炭素鋼の摩耗特性と摩擦面温度の関係*

川本 信** 曾根 匠*** 岡林 邦夫**

Makoto Kawamoto, Takumi Sone and Kunio Okabayashi : Wear Characteristics of Carbon Steel in relation to the Surface Temperature. Wear tests, measurements of the average temperature of the sliding surface and calculations of the temperature of asperities by using Jaeger's equation were performed on 0.45% C carbon steel rubbed against 0.6% C carbon steel and stainless steel in dry sliding on a pin-ring test rig in air and in vacuo, from which the wear characteristics of 0.45% C carbon steel were discussed in relation to the surface temperature.

From the results obtained in this experiment and reported previously, it is concluded that wear of iron and steel reaches the maximum at the average temperature of about 300°C for asperities, and decreases beyond this temperature. Wear of carbon steel increases with seizure when the average temperature of the sliding surface exceeds about 200~250°C. In a state where the temperature of actual contacting asperities approaches the melting point or a high temperature near it, at least above A_1 temperature, and the average temperature of the sliding surface is kept at comparatively low temperatures at which the parts supporting asperities do not begin to soften, wear reaches the minimum and the white hardened layers mostly occur on the sliding surface. In the case of occurrence of the white hardened layers, therefore, the cause for the decrease in wear may be attributed not to the high value of hardness of the white layer after sliding, but to the fact that a high temperature is attained only in the neighbourhood of the interface of contacting asperities to produce rupture.

Oxidation of the sliding surface does not always reduce wear, and wear in vacuo, in which the macroscopic oxidation does not occur, is smaller than in air when the actual contacting asperities reach a high temperature and the average temperature of the sliding surface is comparatively low. In air, thick oxide layers reduce the average temperature of the sliding surface and prevent seizure in a condition where this temperature exceeds 200~250°C in vacuo.

(Received December 7, 1972)

I. 結 言

摩耗試験では試験機、試験方法が違うと、摩耗量ばかりでなくその傾向まで異なることがある。その大きな原因として、摩擦速度、接触圧力あるいは荷重は同じでも、試験片の大きさ、形状、摩擦方法によって、摩擦面温度が違うことが考えられる。すべり摩擦による金属の摩耗は、摩擦面間での凝着部の生成とその剪断によって生じる。一方、摩擦熱によって摩擦面の温度は上昇し、材料の物理的、化学的、機械的性質が変化して、凝着部の生成とその剪断に大きな影響をおよぼす。したがって、摩擦面の温度と摩耗は密接な関係にあると考えられる。摩耗と直接関係する温度としては、閃光温度(Flash temperature)あるいは熱点温度(Hot spot temperature)と呼ばれる凝着部つまり真実接触点で生じる極部的、瞬間的な温度と真実接触点を支える部分の温度、つまり摩擦面の平均温度の二つがある。本実験では炭素鋼について、摩擦面の平均温度を測定し、そ

れから閃光温度を計算して、これら二つの温度と摩耗の関係について検討した。

摩擦面の温度が直接摩耗を支配するのではなく、温度による材料の種々の性質の変化によって摩耗が支配されると考えねばならないが、しかし摩耗と温度の関係を明らかにすることが先決問題であろう。

II. 実 験 方 法

実験に使用した摩耗試験機はピン-リング型で、外径 88、内径 68 mm の水平に回転するリング試片の上端面に直径 10 mm のピン試片を押しつけて、すべり摩擦を行なわしめる方式である。ピン試片としては炭素鋼 S 45 C (0.45% C, 0.22% Si, 0.76% Mn, 0.015% P, 0.012% S, 850°C 焼鈍, Hrb 85), リング試片としては 0.6% C 炭素鋼 (0.60% C, 0.33% Si, 0.64% Mn, 0.020% P, 0.013% S, 850°C 焼鈍, Hrb 91) およびフェライト系ステンレス鋼 SUS 24 (0.08% C, 0.45% Si, 0.64% Mn, 0.017% P, 0.021% S, 17.01% Cr, 850°C 焼鈍, Hrb 84) を使用し、試験はすべて無給油の乾燥状態で行った。摩擦条件は接触圧力 1, 4 kg/cm² (荷重 0.785, 3.14 kg), 摩擦速度 0.20~7.38 m/sec である。

