熱的摩耗状態における球状黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗特性*

平佐多 敬二^{*1}, 林 和 宏^{*1}, 松 浪 広 高^{*2}Friction and Wear of Spheroidal Graphite Cast Iron
in the State of Thermal WearKeiji HIRASATA^{*3}, Kazuhiro HAYASHI and Hirotaka MATUNAMI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka Sangyo University,
3-1-1 Nakagaito, Daito-shi, Osaka, 574-8530 Japan

To clarify the dry friction and wear characteristics of spheroidal graphite cast iron under high sliding speed and high contact pressure, especially those in the state of thermal wear, the wear tests of sliding a cast iron pin on a mild steel disk were carried out by using the pin-on-disk type test rig. The variations of the friction force, the wear rate and the temperature rise with the sliding distance were experimentally measured and the relations among them were clarified. The friction and wear of spheroidal graphite cast iron pin are strongly influenced with the friction-induced temperature rise. Its wear rate changes in three steps as the increment of sliding distance because of the changes of its hardness by temperature rise (the first, the second and the third wear regions in order). The thermal conductivity and the hardness change by temperature rise of spheroidal graphite cast iron give the effects on these three step changes of wear. Meanwhile, the coefficient of friction decreases in the first and the second wear regions as the sliding distance increases, and it finally converges to some constant value in the third wear region. From the experimental results, some empirical formulae giving the relations between the coefficient of friction and the wear rate versus the sliding conditions were derived.

Key Words: Dry Friction, Thermal Wear, Coefficient of Friction, Wear Rate, Spheroidal Graphite Cast Iron, High Sliding Speed, High Contact Pressure

1. 結 言

鑄鉄は、ブレーキシュー材として広く用いられており、その摩擦・摩耗特性については、これまで多くの研究がなされている^{(1)~(10)}。しかしながら、その多くは比較的穏やかなしゅう動条件下におけるものであり、ある種の非常ブレーキにおいて見られるような高速・高面圧の過酷なしゅう動条件下での摩擦・摩耗特性の研究はあまり行われておらず、未解明な部分も多く残されている。高速・高面圧しゅう動下では摩擦熱による温度上昇が激しく、温度上昇による硬度の変化や熱伝導性などの熱的性質が摩擦・摩耗特性に大きな影響を与える。

著者らは先に普通鑄鉄(FC 250 相当)を用いて、無潤滑・高速・高面圧しゅう動条件下での摩擦・摩耗特性を実験的に明らかにした⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。そこで本研究では、

普通鑄鉄よりも常温における硬度は高いが、熱伝導性に劣る球状黒鉛鑄鉄(FCD 800 相当)の高速・高面圧しゅう動条件下での摩擦・摩耗特性を実験的に明らかにするとともに、普通鑄鉄との比較から硬度や熱伝導性の影響について検討する。そのために、高い剛性を有するピンオンディスク式の試験機を設計・製作し、しゅう動材としては、ピンに球状黒鉛鑄鉄(FCD 800 相当)を、回転円板に軟鋼(SS 400 相当)を用いてしゅう動実験を行い、摩擦力、摩耗量、摩耗速度や摩擦熱による温度変化を測定し、それらの関係について検討する。また、摩擦・摩耗状態をより詳しく見るために、しゅう動下の摩擦面近傍の状態を高速度カメラにより観察するとともに、試験後の供試材の断面組織を顕微鏡により観察して検討する。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置 本実験で用いたピンオンディスク式摩擦・摩耗試験機を図1に示す。試料ピンはホルダを介してロードセルに固定されており、エアシリンダによって回転円板面に所定の面圧で押し付けられ

