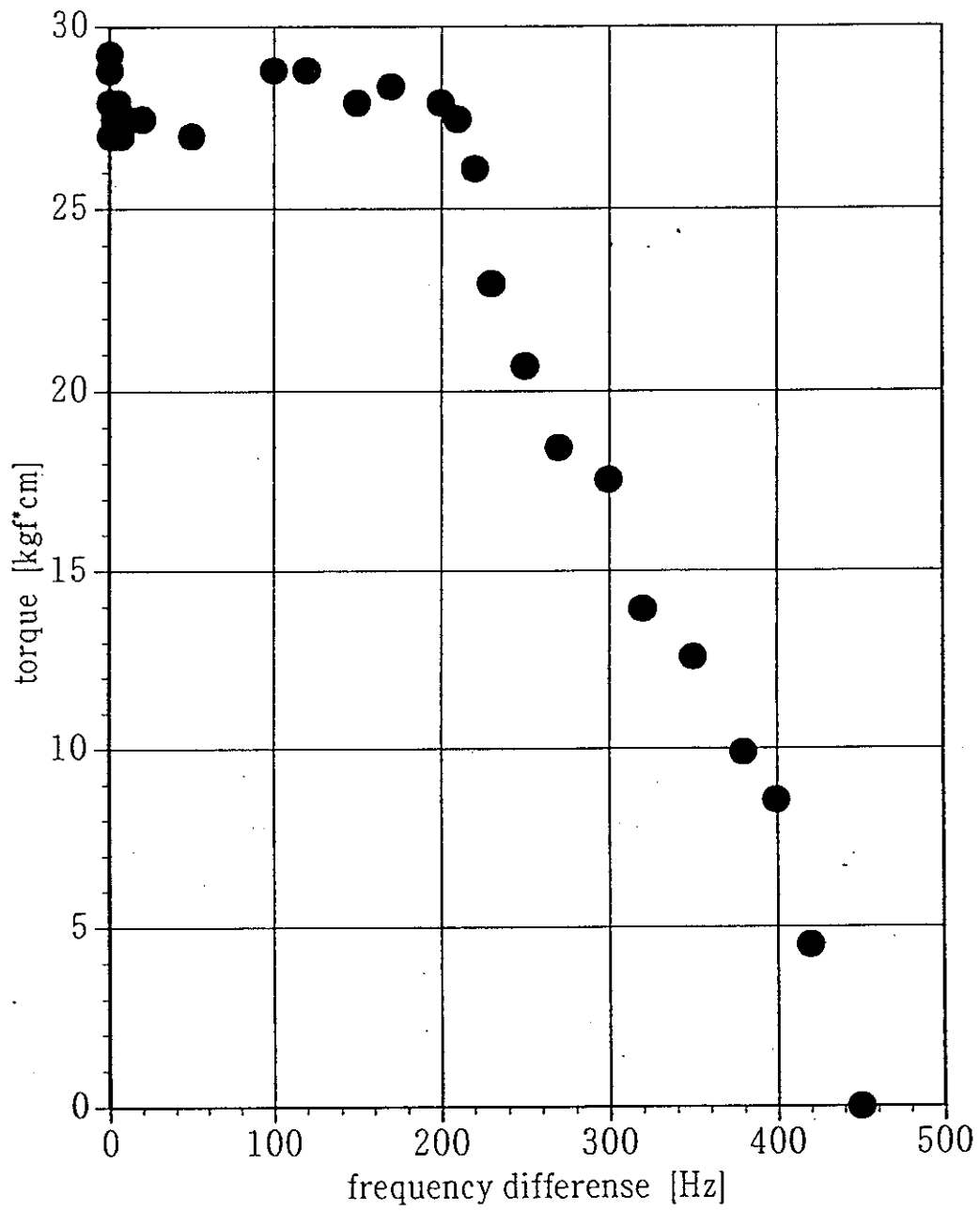


Fig.4.4 周波数差-トルク
 (押し付け力30kgf、印加電圧200Vp-p)

