

軟鋼の疲労摩耗に関する研究 (第1報)

田村 虎雄*・森 重修 一*

Study on Pitting Strength under Rolling Contact of Mild Steel

Torao TAMURA and Shuichi MORISHIGE

Abstract

Wear may be defined as the unwanted removal of solid material from rubbing surface and it contains diverse phenomena such as adhesive, abrasive, surface fatigue, seizing etc. But, in general, one of the these types of wear does not occur individually but two or three types of wear occur together.

Therefore, wear mechanisms of metal have been already studied by many investigators for various material under the simple condition. But, there are few basic studies under the actual condition. The present investigators have studied (friction speed and lubricating method are constant) the relationship of the Hertz's stress P_0 on pitting of structural mild steel with carbon 0.118% preceded by normalized at 900°C through measurement of wear loss and observed the wear surface.

1. ま え が き

摩耗とは摩擦によっておこる物体の表面からの望ましくない離脱であるが、金属対金属の摩耗に関しては、すでに多くの研究結果^{1)~20)}、ことに実験的結果が発表されている。また摩耗の形態には、いろいろあるが、これを現象上から分類すると凝着摩耗、研削剤摩耗、疲労摩耗、微動摩耗および腐食摩耗となる。このうち疲労摩耗とは、ころがり軸受、歯車および圧延ロール材などにおいてとくに問題となり、ある限度以上の接触負荷が 10^6 回程繰返されたときに材料の表面が疲労して、いわゆるまだら摩耗を生ずる現象である。このために、その使用条件および寿命が制限されることになる。したがって、これらの機械要素の寿命を延長し、また適当な使用条件を見出すためには、これらの機械要素におけるころがり接触状態を解析すると共に、いろいろな応力状態における疲労摩耗の発生機構、使用材料の疲労摩耗特性、またその熱処理、表面加工法および潤滑油などの疲労摩耗特性におよぼす影響について検討する必要がある。

つぎに、ころがり接触をするときのまだら摩耗の発生については、すでに古くから S. way¹⁾によって研究結果が発表され接触負荷の繰返しによる疲労のため材料の表面に微細な亀裂を生じ、その間に潤滑油が浸入して、その油の圧力によって亀裂が押しあけられ、疲労摩

耗特有のまだら摩耗を生ずると考えられた。その後西原、遠藤⁴⁾は、いろいろの疲労破損条件をころがり接触に適用して疲労摩耗の発生を検討し、表面からある一定深さまでの平均的なせん断応力、あるいはせん断ひずみエネルギーをとることにより疲労摩耗の発生および潤滑油の影響が説明されると考えている。このほか黒田¹⁸⁾によるせん断応力の振幅最大説などがある。いずれにせよ、まだら摩耗の発生の起点は表面下ある深さのところとしている。したがって本実験では、これらの疲労摩耗に関する説を考慮して軟鋼について潤滑状態ですべりを含む疲労摩耗試験を行ない、各負荷荷重に対する疲労摩耗耐久限度の関係を摩耗量測定と摩耗面あらしの測定を行なって検討したので、その結果を報告する。

2. 試験片および試験方法

2.1 試験片

試験片は市販の45φの一般構造用圧延鋼材SS41を900°Cに2時間保持したのち焼準して使用した。その試験片の化学成分および機械的性質を表1に、焼準組織を図1に示す。つぎに試験片は図2のように作製した。また図3は小坂式表面あらし測定機を使用し倍率、たて500倍、よこ10倍で測定した試験片の加工後の表面あらし曲線で、上、下試験片とも同一である。

2.2 試験機および試験方法

摩耗試験機はアムスラー式金属摩耗試験機を使用し

* 宇部工業高等専門学校機械工学教室

表1 試験片の化学成分および機械的性質

化 学 成 分 (wt%)								機 械 的 性 質		
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	降 伏 点 (Kg/mm ²)	引 張 強 さ (Kg/mm ²)	硬 さ (Hv)
0.118	0.16	0.50	0.002	0.006	0.15	—	0.13	30	48	108