* 原稿受付 2003年6月17日。

^{*1} 正員、大阪産業大学工学部(☎ 574-8530 大東市中垣内3-1-1)。^{*2} 准員、大阪産業大学大学院工学研究科。

E-mail: hirasata@mech.osaka-sandai.ac.jp

る。高面圧での試験を行うため、試験中に円板の回転速度が変動しないように、十分な慣性モーメントをもつフライホイールおよび十分な駆動トルクをもつモータを使用している。接触力および摩擦力は、ホルダを介して試料ピンに取付けられたロードセルによって同時に測定できるようになっている。そして、これを搭載したしゅう動台は水平方向(円板半径方向)に移動可能な構造となっており、回転円板への試料ピンの接触半径位置を変化させることにより、しゅう動速度を変えられるようにしてある。供試材の形状および寸法を図2に、また化学成分を表1に示す。試料ピンおよび回転円板の表面粗さ Ra はそれぞれ $0.3\ \mu\text{m}$ および $1.2\sim 3\ \mu\text{m}$ である。回転円板材として軟鋼(SS 400 相当)を用いたのは、対象としている機器においてこれが一般に用いられていることによる。

2.2 実験方法 実験は常温・大気中において無潤滑で行った。試料ピンおよび円板面をアセトンで十分に洗浄し乾燥させた後、円板を一定速度で回転させた状態で、試料ピンをエアシリングによって所定の接触面圧で回転円板に押し付けてしゅう動させ、試料ピンの摩耗長さがあらかじめ定めた値(本実験では2 mm)に達した段階で、マイクロスイッチを作動させピンを後退させて回転円板から離して実験を終了し

た。接触面圧および摩擦力はホルダを介して試料ピンに取付けられたロードセルにより同時に測定される。また、試料ピンの摩耗長さはホルダ上に取付けた渦電流式非接触変位計により測定した。さらに、試料ピンの温度変化はファイバ式放射温度計(測定可能範囲は $250\sim 1\,000^{\circ}\text{C}$)を用いて測定した。温度の測定位置は、図3に示すように試料ピンのしゅう動入口側側面であり、集光径1 mmの円形部分の平均温度として測定される。

Table 1 Chemical components of pin and disk

	pin	disk
Material	Spheroidal graphite cast iron (FCD800)	mild steel (SS400)
Chemical components(wt%)		
C	3.880	0.140
Si	2.800	0.230
Mn	0.110	0.610
P	0.020	0.011
S	0.007	0.005
Mg	0.039	
Fe	less	less

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Dimensions of pin and disk

Fig. 3 Measurement of temperature

また、試料ピンの摩擦・摩耗現象をさらに詳しく見るために、しゅう動試験中のしゅう動面近傍のようすを、側面より高速度カメラにて観察するとともに、実験終了後の試料ピン断面の顕微鏡による観察を行った。

しゅう動条件は、接触面圧 $P=29.4\sim 98.0$ MPa、しゅう動速度 $V=2\sim 15$ m/s である。

3. 実験結果と考察

3・1 摩擦・摩耗特性、温度のしゅう動距離による変化 試料ピンの摩擦・摩耗特性および側面温度のしゅう動距離による変化を見た実験結果の一例を図4に示す。しゅう動条件は、接触面圧 $P=49.0$ MPa、しゅう動速度 $V=8$ m/s である。摩耗特性は試料ピンの摩耗長さによって、また摩擦特性は摩擦力を接触力で除して求めた摩擦係数によって評価している。この結果から、次のようなことがわかる。試料ピンの摩耗は、しゅう動初期は比較的穏やかであるが、その後急激に増大する。そして、ある時点から再び摩耗速度が減少し、安定した定常状態となる。このように、球状黒鉛鑄鉄の摩耗状態は、しゅう動距離とともに3段階に変化する。そこで、これらを順に第1摩耗領域、

Fig. 4 Variations of friction, wear and temperature of cast iron pin with sliding distance ($V=8$ m/s, $P=49.0$ MPa)

