

# 乾燥転がり接触における表面損傷

## 第2報 表層面の破壊機構

小 川 壽

### Surface Defect on the Rolling Contact of Dryness (2nd Reprt)

#### Destructive Mechanism of the Surface

Hisashi Ogawa

#### Abstract

There are two ways of investigating the surface defect caused by contact of two cylinders ; One is a metallographic way, and the other a dynamic one. I investigated the surface destructive mechanism in case of the latter by comparing the destruction by fatigue with the contact stress theory.

#### 1. ま え が き

2円柱が無潤滑ですべりを伴って回転すると、表面に **scaffing** と呼ばれる損傷を起こす。接触している円柱上には垂直力と接線力とが作用しているが、実際には接触面が非常に小さいために、力の分布を測定することは難しいこととなっている。理論的には接触表面の圧力は楕円分布をなしており<sup>1)</sup>、それを外力として表層面および内部における応力を知ることができる。

損傷が起きる状態を調べる手段として、金属学的方法と力学的方法とがあるが、後者については測定上の問題があり理論の裏付けとしては明確なものではなく、前者の状態より推定している<sup>2)~8)</sup>。著者は表面損傷直後の最大応力が疲労の場合に比較して、どのような関係にあるかを調べてみた。

#### 2. 実 験 方 法

使用した試験片は、外径48φを基準とし、外周は研削仕上げ(3S)とした。試験片寸法は図1に示す通りである。使用材料は機械構造用炭素鋼(S25C, S45C)で、その化学成分、機械的性質は表1および表2に示す通りである。熱処理は素材のまま900°Cで60分間保持した後、炉冷して焼なましを行なった。

#### \*実験条件

実験に使用した試験機はアムスラー型金属摩耗試験機

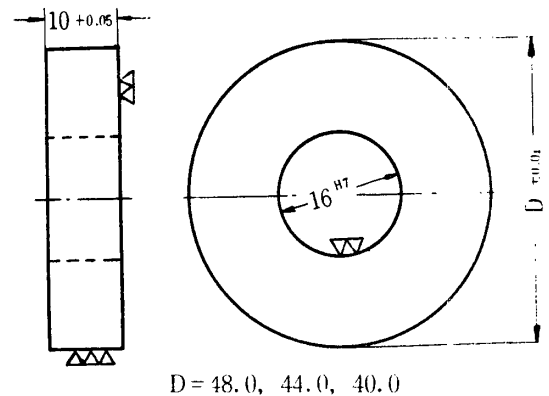


Fig. 1 Test piece

Table. 1 Chemical compositions of material (Weight%)

	C	Mn	Si	P	S
S25C	0.20	0.45	0.23	0.013	0.007
S45C	0.42	0.60	0.27	0.018	0.002

である。実験範囲は次の通りである。

下部試験片直径 48φ

上部試験片直径 48φ, 46.5φ, 44φ

\*宇部工業高等専門学校機械工学科教室

Table. 2 Mechanical properties of material

	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
S25C	31.8	44.4	31.9	59.8
S45C	37.7	66.8	15.9	42.4

相対すべり率 10%, 17.5%, 24%, 25%  
 接触重量 15kg/cm~60kg/cm

3. 接触表面の応力

2円柱が接触する際に、単に接触している場合はnormalな面圧を考えればよいが、回転を伴っている場合にはtangentialな力を考慮しなければならない。これについては、Smithによって理論的に解析がなされている。著者はその結果を基にして、表面上の応力が破壊の条件に対しどのようなようになるか計算した。

接触面上での面圧は

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} \quad \text{---(1)}$$

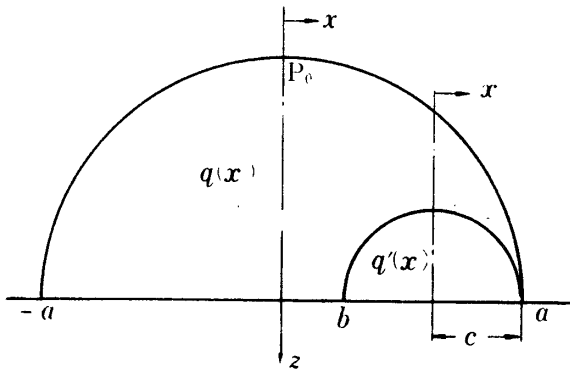


Fig. 2 The stress distribution on the contacted surface

で表わされる。adhesive regionの存在する場合のせん断力分布は

$$q(x) = \mu p(x) \quad \text{---(2)}$$

すなわち、

$$q(x) = \begin{cases} q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} & b \geq x \geq -a \\ q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} \\ -q'_0 \sqrt{1 - \left\{x - \frac{a+b}{2} / \frac{a+b}{2}\right\}^2} & a \geq x > b \end{cases} \quad \text{---(3)}$$

