

低温摩擦について(第1報)

曾田 範宗・宮川 行雄

On the Low-Temperature Frictions (1st Report)

By Norimune Soda and Yukio Miyakawa

ABSTRACT : Characteristics of sliding friction at low temperatures ranging from $+20^{\circ}\text{C}$ to -50°C are obtained under dry and thin-film conditions. The temperature of the test pieces is lowered with dry ice at the back of the plate, and both the plate and the slider are enclosed in a small chamber in which air of extremely low humidity is fed. The dry kinetic friction is found to decrease, in general, slightly with the fall of temperature so far as the surface of the plate is kept from water moisture, but when the water moisture is present and the trace of frost appears on the surface at some temperature under zero degree, friction falls conspicuously. It is found also that when the surface is lubricated with mineral oil, stick-slip disappears at some critical temperature which corresponds to the freezing point of the oil. For butyric acid which shows no orientation at room temperature also appears this critical point at low temperature and it is found to be about -5.5°C for the combination of Cu slider and Cu plate.

(1950年5月1日受理)

1. まえがき

潤滑面の摩擦がしばしばある臨界温度において連続すべり摩擦から stick-slip に転じ、また摩擦の急激な増加を招来することはすでに常識である。これらの現象は主として室温で配列をもつ潤滑剤について観察されることで、その原因はいずれも配列分子の熱擾乱による一種の融解現象の結果として解釋されているものである。^{1), 2)} この論法でゆくと、たとえ室温において配列をもたず、従つて摩擦振動模様の上で stick-slip を生ずるような試料でも、低温において熱擾乱が減少するに従つてしだいに安定な配列をもつてきはしないかということが考えられる。またたとえ配列をまったくもちえないような潤滑剤でも、温度の低下は境界層をより安定なものにし、摩擦の上で好ましい影響を與えることが予想される。温度を下げると液体潤滑剤は比較的簡単に凝固點を通過させることができるがいわゆる配列の轉移温度をもつて境界層の融解點と解釋すれば、非配列性の液体でも薄膜状態においてその凝固點を通過するときには摩擦に大きな異変を示しそうである。さらにいわゆる固体摩擦でも、完全に清浄な固体表面がえられないかぎり、あたかもいわゆる清浄な固体表面の摩擦が温度上昇に伴つてある温度で急激に摩擦を増大し、しかもそれがおそらく吸着分子の

蒸發に原因したように³⁾、温度の低下過程においては凝固點附近において逆の変化を生じはしないかとも想像される。

この研究はこうした立場で“境界摩擦に及ぼす温度の効果”²⁾の一つの拡張としてなされたものである。

2. 實 験

装置はすでに理工研報告に發表したとおりのものである。⁴⁾ 摩擦面の温度を下げるには摩擦板の裏からドライアイスで冷却した。冷却に際しては當然空気中の水分が摩擦面に凝縮し、霜あるいは氷を生ずるので、これを防ぐために摩擦板と摩擦棒の部分に小さい箱をかぶせ、この中に乾燥空気を送つた。それにはまず空気を硫酸洗滌瓶を通し、つぎにソーダ灰、鹽化カルシウム、五酸化磷、ガラス綿等を入れた管を通し、さいごにドライアイスとアルコールの混合液で $-60\sim-70^{\circ}\text{C}$ に冷却したトラップを通して、最後にさきの小箱に導いた。装置全体を箱でつつむことはできなかつたので、摩擦板と摩擦棒の部分に一つの箱をかぶせたのであるが、摩擦棒を保持する板バネが箱をつらぬいて摩擦力に應じて僅かに動くので箱を完全に氣密にすることもできず、以上のようにして乾燥空気を測定前に約30分位送つておいても、なお冷却して行くと $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ 位で表面に薄い霜が生ずるのを防ぎえなかつ

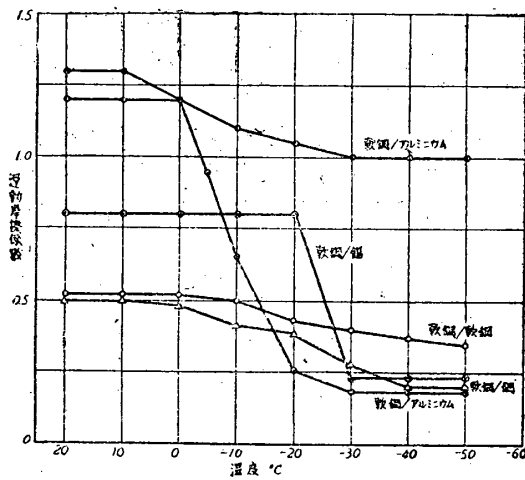
た。従つて油が表面にある場合はともかく、非潤滑面の場合には當然霜の影響が入つてきて完全な意味の非潤滑面とはならないわけである。この點については、今度装置をあらためて真空中で行うように準備しているので、ここでは濕氣の影響が若干入ってくる場合の結果について報告する。

