



鋼の耐摩耗性評価に関する研究

岩 井 善 郎

鋼の耐摩耗性評価に関する研究

岩 井 善 郎

目 次

緒 論	1
第 1 章 乾燥摩耗形態とその遷移挙動	5
1.1 緒言	5
1.2 試験方法	5
1.3 実験結果および考察	7
1.4 結言	17
第 2 章 乾燥摩耗に及ぼす接触面積比の影響	19
2.1 緒言	19
2.2 試験方法	19
2.3 実験結果および考察	20
2.4 結言	32
第 3 章 乾燥摩耗に及ぼす試験方式の影響	34
3.1 緒言	34
3.2 試験方法	35
3.3 実験結果および考察	37
3.4 結言	51
第 4 章 潤滑摩耗面の観察	53
4.1 緒言	53
4.2 摩耗面の微小形状の測定	54
4.3 摩耗面の 3 次元観察	64

4.4	結言	69
第5章	潤滑摩耗に及ぼす接触面積比の影響	70
5.1	緒言	70
5.2	試験方法	71
5.3	実験結果および考察	72
5.4	結言	84
第6章	潤滑摩耗形態とその変化挙動	86
6.1	緒言	86
6.2	試験方法	87
6.3	実験結果および考察	89
6.4	結言	103
第7章	潤滑摩耗の耐摩耗性と材料強度の関係	104
7.1	緒言	104
7.2	試験方法	105
7.3	冷間加工材の耐摩耗性	106
7.4	結晶粒度の異なる鋼の耐摩耗性	116
7.5	結言	119
結	論	121
謝	辞	125
参	考 文 献	126

緒 論

近年の機械の高精度化，自動化にともない，各種表面損傷は単に機械部品の交換に止まらず，そのため全機能の停止など莫大な損失を招くおそれがある。とくに機械の運動部分は摩擦をとまなうことから摺動部での摩耗や焼付きによる損傷は避けられない。機械設計にあたって，破壊強度に注目するのみでなく，さらに摩耗に対する強度を重視する必要がある。

金属の摩耗機構は次第に解明されつつあるが，耐摩耗性は一般のかたき試験や引張試験で得られる値のように，材質によって定まる固有の強度性質ではなく，いまだに体系的な評価はなされていない。すなわち摩耗速度は，組合せた相手材料，摩擦条件，環境などによって著しく変化する。また摩耗試験には，試験方式や接触荷重，すべり速度などを規定した標準試験法というものがない。その結果，実機の耐摩耗設計に適用できる実際的でかつ普遍性のある摩耗データはほとんどみられず，工業界からも不満を聞くことが多い。

摩耗試験結果を実用的なものにするための研究は必要にせまられており，種々の研究機関でも共同研究されてきた。たとえばOECDや日本潤滑学会の摩耗研究部会は，種々の試験機で得られた摩耗データの相互関係を明らかにしようとした。しかし摩擦条件は同じでも試験機が異なると，摩耗の激しい初期摩耗から摩耗量の少ない定常摩耗に遷移する場合とそうでない場合があるため，系統的な関係が得られないと報告している。すなわち摩耗データの評価と実機への適用にとって，このような遷移現象が重大な問題と考えられるが，十分に解明されていない。

接触荷重やすべり速度によって生ずる遷移現象はWelshによる報告以来，その機構や遷移条件が数多く示されている。しかし純金属を用いた結果や試験の容易さからピン・ディスク方式で行われたものが大部分である。純金属を用いた研究は別にしても，ピン・ディスク試験ではピンとディスクの摩擦面積の比

が大きく、従来の報告結果は実機の摩擦部に適用できないであろう。したがってまず実用の炭素鋼を用いて、実機に近い状況の摩耗の遷移現象とその機構を明らかにする必要がある。

ついで摩耗試験に一般性をもたせ、体系的な耐摩耗性のデータを得るためには、接触二面の摩擦面積の比と試験方式が重要な因子と考えられる。すなわち接触面積比（大試験片の摩擦面積と小試験片のそれとの比）が異なる場合および試験方式が異なる場合の摩耗特性を、遷移条件と摩耗量に注目して、何かある評価基準で系統的に整理できないか調べるのが重要である。

潤滑状態で稼動する機械部品の摩耗は、乾燥摩耗のような壊滅的な損傷には至らないが、精度、機能に重大な影響をもつ。乾燥摩擦では接触点の塑性変形によって真実接触面積はほとんど一定で、表面あらさの影響はみられないが、潤滑摩耗では摩耗面形状の変化が進展挙動や摩耗量の大小に影響する。したがって潤滑下の摩耗特性を明らかにするには、まず表面形状の観察手段を確立する必要がある。

潤滑下の耐摩耗設計にとっても、摩擦条件と摩耗形態の関係やその変化挙動を知ることが重要となる。最近の I R G—O E C D の共同研究報告によれば、接触荷重、すべり速度によって摩擦形態は変化するが、これは曲率ピンや球のなじみ運転期間で得られた結果である。多くの機械要素で問題となるのは、平面どうしを摩擦したときの定常運転状態における摩耗形態の相違あるいは初期摩耗から定常摩耗への進展挙動であり、これらは乾燥摩耗や I R G—O E C D とは別に議論すべきである。また種々の潤滑状態における摩耗抵抗を、その形態に注目して調べた研究報告は少なく、耐摩耗性の優劣を評価する基準も知られていない。

以上の観点から、本研究は摩耗試験に一般性をもたせ実用的な摩耗データを得るため、機械構造用炭素鋼を用いて、面積比、試験方式、潤滑状態の異なる摩耗試験を行い、主に摩耗形態の相違およびその変化挙動に注目して耐摩耗性評価法を検討する。これより機械要素、構造物の耐摩耗設計に寄与しようとするものである。

第1, 2, 3章では, 無潤滑の乾燥摩耗について調べる。第1章では, 実機に近い接触状況下の摩耗進展挙動を初期摩耗, 定常摩耗およびその遷移にわけて考察する。それぞれの機構を摩耗量および摩耗面と摩耗粉の形状に注目して検討し, ついで耐摩耗性評価における遷移現象の重要性を明らかにする。

摩耗試験に一般性をもたせるには, 面積比や試験方式が異なる結果の相互関係を知ることが重要である。しかしこれらの影響を調べた研究はほとんどみられない。第2章では, 面積比が摩耗進展挙動, 初期から定常期に遷移する摩擦条件および大小試験片の摩耗量に及ぼす影響を調べ, これらが摩擦面温度に支配されると考えて考察する。また面積比によってみかけの摩擦面積が異なるときの摩耗量の比較を, 表示法をかえて検討する。

第3章では, ピン・ディスク, ピン・円筒および鞍形・円筒のすべり方式と二円筒ころがりすべり方式の摩耗試験を行い, 主に遷移条件と摩耗量に及ぼす試験方式の影響を明らかにする。種々のすべり方式で得られる遷移の荷重や圧力が, 第2章で調べたそれらと面積比の関係を拡張して整理できないか検討する。またころがりすべり方式では, すべり率の影響を求めて, すべり方式との関連を調べる。ついで第1章と第2章の知見とも合せて, 各種試験方式の相互関係を検討し, 耐摩耗性の評価法について考察を加える。

油中での潤滑摩耗は, 焼付きをとまなう激しい摩耗やアブレイブ摩耗を除けば, 単に凝着や切削の機構では説明できない点が多く, 乾燥摩耗とは別に論じる必要がある。第4, 5, 6, 7章では, 潤滑下の耐摩耗性評価にとって重要な摩耗面の観察手段, 摩耗形態とその変化挙動, 材料強度との関係について考察する。

潤滑摩耗の進展挙動を定量的に解析するためには, 摩耗面の微小凹凸の形状と摩耗による変化を知る必要がある。第4章では, 鋼の潤滑摩耗面の観察法を検討する。触針式表面あらさ計の出力電圧をA-D変換して断面曲線を数値化する場合, 量子化幅と標本化幅が, 検出される突起の分布とその形状に及ぼす影響を解析する。ついで摩耗面の3次元高さの分布を測定し, 等高線地図および摩擦方向に直角と平行な形状を得て, 潤滑摩耗機構を一層明らかにする。ここ

で得られる観察法は摩耗の進行特性の識別とともに摩耗寿命の定量化に貢献するものである。

潤滑摩耗面の形状は、面積比によって接触状況が変化すると、著しく異なるものと考えられる。したがって摩耗の進行や摩耗率は面積比の影響をうけることになる。第5章では、潤滑摩耗の進展挙動、初期摩耗の大きさ、定常摩耗率に及ぼす面積比の影響を、主に第4章の観察法を用いて摩耗面形状を解析することにより明らかにする。また得られた結果は第2章の乾燥摩耗の知見と比較検討して、耐摩耗性評価における面積比効果の重要性を考察する。

第6章では、なじみ運転後の定常状態でみられる潤滑摩耗の形態とその転移現象に注目する。マシン油中で接触荷重をかえて摩耗試験を行い、摩擦係数、摩耗率および摩耗面形状の変化から、摩耗形態の相違を知る。ついで接触荷重を階段状に負荷する摩擦試験を行い、摩耗形態の転移条件と焼付き条件を求め、摩擦面温度の測定と対応させて考察する。またこれらの挙動に及ぼす面積比の影響についても検討を加える。

良好潤滑下で生じる摩耗は、微小電圧下や実働荷重下での挙動などから表面疲労によることが明らかにされているが、耐摩耗性の評価基準は十分に知られていない。第7章では、冷間加工を施した軟鋼および熱処理によって結晶粒度を変化させた軟鋼の耐摩耗性を、材料強度との関係に注目して明らかにする。とくに冷間加工材では、疲労試験を合せて行い、良好潤滑下の耐摩耗性の基準を考察する。

結論は、以上の研究の総括であって、いままで体系化されていなかった鋼の耐摩耗性は、摩耗形態とその変化挙動に注目して評価すべきものであり、試験方式や潤滑状態が異なっても面積比、摩耗面形状および材料強度から系統的に明らかにできることを示す。これより耐摩耗設計に適用できる実用的な摩耗データの集積に役立つ知見が得られたことを述べる。

第 1 章 乾燥摩耗形態とその遷移挙動

1.1 緒 言

金属の摩耗は，接触荷重に比例しすべり速度には無関係とされている⁽¹⁾が，Welsh⁽²⁾ Archard⁽³⁾ Hirstら⁽⁴⁾ はある接触荷重やすべり速度から不連続に摩耗率が激増することを報告している。また摩擦条件によっては，摩擦開始時には激しい摩耗でも，その後2～3桁摩耗率の小さい定常摩耗を示す場合がある^(5～10)。このように摩耗形態が変化して摩耗量に著しい差を生ずる現象は，材料の耐摩耗性を評価する場合極めて重要な問題と考えられる。

摩耗形態がある摩擦距離から遷移する現象の研究は数多いが，純金属どうしの摩耗やピン・ディスク方式での結果である。またその機構は摩耗粉の酸化⁽⁶⁾ 摩耗粉の移着成長⁽⁷⁾ あるいは摩耗変質層の形成⁽⁸⁾ によるという報告などがあるが，統一的な見解は得られておらず，実用に供されている機械部品の摩耗現象を必ずしもうまく説明できない。したがって実機に近い接触状態での試験および初期摩耗から定常摩耗への進展挙動を摩耗量，摩耗面の観察から系統的に調べる研究が必要である。

本章では，機械構造用炭素鋼について，二面の摩擦面積の比が1に近い二円筒端面方式で，無潤滑の乾燥摩耗試験を行い，摩耗形態の相違を摩耗量および摩耗面，摩耗粉の観察から明らかにした。さらに初期摩耗から定常摩耗に遷移するときの摩耗面性状の変化を知り，摩耗形態の遷移の機構について考察した。

1.2 試験方法

試験は図 1.1 に示すように，試験片の一つを固定し，その端面に上部スピンドルに取付けたもう一つの試験片の端面を押しつけて摩擦する方式である。負荷する接触荷重の精度は約 50 gf である。図 1.2 に試験片形状を示す。下試験片は端面の一部を切りとり小試験片とした。上試験片は全円周面が摩擦面で，

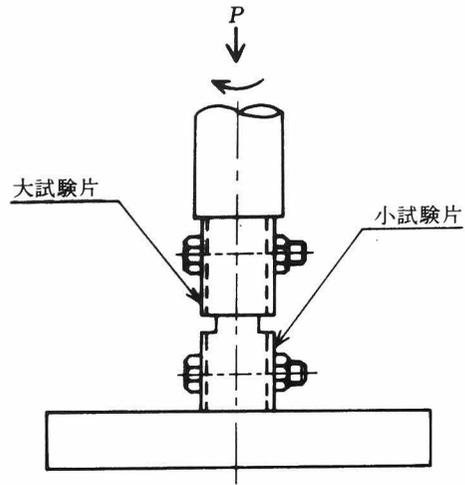


図 1.1 試験装置

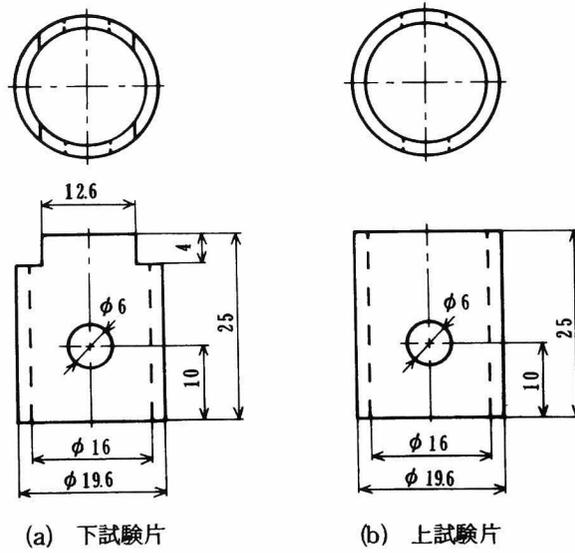


図 1.2 試験片の形状，寸法

摩擦面積は 1.0 cm^2 である。大小試験片の面積比 α は $\alpha = (\text{大試験片の摩擦面積}) / (\text{小試験片の摩擦面積})$ で与えられ、この形式では $\alpha = 2.0$ である。

供試材は 830°C 、1時間保持にて焼なました 0.53% C炭素鋼で化学成分を表 1.1 に、機械的性質を表 1.2 に示す。試験片は所定の寸法形状に機械加工

表 1.1 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.53	0.20	0.66	0.014	0.021

表 1.2 供試材の機械的性質

降伏点 kgf/mm^2	引張強さ kgf/mm^2	伸び %	かたさ Hv
37	64	27	185

した後、端面を #1000 研磨紙で仕上げ 650°C 、1時間真空焼なました。処女面での中心線平均あらさは $R_a = 0.03 \mu\text{m}$ である。またビッカースかたさ (測定荷重 25 gf) は $H_v = 185$ である。試験面はアセトン洗浄後乾燥させて試験に供した。摩耗量は重量減少量を精密天びん (感度 0.01 mg) で秤量して求めた。乾燥摩耗試験は簡単な空調により約 15°C 、相対湿度約 70% の室内で行っている。

1.3 実験結果および考察

1.3.1 摩耗曲線

0.53% C炭素鋼どうしを面積比 $\alpha = 2.0$ で組合せ、すべり速度 $v = 0.15 \text{ m/s}$ 一定で摩耗試験を行った。図 1.3 は小試験片の摩耗曲線である。接触荷

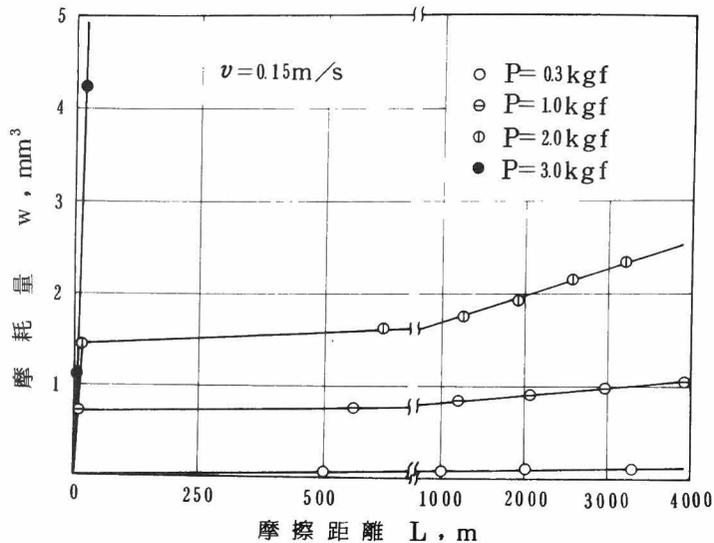
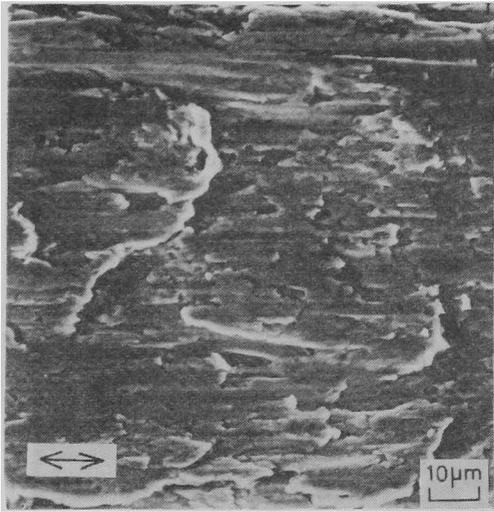


図 1.3 小試験片の摩耗曲線

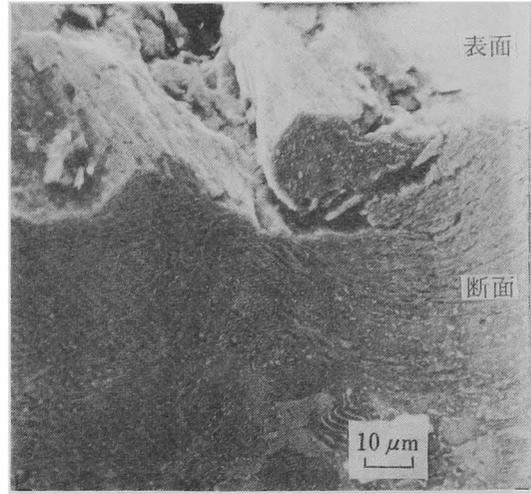
重 $P = 0.3 \text{ kgf}$ では、摩擦開始直後から微小な赤褐色の摩耗粉を生じ摩耗量の小さい状態が続く。 $P = 1.0 \text{ kgf}$ および 2.0 kgf では、はじめに大きな金属光沢の摩耗粉を発生し、大きな摩耗量を示す初期域がある。その後摩擦音が変化し赤褐色の摩耗粉を生じ、定常摩耗への遷移がみられるので、試験を停止して重量減少量を測定した。摩耗曲線の \ominus , \oplus の折れ曲がり点は、この摩耗量を定常摩耗特有の摩擦音が持続しはじめた摩擦距離に対して示したものである。 $P = 3.0 \text{ kgf}$ では初期摩耗が持続し、もはや定常摩耗へは遷移しない。大試験片の摩耗曲線は、小試験片と比べて摩耗量に若干の違いはみられるが、その挙動は同様である。このように摩擦条件によって、摩耗の進行の様子が異なる。

1.3.2 初期摩耗と定常摩耗

初期域の摩耗面および摩擦方向に直角に切断した断面を図 1.4 に示す。断面は研磨後 3% ナイタールでエッチングしたものである。摩耗面下には摩擦熱による相変化はみられないが、摩耗面は著しいせん断破壊をうけている。表面のあらさは大きく、摩擦方向に直角な中心線平均あらさは $Ra \approx 6 \mu\text{m}$ である。



(a) 表面



(b) 断面

図 1.4 初期摩耗の摩耗面と断面 ($P = 2.0 \text{ kgf}$, $v = 0.15 \text{ m/s}$)

また摩耗粉が図 1.5 に示すような大きな金属粉であることから、初期域は接触二面の強い凝着によるシビヤ摩耗である。

一方定常域での摩耗面を図 1.6 に、摩耗粉を図 1.7 に示す。摩耗面はあらかさが $Ra = 2 \mu\text{m}$ となめらかであるが、白く観察される部分があり、ところどころはく離している。これは X 線マイクロアナライザーによる解析から

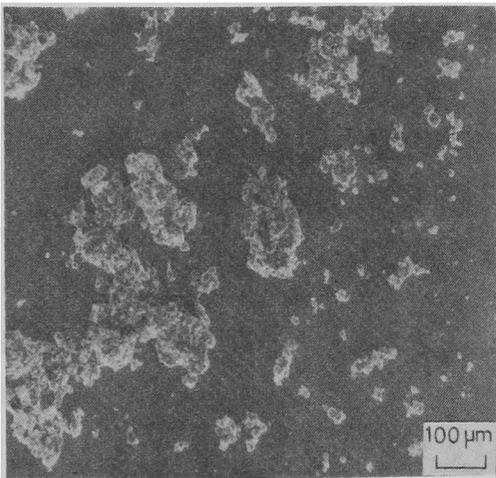


図 1.5 初期摩耗の摩耗粉

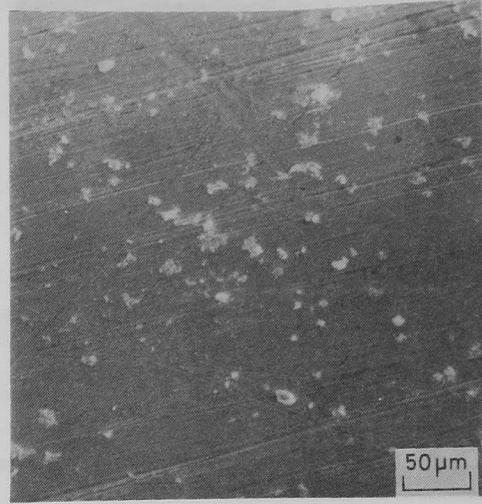
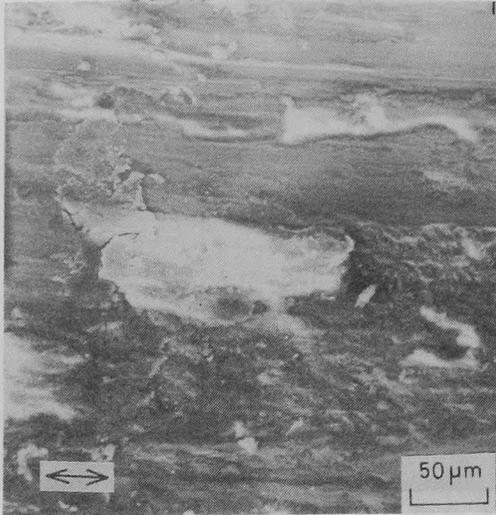


図 1.6 定常摩耗面
($P=2.0 \text{ kgf}$, $v=0.15 \text{ m/s}$)

図 1.7 定常摩耗の摩耗粉

酸化物と推測される。また摩耗粉は赤褐色で極めて小さい。これらのことより定常域では、酸化した摩耗面が繰返し摩擦をうけて破壊するマイルド摩耗であることがわかる。

図 1.8 は初期摩耗期間と接触荷重の関係である。初期摩耗の継続距離は大試験片の円周長さと初期域の全回転数の積で得られる摩擦距離 L_i で示し、同一条件下で行った数回の実験結果の平均値である。図中矢印は、定常摩耗への遷移の可能性が認められず、この摩擦距離で試験を打切ったことを示す。ある接触荷重以上では遷移がみられない。この境界の接触荷重を臨界荷重と呼ぶ。しかし中間の段階も存在しており、初期摩耗の距離は臨界荷重付近で急激に長くなる。

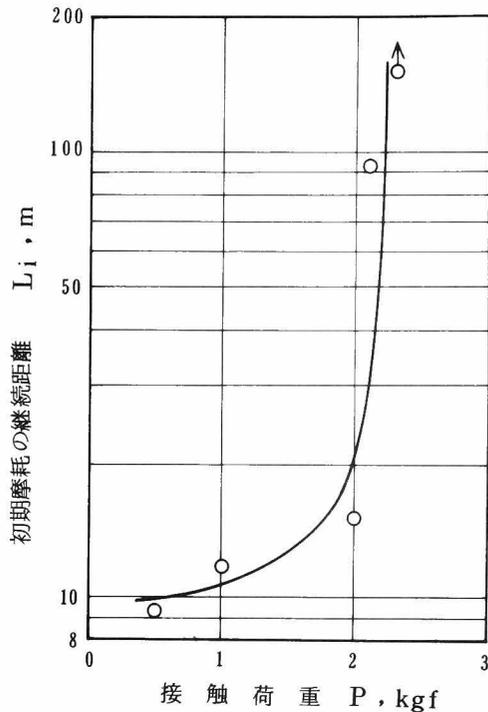


図 1.8 初期摩耗期間と接触荷重の関係

図 1.9 は摩耗率と接触荷重の関係である。初期摩耗率（図の上方の一群の点）は初期域の摩耗量を初期摩耗の継続距離で除した値で、数回の実験結果を平均して示した。定常摩耗率（図の下方の一群の点）は定常域における摩耗曲線のこう配から求めた値である。破線 A は、これ以上の接触荷重ではマイルドな定常摩耗に移らない臨界荷重 P_{cr} を示し、破線 a はこれ以下では摩擦開始直後から終始マイルド摩耗であることを示す。すなわち a—A 間の接触荷重でのみ初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗への遷移現象が存在する。このようにみかけの摩擦面積が大きい平面どうしの摩耗においても、すでに報告されている先端が球や円錐のピン・ディスク方式と同様に、ある摩擦条件下で遷移現象がみられる。

初期摩耗率は大小試験片とも接触荷重とほぼ正比例の関係にあるが、接触荷

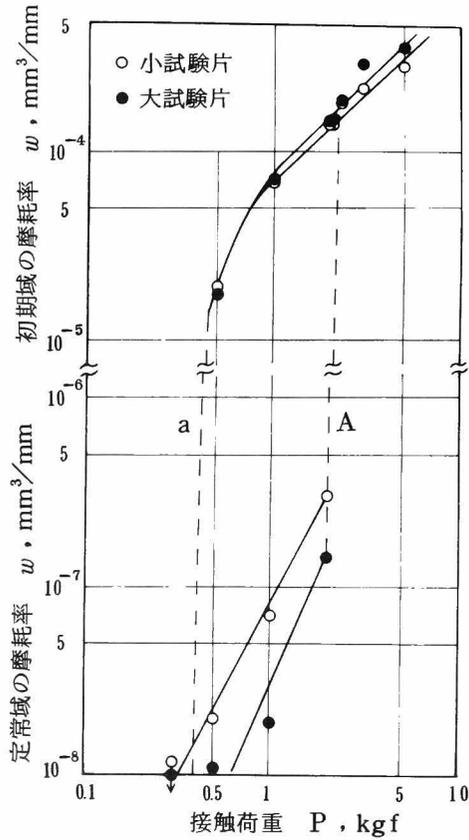


図 1.9 摩耗率と接触荷重の関係

重 a の近傍では低下している。これは摩擦音の変化からも知られるが、初期摩耗期間中にシビア摩耗がしばしば中断してマイルド摩耗が混在するためである。臨界荷重 A 以上では、大試験片の摩耗率が小試験片より若干大きい。また定常摩耗率は初期のそれに比べると 2 ~ 3 桁小さく、接触荷重と両対数表示で直線関係にあるが、小試験片のほうの大きい。大小試験片のどちらがよく摩耗するかについては第 2 章で検討する。

1.3.3 初期摩耗から定常摩耗への遷移

初期のシビア摩耗からマイルド摩耗に遷移する機構を摩耗面の形状の変化から調べるため、接触荷重 $P = 2.0 \text{ kgf}$ の小試験片の同一箇所を走査電子顕微

鏡によって連続観察した。図 1.10 (a), (b) は 50 m 摩擦後の摩耗面である。これは約 20 m の初期摩耗の後定常摩耗に遷移した直後の面である。とくに (b) では表面に付着した摩耗粉を軟かい布で軽く拭いて取り去っている。シビヤ摩

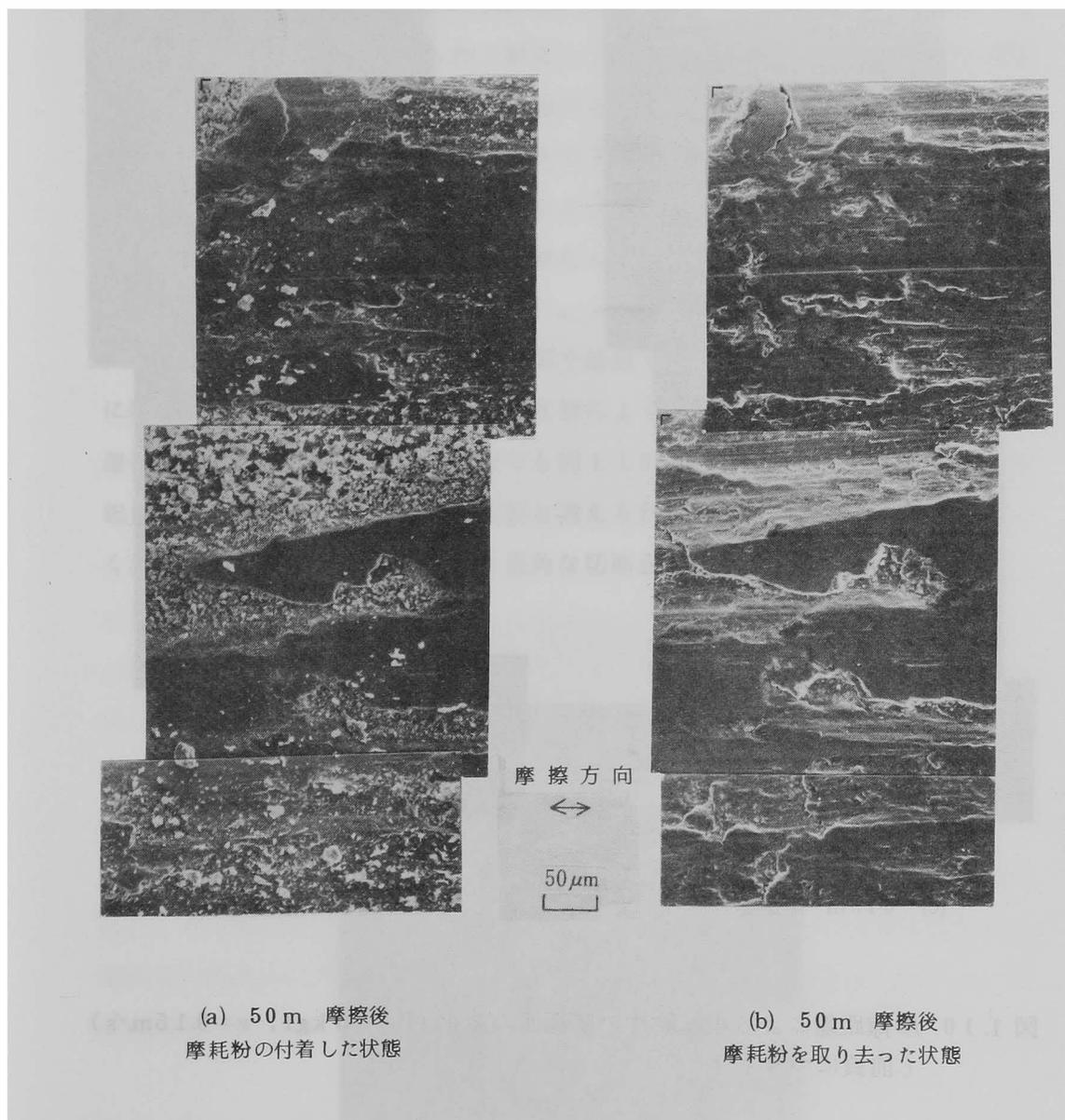


図 1.10 摩擦距離による小試験片の摩耗面の変化 ($P=2.0 \text{ kgf}$, $v=0.15 \text{ m/s}$)

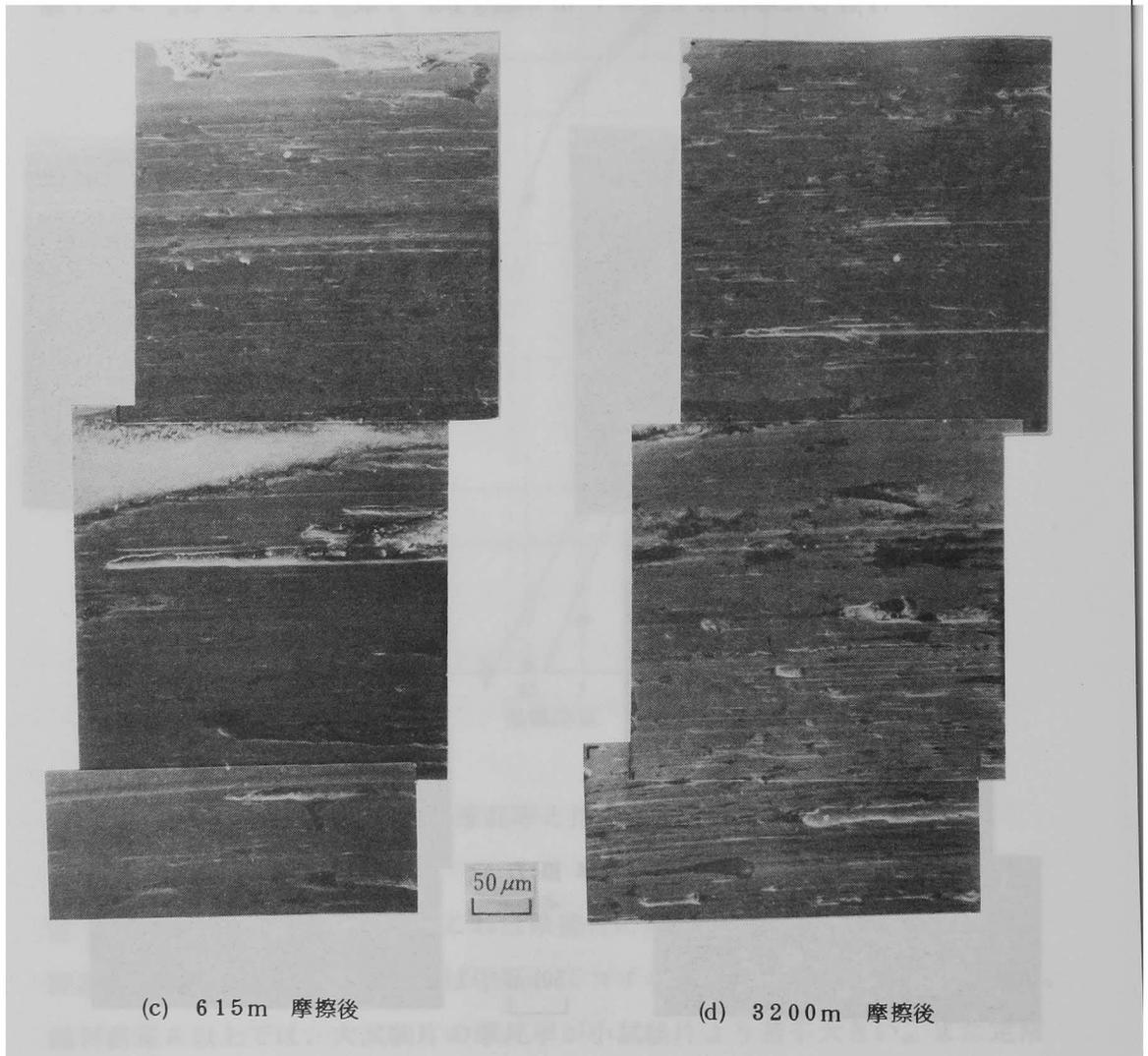


図 1.10 摩擦距離による小試験片の摩耗面の変化 ($P=2.0 \text{ kgf}$, $v=0.15 \text{ m/s}$)
(前頁につづく)

耗面の中に平坦な面がみられる。(a),(b)の比較からわかるように、この部分には摩耗の進行中でも摩耗粉は付着しておらず、定常摩耗に遷移するときの二面の接触は主に平坦な面どうしによることが知られる。この平坦面のビッカースかたさはほぼ $H_v \approx 500$ (測定荷重 100 gf , 20 箇所での測定の平均値)で処女面の 2.7 倍にも加工硬化している。(c)はさらに約 600 m 摩擦したもので、シビヤ摩耗面は次第に減少し、平坦面には図1.6で示したような酸化物や摩耗痕がみられる。(d)は約 3200 m 摩擦後で、酸化物や摩耗痕が一層顕著となる。このとき摩耗面のかたさは、マイルド摩耗に遷移直後の約 70% の $H_v \approx 350$ を示し、若干軟化したことになる。このような摩耗面の変化は大試験片でも同様に観察された。

