

# 平面接触摩擦実験装置の製作とその自動化

宮尾芳一\* 青木博夫\*\* 芳賀 武\*\*\*

## Fabrication of the Flat on Flat Friction Tester and its Automation

Yoshikazu MIYAO, Hiroo AOKI and Takeshi HAGA

Various studies have been carried out to reduce the friction. In vacuum or food machine, resin bonded lubrication films are widely used. However, as friction and durability are complicated, there are few fundamental studies in case of flat on flat contact. So we have developed the experimental apparatus, by which the cylindrical ring end contacts and rotates on the sample films. The features of this apparatus are:

Contact flat on flat with well precision.

Collect and store experimental data automatically.

Stop automatically when the film's life is over.

Measure the abrasion on machine in advancing stages.

And we also report the friction characteristics of typical solid lubricant PTFE and  $\text{MoS}_2$ .

キーワード： 平面-平面接触, 固体潤滑剤, 耐久性

### 1. はじめに

氷筈による単結晶の氷を切断してスケートリンクを製作し、摩擦を減らし記録を更新しようとする試みが話題をよんでいる。また、エンジン等の各種の機械が作動しているとき、摩擦のために大量のエネルギーが消費され、その摩擦を減らすための様々な研究がなされている。一方、自動車のブレーキは大きな摩擦力を応用しているし、人間は地面との摩擦がなければ歩くこともできない。このように日常生活では摩擦と深くかかわっている。

昨今の摩擦の研究は、摩擦係数を減らすばかりでなく、必要なときに必要な摩擦係数を得るにはどのようにすれば良いかも研究されている。しかし、摩擦を少なくする事は、エネルギー問題と材料(資源)損失の観点からも重要である。

各種産業機械の急速な進歩に伴い、潤滑条件も過

酷となってきた。また、普通の潤滑には潤滑油を用いる。しかし、それらの使えない高温や真空中の場所のほかに、汚染をきらう食品機械やコピー機等にはレジジン結合固体潤滑剤被膜が広く使用されている。この被膜の摩擦や耐久性は複雑であるが、この方面の基礎研究は少なく摩擦特性も明かでない。今まで硬球をスライダとして摩擦実験を行い固体潤滑被膜の摩擦と耐久性を報告されてきた<sup>1)</sup>。しかし、実際は平面と平面の接触する場合が多い。そこで、より実用使用に近い条件で特性を調べるため、円筒リング端面を被膜試料に接触回転させる実験装置を製作した。

今回はこの摩擦実験装置に付加した機能を中心に、報告する。また、この装置により得られた、固体潤滑剤として代表的な PTFE (四フッ化エチレン) および  $\text{MoS}_2$  (二硫化モリブデン) の摩擦特性<sup>2-4)</sup>についても参考として報告する。