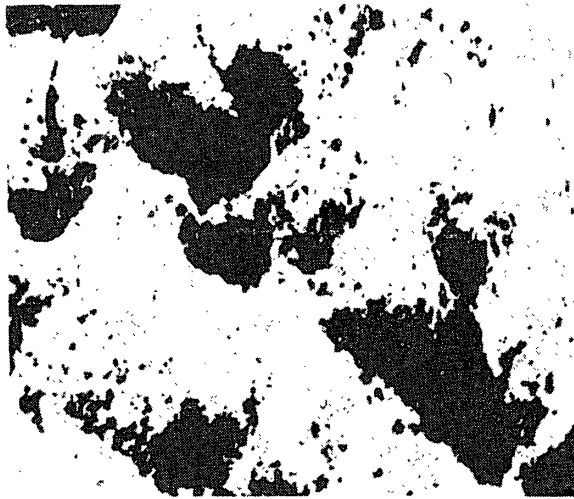


図1 焼準組織 ×400

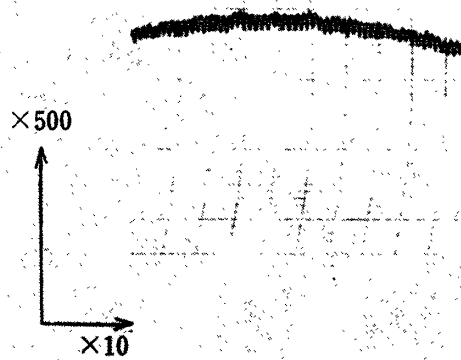


図3 試験片の処女面あらし

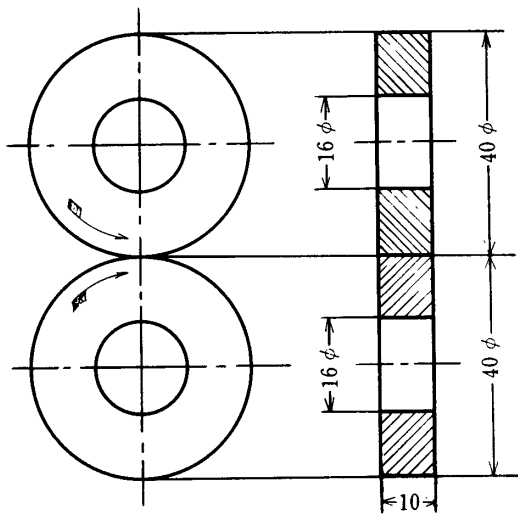


図2 試験片の形状寸法

た。上部試験片回転数200rpmおよび下部試験片回転数222rpmで図2のごとき形状、寸法の試験片を用いる時には、相対すべり速度10%、摩擦速度0.046m/secを与えることができる。なお試験片の回転接触部には試験機についている油槽より軽油を1cc/secの割合で終始一定の潤滑を与えた。つぎに試験は普通20万回転ごとに摩擦量を測定した。測定には感量1mgの精密化学天びんを用いて、試験片をベンジン、アルコールで洗浄、乾燥し

たのち行い、あわせて試験片表面の肉眼的観察を行なった。その結果、ついにまだら摩擦こんを生じて重量の減少が著しくなった時をもって、その試験を中止し、また試験片の接触繰返数が10⁷回転になっても、まだら摩擦こんを生じない場合には疲労摩擦耐久限度以下であるとして、その試験を中止した。これらの結果より、後述のごとく摩擦量と接触繰返数との線図を描き、これより疲労摩擦耐久限度を求めた。

2・2 最大接触応力および接触幅の算出

これについては、試験機の負荷装置により圧縮負荷を加え、図2のような二つの円筒試験片が同じ材質で弾性接触すると考えられる時には、Hertzの弾性接触理論より試験片の接触面における最大圧縮応力 P_0 およびその接触半幅 b は、つぎの式で与えられる。

$$P_0 = \sqrt{\frac{m^2 EP}{\pi(m^2 - 1)BR}}$$

$$b = \sqrt{\frac{4(m^2 - 1)PR}{\pi m^2 BE}}$$

但し、ここで

P : 試験片の間に加えられる負荷荷重 (kg)

