

531.45 : 621.822.7 : 621.89

スピン摩擦に関する一実験*

平野 富士夫**, 桑野 則行***

1. 緒 言

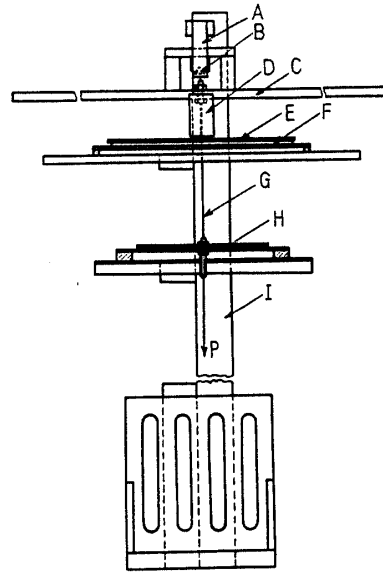
スピン摩擦は玉軸受の運動状態と密接に関係するとともに摩擦や損傷に重要な影響をもつことは古くから指摘され、多くの研究がある^{(1)~(6)}。たとえば Poritsky がピボット形スラスト玉軸受についてスピン摩擦モーメントの解析を行なった結果が今日まで参照されている。実際に玉軸受全体の摩擦モーメントを計測すれば、総合的あるいは平均的なスピン摩擦係数の推定は Poritsky の式を用いて可能である。またその後 Zaretsky ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾、によってもスピン摩擦試験機が考案され弾性流体潤滑の立場からも研究が行なわれている。

著者らは後にこれに成功したが⁽⁹⁾、ここではまずころがりを伴わないスピン運動のみについて、摩擦モーメントの測定を試みた。いうまでもなくころがり運動により弾性流体潤滑膜が形成されている実際に比べて、このような条件は大きい相違を示す。しかし、むしろ潤滑剤の種類や性状による影響に重点を置けば、接触だ円の場所による圧力 p 、すべり速度 V の差異によりスピン摩擦やこれに伴う損傷の特質が明確にされることがわかった。すなわち局所的な pV 値の相違を利用して境界摩擦特性を調べる点に意義があり、これにより各種潤滑剤の特性を推定したり試験したりすることが可能である。以下実験に用いたねじり振り子法と実験結果の概要をまとめて報告する。

2. 実験方法

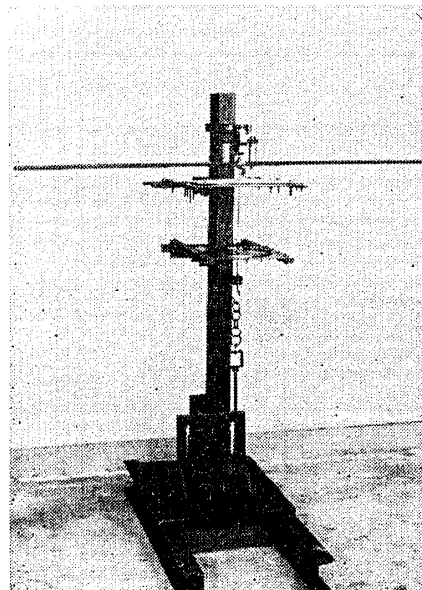
2-1 試験機 試験機はわれわれ自身が設計試作したもので、図 1 にその主要部の構造と外観写真を示す。試験片は深みぞ玉軸受 # 6307 の外輪と 15/32 in 径の玉を使用し、外輪 A を支柱 I に取付け、ねじり振り子 C を外輪上の玉にのせねじり棒 G を介して、荷重をかけられるようにした。ねじり棒はねじりに対してだけ両端固定となるように、上端固定のほか薄いりん

青銅板 H で下端を固定した。このりん青銅板は試験荷重に対し、すなわち張力に対しては無視できる程度の



A: 外輪 F: 鏡
B: 玉 G: ねじり棒
C: ねじり振り子 H: ねじり棒回転止め用りん青銅板
D: 指針 I: 支柱
E: 角度目盛板

(a)



(b)

図 1 試験機

* 昭和 40 年 10 月 16 日 第 43 期全国大会講演会および昭和 41 年 10 月 15 日 第 44 期全国大会講演会において講演、原稿受付昭和 46 年 2 月 22 日。