### 2. 付加する機能

摩擦摩耗試験機は、一般的に自作装置を用いて試験

\* 機械工学科助教授

\*\* 電気工学科助教授

\*\*\* 電子制御工学科教授

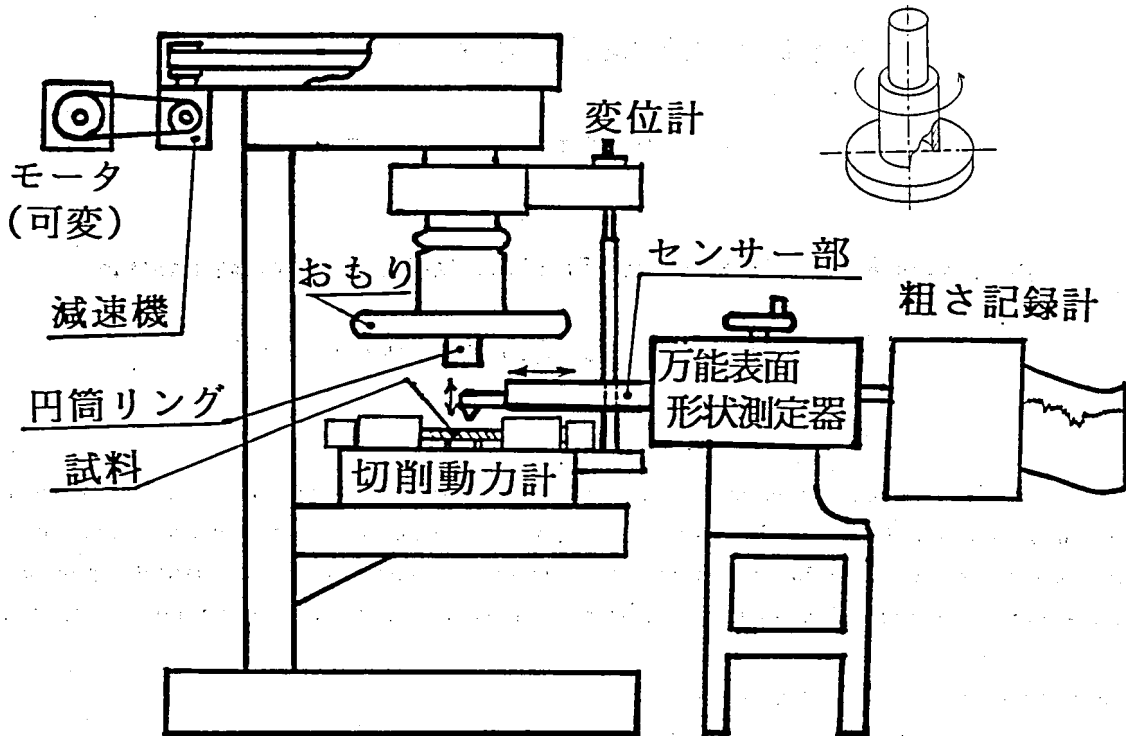


図1 摩擦実験装置

を行うことが多い。また、実際の摩擦面は様々な組み合わせがある。平面と平面の場合も多いが、実験装置で平面と平面を精度良く接触させることは難しく、平面に対して硬球をスライダとした実験で摩擦特性を調べることが多い。そこで、今回製作する実験装置は、平面と平面が精度良く（片あたりしなく）接触できるようにした。

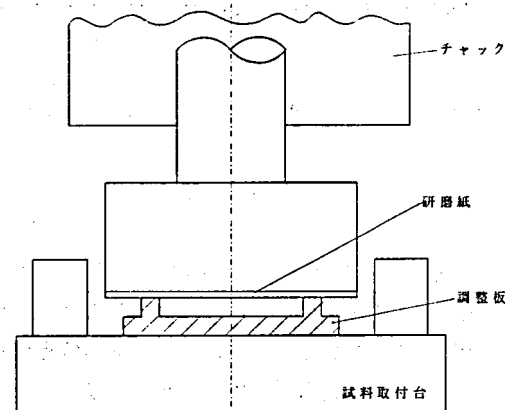
また、固体潤滑剤は機械が壊れるまでの長時間、メンテナンスフリーで作動する摺動部分に使われる。そのため、固体潤滑剤の寿命実験は長時間におよぶ事がある。しかし、被膜の損傷は突然表れる可能性もある。そこで、急に被膜面がなくなり寿命となったとき、装置を自動的に停止する機能をつけた。

さらに、一定時間毎にデータを自動的にパソコン取り込み保存できる機能および試験片を実験装置から外すことなく、形状を測定し摩耗の進行状態を測定できる機能も付加した。

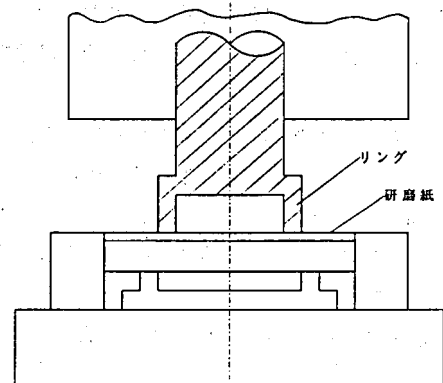
### 3. 実験装置

#### 3-1 構成

図1に今回製作した円筒リング端面による摩擦実験装置の概略図を示す。試料はドリル・タップ用切削動力計（佐藤マシナリーAST-BM）に保持し、円筒リングを回転させて端面を潤滑被膜に摩擦させて実験



