

NACHI  
**TECHNICAL  
REPORT**  
Components

Vol. **18A1**  
Feb/2009

機能部品事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

「トライボロジーの“常識”を考える」

Perspectives on Near-future Technologies  
" Basic Concepts in Tribology "

〈キーワード〉 トライボロジー・摩擦・摩耗・潤滑・摩擦係数・  
流体潤滑・境界潤滑

東京大学・香川大学

名誉教授 木村 好次

Yoshitsugu KIMURA

Professor Emeritus The University of Tokyo and Kagawa University

## 要 旨

トライボロジーは、摩擦、摩耗、潤滑をとり扱う分野である。本稿では、摩擦とはどういう現象か、摩耗とは何を指し、それはどういう原因で起こるのか、摩擦・摩耗を制御、軽減するためにはどのような方法があるのか、基本的な問題に的を絞って、生まれて40年が過ぎたこの分野における“常識”とは何か、それが時代とともにどう変わったかを考える。

## Abstract

Tribology is an engineering field which covers friction, wear and lubrication. This article discusses basic concepts in tribology and how some of them changed in the 40-year history of tribology, by reexamining what friction is, what wear is and what its mechanism is, and what the means to control them are.

## 1. はじめに

“トライボロジー”という言葉が誕生したのは1966年、東京オリンピックの2年後で、ビートルズが日本にやってきた年である。それからもう40年が過ぎたが、その間には重厚長大から軽薄短小へと価値観が変化したり、地球の有限性が認識されてエネルギー・環境問題が最大の関心事になるなど、世の中の“常識”はだいぶ変わったし、昨年来の経済危機でまた変わるのかも知れない。

本稿では、トライボロジーの基本的な問題を中心に、トライボロジーの“常識”とは何かを考えてみることにしたい。その目的は次の二つである。

“潤滑ならまだしもトライボロジーといわれると……”、そう思われる読者があるかも知れないが、その基本とする考え方は、意外に単純なものである。現実の問題にとり組む前に、トライボロジーの出発点となった常識はどんなものなのか、それをぜひ知っていただきたいし、ご存じの読者には再度確認をしていただきたいと思う。これが第一。

そういうトライボロジーの常識には、万古不易のものもあるけれど、この40年間にかなり変わったものがある。その変化には、トライボロジー自身の進展によるものも無論あるが、社会のニーズによって変わったものもあるのだ。トライボロジストは、古い試験機でいつも同じような実験をしているように見えるかも知れないが、トライボロジーも結構変化しているんだ、と認識してほしいのが第二の目的である。



## 2. “トライボロジー”って何？

“トライボロジー”という語は、“こする”ことを意味するギリシャ語“τριβος”に由来しているという。図1がこの言葉を世に出した記念すべき記事<sup>1)</sup>で、“この国——すなわちイギリス——で年額5億1,500万ポンドを節約しよう”と派手な見出しを掲げ、それまで“潤滑学”などと呼ばれていた分野の名前をトライボロジーにしようと呼びかけたのである。

で、それは何をやる分野なのか。“摩擦、摩耗、潤滑”というのが、まずは常識的な答だろう。

摩擦と摩耗、これらはいずれもネガティブな語感をもつ言葉である。まず摩擦のほうだが、自動車を例にとると、ピストンとシリンダーの間をはじめ、軸受、歯車など摺動部が山ほどあり、燃料のもっていたエネルギーの一部が摩擦によって失われてしまう。エネルギーを節減するためには、につき摩擦を低減せねばならない。

といいながら、そもそも自動車はタイヤと路面の摩擦があるからこそ走れるのだし、ブレーキの摩擦があるから止まれるのだが、ま、世の中を見わたせば、摩擦を小さくしたいというニーズのほうが圧倒的に多い。

そういう、なければ困るという救いが摩擦にはあるけれど、摩耗になるとこれは全面的に悪者である。靴底などの例を挙げるまでもなく、摩耗によってものの寿命が規定される例はいくらもあり、それによって有用な資源が失われている。それも、摩耗で失われた量だけが問題なのではなく、摩耗により機能を喪失して廃棄される部品、あるいは機械・設備がまるごと無駄になってしまうのだ。

三つめが潤滑だが、摩擦・摩耗と並べると、どうも据わりが悪い。というのも、摩擦の制御、摩耗の軽減がトライボロジーの主要な目的であるのに対し、潤滑というのはその目的のためのもっとも一般的な手段なのであって、やや位置づけがちがっているのである。