第2摩耗領域および第3摩耗領域と呼ぶことにし、第1から第2および第2から第3摩耗領域への移行点を、それぞれ第1遷移点および第2遷移点と名づける。次に摩擦特性について見ると、摩擦係数はしゅう動開始時に高い値を示し、その後、第1摩耗領域および第2摩耗領域ではしゅう動距離の増加とともに低下していく。そして、第3摩耗領域に達すると、摩擦係数はほぼ一定の安定した状態となる。一方、試料ピンの温度変化(放射温度計で測定したピン側面の温度変化)を見ると、試料ピンの温度はしゅう動開始直後から急激に上昇するが、その上昇速度はしゅう動距離の増加とともに減少する。第2遷移点を過ぎて第3摩耗領域に入っても、温度上昇は続くが、しゅう動距離の増加とともに、その上昇速度は急速に減少して穏やかなものとなり、ほぼ一定値に落ち着いていくように見える。なお、他のしゅう動条件に対する実験結果においても、同様の傾向が見られた。

このような摩擦・摩耗特性の変化には、大量の摩擦熱による激しい温度上昇のために、しゅう動材の硬度が大きく変化することが影響していると考えられる。そこで、供試材の硬度の温度による変化を高温硬度計を用いて測定した。その結果を図5に示す。球状黒鉛鑄鉄の硬度は、 400°C あたりまでに温度上昇とともに緩やかに低下するが、 400°C を過ぎると温度上昇により硬度低下が激しくなることがわかる。軟鋼についても同様の傾向にある。ただし、本しゅう動実験においては、回転円板面(軟鋼)のしゅう動部の温度上昇はたかだか 10°C 以下であった。この回転円板面の温度上昇は、試料ピン通過直後の円板面しゅう動部の温度を赤外線熱画像処理装置により測定した。円板面しゅう動部の最表面温度は、この測定値よりは高いであろうが、それでも硬度が顕著に変化(低下)するほどの上昇

Fig. 5 Variations of hardness of cast iron and mild steel with temperature

ではないと考えられ、回転円板側の硬度変化は無視できるものとして扱える。したがって、実験開始前の常温状態では、鑄鉄ピンのほうが軟鋼円板よりもはるかに硬いが、しゅう動開始後はしゅう動距離の増加とともに試料ピンの温度が上昇し、硬度が低下して、両者の硬度差は減少していく。そして、試料ピンの温度がおよそ 600°C で両者の硬度が逆転することになる。このことを考慮に入れて図4の実験結果を見ると次のようなことがいえる。しゅう動開始からしばらくは、摩擦係数が大きく、大量の摩擦熱を生じて、試料ピンの温度は急激に上昇するが、球状黒鉛鑄鉄の熱伝導率が低いことから、高温部分はしゅう動面の極近傍に限られ、しかもまだ十分に軟化するほどの温度にはなっていない。このために、試料ピンの摩耗状態は比較的穏やかなものである(第1摩耗領域)。その後、しゅう動が進むとともに試料ピンの温度はさらに上昇し、また熱伝導によって高温部分も広がるために、急激な摩耗状態へと移行する(第2摩耗領域)。図4を見ると、第2摩耗領域での温度は $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ であるが、これは前述したように、試料ピン側面の1mm円部分(図3)の平均温度であり、しゅう動面のピンの温度はこれよりも高いと考えられる。このようにしゅう動距離とともに

に試料ピンの温度が急激に上昇し、その硬度が低下していくとともに摩擦係数も低下する。その後、第2摩耗領域における激しい摩耗による大量の熱の除去や摩擦係数の低下による摩擦発熱量の減少などで、熱的平衡状態に達して(第2遷移点)、摩耗状態も定常状態となり、摩擦係数もほぼ一定値に落ち着く(第3摩耗領域)。これらの摩耗状態の変化をもう少し詳しく見てみると、しゅう動初期の第1摩耗領域、特にしゅう動開始直後は、試料ピンの硬度が回転円板面のそれよりもかなり高いために(図5)、後出の図7に見られるように、ピン前端部が円板面を掘りおこす形で摩耗が生じていることがわかる。これに対して、それにつづく第2、第3摩耗領域での摩耗は、図6および図7に見られるように、大量の摩擦熱により試料ピンのしゅう動面近傍の硬度が急激に低下して流動化し、しゅう動面から除去される形で進んでいることがわかる。さらに、先に検討した普通鑄鉄(FC 250 相当)の摩耗特

