

- (7) 鳳誠三郎：“雷をよける”科學朝日(昭22年7月).
- (8) 長岡半太郎：Proc. Imp. Acad. of Japan 5 (1929) 233.
- (9) 箕原 勉，伊藤庸二，新川 浩，山本正治：電信電話學會秋季大會豫稿(昭14).
- (10) C. T. R. Wilson：Proc. Phys. Soc. 37 (1925) 32D.
- (11) E. A. pleton & R. Naismith：Proc. Phys. Soc. 5 (1933) 389. 46 (1935) 107
- (12) J. A. Racliffe & E. L. C. White：Proc. Phys. Soc. 45 (1933) ; 46 (1935) 107.
- (13) V. A. Bailey & D. F. Martin：Phil. Mag. 18 (1934) 369.
- (14) 前田憲一，去來川幸夫：電信電話學會秋季大會豫稿(昭10).
- (15) S. S. Kirby & E. B. Judson：I. R. E. 23 (1935) 73'.
- (16) R. A. Watson Watt, A. F. Wilkins & E. G. Bowen：Proc. Roy. Soc. London 161 (1937) 181.
- (17) O. H. G'sh, H. G. Booker：I. R. E. 17 (1939) 117.
- (18) 河野哲夫：電信電話學會誌 222號(昭16年9月) 613.
- (19) 前田憲一，河野哲夫，大森武夫：電氣通信學會誌 194(昭14) 242.

機械的轉移溫度について (軸受金の組合せに関する基礎實驗)

曾田 範宗・宮川 行雄

(1947年11月25日受理)

まえがき

金屬面上に配列した油脂の分子が，ある特定の溫度以上で配列を失うことは，一つの物理學的現象として既に電子廻折法による研究^{1), 2)}から知られている事實である。一方潤滑面の摩擦の實驗において，摩擦がある特定の溫度以上において連続的なこり摩擦からいわゆる Stick-Slip に移行するという現象³⁾も，また一つの實驗的事實である。この兩現象における限界點はともに轉移溫度 (Transition Temperature) とよばれ，兩者の間に密接な關係のあることは容易に想像できるが，その關連はなお明瞭でない。テイバー⁴⁾はかれの實驗における轉移溫度——電子廻折法によるそれと區別するため，假りに機械的轉移溫度とよぼう——を潤滑劑の融解點と結びつけ，長鎖狀飽和脂肪酸の薄膜においてはその機械的轉移溫度は融解點より約 75°C 高いこと，そしてそれはこの溫度において油脂の分子の配列が失われるか，あるいは配列層の密度が急に低下するかするのが原因であると考えている。

しかるに，元來摩擦面における分子の配列機構は極めて複雑で，大別しても分子相互間のファン・デル・

ヴァールス力による横方向の結合力和，極性原子團による金屬面との親和力による結合力和がまず配列に大きな役割を果していると思われ，實際に同一物質でも金屬面の性質いかんによつて配列をもつたり失つたりする事實も知られている⁵⁾。また摩擦の實驗になると問題は層複雑し，以上の分子間諸力と配列の状態とが摩擦によつていかなる擾亂をうけるかによつて，機械的轉移溫度もまた甚しく影響されることが考えられる。電子廻折法による方法では單純な熱的擾亂のみを與へるから問題は比較的簡單であるが，後者の摩擦による方法では擾亂の要素に力學的なものかはいらぬためその結果は極めて複雑なものとなり，テイバーの實驗におけるように單なる鋼と鋼との摩擦の結果から一義的に轉移溫度が決定できるかどうか疑わしくなるのである。そして實はこの點に實際の軸受の問題——軸受金の組合せと焼付きとの關係——との深い關連が生ずるのである。

