フレットング摩耗に及ぼす相対すべり 量の影響（線接触の場合）*

——フレットング摩耗に関する研究（第1報）——

築 添 正** 大 前 伸 夫***

The Influence of the Amplitude of Relative Slip on Fretting
Wear with Line Contact

——Study on Fretting Wear (1st Report)——

Tadasu TSUKIZOE, Nobuo OHMAE

The phenomenon of fretting wear has been a particular case of wear, which is caused by the slight relative slip motion that occurs between surfaces of vibrating metal members. The severe loss of dimensional accuracy, and subsequent failure in structural components provided the impetus for a very considerable research effort culminating in a number of highly technical research reports. Since fretting is a type of wear, it should be mitigated by proper lubricants, but the investigations in oil are relatively few. The purpose of this report was to experimentally determine the effect of the amplitude of relative slip on fretting wear damage with line contact both in oil and in air. The discharging of wear debris is thought to have an intermediate property with line contact compared with point and area contacts. When the specimens were completely surrounded by oil, oxide debris, generally generated with fretting wear in air, did not form. Thus the effectiveness of oil is the prevention of severe fretting oxidation by the limitation in the supply of oxygen. The magnitudes of the wear damages, frictional forces, adhesive forces and electrical contact resistances were strongly dependent upon the amplitude of relative slip and the surface roughness of specimens. This tendency was especially marked in air.

1. 緒 言

二つの固体仕上面の接触面にごく微小な往復相対すべり運動があるとき、フレットング摩耗が生じることはよく知られている。

一般に潤滑油中で使用される種々の機械部品においてもフレットング摩耗が発生する場合がかなり多いが、現在までに潤滑油中における研究はあまりない^{1)~4)}。

本報は潤滑油中におけるフレットング摩耗のうち、特に摩耗粉の排出過程が点接触あるいは面接触と比べて中間的な線接触の場合について、摩耗量に及ぼす相対すべり量の影響を実験的に明らかにするとともに、接触面における表面あらさの影響についても検討を加えたものである。さらに、潤滑油が空気中の酸素と試験片の接触

を断することによって、空気中におけるフレットング摩耗の場合に見られる多量の酸化摩耗粉の生成を防ぎ、フレットング摩耗の軽減に効果を及ぼすことを確かめた。

2. 実験装置および方法

図1にフレットング摩耗試験機主要部の概略を示す。バイエル型無段変速モータ軸に取付けた偏心カムの変位をレバー⑥で追従し、両側板ばね⑦⑨を軸とするこの揺動を中水平板ばね⑧で水平方向に変換して上部試験片①に往復すべり運動を与える。スパーサ⑩の厚さを適当に変えることにより所定の相対すべり量を得ることができる。なお、相対すべり量波形に好ましくない加速度が加わると実験結果の解析に支障があるので、板ばねの厚さおよび垂直荷重を変化させて相対すべり量波形が正弦波にもっとも近くなる条件を見つけて実験を行なった。潤滑油中における実験は油そう⑪中で行ない、潤滑油としてはマシン油 #120 を使用した。

*原稿受付 昭和47年5月4日。昭和47年度精機学会春季大会学術講演会（昭和47年4月5日）にて発表。

**正 会 員 大阪大学工学部（吹田市宇山田上）

***学生会員 大阪大学工学部

図1 フレッシング摩耗試験機主要部

 $\alpha=280 \mu$, 下部試験片の最初の表面あらさ $16 \mu R_{max}$

図2 上部試験片の摩耗量測定例

試験片は外径 40 mm, 内径 20 mm, 厚さ 10 mm のリング状上部試験片と, 外径 60 mm, 厚さ 10 mm の円板状下部試験片で, 材質はともに S 25 C である。上部試験片外周は旋削仕上 (円筒度; 0.5μ , 真円度; 2.0μ , 表面あらさ; $1.6 \mu R_{max}$) で十分加工硬化 ($H_V=240$) したまま実験に供し, 下部試験片上面は砂吹仕上によって, 16μ , 5.0μ , $2.5 \mu R_{max}$ の表面あらさをつけたのち, 890°C で真空焼鈍 ($H_V=115$) を行なっている。さらに実験条件として, 垂直荷重 (15 kg) および振動数 (600 cpm) は一定とした。

