



Title	クロムめっき軸の摩擦, 摩耗特性に関する研究
Author(s)	肥田, 昭
Citation	大阪大学, 1979, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1762
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

クロムめっき軸の摩擦, 摩耗特性に関する研究

昭和 53 年 8 月

肥 田 昭

クロムめっき軸の摩擦, 摩耗特性に関する研究

昭和 53 年 8 月

肥 田 昭

クロムめっき軸の摩擦，摩耗特性に関する研究

目 次

緒 論	1
第 1 章 めっき方法およびめっき面の諸性質	4
1. 緒 言	4
2. めっき条件と方法	4
3. めっき面の諸性質	6
3.1 表面形状の表示方法	6
3.2 多孔率の表示と測定方法	7
3.3 密着性試験方法	9
3.4 硬さ試験方法	9
3.5 厚さ試験方法	10
3.6 めっき後の処理方法	10
4. めっき軸の諸性質	12
5. 結 論	13
文 献	14
第 2 章 軸受の温度分布と油膜厚さ	15
1. 緒 言	15
2. 実験装置および測定方法	15
2.1 実 験 装 置	15
2.2 供試軸と軸受の形状寸法	16
2.3 温度測定方法	18
2.4 送油量調節方法	18

2.5	回転速度変動と衝撃荷重回数の測定	19
2.6	油膜厚さ測定方法	20
2.7	油膜厚さ校正方法	20
3.	実験結果および考察	23
3.1	軸受温度に及ぼす回転速度の影響	24
3.2	軸受温度に及ぼす送油量の影響	26
3.3	軸受温度に及ぼす荷重の影響	27
3.4	油膜厚さに及ぼす送油量と荷重の影響	29
4.	結 論	30
	文 献	31
第3章 ポーラスクロムのタイプと軸受材料		32
1.	緒 言	32
2.	実験装置および測定方法	32
2.1	実 験 装 置	32
2.2	供試軸と軸受の形状寸法	34
2.3	温度測定方法	37
2.4	油膜厚さ測定方法	37
3.	実験結果および考察	38
3.1	軸受のなじみ性に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	38
3.2	軸受温度に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	40
3.3	油膜厚さに及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	45
3.4	軸受温度と油膜厚さに及ぼす油穴位置の影響	47
4.	結 論	49
	文 献	51

第4章 往復動クロムめっき軸の軸受温度と潤滑	52
1. 緒 言	52
2. 実験装置および測定方法	52
2.1 実験装置	52
2.2 供試軸と軸受の形状寸法	53
2.3 温度測定方法	55
2.4 油膜厚さ測定方法	55
2.5 潤滑方法	55
3. 実験結果および考察	56
3.1 軸受温度に及ぼす潤滑方法の影響	56
3.2 軸受温度に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	59
3.3 油膜厚さに及ぼす軸と軸受の組合せの影響	61
4. 結 論	61
文 献	63
第5章 ポーラスクロムのタイプと油膜形成	64
1. 緒 言	64
2. 実験装置および測定方法	64
2.1 供試材の形状寸法	64
2.2 油滴広がり面積の測定方法	65
2.3 油膜形成の観察方法	65
3. 実験結果および考察	67
3.1 油滴の広がり及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	67
3.2 油膜形成に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響	69
4. 結 論	71
文 献	72

第6章 軸受材料の凝着現象	73
1. 緒 言	73
2. 実験装置および測定方法	73
2.1 実 験 装 置	73
2.2 供試軸と試験片の形状寸法	74
2.3 温度測定方法	76
2.4 凝着現象の測定方法	76
2.5 めっき面の割れの測定方法	76
2.6 圧こん形状の観察	77
3. 実験結果および考察	77
3.1 試験片の温度上昇	77
3.2 純金属試験片の軸への凝着現象	79
3.3 合金試験片の軸への凝着現象	83
3.4 軟質金属を軸へ押付けた場合の圧こん形状の観察	87
3.5 温度によるめっき面の割れの現象	87
4. 結 論	89
文 献	91
第7章 軸受材料の摩耗	92
1. 緒 言	92
2. 実験装置および測定方法	92
2.1 実 験 装 置	92
2.2 供試軸と試験片の形状寸法	93
2.3 温度測定方法	94
2.4 摩擦係数の測定方法	95
2.5 摩耗量の測定方法	95

2.6	負荷の方法	95
2.7	摩耗面の観察	96
3.	実験結果および考察	96
3.1	温度上昇に及ぼす潤滑方法の影響	96
3.2	温度上昇に及ぼす負荷方法の影響	99
3.3	摩擦係数に及ぼす潤滑方法の影響	100
3.4	摩擦係数に及ぼす負荷方法の影響	101
3.5	摩耗量に及ぼす潤滑方法の影響	102
3.6	摩耗量に及ぼす負荷方法の影響	104
3.7	摩耗面の観察	105
4.	結論	106
	文献	108
第8章 他のめっき軸との比較		109
1.	緒言	109
2.	実験装置および測定方法	109
2.1	実験装置	109
2.2	供試軸のめっき方法と試験片の形状寸法	111
2.3	熱処理の方法	112
2.4	温度測定方法	113
2.5	摩擦係数の測定方法	113
2.6	摩耗量の測定方法	113
2.7	摩耗面の観察	113
3.	実験結果および考察	113
3.1	硬さに及ぼす熱処理温度と時間の影響	113
3.2	試験片温度に及ぼすめっき軸の影響	114

3.3	摩擦係数に及ぼすめっき軸の影響	116
3.4	摩耗量に及ぼすめっき軸の影響	116
3.5	摩耗面の観察	119
4.	結 論	122
	文 献	123
第9章	試験片の形状と摩耗	124
1.	緒 言	124
2.	実験装置および測定方法	124
2.1	実 験 装 置	124
2.2	供試軸と試験片の形状寸法	126
2.3	温度測定方法	128
2.4	摩擦係数の測定方法	128
2.5	摩耗量の測定方法	128
2.6	実接触面積の測定方法	129
3.	実験結果および考察	129
3.1	温度に及ぼす試験片形状の影響	129
3.2	摩擦係数に及ぼす試験片形状の影響	130
3.3	摩耗量に及ぼす試験片形状の影響	131
3.4	接触面圧に及ぼす試験片形状の影響	133
4.	結 論	136
	文 献	137
総	括	138
謝	辞	141

緒 論

硬質クロムめっきの歴史は古く、1854年に Bunsen¹⁾ がクロムの電解を試みて以来多くの学者により研究され、クロム酸を主成分とする電解液を Sargent²⁾ が提唱してから実用化されるようになった。

我が国でのクロムめっきは1926年（大正15年）に大藪³⁾ が日本特許を得ている。第2次大戦中には各方面に使用され、1960年初めて日本工業規格（JIS H8615）に工業用クロムめっきが定められ⁴⁾、その後1966年、1972年に改正され現在に至っている。この工業用クロムめっきは従来硬質クロムと呼ばれていたもので、装飾用と区別するために改名された。

工業用クロムめっきの作業条件、方法⁵⁻⁸⁾ や内燃機関のシリンダへの利用についての研究⁹⁻¹³⁾ は多いが、めっき軸が軸受性能に及ぼす影響についての研究は少ない^{14,15)}。企業では、工業用クロムめっき軸をしゅう動部材として比較的広範に使用しているが、使用方法と条件は現場の経験と勘にたよっているため、焼付、損傷などの苦い経験を繰返している。

本論文は、クロムめっき軸の実用時におけるトラブルの解消と軸受選定に対し適切な指針を与えるため、工業用クロムめっき軸が軸受性能に与える影響について実験的、系統的に究明し、さらに摩耗した軸の再生と活用を可能にする方法を見出すことを目的とした。

本研究で採用した工業用クロムめっきは、JISめっき作業標準に従って加工した表面が平滑なめっきと、その表面にエッチングを施した多孔性のポーラスクロムめっきの2種類である。以下に論文の概要を簡単に述べる。

第1章では供試材のめっき軸の加工条件、めっき表面の形状、めっき層と素地金属の密着性とめっき層の硬さの試験方法およびめっき軸の諸性質について述べた。

第2章ではクロムめっき軸を回転軸として用いた場合の軸受温度，温度分布および油膜厚さに対する送油量，回転数および荷重の影響について言及した。

第3章では軸受温度，温度分布および油膜厚さに対するクロムめっき面の種類と軸受材料（黄銅，アルミニウム，りん青銅，銅，ホワイトメタルおよびPTFE）の影響について言及した。

第4章では往復動クロムめっき軸の潤滑について，回転軸の場合と同様に検討し，種々の潤滑方法（油，油と空気および空気潤滑）における軸受温度および油膜厚さについて言及した。

第5章ではめっき面および研磨紙上での油滴の広がりや軸受部での油膜の形成状態を観測し，クロムめっき面の種類と表面あらかさが潤滑性能に及ぼす影響について明らかにした。

第6章ではめっき軸と軸受材料の凝着現象を検討するため，純金属および合金試験片とクロムめっき面との摩擦実験を行い，めっき軸との親和性のよい，すなわち焼付を起こしやすい金属を選びだした。

第7章ではめっき軸と軸受材料の摩耗を調べ，回転速度と荷重を変化させた場合の軸受試験片の温度，摩擦係数と摩耗量の測定および摩耗面の表面観察を行った。

第8章ではクロムめっきの代用として使用されようとしているニボジュールめっき（めっき浴にボロンを添加させた無電解ニッケルめっき）が軸受材料によっては焼付を起こすため，その潤滑性能についてクロムめっきと比較検討した。

第9章では軸受試験片の形状が摩耗に及ぼす影響について，実機に近い試作試験機を用いて検討し，従来の摩耗試験機における結果と比較した。

最後に以上の研究の総括を行った。

文 献

1. Bunsen : Prog. Ann., 91 (1854) 119.
(岸 松平 : クロムめっき, 日刊工業 (1967) 1.)
2. G. J. Sargent : Trans. Am. Electrochem. Soc., 37 (1920) 479.
3. 大藪 : 日本特許, 64046 (1926).
4. JIS H8615 : 1966, 1975.
5. めっき技術便覧編集委員会 : めっき技術便覧, 日刊工業 (1959) 129.
6. 紙野康美 : 日立造船技報, 21, 4 (1960) 208.
7. 岸 松平 : 機械工業 (1962 - 8) 91.
8. 石田武男 : 電気めっきに関する研究 (第1巻), 1962-2.
9. 山内俊平, 伊藤義典, 紙野康美 : 日立造船技報, 21, 4 (1960) 193.
10. 清水三郎, 草間喜代松 : 日本機械学会誌, 70, 581 (1967) 882.
11. 伊藤義典 : 内燃機関, 6, 57 (1967) 11.
12. 小林重一 : 金属材料, 5, 10 (1965) 57.
13. Mayer-Rässler : Metalloberf., 3, 3 (1951) 33.
14. Railway Locomotives and Cars, 134 (1960-3) 33.
15. Motor truck, 35, 7 (1966) 26.

第 1 章 めっき方法およびめっき面の諸性質

1. 緒 言

工業用クロムめっきは高硬度，高融点，すぐれた熱伝導性，低摩擦，耐摩耗性，耐食性などを有しているため，摩耗防止，腐食防止，摩耗した部品の再生のために広く利用されている。しかしめっきを軸に施して用いる場合，軸への密着性，素地の疲労強度低下などが問題となるが，めっき作業管理が十分であれば現在密着性のよいものが得られる。

一般に使用されているクロムめっきでは表面にめっき独特のマクロ的な割れが生じるが，めっき層が厚ければ素地に達するようなものではない。このような割れ目を積極的に利用する方法として，割れ目に潤滑油を保持させ，潤滑性をよくするポーラスクロムめっきがある。他方，この割れの生じない割れ目なしクロム¹⁾と呼ばれる方法もある。

本研究では，現在最も広範に用いられているめっき方法で供試材を作成し，JIS に基づいてその硬さ，厚さ，多孔率などを測定した。使用した試験軸は多種多様であり，しかも同一条件下で作成されねばならなかったため，設備管理の充実した特殊機化工業株式会社にめっき軸作成を依頼し，指示条件どおりの工業用クロムめっきに仕上げた。

2. めっき条件と方法

めっき作業標準については旧 JIS H 9123 (1960)〔1972年2月1日廃止〕に定められていた。

めっき前の金属表面処理方法には次のものがある。

- (a) 有機溶剤（トリクレン，パークレン）による洗浄方法
- (b) アルカリによる浸漬洗浄方法

- (c) 電解洗浄方法
- (d) 有機溶剤浸漬後、超音波洗浄する方法
- (e) 送電エッチング方法（陽極処理）

現在一般に多く用いられている方法は送電エッチング方法²⁾である。この方法ではめっき加工すべき供試材を洗浄してめっき槽に移す作業がないため、表面酸化を防止できる点で（a～d）の方法よりもすぐれているが浴の汚れは速い。

図1-1は陽極処理および電着開始の際における電流の調節について示したものである³⁾。最初30分間供試材をめっき浴中に浸し、その後1～2分間陽極電流を流して表面のエッチングを行い、めっき層の密着性をよくする。

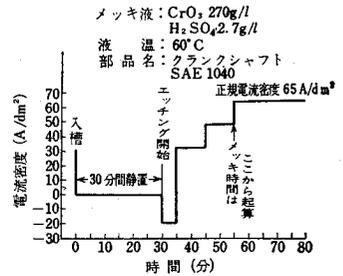


図1-1

陽極処理および電着開始の電流調節

このようにめっき浴中でエッチングを行えば、洗浄槽からめっき浴槽に供試材を移動させる必要がなく、酸化防止と電極取付時間の省略になり、作業能率を向上させることができる。工業用クロムめっき浴の成分は表1-1に示したごとく主にクロム酸である。めっき温度と電流密度を変えることによって軸の疲労強度を大きくしたり、密着力を大きくしたりすることができる⁴⁾。

めっき厚さは電流密度と温度に関係するが、1時間に析出するクロムの厚さが0.020～0.045 mm程度で電着させるのがよい。厚さ1 mm以上のめっきをする場合には、途中で研削を行い、電着時の膜厚のかたよりを防ぐとよい。

表1-1 めっき条件

めっき条件	クロムめっき	ポーラスクロムめっき		
		チャンネルタイプ	インタメディアイトタイプ	ピンポイントタイプ
六価クロム酸, g/l	230~260	同左	同左	同左
三価クロム酸, g/l	3.5~10.0	同左	同左	同左
鉄分, g/l	2.0~8.0	同左	同左	同左
硫酸, g/l	2.0~3.0	1.5~2.5	2.0~3.0	2.0~3.0
温度, °C	50±3	60±3	60±3	50±3
電流密度, A/dm²	30~40	50~60	40~50	30~40
時間, h	電流密度、液温で異なる。1時間約0.020~0.045mm厚			
温度, °C		60±3	60±3	50±3
電圧 (DC), V		5~8	5~8	5~7
電流密度, A/dm²		50~60	40~50	30~40
時間, min		8~10	8~10	8~10

本論文でのめっき加工は表1-1の範囲の条件で行った。めっき素地の仕上げは密着力に関係し、表面仕上のよいものほど密着力が大きい⁵⁾。したがって、本実験では素地の表面あらさが1 μm R_{max}になるよう研削仕上げを行った。

供試材はめっき加工後水洗し、そして研削あるいは液体ホーニングによって約 $10\mu\text{m}$ 表面を除去し、表面あらさ $0.8\sim 1.5\mu\text{m} R_{\text{max}}$ に仕上げた。

