一方向摩擦と往復摩擦とにおけるアブレシブ摩耗*

矢 畑 昇**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 47, No. 8 (1983), pp. 692-698

Abrasive Wear in Uni-directional Friction and Reciprocating Friction

Noboru Yahata**

A comparison of abrasive wear between uni-directional friction and reciprocating friction was made on annealed plain carbon steels sliding against fresh Al_2O_3 abrasive clothes and repeatedly used ones. Wear tests of the two sliding modes were carried out with a testing machine remodeled from a lathe under similar conditions in air. The experiments indicated that in case of fresh abrasive clothes, a heavier wear always resulted from uni-directional friction, and the wear differences between the two sliding modes increased with increasing normal forces and abrasive grain sizes; in case of repeatedly used ones, a heavier wear resulted from reciprocating friction in steady conditions. The wear differences between the two sliding modes can be explained in terms of the differences in the degree of work-hardening of the rubbed surfaces and the amount of the abrasive grains being blunted, fractured, eroded out of the resin base, clogged and capped with metal chips etc.

(Received March 9, 1983)

Keywords: abrasive wear, uni-directional friction, reciprocating friction, wear difference, abrasive cloth, carbon steels, alumina

I. 緒 言

摩耗現象にはアブレシブ摩耗, 凝着摩耗, 疲労摩耗, 腐食摩耗, エロージョン, キャビテーション, 微動摩耗などがある。通常の金属同士の乾燥すべり摩擦においては凝着摩耗とアブレシブ摩耗が混在し, その占める割合は摩擦条件によって支配される。例えば, 真空中や不活性ガス中での摩擦では凝着摩耗が支配的であるが, 微細な酸化粉の付着した摩擦状態ではかなりアブレシブ摩耗も起こるのである。一方, 金属のすべり摩擦に関する研究の大部分は一方方向摩擦によって行われているが, 内燃機関, 工作機械, 伝導装置などには往復動摩擦部分があるため, 摩擦方式すなわち一方方向摩擦と往復摩擦との摩耗量の相違について調べられている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。著者もこれまでに乾燥⁽⁴⁾および潤滑下⁽⁵⁾における鋼同士のすべり摩擦における摩擦方式の摩耗への影響を調べ, 常に往復摩擦の摩耗が一方方向摩擦のものに比べて大きいという結果を得た。本研究はこれらの一環として, 従来ほとんど調べられていないアブレシブ摩耗⁽⁶⁾が支配的に起こると予測される, 焼なまし炭素鋼と研摩布との乾燥摩擦における一方方向摩擦と往復摩擦との摩耗量の相違を処女面摩擦, および繰返し摩擦の場合について調べた。その結果, 摩擦方式により明確な摩耗量の相違が認められ, その原因について考察した。また金属などの仕上加工

に用いられる研摩布の使用に伴う劣化過程についてもある程度明らかにした。

II. 実験方法

摩擦方式以外ではできるだけ同一摩擦条件下で一方方向摩擦と往復摩擦のアブレシブ摩擦試験を行うために, 旋盤を改造したアブレシブ摩耗試験機を製作した。その概略構造を Fig. 1 に示す。横送り台に研摩布固定板を取付け, 親ねじの正逆(往復台の移動で作動するマイクロスイッチにより電動機を正逆転させる)により往復台を往復運動させ, 摩耗試験片と研摩布との往復摩擦を行う。一方方向摩擦は往復台の運動に同期して作動するソレノイドにより試験片ホルダを復行程中持上げることにより達成される。摩擦行程長さは研摩布固定板の縦方向の両側にある玉軸受取付台の位置調整で決める。さらに常に新しい研摩布箇所と摩擦させる処女面摩擦は横送り用ハンドル(6mm/回)の操作で行う。

摩耗試験片として用いた炭素鋼の化学成分は Table 1 に示す $\phi 19$ mm 熱間圧延材である。試験片は機械加工前に 3 鋼種とも 1173 K, 3.6 ks の完全焼なましを行い, その後 5 mm 角の長さ 25 mm に機械加工(摩擦面は 0/4 エメリー紙まで研摩)し, 923 K, 3.6 ks のひずみ取り焼なまし

** 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)

* 1982 年 9 月日本金属学会札幌大会に一部発表

Fig.1 Schematic diagram of the abrasive wear machine.

