日本機械学会論文集

第10巻第39号

第1部

昭和19年5月

日本學術振興會第42小委員會における軸受の研究⁽¹⁾

(その1)

研究経過

(昭和17年12月9日 第431回 [日本學術振興會、日本機械学会と聯合] 講演會に於て講演)

正員 沖 巖⁽²⁾

日本學術振興會第42小委員會は日本機械学会と聯合講演會を開催して下記4名の小委員會委員に依頼して研究発表を行ふことにした。本小委員會は委員長 沖巖君、幹事 柴田晴彦君、委員18名にて各種軸受の構造、材質、潤滑機構並に潤滑剤等に関して機械、冶金、物理、化学等の諸方面より綜合的研究

を行ふ目的を以て昭和15年4月に設置せられたが、先づ滑り軸受の限界摩擦に関する問題を第一目標として研究を進めてきた。茲に各委員の発表するものはその成果の一部分であるが、学界及び工業界に於てこれ等の論文の内容を十分實際に應用せられ国力増進の一助に資せられ、ば甚だ幸である。

(その2)

摩擦面の温度上昇に就て⁽³⁾

(昭和17年12月9日 第431回 [日本學術振興會、日本機械学会と聯合] 講演會に於て講演)

正員 曾田 範宗⁽⁴⁾

摘 要

摩擦面の温度が摩擦金属自体の平均温度に較べて遙かに高い値を示すだらうといふことは容易に推定されるのであるが、最近に到つて潤滑作用が、廣汎な意味における一つの冷却作用⁽⁵⁾と理解されるに及んで、この表面温度の特性に関する問題が愈々大きな意味を加へてきた様に思ふ。それは冷却といふ言葉の内容が2様の意味をもつからである。即ち一つは発生熱量を出来るだけ多量に奪ふといふことで、他の一つは摩擦面の温度を出来るだけ低下せるといふことである。そしてこの冷却の結局の目的が後者にあることは無論で、こゝにこの問題の実用的な意味が存在する。この問題は既にバウデン等⁽⁶⁾によつて、特に乾燥面に関してその研究の結果が発表されてゐるのであるが、その結果に対して、とかくの論もある様であり、筆者も潤滑摩擦面の冷却の問題に関連して同様な実験を潤滑及び非潤滑面に就て行つたので、その結果の概要を報告する。

1. 理 論

摩擦面の温度を支配する因子が、特に冷却の観点から問題になる因子が二つある。一つは摩擦面から入る熱量をその周囲を流れる媒体(冷却液)に持去らせることであり、一つは金属自体の裏金へ持去らせることである。この両者の何れを強調しても表面温度は低下する。

摩擦面の局部的接触状態を第1図の様な円柱状突起と仮定

する。摩擦面から単位時間に Q の熱量が入り、その αQ だけが周囲を流れる媒体に奪はれ、残りの $(1-\alpha)Q$ が裏金に持去られるとする。すると定常状態に於て次の関係が成立してゐる。

$$\pi r^2 K \frac{d^2 T}{dx^2} - 2\pi r \sigma (T - T_0) = 0 \quad \left. \vphantom{\frac{d^2 T}{dx^2}} \right\}$$

(3) On the Temperature Rise of Rubbing Surfaces.

(4) Norimune SODA, Member. The Aeronautical Research Institute, Tōkyō Imperial University.

(5) 摩擦係数を低下させて発生熱量を減少させることはその效果に於て冷却作用の向上と相通する。
(6) F. P. Bowden and K. E. W. Ridler: Proc. Roy. Soc., A., Vol. 154, (1936).

(1) On the study of bearing of the 30th Subcommittee of the Japan society for the promotion of Scientific research.

(2) Iwao OKI, Member. The Waseda University. 早稲田大学。

$$\left. \begin{aligned} \alpha Q &= 2\pi r \sigma \int_0^L (T - T_0) dx \\ (1-\alpha)Q &= - \left[\pi r^2 K \frac{dT}{dx} \right]_{x=L} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

但し K は熱伝導率、 σ は表面熱傳達率で、温度は円柱断面に於て一様に分布してゐるものと考へる。

(1) を解いて結局表面温度上昇として次の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{t_s}{t_b} &= a \left\{ \frac{b-1}{b+1} + 2\alpha \frac{b}{b^2-1} \right\} \\ \frac{1}{a} &= \frac{b^2+1}{b^2-1} \frac{b-1}{b+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

第 1 図

但し、 $t_s = T_s - T_0$ は表面温度上昇 (T_s は摩擦面の温度、 T_0 は冷却液の温度)

$t_b = T_b - T_0$ (T_b は裏金の温度)

$$a = \frac{Q \cdot t_b}{\pi \sqrt{2r^3 K \sigma}}, \quad b = e \sqrt{\frac{2\sigma}{Kr}}$$

で、 a, b はダイメンションのない量である。

(2) から、 a, b をパラメータとして、 α 、即ち表面から入った熱量のうち何 % が周囲から熱傳達で持去られ、何 % が裏金へ熱伝導によつて持去られるか知られると共に、斯様な a, b, α に対する表面温度上昇 t_s/t_b が決定される。

