

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	荷重変動下における炭素鋼の摩擦. 摩擦特性に及ぼすすべり摩擦履歴の効果
Author(s)	後藤穂積
Citation	福岡工業大学研究論集 第38巻第2号 P161-P166
Issue Date	2006-2
URI	http://hdl.handle.net/11478/828
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

Fukuoka Institute of Technology

荷重変動下における炭素鋼の摩擦・摩耗特性に及ぼす すべり摩耗履歴の効果

天 本 祥 文 (物質生産システム工学専攻)
後 藤 穂 積 (知能機械工学科)

Effects of sliding wear history on subsequent friction and wear characteristics of carbon steel under varying load

Yoshifumi AMAMOTO (Material Science and Production Engineering)

Hozumi GOTO (Intelligent Mechanical Engineering)

Abstract

Machines and components in operation are usually subjected to varying loads. Despite this, wear testing has usually been conducted under constant loads. In this study, in order to investigate the effects of changes in loading on the transition from mild to severe wear, pin-on-disk type wear tests of carbon steel in contact with itself were conducted in moist air under dry sliding. During wear testing, the contact load was changed in a step-wise manner just one time, from low to high levels. A longer sliding distance under mild wear conditions at low load in the first stage produces a more flattened and oxidized sliding surface with good wear resistance. In other words, a “quasi-mild wear” regime with low rate occurred, similar to the mild wear, even at high loads in the second stage. The critical sliding distance $L_{S,critical}$ in the first stage necessary for the transition to quasi-mild wear in the second stage is given by an empirical formula. The proposed formula indicates that $L_{S,critical}$ decreases with an increase in the first-stage load and a decrease in the second-stage load. In conclusion the quasi-mild wear can be attained under shorter sliding distance at higher loads in the first stage.

Keywords: Carbon steel, mild wear, severe wear, transition, load change.

1. 緒 言

新たな機械を開発するためには、設計段階で摩擦・摩耗の対策に取り組まなければならない。これは機械要素の接触面間に生じる摩擦を制御し、摩耗を抑える必要があるためである。稼働状態にある機械では構成

要素に作用する荷重、すべり速度等のしゅう動条件が不規則に変動するのが普通である。しかしながら、摩擦・摩耗に関する従来のほとんどの研究においてしゅう動条件を一定に保って試験が行われている。とくに、荷重を試験途中で変化させる試みは見られない。摩耗による寿命を予測して実用機械の構成部品を設計する場合、これらのしゅう動条件が変化する状況における摩擦・摩耗挙動について研究することが重要である。本研究の目的は、接触二面間に作用する荷重を試験途

中で変化させることによって機械の稼働状態に近づけて、荷重変動までのすべり摩擦・摩耗履歴がその後の摩擦・摩耗へ及ぼす影響を調査・考察することである。

一般に無潤滑・一定荷重下における金属の摩耗形態は、激しい摩耗のため金属摩耗粉が生じる“シビヤ摩耗”と低摩耗により微細な酸化摩耗粉が生じる“マイルド摩耗”の2種類の形態に分けられる¹⁾。また材料の種類、雰囲気、接触荷重、すべり速度等に依存して、試験の初期にシビヤ摩耗が現れ、その後マイルド摩耗へ移行する現象が見られる場合もあり^{2,7)}、これを“摩耗遷移”と呼んでいる。

一方、著者らによる荷重変動下の試験^{8,9)}から、荷重増加試験では荷重増加までのすべり摩擦・摩耗履歴によって、荷重増加後の摩耗形態が荷重一定下ではシビヤ摩耗が現れる高荷重域でマイルド摩耗に近い低い摩耗を示す場合があることがわかった。この摩耗形態を“疑似マイルド摩耗”と呼ぶ。そこで本研究においては二段二重荷重下の摩耗試験を行い、第一段階の低荷重下におけるすべり距離(L_s)が第二段階の高荷重下で現れる摩耗形態に及ぼす効果を調べる。第一段階のすべり距離(L_s)および荷重変動前後の荷重(P_L , P_H)を変数として多数の試験を行い、疑似マイルド摩耗が生じる臨界すべり距離($L_{s,critical}$)を表す実験式を求めることを試みた。