** 正員、九州大学工学部。

*** 正員、佐賀大学理工学部 (佐賀市本庄町 1)。

影響しか与えないようにした。ねじり振り子の振幅は角度目盛板Eで読みとった。

2・2 実験条件 荷重は読取りが容易な周期になるような範囲内にとどめ、 $P_1=4\text{ kg}$, $P_2=6\text{ kg}$, $P_3=10\text{ kg}$, $P_4=15\text{ kg}$ の4種類とした (P_1, P_2) と (P_3, P_4) とではねじり棒の径をそれぞれ 1.0 mm と 1.5 mm にかえて記録の読取り可能な範囲に保つようにした。実験には乾燥状態のほか、潤滑剤に1号スピンドル油、無添加2号タービン油、2号シリンダ油、グリースA、グリースB、グリースC、グリースDの7種類を使用した。その性状を表1に示す。これらの潤滑剤を 0.5 mm 厚さ程度 (以下少量と呼ぶ) 塗った場合と、外輪みぞまで満たす程度 (以下多量と呼ぶ) 供給した場合と2種類の潤滑条件のもとで実験を行なった。

2・3 実験操作 まず試験片外輪および玉を図2に示すように取付け、ねじり棒の上下のねじを止める。このとき下部りん青銅の止めねじで指針の 0° を調節し、おもりをのせる。以上の操作をした上で振り子を静かにまわし、指針がほぼ 40° の位置でねじり振り子を解放して1周期ごとのねじれ角を目盛板で読みとった。所定の実験繰返し数 (同じ接触位置で振れ角 40° から 0° までを繰返し実験した回数) のち外輪

表1 潤滑剤の性状

種別	ちょう度	滴点
グリース A	260/290	176°C 以上
" B	180/210	170°C "
" C	270/310	145°C "
" D	300/330	260°C "
	粘度 cS	
	50°C	80°C
1号スピンドル油	9.5	2.3
無添加2号タービン油	33	11
2号シリンダ油	220	58

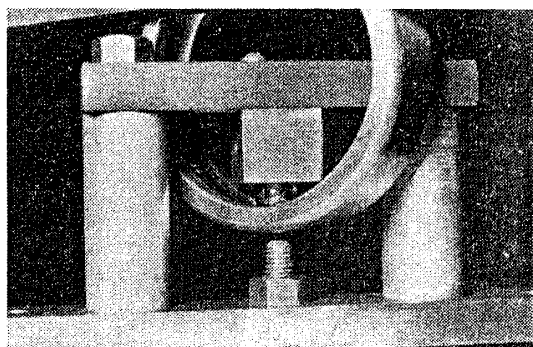


図2 玉取付部

および玉を万能投影器で調べた。次の測定にうつるときは外輪をずらし新しい玉を使った。

2・4 測定の原理 以上述べたように、ねじり振り子の振幅が玉と外輪との摩擦によって減衰するが、これより摩擦モーメントおよび摩擦係数を測定した。すなわち

I : ねじり振り子の慣性能率

θ : ねじり振り子の振れ角

K : ねじり棒のばね定数

F : 摩擦モーメント

t : 時間

とすれば

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + K\theta = \pm F \dots\dots\dots(1)$$

いま摩擦係数が速度に関してある範囲内で一定であるとすれば

$$F = K \frac{A_0 - A_n}{4n} \dots\dots\dots(2)$$

ただし A_0 : 初期振幅, A_n : n 回振動後の振幅である。式(2)から、あらかじめねじり棒のばね定数 K を検定しておけば、摩擦モーメント F を算出することができる。つぎに平均的な摩擦係数 μ を, Poritsky⁽¹⁾ らによって求められた式

$$F = \frac{3}{8} \mu PaE(k) \dots\dots\dots(3)$$

を用いて計算する。ただし、 P : 荷重, $2a \times 2b$: 接触だ円の長径, 短径, また $E(k)$ は第二種の完全だ円積分で、母数 k の値は、 $k = \sqrt{1 - (b/a)^2}$ である。また a, b は次式から求められる。

$$a = m \sqrt{\frac{3\pi}{4} \left(\frac{\kappa_1 + \kappa_2}{A+B} \right) P} \dots\dots\dots(4)$$

$$b = n \sqrt{\frac{3\pi}{4} \left(\frac{\kappa_1 + \kappa_2}{A+B} \right) P} \dots\dots\dots(5)$$

ここに m, n, A, B は接触部の形状により、 κ_1, κ_2 はポアソン比および弾性係数によってきまる値である。なおばね定数は検定の結果 400 gcm/rad (P_1, P_2 の場合), 2150 gcm/rad (P_3, P_4 の場合) で計算結果とほぼ一致する。なお、緒言に述べた pV 値に関しては付録に記しておいた。

3. 実験結果および考察

3・1 実験系列 I (乾燥摩擦, 荷重: P_1, P_3, P_4)

乾燥摩擦については荷重 $4, 10, 15\text{ kg}$ について行なった。荷重 4 kg についての実験結果を図3に、 $10, 15\text{ kg}$ についての実験結果を図4に示す。図3 (荷重 4 kg) は、実験繰返し数 $5, 10, 20, 30$ 回の場合の摩

