電圧を印加した接触二円筒の電圧-電流特性および 摩耗に関する研究*

野西利次^{*1}, 小田 哲^{*1}, 小出隆夫^{*2}

A Study on Wear of Rollers Affected by Impressed Voltage and Electric Current Flowing through Lubricant Film

Toshiji NONISHI^{*3}, Satoshi ODA and Takao KOIDE

^{*3} Fukuyama University, Dept. of Mechanical Engineering,
1 Sanzo, Gakuen-cho, Fukuyama-shi, Hiroshima, 729-0292 Japan

A fundamental study on the electric erosion was carried out with a two-roller testing machine. A property of the electric current which flows between rollers was investigated under the condition of a rolling-sliding contact with the elastohydrodynamic lubrication. The influence of the impressed voltage on the wear of rollers was also investigated. Furthermore, a phenomenon which occurs in the gap between steel disks in the lubricant was observed with a CCD microscope in order to clarify the mechanism of an electricity flow through the elastohydrodynamic film. Experimental results show that the impressed voltage affects considerably the wear of rollers and the electric current flowing between the rollers.

Key Words: Tribology, Machine Element, Electric Erosion, Wear, Roller, Impressed Voltage, Electric Current

1. 結言

電食^{(1),(2)}は機械要素に生じる損傷の一つで、鉄道車輛の歯車や軸受などによく発生すると言われている。電食は機械要素の接触部に電流が流れることにより生じるが、その原因として、電動機の磁気回路不平衡、インバータによる周波数制御による誘導電流、機械部品間の静電容量に起因するもれ電流などが挙げられる⁽³⁾。電食が発生すると摩耗が促進され、機械要素の寿命に著しい影響を及ぼすので、電食の防止は鉄道車輛や種々の電気装置を含む機械の設計では重要な課題である。しかし、電食に関する研究は極めて少なく、電食発生機構は十分解明されているとはいえない状況である。

本研究では、電食に関する基礎的研究として、二円筒接触試験機を用いて実験を行い、転がり-滑り接触する二円筒に電圧を印加し、弾性流体潤滑状態にある円筒の電圧-電流特性を調べた。また、摩耗試験を行い、二円筒接触の摩耗に及ぼす電圧印加の影響を調べた。

さらに、転がり-滑り接触における電流の流れを検討するために、油中に二円筒を設置して電圧を印加し、CCDマイクロスコープにより試験円筒間の微小隙間で生じる現象を観察した。その結果、表面あらさと比べて十分厚い油膜を形成している接触面でも、印加電圧の大きさによってはかなりの電流が流れ、摩耗に影響を及ぼすことなどが判明した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 回転二円筒接触試験機

図1に、回転二円筒接触試験で用いた低速側(L)および高速側(H)試験円筒を示す。試験円筒の材料はS45C調質鋼(熱処理条件: 850℃×1.5h水冷, 620℃×5h空冷, 硬さHV: 248)である。試験円筒は、旋盤加工後、研削仕上げを行い、その表面あらさ R_y は0.3, 1.5, 5.0 μm の3種類である。

この試験円筒を二円筒接触試験機に取付けて荷重を加え、転がり-滑り接触条件で運転し、二円筒間に電圧を印加して円筒間の電圧-電流特性試験や摩耗試験を行った。この二円筒接触試験機は、試験円筒に直結された歯車対の歯数比によって試験円筒の滑り率を決定する機構になっているが、本研究では、回転数と滑

* 原稿受付 2001年9月10日。

^{*1} 正員, 福山大学工学部(☎729-0292 福山市学園町1番地3歳)。

^{*2} 正員, 鳥取大学工学部(☎680-0945 鳥取市湖南町南4-101)。
E-mail: nonishi@fume.fukuyama-u.ac.jp

Fig.1 Test rollers

Fig.2 Electric circuit

り率を低速側円筒で 1000rpm, $-23.8\%[(v_L - v_H)/v_L]$, v_L : 低速側円筒の速度, v_H : 高速側円筒の速度], 高速側円筒で 1238rpm, $19.2\%[(v_H - v_L)/v_H]$ に設定した. 試験円筒は電気絶縁されており, 直流電源を用いて 0~30V の電圧を印加した. この電圧印加による試験円筒間の電流を測定するために, 図 2 に示すように $R_R = 25\Omega$ の抵抗を用いた.