摩擦板の温度は表面の一隅に銅-コンスタンタン熱電対を埋めこんで測つたが、ここでかようにして測つた摩擦板の温度と実際の摩擦面温度との相異が問題となる。この検定には、摩擦棒に $4\phi \times 20$ の軟鋼を用い先端を更に 1ϕ にし、摩擦板には銅を用いて摩擦面で軟鋼-銅熱電対を形成させて、温度降下による両者の指度を比較した。摩擦面温度は摩擦板の表面温度にくらべて -50°C で約 4°C 高く、 -10°C では殆んど一致している。摩擦棒に銅を用いると、摩擦面温度は摩擦板表面温度の約 2 倍位にあらわれる。

実験條件に荷重 400g, 速度 0.05mm/sec の一定に抑えた。

3. 實驗結果

(a) まず固体摩擦の場合であるが、第 1 図に各種の摩擦面金属の組合せに対する運動摩擦係数と温度との關係を示した。

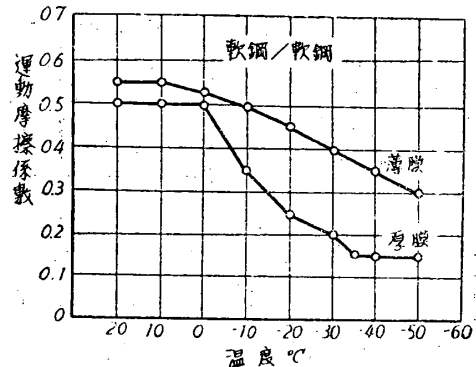


第 1 圖

軟鋼 / アルミニウムの組合せで霜の生成の少いときは 20°C から 10°C までの運動摩擦係数は 1.3 であるが、これ以下の温度では徐々に減じ、 -30°C では 1.0 になる。同一組合せで表面に著しく霜のつくときは 0°C 附近より急激に運動摩擦係数は減少する。軟鋼 / 軟鋼, 軟鋼 / 銅, 軟鋼 / 錫の場合も傾向は同一で温度降下によつて霜が生成すると摩擦係数は減少する。軟鋼 / アルミニウムの条件のよいときにも本質的

は霜の上より正しい場合と同様で、霜の影響するかたちとしては同一である。この図で興味ある點は、室温で比較的開きのある各種金属組合せに対する摩擦が、低温に到つて霜が付きはじめるとほぼ同一の摩擦係数 (0.2 ~ 0.3) に落着くことで、この事實は以前に行つた各種金属の組合せに各級の鎖式飽和脂肪酸を用いたときの傾向⁵⁾と比較するとよく意味がわかる。すなわち後者の場合には、低級の脂肪酸、すなわち潤滑能力の低い試料を用いたときには金属の組合せに應じた非常に開きのある摩擦を示したのであるが高級脂肪酸になるに従つて摩擦も減じ、かつ金属組合せいかなの影響も少なくなつて、ついに C_{12} 以上ではいずれの金属組合せでも摩擦係数 0.1 に落着いたのである。まったく同様にこのたびの実験でも -30°C 程度以下の温度ではほとんど金属組合せいかなの影響が消失している。これは温度低下による霜の發達の影響が、しだいに摩擦面に高級脂肪酸を用いていつたと同一であることを推定させるもので、換言すれば高級脂肪酸の使用によつて摩擦面がしだいに厚い、強靱な境界層によつておおわれていつて、金属と金属との凝着による摩擦がしだいに薄れてゆくと同様に、霜の發生によつて金属の直接接触による金属組合せいかなの影響がしだいに薄くなつてゆく結果と思われる。なお霜の發生によつて摩擦の低下することは、うすい氷の層がかなり強い境界層の役割を果し、二面の接触をさまたげる一種の固体潤滑剤の役割を果していることを意味するものである。なおこの摩擦の低下のなかには空気中の各種の不純物、汚れ等が温度の低下とともに水分と一緒に表面に凝縮するための低下も若干加わつているものと思われる。

