

第7表

溶液 10 cc 中に含まれ ている乾燥 試料の g 数 A g	蒸發乾燥後 110°C の恒 温槽に入れ て或る時間 後の試料の 重量 B g	(B-A) g 試料中に残 存している と考えられ るアセトン の量	乾燥試料に 對する殘存 アセトンの 割合 %
0.0696 g	5 時間後 0.0747 g	0.0051 g	7.3 %
	7 時間後 0.0747 g	0.0048 g	6.9 %
	17 時間後 0.0737 g	0.0041 g	6.0 %

文 献

- 1) T. P. Sager: J. Res. Nat. Bur. Stand., **13**, (1934), 879.
- 2) A. Ya. Drinberg: J. Phys. Chem., (U. S. S. R.) **6**, (1935), 870~882.
- 3) 金丸競, 祖父江寛: 高分子構造論, p. 641.
- 4) 岡田元: 基礎纖維素化學, p. 295.
- 5) 谷口政勝, 細野正夫: 工・化, **46**, (昭 18・10) p. 1103.

單分子層及び多分子層の摩擦

會田範宗・宮川行雄

Friction of Mono- and Multi-molecular Layers

By Norimune Soda and Yukio Miyakawa

ABSTRACT: The kinetic frictions of mono- and multi-molecular layers of stearic acid and barium stearate are measured for various conditions of loads, temperatures, curvatures of sliders and combinations of rubbing materials. The Langmuir-Blodgett technique is used for the deposition of molecular layers on plate (Y-deposition). The decrease of friction with the increase of the number of layers is about the same as observed before by other authors, but the effects of curvature of the slider and the combination of rubbing materials are found not to be neglected. Two regions in boundary friction reported before (this Report, 1 (1947), 50-) are also observed in this experiment, the critical transition pressure being 150-200 kg/mm², and the film thickness for the second region is estimated to be of one or three molecular layers. The rates of increase of friction and wear of molecular layers for various conditions during repetition of sliding are discussed. The mechanical transition temperatures for various thicknesses of molecular layers are measured by stick-slip method, and the increase of the transition temperature with the increase of number of layers is discussed in connection with the relation between friction and number of layers.

(1950年12月22日受理)

ま え が き

潤滑, とくに境界潤滑においてどれくらいの厚さの油膜が存在すれば十分なる潤滑作用, 即ち十分に摩擦を低下し, 十分に摩擦を防ぎうるかは, ただに潤滑や軸受の學問的基本問題であるだけでなく, 實際問題としてもとくに重要な課題である。この問題についてはすでにいくつかの研究がなされている。ラングミュア⁽¹⁾ (1934) はガラス面上の單分子層および多分子層について同一個所の繰返し摩擦實驗を行ない, 單分子層ですでに十分な摩擦の低下と耐摩耗性とが與えられることを示している。クレープール⁽²⁾ (1939) は鋼面上に正電荷をもつた油霧を蒸着させ, 光の干涉色からその厚さを確定したうえで繰返し摩擦實驗を行った。その結果によると 30 Å までは不十分で 40 Å 程度の厚さ以上ではじめて十分な耐摩耗性が示されている。

ア⁽¹⁾ (1934) はガラス面上の單分子層および多分子層について同一個所の繰返し摩擦實驗を行ない, 單分子層ですでに十分な摩擦の低下と耐摩耗性とが與えられることを示している。クレープール⁽²⁾ (1939) は鋼面上に正電荷をもつた油霧を蒸着させ, 光の干涉色からその厚さを確定したうえで繰返し摩擦實驗を行った。その結果によると 30 Å までは不十分で 40 Å 程度の厚さ以上ではじめて十分な耐摩耗性が示されている。

そして 60 Å (SAE 60 鑛油使用) ではじつに 2000 回の繰返し摩擦に對して摩擦にまつたく變化が認められなかつたのである。わが國でも赤松氏⁽³⁾ (1936) や伊勢村氏⁽⁴⁾ (1940) が分子層の枚數と靜止摩擦との關係を測定されており、摩擦條件を一定にして試料をいろいろかえたときの結果をえられている。それによると 7~9 枚では十分な摩擦の低下がおこつている。しかし今日までにえられたうちで比較的系統的な測定はパウデン⁽⁵⁾ (1940) らのもので、ラングミュア・プロジェクトの方法でステアリン酸その他の各種の厚さの分子層 (Y 膜) を鋼面上に累積させ、その摩擦と分子層の耐摩擦性とを繰返し摩擦實驗から測定したのである。その結果、ステアリン酸分子層に對してはラングミュアと同様、單分子層ですでに十分な摩擦低下がおこつているが、繰返し摩擦に對しては、單分子層ないし 10 分子層程度では一回の摩擦に對する膜の摩擦速度がきわめて大きく、20~30 枚以上になつてはじめて一定の、しかも低い摩擦速度に落ちつくことが示されたのである。

しかし以上の諸實驗はすべて摩擦條件がある一定のそれに限られており、各種の厚さの油膜の潤滑効果をはつきりつかむためにはさらに荷重、接觸面積、摩擦面の形狀、溫度、摩擦材料の組合せ等の影響を知る必要がある。われわれはかようにして潤滑における境界分子層の各種の條件下における舉動を明らかにし、また境界潤滑において十分な潤滑効果をあらわすような油膜の最小厚さの概念をもつかむ目的で、以上の諸項目について総合的な實驗を行つた。

實驗方法

實驗裝置、すなわち運動摩擦係數の測定方法はすでに報告したとおりで、⁽⁶⁾ 一般の測定條件では摩擦速度 0.05 mm/sec、荷重 500 g で、とくに荷重の影響をみるためには、裝置の荷重點にあらかじめ檢定した藁巻きばねをとりつけ、それを介してしだいに連続的に荷重をかけることにより、一つの測定で零荷重から約 1 kg までの摩擦の連続的變化の寫眞を記録し、あとでそれを分析する方法をとつた。

摩擦棒の先端の曲率半徑の影響をみるためには、直徑 1"/16, 3"/16 の軸受用鋼球をはじめ、各種材料に

よる 0.5 mm R, 2 mm R, 4 cm R の半球面、特殊な尖つた摩擦棒としてガラス切り用のダイヤモンド刃先、ガラス尖端、蓄音機の針等を用いた。摩擦板には軟鋼、銅、ガラスを用いた。摩擦板は一般にはまず水と酸化クロムとをラップ劑としてフェルト上で十分にみがき、ついで 0.25% 苛性ソーダ液に等量のアルコールを加えた液で電解洗滌を行ない、さいごに蒸留水を十分に注いで洗滌し、その後乾燥した。ガラスの場合はクロム硫酸液で煮沸し、水で洗滌したのち乾燥した。

分子層はつねに摩擦板上に累積形成した。その方法はラングミュア・プロジェクトの方法⁽⁷⁾ によつた。試料としてはステアリン酸を用いたが、技術的にはステアリン酸そのままよりもステアレートにしたほうが膜の安定性がよく、固體面上にも累積しやすいので、水槽内の蒸留水に鹽化バリウムを 10^{-4} モル程度加え、バリウム・ステアレートの膜にしてその累積層を作つた。むしろ實驗上のつごうでステアリン酸のままの膜で累積層を作つた場合もある。ピストン・オイルにはオレイン酸を用いた。累積層を作るためには、水の pH がその難易に非常に影響するが、われわれの場合には一般には金屬板に對して pH 6.8、ガラス板に對しては 8 で行つた。

實驗結果とその考察

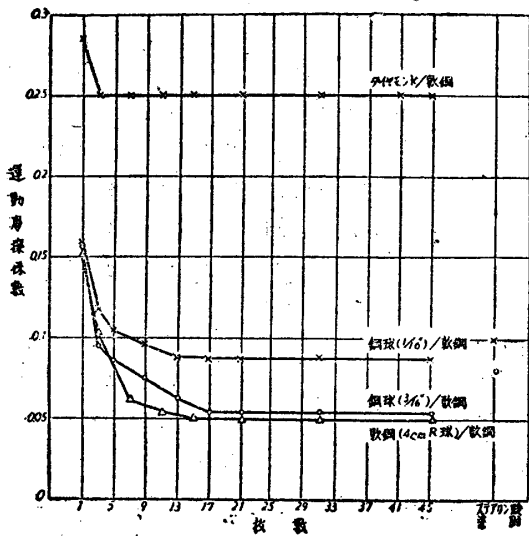
摩擦と分子層の枚數

まずステアリン酸分子層の枚數と運動摩擦係數との關係をみよう。第 1 圖~第 3 圖に種々の摩擦條件に對する兩者の關係を示した。分子層はいずれもバリウム・ステアレートで、單分子層の厚さは約 25 Å である。^{**}