上部試験片の摩耗量は, Talysurf 4 型表面あらさ検査機にチャタームおよびナイフエッジを取付け, 図2のような断面プロファイルを求めて算出した。また, 下部試験片の摩耗量はアボットの負荷曲線の変化からその摩耗体積を算出した。なお, 摩耗量の測定は設定した繰返し数 ($N=5000\sim300000$) 後に行ない, 測定後の両試験片を用いてさらに摩耗実験を続けることはしていない。

相対すべり量 ($a=10\sim500 \mu$) は変位計 (共和電業 120 T-5 B, 測定力 5 g, 測定範囲 $\pm 300 \mu$) の触針を直接上部試験片に接触させて検出し, 摩擦力 (4 枚ひずみゲージ法で測定) ならびに接触電気抵抗 (1 辺 60Ω のブリッジ回路で動的に測定) とともに電磁オシログラフ上に同時に記録して時間的経過を観察した。つぎに凝着力の測定方法を図3に示す。摩擦損失のきわめて少ないレバーの一端にホルダに保持したままの上部試験片を取付け, 他端に取付けたコンテナに水を徐々に加えて, 水の重量から算出した。凝着結合部が切断される瞬間の確認は, 上下試験片を電気接点とする回路中のパイロットランプの消燈で行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 潤滑油中の場合

上下試験片の摩耗量 W と繰返し数 N の関係を, 下部試

①上部試験片 ②下部試験片 ③試験片ホルダ
④パイロットランプ ⑤水準器 ⑥レバー
⑦カウンタウエイト ⑧コンテナ

図3 凝着力測定装置

最左点は $N=4$ の摩耗量を表わす

図4 摩耗量と繰返し数の関係 (潤滑油中)

試験片の最初の表面あらさをパラメータとして図4に示す。相対すべり量および表面あらさが大きいほど上下試験片ともに摩耗量が増加する傾向にある。通常、円筒と平面の組合せにおける摩耗では顕著な初期摩耗域は判定し難いが、図4から繰返し数が20000前後に初期摩耗が終了して比較的定常な摩耗域になると推定できる。摩耗量と相対すべり量の関係を示すには、摩耗進行曲線が直線となる定常摩耗領域で初期摩耗量と定常摩耗量の和を比較するのがよいと考えられるので、繰返し数 $N=50000$ の摩耗量と相対すべり量の関係を表面あらさをパラメータとして図5、図6に示す。概して、相対すべり量が 30μ 以下では繰返し数を2~300000にとって実験を

行なっても、光学顕微鏡で判別できるような摩耗粉はきわめて微量である。相対すべり量が 100μ あたりからは摩耗量が増大するとともに、すべり量の増加につれて黒色の摩耗粉が生成し、上下試験片の接触面からかなり流出してくる。この摩耗粉が両試験片を引っかき、摩耗量に大きな影響を与えると考えられるので、ギャポンを用いて潤滑油を強制的に接触面へ送り込み、摩耗粉をできるだけ排除するような状態で実験を行なった。

この結果を図5、図6に一点鎖線で示す。油そう中における実験結果と比べて摩耗量は軽減され、相対すべり量に比例してほぼ直線的に増加する。このことから、本実験のような場合には、摩耗粉の引っかき作用が摩耗量にかなりの影響を与えることが明らかとなった。

つぎに、摩擦係数および接触電気抵抗の測定結果の一例として、相対すべり量 $a=30\mu$ ならびに $a=280\mu$ の場合を図7に示す。フレットング摩耗においては潤滑油が接触面外に排出されるので流体的な潤滑を行なうのは不可能といわれる⁵⁾。本実験では、繰返し数が増加して $N=20000$ あたりから接触電気抵抗が増加して一定値となるが、この領域で摩擦係数も同時に減少することから、境界潤滑領域に入っていると見ることができる。また、このとき初期摩耗が終了して定常な摩耗域に入ると判断されることは、図5の結果と対応するものである。定性的には、真実接触面積 $\propto$ 摩擦係数 $\propto$ 凝着係数 $\propto 1/\text{接触電気抵抗}$ と考えられる。相対すべり量が大きく、下部試験片の最初の表面あらさが小さいほど摩擦係数が高く

