

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	超音波モータの摩擦特性向上に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石井孝明
Author(English)	TAKAAKI ISHII
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3475号, 授与年月日:2000年9月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3475号, Conferred date:2000/9/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

「超音波モータの摩擦特性向上に関する研究」

東京工業大学

石井 孝明

2000 年

超音波モータの摩擦特性向上に関する研究

第一章 緒論

1. 1	本研究の背景	9
1. 1. 1	従来の超音波モータおよび動作原理	
1. 1. 2	超音波モータの実用化例	
1. 1. 3	超音波モータの問題点	
1. 1. 4	今までの問題解決へのアプローチ	
1. 2	超音波モータの高効率化・低摩耗化の考察	18
1. 2. 1	摩耗体積評価式	
1. 2. 2	比摩耗量 W_s の低減	
1. 2. 3	滑り距離 L の低減	
1. 2. 4	摩擦係数の検討	
1. 3	本研究の目的	22
1. 4	本論文の構成	22

第二章 超音波モータの摩擦駆動部評価法

2. 1	超音波モータ	28
2. 1. 1	超音波モータの動作原理	
2. 1. 2	摺動面の摩耗	
2. 1. 3	摺動面の摩擦損失と摩耗との関係	
2. 2	超音波モータ摺動面のモデル化	30
2. 2. 1	摺動面圧分布	
2. 2. 2	非定常すべり過程における摩擦係数	
2. 2. 3	静止摩擦係数の厳密な意味	
2. 2. 4	超音波モータ摺動部の接線力係数	
2. 3	超音波振動を考慮した摩耗の評価式	34
2. 3. 1	超音波モータの摺動面圧変化	
2. 3. 2	摩耗評価式の導出	
2. 3. 3	基準化摩耗率 W_n の計算方法	

2. 3. 4	滑り率に関して	
2. 3. 5	摩耗予測法	
2. 3. 6	摩耗量及び摩擦損失低減の方策	
2. 4	モータ負荷特性と摩耗評価	43
2. 4. 1	出力負荷を基準にした評価	
2. 4. 2	摩耗体積の出力負荷依存性	
2. 4. 3	比摩耗量 W_s による摩耗体積の傾向	
2. 5	錘の昇降による摩耗体積の傾向	48
2. 5. 1	出力負荷を基準にした評価	
2. 5. 2	摩耗体積の出力負荷依存性	
2. 6	第二章のまとめ	52
第三章	超音波モータ用摩擦材料の摩耗予測	
3. 1	供試超音波モータ	56
3. 2	摩擦材料	60
3. 2. 1	供試摩擦材料	
3. 2. 2	摩擦材料の基礎摩耗特性	
3. 2. 3	摺動面粗さ	
3. 3	実機摩耗試験	65
3. 3. 1	異種摩擦材料での摩耗試験	
3. 3. 2	異種超音波モータでの摩耗試験	
3. 3. 3	錘の昇降による摩耗試験	
3. 4	セラミックスレールを使用した低摩耗駆動法	72
3. 4. 1	セラミックスレールおよび実機摩耗試験	
3. 4. 2	摩耗試験後のセラミックスレール	
3. 4. 3	発塵特性	
3. 5	第三章のまとめ	76
第四章	真空中での超音波モータの摩擦特性	
4. 1	真空中駆動特性	80

4. 2	真空装置	81
4. 3	モータ特性測定法	82
4. 3. 1	立ち上がり特性	
4. 3. 2	立ち下がり特性	
4. 3. 3	測定データ	
4. 4	実験条件	85
4. 4. 1	供試超音波モータ	
4. 4. 2	供試摩擦材料	
4. 4. 3	測定開始時間（真空曝露時間）の問題	
4. 5	ステンレス鋼（SUS）に対する摩擦材料の検討	91
4. 5. 1	超音波モータ特性	
4. 5. 2	真空度依存性	
4. 5. 3	温度上昇の検討	
4. 5. 4	摩耗について	
4. 6	セラミックス（SiC）に対する摩擦材料の検討	100
4. 6. 1	超音波モータ特性	
4. 7	第四章のまとめ	104
 第五章 高次共振波形合成による低摩耗駆動法		
5. 1	摺動面の軌跡	106
5. 2	矩形波振動速度による駆動	107
5. 3	高次振動速度合成による駆動	109
5. 4	共振周波数調整法	110
5. 4. 1	フランジの効果	
5. 4. 2	高次振動モードの選択	
5. 4. 3	印加電圧の振幅および位相	
5. 4. 4	共振周波数比の許容度	
5. 5	実機摩耗試験	115
5. 5. 1	実機について	
5. 5. 2	駆動波形について	

5. 5. 3	摩耗予測	
5. 5. 4	実機摩耗試験結果	
5. 5. 5	低摩耗化の結果	
5. 5. 6	その他の効果	
5. 6	高効率駆動	122
5. 7	第五章のまとめ	122

第六章 潤滑した駆動面の摩擦特性

6. 1	潤滑剤の効果	126
6. 1. 1	潤滑剤を使用することのねらい	
6. 1. 2	提案する摩擦力制御機構	
6. 1. 3	供試潤滑剤	
6. 1. 4	弾性流体潤滑 (EHL) の可能性	
6. 2	供試超音波モータおよび測定系	130
6. 2. 1	高圧化のためのロータ構造	
6. 2. 2	摺動部分の形状	
6. 2. 3	摺動面観測の測定系	
6. 2. 4	モータ特性測定系	
6. 3	動的圧力振幅を変えたときのモータと潤滑剤の挙動解析	135
6. 3. 1	たて振動と油膜の形成	
6. 3. 2	無潤滑摩擦時のロータ・ステータ間抵抗の観測	
6. 3. 3	振動速度分布	
6. 3. 4	超音波モータ特性	
6. 4	静的予圧を変えたときのモータと潤滑剤の挙動解析	140
6. 4. 1	各パラメータの変化	
6. 4. 2	超音波モータ駆動効率	
6. 4. 3	摩擦材料を用いた従来型との比較	
6. 5	エネルギー消費に関する解析	146
6. 5. 1	モータ各部における損失計算方法について	
6. 5. 2	静的圧力を変えた場合のエネルギー消費	

6. 5. 3	動的圧力振幅を変えた場合のエネルギー消費	
6. 5. 4	摩擦材料を用いた従来型のエネルギー消費	
6. 6	第六章のまとめ	152
第七章 結論		
7. 1	本研究で得られた結論	148
7. 2	今後の課題と展望	149
	謝辞	161
	関連発表	163
	付録	173

第一章 緒論

第一章 緒論

“Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics”, by Warren P. Mason という本がある。この本の第1章の初めを抜粋する¹⁾。

1.1 Nature of Piezoelectric Effect

A plate cut from a piezoelectric crystal with electrodes attached serves not only as a capacitor for storing electrical energy but also as **a motor** for turning electrical into mechanical energy and as a generator for turning mechanical energy into electrical energy.

(下線：著者加筆)

「圧電材料は、電気エネルギーを蓄えるコンデンサの働きをするだけでなく、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する“電動機”や、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する“発電機”としても働く」という下りである。ここでは、“a motor”がいわゆる“モータ”を指しているのではなく、一般的に「電気機械変換器」のことを云っている訳であるが、1950年の超音波の本で、“a motor”という単語が使われており、今から50年も前に超音波モータの出現が予言されているようで実に興味深い。

その後、超音波洗浄機や超音波加工機のような動力応用はあったものの、物を動かすような応用はなかったが、ようやく1970年代になって超音波振動から回転力を取り出す原理が紹介され、超音波モータの原形が現れ始めた。当時は超音波振動から動力を取り出すことができるという原理の紹介にすぎなかった。簡単な実験を行ったようであるが、接触面の摩耗が激しくものにならないと考えられていたようである。

本章では、超音波モータの背景についてまず触れ、超音波モータの現状について述べる。続いて問題点としての「摩擦損失」と「摩耗」があることを指摘し、現在までの問題解決のアプローチを紹介する。そして更なる改善を求め、本研究の基本的方針を「高効率化・低摩耗化」と位置づけ、「超音波モータの摩擦特性向上」を目的とすることを述べる。最後に本研究における「高効率化・低摩耗化」

の方針およびその手法について簡単に触れ、本論文の構成を述べる。

1. 1 本研究の背景

1. 1. 1 従来の超音波モータおよび動作原理

ここでは、従来の超音波モータについて概説しその摺動面について紹介する。

超音波モータは1970年代にアメリカや旧ソ連でH.V. Barth²⁾やV.V. Lavrinenko³⁾らによって、相次いで発明された。

図1. 1はBarth (アメリカ合衆国) によるモータの模式図で、図1. 1(a)は全体の概観図、図1. 1(b)は接触部分の拡大図である。

図1. 1(a)中の13、15が超音波振動を発生し、12、14がホーンの働きをしていると考えられる。ロータ10の周方向にホーン先端が接触し、ロータが回転するものである。13を駆動すると時計回り、15を駆動すると反時計回りすることがわかる。(b)の拡大された接触部分をよく見てみると、摺動面はギザギザしており荒れているのが見て取れる。摺動面状態が悪くなりやすいことを説明したのではないだろうか。一応、応力集中を避けるために面接触になるようにしているようである。表面処理や材質については不明である。

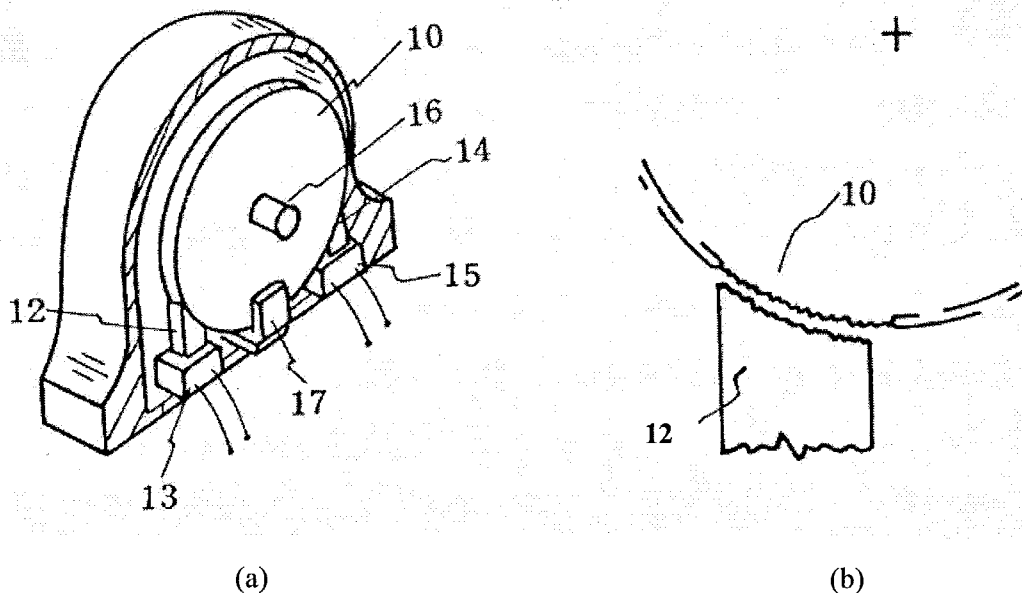


図1. 1 超音波モータ (H.V. Barth による)

このように発明当初から既に摺動面の摩擦・摩耗が問題になっていたと考えられる。

図1. 2はLavrinenko (旧ソビエト連邦) によるモータの模式図で、図1. 2(a)は全体の概観図、図1. 2(b)は接触部分の拡大図である。

図1. 2(a)中の振動子1が左側から P の力で右側のロータを押すとき、(角度 ϕ で接触したとすると)回転軸に $P\cos\phi$ の分力がかかり、周方向に $P\sin\phi$ の分力がかかることを図1. 2(b)は示している。 $P\sin\phi$ の力とロータ半径 ρ の積が回転トルクになる。最大静止摩擦力(摩擦係数 μ と $P\cos\phi$ の積)と半径 ρ の積が最大トルクとなる。

振動子1がロータに接触すると、周方向にA-A'の距離ロータが回転し、それに伴い、振動子も若干たわむ。角度を持たせた接触により回転を得ているため、回転方向が変えられないのが欠点である。

原理は単純明快でわかりやすい。しかし、線接触であるために摩耗が著しかったことが容易に想像できる。表面処理や材質については不明である。

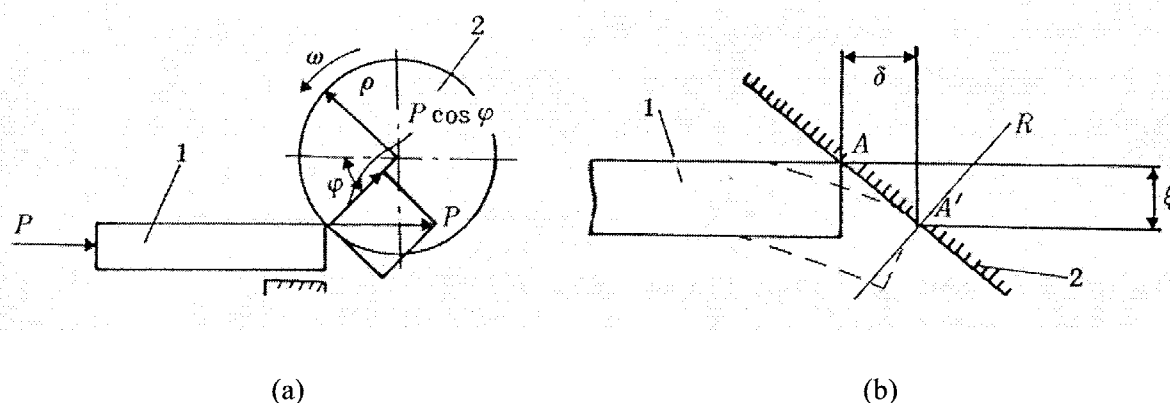


図1. 2 超音波モータ (V.V. Lavrinenko による)

どちらの例も実用化に至ったという話は聞かなかったため、単なる原理の紹介にとどまってしまったものである。アイデア段階から摩耗の問題が超音波モータ実用化に際してのネックになるであろうことが予測されていたわけである。

その後いくつか試作がなされ、問題点が具体的になってきた。

図1. 3は新生工業㈱の指田年生氏の振動片型超音波モータである。図1. 1、1. 2のモータの発展型で、面接触になるように駆動して摩耗を防いでいる。摺動面の状態がどのようなになっているか記述がないため推測の域を出ないが、金属接触で、接触面は研磨をしているものと思われる。寿命

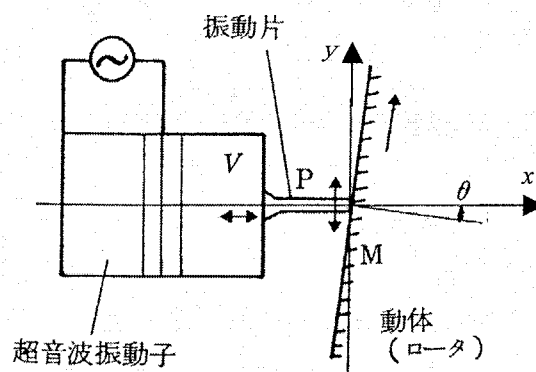


図1. 3 振動片型超音波モータ

もそれほど長くはなかったであろう。このころからすでに振動片先端振動速度とロータの回転速度との関係から摺動面の滑りを減らすことで低摩擦化が得られるとの示唆がなされている。

その後、画期的な発明として、進行波型超音波モータが指田氏によってなされた。

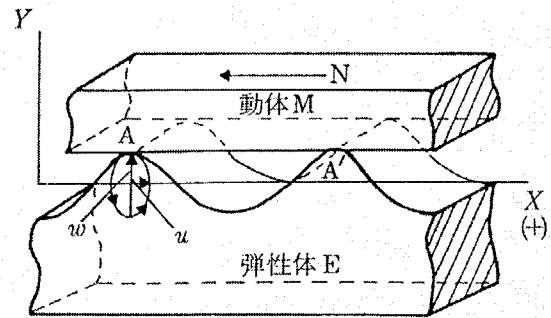


図1.4 進行波型超音波モータの動作原理

図1.4がその原理図である。従来の振動

片型では、形状による非対称性を利用して回転力を得ていた関係上、どうしても一方向回転にならざるを得なかった。扇風機などの一方向回転しか必要ない用途には問題はないのであるが、カメラのレンズ駆動、カーテンの開閉、スクリーンの昇降、等、どうしても双方向回転が必要な用途の方が多いのが現実である。進行波型超音波モータは振動子に進行波を発生させ、その進行波の波頭に接触した移動体を駆動する。弾性体の形状でリニア型や回転型にすることが可能である。進行波は、弾性体の裏側に貼り付けたセラミック振動子の電極パターンの工夫及び二相の印加電圧の位相を制御することにより、両方向に励振することが可能になっている。

このタイプのモータは最終的に数社で商品として実用化され、駆動電源とセットで現在売られている商品である。例えば新生工業(株)製のモータの摺動面には摩擦材料が貼り付けてある。このモータの寿命も明らかにされていないが数千時間程度と考えられる。

図1.5は日立マクセル(株)（当時。現在はピエゾテック社長）の熊田明夫氏の、ねじり結合子型超音波モータである。たて振動をねじり振動に変換してロータを回転させている。最大効率は80%と報告されている。ねじり結合子とロータとの接触面は硬質クロムメッキがなされている。本モータも最初は摩擦に悩まされていたそうである。ある日バネ圧を上昇させたところ、回転が停止したが、更

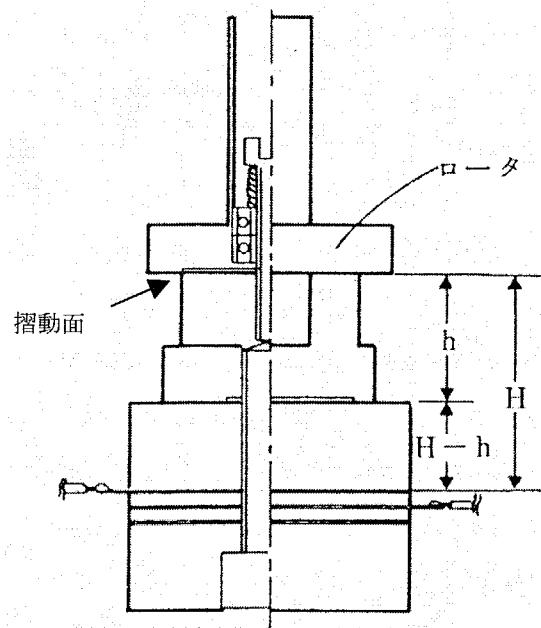


図1.5 ねじり結合子型超音波モータ

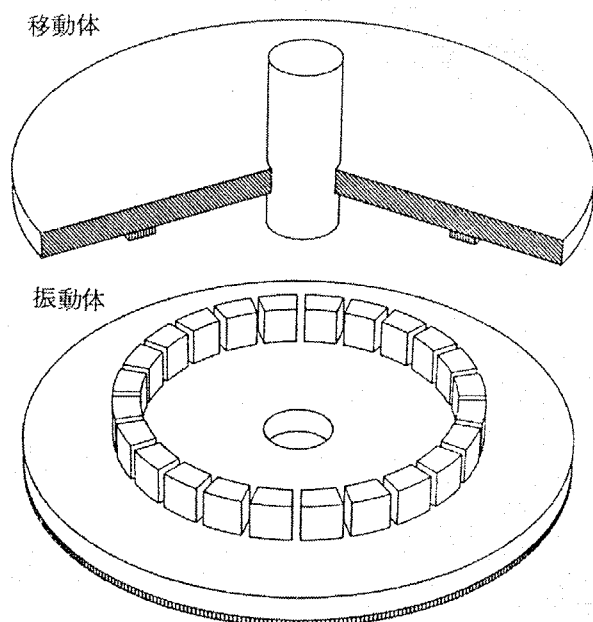


図1.6 ディスク型超音波モータ

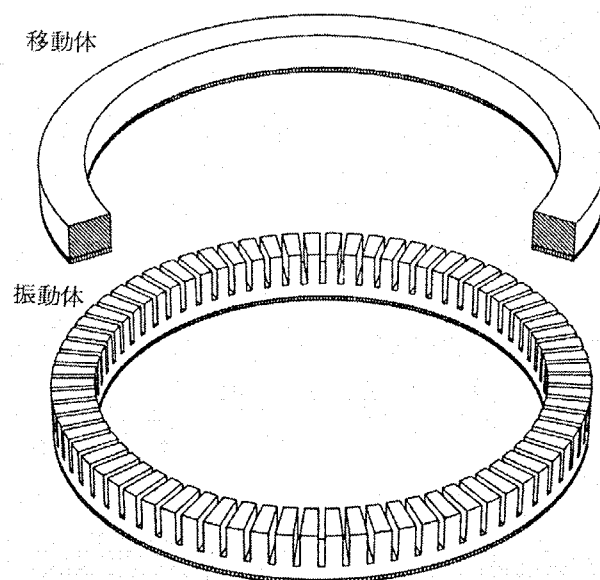
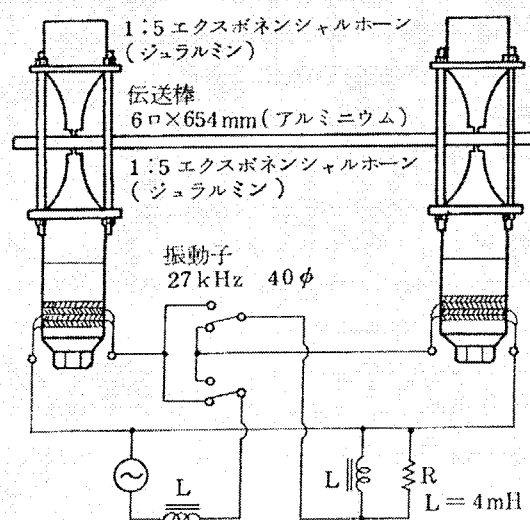


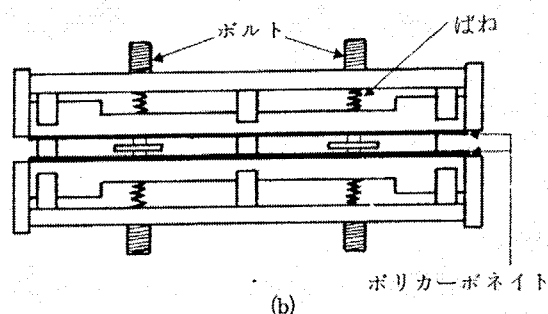
図1.7 リング型超音波モータ

にバネ圧を上昇させていったところ、ロータは逆方向に安定な回転を始めたとのことである。回転方向が変わったのは振動モードが変わったためと考えられるが、興味深いのは、強く押しつけたことにより摩耗がかなり減少したことである。滑りの少ない駆動条件になったものと考えられる。熊田氏のモータは摺動面に潤滑油を使用しているが、駆動後にオイルを拭いても汚れがほとんどないそうである。寿命は不明である。材料の pv 値（ p :応力、 v :摺動速度）を越えない限りは、滑りを抑制するために大きな予圧が必要な場合もあるという例である。

図1.6、図1.7に松下電器産業㈱の伊勢氏、徳島氏による進行波型超音波モータを示す。図を見ると移動体側に何らかの摩擦材料が貼られているように見受けられる。しかしこれらのモータの摺動面にはどのような



(a)



(b)

図1.8 進行波型超音波リニアモータ

材料が用いられているかは明らかではない。

図1. 8に東京工業大学の上羽教授グループによる進行波型リニアモータを示す。このモータにはポリカーボネートが摩擦材料として使用されている。寿命に関する記述は見受けられない。超音波モータ特性としては、高速駆動が実現できており、強力超音波技術を利用した高速高出力超音波モータのさきがけである。

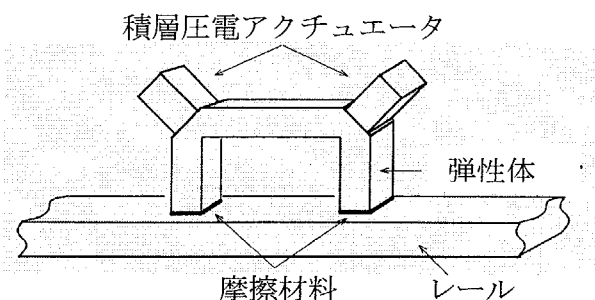


図1. 9 π 形超音波リニアモータ

図1. 9にアルプス電気㈱の大西氏らによる π 形超音波リニアモータを示す。このモータにはCFRPが摩擦材料として使用されており、実機摩耗試験では、約6000時間の駆動が確認されている。摩擦材料の厚さが0.5mmであるので、1.0mmにすると更に寿命が延びると思われる。レールに金属を使用している。材質はSUS440C焼き入れで、ステンレス鋼中では最高の硬さを持つ材料ではあるが、カーボン繊維によるものと思われる摩耗が避けられない。更に高耐久な摩耗しにくい材料をレールに用いることで、更に寿命が延びる可能性がある。

材料の選択については、 π 形超音波リニアモータに限ったことではなく、全ての超音波モータについても当てはまることである。

1. 1. 2 超音波モータの実用化例

実用化された例として最も有名なのは、キヤノンの一眼レフカメラEOSシリーズの自動焦点駆動用進行波型超音波モータである(図1. 10)。ダイレクトドライブで静粛性が高く、

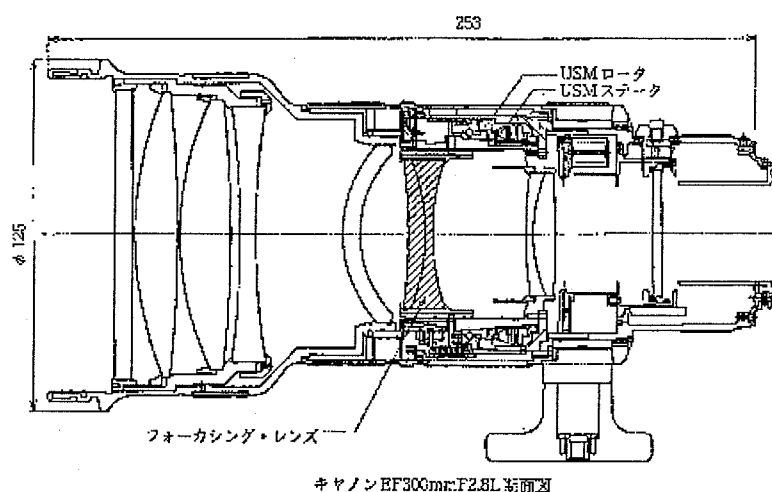


図1. 10 キヤノンEOS用オートフォーカスレンズ

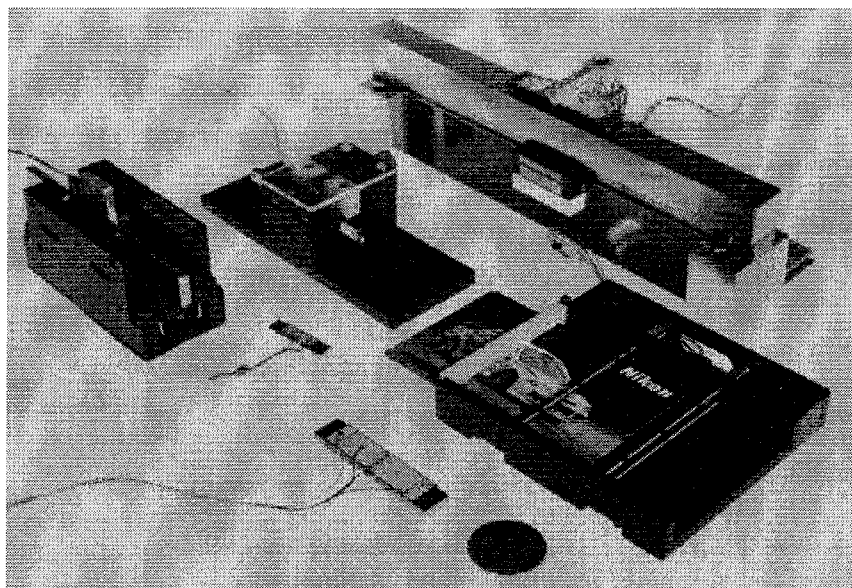


図 1. 1 1 リニア超音波モータ (ニコン)

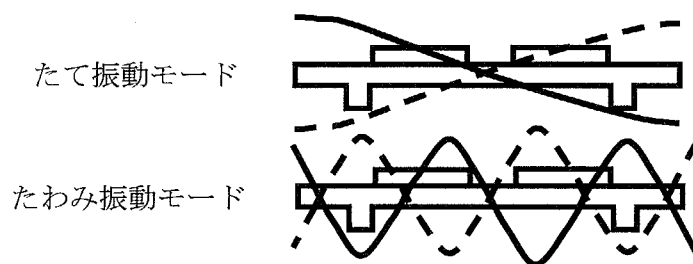


図 1. 1 2 リニア超音波モータ (ニコン) の振動モード

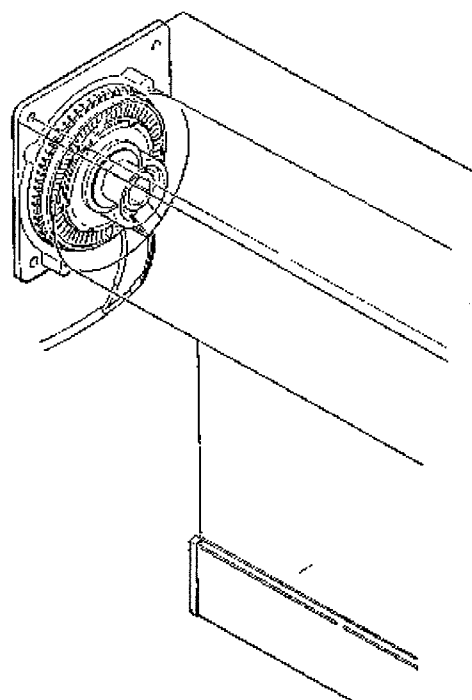
応答速度が速いなどの点が優れている。

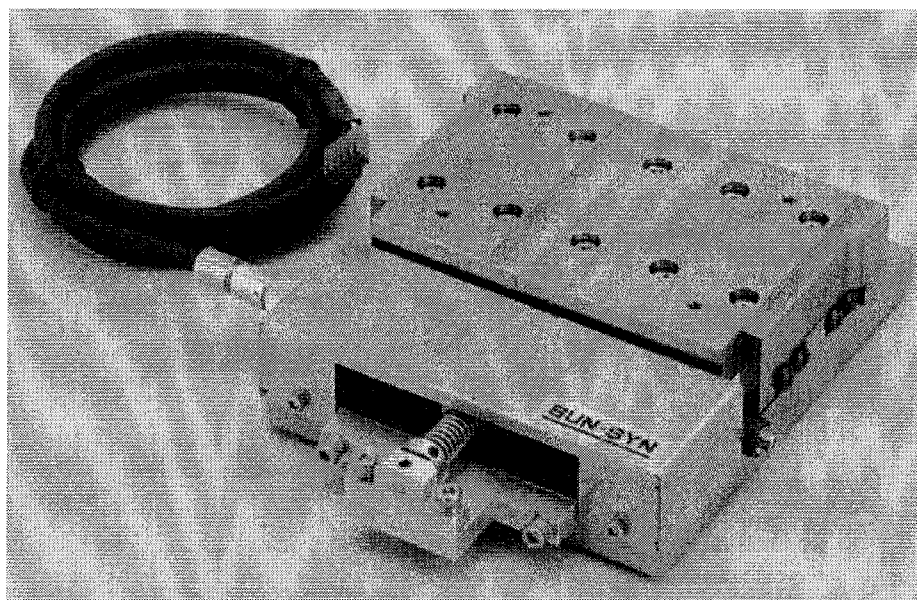
耐久限度は 20 時間以下といわれているが、カメラの自動焦点用としては十分な寿命であった。

(2001 年 4 月にキヤノンは 3000 時間以上の耐久性を持つ超音波モータを開発した。摺動面は、炭素繊維と二硫化モリブデンなどを混合したフッ素樹脂で被膜している。)

図 1. 1 1 に、ニコンの開発した、たてたわみ振動を用いた超音波リニアモータを示す。使用しているたて振動とたわみ振動のモードを図 1. 1 2 に示す。カードリーダーへの応用がなされている例である。

図 1. 1 3 は、進行波型超音波モータであり、都庁のロールスクリーン駆動用として 1000 台納入さ

図 1. 1 3 ロールスクリーン
駆動用超音波モータ

図 1. 1 4 サンシン製 π 形超音波リニアモータ利用ステージ

れた例である。静粛性が高いところがポイントだったようである。比較的負荷が大きいと思われるが、使用頻度がさほど高くないことが予測される。

図 1. 1 4 は、 π 形超音波リニアモータを用いたステージである。超精密ナノ送りや真空対応など様々な仕様での受注生産が行われている。

1. 1. 3 超音波モータの問題点

以上に挙げたように、超音波モータは様々な分野での使用が進められてきている。しかし、解決されなければならない問題点として、摺動部分の摩擦損失や摩擦材料の摩耗の問題が挙げられている。

当然、摩擦損失や摩耗体積は少ない方がよい。摩耗が多ければ寿命も短く、損失が多ければ駆動効率も低い値にとどまることも容易に想像できる。更に、摩耗粉の発生がモータ使用環境中に影響する可能性もある。

図 1. 1 5 に、実際の超音波モータの損失内訳例を示す。入力電力に対して、機械出力が約 35% の場合の例であるが、振動子の損失が約 20%、摩擦の損失が約 45% であった。

振動子の研究は従来からかなり進んでおり、振動子効率は 80~90% と高い値を持っている。にもかかわらずモータ効率が低い値にとどま

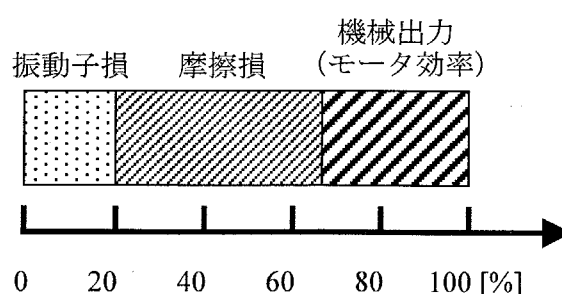
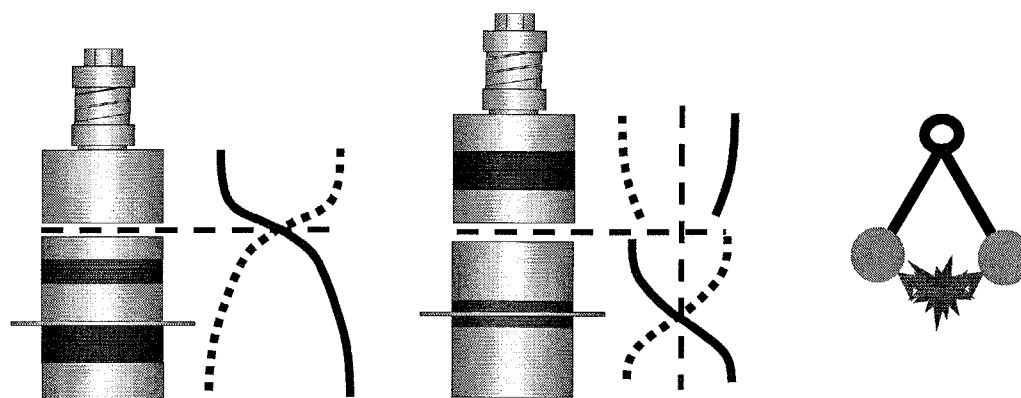


図 1. 1 5 入力電力に占める損失の割合



(a) おしくらまんじゅう方式

(b) アメリカンクラッカー方式

図 1. 1 6 摺動面の接触圧力変化量増大方式

っているのは、とりもなおさず摺動面での摩擦力変換効率が低いためである。この摩擦損を低減させることが、超音波モータの高効率化に必要なのである。

1. 1. 4 今までの問題解決へのアプローチ

ここでは、摩擦や摩耗の問題に対して従来からどのような解決のアプローチがなされてきたかを紹介する。

まずは、摺動部分の材料を検討した研究が挙げられる^{4,5)}。これらの研究では、絨毯爆撃の結果、トルク・回転数・効率の向上には、「材料のヤング率や摩擦係数は高く、 $\tan \delta$ は低く」等の傾向を見いだしているが、まだ十分な高効率は得られなかった。

次に、摺動面の接触圧力変化量を大きくして、摩擦力の変化量を大きくしようとした試みがなされている。図 1. 1 6 にそれらの研究の概要を示す。(a)は摺動面に振動変位の節を持つモードを利用し、摺動面に近い部分にたて用素子を設置し、効率よくたて振動を励振した⁶⁾。こうすることによって、摺動面の応力変化量が大きくなる。(b)は、振動変位の腹が摺動面にあるモードを利用しており、通常では応力ゼロであるが、ロータ側とたて振動の位相が逆になっているため、あたかもアメリカンクラッカーのように振動することが期待され、応力変化量が大きくなる⁷⁾。

いずれの方式も従来からは改善しているが、まだ十分な応力変化が得られずにいるのが現状である。

1. 2 超音波モータの高効率化・低摩耗化の考察

1. 2. 1 摩耗体積評価式

次に、従来からの摩擦や摩耗に関する考え方を超音波モータに適用し、摩擦損失や摩耗を低減する方法について考察する。そして、超音波モータの高効率・低摩耗駆動法について検討・考察し、その具体的手法の提案を試みる。

従来から、摩耗に関しては次のような式が存在する。

$$V = W_s NL \quad (1)$$

ここで、 V :摩耗体積、 W_s :比摩耗量、 N :荷重、 L :滑り距離、である。

摩耗体積は、荷重、滑り距離、比摩耗量の積で表される。従って、低摩耗化には、これらの値を低く抑えることが必要となる。しかし、基本は超音波モータであるため、低摩耗化することによって超音波モータ特性が悪化することは避けなければならないのはいうまでもない。

1. 2. 2 比摩耗量 W_s の低減

比摩耗量 W_s は摩耗のしやすさを表す比例定数 (単位は m^2/N) で、材料固有の値ではなく、相手材料との組み合わせで決まる値である。この点は摩擦係数と性質が似ている。従って、摩擦材料を変えることのみならず、相手材料を変えることでも W_s を低下させることが可能である。小さな W_s を実現できる摩擦材料、若しくは相手材料を使用することで、摩耗体積は低減できる。

例えば、摩擦材料に硬い材料を使用すれば W_s は低下し摩耗は低下する。しかし、相手材料には通常硬い材料を用いるため、一般に硬い材料同士は摩擦係数が小さく、モータ特性が悪くなる可能性があるため、注意が必要である。しかも、硬い材料は一般に摩擦係数が低い。超音波モータ特性が低下する可能性があるため、ここでも注意が必要である。

他には、相手材料の表面粗さを小さくす

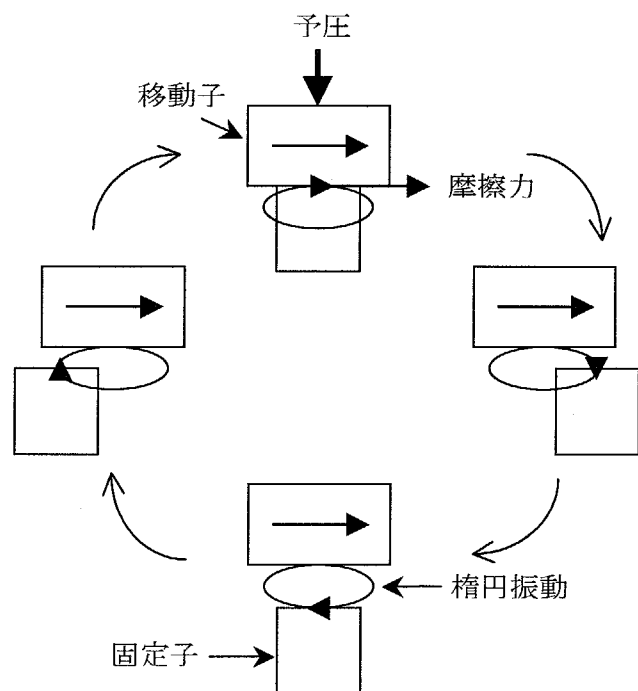


図1. 17 超音波モータの動作原理

ることで Ws を低下させることが考えられる。初期状態の表面粗さも小さくしなければならないが、長期間の駆動も考慮しなければならない。更に硬い材料を相手材料に使用することで、長期間、初期の表面粗さ状態を保ち、長期間 Ws の値を低く保つことができると考えられる。

1. 2. 3 滑り距離 L の低減

滑り距離 L は、超音波モータの摺動面における相対すべりによる値である。図 1. 17 に超音波モータの動作原理を示す。

超音波モータは、駆動力を発生する「固定子」と、伝達された駆動力で出力を取り出す「移動子」によって構成されている。予圧によって移動子と固定子間に接触応力を与え、相対運動することにより摩擦力が発生し、動力が伝達される。固定子には、摩擦力の大きさを制御する垂直方向の振動と、摩擦力の方向を決定する水平方向の振動の 2 つが励振されており、それらの組み合わせによって、接触部分の振動軌跡は楕円を描く。

この時の固定子の振動は、共振を利用するために、正弦的な振動が励起されている。一方、移動子は慣性があるために、ほぼ一定の速度で移動を続けようとする。従って、接触している期間、一定速度で移動する移動子と、正弦的な振動をする固定子との間で速度差が生じ、結果として滑りが発生している。

この滑りが摩耗の原因となっているのは明らかである。従って、この滑り距離 L を減少させることができれば摩耗が減少する。

滑りを減少させるには、摺動面間の相対速度を減少させる必要がある。移動子は慣性の法則で一定速度で運動しているため、こちらを変更することはできない。従って、固定子の駆動に何らかの工夫をする必要がある。固定子と移動子の接触している期間に固定子の速度が一定もしくは、ほぼ一定で、移動子の速度と等しければ滑りが減少すると考えられる。

固定子振動速度波形を通常の正弦波から、矩形波にすることによって L の低減が実現できると考えられる。

更に、滑り速度が減少すれば、摺動面の表面粗さの増加が抑えられることを意味し、 Ws の増加を抑える効果があり、一石二鳥である。

1. 2. 4 摩擦係数の検討

摩耗に摩擦係数が関係しているような気がするが、式(1)には摩擦係数は入っていない。これは、荷重が摩耗を決定し、摩擦力は摩耗に関係しないことを表している。実際に、摩擦係

数が小さいからといって摩耗が少ないとは限らない。例えば、テフロン摩擦は小さいが摩耗は大きい。従って、式(1)にあからさまに摩擦係数が入らないのであろう。

しかし、摩擦係数が摩耗に関して何らかの寄与をしていると考えられなくもない。

例えば、摺動面の表面粗さの違いで摩擦係数が異なっている場合は、表面粗さの違いで、異なる Ws が使用され、摩耗が評価されている。つ

まり、摩擦係数は、 Ws に含まれていると考えることも可能であろう。

また、摩擦力は摩擦熱を発生し、発熱量の違いから Ws の違いを誘発する可能性もある。ここで、大胆に摩擦係数を摩耗評価に取り入れるとしたら、次のようになると考えられる。

$$V = Ws' \mu NL \quad (2)$$

Ws' : 比例定数 (比摩耗量 Ws を μ で割った値に相当する)、 μ : 摩擦係数、である。

式(2)のように、摩擦係数が摩耗体積と関係があるとすると、次のような手法が実現できる可能性がある。

摩擦・潤滑の分野で図1. 18に示すようなストライベック線図という摩擦係数の変化を表す曲線がある。ここで、 η : 潤滑油の粘度、 v : 滑り速度、 p_m : 荷重による摺動面圧力、である。

通常、摺動面は乾燥しており、摩擦係数は滑り速度によって変化しないクーロン摩擦であると考えている。ここで、摺動面に潤滑油を使用し、摺動面での圧力変化が境界潤滑域と流体潤滑域を交互に行き来するように静的予圧や十分なたて振動を設定することができれば、最も駆動力の必要な送りの時に摩擦係数が大きく、摩擦力ができればゼロであって欲しい時に摩擦係数が小さくなる駆動状況が実現できる。

このような状況が実現できれば、摩耗が低減できると考えられる。

同時に、摺動面での摩擦駆動効率が上昇し、摩擦損失の低減が期待でき、モータ駆動効率の向上もあわせてねらうことも可能である。

尚、超音波モータはミクロンオーダーで振動している特殊な摺動条件であるため、摩擦係数というよりは、接線力係数と言い換えた方がよい。このことについては第二章で詳しく述

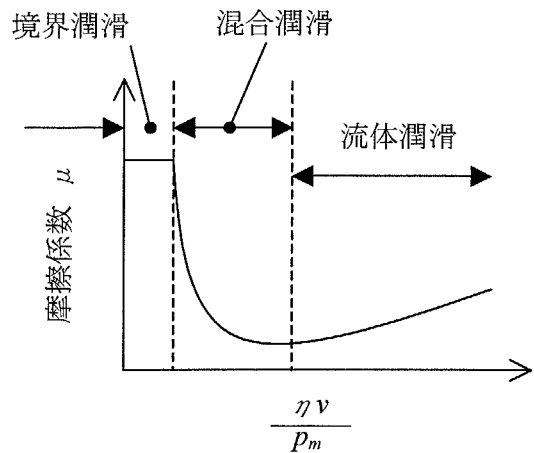


図1. 18 ストライベック線図

べる。

1. 3 本研究の目的

超音波モータは摩擦力をその駆動源としているため、摺動面が極めて大きな役割を果たしていることはいうまでもない。そしてまた、摺動面について摩擦力や摩擦を厳密に正確に見積もることも極めて困難であることは想像に難くない。今までに摺動面の振る舞いから超音波モータの特性を考察した例^{8,9,10,11,12,13,14)}や、摩擦摩擦特性を考察した例^{15,16,17,18)}のように、多くの優れた研究がなされており、超音波モータの出力・トルク特性はある程度実用化になるところまで進歩してきた。

しかし、実用化に当たっていまだに問題になっている項目がある。それは寿命と効率である。超音波モータを使用してみたいという希望はあってもその要求寿命は厳しいものがあり、通常のFA機器では、10000時間が必要とされている。現状では6000時間～10000時間程度になってきているが、軽負荷での応用が多く、まだまだ不安は多い。しかも寿命に関する研究報告はほとんど見受けられない。そして、カメラに代表される電池駆動応用では、当然高効率が期待されている。通常の応用でも発熱の低減が期待されるなど、やはり高効率化は望まれている。

そこで本研究では、「超音波モータの摩擦特性向上」を目的とし、超音波モータの高効率化、低摩擦化に関して提案・検討、及び実機摩擦試験結果について報告する。

具体的には次に挙げるような目的を設定する。

- ・摺動面の振舞いを単純なモデルで仮定して超音波モータに関する摩擦損失および摩擦体積の評価式を導出する。
- ・提案する摩擦体積評価式が一般性を持つことを実験的に確認する。
- ・極限環境中駆動での駆動・摩擦についても検討する。
- ・摩擦評価式より提案できる低摩擦化について検討・実機摩擦試験を行う。
- ・低摩擦化と同時に高効率駆動についても検討・実機摩擦試験を行う。

1. 4 本論文の構成

本論文は図1. 19に示すように7章で構成されている。

第2章では、超音波モータの摩擦駆動部評価法を初めて提案し、1章での新提案を具体的に検証する。3章以降では、2章で提案した評価法の有効性の確認と同時に、1章で考察し

た高効率・低摩耗駆動法の効果について実機試験を行った結果を示す。

第3章では、まず正弦波で駆動した場合、摩耗評価法が超音波モータの型式や摩擦材料の種類によらない一般性を有しているかを実機摩耗試験を通して検討する。3章の最後では、高耐久性セラミックス材料のレールを用いた低摩耗駆動の実機摩耗試験について述べる。

第4章では、極限環境駆動の例として真空中での駆動に言及し、真空中での使用が要求されている超音波モータの基礎データ及び真空中駆動で有効な摺動材料について実機試験を行い検討する。

第5章では、高次共振モードを合成した場合、実機摩耗試験を行ってその有効性を検討する。

第6章では、潤滑油を摺動面に利用した場合の超音波モータ特性について検討する。

第7章では、各章で得られた結論をまとめる。

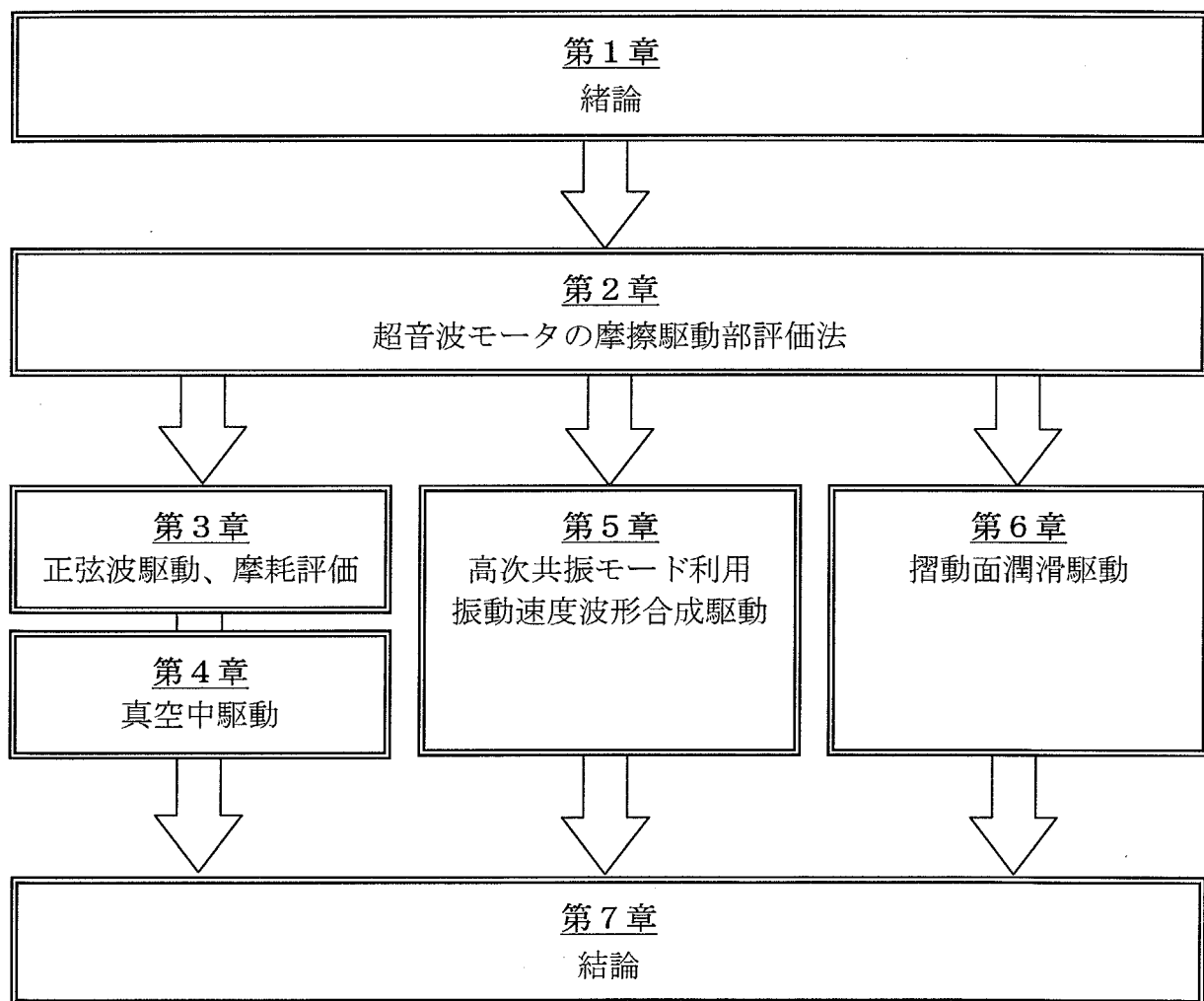


図1. 19 本論文の構成

参考文献

- 1) Warren P. Mason: "Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics"
- 2) H.V. Barth: IBM Tech. Disclosure Bull. 16 (7) (1973) 2263.
- 3) V.V. Lavrinenko et al.: Radio Electron. 13 (1976) 57.
- 4) Kentaro Nakamura, Minoru Kurosawa, Hisayuki Kurebayashi and Sadayuki Ueha :
 "An Estimation of Load Characteristics of an Ultrasonic Motor by Measuring Transient Responses"
 IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., Vol.38 No.5 September (1991) pp.481-485
- 5) 上羽貞行、富川義朗:「新版 超音波モータ」トリケップス pp.223-225
- 6) J. Satonobu, D-K. Lee, K. Nakamura and S. Ueha,
 "Improvement of the longitudinal vibration system for the hybrid transducer ultrasonic motor",
 IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr. Vol. 47, No. 1. pp.216-221, Jan., 2000
- 7) M. Aoyagi, A. Satoh and Y. Tomikawa : "High Torque Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional vibrations, -Characteristics of the Motor with a Revolving Torsional Vibrator Used in Common as a Stator and a Rotor-", Proc. of 1992 IEEE 8th Inter. Sympo. on the Appli. of Ferroelectrics, pp.541-544 (1992)
- 8) Takashi Maeno, Takayuki Tsukimoto, and Akira Miyake : "Finite-Element Analysis of the Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor", IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., **39** (1992) 668-674.
- 9) Takashi Maeno and David B. Bogy : "Effect of the Hydrodynamic Bearing on Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor", IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., **39** (1992) 675-682.
- 10) T. Maena et al.: Trans. ASME, J. Tribol. **115** (1993) 625.
- 11) H. Hirata and Sadayuki Ueha : "Characteristics Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor", IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., **40** (1993) 402-406.
- 12) Nesbitt W. Hagwood IV and Andrew J. McFarland : "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., **42** (1995) 210-224.
- 13) H. Hirata and Sadayuki Ueha : "Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor"
 IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., **42** (1995) 225-230
- 14) 前野隆司:「固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析」、
 日本音響学会誌, **54**, 4 (1998) 305-311.

- 15) 加藤康司、本田知己、井上英治：「進行波型超音波による摩擦駆動における摩擦摩耗の基本特性」、日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集，F・30 (1991) 763-766.
- 16) 本田知己、加藤康司：「進行波型超音波による摩擦駆動における摩耗機構」
日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集，C・1 (1992) 103-106.
- 17) 本田知己、加藤康司：「進行波型超音波による摩擦駆動における摩擦摩耗の基本特性」
トライボロジスト、**38**, 8 (1993) 727-734.
- 18) 本田知己、加藤康司：「超音波駆動における摩擦摩耗特性に及ぼす超音波振幅の影響」
トライボロジスト、**41**, 2 (1996) 170-177.