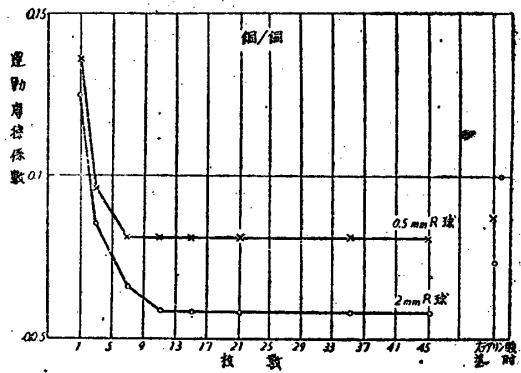
第 1 圖、第 2 圖、第 3 圖をみると、當然はじめから豫想されるように分子層の厚さは境界摩擦の大きさに顯著な影響を與えているが、分子層の枚數がある値に達するとそれ以上厚くなつても摩擦の低下はおこらない。すでにまえがきでものべたように、潤滑効果が飽和するまでに必要な最小枚數なるものが、これらの圖をみるとじつは摩擦係數によつて大幅に異なるべきものであることがわかる。しかもこの摩擦係數が一定値に落ちつくということは、なにも潤滑状態がそこで十分

* 摩擦板を負極、炭素棒を陽極にし、約 1.5 amp で行つた。

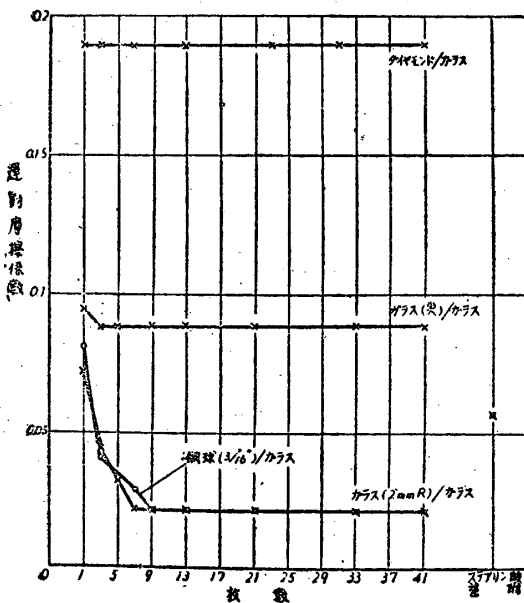
** 鋼球/軟鋼の組合せに對しては pH 8 でも實驗を行つたが 3 分子層以上では pH 6 のときと結果はおなじだつた。1 枚のときは結果にばらつきが多く、はつきりした結論はえられなかつた。アルカリ性の方が酸性のときより分子は密な配列をとるのであるが、そのちがいは大きくないようである。また 鋼球/ガラスの組合せでは pH 7 にして行つてみたが、結果は pH 8 のときと差がなかつた。



第1圖



第2圖

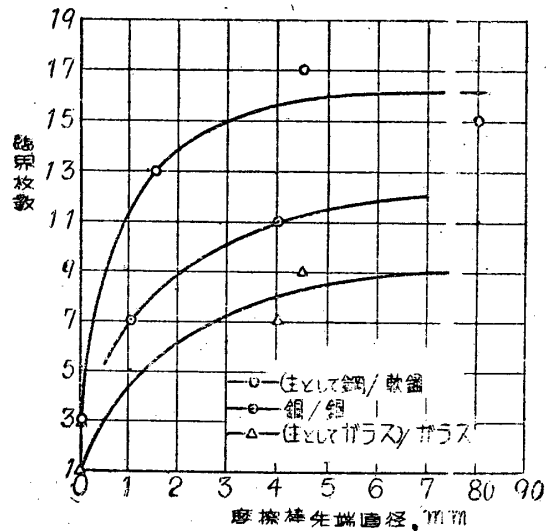


第3圖

満足すべきものになるということにはならないのであつて、それはたんに、いわゆるクーロンの摩擦法則における運動摩擦係数が、與えられた摩擦面の組合せや接觸條件、荷重や速度などに対してこの臨界枚數以上分子膜を重ねてももはや低下しないというだけのことを意味するにすぎないことは注意すべきである。

第1圖において摩擦片にダイヤモンド双先を用いたときは、分子膜1枚と3枚とのあいだで摩擦の低下がみられるが、3枚以上では一定する。そしてこのときの摩擦係数は約0.25で他のものに比してかなり大きい。しかし圖には示さなかつたが、おなじ軟鋼の摩擦板を蓄音機の針で摩擦したときには、枚數の影響はまったくうけず、單分子膜から多分子層を通じ終始摩擦係数は0.7~0.8であつた。しかもこの値はほとんど固體摩擦係數と大差ないものだつた。

いま第1, 第2, 第3圖から、各種の摩擦條件において、摩擦係數が最低値に落ちつく臨界分子膜枚數のだいたいの數をもとめてプロットすると第4圖のようになる。



第4圖

すなわちこの臨界枚數は摩擦面材料とその先端の形狀によつて相異なるが、いずれの摩擦面材料に対しても先端直徑5~10mm程度で飽和し、それ以上大きな曲率半徑の摩擦棒を用いても影響はない。そしてこの臨界分子膜枚數は、十分に丸味をもつた各種摩擦材料に対し、9~17枚の範圍にある。これは分子層の厚さで225~425 Å (約0.02~0.04 μ)に相當する。

第1, 第2, 第3圖の右端の二點は、ステアリン酸を摩擦面上に單純に塗附したときの摩擦である。いずれの場合にも累積分子層の最低摩擦より大きな値がえら

れているが、これは主として表面上のステアリン酸分子の配列が前者においては後者におけるほど密でないことに原因するものと思われる。すなわち後者においては一度水面上に整然たる配列層をつくり、しかもそれをピストンオイルで壓縮したものを摩擦面上に移したためであつて、たとえば赤松氏⁽⁹⁾がピストン・オイルをオレイン酸から表面壓力のより低いカストル油にかえたら、靜止摩擦係数が20~90%も増加したことなどもこの配列分子層の密度の低下に原因するものと説明されているが、まつたくおなじ理由である。

ではこの分子層の厚さの變化にもなる摩擦係数の低下とその飽和現象はなにに原因するだろう。それには眞實表面積ならびに摩擦痕について反省する必要がある。

(a) 第一は眞實表面積の問題である。これについてはすでに著者の一人が別の個所⁽⁸⁾で論じたので詳細は省略するが、要するに固體表面はいかに平滑にみえても、微視的にみるときはなお無数の凹凸や割れが存在し、そのために眞實表面積は見かけの表面積よりもはるかに大きいということである。たとえばジョッフ⁽⁹⁾は完全な結晶面ですらなお表面の收縮などのために自然に(100~1000)Å程度の細かい網目状の割れがあるといひ、これらと表面の凹凸などを合計すると、表面の處理のしかたいかんによつて、眞實表面積はじつに見かけの表面積の(2~1000)倍という實測値がえられているのである。⁽¹⁰⁾そしていま摩擦面に使用している程度の光澤ある仕上げのものでは、およそ(2~5)倍というものがおんとうな値のようである。とすれば単分子膜で表面をおおつたとみえてもそれは見かけ上の表面積をおおつたにすぎず、眞實表面積はきわめてまばらにおおつていることになる。従つて眞實表面積を単分子膜でおおうには、見かけ上は(2~5)分子膜でおおわねばならないことになる。こうしてもしも眞の単分子膜の潤滑によつて摩擦が十分に低下すべきものなら、みかけ上は(2~5)分子膜を累積してはじめて摩擦は一定値に落ちつくはずである。

(b) 第二は摩擦痕または摩擦機構の問題である。すぐに氣づくことは、球面状または尖つた摩擦棒先端で平面上を摩擦するとき、その摩擦している眞實の面はもはや平面ではなく、その先端の形状に比較的近い凹面である。そしてこの凹面ははじめの平面よりは擴大しているはずであるから上のべたとおなじ理由ではじめにたとえ眞實表面積が単分子膜でおおわれていたとしても、この摩擦しつつある眞實の摩擦面を眞の単分子膜でおおうには不足を生じ、ここにさらに餘分

の分子膜を豫じめ準備しておかないと眞實の摩擦面を単分子膜でおおうことはできなくなる。従つてはじめの(2~5)分子膜を更に上まわる分子膜を準備してはじめて眞實の単分子膜潤滑が可能になることになる。

しかしさらにここに注意すべき最も重要な事實は、たとえ潤滑された表面でも、摩擦によつてたんに摩擦棒先端の形状にならつた巨視的な溝ができるだけでなく、そこにはさらに摩擦方向に無数の細かい傷痕を生じ、とくに大荷重や高温のもとにあるときには、ほとんど引つかいたといつた方がおんとうであるような摩擦痕を生ずることである。これは摩擦がたんなる表面現象ではなく、深く材料の内部までも影響をおよぼす作用であること、いいかえれば表面の塑性變形や、凝着作用のために摩擦は一種のきわめて切れあじのわるい切削作用のように相手の面を傷つける事實に原因し、摩擦棒の先端にはしばしば切削しつつある双先の先端にできるような一種の構成双先さへ部分的に形成され、そこにおいて摩擦するという事實によるものである。こうした滑らかでない摩擦面、ないしは荒れた摩擦痕の眞實表面積が、摩擦棒先端の外形にそつた摩擦面積にくらべてはるかに大きかるべきことは明らかで、こうした荒れた表面を一樣に密な単分子膜でおおひながら摩擦するためには、さらに數倍の厚さの分子層、いいかえれば、はじめの見かけ上の表面積をおおうに足るべき単分子膜の數十層を累積しておいてはじめてこの現實の摩擦面を単分子膜で潤滑することができることになる。