われわれは以上のような考えでは機械的轉移溫度に関する實驗を行い，潤滑劑の融解點，電子廻折法による轉移溫度との關係をしらべ，さらに摩擦面金屬の組

合せいかんがいかにか機械的轉移溫度に影響するかをしらべて、機械的轉移溫度と軸受金の組合せに関する基本問題の反省を行うことにした。

潤滑領域の轉移と Stick-Slip

滑り軸受の實驗においてその境界状態における摩擦を測定しようとして次第に荷重を増し、または速度を上げてゆくと、ついに急に摩擦の増加し初める點があらわれてくるが、そのさい軸受の摩擦モーメントをばねで平衡させて測定しようとする、激しい振動を生じて平衡のえられないことは、軸受實驗者の誰も経験するところである。パウデン、レーベン⁽⁴⁾らの Stick-Slipなる現象も實はこゝした線型の復原力と減衰力とをもつた一自由度の振動系にあらわれた特殊な振動模様の一つであり、減衰力が速度に對して負の係數をもつた場合と本質的には同一のもと考えられるのである。Stick-Slipすなわちこの特殊な振動系における偏位自體を摩擦の本質と考えたパウデン、レーベンらに對してはすでにいくつかの批判があり、ハイキン、リソズスキ、ソロモノヴィッチ⁽⁵⁾らやクレメンシック⁽⁶⁾らの鋭い批判がある。それらによると Stick-Slipにあらわれている變動は摩擦自體の變動の本質をあらわすものではなく、單に滑り摩擦が速度に對して下降的特性部分をもつこと、および平均摩擦速度が摩擦特性曲線この下降的部分に該當していることを示すにすぎないのである。いゝかえれば、パウデンらにおいては摩擦の原因と結果とが、顛倒しているのである。さらにハイキンら⁽⁶⁾は、Stick-Slipがなにも新しい現象でも實驗でもなく、すでに1933年にカイダノフスキ、ハイキン⁽⁷⁾らによつてジャーナル軸受の實驗において全く同じ現象がとらえられていることを指摘している。事實カイダノフスキらの實驗は、眞鍮の軸と木材(ぶな)の軸受との組合せで行われたものでパウデンらののべているような金屬間の融着や融解などが全く考えられないにもかゝらず立派な Stick-Slip の模様もとらえられているのである。

こう考えると Stick-Slip はなにを示すものだろうか。振動體の質量が小さい場合、滑りをおこす瞬間の振幅がほぼ静止摩擦を示すことはすぐわかる。しかし運動摩擦はこの模様からたゞちにはわからない。問題はむしろ連続的な滑り摩擦から Stick-Slip に移る限界點にある。

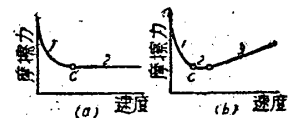
この限界點が摩擦特性曲線上の極小値附近でおこるべきことはすぐわかる。従つて速度を低下すること、荷重を増すこと、溫度をあげること等はいずれもこの極小點の到來と Stick-Slip の發生を促進するもので

ある。テイバー⁽³⁾は摩擦面に熱的擾亂を與えることによつてこの限界點をとらえ、これを轉移溫度とよんだ。われわれの行つた實驗もまたこの機械的轉移溫度に関するものであり、その他の擾亂による轉移現象についてはまた稿を改めたい。

大體クーロンの摩擦法則は固體摩擦係數が滑り速度と荷重とに獨立的な常數であることを實驗的に示したものであるが、その固體摩擦とは實に現在の境界摩擦、すなわち若干潤滑劑の薄膜をへだてた摩擦状態を含めて該當する性質のものである。そしてこの法則が速度荷重の廣範圍にわたつてほぼ成立することはむしろ奇怪なほどであるが、たゞ速度、荷重の極めて低い附近ではいずれの場合にも摩擦係數は増大することが知られている。すなわちこゝに速度に對して下降的な摩擦領域が存在するのである。また一方液體潤滑劑の十分な場合の摩擦實驗でも(特にジャーナル軸受のように摩擦面が楔形をなす場合には)、速度が低いかまたは荷重の高い場合、あるいは潤滑劑の粘度の低い場合にやはり同じ摩擦の下降的領域がうまれるのである。前者のクーロン摩擦の場合、後者の軸受摩擦の場合とは必ずしもその潤滑機構が同一である必要はなく前者が必ずしもゆる境界摩擦領域(適當な金屬組合せでは乾燥摩擦においても)においてのみ成立するのに、後者は必ずしも薄膜である必要はなく完全な油膜潤滑(粘性潤滑)の領域においても、潤滑劑の粘度の壓力による變化を考慮にいれるときはやはりこの摩擦の下降領域があらわれるのである⁽⁸⁾。要は摩擦の機構ではなく、現象的な摩擦の特性である。

第1圖は一般の摩擦-速度曲線である。(a)は一般の境界摩擦、(b)は一般の滑り軸受(摩擦面が楔形を形成し、潤滑劑が十分に存在するとき)の場合である。(a)では2の領域が速度の高いところまでつづくが、(b)では速度の高いところに速度に對して上昇的な領域3が存在する。そして兩者の機構は相異なるが現象的には(a)は(b)に含まれる。

彈性的復原力をもつた振動系が3の領域にある摩擦振動をうけたとき、その自由振動はいわゆる粘性減衰振動



第1圖

で安定であることは無論である。2の領域の減衰力をうけたときはいわゆるクーロン減衰振動でこれもまた明らかに安定である。しかし1の下降領域では負の減衰振動となつて動的に不安定となる。振動範圍が1の領域のみに限られるときは單純な増幅的自勵振動とな