Eyreら⁽⁹⁾やWilsonら⁽¹⁰⁾は、鋼や鋳鉄では、初期摩耗終了時の摩耗面下に塑性変形による硬化層あるいは相変態による硬化層が生じ、マイルド摩耗に遷移すると報告している。本研究でも図1.10でみられるように、硬化した平坦面の形成が遷移挙動にとって重要と考えられる。そこで平坦面について詳しく調べた。図1.11は摩擦方向と直角な切断面を研磨後 3% ナイタールでエッ

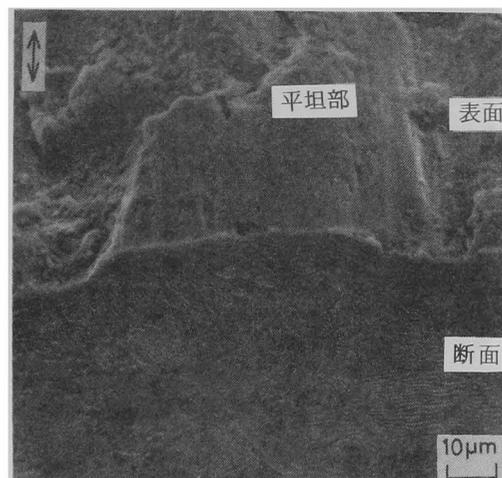


図 1.11 平坦部の断面 ($P=2.0\text{ kgf}$, $v=0.15\text{ m/s}$, 50 m 摩擦後)

チングしたものである。これによれば平坦面は周囲よりも高いが、摩耗粉の付着や摩擦熱による相変化のため生じたものではない。組織が著しく変形しており、激しい塑性変形が原因と考えられる。

またX線マイクロアナライザーにより平坦部表面の鉄元素濃度を測定した。結果を図1.12に示す。測定は摩耗面 a— a' 線上について行った。分布曲線の横軸は a— a' 線的位置に対応している。縦軸は鉄元素の X 線強度であり、定量値は明らかでないが、摩耗面の位置に対する元素濃度の相対的变化がわかる。

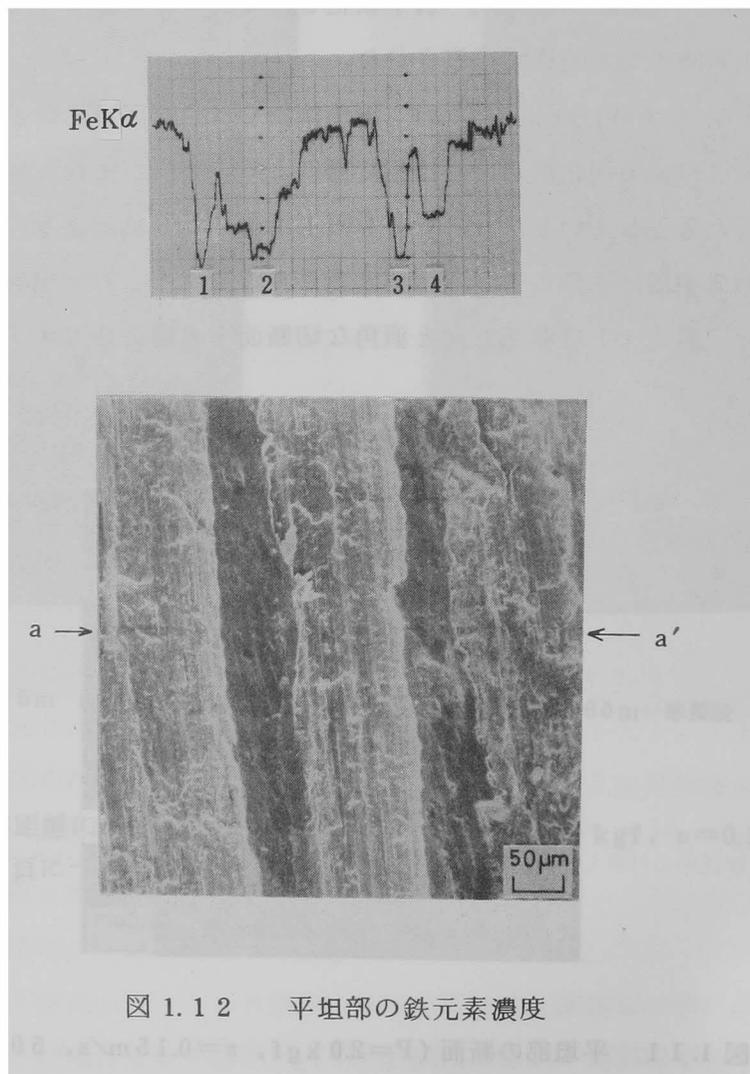


図 1.12 平坦部の鉄元素濃度

分布曲線には4箇所鉄濃度の低い部分があるが、図中1と3の低下は平坦部が高い台地状になっているので、平坦部周辺から放射されたX線が検出されにくいと推測される。これを補正して分布曲線と摩耗面を比較すると、鉄濃度が低下している位置とその幅(図中2と4)は平坦部のそれと一致する。このようなX線マイクロアナライザーの線分析における鉄濃度の低下は、炭素鋼の食塩水中での腐食摩耗面にもみられ、酸化物の形成のためと報告されている⁽¹¹⁾。特性X線の分析深さは酸化層に比べてかなり大きいことが推測されるが、図1.12の鉄濃度の低下は内部の鉄元素濃度の変化によるものではなく、表面での酸化膜の形成によるものと考えられる。したがって平坦部表面はシビヤ摩耗面よりも酸化されていることになる。

摩擦開始後シビヤ摩耗が繰返されると、摩耗面下は次第に塑性変形するため加工硬化が一層進み、この部分は容易に破壊しないで、周囲よりも少し高い平坦な面を形成すると考えられる。これらの硬化した平坦面どうしの接触によって、真の接触面積が増大するため接触圧力が低下し、また接触点の数の減少によって接触から次の接触までの時間が長くなる。その結果平坦面では酸化膜が形成されやすく、マイルド摩耗に遷移するものと考えられる。しかし接触荷重が大きくなると、接触点の数が増加し、摩耗面は温度上昇によって材料強度が低下する。そのため平坦面と酸化は生じにくく、もはやマイルド摩耗へは遷移しない臨界条件を示すものと考えられる。

このように摩擦条件によって、ある摩擦距離後摩耗形態が変化する場合とそうでない場合があり、摩耗量に大きな差異を生じる。従来の機械材料の耐摩耗性は、初期摩耗から定常摩耗への遷移の存在を無視して、一定摩擦時間後の総摩耗量で評価されてきた⁽¹²⁾が、本研究で明らかにした遷移現象に注目して、摩耗試験を再検討し、耐摩耗性の評価基準を見直す必要がある。

1.4 結 言

0.53% C炭素鋼の摩耗試験を、実機の摩擦部に近い試験方式である二円筒端面方式を用いて行い、摩耗形態の遷移現象とその機構を調べた。接触荷重の

大きさによって終始マイルド摩耗の場合，初期にシビヤ摩耗でその後マイルド摩耗に遷移する場合および終始シビヤ摩耗の場合の三種類の異なった進展挙動がみられる。とくにシビヤ摩耗からマイルド摩耗への遷移はある接触荷重の範囲でのみ存在する。この遷移は摩擦開始後ある摩擦距離でシビヤ摩耗面に硬化した平坦面が生じて，酸化膜が容易に形成されるためである。

このような遷移現象に注目して材料の耐摩耗性を評価すべきであるが，遷移を生ずる摩擦条件がすべり速度のみでなく，面積比や試験方式によっても変化することは第2章および第3章で詳しく述べる。また潤滑摩耗の遷移現象についても第5章で検討する。

第2章 乾燥摩耗に及ぼす接触面積比の影響

2.1 緒言

摩耗試験では、接触荷重やすべり速度を同じにしても、用いた試験機によって試験結果に大きな差異を生じることがある^(1~4)。たとえば日本潤滑学会摩耗協同研究報告^(3,4)によれば、二円筒端面方式ではピン・ディスク方式に比べて、初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗へ容易に移行し、その接触荷重やすべり速度も両方式でかなり異なっている。また試験の容易さからピン・ディスク試験がよく行われるが、その結果は実機の摩耗と一致しない場合が多い。これらの現象は摩耗形態の遷移を生じる条件が、大小試験片の摩擦面積の比に影響されるためと考えられる。

大越ら⁽⁵⁾は、接触圧力は一定で面積比を変化させて摩耗試験を行うと、面積比が大きいほど摩耗率は増加することを報告しているが、摩耗形態の変化によるものかどうかは示されていない。面積比が変化すると、接触荷重やすべり速度を同じにしても摩擦面温度は異なる。その結果第1章で述べたように摩擦面温度の影響をうけるシビヤ摩耗—マイルド摩耗の遷移現象は、面積比によって変化するはずである。また摩擦面温度によって摩耗面の強度や酸化の程度が異なるので、大小試験片の摩耗量も面積比によって変化するであろう。

本章では、面積比が初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗へ遷移する条件および初期、定常期の摩耗率に及ぼす影響について明らかにし、その機構について考察した。また種々の面積比で得られた摩耗量の結果を比較する際の摩耗量の表示法についても検討を加えた。

2.2 試験方法

試験装置および方法は第1章で述べたものと同様であるため、ここでは簡単に述べる。下試験片は図2.1に示すように端面を寸法Lだけ残して切りとり、

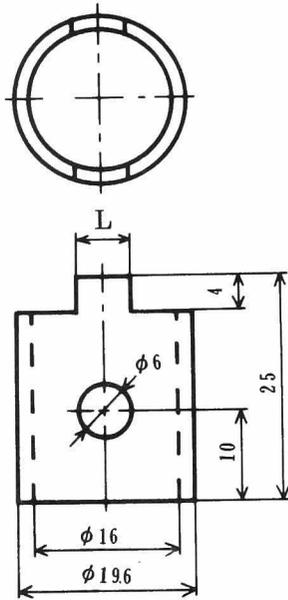


図 2.1 下試験片の形状，寸法

種々の大きさの切欠きを付けて小試験片とした。このようにして得られる大小試験片の面積比 α は，同面積接触の $\alpha = 1.0$ から $\alpha = 4.5$ まで変化させてある。第 3 章で述べるが，ピン・ディスク試験機的面積比はさらに大きく普通 $\alpha = 2.0$ 以上もある。

供試材は第 1 章と同じ 830°C ，1 時間保持にて焼なました 0.53% C 炭素鋼で，化学成分は表 1.1 に，機械的性質は表 1.2 に示されている。試験片は所定の寸法形状に機械加工した後，第 1 章と同様端面を $\#1000$ 研磨紙で仕上げ， 650°C ，1 時間真空焼なましたものである。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 摩耗曲線

0.53% C 炭素鋼どうしを面積比 $\alpha = 1.0$ ， 1.3 ， 2.0 および 4.5 で組合せ，すべり速度 $v = 0.15 \text{ m/s}$ 一定で乾燥摩耗試験を行った。なお $\alpha = 2.0$ は第 1 章で示した結果である。図 2.2 は摩耗曲線の一例で，接触荷重 $P = 2.0 \text{ kgf}$ の小試験片について示した。面積比が $\alpha = 1.0$ ， 1.3 および 2.0 では，摩擦を開始するとシビヤ摩耗を示すが，その後マイルド摩耗の定常域に遷移する。しかし面積比の大きい $\alpha = 4.5$ では， $\alpha = 1.0 \sim 2.0$ の初期域とほぼ同じ摩耗率でシビヤ摩耗が持続し，もはやマイルド摩耗へは遷移しない。このようにシビヤ摩耗からマイルド摩耗への遷移は，接触荷重やすべり速度が同じでも面積比によって変化する。

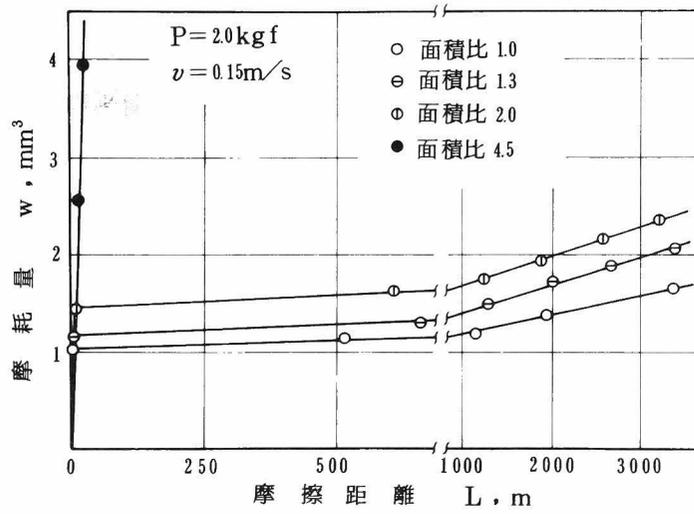


図 2.2 小試験片の摩耗曲線

2.3.2 初期摩耗

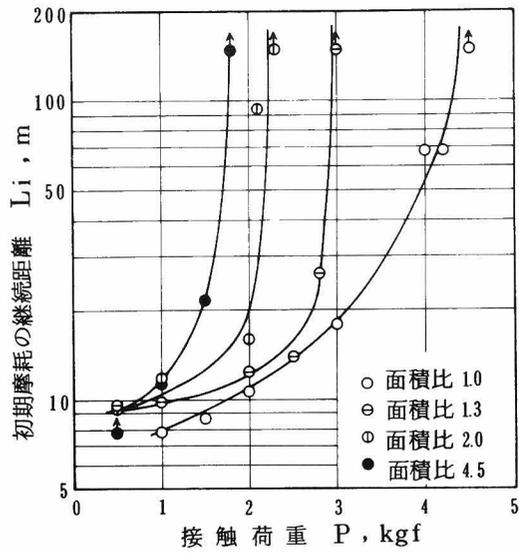


図 2.3 初期摩耗期間と接触荷重の関係

種々の面積比における初期摩耗の継続距離（大試験片の円周長さと初期摩耗期間の全回転数との積で得られる摩擦距離 L_i で示す）と接触荷重の関係を図 2.3 に示す。図中矢印は、この摩擦距離で試験を打切ったことを示す。面積比が大きいほど初期摩耗の期間は長く、いずれの場合も臨界荷重に近づくと急激に増大する。

摩耗率と接触荷重の関係の一例として、図 2.4 に面積比 $\alpha = 1.0$ と 4.5 について示す。(a) は小試験片、(b) は大試験片の結果である。摩耗率は第 1 章で述べた方法で算出した。初期のシビヤ摩耗からマイルド摩耗へ遷移する接触

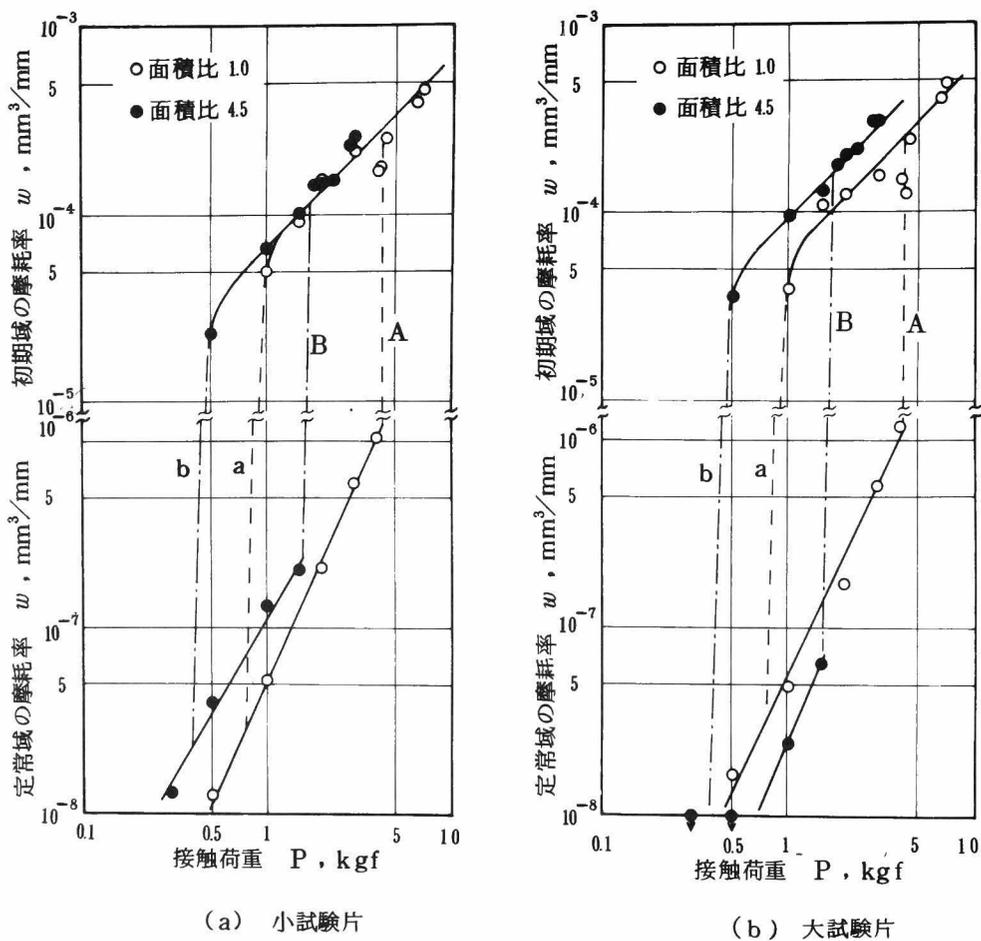


図 2.4 摩耗率と接触荷重の関係

荷重の範囲は、 $\alpha = 1.0$ では a—A、 $\alpha = 4.5$ では b—B であり、面積比によって異なる。臨界荷重 A、B を比べると、 $\alpha = 1.0$ のほうが大きい。臨界荷重と面積比の関係は 2.3.4 項で詳しく述べる。初期摩耗率は小試験片ではほとんど差がないが、大試験片では $\alpha = 4.5$ のほうが大きい。定常摩耗率は 2.3.3 項で述べるが、初期摩耗の挙動とは異なっている。

図 2.5 は比摩耗量すなわち単位接触荷重あたりの摩耗率 (mm^2/kgf) と面積比の関係である。いずれの面積比の場合も、種々の接触荷重で求めた比摩耗量の平均値である。常に接触状態にある小試験片の比摩耗量は、面積比 $\alpha = 1.0$ でのわずかな低下を除けば、面積比によらずほぼ一定である。一方間欠的に接触する大試験片のそれは面積比とともに増加し、相手の小試験片よりも大きくなる。実機の摩擦部分の設計において、いずれの面がより多く摩耗するかはしばしば問題となる。面積比が大きくなるほど小試験片が力学的にも熱的にも苛酷な状態となり摩耗が著しいと推察されるが、実際には大試験片の摩耗が増大する。これは摩耗機構の解明のみでなく、耐摩耗設計に際して極めて重要な知見である。

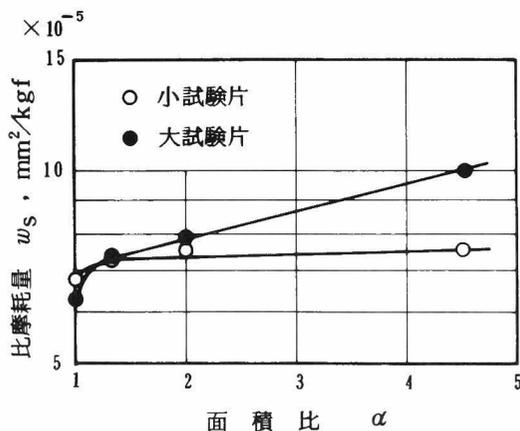


図 2.5 初期域の比摩耗量と面積比の関係

このような比摩耗量の挙動は、脱落する摩耗粉の大きさと数に支配される。図 2.6 は摩擦方向に切断したシビヤ摩耗の断面にみられるき裂である。摩耗粉の脱落は、き裂がある深さまで進展して生じるものと考えられる。そこで大小試験片からの脱落粉径の大小関係を知るため、面積比 $\alpha = 4.5$ について、き裂深さを 500 倍の光学顕微鏡で約 100 個読みとった。接触荷重 $P = 2.0 \text{ kgf}$ におけるき裂深さの平均値は、小試験片では $9.3 \mu\text{m}$ 、大試験片では $10.2 \mu\text{m}$ で、大試験片のほうが大きい。

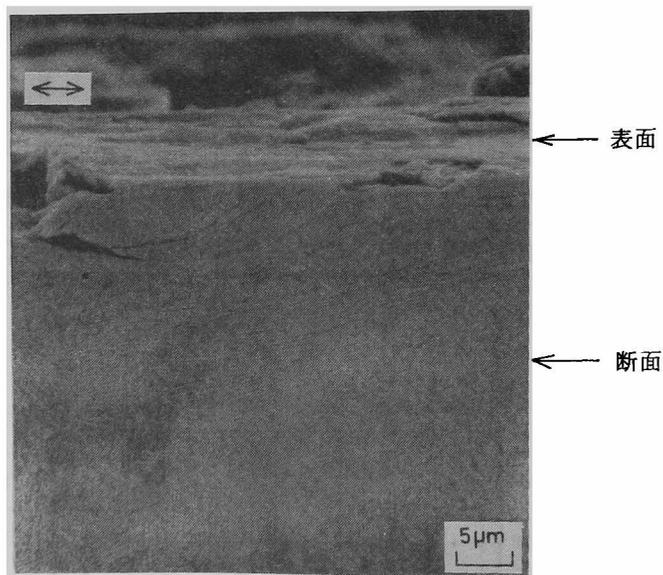


図 2.6 初期のシビヤ摩耗の断面
($P=2.0 \text{ kgf}$, $v=0.15 \text{ m/s}$)

またこのような摩耗では、Finkin⁽⁶⁾が報告しているように摩耗粉径と表面あらかしは対応関係にあると考えられる。そこで摩耗面のあらかしを測定した。図 2.7 は大小試験片の中心線平均あらかし(測定距離 1.5 mm, カットオフ値 0.8 mm)である。測定は摩擦方向に直角に摩耗面の 10 箇所で行い、その平均値で示した。接触荷重が増加するとあらかしは大きくなるが、いずれの荷重でも、

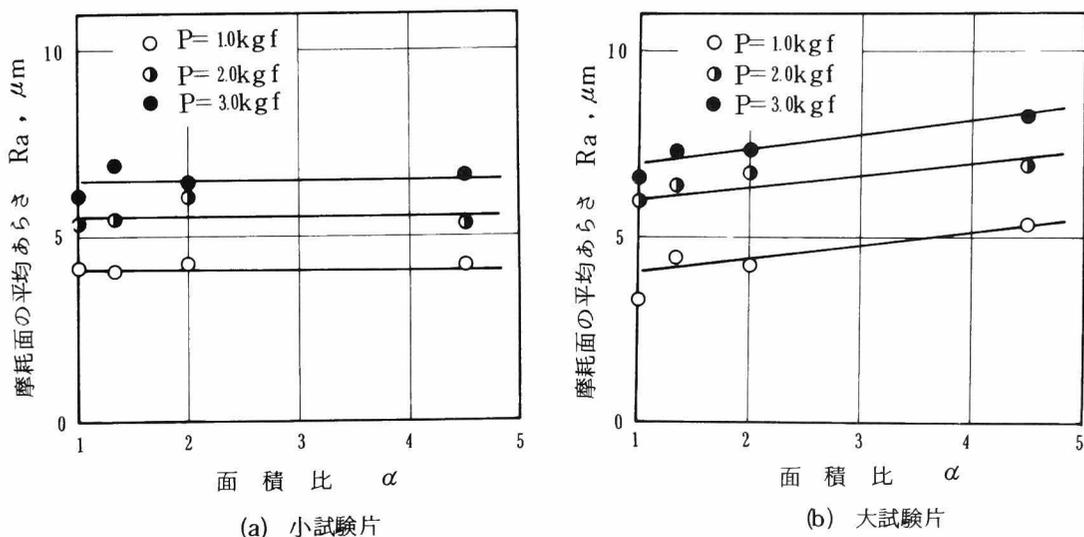


図 2.7 初期のシビア摩耗面の平均あらさと面積比の関係

小試験片のあらさは面積比によらずほぼ一定で、大試験片のそれは面積比とともに増加する。大小試験片の比をとると図 2.8 のように、大試験片のほうが大きく、き裂深さの測定結果と同じである。これらのことより面積比が大きくなると、大試験片での摩耗粉径は次第に増大するが、小試験片のそれは変化しないものと考えられる。図には比摩耗量の比も合わせて示したが、あらさの変化挙動と類似している。

乾燥摩擦では、二面の接触は塑性的であると考えられ、接触点の数や個々の面積はみかけの摩擦面積には依存しない^(7,8)したがって同じ接触荷重下では、面積比が異なっても摩耗粉の大きさは変らないはずである。そのため小試験片の表面あらさや比摩耗量はほぼ一定となる。一方大試験片の摩耗面は、小試験片より温度上昇が小さく、相対的な材料強度は高い。その結果摩耗粉の脱落速度は減少するが、摩耗き裂はかえって深くまで進展することになり、摩耗粉径は大きくなると考えられる。面積比にともなって、このような傾向は著しく、

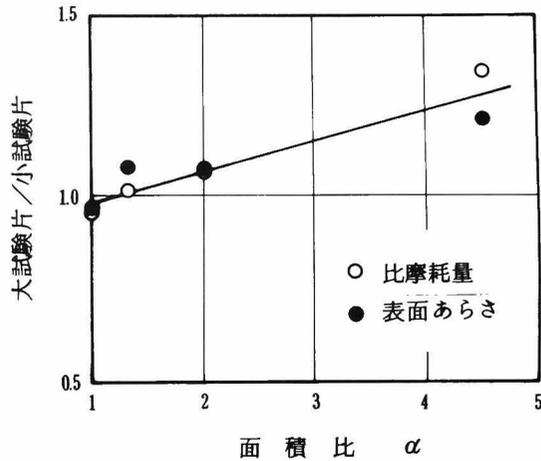


図 2.8 大試験片と小試験片の表面あらさと比摩耗量の比

大試験片の比摩耗量は増加する。ただし面積比 $\alpha = 1.0$ では、接触面から摩耗粉が排除されにくく凝着の程度が減少するため、比摩耗量は小試験片の一定値よりも若干低いものと考えられる。

面積比によってみかけの摩擦面積が異なる試験結果を比較する場合、摩耗量の表示には体積減少量ほかに機械のがたに直接ひびく摩耗深さの変化量も重要である。図 2.9 は初期のシビヤ摩耗における摩耗深さの変化率と接触圧力の関係である。(a) は小試験片で、縦軸は初期摩耗率を摩擦面積で除した単位摩擦距離あたりの摩耗深さの変化率である。これは図 2.4 (a) の縦軸の体積摩耗率と横軸の接触荷重の両者を、みかけの摩擦面積で除して得られる関係であるので、深さの変化率は接触圧力に比例する。また深さの変化率で表示しても接触圧力で整理すれば、小試験片の摩耗は面積比の影響をうけない。一方大試験片は (b) のようである。この場合摩耗深さの変化率は次のようにして求めた。大試験片の摩耗面上の一点は間欠的に接触を繰返すので、一回転あたりにすべる距離は円周長さを面積比で除した値であるとするのが適当である。そこでこのように考えた摩擦距離と摩擦面積で体積摩耗率を除して深さの変化率とした。

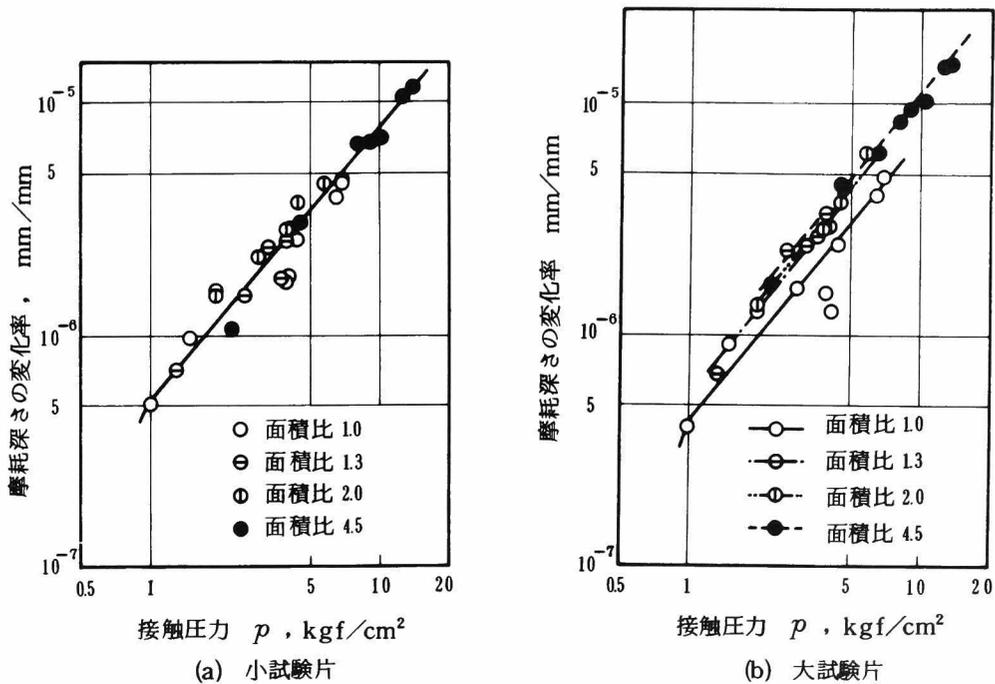


図 2.9 初期域の摩耗深さの変化率と接触圧力の関係

面積比が大きいほど深さの変化率は増加するようであるが、面積比 $\alpha = 1.3$ 以上では、図 2.5 の比摩耗量と面積比の関係で見られるような明瞭な差異はない。しかし初期のシビヤ摩耗を比較する場合、体積摩耗率で表示するときは接触荷重で、また摩耗深さの変化率のときはみかけの接触圧力で整理すれば、統一的な結果が得られる。

2.3.3 定常摩耗

定常域のマイルド摩耗の比摩耗量と面積比の関係を図 2.10 に示す。なお接触荷重 $P = 0.5$ kgf の大試験片の摩耗量は微小で測定できなかった。マイルド摩耗率は図 2.4 で示したように接触荷重と正比例の関係を示さないので、比摩耗量は接触荷重によって変化する。小試験片の比摩耗量は面積比とともに大きくなる。一方大試験片のそれは小試験片より小さく、面積比が $\alpha = 1.0$ より大きくなったとたん著しく減少するが、それ以上の面積比での差は小さい。これ

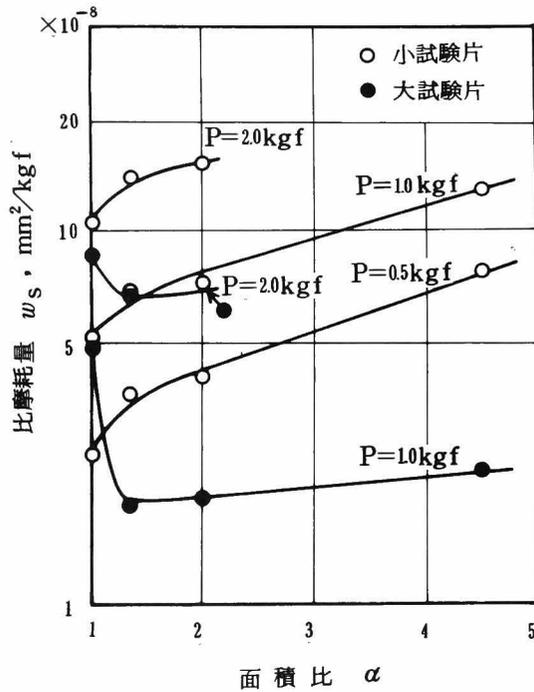


図 2.10 定常域の比摩耗量と面積比の関係

らの変化挙動は初期のシビヤ摩耗とは異なっている。

定常摩耗では、第1章で述べたように、酸化した摩耗面が繰返し摩擦によって破壊する。小試験片では、面積比にもなって摩耗面の温度上昇が大きく、酸化の程度も大きいいため比摩耗量は増大する。大試験片では、摩耗面は直接大気に触れるため温度上昇が減少し、比摩耗量は小試験片より小さいものと考えられる。

摩耗深さの変化率と接触圧力の関係を、初期域の場合と同様な方法で求めると図 2.11 のようである。一定の接触圧力で比較すると、深さの変化率は大小試験片とも面積比とともに小さくなる。これは図 2.10 で得られた比摩耗量と面積比の関係とは逆である。マイルド摩耗では摩耗量の表示法によって、耐摩耗性の順序は逆転することになるので注意を要する。

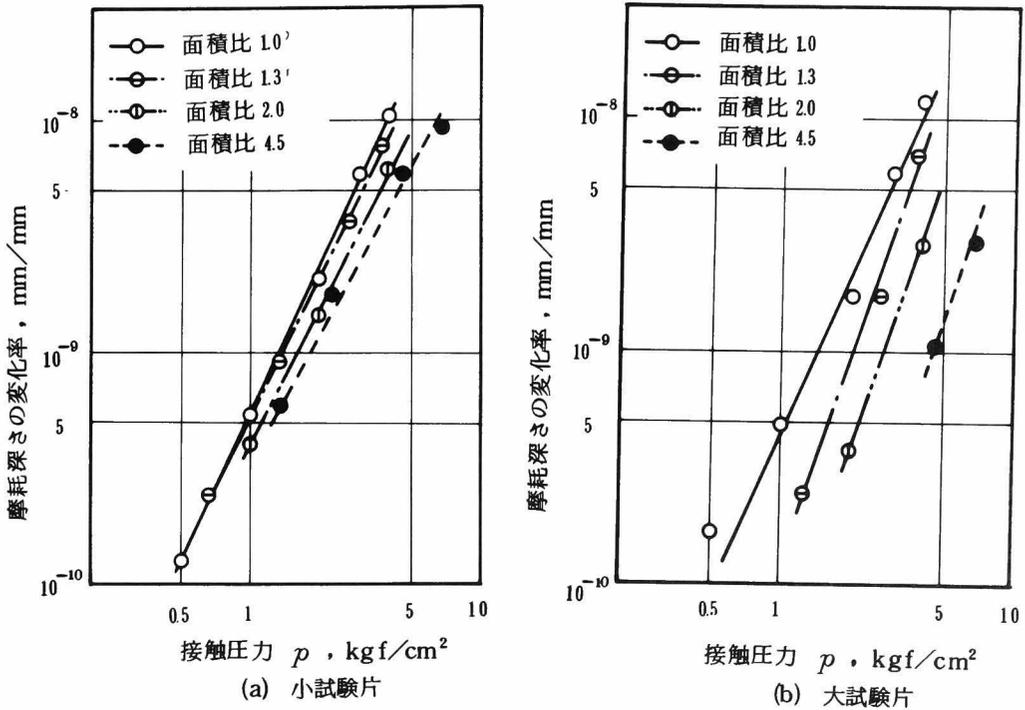


図 2.1.1 定常域の摩耗深さの変化率と接触圧力の関係

2.3.4 初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗への遷移

種々の面積比で得られる臨界荷重を図 2.1.2 に示す。図には臨界荷重をみかけの摩擦面積で除した臨界圧力も示した。図中臨界条件「 \rightarrow 」の上限は終始シビヤ摩耗を示す最小の実験値，下限はマイルド摩耗に遷移する最大の実験値を示す。臨界荷重は面積比が大きくなるほど減少するが，その程度は次第にゆるやかになる。したがってピン・ディスク方式のようにさらに面積比が大きくなると，臨界荷重は一定値に落ち着くことが推測される。この点については第 3 章で詳しく検討する。一方臨界圧力は面積比 $\alpha = 4.5$ になると急激に増大する。

初期のシビヤ摩耗からマイルド摩耗への遷移は，第 1 章で述べたように，硬化した平坦面の発生によって酸化膜の形成が容易となるためである。しかし摩擦面温度の上昇が著しい場合には，平坦面は形成されず臨界条件となる。一般