以上(a)、(b)の二つのおもな理由によつて、摩擦は分子膜數の増加によつて漸次低下し、またやがて飽和すると考えられるが、その低下の模様は條件によつていろいろ相異なる原因については以下に順次にのべよう。

摩擦面の曲率半徑の影響

摩擦棒先端の曲率半徑が異つたら、一定の荷重に對して摩擦の特性はどうかわるだろうか。このさい注意しなければならないのは、一定荷重のもとに曲率半徑がかわることは潤滑上二つの大切な要素に同時に影響を興えることになることで、その一つは一定荷重のもとに曲率半徑が大きくなると、第1表のように平均壓力(荷重500g、ヘルツの式による)が低下すること、他の一つは曲率半徑が大きくなるといわれる楔作用によつて油膜を摩擦面間に構成しやすくなることである。従つて實驗結果の曲率半徑の相異の原因にはつねにこの二つが混入しているのであるが、いずれの要素

第1表

摩擦棒先端	平均壓力 kg/mm ²	接觸面積 mm ²
1/16" 鋼球	182	0.003
3/16" 鋼球	88	0.006
4cm R 鋼球面	13.5	0.037

も曲率半徑の増大とともに摩擦条件はらくになる點で軌に一にしている。それで、ここでは兩者を一緒に考察し、つぎの項で改めて荷重の影響のみをみて兩者を分離することにする。

ではふたたび第1, 第2, 第3圖ならびにそれらを整理してえられた第4圖をみよう。するとまずつぎのような事實のあることがわかる。

(i) 分子膜の枚数の増加によつてえられる摩擦の最低値は、一定荷重に對し、先端曲率半徑が大きいほど低い。

(ii) 摩擦の最低値のえられる臨界分子膜数は、曲率半徑の大きいほど大きい。

(iii) 従つて単分子膜に對する摩擦と、その摩擦棒に對する最低摩擦との差は、曲率半徑が大きいほど(平均荷重の低いほど、または接觸面積の大きいほど)大きい。すなわち第1圖で説明すればこの差は、ダイヤモンド双先では0.03~0.04、1/16" 鋼球では0.07、3/16" 鋼球では0.10となつている。

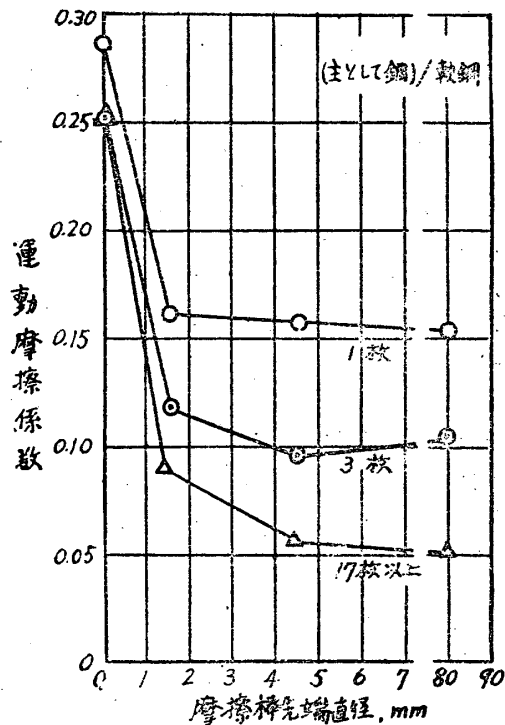
以上の(i), (ii), (iii)はつぎのように解釋すべきものだろう。すなわち先端の曲率半徑の大きいほど平均壓力もさがり、摩擦面の油膜構成能力も増大する。いいかえれば摩擦による油膜の機械的擾亂の作用が小さくなるので、従つてその荷重と摩擦とに對して平衡しうる油膜の厚さも増大しうると考えられるのである。一般に境界層が厚くなるほど配列分子の平均の柔軟性がまし、境界摩擦もまた低下するから、従つて一般にいずれの條件でも分子膜の枚数が増加するほど摩擦は低下するのみならず、曲率半徑の大きいものほどそれに対応する摩擦係数は低下し、また臨界分子膜数は増加するのである。また(iii)の項目も、曲率半徑の大きいものほどそれと平衡しうる分子層の厚さもまた大きくなりうることを考えれば、摩擦の低下においてもまた曲率半徑の大きいものほど大きくなりうることは當然である。

この曲率半徑の影響を別方面、すなわち摩擦面材料の組合せ方面からみることは興味あることであるが、それは改めて別項で論ずることにして、ここでは上の

一般的結論をさらにくわしく、いいかえれば曲率半徑の影響を數量的にしらべてみよう。

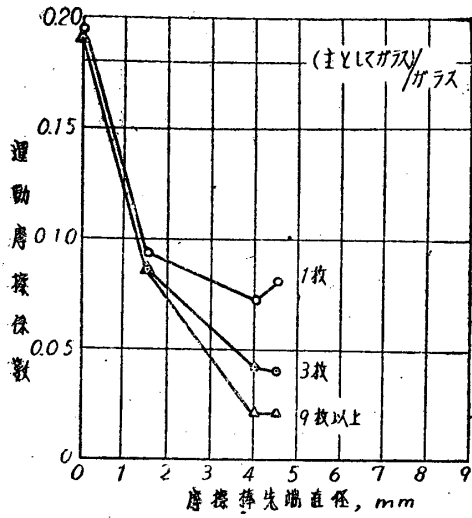
まず臨界分子膜数と曲率半徑との關係であるが、第4圖からすぐわかるように、いずれの金屬、材料組合せに對しても、摩擦棒先端直徑約5mmではほぼ臨界膜数は飽和し、それ以上曲率半徑をましても影響はない。これは境界潤滑においては、この臨界曲率半徑以上大きな曲率半徑をもつた摩擦面を用いても、そこに構成される境界層の厚さはより厚くはならないことを意味するものである。

第二は摩擦と曲率半徑との關係である。第5, 第6圖は第1, 第3圖からひきなおした關係で、單分子層から多分子層まで曲率半徑の影響は鋭くあらわれているのがわかる。そして摩擦係数の一定する摩擦棒先端直徑はさきとおなじくやはり約5mmである。すなわち曲率半徑の大きいことは摩擦係数の低下に有効であるが、直徑で5mmをこえることは意味のないことを示している。



第5圖

以上の事實は、完全潤滑において平面軸受の油導入側にしばしば丸味をつけると——いわゆるフェランチ(Ferranti)の効果——粘性油膜の構成が可能になるという原理と對照するとおもしろい。すなわち粘性油膜におけるように、境界潤滑において、しかも境界層が分子膜1枚といったほとんど流動性のない薄膜であ



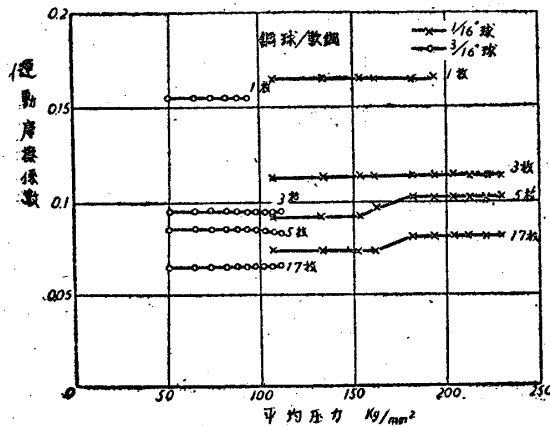
第6圖

る場合にすら油導入側の丸味の影響がきわめて鋭くあらわれるということ、これは実際の潤滑技術上の問題としてもきわめて重要なことである。

なお以上この項でのべたすべての論議においては、はじめにのべたように、曲率半径の大きいことは同時に接触面積の大きいこと、ひいては平均圧力の低下という間接の影響を含んでいるのであるが、じつは以上の曲率半径の影響中、平均圧力の低下という要素はあまり重要でなく、曲率半径の変化が決定的役割を果たしているのである。従つて以上の論は大體プロフィール自體の影響とみてよいのであるが、それについてはつぎの項でのべる。

平均圧力の影響

はじめの實驗方法の節でのべたように、この實驗には連続的に荷重を變化(0~1000g)したときの摩擦の記録寫眞をあつて解析する方法を採用したのであるが、實驗には摩擦棒先端に二種の曲率半径の異つた鋼

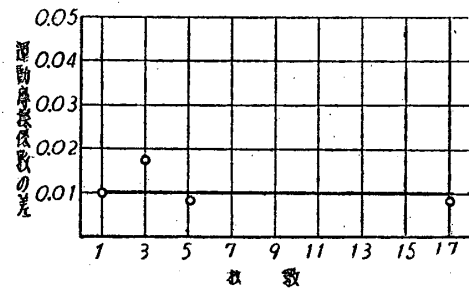


第7圖

球を用い、摩擦板には軟鋼を用いた。横軸にヘルツの平均壓力をとつて兩者の摩擦係數を比較すると第7圖のようになる。圖中の各點は荷重主として100gおきの値をプロットしたものである。

