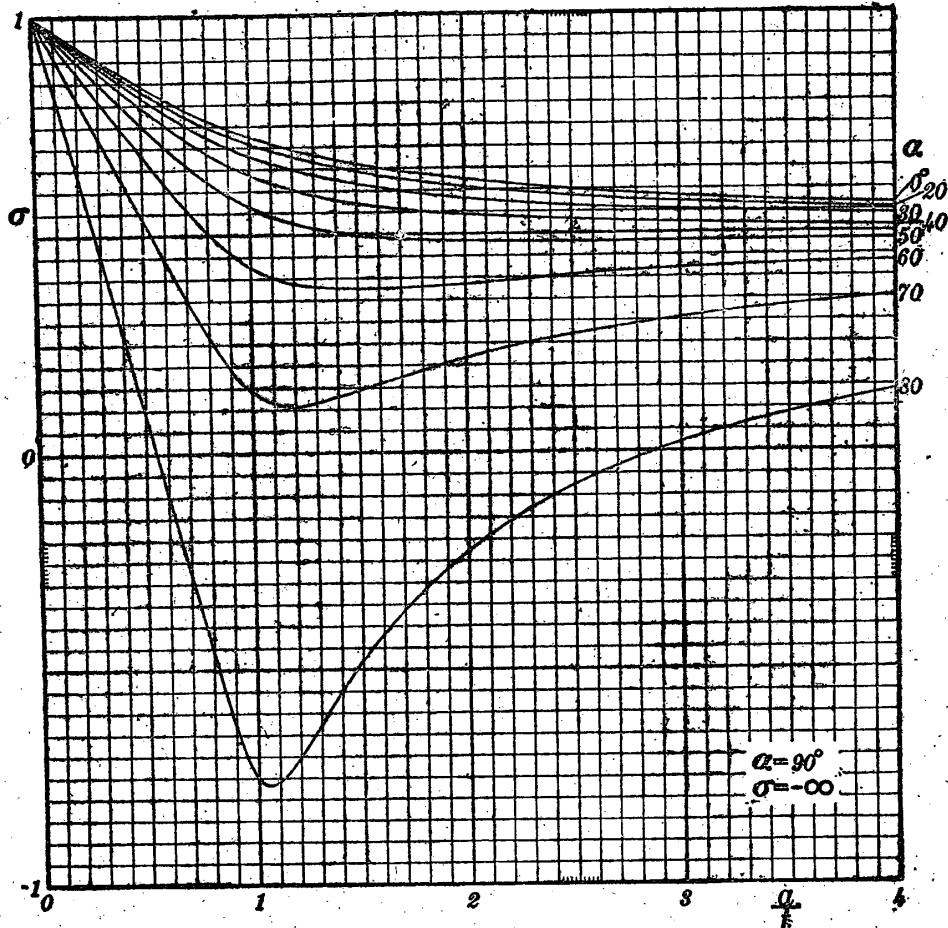


第1卷, 第7.8號

(3) 河田三治: プロペラ渦理論の根本假定に就いて; 日本航空學會誌, 第2卷, 第5號.

(2) Weinig: Die Strömung um die Schaufeln von Turbomaschinen. (單行本)



第 5 圖

### 油脂による薄膜潤滑の熱的限界について

會田 範宗・宮川 行雄

(1948年2月7日受理)

極性分子の金屬面上に配列したものが、ある特定の温度で配列を失うこと、すなわち轉移温度の存在は少くとも境界潤滑に対する油脂の役割に一つの限界點を與えているものである。しかも實際の摩擦面においては、この潤滑上の轉移點がいわゆる機械的轉移温度として物理的な轉移温度よりも一般に低くあらわれるという事實は<sup>1)</sup>苛酷なる金屬摩擦面の油脂による潤滑の問題をいよいよ困難なものにしている。

しかしこの轉移温度以上においてもなお油脂の薄膜

は存在をつづけるもので、それは配列こそ失え、乾燥摩擦に比較すれば格段に良い摩擦特性を與えているもので、潤滑劑としての役割はなお保有してゐるのである。では摩擦の條件がいよいよ困難なものとなり、その温度上昇に比例して熱的苛酷さを加えてゆくとしたら、ついにはいかなる事態に到達するものだろうか。

これは今日油脂という一般的な名稱でよばれている一群の有機性潤滑劑の熱的限度がどこに存在しその限

界が摩擦特性の上でいかなる形態をもつて立ちあらわれてくるかという問題である。われわれはこの限界を基盤にして、さらにつぎの新しい耐熱性の潤滑剤をもとめてゆかねばならない。

ふつう油脂の温度をあげていつた場合、境界潤滑の限界に大きな意味をもつてあらわれそうな物理的、化学的現象として、つぎのような諸項目が考えられる。

1. 轉移温度の問題 (物理的, 機械的),
2. 酸化の問題
3. 分解, 重合の問題,
4. 蒸発の問題, 等々.

轉移温度の問題についてはすでにその一部を報告した<sup>1)</sup>。油膜の酸化の問題については、それがあまりひどく進行しない限り、潤滑上かえつて好ましい効果をもつということに関しては、古くはギルソン<sup>2)</sup>, ドザア, アップルバイ<sup>3)</sup>, キング<sup>4)</sup>から、比較的新らしくはパウデン, レーベン, テイパー<sup>5)</sup>らに到るまで多数の論がある。しかしそれ以上温度が上り、酸化がさらに分解, 重合の段階に進む一方、蒸気圧の高い油脂またはその成分が温度上昇とともに大氣中に失われてゆくとしたら、その摩擦過程はいかに變化してゆきいかなる限界點に到達するだろうか、本稿はこの過程を實際の摩擦實驗によつて追跡し 解析した結果である。

しかし摩擦面に薄く塗附された油脂の薄膜の温度上昇に伴う摩擦特性の變化は、その化学變化自身が大氣、金屬面、混入物質等の効果によつて複雑であると同様 極めて複雑なことが豫期されるのである。特に最も困難な問題は、化学變化の段階に入ると時間の因子が強く影響をもち始めることで、この點われわれは時間的影響が常に一定の大きさで入るよう注意を拂つた。