第二章 超音波モータの摩擦駆動部評価法

第二章 超音波モータの摩擦駆動部評価法

超音波モータの場合、摩擦に伴う摩耗の問題が避けられず、超音波モータの寿命に大きく関わっている。しかし摩耗現象は多種多様で、従来は専ら経験や試行錯誤によってその傾向と対策を立ててきたものであり、「摩耗の問題は研究にならない。泥沼に足を踏み入れるようなもので、やめた方がよい。」¹⁾とさえいわれている。これは、明確な方針を立てずに漫然と研究をすすめ、実験データに溺れる愚を戒めた言葉であろう。しかし、摩耗は理論的にも実際的にも重要な研究分野であることには変わりはなく、超音波モータの分野でも、解明すべき重要なテーマの一つである。

そこで本章では、複雑な超音波モータ摩擦駆動部の摩擦摩耗現象のモデルを単純化することで、超音波モータの摩擦損失および超音波モータ用摩擦材料の摩耗体積の評価を試みた。超音波モータの形式によらない評価式を導出するために、摺動面の接触面圧の振る舞いや、相対すべり運動の振る舞いに着目した。そして、導出した摩耗評価式を元に実機摩擦材料の摩耗評価手法の手順を具体的に説明し、摩耗体積の評価も行った。

2. 1 超音波モータ

2. 1. 1 超音波モータの動作原理

初めに、超音波モータに共通する基本動作原理を、図 2. 1 を用いて説明する。

超音波モータは楕円軌跡を描く振動を発生する「固定子（ステータ）」と、それを受けて移動される「移動子（回転型モータの場合はロータ、リニア型モータの場合はレールと呼ばれる）」とで構成される。

通常の超音波モータでは、固定子の励振に圧電セラミックスを用いる。その圧電セラミックスで発生した振動の役割は、ステ

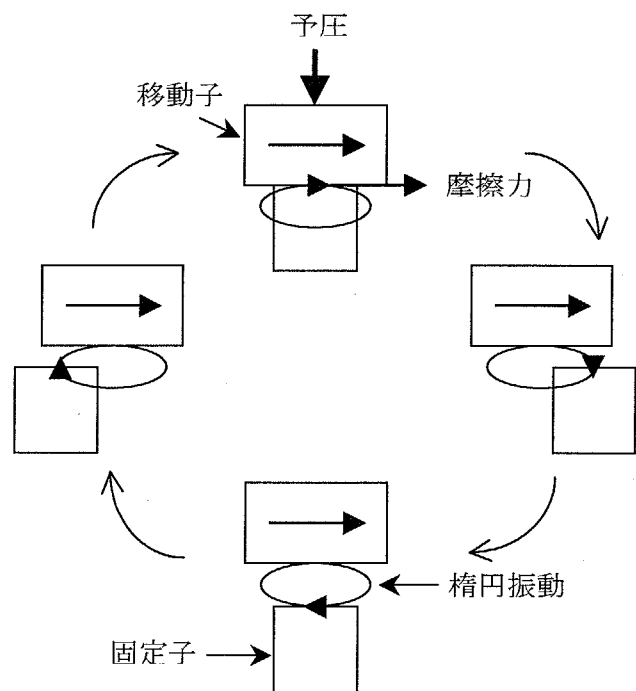


図 2. 1 超音波モータの動作原理

一タ側摺動面上の点の楕円振動を、摺動面に平行な横振動と、摺動面に垂直な縦振動の成分にそれぞれ分けて考えることができる。このとき、縦振動も、横振動も正弦的な変化をする。

摺動面の垂直抗力は、移動子にかかっている「予圧」と呼ばれる静的な押しつけ力をバイアス値として、縦振動成分により変化を受けており、横振動成分は摩擦力の方向を決定する。縦振動によって移動子と固定子が接触したときに、横振動によって発生する摩擦力で、移動子が力を受ける。

型式によっては、移動子が固定で固定子が移動する場合もあるが、摩擦力によって動作する原理は同じである。

2. 1. 2 摺動面の摩擦

移動子は慣性を持つために、超音波モータの駆動時はほぼ一定の速度で移動を続ける。従って、正弦的な振動をするステータとの間は接触している時間、速度差による滑りが生じていると考えられる。これが超音波モータ摺動面の摩擦の原因と考えられている。従って摺動部分には、摺動面の状態を一定に保つために耐摩擦性の高い材料を使用している。金属接触の場合もあるが、摩擦材料と呼ばれている高分子材料や複合材料も使用され、モータ特性を維持しつつ長寿命をねらった材料を試行錯誤的に採用しているのが現状である。

超音波モータの寿命は圧電セラミックスやその他の構成部品が劣化しなければ、通常は摩擦材料が摩擦で消滅するときである。従って、摩擦材料の摩擦量が評価できれば、超音波モータの寿命が予測可能になり、最終的には、モータの寿命設計に摩擦評価法が役に立つことが大いに期待される。

2. 1. 3 摺動面の摩擦損失と摩擦との関係

2. 1. 2で述べた理由と同じく、速度差により摩擦損失が生じると考えられる。

摩擦は一般に摺動面が、一定荷重下、一定速度で滑る場合には、摩擦量 $V[m^3]$ は荷重 $N[N]$ と滑り距離 $L[m]$ に比例することがわかっており、その比例定数を $W_S[m^2/N]$ として、

$$V = W_S NL \quad (1)$$

で示すような関係式で表せることが知られている。

一方、摩擦損失 $P_F[W]$ は、摺動面が、一定荷重下、一定速度で滑る場合には、摩擦係数 μ

と荷重 N [N] の積である摩擦力と、滑り速度 v [m/s] の積であり、

$$P_F = \mu N v \quad (2)$$

と表すことができる。摩擦損失に駆動時間 τ をかけると、 $P_F \tau = \mu N L$ となり、 $V = W_s N L$ との相違は、比例係数のみであり、(1) ときわめて近い関係にあることがわかる。(単位時間あたりの摩耗 $V/\tau = W_s N v$ 、と $P_F = \mu N v$ を比較しても同じ)

従って、 μ と W_s が定数である限りにおいては、両者は全く同じ傾向を持ち、同様の議論が可能である。本章では主に摩耗について述べるが、このような理由により、摩擦損失についてもほとんど同様の議論が可能である。

但し、 μ や W_s が N や v などの関数で、依存性を持つ場合はこの限りではない。

2. 2 超音波モータ摺動面のモデル化

2. 2. 1 摺動面圧分布

まず空間的な接触圧分布は、図 2. 2 (a) のような接触状態の時に、次の式で表される²⁾。

$$N(x) = \frac{N_0}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \quad (3)$$

幅 $2a$ の長方形の平面底をもつ場合、接触圧の空間分布は一様ではなく、周辺で無限大に発散する関数で表される (図 2. 2 (b))。

回転型モータの場合は、径方向を x とおくと、理論的な摺動面圧は式(3)のような分布になり、周方向は一様の接触圧を持つと考えられるが (図 2. 3 (a))、厳密には、予圧はモータの中心部にかかり、中央はへこんで端面は若干持ち上がるようなたわみひずみが生ずると考

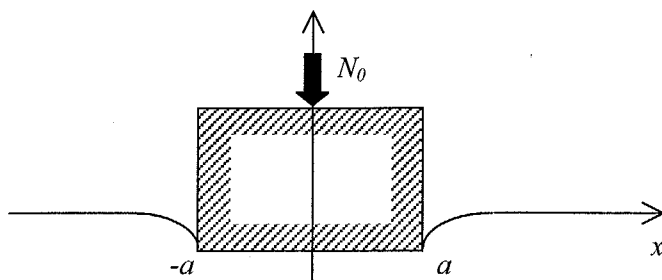


図 2. 2 (a) 接触状態

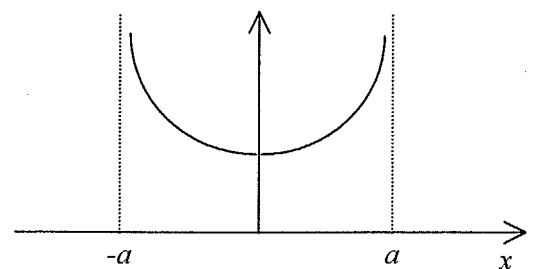


図 2. 2 (b) 接触圧分布

えられる(図2. 3(b))。式(1)は厳密には成り立たないであろう。しかし、本研究で対象としている摩耗は、接触圧に比例して増加するので、接触圧の高いところから摩耗が促進され、徐々に接触圧が平均化され一様になっていくと考えられる(図2. 3(c))。このプロセスが、「初期摩耗」、「あたり」、「なじみ」といった現象を説明する一理由にできると考えられる。本研究では、比較的長時間の摩耗を扱うため、初期における接触圧分布は無視し、このような空間的接触圧分布はなく、一様として話を進めることとする。ただし、初期摩耗の考察のような微妙な問題を取り扱う場合はこの限りではない。

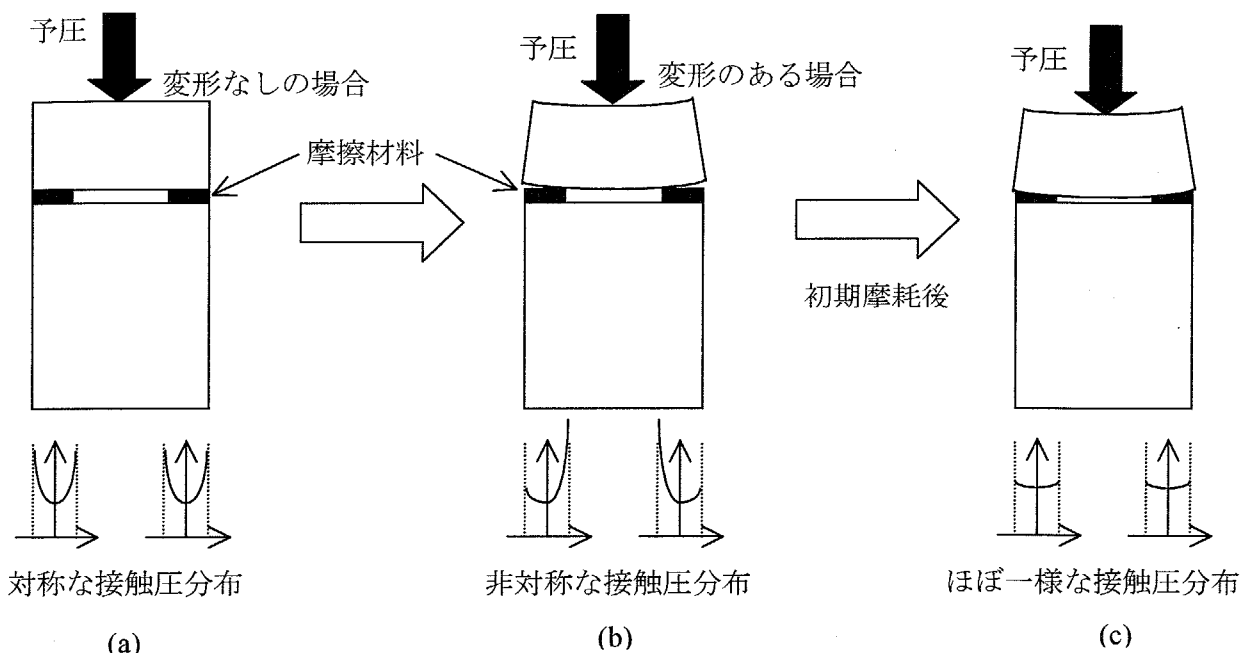


図2. 3 径方向接触圧分布の変化

2. 2. 2 非定常すべり過程における摩擦係数

一般に摩擦力は、垂直抗力×摩擦係数で表され、これを「アモントン・クーロンの法則」と呼ぶ。しかし、その接触力が時間的に変化する、同時に摺動面の摺動速度も変化する超音波モータの場合、摩擦係数をこれらの変化に対してどのように取り扱ったらよいかについて述べる。

アモントン・クーロンの法則は、荷重や滑り速度の広い範囲内において成り立つ経験則であるが、荷重や滑り速度が極端に小さい場合や極端に大きい場合には成立しなくなってくる。

例えば荷重については、低荷重では、表面酸化膜の存在により、摩擦係数は比較的低い値になる。これをマイルド摩耗と呼ぶ。高荷重では、酸化膜が破れて下地の金属との摺動にな

り、摩擦係数は比較的高い値を示すようになると考えられる。これをシビア摩耗と呼ぶ。

超音波モータの場合は、表面酸化膜が破れてしまうほど荷重が高くないようにマイルド摩耗領域で設計するため、実用上は問題にならないであろう。但し、後の章で述べるが、真空中での超音波モータ駆動においては、酸素分圧の低下により酸化膜の再生が困難となり、比較的荷重の高くない条件でも酸化膜が破れてしまう可能性があるため、注意が必要である。

一方、摩擦係数の変化については、マクロには静止摩擦係数と動摩擦係数が存在し2つの値を持つ。2つの物体が相対的に静止している場合には、静止摩擦係数で計算される静止摩擦力が発生し、2つの物体が相対的に運動している場合には、動摩擦係数で計算される動摩擦力が発生し、図2.4(a)のように、不連続に摩擦係数が変化すると簡単には考えられている。しかし滑り速度が低い領域では、摩擦係数が連続的に変化すると考えられる。ミクロに考えると、真実接触点の剪断変形や剪断破壊が、摩擦力の発生起源であると考えられている。しかし、図2.4(a)のように、全ての真実接触点が同時に剪断破壊して相対運動を始め、一気に不連続的に動摩擦係数に移行するとは考えにくい。どちらかといえば、徐々に各所から変形が破壊に移り変わっていくと考えるのが自然であり、静摩擦と動状態の区別を明確につけるのは極めて困難であろう。従って、摩擦係数は滑り速度に伴い連続的に変化すると考えられ、図2.4(b)のようになる³⁾。また、滑り速度が極めて大きい場合では、摩擦熱により表面酸化膜の破壊や軟化などが生じ、摩擦係数が変化すると考えられ、動摩擦係数も滑り速度に対して一定であるとは限らない。

実際に摩擦係数の滑り速度依存性を測定した例では⁴⁾、速度が増加するときと減少するときで異なった摩擦係数を示す履歴をもち、複雑な現象を表している。

本研究では、簡単化のためにこの履歴現象は無視し、通常の超音波モータの動作では、図

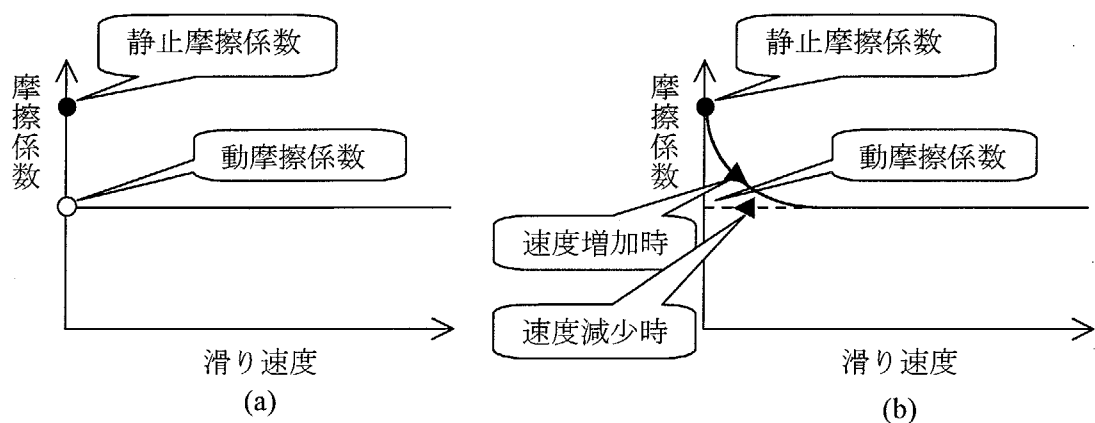


図2.4 摩擦係数の滑り速度依存性

2. 4(a)のように取り扱うこととする。更に精密な議論の場合には、履歴現象を考慮することになるであろう。

2. 2. 3 静止摩擦係数の厳密な意味

微小なモデル接触点を図2. 5に示すように設定し、金属同士の接触の場合について x と $F/W=\phi$ の関係を実験的に求めれば、図2. 6が得られる⁴⁾。実験において F は最大の注意を払い徐々に増加させられている。

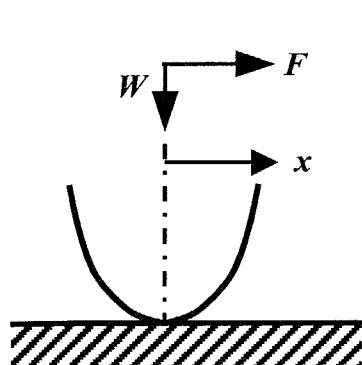


図2. 5 モデル接触点

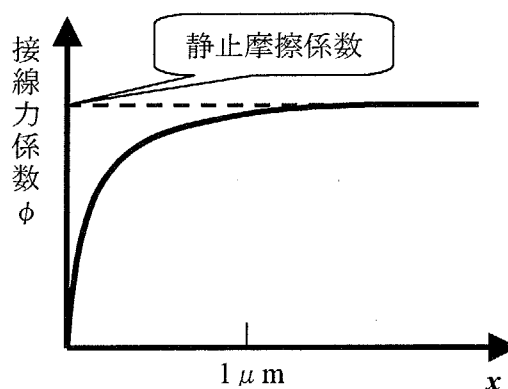


図2. 6 接触点の水平方向変位と $F/W=\phi$ の関係

一般にいわれる静止摩擦係数は、図2. 6において定常状態になった時の ϕ の値である。

2. 2. 2と同じく、真実接触点の弾性変形、塑性変形、等により摩擦力が発生するので、厳密には静止しているときには摩擦力は0であり、摩擦力が発生するときには若干の剪断変形を伴いつつ摩擦力が生じるのは自然である。すなわち $x=0$ における静止摩擦係数は存在しない。

この ϕ を「接線力係数」と呼ぶ。接線力係数が図2. 6のような変化をするのも、ミクロな真実接触点が徐々に弾性変形や塑性変形を起こして摩擦力を生じていることから考えると自然なことである。

2. 2. 4 超音波モータ摺動部の接線力係数

超音波モータにおいては、摺動部分の振動振幅は数ミクロンであり、接線力係数の一定でない部分で動作する可能性も出てくる。

例えば、ステータやロータの摺動部分のコンプライアンスが高く剪断変形が大きく、スティックやスリップを起こしつつ動作している場合、相対速度0から滑り始めるまでの過程では、接線力係数の変化を考慮する必要があるだろう。

従って、超音波モータでは摩擦係数というよりも接線力係数と呼ぶこととする。

尚、本研究での摺動面は常にスリップしている状態を仮定しているため、通常のいわゆる動摩擦係数を用いて議論を進めるが、今後は一般性を持たせるために接線力係数と呼ぶこととする。

2. 3 超音波振動を考慮した摩擦の評価式

2. 3. 1 超音波モータの摺動面圧変化

超音波モータは図2. 1に示すように縦方向振動速度により摺動面の接触圧力が時間的な変動を受ける。一般的には摺動面圧波形の時間変化については、図2. 7(a)、(b)のように、正弦波もしくは正弦波の一部であると仮定する。この波形を一周期(2π)で積分すると、バネ等で静的に予めかけられている予圧 N_0 に等しい。

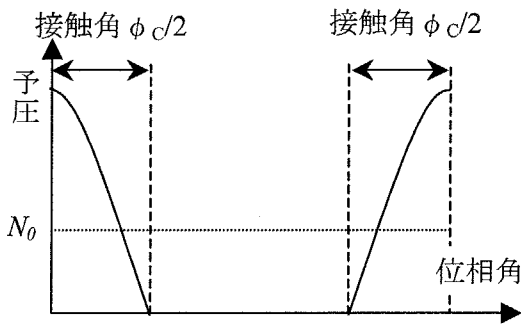


図2. 7(a) 予圧の変化
(接触角 $<360^\circ$)

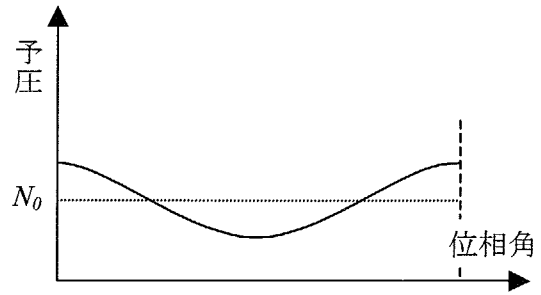


図2. 7(b) 予圧の変化
(接触角 $=360^\circ$)

ここで、一周期 2π のうちで、移動子とステータが接触している期間 ϕ_c を接触角とよぶこととする。図2. 7(a)に示す $\phi_c < 2\pi$ の場合は、

$$N(t) = \beta \left\{ \cos \omega t - \cos \left(\frac{\phi_c}{2} \right) \right\} \quad \left(0 < \omega t < \frac{\phi_c}{2}, 2\pi - \frac{\phi_c}{2} < \omega t < 2\pi \right) \quad (4)$$

(接触区間)

$$\beta = \frac{\pi N_0}{\sin \frac{\phi_c}{2} - \frac{\phi_c}{2} \cos \frac{\phi_c}{2}}$$

$$\begin{aligned}
 N(t) &= 0 \\
 \left(\frac{\phi_c}{2} < \omega t < 2\pi - \frac{\phi_c}{2} \right) \\
 &(\text{非接触区間})
 \end{aligned} \tag{5}$$

である。バネによる予圧と振動振幅から ϕ_c が定まるので $N(t)$ が決まる。

図2. 7(b)に示す $\phi_c = 2\pi$ の場合（全周期接触）は、

$$\begin{aligned}
 N(t) &= N_0(1 + \kappa \cos \omega t) \\
 (0 < \kappa \leq 1)
 \end{aligned} \tag{6}$$

である。 κ は振動の強さを示す定数である。ここでは κ を変調度と呼ぶこととする。

2. 3. 2 摩耗評価式の導出

一般に摺動面が、一定荷重下、一定速度で滑る場合には、摩耗量 $V [\text{m}^3]$ は荷重 $N [\text{N}]$ と滑り距離 $L [\text{m}]$ に比例することがわかっており、その比例定数を $W_S [\text{m}^2/\text{N}]$ として、

$$V = W_S N L \tag{7}$$

の関係で表せることが知られている⁹⁾。ここで W_S は比摩耗量と呼ばれている。

超音波モータの場合は、摺動面荷重は一定でなく、滑り速度も一定ではないが、各瞬間で式(7)の関係が成り立つと仮定し、超音波モータの摩耗評価に式(7)を適用する。そこで、荷重 N と滑り距離 L が 20kHz～100kHz 程度の駆動周波数で変化する周期関数 $N(t)$ 、 $L(t)$ とする。

時間 t から $t + \Delta t$ の微小時間 Δt の間に滑る微小距離 $\Delta L(t)$ は、滑り速度 $v(t) [\text{m/s}]$ （移動子速度と固定子速度の水平方向成分との速度差）から、

$$\Delta L(t) = v(t) \Delta t \tag{8}$$

となる。ここでの滑り速度とは、楕円軌跡を描く振動速度のうち、摺動面と平行方向速度成

分のみをさす。荷重 $N(t)$ は静止時の荷重 N_0 で基準化し、

$$N(t) = N_0 n_0(t) \quad (9)$$

とする。

固定子振動速度を、

$$v_S = v_{S0} \cos \omega t \quad (10)$$

とすると、滑り速度は、

$$v(t) = |v_{S0} \cos \omega t - v_R| \quad (11)$$

と表せる。 v_{S0} は固定子速度振幅で、 v_R は移動子速度である。

ここで滑り速度 $v(t)$ は、移動子速度 v_R で基準化した場合、 ($v_R \neq 0$)

$$\begin{aligned} v(t) &= v_R \left| \frac{v_{S0}}{v_R} \cos \omega t - 1 \right| \\ &\equiv v_R v_0^R(t) \end{aligned} \quad (12)$$

と、固定子速度振幅 v_{S0} で基準化した場合、 ($v_{S0} \neq 0$)

$$\begin{aligned} v(t) &= v_{S0} \left| \cos \omega t - \frac{v_R}{v_S} \right| \\ &\equiv v_{S0} v_0^S(t) \end{aligned} \quad (13)$$

の二通りが考えられる。

式(12)は移動子速度一定で制御した場合に適した評価法であり、式(13)は固定子速度一定で制御した場合に適した評価法であるといえる。摩耗評価する超音波モータの動作特性、制御方法によってこれらを使い分ける。

従って、微小時間 Δt の間に摩擦する微小体積 ΔV はそれぞれの場合、以下のように、

【 v_R 一定】

$$\Delta V = W_S N_0 n_0(t) v_R v_0^R(t) \Delta t \quad (14)$$

【 v_S 一定】

$$\Delta V = W_S N_0 n_0(t) v_{S0} v_0^S(t) \Delta t \quad (15)$$

となる。

経時過間 τ [s]後の摩擦体積 $V(\tau)$ は、式(14), (15)の右辺を0から τ まで時間で積分して得ることができる。

$$V(\tau) = \int_0^{\tau} W_S N_0 n_0(t) v_R v_0^R(t) dt \quad (16)$$

$$V(\tau) = \int_0^{\tau} W_S N_0 n_0(t) v_{S0} v_0^S(t) dt \quad (17)$$

また、 $n_0(t)$ 、 $v_0^R(t)$ 、 $v_0^S(t)$ が周期 T の関数であり、 $\tau \gg T$ であることを考慮すると、

$$\begin{aligned} V(\tau) &\approx \frac{\tau}{T} \int_0^T W_S N_0 n_0(t) v_R v_0^R(t) dt \\ &= W_S N_0 v_R \frac{\tau}{T} \int_0^T n_0(t) v_0^R(t) dt \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} V(\tau) &\approx \frac{\tau}{T} \int_0^T W_S N_0 n_0(t) v_{S0} v_0^S(t) dt \\ &= W_S N_0 v_{S0} \frac{\tau}{T} \int_0^T n_0(t) v_0^S(t) dt \end{aligned} \quad (19)$$

と表すことができる。式(18), (19)中の近似は、0から τ までの経過時間を駆動振動周期 T で除したときの余りを無視したという意味で、 τ が T に比べて十分大きいときにこの近似が成り

立つ。ここで、

$$W_n^R \equiv \frac{1}{T} \int_0^T n_0(t) v_0^R(t) dt \quad (20)$$

$$W_n^S \equiv \frac{1}{T} \int_0^T n_0(t) v_0^S(t) dt \quad (21)$$

を定義する。

W_n は基準化荷重と基準化滑り距離の積であり、単位時間あたりの損失に相当する。「摩擦力」と「滑り距離」の積ならば摩擦損失であるが、「荷重」と「滑り距離」の積なので、ここではこの無次元量の W_n を基準化摩耗率と呼ぶことにする。従って式(20)、(21)は、

$$V(\tau) = W_S N_0 v_R \tau W_n^R \quad (22)$$

$$V(\tau) = W_S N_0 v_{S0} \tau W_n^S \quad (23)$$

となる。

この式(22)及び式(23)が式(7)に対応する超音波モータのための摩耗予測式となる。右辺の W_S は材料の特性であり、簡単な摩耗試験法であらかじめ測定することで得られる。 N_0 、 v_R 、 v_{S0} はモータの駆動条件であり、使用者が決定できる。 W_n^R 、 W_n^S は式(20)及び式(21)を数値計算して求めることができる。

2. 3. 3 基準化摩耗率 W_n の計算方法

予圧の変化、滑り速度の変化、摩擦力の変化、摩耗率（予圧と滑り距離の積）の変化、の一周期分を、駆動力が 0 の時（無負荷定常回転時）と、移動子速度が 0 の時（最大負荷時）の場合についてそれぞれ模式的にまとめた一例が図 2. 8(a)、(b)である。それぞれのグラフの変化について詳しく説明する。

摺動面上の点が描く楕円振動の、摺動面と垂直方向成分は、周期的に予圧を変化させ、それが摩擦力を変化させる要因となる。この垂直成分の一周期を時間平均すると静的な予圧と

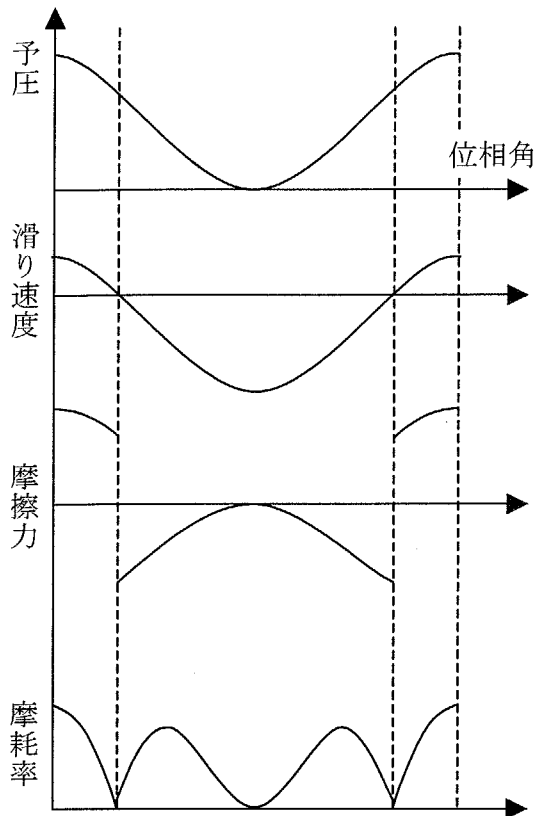


図2. 8(a) 各パラメータの変化
(移動子速度最大、平均摩擦力0)

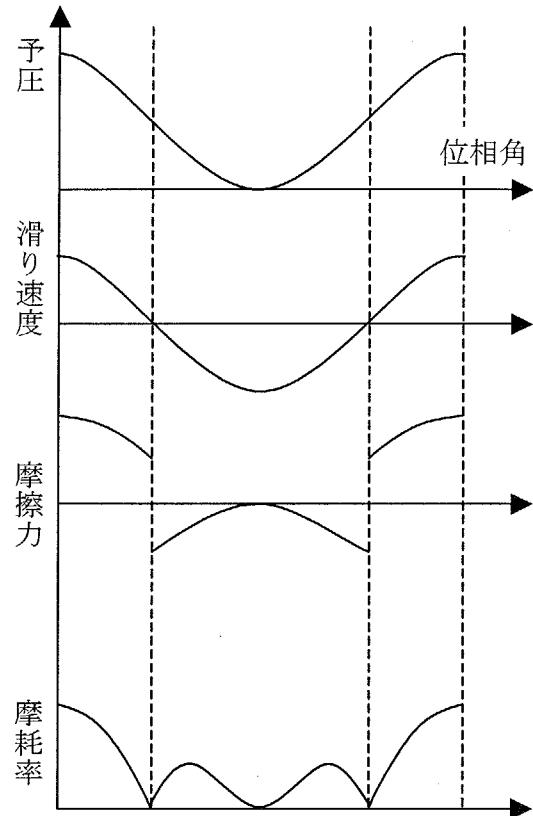


図2. 8(b) 各パラメータの変化
(移動子速度0、平均摩擦力最大)

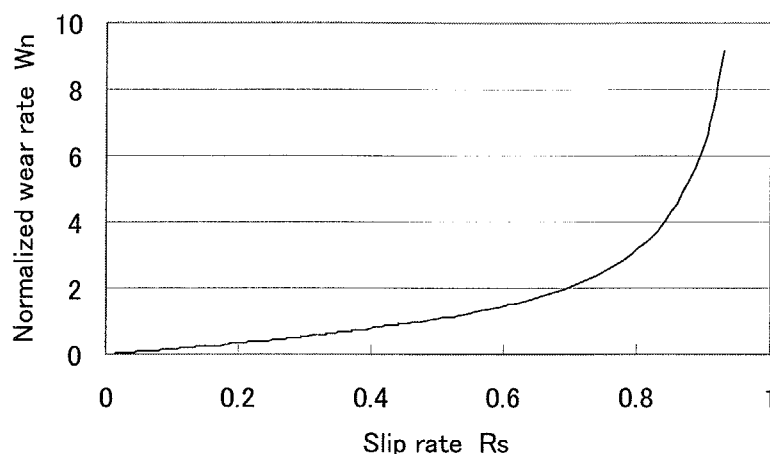
等しくなる。図2. 8(a)、(b)では予圧変化の振幅が静的予圧と同じ場合（変調度 $\kappa=1$ ）の例を示す。

そして楕円振動は、摺動面と平行方向成分も周期的に変化させるが、その時、一定速度で移動する移動子と正弦的に振動する固定子との間で速度差が生じる。この速度差によって摩擦力が発生し、超音波モータの駆動力となる。摩擦力の向きは、速度の絶対値が大きい方に決定され、滑りの向きが反転したときに摩擦力の向きも反転する。摩擦力を一周で時間平均し、正の摩擦力が残ると、移動子が加速、負の摩擦力が残ると減速されることとなる。一周で時間平均した摩擦力が0になったときの速度が移動子の無負荷速度となる。

この時に各瞬間での、予圧と滑り距離の積が摩擦率であり、図2. 8(a)、(b)に示すような波形となる。この波形を数値積分して一周あたりの摩擦率を計算する。

なお、これらの解析法は超音波モータの特性計算法として、これまでよく行われてきたものである⁹⁾。

式(4)、(5)、(6)、(11)を用い、式(20)、(21)に従って、基準化予圧と基準化滑り速度の積を時間で数値積分し、一周で時間平均をとった計算値をそれぞれ W_n^R 、 W_n^S とした。

図2. 9 基準化摩耗率 W_n^R の滑り率依存性

まず、 W_n^R の滑り率に対する依存性を数値計算した結果を図2. 9に示す。

条件は「移動子速度一定」である。

計算アルゴリズムは、

1. 出力負荷を決める。
2. 予圧波形を決める。
3. 固定子速度を変化させ、摩擦力の平均を出力負荷と同じ値にする。
4. その時の滑り率と W_n^R を記録する。
5. 予圧波形を変化させる。
6. 以下3～5を繰り返す。

である。

ここでいう「出力負荷」とは、リニア型では推力[N]、回転型ではトルク[N・m]で表す、外部出力のことである。図2. 9は無負荷の場合を示した。

ここで、滑り率は R_S と表し、

$$R_S \equiv \frac{v_{S0} - v_R}{v_{S0}} \quad (24)$$

と定義した。 v_{S0} はステータ振動速度の振幅、 v_R は移動子速度である。

移動子が停止 ($v_R=0$) した時が、滑り率 R_S は1となり、移動子が固定子と同速度 ($v_{S0}=v_R$) で駆動される時は、滑り率 R_S は0となる。

次に、 w_n^S の滑り率に対する依存性を数値計算した結果を図 2. 10 に示す。

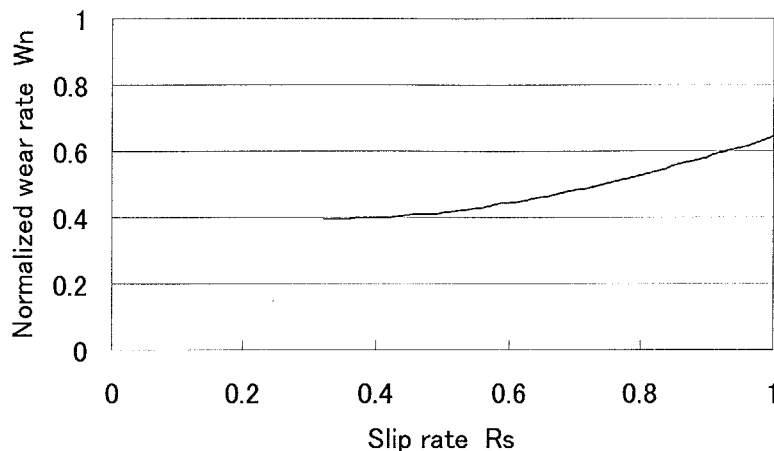


図 2. 10 基準化摩耗率 w_n^S の滑り率依存性

条件は「固定子速度一定」である。

計算アルゴリズムは、

1. 予圧波形を決める。
2. 移動子速度を変化させ、出力負荷を計算する。
3. その時の滑り率と w_n^R を記録する。
4. 移動子速度を減少させる。
5. 以下 2～4 を繰り返す。
6. 移動子速度が 0 になったら計算をやめる。

である。図 2. 10 は予圧接触角 360° で、変調度 κ は 1 の場合である。

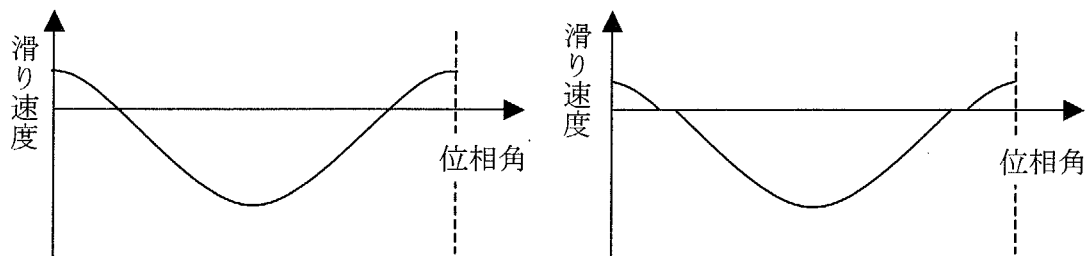
モータの動作状況、制御方法によって、図 2. 9 もしくは図 2. 10 を使い分ければ、摩耗の予測が可能となる。

2. 3. 4 滑り率に関して

ここで注意することは、摺動面のスティックスリップの影響である。図 2. 8 (a)、(b) に示すように、通常の駆動中では一周中に一瞬ではあるが相対速度が 0 になる部分が 2 カ所ある。本研究では常にスリップしている状態を仮定しているが、現実には速度 0 の時点でスティックし、その後接線力の上昇に伴いスリップが生じるというプロセスが起きている可能性がある。その概略イメージを図 2. 11 に示す。摺動面部材の剛性が低い場合（柔らかい材料の場合）は剪断変形により上記のようなスティックスリップが発生しやすくなると考えら

れ、顕著に発生すると考えられる。またこのときには、図2. 6に示すようにスティック時には接線力係数が一定ではないため、摩擦力の取り扱いが複雑になる。

更に、スティックすることで相対滑り速度波形は正弦的ではなくなるため、正弦波状の変化を仮定した式(24)の滑り率は、振動振幅 v_{s0} の定義自体が怪しくなる。今後、このような微妙問題を取り扱う場合、「振動振幅」ではなく「滑り距離」のような別の値で定義した方が一般的であろう。この考え方は、今後の第五章で述べるような振動速度波形が正弦的でない場合にも有用であると考えられる。



(a) フルスリップモデル

(b) スティックスリップモデル

図2. 11 滑り速度の時間変化

摺動面がスティックスリップ状態になり、時間的に滑らない状態が部分的に発生すると、スティック時には摩耗が0となると考えられる為、スティックスリップ状態で動作しているモデルの方が、フルスリップ状態で動作しているモデルよりも摩耗が少ないと考えられる。

2. 3. 5 摩耗予測法

摩耗予測手順を式(22)をもとにして次に示す。

1. W_S (比摩耗量) を摩耗試験器で求める。
2. N_0 (静的予圧)、 v_R (移動子速度) を与える。
3. v_{s0} (摺動面のステータ側の振動速度振幅) を測定や計算により求める。
4. 式(23)より、 v_R と v_{s0} から R_S を求める。
5. 図2. 9より、 R_S から W_n^R を求める。
6. 以上の値を式(22)に代入する。

式(23)をもとにする場合は、

1. W_S (比摩耗量) を摩耗試験器で求める。
2. N_0 (静的予圧)、 v_{s0} (固定子速度) を与える。
3. v_R (移動子速度) を測定により求める。

4. 式(25)より、 v_R と v_{S0} から R_S を求める。
5. 図 2. 10 より、 R_S から W_n^S を求める。
6. 以上の値を式(23)に代入する。

以上の手順で、摩耗量の時間経過や摩耗寿命を予測できる。尚、実際の摩耗予測については第3章において詳しく述べる。

2. 3. 6 摩耗量及び摩擦損失低減の方策

今までの議論を踏まえて、摩耗体積及び摩擦損失の低減法を探る。摩耗体積および摩擦損失は以下のように表すことができる。

$$V(\tau) = W_S \int_0^{\tau} N(t) |v_R - v_{S0} \sin \omega t| dt \quad (25)$$

$$P_{loss} = \mu \frac{1}{T} \int_0^T N(t) |v_R - v_{S0} \sin \omega t| dt \quad (26)$$

従って、これより次の3つの手法を考えることができる。

1. W_S (比摩耗量) を低減する。
2. $N(t) |v_R - v_{S0} \sin \omega t|$ (滑り) を低減する。
3. μ (接線力係数) を制御する。

これらの手法を用いて実験した結果は後の第三章、第五章、第六章でそれぞれ述べる。

2. 4 モータ負荷特性と摩耗評価

2. 4. 1 出力負荷を基準にした評価

超音波モータの特性を語るときに必ず示されるのが負荷特性であり、横軸負荷、縦軸移動速度のグラフで示される。

W_n^S の滑り率に対する依存性を数値計算する時に、固定子速度一定という条件で駆動された超音波モータの負荷特性が得られているので、図 2. 12 に示す。条件は、予圧接触角 360° 、予圧 1、接線力係数 0.1 である。

ここでは、超音波モータの負荷特性と摩耗特性の関係について述べる。

比較のために横軸は出力負荷のままとし、縦軸に各パラメータをとり出力負荷に対する依

存性を検討する。

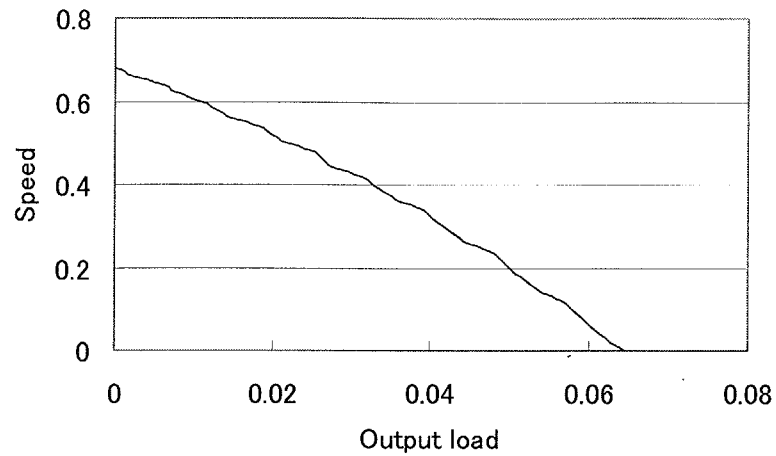


図 2. 1 2 超音波モータ負荷特性の例

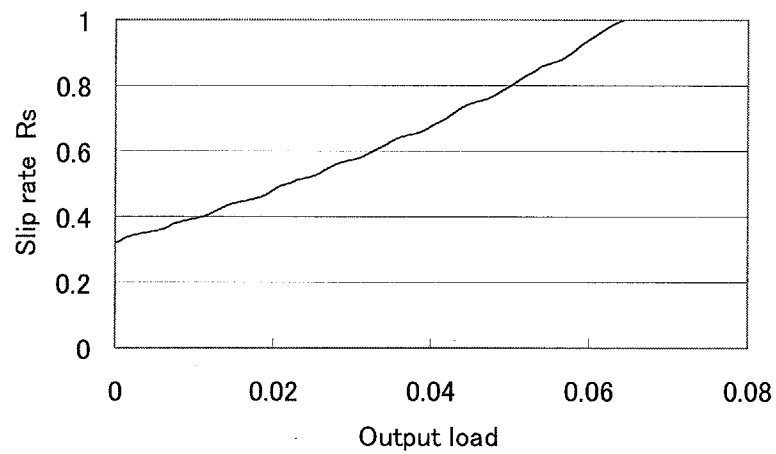


図 2. 1 3 滑り率－出力負荷特性

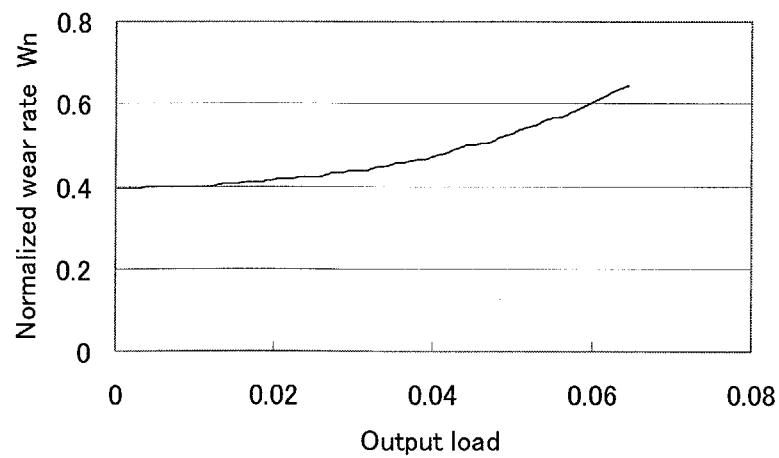


図 2. 1 4 基準化摩耗率－出力負荷特性

まずは、滑り率の依存性を図 2. 1 3 に示す。

出力負荷が増加するに伴い、滑り率も増加している様子がわかる。移動子速度が 0 になった時点（最大負荷時）で、滑り率が最大値の 1 になっている。

次に、基準化摩耗率 W_n^S の依存性を図 2. 1 4 に示す。

出力負荷が増加するに伴い、基準化摩耗率も増加している様子がわかる。移動子速度が 0 になった時点で、基準化摩耗率が最大値になっている。

2. 4. 2 摩耗体積の出力負荷依存性

図 2. 1 4 より、摩耗体積の傾向がわかる。式(21)を参照すると、 N_0 、 v_{s0} は定数なので、

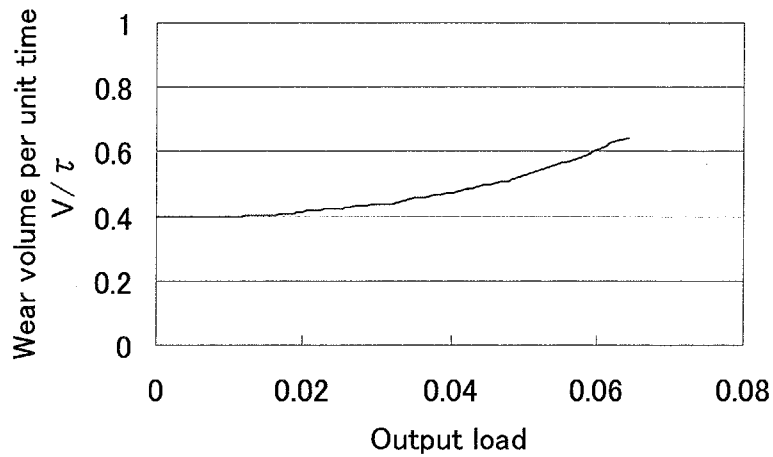


図 2. 1 5 単位時間当たりの摩耗体積－出力負荷特性

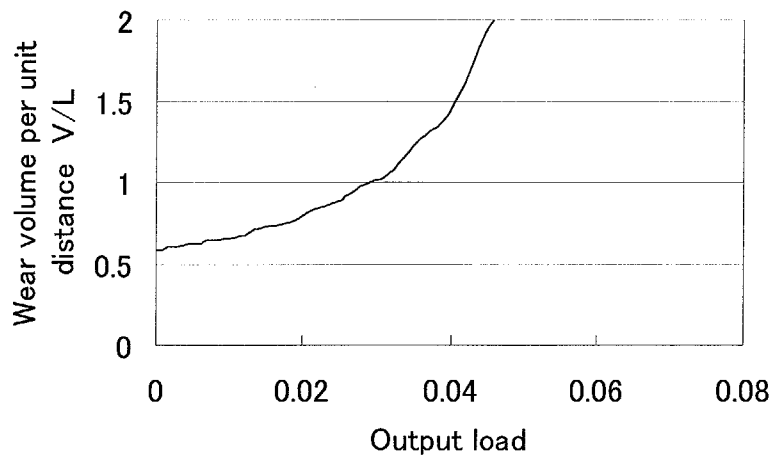


図 2. 1 6 単位距離当たりの摩耗体積－出力負荷特性

ここでは傾向を見るために（簡単のため）それらの値を1とする。比摩耗量 W_S は材料によって定数であったり、滑り速度に依存したりするが、ここでは傾向を見るために、1の場合と、滑り速度に1次で比例する場合の2種類で傾向を検討した。改めて式(23)を示す。

$$V(\tau) = W_S N_0 v_{S0} \tau W_n^S \quad (23)$$

(1) $W_S=1$ の場合。

$V(\tau) = W_n^S \tau$ となり、単位時間当たりの摩耗体積 V/τ は W_n^S となる（図2. 15）。

しかし、モータは時間で駆動するというよりはむしろ、回転数や移動距離で駆動されるものである。従って、単位距離当たりの摩耗体積の傾向を見ておくことも必要である。

移動距離は、 $v_R \times \tau$ であり、単位距離当たりの摩耗体積 $V/v_R \tau = W_n^S / v_R$ となる（図2. 1

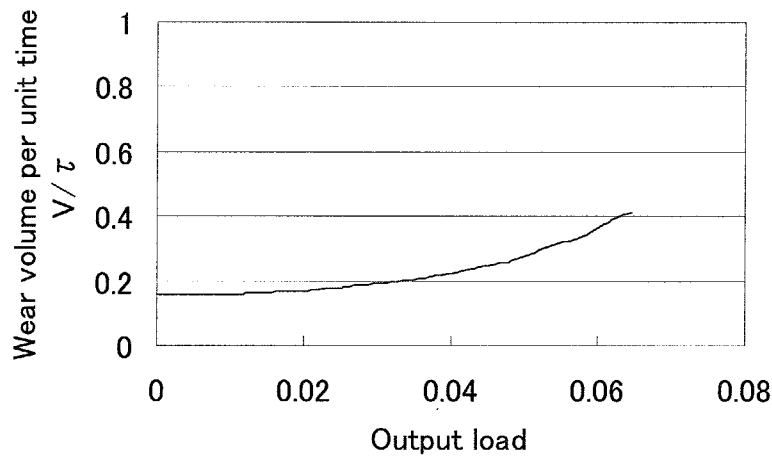


図2. 17 単位時間当たりの摩耗体積－出力負荷特性

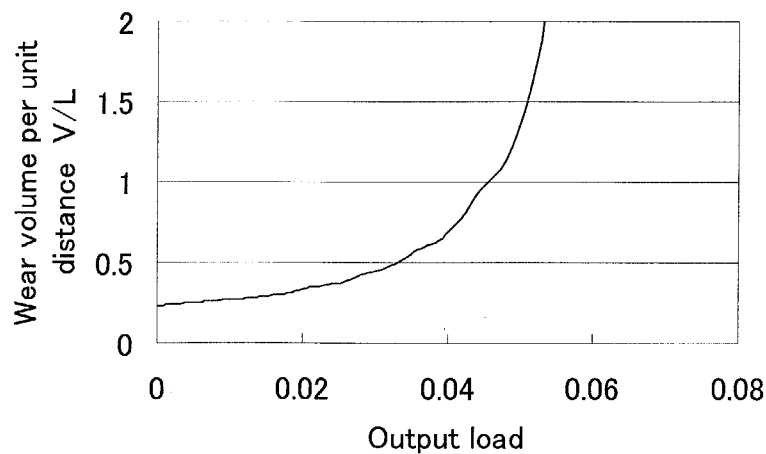


図2. 18 単位距離当たりの摩耗体積－出力負荷特性

6)。

出力負荷が大きくなるに従い、移動子速度は低下するため、移動時間が増加する。従って、単位時間当たりの摩耗体積より、単位距離当たりの摩耗体積の方がより摩耗が大きいことが読みとれる。

(2) $W_S \propto$ 滑り速度の場合

滑り速度 v は

$$\begin{aligned} V(\tau) &= W_S N_0 L \\ &= W_S N_0 v \tau \end{aligned} \quad (7)'$$

と

$$V(\tau) = W_S N_0 v_{S0} \tau W_n^S \quad (23)$$

を比較すると、

$$v = v_{S0} W_n^S \quad (25)$$

である。 W_S と v の比例定数を 1 とすると、 $W_S = W_n^S$ である。従って、 $V = (W_n^S)^2 \tau$ となり、単位時間当たりの摩耗体積は $V/\tau = (W_n^S)^2$ である (図 2. 17)。

単位距離当たりの摩耗体積は、 $V/v_R \tau = (W_n^S)^2 / v_R$ となる (図 2. 18)。

図 2. 13 と図 2. 14 の関係と同様に、単位距離当たりの方が多く摩耗していることがわかる。

2. 4. 3 比摩耗量 W_S による摩耗体積の傾向

単位距離当たりの摩耗体積と出力負荷依存性で、 $W_S=1$ の場合と $W_S \propto v$ (v : 滑り速度) の場

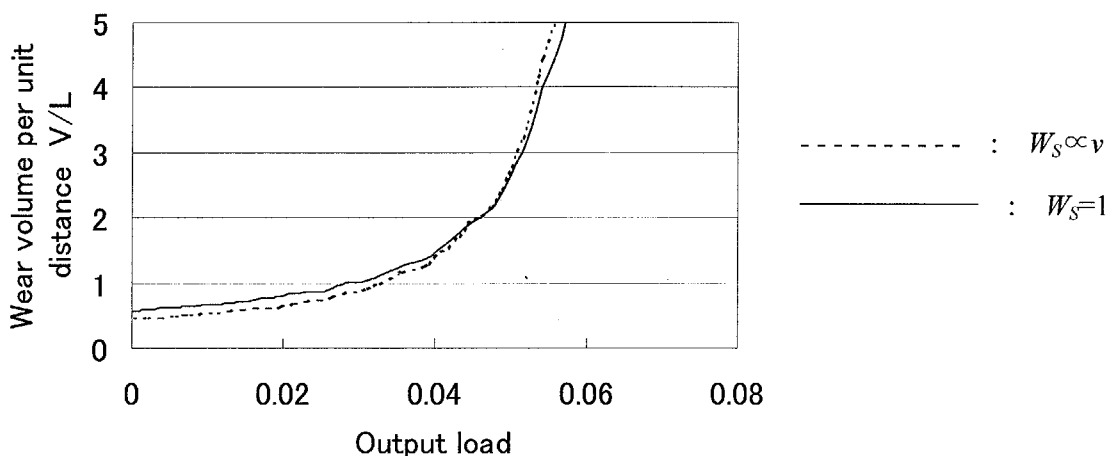


図 2. 19 単位距離当たりの摩耗体積—出力負荷特性

合の2本のグラフを重ねたのが図2. 19である。このグラフでは、比例定数を2とした。

グラフが、ある出力負荷で交わることがわかった。交わる時の出力負荷の値は、 W_s 値や W_s と v の比例定数の値によって変化し、場合によっては交わらないこともある。ここでは、交わるものとして話を進める。

交差点以下の軽負荷では、比摩耗量が滑り速度に比例する材料の方が摩耗体積が少ない。これは、軽負荷では滑り速度が低いためであると考えられる。一方、交差点以上の重負荷では、比摩耗量が滑り速度によらない摩擦材料の方が摩耗体積は少ない。これは、滑り速度が高くなっても比摩耗量が変化しないためと考えられる。

従って図2. 19より、超音波モータの動作状態によっては、摩擦材料を選択することで摩耗を減少させられることがわかる。同じ負荷特性が得られる材料であるならば、実際の使用状況に合わせて低摩耗が期待できる摩擦材料を選択すればよい。

2. 5 錘の昇降による摩耗体積の傾向

超音波モータの応用の一つとして、ブラインドやスクリーンの昇降がある。電磁式モータのような駆動音がせず、劇場や会議室等での静粛な駆動が期待されている。

しかし、従来は超音波モータ特性を述べるときに、負荷が正の場合、つまり物体を巻き上げる時の特性のみを負荷特性として紹介してきており、負荷が負の場合、つまり物体を巻き下げる時の特性は全く紹介されていなかった。しかし、上記のような応用では、必ず昇降駆動が行われ、当然摩耗も昇降時に発生している。ここでは負の負荷の場合も考慮して、正負両方の出力負荷の場合について摩耗を検討する。

2. 5. 1 出力負荷を基準にした評価

2. 4と同じく、固定子速度一定 ($v_{s0}=1$) という条件で駆動された超音波モータの負荷特性が得られているので、図2. 20に示す。条件は、予圧接触角 360° 、予圧1、接線力係数0.1である。

負の負荷が大きくなるに連れ、速度が1に近づいている。

通常、モータの負荷特性といえは負荷が正の部分のみを指し、図2. 20の横軸が正の部分は図2. 12と等しい。モータが負荷に引っ張られて、いわば外部から仕事をしてもらって回転している時は、速度は余り上昇せず、負の負荷が正の最大負荷と等しくなったときに滑り率が1になる（固定子の速度振幅と移動子の速度が等しい）。