摩擦係数の変動をプロットしているが、数回以降は摩擦の値はほぼ一定の値、摩擦係数 $\mu=0.74$ を示している。1回から数回までばらつきの多いのは玉と外輪との接触が安定しなかったためと思われる。実験繰返し数5回のもとの30回のもとの接触あと(玉につい

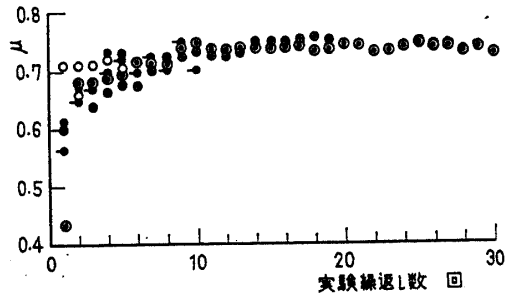


図 3 乾燥摩擦 ($P_1=4\text{ kg}$)

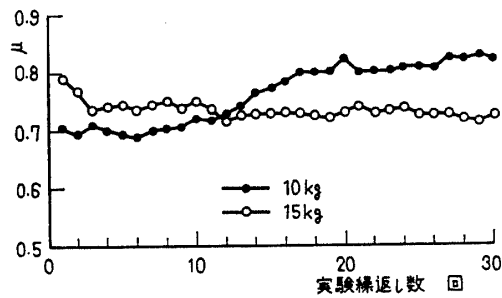
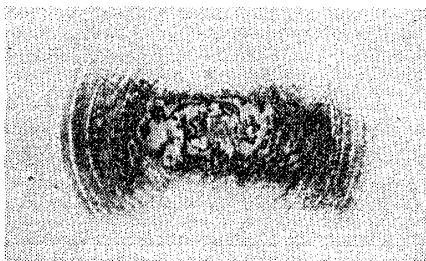
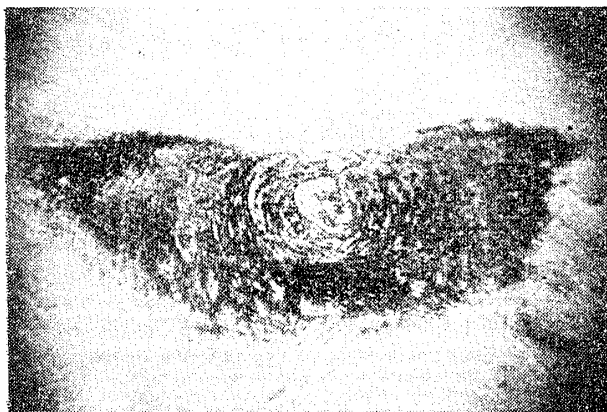


図 4 乾燥摩擦 ($P_s=10\text{ kg}, P_a=15\text{ kg}$)



(a) 図 3 の ○ 印 の 点



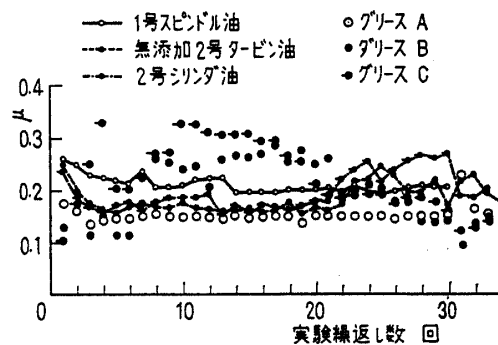
(b) 図 3 の ◎ 印 の 点

0.5 mm

図 5 乾燥摩擦 ($P_1=4\text{ kg}$) の 玉 の 接 触 後 と

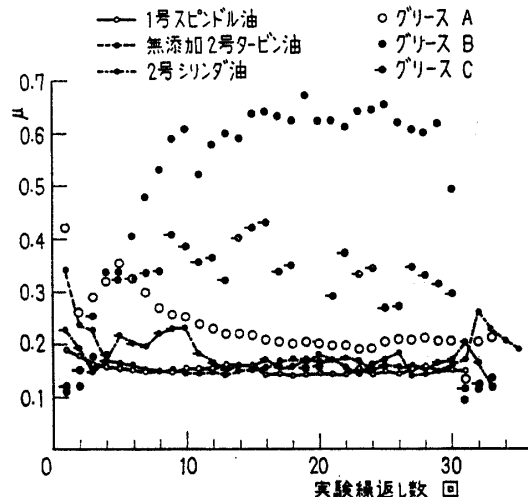
て)の写真を図5に示す。実験繰返し数1回めから一定の値を示したものはその接触あとが対称的な形状をしており[図5(a)参照],ばらついたものは接触部がすべてその形状が三日月状になっている[図5(b)参照]。荷重10,15 kgの場合は図4からわかるように、最初のばらつきはなく、 $\mu=0.7\sim 0.8$ の範囲で変動している。このように乾燥条件のもとでは、摩擦係数は他の試験機による鋼どうしの値0.4~0.6に対してやや高めに出ている。これはPoritskyのように μ を場所によって一定と考えたこととも関係していると思われる。