この供試材は、めっき加工時に浸入した水素を放出させ、割れの発生を防ぐためデシケータ中で1年以上放置し、実験前にアセトンによる洗浄あるいはトリクレン中で超音波洗浄を行って用いた。

3. めっき面の諸性質

3.1 表面形状の表示方法

めっき素地に傷、ピンホール、おうとつなどがあると、めっき後の表面にそれらの影響が大きく現われることは周知のとおりである。これを利用しためっき方法にナーリングタイプという種類がある。これは素地を機械的に多孔性に加工し、それをめっき面に反映させる方法である。しかし素地を機械的に多孔性になると、めっき前処理の溶液がみぞあるいは穴に残り、機械的強度を低下させることがあるため、本論文ではめっき後の表面に電解的にエッチングを施し、多孔性にしたものを用いた。このめっきをポーラスクロムめっきと呼び、表1-1に示したように電流密度と温度を変えることによって、ピンポイントタイプ、チャンネルタイプおよびインタメジエイトタイプの三種類の表面を作成した。

すなわち、図1-2に示したごとく、ピンポイントタイプは表面に微細な穴を、チャンネルタイプはみぞを多く有し、そしてインタメジエイトタイプは両者の中間の表面形態を有するものである。

一般にインタメジエイトタイプは電流密度をチャンネルタイプの値で、温度をピンポイントタイプの値でめっき

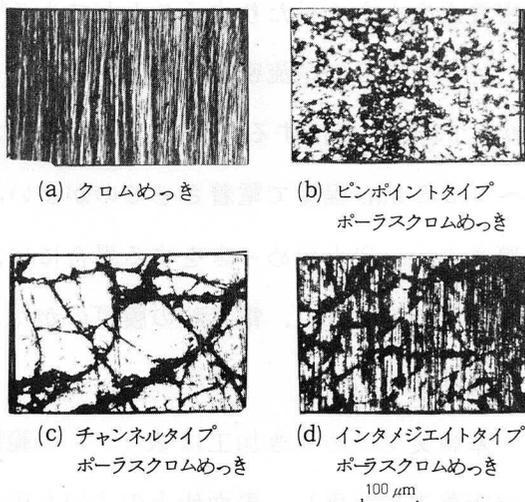


図1-2 ポーラスクロムの種類
(電解エッチング方法による)

を行うため、表面の形態は上記のどちらかのタイプにかたよることが多い。

JIS H8615⁶⁾には工業用クロムめっきの種別を次のように表示するよう定められている。

表1-2 種別とめっき厚さ

単位 mm

種 類	記 号	めっき厚さ	
工業用 クロム めっき	1 種	MICr 1	0.002 以上
	2 種	MICr 2	0.01 以上
	3 種	MICr 3	0.02 以上
	4 種	MICr 4	0.03 以上
	5 種	MICr 5	0.05 以上
	6 種	MICr 6	0.1 以上

上記表示方法の種別はめっき厚さに関係しており、これを表1-2に示した。

本研究では、めっき厚さは0.1mmと定めたので5～6種に属する。

ポーラスタイプを区別する表示規定はないため、本論文中では下記のとおり表示する。

M I Cr	クロムめっき
M I Cr-P	ポーラスクロムめっき
M I Cr-P (Pinpoint or pit)	ピンポイントタイプ ポーラスクロムめっき
M I Cr-P (channel or chan)	チャンネルタイプ ポーラスクロムめっき
M I Cr-P (Intermediate or Int)	インタメジエイトタイプ ポーラスクロムめっき

このポーラスクロムめっき表面形態が潤滑油の広がりや油の保持能力に関係し、軸受性能に影響を与えると考えられるが、いずれのタイプが回転軸あるいは往復動軸に最適であるかはいまだ明確でない。

3.2 多孔率の表示と測定方法

ポーラスクロムめっきの多孔率はめっき面の単位面積内にしめるみぞまたは穴の面積の割合を百分率で表したものであるが、使用目的によってどの程度の多孔率がよいかいまだ明確でないため、当事者間の協定により決めることが多い。現

場表示としては、上記の百分率ではなく、めっき面の単位面積内に存在するピンポイント数（個/mm²）またはチャンネルみぞ幅の最大と最小寸法（ μm ）で表すこともある⁷⁾。

多孔率の測定には顕微鏡による方法と方眼紙を用いる方法とがある。前者ではポーラスクロムめっき面自体、あるいはスンプ法⁸⁾で転写したフィルムの表面を顕微鏡で倍率50倍に拡大し、多孔率を測定する。後者ではめっき面の拡大写真上のみぞまたは穴を方眼紙に写し取り、その面積の割合から求める。

図1-3に上記の方法で測定した各種ポーラスめっき面の多孔率を示した。

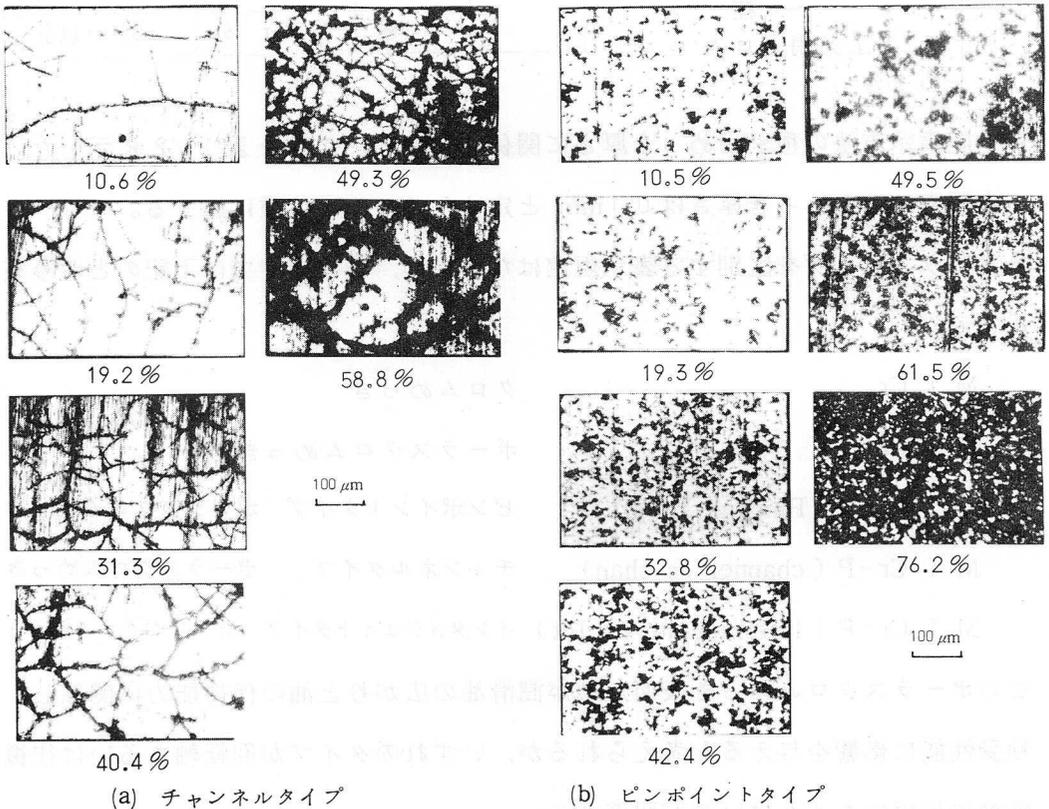


図1-3 ポーラスクロムめっきの多孔率

ポーラスの多孔率をめっき加工時に厳密に決定するのは困難であり、また一部品で部分的に多孔率を変えることもめっき作業を複雑化する。

本実験で用いたポーラスクロムめっき軸の多孔率は10~60%であるが、ピ

ンポイントタイプでは 35 ~ 50 %，チャンネルタイプでは 25 ~ 40 % が多い。

これを現場表示方法で示すと，MICr-P (pit) では 90 ~ 120 個/mm²，MICr-P (chan) ではみぞ幅 10 ~ 30 μm の混在あるいは 20 ~ 30 μm になる。

3.3 密着性試験方法

素地とめっき層の密着性試験には次の方法があり，当事者間の協定によりどの方法を用いてもよい。

(a) と石研削による方法

(b) 折り曲げによる方法 この方法は素地厚さ 2 mm 以上，めっき厚さ 0.05 mm 以上に適用できない。

(c) 押出しによる方法 この方法はめっき厚さ 0.05 mm 以下，円筒形の場合には直径 20 mm 以下には適用できない。

本実験でのめっき厚さは 0.1 mm としているため (b) と (c) の方法は供試材には適用できないので，本論文では以下に詳述する (a) の方法を採用した。

試料を研削盤に取付け，粒度 60，結合度 H ~ M のと石で，と石周速 10 ~ 33 m/s，切込深さ 5 μm 以下の条件で研削油を十分に供給しながら 0.03 mm 以上静かに研削を行う規定 (JIS H8615) を考慮し，本実験では，結合度 H のと石を用い，周速 18 m/s で行った。試験の結果，供試材においてはめっき面のはく離は生じなかった。素地との密着性に関する研究は多数の研究者^{4,5,9)}によって行われているため詳細な記述は省略するが素地の表面あらさが小さいほどめっき層の密着性はよい。

3.4 硬さ試験方法

JIS によれば，クロムめっき面の硬さ測定には微小硬さ試験機を用い，一試験片について 5 箇所以上の硬さを測定し，その算術平均値をもって示す。

多孔率が大で平坦部が少ないようなポーラスクロムめっきにおいては多孔部の部分を除去して測定してもよい。測定時の荷重は原則として 300 g 以上であるが，めっき層が薄い場合は最低 100 g まで使用してもよい。JIS では硬さ Hv 750

以上と定めている。なお、めっき厚さは生じたくぼみの対角線の長さの1.5倍以上と定められている。岸¹⁰⁾は、くぼみ深さの6~7倍以上のめっき層があれば、硬さに及ぼす素地の影響はないとしている。

本研究では、めっき厚さを0.1 mmで統一し、JIS規定を考慮して硬さ試験は荷重300 gで行った。

3.5 厚さ試験方法

厚さ試験には原則として顕微鏡を用いる方法を採用するが、当事者間の協定により次のいずれの方法を用いてもよい。

- (a) 顕微鏡を用いる方法
- (b) 磁力厚さ計を用いる方法
- (c) マイクロメータまたはシリンダゲージを用いる方法
- (d) 電解式厚さ計を用いる方法

顕微鏡を用いる方法ではめっき面に垂直な切断面を作成し、バフ仕上げ後めっき厚さを顕微鏡で測定する。めっき層の境界を見やすくするために適当に腐食して観察してもよい。切断時に垂直面から10°の傾きがあればめっき厚さの測定値に約2%の誤差を生じる⁶⁾。

この方法では試験片を切断しなければならないため、本論文では全数測定容易な図1-4の磁力厚さ計を用いる方法により厚さを測定した。磁力厚さ計としては厚さ既知の標準試験片によって補正されたものを用い、試験面1個所について3回、少なくとも3個所以上の厚さを測定し、その算術平均値を採用した。

3.6 めっき後の処理方法

一般にめっき後の洗浄は水洗が多く採用されている。ポーラスクロムめっきは研削中にチャンネルあるいはピンポイント部分に目づまりを生じる。そこで中性洗剤と水を1:100の

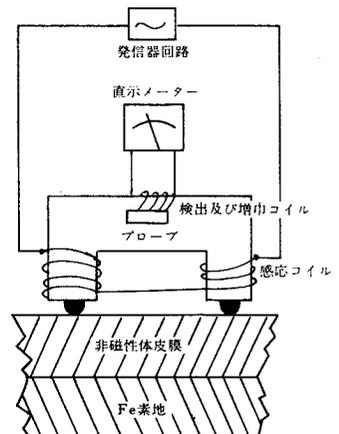


図1-4 磁力厚さ計の原理

割合で混合した溶液中で、ガーゼで表面を洗浄する方法と、この液中で試験軸を30分間煮沸する方法および超音波洗浄による方法の三者についてめっき前後の表面の状態を観察し、結果を比較検討した¹¹⁾。

その結果を以下に示す。

図1-5にMICr-P (pit)を洗剤液中で洗浄した場合の洗浄前、後の表面を示した。表面の汚れは十分とれるが、pit穴に入った汚れは完全にはとれない。

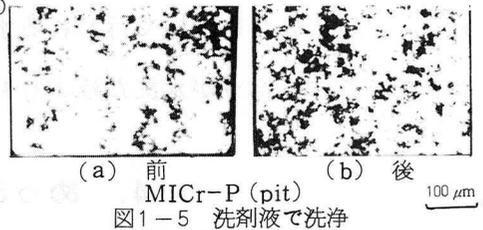


図1-6にMICr-P (chan)を洗剤液中で洗浄した場合の洗浄前後の表面を示した。みぞ中に入った汚れはとれ、MICr-P (pit)より表面は美しくなった。

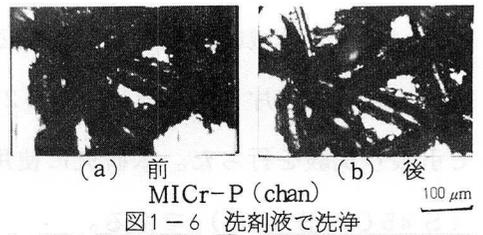


図1-7にMICr-P (pit)を洗剤液中で煮沸した場合の煮沸前後の表面を示した。洗浄の場合よりもpit穴の中に入り込んだ汚れはとれて美しくなった。

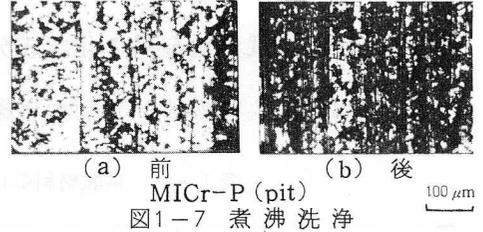


図1-8にMICr-P (chan)を洗剤液中で煮沸した場合の煮沸前後の表面を示した。pitの場合よりわずかに洗浄度は劣るようである。

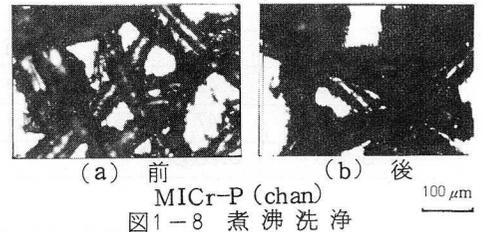


図1-9にMICr-P (pit)を超音波洗浄した場合の洗浄前後の表面を示した。洗剤液で洗浄または煮沸洗浄するよりも表面、pit穴ともに美しくなった。

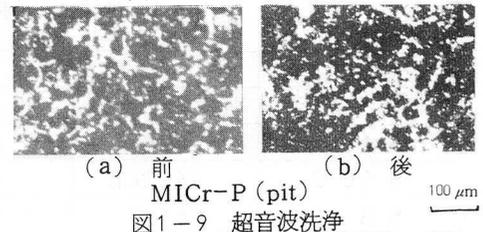
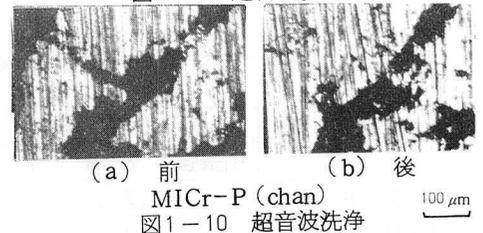


