The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高速すべり摩擦に関する研究
Author(s)	古村, 義彰
Citation	大阪大学, 1979, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1081
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

高速すべり摩擦に関する研究

古 村 義 彰

1 9 7 9

目　　次

第１章　緒　　論 ---------- 1
第２章　高速すべり摩擦の実験的研究 ---------- 3
第１節　緒　言 ---------- 3
第２節　実験装置および方法 ---------- 5
２．１　実験装置 ---------- 5
２．１．１　空気中摩擦実験装置 ---------- 5
２．１．２　特殊ふん囲気中摩擦実験装置 ---------- 6
２．１．３　アルミニウムおよび高分子材料実験装置 ---------- 7
２．２　実験材料 ---------- 7
２．３　実験条件および方法 ---------- 8
２．３．１　実験条件 ---------- 8
２．３．２　空気中摩擦試験法 ---------- 9
２．３．３　特殊ふん囲気中摩擦試験法 ---------- 9
２．３．４　アルミニウムおよび高分子材料摩擦試験法 ---------- 10
第３節　実験結果および考察 ---------- 11
３．１　空気中炭素鋼の場合 ---------- 11
３．１．１　摩擦摩耗の接触圧力特性 ---------- 11
３．１．２　摩擦摩耗の摩擦速度特性 ---------- 14
３．１．３　試験片摩耗部の観察 ---------- 17
３．１．４　試験片および摩擦円板の摩擦面の観察 ---------- 20
３．１．５　摩耗粉の観察 ---------- 23
３．１．６　摩擦面温度および摩擦熱の配分率 ---------- 25
３．２　ふん囲気の影響 ---------- 31
３．２．１　摩擦摩耗の接触圧力特性 ---------- 31
３．２．２　摩擦摩耗の摩擦速度特性 ---------- 35
３．２．３　摩擦面の観察 ---------- 37
３．２．４　摩耗粉の観察 ---------- 41

３。２．５　摩擦面および摩耗粉の分析 ---------- 43
３．３　試験片材料の影響 ---------- 46
３．３．１　鉄系材料の場合 ---------- 46
（１）　摩擦摩耗の接触圧力特性および摩擦速度特性 ---- 46
（２）　摩擦部の観察 ---------- 49
３．３．２　アルミニウムの場合 ---------- 53
（１）　摩擦摩耗の接触圧力特性 ---------- 53
（２）　摩擦摩耗の摩擦速度特性 ---------- 55
（３）　試験片のかたさおよびふん囲気の影響 ---------- 56
（４）　摩擦部の観察 ---------- 60
３．３。３　銅の場合 ---------- 65
３．４　高分子材料の場合 ---------- 67
３．４．１　ポリアミド（ナイロン６）の場合 ---------- 67
（１）　摩擦摩耗の接触圧力特性 ---------- 68
（２）　摩擦摩耗の摩擦速度特性 ---------- 69
（３）　摩擦部の観察 ---------- 71
３．４．２　硬質塩化ビニルの場合 ---------- 75
（１）　摩擦摩耗の接触圧力特性 ---------- 75
（２）　摩擦摩耗の摩擦速度特性 ---------- 76
（３）　摩擦部の観察 ---------- 78
第４節　結　言 ---------- 80
第３章　高速すべり摩擦の理論的解析 ---------- 82
第１節　緒　言 ---------- 82
第２節　理論解析 ---------- 84
２．１　$s = \mu'(A + By)$ と仮定した場合 ---------- 85
２．２　$s = \mu' A$ と仮定した場合 ---------- 88
第３節　計算結果 ---------- 89
３。１　かたさ変化率の影響 ---------- 89

３・２　接触角の影響 …… 90
３．３　凝着係数の影響 …… 92
第４節　実験結果との比較 …… 94
第５節　結　言 …… 96
第４章　摩擦切断への応用 …… 97
第１節　緒　言 …… 97
第２節　線摩耗速度および切断抵抗 …… 99
２．１　空気中炭素鋼の場合 …… 99
２．１．１　接触圧力の影響 …… 99
２。１．２　摩擦速度の影響 …… 101
２．１．３　接触面積の影響 …… 102
２．２　ふん囲気の影響 …… 103
２．３　試験片材料の影響 …… 104
２．３．１　鉄系材料の場合 …… 104
２．３．２　アルミニウムの場合 …… 105
２．３．３　高分子材料の場合 …… 107
（１）　ポリアミド（ナイロン６） …… 107
（２）　硬質塩化ビニル …… 108
２．４　摩擦円板材料を変えた場合 …… 109
２．４．１　接触圧力の影響 …… 109
２．４．２　摩擦速度の影響 …… 111
２．５　おうとつのある円板の場合 …… 113
第３節　砥石切断との比較 …… 116
３．１　接触圧力の影響 …… 116
３．２　摩擦速度の影響 …… 119
３．３　切断能率 …… 120
第４節　結　言 …… 121
第５章　結　論 …… 122

謝　　辞 ……126
参考文献 ……127

第1章　緒　　論

日常経験的に得られた知識は別として，ダビンチ（Leonard da Vinci, 1452～1519 ）以来摩擦摩耗が学問的に研究されだしてからでも既に幾世紀も経過しているが，現在なお摩擦摩耗の問題には不明の点が多い．それは摩擦摩耗の研究が機械工学，材料工学，物理学，化学など広い分野の知識を要するいわゆる中間領域の学問であるためであろう．しかし，1966　年のJost報告[1]を発端として，英国においてトライボロジ（ tribology ）の名のもとにその研究が国家的重要研究課題として取り上げられて以来，摩擦摩耗および潤滑の諸問題が各国の研究者，技術者の関心を高めているので，今後この方面の研究が飛躍的に発展することが期待される．

摩擦の技術には二面があり，その一面は軸受などのように摩擦摩耗を小さくしようとする場合であり，もう一面は逆に大きい摩擦摩耗を積極的に利用しようとする場合であり，摩擦溶接，摩擦切断さらには車両の車輪と軌道およびブレーキとの摩擦[2,3]などは後者の場合に相当する．摩擦切断は高速高荷重の摩擦摩耗特性を利用するもので，焼入鋼のようなかたさの高い材料でも短時間に切断でき，工具としての円板の摩耗はほとんど無視できるなどの利点があるが，大出力の原動機を必要とし音響（騒音）が強烈である，切断面近傍に熱の影響が残り寸法精度が良くない，組織がかなり変化するなどの欠点があり，特殊用途以外ではあまり実用されず，その研究も少ない．しかし摩擦切断のような高速高荷重下の摩擦摩耗の研究は，実用研究として重要であるばかりでなく極端条件下の研究により通常条件下ではかくされていた摩擦摩耗の機構の顕在化がみられ，摩擦摩耗の基礎的機構の理解にも欠くべからざる基礎研究といえる[4,5]．

ところで摩擦摩耗の特性には現在なお不明の点が多いことは上述のとおりであるが，機械の分野で多く使用される炭素鋼の乾燥すべり摩擦において，20m／s 程度以下の摩擦速度範囲ではかなり解明されている．すなわち摩擦速度の上昇とともに，酸化摩耗，輝面摩耗，溶融摩耗の領域があり[6,7]，それぞ

れの摩擦摩耗の機構が明らかにされている．しかし50m／s 以上の摩擦速度範囲については現在まで研究データ[8]が極端に少なく不明な点が多い．このような高速では，酸化摩耗域，溶融摩耗域のFe_2O_3，Fe_3O_4に対して FeO 酸化物が主役を果たす[4]であろうし，また摩擦面表層が軟化ないし溶融状態になる[9]であろうことが予想される．その諸特性および機構を解明することは摩擦摩耗分野の工学的研究として重要であるばかりでなく，近年の機械の高速化とともに技術的にも緊急重要課題となっている．

本研究「高速すべり摩擦に関する研究」は5章から成っている．第2章では高速における摩擦摩耗の諸特性を実験的に詳細に研究している．すなわち高速すべり摩擦摩耗の接触圧力特性および摩擦速度特性をまず空気中炭素鋼試験片の場合について明らかにし，続いてそれらに対する摩擦ふん囲気の影響，金属試験片の材質の影響，さらに軟化溶融しやすい熱可塑性高分子材料の場合の諸特性を追究する．そして高速においては摩擦面平均温度が上昇しそれが第1には摩擦面に酸化物の生成を促進し，第2には摩擦面表層を軟化溶融させるが，特に後者の影響が大きいので，第3章では摩擦面表層の軟化を考慮した摩擦の理論的解析を試み，第2章の実験的研究の結果と比較検討してその妥当性を明らかにする．次に以上の実験的理論的基礎研究の成果の応用として，第4章では機械工作法の一つである摩擦切断を取りあげ，その特性および適当な切断条件を示し，砥石切断の場合と比較検討する．第5章では，本研究によって明確にされた高速すべり摩擦の諸特性ならびに適正な摩擦切断条件に対する指針を記述し，本研究が一般に高速の摩擦摩耗の理解に大きく寄与するであろうことを述べる．

第2章　高速すべり摩擦の実験的研究

第1節　緒　言

すべり速度20m／s以下の摩擦の実験的研究は今日まで広く行われており摩擦摩耗現象に対する新しい解釈がいろいろと検討されている[1～4]．しかし摩擦実験装置による固有の影響が表れ[5]，○○式摩擦試験機による結果であるという添え書きを必要とするのが現状である。それはわずかの実験条件の違いが，実験結果に大きな影響を及ぼすためである．これらのことから特定条件を厳しくすればそれによる影響がはっきりと表れ，通常の条件下でははっきりしなかった摩擦摩耗の機構の顕在化がみられるであろう．たとえば，Bowdenらが見い出した「高真空中で金属相互間の摩擦係数が極度に大きくなる現象」[2]およびRoweらの「酸素ふん囲気が金属相互間の摩擦係数を小さくする現象」[6]などは今日ではよく知られている事実で，しかも摩擦現象としては非常に重要な現象である．このような特殊条件下の摩擦現象は，Amonton-Coulombの摩擦則とよばれる経験則では予想できなかったことである．このような観点から摩擦摩耗の基礎的機構の解明のため，高速度域での摩擦摩耗の実験的研究に重要な意義が認められる[7]．

すべり速度50m／s以上を現時点で高速とみなすと[7]，高速における摩擦摩耗についてはBowden[8,9]，Cocks[10]，Earles[11]，曽田[12]，寺岡[13]らの研究が見られる程度であまり多くはない．しかし，近年機械の高速化に伴い高速における摩擦摩耗がしばしば実際上の問題となってきている。

高速下の摩擦摩耗について笹田[7]は炭素鋼の乾燥摩耗においては摩擦速度の増加につれて，Fe_2O_3，Fe_3O_4，FeOの酸化膜を生ずるそれぞれの速度域で比摩耗量および摩擦係数が低下するとしている。しかし，FeO酸化膜の生ずる速度域の研究はほとんどみられない．

深谷は，摩擦速度が高くなるとせん光温度だけでなく見かけの接触面平均温度も上昇するが，せん光温度自体はある速度以上では一定温度となるため高速域において摩擦現象のクライテリオンとなるべき温度は見かけの接触面

の平均温度である[14]としている．高速では摩擦面の高温酸化や軟化溶融が大きい影響因子となる．Bowdenらの真空中摩擦試験[15]では 300m／s程度で摩擦係数に極小値が見られる．さらに非常に高い摩擦速度では表面溶融膜による完全流体潤滑の状態が考えられ，Wilson の理論的研究[16]が見られる．また，高分子材料についての摩擦摩耗に関する研究[17~19]もいくつか見られるが，それらはほとんどが低PV値の範囲内のものである．

本章の研究の目的および関連した従来の研究の概要は以上のとおりであるが，摩擦速度50m／s以上の高速での特に定常的な摩擦摩耗に関する実験的研究はほとんど見られないと言える．

本章では，炭素鋼を用いて高速における比摩耗量および摩擦係数の摩擦速度特性および荷重特性などを求めるとともに，摩擦面，摩耗粉などを調べ，摩擦摩耗現象の基礎的機構を解明する．また表面酸化による保護被膜および表面軟化膜などによる減摩作用をより明確にするため，摩擦ふん囲気を酸素および窒素に変えて空気中の場合と比較検討する．さらに試験片材料を耐熱耐酸化性材料としてステンレス鋼に，またとも金の影響を示さない材料として鋳鉄に変えて，炭素鋼同志の摩擦摩耗と比較検討する．また融点が低く軟化溶融しやすく，酸化膜が非常に薄く破壊されやすいアルミニウムで軟化溶融の影響およびかたさの影響を調べる．そして最後に比較的低速で溶融し，炭素鋼のように化学的に活性でないポリアミドおよび硬質塩化ビニルを試験片材料に選び，熱可塑性樹脂の摩擦特性を調べるとともに，表層軟化の影響を検討する．

第２節　実験装置および方法

２．１　実験装置

２．１．１　空気中摩擦試験装置

空気中摩擦試験機本体の主要部を図２－２－１に示す．①は試験片で押付け案内金の支持部にねじ止めされる．②は摩擦円板で１１ｋｗの無段変速電動機から特殊Ｖベルトで増速駆動される．摩耗の進行につれて試験片は円板をはさむようなかたちで右に移動するが，そのとき試験片支持部が円板に触れないように，上方から見た形は２つ割りに作られている．③は押付け方向移動用の案内金で，左右３つずつのころがり軸受で案内される．④は案内部の支え金で，案内部の重量および切断時に働く摩擦力を支持する．ここにはひずみゲージがはられ下向きの摩擦力を検出できるようになっている．⑤は滑車で細いワイヤを案内金③の後部に固定し，図のようにおもり⑥をつり下げ，試験片と摩擦円板の間に押付け荷重をかけるようになっている．摩耗量を試験片の押込み量から測定するために，図に示されていないが，差動変圧器の外筒を支え金に，そのスピンドルを案内金に取り付けてある．なお，⑦は砥石切断における一定切込み試験の場合の切込み装置で，そのときの押付け荷重は⑧にはりつけたひずみゲージで検出する．

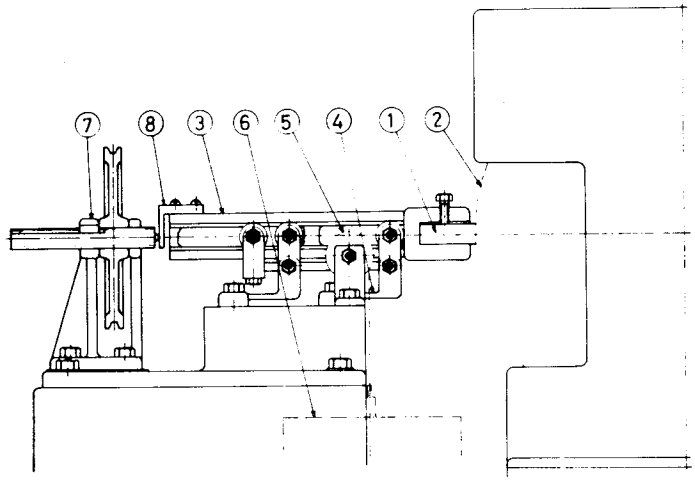


図２－２－１　空気中摩擦試験機本体

図２－２－２は実験装置の全体写真で①は摩擦試験機本体，②は円板駆動用の無段変速電動機，③はその制御器，④は動ひずみ測定器，⑤はサーボ式

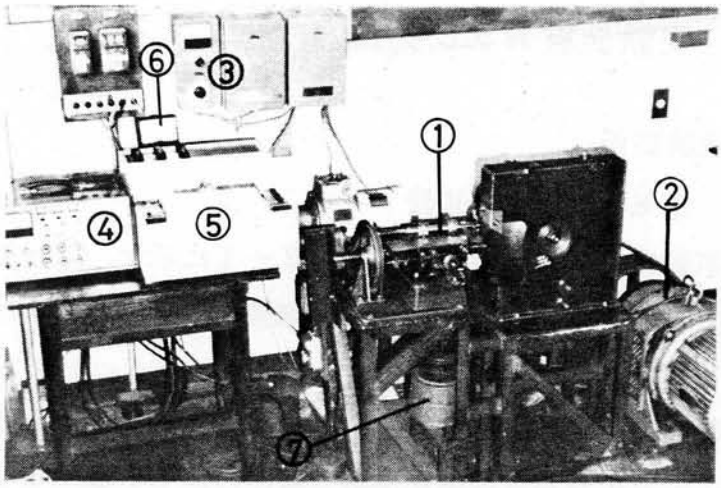


図２－２－２　摩擦試験装置の全体写真

ペン書き記録計，⑥は発電式回転速度計の表示部，⑦は押付け荷重用のおもりである．

２．１．２　特殊ふん囲気中摩擦実験装置

図２－２－３に特殊ふん囲気中摩擦試験機本体の機構図を示す。この試験装置は原理的には空気中摩擦試験装置と同じであるが，試験部分を外気としゃ断して真空にしたり，純粋ガスを導入できるように試験部を密封可能な構造にしてある．①は試験片で，②の摩擦円板に押付けられて摩擦試験される．③は試験片取付腕で，④の摩耗粉受けがねじ止めされている．釣合おもり⑤は無負荷時に試験片取付腕③，負荷用腕⑥，おもり載せ台⑦などと釣合う．⑧は純粋ガス導入用のノズルで，⑨は試験装置の気体しゃ断用兼安全用密封容器で，側面には試験部を観察するためガラス窓が取付けられている．

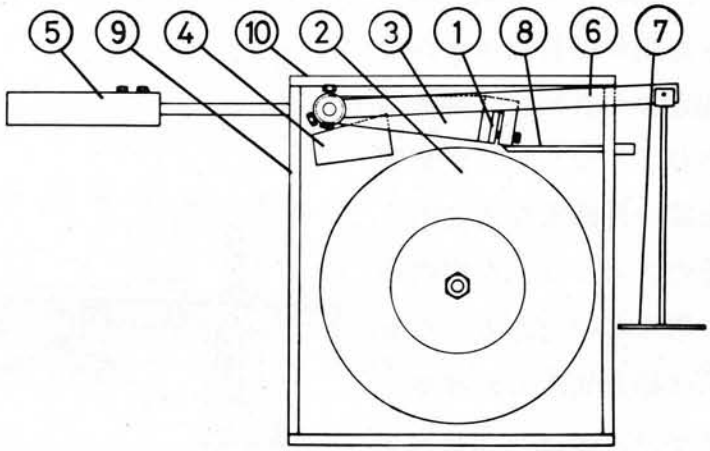


図２－２－３　特殊ふん囲気中摩擦試験装置本体

⑩ は密封容器ふたで，一般には鋼板のものを使用するが，円板外周面の観察時には強化ガラス板を使用する．図示してないが摩耗量測定のために負荷用腕に差動変圧器のスピンドルが磁石で取付けられている．また高速回転主軸部分の軸封には磁性流体による密封装置を，試験片取付腕支持ピンの回転部分とふたの部分の気体封止にはOリングを使用した．

2．1．3　アルミニウムおよび高分子材料摩擦実験装置

アルミニウムおよび高分子材料の摩擦実験装置の基本構造は前記特殊ふん囲気摩擦実験装置と同一である．摩擦動力および摩擦速度が小さくてもよいため駆動形式を変えて，3.3 kwの無段変速電動機の主軸に摩擦円板を直結した．回転主軸その他の軸封にはOリングを使用してあり，その他の部分の構造は特殊ふん囲気摩擦実験装置と同様である．

2．2　実験材料

本章の実験に使用した摩擦円板材料はすべて同一材質の炭素鋼S35Cであり，円板直径を410～440mm，厚さ4.0mmに旋削仕上したものである．円板材料の化学成分を表2－2－1に示す．

金属試験片材料は炭素鋼S35CおよびS20Cの平鋼9mm×50mmを長さ50mmに切断したもの，ステンレス鋼SUS27（304）の50mm丸棒を厚さ9mmの円板状に切断したもの，連続鋳造FC20の50mm角棒を厚さ9mmに切断したもの，アルミニウム板A1100Pの厚さ3.0mmを50mm×50mmに切断したもので以後アルミニウム圧延材と呼ぶもの，同上アルミニウム試験片を焼なまし（空気

表2－2－1　円板材料の化学成分（%）

S35C	C	Si	Mn	P	S
	0.37	0.23	0.80	0.025	0.032

表2－2－2　試験片材料のかたさと化学成分（%）

試験片	かたさ Hv	化学成分% C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S35C	184	0.34	0.22	0.85	0.027	0.037		
S20C	140	0.20	0.34	0.46	0.029	0.013		
SUS27(304)	153	0.066	0.87	1.15	0.018	0.012	8.77	19.18
FC20	236	3.39	2.83	0.31	0.216	0.048		

A1100P	Hv	Cu	Fe＋Si	Mn	Zn
圧延材	45	0.14	1.0	0.05	0.10
焼なまし材	27				

をしゃ断して電気炉で400℃で1時間保持し，炉冷）したもので以後アルミニウム焼なまし材と呼ぶものなどで，これらの試験片材料のかたさＨｖと化学成分（%）を表２－２－２に示す．

高分子材料試験片としてポリアミド（一般にナイロン６と呼ばれているもので以後ナイロン６と呼ぶ）と硬質塩化ビニル（以後塩化ビニルと呼ぶ）を使用した．これらの材料の諸特性を表２－２－３に示す．また，それぞれの引張り強さの温度特性を図２－２－４に示す．ナイロン６は厚さ５mm，塩化ビニルは厚さ６mmの板材を50mm×30mm 大きさに切断して使用した．

表２－２－３　高分子材料の諸特性

(20°C)

試験片	比重	引張り強さ kg/cm²	かたさ ショアD	純度	結晶化度
ナイロン6	1.16	830	51	99%以上	42%
塩化ビニル	1.45	640	65	97 %	15%

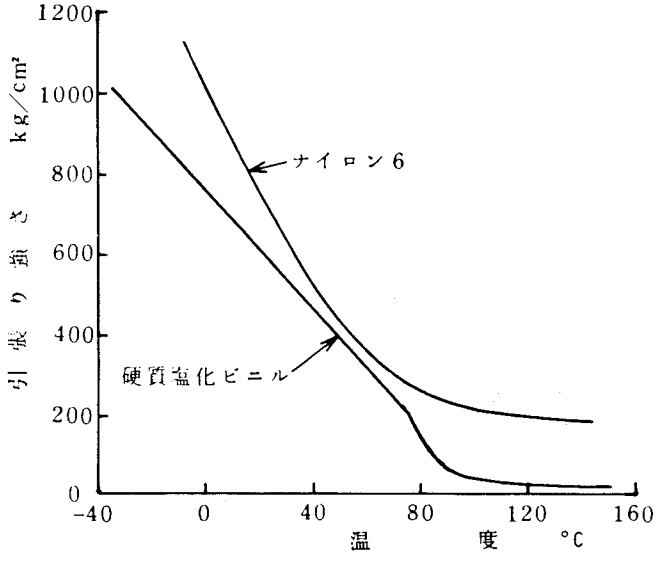


図２－２－４　引張り強さの温度特性

ふん囲気ガスとしては酸素および窒素ガスを使用した．使用ガスの純度と水蒸気濃度を表２－２－４に示す．

表２－２－４　ふん囲気気体

気体	純度，%	水蒸気濃度，ppm
O_2	99.9	30
N_2	99.9	40

２．３　実験条件および方法

２．３．１　実験条件

各実験について，摩擦速度（円板回転速度）の範囲および見かけの接触圧力の範囲を表２－２－５に示す．アルミニウムおよび高分子材料に対しては

摩擦速度および見かけの接触圧力を小さくして，摩擦条件を比較的ゆるくしている．

表2－2－5　実験条件

摩擦条件	摩擦速度（円板回転速度）m／s　（rpm）	見かけの接触圧力 kg／mm²
空気中 特殊ふん囲気中 鉄系材料	21.5 (1000) ～107.3 (5000)	0.05～1.2
アルミニウム	5 (217)～35 (1519)	0.05～0.41
高分子材料	5 (217)～35 (1519)	0.03～0.25

2．3．2　空気中摩擦試験法

空気中摩擦試験ではまず制御器で予定摩擦速度になるように円板の回転速度を設定し，予定の接触圧力になるようなおもりで引張られている押付け金の止め金をはずし，静かに試験片を円板に押付けて摩擦試験を開始する．また摩擦力および摩耗量は実験の始めから電気的に検出してペン書き記録計に記録させ，あらかじめ検定した較正線図を利用して定常摩擦力および定常摩耗率を求めた．摩耗のはげしい場合には深さ30mm程度摩耗するまで，また摩耗量の少ない場合には約30分間摩擦試験を行い記録に定常状態が観察されてから試験を停止し，実験値を読みとった．実験中火花状になって飛び散る摩耗粉を摩耗粉受けに受け，その形状観察などを行う．また円板摩擦面については実験ごと，または数回の実験ごとに砥石で研削したり超硬合金工具で切削したりして実験条件が変わらないように注意した．

ストロボ写真の撮影法は円板の回転に同期するように円板にはりつけた銀紙からの反射光をフォトトランジスタで検出し，この信号をキセノンランプのトリガに使用し，約2枚／秒で連続接写する方法である．

2．3．3　特殊ふん囲気中摩擦試験法

ふん囲気の設定は試験片を試験片取付腕に取付け，真空グリースをぬったOリングを用いて容器ふたで密封した後油回転ポンプで試験容器内を0.1 Torrにしてから酸素または窒素を導入するようにした．密封のままでは実験中にふん囲気ガス，特にO_2が化学反応に消費されふん囲気の成分割合が変化するので，リーク弁を開き容器内ガスを放出しながら，ふん囲気ガスを大気圧よりわずかに高い圧力で絶えず補給しながら実験した．ふん囲気の設定後，負荷用おもりをおもり載せ台に載せ試験摩擦速度で回転している摩擦円板に静かに押付け，定常な測定値が得られるまで実験を続けた．摩耗量は

空気中摩擦試験と同様に差動変圧器で検出したが，摩擦力は無段変速電動機の制御電圧（あらかじめ回転速度ごとに摩擦力と制御電圧の関係を検定してある）から検出して，ペン書き記録計に記録した．摩耗粉は試験片取付腕に取付けた鋼管製の摩耗粉受けで集め，取り出して観察した。また窒素ふん囲気中での摩擦試験では，円板側摩擦面に試験片からの大きな凝着物が付着するので，凝着物を削り落してから実験を行った．さらに実験中に円板に凝着する付着物を超硬チップで削り落しながら，アブレシブ摩耗の影響を少なくした実験も行った．

２．３．４　アルミニウムおよび高分子材料摩擦試験法

アルミニウムおよび高分子材料の摩擦摩耗実験も実験装置が異なるのみで実験方法はほとんど同一である．ただし，アルミニウム焼なまし材の酸素中実験の場合は，やはり試験機本体内を真空ポンプで真空（0.7 Torr以上）にしてから酸素に置換し，さらに摩擦部には一定圧力で酸素を送り込みながら摩擦試験を行った．アルミニウム圧延材，アルミニウム焼なまし材の空気中および高分子材料の実験では，試験機本体のふたを取りはずした状態で行った．その他の実験方法は特殊ふん囲気中摩擦実験の場合と同一である．

第３節　実験結果および考察

３．１　空気中炭素鋼の場合

３．１．１　摩擦摩耗の接触圧力特性

図２－.３－１に比摩耗量と見かけの接触圧力（以後接触圧力と呼ぶ）の関係をいくつかの摩擦速度をパラメータにして示す．いずれの摩擦速度についても接触圧力の小さいところと大きいところ（以後低荷重域，高荷重域と呼ぶ）の間で比摩耗量の値が不連続に変わるのが見られる．低荷重域では比摩耗量の測定値にばらつきと変化が見られるが全般的に小さく，全体的に見てほぼ0.1～0.2 kg／mm² の接触圧力で最小の比摩耗量を示し，その前後で

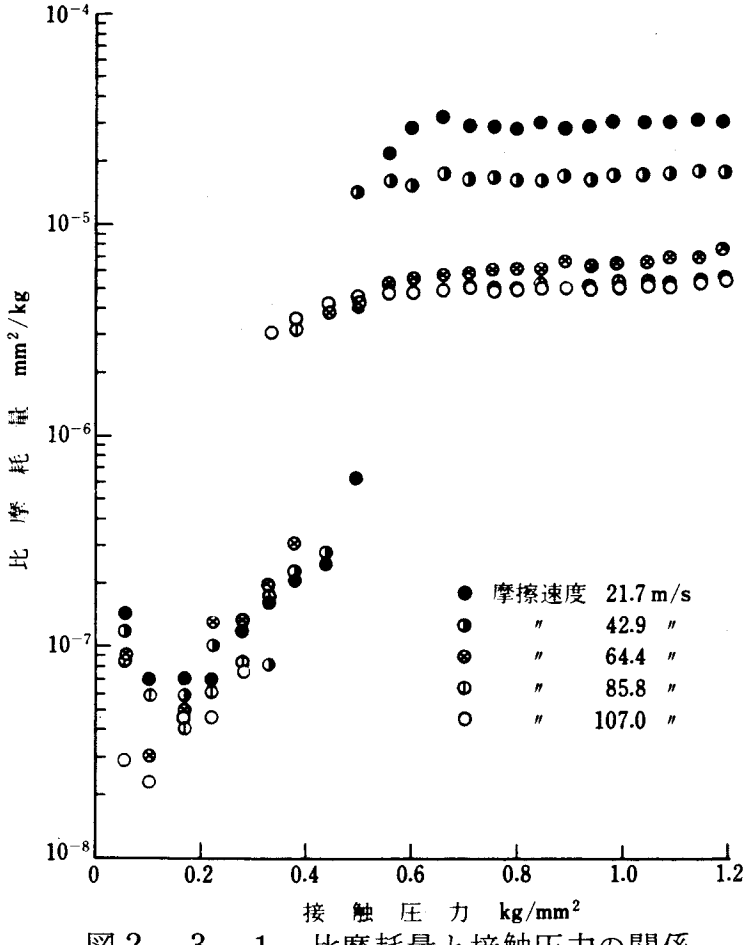


図２－３－１　比摩耗量と接触圧力の関係

比摩耗量が増大している．高荷重域では比摩耗量の測定値に比較的ばらつきおよび変化が少なく，ほぼ一定値をとっている．低荷重域で比摩耗量が小さいのは，その摩擦条件で適当に減摩効果をもった酸化膜が摩擦面にできるためである．本節３．４でも述べるように，試験片の摩擦面は黒紫色の平滑な面であり，主として酸化鉄Fe_3O_4で表面が覆われているものと思われる．この領域では酸化被膜が摩擦面間のはげしい凝着を妨げ，比摩耗量が大きくなるのを押さえているのであり，接触圧力が低すぎれば摩擦熱の発生が少なく酸化が進みにくく，高すぎれば酸化膜を支持している母材が軟化して酸化膜が部分的に破壊されて凝着が起こりやすくなるために，当然中間に極小の比摩耗量を示す接触圧力が存在することになる．

高荷重域において比摩耗量が大きくなるのは，摩擦熱の蓄積のための試験片摩擦面側の軟化と生成酸化物の変化[7]すなわち$Fe_3O_4 \rightarrow FeO$の２つの因子が考えられるが，本節３．２で考察するように，軟化の影響がより大きいと思われる．

低荷重域と高荷重域の境界付近の摩擦条件のときには，試験中ときどき急に摩耗がはげしくなったり，摩耗が非常に少なくなったりする不安定現象が見られた．そして比摩耗量が中間的値を定常的に示すようなことはほとんどなかった．このようにこれらの２つの領域では前述のような摩耗の機構的違いがあるものと考えられる．これらの２つの領域の境界の接触圧力を臨界圧力と名づけて，臨界圧力と摩擦速度の関係を求めると図２－３－２のようになる．摩擦速度の増加とともに臨界圧力が低下しており，曲線の下側がmild wearの領域，上側がsevere wearの領域である．Eyreらの研究[20]に示されている臨界圧力と摩擦速度の関係は上述

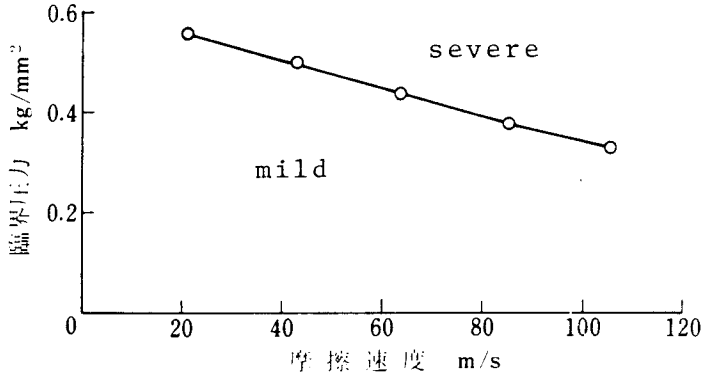


図２－３－２　臨界圧力と摩擦速度の関係

のように単純ではないが，それは本実験の範囲が３つ以上の摩擦機構にまたがって変化するほど広範囲にとっていないためである．また低荷重域では摩耗率に初期摩耗と定常摩耗の差がみられたが，高荷重域では記録に摩耗率のあまり大きな変化はみられなかった．それは初期摩耗の期間が非常に短いためであろう．

図２－３－３に摩擦係数と接触圧力の関係を摩擦速度をパラメータにして示す．摩擦係数も比摩耗量の場合と同様に低荷重域と高荷重域でかなり様子

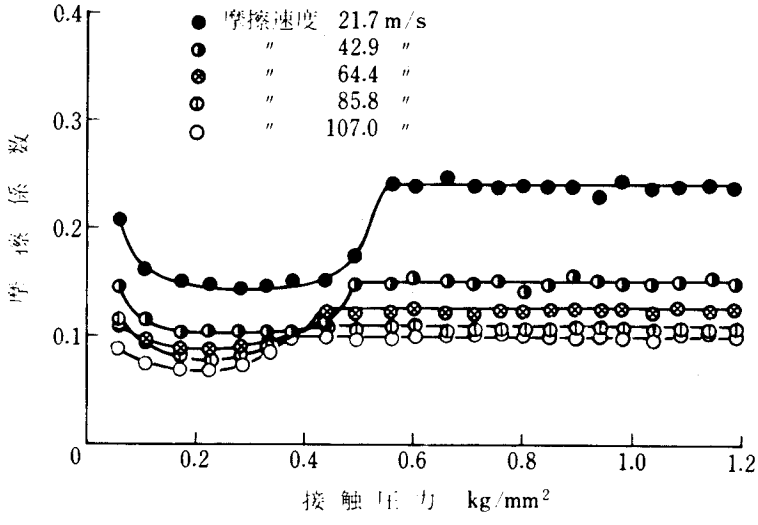


図２－３－３　摩擦係数と接触圧力の関係

を異にしている．高荷重域では各摩擦速度ごとにほとんど一定の摩擦係数を示し，摩擦速度によって異なるある接触圧力以下で急に摩擦係数は小さくなっている．低荷重域で摩擦係数が小さいのは酸化膜Fe_3O_4の減摩作用によるものであり，摩擦係数と接触圧力の関係も前述の比摩耗量と接触圧力の関係と同様に説明できる．摩擦係数が急に大きくなる接触圧力は前述の比摩耗量が急に増大する臨界圧力と当然のことながら等しくなっている．高荷重域では発生する摩擦熱が多く，試験片摩擦面表層はかなり高温軟化していると考えられる．そのせん断抵抗の小さい部分が潤滑剤の作用をしているので，後掲の図４－２－２に示すような火花を飛ばしたはげしい摩擦状態であるにもかかわらず，摩擦係数としては低荷重の場合とあまり変わらない値をとっている．

3．1．2　摩擦摩耗の摩擦速度特性

低荷重域では前述のように比摩耗量のばらつきが比較的大きかった．特に比摩耗量が極小値をとる接触圧力より低荷重側でばらつきが大きいようである．高荷重域では接触圧力が変わっても本実験の範囲内では摩擦速度で決まったほぼ一定の比摩耗量を示した．そこで高荷重域の代表として接触圧力0.8 kg／mm² の場合をとり，比摩耗量と摩擦速度の関係を図2－3－4に実線で示す．摩擦速度が上昇すると30 m／s 程度で極大値をとり，30m／s 以上になると急激に比摩耗量が低下し，60 m／s 程度からはあまり変わらなくなる．約20 m／s 以下の摩擦速度では動特性の関係で振動が大きくなり本実験装置では詳細には確認できなかったが，図2－3－7の結果を考慮すると比摩耗量は低下するようである．図中の破線は接触圧力0.1 kg／mm² の場合である．

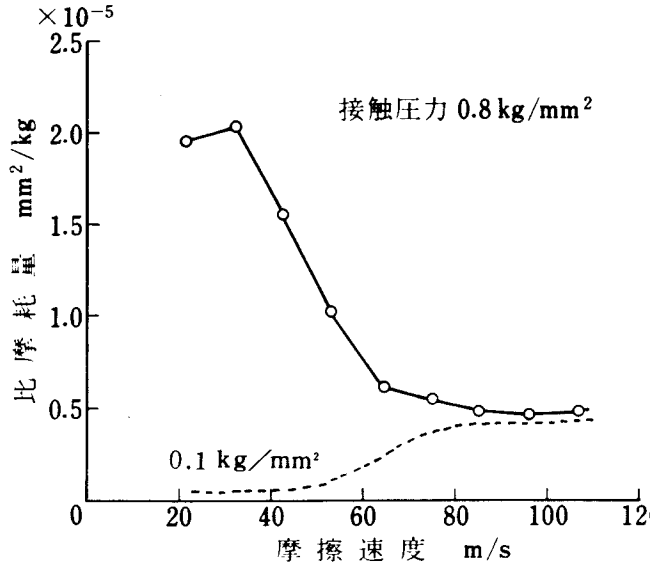


図2－3－4　比摩耗量と摩擦速度の関係

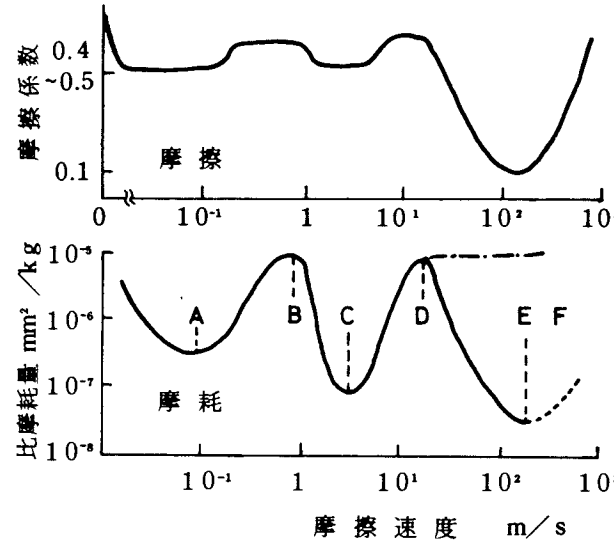


図2－3－5　金属の摩擦摩耗の速度特性

図2－3－5は笹田の論文[7]から引用した図である．鉄系材料の摩擦摩耗においては図中のA点ではFe_2O_3，C点ではFe_3O_4，E点ではFeO の酸化物が主と

して生成し，それぞれ最もよい摩擦条件を作り出して比摩耗量を極小にする．本実験の実験範囲が摩擦速度の大きさから考えて図のＤＥ区間に対応すると考えると，上述の比摩耗量の傾向は定性的によく一致している．しかし定量的には比摩耗量の変化範囲はおおよその目安として示してある値より大きく，高速においてあまり低下しておらず本実験範囲では約１／４程度の低下である．低荷重域の接触圧力0.1 kg／mm²の場合は摩擦摩耗機構が変わるため逆の傾向になっているが，比摩耗量の変化はやはり１：３程度と小さくなっている．

図２－３－６に高荷重域（接触圧力　0.8 kg／mm²）と低荷重域（接触圧力0.1 kg／mm²）における摩擦係数と摩擦速度の関係を示す．摩擦係数は摩擦速度40～ 60 m／s までに急激に低下し，それ以上の摩擦速度ではあまり変化しなくなる．

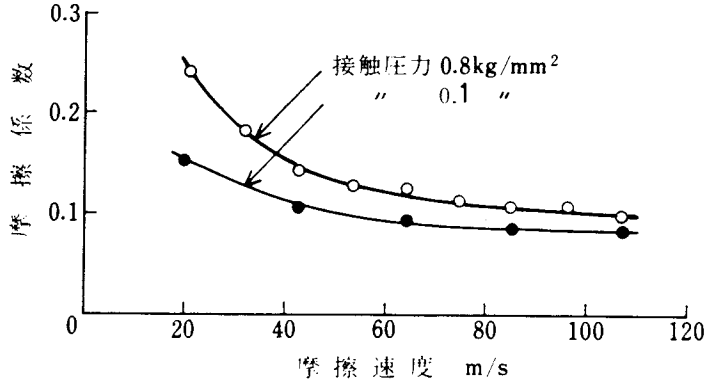


図２－３－６　摩擦係数と摩擦速度の関係

Ｃｏｃｋｓの研究[10]によると，鋼を摩擦速度19m/sおよび66m/s で摩擦試験した場合，摩擦係数が荷重の増加につれて減少し，流体潤滑的傾向を示している．本実験の場合，高荷重域では摩擦係数は摩擦速度の増加とともに減少しており，この傾向は強いて言うならば境界潤滑的傾向と言える．後述するように摩擦面表層が半溶融状態にあり，それが潤滑膜の機能をもつとすればこの傾向を説明しやすいように思われる．低荷重域の場合でも摩擦速度の増加とともに摩擦係数が減少しているが，これは高荷重域での摩擦機構とは異なり摩擦熱による摩擦面温度上昇によって酸化膜Fe_3O_4の生成が促進されるためであろう．

本研究は高速域の摩擦摩耗を対象にしているのであるが，前記笹田の論旨を確認するために無段変速旋盤を利用して，摩擦速度範囲を低速域にまで広げた実験と，荷重範囲を低荷重域にまで広げた実験を行った．その結果を図

2－3－7，図2－3－8に示す．図2－3－7は摩擦速度特性で笹田の図2－3－5に対応するものであるが，山の数が1つ多いようである．詳細な実験を行っていないので，どの部分がどの酸化物に対応しているのかは断定できない．笹田は摩擦摩耗の摩擦速度特性を単純に生成酸化物の変化だけで対応させているようであるが，本研究では本節3．2で述べるように，材料の機械的性質の変化の効果(軟化の影響)などが表れているため，この場合摩擦機構が同じ輝面摩耗の範囲であっても，比摩耗量，摩擦係数に複雑な変化が表れるのであろう．そのような広範囲にわたる現象は摩擦面突起部の平均自由時間[21]や生成酸化物などで単純には説明できないと言える．さらに実験装置固有の影響[22]などが含まれていることも考えられる．

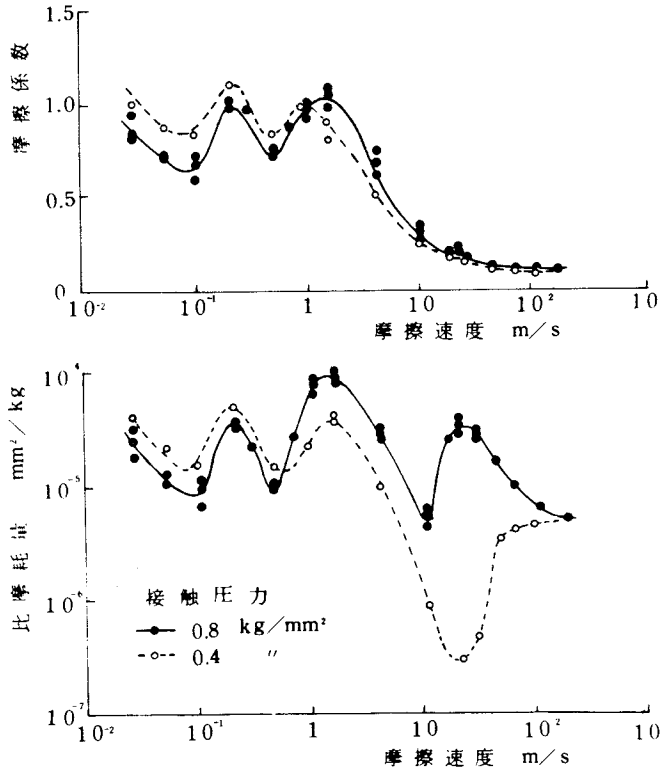


図2－3－7　広範囲の摩擦速度特性

接触圧力が0.8 kg／mm²でも0.4kg／mm²でも比摩耗量と摩擦係数の間にはよい対応関係が見られ，摩擦係数の大きい速度域では比摩耗量も大きくなっていることがわかる．摩擦速度0.7 m／s (接触圧力0.8 kg／mm²)および1.0 m／s (接触圧力0.4 kg／mm²)以下では試験片摩擦面は金属光沢を有している．比摩耗量および摩擦係数が極小値をとっている摩擦速度0.5 m／s付近で，試験片および円板の摩擦面は非常にあれており凝着のはげしいことがわかり，いわゆる輝面摩耗の形態である．このようにはげしい凝着をともなう摩擦形態であるにもかかわらず，摩擦係数，比摩耗量ともに小さくなるのは，その

ような摩擦面温度における試験片材料の凝着しやすさ，試験片材料強度の温度特性，酸化物の生成速度特性などが複雑にからみ合って表れたのであろう．

図２－３－８は接触圧力範囲をより低荷重域まで広げた摩擦摩耗の接触圧力特性である．本実験範囲では接触圧力を下げても，酸化物 Fe_2O_3 と Fe_3O_4 の間で生ずるであろう severe wear の領域は見られなかった．