るが、振動が1より2、または3の領域を含むときは連続的な外力の擾亂をうけても振幅は無限大にはなりえず、有限振幅の自勵振動、いわゆる弛張振動となる。従つてパウデンらおよび以下にのべる装置でわれわれの得た摩擦模様は、摩擦自體の變動をあらわすものでないことは無論であるが、實はこの模様の中に上にのべた摩擦の各領域、いゝかえれば一般減衰振動における減衰項の特性があらわれている筈であり、特にわれわれの場合に重要なことは、3、2なる安定領域と1なる不安定領域との限界點が示されうることである。なんとすれば摩擦面はこの限界點を越えて1の下降的領域に踏みいる事により、急に磨耗や焼付きの危険が増大し、軸受も全面的にこの領域に踏みこんでは長時間の運轉に耐えないことが知れているからである。そしてわれわれが軸受の使用安定限界をとらえ、潤滑境界膜の強さをおさえるのには、單なる摩擦の力學的大いさの轉移をとらえるよりも、この振動特性の轉移をとらえることの方が一層容易で賢明ではないかということである。事實摩擦しながら摩擦の領域を3→2→1と順次に變化させてゆくと(すなわち速度を下げるとか、荷重を増すとか、温度をあげるとかすると)、ある點でついに摩擦振動體は安定を失つて突然振動を初めるのである。もしも振動體の質量が無視できる程度に小さく、1の領域の傾きも十分大きく、なお振動體の外的擾亂も十分大きかつたとすれば、摩擦模様の上の連続的な部分(連続り)からジグ・ザグの振動部分(Stick-Slip)に移行する轉移點は丁度2、1兩域の限界點に一致するはずである。しかし藤井氏⁽⁹⁾の指摘しておられるように、平衡状態の不安定の條件と自勵振動發生の條件とは實際には必ずしも一致するものでなく、現實には振動體の質量、ばねの質量等のため各領域の特性と初期条件の與え方いかんによつては振動の發生に大きな遅れの生ずる可能性がでてくる。これはガス體の液化や液體の凝固における過冷現象が兩相の安定限界となら矛盾しないことゝ類似している。

實際にわれわれの行つた實驗でも、轉移温度の實測値は100~200°Cの範圍で±(2.5~5.0)°C位の幅をもち、特別のときには20°C位の差異すら生じた。しかし摩擦條件の避けることのできない不整一とその複雑性のため、摩擦の測定値は元來極めて不安定な彷徨性にとんだものである。従つて以上の機械的轉移温度の開きが果して自勵振動發生の遅れであるか、それ以外の實驗誤差であるかは容易には判断できない。われわれはたゞつぎの諸點にだけは注意を拂つた。

1. われわれの使用する潤滑領域は第1圖(a)に相當した境界摩擦の領域であるべきで、3なる粘性領域は初めから含めてはならないこと。なんとすれば、初めにのべたように粘性油膜の存在しうるときは、境界分子層の配列の有無に關係なく、全く粘性流體力學的にこの轉移點があらわれうるのであり、この場合にはたとえ連続りからStick-Slipに移つたとしても、分子層の融解、破斷の問題とはなんらの關連もえられないからである。従つてわれわれは潤滑劑を少量にし、滑り速度を下げ、摩擦壓力を高めることに注意を拂つた。

2. 第1圖(a)の特性を假定すると、高温から次第に冷却する1→2方向の轉移過程において、轉移温度通過後なお振動の繼續する可能性が(b)の場合よりも一層大きくなる。従つて冷却過程からえられる轉移温度は加熱過程からえられるそれよりも遙かに大きな誤差を含むだらうということ。

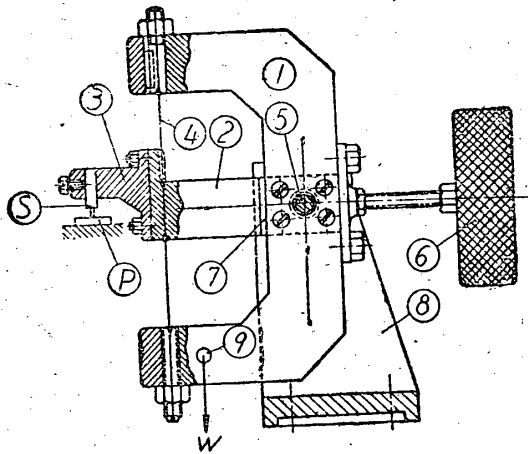
3. 低温から次第に加熱する場合、連続的なりの部分においても、局部的乾燥摩擦の介入、面の状態の不均一、その他の原因で、實際には細かい不規則な連続的擾亂の繰返されていることが考えられ、摩擦過程には絶えず自勵振動發生の十分な外的擾亂が加わつていふと考えられること(討論における機械的擾亂の問題を参照)。

4. 境界摩擦の特性として、摩擦の速度に對する下降的部分の傾きは極めて大きいこと。これは轉移點を鋭く現出するに有利である。

以上を總合して、われわれは低温から加熱してゆく場合、轉移温度のおくれはさほど大きくはなからうということ、すなわち各種の金屬の組合せに對して測定された機械的轉移温度の差異は、それぞれの正しい機械的轉移温度の差異と順位とを示すに十分だらうと考える。たゞ測定された轉移温度は實驗誤差の一部に上にのべた遅れをも含む可能性のあることを注意しておきたい。