図1-10にMICr-P (chan)を超音波洗浄した場合の洗浄前後の表面を示した。



pit の場合と同様，非常に美しくなった。

以上の結果，めっき後の表面洗浄処理方法としては超音波洗浄が最も効果的である。一般にめっき工場で行われる水洗時においても，ガーゼあるいは柔らかいブラシでこするほうが水洗だけよりもめっき面は美しくなる。

4. めっき軸の諸性質

めっき軸の機械的諸性質を試験するため，JIS Z 2201 の 4 号試験片の形状寸法にめっき試験片（めっき厚さ 0.12 mm）を作成し，アムスラ万能試験機を用いて引張り試験を行った。本研究に使用しためっき軸の素地金属は主に炭素鋼（S 45 C～S 50 C）である。

表 1-3 に供試素地金属の化学成分，表 1-4 にそれらの機械的性質および表 1-5 に S 50 C 材のめっき前後の機械的性質をそれぞれ示した。

表 1-3 供試材料の化学成分

記号	化 学 成 分 %				
	C	Si	Mn	P	S
S 45 C	0.42～0.48	0.15～0.35	0.60～0.90	0.030 以下	0.035 以下
S 50 C	0.47～0.53	0.15～0.35	0.60～0.90	0.030 以下	0.035 以下
S S 50	0.30 以下	—	—	0.050 以下	0.050 以下

表 1-4 供試材料の機械的性質

記号	機 械 的 性 質			備 考
	引張強さ Kg/mm ²	伸 び %	硬 さ Hv	
S 45 C	58 以上	20 以上	230	JIS G4051 相当
S 50 C	62 以上	17 以上	268	
S S 50	61.5	18 以上	103	JIS G3101 相当

表 1-5 めっき前後の機械的性質

記号	機 械 的 性 質			備 考
	引張強さ Kg/mm ²	伸 び %	硬 さ Hv	
S 50 C	61.7	15.0	268	
S50C/MICr	63.4	10.8	885 (300g)	めっき厚さ 0.12 mm

めっきを施した素地の炭素鋼の疲労に関しては、Kocanda¹²⁾, Wiegand¹³⁾らの研究があるが、本論文の主目的でないため省略する。一般に電気めっきをすることにより疲労限度は少し低下する。しかしクロムめっきをすることにより耐摩耗性は増加する。

5. 結 論

- (1) めっき浴の管理を十分に行い、表1-1の条件でめっきおよびエッチングを行えば各種のタイプのめっきが得られる。しかしインタメジエイトタイプはめっき温度と電流に応じてチャンネルまたはピンポイントのどちらかにかたよることが多い。
- (2) ポーラスクロムめっきでは多孔率を厳密に決定するのは困難と考えてよい。また多孔率を一部品で部分的に異なる状態にすることは、めっき作業が複雑化する割には要求する多孔率が得にくい。
- (3) 素地の表面あらかさが小さいほどめっき層の密着性はよく、本研究の前加工方法によればめっき層のはく離は生じなかった。
- (4) めっき面の硬さはJISではHv 750以上と指定されているが、本研究ではHv 850以上であった。
- (5) めっき厚さはめっき時間により自由に調節できるが、1.0 mmに達する厚いめっきに対しては、途中でめっき面を研削したほうが厚さの均一なものが得られる。本研究に用いためっき軸ではめっき厚さが0.1 mmであるため、途中研削は行っていない。
- (6) めっき後の表面処理では超音波洗浄が最もよく、めっき工場で単に水洗する場合にも、ポーラスクロムめっきの表面は柔らかいブラシでこするほうが美しくなる。

文 献

1. R. Dow and J.E Stareck: *Plating*, 40, 987 (1953) .
2. 鈴木信利: *金属表面技術*, 8, 4 (1957) 110.
3. 永島彰二: *金属材料*, 5, 10 (1965) 40.
4. 紙野康美: *日立造船技報*, 21, 4 (1960) 205.
5. 鈴木信利: *金属表面技術*, 8, 4 (1957) 104.
6. 日本規格協会: *JIS H8615* (1975) .
7. 肥田 昭: *潤滑*, 11, 3 (1966) 21.
8. 日本金属学会: *金属便覧*, 丸善 (1955) 1176.
9. 岸 松平: *機械工業* (1962-8) 91.
10. 岸 松平: *クロムめっき*, *日刊工業* (1967-9) 230.
11. 肥田 昭, 市村雄弘: *潤滑*, 14, 2 (1969) 70.
12. S. Kocanda : *Metalloberf.*, 15, 4 (1961) 101.
13. H. Wiegand and H. -R. Kaiser. : *Metalloberf.*, 18, 10 (1964) 289.

第 2 章 軸受の温度分布と油膜厚さ

1. 緒 言

機械の良否を判定する一手段として、回転軸の運動の滑らかさや、軸受温度上昇状態などを用いることが多い。

軸受温度は、軸と軸受材料の組合せや、両者間に生ずる摩擦熱、熱伝導、潤滑油の種類など多くの要因により異なる。

また実機テストとモデルテストでは温度の実測値が相違することが多い。しかし、その傾向を把握し実用に役立たせるためには、モデルテストであっても十分参考になると考える。

本章では従来から使用されている軸の代わりにクロムめっき軸を用いた場合、同じ軸受をそのまま用いることが可能か否かを調べるため、種々のタイプのクロムめっき軸とケルメット軸受の組合せで、実機に近い状態で軸を回転させ、軸受温度、温度分布および油膜厚さを測定した。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

軸受温度に及ぼす回転速度の影響を調べる場合は図 2-1 の装置 Aのごとく、 $1/2$ PS, 1720 rpm のモータを用い、中間軸を通じて供試軸を無負荷状態で 1100, 1800 および 1900 rpm になるよう Vプーリを取りかえて回転数を変化させた。

軸受温度に及ぼす送油量の影響を調べる場合は、上記のようなベルト駆動による回転変動を防ぐため、図 2-2 の装置 Bのごとく、 $1/2$ PS, 1720 rpm のモータに供試軸を直結した。

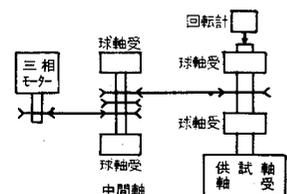


図 2-1 装置 A

軸受温度に及ぼす荷重の影響を調べる場合は、図2-3の装置Cのごとく、

2PS, 3380 rpm のモータを使用し、中間軸を通じて供試軸を 2400 rpm で回転させた。

油膜厚さ測定に用いた装置は図2-3と同じで、回転速度も同じである。

各装置とも回転速度は瞬時読取回転計で測定した。

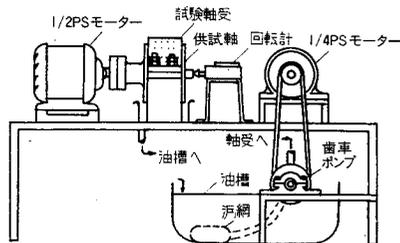


図2-2 装置 B

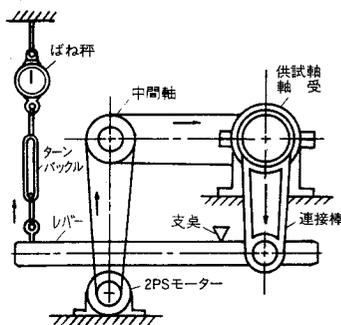
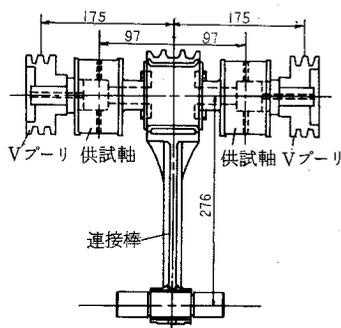


図2-3 装置 C



2.2 供試軸と軸受の形状寸法

軸：図2-4の形状に作成しためっき膜の密着性のよい軟鋼 (Hv 103)¹⁾の表面に第1章表1-1のめっき条件でクロムめっきを施し、研削、洗浄後用いた。

めっきは無地とピンポイントタイプの2種類とした。めっき面の表面あらさは比較標準試験片を用いて比較し、 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ R_{max} と推定した。MICr-P (pit) 軸表面の多孔状態はスンプ法²⁾を用いて観察し、図2-5に示した。そして表面 1 mm^2 当りのピンポイント数を3箇所測定し、平均値

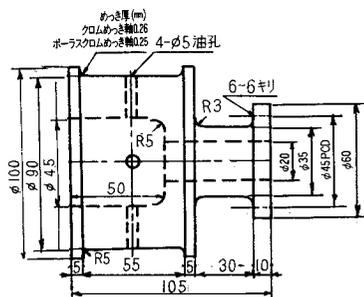


図2-4 供試軸

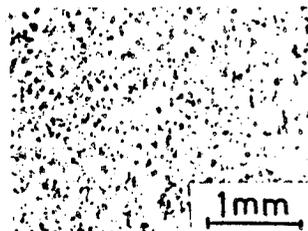


図2-5 スンプ法によるMICr-P表面

2.3 温度測定方法

温度測定用として図2-6と図2-7の軸受に設けた温度測定用穴に銅-コンスタantan熱電対を取付けた。測定温度が半田の融点より低いゆえ、熱電対の接点部は半田付で接合し、補正後の熱電対を竹せんと接着剤で測定用穴に固定して24時間以上経過後使用した。各測定点の温度は、多点測定切替用2段2ポール12接点スイッチを使用し、冷接点を通じてミリボルト計で測定した。測定後、補正 $mV-^{\circ}C$ 曲線で電圧を温度に換算した。測定順序は始動より図2-6あるいは図2-7のA列※位置よりB, C, D列、次に軸の回転方向の列をそれぞれ10秒間隔で測定し、さらに10分後A列※位置より測定を繰返した。

回転速度または送油量を変化させた場合の温度測定時間は2時間とした。また油膜厚さ測定実験においては、回転速度または送油量を変化させた場合の軸受温度が30分経過後と2時間経過後とでは2~3 $^{\circ}C$ 程度しか相違しなかったため、温度測定は30分で打ち切った。

2.4 送油量調節方法

回転速度に応じて送油量を調節するため、表2-1に示したSAE30番モーターオイルを23/油槽に入れ、これを図2-1の中間軸に連結したVベルトで駆動する歯車ポンプによって循環させる送油方法を用いた。

一般に送油量は高速ディーゼル機関で400~600 cc/PS/min、ガソリン機関で約150 cc/PS/minとしている³⁾。

本実験では上記の送油量を参考にして、供試軸の回転速度増加とともに送油量も多くなるようにした。すなわち、1000 rpm 時で83 cc/min に設定したところ、回転速度に応じて1100 rpm で92 cc/min, 1800 rpm で150 cc/min, 1900 rpm で153 cc/min となった。

MICr-P 軸の試験における送油量は上記のように図2-1の装置に調整弁を設置して変化させてもよかったが、送油量をいっそう正確にするため、図2-2のごとく1/4 PS モーターで歯車ポンプを850 rpm で回転させ、調整弁で調節した。

MICr 軸 1900 rpm の送油量が約 160 cc/min であったのに対し、MICr-P 軸の送油量は同じ回転速度で 130, 260 および 420 cc/min と変化させた。

表2-1 潤滑油特性

比 度	0.913
粘 度	レッドウッド 50℃ 267 秒 " 100℃ 56.5 秒
粘度指数	81
引火点	225℃
凝固点	-5℃

この送油量は、試験停止時に、送油配管途中に設けた圧力計が測定時と同じ値を示すように送油穴出口を少し閉じ、その状態で流出した油量をメスシリンダで測定して求めた。荷重を変化させた場合の送油方法は図2-2の送置を利用して油槽内の油(18l)を各軸受に200, 400, 600, 800, 1000 cc/min 送油した。

油槽内の潤滑油は冷却せずに循環させて使用しているゆえ、上部の温度が高くなる。これを防ぐため1/16 PS モータ付かくはん機を用いた。

2.5 回転速度変動と衝撃荷重回数の測定方法

静荷重は図2-3のごとく、接続棒を通じて左右の試験軸に負荷をかける。荷重の調節は接続棒に取付けたレバーの端に接続したターンバックルとばね秤で行う。本装置では無負荷〔ただし軸、プーリなどの重さ約10 kg (0.24 kg/cm²)〕から100 kg/cm²の範囲の荷重が軸受にかかるようになっている。

衝撃荷重の負荷は曾田式衝撃試験機⁴⁾の原理を用い、図2-8のごとくレバーに取付けたフライホイールで行った。フライホイールの周上G点に次式で計算した重錘を取付け、軸の回転数2400 rpmと同じ周波数で負荷がかかるようにした。この方法で、

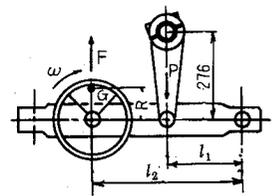


図2-8 衝撃荷重の負荷方法

無負荷, 50 kg (1.2 kg/cm²), 100 kg (2.4 kg/cm²)の衝撃荷重を軸受に与えた。

$$F = \frac{W}{9.8} \omega^2 R \quad l_1 = 0.2 \text{ (m)} \quad F = \text{遠心力 (kg)}$$

$$P = \frac{l_2}{l_1} \cdot F \quad l_2 = 0.4 \text{ (m)} \quad P = \text{衝撃荷重 (kg)}$$

$$W = \frac{9.8 l_1 \cdot P}{l_2 R \omega^2} \quad R = 0.15 \text{ (m)} \quad W = \text{重錘 (kg)}$$

回転速度の変動を測定するため、図2-9のごとく中間軸に厚さ10mmのベークライト円板に接点を設けたものを取付け、また衝撃回数測定のため図2-8のレバーに接点を設け、両接点の接続時の電圧信号を2現象ブラウン管オシロスコープで観測し、回転数と衝撃回数とが一致しているかどうかを測定した。

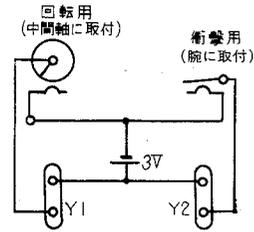


図2-9 回転変動、衝撃回数測定用配線図

2.6 油膜厚さ測定方法

油膜厚さ測定における信号の取出しには、図2-7の軸受に取付けた1.6mmφの銅線とエンパイチューブをかぶせた0.5mmφ、長さ600mmのエナメル線とを半田付けしたものをを用いた。

各測定点の電圧を図の電気回路と1段1ポール12接点スイッチによる信号の切換えによって測定した。使用した油はSAE30番モータオイルである。

油膜を抵抗体^{5,6)}とみなし、油膜厚さの変化に応じた電圧変化を軸受温度の安定した30分経過後に測定する。この電圧変化は2現象ブラウン管オシロスコープで観察し、必要に応じてシングルスイープ波形を連続撮影装置の1コマ送り装置で記録した。また電圧計と電流計だけでも測定できるように電圧計に油膜厚さを目盛った。この場合の電圧と油膜厚さの関係は次節の方法で得られる。

2.7 油膜厚さ校正方法

図2-10に油膜厚さ校正装置を示した。(a)は軸受に取付けた電極(1.6mmφの銅線)と同じ電極を有する装置で、(b)は電極面積を大きくし、印加電圧変化と油膜厚さを連続的に変化させ測定できる装置である。

(a)に示した装置では、図の形状に軸受外側を45mm角に作り、その3面に各々上下2個所の×印位置に、図2-7の軸受に用いた電極と同じ面積をもつ電極を計6個そう入した。