この圖からつぎのことがわかる。

(a) おなじ分子膜の枚數に對し、曲率半径の大きいものほど摩擦係數の低いことはまえと同様であるが、その差は、平均壓力100~150 kg/mm²の範圍の兩者の重なつた部分の比較からわかるように(第8圖參照)、枚數のいかにかわらずほぼ一定(約0.01)である。



第8圖

(b) 摩擦係數は各枚數、各曲率半径に對して平均壓力の變化にもかかわらずほぼ一定で、クーロンの摩擦法則の成立することがみられるが、ただ1/16"鋼球(曲率半径の小さい方)を用いたとき、分子膜5枚以上において平均壓力(150~200) kg/mm²の範圍で摩擦係數が突然に上昇し、しかもその前後の壓力範圍においてはそれぞれ獨立にクーロンの摩擦法則が成立している。

(a)の項目に關し、なぜ分子膜の厚さの大幅の變化にもかかわらず曲率半径の相異の影響が一定摩擦係數差としてあらわれるかは、油膜の厚さとは無關係な、摩擦棒先端の一種の形狀抵抗といつたようなものの影響、すなわち平均壓力が等しければ最高壓力もほぼ等しいが、曲率半径の小さいものほど接觸面積は小さくなり、それだけ應力集中は鋭く、相手の面や表面上の分子膜を傷つける作用が大きくなる結果と思われる。

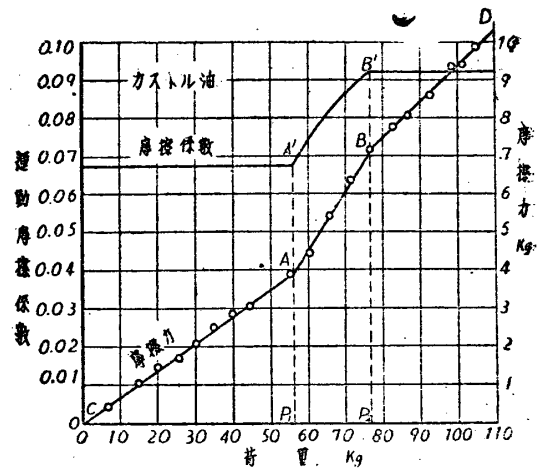
ここで前項で論じた曲率半径の相異の影響に若干ふれよう。曲率半径の相異は、一定荷重の下においては同時に平均壓力の相異の影響をも包含していたが、いま第7圖から一定曲率半径の摩擦面條件において荷重のみを變化したときの状態をみると、摩擦係數に荷重の影響は大體ないとみられるのである。第1表の曲率半径の差による平均壓力の差を第7圖の特性と比較すれば、第1、第2、第3、第5、第6圖にあらわれた曲率半径の相異による摩擦係數の變化は、やはり平均

壓力の變化の影響というよりも先端のプロファイルの差異の影響であることは明らかである。

(b)の問題で、1枚、3枚のときは約 110 kg/mm^2 から 230 kg/mm^2 まで摩擦係数が一定であるのに、5枚以上になると $150\sim 200 \text{ kg/mm}^2$ の範囲で摩擦係数が急に上昇するのはなぜだろう。これはつぎのように解釋すべきである。とにかくこれら一群の曲線は同じ $1/16''$ 鋼球でおなじ条件でしだいに壓力をましているのであるから、1~3枚の曲線と、5枚以上の曲線との相異が材質的なものでないことは明らかである。とすればやはりこの摩擦係数の突然の變化は分子層の構造がこの邊の壓力で急に變化するものと考えなければならぬ。

じつはこれとまつたくおなじ現象はすでに筆者の一名と岡木氏が鋼球と鋼球との點接觸部を利用した境界摩擦の研究⁽¹¹⁾において見いだしているのである。そしてそこではいわゆる境界摩擦と稱せられる領域に、法則的にはいずれもクーロンの摩擦法則に従う意味でともに境界摩擦の特性をもちながら、摩擦係数においては明瞭に大きい領域と小さい領域とに區別さるべき二つの領域の存在することを報告したのであつた。第9圖は、比較のためそのカストル油を用いたときの摩擦特性曲線をあげたもので、横軸に單位球當りの荷重、縦軸に單位球當りの摩擦力と摩擦係数とを示してある。A-Bの領域がいわゆる還移領域で、C-Aが第1領域、B-Dが第2領域である。そしてC-Aなる第1領域は境界層が比較的厚い状態、A-Bで徐々に第2領域に移行し、B-Dは境界層が単分子層ないし數分子層のきわめてうすい境界層で潤滑されている状態と推定したのであつた。しかし當時はこの二つの領域の還移の機構については、ただ境界層の比較的厚い領域から、きわめてうすい領域へ移行するという以外、兩領域の境界層の厚さについてはなんら具體的な數字を示すことはできなかつた。

そこで改めて第7圖をみよう。 $1/16''$ 鋼球を用いたときの5枚以上に對する摩擦係数曲線が第9圖のそれとまつたくおなじことに気がつくとおもう。第7圖と第9圖との實驗條件はまつたく別であるが、摩擦特性が第1領域から第2領域に移行する機構はまつたくおなじと考えられる。すなわち単分子層ないし3分子



第9圖

層の厚さの境界層はほとんど固體面と一體のきわめて強靱な分子膜であり、壓力が 110 kg/mm^2 程度から 230 kg/mm^2 程度まで増大してもその潤滑機能に特別の異常は生じないのであり、結局ただ一つの摩擦係数を有するクーロン法則で規定されるのである。それが5枚以上の分子膜を重ねたときは、ある平均壓力(第7圖では $150\sim 170 \text{ kg/mm}^2$ で境界層の構造に突然變化を生じ、それまでよりもずつとうすくなるのである。いいかえればここで境界層はある種の降伏を生じ、より摩擦係数の大きい境界摩擦に移行するのである。しかしそこでも依然としてクーロン法則は成立する。これが第2領域である。そして大切なことは、この3枚までは降伏せず、5枚以上で降伏することから、見かけ上境界摩擦の第1領域は5分子膜以上の厚さ、第2領域は3枚以下というのが原理的な構造ではないかと思われることである。むろん分子層の降伏にともなう各種の副次的原因から、第2領域とともかならずしも摩擦係数は一致せず、分子膜の枚数の影響はやはり第1~3圖のような形であられるが、これはむしろ當然であろう。

さきの實驗⁽¹¹⁾においてこの第1領域の限界點における最高壓力をヘルツの式で算定したら、一般潤滑油に對し $(300\sim 400) \text{ kg/mm}^2$ という値をえた。従つて平均壓力としては $(190\sim 260) \text{ kg/mm}^2$ という値となり、第7圖の第1領域限界點の平均壓力と比較するとき、實驗條件の大きな相異にもかかわらず程度においてほぼ一致する。

* これはかりにヘルツの弾性變形の式で壓力を算定した上の比較であるが、第7圖の實驗で實際の摩擦痕の幅から平均壓力を算出すると、500gの荷重に對し、 $3/16''$ 球では 55 kg/mm^2 、 $1/16''$ 球では 80 kg/mm^2 となつて、ヘルツの計算値の約半分になる。同様のことは以前の鋼球同志の摩擦實驗⁽¹¹⁾の場合にもいえるから、いずれにせよやはり兩實驗における摩擦曲線のまがり方が同一原因によることはまちがいないと思ふ。

境界層の厚さに關する推定値はこれまでじつに無數に存在し、その値は單分子層からじつに數 μ まで廣く主張されているが、⁽¹²⁾ 固體面で強靱な吸着層を作り、摩擦の機械的擾亂に對してもあまり剝離することなく潤滑の役割を果しうるといふ意味の境界層の厚さは、この實驗からやはりラングミュア⁽¹³⁾ などの主張するように單分子層ないしせいぜい3分子層までといふことになる。

摩擦面材料の影響

潤滑摩擦面における摩擦面材料の組合せの影響はきわめて複雑であるが、その一般原則についてはすでに別の個所⁽⁶⁾、⁽¹⁴⁾ で報告したのでここでは省略する。要するに一般には固體摩擦の大きい組合せほど境界摩擦もまた大きいというのがその一つで、この原則はいまの累積分子層による潤滑面でもほぼ成立している。すなわち摩擦が十分に低下したところでは固體摩擦の機械的擾亂の大きい銅/銅、鋼/鋼の摩擦が大きく、ついでガラスとなつている(第1, 2, 3圖参照)。銅とガラスの同一材料同志の固體摩擦はほぼ同程度かむしろガラスの方が大きいほどであるが、表面の粗さにおいてガラス表面の方が滑らかなだけ境界面の眞實密度は大きく、結局同枚数の分子層でもその潤滑効果はガラス面の方が大きいと思われる。事實潤滑面の摩擦痕をみると、金屬の場合には明瞭な傷痕がのこるのに、ガラス面ではダイヤモンド双先で摩擦したときのほかに傷痕が認められず、その境界摩擦の低い理由はガラスの硬さの低いこと、また表面の滑らかなことなどにあるものと推定されるのである。第3圖ではほぼ先端直徑のおなじ $3/16''$ 鋼球と、2mm R ガラス球面とでガラス面を摩擦したときの特性がまったく重なつてゐるのは、ガラス面を兩球面で摩擦したときの固體摩擦がまったく同程度である事實によるものと思われる。⁽¹⁶⁾

