

乾燥転がり接触に於ける表面損傷 (第1報)

小 川 壽*

Surface Defect on the Rolling Contact of Dryness (1st Report)

Hisashi OGAWA

Abstract

In this report, the state of surface defect is treated as to a rolling contact of dryness. S45C steel is used, and each slip ratio and each contact pressure is given, in this experiment. The results of this experiment are as follows ;

- 1) The velocity of surface defect is related to the following expression " $dN/dl = cp^n$ ".
- 2) The surface defect is mainly caused by the oxide film of surface.
- 3) The rolling contact of dryness shows the phenomenon like Fretting corrosion.
- 4) Plastic flow is seen in surface defect, which exhibits that residual strain remains.

1. ま え が き

乾式における摩耗については酸化摩耗, 機械的破壊摩耗, 熔融摩耗の3種の摩耗現象が存在することが考えられるが一般にその中で機械的破壊摩耗が摩耗量が最大であることがわかっている¹⁾²⁾. 機械的破壊は鋳鉄の場合摩擦速度によっても違うが, 接触圧力が 20kg/cm^2 以上において生ずると言われている. しかしこれらの結果は平面での接触において, その形態を明きらかにしているために, ころがり接触における損傷の場合に3種の摩耗現象がどのような条件下で存在するかは不明確である. また, 機械的破壊摩耗の一種と考えられる Fretting Corrosion^{3)~7)}は回転接触面において起こることがわかっているので同様に考えねばならない. 特にころがり接触における損傷の誘発について損傷以前のいかなる表面状態がそれに関係するかについては研究がなされていないので, そのことを明きらかにする必要がある.

本報では, 乾式のころがり面に相対的すべりと接触圧力の変化を与えることにより, 損傷した場合の摩耗現象が従来の摩耗現象のどの形態に属するかを明らかにし, 損傷後の状態について述べるとともに損傷を生ずる原因を明らかにし, 表面状態, 硬度, 組織等を調べて詳しく検討を行なった.

2. 実 験 方 法

2.1 試 験 片

本実験で使用した供試用試験片は機械構造用炭素鋼 (S45C) であり, 形状は Fig. 1 に示す, 接触部分は研

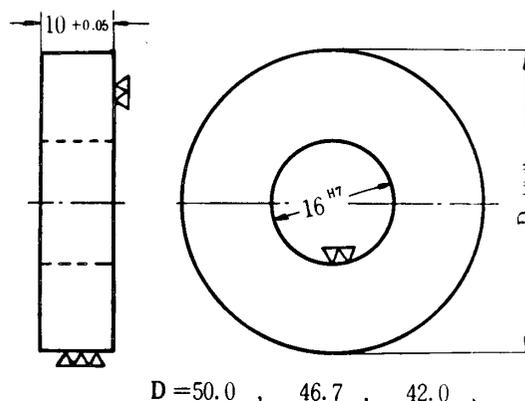
削仕上げ (1.5S) を行ない, 完全に接触を保つようにした. 材料の化学成分, 機械的性質は Table 1 及び Table 2 に示す.

Table 1 Chemical compositions of material (Weight %)

	C	Mn	Si	P	S
S45C steel	0.38	0.78	0.26	0.002	0.008

Table 2 Mechanical properties of material

Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
33.0	62.8	26.4	27.3



D = 50.0 , 46.7 , 42.0 ,

Fig. 1 Test piece

2.2 実 験 方 法

本実験に用いた試験機は, アムスラー型金属摩耗試験

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

機（東京衡機製造 K.K製）で、上部試験片と下部試験片は回転数が10%のずれを生じているため本実験では上部試験片の直径を変えることにより相対的な滑り率の変化を与えた。接触面は乾燥の状態どころがり接触を行なわなければならないので、ベンジンで油をよくふきとって実験を行なった。接触面にかかる荷重は 25kg~60kg として、試験片の表面損傷の拡がりについては一旦停止させ、約 1 mm~2 mm 位の間隔でもって表面損傷の幅を調べた。測定の際、表面に生じた微粉末を余り取り除かないようにして実験の連続性が失なわれないようにした。表面損傷部のあらしについては、微粉末を取り除きベンジンで表面をふいて測定した。

3. 実験結果

3.1 表面損傷の進展

Table 4 及び Table 5 に表面損傷が生ずるまでの回転数が記してある。接触荷重とすべり率については全体として高い方が早く損傷を起こすことがわかるが、ぼらつき易い為余りぼらつきのひどかったものについて

は記載しなかった。Table 3 は試験片の大きさによって同一接触荷重でも接触部最大接触圧力が異なるため、本実験で使用した試験片について接触荷重と最大接触圧力との関係を Hertz の式より求めた。

Table 3 Load and maximum contact pressure as each slip ratio.

Slip ratio	Load	Max Contact pre
%	P kg	P ₀ kg/mm ²
10.0	25	27.09
	40	34.27
	50	38.31
	60	42.00
16.7	25	27.60
	40	34.95
	50	39.08
24.4	25	28.35
	40	35.86
	50	40.09

Table 4 The number of revolution as arising the surface defect.

