

# 摩擦を考える

## What's Friction



坂本 亨\*

Prof. Tohru SAKAMOTO

Friction includes miscellaneous unknown factors. Sometimes, measuring friction troubles tribologists much. How to measure friction exactly is always their important question. The author's experience encountered in some friction measurements is stated briefly.

### 1. はじめに

摩擦，これは一体何だろう．同じ物質どうして摩擦を測っても，機械によって，人によって，日によって，はたまた？？によって，値が違う．めっきやコーティングでも似たような経験をする．同じ手順を踏んでも，うまく膜が付いたり付かなかったりする．多分材料の表面状態が微妙に違うのであろう．コンピュータではこんなことはない．同じ計算をすれば，どのコンピュータでも答えは必ず同じになる．その点実験はやっかいである．それに，摩擦にはたいいてい摩耗が伴うから，これまたやっかいである．実機では摩擦より摩耗の方がずっと問題になるであろうから．

本稿では，筆者が摩擦測定のプロセスで得たいろいろな経験を通じて，日頃何となく思っていることについて順不同で述べてみたい．

### 2. 摩擦測定値は信頼できるのか

大学では，毎年新しい学生が研究室にやって来る．去年と同じ部屋で，同じエアコン条件で，同じピンオンディスク試験機で，同じ試験片で，摩擦を測る．去年と値が違う．学生(測定者)以外は去年と同じはずである．そこで，私も自ら測ってみる．やはり去年と値が違う．何かが去年と違うのであるが，その何かがよくわからないのである．目に見えない何かが幾つもあるので，ほとんど摩擦の変わった原因はわからないままになってしまう．大きく値が違う場合は，原因を探る努力をするのだが，あまり変わらない場合は，「まあ，こんなものか」ということで，そのまま今年の卒業研究の実験が進んでいくのである．

したがって，摩擦とは何ぞやというのが終始頭から離れない．そのときどきで気まぐれに変わるのだから，こんなものは測っても意味がないのではないか．カタログなどに出ている値は信用できるのだろうか．測ったうちで最も低い値か最も高い値が書いてあるのではないか，などと勘ぐってみる．実際信じられないくらい極端な値が載っていることもあるのだから．しかし，その値は嘘だとはまた言えないところがむずかしい．測ったらそう言ったと言われれば反論できない．設計には安全率という便利なものがあるから，いざとなればわからないことは全部そこに放り込んでしまえばよいのかも知れないが．

### 3. 摩擦摩耗測定に影響するものは何だろう

さてそれじゃあ摩擦や摩耗を測るには一体何に注意すればよいのだろうか．摩擦測定システム(トライボメータ)の構成は，たとえば図1のように示される<sup>1)</sup>．摩擦物体，摩擦条件，周囲条件などの入力，摩擦力，摩耗量などの出力から成る一つのシステムを構成する．これらのうち入力条件をざっと羅列してみると，表1に示したようないろいろな因子が頭に浮かぶ<sup>2)</sup>．筆者は現場のことをほとんど知らないので，実機の摩擦部で問題になるような重要な条件が，表1ではまだ抜け落ちているような気もする．いずれにしても，摩擦や摩耗試験は実際の運転条件にできるだけ近い状態にする必要があるろう．できれば，実機で摩擦摩耗が測定できれば最善であるが，これはたいいていの場合不可能だと思われる．だからトライボロジストはどんなテストをすればよいかでその都度苦慮