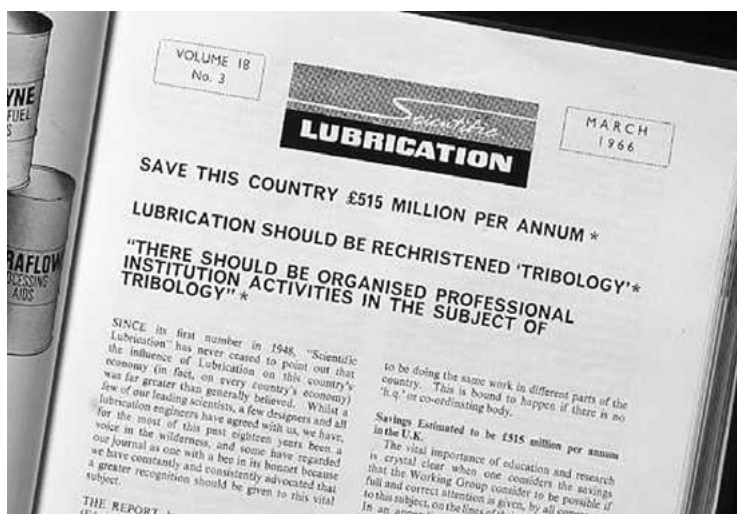


図1 トライボロジーの誕生<sup>1)</sup>

### 3. 環境とトライボロジー

摩擦・摩耗の制御・低減の他に、トライボロジーの目的としてもう一つ、摩擦面に起因する環境への影響の軽減が重要になってきた。目的に関する常識を、少々修正する必要がでてきたのだ。

摩擦面をとりまく環境を広くとらえるならば、例えばブレーキノイズのような摩擦による騒音と振動、半導体製造装置における軸受の発塵、人工関節の摩耗粉による血栓の発生など、さまざまな問題が浮かび上がる。しかし現在最大の問題は、摩擦によって無駄に失われるエネルギーの地球環境への影響であり、その軽減にトライボロジーはすでに大きな貢献をしてきたのである。

その規模がいちばん分かりやすいのは、先ほどもふれた自動車の例だろう。わが国は8,000万台近くの自動車を保有し、年間6,000万k1のガソリンと4,000万k1の軽油を燃して、二酸化炭素の大きな排出源になっている。

1970年代の石油危機を契機に自動車の燃費に対する規制がきびしくなり、それに対応すべくさまざまな技術開発がすすんだが、摩擦の低減にはとりわけ大きな期待が寄せられた。ある試算によると、1980～2004の24年間における、エンジン油や摩擦面材料の改良による乗用車用パワートレイン、すなわちエンジンからタイヤに至る動力機構の効率向上は、燃費に換算して16%に上っているという<sup>2)</sup>。全部の車が新技術を搭載しているわけでもないけれど、このようなトライボロジー技術による二酸化炭素の削減は、年間1,000万トンほどと推定されている。

わが国の、しかも乗用車だけの例だが、トライボロジーはその本来の目的である摩擦の低減によって、このように大きな貢献をしてきたのである。もっとも燃費に関しては、引き続ききびしさを増した規準が導入され、一層の努力が求められている状況で、トライボロジストはなかなか辛い。

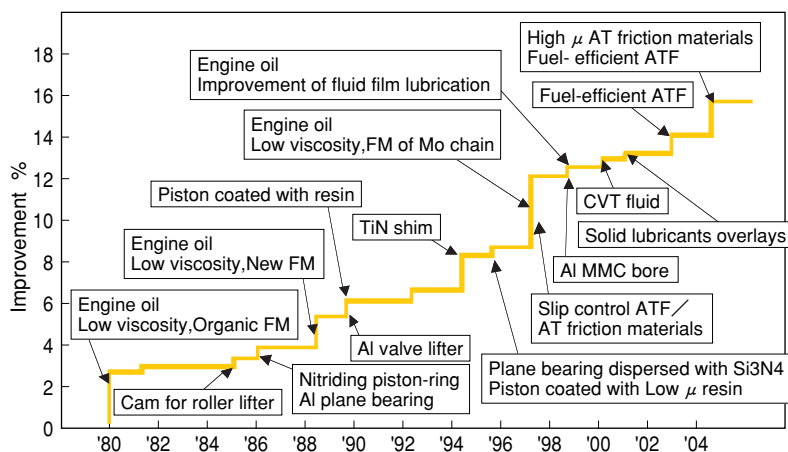


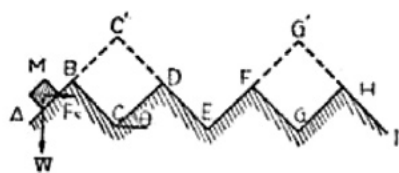
図2 パワートレインの燃費向上<sup>2)</sup>

## 4. 摩擦はなぜ起こるのか

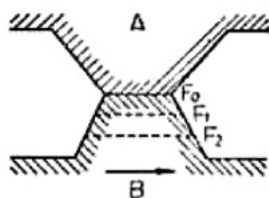
ところで、かくも大きな貢献をした摩擦の低減だが、そもそも摩擦はなぜ起こるのだろうか。