Table 1 Chemical composition and hardness of specimens.

JIS	C	Si	Mn	P	S	Hv
S15C	0.14	0.21	0.42	0.014	0.022	105
S45C	0.46	0.27	0.69	0.011	0.022	168
SK5	0.87	0.26	0.38	0.012	0.007	223

Table 2 Mean abrasive grain size.

Abrasive cloth	M.a.g.s. (μm)
GM 60	360
GM 80	260
GM 120	160
GM 180	110
GM 240	80
GM 400	40

を真空中で行った。そのときの各鋼種のかたさを Table 1 に併記した。試験片の摩擦相手になる研磨布の砥粒材質はアルミナ (Al_2O_3) である。用いた砥粒番号とそれらの平均砥粒径は Table 2 に示す通りである。

摩擦条件は摩擦速度 10 mm/s 一定とし、摩擦荷重 10, 30 N, 摩擦行程長さ 50, 100, 200 mm, 摩擦距離は処女面摩擦では 4.2 m, 繰返し摩擦では定常摩耗状態に達するまでの大気中乾燥摩擦である。

摩耗試験後の摩耗試験片および研磨布の摩擦面や摩耗表面層を顕微鏡, X線回折装置, EPMA, 触針式表面あらさ計などを用いて詳細に観察, 分析した。

III. 実験結果

1. 処女面摩擦の場合

常に新しい各種砥粒径の研磨布と 4.2 m 摩擦した処女面摩擦における S45C 炭素鋼の全摩耗量を求め、それを比摩耗量 (mm^3/Nmm) で表したものが Fig.2 である。図から GM 120(平均砥粒径 160 μm) までは摩耗量は砥粒径とともにほぼ直線的に増加し、その後ほぼ一定か、あるいは GM80 で最大を示した後低下する。これらの傾向は従来研

究報告⁽⁷⁾ されている固着砥粒によるアブレシブ摩耗特性と同様で、摩耗量はある砥粒径まで直線的に増大し、それ以上ではほぼ一定となる、いわゆる臨界砥粒径が存在する。一方向摩擦と往復摩擦における摩耗量の相違は、摩耗荷重 10 N および 30 N とすべての砥粒径において、一方向摩擦の摩耗が往復摩擦のものに比べて多いという結果を得た。この結果は著者がこれまでに研究した鋼同士の乾燥⁽⁴⁾ および潤滑下⁽⁶⁾ でのすべり摩擦の場合とは逆の傾向を示すものである。両摩擦方式における摩耗量の相違は砥粒径の大きいほど、また摩擦荷重の大きいほど顕著になる。

上記の実験結果から両摩擦方式の摩耗量の差が顕著である摩擦条件、すなわち臨界砥粒径以上 (GM 120, 80, 60) で摩擦荷重 30 N を選び、摩擦行程長さおよび硬さ(鋼種)が両摩擦方式の摩耗量の差に及ぼす影響を調べた。それらの結果を Fig.3 および Fig.4 に示す。本実験条件の範囲では摩擦行程長さや試験片材質に関係なく、処女面摩擦では常に一方向摩擦の摩耗が往復摩擦のものに比べて多い。し

Fig.2 Relation between specific wear and mean abrasive grain size.

Material : S45C. Stroke length : 100 mm

Fig.3 Relation between specific wear and stroke length.

Material : S45C. Normal force : 30 N

Fig. 4 Relation between specific wear and hardness.
Normal force : 30 N. Stroke length : 100 mm

Fig. 5 Relation between c.l.a. roughness and mean abrasive size.
Material : S 45 C. Normal force : 30 N.
Stroke length : 100 mm.