10%		16.7%		24.4%	
P ₀ kg/mm ²	N rpm	P ₀ kg/mm ²	N rpm	P ₀ kg/mm ²	N rpm
27.09	3080	27.60	8000	28.35	7400
34.27	1650	34.95	4100	35.86	1500
42.00	780	39.08	800	40.09	680

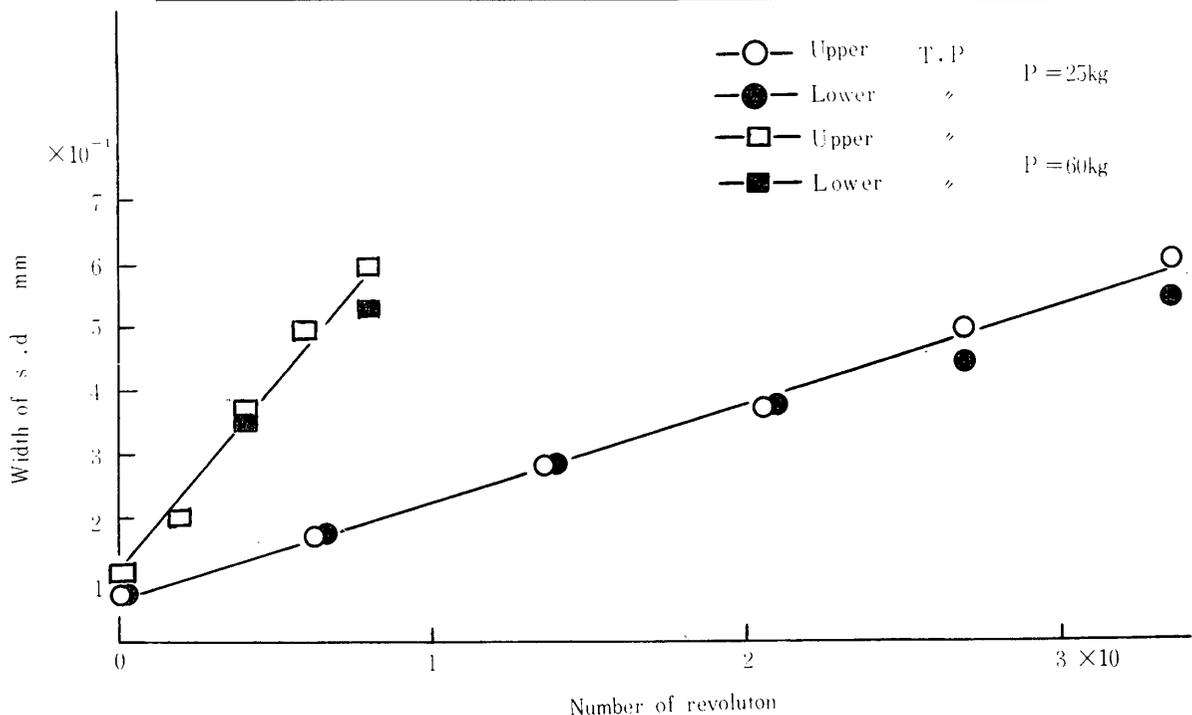


Fig. 2 The development of surface defect against the number of revolution of lower test-piece.