筆者が学生だったころ——というのは1960年代のことだが、この分野の成書といえば、ケンブリッジのF.P.Bowden(英 1903~1968)先生・D.Tabor(英 1913~2007)先生の“The Friction and Lubrication of Solids<sup>3)</sup>”、それに東大の曾田範宗(日 1911~1995)先生の“摩擦と潤滑<sup>4)</sup>”ぐらいしかなかった。曾田先生の本は、先生の研究成果もふんだんに紹介されていたけれど、テキスト風の構成になっていたから——それに何より日本語だったから——われわれはもっぱら後者によってトライボロジーの勉強をした。

その第4章が“乾燥摩擦の機構”であって、“凹凸説と凝着説との論争を中心に”という副題が付いていた。その二つの説の説明図を、同書からキャプションもろとも転載しておこう。



第 21 圖  
凹凸説によるすべり摩擦の模型



第 22 圖 摩擦面の局部的  
凝着と剪断の模型

図3 摩擦の凹凸説と凝着説<sup>4)</sup>

かいつまんで説明しておく、まず凹凸説は、摩擦の原因を表面の凹凸の噛みあいによるとするものである。それ自身には摩擦のない表面ABCD……の上を相手の面の一部Mがすべっていくためには、二面を押しつけている荷重、この図でいうと重力Wに逆らって、坂を登らなければならない。そのために必要なポテンシャル・エネルギーの増分が、摩擦の原因だというわけである。

もう一方の凝着説というのはこうだ。二面AとBの間にできる真実接触点では、両面の原子間の相互作用によって二面がくっついてしまい、ある強度をもつことになる。このへんはまた後で触れるが、そのような状態の面をすべらせようとする、 $F_0$ か $F_1$ か $F_2$ か、ともかくいちばん強度の低い面でせん断が起こり、その抵抗が摩擦の原因だというのである。

凹凸説には、一見して矛盾がある。面が全体として水平であるならば、上り坂と下り坂は全体としてバランスしているはずである。したがって、このメカニズムだけで摩擦による不可逆的なエネルギーの損失を説明することはできないのではないかと。そういう批判もあって、曾田先生は“今日の學界として摩擦の主原因としてはだいたい凝着説に傾いているといつてよからう”と締めくくっておられるから、それが常識であったといつていいだろう。

ではいまの常識は何か。摩擦する物体は多様で例外はいくらでも見つけれられるけれど、金属、ポリマーなど、一般的な工業材料の摩擦の原因はおおむね凝着が主体だと考えていいのだと思う。



## 5. 摩擦の大きさについて

ではそのような摩擦の大きさは、いかほどのものだろうか。それを表現するのに、摩擦係数を使うことは常識だろう。摩擦力と荷重、すなわち二面を垂直に押しつけている力との比である。

その完璧主義によるものか、わが同胞はめったにこういう雑な絵を書かないが、摩擦係数の概略値はだいたい図4のような範囲になる。あちこちに引用してもらったから、一応の常識とお考えいただきたい。

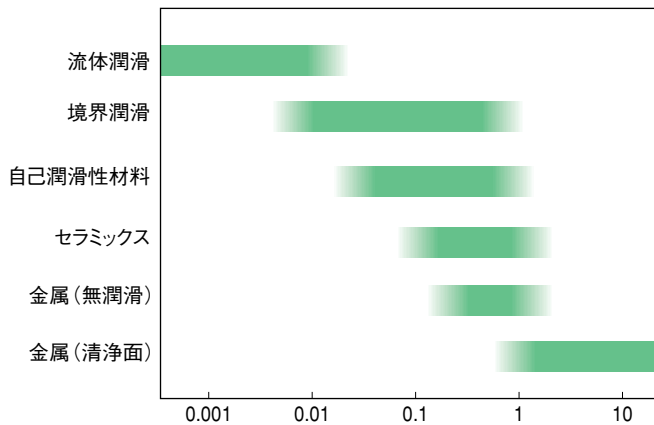


図4 摩擦係数の概略の範囲

まず摩擦係数を0.01以下にしようと思えば流体潤滑、すなわち潤滑油などの粘性を利用した流体潤滑膜を二面の間につくって、固体どうしの接触を防ぐ方法によらなければならない。流体潤滑膜の形成は、荷重が低く、すべりあるいはころがり速度が高いほど容易なので、逆に高荷重・低速になると、どうしても固体どうしが接触してしまう。そのとき接触面に油性剤や極圧剤などの、せん断されやすい吸着膜または反応膜を介在させてやると摩擦を下げることができ、これが境界潤滑である。境界潤滑には流体潤滑ほどの効果は期待できないのがふつうで、摩擦係数は下がっても0.01程度と考えていいだろう。