Fig. 6

Fig. 7 Observation photographs near the sliding surface under sliding speed $V=4\text{ m/s}$ and contact pressure $P=49.0\text{ MPa}$

性⁽¹¹⁾⁽¹²⁾との比較から以下のことがわかる。普通鋳鉄(FC 250 相当)は、本実験で用いた球状黒鉛鋳鉄に比べて、常温における硬度はかなり低く[供試円板(軟鋼)よりは高い]、熱伝導率は約2倍である。そのために、球状黒鉛鋳鉄ピンの場合にはしゅう動初期における摩耗速度は、掘りおしの効果のために、普通鋳鉄ピンのものよりも大きい。また、普通鋳鉄の摩耗状態の変化が、しゅう動初期の摩耗速度の小さいマイルド摩耗状態からしゅう動距離が増して摩耗が激しくなるシビア摩耗状態へと進む2段階的なものであったのに対して、球状黒鉛鋳鉄の場合には3段階的に変化したが、これは熱伝導性の低さが影響したものである。

第3摩耗領域での摩耗状態が第2摩耗領域での摩耗状態よりも穏やかになる理由は以下のように説明できる。図6(a)、(b)は、実験に使用した試料ピン断面の顕微鏡写真である。図6(a)は第2摩耗領域にあるときに試料ピンを回転円板から離して実験を終了させたときの試料ピンの断面写真であり、図6(b)の第3摩耗領域において実験を終了させたときのものである。いずれも上部にある黒色部分との境が摩擦面であり、円板のしゅう動方向は図6(a)中に示されている。いずれの写真においても、摩擦面近傍の試料ピンの組織が回転円板のしゅう動方向に引っ張られて流れているのが見られるが、この流動層の厚さを見てみると、第3摩耗領域におけるもののほうが第2摩耗領域におけるものよりも薄くなっていることがわかる。これはしゅう動初期の大きな摩擦係数によってしゅう動面に発生した大量の摩擦熱が、球状黒鉛鋳鉄の熱伝導の低さのために試料ピンしゅう動面の極近傍に蓄積され、温度上昇による高温部分がしゅう動面の極近傍に限られていたものが(第1摩耗領域)、継続的な大量の摩擦熱の発生と時間経過による熱伝導により高温部分が急増し、軟化して流動しやすくなった層(流動層)が過渡的に厚くなって摩耗速度が急増した(第2摩耗領域)。このように過渡的に厚くなった流動層が除去された後、摩擦係数の低下による摩擦熱の減少とあいまって、熱的平衡状態に達し、流動層の厚さが減少して摩耗速度も小さくなる(第3摩耗領域)。また、大気中における高温状態での摩耗では材料の酸化の影響も考えられるが、本実験ではしゅう動時間が数秒以内と非常に短いこともあって、材料の酸化による影響については検討していない。

以上の摩耗の進行過程をより直視的に知るために、高速度カメラを用いてしゅう動面近傍を観察した。その結果の一例を図7に示す。観察結果から以下のことが知られた。ピンが回転円板に接触した瞬間はピンの

前端部が回転円板面を削る現象が見られたが[図7(a)]、その後、ピン先端側から掘りおしによる摩耗片が断続的に発生し飛散するとともに、ピン後端部からはピン材の微細な摩耗粉が飛散するのが見られた[図7(b)]。第1遷移点を過ぎるとこれらの摩耗粉の飛散は急速に減少し、ピン側面および後端部から、軟化したピン材が流れ出るような状態となって摩耗が進み[図7(b)、(c)]、実験終了にいたる[図7(d)]。流れ出たピン材(塑性流動物と呼ぶ)は飛散せず、ピン側面および後端部に付着してしゅう動とともに成長した。なお、図7において、白く見えているのが試料ピンであり、回転円板との摩擦面を白線で示した。円板のしゅう動方向は図7(a)中に示されている。