## 實 驗

實驗の裝置, 方法等はすべて前の實驗<sup>1)</sup>と同様である。試料(潤滑剤)には一列の飽和脂肪酸を用いた。摩擦金屬の組合せには Ni と Cu との4種の組合せと軟鋼同志の組合せ、あわせて5種の組合せを基準として用いた。その他参考のため、同種純金屬の組合せとして Ag/Ag, Al/Al, Pb/Pb, Sn/Sn 異種金屬の組

合せとして Ag/Cu, Cu/Ag, Ag/Ni, Ni/Ag, Ag/Steel, Steel/Ag, Pb/Steel, Steel/Pb, Steel/Al, Ni/Al, コンスタントン/Steel 等についても全部または一部の試料で實驗した。しかし結果はいずれも大同小異で、基本的特性については、初めの五種の基準組合せの中に包括される。それでわれわれは、この五種の金屬組合せに関する結果のみを報告する。

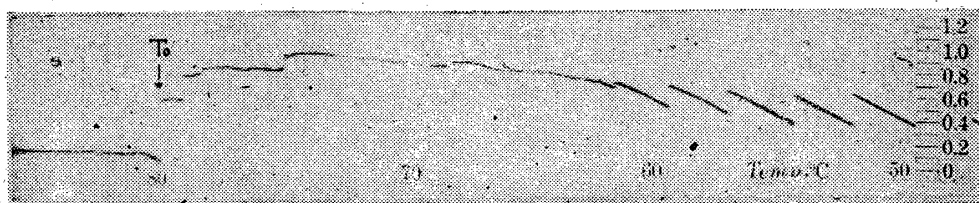
はじめのべた實驗上の諸困難にかんがみて、油脂はすべてできるだけ薄く塗附し、熱的諸變化がなるべく均一に、かつ遅れ少くおこるようにし、加熱速度も凡そ  $90^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  附近の一定値におさえた。

なお實驗はすべて自然大氣中で行われたものである。

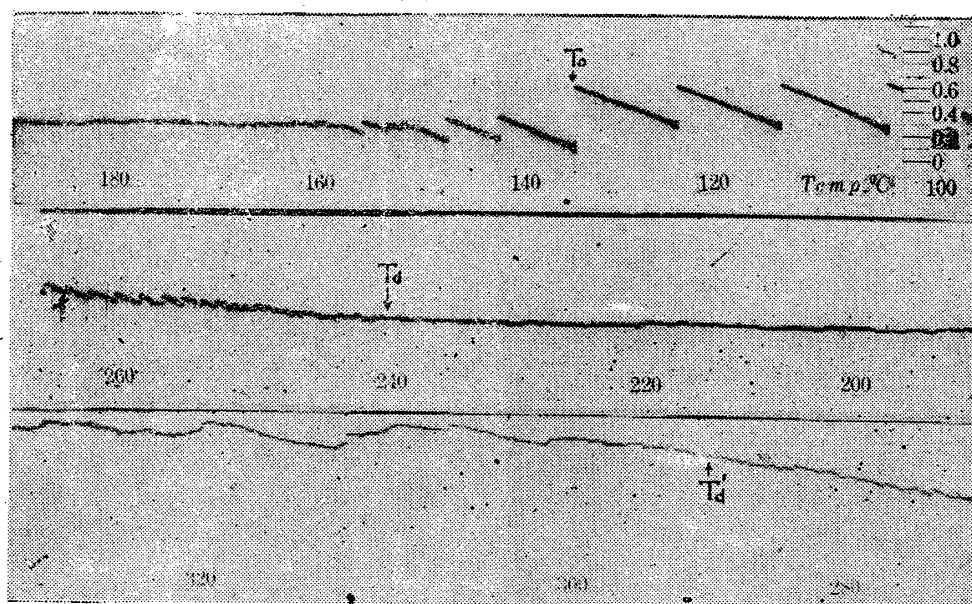
實驗結果——“三つの轉移點  $T_m, T_o, T_d$  がある,, 實驗の結果は極めて特異なものが得られた。その記録の一部を第1, 第2圖の寫真に示した。第1圖はCu/Cu, の組合せに酪酸 ( $C_4$ ) を用いた場合の轉移點 ( $T_o$ ) 附近であり、第2圖は Ni/Ni, の組合せに同じく酪酸 ( $C_4$ ) を用いたときの低温部を除いた全部で、その中に二つの轉移點 ( $T_o$  と  $T_d$ ) とを含んでいる。

これらの例を同種純金屬同志、及び低級脂肪酸からえらんだのは、この場合に最もよくこれらの轉移點があらわれ、いわば典型とみなしえたからである。すなわち、同種純金屬同志の摩擦においては、潤滑剤の種類と條件によつて、連続じり, Stick-Slip (附着—じり), 不整摩擦 (irregular and fluctuating friction) の三つのいずれの特性もあらわれうるのに、同種合金または異種金屬の組合せにおいては、不整摩擦はあらわれないのであり、またわれわれの試料においては、低級のものほど蒸気圧も高く酸化の影響も受け易く、一般に轉移點が明瞭にあらわれたからである。

一般に  $C_6$  以上の脂肪酸に對しては、温度上昇によりまず分子が配列を喪失することに原因する第一の轉移點  $T_m$  があらわれる。これはいわゆる機械的轉移温度で、あとに生ずる二つの轉移點と異り純物理的轉移であり、可逆的である<sup>7)</sup>。この機械的轉移温度  $T_m$  は電子廻折法によつて測定された、いわば物理的轉移温度  $T_m$  と密接な比例的關係を保っているが、金屬の組合せいかに基く乾燥摩擦の擾亂の大小により、多



第 1 圖 Cu/Cu, ( $C_4$ )

第 2 圖 Ni/Ni, (C<sub>4</sub>)

分に移動する性質のものである。そしてこの第一の轉移點  $T_m$  については、すでに前に報告したとおりである<sup>1)</sup>。

第1, 第2圖の金屬組合せ、及び試料に対しては上の第一の轉移點  $T_m$  は低温でもあらわれない。これは既に報告した通りである<sup>1)</sup>。しかし、本研究の對象である。領域に対しては最もよくその轉移を示している。