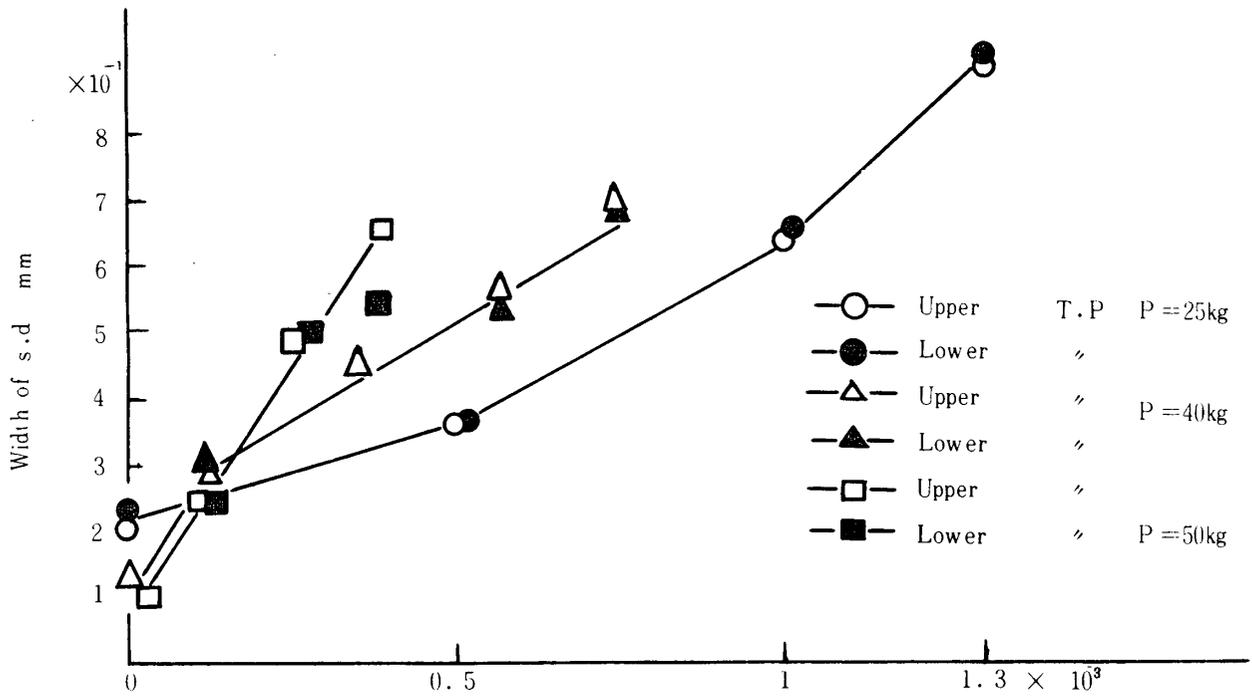


Fig. 3 The development of s. d. Slip ratio 16.7%

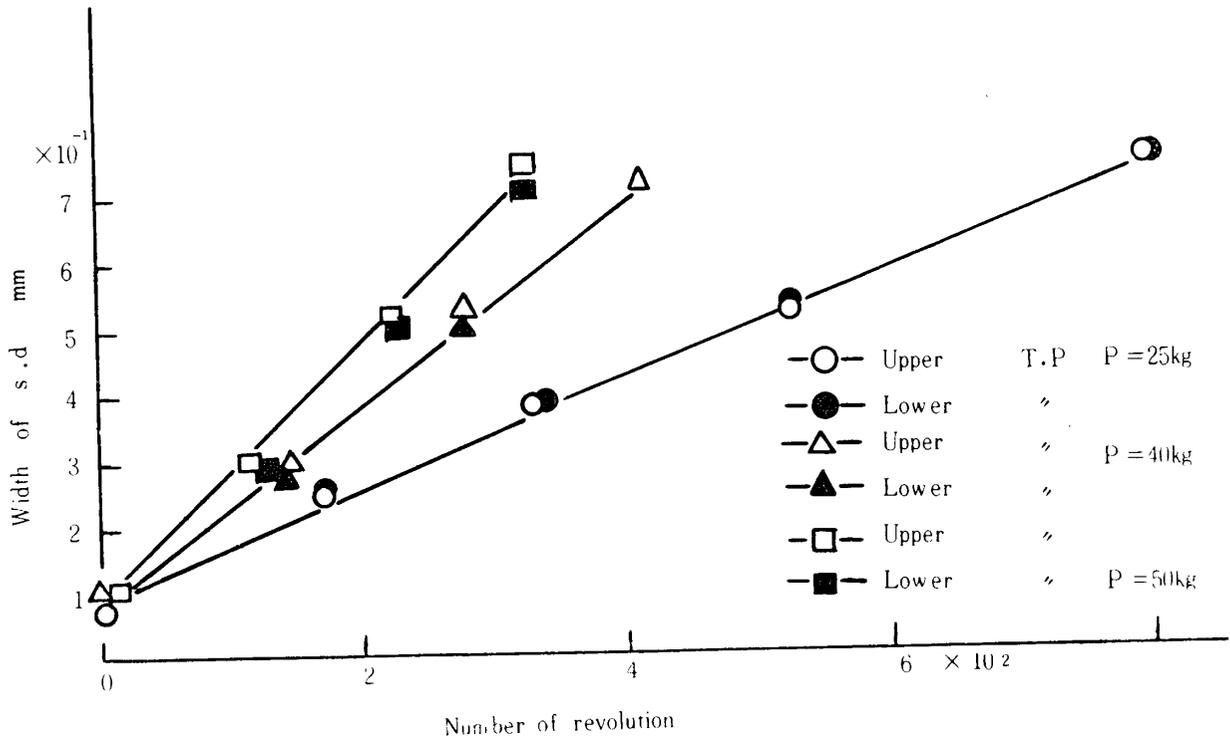


Fig. 4 The development of s. d. Slip ratio 24.4%

Fig. 2～Fig. 4までは表面損傷の進展と回転数との関係を示している。乾燥状態といっても表面は常に乾燥状態を保っているわけではなく、実験を始めてからある回転数（相対すべり率、接触荷重が異なるため）までは最初の状態（実験を始める前までの表面状態）を保つが、その後は表面に酸化物のため湿りを含んだ非常にわずかな摩耗酸化物を生じる。損傷後は微粉末が表面に付着をしている。Fig. 3は少しグラフが曲がっているがこれは最初に表面損傷部分が2ヶ所できたため、初期の状態は拡がり方が早くなっている。

3・2 潤滑油により途中まで疲労させた場合の影響

乾燥状態でころがり接触をさせた場合非常に早く表面損傷が起こるため、試験片の表面近くの状態によって拡がり方がどの程度異なるかを明らかにするため、途中で油（#60、スピンドル油）潤滑させ、 5×10^4 r.p.m

と 2×10^6 r.p.mまで回転させた後の両方の拡がり影にぼす影響を調べた。例えば、Fig. 6の相対すべり率24.4%では $N=55710$ r.p.m まで油潤滑をしてあるが上部試験片の一部はすでに小さな pitting を生じていた。下部試験片については二酸化鉄による酸化膜の影響が見られた。 $N=185950$ r.p.m の場合についても同様であった。しかし両方とも表面損傷後の拡がりについては全く違いが見られない。

Table 5 In case of a surface fatigue by the lubricating oil.

