

論 文

UDC 539.62 : 669.141.25 : 678.072.073 : 62-233

特殊鋳鋼とプラスチック軸受材との摩擦特性について*

稲敷 直次**・吉岡 正三***・山本 久***

Frictional Properties of Plastics Bearing Materials on Special Cast Steels

Naotsugu INAKAZU, Shozo YOSHIOKA, and Hisashi YAMAMOTO

Synopsis:

The friction tests of variously heat-treated special cast steels against several kinds of plastics bearing materials were carried out, by the use of a friction testing machine in the absence of lubricant.

1) In regard to all the plastics bearing materials employed, with the fine structure of cast steel shaft material the sliding friction showed a lower coefficient of friction, and the coefficient of friction increased with a decrease in the hardness of cast steel shaft material.

2) With P.T.F.E. on all the tested cast steels, the sliding friction showed the lowest value, and the variations of frictional force with time were very small.

3) With nylon and phenolic plastics on cast steels, the coefficient of friction increased with decreasing load and sliding speed in the stable condition. The probable reason for this may be due to thermal properties of plastics and 'stick-slip' process.

(Received Aug. 28, 1972)

1. 緒 言

圧延用ロール材としての特殊鋳鋼の軸受部分におけるすべり摩擦現象を調べるために、回転体としてリング状の特殊鋳鋼試験片に対して、その円周表面に各種プラスチック材を押し付けた状態ですべりを起こさせ摩擦現象を再現した。軸受材としては一般に、銅系合金、錫鉛系合金、Al系合金などの金属または合金が多く用いられているが、本実験では非金属材料の軸受としてプラスチックを用いた。軸受材としてのプラスチックは高い耐摩耗性、特有の自己潤滑性、優れた振動吸収能そして良好な耐食性など、多くの特徴を持つており広く使用されている^{1)~3)}。しかし剛性、熱的特性などに多くの問題があり適切な使用条件を把握することがきわめて重要なポイントとなる。本実験ではプラスチックを熱的特性によつて主要な2つのタイプすなわち熱硬化性と熱可塑性に分類し、前者の例としてフェノール樹脂、後者として、P.T.F.E.、ナイロンを用いた。これらの材料と圧延用ロール材としての特殊鋳鋼との摩擦係数の荷重特性、速度特性、組織の影響などを測定、比較することによつて軸受部分の摩擦現象を考察しようとするものである。

2. 実験方法

2.1 試験機

摩擦試験機は本実験のために試作したもので、乾燥状態で回転リング状の試験片にロード試験片を押し付ける形式のものである。試験装置の概略およびブロック図をFig. 1に示す。回転速度については無段変速機によつて回転数を変えることができ、さらにプーリー径の選択によつて広範囲の速度を得ることが可能である。今回の実験では回転速度を112 rpm (17.6 cm/sec) から1544 rpm (242.4 cm/sec) の間で変化させた。負荷は分銅の数を変えることによつて任意の値が得られる。

摩擦力は上方ロード試験片がリングの回転方向へ引張られる力を荷重変換器で支えその歪として検出され、電磁オッシログラフに記録される。

2.2 供試材

2.2.1 リング試験片

軸材は特殊鋳鋼ロール材でその化学成分をTable 1に

* 昭和46年10月本会講演大会にて発表
昭和47年8月28日受付

** 大阪府立大学工学部

*** 大阪府立大学工学部 工博

示す。

上記成分を含む材料を炉冷、空冷、油焼入、水焼入によつて組織の変化を持たせた。各軸材の熱処理方法と硬

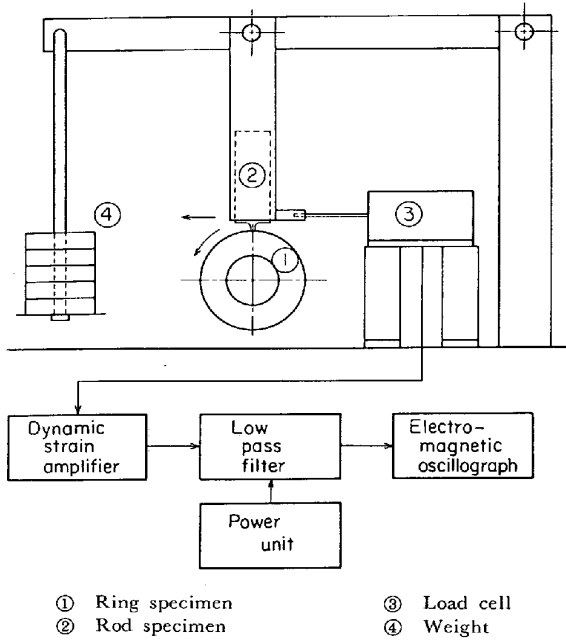


Fig. 1. Schematic and block diagram of the apparatus for friction testing.