こうして第1圖においては室温から約  $60^\circ\text{C}$  まで Stick-Slip がつき、その振幅は温度と共に若干増幅的で、かつ摩擦も増加しつつある。 $60^\circ\text{C}$  附近の最後の Stick はそのまま不整摩擦に移り、その摩擦係数は  $0.9\sim 1.0$  に達している。この値は Cu/Cu の完全な乾燥摩擦の値  $1.41$  に極めて近いが、なお若干の油脂の潤滑効果をうけていると思はれる。 $80^\circ\text{C}$ —突然切りがおこる。そしてそこから新しく、かつ  $C_4$  としてはいかなる金屬組合せにおいても得られなかつた連続切りが始まる。こゝからはすでに酪酸 ( $C_4$ ) ではないのである。なんとすれば  $C_4$  は常温以上では配列をもたず、従つて連続切りを與えることはできないからである。まして機械的擾亂の大きい Cu/Cu 組合せではこの點で餘程強い方向性をもつた分子が新しく誕生したと考えねばならない。金屬面上の油はやゝ褐色化し、殆んど蒸發しきろうとしている。この連続切りはその後再び約  $120^\circ\text{C}$  で Stick-Slip に轉じ、さらに最後は不整摩擦に移行してゆくのであるが、こゝでは省略する。われわれはこの第二の轉移點 (第1圖の  $80^\circ\text{C}$  に相當) を酸化に基くものと考えてこれを  $T_0$  と記録し、この記號で残りの寫眞をも整理することにした。

さて初めにのべたように、この第二の轉移點が化學的原因によるものとすれば、 $T_m$  と異つてそこにはかなり大きな時間的遅れがある筈であり、ある温度で酸化するというような言葉の意味が大變うすいものになる。しかしわれわれがいま問題にしているのは、こうした意味の、たとえば酸化點というように一義的に規定されるべき常數ではなく、一定の加熱條件の下に何がいかなる順序でおこるか、その順序が試料の相異によつていかに影響されるかという、定性的または比較的問題であり、特に熱的限界を知るためには、遅れのある方が安全側において結論を下しうることにもなるので、當面の便宜上からこれを  $T_0$  轉移點として整理したものである。なお第1圖の  $T_0$  があまりに突然であるのは  $C_4$  蒸氣壓が高く、 $60^\circ\text{C}$  位で殆ど蒸發して、 $T_0$  に到つて分子が酸化による方向性を獲得する寸前では、潤滑劑としては最悪の條件にあるため、方向性獲得によるこの點の飛躍がかえつて大きくあらわれたものと思われる。

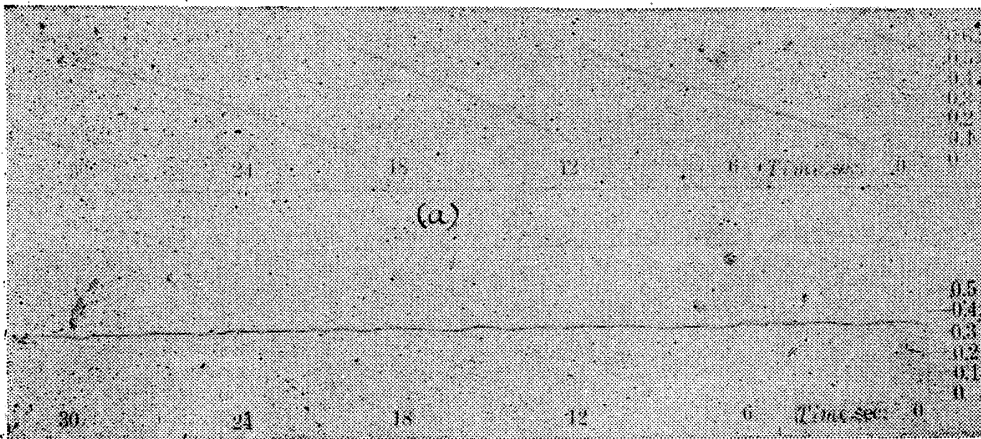
われわれはこの  $T_0$  轉移點が果して酸化によるものかどうかを確かめるために、別個の一つの實驗を行つた。すなわち Cu/Cu の組合せで  $C_4$  について初め室温で摩擦特性をしらべておいた。無論これは大きな Stick-Slip を生じた (第3圖(a))。つぎに標準の加熱速度で問題の  $T_0$  ( $80^\circ\text{C}$ ) よりもやゝ高い約  $100^\circ\text{C}$  まで加熱し、 $100^\circ\text{C}$  に達するやたゞちに摩擦板を取りはずし、急冷して室温にかえし、再び室温における摩擦特性をしらべた。結果は第3圖(b)に示したように連続切りを與えるにいたつた。すなわちこの  $T_0$  轉移點における油脂の變化は化學變化で不可逆的であり、明らかに酸化と判断されるのである。なおこの實

驗で薄膜の加熱を初めてから、100°C に到達後再び冷却し、つぎの摩擦に移るまでの時間は約 3 分間であった。

T<sub>0</sub> 轉移點を通過したのちの摩擦の典型的な例を第 2 圖にみる この寫眞が Ni/Ni と C<sub>4</sub> との組合せであることはすでにのべたが、この場合の T<sub>0</sub> 轉移點は Cu/Cu の場合よりやや高く、約 130°C である。そして恐らく前者より機械的擾亂が小さいため Ni/Ni の

昇するようになる。しかしこれも長くは續かず、290° 近傍からは純金屬のとも金乾燥摩擦の特性たる不整摩擦に移行する。連續りから再度の Stick-Slip に轉移する點を T<sub>d</sub> とし、更に不整摩擦に移行する點を T<sub>d'</sub> としよう。

おそらく T<sub>d</sub>~T<sub>d'</sub> の領域においては、軽度の酸化によつて極性化され、摩擦を滑らかにした分子(層)が、過度の加熱のためこゝで分解、重合を初め、潤滑



第 3 圖 (b) Cu/Cu, C<sub>4</sub>

室溫における乾燥摩擦係数は Cu/Cu に比し約半分、T<sub>0</sub> 點の寸前まで規則的な Stick-Slip が増幅的に發達してきている。それが T<sub>0</sub> 點附近で急に減幅的になり、平均運動摩擦係数も 0.4 から 0.2 に飛躍的に低下して、間もなく低摩擦の連續りに移行する。

