潤滑下の普通鋼と軸受鋼の往復動摩擦に及ぼす 周波数とストロークの影響[†]

伊 東 徳* 藤 井 定**

Effects of Frequency and Stroke on Lubricated Reciprocating Friction between Plain Carbon Steel and Bearing Steel

by

Toku ITOH* and Sadamu FUJII**

Effects of frequency and stroke on the running-in process were investigated on steels with an SRV tester by varying frequency and stroke under the same average velocity. A reciprocating bearing steel ball (SUJ2) was slid against a disc of plain carbon steel (S35C). As lubricant, paraffin base oil and DBDS (Dibenzyl Disulfide)-added oil were used. At higher frequency and smaller stroke the coefficient of friction fluctuated at the stage of initial friction but settled down to a steady friction in base oil. At lower frequency and larger stroke, the coefficient of friction continued to fluctuate, which resulted in a larger wear. The addition of DBDS significantly lowered the coefficient of friction independent of stroke. However, the wear was larger at lower frequency and larger stroke in DBDS-added oil. On the other hand, higher frequency increased the number of reciprocating contacts between specimens under a constant average velocity and it promoted the oxide film formation, which contributed to the decrease in wear.

Key words : Frequency, Stroke, Specific wear rate, Reciprocation, Coefficient of friction, Sliding velocity, Running-in, S35C, SUJ2, Wear debris

1 緒 言

往復動摩擦は速度反転を伴う非定常速度下の摩擦であり、すべり速度の変化に伴って油膜の形成能力、摩擦熱の発生、表面粗さや硬さ、酸化膜生成状態などが摩擦の進行やストローク位置によって変化すると考えられる。焼付を始めとする表面損傷防止のため軽負荷でなじみ試験が行われるが、表面粗さや硬さ、酸化膜などの因子は、このなじみにも大きな影響を与えるとされている。^{1)~2)}

往復動摩擦においてなじみ効果を高め損傷を防ぐためにも、周波数やストロークの影響を明らかにすることが重要と思われる。曾田³⁾は、無潤滑下で平均すべり速度を一定にして往復動摩擦試験を行った結果、平均すべり速度が一定であっても周波数やストロークによって摩耗が異なることを明らかにしている。往復動摩擦における添加剤効果の作用機構について論じられているが、⁴⁾このような周波数やストロークの特徴は、添加剤の摩擦低減効果にも影響を及ぼすと考えられる。

本実験では、鉱油基油および硫黄系極圧添加剤 DBDS (二硫化ジベンジル) を用いて、平均すべり速度一定下でストロークや周波数を変えて往復動摩擦試験を行い、周波数やストロークがなじみにどのような影響を及ぼすかを調べた。また、酸素と硫黄分析および摩耗粉画像解析なども併せて行い、酸化被膜や硫化物被膜の生成状態、摩耗粉形態などを検討した。

2 実験方法

Fig. 1 に、今回使用した Optimol 製 SRV 試験機の概略図を示す。モーター駆動により一對の平歯車を介して、試験片上方の軸を回転し荷重を負荷した。摩擦中ストロークが変化しても、最初に設定したストロークが維持される様に電氣的に制御されている。上部可動試験片として径 10mm の軸受鋼球 (SUJ2, HV750) を用いた。また下部固定試験片として S35C 材を焼鈍し、径 24mm、厚さ 6mm に加工したものを使用した。試験片表面はバフ研磨により鏡面に仕上げた (0.04Ra, HV168 ~ 180)。

この上下試験片間の分離電圧を測定するために、この下部固定試験片を雲母で試験機本体と絶縁した。試験片間に並列抵抗をつなぎ、さらに直列抵抗と電源の 1.5V 電

Fig. 1 SRV Tester.