度を Table 2 に示す。

顕微鏡組織写真を Photo. 1 に示す。軸材の形状は外径 30 mmφ, 内径 15 mmφ, 幅 8 mm のリング状で、表面は鏡面仕上げとする。(Fig. 2 a)

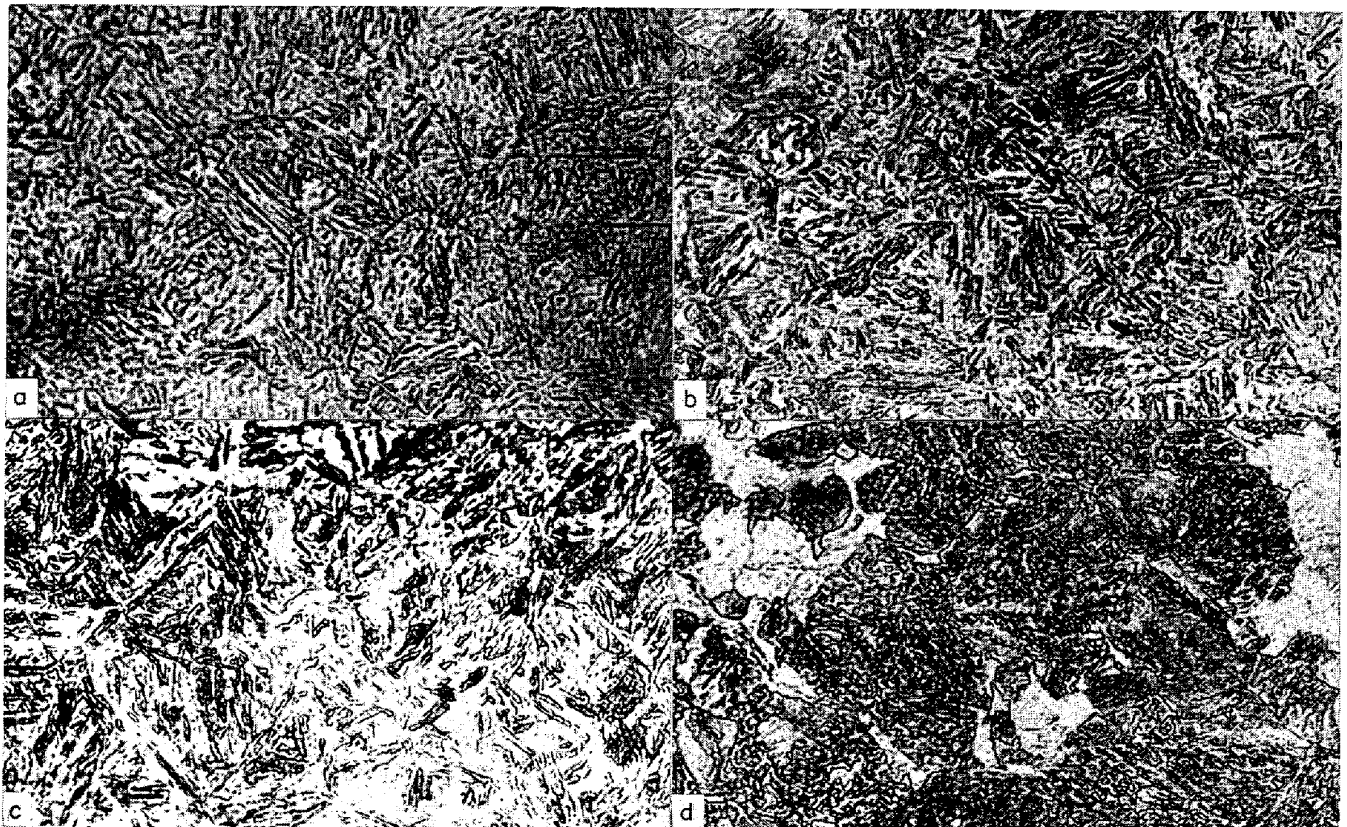
2.2.2 ロッド試験片

軸受材には熱可塑性樹脂として、P.T.F.E およびナイロンを、熱硬化性樹脂としてフェノール樹脂を用いた。各材料の特性は Table 3 に示す。

P.T.F.E には充填材として黄銅を含むもの (Type A) とガラス繊維を含むもの (Type B) を用いた。フェノール樹脂は補強材として摩擦面と平行に綿布を積層させてある。軸受材の形状は Fig. 2 b に示す。試験中接触面積の変動をなくすため、リングに接する先端は細くなっている。なお摩擦面はエメリー紙 04 で統一した。

Table 1. Chemical composition of test material (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.76	0.41	0.68	0.021	0.013	1.58	0.74	0.40



×450 (4/5)

(a) Water quenched cast steel (No 4), (b) Oil quenched cast steel (No 3)
(c) Normalized cast steel (No 2), (d) Annealed cast steel (No 1)

Photo. 1. Microstructures of ring specimen.

Table 2. Heat treatment and hardness.

Specimen No	Heat treatment	Hardness (shore)
1	R T \rightarrow 850°C \times 50 min \xrightarrow{FC} R T	40
2	R T \rightarrow 850°C \times 50 min \xrightarrow{AC} R T	57
3	R T \rightarrow 850°C \times 50 min \xrightarrow{OQ} R T \rightarrow 250°C \times 20 min	72
4	R T \rightarrow 850°C \times 50 min \xrightarrow{WQ} R T \rightarrow 250°C \times 20 min	77

Table 3. Characteristics of plastics.