3.2 実験系列II(各種潤滑剤の摩擦,荷重 P_1, P_2 ,潤滑剤少量) 各種潤滑剤を接触部に少量塗布し、荷重4 kgまたは6 kgを加えて行なった。それぞれの結果が図6,7で、油潤滑剤はグリースに比べて繰返し摩擦に対して安定した値を示しており、たとえば1号スピンドル油は荷重4,6 kgに対してそれぞれ $\mu=0.2$ ないし0.15になる。2号シリンダ油は荷重4 kgで実験繰返し数20回以降変動しているが、6 kg



$P_1=4\text{ kg}$, 少量塗布

図 6 実験系列IIの摩擦



$P_2=6\text{ kg}$, 少量塗布

図 7 実験系列IIの摩擦

では $\mu=0.16$ に落ち着く。ただグリースのうちでは Li 石けんグリース A だけは安定した値を示す。また 6 kg でもっともかたいグリース B はもっとも高い摩擦係数の値を示す。なお図 7 で、実験繰返し数 31 回めで摩擦係数が低下しているのは、実験繰返し数 30 回終了後ねじり振り子を静かに左右に振り実験を続けたため、接触面のグリース膜が修復されたためと考えられる。以上総括的に考察すれば、例外もあるがグリースは繰返し摩擦により、排除された膜の修復性が不良なため、摩擦は高くばらつきやすい。しかもかたいグリースが修復性が不良である。

3.3 実験系列Ⅲ (各種潤滑剤の摩擦, 荷重 P_1, P_2 , 潤滑剤; 多量) 各種潤滑剤を接触部に多量塗布し、荷重 4 kg または 6 kg を加えて行なった。それぞれ

の結果を図 8, 9 に示す。この場合も実験系列Ⅱと同様、油潤滑剤のほうがグリースよりも安定した値を示す。グリースの場合実験繰返し数 30 回終了後左右にふらせて実験すれば摩擦係数が低い値を示すことも実験系列Ⅱと同様である。またもっともかたいグリース B が高い摩擦を示し、図 3 と比較すればわかるように、最高 $\mu=0.74$ を示し、乾燥摩擦と同程度まで上昇しているが、その玉につけられた接触あととは、図 10

