- (3) 財満鎮雄, 結城明泰: 軽金属, **16**, 76 (1966), 74.
 (4) 財満鎮雄, 結城明泰: 軽金属, **16**, 75 (1966), 13.
 (5) 金井実徳, 大野武房, 高都正男: 機械技術研究所報, **30** (1976), 57.
 (6) 青木利誠, 中沢茂治, 佐藤富司, 織戸克美: マニースト, **4** (1973), 67.
 (7) C. H. Kahng: *Society of Manufacturing Engineers*, (1974), MR 74-862.

一方向摩擦と往復摩擦における0.42%C炭素鋼の摩耗特性*

矢 畑 昇** 葉 山 房 夫*** 犬 養 健**

Noboru Yahata, Fusao Hayama and Takeshi Inukai: Wear Characteristics of 0.42%C Carbon Steel in Uni-directional and Reciprocating Friction. A comparison of the wear between uni-directional and reciprocating frictions was made on an annealed 0.42%C carbon steel. Wear tests of the two sliding modes were carried out with a special designed testing machine under similar conditions of unlubricated sliding in air.

The results obtained are as follows:

- (1) A higher wear is obtained in reciprocating friction for both metallic and oxidative wear.
- (2) The surface residual stresses induced by uni-directional friction are always more compressive.
- (3) The differences in wear for the two sliding modes can be explained in terms of the differences in the amount of abrasion by the oxidative debris, in the difficulty of plastic flow, and in the fatigue strength at the rubbing surfaces.

(Received February 5, 1979)

I. 緒 言

金属のすべり摩耗に関する研究は数多くあるが, 大部分は一方摩擦によって行われている。しかし, 内燃機関, ポンプ, 工作機械などの往復動部分は往復摩擦である。そのため一方摩擦と往復摩擦による摩耗の比較に関する研究もあるが, きわめて少ない^{(1)~(4)}。これらの研究結果によれば, 一般に往復摩擦は一方摩擦より摩耗は多いが, その理由については各研究者によって異なる。すなわち, (1) 摩耗粉の摩擦面への蓄積⁽²⁾, (2) 摩耗粉のアブレシブ作用⁽³⁾, (3) 摩擦面表層部の塑性流動⁽⁴⁾などが摩擦方式により相違するためと考えており, まだ統一した見解は得られていない。また, 凝着摩耗はアブレシブ摩耗などに比べて著しく複雑な現象となり, いまだにその機構については明確でない。古くは Archard のジャンクションの形成・破断説⁽⁵⁾があり, その後 Rabinowicz の表面エネルギー説⁽⁶⁾, Cocks のくさび形成説⁽⁷⁾が発表され, 最近では Suh のデラミネーション理論⁽⁸⁾がある。

本研究は摩擦方式以外ではできるかぎり摩擦条件を同じくするため, 一方摩擦と往復摩擦が同一試験機で行えるものを設計製作した。今回は乾燥すべり摩擦における両者の

摩耗量の相違を調べ, その原因および摩耗機構を摩擦表面と摩耗表面層を詳細に観察分析することにより明らかにしようとした。その結果, 一応の知見を得たので以下報告する。

II. 実験方法

同一試験機で一方摩擦と往復摩擦を行うため, 往復スライダクランク機構を応用した摩耗試験機を設計製作した。Fig.1 にその概要を示す。図においてクランク軸に取付けたカムとそれに従動するレバーにより復行程でピンホルダを持ち上げ, 往行程のみで摩擦し, 一方摩擦となる。このレバーを取外すことにより, 往行程および復行程とも摩擦する往復摩擦となる。したがって, 同一クランク回転数では往復摩擦では一方摩擦に比べ2倍の摩擦回数を行うことになる。Fig.2 はクランク回転数 60 rpm のとき, 行程 50 mm 間における摩擦速度変化を示すものである。

実験に用いた材料はプレート試片が S43C 炭素鋼 (C 0.42, Si 0.25, Mn 0.77, P 0.011, S 0.014 (wt%)), その摩擦相手のピン試片は SUJ2 (C 1.04, Si 0.26, Mn 0.34, P 0.013, S 0.021, Cr 1.40 (wt%)) で, それぞれ Fig.3 の

** 東京農工大学工学部機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei)

*** 早稲田大学理工学部金属工学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo)

* 1978 年 10 月日本金属学会富山大会に発表

Fig.1 Schematic diagram of the wear testing machine.