摩擦雰囲気は大気中, 10 mmHg 中, 10⁻¹ mmHg 中および 10⁻⁴ mmHg 中とした。摩擦熱による真実接触点の酸化

** 大阪府立大学工学部(College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai)

*** 大阪府立大学大学院, 現在: 大阪府立工業奨励館(Graduate School, University of Osaka Prefecture, Sakai. Present address: Industrial Research Institute, Osaka Prefecture, Osaka)

* 1971 年 10 月金属学会金沢大会に発表

とその酸化物の破壊、脱落の關係が鉄鋼材料の摩耗を支配するという考え方が提案されており⁽¹⁾、摩耗と摩擦面、摩耗粉の酸化との間には密接な關係が認められている⁽²⁾⁽³⁾。確かに摩擦面の酸化は摩耗を支配する重要な因子の一つであるが、摩擦雰囲気によって摩擦面の酸化の程度が違い、これが摩擦面の温度に影響することに注目し、本論文では酸化との関連においてよりも、主として摩擦面温度の観点から摩耗を検討する。

摩擦面の平均温度はピン試片の摩擦面から1.5, 4.0, 8.0, 12.0 mmの位置にクロメル-アルメル熱電対を埋め込んで測定したピン試片の温度勾配と熱伝導式から計算で求めた。閃光温度の計算は摩擦面の平均温度での物理的性質、機械的性質と摩耗試験と同時に測定した摩擦係数から、Jaegerの式⁽⁴⁾によって行なった。

摩耗試験後のピン試片はX線回折によって酸化物の同定をし、斜め切断して摩擦面直下の組織変化を顕微鏡観察した。

III. 実験結果と考察

一般にすべり摩擦による摩耗試験では、摩擦開始直後から摩擦距離に対して直線的に摩耗が進行することは少なく、初期摩耗と定常摩耗が生じる。初期摩耗は摩擦面の仕上げ状態、微妙な接触状態の差に影響され、本実験に使用した試験機では必ずしも良い再現性が得られなかった。しかし摩擦面および接触がその摩擦条件に対応した平衡状態に達すると、初期摩耗は終了して定常状態になり、距離に対してほぼ直線的に摩耗するようになる。本実験では初期摩耗は数100 mで終わったので、定常摩耗域での摩擦距離1~5 kmの1 km当りの摩耗量で摩耗特性を調べた。

Fig. 1は接触圧力4 kg/cm²、相手材を0.6% C炭素鋼と

Fig. 1 Variation of the wear rate of 0.45% C carbon steel rubbed against 0.6% C carbon steel with sliding speed. Contact pressure, 4 kg/cm²

した時の各摩擦雰囲気での S 45 C ピン 試片の摩耗の速度特性である。大気中での速度特性は、これまでに報告された多くの研究者による炭素鋼、低合金鋼についての結果とよく一致している。摩耗は1 m/sec以下の低速では、いわゆる機械的破壊摩耗がおこって非常に多いが、1 m/sec以上になると速度とともに減少し、5 m/sec以上ではほぼ一定の値になっている。Photo. 1は摩耗試験終了後の摩擦面を斜め切断して観察したものである。摩耗が多い0.82 m/secでは、摩擦面近傍は摩擦力によって加工された組織になっているが、断面観察によっても、また摩擦面のX線回折、顕微鏡観察によっても酸化物は認められなかった。

Photo. 1 Taper section of the sliding surface of 0.45% C carbon steel in air. Contact pressure, 4 kg/cm²
(a) Sliding speed, 0.82 m/sec
(b) 1.64 m/sec
(c) 4.92 m/sec

- (2) 岡林邦夫, 川本 信, 野谷秀雄: 鋳物, **38**(1966), 501.
- (3) T. F. J. Quinn: Advan. X-ray Anal., **10**(1967), 311.
- (4) J. C. Jaeger: Proc. Roy. Soc., N. S. W., **56**(1942), 203.

