

氏 名	ほん だ とも み 巳
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学位論文題目	超音波駆動のトライボロジー
指 導 教 官	東北大学教授 加藤 康司
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 中村 僖良

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

従来, 超音波の特長を利用した工業的応用として, 超音波洗浄機や超音波加工機などがあげられるが, それらに加えて近年では超音波を駆動に応用した超音波駆動が注目を集めている。

超音波駆動は, 圧電素子によって発生させられた超音波振動を摩擦力を介して駆動力に変換するものである。その特徴として, 小型軽量, 低速・高トルク, 高制御性, 静粛性, 磁力線を発生しないなどの点があげられる。そこで, 宇宙用アクチュエータや産業用ロボット, 精密位置決め装置, 自動車電装品, カメラのレンズやフロッピーディスクの駆動装置への応用が期待されている。一方, 超音波駆動は, 接触面における摩擦により駆動力を伝えているため, 性能及び寿命を向上させるためには接触面の形状, 接触圧力, 摩擦係数及び接触面における磨耗を制御することが設計上の重要点になる。そこで本研究では, 伝達特性や寿命に影響を及ぼす種々の因子を取り上げ, その中でも最も超音波駆動の本質に関わると思われる接触部の剛性や超音波波形に注目し, それらが伝達率及び駆動面の磨耗に及ぼす影響について実験的に明らかにし, 超音波駆動を設計する際の設計指針を得ることを目的とした。

第 2 章 進行波型超音波による摩擦駆動における摩擦磨耗特性に及ぼす接触部の剛性の影響

本章では, 進行波型超音波駆動を構成しているロータとステータの形状を変えることによって各々の接触部の剛性を変化させて様々な駆動条件で実験を行い, 摩擦による伝達率と磨耗特性に影響を

及ぼす主要因子を解明するとともに、モータの使用限界を決める上で一つの指針となる磨耗形態の分類を行った。

図1はフランジ状ばね長さを変化させることにより垂直方向の剛性を変えたときの摩擦による伝達率 η と回転むら ξ の時間変化を示したものである。垂直方向の剛性の増加に伴い伝達率が増加する傾向にあり、 $L_s=2.05\text{mm}$ から $L_s=1.15\text{mm}$ まで変化したときの伝達率の増加は、約40%である。また回転むらは伝達率の場合とは逆に、剛性の増加に伴い増加する傾向にある。磨耗率も剛性の増加に伴い低下することがわかった。これは、ロータの剛性が増加したことによってステータとの接触時間が減少したためである。

また、本章で用いた超音波駆動の磨耗形態は図2のようにすべり率によって3つの形態に分類することができる。第一にロータとステータの両表面において平滑な面が得られるSmoothing領域、第二にロータ表面においては島状の移着物が形成され、ステータ表面では軽度のスクラッチ痕が観察されるMild abrasion領域、第三にロータの表面においてはフレーク状の移着物が形成され、ステータ表面では明かなスクラッチ痕が観察されるSevere abrasion領域の3つの領域に分けることができる。図3はこのような磨耗のモデルを示す。これらの結果から、高伝達及び低磨耗という点から接触部の剛性は高い方がよいということが言える。

第3章 超音波による摩擦駆動における摩擦磨耗特性に及ぼす円形超音波の振幅の影響

実際の超音波駆動において、ステータ表面の楕円運動における周速度とロータの回転速度に差が生じている場合、速度差によって生じるすべりを損失となって摩擦による伝達率を低下させているものと思われる。つまり、ステータにおいて形成される楕円運動がどのような状態でロータに接触するのかということや、どのような接触形態の時に摩擦による損失が生じるのかということが重要であると考えられる。そこで本章では、接触形態の違いによる摩擦抵抗と磨耗の関係ということに重点をおき、楕円運動の接触の仕方の優劣を調べることを目的とし、超音波の波頭を円運動としてモデル化し、振幅を変化させられるPin-on-disk型の実験装置を考案した。

ディスクの磨耗はピン材料の磨耗による移着が支配的であることから、あらさ曲線において初期面より上部に突出している部分を最大突起高さ h_{max} として新たに定義した。図4は振幅 $2a$ と最大突起高さ h_{max} の関係を示す。最大突起高さ h_{max} はある振幅(0.35, 0.45 μm)のときに高い値をとり、振幅が0.53 μm の場合に低い値をとることがわかる。また、図5は振幅 $2a$ と摩擦抵抗 F の関係を示す。摩擦抵抗においても図4と同様の傾向がみられた。これらの結果から、摩擦による損失及び磨耗の低減という点から、超音波の振幅は大きい方がよいということが言える。

第4章 超音波による摩擦駆動における摩擦磨耗特性に及ぼす楕円形状の影響

本章では、単一の楕円振動に注目し、その楕円形状を変化されたときの摩擦磨耗特性を調べ、摩擦力の荷重依存性と楕円形状依存性を見いだすことにより、高摩擦力を発生させる楕円形状や楕円サイズを提案することを目的とし、超音波の波頭の楕円運動をモデル化した実験方法を開発した。