次の自己潤滑性材料というのは、黒鉛や四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) など、固体潤滑剤の別称である。摩擦係数の低いものとしてはPTFEが有名で、ギネスブックにも載っていた。一方高いほうは、どこまでという規準はないけれど、鉛、金などの軟質金属も自己潤滑性材料の仲間に入れられることがある。

セラミックスはいつきブームになり、それなりの応用範囲が固まった。ただし潤滑しなくても相当低摩擦を示すという期待もあったが、その点はそれほどでもないことが分かったように思われる。

もっとも広く使われる金属が、実は難物である。というのも、金属は表面エネルギーがとても高いという特徴があり、だから裸の金属面は不安定で、何かとくっついて安定になろうという傾向が大変強い。潤滑剤の効きがいいというのはそのプラスの面だが、相手の摩擦面とくっつきやすいというマイナス面がある。

まず金属(無潤滑)と書いたのは、さきほどの“乾燥摩擦”と同じで、ベンジンとかアセトンなどの溶剤で洗って“空気中できれいにした金属面”という意味である。空気中だから表面はだいたい酸化膜で覆われていて、摩擦係数は0.4~1.0あたりというのが相場である。

ところが超高真空中、あるいは水素などの還元性雰囲気中で酸化膜をはぎとってやると、裸の金属面どうしがくっついてしまい、数十から100以上という摩擦係数が測定されることがある。実験室でそのような高摩擦を実現しようとするホネだが、酸素の存在しない宇宙ではこれが問題になるし、また焼付きも、最終的には潤滑膜がうまく覆えなくなった金属面間の、高摩擦の問題であるわけだ。摩擦というのはは地の悪い代物である。

## 6. ゼロ摩擦は存在するか

流体潤滑でなければ0.01以下の摩擦係数にはならないという常識の話をしたが、固体どうしの摩擦係数もゼロになりうるという説がある。

図5<sup>5)</sup>がそのモデルで、二つの結晶面が接触しているところである。いってみれば図3のF<sub>0</sub>面の原子モデルであって、丸い印で上の面の原子が、下の面の原子との相互作用によるそのポテンシャルがカーブで示してある。

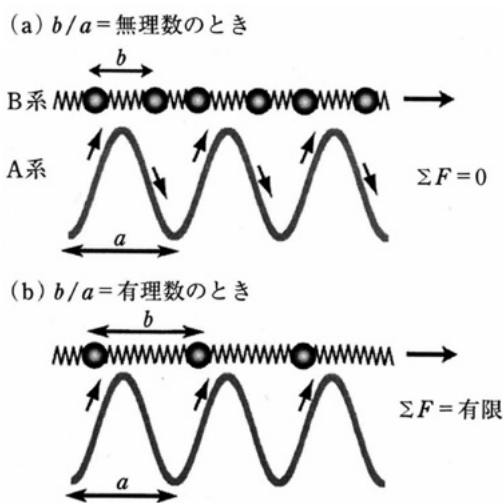


図5 ゼロ摩擦のモデル<sup>5)</sup>

いま上の図で左端の原子を右へ動かそうとすると、その部分ではポテンシャルの上り坂を登らなくてはならないから力が必要になり、左から2番目の原子を動かそうとする場合には、ポテンシャルの下り坂が逆に後押しをしてくれる、そういう原理である。

図の(b)のように、下の面の原子間の距離  $a$  と上の面の原子間の距離  $b$  が等しいか、あるいは整数倍である場合には、上の面をすべらせようとすると、その原子が一斉に坂を上りはじめるから力が必要になり、これが摩擦の原因になる。ところが図の(a)のように、 $a$ と $b$ の比が無理数、つまり割り切れない比になっていると、上の面の原子はポテンシャルの上り坂に

いる奴もあれば下り坂にいる奴もあることになり、必要な力の総和  $\Sigma F$  すなわち摩擦力はゼロになる、というのがその説明である。

気付かれた読者も多いだろうが、結局図5というのは、図3の上半に示した凹凸説のモデルを換骨奪胎したものに他ならず、凹凸説に関する批判は、本質的にここにも当てはまるはずである。ということは図5のメカニズムにしても、(a)において摩擦がゼロになりうるという説明にはなっても、(b)だけで有限の  $\Sigma F$ 、すなわち摩擦の原因の説明はできないように思う。

ゼロ摩擦の考え方にはこういう、いまひとつ腑に落ちないところがあるのだが、それに触発されて、流体潤滑によらずともゼロ摩擦に近い超低摩擦を実現したという研究があるから、世の中は面白い。