Fig.2 Relation between the sliding velocity distribution and the stroke at 60 rpm.

Fig.3 Shape and dimension of specimens (mm).

形状に機械加工した後、エメリ紙 400 番まで研磨した。熱処理は S43C プレート試片は真空中で 920°C・1h の完全焼なましであり、SUJ2 ピン試片は無酸化雰囲気炉で 820°C に加熱・油焼入れ後、700°C および 200°C で 1 時間の真空焼もどしを行った。熱処理後の各試片のかたさは S43C: Hv 186, SUJ2: Hv 230 (700°C 焼もどし); Hv 770 (200°C 焼もどし) である。各試片ともアセトンで洗滌して実験に用いた。

摩擦条件は摩擦荷重 19.6, 39.2, 58.8 N, 行程 50 mm, クランク回転数 30, 60 rpm の大気中乾燥すべりである。なお、各摩擦荷重下における摩擦初期の最大接触圧力を Hertz の弾性接触理論式⁽⁹⁾から求めると、おのおの 133, 188, 240 MPa となる。

摩擦面の残留応力は摩擦方向について、 $\alpha\text{Fe}\{211\}$ 面を X 線回折の平行ビーム法で測定し、 $\sin^2\psi$ 法で求めた。その X 線回折条件は特性 X 線: Cr-K α , フィルタ: V, 管電圧: 40 kV, 管電流: 30 mA, 照射面積: 2×2 mm², 時定数: 5 s, ゴニオメータ速度: 1°/min, 記録紙送り速度: 20 mm/min である。

III. 実験結果

1. 摩耗試験

Fig.4 はクランク回転数 60 rpm (平均摩擦速度 100 mm/s) において、700°C 焼もどし SUJ2 ピン試片 (Hv 230) と摩擦したときの焼なまし S43C プレート試片 (Hv 186) の摩擦回数に伴う摩耗進行過程を示すものである。本実験の摩擦荷重 (19.6, 39.2, 58.8 N) 下では摩擦方式に関係なく、すべてあらい条痕を有する金属光沢の摩擦面と金属摩耗粉を生ずる輝面摩耗である。そして摩耗量は摩擦回数とともに直線的に増大し、かつ摩擦荷重に比例して大きくなる。また往復摩擦の摩耗は一方方向摩擦のものに比べて常に大きいという結果が得られた。

Fig.4 Variation of the wear of annealed S43C plates with number of rubbing.

Pin hardness: Hv 230

Crank revolution: 60 rpm

つぎに、硬いピン試片すなわち 200°C 焼もどし SUJ2 (Hv 770) と摩擦したときの S43C プレート試片の摩擦回数と摩耗量との関係を Fig.5 (クランク回転速度 30 rpm: 平均摩擦速度 50 mm/s) および Fig.6 (クランク回転速度 60 rpm) に示す。両クランク回転速度ともほぼ同じような摩耗曲線を示す。多くの場合は比較的摩耗率の多い初期摩耗から著しく摩耗率の小さい定常摩耗に移行し、全摩耗量は摩擦荷重とともに増大している。一方方向摩擦の摩耗が往復摩擦より少ないことは、軟らかいピン試片を相手にしたときと同じである。さらに往復摩擦は一方方向摩擦に比べて摩耗率の小さい定常摩耗に移行し難い。たとえば摩擦荷重

Fig.5 Variation of the wear of annealed S43C plates with number of rubbing.
Pin hardness : Hv 770
Crank revolution : 30 rpm

Fig.6 Variation of the wear of annealed S43C plates with number of rubbing.
Pin hardness : Hv 770
Crank revolution : 60 rpm