3・2 摩擦係数 摩擦係数は、図4に示されるよ

(a) Variation of coefficient of friction
(at the start point of sliding)

(b) Variation of coefficient of friction
(at the first transition point)

(c) Variation of coefficient of friction
(at the second transition point)

Fig. 8

うに、しゅう動初期は高い値を示すが、しゅう動距離の増加とともに低下し(第1および第2摩耗領域)、第3摩耗領域に達するとほぼ一定の安定した状態となる。しゅう動初期につねに高い摩擦係数を示すのは、球状黒鉛鋳鉄ピンの常温近傍での硬度が軟鋼円板面のそれよりもはるかに高く、掘りおこし効果によるものと考えられ、球状黒鉛鋳鉄よりも硬度が低い普通鋳鉄の場合にしばしば見られた、しゅう動初期に低い摩擦係数を示す現象⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は見られなかった。そこで、しゅう動開始時、第1遷移点および第2遷移点での摩擦係数(μ_0 , μ_1 および μ_2) がしゅう動条件によっていかに変化するかを見たものが図8(a)~(c)である。これらの摩擦係数はいずれもしゅう動速度に依存し、しゅう動速度の増加とともに低下するが、接触面圧にはほとんど影響されないことがわかる。図8中のデータは同一条件での複数回の実験結果の平均値であり、実線はデータに最小二乗法を適用して引かせたもので、これから次の実験式が得られる。

$$\mu_i = a_i \cdot V^{b_i}, (i=0, 1, 2) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $a_0=0.76$, $a_1=0.60$, $a_2=0.46$, $b_0=-0.35$, $b_1=-0.32$, $b_2=-0.29$ である。

この結果を見ると、 μ_0 , μ_1 および μ_2 のしゅう動速度への依存の仕方にはあまり大きな差がないことがわかる。

3・3 摩耗速度 摩耗特性の評価には一般に次式で定義される比摩耗量 W が用いられる。

$$W = v / (F \cdot L) \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 v は摩耗体積、 F は接触荷重、 L はしゅう動距離である。今の場合、試料ピンの断面積 A は一定であるから、 $v = A \cdot l$, $F = A \cdot P$ であり、式(2)は

$$W = l / (P \cdot L) \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \cdots \cdots (3)$$

となる(l は試料ピンの摩耗長さ)。比摩耗量としゅう動距離の関係を求めた一例を図9に示す。ところで、ここで取扱っているような熱的摩耗を伴う激しい摩耗

状態を評価するのに、この比摩耗量は心ずしも適切ではない。そこで、先報において、著者らがこのような激しい摩耗状態を評価するために新しく導入した、修正比摩耗量と名づけた物理量 W_m を用いることにする。この W_m は、

$$W_m = dv / (F \cdot dL) \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \cdots \cdots (4)$$

で定義され、比摩耗量 W と同じ次元をもつ物理量である。ここで、 dv はしゅう動距離の増分 dL による摩耗体積の増分である。式(4)を変形すると

$$W_m = dl / (P \cdot dL) = \dot{l} / (P \cdot V) \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \cdots \cdots (5)$$

となり、修正比摩耗量 W_m は試料ピンの摩耗速度 $\dot{l}$ ($=dl/dt$, t は時間)としゅう動の厳しさの目安である PV 値の比となることがわかる。そこで、図9で示された結果を、修正比摩耗量としゅう動距離の関係として整理しなおすと図10のようになる。図10から、修正比摩耗量、言い換えれば摩耗速度は、第1, 第2, 第3の各摩耗領域においてはしゅう動距離に関係なく一定であり、第1摩耗領域から第2摩耗領域に移行すると摩耗速度が急激に増大し、第3摩耗領域に達すると再び摩耗速度が減少して安定状態になることが明快に見てとれる。各摩耗領域における修正比摩耗量としゅう動条件との関係を図11(a)~(c)に示す。