(A) 調整板の面だし



(B) リング端面の面だし

図2 平面だし原理

を行った。

可変モーター→減速機→主軸回転で円筒リングを回転させ、所定の回転速度が出るようにした。このときの切削動力計のトルク値から摩擦力、摩擦係数を算出した。

変位計を用いリングの上下量を、また、測定部に直列に 1KΩ の抵抗を接続し、5V の電圧をかけたときの降下電圧より摩擦面の接触抵抗を算出した。

リング形状は接触面積 40mm<sup>2</sup>(外径φ 16.6, 内径φ 15.0)で材質は S45C である。今回の被膜の寿命は摩擦係数μが再上昇して 0.3 以上の時とした。実験は 20~25℃, 湿度は 40~50%の室内空気中で行った。

### 3-2. 付加した機能

#### 3-2-1 平面-平面接触

平面-平面が精度よく接触できない理由は円筒リングをチャックに取り付ける際の傾き誤差、および試料の取付時の誤差が考えられる。そこで次のようにし誤差を少なくした。

- (1) 図 2(A)に示すように切削動力計の試料取付をできるだけチャック(回転軸)と垂直になるように固定する。
- (2) 試料取付台に細い凸部を持つ調整板を接着剤で固定する。
- (3) チャックに砥石(研磨紙)をつけ、調整板凸部を研磨する。この時、たとえ砥石面が回転軸に垂直でなくて砥石最下部が凸部にあたり研削する事になるので、凸部上面は回転軸に垂直な面となる。
- (4) 図 2(B)に示すように、試料取付台に試料の変わりに砥石をつける。
- (5) 円筒リングをできるだけセンタを出しながらチャックに取り付ける。

- (6) 円筒リング端面を砥石面に接触させ端面を削る。

砥石面が僅かに傾いていても砥石の最上部で円筒リング端面を研削し、円筒リング端面は回転軸に対し垂直に形成される。

- (7) 被膜試料は平面研削盤で加工した鋼材に被膜を塗布したので試料平面の平行度は極めて良い。この試料を取り付けると、試料表面と円筒リング端面は精度良く接触する。

#### 3-2-2 データの自動採取とその保存

実験装置にパソコンを連結し、実験データを自動的に得るようにした。図 3 にシステム構成を示す。

摩擦力等のデータは電圧値で出力されるので、その電圧を増幅し、A/D変換した後パソコンに取り込めるようにした。所定の回数(時間)毎にデータを取り込み配列にいれ保存した。データは変動があるので一定個数を取り込み、その平均値を使用した。

#### 3-2-3 装置の自動停止

実験中に摩擦係数が 0.3 となる摩擦力を越したら、実験装置の駆動モータ電源、記録計の電源、電子回路の電源を自動的に遮断するようにした。この回路図を図 4 に示す。

スイッチ PS2 を押している間は、モータ電源のリレー R3 のスイッチがオンになると共に、コンセントには交流 100V の電圧がかかり、直流電源もオンになりオペアンプ、電子回路、直流リレーが作動できる状態になる。そしてスイッチ PS1 をオンにするとリレー R1 が働き自己保持回路となる。リレー R1 内の 100V のスイッチがオンになり、PS1, PS2 をオフにしてもモータ電源は供給され、電子回路も働き実験可能な状態が保持される。