一般的な関係としてこれを線図で示すと第 2 図及び 3 図のやうになる。

第 2 図で、 $a > 0$ の場合は $Q > 0$ に対して $t_b > 0$ 、即ち裏金の温度が冷却液の温度よりも高いときを表はし、 $a < 0$ の場合は $t_b < 0$ 、即ち裏金の温度の方が低いときを表はす。 $a = \pm \infty$ は $t_b = \pm 0$ 、即ち裏金と冷却液とが等温のときを意味する。そして [I] の範囲では $\alpha > 1$ で、これは同じ b に対しても a が十分小さいか (例へば裏金の温度が冷却液のそれよりも遙かに高いとか)、同じ a に対して b が十分大きい (例へば L が非常に長いとか) するために、摩擦面に発生した熱量よりも余分の熱量が冷却液に持去られ、換言すれば冷却液が裏金を冷却する場合である。従て裏金の温度が冷却液の温度よりも高い場合、即ち $t_b > 0$ 、又は $a > 0$ の場合に対してのみこの状態が成立する。[II] の範囲では $0 < \alpha < 1$ で、上と同様の考で、摩擦面に発生した熱量の中の一部分は冷却液に、残部は伝導によつて裏金に持去られる場合である。 $a = \pm \infty$ のときに常に $0 < \alpha < 1$ であることは $t_b = 0$ の条件から容易に推定出来るが、 $t_b < 0$ でも $-\infty < a < -1$ のときには b の大きいところで $\alpha > 0$ となり得ることがみられる。[III] の範囲では $\alpha > 0$ で、こゝは冷却液が摩擦面に発生した熱量を奪ふ以上の熱量が逆に裏金へと奪ひ去られること、換言すれば裏金が冷却液を冷却してゐる場合である。従てこの条件は裏金の温度が冷却液の温度よりも低い場合、即ち $t_b < 0$ 、又は $a < 0$ の場合でなければ充足されない。

第 3 図は以上の a, b, α に対する表面温度上昇 t_s/t_b を

第 2 図

第 3 図

図示したものであるが、 $a > 0$ 又は $a < 0$ によつて全く異なつた特性を示すことは前と同じである。 $a > 0$ に対しては、 $t_b > 0$ であるから常に $t_s/t_b > 0$ であることは無論であるが、 b を 1 より次第に増加すると t_s/t_b は 1 より大きなある極大値を経て、以後次第に低下して夫々定まつた極限値に漸近する。そしてこの極限値は $a > 1$ なら 1 より大、 $0 < a < 1$ なら 1 より小であるから、摩擦面の温度を最低に保つには、 $a > 1$ なら b の十分小さいところを、 $0 < a < 1$ なら b の十

[昭和 19 年 5 月]

分大きなところを選べよことになる。

$\alpha < 0$ に対しては $t_b < 0$ であるから b の如何によつて t_s/t_b は正にも負にもなる。即ち前の $\alpha > 0$ の場合に摩擦面の温度が冷却液の温度より常に高かつたのに較べて、このときには b の選び方によつて高くも低くもなり得ることを意味する。そしてこのときに摩擦面の温度を最低に選ぶには一律に b を出来るだけ小さくとることが必要になる。そしてこのときの t_s の最低値は t_b そのまゝである。

更にいま t_s に対する金属の熱傳導率 K や表面熱傳達率 σ の効果をみるために、簡単に $t_b = 0$ 、即ち冷却液と裏金の温度が等しい場合に就て一考してみよう。このときの解は

第 4 図

$$\left. \begin{aligned} t_s &= \frac{Q}{\pi \sqrt{2r^3 K \sigma}} \left\{ \frac{b+1}{b-1} + 2\alpha \frac{b}{b^2-1} \right\} \\ \alpha &= \frac{(b-1)^3}{b^3+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

これを線図に示すと第 4 図のやうになる。

(3) 式から α を消去すると

$$t_s = \frac{Q}{\pi \sqrt{2r^3 K \sigma}} \cdot \frac{b^2-1}{b^3+1} \dots\dots\dots (4)$$

となるが、いま摩擦面から入つた熱量 Q がすべて冷却液に熱傳達によつて持去られると考えると、それは $L \rightarrow \infty$ (7) の場合に相當し、このときの表面温度上昇は、

$$\lim_{L \rightarrow \infty} t_s = \frac{Q}{\pi \sqrt{2r^3 K \sigma}} \dots\dots\dots (4)'$$

となる (8)。

もしも亦全熱量が熱傳達によつて裏金へ持去られるものとすれば、表面温度は同様にして

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} t_s = \frac{QL}{\pi r^2 K} \dots\dots\dots (4)''$$

となり (9)、前者に於て t_s が $\sqrt{K}$ に逆比例したのに対して、後者に於ては K に逆比例する。実際には兩者の中間にある筈である。

筆者は初めに冷却の概念に二つあること、即ち一つは発生熱量を出るだけ多量に奪ふこと、一つは摩擦面の温度を出

(7) $\sigma \neq \infty$, $K \neq 0$, $r \neq 0$ とす。 (8) パウデンの算式と一致す。前掲文献 (6)。 (9) $K \neq \infty$, $r \neq \infty$, $L \neq 0$ とす。

来るだけ低下することの二つあることを述べたが、こゝで兩者の關係を一す調べてみよう。第 4 図から α が b の大きい程大きくなることが分かるが、 b の中で K と σ とは σ/K で入つてゐるから、 σ の増加と K の減少、又は σ の減少と K の増加とが全く同じ効果をもつてゐることがわかる。

いま一例として摩擦面から入る熱量のうち 50% が冷却液に持去られ、残りの 50% が裏金に持去られる場合、即ち $\alpha = 0.5$ の場合をとつて、斯様な條件を満足する如き 1 組の K 及び σ を K_0, σ_0 とすると、それに対する温度上昇が (3) 式から決定される。かうしていま K 又は σ を夫々 K_0, σ_0 の 2 倍、3 倍... 又は $1/2, 1/3...$ と増減したときの α 及び t_s を第 5 図に示す。