2. 試験装置および方法

ピンおよびディスク試験片の供試材として機械構造用炭素鋼 S35C を使用した。S35C の化学成分を Table 1 に示す。なお、素材購入後の熱処理を行っていない。ピン (長さ 52mm, 直径 6 mm) の先端部を更に細い円柱 (長さ 4 mm, 直径 4 mm) に、またディスクの外径、内径、厚さをそれぞれ 60, 25, 7 mm に機械加工した。各試験片は 1500 番 (粒度 $10.5\mu\text{m}$) のエメリー紙で最終研磨され、試験表面の中心線平均あらさ R_a はピン、ディスクでそれぞれ $0.11\mu\text{m}$, $0.04\mu\text{m}$ である。またピンおよびディスクのピッカース硬さはそれぞれ $Hv=$

Table 1 Chemical composition of carbon steels (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Pin specimen	0.33	0.19	0.73	0.014	0.015	0.16	0.05	0.07
Disk specimen	0.35	0.19	0.74	0.019	0.021	0.02	0.02	0.12

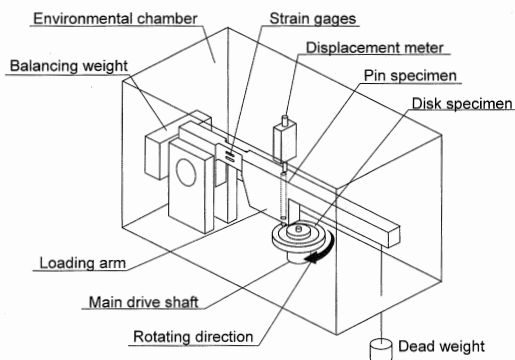


Fig. 1 Pin-and-disk type friction and wear apparatus

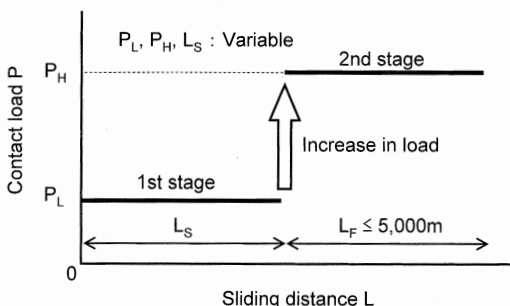


Fig. 2 Loading pattern for wear tests under increased load

238, $Hv=223$ である。

試験には Fig. 1 に示すピン・ディスク形摩擦・摩耗試験機を用いた。その荷重精度は約 $\pm 0.5\text{N}$ である。回転主軸にディスクを、負荷用アームにピンを取り付けて両試験片を接触させ、所定の荷重を加えた。すべり速度を 0.15m/s として試験を開始した。ディスク上の平均摩耗痕直径は 43mm である。

荷重一定試験においては荷重範囲を $P=3.9\text{N}\sim 98\text{N}$ 、全すべり距離を $L \leq 5,000\text{m}$ とした。荷重増加試験法を Fig. 2 に示す。二段二重の荷重増加試験においては、第一段階で低荷重 P_L で任意のすべり距離 L_s だけすべらせた後、高荷重 P_H に荷重を増加させて試験は第二段階に移行する。ここで、荷重一定試験との比較のため第二段階におけるすべり距離を $L_F \leq 5,000\text{m}$ としている。このときの第一段階の荷重 P_L 、第二段階の荷重 P_H 及び第一段階のすべり距離 L_s を変数として試験を行った。また荷重一定試験および荷重増加試験において、試験中にシビヤ摩耗が生じた場合は全摩耗深さ T が 2mm に到達した時点で試験を終了した。

試験部分を雰囲気箱で覆い、試験部分の気体温度を $24 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 RH を $70 \pm 3\%$ の一定に保った。雰囲気箱の内部に水を満たしたビーカーを設置し、それに巻き付けたラバーヒーターを使用して蒸発水蒸気量を調節し、RH を設定した値に維持した。温湿度の監視には電子式温湿度計を用い、接触面近傍にそのセンサを設置した。