前項で最小摩擦係数のえられる臨界分子膜枚数と摩擦棒先端直徑との関係をもとめ、後者がだいたい5mm前後で臨界枚数は一定することを指摘したが、この臨界分子膜枚数の飽和値が摩擦面材料の組合せによつていかに相異なるかを觀察しよう。

この関係は第4圖に明らかである。すなわちガラスで7~9枚、銅で11~13枚、鋼で15~17枚である(第1~3圖参照)。この理由も境界摩擦における機械的擾亂の影響の法則ではほぼ説明されるのであつて、機械

的擾亂の要素の低い鋼が厚い油膜を構成し、高い銅がうすい油膜を構成するのは當然である。しかしこれでもまたガラスは一つの特異性を發揮し、最もうすい分子層しか構成しえないのである。しかしこれは摩擦といふよりもやはりガラスの硬さが軟鋼の5倍、銅の20倍といつたきわめて大きい値をもつために、その高い平均壓力が累積分子層の上層部を剝ぎとるためと、表面が平滑であるために比較的少ない分子膜枚数でいち早く必要な表面分子密度に達するためと考えればわかる。

要するにこの實驗にあらわれた結果はすべて境界摩擦における機械的擾亂の大小の原因からほぼ説明できるのであるが、ただ一つガラスにのみ特異性がみられ、それは硬いために平均壓力の高くなる潤滑上の困難と、滑らかなために分子層の眞實密度が一般金屬よりも高くなる潤滑上の有利さが混合してあらわれ、しばしば異常性を示すものである。これをやさしくいえば、ガラスとガラス面とのあいだには厚い分子層は構成されにくい、單分子層程度のうすい膜でも比較的よく潤滑の目的を達するというこゝで、第1~3圖をみても單分子膜に對する摩擦はガラスが一ばん低いのである。

繰返し摩擦による分子層の摩耗

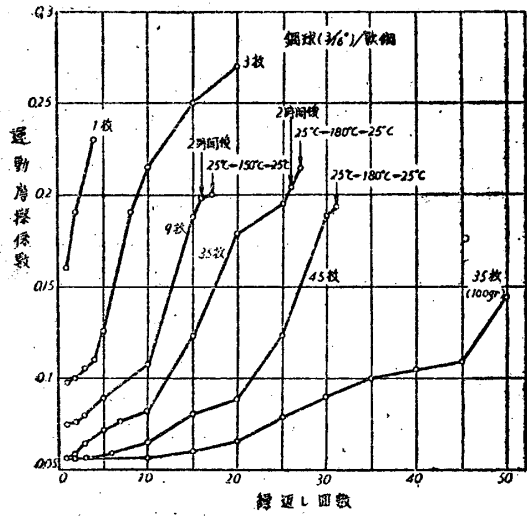
以上の實驗はすべて完全に構成された何枚かの分子層をただ一回摩擦したときの摩擦係数をもとめたものであるが、じつさいの軸受面では、同一個所を連続的に摩擦するためにしだいに潤滑膜が剝離摩耗し、ついに焼けついたり、ひどい摩耗を生じたりするのである。それでつぎにラングミュア、その他の例にならつて分子膜の繰返し摩擦の實驗を行ない、摩擦條件を廣くかえることによつて、この方面からさらに潤滑や摩擦における境界分子層の挙動を追究することを試みた。

實驗にはやはりまえとおなじ軟鋼、銅、ガラスを摩擦板として用い、摩擦棒で5mmだけ摩擦すると、つぎに3minだけ時間間隔をおいて同じ摩擦棒で前回の摩擦痕上において第2回の摩擦を行つた。プロットした値はすべて各回5mm摩擦したあいだの平均運動摩擦係数で、荷重は500gを標準とした。

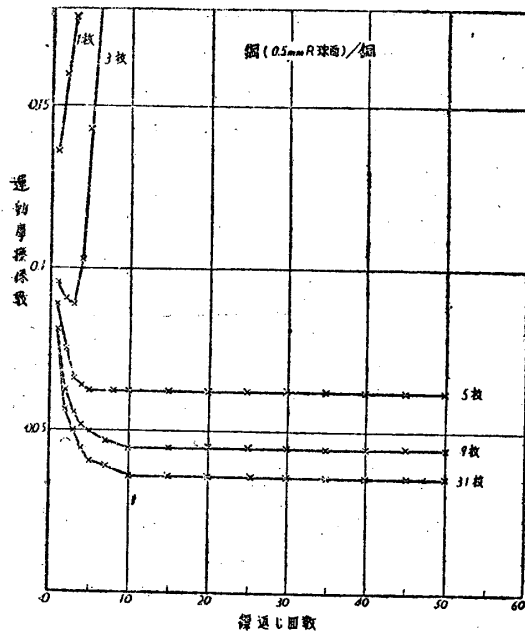
第10, 11, 12圖に各摩擦板に對する測定結果を示す。

第10圖は軟鋼摩擦板の場合で、累積層はバリウム。

* ショアの硬さで、ガラスは130、軟鋼は20~30、銅は6程度である。⁽¹⁵⁾



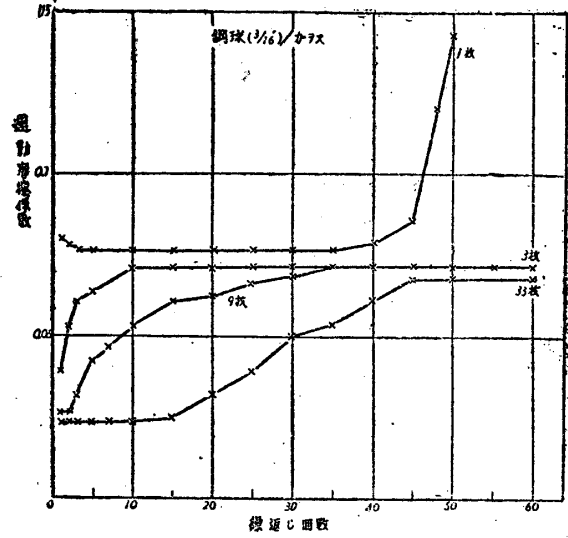
第 10 圖



第 11 圖

ステアレートではなくてステアリン酸のみである。それは、あとの項でものべるように、この実験の途中若干の熱擾亂の影響をしらべたので、その融点(69.1~69.2°C)や轉移温度(137°C)のはつきり知れている⁽¹⁷⁾方が好ましかつたからである。

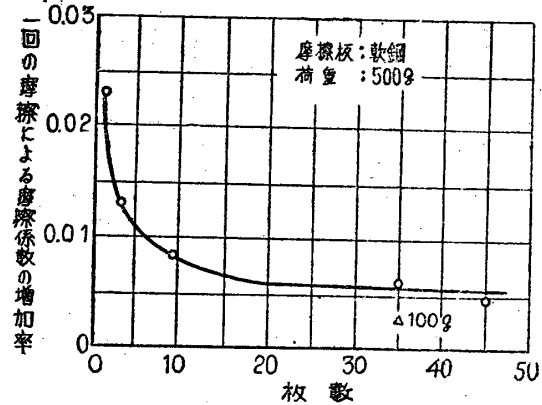
圖で單分子層の場合は繰返し摩擦によつて摩擦係数は急速に増大する。これはあとの項でものべるような機構で分子層が急速に剝離または摩耗することを意味する。そして分子膜の枚數が増大するに従つて分子層の摩擦速度の低下することはラングミュア、クレープール、パウデンらの實驗結果とまつたく同傾向である。そして45枚重ねると30回の摩擦でようやく摩擦係数は



第 12 圖

はじめの0.06から0.19まで増大する。むしろこの分子層の摩耗は機械的な原因によるものであるから、たとえば荷重が減少すれば摩耗率の低下するのは當然で、圖に荷重100gの場合の一例を示した。すなわちこのときは35枚で50回摩擦しても摩擦係数は0.06からようやく0.15に増加したにすぎない。

第10圖から各枚數に對する分子層の摩耗状態をみるため、一回の摩擦による平均の摩擦係数の増加率をもとめた。第13圖がそれで、摩擦係数が第一回の摩擦における値から約0.2に増大するまでの平均値をとつてある。すなわち枚數の少ないときの摩擦係數の増

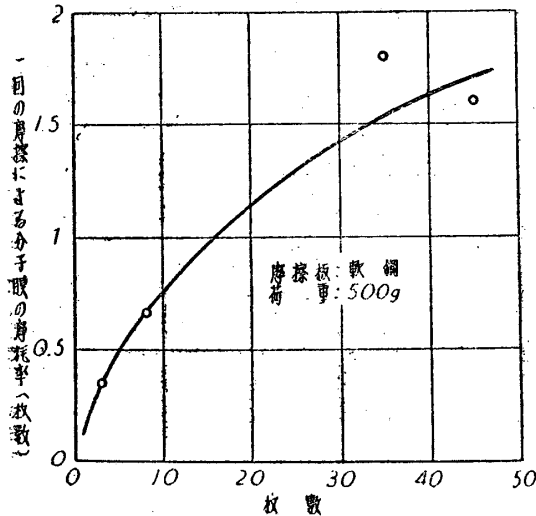


第 13 圖

加率は非常に大きく、10枚以上ではほぼ一定する。そしてこの臨界枚數は摩擦係數の一定する臨界枚數とほぼ一致する。この傾向はパウデン⁽⁶⁾らが摩擦棒先端表面に分子膜を累積してえた結果とほぼ一致している。荷重を100gに減じたときの摩耗率の低下の状態も圖にプロットしたとおりである。