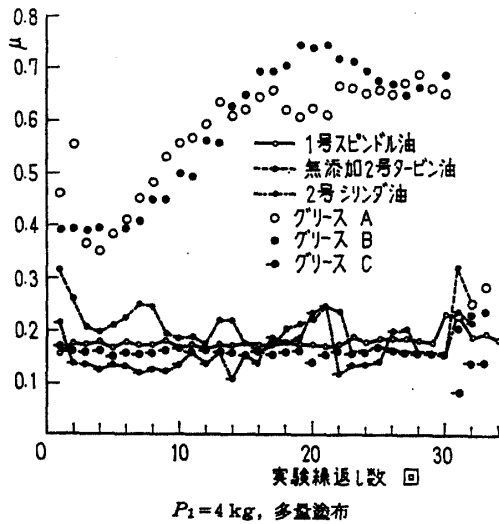


図 8 実験系列Ⅲの摩擦

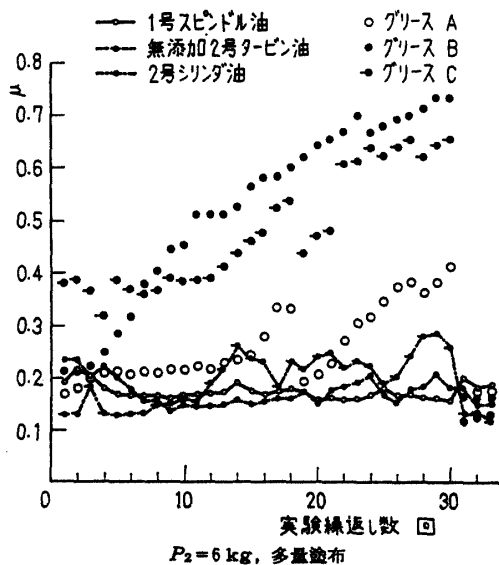


図 9 実験系列Ⅲの摩擦

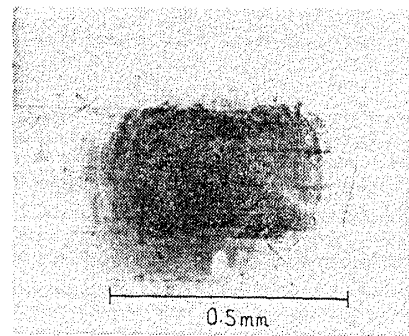


図 10 実験系列Ⅲ (グリース B) 玉の接触あと

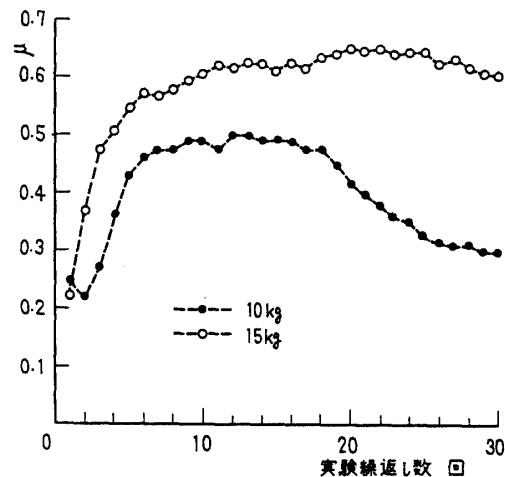


図 11 1号スピンドル油の摩擦

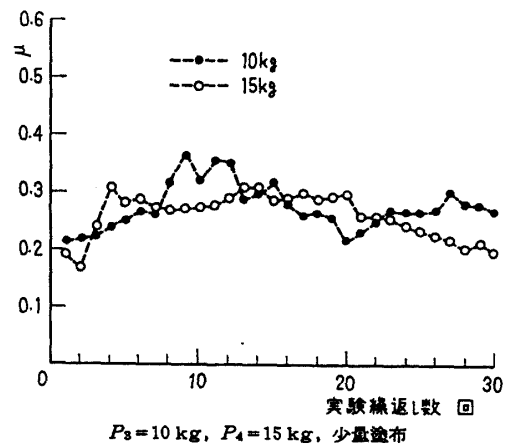
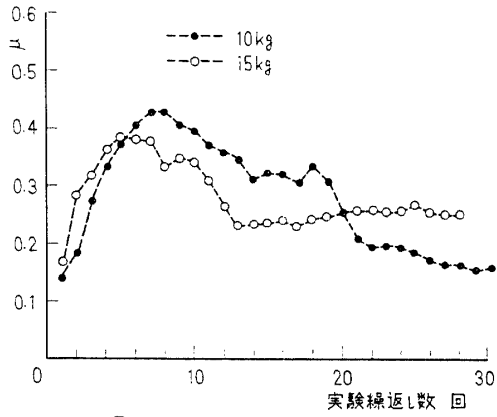