図に於て曲線 (1) は $\alpha = \sqrt{K/K_0}$ を、(2) は $\alpha = \sqrt{\sigma/\sigma_0}$ を示す。 $\sqrt{K/K_0}$ の増大によつて α が低下し、 $\sqrt{\sigma/\sigma_0}$ の増大に伴つて α が増加するのは無論であるが、更に (1) を $(1-\alpha) = \sqrt{K/K_0}$ にひき直してみると、これは K の変化によつて熱傳達によつて持去る熱量がいかに変化するものであるかを示すものであり、曲線 (3) との対比によつて、この場合 K の増加によつても σ の増加によつても、第 1 の意味の冷却効果、即ち夫々熱傳導及び熱傳達

第 5 図

によつて運び去る全熱量に於ては大差ないことが知られる。そして次に第 2 の意味の冷却効果、即ち表面温度上昇 t_s をみると、曲線 (4) は

$$t_s / \left(\frac{Q}{\pi \sqrt{2r^3 K_0 \sigma_0}} \right) = \sqrt{K/K_0} \text{ を、(5) は } t_s / \left(\frac{Q}{\pi \sqrt{2r^3 K_0 \sigma_0}} \right) = \sqrt{\sigma/\sigma_0}$$

を示すものであるが、持去る熱量の意味では若干 σ の変化の方が大きな効果をもつてゐるのに反して、表面温度に於ては K の変化の方が遙かに著しい影響をもつてゐることが知られる。そして K 又は σ の増大に伴つて表面温度上昇が次第に 0 に漸近するのは當然であるが、重要なことは K 又は σ が次第に小さくなつて 0 に近付いたとき、その極限に於て、 σ に対しては

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sigma}{\sigma_0} \rightarrow 0 \left(\frac{t_s}{\pi \sqrt{2r^3 K_0 \sigma_0}} \right) = \log b_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_0 L}{K_0 r}}$$

なる一定値が得られるのに対して、 K に対しては

$$\lim_{K \rightarrow 0} \frac{K}{K_0} \rightarrow 0 \left(\frac{t_s}{\pi \sqrt{2r^3 K_0 \sigma_0}} \right) = \infty$$

第 6 図

第 7 図

第 8 図

に到達することである。これも σ による熱の放散が熱伝導を前提として行はれることを考へれば當然であるが、このことからたとへ熱量的な意味の冷却効果が略：同一でも、温度的な意味の冷却効果に於ては大きな差異の起りうる事が推定され、若しも表面温度に関して K 及び σ の増大又は減少に同量の努力を拂ふならば、 K を強調した方がずっと効果的であることがわかる。

α が 0.5 以外のときを標準にとつても結論は同様である。

K , σ のほかに r も亦直交 t_s に関係をもつのであるが、これは以下で実験的なことを述べる際に触る。

2. 潤滑面に対する実験

以上、摩擦面の温度上昇に関する主たる諸因子間の量的関係に就て大体を考察したが、次に表面温度に関する実験の結果を報告する。実験は潤滑及び非潤滑面に就て行つたが、本章では潤滑面に関する実験の結果をのべ、それが前述せる基本的な諸関係式と如何に結びついてゐるかを考へてみたい。

1. 実験の方法 実験の方法は前掲パウデン等のやつたもの⁽¹⁰⁾と殆ど同様である。第 6 図がその骨組図で、図中 D は表面とラップした軟鋼製円盤で電動機から各種速度に減速駆動する。 T は試験片で、その先端を以て円盤に摩擦する。先端は各種の直径のものを用ひたが、基本的なものは 1 mmφ である。円盤 D からは同じく軟鋼製のリードを出して H_g 槽に浸す。そして T と D の間の熱起電力を電位

差計で測定する⁽¹¹⁾。使用した電位差計はリーズ・アンド・ノー・スロップでガルバは 10^{-11} A、回路には若干の減衰抵抗を挿入した。使用潤滑油はスピンドル油である。

初めに同じ円盤 D から切りとつた軟鋼の一片を以て試験片を作り、摩擦によつて電圧を生じないことを確かめてから実験にかゝつた。円盤上の同じ跡を繰返し摩擦したのでは試験片の磨耗による細かな粉末が忽ち円盤に附着して電圧が零に下るので⁽¹²⁾、数回の練習の後、脱脂綿にスピンドル油を軽く浸みこませ、これで摩擦面を絶えず拭淨することによつて一應成功した。併しその後これによつても尚磨耗粉末の附着の影響が相當残ることが明らかになつたので、結局最後には摩擦し乍ら試験片を円盤の半径方向に徐々に移動させ、絶えず新しい面に於て摩擦する様にし、1 回摩擦する度に円盤の全面を新たに砥石を以て丁寧にラップし直すことにして略：

目的を達することが出来た。

この操作は極めて労力的であつたが、それだけに摩擦面に喰ひ入つた金属粉末の除去は困難なものであり、完全に除去するには、新たに研磨し直すより他あるまいと考へる。

以下実験の進行のまゝに結果を並べ乍ら考察していこう。尚摩擦速度はすべて電動機の回転数で整理したので、その摩擦速度との関係を第 7 図に示しておいた。

2. 実験の経過 第 8 図は Cu 製の試験片を用ひたときの熱起電力 E と回転速度との関係で、試験片にかゝる實際荷重をパラメータにとつてある。一定荷重に於て熱起電力が速度に比例して上昇することは摩擦面における発熱量との関聯に於て容易に説明出来る。併し常識的にみてこゝで極めて不思議に思はれるのは荷重が低い程熱起電力が高く、荷重が高い程それが低く表はれてゐることである。

