

論 文

UDC 539.62 : 669.14

低摩擦速度における鉄鋼材料の摩耗と摩擦面温度の関係*

川本 信**・新谷 進***・岡林 邦夫**

Relation between Wear of Iron and Steel and Sliding Surface Temperature

Makoto KAWAMOTO, Susumu SHINTANI, and Kunio OKABAYASHI

Synopsis:

The wear characteristics of 0.42%C steel, 17Cr stainless steel and pearlitic cast iron at relatively low sliding speed have been examined by the pin-disc type wear machine in relation to the sliding surface temperature, and the general relation between wear of iron and steel and the sliding surface temperature has been estimated from this experiment and the previous reports. Both the temperature of actual contacting regions (flash temperature) and the mean temperature of apparent contacting surface were considered as the sliding surface temperature. To measure the flash temperature by the dynamic thermoelectromotive force method, 0.42%C steel and cast iron were rubbed against 17Cr stainless steel and 17Cr stainless steel was rubbed against 0.60%C steel.

It has become clear that the wear characteristics of iron and steel can be understood systematically by the mutual relation between the flash temperature and the mean temperature of the sliding surface. Regardless of the sliding condition, when the flash temperature is about 300°C, the maximum point of wear by the severe wear appears, and wear being a very little below 250°C. When the flash temperature is so high as some of the actual contacting regions reach or approach to the melting point, wear depends on the mean temperature. It occurs slightly at relatively low mean temperature and the scuffing occurs at relatively high mean temperature.

1. 緒 言

金属の凝着摩耗は接触部間での凝着とその破壊によって進行し、それに付随して摩擦面では転移 (transfer)、逆転移、酸化、拡散などの現象がおこり、摩耗に影響をおよぼすと考えられている。これらの現象はいずれも温度に強く影響されるもので、摩耗現象において温度が重要な役割を演じていると推測される。摩擦環境が室温の場合でも摩擦熱によって摩擦面温度は上昇するので、摩擦面温度を無視して摩耗現象を論じることはいかなるであらう。摩耗に直接関係する摩擦面温度としては、瞬間的、局部的であるため閃光温度 (flash temp.) または熱点温度 (hot spot temp.) と呼ばれる真実接触部の温度と実際には接触していない部分を含む見掛けの摩擦面全体の平均温度の2つがあり、これを区別して考えなければならない¹⁾。

鉄鋼材料の摩耗は一定荷重でも摩擦速度によって複雑

に変化し、比較的低摩擦速度域で極大になることが一般に認められており、この摩耗の極大域は機械的破壊摩耗または輝面摩耗と呼ばれている²⁾。本報告は鉄鋼材料の機械的破壊摩耗と摩擦面温度の関係を検討したものである。高速摩擦域での摩耗は閃光温度、平均温度の2つの摩擦面温度の相互関係で考えなければならないが¹⁾³⁾⁴⁾、比較的低摩擦速度にある機械的破壊摩耗域では平均温度はほとんど上昇しないので、主として摩耗に関係する摩擦面温度は閃光温度と考えられる。

2. 実 験 方 法

使用した摩耗試験機はピン・ディスク型で、外径88, 内径 68 mm の水平に回転するリング状試験片 (相手材) の上端面に直径 10 mm のピン試験片 (試験材) を押しつけて、すべり摩擦を行なわせる方式である。試験はすべて無給油の乾燥状態で行なつた。接触条件は摩擦速度 0.10~6.56m/sec, 接触圧力 1~16 kg/cm² (荷重

* 昭和 50 年 4 月 18 日 受付 (Received April 18, 1975)

** 大阪府立大学工学部 工博 (University of Osaka Prefecture, 4-804, Mozuume-machi Sakai 591)

*** 大阪府立大学大学院 (現在: 住友金属工業(株)鋼管製造所) (University of Osaka Prefecture)

Table 1. Chemical composition and hardness of specimens.

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Hardness
Pin	Carbon steel S43C	0.42	0.26	0.73	0.014	0.013	0.16	0.18	Hv 185
	Stainless steel SUS430	0.06	0.30	0.31	0.025	0.022	16.90		Hv 219
	Pearlitic cast iron	3.40	2.06	0.42	0.010	0.018	0.22	0.90	Hv 218
Ring	Carbon steel S58C	0.60	0.33	0.64	0.020	0.013	0.08		Hv 197
	Stainless steel SUS430	0.08	0.62	0.54	0.027	0.022	17.37	0.08	Hv 183

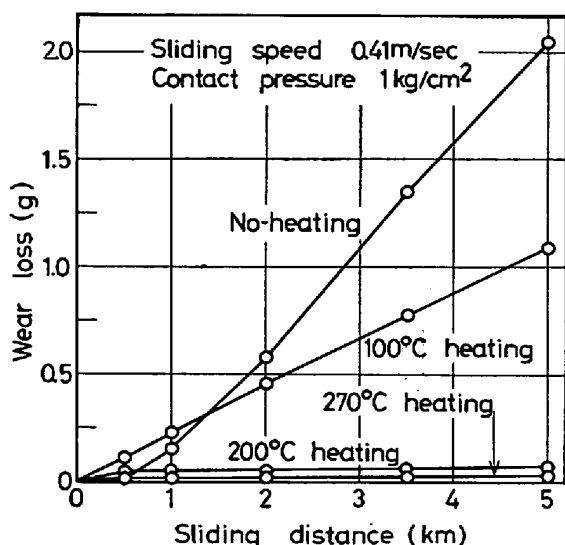


Fig. 1. Wear loss-sliding distance curves of 0.42 %C steel sliding against 17Cr stainless steel.

0.8~12.6 kg, 試験片の大きさを一定にしているので, 接触圧力と荷重は比例する)とした。

試験材, 相手材の化学組成と硬さを Table 1 に示す。試験材は炭素鋼 S43C, 17Cr ステンレス鋼 SUS 430, 鋳鉄の 3 つである。熱起電力法で閃光温度を測定するために, S43C, 鋳鉄の相手材は SUS 430, SUS 430 の相手材は S58C とした。なお, S43C, S58C, SUS 430 は 850°C で焼なましてあり, 鋳鉄は Cr, Cu を少量添加した鋳放しのパーライト鋳鉄である。

同じ摩擦速度, 接触圧力 (荷重) で摩擦面温度だけを変化させるために, ピン試験片にシースヒーターを巻きつけて強制加熱状態での実験を行なった。相手材から離れた状態で, ピン試験片の摩擦面から 1 mm の位置が所定の温度で一定になった後 (本報告では, 便宜的にこれを加熱温度と称する), 加熱を続けたまま試験, 測定をした。相手材の加熱をしていないこと, およびその他の原因で, 強制加熱分だけ摩擦面温度が上昇するとは限らない。