しかしここで重要な點は、摩擦係數の増加率が枚數

の増加とともに低下するということが、分子層自體の摩擦率がやはり枚数の増加とともに低下するというにはならないことである。むしろ結果は逆で、一回の摩擦による分子層の摩擦率は枚数の増加とともに増加するのである。いま多分子層を摩擦したとき、摩擦はしだいに増加してついに単分子膜の値に達するが、この単分子膜に対する摩擦まで増加したとき、かりに多分子層がちようど単分子膜まで摩擦したものと仮定すれば、一回の摩擦に対する分子層の摩擦率をもとめられる。第14圖はこうして第10圖からもとめた関係である。



第14圖

なぜこのような傾向をたどるかという、まず分子層の摩擦率は、一つには摩擦の外的原因となる機械的擾亂、すなわち摩擦の大小により、他には摩擦さるべき分子層が表面に吸着している平均の強さ、すなわち分子層の摩擦に対する抵抗力によつてきまるべきものである。ところが、前者は分子膜の枚数の増加によつてはじめは急速に低下してやがて一定し、後者は枚数の増加によりしだいに弱くなるのである。この兩者のバランスによつて分子層の摩擦率がきまるが、単分子膜に近いときは摩擦の増加の割合よりも分子膜の吸着力の増加の方がはるかに大きいためにその摩擦率は小

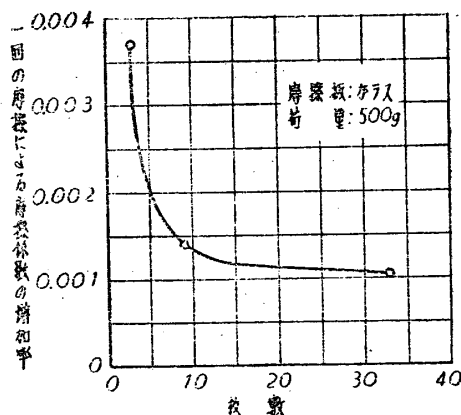
さくあらわれ、多分子層になるほど一定の摩擦力に対して多分子層の平均の吸着力はますます弱くなるのでその摩擦率は増加するのである。

第11圖の銅棒と銅板の組合せの場合をみよう。分子層はバリウム・ステアレートである。第10圖との相異は、1枚に対して急激に摩擦の増加する点はおなじであるが、3枚以上において、はじめの数回の摩擦に対して摩擦係数がかえつて低下していることである。こうした傾向はパウデン⁽⁸⁾らの実験にも若干認められたが、おそらく銅の場合は鋼の場合よりも摩擦による摩擦面の塑性變形が著しくあらわれた事實に原因するものと思われる。すなわち軟鋼の場合には摩擦にさいして分子膜が金属とともに堀りおこされてしだいに溝がふかくなつていたのに反し、銅の場合には分子層の摩擦よりも塑性變形による摩擦面の増大の方が目立ち、そのために摩擦が低減したためと思われる。事實5枚以上で50回繰返し摩擦したあとの摩擦痕をしらべてみても著しい凹みの痕はついているが、その表面に銅の地肌がむき出しにでている形跡は認められず、従つて鋼の実験結果(第10圖)との比較から、分子層が金属もろとも堀りかえされて摩擦するのでなく、ただ表面をなでる意味で摩擦しただけの機械的擾亂では分子層は繰返し摩擦に対してもなかなか摩擦するものでないことが推定されるのである。

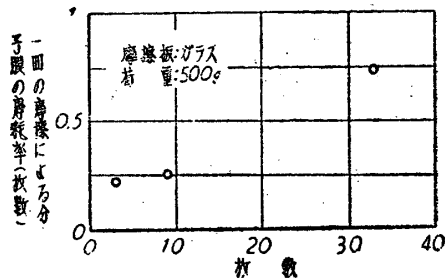
この重要な結論は、これまですでにしばしば論ぜられてきたように、表面に吸着した単分子膜が機械的な擾亂に対してはきわめて強靱であり、事實上表面の金属原子と一體と考えるべきものであるという考え、また化学的な表面の洗滌などによつても容易に除きえない程度のもので、もしもこれを除かんとすれば電解洗滌とか、機械的に研削するとか、とにかく地肌をなす金属原子もろともに除くような手段でなくしては単なる機械的擾亂ではなかなか剝離するものでないという考え方を強く支持するものである。そしてこの結論はつぎのガラスを摩擦板とした実験によつてさらに強力に實證されるのである。

* 古賀氏⁽¹⁸⁾はバルミチン酸の薄膜を摩擦によつて剝離する実験を行ない、100 g/cm²の壓力で同じ個所を1000回摩擦してもまったく剝離した形跡のないことを電位解析法でたしかめられている。この壓力は實際の軸受面平均壓力としてはきわめて低い、単分子膜の吸着力の異常に大きいことを示すものである。われわれの実験では數萬氣壓の平均壓力で摩擦したが、それでもなお簡単には剝離しない。とくにガラス面上の単分子膜が數萬氣壓で40回の摩擦に耐えたことは驚くべきことである。この機械的擾亂に強靱な単分子膜も熱的擾亂にはきわめてよわく、いわゆる轉移溫度以上で簡単に剝離することはしばしば論ぜられてきたとおりである。そしてこうしたことから、軸受の焼付き現象が壓力の直接の影響ではなくて溫度上昇の結果であり、高壓力は軸受の高温を招來するからこそ危険なのであることは明らかで、この點は改めて力説したい。(21)

では第 12 圖をみよう。分子層はおなじくバリウム・ステアレートである。まず目につくのは、単分子膜ですでに 40 回の繰返し摩擦によくとえることである。そして多分子層のときには摩擦のたびに分子膜が少しずつ摩擦してやがて平坦な単分子膜の摩擦直線に近づくのである。いま軟鋼面に対するとおなじ考えで分子層の摩擦状態を繰返し摩擦による摩擦係数の増加率と分子層の摩擦率とであらわすと、それぞれ第 15, 16 圖のようになり、いずれにおいても軟鋼の場合と傾向はおなじであるが値においてはるかに低いことがわかる。



第 15 圖



第 16 圖

ガラス板における摩擦後の摩擦痕はとくに注目すべきものがある。それは繰返し摩擦後も摩擦面になんらの傷痕が残らないことである。すなわち摩擦の痕跡がまったく見あたらない程度にしか表面を傷つけないのであつて、これは金属摩擦板のときと非常に異なつた現象である。鋼球でこする場合、相手が金属でないこと、ガラス表面が傾いこと、きわめて平滑なことなどが相まつて摩擦の機械的擾亂を低下させ、ために分子層の摩擦が少ないのであろう。かようにしてガラス面においては表面のみで摩擦しあうのであり、表面が崩り荒らされる金属面の場合のように、分子層が崩れおこされ、または摩擦する金属とともに摩擦面からとり除かれることがなく、従つてまた新たに表面に露出した

地肌を潤滑する必要もないので、比較的やすい分子層で多数回の繰返し摩擦にたえるものと考えられる。これは分子層の摩擦が一般金属摩擦の場合には分子層だけの摩擦として金属の摩擦と獨立には容易におこるものではないというさきの主張の一つの強い論據となるとともに、ガラスの摩擦が金属の場合に比して比較的少ない分子膜枚数で一定値に低下し、また接觸面の曲率半径のいかんにも比較的鈍感であるというはじめにのべた事実ともよく符合するものである(第 3 圖, 第 4 圖参照)。

なお以上を一括して、各種の厚さの分子層を繰返し摩擦したとき、何回で単分子膜に対する摩擦まで増大し、またはそれを超過するかを第 2 表に示した。この表から一般に単分子膜に対する摩擦係数の低いものほど摩擦回数が多くなることがはつきりとわかる。これもまた境界潤滑の諸現象における機械的擾亂の影響としてみれば無理なく理解できることである。

第 2 表

分子膜枚数	鋼球(3/16")	銅(0.5 R)	鋼球(3/16")
	軟鋼	銅	ガラス
1	1	1	40
3	7	5	60 以上
5	—	50 以上	—
9	13	50 以上	60 以上
31	—	50 以上	—
33	—	—	60 以上
35	18	—	—
45	28	—	—
単分子膜の摩擦係数	0.16	0.13	0.08

二三の機械的、熱的擾亂の影響
—分子層の流動性について

累積したステアリン酸分子層がたんに塗附したときよりも密度の高い強靱な境界層を作ることには、はじめにのべた単純な摩擦實驗の結果からも明らかである。しかしこの累積分子層も枚数の増加とともに、その上層部の配列はしだいに弱いものとなり、その證據には繰返し摩擦實驗においても第 14, 15 圖のような結果をえた。一方繰返し摩擦實驗において数分子膜以上の厚さになると、よく数回ないし数十回の摩擦に耐えるようになるが、それには分子層の上層部が流動性をもち、一回摩擦して分子層が排除されたところに、つぎの摩擦までのあいだにまわりから再び分子膜が擴張または流下し、そのために次回の摩擦においても前回とおなじ程度の摩擦係数を示すのだという推論もなされ