\*姫路工業大学 工学部 機械工学科 教授 工学博士

するのではなからうか。摩擦測定の実験方法については、たとえばCzichos<sup>3)</sup>のくわしい分析が大変参考になると思う。

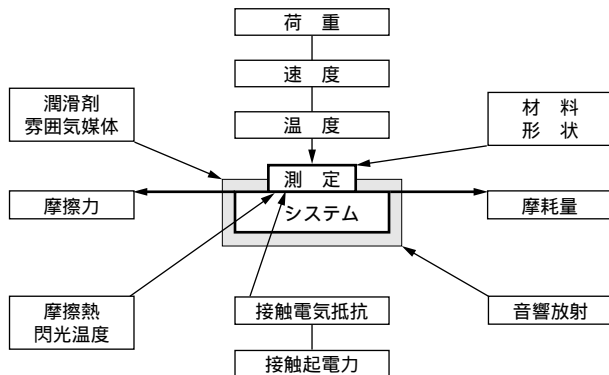


図1 トライボメータの基本構成<sup>1)</sup>

Tribometer

表1 摩擦摩耗試験で考慮すべき因子<sup>2)</sup>

Factors influenced on friction and wear measurement

項目	内容
1. 接触面性状	材質, 仕上げ方法, 表面粗さ・うねり, 加工変質層, 酸化膜, 吸着膜, 汚れ膜
2. 接触形式	点・線・面接触 (どの場合も摩耗が進むといずれ面接触になる)
3. 試験片	接触部形状 (曲面・平面), 全体形状, 寸法, 配置 (上下・左右など)
4. 摩擦方式	すべり・ころがり, 一方向・往復・衝突・スピン運動, 摩擦方向 (水平・鉛直・傾斜)
5. 荷重	種類 (一定・ステップ増減・連続増減・振動), 付加方法, 荷重とその範囲
6. 摩擦速度	速度とその範囲
7. 雰囲気	潤滑・無潤滑 (湿度), 特殊雰囲気 (真空中・気体中・溶液中・塵埃中など)
8. 温度	加熱・冷却方法, 温度とその範囲
9. 試験機特性	摩擦摩耗測定法, 荷重検出法, 機械的変形, 熱変形, 振動 (本体・設置環境)
10. 測定者	性格, 能力, 知識, 測定手順の厳密さ, 結果の判断・整理・考察

摩擦摩耗潤滑実験室において、流体潤滑の実験以外では、その手軽さのためかピンオンディスク試験が最も頻繁に採用される。ピン対ディスクの接触形式は、常識的には現実とかなりかけ離れた摩擦状態であると思われる。それにもかかわらず、この試験方式がよく使われる理由は、いろいろな摩擦状態を実機に忠実に復元することがもともと不可能なためではあるまいか。つまり、複雑怪奇でわからないことだらけの摩擦状態をどうせ実現できないのなら、いっそのことすべてを無視し

て最も単純に摩擦接触部だけを取り出してみてもということになる。このように勝手な推測をして、筆者もピンオンディスクやピンオンフラット試験ばかりをやってきた。

さて、摩擦摩耗実験をやってみようとするとき、表1にあるような因子を考慮しつつ、既存の試験機を選ぶか、あるいは新たに試験機を設計製作する必要が生じる。表1をじっくり見ていると、あることに気が付く。当たり前といえばそれまでなのであるが、現実の摩擦条件を完全に満たすことはできないにしても、大部分の因子は実験者の方で決めることができるのである。どうしてもない因子はそれほど見当たらない。

#### 4. 湿度は要注意

筆者はころがり摩擦や流体潤滑下のすべり摩擦実験をやったことがないので、無潤滑下の摩擦実験を対象に考えてみることにする。そうすると、最も問題となるのは、表1のうち接触面の性状ということになる。加工法によって、表面粗さやうねりなどの幾何学的性状は制御できても、加工変質層・酸化膜・吸着膜・汚れ膜などを、試験片全部で統一することは至難の業である。無潤滑の場合、これらいろいろな膜が摩擦係数に大きく効くからやっかいである。加工変質層は、場合によっては酸化膜も、加工法や切削速度・温度などの加工条件で制御できるかもわからない。他方、吸着膜、汚れ膜はもちろん、酸化膜もまた、雰囲気によって変わり、実体はよくつかめないのが普通である。空気中での通常の摩擦実験では、雰囲気として温度や湿度を考えなければならない。実験室の温度は、冷暖房があれば、四季を通じてそれほど変わらないので、その摩擦への影響は無視できるかもわからないが、湿度についてはそうはいかない。要注意である。雨の日と晴れの日、夏と冬、昼と夜、湿度は変わる。最低でもエアコンがほしい。

湿度、すなわち空気中の含有水分が変わると摩擦はどうなるのだろうか。一例として、窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )を相手に無電解ニッケルりんめっき膜の摩擦摩耗を、湿度を変えて測った結果を図2と図3にそれぞれ示してみる<sup>4)</sup>。摩擦係数、比摩耗量とも湿度の影響を大きく受け、相対湿度(R. H.)が低いほど摩擦・摩耗とも大きい。湿度低下に伴い表面の損傷は必然的に大きくなることも観察された。本実験のような極端な湿度変化は、一般の実験室では起こり得ないが、湿度によって摩擦摩耗が必ず変化することは、無潤滑下の摩擦測定における重要な留意事項である。