Fig. 1 は摩擦速度 0.41 m/sec, 接触圧力 1 kg/cm² で

の S43C の摩耗量-摩擦距離曲線である。100°C および 270°C 加熱では始めから摩耗量は距離に対して直線的に増加しているが, 加熱なし (室温 ≈ 15°C), 200°C 加熱では 0.5 km 以上で直線になっている。本実験に使用した試験機では, 摩擦初期には摩擦面の汚れ, 片当たりなどによつて必ずしも十分な再現性が得られないが, ほかの材料および摩擦条件でも 0.5 km 以上では摩耗量は摩擦距離に対してほぼ直線的に増加していた。そこで, 摩擦距離は 5 km を原則とし, 全材料, 全摩擦条件について摩耗量-摩擦距離曲線を作成して, 0.5 km 以上での単位摩擦距離当たりの摩耗体積 [摩耗率 (mm³/mm)], 単位荷重当たりの摩耗率 [比摩耗量 (mm³/mm · kg)] で摩耗量を表わした。

閃光温度の測定方法の概略を Fig. 2 に示す。ピン, リング両試験片を試験機本体と絶縁し, 摩擦面間で発生した熱起電力をシンクロスコープ (周波数帯域 DC~1 MHz, -3dB, 入力インピーダンス 1 MΩ, 最高電圧感度 50 μV/cm) で測定して, Fig. 3 に示すあらかじめ測定した温度と熱起電力の関係から温度に換算した。SUS 430 に対する 0.45% C 鋼と 0.65% C 鋼の熱起電力にはほとんど差がなかった。なお, この組合せでは約 90°C に熱起電力の中立点があるため, 熱起電力法では約 180°C 以下の閃光温度は測定できないが, 本実験の摩擦条

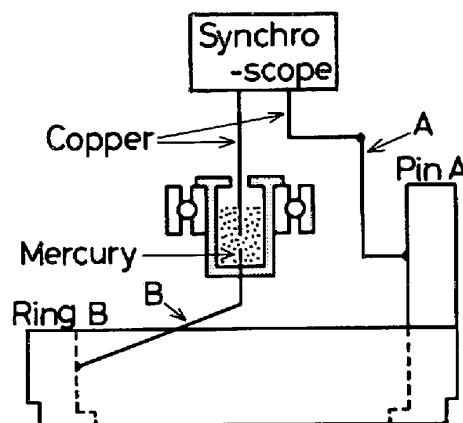


Fig. 2. Method for measuring flash temperature (temperature at actual contacting regions).

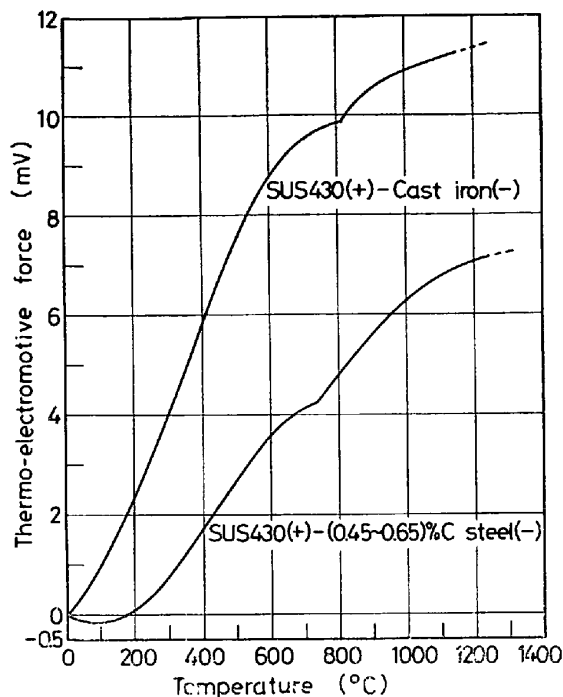


Fig. 3. Relation between temperature and thermo-electromotive force.

件では 250°C 以上になっていたのでは問題はない。SUS 430-炭素鋼、鋳鉄で約 730°C 、約 810°C にある熱起電力の不連続点は炭素鋼、鋳鉄の A_1 変態によると考えられる。SUS 430, S43C, S58C の導線としては同種材を用いた。鋳鉄の線材は作れないので、鋳鉄との熱起電力が小さい 18-8 ステンレス鋼 SUS 304 を使用し、あらかじめ鋳鉄-SUS 304 の温度と熱起電力の関係を測定しておき、鋳鉄試験片への溶接部の温度を測定し、シンクロスコープに測定される熱起電力を補正して温度を求めた。回転する相手材から導線をとるための水銀接点の抵抗は、回転時でもシンクロスコープの入力インピーダンス

に較べて十分小さいことを確認した。

SUS 430 を相手材とした鋳鉄の閃光温度の測定例を Fig. 4 に示す。定常的に到達する最高閃光温度は加熱なしの状態では約 160°C 、 100°C 加熱で約 300°C である。熱起電力法による閃光温度の測定には種々の問題がある⁵⁾⁶⁾が、定常的に到達する最高閃光温度と摩耗との間には密接な関係が認められている⁴⁾⁵⁾ので、本報告でもこれを閃光温度として機械的破壊摩耗との関係を検討する。なお、相手材は加熱してなく、摩擦前の試験材を 100°C 加熱しただけで、Fig. 4 では閃光温度が約 140°C も上昇している。この原因についてはあとで検討する。

3. 実験結果と考察

3.1 鋳鉄の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係

相手材ステンレス鋼 SUS 430、摩擦速度 $0.10\sim 6.56$ m/sec、接触圧力 $2\sim 16$ kg/cm²、試験材温度室温($\approx 15^{\circ}$) $\sim 320^{\circ}\text{C}$ でパーライト鋳鉄の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係を検討した。

Fig. 5 は摩耗率の速度特性である。全速度範囲で高接触圧力(荷重)ほど摩耗率は大きくなっており、比較的低速に機械的破壊摩耗による摩耗率の極大があつて、その摩擦速度は接触圧力が大きくなると低速に移っている。これは典型的な鋳鉄の摩耗特性で、SUS 430 を相手材とした実験でも一般的な摩耗と閃光温度の関係が得られると考えてよい。なお、低速のいわゆる酸化摩耗²⁾域での摩耗率は 10^{-6} mm³/mm 以下であつた。

接触圧力 2, 4, 16 kg/cm² での比摩耗量、閃光温度の速度特性を Fig. 6 に示す。接触圧力によつて比摩耗量が極大になる摩擦速度は違うが、閃光温度が約 300°C の時に比摩耗量の極大点が見れ、そこでの摩耗率は接触

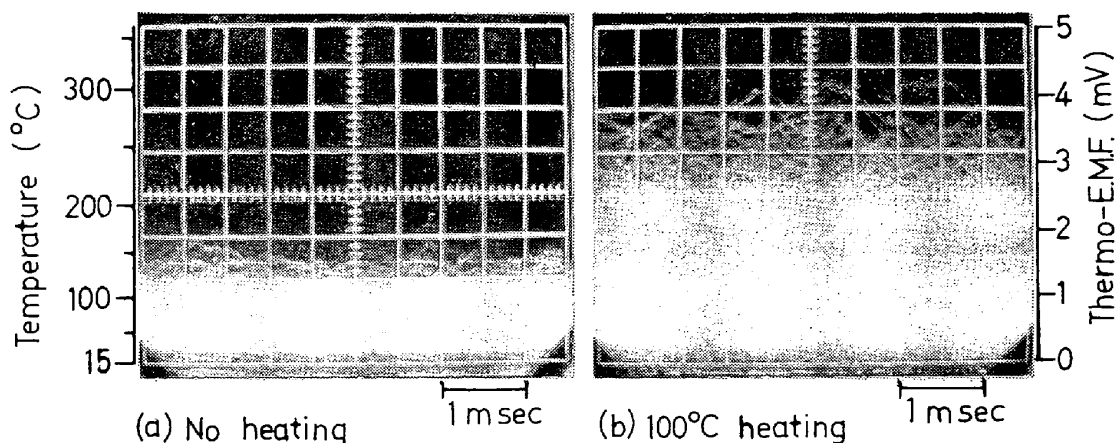


Fig. 4. Examples of measurement of flash temperature. Cast iron was rubbed against 17Cr stainless steel at sliding speed 0.82m/sec and contact pressure 2 kg/cm².

