鑄鉄の摩耗特性と摩擦面温度の関係*

川 本 信** 岡 林 邦 夫**

Makoto Kawamoto and Kunio Okabayashi: Wear Characteristics of Cast Iron in relation to the Surface Temperature. In relation to the surface temperature the wear characteristics of cast iron rubbed against nickel and constantan in dry sliding on a pin-ring test rig in 10^{-4} mmHg were examined by measuring the temperature at actual contacting asperities, i.e., the flash temperature, and the average temperature of the sliding surface.

It is estimated that the flash temperature which is converted from the thermo-electromotive force developed between the sliding surfaces does not indicate the maximum temperature among numerous asperities contacting simultaneously or the temperature at each individual asperity, but represents the average temperature at asperities. The average temperature of the sliding surface is considered to be indicative of the initial temperature of asperities and/or the temperature of parts which support asperities.

The flash temperature is closely related to wear and the white hardened layer caused by melting of asperities on the sliding surface. When the average temperature of actual contacting asperities is about 300°C , the wear of cast iron is the largest and decreases beyond this temperature. In a state where all asperities contacting simultaneously come to the melting point, wear reaches the minimum and more than 70% of the sliding surface is covered with white hardened layers. The quantitative relation between wear and the maximum flash temperature, from which an experimental equation could be obtained, was recognized in a sliding condition where the white hardened layer occurs on the sliding surface. The flash temperature measurement by the thermo-electromotive force developed between the sliding surfaces must be an effective source to make clear the wear characteristics. The severe seizure due to softening of the sliding surface does not occur in cast iron, when the average temperature of the sliding surface is lower than 500°C .

At high sliding speeds where a large quantity of frictional heat generates, wear reaches the minimum in a state at which the temperature of actual contacting asperities approaches the melting point or a high temperature near to it and a sufficient strength is maintained on the parts supporting asperities. The average temperature of the sliding surface is considered to have a significant meaning as the value to judge the occurrence of seizure.

(Received December 7, 1972)

I. 緒 言

摩耗は種々の物理的、化学的、機械的因子の影響を受ける複雑な現象で、無潤滑の乾燥摩耗でも摩擦面の酸化、凝着、摩耗変質層の生成、拡散などの現象を付随する。これらはいずれも温度に大きく影響される現象で、摩耗現象において温度が重要な役割を演じていることが容易に推察される。

金属の摩擦面にはその平均温度よりもはるかに高い閃光温度(Flash temperature)、あるいは熱点温度(Hot spot temperature)と呼ばれる瞬間的極所高温が発生し、摩擦条件によっては材料の融点に達することが知られている⁽¹⁾。この高温は摩耗、焼付きなどの摩擦にともなう表面損傷と密接に関係していると考えられる。我々は先に鑄鉄同志の高速摩擦で、鋼の摩擦面に発生すると同様の白色の硬化層が生成し、その組織成分から真実接触部が摩擦熱によ

て溶融し、接触が断たれると同時に急冷されて生じることを明らかにした⁽²⁾。

摩耗と温度の関係を考える場合、摩擦熱による摩擦面の温度上昇に限っても、摩耗に直接影響をおよぼすと考えられる温度として、真実接触点で瞬間的に発生する閃光温度と摩擦面の平均温度がある。摩耗が真実接触点の破壊によると考えるならば、真実接触点の温度はもちろん、その真実接触点を支える部分の温度も摩耗と密接に関係しているであろう。本実験では鑄鉄摩擦面の閃光温度、平均温度を測定し、摩擦面温度と摩耗および摩擦面に生じる白色の硬化層との関係について検討した。

II. 実 験 方 法

本実験で使用した摩耗試験機は、水平に回転するリング試片(外径 88, 内径 68 mm)の上端面にピン試片(直径 10 mm)を押しつけて、摺動摩擦を行なわしめるピン-リング

- (1) バウデン・ティパー(曾田範宗訳): 固体の摩擦と潤滑, 丸善, (昭 36)。
- (2) 岡林邦夫, 川本 信, 井上次峯, 斎藤省三: 金属学会誌, 32(1968), 639。