	16.7%	24.4%
N rpm	1250	350
	1010	2150

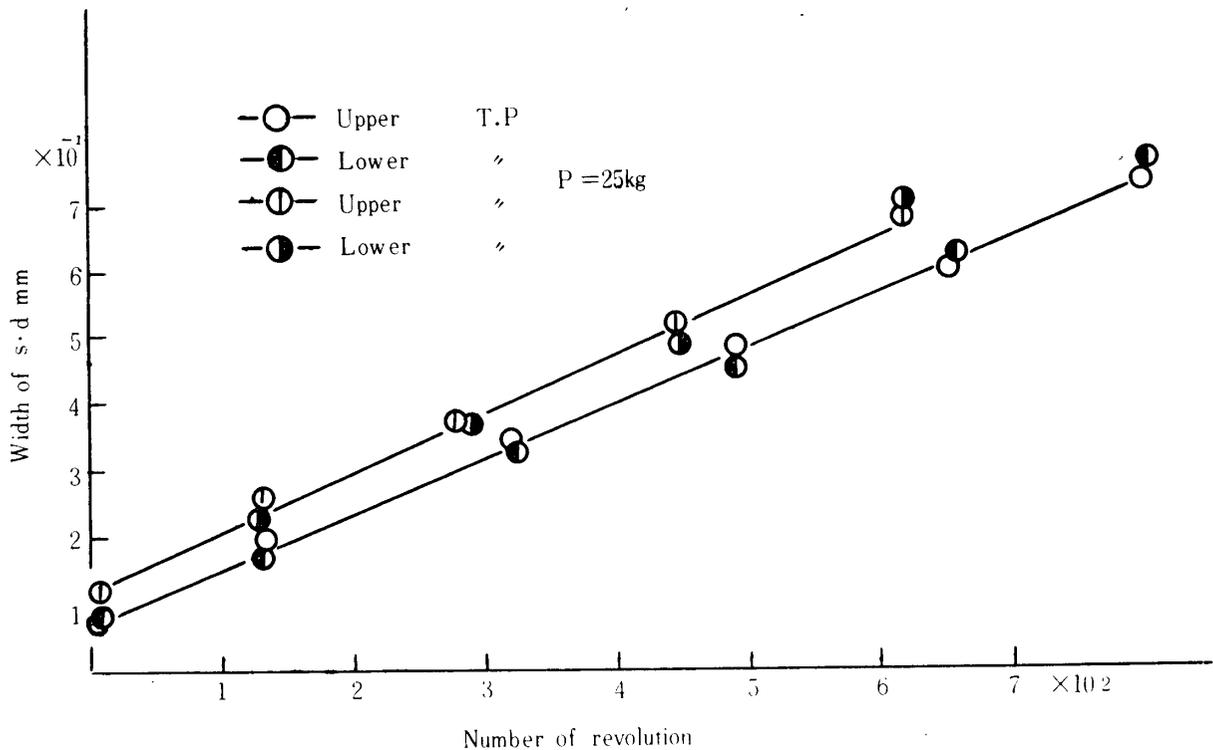


Fig. 5 The development of s. d in case of a surface fatigue by the lubricating oil.

U line is $N=5.3 \times 10^4$ and L line is $N=1.8 \times 10^5$. Slip ratio 16.7%.