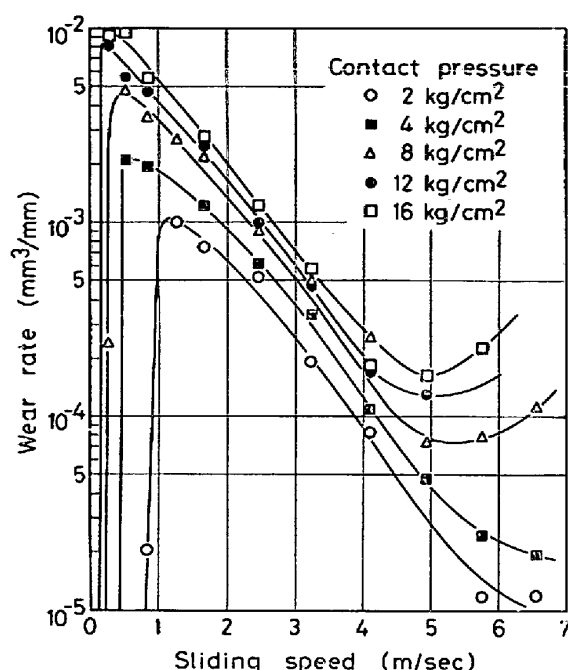


Fig. 5. Variation of wear rate of pearlitic cast iron with sliding speed sliding against 17Cr stainless steel.

圧力（荷重）に比例し、比摩耗量はほぼ等しくなっている。比摩耗量は閃光温度が $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ では非常に大きく、高速になって 400°C 以上になるとしだいに減少している。これは真空中でニッケル、コンスタンタンを相手材にした場合と全く同じである⁶⁾。摩擦速度 $1\sim 5\text{ m/sec}$ では高接触圧力ほど摩耗率は大きい (Fig. 5) が、比摩耗量は逆に小さくなっており、一定速度での摩耗率は接触圧力（荷重）には比例していない。これは閃光温度が違うためと考えられ、閃光温度が高くなる高接触圧力で比摩耗量が小さくなっている。しかし、同じ閃光温度での比摩耗量はほぼ等しく、そこでの摩耗率は接触圧力に比例しているのである。閃光温度が 250°C 以下の低速域では、比摩耗量は非常に小さい。

室温での摩擦による閃光温度の上昇は摩擦熱だけによるもので、摩擦仕事のすべてが摩擦熱になるとすれば、その量は $\mu P_g V/J$ (μ : 摩擦係数, P : 荷重, g : 重力の加速度, V : 摩擦速度, J : 熱の仕事当量) となる。摩擦係数は摩耗機構によつて違い、鉄鋼材料の場合は低速の酸化摩耗域におけるよりも機械的破壊摩耗域で大きい²⁾。これは鋳鉄について、本実験に使用した試験機でも確認されている⁷⁾。そのために、酸化摩耗から機械的破壊摩耗への変化がおこる低速域での閃光温度の上昇の傾きは大きくなっている。この摩耗機構の変化は $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ の小さな閃光温度範囲で急激におこるので、摩耗率、比摩耗量の速度特性では酸化摩耗から機械的破壊摩耗への

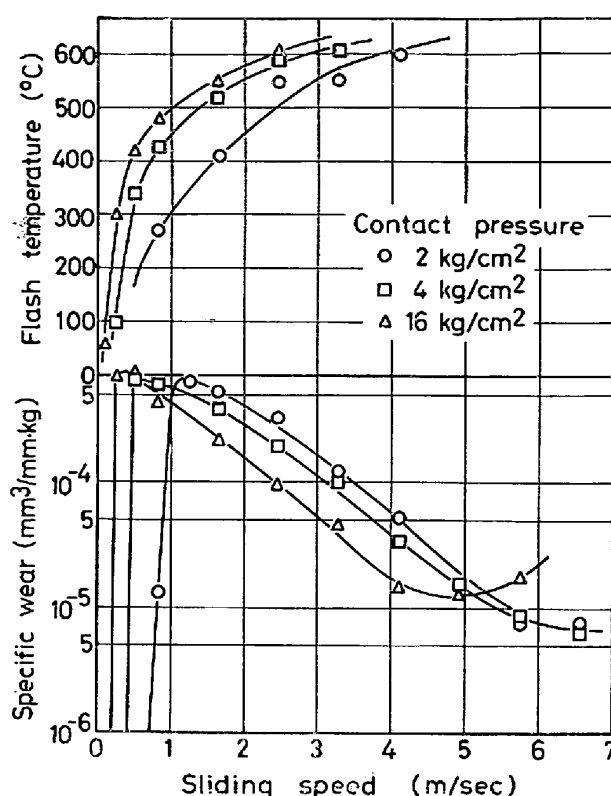


Fig. 6. Variation of specific wear and flash temperature of cast iron with sliding speed.

立上りは急である。高速摩擦になると、固定試験片（本実験では試験材）への摩擦熱の分配率は小さくなり⁸⁾、摩擦係数も比較的小さくなる⁷⁾ため、閃光温度の上昇が小さく、摩耗率、比摩耗量の減少もなだらかなになると考えられる。

比摩耗量、閃光温度の圧力（荷重）特性を Fig. 7 に示す。 0.25 m/sec の場合、 8 kg/cm^2 以下では閃光温度は 200°C 以下で比摩耗量は小さいが、 $12, 16\text{ kg/cm}^2$ では閃光温度が約 300°C になり、機械的破壊摩耗によつて比摩耗量は非常に大きくなっている。 0.82 m/sec になると、閃光温度が 400°C 以上になる 4 kg/cm^2 以上では接触圧力とともに摩耗率は大きくなる (Fig. 5) が、比摩耗量は小さくなっている。閃光温度が約 270°C の 2 kg/cm^2 では比摩耗量は小さいので、 $2\sim 4\text{ kg/cm}^2$ の間に比摩耗量の極大点があると考えられる。 1.64 m/sec では 2 kg/cm^2 ですでに閃光温度は 400°C になり、比摩耗量は減少しているが、閃光温度の変化から 1 kg/cm^2 前後に比摩耗量の極大点があると推測される。これと高速摩擦では比摩耗量は高接触圧力ほど大きくなる (Fig. 6) ことから、比摩耗量の圧力（荷重）特性には極大点、極小点があり、摩耗率の速度特性と同じ形になることが明らかである。 $2\text{ kg/cm}^2\text{--}0.82\text{ m/sec}$ と $12\text{ kg/cm}^2\text{--}$