E : 試験片のヤング率 (kg/mm²)

$\frac{1}{m}$: ポアソン比

B : 試験片の幅 (mm)

R : 試験片の半径 (mm)

である。

なお表2に本実験に使用した負荷荷重 P に対する最大圧縮応力 P_0 および接触半幅 b を示す。

表2 各負荷荷重における最大圧縮応力と接触幅

P (Kg)	170	130	100	80	60	40	25	9
P_0 (Kg/mm ²)	83.2	73	64	57.2	48.6	40.3	32	23
b (mm)	0.13	0.11	0.1	0.09	0.08	0.06	0.05	0.03

3. 実験結果

3.1 摩耗量について

図4~図7に摩擦速度, すべり率および潤滑条件を一定として, 最大圧縮応力を変えたときの摩耗量と繰返数

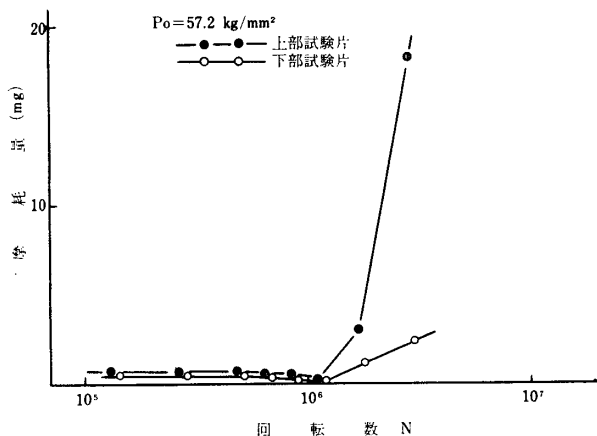


図4 繰返数と摩耗量の関係

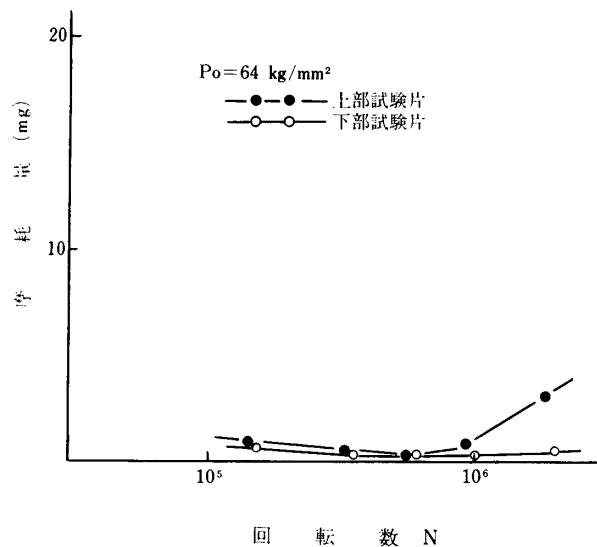


図5 繰返数と摩耗量の関係

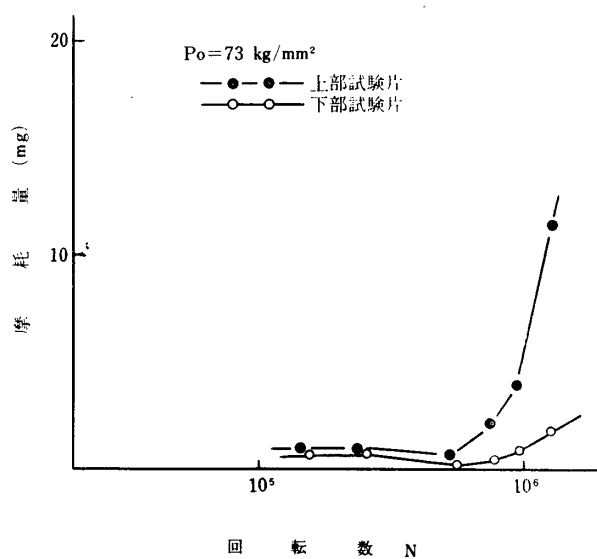


図6 繰返数と摩耗量の関係

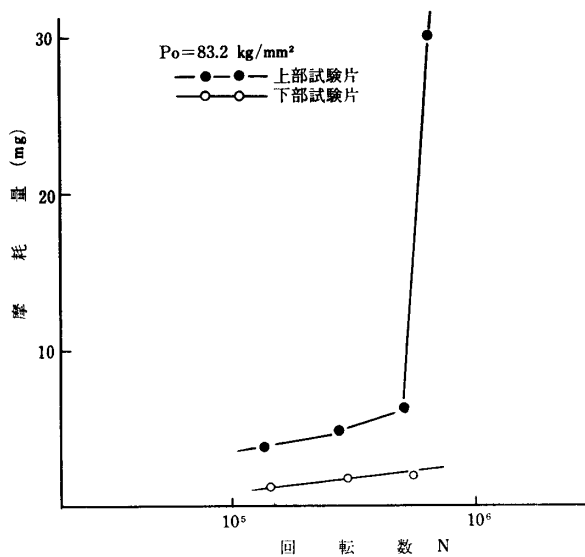


図7 繰返数と摩耗量の関係

との関係を示す。これから最大圧縮応力が大きくなるほど摩耗量の急増する繰返数が低くなっていることがわかる。つぎに最大圧縮応力が 73kg/mm^2 以下では繰返数が 5×10^5 回転以上になると摩耗量が、わずかに減少する傾向があらわれているが、これは後述するように酸化被膜の組成や厚さの影響によるものと思われる。