

マイクロマシン

〈財〉マイクロマシンセンター 矢田 恒二

1. まえがき

通産省の産業科学技術研究開発制度による「マイクロマシン技術の研究開発」通称マイクロマシンプロジェクトは 1991 年度を初年度として 10 年計画で 250 億円の予算規模で発足し、今年 2000 年度で最終段階を迎える。ここではこのプロジェクトの概要を紹介し、その中で得られた摩擦現象に関わる実験結果を述べるとともに、現在までに発表されているマイクロマシンに係のある摩擦に関する知見を展望したい。

2. マイクロマシンプロジェクトの概要

プロジェクトは次の 3 種類の分野に関するシステムを開発することが試みられた。

1. 発電施設の検査システム
2. マイクロファクトリー
3. 医療応用システム

発電施設の検査システムは蒸気発生設備の細いパイプの検査を目的としたものと、タービンの翼列の検査などを想定したシステムであり、いずれも挟所作業を目的としている。ここでタービン翼列の検査システムは図 1 のように工業用カテーテルともいうべきもので、先端にレーザ溶接装置を備え、検査だけでなく補修機能をも持たせている。

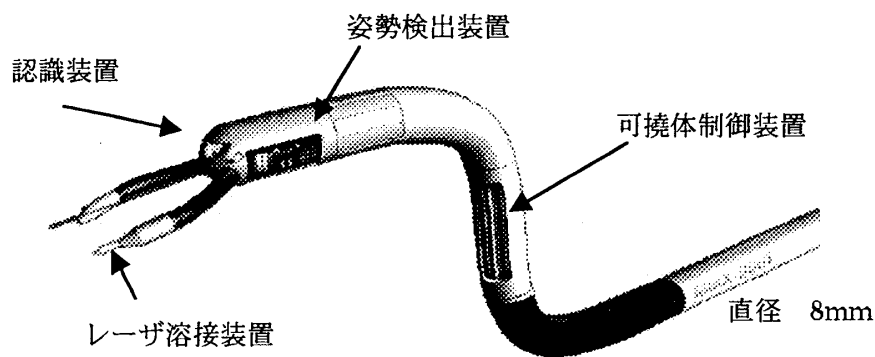


図1 タービン翼列の検査システム

またパイプの検査に関してはパイプの内面と外壁を検査する 2 方式に分かれるが、内面検査システムはワイヤレスで移動可能なシステムで、外部から赤外線および超音波を使ってエネルギーと情報の伝送を行うシステムで、検査ユニットはエネルギーと情報の受発信システム、視覚装置、

移動機構などから構成され外形 9.5mm である。外壁の検査システムは多数の小型ユニットが独立に移動できるとともに、相互に連結することで一つの機能を発揮することもできるシステムである。このことについては後に述べる。

マイクロファクトリーはデスクトップ型工場とでもいうべき、一つの製造システムを机の上に乗る程度までに圧縮したシステムを開発しようとするものである。現状の製造システムでは小さいものでも大きな生産機械を使って作られることが一般的であり、エネルギー消費の観点に立てば無駄なことが多い。これを小さくすることでその無駄をなくせるのではないかという問題意識を出発点としている。

医療応用システムは脳動脈瘤を治療することを想定し、そこに要求される多機能カテーテルを実現するための要素技術を開発することに主眼がおかれた。カテーテルの外径は 1.5mm である。

これらのシステムは 2000 年 11 月のマイクロマシン展において一斉に公開され多方面からの注目を浴びたが、初期の開発目的は達成されたものと考えている。今後はこのプロジェクトで培われた技術をどのように実用に供することができるかというところにきている。

ここで開発の対象となったシステムはいずれも外形的にはサブミクロン領域に属するが、個々のデバイスに関わる要素技術はミクロンオーダの領域を対象にしている、様々な新しい試みを随所にみることができる。しかしこのプロジェクトの中で摩擦に関わる研究が行われた例は少なく、ここでは次に述べる細管外壁検査システムに用いられた減速装置に関するものをとりあげる。