摩擦摩耗に対しては酸化膜が大きく影響し，それに関連した突起部の平均自由時間から荷重特性と速度特性は等価であると言われている[23]．ところが図２－３－１，図２－３－３，図２－３－４および図２－３－６の傾向はこのことと矛盾している．また図２－３－７と図２－３－８の間でも速度特性と荷重特性は等価とは言えないようである．接触圧力が本研究の実験範囲よりもさらに大きくなれば摩擦摩耗は低下するであろうか．荷重特性と速度特性が等価であると考えられるのは，おもに摩擦熱によって摩擦面の軟化が無視し得るような範囲と見なすほうがよいのであろう．摩擦面表層部がかなり高温軟化するような高速における摩擦摩耗では，もはや荷重特性と速度特性は等価でなくなると考えるべきであろう．

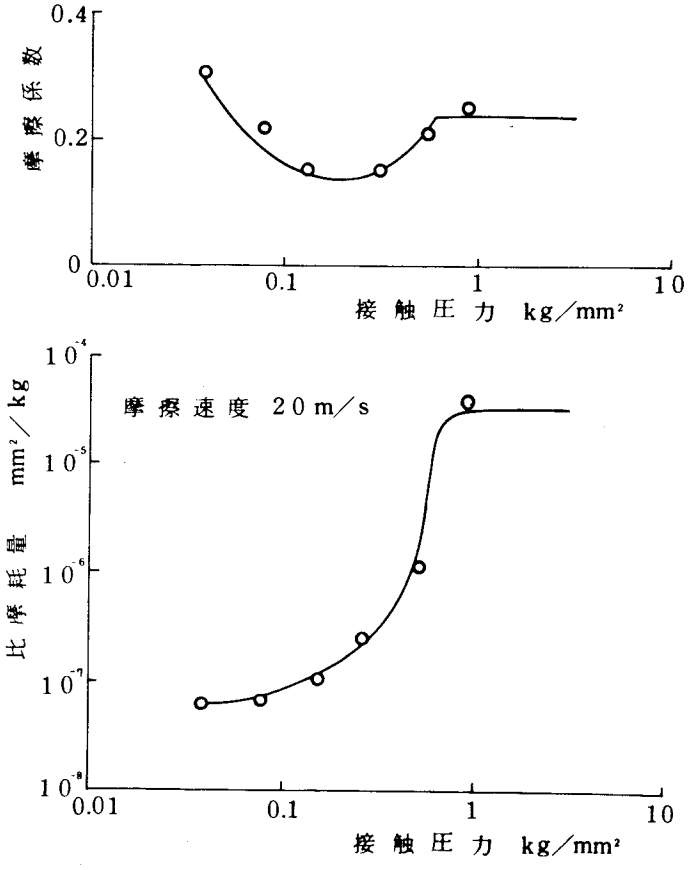


図２－３－８　広範囲の接触圧力特性

３．１．３　試験片摩擦部の観察

図２－３－９は高荷重域における摩擦方向断面写真である．摩擦条件は摩

擦速度64.4m／s，接触圧力0.8kg／mm² である．摩擦面後方に特に大きいかえりを生じていることがわかる．かえり部体積が摩擦によって試験片から排除された体積に対してかなり大きい割合を占めるように思われたので，それを各速度について測定したものを図2－3－10に示す．低速においてはいくぶん低下しているが，40～50m／s 以上の高速ではかえり部体積率（かえり部体積／摩耗体積）は8％程度でほぼ一定している．低荷重域の摩擦試験では，後方にごくわずかのかえりが生ずるのみでほとんど無視できるのに対して，上述のかえり部体積率はかなり大きいと言える．図2－3－11 は摩擦部およびかえり部近傍の金属組織を観察するために5％ナイタルで腐食した図2－3－9の結晶組織のおおよその流れを示すスケッチである．両図中の矢印は摩擦方向を示している．図2－3－9で前方かえり部の付け根あたりから後方かえりにかけて白っぽく見える部分は図2－3－11のAとBの部分に対応しており，結晶粒の微細化などのため腐食の状態が変化しているためで

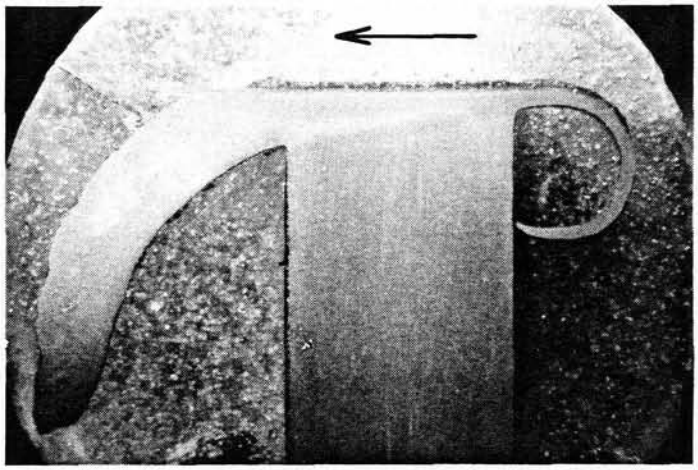


図2－3－9　試験片の摩擦方向断面写真

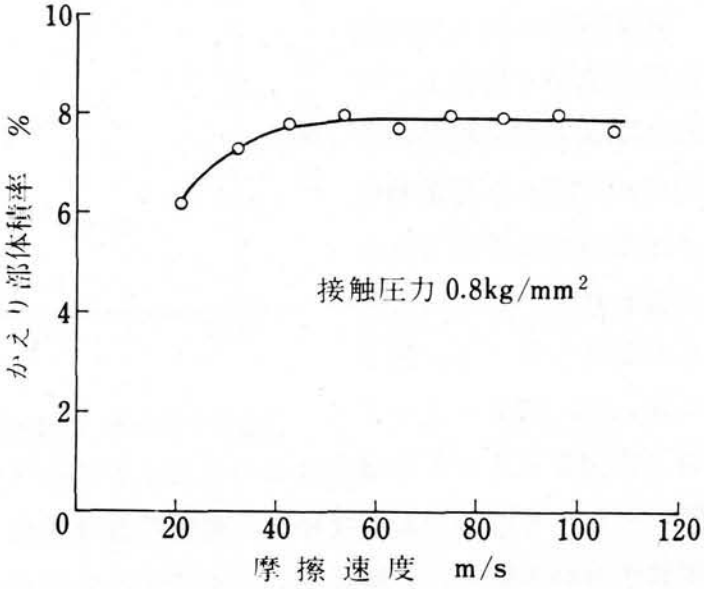


図2－3－10　かえり部体積率と摩擦速度の関係

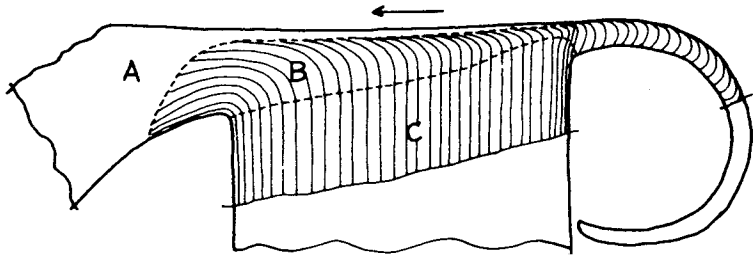


図２－３－11 結晶組織の流れを示すスケッチ

ある．Ａ部は結晶組織が細かく，個々の結晶粒界がはっきりしない部分である．摩擦面表層部に結晶粒がはっきり見られないのは摩擦力のため結晶粒が細かく破壊されているためであろう．後方かえりの裏側の付け根部には結晶粒が見られるが，後方かえりの大部分で結晶粒界はほとんど観察できなかった．それは後方かえりが実験中赤熱状態にあり，微小な再結晶粒子が生成しているためであろう．Ｃ部は摩擦試験の影響がほとんど見られない部分で，試験片素材として 9.0 mm 厚さの平鋼を熱処理せず熱間圧延のままで使用したため，圧延方向に平向な繊維組織が見られる．またＢ部はその組織が摩擦力のため曲げられている部分である．摩擦部後方では摩擦表面の約 2.2 mm 内部から組織が曲げられており，かなり高温軟化していることがわかる．

試験片摩擦面中央部におけるかたさ分布を図２－３－12 に示す．摩擦面から約 0.5 mm 内部で最高かたさになり，約 3.5 mm 内部で素地のかたさになっている．試験条件は摩擦速度 64.4 m／s，接触圧力 0.8 kg／mm² である．

図２－３－13 は高荷重域における摩擦試験の場合の試験片摩擦面の外観写真である．試験条件は摩擦速度 85.8 m／s，接触圧力

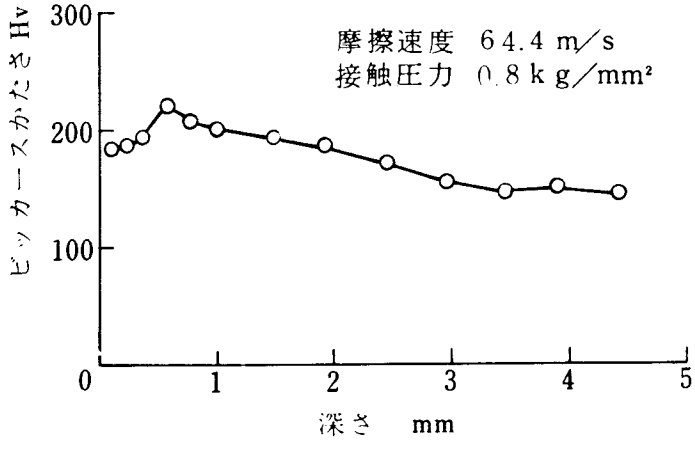


図２－３－12 試験片中央部のかたさ分布

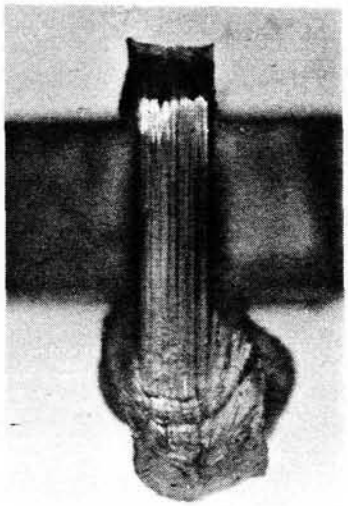
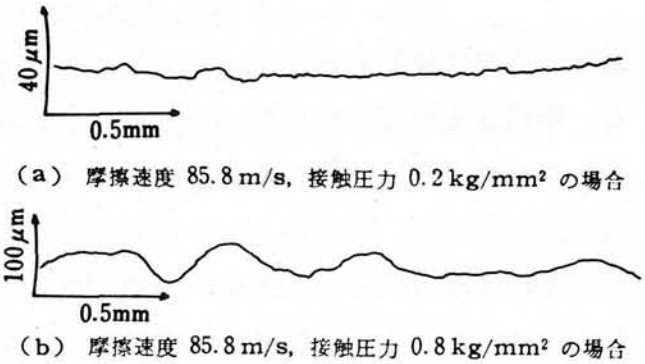


図２－３－１３ 試験片
摩擦面の外観写真
（摩擦速度 85.8 m／s，
接触圧力 0.8 kg／mm²）

0.8 kg／mm² である．摩擦面には大きな摩擦すじができており，その表面あらさを仕上面検査機で記録したのが図２－３－１４（b）である．また同一摩擦速度で接触圧力 0.2 kg／mm²の低荷重域の場合の摩擦面あらさ曲線を図２－３－１４（a）に示す．摩擦面は低荷重域の場合，



（a） 摩擦速度 85.8 m/s，接触圧力 0.2 kg/mm² の場合

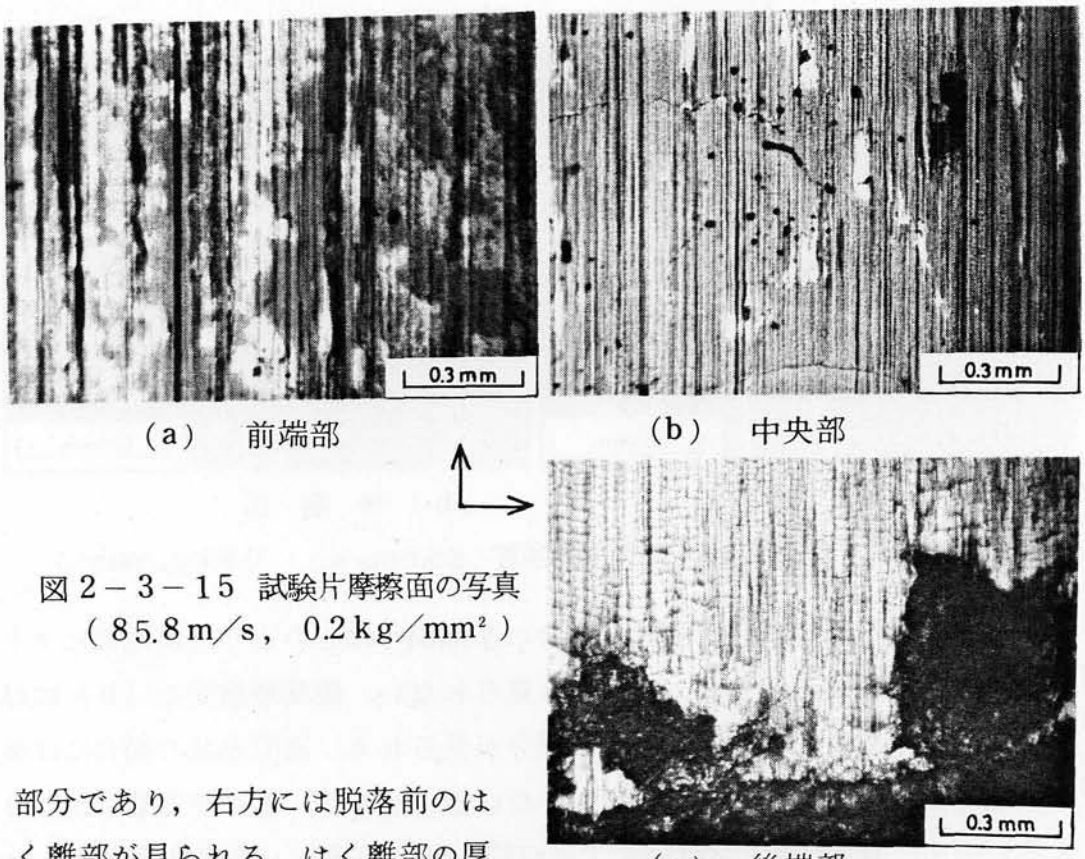
（b） 摩擦速度 85.8 m/s，接触圧力 0.8 kg/mm² の場合

図２－３－１４ 試験片摩擦面のあらさ曲線

最大高さあらさ 5μm 程度以下の平滑な面であるが，高荷重域の場合 50μm 程度の大きいでこぼこが見られる．

３．１．４ 試験片および摩擦円板の摩擦面の観察

図２－３－１５は低荷重域（摩擦速度 85.8 m／s，接触圧力 0.2 kg／mm²）の場合の試験片摩擦面の前端，中央，後端の写真である．（a）は前端部で，黒く見える部分は肉眼では黒紫色に見え，Fe_3O_4 の酸化膜であり，白く見える部分はあまり酸化されていない部分である．（b）は中央部で，ほとんど全面酸化膜で覆われており，ところどころ酸化膜にクラックを生じている．（c）は後端部でクラックが密生し，一部はく離している．このようなはく離は摩擦面中央部では実験直後にはあまり見られないが，１か月程度実験室中に放置したものにはしばしば見られる．クラックから酸化膜の下方に腐食が進行したためであろう．図２－３－１６ははく離部の斜切断面（摩擦方向を含み摩擦面に 45°の面）である．図中左方は既にはく離脱落した



(a)　前端部　　(b)　中央部

(c)　後端部

図２－３－１５ 試験片摩擦面の写真
（８５.８m／s，０.２kg／mm²）

部分であり，右方には脱落前のはく離部が見られる．はく離部の厚さは約２０μmである．

図２－３－１７は高荷重域（摩擦速度８５.８m／s，接触圧力０.８kg／mm²）の場合の試験片摩擦面の写真である．（a）は前端部，（b）は後端部で，（a）の左側部に黒く特に大きいみぞが見られるが，大きい摩耗粉が摩擦円板とともに回転して，再び前方かえりと摩擦円板の間にかみ込まれて生じた大きい引きかき傷である．また摩擦面には

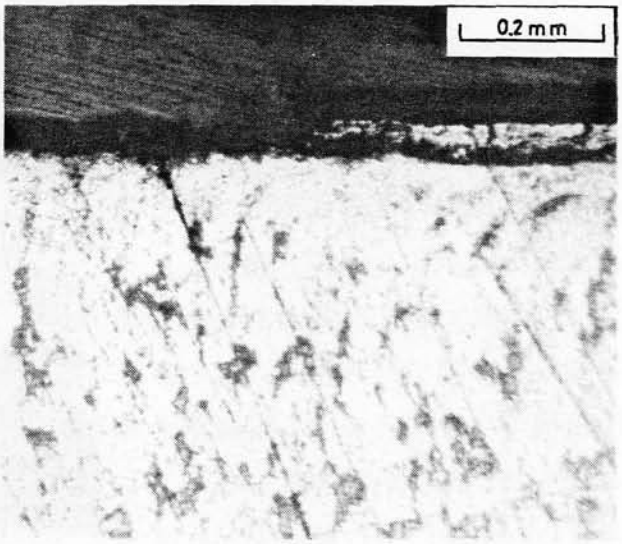
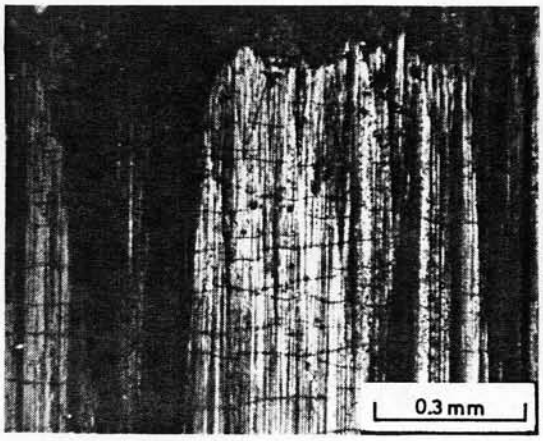
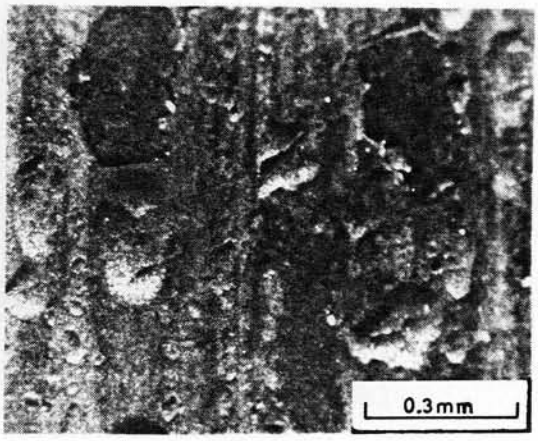


図２－３－１６ はく離部の４５°斜切断面





（a）前 端 部　　（b）後 端 部

図2－3－17　試験片摩擦面の写真（85.8m／s，　0.8kg／mm²）

クラックが見られる．高荷重域の場合の摩擦面ではこのように前端部にクラックが見られるが，中央部より後には見られない．後部摩擦面の（b）には酸化膜の膨らんだ部分や，脱落した部分が見られる．高荷重域の場合には後方かえりは摩擦熱によって試験中だいだい赤色を帯び，また熱容量もかなり大きいので，試験後急には冷却せずその間に酸化が進み，熱間鍛造品のスケールのような状態になっている．　したがって高荷重域の場合には，試験片摩擦面は摩擦中と試験後観察するときではかなり様子が違っていると考えられる．

図2－3－18は高荷重域（摩擦速度85.8m／s，接触圧力0.8kg／mm²）で鋼板S35C試験片と摩擦した後の円板摩擦面の写真である．黒く見える部分は試験片側から融着した部分で，摩擦は実質的にはこの融着部と試験片の間で行われる．そのため円板側では融着部がはく離脱落するときその一部がかけて落ちることも考えられるが，その量は少なくほとんど摩耗を生じない．このように摩

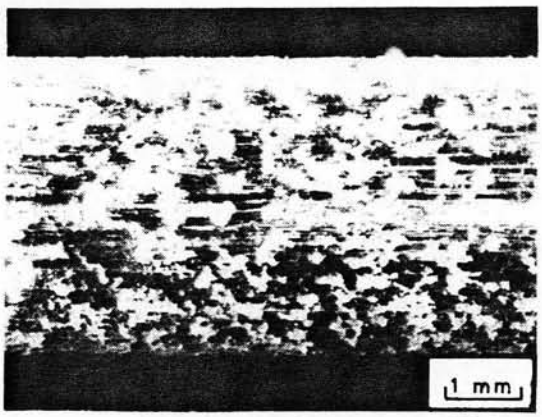
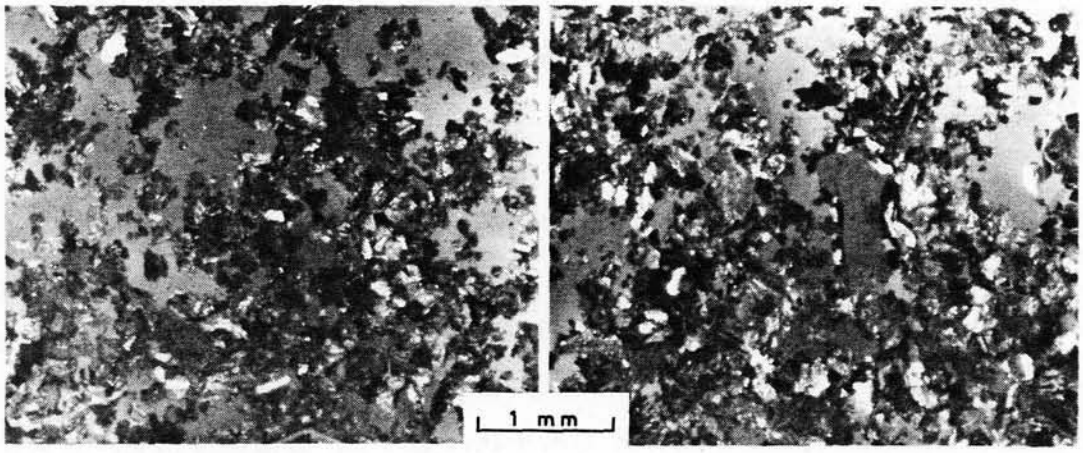


図2－3－18 円板摩擦面の写真
（85.8m／s，0.8kg／mm²）

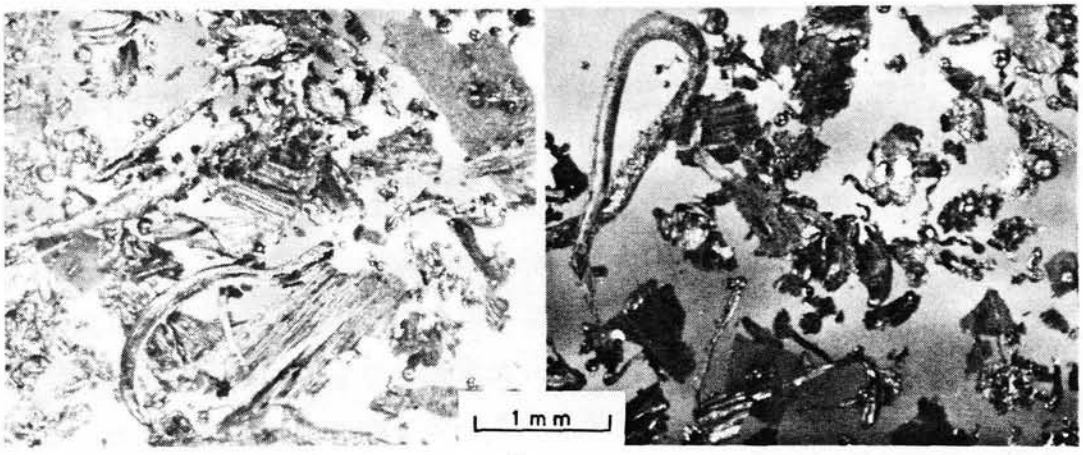
擦面積に大きい差がある場合，１回転中のわずかな接触時間だけ摩擦される円板側摩擦面は高速すべりでほとんど摩耗しないと考えてよい[22~24]．

３．１．５　摩耗粉の観察

図２－３－１９は摩擦試験によって生じた摩耗粉を摩耗粉受けで集めたものの拡大写真である．（a），（b）は低荷重域（接触圧力 0.17 kg／mm²），（c），（d）は高荷重域（接触圧力 1.0kg／mm²）のもので，（a），（c）は摩擦速度 32.2m／s，（b），（d）は 64.4 m／s のものである．低荷重域の摩耗粉は小さく，ほとんどりん片状のもので，摩擦速度が大になるとわずかに大きくなっているようである．これに対して高荷重域での摩耗粉は，完全に溶融して表面張力で球状になったもの，摩擦円板に融着し次回以後の摩擦時にはく離したりん片状のもの，摩擦円板のとつ部で直接けずり取られた切りくず状のものの３種類から成っている．図２－３－２０はこれらのうちのりん片状摩耗粉の顕微鏡写真である．円板に凝着した側の面には不規則で方向性のないでこぼこが見られるが，摩擦面側には摩擦すじが見られ，これは図２－３－１８で黒く見えた部分に対応する．摩擦試験を終わり試験片を摩擦円板から離すとき摩擦面間にあった流動状のものがたまたま試験片側にはく状に付着して残ったものが図２－３－２１のように観察された．これらの図から総合して考えると，高荷重域の場合完全な流体潤滑状態とは言えないが，試験片摩擦面のかなりの部分が流動状の膜で覆われている．また鋼のガス切断が容易に行えるのは，母材Ｆｅの融点（1535°C）より酸化物ＦｅＯの融点（１３８０°Ｃ）が低く流動性が良いことがその理由の１つと言われている[25]．流動状になった試験片摩擦面はひえたままのかたい円板摩擦面によってぬぐい取られ，あるいはかきとられる．このことが比較的大きい比摩耗量にもかかわらず摩擦係数が小さい理由であろう．また火の粉状摩耗粉の一部は円板とともに回転し，その間に冷却しかたくなって前方かえりと円板の間から引き込まれ研摩材の働きをし，円板摩擦面の突起部とともに軟化流動状の試験片摩擦面をアブレシブ摩耗的に引きかき，そのために図２－３－１３，図２－３－１４（b）のように大きい摩擦すじ目を生ずるのである．



(a) 32.2 m/s , 0.17 kg/mm² (b) 64.4 m/s , 0.17kg/mm²



(c) 32.2 m/s , 1.0 kg/mm² (d) 64.4 m/s , 1.0 kg/mm²

図 2－3－19 摩耗粉の写真

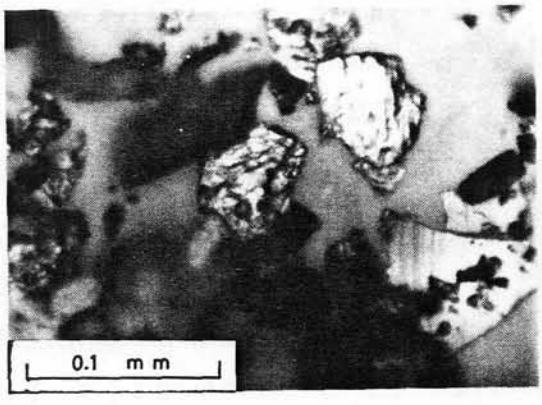


図2－3－20 りん片状摩耗粉の拡大写真

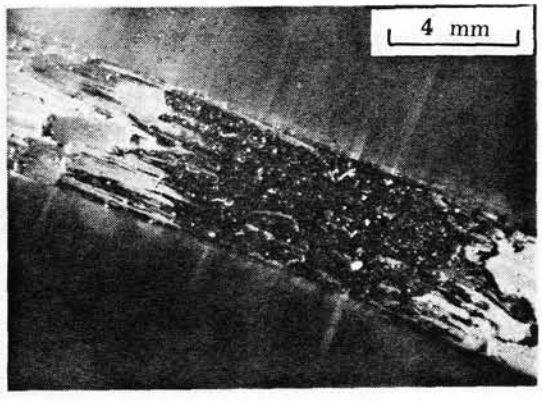


図2－3－21 試験片摩擦面上に残ったはく片状摩耗粉

３．１．６　摩擦面温度および摩擦熱の配分率

試験片摩擦面の温度を推定するために，図２－３－２２に示すような摩擦面近傍の温度を熱電対で検出できるようにした試験片を製作した．使用した熱電対は線径0.4 mmのＣＡ熱電対で，高温接点は直径約１mmの球状であり図中の①～⑥で示した位置に絶縁がいしを用いて装入した．また熱電対と試験片の接触を良くするため絶縁がいしを押しねじで固定した．図２－３－２３はこの試験片を用いて実験したときの試験片の各位置における温度上昇線図である．図中の番号は図２－３－２２の熱電対位置に対応している．実験条件は摩擦速度６４.４m／s，接触圧力 1.0kg／mm² である．（a）は各熱電対装入位置に対する温度上昇と摩耗深さの関係である．（b）は各測定位置の温度が時間的にどのように変化するかを示すために（a）を書きなおしたものである．例えば曲線②は②の位置((深さ12mm)を摩擦しているときの①～⑥の位置の温度を示している．⑥の位置を摩擦しているときは摩擦円板近傍の試験片全体が約３００°Ｃ以上になっていることがわかる．最高検出温度は約８００°ＣでＦｅＯ の融点（１３８０°Ｃ）に比べればかなり低い．試験後の断面は図２－３－２４に見られるように錐穴先端が押されて高温接点をかえりでつつむような形になっているが，接点前端と摩擦面の間には約0.7 mm の距離がある．そこでがいしが後退しないようにエポキシ系接着剤で固定し，熱電対が切れるまで実験したが，約１０００℃を超す温度は検出できなかった．しかし，図２－３－２１および後掲の図２－３－５３を参照して考え合わせると，試験片表層はＦｅＯ の融点ないしはそれに近い温度に達しており，温度こう配が急激なためそのような高い温度が熱電対で検出でき

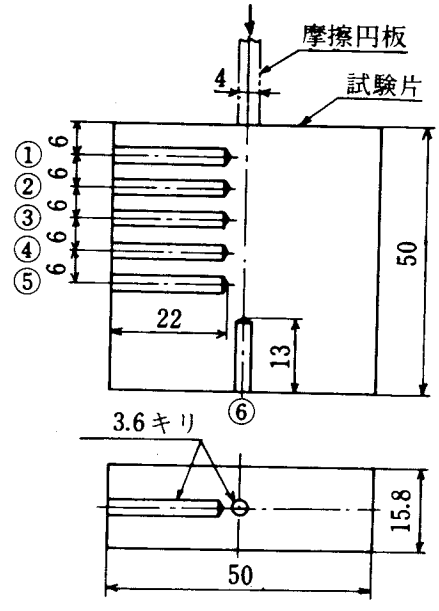


図２－３－22　熱電対装入位置

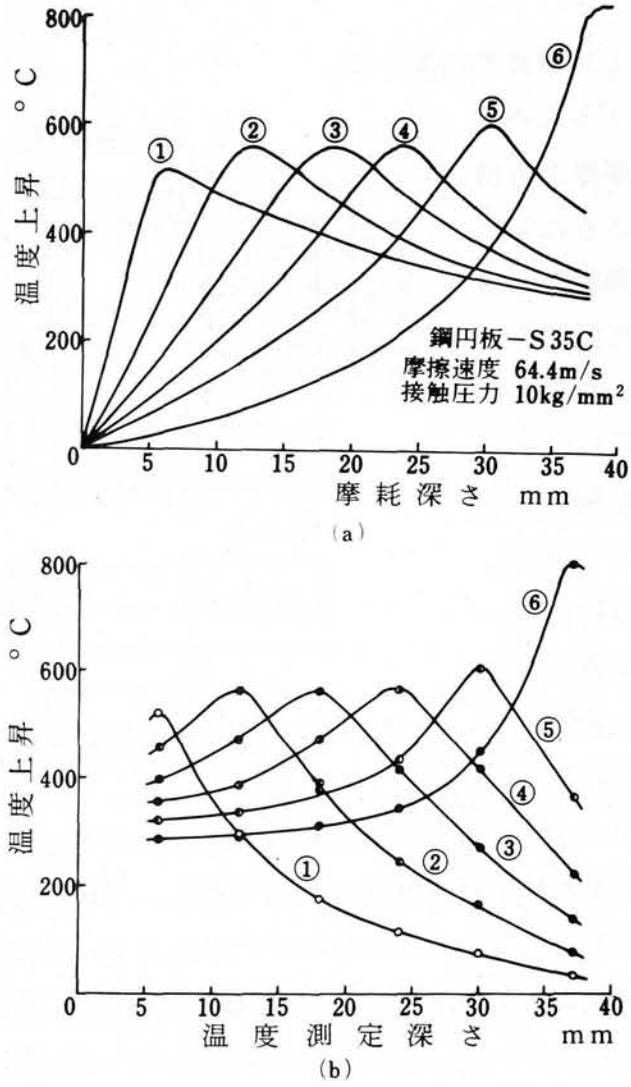


図2－3－23 試験片の温度上昇

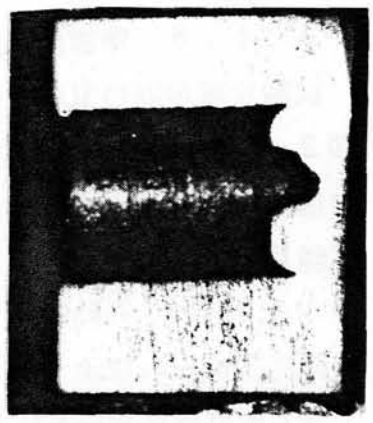


図2－3－24
試験後の熱電
対装入部断面

なかったにすぎないと思われる.

図2－3－25に示すような水路を設けた試験片を水冷しながら摩擦試験したときの摩擦による切込み量（摩耗深さ）と水の温度上昇が摩擦時間とともにどのように変わるかを図2－3－26（a），（b）に示してある.

冷却水の温度上昇の測定には試験片水路の出口と入口に，CA熱電対を装入して温度差を直接記録計に記録する方法

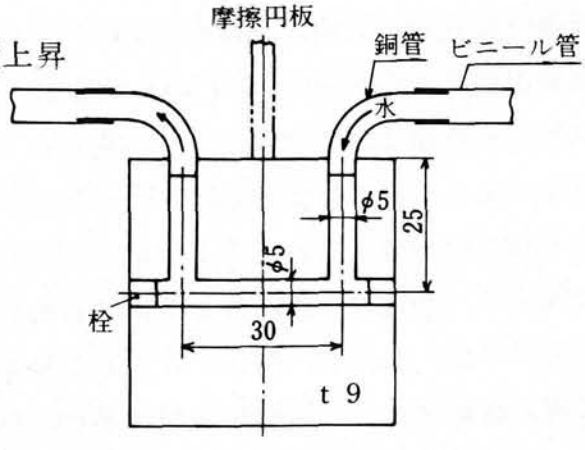


図2－3－25 試験片水冷の方法

をとった．冷却水量 13.2，30.1 cc／sの場合，水冷しない場合と比べ特に違いは見られなかったので，流量を62.5 cc／sに増加したがこの場合にも水路直前まで摩耗状態は変わらなかった．しかし水路に接近すると水冷による摩擦温度の低下のため摩耗率が低下し，試験後の摩擦面は低荷重域の場合と同様滑らかな黒紫色であった．また水の温度上昇も摩耗率の低下に伴い急激に低下した．なお実験後の水路断面は図2－3－27のように摩擦面側が押されて後退しており，その部分の厚さは約1 mmであった．本実験程度の水量では水冷の効果は水路直前まででてこないことがわかる．

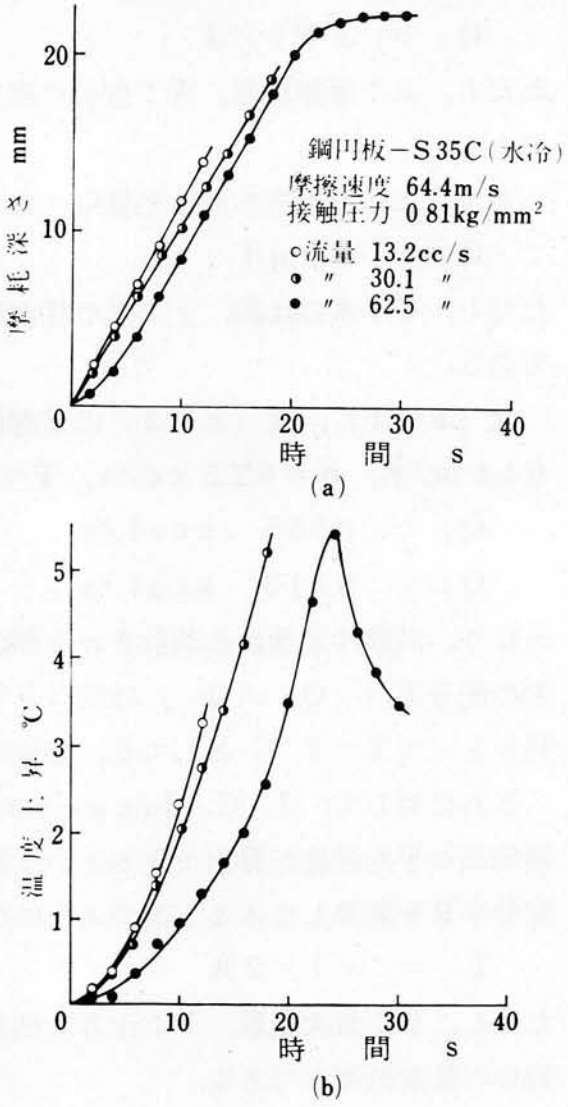
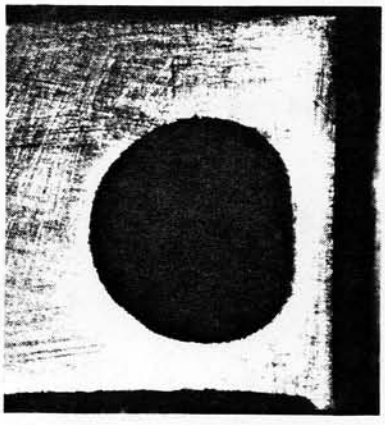


図2－3－26　水冷摩擦時の試験片摩耗深さ（a）と水の温度上昇（b）の経過



← 図2－3－27
試験後の水路部断面

摩擦仕事を熱量Q_1に換算すると次のようになる.

$$Q_1 = \mu W v / J \qquad (2-1)$$

ただし, μ：摩擦係数, W：押付け荷重, v：摩擦速度, J：熱の仕事当量である.

また, 水に持ち去られる熱量Q_2は次式で表せる.

$$Q_2 = C \gamma q T \qquad (2-2)$$

ただし, C：水の比熱, γ：水の比重量, q：体積流量, T：水の温度上昇である.

式（2－1）, 式（2－2）に実測値$\mu = 0.129$, W＝29 kg, v＝64.4 m／s, q＝62.5 cc／s, T＝5 ℃を代入すると,

$$Q_1 = 0.565 \quad \mathrm{kcal/s}$$

$$Q_2 = 0.313 \quad \mathrm{kcal/s}$$

となり, 試験片表面から放散される熱伝達を無視した場合の試験片への摩擦熱の配分率（＝Q_2／Q_1）は約55％となる. 実験の比較的初期の温度上昇をとってT＝2 ℃としても, 配分率は約22％になる.

これに対して, J. C. Jaegerの式[26]を見かけの接触面に適用すれば, 接触面の平均温度が算出できるという考え方[27]もあるので, 大胆な摩擦熱の配分率Rを試算してみると次のようになる.

$$L = v l / 2K \qquad (2-3)$$

ただし, L：無次元数, l：正方形熱源と仮定した一辺の長さの半分, K：物体の温度伝導率である.

ここで, v＝64.4m／s, l＝3 mm, K＝0.134 cm²／sとすると,

$$L = 7209$$

となり, 熱の配分率Rは次式（2－4）で計算できる[28].

$$R = \frac{0.796\,\lambda_2}{0.796\,\lambda_2 + \lambda_1\sqrt{L}} \qquad (2-4)$$

ただし, λ_1, λ_2：円板および試験片の熱伝導率である.

ここで, L＝7209 を代入すると, 熱の試験片側への配分率Rは次のようになる.