また図8はこれらの結果より各々の最大圧縮応力においてまだら摩耗を生ずるまでの繰返数とその最大圧縮応力との関係を示したものである。これより最大圧縮応力 23kg/mm^2 が疲労摩耗耐久限度であることがわかる。つぎに図9に疲労によって生じた試験片表面のまだら摩耗こんの写真を示す。これからわかるように最大圧縮応力が大きいほど大きなまだら摩耗こんを生じており、このまだら摩耗こんの発生と摩耗量の急増しはじめる時期との間

には、明らかな相関関係が存在している。

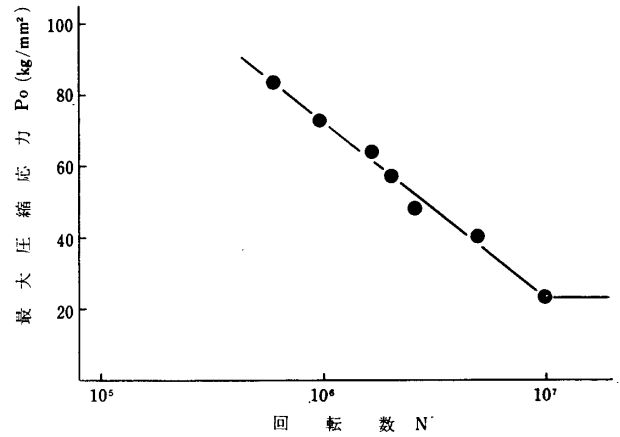
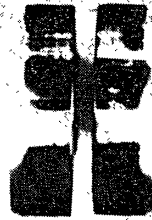


図8 ころがり摩耗特性



(a)



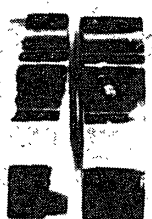
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

図9 試験片表面のまだら摩耗こん

左側：下部試験片，右側：上部試験片

- (a) $P_0=83.2\text{kg/mm}^2$, 回転数 5.5×10^5 (b) $P_0=73\text{kg/mm}^2$, 回転数 7.8×10^5
 (c) $P_0=64\text{kg/mm}^2$, 回転数 1.1×10^6 (d) $P_0=57.7\text{kg/mm}^2$, 回転数 1.6×10^6
 (e) $P_0=48.6\text{kg/mm}^2$, 回転数 2.7×10^6 (f) $P_0=40.3\text{kg/mm}^2$, 回転数 4.0×10^6