図6は変化させた楕円形状の種類を示している。図のように縦長のものから横長のものまで5種類とした。図7は楕円比 δ を変化させたときの楕円比 δ と摩擦力 F の関係を示す。楕円形状が駆動方向に長く扁平であるほど大きな摩擦力が生じることがわかる。 $\delta=2.0$ の場合には、 $\delta=1.0$ のときの約2.5倍の摩擦力が生じた。また、楕円比 δ を変化させたときの磨耗痕の観察から、駆動方向に長く扁平な楕円になるほど、移着による被膜が形成されやすくなることがわかった。これらの結果から、大きな摩擦力という点からは楕円形状は駆動方向に長く扁平である方がよいと言える。

第5章 超音波駆動の設計指針

第2章から第4章において現在までほとんど明らかにされていなかった「超音波駆動のトライボロジー」について3つの観点からアプローチし、それらの因子が超音波駆動の摩擦磨耗特性に及ぼす影響の解明を試みた。本章ではそこで得られた知見より、超音波駆動のための設計指針を摩擦磨耗という観点から述べている。これらを簡潔にまとめたのが表1である。

例えば接触部の剛性についてであるが、縦方向の剛性を変化させた場合、これは直接ロータとステータの接触時間に関わってくる。理想的には超音波駆動における楕円振動の頂点のみで両者が接触する場合に、最も効率よく駆動力を伝えられるはずである。従って、どちらの材料に関しても弾性変形、塑性変形ともに少ないものが望ましいと考えられる。また、横方向の剛性を変化させることは、そのシステムの出力可能な駆動力に関わってくる。表面である接線力を受けた場合に、横方向の剛性が低くなるほど、せん断歪に対する変形も大きくなり、変形のみを行うことになる。そのほかに負荷がかかった場合についても、横方向の剛性が低くなると、その変形にエネルギーを消費され伝達率は低下する。従って駆動系の剛性のみならず材料を選択する際も、伝達率という立場からは、変形の少ない剛性の高い材料が望ましい。