(1) T. F. J. Quinn: ASLE Trans., **10**(1967), 158.

摩耗が急激に減少する 1.64 m/sec になると、加工組織になると同時に、 Fe_3O_4 を主とする酸化物と Hv 800 (荷重 50 g) 以上に達する白色の硬化層の発生を伴うようになる。白色の硬化層の生成および硬化機構については種々の説が提案されているが、組織、硬さ、熱処理に対する挙動の類似性から鑄鉄の摩擦面に生じる白色の硬化層⁽⁵⁾と同様に、摩擦熱によって融点に達した真実接触部が接触が断たれると同時に急速凝固、冷却して生じると推定される。摩耗の減少と酸化物、白色の硬化層の生成とは密接に関係しているが、その因果関係については今後検討しなければならない。速度がさらに大きくなると、生じる酸化物は Fe_3O_4 から FeO に代わり、摩擦面を覆う割合も多くなって、 5 m/sec 以上になると摩擦面が非常に滑らかになり、厚さ 5μ 前後の FeO を主体とする酸化物層が摩擦面の 80% 以上を覆うようになる。白色の硬化層も生じているが、点在する程度で、速度とともに多くなることはない。

10 mmHg 中では、 1 m/sec 以下の低速では摩耗、摩擦面の状態とも大気中とほとんど同じであるが、 2 m/sec 前後での摩耗は大気中よりも少なくなっている。この時の摩擦面には、大気中におけるよりも多くの白色の硬化層が生じており、X線回折、顕微鏡観察では摩擦面に酸化物は認められない。 3 m/sec 以上になると、摩耗は再び多くなり始め、 5 m/sec 以上ではほぼ一定の値になっている。この領域の摩擦面には、多量の白色の硬化層と同時に、大気中におけるよりも幾分薄く、摩擦面に占める割合も少ないが、 FeO を主体とする酸化物層が生じていた。

10^{-1} , 10^{-4} mmHg 中でも、低速では速度とともに摩耗は減少し、 2 m/sec 前後では摩耗は非常に少なく、 1 mg/km あるいはそれ以下である。 10^{-4} mmHg 中の 0.2 m/sec での摩耗は他の雰囲気にくらべて少なく、すでに摩擦面に白色の硬化層ができていた。 10^{-1} mmHg 中では、摩耗が少なくなった 0.82 m/sec になって始めて硬化層の発生が認められた。 3 m/sec 以上になると、摩耗は急激に増大し、その程度は 10 mmHg 中におけるよりも大きい。 4 m/sec 以上では、激しい焼付きのために長時間の摩耗試験はできなかった。Photo.2 は 10^{-1} mmHg 中、 4.10 m/sec で比較的短時間摩擦した後の摩擦面の断面組織である。摩擦面下 $20 \sim 30 \mu$ まで微細な再結晶組織になっており、その下部には約 0.5 mm の深さまで結晶粒が粗大化して、ソルバイト様の組織になっている。これは $1000 \sim 1100^\circ\text{C}$ に加熱した後、空冷した組織とよく似ている⁽⁶⁾。さらにこの下部には溶接の熱影響部にみられるような組織があり、摩擦面から 1 mm 以上内部になってはじめて母材組織となる。 10^{-1} , 10^{-4} mmHg 中の高速で、激しい焼付きによって摩耗が急激に多くなったところでは、組織観察からだけでも摩擦面

Photo.2 Taper section of the sliding surface of 0.45% C carbon steel worn in 10^{-1} mmHg . Contact pressure, 4 kg/cm^2 . Sliding speed, 4.10 m/sec

から $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ の内部まで温度が相当高くなっていたことがわかる。なお 10^{-1} , 10^{-4} mmHg 中では、厚さが μ オーダー以上の巨視的な酸化物層の発生は認められなかった。