表面上の圧力分布は図2に示すようになる。

$$q_0 = 2p/\pi a \quad p: \text{Total normal force.}$$

$$p_0: \text{Maxmam normal force}$$

q'\_0についてはつり合いの条件より

$$T = \int_{-a}^a q(x) dx = \int_{-a}^a \left[ q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} - q'_0 \sqrt{1 - \left\{x - \frac{a+b}{2} / \frac{a+b}{2}\right\}^2} \right] dx + \int_{-a}^b q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} dx \quad \text{---(4)}$$

これを解くと

$$q'_0 = \left( \frac{\pi a}{2} q_0 - T \right) / \left\{ \frac{a-b}{a+b} \sqrt{ab} + \sin^{-1} \left( \frac{a-b}{a+b} \right) \right\} \quad \text{---(5)}$$

a点で接した、上下試験片は相対変位量Scがb点の臨界変位量Sc maxまで直線的な増加を示し、Sc maxに達すると凝着部分がはれてすべり領域に入る。接線力Tが、T < μpの場合にはadheve regionが存在していることになる。

表面に働く力としては、normal方向とtangential方向とがあるが、normalな力によって生ずる応力は面圧の作用している部分にだけ生じ、adhesive regionが存在してもその影響を受けることはない。

$$x_{x'} = x - \frac{a+b}{2}, \quad c = \frac{a-b}{2}$$

とすると、せん断力で生ずる表面上の応力は次のように表わせる。

$$\sigma_{xt} = \begin{cases} -2q_0 \left[ \frac{x/a}{\sqrt{(x/a)^2 - 1}} \right] + 2q_0 q'_0 \left[ \frac{x'/c}{-\sqrt{(x'/c)^2 - 1}} \right] & x > a \\ -2q_0 x/a + 2q_0 q'_0 x'/c & a \geq x \geq b \\ -2q_0 x/a + 2q_0 q'_0 \left[ \frac{x'/c + \sqrt{(x'/c)^2 - 1}}{b > x \geq -a} \right] \\ -2q_0 \left[ \frac{x/a + \sqrt{(x/a)^2 - 1}}{+ \sqrt{(x'/c)^2 - 1}} \right] + 2q_0 q'_0 \left[ \frac{x'/c}{x < -a} \right] \end{cases} \quad \text{---(6)}$$

$$\tau_{xzt} = \begin{cases} -q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} - q_0 q'_0 \sqrt{1 - (x'/c)^2} & a \geq x \geq b \\ -q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} & b > x \geq -a \\ 0 & x \geq a, x \leq -a \end{cases} \quad \text{---(7)}$$

$$\sigma_{zt} = 0 \quad \text{---(8)}$$

$$\sigma_{yt} = \nu(\sigma_{xt} + \sigma_{zt}) = \nu \sigma_{xt} \quad \text{---(9)}$$

次に実際に表面に生ずる応力は、tangentialな力とnormalな力との合成として表わすことができるから合成の応力は

$$\sigma_x = \begin{cases} -2q_0 \left[ \frac{x}{a} - \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 - 1} \right] \\ + 2q_0q'_0 \left[ \frac{x'}{c} - \sqrt{\left(\frac{x'}{c}\right)^2 - 1} \right] & x > a \\ -P_0\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 2q_0x/a + 2q_0q'_0x'/c & a \geq x \geq b \\ -P_0\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 2q_0x/c \\ + 2q_0q'_0 \left[ \frac{x'}{c} + \sqrt{\left(\frac{x'}{c}\right)^2 - 1} \right] & b > x \geq a \\ -2q_0 \left[ \frac{x}{a} + \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 - 1} \right] \\ + 2q_0q'_0 \left[ \frac{x'}{c} + \sqrt{\left(\frac{x'}{c}\right)^2 - 1} \right] & x < -a \end{cases} \quad (10)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{xzt} \quad (11)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} -P_0\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} & |x| \geq a \\ 0 & x > a, x < -a \end{cases} \quad (12)$$

$$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z) = \begin{cases} -2P_0\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 2q_0x/a + 2q_0q'_0x'/c & a \geq x \geq b \\ -2P_0\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 2q_0x/a \\ + 2q_0q'_0 \left[ \frac{x'}{c} + \sqrt{\left(\frac{x'}{c}\right)^2 - 1} \right] & b > x \geq -a \\ \sigma_z & x > a, x < -a \end{cases} \quad (13)$$