58.8 N 下で往復摩擦は初期摩擦が継続されるが、一方向摩擦ではある摩擦回数で定常摩擦へ移っている。摩擦面の状態は摩擦方式(往復摩擦、一方向摩擦)、摩擦荷重、摩擦速度などの相違による明瞭な差異は認められない。しかし、一般に S43C プレート試片では往復摩擦面の方が一方向摩擦面に比べて酸化摩耗粉の付着量が多いように観察された。他方、焼入れ SUJ 2 ピン試片はいずれも酸化摩耗粉でラップされたため、数本の引掻き痕を伴う鏡面を呈していた。

本実験の摩耗試験機には Fig.2 に示すような摩擦速度分布を有するが、いずれの摩擦条件下においても行程の場所

による摩擦面状態や摩耗深さの相違はほとんど観察されなかった。ただし、酸化摩耗では摩耗量が少なかったため、摩耗深さについては確認できなかった。斎藤ら⁽¹⁾の研究では、平均摩擦速度の小さいときに、摩耗深さの速度分布依存性が認められている。

なお、Fig.4 と Fig.6 から、S43C プレート試片の摩耗量は摩擦する相手材の材質が同じでも、そのかたさが硬いほど著しく減少する。この事実は著者ら⁽¹⁰⁾がピン・ディスク式摩耗試験機で得た結果と同じ傾向を示している。

2. 表面層組織

摩耗表面層の組織変化の観察を容易にするため、表面に付着した摩耗粉はアセチルセルローズフィルムを用いたレプリカ法で除去し、ニッケルめっきを施して切断研磨した。切断方向は摩擦方向と平行である。

Photo.1(注：(a),(a')は同一試料で前者は一般的なものを、以下同様)に示すものは、軟らかい SUJ 2 ピン試片(Hv 230)と摩擦したときの S43C プレート試片の代表的な光学顕微鏡組織である。今回の摩擦条件下では組織の相変化は全く認められず、組織の流動のみが観察された。その組織流動方向は摩擦方式から予測されるように、一方向摩擦では一方向にのみ流動しているが、往復摩擦では複雑な流れを示し、かつその程度も小さいようである。流動変形程度とその深さは摩擦荷重とともに大きくなる。また、摩擦面には Photo.1(a')~(d')に示すようなステップが所々に見られ、その箇所に黒く腐食された組織がある。その部分を電子顕微鏡で拡大したものが **Photo.2**(Photo.1(d')の□内の領域)で、著しく変形を受けていることがわかる。すなわち著しく変形されたため腐食されやすくなったのである。

硬い SUJ 2 ピン試片(Hv 770)と摩擦したときの S43C プレート試片の表面層組織を **Photo.3** に示す。軟らかなピン試片と摩擦した場合に比べて組織流動は小さく思われるが、同じように往復摩擦のものは一方向摩擦より小さく、摩擦荷重の増大とともに大きくなる。また、規模と数は小さいがやはりステップ状の箇所が認められた。

3. 摩擦面の残留応力

S43C プレート試片の定常摩擦における摩擦面の残留応力を摩擦方向について、X 線回折法で測定した結果を **Fig.7** および **Fig.8** に示す。軟らかいピン試片と摩擦したときは、摩擦荷重にほとんど関係なく一定の圧縮残留応力を示し、摩耗の少ない一方向摩擦面が大きな圧縮応力である。硬いピン試片との摩擦では摩擦荷重に依存し、摩擦方式や摩擦速度に関係なく 39.2 N 付近で最大圧縮応力を示す。同様に摩耗の少ない一方向摩擦は往復摩擦より大きな表面圧縮残留応力を誘起する。Fig.7 と Fig.8 について各摩擦方向を比較すると、概して摩耗の少ない硬いピン試片と摩擦したときに大きな圧縮残留応力が生じている。

Photo.1 Optical microstructures of the surface layer of S43C carbon steel in the sliding direction (The framed area shown in (d') is enlarged in Photo. 2).