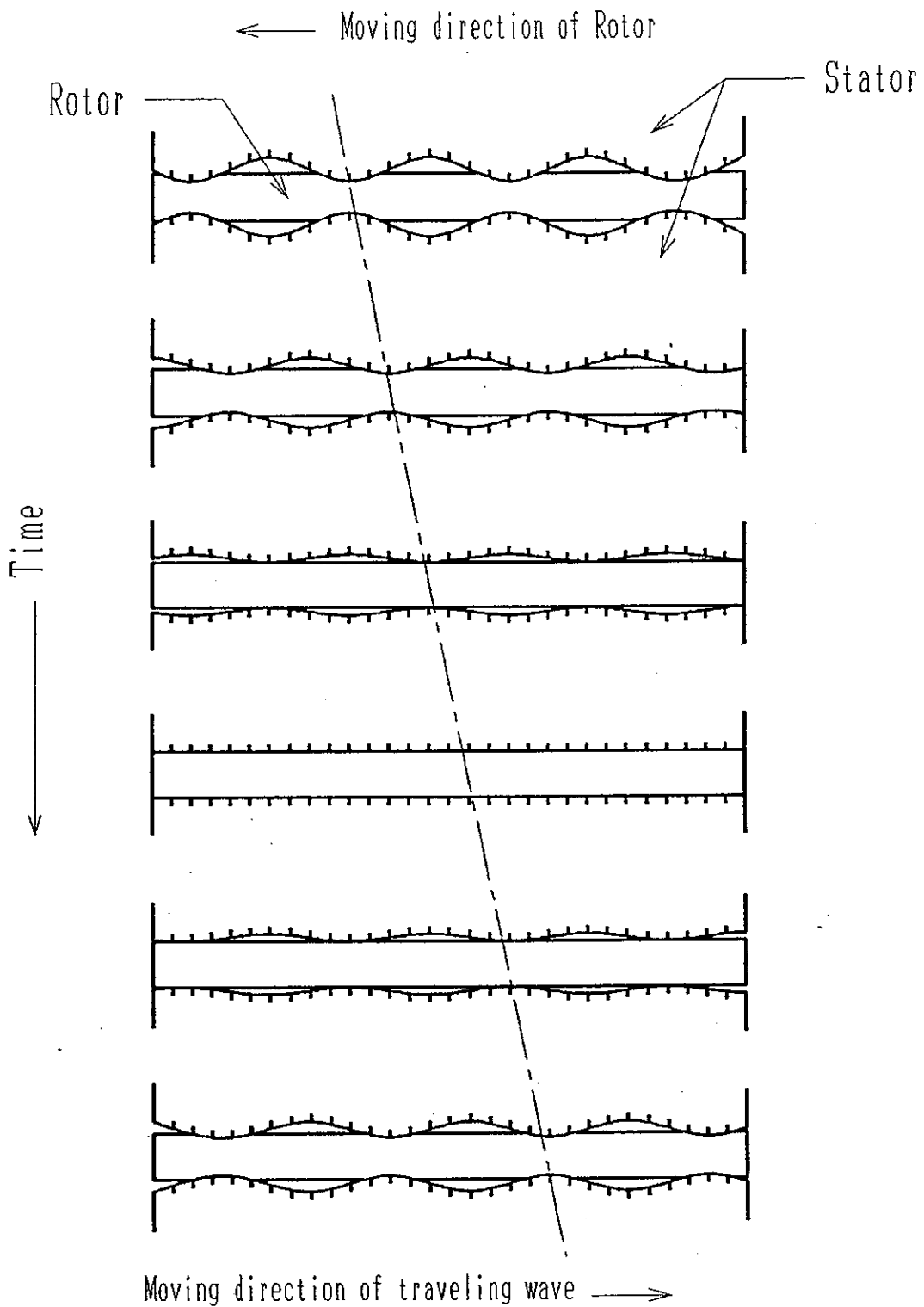


Fig.4.5 うなりが生じているときのステータの振動

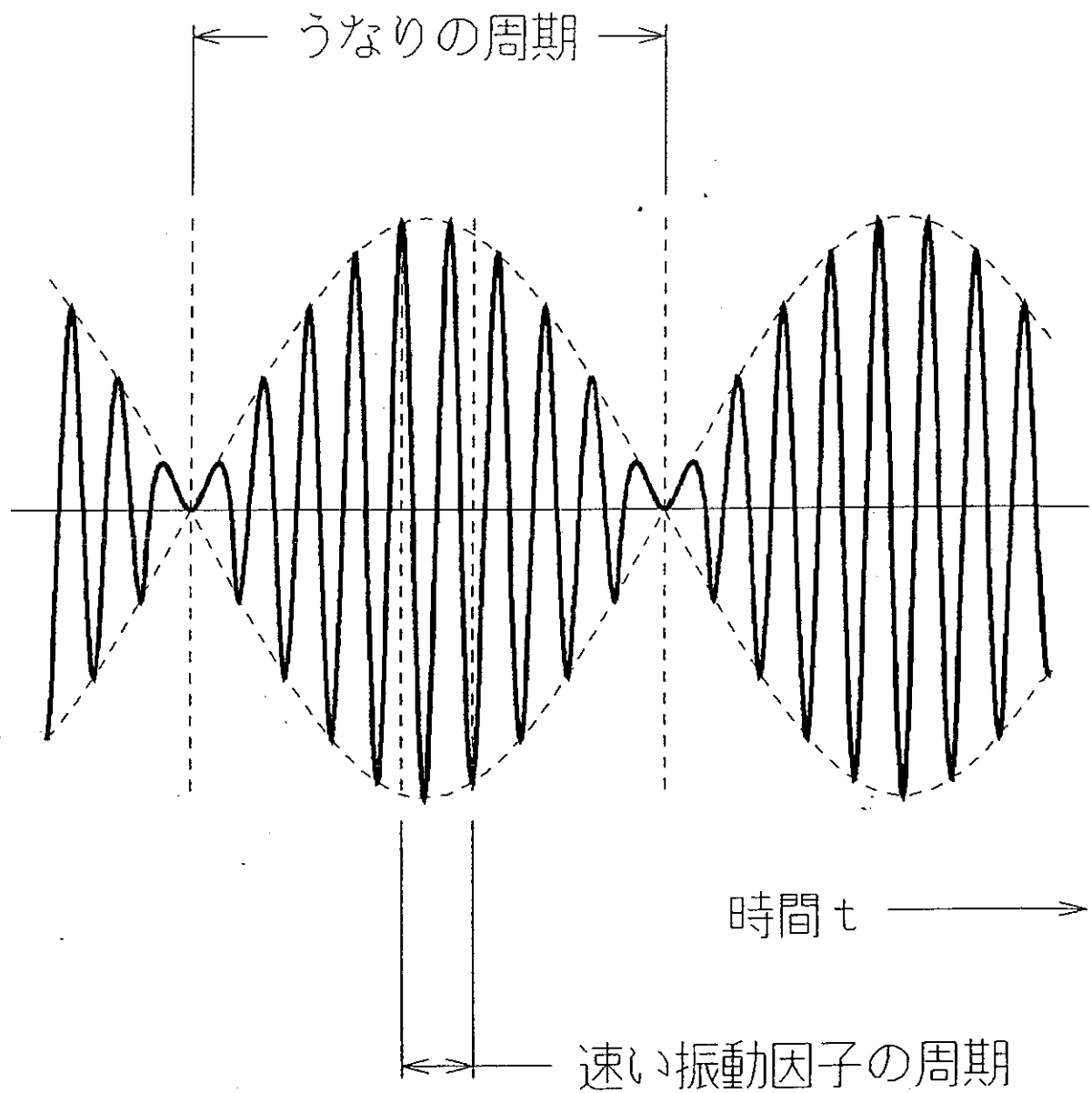


Fig.4.6 うなりの周期

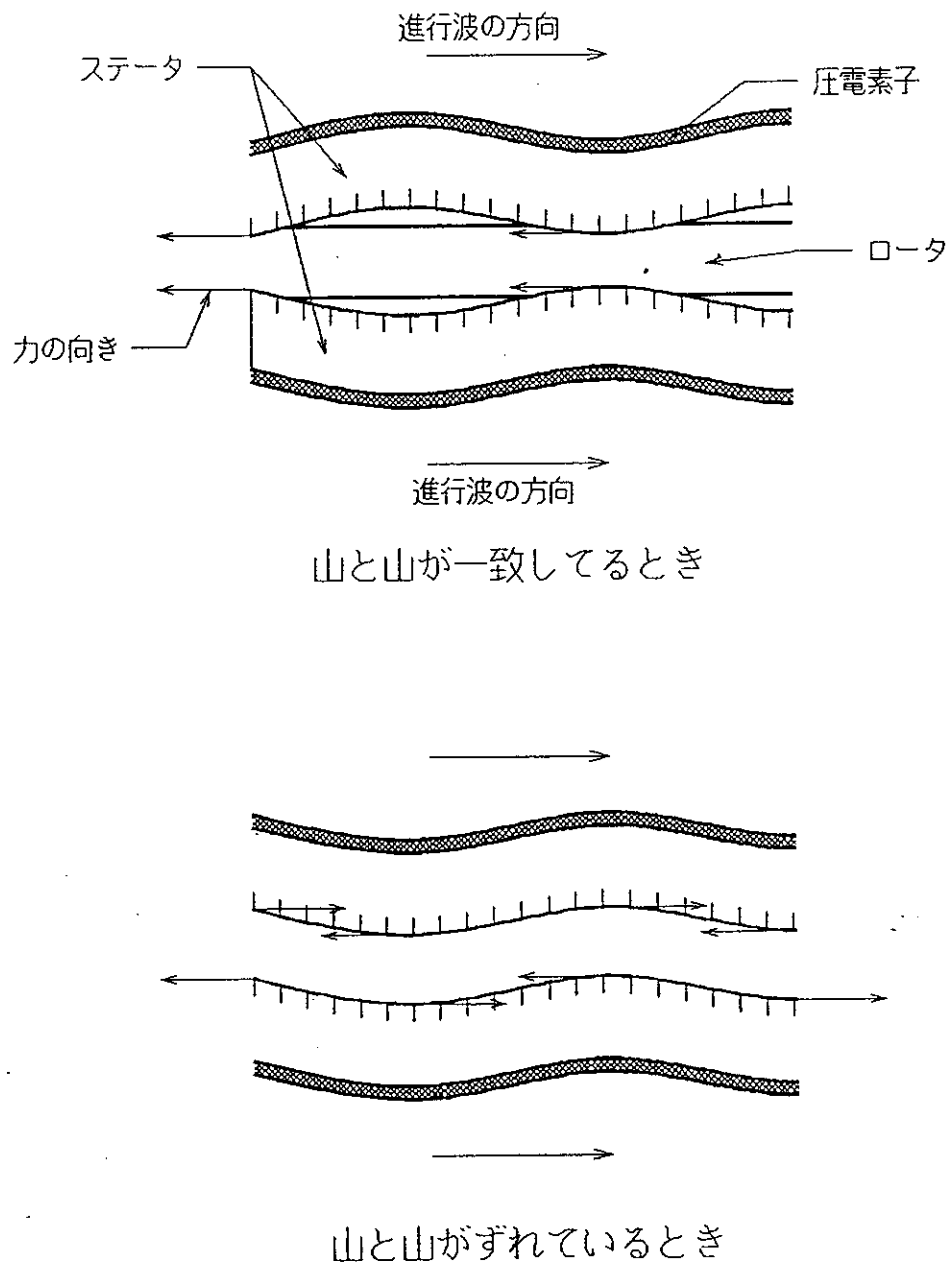


Fig.4.7 同周波数でのステータからロータへの力の伝播

D. 考察

4.2 基本特性

結果をFig.4.8～Fig.4.16に示す。ここでの測定は、ステータ 2 枚のとき、入力周波数はすべて200Hzずらして行った。

Fig.4.8, Fig.4.9は押し付け力の変化によるトルク特性。Fig.4.10, Fig.4.11は押し付け力の変化による回転速度特性。それぞれステータ 2 枚と 1 枚のときの実験した。

Fig.4.12は印加電圧の変化によるトルク特性。Fig.4.13は印加電圧の変化による回転速度特性。

Fig.4.14は位相差の変化によるトルク特性。Fig.4.15は位相差の変化による回転速度特性。

Fig.4.16は駆動トルクの変化による回転速度特性。

4.2.1 押し付け力による特性

測定は印加電圧を160Vp-p, 200Vp-pで2回行ったが、共に同じ様な傾向が得られた。トルクは押し付け力に比例し大きくなり、押し付け力が30kgf付近で最高になり、それ以上は減少していった。これは30kgf以上では、ステータ表面波の山がロータに食い込み過ぎるので、回転方向以外の方向に力が生じ、トルクは減少すると考えられる。また23kgf以下では、200Vp-pと160Vp-pで同じくらいになる。この原因としては、トルクは、ある電圧以上では電圧の高低によらず、押し付け力にのみにより決まるといことが考えられる。つまり、ある押し付け力に対して、最適な電圧の値があると考えられる。