ここで、摩擦力に起因する切削動力計から出力する

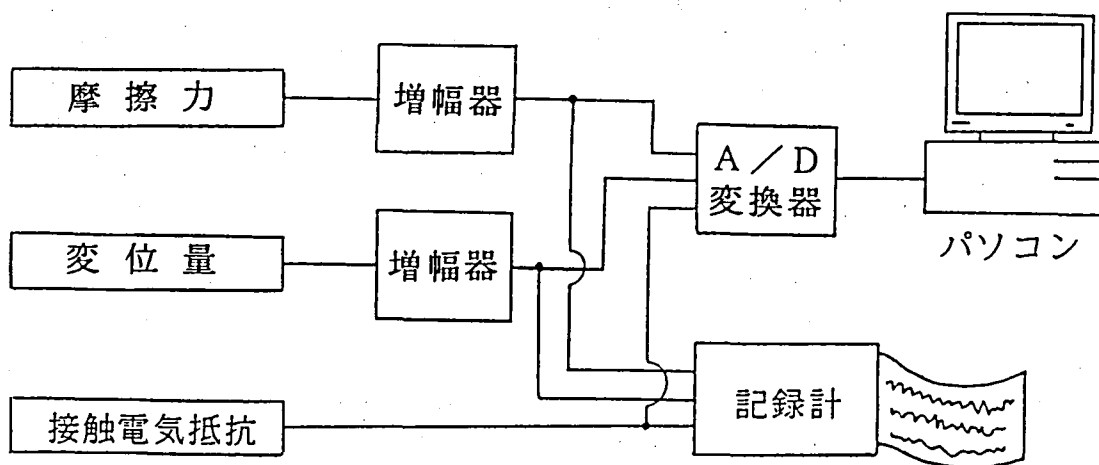


図 3 システム構成

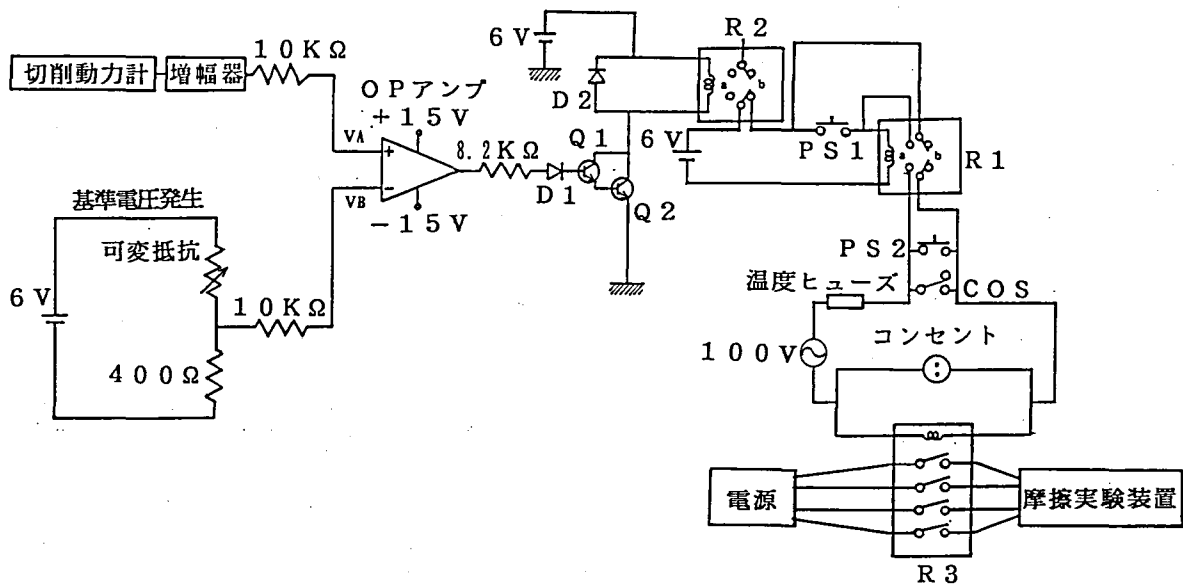


図4 電気回路図

電圧をVA, 実験条件により調整できる基準電圧をVBとする。これらの電圧を摩擦実験中にオペアンプで常に比較している。摩擦力が大きくなり  $V_F - V_B \geq 0$  になったら, オペアンプの出力がハイレベルとなり, リレーR2が作動し, リレーR1の自己保持できなくなり, 100V電源, 直流電源, 3相200V電源が遮断される。

#### 3-2-4 摩耗痕深さの測定

被膜の摩擦特性を調べ損傷, 寿命を予測するために, 被膜の摩擦進行状態を観察する事は重要である。一度試料をはずし, 被膜を観察してから同一箇所に取り付け実験を再開することは殆ど不可能である。そこで摩擦実験装置に形状測定装置を組み込み, 試料を外すことなく一定回数毎に円筒リングを上昇させ, 試料表面に形状測定器のセンサー部を移動させ, 同一箇所の摩耗痕の形状の測定できるようにした。また, 測定に必要な試料表面とセンサー部の移動が平行になるような調整機能もつけた。