摩擦雰囲気に関係なく、白色の硬化層は比較的摩耗の少ない条件で発生しており、本試験機では摩耗率が 0.05 g/km 以下の時に認められた。この硬化層は前述のごとく、摩擦熱による溶融部が急速凝固、冷却して生じると推定されるが、たとえ融点までは達していなくても、少なくとも A_1 温度以上に達した後、急冷されてマルテンサイト変態していることは確かであろう⁽⁷⁾。こう考えるならば、この白色層は接触が断たれた後に硬化したのであって、実際に接触している時には非常に軟化するか、もしくは粘性体化しているであろう。この部分が硬化層として摩擦面に残るためには、接触が断たれた後に急冷されることが必要で、摩擦面から相当内部まで高温に達する場合には、冷却速度が遅くなるために Photo.2 のように微細な再結晶組織になってしまう。

摩擦面での酸化物の生成の点から各雰囲気での摩耗を比較すると、 2.5 m/sec 以下の速度では酸化物の生じやすい雰囲気におけるほど摩耗は多く、 3 m/sec 以上では逆に厚い酸化膜が多く生じるほど摩耗は少なくなっている。また約 2 m/sec までは雰囲気に関係なく摩耗は速度とともに減少しており、その程度もほぼ等しい。これらの結果から、低速域で速度とともに摩耗が減少する現象を酸化との関係だけで説明することはできないと考えられる。

摩擦面での白色の硬化層および酸化物の生成には、摩擦力による歪も関係しているであろうけれども、温度が最大の因子として作用していると考えられる。本研究では摩耗現象を摩擦面温度との関係でまとめることにする。Fig.2 は接触圧力 4 kg/cm^2 で 0.6% 炭素鋼と組合せた S45C ピン試片摩擦面から $1.5, 4.0, 8.0, 12.0 \text{ mm}$ の位置の温度

(5) 岡林邦夫, 川本 信, 井上次幸, 斎藤省三: 金属学会誌, 32(1968), 639.

(6) 佐藤知雄編: 鉄鋼の顕微鏡写真と解説, 丸章, (1968), 45.

(7) N.C. Welsh: J. Appl. Phys., 28(1957), 960.

とそれから計算した摩擦面の平均温度の時間変化である。摩擦時間が3分(摩擦距離約1.2 km)以上経過すると、温度はほぼ一定の値になっている。この距離は初期摩擦が終わり、定常摩擦が始まるところとだいたい一致するので、ある時間経過して一定になった値がその摩擦条件での定常的な温度と考え、Fig. 3に摩擦速度によるその変化を示す。3 m/sec以上での変化は、Fig. 1の摩擦の速度特性と非常によく対応している。 10^{-1} , 10^{-4} mmHg中で、激しい焼付き状態になって摩擦が急激に多くなった3.28 m/secでは、平均温度は800°C以上になっている。この温度は摩擦面でも実際には接触していない部分も含めたものであるから、真実接触点の下部ではPhoto. 2に示すように結晶粒が粗大化するほど高温になっているであろう。 10 mmHg中でも、3 m/sec以上になって摩擦が多くなると温度も上昇し、300°C以上になっている。しかしその温度は7 m/sec以上でも約400°Cで、摩擦も 10^{-1} , 10^{-4} mmHg中におけるほど多くはない。大気中の場合も速度とともに温度は上昇するが、本実験の範囲内では250°C以下になっており、摩擦は少ない。

Fig. 2 Temperatures at 1.5, 4.0, 8.0 and 12.0 mm from the sliding surface and the average temperature of the sliding surface. Contact pressure, 4 kg/cm². Sliding speed, 6.56 m/sec

Fig. 3 Variation of the average temperature of the sliding surface with sliding speed. Contact pressure, 4 kg/cm²