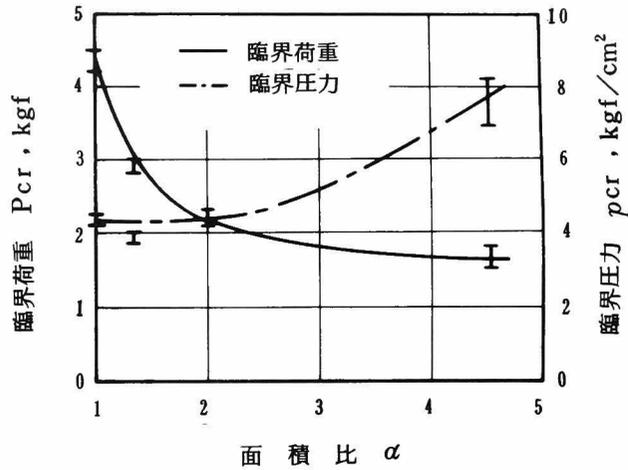


図 2.12 臨界条件と面積比の関係

に摩擦面温度はみかけの接触圧力とすべり速度に依存する⁽⁹⁾ したがって面積比が大きいほど、高い摩擦面温度を示すことになるので、臨界荷重は減少する。しかし大きな面積比では、大試験片の温度上昇が小さく、臨界荷重はあまり変化しないで一定値に近づくものと考えられる。

臨界条件が摩擦面温度に支配されるとすると面積比による変化挙動がうまく説明できるが、このように考えるとすべり速度に対しても同様な挙動を示すはずである。そこで臨界条件のすべり速度による変化を調べた。図 2.13 は面積比 $\alpha = 1.0$ と 4.5 の結果である。すべり速度 v が大きくなると臨界条件は低下するが、臨界荷重 P_{cr} は $\alpha = 1.0$ のほうが大きく、臨界圧力 p_{cr} は $\alpha = 4.5$ のほうが大きい。臨界条件の変化はほぼ $P_{cr} \cdot v \approx C$ あるいは $p_{cr} \cdot v \approx C'$ の関係を持ち、この定数 C 、 C' の値が面積比によって異なる。とくに $P_{cr} \cdot v \approx C$ の関係は試験方式が変化しても面積比のみに依存するので、遷移条件の統一的な評価を可能にすることを第 3 章で述べる。

このようにシビヤ摩耗からマイルド摩耗への遷移は接触荷重やすべり速度と同様に面積比によっても系統的に変化する。同じ方式で行われた摩耗試験の結

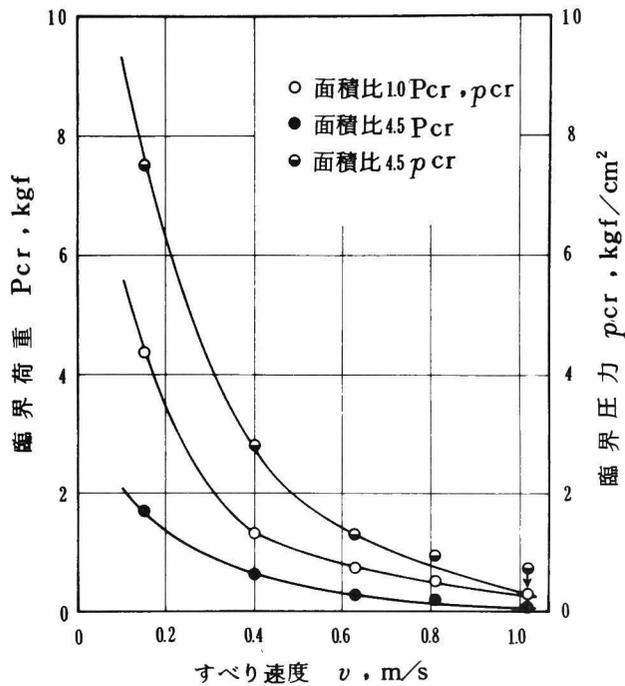


図 2.13 すべり速度による臨界条件の変化

果が、摩擦条件をそろえたにもかかわらず一致しないのは、面積比の違いによるものであり、試験結果を実機に適用する際面積比に注意をはらわねばならない。

図 2.14 はシビヤ摩耗の比摩耗量とすべり速度の関係である。高速度域では比摩耗量の低下がみられ、その程度は面積比の大きいほうが著しい。これはすべり速度が大きくなると、温度上昇による摩耗面の軟化が進行し、その程度が面積比とともに著しくなるためと考えられる。いずれのすべり速度でも小試験片の比摩耗量は面積比 $\alpha = 1.0$ と 4.5 ではほぼ一致するが、大試験片の $\alpha = 4.5$ はこの値より大きい。これは 2.3.2 項で述べたように、摩擦面温度の低い $\alpha = 4.5$ の大試験片では摩耗粉径が大きくなるためである。

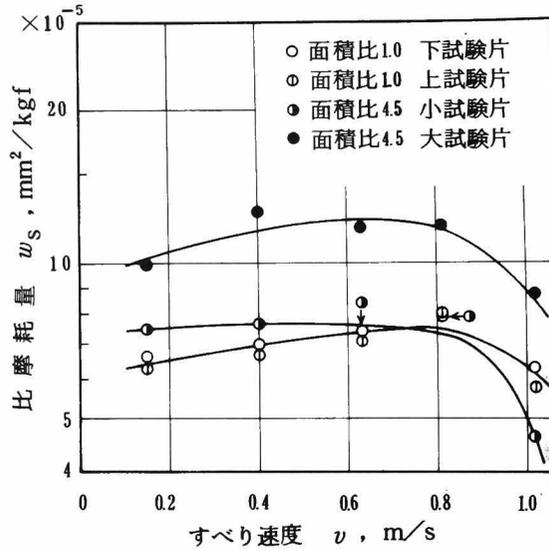


図 2.14 初期域の比摩耗量のすべり速度による変化

2.4 結 言

種々の接触状態での摩耗試験結果に一般性をもたせるため、新たに面積比の概念を取入れて、初期のシビヤ摩耗からマイルド摩耗へ遷移する条件や摩耗量に及ぼす面積比の影響を調べた。摩耗試験は同面積接触方式とピン・ディスク方式との中間の接触状態で面積比を変化させて行い、つぎのような結論が得られた。

(1) ある摩擦条件下では初期のシビヤ摩耗ののち、マイルドな定常摩耗のあらわれない面積比が存在する。これはマイルド摩耗に遷移できない臨界条件が面積比によって変化するためである。すなわち面積比が大きくなると臨界荷重 P_{cr} は減少し、臨界圧力 p_{cr} は増加するが、面積比による摩擦面温度の上昇から説明される。またすべり速度が変化しても同様な挙動を示し、臨界の $P_{cr} \cdot v$ 値あるいは $p_{cr} \cdot v$ 値が面積比によって変化する。

(2) 凝着によるシビヤ摩耗では、小試験片の比摩耗量は面積比 $\alpha = 1.0$ でのわずかな低下を除けば面積比の影響をうけないが、大試験片のそれは面積比とともに大きくなる。摩耗面の酸化に支配されるマイルド摩耗では、小試験片の比摩耗量は面積比にともなって大きくなる。大試験片のそれは面積比が $\alpha = 1.0$ より大きくなると著しく減少するが、面積比による差は小さい。

(3) 種々の面積比で得られた結果から、摩耗率の大小を比較する場合、シビヤ摩耗では体積摩耗率と接触荷重の関係あるいは摩耗深さの変化率と接触圧力の関係であらわせれば一致した結果が得られるが、マイルド摩耗では両者の表示では異なるので注意を要する。

第3章 乾燥摩耗に及ぼす試験方式の影響

3.1 緒 言

摩耗試験では用いた方式によって結果に大きな差異がみられることは第2章の緒言で述べた。そのため試験方式や摩擦条件などを規定した標準摩耗試験法は、いまだ確立されていない⁽¹⁾。また種々の方式で得られた試験結果を実用の機械でみられる摩耗と比べてみると、定量的のみでなく定性的にも一致しないことが多い。これらは初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗に遷移する摩擦条件や摩耗量が、面積比のみでなく試験方式によっても異なるためと考えられる。摩耗試験に一般性をもたせ、その結果を実機の耐摩耗設計に適用するためには、さらに乾燥摩耗に及ぼす試験方式の影響を明らかにして、耐摩耗性の評価法を確立する必要がある。

第2章において、シビヤマイルドの遷移は接触荷重やすべり速度と同様に面積比によっても変化することを述べた。しかし面積比の著しく大きいピン・ディスク方式や曲率面で接触する鞍形・円筒方式に対しても、二円筒端面方式で得られた遷移条件と面積比の関係および比摩耗量と面積比の関係を、拡張して適用できるか疑問である。とくにピン・ディスク方式では水野^(2,3) 佐田⁽⁴⁾ 笹田⁽⁵⁾が指摘しているように、面積比は同じでもピン直径が異なる場合あるいは摩耗痕ピッチ円直径によって面積比が異なる場合についても議論すべきであろう。大きなすべりを伴うころがり摩耗方式では、摩耗進展挙動に及ぼす接触荷重やすべり率の影響を知るとともに、すべり摩耗との関連を明らかにする必要がある。

本章では、鋼の摩耗試験をピン・ディスク、鞍形・円筒、ピン・円筒のすべり方式と二円筒ころがりすべり方式で行い、シビヤマイルドの遷移条件、初期摩耗期間および摩耗量に及ぼす試験方式の影響を明らかにした。さらに各種方式で得られた結果の相互関係を検討した。

3.2 試験方法

摩耗試験は図 3.1 に示すように、いずれも大気中で所定の接触荷重 P で摩擦

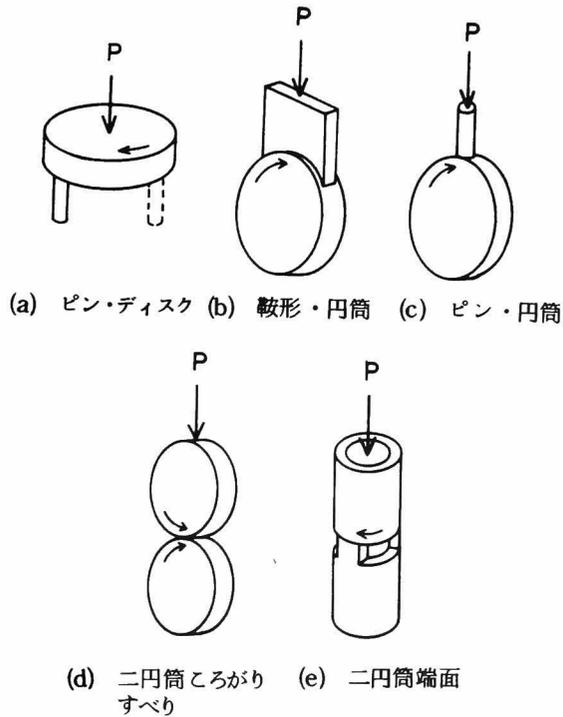


図 3.1 摩耗試験方式

する形式である。(a)のピン・ディスク試験は上に取り付けたディスクと下側の平坦なピン端面の摩耗である。(b)は円筒周面に鞍形の固定試験片を押しつける方式である。(c)は(b)と同じ円筒周面にピンを押しつける方式で、ピン端面はあらかじめ乾燥摩耗させることにより円筒となじんだ凹の曲率面をもつ。したがって(b)の鞍形試験片を小さくすると(c)に近づく。(d)は二円筒ころがりすべり方式で、上試験片を低速、下試験片を高速で回転し種々のすべり率でころがりすべり摩耗試験を行う。(e)の二円筒端面方式は、第2章で得られた結果で、この結果を延長すると(a)に近づくので比較検討に用いた。いずれの方式でも摩擦係数は測定していない。

種々の方式における試験片の寸法形状，処女面の平均あらさ Ra および 面積比を表 3.1 に示す。試験片はいずれの場合も一般によく用いられる寸法形状とした。ピン・ディスク方式の面積比は $\alpha = 20$ であるが，図 3.1 (a) の破線のように同じピッチ円上に 2 本のピンを配置して $\alpha = 10$ の試験も行った。また $\phi 4$ ピンではピッチ円直径をかえることによっても面積比を変化させた。鞍形・円筒方式の面積比は，接触部の投影面積を鞍形試験片の摩擦面積として算出した。

表 3.1 各試験方式における試験片の詳細

接触形式	試験方式		寸法形状 (mm)	Ra (μm)	面積比
平面	二円筒端面	円筒	外径 $\phi 19.6$ 内径 $\phi 16.0$	0.03	1.0~4.5
	ピン・ディスク	ピン	$\phi 6, \phi 4$	0.04	$\phi 6$ ピン 10, 20
ディスク		ピッチ円直径は 面積比により変化	0.09	$\phi 4$ ピン 10~42	
曲面	鞍形・円筒	鞍形	長さ 5~20, 幅 5	1.8	5.0~20
		円筒	$\phi 32$, 幅 8	1.5	
	ピン・円筒	ピン	$\phi 6, \phi 4$	—	$\phi 6$ ピン 21
		円筒	$\phi 32$, 幅 8	—	$\phi 4$ ピン 32
線	二円筒 ころがりすべり	円筒	$\phi 50$, 幅 10	1.5	—

供試材は 830°C ，1 時間保持にて焼なました 0.50% C 炭素鋼で，化学成分を表 3.2 に，機械的性質を表 3.3 に示す。第 1 章，第 2 章の二円筒端面方式で用いた供試材は 0.53% C 炭素鋼であるが，表 1.1 の化学成分および表 1.2 の機械的性質を 0.50% C 炭素鋼のそれと比べても，ほとんど差がない。各試験片

表 3.2 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.50	0.26	0.81	0.027	0.020

表 3.3 供試材の機械的性質

降伏点 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸び %	かたさ Hv
37	66	29	190

は所定の寸法形状に機械加工したのち、試験方式ごとに所定の仕上げを施して 650℃、1時間真空焼なましした。とくにピン・ディスク方式の平坦ピン試験面は摩擦開始時のあたりをよくするため、相手ディスク表面に#320研磨紙をはりつけて摩擦研磨した。試験面はいずれもアセトン洗浄後乾燥させて試験に供した。摩耗量は重量減少量を精密天びん(感度0.01mg)で秤量して求めた。試験は15~20℃、相対湿度55~70%に保たれた室内で行った。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 すべり摩耗方式

3.3.1.1 摩耗曲線

種々の試験方式を用いて、すべり速度 $v = 0.15 \text{ m/s}$ 一定で乾燥摩耗試験を行った。図 3.2 は接触荷重 $P = 1.0 \text{ kgf}$ における小試験片(ピン, 鞍形)の摩耗曲線である。φ6ピン・ディスク方式と鞍形・円筒方式では、摩擦を開始するとシビヤ摩耗の初期域がある。その後摩擦音が変化しマイルド摩耗の定常域に遷移する。マイルド摩耗特有の摩擦音が持続しはじめるまでの初期摩耗期間および初期摩耗量は試験方式や面積比によって異なる。これに対しφ4ピン・

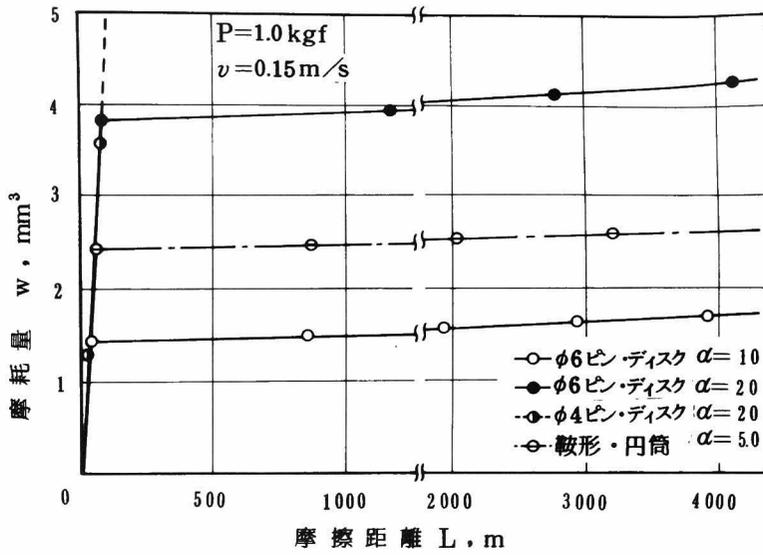


図 3.2 小試験片の摩耗曲線

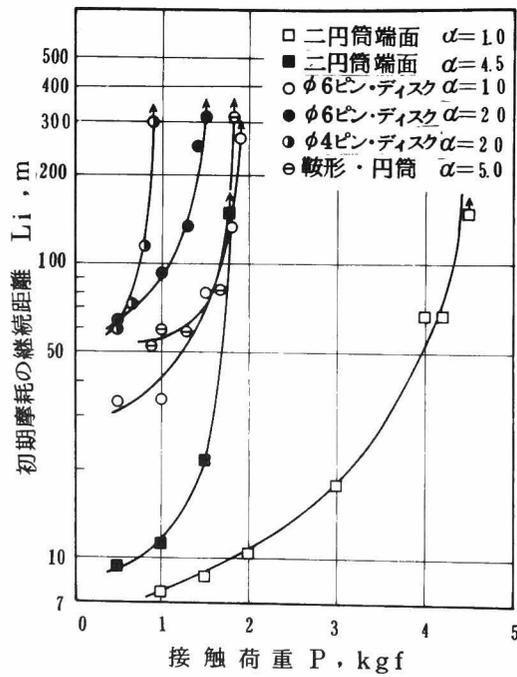


図 3.3 初期摩耗期間と接触荷重の関係

ディスク方式ではシビヤ摩耗が持続する。接触荷重をかえて試験を行うと、 $\phi 6$ ピン・ディスク，鞍形・円筒方式でも，ある条件下では初期のシビヤ摩耗が持続して遷移を示さない。

図 3.3 は初期摩耗の継続距離と接触荷重の関係である。継続距離はいずれの方式でも，大試験片のピッチ円の円周長さと初期域での全回転数との積で得られる摩擦距離 L_i で示し，数回の試験結果の平均である。二円筒端面と $\phi 6$ ピン・ディスク方式のそれは，面積比が大きくなるほど長くなるが，鞍形・円筒方式は面積比が小さいにもかかわらず長い。

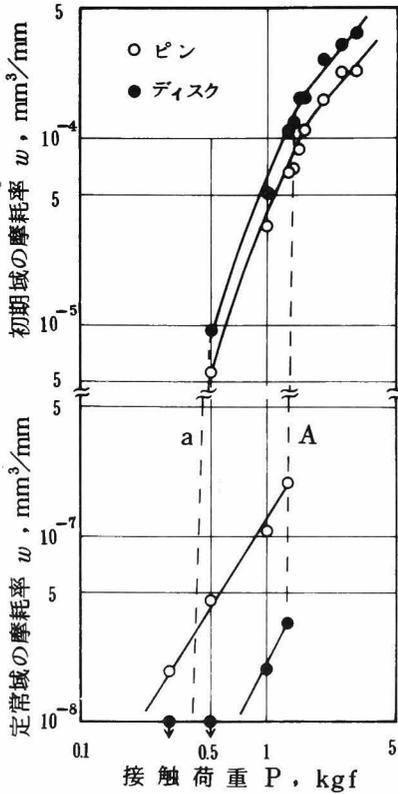


図 3.4 $\phi 6$ ピン・ディスク ($\alpha=20$) 方式の摩耗率と接触荷重の関係

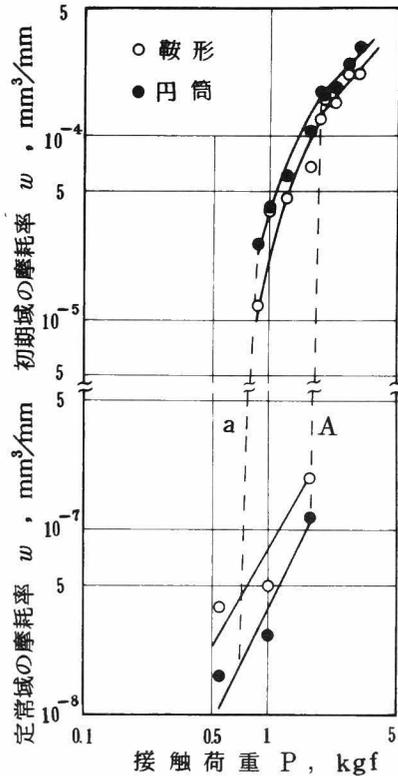


図 3.5 鞍形・円筒 ($\alpha=5.0$) 方式の摩耗率と接触荷重の関係

摩耗率と接触荷重の関係は、 $\phi 6$ ピン・ディスク ($\alpha = 20$) 方式では図 3.4 のように、鞍形・円筒方式では図 3.5 のようになる。シビヤ摩耗—マイルド摩耗の遷移現象を生じる接触荷重の範囲は $a - A$ の領域で、その値は試験方式によって異なることがわかる。初期摩耗率は臨界荷重 A 以上ではほぼ荷重に比例して増大するが、遷移を生じる接触荷重範囲では比例関係より低い値を示す。これは摩擦音の変化から知られるが、初期摩耗が完全に終了するまでにマイルド摩耗の発生、消滅を数回繰返すためである。

3.3.1.2 初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗への遷移条件

種々の試験方式で得られる臨界荷重 P_{cr} を面積比に対して表示すると図 3.6 のようになる。図中 \ominus は鞍形試験片の幅を $1/2$ にして、面積比はそのまま摩擦面積が $1/2$ のときの結果である。また \otimes のところがりすべり方式の結果については 3.3.2 項で述べる。ピン・ディスク方式ではピン直径が増大して $\phi 6$ ピンになると、後に述べる考察で明らかにするが、臨界荷重はピン摩耗面の外側と内側での周速の差が大きいため変化する。そこで $\phi 6$ ピン・ディスク方式の結果

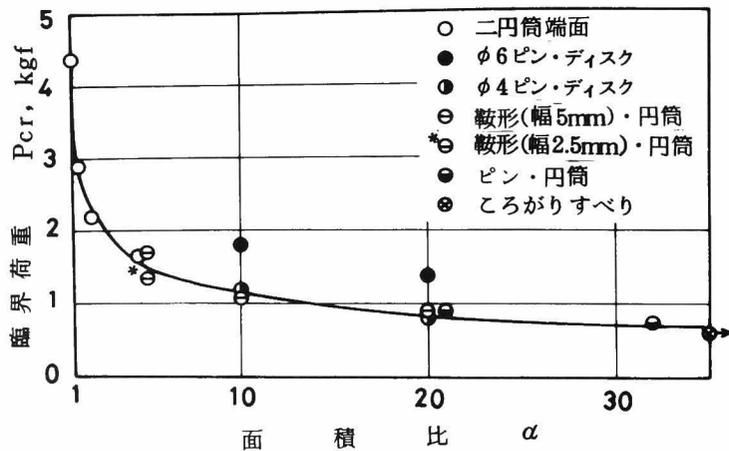


図 3.6 各種試験方式における臨界荷重

を除くと、臨界荷重は試験方式によらず面積比が大きくなると減少し、ほぼ一定の値に落ち着くようである。また鞍形・円筒方式の \ominus 、 $^*\ominus$ がほぼ一致することからも、臨界荷重が摩擦面積によらず面積比に支配されることが知られる。

臨界荷重をみかけの摩擦面積（鞍形・円筒方式では接触部の投影面積）で除した臨界圧力 p_{cr} を図3.7に示す。圧力で表示すると試験方式によって著しく異なる。これは面積比は同じでも、摩擦面積が異なるためである。同じ円筒の周面に固定試験片を押しつける鞍形・円筒方式とピン・円筒方式の臨界圧力はほぼ同一曲線で整理できるが、平面どうしの接触による二円筒端面方式とピン・ディスク方式のそれらは一致しない。しかしいずれの方式でも面積比が大きくなると臨界圧力は増加している。

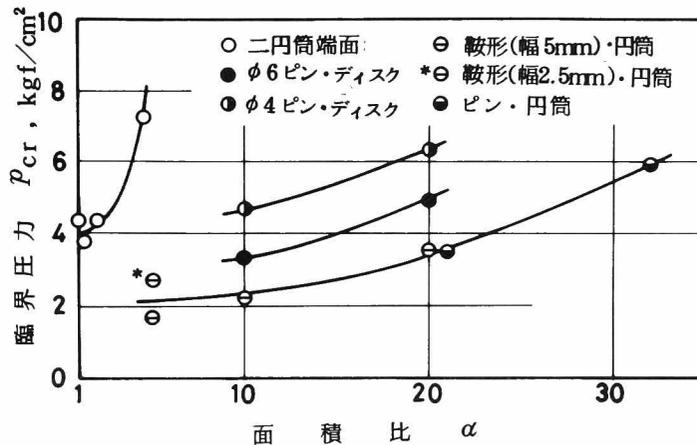


図 3.7 各種試験方式における臨界圧力

これらのことより臨界条件は圧力より荷重が主であることが知られる。すなわち材料の臨界条件は、用いた試験方式によって変化するが、臨界荷重と面積比の関係から評価できる。耐摩耗設計に際しては、材料の臨界荷重—面積比曲線を求め実機の摩擦部の面積比を知れば、シビヤ摩耗を持続させない運転荷重の決定が可能であろう。

マイルド摩耗へ遷移できない臨界条件は、第1章で述べたように、シビヤ摩耗面に硬化した平坦面が形成されない摩擦条件である。これは第2章で述べた摩耗面の温度上昇のみでなく、摩耗粉の脱落や摩耗面の凹凸の変化の程度にも支配されるものと考えられる。そこでこのような観点から試験方式による臨界荷重の相違を検討するため、摩耗断面のき裂深さと摩耗面のあらさを調べた。

接触荷重 $P = 2.0 \text{ kgf}$, すべり速度 $v = 0.15 \text{ m/s}$ のシビヤ摩耗における測定結果を表3.4に示す。き裂深さは摩擦方向に平行な断面でみられるき裂を、500倍の光学顕微鏡で約100個読みとり平均値で示した。あらさは表面の3~5箇所での摩擦方向に直角の断面曲線から、 $10 \mu\text{m}$ 以上の凹凸の大きさ(山と谷の距離)を測定して平均値で示した。両者とも小試験片ではほぼ一定で、大試験片では変化するようである。すなわち第2章でも考察したように、小試験片の摩耗粉径は試験方式や面積比の影響をうけないが、大試験片のそれは面積比が増加すると大きくなる。そのため面積比とともに平坦面が形成されにくくなって臨界荷重は次第に減少するが、面積比が同じであれば臨界荷重は試験方式によらず一定となるものと考えられる。

表 3.4 シビヤ摩耗面のき裂深さと表面あらさ
 $P = 2.0 \text{ kgf}$, $v = 0.15 \text{ m/s}$

試験方式	面積比	(μm)			
		き裂深さ		表面あらさ	
		小試験片	大試験片	小試験片	大試験片
二円筒端面	4.5	9.3	10.2	21	23
鞍形・円筒	5.0	9.2	10.0	22	23
φ6ピン・ディスク	2.0	9.1	10.5	24	31
φ6ピン・円筒	2.1	9.2	9.8	24	30

しかし面積比一定でもピン・ディスク方式では、ピン直径が大きくなると臨界荷重は増加し、他の方式のそれとも一致しない。この原因を検討するため、シビヤーマイルドの遷移に際して平坦面がピン表面のどのような位置にまず形成されるかを $\phi 6$ ピンと $\phi 4$ ピンについて調べた。測定は次のようにして行った。マイルド摩耗に遷移した直後のピン表面のマクロ写真を撮影する。写真の摩耗面を摩擦方向に平行と直角に1 mmごとに区分して各区画内の平坦面の割合を求める。そして最大割合を示した区画を1として換算し4段階に分類した。図3.8にそれぞれ約10個の試料で得られた結果を示す。図中の黒い部分

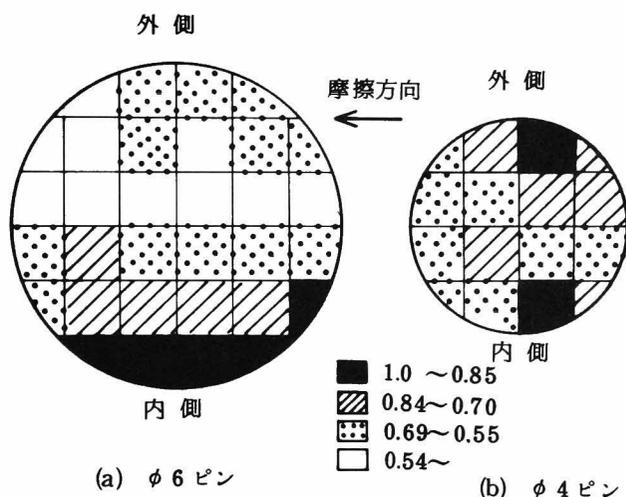


図 3.8 ピン表面での平坦面の形成割合

は平坦面が最も生じやすいことを示す。 $\phi 6$ ピンの黒い領域は周速の相違のためピンの内側に集中しているが、 $\phi 4$ ピンでは散在していて消滅、移動を繰り返している。このためピン直径が大きくなると臨界荷重は上昇するものと考えられる。

以上の結果から面積比が大きいとき、すなわちよく用いられるピン・ディスク方式の臨界荷重は一定値に近づくが、ピン直径が大きくなると、面積比は

同じでも臨界荷重は上昇し、ピンの寸法効果がある。面積比が小さく1に近い方式での臨界荷重は大きくなり、試験方式の影響を受けやすい。鞍形・円筒 ($\alpha = 5.0$)方式では臨界荷重は二円筒端面 ($\alpha = 4.5$)方式、 $\phi 6$ ピン・ディスク ($\alpha = 1.0$)方式と変わらないが、初期摩耗期間は図 3.8 で示したように長く不利である。これは鞍形試験片の中央部と両端部で平坦面が一樣に形成されにくく、平坦面が接触面全体に広がるまでに長期間を要するためと考えられる。

3.3.1.3 比摩耗量

臨界荷重以上のシビヤ摩耗で求めた比摩耗量を表 3.5 に示す。これらは多くの報告結果⁽⁶⁾と同様 $1.0^{-5} \sim 1.0^{-4} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ のオーダーである。小試験片では、

表 3.5 シビヤ摩耗の比摩耗量

試験方式	面積比	比摩耗量 $\times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kgf}$	
		小試験片	大試験片
二円筒端面	1.0	6.6	6.2
	1.3	7.2	7.3
	2.0	7.5	7.8
	4.5	7.5	10.0
$\phi 6$ ピン・ディスク	1.0	6.7	9.9
	2.0	7.3	11.9
$\phi 4$ ピン・ディスク	2.0	5.1	9.6
	4.2	5.7	12.0
鞍形・円筒	5.0	7.1	8.9
	1.0	4.1	6.3
	2.0	3.0	6.2
$\phi 6$ ピン・円筒	2.1	4.6	10.3
$\phi 4$ ピン・円筒	3.2	3.3	9.1

鞍形・円筒方式の面積比の大きい場合およびピン・円筒方式を除けば、試験方式による差は小さい。大試験片の値は試験方式や面積比によって変化するが、いずれの場合も小試験片より大きい。

遷移領域も含めた種々の接触荷重で、大小試験片のシビヤ摩耗率の比を求め、その平均値を面積比で整理すると図 3.9 のようになる。

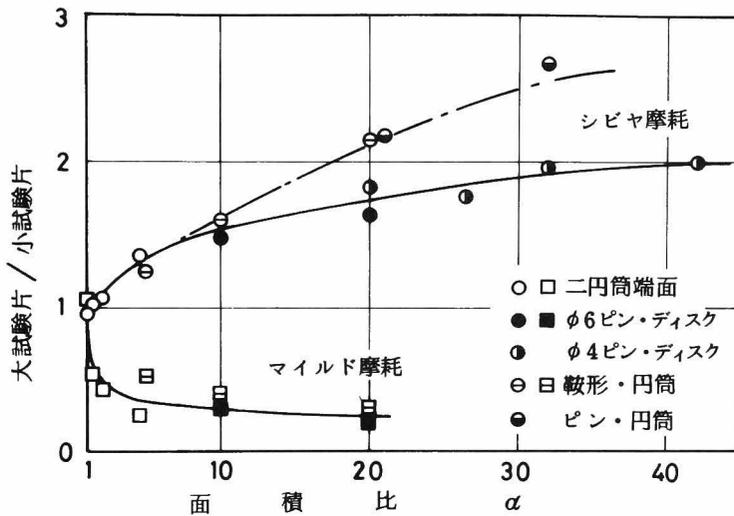


図 3.9 大小試験片の摩耗率の比と面積比の関係

図にはマイルド摩耗の結果も示した。シビヤ摩耗では面積比とともに比は増加し、面積比 $\alpha = 20$ の鞍形・円筒方式やピン・円筒方式の比はとくに大きい。ピン・ディスク方式の $\alpha = 20 \sim 42$ の値は、 $\phi 4$ ピンを用いてピッチ円直径を変化させたときの結果である。この方式ではピン直径やピッチ円直径が異なっても、変化は小さい。表 3.4 で示したき裂深さと表面あらさの結果から知られるように、小試験片での摩耗粉径は試験方式の影響をうけない。大試験片でのそれは小試験片より大きく、その程度は面積比とともに著しくなる。その結果シビヤ摩耗の比摩耗量とその比は前述のような挙動を示すものと考えられる。しかし鞍形・円筒方式の面積比の大きい場合とピン・円筒方式の特異な挙動の

原因はよくわからない。

一方マイルド摩耗の結果はシビヤ摩耗とは逆である。大試験片は温度上昇が小さく酸化の程度も小さいため、摩耗量は小試験片より低下する。その結果面積比にともなって比は1より次第に減少するものと考えられる。

このように摩耗量も臨界条件と同様に試験方式の影響をうけるため、各種方式での結果が定量的に一致しないと考えられ、耐摩耗性評価に際してこの点にも注意を要する。

3.3.2 ころがりすべり摩耗方式

すべり摩耗における臨界条件と比摩耗量は、試験方式により系統的に変化した。ころがり接触しながら大きなすべりを伴う摩耗では、転動疲労ともすべり摩耗とも異なるであろう。そこですべり率の異なる二円筒ころがりすべり試験を、相対速度を前項のすべり試験と一致させて行い、その挙動およびすべり

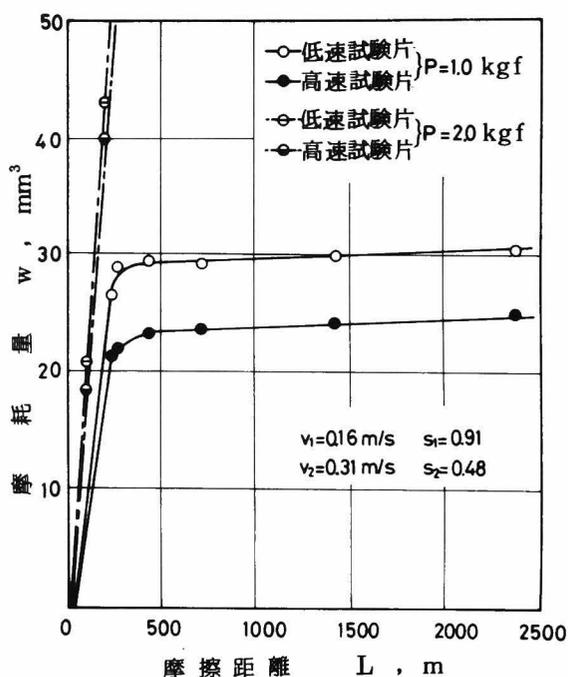


図 3.10 二円筒ころがりすべり方式の摩耗曲線
(すべり速度 低速試験片 $v_1=0.16\text{ m/s}$. 高速試験片 $v_2=0.31\text{ m/s}$, 相対すべり速度 $v=0.15\text{ m/s}$)

摩耗との関連を検討した。

図 3.1 0 は摩耗曲線の一部である。上試験片は周速 $v_1 = 0.16 \text{ m/s}$ ，すべり率 $s_1 = 0.91$ [$s_1 = (v_2 - v_1)/v_1$]，下試験片は $v_2 = 0.31 \text{ m/s}$ ， $s_2 = 0.48$ [$s_2 = (v_2 - v_1)/v_2$] で相対すべり速度は $v = 0.15 \text{ m/s}$ である。摩擦開始後金属光沢の摩耗粉が脱落しシビヤ摩耗となる。接触荷重 $P = 1.0 \text{ kgf}$ では，その後摩耗量の小さい定常摩耗を示すが，初期期間はすべり方式の 3 ~ 10 倍も大きい。 $P = 2.0 \text{ kgf}$ では初期のシビヤ摩耗が持続する。

摩耗率と接触荷重の関係を図 3.1 1 に示す。摩耗率は高低速試験片とも単位の相対摩擦距離（相対すべり速度と摩擦時間の積）あたりの摩耗量で表示した。すべり摩耗試験方式と同様にある接触荷重範囲でシビヤマイルドの遷移現象がみられ，両摩耗域とも摩耗率は接触荷重に比例して増大する。