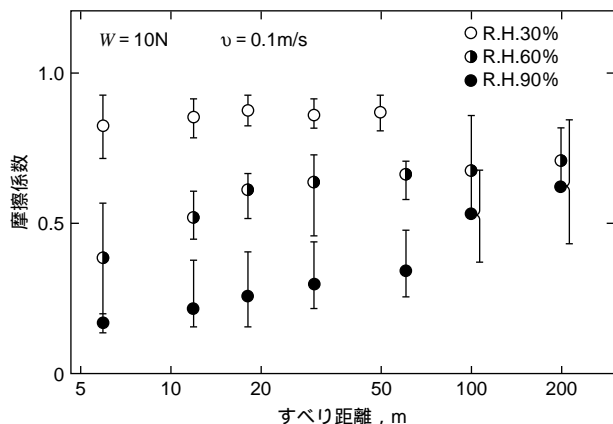


図2 摩擦の湿度依存性<sup>4)</sup>  
 (無電解Ni-Pめっき球 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ディスク)  
 Change in friction with humidity  
 (Electroless Ni-P plated ball vs. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> disk)

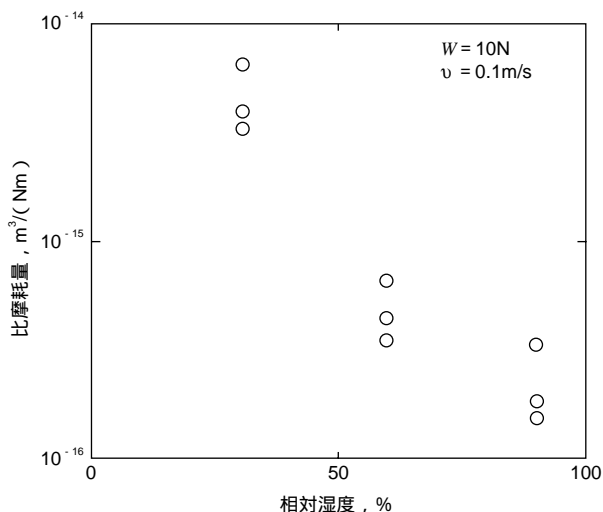


図3 摩擦の湿度依存性<sup>4)</sup>  
 (無電解Ni-Pめっき球 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ディスク)  
 Change in wear with humidity  
 (Electroless Ni-P plated ball vs. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> disk)

5. 試験片の配置も要注意

二つの試験片をどのように配置するかも重要である。ピンディスク式で試験片の主要な相対位置関係は図4(a)~(c)の三種類である<sup>1)</sup>。小試験片のピンや球が大試験片のディスクに対してどのような位置にあるかで、摩耗粉の摩擦系外への排出のされ方が異なる。図4(a)の場合、摩耗粉が出ると摩擦部あるいはディスク上にたまる一方であるが、(b)と(c)では摩耗粉は落下しやすい。摩擦部に摩耗粉が多量に残ると、移着膜を形成したり、アブレシブ材として作用したりするので、本来の材料どうしの純粋な摩擦状態とは異なる場合が生じてくる。