接触圧力1 kg/cm²でステンレス鋼 SUS 24 と組合せた S 45 C の摩耗と摩擦面の平均温度の摩擦速度による変化を Fig. 4 に示す。この組合せ、摩擦条件でも Fig. 1, 3 と同様、平均温度の比較的低い低速域では、摩耗は速度とともに減少し、大気中よりも 10^{-1} mmHg 中において少なくなっている。また、 10^{-1} mmHg 中で4 m/sec を越えると、温度は約350°C に急上昇し、それに対応して摩耗は再び増大している。しかし大気中では、温度は120°C 以下で、摩耗は非常に少ない。これからも高速域で摩耗が増大する原因は、摩擦面の平均温度の上昇にあることが明らかである。

Fig. 5 は摩擦面の平均温度に対して、S 45 C の単位摩擦距離、単位荷重当りの摩耗量(比摩耗量)を示したものである。このように表示すると、相手材、接触圧力、摩擦雰囲気に関係なく、温度と摩耗の間に一定の関係が成立している。すなわち、約200°C で摩耗は最低となり、250°C 以

Fig. 4 Variations of the wear rate and the average temperature of the sliding surface of 0.45% C carbon steel rubbed against stainless steel SUS 24 with sliding speed. Contact pressure, 1 kg/cm²

Fig. 5 Relation between the wear rate per unit load of 0.45% C carbon steel and the average temperature of the sliding surface

上になると焼付きが生じ、摩耗は増大している。このような現象は本実験とは異なった試験機、試験方法による炭素鋼の摩耗試験にも認められており、摩擦面の平均温度が 200°C を越えると摩耗が多くなることが報告されている⁽⁸⁾。温度測定の方法も異なるにもかかわらず、摩耗が増大し始める温度がよく一致していることから、本実験での測定方法も十分に信頼できるものであるといえる。また摩擦面の平均温度が 200°C を越える摩擦条件では、炭素鋼には焼付きの危険があると考えねばならない。真実接触点の初期温度あるいはそれを支えると考えられる部分の温度が 200°C 以上になると、材料が軟化して真実接触面積が大きくなり、また真実接触点界面の凝着強さよりも材料内部の剪断強さが小さくなって、そこで破壊がおこるために摩耗が多くなるのであろう。

一般に摩擦面に酸化物が生成すると、それが摩擦面間の凝着力を弱め、また固体潤滑剤的な作用をして、焼付きを防止すると考えられている。一方これを摩擦面の平均温度の観点からみると、Fig.2 に示すように、大気中でも摩擦開始直後は金属間接触するために一時的には温度は 300°C 以上になることがあるが、酸化物が生成すると、摩擦係数が低下して発熱量が減少するとともに熱伝導性の悪い酸化物が摩擦面を覆うことによって、摩擦面の温度上昇が抑制されている。10 mmHg 中でも酸化物の生成によって温度の低下はあるが、酸化膜は大気中におけるほど厚くなく、摩擦面を覆う割合も小さいので、温度低下の程度が小さい。このように酸化物は摩擦面の平均温度を上昇せしめない効果をもっているのである。大気中での摩擦であっても、巨視的な酸化物のない摩擦初期に完全な焼付きが生じるような高温になる条件では、焼付きが先行して、摩擦面の酸化速度よりも摩耗の方が速くなって、酸化物を生じることなく摩耗が急激に進行するであろう。

摩擦面の平均温度が 200°C 以下では、温度の上昇とともに摩耗が減少している。しかし 200°C 以下では、炭素鋼の諸性質はあまり変化しないので、1000 倍近い摩耗の差を平均温度の変化で説明することはできないと考えられる。計算式によると真実接触点の温度が融点あるいはそれに近い高温に達していると推定される 16 m/sec 以上の高速では、平均温度が 200°C 以下の時には摩耗はこの温度にほとんど無関係である⁽⁸⁾。本実験では試験片およびそのホルダーの熱的条件が一定のために、真実接触点の温度が融点以下の場合には、この温度と平均温度は 1 対 1 の対応をしていると考えられる。したがって、平均温度の上昇とともに摩耗が減少しているように見えるが、これは本質的なものではなく外見上のことであって、真の原因は鉄の摩耗について先に報告したように⁽⁹⁾、真実接触点の温度上昇にあると考えられる。