アーム上面に変位センサ (精度: $\pm 1 \mu\text{m}$) を接触させ、摩耗によるアームの変位を検出して、ピン試験片の摩耗長さやディスク試験片の摩耗深さの和を変位計で測定した。本研究では同種材同士の組合せで試験を行っているため、アームの変位量をピンとディスクの全摩耗深さとしている。また、アーム側面に接着したひずみゲージで接触面間の摩擦力を検出して動ひずみ計で測定し、摩擦力を荷重で除して摩擦係数を求めた。各測定電圧を A/D 変換器 (12bit) でデジタル化し、パーソナルコンピュータにて試験中所定の時間間隔で記録した。試験終了後に、ディスクのしゅう動面を走査形電子顕微鏡 SEM (Scanning Electron Microscope) で観察した。

3. 試験結果および考察

3.1 摩耗曲線

通常の摩擦・摩耗試験は接触面に作用する荷重を一定に保って行われる。しかしながら、稼働状態にある機械では荷重が変動する場合が多い。本研究においては、摩耗試験を実働機械の負荷状態に近づけるために、試験中に低荷重から高荷重へ荷重を一度だけ増加する試験を行った。

荷重増加試験における摩耗曲線を Fig. 3 に示す。第

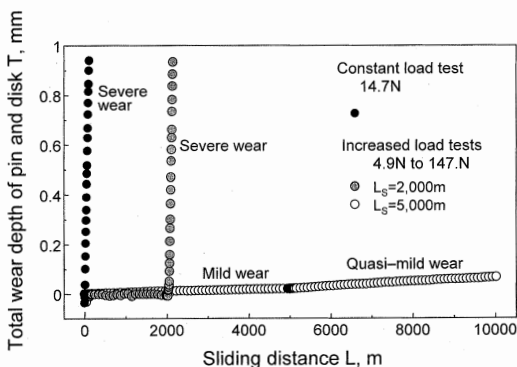


Fig. 3 Wear curves

一段階の荷重 P_L は 4.9N 、第二段階の荷重 P_H は 14.7N 、第一段階におけるすべり距離 L_S は $2,000\text{m}$ および $5,000\text{m}$ である。また荷重増加後の第二段階におけるすべり距離 L_F は $5,000\text{m}$ 以下である。比較のために、 $P=14.7\text{N}$ で行った荷重一定試験の摩耗曲線を Fig. 3 に合わせ示す。荷重一定試験 ($P_L=14.7\text{N}$) では、試験開始直後からシビヤ摩耗が短いすべり距離内で急激に進展する。荷重増加試験において第一段階のすべり距離が短い場合 ($L_S=2,000\text{m}$) は、 $P_L=4.9\text{N}$ から $P_H=14.7\text{N}$ への荷重増加後にシビヤ摩耗が現れる。一方、第一段階のすべり距離が長い場合 ($L_S=5,000\text{m}$) は、荷重増加後にシビヤ摩耗への遷移が起こらず、傾きの緩やかな摩耗が持続する。このように荷重一定試験ではシビヤ摩耗となるような高い荷重下で、マイルド摩耗と同じ程度の直線の傾き、すなわち低い摩耗率を示す摩耗形態を“疑似マイルド摩耗”と定義する。この図より、荷重増加試験における荷重増加後の摩耗形態は第一段階のすべり距離 L_S の大小により変化することが推測される。

3.2 摩擦係数の変化

荷重増加試験におけるすべり距離に伴う摩擦係数の変化例を Fig. 4 に示す。第一段階のすべり距離が $L_S=2,000\text{m}$ の場合は、荷重増加後のシビヤ摩耗状態における摩擦係数は荷重一定試験におけるシビヤ摩耗の摩擦係数と同じ程度の高い値である。一方、第一段階のすべり距離が $L_S=5,000\text{m}$ の場合は、上述のように荷重増加後に疑似マイルド摩耗が現れ、その摩擦係数は荷重一定試験のマイルド摩耗と同じ程度の低い値を示す。