図 2. 20 を元にして、まずは、滑り率の依存性を図 2. 21 に示す。

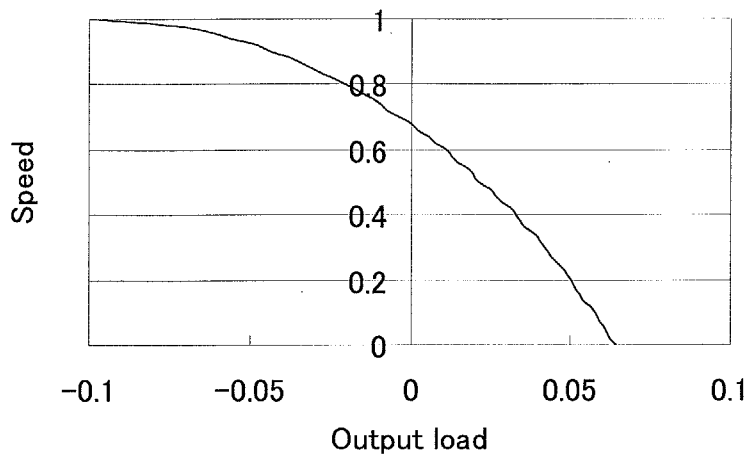


図 2. 20 超音波モータ負荷特性の例

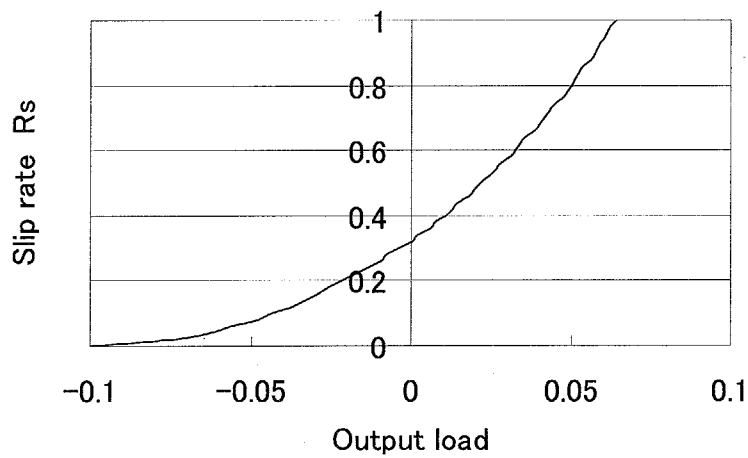


図 2. 21 滑り率—出力負荷特性

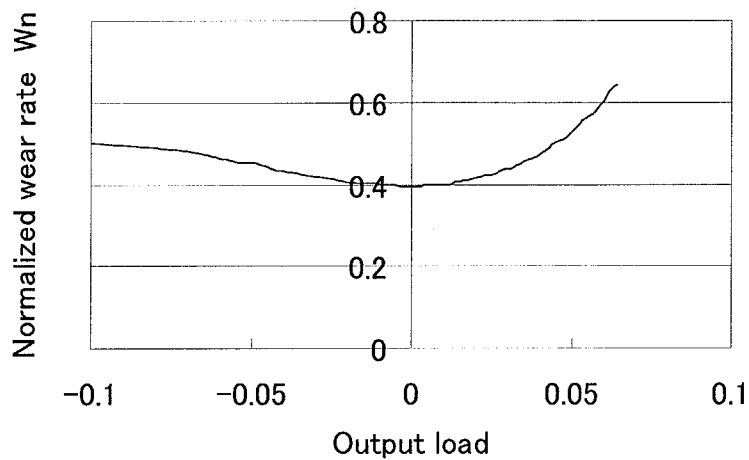


図 2. 22 基準化摩耗率—出力負荷特性

負の負荷が大きくなるに連れ、滑り率は0に近づく傾向が見られる。

移動子速度が1になった時点で、滑り率が最小値の0になっている。

次に、基準化摩耗率 W_n^s の依存性を図2. 22に示す。

負の出力負荷が増加するに伴い、滑り率が減少しているのにも関わらず、基準化摩耗率は若干の増加傾向を示している様子がわかる。移動子速度が1になる時点まで、概ね一定の基準化摩耗率を示しており、滑り率が0になっても摩耗は0にはならない。

2. 5. 2 摩耗体積の出力負荷依存性

2. 4と同様に、図2. 22より摩耗体積の傾向がわかる。式(21)を参照すると、 N_0 、 v_{s0}

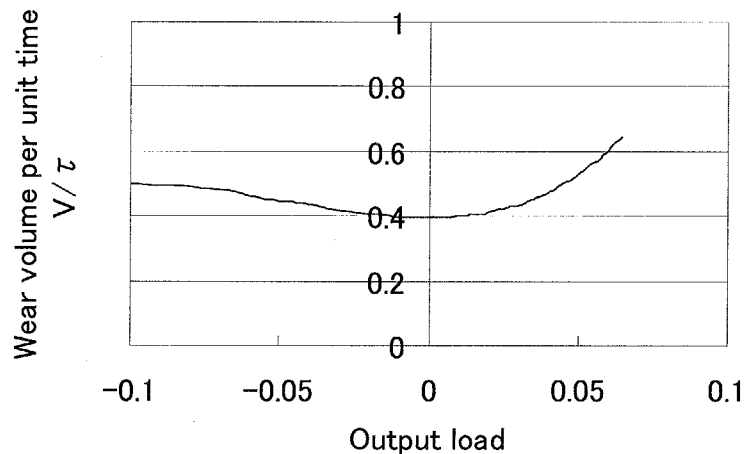


図2. 23 単位時間当たりの摩耗体積－出力負荷特性

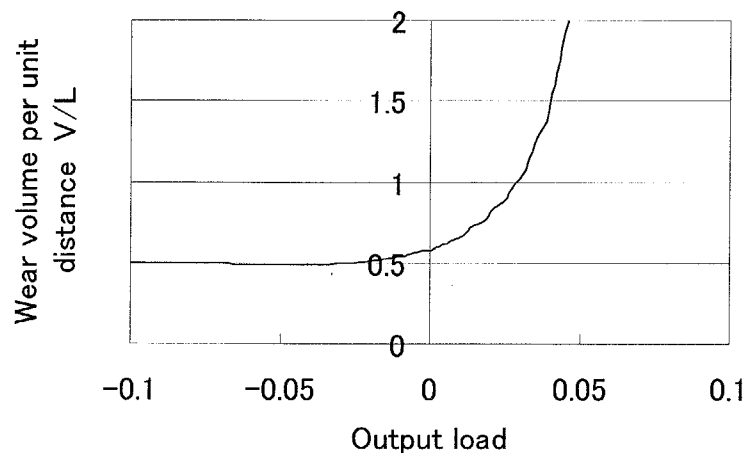


図2. 24 単位距離当たりの摩耗体積－出力負荷特性

は定数なので、ここでも傾向を見るために（簡単のため）それらの値を 1 とする。比摩擦量 W_s は材料によって定数であったり、滑り速度に依存したりするが、ここでは傾向を見るために、1 の場合と、滑り速度に 1 次で比例する場合の 2 種類で傾向を検討した。

$$V(\tau) = W_s N_0 v_{s0} \tau W_n^S \quad (23)$$

(1) $W_s=1$ の場合。

$V(\tau) = W_n^S \tau$ となり、単位時間当たりの摩擦体積 V/τ は W_n^S となる（図 2. 2 3）。

しかし、モータは時間で駆動するというよりはむしろ、回転数や移動距離で駆動されるものである。従って、単位距離当たりの摩擦体積の傾向を見ておくことも必要である。

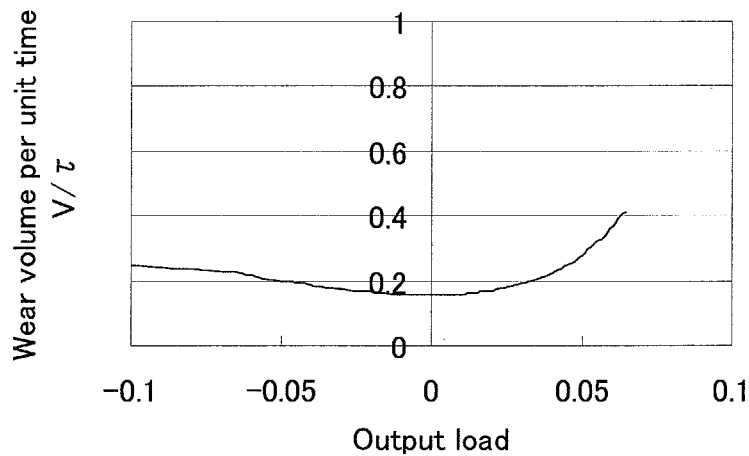


図 2. 2 5 単位時間当たりの摩擦体積－出力負荷特性

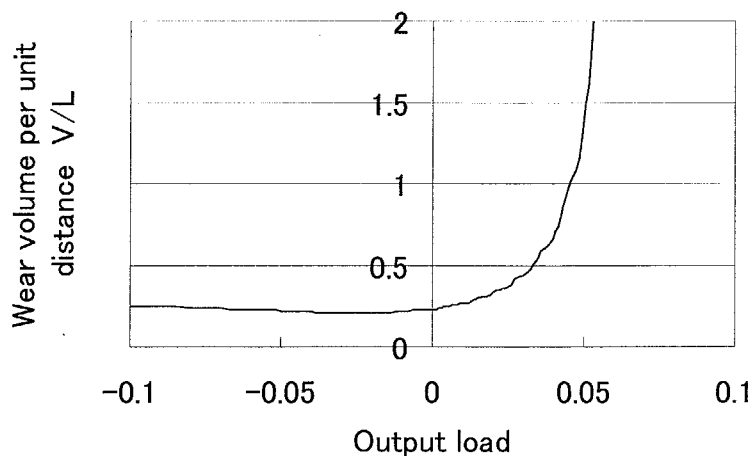


図 2. 2 6 単位時間当たりの摩擦体積－出力負荷特性

移動距離は、 $v_R \times \tau$ であり、単位距離当たりの摩耗体積 $V/v_R \tau = W_n^S/v_R$ となる (図 2. 2 4)。

出力負荷が大きくなると移動子速度は低下し、移動時間が増加するため、単位時間当たりの摩耗体積より、単位距離当たりの摩耗体積の方がより摩耗が大きいことは 2. 4 と同様であった。

図 2. 2 4 からは、負の出力負荷が範囲では、ほとんど一定の摩耗体積になることがわかった。

(2) $W_S \propto$ 滑り速度の場合

滑り速度 v は

$$\begin{aligned} V(\tau) &= W_S N_0 L \\ &= W_S N_0 v \tau \end{aligned} \quad (7)'$$

と

$$V(\tau) = W_S N_0 v_{S0} \tau W_n^S \quad (23)$$

を比較すると、

$$v = v_{S0} W_n^S \quad (25)$$

である。 W_S と v の比例定数を 1 とすると、 $W_S = W_n^S$ である。従って、 $V = (W_n^S)^2 \tau$ となり、単位時間当たりの摩耗体積は $V/\tau = (W_n^S)^2$ である (図 2. 2 5)。

単位距離当たりの摩耗体積は $V/v_R \tau = (W_n^S)^2/v_R$ となる (図 2. 2 6)。

図 2. 2 3 と図 2. 2 4 の関係と同様に、単位距離当たりの方が多く摩耗していることがわかる。

2. 6 第二章のまとめ

- ・超音波モータ用摩擦材料の摩耗評価式を導出した。
- ・超音波モータの摩擦駆動部の摩擦損失式が摩耗評価式と相似であることを見いだした。
- ・超音波モータの負荷特性と摩耗評価式の間係を明らかにした。
- ・従来触れられることのなかった、負の負荷 (モータが負荷に引っ張られる場合) についても考察を行った。
- ・次章で、本評価式の妥当性について実機摩耗試験結果とあわせて検討する。
- ・本評価をすることで、摩耗にはどのようなファクターが絡んでいるのかを明らかにし、今後の低摩耗化の指針とすることができた。
- ・本研究の摩耗評価式では材料の W_S を用いたが、更に材料のヤング率や剛性率もパラメータ

として評価を行うと、また新しい知見が得られると考えられる。今後の課題である。

参考文献

- 1) 佐藤健児・編、佐藤健児、萱場孝雄、高梨三郎、菅原昇、松井正己、武田信男：金属の摩擦とその対策、養賢堂、(1965)、p.1
- 2) ガーリン（佐藤常三 訳）：弾性接触論、現代工学社、p.45
- 3) 岡本純三、中山景次、佐藤昌夫：トライボロジー入門、幸書房、p.23-24
- 4) 加藤康司：ロータとステータの接触面の摩擦について、第25回東北大通研シンポジウム「超音波エレクトロニクスー新しい圧電応用ー」、p.101-106
- 5) 田中久一郎：摩擦のおはなし、日本規格協会、p.165
- 6) K. Nakamura et al.: IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., No.3, May (1991) 188.

第三章 超音波モータ用摩擦材料の摩耗予測

第三章 超音波モータ用摩擦材料の摩耗予測

超音波モータの摺動面には大まかには次の二つの組み合わせが存在する。

1. 片側に樹脂材料を貼り付けたもの。（金属－樹脂の組み合わせ）
2. 片側に硬質な材料をメッキや溶射などでコーティングしたもの。（異種金属の組み合わせ）

具体的な超音波モータでいうと、1は、新生工業の進行波型超音波モータ、松下電器産業の進行波型超音波モータ、アルプス電気の π 形超音波リニアモータ、アルプス電気の複合振動子型超音波モータがある。2はカメラに搭載されているキヤノンの進行波型超音波モータ、キヤノンの棒状皿回し型超音波モータである。どちらのタイプも長所短所が存在し有利性は一言でいえないが、より現実的なのは1であろう。金属は摩耗すると表面粗さが増加し、摺動面状態が徐々に悪化、モータの駆動に影響を与えることになる。その点樹脂材料は、摩耗することによって常にフレッシュな面が摺動面になり、表面粗さはほとんど変化しないと考えられ、摺動面状態が一定になりやすいと考えられる。（もちろんこれは、相手の金属材料がほとんど摩耗しないときに限られ、相手材料の金属が摩耗に伴い表面粗さが増加すると、あたかもヤスリで削られるように樹脂材料が消耗してしまう点に注意。）本章では金属と樹脂材料の摺動面状態を研究対象とする。そして、第二章で述べた摩耗評価法の有効性、一般性について本章で議論する。

第三章 超音波モータ用摩擦材料の摩耗予測

3. 1 供試超音波モータ

(1) 複合振動子型超音波モータ

まず複合振動子型超音波モータの動作原理図を図3. 1に示す¹⁾。モータは、回転子である「ロータ」と固定子である「ステータ」部分に分けられる。ステータは、圧電セラミックスを金属ブロックでボルトを介して挟み込んだ、いわゆる、ボルト締めランジュバン型振動子の構造を持っている。この超音波モータの特徴は、摺動面上の楕円振動軌跡の平行成分と垂直成分を発生する振動子が独立しており、それぞれねじり用振動子とたて用振動子として挟み込んである。これにより、駆動の自由度が向上し（楕円振動リサージュ波形の長径と短

径の比が自由にえられる)、動作特性の改善がはかられている。直径は25mmで、ステータ側に摩擦材料を貼り付けてある。ねじり振動の共振周波数約26kHzで駆動し、回転方向は、それぞれの振動子に印加した電圧の位相差を変えることで逆転が可能である。

次に、摺動面の応力分布および滑り速度分布について述べる。

摺動面は同位相で振動し、周方向や径方向には節を持たない。しかし、たて振動による端面の変形は一様ではなく、図3.2(a)に示すように中央が最もよく振れて周辺がやや振れが小さくなるような径方向の分布を持っている。従って、摺動面の径方向応力分布は、厳密には一様ではないことがわかる。

更に、周方向の振動角速度についても同様に、図3.2(b)に示すように周辺が最もよく振れて中央の振れが小さくなるような径方向の分布をもっている。

しかしこれはあくまでも厳密な場合であり、しかも摺動面は、ステータ端面の周辺部分の一部にリング状に存在する場合がほとんどである。従って、摺動面径方向応力分布はほぼ一様と考えて実用上は差し支えない。

また、周方向は一様に振動している

摺動面内において、ねじり角速度が径方向で一定とすると、ねじり速度とロータの回転速度の速度比も一定となる。よって、最外周の速度を測定することで摺動面内の滑り率の測定が可能である。

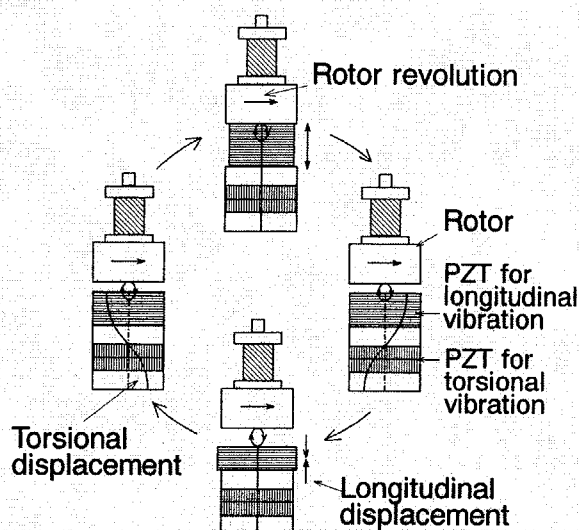


図3.1 複合振動子型超音波モータ

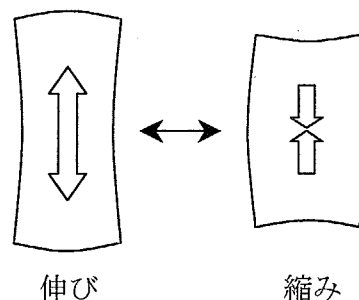


図3.2(a) たて振動モード

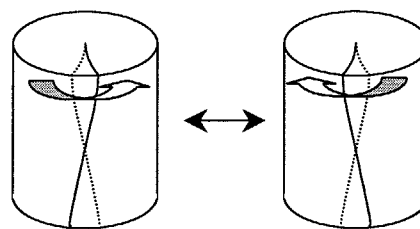


図3.2(b) ねじり振動モード

(2) π 型超音波リニアモータ

次に、 π 形超音波リニアモータの模式図を図3. 3(a)に示す²⁾。 π 形の金属製弾性体の角に5 mm×5 mm×9 mmの積層型圧電アクチュエータを接着し、端面に摩擦材料を接着した構成である。積層型圧電アクチュエータにそれぞれ90°位相をずらした約90kHzの駆動電圧を印加すると、図3. 3(b)に示すように弾性体の端面（摩擦材料の表面）が楕円軌跡を描く振動を生じ、押しつけたレールが駆動される。印加電圧の位相差を-90°にすると駆動方向が逆転する。実際にリニアステージと組み合わせた例の模式図を図3. 4に示す。

振動モードは、厚さ方向には一様であるので、レールとの滑り方向の振動分布より、摺動面の応力分布を推定する。左右の足の振動は、位相差があるのみで、ほぼ同じ振動をしており、片足のみ考察すればよいと考えられる。

足はたわみ振動をしており、摺動部分の応力はたわみに応じて滑り方向に分布を持っていると考えられる。常に片方向に駆動されているならば、この応力分布を考慮する必要があると考えられるが、リニアステージの駆動のように、両方向に駆動されているならば、平均化され、一様な応力分布であると考えても長期間では差し支えないと考えている。

従って、本研究では、 π 形超音波リニアモータの摺動面応力分布は時間的に変化するのみで、空間的には一様であると仮定して評価を行うこととする。

(3) 進行波型超音波モータ

最後に進行波型超音波モータの模式図を図3. 5(a)に示す³⁾。円板状弾性体の底面に厚さ0.5 mmのリング状圧電セラミックスを貼り付け、分割した電極に90°位相の異なる電圧を印

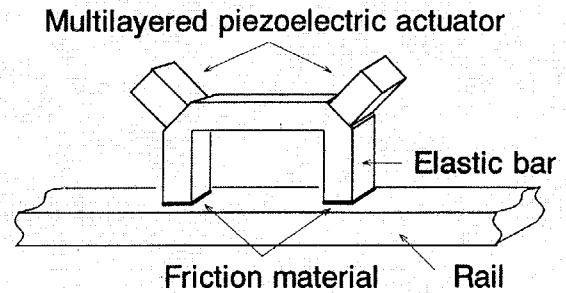
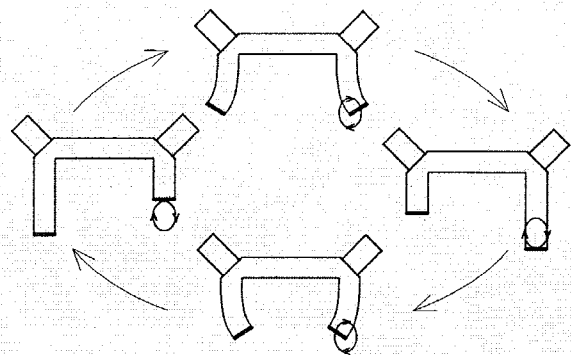

 図3. 3(a) π 形超音波リニアモータ


図3. 3(b) 動作原理

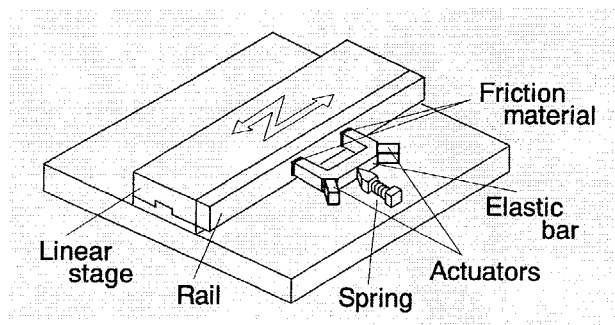


図3. 4 リニアステージに組み込んだ例

加した。図3. 5(b)に示すように弾性体が振動し、楕円振動する上面に接触させたロータを駆動する。今回は周方向7次の振動モードを用いた。摩擦材料はロータ側に接着した。回転方向は位相差を -90° にすることで変えることができる。ステータには突起が設けてあり、その突起の効果は摩耗粉が溝に落ちるため特性が変化しにくいこと、振動変位を拡大することができることなどが挙げられる。ステータは外径60 mm、内径50 mm、厚さ9 mm（圧電セラミックス及び突起を含む）で、 6° ごとに幅1.5 mm、深さ2 mmの溝を設けてある。ステータはリン青銅製で、表面は#2000 砥粒による研磨を施してあり、鏡面ではない。

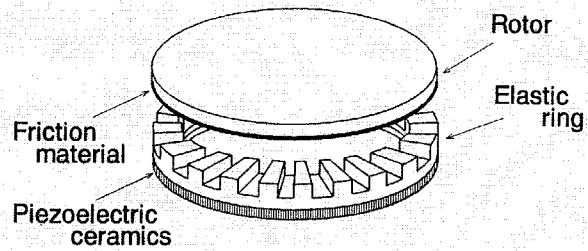


図3. 5(a) 進行波型超音波モータ

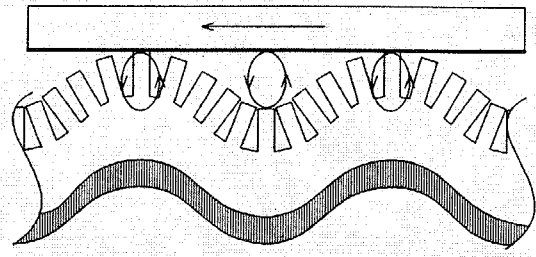


図3. 5(b) 動作原理

ロータ側の接触部分は、外径57 mm、内径53 mmである。

摺動面内では、まず径方向に応力分布が存在するが、既に述べたように一部分のみを取り扱うので、径方向は一様とする。

次に、周方向の応力分布だが、これは、進行波による応力の変化である。全周接触しているときは、正弦的な応力分布になる。そして、予圧が小さい場合や振動振幅が大きい場合には、部分接触になる。この時の応力分布は、正確には次の式(1)に示すようになる⁴⁾。

$$p(x) = \frac{2\bar{p}\cos(\pi x/\lambda)}{\sin^2(\pi a/\lambda)} \left\{ \sin^2(\pi a/\lambda) - \sin^2(\pi x/\lambda) \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$p(x)$: 接触圧力、 $\bar{p}$: バネ等による静的予圧、 $2a$: 接触角、 λ : 波長

本章では簡単のため、部分接触部の応力分布の形を正弦波の一部と仮定することとする。このように近似することで、他型式の超音波モータの場合と同様の議論が可能になり、より一般性が高くなると考えられる。

各モータの摩擦材料サイズ、摩擦材料枚数、見かけの接触面積、摺動面仕上げ、等について表3. 1にまとめた。

表 3. 1 供試超音波モータの条件一覧

モータ型式	複合振動子型	π 形リニア	進行波型
摩擦材の形状	$5 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$	$5 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}$	$5 \times 2 \times 0.5 \text{ mm}$
摩擦材の枚数	10 枚	2 枚	30 枚
見かけの接触面積	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$1.66 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
相手材料	SUS440C	SUS440C	リン青銅
相手材料の仕上げ	鏡面	鏡面	#2000 処理

3. 2 摩擦材料

3. 2. 1 供試摩擦材料

(1) CM (カーボンメタル)

カーボンメタルはアモルファス構造の黒鉛 (図 3. 6 参照) にメタルを含浸させた材料である⁵⁾。この材料はマツダのロータリーエンジンのおむすび形ロータの頂点に使用

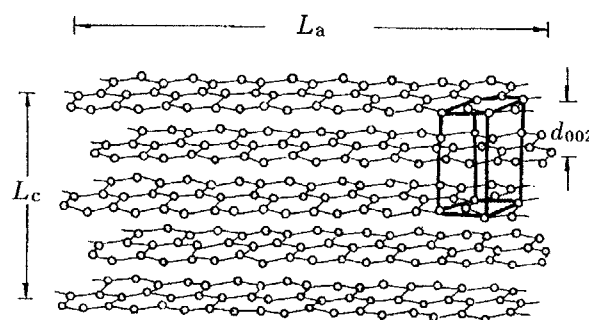


図 3. 6 黒鉛構造

されているアベックスシールであり、エンジン内部での摺動材料として実績がある。高温、高圧、高摺動速度に十分耐えうる材料と考えられる。このような用途では、接線力係数が小さくなるように設計されており、ある程度の接線力係数が必要な超音波モータには向かないかもしれない。しかし、燃料や潤滑油が存在し、流体潤滑～混合潤滑～境界潤滑などの様々な状態にある摺動面と比較し、超音波モータに使用した場合には液状潤滑剤を使用しないため、カーボン等による固体潤滑作用 (境界潤滑状態) のみになると考えられる。接線力係数はある程度増加するものと期待できる。

ちなみに、アンチモン系、アルミ系、銅系のカーボンメタルと、S45C (面粗さ 3S) との摺動実験では、滑り速度 1 m/s 、荷重 5 kgf/cm^2 において接線力係数は、大気中で 0.2 前後、水中で 0.04 前後とのことである⁶⁾。

第四章で述べるが、SUS303 との実験では、大気中の接線力係数は約 0.06 程度であり、余り超音波モータには向いていない可能性があるが、比較材料として実験に供することとする。

一方、組成は異なると思うが、ディスクブレーキパッドにもカーボンメタルは採用されており、適切な組成を選択することで、カーボンメタルの超音波モータへの使用可能性が残されている。

カーボンメタルの外観は、色は黒。複合材料であるが、目で見えるような構造は無く、等方性材料である。元の形は煉瓦のような塊で、それを必要な大きさにカットして使用する。例えば π 形超音波リニアモータ用であれば 5mm 角で厚さ 0.5mm にするが、このくらいの厚さになるとパリッと割れてしまう。脆性材料である。

(2) CFRP

CFRPはCarbon Fiber Reinforced Plastics (炭素繊維強化プラスチック) の略である。マトリックス材料に高分子材料、強化繊維にカーボン繊維を使用している。

本来は構造材料として使用されるため、繊維を3次元的に編みである。本研究でも3次元的に繊維を編んだものも使用しているが、摺動材料として考えた場合、摺動方向にのみ繊維が存在しても大丈夫と思われる。そのため1次元的に繊維を入れて強化した材料も使用した。

本研究では、2種類のマトリックス材料のものを使用した。摺動方向と繊維の方向を平行にした場合と直角にした場合の2種類の使用方法を試した⁷⁾。

CFRPの外観を肉眼で観察すると、繊維が一方方向に配向していることが見て取れる。色は黒。複合材料である。元はシート状の材料で、必要な大きさにカットして使用する。1軸配向の材料は異方性が強く、繊維と平行の方向にはカッターナイフで樹脂を削るように簡単に切断できるが、繊維と直角の方向にはカッターナイフではなかなか切断できない。

この材料は、実際の超音波モータに使用している実績のある摺動材料である。

(3) 石綿ジョイントシートパッキング (JIS B 3450)

石綿ジョイントシートパッキング (通称: 石綿ゴム) は、クリスタル石綿繊維に、耐熱性、耐油性に富むゴムを混和し、圧搾加硫して板状にしたもので、JISでは耐油用、水蒸気用、共用の種類に分類され普及品として無印のものが市販されている⁸⁾。石綿繊維は特に決まった方向はないようであるが、シート状であるのでシートに平行な方向で絡み合っているようで2次元的な構造をもっていると考えられる。もともと摺動材料として使用されるものではないので、剛性率は低く割合とぐずぐずとしたほぐれ方をするが、実際に超音波モータに使用すると、モータ特性としては比較的よい値が得られるが、上記理由により摩耗が著しいため寿命は短い。

この材料は、上羽・中村研究室で様々な材料を検討した末に見いだした材料で、研究室内では超音波モータ用として通常使用されている材料である。

3. 2. 2 摩擦材料の基礎摩耗特性

(1) 摩耗試験器

図 3. 7 に使用した摩耗試験器を示す。摩擦材料は π 形の弾性体に貼り付け 2000 番の耐水ペーパで表面を仕上げた。レールは、ステンレス鋼 (SUS440C 焼き入れ) で 2000 番の耐水ペーパとダイヤモンドで鏡面に仕上げた。

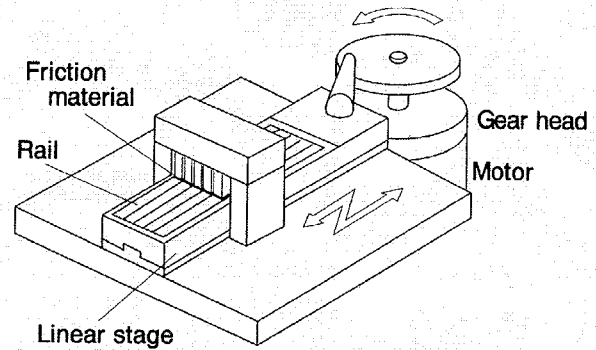


図 3. 7 摩耗試験器

また、正弦的な滑りを再現するために、クランクを用いて外部モータの回転運動を往復運動に変換するタイプにした。モータのギアヘッドを交換することで、滑り速度を変化させることができる。滑り速度の変化幅は、実際の π 形超音波リニアモータの滑り速度がその範囲内に入るように考慮して決定した。

滑り速度は正弦的に変化するために、「平均滑り速度」で評価を行うこととする。平均滑り速度 = (滑り距離) / (滑り時間) と定義する。

実は摩耗試験器は、JIS-K7204 に規定されている。規格制定に携わった方のお話を伺うと、昭和 52 年当時は、テイバー社の摩耗試験器が多く使用されていたという背景があった。試験荷重や試験速度はどのようにして決められたかということ、国産の摩耗試験器も含め、テイバー社のオリジナルの値を参考にして決められたとのことである。また、アメリカにおける ASTM の繊維の摩耗試験規格の試験にテイバー社の物が使われていたのも考慮されたようである。

当時、試験片を各社に配布し摩耗試験をしてもらったところ、非常にばらつきが大きかったそうである。特に、基本寸法、速度、荷重がかなり効くとのことであった。

「基本寸法」はおそらく、伝熱・放熱の条件に密接に関わっていると考えられる。

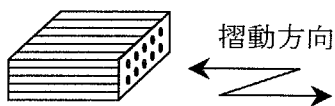
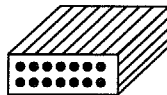
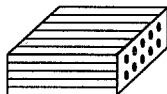
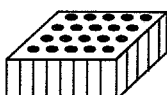
本研究で自作の摩耗試験器を使用することは一般性の点からやや問題が残るかもしれない。しかし上記の背景に配慮し、基本寸法、速度、荷重に関しては、なるべく実機に近い物を用いることとした。ここでは、 π 形超音波リニアモータに近い状況で試験を行っている。

ここで得られた値は π 形超音波リニアモータ以外のモータにも適用する予定であるが、その時は、試験時の基本寸法が異なることによる誤差が含まれることを予め考慮しておく必要がある。できればこのような形状依存性がでない摩耗試験が望ましく、今後の課題である。

(2) 摩耗特性

摩耗試験に使用した摩擦材料を表 3. 2 にまとめた。

表 3. 2 供試摩擦材料

	試料名	繊維配向	摺動条件
1	カーボンメタル	なし	—
2	CFRP1	// 摺動面 // 摺動方向	
3	CFRP1	// 摺動面 ⊥ 摺動方向	
4	CFRP2	// 摺動面 // 摺動方向	
5	CFRP3	ほぼ ⊥ 摺動面	

// : 平行、⊥ : 垂直

摩耗試験結果を図 3. 8 に示す。図 3. 8(a)にあるように、1-CM と 2-CFRP1 // と 4-CFRP2 は平均滑り速度が上昇するにつれて比摩耗量 W_s が比例して増加する速度依存性を示した。また、図 3. 8(b)にあるように、3-CFRP1 ⊥ と 5-CFRP3 については速度依存性は見受けられず、ほぼ一定の値をとることがわかった。

これらの結果より、摩耗予測式の適用を材料特性によって適切に選択する必要があることが明らかになった。今後の実機摩耗試験に使用する材料としては、摩耗が少ない材料が好ましく、CM が候補となるが、CM は摩耗粉がレールに付着し、モータとして安定な動作が望めないことがわかったため今回は使用を見送った。従って今回は 2-CFRP1 // を使用した。本材料は超音波モータにすでに実用化されている材料である。

本摩耗試験器により、各材料の W_s が測定できるが、 W_s は接線力係数と同様に、滑らせる相手材料との組み合わせや摺動面状態によって異なると考えられ、今回測定した W_s が材料固有の値として得られているわけではない。相手材料や摺動面状態が異なる超音波モータを評価する場合には、改めて当該材料で摩耗試験を行い、 W_s を求め直す必要があると考えている。

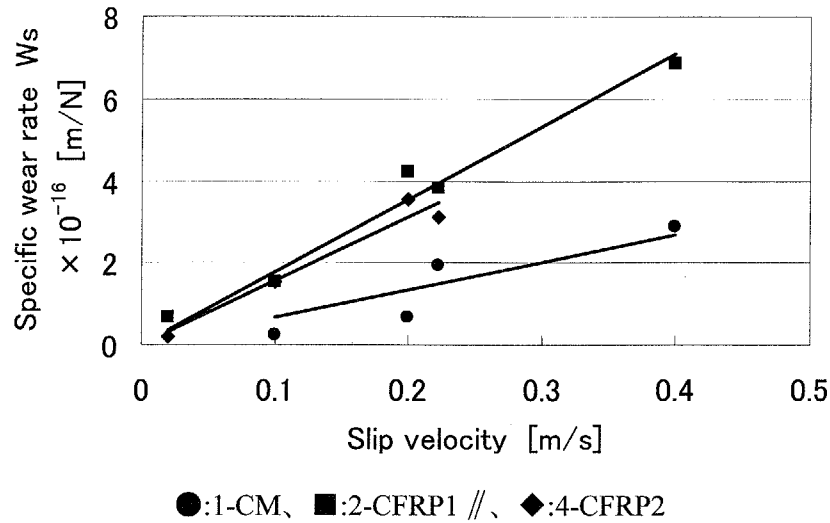


図 3. 8(a) 比摩耗量に滑り速度依存性のある場合

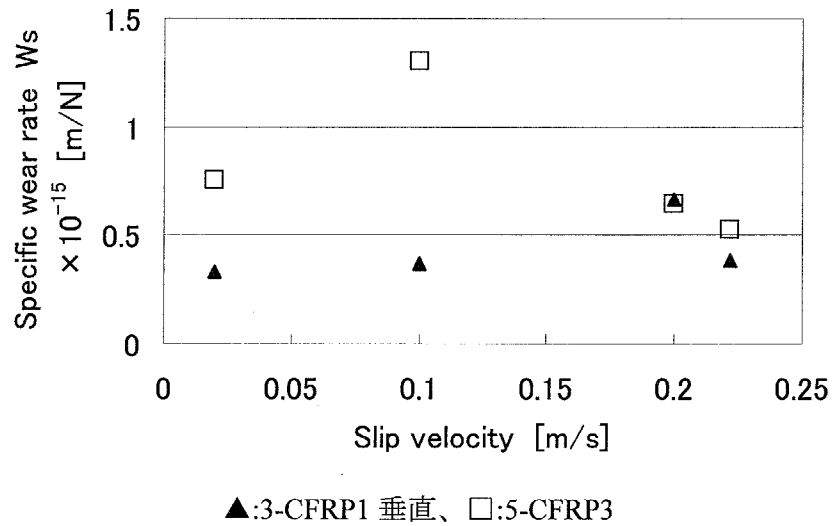


図 3. 8(b) 比摩耗量に滑り速度依存性のない場合

3. 2. 3 摺動面粗さ

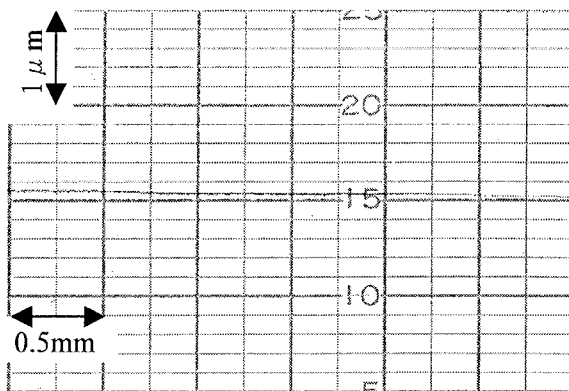


図 3. 9(a) レール未使用面

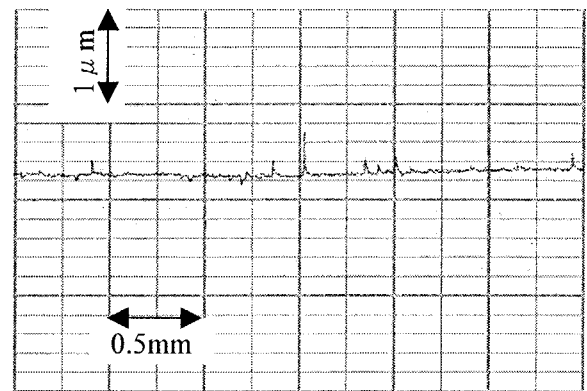


図 3. 9(b) レール使用後面

摩耗試験に伴いレールの表面粗さが変化した様子を図 3. 9 に示す。

レールは SUS440C 焼き入れ、摩擦材料は 2-CFRP1 // を使用し、約 300 時間の摩耗試験後である。表面粗さは触針式表面粗さ測定装置（ランク・テラー・ホブソン社、タリサーフ 4）を用いて、摺動方向と直角に測定した。

比較のために使用前、使用後の倍率を 10000 倍にそろえてあるが、この倍率では使用前は滑らかに見える（図 3. 9 (a)）。100000 倍で測定を行うと、最大高さ $R_{max} \approx 0.01 \mu m$ であった。使用後は、 $R_{max} \approx 0.1 \sim 0.2 \mu m$ 程度の凹凸が観測された（図 3. 9 (b)）。凹部は摩耗であるが、凸部は摩擦材料が付着したためと考えられる。

これにより摩耗試験に伴い表面粗さが変化することが確認された。実機での摩耗試験においても表面粗さが変化することを考えると、特にこの点は考慮せずに W_s を求めた。しかし今後、更に正確な W_s を求めるためには、表面粗さの変化を考慮することは必要であろう。

3. 3 実機摩耗試験

次に実際の超音波モータに貼り付けて駆動した場合の実機摩耗試験を行い、実機での摩耗予測可能性を検討した。なお、実験は全て常温・常圧の通常の実験室環境下で行った。

3. 3. 1 異種摩擦材料での摩耗試験

速度依存性のない材料とある材料の 2 種類について実機摩耗試験を行った。実機には、両方とも複合振動子型超音波モータを使用した。使用した材料は、速度依存性のない材料として CFRP1 ⊥ を、速度依存性のある材料として CFRP1 // を使用した。

各材料を用いたときのモータの動作状態を表 3. 3 にまとめた。

表 3. 3 動作状態

摩擦材料	CFRP1 ⊥	CFRP1 //
静的予圧 N_0	490 N (50 kgf)	
見かけの接触圧力	3.27×10^6 Pa	
ロータ周速度 v_R	1.28×10^{-1} m/s	7.9×10^{-2} m/s
ステータ周速度 v_{S0}	2.9×10^{-1} m/s	1.1×10^{-1} m/s
速度比 v_R / v_{S0}	0.44	0.69
滑り率 $1 - v_R / v_{S0}$	0.56	0.31
基準化摩耗率 W_n^S	0.56	0.37
平均滑り速度 $v_{S0} W_n^S$	—	0.04 m/s
比摩耗量 W_s	4.5×10^{-16} m ² /N	9.2×10^{-17} m ² /N

まず、速度依存性のない材料 (CFRP1 ⊥) の場合、表 3. 3 の値より摩耗予測式は、第二章の式(23)より、 $V(\tau)=W_s N_0 v_{s0} \tau W_n^S=4.5 \times 10^{-16} \times 490 \times 2.9 \times 10^{-1} \times 0.56 \times \tau=3.6 \times 10^{-14} \times \tau$ 。

$V(\tau)=3.6 \times 10^{-14} \times \tau$ になった。図 3. 9 に実際の摩耗と摩耗予測直線を示す。実測と予測はオーダが合う程度で予測できた。

次に、速度依存性のある材料 (CFRP1 //) の場合、表 3. 3 の値より摩耗予測式は、第二章の式(23)より、 $V(\tau)=W_s N_0 v_{s0} \tau W_n^S=9.2 \times 10^{-17} \times 490 \times 1.1 \times 10^{-1} \times 0.37 \times \tau=1.8 \times 10^{-15} \times \tau$ 。

$V(\tau)=1.8 \times 10^{-15} \times \tau$ になった。図 3. 10 に実際の摩耗と摩耗予測直線を示す。実測と予測はオーダが合う程度で予測できた。

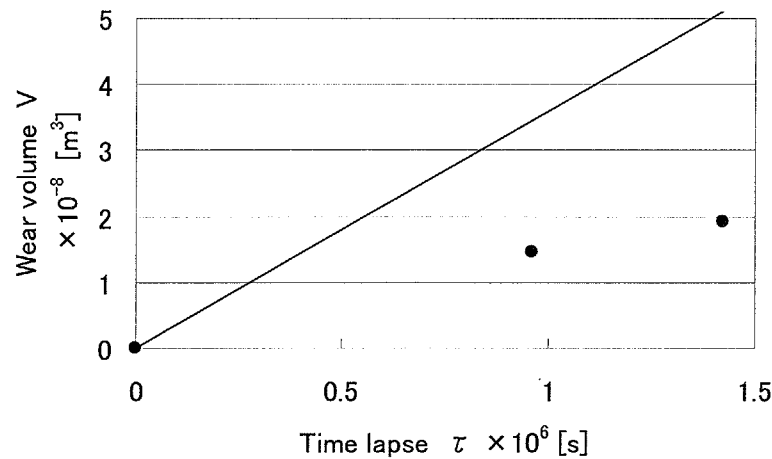


図 3. 9 実機摩耗試験
複合振動子型超音波モータ+速度依存性のない材料

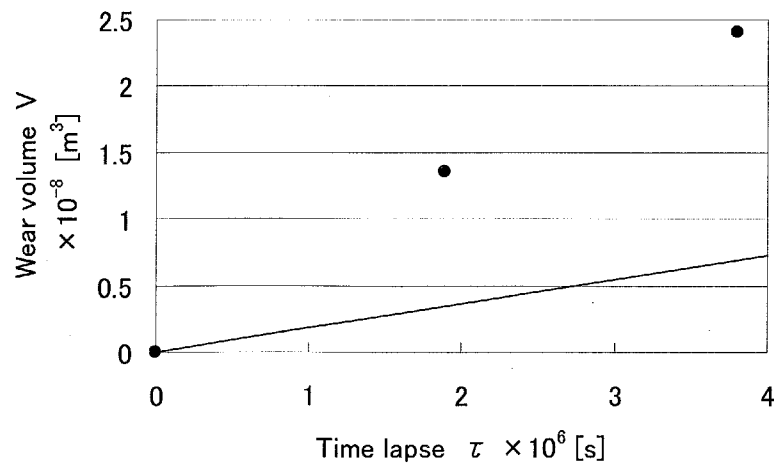


図 3. 10 実機摩耗試験
複合振動子型超音波モータ+速度依存性のある材料

以上の結果より、予め簡単な摩耗試験により摩擦材料の摩耗特性を明らかにし、摩耗予測にその特性を取り込めば、異種摩擦材料でもオーダがあう程度の精度で摩耗予測が可能であることがわかった。

誤差が生じた原因は様々あると考えられるが、一つ挙げるとするならば、クランク式摩耗試験器の試験片として π 形超音波リニアモータ用弾性体を利用したため、複合振動子型超音波モータの予測に当てはめたときに差異が生じたものと考えられる。

3. 3. 2 異種超音波モータでの摩耗試験

実機には、 π 形超音波リニアモータおよび進行波型超音波モータを使用した。そして、摩擦材料は、実用化されている材料である 2:CFRP1 //を用いた。各モータの動作状態を表 3. 4 にまとめた。

表 3. 4 動作状態

摩擦材料	π 形	進行波型
静的予圧 N_0	29.4 N (3 kgf)	9.8 N (1 kgf)
見かけの接触圧力	5.9×10^5 Pa	5.9×10^4 Pa
移動子速度 v_R	7×10^{-2} m/s	1.8×10^{-1} m/s
ステータ周速度 v_{S0}	2.7×10^{-1} m/s	2.7×10^{-1} m/s
速度比 v_R / v_{S0}	0.26	0.67
滑り率 $1 - v_R / v_{S0}$	0.74	0.33
基準化摩耗率 W_n^S	0.61	0.4
平均滑り速度 $v_{S0} W_n^S$	0.16 m/s	0.11 m/s
比摩耗量 W_S	2.9×10^{-16} m ² /N	2.1×10^{-16} m ² /N

まず、 π 形超音波リニアモータの場合、表 3. 4 の値より摩耗予測式は、第二章の式(23)より、

$$V(\tau) = W_S N_0 v_{S0} \tau W_n^S = 2.9 \times 10^{-16} \times 29.4 \times 2.7 \times 10^{-1} \times 0.61 \times \tau = 1.4 \times 10^{-15} \times \tau。$$

$V(\tau) = 1.4 \times 10^{-15} \times \tau$ になった。図 3. 1 1 に実際の摩耗と摩耗予測直線を示す。実測と予測がほぼ合っているといえる。

これは、試験片形状と、実機形状が似ていたため、比較的精度の高い予測結果が得られたものと考えられる。

次に、進行波型超音波モータの場合を述べる。しゅう動面での相手材料が「リン青銅」で

あり、また表面仕上げの初期状態も異なっているが、SUS440C・鏡面仕上げの場合の W_s 値で予測を試みた。表 3. 4 の値より摩耗予測式は、第二章の式(23)より、

$$V(\tau) = W_s N_0 v_{s0} \tau W_n^S = 2.1 \times 10^{-16} \times 9.8 \times 2.7 \times 10^{-1} \times 0.4 \times \tau = 2.2 \times 10^{-16} \times \tau。$$

$$V(\tau) = 2.2 \times 10^{-16} \times \tau \text{ になった。}$$

図 3. 1 2 に実際の摩耗と摩耗予測直線を示す。実測と予測はオーダーが合う程度で予測できた。

誤差が生じた原因の一つとしては、表面が鏡面でなく少し粗かったこと、さらに突起があることにより、そのエッジ部分の影響で摩耗が増加した可能性があることを考慮すると、実

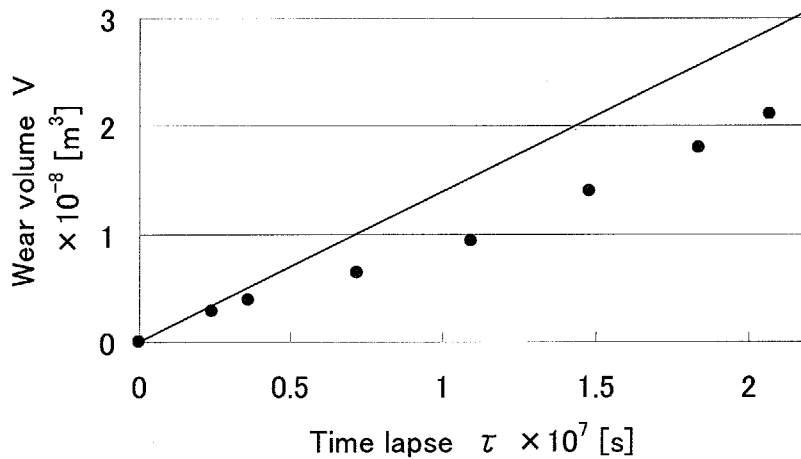


図 3. 1 1 実機摩耗試験

π 形超音波リニアモータ + 速度依存性のある材料

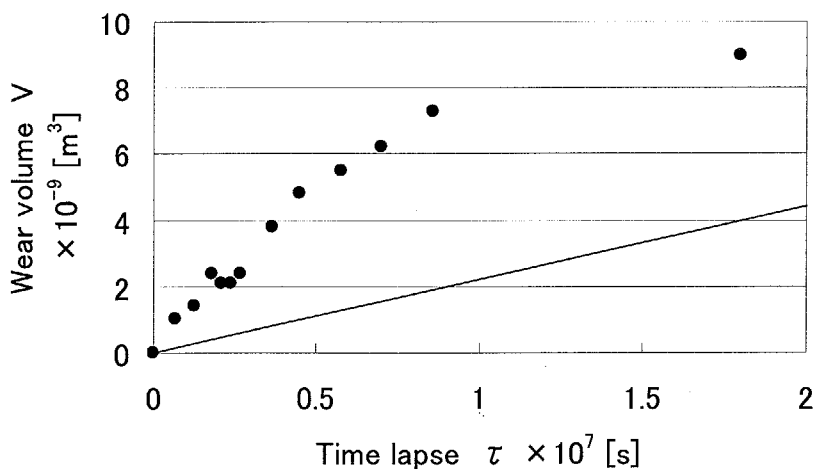


図 3. 1 2 実機摩耗試験

進行波型超音波モータ + 速度依存性のある材料

機の結果が予測より大きいのは妥当な結果であるといえる。

以上の結果より、超音波モータの動作特性を明らかにし、摩耗予測にその特性を取り込めば、異種超音波モータでもオーダが合う程度の精度で摩耗予測が可能であることが明らかになった。

3. 3. 3 錘の昇降による摩耗試験

次に、スクリーンの昇降などの負荷がかかった場合の摩耗について、実機摩耗試験を行った。複合振動子型超音波モータを使用して、錘を昇降させた場合の実機摩耗試験結果を示す。

図 3. 1 3 に昇降摩耗試験器を示す。

負荷錘には、500 g、1 kg、2 kg の 3 種類を用いた。プーリは直径 2cm で、それぞれの錘を用いたときの負荷トルクは、0.5 kgf・cm、1 kgf・cm、2 kgf・cm である。

錘が一番上まで巻き上げられたり、一番下まで巻き下げられたりすると、逆転スイッチにより超音波モータの回転方向が逆転する。予圧は、 2.94×10^2 N (30 kgf) である。

巻き上げ時及び巻き下げ時の各パラメータを表 3. 5 に示す。

負荷が変化すると滑り率も変化する。

無負荷時の滑り率が 0.7 になるのは、変調度 $\kappa=0.3$ (接触角 360°) の時であるので、 $\kappa=0.3$ の時の値を、接線力係数=0.1、予圧 1、ステータ速度 1、の条件で計算した。モータ負荷特性、滑り率特性、 W_n^S 値を図 3. 1 4、3. 1 5、3. 1 6 に示す。

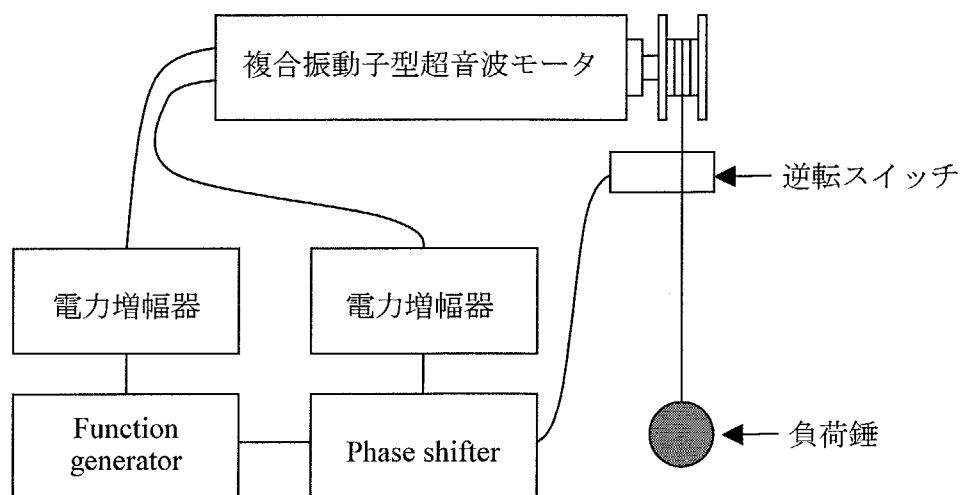


図 3. 1 3 昇降摩耗試験器

表 3. 5 負荷試験時の各パラメータ

	巻き上げ				巻き下げ			
錘 kgf	v_R cm/s	v_{SO} cm/s	R_S	W_n^S	v_R cm/s	v_{SO} cm/s	R_S	W_n^S
0	6.7	23.1	0.71	0.61	6.2	20.0	0.69	0.61
0.5	6.0	21.7	0.72	0.61	7.1	21.4	0.67	0.61
1.0	5.1	19.7	0.74	0.61	7.5	23.3	0.68	0.61
2.0	3.7	15.4	0.76	0.61	8.3	25.1	0.67	0.61

本モータは、最大トルクが、約 $4.4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ である。ここに 2 kg の錘を用いると、 $2 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ のトルクとなり、最大トルクの約 45%がかかっていることになる。図 3. 1 4 より、錘を負荷とした場合、下降時と上昇時ではロータ速度は約 $2/3 \sim 4/3$ の間で変化し、滑り率は約 0.6

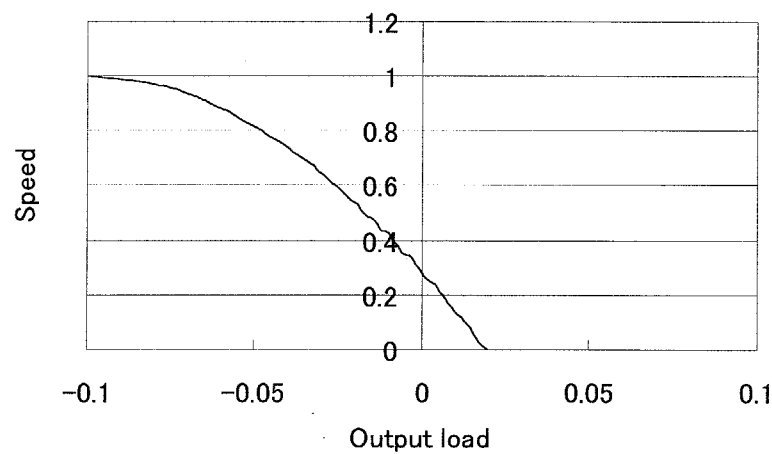


図 3. 1 4 負荷特性

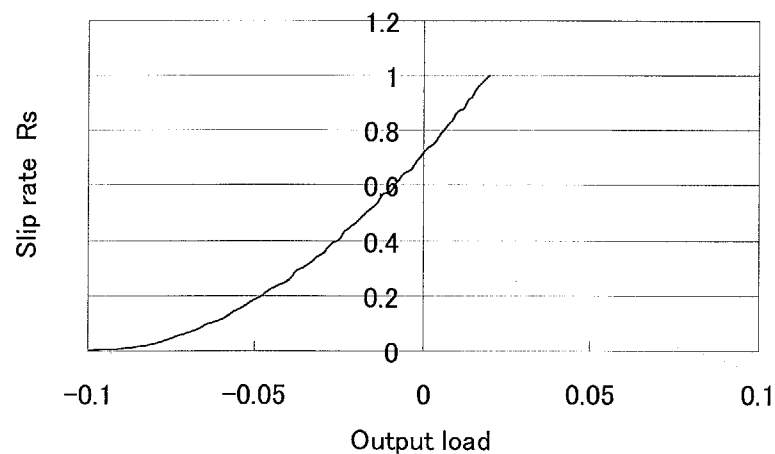
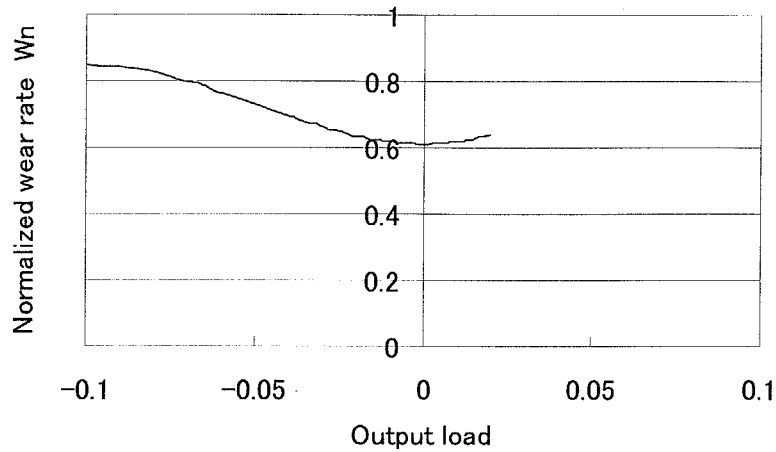