Fig. 6 Relation between half-value breadth ratio of X-ray diffraction line and mean abrasive grain size.
Material : S 45 C. Normal force : 30 N.
Stroke length : 100 mm.

かし摩擦行程長さの比摩擦量および両摩擦方式の摩擦量の差に及ぼす影響に一定の傾向は認められなかった。また炭素鋼の標準組織におけるかたさの増加は比摩擦量を減少させるが、両摩擦方式の摩擦量の差には同様に明瞭な効果は示さなかった。ただし比較的硬い共析鋼 SK 5 は他の 2 鋼種 (S 15 C, S 45 C) に比べると砥粒径および摩擦方式の相違による摩擦量への影響は小さい。

各種砥粒径の研磨布で 4.2 m 摩擦した後、すなわち定常摩擦状態における摩擦面の中心線平均あらさ R_a と摩擦面に平行な $\alpha\text{Fe}\{211\}$ 面の X 線回折線の半価幅比 b/b_0 (b_0 は摩擦前の半価幅で $b_0=1^\circ 25' 30''$ である) を測定した。それらの結果を Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれ示す。中心線平均あらさ R_a は GM 80 (平均砥粒径 260 μm) まではほぼ直線的に増加し、その後一定か、やや低下する。また一方方向摩擦のあらさが往復摩擦のものより全体的に大きい。半価幅比 b/b_0 は両摩擦方式とも砥粒径とともに漸次増大し、かつ一方方向摩擦の方がわずかに大きい。半価幅のブロードは一般に結晶粒の微細化や結晶粒の内部ひずみに原因するものである。しかし本測定条件では半価幅の情報は約 10 μm 深さの平均的なものであり、砥粒が直接関与するごく表層の損傷程度が粗砥粒径の方が必ずしも大きいとは言えない。Fig. 7 に細砥粒径および粗砥粒径による摩擦面近傍の組織を示す。砥粒径の大きいほど組織の流動が大きく、かつ深部まで及んでいる。また一方方向摩擦の組織流動は往復摩擦のものより大きい。さらに砥粒径の大きい GM 80 や GM 60 では摩擦面に象がなされた砥粒がたびたび観察された (例えば、Fig. 7 (d) 参照)。

2. 繰返し摩擦の場合

研磨布の同一箇所を繰返し摩擦する場合 (以下繰返し摩擦と称する) における S 45 C 試験片の摩擦回数に伴う摩擦量の進行曲線を各種砥粒径をパラメータとして表したものが Fig. 8 である。摩擦初期には高い摩擦率を示すが繰返し摩擦とともに漸次摩擦率は低下し、特に細かい砥粒径ではある摩擦回数後ではほぼ一定の摩擦量に飽和し、摩擦が起こらなくなる。定常摩擦状態ではいずれの砥粒径においても往復摩擦の摩擦が一方方向摩擦のものに比べて多い。この傾向は前述の処女面摩擦とは逆の傾向である。しかし粗砥粒径側 (GM 60, GM 80) ではある摩擦回数までは一方方向摩擦の摩擦が大きいことが測定された。

ここで繰返し摩擦初期における摩擦回数 400 回までの摩擦量を摩擦荷重 10 N および 30 N について詳細に実験を行った。摩擦荷重 10 N の結果を Fig. 9 に示すが、30 N のときはこの約 3 倍の摩擦量が得られたほかはほぼ似た傾向を示した。Fig. 8 に見られた粗砥粒径側ではある摩擦回数までは一方方向摩擦の摩擦が往復摩擦のものに比べて多いことが再度確認された。すなわち摩擦回数 400 回までは摩擦荷重 10 N では粗砥粒径 (GM 60, 80) では一方方向摩擦の摩擦が多く、細砥粒径 (GM 120, 240, 400) では往復摩擦の摩擦が

Fig.7 Optical microstructures of the surface layers abraded against the fresh coated abrasive clothes at 30 N.