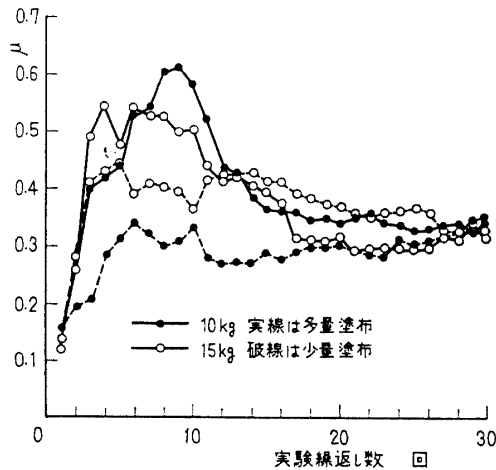
図 12 無添加2号タービン油の摩擦

に示すように、乾燥摩擦の接触あと [図 5(a)] よりはるかに径が小さくなっている。

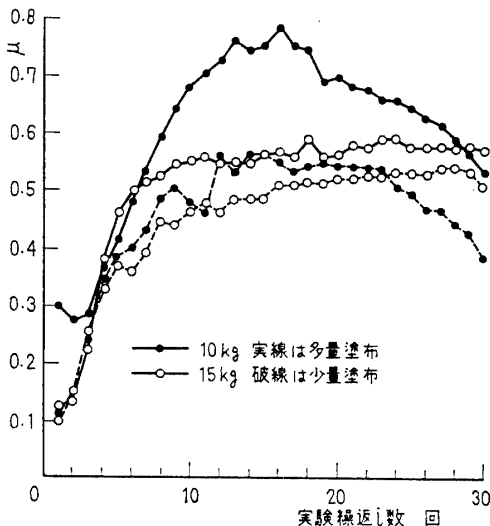
3.4 実験系列IV (各種潤滑剤の摩擦, 荷重 P_3, P_4 ,



$P_3=10\text{ kg}, P_4=15\text{ kg}$, 少量塗布
図 13 2号シリンダ油の摩擦



$P_3=10\text{ kg}, P_4=15\text{ kg}$, 少量, 多量塗布
図 14 グリースAの摩擦

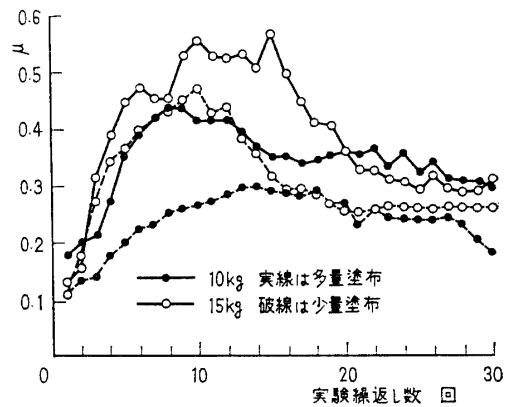


$P_3=10\text{ kg}, P_4=15\text{ kg}$, 少量, 多量塗布
図 15 グリースBの摩擦

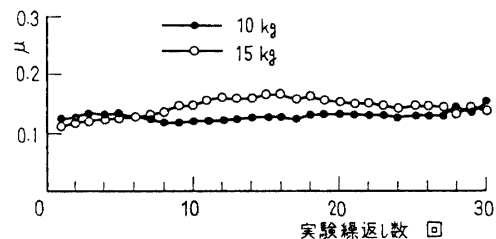
潤滑剤; 少量, 多量) 各種潤滑剤を接触部に少量または多量塗布し, 荷重 10 kg または 15 kg を加えて行なった. それらの結果を図 11~17 に示す (油潤滑の場合はすべて少量塗布). この場合は実験系列(II), (III)といくぶん傾向をことにしており, 油潤滑剤とグリースとの相違が顕著でなくなる. 1号スピンドル油がもっとも高い摩擦を示す. とくに 15 kg の場合がそうである. 2号シリンダ油, 無添加2号タービン油は比較的安定して $\mu=0.2\sim 0.3$ を示すが実験系列(II), (III)に比べて高い値である. グリースA, グリースCはほぼ同じ傾向を示すが, 前半において摩擦係数は高い値に上昇するが最終的には比較的低い値 $\mu=0.3\sim 0.35$ を示す. もっともかたいグリースBは前系列と同様に高い摩擦係数を示し, とくに荷重 10 kg, 潤滑剤多量の場合は乾燥摩擦の値 $\mu=0.7\sim 0.8$ まで上昇する. またグリースは塗布量が多量の場合のほうが摩擦は高くなる. グリースDは極圧添加剤入りのものであるが, 10, 15 kg のもとでも著しく安定した値, $\mu=0.15$ を示している. 接触あとの損傷状態も他の油潤滑剤のそれに比べてきわめて軽度であった [図 18 (a) 参照].

3.5 実験系列V (接触あとの進行状態の追跡)

この系列の実験は接触あとの進行状態を調べるためにグリースA, グリースC, 2号タービン油につい



$P_3=10\text{ kg}, P_4=15\text{ kg}$, 少量, 多量塗布
図 16. グリースCの摩擦



$P_3=10\text{ kg}, P_4=15\text{ kg}$, 多量塗布
図 17 グリースDの摩擦

て、べつべつの試料を用い、相異なる実験繰返し数ごとの接触あとの写真を取りその状態変化をしらべた。グリースCの実験繰返し数 2, 5, 24 回の玉の接触あとの写真を図 18 (b), (c), (d) に示す。またこれに対応するグリースCの摩擦係数の実測値を図 19 に示す。図 19 は実測値の再現性の良いことを示している。図 18 (b), (c), (d) からわかるように、まず接触だ円の長径よりやや内側から接触きずが認められ、これが繰返し数とともに接触だ円の内部に向かって広がる。繰返し数5回摩擦の後では、摩擦きず〔図 18 (c)〕がもっともひどい中心位置が長径の0.7の径の円周上になり、これは接触圧力 p とすべり速度の積 pV の最大になる位置である。またこの回数は図 19 のピークと一致している。グリースA, 2号タービン油の場合も同様な傾向であった。これら摩擦経過写真〔図 18 (b), (c), (d)〕と実験系列IVの玉の接触あとの一部〔図 18 (a), (e), (f)〕から摩擦係数の違いの原因は次のようであると考えられる。すなわち摩擦係数の小さい油潤滑剤の場合は、摩擦係数の高い部分が内側になっており摩擦モーメントの腕の長さが短い。すなわち外周部では速度大、ヘルツ圧力小、それに加えて油のひろがりやすさとあいまって、流体摩擦の部分がか