Characteristic	Material		
	PTEF	Nylon	Phenol
Specific gravity	2.03 ~ 4.0	1.14 ~ 1.17	1.36 ~ 1.43
Tensile strength (kg/cm ²)	100 ~ 270	750 ~ 850	800 ~ 900
Elongation (%)	150 ~ 300	25 ~ 40	—
Izod impact value (kg-cm/cm ²)	15 ~ 20	—	40
Thermal conductivity ($\times 10^{-4}$ cal/cm ² °C sec)	9 ~ 12	5 ~ 6	4 ~ 7
Coefficient of expansion ($\times 10^{-5}$ /°C)	4 ~ 12	8 ~ 10	3 ~ 4
Critical temperature (°C)	260	130 ~ 150	150

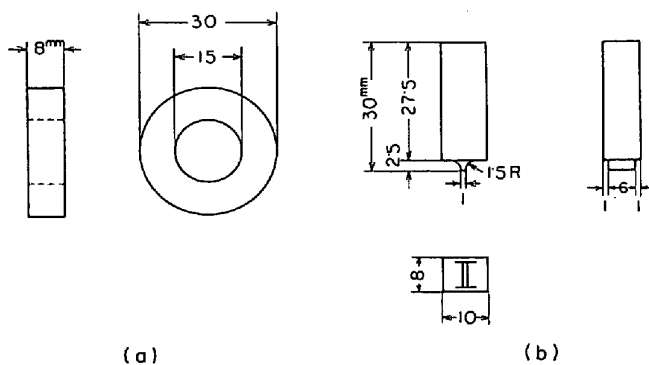


Fig. 2. Shape and dimensions of the ring and rod used for the test.

2.3 実験方法

試験片の組合せは特殊鋳鋼を下方リング試験片とし、P.T.F.E, ナイロン, フェノール樹脂を上方ロッド試験片として試験を行なった。実験開始前にリング試験片はバフ研磨により鏡面仕上げとし、ロッド試験片は摩擦面をエメリー紙 04 で磨き表面を一定の状態に保った。両試験片表面はエチルアルコールで十分に脱脂を行なった。実験開始後は時間をおいて適宜摩擦力を記録した。摩擦面の肉眼的観察, 顕微鏡観察も合せて行なった。実験条件として, 荷重はロードセルの能力および試片の形状によつて制限されるが, ここでは 2875 g 以下で行なった。回転速度は装置の最高速度 1544 rpm とした。摩擦距離は摩擦特性が十分定常状態に到達すると考えられる 20000 m とした。摩擦係数は AMONTONS の関係式 $F = \mu N$ を用いて算出した。

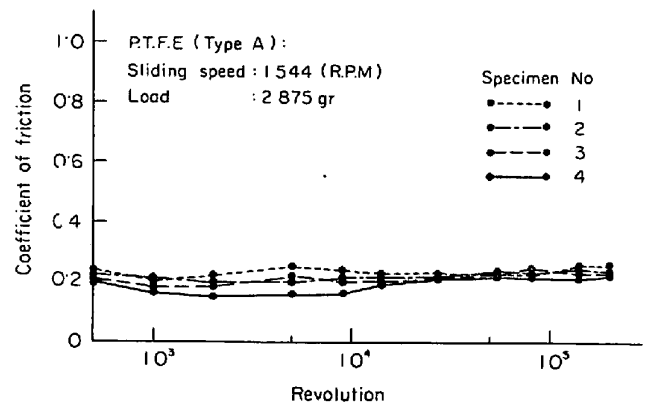


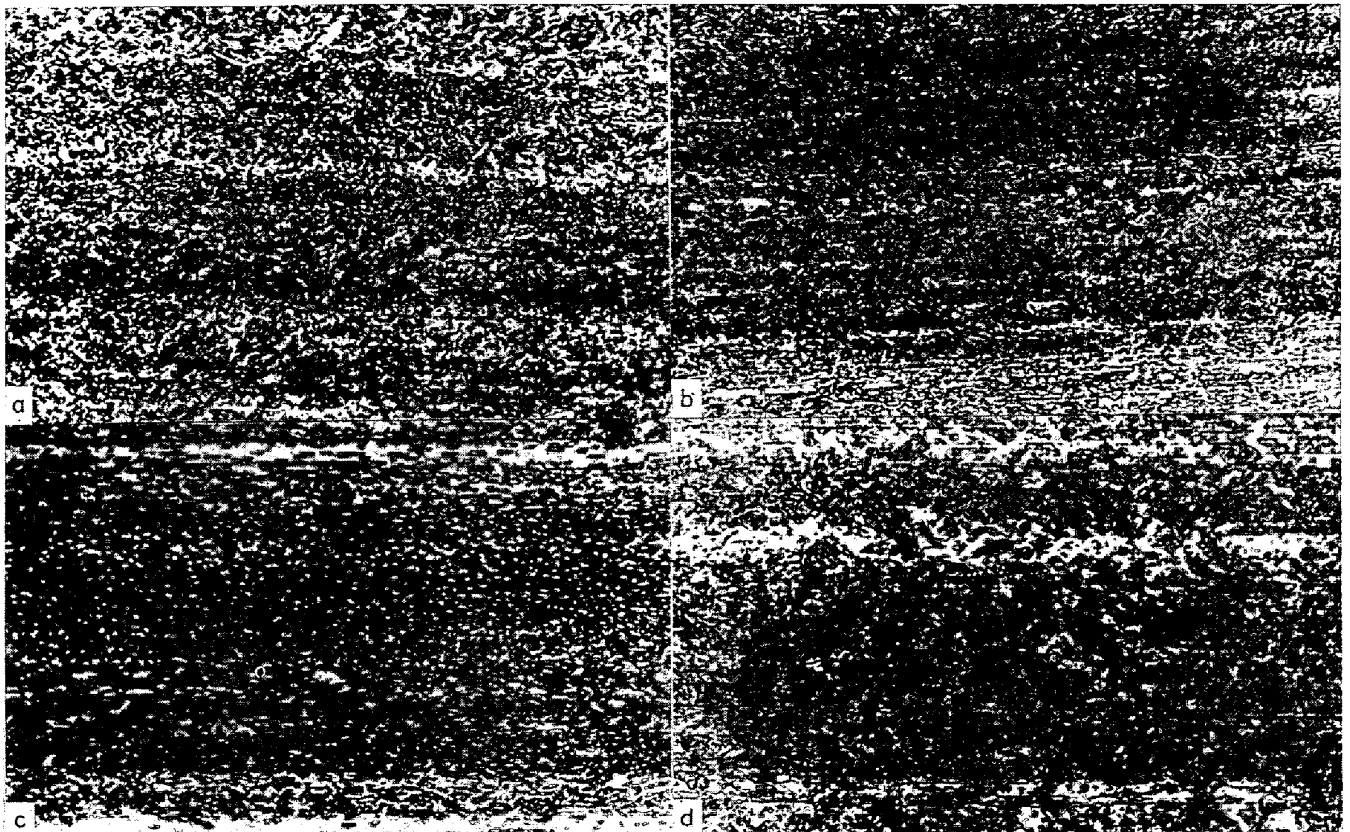
Fig. 3. Variation of the coefficient of friction with the microstructure of the ring specimen. (on P. T. F. E)