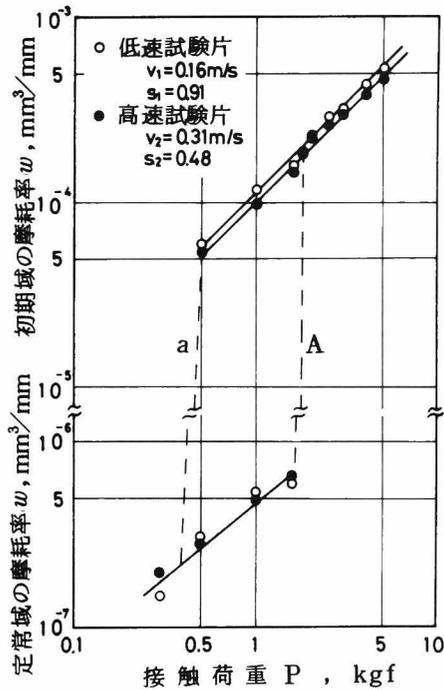


図 3.1 1 二円筒ころがりすべり方式の摩耗率と接触荷重の関係

ころがりすべり摩耗では、接触荷重や相対すべり速度のほか、すべり率によっても遷移条件や摩耗量は変化することが推測される。そこで図 3.10 のすべり率のほか、上下試験片の周速を変化させてすべり率の異なる試験を行った。相対すべり速度は一定の $v=0.15\text{m/s}$ としたので、すべり率が増加すると両試験片の単位時間あたりの回転数は減少する。図 3.12 に臨界荷重の変化挙動をすべり率 s_1 に対して示す。 $s_1=0$ は純ころがり、 $s_1=\infty$ は純すべりである。すべり率の小さい $s_1=0.35$ では、用いた試験機で可能な最大荷重 $P=45\text{kgf}$ でも初期に少量の金属摩耗粉を脱落した後マイルド摩耗を示す。すべり率が増加すると臨界荷重は急激に減少し、すべり率 $s_1=2$ 以上ではほぼ一定となる。このようなすべり率に対する臨界荷重曲線は、すべりを伴うころがり摩擦のすべり率と摩擦係数の関係⁽⁷⁾を反転した形と一致する。すなわち非常にすべり率が小さいときは弾性固着をしているが、すべり率が大きくなるとマクロなすべりが増加し臨界荷重は低下する。しかしあるすべり率以上では、接触面全体がすべり摩耗するため臨界荷重は一定になると考えられる。

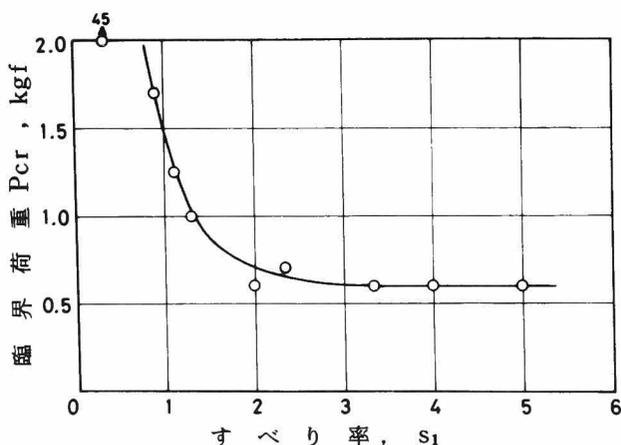


図 3.12 臨界荷重とすべり率 s_1 の関係
(相対すべり速度は $v=0.15\text{m/s}$ で一定)

シビヤ摩耗における高速、低速試験片の比摩耗量と両者の比を図 3.13 に示す。比摩耗量は単位の相対摩擦距離と接触荷重あたりの摩耗量とした。比摩耗量はすべり率 $s_1 = 0.35$ では小さく $10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ のオーダーである。それ以上

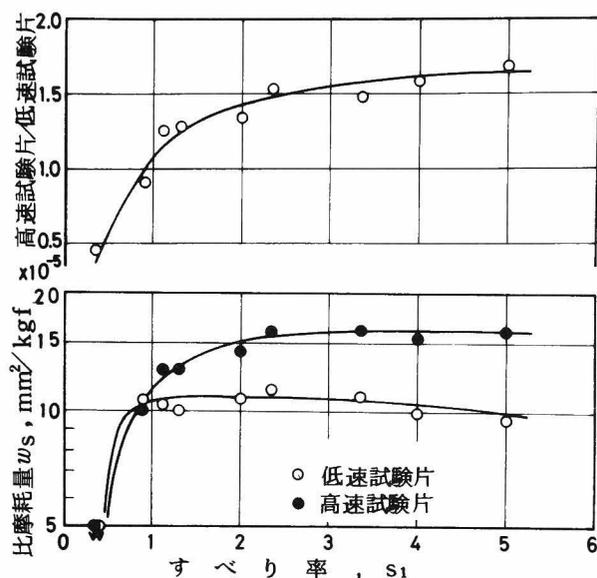


図 3.13 高低速試験片の比摩耗量およびその比のすべり率 s_1 による変化

のすべり率ではすべり摩耗と同じ程度のオーダーであるが、値は若干大きい。高速、低速試験片の比は、臨界荷重が一定値を示すすべり率 $s_1 = 2$ 以上ではほぼ一定となる。

摩耗断面を観察するとすべり摩耗と同様な被害やき裂がみられる。そこでき裂深さと表面あらさを前述の方法で測定した。すべり率 $s_1 = 0.9$ と 5.0 の結果を表 3.6 に示す。これより $s_1 = 0.9$ では高速、低速試験片の摩耗粒径に差はないが、 $s_1 = 5.0$ では低速試験片のほうが小さいことが知られる。

これらの結果をすべり摩耗と比較すると、大きなすべり率で得られる臨界荷重の一定値は、図 3.6 に示したように面積比の大きいすべり方式のそれとほぼ

表 3.6 すべり率の異なる試験片のき裂深さと表面あらさ
 $P = 2.0 \text{ kgf}$, $v = 0.15 \text{ m/s}$

すべり率 s_1	(μm)			
	き裂深さ		表面あらさ	
	高速試験片	低速試験片	高速試験片	低速試験片
0.9	1 2.8	1 2.5	2 4	2 3
5.0	1 2.8	9.1	2 5	1 9

一致する。また同様に摩耗率の大小試験片の比と高速、低速試験片の比も近似している。これはすべり率が大きくなると高速試験片は大試験片の摩耗と、低速試験片は小試験片の摩耗と同じ現象となり、ころがりすべり摩耗が面積比の大きなすべり摩耗の機構に近づくためである。しかしすべり率の小さい場合は、部分的な弾性固着によってマクロなすべりは小さく、すべり摩耗に比べて臨界荷重は大きく、みかけの摩擦距離あたりの摩耗率は小さい。

3.3.3 臨界条件に及ぼすすべり速度の影響

臨界条件は摩擦面温度の影響をうけるので、すべり速度によっても変化するはずである。図 3.14 は臨界荷重 P_{cr} とすべり速度の関係である。鞍形・円筒、ピン・円筒方式では $v = 0.8 \text{ m/s}$ 以上で、二円筒ころがりすべり ($s_1 = 5.0$) 方式では $v = 0.5 \text{ m/s}$ 以上で固定 (低速) 試験片が上下方向に激しく振動するため、臨界荷重は測定できなかった。

いずれの方式でも臨界条件はほぼ $P_{cr} \cdot v \approx C$ であらわされる。この定数 C は面積比が大きいほど小さくなる。しかし $\phi 6$ ピン・ディスク方式では面積比が大きいにもかかわらず大きな定数を示すが、これはピン表面での周速の相違によって平坦面が偏在するためである。二円筒ころがりすべり ($s_1 = 5.0$) 方式はすべり方式の面積比の大きい場合に相当するので、小さな定数を示す。これらの関係は種々の方式で得られる臨界条件を評価する際の一基準となるであろう。

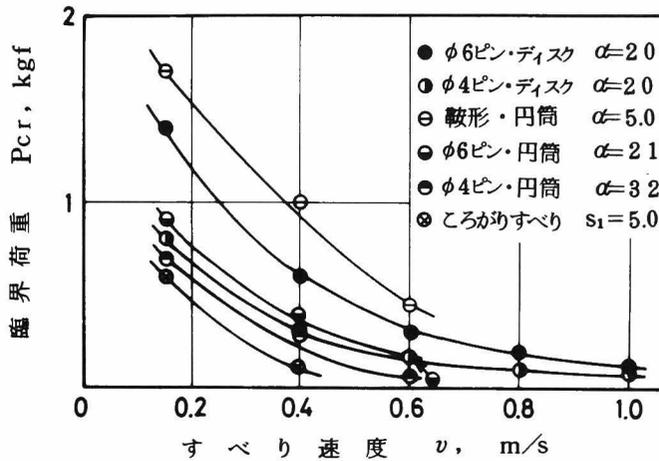


図 3.14 各種試験方式の臨界荷重とすべり速度の関係

3.4 結 言

試験方式が摩耗に及ぼす影響を主に遷移条件と摩耗量に注目して調べ、第1章および第2章で得られた結果も合せて乾燥摩耗における耐摩耗性の評価法について考察して、次のような結論が得られた。

(1) シビヤ摩耗からマイルド摩耗へ遷移しない臨界条件は、荷重表示では試験方式によらず面積比が大きくなるほど減少し一定値に落ち着く。圧力表示では試験方式によって異なる。

(2) シビヤ摩耗の比摩耗量は小試験片では試験方式の影響をあまりうけないが、大試験片では試験方式や面積比によって異なる。大小試験片の比をとると、ほぼ面積比で整理できる。

(3) ころがりすべり摩耗方式でもシビヤマイルドの遷移現象がみられ、臨界荷重はすべり率によって減少するが、あるすべり率から一定となる。この一定値はすべり摩耗方式における大きな面積比の臨界荷重と一致する。

(4) 臨界条件はほぼ $P_{cr} \cdot v = C$ の関係にあり、面積比が大きくなると定数 C は減少する。しかしピン・ディスク方式ではピン直径が大きくなると定数 C

は増加し、寸法効果がある。すべり率の大きなころがりすべり方式は、大きな面積比のすべり摩耗に相当するので定数Cは小さい。

以上の知見を用いれば、各種の試験方式で得られた乾燥摩耗データから統一的な耐摩耗性評価が可能であり、実機の耐摩耗設計に適用できる実用的なデータの集積が期待される。また従来困難とされてきた摩耗試験法の標準化に貢献すると考えられる。

第 4 章 潤滑摩耗面の観察

4.1 緒 言

乾燥摩擦では、接触点の塑性変形によって真実接触面積はほとんど一定で、摩擦面のあらかさは影響しないが、潤滑下では弾性接触の場合があり、Greenwoodら⁽¹⁾ Johnsonら⁽²⁾ Hirst⁽³⁾ が指摘しているように面の凹凸が摩擦、摩耗にとって重要となる。したがって潤滑下における金属の摩耗機構を明らかにし、耐摩耗性を定量的に評価するためには、まず摩耗面の形状および摩耗によるその変化を知ることが必要である。

表面の形状を観察する手段としては、近年高倍率の触針式表面あらかさ計を用い、その出力電圧を A-D 変換してデジタル計算機で処理することにより、統計的な表面形状の解析が行われている。しかし Archard⁽⁴⁾ Whitehouse⁽⁵⁾ も述べているように、A-D 変換の際の量子化幅と標本化幅が突起の分布とその形状の測定に大きな影響をもたらす。この種の観察においては、摩擦や摩耗に対してどのスケールの大きさの突起が重要な意味をもつかという観点から行われるべきであろう。

また従来の表面形状の測定は 2 次元的にのみ行われることが多かった。金属の摩耗面には摩擦方向に摩耗溝が形成されており、このような面を触針式表面あらかさ計で摩擦方向に測定しても、触針が溝の底を選択的に移動する可能性がある。また光干渉法を用いても、摩擦方向に生じた摩耗溝の形状の識別は困難である。しかし摩擦、摩耗に対しては、摩擦方向の凹凸の分布や、3 次元的な表面形状も重要と考えられ、摩耗面の等高線地図や 3 次元の形状特性値を知る必要がある。

本章では、摩耗による表面形状の変化を観察する手段を検討するため、摩耗に関与する微小突起の検出に際して A-D 変換の量子化幅と標本化幅の選択について調べた。また鋼の潤滑摩耗面について、摩擦方向に直角な 2 次元測定を

微小送りを繰返して行い、3次元高さ分布を得て等高線地図を描き、摩擦方向のあらさの特性値を求めた。さらにこれらを走査電子顕微鏡の観察結果とも合せて検討し、良好潤滑下の摩耗の進行状況を考察した。

4.2 摩耗面の微小形状の測定

4.2.1 試験方法

表面形状を示す種々の特性値は、触針式あらさ計を用いて摩擦方向に直角な断面曲線を得ると同時に、その出力電圧をA-D変換し、さん孔テープに記録してデジタル計算機によって計算した。図4.1は測定系のブロック線図である。触針の先端曲率半径は約 $3\ \mu\text{m}$ 、測定圧は約 $50\ \text{mgf}$ である。触針の送り速度は $10\ \mu\text{m/s}$ 、さん孔機の標本化速度は毎秒10点である。したがって標本化幅SI(A-D変換の際の連続する2点の測定面上での間隔)は $1.0\ \mu\text{m}$ である。標本値は正負2桁($-99\sim+99$)のデジタル値からなる。測定縦倍率は通常10000倍を用い、この場合の量子化幅QI(A-D変換された数値の1に相当する断面曲線上での高さ)は $0.0286\ \mu\text{m}$ である。すなわち高さ

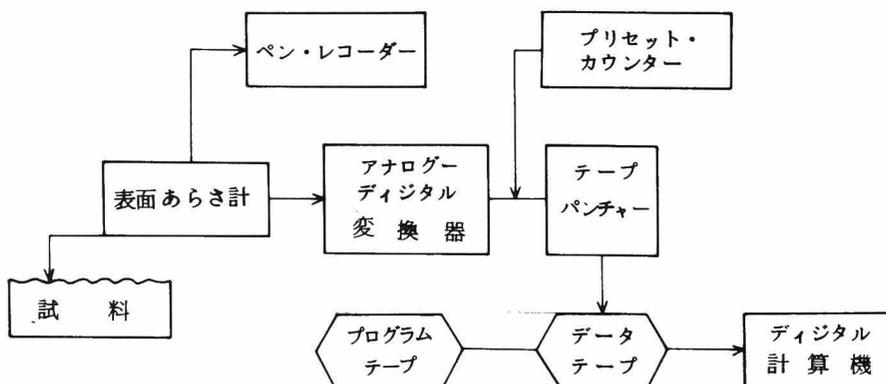


図 4.1 測定系のブロック線図

が $0.0286\ \mu\text{m}$ の幅の中にある 2 点は同じ高さの点とみなされる。観察しようとする鋼の潤滑摩耗面の R_{max} は $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、 $30\sim 40$ 個の間隔が R_{max} の中に存在することになる。これらの量子化幅、標本化幅は測定に用いられた最小の値であり、計算にあたっては数学上の処理により QI 、 SI を増大させ、表面形状特性値に及ばず影響を検討した。

数値化された断面曲線から計算される特性値は、中心線平均あらさ R_a 、二乗平均あらさ R_{rms} 、断面曲線上に存在する突起間の距離の平均値（単位長さあたりに存在する突起の数の逆数、あらさピッチ R_p と呼ぶ）および突起の先端の曲率半径の平均値 ρ である。 R_p を求めるために断面曲線より突起を検出するにあたっては、いわゆる 3 点法も含めて、連続する数個（1 個の場合も含む）の点の高さが等しく、その両端の 2 点よりも高い台形状の形をしたものを突起として検出した。両端の低い 2 点と中央の高い水平部の中点を通る放物線で突起を近似し、その先端の曲率を求める。曲率はほぼ正規分布している⁽⁶⁾ので、曲率の相加平均値の逆数を曲率半径 ρ とする。 R_a および R_{rms} は相次ぐ標本値を直線で結んでできる形状を断面曲線として計算する。

測定に用いた摩耗面は、 $910\ ^\circ\text{C}$ で焼なました軟鋼 $S15C$ どうしおよび工具鋼 $SK3$ どうしを約 $100\ \text{km}$ 潤滑摩耗した表面である。供試材の化学成分と処女面および摩耗面のかたさ（測定荷重 $25\ \text{gf}$ 、 20 箇所での平均）を表 4.1 に示す。試験方式は外径 $19.6\ \text{mm}$ 、内径 $16\ \text{mm}$ の円筒形試験片の端面

表 4.1 供試材の化学成分とかたさ

	化 学 成 分 (%)					ビッカースかたさ Hv	
	C	Si	Mn	P	S	処女面	摩耗面
S15C	0.16	0.27	0.49	0.026	0.025	135	160
SK3	1.03	0.35	0.28	0.011	0.008	230	252

どうし（面積比は $\alpha = 1.0$ ）の摩擦である。試験は 25°C のマシン油中に摩擦部を浸漬して接触荷重 $P = 6 \text{ kgf}$ ，すべり速度 $v = 0.28 \text{ m/s}$ 一定で行っている。さらにこれらの摩耗面と比較参照させるため，あらし計検定用の標準面（ $R_{\text{max}} = 1.5 \mu\text{m}$ ）を用いた。図 4.2 は標準面を仕上げ方向より斜めに触針を移動させた場合（a： $R_p = 30 \mu\text{m}$ ），直角に移動させた場合（b： $R_p = 15 \mu\text{m}$ ）および SK3 摩耗面の摩擦方向に直角に触針を移動させた場合（c）の断面曲線である。このときの摩耗面のあらしは，S15C，SK3とも $R_a = 0.09 \mu\text{m}$ ， $R_{\text{rms}} = 0.11 \mu\text{m}$ である。

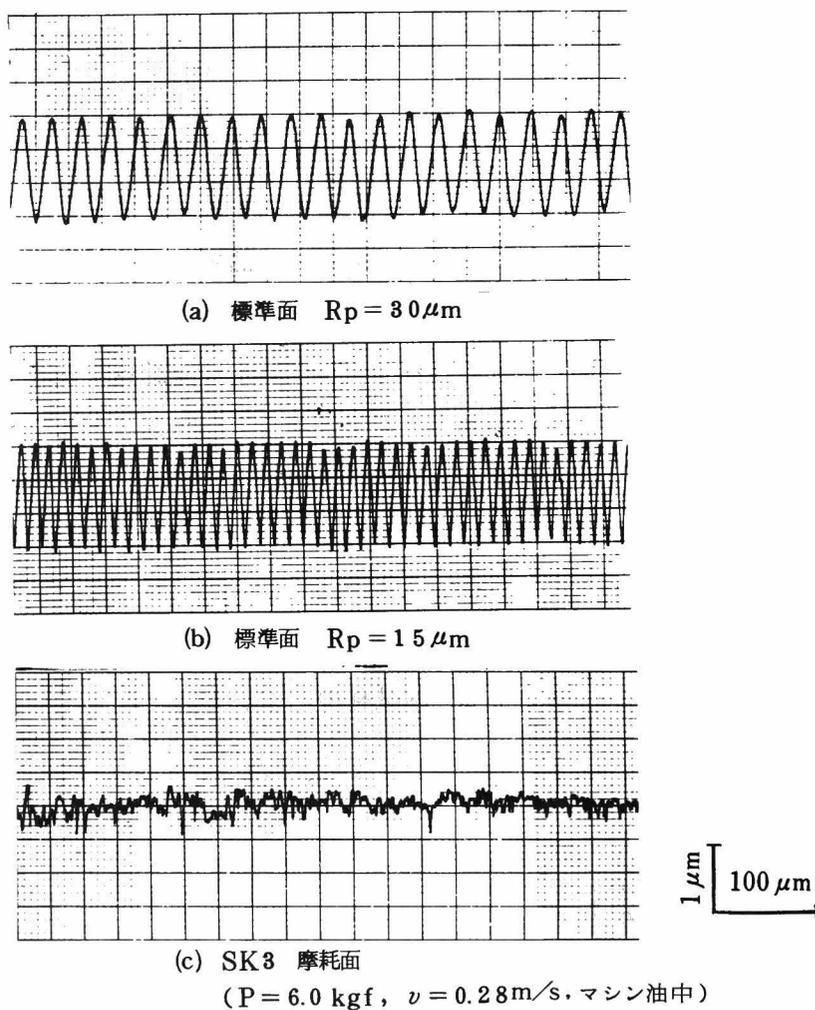


図 4.2 標準面および SK3 摩耗面の断面曲線

4.2.2 実験結果および考察

摩耗面の周期成分の有無を調べるため、断面曲線に対する自己相関係数 $r(\beta)$ とパワースペクトル $P(\omega)$ を奈良による手法⁽⁷⁾を用いて計算した。すなわちA-D変換された断面曲線の測定方向の座標をx軸とする。標本化幅で分割された各点を $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ とし、それぞれの点における断面曲線上の点を $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_i), \dots, Z(x_n)$ とする。自己相関係数 $r(\beta)$ は

$$r(\beta) = \frac{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} Z(x)Z(x+\beta)dx}{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} Z(x)^2 dx} \quad (4.1)$$

で与えられるので、デジタル計算するときは

$$r(\beta) = \frac{\frac{1}{n-\beta} \sum_{i=1}^{n-\beta} Z_i \cdot Z_{i+\beta}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (4.2)$$

n : 計算に用いた測定点の数

β : ずらした数

$$Z_i = Z(x_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i)$$

で得られる。図4.3(a)は式(4.2)の $r(\beta)$ を β に対して示したコレログラムである。

式(4.1)の $r(\beta)$ をフーリエ変換すると

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(\beta) \cos(\omega\beta) d\beta \quad (4.3)$$

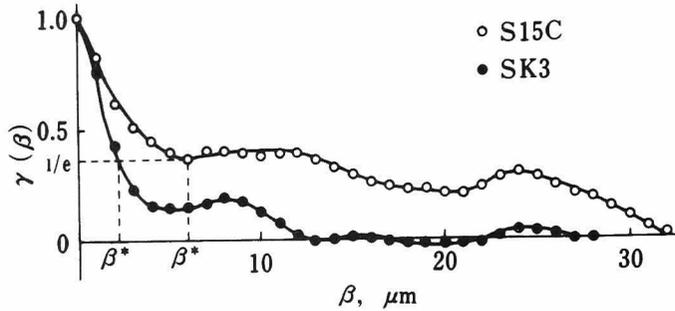
でスペクトル密度が与えられる。計算機では

$$P_{\omega} = \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{\beta=1}^{\beta} r(\beta) \cos(\omega\beta) \right\} \quad (4.4)$$

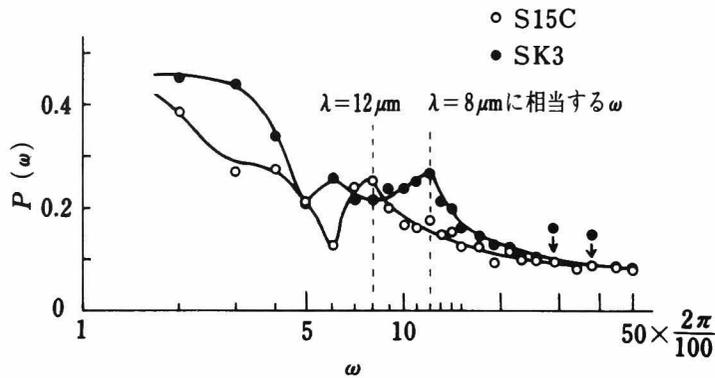
となる。式(4.4)にさらにハミングウインドウをかけて、スペクトルを平滑化して信頼精度をあげると

$$P(\omega) = 0.23 P_{\omega-1} + 0.54 P_{\omega} + 0.23 P_{\omega+1} \quad (4.5)$$

で、摩耗面のスペクトル $P(\omega)$ が得られる。図4.3(b)は式(4.5)の $P(\omega)$



(a) コレログラム



(b) スペクトログラム

図 4.3 摩耗面の自己相関係数 $r(\beta)$ とパワースペクトル $P(\omega)$

を ω について示したスペクトログラムである。

$r(\beta) = 1/e$ となる β を相関の及ぶ幅 β^* と定義すると, S15C では $\beta^* = 6.0 \mu\text{m}$, SK3 では $\beta^* = 2.2 \mu\text{m}$ となる。Whitehouse ら⁽⁸⁾ は β^* は単位面積あたりに存在する突起の数の平方根に反比例すると述べており, あらさピッチ R_p は β^* と比例関係をもつことになる。しかし図 4.3 (a) の $r(\beta)$ でみられる周期性は S15C ではほぼ $12 \sim 14 \mu\text{m}$ であり, SK3 では $8 \mu\text{m}$ である。さらに図 (b) の $P(\omega)$ では, 最小の $\lambda = 2\pi/\omega$ のピークは S15C で $\lambda = 12 \mu\text{m}$, SK3 で $\lambda = 8 \mu\text{m}$ に相当する ω の位置にみられる。 $r(\beta)$, $P(\omega)$ の解析から,

これらの摩耗面は β^* で表示されるよりも、むしろS15Cで $12\mu\text{m}$ 、SK3で $8\mu\text{m}$ の周期性をもつ。すなわちそれぞれ $R_p = 12\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ のあらさピッチをもつ面であることが知られる。

表面形状特性値の計算結果に及ぼす量子化幅と標本化幅の影響は、図4.4(a)に示すような最小量子化幅 $QI = 0.0286\mu\text{m}$ 、最小標本化幅 $SI = 1.0\mu\text{m}$ で数値化した断面曲線を、数学上の処理で QI を n 倍にし、 SI を n' 倍にして

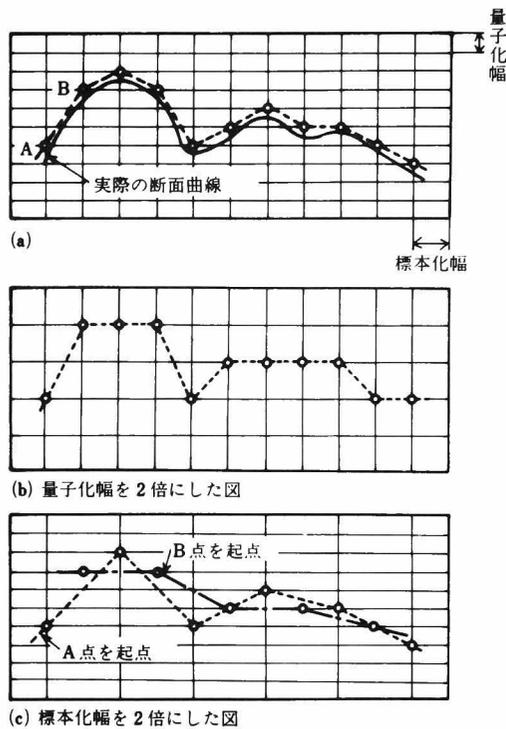


図 4.4 QI, SI の変化に対する断面曲線のひずみの模式図

検討した。図4.4(a)に示される断面形状が、 $n = 2$ に増大されたときに変化する模式図を(b)に示す。(c)に SI を $n' = 2$ に増大させた図を示す。この場合の断面曲線は n' 個が考えられ、それによって結果にやや差が出る。

最小量子化幅の大きさは測定に用いた倍率とA-D変換の分割の程度によっ

て決定されるが、Whitehouse⁽⁵⁾も指摘しているように、あまり小さな量子化幅を用いても誤差のほうが大きくなる。塚田ら⁽⁹⁾は量子化幅の目安としてRrmsの0.2倍を用いている。本研究におけるRrmsはほぼ0.1 μm 程度であり、0.0286 μm は最小量子化幅として適当と考えられる。

Archard⁽⁴⁾は実際の金属表面には種々の大きさの突起が存在するが、表面接触で重要な意味をもつのは最も大きいスケールの突起であると述べ、ランダムな凹凸の表面では相関がほとんど及ばない $r(\beta) = 0.1$ に対する β 、すなわち $2.3 \beta^*$ を標本化幅にするのが適当としている。本研究のS15C摩耗面では $2.3 \beta^* \approx 14 \mu\text{m}$ 、SK3では $2.3 \beta^* \approx 5 \mu\text{m}$ で、いずれもこの値を標本化幅とするのは大きすぎると考えられる。またStoutら⁽¹⁰⁾は最小標本化幅は触針の物理的寸法によって決まる値として、2 μm を採用している。そこで本研究では最小標本化幅としては、あらかじ触針部の最小送り速度で得られる1.0 μm を用いた。

図4.2(a),(b)に示した標準面に対してQIをn倍に変化させたときの R_p を図4.5に示す。また図4.6に摩耗面より得た R_p とnの関係を示す。標準面では R_p はnによってほとんど変化せず30 μm 、15 μm と一定であるが、摩耗面ではS15C、SK3ともnが増大すると R_p は大きくなる。すなわち検出される突起の数が減少する。

標準面では各突起が R_{max} に等しい高さをもっているため、QIが増大してもすべての突起が検出される。一方摩耗面では種々の高さの突起をもっているために、低い突起が1量子化幅の中に入って省略されたり、大きな突起の上にある複数個の突起が省略されて大きな1突起として検出される。その結果QIが増大すると、突起の検出数が減少するものと考えられる。しかし摩耗に影響する突起としては、このような小さな突起は省略すべきであろう。図4.3の自己相関係数、パワースペクトルの結果からも、S15Cに対しては $n=6$ のQIを、SK3には $n=5$ を用いると、面の周期性と一致することになる。すなわち R_p は材料によって異なるが、このような潤滑摩耗面に対しては $n=4 \sim 6$ のQIで測定するのが適当であろう。

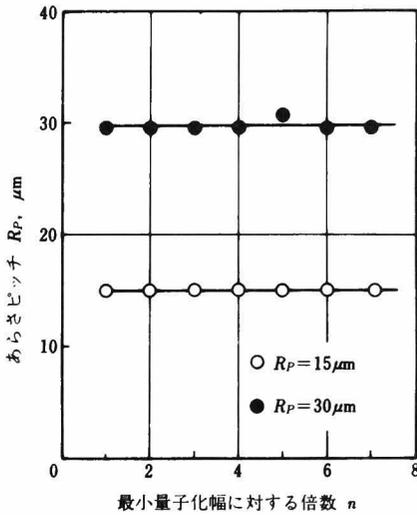


図 4.5 標準面の R_p と Q_I の関係

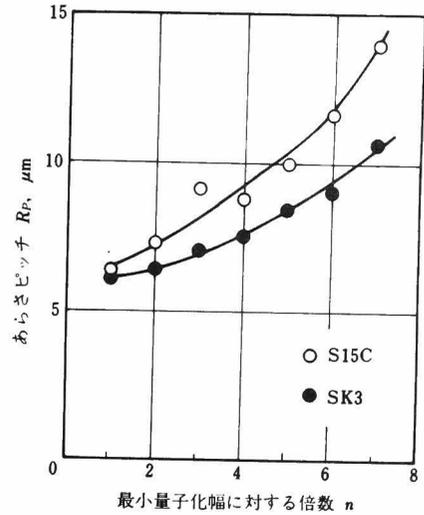


図 4.6 摩耗面の R_p と Q_I の関係

次に種々の Q_I で検出された突起について、曲率半径 ρ を計算すると図 4.7 のようになる。○●は検出された突起について、その頂部を最小量子化幅で表示された 3 点を通る放物線で計算した曲率半径 ρ_0 であり、⊙●は検出に用いた量子化幅のままの頂部の 3 点で計算した曲率半径 ρ_n である。 ρ_0, ρ_n は n の増大とともに逆の傾向を示している。そこで S 15 C について $n=6$ で検出した突起の曲率 ρ_0^{-1}, ρ_n^{-1} の分布を調べた。結果を正規確率紙に示すと、図 4.8 のように ρ_0^{-1} はほぼ正規分布しているが、 ρ_n^{-1} は大きな曲率の度数が増加しひずんでいる。これは ρ_n^{-1} では、曲率半径の小さい突起のところが強調されて計算されるためと考えられる。したがって曲率半径は ρ_0 で評価するほうがよいことになる。S 15 C, S K 3 とも ρ_0 は n にもなって増大する。これは大きな突起の上にある曲率半径の小さな突起が省略されるためと考えられる。しかし自己相関係数、パワースペクトルの解析で述べた面の周期性と R_p が一致する n の近傍では、 ρ_0 も n の影響をあまりうけない。

標準面で得た断面曲線の R_p に及ぼす標準化幅 S I の影響を図 4.9 に示す。

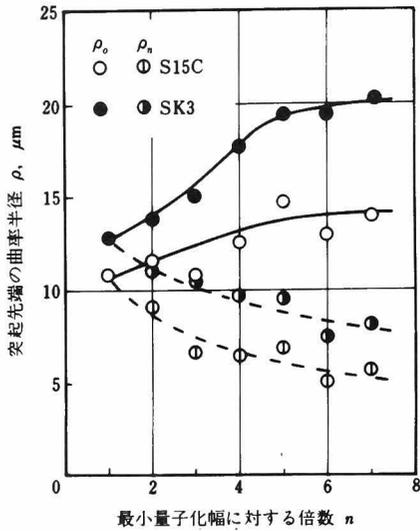


図 4.7 摩耗面に対して突起検出のための QI を変化したときの ρ

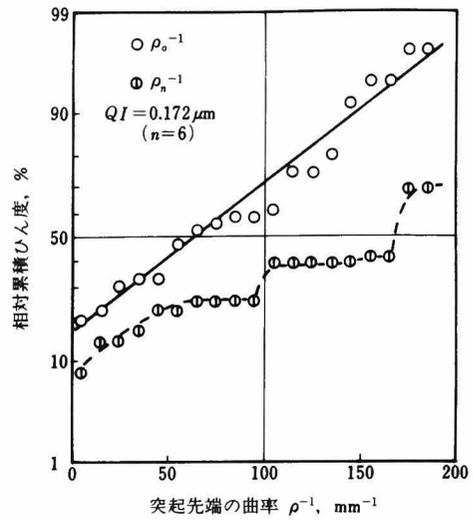


図 4.8 S15C 摩耗面の曲率の分布

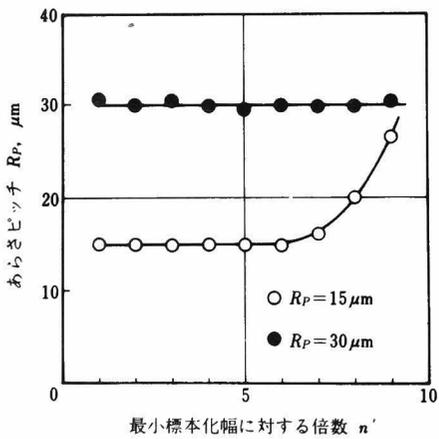


図 4.9 標準面の R_p と S I の関係

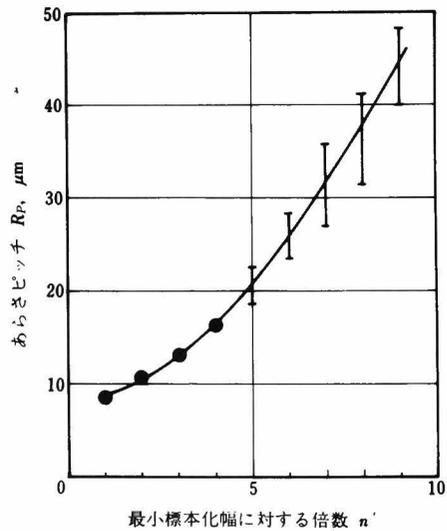
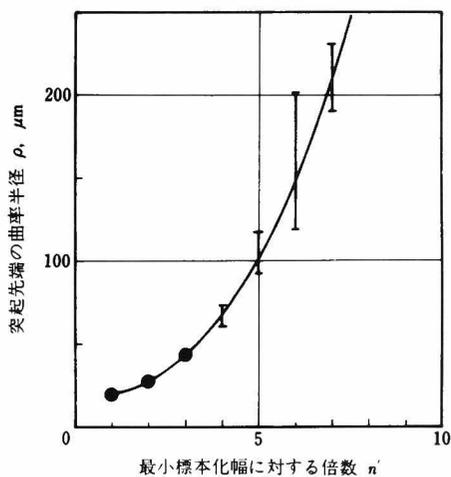


図 4.10 SK3 摩耗面の R_p と S I の関係

$R_p = 30 \mu\text{m}$ の面では $n' = 9$ に至るまで R_p は変化しないが、 $R_p = 15 \mu\text{m}$ の面では n' が 7 より大きくなると R_p が増大しはじめる。理論上からもわかるように、規則正しい間隔の山をもつ面に対しては、SI の 2 倍より小さい R_p の突起は検出されない場合を生じるため、 R_p は大きくあらわれる。