0.25m/secでの閃光温度はほぼ 270°C であるが、前者では酸化摩耗、後者では機械的破壊摩耗によつて比摩耗量は極大になっている。これから閃光温度 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$

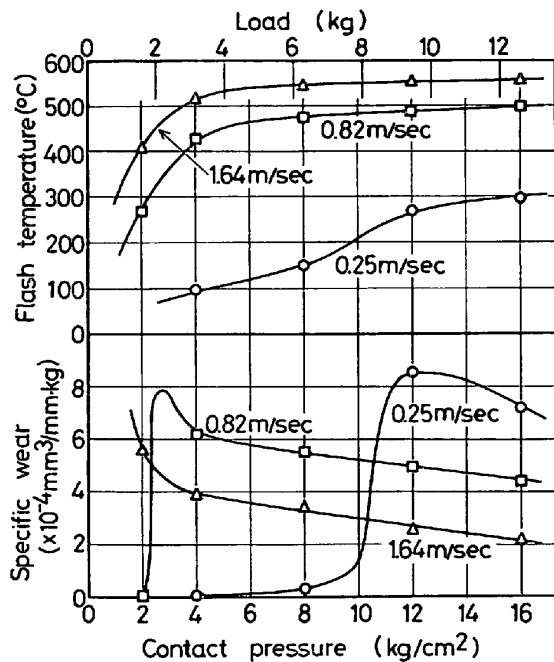


Fig. 7. Variation of specific wear and flash temperature of cast iron with contact pressure (load).

が酸化摩耗 $\longleftrightarrow$ 機械的破壊摩耗の摩耗機構の変化の遷移温度になっていることがわかる。0.82, 1.64m/secの 4 kg/cm^2 以上で閃光温度の上昇が小さくなっているのは、比摩耗量が減少する領域で摩擦係数が比較的小さいこと、および接触圧力(荷重)の増大によつて真実接触部の数と面積が大きくなることによると考えられる。真実接触部の温度は摩擦熱量だけでなく、それが供給される真実接触部の数と大きさにも関係するのである⁹⁾¹⁰⁾。

Fig. 8 は閃光温度と比摩耗量の関係である。閃光温度が 250°C 以下の時には、比摩耗量は非常に小さい。

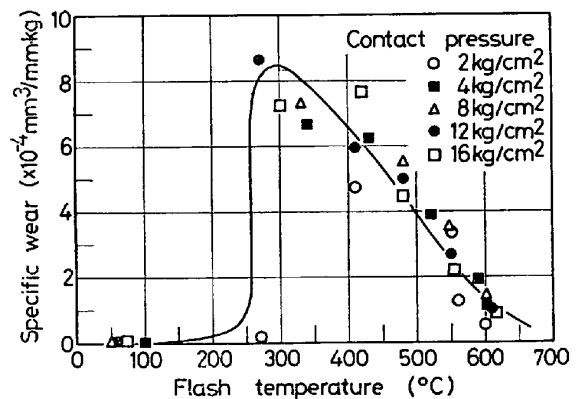


Fig. 8. Relation between specific wear of cast iron and flash temperature.

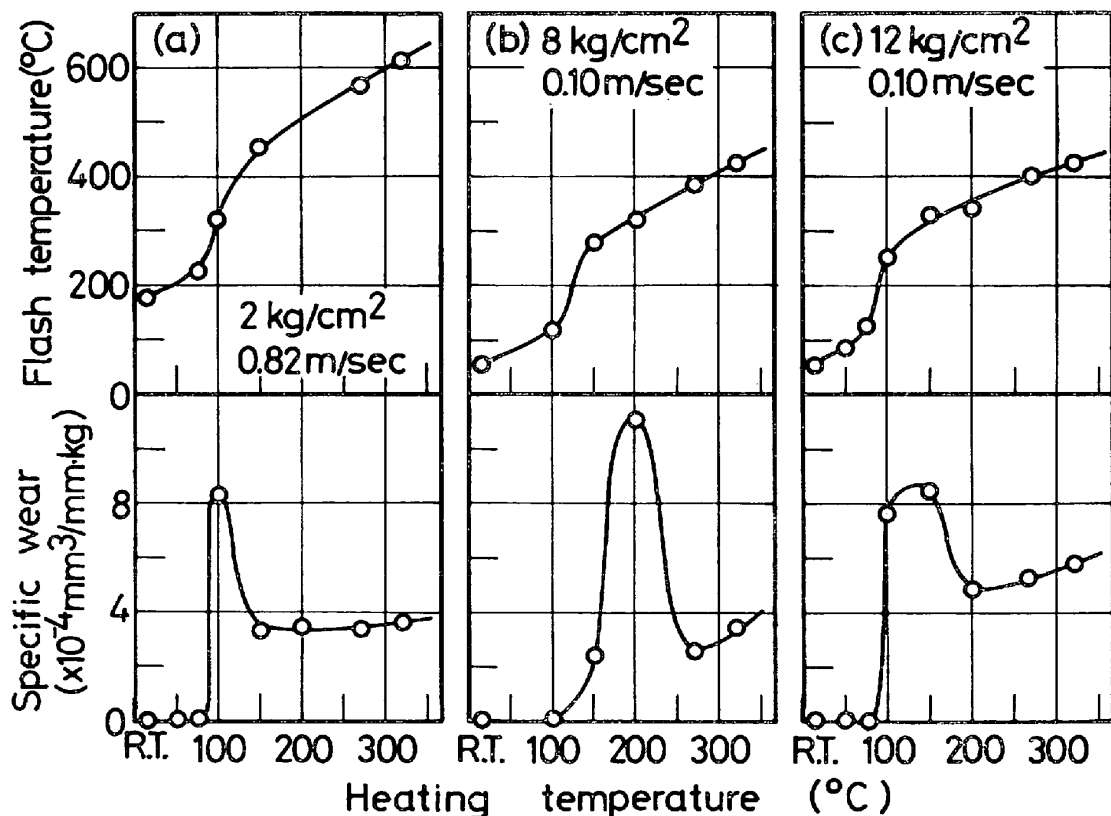


Fig. 9. Variation of specific wear and flash temperature of cast iron with heating temperature of specimen.