電極先端面と軸受内面は同一面になるように設定した。また、軸と軸受には1/10のテーパをつけ、軸の上下電極間6mmにはテーパをつけず、丸穴加工し

た。拡大図は、軸を完全にはめこんだ状態の図で、軸受の上部電極位置が軸に接触し、下部電極位置では軸受と0.3 mmのすきまができる。軸受下部の油だめにはSAE30番モータオイルが入っているので、軸と軸受間は、この油で油膜が形成される。

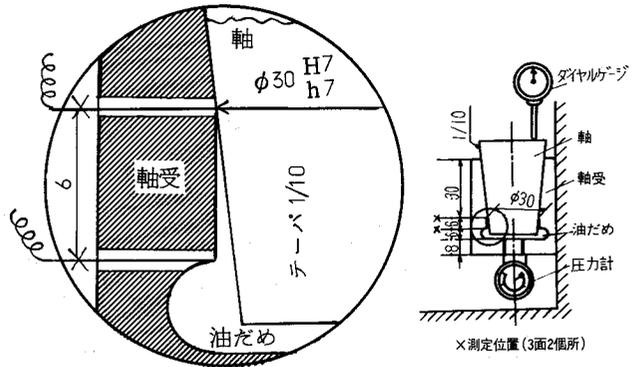


図2-10(a) 油膜厚さ校正装置

油膜厚さ測定にあたって、まず電極と軸の間に一定の電圧を印加しておき、テーパ軸を徐々に降下させていく。テーパ軸を $1\mu\text{m}$ 降下させると、電極位置において軸受すきまは $0.05\mu\text{m}$ 狭くなるので、油膜厚さは徐々に小さくなる。

油膜厚さが厚いと回路に電流は流れず、ある厚さ以下になると電流が流れはじめる。したがって、ブラウン管オシロスコープで電圧変化が現われるのを観察しながらテーパ軸を降下させ、波形変化時の軸の移動距離をダイヤルゲージで読みとる。この値から油膜厚さを求める。その結果、印加電圧6Vにおいて、絶縁破壊のはじまる時の油膜厚さは $80\mu\text{m}$ となった。

(b)に示した装置では、直流電圧電流発生装置、マイクロメータ、ブラウン管オシロスコープ(またはペン書きオシログラフ)を用いる。

電極は表面あらさ $0.5\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 、厚さ2.0 mmの均一な銅板で作り、顕微鏡試料埋込用樹脂で片面を露出させて固めた。この電極を図2-10(b)のバーニヤ付マイクロメータのアンビル上に露出面を上にして乗せ、電極とスピンドルとの平行平面間に油膜をつくる。印加直流電圧は1V~6Vの範囲で、1Vずつ変化させ、各電圧において絶縁破壊のはじまる油膜厚さをマイクロメータで読みとり、油膜厚さと電圧の関係を測定する。

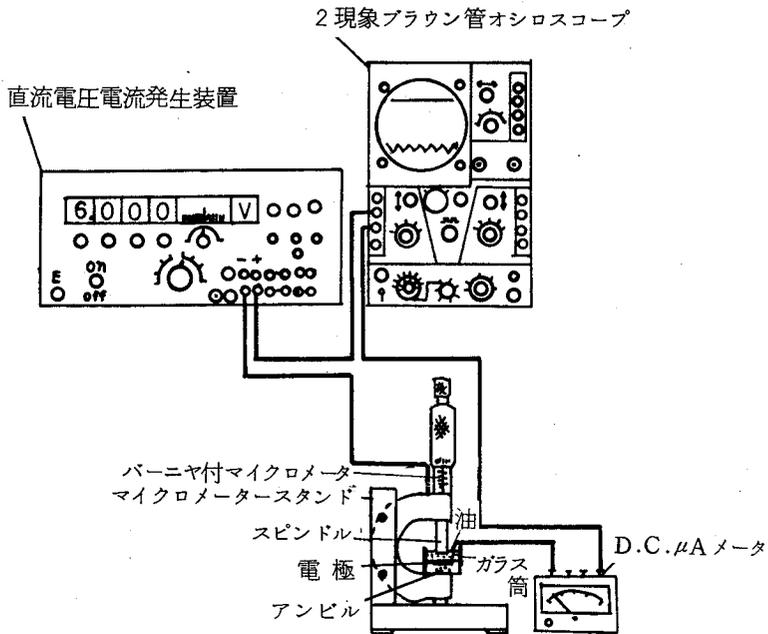


図 2-10 (b) 油膜厚さ連続校正用装置

この方法は、図 2-10 (a) の方法と違って、油膜厚さを変化させることが可能であり、膜厚と電圧との関係が求められる。図 2-10 (a) および (b) の装置で求めた油膜厚さと電極面積との関係を電圧 6V の場合について図 2-11 に示した。絶縁破壊のはじまる油膜厚さは電極面積に反比例することがわかる。

油の体積固有抵抗 ρ_v ($\Omega \cdot \text{cm}$) はホイートストンブリッジとポテンシオメータを用いて測定し、次式⁷⁾ から約 $5.98 \times$

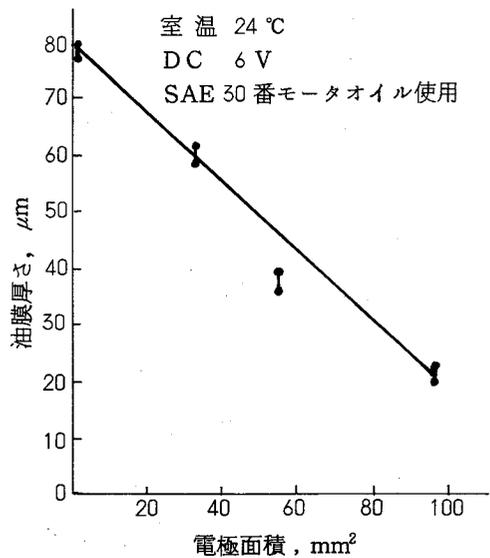


図 2-11 電極面積と油膜厚さ

$10^7 (\Omega \cdot \text{cm})$ の値を得た。

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{A}{h} \quad (1)$$

$$E = I \cdot R_v \quad (2)$$

$$\rho_v = \frac{E}{I} \cdot \frac{A}{h} \quad (3)$$

R_v : 体積絶縁抵抗 (Ω)

A : 電極面積 (cm^2)

h : 油膜厚さ (cm)

E : 電圧 (V)

I : 電流 (A)

体積絶縁抵抗は電極面積と油膜厚さにより変化することが上式より明らかである。すなわち体積絶縁抵抗は油膜厚さに比例し、電極面積に反比例する。

各軸受に埋込んだ電極による油膜厚さ測定法では、油膜部への印加電圧が6Vの場合、80 μm 以上の油膜厚さで電流は流れず、したがってブラウン管上で波形の変化も生じない。

油膜厚さ80 μm 以下で、はじめて測定が可能となり、厚さ0 μm で最大電圧6Vが検出できる。

そこで油膜厚さ80 μm での電圧0Vを基準にとり、これを2現象ブラウン管オシロスコープの一方に接続し、厚さ測定の基線とする。他方の端子に油膜厚さの変化による電圧信号を接続し、この電圧と0Vの基線との間隔から厚さを測定する。本方法では油膜厚さ80 μm ~ 0 μm の変化に対して、測定電圧は0 ~ 6Vの範囲で比例的に変化する。

$$h = 80 - kS$$

h : 油膜厚さ (μm)

k : 定数

S : 電圧変化 (mm)

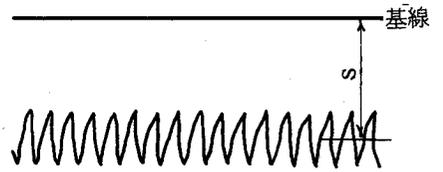


図2-12 電圧変化と基線

図2-12に軸を回転させた場合の油膜厚さ記録の一例を示した。

3. 実験結果および考察

温度測定において、測定時の室温は始動時の潤滑油の温度あるいは軸受からの

放熱などに関係すると思われるので、始動前の温度を一定にするか、軸受温度から室温を差引いて軸受温度上昇を比較するほうがより正確と考えられる。そこで始動時の室温を0℃に換算して図示する方法をとる。

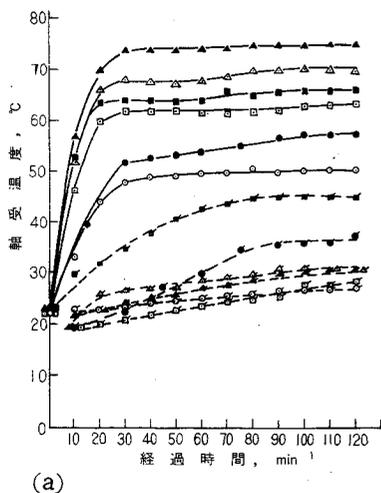
以下に示す軸受温度は各測定点において測定した温度の算術平均した値である。

3.1 軸受温度に及ぼす回転速度の影響

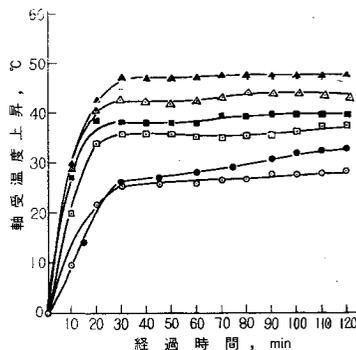
図2-13に回転速度を変化させた場合の軸受温度上昇を示した。図(a)は実際の軸受温度を示し、図(b)は始動時の室温を基準にした、軸受温度上昇を示したものである。いずれの軸でも回転速度の増加とともに軸受温度が上昇することがわかるが、注意すべき点は1800から1900 rpmへ回転速度をわずかに増加させるだけで、軸受温度にかなりの上昇が認められることである。

MICr軸とMICr-P軸では、いずれの回転速度においてもMICr-P軸を用いたほうが軸受温度は低い。

図2-14に、回転速度を変化させた場合の90分経過時の軸方向各点の温度を平均し、円周方向の温度分布を示した。高温個所が左上と右下側であるのは、油穴が下側にあるため温度の低い油が左側を冷やし、かつ無負荷状態



(a)



(b) 室温補正 無負荷

回転速度 rpm	軸受温度		油槽温度	
	MICr	MICr-p	MICr	MICr-P
1100	○	◇	△	▽
1800	●	◆	▲	▼
1900	⊙	⊠	⊡	⊢

図2-13 温度上昇と経過時間

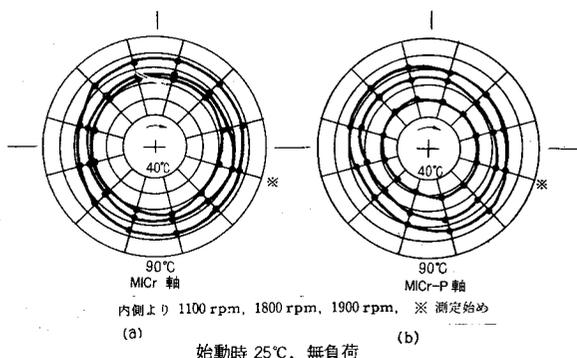


図2-14 90分経過時の円周方向温度分布

であるため、ベルト駆動による軸心の片寄りによるためと考えられる。

図2-15に始

動時の温度を25

℃とし、90分経

過時の各回転速

度における軸受

面の等温線図を

示した。温度上

昇は時間とともに

ちょうど波紋

を描くように広

がるが、図2-

15(a)に示した

MICr軸の場合、

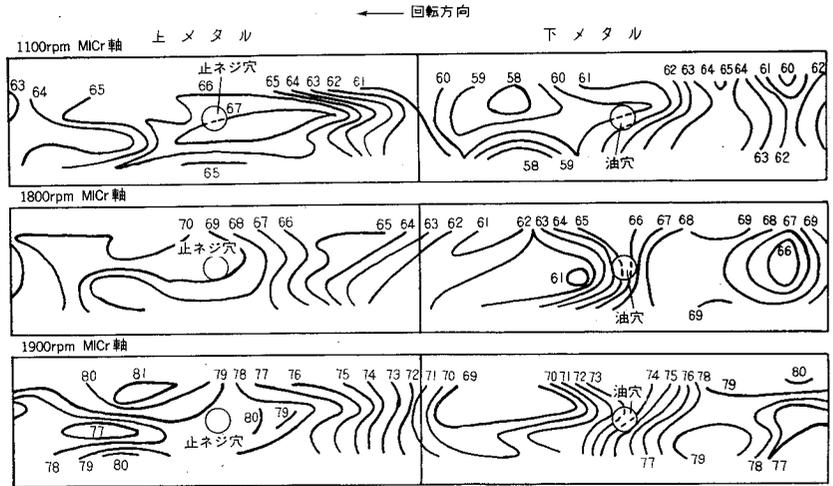
油穴を中心とし

て等温線が存在

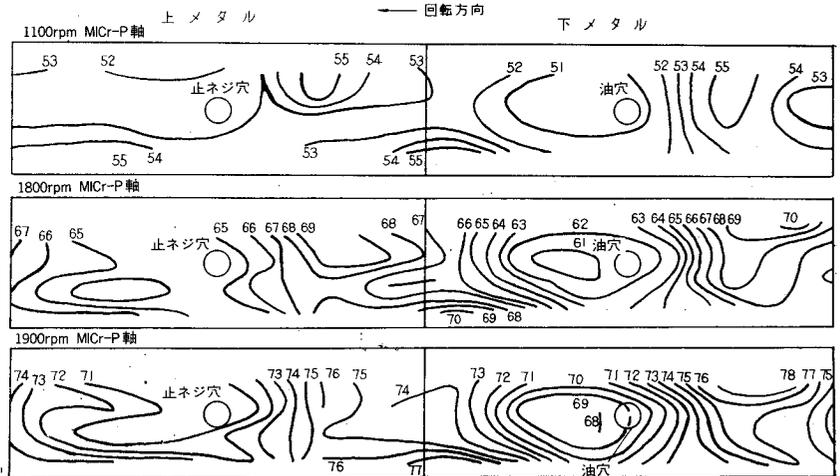
せず、回転方向

にややずれた複

雑な模様となる。



(a) MICr軸の軸受 無負荷



(b) MICr-P軸の軸受 無負荷

図2-15 各回転速度における90分経過時の軸受面の等温線図

図2-15(b)の

MICr-P軸の

場合は給油点を中心とした円状に等温線が存在する。また、軸方向では中央附

近で両端よりも低く、この傾向は円周方向最高温度附近で著しく、W. Nückerの

報告⁸⁾と一致している。

軸受温度を低く保つことが可能であれば高速のほうが油膜の形成がよい。

しかし実際には摩擦回数が増加すると軸受温度は高くなり軸受の負荷能力はさ

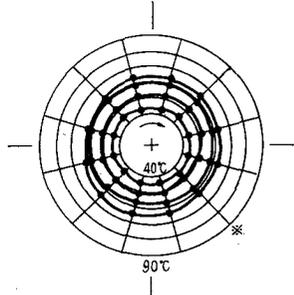
がる。これを防ぐため、すきまを大きくしたり、潤滑油粘度を低くすることなどが考えられているが、このような方法は動的に不安定になりやすく、軸受各部の均等な潤滑が不十分となって油膜破断の恐れが生じる。これらの点についても MICr-P 軸は有利になると思われる。

3.2 軸受温度に及ぼす送油量の影響

図2-16 は送油量を変化させた場合の軸受温度上昇を示した。(a) は実際の温度変化を示しており、始動時の温度が異なることがわかる。上記 3-1 節と同様に始動時の室温を 0℃として (b) に示した。