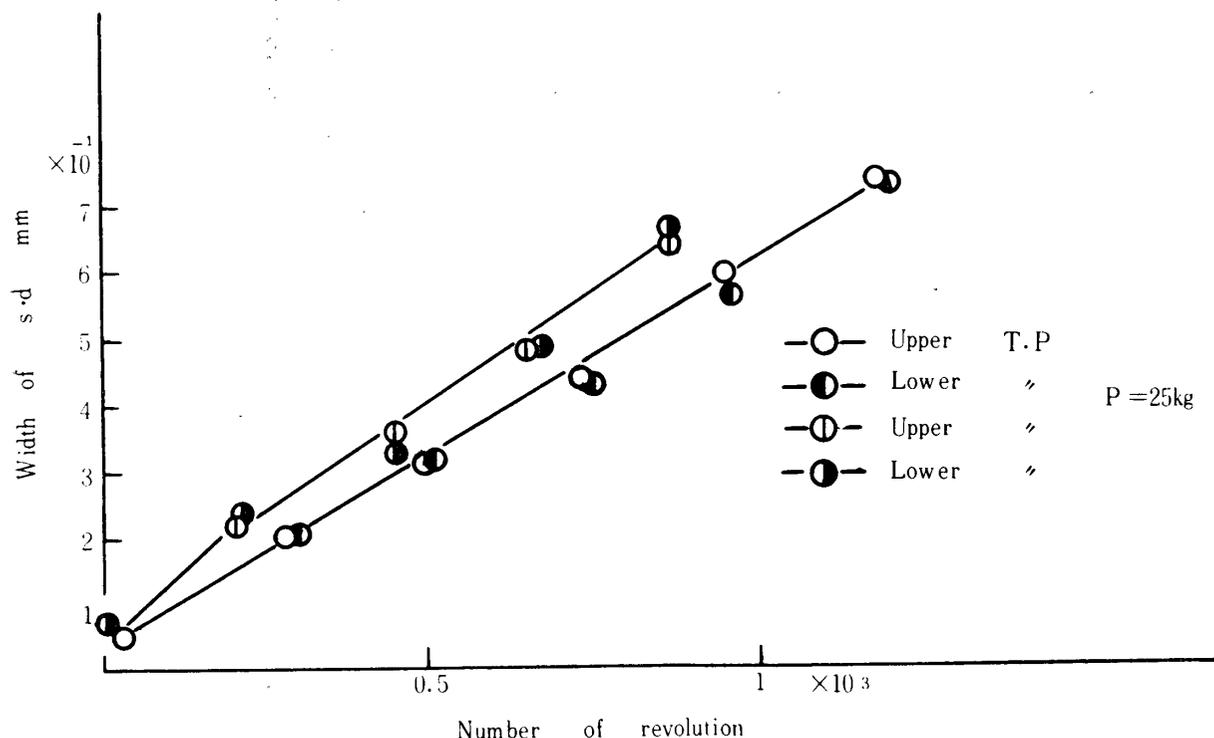


Fig. 6 The development of s. d in case of a surface fatigue by the lubricating oil.
 U line is $N=5.6 \times 10^4$, and L line is $N=5.6 \times 10^4$ Slip ratio 24.4%.

3.3 摩擦係数

接触荷重 25kgと50kgの場合のすべり率の異なった場合について表面損傷を生ずる以前(輝面状態以前)の摩擦係数と表面損傷を生ずる直前(もしくは生じた点)での摩擦係数の値を Fig. 7 に示す。

図から表面損傷以前の状態についてはすべり率には関係なく摩擦係数は一定であるが、表面損傷直前の摩擦係数はすべり率の大きい程非常に高くなっている。

摩擦係数は下記の式で計算した。

$$\mu = \frac{Q}{p} = \frac{T}{r \cdot p} \quad (1)$$

T: 試験片上の Torque kg · cm

p: 接触荷重

Q: 摩擦力

r: 下部試験片の半径

3.4 損傷面の表面あらさ

損傷を起こした面の幅が約6~7mm位のところで表面状態を調べるため、あらさ計を用いて表面の損傷の程度を調べた。Fig. 8は接触荷重が25kgの際の上部、下部それぞれのすべり率による表面あらさであり、Fig. 9は接触荷重50kgについてである。すべり率10%では25kg、50kgともにさ程あらさも大きくないが、特に24.4%のす

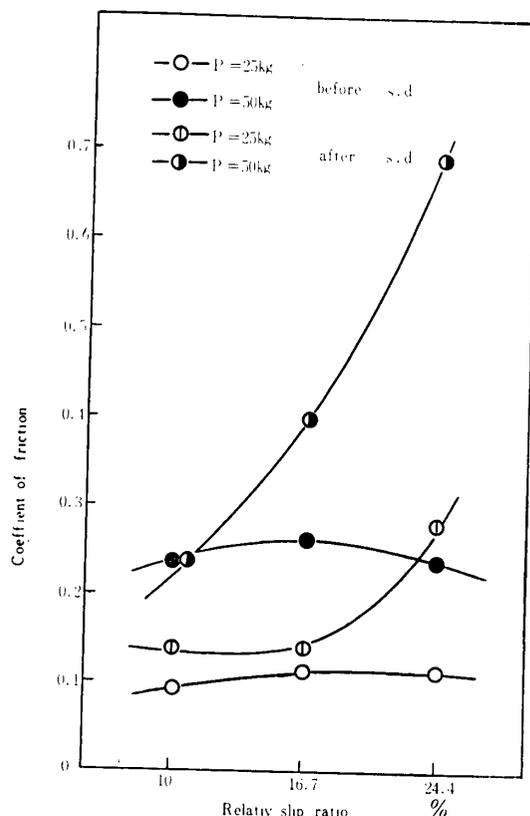


Fig. 7 Coefficient of friction at rolling start and surface defect.