3・2 摩耗面あらし

これについては、最大圧縮応力 48.6kg/mm^2 一定とし、繰返数を変化させた時の摩耗面あらしの変化状況を図10に示す。測定は試験片の処女面あらしを測定したときと全く同様な方法で行なった。これからわかるように繰返数の増加するにつれて摩耗面のあらしには明らかに

平滑化が認められ、繰返数が 6×10^5 回転程度以上になると摩耗面のあらしにはほとんど変化が認められなかった。なお、このほかの応力についても摩耗面あらしの変化状況を測定したが、ほとんど同様な傾向を示していた。すなわち摩耗量と摩耗面あらしの間にも相関関係が存在する。

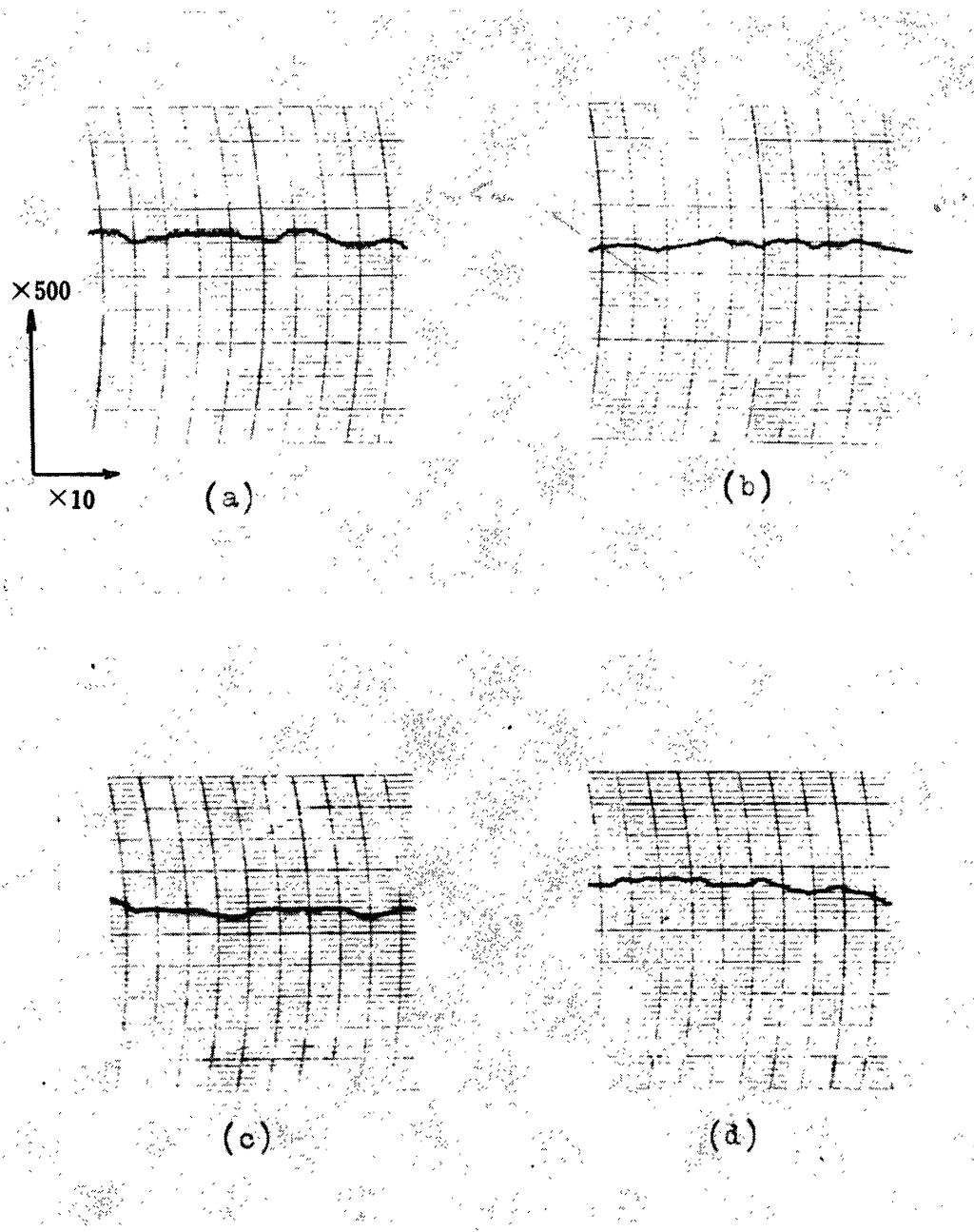


図10 繰返数と表面あらしの関係 $P_0=48.6\text{kg/mm}^2$

繰返数	
(a) 3.9×10^5	(c) 7.7×10^5
(b) 5.8×10^5	(d) 9.7×10^5

3・3 摩耗面下の硬度

図11に疲労摩耗試験を終った試験片のころがり接触による摩耗面下の硬度の測定結果を示す。測定には明石の微小硬度計を使用し、測定荷重100g、荷重保持時間30 secで行なった。これより試験片によって matrix の硬

度には多少の差異があり、そして最大圧縮応力の高いほど、ころがり接触による硬度の上昇割合は大きい。その最大値を示す深さは最大圧縮応力に無関係に摩耗面下約0.15~0.25mmのところにあることがわかる。なお、このほかの応力のときも、同様な傾向を示していた。