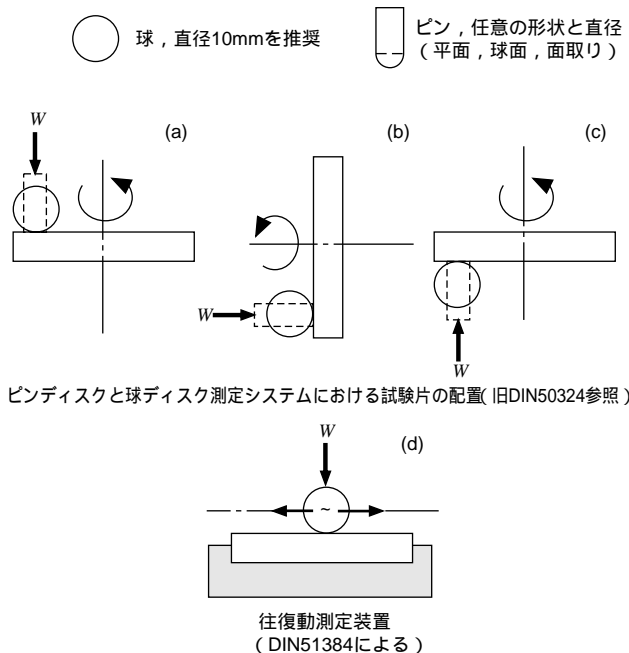


図4 摩擦試験片の相対位置<sup>1)</sup>  
 Relative position between contact bodies

6. 同じ摩擦変化形態ならば接触界面の状態は同じなのだろうか

図5は材料どうしの純粋な摩擦変化の例である。厚さ0.5 μmの窒化チタン(TiN)膜の上でダイヤモンド円すい圧子を図4(d)の形式で往復動摩擦させる。ダイヤモンドはTiN膜より硬いので、最初TiN膜を掘り起こしながら摩擦が進むが、何度も往復するうちに円すい形状に応じたV溝が形成され、最終的にはこの溝の中をダイヤモンド圧子が行ったり来たりすることになる。とどのつまり、掘り起こし抵抗がなくなり、摩擦力はせん断成分(凝着成分)のみになってしまう。掘り起こし成分は摩擦回数の増加とともに減少するので、摩擦係数は摩擦回数とともに減少し、図5のような変化をすることになる。この実験の場合、TiNの摩耗はほとんどないので、摩耗粉や移着膜の影響を考慮する必要はない。参考のために、図5にはダイヤモンド球による摩擦係数も表示してあるが、この場合掘り起こし抵抗は無視できるほど小さいので、摩擦係数は凝着成分のみで終始一貫ほぼ一定値を示している。円すいによる摩擦係数は、掘り起こしがなくなるにつれて、球によるこの低い摩擦係数に漸近していくことがわかる。



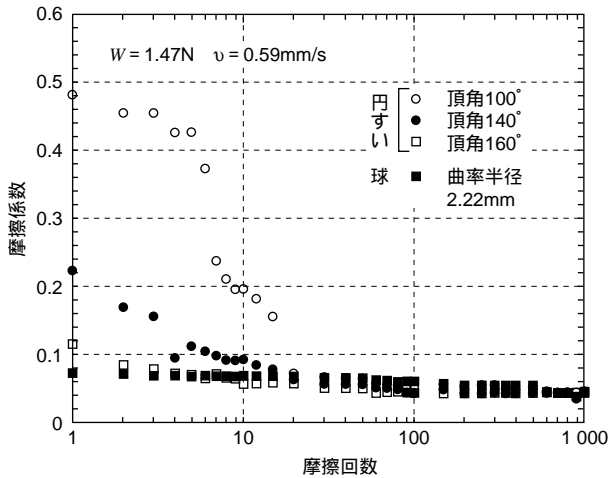


図5 摩擦変化(ダイヤモンド円すい - TiN膜)  
Friction variation with sliding  
(Diamond cone vs. TiN coating)

ところが、同じ試験機、同じ摩擦条件のもとで、同じTiN膜をベアリング用鋼球でこすると、摩擦変化は図6のようになり、図5とは全く様相を異にする。摩擦係数は摩擦回数の増加とともに減少するのではなく逆に増加する。摩擦が増加するのは、TiN膜が破断はく離して基板のステンレス鋼が露出してくるためではないかと常識的には考える。TiN膜は超硬質とはいえ厚さがたった0.5 $\mu$ mの極薄膜なのだから、相手が自分よりかなり軟らかい軸受鋼でも、対戦すると簡単に負けてしまうのではと思っても不思議はない。しかし、現実にはこの薄膜は基板との密着性がすこぶる良好で、この摩擦試験では全く破れなかった。代わりに鋼球の方が摩耗してTiN膜上に移着膜を形成するタイプの摩擦状態が生じることになった。移着膜の成長に伴い、摩擦は鋼球と移着膜、すなわち同種の鋼材どうしの接触が支配的になり、摩擦力が次第に増加することになってしまったわけである。