## 4. 実験結果および考察

これらの機能が付加した実験装置により得られた一例として代表的な固体潤滑剤であるPTFEと $\text{MoS}_2$ の摩擦特性を調べた。

#### 4-1 試料作成

本研究で使用した固体潤滑剤被膜は固体潤滑剤として, 平均粒径  $5\mu\text{m}$  のPTFEおよび  $0.45\mu\text{m}$  の $\text{MoS}_2$ を, 結合剤としてPAI (ポリアミドイミド樹

脂)を使用した。直径45mmのS45C ( $0.6\mu\text{mRa}$ , 240HV)円板に, スプレー法にてレジン結合剤, 固体潤滑剤, 溶剤の混合液を被膜が一定の厚さになるまで, 塗布 → 乾燥 → 膜厚測定を繰り返し, 焼成 ( $230^\circ\text{C}$ , 30分)した。

#### 4-2 固体潤滑剤含有の摩擦特性

図5に, 被膜厚がほぼ同じ ( $25 \pm 5\mu\text{m}$ ) で, 結合剤PAI (図中表示PAI) のみの場合と固体潤滑剤PTFEを33wt%含有 (PAI-P-33wt%) の場合, これと体積%がほぼ同じ $\text{MoS}_2$ を50wt%含有 (PAI-M-50wt%) の場合の代表的な摩擦係数と摩擦回数の特徴を示す。

固体潤滑剤が $\text{MoS}_2$ の場合, 摩擦係数は, 最初は低い但其後摩擦回数と共に増加しピーク値を示し, その後再び低い値を長い期間示したのち寿命に達した。最初のピーク値までは, PAIのみの場合とほぼ同じ傾向になった。これは $\text{MoS}_2$ は結合剤で被覆されているので, ピーク値になるまでの摩擦特性は潤滑剤無しのPAIのみの摩擦特性を示していると思われる。 $\text{MoS}_2$ 含有の場合はピーク後に $\text{MoS}_2$ の被覆が破壊し, 本来のもつ低摩擦が表れると思われる。

固体潤滑剤PTFE含有の場合, 平均接触圧力が低いと寿命がかなり長いので平均接触圧力Pが5MPaの摩擦特性と比較した。 $\text{MoS}_2$ 含有の場合と異なり, 摩擦係数は摩擦回数Nが増加してもおよそ0.1から僅かずつ上昇し, N=12万回で0.18となり, N=13万回で寿命となった。