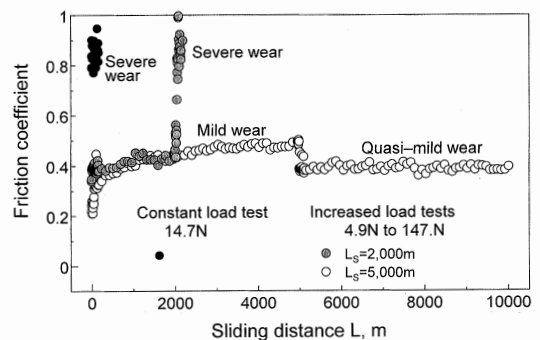


Fig. 4 Change in friction coefficient with sliding distance

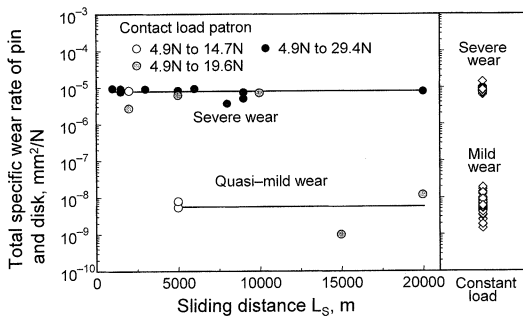


Fig. 5 Relationship between total specific wear rate of pin and disk and sliding distance in 1st stage

3.3 比摩耗量と第一段階のすべり距離の関係

ピンとディスクの比摩耗量と第一段階のすべり距離の関係を示す。この場合、第一段階の荷重 P_L を4.9Nの一定とし、第二段階の荷重 P_H および第一段階のすべり距離 L_S を変数として、荷重増加試験を行った。なお、荷重増加後のすべり距離 L_F を5,000m以下とした。比較のため荷重一定試験の結果を合わせ示している。 $P_L=4.9N$ から $P_H=29.4N$ への荷重増加試験では、第一段階で $L_S=20,000m$ ほどの長いすべり距離を与えても、増加後の摩耗形態はシビヤ摩耗が生じる。 $P_L=4.9N$ から $P_H=14.7N$ への荷重増加試験では、第一段階で $L_S=5,000m$ すべらせた後に荷重を増加すると、疑似マイルド摩耗が生じる。増加後の

荷重が $P_H=19.6N$ の場合、第一段階で $L_S=15,000m$ 以上の長いすべり距離を与えると、荷重増加後の摩耗形態は疑似マイルド摩耗へと遷移する。これより第一段階のマイルド摩耗が進行する過程で十分ななじみ期間を与えることによって、良好な耐摩耗性を持つ摩擦面が得られることが解る。

3.4 摩耗面の観察

試験終了後にSEMを使用して各摩耗形態を表すディスク試験片の摩耗面を撮影した。二次電子像をFig. 6に、組成像をFig. 7に示す。 $P=4.9N$ の荷重一定試験後(総すべり距離 $L=5,000m$)におけるマイルド摩耗の摩耗面(Fig. 6(b))は、全体的に損傷が小さいため、滑らかである。その組成像(Fig. 7(b))を見ると、酸素の吸着及び酸化摩耗粉の付着により黒色に変色している部分が観察される。 $P=4.9N$ の荷重一定試験後(総すべり距離 $L=1,000m$)におけるマイルド摩耗面(Fig. 6(a))は試験初期のひっかき傷の影響が大きいため、若干粗く見える。その組成像(Fig. 7(a))では、 $L=5,000m$ の摩耗面と比べると酸化している箇所が部分的であり、酸化面積はきわめて小さい。

荷重増加試験において荷重増加後に疑似マイルド摩耗が生じた摩耗面(Fig. 6(c))では、荷重一定試験でシビヤ摩耗が生じる14.7Nの負荷が加わっているにも拘わらず、マイルド摩耗と同様に損傷は小さく、表