図6の例では薄膜の破断はないのであるが、他方薄膜が破断すると摩擦が増加する現象の例を図7に示す<sup>5)</sup>。レーザ照射によってグラファイト(C)と窒化ホウ素(BN)の複合潤滑膜をステンレス鋼上に形成し、これを図6と同じ鋼球で往復動摩擦した結果である。レーザ出力をいろいろ変えてつくった膜の摩擦変化を示すものであるが、出力250Wから450Wで作製した膜において、それぞれある摩擦回数から摩擦係数が増加し始める。摩擦部の観察の結果、この増加現象は薄膜の摩耗によるもので、移着膜などによるのではないことが明らかとなっている。グラファイトと窒化ホウ素は固体潤滑剤であるから当然鋼球より軟らかく、鋼球によって膜の摩耗除去が起こるのである。図6の場合と違って、膜の存在する間は鋼球にはほと

んど損傷が生じない。以上のように、図6と7は同じような摩擦変化形態を示すのに、摩擦摩耗の実体は全く異なることがわかる。

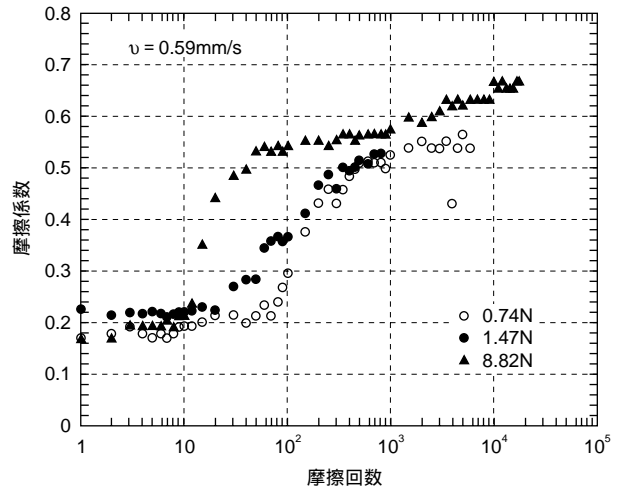


図6 摩擦変化(鋼球 - TiN膜)  
Friction variation with sliding (Steel ball vs. TiN coating)

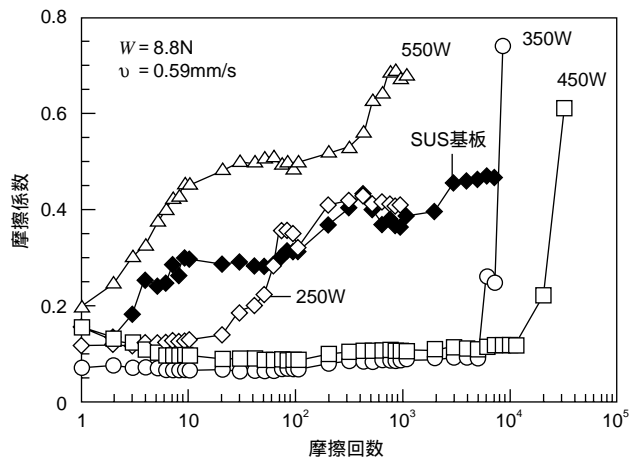


図7 摩擦変化<sup>5)</sup>  
(鋼球 - レーザラッドC/BN複合固体潤滑膜)  
Friction variation with sliding (Steel ball vs. C/BN coating)

## 7. 摩擦測定ばねは摩擦部の実体を攪乱する

最近ではセンサ、計測機器、観察分析機器、コンピュータなどの発達により、摩擦測定も大変楽になってきた。圧電素子、AFM、STMなどの使用で、以前は不可能であったマイクロスケールの摩擦測定も可能である。しかし、一般には未だ図8に示したような測定方式が基本ではなからうか<sup>6)</sup>。すなわち、摩擦力の検出にはばね変位を用いる方法である。ところがこのばねの剛性が検出する摩擦力に大きく影響するので注意が必要である。ばねが硬いか軟らかいかで、同じ試験片どうしても検出される摩擦力の大きさや変化波形が異なってくるからやっかいである。



要は、速度が速いと摩擦物体どうしはゆっくり静かに引っ付いている暇を与えられないというごく当たり前の結果である。

すべり速度がさらに大きい場合は別の問題が発生する。摩擦振動である。あるピンディスク装置で窒化ケイ素どうしを速度を変えて摩擦させると、図12のような摩擦波形が観察された<sup>6)</sup>。