次にadhesive regionの存在についてはすべり率10%, 接触荷重 30kg/cm, R = 4 cm, E = 2.1 × 10<sup>6</sup>kg/cm<sup>2</sup>として相対変位量を計算すると

$$Sc = 2as = 8.16 \times 10^{-4}$$

となり文献3の結果から摩擦係数φは

$$\phi = T/\mu p = 9.2$$

となりc/a = 0.25となってしまう。

すなわち, 相対すべり率が10%においては adhesive regionは存在しているが, 20%になるとφ = 1となり adhesive regionは存在しなくなる。本実験の場合 adhesive regionは考慮せずに計算を行なった。

ここで破壊が生ずる応力として考えてみる場合, 最大主応力, 最大せん断応力を考えてみることにした。

最大主応力

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{cases} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (14)$$

σ<sub>1</sub> = σ<sub>f</sub>にて破壊

最大せん断応力

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_f \text{にて破壊} \quad (16)$$

σ<sub>f</sub>については同一材料の引張圧縮両振疲労の同一回転における破壊応力と同じ値に推定して行なった<sup>9)</sup>。

#### 4. 実験結果および考察

##### \* P<sub>0</sub>-N線図

図3および図4にS25C, およびS45Cの表面損傷を生ずるまでの回転数と接触圧との関係について図示した。両方を比べてみると, S45Cの方が表面破壊にいたるまでの rev が若干伸びている。S.R 17.5%と25%付近は損傷 rev の差が余りなく, この付近のS.R比においては同一負荷に対し摩擦係数の値に違いがなく, すべりに対し接線力が同じ位の値を示すものと考えられる。