3. 実験結果および考察

3.1 摩擦係数の時間的変動に伴うリング材組織の影響

(1) P.T.F.E (Type A) の場合

回転数と摩擦係数との関係を Fig. 3 に示す。摩擦の初期 ($N=0 \sim 10^4$) では, 水焼入れ材に対する摩擦係数が他の材料のものと比較して最も低い。摩擦係数は, とくに P.T.F.E については基地組織の微細なリング材に対して低い値を示すことが報告されているが, この場合摩擦の初期には微細な組織のみならず材料硬度の違いからも表面の肌荒れに差を生じたものと思われる。すなわち炉冷材は脱炭による遊離フェライトを含むパーライト地で軟らかく, 一方水焼入れ材はマルテンサイト組織で最も硬い状態にある。リング表面に付着したロッド材皮



(a) Film on W.Q ring (No4) (b) Film on O.Q ring (No3)
 (c) Film on A.C ring (No2) (d) Film on F.C ring (No1)

Photo. 2. P.T.F.E. film on various cast steel rings.

膜の顕微鏡観察 (Photo. 2) からわかるように、水焼入れ材に対しては表面に均一なロッド材の付着が見られ、他のリングに対しては組織が荒く、かつ硬度が低下するほどその膜は粗い。10⁴ 回転以後次第に組織の違いによる摩擦係数の差が少なくなっていくが、これは実験の進行とともに表面に P.T.F.E 皮膜を生じリングの組織の影響を蔽い隠すためであろう。P.T.F.E の摩擦特性は他のプラスチックと異なつて、すべり中に起こる凝着は小さい。しかし凝着が小さいのは表面皮膜によるものではない。この特性は高分子材料の構造と化学的性質とによるもので、HANFORD と JOYCE⁴⁾ によれば、P.T.F.E では比較的大きなふつ素原子が炭素原子上の正の電荷を遮蔽するもので隣りあう分子に含まれるふつ素原子の負電荷の相互作用が弱くなるためその分子凝集は低下するということになる。したがつて P.T.F.E 皮膜の状態の差によつては摩擦係数にそれほど大きな変動が現われることはないと考えられる。