てきた⁽²⁾。なるほど 1 回の摩擦による分子層の摩擦率が、枚数の増加とともにふえることは、理論的にも當然そうであるべきように、上層部ほど配列、または結合力が弱いことを意味するものであるが、いわゆる流動性が数分子層にしてあらわれるかどうかは大いに問題がある。

機械的擾亂に関する実験として、まず 21 枚のバリウム・ステアレート累積層を濾紙で軽くふきとると、それまであらわれていた干涉色はまったく消失し、機械的に簡単に剝離することがわかる。この残留分子膜数を摩擦実験によつて推定すると、約 3 枚に相當する摩擦係数を示す。従つて自然の流動性は別としても、分子層中きわめて強力に固體表面に吸着しているのはやはり 1 枚ないし 3 枚ということが結論される。

第二に流動性に関する簡単な実験の意味で、干涉色のあらわれている固體面上の多分子累積層に棒の先端で任意に文字をかいた。するとそこだけ干涉色が失われてはつきりと文字がよみとれる。それを数日間放置しておいたのであるが、その文字は消失するどころか、鮮明度になんらの變化がみられなかつたのである。

第三に軟鋼板上に適當な間隔で 9 枚、21 枚、41 枚、61 枚、81 枚、101 枚の各厚さのステアリン酸分子膜を累積し、これを音叉の先端につけて 50 サイクルで約 5 時間振動を與えたが、各分子層の干涉色や面積になんらの變化が認められなかつた。分子層の厚さは 101 枚で約 0.25μ である。

第四におなじ試験片を直径 70 mm の回轉圓板の周縁につけて約 1 時間ふりまわしてみたがやはりなんらの異常は認められなかつた。

きわめてうすい層であるため、おそらく粘度の影響だけでも簡単に流動はしないと思われるが、そこにさらに配列の効果が加わつて、いずれにせよ摩擦痕を自然にまわりの油分子膜が補修するということは考えられないようである。

つづいて若干の熱擾亂の実験を試みた。

まず摩擦板をステアリン酸の融點よりも高い 80°C 以上に加熱し、そこにステアリン酸を塗附してから室温まで冷却したのち摩擦係数を測定すると、まえにものべたようにその値は 21 枚以上の累積層のときよりも大きくなる。その理由はまえにものべたように分子層の密度が後者におけるほど密でないためである。さらに蒸溜水のみでステアリン酸の多分子層 (35 枚) を

累積すると第 10 圖に示したように $3/16$ 銅球に對し、摩擦係數 0.055 を示すが、これを加熱すると 70°C 前後でそれまであらわれていた干涉色が消失して白い膜になる。融解による配列層上層部の亂れによるものと思われる。それで 35 枚の累積層を室温 (27°C) から一度 150°C まであげて、ふたたび 27°C にさげて改めて摩擦係数を測定すると、はじめの 0.055 にもどらずに 0.12 に増大した。これは高温による配列の亂れがそのまま残つた影響である。

一方バリウム・ステアレートの累積層は 150°C くらいまで加熱しても、その干涉色は依然として消失せずに残つている。そこでこのバリウム・ステアレートの 35 枚の累積層を作り、室温 (27°C) から 150°C まで加熱してふたたび 27°C にさげ、しかるのち摩擦係数をもとめたら、やはり加熱前とおなじ 0.055 なる値をえた。もつともバリウム・ステアレートの薄膜の融點は水の pH によつて著しくかわるし、また蒸溜水にバリウム・イオンとして加えるものが鹽化バリウムであるか炭酸バリウムであるかによつてもかわるから、嚴密に一義的に何度ということはいきめられない。これはプロジェクトの実験⁽⁷⁾などにもよく示されている。しかしわれわれの実験でえられたバリウム・ステアレート膜は 150°C くらいまで配列にさしたる亂れがおこらず、その結果ふたたび温度をさげたときにはじめとおなじ摩擦係数を示したことは容易に想像できる (次項参照)。プロジェクトの報告⁽⁷⁾によると、加熱によつて累積層は若干厚みが小さくなるようである。配列の弛緩であるが、この程度のことは冷却によつてふたたびもとの状態にかえるようである。

前項の繰返し摩擦実験の途中においても若干の熱擾亂の影響に関する試みを行つた。第 10 圖において 9 枚の累積分子層に對し、15 回の繰返しの摩擦によつて相當摩擦部分の分子膜の剝離したところで 2 時間放置し、その後 16 回目の測定を行つたが、膜の流動や擴張によつてその摩擦痕が新しく潤滑されるといつた様子はなんら認められず、摩擦係数はさらに増大していた。ついで室温 (25°C) から 150°C に加熱して膜を一度融解させ、ふたたび 25°C に冷却して 17 回目の測定を行つたが、依然として摩擦係数の低下は認められなかつた。同様にしてもつと厚い 35 枚、45 枚の累積分子層についても同様の実験を行つたが、圖に示したように結果はおなじだつた。

* さきの機械的擾亂による流動性の実験は、主として干涉色の變化をみただけで、干涉色に變化はなくとも擴張作用による分子膜の擴がりが無いとは斷言できなかつた。ここでのべる摩擦実験は單分子膜の有無にすらきわめて鋭敏に反應するから、この實驗結果は擴張作用による分子膜的流動効果をも否定するものである。

以上のような分子層の弛緩、流動性に關する實驗から、數十分子層程度 (0.25μ 以下)の薄膜に對しては流動性の効果といつたものは考えられず、従つて一度摩擦した痕跡に側面から潤滑油が補給されるということはまったく考えられない。やはり1回の摩擦によつてなお摩擦痕に残つてゐる潤滑油膜がさらに2回目の摩擦に對して潤滑効果を發揮し、しだいに摩擦してまつたくなつたに近くなつてはじめて摩擦は急上昇するという考え方が正しいように思う。もつとも數百分子層以上になつたらまた條件はおのずから異なるであろう。むしろ數十分子層のものが一定の割合で剝離するのではなく、厚いときほど摩擦剝離の速度は大きく、さいごの単分子ないし3分子層程度が摩擦條件すなわちその機械的な擾亂の大きさによつて、たとえばガラス面のような場合にはよく數10回の摩擦にたえ、鋼や銅の場合には比較的急速に摩擦するのである(第14, 16圖參照)。こうした意味でクレープール⁽²⁾が4分子層程度でかなり強靱な潤滑膜が形成され、相當の繰返し摩擦に耐えるという考え方はわれわれの實驗結果ともほぼ一致するのであるが、6分子層程度ですでに膜の流動性の効果があらわれるという推定には賛成できない。むしろすでに簡単な實驗でわかつたように3分子層程度以上の高次配列層は機械的には非常に弱いのであるから、摩擦と同時に摩擦棒先端のまわりにこれらの分子が附着し、摩擦と同時にこれらの油分子は摩擦棒先端の後側から分子膜の一度剝離した痕跡に改めて塗附されてゆく効果の方を重視したいと思う。

多分子層の機械的轉移溫度について

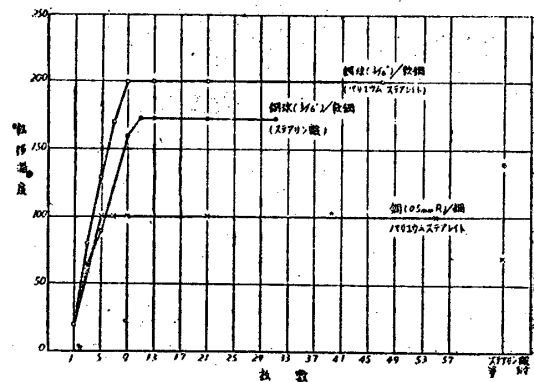
この問題に關するややくわしい報告はすでに別の個所⁽¹⁹⁾に發表しているので、ここでは要點のみをのべる。

機械的轉移溫度がテーパー⁽²⁰⁾のというような單なる使用した潤滑劑にのみ個有の溫度ではなく、そのときの摩擦金屬の組合せによつて大幅に相異なることはすでにまえに報告した。⁽⁶⁾そしてこの摩擦金屬の影響というのが、じつは金屬面上の潤滑劑分子の配列のもちやすさという問題ではなしに、主としてその金屬組合せに對する摩擦の大小いかんによつて決定されること、いいかえればその金屬組合せに對する摩擦の大きいものほど機械的轉移溫度は低くあらわれることをのべた。

この考え方で多分子層の摩擦の問題を見なおすときただちに氣づくのは、第1~第3圖において、おなじ潤滑劑を使用してもその分子層の厚さによつて摩擦が

著しく相異なることである。すなわち單分子膜の摩擦は著しく高く、枚数を重ねるに従つて摩擦はしだいに低下して、だいたい10枚前後に至つてはじめて一定値におちつくのである。従つて、まえの實驗⁽⁶⁾では潤滑劑(鎖式飽和脂肪酸)は十分に塗附して行つたのであるが、もしも累積分子層をもつて潤滑するならば、前報告の原則に従えば機械的轉移溫度は單分子層に對しては最も低く、約10枚までしだいに上昇して、摩擦の一定する分子層の厚さ以上では一定の値を示すべきである。