図 4.10 は SI による摩耗面の R_p の変化として SK3 について示したものである。突起は $QI = 0.143 \mu\text{m}$ ($n = 5$) で検出されている。図中 --- は n' 個の断面曲線によるばらつきを生じた範囲である。 R_p は n' の増大によって大きくなる。これは図 4.4 (c) に示したように、SI の 2 倍以下の間隔の突起が検出されないためである。同様に SK3 の ρ_0 に及ぼす SI の影響を図 4.11 に示す。SI の増大は凹凸波形のひずみをもたらして ρ が大きくあらわれる。図 4.10, 図 4.11 をみると、SI が $1 \mu\text{m}$ 程度になると R_p , ρ の変化が小さくなっており、SI を最小の $1.0 \mu\text{m}$ としたことの妥当性が知られる。



これより結論として、 R_{max} が $1 \mu\text{m}$ 程度の潤滑摩耗面を観察する場合、標準化幅は最小の $1.0 \mu\text{m}$ ($n' = 1$) を用い、突起の検出にあたっての量子化幅は $0.143 \mu\text{m}$ ($n = 5$) を、突起の曲率半径の計算には最小量子化幅を用いるとよい。

図 4.11 SK3 摩耗面の ρ と SI の関係

4.3 摩耗面の3次元観察

4.3.1 試験方法

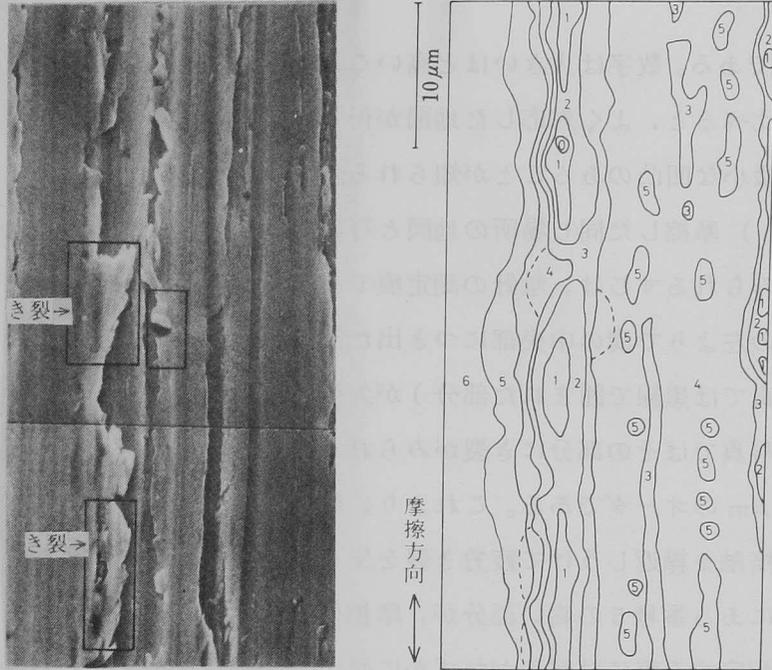
観察に用いた摩耗面は、前節と同様の焼なましたS15CとSK3のマシン油中で約100 km 摩擦したものである。円筒形試験片をあらき測定用の試料保持台に、試験片の中心軸と台の回転軸を一致させて固定する。試験片の平均半径は9 mm であるので、回転軸より90 mm の位置で、ダイヤルゲージによって試料台を10 μm 回転させると、試料面上の触針の測定位置は摩擦方向に1 μm 移動する。このようにして、1 μm 間隔の断面曲線を50 本得る。測定の際の標本化幅は1 μm であるので、1 本の断面曲線の測定長さを100 μm にすれば、100 個 \times 50 個の配列要素として100 μm \times 50 μm の長方形の1 μm 間隔の立体的な高さ分布を得ることができる。

各断面曲線を記録する際の始発点の決定は次のようにする。あらかじめ測定位置近くに小さいビッカース圧痕(約20 μm)を目印として付ける。ついで断面曲線をペンレコードして圧痕の中心位置を求め、ダイヤルゲージによってこれより規定量だけずらした点から測定を開始する。さらに念のため、測定面の走査電子顕微鏡写真により、比較的直線状をなす摩耗溝を選んで断面曲線の谷と一致させて補正する。

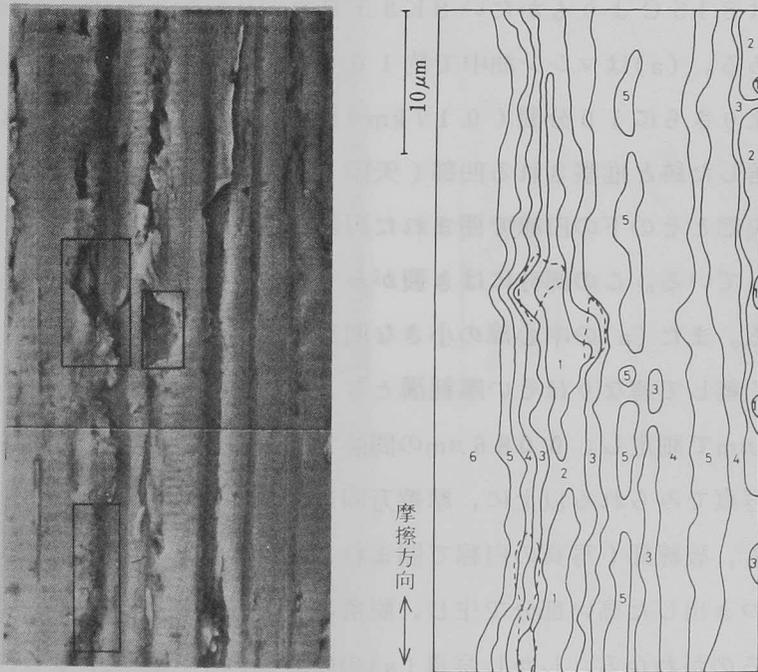
各断面曲線の高さ方向の位置は、それぞれの中心線が同一の水平面内にあるとして一致させる。この場合の高さ方向の誤差は、別に基準面をもつ試験片で検定したが、中心線の高さのばらつきの幅は最小量子化幅0.0286 μm の2倍程度である。したがって、これより得ようとする等高線の高さ方向の間隔は最小量子化幅の2.5倍程度(0.07 μm)以上であれば、この誤差はほぼ除くことができると考えられる。

4.3.2 実験結果および考察

図4.12(a)は、マシン油中で約100 km 摩擦後のS15C摩耗面の測定結果と走査電子顕微鏡による同じ位置の写真である。測定結果は配列要素として示された高さを印字して、これより高さ分布を示す等高線をひいた地図の一部である。断面曲線は最小量子化幅0.0143 μm で測定し、等高線の間隔は



(a) S 15 C 摩耗面の等高線地図と同じ位置の走査電子顕微鏡写真

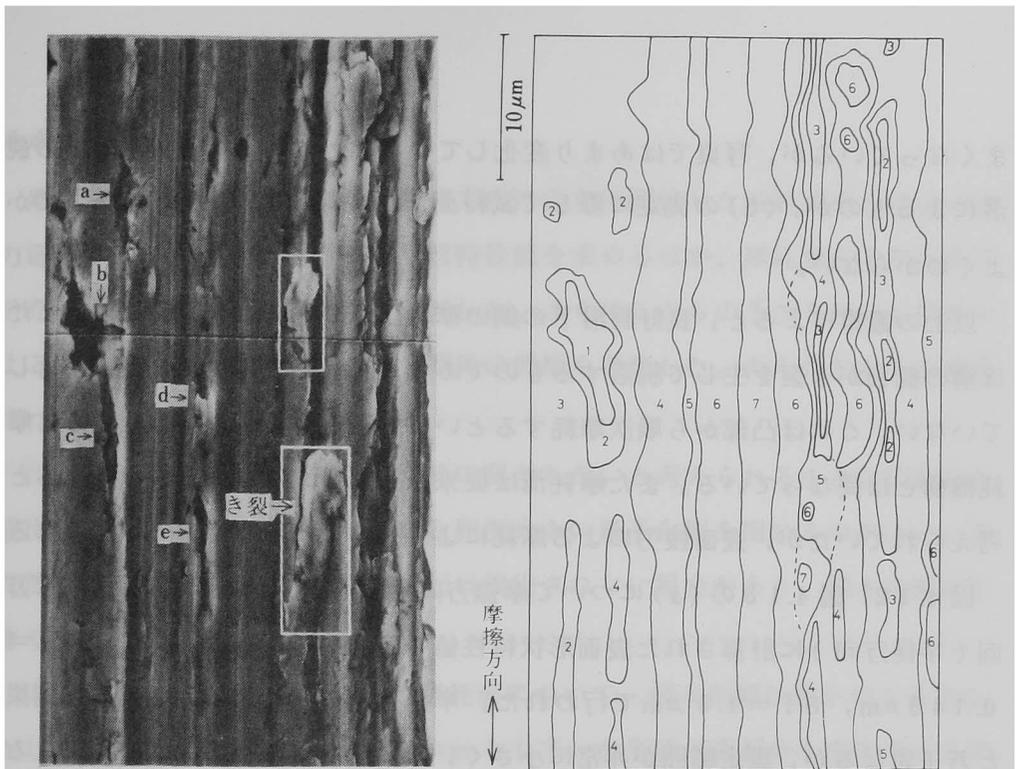


(b) (a) よりさらに 10 分間摩擦後

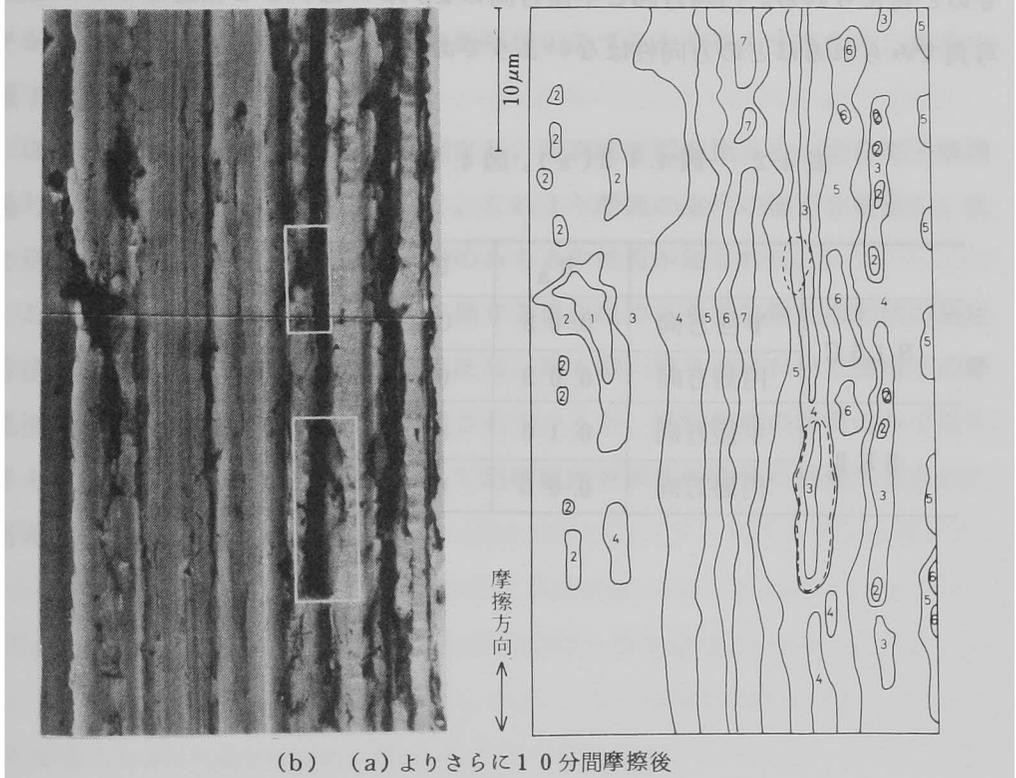
図 4.12 S 15 C 摩耗面 ($P=6.0 \text{ kgf}$, $v=0.28 \text{ m/s}$ ・マシン油中)

0.071 μm である。数字は大きいほど高いことを示す。倍率をあわせて横に示した写真と比べると、よく対応した地図が得られている。また写真で平坦にみえる面にも微小な凹凸のあることが知られる。(b)はこれよりさらに10分間(0.17 km)摩擦した同じ場所の地図と写真である。写真で摩擦方向に直角に等間隔でみられるすじは、触針の測定痕である。(b)を(a)と比較してみると、(a)の左よりで溝の中央部につき出た部分と溝の下方の左側(地図では破線部、写真では黒線で囲まれた部分)が欠損して、高さが3~1になっており、(a)の写真ではその部分にき裂がみられる。落ちたと推測される摩耗粉の大きさは数 μm のオーダーである。これより、溝につき出した突部が弾性的ないし塑性的な接触を繰返すうけて疲労き裂を生じ、脱落することが知られる。(a)の右のほうにある番号5の高い部分が、摩擦後の(b)では増加しているが、これは(b)を測定する際に試料面がわずかに傾いて、量子化幅0.071 μm 以上の高さの誤差を生じたためと考えられる。

図4.13はS15CよりもかたいSK3工具鋼どうしでの摩耗の様子を観察したものである。(a)はマシン油中で約100 km摩擦後の定常摩耗面であり、(b)はこれよりさらに10分間(0.17 km)摩擦後である。(a)の写真では、摩耗粉が脱落した跡と推察される凹部(矢印a~e)がみられる。写真の右よりの溝の中央部とその下の白線で囲まれた両部分は、(b)では脱落して1本の摩耗溝となっている。この部分にはき裂がみられ、表面疲労による摩耗粉の形成が知られる。また(a)の中心部の小さな凹部(矢印d, e)の前後の部分が、(b)でははく離して連なりほそい摩耗溝となっている。一方地図は最小量子化幅0.0286 μm で測定し、0.086 μm の間隔で等高線をひいたものである。(a)の地図では写真でみられる以上に、摩擦方向に直角にかなり高低がある。地図(a)(b)でも、破線部(写真の白線で囲まれた部分に対応する)で示される脱落は、溝につき出した高い部分で生じ、脱落によって高さの番号は2~3程度低下しているのがわかる。しかし写真(a)の中心部の小さい脱落跡や、それが連なった(b)の摩耗溝は地図ではみられず、触針式あらし計の測定からもれている。地図(b)では(a)に比べ、中央部の番号7を中心にして山の幅方向がせ



(a) SK3 摩耗面の等高線地図と同じ位置の走査電子顕微鏡写真



(b) (a) よりさらに 10 分間摩擦後

図 4.13 SK3 摩耗面 ($P=6.0 \text{ kgf}$, $v=0.28 \text{ m/s}$, マシン油中)

まくなっているが、写真ではあまり変化していない。これが小さい摩耗粉の脱落によるものか、(b)の測定に際して試料面がわずかに傾いたためであるのか、よくわからない。

以上の観察によると、良好潤滑下の鋼の摩耗は摩耗溝につき出した部分または溝の側面がき裂を生じて脱落するものであり、必ずしも高い部分から脱落していない。これは凸部から順次摩耗するというKragelskii⁽¹¹⁾の提唱した摩耗機構とは異なっている。また摩耗溝は従来、凝着やアブレシブ作用によると考えられていたが、表面疲労による摩耗によっても形成されることが知られる。

図4.12、図4.13の(a)について摩擦方向(円周方向)とそれに直角な方向(半径方向)に計算された表面形状特性値を表4.2に示す。計算は $QI = 0.143 \mu\text{m}$ 、 $SI = 1.0 \mu\text{m}$ で行われた。半径方向の特性値は4.2節での結果と若干異なるが、測定範囲が非常に小さく、摩耗面での形状のばらつきによるものと考えられる。円周方向と半径方向の R_p, ρ には大きな相違はなく、地図、写真でみられるほどの方向性はないようである。

表 4.2 図 4.1 2 (a) , 図 4.1 3 (a) の表面形状特性値

(μm)

		R_a	R_{rms}	R_p	ρ
S 1 5 C	半径方向	0.08	0.10	13.3	18.2
	円周方向	0.03	0.04	12.1	19.4
S K 3	半径方向	0.10	0.13	9.8	17.1
	円周方向	0.05	0.06	9.3	8.9

4.4 結 言

摩耗面形状を観察するため、摩擦方向に直角に測定した触針式あらし計の出力電圧をA-D変換し、種々の形状特性値を求めるほか、摩耗面の3次元高さ分布と等高線地図を得る方法を検討した。さらにこれらの手段を用いて摩耗による表面形状変化を観察し、潤滑摩耗の機構を考察した。得られたおもな結論はつぎのようである。

(1) 量子化幅が小さい場合、摩耗に関与しないと考えられる小さな突起をも検出するので、潤滑摩耗面ではある程度大きい量子化幅を用いるのがよい。また間隔が標本化幅の2倍以下の突起は検出されない場合があり、標本化幅は小さくすべきである。

(2) R_{max} が $1\ \mu\text{m}$ 程度の潤滑摩耗面について、標本化幅は最小の $1.0\ \mu\text{m}$ とし、量子化幅は $0.12\sim 0.17\ \mu\text{m}$ として、台形状の突起をも検出するとき、表面あらしのパワースペクトル解析から得られた周期成分の波長とあらしピッチが一致する。曲率半径の計算は表面形状のひずみを小さくするため、最小の量子化幅を用いて行うべきである。

(3) 摩耗面の3次元高さ分布を測定し、等高線地図を描くと、走査電子顕微鏡写真とほぼ一致した図が得られた。これより摩耗の進行の様子を観察し、また従来測定の困難であった摩擦方向のあらしの性質が知られた。

これによって、潤滑摩耗特性を評価する場合極めて重要な摩耗面形状の測定方法が確立された。これらの観察手法は、第5章、第7章において潤滑下の摩耗進展挙動と摩耗抵抗の解明に適用されているが、摩耗機構の解明のみでなく、さらに摩耗寿命の定量化を可能にして耐摩耗性評価法の開発に貢献するものと考えられる。

第5章 潤滑摩耗に及ぼす接触面積比の影響

5.1 緒 言

潤滑摩耗は一般に壊滅的な損傷には至らないが、精度、機能に影響を及ぼすので無視できない。この種の摩耗においても、初期から定常期への遷移挙動は、第1章で述べた乾燥摩耗の場合と同様、耐摩耗性の評価にとって大きな問題点である。

潤滑下の初期摩耗や摩耗進展挙動については、主に摩耗面の形状変化から若干報告されている^(1~3)。しかし乾燥摩耗の遷移現象が面積比の影響をうけるように、潤滑摩耗でも初期のなじみ期間や初期、定常期の摩耗量は面積比によって異なるものと考えられる。とくに種々の摩耗試験で得られた摩耗進展や摩耗速度の知見を実機に適用して、耐摩耗設計に貢献するためには、これらに及ぼす面積比の影響を調べる必要がある。

潤滑摩耗の機構は摩耗面の微小凹凸の形状やかたさ、残留応力と密接な関係にある^(1,3)。面積比によって接触状態が異なると、摩耗面形状や摩擦によるそれらの変化の様子も異なると考えられ、面積比の影響は摩擦面温度から説明できる乾燥摩耗の結果からは推測できない。したがって潤滑下の面積比の影響は、第4章で述べた表面観察法を用いて摩耗面形状を詳細に測定し検討すべきであろう。

本章では、あまり過酷でない摩擦条件下で炭素鋼の潤滑摩耗試験を行い、面積比による摩耗曲線や摩耗量の相違を調べた。さらに摩耗面の顕微鏡観察や凹凸の形状、残留応力、かたさを測定することによって、その機構を考察した。これらの結果は乾燥摩耗で得られた知見と比較検討して、耐摩耗性評価における面積比効果を明らかにした。

5.2 試験方法

摩耗試験は第2章と同様な試験片による二円筒端面方式で、端面に種々の切欠きをもつ下試験片と全円周面が摩擦面上試験片を潤滑油中で摩擦して行った。潤滑油としては流動パラフィンを用いたが、摩耗面の凸部を石鹼化してかきとることにより、面をなめらかにして良好潤滑状態を得るため、0.1% (重量比) のオレイン酸を添加した。また油の劣化を防ぐため、潤滑油は一定摩擦距離ごとに交換した。油温は25℃一定に保った。このときの粘度は約140 cStである。摩擦条件は接触荷重 $P = 10 \text{ kgf}$, すべり速度 $v = 0.28 \text{ m/s}$ 一定である。

供試材は焼なました0.53% C炭素鋼である。化学成分は表1.1に、機械的性質は表1.2に示されている。下試験片は第2章と同じ種々の大きさの切欠きをつけた小試験片である。潤滑摩耗では、処女面どうしを摩擦する場合、はじめからの全面あたりは得にくいので、試験面は次のように仕上げた。組合せる大小試験片の試験面全体をあらかじめ小荷重で摩耗させる。その後試験面を#1000研磨紙までみがき、#2000酸化アルミナでラップ仕上げを施し、650℃、1時間真空焼なましして試験に供する。処女面の中心線平均あらさは $R_a = 0.11 \mu\text{m}$ である。このような処女面どうしを摩擦すると、試験開始直後から小試験片の切欠き端のだれた部分を除いてほぼ一様に接触するので、面積比 α は小試験片の摩耗部の面積を光学的に読みとって求めた。ここで試験した面積比の範囲は $\alpha = 1.0 \sim 6.7$ である。摩耗量は重量減少量を精密天びん (感度0.01 mg) で秤量した。摩擦力は下試験片固定用油槽に取付けた板バネの曲げモーメントから求めた。

摩耗面の形状特性値、すなわち中心線平均あらさ R_a , 突起間の平均距離 (あらさピッチ) R_p , 突起の曲率半径 ρ は、第4章で述べたように触針式表面あらさ計を用いて断面曲線を得ると同時に、その出力電圧をA-D変換してデジタル計算機によって計算した。測定に用いた標本化幅は $1.0 \mu\text{m}$, 量子化幅は $0.0286 \mu\text{m}$ である。摩耗面の微小突起の検出には、第4章で得られた結果から最小量子化幅の5倍の $0.143 \mu\text{m}$ を用い、曲率の計算には最小量子化

幅の $0.0286\ \mu\text{m}$ を用いた。測定長さは摩擦方向に直角に約 $0.7\ \text{mm}$ で、試験面の 3 箇所について行った。

摩耗面のかたさは測定荷重 $25\ \text{gf}$ のビッカースかたさで、20 箇所の平均値で示した。残留応力は計数管式残留応力測定装置を用いた X 線法で測定した。測定条件を表 5.1 に示す。X 線回折強度のピークの位置は半価幅法により決定し、 $\sin^2\psi$ 法で応力値を求めた。

表 5.1 残留応力の測定条件

特 性 X 線	$\text{Cr} - \text{K}\alpha$
回 折 面	(211)
管 電 圧	30 kV
管 電 流	6 mA
照 射 面 積	$2 \times 5\ \text{mm}^2$
検 出 器	シンチレーション検出器
フ ィ ル タ ー	バナジウム箔
検出器走査速度	2 deg/min
X 線入射角	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
ピーク値決定法	半 価 幅 法

5.3 実験結果および考察

5.3.1 摩耗曲線

0.53% C 炭素鋼どうしを種々の面積比で組合せ、0.1% オレイン酸を添加したパラフィン油中で、 $P = 10\ \text{kgf}$ 、 $v = 0.28\ \text{m/s}$ 一定の摩耗試験を行った。図 5.1 は小試験片の摩耗曲線である。乾燥摩耗では第 2 章で述べたように、初期のシビヤ摩耗から定常期のマイルド摩耗への遷移はある面積比の範囲でみられ、それより大きな面積比ではシビヤ摩耗が持続する。またその遷移は急激

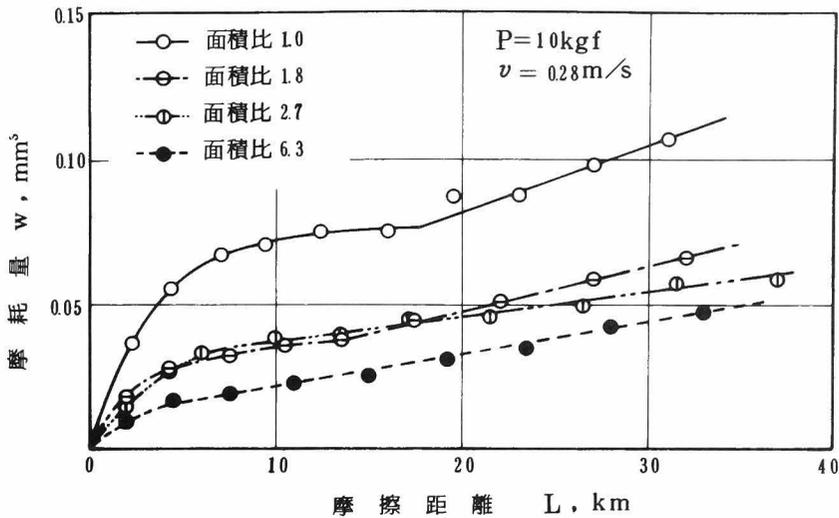


図 5.1 小試験片の摩耗曲線（0.1%オレイン酸添加パラフィン油中）

である。これに対して潤滑摩耗ではいずれの面積比の場合も，初期に連続的に摩耗率が減少して定常期に移行する。また摩擦開始直後約2.0 km までの初期の摩耗率でも定常期のそれよりたかだか1 オーダ大きい程度で，乾燥下でのそれが約1000倍にもなるのに比べてはるかに小さい。面積比 $\alpha = 1.0$ と1.8では，従来より報告⁽¹⁾されているように，初期から定常期に移行する区間で変曲点があられ，いったん摩耗率が減少したのち再び大きい一定摩耗率を示す傾向がある。しかし面積比が大きくなると，摩擦開始直後の摩耗量は小さく，摩耗率のいったん減少する区間や変曲点は不明瞭となるが，ある摩擦距離から定常的な摩耗の進展がみられる。このとき大試験片の進展挙動は小試験片と同じである。

摩耗曲線の変化と摩耗面形状の間には密接な関係がある⁽³⁾。そこで種々の摩擦距離で中心線平均あらさ R_a を測定すると図5.2のようである。面積比 $\alpha = 1.0$ では， R_a は摩擦開始直後増大したのちいったん低下するが，再び増大してほぼ一定値を示す。面積比 $\alpha = 6.3$ の R_a は小試験片のほうが大試験片より

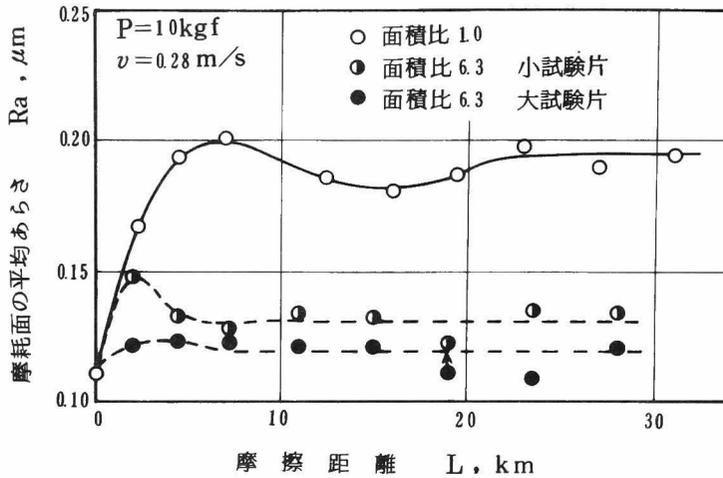


図 5.2 摩耗面の中心線平均あらしの変化

も大きく、増大したのち低下して一定となる。このときほぼ一定となる摩擦距離は摩耗曲線の定常域の開始点とほぼ対応しており、面積比 $\alpha = 6.3$ のほうが短い。したがって両面積比の摩耗面は初期では変化するが、定常域では一定の形状を持続していることがわかる。

5.3.2 初期摩耗

潤滑下の初期摩耗は、図 5.1 からわかるように摩耗率が刻々と変化しており、初期摩耗の定義は明確でない。そこで本研究では、初期摩耗の継続期間と摩耗量を次のように評価することにした。

図 5.3 は図 5.1 で示した摩耗曲線の模式図である。面積比 $\alpha = 1.0, 1.8$ で得られる曲線では、変曲点 B 以後の定常摩耗のこう配が、初期曲線上の接線のそれと一致する点 A を初期摩耗終了点とみなす。これは初期摩耗が、定常摩耗よりも大きな摩耗率で進展する初期の領域とされるからである。変曲点をもたない曲線に対しては、定常摩耗に移る点を A として用いる。そして両者とも、A までの摩擦距離 L_i および摩耗量 W_i を初期域のそれとして検討する。

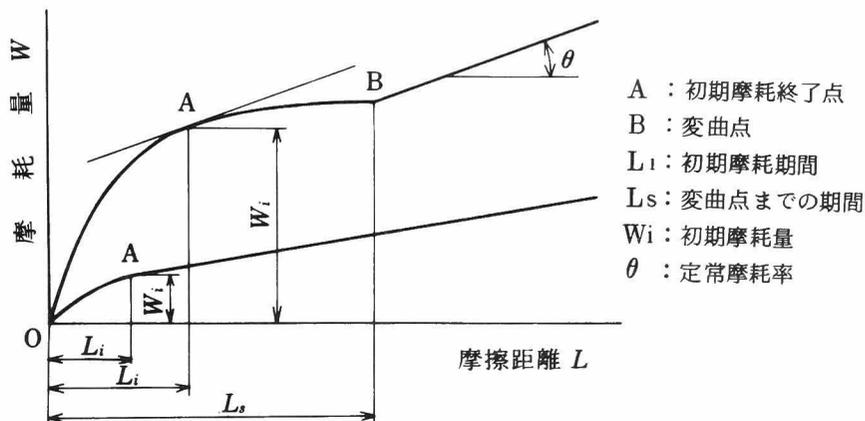


図 5.3 初期摩耗の定義

図 5.4 は種々の面積比における初期摩耗期間である。面積比が大きいほど期間は短くなる。また●で示すように、変曲点までの距離は面積比 $\alpha = 1.0$ では著しく長いが、 $\alpha = 2.3$ 以上では確認できない。これらのことより面積比が極めて大きいピン・ディスク方式では、定常摩耗にはやく移行することが推測され、乾燥摩耗の場合とは全く逆である。

図 5.5 は初期域の全摩耗量である。摩耗量は面積比が $\alpha = 1.0$ より大きくなったとたん著しく減少する。さらに面積比が増大すると、小試験片では小さくなり、大試験片ではあまり変化しないが、いずれの面積比でも小試験片より小さい。面積比 $\alpha = 1.0$ では回転と固定の試験片間に若干の相違がみられるが、両者のあたり具合によるものであろう。図 5.5 の初期摩耗量を図 5.4 の摩擦距離と接触荷重 $P = 10 \text{ kgf}$ で除して得られる初期域での平均的な比摩耗量は、 $w_s = 2 \sim 8 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ である。体積摩耗量を平均摩耗深さに換算して表示すると図 5.6 のようになる。大きな面積比の小試験片の摩耗深さは、面積比 $\alpha = 1.0$ より大きく、体積表示とは異なっており注意を要する。

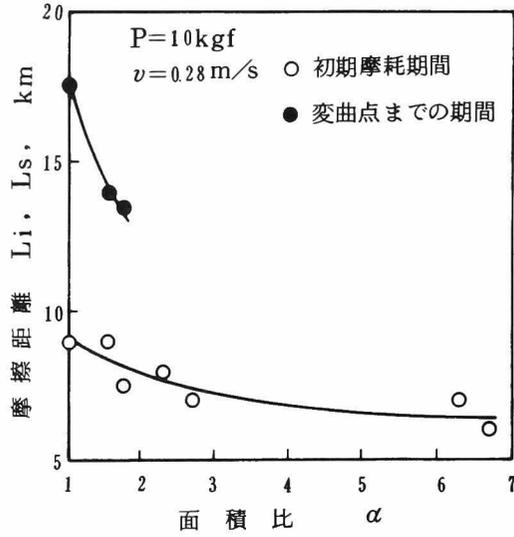


図 5.4 初期摩耗期間と面積比の関係

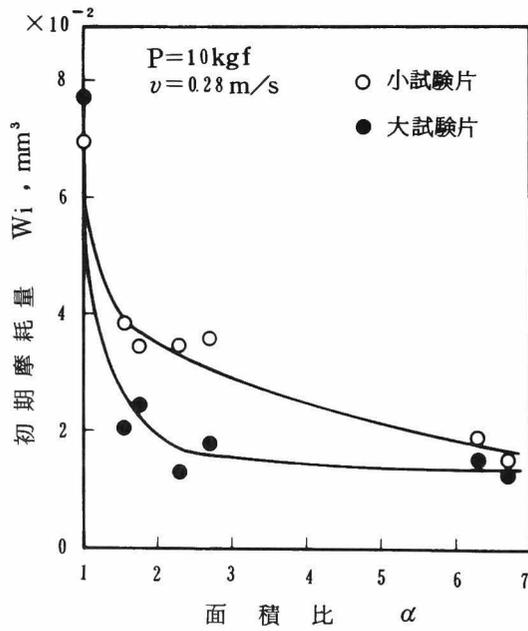


図 5.5 初期摩耗量と面積比の関係

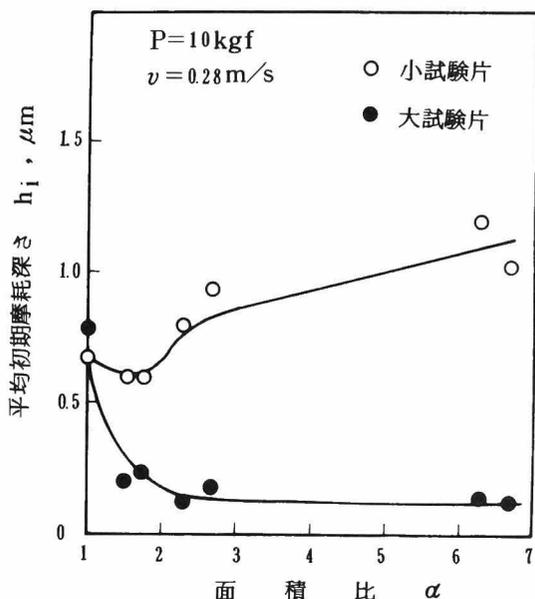


図 5.6 平均初期摩耗深さと面積比の関係

図 5.7 は初期域である 4.5 km 摩擦後の断面曲線の一例である。表面被害の様子は面積比や大小試験片で異なる。面積比 $\alpha = 1.0$ (図 a) では、局部的に大きな溝やあれがみられ、表面の変形や損傷が大きいことが知られる。これに比べて面積比 $\alpha = 2.7$ のあれは小さく、小試験片 (図 b) では溝が規則的に形成され、大試験片 (図 c) では細かいあれが面全体にみられる。

このような摩耗面の変化を形状特性値 R_a , R_p および ρ で示すと図 5.8 のようである。面積比が増大すると、 R_a は大小試験片とも減少し、 R_p は小試験片では大きくなるが、大試験片での変化は小さい。したがって大小試験片の接触は、面積比が大きいほどなめらかな面どうしによることが知られる。これらの特性値と図 5.7 の断面曲線を比較してみると、たとえば面積比 $\alpha = 2.7$ における大小試験片間の R_p の大小関係は、断面曲線の表面被害の様子から推測される脱落粉径のそれと一致する。したがってすでに表面疲労による定常域の摩耗では知られている⁽¹⁾が、初期摩耗でも大部分の摩耗粉の大きさは R_p と密接な関係

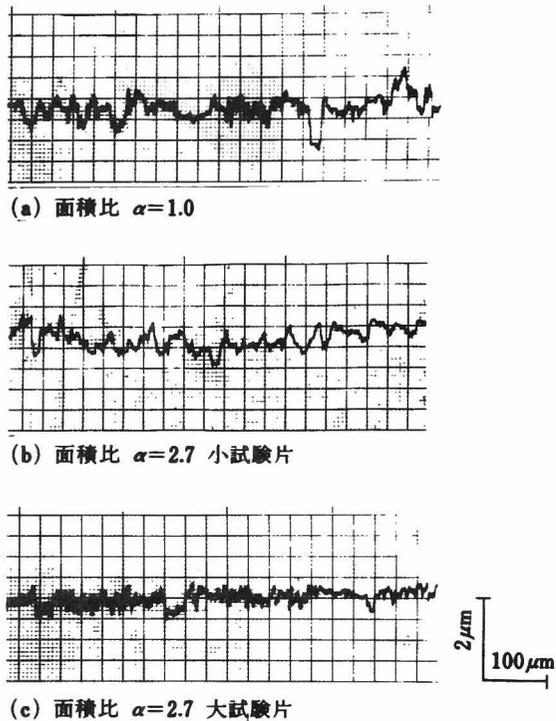


図 5.7 4.5 km 摩擦後の断面曲線

にあると考えられる。

初期摩耗は突起の先端部が徐々に摩耗していく過程とする報告^(4,5)があるが、表面あらしが大きい場合であろう。本研究のように比較的なめらかな面どうしを摩擦させたときの初期摩耗は、局部的に境界油膜が破れて生じた金属接触部での凝着による損傷と、それにともなって生じた盛り上り部の損傷であると考えられる。これは図 5.9 に示す走査電子顕微鏡写真からも知られる。このような機構の初期摩耗では、図 5.2 でみられるように摩耗面形状が摩擦距離によって変化し、それにともなって潤滑状態が変わる。その結果摩耗進展は摩擦距離に対して直線的とはならず、初期から定常期へなだらかに遷移するものと考えられ、乾燥摩耗の遷移機構とは著しく異なる。