(2) ナイロンの場合

Fig. 4 にその様子を示す。それぞれの摩擦係数は時間の経過とともに増大しある一定値に近づく。ナイロンは熱可塑性樹脂であるため発熱によつて軟化溶着し、この

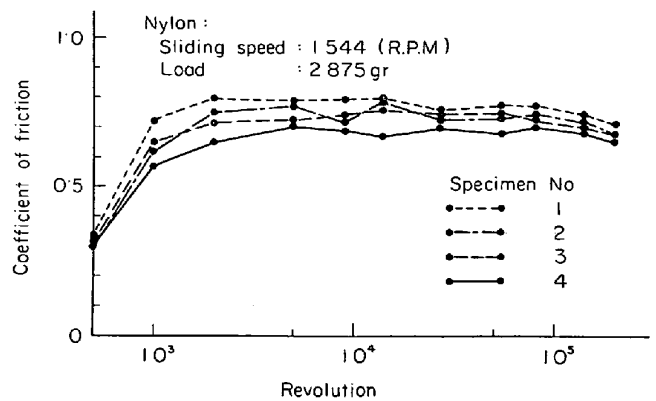
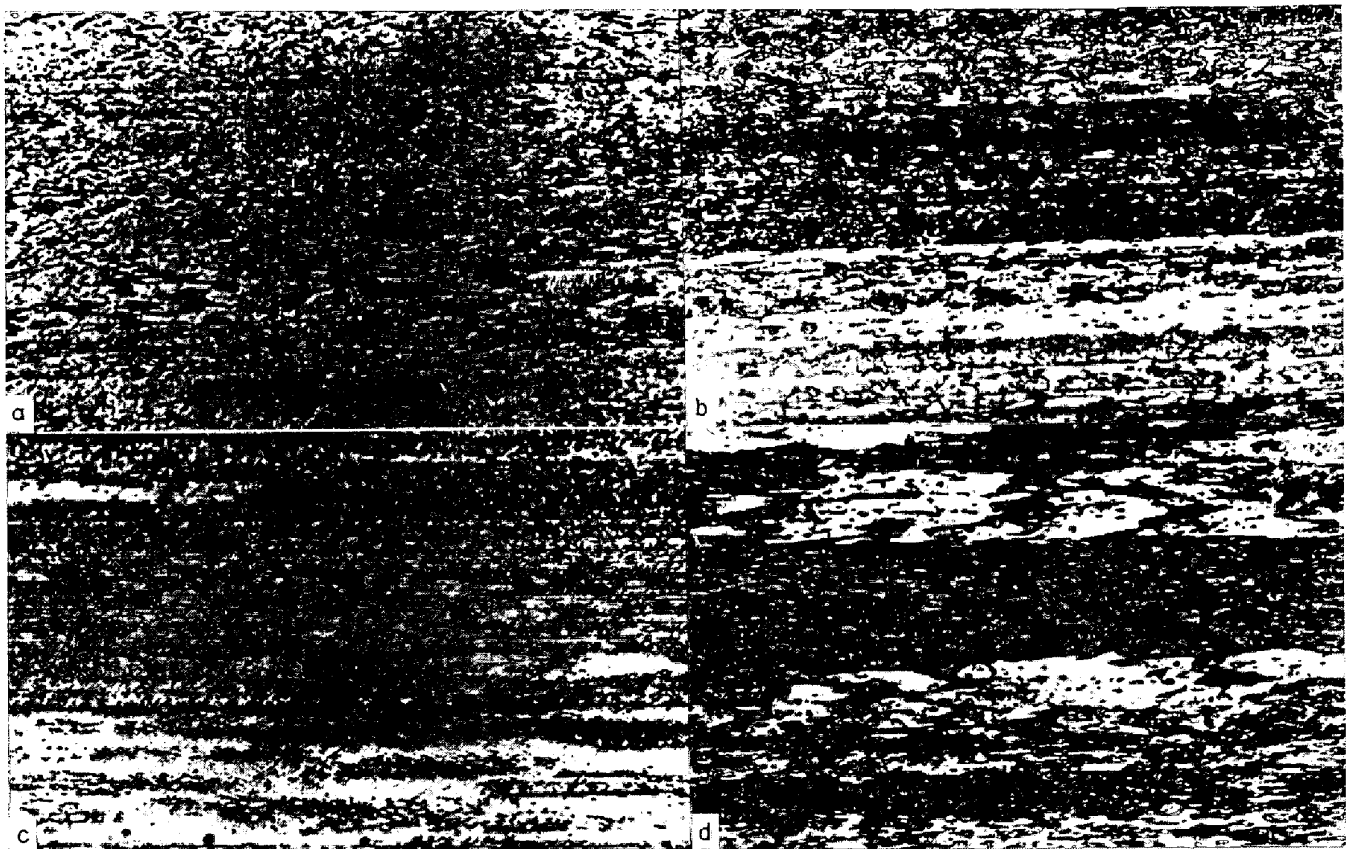


Fig. 4. Variation of the coefficient of friction with the microstructure of the ring specimen. (on Nylon)

樹脂の皮膜と母材樹脂との間の凝着力が問題となる。上記の定常状態においては、金属-ナイロン間の摩擦ではなく、ナイロン-ナイロン間の摩擦となつていことが考えられる。一般にプラスチックの摩擦係数は、材料のバルクの単位面積当たりのせん断強さ(s)と、その降伏応力(p)との比にほぼ等しいことが報告されている⁵⁾。したがつてこのロッド試験片に関して s/p 値を求める



(a) Film on W.Q. ring (No 4) (b) Film on O.Q. ring (No 3)
 (c) Film on A.C. ring (No 2) (d) Film on F.C. ring (No 1)

Photo. 3. Nylon film on various cast steel rings.

と、 $s/p=0.80\sim 0.84$ の範囲内に納まることがわかつた。Fig. 4よりこの値に該当する組合せを見ると、炉冷材と空冷材のリングとの組合せのときで、しかも $N=2\times 10^3\sim 5\times 10^3$ の間で上記の範囲内にある。その他の組合せおよび時間的変動に対してはすべて低い値を実測した。なお求められた s/p 値は常温におけるもので、実際の温度変化が考慮されていないが上記の時間がごく初期 ($N=2\times 10^3\sim 5\times 10^3$) の状態と考えると、よい符合を示している。これは上述の結果の実験的な確認でもある。組織の違いの影響としては、P.T.F.Eと同様マルテンサイト組織が他の3種のリング材よりも常に低い値を示している。組織の違いは同時にナイロン皮膜の付着状態に影響を及ぼしている。Photo. 3にその様子を示す。素地の軟らかいしかも粗い組織のリング材ほど付着皮膜は「むら」が多く、所々融着したと思われるような肌荒れを呈している。この場合 P.T.F.E と異なり、分子凝着力が強いため摩擦係数の差は皮膜の状態によつて生じたものと考えられる。