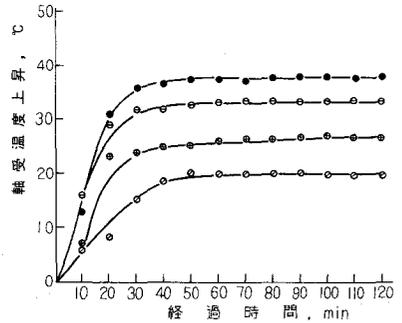
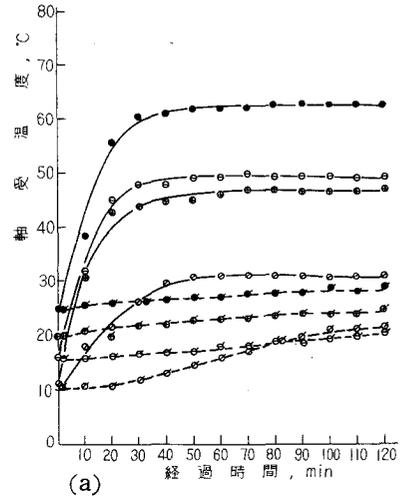
送油量が 130 cc/min の MICr-P 軸の軸受温度上昇が、160 cc/min の MICr 軸の軸受温度上昇より低いことに注目すべきで、MICr-P 軸を用いた場合の軸受内の潤滑状態が良好であることを暗示している。

図2-17 は送油量を変化させた場合の 90 分経過時の軸方向各点の平均軸受温度分布を示したもので、図2-14 と比べると、ベルトによる影響はなくなり、高温箇所が左下側にある。この場合温度の低い潤滑油で左側が



内側より MICr-P 420, 260, 130cc/min
MICr 160 cc/min
* 測定始め
始動時 25℃, 回転速度 1720 rpm

図2-17 90分経過時の円周方向温度分布



(b) 室温補正

種別	送油量cc/min	軸受温度	油槽温度
MICr	160	●	○
MICr-P	130	○	○
	260	○	○
	420	○	○

回転速度 1720 rpm, 無負荷

図2-16 送油量を変化させた場合の軸受温度上昇と経過時間

冷却されているはずであるが、その影響は認められなかった。

この理由として、図2-16 に示した潤滑油の温度上昇がわずかであることから、

潤滑油による軸受部の冷却が十分行われていないと考えられる。

図2-18に始動時の温度を25℃とし、各送油量における90分経過時の軸受面の等温線図を示した。MICr-P軸は、MICr軸に比べて、送油量が比較的少なくても軸受温度はあまり変化せず、熱による軸受変形などの影響も少ないと思われる。

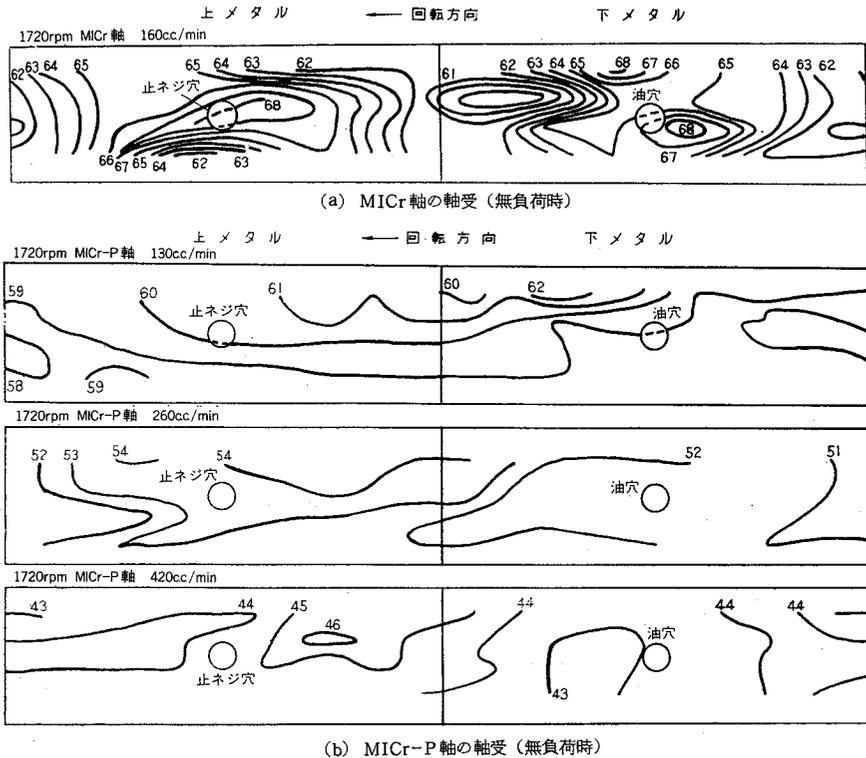


図2-18 各送油量における90分経過時の軸受面の等温線図

荷重負荷時の軸受温度に及ぼす送油量の影響は次の3.3節で述べる。

3.3 軸受温度に及ぼす荷重の影響

図2-19に静荷重を加えた場合の軸受温度を無負荷時の温度とともに示す。荷重を負荷し、送油量を少なくした場合でも、MICr-P軸の軸受温度はMICr軸のそれに比べて一般に低く、MICr軸にみられるような荷重負荷による急激な温度上昇は認められない。

図2-20に無負荷および静荷重下の30分経過時における送油量と軸受温度の関係を示した。

MICr軸に比べてMICr-P軸の軸受温度は約10℃低い。また無負荷の場合、送油量は軸受温度にあまり影響を与えないが、荷重を加えるとその影響は大きい。

図2-21に衝撃荷重の場合の軸受温度を示した。

MICr軸では荷重増加による軸受温度は高く、時間とともに急激に温度が高くなる。MICr-P軸では荷重や時間に対する軸受温度上昇の割合が小さい。

図2-22に衝撃荷重の場合の30分経過時における軸受温度と送油量の関係を示した。送油量の変化に対してMICr-P軸では、MICr軸に比べて、無負荷の場合で7℃～15℃、荷重を負荷した場合で5℃～20℃軸受温度が低

く、良好な潤滑状態を示している。図2-19～2-22の結果から、衝撃試験における単位面積当りの荷重は静荷重のそれより少なくとも、軸受温度は静荷重の軸受温度よりも高く、荷重のかけ方の軸受温度に対する影響は非常に大きいことがわかる。またクロムめっきの種類と荷重の負荷方法にかかわらず、軸受温度は始

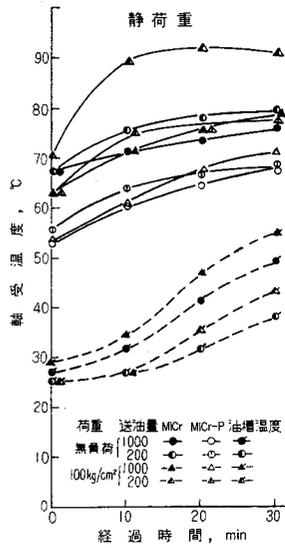


図2-19 経過時間と軸受温度

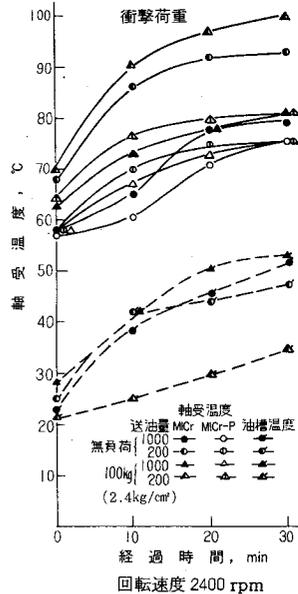


図2-21 経過時間と軸受温度

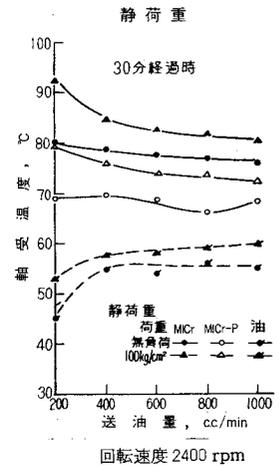


図2-20 送油量と軸受温度

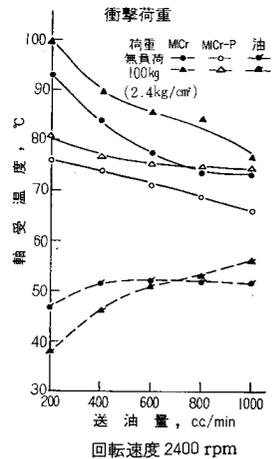


図2-22 送油量と軸受温度

動後 10 ~ 30 分で定常な状態に達することが明らかとなった。

3.4 油膜厚さに及ぼす送油量と荷重の影響

図 2-23 は静荷重の場合の 30 分経過時の送油量と油膜厚さの関係を示す。

図中に示す油膜厚さは全測定点において測定した値を算術平均した値である。負荷をかけた場合に比べ、無負荷状態で油膜厚さが薄いのは軸のふれまわりによるためと考えられる。また送油量に関係せず MICr

-P 軸のほうが油膜厚さは厚い。

軸受の油膜厚さは次式で計算される⁹⁾。

$$h = (r_1 - r_0) + e \cos \theta$$

h : 測定点における油膜厚さ (mm)

r_0 : 軸半径 = 45 - 0.010 (mm)

r_1 : 軸受半径 = 45 + 0.015 (mm)

e : 偏心距離 = 0.02 (mm)

θ : 測定点までの角度

(軸受温度最高点を $\theta = 180^\circ$ とした)

しかし表 2-2 のごとく測定値と計算値とは

$\theta = 90^\circ$ および $\theta = 270^\circ$ の場合を除きかなりの相違がある。これは運転中に軸中心が軸受中心のまかりを回転するためと思われる。なお、軸の全周に油膜が形成されるまでの時間は油膜

厚さ測定における検出電圧を連続撮影装置で記録した結果、0.1 ~ 0.2 秒であることがわかった。すなわち軸の回転速度が 2400 rpm であるから軸が 4 ~ 8 回転すれば油膜が形成されることになる。

全般を通じて MICr-P 軸のほうが MICr 軸よりも 2 ~ 3 μm だけ油膜が厚く、わずかではあるが軸受温度上昇の抑制に対して有利であると思われる。

以上の結果、MICr-P 軸は、多孔質金属のごとく作用し、軸が回転するとポーラスクロムめっきの穴からにじみ出た油が油膜の形成を助け、回転が止まれば軸

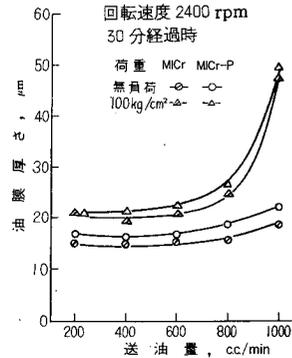


図 2-23

静荷重の場合の送油量と油膜厚さ

表 2-2 円周方向の油膜厚さ

θ ($^\circ$)	計算値 (μm)	測定値 (μm)	
		クロムめっき軸	ポーラスクロムめっき軸
90	25.0	26.0	27.1
130	12.1	26.4	28.0
170	5.3	26.7	28.0
270	25.0	26.3	28.0
310	37.9	25.7	27.1
340	43.8	25.5	27.5

受面にある油はポーラスの穴にたまるものと考えられる。

汎用内燃機関では、始動後軸受面に潤滑油が行きわたるまでに夏季で30秒、冬季で2～3分かかるが、軸をMICr-Pにしておくと、この過渡状態での潤滑に役立つものと思われる。

4. 結 論

- (1) 機器の運転中の軸受温度は始動後できるだけすみやかに定常状態に入り、かつその後の温度上昇が少ないことが望まれる。今回の実験によると始動後10～30分の間は温度変化が大きく、その後はほぼ定常な状態に入ることがわかった。したがって、実際の軸受で回転速度、軸受荷重などを変化させる場合は、変化後10～30分間の軸受温度に注意すれば焼付による破損を未然に防ぐことができる。
- (2) 回転速度を増加させると、軸受温度は高くなり、負荷能力はさがる。これを防ぐためには送油量を多くするか、潤滑性のよい軸を用いればよいことが明らかになった。
- (3) クロムめっき軸とポーラスクロムめっき軸とではいかなる送油量においてもポーラスクロムめっき軸のほうが軸受温度が低く、特に送油量が少なく荷重が大きい場合にその傾向が著しい。
- (4) 軸受に衝撃荷重がかかる場合には、単位面積当りの荷重が静荷重の場合よりはるかに低い値であっても軸受温度は静荷重時とほとんど同じ値であったことは実用面で十分注意を要する。

文 献

1. K. Kuun : South Africa, Mech. Engr., 9, 6 (1960-1) 139.
2. 日本金属学会編：金属便覧，丸善（1955）1176.
3. 長尾不二夫：内燃機関講義 上，養賢堂（1958）414.
4. 内海竜夫，金子練造：ころがり軸受の検査法，オーム社（1954）143.
5. 古浜庄一：機械学会論文集，27，175（1961）357.
6. I. O. M. Conochie , A. Cameron : Trans. ASME Ser. D 82, 1 (1960) 29.
7. 電気学会編：絶縁試験法ハンドブック，電気学会（1976）197.
8. W. Nücker : Forschungsheft, 355 (1932).
9. 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，養賢堂（1970）117.

第 3 章 ポーラスクロムのタイプと軸受材料

1. 緒 言

第 2 章ではクロムめっき軸あるいはピンポイントタイプポーラスクロムめっき軸と分割型で油みぞを有するケルメット軸受とを組合せた場合、軸受温度および油膜厚さに対する軸受の運転条件の影響を検討した。

本章では、チャンネルタイプのポーラスクロムめっき軸をも含めて、ポーラスクロムのタイプが軸受性能に与える効果を総合的に判断しようとするものである。一般に油みぞの形状が油膜厚さなどに影響を及ぼすことがわかっている¹⁻³⁾、この影響を除くため、主として油みぞのない軸受を用い、ポーラスクロムのタイプが軸受のなじみ性、軸受温度および油膜厚さに及ぼす影響と、さらに油穴の位置が軸受温度と油膜厚さに及ぼす影響について検討した。種々の軸と軸受の組合せについて、軸受試験条件（回転速度、荷重および送油量）と軸受の油穴位置を変化させ、軸受温度、温度分布および油膜厚さを測定した。使用した軸受は、油みぞのない黄銅、アルミニウム、りん青銅、銅系含油および PTEF 製の軸受と油みぞのあるホワイトメタル軸受である。

供試軸にはクロムめっき軸のほかに S 50 C 軸も用いた。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実 験 装 置

図 3-1 に示した装置において、1 PS, 3400 rpm のモータを駆動源として使用し、無段変速機、中間軸、2 段 V プーリを介して供試軸を回転させた。軸と軸受材料のなじみ性を検討する場合には、1000, 2000 および 3,000 rpm に回転速度を変化させた。“なじみ性がよい”とは、軸回転の開始後短時間で急激な軸受温度上昇が起こらずに定常な温度に達し、かつその温度が低く安定な状態に保持