そこで同じ試験片に対して、一定速度で、荷重を色々変化させて熱起電力を測定してみた。

その結果の一例を第 9 図に示す。図に見られるやうに軽荷重に於て極めて高い起電力を示し、500 g までに急激に降下するが 800~900 g 附近から先で再び若干の上昇を生ずる。

(10) 前掲 (6) 参照。 (11) 油脂の薄膜が存在すると、摩擦状態に於てその接觸抵抗は容易にメガオーム程度に達するので、普通の電圧計では測定出来ない。

(12) 甚だしきは焼付を生じて深い白い溝を円盤面に形成する。筆者の第 1 回の実験には Al の試験片を用ひたが、始動後約 20 秒位で電圧が降下するとみるや円盤は忽ち白い引掻きを作つて、やけつき試験片の先端はとけ曲り、その先端を顕微鏡でのごとく明らかに Al の酸化物と思はれる被膜に被はれてゐた。かうして最初の試験円盤は簡単に棄つてしまつた。

図中、 F はその時同時にバランスで測定した摩擦力で、荷重に対して略、直線的に上昇してゐるのは、境界摩擦の一般的特性として當然であり、実験における摩擦状態が略、境界状態であることをも意味する。これより、荷重増加によつて摩擦面には事実上それに比例した発生熱量の増加のあることに

第 9 図

疑ひはない。 f は摩擦係数で、略、一定のところ、荷重の小さいところで急激に増加してゐることは、これまた境界摩擦の特性である。

第 10 図

第 11 図

次に問題になるのは、摩擦面の発生熱が P に比例するとしても、果してその発生熱に比例した熱量が実際に試験片に入ってくるものか否かである。これは簡単に確かめられる。即ち第 10 図のやうに試験片の先端から約 0.5 mm 下つたところに小さい錐孔をあけ、そこにコンスタンタン針金の先端を没入させてそこに銅-コンスタンタンの熱電対をつくり、荷重増加によつてその温度がいかに変化するかをしらべた。第 11 図がその実験結果で、表面の熱起電力 E (mV) が依然として荷重増加と共に低下するの、試験片先端のすぐ裏の温度 E' (in mV)⁽¹³⁾ は、荷重増加と共に比例的に上昇してゐる。これは荷重増加と共に、摩擦熱の何 % かは判らないが、とに角摩擦熱の増加に正比例した熱量の入りがあつたことを証明する。

以上を総合すると、境界摩擦面直接の温度変化に対しては、熱量のみの変化で説明出来ない特殊な機構の存在することが想像される。

(13) E' mV は Cu-コンスタンタン-カップルであるから、温度に於ては E の目盛より余程低い筈である。

そこで方面をかへて、試験片の材質にコンスタンタンを選んだ。これは実際に測定に用ひて起電力も大きく、指数も比較的安定で扱い良い材料である。その典型的な一つの資料を第 12 図に示した。前と同様に、 E, F, f は夫々熱起電力、摩擦力、摩擦係数を表はす。 F が荷重に対して直線的な変化を示すこと、 f の特性、何れも銅におけると同じで、只若干値が大きいためである。併し温度特性 E は銅とは非常に相異し、大体荷重の増加と共に直線的に上昇するのだが、荷重の小さいところに一つの谷を生じ、或最低温度を示す荷重よりも更に荷重を減すると、急に温度は却て上昇するに到る。この荷重の小さい附近における E 曲線の急激な曲りは、この材料に特有であるらしく、他の回転数 300 rev/min に於てもこの谷は依然として大体相似た荷重附近に表はれてくる。そしてこの材料のときにも、温度上昇 E は略、回転数には比例してゐる。そしてこの場合にも、やはり表面温度を決定する特殊な機構の存在することが推定される。

以下にこの原因に就て考察しよう。

3. 実験結果の解釈 以上の資料を説明するために、前に述べた表面温度の基本的諸関係を反省してみよう。

試験片の先端の長さは、入力熱量をその周囲からまはりの

第 12 図

空気に発散させるに十分と考へられるから、我々の場合、定常状態に於て前述第 (4)' 式が近似的に成立してゐると考へて良いだらう。即ち再録すると

$$t_s = \frac{Q}{\pi \sqrt{2r^2 K \sigma}} \dots \dots \dots (4)'$$

この関係式の中で、 K, σ は少くも実験範囲内の条件に於ては略、一定と看做される。そして F 従て Q は前述した何れの実験に於ても荷重に対して略、直線的な関係があるからこの摩擦直線が座標の原点を通過せず、原点より若干高いところで縦軸を切ることに注意して (この事実が結局、境界摩擦係数が荷重の小さい附近で急激に増加するといふ一般的特性を招来する)、結局 Q は次の式で表はせる。

$$Q = (C_1 + C_2 P) V / J \dots \dots \dots (5)$$

こゝに C_1, C_2 は常数で、 C_1 は摩擦直線が縦軸を切る点の縦座標、 C_2 は直線の傾きを表はすダイメンションのない量、 P は荷重、 V は摩擦速度、 J は熱の仕事當量である。 F が P のみの函数として表はされ、 V に大体独立であることは、第 12 図及び 13 図からも略、看取出来る。