なりの部分をしめている。一方摩擦係数の高いグリースの場合はこの効果がなく、摩擦モーメントの腕の長さが長くなって、その摩擦モーメント、したがってその平均摩擦係数が大となる。2号タービン油、グリースBの30回繰返し後の接触あとの写真を図 18 (e), (f) に示しているが、この写真からも摩擦の高い場合と低い場合の、その機構の違いがよくわかる。すなわち2号タービン油は中央部であたり、グリースBは外周までつよくあたっている。グリースDは先にも述べたように極圧添加剤のため外周での摩擦の状態がよくなり、中央部も改善されて良好な結果を示したものと考えられる。なお図 18 (d), (e), (f) は中央部が強くとあたっているが、これは図 20 からわかるように、中央部(図 20 斜線部)は常に接触しているためであろう。また30回繰返し後の玉の接触あとの径は接触だ円の計算値とほぼ一致する。外輪でも玉とほぼ同じような接触あとのをのこすが、その損傷の度合は玉の場合よりはるかに少ない〔図 18 (g) 参照〕。

4. 結 言

以上玉軸受のスピン摩擦を測定する初歩的段階として、静的接触におけるスピン摩擦をねじり振り子を利

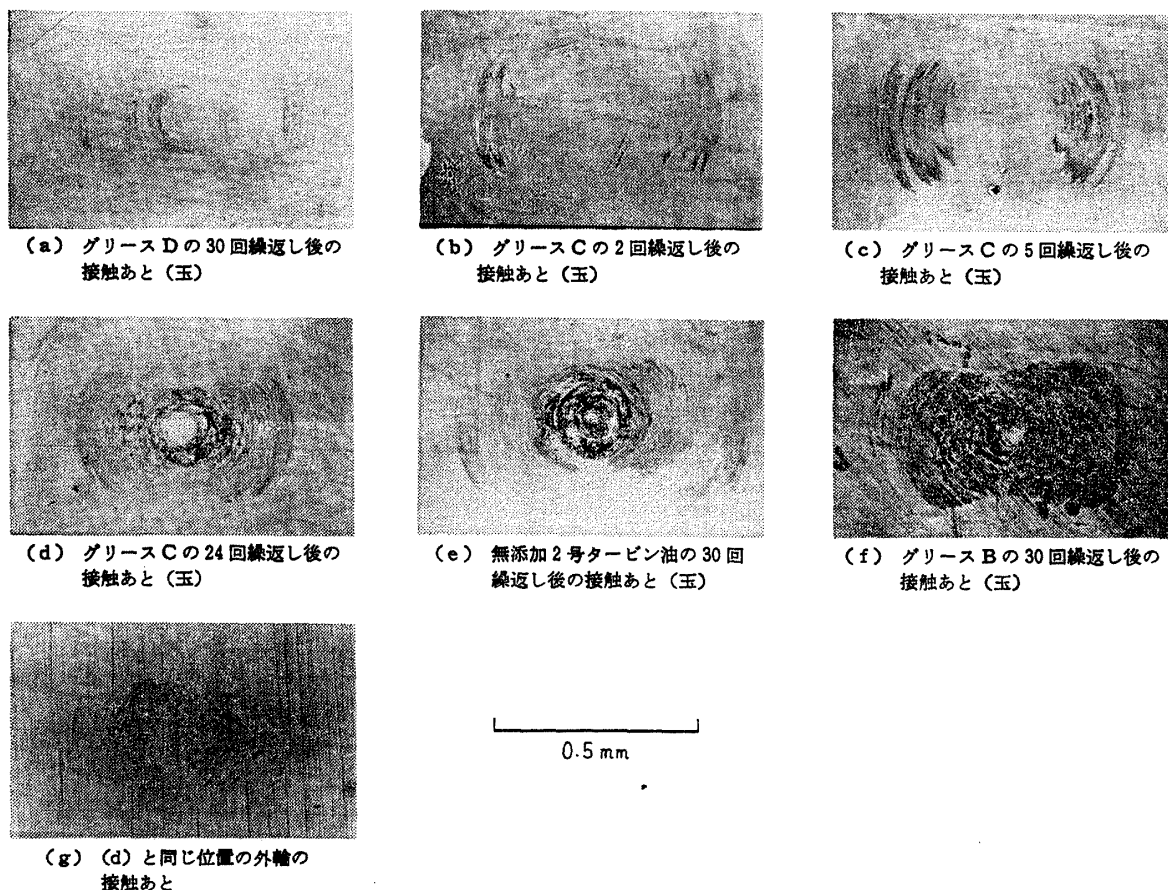


図 18 玉および外輪の接触あと [$P_3=10$ kg, (g) 以外は玉]