實 驗

實驗に用いた装置を第2圖に示す。この装置はパウデンらのものと大差ないが、たゞ荷重を零から十分大きな値まで正確に加えることができ、かつ要すれば摩擦中連続的に荷重の増減ができるように、パウデンらのように振動子にばねをとりつけることをせず、杵に直接錘りをさげるようにしたこと、振動子は二本吊りのかわりに板ばねとピアノ線の張力によつて支持して確實な一自由度の振動を生ずるようにしたことなどがやゝ相異なる。



第 2 圖

圖において1は剛性の高い杵, 2, 3は一體をなした振動子で, 7なる板ばねを介して四本のボルトで杵に取付けてある。振動子3の中央には杵に張られた一本のピアノの線がかたく通つており, 杵端のボルトを締めあげることによつてピアノ線を緊張する。振動子と杵とは一體になつて二個の小型球軸受5によつて支持臺8に支えられる。6は平衡錘で装置を水平に調節する。3の先に摩擦棒Sをボルトで取付け, その先端は装置の水平位置において摩擦板Pに零荷重で觸れるように調節する。9に荷重Wを加える。Sの寸法は $4\phi \times 20$ で, 先端はさらに 1ϕ に削る。Pは 16×20 である。Pは減速歯車を介して電動機で紙面に垂直に動かされ, その速度は 0.05 mm/sec を標準とする。また摩擦位置をかえるため, 紙面に平行に左右にも動かされる。Pの下側にはPの下面を覆うにたる面積をもつた電熱器を取付け, 摩擦中に摩擦面を加熱する。その速さは約 100°C/min である。實驗に用いた振動子の固有振動数は 110 サイクル/sec である。

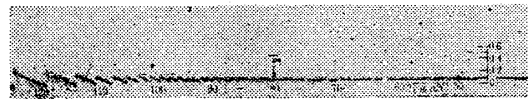
摩擦面の温度はあらかじめ検定しておいた。すなわち軟鋼製摩擦板Pの表面の一隅にコンスタンタン-銅熱電對を植えこみ, 一方摩擦棒Sとしてコンスタンタンを用いて摩擦板に試験荷重で接觸させ, 温度上昇にともなう兩者の指示を對照した。兩カプルのあらかじめ検定しておくことによつて, 摩擦板表面の温度から摩擦面の温度を決定し, 摩擦のオシログラムに同時に記録した。摩擦棒の先端は平面狀に磨いて用いたが検定の結果, 摩擦面の温度は摩擦板の表面温度にくらべて 100°C で約 10°C , 360°C で約 30°C の低下を示した。摩擦棒に熱傳導度の高いAg, Cu, Al等を用いたときはさらにこの差異がいちどるしく, 摩擦面温度は摩擦板表面温度の $2/3 \sim 1/2$ に低下する。なお検定の直接不可能な組合せに對しては熱傳導度の差異

を考慮した。

實驗に用いた金屬組合せは第1表の五種であり, f_d は乾燥面の常温における摩擦係數である。これらの金屬の選び方は, Niは油脂の分子がその表面で配列をもちにくいものゝ代表として, Cuはもち易いものゝ代表として純金屬中からえらんだものであり, 軟鋼はテイバーの實驗結果と比較するためにつけ加えたものである。またStick-Slipの特性上からいえば, (1), (2)は異種純金屬の組合せ, (3), (4)は同種純金屬の組合せ, (5)は一種の合金同志の組合せを代表するものである。摩擦の測定には, 第2圖の3に鏡をはりつけ, アークから受けた光を反射させて, その摩擦による微小偏位をオシログラムのフィルムに記録させた。第3圖の寫眞は摩擦棒にNi, 摩擦板にCuを用い, 潤滑劑にラウリン酸(C_{12})を用いたときの記録で, T_m がその機械的轉移温度である。

第 1 表

番 號	摩 擦 棒	摩 擦 板	f_d
(1)	Ni	Cu	0.40
(2)	Cu	Ni	0.80
(3)	Ni	Ni	0.70~0.80
(4)	Cu	Cu	1.20~1.50
(5)	軟 鋼	軟 鋼	0.40



第 3 圖

潤滑劑としてはすべて直鎖狀飽和脂肪酸をえらんだが, その試料の電子廻折法による轉移温度はすべて菅氏が實驗²⁾に用いられて既知のものである。

試験片の洗浄法としては實驗毎に, カーボラシタム800#で磨き, つぎに辨柄と水道水とで磨き, 水で洗いおとしたのちすばやく熱氣乾燥するという機械的方法をえらんだ。