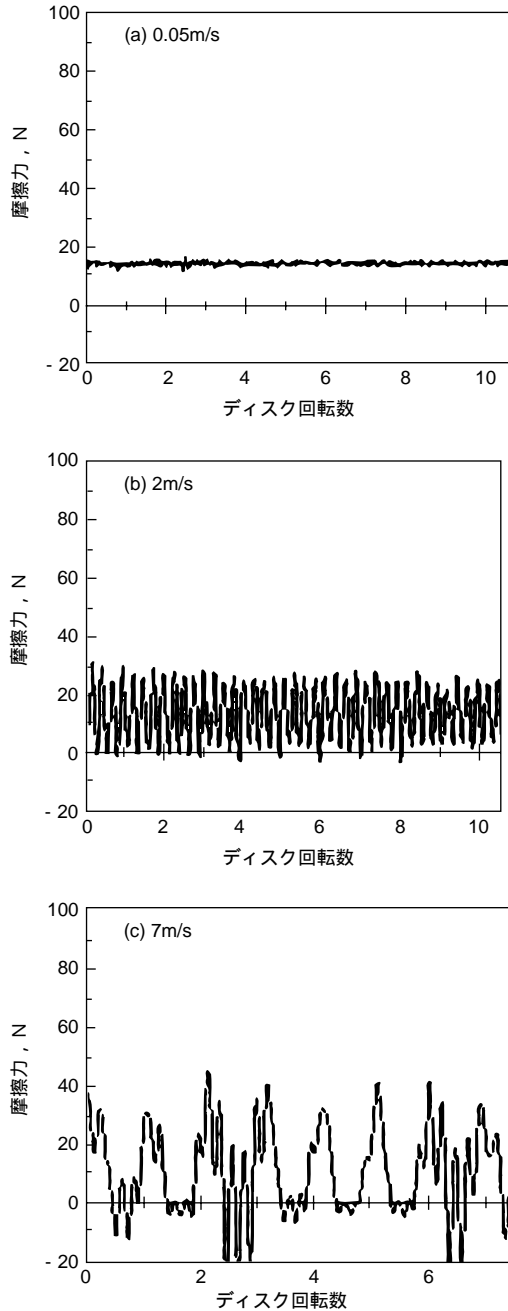


図12 すべり速度と摩擦変化<sup>6)</sup>  
( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ピン -  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ディスク 分銅荷重付加,  $W = 20\text{N}$ )  
Friction change with sliding speed  
( $\text{Si}_3\text{N}_4$  pin vs.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  disk, loading by dead weight)

図12(a)のように、速度が低いと摩擦力は一定値で安定し、変動はほとんどない。速度が増すと、(b)図のように、平均の摩擦力は(a)と変わらないが、平均摩擦力と同程度の大きな振幅を持つ規則的な摩擦振動が生じている。さらに速度が大きい場合は、(c)図に見られる不規則な振動波形が現れ、もはや何を測っているのかよくわからないことになる。摩擦力は大きくマイナス側にも振れており、摩擦中にピンがはね飛び跳躍現象が起きていることが伺える。摩擦接触は正常な状態とはいええず、ピンがディスクをたたく感じになる。摩擦変化がこれだから、摩耗形態もまた変わってしまい、ひいては摩耗率も変わってしまう。いずれにしても、図12の高速の場合とはとも摩擦摩耗測定ができる状態ではなく、それ以前に装置の欠点を取り除かねばならない。高速でもこのような接触状態が生じないように機構や方策を講じるべきであろう。図12は分銅で荷重をかけていたのだが、たとえばエアシリンダで荷重を付加する方法に変えてみると、同じ摩擦条件でも、図13のように振動をかなり抑えることができる。