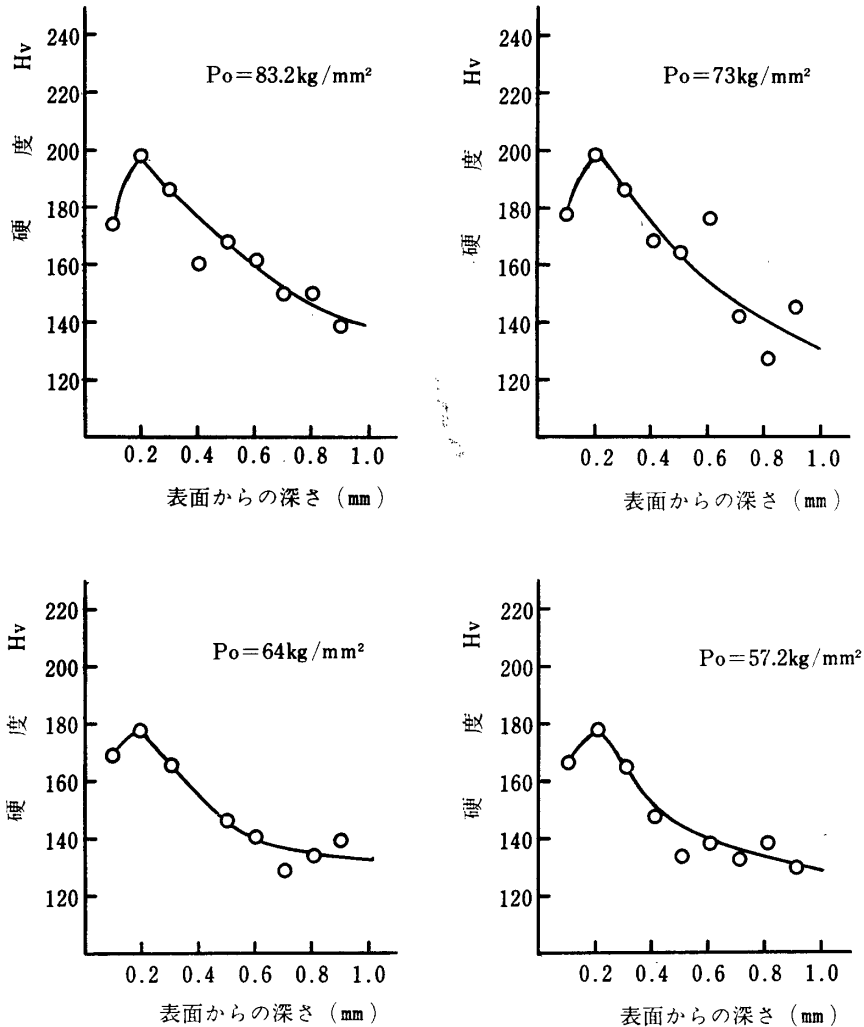


図11 負荷繰返し試験片の表面下の硬度

4. 考 察

4・1 摩耗量について

上部試験片が下部試験片に比べて摩耗量が上昇し、疲労現象が顕著にあらわれている点について考察を進める。上・下試験片の相対すべり速度は一定であるが、すべり率は上部試験片で11%、下部試験片では10%と異なる。したがって西原、小林²⁾のいっているように疲労摩耗にはすべり率は直接関係しないはずであるが、すべり率が10%位までの変化に対しては摩擦係数が著しく増加しているためと、すべり方向が転動方向に対して上・下

試験片ではそれぞれ逆になっており、S. Way¹⁾の理論による表層の亀裂への潤滑油の浸入の難易も影響しているものと思われる。したがって、図9からもわかるように、試験片の疲労によるまだら摩耗は上部試験片に著しく発生していることがうなずける。つぎに最大圧縮応力が83.2kg/mm²をのぞいては、繰返数が5×10⁵回転程度になると摩耗量がわずかに減少し、しかも最大圧縮応力の低くなるほど、この傾向が著しくなっている。これは試験中に試験片の表面に発生した酸化被膜の生成に起因するものと考えられる。また一方、酸化被膜の生成機

構を考えると、潤滑油を使用した場合、水野³⁾のいっているようにそれに含まれている水分、および硫黄などの酸化物の作用をうけて酸化被膜を生ずるときには、直接酸化により生じた酸化被膜よりも多孔質³⁾であるといわれており、均一な厚さの酸化被膜ができて摩擦係数の減少するのが遅れるためと思われる。すなわち最大圧縮応力により摩耗面の温度に高低を生じ低い応力のときには長い時間を要して均一な厚さをもった Fe_2O_3 の平滑な被膜を生成するものと思われる。しかし最大圧縮応力が 83.2kg/mm^2 のときには、この摩耗量のわずかに低下する傾向がみられないが、これは、その応力が疲労摩耗耐久限度に比べて著しく大きいため酸化被膜が十分に発達しないうちに疲労摩耗が起ったものと思われる。