ステータ 2 枚のときと、1 枚のときのトルクを比較すると、押し付け力30kgf付近の最高値では、2 枚は 1 枚の約 1.5 倍になった。Fig.4.8, Fig.4.9を見ると、2 枚の場合、トルクは、押し付け力25kgfぐらいまで押し付け力に比例して大きくなってい

るが、25kgf過ぎから上昇率が小さくなっている。それに対して、1枚の場合、30kgfまで比例して大きくなっている。このことから、2枚の場合、トルクが限界のときの押し付け力は、1枚のときに比べて、小さいことが分かる。しかし、25kgf以下では、2枚でのトルクは1枚でのトルクと比べて、約2倍である。以上のことより、サンドイッチ構造では、押し付け力が小さいときは、トルクは1枚のモータの2倍得られるが、押し付け力が大きいと2倍にはならない。

回転速度は2枚のとき、押し付け力が20kgf以上で横ばいになり、ある値を過ぎると、減少していく。20kgf以下では回転数は小さくなっているが、これは押し付け力が小さすぎて、ステータからロータにうまく力が伝わらないと考えた。また30kgf以下では電圧の高低によらず同じ様な速度である。2枚のときと1枚のときの回転数を比較すると、2枚のほうが速い。トルクが最高値である30kgfでは、倍以上の速さである。

4.2.2 電圧による特性

Fig.4.12を見ると、トルクは電圧が高いほど大きい。押し付け力20kgfの結果を見ると、電圧150V_{p-p}以上ではトルクは一定になっている。これにより、ある押し付け力に対して、最適な電圧の値があり、その値より高い電圧を印加しても、トルクは上がらないことが分かる。