真実接触点の温度の計算式は種々提案されており、すべて摩擦については、Jaeger の式⁽⁴⁾ がその基本になっている。この理論式を導出するにあたって行なった仮定が必ずしも実際の摩擦の状態とは一致しないのはもちろんであるが、さらに計算に必要な摩擦面の物理的性質および機械的性質の採用の仕方についても多くの問題が指摘されており⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、真実接触点の温度の計算には多くの問題が残っている。しかし Jaeger の式で摩擦面の平均温度での材料の諸性質、平均の摩擦係数を用いた計算値は、多数ある真実接触点の平均的な温度が得られると考えられる熱起電力法による実測値と比較的によく一致する⁽⁹⁾。Fig.6 はこの方法で計算した接触圧力 4 kg/cm^2 で $0.6\% \text{C}$ 炭素鋼と組合せた S45C の真実接触点の温度と摩耗の関係である。大気中の高速摩擦で厚い酸化膜が生じる以外の摩擦条件では、摩擦係数の変動が大きいために、これの平均値で計算した温度の絶対値そのものには問題があるが、定性的な傾向はつかめるであろう。すなわち、いずれの雰囲気でも摩耗は真実接触点の温度が 300°C 前後で最高となり、温度の上昇とともに減少している。しかし 1000°C 近く、あるいはそれ以上になると、真実接触点の温度と摩耗の関係は雰囲気によって異なっている。この領域では Fig.5 に示すように、摩耗は摩擦面の平均温度に支配されているためと考えられる。なお Photo.1 に示すように大気中および 10 mmHg 中の摩擦では 1.64 m/sec 、 10^{-1} mmHg 中では 0.82 m/sec 、 10^{-4} mmHg 中では 0.20 m/sec で、少なくとも A_1 以上の温度から急冷されて生じたと考えられる白色の硬化層が生じているにもかかわらず、真実接触点の温度の計算値はそれよりも低く、とくに 10^{-4} mmHg 中の 0.20 m/sec では 300°C 足らずにすぎない。これは平均の摩擦係数で

Fig.6 Relation between the wear rate of $0.45\% \text{C}$ carbon steel rubbed against $0.6\% \text{C}$ carbon steel and the flash temperature calculated from Jaeger's equation. Contact pressure, 4 kg/cm^2

(8) S.W.E.Earles and M.G.Hayler: Wear, **20**(1972), 51.

(9) 川本 信, 岡林邦夫: 金属学会誌, **37**(1973), 350.

(10) S.W.E.Earles, M.G.Hayler and D.G.Powell: ASLE Trans., **14**(1971), 135.

(11) D.G.Powell and S.W.E.Earles: ASLE Trans., **15**(1972), 103.

計算したためで、常に大きく変動する摩擦係数の最大値で計算すれば相当高温になるであろう。しかし摩擦との関連で真実接触点の温度を考える場合には、真実接触点中の極部的、瞬間的な最高温度よりも、同時に接触している多数の真実接触点の平均温度の方がより適当と考えられる。