R ＝ 0.0093

したがって，本実験の場合J.C.Jaeger の式を使用した場合熱の配分率は約1％にしかならない．前述のように水路近くまで摩耗率は水冷の影響を受けていないので，とくに水冷しない場合でも試験片全体の平均温度がいくぶん上昇し，熱伝達による空中への放散が多くなるだけで摩擦熱の配分率にはあまり大きく影響しないと思われる．これらのことから本実験条件にはJ.C.Jaeger の式は適用すべきでないと思われる．なお同様のことから試験片の性質のうち熱伝導率そのものは，本実験条件では比摩耗量にほとんど影響しないと言える．

円板の表面温度が摩擦とどのような関連性があるかを知るために，赤外線ふく射温度計を用いて図2－3－28に示すような位置の円板表面温度を測定した．その結果，図2－3－29に示すような比摩耗量と円板表面温度の関係が得られた．銅円板－S35C試験片の組合せで，低速での円板表面温度は80～110°Cであるが，比摩耗量は高速（130～200

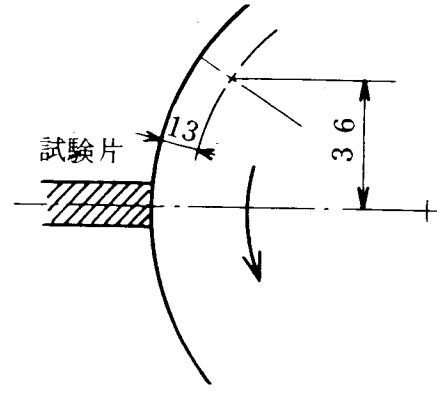


図2－3－28 温度測定位置

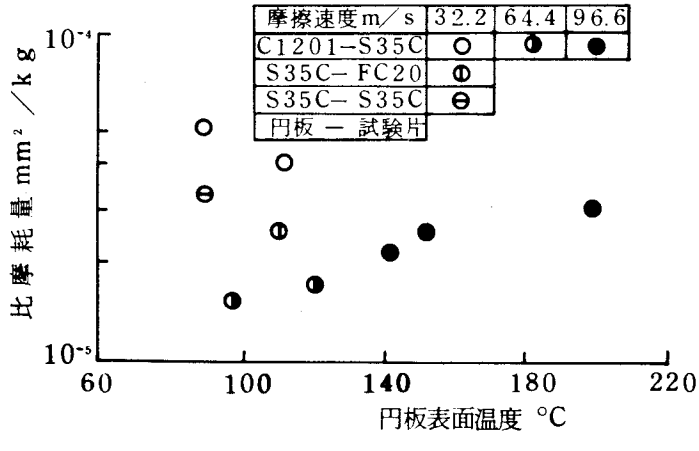


図2－3－29 比摩耗量と円板表面温度の関係
（接触圧力 0.96 kg／mm²）

°C）に比べ大きくなっている．また鋼円板の場合にも，銅円板のときと同じくらいの温度になっていることがわかる．いづれにしても円板の表面温度は80～200℃程度で，試験片摩擦面の平均温度はＦｅＯの融点またはそれに近い温度まで上っているので，円板の温度が直接摩擦力，比摩耗量などに影響を与えるとは考えられない．なお円板と赤外線ふく射温度計の距離は1.5ｍで，空気中で測定した．

3．2　ふん囲気の影響

炭素鋼の乾燥摩耗においては，摩擦速度の増加につれてそれぞれ主として Fe_2O_3，Fe_3O_4，FeO の酸化膜を生ずる速度域で比摩耗量および摩擦係数が低下すると言われている[7]．本研究でもすでにこのような傾向，特にFeOが主として減摩作用を果たす高速の場合，摩擦速度の増大とともに摩擦面平均温度が上昇し，酸化膜を生成しやすくなり，比摩耗量および摩擦係数が低下することを明らかにした．酸化膜の減摩作用をより明確にするため本項では試験片を炭素鋼S20Cに限定して，摩擦ふん囲気を窒素，酸素に変えて，酸化膜の生成を抑制したり，促進させたりして空気中の場合と比較検討する．

3．2．1　摩擦摩耗の接触圧力特性

図2－3－30は摩擦速度64.4m／sにおける比摩耗量と見かけの接触圧力との関係を示している．この図で空気中の場合の比摩耗量の値は，これまでに述べてきた大気中開放の実験装置で得られた値でなく，特殊ふん囲気中摩擦実験装置を使用して，コンプレッサから空気を送り込みながら実験して得られた値である．しかしこれらの実験値は大気中開放の実験装

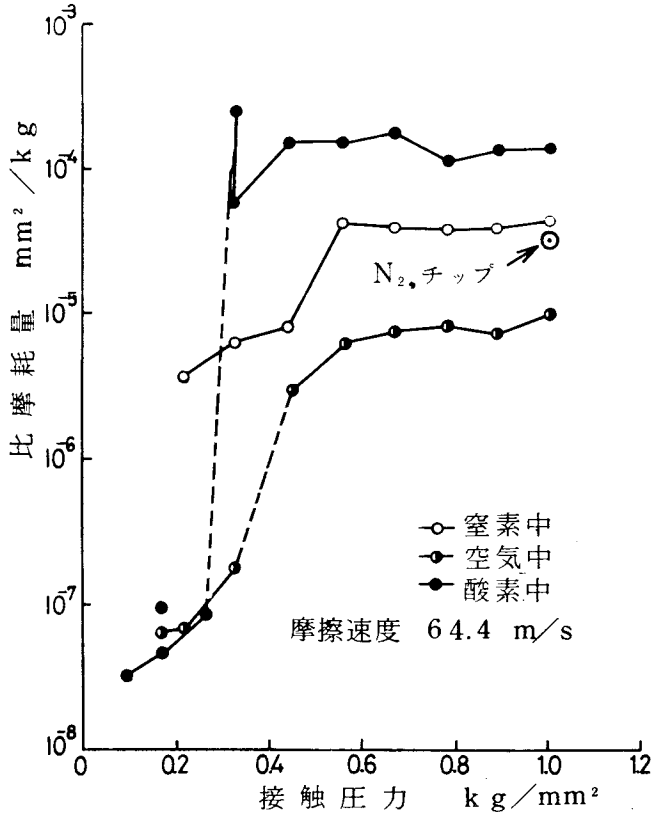


図2－3－30　比摩耗量に対するふん囲気の影響

置で得られた図２－３－１と同様の結果を示している．接触圧力約0.4kg／mm²以上の高荷重域の比摩耗量はそれ以下の低荷重域の値のほぼ10^2倍になっており，摩擦摩耗の機構が異なっている．低荷重域では摩擦面は黒紫色の酸化膜で覆われ平滑でありmild wearの領域である．高荷重域では摩擦面は青みを帯びた酸化膜で覆われているが，かなり大きい摩擦すじが見られsevere wearの領域である．酸素中では低荷重域で空気中とあまり大きい比摩耗量の差はないが，高荷重域では空気中よりもはるかに大きく，低荷重域に比べて10^3倍以上に増大している．空気中の臨界圧力では試験中に急に摩耗がはげしくなったり，また少なくなったりする不安定現象が見られる場合があったが，定常的に比摩耗量が中間的値を示すことはなかった．しかし酸素中の臨界圧力ではsevere wearの範囲で比摩耗量の大きい状態を経過してより小さい状態にほぼ落ちつくようである．図中で酸素中の接触圧力約0.3kg／mm²における比摩耗量の測定点が２つ示されているのはそのためである．

高荷重域における摩耗量の時間的経過を一般的に示すと図２－３－３１のようになる．摩擦初期の数秒間は摩擦面平均温度が低く比摩耗量も小さいが，その間に摩擦熱が蓄積して平均温度が上昇し摩擦面が軟化し，比摩耗量が急に大きくなる．その後一定の大きい比摩耗量で摩耗が進行する．一般には初期摩耗率が定常摩耗率より大きいが，高速高荷重域ではその逆になっている．ところで酸素中の臨界圧力では，上述のように比摩耗量の大きい状態を経過して定常

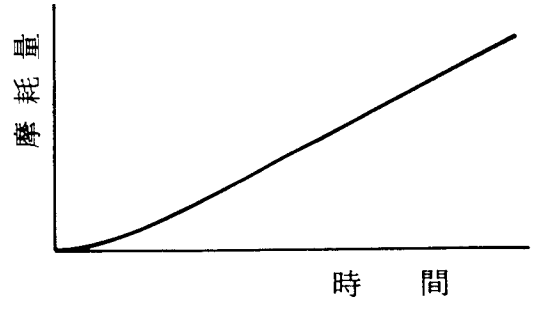


図２－３－３１　一般的摩耗の形態（高荷重域）

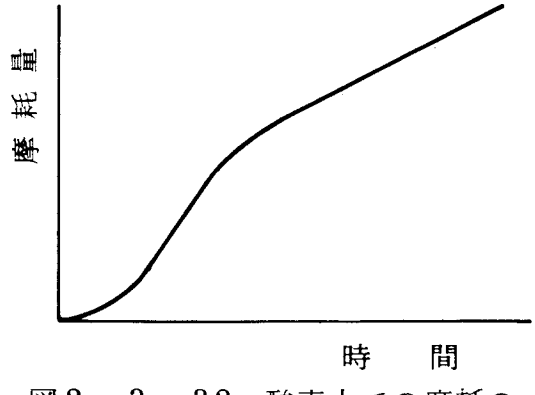
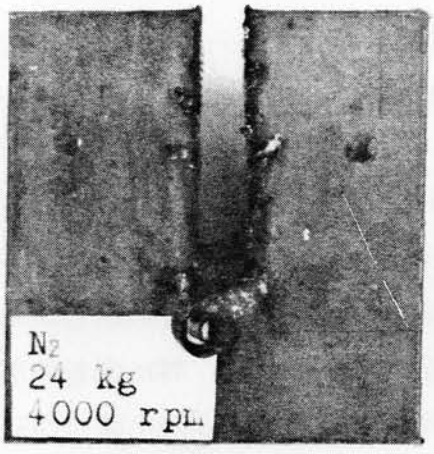


図２－３－３２　酸素中での摩耗の形態（臨界状態）

摩耗状態に入る．その経過を図示すると図２－３－３２のようになる．その理由は摩擦初期の比摩耗量が低い間に摩擦熱が蓄積され摩擦面平均温度が上昇すると，酸素中のため燃焼的な急激な酸化が起こり，比摩耗量は大きくなる．しかしその急激な摩耗によって高温部分を通過すると，摩擦面に定常的なＦｅＯ酸化膜を生成しながらいくぶん低い比摩耗量で定常状態になる．このような経過を示す場合の試験片の写真を図２－３－３３（ａ）に示す．図からわかるように摩擦円板と直接接触しない部分も溶融脱落している．その部分についてはガス切断と同様の現象が起こっていると考えられる．溝幅の狭い部分が定常摩耗の部分である．臨界圧力を超えた高荷重域では摩擦試験の始めから摩耗によるくい込み速度が大きいため摩擦熱および酸化熱の蓄積が起こらず，わずかの初期摩耗期間を経た後一定の比摩耗量が維持される．



（ａ）酸素中（臨界状態）　　（ｂ）窒素中

図２－３－33　試験片の摩耗状態

窒素中では低荷重でも減摩作用を果たす保護被膜ができないため比摩耗量は大きく，高荷重域になっても約１０倍の増大にとどまっている．また図２－３－３０の⊙印で示した点は実験中に円板凝着物をセラミック工具で切除しながら摩擦試験したときの比摩耗量の値で，摩耗量の約３０％が大きな円板凝着物の影響であることがわかる．窒素中でははげしい凝着のため摩耗量の約７０％は見かけ上の凝着摩耗と考えられる。このように窒素中では凝着がはげしいため，全般的に他のふん囲気気体中に比べて実験装置の振動がか

なり大きかった．なお窒素中での摩擦試験後の試験片はほとんどの場合，図２－３－３３（ｂ）のように摩擦試験後期になるほど円板側面の凝着物のため摩耗幅が広くなっていた．しかし，本論文での比摩耗量の値は試験片の円板方向への移動速度から計算したので，このようにして摩耗した部分は含まれていないことになる．臨界圧力は酸化性ふん囲気ほど低く，酸素中で最も低く，空気中，窒素中の順に大きくなっている．この理由は酸化熱による表層軟化に帰せられるであろう．これは，笹田の「温度上昇にともなって付着限界がより低荷重側に移行し，臨界圧力を下げ非付着域の範囲を狭める」という議論[29]とも一致する．しかし，高荷重域では空気中で最も比摩耗量が小さく，比摩耗量を最小にする適当なふん囲気酸素濃度があると言える．

図２－３－３４は前述の摩擦速度64.4m／sの場合の比摩耗量に対応した摩擦係数の図である．高荷重域では全般的に接触圧力が変化しても，ほぼ一定の摩擦係数になっており，窒素中で最も大きい．また，比摩耗量の特に大きい酸素中では，比摩耗量の最も小さい空気中の場合に近い小さい摩擦係数になっている．酸素中でも摩擦面には比較的大きい摩擦すじが見られるので，Ｗｉｌｓｏｎ の表面溶融による流体潤滑状態[16]とは言えないが，軟金属薄膜による潤滑状態[30]に近いと推測される．また高荷重域では低荷重域に対して比摩耗量がはるかに大きいにもかかわらず，摩擦係数にはあまり大きい差はなく全般的に小さい．特に凝着の著しい窒素中でも0.15 程度であり，一般には高速高荷重下では酸化膜の作用もさることながら，摩擦面表層の軟化が

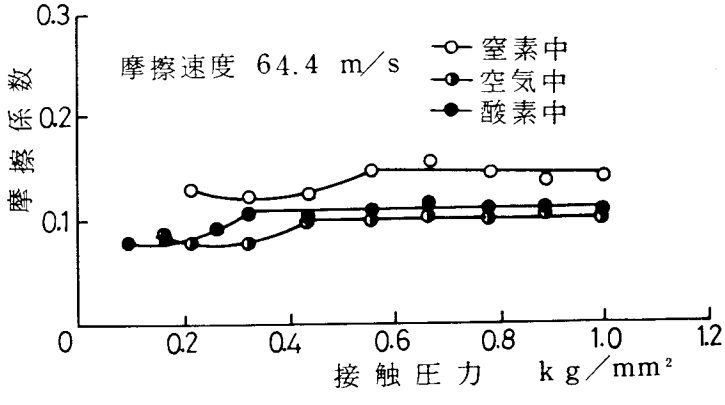


図２－３－３４　摩擦係数に対するふん囲気の影響

かなり大きく影響すると思われる．また，摩擦速度32.2m／sの場合は図の曲線を右上方へ平行移動したようになり，ほぼ同じ傾向を示す．

3．2．2　摩擦摩耗の摩擦速度特性

図2－3－35，図2－3－36は高荷重域（接触圧力 1.0 kg／mm²）の場合の比摩耗量と摩擦係数に及ぼすふん囲気の影響を示している．比摩耗量は全般的に摩擦速度の増加につれて低下しており，空気中が最も小さく，窒素中，酸素中の順に大きくなっている．摩擦係数も全般的に摩擦速度の増加につれて低下し，空気中と酸素中ではあまり違わないが，窒素中が最も大きく，特に低速域では他のふん囲気中の2倍くらいにもなっているが，速度の増加とともに急激に小さくなり，摩擦速度100m／s程度の高速では空気中や酸素中の場合に比較的近い値になっている．すでに空気中の場合に摩擦速度の増大によって比摩耗量と摩擦係数が低下するのは，摩擦面平均温度の上昇により，減摩作用を果たす酸化膜の生成が促進されるからであるとした．しかし高荷重窒素中での摩擦係数の急激な低下の原因を，酸化膜の生成に帰することはできない．窒素中では凝着が著しいため摩擦

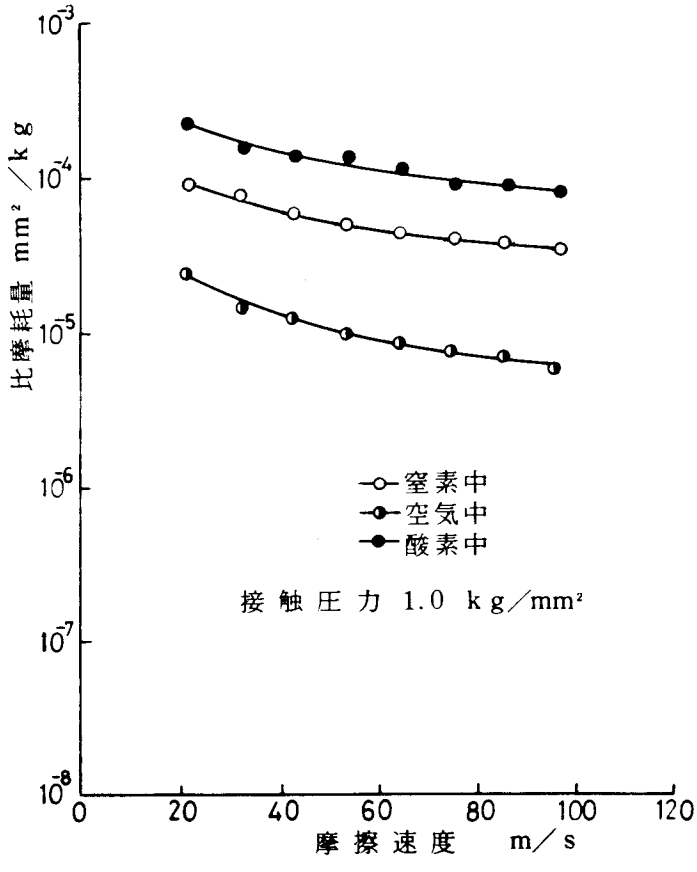


図2－3－35　比摩耗量に対するふん囲気の影響

係数が大きく，そのため摩擦仕事が非常に大きく（摩擦速度が大きければ大きいほど摩擦仕事が大きい），摩擦面表層が軟化し，表層軟化による軟金属薄膜的潤滑の効果がとくに大きく表れるためである．軟金属薄膜的潤滑効果の理論的解析は第３章で詳述し，実験結果との比較を行う．

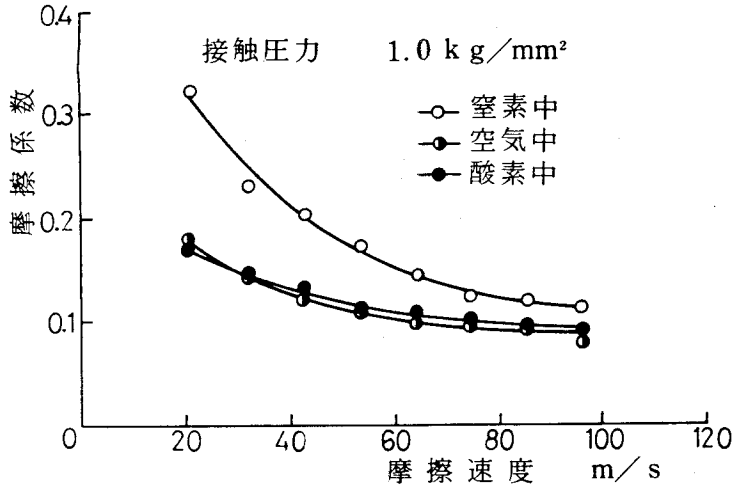


図２－３－３６　摩擦係数に対するふん囲気の影響

図２－３－３７および図２－３－３８は低荷重域（接触圧力0.17 kg／mm²）の場合の比摩耗量および摩擦係数の摩擦速度特性で，ふん囲気の影響を示している．空気中および酸素中では酸化膜の減摩作用で比摩耗量は小さいが，窒素中では凝着の傾向が著しいため，前者の10^2倍ほど大きい値になっている．低荷重域窒素中での摩擦係数が高荷重域の場合ほど急激に低下せず，空気中，酸素中と同程度に低下するだけで，高速域では空気中，酸

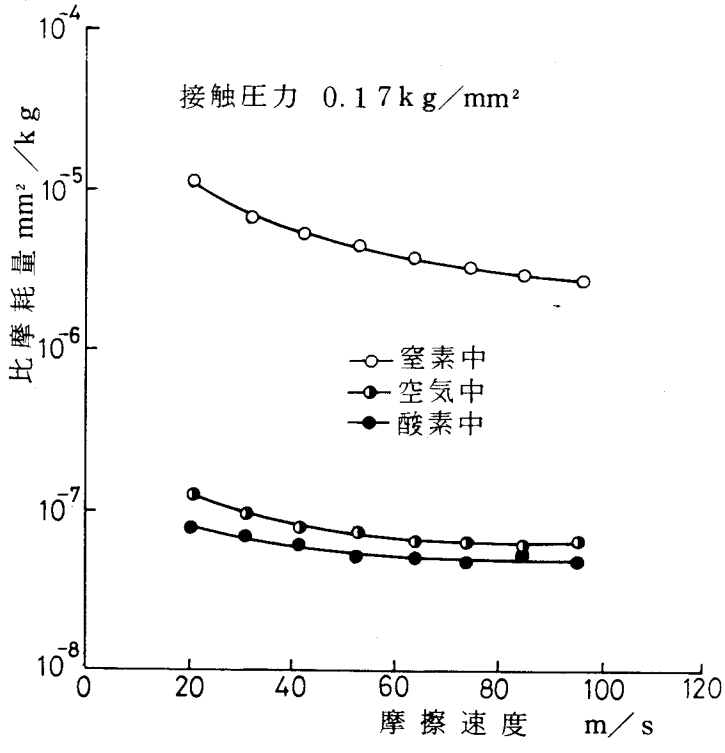


図２－３－３７ 比摩耗量に対するふん囲気の影響

素中に比べて約２倍の大きさになっている．窒素中では凝着が著しいが荷重が小さいため，摩擦面表層の軟化がそれほどみられず，軟金属薄膜の潤滑効果が少ないためであろう．したがって比摩耗量，摩擦係数は窒素中で最も大きくなっている．摩擦係数が摩擦速度の増加につれて低下する傾向やふん囲気気体の違いによる大きさの順位は高荷重域と低荷重域で異なり，低荷重域では単純に保護被膜ができやすい酸化性ふん囲気ほど小さい．

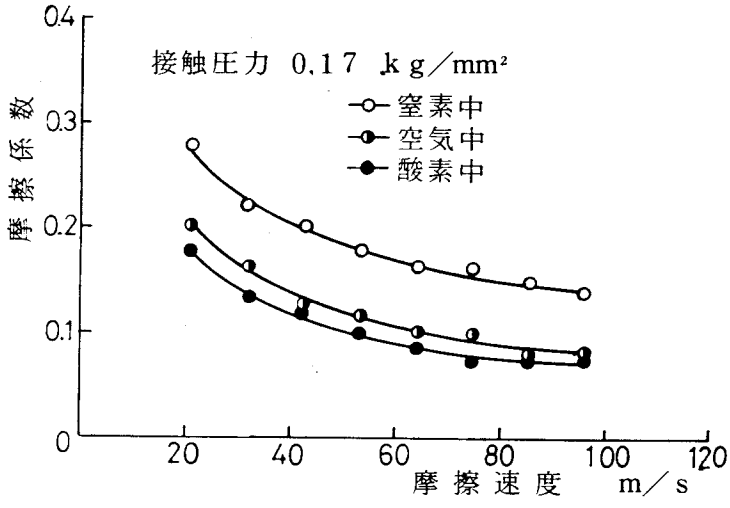


図２－３－３８ 摩擦係数に対するふん囲気の影響

３．２．３ 摩擦面の観察

図２－３－３９は摩擦速度64.4m／sにおいて荷重条件とふん囲気条件を変えたときの試験片摩擦部の外観写真である．空気中高荷重および窒素中低荷重，高荷重の場合には，摩擦部後方に大きいかえりが見られるが，空気中低荷重および酸素中の低荷重，高荷重では小さいかえりが見られるだけである．酸素中高荷重の場合のかえりはガス切断の場合と外見がよく似ている．空気中低荷重での摩擦面の前端部は白っぽく，あまり酸化されておらず，後端部はFe_3O_4の黒っぽい酸化膜で覆われている．窒素中では高荷重でも低荷重でも摩擦すじは平行でなく，後述するように（図２－３－４１，図２－３－４２参照）摩耗片の再移着がうかがえる．また，摩擦面の色は特異で前端部から中央部が少し白っぽい金色，後端部が濃青色，後方かえり部がねずみ色に見える．これは摩擦試験後充分熱を逃がしてから外気に開放した場合にも同様な色あいが見られたことと，他のふん囲気中の実験では全く見られなかった色であることから，窒化物の生成されるためか，窒素ふん囲気中に

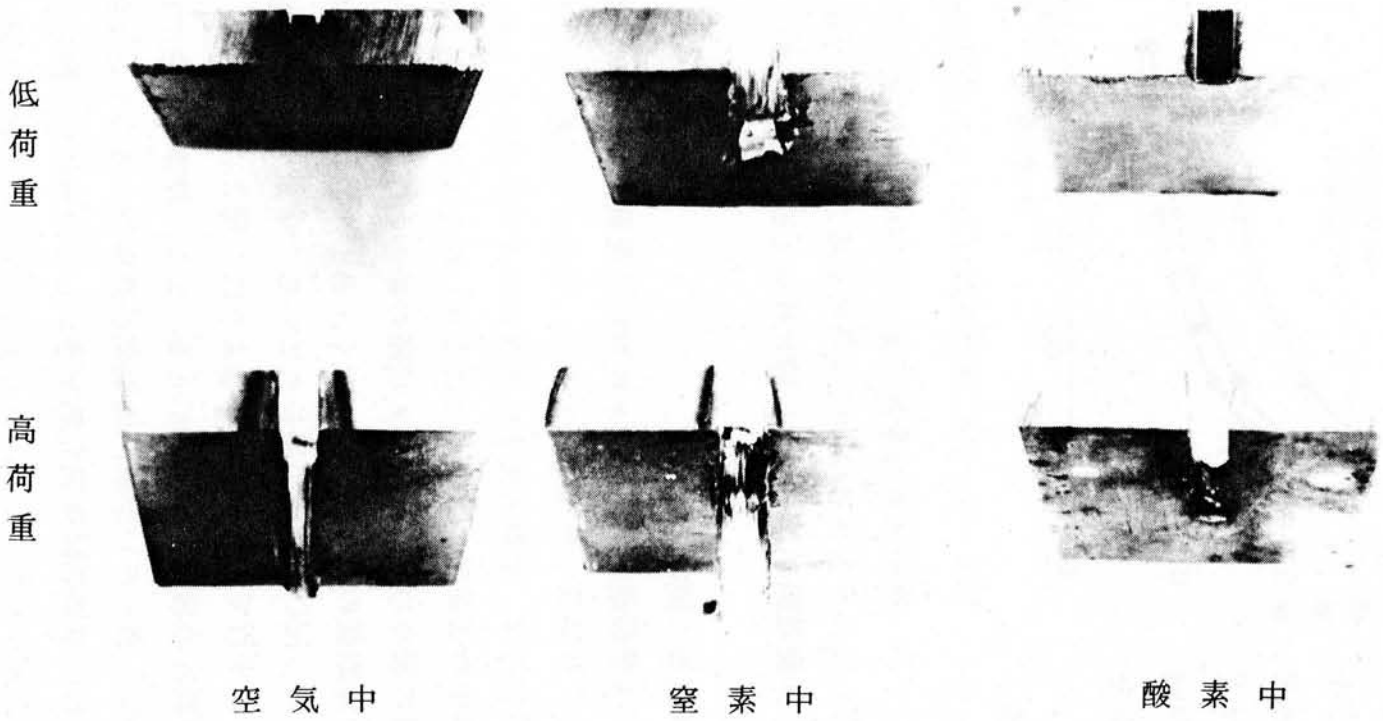


図2－3－39　試験片摩擦面の写真（64.4m／s）

あるわずかの残留酸素による非常に薄い酸化膜による干渉色と思われる．しかし後述のX線回折による分析では窒化物は検出できなかった．また写真ではわかりにくいが，後方かえり端には窒素中独特の糸状のものが付着している．窒素中の摩擦切断幅は円板側面への凝着物が多いため，他のふん囲気中のものに比べて摩擦後期ほど広いことは既述のとおりである．これを考慮して比摩耗量を計算すると，前述の実験点より１０％程度大きくなる．

図２－３－４０は高荷重域（摩擦速度64.4m／s，接触圧力1.0kg／mm²）における各ふん囲気中で試験した後の円板摩擦面の写真である．窒素中では保護被膜ができないため異常に大きい凝着物が見られる．また摩擦面（円周面）だけでなく，円板側面にも凝着物が見られ摩擦は円板円周面だけでなく円板側面と試験片切込側面との摩擦も加わる．これが他のふん囲気中に比べ摩擦係数を全般的に大きくしている理由の一つと考えられる．空気中でははく状凝着物が多いが，それが酸化されているので成長しにくく，つぎつぎにはく離脱落し，摩耗粉の中にもはく片状摩耗粉が多く見られる．酸素中では試験片摩擦面上で溶融状態となったものが，円板摩擦面全体にわたって薄く付着し，その上にところどころ流動状の酸化物がへばりついたように見える．低荷重域では空気中，酸素中ではく状凝着物が見られるが，その量は少なく，

空　気　中

窒　素　中

酸　素　中

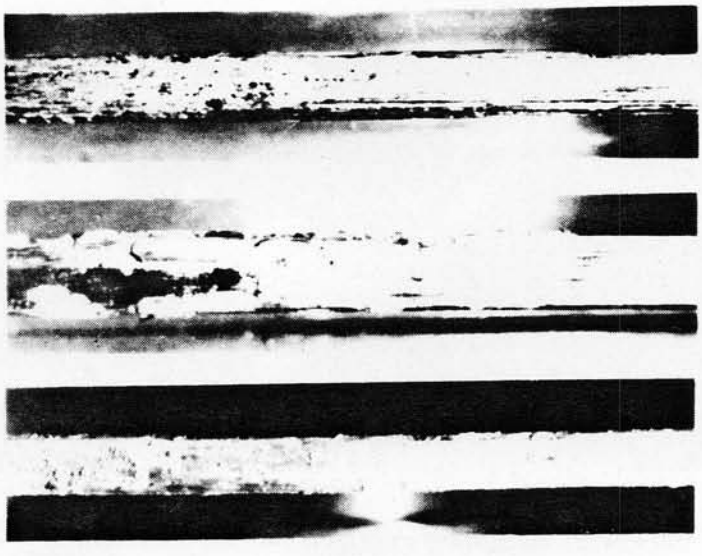


図２－３－４０　円板摩擦面の写真

窒素中では高荷重と同様の凝着物が見られるが，その大きさが小さくなっている．

図２－３－４１は，窒素中で摩擦速度３2.2ｍ／ｓ，接触圧力0.67kg／mm² の場合に，りん片状摩耗粉（片）が円板から試験片に再移着したばかりと思われる試験片摩擦面の写真である．窒素中ではこのような例がときどき見られ，摩擦すじも平行になっていない．また窒素中では円板凝着物によって摩擦面前部かえりが絶えずたたかれるため，ほとんどの場合前部かえりは割れている．図２－３－４２は図２－３－４１に示したＸ－Ｘ断面の顕微鏡写真で（ｂ），

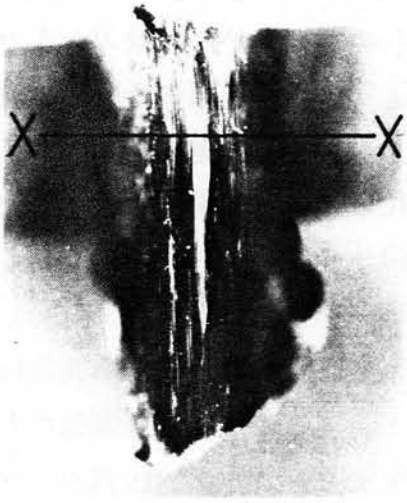
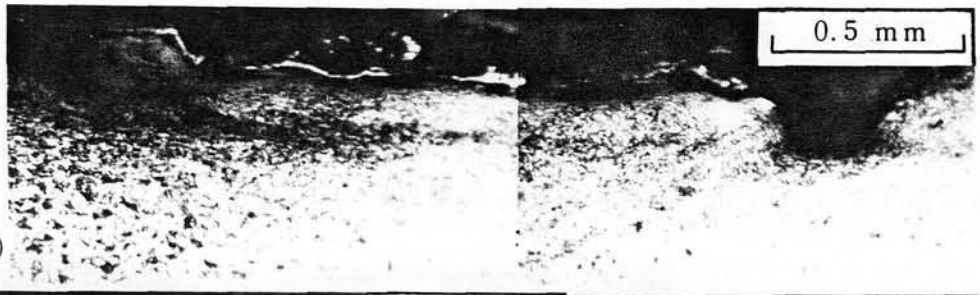
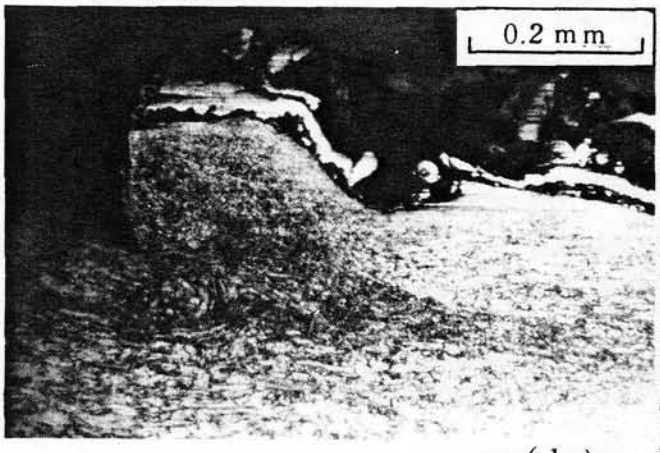


図２－３－４１　窒素中での試験片摩擦面



（ａ）



（ｂ）

図２－３－４２　窒素中での試験片断面の顕微鏡写真　（ｃ）

（ｃ）は（ａ）の拡大写真である．図からも，窒素中では保護被膜ができないため，再移着した摩耗片は試験片と完全に凝着しており組織は連続的であることがわかる．

３．２．４　摩耗粉の観察

摩耗粉は図２－２－３に示す摩耗粉受け④で集めたため，細かい粉体状の摩耗粉はあまり集められていないが，摩擦速度 64.4m／sにおける各ふん囲気中での低荷重および高荷重での摩耗粉の写真を図２－３－４３に示す．空気中低荷重の摩耗粉の大部分は通常の摩耗粉よりは大きいが，本実験中では比較的小さいはく片状摩耗粉である．高荷重の場合には切りくず状摩耗粉，円板からはく離したはく片状摩耗粉および酸化溶融した球状摩耗粉から成っている．窒素中の摩耗粉は低荷重，高荷重ともに切りくず状摩耗粉，円板凝着物の脱落したはく片状摩耗粉およびわずかの球状摩耗粉から成っており，摩擦摩耗の機構は凝着した摩耗片による引きかき摩耗的であることがわかる．図２－３－４４は窒素中でのはく片状摩耗粉の表面と裏面の写真である．はく片状摩耗粉の円板側は破断面状であり，摩擦面側にははっきりした引きかきのすじが見られる．空気中の場合のはく片状摩耗粉も同様である．しかし酸素中低荷重域でのはく片状摩耗粉は，酸化のためざらついた多孔質的表面になっている．酸素中では球状摩耗粉が多く，とくに高荷重域の場合にはほとんど球状摩耗粉から成っている．球状摩耗粉は摩擦面やかえり部が非常に高温になり，赤熱状態で摩耗粉となり，さらに飛散中に酸素との化合による急激な酸化発熱が加わり完全な流動状態となり，その表面張力で球状になったものである．酸素中では飛散中の酸化がとくに急激であり，とくに高速高荷重域では図２－３－４３に見られるような中空の大きな球状摩耗粉が生成されることがある．また酸素中高荷重域での酸化は燃焼的であり，摩耗粉受けに受けとれないような微細な酸化摩耗粉が茶色の煙として容器内に立ちこめて，観察窓から摩擦部をのぞいてもほとんど見えない状態になる．また全体的に摩擦速度による差異はあまり見られない．

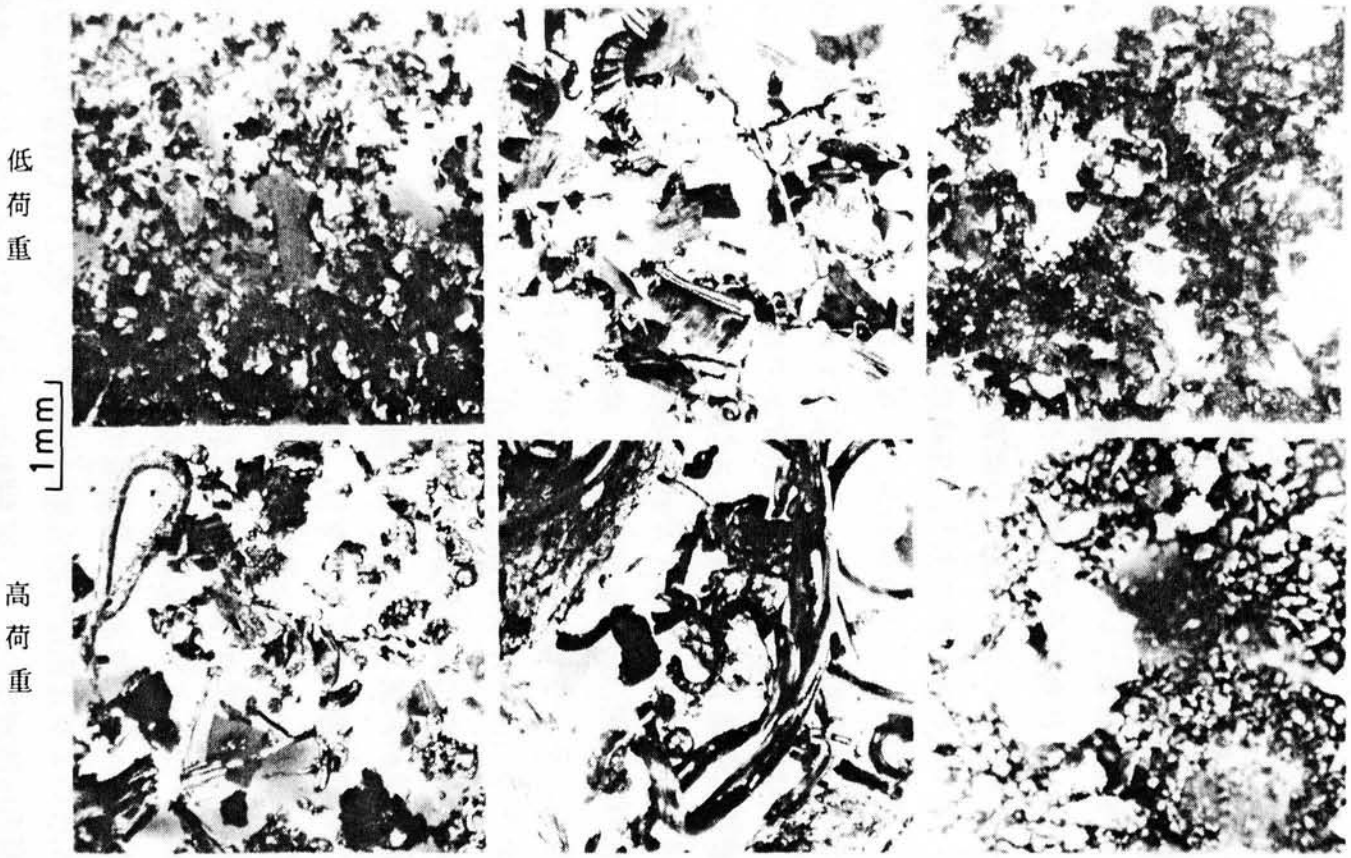


図2－3－43 摩耗粉の写真

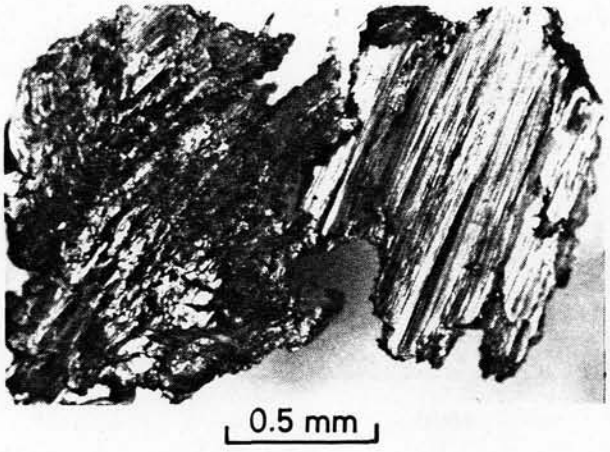


図２－３－４４　窒素中でのはく片状摩耗粉の表と裏

３．２．５　摩擦面および摩耗粉の分析

高速高荷重では試験片摩擦面近傍はかなり温度が高く，摩耗粉は火花状に排出され，試験後も室温にもどるまでにかなり酸化，窒化などの化学反応が進行するため，試験後の摩擦面や摩耗粉を分析しても試験中の状態を確認したことにはならない．それについては図２－３－１７の説明に関連してすでに述べている．しかし念のためにＸ線回折装置を用いて，定性分析をしてみた．表２－３－１にＸ線回折の測定条件を示す．図２－３－４５は高荷重域（摩擦速度64.4m／s，接触圧力 1.0 kg／mm²）における各ふん囲気中での試験片摩擦面のＸ線回折記録例である．バックグラウンドが一定になっていないが，地の鉄と各酸化物のピークが認められる．空気中，酸素中摩擦面の回折では鉄のすべての酸化物，Fe_2O_3，

表２－３－１　Ｘ線回折条件

項　目	単 位	測定条件
target		Cu
filter		Ni
voltage	kV	40
current	mA	155
full scale count	cps	1×10^4
time constant	s	0.5
scanning speed	°(2θ)/min	1
chart speed	mm/min	10
divergence slit	°	1
receiving slit	mm	0.2
scatter slit	°	1
scanning range	°(2θ)	20 ~ 120

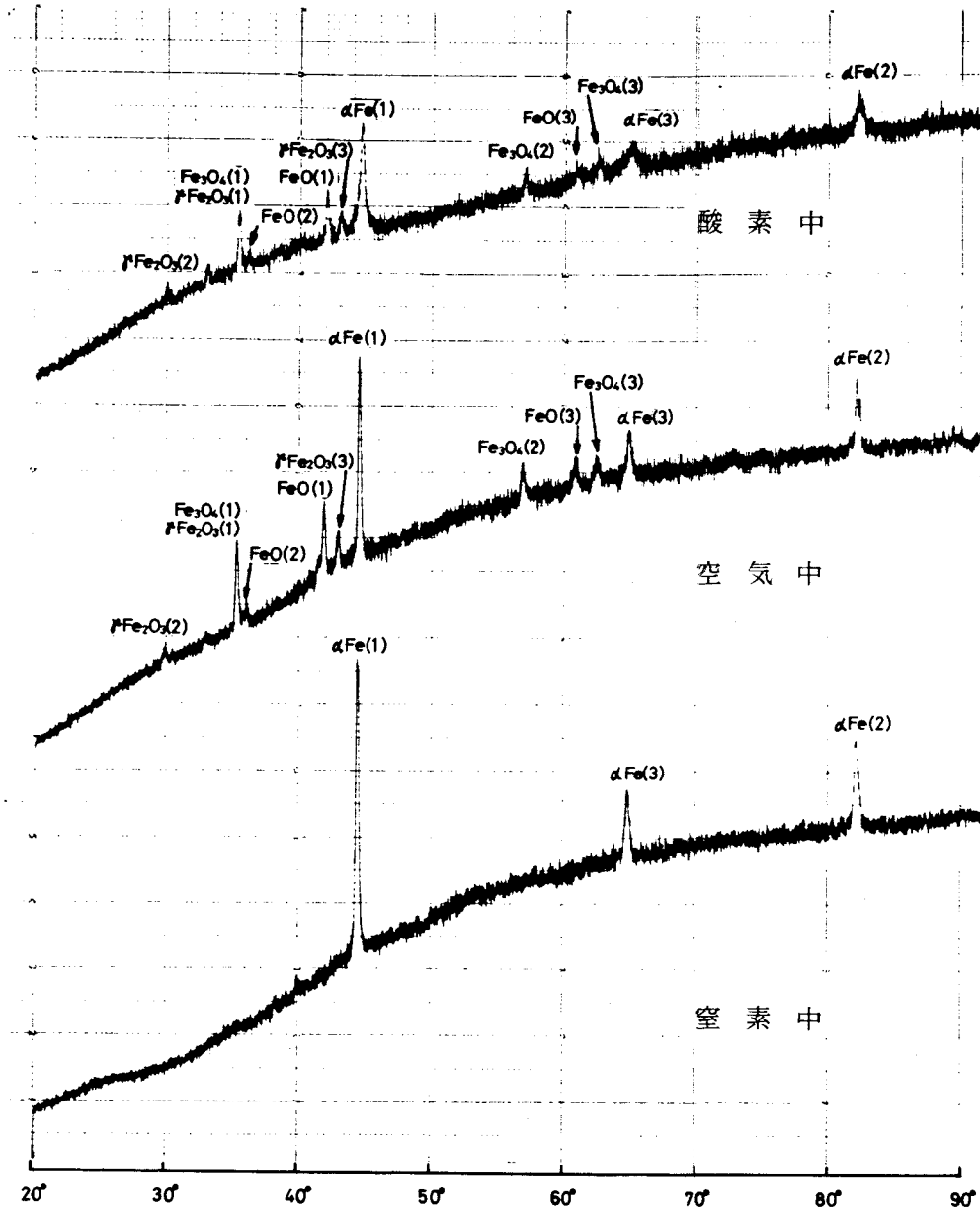


図２－３－４５　Ｘ線回折記録例

（摩擦速度６４.４ｍ／ｓ，接触圧力１.０ｋｇ／ｍｍ²）

Fe_3O_4，FeOのピークが両方ともに存在することを確認できる．また，酸素中高荷重域の摩耗粉のX線回折ではFeOは確認できなかった．それは酸素不足形の酸化物摩耗粉が高温であるため，摩擦面から離れた後で急激に酸化し，Fe_3O_4，Fe_2O_3 に移行するためであろう．窒素中の摩擦面は前述のように白っぽい金色に見えるが，それは窒化鉄または残留酸素による酸化鉄による干渉色と思われるが，薄いため地のα−Feのピークだけが認められ，期待した窒化物は検出できなかった．この分析結果からは，結局空気中および酸素中の高速高荷重域でも，摩擦面酸化膜の主成分をFeOとは言えない．

3．3　試験片材料の影響

本項では鉄系材料および非鉄材料の二つに分けて試験片材料の特性を明らかにする．既に試験片材料の酸化しやすさ，高温における軟化の程度，化学的活性度などが，摩擦摩耗特性に大きな影響を与えることを指適している．そこでこれらの影響をより明確にするために，鉄系材料として特に耐熱耐酸化性の優秀なステンレス鋼SUS27(304)および安定で活性が低くとも金の影響を示さない鋳鉄FC20を炭素鋼S35C円板と摩擦摩耗試験し，　炭素鋼S35C同志の摩擦摩耗と比較検討し，材料特性を調べる．また非鉄材料としては，材料の軟化の影響を検討しやすいように融点が低く，純度の高いものが得やすいアルミニウムおよび銅を選んだ．特にアルミニウムは酸化膜が非常に薄く，破壊されやすく，活性度も高いという特徴がある．

3．3．1　鉄系材料の場合

（1）摩擦摩耗の接触圧力特性および摩擦速度特性

図2－3－46は鋼円板を用い，試験片材料を炭素鋼S35C，鋳鉄FC20，ステンレス鋼SUS27(304)と変えたときの比摩耗量と接触圧力の関係を示している．低荷重域でも高荷重域でも炭素鋼S35Cが最も比摩耗量が小さく，S35C，FC20，SUS27(304)の順に大きくなっている．これらの関係は酸化膜の減摩

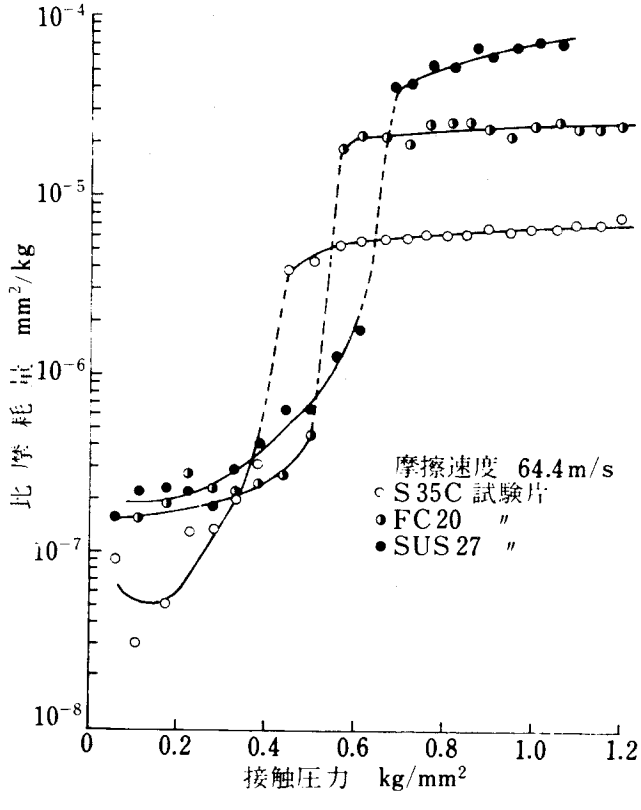


図2－3－46　比摩耗量と接触圧力の関係

作用から説明できる．3.2.5のX線回折装置による分析のところでも述べたが，高速高荷重域の例では空気中，酸素中の場合かなり多くのFeOを生成していることがわかる．さらに酸化膜の色および笹田の展望論文[7]も参照して考えると，低荷重域では主としてFe_3O_4の酸化膜が凝着を妨げ，減摩作用を果たし，高荷重域では主としてFeOの酸化膜のでき具合によって比摩耗量は影響を受け，融点の低いFeOが十分に表層にできると，その部分でせん断され比摩耗量は低下する．そのため比摩耗量の大きさの順序は酸化されにくさと一致している。またS35C，FC20はその臨界圧力がはっきりしているが，SUS27(304)の場合にはあまりはっきりせず比摩耗量は接触圧力の増加とともにゆっくりと増加している．それは接触圧力が増大しFe_3O_4酸化膜の減摩作用が不足するときに，SUS27(304)の耐熱性のために地金の急激な軟化が起こらないためであろう．

図2－3－47は図2－3－46に対応した摩擦係数の荷重特性である．この場合も酸化膜のできにくい材料ほど凝着しやすく，摩擦係数は大きくなっている．すなわちS35Cが最も小さく，次にFC20，SUS27(304)の順に大きくなっている．しかし，その荷重特性は材料に関係なくよく似た傾向を示している．