図5 上部試験片の摩耗量と相対すべり量の関係 (潤滑油中, $N=50000$)

図6 下部試験片の摩耗量と相対すべり量の関係 (潤滑油中, $N=50000$)

図7 摩擦係数、接触電気抵抗と繰返し数の関係 (潤滑油中)

図 8 摩擦係数, 凝着係数および接触電気抵抗と相対すべり量の関係 (潤滑油中, $N=50000$)

接触電気抵抗が小さい傾向を示す。このことから、最初の表面あらさが小さいほど真実接触面積が増加することによって凝着力も大きくなると考えられる。そこで、繰返し数 $N=50000$ における摩擦係数, 凝着係数ならびに接触電気抵抗と相対すべり量の関係を図 8 に示す。相対すべり量が 100μ 以下では摩擦係数, 凝着係数が低く, 接触電気抵抗が大きい。また, 表面あらさが小さいほど摩擦係数, 凝着係数が高く, 接触電気抵抗が小さくなっているが, これは表面あらさが小さいほど真実接触面積が増加することに起因しているものと考えられる。摩擦係数と凝着係数が相対すべり量の増加に伴ってほぼ同様に増加するので, 両者の相関係数を計算した結果, 0.92 と相関の水準はきわめて高く,

観察主に及ぼす凝着の影響が大きいことがわかる。また, 相対すべり量が大きく表面あらさが小さいほど接触電気抵抗が小さくなることは, 摩擦係数および凝着係数と同様の傾向を示すものであると思われる。

相対すべり量 $a=30\mu$ ならびに $a=280\mu$ の場合について, 繰返し数 $N=50000$ における下部試験片の表面突起の変形を Talysurf 4 型表面あらさ検査機で測定した結果を図 9 に示し, 光学顕微鏡による観察結果をも付け加える。相対すべり量 $a=30\mu$ の場合には突起はほとんど合流を起こさないが, $a=280\mu$ の場合には突起の変形ならびに合流が激しく, 上部試験片の巨視的な曲率かなり転写されているのがわかる。また, 最初の表面あらさが大きい場合には, この繰返し摩擦回数後もまだ深い谷が残存し, 突起の合流が激しくなっておらず, 真実接触面積が増加する割合が少ないと考えられることは, 図 7 および図 8 における摩擦係数, 凝着係数および接触電気抵抗の測定結果と対応するものと考えられる。

光学顕微鏡で摩耗面を観察すれば, 上下試験片ともに無数の引っかき傷が往復すべり方向についているのが見られる。引っかき傷の幅は約 5μ 程度が多く, 長さは相対すべり量よりかなり長い。このような引っかき傷が主として摩耗粉によって形成されたものであるという確証を得るため, 下部試験片をバフ仕上で $0.4\mu R_{max}$ に作成して図 10 に示す条件で実験を行なった。下部試験片についての引っかき傷と, この引っかき傷を形成しつつエネルギーを消費してついには下部試験片に埋め込まれた摩耗粉を観察することができる。接触面に介在する摩耗粉の作用として, 図 5 および図 6 で摩耗粉を強制排除すれば摩耗量をかなり軽減できることを確かめた。フレッティン

図 9 下部試験片突起の断面プロフィールと光学顕微鏡写真 ($\times 500/3$) の一例 (潤滑油中 $N=50000$)

$a=280\ \mu$, $N=50000$ (潤滑油中) 接触面
中央部から約 $300\ \mu$ 離れた場所

図 10 下部試験片の引っかかり傷と摩耗粉

グ摩耗の場合には、摩耗粉が接触面から逃げにくくなるほど引っかかり摩耗が促進して摩耗量が増大するものと考えられる。

一般に、摩耗形態の分類は凝着摩耗 (adhesive wear)、引っかかり摩耗 (abrasive wear)、酸化摩耗 (oxidative wear)、まだら摩耗 (pitting) とする場合⁹⁾が多いが、フレッティング摩耗はこれらが混在した特殊な形態の摩耗と考えられ、試験片の接触方法によっては摩耗形態の混在する割合が大きく変化するものと考えられる。