3. 細管外壁検査システムでの減速装置の摩擦

このシステムは図 2 に示す装置を一つのユニットとして、このユニットが独立に動きながら、管壁を取り囲み最終的には相互に連結して管の外壁を移動するシステムである¹⁾。そのために必要な機能を実現するために連結装置と移動装置を備えている。移動装置には動力源としての小型電動機と高減速比を持つ遊星歯車機構、それに磁石ローラからなる車輪から構成されている。

減速装置は不思議歯車と呼ばれる遊星歯車機構から構成されていて、この機構を構成する歯車としては太陽歯車とその周辺を遊星のように自転と公転をしながら回転する 3 個の遊星歯車、それに遊星歯車と内面でかみ合っている内歯歯車からなっている。歯車の基本的寸法であるモジュール（歯の高さの約半分の寸法）は 0.03mm である。材質は工具鋼で放電加工によって製作された不思議歯車機構は機構の構成からくる制約のために本質的に高効率を期待できない弱点をもっている。一方、歯車のかみ合いは正確な幾何学形状を要求するので、通常の大きさのものではその工作精度は厳しく、形状精度 10^{-6} 以上のものが要求される。しかし、このような小さな歯車ではこれだけの精度は期待できないし、形状の測定法そのものがないというのが現状である。従ってこの減速機に高い効率を期待することができない。このことは摩擦損失が大きいことでもあり、摩擦・摩耗の低減は大きな課題となった。

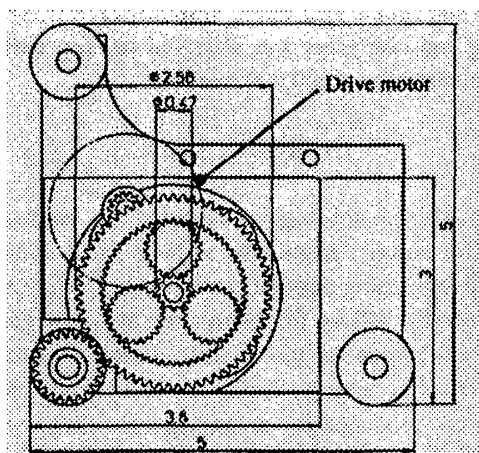


図2 不思議歯車機構の寸法

表1 歯面の状態

歯面表面		DLC	CrN	MoS ₂ 加工面
膜厚	μm	1	1	0.3
硬度	H.v	461	582	~ 290
摩擦係数	静的	0.18	0.21	0.19
	動的	0.08	0.13	0.13

摩擦損失の定量的な測定法には一定速度で回転した後、駆動側と歯車装置を切り離し、時間の経過とともに減少する速度を測定して減速度を求めることにより、損失動力を測る方法を用いた。図3はその測定結果を示す²⁾。この結果より軸受として転がり軸受を使うのがもっとも損失が少ないことが示されている。