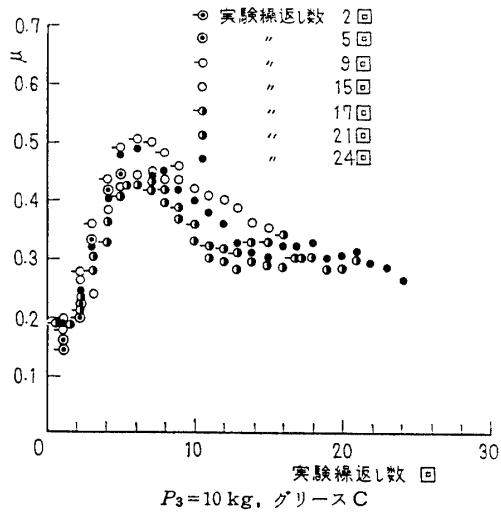


図 19 接触あとの追跡のための摩擦の一例

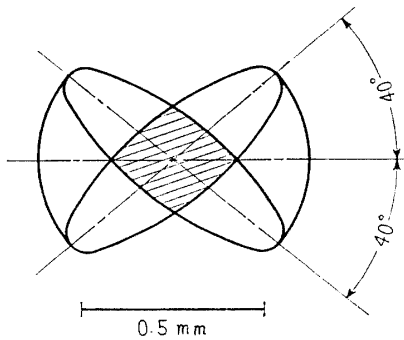


図 20 接触だ円の移動範囲 ($P_3=10 \text{ kg}$)

用して測定したが、この試験機での測定結果が、各種潤滑剤の境界摩擦の特長をよくとらえることができることがわかった。なお終局的目的である、ころがり接触下のスピン摩擦の測定は今後続行する予定である*。終わりに実験に協力していただいた林栄治、畠中達夫、太田昭夫、山中俊二の諸君に厚く感謝する。

付 録

ここで摩擦条件の局所的相違について触れる。まず接触だ円の長軸上の圧力分布はヘルツ最大圧力を p_{\max} 、だ円中心からの長軸上の距離を x とすれば

$$p = p_{\max} \sqrt{1 - (x/a)^2}$$

* なお振り子でなく一方向の回転の場合の測定結果もえられており、振り子試験の結果と相まって潤滑剤の pV 特性を試験するのに適した方法であることがわかっている。これらについては別に報告する予定である。

表 2 ねじり振り子試験機の摩擦条件

$P \text{ kg}$	$p_{\max} \text{ kg/mm}^2$	$a \text{ mm}$	T_s	$(pV)_{\max} \text{ (kg/mm}^2\text{)(mm/s)}$
4	79.7	0.266	18.0	2.58
6	90.5	0.302	18.0	3.33
10	109	0.361	9.0	9.60
15	122	0.407	9.0	12.1

で与えられる。つぎに振り子の減衰しつつある瞬間振幅を θ_* とし減衰項を小さいとすれば、ねじれ角の変動は $\theta = \theta_* \sin \omega t$ であるから、速度は $\dot{\theta} = \theta_* \omega \cos \omega t$ 、したがって最大すべり速度は

$$V = x(\dot{\theta})_{\max} = x\theta_*\omega$$

となる。ただし、 ω は振り子の円振動数で、 $\omega = 2\pi/T$ (T : 周期) である。

もちろんすべり方向に対し圧力は上式の p から 0 まで変動するが、最高の pV 値を求めるには長軸上の圧力分布を取り

$$pV = p_{\max} \theta_* \omega x \sqrt{1 - (x/a)^2}$$

で局所的 pV 値とすることができる。この pV 値の最大は $x = a/\sqrt{2}$ で生ずるから

$$(pV)_{\max} = p_{\max} \theta_* \omega a / 2 = p_{\max} \pi a \theta_* / T$$

θ_* として初期の片振幅 $40^\circ = 0.698 \text{ rad}$ を取れば

$$(pV)_{\max} = 2.19 a p_{\max} / T$$

で与えられる。これらを各実験条件に対し求めると、表 2 のようになる。

なお著者らは振り子式でなく一方向回転すなわち高い V の値での摩擦、摩耗をも観察したが、この場合にはいっそう pV 条件の局所的差異が明確になり、摩耗こんの深さも $x\sqrt{1 - (x/a)^2}$ に相似の形状になる場合が多いことも認めている。

文 献

- (1) Poritsky, H., ほか 2 名, *J. Appl. Mech.*, 14 (1947-12), A-261.
- (2) Johnson, K.L., *J. Appl. Mech.*, 25-3 (1958-9), 332.
- (3) Hirano, F., *ASLE Trans.*, 9-4 (1965), 425.
- (4) Jones, A.B., *Trans. ASME, Ser. D*, 81-1(1959-3), 1.
- (5) Harris, T.A., *Rolling Bearing Analysis*, (1961), John Wiley & Sons.
- (6) 山本, 潤滑, 13-9 (昭 43), 508, 516.
- (7) Miller, S.T., ほか 2 名, *NASA TN D-2796* (1965).
- (8) Allen, C.W., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. F*, 92-1 (1970-1), 89.
- (9) 桑野・ほか 2 名, 機講論, No. 700-18 (昭 45-10), 149.