Fig.8 Variation of wear volume with number of friction at 10 N.

多い。そして摩擦荷重が 30 N になると GM 120 まで一方向摩擦の摩耗が多くなり、摩耗の逆転が細砥粒径側へ移行する。なお粗砥粒径の研摩布では摩擦回数が数百回までは摩耗量と摩擦回数とはほぼ直線的な関係にある。

Fig.8 において摩耗量 M と繰返し回数 N との関係は一般に次式で表示できる⁽⁸⁾。

Fig.9 Variation of wear volume with number of friction at 10 N.

Material : S 45 C. Stroke length : 100 mm.

$$M = M_{\infty} (1 - e^{-\beta N})$$

ここで M_{∞} は極限摩耗量、 β は劣化係数である。 M_{∞} と β を摩耗実験データより最小自乗法で求め、それらの値を図

Fig.10 Relation between ultimate volume and mean abrasive grain size at 10 N.

Fig.11 Relation between deterioration factor and mean abrasive grain size at 10 N.

に表したものが Fig.10 および Fig.11 である。一方向摩擦では往復摩擦に比べて劣化係数 β は大きく、極限摩擦量 M_{∞} は小さい。砥粒径に対する β 値と M_{∞} 値の傾向は Date ら⁽⁹⁾の実験結果と似た傾向にある。

摩擦回数に伴う摩擦係数の変化を最も粗い砥粒径研摩布 (GM 60) と最も細かい砥粒径研摩布 (GM 400) についての測定結果を Fig.12 に示す。他の砥粒径研摩布についてもほぼ同様な傾向を示した。すなわち摩擦開始直後では高い摩擦係数であるが、繰返し摩擦とともに急激に減少する。その後粗い砥粒径側では徐々に低下し、細かい砥粒径側ではほぼ一定の値になる。また砥粒径が大きいほど全体的に大きい。摩擦係数の一方向摩擦と往復摩擦には摩耗曲線のような明瞭な差異は認められなかった。

Fig.13 は GM 60 研摩布と約 3.2×10^4 回繰返し摩擦した試験片の摩擦表面層の顕微鏡組織である。処女面摩擦のものに比べて摩擦面は平滑であり、組織流動の程度も小さい。特に処女面摩擦で観察された摩擦面への砥粒の埋込み

Fig.12 Variation of coefficient of friction with number of friction at 10 N.

Uni-directional friction

Reciprocating friction

GM 60

40 μm

Fig.13 Optical microstructures of the surface layers repeatedly abraded against the coated abrasive clothes at 10 N.

Fig.14 Sections of GM 60 alumina abrasive clothes unused and abraded in reciprocating friction at 10N.

は全く認められなかった。Fig.14 は GM 60 研摩布の未使用および繰返し往復摩擦過程における摩擦方向の断面写真である。未使用状態では鋭く空出した砥粒は繰返し摩擦とともに減少し、かつ細かく破壊されて行くことがわかる。特に砥粒の長手方向が水平状態になって行くことが注目される。また研摩布を構成している裏布の糸が次第に圧縮されていることも認められる。しかし一方向摩擦と往復摩擦における研摩布断面の顕微鏡観察では明瞭な差異を認めることができなかった。

IV. 考 察

大気中乾燥下で焼なまし炭素鋼を各種砥粒径のアルミナ質研摩布と一方向摩擦および往復摩擦で処女面摩擦ならびに繰返し摩擦を行い、それらの摩耗量の比較実験を行った。その結果、金属同士を摩擦した場合と異なり、処女面摩擦では一方向摩擦の摩耗が往復摩擦のものに比べて大きい。一方、繰返し摩擦では処女面摩擦とは逆に往復摩擦の摩耗が一方向摩擦のものより大きいという結果を得た。ただし繰返し摩擦の場合、粗砥粒径研摩布ではある繰返し摩擦回数までは一方向摩擦の摩耗が往復摩擦のものより大きい。以上の結果を生じた理由について種々の観点から以下考察する。