されることを示すものとする。荷重を無負荷から 100 kg/cm^2 まで変化させた場合の回転速度は 1000 rpm とした。

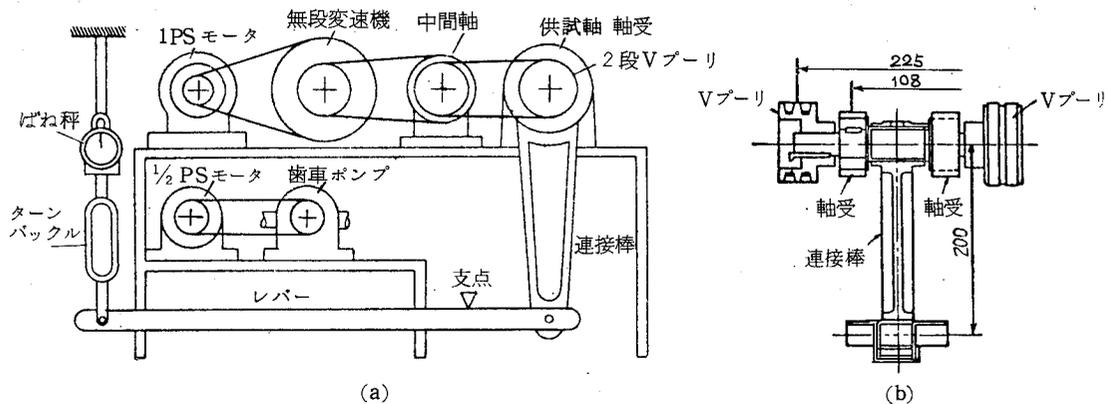


図3-1 装置

潤滑には油槽に 30 番モータオイルを 10 l 入れ、 $1/2 \text{ PS}$, 1700 rpm のモータ 2 台で 2 台の歯車ポンプをそれぞれ回転させ、各軸受に送油した。

軸受のなじみ性に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響を調べる場合には、送油量を 1000 cc/min とした。各種の軸受材料において、軸受温度と油膜厚さに及ぼすポーラロクロムのタイプの影響を調べる場合には、送油量を 500 cc/min に減少させて実験を行った。

油槽内の潤滑油は冷却せず、 40 メッシュの金網でろ過しつつ、常にかくはんしながら使用した。

含油軸受の場合は、軸受の油穴出口から送油管内にかけて 20 mm 内側までフェルトをつめ込み、多量の油が流出するのを防いだ。流出量は送油管に接続したビューレットの油面の位置を一定に保つ方法で調節した。実験では流出油量を約 0.35 cc/min の一定に保持した。

PTFE 軸受に対する潤滑剤としては、水と切削油剤 (JIS K 2341 の W 1 種) を $10:1$ の割合で混合した乳化油を用いた。送油量は $20, 50$ および 100 cc/min とした。油穴位置が軸受温度と油膜厚さに及ぼす影響を調べる場合は、送油量を

さらに少なくし、18.5 cc/min にした。

負荷方法としては図3-1のごとく連接棒に取付けたレバーに接続したターンバックルをまわし、ばね秤で無負荷(0.28 kg/cm²)から100 kg/cm²までの荷重が各軸受にかかるようにした。

軸受のなじみ性を試験する場合は荷重を無負荷から100 kg/cm²まで20 kg/cm²ずつ変化させた。またポーラスクロムのタイプの軸受へ及ぼす影響を調べる場合の荷重は、無負荷(0.28 kg/cm²)、50 kg/cm²および100 kg/cm²とした。

PTFE 軸受に対しては無負荷(0.28 kg/cm²)、2.8 kg/cm²および5.6 kg/cm²とした。

油穴位置の軸受への影響を調べる場合には無負荷(0.28 kg/cm²)、0.30 および 2.8 kg/cm²とした。

2.2 供試軸と軸受の形状寸法

軸：S 50C (Hv 230) で図3-

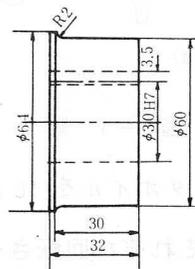


図3-2 供試軸

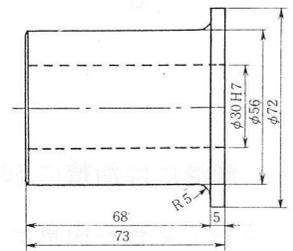


図3-3 供試軸
(ホワイトメタル軸受用)

2の形状に試験軸を作成した。ホワイトメタル軸受に用いた軸の形状寸法は図3-3に示した。

供試軸の表面は第1章の表1-1のめっき条件で150 μmの厚さにめっきしたのち、エッチングによってMICr-P (pit) 軸およびMICr-P (chan) 軸を作成した。めっき加工後、液体ホーニングを施し⁴⁾、軸寸法を60mm φにした。表面あらさは比較標準試験片を用いて比較し、0.2~0.8 μm R_{max}と推定した。

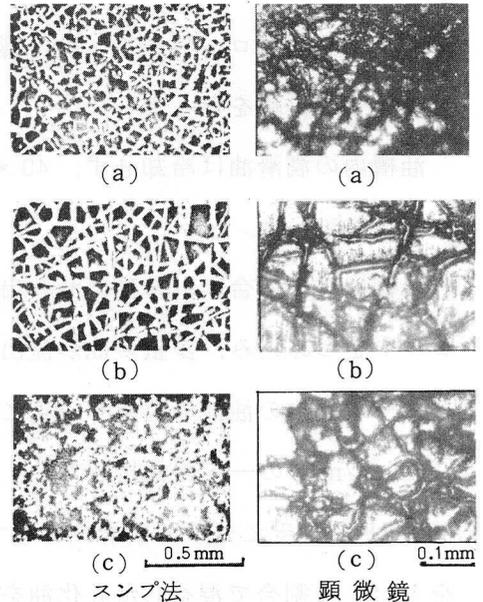


図3-4 ポーラスクロム軸の表面

図3-4 にスンプ法と顕微鏡で直接観察

した場合の MICr-P 軸表面の数例を示した。(a)と(b)はチャンネルタイプで、(a)はみぞ幅の小さいもの、(b)はみぞ幅の大きいものである。(c)はピンポイントタイプの表面である。

MICr-P 軸の両端面から油の流出を防ぐ目的で端から 5mm の幅だけエッチングしない軸 (No.10 および 11) も作成した。

軸受: 図 3-5 の形状にアルミニウム (Al), 黄銅 (Bs), りん青銅 (PB), 銅系含油 (SBK) およびテフロン (PTFE) の材料で試験用軸受を作成した。また, 図 3-6 に油みぞを有するホワイトメタル (WJ) 軸受の形状寸法を示した。ホワイトメタル軸受の裏金は炭素鋼である。

各軸受材料の硬さを表 3-1 に示した。

表 3-1 軸受材料の硬さ

軸受材料	硬さ (Hv)	JIS 材料記号表示	JIS 相当(旧)
Al	42	Al B2	H 4163
Bs	168	BsBF2-1/2H	H 3423
PB	213	PBB2-1/2H	H 3741
SBK	199	SBK1112	B 1581
WJ	37	WJ 1	H 5401
PTFE	—	—	—

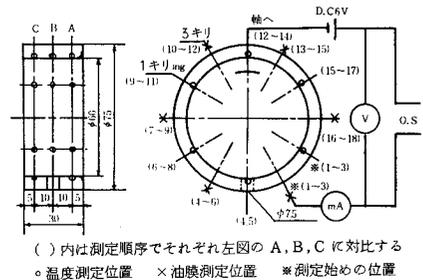


図 3-5 軸受の形状

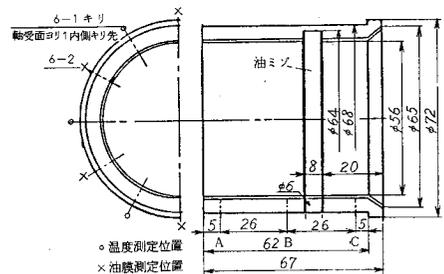


図 3-6 軸受の形状
(ホワイトメタル軸受)

軸受には前章 2-2 節と同様に, 温度測定のために 1mm φ, 深さ 6.5mm の穴を軸方向に 3 列, 円周方向に 6 点 計 17 個所 (送油穴位置を除く) あけた。油膜厚さ測定位置には 3mm φ 穴を軸方向に 3 列, 円周方向に 6 点, 計 18 個所あけ, 1.6mm φ, 長さ 10mm の銅線にエンパイヤチューブをかぶせて周囲と絶縁したものを穴に取付けた。

実験に用いた軸と軸受の組合せ, 図 3-1 (b) の装置において同時に試験する軸の組合せ, 軸と軸受の取付すきまおよび実験条件を表 3-2 に示した。

表3-2 軸と軸受の組合せおよび実験条件

	軸 と 軸 受							実 験 条 件								
	軸		軸受材料		直径すきま	多孔率	多孔率	組合せ	記号	荷重	回転速度	送油量	測定時間			
	No	種 別	No	種 別	μm	約 (%)	みぞ幅 μm pit数個/mm ²							kg/cm ²	rpm	cc/min
な じ み 性	1	MICr	1	A1	72	-	-	A(C)	▲	無負荷	1000 2000 3000	1000	60 +30 +30			
	2	MICr	1	Bs	65	-	-	B	●	20						
	3	MICr-P(C)	2	A1	72	42	13~30	C	△	40						
	4	MICr-P(P)	2	Bs	71	44	112	B	○	60						
	5	S50C	3	A1	72	-	-	A	▲	80						
	6	S50C	3	Bs	65	-	-	C	●	100						
ポ ラ ス ク ロ ム の タ イ プ	7	MICr-P(C)	4	Bs	96	34	9~29	a	⊙	無負荷	1000	500	60			
	8	MICr-P(C)	5	Bs	68	50	21~30	b	◇	50						
	9	MICr-P(C)	6	Bs	45	39	9~30	c	□	100						
	10	MICr-P(C)	7	Bs	78	39	19~20	c	⊗							
	11	MICr-P(P)	8	Bs	75	45	116	a	⊕							
	12	MICr-P(P)	9	Bs	52	40	102	b	○							
	13	MICr	1	PB	46	-	-	d	●	無負荷				1000	500	60
	14	MICr-P(C)	2	PB	32	32	8~25	e	⊙	50						
	15	MICr-P(P)	3	PB	51	51	130	d	○	100						
	16	S50C	4	PB	38	-	-	e	●							
	17	MICr	1	SBK	43	-	-	f	●	無負荷				1000	0.35 吸上	60
	18	MICr-P(C)	2	SBK	47	35	4~33	g	⊙	50						
19	MICr-P(P)	3	SBK	41	46	119	f	○								
20	S50C	4	SBK	44	-	-	g	●								
21	MICr	1	WJ	50	-	-	i	●	無負荷	1000	1000 600 200	60				
22	MICr-P(C)	2	WJ	51	12	2~8	i	⊙	50							
23	MICr-P(P)	3	WJ	50	56	143	h	○	100							
24	S50C	4	WJ	52	-	-	h	●								
25	MICr	1	PTFE	170	-	-	j	●	無負荷 2.8	1000	100 50 20	60				
26	S50C	2	PTFE	175	-	-	j	●	5.6							
油 穴 位 置	27	MICr	10	Bs	48	-	-	k	●	無負荷 0.3	1000	18.5	60			
	28	MICr-P(C)	11	Bs	55	10	3~5	k	⊙	2.8						

註 (1) 組合せ, A, B, C は試験機の左右に取付け同時に測定したものを示す。
 (2) 種別で MICr-P(C), MICr-P(P) の () 中はボラスクロムのチャンネル, またはピンポイントタイプを意味する。
 また, (C₁), (P₁) は両端5mm エッチングしないもの。

この表中、組合せ欄の記号が同じ軸は同時に試験したことを意味する。たとえば、MICr 軸 (No. 1) と S 50 C 軸 (No. 5) とは装置の左右に同時に取付けて試験したので、両者に A の記号をつけている。

2.3 温度測定方法

温度測定は図 3-5 および図 3-6 の軸受に設けた測定用穴に長さ 1000 mm の銅 (0.2 mm ϕ)-コンスタンタン (0.35 mm ϕ) 熱電対を取付けて行った。各測定点の温度は多点測定切替用 2 段 2 ポール 1 2 接点スイッチを使用し、冷接点を通じてミリボルト計で測定した。測定後 mV- $^{\circ}$ C 曲線で電圧を温度に換算した。測定順序は図 3-5 の A 列※位置より数字の順に A, B, C 列, 次に軸の回転方向の列をそれぞれ 10 秒間隔で測定し、さらに 10 分後 A 列※位置より測定を繰り返した。始動より 30 分間は測定しながらならし運転し、さらに続けて 30 分間、計 1 時間の温度測定を行った。

軸受のなじみ性に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響を測定する場合は 1000 rpm, 1 時間の測定に続いて 2000 rpm で 30 分, 3000 rpm で 30 分, 計 2 時間の測定を行った。

2.4 油膜厚さ測定方法

図 3-5 に示した電気回路により、第 2 章 2.6 節と同様の方法で油膜厚さの測定を行った⁵⁾。油膜厚さ測定は 30 分経過時と 60 分経過時に図 3-5 に示した数字の順序で※位置より回転方向に測定した。

図 3-7 に油膜厚さ測定時のブラウン管オシロスコープの波形を示す。



図 3-7 油膜厚さ測定時の波形

(a) は軸と軸受間に油膜が存在している場合で、図中のSは基線からの移動距離を示す。

(b) は油膜が時々切れる場合の波形である。

(c) は油膜が切れて軸と軸受が接触した場合の波形である。

3. 実験結果および考察

3.1 軸受のなじみ性に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響

図3-8は無負荷と100 kg/cm² 負荷時のアルミニウム軸受と黄銅軸受の軸受温度上昇の時間的変化である。温度表示は実際の軸受温度から室温を差し引いたものである。また実験値は軸受の各測定点における測定値を算術平均した値である。

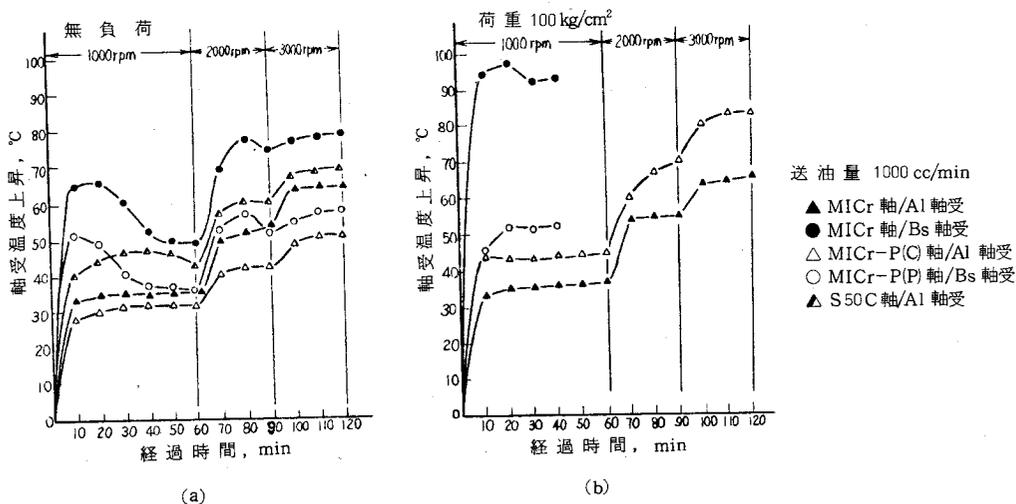


図3-8 経過時間と軸受温度上昇

無負荷の場合 (a) において、始動後約 15 分まで、黄銅の軸受温度は急に上昇し、その後時間が経過すると徐々に軸受温度は下り、始動後約 40 分経過してほぼ定常状態になる。回転速度を 1000 から 2000 rpm に増加させると軸受温度は上昇し約 20 分後に最高となったが、その後低くなるような傾向を示した。さらに回転速度を 2000 から 3000 rpm に増加させても 2000 rpm の軸受温度より少し高