潤滑油中で行なった実験結果から、相対すべり量に依存した摩耗形態の変化について若干の考察を試みる。凝着力の測定結果から、凝着力が発生する相対すべり量約 $100\ \mu$ 以上では凝着摩耗が起こっていると考えられる。これは図 9 に示したように、相となる表面突起の合流が激しくなり、真実接触面積が増加して凝着力が増大することによる。また、摩耗粉を強制排除した実験の結果から、摩耗粉による引っかかり摩耗も相対すべり量が約 $100\ \mu$ 以上で顕著になると考えられる。光学顕微鏡による摩耗面の観察結果では、相対すべり量が約 $100\ \mu$ 以下では下部試験片には突起の塑性流動とともに、上部試験片のかたい突起に引っかかれた小さな条こんが真実接触点において観察され、これらの長さは相対すべり量とほぼ等しい。よって、相対すべり量が約 $100\ \mu$ 以下では突起の塑性流動とかたい突起による引っかかり摩耗が主で、凝着摩耗の起こる可能性はきわめて少ない。

以上は凝着摩耗と引っかかり摩耗についての考察を行なったが、酸化摩耗が潤滑油中でも起こるかという疑問が残る。接触電気抵抗が常に小さい値を示すこと (鉄酸化物が生成すると接触電気抵抗はきわめて大きくなる)、ならびに摩擦係数が低いことから、空気中におけるフレッティング摩耗の場合に見られるような酸化摩耗粉の生成は考えられない。潤滑油中においても鉄酸化物が生成するか否かという問題は、従来より論争されてきた。G. A. Tomlinson ら¹⁾は、空気中ほど激しくないが、潤滑油中でも酸化すると考えた。一方、J. O. Almen⁷⁾

$a=280\ \mu$, $N=50000$
(潤滑油中)

図 11 摩耗粉たい積面の電子線回折写真

らは、潤滑油が大気との接触を防ぐため、空気中の場合のような酸化はないとしている。今回は電子線回折によって摩耗面ならびに摩耗粉を解析した。摩耗面ならびに摩耗粉たい積面からの回折リングを ASTM カードと同一した結果、図 11 に示すごとくハロー像ではあるが母材と同じ α -Fe が検出されたのみで、鉄酸化物と同定できるような物質は発見できなかった。よって、潤滑油が空気中の酸素と試験片の接触を防ぎ、酸化させない作用をすると考えられ、広範囲な油膜の欠乏が生じないかぎり潤滑油中においては酸化摩耗は起こらない。

3.2 空気中の場合

3.1 では潤滑油中において酸化が起こらないことを実験的に確かめた。一方、空気中におけるフレッティング摩耗では摩耗面の酸化が重要な因子となる。フレッティング摩耗が相対すべり量に依存することは面接触の場合にも認めているが、ここでは今後の結果と対比するため空気中における相対すべり量の影響について述べる。

空気中における線接触状態での摩耗試験は相対湿度が $65 \pm 3\%$ ふん囲気中で行なった。ただし、実験条件は潤滑油中の場合と異なり、リング状上部試験片は 840°C で水焼入れ ($H_V=500$) ののち、0/5 ペーパーで最終仕上 ($0.3\ \mu R_{\max}$) し、円板状下部試験片は砂吹仕上で表面あらさをつけたのちに 830°C で真空焼鈍 ($H_V=120$) を行なった。材質はともに S35C であり、垂直荷重 ($20\ \text{kg}$) および振動数 ($800\ \text{cpm}$) は一定とした。摩耗量と繰返し数との関係を種々の実験条件下で求め、この結果から定常な摩耗域に属すると考えられる $N=50000$ の値をもって、摩耗量と相対すべり量の関係を示したのが図 12 である。図 12 から、潤滑油中の場合よりも摩耗量が相対すべり量に依存して大きく変化することがわかる。このような結果は Uhlig^{8),9)}が摩耗量に関して得た結果とは異なり、むしろ Halliday ら¹⁰⁾の結果とよく似ている。さらに、摩擦係数、接触電気抵抗の測定ならびに光学顕微鏡による摩耗面の観察から、相対すべり量が約 $70\ \mu$ 以下では主として酸化摩耗であり、相対すべり量が約 $70\ \mu$ 以上では上下試験片の摩耗過程には、酸化摩耗、凝着摩