回転速度は、Fig.4.13より電圧に比例して大きくなることが分かる。この測定は押し付け力30kgf,25kgf,20kgfで行ったが、押し付け力の値に対してあまり違いがない。これにより、回転速度は最適な押し付け力の値以下では、押し付け力により決まるものではなく、電圧により決まることが分かる。

4.2.3 位相差による特性

Fig.4.14, Fig.4.15を見ると、トルク及び回転速度の位相差の変化に対する軌跡は、 \sin カーブに近い形をしている。位相差が 90° のとき、トルクが大きく、回転速度は速い。この傾向は、1枚の超音波モータの傾向と同じである。

4.2.4 駆動トルク－回転速度特性

本研究でのサンドイッチ構造の超音波モータの特性を考慮して、押し付け力30kgf、電圧200V_{p-p}の条件が最適であると考え、この条件で駆動トルク－回転速度を求めた。Fig.3.16を見ると、モータとしての性能は、ステータ1枚のモータに比べて、非常に良い。

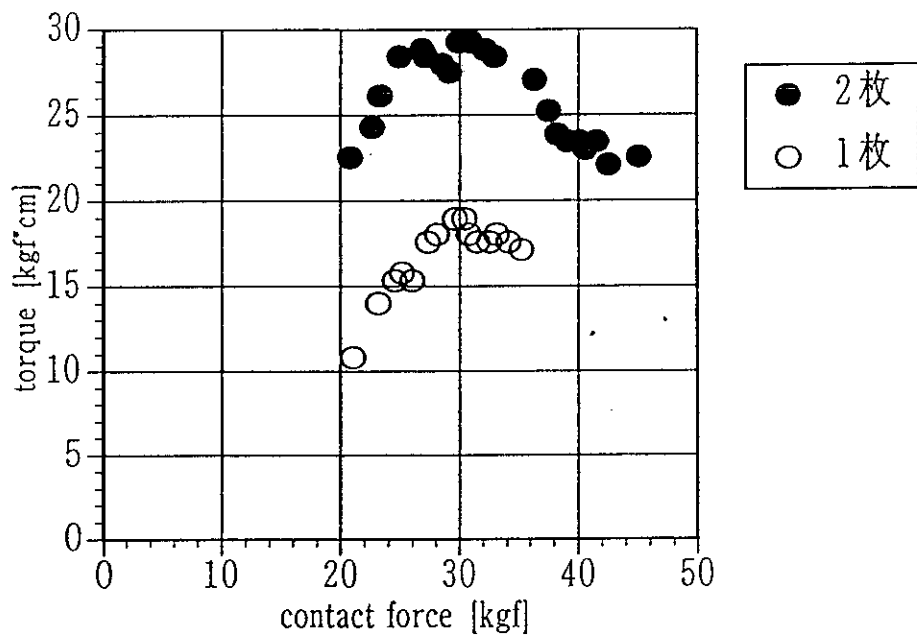


Fig.4.8 押し付け力-トルク特性 (印可電圧200Vp-p)

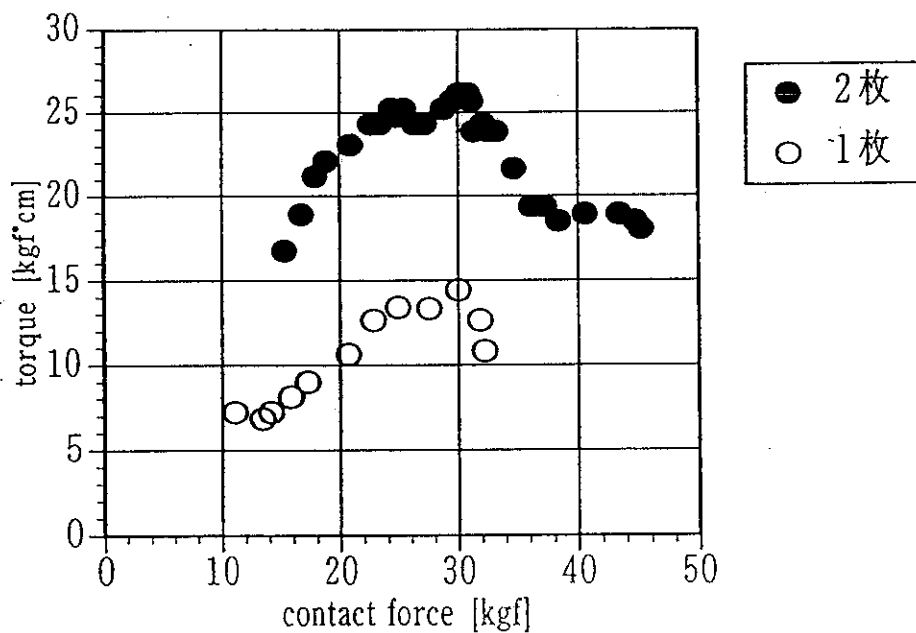


Fig.4.9 押し付け力-トルク特性 (印可電圧160Vp-p)

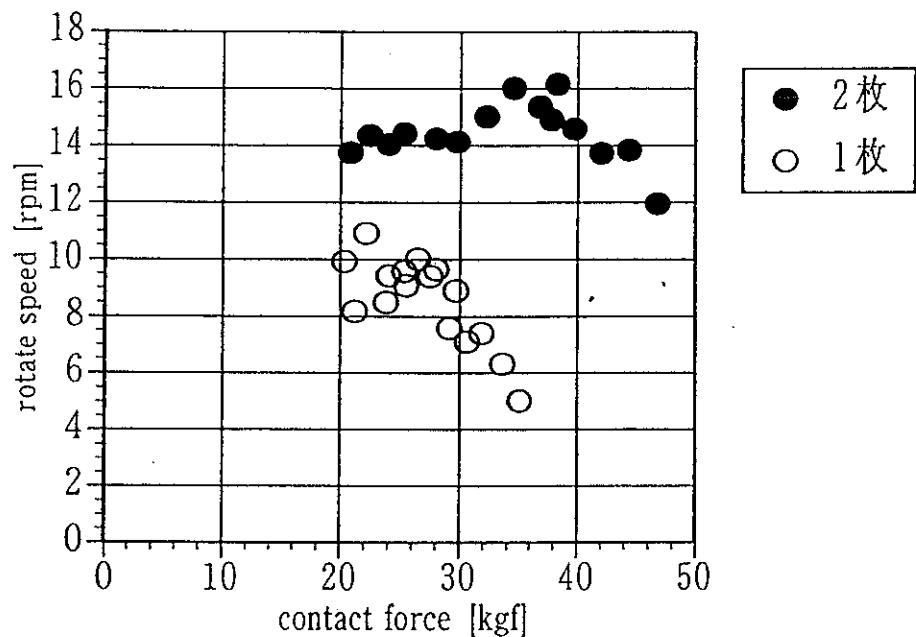


Fig.4.10 押し付け力一回転速度特性 (印可電圧200Vp-p)