しかし間もなく第三の轉移點があらわれ初める。すなわち酸化によるこの連續りや、240°C 前後において再び Stick-Slip に轉移し、それはその後の溫度上昇とともに増幅的に發達しつゝ、摩擦もまた次第に上

性能の劣化をきたして Stick-Slip に轉じたのであり T<sub>d'</sub> において完全に潤滑能力を喪失して事實上乾燥摩擦にはいるものであろう。われわれはこの T<sub>d</sub> ないしは T<sub>d'</sub> を第三の轉移點とよぶことにする。高級の脂肪酸では T<sub>d</sub>, T<sub>d'</sub> の差異ははつきりせず、それらは連續りがある溫度で急に Stick-Slip に轉じ、また摩擦を上昇するというかたちであられる。

こうした見地からはじめにのべた金屬組合せ、および各種の脂肪酸に対する轉移點 T<sub>0</sub>, T<sub>d</sub>, また T<sub>0</sub> 點

第 1 表

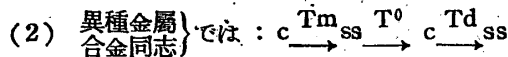
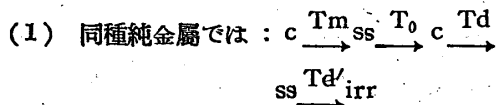
飽和脂肪酸	沸點 °C	(1) Ni/Cu				(2) Cu/Ni				(3) Ni/Ni				(4) Cu/Cu				(5) 軟鋼/軟鋼			
		T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	T <sub>d</sub> °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	T <sub>d</sub> °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	T <sub>d</sub> °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	T <sub>d</sub> °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	T <sub>d</sub> °C
C <sub>4</sub>	163	120	0.25 es	0.10 c	250 →ss	80	0.30 ss	0.15 c	160 →ss	130	0.40 ss	0.20 ss+c	240 (~290) →ss →	80	0.90 ss+	0.20 c	120 →ss →	110	0.50 ss	0.50 c	260 →ss
C <sub>6</sub>	205	150	0.25 ss	0.10 ss	270 →ss	100	0.30 ss	0.20 c	160 →ss	?	0.30 ss	0.20 ss+	160 irr →irr	90	0.50 ss	0.10 c+	130 →ss	140	0.20 ss	0.20 c	200 →ss
C <sub>8</sub>	237	180	0.50 ss	0.30 es	300 →ss	20	0.40 ss	0.40 ss	>200	?	?	0.40 s;	200 →irr	80	?	?	?	180	0.20 ss	0.20 c	250 →ss
C <sub>12</sub> (100 mm)	225	200	0.50 ss	0.30 ss	320 →ss	—	—	—	—	—	—	—	—	110	0.50 ss	0.30 ss	150 →ss	?	?	0.20 ss	>360
C <sub>14</sub> (100 mm)	248	240	0.40 ss	0.20 ss	330 →ss	150	0.30 ss	0.30 ss	>200	?	?	0.60 ss	340 →irr	140	0.60 ss	0.30 ss	>200	?	?	0.20 ss	>360
C <sub>16</sub> (100 mm)	268	?	0.30 ss	0.10 ss	>360	160	0.15 ss	0.10 ss+c	>200	?	?	0.30 ss	300 →irr	—	—	—	—	—	—	—	—
C <sub>18</sub> (100 mm)	287	280	0.60 ss	0.30 ss	>360	160	0.25 ss	0.25 ss	>200	?	?	0.30 ss	>360	140	0.60	0.40	>200	?	?	0.20 ss	>360

前の運動摩擦係数  $f_1$ ,  $T_0$  點後のそれ  $f_2$  等を整理すると第1表のようになる。そこには参考のため試料の沸點をも記入しておいた。なお表中, ss, c, irr と記したのはそれぞれ Stick-Slip, 連続り, 不整摩擦を意味し  $f_1$  欄にあるのは  $T_0$  點前,  $f_2$  欄にあるのは  $T_0$  點後の, また  $T_d$  欄にあるのは  $T_d$  點後のそれぞれ摩擦特性を示す。

表中の空欄は前報<sup>1)</sup>どおり試料の缺乏のためデータの得られなかつたものであり, ?欄は轉移の様子のはつきりしなかつたものである。データ中數回繰返して確かめたものもあるが, 機械的轉移温度の測定に比べると現象が化學的であるだけに整一を缺くことが多く, 誤差の範圍は低温で  $\pm 10^\circ\text{C}$  高温で  $\pm 20^\circ\text{C}$  位である。

## 討 論

第1表から最初に分かることは, 同種純金屬の組合せ (Ni/Ni, Cu/Cu) と, 異種金屬または合金同志 (Ni/Cu, Cu/Ni, 軟鋼/軟鋼) とで, 温度上昇による摩擦特性の變化が異なることである。すなわち原則的には,



となるので, 例外としていずれの場合にも低級脂肪酸の場合にははじめの  $c$  がなく, 従つて  $T_m$  もなく, すぐ  $\text{ss}$  から始まる。しかし重要なのは最後の特性で, (1)のときは irr, (2)のときは  $\text{ss}$  でおわるのが原則である, たゞし(1)の場合には高温時の  $\text{ss}$  がなくたゞちに irr に移ることがあり, また(2)の場合には高温時のときに irr に類似の模様を示すことがある。そして十分に發達した irr や  $\text{ss}$  は, それぞれ同種または異種金屬組合せに対する乾燥摩擦の特性でわれわれはこのことから, 上の過程の最後の段階は潤滑劑がほぼ完全に機能を喪失した状態と考えるのである。

$T_0$  轉移點を酸化による轉移點と考えるかぎり,  $T_0$  點までは必ず油脂の薄膜がなにかの形で存在するはずであり一般に  $T_0 > T_m$  なることも容易に考えうるから, (1)(2)いずれの場合にも  $T_0$  轉移點の前が一般に  $\text{ss}$  であることは容易にわかる。しかし  $T_0$  のあとに問題がある。実際には  $T_0$  後すぐに  $c$  に移るもの, 小さな  $\text{ss}$  に移つてそれがつづくもの, 小さな  $\text{ss}$  に移つてからさらに  $c$  に轉ずるもの等がある。