1. 処女面摩擦の場合

本実験で得られた研摩布砥粒径とアブレシブ摩耗量との関係 Fig.2 は、これまでに他の研究者⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾によって報告

されたものと同じ傾向を示す。すなわち摩耗は砥粒径とともにほぼ直線的に増加し、ある砥粒径(臨界砥粒径)以上では一定となる。両摩擦方式とも上記に示した摩擦特性を示すが、両摩擦方式の摩耗量の差は砥粒径が大きいほど、また摩擦荷重が大きいほど大となっている。処女面摩擦においては試験片は常に新しい研摩布箇所と摩擦されるので、両摩擦方式における摩耗量の相違を生ずる原因は研摩布側にあるのではなく、試験片側に存在すると考えられる。一般にアブレシブ摩耗された摩擦面は著しく加工硬化している⁽¹¹⁾。そして摩耗粉として脱落するまでには非常に大きいひずみを受ける⁽¹²⁾。また Khrushchov⁽¹³⁾は冷間加工でかたさを増した(加工硬化)ものは、耐アブレシブ摩耗性は焼なまし材のものと同じか、わずかに低下する傾向の結果を得た。すなわちアブレシブ摩耗においては焼なまし材の摩擦面はアブレシブ砥粒により著しく大きなひずみを受けて極度に加工硬化している。そのために加工硬化材料は耐アブレシブ摩耗性を有せず、加工硬化に要する仕事が必要ないため、むしろ低下するであろう。

以上のことから、本実験で往復摩擦の摩耗が一方向摩擦のものより少ない結果の主因は、往復摩擦では各摩擦回ごとに摩擦方向が反転するために摩擦面の加工硬化程度が一方向摩擦に比べて小さいと推論される。その相違は摩擦荷重が大きいほど、また砥粒径が大きいほど顕著になると考えられる。往復摩擦面の加工硬化程度は摩擦面が粗いため微小硬さ計では測定できなかったが、一方向摩擦のものよ

りX線回折線の半価幅の小さいことおよび表面層組織の塑性流動の小さいことから推測できる。

2. 繰返し摩擦の場合

固着砥粒である研磨紙や研磨布の同一箇所を繰返し摩擦すると、Fig.8に示すように摩擦する金属の摩耗量は摩擦回数とともに漸次減少することは、他の研究者⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾によっても報告されている。そして繰返し摩擦に伴って摩耗が減少する原因として、アプレシブ砥粒先端の摩耗や破壊、砥粒の接着剤からの脱落、金属摩耗粉や破壊・脱落した砥粒などの固着砥粒間への目づまり、砥粒先端への金属片の移着などの増大が認められている。さらにFig.14のようにアプレシブ砥粒の繰返し摩擦による固着状態の変化、すなわち砥粒長手方向が垂直状態から水平状態へ変化して摩耗が減少することも考えられる。そこで本実験で得られた繰返し摩擦における一方摩擦と往復摩擦における摩耗量の相違はFig.8に示すように、定常摩耗状態ではいずれの砥粒径においても往復摩擦の摩耗が一方摩擦のものに比べて多く、粗砥粒径ではある摩擦回数までは一方摩擦の摩耗が多いという理由を上記の諸因子を考慮して考えてみる。