[†] 原稿受理 平成 18 年 3 月 23 日 Received Mar. 23, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 大分工業高等専門学校機械工学科 〒870-0152 大分市牧, Dept. of Mech. Eng., Oita Tech. College, Maki Oita, 870-0152

** 大分工業高等専門学校技術センター 〒870-0152 大分市牧, Technical Center, Oita Tech. College, Maki Oita, 870-0152

池で回路を形成した。直列抵抗と並列抵抗の比を 14 : 1 とし、並列抵抗の切り替えで油膜（並列抵抗 5kΩ）や被膜（並列抵抗 22Ω）の生成状態を検討できる。完全分離状態で 100mV の電圧が発生するように設計されており、測定電圧をオシロスコープに取り込みデジタル処理をした。潤滑油に鉱油基油 H500 (86.65mm²/s @40℃, 10.70 mm²/s @100℃) を使用した。ディスク試験片周囲にステンレスリングで油溜りを作り、油量約 0.3mℓ で試験を行った。添加剤として硫黄系極圧添加剤、二硫化ジベンジル DBDS を 1% 添加した。試験条件は、荷重 60N、温度 30℃ の一定下で、平均すべり速度を 0.08m/s ~ 0.16m/s まで変え、試験時間を 1 時間とした。

平均すべり速度 $\bar{v}$ は、式 (3) で与えられる。

$$y = \frac{S}{2} \sin \omega t$$

$$= \frac{S}{2} \sin 2\pi f t \quad (1)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = \pi f S \cos 2\pi f t \quad (2)$$

$$\bar{v} = \pi f^2 S \int_0^T |\cos 2\pi f t| dt$$

$$= 2 \times f \times S \quad (3)$$

ここで、 y : 往復動摩擦の変位 [mm]、 S : ストローク [mm]、 ω : 角速度 [rad/s]、 f : 周波数 [Hz]、 v : すべり速度 [m/s] とする。この平均すべり速度 $\bar{v}$ を満足する周波数とストロークの組み合わせは幾つか考えられるが、各平均すべり速度について 4 つの周波数とストロークの組み合わせで実験を行った。試験条件を Table 1 に示す。以後、平均すべり速度のことを単にすべり速度、ストローク 1mm を 1mm とする。また平均すべり速度 0.16 m/s でストローク 1mm の条件を 0.16m/s (1mm) のように書く。

ひずみ度 S_k は次式に示すように、粗さ曲線の平均値回り 3 次モーメントを示す。

$$S_k = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (z - m)^3 \phi(z) dz \quad (4)$$

ただし、それぞれ σ : 自乗平均粗さ、 z : 粗さ曲線、 m : 粗さ平均値、 $\phi(z)$: 確率密度関数である。

粗さは、三次元表面粗さ計からのデータをオシロスコープに入力して AD 変換を行い、ひずみ度を始めとする諸数値を求めた。

Table 1 Test conditions.

Average sliding velocity (m/s)	Frequency (Hz)	Stroke (mm)
0.08	40	1.0
	27	1.5
	20	2.0
	16	2.5
0.12	60	1.0
	40	1.5
	30	2.0
	24	2.5
0.16	80	1.0
	53	1.5
	40	2.0
	32	2.5

摩耗量算出に当たって、摩耗痕中央部付近で摩擦方向に対して直角方向に粗さを測定し、断面積を求めた。更に、摩耗痕中央部とストローク端との等分点付近の粗さを左右 2 箇所測定した。以上、計 3 箇所の断面積にストローク長さを乗じて求めた値の平均値を摩耗体積とし、比摩耗量を求めた。試験機は荷重および摩擦力を圧電式荷重センサー (Kistler 製) で検出し、制御機器内部の演算ユニットで算出した摩擦係数値を記録計に出力している。摩擦力波形はピーク値か平均値かのいずれかを選択できるが、今回は平均値を使用した。

試験終了後潤滑油をヘキサンで希釈し、孔径 0.45μm のフィルターでろ過して、摩耗粉を採取した。パソコン上で画像解析を行い、粒径、光沢度などの摩耗粉形態パラメーター⁵⁾を求めた。

3 実験結果および考察

3・1 摩擦係数変化

Fig. 2 (a)~(c) は基油および DBDS 添加油を使用し、すべり速度 0.08m/s ~ 0.16m/s、1mm と 2.5mm で実験した摩擦係数をすべり距離に対してプロットしている。摩擦係数変化は、始動時に摩擦係数が急激に増加し、しばらく変動する時期と摩擦がやがて低下し摩擦係数がほぼ一定な状態が続く。前者を初期摩擦 (initial friction)、後者を定常摩擦 (steady friction) と呼ぶことにする。