こうした立場で軟鋼板に3//16鋼球を組合せたとき、ならびにさらにより摩擦の大きい銅と銅とを組合せた場合について各種厚さのステアリン酸分子層の機械的轉移溫度を測定した。その結果は第17圖のとおりである。



第17圖

すなわち豫想はまったく適中しているのであつて、第1, 第2圖との比較から明らかなように、摩擦係数のほぼ一定値におちつく分子膜枚数附近で機械的轉移溫度もまた一定値におちつくのである。そしてこの關係はステアリン酸のかわりにバリウム・ステアレートを使用してもおなじである。ただ機械的轉移溫度が若干高くあらわれるだけ相異なる。金屬組合せの影響もまたまったくおなじで、摩擦の大きい銅/銅に對してはずつと低くあらわれている。

摩擦の途中にあらわれた狀況は、まえの熱擾亂の項でのべたように、ステアリン酸膜は70°C附近で融解するので、摩擦係数もこの附近で若干増大する。それはこの附近の溫度で金屬面上の第一層をのこして上層部が融解する結果である。しかし第一層はなお健在するので摩擦係数はひどくは増大しない。それがその機械的轉移溫度附近で第一層まで剝離するので、そこで急に附着一滑りに轉移するのである。バリウム・ステアレートではまえの項でのべたように高温まで融解し

ないため、摩擦係数もまた機械的轉移温度まで一定だった。

比較のためステアリン酸をたんに塗附したのみのときの結果を、二つの金属組合せにつき圖の右側に示した。いずれもそれぞれに對應した、累積分子層の機械的轉移温度よりも低くあらわれているが、それもやはり整然たる密度の高い配列構造をもつともたぬとが熱的、機械的擾亂に對する抵抗に大きな差をもつ結果と考えれば、以上のあらゆる論議と矛盾なく理解できることである。

むすび

境界潤滑面の摩擦係数は分子層の厚さによつて著しく相異し、條件によつて(あまり鋭くがたつたもので摩擦しないかぎり)7~17枚程度、平均して10枚前後ではぼ一定値におちつく。この結果は從來のデータとはぼ一致するが、この一定値におちつく臨界分子枚数や摩擦係数が、摩擦面の曲率半径や金属組合せによつて著しく相異なることは重要である。

荷重の摩擦係数に對する影響は上にのべた因子ほど大きくないが、ある荷重以上になると急に摩擦係数は増大し、そこにはつきりした境界摩擦の二つの領域があらわれる。これはすでにまったく別の装置で見出した結果とよく一致する。そしてその低荷重側領域、すなわち第1領域は5枚以上の分子膜を介在し、第2領域は3枚をのこして5層以上が降伏した領域であることが推定された。

摩擦による分子層の剝離の機構に關し、分子層の厚いときは一回の摩擦によつて比較的大きく剝離するが、うすくなるに従つてこの割合は低下する。そして第1層ないし第3層までの分子層は事實上固体表面と一體となつていて、熱的、機械的擾亂に對してきわめて頑強に抵抗し、熱的擾亂に對しては分子層の融點ではなくして機械的轉移温度においてはじめて剝離すること、機械的擾亂に對しては金属摩擦粉ないしは堀りおこし作用によつて金属肌もろともでなしにはなかなか剝離しないことを實證した。従つて摩擦面を保護するためには、温度の低いことはむしろ好ましいが、機械的擾亂に對しては単分子膜のみでおおわれる程度になつてもなお摩擦が増大しない程度に表面がかたくてなめらかなことが絶対に必要になる。このような條件にあつては、単分子膜でなお數十回の繰返し摩擦に耐えることはガラス面の結果からよく理解できる。平滑な表面の摩擦が大きいのか、粗い表面の摩擦が大きいのかの論議はしばしばくり返され、清浄な表面ではしばしば平

滑な方がむしろ大きいのであるが、潤滑面においてはそれと無關係に分子層の剝離を防ぐ目的でぜひ平滑なことがのぞましい。第1層分子膜の剝離は機械的にはつねに金属の摩擦や傷つきとともに起ると斷定してよい。

分子層の流動性や擴張作用はきわめてのろく、一回摩擦した跡を數時間内に側面から流入補修するということはありえない。しかしかなり厚いときに摩擦棒先端によつて摩擦と同時に改めて塗附されることは考えられる。分子層は與えられた厚さから摩擦ごとに摩擦し、さいごの1層は機械的擾亂の大小と温度の高低によつて長い生命も保ちうるし、一時に剝離することもある。

機械的轉移温度は金属組合せのいかんによるほか、分子層の厚さによつても相異し、いずれも摩擦という機械的擾亂の大小の影響に關する原則⁽⁶⁾から統一的に理解される。

この研究にあつて、本所永井研究室の長谷川浩氏から種々試料の便宜をはかつていただいた。末筆ながら厚く謝するしだいである。

文 献

- 1) I. Langmuir : J. Franklin Inst., 218 (1934), 143.
- 2) W. Claypoole : Trans. ASME., 61 (1939), 321.
- 3) H. Akamatsu and J. Sameshima : Bull. Chem. Soc. Jap., 11 (1936), 791.
- 4) T. Isemura : Bull. Chem. Soc. Jap., 15 (1940), 467.
- 5) F. P. Bowden and L. Leben : Trans. Roy. Soc., 239 (1940), 1.
- 6) 曾田, 宮川 : 理工研報告, 2 (1948), 23.
- 7) K. B. Blodgett : J. Am. Chem. Soc., 57 (1935), 1007.
- 8) 曾田 : 機械の研究, 2 (1950), 135.
- 9) A. F. Joffe : The Physics of Crystals, 61, New York 1928.
- 10) J. W. McBain : The Sorption of Gases and Vapours by Solids, 338-348, London 1932.
- 11) 曾田, 岡本 : 理工研報告, 1 (1947), 50.
- 12) 曾田 : 機械の研究, 1 (1949), 570; 2 (1950), 88, 133, 185, 225.
- 13) I. Langmuir : Phys. Rev., 6 (1915), 79.
- 14) 曾田 : 機械の研究, 1 (1949), 227.
- 15) 芝 : 物理常數表, 71, 岩波 1947.

- 16) 宮川, 深谷: 理工研報告, 3 (1949), 171. 19) 曾田, 宮川: 應用物理, 未刊.
 17) 菅: 理研イ報, 22 (1943), 109. 20) D. Tabor: Nature, 147 (1941), 609.
 18) 古賀: 機械の研究, 2 (1950), 265.

電氣的方法をとり入れた翼列の解法の改良

(軸流回轉機の研究 第10報)⁽¹⁾

大塚新太郎

Improvement of "Latticed Wing Solution with the Aid of Electricity"

By Shintarō Ōtsuka

ABSTRACT: The writer manifested in the previous paper^{*} that latticed wing solution can be easily obtained with the aid of electricity. But when the pitch-chord ratio is small, the distance between model boundary and sink or source becomes very very small. According to this fact, the process of calculation becomes very troublesome, and model making impossible. For the former trouble a few convenient equations for calculation are illustrated, for the latter Kármán-Trefftz's transformation is adopted in compensation for Joukowski's. Bipolar coordinate has been found to be very helpfull for whole calculations.

* "Latticed Wing Solution with the Aid of Electricity". The Report of the Institute of Science and Technology, University of Tokyo: Vol. 4, No. 1-2, 1950

(1950年12月21日受理)

まえがき

第8報⁽¹⁾でのべたように翼列のまわりのポテンシャル流は電氣の力をかりることにより, かなり容易にもとまることがわかつた。計算例も理論値に對して相當によい一致を示している。ところでこの計算例は, タービン翼として考えると, 刻み・翼弦比 a/b のかなり大きいものであつたので, これが小さくなつた場合(現用のものでは 0.4 に近いものがある。)果してこのままのやり方でうまく行くものかどうかということ, いささか疑問であつた。第11報で計算結果をのべるつもりであるが, 現用のタービン翼列について計算をはじめてみると, やはりいろいろ不都合な點があらわれてきた。その主な點をあげると,

1. ζ_1' 面の ± 1 の點と翼の前・後縁附近とが非常に接近してくる。このため第8報(2)式の \cosh , \sinh の値の桁數を非常に多くとらなければなら

ない。

2. 同じ理由で ζ_2 面を出す(4)式の計算も桁數のとり方が非常に繁雜で, 計算していて不愉快である。
3. また, 模型の電極の位置と境界の距離が小さくなりすぎる。

1の對策は後にのべる通りである。2, 3の困難は Kármán-Trefftz の寫像⁽²⁾と, 双極座標を用いることにより, きりぬけることができた。さらに第8報の末尾でのべたように, ζ_2 面と Z 面の對應^{**}以下の部分の變數を双極座標におきかえることによつて, 計算の手數を非常に少なくすることができた。

この解法で一番手數がかかつていやな部分は Joukowski 又は Kármán-Trefftz の寫像の計算であつて, 全手數の約5割を占める。模型の製作・測定・それ以下の計算は思つたより樂で3割程度を占めるにすぎないようである。

** 第8報にはこの見出しがぬけている。52頁終りから6行目の前に ζ_2 面と Z 面の對應を挿入。