図 3. 1 5 滑り率特性

図 3. 16 W_n^S 値

~0.8 の間で変化することが予測された。その範囲での W_n^S 値は約 0.61 でほぼ一定である。

実際にモータを駆動した結果を表 3. 6 に示す。

表 3. 6 負荷試験時の各パラメータおよび摩耗予測式

	巻き上げ							巻き下げ						
錘 kg	v_R cm/ s	v_{SO} cm/ s	R_S	W_n^S	v_{SO}^S W_n^S	W_S	τ s	v_R cm/s	v_{SO} cm/ s	R_S	W_n^S	v_{SO}^S W_n^S	W_S	τ s
0	6.7	23.1	0.71	0.61	14.1	2.5 e-16	14.2	6.2	20.0	0.69	0.61	12.2	2.2 e-16	15.3
片道	$1.5 \times 10^{-13} \text{ m}^3$							$1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3$						
往復	$2.7 \times 10^{-13} \text{ m}^3$													
0.5	6.0	21.7	0.72	0.61	13.2	2.3 e-16	15.8	7.1	21.4	0.67	0.61	13.1	2.3 e-16	13.3
片道	$1.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3$							$1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3$						
往復	$2.6 \times 10^{-13} \text{ m}^3$													
1.0	5.1	19.7	0.74	0.61	12.0	2.1 e-16	18.5	7.5	23.3	0.68	0.61	14.2	2.5 e-16	12.6
片道	$1.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3$							$1.3 \times 10^{-13} \text{ m}^3$						
往復	$2.7 \times 10^{-13} \text{ m}^3$													
2.0	3.7	15.4	0.76	0.61	9.4	1.7 e-16	25.4	8.3	25.1	0.67	0.61	15.3	2.7 e-16	11.4
片道	$1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3$							$1.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3$						
往復	$2.6 \times 10^{-13} \text{ m}^3$													

式(21)に従って、予測式を表 3. 6 に示す。予測式は、錘が片道分移動したときの摩耗を示している。上げと下げを合計した値を往復として示してある。

巻き上げ時は、錘が重くなるにつれて、ロータ速度が減少し、滑り率や駆動時間は増加している。しかし、滑り速度が低下してくるため比摩耗量 Ws は低下し、結果として、片道あたりの摩耗量は減少傾向を示した。

巻き下げ時は、錘が重くなるにつれて、ロータ速度が増加し、滑り率や駆動時間は減少している。しかし、滑り速度が増加してくるため比摩耗量 Ws は増加し、結果として、片道あたりの摩耗量は増加傾向を示した。

以上をまとめると、往復駆動では増加と減少が相殺して、錘の重さにかかわらずほぼ同程度の摩耗になると予測された。

図 3. 17 に摩耗予測線と、実機摩耗試験結果を示す。

0.5~2kg の錘を昇降させた結果は、2kg の時の摩耗が若干減少しているようであるが、予測のように、重さの違いによらずほぼ同じような摩耗を示した。

3. 4 セラミックスレールを使用した低摩耗駆動法

3. 4. 1 セラミックスレール及び実機摩耗試験

第一章で述べたように、摩耗評価式からは、低摩耗化には比摩耗量 Ws を低下させる方法が有効であることがわかる。 Ws は摩擦材料と相手材料との組み合わせで決まる値である。

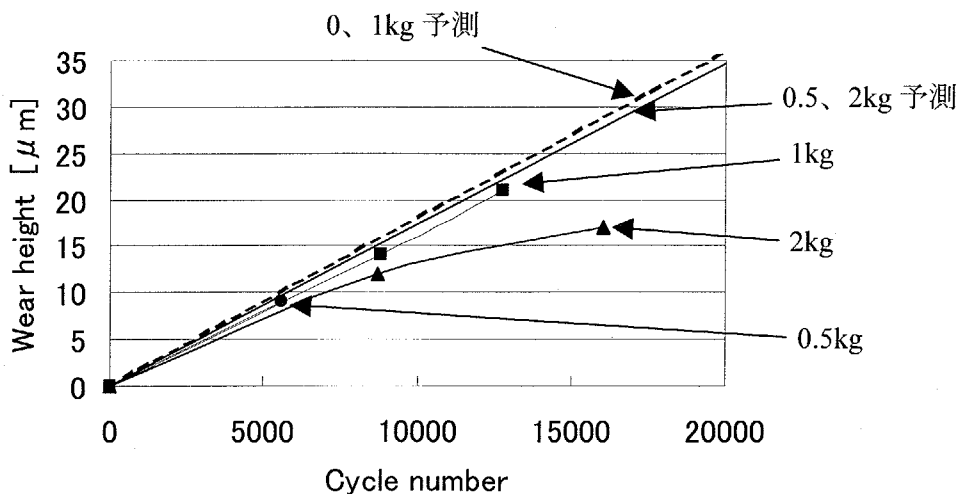


図 3. 17 負荷摩耗試験結果

今までは、CFRP 摩擦材料に、SUS440C（焼き入れ・鏡面研磨）という組み合わせで実験を行ってきたが、いかに硬いステンレス鋼とはいえ、長期間の摩耗試験では表面粗さが悪化してくる。

そこで、摺動材料として、硬くて摩耗しにくい材料であるセラミックスを使用することとした。セラミックスには各種あるが、本実験ではジルコニア製のレールで摩耗試験を行った。摩擦材料は同じく CFRP を使用した。使用したのは π 形超音波リニアモータである。

ジルコニアは比較的空孔が少ないため、相手材料に対するあたりがやさしいと考えられる。空孔が多いと、表面にできるオープンポアが多く発生し、摩耗の増加が心配されるからである。

本セラミックス製レールでは摩耗試験を行っていないため Ws の値が得られていない。あくまでも参考データとしてここに載せることとする。

実験結果を図 3. 18 (a)、(b) に示す。縦軸は摩耗深さで、摩擦材料の厚さが 0.5mm なので、グラフの上限 500 μm が摩耗限界となる。

図 3. 18 (a) は横軸時間にとった時の摩耗特性である。摩耗の初めに「初期摩耗」とよばれる摩耗特性がカーブする様子が見られる。いわゆるあたりがつくまでが初期摩耗である。その後ほぼ時間に比例する摩耗が観察される。ステンレスレールは徐々に傾きが大きくなっている。これは、レールの表面粗さが徐々に悪化しているためと考えられる。一方、セラミックスレールの方は、このグラフの範囲ではまだほぼ直線を保っている。表面粗さは目視でほとんど悪化していない（鏡面が残っている）。詳細は次で述べる。

図 3. 18 (a) の傾きから約 3.4 倍セラミックスレールの方が長寿命であることがわかった。しかし、ステンレスレール及びセラミックスレールを使用した場合の、平均移動速度はそれぞれ 7.0cm/s、5.3cm/s、であったため、単位距離あたりに換算すると、約 2 倍の延命効果があることになった。図 3. 18 (b) に横軸をステージの移動距離にした摩耗特性を示す。既に述べたように、傾きから約 2 倍長寿命であることがわかった。

ステンレスレールの方は約 5760 時間で停止した。まだ若干の摩擦材料は残っていたが、超音波モータの支持部分の変形による摩擦材料の片減りや、レール表面粗さの悪化による停止と考えられる。

セラミックスレールの方は、約 12400 時間で停止した。まだ摩擦材料は残っていたが、超音波モータの支持部分の変形により、超音波モータが支持部を中心に回転する現象を起こしていた。回転による摺動面への接触状態の不安定化が停止の原因と考えている。一応ユーザ

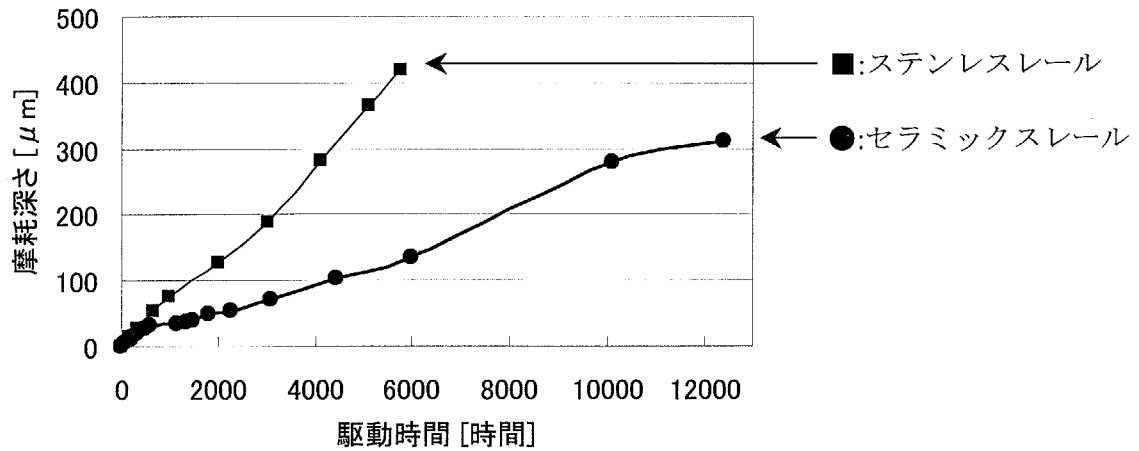


図 3. 18 (a) 長期実機摩耗試験 (駆動時間)

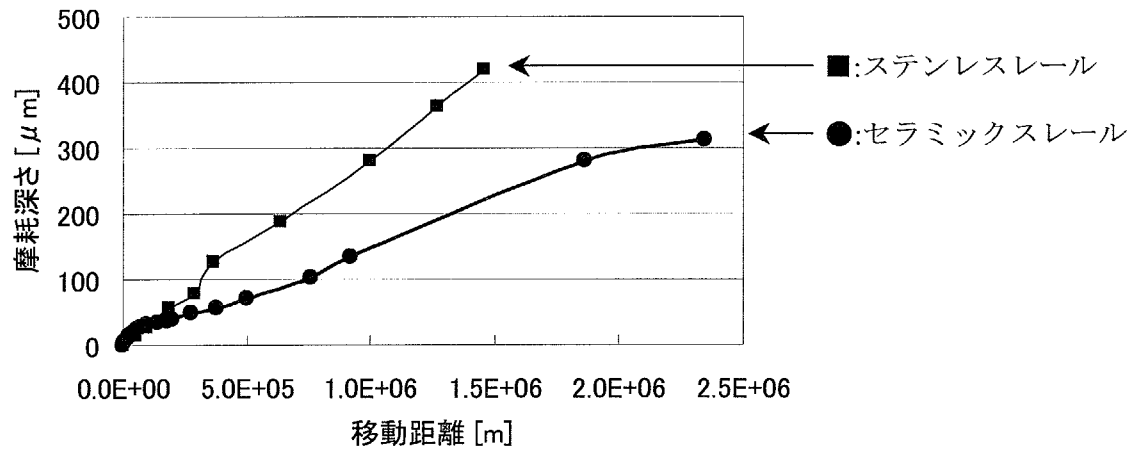


図 3. 18 (b) 長期実機摩耗試験 (移動距離)

一側の要求である 10000 時間は、「無負荷」という条件ではあるが達成した。

3. 4. 2 摩耗試験後のセラミックスレール

使用後のセラミックスレール表面外観写真を図 3. 19 に示す。材質はジルコニアである。

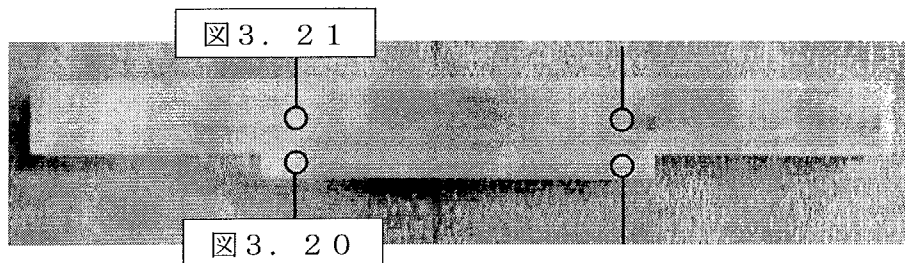


図 3. 19 セラミックスレール

目視では、摺動面でも鏡面が残っており、目立った摩耗は見受けられない。若干黒く色が付いているが、これは摩擦材料である CFRP が付着しているものと考えられる。

図 3. 20 に未使用面の、図 3. 21 に 12400 時間後の摺動面の表面拡大写真を示す。倍率は 1000 倍である。ほとんど違いが見られない。写真中の黒点はおそらく空孔と思われる。

また、中心線平均粗さを測定した結果、未使用面は $Ra=14.1nm$ 、摺動面は $Ra=18.6nm$ であった。（指定は $Ra=20nm$ 以上の仕上げ面）若干の面粗さ上昇が観測されたが、それでも初期の指定値を超えることは無く、良好な面粗さ状態を保っていた。

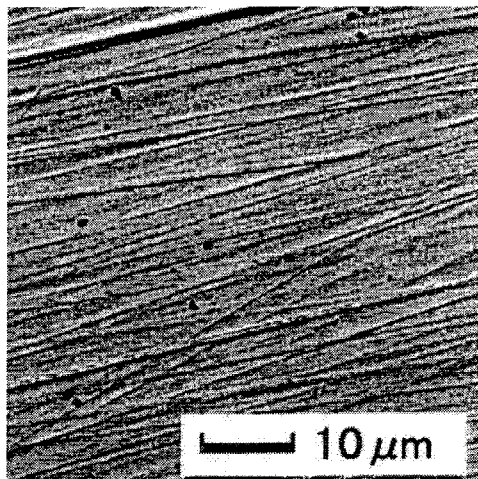


図 3. 20 未使用面

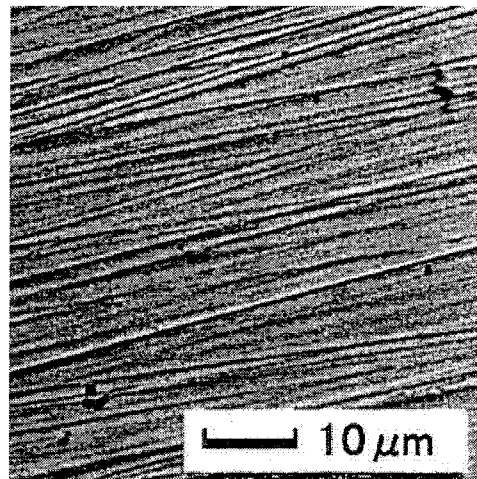


図 3. 21 12400 時間摺動面

3. 4. 3 発塵特性

クリーンルーム等で使用するに当たって、発生する摩耗粉量は気になるところである。

そこで図 3. 22 に示すような測定系で、パーティクルカウンタ（リオン製 KC-03）を用い、温度 25°C、湿度 50%RH、クラス 1 のクリーンベンチ内で発生塵埃個数を測定した。

ステージをストローク 60mm、移動速度 70mm/s、折り返し地点での待ち時間 0.4s で往復駆動しながら、採取空気量 3 $\frac{l}{min}$ で一回の測定を 56 秒間行った。パーティクルカウンタの試

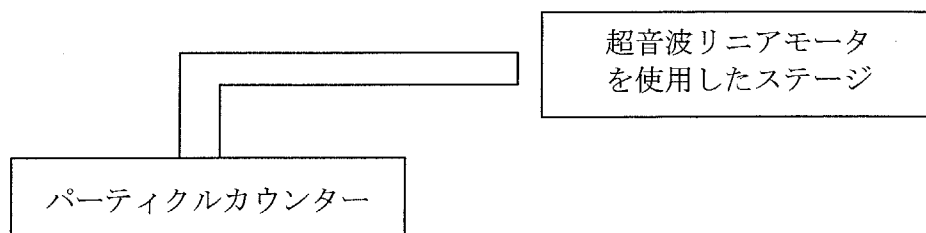


図 3. 22 発塵特性測定系

料吸引口はステージの横に置いた。測定結果を採取空気量 0.1 立方フィートに換算した値で評価した。採取測定した粒子の径は $0.3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ である。

その結果、SUS レールを用いたときは 40 個前後の発塵が認められ、セラミックスレールを用いたときは 14 個前後の発塵が認められた。尚、発生した塵埃が、摩擦材料であるか、レールであるか、その他の物質であるかの成分分析は行っていない。

塵埃個数が約 3 分の 1 に減少したことからも摩耗量低減の効果が確認できる。これは図 3.18 (a) に示すように単位時間あたりの摩耗量が減少し、寿命が約 3.4 倍になったという結果と符合する。このことより、おそらく発生塵埃は摩擦材料の摩耗粉であろうと考えられる。

3. 5 第三章のまとめ

- ・超音波振動を考慮した、超音波モータに適した摩耗予測式を導出した。
- ・摩擦材料の摩耗特性を簡単な摩耗試験器で測定し、得られた値を摩耗予測に利用した。
- ・摩耗特性の異なる摩擦材料に適用し、予測と実機による摩耗試験の結果が、オーダが一致する程度の精度で予測できることが確認できた。
- ・異なった型式の超音波モータに適用し、予測と実機による摩耗試験の結果が、オーダが一致する程度の精度で予測できることが確認できた。
- ・予測と実際との差異については、以下のような要因があると考えている。

予圧や滑り速度の仮定によるもの。

摺動面の状態、摺動面の形状が異なるためによるもの。

試験中に摺動面の状態が変化しているためによるもの。

クランク式摩耗試験器の試験片形状と実機超音波モータの形状が異なるためによるもの。

- ・従って本方法は、超音波モータの型式や摩擦材料の種類に関わらず適用可能な一般的な手法であると考えている。さらに、上に挙げた要因を考慮し予測法を精密化することで、予測誤差が縮まるものと考えられる。
- ・クランク式摩耗試験器では、滑り速度の時間変化率が超音波振動による実機試験に比べて大幅に小さい。このことの影響については、今後検討が必要である。
- ・表面がきわめてフラットで比摩耗量 W_s が小さいと思われ、更にその硬さ故、表面粗さが悪化しにくいと思われるセラミックスレール（ジルコニア製）を使用した実機摩耗試験では、今までのステンレス製レールと比較して、本研究では寿命を約二倍の 12400 時間を達成することができた。

- ・ 12400 時間後のレール表面を観測し、表面粗さがほとんど変化していないことを観測し、セラミックスレールの堅牢さを確認することができた。
- ・ 摩擦材料のヤング率や剛性率が摩耗とどのような関係にあるかについては、ヤング率：E、剛性率：G、ポアソン比： σ とすると、 $E = 2(1 + \sigma)G$ 、と相互に関係する値なので、一緒に考察することにする。摩耗については、本研究の範囲内ではカーボンメタルが最も摩耗が少ない結果が出ている。カーボンメタルのヤング率は $2 \sim 3 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ ($2 \sim 3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$) と、高分子材料と比較すると堅い材料なので、ヤング率・剛性率の高い材料が摩耗も少ない（比摩耗量 W_s が小さい）といえると思われる。

参考文献

- 1) K. Nakamura et al.: IEEE trans. Ultrason. Freq. Contr., No.3, May (1991) 188.
- 2) 大西一正、他：日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会第 36 回研究会資料、(1993) 5.
- 3) 指田年生：日経メカニカル、1983 年 2 月 28 日号、p.44.
- 4) K.L. Johnson: "Contact Mechanics", Cambridge University Press, (1985) p.399
- 5) 松永正久 監修 津谷裕子 編集：固体潤滑ハンドブック、幸書房 (1978) p.355
- 6) 松永正久 監修 津谷裕子 編集：固体潤滑ハンドブック、幸書房 (1978) pp.358-359
- 7) Klaus Friedrich (Editor): "Friction and Wear of Polymer Composites", Elsevier, (1986) pp.205-217
- 8) 全日本機械工具標準型録 (1985 年版)、p.709

第四章 真空中での超音波モータの摩擦特性

第四章 真空中での超音波モータの摩擦特性

超音波モータは通常の電磁式モータと比較していくつか優れた特徴があるが、その中で非磁性対応が可能であるという点が注目されている。電磁力を用いるモータと比較して、電界で励振される圧電セラミックスを駆動源とし、摩擦駆動を用いているため、モータ自身がほとんど磁場を発生せず、また外部磁場からの影響をほとんど受けない特性を有している。従って、電子ビームが飛ぶような状況下、例えば SEM のステージ駆動用モータや、半導体電子線描画装置ステージ駆動用モータ等、での使用が熱望されている。ところが、そのような電子線を飛ばす用途では、通常、装置内が真空である。しかし従来の超音波モータの研究は大気中でのみ行われてきたため、果たして真空中でも使用が可能なのか、可能だとしても、特性に変化はあるのか、寿命はどうなのかなど、未知の部分が多い。そこで本章では、真空装置内に超音波モータを持ち込んで、モータ特性、摩耗特性の測定を行い、真空中でのモータ使用可能性について検討した。

第四章 真空中での超音波モータの摩擦特性

4. 1 真空中駆動特性

真空中で超音波モータを駆動することと、大気中で駆動することとの間にある相違は以下のような現象が考えられる。

1. 酸素分圧の低下に伴い、摩耗した酸化膜が再生しにくくなる。

●耐摩耗性の悪化や、凝着が起こる可能性がある。つまり、マイルド摩耗からシビア摩耗への閾値が変化する。

2. 大気への放熱が期待できない。

●モータの温度上昇がより顕著になり、モータ特性、摩擦材寿命の悪化が予測される。

3. 真空を引くことにより、直後は、断熱膨脹で温度が下がるなどし、結露が起きる。

●摺動面が若干湿り、接線力係数が低下し、駆動初期段階でのモータ特性が悪化する。

4. 真空を引くことにより、水蒸気がほとんどなくなる。

●炭素系固体潤滑剤の潤滑機能は空気中の水分が必要といわれているため¹⁾、潤滑作用が弱くなり、摩耗が増加する。

これらの変化が予測される。本章では、具体的にモータ特性を測定し、真空中での特性を明らかにする。

現在のところ、要求されている真空度は、ロータリポンプ程度からディフュージョンポンプ程度 ($10^0 \sim 10^{-2}$ [Pa] / $10^{-3} \sim 10^{-5}$ [Torr]) であるが、時には、宇宙での使用可能性を検討した研究も見受けられる²⁾。

最終目標としては、スペースシャトル搭載用超音波モータとして、 10^{-5} [Pa]程度の真空度(図4. 1 参照)で利用できるモータの実現である。しかし本研究では、まず中真空程度での要求を満たす超音波モータの実現可能性を検討し、将来の宇宙用モータ応用への第一歩とする。

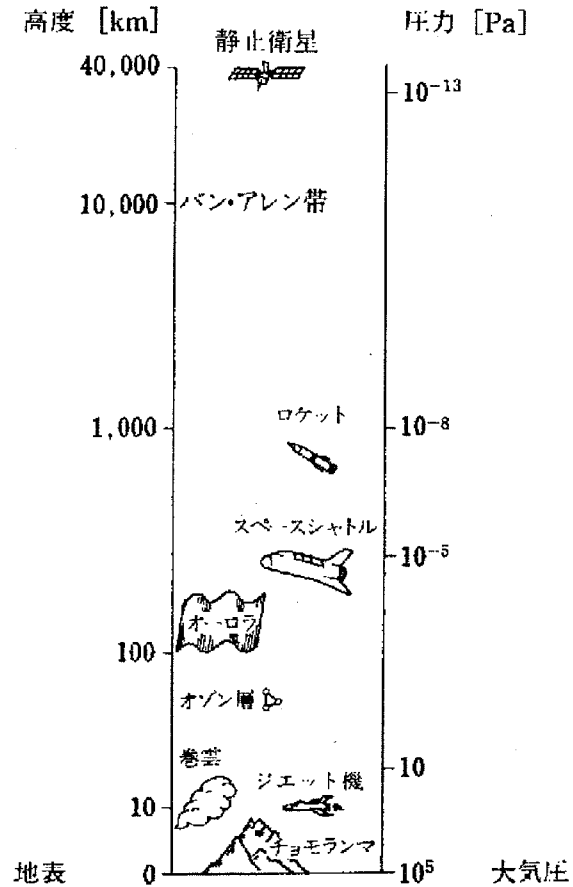


図4. 1 高度と気圧(真空度)³⁾

4. 2 真空装置

本研究で使用した真空装置は、通常の真空蒸着装置を利用した。測定系の概略を図4. 2

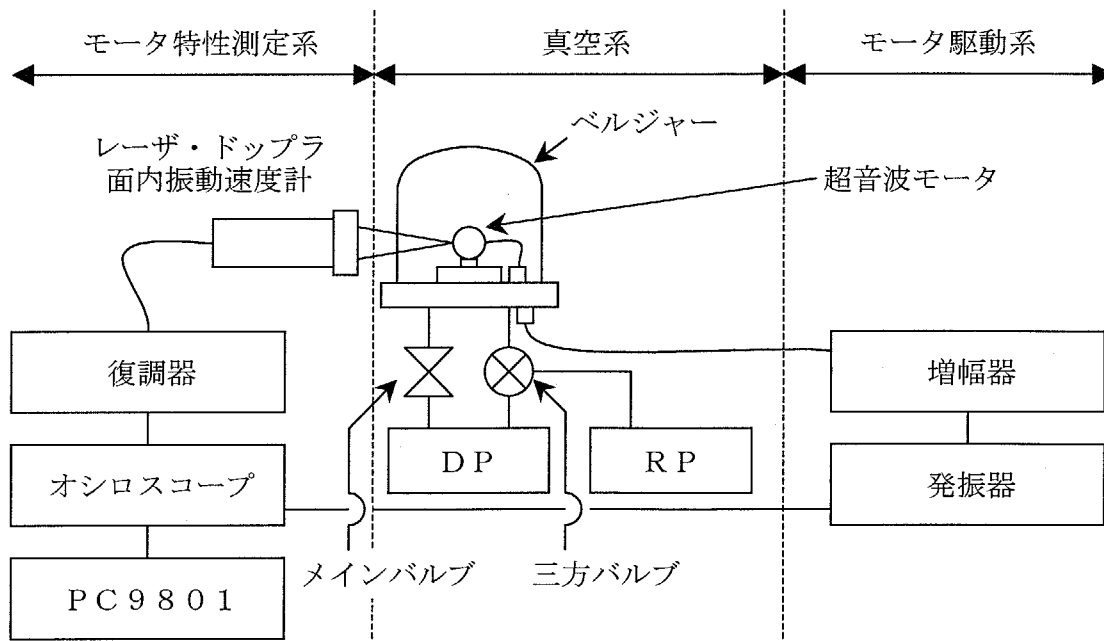


図4. 2 真空中駆動超音波モータ特性測定系

に示す。測定系は、真空系、モータ駆動系、モータ特性測定系に分けられる。

真空系及びモータ駆動系は、ごく普通の装置である。

モータ特性測定系は、レーザドップラ振動速度計を用いており、ロータの回転速度を透明なガラス製のベルジャーを通して、非接触で測定する。

各ポンプの性能は表 4. 1 に示す。実験は、1 : 大気中、2 : ロータリポンプ使用、3 : ディフュージョンポンプ使用の 3 種類の真空中で行った。

表 4. 1 各真空ポンプの到達真空度

種類	ロータリポンプ (R P) (油回転ポンプ)	ディフュージョンポンプ (D P) (油拡散ポンプ)
到達真空度	$\sim 1 \times 10^0$ [Pa] (7.6×10^{-3} [Torr])	$\sim 1 \times 10^{-2}$ [Pa] (7.6×10^{-5} [Torr])

4. 3 モータ特性測定法

真空はベルジャーとよばれるガラス製の容器内で行く。従って、真空槽内に全て持ち込むか、外部から何らかの方式で超音波モータの特性を測定しなければならない。本研究では、レーザドップラ振動速度計を使用した非接触式特性測定法を用いた⁴⁾。

超音波モータの特性測定として「縦軸回転数（縦軸）－出力トルク（横軸）」特性を測定する。通常は、外部からブレーキや錘等でトルクをかけてその時のロータ回転数を測定し結果をプロットする。しかし本研究の装置内では困難である。今回使用した手法は、ロータの回転立ち上がり特性から、モータの負荷特性を求めるもので、短時間に特性が得られるのが特徴である。また、ロータ停止時の立ち下がり特性からは摺動面の接線力係数が求められる。

図 4. 3 に超音波モータの回転数立ち上がりおよび立ち下がり特性の概略を示す。（ ω : ロータ回転速度、 ω_0 : 無負荷時回転速度（最大回転速度））

4. 3. 1 立ち上がり特性

立ち上がり曲線 ω は、1 次遅れ型で近似でき、次の式で表す。

$$\omega = \omega_0 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_r} \right) \right\} \quad (1)$$

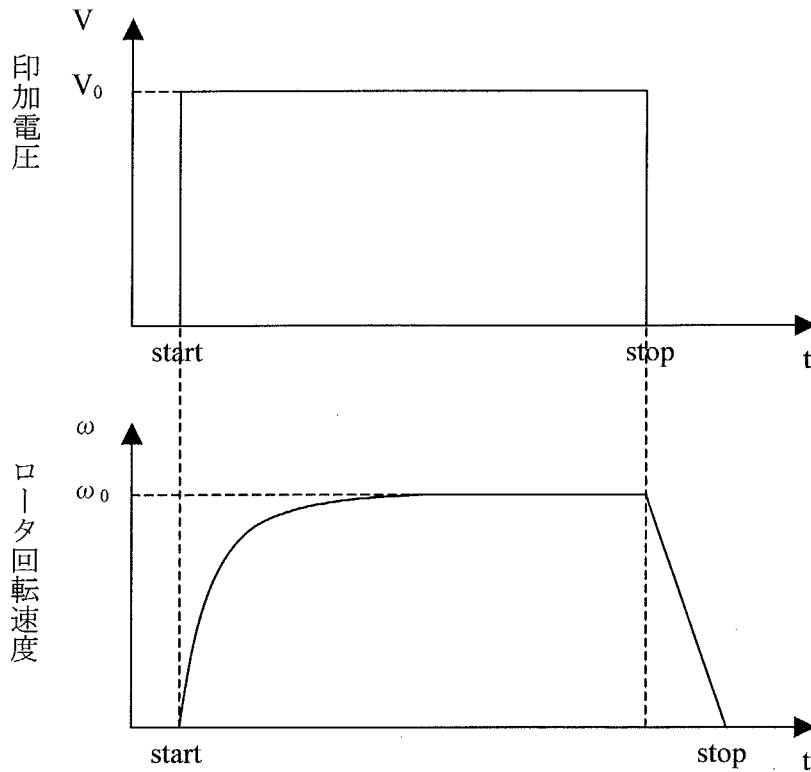


図4. 3 超音波モータの開始時及び停止時の回転数過渡応答

τ_r は立ち上がり時間もしくは時定数と呼ぶ。 τ_r は ω が ω_0 の $(1-1/e)$ 倍、すなわち、約63%に達するまでの時間と定義できる。

振動の立ち上がりがロータの立ち上がり時間よりも充分速いと仮定する時、ロータの運動方程式は、回転角速度を ω 、トルクを T 、回転部分の慣性モーメントを I とすると式(2)のようになる。

$$T = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

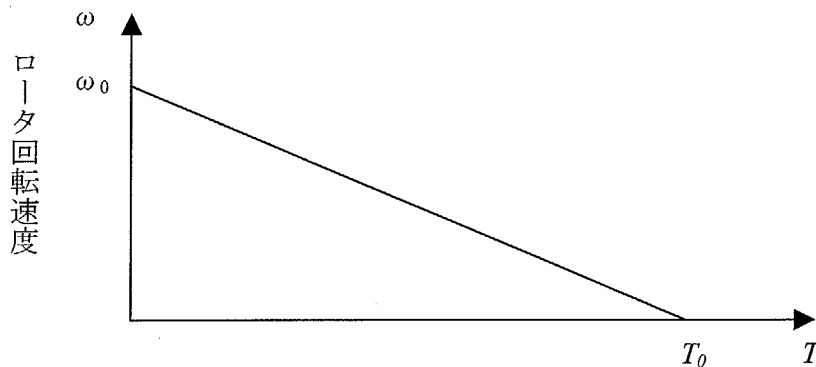


図4. 4 超音波モータの負荷特性

(2)に(1)を代入すると、

$$T = \frac{I}{\tau_r}(\omega_0 - \omega) \quad (3)$$

従って、回転速度—トルク特性は、

$$\omega = \omega_0 - \frac{\tau_r}{I} T \quad (4)$$

のように直線状の垂下特性となる（図4. 4）。

$T=0$ のときに最大速度を示し、 $\omega=\omega_0$ である。 $\omega=0$ のときに最大トルクを示し、 $T=T_0$ とする。最大トルクと立ち上がり時間は次のように表せる。

$$T_0 = \frac{I\omega_0}{\tau} \quad (5)$$

$$\tau_r = \frac{I\omega_0}{T_0} \quad (6)$$

よって式(5)より、慣性モーメント I 、最大速度 ω_0 、時定数 τ_r を用いて最大トルク T_0 を求めることができる。

4. 3. 2 立ち下がり特性

たて素子とねじり素子を同時に停止すると回転速度は摺動面の摩擦力により、ほぼ一定の割合（等加速度）で低下していく。つまり、立ち下がりでは等角加速度運動とみなすことができる。

摩擦力を f 、半径を r 、接線力係数を μ とすると、制動トルク T_s は、

$$T_s = -\mu f r \quad (7)$$

と表せる。そして、立ち下がり特性は直線とみなせるので、 τ_s を立下り時間とすると

$$\omega = -\frac{\omega_0}{\tau_s} t \quad (8)$$

式(2)に代入すると、

$$T_s = -\frac{I\omega_0}{\tau_s} \quad (9)$$

となる。従って、式(7)に代入すると、接線力係数は、

$$\mu = \frac{I\omega_0}{f r \tau_s} \quad (10)$$

と表せる。

4. 3. 3 測定データ

実機は複合振動子型超音波モータを用いた。真空装置には電気端子が装備しており、そこを介して内外を電氣的に接続できる。

データは、1. 最大回転数、2. 最大トルク、3. 接線力係数、4. 滑り率、5. 温度を測定した。レーザにて測定したデータより、1、2、3、4を、モータに接触させたK熱電対（クロメル・アルメル）より、5を測定した。

4. 4 実験条件

4. 4. 1 供試超音波モータ

モータは複合振動子型超音波モータを2種類使用した。

(1) ステータ側が SUS304（焼き入れ無し）で、ロータ側に摩擦材料を貼り付けたタイプ
写真4. 1にモータの外観を示す。モータ直径は 30mm、長さ約 90mm である。ステータ

のロータと接触する部分は外周部で接触するように、外径 26mm、内径 24mm、高さ 1mm のリング状突起を設けてある（写真 4. 2）。

駆動条件は表 4. 2 にまとめた。

表 4. 2 超音波モータ駆動条件

駆動周波数 f_d	19.45 kHz
駆動方法	間欠駆動（80ms 駆動-80ms 停止の繰り返し）
予圧 F_c	98 N
接触応力 P_c	1.25 MPa
たて素子印加電圧 V_{Lp-p}	250 V
ねじり素子印加電圧 V_{Tp-p}	250 V
ロータ側摩擦材料表面	#2000 ラッピング セラミック材は更にダイヤモンドラップ
ステータ側表面	#2000 ラッピング

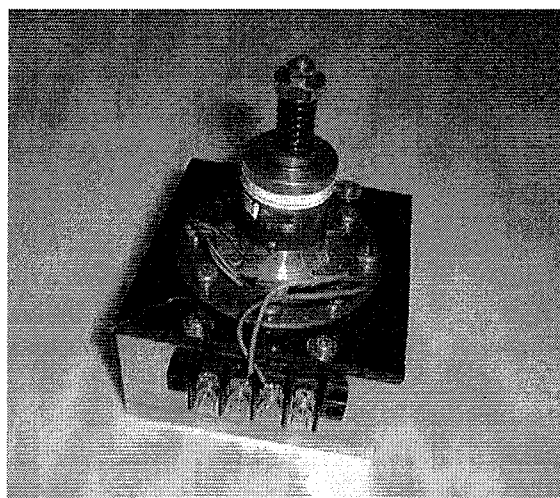


写真 4. 1 複合振動子型超音波モータ
(タイプ 1)

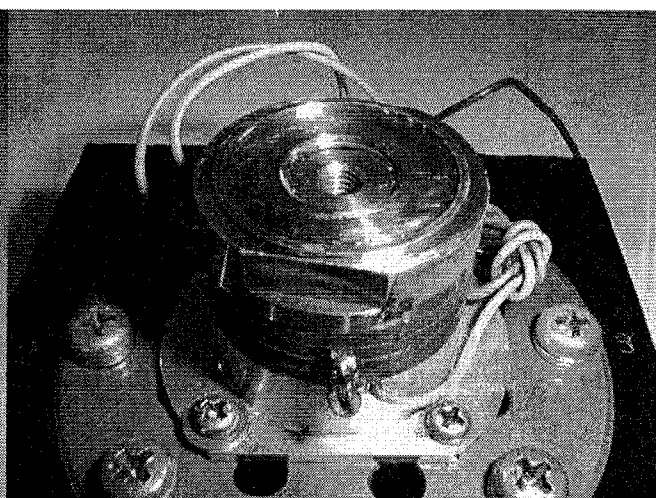


写真 4. 2 ステータ接触面形状

(2) ロータ側が SUS440C（焼き入れ）で、ステータ側に摩擦材料を貼り付けたタイプ

写真 4. 3 にモータの外観を示す。モータ直径は 25mm、長さ約 100mm である。ステータ側には、外径 25mm、内径 19mm、厚さ 0.5mm のリング状セラミックスを貼り付けてある。

立ち上がり・立ち下がり特性を緩やかにして測定を容易にするための付加慣性モーメントとして、真鍮製の円柱をモータ出力軸に取り付けてある。

駆動条件は表 4. 3 にまとめた。

表 4. 3 超音波モータ駆動条件

駆動周波数 f_d	26 kHz
駆動方法	間欠駆動 (200ms 駆動-200ms 停止の繰り返し)
予圧 F_c	98 N
接触応力 P_c	0.47 MPa
たて素子印加電圧 V_{Lp-p}	200 V
ねじり素子印加電圧 V_{Tp-p}	250 V
ロータ側表面	#2000 ラッピング
ステータ側摩擦材料表面	#2000 及びダイヤモンドラッピング

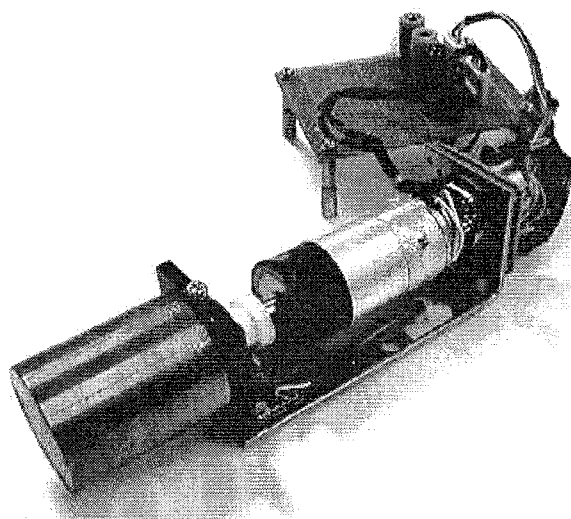


写真 4. 3 複合振動子型超音波モータ (タイプ 2)

4. 4. 2 供試摩擦材料

ここでは、今まで使用してきた CFRP、CM、石綿ジョイントシートに加えて、真空中での使用に良いといわれている⁹⁾セラミックス材料を超音波モータの摩擦材料として使用する。CFRP、CM、石綿ジョイントシートの詳細については第 3 章で既に述べているためそちらを参照願いたい。

一般的に真空中では、金属材料の μ (接線力係数) は容易に 10 を越える。しかし、セラミックスは真空中・不活性ガス中で μ が 1.0 を越えることはない。これはセラミックスの基本的な特性であり、超高真空中用摩擦材料として期待されている所以である。

通常セラミックスといえば、 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 、 SiC の 4 種の焼結材料が挙げられる。そのうち、 ZrO_2 は既に長寿命超音波モータ用レールとして使用し、その硬さや表面粗さの少なから超音波モータの長寿命化が達成できた。本研究では、残る 3 種類の材料を利用し、真

空中で使用した場合のモータ特性を検討した。

更に、固体潤滑剤であると同時にファインセラミックスの一種であるBN（窒化硼素）も摩擦材料として利用できるかどうかとも検討した。

摺動面は、ダイヤモンドで鏡面仕上げし実験に供した。表面粗さは触針式表面粗さ測定装置（ランク・テラー・ホブソン社、タリサーフ4）で測定した。

(1) Al_2O_3 （アルミナ）

アルミナは各種エンジニアリングセラミックスの中で最初に実用化され、現在でも最も多く使用されている材料の一つである。

鏡面仕上げした後の表面粗さを図4.5示す。図4.5より、比較的多数のミクロン程度の深さがあるくぼみが観測できた。目視でも表面にさほど艶が無いことが確認でき、何らかの欠陥が多数存在していることが予測できた。これは、セラミックス中の空孔

（closed pore）が表面に現れたため（open pore）と考えている。硬いセラミックス材料であるので、全体として表面は平坦にはなるとは思うが、表面粗さは余り良くなならないと考えられる。相手材料にヤスリのように働き、アブレシブ摩耗が生じる可能性が高いと予測され、モータ特性やモータ寿命に悪影響が心配される。しかし透明アルミナのように空孔がないか、あってもきわめて小さい材料もあるので、アルミナの可能性が消えたわけではない。

(2) Si_3N_4 （窒化珪素）

窒化珪素は、比重が小さく高温でも強度低下が小さい。また、熱膨張率が小さいので熱衝撃に優れ、靱性も比較的高い。このため、過酷な条件での摺動部品や精密機械部品として実用化が進んでおり、例えば、セラミックベアリングの材料として使用さ

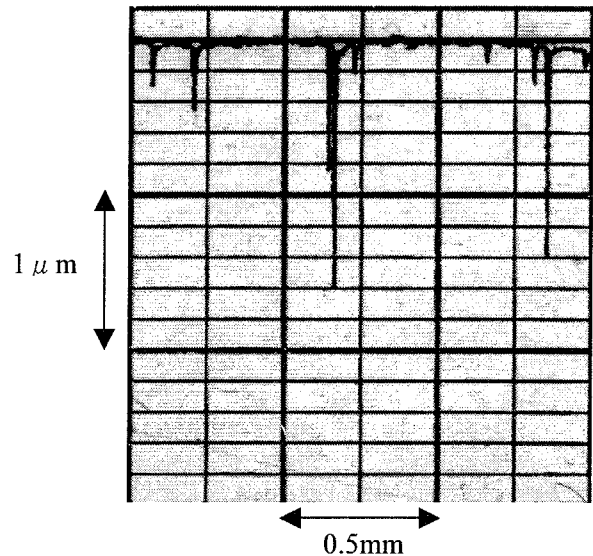


図4.5 表面粗さ (Al_2O_3)

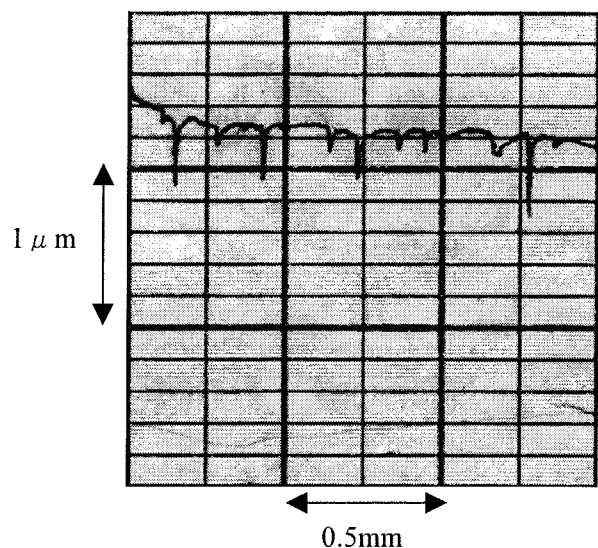


図4.6 表面粗さ (Si_3N_4)

れている。

鏡面仕上げ後の表面粗さを図4. 6に示す。アルミナほど深くはないが、サブミクロン程度の深さのくぼみが観察できる。アルミナと同様に、相手材料のアブレイブ摩耗の可能性があるが、これも良質な材料を選択することで解決することができると考えられる。

(3) SiC (炭化珪素)

炭化珪素は、1892年、E.G. Achesonにより合成された人工物質で、硬度が極めて高く、耐摩耗性、耐熱性に優れ、適度の導電性をもった物質として多くの分野で使用されている⁹⁾。特に硬度はダイヤモンド、 B_4C に次いで高い。

鏡面仕上げ後の表面粗さを図4. 7(a)に示す。線が傾いているのはサンプルが傾いていたためである。アルミナや窒化珪素と比較して、同倍率(10000倍)ではへこみが観測できなかった。更に倍率を上げて(100000倍)観測した結果が図4. 7(b)である。実際の表面粗さか測定装置のノイズかははっきりしないが、最大高さが約 $0.02\mu m$ の表面になっているようである。

このような極めてフラットな平面であれば、相手材料へのあたりがマイルドと考えられ、良好なモータ特性及び長寿命が期待できる。

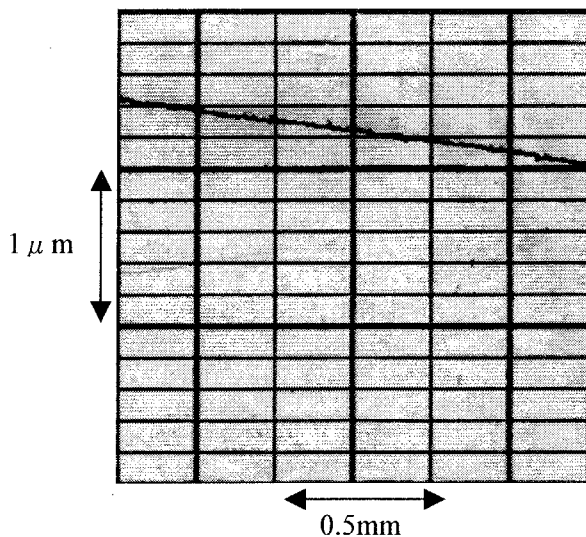


図4. 7(a) 表面粗さ (SiC)

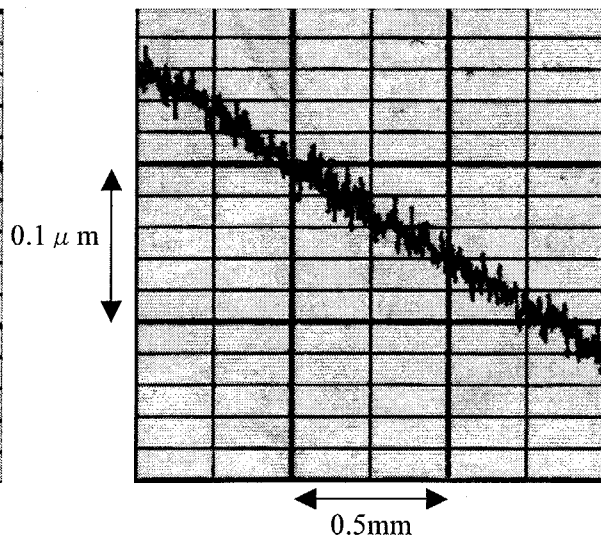


図4. 7(b) 表面粗さ (SiC)

(4) BN (窒化硼素)

窒化硼素は、ステンレススチールと同程度の熱伝導性を持ちながら電気的には絶縁体であ

り、固体潤滑剤であると共にファインセラミックスである。熱安定性、耐衝撃性に優れ、化学的に安定であり、熔融金属、熔融ガラスと反応せず、機械加工性に優れるなどユニークな特性を持っている。潤滑剤、摺動剤として用いられるのは六方晶系である。六方晶系の結晶構造は黒鉛に類似しており、層状構造である。

しかし、モース硬度 2 からわかるように比較的柔らかい材料であるため、超音波モータ摺動面の圧力に耐えがたい。本材料はカーボンメタルのように、何らかの複合材料として使用しなければ強度が足りないものと思われる。

最後に表 4. 4 に各セラミックスの材料特性をまとめた。

表 4. 4 各セラミックスの材料特性

	密度 g/cm ³	HV* kg/mm ²	弾性率 kg/mm ²	ポアソン比	最高使用 温度 °C	摩耗特性 (摩耗量[g])
アルミナ	3.9	1900	4.0×10^4	0.24	1600	0.5
窒化珪素	3.2	1500	2.8×10^4	0.27	1200	0.2
炭化珪素	3.15	2400	4.2×10^4	0.16	1600	0.15
窒化硼素	2.26	モース硬度 2	—	—	900	—

*ヴィッカーズ硬度

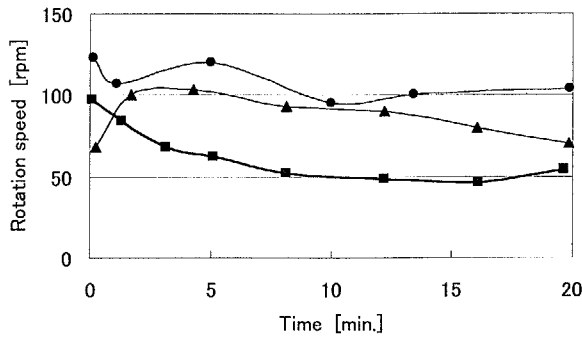
4. 4. 3 測定開始時間（真空曝露時間）の問題

ロータリポンプでの真空引き（VR）は約 10 分、ディフュージョンポンプでの真空引き（VD）は約 1 時間で所望の真空度に到達した。当初は真空が引けた直後から測定を行っていた。測定は 20 分間行ったが、表 4. 2 で述べたようにデューティー 1:1 の間欠駆動のため、実質駆動時間は 10 分である。写真 4. 2 のモータを使用し、摩擦材料は CFRP を用いた場合のモータ特性を図 4. 8 に示す。

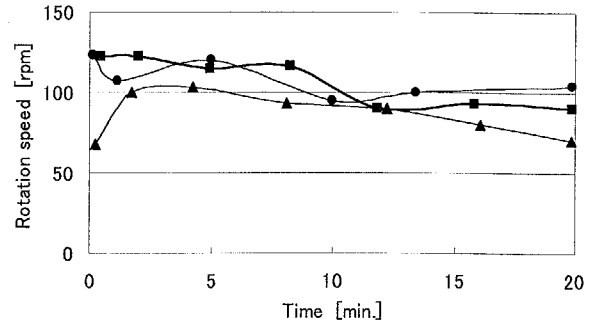
その結果、VR 直後のモータ特性が VD 中のモータ特性よりも悪く（図 4. 8(a)）、原因の説明がつかなかった。そこで、VR 引き後も、VD と同じように 1 時間経過した後にモータ特性を測定したところ、妥当な値が得られた（図 4. 8(b)）。

写真 4. 3 のモータを使用したときも、駆動しながら真空を引き始めると、それまでは普通に回転していたモータが急に回転数を落とす現象が確認され、真空引き直後は何らかの変化が真空槽内で発生し、モータ特性に何らかの影響を与えたと考えられる。

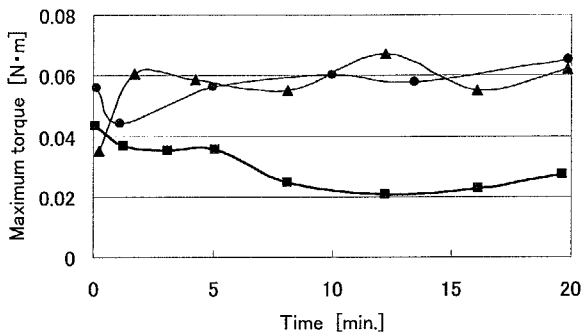
その理由の一つとして、真空引き直後の断熱膨脹による結露が考えられる。時には引き初



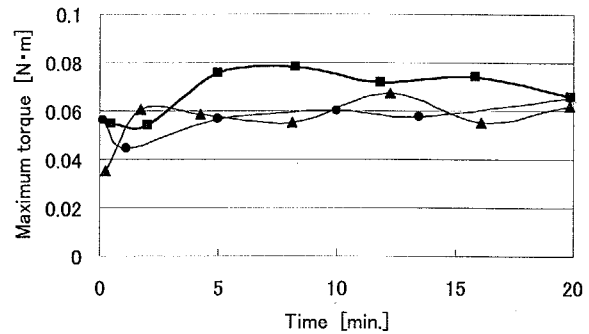
(a) 最大回転数



(a) 最大回転数



(b) 最大トルク



(b) 最大トルク

●:大気、■:VR、▲:VD

図4. 8(a) 真空引き直後のモータ特性

●:大気、■:VR、▲:VD

図4. 8(b) 真空引き1時間後のモータ特性

めにベルジャー内が白く曇る現象も観測され（その霧はほどなく消滅するのだが）、摺動面での結露による水分付着が長時間残留することが予測された。このことの証明には、実験的に結露させて現象の再現性を調査する必要がある。

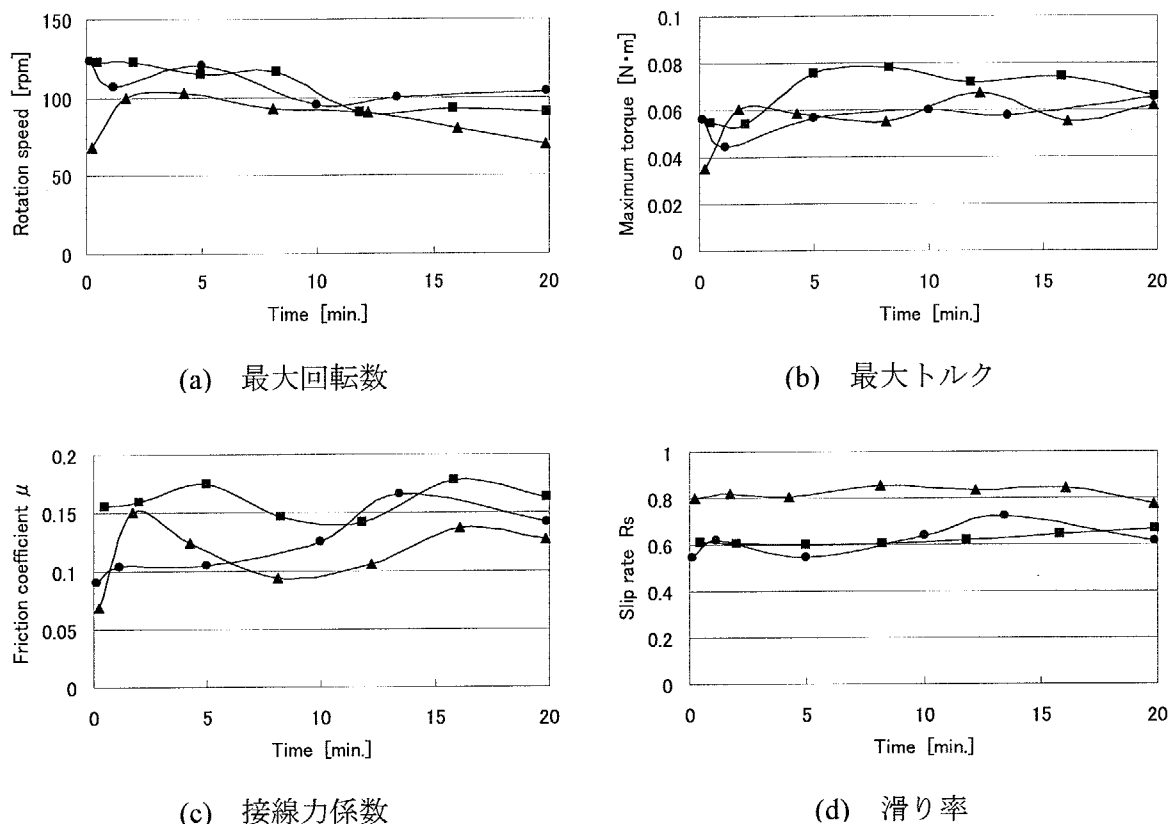
断熱膨脹による温度低下も観測されるが、すぐに元の温度に戻ることが観測されており、モータの温度変化による特性変化とは考えにくい。