基油では、各すべり速度で 1mm と 2.5mm の間には摩擦係数変化に顕著な差が認められる。すなわち 0.08m/s の場合、1mm の摩擦係数は始動とともに 0.5 前後まで急増しているが、30 分過ぎには初期摩擦から定常摩擦へと変化している。一方、2.5mm では摩擦係数の変動が大きく、この状態が実験終了まで続いた。1.5mm や 2.0mm の場合も、2.5mm と同じ様な摩擦係数の変動が観察された。0.12m/s や 0.16m/s では、0.08m/s よりも摩擦係数の変動も小さく、1mm と 2.5mm とともに定常摩擦係数が低下していることから速度効果が見られる。このように基油では、すべり速度は同じでも、ストロークが小さく周波数の高い方がなじみ効果大きい。

DBDS 添加油では 0.08m/s ~ 0.16m/s のすべり速度で、基油に比べて顕著に摩擦係数が低下しており、添加剤の効果が認められる。1mm、2.5mm いずれも定常摩擦係数は 0.1 以下であり、5 分以内に初期摩擦から定常摩擦状態へ変化している。基油とは異なり、初期摩擦や定常摩擦に及ぼす周波数やストローク、およびすべり速度の影響が小さい。

3・2 初期摩擦終了後の摩擦面

Fig. 3 に、すべり速度 0.08m/s および 0.16m/s における初期摩擦後の 1mm と 2.5mm のストローク端のディスク摩擦面顕微鏡写真を示す。0.08m/s では、1mm、2.5mm とともに表面に多数の凝着痕が観察され、表面の起伏が多かった。またストローク中央部にはアブレッシブ摩耗痕を生じていた。一方、ボールの摩擦表面もディスクと同様、表面の凹凸が大きかった。0.16m/s では摩擦面に酸化被膜が形成されているのが観察され、0.08m/s の場合よりもディスク摩擦面の凹凸が小さかった。1mm の方が 2.5mm

(a) Sliding velocity 0.08m/s

(b) Sliding velocity 0.12m/s

(c) Sliding velocity 0.16m/s

Fig. 2 Changes in coefficient of friction with sliding distance.

よりも摩擦表面は滑らかであり、1mmのボール摩擦面の摩擦は、ほとんど認められないほど軽度であった。

3・3 すべり速度と比摩耗量の関係

Fig. 4は試験後の基油とDBDS添加油の比摩耗量をすべり速度に対してプロットしたものである。比摩耗量は基油、DBDS添加油ともにすべり速度が大きくなるほど小さい。また同じすべり速度では、周波数が高くストローク

Fig. 3 Micrographs of rubbed surface at stroke ends after the stage of initial friction at 0.08m/s and 0.16m/s slid in H500.

Fig. 4 Effects of stroke on specific wear rate under the same sliding velocity in H500 base oil and DBDS-added oil.

の小さい方が比摩耗量は低い。基油で比摩耗量が最も大きいのは、すべり速度 0.08m/s、2.5mm の場合で、 $1.38 \times 10^{-8} \text{mm}^2/\text{N}$ であった。DBDS 添加油の比摩耗量は基油よりも小さく、いずれも $4 \times 10^{-9} \text{mm}^2/\text{N}$ 以下であった。概してストロークの大きい方が基油およびDBDS 添加油の比摩耗量は大きく、0.08m/s ではその傾向が顕著である。DBDS の摩擦低減効果は、摩擦係数の変動が大きく、初期摩擦から定常摩擦への変化が認められなかった 0.08m/s (2.5mm) や 0.08m/s (2.0mm) の場合が大きい。このようにDBDS 添加剤効果は、同じすべり速度では、ストロークが大きく周波数が低いほど、言い換えれば摩擦係数が高いほど添加剤効果が顕著に現れている。

3・4 分離電圧変化

Fig. 5 (a), (b)は、それぞれ1mmと2.5mmの基油およびDBDS 添加油の分離電圧変化（並列抵抗 22Ω）をすべり距離に対してプロットしている。分離電圧測定に当たって、熱起電力や酸化物生成に伴う腐食電位の影響

(a) H500 base oil

(b) DBDS-added oil

Fig. 5 Changes in separation voltage for H500 base oil and DBDS-added oil.