い温度で安定した。

一方、アルミニウム軸受では S 50 C 軸以外のめっき軸に対して、始動後約 20 分で軸受温度は定常状態になる。回転速度を増加させると軸受温度は高くなるが、黄銅軸受にみられたような急激な温度上昇と引き続く降下の傾向は示さない。

荷重 100 kg/cm² の場合 (b) において、MICr 軸と黄銅軸受との組合せは、20 分経過時の実際の軸受温度が 120℃ を超え、その後、約 10 分経過すると軸受温度は無負荷の場合と同様に低くなる傾向を示す。しかし、軸受温度が非常に高いため実験を途中で中止した。

このように、一般に黄銅軸受はアルミニウム軸受よりも軸受温度上昇が激しく、そのうえ定常状態になるまでの時間も長い。したがってなじみ性が悪いと考えられる。また、S 50 C 軸とアルミニウム軸受との組合せでは無負荷時でも比較的軸受温度が高く、めっき軸を用いた場合よりも悪い結果を示した。

なじみ性の悪い黄銅軸受において、MICr 軸と MICr-P (pit) 軸とを比べると、荷重を増加させた場合でも MICr-P (pit) 軸の軸受温度は MICr 軸のそれに比べて低い。このことからポーラスクロムめっきは潤滑に役立っていると思われる。

図 3-9 は各回転速度における荷重と軸受温度上昇について示したものである。

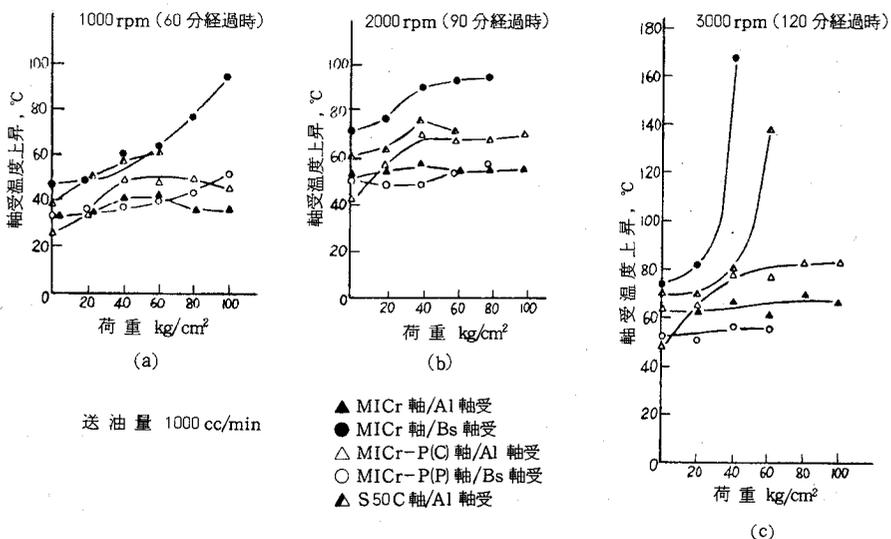


図 3-9 荷重と軸受温度上昇

一般に荷重を増加させた場合、MICr 軸に対する黄銅軸受の組合せでは MICr 軸とアルミニウム軸受の組合せよりも軸受温度は高くなった。MICr-P (pit) 軸と黄銅軸受の組合せでは、1000 rpm、100 kg/cm² において、MICr-P (chan) 軸とアルミニウム軸受の組合せよりもわずかに軸受温度が高かったが、回転速度を 1000 から 2000 および 3000 rpm に増加させた場合には他の軸に対するよりも低い軸受温度となった。このように、黄銅軸受に対して MICr 軸では、荷重を増加させると軸受温度が非常に高くなり、MICr-P (pit) 軸では急に軸受温度が高くなることはなく、軸受の硬さ、材質などがめっき軸とのなじみに関係があるように思われる。実験後の軸受面を観察すると、黄銅軸受では焼付を生じたような変色個所あるいは目づまりがあるのに対して、アルミニウム軸受面は各所に輝面摩耗を起こしている。この輝面摩耗は硬い軸で軟らかく延性の大きいアルミニウム軸受面を強くこすったことによる塑性変形のためと思われる。

3.2 軸受温度に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響

MICr-P 軸のポーラスクロムのタイプが軸受温度に及ぼす影響を調べるため、なじみ性の悪い黄銅軸受を主として用いた。同時にりん青銅軸受、銅系含油軸受⁶⁾ およびホワイトメタル軸受⁷⁾ も用いて軸受温度を測定した。この結果を、S50C 軸と MICr 軸にりん青銅軸受、銅系含油軸受、ホワイトメタル軸受および PTFE 軸受⁸⁾ を組合せて得た軸受温度と比較し、ポーラスクロムのタイプと軸受材料の関係について検討する。

図 3-10 に黄銅軸受の温度上昇を経過時間について示した。

無負荷の場合 (a) において、端をエッチングしない MICr-P (chan 端) 軸 No.10 と MICr-P (pit 端) 軸 No.11 とを比べると、前者は始動後約 10 分経過時に軸受温度が急に上昇し、局部的に凝着を起こす傾向を示した。これは MICr-P (pit 端) 軸よりも軸端からの油の飛散が多かったためと思われる。MICr-P (pit 端) 軸では軸受温度が速く定常状態になり、しかもその温度は低く凝着するような傾向は示さなかった。全表面をエッチングした MICr-P (chan) 軸 No.7~9 と MICr-P

(pit) 軸 No.12 とを比べると、MICr-P (pit) 軸の軸受温度は chan 軸 No.7 と 8 軸よりも高く、No.9 軸よりも低い。チャンネル幅の異なるみぞが混在している No.7 および 9 軸とみぞ幅の太い No.8 軸とを比較すると、No.8 軸は No.7 軸と No.9 軸の中間の軸受温度となる。これがチャンネルみぞ幅による影響か、軸受すきまによる影響かは明らかでない。

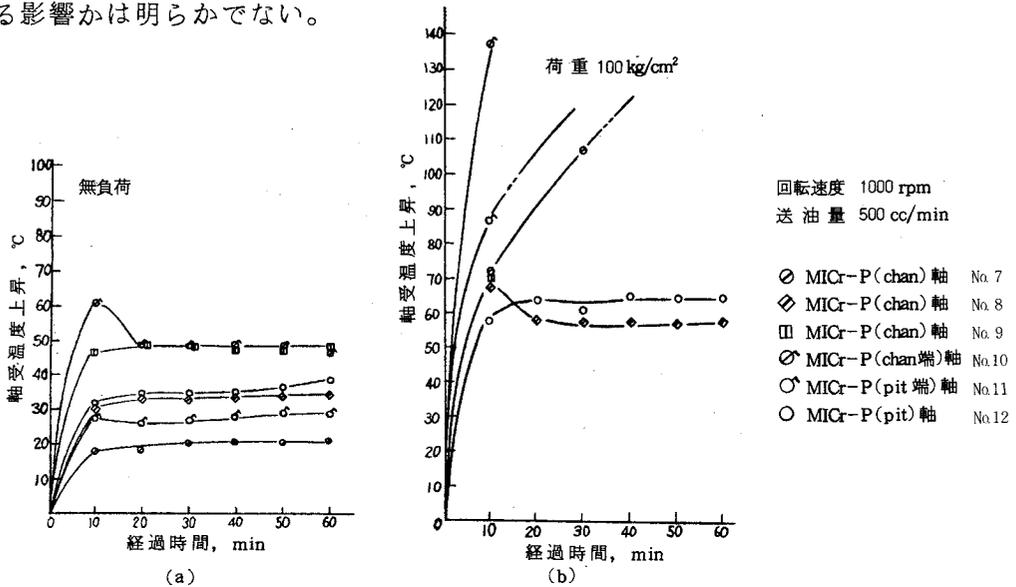


図3-10 経過時間と軸受温度上昇(黄銅軸受)

荷重 100 kg/cm^2 の場合 (b) において、10分経過後 MICr-P (chan 端) 軸は焼付を生じ、また MICr-P (pit 端) 軸も軸受温度が非常に高くなったので実験を中止した。端をエッチングしない軸 (No. 10 および 11) はエッチング部と非エッチング部との境界でわずかに段がつき、そのため悪い結果を示したと考えられる。MICr-P (chan) 軸 No. 7 および 8 と MICr-P (pit) 軸 No. 12 とを比べると、No. 7 軸は 30分経過時に軸受温度が 120°C を超え、また No. 8 軸は 10分経過時の実際の軸受温度が 85°C にもなり凝着を起こす恐れがある。MICr-P (pit) 軸では 10分程度で、軸受温度は定常状態になる。

以上の結果から、ピンポイントタイプのほうがチャンネルタイプよりも軸受温度は速く定常状態になりすぐれている。

図3-11 にりん青銅軸受の温度上昇を経過時間について示した。

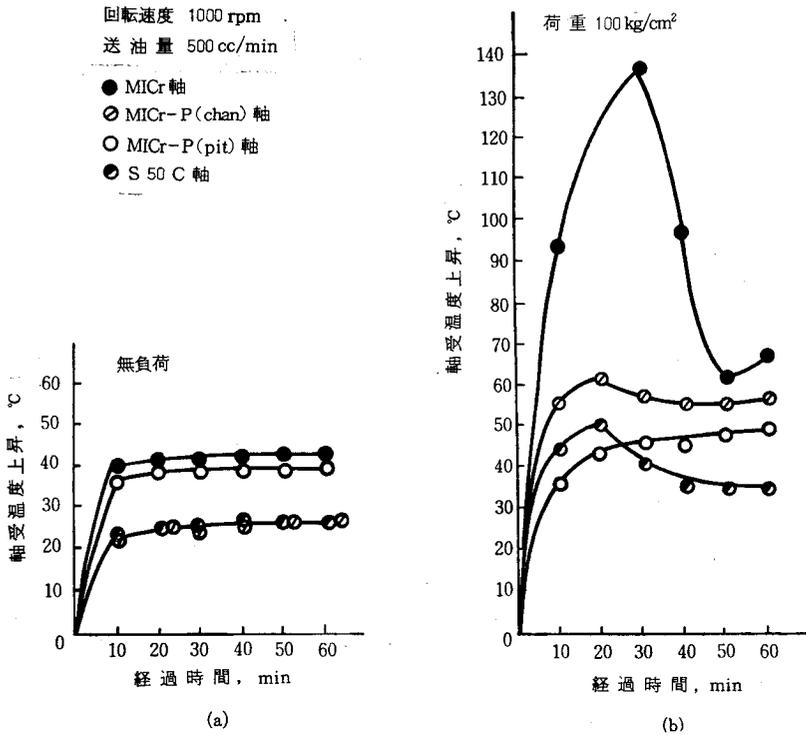


図3-11 経過時間と軸受温度上昇(りん青銅軸受)

無負荷の場合(a)において、MICr-P (chan)軸では最も軸受温度が低く、MICr 軸では高い。荷重 100 kg/cm² の場合(b)において、MICr-P (pit)軸はめっき軸の中で最も軸受温度が低く、MICr 軸は無負荷の場合と同様に高い。特に30分経過時の測定時における軸受温度が140℃を超え、局部的な焼付を起していると考えられる。めっきしないS 50 C軸の60分経過時の軸受温度はMICr-P (pit)軸よりも低いが、20分経過時までには高いことからなじみ性はMICr-P (pit)軸よりよくないと考える。

以上のごとく、りん青銅軸受の温度に対してポーラスクロムのタイプの影響は大きく、チャンネルタイプよりもピンポイントタイプのほうがすぐれている。

図3-12に焼結合油軸受の温度上昇を経過時間について示した。無負荷の場合(a)において、めっき軸のうちでMICr-P(pit)軸で最も軸受温度が低く、MICr-P(chan)軸で高い。荷重50 kg/cm²の場合(b)において、MICr軸で最も軸受温度が低い。

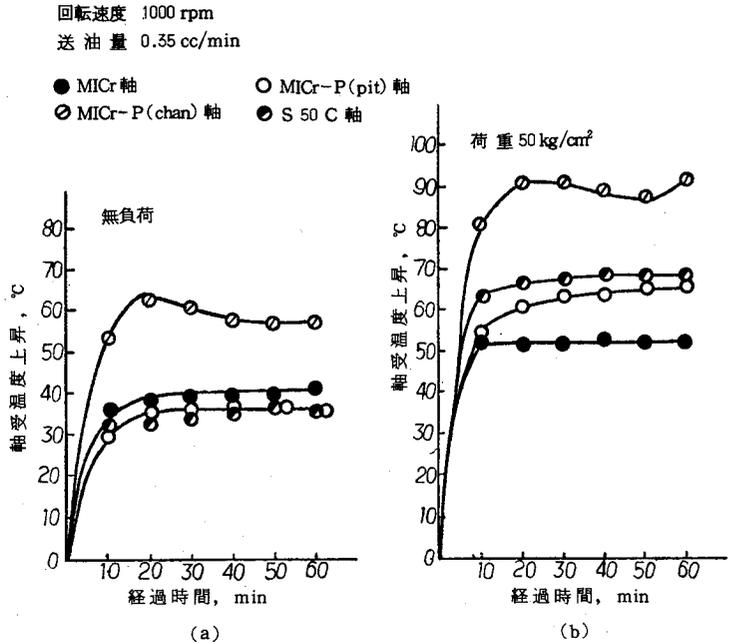


図3-12 経過時間と軸受温度上昇(焼結合油軸受)

MICr-P(chan)軸では軸受温度が最も高く、30分経過後わずかに低くなるが、50分経過後温度はさらに上昇する傾向を示している。

図3-13にホワイトメタル軸受の温度上昇を経過時間について示した。送油量は1000 cc/minの場合である。無負荷の場合(a)において、MICr-P(pit)軸で最も軸受温度が低

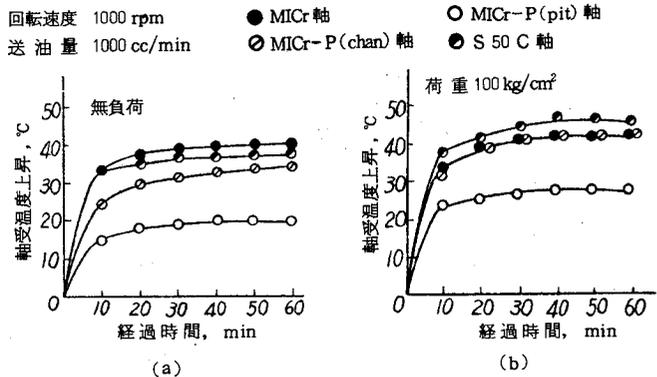


図3-13 経過時間と軸受温度上昇(ホワイトメタル軸受)

く、続いてMICr-P(chan)軸、S 50 C軸、MICr軸の順序となり、初期なじみの悪いMICr軸ではS 50 C軸よりも悪い結果を示している。荷重100 kg/cm²の場合(b)において、MICr-P(pit)軸で最も軸受温度が低く、MICr軸とMICr-

P (chan) 軸とはほとんど同じである。無負荷時において S 50 C 軸よりも軸受温度の高かった MICr 軸は荷重 100 kg/cm^2 においてはわずかに低い値となった。