$T_0$  における酸化が理想的な程度に行われ, 分子の

極性化が適當であると, 機械的擾亂が小さく,  $T_0$  の温度もあまり高くないかぎり  $c$  にすぐ移ることは容易に考えられる。しかし極性化された分子も, その機械的轉移温度が  $T_0$  より低いとか, 機械的擾亂が大きいかすると  $T_0$  點の轉移は  $\text{ss} \rightarrow \text{ss}$  となり, たゞ若干振幅が小さくなる程度であることが考えられる。表中  $f_1$  より  $f_2$  に移るさい  $\text{ss} \rightarrow \text{ss}$  なる轉移の行われるのは, みな振幅に跳躍が認められるのである。従つてこの  $T_0$  點の温度における酸化生成物の極性いかんと機械的擾亂の程度によつては,  $\text{ss}$  の模様に残んど轉移が認められないこともありうる。第1表中の ?欄は轉移の明瞭でないものであるが, その中にはこうしたものも含まれると思う。また  $T_0$  附近で酸化が急激に進行したりすると, やはり配列層の形成が不十分で  $\text{ss} \rightarrow \text{ss}$  の轉移があらわれると考えられる。第1表をみると, いずれの金屬組合せにおいても低炭素数のものに  $\text{ss} \rightarrow c$  の轉移が認められ, 高級のものはきまつて  $\text{ss} \rightarrow \text{ss}$  である。また摩擦による擾亂の小さい軟鋼 軟鋼においては,  $T_0$  の最も高温度 ( $180^\circ\text{C}$ ,  $C_9$ ) まで  $\text{ss} \rightarrow c$  の轉移が行われている。そして  $T_0$  から  $T_d$  までのかなりの温度範圍を安定な  $\text{ss}$  ですぎることなど考えると,  $T_0$  點における摩擦振動模様の轉移には, 酸化生成物の轉移温度, 機械的擾亂, 酸化温度等の相互關係が重要な役割を果していると思われる。

つぎに  $T_0$ ,  $T_d$  を見よう。脂肪酸の炭素數が増すほど分子の比較的な安定性も増すと考えられるので,  $T_0$ ,  $T_d$  ともに炭素數が多いほど高くあらわれているとおもわれ, 特に  $T_0$  は同一程度の酸化でも分子が短いほど, その極性とか配列性に及ぼす効果は大きいと思われる。従つて分子が長いほど  $T_0$  の高いのは當然である。そして  $T_d$  が, 特に機械的擾亂の少ない軟鋼/軟鋼, Ni/Cu 等において沸點よりも高くあらわれているのは,  $T_d$  點に到るまでに試料が一部酸化をうけて, もつと高沸點の物質が表面に生成していることを意味するものである。また  $T_d$  が摩擦による擾亂の小さいものほど高いことは, 機械的轉移温度  $T_m$  におけると同じである。また  $T_0$  温度に関しては, 理論的には同一酸化状態に対しては機械的擾亂の小さいものほど低くあらわれるはずであるが, この點はわれわれのデータでは明瞭でない。Ni/Ni の組合せの高いのはよくわかるが, それよりも Cu/Cu の組合せの  $T_0$  の低いのが不思議である。この問題について, われわれは Cu/Cu, Ni/Ni の高温摩擦特性が常温におけるものと甚だしく相異し, Cu/Cu は酸化膜の生成する結果として, 酸化膜のできにくい Ni/Ni 組合せの高温特性とひどくかけはなれた性質をもちはしないかと考

え、兩者の比較実験を行つた。結果は第2表に示したとおりで、Cu/Cu ははじめやゝ増加するが、100°C内外から酸化膜の生成にともなつて次第に摩擦を低下し、300°Cでは室温の約1/3に低下する。Ni/Ni は安定で酸化被膜を生じにくいので温度とともに次第に摩擦を増し、300°Cでは室温の約倍に増加する。しかも注目に値するのは、いずれもとも金純金属として irr の特性模様ではほぼ全領域をつらぬいているうち、Cu/Cu

第 2 表

温度, °C	20	50	100	150	200	250	300
Cu/Cu	1.60	1.70	1.30	1.10	0.70	0.50	0.50
Ni/Ni	0.80	1.00	1.10	1.10	1.30	1.30	1.50

は 280°C 以上において不完全ながらも ss に轉移していることである。これも Cu の表面にできた酸化膜のためにも金純金属の特性模様が失われた結果と考えるべきものである。

こうして Cu 表面に生成した酸化被膜が Cu/Cu の  $T_0$  を異常に低下したということは定性的にはいつてよからうとおもう。しかし一方高温摩擦が Cu/Cu の方が Ni/Ni より低いとしたら、Cu/Cu の  $T_d$  が Ni/Ni よりも低いようにおもわれることはどう考えたらよからう。それは摩擦模様のなかに一つの解答が見出される。すなわち同じとも金でありながら Ni/Ni は  $T_d$  において全部 ss→irr の轉移をなしているのに、Cu/Cu は  $T_d$  で ss→ss の轉移を行つている。これは第2表にみたように、酸化膜を形成するといふなどの結果としてあらわれた相異であるが、われわれは表に示した Cu/Cu の  $T_d$  温度が油膜の分解重合の初期の徴候を示したにとゞまり、その更に高温部(われわれの測定できなかつた)に眞實の  $T_d$  があらわれるのではないかと考えている。

さらに前報告<sup>1</sup>の機械的轉移温度  $T_m$  と比較のうへ、 $T_d-T_0$ ,  $T_0-T_m$  の表をつくつてみる。第3表が