従って、真空中で超音波モータを使用する場合には（実際の応用でも測定でも）、上記現象を考慮して、真空曝露時間と呼ぶような“なじませ時間”が必要であることがわかった。本研究では今後、VDの真空到達が約1時間かかるため、条件を同じにするためにVRの場合も1時間経過してから測定を行うこととした。できれば、真空槽内に外気を導入する場合には乾燥気体を用いた方が望ましいことは十分に考えられる。

4. 5 ステンレス鋼（SUS）に対する摩擦材料の検討

4. 5. 1 超音波モータ特性

ここでは、写真4. 2の超音波モータを用いた実験結果について示す。各摩擦材料はロー



●:大気、■:VR、▲:VD

図4. 9 真空中駆動超音波モータの特性変化 (CFRP の場合)

タ側に接着し、ロータを交換することで各種材料を測定した。摩擦材料及びステータ側の表面は実験の度にラッピングを行い、常に同条件で実験が行われるように配慮した。

(1) SUS-CFRP

写真4. 4に摺動面を示す。摩擦材料はカーボン繊維が一軸配向した CFRP で、繊維方向を摺動方向とあわせるためにモザイク状に貼り付けた。測定データを図4. 9に示す。

駆動を始めて 10 分程度までは比較的大きな変化を示しているが、その後は安定した特性を示した。これは約 10 分で初期なじみ運転が終了したのではないかと考えられる。

回転数については、20 分経過後を見ると、大気中のものが最も大きく、VR、VDと徐々に小さな値になっており、真空度依存性があるようである。

接線力係数と最大トルクは相関が強いと考えられ、ほぼ似たような傾向が観測された。V

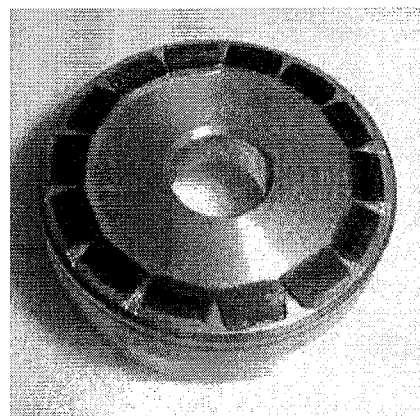
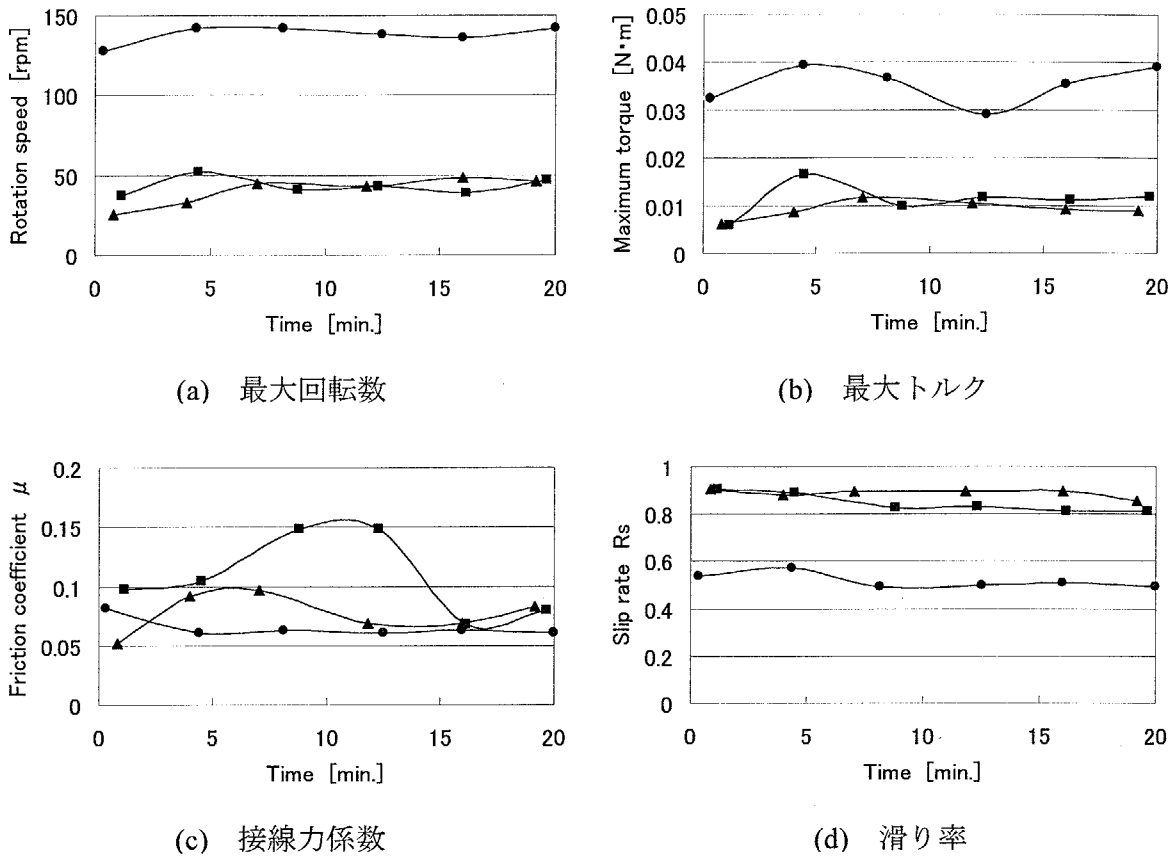


写真4. 4 CFRP



●:大気、■:VR、▲:VD

図 4. 1 0 真空中駆動超音波モータの特性変化 (カーボンメタルの場合)

D の場合が比較的接線力係数が小さく、最大トルクも小さめの値を示している。

滑り率は VD の場合が約 0.8 を示し、大気中、VR 中の場合の 0.6~0.7 よりもスリップが増加している。これは接線力係数の低下によるものと考えられる。

接線力係数の低下した原因として考えられるのは、摩耗粉の発生によるスリップや摩耗により表面状態が変化し、それに伴い接触状態が変化したためと考えられる。

(2) SUS-CM

摩耗が激しかった。さらに、モザイク状の貼り方も応力集中が起きやすく、耐久性に問題があると思われた。空気中で比較的よいモータ特性が得られていたが、真空中では急速に特性が悪化した。水蒸気の影響がキーポイントと考えられる。超音波モータ特性の測定結果を図 4. 1 0 に示す。

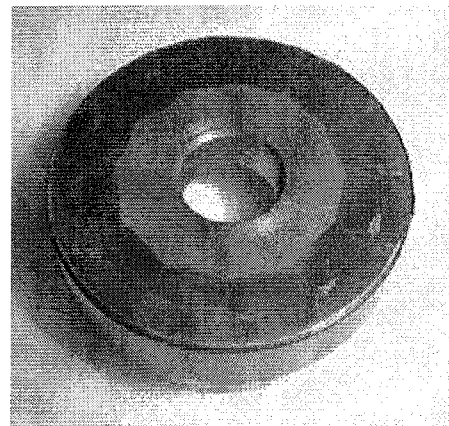
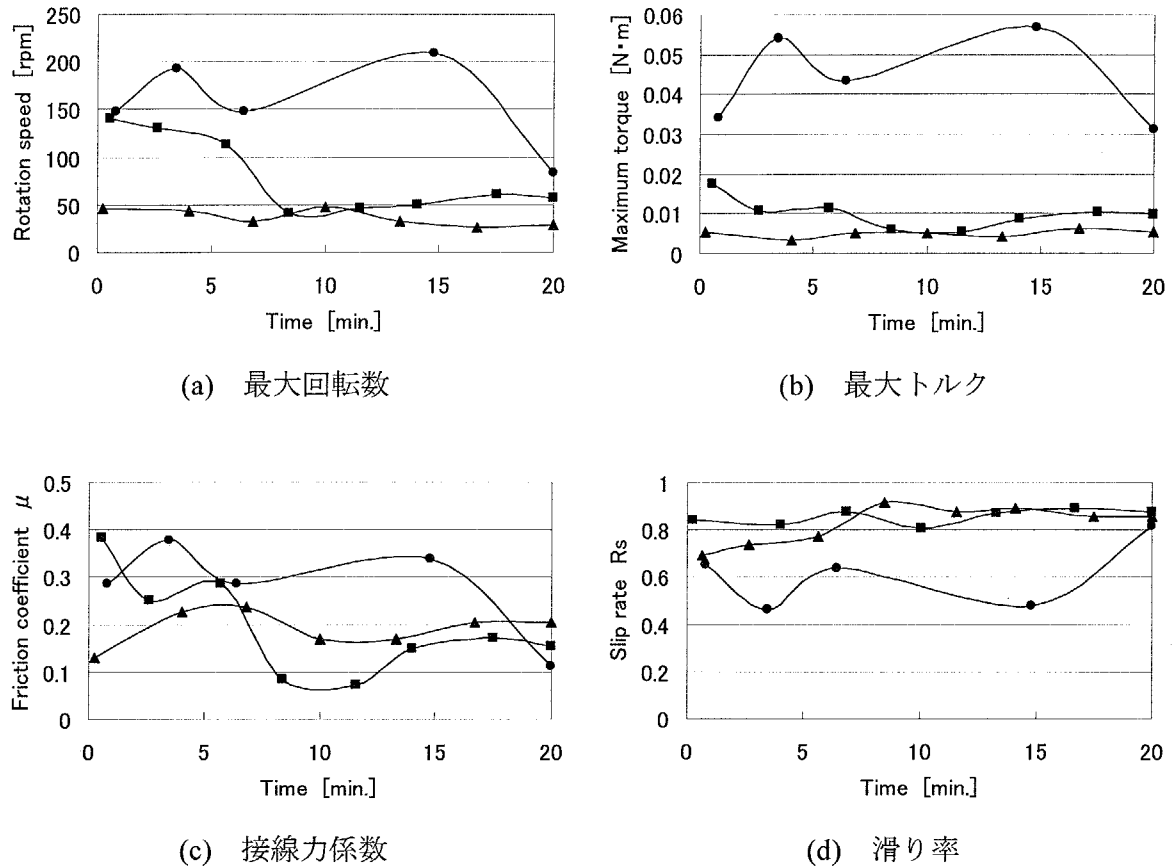


写真 4. 5 カーボンメタル(CM)



●:大気、■:VR、▲:VD

図4. 1 1 真空中駆動超音波モータの特性変化 (アルミナの場合)

駆動中は、全体を通して比較的安定した動作が確認できた。

回転数については、大気中の場合が最も大きく、VRとVDでは小さな値になっており、強い真空度依存性があるようである。

最大トルクも、回転数の場合とほぼ似たような傾向が観測された。しかし、最大トルクが変動しているにもかかわらず、接線力係数の変化は傾向が全く異った。そこで超音波モータのたて共振周波数を測定したところ、駆動前と駆動後ではねじり共振周波数との大小関係が逆転していることが確認できた。この後に述べるが、カーボンメタルは摩耗が激しかった。そのため摺動面の変化が大きく、たて共振周波数を大きく変化させたものと考えられる。

滑り率はVR・VDの場合が約0.8~0.9を示し、大気中の場合の0.5よりもスリップが増加している。滑り率の上昇した原因として考えられるのは、摩耗粉の発生によるスリップのみならず、たて振動が変化して摩擦制御がうまく行われなかったための2つの原因の両方が関与していると考えられる。

(3) SUS-Al₂O₃ (アルミナ)

CFRP や CM の時と比較して、回転数が低く、測定が困難であった。従ってアルミナの場合は予圧を半分の 49N にして測定を行った。図 4. 1 1 にその結果を示す。

アルミナ自体は硬い材料であるが、空孔が起源と思われる表面欠陥がヤスリのように作用したと思われ SUS が激しく摩耗した。欠陥の近傍では応力集中が発生し、それに伴い欠けが生じて摩耗粉が研磨材のように働いたと考えられる。写真に見える摩耗痕は深くて、初期状態への復活が困難であった。従って、アルミナは真空中

に限らず、大気中においても使用が難しいと考えられる。但し、透明アルミナのような、空孔のほとんどないアルミナであれば、使用可能であろうと考えている。

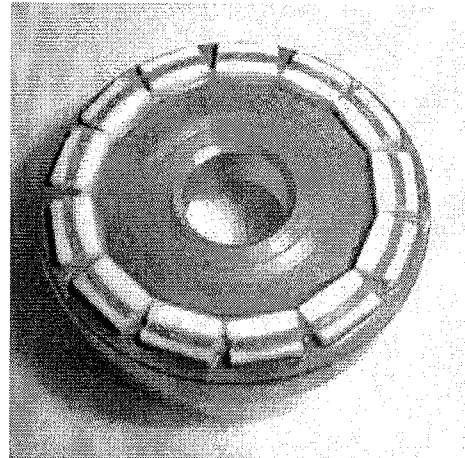


写真 4. 6 アルミナ(Al_2O_3)

(4) SUS- Si_3N_4 (窒化珪素)

表面粗さからわかるように、アルミナよりは表面欠陥が少なそうである。しかし、実験を行ったところ、SUS に対する攻撃はまだ激しく、SUS は摩耗し、窒化珪素も傷ついた。やはり、表面に欠陥のあるセラミックス材料 (硬い材料) は相手材を痛めるため、避けた方がよいことがわかった。

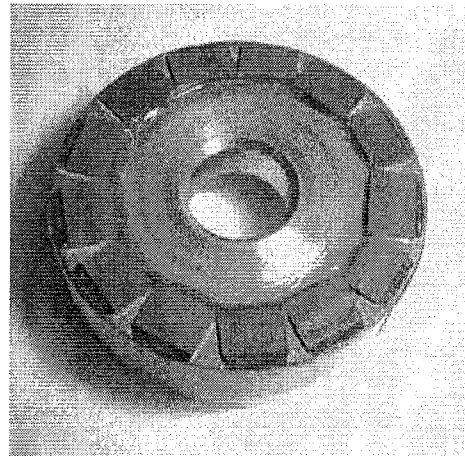


写真 4. 7 窒化珪素 (Si_3N_4)

(5) SUS- SiC (炭化珪素)

表面粗さからわかるように、最も欠陥が少なく、極めて滑らかな表面が実現できている。セラミックス材料を用いた実験の中で最も SUS への攻撃が少なかった。写真からわかるように、モザイク状に加工して貼り付けている関係上、エッジの部分で応力集中が生じ、 SiC は欠けが生じてしまった。これは、摩擦材自体の問題ではなく、構造上の問題と考えられ、次の実験では継ぎ目のない SiC を使用して実験を行った。

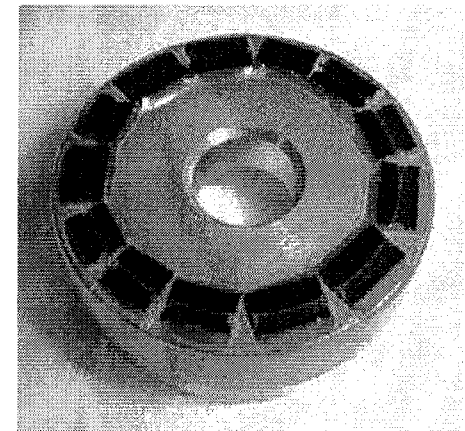


写真 4. 8 炭化珪素 (SiC)

(6) SUS-BN (窒化硼素)

固体潤滑作用を期待して使用を試みたが、材料の説明で既に述べたとおり、柔らかくて摩耗が激しく、このままでは超音波モータには不向きであった。超音波モータ用摩擦材料としては複合材料等にするなどの工夫が必要と思われる。モータ特性については表 4. 5 に示す。

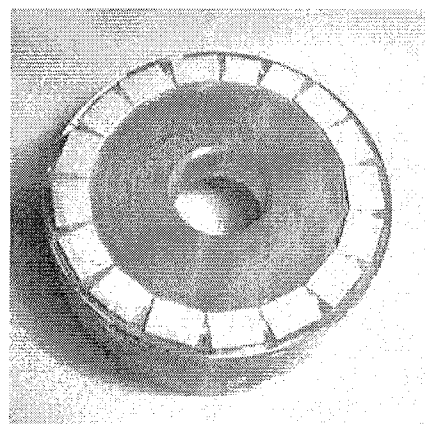


写真 4. 9 窒化硼素 (BN)

表 4. 5 SUS-BN の場合の超音波モータ特性

接線力係数		最大トルク $\text{N} \cdot \text{m}$		最大回転数 rpm	
大気	VR	大気	VR	大気	VR
0.20	0.21	0.0098	0.0074	86.6	64.9

ヤング率が低かったためか、モータのたて共振周波数が低くなったようで、VR 中での接線力係数は約 0.2 と、他の摩擦材料とほぼ同じであるにもかかわらず、最大トルクは約 0.01 $\text{N} \cdot \text{m}$ (他材料の場合の約 1/5) の低い値にとどまった。VR 中の最大回転数も約 80rpm (他材料の場合の約 1/2) であった。

(7) SUS-石綿ジョイントシート

写真 4. 10 に摺動面を示す。摩擦材料は石綿とラバーの複合材料で、通常は、シール材として用いられている材料である。もともとは摺動材料ではなく摩耗しやすいが、大気中では比較的良いモータ特性が得られる材料であることが確認されている。モータ特性を表 4. 6 に示す。



写真 4. 10 石綿ジョイントシート

表 4. 6 SUS-石綿ジョイントシートの場合の超音波モータ特性

接線力係数		最大トルク $\text{N} \cdot \text{m}$		最大回転数 rpm	
大気	VR	大気	VR	大気	VR
0.16	0.10	0.074	0.11	152.5	155

大気中、VR中ともにほぼ同じような値が得られた。石綿ジョイントシートは、手軽に実験ができ、容易に良い特性が得られるのだが、石綿は有毒な材料であることに注意が必要である。

4. 5. 2 真空度依存性

図4. 1 2に代表的な材料を用いたときの超音波モータ特性の真空度依存性を示す。

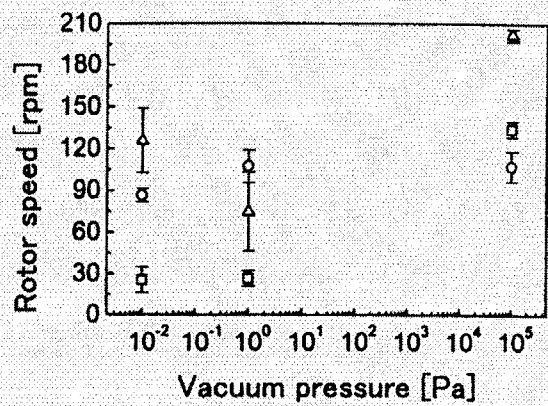
横軸が圧力で、大気圧： 1×10^5 Pa、VR： 1×10^0 Pa、VD： 1×10^{-2} Pa、である。縦軸が各モータ特性（最大回転数、最大トルク、接線力係数）である。モータ特性が安定する10分以降の値の平均値をプロットし、ばらつき（標準偏差 σ ）をエラーバーで示した。左に行くほど真空度が高くなる。

摩擦材料は、CFRP、CM、SiCの3種類を使用した。

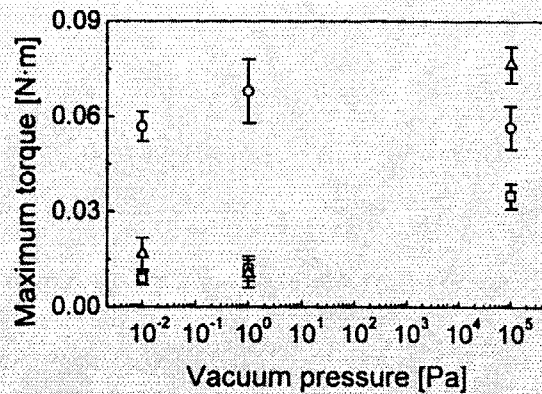
（CFRP、CMについては、上記で既に述べているが）CFRPはこの程度までの真空度では、ほぼ同じようなモータ特性が得られており、真空中使用は可能であると考えられる。

CMは、VR・VDともに、接線力係数の変化が余りないにも関わらず、特性の低下が著しかった。この理由としては、摩耗粉によるスリップと、摩耗によるたて共振周波数の

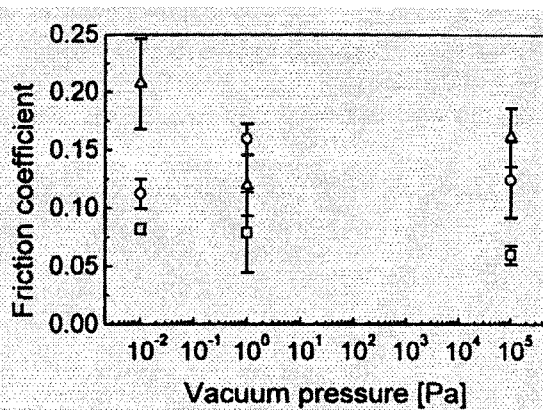
変化で、モータの駆動条件そのものが変化したための両方の影響が考えられる（摩耗については後で述べる）。CMの場合が最も特性のばらつきが少なく安定した値が得られた。これは、CMの摩耗が激しく常にフレッシュな面が現れていて摺動条件が一定であったと考えられる。



(a) ロータ速度の真空度依存性



(b) 最大トルクの真空度依存性



(c) 接線力係数の真空度依存性

○:CFRP、□:CM、△:SiC

図4. 1 2 モータ特性の真空度依存性

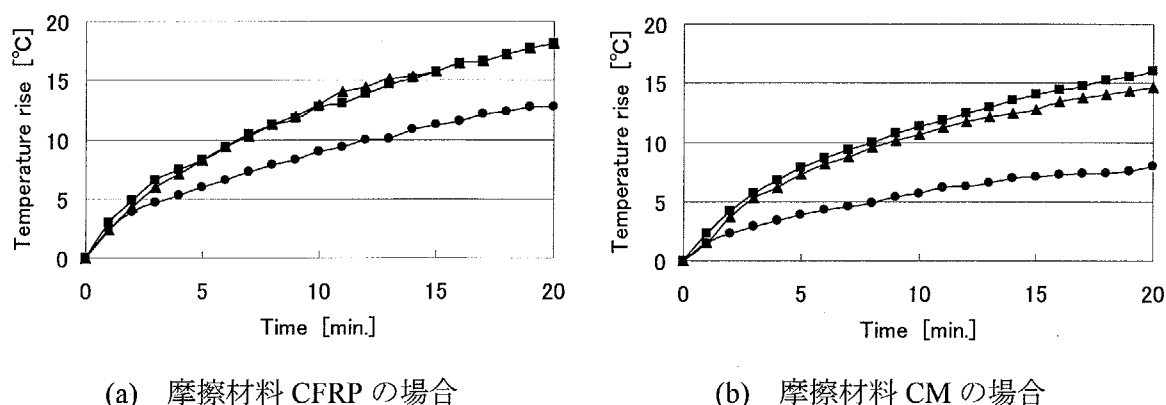
SiC は、大気中で最も良い特性を示した。しかし、VR・VDともに、接線力係数はさほど変化していないにもかかわらず、特性が低下しあまりよい結果が得られなかったのは、現在のところ明確な理由が不明である。アルミナの時も同じような傾向があり、やはり理由が不明であった。おそらく、硬いセラミックス材料をモザイク状に貼って駆動した場合、角の部分の応力集中で、相手材料の SUS が摩耗し、その結果摺動面のあたりが変化してこのような結果になったと思われる。材料の特性ではなく、形状による問題であるならば、今後の工夫で良い特性が真空中でも維持できる可能性はある。大気中での特性が良かったため、真空中での特性も良い値が期待できる。

4. 5. 3 温度上昇の検討

真空中で駆動したときに問題になると考えられるのは、温度上昇である。

通常の大気中駆動では、セラミックスの発熱や摺動面の摩擦熱などは、空気を通して冷却されていると考えている。しかし、真空中では当然空気への熱伝導は期待できない。従って、モータを保持している構造材料への熱伝導、赤外線放射のみが放熱源となる。圧電セラミックスは温度特性が悪く、温度変化に対して敏感にその圧電特性が変化する。温度上昇が超音波モータ特性に与える悪影響は無視できない。

ここでは、大気中・VR・VDの3種類の大気圧でモータの温度上昇を測定した。使用した超音波モータは表4. 2のもので、摩擦材料は、CFRP および CM の場合である。アルミナは摺動面状態が悪く、今回は測定を除外した。測定結果を図4. 13に示す。



●:大気、■:VR、▲:VD
図4. 13 真空中で駆動した超音波モータの温度上昇

駆動開始時の温度を基準とし、モータ特性測定 of 20 分間における温度上昇を測定した。や

はりどちらの摩擦材料でも、大気中駆動の時の温度上昇が少なかった。真空度が VR と VD では約 2 桁異なるが、温度上昇はほぼ同じであった。CM の方が CFRP と比較して温度上昇が少なかった。CM の場合、スリップが多いがそれは摩耗粉によるものと考えられ、接線力係数が小さく摩擦熱の発生が少なかったためと考えられる。

モータ特性測定では 20 分間で約 15~20℃の温度上昇が認められたため、超音波モータを恒温槽中に入れ、約 20℃の温度上昇を超音波モータに与え、共振周波数を測定した。その結果を図 4. 14 に示す。

共振周波数は 19.45 kHz から 19.24 kHz まで低下した。しかし、図 4. 9、図 4. 10 からわかるように、この程度の周波数変化では、モータ特性にほとんど影響はなかった。しかし、これ以上の温度変化に対しては、モータ特性の悪化が予測される。更に長時間の駆動時には周波数の自動追尾等が必要であろうと考えられる。

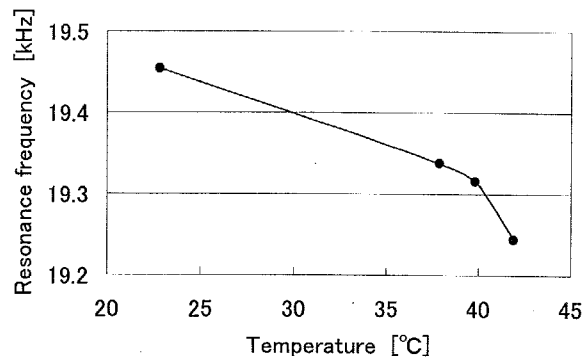


図 4. 14 ねじり共振周波数の温度依存性

4. 5. 4 摩耗について

摩擦材料の表面粗さを測定することで、超音波モータの寿命に関して検討した。

測定は、ランクテラーホブソン社のタリサーフ 4 (触針式) を使用した。

まず、SUS-CFRP (メッシュ) の場合を図 4. 15 (a)~(c) に示す。

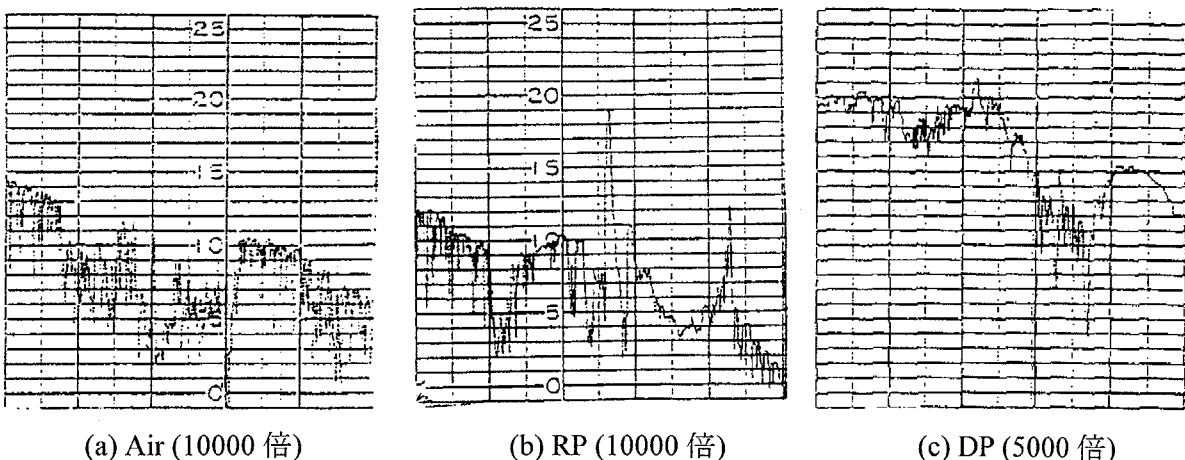


図 4. 15 真空中駆動試験後の摺動面粗さ (SUS-CFRP)

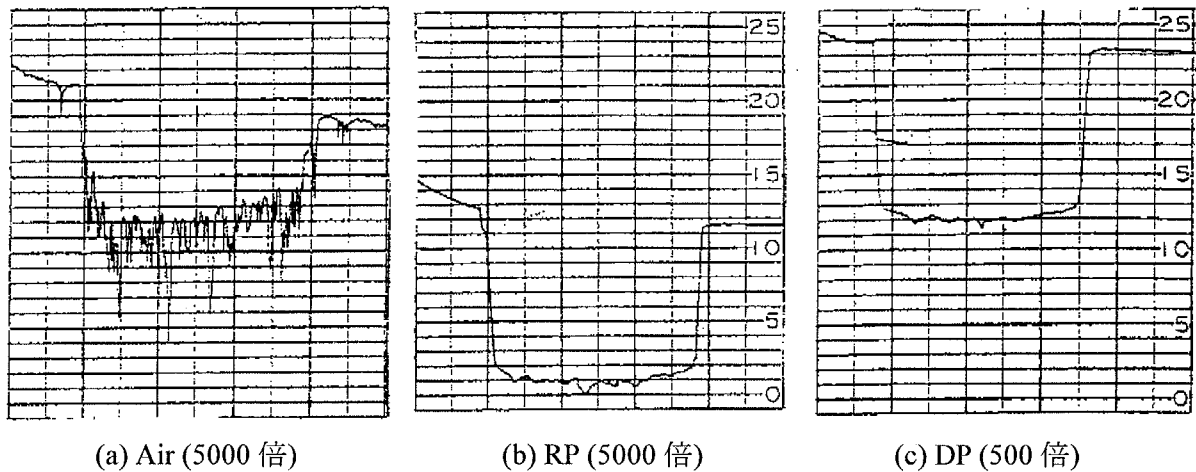


図4. 16 真空中駆動試験後の摺動面粗さ (SUS-CM)

CFRP は、大気圧中では、実駆動時間 10 分間で、約 $0.8[\mu\text{m}]$ の摩耗深さであった。RP 真空中では、約 $0.7[\mu\text{m}]$ と、ほぼ同等の摩耗をしめし、RP 中であれば、大気中と同様に使用可能であろうと考えられる。DP 真空中では、約 $3.3[\mu\text{m}]$ の摩耗を示し、大気中や RP 中と比較して、寿命が約 1/4 に短くなると考えられる。

次に、SUS-CM の場合を図 4. 16 (a)~(c) に示す。

CM は、大気圧中では、実駆動時間 10 分間で、約 $3.6[\mu\text{m}]$ の摩耗深さであった。RP 真空中では、約 $46.5[\mu\text{m}]$ 、DP 真空中では、約 $44.5[\mu\text{m}]$ の著しい摩耗の増加を示し、大気中と比較して、RP や DP 中では、寿命が約 1/10 以下に短くなると考えられる。大気中でのみ使用可能な材料であろう。

4. 6 セラミックス (SiC) に対する摩擦材料の検討

4. 6. 1 超音波モータ特性

既に写真 4. 2 の超音波モータを用いた実験からもわかるように、セラミックスを摺動材料として用いた超音波モータの特性は決して悪いものではなかった。そこでここでは、過剰な摩耗を防ぐために欠陥の少ない SiC を代表として使用した。また、摩擦材形状は応力集中による相手材料への攻撃をなくすためにリング状にした (写真 4. 11)。

ここでは、写真 4. 3 の超音波モータを用いた実験結果について示す。まずは、(1) ステータ側に $5\text{mm} \times 3\text{mm}$ の CFRP を 10 枚ステータ側に接着して、ロータ側にリング状 SiC を貼り付けたタイプを使用

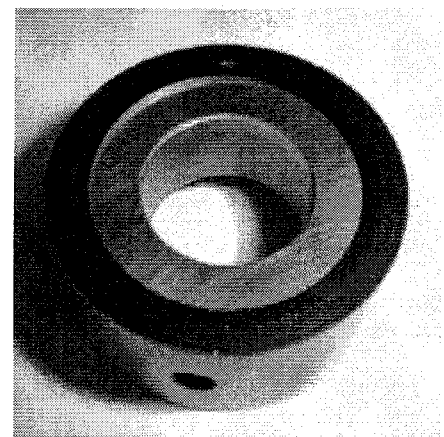


写真 4. 11 SiC リング

した。次に、(2) リング状 SiC をステータ側に接着したタイプを使用した。そして、(3) ステータにはリング状 SiC を貼り付けて、ロータ側は SUS440C (焼き入れ) 製そのままを使用した場合の 3 種類の組み合わせで、超音波モータ特性を測定した。

摩擦材料及びステータ側の表面は実験の度にラッピングを行い、常に同条件で実験が行われるように配慮した。発熱を防ぐために「200ms 駆動-200ms 停止」を 1 サイクルとして 20 分間駆動した。実駆動時間は 10 分間である。予圧は、バネにより 10kgf (98N) をかけた。

(1) SiC (炭化珪素) -CFRP

まずは、通常の大気中で超音波モータ用摩擦材として使用されている CFRP を相手材料として使用した。

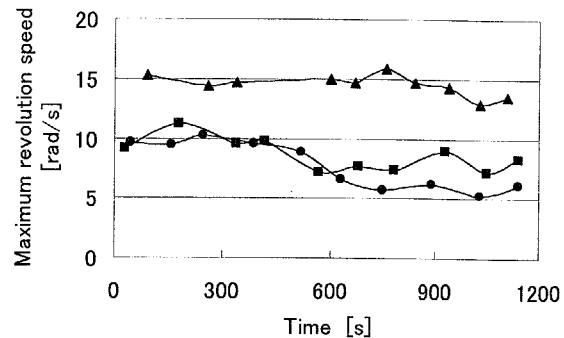
見かけの接触面積は $1.50 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、見かけの接触応力は 0.65 MPa である。図 4. 17 に結果を示す。

大気中と VR 中はほぼ同じような特性を示した。VR 程度の真空度 (約 $1 \times 10^0 \text{ Pa}$) では問題なく使用できると思われる。

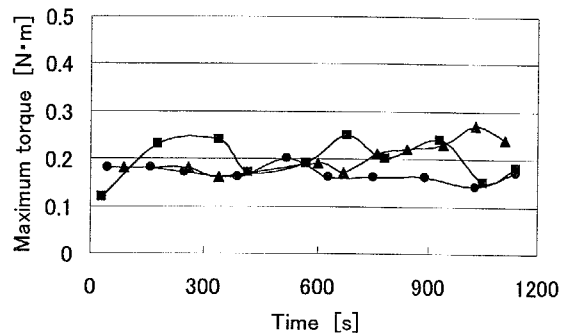
VD 中駆動は接線力係数が約 2 倍になり、無負荷回転速度も約 2 倍になった。最大トルクはやや大きめであるが 2 倍にはなっていない。VD 程度の真空度 (約 $1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$) では摺動面に変化が現れたようである。具体的にどのような変化があったのかは明らかではない。

全体的に特性の時間変化が緩やかで、安定している。最初の 10 分間で変化が落ち着いて (接線力係数については、20 分後でもまだ変化があるようであるが)、後半の 10 分間はほぼ一定の値を示している。

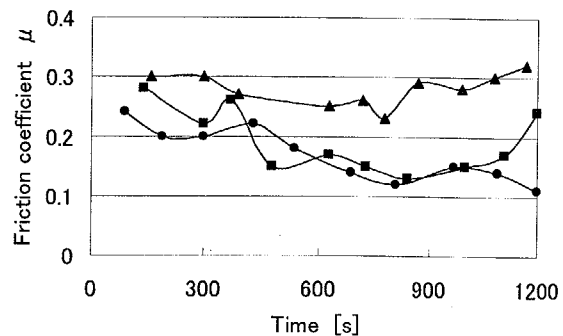
駆動状況としては全く問題なく回転して



(a) 最大回転速度



(b) 最大トルク



(c) 接線力係数

●:大気、■:VR、▲:VD

図 4. 17 真空中駆動超音波モータの特性変化 (SiC-CFRP の場合)

いた。

(2) SiC (炭化珪素) -SUS440C

次に、金属の使用も試みた。通常は CFRP の相手材料として使用されている SUS440C (焼き入れ) である。金属同士では真空中で容易に μ が上昇するといわれているが、セラミックスと金属の組み合わせならばさほど上昇はしないのではないかと考えた。

見かけの接触面積は $2.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、見かけの接触応力は 0.47 MPa である。図 4. 18 に結果を示す。

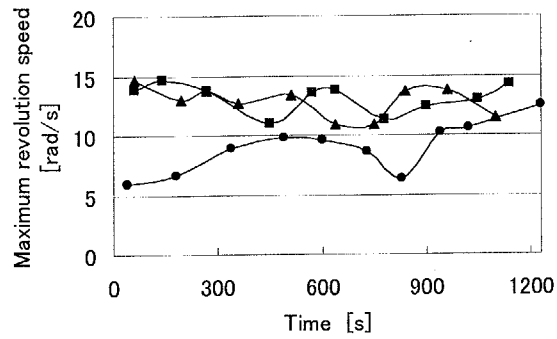
接線力係数は、大気中では 0.1~0.25 の変動があったが、ある程度低い値にとどまっていた。VR・VD 中では、0.2~0.4 の変動があり、大気中の時よりも大きくはなったが、約 2 倍程度にとどまった。しかし、比較の変動が激しかった。

VD 中の接線力係数は VR 中の時とさほど変わらない値にも関わらず、最大トルクは VR 中よりも大きな値となった。

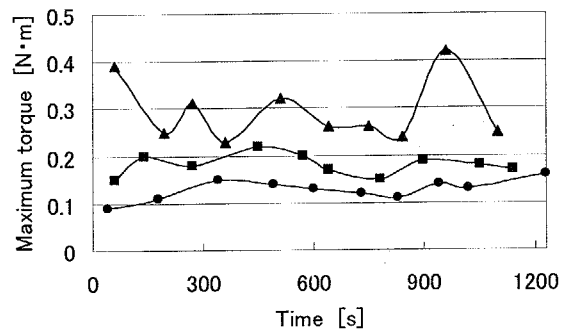
また、SiC、SUS440C とともに鏡面研磨したためか、密着が起きたと考えられ、ロータが回転しないという再始動が困難な場面が見受けられた。何度か起動を繰り返すことで始動することができた。

全体的に変化が大きく、あまり安定していない。また、密着によるものと思われる再起動の困難さが時々発生することから、真空中での使用に不安を残す結果となった。

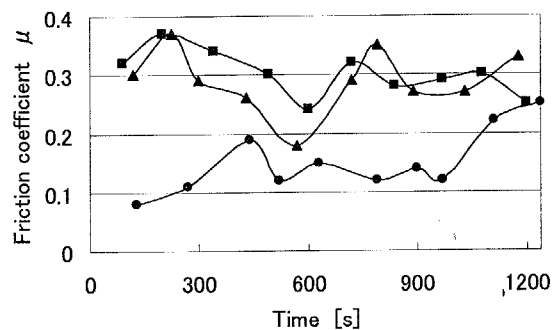
トルクや接線力係数は変動したが、回転数はそれらと比較して余り変動しなかった。低負荷という条件下でならば使用の可能性があると考えられなくもない。



(a) 最大回転速度



(b) 最大トルク



(c) 接線力係数

●:大気、■:VR、▲:VD

図 4. 18 真空中駆動超音波モータの特性変化 (SiC-SUS440C の場合)

(3) SiC (炭化珪素) -SiC (炭化珪素)

一般には、同種材料の摺動は「ともがね」とよばれ、避けるべきものとされている。同種材料はなじみやすく、接線力係数が高くなり最終的には凝着・かじり等のシビア摩耗になりやすいからである。しかし、SiCは構造セラミックス中でも最高の硬さ持つものの一つ($HV \approx 2400$)であるため、摩耗はしにくいと考え、あえて同種材料を摺動材として使用を試みた。

見かけの接触面積は $2.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、見かけの接触応力は 0.47 MPa である。図4. 19に結果を示す。

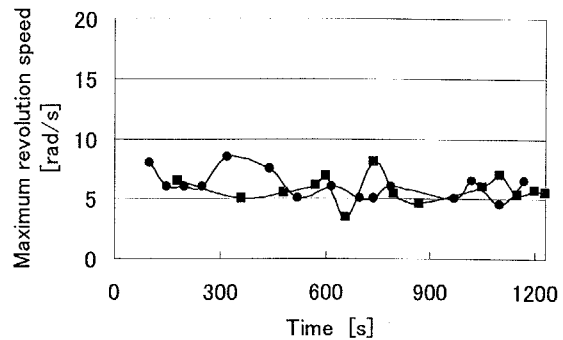
接線力係数が同種材料であるにも関わらず、低い値(約 $0.1 \sim 0.2$)にとどまっているのはセラミックスの特性であろうと考えられる。

そのためか、最大トルクも最大回転速度もさほど大きくない。大気中とVR中ではほぼ同じ特性を示した。

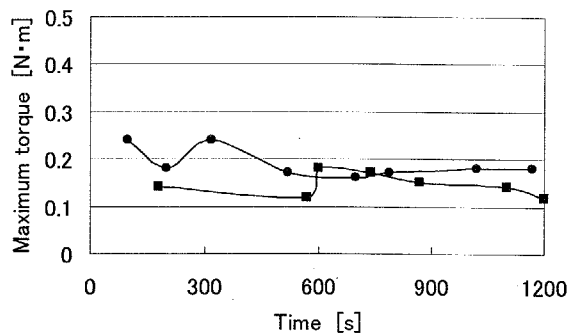
余り優れた結果は出ていないが、時間経過に対するばらつきは少なく、特性の安定性はあるようである。

実は、本実験をVR中まで行ったところ、SiCに亀裂が生じ、VD中での実験を断念した。亀裂はひびというよりは、剥離に近い様子が目視で読みとれた。

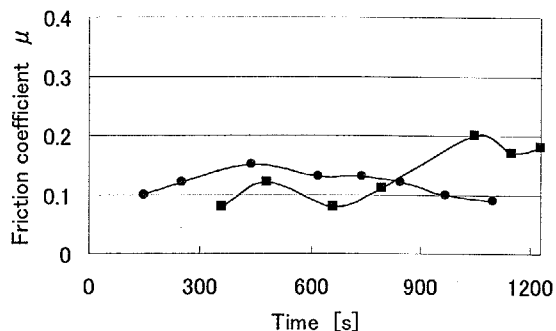
また、SUS440Cの時と同様に摺動面の密着と思われる現象が生じ、再始動が困難な場合があった。特にモータを分解したときに、ステータとロータが密着して離れなかった場合があり、密着度の著しさを物語っている。



(a) 最大回転速度



(b) 最大トルク



(c) 接線力係数

●:大気、■:VR

図4. 19 真空中駆動超音波モータの特性変化 (SiC-SiC の場合)

4. 7 第四章のまとめ

- ・レーザドップラ振動速度計を用いることにより、ベルジャー内の真空中にある超音波モータのモータ特性を非接触で測定することができた。
- ・真空中での摺動材料として実績のある代表的なセラミックスを用いて超音波モータの摺動部材料として使用し、駆動を大気中および真空中で確認した。
- ・真空を引いた直後はモータ特性の悪化が観測され、安定動作には真空曝露時間が必要であることを見いだした。
- ・摺動材料の組み合わせとして、SUS304 に対して数種類の材料を組み合わせせて実機試験を行った。SUS304-CFRP の組み合わせが比較的良好な結果であった。
- ・摺動材料の組み合わせとして、SiC に対して数種類の材料を組み合わせせて実機試験を行った。SiC-CFRP の組み合わせが比較的良好な結果であった。SiC-SUS440C の組み合わせは特性の安定性に若干の問題を残したが、接線力係数の上昇もなく、今後 CFRP が使用できないような温度範囲での使用が可能かと思われる。

参考文献

- 1) 田中久一郎：「摩擦のおはなし」、日本規格協会 (1985) p.104-106
- 2) 樋口 健：“宇宙空間のリニア超音波モータ”、超音波 TECHNO12 月号 (年不明) p.61-64
- 3) 山科俊郎、広畑優子：「真空工学」、共立出版(株) (1991) p.3
- 4) Kentaro Nakamura, Minoru Kurosawa, Hisayuki Kurebayashi and Sadayuki Ueha: “An Estimation of Load Characteristics of an Ultrasonic Motor by Measuring Transient Responses”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.38, No.5, September 1991 pp.481-485
- 5) 日本潤滑学会編、「新材料のトライボロジー」、養賢堂 (1991) p.105
- 6) 日本潤滑学会編、「新材料のトライボロジー」、養賢堂 (1991) p.127

第五章 高次共振波形合成による低摩耗駆動法

第五章 高次共振波形合成による低摩擦駆動法

超音波モータの摩擦駆動面の摩擦についてその評価式を第二章で導出した。その提案した評価式から超音波モータ用摩擦材料の低摩擦駆動に必要な条件を明らかにした。本研究では、この条件に基づいた二つの低摩擦駆動法を提案した。一つは耐摩擦性の高い材料を使うことである。これについては3.4である程度の成果を得ることができたことを既に述べた。もう一つは駆動振動速度波形を滑り速度が小さくなるように制御することである。しかし超音波モータは共振で駆動されているため、印加電圧波形を制御するだけではメカニカルフィルタにかけたように共振周波数の波形のみが励振され、制御できない。制御のための特殊な構造を提案し、その効果を明らかにした。そして提案した構造を用いた新型超音波モータを試作し、実機摩擦試験を行った。

第五章 高次共振波形合成による低摩擦駆動法

5.1 摺動面の軌跡

超音波モータは機械的共振状態で駆動されており、超音波モータの機械的共振周波数と等しい交流電圧を印加する。通常は単一の周波数で駆動するので機械的振動も単一の周波数、つまり正弦的に振動する。前章までの超音波モータでは全てこのような駆動を行っていた。たとえ、数種類の周波数を混合した電圧を印加し

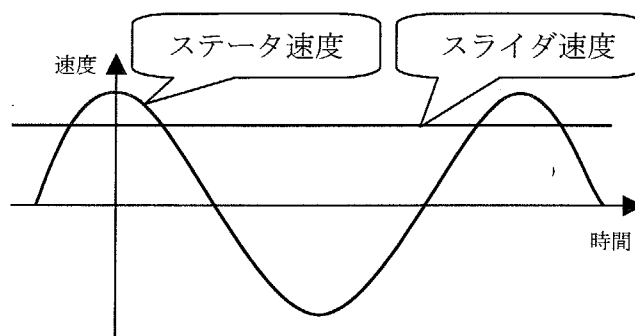


図5.1 摺動面の速度関係

たととしても、共振周波数と一致しない周波数の振動は励振されない。従って通常、摺動面はステータ側が正弦的な振動速度をもち、スライダ側がほぼ一定の速度を持つことになる。(図5.1参照)

この速度差で滑りによる摩擦が発生することは前章で述べた。この時のステータの振動軌跡は楕円を描く。もしも、究極的にこの速度差を無くすことができれば、理論上無摩擦駆動が実現できる。實際上無摩擦が無理としても、速度差を減少させることができれば、低摩擦

駆動が実現できる。従って振動変位ではなく、振動速度が摩擦の低減に関しては重要になる。以下に、この楕円振動軌跡をどのように制御すれば低摩擦駆動が実現できるのかを述べる。

5. 2 矩形波振動速度による駆動

実は、速度差の無い駆動というものは既に存在する。その例はインチワームである。インチワームの基本動作を図5. 2に示した。これは、1～3の3つのアクチュエータがそれぞれ順番に伸び縮みして、いわば尺取り虫のように軸上を移動していく。

1と3がクランプ用で軸を把持したり緩解したりする。2が送り用でこの素子の伸び縮みにより1ストローク分送られる。位相を変えることで移動方向が変えられる。

このインチワームは共振で駆動するのではなく、非共振駆動であり、一つ一つの動作が十分低い周波数で切り替わり、接触面は滑ることなく、静止摩擦力で動力を伝えている。

このような静止摩擦力による駆動を理想とし、超音波モータに当てはめたときのタイムスケジュールは図5. 3のようになる。

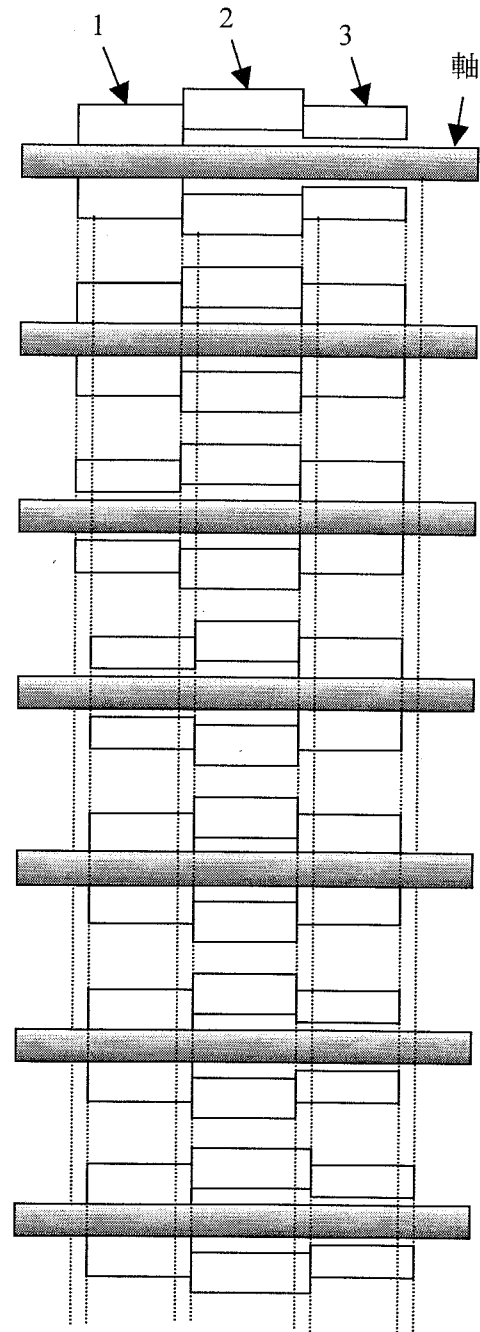


図5. 2 インチワームの動作原理

縦振動子は瞬時に変位して最大の予圧を発生し、その変位をキープする。振動変位波形は矩形波になる。その為には振動速度はスパイク状になり、極めて短時間に高速に変化しなければならない。(矩形波の微分波形になる)

横振動子はスライダとの接触中に同速度で(滑ることなく)移動しなければならない。従って振動速度波形は矩形波になる。なお、振動変位波形は三角波である。(矩形波の積分になる)

インチワームの動作を超音波モータの動作に応用できないかというのが本章の狙いである。つまり、理想の駆動速度波形が図5. 3なのである。

しかし、この駆動速度波形は、縦振動はインパルス的であり、横振動は矩形波である。この種の波形は多くの周波数成分を含んでいる。先ほども述べた超音波モータの駆動の特徴により、共振周波数の成分のみしか振動が励振されない。試みに、超音波モータに矩形波電圧を印加してみても、振動速度は基本周波数の正弦波成分のみが励振される。

摺動面の滑り速度は、横振動速度が主に関係しているため、横振動速度波形を矩形波にしなければならない。横振動速度波形が矩形波ならば基本的に送り時の相対速度は0になるので、縦振動速度や変位の時間変化が多少理想からはずれていてもさほど影響はないと

思われる。そこで、縦振動速度は励振が容易な正弦的なままで、横振動速度が矩形波の場合

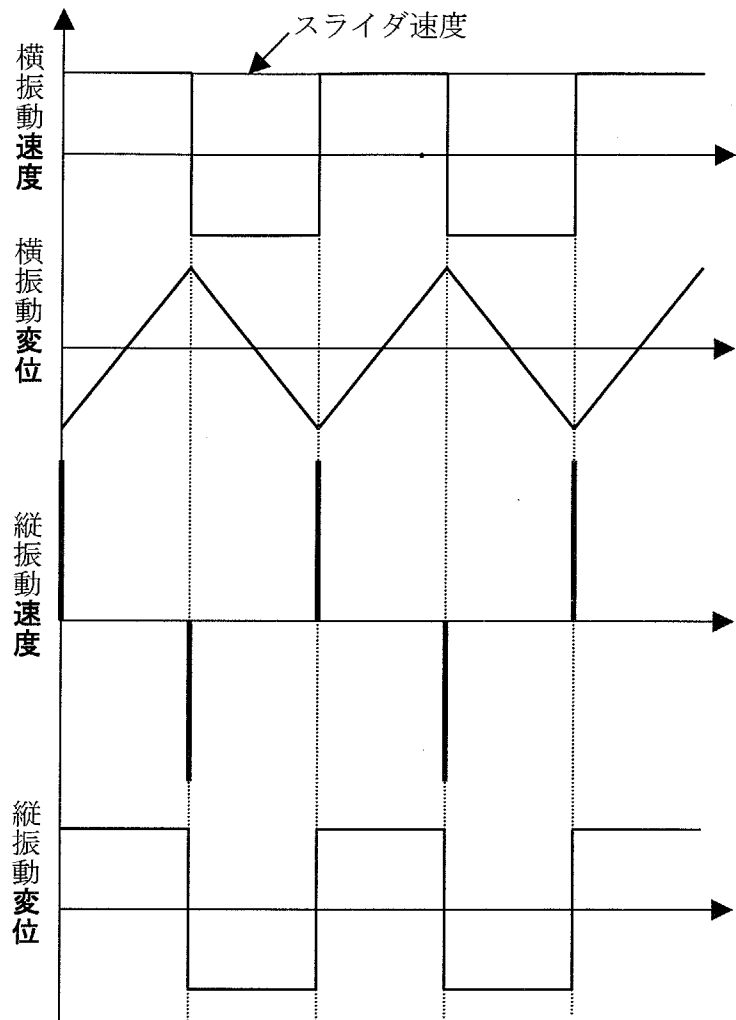


図 5. 3 理想の駆動波形

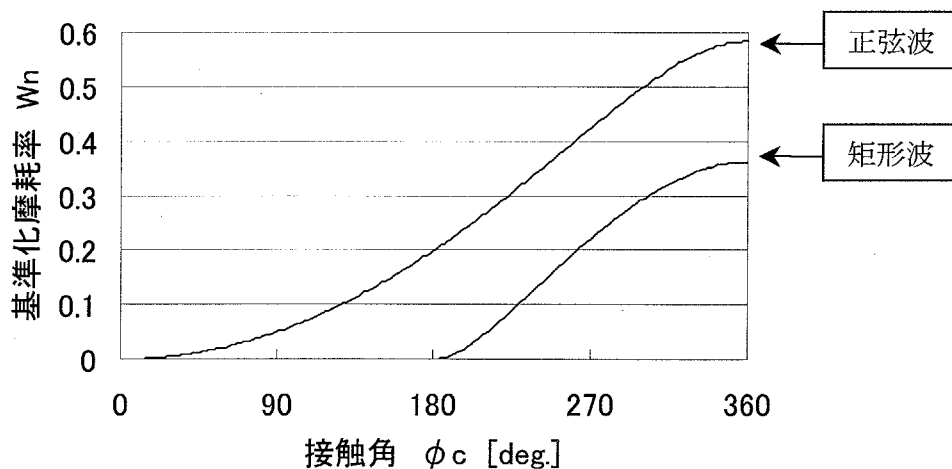


図 5. 4 基準化摩擦率の接触角依存性
横振動速度が矩形波及び正弦波の場合

及び正弦波の場合の基準化摩擦率 W_n を無負荷の条件で数値計算したのが図 5. 4 である。全ての接触角領域で摩擦率が減少しているのがわかる。特に顕著なのが、接触角が 180° 以下の時で、横振動の戻り時に接触しなくなるため、計算上全く摩擦が無くなることわかる。