最初に測定結果を発表したのは、リヨンのMichel Martinたちであるらしい<sup>6)</sup>。彼らは10nPaという超高真空中で、清浄な二硫化モリブデンのコーティングが測定限界以下、すなわち0.002以下の摩擦係数を示すことを見つけた。その面を分析したところ、二硫化モリブデンの結晶構造のもっともすべりやすい面どうしの摩擦になっていた。ただし二つの表面の結晶が同じ方位で接触していたわけではなく、摩擦面に平行な面内で16°あるいは29°だけずれていて、図5の(a)のような状態が実現されたというわけだ。

これは清浄な結晶面、超高真空という、デリケートな条件において実現したという話だったけれど、ある種のダイヤモンドライクカーボンを、グリセロールモノオレエートという一種のエステルを含む油で潤滑してすべらせると、摩擦係数が0.006という低い値になったという、実用に近い報告<sup>7)</sup>もあって、常識が変わりつつあるようにも思われる。

## 7. 一口に摩擦というけれど……

さてこのへんで、摩擦に話を移そう。

トライボロジーの目的に、摩擦の制御と摩擦の軽減を並べたが、摩擦のほうにはちょっと説明を付け加えておかななくてはならない。

だいたいトライボロジーの用語には、さまざまな現場用語を持ち込んだものが多いが、摩擦という言葉もかなり広義で、というより、いい加減に使われているように思う。たしかに摩擦面に何か損傷が発生すると、たいていは摩擦面がむしられる——つまり減量が生じるから、摩擦と呼びたい気持ちも分からないではない。トライボロジーの目的に挙げた“摩擦の軽減”というときの摩擦は、そのような意味なのである。しかし実際に対策を考えようとするならば、用語はもっと厳密に使うべきで、これが常識ではよろしくない。

摩擦面の損傷は、どういう部品に発生したか、どこまで進展したかなどによって見かけも千差万別だが、同じ部位に代表的な損傷3種が発生した珍しい例を、図6に紹介しておこう。何十年か前の、自動車エンジンのバルブリフターであって、(a)が焼付き、(b)が摩擦、(c)がころがり疲れと呼ぶべき損傷である。

まず焼付きは、潤滑された摩擦面において当初予期した潤滑が何らかの理由で不可能になり、摩擦が急増する突発的な現象であって、スカuffing、スコアリングなどと呼ばれることも多い。起こってしま

えば通常手の打ちようはなく、問題となるのは発生条件であって、減量は単なる結果に過ぎない。

これに対して摩擦というの、摩擦によって摩擦面から材料が少しずつ失われる漸進的な現象である。失われながらも摩擦面はその機能のある程度維持しているのが普通で、問題となるのはどれだけ減ったかという量、摩擦量である。

最後のころがり疲れは、ころがり接触において繰り返される接触荷重と摩擦力によって摩擦面にクラックを生じ、それがすすんではく離を起こす現象で、発生する機械要素により、フレーキング、ピッチング、スポーリングなどの呼び名がある。問題となるのは、それによって振動を生じ、ころがり面としての機能が失われるまでの寿命である。

詳しくお話しするといろいろディテールがあるけれど、摩擦面の損傷の呼び方としては、このへんを常識と考えていただきたい。

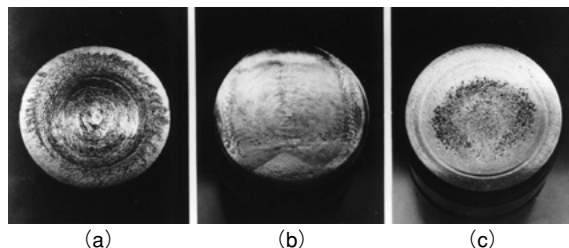


図6 代表的な摩擦面損傷

## 8. 摩擦はなぜ起こるのか

で、そのように定義した摩擦だが、その話がまた混乱している。これには研究者の責任が大きく、どんな摩擦のメカニズムを考え出しても、それを実現するような実験はたいてい可能だから、それを根拠に自説を主張する。しかし、それが常識では困るのだ。トライボロジーが技術としての意味をもつためには、実際の機械・設備で問題になっているのはどのような摩擦なのか、そこからスタートしなくてはならない。