さらにこの結果をたしかめる意味で、はじめからことさらに表面に明瞭な氷層を生成させたときの摩擦を測定した。その結果を第 2 図に示す。



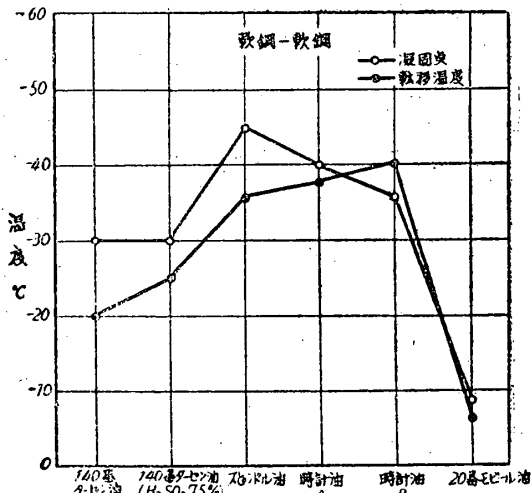
第 2 圖

図に氷層の厚い場合と薄い場合とを示したが、いず

れも室温から 0°C 附近まではほぼ非潤滑面程度の大きい摩擦係数を示している。それが氷の生成とともに摩擦は減少し、しかも氷層の薄いときには -50°C まで一様な stick-slip を示した。一方氷層の厚いときには薄いときよりも摩擦係数は低く、-35°C までは stick-slip を示しているがこれ以下の温度では連続的な摩擦特性を示し、摩擦痕をしらべてみても -30°C 以下では氷層の上を滑っていることが明らかだつた。しかもこの摩擦低下の経過は第1図とほぼ同様で、第1図の経過が固体摩擦自体の温度効果をあらわすというよりも、うすい氷層の潤滑効果をあらわすことはほぼ間違いないと思う。そして一般に湿気のある環境では水の凝固点をほぼ境にして、それ以下の温度で急に摩擦は低下するのである。

(b) ついで潤滑面について同様の実験を行つた、この場合には湿気が直接金属面に触れないので、その影響はまえほど大きくないことが予想される。第3図がその軟鋼/軟鋼組合せに対する測定結果である。横軸に各種の潤滑油をとり、縦軸にはそれぞれの轉移温度と凝固点を示した。ただしここにいう轉移温度とは、一般に温度を下げるといずれの油でもある特定の温度で急激に摩擦が低下し、stick-slip は連続すべりにかわつたが、この臨界温度をいうものである。しかし測定技術上、一定速度で温度を下げることは困難であり、しかもこの轉移過程は可逆的であると考えられるので、はじめに摩擦面に油を塗附したのち温度を -50°C まで下げ、ついで室温まで温度をほぼ一定速度であげる過程においてこの轉移温度をとらえたものである。

図にみるように低温における油の轉移温度はあきら

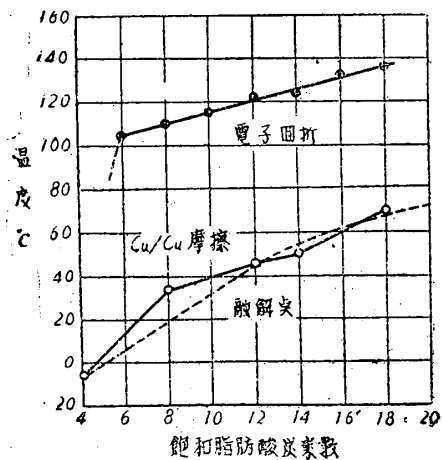


第3圖

かにその凝固點に比例的に関連し、予想どおり両者はほぼ一致するとみてよい。その理由はすでにまえにのべたとおりである。そしてまえの空気中の固体摩擦におけるように、このときにも油のなかの若干の極性不純物がやはり温度低下によつて金属面に吸着することの影響もはいつていると思われる。

この図には鉱物油のみが試料として示されているが実際には脂肪油をも測定した。しかしこの種の油、たとえばまし油、茶油、スピンドル油に 0.1% ステアリン酸を添加したものなどでは、室温ですでに連続すべりの摩擦を示しているの、この程度の温度範囲では全部一様な連続すべりを示し、以上にのべた轉移温度は認められなかつたのである。しかしいずれにせよ温度の低下は境界摩擦に関するかぎり好ましい効果を與えることは明らかである。