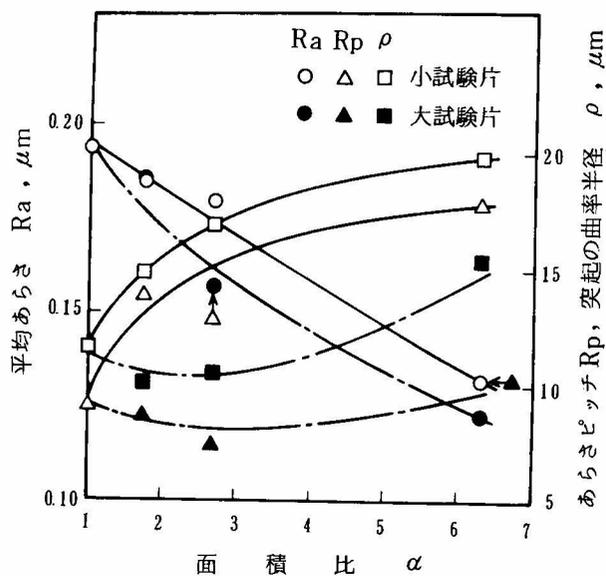


図 5.8 4.5 km 摩擦後の摩耗面の形状特性値

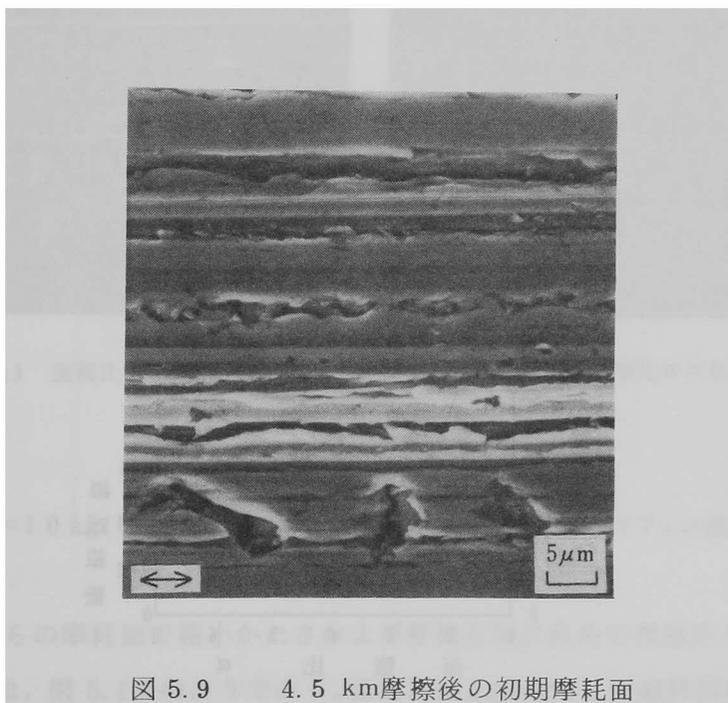


図 5.9 4.5 km 摩擦後の初期摩耗面
(面積比 $\alpha=1.0$, $P=10 \text{ kgf}$, $v=0.28 \text{ m/s}$, 0.1%オレイン酸添加パラフィン油中)

面積比が $\alpha = 1.3$ では $\alpha = 1.0$ に比べて、接触面に油が侵入しやすく、摩擦開始後の境界潤滑膜の破壊が減少する。またアブレシブ摩耗を助長する遊離摩耗粉も摩耗面から排出されやすい。そのため摩耗量は急減するものと考えられる。さらにすべり長さの短い大きな面積比では、潤滑状態が一層良好となり、小試験片での ρ が大きく、真実接触圧力が低下して、凝着摩耗量も減少する。このとき大試験片の摩耗面は間欠的に接触するため、局所的な変形や損傷は小さく、小試験片に比べて R_p , ρ は小さくなる。その結果摩耗粉径が減少して摩耗量も小さくなる。しかし面積比 $\alpha = 6.3$ では小試験片の摩耗量の低下も著しいため、大小試験片の摩耗量に差がみられないものと考えられる。

5.3.3 定常摩耗

図 5.10 は定常域での摩擦係数の平均値および摩耗率と面積比の関係である。大小試験片の摩擦距離は、両者とも一回転あたり大試験片の円周長さとした。面積比 $\alpha = 1.0 \sim 2.7$ では、大小試験片の摩耗率はほぼ同じで面積比とともに低下する。しかし初期域のように面積比が1.0より大きくなったとたん摩耗率

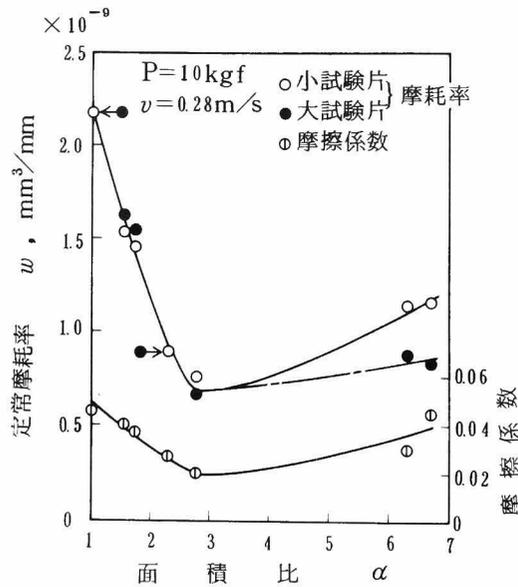


図 5.10 定常域の摩耗率および摩擦係数と面積比の関係

が急減する傾向はみられず、 $\alpha = 1.5$ 、 1.8 では中間の段階を示している。面積比 $\alpha = 6.3$ 以上の摩耗率は $\alpha = 2.7$ よりも増大し、小試験片のほうが大きい。摩擦係数は $\alpha = 2.7$ で最小値をとりそれより大きな面積比では増大しており、摩耗率と面積比の関係とよい対応を示している。

小試験片の定常摩耗面を顕微鏡観察すると図 5.11 のようである。面積比 $\alpha = 2.7$ では (a) のようなはく片状の摩耗粉の形成がみられ、第 4 章の観察結果と比較しても良好潤滑下での表面疲労による摩耗であることがわかる。面積比 $\alpha = 6.3$ では (b) に示す形状がみられ、これは第 1 章で示した乾燥摩耗の摩耗面に類似しており、金属接触部の凝着による摩耗と考えられる。

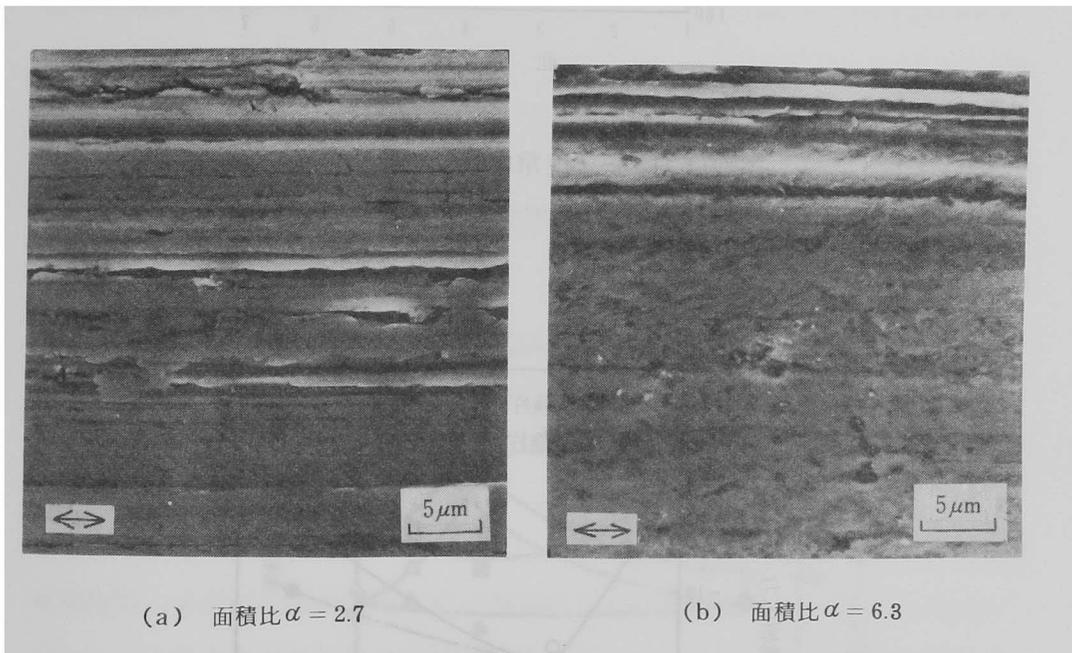


図 5.11 小試験片の定常摩耗面

($P=10 \text{ kgf}$, $v=0.28 \text{ m/s}$, 0.1% オレイン酸添加パラフィン油中)

またこれらの摩耗面で微小かたさおよび摩擦方向に直角の残留応力を測定すると図 5.12, 図 5.13 のようである。面積比によるかたさと圧縮残留応力の変化挙動はほぼ同様で、面積比が大きくなると低下するが、 $\alpha = 6.3$ では逆に増大

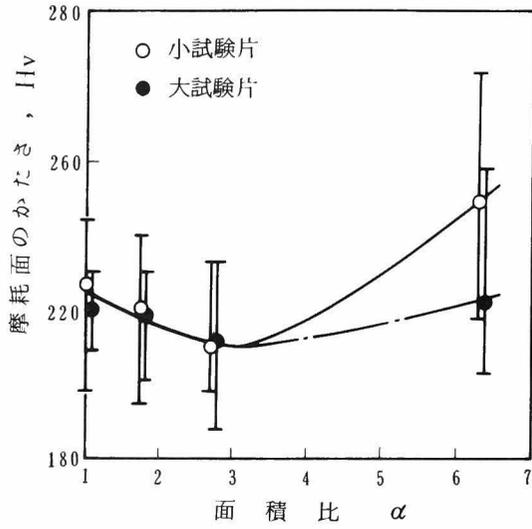


図 5.12 定常摩耗面のかたさ

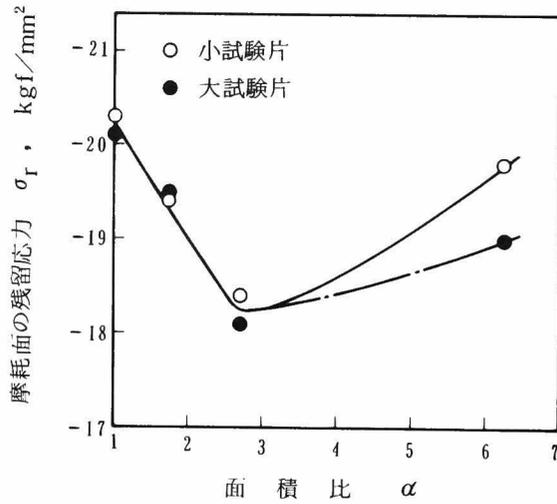


図 5.13 定常摩耗面の残留応力

する。これは面積比による摩擦係数および摩耗率の変化と対応している。とくに面積比 $\alpha = 6.3$ の小試験片では硬化の程度が著しい。潤滑摩耗においても、凝着摩耗の傾向が強くなるほど摩擦の繰返しによる加工硬化は増大するためと考えられる。したがって摩耗面の性状からも顕微鏡観察と同様に、面積比 $\alpha = 6.3$ では凝着による摩耗が主であることが知られる。

図 5.14 は定常摩耗面の形状特性値 R_a , R_p および ρ と面積比の関係である。これらは摩擦方向に直角に測定し、定常域の種々の摩擦距離での値を平均したものである。面積比が大きくなると R_a は減少する。また R_p や ρ は面積比 $\alpha = 6.3$ を除くと、面積比にともなって小試験片では増加し、大試験片ではほとんど変化しない。

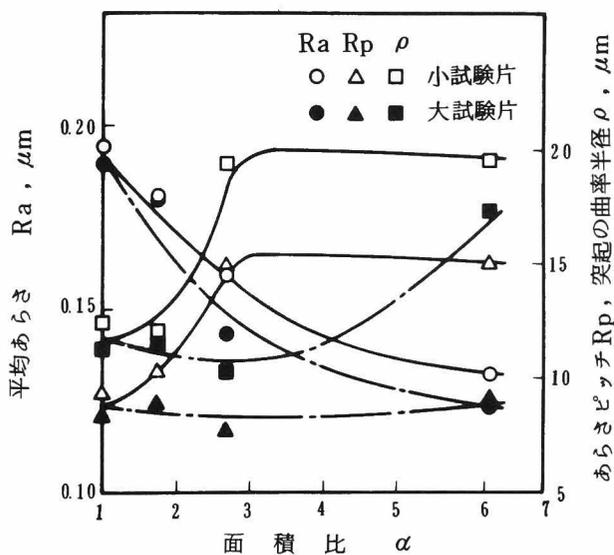


図 5.14 定常摩耗面の形状特性値
 ($\alpha = 1.0$ の ●, ▲, ■ は
 試験終了後測定した値である)

面積比 $\alpha = 1.0 \sim 2.7$ では、接触二面はなじんでいて境界油膜の生成も十分で、摩耗は油膜破断時の金属接触よりも油膜を介しての繰返し接触によって生じると考えられる。面積比にともなって Ra が減少し、また小試験片の R_p, ρ が増大するので、個々の突起での接触圧力は低く、変形量も小さくなって摩擦力が低下するものと考えられる。その結果突起の脱落に要する接触繰返し数は増加するため、摩耗粉の数が減少して摩耗率は面積比にともなって低下する。このとき、たとえば面積比 $\alpha = 2.7$ の大試験片の R_p, ρ は小試験片の約 $1/2$ であるが、摩耗率は両試験片でほぼ等しい。これは大試験片では摩耗粉径は小さいが、その数が増加するためと考えられるが、よくわからない。摩耗率の大小と摩耗面形状から推察される摩耗粉径と数の関係は、さらに検討を要する課題である。

面積比の大きい $\alpha = 6.3$ では、みかけの接触圧力が増大するため局部的に金属接触を生じる。また Ra が小さいので、境界摩擦で知られている⁽⁶⁾ように、二面の凸部どうしの接触の機会が増し金属接触部を生じやすくなる。その結果凝着摩耗の様相を呈し、摩擦係数は大きく摩耗率は増大する。このとき大試験片の摩耗率は小試験片より小さい。これは摩耗面の温度上昇の小さい大試験片のほうが図 5.12, 図 5.13 からわかるように、凝着の傾向が小さいためと考えられる。

5.4 結 言

摩擦条件が過酷でない良好潤滑下の摩耗に及ぼす面積比の影響を、初期摩耗と定常摩耗にわけて調べた。得られた主な結論はつぎのようである。

(1) 潤滑摩耗では乾燥摩耗とは異なり、初期から定常期へなだらかに遷移し、面積比が大きいほど初期摩耗ははやく終了する。初期域では面積比が $\alpha = 1.0$ より大きくなったとたん摩耗量は著しく減少する。さらに面積比が大きくなると、小試験片の摩耗量は減少するが、大試験片での変化は小さい。これは面積比が増加すると、摩耗面は摩擦開始直後からはやくなめらかになって良い潤滑状態が得られ、凝着による摩耗が減少するためである。

(2) 定常摩耗では、表面疲労によって摩耗を生じ、面積比が大きくなると摩擦力が低下して摩耗率も減少する。しかしある大きな面積比以上では、凝着摩耗の様相を呈し摩耗率は再び増大する。これらは摩耗面の形状特性値やかたさ、残留応力の変化から説明される。

(3) これらの結果は、いずれも乾燥摩耗のそれとは異なるが、乾燥下、潤滑下にかかわらず耐摩耗性の評価や摩耗データを実機に適用する場合、面積比効果を考慮すべきことが明らかとなった。

第6章 潤滑摩耗形態とその変化挙動

6.1 緒 言

潤滑摩耗では、第5章で述べたように、初期、定常期での摩耗形態の相違のみでなく、定常摩耗域でも面積比によって疲労による摩耗と凝着による摩耗がみられた。乾燥摩耗ではシビヤ摩耗とマイルド摩耗の2形態があり、耐摩耗設計に際しては、まずシビヤ摩耗を避けてマイルド摩耗の範囲にあるように摩擦条件を選ぶことが重要であった。潤滑下で稼動する機械要素の摩擦部でも、やはり大きな被害を生じる摩耗形態は避けるべきであろう。

潤滑摩耗も本質的には金属接触部の凝着によるもので、乾燥摩耗の遷移条件が適用できるという報告⁽¹⁾もある。しかし良好な潤滑下では、第4章で観察例を示したように表面疲労による摩耗を生じ、凝着摩耗とは異なる。したがって潤滑摩耗の形態とそれらが変化する摩擦条件は、乾燥摩耗とは別に議論する必要がある。

IRG-OECDの共同研究は、油中での四球式またはピン・ディスク方式の試験を接触荷重、すべり速度および油温をかえて行くと、摩擦係数、摩耗率は3段階に変化することを示している⁽²⁾⁽³⁾。しかしこれらの報告での形態の変化は、なじみ運転期間中の弾性流体潤滑から摩耗面の壊滅的な破損への急激な転移である。実際の機械要素の摩耗では、平面どうしを摩擦したときのマイルドな定常摩耗域でみられる形態の相違やそれが転移する摩擦条件を知ることが重要と考えられる。Czichos^(4~6)は、完全な弾性流体潤滑から部分的なそれへのゆるやかな転移を研究しているが、両領域での摩耗挙動は明らかにされておらず、摩擦力のみでなく摩耗量にも注目して転移現象をさらに検討する必要がある。

また点接触と線接触による試験では、ピンの曲率半径⁽⁷⁾や接触面形状⁽⁸⁾によって転移条件が変化する。平面どうしを摩擦した場合でも、試験片の接触面

積の大きさあるいは形状が、境界潤滑での摩擦係数と焼付き値に影響することが報告^(9,10)されている。また乾燥摩耗のシビヤーマイルドの遷移条件は第2、第3章で述べたように面積比や試験方式によって変化する。したがって潤滑摩耗形態の転移の知見を一層実用的なものにするには、さらに面積比の影響を明らかにする必要がある。

本章では、平面接触の摩耗試験を接触荷重をかえて行い、摩擦係数、摩耗率の変化にみられる摩耗形態の相違を調べた。また接触荷重を階段状に増加させる方法での摩擦試験をすべり速度、面積比をかえて行い、摩擦面温度の測定から摩耗形態の転移の機構を明らかにした。これらは第1章、第2章で得られた乾燥摩耗の結果および IRG - OECD の結果とも比較検討した。

6.2 試験方法

試験は油中で、二つの円筒形試験片の端面どうしを摩擦する方式で行った。装置の主要部を図 6.1 に示す。試験機本体は卓上ボール盤を補強して剛性を高めたもので、試験面に加える接触荷重はレバーにおもりを負荷することによって任意に得られる。摩擦力は下試験片固定用油槽に取付けた板バネの曲げモーメントから求めた。

摩擦部分は油槽内で潤滑油に浸っている。油の劣化と油槽温度の著しい上昇を防ぐため、油を外部の油タンクからビニールパイプを通して下試験片の内側へ約 100cc/min の割合で供給した。潤滑油は循環して用いたが、ごみや巨大な摩耗粉はオイルフィルター（ろ過範囲 10 μ m 以上）によって除去した。油温は水銀接点温度計とヒーターを用いて下試験片への注油口で 25 $^{\circ}$ C 一定に保った。潤滑油としては無添加マシン油を用い、25 $^{\circ}$ C の粘度は約 120 cSt である。

供試材は第1章と同じ 830 $^{\circ}$ C、1時間保持にて焼なました 0.53% C 炭素鋼で、化学成分は表 1.1 に、機械的性質は表 1.2 に示してある。下試験片は図 2.1 で示したような端面に種々の切欠きをつけた小試験片である。試験面は #2000 酸化アルミナでラップ仕上げした後、あらかじめ小荷重で潤滑摩耗

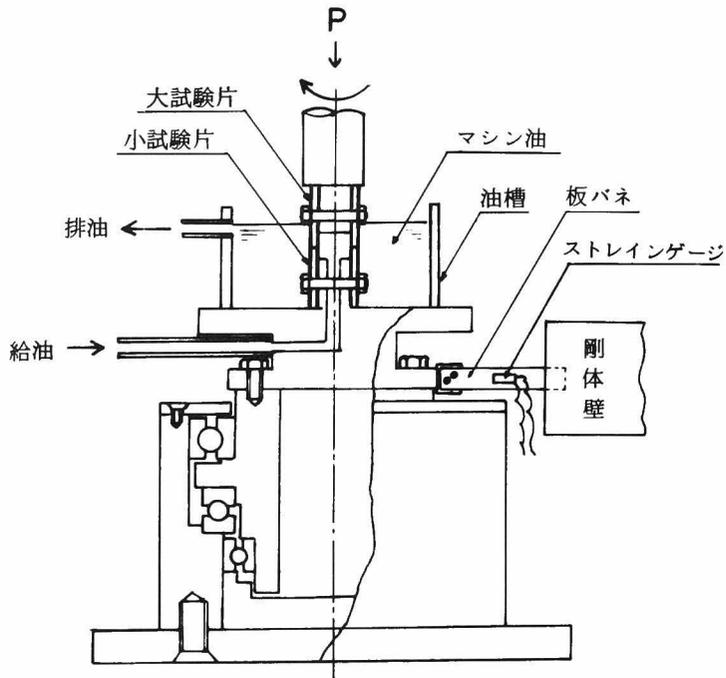


図 6.1 試験装置

させ、全面あたりが得られたのを確かめてから 650°C 、1時間真空焼なました。その後接触荷重一定の摩耗試験では試験荷重で、接触荷重を階段状に増加させる摩擦試験では接触荷重 $P = 12\text{ kgf}$ 、すべり速度 $v = 0.30\text{ m/s}$ にして約 2 km のならし運転を行い試験に供した。

摩耗量は重量減少量を精密天びん（感度 0.01 mg ）で秤量して求めた。小試験片の残留応力は第5章で用いた計数管式残留応力測定装置によるX線法で測定した。測定条件は表5.1に示してある。小試験片の温度上昇は、すべり長さの中心で摩擦表面から 1 mm 下の試験片側面に深さ 1 mm の穴をあけ、直径 0.2 mm のCA熱電対を挿入して測定した。また同時に小試験片の摩擦面近傍の内外の側面に直径 0.1 mm のCC熱電対のそれぞれをスポット溶接して摩擦面の平均温度を測定した。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 摩耗形態とその変化挙動

なめらかな処女面どうしを接触させて潤滑摩耗試験を行うと、一般に初期摩耗を経て定常的に摩耗が進展する⁽¹¹⁾。しかし本章では、あらかじめ試験荷重によるならし運転によって得られた定常摩耗面どうしを摩擦して生じる摩耗形態の相違について調べた。

無添加マシン油中で、面積比 $\alpha = 2.0$ の摩耗試験をすべり速度 $v = 0.30 \text{ m/s}$ で行った。種々の接触荷重で得られる摩擦係数を図 6.2 に示す。試験期間は接触荷重によって異なるが、低荷重域では $10 \sim 20 \text{ km}$ 、高荷重域では $3 \sim 10 \text{ km}$ である。測定は定常摩耗面を得たのち行ったので、試験期間中の摩擦係数の変動は少ないが、一定摩擦距離ごとの値を平均して示した。摩擦係数の変化挙動はおおよそ3つの領域にわけられる。接触荷重の小さい領域では、摩擦係数は小さくて接触荷重の増加に対して若干低下する。 $P \approx 50 \text{ kgf}$ 以上では摩擦係数は徐々に増加し、 $P \approx 120 \text{ kgf}$ をこえると高い値で落ち着く。このような3領域の境界の荷重は、図中に示したように、それぞれ第1転移荷重、第2転

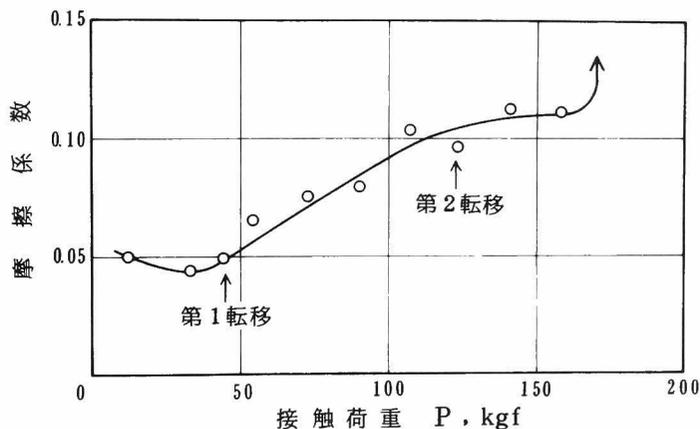


図 6.2 摩耗試験における摩擦係数と接触荷重の関係
(面積比 $\alpha = 2.0$, $v = 0.30 \text{ m/s}$, マシン油中)

移荷重と呼ぶ。そして $P \approx 170 \text{ kgf}$ 以上では焼付くが、第 2 転移荷重以上でも試験の途中で焼付くことがある。

図 6.3 は大小試験片の比摩耗量と接触荷重の関係である。 $P \approx 50 \text{ kgf}$ までは、大小試験片の比摩耗量はほぼ等しく、接触荷重にともなって減少する。それ以上の荷重では比摩耗量は増加し、小試験片のほうが大試験片より大きい。

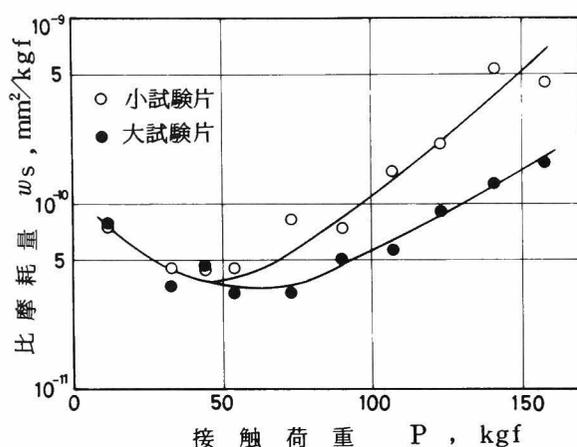


図 6.3 比摩耗量と接触荷重の関係
(面積比 $\alpha = 2.0$, $v = 0.30 \text{ m/s}$, マシン油中)

比摩耗量と接触荷重の関係を摩耗率の逆数 $1/w$, つまり単位量の摩耗を生じるのに必要な摩擦距離と摩擦力との関係で示すと図 6.4 のようである。すでに疲労摩耗で知られている結果^(11,12)と同様, この場合もき裂進展速度を示す線図と似た図が得られる。しかし異なった 2 曲線となり, 高摩擦力の曲線は低摩擦力のそれに比べて, 摩擦力に対する摩耗率の変化が著しい。これらを図 6.2 と対応させてみると, 第 1 転移荷重以下では低摩擦力の曲線となり, それ以上の荷重では高摩擦力の曲線で整理できる。

摩耗試験終了後の小試験片の定常摩耗面を走査電子顕微鏡で観察した。図 6.5 に観察結果の一例を示す。(a) は $P = 33 \text{ kgf}$ の摩耗面, (b) は $P = 141$

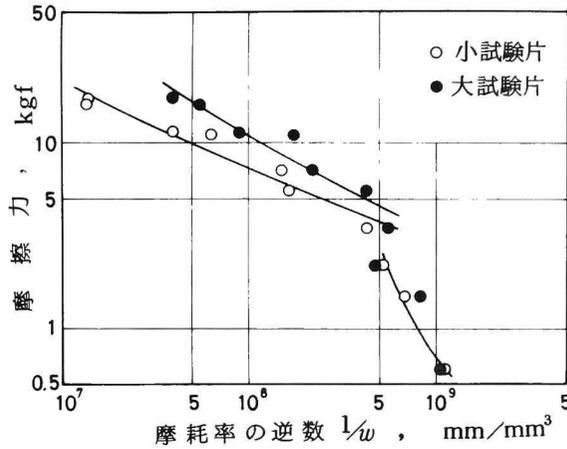
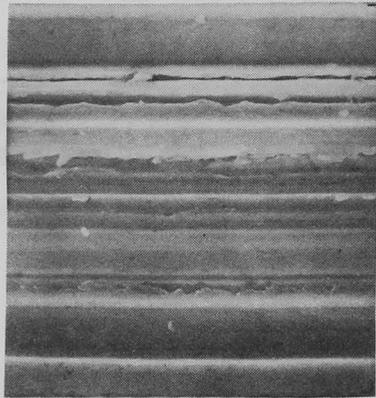


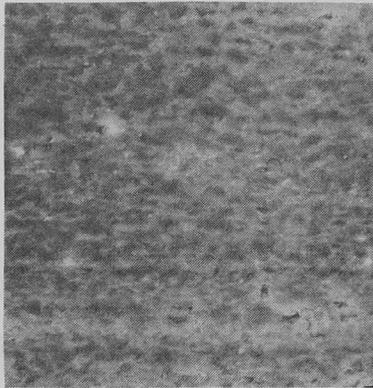
図 6.4 摩擦力と摩擦率の逆数の関係

kgf の摩擦面，(c) はとくに高荷重域でしばしばみられる形状である。(a) は第 4 章および第 5 章の小さな面積比でみられた摩擦面と類似しており，表面疲労による摩擦と考えられる。このような形状はならし運転の際局所的な凝着や摩擦粉のアブレイブ作用によって摩擦溝ができ，その後の摩擦によって溝につき出した部分または溝の側面が定常的に脱落して形成されることは第 4 章で詳しく述べた。(b) は第 1 章の乾燥摩擦でみられた摩擦面に類似しており，金属接触部の凝着による摩擦である。(c) でみられる大きな溝は遊離摩擦粉によるアブレイブ作用の痕跡であろう。

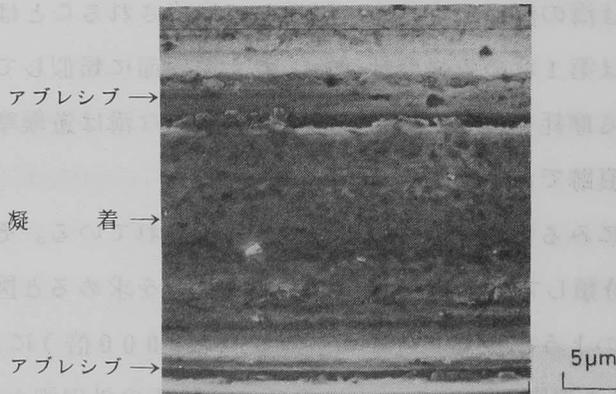
試験面は大まかにみると，これらの形状から構成されている。そこで摩擦面を (a)(b)(c) に分類して，試験面全体に占める割合を求めると図 6.6 のようである。測定は次のようにした。電子顕微鏡（倍率 3000 倍）による $33\mu\text{m} \times 33\mu\text{m}$ の摩擦面の撮影を，摩擦方向に直角に試験片の外周側から内周側に向かって $70\mu\text{m}$ ずつ移動させて約 25 箇所で行う。写真撮影されたそれぞれの摩擦面について半径方向の形状変化を (a)(b)(c) に分割して割合を求め，観察面全体で平均して表示した。このようにすると摩擦方向に直角の形状の約 $1/2$



(a) P = 33kgf 疲労摩耗



(b) P = 141kgf 凝着摩耗



(c) P = 106kgf アブレシブ摩耗

図 6.5 小試験片の摩耗面
(面積比 $\alpha = 2.0$, $v = 0.30 \text{ m/s}$, マシン油中)

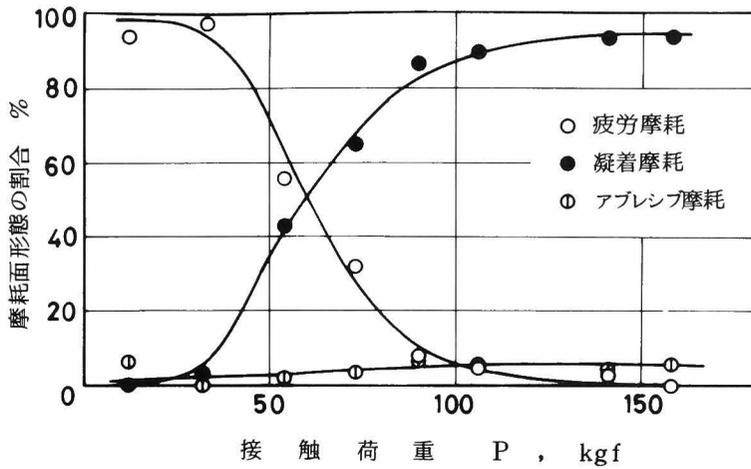


図 6.6 小試験片における摩耗面形態の割合と接触荷重の関係

を観察したことになる。P = 33 kgf までは大部分が疲労摩耗面である。接触荷重が大きくなると、凝着摩耗面が徐々に増加して、P = 100 kgf からほぼ試験面全体を占める。アブレシブ摩耗面の割合は接触荷重とともに若干増加するが、いずれの場合も小さい。(a), (b) の形状が混在する摩擦条件下でも、マクロ的にみると試験面はほぼ均一に摩耗している。また (a), (b) があらわれる位置は摩擦距離とともに変動するが、その割合はほぼ一定であった。

このような形状をもつ小試験片の摩耗面で、摩擦に直角方向の残留応力を測定すると図 6.7 のようである。接触荷重が大きくなると圧縮残留応力は増加するが、P = 90 kgf から約 -25 kgf/mm^2 で一定となる。低荷重域の圧縮残留応力は、初期域で凝着によって大きな値を生じて、その後減少して摩擦力に比例した値を示す⁽¹¹⁾ ので、接触荷重にもなって上昇する。しかし P = 90 kgf 以上では摩擦力は増大しても、摩耗面の大部分で金属接触を生じ凝着しているため、残留応力は飽和するものと考えられる。

これらのことから第 1 転移荷重以下では疲労摩耗を生じ、それ以上の接触荷重で凝着摩耗があらわれ、第 2 転移荷重以上では飽和する。凝着摩耗量は、疲

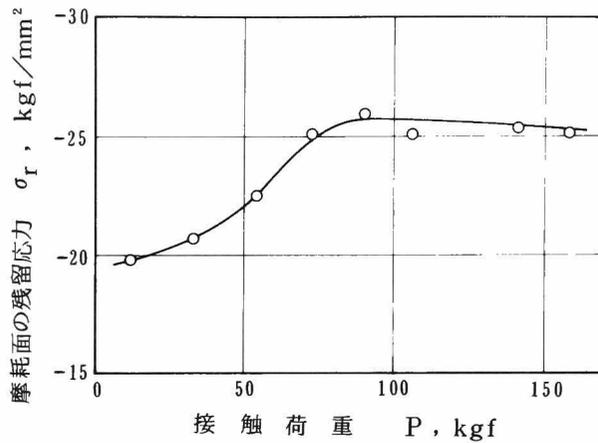


図 6.7 小試験片の摩耗面の残留応力と接触荷重の関係

劣摩耗よりたかだか1オーダー大きいだけで、乾燥摩耗のマイルド摩耗と比べても約1/100と小さい。また疲労から凝着摩耗への転移は、乾燥下のマイルド、シビヤ摩耗のそのように急激ではなくなめらかである。これは第1転移荷重以上で金属接触の割合が徐々に増加するためと考えられる。

IRG—OECDは、第1転移は比摩耗量を5倍程度、第2転移はさらに100倍も増大させ、その後壊滅的な表面損傷に至ると報告している⁽²⁾これに比べて本研究結果の摩擦係数、比摩耗量は著しく小さく、第2転移は大きな損傷を伴わない。したがって定常摩耗領域でみられる摩耗形態はなじみ期間中のそれとは著しく異なることになり注意を要する。