図11中のデータはそれぞれ同一しゅう動条件下での複数回の実験結果の平均値であり、実線はそれらに最小二乗法を用いて引かせたものである。図11から、いずれの摩耗領域においても、修正比摩耗量は接触面圧 P には影響されず、しゅう動速度 V に依存してしゅう動速度が大きくなるとともに減少することがわかる。図11中の実線から、各摩耗領域における修正比摩耗量 W_{mi} ($i=1, 2, 3$) に対して以下の実験式が得られる。

$$W_{mi} = a_i \cdot V^{\beta_i}, (i=1, 2, 3) \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \cdots (6)$$

ここで、 $a_1=2.00$, $a_2=17.1$, $a_3=23.4$, $\beta_1=-0.17$,

Fig. 9 Relation between specific wear amount and sliding distance

Fig. 10 Relation between modified specific wear amount and sliding distance

(a) Modified specific wear amount in the first wear region

(c) Modified specific wear amount in the third wear region

Fig. 11

$\beta_2 = -0.95$, $\beta_3 = -1.24$ である。式(5)に式(6)を用いると、第1、第2および第3摩耗領域における試料ピンの摩耗速度(ピン長さの減少速度) i_i ($i=1, 2, 3$) は次式で与えられることになる。

$$\dot{l}_i = \alpha_i \cdot P \cdot V^{1+\beta_i}, \quad (i=1, 2, 3) \quad [\text{mm/s}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、接触面圧 P [MPa]、しゅう動速度 V [m/s] である。式(7)より、試料ピンの摩耗速度は、すべての摩耗領域において接触面圧に比例することがわかる。また、しゅう動速度に対する依存の仕方は各摩耗領域によって異なり、第1摩耗領域ではしゅう動速度の増大とともに増加するが、第2摩耗領域ではしゅう動速度にはあまり依存しなくなる。そして、第3摩耗領域ではしゅう動速度が増大すると逆に減少することがわかる。

3・4 温度上昇 しゅう動中の試料ピンの温度変

(a) Temperature rise at the first transition point

(b) Temperature rise at the second transition point

Fig. 12

化は、ファイバ式放射温度計を用いて測定された。測定された温度は、2・2節で述べたように、試料ピンのしゅう動部入口側側面の、集光径 1 mm の円形部分の平均温度である。そこで、第1遷移点(第1摩耗領域から第2摩耗領域への移行点)および第2遷移点(第2摩耗領域から第3摩耗領域への移行点)における試料ピンの温度上昇がいかなるものかを、温度上昇と密接に結びついている PV 値との関係として整理したものが図 12(a), (b) である。どちらの遷移点においても、 PV 値の増大とともに温度上昇は大きくなるが、その変化はそれほど著しいものではない。第1遷移点での温度上昇 H_1 は 400~500°C であり、第2遷移点での温度上昇 H_2 は 500~700°C 程度である。これらのことを図 5 の供試材の温度による硬度変化の測定結果と合せてみると、400~500°C は試料ピンの硬度が急激に低下し始める温度域に対応しており、また 500~700°C は試料ピンの硬度がさらに激しく低下するとともに、回転円板面の硬度と逆転する温度域に対応していることがわかる。なお、図 12 中の実線は実験データに最小二乗法を適用して引かせたものであり、それぞれ次の数式で与えられる。

$$H_1 = 3.1 \times 10^2 \cdot (PV)^{0.07} \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$H_2 = 3.6 \times 10^2 \cdot (PV)^{0.08} \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots\dots\dots (9)$$