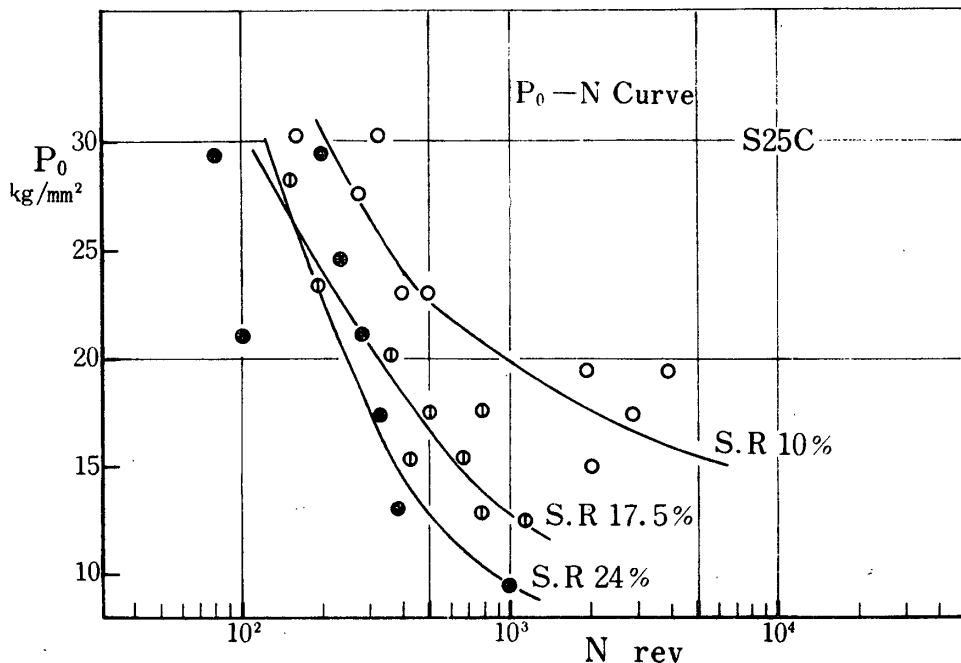


Fig. 3 The relation of P<sub>0</sub> and N rev at S25C

表面破壊直後の摩擦係数を表3に示す。この値を接線力の計算に用いた。摩擦係数はすべり率、接触圧によっ

て異なるが、S.R 17.5%、25%においては接触圧による違いは余りなく、S.R 10%の場合、接触圧の増加に

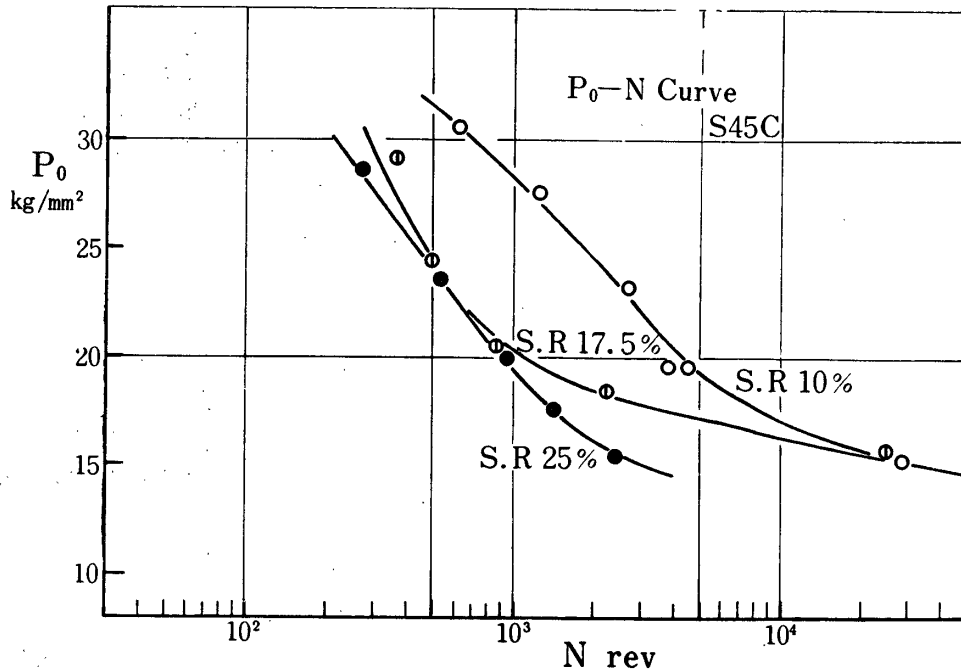


Fig. 4 The relation of P<sub>0</sub> and N rev at S45C

Table. 3 The torque and and the coefficient of friction on the each load.

S 25 C

S.R	Load	Torque	f
%	kg/cm	kg-cm	
10	15	10	0.278
	20	23	0.479
	25	30	0.500
	35	30	0.357
	35	55	0.655
	50	80	0.667
	60	75	0.521
17.5	60	90	0.625
	10	12	0.500
	10.75	13	0.504
	15	15	0.417
	20	18	0.375
	20	20	0.417
	25	28	0.467
	35	35	0.417
50	60	0.500	

24	5	7	0.583
	9.5	8	0.351
	17.5	15	0.357
	25	20	0.333
	25	22	0.367
	35	33	0.393
	50	40	0.333
	50	50	0.417

S45C

S.R	Load	Torque	f
%	kg/cm	kg-cm	
10	15	10	0.278
	20	20	0.417
	25	32	0.533
	35	60	0.714
	50	70	0.583
17.5	60	90	0.625
	15	14	0.389
	20	20	0.417
	25	20	0.333
	35	60	0.714
50	70	0.583	

	20	15	0.313
	25	14	0.233
25	35	35	0.417
	50	50	0.417

\* 破損時の表面応力

S25C, S45C, の場合の破損直後の最大応力と rev との関係を示したものが図5~8である, 全体的にみると主応力による破壊の場合, 疲労の破壊推定域より上側になっているし, せん断応力の場合は下になっている. 両

半って上昇している.