このような転移を生じる条件およびその機構を、接触荷重を焼付くまで階段状に増加させる摩擦試験から調べた。摩擦試験は50mすべらせるごとに接触荷重を約10kgfずつ増加させて行い、摩擦力は50mすべらせた時点で測定した。また摩擦力が急上昇したとき焼付いたとした。

図6.8は図6.2と同じ条件すなわち面積比 $\alpha=2.0$ 、 $v=0.30\text{m/s}$ で得られる摩擦係数と接触荷重の関係である。図中破線は図6.2の結果を示す。この

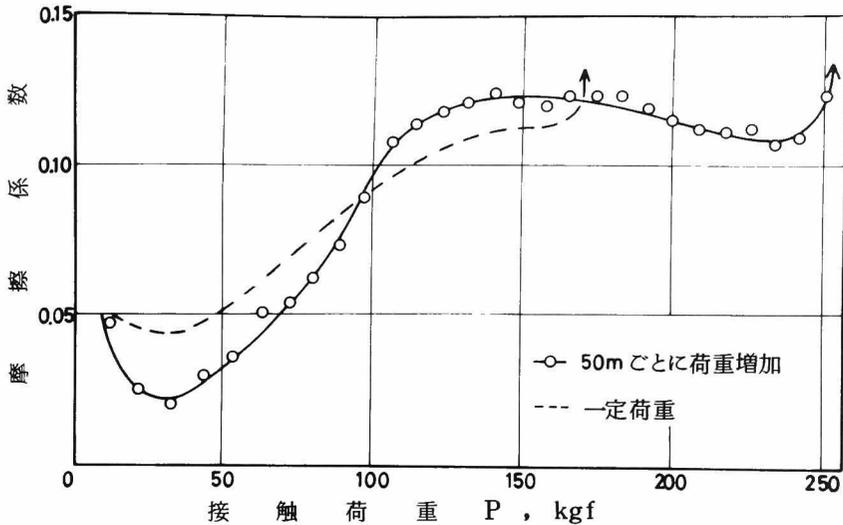


図 6.8 50 m ごとに荷重増加の摩擦試験における摩擦係数と接触荷重の関係 (面積比 $\alpha=2.0$, $v=0.30\text{ m/s}$, マシン油中)

場合も接触荷重が増加すると、摩擦係数は小さく若干低下する領域、次第に増加する領域および高い値で一定となる領域がみられる。長時間すべらせた摩耗面は、試験荷重によって定まる固有のあらさをもつ⁽¹²⁾これに対して 50 m すべらせる摩擦試験では、ならし運転で得られた小さなあらさが高荷重域まで保たれる。このあらさの差によって第 1 転移荷重以下では、短時間すべらせたときの摩擦係数は 10 ~ 20 km すべらせた摩耗試験のそれより小さくなっている。両試験での第 1 と第 2 の転移荷重およびこの領域での摩擦係数はほぼ同じで、あらさの影響は凝着や塑性接触のためみられないことになる。焼付き荷重は 50 m すべらせた試験のほうが大きくなる。しかし潤滑摩耗の転移条件は、接触荷重を階段状に増加させて行う摩擦試験から評価できるであろう。

摩擦係数のこのような変化挙動は、すべり速度が異なっても同様にみられる。図 6.9 に第 1, 第 2 転移荷重および焼付き荷重とすべり速度の関係を示す。

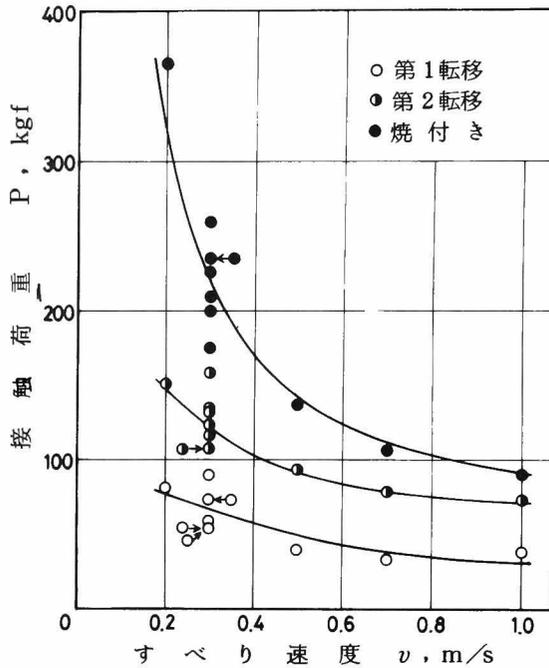


図 6.9 転移，焼付き荷重とすべり速度の関係
(面積比 $\alpha = 2.0$)

$v = 0.30 \text{ m/s}$ では数回の試験を行っており，その結果を示した。焼付きは第2転移荷重以下では生じない。したがって第2転移荷重曲線は焼付きがおこらない条件，焼付き荷重曲線は平均的な焼付き条件を示している。すべり速度が上昇すると，いずれの条件も減少するが，高速度域では第2転移荷重をこえるとすぐに焼付くことが知られる。

第1，第2転移時および焼付く直前における摩擦面近傍の温度 T_s と摩擦面下 1 mm の温度 T_u を，それぞれの荷重に対して示すと図 6.10 (a)(b) のようである。すべり速度によって転移，焼付き荷重は変化するが，第1転移は $T_s \approx 40^\circ\text{C}$ ， $T_u \approx 30^\circ\text{C}$ で，焼付きは $T_s \approx 150^\circ\text{C}$ ， $T_u \approx 90^\circ\text{C}$ のほぼ一定温度で生じる。しかし第2転移はすべり速度が上昇して転移荷重が減少するほど，大きな T_s ， T_u で生じる。測定された T_s は，摩擦面に熱電対を埋め込みそれ

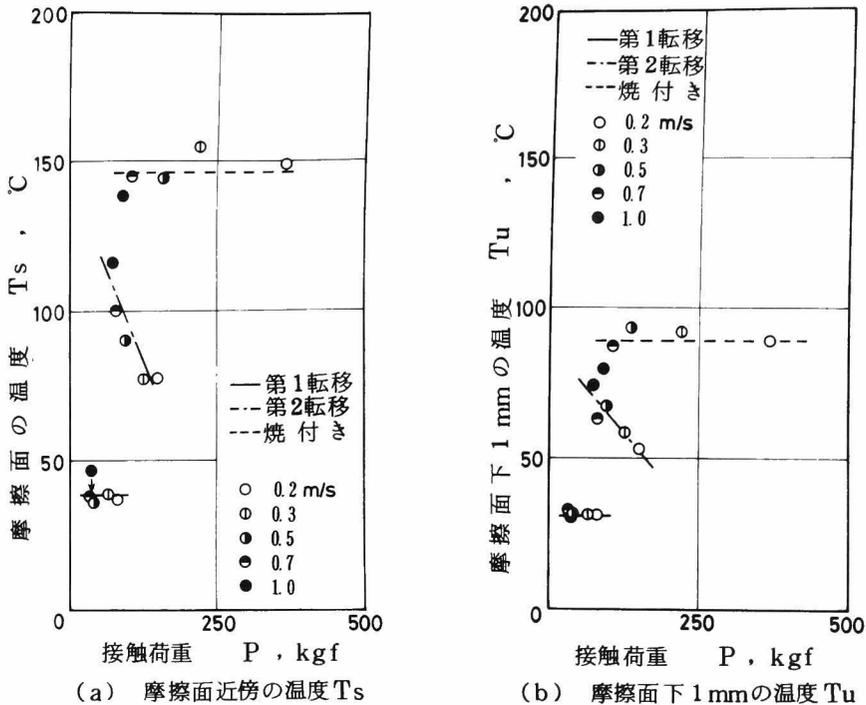


図 6.10 転移，焼付きでの試験片の温度

を摩擦した時に示す温度とほぼ一致することから，摩擦面平均温度を示すものと推測される。したがって第 1 転移と焼付きは，試験片の摩擦面平均温度に支配されるが，第 2 転移は温度以外の因子が作用することが知られる。

以上の結果から潤滑摩耗の転移の機構は次のように考えられる。摩擦面平均温度がある一定値に達すると，油膜が繰返し摩擦によって摩耗しはじめ局部的に金属接触を生じるため第 1 転移があらわれる。この機構は IRG-OECD が報告している弾性流体潤滑膜の破損と関連づけた First Transition のそれと類似している。しかし平面接触の定常摩耗域でみられる転移現象では，比摩耗量の著しい増加を伴わない点が異なっている。接触荷重が大きくなると，油膜の摩耗が一層進み金属接触が増加して第 2 転移を生じ，焼付く危険性をもつ。境界潤滑膜の摩耗速度はすべり速度とともに減少するので，第 2 転移はすべり

速度の上昇によって高い摩擦面平均温度で生じる。第2転移をこえると油膜が局部的に容易に熱的破断し、その部分を核として焼付きに至る。マシン油#120の転移温度は $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ⁽¹³⁾とされており、この場合も摩擦面平均温度が油の転移温度に達するため焼付くものと考えられる。

6.3.2 摩耗形態の変化挙動に及ぼす面積比の影響

前項で得られた結果を、実機でみられる種々の接触状態に適用するため、面積比を $\alpha = 1.3$ からピン・ディスク方式に近い $\alpha = 9$ まで変化させて摩擦試験を行った。いずれの面積比の場合も、大試験片の円周長さと回転数の積で得られる摩擦距離が50mに達するごとに摩擦力を測定し、接触荷重を約10kgfずつ増加させる。結果は後述の理由から、接触荷重を摩擦面積で除したみかけの接触圧力で整理した。

図6.11はすべり速度 $v = 0.30\text{m/s}$ で得られる摩擦係数と接触圧力の関係である。接触圧力の増加にともなって、いずれの面積比でも、前項で述べたよ

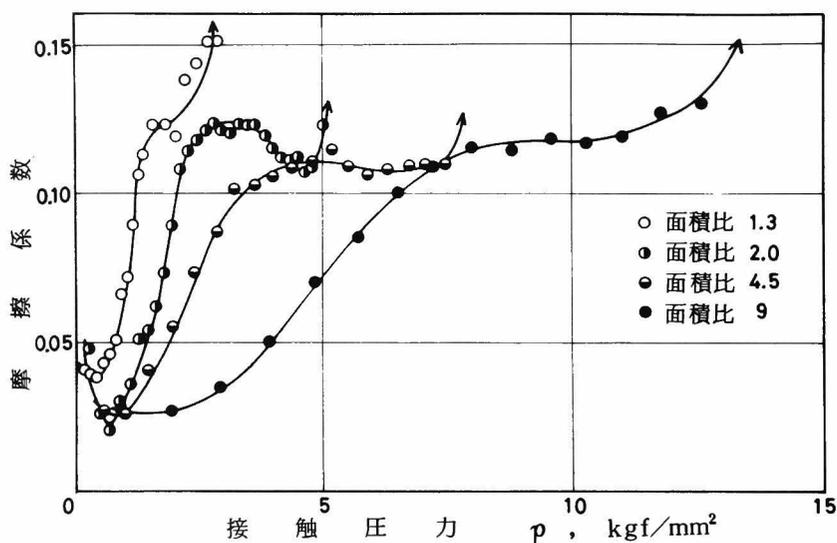


図 6.11 種々の面積比における摩擦係数と接触圧力の関係
($v = 0.30\text{m/s}$, マシン油中)

うに摩擦係数は小さくて減少する領域, 増加する領域および高い値で一定となる領域の3つに分けられる。

同じ面積比で行った数回の試験結果から, 第1と第2の転移圧力および焼付き圧力を求めると図 6.12 のようである。いずれの条件もばらつくが, その程度と面積比の関係を知るため焼付き値について詳しく調べた。種々の面積比の焼付き実験点の標準偏差を, 荷重と圧力の両者について求めた。結果を表 6.1 に示す。焼付き荷重の標準偏差は面積比が増加すると小さくなるが, 焼付き圧力では面積比によらずほぼ一定である。これは潤滑摩耗の転移現象が接触圧力に支配されるためで, 転移条件と面積比の関係は接触圧力で整理するとよいことが知られる。図 6.12 によれば第1と第2の転移圧力および焼付き圧力は面積比の増加にともない $\alpha = 2.0$ までは急増するが, それ以上ではほぼ直線的に大きくなる。その結果面積比が大きいほど, 各転移間の領域は広くなる。

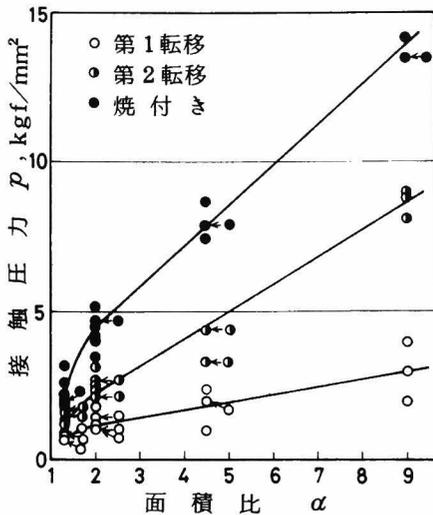


図 6.12 転移, 焼付き圧力と面積比の関係

($v = 0.30 \text{ m/s}$)

表 6.1 $v = 0.30 \text{ m/s}$ における焼付き値の標準偏差

面積比	荷重 kgf	圧力 kgf/mm ²
1.3	32.6	0.42
2.0	24.7	0.41
4.5	10.1	0.45
9	4.2	0.38

図 6.13 (a)(b) は種々の面積比における第 1 と第 2 の転移時および焼付く直前で摩擦面近傍の温度 T_s と摩擦面下 1 mm の温度 T_u である。面積比が異なっても、第 1 転移は $T_s \approx 40^\circ\text{C}$ 、 $T_u \approx 30^\circ\text{C}$ で、焼付きは $T_s \approx 150^\circ\text{C}$ 、 $T_u \approx 90^\circ\text{C}$ で生じる。これらの結果は前項で得られた結果と一致する。第 2 転移は面積比にともなって高い摩擦面温度であらわれる。したがって第 1 転移と焼付きはいずれの摩擦条件下でも、摩擦面平均温度が一定値に達すると生じるが、第 2 転移はすべり速度や面積比の影響をうける。

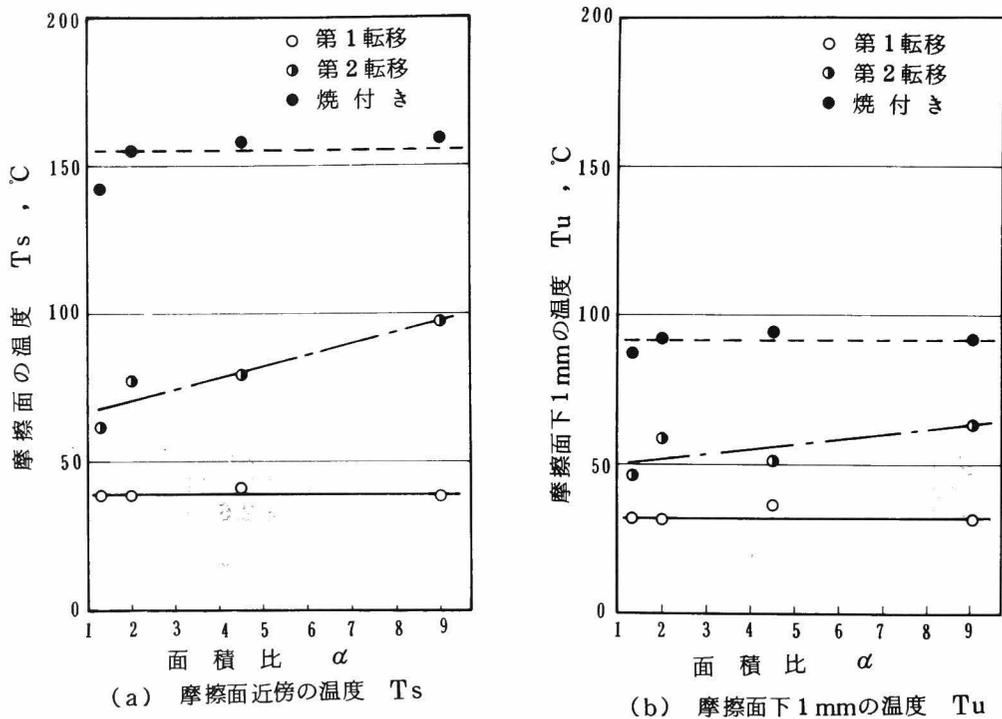


図 6.13 転移、焼付きでの試験片の温度と面積比の関係

種々の面積比における第 1 と第 2 の転移圧力とすべり速度の関係を図 6.14、図 6.15 に示す。面積比が大きくすべり速度が小さいとき、第 1 と第 2 の転移圧力は低下する。これはこの領域では油膜厚さが減少し、金属接触を生じやす

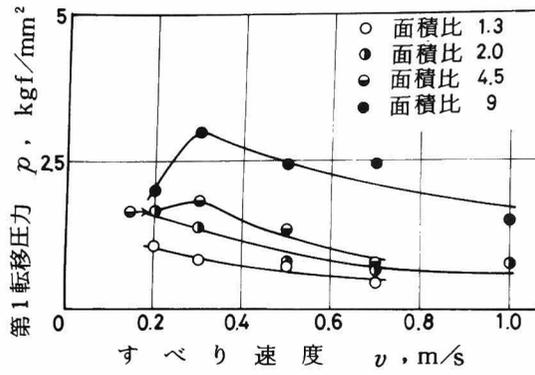


図 6.14 第 1 転移圧力とすべり速度の関係

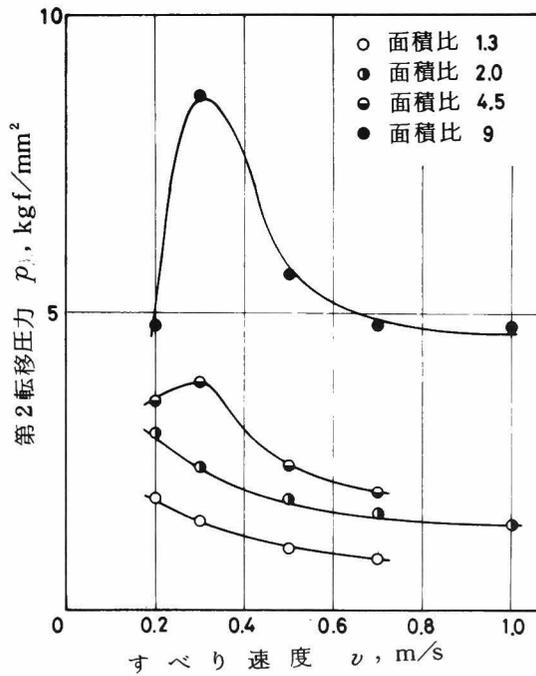


図 6.15 第 2 転移圧力とすべり速度の関係

くなるためと考えられるが、詳しくは調べていない。しかしこれを除くとすべり速度が高速になるほど転移圧力は低下する。図 6.16 に焼付き圧力とすべり速度の関係を示すが、これは転移圧力のような低速度域での低下はみられず、すべり速度とともに減少する。

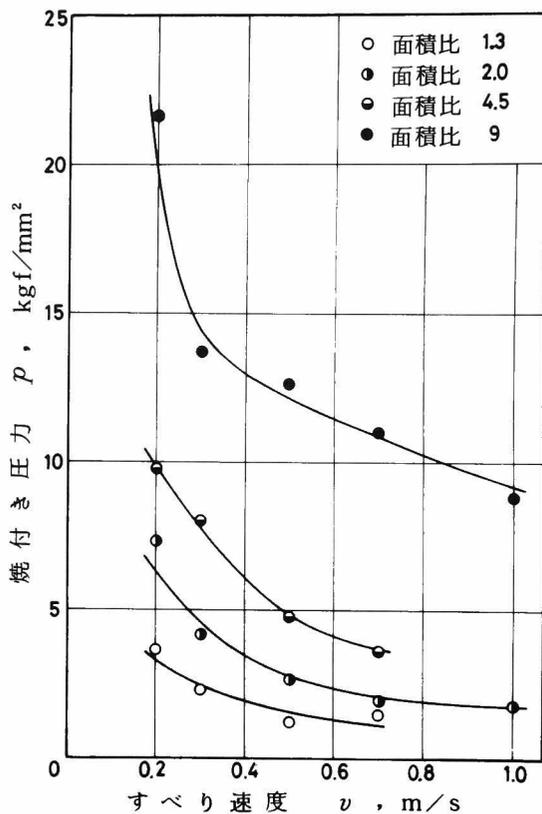


図 6.16 焼付き圧力とすべり速度の関係

Czichos⁽¹⁴⁾ は、潤滑膜の破壊は接触荷重，すべり速度，油温の因子を用いて、 $F_n^a \cdot v^b \cdot T^c = \text{一定}$ ($0 < a, b, c < 1$) の実験式であらわせると報告している。本研究の場合も低速度域を除いた第 1，第 2 の転移圧力とすべり速度の関係および焼付き圧力とすべり速度の関係は、いずれの面積比でもおおまかに $p \cdot v^n = C$ であらわせる。n の値は若干ばらつくが、面積比が増加すると定数

Cは大きくなる。これは面積比が大きくなると、転移や焼付きを生じるある一定の摩擦面平均温度に達するには、大きな p と v を要するためである。以上のように摩擦、摩耗形態の転移条件は面積比によって系統的に変化し、摩擦面の温度上昇と潤滑膜の摩耗に及ぼす面積比の影響から説明できる。

6.4 結 言

平面接触の潤滑摩耗で、なじみ後の定常状態でみられる摩耗形態の相違とその転移を生じる摩擦条件を調べ、それらの機構を考察した。得られた結論はつぎのようである。

(1) いずれの面積比の試験でも、接触荷重に対する摩擦係数の変化挙動には3つの領域がある。接触荷重の増加に対して、摩擦係数は小さくて若干低下する領域、次第に増加する領域および高い値で落ち着く領域である。

(2) 摩耗率と摩耗面性状の測定によれば、第1転移荷重以下では疲労摩耗を生じ、それ以上では凝着摩耗があらわれ、第2転移荷重をこえると飽和する。しかし疲労、凝着摩耗の比摩耗量の相違はたかだか1オーダーであり、その転移は乾燥摩耗のマイルドとシビヤ摩耗のように急激ではなくゆるやかである。

(3) 接触荷重を階段状に負荷する摩擦試験によれば、すべり速度や面積比によって転移条件と焼付き条件は系統的に変化する。第1転移と焼付きは摩擦面平均温度が一定値に達すると生じ、第2転移はすべり速度や面積比の影響を受け、温度以外の因子も作用する。

(4) これらの結果をIRG-OECDの報告と比較すると、平面接触の定常運転でみられる摩耗形態とその変化挙動は、点や線接触のなじみ運転のそれらとはかなり異なっており、実機の耐摩耗性を論じる場合この点に注意を要する。

第7章 潤滑摩耗の耐摩耗性と材料強度の関連

7.1 緒 言

一般に潤滑下で稼動する機械要素では、マイルドな摩耗でも長時間にわたるため、耐摩耗設計に際して摩耗形態の相違やその変化現象に注目するとともに、表面形状や摩耗率から摩耗寿命を検討する必要がある。そこで本章では、冷間加工や熱処理を施してかたさ、残留応力、結晶粒度などを変化させた鋼について、種々の潤滑状態下での耐摩耗性の優劣を検討し、これを材料強度との関連から考察して一評価基準を示した。

Khruschov⁽¹⁾は冷間加工によってかたさが増加しても、アブレシブ摩耗に対する摩耗抵抗は向上しないと報告している。しかしこの結果は力学的に非常に過酷な摩耗に対するものであり、潤滑下のマイルドな摩耗には適用できないであろう。乾燥摩耗では残留応力の正負にかかわらず摩耗率は増大するが、潤滑摩耗では引張残留応力は摩耗率を増大し、圧縮残留応力は摩耗率を減少して、平均応力をともなう疲労強度の挙動とよい対応を示している⁽²⁾。したがって冷間加工による圧縮残留応力やかたさの増加は潤滑摩耗に対しては有効に作用して、冷間加工を施した材料の耐摩耗性を向上させることが考えられる。

熱処理による組織変化や結晶粒子の大きさが摩耗に及ぼす影響は、アブレシブ摩耗や凝着摩耗ではかなり明らかにされている。Eilender⁽³⁾によれば、純鉄では結晶粒子の大きいほうが耐摩耗性は高いが、試験条件は過酷で凝着による摩耗である。またすべり速度の大きい乾燥摩耗では、結晶粒子の大きい低炭素鋼のほうが耐摩耗性は高く、低速度下では逆に結晶粒子の小さいほうが高いが、これは両試料の高温と常温におけるかたさの大小関係と一致している⁽⁴⁾。しかし潤滑摩耗に関する報告はほとんどみられない。一般に機械材料の強度は結晶粒子の細かいほうが強く、良好潤滑下の耐摩耗性も高いことが考えられる。

耐摩耗性をかたさ、引張強さなどの静的な強度から評価した研究は多い。し

かし潤滑下では摩耗面は繰返し接触をうけるので，耐摩耗性の優劣は動的な材料強度と関連をもつと考えられるが，このような研究結果はまだ報告されていない。

このような観点から本章では，冷間加工を施した軟鋼と熱処理によって結晶粒度を変化させた軟鋼について潤滑と無潤滑あるいは不良潤滑状態で摩耗試験を行った。摩耗面の形状やかたさ，残留応力および摩耗粉径を測定して，冷間加工や結晶粒度が摩耗に及ぼす影響を明らかにするとともに，疲労試験を合わせて行い，良好潤滑下の耐摩耗性と材料強度の関係を考察した。

7.2 試験方法

冷間加工材を用いた試験は，図 7.1 に示すように固定した平板試験片に円筒形工具を所定の接触荷重で押しつけて，すべり摩擦する方式である。結晶粒度の影響を調べる試験は，同じ熱処理を施した二個の円筒形試験片どうしを摩擦する同面積接触方式である。摩擦係数は両試験方式とも，油槽外部に取付けた

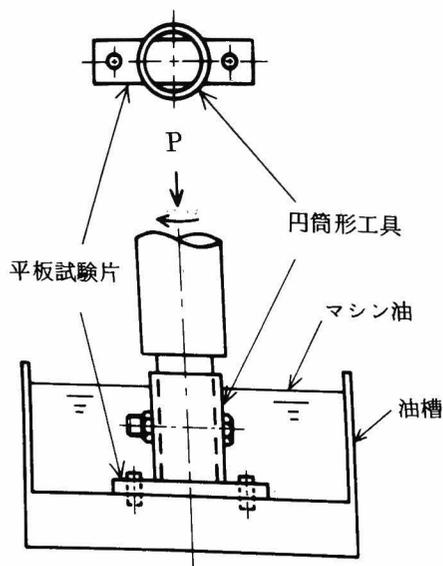


図 7.1 試験装置

板バネの曲げモーメントを測定することにより求めた。

重量減少量は精密天びん（感度 0.01 mg）で秤量した。また定常摩耗域で発生した摩耗粉を試験油中から遠心分離機によって採取し、その一方向径を測微顕微鏡により測定した。摩耗面の中心線平均あらさ Ra, あらさピッチ Rp および突起の曲率半径 ρ は、第 4 章で述べた方法によって、触針式表面あらさ計を用いて断面曲線を得ると同時に、その出力電圧を A-D 変換してデジタル計算機によって計算した。測定に用いた標本化幅は 1.0 μm , 量子化幅は 0.0186 μm である。残留応力は第 5 章と同じ計数管式 X 線残留応力測定装置を用いて、表 5.1 と同じ測定条件で測定した。

7.3 冷間加工材の耐摩耗性

7.3.1 試験片

供試材は 0.15% C 炭素鋼で、化学成分を表 7.1 に示す。素材の丸棒を後に行われる冷間加工の圧縮加工率をみこんだ厚さに準備して、850 $^{\circ}\text{C}$, 5 時間保持で焼なました。その後 600 トンプレスを用いて、良好な潤滑条件下で厚さ 4 mm に 20, 40, 60% の加工率で冷間圧縮加工を行った。また比較のため焼

表 7.1 冷間加工素材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.25	0.47	0.015	0.013

なましたままの素材を焼鈍材として使い、加工率 0% で示した。摩耗試験片の幅は 12 mm で、冷間加工された素材の中央部から素材の長手方向と試験片のそれが一致するように切り出す。試験面は #1000 研磨紙でみがいたのち電解研磨で表面層を 20 μm 程度除去した。相手の円筒形工具は外径 20 mm, 内径 16 mm で、通常は冷間加工の素材と同じ、0.15% C 炭素鋼を用いたが、0.35% C, 0.55% C 炭素鋼でも試験を行った。なお工具端面の摩擦面はバフ研磨

で仕上げてある。このような円筒形工具を平板試験片に組合せると，面積比はほぼ $d \approx 2$ となる。

図 7.2 は焼鈍および冷間加工された試験片の表面および断面の組織写真の一例である。これらの結晶粒子の大きさと加工率の関係を求めると図 7.3 のようである。結晶粒子は加工率が増加すると偏平になる。これより結晶粒子の体積を計算すると加工率によらずほぼ一定で，冷間加工によっても結晶粒子はほとんど細分化されていないことになる。摩耗試験片の長手方向と一致させて行った冷間加工を施した素材の引張試験結果を表 7.2 に示す。またビッカースかたさ（測定荷重 25 gf，20 箇所平均）および試験片の長手方向に測定した残留応力の平均値も合せて示す。加工によって硬化と脆化がみられる。

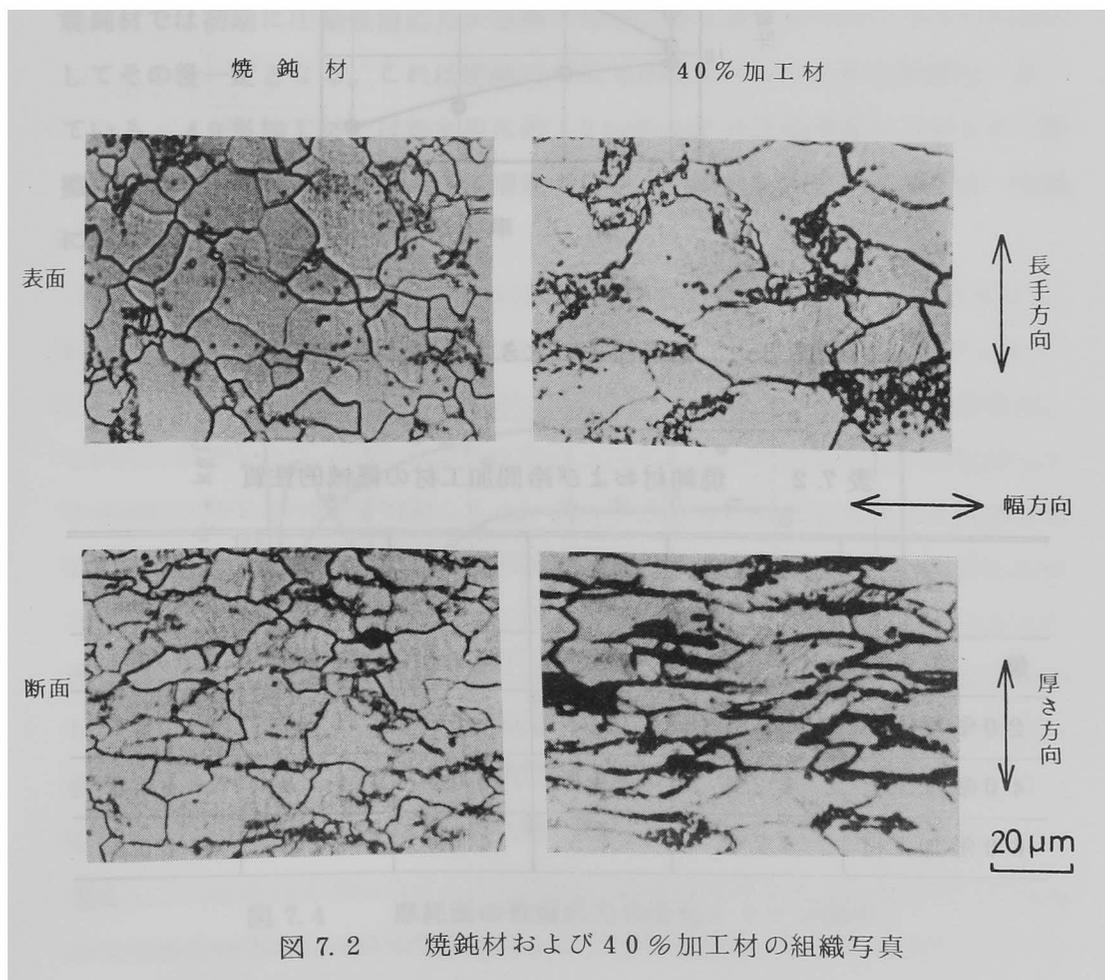


図 7.2 焼鈍材および 40%加工材の組織写真

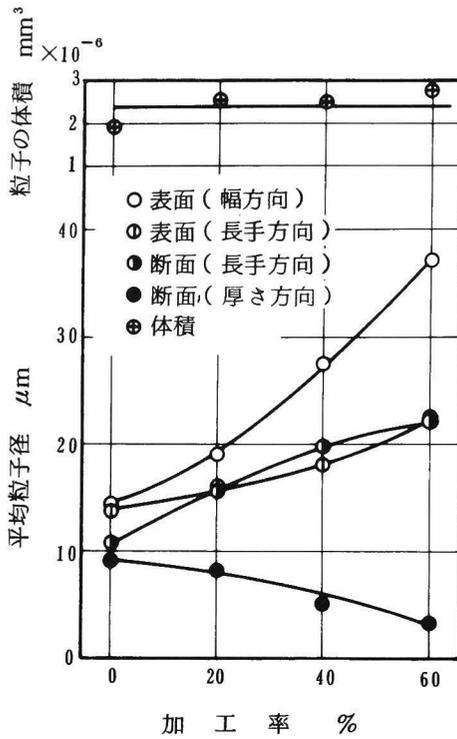


図 7.3 結晶粒子の大きさと加工率の関係

表 7.2 焼鈍材および冷間加工材の機械的性質

	引張強さ kgf/mm ²	伸び %	絞り %	かたさ Hv	残留応力 kgf/mm ²
焼 鈍 材	3 9.6	4 3.7	6 7.6	1 3 6	0
2 0 % 加工材	5 8.5	1 2.1	5 5.6	1 9 4	- 9.4
4 0 % 加工材	7 2.5	9.9	5 0.0	2 1 3	- 1 0.0
6 0 % 加工材	7 7.3	7.5	4 1.0	2 2 3	- 1 3.5

7.3.2 実験結果および考察

潤滑摩耗試験は無添加マシン油（33℃一定で粘度は55 cSt）中にて、相手工具に0.15% C炭素鋼を用いて、すべり速度 $v = 0.56 \text{ m/s}$ 一定で行った。焼鈍材および加工材とも摩擦係数は摩擦開始からほぼ0.05を示し、試験期間中大きな変動はみられない。焼鈍材では、すでに報告されているように、初期摩耗から定常摩耗に移行する区間で変曲点を示す⁽⁵⁾。一方加工材では変曲点はみられず、摩耗率は摩擦開始後の高い値から単調に減少して一定の定常摩耗率を示すようになる。

摩擦距離にともなう摩耗面の残留応力と微小かたさの変化を、焼鈍材と40%加工材について測定した。図7.4は摩擦に直角方向の残留応力の変化である。焼鈍材では初期に圧縮残留応力が急激に増加し最大値を示すが、いったん減少してその後一定となる。これは焼鈍材の疲労試験でみられる変化挙動と一致している。40%加工材では処女面に約10 kgf/mm²の圧縮残留応力をもち、摩擦によって圧縮残留応力はさらに増加するが、減衰の傾向を示さずある一定値に落ち着く。

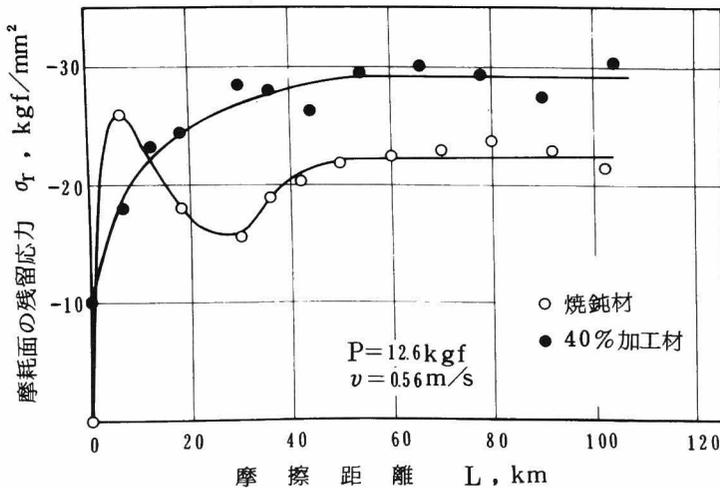


図 7.4 摩耗面の残留応力の変化（マシン油中）

図 7.5 は摩耗面のかたさの変化で、各点は測定荷重 25 gf で摩耗面の 5 箇所
で測定したビッカースかたさの平均値である。焼鈍材では急激に上昇して一定
となるが、40%加工材では初期にやや大きな値を示したのち一定となる。