工具鋼および高速度鋼⁽¹²⁾、低合金鋼⁽¹³⁾、铸铁⁽⁹⁾について、真実接触点の温度が300°C前後で、いわゆる機械的破壊摩擦による摩擦の極大が生じることが報告されている。本実験で炭素鋼S45Cについて得られた結果もこれとよく一致する。試験機、試験方法が異なり、真実接触点の温度の計算方法、測定方法も違うにもかかわらず、化学組成、熱処理の異なる多種類の鉄鋼材料で真実接触点の温度が300°C前後のときに摩擦の極大が生じていることは注目すべき現象である。鉄鋼材料の相対すべりによる摩擦面の破壊、すなわち摩擦がこの温度で非常に多くなる原因については今後の検討を待たねばならないが、現象としてはほぼ間違いないと考えられるので、真実接触点の温度がこのような摩擦条件を避けることが、いわゆる機械的破壊摩擦による異常に多い摩擦を防止する方法の一つとして有効である。現在のところ比較的簡単に真実接触点の温度を測定する方法は、摩擦面間の熱起電力を測定するか、摩擦面から放射される赤外線エネルギーを測定するかはなく、これらも材料の組合せに制限があり、またそのために設計した特殊な試験機で行なわねばならないので、実用機械の摩擦部分での測定はほとんど不可能である。しかし摩擦部分が高温度あるいは低温雰囲気ではなく、常温にある場合には、真実接触点の温度が数100°C以下であれば、摩擦面の平均温度は200°C以下であろう。鉄鋼材料については、200°C以下であれば、その物理的性質、機械的性質は常温での値とあまり変らない。このような状態では、Jaegerの式⁽⁴⁾によっても、あるいはこれを簡略化したArchardの式⁽¹³⁾によっても、摩擦部分の形状、大きさに関係なく、材料の常温での性質、平均の摩擦係数で真実接触点の温度が簡単に計算でき、鉄鋼材料の機械的破壊摩擦を防止するための摩擦条件を推定するのに有効と考えられる。なお工具鋼および高速度鋼について、真実接触点の温度が800°Cを越えると、摩擦が急激に多くなることが報告されている⁽¹²⁾が、これはFig.6の真空中での結果と傾向が一致しており、摩擦面の平均温度が高くなっているためと考えられる。この温度は摩擦部分の形状、熱容量に影響されるので、真実接触点の温度のような一般的な計算式はない。摩擦面の近傍に熱電対を挿入して、実測するのが簡単であろう。

炭素鋼、合金鋼、铸铁で機械的破壊摩擦が生じる真実接触点の温度は約300°Cで、ほぼ一致している。これよりも温度が上昇するにしたがって摩擦は減少するが、摩擦面

の平均温度が高くなると焼付きによって摩擦は再び増大する。摩擦が増大し始める平均温度は鉄鋼材料の種類によって異なり、炭素鋼は200°C以上になると危険領域になり、铸铁は500°C以下であれば激しい焼付きはおこらない⁽⁹⁾。このように摩擦と温度の関係を考える場合には、温度を真実接触点の温度と摩擦面の平均温度に分けて考察しなければならない。摩擦は摩擦面の平均温度が焼付きを生じる温度よりも低く、真実接触点の温度が融点あるいはそれに近い高温に達している時に最も少ない。このような状態では、真実接触点のごく近傍だけが軟化あるいは粘性体化し、それを支える基地では十分な強度が保持されているために、破壊が真実接触部の界面の極く薄い層内でおこるのである。Photo.1に示す白色の硬化層はこのような状態での摩擦後に最も多く観察される。融点あるいはそれ近くの高温度、少なくともA₁以上の温度になっていたと考えられる白色の硬化層が観察されることから、そのような高温に達した突起部全体が摩擦粉として脱落してしまうのではなく、その先端部だけが摩擦していることがわかる。摩擦面の平均温度が800°Cを越える高温になると、真実接触点をつくる突起部の相当内部まで高温に達して、そこで破壊がおこるために摩擦が多く、また冷却速度も遅くなるためにPhoto.2に示すように白色層は生じない。

Fig.5のような摩擦面の平均温度と摩擦の関係を示するのは鉄鋼材料だけでなく、銅合金にもみられる。試験片ホルダーの熱的条件を変えて、焼入工具鋼に対する鉛入黄銅の摩擦と摩擦面の平均温度の摩擦速度による変化を測定した結果⁽¹⁴⁾を、摩擦と摩擦面の平均温度の係に整理しなおすと、Fig.5と全く同じ傾向になった⁽¹⁵⁾。その原因はFig.5の説明と同じ理由によると思われる。ただ鉛入黄銅は炭素鋼にくらべると耐熱性に劣るために、平均温度が100°C以上になると摩擦が多くなる。種々の材料について、摩擦が多くなり始める摩擦面の平均温度が決定されるならば、焼付きを避けるための摩擦条件の選定に有効であろう。