5. 3 高次振動速度合成による駆動

共振駆動で矩形波振動速度を得るためには、次の条件を満たす必要がある。矩形波の周波数成分は、式(1)に示すように、基本周波数及びその奇数倍の高調波成分からなっている。

$$v(t) = v_0 \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin(2n+1)\omega t \quad (1)$$

($v(t)$:矩形波、 v_0 :矩形波振幅)

今まで述べてきたように、超音波モータのような共振系で矩形波を実現するためには、駆動信号の全ての周波数成分が超音波モータの共振周波数及びその整数倍に一致していなければならない。しかし、実際の超音波モータでは、高次共振周波数は基本共振周波数の整数倍にはなっていない。従って、矩形波振動速度の実現は極めて困難であることがわかる。

そこで、たとえ全ての共振周波数を合わせることはできなくても、式(1)中の初めのいくつかの周波数を一致させることができれば、ある程度の摩擦低減効果が得られることが期待できる。図 5. 5 に横振動速度の基本周波数に高次共振周波数を重畳した場合の W_n 値の接触角依存性を示す。

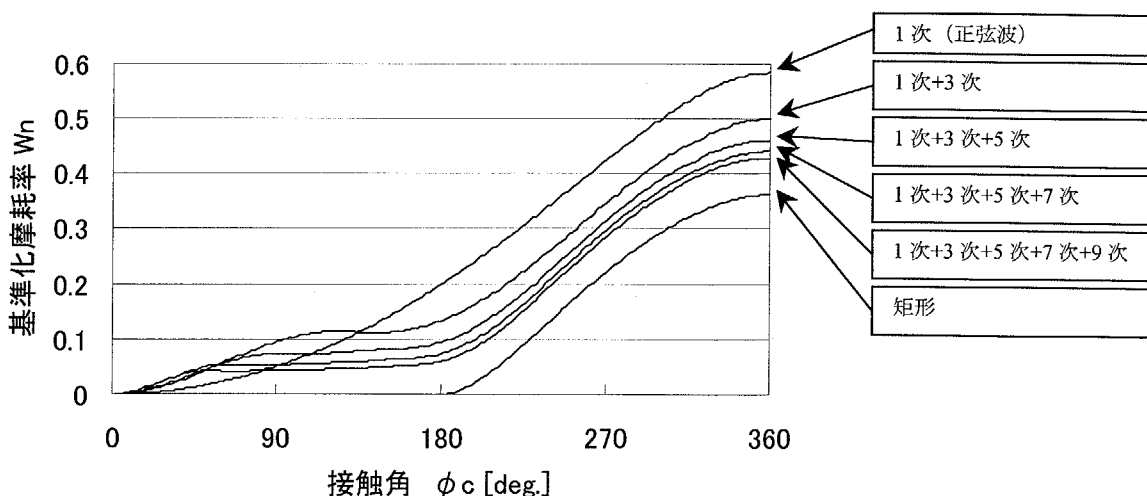


図 5. 5 基準化摩擦率の接触角依存性
異なる駆動波形による相違

基本周波数のみの場合と比較して、高次共振周波数を合成した場合の方が W_n 値の減少が認められる。接触角 135° 以下では、3 次以上の共振周波数を合成した場合に、かえって W_n 値が上昇しているが、これは、矩形波への近似が不十分なためである。

しかし、通常の超音波モータの駆動では接触角が小さくなることは余りないため、実用上は高次共振周波数波形を合成するだけでも、摩擦低減効果が期待できると考えられる。

5. 4 共振周波数調整法

今回は、複合振動子型超音波モータのねじり振動速度波形を合成することとした。

ねじり共振モードを図 5. 6 に示す。1 次の基本モードは中央に節があり、3 次の高次モードは中央及びその両側の 3 ヶ所に節がある。これらのうち、中央をのぞく 2 ヶ所の 3 次モードの節位置に、フランジや溝を設けることで、1 次共振周波数と 3 次の共振周波数の比を変化させることが可能となった。結果として、3 次共振周波数を 1 次の共振周波数の 3 倍に調整することが可能となる。

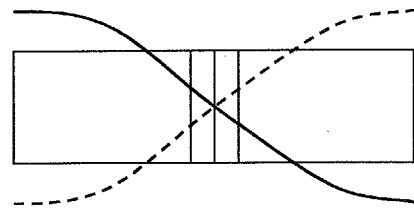


図 5. 6(a) 1 次のねじり振動モード

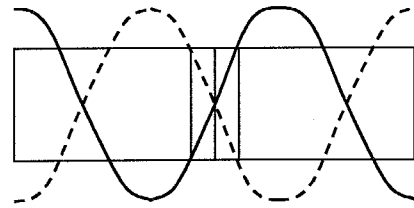


図 5. 6(b) 3 次のねじり振動モード

5. 4. 1 フランジの効果

3 次モードの節位置にフランジを設けた場合の振動子例を図 5. 7 に示す。

フランジを設けても、波長に比べて厚さが薄ければ、3 次モードにはほとんど影響がないと予測される。よって 3 次共振周波数はほとんど変化しない。1 次モードにとっては、フランジを設けることで、振動の腹に近い部分の慣性モーメントが増加する。よって 1 次共振周波数は低下する。

周波数変化の度合いは、フランジの厚さや直径による。また、フランジは片側にのみ設けても効果はある

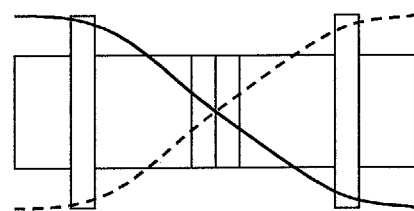


図 5. 7(a)

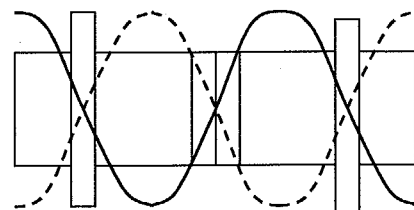


図 5. 7(b) フランジ付き振動子

が、両側につけた方がバランスも良く、効果も大きい。

図5. 8にフランジの効果についてFEM解析をした結果及び実験結果を示す。

使用した振動子は、直径30mm、長さ58mmである。端面から10.3mmの位置に厚さ1mm、直径40mmのフランジを設けた。フランジ位置は、FEM計算より求めた3次モードの節位置である。フランジを徐々に削りながら測定を行った。

3次共振周波数はFEM結果の通り、振動子の直径である直径30mm（フランジ無しの状態）まで、ほとんど変化が無かった。1次共振周波数もFEM結果の通り変化した。測定した共振周波数の絶対値はFEM結果と異なっていたが、フランジ直径の変化に対する変化の傾きはFEM結果と実験結果ではほぼ一致した。

FEMでは34.7mmで共振周波数が3倍になると出ているが、実際は、約31mmで共振周波数が約3倍になった。

これより、フランジを設け、その直径を調整することで共振周波数の調整が可能であることが示された。

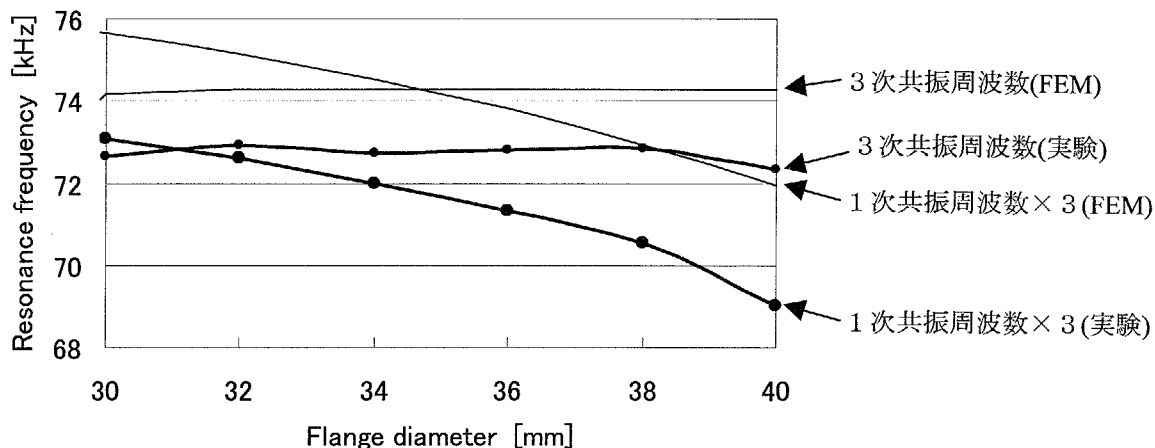


図5. 8 共振周波数のフランジ直径依存性

5. 4. 2 高次振動モードの選択

以上より、高次振動モードが摩擦を低減させることがわかり、また3次の共振周波数を1次の共振周波数の3倍に調整する機構を提案しその効果を確認することができた。従って、今後は更に5次、7次と更に高次のモードを重ね合わせて最終的には矩形波に近い形に振動速度波形を制御していきたい。しかしここで述べた手法では、更に高次の項を調整することは極めて困難が予測される。それは、3次の節、5次の節、7次の節、等にそれぞれ設けた

フランジがそれぞれ独立に効果を発揮すれば良いのであるが、フランジは他の全ての振動モードに影響を与え独立に制御することができない。

再び図 5. 5 を参照する。もしも 1 つの高次モードのみを合成するとしたら、どの次数のモードを合成したときが最も摩耗低減効果が高いかをみると、3 次のモードを合成したときが最も高いことがわかる。従って今後は、1 次 + 3 次のモードで摩耗低減をはかり、研究を進めていくこととする。

5. 4. 3 印加電圧の振幅および位相

ねじり振動速度、印加電圧、電流の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} i &= YV \\ &= (Y_m + Y_d)V \\ &= B\omega + Y_d V \end{aligned} \quad (2)$$

(i :電流、 Y :全アドミッタンス、 V :印加電圧、 Y_m :動アドミッタンス、 Y_d :制動アドミッタンス、 B :トルク係数、 ω :ねじり振動の角速度)

ここで、周波数比を 3 と仮定したときの印加電圧比について考察する。

$$\begin{aligned} \text{・ 1 次モードの振動速度} \quad \omega_1 &= \frac{Y_{m01}}{B_1} V_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{・ 3 次モードの振動速度} \quad \omega_3 &= \frac{Y_{m03}}{B_3} V_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{・ 振動速度比} = 1/3 \quad \frac{\omega_3}{\omega_1} &= \frac{Y_{m03}}{Y_{m01}} \frac{B_1}{B_3} \frac{V_3}{V_1} = \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{・ 印加電圧比} \quad \frac{V_3}{V_1} &= \frac{Y_{m01}}{3 Y_{m03}} \frac{B_3}{B_1} \end{aligned} \quad (6)$$

(Y_{m0} :共振時のアドミッタンス)

よって、共振周波数比が 3 ならば、印加電圧を式(6)の比にすれば、所望の振動速度比が得られることになる。

印加電圧の位相差については、180 度（1 次と 3 次は逆相）とする。図 5. 6 や図 5. 7 を見ると、励振部であるセラミックス部分のねじれる方向と、出力部である端面のねじれる方向が、1 次モードでは同相であるが、3 次モードでは逆相になっているため、端面において同相で合成するためには逆相で励振する必要があるためである。

5. 4. 4 共振周波数比の許容度

共振周波数を整数倍にしなければならないのであるが、実際は、加工精度や駆動中の素子温度変化、印加電圧、予圧、負荷、等によって微妙に影響を受け、若干の周波数比のずれが予測され、式(6)のようにならないおそれがある。そこで周波数比の許容度について考察する。

共振周波数の許容度は共振の鋭さを表す Q 値によって決まる。 f_1 （1 次共振周波数）の Q_1 と f_3 （3 次共振周波数）の Q_3 の 2 つがあるが、どちらも関係がある。 Q が小さければ多少周波数が整数倍からはずれていても波形合成は可能であろう。 Q が大きければそれだけ正確に周波数を整数倍にあわせなければ波形合成ができないと考えられる。

Q が大きい（共振が鋭い）と、周波数が共振からずれたときに、アドミッタンスや位相の変化が大きい。従って、1 次モードと 3 次モードの励振電圧比や位相差を理想値から変化させなければならず、またその変化値も大きくなってくる。

従って、振動子の Q はできればあまり大きくない方が本研究には適していると考えられる。実際の駆動時は、 Q は低下する傾向にあり、さほど心配はないのではないかと予測される。

表 5. 1 振動子の特性

フランジ 直径	1 次共振周波数 f_1 kHz	3 次共振周波数 f_3 kHz	周波数比 f_3/f_1	周波数差 $f_3 - 3 \times f_1$ kHz
34mm	24.4180	73.8488	3.02	0.5948
33mm	24.5300	73.8542	3.01	0.2642
32mm	24.6318	73.9051	3.00	0.0097

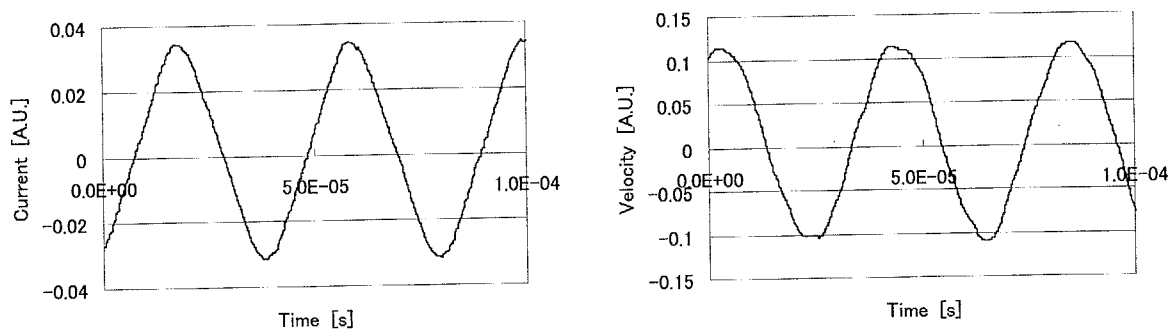
フランジ 直径	Y_{m01} [mS]	Y_{m03} [mS]	Q_1	Q_3	B_1 [As]	B_3 [As]
34mm	83.392	161.906	1220	1067	8.22×10^{-3}	1.87×10^{-2}
33mm	79.032	192.439	1182	1253	7.96×10^{-3}	1.96×10^{-2}
32mm	85.934	155.067	1281	1023	7.28×10^{-3}	2.12×10^{-2}

次に直径 30mm のねじり振動子にフランジを設けたものを試作し、その直径を変化させたときの諸特性について表 5. 1 にまとめた。

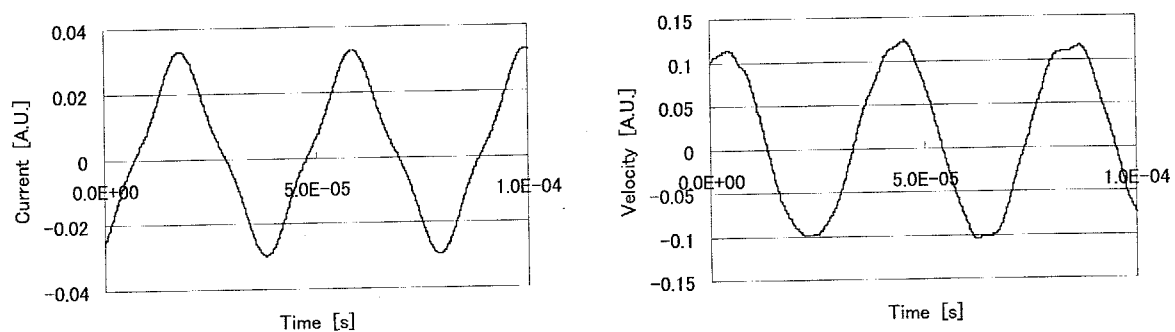
振動子の直径は 30mm、長さ 58.4mm である。中央に外径 28mm 内径 14mm 厚さ 4mm のねじり振動子を 2 枚はさんである。厚さ 0.2mm の電極板を 2 枚使用した。

駆動は 1 次共振周波数を基準とし、3 次モードの励振周波数は 1 次共振周波数の 3 倍とした。式(6)に従って電圧を印加した場合の電流および振動速度波形を図 5. 9 に示す。

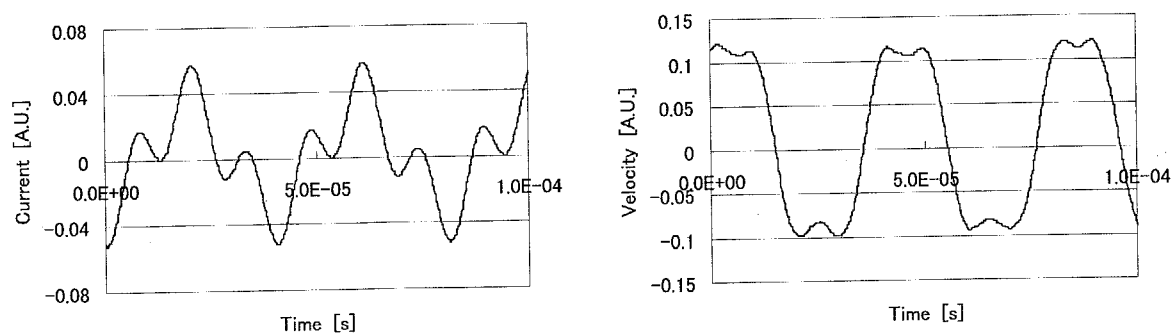
例えばフランジ径 32mm の時、 $f_3/2Q_3 \approx 0.0722$ である。約 72Hz 共振がずれるとアドミッタ



(a) 周波数比 3.02 の場合



(b) 周波数比 3.01 の場合



(c) 周波数比 3.00 の場合

図 5. 9 周波数比の変化による振動速度波形の相違

ンスが $(1/\sqrt{2})$ になる。周波数差が約 10Hz と 72Hz 以内なので、さほど深刻な差異ではない。図 5. 9(c)のように、ほぼ予測通りの合成波形が得られた。尚、1 次モードと 3 次モードの印加電圧の位相差は、振動速度波形が同相になるように設定した。この時、電流波形はほぼ逆相になっている。完全な逆相でないのは約 10Hz の周波数差による位相差であろう。

また、フランジ径が 33mm の時は、周波数差が約 264Hz と 72Hz よりも大きく、3 次モードがあまり励振されていない。更にフランジ径が 34mm のときは、図 5. 9(a)に見られるようにほとんど正弦波駆動に見える。

しかし、周波数比が 3.00 でなくても、3 次の励振電圧を高くする事である程度（絶縁破壊をしない程度までの電圧を上限とする）は図 5. 9(c)のような波形を得ることが可能である。周波数ずれの許容範囲は、 $\pm f_3/2Q_3$ が一応の目安となろう。

5. 5 実機摩擦試験

5. 5. 1 実機について

摩擦予測から、駆動波形を矩形波に近づける目的で 3 次の高次モードを合成すると、摩擦の低減が可能になった。従って、本手法を用いて実機摩擦試験を行い実験的に検証した。

今回実験に使用した超音波モータの概略を図 5. 10 に、外観を写真 5. 1 に示す。図 5. 7 のようなねじり素子のみ構成ではなく縦素子も必要なのはいうまでもない。通常は、縦素子 1 組ねじり素子 1 組をそれぞれ効率よく励振するために、それぞれ相応しい位置（各モードの節もしくは節に近い位置）に配置している。しかし、本手法は周波数比を 3 に調節し、振動速度波形を合成しなければならないので、できれば対称構造

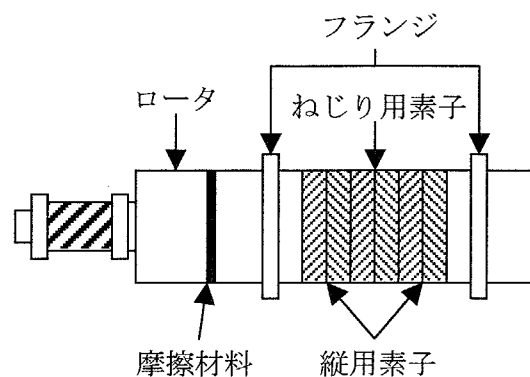


図 5. 10(a) 実機摩擦試験用超音波モータ

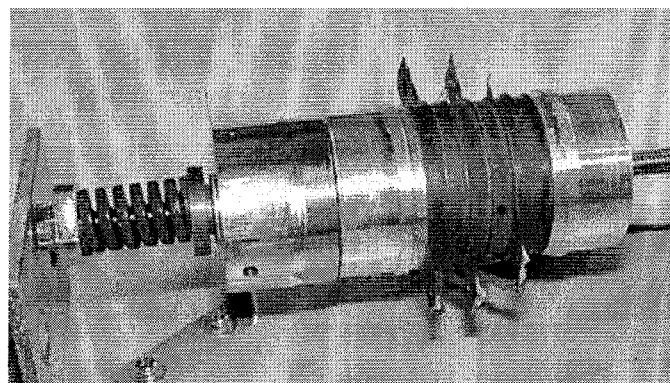


写真 5. 1 実機摩擦試験用超音波モータ

にした方がフランジ位置も対称になり、波形合成が実現し易い。そこで、ねじり素子を中心

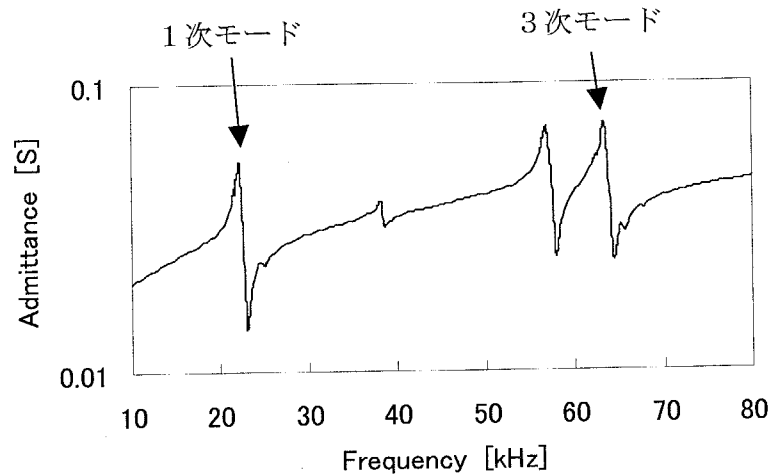


図5. 11 速度波形合成超音波モータのアドミッタンス特性

に置き、その両側に縦素子を置いたボルト締めランジュバン型振動子とした。

ステータは長さ 52mm、直径 30mm である。中央に外径 28mm 内径 14mm 厚さ 4mm のねじり用振動子を 2 枚、その両側に外径 29.2mm 内径 15mm 厚さ 3.5mm の縦用振動子を各 2 枚挟んでいる。フランジは直径 31mm、厚さは 2mm で、位置は 3 次共振モードに与える影響を少なくするため 3 次共振モードの節となるところとし、FEM 解析結果より端面から 11.5mm の位置とした。ロータは直径 30mm 厚さ 20mm の SUS303 製である。焼き入れは行っていない。

摩擦材料は石綿ジョイントシートをステータの端面に貼り付けた。外径 30mm、内径 24mm 厚さ約 0.5mm である。

アドミッタンス特性を図 5. 11 に、それより得られた諸特性を表 5. 2 に示す。周波数比は 2.859 であった。3 からはずれているが、実際の駆動時には 3 次の印加電圧、位相を調整し、振動速度比を 3 になるようにした。

表 5. 2 超音波モータ諸特性

1 次共振 周波数 f_1 [kHz]	3 次共振 周波数 f_3 [kHz]	周波数比 f_3/f_1	周波数差 f_3-3f_1 [kHz]	Y_{m01} [mS]	Y_{m03} [mS]	Q_1	Q_3
22.1914	63.4409	2.859	-3.1333	1.185	2.230	41	113.76

3 次の波形が合成できた理由としては、超音波モータを駆動すると、実質的な Q が低下し、周波数比の許容度が増すこと、高電圧を印加することにより共振周波数の低下が起こったこ

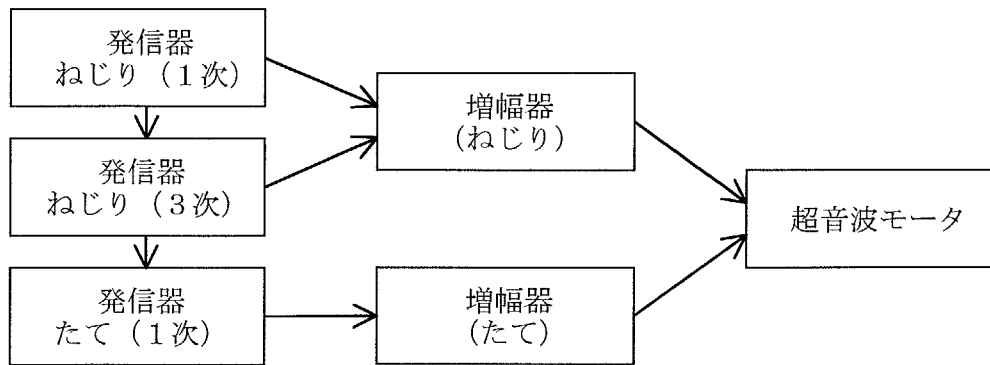


図5. 12 波形合成超音波モータの駆動ダイアグラム

となどが考えられる。

実機の駆動周波数は最も回転数が高かった周波数である 21.5kHz とした。

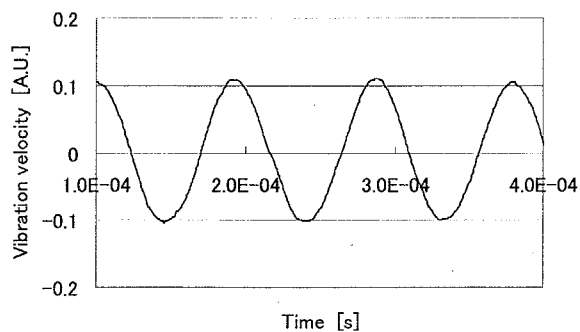
駆動システムのダイアグラムを図5. 12に示す。1次の駆動波形用の発振器、3次の駆動用発振器、縦振動用の発振器をそれぞれ使用し、増幅して超音波モータに印加した。1次と3次のねじり振動励振信号は、増幅器で合成した。

振動速度の測定には、非接触で測定が可能な、レーザ・ドップラ振動速度計（ダンテック）を使用した。

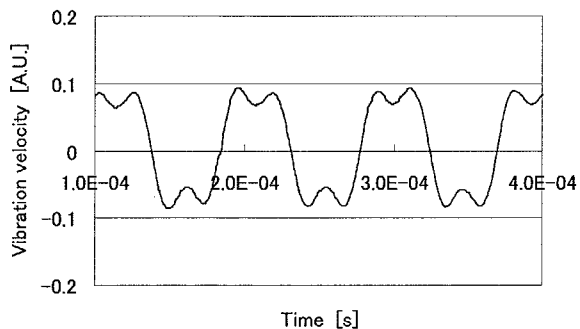
5. 5. 2 駆動波形について

摩擦低減効果の比較検討するために、以下の3種類の波形を用いて実機摩擦試験を行った。

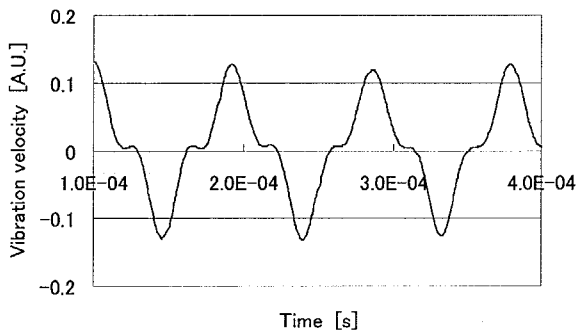
1. 正弦波（1次振動モード）による駆動
（通常の駆動方法）
2. 同相合成波（1次＋3次振動モード）による駆動（低摩擦駆動法）



(a) 正弦波駆動速度波形



(b) 同相駆動速度波形



(c) 逆相駆動速度波形

図5. 13 実機の振動速度波形

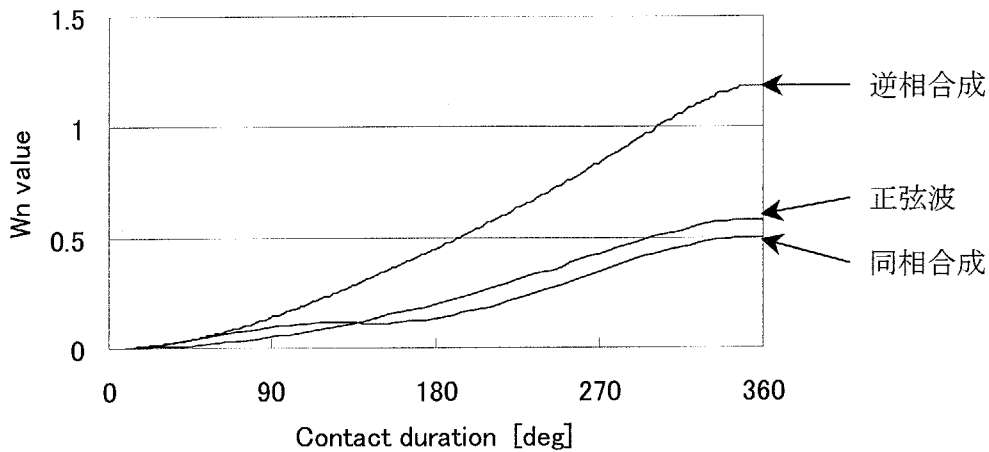


図5. 14 摩擦率の接触角依存性

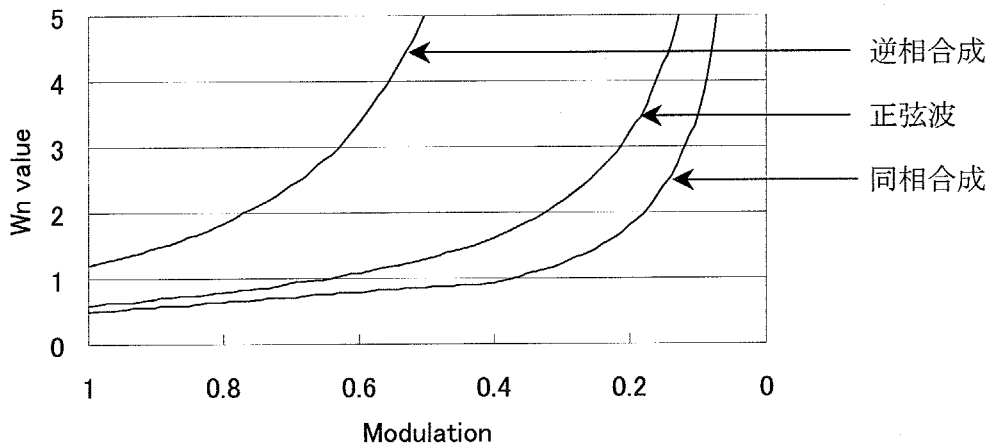


図5. 15 摩擦率の変調依存性

3. 逆相合成波（1次－3次振動モード）による駆動（高摩擦（？）駆動法）

図5. 13にその時の振動速度波形を示す。

合成波形の比較条件は、基本となる1次モードの振動速度の大きさは全て同一とした。同じ正弦波形に3次の高次モードを同相で加えた場合が(b)、逆相で加えた場合が(c)である。ほぼ予定の振動速度が得られているのがわかる。

次にそれぞれの駆動速度波形により、どの程度摩擦が異なるかをモータ無負荷の条件で計算した結果を図5. 14、図5. 15に示す。(接触角 ϕ_c 及び予圧変調度 a/b については図5. 16(a)、(b)に示す)

接触角が 360° 以下では、同相合成の効果はほぼ一定であるが、接触角が 360° の場合、変調度が低くなるにつれて同相合成の効果が徐々に高くなって（摩擦率の低下が大きくなっ

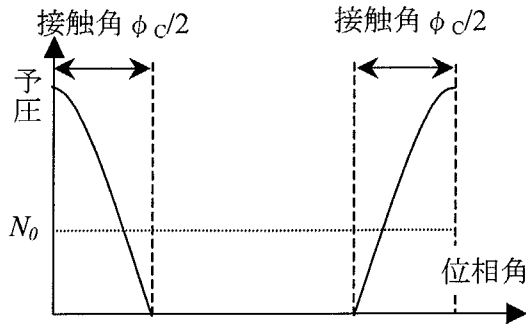


図 5. 1 6 (a) 接触角の定義
(接触角 $<360^\circ$)

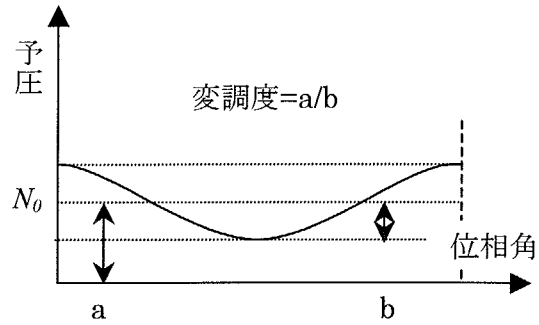


図 5. 1 6 (b) 変調度の定義
(接触角 $=360^\circ$)

て) いる。

本手法が、低変調度時の、悪い駆動条件で威力を発揮する傾向があることが予測される。

5. 5. 3 摩擦予測

今回の実機試験の摩擦予測を行う。

速度比：接触角（変調度）のグラフを各波形ごとに出す。

速度比は、ロータ速度約 2cm/s、ステータ速度約 25cm/s より、0.08 であった。よって変調度は約 0.1 となる。押しつけ力 $N=98\text{ N}$ 、接触面積 $S=2.54\times 10^{-4}\text{ m}^2$ である。

直径 30mm で、一回転すると約 0.0942m になる。 R 回転では、 $0.0942\times R\text{ m}$ である。

摩擦評価式は、 $V=0.0942\text{ } Ws\text{ } N\text{ } Wn\text{ } R\text{ [m}^3\text{]}$ 、 $h=V/S=371\text{ } Ws\text{ } N\text{ } Wn\text{ } R\text{ [m]}$ となる。表 5. 3 に各定数をまとめた。また、10000 回転時の摩擦深さも計算した。

但し、ここの Ws 値は相手材料が焼き入れした SUS440C の時の値を使用した。本実機のロータは焼き入れしていない SUS303 であるので、実際の Ws 値はこの値より大きいと予測される。

表 5. 3 各定数・摩擦予測式および摩擦評価

	$Ws\text{ [m}^2\text{/N]}$	$v_R\text{ [m/s]}$	Wn	摩擦予測式	10000 回転時
正弦波	2.39×10^{-14}	2.2×10^{-2}	2.2	$h=1.91\times 10^{-9}\text{ } R\text{ [m]}$	$h=19\text{ }\mu\text{ m}$
同相波	2.39×10^{-14}	2.7×10^{-2}	1.2	$h=1.04\times 10^{-9}\text{ } R\text{ [m]}$	$h=10\text{ }\mu\text{ m}$
逆相波	2.39×10^{-14}	1.5×10^{-2}	18.8	$h=1.63\times 10^{-8}\text{ } R\text{ [m]}$	$h=163\text{ }\mu\text{ m}$

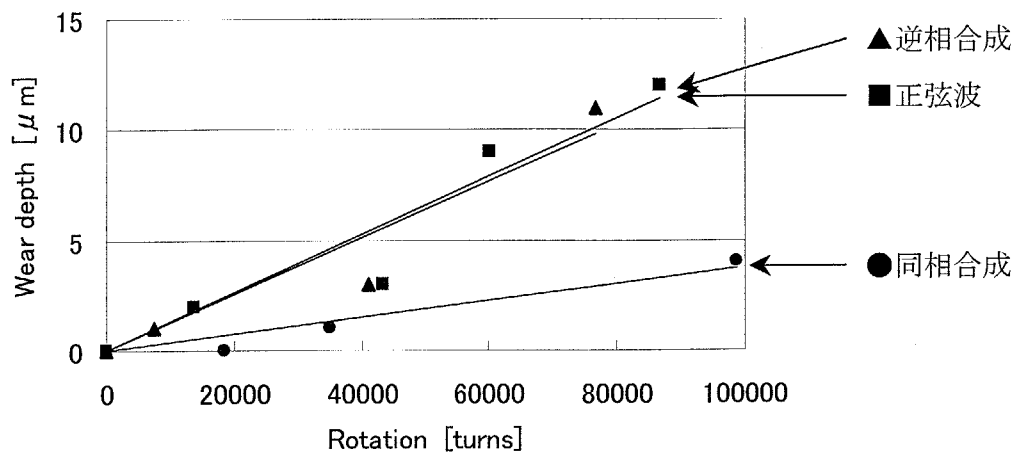


図 5. 17 実機摩耗試験結果

5. 5. 4 実機摩耗試験結果

実験は常温で行った。予圧は 10kgf、摩擦材料は石綿ジョイントシートを使用した。過熱を防ぐために間欠駆動とし、10 秒駆動・10 秒停止を繰り返した。尚、冷却のためファンで常時空冷を行った。

図 5. 17 に実機摩耗試験結果を示す。横軸は総回転数、縦軸が摩耗深さである。直線は、最小自乗法による 1 次の近似直線（原点を通るようにした）である。

摩耗深さが回転数にほぼ比例していることがわかる。予測通り、同相で 3 次の高次共振モードを合成した場合が他の場合よりも摩耗が減少しているのが観測された。直線の傾きより、およそ 3.4 倍寿命が延びることが期待できる。

しかし逆相駆動時の摩耗が、通常駆動の場合とほとんど同じ摩耗量であった。その理由の一つとして、次のように考えた。本実機のロータは焼きが入れてない SUS303 であり、駆動に伴い表面が急速に荒れてくる。そして正弦波駆動や逆相合成波駆動では同相合成波駆動と比較して表面の荒れが早く生じたと考えられる。この表面粗さがある値で飽和するのではないだろうか。従って、ほぼ同じような摩耗量になったのではないだろうか。

またさらに、滑りに伴う摩擦熱の影響ももう一つの理由と考えられる。

先に述べた摩耗予測結果では、10000 回転で $10 \sim 163 \mu\text{m}$ 摩耗すると予測したが、実際はその 10 倍の約 100000 回転で約 $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 摩耗した。この相違については、使用した摩擦材料である石綿ジョイントシートの摩耗特性にあるのではないかと考えている。石綿ジョイントシートを用いた摩耗評価を今までに何度か行ってきたが、約 10 倍異なる傾向があることがわかっていて、これは、本研究で Ws を求めている摩耗試験器の摩耗条件と実機での駆動条件の

違いが、摩擦特性に大きく影響しているのではないかと考えられる。おそらく異なる摩擦メカニズムになっているのではないだろうか。今後の課題である。

5. 5. 5 低摩擦化の結果

ねじり振動速度波形を矩形波に近づけることで摩擦材料の低摩擦化が達成できることが明らかになった。更に滑りの減少に伴い、摺動面の表面粗さの増加が抑えられ、予測以上の低

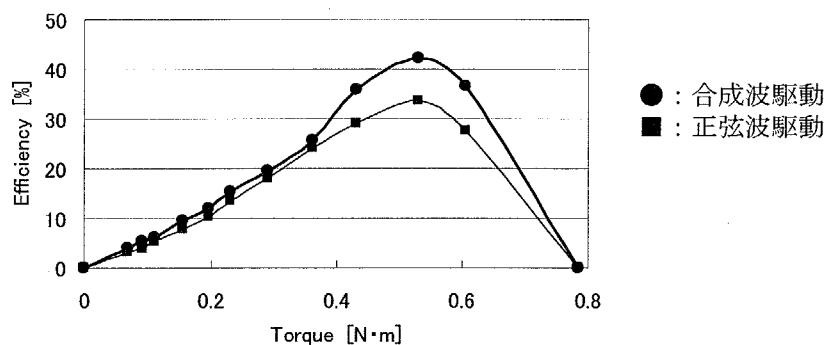


図 5. 18(a) 効率—トルク特性

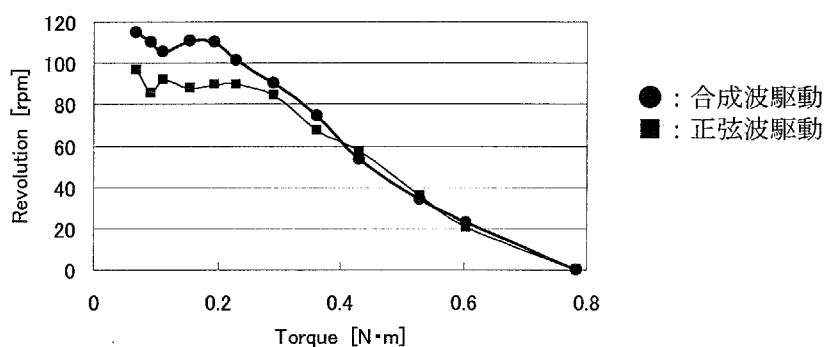


図 5. 18(b) 回転数—トルク特性

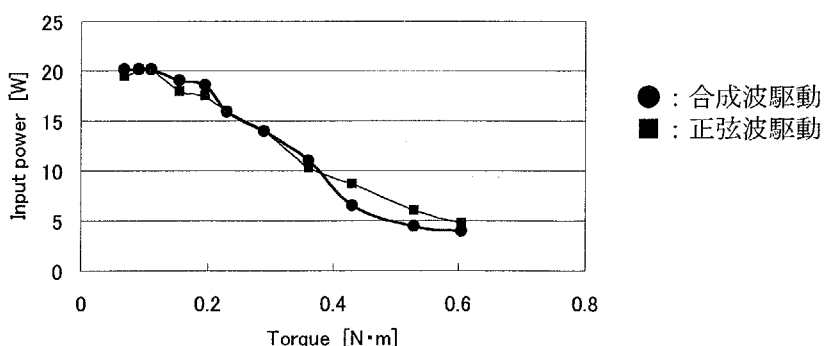


図 5. 18(c) 入力電力—トルク特性

摩耗効果が認められた。

5. 5. 6 その他の効果

また今回、1次のねじり共振周波数の3倍と3次の共振周波数を近づけることにより、たとえ1次の励振信号のみを印加していても、3次のモードが励起されることが確認された。その理由としては、ロータを押しつけてモータとして動作させた場合、縦振動によって摩擦力が時間変化する非線形負荷となるので、正弦駆動でも、振動速度波形がひずむと考えられる。またこの場合、効率が向上することが予測されている。

5. 6 高効率駆動

次に、本手法を用いて、超音波モータの高効率駆動を試みた。

同じ実機超音波モータを使用し、負荷特性を測定した。図5. 18(a)、(b)、(c)にトルクに対する、効率、回転数、入力電力を示す。横軸は出力トルクである。

図5. 18(a)よりわかるように、最大効率は34%から42%へと向上したことが認められた。

超音波モータの損失は、セラミックスの誘電体損、振動子の振動損、摩擦駆動面の摩擦損、があるが、本手法での効率の向上は、摺動面での摩擦損失が減少したためと考えている。

5. 7 第五章のまとめ

- ・ 摩耗の生じない理想的な駆動波形を示し、その波形に近くて実現可能な波形を提案した。
- ・ 提案した波形で駆動した場合の摩耗評価を行い、摩耗低減効果を検討した。
- ・ 提案した波形を合成するための、新しいステータ構造（周波数調整用フランジ付き）を提案・試作し、その効果を確認した。
- ・ 実機摩耗試験を行い、寿命が約3.4倍延びることを確認した。
- ・ 本手法を用いることにより、超音波モータの駆動効率が34%から42%へ向上することを確認し、高効率駆動法でもあることがわかった。
- ・ 今後は他型式の、例えば π 形超音波リニアモータや進行波型超音波モータの波形合成が望まれている。特に進行波型超音波モータや棒状モータのようなカメラ搭載用超音波モータは、低摩耗化及び高効率化により、モータや電池の長寿命化がはかれ、実現できるとより意義のある研究成果となるであろう。
- ・ 上記提案は、モータにフランジや溝を設けるとか、セラミックスや電極の配置の工夫など

で解決できると予測されるが、具体的な方策・効果については今後の研究が待たれている。

参考文献

- [1] Takaaki ISHII, Tsuyoshi SHINKODA, Sadayuki UEHA, Kentaro NAKAMURA and Minoru Kurosawa: "Efficiency Improvement of an Ultrasonic Motor Driven with Rectangular Waveform", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35 No.5B (1996) pp.3281-3285

第六章 潤滑した駆動面の摩擦特性

第六章 潤滑した駆動面の摩擦特性

これまで、非常に多くの複合振動子型超音波モータの原理・設計・振動など様々なテーマに関する研究が行われてきたが、摩擦駆動面が潤滑されたときの摩擦駆動機構、モータの動作と振動分布の関係、摩擦駆動面でどのような現象が起きているかという観察・解析はあまり行われてきていなかった。摩擦力を伝達する部分に摩擦力を減少させる潤滑油の使用はあまり考えられていなかったからである。しかし自動車の CVT 技術のように、摩擦力を伝達する部分での潤滑剤の利用など、超音波モータの摩擦駆動面にも潤滑剤使用の可能性がでてきた。その結果、超音波モータ特性、耐久性、駆動効率の改善が見込めることがわかってきた。そこで本章では、超音波モータの摩擦駆動面を潤滑した場合に考えられるメリットを述べ、潤滑剤を使用した超音波モータのロータ・ステータの挙動および潤滑剤の挙動を観測した。更に超音波モータの高効率駆動を検討した。

第六章 潤滑した駆動面の摩擦特性

6. 1 潤滑剤の効果

6. 1. 1 潤滑剤を使用することのねらい

繰り返しになるが、超音波モータは摩擦力を利用して動力を取り出すモータで、図 6. 1 に示すような原理に基づいている。移動子は、

慣性のためほぼ等速度で移動しているが、一方で固定子側は正弦的な振動をしており、摺動部では、速度差による摩擦損失は避けられず、超音波モータ駆動効率は低い値にとどまっていた。

そこで従来から、超音波モータの駆動効率を向上させるために様々な試みがなされている。その例として、摩擦材料の選択^{1,2,3)}、摩擦駆動部の解析⁴⁾、振動速度波形合成⁵⁾、等が検討され、それぞれ成果があげられているが、まだ高効率な超音波モータを得るには至っていない。

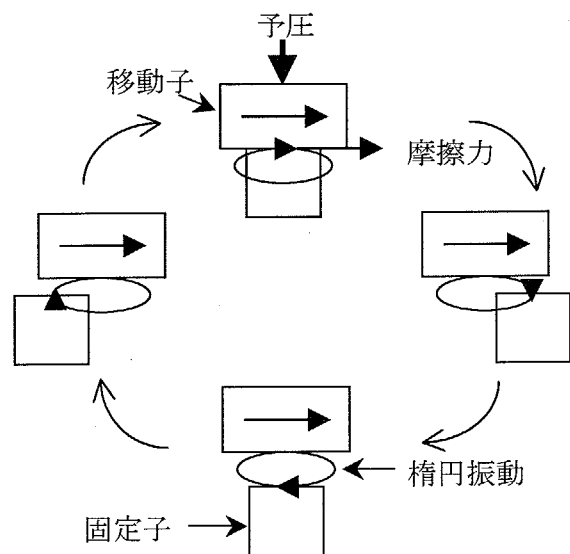


図 6. 1 超音波モータの動作原理

そこで本章では、新たに潤滑油の性質を利用して、予圧変化により接線力係数を変化させることで、十分大きな摩擦力変化量を実現することを試みた。摩擦損失の低減および超音波モータ効率の向上を目的とする。

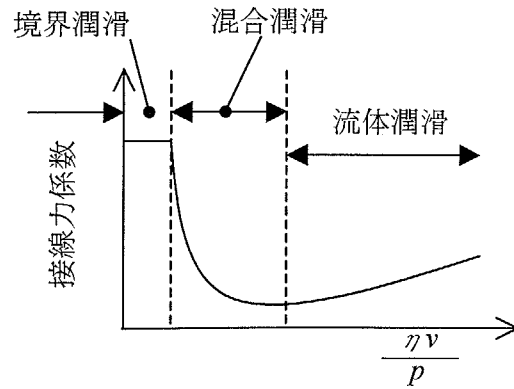


図6. 2 ストライベック曲線
 η :潤滑油の粘度, v :摺動速度, p :圧力

6. 1. 2 提案する摩擦力制御機構

図6. 1の摺動部分は戻りの行程で離れてい

るが、常に接触していても、接触圧力が変化することで、送り時の摩擦力の方が戻り時の摩擦力よりも大きければ、モータは駆動される。実際、十分な駆動力を得るためには大きな予圧を必要とし、常に接触している状態で駆動されている超音波モータは多い。しかしその場合、戻りの行程で発生する逆向きの駆動力は超音波モータ特性を悪化させると同時に、摺動部分の摩擦損失を増大させ、超音波モータ効率を低下させていた。

そこでもし、送りの行程で接線力係数が大きく、戻りの行程で接線力係数が低くなれば、摩擦損失を低減でき、効率向上の可能性がある。

一般に、潤滑油を用いた摺動面の接線力係数は圧力の大きさによって大きく変わることが知られており、図6. 2に示すようなストライベック (Stribeck) 曲線⁶⁾によって説明される。接触圧力が低い場合は十分な油膜厚さ

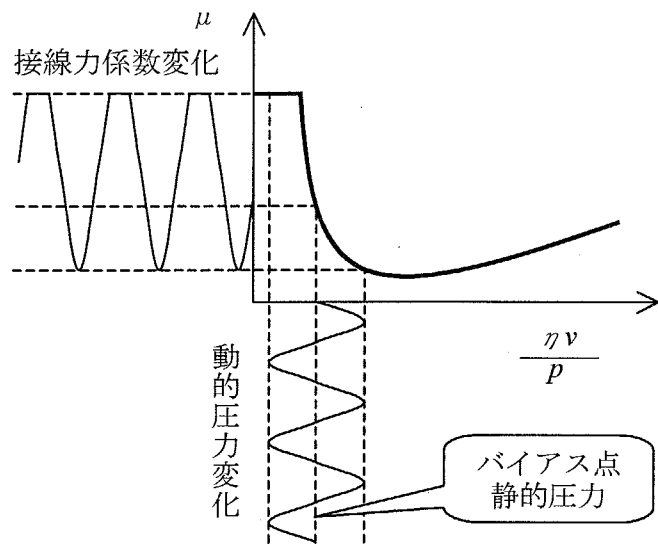


図6. 3 動的圧力変化に伴う接線力係数変化

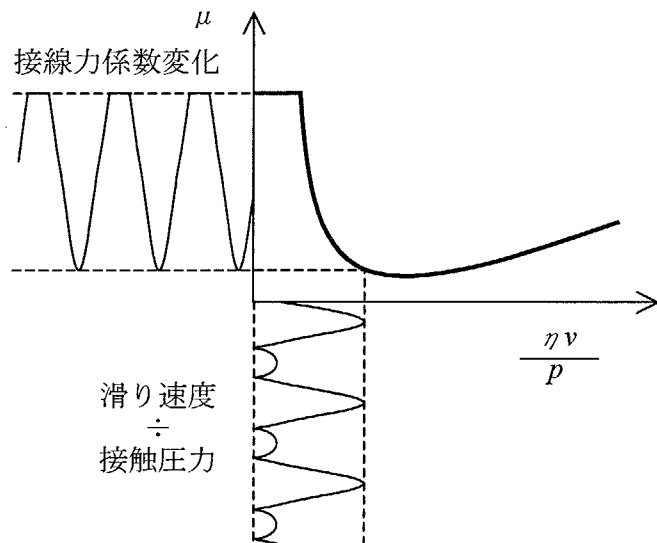


図6. 4 圧力 p 及び速度 v の変化に伴う接線力係数変化

が確保され、接線力係数の低い流体潤滑状態になる。そして、接触圧力が高い場合は油膜が破れて固体接触となり、接線力係数の高い境界潤滑状態になると考えられている。

そこで超音波モータの摺動部分に潤滑油を使用した場合、図 6. 3 に示すように、動的圧力変化に伴って接線力係数が変化することが期待される。動作点である静的圧力（バネによる予圧）の大きさ、および接線力係数の変化量に対応する動的圧力の変化量を適切に選択することにより、送りの摩擦力の時は接線力係数の大きい境界潤滑領域で、戻りの摩擦力の時は接線力係数の小さい流体潤滑領域で駆動することが可能となり、超音波モータ特性も向上し、超音波モータ駆動効率も向上することが期待される。

超音波モータを駆動したときには、圧力変化のみでなく、滑り速度も発生するため、図 6. 3 の横軸の変化は更に複雑になる。その様子を図 6. 4 に模式的に示す。圧力や滑り速度によって η が変化しないと仮定すると、おおよそこのような変化をすると考えられる。駆動時は滑り速度が遅く、戻り時は滑り速度が速いので、より接線力係数の変化量は大きくなると予測される。

更に、高圧力下では潤滑油の相転移による η の増加が見込まれるため、接線力係数の変化量が減少する心配はない。

6. 1. 3 供試潤滑剤

潤滑剤といえば、機械油、エンジンオイル、グリース、等あり、それぞれに粘度や性質も様々な物が存在するが、本研究で用いるトラクションオイルとしては、自動車の CVT に用いられている、Nissan CVT transmission oil NS-1 を使用した。このオイルを選択した理由は、超音波モータの動作原理である「摺動面で摩擦力を伝達する」が、金属ベルトとプーリの金属接触による摩擦力で動力を伝達するという CVT の動作と似ている点からである。入手のしやすさから日産自動車の CVT オイルを使用した。

CVT 用オイルは一般に、ベースオイルと添加剤から構成されており、CVT の動作に適した特性を持つように調合されている。ベースオイルとしては、いくつかの粘度のものを混合している。添加剤としては、皮膜を作って接線力係数を上げ、表面を保護し、摩耗を防ぐ働きを持つ物を使用している。また、滑る範囲内で接線力係数が変わらないようにもしている。

NS-1 の性状について表 6. 1 に、各種添加剤の効果について、表 6. 2 にまとめた⁷⁾。

このオイルは、百数十 MPa の面圧下で境界潤滑状態で使用されているとのことである。

本研究では、動作点（バイアス点）を境界潤滑状態よりはやや流体潤滑状態より（混合潤

滑状態) に設定することにより、動的圧力変化に伴い、境界潤滑と流体潤滑を繰り返す状態をねらっているので、数十 MPa の静的圧力を摺動面にかけることとした。

表 6. 1 NS-1 の性状

動粘度 [mm ² /s]	@40℃	38.0
	@100℃	7.19
元素分 mass%	Ca	0.125
	Zn	0.069
	P	0.061
	B	0.019

表 6. 2 添加剤の効果

添加剤	名 称	効 果
Ca	金属清浄剤 分散剤	スラッジをオイル中に抱き込む（分散）する。
Zn	耐摩耗剤	金属表面（カム、ピストンリング等、高温高負荷状態）に皮膜を作って摩耗を防ぐ。金属表面に吸着して接線力係数を下げる。
P		
B	金属清浄剤 分散剤	スラッジをオイル中に抱き込む。 Ca に比べて低温でその効果を発揮する。
ZnDTP*	耐摩耗剤 酸化防止剤	表面に反応層を形成。接線力係数を上げる。摩耗を抑える。

*zinc dialkyldithiophosphate （ジアルキルジチオリン酸亜鉛）

超音波モータの動作では、燃焼に伴うスラッジの生成はないと考えられるため、Zn、P、ZnDTP の役割が支配的と思われる。添加剤によって耐摩耗性の向上および接線力係数の上昇がもたらされ、超音波モータ摺動面の保護と摩擦力の確保をしていると考えられる。しかし、真実接触点では高圧が発生し、高温状態になっていると考えられることから、その部分でのスラッジ状の物質が発生する可能性もあり、Ca、B の役割も必要であろう。

6. 1. 4 弾性流体潤滑（EHL）の可能性

相対的に運動していない場合には、圧力が上昇すると油膜が破れて金属接触状態に陥ることは容易に想像できる。一方、相対的に運動している場合、油膜の圧力が上昇してもなお油

膜が保持されていると推測される状態がある。これは弾性流体潤滑 (elastohydrodynamic lubrication) と呼ばれている⁸⁾。油膜の圧力が GPa のオーダーになると、油が相転移し粘度が上昇するといわれており、単に圧力の変化が接線力係数を変化させているのではなく、粘度の変化も加わってきて、ストライベック曲線の横軸の値を複雑に変化させると考えられる。

本研究では、見かけの接触圧力は 100MPa のオーダーで一桁低い、真実接触圧力は GPa のオーダーになっていると考えられ、部分的には EHL が発生している可能性もある。EHL 駆動であるか否かの判定は今後の課題である。