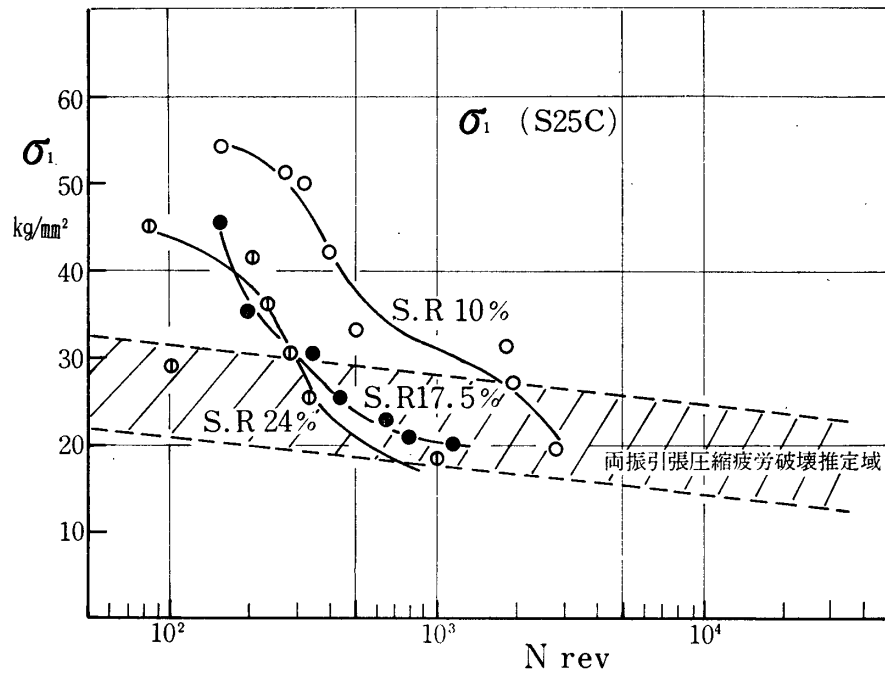


Fig. 5 The relation of  $\sigma_1$  and N rev on th contacted surface at S25C

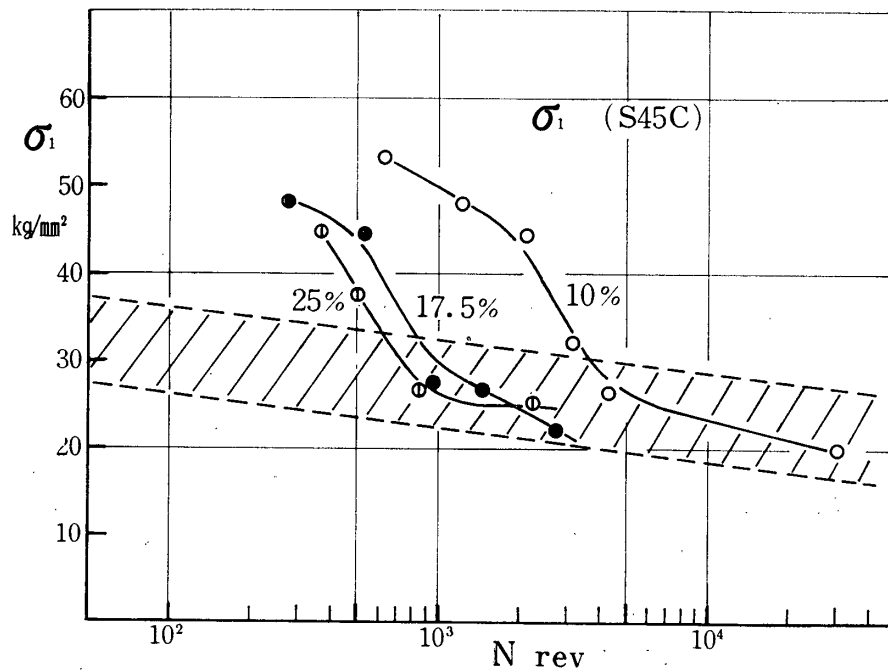


Fig. 6 The relation of  $\sigma_1$  and N rev on the contacted surface at S45C

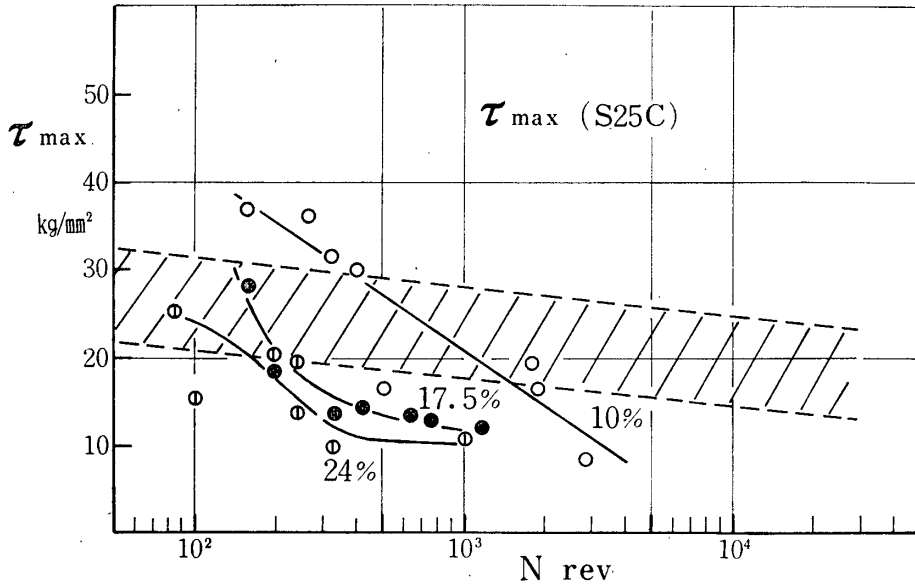


Fig. 7 The relation of  $\tau_{max}$  and N rev on the contacted surface at S25C

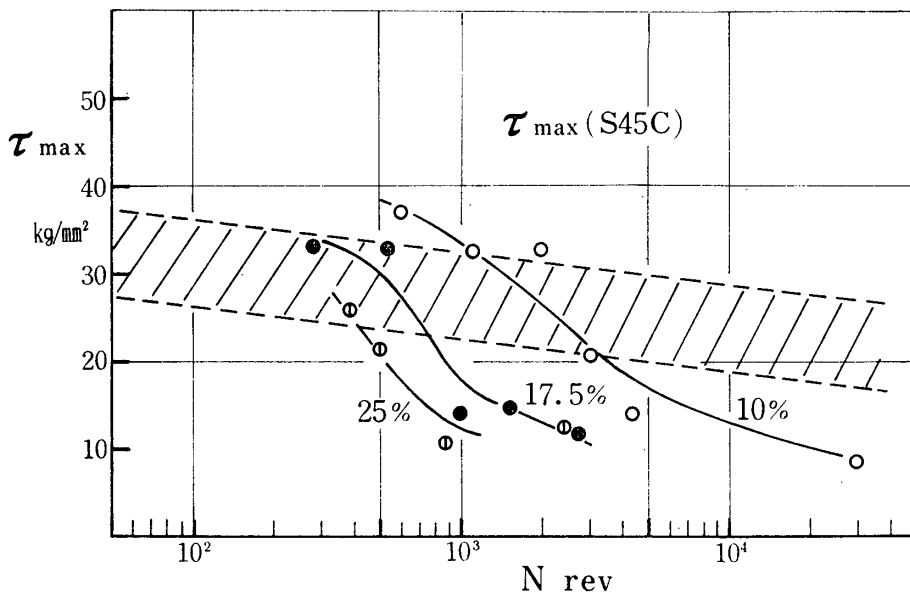


Fig. 8 The relation of  $\tau_{max}$  and N rev on the contacted surface at S45C

方の中間的なものがちょうど推定域に存在するようになると考えられる。