約 300°C に比摩耗量の極大点があり、それ以上では温度の上昇とともに比摩耗量は減少する。閃光温度による比摩耗量の変化は比摩耗量の速度特性、圧力(荷重)特性と同じ形になっていることから、機械的破壊摩耗前後での摩擦速度、接触圧力(荷重)による比摩耗量の変化の主たる原因は閃光温度にあると考えられる。

ところで、Fig. 8 は摩擦速度、接触圧力を変化させて得た結果である。そこで、この2つの摩擦条件に関係なく閃光温度が約 300°C で比摩耗量が極大になることを確認するために、室温での試験では閃光温度が 200°C 以下になる条件で、試験片を強制加熱した実験を行なった。その結果を Fig. 9 に示す。2 kg/cm²-0.82m/sec での比摩耗量は 75°C 加熱までは室温におけると同じく小さいが、100°C 加熱で急激に大きくなり、150°C 以上加熱すると再び小さくなっている。比摩耗量が極大になった時の閃光温度は約 300°C で、Fig. 8 の結果と一致している。8, 12 kg/cm²-0.10m/sec では、200°C, 100~150°C 加熱で閃光温度が約 300°C になり、比摩耗量は極大になっている。16 kg/cm²-0.10m/sec での比摩耗量は 75°C 加熱で極大になっていた。同じ摩擦速度では接触圧力(荷重)が大きいと摩擦熱の発生が多いので、低い加熱温度で閃光温度が約 300°C になり、比摩耗量は極大になる。4 kg/cm²-0.25m/sec では 100°C 加熱で比摩耗量に極大点が見れた。これから摩擦速度、接触圧力(荷重)に関係なく、機械的破壊摩耗による比摩耗量の極大は閃光温度に依存していることが明らかである。さらに極大点での比摩耗量も Fig. 8 とほぼ一致し、 $(8 \sim 10) \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{kg}$ である。閃光温度は比摩耗量が極大になる加熱温度で急上昇し、その前後では加熱温度にほぼ直線で、平行になっている。これは機械的破壊摩耗域では摩擦係数が大きく、発熱量が多くなっているためと考えられる。前述したごとく、閃光温度には真実接触部の数と大きさが関係するため、低速の高接触圧力では比較的低下している。しかし、320°C 加熱による閃光温度の上昇は約 400°C で、ほぼ一致している。本実験では加熱しているのは試験材だけで、実質的な加熱温度はそれより低いと考えられるにもかかわらず、閃光温度の上昇が大きくなっている。これはいずれの場合も比摩耗量の極大点をはさんでいるためである。

3.2 炭素鋼 S43C の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係

相手材 17Cr ステンレス鋼 SUS 430, 摩擦速度 0.10~0.82m/sec, 接触圧力 1 kg/cm², 試験材温度室温(≈15°C)~270°C で、炭素鋼 S43C の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係を検討した。

Fig. 10 は摩擦速度別に強制加熱が摩耗率、閃光温度

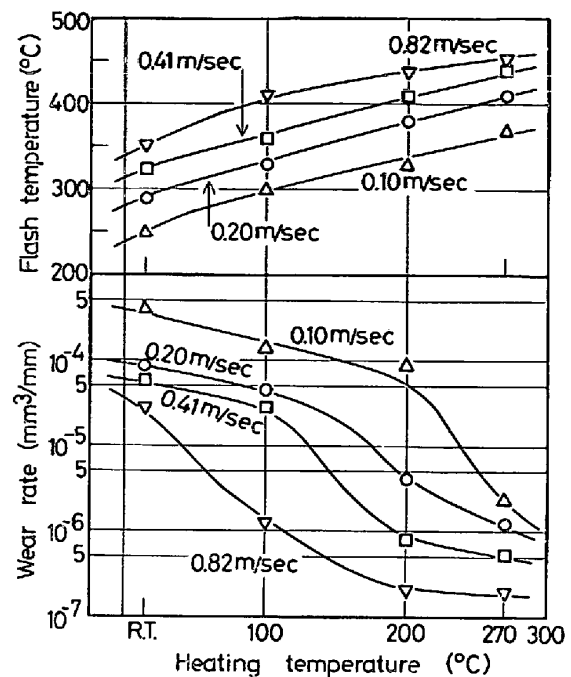


Fig. 10. Wear rate and flash temperature of 0.42% C steel sliding against 17Cr stainless steel (contact pressure 1 kg/cm²).

におよぼす影響を示す。室温においても、0.10~0.82m/sec では摩耗率は摩擦速度とともに減少している。一般に鋳鉄よりも炭素鋼の摩耗率の極大点は低速にあるが、その摩耗率の速度特性は Fig. 5 に示した鋳鉄と同じ形になることは広く知られている²⁾。摩耗試験の相手材としてはあまり一般的でない SUS 430 を使用しても、0.4m/sec 以上では S43C の摩耗率の速度特性は炭素鋼を相手材とした一般的な傾向と一致することが明らかになっている³⁾⁴⁾。本実験の摩擦条件では摩耗率の極大点は現われていないが、0.1m/sec 以下で摩耗率は極大になり、それ以下の速度ではいわゆる酸化摩耗がおこると推測される。室温では摩擦面、摩耗粉とも金属光沢を呈し、摩耗率も大きいので機械的破壊摩耗がおこっていると考えてよい。本実験は摩耗率の極大点以上の速度域での機械的破壊摩耗について検討することになる。摩擦速度が大きく、加熱温度が高いほど閃光温度は高く、摩耗率は小さくなっている。相手材を加熱してないので、100°C 加熱による閃光温度の上昇は約 50°C にすぎないが、摩擦速度によらず強制加熱による閃光温度の上昇の傾向は同じである。しかし、摩耗率の減少の様相は摩擦速度によって違っている。0.10m/sec では 200°C までの加熱による摩耗率の減少は比較的小さく、200°C から 70°C の加熱で急激に減少している。0.20, 0.41m/sec での大きな摩耗率の減少は 100°C から 200°C の間にあり、0.20m/sec では 200~270°C の間にまだかなりの

減少があるが、 0.41 m/sec では小さい。 0.82 m/sec になると 100°C の加熱で摩耗率は大きく減少し、 200°C と 270°C ではほとんど差がない。これを閃光温度との関係でみると、摩擦速度によらず摩耗率の急激な減少は閃光温度が $350\sim 400^\circ\text{C}$ でおこっており、機械的破壊摩耗が閃光温度と密接に関係していることは明らかである。摩耗率を加熱温度に対して整理するとその変化の挙動は摩擦速度によつて違い、また摩擦速度に対すると加熱温度によつて異なる。これは閃光温度が摩擦速度と加熱温度の2つの因子によつて変化し、閃光温度 $350\sim 400^\circ\text{C}$ で摩耗率に急激な減少があるためと考えられる。

Fig. 10 から摩耗率と閃光温度の関係を求めた結果を Fig. 11 に示す。これから閃光温度が $250\sim 300^\circ\text{C}$ 以上 500°C 以下の範囲では閃光温度の上昇とともに摩耗率は減少し、摩擦条件に関係なく摩耗率はほぼ閃光温度によつて決まることが明らかである。本実験では接触圧力は一定であるが、高速摩擦域での結果⁴⁾ および 3.1 節に示した鋳鉄の結果から、比摩耗量の閃光温度による変化は接触圧力(荷重)にもほとんど関係なくなると推測される。

Fig. 11 で閃光温度 $350\sim 400^\circ\text{C}$ を境にして、それ以下では上に凸、以上では下に凸な曲線になっている。摩擦速度に対して摩耗率を対数目盛で図示した S43C の摩耗率の速度特性も同じ形になる^{3,4)} ので、摩耗率の極