次は r であるが、これは接触する眞実の面積を代表する項として、荷重の変化に対してかなり変化することが想像され、これが表面温度に影響したとしても別に不思議はない。実際には極めて多数の接触点の総和として接触面積が働いてゐる筈であるが、そのある一種の平均値として 1 箇の半径 r

第 13 図

の接触面積が存在し、それが荷重の変化に対していかに應ずるかを考へることは第 1 近似として然程無理でもあるまい。只その接触面積の絶対値だけは一應は求まりさうないが、変化の特性だけは簡単に接触電気抵抗の変化からも知られる。両材質に対して求めた多数の実験値の平均は第 14 図に示した通りである。一般に接触電気抵抗 R は P の函数として次式で示される。

$$R = \text{const.} \cdot \frac{1}{P^n} \quad (6)$$

この式中、 n を両材質に対して実験的に求めると、曲線の主要部分に於て、

$$\begin{aligned} \text{銅} &: n = 0.95 \sim 1 \\ \text{コンスタンタン} &: n = 0.60 \sim 0.65 \end{aligned}$$

コンスタンタンに対しては、軽荷重に於て極めて大きな抵抗を示して十分な測定が出来ないが、100 g 位から銅に比較してずつと緩慢な抵抗の減少を示し、殆ど一定値と看做される位平坦な傾向をたどる。

バウデン等の実験⁽¹⁴⁾によると、材質の弾性学的性質の如何に拘らず、荷重による小さな接触点の変形特性は塑性として表はれてをり、これはその應力集中を考へれば十分納得のゆくものであるが、この度の場合は試験条件がやゝ異なり、コンスタンタンの様な堅い材質が小面積で十分擦合される場合には、その局部的接触状態は塑性特性を示さうと、ある荷重

以上で急に全面に近い當りを示し初め、それ以後見かけ上弾性変形、乃至はより変形の少い特性を示したからとて不思議はなさうに思ふ。筆者は適當な材料を適當に擦合はせた場合には、擦合せ面積の小さいときにはさほど著大な荷重でなくとも可成りいゝ當りを、少くもバウデン等⁽¹⁵⁾の推定した数千、数万分の一といふ値より大分大きい値が可能なのではないかと考へる。事実筆者の表面温度の資料は、コンスタンタンに対して接触面積が塑性的变化を生ずるものと仮定したのでは説明出来ないものであつて、第 14 図に表はれてゐる面積変化をそのまゝ受入れて初めて綺麗に触取出来たものである(尙擦合せの効果の項参照)。

試験片の先端の構造上、 R は略し接触面積 A に逆比例すると考へられるから

$$A = \pi r^2 = \text{const.} \cdot P^n \quad (7)$$

然るに (7) 式で $n=1$ と置けばこれは塑性変形を意味し、 $n=2/3$ と置けば弾性変形を示すもので、我々の得た n の値は略し上の両極端の場合に近いことが分かる。従て簡単のため今銅に対し塑性変形を代表させて $n=1$ と置き、コンスタンタンに対し弾性的表面変形を代表させて $n=2/3$ と置けば、これらの n に対して (7)

第 14 図

第 15 図

第 16 図

式を (5) 式と共に (4)' 式に代入して次の一般式が得られる。

塑性変形 (銅) に対して

$$t_s = \text{const.} \cdot \frac{(C_1 + C_2 P) V}{P^{3/4}} \quad (8)$$

弾性的変形 (コンスタンタン) に対して

$$t_s = \text{const.} \cdot \frac{(C_1 + C_2 P) V}{P^{1/2}} \quad (9)$$

(8), (9) 式によつて表面温度 t_s に対する P と V との影響が推定出来る。

第 9 図及び第 12 図から摩擦直線 F の C_1 , C_2 を算出すると、

(14) F. P. Bowden and D. Tabor: *Pror. Roy. Soc., A*, Vol. 169 (1939).

(15) F. P. Bowden and D. Tabor: 前掲。

銅に対して

$$C_1 = 6 \text{ g}, \quad C_2 = 0.0215$$

コンスタンタンに対して

$$C_1 = 4 \text{ g}, \quad C_2 = 0.0460$$

表面温度が摩擦速度に比例するといふ実験資料は上の (8), (9) 式にも明らかに示してあるから、今上の C_1, C_2 を用ひて荷重 P に対する表面温度 t_s の変化を計算してみると第 15 図、第 16 図のやうになる (t_s/CV はダイメンションのある量)。

一見直ちにコンスタンタンの場合、銅の場合よりも荷重の大きいところで遙かに著しい温度の上昇のおこることが分かる。そして両曲線の形状は第 12 図又は第 13 図の実験で曲線 E に極めてよく一致することが見られる。

興味あるのは第 15, 16 図共、 t_s の $\cdot \text{min}$ を與へる特定の荷重 P_{min} の存在する事で、今 (8), (9) 式からこの P_{min} を求めると、

第 17 図

第 18 図

第 19 図

第 20 図

第 21 図

弾性的変形(銅)に対して

$$P_{\text{min}} = 3 \frac{C_1}{C_2} \dots\dots\dots (10)$$

弾性的変形 (コンスタンタン) に対して

$$P_{\text{min}} = \frac{C_1}{C_2} \dots\dots\dots (11)$$

なる簡単な関係が求まる。

これらの式に前に得た C_1, C_2 の資料を代入すると、銅に対しては

$$P_{\text{min}} = 3 \times 6 / 0.0215 = 837 \text{ g}$$

コンスタンタンに対しては

$$P_{\text{min}} = 4 / 0.0460 = 87 \text{ g}$$

第 10 卷 第 39 号 (第 1 部)]