各すべりによる破壊応力について考えると、同一負荷におけるすべりに対し17.5%と25%の場合は、ほぼ近い応力で破壊していることがわかるが、10%の場合他より高い応力になっている。

実際には同一上の応力になると考えられるが、他の2つとは rev が伸びていることと、摩擦係数が高いために応力が高く出たと考えられる。

### 5. 結 論

乾燥状態における転がり回転面の表面上の応力について3種のすべり率の場合の最大応力値の計算を行なったが一応、adhesive region は存在しないと考え、最大応力は疲労破断推定域に対し、最大主応力の場合上限に、最大せん断応力の場合は下限に位置した。

### 参 考 文 献

- 1) J. O. Smith & C. K. Liv, J. Appl. Mech.,

- 20 (1953-3), 157.
- 2) 西岡, 平川: 機論34-26 (昭43-10), 1635.
- 3) " " 34-268 (昭43-12), 2068.
- 4) 山下, 平野: 機論37-304 (昭46-12), 2379.
- 5) " " " 2387.
- 6) 小川: 宇部高専研報14 (昭46-12) 9.
- 7) " " 16 (昭47-12), 7.
- 8) " 機講論 No.735-1 (昭48-8), 49.
- 9) 金属材料疲れ強さの設計資料 I, 日本機械学会