機械に使われている潤滑油をとり出して含まれている摩擦粉を分析する、フェログラフィーという手法が使われるようになったのはもう30年以上前のこ

とだが、そこで見つかった代表的な摩擦粉は、図7のようなものであった。(a)と(b)は電子顕微鏡像、(c)のみは光学顕微鏡像である。

まず(a)では、真ん中の「つ」の字形の摩擦粉に注目してほしい。摩擦面に侵入した砂など、硬い物体で削りとられたアブレイブ摩擦の摩擦粉であって、硬い相手面との摩擦によっても同様な摩擦が起こる。つぎの(b)には、コーンフレックミたいな粒子が重なっているが、これが凝着摩擦の摩擦粉である。最後の(c)は正体のないどろどろしたものだが、摩擦面が潤滑油中の酸などと化学反応してできた生成物が摩



擦によってとり去られた、腐食摩耗の生成物である。空气中で酸化した金属がとり去られる摩耗、一名酸化摩耗もその一種である。

凝着摩耗だけ説明をしなかったが、実をいうと潤滑された機械の摩擦面において、固体どうしが接触する限り必ず発生する一般的な摩耗であって、そのメカニズムがまた議論のあるところなのだ。

そもそも凝着摩耗という言葉は、摩擦の凝着説から派生したものであった。ここで、図3の下半分をもう一度ご覧いただきたい。この凝着部が引き離される時、二面の最初の境界であった $F_0$ ですんなり切れてくれればいいのだが、それ以外の $F_1$ とか $F_2$ とかで切れると、その分だけ下の面は減量を生じることになる。これが凝着摩耗だ、というのがかつての常識であった。ならば、下の面が減量した分だけ上の面

は増量するわけで、それでは摩耗粉が発生する説明にはならないじゃないか、という常識的な反論はむろんあり、そこでさまざまな説が展開されることになったのである。

異論があるのは承知でいうと、凝着摩耗の現在の常識的な解釈は次のようなものである。摩擦の過程で図3下半分のような接触点が発生するというのはいいだろう。そのような接触点は、摩擦面に加わる荷重を受けて、凹凸の凸の部分に変形してできるものだから、そこには大きな垂直力と摩擦力が繰り返し作用する。それによる局所的な疲労破壊によって、図7(b)のような摩耗粉が発生する。

このような考え方が常識になると、現実には発生している摩耗の問題の解決が、少しはスムーズにすすむのではないかと筆者は思う。

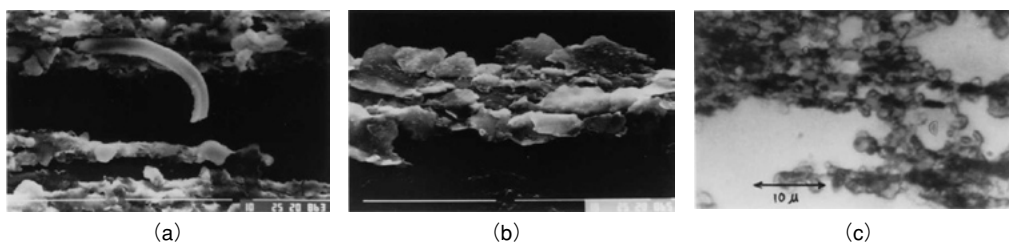


図7 代表的な摩耗粉

## 9. 問題を解決する手段について

さて、トライボロジーの課題である摩擦の制御、広義の摩耗の軽減は、どのようにして実現することができるのだろうか。はじめに“もっとも一般的な手段が潤滑だ”と書いたが、もう少し詳しく書く。

読者には、長い間ミシガン大学で摩耗の研究をしておられたLudema先生という人の、研究業績はともかくその名前を覚えておいてほしいと思う。

これは筆者のオリジナルの中で、いちばん人口に膾炙かいしゃしたもののようなのだが、いろいろ現実の問題のお手伝いをしているうちに、トライボロジカルな問題を解決する手段は三つしかないことに思い当たった。それは、潤滑剤を変える、摩擦面の設計を変える、材料を変える、この三つであって、潤滑剤=Lubricant、設計=Design、材料=Material、その頭2字ずつ

をとると、旧知のLudema先生の名前になるではないか。

手段が三つしかないということを裏返すと、問題解決の糸口が三つもあるということである。

ある製品の性能をもっと上げたいとき、あるいはトライボロジカルな問題が発生したときに、潤滑剤だけ、設計だけ、材料だけに注目して解決しようとしても、往々にしてうまくいかないことがある。機械メーカーの人にいわせると“潤滑剤を変えるのに投資はしない”のかも知れないが、ベストな解は設計変更、新材料の採用にあるかもしれないし、あるいは潤滑剤を含め、それらの組みあわせに見つかるかも知れないのだ。これをぜひ常識と考えてほしい。

## 10. 流体潤滑について

すべり軸受がいい例だが、固体面間のすきまがだんだん小さくなる部分に、流体が粘性によって引き込まれて圧力を発生するという、動圧流体潤滑の理論が発表されたのは、1886年のことである。流体力学の大先生Osborne Reynolds(英 1842~1912)の80ページほどもある論文<sup>8)</sup>1編で、流体潤滑の基礎はほぼできあがってしまったのだ。