これらの値も亦実験値に見られる最低温度荷重と極めてよく一致する。そして P_{min} が V その他に独立に C_1, C_2 のみで定まることは、第 12 図、第 13 図の P_{min} が全く一致してゐる事実を説明する。

尚 (8), (9) 式より一般的に弾性的及び弾性的変形に対して表面温度 $t_s/°C$ が P に対してどのように変化するかを C_2 をパラメータとして求めてみた。第 17, 18 図がそれで、何れも $C_1 = 5 \text{ g}$ とおいてある。又図中 m は最低温度点である。

図からわかるやうに、弾性的変形に対しては弾性的変形に対するよりも余程曲線は平坦であり、且最低温度点も余程荷重の大きいところに位置してゐる。しかし C_2 の大きいところではやはりかなり立つた曲線が得られる筈である。

実際には C_1 と C_2 との組合せいかんによつて種々の傾向をもつた曲線が得られるのであるが、以上のやうにして、摩擦面温度の荷重に対する変化特性においては、その荷重による摩擦力の変化のみならず、その荷重による摩擦面積の変化、ひいてはその材質の荷重による変化特性、擦合せの程度如何

が極めて大きな影響をもつてゐることは明らかである。

4. 擦合せの効果に就て

以上のやうに眞実の摩擦面積が摩擦面の温度上昇に重大な役割を果し、而もコンスタンタンのやうな堅い材料では眞実の接触面積が案外に大きくなり得るとすれば、擦合せによつても荷重

増加による接触面積の著しい増加と同様の温度降下の効果がある筈である。

第 19 図はかうした意味の実験結果で、初め銅で先端を乱暴に仕上げたコンスタンタンの試験片の表面温度が、時間と共に擦合せが進行するに従つて次第に低下する事実を示す。

初めの 1 分間位で急激に低下し爾後は緩慢にそして 10 分程すると略一定値に安定する⁽¹⁶⁾。

(16) このデータは、擦合せに比較的長時間を要するため、同じ跡に於て摩擦を続けた結果である。従つて慎重に拭き取り乍ら実験を行つたといへ、実験より若干大きい電圧降下が示されてゐることをおそれる。併し短時間とは云へ、絶えず新摩擦面でこすつた実験に於ても全く同様な傾向が示されてゐる。そして、かうしたこすり方では、実は擦合せにならないのであるが、それでもある程度まで温度降下の示されたことを附記する。そしてある程度以上面積が廣がると、それ以上は見かけの面積変化にも拘らず、表面温度は荷重のみによる面積変化の影響を受けない。従つて換言すれば擦合せの効果には限度があり、比較的短時間に完成するものと考へる。

同様の効果は他の材料でもおこるが、これ亦摩擦面の温度上昇に対する摩擦面積の変化の効果を明らかにするもので、工業技術的にも歴々：應用される擦合せ効果といふものが、実は意外に高度な2面の接触を可能ならしめるものであり、且擦合せとは、実は摩擦面の温度降下の効果を暗黙の中に期待してゐたのではなかつたかとも考へられるのである。

3. 非潤滑面に対する実験

摩擦面の条件が苛酷を加へて、2 面間に介在した油脂の薄膜が破壊されると、その部分は全く潤滑剤を挟まない、いはゆる非潤滑状態乃至は乾燥状態に入る。

この状態は前の境界状態に比してその摩擦係数の著しく大きい点に先づ大きな特徴を有するもので、従てそのために発熱が著しく、焼付きは先づこの状態に於て発展すると考へら

第 22 図

れる。筆者は前の境界状態に対する実験に引続いてこの非潤滑状態に対する摩擦面の温度上昇の実験を行ひ、その温度上昇の機構をしらべた。そして1で述べた理論との対比を行ひ、非潤滑面に於ても本質的には境界潤滑面におけると差異のないことを明らかにした。

実験の準備、方法は総べて2で述べた通りである⁽¹⁷⁾。

1. 実験結果 前の実験同様、先づ銅を試験片に使用した結果を第20, 21 図に示す。第20 図は回転速度に対する特性で、第8 図と同様直線的な上昇を示してゐる。併し第8 図と異なるのは、このときには常識的に考へられるやうに、荷重が高いほど、初めから高い温度上昇を示してゐることである。

この点を一層明らかにするものが第21 図の荷重に対する温度特性である。図にみるやうに、荷重を加へてゆくと、原点から始つて初めは急激に、そしてその後は次第に緩慢に殆ど直線的に近い温度上昇を示し、2の境界潤滑面における如き低下のやうな傾向は全く見られない。

又材料をかへてコンスタンタンを使用したときも傾向は全く同様で、第22 図に示した通りである。そして第12 図及

(17) 非潤滑面といつても理想的な非潤滑面は少くも多数回の反覆実験に対してはなかなか得難い。本章の実験における非潤滑面乃至は乾燥面とは、すべて摩擦面をガソリンで丁寧に洗浄し、暖気乾燥を行つた程度を意味することを附記する。

び13 図にみられるやうな、軽荷重における曲線の谷は認められない。

これらの、いはゆる非潤滑面に対する温度上昇の模様の特徴は、前にのべたやうな、弾性学的にかなり性質の異なつた2種の材料に対して何れも荷重の増加に対して先づ温度上昇は原点に始り、初めは急激に、そして爾後は次第に緩慢に、殆ど直線的に近い温度上昇を示してゐることで、潤滑面に対する如き下降や最低点等は全く表はれてゐないことである。これらの原因に就て次に考察しよう。