(3) フェノール樹脂の場合

前述した材料と異なりフェノール樹脂は熱硬化性で、加熱されれば幾分軟化するといえ融着するまでには到

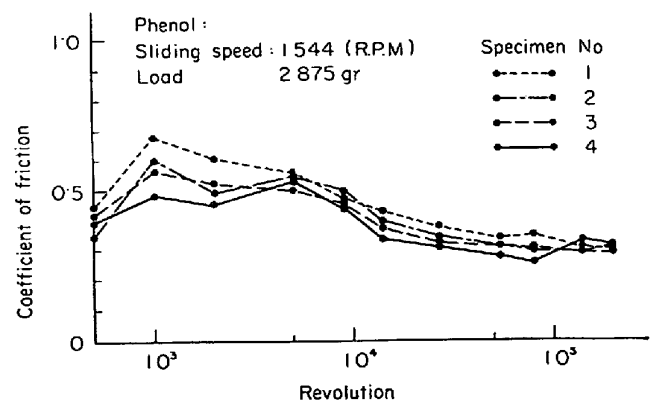


Fig. 5. Variation of the coefficient of friction with the microstructure of the ring specimen. (on Phenol)

らない。そして十分な高温で不可逆的に炭化分解する。この樹脂は主として水潤滑下で用いられ一般に金属、ゴムなどよりも摩擦係数が小さい。本実験では乾燥摩擦を行なつたため条件としては、かなり苛酷なものである。Fig. 5にその様子を示す。 $10^3\sim 4\times 10^3$ 回転付近で摩擦係数が最大となり以後減少している。いずれのリング材に対してもこの傾向に変わりはない。これは摩擦の初期

にそれほど熱の上昇がないのでリング表面のフェノール皮膜とフェノール母材との間で強い凝着を起こすことを示している。更に回転を続けると次第に摩擦係数が減少していくのが見られる。試験後のロッド表面の観察により摩耗粉の黒化が見られることから、摩擦熱により徐々に樹脂の炭化が進みこの炭化物が凝着を阻止する作用をしていると思われる。リングの組織による摩擦係数の違いはやはり微細なマルテンサイト素地を有する水焼入れ材のものが最も低い値を示すが、摩擦が進むにつれて他のリング材との差はあまり大きくない。初期における組織の影響は P.T.F.E やナイロンの場合と同様な解釈が可能であろう。リング表面の皮膜については組織による違いよりもリング皮膜上に発生した条痕の影響が大きく、この条痕はロッド材に混入してある綿布によるものでこの綿布の現出度合によつて条痕の出方が変わる。(Photo. 4)

3.2 摩擦係数の時間的変動に伴う荷重の影響

実験条件は摩擦速度を 1 544 rpm で一定にし、荷重を 885 g (低荷重) と 2 875 g (高荷重) に変化させ、リング材は最も微細な組織を呈する水焼入れ材を鏡面仕上げして用い、ロッド材は P.T.F.E (Type A, B), ナイロン, フェノール樹脂を用いた。



(a) Film on W.Q ring (No 4)
(b) Film on F.C ring (No 1)

Photo. 4. Phenolic plastics film on W.Q and F.C rings.

(1) P.T.F.E の場合

Fig. 6 に示すように Type A, B とともに摩擦係数は低く変動が少ない、とくに Type A は 10^3 回転以後はほとんど変動がなく一定値を記録した。また両 Type 共荷重の影響はほとんど見られず、すなわち Amontons の法則によくしたがうことがわかった。

(2) ナイロンの場合

摩擦の初期には、高荷重のものが高い摩擦係数を示すが、やがて逆転して高荷重のものが一定値に落ち着くのに対して、低荷重の場合摩擦係数は増加し続ける。この様子を Fig. 7 に示す。これは低荷重では定常状態への移行が遅く、摩擦係数が高いのは発熱量が小さいためリング表面の樹脂皮膜の流動性が悪いためであろう。低荷重は Amontons の法則に反して大きな摩擦力を示すが、これは表面皮膜の存在によつて、摩擦面の真の接触面積が荷重に正比例しなくなっているためと考えられる。この点については後述する。

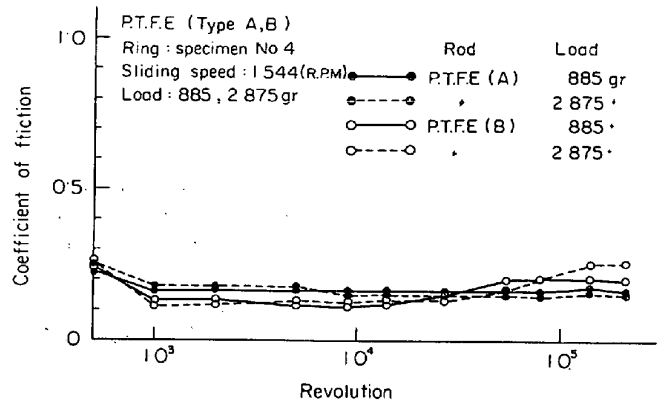


Fig. 6. Variation of the coefficient of friction with load (on P.T.F.E).

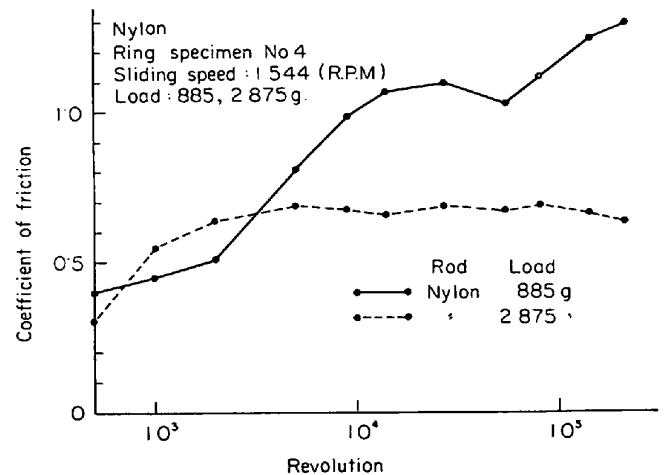


Fig. 7. Variation of the coefficient of friction with load (on Nylon).