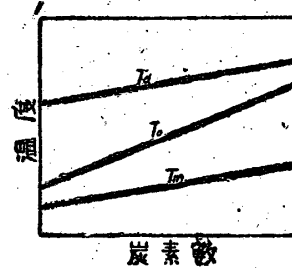
第 3 表

飽和脂肪酸	(1)Ni/Cu		(2)Cu/Ni		(3)Ni/Ni		(4)Cu/Cu		(5)軟鋼/軟鋼	
	$T_d-T_0$ °C	$T_0-T_m$ °C	$T_d-T_0$ °C	$T_0-T_m$ °C	$T_d-T_0$ °C	$T_0-T_m$ °C	$T_d-T_0$ °C	$T_0-T_m$ °C	$T_d-T_0$ °C	$T_0-T_m$ °C
C <sub>4</sub>	130	—	80	—	110	—	40	—	150	—
C <sub>6</sub>	120	110	60	—	—	—	40	—	60	45
C <sub>8</sub>	120	125	—	—	—	—	—	45	70	70
C <sub>12</sub>	120	120	—	—	—	—	40	65	—	—
C <sub>14</sub>	90	150	—	85	—	—	—	90	—	—
C <sub>16</sub>	—	—	—	85	—	—	—	—	—	—
C <sub>18</sub>	—	105	—	80	—	—	—	70	—	—

それである。

この表から見られるように、 $T_d-T_0$  すなわち油膜が酸化をはじめるか、または酸化の効果を示しはじめたからは完全に潤滑能力を喪失するまでの温度範囲は低級脂肪酸の方が高級のものより広いということになる。また  $T_0-T_m$  すなわち機械的轉移温度から酸化温度までは、大體高級のものほど広いことがみられる。前者は、酸化生成物の化学的性質、特に潤滑剤としての性能の差が、各試料の純粋な形における耐酸化性の差ほどいぢるしくないといふ事で、後者は機械的轉移温度の炭素数による差異もまた各、試料の耐酸化性の差異ほどいぢるしくないということを意味する。

これらの  $T_m$ ,  $T_0$ ,  $T_d$  の炭素数に対する関係、および相互間の関係を一般的に圖示すると第4圖のようになり、 $T_0$  の炭素数に対する傾きが一番大きいということを示している。



第 4 圖

第3表からさらに  $T_d-T_m$  をもとめて表示すると第4表がえられる。たゞしデータが不足なので Ni/Cu に対する値のみを示した。

第 4 表

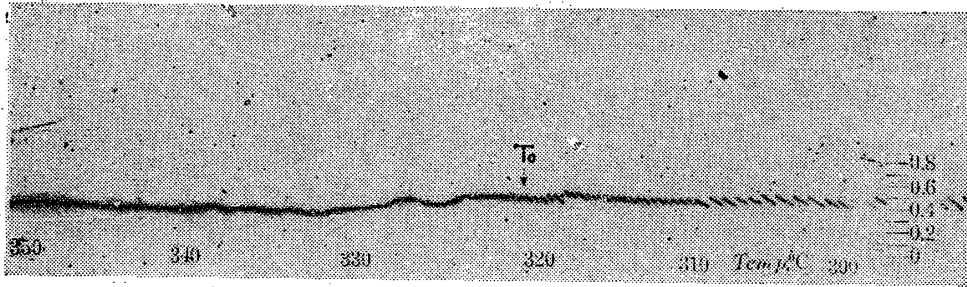
飽和脂肪酸	C <sub>4</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>18</sub>
(1)Ni/Cu $T_d-T_m$	—	230	245	240	240	—	—

すなわち  $T_d-T_m$  はほぼ一定で、第4圖における  $T_m$  と  $T_d$  の兩直線は平行的であることになる。これらの  $T_m$ ,  $T_0$ ,  $T_d$  の三直線の相互距離等が金属組合せで異なることは無論である。

この機械的擾亂の差異の影響、すなわち金属組合せの差異による乾燥摩擦の差異が、 $T_d-T_0$ ,  $T_0-T_m$  等にかに影響するかの問題については、理論的には  $T_d-T_0$  は機械的擾亂の大きいほど小さく、 $T_0-T_m$  は機械的擾亂の大きいほど大きくあらわるべきである。第3表から  $T_d-T_0$  については上の豫想が正しくあてはまることがわかる。しかし  $T_0-T_m$  については必ずしも明瞭でない。いずれにせよ、 $T_0$ ,  $T_d$  は  $T_m$  に比較してはるかに一義的決定が困難で、特に  $T_0$  における轉移の遅れの問題、 $T_d$  における摩擦の擾亂が室

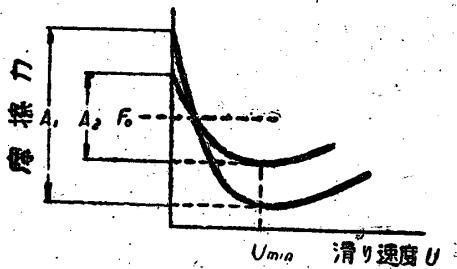
温におけるそれとかならずしも平行的でないこと等を考えるとき、われわれのえた結果からこれ以上の論議をすゝめることは意味がないようにおもう。

以上は直鎖状飽和脂肪酸の系列についてえた結果であるが、普通の潤滑油の特性はどうだろうか。低粘度油、高粘度油等における比較は、以上の論議から容易に推察できる。一例のみを第5圖に示した。この寫眞はスピンドル油を用いたときの軟鋼/軟鋼の結果であるが、320°C くらいでやはり酸化による ss→c の轉移を示している。



第5圖 軟鋼/軟鋼, スピンドル油

まえにも觸れたように、轉移點、特に  $T_0$  轉移點においては ss→ss なる移行が多く、しかもたゞ振幅の段階的に小さくなるものが比較的多い。これは第1表にしばしば見られる。この種の轉移においては、平均の運動摩擦係数としてはその前後において相等しくなるのである。しかし摩擦特性としては明らかに飛躍があるもので、たとえば平均運動摩擦力が  $F_0$  という一定値で、振幅のみ  $A_1$  から  $A_2$  に變化したということ