實驗條件は一貫して荷重 400g , 速度 0.05 mm/sec である。

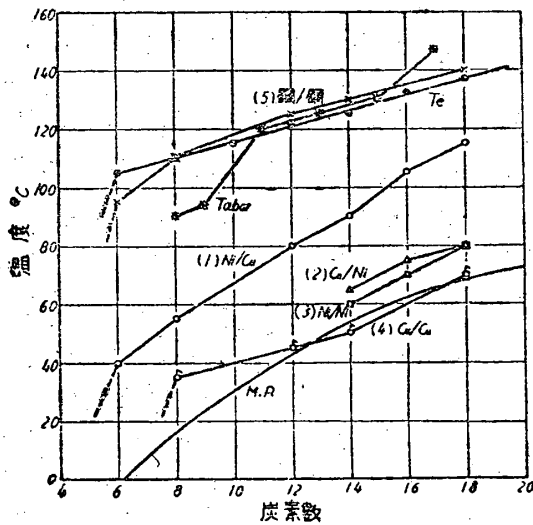
實 驗 結 果

上にのべた各金屬の組合せ, および各試料に對する機械的轉移温度, 摩擦係數等の測定結果を一括して第2表および第4, 第5圖に示す。

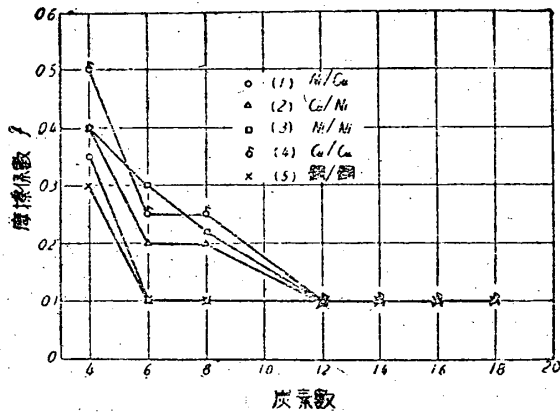
第2表においてM.P.は融點, T_e は菅氏の電子廻折法による轉移温度²⁾, T_m は測定した機械的轉移温度, f は常温における運動摩擦係數(附記参照)である。

第 2 表

飽和脂肪酸	M. P. °C	T _e °C	(1) Ni/Cu		(2) Cu/Ni		(3) Ni/Ni		(4) Cu/Cu		(5) 軟鋼/軟鋼	
			T _m °C	f	T _m °C	f	T _m °C	f	T _m °C	f	T _m °C	f
C ₄	-8	<15	<30	0.35	<30	0.40	<30	0.40	<20	0.50	<20	0.30
C ₆	-2	105	40	0.10	<30	0.20	<30	0.30	<30	0.25	95	0.10
C ₈	16.1~16.6	110	55	0.10	<30	0.20	<30	0.22	35	0.25	110	0.10
C ₁₂	43.7	122	80	0.10	—	—	—	—	45	0.10	125	0.10
C ₁₄	53.8	125	90	0.10	65	0.10	60	0.10	50	0.10	130	0.10
C ₁₆	62.0	132	105	0.10	75	0.10	70	0.10	—	—	—	—
C ₁₈	69.1~69.2	137	115	0.10	80	0.10	80	0.10	70	0.10	140	0.10



第 4 圖



第 5 圖

第4圖は各試料の融點、並びに機械的轉移溫度をその分子中の炭素數に對してプロットしたもので、比較のため、テイバーの測定値をも記載した。第5圖は運動摩擦係數と炭素數との關係である。

なお第2表中の缺欄は、試料の缺乏のためデータのえられなかつたものである。

討 論

第4圖を一見してたゞちに氣づくことは、あらゆる

機械的轉移溫度が、電子廻折法による轉移溫度 T_e より低くあらわれている事實である。これは初めに論じたような自勵振動發生のおくれを考えると、安全側においていえることである。また各種金屬の組合せに對し、それぞれ異つた轉移溫度の示されている事實である。大體轉移溫度は分子の配列の喪失される溫度と考えられ、それが單なる熱的擾亂のみによつてあらわれたものが電子廻折法によつて測定された轉移溫度である。しかし分子層の配列は更に機械的にも擾亂をうけるはずで、それが純機械的效果によつて行われたとき本當の意味の機械的轉移點とよばれるべきである。しかしテイバー並びに本實驗で得たところの機械的轉移溫度とは、實は熱的擾亂による轉移點を機械的效果によつて發現させようとするもので、その實驗技術上、必然的に熱的擾亂に機械的擾亂が加わつていのである。従つて純粋な熱的擾亂の場合より、機械的擾亂の程度に應じて轉移溫度が低くあらわれることは當然考えられることである。またこの實驗の初めに金屬の組合せをえらぶ際に考慮した配列のもち易さの程度もまた當然影響しているはずである。そしてその結果はこのような大幅の開きを生じたのである。従つてテイバーのべたような機械的轉移溫度と融解點との差が約 75°C などということは一義的にはいえず、それは各金屬の合組せいかんによつて異つた値を示すものである。圖を見ると偶然テイバーの T_m は T_e にほぼ一致している。それは鋼/鋼組合せに對して得たものであるが、筆者らが同じ組合せに對して得たデータは一層よく T_e に一致している。おもうによく磨かれた鋼/鋼組合せは機械的擾亂の最も少いものの一つで、そのわずかの機械的擾亂は轉移溫度 T_e 以下においてはなお摩擦に突然の變化を與えるに足らず、丁度 T_e において分子層の結晶構造に融解に類似した弛緩を生じたとき初めて摩擦にも轉移を起させるにたる程度の強さをもつているためと思われる。なお鋼が分子の配列