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

* 1971 年 10 月金属学会金沢大会に発表

型である。ピン試片として 3.40% C, 2.06% Si, 0.42% Mn, 0.010% P, 0.018% S, 0.90% Cu, 0.22% Cr の鋳放しのパーライト地ねずみ鋳鉄, リング試片としては熱起電力法で閃光温度を測定するためにニッケルおよびコンスタンタン (51.85% Cu, 46.89% Ni, 0.68% Mn) を使用した。摩擦条件は接触圧力 2, 4 kg/cm², 摩擦速度 0.20~7.38 m/sec, 無潤滑の乾燥状態である。摩擦面, 摩耗粉の酸化と摩耗との間には密接な関係が認められ⁽³⁾⁽⁴⁾, 摩擦面の酸化が摩耗を支配する主要な因子であるとする考え方⁽⁵⁾もあるが, 本実験では現象を単純化するために試験はすべて真空中 (10⁻⁴ mmHg) で行なった。

摩擦面温度の測定方法の概略を Fig. 1 に示す。摩擦面の平均温度は鋳鉄試片摩擦面から 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試片の温度勾配と熱伝導の式から計算した。閃光温度は鋳鉄とニッケルまたはコンスタンタンとの摩擦面で発生する熱起電力をシンクロスコープで測定して得た。鋳鉄の導線としては, 鋳鉄との熱起電力が小さい 18-8 ステンレス鋼を摩擦面から 12 mm の位置に溶接した。測定された熱起電力の温度への換算は, あらかじめ測定した供試鋳鉄とニッケル, コンスタンタン, 18-8 ステンレス鋼の温度と熱起電力の関係と摩擦面の平均温度を求める際に測定した摩擦面から 12 mm の位置の温度から行なった。本実験に使用したシンクロスコープ (周波数帯域 DC~30 MHz -3 dB, 入力インピーダンス 1 M Ω) は電圧感度が低いために, 前置増幅器 (DC~200 k Hz -3 dB, 10 k Ω) を使用しているが, 摩擦速度が 10 m/sec 以下であるから 200 k Hz -3 dB の周波数特性があれば十分正確な波形が観測されと考えられる。

Fig. 1 Experimental arrangements for measuring of the flash temperature (a) and the average temperature of the sliding surface (b)

III. 実験結果と考察

Fig. 2 は鋳鉄の摩耗の速度特性である。摩耗量の絶対値は異なるが, 相手材に関係なく摩擦速度に対する鋳鉄の摩耗の傾向は同じで, 約 0.5 m/sec で摩耗は極大になり, こ

Fig. 2 Variation of the wear rate of cast iron with sliding speed

れ以上の高速では速度とともに摩耗は急激に減少し, 6 m/sec 以上になるとほぼ一定の値になっている。また相手材がいずれの場合でも, 1.5 m/sec 以上の高速摩擦では鋳鉄摩擦面に白色の硬化層が生成し, 組織観察, X線回折によって鋳鉄同志の摩擦で生じる硬化層⁽²⁾と全く同じものであることが確認された。したがって, 相手材がニッケル, コンスタンタンという特殊な材料であっても, 本実験で鋳鉄の摩耗と摩擦面温度の間の一般的な関係が得られると考えられる。

摩耗が低速で極大になった後減少する現象について, その主たる原因は摩擦面の温度上昇による酸化であるとし, 真実接触部での酸化速度と母材が保持し得る酸化膜厚さとの関係で説明する考え方が提案されている⁽⁵⁾。しかし顕微鏡観察, X線回折では酸化物の発生が認められない真空中でも, 高速での摩耗は低速での極大値の 1/100~1/1000 になっている。高速では摩擦熱による鋳鉄摩擦面の酸化によって摩耗は減少するが, 大気中と 10⁻⁴ mmHg 中との摩耗量の差は最大 10 倍程度にすぎない⁽⁶⁾ ことから, 速度とともに摩耗が減少することの第 1 の原因として摩擦面の酸化を考えることはできないのではなからうか。