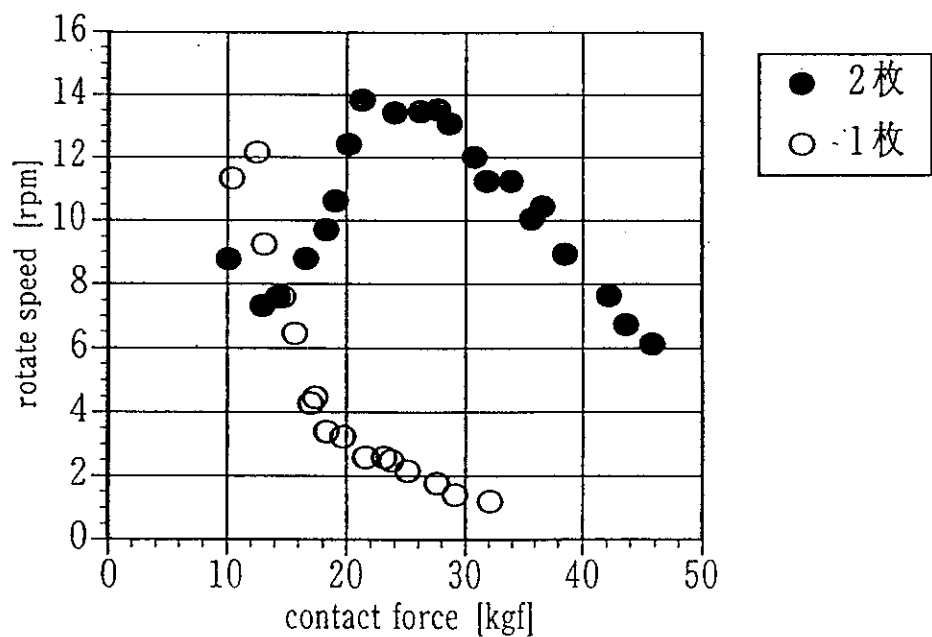


Fig.4.11 押し付け力一回転速度特性 (印加電圧160Vp-p)