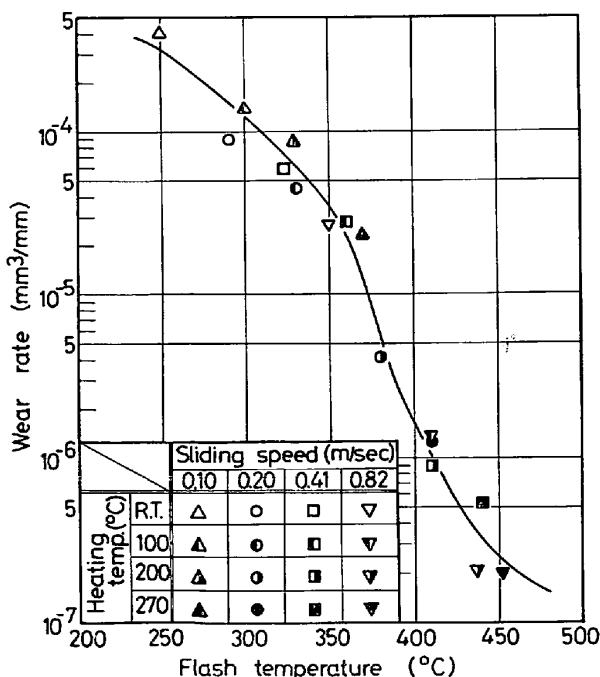


Fig. 11. Relation between wear rate of 0.42% C steel and flash temperature (contact pressure 1 kg/cm^2).

大点以上の比較的低速域での摩耗率の変化の原因は主として閃光温度にあると考えられる。摩耗率が多い上に凸の領域の摩擦面は組織が流れているだけであるが、下に凸の領域になると白色層と酸化物層が生じる³⁾。熔融に起因することが明らかになっている鋳鉄の白色層^{11,12)}と同じ機構で炭素鋼の白色層も生じるとすれば、瞬間的には真実接触部の一部は熔融していることになる(本報告の閃光温度は複数の真実接触部の平均的な温度である⁶⁾)。下に凸の領域では、この点からは熔融摩耗がおこっていると考えられ、酸化物層に注目すれば第2次酸化摩耗¹³⁾ということになる。摩耗機構をどのように呼ぶかは別として、閃光温度 $350\sim 400^\circ\text{C}$ で摩耗機構が変化していることは明らかで、そのために摩耗率が大きく変化するであろう。

本実験の摩擦条件では閃光温度が 250°C 以上になり、酸化摩耗から機械的破壊摩耗への変化がおこる閃光温度は明らかではないが、軸受鋼、高速度鋼について計算で求めた閃光温度と比摩耗量の関係¹⁴⁾、3.1 節に示した鋳鉄の結果 (Fig. 8) から $250\sim 300^\circ\text{C}$ で摩耗機構が変化し、 200°C 以下では摩耗率、比摩耗量は非常に小さいと推測される。

3.3 17Cr ステンレス鋼 SUS 430 の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係

相手材炭素鋼 S58C, 摩擦速度 $0.20\sim 1.0\text{ m/sec}$, 接触圧力 1 kg/cm^2 , 試験材温度 室温($\approx 15^\circ\text{C}$) $\sim 270^\circ\text{C}$ として、17Cr ステンレス鋼 SUS 430 の機械的破壊摩耗と閃光温度の関係を検討した。

Fig. 12 は摩耗率、閃光温度におよぼす強制加熱の影響を示す。炭素鋼 S43C (Fig. 10) と同じく、加熱温度が高く、摩擦速度が大きいほど摩耗率は小さくなり、本実験の範囲では機械的破壊摩耗による摩耗率の極大、それより低速にある酸化摩耗は現れてないが、摩擦面、摩耗粉の観察から摩耗率が $10^{-5}\text{ mm}^3/\text{mm}$ 以上では機械的破壊摩耗がおこっていると考えてよい。ステンレス鋼は炭素鋼に較べると熱伝導性が悪いために、同じ摩擦条件でも閃光温度が高く、 $450\sim 850^\circ\text{C}$ になっている。これは 0.4 m/sec 以上の高速域で比摩耗量の減少が閃光温度の上昇を伴う範囲である⁴⁾。

Fig. 13 は Fig. 12 から得た摩耗率と閃光温度の関係である。閃光温度が 450°C 以上では、その上昇とともに摩耗率は減少し、摩擦条件に関係なく摩耗率は閃光温度に支配されていることがわかる。これから強制加熱、摩擦速度による摩耗率の変化の原因は閃光温度にあることが明らかである。 0.2 m/sec では 270°C 加熱でも閃光温度は約 620°C にすぎないので、 800°C 以上になる

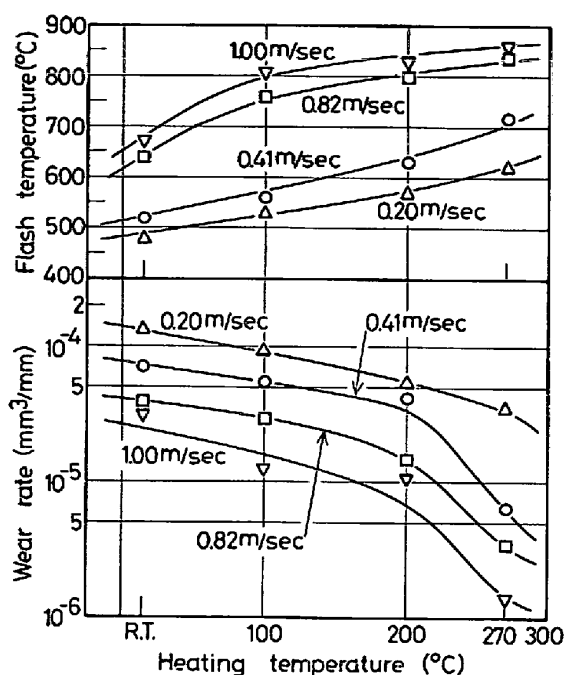


Fig. 12. Wear rate and flash temperature of 17 Cr stainless steel sliding against 0.60% C steel (contact pressure 1 kg/cm²).

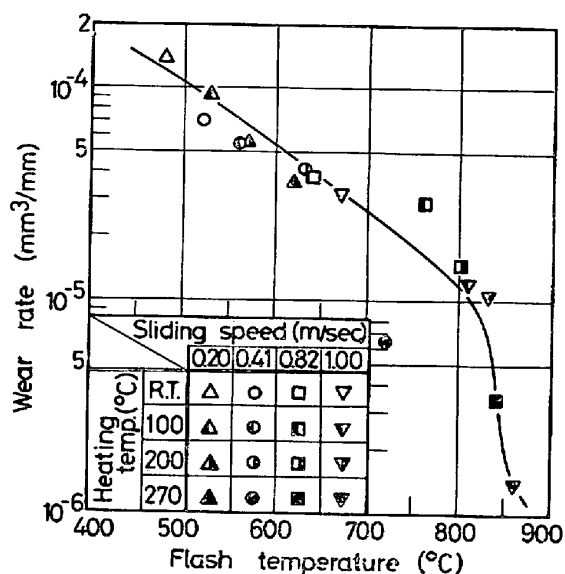


Fig. 13. Relation between wear rate of 17Cr stainless steel and flash temperature (contact pressure 1 kg/cm²).