図 12 上下試験片の耗量と相対すべり量の関係 (空气中, $N=50000$)

耗および引っかかり摩耗が混在していると考えられる。空气中におけるフレッティング摩耗の解析は次報で面接触の場合について詳細な検討を加えるので、本報では摩耗量の相対すべり量依存性が見られる図12の結果を示すにとどめる。

4. 結 言

潤滑油中における炭素鋼 S25C のフレッティング摩耗について、摩耗量、摩擦係数、凝着係数および接触電気抵抗の測定ならびに摩耗面の光学顕微鏡観察、電子線回折による解析の結果から、線接触の場合におけるフレッティング摩耗機構に及ぼす相対すべり量ならびに表面あらさの影響としてつぎの諸点をあげる。

- 1) 繰返し数が一定の場合、上下試験片の摩耗量は相対すべり量ならびに下部試験片の最初の表面あらさが大きいほど大である。
- 2) 繰返し数が一定の場合、下部試験片の最初の表面あらさが小さいと、摩擦係数、凝着係数が高く、接触電気抵抗が小さいが、このことは最初の表面あらさが小さいほど真実接触面積が増加することに起因する。

- 3) 潤滑油が空気中の酸素と試験片の接触を防ぎ、この結果酸化物および酸化膜の生成は認められず、突起の塑性流動とかたい突起による引っかかり作用および上下試験片の凝着ならびに生成した摩耗粉による引っかかり作用で摩耗が促進する。

また、空气中における実験結果では、潤滑油中の場合よりもフレッティング摩耗機構の相対すべり量依存性が顕著に認められ、相対すべり量の変化に伴う摩耗形態の変化が存在することは確実であると考えている。

終りに臨み、本研究を行なうにあたり終始ご鞭撻をいただいた大阪大学久門輝正助教授に厚く感謝します。

また、実験遂行にご協力いただいた当時の本学大学院生中川久敏氏に深謝します。

参考文献

- 1) G. A. Tomlinson, P. L. Thorpe and H. J. Gough: An Investigation of the Fretting Corrosion of Closely Fitting Surfaces, Proc. Inst. Mech. Engrs., **141**, 3 (1939) 223.
- 2) D. Godfrey: A Study of Fretting Wear in Mineral Oil, Lubrication Engineering, **12**, 1 (1956) 37.
- 3) J. R. McDowell: Fretting of Hardened Steel in Oil, ASLE Trans., **1**, 2 (1958) 287.
- 4) A. K. Rahm and H. J. Wurster: Fretting Corrosion in Aircraft and Aircraft Accessories, Lubrication Engineering, **7** (1951) 22.
- 5) たとえば W. E. Cambell: Boundary Lubrication-An Appraisal of World Literature-, ASME United Engineering Center, N. Y., (1969) 119.
- 6) J. T. Burwell Jr.: Survey of Possible Wear Mechanisms, Wear, **1**, 2 (1957) 119.
- 7) J. O. Almen: Lubricants and False Brinelling of Ball and Roller Bearings, Mechanical Engineering, **59**, 6 (1937) 415.
- 8) H. H. Uhlig: Mechanism of Fretting Corrosion, J. Appl. Mechs., **21**, 4 (1954) 395.
- 9) H. H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, Wiley, J. N. Y., (1963) 131.
- 10) J. S. Halliday and W. Hirst: The Fretting Corrosion of Mild Steel, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A, **23f** (1956) 411.