まず研磨布に固着された砥粒の摩擦過程におけるモデルをFig.15に示す。このモデルから往復摩擦の摩耗が一方摩擦の摩耗より多くなる原因には、金属片の砥粒先端に移着する箇所が両側にあること、金属摩耗粉や脱落・破壊砥粒が固着砥粒の両側に堆積できる空間を有するので目づまりが少ないこと、さらに砥粒は両側から交互の繰返し力を受けるので水平になり難いなどが挙げられる。一方、往復摩擦では砥粒が両振りの繰返し応力を受けるため、片振りの繰返し応力である一方摩擦に比べて接着剤の疲労に基づく脱落が起り易く、摩耗の減少が一方摩擦より大きいであろう。特に粗砥粒では接着剤層から砥粒がかなり突出しており、この効果は顕著であろう。例えばFig.8のようにある繰返し摩擦回数までは一方摩擦が多いことは、繰返し応力の様式の差に基づく砥粒の脱落の難易によるものと考えられる。しかし、ある程度脱落してしまうと、移着や目づまりなどの因子が効果的になり、そのため定常摩耗状態では往復摩擦の摩耗が多くなる。細かい砥粒では砥粒の大部分が接着剤層に埋められているために脱落し難く、むしろ移着や目づまりなどの因子が支配的となり、その結果摩擦初期から往復摩擦の摩耗が多いのである。以上

Fig.15 Models of the coated abrasive cloth situation during repeating friction.

のように考えるとFig.8はある程度定性的に説明できる。しかし、このほかに処女面摩擦で認められた試験片摩擦面の加工硬化、砥粒へ移着した金属片の脱落、摩擦トラックからの金属摩耗粉や脱落・破壊した砥粒の排出などの摩擦方式による差異の効果が考えられ、今後さらに詳細な観察による検討が必要である。

V. 結 言

焼なまし炭素鋼と研磨布との乾燥摩擦下における一方摩擦と往復摩擦の摩耗試験を行い、摩擦方式による摩耗量の相違について調べ、その原因および理由について検討した。その結果、次のことが明らかになった。

処女面摩擦では金属同士のすべり摩擦とは異なり、一方摩擦の摩耗が往復摩擦のものに比べて常に大きい。その相違量は砥粒径および荷重が大きいくほど増加する傾向を示した。この主因は摩擦面のアプレシブ摩耗による加工硬化の相違によるものである。

繰返し摩擦では処女面摩擦とは逆に、往復摩擦の摩耗が一方摩擦のものより大きい。ただし粗砥粒径の研磨布ではある繰返し摩擦回数までは一方摩擦の摩耗が往復摩擦のものより大きい。これらの原因は摩擦方式によりアプレシブ砥粒の摩耗や破壊、接着剤からの脱落、目づまり、金属片の移着、接着状態変化など主に研磨布側の劣化程度が相違するためと考えられた。

砥粒径と摩耗量との関係は処女面摩擦では砥粒径とともに摩耗は増加し、ある砥粒径以上で一定となる限界砥粒径が存在する。しかし繰返し摩擦では限界砥粒径は存在せず常に増加する。この原因は砥粒径が大きいくほど劣化し難いことによるものである。

おわりに、本実験の遂行に協力された本学卒 田巻尚芝、増田 耕、加藤公二、斉藤一雄の諸氏に感謝いたします。

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) 矢畑 昇, 葉山房夫, 犬養 健: 日本金属学会誌, **43**(1979), 708.
- (5) 矢畑 昇, 葉山房夫: 日本機械学会論文集, **47**(1981), 1354.
- (6) J. Sugishita, S. Fujiyoshi and T. Imura: Wear, **52**(1979), 219.
- (7) J. Larsen-Badse: Wear, **12**(1968), 35.
- (8) T. O. Mulhearn and L. E. Samuels: Wear, **5**(1962), 478.
- (9) S. W. Date and S. Malkin: Wear, **40**(1976), 223.
- (10) E. Rabinowicz and A. Mutis: Wear, **8**(1965), 381.
- (11) P. J. Alison and H. Wilman: Brit. J. Appl. Phys., **15**(1964), 281.
- (12) J. Larsen-Badse and K. G. Mathew: Wear, **14**(1969), 199.
- (13) M. M. Khrushchov: Proc. Conf. Lub. and Wear, IME, London, (1977), 655.