に好ましい金属であることも一役を果してあるものと思われる。テイバーのデータの C_{17} に對するものが T_e から實驗誤差以上にとび離れてゐるのは再實驗を要すると思われるが、 C_8 , C_9 の點がかなり下つてゐるのは筆者らのデータの C_6 に對するものがやゝ低くでているのと同性質の意味をもつものである。すなわち配列している分子は、轉移溫度以下においてはいかなる溫度でも同一の安定性、いゝかえれば同一のエネルギーをもつてゐるものではなく、溫度の上昇とともに次第に、特に轉移溫度に近づくとつれて急激に振動のエネルギーを増し、従つてそれだけ不安定になつてゆくのであり、それは電子廻折法によるパターンにも明瞭にあらわれてくるのである⁽¹⁾。従つて比較的配列の弱い低炭素数の分子において特に機械的擾亂の影響をうけて T_m が低くあらわれ易いことは當然豫期できることである。更に後述するように機械的擾亂の最も大きい Cu/Cu 組合せに對しては C_6 においては何べん繰返して實驗しても最初から Stick-Slip を生じてついに T_m は常溫近くでは得られなかつたのである。

テイバーは C_8 , C_9 二點の低くあらわれた意味を理解しえなかつたことゝ、 C_{17} に對する點の誤差とのために、 T_e 曲線の傾向を融解點に結びつけて考えたように思われる。しかし菅氏の豫想された通り⁽²⁾ 機械的轉移溫度 T_m の傾向が本質的には電子廻折法による轉移溫度 T_e に平行的であることは圖から明らかである。そして融解點は C_{24} を峠として以後低下するから、もつと高炭素数の分子を用いれば一層明瞭になると思われる。

つぎに極めて興味ある事實を發見する。それはいかなる金属組合せに對しても、機械的轉移溫度は炭素數にほぼ比例して増加し、かつ増大の傾向が T_e にほぼ平行的であることである (Ni/Cu の場合のみはやゝ傾きが大きい)。これは一定の金属組合せが與えられると、試料のいかに拘わらずその機械的擾亂の程度、いゝかえれば轉移溫度の低下量であらわした擾亂の強さがほぼ一定であることを意味する。Cu/Cu 組合せに對し、 C_6 以下で機械的轉移溫度が 30°C 以上ではえられないことは既にのべたが、Cu/Cu 直線の平均の傾きを C_6 まで延長すると明らかに 30°C 附近、あるいはそれ以下になつて、上の事實をよく説明する。すなわち純熱的擾亂に對し、分子は炭素數に比例してその抵抗力を増加するのであるが、機械的擾亂の下においても全く同じ傾きをもつて抵抗力をますのであり、當然のことながら分子の配列—極性原子團による金属面との結合、ファン・デル・ヴァールス力による分子

相互間の結合等—が外的な機械的擾亂と全く獨立に進行することを意味するものである。

そこで一番重要な問題がおこる。この機械的轉移溫度の開きは何に原因するだろうか。既にのべたようにわれわれは初め金属面の配列のもち方の難易にこれを求めた。しかし事實はむしろ逆で、配列をもち易い Cu/Cu の組合せが一番 T_m は低いのである。この配列の意味では Ni/Ni が最悪であろうとたゞちに豫想されるのであるが、Cu/Cu と Ni/Ni とはほぼ誤差範圍内で同程度に悪い組合せである。Ni/Cu と Cu/Ni との組合せにおいては全く同程度の轉移溫度が現われるべきである。しかるに事實はかなり大きな開きが見られる。

では第5圖を見よう。炭素數 12 以上においては、摩擦係數 f はいかなる金属組合せに對しても全く同一である (C_{10} の測定を行つたらあるいはこの點は C_{10} になるかも知れない)。しかしそれより炭素數の少ないところでは各金属ごとに異つた f の傾向をたどり、注目すべきことは、機械的轉移溫度の高いものほど摩擦係數は低いのである。そして興味あるのは、第4圖に見るように、 C_{12} 以上においても機械的轉移溫度にあつたように大きな開きを生じた各種の金属組合せが、摩擦係數においてはいずれも相等しい約 0.1 の値を與えている事實である。これは以前に筆者の一人が別の装置によつて鋼/鋼組合せで得た運動摩擦係數の傾向⁽¹⁰⁾ とよく一致し、且つ鋼/鋼以外の組合せでも炭素數の高いところでは全く同一の係數を示すということは、この附近では境界分子層の配列が完全で且つ強靱であり、摩擦の大部分が分子層自體の摩擦であることを物語るものである。しかも第4圖にみるように機械的轉移溫度には高炭素數の範圍でも明瞭な差異があらわれているのは、 C_{12} 以上において殆んど平均摩擦に影響を與えない程度の微少な機械的擾亂—恐らく微少接觸點における分子の剝離に基く乾燥摩擦—が、實は將來轉移溫度を左右すべき重大なる核として室溫より溫度の上昇するあいだ潜在的なカタチで温存され (kept alive); 轉移溫度 T_e に接近して配列に弛緩を生ずると同時に忽ち全貌をあらわして Stick-Slip に轉移するためとしか考へられない。これはそのまま境界摩擦の機構を意味する。