Fig. 3 は鋳鉄摩擦面に占める白色の硬化層の割合を摩擦速度に対して示したものである。速度が大きくなって摩耗が減少するのに対応して, 硬化層が摩擦面に占める割合は大きくなっている。6 m/sec 以上で摩耗が一定になると, 硬化層の占める割合もほぼ一定になり, 摩擦面の 70% 以上が硬化層に覆われるようになる。このように, 鋳鉄の摩耗と硬化層の発生との間には密接な関係が認められる。しかし硬化層の硬さと摩耗の間には一定の関係はなく⁽⁷⁾, 硬化層は硬いがゆえにこれが生成する摩擦条件で摩耗が減少するのではない。この硬化層はその部分の接触が断たれ

(3) 岡林邦夫, 川本 信, 野谷秀雄: 鋳物, **38**(1966), 501.

(4) T. F. J. Quinn: Advan. X-ray Anal., **10**(1967), 311.

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

(6) 山田俊宏, 川本 信, 岡林邦夫: 金属学会誌, **35**(1971), 58.

(7) 川本 信, 山田俊宏, 岡林邦夫: 金属学会誌, **34**(1970), 464.

た後に生成したのであって、実際に接触している時には融体であったと考えられる⁽²⁾。高速で摩擦が減少する主たる原因は真実接触点の一部が溶融して、摩擦面間の破断が溶融層でおこり、材料内部での破壊がおこりにくくなるためと考えられる。真実接触点中で溶融しているものが多くなるほど摩擦は減少し、摩擦後は硬化層が多く残ることになる。

Fig. 3 Variation of the proportion of the area occupied by white hardened layers to the sliding surface with sliding speed

閃光温度を得るための摩擦面間で発生する熱起電力の測定においては、Fig. 1(a)に示すように水銀槽と摩擦面の二つの移動接点がある。もしこれらの接点の抵抗が非常に大きいならば、摩擦面間で発生した熱起電力が正確に測定できなくなる。Fig. 4に熱起電力測定の際と同じく、二つの接点を直列につないだ時の抵抗測定の一例を示す。摩擦速度 1.64 m/sec までは静止状態とほぼ同じで、接触抵抗および導線の抵抗が約 1Ω あるにすぎないが、これ以上の高速になると抵抗が無限大、つまり接触が断たれた状態が断続的に生じるようになる。水銀接点の抵抗は高速でもほぼ零であったから、抵抗の変化は摩擦面での接触状態によると考えられる。しかしこの抵抗変化はほとんどの場合、摩擦面が接触しているかどうか起因するもので、定常的に中間の値をとることはなく、一時的になる中間の値も数 Ω にすぎない。本実験に使用した前置増幅器の入力インピーダンスは $10 \text{ k}\Omega$ であるから、数 Ω の抵抗は測定値に誤差を生ぜしめることはないと考えてよい。接触抵抗測定によって、摩擦状態に関する興味ある情報が得られる。速度 1.64 m/sec までは見掛けの摩擦時間と真実接触時間は一致するが、2.46 m/sec 以上になると見掛けの摩擦時間中に実際は接触していない時間ができはじめ、6.56 m/sec では接触が断たれる時間は 10^{-3} 秒のオーダーにすぎないが、見掛けの接触時間の約 20% では接触が断たれていたことがわかる。

シンクロスコープによる閃光温度の測定結果の一例を

Fig. 4 Trace of the electric resistance in the circuit for measuring the flash temperature when cast iron was rubbed against constantan. Contact pressure, 2 kg/cm².