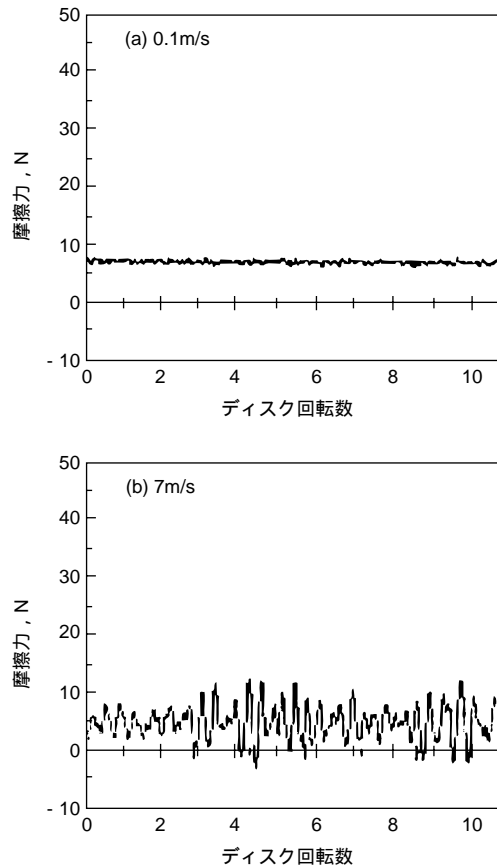


図13 すべり速度と摩擦変化 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ピン -  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ディスク, エアシリンダ荷重付加,  $W = 20\text{N}$ )  
Friction change with sliding speed  
( $\text{Si}_3\text{N}_4$  pin vs.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  disk, loading by air cylinder)

図12と図13の一連の実験の結果をまとめてみると、すべり速度を変えた場合の摩擦・摩耗変化は図14のようになった。分銅による荷重付加法では、平均の摩擦係数も比摩耗量も速度によって極端に変わるが、エアシリンダを採用すると、摩擦・接触状態は安定することがわかる。

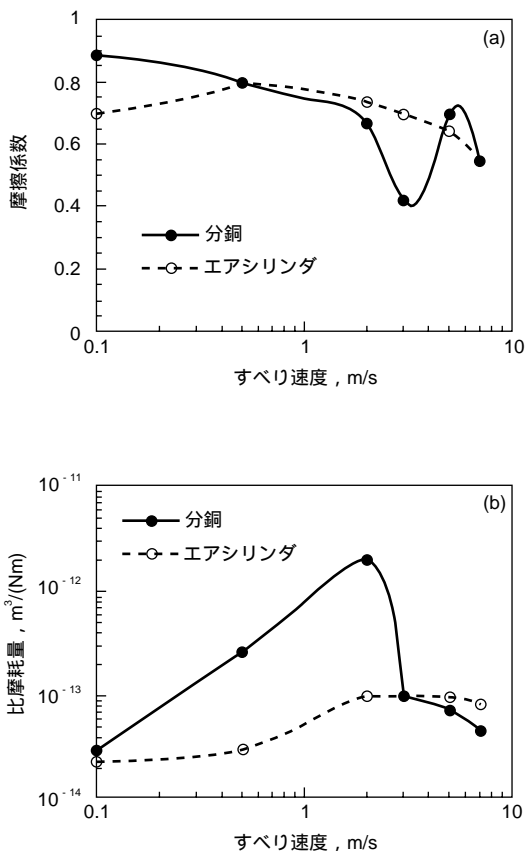


図14 荷重付加方式の違いによる摩擦・摩耗変化  
(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ピン - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ディスク, W = 20N)  
Friction and wear changes with loadig methods  
(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pin vs. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> disk)

## 9. おわりに

摩擦測定で経験したいいくつかの事例について述べてみたが、いずれも「そんなことは測る前からわかっていることではないか。何を今さらくどくど書いていいのか。」と言われればそれまでである。しかし、浅薄さを省みずに書かせていただいた中に、読者のお役に立つことが一つぐらいあれば幸いに思う次第である。また、筆者の気付いていない測定上の問題に関するご教示をいただければ幸いである。光洋精工株式会社の皆様には、日頃から種々ご教示を賜ったり、試料のご提供をいただいている。紙面をお借りし厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Tribologie und Schmierungstechnik, vol. 47, no. 1(2000)45.
- 2) 坂本 亨：日本機械学会関西支部第232回講習会教材(1998)1.
- 3) H. チコス著，桜井俊男監訳：トライボロジー，講談社(1980)197.
- 4) 坂本 亨・鷹野 修・西羅正芳：日本潤滑学会第31期全国大会(名古屋)予稿集(1986)85.
- 5) 加藤隆弘・坂本 亨・格内 敏：トライボロジスト, vol. 44, no. 5(1999)350.
- 6) 坂本 亨：機械設計, vol. 41, no. 10(1997)74.