4.2 摩耗面あらしについて

試験中における凹凸のかみ合いによって一定回転数の後には酸化被膜で被われたかなり平滑な面になっている。これは中村²⁰⁾のいっているように突起部のせん断破壊のときに発生する急激な発熱現象により、せん断された摩耗粉は、ほとんど溶融点に近い温度となり凹部をうめ、そこに溶着する。また、このような強度の加工を受けた摩耗粉は非常に酸化されやすい状態にあるため、突起部はせん断されないにしても局部的に非常に高温になり、いわゆる溶融状態となり、その部分が塑性流動をおこして面を平滑にする二つの場合が考えられるが、本実験では前者の作用が支配的だったと考えられる。

4.3 摩耗面硬度について

図11からわかるように摩耗面下 $0.15\sim 0.25\text{mm}$ のところで最大となり、前述した疲労摩耗に関するいずれの説をとるにしても $0.50\sim 0.70b$ の位置において応力値が最大となるという結果と大きく相違し、大越、佐田¹⁵⁾による転動仕上を行った際の転動仕上面の硬度分布と同様な結果があらわれている。その理由は、図9からもわかるように試験片全体が接触しておらず、edge-effect が大きく、応力状態も端面では二次元応力に近い状態になるためと相対すべり速度が10%もあり、Poritsky⁶⁾、大越、佐田¹⁴⁾によれば最大応力が14%も増し、最大値を生ずる深さが非常にあさくなるといわれていることにより摩耗面下 0.1mm 以内のところにおいて応力が最大になる点があったものと思われる。したがって、edge-effect をなくすために上・下試験片を面取りするなどの加工を施せば、かなり理論値に近い値になるはずである。