Fig. 5に示す。温度の変動が非常に激しく、この組合せでの最高閃光温度は 0.20 m/sec で 230°C 、2.46 m/sec で 720°C 、6.56 m/sec で 910°C に達している。ここで熱起電力法で測定した閃光温度は、どこのいかなる温度を意味しているかが問題になる。平面を接触させた時の真実接触面積は見掛けの接触面積にくらべて非常に小さく、静止状態で鋼に荷重を 500 kg かけても $1/400$ 、5 kg では $1/40000$ にすぎない⁽¹⁾。摩擦が行なわれた場合も、複数の非常に小さな領域で接触していることが報告されている⁽⁸⁾。したがってシンクロスコープで測定される電圧は、小さな複数の真実接触点で発生した熱起電力が合成された値と考えられる。各接触点の大きさや負荷は同じではないと考えるのが妥当であるから、模型的に Fig. 6に示すように、電圧 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 、内部抵抗 $r_1, r_2, \dots, r_n$ の電池を n コ並列に接続した時の電圧が測定されることになるので、

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 - i_1 r_1 \\
 &= E_2 - i_2 r_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 &= E_n - i_n r_n
 \end{aligned}$$

(8) W. Hirst and J. K. Lancaster: Proc. Roy. Soc., A 259 (1960), 288.

Fig.5 Trace of the flash temperature converted from the thermo-electromotive force developed between the sliding surfaces of cast iron and constantan. Contact pressure, 2 kg/cm^2

Fig.6 Schematic diagram of generation of the thermo-electromotive force between the sliding surfaces

$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = 0$$

これから $i_1, i_2, \dots, i_n$ を消去すると,

$$E = \frac{r_2 r_3 \dots r_n E_1 + r_3 \dots r_n r_1 E_2 + \dots + r_1 r_2 \dots r_{n-1} E_n}{r_1 r_2 \dots r_{n-1} + r_2 r_3 \dots r_n + \dots + r_n r_1 \dots r_{n-2}}$$

いま接触点 1 での温度が最高, つまり $E_1 > E_2, E_3, \dots, E_n$ とすると, $E < E_1$ となり, 真実接触点中の最高温度は測定される最高閃光温度よりも高いことになる. 各接触点での抵抗が等しい場合には,

$$E = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}$$

となり, 各接触点の算術平均温度が測定されることになる. しかし実際にはこのようなことはありえないであろうから, 熱起電力法で測定される閃光温度は多数の接触点の平均的な値で, 測定される最高値よりもさらに高い温度になっている接触点もあると考えねばならない.

測定された最高閃光温度と鋳鉄摩擦面の平均温度の摩擦

速度による変化を Fig.7 に示す. これら二つの温度の変化は摩耗, 摩擦面に占める硬化層の割合の変化と対応しており, 摩耗, 硬化層の占める割合が一定になる高速では, 最高閃光温度, 平均温度ともほぼ一定の値に飽和している. このように摩耗, 硬化層の生成, 最高閃光温度, 平均温度の間には密接な関係が認められる. 高速で一定になった最高閃光温度はコンスタンタン相手で約 900°C , ニッケル相手では約 1030°C に達している. 真実接触点の温度は組合せた材料の低融点側の材料の融点を越えないことが知られており⁽¹⁾, 高速で最高閃光温度が一定の値になるのは, 瞬間的には真実接触点のすべてが鋳鉄の融点に達することがあることを意味していると考えられる. 鋳鉄の融点としては, かなり低い温度しか測定されない原因としては次のような事が考えられる. (i) 十分遅い速度で加熱, 冷却して, 平衡状態に近い組織で測定した温度と熱起電力の関係を摩擦の場合のごとき急速加熱, 冷却される非平衡状態の組織での熱起電力にそのまま適用できない. (ii) 歪のない状態で静的な熱接点をつくる場合と動的な熱接点をつくり歪が生じている場合とでは熱起電力が違う. (iii) レーデブライト組織の白色の硬化層が再接触する場合には, パーライトねずみ鋳鉄の熱起電力とは異なる. (iv) 摩擦面間で材料の転移 (transfer) がある場合には, 一部で同材同志の接触がおり, 真実接触点での温度よりもかなり低いと考えられる転移面間での熱起電力しか測定されない. これらの原因は熱起電力法で閃光温度を測定する際には避けられないこ