Pin hardness : Hv 230. Crank revolution : 60 rpm

摩擦摩耗による残留応力の定性的な発生機構については既に報告した⁽¹¹⁾。摩擦面の残留応力は摩擦力による表面近傍の引張り塑性変形にもとづく圧縮残留応力と、摩擦熱で表面が急加熱や相変態で膨張した圧縮の塑性変形で生ずる引張残留応力の合成されたものである。これに、繰返し摩擦による累積変形と摩耗による除去、局部的変形や熱発

生なども考慮する必要がある。本実験範囲においての最高閃光温度 (Archard の式⁽¹²⁾) は 200°C 以下であり、熱的影響は少なく主に機械的な塑性変形によるものであろう。

IV. 考 察

一方向摩擦と往復摩擦における摩耗量を比較すると、摩

Photo.2 Electron microscope observation on the framed area shown in Photo.1(d').

耗形態に関係なく、すなわち輝面摩擦であろうと酸化摩擦であろうとも常に往復摩擦の方が摩耗は多い (Fig.4~6). この実験結果は従来報告されている結果^{(2)~(4)}と同じ傾向である。

まず輝面摩擦における摩耗量と摩耗表面層との関係について考察する。摩耗の多い往復摩擦面は常に一方向摩擦に比べて小さい圧縮応力である (Fig.7). いいかえると、摩擦面に大きな圧縮応力を生じる摩擦方式の方が摩耗は少ないことである。また両摩擦方式による表面層の流動組織状態を比較すると、ごく表層の変形量は一方向摩擦の方が大きい (Photo.1). このことは残留応力値と定性的に一致した傾向を示している。ここで、両摩擦方式とも摩耗量は摩擦荷重とともに増大するけれども表面圧縮残留応力はほぼ一定値を示す。X線回折法で測定される応力は、表面から数 μm 深さの平均値である⁽¹³⁾。したがって摩擦方式が同一ならば、表面近傍 (数 μm 深さ) の変形量は摩擦荷重に関係なくほぼ一定と推測される。そして摩擦荷重の増加は流動組織の範囲を深くすることが表面層組織写真から観察される。以上のことから、往復摩擦が一方向摩擦に比べて摩耗の多い原因は、遠藤ら⁽⁴⁾がいうように、ごく表層の塑性流動が前者は後者に比べてしやすい、すなわち1往復の繰り返しにおいて、逆方向の応力によって降伏点が低下 (このことは実接触面積を増大させる) するバウシンガー効果によるものと考えられる。また、一般に両振り疲労強度は片振り疲労強度より小さいとされており⁽¹⁴⁾、往復摩擦は両振り応力に一方向摩擦は片振り応力に対応している。しかし、本実験のように摩耗量の多い場合は疲労の因子は小さいであろう。

Photo.1(d') などに見られるステップに相当する表面状

況を **Photo.4** に示す。細長いみぞは摩擦方向に向かって徐々に深くなり、その先端は突然終わっている (ここがステップとなる)。これは Cocks がごく低摩擦速度 (たとえば 0.33 mm/s) で観察したくさび形成⁽⁷⁾の結果によるものであろう。本実験のように比較的速い摩擦速度でもくさび形成による摩耗が起っていると考えられる。

つぎに、酸化摩擦における摩耗量と摩耗表面層との関係であるが、全体的には輝面摩擦の場合と同じことがいえる。すなわち、往復摩擦の摩耗は一方向摩擦より多く、また摩耗の少ない定常状態に移行し難い (Fig.5, 6)。それに相応してごく表層の流動組織程度は少なく (Photo.3)、摩擦面の圧縮残留応力は小さい値である (Fig.8)。したがって、摩擦方式により摩耗が異なる原因には、前述のバウシンガー効果にもとづく塑性流動の難易や両振り応力と片振り応力の疲労的因子などの相違が関与していると考えられる。さらに、往復摩擦面には一方向摩擦面より酸化粉の付着が多く観察されたことから、前者は後者より摩耗粉が摩擦面から排除し難いと思われる。摩擦面間の酸化摩耗粉は摩耗を増加させる場合と減少させる場合があり、付着性の悪い Fe_2O_3 酸化粉はアブレシブ作用をなして摩耗を増大させる。本実験で生じた酸化摩耗粉は Fe_2O_3 なので、往復摩擦の方がよりアブレシブ作用が多くなる。フレッチングにおいても大きなすべり振幅下では酸化摩耗粉のアブレシブ作用が摩耗の主原因とされている⁽¹⁵⁾。