2. 実験結果の解釈 非潤滑面に対しても、潤滑面におけると同様、その実際に摩擦してゐる表面の小突部に於ては、原理的に1でのべたと全く同様な発熱、冷却の作用が行はれてゐると考へてよからう。従て前章同様、先づ(4)' 式は成立してゐるものと考へる。

第 23 図

第 24 図

次は(5)式に相當すべき発熱量の關係式であるが、これには実際に非潤滑に就て摩擦の実験を行つて摩擦係数と荷重との關係を求める必要がある。実験の結果は第23 図に示した通りである。銅、コンスタンタン初め、他の材料に於ても、摩擦曲線は境界摩擦面同様直線的に表はれてゐるが、大切なことは、このときには何れの直線も正しく原点を通過してゐることである。従て摩擦係数は何れも横軸に平行な直線で表はされ、境界摩擦面に対する如き、軽荷重において急激に摩擦係数が増加する如き特性はみられない。

従て非潤滑面に対しては

$$Q = C_2 PV/J \dots (12)$$

C_2 はそのまゝ摩擦係数を表はす。

(12) 式を(4)' 式に代入し、且眞実接触面の荷重による変化の影響を前章と同様に算入すると

塑性的変形(銅)に対して

$$t_s = \text{const} \cdot \left(\frac{C_2}{\sqrt{K}} \right) P^{1/4} V \dots (13)$$

弾性的変形(コンスタンタン)に対して

$$t_s = \text{const} \cdot \left(\frac{C_2}{\sqrt{K}} \right) P^{1/2} V \dots (14)$$

(13), (14) 式によつて非潤滑面に対する表面温度が、 P , V によつていかに変化すべきかを推定できる。

何れにおいても表面温度が速度に対して直線的に上昇すべきことは、実験的にも既に示されてゐるが、今荷重に対する特性をみるため、(13) 式によつて t_s と P との關係を求めると第24 図のやうになり、初めは急激に、爾後は次第に緩慢な温度上昇を示すべきことが知られる。そしてこの曲線の傾向は第21 図の実験の結果と極めてよく一致し、非潤滑面

[昭和19年5月]

に於てもやはり荷重による接触面積の変化の影響が著しくきいてゐることが知られる。

第(14)式の表はす傾向も第24図と略、同様であつて、同じく第22図の傾向をよく解釈する⁽¹⁸⁾。

尙この際注目値するのは、表面温度に対して、摩擦係数 C_2 が $\sqrt{K}$ との比を以てきいてゐること、(13), (14) 式参照、表面温度の低下に対しては、單に材料の摩擦係数 C_2 の低いことが望まれる以外、更にその熱傳導率の高いこと、結局 $C_2/\sqrt{K}$ の低いものが望まれるといふことである。試みに二三の材料の C_2 と $C_2/\sqrt{K}$ とを比較すると第25図のやうになり、Cd, Al 等の C_2 は比較的高いにもかゝらず、 $C_2/\sqrt{K}$ は低く、表面温度の低下に対しては好ましい材料であることが知られる。Cu は C_2 , $C_2/\sqrt{K}$ の両観点から非常に好ましいものである。Ag⁶ 等も同様に考へられる⁽¹⁹⁾。

第 25 図

以上の実験結果は非潤滑面に対する比較的低速度における測定値であるが、表面温度が速度に比例すべきことは以上の実験及び理論から共に明らかなことであるから、今これらの資料から実際の軸受面における温度を推定してみよう。

今非潤滑面に於てどの程度に達するかをコンスタンタンに就て考へると、第22図から大体 1 m/s, 1 kg 當り約 1 mV に相當することがわかる。従て実際の軸受などにおこるやうな 15 m/s, 3 kg/mm² といつた条件に延長して考へると約 45 mV に達する筈で、これは約 1000°C 程に相當する。第20, 21 図の銅の資料では、その $C_2/\sqrt{K}$ が低いためこれより余程低くなつてゐるが、それにしても一般に摩擦表面の温度が 100°C 乃至 1000°C にも達してゐることは大切であり、この点、以前バウデン等の得た実験結果⁽²⁰⁾は大体正しいとみ

(18) 第21, 22 図、特に第22図に於て初め急激に上昇したのち、緩やかな曲線といふよりもむしろ直線に近い形状を以て温度が上昇してゐるのは、第24図の曲線がどこまでも材料の塑性変形を前提としてゐるのに、第21, 22図の実験結果に於ては、ある荷重以上においては接触面積の変化が初め程著しくなくなり、そのため計算結果よりも上昇傾向が大きくなるためと思ふ。接触面積が一定に落付けば、温度は直線的に上昇すべきである。

(19) Pb は $C_2/\sqrt{K}$ の観点からあまり好ましくないが、Pb の軸受材料における役割は表面温度の關係ではなく、むしろそのなじみ易い点、更に熔點すれば局部的に容易に (M.P. = 327°C) 熔融して軸をいためない点等にあるとみてよからう。かくみれば、むしろ $C_2/\sqrt{K}$ の高い点が Pb の特長なのではあるまいか。

(20) 前掲 (6) に同じ。

てよいと思ふ。Pb 等も $C_2/\sqrt{K}$ が高いから、容易に熔融点に達してゐよう。

4. 実験後の考察 (バウデン等の実験に就て)