とである。金属同志の摩擦では、これ以外に適当な方法がないのでやむを得ない。鋳鉄の相手材のニッケル、コンスタンタンの摩擦の速度特性は鋳鉄と同様の傾向を呈し、低速では 0.5 g/km 以上摩擦して、鋳鉄の巨視的な転移は認められないが、 4 m/sec 以上の高速になると摩擦はほとんど零になるか、わずかに増量することもある。この時には摩擦面に鋳鉄の転移がパッチ状におこっている。これは高速では、摩擦面の一部で鋳鉄同志の接触がおこっていたことを意味する。このような鋳鉄の転移はニッケルに対するよりも、コンスタンタンに対する方がわずかに多い。鋳鉄の融点としては低い温度しか測定されない最大の原因は、鋳鉄の転移によって一部で鋳鉄同志の接触がおこっていることによると考えられる。溶融に起因する白色の硬化層は既に 1.64 m/sec で生じる (Fig. 3) にもかかわらず、温度は $700 \sim 900^\circ\text{C}$ しか記録されていない。この速度ではニッケル、コンスタンタンの摩擦も相当あり、摩擦面の観察によっても鋳鉄の転移はないと考えられるので、Fig. 6 に示す熱起電力の平均的表示によるもので、融点に達している真実接触点の一部にすぎないことがわかる。

Fig. 7 Variation of the maximum flash temperature and the average temperature of the sliding surface with sliding speed

摩擦面の平均温度は真実接触点を支える部分の温度、あるいは真実接触点の初期温度として、摩擦と密接に関係していると考えられる。本実験では生じていないが、高速で摩擦が増大する現象は平均温度の上昇で説明される⁽⁹⁾。真実接触点の温度の計算においても、平均温度は大きな意味をもつであろう⁽¹⁰⁾。

測定された最高閃光温度と摩擦の関係を Fig. 8 に示す。縦軸は単位荷重、単位摩擦距離当りの摩擦量 (比摩擦量) で

Fig. 8 Relation between the wear rate per unit load and the maximum flash temperature

示してある。相手材、摩擦条件に関係なく、鋳鉄の摩擦は真実接触点の温度が $200 \sim 600^\circ\text{C}$ で多く、摩擦の極大は $300 \sim 400^\circ\text{C}$ で生じている。これは軸受鋼、高速度鋼について、計算で求めた真実接触点の温度と摩擦の関係⁽¹¹⁾とよく一致する。真実接触点の温度が 600°C 以上になると、温度の上昇とともに摩擦は急激に減少し、全接触点が融点に達する状態になると摩擦は極小になる。しかしこのような状態であっても、摩擦面の平均温度が高くなりすぎると、摩擦は増大する⁽⁹⁾。摩擦は比摩擦量で表示しても、真実接触点の温度だけでは説明できない。相手材に関係なく、比較的低温では荷重が小さい場合 (本実験では試験片の大きさが一定であるから、接触圧力は荷重に比例する) には比摩擦量が大きく、温度が高くなると逆に荷重が大きい時に比摩擦量が多い。荷重の増大は真実接触面積を大きくして摩擦を増大させること、および摩擦熱を多くして温度を上昇させる効果以外に、接触部の変形、破壊に対しても何らかの影響をおよぼすのであろう。

Fig. 2 と Fig. 7 を比較すると、摩擦が極大になる以上の速度では、速度とともに摩擦は減少し、一方最高閃光温度は上昇して、 6 m/sec 以上では両方の値ともほぼ一定になっている。鋳鉄摩擦面に白色の硬化層が発生する 1.64 m/sec 以上の速度について、摩擦率 W と最高閃光温度 $T(^{\circ}\text{K})$ の関係を Fig. 9 に示す。白色の硬化層は溶融に起因するのであるから、この速度範囲では真実接触点の少なくとも一部は融点に達しているが、Fig. 6 の熱起電力の平均的表示によって低い温度しか測定されない。なお高速では Fig. 4 に示すように、摩擦中に実際は接触していない時間があるので、接触抵抗測定から求めた真実摩擦距離当りの摩擦量で摩擦率を計算している。 W_0, T_0 は 6 m/sec 以上で一定になった W, T である。前述のように、熱起電力法による閃光温度の測定には種々の問題があり、測定された最高閃光温度の正確な定義はできないが、しかし接触部の一部で