摩耗試験は, 0~30V の電圧を印加した状態で, 最大ヘルツ応力 0.98GPa の負荷条件で行い, 繰返し数が 10^4 , 2×10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 , 10^5 , 2×10^5 , 5×10^5 , 10^6 , 2×10^6 のとき試験円筒を取り外し, 摩耗量を測定した.

なお, 潤滑油には軸受油(FBK-R0150)を用い, 油温 40℃(粘度 0.13 Pa s)とし, 油量 0.3L/min で強制潤滑した.

2.2 静止二円筒接触試験装置

油を介して接触する二円筒の間に流れる電流について検討するため, 油中[パラフィン系基油, 25℃(粘度 0.054 Pa s)]に静止二円筒を設置し, 電圧を印加して電圧-電流特性を測定した. また, CCD マイクロスコープにより試験円筒間の微小隙間で生じる現象を観察した. 試験円筒の寸法は, 直径 60mm で幅 5mm であり, 材質は S45C である. 試験円筒間の微小隙間の大きさは, 試験機に取付けたマイクロメータのヘッドにより試験円筒の一方を移動させ, 円筒中心間距離を変化させることで調節が可能である. 試験円筒の移動量はマイクロメータおよび渦電流式変位計で測定し, 円筒間の電圧, 電流はマルチメータで測定した.

3. 実験結果および考察

3.1 回転二円筒接触試験

3.1.1 電圧-電流特性

図 3(a), 図 3(b), 図 3(c) は, 回転二円筒接触試験において, 10V または 30V の電圧を印加した場合に抵抗 R_R に生じる電圧 V_R の測定結果である. 印加電圧

(a)

(b)

(c)

Fig.3 Measured results of voltage V_R

(a) $R_y = 0.3 \mu\text{m}$ (b) $R_y = 1.5 \mu\text{m}$ (c) $R_y = 5.0 \mu\text{m}$ Fig. 4 Relation between mean current I and Hertz stress σ_H Fig. 5 Relation between current ratio and $h_{\min}$

V_0 が10Vのとき、図3(a)に示すように電圧 V_R は0Vと10Vの間で変化して、断続的に電流が流れているのに対し、印加電圧 V_0 が30Vになると、図3(b)のように V_R は常に30Vとなって電流が安定して流れているのがわかる。図3(c)は、図3(a)と同じ10Vの印加電圧であるが、接触荷重を増加させたときの測定結果で、この場合も電圧 V_R は常に10Vとなって一定値を示し、安定して電流が流れている。

図4(a)、図4(b)、図4(c)は、試験円筒に流れる電流の平均値が、表面あらさ、ヘルツ応力、印加電圧によってどのような影響を受けるのか示したものである。この平均電流 I は、それぞれ円筒静止時および運転時について、各印加電圧に対する抵抗間の電圧 V_R の測定波形より算出した。円筒静止時の平均電流については、いずれの表面あらさの円筒の場合も、接触荷重を加えると電圧 V_R は印加電圧 V_0 に等しくなり、平均電流は一定値($=V_0/R_y$)となった。一方、運転時の平均電流は、ヘルツ応力の増加とともに増大し、ヘルツ応力がある値以上になるとほぼ一定値になることが図4(a)、図4(b)、図4(c)からわかる。また、この平均電流がほぼ一定値になるときのヘルツ応力は、表面あらさ、印加電圧の増加につれて減少していることがわかる。図4(a)~(c)のような実験結果が得られた理由として、つぎのことが挙げられる。即ち、ヘルツ応力が小さいと油膜厚さが大きくなり、さらに表面あらさが十分小さければ、油によって固体面は完全に分離するので、低電圧では電流は流れにくく、電流が流れるためには電圧が高くなって放電する必要があるが、ヘルツ応力や表面あらさが大きくなれば、固体面が接近するので、より低電圧で放電が生じて電流が流れやすくなると考えられる。

図5は、図4(a)と同じ実験結果であるが、横軸にDowsonの理論近似式⁽⁴⁾により計算した最小油膜厚さ

(a) $R_y = 0.3 \mu m$

(b) $R_y = 1.5 \mu m$

(c) $R_y = 5.0 \mu m$

Fig.6 Wear test results ($\sigma_H = 0.98 \text{ GPa}$)