が考えられる。この熱起電力や腐食電位の影響を調べるために、潤滑油 H500 基油、すべり速度 0.16m/s、ストローク 1mm の条件下で分離電圧回路のスイッチを切つて、ボールとディスク間の電位を直接測定した。その結果、電位は始動時から実験終了まで 0mV のままであった。従って、分離電圧への熱起電力や酸化物生成に伴う腐食電位の影響は少ないのではないかと考えられる。並列抵抗 5kΩ での分離電圧は高々 1mV であるが、摩擦や摩耗に速度効果が認められることから、混合潤滑下で境界潤滑に近い状態と考えられる。

基油潤滑では、分離電圧はすべり速度が増えるにつれて高くなっている。0.08m/s では 1mm の方が 2.5mm よりも分離電圧が高い。0.12m/s や 0.16m/s では、初期摩擦よりも定常摩擦状態の方が分離電圧は高く、酸化膜の形成がなじみに大きく影響していることを表している。また初期摩擦状態では、2.5mm の方が 1mm よりも分離

電圧の低下も頻繁に起きており、その電圧降下の値も大きい。従って Fig. 2 の摩擦係数の変動は、摩擦表面酸化物の生成、はく離の反映であると思われる。

DBDS 添加油では基油の場合とは異なり、摩擦係数の変動が大きかった 0.08m/s の分離電圧増加が 1mm と 2.5mm とともに著しい。基油に較べて分離電圧の低下が小さく、硫化物を主とする被膜が摩擦低減に効果を現している。概して同じすべり速度では、2.5mm の方が 1mm よりも分離電圧が高い。摩擦が高かった 2.5mm で DBDS の反応もそれだけ活発であったためと考えられる。すべり速度 0.12m/s や 0.16m/s では、頻繁に分離電圧の増加と下降を繰り返している。

3・5 ディスク摩擦表面の XMA 分析

Fig. 6 は基油潤滑で試験後、ディスクを XMA により酸素分析を行った結果である。摩耗痕中央部付近をライン分析し、酸素強度の平均値 (cps) を求めた。酸素強度は 0.12m/s (1mm) を除き、摩擦係数の変動が大きかった 0.08m/s や 0.12m/s よりも 0.16m/s の方が高い。この酸素分析結果は Fig. 5 (a) のすべり速度 0.16m/s において、分離電圧測定結果が 50mV ~ 100mV と他のすべり速度条件下の場合よりも比較的高かったこととも一致している。

Fig. 7 (a), (b) はそれぞれ DBDS 添加油で、初期摩擦と定常摩擦後、ディスクについて酸素と硫黄を XMA 分析した結果である。初期摩擦の酸素強度レベルは非常に低く、硫化膜の形成が主であることがわかる。また硫黄の強度レベルは、ストロークが大きいほど低い。これは初期摩擦において活性化された摩擦面で DBDS の反応が促進される一方で、硫黄化合物被膜の摩耗も大きく、被膜生成、修復が繰り返された結果と思われる。

(b) の定常摩擦後では (a) の初期摩擦 XMA 分析結果とは異なり、酸素強度の増加が著しい。酸素強度はすべり速度の増加に伴って高くなっているが、逆に硫黄強度は減少している。速度増加により摩擦係数が低下するのに伴い、DBDS の反応も弱くなっている。ストロークが小さくなるにつれて酸素強度が大きくなるのとは対照的に、

Fig. 6 Oxygen intensity at the stage of initial friction in H500 base oil.

(a) At the stage of initial friction.

(b) At the stage of steady friction.

Fig. 7 Oxygen and sulphur analysis at the stage of initial friction and steady friction in DBDS-added oil.

硫黄強度の方は低くなっている。また基油よりも DBDS 添加油の方が酸素強度が高くなることについては、酸素と硫黄の競合結果と見られる。酸化物と硫化物の共存により摩擦面が滑らかになり潤滑効果を高めるが、⁶⁾本実験でもこのような酸素と硫黄の共存効果が発揮されたと思われる。

Fig. 8 は、H500 基油潤滑において 0.12m/s と 0.16m/s の初期摩擦終了後、表面粗さ計でディスク摩擦面のひずみ度を測定し、これを試験片間の接触回数に対してプロットした結果である。また、0.08m/s では -0.2 ~ (-0.1)、0.12m/s と 0.16m/s の定常摩擦後では -0.9 ~ (-0.3) であった。ひずみ度はなじみ状態の進行をよく反映していると言われるが、⁷⁾ひずみ度は概して、接触回数が増加するほど小さくなっている。同じ平均速度で比較した場合、ストロークが小さいほど、言い換えれば周波数が高いほどひずみ度は小さい。平均速度の増大は速度効果の他に、このような接触回数の増加によりなじみ効果を高める。