ように加熱すれば摩耗率はさらに減少し 10^{-6} mm³/mm のオーダーになると推測される。しかし 1 m/sec では、さらに加熱温度を高くすると閃光温度は高くなるであろうが、それに伴って摩擦面の平均温度も上昇して焼付きがおこり、摩耗率は大きくなるであろう⁴⁾。摩耗率が急激に減少する閃光温度は 800~850°C で、炭素鋼より高くなっている。これはステンレス鋼は炭素鋼よりも耐

熱性にすぐれるためと考えられる。

3.4 鉄鋼材料の摩耗と摩擦面温度の関係

本実験は比較的低摩擦速度での鋳鉄、炭素鋼、17Cr ステンレス鋼の摩耗と閃光温度の関係を検討したものであるが、すでに著者らは上記の材料について高速域での摩耗と摩擦面温度の関係について報告した³⁾⁴⁾⁶⁾。そこで、これらの結果と 2, 3 の研究者の報告の検討から、鉄鋼材料の摩耗と摩擦面温度の一般的な関係について推測を試みる。

摩耗率の速度特性、比摩耗量の荷重特性とその時の摩擦面の平均温度、閃光温度を模式的に示すと Fig. 14 のようになる。鉄鋼材料の摩耗率の速度特性は、比較的低速に極大点、高速に極小点があり、複雑な変化をする。これを摩擦面温度との関係でみると、閃光温度が 300°C 前後になる条件(B)で摩耗率は極大になり、250°C 以下の条件(A)では非常に小さい。閃光温度が 300~400°C 以上の条件(C)では、この温度の上昇とともに摩耗率は減少し、平均温度は低く瞬間的には真実接触部の一部では溶融がおこるような条件(D)で極小になる⁴⁾。閃光温度は極小点におけるのと同じか、それ以上になっても、平均温度が高くなる条件(E)では、摩擦面全体が巨視的な塑性流動をおこして焼付き、摩耗率は大きくなる³⁾⁴⁾。室温での摩擦では(A)でも、強制加熱によつて閃光温度を約 300°C にすると、摩耗率はほぼ極大点の大きさに

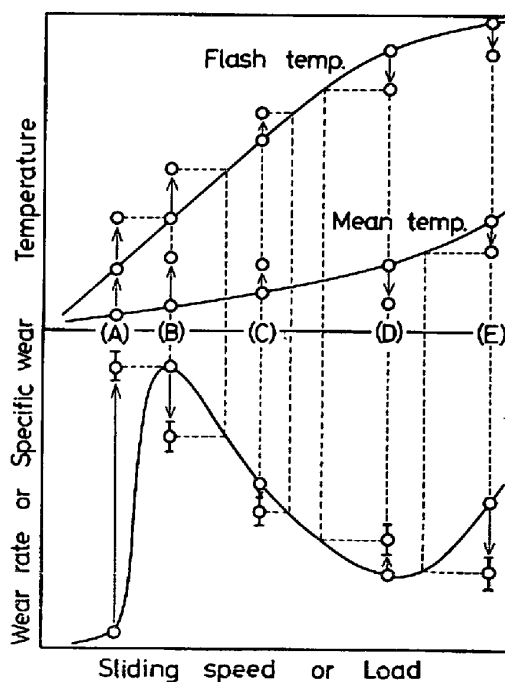


Fig. 14. Schematic diagram for variation of wear rate or specific wear, and sliding surface temperature with sliding speed or load.

なる。すべり摩耗は凝着摩耗とアブレシブ摩耗に大別され、金属の乾燥すべり摩擦では摩擦面の凝着部の剪断に起因する凝着摩耗が支配的¹⁵⁾、機械的破壊摩耗は凝着摩耗の1形態と考えてよい。ところで、金属の変形、破壊は温度だけでなく、歪速度にも影響されるので、摩耗率は摩擦速度によっても変化し、摩耗率の極大値が摩擦速度によらず完全に一致することはないであろう。しかし、本実験で閃光温度だけによつて摩耗状態が(A)→(B)→(C)と大きく変化することが確認された。(B)～(C)で加熱して閃光温度を上昇させると、平均温度があまり高くならなければ、(A)での加熱とは逆に摩耗率は減少する。同じ(B)～(C)でも、閃光温度を100°C程度低下させた時の摩耗率は(B)では非常に小さくなり、(C)では逆に大きくなると推測される。摩耗率の極大点前後でのこのような摩耗率の変化は閃光温度を考えなければ整理できないであろう。(D)で摩擦面温度を低下せれば、摩耗を主として支配する因子は閃光温度となつて摩耗率は大きくなり、(E)での支配因子は平均温度で、冷却すると摩耗率は減少する⁴⁾。なお、炭素鋼の摩耗率の極大点が鋳鉄よりも低速にあるのは、摩擦係数の違いによると考えられる。機械的破壊摩耗域での炭素鋼の摩擦係数は1.5程度で³⁾、鋳鉄のそれは約0.7である⁷⁾。そのために炭素鋼では摩擦熱の発生が多く、鋳鉄よりも低速で閃光温度が約300°Cになるのである。

摩耗率の速度特性が複雑であるため、荷重による摩耗率の変化は摩擦速度に強く影響される。摩擦速度によつては荷重に対して摩耗率が極大点、極小点をもつて変化することもある¹⁶⁾が、荷重とともに摩耗率は大きくなる場合が多い²⁾。しかし本実験で鋳鉄について確認したように、鉄鋼材料の一般的な比摩耗量の荷重特性は摩耗率の速度特性と同じ形になり、それは2つの摩擦面温度の相互関係で説明できると考えられる。

同じ摩擦条件でも摩擦する2つの物体やその支持部の形状、材料などの熱的条件によつて摩擦面温度の上昇が違い、使用する試験機によつて摩耗率、比摩耗量が極大極小になる摩擦速度、荷重は違うと考えられる。同じ試験機でも試験片ホルダーの熱的条件を代えるだけで摩擦面温度の上昇が違つて、摩耗率の極小点の摩擦速度が変化することが報告されている¹⁷⁾。本実験では熱起電力法で閃光温度を測定するために、試験片支持部を試験機本体から絶縁しているが、それをしない場合よりも摩耗率の極小点が低速に現れた。材料の摩擦部への使用限界を試験機で得たPV値あるいは μPV 値(μ :摩擦係数、 P :荷重、 V :摩擦速度)で表わすことがあるが、これは試験機によつても異なるもので、材料の特性値ではな

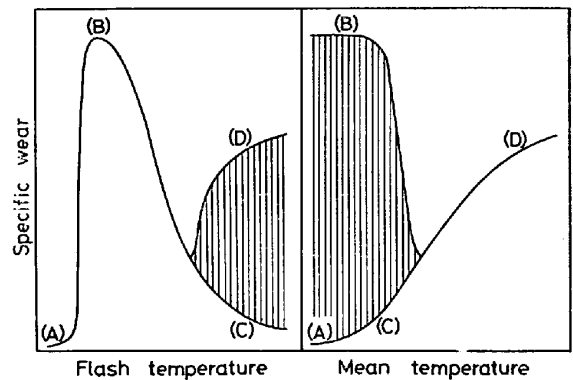


Fig. 15. Schematic diagram for relation between specific wear and sliding surface temperature.