$\text{MoS}_2$ のようにピーク値 (大きな摩擦係数) を示さ

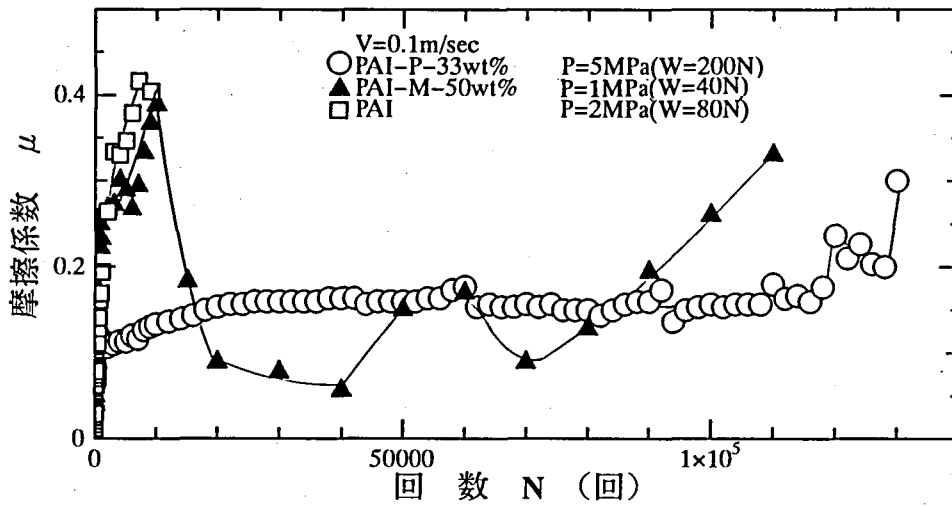


図5 固体潤滑剤含有の影響

なくてほぼ一定なのは、最初から PTFE が潤滑剤として作用していることを示している。

4-3 MoS<sub>2</sub>系の摩擦特性

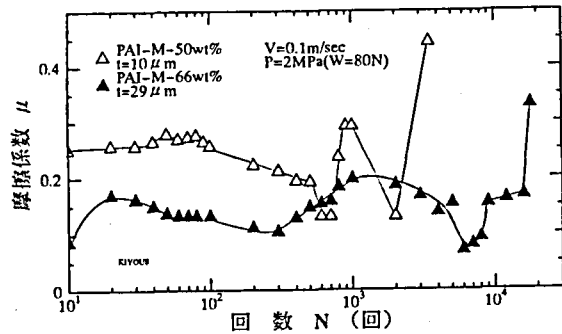
図6(A)に代表的な MoS<sub>2</sub>系の摩擦係数と摩擦回数 N の関係を、図6(B)に実験の途中回数における 摩耗痕形状曲線を示す。また、この形状曲線から得た摩擦回数に対する摩耗痕深さの変化を 図6(C)に示す。図6(B)より、含有率 66wt% の場合では、すでに N=50 までに表面の一部が凹状となり、N=500 までに膜厚相当の厚みで被膜が剥離した。この時はまだリング端面は底部に接触していない。N=5000 では被膜は殆ど無い状態でリング端面が摩耗痕底部に接触し、底部が平面化した。この時期が薄い被膜および再付着被膜の結合剤被膜が破壊し MoS<sub>2</sub>の本来のもつ低摩擦を示すと考えられる。

含有率 50wt%で膜厚 t が 10 μm の場合も初期にリングとの接触部の一部が剥離しそれが拡大した。その後リング端面が摩耗痕底部と接触し、底面が平面化し被膜が無くなり寿命に至った。MoS<sub>2</sub>の場合、図6(C)に示すように小さな回数で被膜が急激に破壊する場合が多かった。

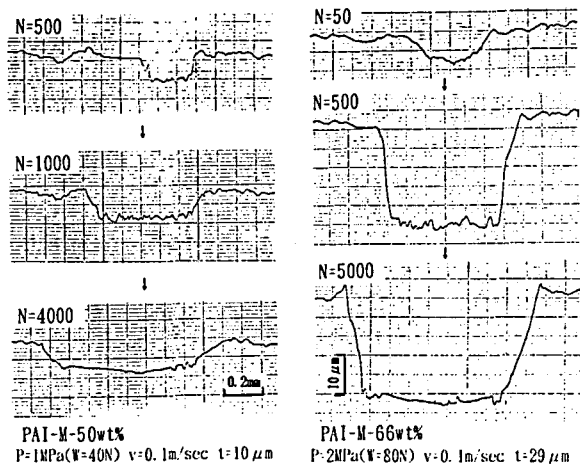
4-4 PTFE系の摩擦特性

図7(A)に PTFE 系の代表的な 摩擦係数と摩擦回数 N の特性を示す。この条件で摩擦係数は、N=2000 まではおよそ 0.1 であり、その後上昇し 0.17 近くを保ち N=8500 で寿命となった。

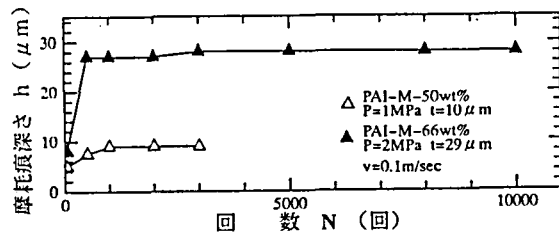
この実験における途中回数での摩耗痕形状曲線を図7(B)に示す。また、この形状曲線から得られた 摩擦回数に対する 摩耗痕深さの変化を図7(C)に示す。これより、N=5 ですでに表面凸部が変形し、摩耗痕の