そこがReynolds大先生の面目躍如たるところなのだが、長ったらしい粘性流体の運動方程式を、せん断応力はせん断速度に比例する、流体は非圧縮性である、流れは乱れがない層流である、重力や遠心力などは無視する、流体の粘度は一定である、すきまはきわめて薄い、という実に有効な仮定をおくことによって、後にレイノルズ方程式と呼ばれるとても簡単な式にしてしまった。さらに固体面は変形しないと仮定し、表面の粗さを無視することにより、油で潤滑したすべり軸受の性能などをこの式から比較的容易に導くことができたのである。流体潤滑の常識となった基礎理論は、1世紀以上も昔に確立されてしまったのであって、計算機が簡単に使える現在では、実際問題への適用は朝飯前、もはや研究のテーマにもならない。

その後の技術の進展とともに、上述の仮定が成り立たない場合がいろいろ現われ、それらのいくつかは解決されてきた。せん断応力とせん断速度とが比例しない非ニュートン流体による潤滑、気体のよう

な圧縮性流体による潤滑、高速において流れが乱流になった場合の潤滑などがその例だが、極め付きは弾性流体潤滑(EHL)理論だろう。

ころがり軸受や歯車などの流体潤滑は、レイノルズ方程式を直接適用すると、計算される潤滑膜の厚さが実際とあわないことが指摘されていた。この問題を解決したのは、最近傘寿を迎えられたリーズ大学のDuncan Dowson(英 1928~)先生ら<sup>9)</sup>であって、固体面の弾性変形と圧力による流体の粘度の上昇の双方を理論に組み入れることにより、現実には適合する解を導いたのである。さらにその膜の最小厚さを、いとも簡単な式で示したところがDowson先生らの真骨頂であって、EHL理論は——というよりDowson先生らの膜厚の式は、トライボロジーの常識になっている。

ここで手前みそを一つ。銅球とガラス円板との間にできたグリースの潤滑膜を、光干渉で観察した写真を、図9<sup>10)</sup>にお目にかけてよう。運動の向きは右から左で、弾性変形で平たくなった円形接触部の出口のところ、縁に沿って白っぽく見えるのが流体膜のもっとも薄い部分で、こういう形に現われるのがEHLの特徴である。グリースの非ニュートン粘性によるものだが、ころがり速度わずか毎秒2mmの低速で流体潤滑効果を観測したというのが売りである。常識を若干拡張したといえるだろうか。

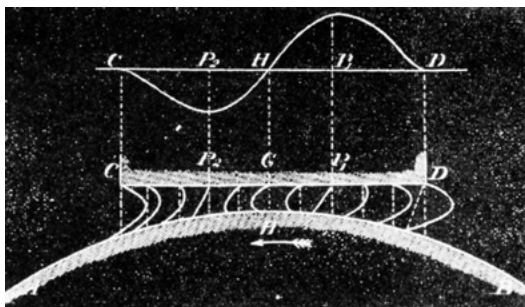


図8 Reynoldsの論文の挿絵の一つ<sup>8)</sup>



図9 低速におけるグリースのEHL膜<sup>10)</sup>

# 11. 流体潤滑の限界

一般に流体潤滑膜は、荷重が低く、すべりあるいはころがり速度が高いほど厚くなるという話をした。したがって、高荷重・低速になると薄くなって、その最小値が摩擦面の粗さ以下になると固体どうしが接触してしまう。そうなると流体潤滑は不可能になって、境界潤滑効果に期待しなければならない。ところが、先にお話したように、境界潤滑では特殊な例を除いて流体潤滑より摩擦係数が高くなるし、摩耗などの損傷を生じる危険も大きく、流体潤滑の限界を知っておくことは大変重要である。にもかかわらず、流体潤滑理論はそのような限界を予測することができない。

それは“まだできない”というのではなく、本質的にできないのだ。というのも、流体潤滑理論は流体力学にもとづいているから、流体の中の現象しか対象としない。今の場合についていうと、流体膜の存在が理論の前提になっているのである。

具体的にいうと、膜が無限に薄くなると、理論上圧力は無限に高くなり、どんな大きな荷重でも流体圧で支えられるという計算になるのである。材料がそんな状況に耐えられるはずはないが、それは流体潤滑理論の与り知らぬところなのだ。表面粗さを流体潤滑の計算に入れたとしても、粗さの突起の先端でやはり同じ結果になる。