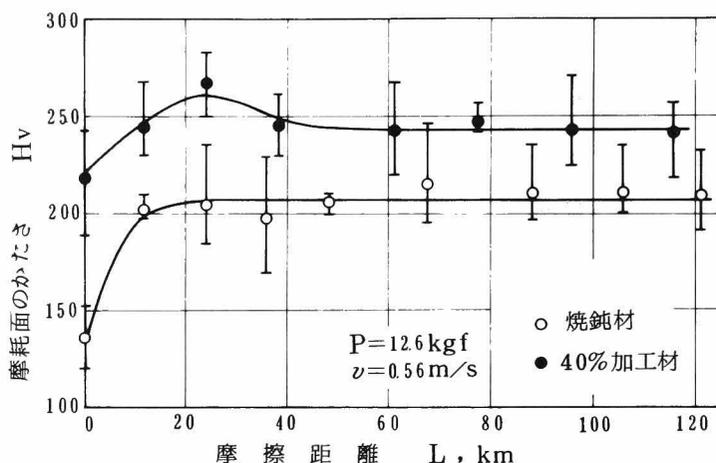


図 7.5 摩耗面のかたさの変化 (マシン油中)

定常摩耗域における摩耗面の残留応力、かたさと加工率の関係を図 7.6 に示
す。残留応力は定常域での数回の測定結果の平均値で、かたさは摩耗試験終了
後の摩耗面で測定した 20 箇所の平均値である。図中破線は処女面での結果で
ある。繰返し摩擦による圧縮残留応力の増加は、加工率が増加するとやや少な
くなるが、ほぼ一定に近い。これは冷間加工によって生じた残留応力と繰返し
摩擦による残留応力とは性質が異なるためと考えられる。繰返し摩擦による硬
化は、加工率の大きい場合すなわち材料が硬いとき小さくなっており、硬化は
飽和することになる。図には定常摩耗率も合わせて示した。材料に冷間加工を施
すと、定常摩耗域の摩耗抵抗は非常に向上するが、向上の程度はある加工率で
飽和し、加工率 60% ではむしろ減少している。これは処女面のかたさ、引張
強さからは説明できない現象で、過加工による被害が材料強度の動的性質にあ

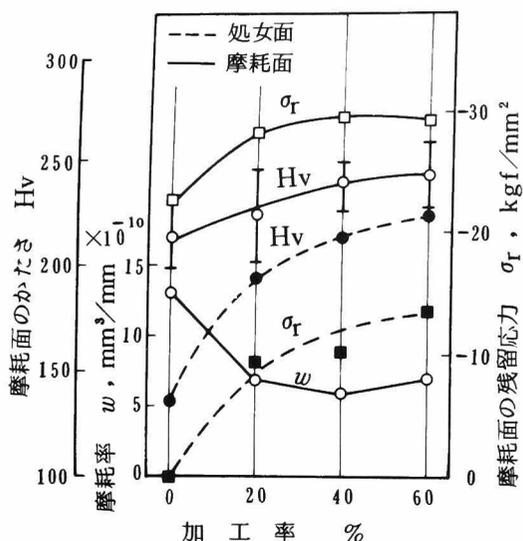


図 7.6 摩耗率および摩耗面のかたさ，残留応力と加工率の関係
($P=12.6 \text{ kgf}$, $v=0.56 \text{ m/s}$, マシン油中)

らわれたためと考えられる。

そこで耐摩耗性と材料強度との関係を，摩耗試験片と同様な方法で冷間圧縮加工した 0.15% C 炭素鋼の疲労試験片を用いて，両振り平面曲げ疲労試験を行い検討した。疲労試験片の形状寸法は図 7.7 に示すが，中央部に直径 1.5 mm の円孔切欠きをもつ。試験は大気中でシェンク型曲げ疲労試験機を用いて行い，その繰返し速度は 3300 cpm である。S-N 曲線を図 7.8 に示す。これより得られる疲労限度および種々の接触荷重の摩耗試験から得られる定常摩耗率と加工率の関係を示すと図 7.9 のようである。疲労限度は加工率にともなって増大するが，60% 加工材では逆に若干低下しており，摩耗抵抗と加工率の関係はこれとよい対応を示している。これは切欠き試験片の疲労強度はき裂進展の抵抗を示すものであって，定常域の摩耗率の逆数すなわち摩耗抵抗が，疲労き裂進展の大きさに支配されるためと考えられる。

図 7.10 は相手円筒形工具を 0.15% C 炭素鋼のほか，かたさの異なる炭素鋼にかえて冷間加工材を摩擦したときの定常摩耗率と加工率の関係である。

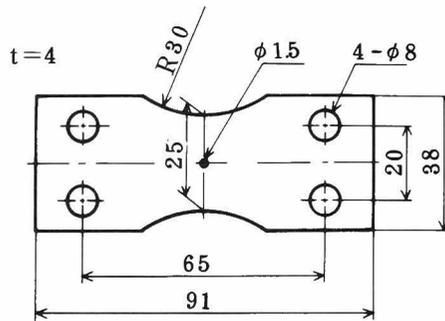


図 7.7 切欠き疲労試験片

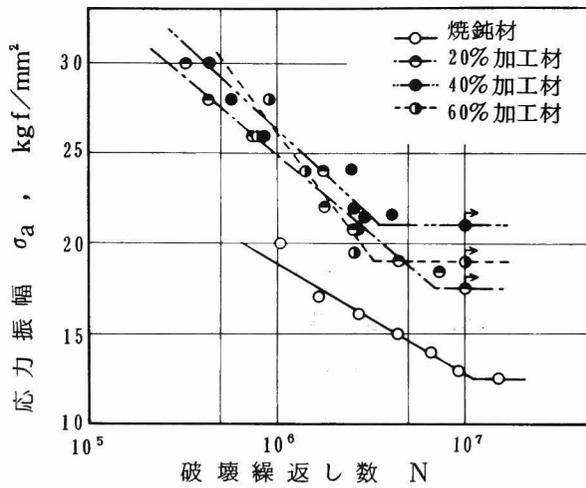


図 7.8 冷間加工を施した切欠き試験片の S-N 曲線
(3300 cpm, 室温大気中)

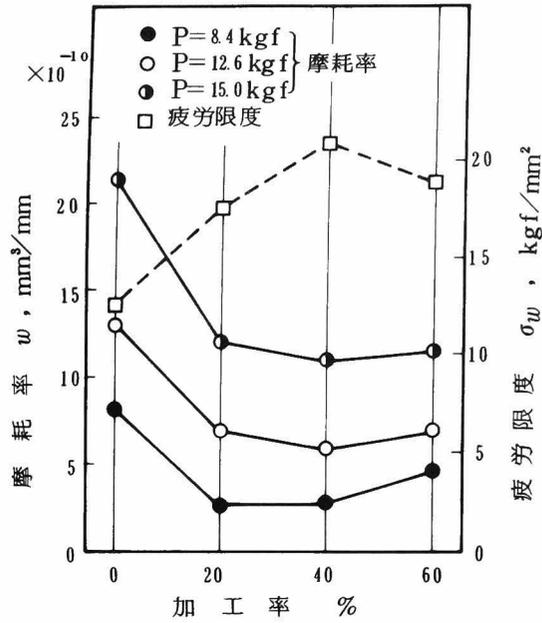


図 7.9 摩耗率および疲労限度と加工率の関係

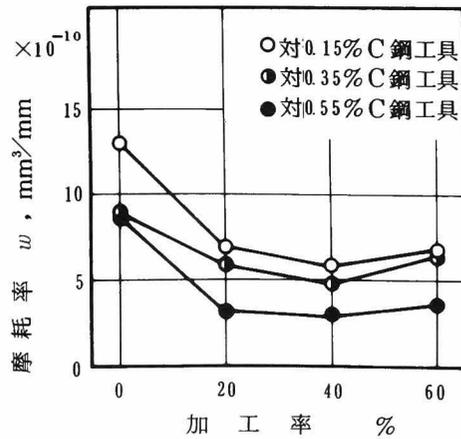


図 7.10 種々の工具で摩擦したときの摩耗率と加工率の関係
($P=12.6 \text{ kgf}$, $v=0.56 \text{ m/s}$)

工具のかたさは0.15% C炭素鋼で $H_v=158$ ，0.35% C炭素鋼で $H_v=170$ および0.55% C炭素鋼で $H_v=210$ である。相手円筒形工具が硬くなるほど、摩耗率は若干低下するが、摩耗率と加工率の関係は図7.9と同じ傾向を示している。これらのことより、冷間加工による摩耗抵抗の向上は圧縮残留応力やかたさの増大による疲労強度の上昇のためと考えられ、良好潤滑下の定常摩耗が摩耗表面層の疲労破壊によって進行することが知られる。

0.15% C炭素鋼の円筒形工具を用いて接触荷重 $P=12.6 \text{ kgf}$ で行った摩耗試験において、定常域で測定した摩耗面のあらさピッチ R_p および摩耗粉径300個の平均値を表7.3に示す。あらさピッチと摩耗粉径の両者ともその大きさは冷間加工した供試材の結晶粒子より著しく小さく、このような潤滑摩耗は結晶粒子が一個ずつ脱落する機構によるものではないことがわかる。加工率が増加すると、あらさピッチおよび摩耗粉径とも小さくなる。これは冷間加工によって摩耗表面の強度が向上するためである。また摩耗表面の微小き裂の進展は冷間加工による圧縮残留応力によって阻止されるため、摩耗粉の数も減少すると考えられる。すなわち冷間加工による摩耗率の低下は、摩耗粉の大きさと数の減少によるもので、いずれも材料強度の向上によることが知られる。

表7.3 定常域での摩耗面のあらさピッチと摩耗粉径
($P=12.6 \text{ kgf}$, $v=0.56 \text{ m/s}$)

	あらさピッチ μm	摩耗粉径 μm
焼 鈍 材	6.5	3.4
20% 加工材	6.1	2.8
40% 加工材	6.1	2.7
60% 加工材	5.9	2.7

このような良好潤滑下における耐摩耗性の優劣は、潤滑条件や摩耗機構が異なるときのそれとは一致しないことが多い。そこで乾燥摩耗試験を潤滑摩耗と同様な方法で室温約30℃、相対湿度50～70%の大気中で行った。相手円筒形工具に0.15% C炭素鋼を用いて、接触荷重は $P=1.8\text{ kgf}$ 、摩擦速度は $v=0.56\text{ m/s}$ で一定とした。焼鈍材および加工材とも摩耗曲線は、摩擦開始後からはほぼ直線的に進行しており、終始マイルド摩耗である。摩耗率および摩耗面のかたさ（測定荷重50 gf、20箇所での平均値）と加工率の関係を図7.11に示す。摩耗面のかたさは潤滑摩耗で得られた最大値よりも大きく、加工硬化は一段と進んでいるが、加工率による違いはみられない。このような摩擦条件下の乾燥摩耗でも、摩耗面は十分に加工硬化される。摩耗率も潤滑下のそれに比べると著しく大きく、冷間加工の影響をうけない。したがって冷間加工材の摩耗試験からも、乾燥下での凝着摩耗と潤滑下の疲労摩耗では耐摩耗性の優劣が著しく異なることが知られる。

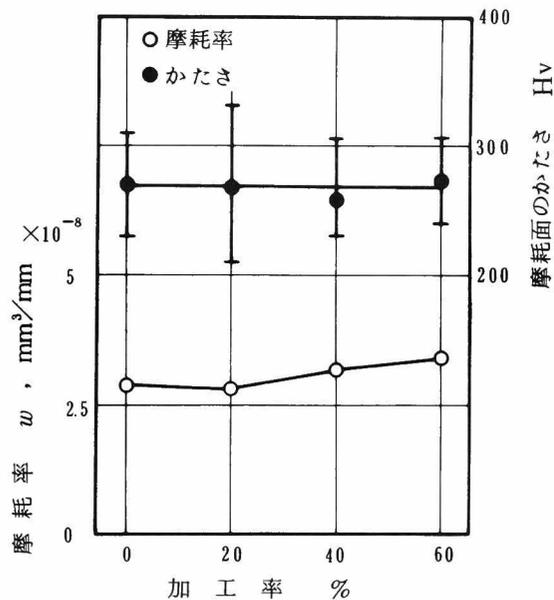


図 7.11 乾燥摩耗における摩耗率および摩耗面のかたさと加工率の関係
($P=1.8\text{ kgf}$, $v=0.56\text{ m/s}$, 室温大気中)

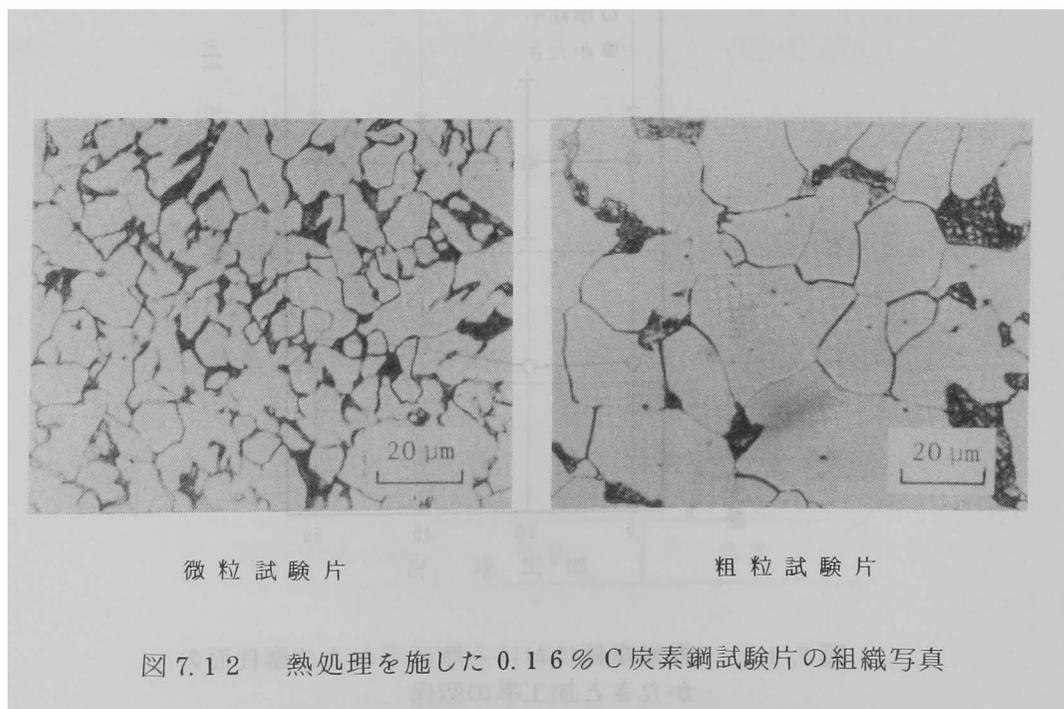
7.4 結晶粒度の異なる鋼の耐摩耗性

7.4.1 試験片

供試材は 0.16% C 炭素鋼で、化学成分を表 7.4 に示す。試験片は 930℃で 3 時間保持後炉冷して結晶粒子を粗くしたものと、880℃から油焼入れして結晶粒子を細かくしたものである。試験片の組織写真を図 7.12 に示す。またそれぞれの試料のパーライトとフェライトの平均粒子径を表 7.5 に示す。表にはハネマン微小硬度計で測定（荷重 5 gf）したパーライト，フェライトのかたさおよびピッカース微小硬度計で測定（荷重 300 gf）した平均かたさも合せて示したが、いずれも微粒のほうが硬い。このような試料の外径 20mm，内径 16

表 7.4 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.16	0.27	0.49	0.026	0.025



mmの円筒形試験片どうしを組合せて(面積比は $\alpha = 1.0$)摩耗試験を行った。試験片は端面を#2000酸化アルミナでラップ仕上して、650℃1時間の真空焼なましを施されている。

表 7.5 試験片の処女面の性質

熱 処 理	微 粒 試 験 片		粗 粒 試 験 片	
		機械加工→880℃油焼 入れ→650℃1時間真 空焼なまし		930℃3時間焼なまし →機械加工→650℃1時 間真空焼なまし
	パーライト	フェライト	パーライト	フェライト
粒 子 径 μm	2.1	9.9	5.5	16.5
かたさ (Hv 5 gf)	164	125	131	97
かたさ (Hv 300 gf)	134		116	

7.4.2 実験結果および考察

摩耗試験は、油温約10℃の無添加パラフィン油(粘度約400 cSt)および無添加マシン油(粘度約320 cSt)中で、接触荷重 $P = 10 \text{ kgf}$ 、すべり速度 $v = 0.28 \text{ m/s}$ 一定で行った。定常摩耗域における試験結果および摩耗面の性質を表7.6に示す。

パラフィン油中では、マシン油中に比べて摩擦係数や摩耗率は大きく、摩耗面は硬化している。また結晶粒子の粗いほうが細かいものより加工硬化は著しいが、マシン油中では逆の結果を示している。図7.13は定常摩耗面の走査電子顕微鏡写真である。パラフィン油中の摩耗面(図a)は乾燥状態下の摩耗面とよく似た様相を呈しており、第6章の観察結果と比較しても凝着摩耗面に分類される。すなわち潤滑能力の低いパラフィン油中の不良潤滑状態では、摩耗は凝着摩耗の傾向を示す。

表 7.6 結晶粒度の異なる 0.16% C 炭素鋼試験片の摩耗試験結果
 $P=10 \text{ kgf}$, $v=0.28 \text{ m/s}$

	微粒試験片		粗粒試験片	
	パラフィン油	マシン油	パラフィン油	マシン油
摩耗率 $\times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{mm}$	10.7	2.9	6.2	3.5
摩擦係数	0.061	0.028	0.053	0.024
摩耗面のかたさ (Hv300gf)	151	141	166	131
平均あらさ Ra μm	0.4	0.1	0.2	0.06
あらさピッチ Rp μm	7.0	5.9	6.8	6.9
突起の曲率半径 ρ μm	32	24	26	34
摩耗粉径 μm	—	3.7	—	4.5

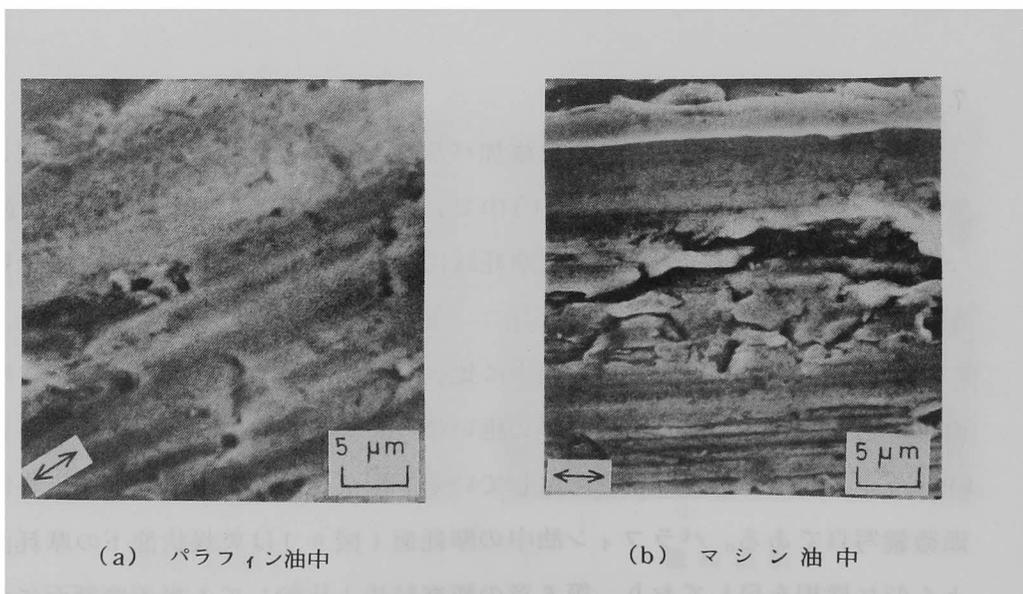


図 7.13 微粒試験片の定常摩耗面
 $(P=10 \text{ kgf}, v=0.28 \text{ m/s})$

凝着摩耗では、結晶粒界は材料の変形を妨げる。そのため粗粒のほうが摩耗面の硬化が著しいことから知られるように、局所的な塑性変形による真実接触面積は大きくなり、接触点での真の接触圧力は小さくなる。その結果摩耗率は粗粒のほうが低下するものと考えられる。

一方マシン油中では、加工硬化の程度はパラフィン油中より少ないが、微粒の摩耗面かたさは粗粒よりも大きくなる。また摩耗率は微粒のほうが小さく、パラフィン油中とは逆である。定常域の摩耗面形状特性値をみると、あらさピッチ R_p と突起の曲率半径 ρ は微粒のほうが小さくなり、摩耗粉径も同様な関係を示す。 ρ が小さいことは、弾性接触における接触応力は大きい、その応力の及ぶ範囲は小さいことを、また R_p が小さいことは弾性接触の回数が多いことを示す。したがって微粒試験片では摩耗粉の発生数は多いが、その大きさは小さく、摩耗率は低下するものと考えられる。しかし摩耗粉径はフェライト粒子の大きさに比べてかなり小さく、このような表面形状の生成の原因はよくわからない。図 7.13(b) はマシン油中の摩耗面である。表面上に微細なき裂がみられ、これより推測される摩耗粉の大きさは表 7.6 の測定値と近似している。このように微粒の耐摩耗性が向上した現象は、材料の疲労強度が結晶粒子の細分化により向上したこととよく対応している。したがって良好潤滑下の耐摩耗性は材料の疲労強度の優劣から評価できる。

7.5 結 言

冷間加工を施した軟鋼および結晶粒度の異なる軟鋼の摩耗試験を潤滑下、無潤滑下および不良潤滑下で行い、つぎのことが明らかとなった。

(1) 乾燥下の凝着摩耗では冷間加工の影響はみられないが、潤滑状態でのマイルドな摩耗では冷間加工によって摩耗抵抗は向上し、加工による疲労強度の上昇と対応する。

(2) 不良潤滑下では、結晶粒子の粗いほうが摩耗率は減少し、乾燥摩耗の挙動と一致しており、凝着摩耗の傾向がみられる。良好潤滑下では結晶粒子の細かいほうが摩耗率は小さく、動的な材料強度の向上との関連がみられる。

(3) これらの結果は、良好な潤滑状態における摩耗が、表面の凹凸の疲労によることを示しており、耐摩耗性の評価基準として材料の疲労強度が目安となることが知られた。しかし乾燥下、不良潤滑下のように摩耗機構が異なると、材料強度の摩耗抵抗への影響が変化するので、摩耗形態に注意して耐摩耗性を判断する必要がある。

結 論

種々の試験方式や摩擦条件下で行われた鋼の摩耗試験結果には，一致しない点が多く，機械設計に適用できる体系的な耐摩耗性評価は困難とされてきた。本研究は，摩耗試験結果に一般性をもたせ実用的な耐摩耗性を得るという観点に立って，無潤滑下と潤滑下の摩耗進展挙動を検討し，耐摩耗性の評価法を明らかにしようとしたものである。鋼の耐摩耗性は，摩耗形態およびその変化挙動に注目して評価すべきであり，またこれらの現象に及ぼす面積比，試験方式，潤滑条件の影響が重要であることを確認した。さらに潤滑摩耗では，摩耗特性を知る上で重要な摩耗面形状の観察手段を開発し，摩耗抵抗と材料強度の関係も合わせて考察して，耐摩耗性の評価法を確立した。

第1章では，実機に近い接触状況下の乾燥摩耗特性を調べ，耐摩耗性評価にとって摩耗形態の遷移現象がもっとも重要であることを明らかにした。接触荷重によって，摩耗曲線には終始マイルド摩耗の場合，初期にシビヤ摩耗でその後マイルド摩耗に遷移する場合，終始シビヤ摩耗の3種類の挙動がみられ，摩耗量に大きな差があらわれる。シビヤマイルドの遷移現象はある接触荷重の範囲でみられ，これはシビヤ摩耗面に硬化した平坦な面を生じて酸化膜が形成されるかどうかで決まる。これらの結果から，一定摩擦時間後の総摩耗量で評価されてきた従来の耐摩耗性は，再検討すべきことが明らかとなった。

第2章では，接触状態の異なる摩耗試験結果の差異は，主に遷移現象が二面の摩擦面積の比に支配されるためと考えると，新たに面積比（大試験片の摩擦面積と小試験片のそれとの比）の概念を取上げ，摩耗に及ぼす影響を調べた。面積比が大きくなると，初期のシビヤ摩耗からマイルド摩耗に遷移しない臨界荷重は減少し，臨界圧力は増加する。これは面積比による摩擦面温度上昇の相違から説明された。さらに種々の面積比で得られた摩耗量を，比摩耗量，体積摩耗率，摩耗深さの変化率で比較して，面積比によって系統的に変化することを明

らかにした。

第3章では、試験方式が遷移現象と摩耗量に及ぼす影響を調べ、第1章と第2章で得られた結果も合せて乾燥摩耗における耐摩耗性評価を明らかにした。すべり方式の臨界荷重 P_{cr} は試験方式によって変化するが、面積比で整理できる。すなわち面積比が大きくなるほど P_{cr} は減少し一定値に落ち着く。ころがりすべり方式の P_{cr} はあるすべり率から一定となり、この値は大きな面積比のすべり摩耗の P_{cr} と一致する。すべり速度 v と臨界条件にはほぼ $P_{cr} \cdot v = C$ の関係があり、試験方式にかかわらず面積比が増加すると定数 C は減少する。ころがりすべり方式は面積比の大きい場合に相当するので定数 C は小さくなる。これらは各種方式で得られた遷移条件を比較する際の一基準となる。またシビヤ摩耗率は、大試験片では試験方式によって異なり、小試験片ではほぼ一定であるが、両試験片の比は面積比で系統的に整理できる。これより各種方式で得られる試験結果から統一的な耐摩耗性評価が可能であり、耐摩耗設計に適用できる実用的な摩耗データの収集に際しての基本的知見が得られた。また従来困難とされてきた摩耗試験法の標準化に貢献するものである。

潤滑下の摩耗特性は、乾燥摩耗と一致しないことが多く別に論じ、両者の相違についても考察した。第4章では、潤滑摩耗面形状の観察手段と観察結果を示した。断面曲線を数値化して計算機処理する場合、表面あらし計の出力電圧の A-D 変換には最適な標本化幅と量子化幅がある。摩耗面の3次元高さ分布を測定し等高線地図を描くと、走査電子顕微鏡写真とはほぼ一致した図が得られる。これにより摩耗進展の様子と摩擦方向のあらしの性質が一層明らかとなった。ここで確立された手法は、摩耗機構の解明のみでなく、さらに摩耗寿命の定量化を可能にするものである。

第5章では、良好潤滑下の進展挙動に及ぼす面積比の影響を、第4章で述べた手法により摩耗面形状を測定して考察した。初期摩耗から定常摩耗への遷移はいずれの面積比でもあらわれるが、乾燥摩耗のシビヤマイルドの遷移に比べるとゆるやかである。面積比が大きいほど初期摩耗ははやく終了し摩耗量も小さい。したがって一般に用いられているピン・ディスク方式では定常摩耗にはや

く移行することが知られる。定常摩耗率は面積比にもなって減少するが、ある大きな面積比から再び増大する。これらの挙動は第2章で述べた乾燥摩耗と著しく異なる。しかし乾燥下、潤滑下にかかわらず、耐摩耗性の評価や摩耗データを実機に適用する場合、面積比効果を十分に考慮すべきことからはじめて明らかにされた。

第6章では、潤滑下で十分になじんだ平面どうしを摩擦して、種々の摩擦条件でみられる摩耗形態とその変化挙動を検討した。接触荷重の増加にともない3つの領域を生じる。第1転移荷重以下では疲労摩耗を生じ、それ以上では凝着摩耗があらわれ、第2転移荷重以上で飽和する。しかし疲労と凝着の摩耗量の差は小さく、その転移はゆるやかである。第1転移と焼付きは摩擦面平均温度が一定値に達すると生じ、第2転移は温度以外の因子の影響も受ける。これらの結果は処女面摩擦で得られたIRG-OECDの結果と著しく異なることが知られた。さらに転移条件に及ぼす面積比の影響を調べ、摩擦面の温度上昇への効果から説明を加えて、摩耗形態の変化挙動の知見を一層実用的なものにした。

第7章では、冷間加工を施した軟鋼および結晶粒度の異なる軟鋼について、種々の潤滑状態での摩耗抵抗を明らかにし、材料強度との関連から考察した。冷間加工によって潤滑摩耗抵抗は向上し、加工による疲労強度の上昇と対応する。また結晶粒子の細かいほうが粗いものより摩耗率は小さく、疲労強度の向上と関連がみられる。これより動的な材料強度が、潤滑下の耐摩耗性の評価基準となることが知られた。しかし乾燥下や不良潤滑下での挙動はこれとは著しく異なり、耐摩耗性は摩耗形態に注意して評価すべきことが確かめられた。

以上の研究により、実用的な摩耗試験結果を得て耐摩耗性評価を体系化する場合、著しく問題となる摩耗形態の変化現象およびそれらに及ぼす面積比と試験方式の影響、摩耗面形状の観察法、耐摩耗性の評価基準を明らかにすることができた。すなわち乾燥摩耗では、シビヤーマイルドの遷移現象の存在に注目して耐摩耗性を評価すべきであり、各種の試験機で得られる遷移条件や比摩耗量は、面積比で整理すれば統一的な評価が可能であることが知られた。また潤滑摩耗特性は乾燥摩耗とは異なるものであるが、耐摩耗性の評価に際しては、

やはり摩耗形態とその変化挙動が重要となる。ここで明らかにされた鋼の耐摩耗性評価に関する知見は，各種機械要素，構造物の耐摩耗設計に適用しうる実用的な摩耗データの集積とその解析に貢献するものである。

謝

辞

本研究を行うに際して，終始懇切なる御指導を賜りました，京都大学教授・遠藤吉郎先生に深甚の謝意を表します。また多大の御援助，御助言をいただきました，福井大学教授・岡田庸敬先生ならびに京都大学工学部機械材料研究室の各位に対して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

第 1 章

- (1) E. Rabinowicz: Proc. Phys. Soc., B-66 (1953) 929
- (2) N. C. Welsh: J. Appl. Phys., 28 (1957) 960
- (3) J. F. Archard: Wear, 2 (1958/59) 438
- (4) W. Hirst & J. K. Lancaster: J. Appl. Phys., 27 (1956) 1057
- (5) R. M. Farrell & T. S. Eyre: Wear, 15 (1970) 359
- (6) 佐田登志夫 : 日本機械学会論文集, 24, 143 (1958) 407
- (7) 笹田直・大村平人 : 潤滑, 15, 11 (1970) 758
- (8) 小坂誠一郎 : 摩耗変質層の研究, 万理閣(1946)
- (9) T. S. Eyre & D. Maynard: Wear, 18 (1971) 301
- (10) F. Wilson & T. S. Eyre: Wear, 14 (1969) 107
- (11) K. Endo, K. Komai & H. Shiomi: Wear, 30 (1974) 285
- (12) たとえば齊藤省三・山本信公 : 摩耗試験, 常磐書房(1943)

第 2 章

- (1) A. Begelinger & A. W. J. de Gee: Lubrication Engineering. Feb. (1970) 56
- (2) A. W. J. de Gee: Proc. Instn. Mech. Engrs. 1965-66, 180 Pt 3K (1966) 15
- (3) 日本潤滑学会第 13 期摩耗部会 : 潤滑, 14, 12 (1969) 671
- (4) 日本潤滑学会第 15 期摩耗部会 : 潤滑, 17, 22 (1972) 113
- (5) 大越諄・佐田登志夫・水野万亀雄 : 試験研究委託事業費による研究報告書, 科学研究所(1955) 53
- (6) E. Finkin: Wear, 8 (1963) 293
- (7) 築添正 : 潤滑, 13, 3 (1968) 101
- (8) I. V. Kragelskii: Friction and Wear, Butterworths (1965)

- (9) J. C. Jaeger: Proc. Roy. Soc. NSW, 76 (1942) 203

第3章

- (1) T. S. Eyre: Tribology, 9, 5 (1976) 203
(2) 水野万亀雄 : 精密機械, 27, 7 (1961) 462
(3) 水野万亀雄 : 精密機械, 29, 7 (1963) 492
(4) 佐田登志夫 : 日本機械学会論文集, 24, 143 (1958) 407
(5) 笹田直 : 機械の研究, 24, 6 (1972) 843
(6) たとえば日本潤滑学会第20期摩耗部会 : 摩耗試験データ
収集報告, (1976)
(7) 曾田範宗 : 軸受, 岩波全書(1964) 100

第4章

- (1) J. A. Greenwood & J. B. P. Williamson: Proc. Roy. Soc.,
A-243 (1957) 190
(2) K. L. Johnson, J. A. Greenwood & S. Y. Poon: Wear, 19
(1974) 88
(3) W. Hirst: IME-CME, 21 (1974) 88
(4) J. F. Archard: Tribology, 7, 5 (1974) 213
(5) D. J. Whitehouse: Tribology, 7, 6 (1974) 249
(6) K. Endo & S. Kotani: Wear, 26 (1973) 239
(7) 奈良治郎 : 精密機械, 30, 11 (1964) 26
(8) D. J. Whitehouse & J. F. Archard: Proc. Roy. Soc. (London),
316A (1970) 97
(9) 塚田忠夫・阿武芳朗 : 精密機械, 40, 2 (1974) 150
(10) K. J. Stout, T. G. King & D. J. Whitehouse: Wear, 43 (1977)
99
(11) L. V. Kragelskii: Friction and Wear, Butterworths (1965)

第 5 章

- (1) 遠藤吉郎・福田嘉雄・高宮脩武 : 日本機械学会論文集, 37, 296
(1971) 670
- (2) 遠藤吉郎・福田嘉雄・田辺晃夫 : 日本機械学会関西支部第 224 回
講演会講演論文集, 42
- (3) K. Endo & S. Kotani: Wear, 26 (1973) 239
- (4) 久門輝正・築添正 : 潤滑, 21, 4 (1976) 228
- (5) C. A. Queener, T. C. Smith & W. L. Mitchell: Wear, 8 (1965) 391
- (6) 宮川行雄 : 日本機械学会論文集, 29, 199 (1963) 572

第 6 章

- (1) 野呂瀬進・笹田直 : 潤滑, 24, 4 (1979) 231
- (2) G. Salomon: Wear, 36 (1976) 1
- (3) A. Begelinger & A. W. J. de Gee: Wear, 28 (1974) 103
- (4) H. Czichos: Wear, 36 (1976) 13
- (5) H. Czichos: Wear, 41 (1977) 1
- (6) H. Czichos: Wear, 28 (1974) 95
- (7) A. Begelinger & A. W. J. de Gee: Wear, 36 (1976) 7
- (8) H. Czichos: Proc. of JSLE-ASLE Intern. Lub. Conf., Tokyo
(1975) 368
- (9) 久門輝正・築添正・森下八郎 : 日本機械学会論文集, 42, 358
(1976) 1891
- (10) 曾田範宗・青木朗 : 潤滑, 23, 9 (1978) 654
- (11) 遠藤吉郎・福田嘉雄・豊田洋民 : 日本機械学会論文集, 34, 266
(1968) 1769
- (12) K. Endo & S. Kotani: Wear, 26 (1973) 239
- (13) 曾田範宗 : 摩擦と潤滑 (1954), 岩波書店 207
- (14) H. Czichos: Tribology, 7, 1 (1974) 14

第 7 章

- (1) M. M. Khrushov: Proc. Conf. on Lub. and Wear, IME (1957)
655
- (2) 遠藤吉郎, 他 3 名 : 精密機械, 37, 7 (1971) 496
- (3) W. Eilender: Archiv für Eisenhüttenw, 8, 2 (1934) 61
- (4) 遠藤吉郎・福田嘉雄・八尾良三郎 : 材料, 14, 145 (1965) 807
- (5) 遠藤吉郎・福田嘉雄・高宮脩武 : 日本機械学会論文集, 37, 296
(1971) 670