既にふん囲気の影響の項で，酸素ふん囲気中では摩擦熱が多く発生し，摩擦部分が鉄の燃焼温度より高くなるほど摩擦条件が厳しい場合には，燃焼的酸化により比摩耗量が窒素ふん囲気中よりも多くなることを，図2－3－30

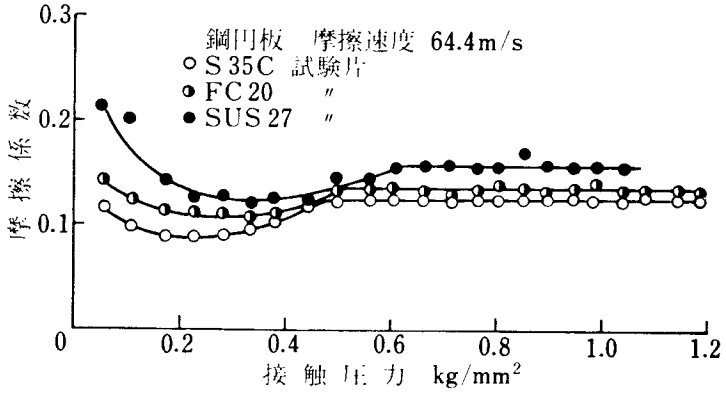


図2－3－47　図2－3－46に対応した摩擦係数

の考察で述べた．また，その場合比摩耗量は大きいが，摩擦係数は小さくなることを述べた．しかしそのような現象は本項で述べたような空気中の摩擦による摩耗とは異質な現象である．空気中では酸化しにくく凝着しやすいステンレス鋼SUS27（304）の場合に，比摩耗量も摩擦係数もともに最も大きくなっている．

図2－3－48は鋼円板に対する炭素鋼S35C，鋳鉄FC20，ステンレス鋼SUS27（304）試験片の比摩耗量と摩擦速度の関係である．既にS35C円板－S35C試験片の場合に高荷重域では摩擦速度の増大とともに比摩耗量が低下するとし，その理由を高速において生ずる低融点のFeO酸化膜の潤滑作用のためとした．鋳鉄FC20，ステンレス鋼SUS27（304）の場合，ともに高速においても比摩耗量が低下せず炭素鋼S35Cの場合より大きいが，それはFC20，SUS27（304）がS35Cに比べて酸化されにくいためである．鋼では笹田の展望論文[7]に見られるようにFe_2O_3，Fe_3O_4，FeOが主として生ずる条件で比摩耗量が低下するはずである．このことは比摩耗量が材料の酸化されやすさに左右されるだけでなく，ふん囲気条件によっても影響されることを示している．しかし，既に述べたように酸化されることが比摩耗量を減少させるのは酸化の進行が適度な場合である．高速高荷重域の摩擦試験中，酸素を摩擦部に噴きつけるとガス切断と同様急激な溶融摩耗を起

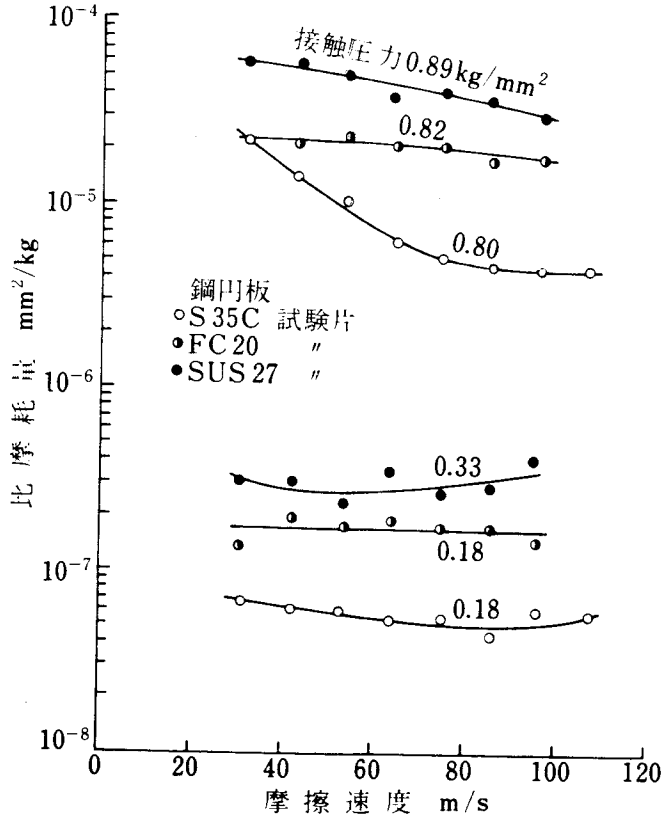


図2－3－48　比摩耗量と摩擦速度の関係

こす場合がある．

図２－３－４９は試験片材料を変えたときの摩擦係数の摩擦速度特性である．高荷重，低荷重いずれの場合にも摩擦速度の増加とともに摩擦係数が小さくなっているが，それは摩擦速度の増加とともに摩擦面の平均温度が高くなり，地金の表層軟化や酸化膜の生成量の増加のためと考えられる．またど

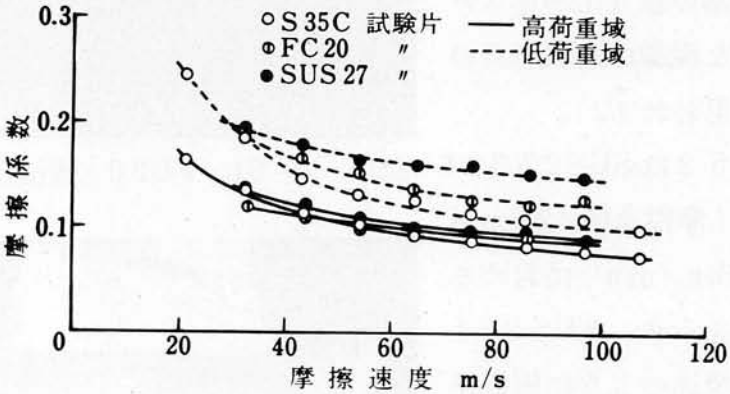


図２－３－49　図２－３－48に対応した摩擦係数

の材料についても同様な傾向を示し，全般的にS35C，FC20，SUS27（304）の順に摩擦係数が大きくなっている．

（２）摩擦部の観察

S35C，FC20試験片と鋼円板の摩擦試験では摩擦円板に薄いはく状凝着物が付着，脱落を繰返し，試験後の試験片摩擦面には凝着物は見られないが，円板側の凝着物は薄く青みをおび，酸化されている．FC20の場合，試験片摩擦面にはS35C（図２－３－13）と同様に摩擦すじが見られた．しかし図２－３－５０（摩擦速度64.4m／s，接触圧力0.68kg／mm²）に示すように，S35CおよびSUS27（304）に見られるような大きいかえりはない．それはFC20がじん性に乏しいためである．さらにS35C（図２－３－11）

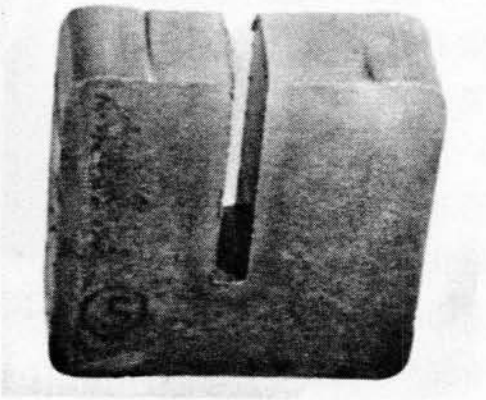


図２－３－50　FC20の試験片摩擦部

およびSUS27(304)では摩擦面の内部に摩擦力による結晶組織の流れが見られるが，結晶の成長は見られない．しかしFC20では図2－3－51に示すようにかなり内部まで結晶の粗大化が見られる．そのような現象は鋳鉄材料の材質的特徴と思われる．

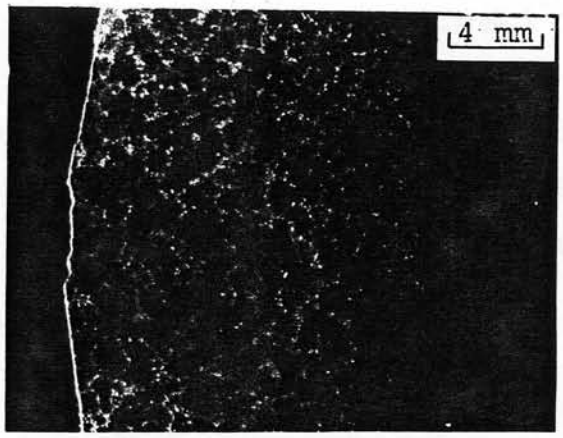


図2－3－51　FC20の断面組織

図2－3－52はSUS27(304)の高荷重域(摩擦速度42.2m/s，接触圧力0.89kg／mm²)における試験片摩擦面を示す．SUS27(304)の場合後述のように円板摩擦面の凝着物が大きいため，S35CやFC20の場合と異なり比較的ピッチの大きいうねり状の引きかきすじが見られる．図2－3－53はS35C円板－SUS27(304)試験片の組合せで，摩擦速度64.4m／s，接触圧力0.8kg／mm²の場合の試験片摩擦面の走査形電子顕微鏡写真である．全体的に見ると，高温軟化した表層がぬぐいとられるような状態で摩耗が進行しているようであり，試験中溶融状態であったことを思わせる付着物が見られる．しかし，摩擦面を細かく観察すると滑らかではない．それは摩擦試験後赤熱状態から室温まで冷える間に酸化が進行しているためである．試験中の摩擦面はこのよ

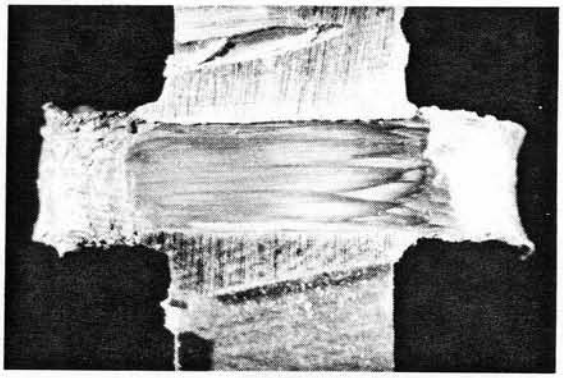


図2－3－52　SUS27試験片の外観

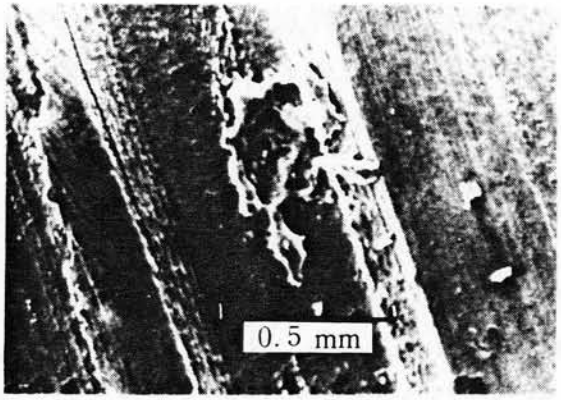


図2－3－53　SUS27試験片の摩擦面

うにざらついた面ではないと思われる.

旋削直後の鋼円板を用いて摩擦試験すると，SUS27(304)試験片の場合には比較的酸化されにくいので，円板摩擦面への凝着が強固であり，凝着した部分は高いため以後選択的に凝着が進み成長し，そのため振動を発生するようになる．そのような摩擦実験(摩擦速度42.9m／s，接触圧力0.89kg／mm²)開始10秒後の円板凝着物の上面および側面の写真を図2－3－54に示す。凝着物は円板全周にわたって付着しており，この例の凝着物の厚さは約0.5mmにもなっている．このような凝着物の成長のようすを調べるために，ストロボスコープを回転に同期させて約2枚／秒で連続撮影した写真の一部を図2－3－55に示す。この写真の試験条件は前図と同じ条件である．キセノンランプのせん光時間は3μsで，

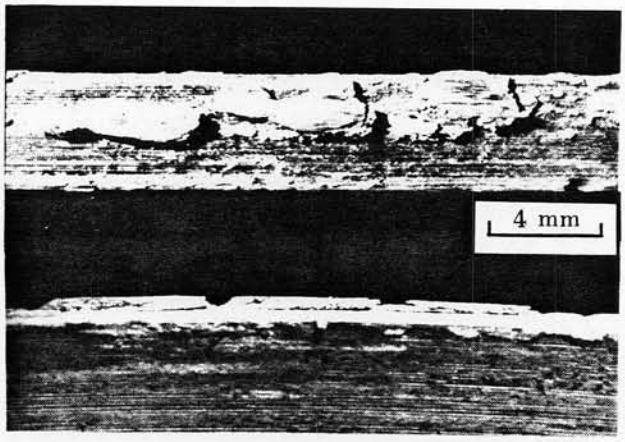


図2－3－54　異常成長したSUS27(304)の凝着物

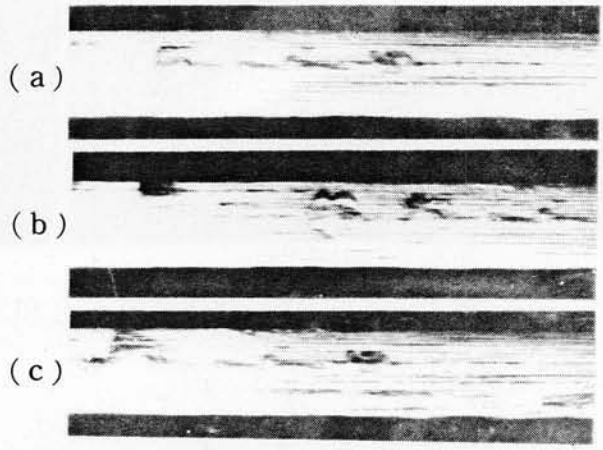


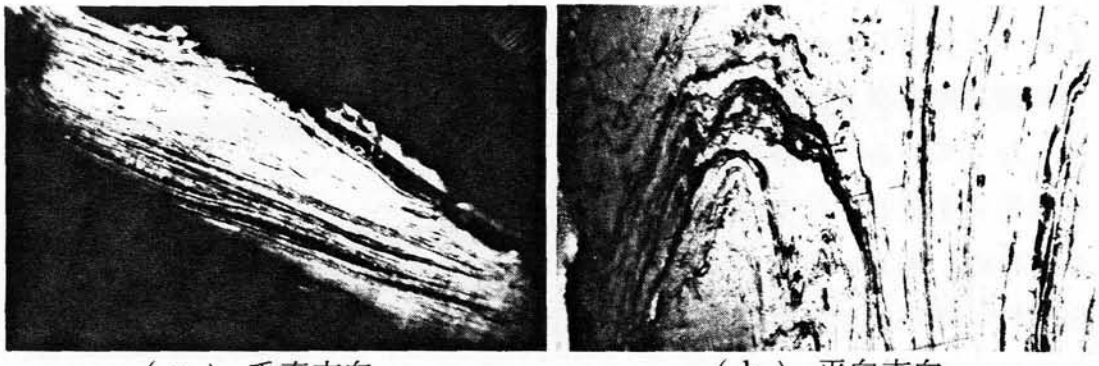
図2－3－55　円板摩擦面の連続写真

像が摩擦方向に流れて明瞭ではないが，同一凝着物であることが確認できる．(a)と(b)の時間間隔は約1秒(円板33回転)，(a)と(c)の時間間隔は約4秒(円板132回転)であるが，上方から見た凝着物の形状，大きさはあまり変化していない．このことから試験片摩耗量の一部は，図2－3－56のように主として厚さ方向にたい積成長すると考えられる．なお，(a),(c)の写真の右下方に白く見える部分は凝着物が脱落した部分で，硬化した凝着

物を介して衝撃的圧力を受け円板側がくぼんでいることを示している．

図２－３－５６（ａ)(ｂ）はこのような凝着物を摩擦方向を含み，摩擦面に垂直に切断した断面および摩擦面に平行に切断した断面の顕微鏡写真で，（ａ）はまさ目状の，（ｂ）は板目状の組織が見られ，たい積成長のようすがうかがわれる．

図２－３－５７は凝着物断面をＸ線マイクロアナライザによって，図中の矢印位置で走査分析した記録例である．図中の黒く見えている部分には酸素が多く，ニッケル，鉄が減少していることがわかる．またクロムについては左側の黒い部分でかえって増加しているが，それは研摩後の洗浄が不十分で酸化クロムがわずかに残っていたためと思われる．これらのことから黒く見える部分は比較的強く酸化されている層であると思われる．凝着物は一定速



（ａ） 垂直方向　　（ｂ） 平向方向

図２－３－５６　異常成長したSUS27（304）凝着物の断面

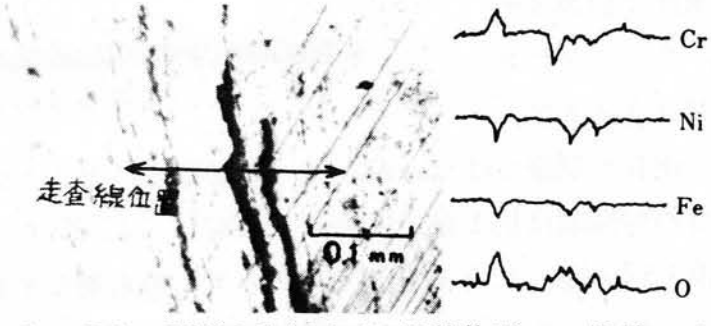


図２－３－５７　SUS27（304）凝着物断面のＸ線マイクロアナライザによる分析結果

度ではたい積せず，酸化をよく受けている部分とそうでない部分の層状組織になっている．それは振動のため凝着物が１回転ごとに試験片と摩擦するとはかぎらないためであろう．またこのような凝着物の合計面積は円板の見かけの摩擦面積に比べてかなり小さいが，比摩耗量は薄い凝着物が広く分布する場合とほとんど変わらなかったので，この場合はとくに凝着摩耗よりアブレシブ摩耗的性格が強いと考えられる．図２－３－５８はSUS27(304)試験片を中央で切断して，摩擦面内部に向かってかたさがどのように変わるかを示したものである．摩擦面から約0.4 mm内部で最高かたさになっている．これは摩擦試験後の急冷によるもので，表面では最高かたさよりいくぶん低下しており，鋼の場合（図２－３－１２参照）と同じ傾向である．また鋼円板の凝着物の表面のビッカースかたさを測定して平均するとＨｖ＝３５５となり，試験片の表面かたさよりいくぶんかたくなっているが，これは試験片より冷却速度が早いためと酸化物の割合が多くなっているためであろう．

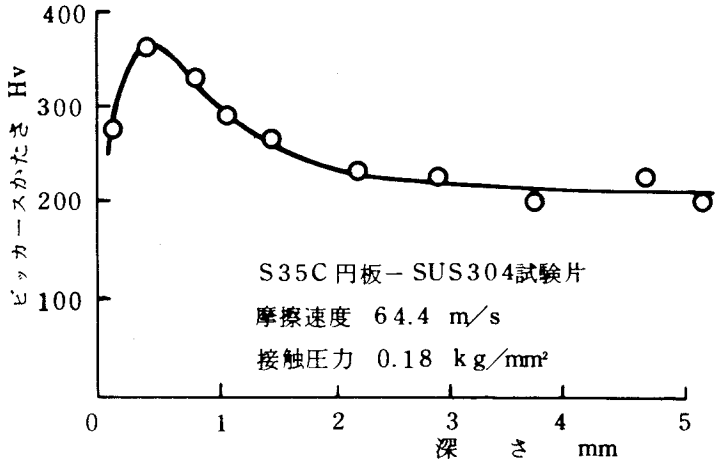


図２－３－５８　試験片中央部のかたさ分布

３．３．２　アルミニウムの場合

（１）摩擦摩耗の接触圧力特性

図２－３－５９にアルミニウム圧延材についての比摩耗量の接擦圧力特性を摩擦速度をパラメータにして示す．摩擦速度5m／sの場合，接触圧力0.05 kg／mm² で比摩耗量はかなり小さいが，0.08kg／mm² では急激にその約２０倍に増大し，さらに接触圧力が増大しても比摩耗量の増加率は小さい．接触圧力0.05kg／mm²，摩擦速度5m／sでは試験片摩擦面は後述するよう

に滑らかであり，減摩作用を果たす酸化膜が破壊されにくく，摩擦面間に大きい凝着が起こらず，そのため比摩耗量が小さいと考えられ，(3) において述べる酸素中の場合は別として，空気中の場合本実験中唯一のmild wearの状態である．それ以上の厳しい摩擦条件では凝着がはげしく，摩擦面にはかなり大きいおうとつが見られ，比摩耗量の大きいsevere wear域に相当する．摩擦速度が増加すると，5m/sの曲線を接触圧力の低いほうに移動したような傾向で炭素鋼の場合の図2－3－2に示されるように臨界圧力が低下して，本実験範囲でmild wearの状態が見られず，高荷重域では全般的に摩擦速度が高いほど比摩耗量は大きい．また摩擦速度35m/s程度で比摩耗量は飽和するようで，接触圧力が増大してもあまり大きくならず，25m/sの場合とほぼ似た値になっている．

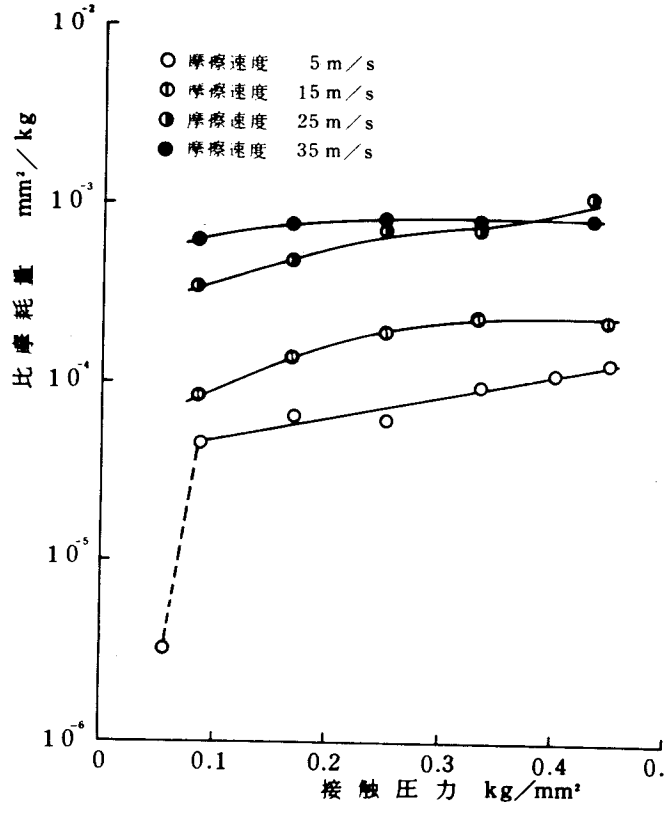


図2－3－59 比摩耗量と接触圧力の関係

図2－3－60は圧延材の場合の摩擦係数の接触圧力特性を示している．摩擦速度5，15m/s の場合，接触圧力の増加とともに摩擦係数は増大しているが，それは減摩作用をする酸化膜が再生されるよりも破断される傾向が強いためである．また摩擦速度5m/s，接触圧力0.05kg/mm² の場合は前図に関して述べたようにmild wear域に相当しているため摩擦係数は特に小さい．摩擦速度25m/s，35m/sでは接触圧力が増加しても摩擦係数はあまり増大せず，全般的に小さい．それは摩擦速度が高いため摩擦面平均

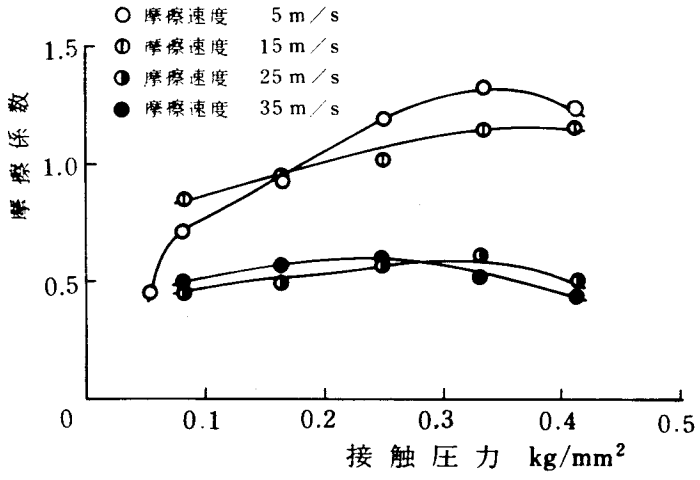


図２－３－６０　摩擦係数と接触圧力の関係

温度が高く，摩擦面が軟化し部分的には溶融しており，せん断抵抗が小さいためと考えられ，炭素鋼の場合の高荷重域に見られた状態に相当している．炭素鋼の場合に主としてFe_3O_4酸化膜が減摩作用をする範囲を，溶融摩耗域と一般に称しているが，しかし上述のように摩擦面表層が軟化し，部分的には溶融しているような状態に対して，より適当な述語と考えられる．それはアルミニウムでは上述の摩擦速度２５m／s　以上の範囲であり，炭素鋼ではすでに述べたように，主として ＦｅＯ酸化膜が減摩作用をする高速高荷重域に相当する．

（２）摩擦摩耗の摩擦速度特性

図２－３－６１に比摩耗量の摩擦速度特性を示す．比摩耗量は摩擦速度の増加とともに増大し，全般的に接触圧力が大きいほど大きい．しかし比摩耗量の増加率は摩擦速度の増加とともに低下し，35m／s 程度で接触圧力の大きさにかかわらずほぼ一定（約8×10^{-4} mm² ／kg）になっている．

図２－３－６２に摩擦係数の摩擦速度特性を示す．低速で摩擦係数はかなり大きい．それはアルミニウムの場合，酸化膜が十分に摩擦面を保護できず凝着がはげしいためで，特に接触圧力が大きい場合に著しい．摩擦速度が増加すると摩擦係数は急に低下するが，２５m／s を超えるとほぼ一定の値（約

0.5）になる．それは摩擦面の平均温度が上昇しせん断抵抗が減少するのが主原因と思われ，25m／s以上の範囲では摩擦面のかなりの部分で溶融状態になっていることはすでに（1）で述べたとおりである．なお図からわかるように，10m／sで摩擦係数が最大で，5m／sでいくぶん低下しているのはmild wear域に近いためであろう．

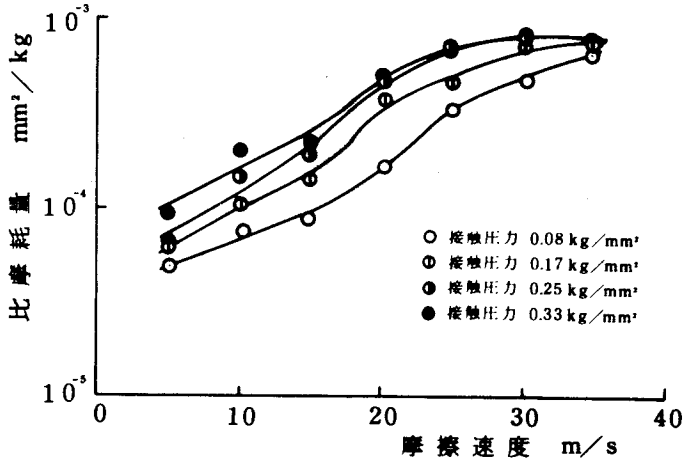


図2－3－61　比摩耗量と摩擦速度の関係

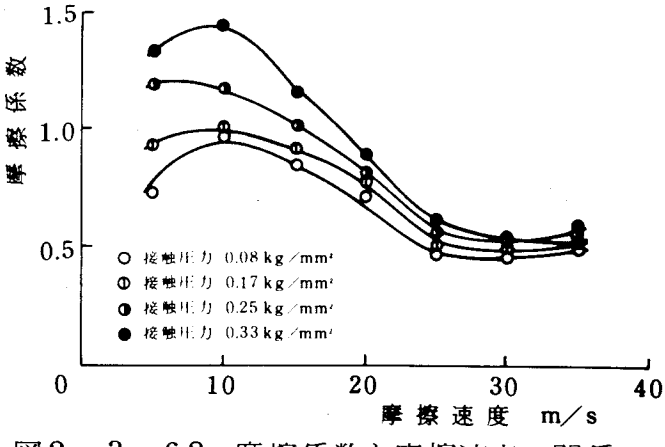


図2－3－62　摩擦係数と摩擦速度の関係

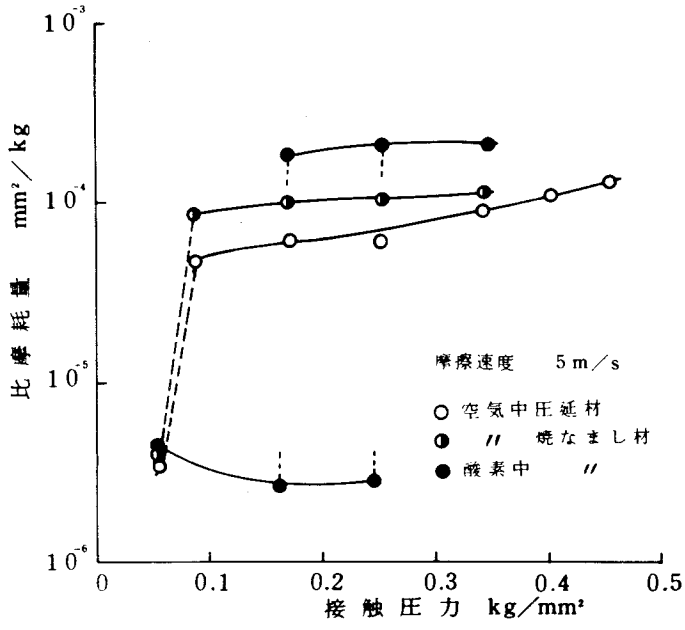
全般的にアルミニウムの場合の摩擦摩耗の特性は，既述の鉄系材料の場合と同様に，酸化膜の減摩作用と摩擦面の軟化ないし溶融を考慮して説明できることがわかった．

（3）試験片のかたさおよびふん囲気の影響

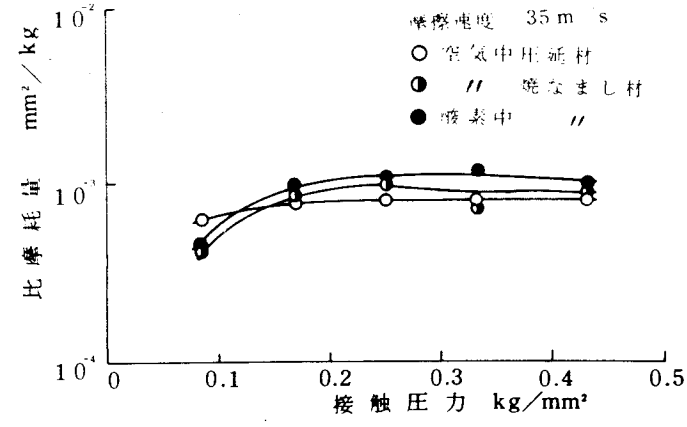
（1）および（2）においてアルミニウム圧延材の場合の摩擦摩耗の特性について述べた．ここではアルミニウム圧延材を焼なましてかたさを減少させた場合の影響および空気中に対してふん囲気を酸素にした場合の影響について示す．

図2－3－63は，摩擦速度5m／s（a）および35m／s（b）の場合の比摩耗量の接触圧力特性を，空気中圧延材，空気中焼なまし材，酸素中焼なまし材について比較して示している．圧延材のビッカースかたさ45に対して，焼なまし材は27でかなり軟らかいが，その比摩耗量は（a）図におい

てわずかに大きい程度で，摩耗の機構を変えるほどの影響は見られない．全般的に焼なまし材の比摩耗量がわずかに大きい原因は，第1には生成する酸化膜を支える地のかたさが小さく，破断して凝着を起こしやすいためであり，第2には試験片摩擦面には円板側凝着物による引きかき溝が見られ，摩耗の性格がアブレシブ摩耗的であり，一般にアブレシブ摩耗では軟らかいほど大きい[31]ためである．酸素中の比摩耗量は空気中の場合に対してかなり異なっている．空気中では摩擦速度5m／sにおいて接触圧力0.05kg／mm² の場合にのみmild wearの状態である．しかし定常的に比摩耗量の小さい範囲はあまり広がらず，臨界状態で実験中に比摩耗量が小さい状態（図中◐で示す）と大きい状態（図中●で示す）を繰り返す場合が多い．そして比摩耗量は◐ではかなり小さいが，●では空気中の場合よりも大きい．それは比摩耗量の小さい状態で摩擦熱のほかに酸化熱が蓄積されて摩擦面の平均温度が上昇し軟化した部分が急にはげしく摩耗するためである．臨界圧力を超えると比摩耗量は定常的に大きい．（b）図の摩擦速度35m／sの場合には摩擦熱の発生



（a）



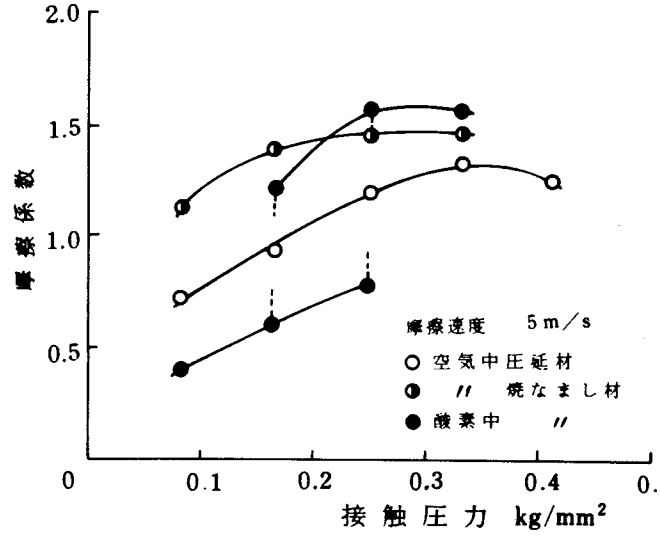
（b）

図2－3－63 比摩耗量と接触圧力の関係

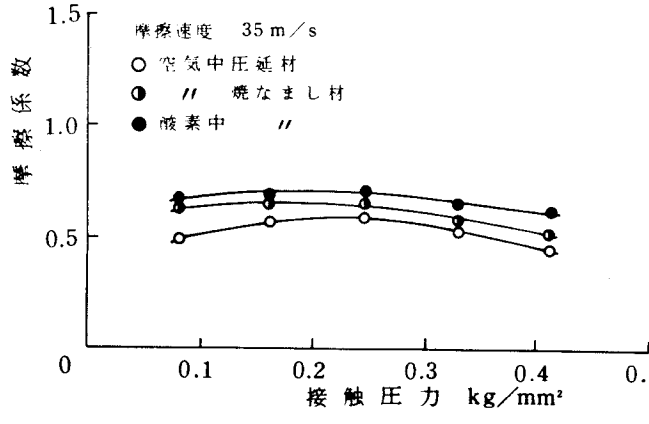
量が多いため，かたさおよびふん囲気の変化にかかわらず摩擦面は軟化ないし溶融を起こし，比摩耗量は同程度に大きく，さらに接触圧力によってもあまり違いが見られない．

図２－３－６４は図２－３－６３に対応した摩擦係数の接触圧力特性である．図２－３－６４と図２－３－６３はよく似た傾向を示しており，摩擦係数の接触圧力特性は比摩耗量のそれと同様に説明できる．全般的に摩擦摩耗は低速低荷重域でかたさおよびふん囲気に大きく影響されるが，高速では比較的その影響が小さいようである．

図２－３－６５に比摩耗量の摩擦速度特性を示す．摩擦速度25m／sまでは摩擦速度の増加とともに比摩耗量は増加するが，25m／s 以上ではあまり摩擦速度によって変わらない．摩擦速度5m／sの場合（ａ）図では比摩耗量が酸素中で小さく，（ｂ）図では酸素中で大きい．また，高速域では酸素中で両図とも比摩耗量が大きくなっている．このことから，酸素ふん囲気は摩擦条件がゆるい場合には酸化による保護被膜の生成を促進し減摩作用を果たし，摩擦条件が厳しい場合には酸化膜は破断されやすく，酸化熱のため摩擦面を軟化な



（ａ）

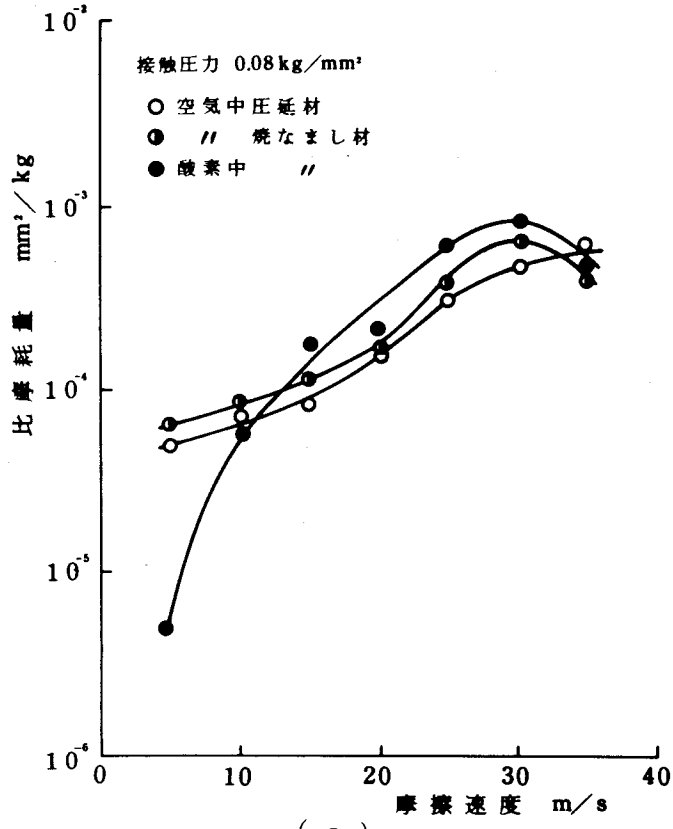


（ｂ）

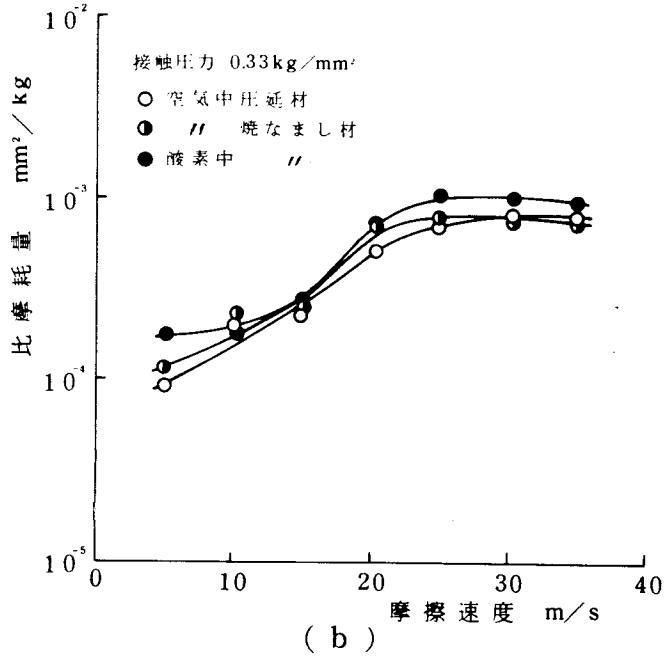
図２－３－６４　摩擦係数と接触圧力の関係

いし溶融させる効果のほうが大きく，摩耗を促進させる働きをする．焼なましによる軟化の程度では，その影響は比較的小さいことがわかる．

図２－３－６６は図２－３－６５に対応した摩擦係数の摩擦速度特性である．図からわかるように，摩擦係数は接触圧力の小さい（ａ）図（0.08kg／mm²）では（ｂ）図（0.33kg／mm²）よりもふん囲気および焼なましの影響を大きく受けているのがわかる．そのことは図２－３－６４の接触圧力特性と同様の傾向であり，図２－３－６４の説明で述べたように，一般に摩擦条件のゆるい場合にふん囲気および試験片かたさの影響が大きく，摩擦条件が厳しい場合比較的影響が小さいと言える．図２－３－６６(ａ)において摩擦速度のある値で摩擦係数に極大値が見られ，特に酸素中で低速で急に摩擦係数が



（ａ）



（ｂ）

図２－３－６５　比摩耗量と摩擦速度の関係

小さくなっているのはmild wearの領域にあるためである．空気中では低速で摩擦係数の減少が酸素中の場合より少なく，さらに接触圧力の大きい（b）図の場合には各曲線ともほとんど低下していない．それはmild wearに入る臨界条件から遠く離れているためである．また摩擦速度の上昇とともに摩擦係数が低下するが，それは摩擦面平均温度の上昇によるせん断抵抗の減少のためである．しかし25m／s以上では摩擦係数の低下率は減少する．接触圧力の大きい（b）図の場合，摩擦係数はふん囲気および試験片かたさによって摩擦速度に対する傾向が似ているだけでなく，その大きさも近似している．

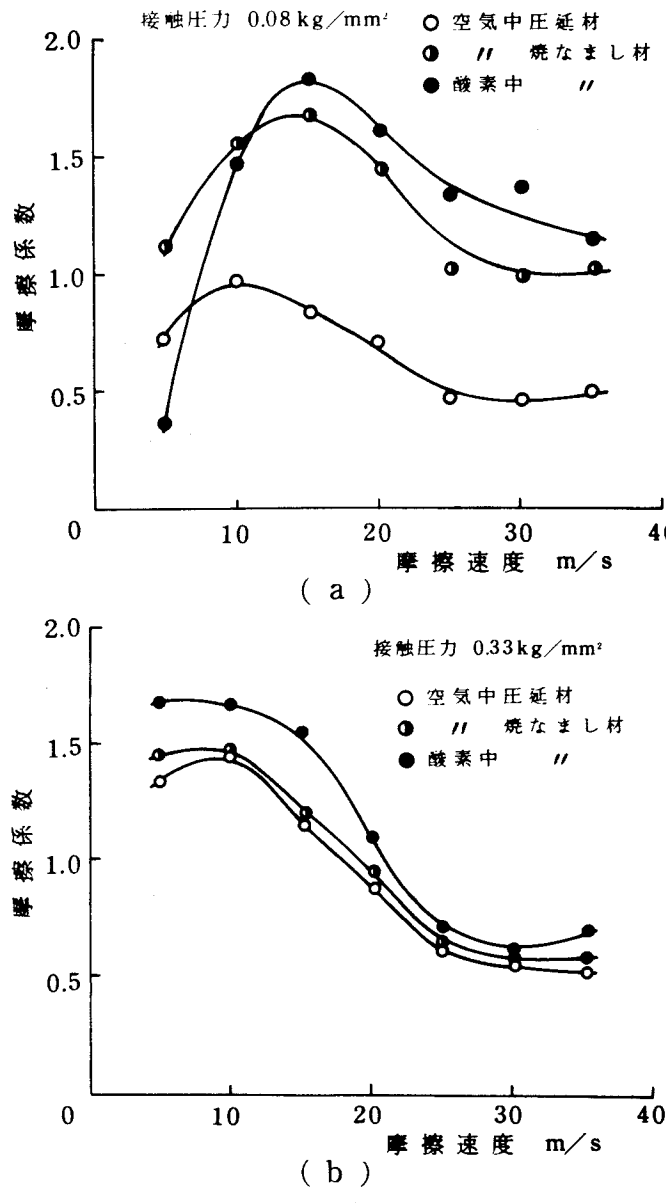
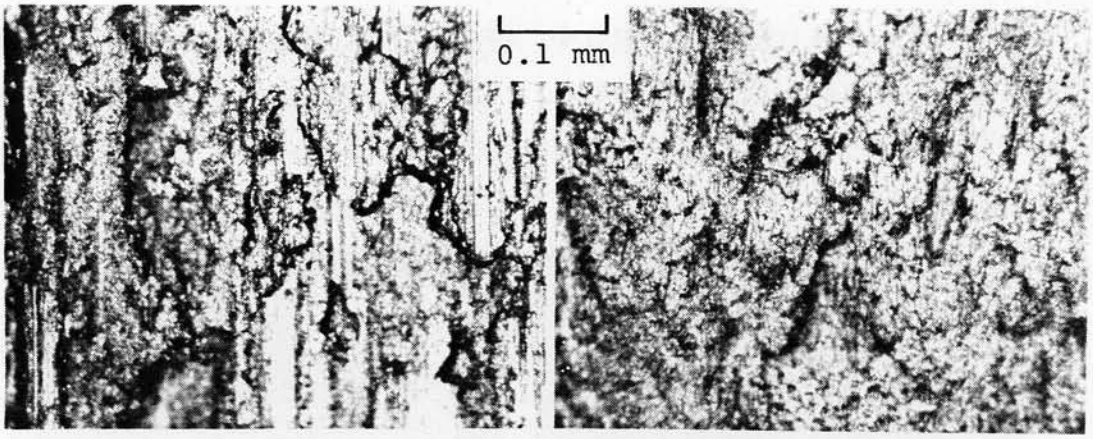


図2－3－66 摩擦係数と摩擦速度の関係

（4）摩擦部の観察

図2－3－67は接触圧力0.33kg／mm²，空気中における圧延材試験片の摩擦面を示す．（a），（b）ともにsevere wear域に相当しているが，（a）図摩擦速度5m／sの場合には摩擦方向の引きかきすじが見られ，また円板凝着物によって摩擦方向に塑性流動させられたことを示す波状のおうと