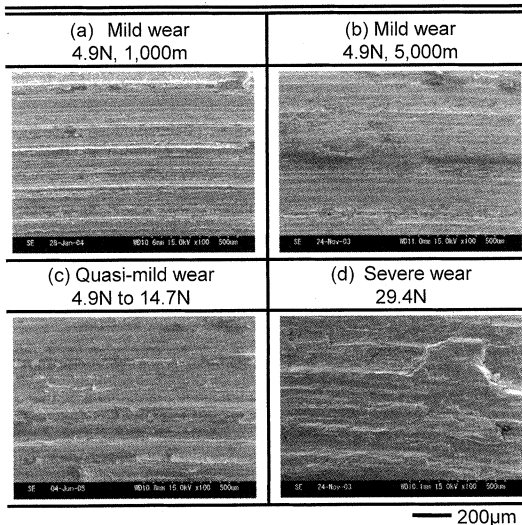


Fig. 6 SEM (SED) images of wear surface

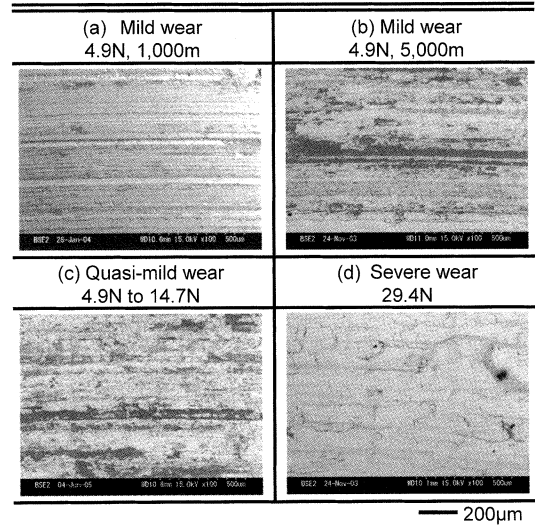


Fig. 7 SEM (BEI composition) images of wear surface

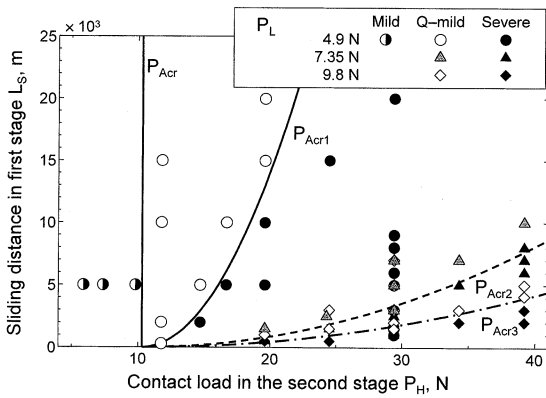


Fig. 8 Wear mode map after an increase in load as a function of contact load in the second stage

面は滑らかである。また、摩耗面 (Fig. 7(c)) が酸化しているのが確認されるが、付着した摩耗粉が負荷に耐えきれず剥離している箇所も見られる。マイルド摩耗面と疑似マイルド摩耗の摩耗面の状態は非常に酷似していることから、高荷重下にも拘わらず、疑似マイルド摩耗の摩耗面は荷重増加前のマイルド摩耗状態を維持していると判断される。これらの結果より、荷重増加試験における第一段階のすべり距離の違いによる摩耗面の性状変化が、荷重増加後の摩耗形態に大きく影響しているものと考えられる。

29.4N の一定荷重試験で得られたシビヤ摩耗の摩耗面 (Fig. 6(d)) は損傷が激しいため非常に粗く、かつ摩耗面 (Fig. 7(d)) は酸化していない。

4. 考 察

第一段階の荷重 P_L を 4.69N, 7.35N, 9.8N とし、第二段階の荷重 P_H を変数として多数の試験を行い、荷重増加後に遷移する摩耗形態のマップを描いた。これを Fig. 8 に示す。

荷重一定試験において各摩耗形態の違いにより、シビヤ摩耗とマイルド摩耗間の境界として上臨界荷重 P_{Acr} ($=10.3N$) および摩耗遷移が起きる下臨界荷重として P_{acr} ($=5.88N$)、また試験初期に摩耗が全く生じない現象すなわち“ゼロ摩耗”が現れる臨界荷重として $P_{Zero\ wear}$ ($=4.74N$) の三本の境界線が引ける^{8,9)}。荷重一定試験において試験荷重 P が上臨界荷重 P_{Acr} より高い場合は、試験中常にシビヤ摩耗が生じる。また、 P が下臨界荷重 P_{acr} より低い場合は、試験中常にマイ