(A) 摩擦係数の変化



(B) 摩耗痕形状



(C) 摩耗痕深さの変化

図6 MoS<sub>2</sub>の摩擦特性

形成が観察される。摩擦係数がおよそ 0.1 である  $N=100\sim 2000$  では、回数の増加と共に摩擦痕深さが徐々に大きくなるが、摩擦痕底部の粗さは極めて少ない。また摩擦痕両側での盛り上がり層は観察できないので、周囲への塑性変形は生じていないと思われる。

また、摩擦係数が 0.17 に上昇した  $N=5000\sim 8000$  の摩擦痕の底部は少し荒れてきていることが観察された。このように摩擦回数が増加し、摩擦係数が上昇すると摩擦痕底部の粗さが大きくなった。しかし、図 7 (C)より摩擦痕深さは  $N=200\sim 8000$  では、ほぼ回数に比例し寿命に至った。この間の平均摩擦痕深さは  $0.64\mu\text{m}/\text{回}$  であった。平均接触荷重が  $5\text{MPa}$  と大きいので、すなわち潤滑剤被膜が極めて薄い状態（摩擦痕深さがほぼ膜厚深さに相当）で低摩擦が続くことなしに寿命に達したと思われる。

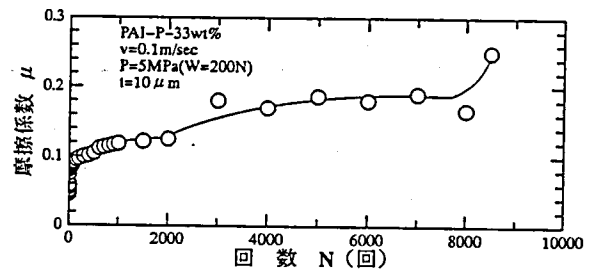
## 5. おわりに

この方法で、かなりの精度で平面出しができ、平面-平面接触の場合の摩擦特性を調べられた。また、固体潤滑剤被膜も PTFE 含有の場合と  $\text{MoS}_2$  含有の場合では摩擦特性が異なり、使用する際には注意を要することが分かった。

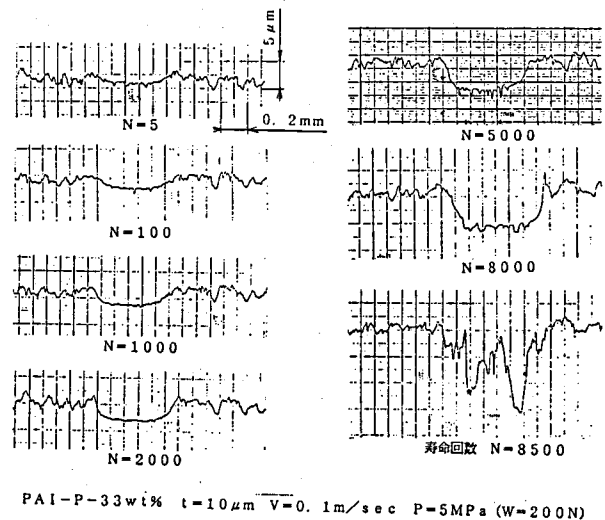
特に  $\text{MoS}_2$  は急激に寿命となる傾向があるので、摩擦力が一定以上になると停止できる装置は有効であった。

## 参考文献

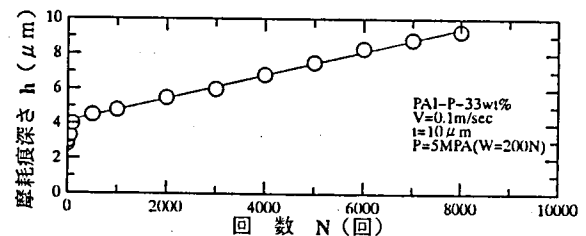
- 1) 田中ほか (社) 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議予稿集 (福岡 1991-10, P.617) など
- 2) 宮尾ほか 同上 (東京 1997-5, P.99)
- 3) 宮尾ほか 同上 (大阪 1997-11, P.646)
- 4) 宮尾ほか 同上 (東京 1998-5, P.204)



(A) 摩擦係数の変化



(B) 摩擦痕形状



(C) 摩擦痕深さの変化

図 7 PTFE の摩擦特性