他方からこの摩擦曲線を解析すれば、 C_{12} (あるいは C_{10}) 以下においては、轉移溫度とは無關係に既に上にのべた微少乾燥摩擦の特性が部分的に自己を露呈しているのであり (第5圖の摩擦曲線は前にのべたとおり常溫における運動摩擦係數で、その摩擦特性は、各組合

せ-C₂; Cu/Ni, Ni/Ni, Cu/Cu -C₆; Cu/Ni, Ni/Ni -C₆ の場合のほかは連続りを與えているものである), それは第4圖において C₆, C₆ 附近から急に機械的轉移溫度が低下し, また消滅する事實とよく符合するものである。

そこでこの轉移溫度の低下を招くべき微少乾燥摩擦面の摩擦特性が問題になる。第1表に示した乾燥摩擦係数 f_d は實はこうした解析と反省のち, 實驗の最後に測定したものである。 f_d の順位はほぼ T_m の順位に對應している。恐らく f_d の相互の關係順位が, 金屬と分子との親和力の大小 (配列の難易) によつて修正されて第5圖における摩擦係数の順位となり, それがそのまま機械的轉移溫度の順位となつて現われるのであろう。

結論—はじめに金屬があつた

機械的轉移溫度に関する結論的な事項についてはすでに討論の中で述べた。最後に, これを更に實際の軸受, その他の摩擦面の組合せの問題に關連させて結論としよう。

機械的轉移溫度がいわゆる焼付きの問題に關連して摩擦金屬の組合せに重大な影響をもつことは明らかであるが, 討論中で述べたように, 機械的轉移溫度, いふかえれば潤滑劑自體の轉移溫度に對する機械的轉移溫度の低下に決定的影響を及ぼすものは, 金屬各組合せにおける乾燥摩擦の大小自體である。すなわち機械的轉移溫度に關する限り, その乾燥摩擦の大小によつて軸受 (摩擦面) の運命の大半は決定するのである。われわれはこの實驗によつて摩擦面の焼付きに對する金屬と潤滑劑との役割をある程度明らかにすることができたと思う。そして初めに先づ金屬があり, つぎに潤滑劑の存在することを知つた。軸受の發達の歴史をみても, その飛躍的性能向上は常に軸受金屬の變革によつて果されている。そして金屬の油分子に對する親和力 (金屬面上における潤滑劑分子の配列の難易) の大小は第二義的な意味しかもたないものである。

極言すれば, 少くも轉移溫度に關する限り, 摩擦面 (軸受) は油のない状態 (乾燥状態) において良好なる摩擦特性をもつものでない限り, その摩擦面はいかなる潤滑劑を用いても完全には救われないのである。摩擦面 (軸受) の問題は, 金屬と潤滑劑との組合せいかによつて, ある潤滑劑に對して好ましい金屬が, 他の潤滑劑に對して好ましくなくなり, またある油に適した金屬が他の油には不適であるといつた對等の意味のものではなく, 初めに先づ好ましい金屬組合せが油の問題と獨立に存在し, 潤滑劑はさらにその性能を

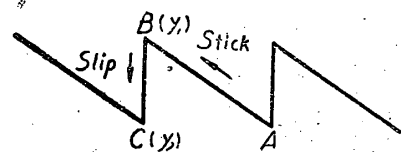
向上修正させるものであるというのである。

なおこの結論は飽和脂肪酸を用いたときの境界摩擦から焼付きへの移行を機械的轉移溫度なる物理現象を通じて論じたものであり, そのなかに金屬の腐蝕の問題, 疲れの問題, その他塵埃の介入, 磨耗等は考慮に入れてない。軸受の焼付に對して最も直接的な關係をもつ潤滑領域の移行—その契機としての機械的轉移溫度を通じて論じたもので, 實際の軸受金の選擇にはさらに別方面の考慮を拂ひ必要のあることは無論である。

この研究では第一工學部菅教授, 藤井助教授らから厚意ある御討議をいただいた。厚く謝する次第である。

附 記

運動摩擦係数 f は, 摩擦が連続りを與えている領域では寫真からたゞちによみとれるが, Stick-Slip をおこしている領域からはすぐには知られない。しかしもしも Slip の間の摩擦係数を速度にかゝらず一定と假定し, これをもつて運動摩擦係数とするならば, それは Stick-Slip の模様から簡単に算出できる。第2表の運動摩擦係数 f はこうして求めた値である。