(11) 佐田登志夫：日本機械学会論文集，25 (1959)，227。

(9) 岡林邦夫，川本 信：機械の研究，24 (1972)，1196。

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

Fig. 9 Relation between the wear rate and the maximum flash temperature, in a state where white hardened layers occurred on the sliding surface. T , maximum flash temperature ($^{\circ}\text{K}$). W , wear per actual sliding distance. T_0 and W_0 , T and W kept constant at sliding speeds above 6 m/sec

溶融がおこる摩擦条件での摩耗との間には一定の関係

$$\log W/W_0 = C(1 - T/T_0)^2$$

が成立している。 W_0 は接触圧力および相手材によって決まる定数、 C は相手材によって決まる定数になっている。 W_0 , C と摩擦条件、相手材との関係については、さらに詳細な実験を行なう必要があり、またこの実験式の物理的意味については解析ができていないが、摩耗を定量化する一つの端緒になると考えられる。

閃光温度の測定は技術的にもむづかしく、組合せる材料にも制限があるために、実用機械の摩擦部分での測定は非常に困難である。真実接触点の温度の計算式は多数提案されている。すべり摩擦については Jaeger の式⁽¹²⁾が基本となっており、これを簡略化した Archard の式⁽¹³⁾がよく用いられる。計算に際しては、材料の機械的性質、物理的性質として、どこかの温度での値を採用するかが大きな問題である。摩擦熱によって真実接触点だけでなく、摩擦面全体あるいは内部も温度が上昇するので、常温でのこれらの値を使うことはできない。摩擦面の平均温度は真実接触点を支える部分、あるいはその初期温度と考えられるので、この温度での値を用いて計算するのが適当であろう。この方法についても種々の疑問が指摘されているが、大きな間違いはない⁽¹⁰⁾。Fig. 10 は鋳鉄とニッケルの組合せについて、リングとピンの摩擦面の平均温度が等しいと仮定して、その温度での機械的性質、物理的性質の値で Jaeger の式によって計算した真実接触点の温度と実測値との比較である。実測値と計算値の速度に対する上昇の傾向は類似しているが、絶対値は必ずしも一致していない。とくに

2 m/sec 前後での差が大きい。計算式の導出および計算に必要な材料の性質を採用する際の仮定に問題があることはもちろんであるが、摩擦係数のとり方にも原因があると考えられる。最高温度は摩擦係数が最大になった時に生じるはずであるが、瞬間的に生じる動的な力を正確に測定することはむづかしいので、平均の摩擦係数で計算している。現段階では真実接触点の温度の計算には困難な問題があるが、これの正確な計算ができれば、Fig. 8, 9 の結果から、摩擦条件をパラメーターとして摩耗の定性的な傾向を予測するだけでなく、定量的な計算が可能になるかもしれない。

Fig. 10 Comparison of the flash temperatures obtained from measurement and calculation according to Jaeger's equation

Fig. 11 は摩擦面の平均温度と摩耗の関係である。これだけを見ると、平均温度が高くなるほど摩耗は減少すると結論されることになるが、これは見掛け上のことにすぎないと考えられる。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 16~100 m/sec の高速

Fig. 11 Relation between the wear rate and the average temperature of the sliding surface

(12) J. C. Jaeger : Proc. Roy. Soc., N.S.W., **56** (1942), 203.