第 6 圖

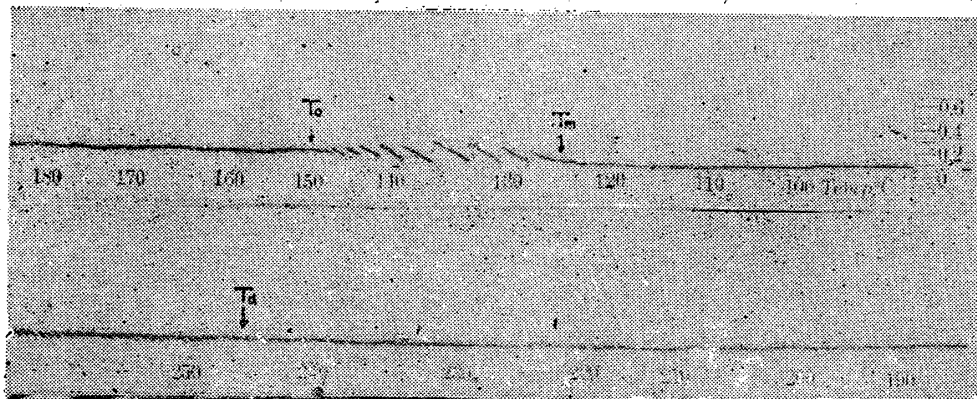
は、第6圖に示されただけの摩擦特性曲線の形の上の相異を意味するのである。なんとすれば、カイダノフスキ、ハイキン<sup>9)</sup>らののべているように、振動質量が小さく、平均摩擦速度が摩擦特性曲線の下降部分にあるときは、 $\dot{\gamma}$  直線の摩擦が静止摩擦(滑り速度  $U=0$ ) に對應するのは勿論、附着瞬間の滑り速度は最小摩擦點に相當する速度  $U_{min}$  に對應すると考えられ、かつ平均運動摩擦係数は、振幅の中央點の摩擦係数としてよいかからである<sup>8)</sup>。

なお前報告<sup>1)</sup>で觸れたように  $T_0$  轉移點は、摩擦特

線の下降部分において、急峻なものからよりなだらかな特性へ(ss→ss)、あるいは下降特性より平坦特性へ(ss→c)、移行する點であるため、機械的轉移温度  $T_m$  における轉移(加熱過程でとらえられた場合の)よりも遅れの生ずる可能性が大きい。しかしその量的批判はこゝでは簡単にはできない。實際には第7、8圖の寫眞にもみられるように、極めて圓滑に振幅を減じて連続 $\dot{\gamma}$ に轉移するものが多い。

### 轉移過程の一二の例

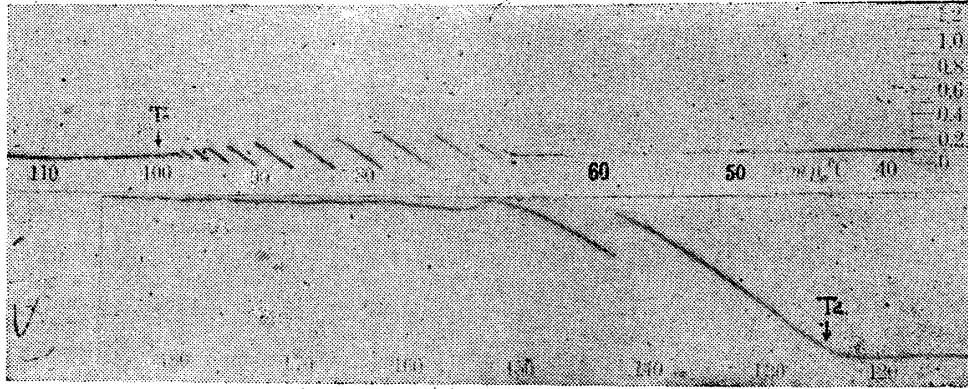
油脂の薄膜の熱的轉移過程については、いろいろの金屬組合せについて數百の記録をとつたのであるが、そのうちこゝに Pb を用いたときの二つの寫眞を示そう。第7圖は軟鋼/Pb で  $C_{14}$  を用いたとき、第8圖は Pb/Pb なるも金と同じく  $C_{14}$  を用いたときである。それぞれ  $T_m$ 、 $T_0$ 、 $T_d$  が明瞭に認められる。なお軟



第 7 圖 軟鋼/Pb,  $C_{14}$

第 5 表

飽和脂肪酸	軟 鋼/Pb					Pb/軟 鋼					軟 鋼/軟 鋼					Pb/Pb				
	Tm °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Td °C	Tm °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Td °C	Tm °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Td °C	Tm °C	T <sub>0</sub> °C	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Td °C
C <sub>14</sub>	125	150	0.2 ss	0.2 c	245 →ss	108	?	?	0.2 ss	?	130	?	?	?	>360	68	100	0.1 ss	0.1 c	125 →irr

第8圖 Pb/Pb, C<sub>14</sub>

鋼-Pb の四つの組合せに C<sub>14</sub> を用いたときの特性を第1表に準じて第5表に示した。

第7圖の Td 轉移が第8圖のような明瞭な摩擦の増大を示さないで、小さな Stick-Slip のみ發達しているのは、異金屬の組合せであること、また Pb の熔融點に接近して、Pb 自體の潤滑性があらわれていることなどの結果と思われる。この問題についてはおつて報告したい。Pb/Pb の轉移點が最も明瞭であること、またこの場合 Td で irr に轉移することなどもまえの實驗結果と同様である。第5表に示されている特性は、第1表の特性とほぼ傾向を一にしている。すなわち乾燥摩擦の大きい Pb/Pb において Tm, Td とともに低く、摩擦の順に Pb/軟鋼, 軟鋼/Pb, 軟鋼/軟鋼と次第に高くなっている。たゞ軟鋼/軟鋼が純金屬同志のとも金でない點だけ考慮にいれればよい。

### む す び

われわれは金屬面上に油脂の薄膜を作つてそれを加熱しつつ摩擦する過程に發現する轉移現象について分析し、主な轉移點として Tm, T<sub>0</sub>, Td (Td')なる三點をえた。そして機械的轉移溫度 Tm において一應生命を失つた油脂も、なお潤滑劑としての機能を若干保持しているのであり、Td 轉移點においては新になる生命をさえ附與されうるのである。しかし Td 轉移點は全くの破局である。そののちに來るものは全くの乾燥摩擦の特性、またはそれにきわめて近い特性で、それも高温におけるそれである。われわれはこの Td が案外に低い溫度にあらわれる事實を考えると、新たな立場から再び乾燥摩擦すなわち無油状態における摩擦の問題を取りあげねばなるまい。