(a) 5 m/s, 0.33 kg/mm^2　　(b) 30 m/s, 0.33 kg/mm^2

図2－3－67　空気中圧延材試験片の摩擦面

つが見られる．（b）図30m／s の場合には摩擦方向に塑性流動させられていることはわかるが，摩擦すじは見られない。それは，摩擦接触部がかなりの割合で溶融状態になっており，試験片を摩擦円板から離したときに表面張力の作用で消えたものと思われる．細かいとつ部のすべてが丸みをおびている．図2－3－68は焼なまし材のmild wear 域（摩擦速度5m／s，接触圧力0.05kg／mm^2）における摩擦面で，severe wear域の摩擦面の前図に比べると非常になめらかで，浅い摩擦すじが見られるが，肉眼で見ると光沢がある．また摩擦面にはき裂が走っている。それは実験中に摩擦面の非常に薄い層（おもに酸化膜）が内部に比べてかなり高温になっており，摩擦試験後急冷され表層の収縮量がかなり大きいためであり，severe wear域の場合にき裂が見られないのは，表層が流動状態になっており，表面から内部までかなり温度が高いためと思われる．

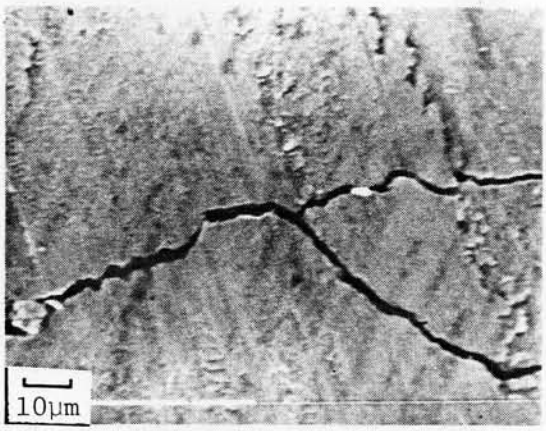
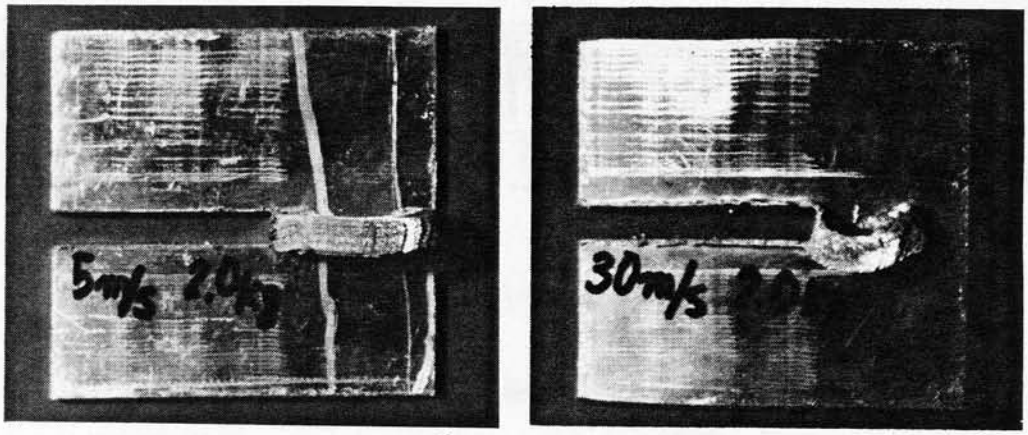


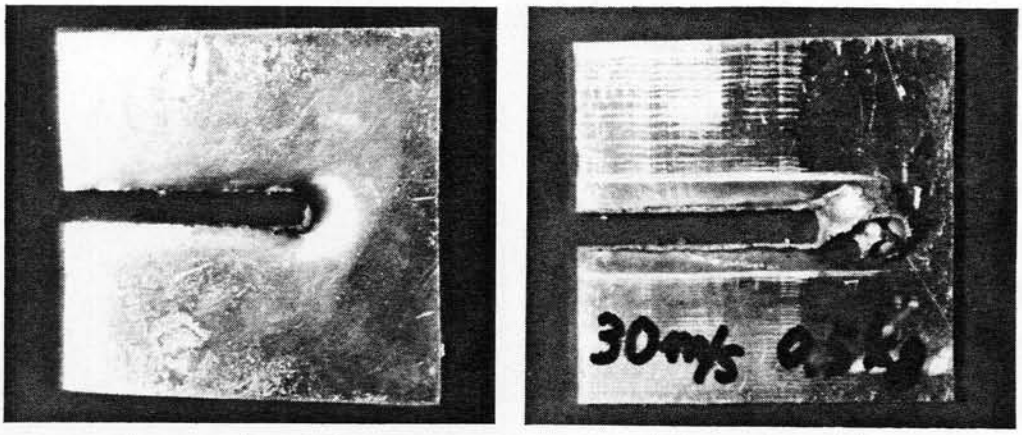
図2－3－68　空気中焼なまし材試験片の摩擦面
（5m／s，0.05 kg／mm^2）

図２－３－６９は圧延材の空気中，接触圧力0.33kg／mm² における試験片摩擦部の後方から見た写真である．（a）図（摩擦速度5m／s），（b）図（30m／s）ともによく似た形状大きさのかえりが見られ，それは焼なまし材の図２－３－７０の場合でも同様である．また焼なまし材の場合，母材の



(a) 5 m/s, 0.33 kg/mm²　　(b) 30 m/s, 0.33 kg/mm²

図2－3－69　空気中圧延材のかえり部

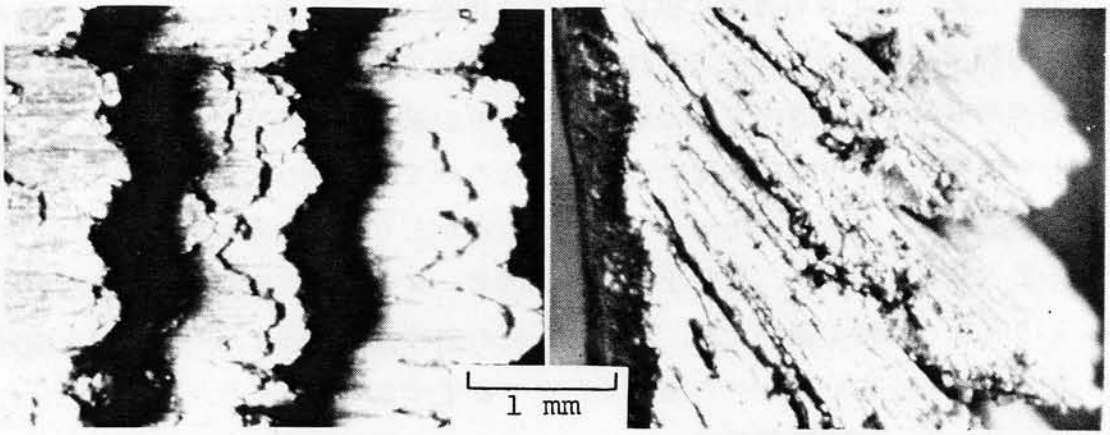


（a）表　面　　（b）裏　面

図2－3－70　空気中焼なまし材のかえり部（30m／s，0.08kg／mm²）

かたさが低いため円板凝着物による摩擦方向衝撃力によって摩擦部近傍が摩擦方向に変形しており，そのようすが摩擦部表面側から撮った写真（a）に認められる．

図２－３－７１は摩擦速度10m／s，接触圧力0.1 kg／mm² の場合のかえり部の上面（（a）図）および側面（（b）図）の拡大写真である．図から



（a）上 面　　（b）側 面

図2－3－71　空気中圧延材のかえり部（10m／s，0.1kg／mm²）

わかるように，かえり部は軟化した試験片表層が摩擦円板上の凝着物によって塑性流動させられて積みかさなってできている．図2－3－72は10m／s，0.42kg／mm² の場合のかえりであるが，かえり部の形状は前図と同様である．鉄系材料の場合，生成する酸化物FeOの融点が地のFeより低く，摩擦中のせん断が表面に近い層で生ずるのに対して，アルミニウムの場合，生成する酸化物Al_2O_3はAlよりも融点が高く，またち密であり深く成長しないので，薄い酸化膜は地が軟らかいことと相まって容易に破壊されて，鉄系材料の場合より深い層で塑性流動させられるため，アルミニウムの場合に上述のようなかえりを生ずるのである．また図2－3－71に対し接触圧力の大きい図2－3－72の場合に，積みかさなりのピッチが小さい．その理由は次のように説明できる．接触圧力の小さい図2－3－71の場合は軟化層が薄く，かえりの基板（（b）図の黒っぽい部分）の温度が

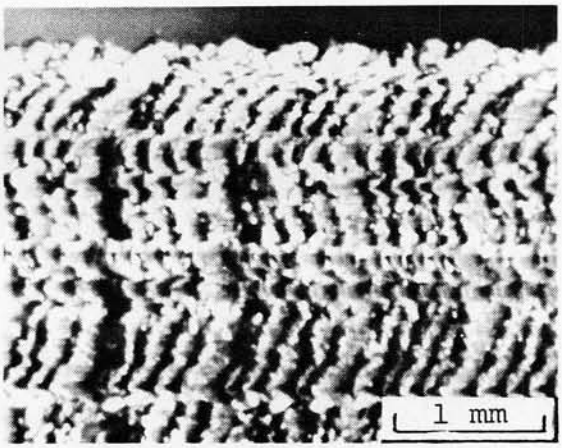


図2－3－72　空気中圧延材のかえり部（10m／s，0.42kg／mm²）

低いため，かえりの部分に軟化層が塑性流動して積み重なり，かえりに働く力の作用点が徐々にかえりの付け根から離れて行くため，かえりを押しつけるモーメントが大きくなると始めてかえりの基板が塑性変形して曲がり，新しい位置にかえりが積み重なるようになるのでピッチの大きな階段状のかえりが生じる．（a）図から一つの階段状のかえりが薄い層の積み重なりであることがよくわかる．接触圧力の高い図２－３－７２は摩擦面温度およびかえり基板の温度も高いため，かえり基板の曲げ強さも弱く，つぎつぎと曲げられるため小さいピッチの階段状かえりを生ずるのであろう．またここには示さないが，高速高荷重域ではピッチがあまり規則的でなく，上面から見た縞紋様も乱れている．これはかえり部基板の温度が高いため，積み重なりの初めの段階から徐々に基板が変形してしまうためと，次に述べる厚い円板凝着物の不規則な衝撃力のためと考えられる．

図２－３－７３は摩擦速度30m／s，接触圧力0.33 kg／mm²の円板摩擦面の写真である．試験片が炭素鋼や鋳鉄の場合の薄いはく状の凝着物と異な

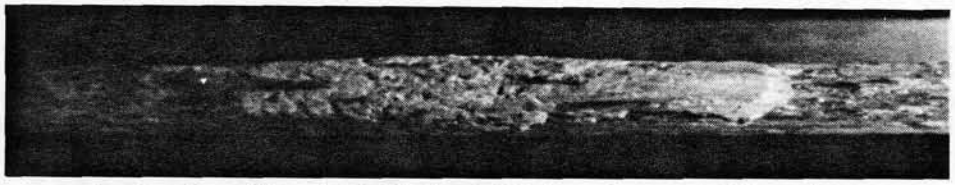


図2－3－73　円板摩擦面（30m／s，0.33 kg／mm²）

り，かなり凝着物が厚いことがわかる．しかしステンレス鋼の場合の図２－３－５４のように集中的に凝着物が厚く成長することはなく，円板摩擦面に広く分布し，接触圧力が高いほどその傾向が強い．

図２－３－７４は摩擦速度30m／s，接触圧力 0.33 kg／mm² の場合の摩耗粉の写真である．細く丸みをおびた形状で，高分子材料の場合に見られるころ状摩耗粉[32]によく似ている．この形状は，摩耗粉を多く排出し，採取して観察しやすいsevere wear域では共通的であった．ころ状摩耗粉が生成するためには，試験片材料が延性的でなければならないと言われている[33]．アルミニウムの摩擦熱で軟化した摩擦面表層は確かに延性的と言えるので，高分子材料の場合のころ状摩耗粉の生成機構と同様であろう．

高速における摩擦摩耗では，酸化されやすさ，生成する酸化膜の性質および摩擦面表層の軟化によって説明できることは既述のとおりである．炭素鋼および鋳鉄では高速高荷重域で主としてFeOを生じ，それが地のFeより融点が低くせん断されやすく，摩擦面表層の軟化とともに摩擦摩耗を低減させる効果をもち，酸化されにくいステンレス鋼では主として軟化の効果によって低減する．アルミニウムの酸化が深さ方向にあまり進行せず，また地が軟らかいこともあって，酸化膜が保護被膜の役を果たせず，凝着を起こしやすいので，アルミニウムの場合もステンレス鋼の場合と同様に，摩擦面表層の軟化が主として高速で摩擦摩耗を低減させる役目を果たしている．

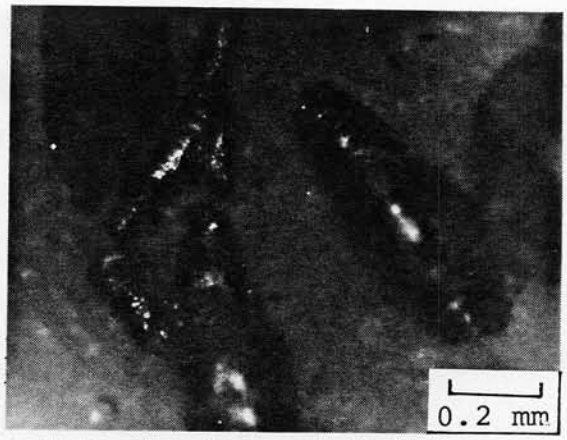
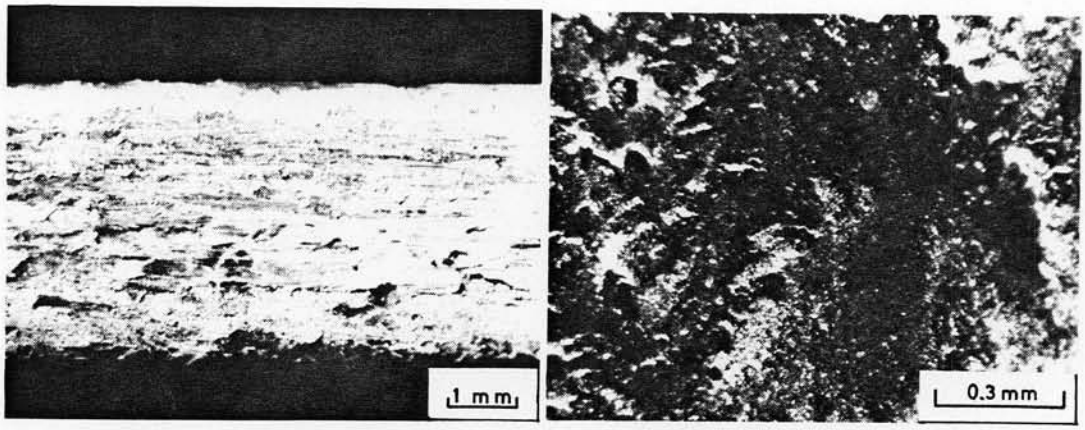


図2－3－74　摩耗粉
（30m/s，0.33kg/mm²）

3．3．3　銅の場合

銅試験片についても摩擦試験を試みたが，アルミニウムの場合よりもさら



（a）円　板　側　　（b）試　験　片　側

図2－3－75　試験片側を銅板としたときの荒れた摩擦面
（75.1m/s，0.1kg/mm²）

に凝着が著しく，摩擦力の絶対値およびその変動が大きく，短時間で試験を中止せざるを得なかった．そのときの鋼円板摩擦面には図２－３－７５（摩擦速度７5.1 m／s，接触圧力0.1 kg／mm²）（a）に示すようにほとんど全面に銅が凝着し，円板および試験片摩擦面（b）はかなり荒れていた．そして摩擦面は両者とも赤銅色で，ほとんど酸化されていないようである．また定常摩耗の状態まで実験を続行できなかったが，比摩耗量，摩擦係数ともに鉄系材料やアルミニウムの場合より著しく大きいようである．

3．4　高分子材料の場合

ここでは一般に摩擦特性が非常にすぐれていると言われているナイロン6および高分子材料として安価で大量に使用されている硬質塩化ビニルを，摩擦摩耗の実験材料として使用した．それはここで選んだ高分子材料が既に述べたように熱可塑材で，比較的低摩擦速度で軟化溶融し，化学的に活性でないためふん囲気の影響を無視でき，軟化溶融の影響を抽出確認しやすいと考えたからである．

3．4．1　ナイロン6の場合

ナイロン6，4ふっ化エチレン樹脂，ポリアセタールなどの結晶性プラスチックは自己潤滑性を有し，潤滑剤を用いない乾燥摩擦でもＰＶ値の低い範囲ではその比摩耗量はかなり小さいと言われている．そのため各種しゅう動部用材料として重要な位置を占めるようになってきている．しかし，一般には本研究で対象にしているような高速高荷重下での摩擦摩耗の研究はあまり行われていない．

本研究では比摩耗量の値は，試験片が回転円板円周面にくい込んだ量を差動変圧器で検出し，それをペン書き記録計で記録し定常状態の勾配から算出した．しかし，計測器のドリフト，振動などのため誤差範囲内に入ってしまうほど摩耗量の小さい場合があった．また，本節3.1～3.3 で述べた比摩耗量の急変する圧力すなわち臨界圧力状態で見られたような，急に摩耗が進行したりほとんど摩耗しない状態を繰り返し，中間的な摩耗率で定常的には摩耗しないという状態が見られた．このような場合，比摩耗量の値は摩耗が進行する場合の測定値をとった．また，一般的に言って摩耗する場合と摩耗しない場合では摩擦係数の値も変わるので，比摩耗量がはっきり測定できた場合の摩擦係数を●印で，精度上比摩耗量が小さすぎて測定できなかった場合の摩擦係数を○印でグラフ上に記入する．以下それぞれを摩耗する場合，摩耗しない場合と略記することにする．ただし，比摩耗量の値の●,⊗,○などの印は，各パラメータ（速度，荷重など）の区別を表している．ナイロン6の

場合摩擦係数はかなりのばらつきが見られるが，比摩耗量の値はかなり安定しており，ばらつきも少ないため数点の平均値で表した．

（1）摩擦摩耗の接触圧力特性

図2－3－76に比摩耗量と接触圧力の関係を示す．本実験範囲では比摩耗量は接触圧力が高くなるほど大きくなるが，摩擦速度が小さいほど比摩耗量の増加率は大きく，摩擦速度35 m/s では接触圧力15 kg/cm² 以上で増加しなくなっている．このため接触圧力の小さい部分では摩擦速度が小さいほど比摩耗量も小さくなっているが，接触圧力の大きい25 kg/cm² ではわずかではあるが摩擦速度が小さいほうが比摩耗量は大きくなっている．また摩擦速度5 m/s では実験範囲内のすべての接触圧力で，摩擦速度10，15，20m/s では低接触圧力域でほとんど摩耗しないため，比摩耗量を測定できず測定点をプロットしてない．

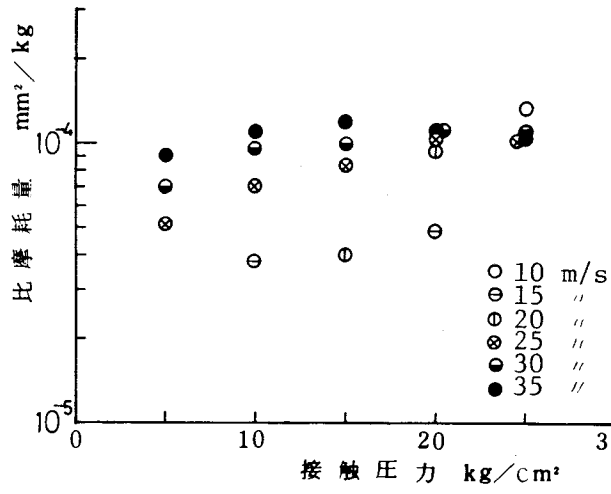


図2－3－76　比摩耗量と接触圧力の関係

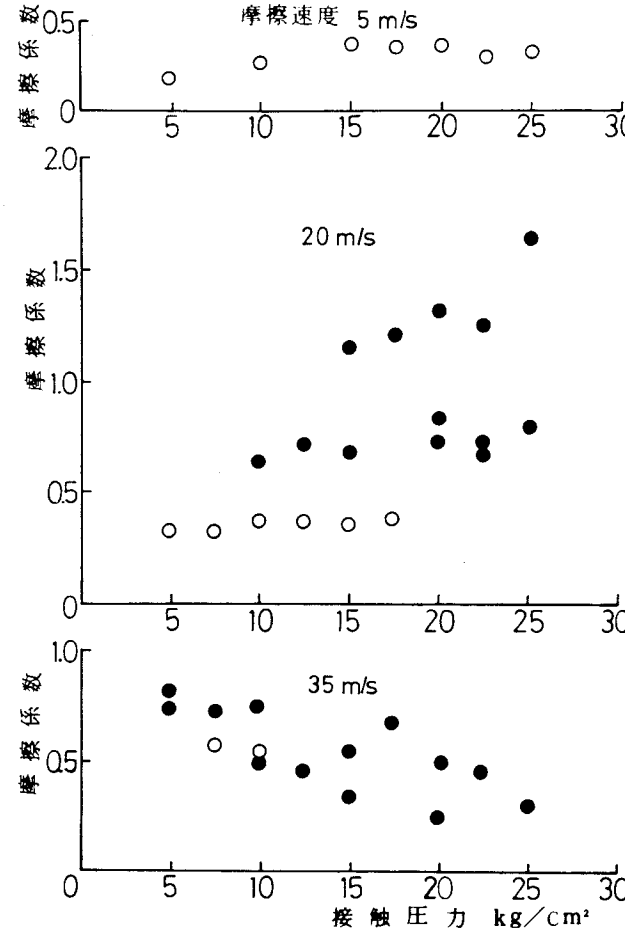


図2－3－77　摩擦係数と接触圧力の関係

図２－３－７７は摩擦係数と接触圧力の関係である．摩擦速度5m／sではすべて○印で，摩擦面温度が低いため摩擦係数はほぼ 0.25 程度である．摩擦速度20 m／sでは接触圧力が低い場合摩耗せず，逆に接触圧力が20 kg／cm²よりも高い場合には摩耗し，中間の接触圧力（10～20kg／cm²）ではすでに述べたように実験中ほとんど摩耗しない状態とかなり大きい摩耗率で摩耗が進行する状態を繰り返す．この場合摩耗しない場合の摩擦係数はやはりばらつきが少なく，ほぼ 0.35一定である．摩耗する場合は全般的に摩擦係数が大きく，ほぼ0.75 程度であるが，ばらつきが大きく 1.0 を超す場合もある．摩擦速度 35 m／sでは摩擦速度20m／s に比べてばらつきが比較的小さくなっており，接触圧力の増加とともに摩擦係数は低下している．また摩耗しない場合（○）と摩耗する場合（●）の摩擦係数の差が少なくなっている．

（２）摩擦摩耗の摩擦速度特性

図２－３－７８に比摩耗量と摩擦速度の関係を，接触圧力をパラメータとして示す．比摩耗量は全般的に接触圧力が高いほど大きい．また摩擦速度の上昇とともに接触圧力の低い場合は急に比摩耗量が大きくなるが，接触圧力が高くなるにつれて増加率が小さくなり，20 kg／cm² ではほぼ一定になり，25 kg／cm² では逆にいくぶん減少している．そのため摩擦速度35m／s 付近では実験範囲内のどの接触圧力でも比摩耗量はほぼ近似した値になっている．このような傾向は炭素鋼Ｓ35Ｃで広範囲の摩擦速度特性をとったときの図２－３－７の摩擦速度１００m／s近傍における傾向に類似しており，後述のようにこの範囲で図２－３－７９の摩擦係数の傾向も図２－３－７の傾向に類似している．図２－３－７９は摩擦係数と摩擦速度の関係である．接触圧力５kg／cm² で

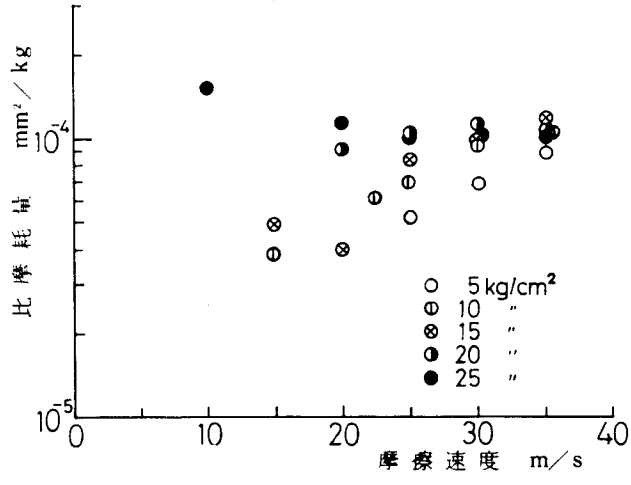


図２－３－７８　比摩耗量と摩擦速度の関係

は接触圧力が低いため，摩擦速度30m／s まで摩耗しない状態が見られ，そのときの摩擦係数は摩擦速度とともに大きくなっている．摩耗する場合の摩擦係数は摩擦速度が増加してもほとんど一定であるが，図２－３－７８の比摩耗量の値は２倍くらいに増加している．接触圧力が15，25 kg／cm² と大きくなるほど摩耗しない範囲がせまくなり，摩擦係数はあまり変わらないが，摩耗する場合の摩擦係数は摩擦速度の上昇とともに低下している．特に摩耗する限界付近，たとえば15～20m／s 程度の摩擦速度で摩擦係数がかなり大きいのが注目される．また接触圧力15kg／cm² の場合摩擦係数は減少するが，比摩耗量は増加している．上述の事項に対する理由は次のように考えられる．ナイロン６はＰＶ値が小さい範囲でほとんど摩耗せず潤滑性があると考えられており[34]，それは見かけの接触面積中の微小面積で溶融し，そのときの溶融粘度が比較的小さいため摩擦係数も小さくなるのである．そのような状態は本実験では○印で示す実験点に対応し，それに対して●印で示した実験点はＰＶ値が大きく摩擦面が巨視的に見ても軟化溶融している状態と考えられる．

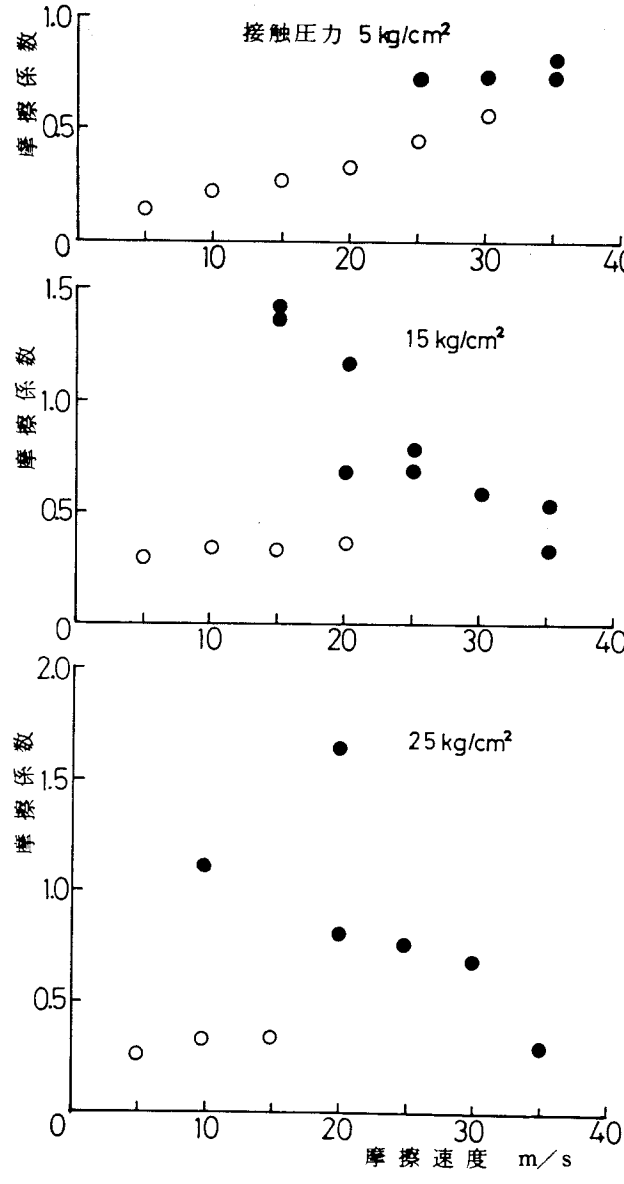
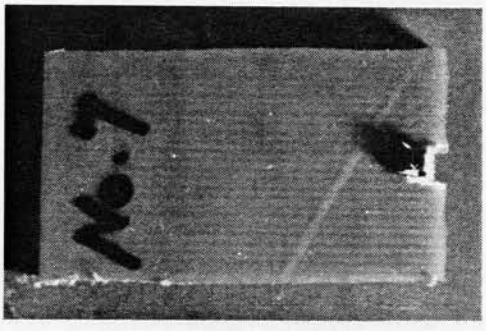


図２－３－７９　摩擦係数と摩擦速度の関係

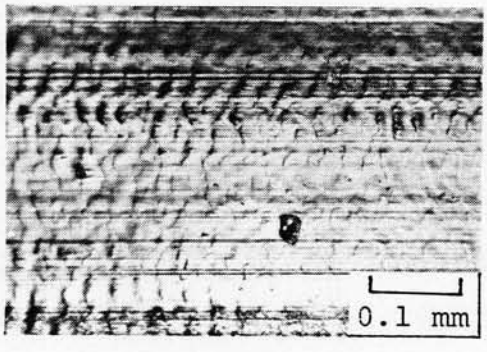
さらに●印の中でも限界ＰＶ値（各接触圧力に対して摩耗する最低の摩擦速度に対する値）の近傍では摩擦面が十分な溶融状態には至らず，増大した真実接触面積の軟化層でせん断されるために摩擦係数が特に大きくなるのであろう．また摩擦速度35m／s では摩耗しない場合の摩擦係数 0.25 と同程度で小さくなっている．それは巨視的に見ても見かけのほとんど全摩擦面積で溶融しており，そのときの有効粘度やずり速度が小さいためであろう[35]．このような状態は炭素鋼Ｓ35Ｃの実験結果の図２－３－４，図２－３－６および図２－３－７の最高速域の部分の比摩耗量および摩擦係数の摩擦速度特性の傾向とよく似ており，摩擦面が軟化溶融状態であることを再確認できるであろう．またこのことは後述の摩擦面の観察のところでも記述する．

（３）摩擦部の観察

図２－３－80はmild wear 域（摩擦速度5m／s，接触圧力0.05kg／mm²）の場合の試験片の外観と摩擦面の拡大写真である．この場合はほとんど摩耗しないためかなり長時間の実験を行って始めて，（ａ）に示すような摩耗量になるため比摩耗量は測定していない．摩擦面は肉眼で見た場合には滑らかに光って見えるが，顕微鏡で見ると（ｂ）に示すように摩擦方向のすじと，それに直角方向の細かいひだが見られる．また図示していないが摩耗する条件に近い mild wear域では，摩擦すじが少なくひだが大きくなっている．



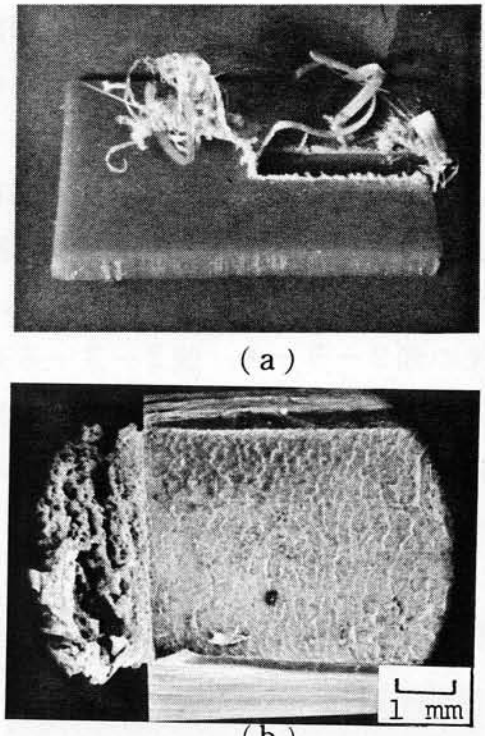
（ａ）



（ｂ）

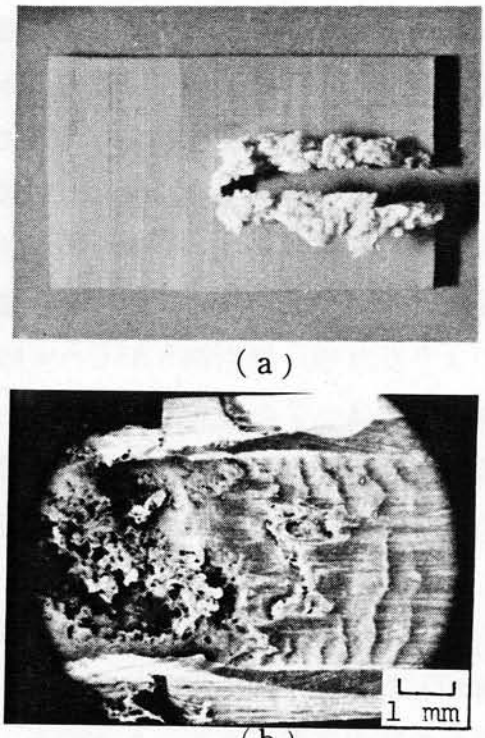
図２－３－80 mild wear 域の試験片外観と摩擦面

図２－３－８１および図２－３－８２は摩耗する場合の試験片外観（ａ）と摩擦面（ｂ）の写真で



(a)　(b)

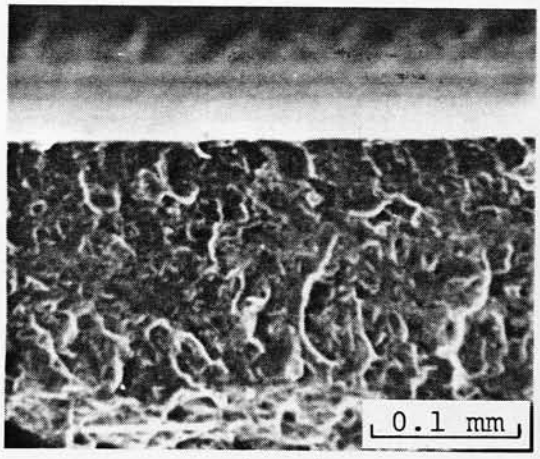
図2－3－81　高速低荷重域の試験片外観と摩擦面



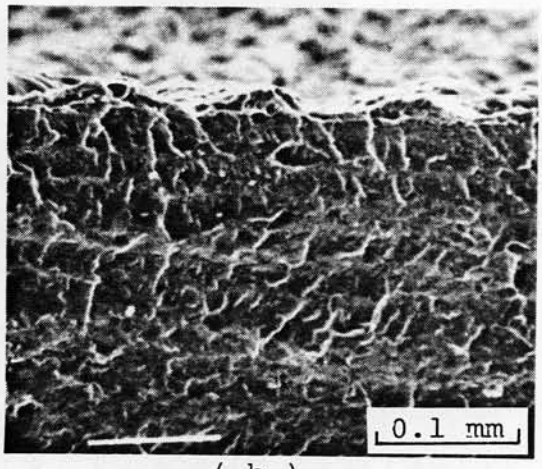
(a)　(b)

図2－3－82　低速高荷重域の試験片外観と摩擦面

ある．摩耗する場合には，短時間の摩擦試験でもこれらの図のように大きく摩耗し，摩耗形態は2種類に分けられる．図2－3－81は高摩擦速度で，比較的接触圧力が低い場合で，かえりの主要部は前述のアルミニウムの場合と同様に薄い板を重ね合わせたような細かい階段状をなしており，それに後述するような円板側で細長く大きく成長したリボン状の付着物の再移着がところどころに見られる．摩擦面は図2－3－80に示したmild wear 域の場合と似ているが，ひだのピッチおよびおうとつが大きく摩擦方向のすじが見られなくなっている．図2－3－82は比較的摩擦速度が低く，接触圧力が高い場合に見られる．試験片の軟化溶融した部分が，高い接触圧力のため摩擦部分からおし出され，後方および横方向にはみ出しさんご状に付着している．この場合の摩擦面は前図に比べてさらにあれた状態になっており，はっきりと溶融したと思われる部分が見られ，前図と同様摩擦すじは全く見られないが，摩擦面の軟化のため試験片を円板から離すとすぐに消失するため



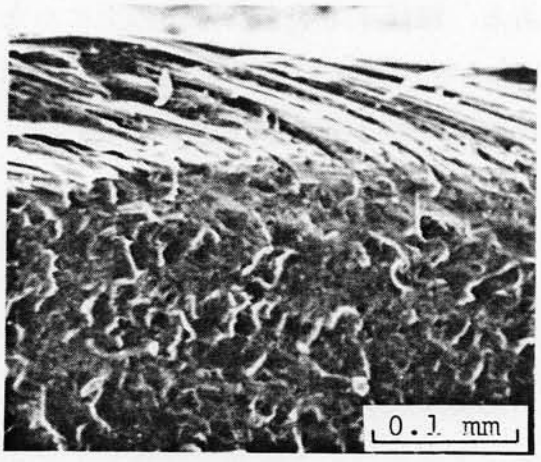
（ａ）



（ｂ）

であろう．

図２－３－８３はナイロン６試験片を液体窒素中で冷却してから摩擦面付近で折り，摩擦面に直角方向の組織の変化を走査形電子顕微鏡で観察した写真である．（ａ）は摩耗しない場合で，（ｂ），（ｃ）は摩耗する場合で，それぞれ図２－３－８０，図２－３－８１，図２－３－８２に対応するものである．（ａ）は低速低荷重域で摩耗しない場合で，摩擦面表層は非常になめらかで内部の組織の変化もほとんど見られないようである．（ｂ）は既述のように高速低荷重域の摩擦面断面で，摩擦面表層にいくぶんうねりが見られるが深さ方向にはあまり変化していないようである．（ｃ）は低速高荷重域の場合で，0.1 mm くらいの深さまで組織が流れており，高圧で押し流されている様子がうかがえる．しかしそれ以上の深さではほとんど変化が見られない．液体窒素を使用した理由は，摩擦面の組織を見るための手順で摩擦面の組織が変化しないように，試験片を冷却してぜい化させ摩擦面に直角方向に折るためである．



（ｃ）

図２－３－８３　試験片摩擦面の断面

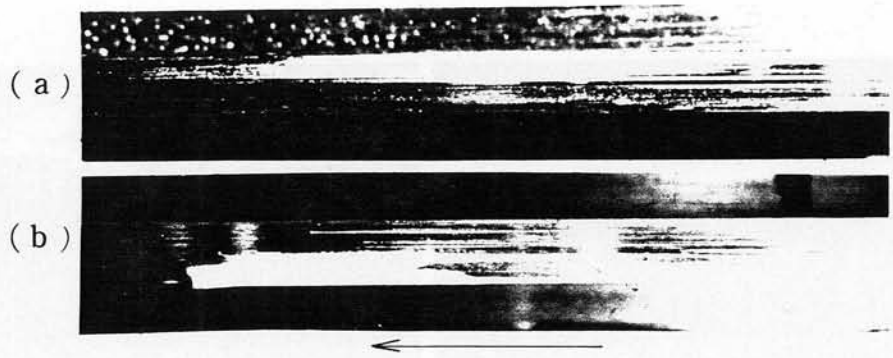
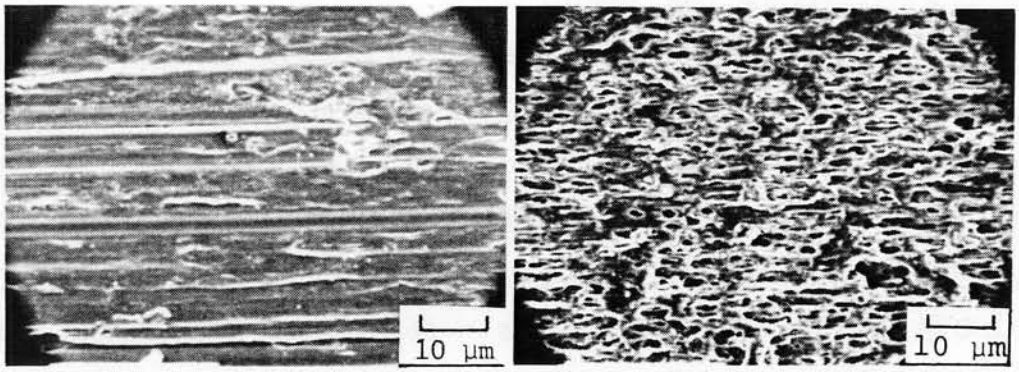


図2－3－84　円板上のリボン状付着物（矢印は円板回転方向）

図2－3－84は摩擦試験後の円板上に残っているリボン状付着物である．(a),(b)はそれぞれ図2－3－81，図2－3－82の摩擦条件の場合である．摩耗する場合には円板上にかならずリボン状の付着物が見られるが，(a)の場合にはさきに述べたように，試験片かえりの部分への再移着が見られるためあまり厚く成長しないが，(b)の場合には再移着が見られないためいくぶん厚いようである．

図2－3－85はリボン状付着物の円板側および摩擦面側の走査形電子顕微鏡写真である．(a)は円板側で，円板面上の旋削あるいは研削すじが押しつけられて転写されているのがわかる．(b)は摩擦面側で肉眼では滑らかに光って見えるが，拡大するとかいめん状に見え，摩擦面が軟化温度以上まで上っていると推定できる．したがって，試験片摩擦面はそれ以上の温度になっていると考えられる．



(a) 円板側　　(b) 摩擦面側

図2－3－85　リボン状付着物の拡大写真

3．4．2　硬質塩化ビニルの場合

硬質塩化ビニルは金属材料に代わる耐蝕材料としてドイツで実用化され，現在その優れた特性，経済性から工業材料として欠かせぬ材料となってきている．硬質塩化ビニルは熱可塑性樹脂で図2－3－4に示したように温度の上昇とともに引張り強さが小さくなり，柔軟温度は75℃付近で，硬質状から軟質状に転移し，170～190℃で溶融状態となり加圧することにより流動し粘性を示し，190～230℃で短時間に分解炭化する．また硬質塩化ビニルは熱伝導率が小さく（0.13kcal／mh℃），著しい熱の不良導体でアルミニウムの1／1500，水の1／4，コルクの2.5倍である．このように融点が低く熱伝導率が小さいため，摩擦面表層は非常に軟化溶融しやすいと言える．そこで硬質塩化ビニルを使用して軟化の影響を調べることにする．

（1）摩擦摩耗の接触圧力特性

図2－3－86に比摩耗量と接触圧力の関係を摩擦速度をパラメータにして示す．摩擦速度20m／s以上では本実験の接触圧力範囲全域で大きい比摩耗量でほぼ一定の値2×10^{-4} mm²／kgになっている．15m／sでは5kg／cm²以下の接触圧力で比摩耗量の小さい場合が見られ（ナイロン6の

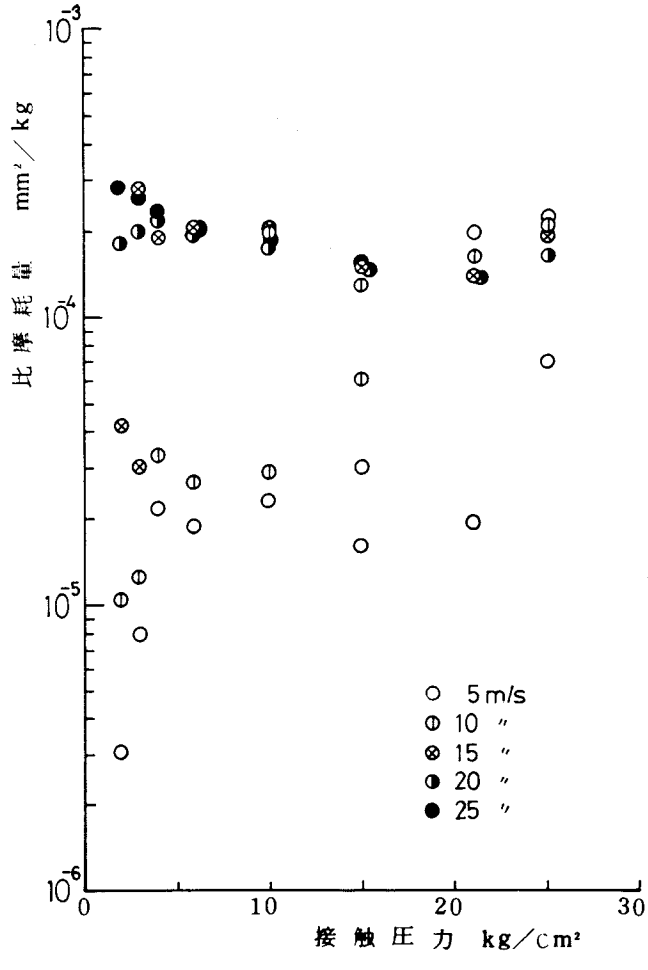


図2－3－86　比摩耗量と接触圧力の関係

場合には比摩耗量が小さすぎて本試験装置では測定できない場合があったが，硬質塩化ビニルの場合には10^{-6} mm^2/kg のオーダに入っており，ばらつきはみられたがすべて測定可能であった），5m/sと低速になるほど大きい比摩耗量になる接触圧力が高くなる．また摩擦速度が低いほど，接触圧力の増加とともに比摩耗量は徐々に大きくなるようになり，臨界圧力がはっきりしなくなる．図2－3－87は摩擦係数と接触圧力の関係である．摩擦速度5m/s の場合には，摩擦係数のばらつきが大きくその傾向ははっきりしない．15m/s，25m/s と摩擦速度が大きくなると，接触圧力の増加とともに摩擦係数ははっきりと低下の傾向を示している．この傾向はShooter らの研究[36]とよく似ている．また接触圧力が低いほど摩擦係数のばらつきが大きいようである．図2－3－86と図2－3－87を合わせ考えると，全般的に比摩耗量の小さいときには摩擦係数のばらつきが大きく，比摩耗量が大きい場合には摩擦係数のばらつきが小さく，その値もいくぶん小さいように見える．