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

では、鋼の摩耗は平均温度が約200°Cまではこの温度にほとんど関係なく、それ以上になると平均温度とともに急に多くなり、80 Ni-20 Cr 合金の摩耗は平均温度が上昇するにつれて多くなっている⁽¹⁴⁾。Fig.11では平均温度の上昇とともに摩耗が減少するように見えるが、これは平均温度の上昇の効果ではなく、それにともなう閃光温度の上昇によって真実接触点が溶融するためと考えられる。本実験では試験片の形状が一定であるから、平均温度と閃光温度は互に対応して変化するが、何らかの方法で閃光温度を融点あるいはそれに近い高温で一定に保ち、平均温度だけを変化させるならば、これが低い方が摩耗は少ないであろう。試験片加熱による摩耗試験⁽¹⁵⁾から、平均温度が500°C以上になると、鋼と同様に平均温度の上昇とともに摩耗は急激に多くなると推定される⁽⁹⁾。鋳鉄の摩耗が急激に多くなり始める摩擦面の平均温度が鋼よりも高いのは、組織中の黒鉛が固体潤滑剤として作用して焼付きを防止しているためと考えられる。摩擦熱によって真実接触点の温度が200~300°C以上になる摩擦条件では、閃光温度が融点あるいはそれに近い高温に達して、平均温度が低い時、つまり真実接触点だけが非常に軟化または粘性体化して、それを支える下地では十分な強度が保持されている状態で摩耗は最も少なくなると考えられる。

最高閃光温度と摩擦面に占める硬化層の割合の間にも、Fig.12のごとく一定の関係が認められる。硬化層が生成し

Fig.12 Relation between the proportion of the area occupied by white hardened layers to the sliding surface and the maximum flash temperature

ているのは、接触部の一部では溶融がおこっていることを示すものであるが、熱起電力法による閃光温度の測定では真実接触点間の平均的な値しか測定されないで、硬化層の生成が少ない場合には低い温度しか測定されない。Fig.9のように摩耗は $(1-T/T_0)$ の関数として表わしても相手材によって異なるが、硬化層の占める割合は相手材にもよらず、また接触圧力にも無関係である。これから硬化層の発生は全く真実接触点の温度によることが明らかである。

IV. 結 言

鋳鉄とニッケル、コンスタンタンとの組合せで、真実接触点の温度(閃光温度)と摩擦面の平均温度を測定し、鋳鉄の摩耗との関係を検討した。熱起電力法で測定した閃光温度は個々の真実接触点の温度や、真実接触点中の最高温度を示すものではなく、同時に接触する多数の真実接触点の平均的な温度を示すと考えられる。摩擦面間で材料の転移がある場合には、一部で同材同志の接触がおこる可能性があるので注意しなければならない。このように熱起電力法で測定した閃光温度を正確に定義することはできないが、摩耗との間に密接な関係が認められた。鋳鉄の摩耗は最高閃光温度が300°C前後で最も多く、これより温度が上昇するにしたがって減少し、全接触点が鋳鉄の融点に達するようになると摩耗は最少になる。真実接触点の一部で溶融がおこって鋳鉄摩擦面に白色の硬化層が生成する摩擦条件では、摩耗と最高閃光温度との間に定量的な関係が成立しており実験式が得られた。また最高閃光温度と硬化層が摩擦面に占める割合との間にも一定の関係が認められた。このように熱起電力法による最高閃光温度の測定は、摩耗現象を解明する有力な手掛りになると考えられる。摩擦面の平均温度が500°C以下であれば、鋳鉄には摩擦面の軟化による激しい焼付きはおこらない。摩擦熱の発生が多い高速摩擦では、真実接触点が融点あるいはそれに近い高温になって非常に軟化もしくは粘性体化し、その真実接触点を支える部分が十分な強度を有する比較的低温の状態では、摩耗は最少になると考えられる。摩擦面の平均温度は激しい焼付きが生じるかどうかを判断するための基準として大きな意味をもつと考えられる。摩耗と温度の関係を論じるに際しては、その温度が真実接触点の温度であるか、摩擦面の平均温度であるかをはっきりしておかなければ混乱をきたすであろう。

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、中川電機(株))池田真治郎君に厚く感謝する。

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

(15) 楠瀬四郎：鋳物, **38**(1966), 846.