べり率ではあらさは極端になり $p=50\text{kg}$ の場合には表面はぜい性破壊を起こしたようになっている。あらさ全体としては上部、下部試験片を比較した場合、下部試験片の方が大きくなっている。特に最初の基準高さ（損傷

を招いてない部分）と損傷面とを比較してみると、表面全体としては損傷によってくいこんだ面となっているが、損傷のない面との境界領域付近では逆に損傷面のより上がりが見られる。くいこみ量、より上がり量とも接触荷重には余り関係せず、すべり率によって著しい変化が見られくいこみ量、より上がり量はすべり率によって反対の状態を程している。

Taale 6 Swelled height and deficit height.

Slip ratio	T. P	P=25kg		P=50kg	
		Swelled	Deficit	Swelled	Deficit
%		μ	μ	μ	μ
10	Upper	18	10	26	14
	Lower	14	18	16	8
16.7	Upper	10	22	4	28
	Lower	24	38	40	26
24.4	Upper	0	44	0	80
	Lower	14	52	16	06

4. 考 察

以上の結果から、この表面損傷については、その状態が Fretting Corrosion と似ている。一般に Fretting Corrosion は微粉末を生じ、摩耗量は微小振動の繰返し数に対し直線的な増加をすることが知られている。

本実験では損傷の際、微粉末を生じながら損傷が増加し、回転数に対し損傷面幅が比例することより上記のことと一致する。表面損傷の進展が回転数（応力振幅）と比例関係をもっていることが確かめられたので最大接触圧力との関係を式で表わすと、

$$\frac{dl}{dN} = cp_0^n \quad (2)$$

となり定数 c は、すべり率 10% ($c=0.5 \times 10^{-5}$), 16.7% ($c=1.5 \times 10^{-5}$), 24.4% (1.9×10^{-5}) として、 $n=2.5$ とした結果と実験結果を照らし合わせる

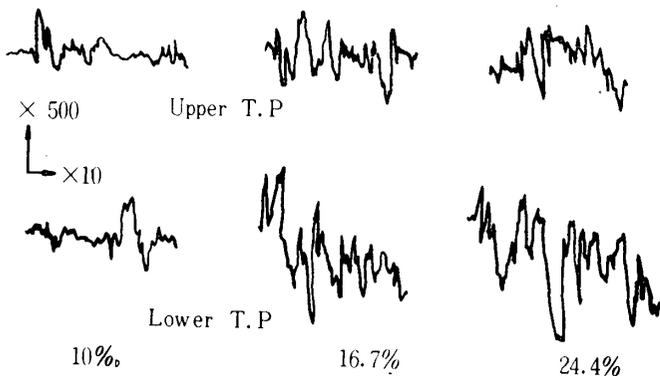


Fig. 8 Roughness of surface defect at $p=25\text{kg}$.

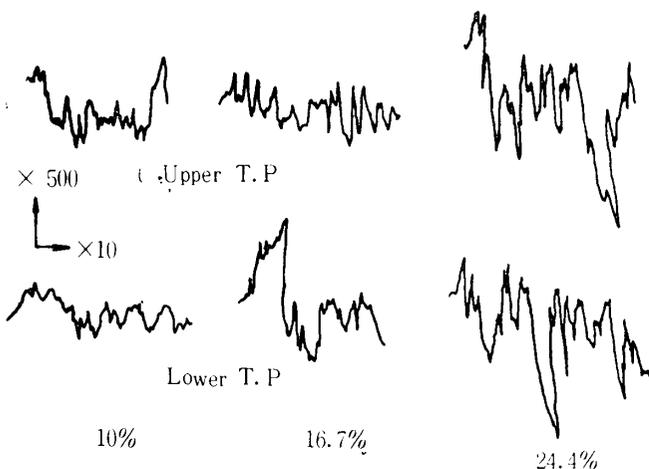


Fig. 9 Roughness of surface defect at $p=50\text{kg}$.

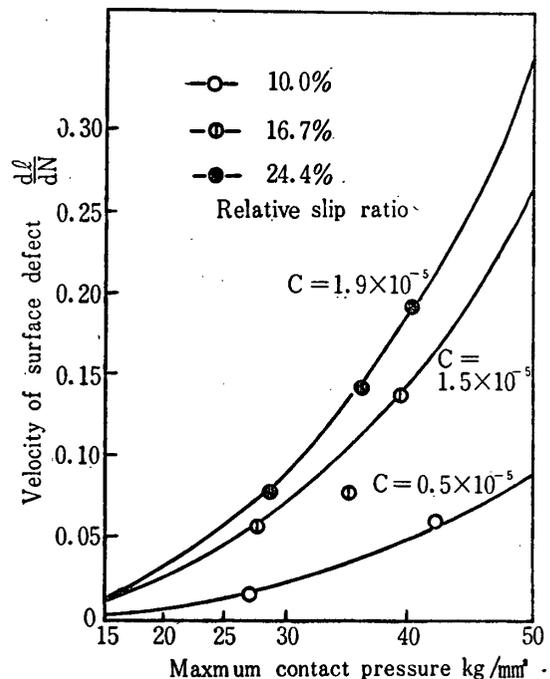
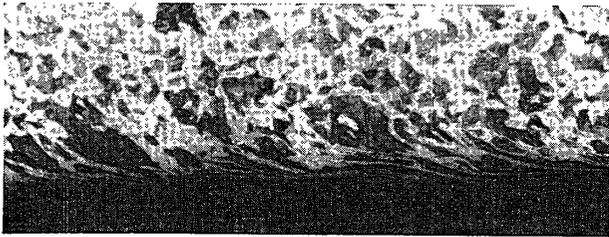


Fig. 10 The relation between the maximum contact pressure and the velocity of surface defect .