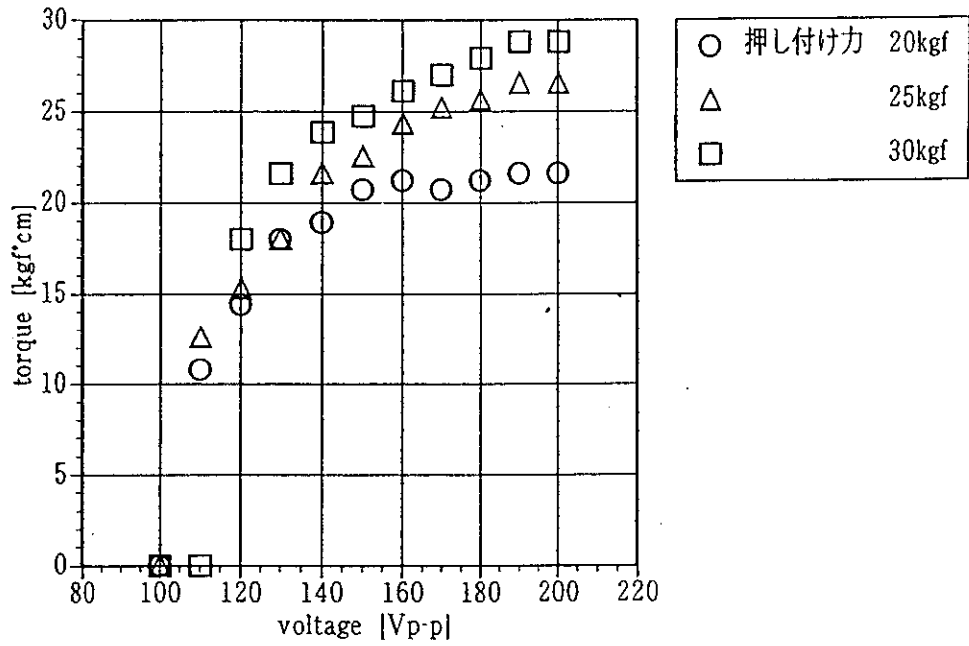


Fig.4.12 印可電圧—トルク特性

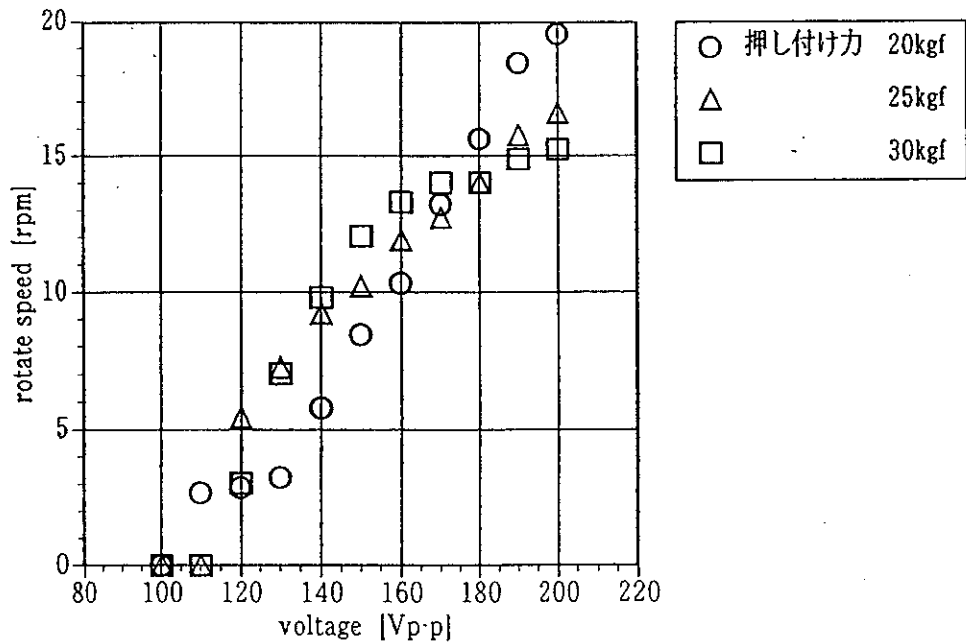


Fig.4.13 印加電圧—回転速度特性

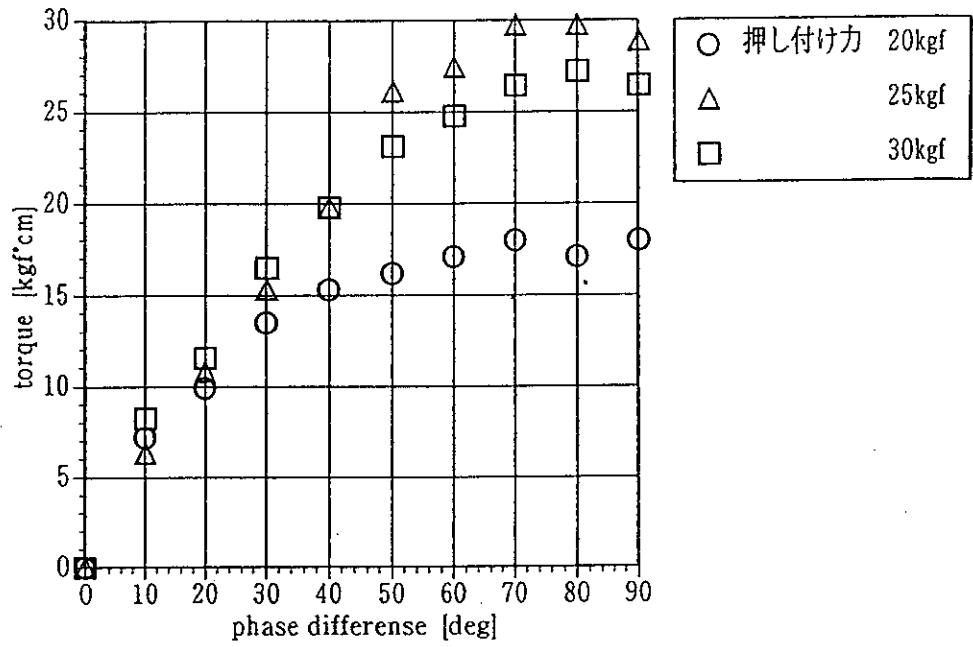


Fig.4.14 位相差—トルク特性 (印可電圧200Vp-p)

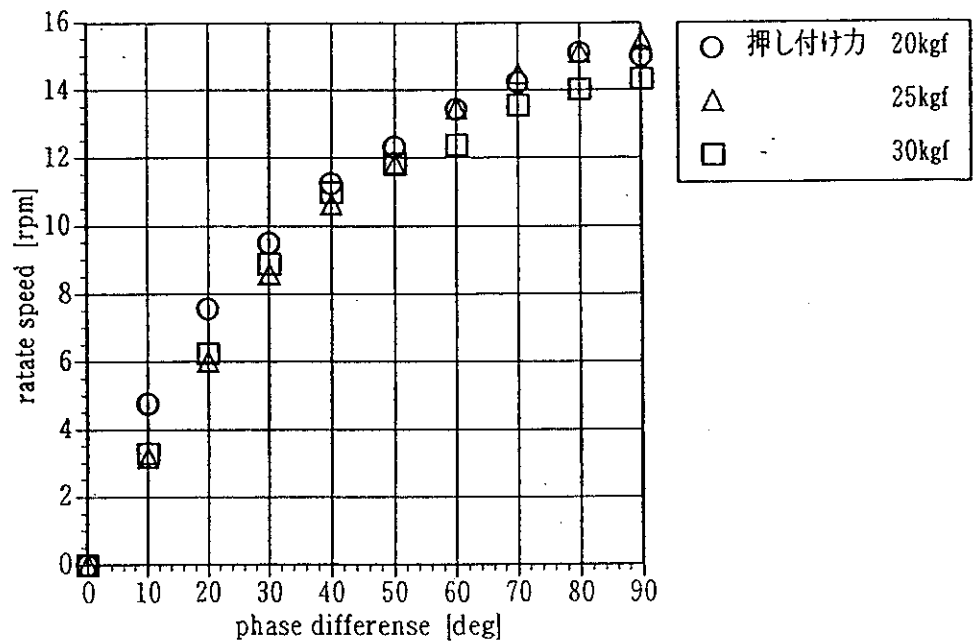


Fig.4.15 位相差—回転速度特性 (印可電圧200Vp-p)