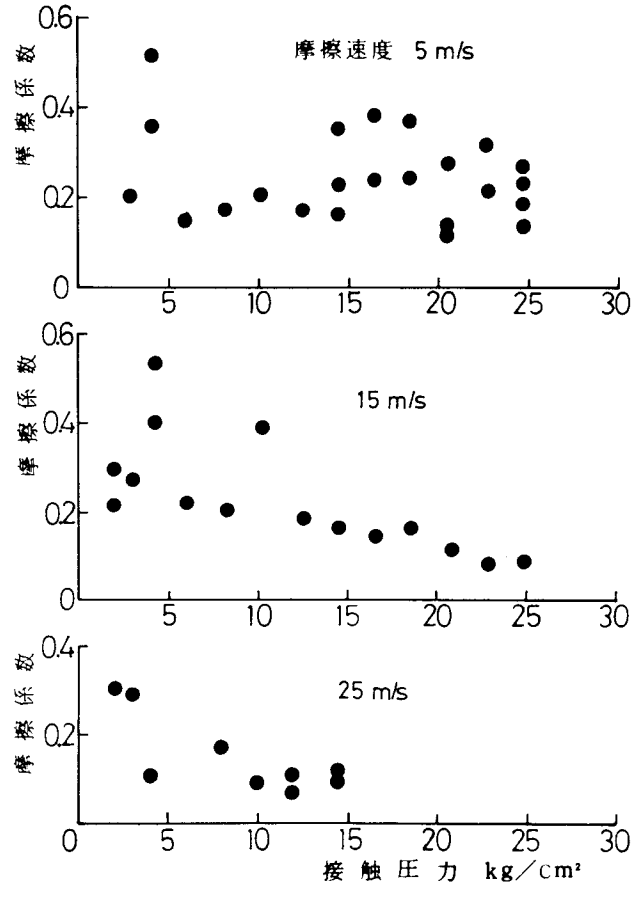


図2－3－87 摩擦係数と接触圧力の関係

（2）摩擦摩耗の摩擦速度特性

図2－3－88は図2－3－86を書きかえて横軸を摩擦速度にして示した図である．図から接触圧力が大きいときには，摩擦速度が変わっても比摩耗量の値はあまり変わらず，前述のように2×10^{-4} mm^2/kg になっている．

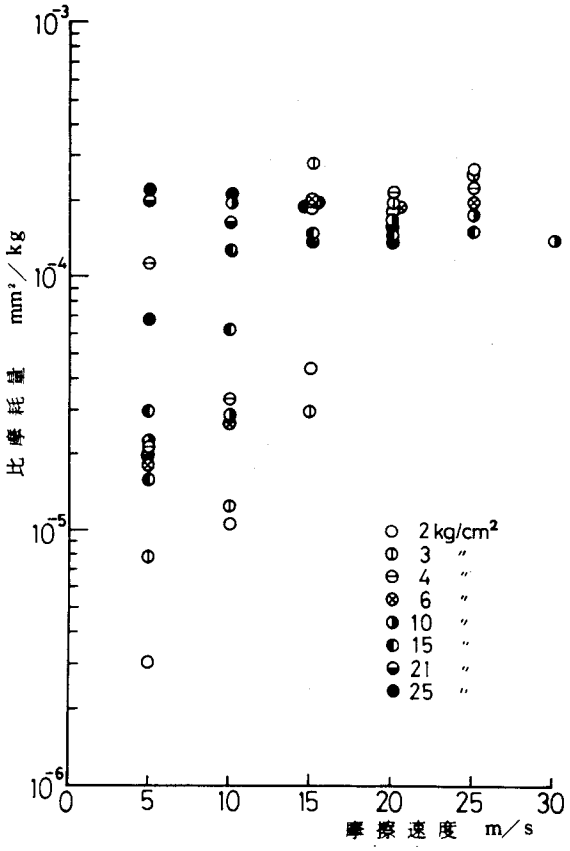


図2－3－88 比摩耗量と摩擦速度の関係

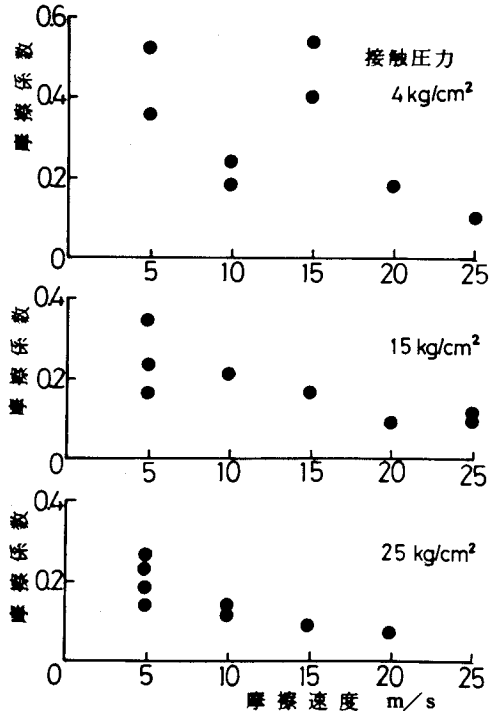


図2－3－89 摩擦係数と摩擦速度の関係

接触圧力が低いときには摩擦速度が低いほどばらつきが大きいが，比摩耗量の値は小さくなっている．また高速高荷重域での比摩耗量の値はナイロン6の約2倍くらいになっている．図2－3－89に摩擦係数と摩擦速度の関係を示す．この場合も低速低荷重域では摩擦係数のばらつきが大きいが，接触圧力15kg／cm²，25kg／cm²と大きくなるほどその傾向がはっきりして，摩擦速度の上昇とともに摩擦係数が小さくなる．そしてその値は0.1以下になり，自己潤滑性のあるナイロン6の場合（約0.25）よりも小さくなっている．ナイロン6において自己潤滑性が見られるのは摩擦面の軟化が見られない範囲であるためである．常温での製品かたさはほぼ同じであるが，塩化ビニルは高温かたさが低いため比摩耗量が大きくなり，第3章の理論的解析の項でも述べるように，逆に摩擦係数が小さくなるのであろう．このように，

ＰＶ値が大きい場合には次の摩擦部の観察のところでも述べるが，摩擦面表層がかなり軟化溶融状態にあると考えられる。

（３）摩擦部の観察

図２－３－９０は試験片の外観および摩擦面の拡大写真である．（ａ）は低速低荷重（５m／s，３kg／cm²），（ｂ）は低速高荷重（５m／s，２５kg／cm²），（ｃ）は高速低荷重（２５m／s，４kg／cm²）の場合である．低速低

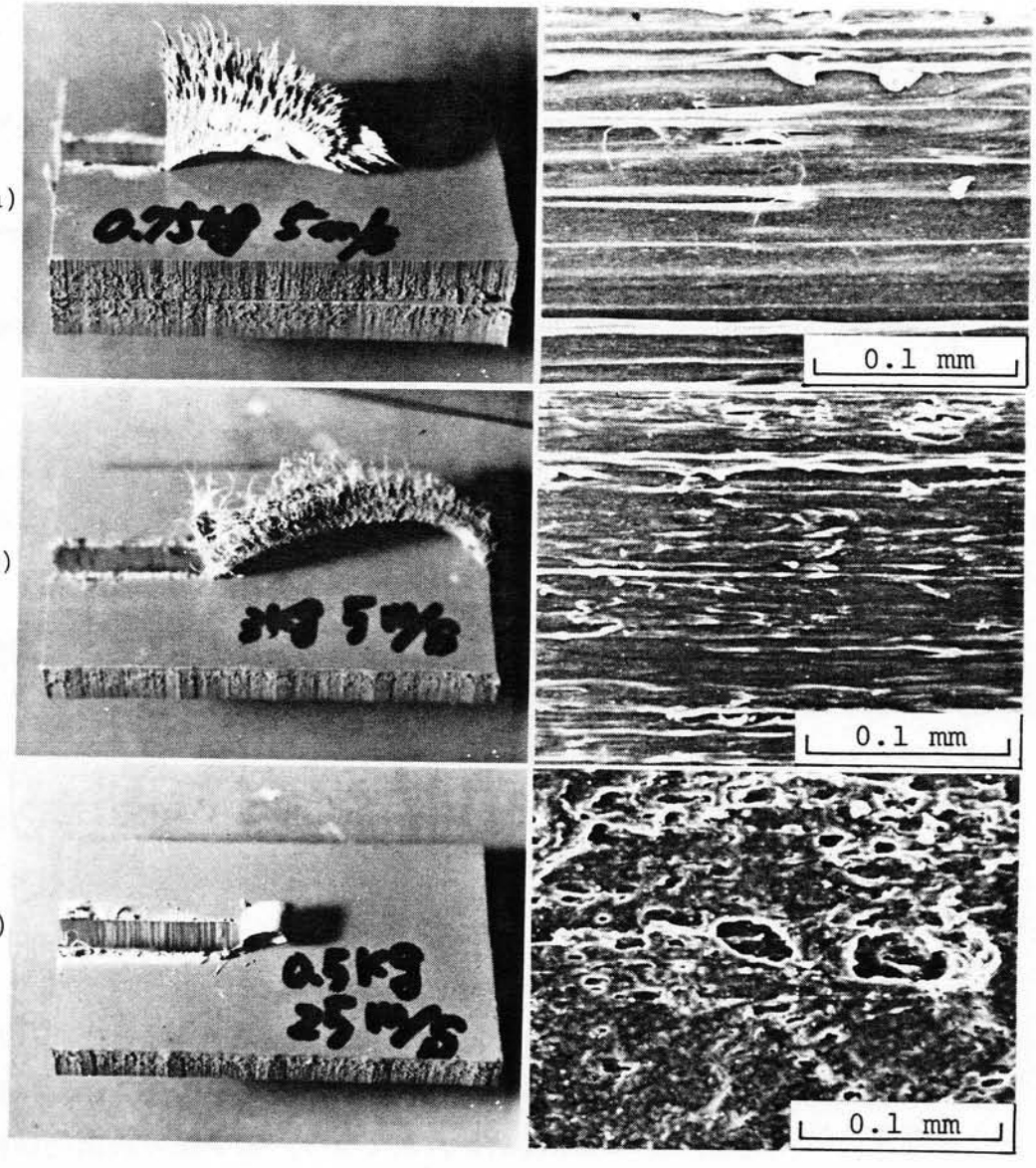


図２－３－９０　試験片の外観および摩擦面

荷重（a）のかえりはかえり基板上に針状のアブレシブ摩耗片らしきものが積み重なっているようで，摩擦面表層には平行線状の引きかき傷がみられ表層はそれほど高温軟化していないようである．低速高荷重（b）のかえりのようすは（a）とはいくぶん異なり，針状のものがうすく平らになり曲がっており，温度もかなり高くなっていると考えられる．また摩擦面のようすからも表層がいくぶん軟らかくなり，摩擦円板でぬぐいとられたように見える．高速低荷重（c）のかえりは（a),(b）とは全く異なり針状の積み重なりは全くなく，ぬぐいとられた部分は高温になっており，基板に付着することなく遠心力で飛び散ってしまったものと考えられる．摩擦面を見ると，はっきりと溶融したことがわかり，摩擦方向のすじはほとんど見られない．このように高速低荷重ないし高速高荷重では摩擦面が軟化溶融状態になるため比摩耗量が大きく，摩擦係数は非常に小さくなるのであろう．

第4節　結　言

本章ではすべり速度100m/s 程度までの高速での摩擦摩耗について，摩擦切断形式の試験装置を用いて基礎的に詳細に実験的研究を行った．その結果を要約すると次のようになる．

1. 本研究の実験範囲では，接触圧力が臨界圧力以上と以下で炭素鋼の摩擦摩耗の状態が明りょうに異なり，低荷重域では比摩耗量，摩擦係数ともに小さく，この領域では定常的に覆っているFe_3O_4 酸化膜が摩擦面間の凝着を妨げ減摩作用を果たしている．高荷重域では比摩耗量，摩擦係数ともに接触圧力の変化によってはあまり変わらず，摩擦速度の上昇とともに低下している．また高荷重域では摩擦面表層は高温軟化しており，その軟化膜は境界潤滑剤として働くので，摩擦の外見的性格は境界摩擦的で，摩耗の外見的性格はアブレシブ摩耗的である．
2. 一連の実験としては行われたことのない広範囲の摩擦速度（2×10^{-2} ～ 2×10^{2} m/s）にわたる実験を行い，比摩耗量および摩擦係数の双方が4つの領域で低下することを実証した．
3. 本実験条件では高速高荷重下で水冷の効果はあまり見られず，試験片の熱伝導率はあまり関係しない．水の温度上昇から計算した摩擦熱の試験片への配分率はJ. C. Jaegerの理論式から計算されるものよりはるかに大きく，本実験条件にはJ. C. Jaegerの式を適用できない．
4. 酸素，窒素ふん囲気中でも空気中の場合と同様に，摩擦速度が増すと比摩耗量，摩擦係数ともに小さくなる．特に窒素中高荷重域での摩擦係数の低下が著しい
5. 高速高荷重下での比摩耗量，摩擦係数の低下は酸化物の影響よりも摩擦面表層軟化の影響のほうが大きいが，高荷重域では比摩耗量を最小にする適当な酸素濃度があり，低荷重域の場合には単に保護被膜ができやすい酸化性ふん囲気ほど比摩耗量，摩擦係数ともに小さくなる．
6. S35C，FC20，SUS27(304)各試験片材料に対する比摩耗量お

よび摩擦係数の接触圧力特性はよく似ており，記述の順に後ほど大きくなっている．S35Cに対するそれぞれの値は摩擦速度の増大につれて減少するが，FC20およびSUS27(304)の値はあまり変化しない．それらは酸化膜の減摩作用で説明できる．

7. アルミニウムは鉄系材料に比べて，かたさ値が小さいためアブレシブ摩耗を受けやすく，比摩耗量，摩擦係数ともに大きくなる．また圧延材に比べて焼なましによるかたさの低下はあまり大きく影響しない．

8. アルミニウムでも鉄系材料と同様に酸化および軟化溶融で摩擦摩耗の特性を記述することができ，摩擦条件のゆるい場合には酸化膜が減摩作用を果たし，厳しい条件のときには酸化熱のための軟化も加わって酸化膜が破壊されやすく，酸化性ふん囲気ほど比摩耗量が大きくなる．また酸化膜および軟化溶融が重要な役割を果たすときには，摩擦係数も小さくなる．

9. 高分子材料は軟化温度が低いため，アルミニウムに比べてより低いPV値でsevere wear域に入り，摩擦面表層は軟化ないし溶融している．またアルミニウムほど活性でないため，凝着が少なく，比摩耗量の値は鉄系材料とアルミニウムの中間にある．そして溶融粘度が低いために摩擦係数が小さくなる．またナイロン6ははっきりと自己潤滑性を示した．

第3章　高速すべり摩擦の理論的解析

第1節　緒　言

前章の実験的研究で100m/s 近傍の摩擦速度まで，摩擦速度の増大とともに摩擦係数は単調に減少することを明らかにした．鋼の空気中，酸素中摩擦試験において，高荷重下の100m/s 前後の速度域で比摩耗量および摩擦係数の低下する原因は従来 FeO酸化膜の減摩作用で説明されている．しかし，窒素ふん囲気中でも比摩耗量，摩擦係数ともに前者よりは全般的に大きいが，摩擦速度の増大とともに単調に減少する傾向はやはり前者と同様である．したがって従来考えられていたような単純な酸化膜の減摩作用のみでは，上述のような現象を十分には説明できない．また摩擦面にはふん囲気の種類にかかわらず大きい摩擦すじが見られ，摩擦の外見的性格は引きかき摩耗的である．引きかき摩擦については石塚ら[1,2]の理論的研究があるが，軟らかい平面材料のかたさを一様としており，本研究のように高速において摩擦面表層のみが軟化する場合にはあてはまらない．したがって，Bowdenらの真空中摩擦試験の300m/s 程度で，摩擦係数に極小値が見られる[3]ことや窒素中の摩擦特性などから，境界潤滑的なそのような傾向は FeO酸化膜の減摩作用のほかに，摩擦面表層の軟化溶融を考慮した引きかき摩擦的説明が必要であろう．

本研究のように試験片を大きい摩擦円板外周に押しつける摩擦切断形式の摩擦試験では，摩擦熱と酸化熱のため試験片側摩擦面表層は温度上昇し，軟化するが，円板側は接触面積比が非常に大きいため，図2－3－29でも示したように温度上昇は少なく，円板外周に凝着したかたい突起部で試験片の摩擦面はアブレシブ摩耗的な引きかきを受ける．

以上のような現象面の事実をふまえるとともに単純化するために，円板外周の突起部を剛体球とし，この剛体球が表層軟化した平面上を摩擦するとして解析を進める．そして摩擦抵抗としては，剛体球の引きかきによる抵抗と凝着による抵抗の両方を考慮する．ここで凝着部分に作用するせん断力の方

向は石塚らの考え方を採用する．表層軟化の状態は摩擦面からの深さ方向の温度分布がわかるとともに，その材料の温度とかたさの関係がわかれば解明できる．しかしそのような資料はあまり見当らないので，ここでは簡単のために塑性流動圧力を深さの一次関数で表すことができると仮定する．

第2節　理論解析

図3－2－1は荷重Wのもとで，摩擦力Fに打ちかって平面が右方へ動く

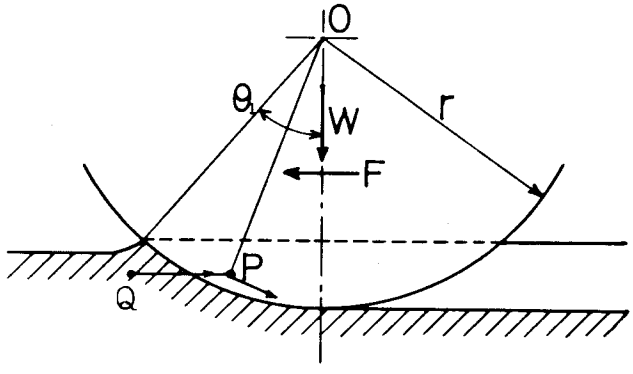


図3－2－1　剛体球摩擦モデル

剛体球による表層軟化平面上の摩擦モデルである．剛体球の半径はr，真実接触面は図示するような中心角θ_1の球面の前（左）半分だけである．表層軟化に関する情報はほとんどないが,ここでは摩擦面表層が一番かたさが低く深くなるほどかたさが高いので，簡単のために摩擦面表層からの深さyと塑性流動圧力P_mの関係が次式のような一次式で表されると仮定する．

$$P_m = A + By \qquad (3-1)$$

ただし，A：摩擦面表層の塑性流動圧力，B：塑性流動圧力の増加率である．

凝着抵抗については次の二つの場合が考えられる．その一つは接触面の凝着部分のせん断強さをsとしたとき，sとその部分の材料の塑性流動圧力P_mの比が一定になる場合（$s=\mu' P_m$でμ'は一定）である．他の一つは凝着部分のせん断強さsと，摩擦面表層の塑性流動圧力Aとの比が一定になる場合（$s=\mu' A$でやはりμ'は一定）である．後者は表層の軟化した薄膜が潤滑剤的に摩擦面に引き込まれて流体潤滑的作用をするという考え方である．ここでμ'（凝着抵抗による摩擦係数）を凝着係数[1]と呼ぶことにする．荷重WはP_mおよびsの垂直方向成分の積分値に，摩擦力FはP_mおよびsの水平方向成分の積分値に等しいと考える．なお，この場合凝着部のせん断方向

はいろいろ考えられる。そこで図3－2－1で微小部分Qの移動を考える．Q部分は剛体球に衝突するまでは水平にFと逆方向に移動し，剛体球面上の一点Pに衝突した後，$\overline{QP}$と$\overline{OP}$を含む平面内でP点の接線方向に流れるとする．凝着抵抗については前述のように二つの考え方があるので，以下二つに分けて理論解析を進める．

2．1　$s = \mu'(A + By)$ と仮定した場合

$\overline{OP}$とOを通る垂線（荷重方向）との角をθとすると，P点での塑性流動圧力P_mは次式で表される．

$$P_m = A + Br(\cos\theta - \cos\theta_1) \qquad (3-2)$$

P_mの垂直方向成分の積分値W_1は図3－2－2を参照して次式のようになる．

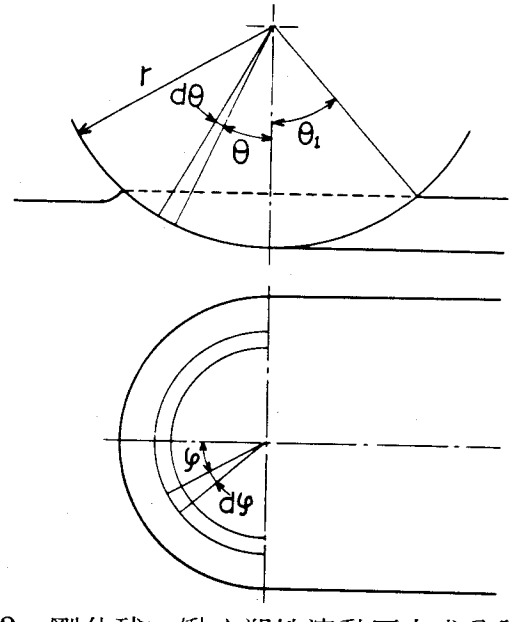


図3－2－2　剛体球に働く塑性流動圧力成分計算のための図

$$dW_1 = (r\,d\theta\, r\sin\theta\, d\varphi)\cdot P_m \cos\theta \qquad (3-3)$$

$$W_1 = 2\int_0^{\theta_1}\int_0^{\pi/2} P_m r^2 \sin\theta\cos\theta\, d\varphi\, d\theta$$

$$= r^2\int_0^{\theta_1} \sin\theta\cos\theta\{A+Br(\cos\theta-\cos\theta_1)\}d\theta\cdot 2\int_0^{\pi/2} d\varphi$$

$$=\pi r^2\{(A-Br\cos\theta_1)\frac{\sin^2\theta_1}{2}-\frac{Br}{3}(\cos^3\theta_1-1)\}$$

(3－4)

またP_mの摩擦方向成分の積分値F_1も同図を参照して次式となる.

$$dF_1=(r\,d\theta\ r\sin\theta\,d\varphi)\cdot P_m\sin\theta\cos\varphi \qquad (3-5)$$

$$F_1=2\int_0^{\theta_1}\int_0^{\pi/2}P_m\,r^2\sin^2\theta\cos\varphi\,d\varphi\,d\theta$$

$$=r^2\int_0^{\theta_1}\sin^2\theta\{A+Br(\cos\theta-\cos\theta_1)\}d\theta\cdot 2\int_0^{\pi/2}\cos\varphi\,d\varphi$$

$$=r^2\{(A-Br\cos\theta_1)(\theta_1-\frac{1}{2}\sin 2\theta_1)+\frac{2}{3}Br\sin^3\theta_1\}$$

(3－6)

図3－2－3のように摩擦方向前方から見た微小部分の角度をβ, $d\beta$とし，そこを通る同心円の半径をr_β，その円弧の角度をβ_1とし，$\overline{OP}$を含み

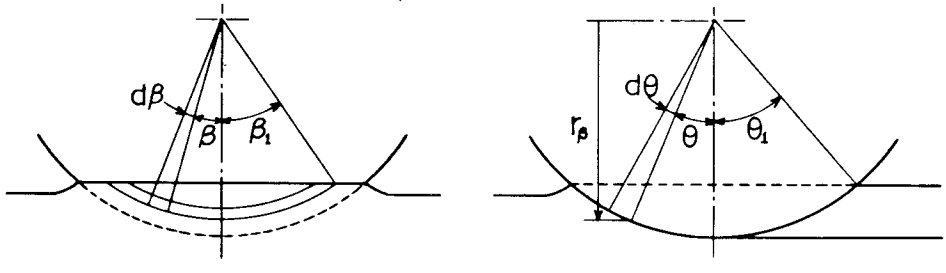


図3－2－3　剛体球に働く凝着力成分計算のための図

紙面に垂直な平面と垂線の角をθとすると，P_m,β_1は次式のようになる.

$$P_m=A+Br(\cos\theta\cos\beta-\cos\theta_1) \qquad (3-2')$$

$$r_\beta=r\cos\theta\ ,\qquad r_\beta\cos\beta_1=r\cos\theta_1$$

$$\therefore\ \cos\beta_1=\cos\theta_1/\cos\theta \qquad (3-7)$$

式（3－2′），式（3－7）を使って，sの摩擦方向成分の積分値F_2は次のようになる.

$$dF_2=(r\,d\theta\ r\cos\theta\,d\beta)\cdot\mu' P_m\cos\theta \qquad (3-8)$$

$$F_2=2\int_0^{\theta_1}\int_0^{\beta_1}\mu' P_m\,r^2\cos^2\theta\,d\beta\,d\theta$$

$$= 2\mu' r^2 \ (A - Br\cos\theta_1) \int_0^{\theta_1} \beta_1 \cos^2\theta \, d\theta$$

$$+ 2\mu' r^3 B \int_0^{\theta_1} \cos^2\theta \sqrt{\cos^2\theta - \cos^2\theta_1} \, d\theta$$

$$(3-9)$$

また，sの垂直方向成分の積分値W_2は次のように求まる．

$$dW_2 = (r\,d\theta\, r\cos\theta\, d\beta) \cdot \mu' P_m \sin\theta\cos\beta \qquad (3-10)$$

$$W_2 = 2\int_0^{\theta_1}\int_0^{\beta_1} \mu' P_m \ r^2 \sin\theta\cos\theta\cos\beta \, d\beta \, d\theta$$

$$= \mu' r^2 (2A - Br\cos\theta_1) \int_0^{\theta_1} \sin\theta \sqrt{\cos^2\theta - \cos^2\theta_1} \, d\theta$$

$$+ \mu' r^3 B \int_0^{\theta_1} \beta_1 \cos^2\theta \ \sin\theta \, d\theta$$

$$= \mu' r^2 A \{\sin\theta_1 - \cos^2\theta_1 \ln(1 + \sin\theta_1) / \cos\theta_1\}$$

$$+ \frac{1}{3}\mu' r^3 B \{\theta_1 - 2\sin\theta_1\cos\theta_1$$

$$+ \cos^3\theta_1 \ln(1 + \sin\theta_1) / \cos\theta_1\}$$

$$(3-11)$$

水平，垂直方向の力のつり合から

$$F = F_1 + F_2 \qquad (3-12)$$

$$W = W_1 - W_2 \qquad (3-13)$$

したがって，摩擦係数μは次式のように表される．

$$\mu = F / W$$

$$= \frac{F_1 + F_2}{W_1 - W_2} \qquad (3-14)$$

式（3－14）に，式（3－4），式（3－6），式（3－9）および式（3－11）で計算した値を代入すれば，摩擦係数μを求めることができる．凝着係数μ'を零とおくと，堀り起こしのみを考慮した摩擦係数μ_1を求めることができる．

$$\mu_1 = F_1 / W_1 \qquad (3-15)$$

せん断による摩擦係数μ_2をμとμ_1の差として定義する[1]と

$$\mu_2 = \mu - \mu_1 \qquad (3-16)$$

2．2　s ＝ μ'A と仮定した場合

軟金属薄膜の潤滑ではかたい地金で荷重を支え，完全には排除されずに残っている軟らかい薄膜内（凝着力が小さいときは接触面間）でせん断が起こるため，摩擦係数が低下すると考えられている[4]．また始めに述べたせん断方向の考え方から表層は球面に沿って流下する．したがって，ここでは2.1のせん断項の計算におけるせん断強さsをs＝$\mu'P_m$＝μ'Aと仮定することにする．この場合せん断による力の水平成分F_2，垂直成分W_2の値は式（3－9），式（3－11)中でBr＝0とすればよいから

$$F_2 = 2\mu' r^2 A \int_0^{\theta_1} \beta_1 \cos^2\theta \, d\theta \qquad (3-9')$$

$$W_2 = \mu' r^2 A \{ \sin\theta_1 - \cos^2\theta_1 \ln(1+\sin\theta_1) / \cos\theta_1 \} \qquad (3-11')$$

となる．

摩擦係数μの計算は式（3－4），式（3－6），式（3－9′）および式（3－11′）を2.1の摩擦係数の式（3－14）に代入すればよい．

本節2.1および2.2項の式（3－9）および式（3－9′）の積分は解析的に求めることができないため，数値積分によって求める．

第3節　計算結果

3．1　かたさ変化率の影響

図3－3－1は，$s=\mu'(A+By)=\mu'\{A+Br(\cos\theta-\cos\theta_1)\}$と仮定した場合の式（3－14）から計算した摩擦係数μとBr／Aの関係を示す．Br／Aは式（3－1），式（3－2）からわかるように表層軟化の程度を表すパラメータ（以後かたさ変化率と呼ぶ）で，それが大きいほど表層軟化が著しいことを表している．しかし，接触角θ_1によって同じBr／Aでも表層軟化の程度が異なる．たとえばBr／A＝1000の場合，$\theta_1=0.02$ radのとき表面に対し溝底のかたさは約1.2倍であるが，$\theta_1=0.2$，0.4 radのときそれぞれ約20倍，80倍である．いずれにしても図3－3－1からわかるように，Br／Aがかなり大きい値になっても摩擦係数μの低下は

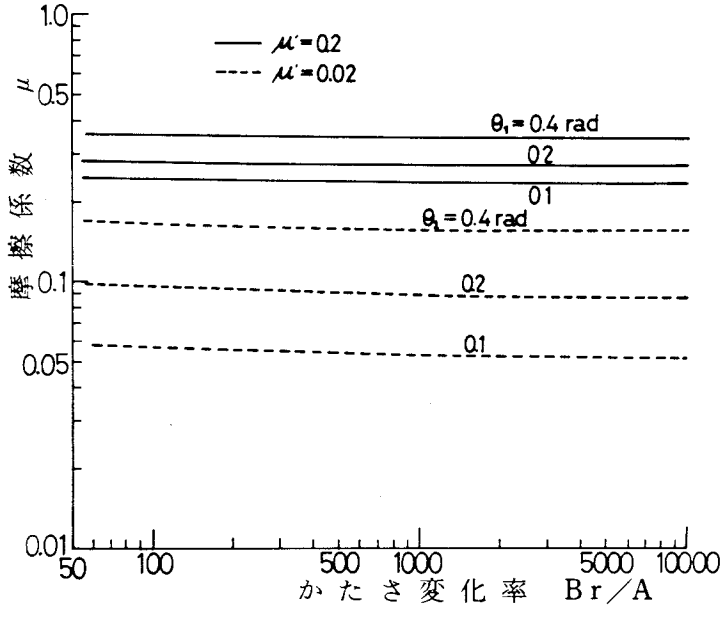


図3－3－1　摩擦係数とかたさ変化率の関係：$s=\mu'(A+By)$

ごくわずかである．したがって本章2.1のような考え方$s=\mu'(A+By)$では実験結果のような大きい摩擦係数の低下を説明できない．

図3－3－2は本章2.2で述べたように，$s=\mu'A$と仮定して計算したと

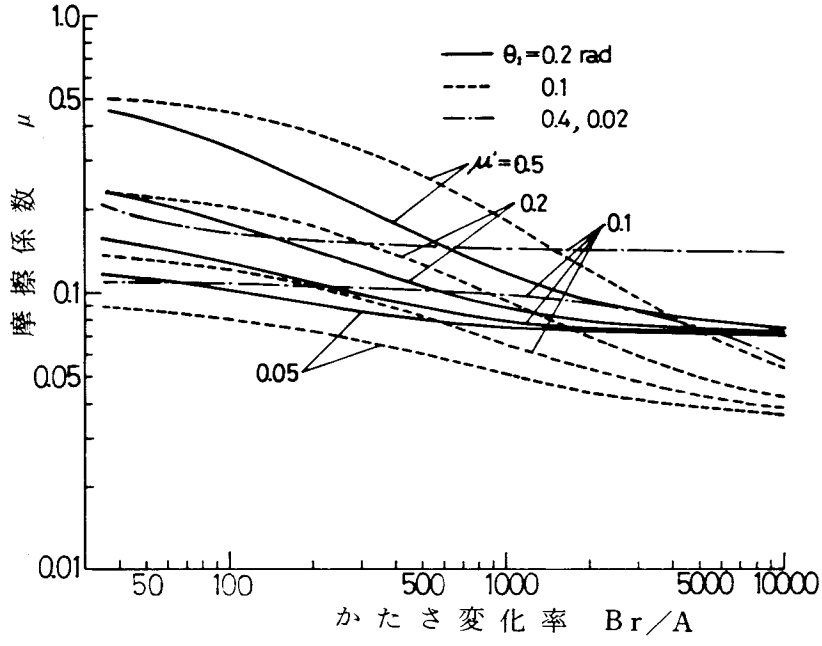


図3－3－2　摩擦係数とかたさ変化率の関係：$s=\mu' A$

きに得られた摩擦係数μとかたさ変化率Br/Aの関係を示す．図3－3－1とは異なり，Br/Aの増加によって摩擦係数μはかなり低下している．全般的に凝着係数μ'が大きいほど（Br/Aの小さいところで）摩擦係数μは大きい．図中上側の一点鎖線は接触角$\theta_1=0.4$ rad であり，下側の一点鎖線は$\theta_1=0.02$ rad である．全般的にみると接触角θ_1が大きいほど，各曲線の変曲点の位置はBr/Aの小さいほうに移っている．すなわち接触角θ_1が大きいほど摩擦係数μはBr/Aの小さいところで一定値に収束する．そして収束する摩擦係数の値は大きくなることがわかる．

以上のように，$s=\mu' A$とすると実験結果をよく説明できるため，次項の3.2以下では$s=\mu' A$として計算して考察する．

3．2　接触角の影響

図3－3－3はかたさ変化率Br/A＝1000の場合の摩擦係数μと接触角θ_1の関係を凝着係数μ'をパラメータとして示している．凝着係数$\mu'=0$はせん断項を無視した場合に相当し，接触角θ_1が大きくなると摩擦係数μは

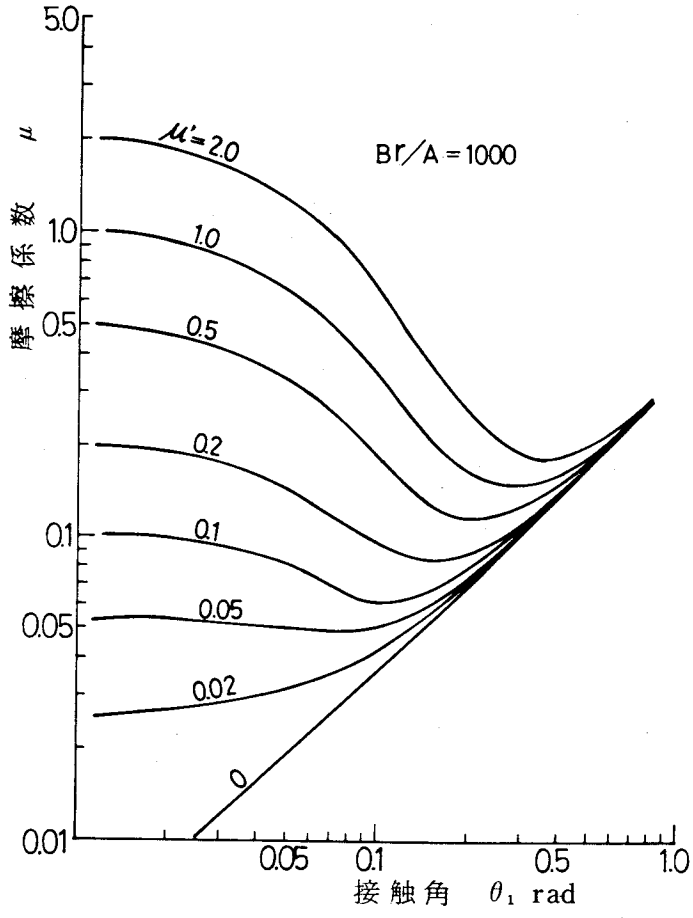


図３－３－３　摩擦係数と接触角の関係：$s=\mu' A$

両対数グラフ上でほぼ直線的（こう配は約１程度である）に増大する．しかしμ'が大きくなるとμとθ_1の関係は$\mu'=0$の場合と異なっている．全般的な傾向としては接触角θ_1が小さいときは当然のことながら，摩擦係数μは凝着係数μ'の値に収束するようであり，θ_1が大きくなってくるとμ'よりわずかに大きくなり，その後徐々に小さくなり，ある接触角θ_1で摩擦係数は極小値をとる．それよりθ_1が大きくなると凝着係数$\mu'=0$の線に収束して行き，ほぼ直線的に増大するようである．すなわち全般的にθ_1の小さい範囲でμ'の影響が大きく，θ_1が大きくなると堀り起こし項がμ中の大きい割合を占めるため$\mu'=0$の線に近ずく．

3．3　凝着係数の影響

図3－3－4はBr/A=1000 の場合の摩擦係数μと凝着係数μ'の関係を接触角 θ_1 をパラメータとして示している．接触角 θ_1 が小さいときには摩擦係数μの主成分はせん断項となり，凝着係数μ'の影響を大きく受けるが，θ_1 が大きい場合には凝着係数μ'の変化によってあまり変わらない．さらにμ'が大きいところで θ_1 が大きいほうがμが小さいことを示している．それはBr/A=1000 と一定の場合ではあるが，前述のように θ_1 が大きいほど，表面と接触の底部とのかたさの差が大きく，そのため接触角 θ_1 の増大による摩擦力の増加よりも負荷能力の増加の割合がはるかに大きいためである．このことを明確にするために本章2.1の場合の計算結果を図3－3－5に示した．摩擦係数μ中の堀り起こし抵抗成分は凝着係数μ'が小さいほどその割合が大きく，μの曲線はμ'が小さいとき接触角 θ_1 の増大につれて $\mu = \mu'$

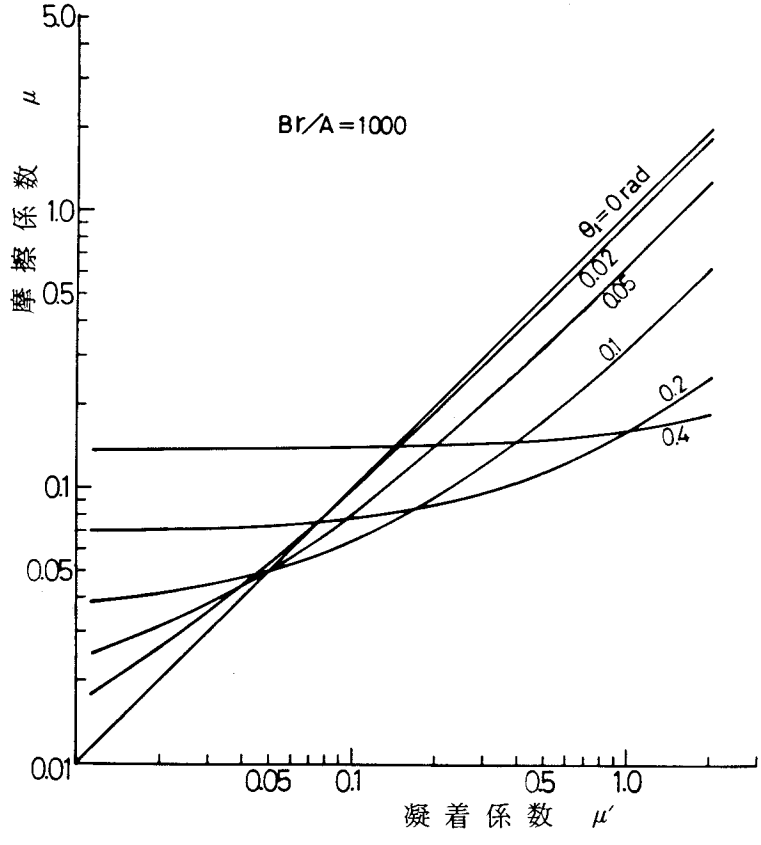


図3－3－4　摩擦係数と凝着係数の関係：s＝μ'A

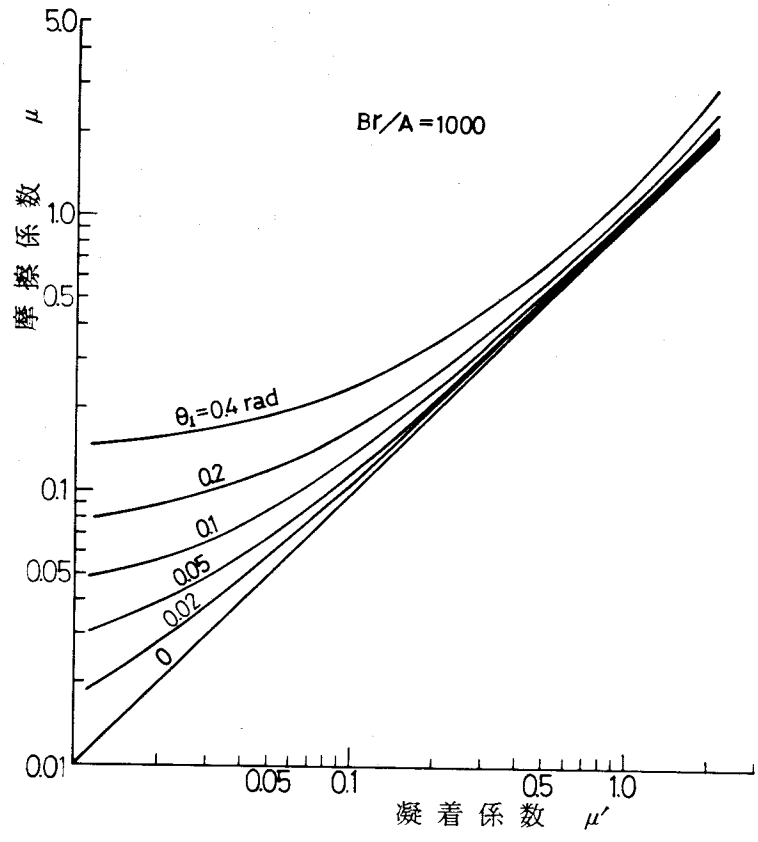


図3－3－5　摩擦係数と凝着係数の関係：$s = \mu'(A + By)$

（$\theta_1 = 0$に対応）の直線よりかなり上になるが，μ'が大きくなるとθ_1の違いはあまり影響しなくなる．それにしても凝着係数μ'の全範囲で接触角θ_1が大きいほど全般的に摩擦係数が大きくなっており，図3－3－4の場合と比べて著しく相違している．

第4節　実験結果との比較

第2章第3節3.2で取り扱ったふん囲気を変えた場合の摩擦係数の速度特性の図2－3－36と，前節3.1の理論計算結果の摩擦係数μとかたさ変化率Br/Aの関係の図3－3－2とを比較することにする．ところが実験結果の横軸は摩擦速度Vであるのに，理論計算には速度の変数が入っておらず横軸はかたさ変化率Br/Aとなっている．したがって実験と理論を関連づけるには，摩擦速度Vとかたさ変化率Br/Aの関係が明らかでなければならない．またそのほかにも，パラメータである接触角θ_1，凝着係数μ'などが既知でなければ比較できない．ただし，接触角θ_1については試験片摩擦面の摩擦すじの形状を調べることで大よその値を求めることができる．図2－3－14（b）(摩擦速度85.8m/s，接触圧力0.8 kg/mm^2)の摩擦面あらさの曲線の谷の形状を球状突起が引きかいた後の円弧として近似すると，図中の3つの谷の接触角θ_1 rad，球半径r mmは，(θ_1，r）と表せばそれぞれ（0.29，0.34)，(0.14，1.4)，(0.075，5.0)であり，平均的に大よそθ_1＝0.1～0.2 radと考えればよい．また凝着係数μ'は堀り起こしを考えない(θ_1＝0）凝着説的摩擦係数に対応すると考えれば，一般に10^{-1}のオーダとみなしてよいであろう．これらのことを考慮し，摩擦速度Vを適当な対数尺上にとり理論計算結果のグラフ上にプロットすると，図3－4－1のようになる．図から窒素中および空気中の摩擦係数は，それぞれθ_1＝0.2 rad，μ'＝0.5およびθ_1＝0.2 rad，μ'＝0.2の理論曲線上によく乗っていることがわかる．そして上記計算条件の接触角θ_1および凝着係数μ'は前述のように妥当な値である．したがって，本章第1節および第2節2.2の考え方は高速における摩擦を説明するための一提案として，十分な妥当性があるものと言えよう．さらに，摩擦速度Vの20m/sから100m/sへの変化は，かたさ変化率Br/Aでは約100から1000への変化に対応し，高速になるほど摩擦面表層のかたさ変化が急激になることを示している．またふん囲気の変化は凝着係数μ'の変化に対応し，窒素ふん囲気中では凝着係数がμ'＝0.5と大