$h_{\min}$, 縦軸に運転時と静止時の平均電流の比を取って描いたものである。図5から、最小油膜厚さが小さくなるほど、また、同じ油膜厚さでは印加電圧が高いほど電流が流れやすくなることがわかる。なお、表面あらさと油膜厚さの比であるD値⁽⁵⁾を計算してみると、図5の実験条件では、 $D=0.26(h_{\min}=2.3 \mu m) \sim 0.43(h_{\min}=1.4 \mu m)$ となり固体接触がほとんど生じないEHL状態であることを示している。

3.1.2 摩耗量に及ぼす印加電圧の影響

図6(a), 図6(b), 図6(c)は、ヘルツ応力0.98 GPaの負荷条件で運転し、電圧を印加したときの試験円筒の平均摩耗量 v (mm^3)と繰返し数 N の関係を示したもので、表面あらさ R_y が0.3, 1.5, $5.0 \mu m$ の試験円筒を用いた実験結果である。この平均摩耗量 v は、低速側円筒および高速側円筒の摩耗重量を測定し、算術平均により求めた。図6(a), 図6(b), 図6(c)より、印加電圧が10Vの場合は、電圧を印加しない場合と平均摩耗量はほぼ同じであるが、印加電圧が20V以上になると、印加電圧の増加とともに平均摩耗量は増大していることがわかる。表面あらさが摩耗量に及ぼす影響に関しては、一般的な傾向として、表面あらさが大きくなると摩耗量が増大しており、特に、電圧が低い方が表面あらさの影響を受けやすくなっていることがわかる。

なお、印可電圧が20V以上の場合は、摩耗試験の後、試験円筒には表面が溶融した痕が見られた。

3.2 静止二円筒接触試験

図5に示したように、回転二円筒接触試験では、試験円筒の表面あらさと比べて油膜が十分厚い場合でも円筒間に電流が流れることがわかった。この実験結果について検討するため、静止二円筒接触試験を行い、二円筒間の微小隙間に生じる現象をCCDマイクロスコープで観察し、さらに二円筒間における電圧-電流特性を調べた。

図7は、最初、非接触状態にある二円筒の一方をマイクロメータのヘッドで移動させて、二円筒間の隙間を減少させていき、ある時点で電流が流れると、今度は逆向きの移動により二円筒間の隙間を増加させた場合の実験結果である。その際、二円筒が非接触状態で印加電圧 V_0 を3V、直流電源の最大許容電流を4Aに設定した。二円筒を油に浸して実験を行うと、図7に示すように、円筒間隙間が0付近(二円筒の電気抵抗が 1Ω となる点を便宜的に0とした)でスパークが生じて急激に電流が流れ始め、電圧は1.7Vに減少し

Fig.7 Limit range of spark

Fig.8 Generation of spark

Fig.9 Relation between voltage V_o and current I Fig.10 Relation between voltage V_o and current I

た. この状態で円筒間隙間を増大していても電流は流れ続け, 円筒間隙間が $80 \mu\text{m}$ に達しても流れた. つぎに比較のため, 二円筒を油槽から取出し, 空气中で同じ条件で実験を行い, その結果も図 7 に示した. この場合も, 円筒間隙間 0 付近でスパークが生じ, 電圧は 0.6V に減少した. 円筒間隙間を増大していくと, 油中と比べて空気中では電圧増加の割合が著しく, 円筒間隙間が $17 \mu\text{m}$ で電流は流れなくなった. なお, 油中での実験後, 円筒間隙間の油に黒い糸状のものが存在しており, 二円筒間の抵抗を測定すると, 円筒間隙間が $80 \mu\text{m}$ であるにもかかわらず数 Ω であった. このことから, 油中で円筒間隙間を減少させていくと, ある位置でスパークが生じて電流が流れ始め, その時の高温によって油の一部が炭化し, そのため空気中よりも油中の方が円筒間隙間が大きくても電流が流れやすくなったと考えられる.

図 8 は, 図 7 の実験の際, CCD マイクロスコープで撮影した油中の円筒間に生じたスパークの映像である.