最近実用化された日産自動車のトロイダル CVT は GPa のオーダーで駆動され、当該 CVT 用オイルは EHL 状態で使用されているといわれている。超音波モータにこのオイルを使用することも今後の研究課題である。

6. 2 供試超音波モータおよび測定系

6. 2. 1 高圧化のためのロータ構造

ここでは、摺動面の圧力を制御する素子と、駆動力を発生させる素子が独立に制御できる複合振動子型超音波モータを使用した。

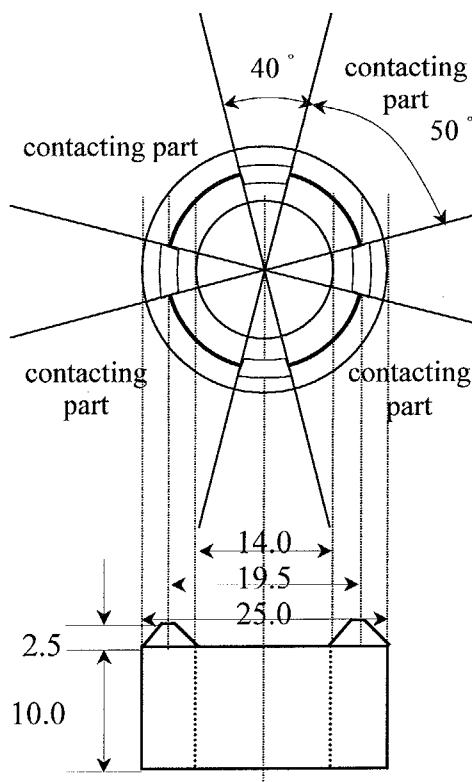
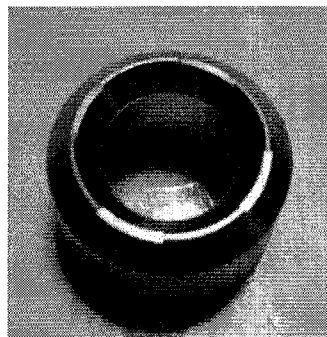


図 6. 5 提案したロータ形状

本トラクションオイルは、従来の乾燥摩擦型における面圧である数 MPa より一桁高い面圧下で使用することはすでに述べた。そこで、ここではオイルの動作に適した高い接触圧力を得るための新しい構造を提案する。図 6. 5 に新提案のロータの写真及び寸法を示す。接触面積を減少させることで、高い接触面圧を得られるようにした。



摺動面は、ステータ側にスラストベアリング用軌道輪 (SUJ2) を接着し、2000 番のエメリーペーパーで鏡面に仕上げた。ロータの材質は SUS440C 焼き入れ、硬度は HRC55~60 程度、

直径、内径は従来のロータと同じ $25\text{mm} \cdot 14\text{mm}$ 、ロータ長の方もほぼ同じ 12.5mm というサイズである。堤状に盛り上げた幅 0.30mm の接触部とし、 40° ずつ 4 カ所は接触面よりさらに 0.30mm 掘り下げてある。ステータとの接触面積は従来の 150mm^2 に対して 10.2mm^2 と $1/15$ になった。全周接触しない構造にすることで常に接触面に十分な油膜が供給され、ロータの焼き付きを防ぐことができると考えられる。全周接触する構造のものも試作したが、この場合はほとんど回転せず、ステータへの攻撃性が強く、深く溝を掘ってしまい、最終的には焼き付いてしまった。

また、ロータの高さや接触部分の幅を調節することでねじり共振周波数とたて共振周波数を合わせることが可能であり、幅 0.30mm でほぼ共振周波数は一致した。

6. 2. 2 摺動部分の形状

先ほど述べたストライベック曲線は、表面粗さと、摺動部分の曲率半径で図 6. 6 に示すような大まかな傾向がいえ。

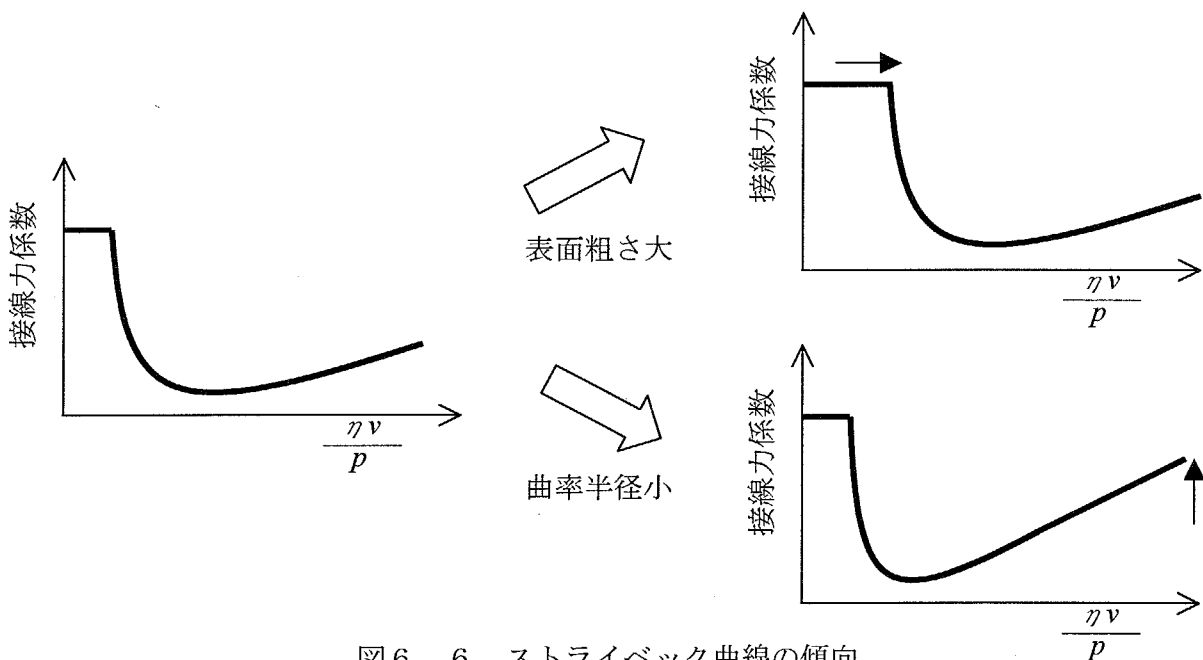


図 6. 6 ストライベック曲線の傾向

表面粗さが大きくなると、油膜が破れやすく、境界潤滑になり始める位置が変化する。

曲率半径が小さくなると、流体潤滑部分の傾きが大きくなる。

このように、摩擦特性は使用している潤滑剤の性質のみならず、摺動面の表面粗さや曲率半径によって異なってくることに注意しなければならない。

そこで次に、本実験で用いた摺動面の表面粗さを測定した結果を次に示す。

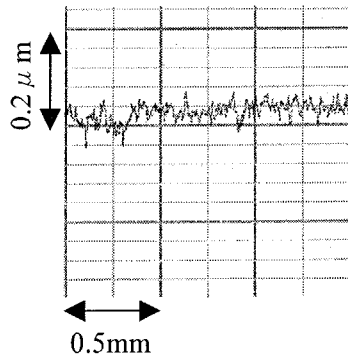


図6. 7 ステータ側表面粗さ

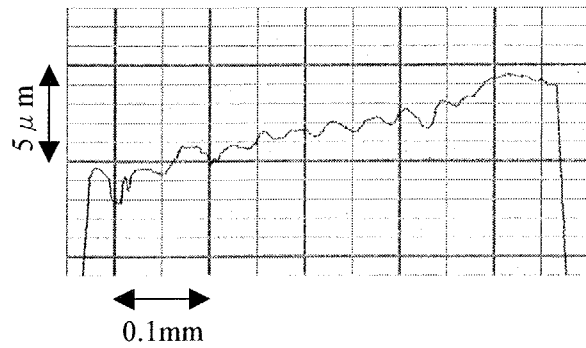


図6. 8 ロータ側表面粗さ 未使用面

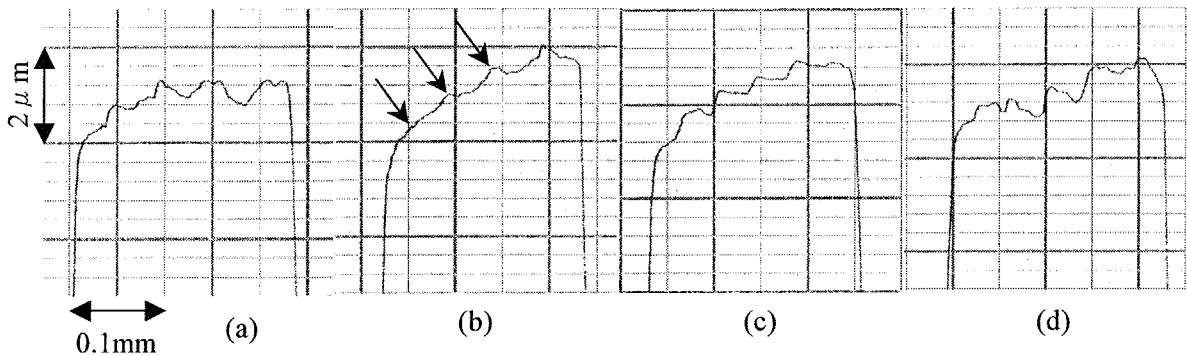


図6. 9 ロータ側表面粗さ 実験後

ステータ側は、図6. 7に示すように最大高さ R_{max} が約 $0.05 \mu m$ の表面粗さを持ち、ほぼ平坦な形状をしている。

ロータ側は、中心から外側に向かって、半径方向に測定を行った。図中左側が内側で、右側が外側に対応する。図6. 8が実験前の面であり、 R_{max} が約 $1 \mu m$ の表面粗さで、ほぼ平坦な形状をしている。（測定台が若干傾いていた為か、傾いたデータになってしまった）

実験後のロータ側摺動面の表面粗さを図6. 9に示す。4カ所を順番に測定したが、接触状態は均一ではないようである。全体的に、内側が摩耗している様子が伺える。これは、バネによる予圧でロータが変形し、主として内側がステータ側と接触していた為と考えられる。また、(d)が最も摩耗が少なく、原形をとどめているように見える。一方その反対側の(b)は最も摩耗しているようで、表面が滑らかになり、内側の角も丸くなっている。これは、コイルスプリングの使用による予圧の不均一性、中心軸の垂直度、ロータのスプリング側の面と接触面の平行度、接触面の平坦度、等の要因により接触が均一にならなかった為と考えている。

これらのデータより接触部分の曲率半径を求めことにするが、ここでは最もよく当たっている図6. 9(b)を使用した。接触点と思われる図中の矢印部分3点を取り出し、曲率半径を求めると約 $0.013m$ となった。

6. 2. 3 摺動面観測の測定系

まず図6. 10に本実験の測定系を示す。

ここでは、ロータ・ステータの接触面近傍での縦・ねじり瞬時振動速度から求めたロータ・ステータ間相対変位（ロータ・ステータ間距離）、ステータ側ねじり振動速度、そしてロータ・ステータ間にかかる電圧から求めた油膜の抵抗値である。一般に油膜が $0.1\mu\text{m}$ 存在すると $10^6\sim 10^{10}\Omega/\text{cm}^2$ と非常に高い値を示すと言われており⁹⁾、この値から油膜の存在を電氣的に十分モニタできると考えられる。これらの値を、潤滑剤にかかる面圧を様々に変えた上で、すべて同一時間軸上で比較検討する。

まず、ロータとステータの瞬時速度を 2D-LDV（2次元のレーザドップラ振動速度計）を用いて測定する。測定点は図内に示したように接触面近傍のロータ側とステータ側である。ここで、同時刻に両側の測定が行えないことから、縦振動素子に流れる電流波形から時間あわせを行った。

これらの瞬時速度の測定と同時に、ロータ・ステータ間の抵抗 r_{R-S} にかかる電圧 V_{R-S} を測定した。 V_{R-S} から r_{R-S} への換算式は、次の式(1)および式(2)より、式(3)のように求められる。

$$V_r : V_{R-S} = r : r_{R-S} = 100 : r_{R-S} \quad (1)$$

$$V_r + V_{R-S} = V_{cc} = 5.0 [\text{V}] \quad (2)$$

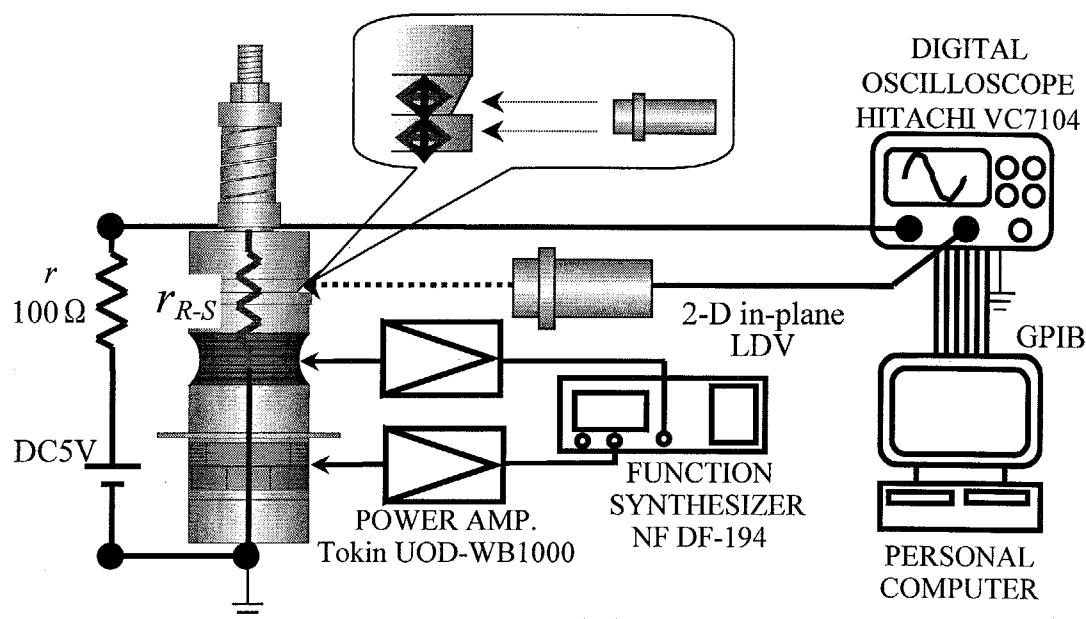


図6. 10 供試超音波モータおよび測定系

$$r_{R-S} = \frac{V_{R-S} \cdot r}{V_{cc} - V_{R-S}} \quad (3)$$

$$= \frac{100V_{R-S}}{5.0 - V_{R-S}}$$

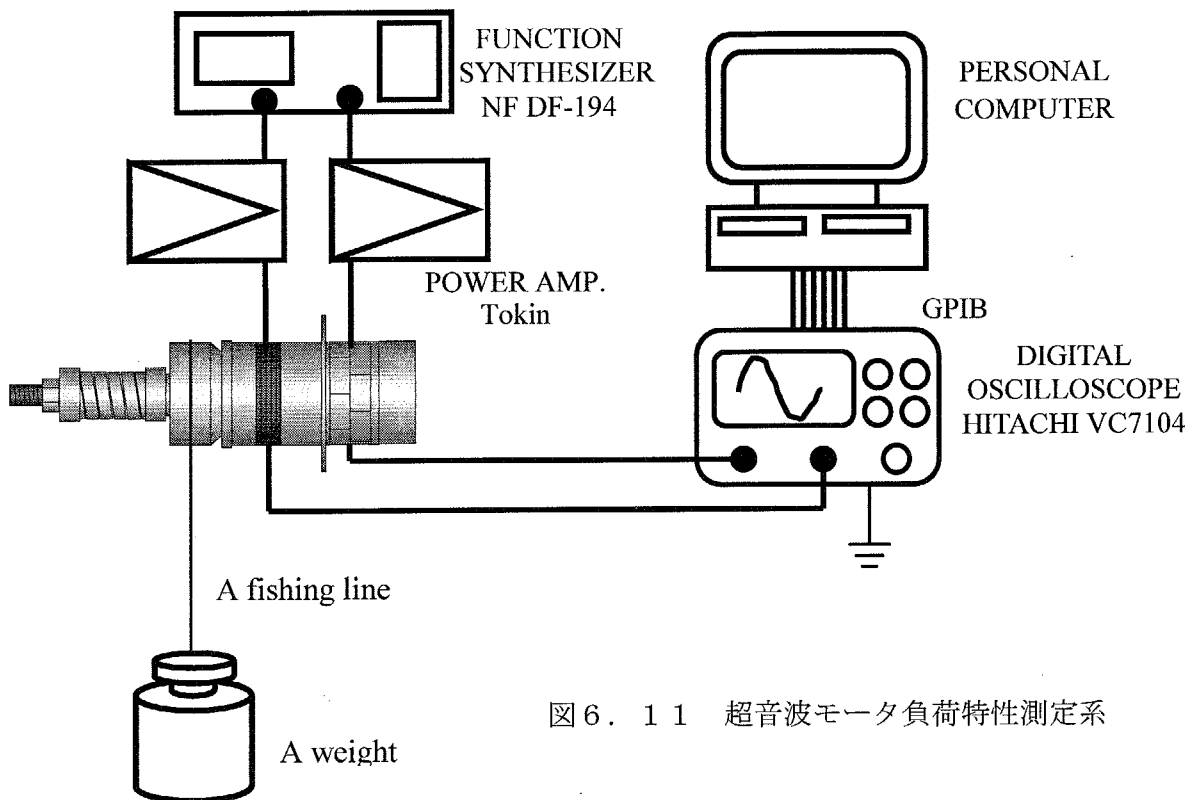


図 6. 1 1 超音波モータ負荷特性測定系

6. 2. 4 モータ特性測定系

図 6. 1 1 に超音波モータの負荷特性測定系を示す。錘を取り替えることで負荷トルクを変化させることができる。図 6. 1 1 中では省略したが、図 6. 6 と同じ測定系も組んであり、負荷特性を測定しつつ、図 6. 1 0 と同じ測定（ロータ速度、入力電力、振動速度、接触電気抵抗、等）も同時に行う。

ここで、効率の定義であるが、本来なら

$$\text{電气的入力} = \text{ねじり振動子入力電力} + \text{縦振動子入力電力} \quad (4)$$

であるのだが、ねじり振動子入力電力が数十 W であるのに対し、縦振動子入力電力が数十 mW オーダであることから、今回はほぼ 0 と見なし、以下の近似式で効率計算を行っている。

$$\text{効率} = \frac{\text{機械的出力}}{\text{電氣的入力}} \approx \frac{mg \cdot v}{\text{ねじり振動子入力電力}} \quad (5)$$

なお、 m はおもりの質量、 g は重力加速度、 v はおもりの速度である。

6. 3 動的圧力振幅を変えたときのモータと潤滑剤の挙動解析

6. 3. 1 たて振動と油膜の形成

ここで述べる摺動面の接触圧力には、バネによる予圧で生じる静的な接触圧力と、たて素子の励振により生じる動的な接触圧力の変動の2つがある。静的な圧力は、図6. 4における動作点を決定する値であり、動的な圧力変化は、摺動面の接線力係数の変動幅を決定する値である。

ここではまず、動的な圧力変化の度合いがモータ特性にどのような影響を及ぼすかを測定した。駆動周波数は21kHz近傍、ねじり振動子印加電圧は $V_T=500V_{p-p}$ 、静的な圧力は36.0MPaとし、たて振動子印加電圧を変えることで動的予圧振幅を変え、この時のモータと潤滑剤の挙動解析を行った。測定結果を図6. 12から図6. 14にまとめる。

たて素子電圧が $100V_{p-p}$ のときはほとんど接触電気抵抗値が変化せず、油膜の生成がなされていないことを表している。 $200V_{p-p}$ になると、変位と同位相に少し抵抗値の変化がみられるようになり、 $400V_{p-p}$ では3桁におよぶ抵抗値の変化が得られた。これより、たて振動が大きくなると油膜が生じていることが確認され、接線力係数の変化を期待することができる。

尚、図6. 12～15では、接触面の相対変位として縦振動の強さを表しており、いかにも接触面がミクロン単位で離れているかの印象を与えている。しかし、実際の測定は摺動面から若干離れた位置の振動速度を測定し積分により相対距離を求めているため、ここでの相対変位は摺動面間の距離ではなく、あくまで測定点間の距離である。接触状態は電気抵抗で間接的に類推する。

6. 3. 2 無潤滑摩擦時のロータ・ステータ間抵抗の観測

今回は従来と異なる新構造のロータを使用している。従って、図6. 14で得られたような接触部分の振る舞いは、ロータの新構造によるものである可能性が否定できない。そこで、

同様の駆動条件で無潤滑の場合でも測定を行ったのが図6. 15である。条件は図6. 14と同じである。

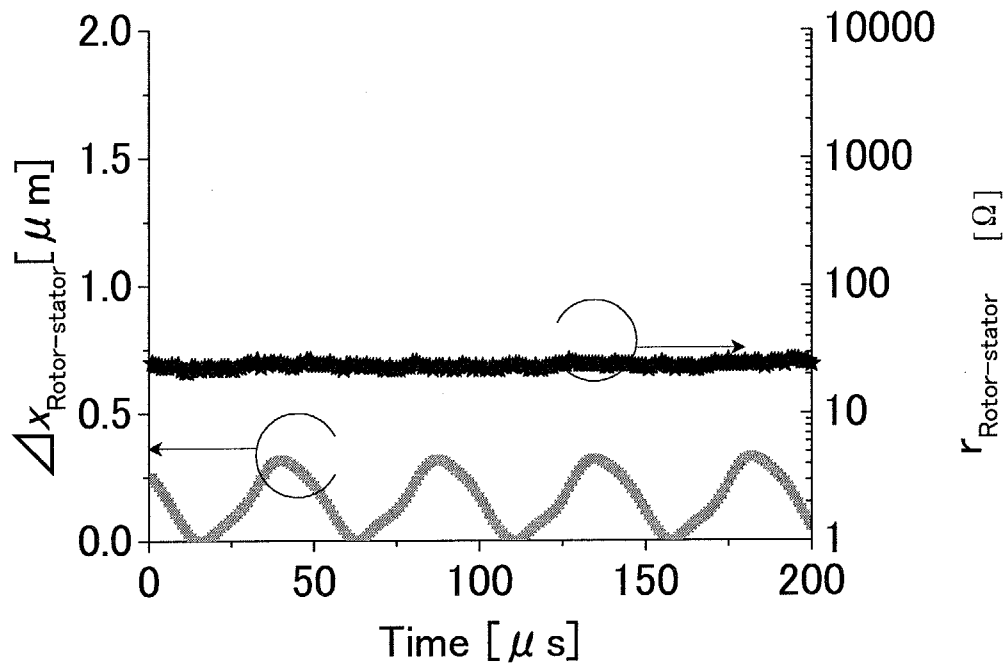


図6. 12 接触部分の相対変位および電気抵抗
たて素子印加電圧 $V_L=100V_{p-p}$

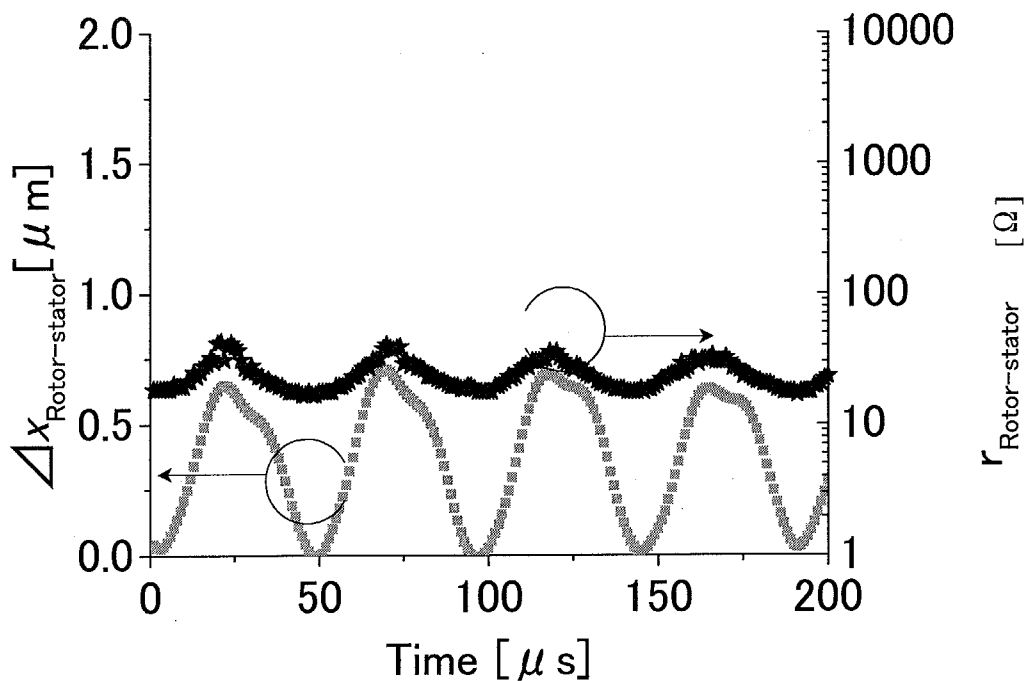


図6. 13 接触部分の相対変位および電気抵抗
たて素子印加電圧 $V_L=200V_{p-p}$

図6. 15の方が若干相対変位が大きいにもかかわらず、電気抵抗値が図6. 14ほど変化していない。これは常に金属接触の状態が続いているためと考えられる。

従って、潤滑剤を用いることで摺動面間に油膜を生じ、接線力係数変化を得られる期待ができることが確認できた。

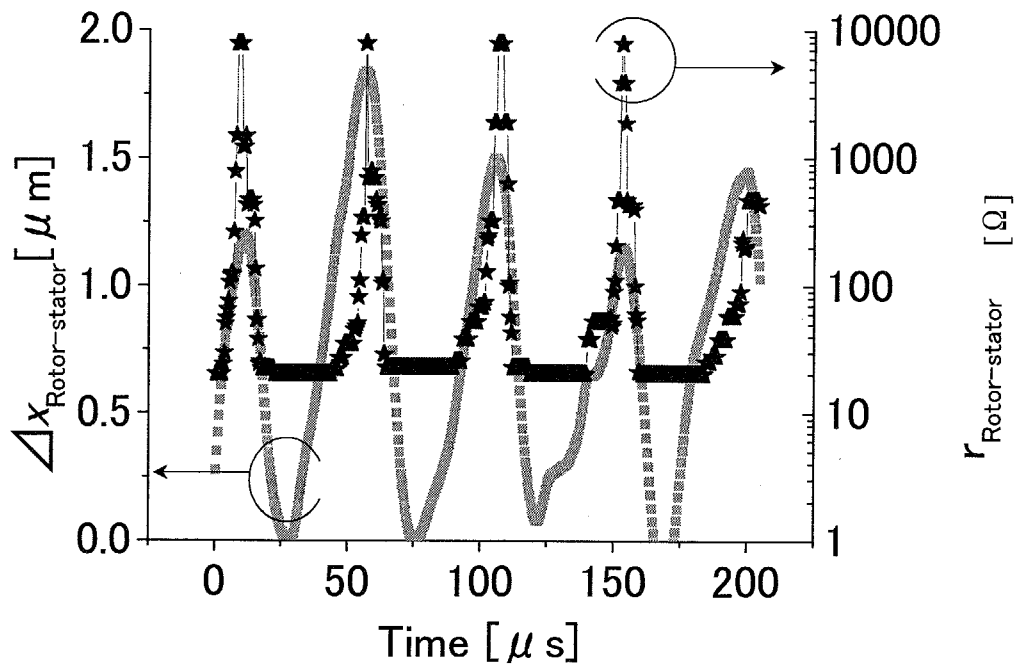


図6. 14 接触部分の相対変位および電気抵抗
たて素子印加電圧 $V_L=400V_{p-p}$

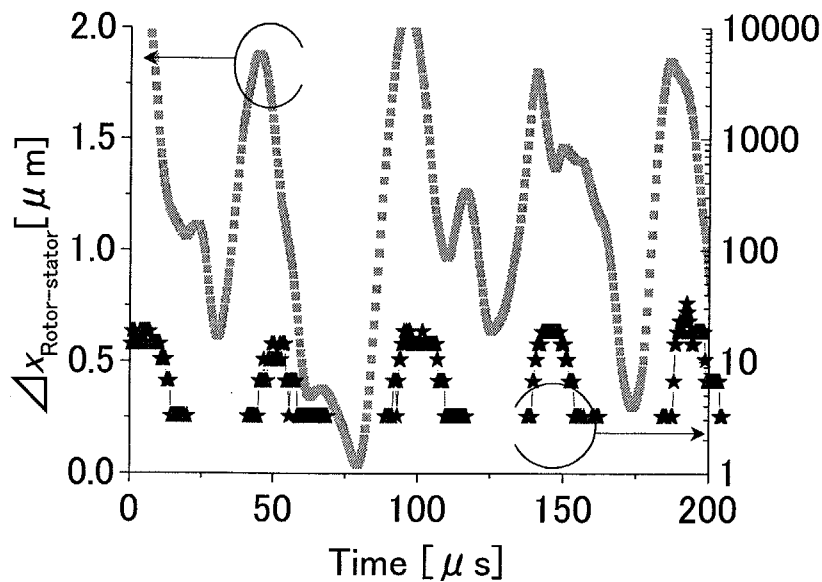


図6. 15 無潤滑状態の場合
接触部分の相対変位および電気抵抗
見かけの接触圧力 36.0 MPa

尚、無潤滑摩擦状態では静的予圧が 22.4MPa、36.0MPa の時のみ動作が確認できた。また、無潤滑状態では、摺動面が焼き付いてすぐに動作できなくなってしまうことも確認した。

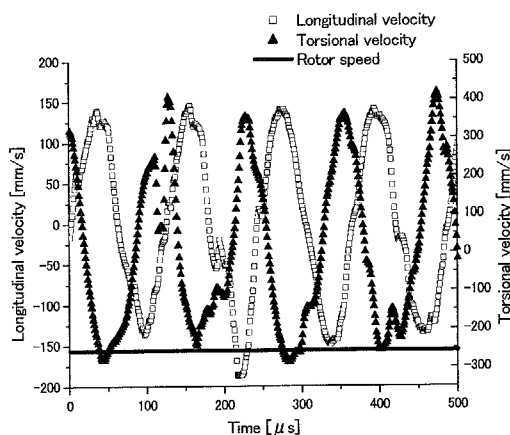
6. 3. 3 振動速度分布

摺動面近傍でのステータ側およびロータ側の振動速度を測定した結果を図 6. 16 に示す。

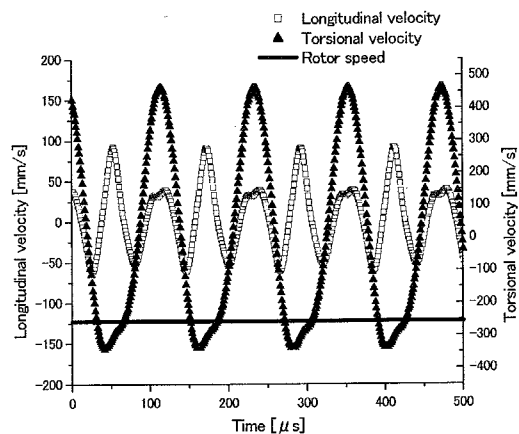
図 6. 16 (a) に示すように、摺動面の近傍でステータ側およびロータ側を測定した。

通常はロータにはねじり振動は伝達されないとされているのであるが、本実験でのロータには図 6. 16 (b) に示すように、ねじり振動が観測された。ロータは、図 6. 5 に示したように接触部分が細くなっているため、見かけの剛性が低下して変形しやすくなっている。そのためねじり振動が励起されたと考えられる。

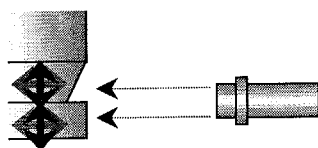
しかしこのねじり振動はロータの摺動面近傍のみで観測され、数 mm 離れるとほとんど観測されない。これは、先端から離れるとロータの剛性が上昇してねじり振動が励起されなくなったと考えられるが、直近の潤滑剤の振動を拾っている可能性もあり、今のところ断定はできない。モータ特性や摩耗特性への影響に関しては、今後の課題である。



(b) ロータ側振動速度 (たて、ねじり)



(c) ステータ側振動速度 (たて、ねじり)



(a) 振動速度測定場所 (摺動面近傍)

図 6. 16 摺動面近傍の
たて及びねじり振動速度

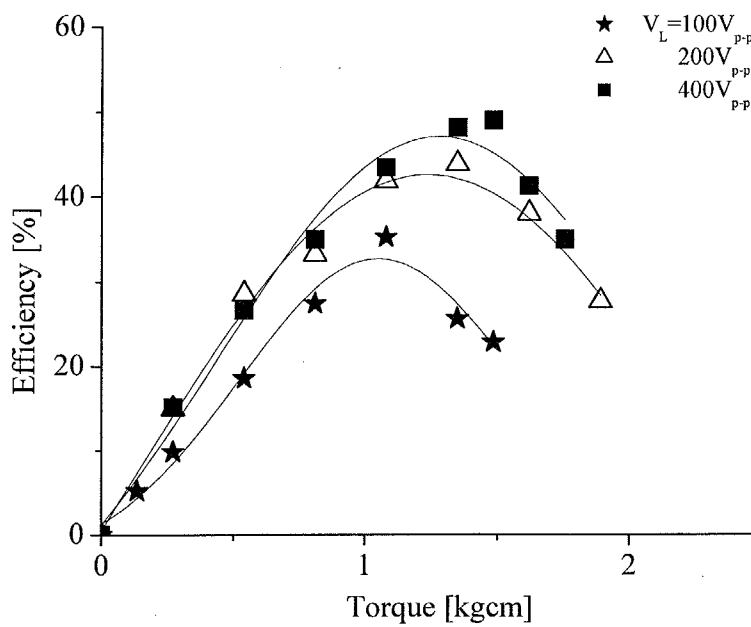


図 6. 17 各たて素子印加電圧の時の超音波モータ効率

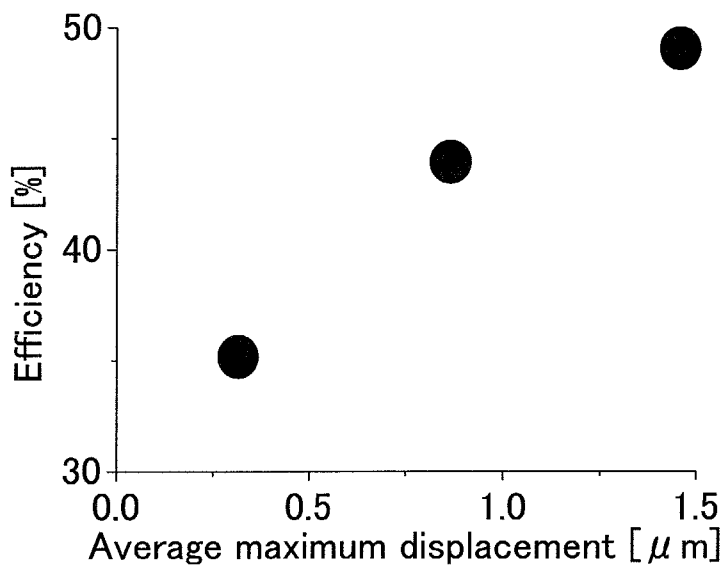


図 6. 18 最大相対変位の平均と最大モータ効率

6. 3. 4 超音波モータ特性

次にモータ特性の測定を行った。測定条件は面圧を設定後、適当な負荷をかけ、そのときの特性がよい周波数で駆動した。ねじり振動子印加電圧は $V_T = 500V_{p-p}$ 、予圧は 37.5kgf (面圧=36.0MPa) とした。図 6. 17 に効率とトルクの特性を示す。

このように、動的予圧振幅が大きくなるにつれて最大効率も上昇していることがわかる。

さらに、縦振動強度と効率との関係であるが、ここでは最大相対変位の平均値に着目する。この値が大きければ、最大油膜厚も厚くなっていることは図6. 12～図6. 14の結果より明らかであるので、図6. 18に最大相対変位の平均値に対する最大モータ効率を示す。

ここでも、ロータ・ステータ相対変位の最大値の平均が大きくなるにつれ、効率が向上していることが分かる。

次に、図6. 19に回転数とトルクの特性を示す。

油膜がほとんど形成されていない $V_L=100V_{p-p}$ の時は回転数が低く不安定だが、油膜が形成されると回転数も安定する方向へ動いている。しかし、 $V_L=200V_{p-p}$ も $V_L=400V_{p-p}$ もあまり変わらない特性となった。

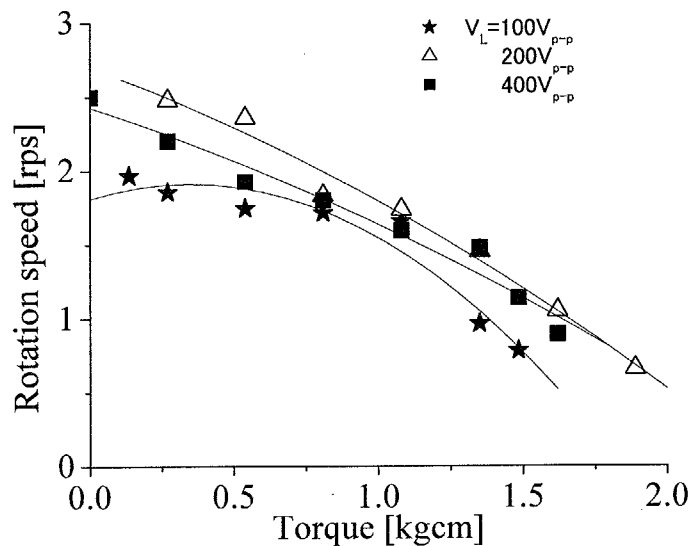


図6. 19 各たて素子印加電圧の時の超音波モータ特性

6. 4 静的予圧を変えたときのモータと潤滑剤の挙動解析

6. 4. 1 各パラメータの変化

ここではまず、静的な圧力変化の度合いが各パラメータにどのような影響を及ぼすかを測定した。バネによる予圧を変化させることで静的圧力を変え、この時のモータと潤滑剤の挙動解析を行った。動作条件は縦振動素子に $400V_{p-p}$ 、ねじり振動素子に $500V_{p-p}$ 、位相差を $90deg$ に設定後、駆動周波数は $21kHz$ から $22kHz$ 付近で、負荷をかけたときの特性が良いところで動作させた。測定結果を図6. 20～図6. 23に示す。

まずステータ側接触面近傍ねじり振動速度 v_T とローターステータ間相対変位 (= 距離) Δ

$x_{\text{Rotor-stator}}$ であるが、ほぼ理想通りの動作である同位相での動作が確認できた。動作条件は従来ではモータ効率、回転数、トルク等の出力諸特性からの判断、最適化を行っていたが、今後はこのように v_T と $\Delta x_{\text{Rotor-stator}}$ の関係を観察することでも、最適化が可能になるともいえる。

続いて、ローターステータ間相対変位を電氣的にモニタした油膜抵抗値 r_{oil} であるが、これもロータとステータが離れていることを示す $\Delta x_{\text{Rotor-stator}}$ が正の値を示すときとほぼ同位相で大きな値を示しており、このことがローターステータ間に油膜が形成されていることの現れ

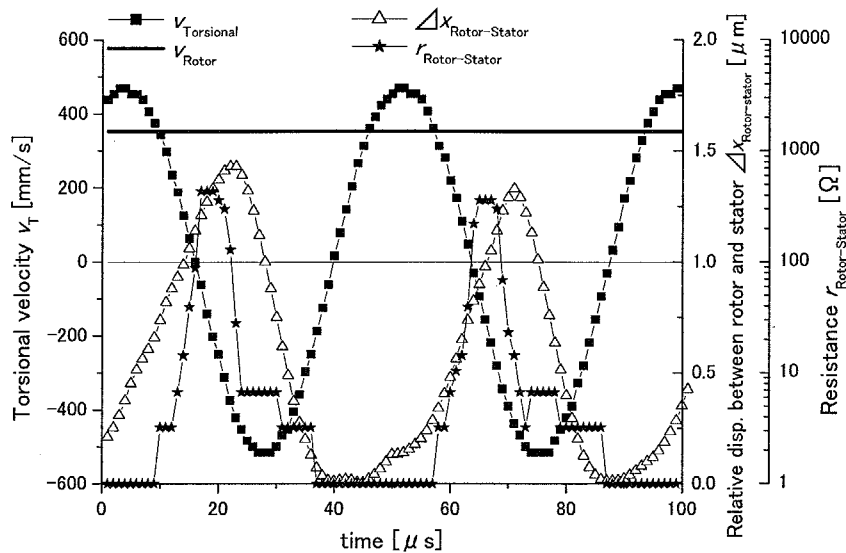


図 6. 20 ねじり振動速度、摺動面間の相対変位及び電気抵抗
見かけの接触圧力 21.6 MPa.

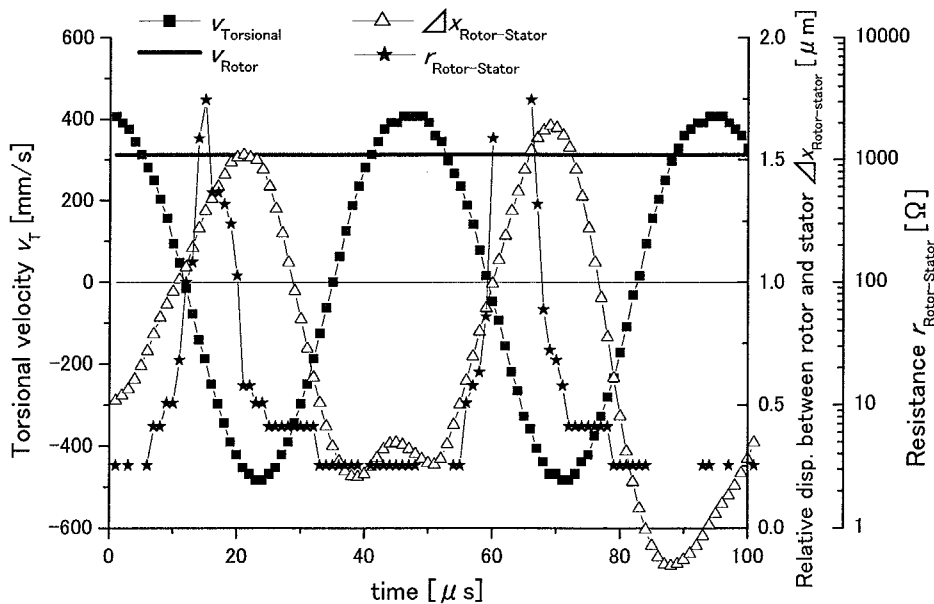


図 6. 21 ねじり振動速度、摺動面間の相対変位及び電気抵抗
見かけの接触圧力 36.0 MPa.

であるといえよう。

ここで、振動応力レベルを推定することとする。印加電圧 400Vp-p において、静的応力 50.4MPa まで油膜が存在し、64.8MPa で油膜が存在しなくなった。大胆ではあるが、これより、400Vp-p の時の動的応力振幅は $\pm 50.4 \sim 64.8$ MPa であると考えられる。

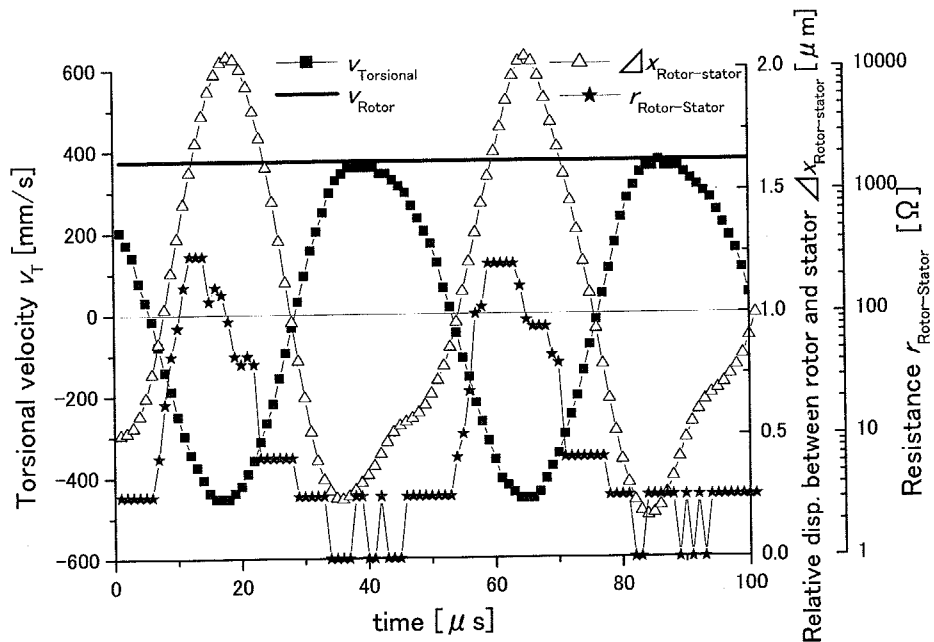


図6. 22 ねじり振動速度、摺動面間の相対変位及び電気抵抗
見かけの接触圧力 50.4 MPa.

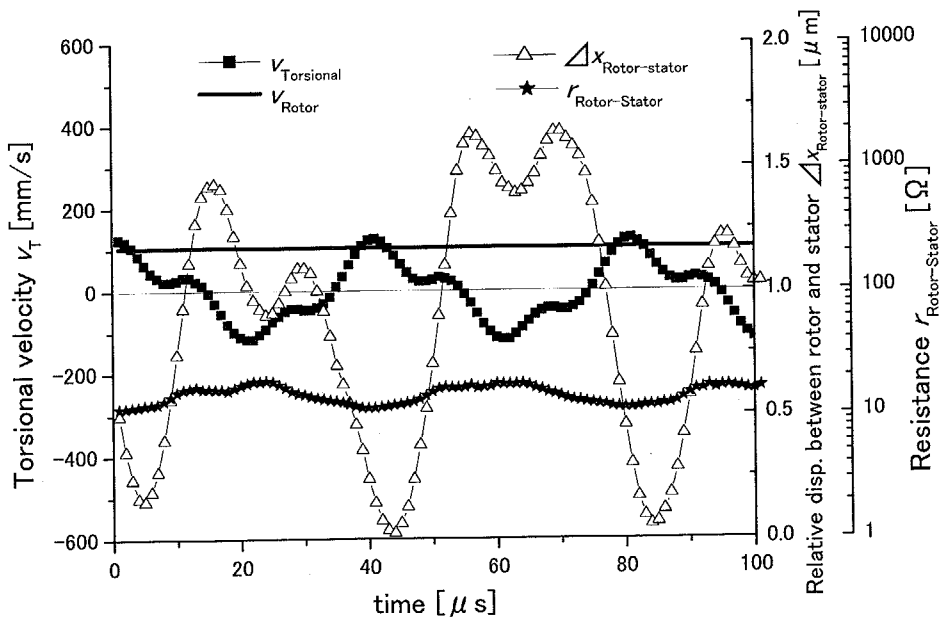


図6. 23 ねじり振動速度、摺動面間の相対変位及び電気抵抗
見かけの接触圧力 64.8 MPa.

6. 4. 2 超音波モータ駆動効率

効率とトルクを図6. 24に、回転数とトルクを図6. 25に示す。

まず効率に関してであるが、油膜が形成されていた面圧21.6MPaから50.4MPaでは面圧の上昇に伴い、効率が改善されていき、最高で約72%という値を達成した。一方で、面圧が64.8MPaになると最高効率が低下している。これは、先にも述べたとおり油膜の形成が破れ、

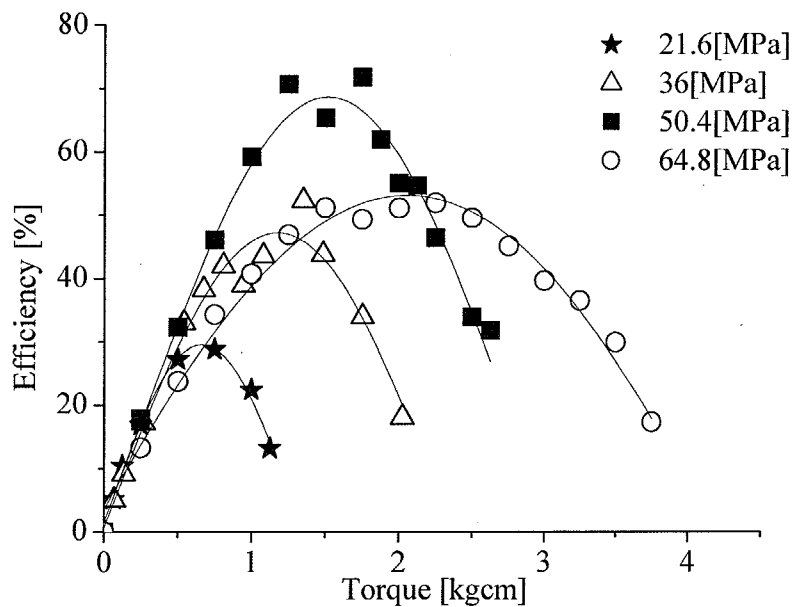


図6. 24 各静的圧力に対する効率－トルク特性

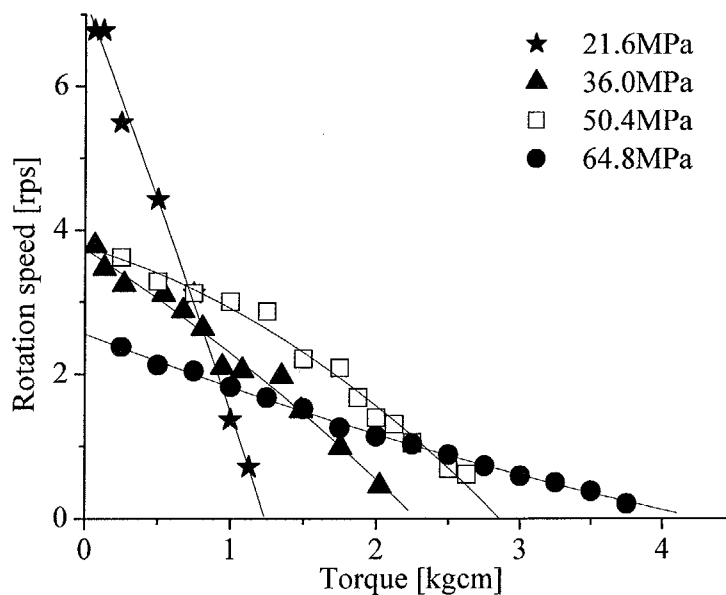


図6. 25 潤滑摩擦状態での超音波モータ特性

境界潤滑状態に移行したためと考えられる。

図6. 25については、次項での従来型との比較で述べる。

6. 4. 3 摩擦材料を用いた従来型との比較

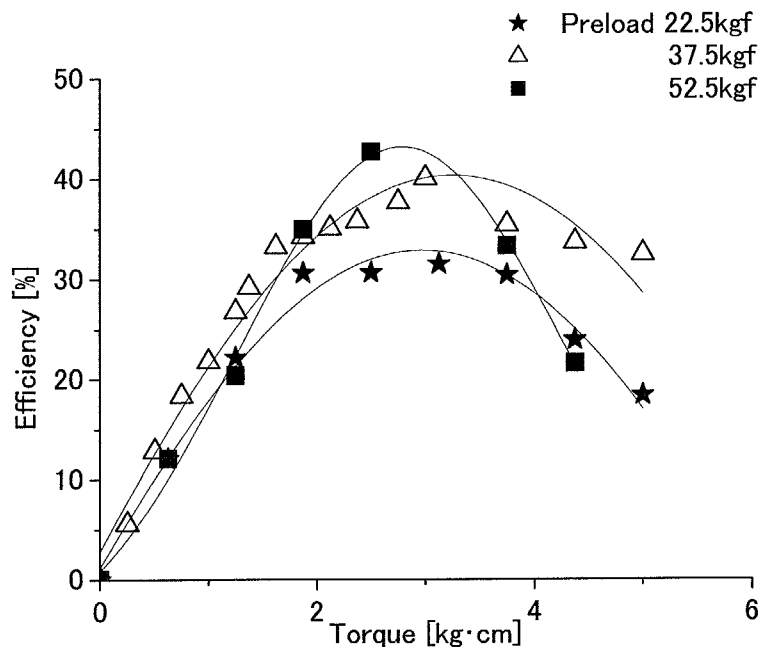


図6. 26 各予圧での超音波モータ効率
石綿ジョイントシート使用の場合

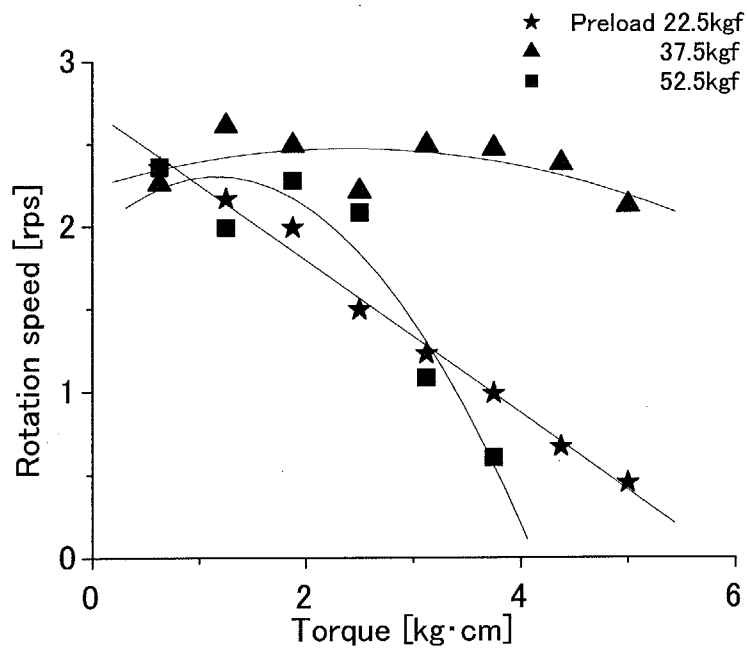


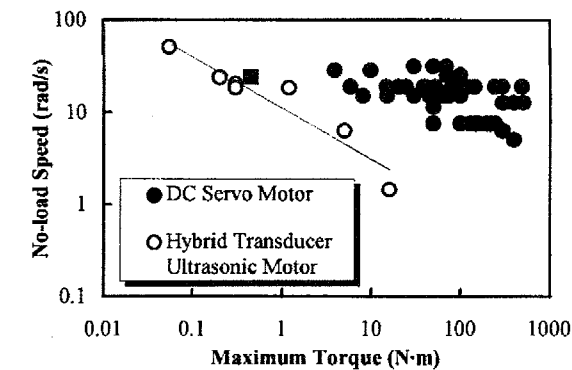
図6. 27 石綿ジョイントシート使用の超音波モータ特性

続いて、潤滑したことの効果を検討するために、従来の乾燥摩擦型（摩擦材：石綿ジョイントシート使用）での効率とトルクの関係を図6. 26に示す。

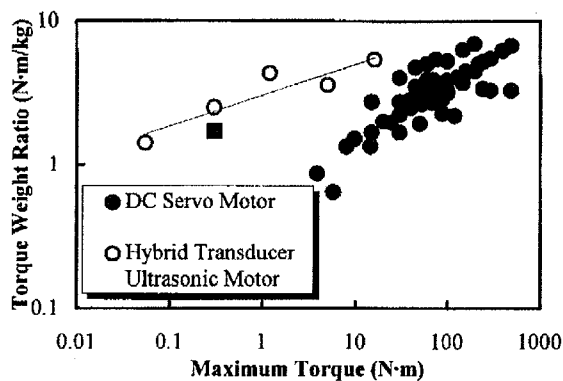
ここで、予圧が 67.5kgf の時の測定値がないが、これは予圧過大のためモータが動作せず、測定が行えなかったためである。動作状況が異なるので、同予圧同士での比較はできないが、結果より、効率の最高値は 43%程度 の値であることが分かる。効率・トルク・回転数の測定方法は潤滑動作時も乾燥摩擦時も全く同一であることから、潤滑剤を導入した結果、摩擦駆動面におけるロスが低減されたといえよう。