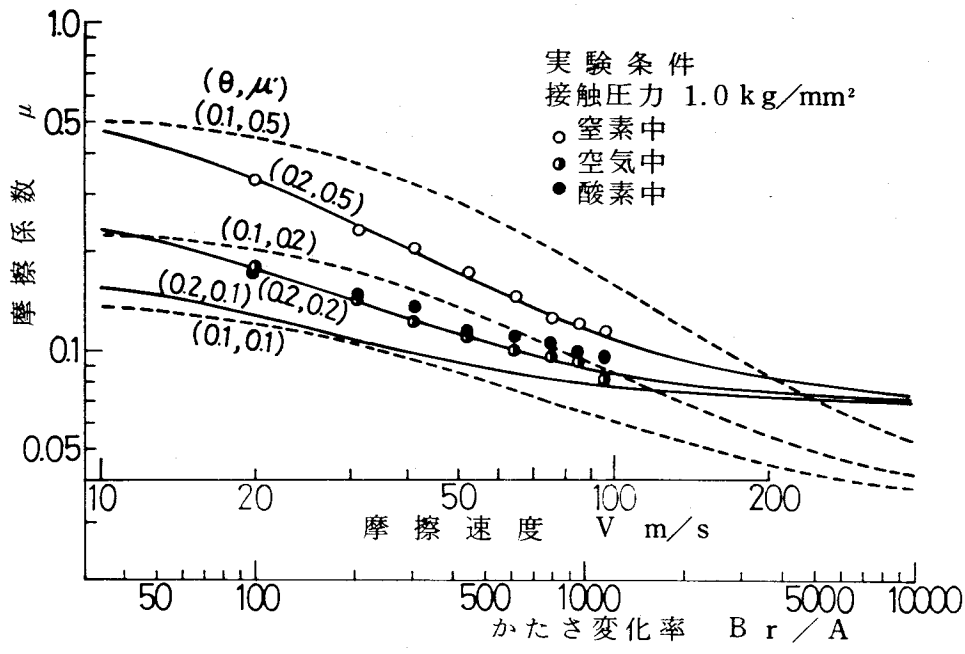


図３－４－１　理論計算と実験結果の比較

きく，空気中，酸素中では凝着係数は$\mu'=0.2$と小さく妥当な値である．

なお酸素中の摩擦係数は高速において空気中の値よりもいくぶん大きいが，酸素中では流動状態の酸化膜ＦｅＯが生じており，それが接触の谷部にある程度うめられ，その部分は負荷能力にはあまり関与しないが，その部分のせん断抵抗（流動抵抗）は球状突起と平面の摩擦抵抗に加わり，摩擦力を増大させる働きを持つからであろう．すなわち酸素中の摩擦は固体摩擦と流体摩擦からなり，空気中の場合はほとんど固体摩擦のみと考えればよいであろう．さらに高速になると摩擦面がすべて溶融膜で覆われ流体摩擦状態になり，その段階がＷｉｌｓｏｎの理論[5)]が適用される範囲と思われる．

要するに「本研究のような高速高荷重における摩擦摩耗の対摩擦速度特性，すなわち摩擦速度の上昇とともに比摩耗量および摩擦係数が低下する傾向は，摩擦面平均温度の上昇によるＦｅＯ酸化膜ができやすくなるためである．」という解釈が従来一般的であったが，実験結果とよい一致を示す本解析によって，酸化膜の効果よりもむしろ摩擦面平均温度の上昇による摩擦面表層軟化の効果が大きいことを明らかにした．

第5節　結　言

本章では第2章で得られた結果を説明するために，高速高荷重域の摩擦では表層が軟化溶融してその軟化膜が潤滑剤として作用し，「表層からの深さの一次関数で塑性流動圧力が表されるような表層軟化平面上を剛体球が滑る」という摩擦モデルを考えて理論解析を行い，次のような結果を得た．

1. 球と平面の凝着抵抗がその深さの塑性流動圧力で決まると考えた場合には，かたさ変化率を増加しても摩擦係数はほとんど低下しない．しかし，球と平面の凝着抵抗が最表層軟化膜のせん断強度で決まると考えると，かたさ変化率が大きくなるほど摩擦係数は小さくなり実験の傾向と一致する．

したがって，以下後者のように $s=\mu' A$ として計算すると，

2. 剛体球と平面の接触角が大きくなると，凝着係数を零とした場合には両対数グラフ上で摩擦係数は単調増加である．凝着係数が大きくなると凝着係数が零の場合より摩擦係数ははるかに大きく，接触角が小さい間は接触角の増大とともに減少するが，接触角が大きくなると凝着係数が零の曲線に漸近する．
3. 接触角が小さいときには摩擦係数の主成分はせん断項によるもので，凝着係数の影響を大きく受ける．接触角が大きい場合には凝着係数の影響をあまり受けず，凝着係数が大きいところで接触角が大きいほうが摩擦係数は小さくなる．
4. 摩擦速度をかたさ変化率に，ふん囲気の変化を凝着係数の変化に対応させて比較すると，理論計算結果は実験結果とよく一致する．

上記のことから，高速高荷重域における摩擦速度の増大とともに比摩耗量および摩擦係数が低下する機構をFeO酸化膜で説明するよりも，摩擦面表層軟化の効果で説明するほうが妥当である．

第4章　摩擦切断への応用

第1節　緒　言

一般的に摩擦は工学上有害作用を呈するとみられているが，逆に積極的に摩擦を生じさせてその発熱作用を加工に利用しようとするのが，本章で扱う摩擦切断である．しかし既に述べたように摩擦切断はかなり大きな動力を必要とし，騒音が大きい，振動を伴う，被切断材に熱的影響を及ぼし精密な加工には向かない，無理な作業を行うと摩擦円板が破壊して飛ぶ恐れがあるなどの欠点があるため，わずかの研究[1~3]がみられるのみで実際にはあまり使用されていないようである．しかし砥石切断の場合砥石の消耗が著しいが，それに比べて摩擦切断では摩擦円板の消耗はほとんど問題にならない．摩擦円板としてごくありふれた軟鋼板を用いて，高速度鋼丸のこでは切断できないような硬い材料を短時間で切断できる．以上のような長所をもっているので使用法が適当であれば摩擦切断の実用が有効となるであろう．

摩擦切断は被切断材料を局部的に高温軟化させ，その部分をこすり取るという二つの作用で切断する方法である．被切断材だけを局部的に高温軟化させ，工具材を軟化させないためには摩擦速度が大きく，工具の摩擦部分長さが被切断材との接触長さに比べて十分に長いことが必要である．そのような条件では接触摩擦中に工具および被切断材のせん光温度はともに上昇するが，工具は一周して次の接触位置にくるまでに空気中でよく冷却してその摩擦面平均温度は低く，被切断材は連続的に摩擦されてその摩擦面平均温度は高くなっている．このために高温軟化している被切断材の摩擦面は，工具摩擦面上の凝着とつ部によって容易にアブレシブ摩耗的に摩耗させられて切断作用を行うことができる．したがって摩擦切断は本研究で行ったように摩擦円板を使用することが必要条件ではなく，エンドレスの帯のことかワイヤなどを高速で走行させることでも可能であり，それによれば曲率のある輪郭の切断にも使用することができる．しかし，一般にワイヤカットは摩擦切断単独で使用されることはなく，放電加工などを併用しておりいくぶん趣を異にして

おり，切断速度はそれ程早くなく精度を高めることに重点が置かれている．

本章では第2章で明確にされた高速すべり摩擦の特性を，摩擦切断への応用を考慮して線摩耗速度および切断抵抗の観点から考察を行っている．さらに摩擦円板を熱伝導率の大きい銅円板とした場合および引きかき摩耗の影響を見るためおうとつを設けた摩擦円板を使用して，その機構的な面および実用的な面について論述している．また，砥石切断は工業的に多用されているが，研究データ[4~6]が非常に少ないので，摩擦切断と砥石切断を比較しながらその得失を論じている．

第２節　線摩耗速度および切断抵抗

本節では接触面積の項以外はすべて，９mm厚さの試験片を使用した場合について述べる．ここでは単位時間に９ｍｍ厚さの試験片をどれだけ切り込み（切断）できるかを示す値を線摩耗速度，摩擦円板に働く接線力を切断抵抗と呼ぶことにする．前者は切断の能率に，後者は切断の所要動力に関係した値である．それぞれの値は，これまで述べてきた値と次の二式で関係づけられている．本章の図はこれらの関係式を使って，主に第２章の図を書きなおしたものである．

（線摩耗速度）＝（比摩耗量 × 接触圧力 × 摩擦速度）　（４－１）

（切断抵抗）＝（摩擦係数 × 接触圧力 × 接触面積）　（４－２）

２．１　空気中炭素鋼の場合

２．１．１　接触圧力の影響

図４－２－１は炭素鋼Ｓ３５Ｃを摩擦切断したときの線摩耗速度と接触圧力の関係である．摩擦切断は当然のことであるが，図中の破線より上の厳しいsevere wearの条件で行われるが，そのような条件で実験を行うと図４－２－２に示すように光花を飛ばし，砥石切断の場合と同様早い線摩耗速度で摩耗が進行する（図４－３－１参照）．その

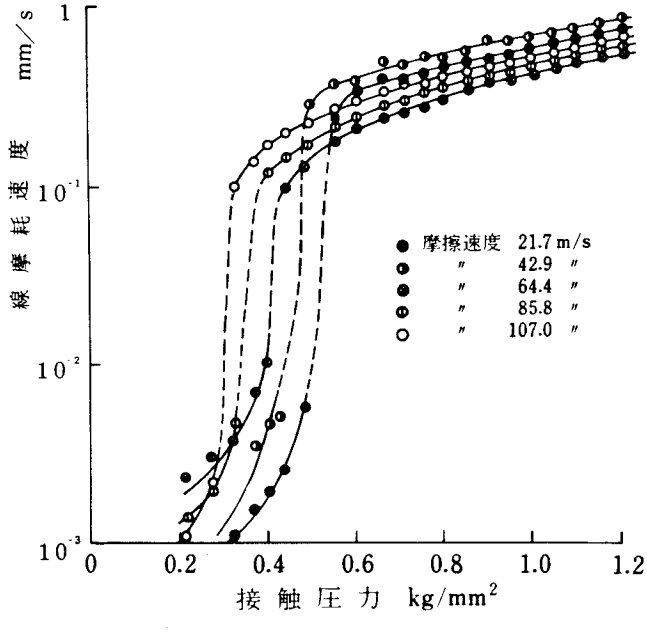


図４－２－１　線摩耗速度と接触圧力の関係

severe wear域では比摩耗量の値は接触圧力に無関係にほぼ一定となった(図2－3－1参照)のに対して，図4－2－1からわかるように線摩耗速度は接触圧力の増大とともにそれに比例して大きくなっており，接触圧力が大きいほうが能率のよいことがわかる．また摩擦速度をパラメータにして示してあるが，比摩耗量の値は低摩擦速度ほど大きかったが，線摩耗速度は摩擦速度42.9m／s の場合が最も大きくなっていることがわかる．これについては図4－2－4のところで詳述する．接触圧力0.4～0.6kg／mm²以下のmild wear域では，線摩耗速度はsevere wear域の値の1／100から1／1000になってしまうため，摩擦切断の実用にはならない．

図4－2－3は切断抵抗と接触圧力の関係である．切断抵坑は摩擦速度が小さいほど大きくなっており，

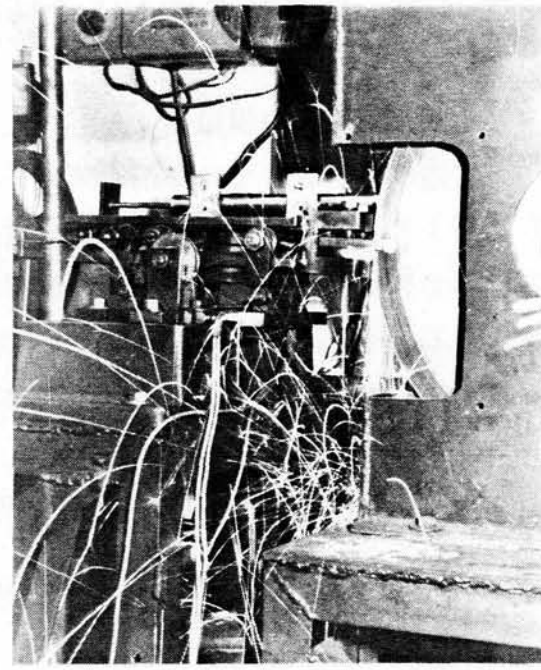


図4－2－2　摩擦試験中の外観（高荷重域）

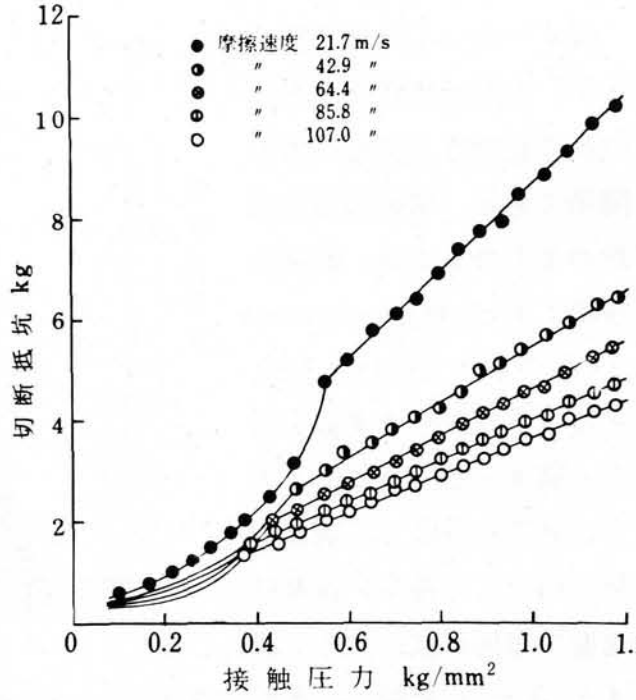


図4－2－3　切断抵坑と接触圧力の関係

接触圧力にほぼ比例している．接触圧力の低い範囲で直線からはずれている部分はmild wear の領域に相当している．図4－2－1および図4－2－3を合わせて考えると，実用的には接触圧力が大きいほど大きな摩擦動力を必要とするが，線摩耗速度すなわち切断速度は大きくなることがわかる．

2．1．2　摩擦速度の影響

図4－2－4は線摩耗速度に対する摩擦速度の影響を示している．接触圧力をsevere wear域の代表として0.8kg／mm²をとっている．すでに接触圧力の影響の項で摩擦速度42.9m／s 付近で線摩耗速度が最も大きくなることを述べたが，図から40m／s付近で極大値をとり70m／s付近で極小になりその後また大きくなっていることがわかる．この図は接触圧力0.8kg／mm²の場合であるが，severe wear域であれば，図4－2－1からどの接触圧力の場合でも同様で，この曲線が上下に平行移動するだけであることがわかる．

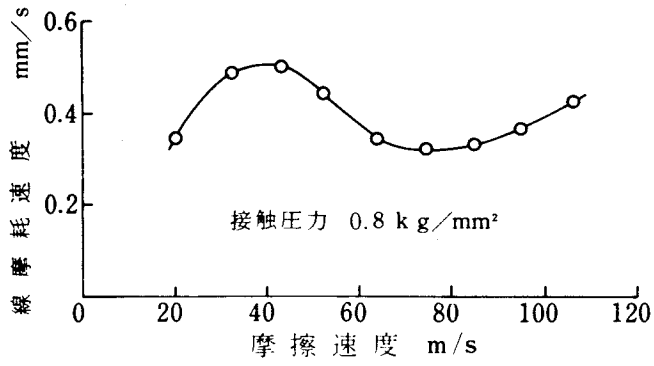


図4－2－4　線摩耗速度と摩擦速度の関係

図4－2－5は切断抵抗と摩擦速度の関係である．摩擦速度の増大とともに切断抵抗は小さくなっている．接触圧力0.8kg／mm²に比べて，mild wear域の0.1kg／mm²の曲線ははるかに小さくなっている．これは切断抵抗が式（4－2）

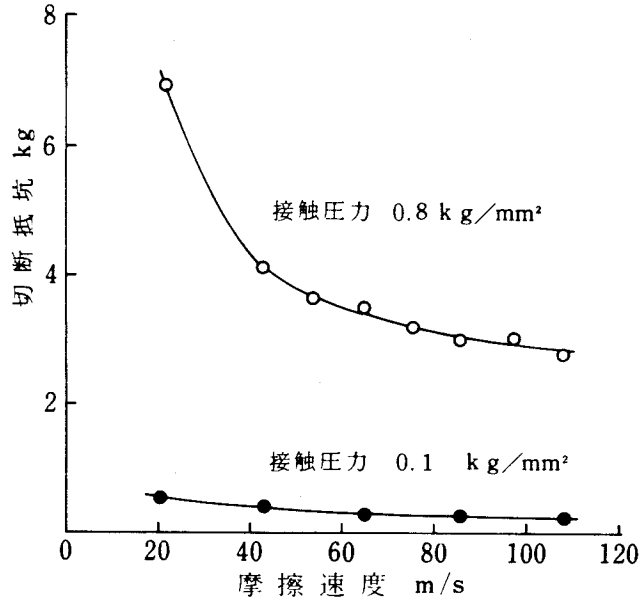


図4－2－5　切断抵抗と摩擦速度の関係

で表され，摩擦係数，接触圧力ともに小さいためである．図4－2－4および図4－2－5から線摩耗速度は，摩擦速度40m／s付近または100m／s以上で最も大きくなるが，切断抵抗は摩擦速度が大きいほうが小さくなるため，詳細に検討しなければ最適切断条件は求められない．これについては本章第3節で図4－3－7に関連して述べる．

2．1．3　接触面積の影響

図4－2－6は比摩耗量と試験片厚さまたは接触面積の関係である．図から本実験範囲内で比摩耗量は摩擦速度21.7m／s および42.9m／sの場合には，試験片厚さまたは接触面積の増加とともに，片対数グラフ上でほぼ直線的に小さくなっている．しかし，摩擦速度64.4m／s および85.8m／s では接触面積の増加とともに急激に比摩耗量は小さくなり，接触面積40mm² 程度で落ちつきそれ以上面積が大きくなってもあまり変わらなくなる．摩擦速度が小さいほうが試験片厚さの影響が少ないため，切断試験片厚さをあまり考えなくても安定した切断が可能である．

図4－2－7は接触圧力1.0 kg／mm²のときの摩擦係数と接触面積の関係である．比摩耗量の最も大きい21.7m／s では摩擦係数も最も大きく，平均して0.25 程度で接触面積が増大すると小さくなる．しかし摩擦速度が42.9m／s 以

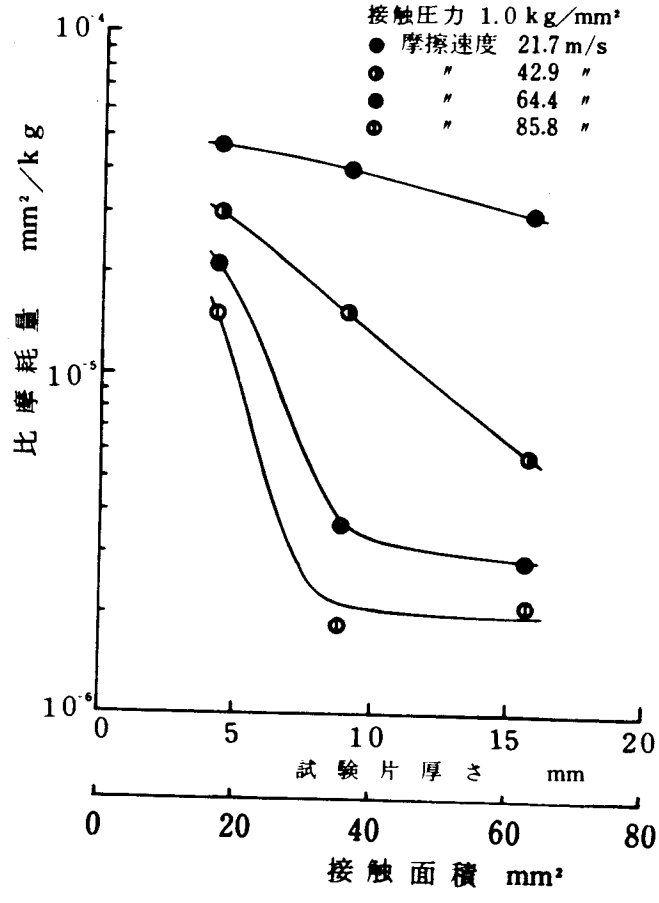


図4－2－6　比摩耗量と接触面積の関係

上では接触面積の影響はほとんどみられなくなり．摩擦速度が小さいほど摩擦係数は大きく0.15 から0.1の間のほぼ一定の値をとる．本項ではグラフの縦軸として線摩耗速度および切断抵抗をとらずに，比摩耗量および摩擦係数としたのは試験片厚さを変えた場合には線摩耗速度，切断抵抗を同列には考えられないからである．

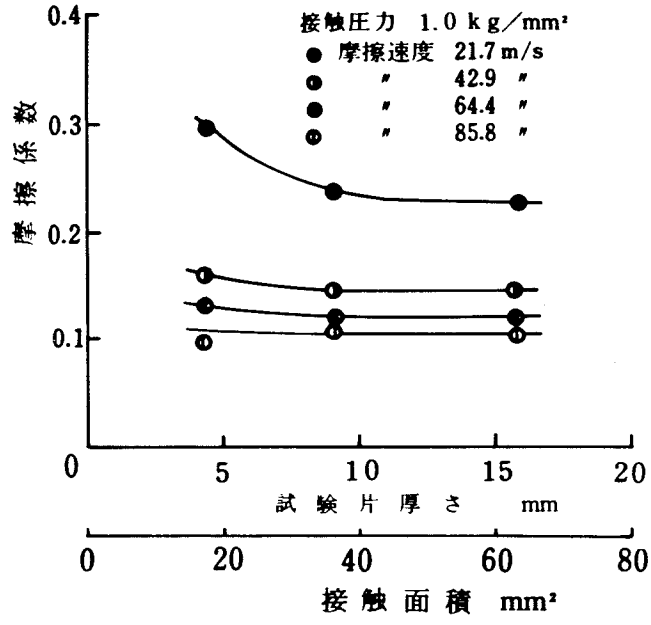


図4－2－7　摩擦係数と接触面積の関係

ここではグラフの横軸を試験片厚さと接触面積の２種類で表示してあるが，試験片厚さを変えた場合には摩擦摩耗の機構が変わることが考えられるが，摩擦円板の厚さを変えて接触面積を変えても摩擦摩耗の機構が変わるとは考えられない．したがって以上のデータは接触面積の影響というより，試験片厚さの影響だけと考えるべきかもしれない．摩擦切断を行うには摩擦円板厚さが薄いほうが切り代が少なくなり，切断動力も少なくてすむなど工業上有利であり，なるべく薄いほうが得策であるが，円板の熱変形や強度上の問題点があり３～４mm 以下とするのは困難である．

結局，空気中炭素鋼の場合を総合して考えると，摩擦速度40m／s 付近で接触圧力0.6 kg／mm²以上で摩擦切断を行うのが，工業的には最適であろう．

２．２　ふん囲気の影響

図４－２－８および図４－２－９に線摩耗速度および切断抵抗に対するふん囲気の影響を示す．酸素中で最も線摩耗速度が大きく，空気中に対して２０倍以上の切断の能率を得られる．これは，摩擦切断にガス切断の効果が

加わったためと考えられる．切断抵抗は酸素中でも空気中に対して，わずかに大きいだけである．したがって酸素を利用することは切断能率の向上に有効である．ふん囲気の影響の実験では密封容器内で試験しているが，それは実用上は不便であり，実際には切断点近傍に酸素を噴射する方法をとることになる．なお，窒素中でも空気中に比べて線摩耗速度は大きくなるが，切断抵抗は酸素中の場合よりもかなり大きくなる．したがって，ふん囲気として窒素を使用することは実用上あまり有効とは言えない．

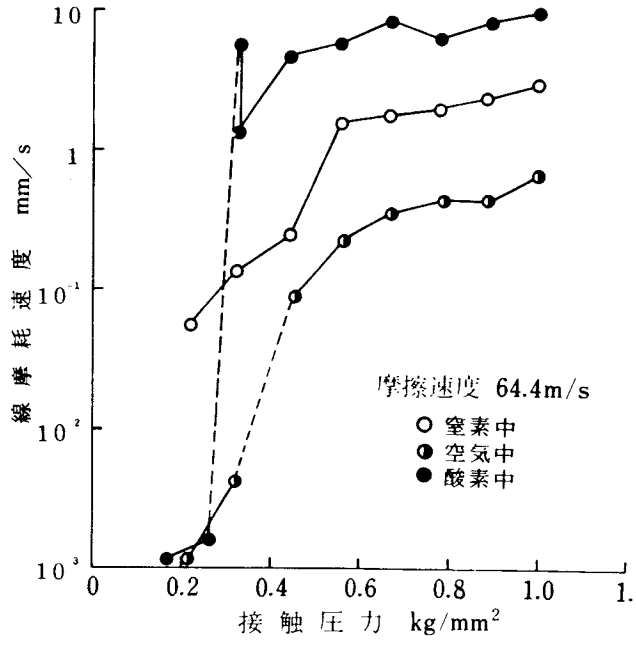


図4－2－8　線摩耗速度と接触圧力の関係

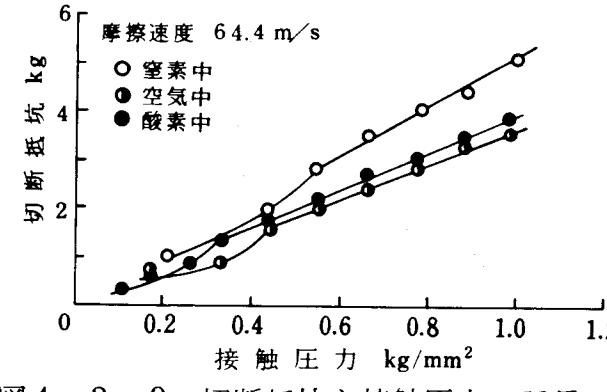


図4－2－9　切断抵抗と接触圧力の関係

2．3　試験片材料の影響

2．3．1　鉄系材料の場合

図4－2－10および図4－2－11に鉄系材料S35C，FC20およびSUS27（304）の比較を示す．これらの図からわかるように，上記の順に酸化されにくい材料ほど線摩耗速度および切断抵抗は大きくなる．しかし，切断抵抗の差は比較的小さいので，切断動力（＝切断抵抗×摩擦速度）当たりの切断速度（線摩耗速度）は炭素鋼S35Cよりもステンレス鋼 SUS27(

304)のほうがはるかに大きくなる．しかし，SUS27(304)の場合，摩擦円板上の凝着物が厚く成長するので，切断中振動をともないがちになり，丸のこによる切断の場合と同様にSUS27(304)は扱いにくい材料と言える．

切断抵抗のmild wear域の実験点をかなり省いて記入してある．これは見にくくなるために数点の実験点で代表させたためと，摩擦切断には利用できない範囲の点であるからである．

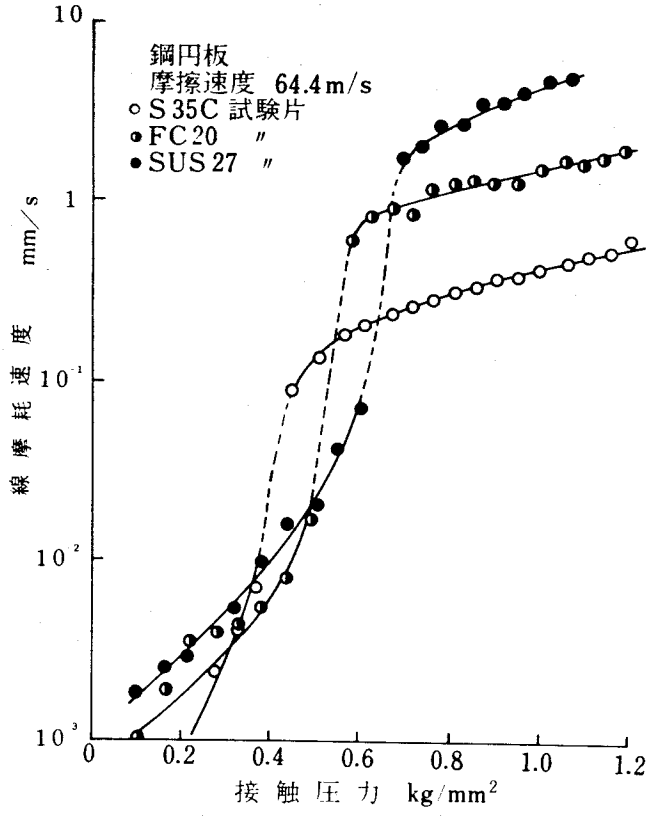


図4－2－10　線摩耗速度と接触圧力の関係

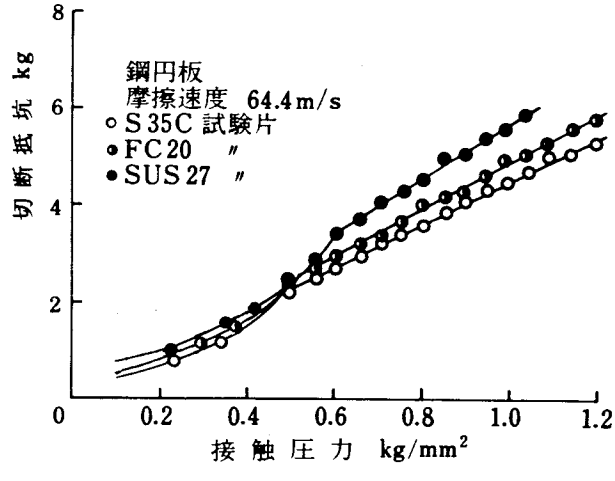
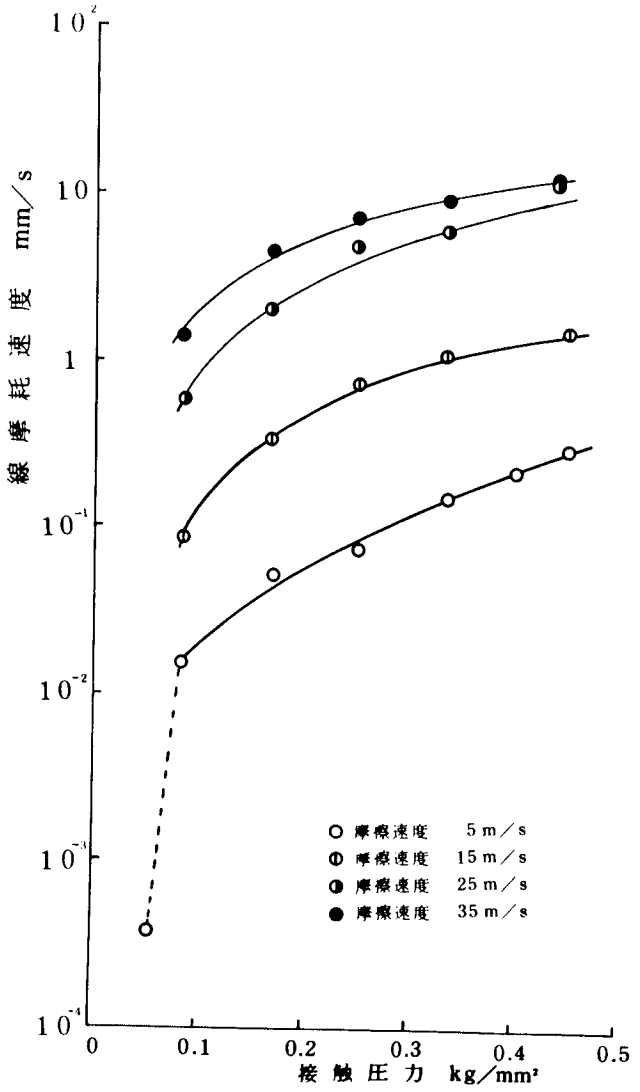


図4－2－11　切断抵抗と接触圧力の関係

2．3．2　アルミニウムの場合

図4－2－12はアルミニウム圧延材の線摩耗速度の接触圧力特性である．



← 図4－2－12 線摩耗速度と接触圧力の関係

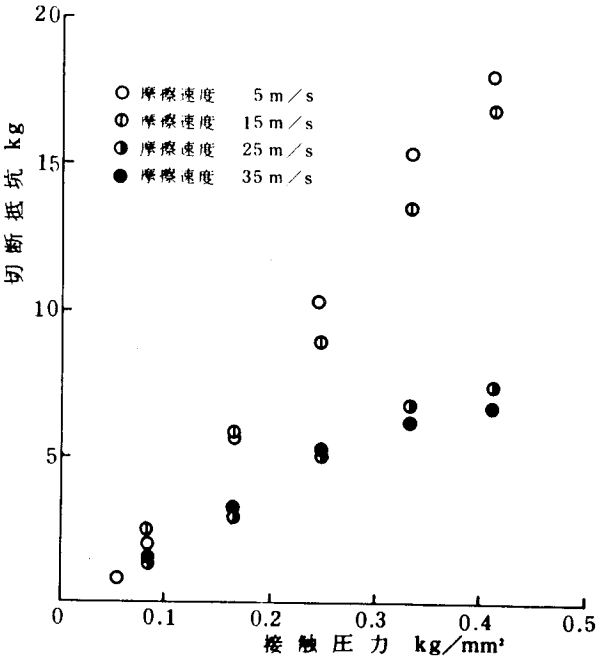


図4－2－13 切断抵抗と接触圧力の関係の関係

低接触圧力0.1 kg／mm² の場合でも，摩耗形態がsevere wear 域にあるため，摩擦速度35m／sでは線摩耗速度は1mm／s 以上でかなり早く切断できることがわかる．そして5m／s に比べて5～7倍の摩擦速度25～35m／sになると，線摩耗速度は1～10mm／sとなり，5m／sに比べて100 倍以上も大きくなる．また図4－2－13は切断抵抗の接触圧力特性である．この場合切断抵抗は接触圧力が小さいほど小さく，また摩擦係数の関係と同様摩擦速度が大きいほうが切断抵抗は小さい．そして摩擦速度 25m／sと35m／s ではあまり差が見られず，線摩耗速度にもそれほど大きな差異はみられない．したがってアルミニウムを切断する場合には，摩擦速度25m／sくらいで行うのが最も切断能率がよいと考えられる．また低速5～15m／sの場合の切断抵抗は鉄係材料と比べてはるかに大きいが，線摩耗速度は小さい．これはアルミニウムは鉄系材料に比べてはるかに凝着がはげしく，摩擦係数が大きいためである．したがって，アルミニウムの摩擦切断は低速域では実用的でない．

2．3．3　高分子材料の場合

（1）ポリアミド（ナイロン6）

図4－2－14および図4－2－15はナイロン6の線摩耗速度および切断抵抗の接触圧力特性である．ナイロン6の場合比摩耗量は摩擦条件を変えてもあまり変わらなかったが，線摩耗速度は式（4－1）からわかるように（接触圧力×摩擦速度）に比例するため，接触圧力，摩擦速度ともに大きいほど大きくなる．ま

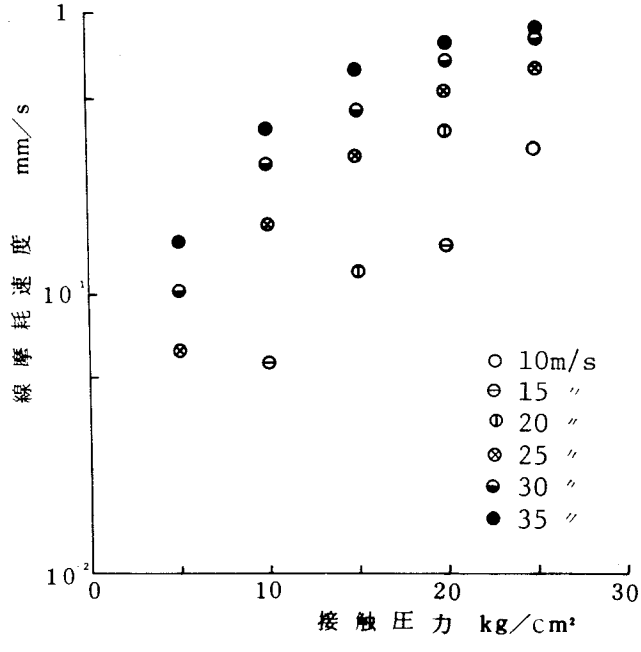


図4－2－14　線摩耗速度と接触圧力の関係

た，かたさ値，引張り強さともに金属材料に比べて小さいため，接触圧力は1／10以下，摩擦速度は数分の1程度でも，金属材料の場合と同程度の線摩耗速度が得られている．これらのことから十分実用になるものと考えられる．また図4－2－15の切断抵抗は，摩擦速度35m／sの場合であるが，全般的に接触圧力が低い割に切断抵抗は大きいようである．また摩擦速度が小さい場合にはさらに切断抵抗は大きくなる．

（2）硬質塩化ビニル

図4－2－16および図4－2－17は塩化ビニルの線摩耗速度および切断抵抗の接触圧力特性である．線摩耗速度は非常に広範囲にわたり，約1から10^{-3} mm／s以下にまで散らばっている．摩擦速度および接触圧力が大きいほど線摩耗速度は大きくなっている．また切断抵抗も接触圧力が大きくなるほど，摩擦速度

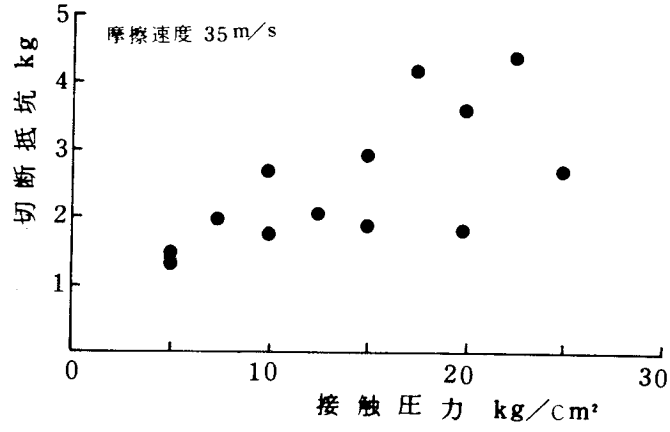


図4－2－15　切断抵抗と接触圧力の関係

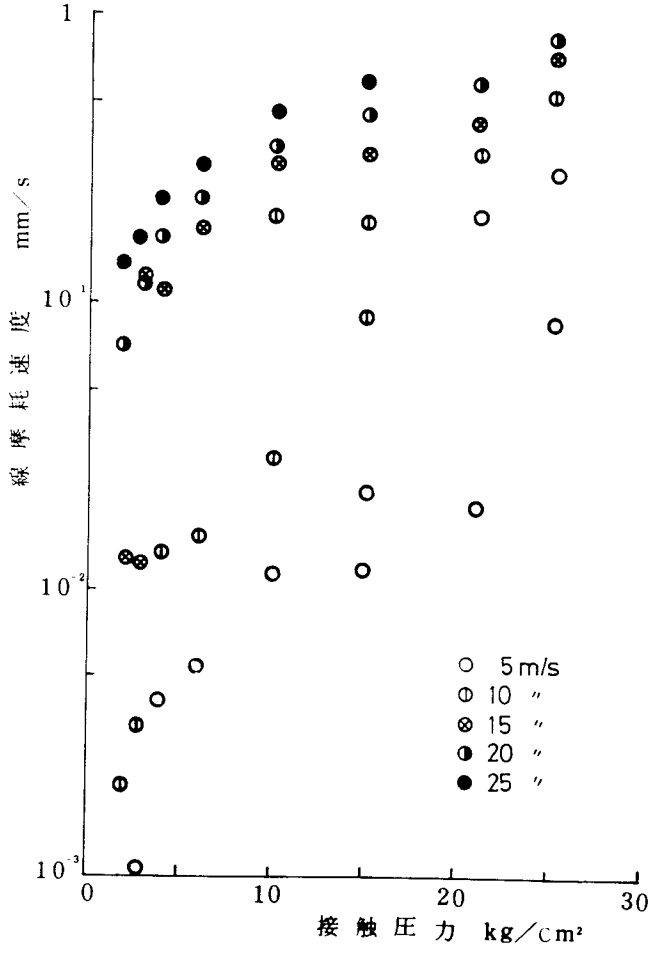


図4－2－16　線摩耗速度と接触圧力の関係

が小さくなるほど大きくなっている．塩化ビニルはナイロン6の場合に比べて摩擦係数が小さいため切断抵抗は約1／2になり，線摩耗速度は同じくらいで，ナイロン6より摩擦切断しやすい材料と言える．

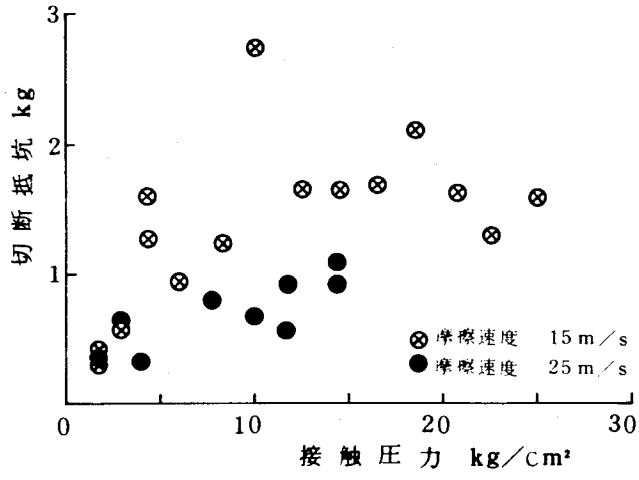


図4－2－17　切断抵抗と接触圧力の関係

高分子材料を切断すると熱分解して腐食性ガスを発生する場合があり，その場合には丸のこによる切断では著しく切刃を摩耗させる．したがって摩擦切断が高分子材料の実用切断法として適用できる場合が多いと考えられる．

全般的に線摩耗速度は摩擦速度および接触圧力の上昇とともに増大するが，25m/s 以上および20kg／cm² 以上の範囲ではその増大の割合が小さいので，一般的に高分子材料の適当な摩擦切断の条件はおおよそ摩擦速度 25m／s，接触圧力20kg／cm² と言える．

2．4　摩擦円板材料を変えた場合

円板材料として熱伝導率が非常に大きくて，かたさ値が小さく，そして既に述べたように試験片材料として使った場合には凝着がはげしくて実験を続けられなかった銅を使用して，円板材料の線摩耗速度および切断抵抗に及ぼす影響について検討する．銅は鉄系材料に比べて常温硬度も高温硬度も小さく，軟化温度もかなり低い．しかし，既に第2章第3節3.1.6の図2－3－29に関連して述べたように摩擦円板の温度は200℃ 以下で，試験片温度に比べてはるかに低いため円板強度の影響は少ないように思えるが，それについて本項で確認検討する．

2．4．1　接触圧力の影響

図4－2－18は摩擦円板として銅円板を使用し，見かけの接触圧力を変

えたときの炭素鋼S35C試験片の線摩耗速度の変化を，3つの代表的摩擦速度について示している．実験結果は既に述べた鋼円板を使用した場合と同様の傾向，すなわち臨界圧力を境にして高，低荷重域で大きい比摩耗量および線摩耗速度の差があること，また高荷重域では線摩耗速度が接触圧力の増大とともにほぼ直線的に増大しており，比摩耗量が一定になっていることを示している．しかし図4－2－1の鋼円板を用いた場合と比較して，臨界圧力が摩擦速度によってあまり変わらないようである．また低荷重域における比摩耗量が鋼円板を用いた場合に比べていくぶん大きくなっている．本実験条件では試験片摩擦面に比し円板摩擦面のほうが摩擦面積がはるかに大きい．したがって試験片摩擦面の平均温度は高く，特に高荷重域では最高温度はFeOの融点以上になっていると考えられるが，円板摩擦面の温度はあまり上昇しない．そのため摩擦摩耗に対して円板材料の性質のうちかたさはあまり関係なく，試験片側からの移着に影響する親和性が主として関係すると考えられる．銅試験片の場合には鋼円板への凝着が激しすぎて実験を続けられなかったことを既に述べた．このように銅は炭素鋼との親和性が大であり，摩擦円板表面にはく状の凝着物が見られ，一実験例では凝着部の面積は円板摩擦面の約40％であった．この部分は円板の地の面より高く，実際にはこの凝着部で摩擦され摩擦円板面が直接接触することはあまりない．したがって銅円

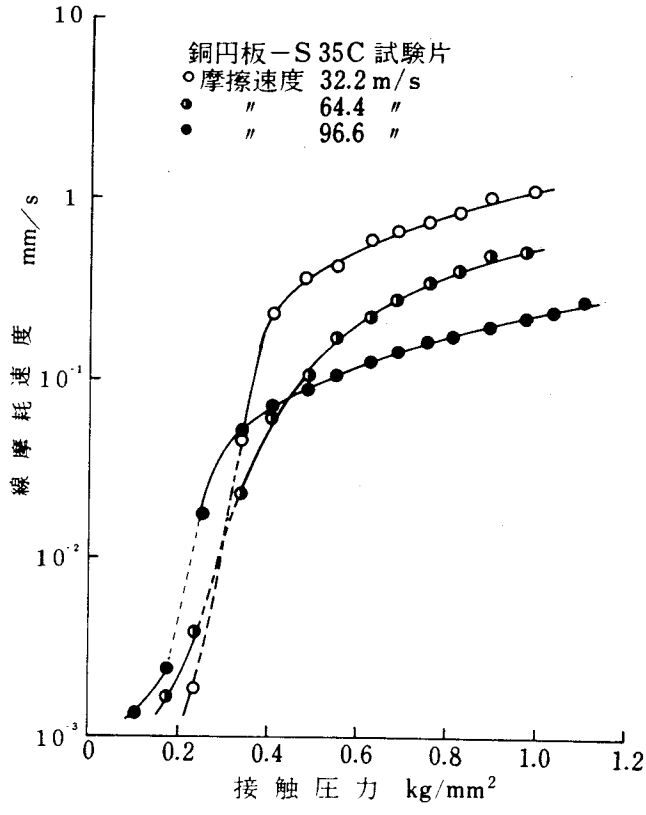


図4－2－18　線摩耗速度と接触圧力の関係

板を使用しても炭素鋼円板を使用した場合と同様炭素鋼S35C試験片とその凝着物との摩擦現象として，定常状態としては同様の結果が得られたものと思われる．

図4－2－19は図4－2－18に対応した切断抵抗の接触圧力特性を示している．摩擦円板に炭素鋼S35C円板を使用した図4－2－3とほとんど同じ特性を示している．高荷重域では線摩耗速度が大きい速度（低摩擦速度）ほど切断抵抗は大きくなっている．また既に述べたようにsevere wear 域では切断抵抗に比例する特性になっているので，式（4－2）から摩擦係数は接触圧力に関係なく一定であることがわかる．