摩擦面の平均温度が250°C以下の場合について、接触圧力4 kg/cm²で0.6% C炭素鋼と組合せたS45Cの摩擦と平均摩擦係数との関係をFig.7に示す。摩擦面の平均温度の上昇による焼付きが生じない時には、雰囲気に関係なく、摩擦係数と摩擦との間には一定の関係が認められる。この組合せでは、機械的破壊摩擦が生じて摩擦が多い時には、摩擦係数が1以上であり、1以下では摩擦は少ない。摩擦が多いのは摩擦面での破壊が多いということで、そのためには大きな力が必要であるから、摩擦係数が大きくなるのは当然であろう。

(14) W. Hirst and J. K. Lancaster: Proc. Roy. Soc., **A 259** (1961), 228.

(15) 岡本邦夫, 川本 信: 潤滑, **18** (1973), No. 4.

(12) 佐田登志夫: 日本機械学会論文集, **25** (1959), 227.

(13) J. F. Archard: Wear, **2** (1959), 438.

Fig.7 Relation between the wear rate of 0.45% C carbon steel rubbed against 0.6% C carbon steel and the average frictional coefficient, in the condition where the average temperature of the sliding surface is lower than 250°C. Contact pressure, 4 kg/cm²

IV. 結 言

摩擦面の温度を真実接触点の温度と摩擦面の平均温度とに分けて考えるならば、摩耗と温度との間には密接な関係が認められる。鉄鋼材料では、真実接触点の平均的な温度が 300°C 前後で機械的破壊摩耗による摩耗の極大が生じ、これより高温になるにしたがって摩耗は減少する。しかし炭素鋼では、摩擦面の平均温度が 200~250°C 以上になると、焼付きが生じ始め、摩耗は増大するようになる。この段階では真実接触部を支える基地が軟化して、真実接触面積が大きくなり、真実接触部の界面よりも内部で破壊がお

こるようになって、摩耗が多くなると考えられる。摩擦面の平均温度が 800°C を越える高温になると、摩擦面には薄い微粒再結晶層、その下部には結晶粒の成長した空冷組織が生じ、摩擦面から約 1 mm まで熱影響を受けた組織となる。摩擦熱による温度上昇がある摩擦条件では、真実接触点の温度が融点あるいはそれ近く、少なくとも A₁ 以上の高温に達し、摩擦面の平均温度が常温に近い低温の時に摩耗は最も少ない。この状態で、摩擦面に最も多く白色の硬化層が生じる。したがって白色層が生じた時に摩耗が少ない主たる原因は、それが摩擦後に高硬度を有しているからではなく、摩擦中に真実接触部の界面近傍だけが高温に達して、そこで破壊がおこることによると考えられる。摩耗は摩擦面の突起部の接触、凝着、その破壊によっておこると考えるならば、突起にかかる応力、その負荷速度によって材料の変形挙動が変化し、とくに接触部界面が粘性体化するような高温になると、界面の移動速度によって接触部の挙動が変わると考えられる。したがって接触圧力(または荷重)、摩擦速度は温度に対する効果だけではないであろうけれども、摩擦面温度によって摩耗の定性的な傾向、いかなる形態の摩耗が生じるかは十分判断できる。

摩擦面の酸化は必ずしも摩耗を減少せしめるとはかぎらず、真実接触点が高温度に達し摩擦面の平均温度が低い時には、巨視的な酸化がおこらない真空中の方が大気中よりも摩耗が少ない。真空中では摩擦面の平均温度が 200~250°C 以上に達するような摩擦条件でも、大気中では厚い酸化膜が生じることによってこの温度が低下し、焼付きが防止される。

本研究を行なうにあたり、実験に協力された大阪府立大学学生(現在、日本精線(株))南 整二君に厚く感謝する。