(c) すでにまえの報告⁴⁾で、正酪酸(C₈H₁₇COOH)はそのときに用いたあらゆる金属組合せに対して室温以上で終始 stick-slip を示すことをのべた。従つて室温以上ではいわゆる轉移温度はあらわれなかつたのである。しかしもしも温度を室温以下に低下させたらどうだろう。熱擾乱の減少に伴つてあるいは配列が促進されるかも知れないし、少くもこれまでのべた思想でゆくと潤滑能力は増大するはずである。それで固体摩擦が非常に大きく、カブロン酸(C₆)以下の低級脂肪酸では轉移温度を示さなかつた Cu/Cu の摩擦面組合せに対して、潤滑剤に正酪酸を用いて実験を行つた。その結果約 -5.5°C に明瞭な轉移温度があらわれたのである。この温度を前報告⁴⁾の図上にプロットする第4図のようになつて、電子回折法による轉移温度⁶⁾に平行的というよりもやや下降した位置に位する。しかも正酪酸の凝固點は -5.5°C⁷⁾ とか -7.9°C⁸⁾ とか、わられているから、この轉移温度は事実上凝固點と一致



第4圖

しているとみられる。はたしてこの摩擦の上にあらわれた轉移溫度が分子の配列の回復に原因するものか、あるいは正酪酸全体としての凝固現象によるものかは今後の研究にまたないと断言できないが、電子回折法による轉移溫度の傾向を延長すると正酪酸で 100°C 附近にあらわれるべきものが室温以上ではまったくあらわれないのであるから、この不連続的特性からおして、摩擦の上にあらわれた轉移溫度 -5.5°C もおそらく配列の獲得によるものではなくて、さきの種々の無極性潤滑油におけるようにその凝固によるものと考える方が自然であろう。

4. むすび

(a) 非潤滑面に対して溫度を室温から -50°C まで低下させると、摩擦係数は霜の發達によつて急激に低下する。この霜の發達は簡単には防止できなかったため、この実験からただちに固体摩擦の溫度係数をもとめることはできなかった。しかし霜の發達の少ない場合ほど溫度効果は少なかつたから、おそらく完全な固体摩擦における溫度効果はきわめて小さいものではなからうか。パウデン⁹⁾らの高温摩擦のデータによると、室温以上で摩擦は溫度上昇とともに増大するものと低下するものといずれも存在する。一方シュノールマン¹⁰⁾は $-100^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ の測定結果から静止摩擦係数の溫度係数として $-7.5 \times 10^{-4} / +1^{\circ}\text{C}$ なる値をえている。しかしいずれにせよその効果は比較的室温に近いところではきわめて小さいもので、その限りではこの実験結果も以上の諸データとあえて矛盾しないと思われる。

(b) 方向性をもたない潤滑剤も、溫度をさげてゆくと一種の轉移溫度があらわれ、stick-slip は連続す

べりに轉移する。この溫度はほぼ油の凝固點に對應する。

(c) 正酪酸のように室温で配列をもたず、stick-slip を生ずるようなものも、低温のある臨界溫度において連続すべりに轉ずる。この轉移溫度は正酪酸の分子層がこの溫度において配列を獲得するというよりもやはり凝固によるものと思われる。

(d) 以上の低温における轉移溫度の問題は、広い意味において低温で潤滑油分子の熱擾乱が減少し、吸着や配列や固化などの作用が促進し、ために境界層が厚く強靱になる結果と考えれば無理なく理解できる。無論これは境界摩擦に関してであつて、低温において潤滑剤の粘度が著しく増加し、凝固し、その bulk effect として機械の摩擦部分が動かなるというような問題はおのずから別である。

文 献

- 1) D. Tabor : Nature, **147** (1941), 609.
- 2) 曾田範宗, 岡本昇二 : 應用物理, **15** (1946), No. 3-4, 9.
- 3) 曾田範宗, 宮川行雄 : 理工研報告, **2**(1948), 80.
- 4) 曾田範宗, 宮川行雄 : 同上, **2** (1948), 23.
- 5) 文献 4), 第 5 図.
- 6) 菅養夫 : 理研イ報, **22** (1943), 199.
- 7) 芝龜吉 : 物理常数表, 1947, 岩波書店 25.
- 8) Landolt Börnstein Roth/Scheel. Physikalisch-Chemische Tabellen, (1923), 368.
- 9) F. P. Bowden and T. P. Hughes : Proc. Roy. Soc., **172**(1939), 263.
- 10) R. Schnurmann : Proc. Roy. Soc. (Abstract), **176** (1940), s. 50.

平面上の球のころがり摩擦について

曾田 範宗・甲 藤 好 郎

Rolling Friction between Ball and Plane

By Norimune Soda and Yoshirô Kattô

ABSTRACT: We are apt to take the cause of rolling friction too simply : one takes it to rise from the slip, and the other to rise from the adhesion between rolling surfaces. Concerning rolling friction, however, the experimental data are too deficient now to decide which is the true. Rolling friction consists of many factors, the most important of