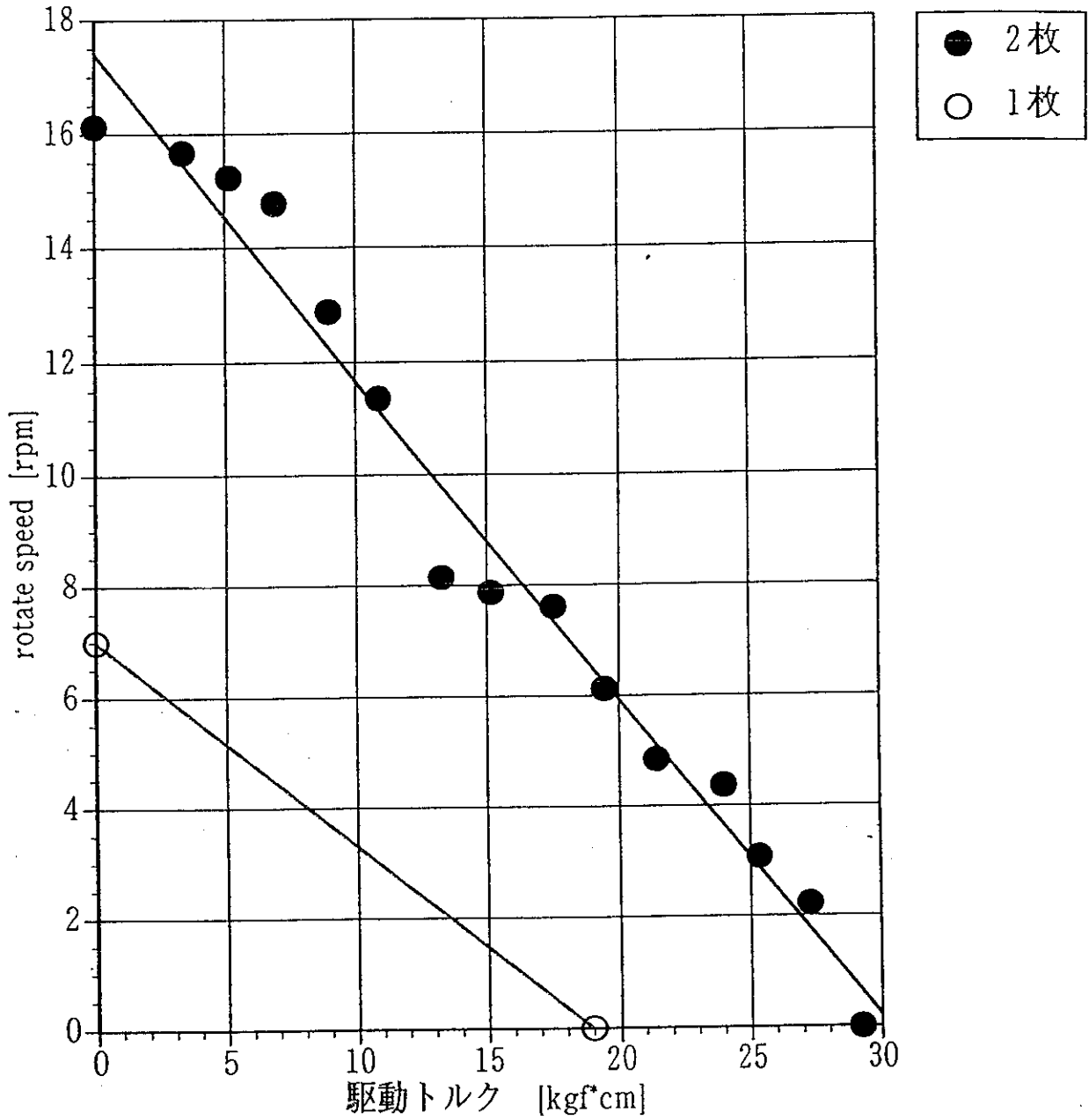


Fig.4.16 駆動トルク一回転速度特性 (印加電圧200Vp-p、押し付け力30kgf)

E. 結論

本研究では、超音波モータをサンドイッチ構造にして、高トルク化を目的とし、実験を行い基本特性、サンドイッチ構造での問題点を調べた。その結果次のことが分かった。

- [1] サンドイッチ構造にすると、ロータの材質・厚さにより、ステータの振動がロータを介して反対側のステータに伝達してしまう。それにより、入力電圧の周波数が同じとき、モータの回転は不安定になり、回転するときとしないときがある。また、周波数をずらしたとき、ステータはうなりを発生し、モータの挙動は回転・静止・回転・静止…という様に不連続な回転になる。
- [2] 得られる最高トルクは、通常のステータ1枚のモータに比べて、約1.5倍である。しかし、モータ駆動時の性能は、非常に良い。
- [3] 位相差に対する特性は、ステータ1枚のモータと同じ傾向である。

今後の課題としては、うなりが発生している状態では、回転が不連続であり、またモータ全体が振動する。そこで、ロータがステータの振動を伝えない様なロータを作り、2枚のステータへの入力電圧の周波数を同じに出来る様にして、連続的な回転を得る様にする。

またトルクを、ロータの材質を考えて、サンドイッチ構造における押し付け力の限界を大きくし、ステータ1枚のモータで得られるトルクの2倍にする。

厚生科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）

分担研究報告書

ロータ材とステータ材の検討、モータ取付部の設計に関する研究

研究者 桑原 利彦 東京農工大学工学部助教授

研究要旨

超音波モータは、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。この機械的振動は、振動子の一部を構成する圧電素子に、超音波領域の2相の交流電圧を印加し、振動子に共振振動を起こすことにより得られる。この共振振動しているステータにロータを押し付けることにより、摩擦力によって回転のエネルギーがロータへと伝達される。このような超音波モータの駆動原理により、ステータとロータの接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのため、ステータ材とロータ材の検討は極めて重要である。

本年度は高出力トルクを得るためのロータ材の検討を中心に研究を行った。ロータ材として、ポリカーボネイト、ナイロン、66ナイロンを取り上げトルク、摩耗特性を調べた（実際には、ガラスやセラミックス（チッカ珪素）など多くの材料を実験したが、実用的な出力トルクが得られなかった）。その結果、以下のことが判明した。ポリカーボネイトは摩耗の問題や熱膨張のための変形もあり、ロータ材としてはあまり適切とはいえない。ナイロンは表面が柔らか過ぎるために大きなトルクを得ることができなかった。66ナイロンは安定して高トルクを出力し、摩耗も少なかった。また、温度については、無負荷時にはすべりなどのため50度前後になるが問題となるほどではなかった。したがって、現時点では66ナイロンがロータ材として最も適したものであると考えられる。モータの取り付け位置の検討は次年度の人体のコンピュータシミュレーション結果をふまえて議論することとした。