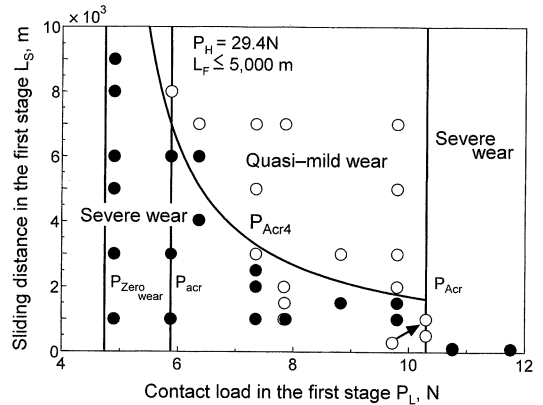


Fig. 9 Wear mode map after an increase in load as a function of contact load in the first stage

ルド摩耗が生じる。 $P_{acr} \leq P \leq P_{Acr}$ の範囲では、試験初期にシビヤ摩耗が生じ、その後あるすべり距離でマイルド摩耗への遷移が起きる。

荷重増加試験においては、上臨界荷重 P_{Acr} よりも高い荷重域で疑似マイルド摩耗が生じ、低い比摩耗量の現れる範囲が高荷重側に大きく拡大する。現時点上臨界荷重 $P_{Acr} = 10.3N$ から $P'_{Acr} = 39.2N$ まで、荷重一定試験の P_{Acr} の約 4 倍程度まで臨界荷重が拡大することがわかっている^{8,9)}。Fig. 8 においてシビヤ摩耗と疑似マイルド摩耗の間に境界線が引ける。第一段階の荷重 ($P_L = 4.69N, 7.35N, 9.8N$) のいずれの場合も、第一段階のすべり距離 L_s が大きいほど、臨界荷重 P_{Acr} を表す第二段階の荷重 P_H は高くなる。

荷重増加後の $P_H (=P_{Acr})$ を 29.4N に統一して、Fig. 8 の摩耗形態のマップを第一段階の荷重でまとめたものを Fig. 9 に示す。荷重一定試験において荷重 P_L がマイルド摩耗となる範囲では、第一段階の荷重 P_L が低くなるにつれて疑似マイルド摩耗に遷移するために必要なすべり距離 L_s は大きくなる。とくに $P_L = 4.9N$ のとき、 $P_H = P_{Acr} > 22N$ では、疑似マイルド摩耗への遷移のために $L_s = 20,000m$ 以上の非常に長いすべり距離が必要である。ただし、第一段階の荷重 P_L をシビヤ摩耗が生じる P_{Acr} 以上に設定すると、荷重増加後もシビヤ摩耗が維持される。

疑似マイルド摩耗に遷移するために必要なすべり距離 L_s は第一段階の P_L と増加後の荷重 P_H が影響して変化することから、シビヤ摩耗と疑似マイルド摩耗の境界線は P_H と P_L の関数として表すことができる。そこで、多数の試験より得られたデータを用いて、疑似

マイルド摩耗に遷移するために必要な第一段階の臨界すべり距離 $L_{S,critical}$ を実験式で表すことを以下のように試みた。

Fig. 8より P_H が高くなると、擬似マイルド摩耗に遷移するために必要なすべり距離 L_S は長くなる。また、 P_H が P_{Acr} (=10.3N) になる時、上述の臨界すべり距離は0となる。そのため $L_{S,critical}$ の P_H に関する項は荷重差のべき乗 $(P_H - P_{Acr})^n$ で表される ($n > 0$)。また Fig. 9より、 P_L が高くなると上述のすべり距離は短くなり、逆に P_L が小さくなるほどその遷移が生じ難くなる。すなわち、 P_L が $P_{Zerowear}$ (4.74N) に近づくほど上述の臨界すべり距離は長くなる。そのため $L_{S,critical}$ の P_L に関する項は荷重差のべき乗 $(P_L - P_{Zerowear})^m$ で表される ($m < 0$)。以上の考え方を基に実験式を求めると、式(1)ようになる。ここで、 A , m , n は定数である。但し、 $P_H \geq 10.3N$, $4.74N < P_L \leq 10.3N$ とする。