第6章 結 論

本章は、本研究の主たる結果をまとめたものである。

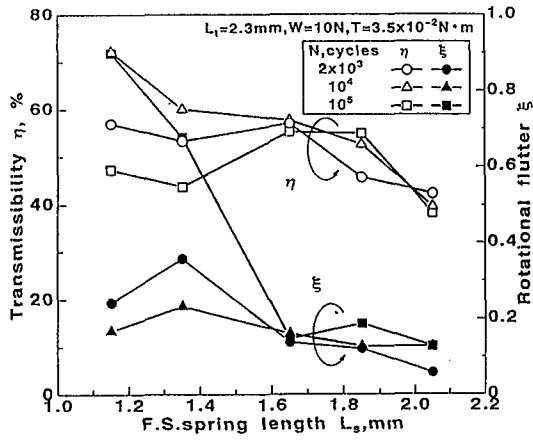


図1 摩擦による伝達率及び回転むらとフランジ状ばね長さの関係

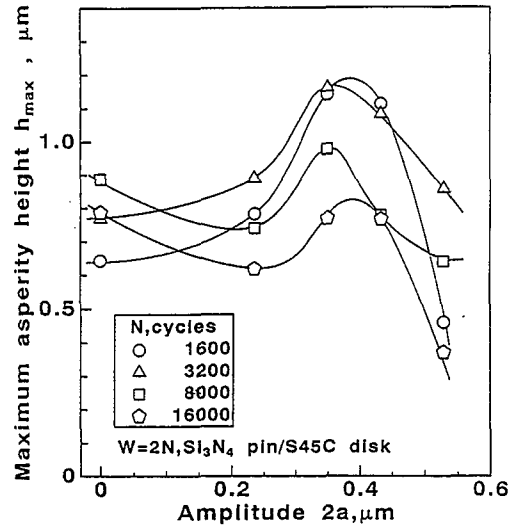


図4 振幅と最大突起高さの関係

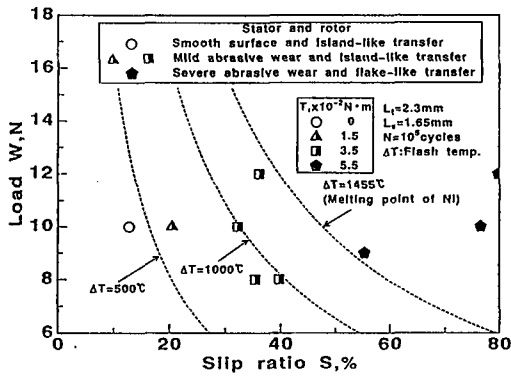


図2 負荷トルクを変化させたときのステータ及びロータの摩耗形態

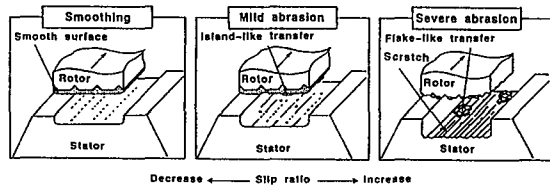


図3 ステータ及びロータの摩耗モデル

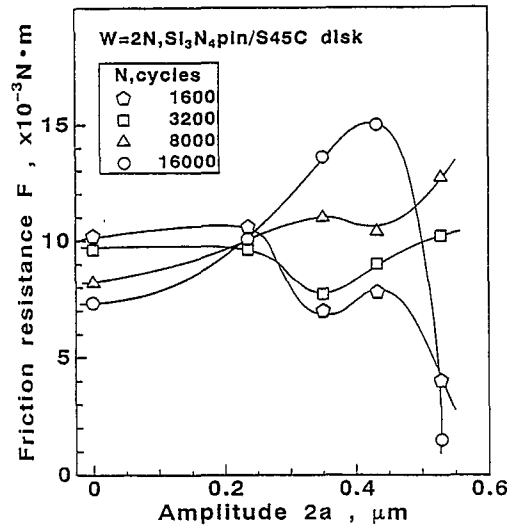


図5 振幅と摩擦抵抗の関係

表1 超音波駆動の設計指針

		摩 擦 力	摩 耗 率	安 定 性	応 答 性
接触部の剛性	増 加	◎	◎		◎
	低 下			◎	
超音波の振幅	増 加	◎	◎		
	減 少				
槽門の形状	横 長	◎			
	縦 長		◎		

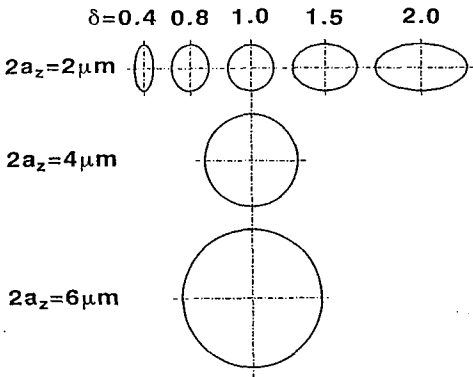


図6 楕円比と楕円形状の関係
($2a_z$: 縦方向の全振幅)

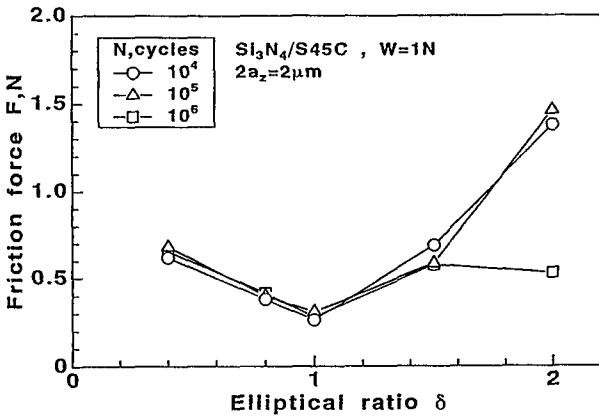


図7 楕円比と摩擦力の関係
($2a_z = 2 \mu\text{m}$, $W = 1\text{N}$, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{S45C}$)

審 査 結 果 の 要 旨

超音波による摩擦駆動を用いた超音波モータは、新しいタイプのモータとして種々の優れた特徴を有しているが、駆動面の磨耗に起因する寿命の短さと伝達率の不安定さのために、広く利用されるに至っていない。そこで、著者は駆動系の剛性及び超音波波形が伝達率及び駆動面の磨耗に及ぼす影響を実験的に明らかにした。本論文は、その成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、超音波駆動におけるトライボロジーの問題点を明らかにしている。

第2章では、進行波型超音波による摩擦駆動において、伝達率はロータの剛性の増加により増加し、一方で磨耗率は減少することを明らかにしている。更に、摩擦駆動面における磨耗形態は3種類存在し、すべり率によって変化することが示されている。これらは、摩擦駆動系の剛性を設計するために有効な知見である。

第3章では、駆動中の超音波を抜き出し振幅を変化させられる実験方法を考案し、これにより振幅の増加にともない一般に磨耗は増加するが、一定の振幅において凝着移着による摩擦面の突起の成長は最大となることを明らかにしている。また、摩擦抵抗も一定の振幅において最大となり、振幅の増加により減少することが示されている。

第4章では、超音波の波頭形状を楕円に近似し、1つの楕円状超音波による摩擦駆動をモデル化した実験方法を開発し、それにより楕円形状が駆動方向に長く扁平であるほど大きな摩擦力が生じることが明らかにしている。また、駆動面の磨耗状態も楕円形状により異なり、駆動方向に長く扁平な楕円になるほど、移着による被膜が形成されやすくなることが示されている。超音波の摩擦と磨耗に対する影響がこの様に明らかにされたのは超音波駆動の分野において初めてであり、非常に重要な知見である。

第5章では、本研究で得られた結果を総合し、接触部の剛性、超音波の振幅及び超音波の形の観点から、超音波駆動機構設計のための指針を提示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超音波による摩擦駆動を広く実用化するための基礎知識として、超音波駆動における摩擦磨耗の微視機構を新しい実験方法により明らかにしたものであり、機械工学、特にトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。