と Fig.10 のようになる。Fig.10 よりこの損傷の進展を押しやる方法として、最大接触圧力を下げることとすべり率を低下すれば表面損傷進展速度は低下させることができる。一般に油潤滑による疲労摩耗では何回もの繰返し応力が働き塑性流動を生ずるのであるが、本実験の場合 Fig.12 より表面損傷付近で塑性流動を生じている。



×100

Fig.12 Plastic flow of surface defect.

このことより損傷面近くで非常に高い応力が働き塑性流動を生じさせたと考えられる。表面付近にはそのための残留歪が生じているため、Vickers 硬さ試験によりその値を調べた。

Vickeys 硬度と材料の降伏応力との関係は

$$H_V = CY(\int \delta \epsilon_{eq})$$

で表わされ、降伏応力 Y は歪硬化より次のように表わされる。

$$Y = Y_0 + F |\epsilon_n|^n$$

これを簡単に直線関係で表わすと

$$Y = Y_0 + H \left(|\epsilon_n| - \frac{Y_0}{E} \right)$$

Y : 加工硬化による降伏応力

Y_0 : 最初の降伏応力

H : 材料定数

ここで平均残留歪 $\bar{\epsilon}_q$ は

$$\bar{\epsilon}_p = |\bar{\epsilon}_n| = \int \delta \epsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\epsilon_{x1}^2 + \epsilon_{y1}^2 + \epsilon_{z1}^2}$$

$$\bar{\epsilon}_{xp} = \int_0^c \epsilon_{zp} dz$$

$$\bar{\epsilon}_{yp} = \int_0^c \epsilon_{yp} dz$$

$$\bar{\epsilon}_{zp} = \int_0^c \epsilon_{zp} dz$$

C : ダイヤモンド錐の押しこみ深さ

即ち残留歪 ϵ_p は

$$\bar{\epsilon}_p = \left(\frac{Y}{Y_0} - 1 \right) \frac{Y_0}{H} \quad (3)$$

と表わされ $H = 120 \text{ kg/mm}^2$ としてその結果を Fig.11 に記した。

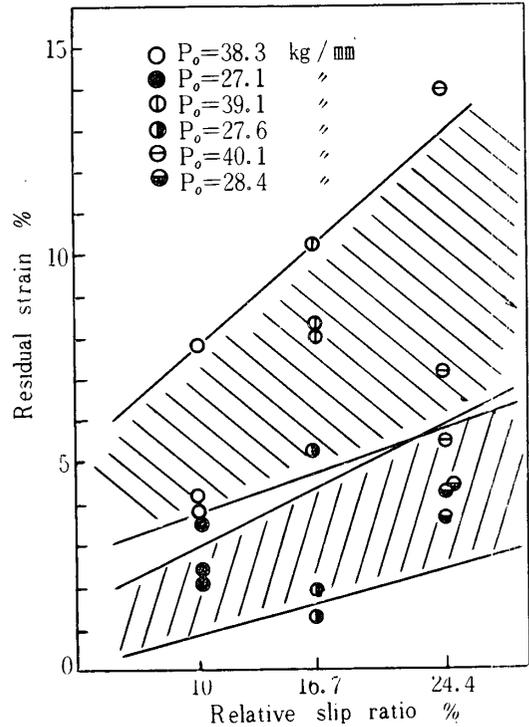


Fig.11 The residual strain of surface against each relative slip ratio.

表面に生じた微粉末の化学成分を調べてみると、接触荷重25kg、相対すべり率10%で Carbon 量0.5%, M_n 量0.8%, 50kgで Carbon 量0.4%, M_n 量0.77%となった。 M_n 量は試験片の化学成分と比べて変化はないが Carbon 量は増加している。このことは表面の析出微粉末が酸化物を含んでいることを裏づけるものとなる。

表面損傷の生ずる原因として剪断応力が問題となるが最大剪断応力が生ずる位置と、表面損傷部のくいこみとの関係について一般に剪断応力は

$$\tau_1 = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)_{x=0}}{2} = 2 \frac{P_0 Z}{\sqrt{b^2 + z^2}} \left(\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right)_{x=0}$$

最大剪断応力は

$$\tau_{1\max} = 0.301 P_0$$

最大剪断応力部の深さは

$$z = 0.786b = 1.195 \sqrt{\frac{q}{E} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \quad (4)$$

($\nu = 0.3$)