第 6 圖

第6圖で AB を Stick, BC 間を Slip の區間とすれば, B より C まで滑る間に失ふ弾性エネルギーは全部摩擦損失となる筈だから次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}k(y_1^2 - y_2^2) = fP(y_1 - y_2)$$

但し k は板ばねのばね常數, P は荷重である。これより f は

$$f = \frac{k}{P} \cdot \frac{y_1 + y_2}{2}$$

となる。すなわち BC 間の中央點で摩擦係数を算出すればよいことになる。

文 獻

- (1) K. Tanaka. M. moirs Coll. Sci. Kyoto Imp. Univ., 23 (1941), 195—205.
- (2) 菅 義夫. 理研彙報, 22 (1943), 199—214.
- (3) D. Tabor. Nature, 147 (1941), 609—610.
- (4) F. P. Bowden and L. Leben. Proc. Roy. Soc., 169 (1939), 371—391.
- (5) S. Haykin, L. Lissovsky and A. Solo-

- monovich. Journal of Phys. USSR., II (1940), 253—253.
- (6) A. Klemencic. Forschung, 11 (1940), 108—115.
- (7) N. L. kaydanovsky and S.E. Haykin. Journal of the Tech. phys., III (1933), 91—109. (In Russian).
- (8) S. J. Needs. Trans. ASME., RP-60-7 (1938), 347—358.
- (9) 藤井澄二. 日本機械學會第489回講演會講演.
- (10) 曾田範宗, 岡本昇二. 應用物理, 15(1946), 9—13.

地面附近の風の亂れに関する一實驗

河村龍馬・岡田正次郎

(1947年12月23日受理)

まえがき

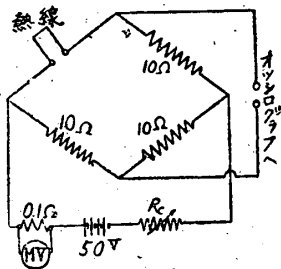
地面附近を吹く風は、時間的に一樣な流れではなく所謂風の息があるのは衆知の事である。我々は地面附近の風を研究するに當つて、先づこの風の息即ち亂れの強さの程度とか或時間中の風速の頻度分布とかを調べて置く必要を感じ、以下に報告する實驗を行つた。

實驗

この實驗は、1947年の5、6兩月にわたつて理工學研究所の本館時計塔上(高さ地上約30米)に於て行つた。この時計塔の近傍には高さ10米程度の建築物があるが、それ以上の高さの障害物は遙か遠方迄存在してゐない。この塔上に更に高さ1米の棒を突出し、その尖端に熱線風速計を取付け、これによつて10分間の風速變動を調べた。その方法は、

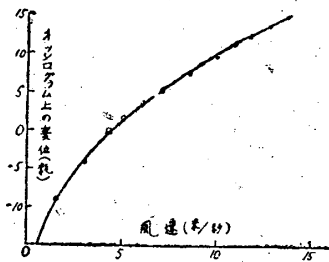
風速變化による熱線風速計の振れを電磁オツシログラフの振動子によつて靜止乾板上に記録し、實驗終了後乾板の濃度を測定し寫眞測光法の原理を應用して10分間の風速の頻度分布を求めたのである。この方法は、Simmons及Salter⁽¹⁾が風洞内の氣流の亂れを求める爲に使用したものと同じであるが、我々の場合は實驗室内の實驗とは違つて色々な制約を受けるので多少變更した點はある。

使用した熱線風速計の結線圖は、第1圖に示してある。熱線としては直徑0.01耗の白金線(ウオラストン線)を使用し、露出部の長さを約3耗とした。その抵抗値は常溫で約6Ω、使用狀態で約10Ωである。



第1圖

この程度の細線を使へば毎秒100回程度の風速變動にも正確に追隨することが出来るから、自然風を對象とする限り周波數特性については考慮する必要はない。



第2圖

自然の風では風洞内の氣流の亂れに比べて風速變動の割合が大きいので増巾器を用ひる必要がなく、第1圖のやりにホキットストーンブリッジに電磁オツシログラフのH型振動子を直接挿入して十分大きい振れが得られた。第1圖のミリ電壓計は實驗中ブリッジに通ずる電流を一定に保つ爲に挿入したものである。

風速とオツシログラフの振れとの關係を知る爲には直徑3.5米の回轉腕を用ひた。回轉腕の尖端に熱線を取付け、導線の長さとか電流の強さとかすべての條件を實驗時と同一に保つて置いて回轉腕をまわし、回轉速度と熱線計の振れとを同一オツシログラム上に記録しそれより風速と熱線計の振れとの關係を求めた。この際 Swirl の影響を避ける爲に回轉腕の初の一回轉丈を使用した。斯様にして得られた風速と熱線風速計の振れとの關係を與へる曲線の一例を第2圖に示す。

檢定の終つた熱線風速計を時計塔上に平均風向に直角に水平に取付け、ブリッジに檢定時と同一の電流を通じ風速變動によるオツシログラフの振れをオツシログラフの回轉ドラムを取外してそれと同じ位置に特別