いと考えられる。本実験で鉄鋼材料の摩耗特性に対しては、摩擦速度、荷重よりも摩擦面温度の方が大きな因子として作用していることが明らかになった。

Fig. 15は閃光温度、平均温度と比摩耗量の関係を模式的に示したものである。(A)は閃光温度が250°C以下の比摩耗量が小さい領域で、約300°Cの(B)で比摩耗量は極大になる。平均温度は閃光温度より高くなることはないで、平均温度が低い時の摩耗を主として支配する因子は閃光温度で、平均温度に対して比摩耗量を整理すると(A)～(B)の大きな範囲に広がる。閃光温度が高く、平均温度が低い(C)では比摩耗量は小さく、速度特性ではここで摩耗率は極小になる。高閃光温度での摩耗は主として平均温度に支配され、これが高い(D)では焼付きがおこつて比摩耗量は大きくなる。比摩耗量が極大になる閃光温度は材料の種類によらずほぼ300°Cで一致すると考えられるが、焼付きと平均温度の関係は材料によつて異なる。中炭素鋼では(C)は約250°Cまではほとんど温度軸に平行で、それ以上になると急激に(D)の状態になつていた³⁾⁴⁾。低炭素鋼のこのような臨界の平均温度は約200°Cで¹⁸⁾、高温での摩耗試験結果¹⁹⁾から軸受鋼、高速度鋼はもつと高温まで焼付きはおこらないと推測される。17Crステンレス鋼の(C)域は温度に対して連続的に上昇し⁴⁾、Nimonic 75合金も同様である¹⁸⁾。鋳鉄の激しい焼付きは平均温度500°Cまではおこらない⁶⁾。このような違いは温度による材料の酸化、機械的性質の変化の差に原因すると考えられる。凝着部の変形、破壊の挙動は摩擦速度、荷重にも影響されると考えられるので、比摩耗量は摩擦面温度だけでは整理できないであろうが、摩擦面温度が摩耗を支配する大きな因子であることはまちがいない。摩耗の絶対量は材料の種類、その熱処理状態、摩擦の相手材によつて違うが、閃光温度、平均温度がわかれば、どのような形態の摩耗

がおこり、その量が多いか少ないかのおおまかな推測はできる。

Fig. 15 のような関係の原因は次のごとく考えられる。接触部間の凝着は温度に強く影響されるもので、絶対零度に近い低温でもおこるが、材料の融点(絶対温度)の約 0.4 倍以上の温度になると著しくなる²⁰⁾。鉄鋼材料の融点は 1 150~1 500°C にあるので、300~400°C 以上になると凝着がおこりやすくなることになる。そうすれば接触部界面での相対運動はおこり難くなり、その直下は加工硬化しているので内部で破壊がおこつて、比摩耗量は大きくなると考えられる。閃光温度が 250°C 以下で比摩耗量が小さいのは、凝着そのものがあまりおこらないためであろう。400°C 以上になると凝着はおこりやすくなるが、凝着強さが低下し、また接触部の界面直下の温度も上昇して破壊がおこる位置が摩擦面に近くなつて、比摩耗量は減少すると考えられる。閃光温度は相当高温で、平均温度が低い比摩耗量の極小点では、接触部の界面およびその直下だけが非常に軟化または粘性体化し、その下部は室温に近い強度が保持されて、破壊が極く薄い界面層でおこるのである。ところが平均温度が高くなると、界面層の相当内部の強度も低下して接触面積が大きくなり、見掛けの摩擦面全体が巨視的な塑性流動をおこして焼付くのであろう。ところで、粘性体の挙動は力の負荷速度に大きく影響されるので、真実接触部の温度が高い時の摩耗に対しては、閃光温度が低い比摩耗量の極大点前後におけるよりも摩擦速度の影響が大きいと推測される。

4. 結 論

本実験では主として低摩擦速度域での鉄鋼材料の摩耗と摩擦面温度の関係を検討し、従来の報告とあわせて鉄鋼材料の摩耗と摩擦面温度の一般的な関係について推測を試みた。その結果、鉄鋼材料の摩耗特性は真実接触部の温度(閃光温度)と見掛けの摩擦面全体の平均温度の相互関係で統一的に整理できることが明らかになった。要約すると、

(1) 摩擦条件に関係なく、閃光温度が約 300°C の時に機械的破壊摩耗による比摩耗量の極大点が現れ、

250°C 以下では比摩耗量は非常に小さい。

(2) 平均温度が低く、閃光温度が 300~400°C 以上の時には、その上昇とともに比摩耗量は減少する。

(3) 閃光温度が高い時の摩耗は主として平均温度によつて変化し、これが高くなると焼付きがおこる。

(4) 摩耗は摩擦系または摩擦雰囲気(気)の温度には直接関係なく、それによる摩擦面温度の変化による。

終りに、本実験に協力された大阪府立大学学生菊野俊君(現在、光洋精工(株))に感謝いたします。

文 献

- 1) 岡林, 川本: 潤滑, 18 (1973), p. 282
- 2) 朝倉: 金属の摩耗, (1948), [丸善]
- 3) 川本, 曾根, 岡林: 日本金属学会誌, 37 (1973), p. 357
- 4) 川本, 新谷, 曾根, 岡林: 日本金属学会誌, 37 (1973), p. 1236
- 5) バウデン・ティバー(曾田訳): 固体の摩擦と潤滑, (1961), p. 33, [丸善]
- 6) 川本, 岡林: 日本金属学会誌, 37 (1973), p. 350
- 7) 山田, 川本, 岡林: 日本金属学会誌, 35 (1971), p. 58
- 8) J. C. JAEGER: Proc. Roy. Soc. N. S. W., 56 (1942), p. 203
- 9) D. G. POWELL and S. W. E. EARLES: ASLE Trans., 15 (1972), p. 103
- 10) 川本, 山田, 岡林: 日本金属学会誌, 37 (1973), p. 633
- 11) 岡林, 川本, 井上, 斎藤: 日本金属学会誌, 32 (1968), p. 639
- 12) 川本, 山田, 岡林: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 464
- 13) 岡林, 川本, 野谷: 鋳物, 38 (1966), p. 501
- 14) 佐田: 日本機械学会論文集, 25 (1959), p. 227
- 15) 日本潤滑学会編: 潤滑用語解説集, (1970), p. 22, 148, [朝倉書店]
- 16) 中村, 斎藤, 岡林: 日本金属学会誌, 28 (1964), p. 396
- 17) W. HIRST and J. K. LANCASTER: Proc. Roy. Soc., A259 (1961), p. 228
- 18) S. W. E. EARLES and M. G. HAYLER: Wear, 20 (1972), p. 51
- 19) 辻: 金属材料技術研究所研究報告, 13 (1970), p. 339
- 20) A. P. SEMENOV: Wear, 4 (1961), p. 1