A. 研究目的

超音波モータは、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。この機械的振動は、振動子の一部を構成する圧電素子に、超音波領域の2相の交流電圧を印加し、振動子に共振振動を起こすことにより得られる。この共振振動しているステータにロータを押し付けることにより、摩擦力によって回転のエネルギーがロータへと伝達される。このような超音波モータの駆動原理により、ステータとロータの接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのため、ステータ材とロータ材の検討は極めて重要である。超音波モータのロータ材の最適条件は熱膨張率が小さく、表面に適度な弾性を有し、さらに摩擦係数が高く耐摩耗性にも優れているといった条件が挙げられる。一方、ステータ材としての最適条件は次のような状況を把握したうえで決定される。ステータ振動子は全体を加熱しながら圧電素子を貼りつけているために、熱膨張を起こす。そのために圧電素子と熱膨張係数が近い材料が適している。また、使用形態に容易に加工ができることを考慮した加工性、耐摩耗性、振動の温度特性などを有する事が挙げられる。

本研究では、ロータの表面における微視的状态と摩耗特性、駆動時の振動や摩擦による発熱状態を考察することにより、ひざ用の高出力超音波モータで使用するロータ、ステータ材の最適条件、最適材料の選定することを目的とする。

B. 研究方法

ロータ材3種類のロータをそれぞれ連続で駆動させ、一定時間ごとに表面粗さ計でステータとの接触部分の表面粗さを測定し、かつレーザ顕微鏡で接触部分の表面写真を撮影する。さらにトルク試験器によって駆動トルクを測定し、回転状態を見るための参考にした。トルク試験は、ロータに取付けられた出力軸を電磁ブレーキ押さえることにより回転を止め、そのときの出力軸のねじれよりトルクメータで測定する。

事前にガラスやセラミックスなども含めた多種の材料を実験し、その中から、実用トルクが得られる可能性のある材料として、ポリカーボネイト、ポリカーボネイトにグラスファイバーを20%充填したもの（GF20ポリカーボネイト）、66ナイロンの3種類を取り上げた。

3種類のロータをそれぞれ駆動させ、随時ロータの温度を測定する。

60 [V_{pp}] の印加電圧において圧電素子が発生している振動振幅を回転数の割合と比較しピーク回転数時を100%と考え、それ以降周波数を変えることにより、振動振幅の割合を75%、50%、25%とする。その振動振幅の変化が3種類のロータの温度上昇にどの程度影響を及ぼすか測定する。

ステータ材の選定はさまざまな条件を考慮する必要がある。開発する超音波モータの寸法や、耐久性、圧電素子の貼りつけ、超音波モータステータとして安定した共振振動を発生するか、また目的で挙げられたようなステータ材としての条件を考慮し無ければならない。したがって、材料の選定では従来使用していたB s Bm材からよりステータとして最適である材料の選定を行った。一概に前記の条件にB s Bm材から考慮し選定を行うと物性値から判明する事項だけではないことが既知である。したが

って、実際の超音波モータステータとしての駆動に近い状態での検討が必要であるが、それには多大なコストや時間が必要となる。したがって、ステータ材を選定するにあたり、有限要素法を用いた静的、動的解析によるステータ材としての最適材料を選定した。これまでの研究により、熱膨張係数が用いる圧電素子にちかく、加工後の強度や対摩耗性から考慮して、ステンレスがステータ材として適しているという成果が得られている。

C. 研究結果

3種類のロータの表面粗さの変化を図1に示す。ロータの材質によって進行状況に大きな差があるが、駆動開始後に摩耗が大きく進行する。しかし、ある一定以上摩耗が進行すると、3種類とも摩耗の進行が遅くなっている。摩耗が進行したところで駆動を止め、参考としているトルクを確認したところ、トルクの低下が見られた。

次に各ロータの温度上昇についての測定結果を図2～4に示す。駆動を始めた直後から温度は上昇を始めるが、ある程度時間が経過すると温度の上昇は押さえられる。

周波数をずらして、振動振幅を押さえたときの温度上昇の変化を図5～7に示す。この結果から、振動振幅を押さえることにより温度上昇を押さえられることが分かった。

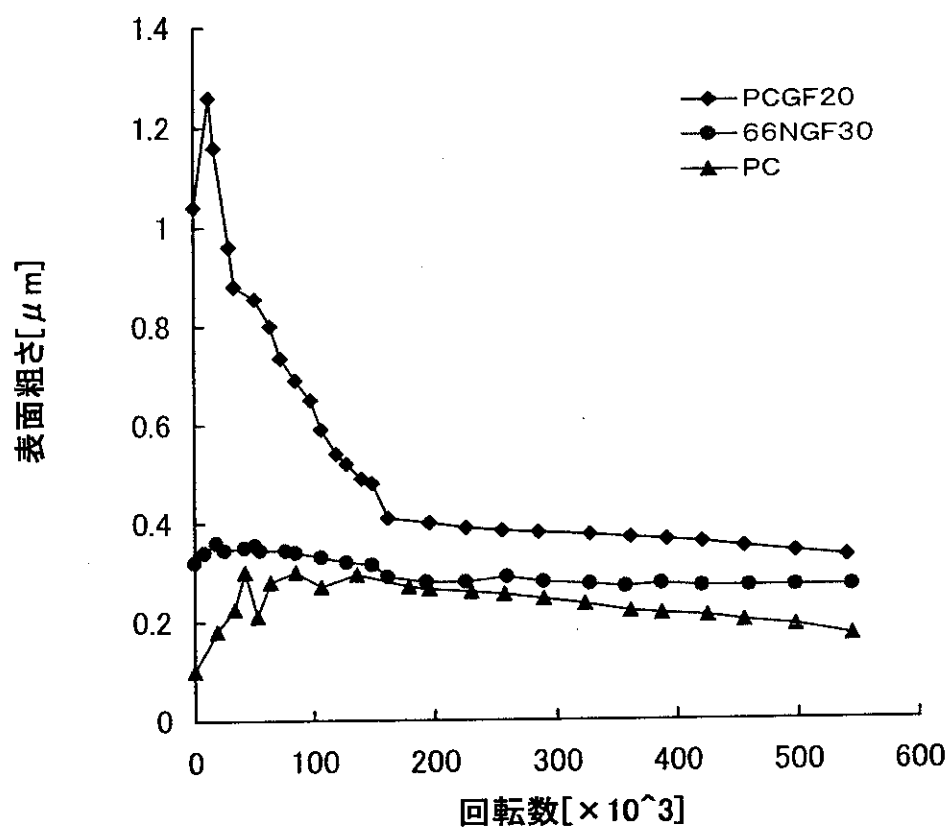


図1 各ロータの表面粗さ