4. 結 言

無潤滑、高速・高面圧しゅう動条件下での、球状黒

鉛鋳鉄の摩擦・摩耗特性をピンオンディスク式試験機を用いて、実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) ここで取扱っているような過酷なしゅう動条件下では、摩擦・摩耗は大量の摩擦熱による激しい温度上昇で生じる硬度変化に大きく影響される。

(2) 試料ピンである球状黒鉛鋳鉄の摩擦面近傍の温度は、しゅう動開始直後から急激に上昇するが、しゅう動距離が増すにつれて温度変化は次第に穏やかとなり、一定値へと落ち着く。

(3) 摩耗状態は、しゅう動距離とともに大きく3段階に変化する。すなわち、しゅう動初期は試料ピンである球状黒鉛鋳鉄の温度上昇による硬度低下も小さく、片状の摩耗粉を伴う比較的穏やかな摩耗状態であるが(第1摩耗領域)、その後、蓄積された摩擦熱による激しい温度上昇のために試料ピンの硬度が急激に低下し、摩擦面近傍には塑性流動物が生成され、その一部は側面から押し出され、修正比摩耗量、言い換えれば摩耗速度は急増する(第2摩耗領域)。さらにしゅう動が進むと、摩耗粉は微細となり、その量も減少し、摩擦面の周囲からはさらに軟化した流動物が流れ出るように排出される。この激しい摩耗による摩擦熱の除去や摩擦係数の低下による発熱量の減少などから熱的平衡状態に達して、修正比摩耗量(摩耗速度)は低下して定常状態となる(第3摩耗領域)。この摩耗状態の3段階の変化には、先の3章において考察したように、球状黒鉛鋳鉄の熱伝導性と硬度の温度変化の仕方が深くかかわっている。

(4) 第1遷移点での試料ピンの温度上昇は400~500°Cで、これは球状黒鉛鋳鉄の硬度が急激に低下する温度域に対応しており、また第2遷移点での温

度上昇は500~700°Cで、これは試料ピン(球状黒鉛鋳鉄)と回転円板(軟鋼)の硬度が逆転する温度域に対応している。

(5) 試料ピンの摩耗速度は、いずれの摩耗領域においても接触面圧に比例して増大するが、しゅう動速度への依存の仕方は各摩耗領域で異なる。

(6) 摩擦係数は、しゅう動初期、高い値を示すが、しゅう動が進むにつれて減少し(第1および第2摩耗領域)、次第に一定値に落ち着く(第3摩耗領域)。

(7) しゅう動開始時、第1遷移点および第2遷移点における摩擦係数は、いずれも接触面圧にはほとんど依存せず、しゅう動速度に依存し、しゅう動速度の増加とともに減少する。しゅう動速度への依存の仕方には、三者のあいだであまり大きな差はない。

最後に、本研究に対しご協力を賜った三菱電機(株)稲沢製作所に謝意を表す。

文 献

- (1) Takeuchi, E., *Wear*, **19-3** (1973), 267-276.
- (2) Ivusic, V., *Wear*, **74-2** (1981), 307-314.
- (3) Takeuchi, E., *Wear*, **75-2** (1982), 303-312.
- (4) Leach, P. W., *Wear*, **96-2** (1984), 135-142.
- (5) 岡田克己・吉田忠弘・土方明躬, 潤滑, **24-1** (1979), 27-32.
- (6) 岡田克己, 潤滑, **30-10** (1985), 733-738.
- (7) 高沢克朗・辻村太郎・由利三郎, 鋳物, **57-8** (1985), 516-521.
- (8) 辻村太郎・真鍋修二, 鋳物, **59-7** (1987), 421-426.
- (9) Earls, S. W. E., *Wear*, **20-1** (1972), 51-57.
- (10) Kennedy, F. E., *Wear*, **100** (1984), 453-476.
- (11) 林和宏・平佐多敬二・村松英明・杉田和彦, 機論, **61-585**, C (1995), 290-296.
- (12) 林和宏・平佐多敬二・亀中祐司・杉田和彦, 機論, **63-616**, C (1997), 244-249.