以上の研究は主として表面温度の定性的な問題に重点をおいて行つたものであるが、大体初めにも述べたやうに、表面温度の問題に於ては一定の材料の組合せを用ひても表面の拭淨の程度、表面の粗さ、眞実接触面積の如何等が直接影響するので、その絶対値を云々することは極めて困難且危険である。従て表面温度の絶対値を云々することは本文中特に避けておいたが、実験には出来るだけ慎重を期した積りであり、且多数回行つた結果大体正しいと思はれる結果のみ引用しておいたから、絶対値の問題に於ても先づ拮違ひの誤差はあるまいと思ふ。それで末尾に参考のため供用材料の組合せによる熱起電力の検定曲線をのせておいた (附録参照)。

これらの検定曲線との対比によつて、いまこの実験による表面温度をバウデン等の得た資料と比較してみると、バウデン等の資料が若干高いやうに思ふが、しかしオーダーからみて他で屢々批判されてゐるやうな拮違ひの誤差はなく、略々正しいとみてよい様と思ふ。

しかし一方、以下にも述べるやうに、試験片及び摩擦面の条件によつては、同一運轉条件に対して、もつと高い温度が得られたとしても別に不思議ではない。

前にも引用したバウデン等の論文は、問題の試験片、試験条件、測定法等の記述が極めて不十分ではつきりしたことが分らない。只云へることは、同一試験片でも、表面温度は第19図にみる如く、時間の経過と共に大きな変化をまねくことで、従て同一試験片でも、供用後何分擦合はせたとこの資料をとるかが比較上の厄介な問題となる。かうした本研究で大きな問題となつてゐるやうな点がバウデン等の研究に於ていかに考慮されてゐるかは全く不明である。本研究ではすべて第19図における温度曲線における平坦部分の温度を記録した。

バウデン等の実験はその大部分が非潤滑面に対してであつて、潤滑面に対しては、僅かにコンスタンタンに関して速度に対する温度特性を求めたまでである。そして荷重に対する特性は求めてない。従て本稿に表はれたやうな曲線の下降や谷の現象には全く触れてゐない。これらの特性に対して、我々は摩擦特性と荷重による接触面積の変化とを以て説明した。

バウデン等の実験結果と本稿の内容を示す実験結果との最も大きな喰違ひは、荷重による接触面積の変化の影響である。上述したやうに、バウデン等の実験は主に非潤滑面に関したもので、潤滑面に関する資料、特に荷重に対する温度上昇の資料が殆どないから、この点につきりした比較は出来ないが、非潤滑面に関しても両実験結果にはかなり喰違ひがあり、我々の実験に於てはやはり荷重による接触面積の変化が著しく効いてゐることは明らかである。

この荷重による接触面積の変化は、その後バウデン等自身詳細な研究⁽²¹⁾を行つてゐるのであるが、前掲温度実験には

(21) F. P. Bowden and D. Tabor: 前掲 (6)。

全く考慮されてゐない。或は何か特別の条件を與へて荷重によつて接触面積の変化する影響が殆ど入らないか、又は荷重によつて接触面積が終始一定である如き条件を附與したものかとも考へられるが不明である。或は筆者の実験は比較的 PV の低いところを細かに調べたのであるが、パウデン等のは PV の高いところが主になつてゐるので、斯様な特性をミスしてゐたのかとも考へる。

只共通に云へることは、表面温度上昇の程度がやはりパウデン等の得たやうに著しく高いこと、速度に対しては直線的に上昇すること等である。

5. 結 び

以上を綜合して結論的なことを二三拾ひあげよう。

(1) 摩擦面の表面温度と裏金の温度とは一應別のものであり、前者は單に後者より格段に高温であるだけでなく、両者の間にも必ずしも比例的関係はない。従ていはゆる軸受の焼付等の表面現象を細密に考察研究する場合には前者に重点をおくべきである。

(2) 表面温度は意外に高く、 1000°C を越えることが推定される。従て実際の軸受面に於ても、局部的に境界状態乃至は非潤滑状態にある部分では容易にその軸受金属の熔融点にまで達してゐるものと考へられる。

(3) 表面温度は速度に対しては、略、直線的な上昇を示すが、荷重に対しては荷重による摩擦力の変化のほか、荷重による眞実接触面積の変化の効果が大きな影響をもつてゐる。従てこの点荷重増加によつて接触面積の擴がり易いやうなものの、例へば従来軸受金として多く使用されてきた Pb, Sn, Cu 系の軸受合金は、摩擦面の温度の点で好ましいものである。

(4) 表面温度に対しては材料の熱傳導率が著しく効いてくる。非潤滑面に於ては表面温度は $C_0/\sqrt{K}$ に比例するからこの値の低いものほど好ましいことになる。

(5) 表面温度の低下に対しては、金属の熱傳導率を増大しても、その表面熱傳達によつて熱を奪つても同じくその目的を達することができるが、同量の熱量を奪ふなら、熱傳導によつて奪つた方が表面温度の低下に対しては効果的である。尙本実験に當つて資料の準備に御骨折下さつた理化学研究所菅義夫氏、航空研究所麻田宏氏に深甚なる謝意を表す。

附 録

実験に使用した組材料の温度-熱起電力検定曲線を第26, 27 図に示す。何れも冷接点には室温をそのまま用ひてある。各室温は図中に示してある。

コンスタンタン-軟鋼は何れも実験に使用したと全く同一素材によるものである。銅-軟鋼における銅は絹巻銅線 (0.3ϕ) で、実験に用ひた銅 (棒材削り出し) とは別物であるが、両者間に大きな物理的性質の差異があるとは考へられない。末尾乍らつけ加へておく。尙本研究は尙継続中であり、追て総括的な報告は航空研究所報告で述べたい。

第 26 図

第 27 図

(昭和 19 年 1 月 14 日受付)