3・6 摩耗粉形態の特徴

Fig. 9 は、それぞれすべり速度 0.08m/s と 0.16m/s について試験後、油中より摩耗粉を採取し画像処理により光沢度と粒径を求めてプロットした結果を示す。基油と DBDS 添加油中で実験した 1mm と 2.5mm とをプロットしており、精度向上のため、3 μ m 以上の比較的大きな摩

Fig. 8 The relationship between skewness and the number of reciprocating cycles at the initial friction period for H500 base oil.

耗粉について解析の対象にした。光沢度は表面の相対的な反射率を表し、摩耗粉表面の酸化程度や表面の凹凸が大きいほど光沢度は低下する。⁵⁾

基油の場合、0.08m/s (1mm) の摩耗粉の光沢度は大半が 180 以上であるのに対して、0.08m/s (2.5mm) の摩耗粉の光沢度は 180 以下である。2.5mm は 1mm よりも摩擦変動が大きく、表面突起干渉の影響によって摩耗粉表面も起伏に富んだ形状になったと考えられる。DBDS 添加によって光沢度が 1mm、2.5mm とともに低下しているのは、硫化物生成のためと見られる。光沢度の低下は 1mm よりも 2.5mm の方が大きい。摩擦係数が高かった 2.5mm は、DBDS 添加剤の反応もより活発となったためと思われる。0.16m/s (1mm) の基油における光沢度は、0.08m/s (1mm) よりも低下しているが、分離電圧や酸素分析の結果から酸化の影響を示している。DBDS 添加油の場合、光沢度は 0.16m/s (2.5mm) よりも 0.08m/s (2.5mm) の方が低く、摩擦状態の厳しさを反映している。

4 結 言

平均すべり速度一定下で焼鈍炭素鋼平板とクロム軸受鋼球を用い、往復動摩擦のなじみに及ぼす周波数とストロークの影響を調べた結果、以下のようなことが分かった。

(1) 基油潤滑では、周波数が高くストロークの小さい方が摩擦や摩耗が小さかった。DBDS 添加油では、摩擦に対する周波数やストロークの影響は少ないが、摩耗に対しては基油と同様な影響が見られた。

(2) すべり速度が小さい場合、周波数が低くストロークの大きい条件下で主に硫化物が、またすべり速度が大きい場合は周波数が高く、ストロークの小さい条件下で主として酸化物が生成する傾向がある。これは、摩耗粉形態の光沢度に反映していた。

(3) 基油の初期摩擦におけるひずみ度は、周波数が高くストロークの小さい方が、すなわち接触回数が増加すると小さくなる傾向が見られ、なじみの進行に周波数の影響が大きい。

Fig. 9 Morphological wear debris characteristics at sliding velocity of 0.08m/s and 0.16m/s.

参考文献

- 1) Y. Yamamoto and M. Hashimoto, "Effects of Running-in Process on Scuffing", Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol.27, No.9, pp.697-702 (1982).
- 2) Y. Yamamoto and M. Hashimoto, "Changes of Surface properties in Rolling/Sliding Contact During Running-in Process", Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol.29, No.2, pp.137-143 (1984).
- 3) N. Soda and A. Akira, "On Fretting Corrosion", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.25, No.158, pp.995-1003 (1959).
- 4) K. Arai and Y. Yamamoto, "Effect of Organic Sulfides on Depth Composition Profiles of Surface Films Produced by MoDTC", Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.44, No.6, pp.436-443 (1999).
- 5) T. Itoh, J. Sugimura and Y. Yamamoto, "Prognosis of scuffing failure by wear debris image analysis", Proceedings of International Tribology Conference, Part I. pp.193-198 (1995) Han Lim Won Publishing Company.
- 6) M. Tomaru, S. Hironaka and T. Sakurai, "Effects of Oxygen on the Load-Carrying Action of Some Additives", Wear, Vol.41, pp.117-140 (1977).
- 7) K. J. Stout and T. G. King, "Analytical Techniques in Surface Topography and Their Applications to a Running-in Experiment", Wear, Vol.43, pp.99-115 (1977).