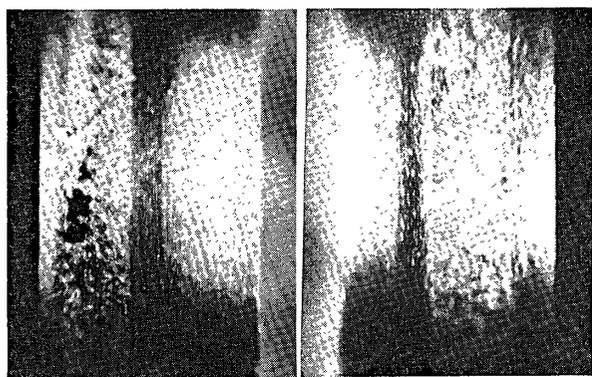
z : 接触面からの深さ mm

b : 接触幅 mm

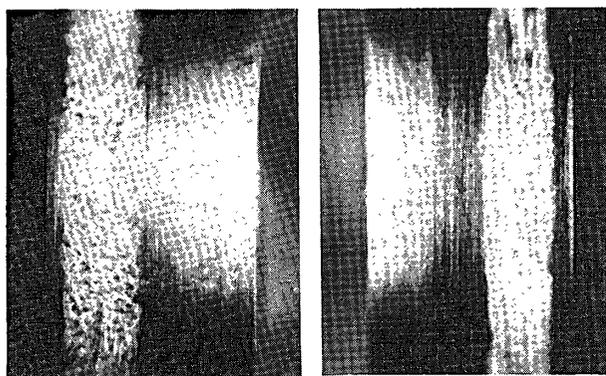
(4)式より計算した値と Table 4 とを比較してみると $P_0 = 28 \text{ kg/mm}^2$ において約20 μ , $P_0 = 40 \text{ kg/mm}^2$ では35 μ となり、すべり率16.7%の場合ほぼ近い値を示して

いるが、10%の場合には浅い部分において損傷を生じており24.4%ではそれよりも深い位置で損傷を生じている。則ち、最大剪断応力の他に別の応力が大きく作用していると考えられる。

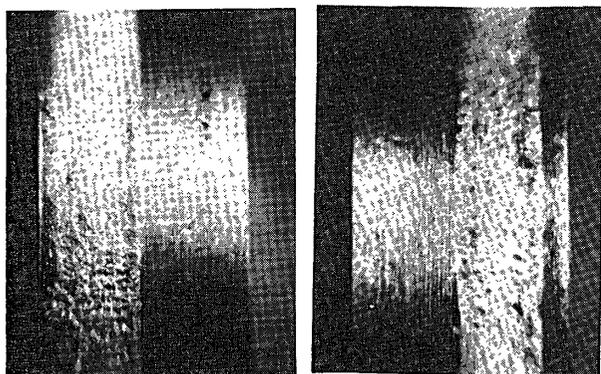
損傷を引き起こす原因としては酸化膜の形成が摩擦係数の増加を引き起こしていると考えられ損傷を防ぐ方法として酸化膜を作らせない必要がある。



Slip ratio 10%



Slip ratio 16.7%



Slip ratio 24.4%

Fig.15 Photograph of T. P that arised the surface defect. Left photo is $p=25\text{kg}$ and right is $p=50\text{kg}$.

5. む す び

本実験に関して次のようなことが明らかになった。

- 1) 乾式の高圧力ころがり接触は、Fretting Corrosion と非常に似た状態を示す。
- 2) 表面損傷速度はころがり面回転数に対し比例関係を持ち、接触荷重、相対すべり率によって非常に左右され、接触荷重に対しては放物曲線の増加をする。油潤滑によって表面にころがり疲れを与えても後の表面損傷速度には影響を及ぼさない。
- 3) 表面の状態は接触荷重、すべり率の増大によって著しく悪くなり、損傷部分はころがり方向に対し塑性流動が見られる。
- 4) 表面損傷に作用する応力として剪断による破壊は実験結果と合わない点があるため、他の要因が大きく作用すると考えられる。表面損傷の生ずる主な原因として接触面の摩擦の増大が考えられるが、そのことは表面酸化膜の形成によるもので、表面酸化膜を生じさせないことが損傷を防ぐ方法の一つとなる。

最後に本研究に対し御指導頂いた山口大学工業短期大学部福井先生及び測定機器に対し御便宜を頂いた本校森重修一氏に感謝の意を表わすとともに本論文に対し御批評して下さい本校足立、望月両先生に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大越 諄, 坂井秀春: 摩耗機構の研究 (第3報) 機械学会論文集 7, 29, p. 29, (1941)
- 2) 大越 諄, 坂井秀春: 摩耗機構の研究 (第4報) 機械学会論文集 9, 35, p. 67, (1943)
- 3) 西岡邦夫, 平川賢爾: フレッチング疲労 材料 18, 191, p. 669, (1969)
- 4) 西岡邦夫, 平川賢爾: Fretting 疲れに関する研究 (第2報) 機械学会論文集 34, p. 1183 (1968)
- 5) 同 (第3報) 機械学会論文集 34, p. 1635, (1968)
- 6) 同 (第4報) 機械学会論文集 34, p. 1645, (1968)
- 7) 同 (第4報) 機械学会論文集 34, p. 2068, (1968)

(昭和46年9月20日受理)