同様に、回転数とトルク関係を乾燥摩擦条件で測定した結果を図6. 27に示す。

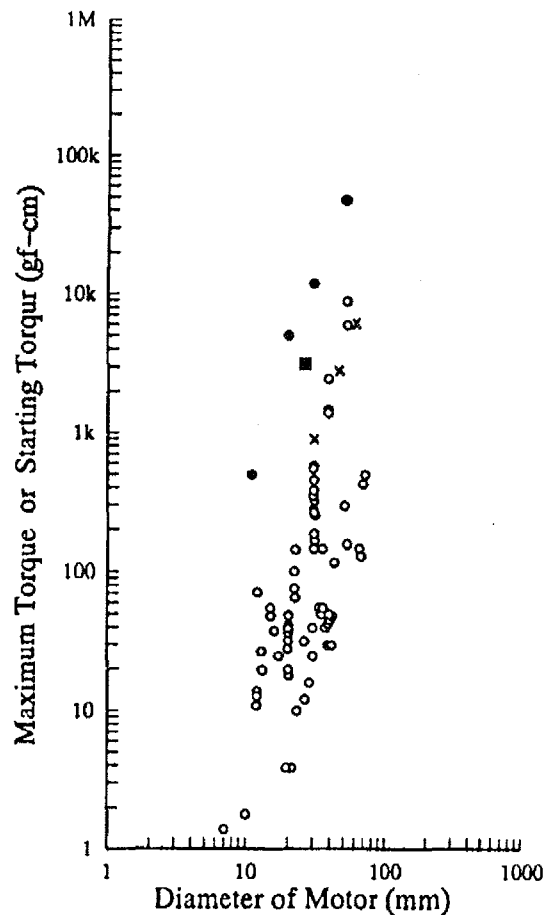
図6. 25と図6. 27の比較をすると、潤滑動作させることで回転数は上昇するということがわかった。無負荷最大回転数の比較だとおよそ2～3倍潤滑動作の時の大きい。潤滑剤使用モータと、他の超音波モータ及び電磁モータとの性能の比較を図6. 28(a)～(c)に示す。最大回転数はやや高め、最大トルク、トルク重量比はやや低めになった。



(a) 最大トルクと最大回転数



(b) 最大トルクとトルク重量比



(c) モータ直径と最大トルク

図6. 28 モータの性能比較 ■:油潤滑モータ

最大回転数がやや高めに出了のは、潤滑剤を導入した為に、摩擦駆動面におけるロスが低減された効果であると考えられるが、金属接触になって従来の高分子を利用した摩擦材料と比較して、摺動面の剛性がアップした効果も併せて考えられる。

最大トルクがやや低めに出了のは、ロータを加工して接触部分の直径（約 20mm）がモータ本体の直径（25mm）よりも小さくなったことに起因すると考えられる。現状ではまだ駆動条件の選択が十分ではないため、今後より適した条件を探ることで更によりモータ特性が得られると考えられる。

6. 5 エネルギー消費に関する解析

6. 5. 1 モータ各部における損失計算方法について

本章では、モータの各部で生じているエネルギー損失の計算方法と、潤滑剤を導入したことにより各部の損失にどのように影響を与えているかを解析する。

複合振動子型超音波モータは、以下の図 6. 29 で示すような電気等価回路で表すことができる。この回路を用いてモータ各部のエネルギー消費量を見積もることとする。

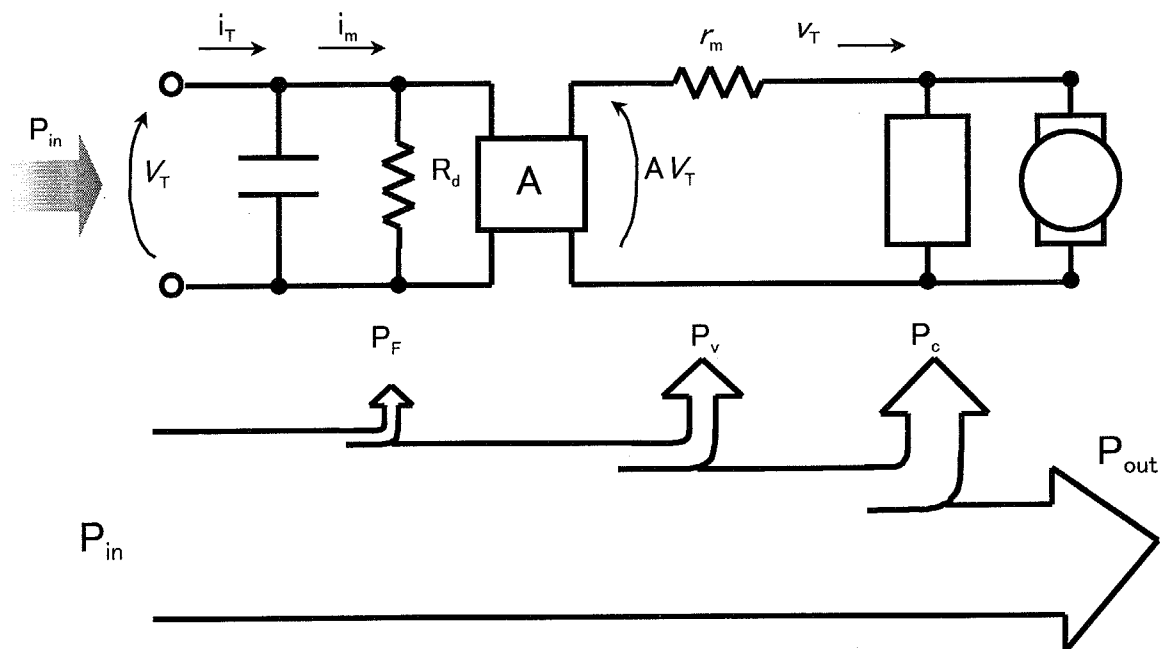


図 6. 29 超音波モータの等価回路および消費電力の内訳

なお、図 6. 29 中にあるそれぞれの文字は以下のように定義している。

i_T : ねじり入力電流 i_m : ねじり振動子有効電流 v_T : ねじり振動速度
 V_T : ねじり印加電圧 R_d : 誘電体損 r_m : 等価機械抵抗

P_F : 誘電体損 P_v : 振動損 P_c : 摩擦駆動部損

アドミタンス特性より、 R_d が以下の式で求められる。

$$R_d = \frac{1}{\omega C_d \tan \delta} = 31.7 \text{ M}\Omega \quad (6)$$

これから、誘電体損 P_F が求められる。

$$P_F = \frac{V_r^2}{R_d} = 7.88 \text{ mW} \quad (7)$$

本研究ではねじり振動子印加電圧 V_T は一定値 $500V_{p-p}$ であることより、 P_F も一定となる。

続いて、 r_m のねじり振動速度 v_T に対する関係を図 6. 30 に示す。

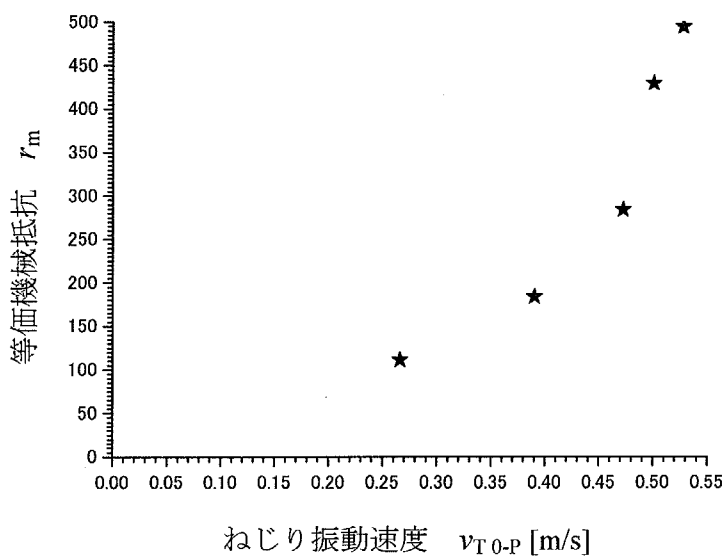


図 6. 30 等価機械抵抗のねじり振動速度依存性

この結果と、各予圧における最高効率時のねじり振動速度から振動損 P_v が求められる。入力 P_{in} 出力 P_{out} はすでに効率測定の際に求められていることから、摩擦駆動部損 P_c は

$$P_c = P_{in} - (P_{out} + P_F + P_v) \quad (8)$$

と表すことができる。

6. 5. 2 静的圧力を変えた場合のエネルギー消費

静的圧力を変えた場合のモータと潤滑剤の挙動解析を行い、モータ効率、出力等は既に求めたが、ここでは、モータに入力したパワーがどの部分でどの程度消費されたかを解析した。

これらの結果を表6. 3にまとめた。なお、各圧力における P_{in} 、 P_{out} は最高効率が得られた条件における値である。

表6. 3 各静的予圧における超音波モータの出力および損失の内訳

予圧	入力 P_{in} [W]	誘電体損 P_F [mW]	振動損 P_v [W]	出力 P_{out} [W]	摩擦損 P_c [W]
22.5kgf	46.2	7.88	0.131	14.4	31.7
37.5kgf	31.3	7.88	0.178	16.3	14.7
52.5kgf	31.3	7.88	0.225	22.4	8.62
67.5kgf	27.5	7.88	0.45	14.3	12.8

次に、各部分での損失がどの程度の大きさを調べ、まとめたのが図6. 31である。

同様に、各部の動作効率を入力電力に対する割合で調べたのが図6. 32である。

ここで、以下のように文字を定義している。

$$\text{振動子効率} \quad \eta_v = \frac{P_{out} + P_c}{P_{in}}$$

$$\text{摩擦駆動部効率} \quad \eta_f = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c}$$

$$\text{モータ効率} \quad \eta_M = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\text{摩擦駆動部損失比率} \quad \eta_c = \frac{P_c}{P_{in}}$$

$$\text{振動子損失比率} \quad \eta_v = \frac{P_v}{P_{in}}$$

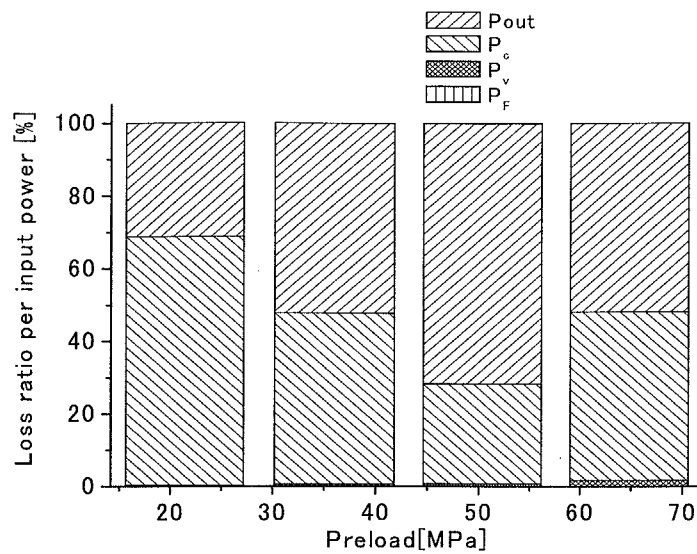


図 6. 3 1 各予圧に対する、出力および各損失の
入力に対する割合

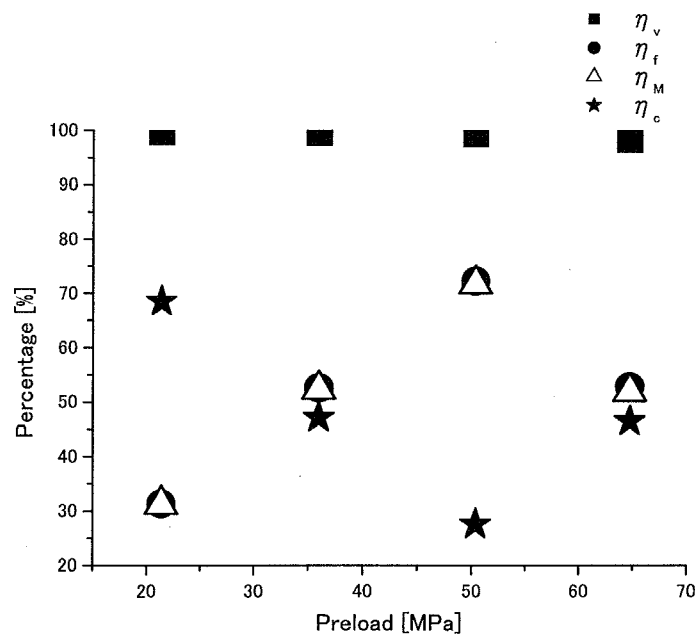


図 6. 3 2 各予圧に対する、各部の率

グラフの特徴として、圧電振動子自体の損失は非常に小さい一方で、摩擦駆動部におけるロスが非常に大きい割合を占めていることがわかる。しかし、グラフ中の★印でわかるとおり条件を最適化することで、摩擦駆動部におけるロスを大幅に低減できたこともわかる。

予圧 64.8MPa では予圧過多のため油膜がほとんど形成されず、効率が低下していた。

6. 5. 3 動的圧力振幅を変えた場合のエネルギー消費

6. 3で動的圧力振幅を変えた場合のモータと潤滑剤の挙動解析を行い、モータ効率、出力等を求めたが、ここではモータに入力したエネルギーがどの部分でどの程度消費されたかを解析した。これらの結果を表6. 4にまとめた。なお、各印加電圧における P_{in} 、 P_{out} は最高効率が得られた条件における値である。

表6. 4 各たて素子印加電圧における出力および損失の内訳

縦振動子 印加電圧 V_L [Vp-p]	入力 P_{in} [W]	誘電体損 P_F [mW]	振動損 P_v [W]	出力 P_{out} [W]	摩擦損 P_c [W]
100	31.3	7.88	6.47	11.0	13.8
200	27.5	7.88	6.47	12.1	8.96
400	27.5	7.88	7.97	13.5	6.04

次に、各部分での損失がどの程度の大きさを調べ、まとめたのが図6. 33である。

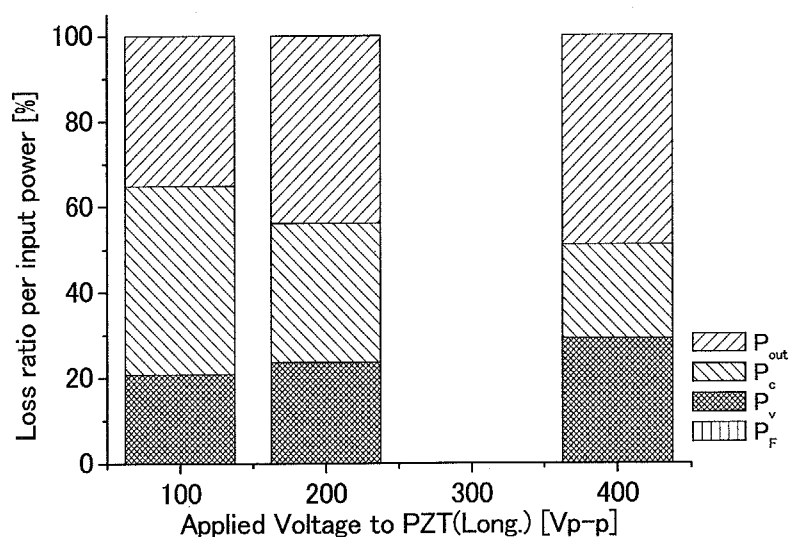


図6. 33 各たて素子印加電圧に対する、出力および各損失の入力に対する割合

同様に、各部の損失を入力電力に対する割合で調べたのが図6. 34である。

図6. 33、図6. 34からわかるとおり、動的圧力振幅の増大に伴い、摩擦駆動部におけるロス P_c の入力に占める割合が徐々に小さくなっている。これは、印加電圧に比例して動的圧力振幅が増大し、摩擦駆動部における潤滑剤の効果が増し、その結果損失が低減されたためと考えられる。

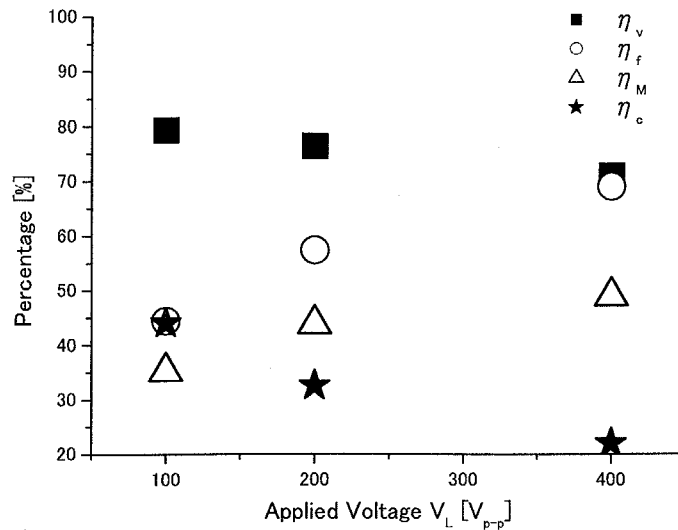


図6. 34 各たて素子印加電圧における、各部の効率

6. 5. 4 摩擦材料を用いた従来型のエネルギー消費

ここでは、石綿ジョイントシートを用いた乾燥摩擦状態でのエネルギー消費の内訳を調べ、検討を行った。これらの結果を表6. 5にまとめた。なお、各予圧における P_{in} 、 P_{out} は最高効率が得られた条件における値である。

表6. 5 各予圧における超音波モータの出力および損失の内訳

予圧	入力 P_{in} [W]	誘電体損 P_F [mW]	振動損 P_v [W]	出力 P_{out} [W]	摩擦損 P_c [W]
22.5kgf	75	7.88	4.16	23.6	47.2
37.5kgf	71.5	7.88	0.586	28.7	42.2
52.5kgf	75	7.88	0.325	32	42.7

次に、各部分での損失がどの程度の大きさかを調べ、まとめたのが図6. 35である。

同様に、各部の損失を入力電力に対する割合で調べたのが図6. 36である。

このように、乾燥摩擦状態での動作では、動作条件によらず入力電力の大部分（約 60%）が摩擦駆動部で消費されてしまっていることがよくわかる。今回のこの乾燥摩擦状態での効率測定は潤滑状態での測定条件とは同一でなく、ロータ構造が従来のドーナツ型で行っており、単純に潤滑時の結果と比較はできないが、潤滑を行い、条件を最適化することで摩擦駆動部におけるロスが大幅に低減できるということはいえと考えられる。

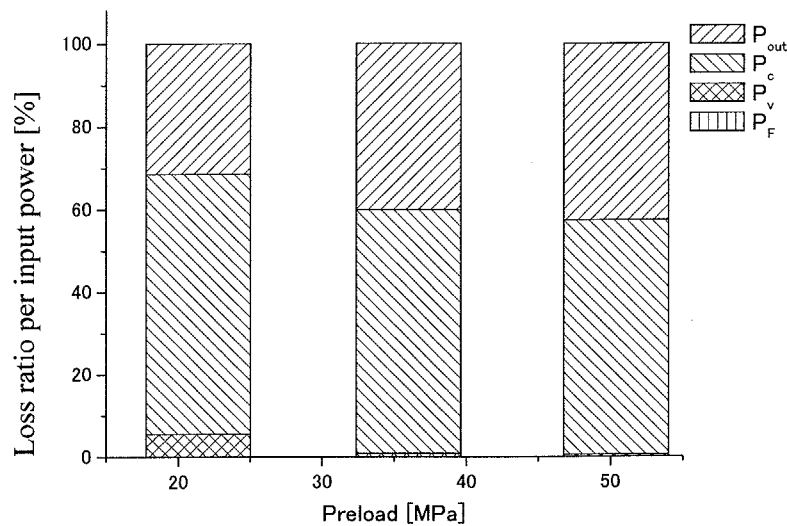


図 6. 3 5 各予圧に対する、出力および各損失の
入力に対する割合

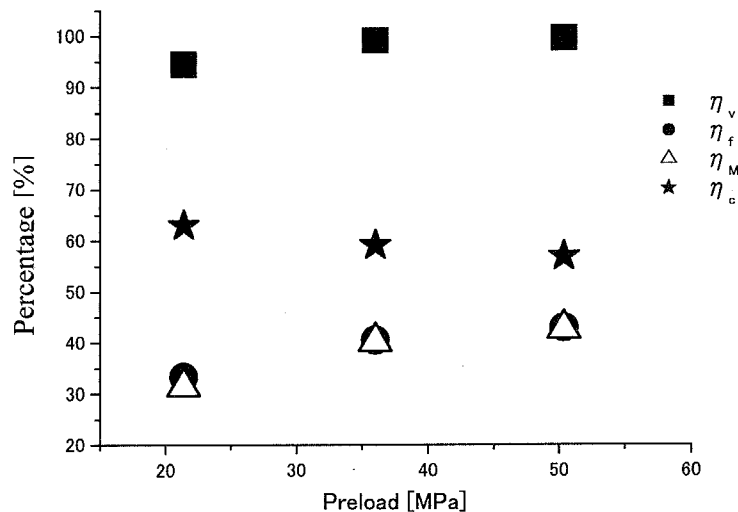


図 6. 3 6 各予圧に対する、各部の効率

6. 6 第六章のまとめ

- ・複合振動子型超音波モータの摩擦駆動面が潤滑された時の摩擦駆動機構、モータの動作と振動分布の関係、摩擦駆動面でどのような現象が起きているかという観察・解析を行った。
- ・潤滑剤に印加する静的な予圧を変えたときの摩擦駆動面の挙動解析とモータ諸特性の測定を行った。油膜が形成されなくなると効率は低下していった。このときの現象説明として、面圧の上昇により潤滑剤が流体潤滑状態から境界潤滑状態に移行したため、接線力係数が上昇し、ロスが再び上昇したためであろうと結論づけた。
- ・従来の石綿ジョイントシートを用いた乾燥摩擦型モータと潤滑したときのモータ諸特性の比較を同試験方法で行った。従来型のモータは効率が最高 43%程度であったのに対し、本

研究で提案した潤滑型は最高で約 72%という高効率を実現した。これは、潤滑により摩擦駆動面でのロスが大幅に低減できたためと結論づけた。また、回転数も最高値で約 2 倍の値を得ることができた。

- ・油膜形成には縦振動強度のみでなく、ロータ回転の関与も検討した。縦振動のみ強度を変えて励振し、ねじり振動は励振させず、ロータを回転させない時とねじり振動を励振子モータ動作させたときの油膜形成度合いの検討から、ロータの回転により潤滑剤が摩擦駆動面に浸透する結果油膜が形成されやすくなると考えられる。
- ・縦振動強度を変えることで油膜の形成度合いが変わってくるが、その度合いがモータ諸特性に与える影響を検討した。その結果、縦振動強度の上昇につれて効率が上昇していくことを確認した。
- ・潤滑剤を導入することによる、接触面での接触度合いの変化を調べた。ロータ・ステータは本研究で提案したものそのまま、潤滑剤を取り除き、無潤滑摩擦状態でのロータ・ステータ間接触抵抗を観察し比較した。その結果、無潤滑摩擦状態では接触抵抗の変化は潤滑剤を導入した場合に比べて非常に小さくなった。これは、表面粗さ同士の接触の際に潤滑剤が導入されていれば、油膜分子が介在してくるためと考えた。この結果、潤滑剤を導入することで、摩擦駆動面でのロスが低減され、効率が上昇したと考えることができる。
- ・複合振動子型超音波モータの摩擦駆動面を潤滑し、動作をおこなった場合のモータ各部におけるエネルギー消費量を、電氣的等価回路を用いて算出した。
- ・静的圧力を変えたとき、21.4~50.4MPa では予圧の上昇に伴い摩擦駆動面における損失が低下していくことがわかった。すなわち、本研究で目的とした摩擦駆動面での損失低減が実現できていることが確認できた。このことが本章で得られたモータ効率の向上の主たる原因につながったと思われる。一方、静的予圧が 64.8MPa では再び摩擦駆動面における損失が増加していた。これは油膜の形成がほとんどなされず、その結果損失が増加したものである。但し、ここで挙げた値は、本研究で使用した潤滑剤、摺動面条件にて得られた値であり、この値が最適値ではない。更に条件を詰めていけば、より高効率、高耐久のモータが構成できる可能性は十分にある。
- ・動的圧力振幅を変えたとき、振幅の増大に伴い摩擦駆動面における損失が低下していくことがわかった。この損失低下は振幅の増大に伴い油膜の形成が増加していたことと関連づけることができると考えられる。
- ・従来型の乾燥摩擦状態である石綿ジョイントシートを摩擦材料に用いた場合のエネルギー消

費の詳細を解析し、潤滑剤の効果を比較・検討したところ、摩擦駆動部でのロスが乾燥摩擦時に比べ大幅に低減できていることを確認した。

今後の課題として、以下の点が挙げられる。

- ・使用した潤滑剤の接線力係数の特性がまだ不明であるため、ここを明らかにすることで、より高効率化の足がかりになるであろう。
- ・ねらい通りの接線力係数変化が、実際の超音波モータ摺動面で起きているかどうか不明であるため、接線力係数の測定ができれば動作状態の検証になると考えられる。
- ・見かけの接触応力は数十 MPa 程度であるが、部分的には（真実接触部では）数 GPa になっていると考えられ、EHL の可能性が否定できないため、観測手段を検討したい。
- ・本章では、静的予圧、動的予圧の大きさを変化させて、最適値を見いだしてきた。しかし、表面粗さ、トラクションオイル種類、曲率半径、は 1 種類のみで実験を行ってきたにすぎないため、今後は、これらの値を変化させて測定をする必要があると考えている。
- ・更に高効率をねらうためには、表面粗さ、トラクションオイルの性質（ベースオイルの粘度、添加剤の種類、量）、曲率半径の大きさ、予圧の初期値及びその変化量、等を接線力係数の変化量を大きくする方向に調整することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Akira Endo and Nobutoshi Sasaki: "Investigation of Friction Material for Ultrasonic Motor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26 (1987) Suppl. 26-1, pp.197-199
- 2) Kentaro Nakamura, Minoru Kurosawa, Hisayuki Kurebayashi and Sadayuki Ueha: "An Estimation of Load Characteristics of an Ultrasonic Motor by Measuring Transient Responses", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.38, No.5, Sept. 1991 pp.481-485
- 3) 上羽貞行、富川義朗: "新版 超音波モータ"、トリケップス、pp.223-225
- 4) 前野隆司: 固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析, 日本音響学会誌, **54**,4 (1998) 305.
- 5) Takaaki ISHII, Tsuyoshi SHINKODA, Sadayuki UEHA, Kentaro NAKAMURA and Minoru Kurosawa: "Efficiency Improvement of an Ultrasonic Motor Driven with Rectangular Waveform", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35 No.5B (1996) pp.3281-3285
- 6) 岡本純三、中山景次、佐藤昌夫: トライボロジー入門、幸書房 (1990) p.4

- 7) 光井秀明:“金属ベルト式 CVT フルードの動向と要求性能”、トライボロジスト、**45**, 6 (2000)
pp.435-440
- 8) 岡本純三、中山景次、佐藤昌夫: トライボロジー入門、幸書房 (1990) p.110
- 9) バウデン、テーバー: “固体の摩擦と潤滑”、曾田範宗 訳、丸善 (昭和 36 年) p.237

第七章 結論

第七章 結論

「超音波モータの摩擦特性向上に関する研究」と題して、第二章から第六章まで研究を進めた結果、得られた結論について述べる。

第七章 結論

7. 1 本研究で得られた結論

- (1) 超音波振動を考慮した、超音波モータ用摩擦材料の摩耗評価式を導出した。
- (2) 超音波モータの負荷特性と摩耗評価式の関係を明らかにした。
- (3) 得られた摩耗評価法を、摩耗特性の異なる摩擦材料や異なった型式の超音波モータに適用し、オーダが一致する程度の精度で予測できることが確認できた。
- (4) セラミックスレール（ジルコニア製）を使用した実記摩耗試験（無負荷条件下）で、寿命 10000 時間を達成することができた。従来の SUS440C レールを使用した場合と比較して寿命が約 2 倍延びることを確認した。
- (5) 真空中での摺動材料として適しているセラミックスは、超音波モータ用摺動材料として使用できることを確認した。
- (6) 真空中駆動では、SUS304-CFRP、SiC-CFRP、SiC-SUS440C の組み合わせが比較的良好であった。
- (7) 高次共振振動速度波形合成超音波モータでの摩耗試験では、寿命が約 3.4 倍延びることを確認した。
- (8) 高次共振振動速度波形合成超音波モータを用いることにより、超音波モータの駆動効率が 34% から 42% へ向上することを確認した。
- (9) 従来の石綿ゴムを用いた乾燥摩擦型モータの効率が最高 43% 程度であったのに対し、提案した潤滑型は最高で約 72% という高効率を実現した。潤滑により摩擦駆動面でのロスが大幅に低減できたためと確認した。また、回転数も最高値で約 2~3 倍の値を得られた。
- (10) モータ各部におけるエネルギー消費量を、電氣的等価回路を用いて算出し、適切な予圧条件では、摩擦駆動面における損失が低下することがわかった。

7. 2 今後の課題と展望

- (1) クランク式摩耗試験器では、滑り速度の時間変化率が超音波振動による実機試験に比べて大幅に小さい。このことの影響については、今後検討が必要である。
- (2) 低摩耗化手法の一つである、高次共振振動速度波形合成駆動法は、今後は他型式の、例えば π 形超音波リニアモータや進行波型超音波モータへの適用が強く望まれている。特に進行波型超音波モータや棒状モータのようなカメラ搭載用超音波モータは、低摩耗化及び高効率化により、モータや電池の長寿命化がはかれ、実現できるとより意義のある研究成果となるであろう。
- (3) 上記提案は、モータにフランジや溝を設けることや、セラミックスや電極の配置の工夫をすることなどで解決できると予測されるが、具体的な方策・効果については、今後の研究が待たれている。
- (4) 摩擦材料が摩耗すると、摩耗に伴って押しつけ力を発生させているバネ長が変化して押しつけ力が変化してしまう。これは必要な押しつけ力を発生させる時のバネの縮み量に対して摩耗深さが無視できない大きさの時に顕著に現れる。もしもそのような条件でしかも長期間メンテナンスできない場合などは、超音波モータの特性を一定に保つことは困難になる為、バネ圧を一定に保つ為の制御が必要と考えられる。例えば、ストロークの長いバネの使用（小型化とのトレードオフ）や、非線形バネの利用が考えられる。
- (5) 潤滑駆動法はまだ始まったばかりで以下のような様々な点が未解決である。
 - ・ねらい通りの接線力係数変化が、実際の超音波モータ摺動面で起きているかどうか
が不明なため、接線力係数の測定ができれば動作状態の検証になると考えられる。
 - ・見かけの接触応力は数十 MPa 程度であるが、部分的には（真実接触部では）数 GPa
になっていると考えられ、EHL の可能性が否定できない為、観測手段を検討したい。
 - ・表面粗さ、トラクションオイル種類、曲率半径を変化させて測定をする必要がある
と考えられる。
 - ・更に高効率をねらうためには、表面粗さ、トラクションオイルの性質、曲率半径の
大きさ、予圧の初期値及びその変化量、等を接線力係数の変化量を大きくする方向
に調整することが必要であると考えられる。
- (6) 更にモータ効率を向上させるためには、次のような手法が考えられる。
 - ・摺動部分の損失を少なくするには、送る時には確実に滑らず送り、戻るときには接

触せず滑らかに戻ることが必要である。従って、接触応力の変化を大きくし、接線力係数の変化の大きい状態を実現する（例えば接触角 180° 以下）、もしくは実現できる潤滑油を使用する。もしも、戻るときの接線力係数が 0 になる潤滑剤を実現できれば、たとえ接触していても、滑りの損失は発生しなくなるので有効である。

- ・ 高次共振振動速度波形合成法を組み合わせることも有効である。

(7) 新たな手法として、複合材料等の異方性材料を摺動面に使用することが考えられる。

例えば、応力によって接線力係数が増加する材料、摺動方向によって接線力係数が増加する材料などが存在して使用可能であるならば、新たな応用が期待できる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始熱心で暖かい御指導を賜りました、東京工業大学 精密工学研究所 上羽貞行 教授、中村健太郎 助教授に深く感謝いたします。そして、本論文をまとめるにあたり、有益な御意見・御討論や励ましをいただきました、東京工業大学、中原綱光 教授、林 巖 教授、黒澤 実 助教授に深く感謝いたします。

受託研究員として東京工業大学 精密工学研究所 上羽研究室在籍中は、上羽貞行 助教授（現・教授）、黒澤 実 助手（現・助教授）、中村健太郎 助手（現・助教授）、飯田治久 技官（現・日立製作所）、博士課程 平田 拓 氏（現・山形大学 助教授）、杉本恒美 氏（現・桐蔭横浜大学 講師）、受託研究員 渡辺隆之 氏（元・アルプス電気）には御世話になりました。感謝いたします。

また、学会等の場において、山形大学 富川義朗 教授、足立和成 助教授、青柳 学 助手、東北工業大学 高野剛浩 教授、神奈川大学 辻野次郎丸 教授、芝浦工業大学 金子誠司 教授、日本大学 三浦 光 助教授、愛媛大学 野村信福 助教授、筑波大学 水谷孝一 講師、拓殖大学 渡辺裕二 講師、東北大学 足立幸志 講師、日本電気(株) 高橋貞行 氏、(株)カイジョー 橋本芳樹 氏、中島憲彦 氏、には暖かい励まし、有意義な御討論をいただきました。感謝いたします。

圧電セラミックス・超音波モータの基礎は、元・上智大学 内野研二 助教授（現・ペンシルバニア州立大学教授）より学ばせていただきました。感謝いたします。圧電セラミックス・超音波モータの製造方法からその応用までは、アルプス電気株式会社 新潟事業部 長岡工場の皆様と勉強させていただきました。諸橋毅史 係長（現・日本油脂）、梅田幹雄 氏（現・新潟職業能力開発短期大学校助教授）、中澤 徹 氏、木村洋一 氏、田中正行 氏、内山雅裕 氏、高橋利男 氏、河原田勝 氏、佐藤 昭 氏、大橋昭彦 氏、高橋伸幸 氏、行田浩樹 氏、桐生和子 氏、石黒日和 氏、古畑昌人 氏、に感謝いたします。特に大西一正 主任技師（現・主幹技師）には大変御世話になりました。心より感謝いたします。

民澤 稔 氏（(株)NF 回路設計ブロック）、村井保秀 氏（(株)富士通ゼネラル）、滝澤宏行 氏（オリンパス光学工業(株)）、松永文昭 氏（住友ベークライト(株)）、平尾善裕 氏（(財)小林理学研究所）、高三正己 氏（(株)豊田自動織機製作所）、田沼千秋 氏（(株)東芝）には、常に暖かく見守っていただき、応援して下さいました。感謝いたします。

π 形超音波リニアモータに関しましては、(株)サンシン 佐藤信一郎 氏（代表取締役社長）、

永田敦一 氏、岩見和正 氏、京田俊一 氏（元社員）、には大変お世話になりました。感謝いたします。

機械加工に関しましては、精研工場の、和田 選 氏、岡部信次 氏、長峯靖之 氏、杉原輝哉 氏、故 黄木 昇 氏には大変お世話になりました。感謝いたします。

苦楽を共に一緒に研究をした、新小田剛 氏（高効率駆動法）、松尾英一 氏（真空中駆動）、前野清元 氏（潤滑駆動法）に深く感謝いたします。

常日頃、暖かいおつきあいをさせていただいている精密工学研究所職員の皆様に感謝いたします。

平日にもかかわらず公聴会に御出席いただきました皆様に感謝いたします。内野研先輩の杉山茂孝 氏、佐田 透 氏には公聴会に駆けつけて下さいました。感謝いたします。

研究室におきましては、特別研究推進員 津田米雄 氏に大変お世話になりました。感謝いたします。そして、いつも一緒に苦楽を共にし、いつも助けていただいた、元・東京工業大学 精密工学研究所 小池義和 助手（現・芝浦工業大学 講師）、高橋久徳 技官、そして研究室の皆様に深く感謝いたします。

皆様、本当にありがとうございました。

（※御所属につきましては、平成12年頃のものです）

関連発表

本研究に関する発表

1. 論文

- [1] Takaaki ISHII, Sadayuki UEHA, Kentaro NAKAMURA and Kazumasa OHNISHI:
“Wear Properties and Life Prediction of Frictional Materials for Ultrasonic Motors”,
Jpn. J. Appl. Phys., Vol.34 No.5B (1995) pp.2765-2770 (第2章、第3章)
- [2] Takaaki ISHII, Tsuyoshi SHINKODA, Sadayuki UEHA, Kentaro NAKAMURA and Minoru Kurosawa: “Efficiency Improvement of an Ultrasonic Motor Driven with Rectangular Waveform”,
Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35 No.5B (1996) pp.3281-3285 (第5章)
- [3] Takaaki ISHII, Eiichi MATSUO, Kentaro NAKAMURA, Sadayuki UEHA and Kazumasa OHNISHI: “Characteristics of Ultrasonic Motors Driven in a Vacuum”,
Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37 No.5B (1998) pp.2956-2959 (第4章)
- [4] Takaaki Ishii, Hisanori Takahashi, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha and Kazumasa Ohnishi:
“Low Wear Driving Methods of Ultrasonic Motors”,
Jpn. J. Appl. Phys., Vol.38 No.5B (1999) pp.3338-3341 (第5章)
- [5] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
“超音波モータ用摩擦材料の摩耗予測法”、
トライボロジスト、Vol.45 No.1 (2000) pp.62-71 (第2章、第3章)
- [6] Takaaki Ishii, Seigen Maeno, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha:
“High efficiency driving method for ultrasonic motors using lubricant”,
IEEE. UFFC. (preparation for Submission) (第6章)

2. 国際会議

2. 1 口頭発表

- [1] Takaaki ISHII, Tsuyoshi SHINKODA, Sadayuki UEHA and Kentaro NAKAMURA:
“Realization of Higher Efficiency Ultrasonic Motor by Using Shaped Torsional Vibration”,
1995 World Congress on Ultrasonics, Berlin, Germany, September 4, Lecture Hall 3 (1995)

2. 2 ポスターセッション

[1] Takaaki Ishii, Eiichi Matsuo, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha:

“Characteristics of Ultrasonic Motors Driven in a Vacuum”,

1997 World Congress on Ultrasonics, Yokohama, Japan, (1CP16) p.168-169 (1997)

[2] Takaaki Ishii, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha and Kazumasa Ohnishi:

“A Wear Evaluation Chart of Friction Materials Used for Ultrasonic Motors”,

A Conference of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society (UFFC-S),

PCC-2 pp.340-341 (1998)

3. 国内会議

3. 1 口頭発表

[1] 大西一正、石井孝明、上羽貞行:

“新摩擦材料による長寿命超音波モータの開発”、

日本学術振興会 弾性波素子技術第 150 委員会 第 36 回研究会資料、p.5-10 (1993)

[2] 石井孝明、新小田剛、上羽貞行、中村健太郎、黒澤実:

“高次共振利用振動速度合成”、

日本音響学会 平成 6 年度秋季研究発表会講演論文集、(2-1-17)、p.1149-1150 (1994)

[3] 新小田剛、石井孝明、上羽貞行、中村健太郎、黒澤実:

“振動速度波形制御による超音波モータの高効率化”、

日本音響学会 平成 7 年度春季研究発表会講演論文集、(3-2-11)、p.1045-1046 (1995)

[4] 石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、大西一正:

“超音波モータに使用する摩擦材料の摩耗評価法”、

トライボロジー会議 東京 1996-5、(1E3)、p.189-190 (1996)

[5] 石井孝明、松尾英一、中村健太郎、上羽貞行、大西一正:

“真空中における超音波モータの動作特性の検討”、

日本音響学会 平成 8 年度秋季研究発表会講演論文集、(1-9-9)、p.925-926 (1996)

[6] 松尾英一、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、大西一正:

“真空中における超音波モータの動作特性の検討 (2)”、

日本音響学会 平成 9 年度春季研究発表会講演論文集、(2-2-5)、p.1061-1062 (1997)

[7] 石井孝明、松尾英一、中村健太郎、上羽貞行、大西一正:

“真空中における超音波モータの摩擦駆動特性の検討”、
トライボロジー会議 東京 1997-5、(2B4)、p.256-257 (1997)

- [8] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行：
“超音波モータ用摩擦材料の摩耗評価法”、
日本機械学会 [No.99-8] VSTech'99 振動・音響新技術シンポジウム講演論文集、211、
p.126-129 (1999)
- [9] 石井孝明、前野清元、中村健太郎、上羽貞行：
“潤滑剤利用による超音波モータの摩擦駆動効率向上”、
電子情報通信学会技術研究報告 [超音波]、US2000-6 p.35-42 (2000)
- [10] 石井孝明、前野清元、中村健太郎、上羽貞行：
“潤滑された超音波モータ摩擦駆動面の挙動観察”、
強誘電体応用会議、FMA-17 (27-A-6) (2000)

3. 2 ポスターセッション

- [1] 石井孝明、上羽貞行、中村健太郎、大西一正：
“超音波モータ用摩擦材料の評価”、(π型超音波リニアモータの場合)
日本音響学会 平成6年度秋季研究発表会講演論文集、(3-P-10)、p.1195-1196 (1994)
- [2] 石井孝明、上羽貞行、中村健太郎、大西一正：
“超音波モータ用摩擦材料の評価”、(π型超音波リニアモータの場合)
第15回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、
(PB-47)、p.255-256 (1994)
- [3] 石井孝明、上羽貞行、中村健太郎、大西一正：
“超音波モータ用摩擦材料の評価(2)” (複合振動子型超音波モータの場合)
日本音響学会 平成7年度秋季研究発表会講演論文集、(2-Q-18)、p.1131-1132 (1995)
- [4] 石井孝明、新小田剛、上羽貞行、中村健太郎、黒澤実：
“振動速度波形制御による超音波モータの高効率化”
第16回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、
(PG-10)、p.273-274 (1995)
- [5] 石井孝明、高橋久徳、James R. Friend、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
“超音波モータ用摩擦材料の評価(3)” (進行波型超音波モータの場合)

- 日本音響学会 平成8年度秋季研究発表会講演論文集、(2-P-5)、p.1065-1066 (1996)
- [6] 石井孝明、高橋久徳、James R. Friend、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
 “進行波型超音波モータに用いた摩擦材料の摩耗評価”
 第17回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、
 (PH-10)、p.181-182 (1996)
- [7] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
 “超音波モータ用摩擦材料の評価（4）”（複合振動子型超音波モータに CFRP 直角貼
 付の場合）
 日本音響学会 平成9年度春季研究発表会講演論文集、(3-Q-32)、p.1211-1212 (1997)
- [8] 石井孝明、松尾英一、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
 “真空中における超音波モータの駆動特性の検討（3）”
 第18回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、(PG4)、
 p.173-174 (1997)
- [9] 石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：
 “摺動面にセラミックスを用いた真空中駆動用超音波モータ”
 日本音響学会 平成10年度春季研究発表会講演論文集、(3-P-26)、p.1127-1128 (1998)
- [10] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行：
 “超音波モータの低摩耗駆動法”
 日本音響学会 平成10年度秋季研究発表会講演論文集、(2-Q-30)、p.1263-1264 (1998)
- [11] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行：
 “超音波モータの低摩耗駆動法”
 第19回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、(PF5)、
 p.99-100 (1998)
- [12] 石井孝明、高橋久徳、中村健太郎、上羽貞行、大西一正：
 “負荷を考慮した超音波モータ用摩擦材料の摩耗評価法”
 日本音響学会 1999年春季研究発表会講演論文集、(3-P-3)、p.983-984 (1999)
- [13] 前野清元、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：
 “潤滑された超音波モータ摩擦駆動面の挙動観察”
 日本音響学会 2000年春季研究発表会講演論文集、(2-Q-8)、p.955-956 (2000)

その他の発表

1. 論文

- [1] 内野研二、石井孝明：
“圧電セラミックスを用いた機械的ダンパー”、
日本セラミックス協会学術論文誌 96 [8] 863-867 (1988)
- [2] 大西一正、河原田勝、石井孝明、田辺靖博、安田榮一：
“MnO₂, NiO 添加 PZT-PMN 固溶体-アルミナ系ナノコンポジット”、
日本セラミックス協会学術論文誌 99 [12] 1245-1249 (1991)
- [3] Takaaki ISHII, Kazumasa OHNISHI and Sadayuki UEHA:
“Characteristics of a Bidirectional Rotary Ultrasonic Motor Using Obliquely Polarized
Piezoelectric Transducers”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.32 No.5B (1993) pp.2399-2401
- [4] Kentaro NAKAMURA, Jacques MARGAIRAZ, Takaaki ISHII and Sadayuki UEHA:
“A Stepping Ultrasonic Motor”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency
Control., Vol.44 No.4 July (1997) pp.823-828
- [5] Takaaki ISHII, Keisuke Ohtani, Kentaro NAKAMURA and Sadayuki UEHA:
“Basic Characteristics of a Hopping Ultrasonic Motor”,
The Journal of the Acoustical Society of Japan (E), Vol.18 No.5 (1997) pp.111-113

1. 1 レター

- [1] Takaaki ISHII, Keisuke Ohtani, Kentaro NAKAMURA and Sadayuki UEHA:
“Basic Characteristics of a Hopping Ultrasonic Motor”,
The Journal of the Acoustical Society of Japan (E), Vol.18 No.5 (1997) pp.111-113

1. 2 講演論文(Proceedings)

- [1] Takafumi Amano, Takaaki Ishii, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha:
“An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and Longitudinal
Vibrations of a Single Stator”, 1998 Ultrasonics Symposium Proceedings, Vol.1 of 2 pp.667-670
(1998)

1. 3 雑誌

[1] 上羽貞行、石井孝明：

“第1回 World Congress on Ultrasonics に参加して”、
超音波テクノ、VOL.8, No.6, p.59-60 (1996)

[2] 佐藤信一郎、石井孝明、小坂光二：

“位置決め分解能で nm オーダー ステージ駆動に π 形超音波リニアモータを使う”、
日経メカニカル、No.507, p.74-79 (1997)

[3] 石井孝明：

“第2回超音波世界会議 WCU97 横浜で開催”、
超音波テクノ、VOL.10, No.1, p.38-43 (1998)

[4] 石井孝明、上羽貞行：

“上羽・中村研究室（東工大）の様子（ヒューマンネットワークに基づく超音波工学のす
すめ）”、研究室紹介、
超音波テクノ、VOL.11, No.12, P.70 (1999)

2. 国際会議

2. 1 口頭発表

[1] Takafumi Amano, Takaaki Ishii, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha:

“An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and Longitudinal
Vibrations of a Single Stator”, A Conference of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and
Frequency Control Society (UFFC-S), L-5 pp.112-113 (1998)

2. 2 ポスターセッション

[1] Takaaki ISHII and Kenji UCHINO:

“ULTRASONIC MOTOR USING ALUMINA CERAMICS”,
The American Ceramic Society, 89th Annual Meeting, Pittsburgh, (36-EP-87) p.149 (1987)

3. 国内会議

3. 1 口頭発表

[1] 石井孝明、内野研二：

“全磁器製超音波モータ”、

- 日本物理学会 1987 年秋の分科会講演予稿集、(26a-M-9)、p.66 (1987)
- [2] 内野研二、石井孝明：
“圧電磁器を利用したアクティブ・ダンパー”、
日本物理学会 1987 年秋の分科会講演予稿集、(26a-M-12)、p.67 (1987)
- [3] 石井孝明、河原田勝、大西一正、赤津 隆、田辺靖博、安田榮一：
“圧電ナノコンポジットの機械的特性”、
第 4 回シンポジウム 電磁力関連のダイナミックス講演論文集、(307)、p.91-92 (1992)
- [4] 石井孝明、大西一正、上羽貞行：
“斜め分極圧電素子を用いた双方向回転超音波モータ”、
日本音響学会 平成 4 年度秋季研究発表会講演論文集、(2-6-12)、p.1031-1032 (1992)
- [5] 石井孝明、大西一正、上羽貞行：
“斜め分極圧電素子を用いた双方向回転超音波モータの動作特性”、
第 13 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集、
(A1)、p.1-2 (1992)
- [6] 大西一正、高橋利男、石井孝明：
“複合振動子型超音波モータの実用化研究”、
電子情報通信学会技術研究報告 US92-76 [超音波] Vol.92 No.376 p.45-51 (1992)
- [7] 石井孝明、大西一正、上羽貞行：
“斜め分極圧電素子を用いた超音波リニアモータ”、
日本音響学会 平成 5 年度春季研究発表会講演論文集、(3-1-19)、p.863-864 (1993)
- [8] 石井孝明、大西一正、上羽貞行：
“ LiNbO_3 単結晶を用いた複合振動子型超音波モータ”、
日本音響学会 平成 5 年度秋季研究発表会講演論文集、(1-1-20)、p.921-922 (1993)
- [9] 石井孝明、上羽貞行、大西一正：
“バイモルフ駆動 π 形超音波リニアアクチュエータ”、
日本音響学会 平成 6 年度春季研究発表会講演論文集、(3-3-7)、p.1065-1066 (1994)
- [10] Jacques MARGAIRAZ, Takaaki ISHII, Sadayuki UEHA and Kentaro NAKAMURA:
“Ultrasonic Motor for a Watch Application”,
電子情報通信学会技術研究報告 [超音波]、(US94-75)、Vol.94 No.390 p.39-44 (1994)
- [11] 大谷敬亮、石井孝明、上羽貞行、中村健太郎：

“フィン型マイクロ超音波モータ”

日本音響学会 平成8年度春季研究発表会講演論文集、(1-10-4)、p.933-934 (1996)

[12] 里信 純、石井孝明、上羽貞行、中村健太郎：

“振動系の改善と駆動法の検討

—複合振動子型超音波モータのトルク合成法の検討（Ⅱ）—”、

日本音響学会 平成8年度春季研究発表会講演論文集、(1-10-12)、p.949-950 (1996)

[13] 里信 純、真金文雅、小池義和、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：

“ねじり振動パワー合成法の検討”

日本音響学会 平成8年度秋季研究発表会講演論文集、(1-9-12)、p.931-932 (1996)

[14] 天野隆史、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：

“複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作（Ⅱ）”

日本音響学会 平成10年度春季研究発表会講演論文集、(2-3-1)、p.1019-1020 (1998)

[15] 青木浩二、石井孝明、上羽貞行、道畑浩司：

“落槌試験法によるスチレン系ゲルの粘弾性特性の測定”、

日本音響学会 平成10年度秋季研究発表会講演論文集、(3-3-9)、p.767-768 (1998)

[16] 青木浩二、石井孝明、上羽貞行、道畑浩司：

“落追試験法によるスチレン系ゲルの粘弾性特性の測定（2）”、

日本音響学会 1999年春季研究発表会講演論文集、(2-8-5)、p.655-656 (1999)

[17] 高橋大三、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、落合 勉、平尾善裕：

“ポリ尿素圧電薄膜による超音波送受特性の検討”、

日本音響学会 1999年秋季研究発表会講演論文集、(2-9-5)、p.1019-1020 (1999)

[18] 高橋大三、小杉 勉、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、平尾善裕、落合 勉：

“ポリ尿素圧電薄膜の超音波トランスデューサへの応用”、

日本学術振興会 弾性波素子技術第150委員会 第66回研究会資料、p.1-4 (2000)

[19] 尹 喆鎬、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、明石幸治：

“超音波リニアモータの高出力化の検討”、

日本音響学会 2000年春季研究発表会講演論文集、(3-JA-2) (2000)

[20] 羽田浩二、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：

“高出力多自由度超音波モータの小型化”、

日本音響学会 2000年春季研究発表会講演論文集、(3-JA-3) (2000)

3. 2 ポスターセッション

- [1] 石井孝明、田中 繁、大西一正：

“アルミナー圧電セラミックスコンポジットの微構造と機械的特性”、
第29回セラミックス基礎科学討論会講演要旨集、(1A29) p.27 (1991)

- [2] 石井孝明、田中 繁、大西一正

“アルミナー圧電セラミックスコンポジットの微構造と圧電特性”、
第29回セラミックス基礎科学討論会講演要旨集、(1A30) p.28 (1991)

- [3] 花田秀人、中村健太郎、黒澤 実、上羽貞行、石井孝明、大西一正：

“円板状たわみ振動子を用いた弾性フィン超音波モーターモーターの構成と動作特性”、
日本音響学会 平成5年度春季研究発表会講演論文集、(2-P-10)、p.913-914 (1993)

- [4] 渡辺隆之、石井孝明、大西一正、中村健太郎、黒澤 実、上羽貞行：

“ ϕ 5 複合振動子型超音波モーターの試作”、
日本音響学会 平成5年度春季研究発表会講演論文集、(2-P-13)、p.919-920 (1993)

- [5] 藤原信緒、中村健太郎、黒澤 実、上羽貞行、石井孝明、大西一正：

“複合振動子型超音波モーターの高トルク化(Ⅲ)”、
日本音響学会 平成5年度春季研究発表会講演論文集、(2-P-14)、p.921-922 (1993)

- [6] Jacques MARGAIRAZ, Takaaki ISHII, Sadayuki UEHA and Kentaro NAKAMURA:

“Ultrasonic Stepping Motor for a Watch Application”,
日本音響学会 平成6年度秋季研究発表会講演論文集、(3-P-11)、p.1197-1198 (1994)

- [7] 高橋久徳、石井孝明、小池義和、上羽貞行、中村健太郎：

“超音波モーターを用いた人工心臓用ポンプの検討”、
日本音響学会 平成7年度春季研究発表会講演論文集、(2-P-20)、p.1089-1090 (1995)

- [8] 木原 学、小池義和、石井孝明、上羽貞行、中村健太郎：

“複合振動子型超音波モーターの同期運転”、
日本音響学会 平成7年度春季研究発表会講演論文集、(2-P-22)、p.1091-1092 (1995)

- [9] 荒牧千恵、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行：

“圧電セラミックス諸定数の振動応力依存性の検討”
日本音響学会 平成8年度春季研究発表会講演論文集、(3-P-8)、p.1107-1108 (1996)

- [10] 石井孝明、天野隆史、中村健太郎、上羽貞行：

“複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作”

日本音響学会 平成9年度秋季研究発表会講演論文集、(2-P-27)、p.1171-1172 (1997)

[11] 小杉 勉、高橋大三、石井孝明、中村健太郎、上羽貞行、平尾善裕、落合 勉：

“ポリ尿素圧電薄膜による振動板トランスデューサの検討”

日本音響学会 2000年春季研究発表会講演論文集、(2-Q-14)、p.967-968 (2000)

3. 3 その他

[1] 石井孝明：

“Wear Properties and Life Prediction of Frictional Materials for Ultrasonic Motors”,

第50回固体アクチュエータ研究部会、日本工業技術振興協会、平成7年11月22日

超音波モーターの効率改善

東工大、最大で72%にアップ

東京工業大学精密工學研究所の上羽貞行教授、石井孝明助手らは、超音波モーターに、最大で七二%にアップさせることで、駆動効率を向上した。超音波モーターはトルクが大きく、

ブレーキ機構が不要なため、従来の電気モーターと異なる用途開発が期待される。超音波モーターは駆動音も小さいため、カメラのオートフォーカスで使用されている。また最近では、自動車のハンドルの上下や、半導体製造装置の搬送などに使われ始めてい

る。電気力を力に変換するには、電気モーターが効率九割以上と優秀だが、ほとんどの場合は歯車などを介する必要があつて結局は五割程度に下がる。これに対して、超音波モーターは直接回転を起こす。超音波モーターは、ねじり振動を繰り返す振動子を、たて振動子でタイミングをあわせて円盤に接触させて回転を起こすのが基本原理。ねじり振動子の角速度が大きいときだけ接触するようにタイミングが合えば理論的には八〇%の駆動効率が可能とされるが、実際には速度差による摩擦ロスもあつて五〇%に止まっていた。

また、機械オイルの性能を十分に生かすために、面同士を全体的に接触するのではなく、突起をつけて接触時の圧力が高くなるように工夫した。この結果、従来の乾燥摩擦では四三%の効率だったモーターが、七二%に改善した。パワー向上のほか、消費電力の低減、発熱の抑制などのメリットがあるという。

超音波モータの摩擦特性向上に関する研究

平成 12 年 5 月 9 日	初 版 発 行
平成 12 年 6 月 23 日	第 2 版発行
平成 12 年 8 月 23 日	第 3 版発行
平成 13 年 7 月 9 日	第 4 版発行

石井 孝明

東京工業大学 精密工学研究所