$$L_{S,critical} = A (P_H - P_{Acr})^n (P_L - P_{Zerowear})^m \quad (1)$$

実験データからばらつきを考慮して上式中の定数を求めると、式(2)が得られる。

$$L_{S,critical} = 24 (P_H - 10.3)^2 (P_L - 4.74)^{-1} \quad (2)$$

式(2)を用いて、荷重増加試験で擬似マイルド摩耗に遷移するために必要な初期のすべり距離 $L_{S,critical}$ を求めると、Fig. 8中の $P_{Acr1} \sim P_{Acr3}$ 、および Fig. 9中の P_{Acr1} の曲線が得られる。これらの曲線は各 P_L に対するシビヤ摩耗と擬似マイルド摩耗の境界線を明確に示している。式(2)中の定数 A (=24) は材料定数であると考えられるが、現時点ではその妥当性を検証するための手段・方法を持ち合わせていない。

5. 結 言

機械構造用炭素鋼 S35C 同士の組合せで二段二重荷重変動下の乾燥すべり摩耗試験を行った。この場合、第一段階の荷重 P_L 、第二段階の荷重 P_H 及び第一段階のすべり距離 L_S を変数とした。第一段階の低荷重下におけるすべり距離 (L_S) が第二段階の高荷重下で現れる摩耗形態に及ぼす効果を調べた。荷重増加試験から

得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

(1) 第一段階のすべり距離が長くなるに従って、しゅう動面は平坦化し、その過程で生じる酸化の影響を受けて、耐摩耗性の良好なしゅう動面が形成される。このため荷重増加後に擬似マイルド摩耗への遷移が促進される。

(2) 荷重増加後に擬似マイルド摩耗が現れるために必要な第一段階の臨界すべり距離は実験式

$$L_{S,critical} = A(P_H - P_{Acr})^n (P_L - P_{Zerowear})^m, (n > 0, m < 0)$$

で表される。

文 献

- 1) N. C. Welsh, The dry wear of steels, Phil. Trans. Roy. Soc., London, **257**, A-1077, (1965), pp.31-70.
- 2) H. Goto, M. Ashida and Y. Terauchi, Wear behaviour of a carbon steel subjected to an ultrasonic vibration effect superimposed on a static contact load, Wear, **110-2**, (1986), pp.169-181.
- 3) 駒井謙治郎・八木英次・遠藤吉郎, 鋼の乾燥摩耗の遷移に及ぼす Cr 含有量の影響, 材料, **32-361**, (1983), pp.1187-1193.
- 4) 平塚健一, シビヤ・マイルド摩耗遷移における摩耗粉の役割, 日本機械学会論文集 (C編), **58-555**, (1992), pp.182-188.
- 5) A. Iwabuchi, K. Hori and H. Kubosawa, The effect of oxide particles supplied at the interface before sliding on the severe-mild wear transition, Wear, **128-2**, (1988), pp.123-137.
- 6) 遠藤吉郎・岩井善郎, 潤滑下の鋼の摩耗に及ぼす接触面積比の影響, 潤滑, **21-12**, (1976), pp.811-818.
- 7) R. M. Farrell and T. S. Eyre, The relationship between load and sliding distance in the initiation of mild wear of steels, Wear, **15-5**, (1970), pp.359-372.
- 8) H. Goto and Y. Amamoto, Effect of varying load on wear resistance of carbon steel under unlubricated conditions, Wear, **254-12**, (2003), pp.1256-1266.
- 9) Y. Amamoto and H. Goto, Friction and wear of carbon steel near T_1 -transition under dry sliding, Tribology International, In press, Available online 15 August 2005.