ところが計算機が使われるようになり、数値解を求めるようになって、妙なことが起こった。数値計算では、物体中に何ミクロンとか何ミリとかの格子を仮想して、その格子点での数値を計算するのがふつうである。となると、その格子点の間隔が有限である限り、圧力の計算値も無限に大きくはならないのである。適当といえばまさにテキトーな話だが、現実にはそれで話がすすんでいるようだ。これを常識というのには、若干抵抗があるけれど……。

# 12. 境界潤滑の考え方

そこを飛び越して境界潤滑に入ると、これがまた混沌とした世界である。

まずその潤滑膜を意味する言葉が混乱していて、境界膜、境界層、境界潤滑膜などという用語が乱れ飛んでいるのだ。境界層というのは流体力学の用語で、固体面に近く、粘性の影響を強く受ける層をいう。ところが境界潤滑というのは、もともと流体潤滑作用以外の潤滑を指す用語だったから、境界潤滑膜というのは逆に、粘性以外の潤滑効果をもつ膜を意味していた。図3の凝着説のモデルでいうと、接触部 $F_0$ に介在してその面のせん断強度を低下さ

せる膜、といえはいいだろう。もう一つの境界膜というのはあいまいな言葉で、定義がはっきりしていない。まずこのへんの常識をしっかりとほしいと筆者は思う。

流体潤滑作用以外というわけだから、境界潤滑はバラエティーに富んでいる。金属の酸化膜の潤滑効果もそうで、したがって摩擦の原因のところでもふれた乾燥摩擦というもの、酸化膜による境界潤滑下の摩擦だし、自己潤滑性材料の潤滑作用も、固体潤滑と呼ばれてはいるが、メカニズムは境界潤滑に含めるべきものである。

しかしもっとも一般的なのは、潤滑剤中に添加した油性剤や極圧剤の、固体面への吸着膜あるいは反応膜による潤滑である。固体面間の接触点には大きな垂直力・摩擦力が加わり、それらにめげずに二面間に介在し得て、かつせん断強度は低くなくてはならないから、脂肪酸、アルコール、エステルなど極性基をもつ油性剤の化学吸着膜、あるいは塩素、イオウ、リンなどを含む極圧剤の摩擦面金属との反応膜などが、この目的に使われてきた。

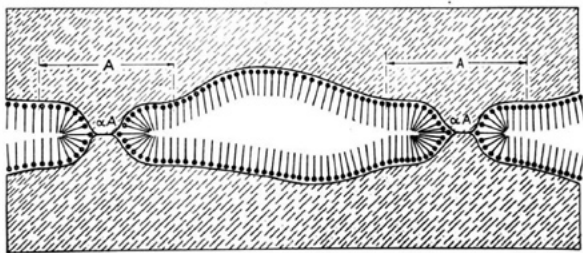


図10 境界潤滑のモデル<sup>3)</sup>

図10がBowden先生らの著書<sup>3)</sup>にある境界潤滑のモデルで、「A」と書いてある部分が真実接触点であり、オタマジャクシのようなのが吸着された脂肪酸などの分子である。さすがの吸着膜も「 $\alpha A$ 」なる部分で破けているところなど、芸が細かい。

このような境界潤滑のメカニズムに関する常識は、Bowden先生のころからほとんど変わっていないが、実際に使われる油性剤や極圧剤はずいぶん変わった。そしてその変化をドライブしたのは、潤滑効果の向上よりも、トライボロジーの第三の目的、環境負荷の低減だったのである。廃棄時にダイオキシンを発生する切削油剤中の塩素の使用中止、自動車の排気ガス処理用触媒の性能を劣化させるイオウ、リン量の低減などがその代表例で、潤滑性能を保ちながらそれらの代替となる添加剤の開発は、現在大きなターゲットになっている。

#### 参考文献

- 1) Scientific Lubrication, 18, 3 (1966) 3
- 2) S.Toyoda : Proc.35th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, (to be published) .
- 3) F.P.Bowden and D.Tabor : The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford (1950) .
- 4) 曾田範宗 : 摩擦と潤滑 岩波書店 (1954)
- 5) 佐々木成朗・三浦浩治 : トライボロジスト, 51, 12 (2006) 855
- 6) J. M. Martin et al., Phys. Rev., B48 N14 (1993) 10583 (岩木雅宣 : トライボロジスト 51, 12 (2006) 873の紹介による)
- 7) M. Kano et al., Trib. Letters, 18, 2 (2005) 245
- 8) O. Reynolds, Phil. Tarns. Roy. Soc. Lond., 177, Pt.1 (1886) 157
- 9) D.Dowson and G.R.Higginson : Elasto-Hydrodynamic Lubrication, Pergamon Press (1966)
- 10) 遠藤敏明・董大明・木村好次 : トライボロジー会議予稿集 東京 2008-5 (2008) 181