(3) フェノール樹脂の場合

フェノール樹脂については、Fig. 8 に示すように高荷重の場合の摩擦係数がある極大点を維持した後、次第に下降するのがわかる。これは前述したごとく炭化作用を考慮すれば説明がつく。低荷重では摩擦係数は高く、しかも不安定な変動を見せている。このことに関しては、ナイロンの場合のように低荷重で Amontons の法則から外れることと同様の理由によるものであろう。また不安定な変動を示すのは補強材として混入してある繊維の影響によるものと考えられる。

3.3 定常状態における摩擦係数と荷重の関係

摩擦面が定常状態にあると考えられる 2×10^5 回転に到達したリングとロッド間の摩擦特性におよぼす荷重の影響を調べた。リングは水焼入れ材で、速度は 1544 rpm、荷重は 2875 g から 885 g に減少させながら行なった。ロッド材は荷重依存性の強いナイロンとフェノール樹脂を用いた。結果を Fig. 9 に示す。ナイロン、フェノール樹脂共に低荷重ほど摩擦係数が大きいことがわか

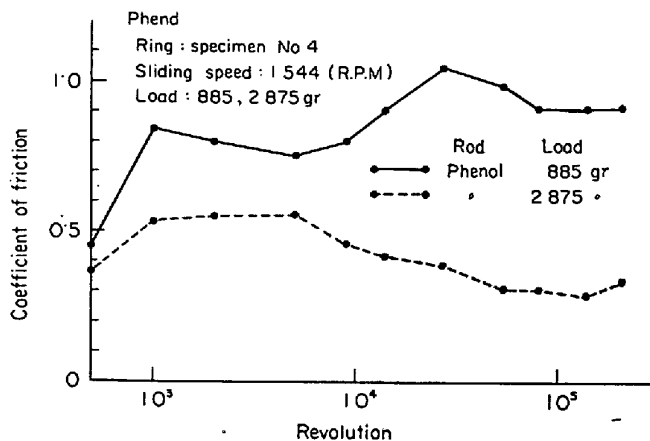


Fig. 8. Variation of the coefficient of friction with load (on Phenol).

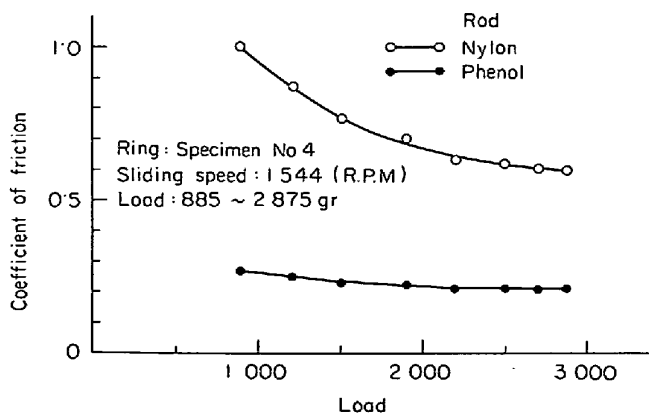


Fig. 9. Relation between load and the coefficient of friction.

る。これは前述したことの実験的確認である。すなわちリング表面の樹脂皮膜の流動性に左右されるようになることである。フェノールについては、この傾斜が比較的ゆるやかなのはリング表面の凝着皮膜が補強材である繊維によつて剝離されやすいこと、凝着皮膜の硬度が高いことによるものである。つまり荷重と真実接触面が正比例に近い関係、すなわち Amontons の法則に近い関係が得られているためと考察される。荷重が小さい場合に摩擦係数が Amontons の法則からどの程度偏位するかを知るための実験結果が報告されているが⁶⁾、それによると金属表面に軟かい金属薄膜を付着させ潤滑膜とした実験では低荷重における摩擦係数の上昇が見られた。その原因として、非潤滑の鋼では金属の接触面積は加えた荷重に正比例するが、軟かい金属の薄膜を潤滑剤として用いると荷重が増すとともに下地の鋼の変形は増大するが、真実接触面積は極くわずかししか増大しない。そのため荷重の増加に比べて摩擦力はわずしか増加しないといわれているが、上記の結果とよく符合する。

3.4 定常状態における摩擦係数と摩擦速度の関係

前節と同様に、摩擦面が定常状態にあると考えられる 2×10^5 回転に到達したリングとロッド間の摩擦特性におよぼす摩擦速度の影響を調べた。リングには水焼入れ材を用い、ロッドはナイロンとフェノール樹脂を用いた。荷重は 2875 g、摩擦速度は 1544 rpm から 112 rpm に落しながら測定した。Fig. 10 に見られるごとくナイロン、フェノール樹脂ともに摩擦速度が大きいほど摩擦係数は小さい。摩擦係数は摩擦速度に無関係であるという COULOMB の古典的法則にしたがわないのには次のような理由が考えられる。第 1 に熱による皮膜の変化である。すなわちすべり速度の増加は発生する摩擦熱の増加をきたし、この熱によつてリング表面に付着したプラスチック皮膜の流動性がよくなる。フェノール樹脂樹のよ