図 9, 図 10 は, 油中での静止二円筒間の電気抵抗

が $1 \text{ k}\Omega$ になるようにマイクロメータのヘッドで円筒間の隙間を調節した後, 円筒間に 0.2V づつ約 10 秒の割合で, 段階的に印加電圧を増加させたときの電圧 - 電流特性を示している. 表面あらし R_y が $8 \mu\text{m}$ の円筒の場合は, 印加電圧 V_o を増加していくと, 0.8V までは電流 I がほとんど流れないが, 0.8V を超えると急激に電流が流れだしている. その後, 印加電圧を減少させていくと, 電圧上昇時とは別の経路をたどって電流が減少していくのがわかる. 表面あらし $1.6 \mu\text{m}$ の円筒の場合も同様なことが言えるが, 印加電圧上昇時に, より低い電圧で電流が流れ始めている. 二円筒間の電気抵抗は, 二円筒の表面あらしの突起先端の接近度合により決定されると考えられるので, 二円筒間が同じ電気抵抗であっても, あらしが小さい方が平均的な隙間は小さくなり, 隙間に存在する油の量が少なくなる. したがって, 絶縁体としての油が二円筒間の隙間に少ない, あらしの小さい円筒の方が低い電圧でスパークしたと考えられる.

図 9, 図 10 で, 電圧上昇時と電圧下降時で経路が異なっている理由としては, 印加電圧を増加していく

と、ある電圧値でスパークが生じて電流が流れ始め、前述したように、そのときの高温により油の一部が炭化して、その後は電流が流れやすくなり、電圧を減少させた場合は、電圧上昇時とは別の電圧-電流特性を示したものと考えられる。

なお、実験では静止二円筒間の電気抵抗を変化させて、図9、図10と同様な実験を行ったが、 $10\Omega \sim 2\text{ k}\Omega$ の範囲では実験結果に大きな違いは見られなかった。電気抵抗が $2\text{ k}\Omega$ 以上では20Vまでの電圧を印加しても電流は流れなかった。

静止二円筒接触試験で得られた図7～図10の実験結果を、回転二円筒の実験結果の説明に、そのまま用いることは困難であるかもしれないが、回転二円筒接触試験においても、スパークが生じ、その高温により油が変質して電圧-電流特性に影響を及ぼした可能性は図7～図10より十分考えられる。

4. 結 言

電食の基礎的研究として、転がり-滑り接触する二円筒に電圧を印加し、弾性流体潤滑状態にある円筒の電圧-電流特性および摩耗に及ぼす電圧印加の影響を調べた。さらに、油中に静止二円筒を設置し、電圧印加により生じる現象を顕微鏡で観察して、二円筒間を流れる電流について検討した。その結果つぎの結論が得られた。

(1) 転がり-滑り接触する二円筒間に流れる電流は、ヘルツ応力の増加とともに増大し、ヘルツ応力がある値以上になるとほぼ一定値になる。また、この平均電流がほぼ一定値になるときのヘルツ応力は、表面あらさ、印加電圧の増加につれて減少する。

(2) 固体接触がほとんど生じないEHL状態であっても

電流は流れ、最小油膜厚さが小さくなるほど、また、印加電圧が高いほど電流が流れやすくなる。

(3) 印加電圧が低い場合は、電圧を印加しない場合と平均摩耗量はほぼ同じであるが、印加電圧が高くなると、印加電圧の増加とともに平均摩耗量は増大する。また、一般的な傾向として、表面あらさが大きくなると摩耗量が増大するが、特に、電圧が低い方が表面あらさの影響を受ける。

(4) 油中の静止二円筒の隙間で一度スパークが生じると、隙間を増大していても電流は流れ続ける。また、円筒間隙間を一定にして、印加電圧を増加させていくと、ある電圧値において急激に電流が流れ、つぎに印加電圧を減少させていくと、電圧上昇時とは別の経路をたどって電流は減少する。これらの現象は、円筒間隙間の減少あるいは印加電圧の増加により、ある瞬間にスパークが生じて電流が流れ始め、そのときの高温によって油の一部が炭化し、そのため電流が流れやすくなって生じるものと考えられる。

文 献

- (1) 日本トライボロジー学会編、トライボロジー辞典、(1995)、173、養賢堂。
- (2) 山本雄二・兼田楨宏、トライボロジー、(1998)、188、理工学社。
- (3) 渡邊朝紀・池田博志、トライボロジスト、41-7 (1996)、570-575。
- (4) Dowson, D., Proc. Inst. Mech. Eng., 182, Pt. 3A(1967-68), 151-167。
- (5) 日本潤滑学会編、潤滑ハンドブック、(1987)、844、養賢堂。