實際の軸受面で油脂の膜が境界状態にあり、それが摩擦による高温、または外的な加熱によつて破局を招くときにも單時間とはいへ、やはり上の過程を原則として通過するものであろう。たゞわれわれの實驗條件は、金屬面に試料が廣く薄く塗附され、大氣中の O<sub>2</sub> に廣く接觸しているため、金屬のカタリシスとしての効果も加わる。従つて空氣に接する機會少なく軸受内を通過する油膜にも比較すると、遙かに急速に酸化、分解の過程をへるものである。しかし一般の潤滑劑自體がすでに O<sub>2</sub> を含む以上、完全に外氣を遮斷しても苛酷な摩擦條件の下ではやはり酸化の機會はある筈であり、また軸受内で酸化する機會は少くとも、潤滑系中に酸化の機會の多いときは、その油はやはり軸受内でわれわれのえたと同じ特性を示すはずである。こうしてわれわれは油脂の變質點、その摩擦特性との関連これらの轉移點と金屬や試料との関連等について若干知ることができた。

いずれにせよ、油脂の潤滑劑としての機能は、少くも酸化の機會の多い場合には 200~300°C で喪失されるということは重要で、特に苛酷な高温摩擦面の問題を扱かうときには重要である。とにかく有機化合物を潤滑劑として用いる限り、ほゞ上の範圍内外に限界のおかれることは止むをえない。軸受合金の問題も、實はこうした油脂系潤滑劑の熱的限界が案外に低いところにあり、しかもそれが軸受摩擦面の到達しうる溫度範圍内にあるということに深い関連があるのではなからうか。(1947年11月30日)

### 文 獻

1. 曾田, 宮川, 理工研報告, 2 (1948).
2. E. G. Gilson. Ind. Eng. Chem., 18(1926),



- 467-470.  
 3. M. V. Dover and R. B. Appleby. *ibid.*, 63.  
 4. R. O. King. *Proc. Roy. Soc., A*, 139.  
 (1933), 447-459.  
 5. F. P. Bowden, L. Leben, and D. Tabor  
*Trans. Faraday Soc.*, 35 (1939), 900-905.

6. P. Karrer. *Lehrbuch der org. Chemie*,  
 7. D. Tabor. *Nature*, 147 (1941), 609-610.  
 8. 文獻 1, 附記  
 9. N. L. Kajdanowskyund S. E. Chajkin.  
*Zeits. für tech. Physik. (U. S. S. R)*  
 (1933), 91-109.

## 棒の横振動に於ける振幅の影響

吉村慶丸・植村益次

(1948年2月17日受理)

### 1. 緒言

細い棒が横振動を行う場合、其の周期は材料の内部粘性、空気抵抗或ひは廻轉慣性、振幅等種々の二次的原因に因つて影響されることは勿論である。振幅以外のもの影響は一應微小振動として論ずることが出来るので取扱いが容易である。それに就いての重要な報告も多数ある。併し若し振幅が少しでも影響を有するものであれば、理想的な微小振動でない限り振幅の大きさを無視してそれ以外のもの影響を云々することは出来ないことである。内部粘性等の影響の大きさを正確に推定する爲めの基礎を與へる意味からも、又實際に振幅が可なり大きな振動を考へる場合の必要性からも振幅の影響を出来るだけ厳密に論じておく必要がある。このためには有限振幅に對する運動方程式を求めて、それを何等かの方法で解けばよい。

本報告では微小歪即ち Hooke の弾性法則の成立つ範囲内で、細長い直線狀の棒が任意の大きさの振幅で振動する場合の運動方程式の正確な形を決定し、それを變位の微係數の3次の項までとつた場合に就いて近似的に解くことを考へた。但しこの場合座標としては物體に固定した座標を取ることによつて、運動方程式の慣性の項を空間固定の座標の場合より遙かに簡単な形にすることが出来た。

### 2. 歪の解析

直線狀の棒の一平面内の曲げを考へる。その際棒は極めて細長く従つて有限の變位に對しても歪は微小であると考へる。従つて所謂棒の中心線に對する法線の保存が成立つと考へることが近似的に許されるから、

變形の前後に於ける棒の中心線上の相對應する點  $P$ ,  $\bar{P}$  の位置ベクトルを夫々  $r$ ,  $\bar{r}$ ,  $P$ ,  $\bar{P}$  に於ける單位法線ベクトルを  $n$ ,  $\bar{n}$  とすれば、變形前に於ける  $P$  點における中心線の法線上の點  $Q(r+zn)$  は、變形によつてそさに相對應する點  $\bar{Q}(\bar{r}+z\bar{n})$  に移る。但し  $P\bar{Q}=z$  である。 $P$  に相接近する中心線上の  $P'$  點を取り、それに應じて上と同様に  $\bar{P}'$ ,  $Q'$ ,  $\bar{Q}'$  を考へ、 $QQ'=s$ ,  $\bar{Q}\bar{Q}'=\bar{s}$ 、且つ變形前及び後の中心線に沿つて測つた長さを夫々  $s$ ,  $\bar{s}$ 、中心線に對する單位切線ベクトルを夫々  $t$ ,  $\bar{t}$ 、變形後の曲率を  $\kappa$  とすれば、

$$\sigma = t\bar{d}s + n\bar{d}z \quad (1)$$

$$\sigma = (1-z\kappa)\bar{t}\bar{d}s + \bar{n}\bar{d}z \quad (2)$$

$$t = \frac{dr}{ds}, \quad \bar{t} = \frac{d\bar{r}}{d\bar{s}} \quad (3)$$

一方歪成分  $e_s, e_z, e_{sz}$  は

$$\sigma^2 = (1+2e_s)ds^2 + (1+2e_z)z^2 + 2e_{sz}zdsdz \quad (4)$$

によつて定義されるから、之を(2)式と比較することによつて、

$$\left. \begin{aligned} 1+2e_s &= (1-z\kappa)^2(1+\epsilon)^2 \\ e_z &= 0, \quad e_{sz} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

が得られる。但し  $\epsilon$  は中心線の伸びの歪で  $1+\epsilon = \frac{d\bar{s}}{ds}$  で與へられる。 $e_z, e_{sz} = 0$  は法線保存の假定から得られる當然の結果である。(5)式で  $\epsilon, \kappa$  の一次の項のみを取れば、

$$e_s = \epsilon - z\kappa \quad (6)$$

となる。

→  $PP'$  によつて表はされる變位ベクトルを  $u$  で表