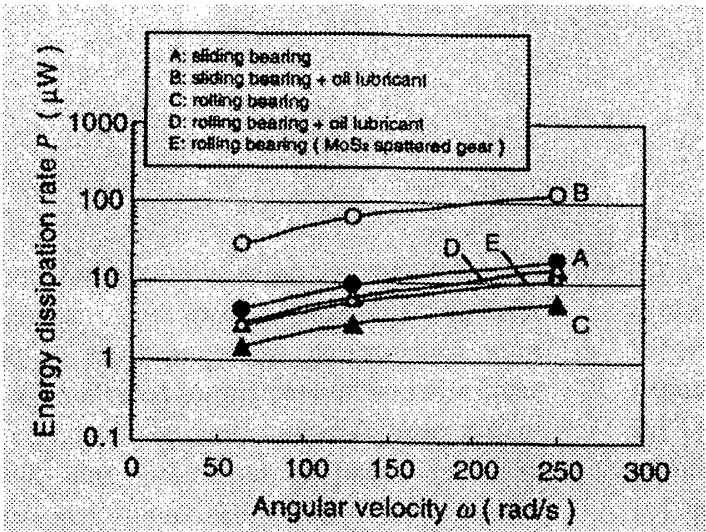


図3 減速機内部のエネルギー損失

また摩耗対策として歯のかみ合い面に硬質膜（DLC、CrN）や固体潤滑剤 MoS_2 などを蒸着して摩擦・摩耗の低減対策とした。それらの膜が摩擦係数に及ぼす影響は表1示すとおりである。動摩擦および静摩擦とも固体潤滑剤がもっとも摩擦係数が少ないが、 10^5 回の繰り返して膜がはがれてしまった。

ここで使われた歯車は従来の考え方からすれば十分小さく、それも動力伝達用の歯車としての機能を果たしていることから先端的なものといえる。しかし形状測定、性能評価法などまだ周辺の技術が不備であるために、本来の歯車の機能は十分発揮できているとはいえない面があるが、

この程度の大きさまでは通常の大きさの歯車で性能を支配する因子以外のものが歯車性能に影響している様子はなく、従来の知見の延長上で考えられることが分かった意味は大きい。そこでさらに歯車を小さくした場合の例を次に述べる。

4. サンディア国立研究所における歯車の運転実験

米国のサンディア国立研究所は静電気で動く櫛の歯状アクチュエータで駆動する、スキャナミラーを開発している。櫛の歯状アクチュエータは直線運動をするので、これをX、Y軸状に配置して同期をとって動かすことにより、アクチュエータの2軸の交点に円運動を発生させることができる。この動きを蔵ランク運動により歯車の駆動力とするものである。

この装置は全体としてシリコンウエーファ上に半導体プロセス技術を使って一体として製作されている。従って歯車の厚みも2～3 μm 程度しかなく薄い歯車である。またモジュールも3～4 μm 程度で、報告によればその歯形は完全なインボリュートであるとしている。しかしそれをどのようにして測定したかは述べられていない。普通の大きさの歯車でも歯形測定機は精密機械の取り扱いをされていて、測定レンジはミクロンオーダであることを考えると、この大きさで完全なインボリュート曲線を持つというのは言い過ぎのような感じがする。

サンディア研究所ではこの歯車列を200万回連続運転し、その摩耗状態を観察した³⁾。このような小さな歯車の連続運転実験は非常にまれな例でありその知見は大変興味がある。その結果によると摩耗の発生は軸受部分やクランクピンの部分などでみられたが、摩耗量は運転雰囲気中の湿度に関係するとしている。すなわち湿度と摩耗量の多さは逆相関の関係があり、湿度が高い方が潤滑状態の改善がみられ摩耗粉の発生が少ないことが観察された。

摩耗粉の形態には球形、円筒形、ひも状の3種類があり、円筒状のものの大きさは直径50nm、長さ500nm、球状のものは直径250nmで酸化シリコンのアモルファスであり、これらは低湿度の時に発生する。またひも状のものは湿度の高いときに発生するとしている。さらに真空中の運転では運転後の摩擦面は SiO_x の上に SiO_x があるようにみられ、酸素が磨耗の状態を変えている。

微小接触面での摩擦係数をはかるためにポリシリコン製の半径2 μm の円筒面と断面形状 2.5 $\times$ 1.8 μm のビームを、一方を完全乾燥状態面にし、他方をODT(Octa-Decyl-trichlorosilane)でコーティングした面を摺動させた結果、コーティングしない面同士の接触の場合よりも寿命は3倍に延び、その摩擦係数は0.14～0.16であった⁴⁾。

参考文献

- ¹⁾ Shimizu, N., et al, The 4th Int. Micromachine Sympo Proceedings, 1998, Oct 29-30, p177.
- ²⁾ Takeuchi H., et al, IEEE MEMS 2000, p170-175
- ³⁾ Walraven J.A., et al, SPIE vol.3880, 1999, p30-39,
- ⁴⁾ Rodger M.S., et al., Proc. SPIE vol.3324, 1997, p120-130