V. 結 言

焼なまし S43C 炭素鋼の乾燥大気中における同じような摩擦条件下で一方向摩擦と往復摩擦の摩耗特性を調べた結果、次のことが明らかになった。

- (1) 往復摩擦の摩耗は摩耗形態に関係なく、すなわち輝

Photo.3 Optical microstructures of the surface layer of S43C carbon steel in the sliding direction.
Pin hardness : Hv 770. Crank revolution : 60 rpm

面摩耗および酸化摩耗において常に一方向摩擦より大きい。

(2) 摩擦摩耗による表面残留応力は、摩耗の多い往復摩擦では一方向摩擦より小さい圧縮である。

(3) 往復摩擦における摩耗表面層の組織流動は複雑な流動方向を示し、その流動程度は小さい。

(4) 往復摩擦の摩耗が多い原因には、一方向摩擦に比べ

て酸化摩耗粉のアブレシブ作用が大きいこと、表層部の塑性流動が容易なこと、疲労作用が大きいことが挙げられ、それらの各因子の摩耗への寄与割合は摩耗形態により異なると考えられる。

(5) 表面層および摩擦面観察から、Cocks のくさび形成による摩耗機構も起っていることがわかった。

終りに、本研究の実験に協力された当時東京農工大学学

生 石川一郎君(トッパン・ムーア), 高田行哉君(鈴木自動車)に深く感謝します。

Fig.7 Variation of the surface residual stress parallel to the sliding direction with normal force. Pin hardness : Hv 230 Crank revolution : 60 rpm

Fig.8 Variation of the surface residual stress parallel to the sliding direction with normal force. Pin hardness : Hv 770

Rubbing direction →

Photo.4 Worn surface of S43C carbon steel plate rubbed with SUJ2 pin (Hv 230) in the uni-dirc-tion motion, showing the groove produced by the wedge formation. Normal force : 19.6 N, Crank revolution : 60 rpm

文 献

- (1) 斎藤省三, 岡林邦夫, 中村文俊 : 日本金属学会誌, **20** (1956), 600, 604.
- (2) 曾田範宗, 佐藤準一 : 潤滑, **11** (1966), 335.
- (3) R. Ward : Wear, **15** (1970), 423.
- (4) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 藤吉正之雄, 杉下潤二 : 日本機械学会論文集, **39** (1973), 3803.
- (5) J.F. Archard : J. Appl. Phys., **24** (1953), 981.
- (6) E. Rabinowicz : J. Appl. Phys., **32** (1961), 1440.
- (7) M. Cocks : J. Appl. Phys., **33** (1962), 2152; **35** (1964), 1807.
- (8) Nam P. Suh : Wear, **25** (1973), 111.
- (9) S. Timoshenko and J.N. Goodier : *Theory of Elasticity*, Kōgakusha, Tokyo, 2nd edn., (1969), 372.
- (10) 葉山房夫, 矢畑 昇, 宮内一夫 : 鈔研報告, **31** (1976), 1.
- (11) 矢畑 昇, 葉山房夫 : 日本金属学会誌, **41** (1977), 21.
- (12) J.F. Archard : Wear, **2** (1958/59), 438.
- (13) 日本材料学会編, X線応力測定法, 養賢堂, (1966), 263.
- (14) 横堀武夫 : 機械の研究, **12** (1960), 845.
- (15) N. Ohmae and T. Tsukizoe : Wear, **27** (1974), 281.