5. む す び

以上、得られた結果をまとめると、つぎのとおりである。

- (1) 摩耗量を測定し、それが急激に増加するところをもって疲労摩耗の発生が判定できる。
- (2) 最大圧縮応力が約 73kg/mm^2 以下のときは、 5×10^5 回転ぐらいのところまで摩耗量のわずかな減少が始まる。
- (3) 負荷荷重の繰返しによる硬化層は摩耗面下 $0.15\sim 0.25\text{mm}$ のところに存在し、これは転動仕上の影響と思われる。
- (4) 摩耗面のあらしは、比較的少ない回転数で平滑化され、その試験条件で定まった一定値になる。
- (5) 摩耗の初期段階においては、摩耗面の温度はすくなくとも局部的には融点近くに達したものと思われる。
- (6) 試験片の面取りをしなければ edge-effect がおこる。

謝 辞

本実験研究に当り終始御指導をいただいた山口大学工業短期学部福井昂先生並びに機器使用に際して御助力頂きました本校材料力学実験室の方々に厚く御礼申しあげます。

参 考 文 献

- 1) S. Way : Pitting Due to Rolling Contact, J. Appl. Mech., 2, P. 49, (1935).
- 2) 西原利夫, 小林俊郎 : “油入り転り接触における鋼の斑摩耗と歯形面の許容応力”, 日本機械学会論文集, 3, 13, P. 292, (1937).
- 3) 水野昂一 : “酸化膜と摩耗”, 日本金属学会分科会報告 1, P. 35, (1947).
- 4) 西原利夫, 遠藤吉郎 : “転り接触における耐久限度” 日本機械学会論文集, 14, 46, P. 103, (1948).
- 5) F. P. Bowden and D. Tabor : Friction and Lubrication of Soid, Oxford Univ. Press. London, Chap. 1. (1950).
- 6) H. Poritsky : Stresses and Deflection of Cylindrical Bodies in Contact With Application to Contact of Gears and of Locomotive Wheelies, J. Appl. Mech., 17, P. 191, (1950).
- 7) T. L. Oberle : Wear of Metals, J. Meals. 3, P. 438, (1951).

- 8) 穂坂衛：“ころがり接触について”，日本機械学会論文集. **17**, 61, P. 161, (1951).
- 9) J. T. Burwell and C. D. Strang : J. Appl Phys., **23**, P. 18, (1952).
- 10) 大越淳, 佐田登志夫：“転がり摩耗の研究”，科学研究所報告, **29**, 5, 6, P. 76, (1953).
- 11) T. NISHIHARA and K. ENDO : Research on Pitting Strength Under Rolling Contact, Bulletin of Eng. Research Inst., Kyoto Univ., **5**, 3, P. 1 (1954).
- 12) 吉本源之助, 築添正, 菊地進：“金属接触機構における表面アラサの影響について”，日本機械学会論文集, **23**, 135, P. 880, (1957), **23**, 135, 885, (1967).
- 13) 吉本源之助, 築添正；“金属面摩耗機構に関する研究”，日本機械学会論文集 **23**, 135, p.880, (1957), **23**, 135, p. 885,(1957).
- 14) 大越淳, 佐田登志夫：“転がり摩耗の研究”，科学研究所報告. **33**, 1, P. 1, (1957).
- 15) 大越淳, 佐田登志夫：“転がり摩耗の研究”，科学研究所報告. **33**, 1, P. 8, (1957).
- 16) 赤岡純, 平沢弘太郎：“すべりを伴うころがり接触下の疲れ現象”，日本機械学会誌. **61**, 472, P. 505, (1958).
- 17) 黒田昌夫：“軸受鋼の転動疲れはく離の機構”，日本機械学会論文集. **26**, 169, P. 1258, (1960).
- 18) 黒田昌夫：“軸受鋼の転動疲れ寿命に対する潤滑剤の影響”，潤滑**5**, 5, P. 283, (1960).
- 19) 赤岡純，“ころがり 軸受の寿命に及ぼす潤滑の影響”，**6**, 2, P. 109, (1961).
- 20) 中村文俊：“摩耗の過渡現象に関する二・三の研究”，日本機械学会論文集. **28**, P. 683, (1962).

(昭和44年9月5日受理)