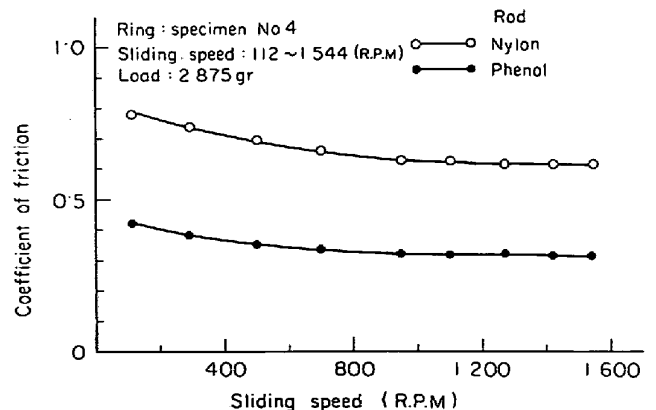


Fig. 10. Relation between sliding speed and the coefficient of friction.

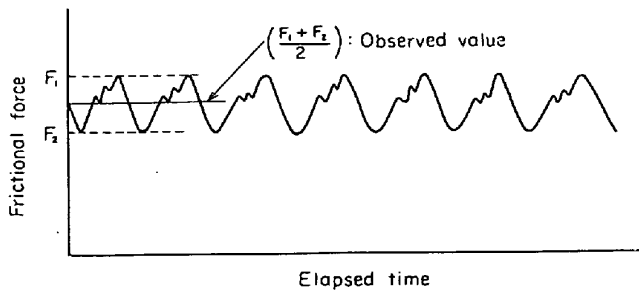


Fig. 11. Observed distortion of curve.

うな熱硬化性材料については熱によつて皮膜の炭化が促進される。しかしフェノール樹脂の炭化は不可逆反応であることを考えると、高速から低速にすべり速度を変化させたときに摩擦力が増加することの説明がつかない。しかしこの点については高速では炭化した古い皮膜の剝離を補うだけの新しい炭化が進行するのに対して、低速では炭化が遅れるためリング表面における炭化物の平衡量が減少するものと考えればうまく説明がつく。第2に考えられるのは、リング表面とロッド表面との相対的間欠運動である。もしすべり面の一方がある程度の弾性自由度をもっているならば、運動は連続にはならず間欠的となり、付着—すべり、の現象がおこるのであろう。このことについて BOWDEN は、付着は2面間の静止摩擦が高いこと、すべりはすべっている間の動摩擦が低いことによるもので、非常に簡単な解析によりこの種の間欠運動を静摩擦が動摩擦よりも高いということの直接の結果として証明している。この間欠運動の発生は、材料の組合せ、摩擦—速度特性、固有振動数、慣性などによつて左右されることなどが報告されている⁷⁾⁸⁾。本実験でも Fig. 11 に示すような記録紙上における波形の乱れを観測した。なお測定値は波形の最大値と最小値の平均すなわち中間値を採用した。

4. 総 括

特殊鋳鋼を軸材としてそれに対する軸受材に P.T.F.E, ナイロン, フェノール樹脂を選び、乾燥すべり摩擦試験を行ない摩擦係数を通してそれぞれの組合せにおける摩擦特性を調べたが、次のような結果を得た。

(1) 実験に供された軸受材 P.T.F.E, ナイロン, フェノール樹脂のいずれも、緻密な組織をもつリングに対して低い摩擦係数を示した。組織が荒く、硬度が低下するリングに対してはリング表面に付着した皮膜はまだらの多い荒い模様を呈し、摩擦係数も高い値を示した。

(2) P.T.F.E は非常に低い摩擦係数を示し、しかもいかなる組織の場合でもその値に時間的変動が少なく、きわめて優秀な軸受材であるといえる。

(3) ナイロン, フェノール樹脂は低荷重での摩擦係数が大きい。とくにナイロンについては、その現象が著しく、摩擦係数の急増が認められた。

(4) 摩擦速度の低下とともに摩擦係数が増大する。これには熱の影響による皮膜の変化と、間欠運動の作用による摩擦力の増大の2つの理由が考えられる。

終わりに本研究を遂行するにあたり、特殊鋳鋼のリング材を提供された(株)淀川製鋼所ならびに各種プラスチックのロッド材を提供されたスターライト工業(株)に厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) P. H. PINCHBECK: *Wear*, 5 (1962), p. 85
- 2) R. T. STEINBUCH: *Wear*, 5 (1962), p. 458
- 3) W. A. GLAESER: *Wear*, 6 (1963), p. 93
- 4) W. E. HANFORD and R. M. JOYCE: *J. Amer. Chem. Soc.*, 68 (1946), p. 2082
- 5) K. V. SHOOTER and E. RABINOWICZ: *Proc. Phys. Soc.*, B 65 (1952), p. 671
- 6) F. P. BOWDEN and D. TABOR: *The Friction and Lubrication of Solids*, (1950), 99, [Oxford]
- 7) J. R. BRISTOW: *Nature*, 149 (1942), p. 169
- 8) F. P. BOWDEN and L. LEBEN: *Proc. Roy. Soc.*, A 169 (1939), p. 371