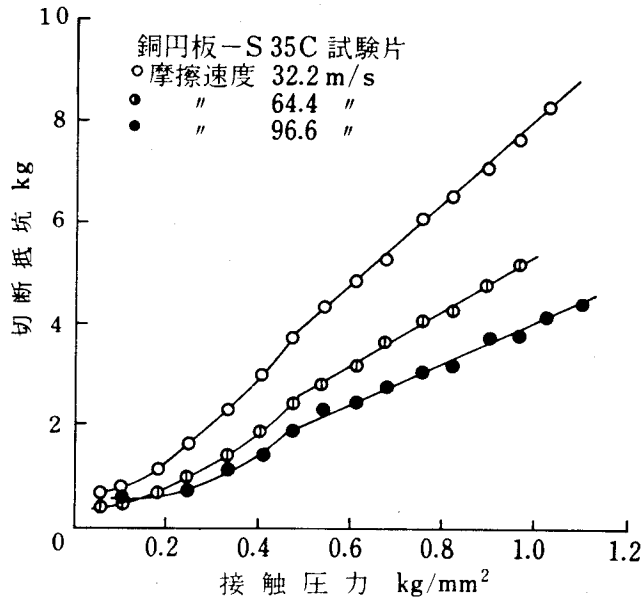


図4－2－19 切断抵抗と接触圧力の関係

2．4．2 摩擦速度の影響

図4－2－20に銅円板と炭素鋼S35C試験片の組合せでの線摩耗速度の摩擦速度特性を示す．低荷重域（接触圧力0.18 kg／mm²）では線摩耗速度は高荷重域（0.96 kg／mm²）の値より3桁くらい小さくなっており，実験点がばらついており，摩擦速度の増加とともにいくぶん増大している（比摩耗量はほとんど一定でわずかに小さくなる）．図中の○，⊕印は接触圧力 0.96 kg／mm² で行った実験結果で，実験経過の違いの影響を示したものである．○印は円板摩擦面の初期状態に関係なく，低摩擦速度から一連の実験を行った場合で，⊕印は低荷重（mild wear 域であれば低速でも高速でもよい）で実験した後の摩擦円板を用いて，高速側から低速側へと矢印で示したように一連の実験を行った場合を示す．低速では円板摩擦面が比較的あらく，その円板初期状態で次の高速側の実験をするため○印の実験ではアブレシブ

摩耗成分が多く，線摩耗速度は比較的大きい値になっている．またmild wear域の摩擦では円板表面の凝着物は全般的に小さくなめらかであるが，この滑らかな凝着膜が比較的強固に付着しており，また高速高荷重域では試験片摩擦面が高温軟化しているので，円板摩擦面は比較的滑らかに保たれ高速側から一連の実験をしたΦ印の場合には，線摩耗速度は○印に比べて小さくなるのであろう．しかしこれに関連して後述するが，おうとつのある円板とない円板の場合の線摩耗速度の違いはあまり大きくないことから，○とΦ印の線摩耗速度の違いを円板初期条件の違いのみで説明するのは少し無理のようであり，何か別の要因があるのかもしれない．これらの実験では試験片が30 mm 程度切り込まれて，摩擦抵抗および摩耗速度が記録の上でほぼ定常に達したと思われるところで終了している．しかし同じ実験条件では同じ比摩耗量になるはずだと考えれば，○とΦ印で比摩耗量が異なっていることから厳密には定常状態には達していないとも言える．また逆に初期条件がわずかに違っているだけで異なった2つの定常状態があるのかもしれずまだ断言できない状況にある．銅円板の場合にこのような現象が見られたので，鋼円板－鋼試験片の場合を追実験したところ，鋼円板の場合にも高速で比摩耗量があまり低下しない場合もあることが確認できた．前述したようにステンレス鋼，鋳鉄試験片では高速で比摩耗量が低下する傾向が見られず，摩擦円板

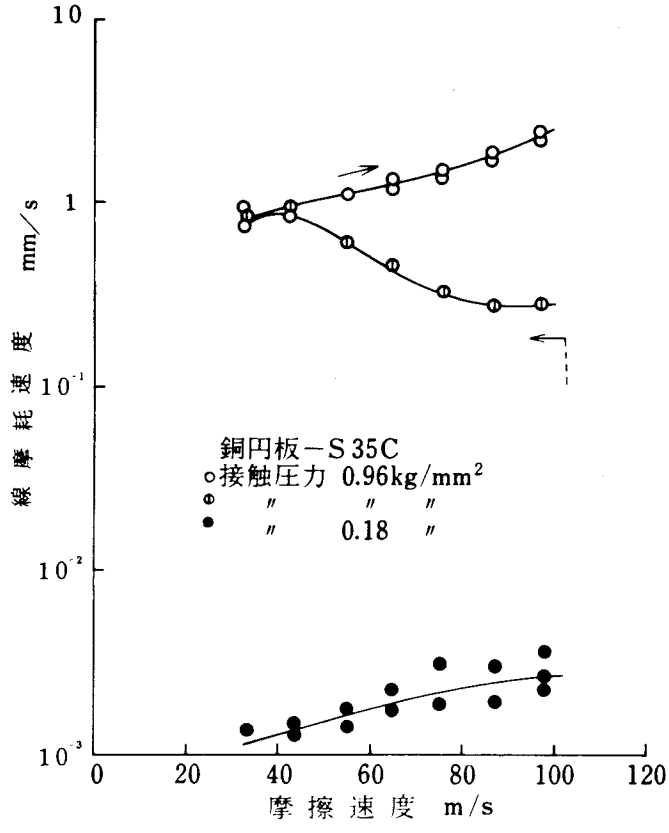


図4－2－20 線摩耗速度と摩擦速度の関係

初期条件によって２つの安定状態が見られるのは鋼試験片の場合のみであった．

図４－２－２１に切断抵抗の摩擦速度特性を示す．○，Φ印は図４－２－２０で述べたとおりで，実験経過の違いを表している．切断抵抗も既に述べた線摩耗速度の説明が当てはまり，切断抵抗が大きいほど線摩耗速度も大きいようである．また低速域では鋼円板の場合に比べて，切断抵抗は大きいようである．以上のことからかたさの影響，熱伝導率の影響はほとんど見られないことがわかった．

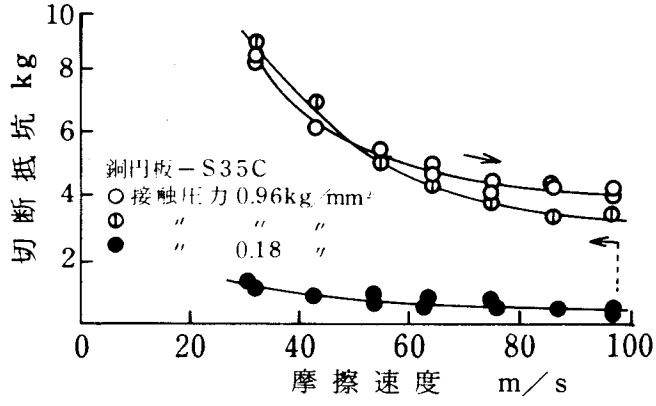


図４－２－２１　切断抵抗と摩擦速度の関係

したがって，実用的にはわざわざ高価な銅円板を用いなくても鋼円板で十分と言える．さらに丸のこの場合のように高速度鋼のような刃物用の高硬度材料を特に使用する必要もないと言える．

２．５　おうとつのある円板の場合

高荷重域では多量の摩擦熱および酸化熱のため，被切断側試験片の摩擦面表層が高温軟化し，あらい摩擦すじができ，摩耗の性格が外見的にアブレシブ摩耗的であることをすでに明らかにした．そこでおうとつを持った摩擦円板（直径４１５mm，厚さ 4mm の円板外周をピッチ円として，モジュール１，圧力角14.5°のホブで歯切りしたもので，とつ部おう部ともにπ／２mm となっている）を作り摩擦摩耗実験を行い，おうとつのない摩擦円板の場合と比較検討した．

図４－２－２２は摩擦速度64.4m／s について，おうとつのない円板とおうとつのある円板の線摩耗速度を比較したものである．図からわかるように線摩耗速度はよく似た傾向を示している．ただおうとつのある円板の場合臨界圧力が高荷重側に移っている．それはおう部があるため摩擦試験片の摩擦

面に空気のふれる機会が多く，酸化されやすいため高荷重側まで酸化膜Fe_3O_4の減摩作用が有効に働くこと，および連続的接触でないため摩擦面温度が比較的高荷重まで低いためであろう．また臨界圧力以上においておうとつのある円板の場合のほうが線摩耗速度が大きく，荷重の増加とともにいくぶん増加する傾向が大きい．以上はおうとつのある円板の場合にはおう部では荷重を支えないと考えて接触面圧を求めた場合の比較である．おうとつのある円板とない円板に同一荷重をかけた場合の線摩耗速度を比較するには，おうとつのある円板の場合の見かけの接触圧力で書きなおした図中の太い破線で示した線と比較するほうがよいであろう．その場合には接触圧力の全範囲で，おうとつのある円板のほうが線摩耗速度は大きいと言える．

図4－2－23は高荷重域（摩擦速度64.4m／s）で試験した後のおうとつのある円板摩擦面の写真である．とつ部におけるはく状凝着物はおうとつのない円板の場合よりも少なく，とつ部の角の部分で引きかかれて付着物の量がかなり多いことがわかる．おうとつのある円板の場合は，より引きかき摩耗的（アブレシブ摩耗的）であると考えられる．しかし，そのとつ部は平担

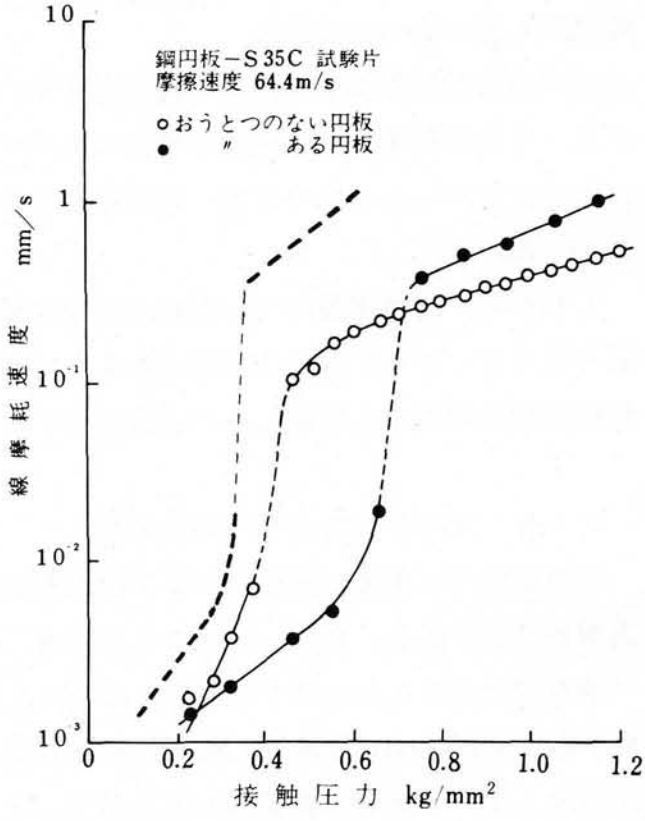


図4－2－22 線摩耗速度と接触圧力の関係

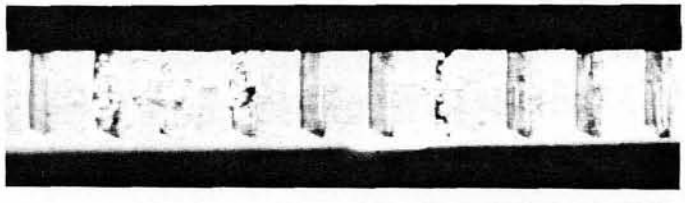


図4－2－23 試験後のおうとつ円板摩擦面

であり，図4－2－22に見られるように線摩耗速度はいくぶん大きいが，あまり大きな差はなく，試験後の試験片上摩擦こんの形状もあまり変わらなかった．

図4－2－24は切断抵坑について比較したもので，線摩耗速度に対する影響とほとんど同じような影響を及ぼしていることがわかる．

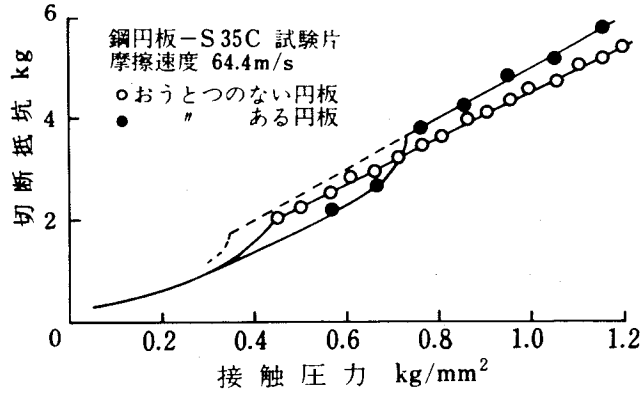


図4－2－24 切断抵坑と接触圧力の関係

以上のことから，おうとつのある円板のほうがいくぶん有利と言えるであろう．しかし摩擦切断を続行するとおう部はしだいにうめられておうとつの効果はなくなるので，円板外周に特におうとつを設けても実用上あまり有利とは言えない．

第３節　砥石切断との比較

既に本章で円板材料を変えた場合および円板外周におうとつがある場合とない場合について比較検討を行った．そこで本節では砥石円板を使って炭素鋼試験片の切断実験を行い，実際によく利用される砥石切断と既述の摩擦実験と比べて考察を進める．切断砥石は外径４０５mm，厚さ３mm，その材質はA36PB(ガラス繊維補強レジノイド結合材)である．また本研究では研削状態と厳しい摩擦状態を比較するのが目的であるため，砥石をわざと目つまりしやすいように試験片厚さ（研削方向接触長さ）を大きく５０mmとした．

３．１　接触圧力の影響

図４－３－１は砥石切断の場合を示し，縦軸に研削率を摩擦の場合と同様の表現法（線摩耗速度）で表している．なお見かけの接触圧力は摩擦切断の場合に比べて約1/10である．摩擦（研削）速度が２０.2～５０.4m／sの範囲では接触圧力とともに線摩耗速度が増加し，その大きさは摩擦切断の場合の高荷重域における値と同程度の大きさになっているが増加率が大きい．

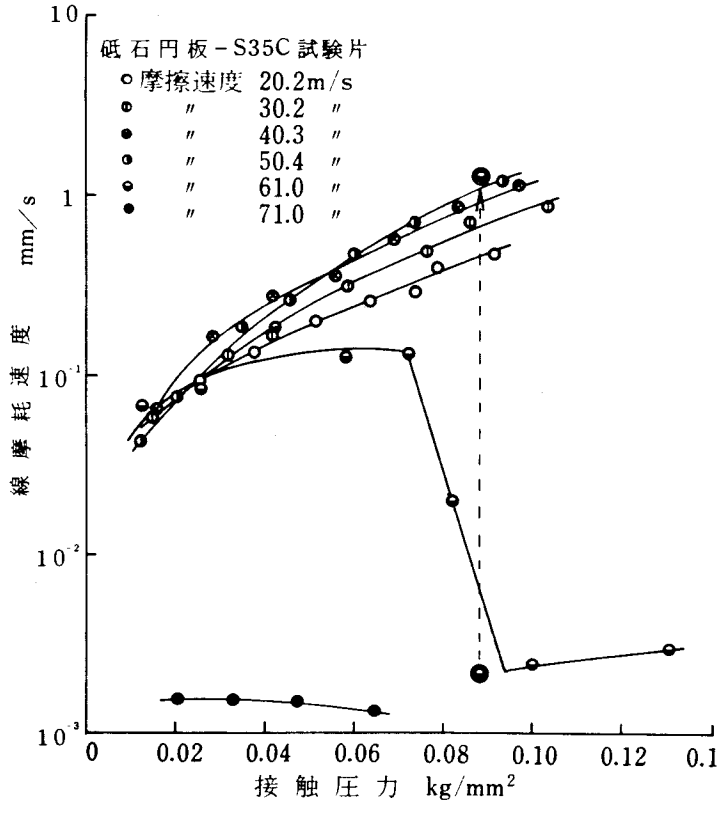


図４－３－１　線摩耗速度と接触圧力の関係

61.0m／s では接触圧力の増加につれていくぶん増加しているが，約0.07 kg／mm² で急激に低下し，鋼円板摩擦の場合の低荷重域と同程度の接触圧力において数倍程度の線摩耗速度の大きさになっている．実際の砥石切断では見かけの接触圧力をかなり大きくするので，この速度は適当な摩擦（研削）速度を超えていると言える．佐藤らの研究[7]ではこのような目つまりにより切れなくなる速度を臨界砥石周速と称し，他の条件にもよるがほぼ50～60 m／s としており，本実験結果とほぼ一致している．このように線摩耗速度が小さくなる条件における試験後の砥石表面はかなりの部分が砥石表面より高い凝着物で覆われ，その凝着物が主として試験片と摩擦している状態になっている．試験片表面の金属組織の流れも線摩耗速度が小さい場合には，鋼円板摩擦の場合と同様かなり深いところまで生じているが，線摩耗速度の大きい場合には一般の研削と同様にわずかである．なお図中上側の◉印は下側の◉印の状態で実験中に砥石表面で大きい脱落が起こり，切れ味が一時的に急に良くなったことを示すものである．また71.0m／s では実験範囲で正常な研削状態は見られなかった．

図４－３－２は研削抵抗の背分力と接線分力の比を鋼円板摩擦の場合と同様に摩擦係数として示したものである．線摩耗速度の小さい場合（目つまり状態）に対応した摩擦係数はだいたい0.2以下の小さい値を示している．鋼円板の場合と同じくらいの摩擦係数になっており，機構的にも同じ状態であろう．しかし，線摩耗速度の大きい場合（正常研削状態）に対応した摩擦係数はかなり大きく，大きいものでは0.8程

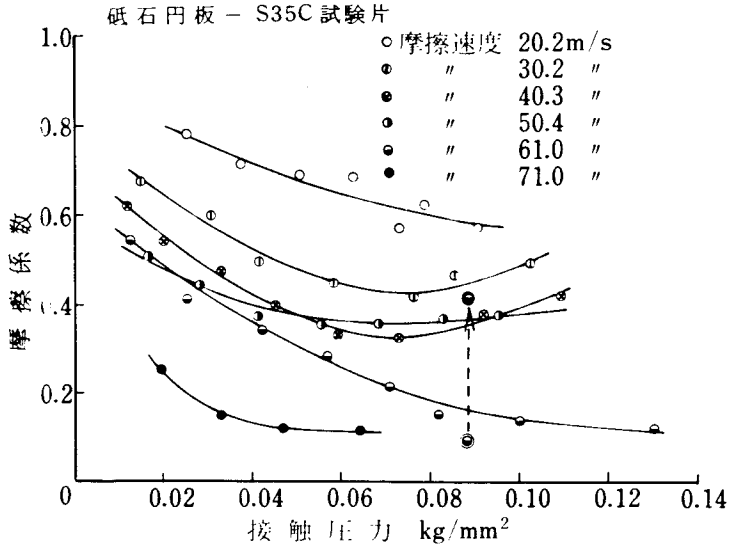


図４－３－２　摩擦係数と接触圧力の関係

度のものもある．鋼円板摩擦の場合の高荷重域ではかなり大きい線摩耗速度を示し，摩擦すじも大きいが摩擦係数はずっと小さい．したがって摩擦切断における摩耗状態はいわゆる研削摩耗，アブレシブ摩耗とは明らかに異なっている．このような違いは実験中の研削面と摩擦面の温度の違いによるものである．図4－3－3は砥石切断試験片を切断面と同じ方向に切断したときの，断面組織の顕微鏡写真である．図2－3－11および図2－3－16と比べて組織の流れが少なく，砥石による切断は研削と同様であるので，摩擦面の温度上昇がかなり少ないためであることがわかる．なおこのときの切断条件は，摩擦速度 20.2 m／s，接触圧力0.07 kg／mm² である．

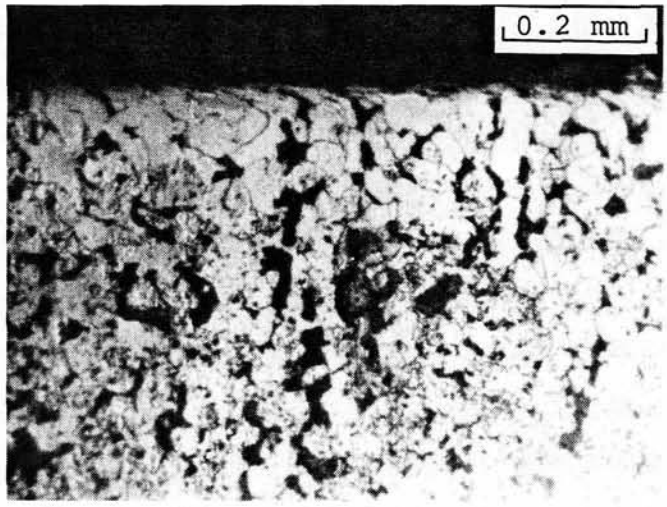


図4－3－3　砥石切断による試験片断面

図4－3－4は切断砥石による切断抵抗と接触圧力の関係を鋼円板摩擦の場合と同様に表したものである．線摩耗速度の小さい場合

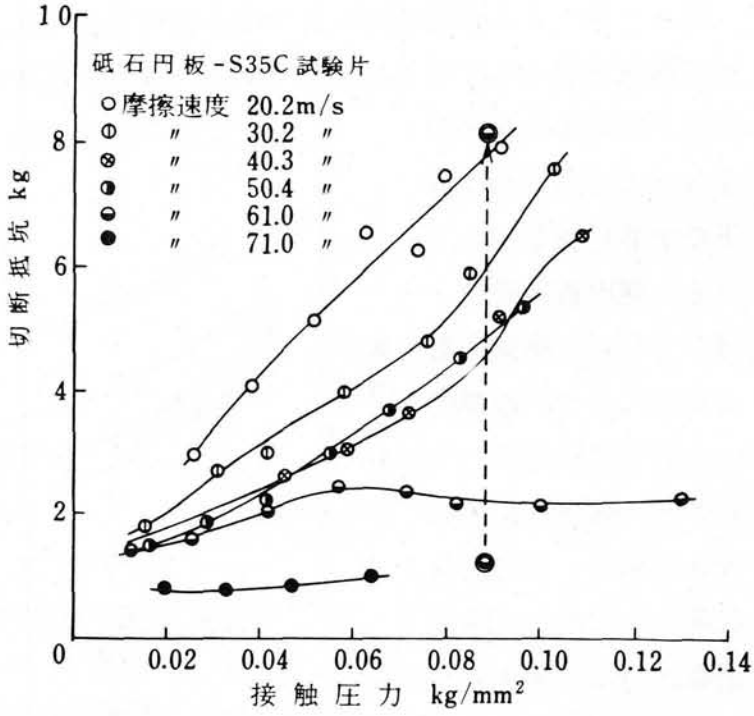


図4－3－4　切断抵抗と接触圧力の関係

は砥石の目つまり状態に対応しているが，そのときの切断抵抗は既述の鋼円板の場合に比べて，接触面積が大きいにもかかわらず接触圧力が1桁程度小さいために切断抵抗は同じくらいの値になっている．そして切断抵抗は接触圧力の増加とともにほぼ比例的に大きくなっている．

3．2　摩擦速度の影響

図4－3－5および図4－3－6にそれぞれ線摩耗速度および切断抵抗の摩擦速度特性を示す．図中⊕，◉印はそれぞれ目つまり状態における値を示している．正常砥石切断状態では摩擦速度の増加とともに線摩耗速度は増加し，切断抵坑は減少する．摩擦速度の上昇による切断抵坑の減少の割合は，摩擦切断の図4－2－5の場合と同様にかなり大きく，砥石切断でも摩擦切断の場合ほどではないにしても，摩擦速度の上昇によって表層がかなり高温軟化していると思われる．いずれにしても両図から，目つまり状態にならない範囲で摩擦速度はなるべく大き

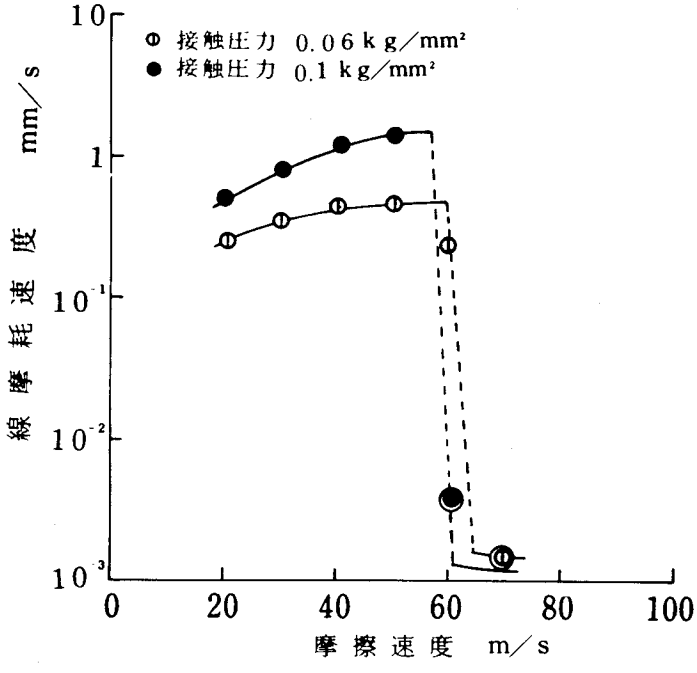


図4－3－5　線摩耗速度と摩擦速度の関係

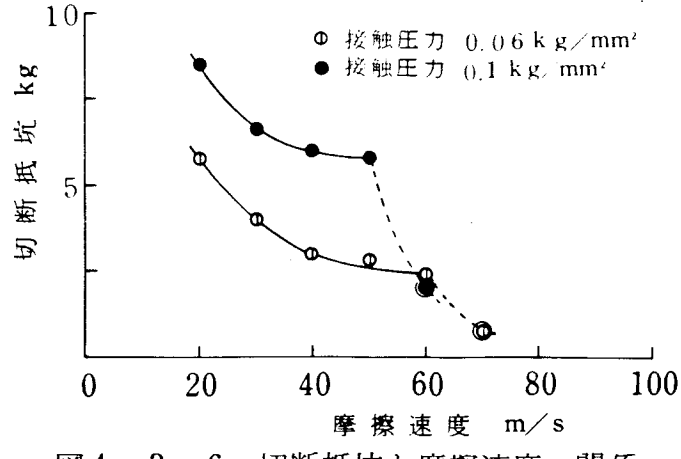


図4－3－6　切断抵坑と摩擦速度の関係

くしたほうがよい．本実験条件では砥石円板の場合の最適摩擦速度は約50 m／s である．なお本実験では接触弧の長さが 50 mm であるが，それより接触弧が長くなる場合には目つまりしやすくなるため，接触圧力および摩擦速度を低下する必要があり，また接触弧が短い場合には接触圧力および摩擦速度を上げて切断能率を向上することができる．

3．3　切断能率

図4－3－7に鋼円板および砥石円板で炭素鋼試験片を切断したときの，単位切断動力当たりの切断距離すなわち切断能率と摩擦速度の関係を示す．ただし，砥石切断での試験片厚さは50 mm，砥石厚さは 3 mm であるので，この摩耗体積から試験片厚さを 9 mm，砥石厚さを4 mmとしたときの線摩耗速度に求めなおして計算したものである．

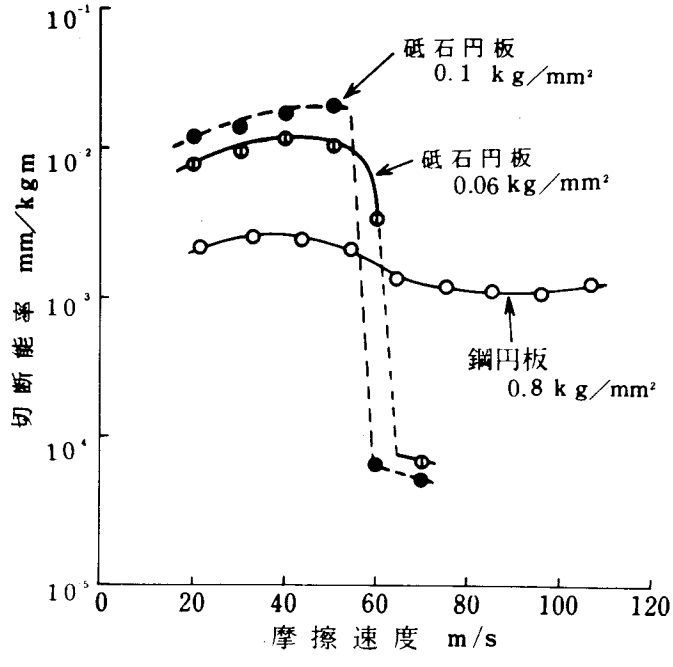


図4－3－7　切断能率と摩擦速度の関係

砥石円板で目つまりしない場合は，摩擦切断（0.8 kg／mm²）に比べて切断能率が1桁くらいよく，摩擦速度の増加とともによくなっていることがわかる．しかし，砥石切断の場合は摩擦速度が大きくなると，いずれの場合も目つまり状態になるため，鋼円板の場合のsevere wear 域の摩擦切断より切断能率は悪くなる．鋼円板の場合には全体的に切断能率が悪く摩擦速度40 m／s付近で最も切断能率がよいことがわかる．しかし鋼円板の場合は砥石切断に比べてかなり摩擦速度および接触圧力をともに大きくできるので，線摩耗速度としては既述のように同じくらいの値が得られている．

第4節　結　言

本章では第2章で得られた高速すべり摩擦の実験結果を，摩擦切断への応用を考慮して線摩耗速度および切断抵抗の観点から考察を行い，次のようなことがわかった．

1. 鋼円板の場合実用的には接触圧力が大きいほど大きな動力を必要とするが，線摩耗速度すなわち切断速度は大きくなる．
2. 炭素鋼S35C試験片の場合，線摩耗速度は摩擦速度40m／s付近で極大になり，75m／s付近で極小になる．切断抵抗は摩擦速度の上昇とともに急激に小さくなる．結局摩擦速度40m／s付近で，接触圧力0.6kg／mm^2以上で摩擦切断を行うのが工業的には最適である．
3. 摩擦切断中に酸素を使用することは切断能率の向上に有効で，酸素を切断点近傍に噴射すると２０倍くらいの切断の能率が得られる。
4. SUS27のように酸化されにくい材料ほど線摩耗速度および切断抵抗は大きくなり，切断中振動を伴うようになる．またアルミニウムを切断する場合には摩擦速度25m／s，接触圧力0.1 kg／mm^2 以上で行うのが適当である．
5. 高分子材料の場合，摩擦速度および接触圧力の上昇とともに線摩耗速度は増大するが，その増大の割合は減少するので，適当な摩擦切断条件は摩擦速度25m／s，接触圧力20kg／cm^2 である．
6. 摩擦円板として銅円板を使用する必要はなく，鋼円板を使用した場合とほとんど同じ結果が得られる．また，おうとつのある円板のほうがいくぶん線摩耗速度は大きいが，切断を続行するとおう部はしだいにうめられるので，実用的にはあまり意味がない．
7. 砥石切断の場合，約1／１０くらいの接触圧力で，炭素鋼円板による摩擦切断と同じくらいの線摩耗速度が得られ，切断能率ははるかによい．また切断部はほとんど熱の影響を受けず切断精度も高い．しかし摩擦切断の場合，鋼円板の摩耗をほとんど考えなくてよい有利さがある．

第5章　結　　論

高速の摩擦摩耗の研究が，近年機械の高速化に伴い実用研究として重要になってきているだけでなく，通常の摩擦条件下でかくれていた影響因子が厳しい条件下で顕在化し，摩擦摩耗の機構的解明に基礎研究として有効であることを考慮して，本論文は高速のすべり摩擦および摩耗の基礎と応用について，実験的ならびに理論的に研究した。

第1章で本主題の重要性，目的と問題点に触れた後，第2章では，鉄系材料，アルミニウム，高分子材料などを用い，摩擦面が軟化溶融状態になるような高速高荷重域までの乾燥すべり摩擦の実験的研究について述べている．

炭素鋼の場合，接触圧力が臨界圧力以下と以上とで摩擦摩耗の状態は明らかに異なる．低荷重域ではFe_3O_4酸化膜が摩擦面間の凝着を妨げ比摩耗量，摩擦係数ともに小さく，高荷重域では接触圧力の変化にかかわらず比摩耗量はほぼ一定の大きい値となるが，摩擦係数は比較的小さい．高荷重域では摩擦速度の上昇とともに比摩耗量および摩擦係数は低下する。また一連の実験としては行われたことのない広範囲（$2\times10^{-2}\sim2\times10^{2}$ m／s）の摩擦速度にわたる実験を行い，比摩耗量および摩擦係数の双方が4つの領域で低下することを実証した．また接触圧力を$3\times10^{-2}\sim1.2$ kg／mm^2 の範囲にわたって実験したが，速度特性に見られたような複雑な変化は見られなかった．従来摩擦摩耗に対して酸化膜が大きく影響し，それに関連した摩擦面突起部の平均自由時間や摩擦熱から考えて，荷重特性と速度特性は等価であると言われているが，上述のことから高速高荷重域では等価でないことが明らかになった。また，低荷重域では窒素中，空気中，酸素中の順に酸化性ふん囲気ほど比摩耗量および摩擦係数は小さくなる．高荷重域では酸素中で最も比摩耗量が大きく，酸素中，窒素中，空気中の順に小さくなり，摩擦係数は窒素中で最も大きく，空気中，酸素中で同程度に小さい。したがって高速高荷重下では摩擦摩耗を最も小さくする適当な酸素濃度があると言える。さらに炭素鋼，鋳鉄，ステンレス鋼の順に酸化されにくい材料ほど比摩耗量，摩擦係数ともに

大きくなる．全般的に高速高荷重下では，摩擦の外見的性格は境界摩擦的であり，摩耗の外見的性格はアブレシブ摩耗的である．低荷重域では主としてFe_3O_4酸化膜が減摩作用を果たしている．空気中高荷重域において摩擦速度の上昇とともに炭素鋼の摩擦係数および比摩耗量の低下する現象を，従来摩擦面平均温度の上昇によるFeO酸化膜の生成で説明している．しかし同様の現象が窒素ふん囲気中でも見られるだけでなく，窒素中では比較的低速における摩擦摩耗がとくに大きいため，摩擦速度の上昇による摩擦係数および比摩耗量の低下率は空気中よりもむしろ大きく，摩擦面はかなり軟化し，部分的には溶融状態にあると考えられる．したがって，高速高荷重下で摩擦速度の上昇とともに摩擦係数および比摩耗量の低下する原因は，第1次的には摩擦面平均温度の上昇であるが，第2次的あるいは直接的には摩擦面平均温度の上昇にともなうFeO酸化膜の生成しやすさと摩擦面表層の軟化の2つが原因であると言える．

アルミニウム試験片の場合は，かたさ値が小さいため，凝着物とつ部によるアブレシブ摩耗的性格が強く，比摩耗量，摩擦係数ともに鉄系材料とははるかに大きくなる．アルミニウムの場合にも鉄系材料と同様に，摩擦条件のゆるいときには酸化膜が減摩作用を果たし，厳しい摩擦条件のときには摩擦熱および酸化熱による高温軟化も加わり酸化膜が破壊されやすく，酸化性ふん囲気ほど比摩耗量は大きくなる．そして酸化膜および軟化溶融が重要な役割を果たす条件では摩擦係数が小さくなる．

熱可塑性高分子材料の場合には前記アルミニウムより軟化温度が低いため低PV値でsevere wear域に入り，摩擦面表層は軟化溶融する．しかしアルミニウムほど活性でないため凝着が少なく，比摩耗量の大きさは鉄系材料とアルミニウムの中間にある．そして摩擦係数は溶融粘度が小さいため約0.2くらいになる．またナイロン6の低荷重域では摩耗率が測定できないほど小さく，はっきりと自己潤滑性を示すことを明らかにした．

第3章では，第2章で得られた高速高荷重域でのすべり摩擦の実験結果を説明するために，理論的解析を行った．理論解析の基礎となる前提として，「①高速高荷重域の摩擦では摩擦面表層は軟化溶融して，その軟化膜が潤滑

剤として作用する. ②その軟化膜の塑性流動圧力は表層からの深さの一次関数で表され，その表面を剛体球が滑る.」 という仮定を置いた。このような摩擦モデルでは，球と平面の摩擦における凝着抵抗がその深さの塑性流動圧力で決まると考えると，かたさ変化率が変わっても摩擦係数はほとんど変わらない. しかしその凝着抵抗が最表層軟化膜のせん断強さで決まると考えると，かたさ変化率が大きくなるほど摩擦係数は小さくなることが明らかとなった. また後者の考え方では接触角が小さいときには摩擦係数は凝着係数の影響を大きく受ける. さらに凝着係数が大きい場合には，接触角が大きいほうがかえって摩擦係数は小さくなることがわかった. そして摩擦速度をかたさ変化率に，ふん囲気の変化を凝着係数に対応させると実験結果と理論解析結果はよく一致する. これらのことから高速高荷重域において摩擦速度の上昇とともに摩擦係数が低下する現象は， FeO 酸化膜の効果より，摩擦面表層軟化の効果で説明するほうが妥当であることを明らかにした.

第４章では摩擦切断への応用を目途として，高速すべり摩擦および砥石切断での線摩耗速度および切断抵抗を求めて考察した. 炭素鋼試験片では摩擦速度は４０m／s程度，接触圧力は0.6kg／mm^{2}以上で摩擦切断するのが最適であり，摩擦切断中に切断点近傍に酸素を噴射すると切断能率は２０倍くらいに増加し，酸素を使用することが有効であることを明らかにした. また酸化されにくい材料では摩擦円板上の凝着物が大きくなり，振動を伴うのでステンレス鋼などは切断しにくい. アルミニウムの最適切断条件は25m／s，0.1kg／mm^{2}以上で，高分子材料の場合は25m／s，0.2kg／mm^2 くらいである. さらに銅円板や炭素鋼のおうとつを設けた円板を使用してもあまり有効ではなく，実用的には単純な炭素鋼円板の使用が得策であることを明らかにした. 砥石切断では炭素鋼円板による摩擦切断の場合の約1／10くらいの接触圧力で同じくらいの切断速度が得られ，切断能率もはるかによいが，摩擦切断では円板の消耗をほとんど考慮しなくてもよい有利さがある. したがって適用対象を選択して摩擦切断法の有利性を活かして利用する必要がある。

以上のように高速すべり摩擦に関して，基礎的に実験的ならびに理論的解

析を試み，高速高荷重域の摩擦摩耗の諸特性をかなり明らかにすることができた．さらにその応用として摩擦切断の最適条件およびその有用性を明示することができた．

謝　辞

本論文の終りに臨み，終始かわらぬ御懇篤な御指導と御鞭撻を賜った，恩師，福井大学教授豊島敏雄博士に衷心より感謝致します．

また本研究を進めるにあたって特別の御指導と御厚情を賜った大阪大学教授築添　正博士，津和秀夫博士，京都大学教授岡村健二郎博士に深甚の謝意を表します．

なお日頃から本研究を遂行するにあたって御援助いただいた本学機械系教室の三村秀隆氏ならびに諸先生方に感謝の意を表します．

参考文献

第1章

1) Department of Education and Science, Lubrication (Tribology). A Report on the Present Position and Industry's Needs, (1966).

2) 寺岡利雄, 日本機械学会誌, 76, 650, (1973−2), 232 .

3) 大山忠夫・吉見 稔・太田明宏・上岡信夫, 日本潤滑学会北陸大会 (昭和53年度)予稿集, (1978−11), 97 .

4) 笹田 直 ,日本機械学会誌 , 76, 650, (1973− 2), 226 .

5) 曾田範宗・深谷敏雄・藤井考一, 日本機械学会誌, 76, 652, (1973−4), 468 .

6) 大越 諄・坂井秀春, 日本機械学会論文集, 7, 29, (1941) I − 29 .

7) T.Sasada, H.Ohmura and S.Norose, Proc. 15th Nat. Congr. Mater, Reserach 1971 (1972), 58.

8) F.P.Bowden and D.Tabor, The Friction and Lubrication of Solid. Part II, (1968), 451-478, Oxford Univ. Press.

9) W.R.D.Wilson, Trans. of ASME, 98, F-1 (1976), 22.

第2章

1) E.Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, (1965).

2) F.P.Bowden and D.Tabor, The Friction and Lubrication of Solids. (1954).

3) たとえば, 久門輝正・築添 正・大島博人, 日本機械学会論文集,

42, 359, (1976−7), 2185および2196 .
4) 石塚鎮夫・江上　登，潤滑，22，1，(1977−1)，45および22，3，(1977−3)，199 .
5) 遠藤吉郎・岩井善郎，日本潤滑学会北陸大会（昭和53年度）予稿集，(1978−11)，49 .
6) G.W.Rowe and E.F.Smart, Brit. J. Appl. Phys., 14, (1963), 924.
7) 笹田　直，日本機械学会誌，76，650，(1973−2)，226 .
8) F.P.Bowden and D.Tabor, The Friction and Lubrication of Solids. Part Ⅱ , (1968),451-478, Oxford Univ. Press.
9) F.P.Bowden and E.H.Freitag, Proc. Roy. Soc., A248, (1958), 350.
10) M.Cocks, J. Appl. Phys., 28, 8,(1957), 835.
11) S.W.Earles and M.J.Kadhim, Proc. Inst. Mech. Engrs., part 1, 180-22, (1965-1966), 531.
12) 曽田範宗・深谷敏雄・藤井考一，日本機械学会誌，76，652，(1973−4)，468 .
13) 寺岡利雄，日本機械学会誌，76，650，(1973−2)，232 .
14) 深谷敏夫，潤滑，15，11，(1970−11)，734 .
15) F.P.Bowden and P.A.Persson, Proc. Roy. Soc., A260, (1961), 433.
16) W.R.D.Wilson, Trans. of ASME, 98, F-1,(1976), 22.
17) 坂本　亨・築添　正，潤滑　21，9，(1976−9)，598 .
18) C.M.Pooley and D.Tabor, Proc. Roy. Soc., A329, (1972), 251.
19) K.Tanaka, Y.Uchiyama and S.Toyooka, Wear, 23, (1973), 153.
20) T.S.Eyre and D.Maynarb, Wear, 18, (1971), 301.
21) 笹田　直，機械の研究，23，11，(1971)，1541 .

22）遠藤吉郎・岩井善郎，潤滑，21，12，（1976−12），811．
23）笹田　直，機械の研究，10，2，（1972−6），843．
24）沢本　毅・森　利徳，潤滑，10，2，（1965−2），132．
25）溶接学会，溶接便覧，（1966），580，丸善．
26）J.C.Jaeger, Proc. Roy. Soc. NSW, 76, (1942), 203.
27）佐藤健児，表面工学概論，（1968），78，養賢堂．
28）　〃　　〃　　〃　71，　〃
29）笹田　直，機械の研究，24，9，（1972−9），1239．
30）桑原改造・野坂正隆，潤滑，20，10，（1975），727．
31）潤滑学会，潤滑ハンドブック，（1970），79，養賢堂．
32）内山吉隆・田中久一郎，日本潤滑学会名古屋大会（昭和52年度）予稿集，121．
33）S.M.Aharoni, Wear, 25, (1973), 309.
34）松原　清，潤滑，10，6，（1965−6），533．
35）田中久一郎・内山吉隆・北岸外茂治，潤滑，19，11，（1974−11），823．
36）K.V.Shooter and D.Tabor, Proc. Phy. Soc. B 65, (1952), 661.

第3章

1）石塚鎮夫・江上　登，潤滑，22，1，（1977−1），45．
2）石塚鎮夫・江上　登，潤滑，22，3，（1977−3），199．
3）F.P.Bowden and P.A.Persson, Proc. Roy. Soc., A260, (1961), 433.
4）桑原改造・野坂正隆，潤滑，20，10，（1975−10），727．
5）W.R.D.Wilson, Trans. ASME, 98, F-1 , (1976), 22.

第4章

1）切削加工技術便覧編集委員会，切削加工技術便覧，（1968），1124，日刊工業．

2）小川正義・歌川正博，日本機械学会誌，56，415，（1953−6），622．

3）J.M.Lewis and G.H.Sheppard, Tool Engineers Handbook, McGraw-Hill, 66-13 and 67-7.

4）竹中則雄，研削加工，（1968），207，誠文堂新光社．

5）切削加工技術便覧編集委員会，切削加工技術便覧，（1968），820，日刊工業．

6）砥粒加工研究会，砥粒加工技術便覧，（1965），315，日刊工業．

7）佐藤耕吉・山本富才・木村康之，精機学会北陸信越支部長野地方講演会前刷集，（1974），297．