図3-14 に荷重と送油量を変化させた場合のホワイトメタル軸受の60分経過時の軸受温度上昇を示した。

軸受温度は送油量の減少、荷重の増加に従って一般に高くなる。

MICr-P (pit) ではいずれの荷重あるいは送油量においても、他の軸よりも軸受温度が低くすぐれている。

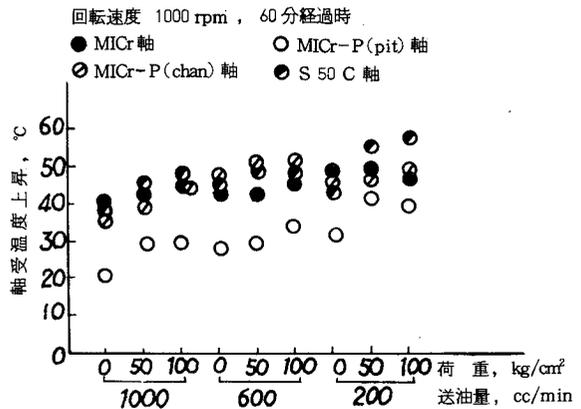


図3-14 荷重、送油量と軸受温度上昇 (ホワイトメタル軸受)

図3-15 に PTFE 軸受の温度上昇を経過時間について示した。無負荷の場合 (a) において、送油量が少ないと軸受温度は高く、その傾向は MICr 軸のほうが大である。

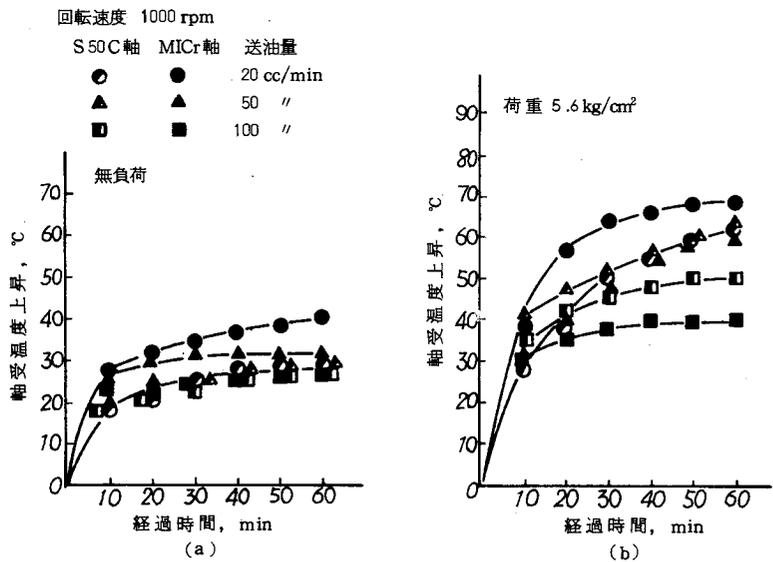


図3-15 経過時間と軸受温度上昇 (PTFE 軸受)

荷重 5.6 kg/cm^2 の場合において、送油量が少ないと MICr 軸のほうが S 50 C 軸よりも軸受温度は高く、送油量が多いと MICr 軸のほうが低くなる。このように MICr 軸と PTFE 軸受の組合せでは冷却を十分行う必要があるといえる。

実験終了後の MICr 軸表面を観察すると、軸表面には段がつくほどクロムの摩耗が生じた。これは軟かい PTFE 軸受にクロムの摩耗粉が押し込まれ、Cr と Cr の接触を行ったためと思われる。

3.3 油膜厚さに及ぼすポーラスクロムのタイプの影響

以下の図中に示す油膜厚さは軸受各測定点における測定値を算術平均した値である。

図3-16 に黄銅軸受における60分経過時の荷重に対する油膜厚さの変化を示した。

MICr-P (chan) 軸 No.7
ではどの荷重においても油膜厚さが最も薄い。

MICr-P (chan) 軸 No.8
では、荷重が増加しても無負荷の場合と油膜厚さは変わらず全般に薄い。

MICr-P (chan) 軸 No.9
では無負荷の油膜厚さは厚いが、荷重の増加とともに薄くなっている。

両端をエッチングしない MICr-P (chan 端) 軸 No.10 でも No.9 と同様に荷重の増加とともに油膜厚さは薄くなり、100 kg/cm² の場合には MICr-P (chan) 軸 No.7 に近い値を示す。両端をエッチングしない MICr-P (pit 端) 軸 No.11 では荷重が増加しても油膜厚さは薄くならず、いずれの軸よりも油膜は厚い。

MICr-P (pit) 軸 No.12 は荷重の増加とともに油膜厚さが薄くなってはいるが、100 kg/cm² 時の油膜厚さが 20 μm で他の軸の場合よりも厚い。以上のことから MICr-P (pit) 軸のほうが MICr-P (chan) 軸よりも油膜厚さは厚く潤滑をよくしているといえる。

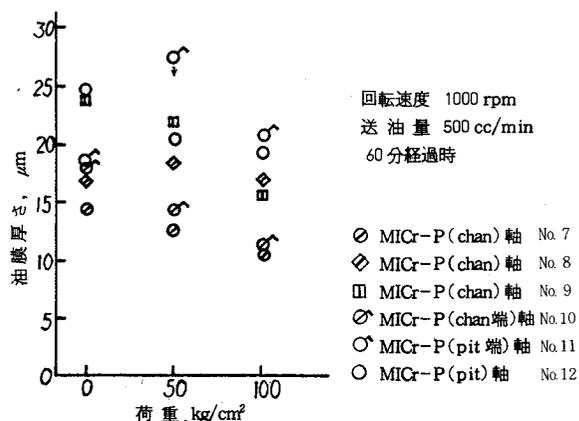


図3-16 荷重と油膜厚さ (黄銅軸受)

図3-17 にりん青銅軸受における60分経過時の荷重に対する油膜厚さの変化を示した。

MICr-P (chan) 軸ではめっき軸の中で最も油膜厚さが薄い。しかし、荷重を増加した場合に油膜厚さは少し厚くなっている。

MICr-P (pit) 軸では荷重の増加とともに油膜厚さは薄くなるが、100 kg/cm² 時においても28 μmの油膜厚さがあるため、潤滑のよいことがわかる。

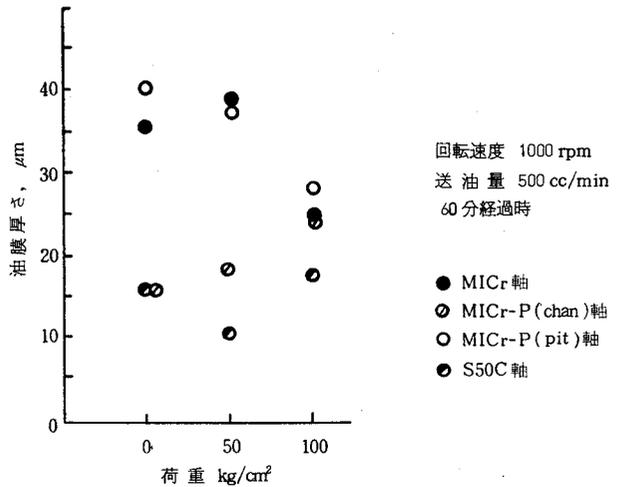


図3-17 荷重と油膜厚さ(りん青銅軸受)

図3-18 に含油軸受における60分経過時の軸の種類と油膜厚さについて示した。

MICr-P (chan) 軸と MICr-P (pit) 軸での油膜厚さの違いはほとんどないが、負荷50 kg/cm² 時に MICr-P (pit) 軸のほうがわずかに厚い。

無負荷時よりも50 kg/cm² において油膜厚さが厚くなっ

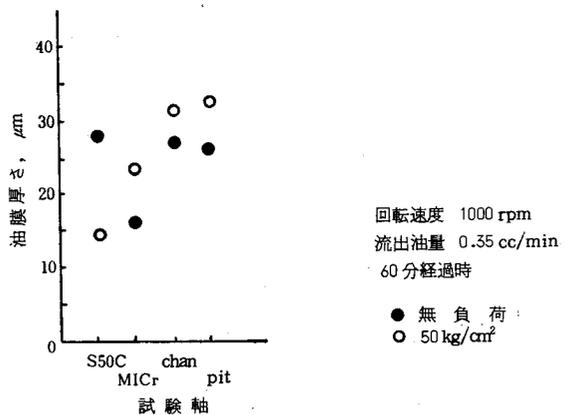


図3-18 軸と油膜厚さ(含油軸受)

ているのは、軸が軸受下部にかたよるためその部分の油膜厚さは薄くなるが、それ以外の部分では油膜厚さが厚くなり、全測定値の平均値が厚くなったものと思われる。

図3-19 に荷重と送油量を変化させた場合のホワイトメタル軸受における60

分経過時の油膜厚さを示した。

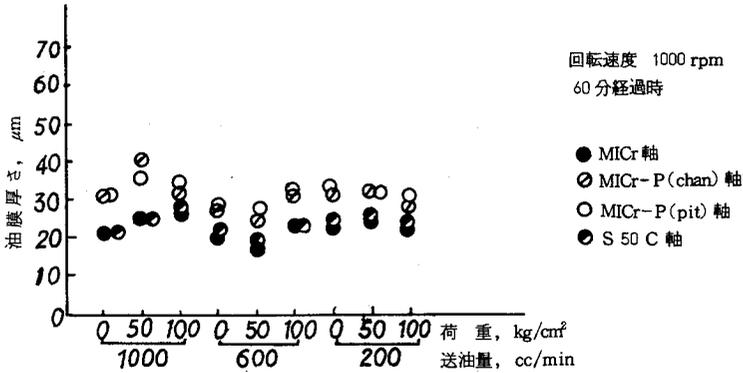


図3-19 荷重、送油量と油膜厚さ（ホワイトメタル軸受）

各送油量、荷重において、MICr軸とS50C軸では油膜厚さがほとんど同じか、あるいは少しMICr軸のほうが薄い程度で大差はない。

MICr-P(chan)軸とMICr-P(pit)軸とでも油膜厚さはあまり変わらない。しかしMICr軸とMICr-P軸とではMICr-P軸のほうが約 $10\mu\text{m}$ ぐらい油膜は厚く、潤滑のよいことがわかる。

3.4 軸受温度と油膜厚さに及ぼす油穴位置の影響

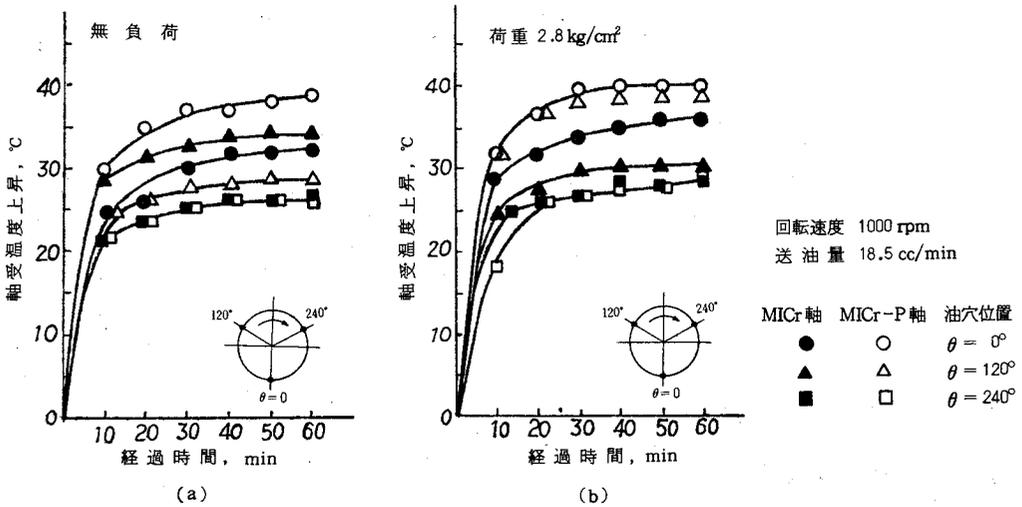


図3-20 経過時間と軸受温度上昇（黄銅軸受）

図3-20に黄銅軸受の油穴位置を変化させた場合⁹⁾の軸受温度上昇を経過時間について示した。

無負荷時(a)および2.8 kg/cm²時(b)において、MICr軸、MICr-P軸とも油穴の位置240°の軸受温度が低くてよい。油穴位置0°と120°における軸受温度は荷重2.8 kg/cm²の場合にMICr-P軸のほうが高い。これは送油量が18.5 cc/minと非常に少ないため、潤滑油による冷却よりも常に温度の高い油がポアラス中に存在するためであると思われる。

図3-21に60分経過時の油穴位置に対する軸受温度上昇を示した。油穴位置0°では軸の種類、荷重によって軸受温度が異なるが、他の油穴位置の場合よりも高い。そして240°では荷重の増加にともなって軸受温度は高くなる。以上の結果から油穴位置は120°~240°の範囲に設けるとよい。

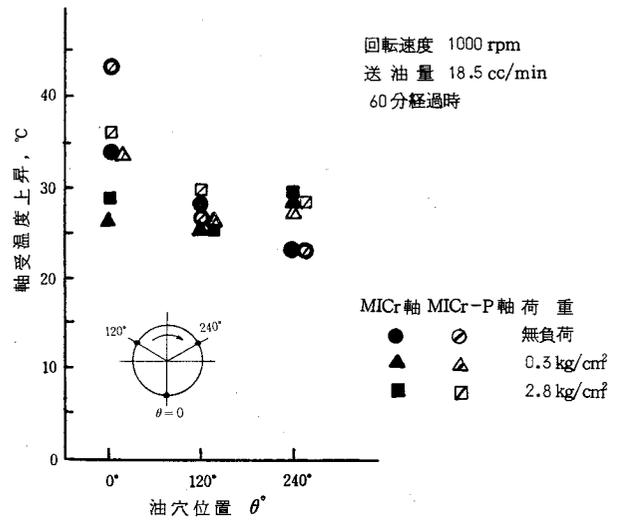


図3-21 油穴位置と軸受温度上昇(黄銅軸受)

図3-22に60分経過時の油膜厚さを油穴位置について示した。

油穴位置0°では他の油穴位置よりも油膜厚さは薄く、240°では荷重が増加しても油膜厚さは厚い。MICr軸とMICr-P軸とを比べると、MICr-P軸のほうが油膜厚さは一般に厚く、送油による冷却作用は少ないにしても潤滑性のよいことは明らかである。

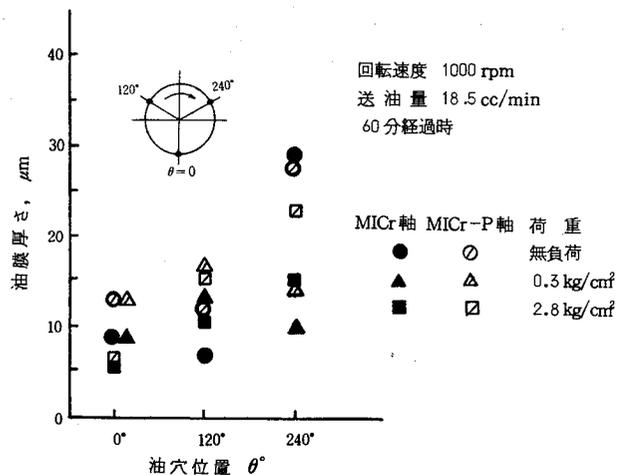


図3-22 油穴位置と油膜厚さ(黄銅軸受)

4. 結 論

クロムめっき軸、ポーラスクロムめっき軸に対する軸受温度上昇は軸受の硬さや材質に大きく影響されるように思われる。本実験で用いた各種の軸受材料において、荷重、送油量はすべて同じではないが、ポーラスタイプが軸受のなじみあるいは油膜厚さに及ぼす影響は次のごとく明らかになった。

- (1) 黄銅軸受とクロムめっき軸との組合せでは回転速度や荷重を増加させると軸受温度は急に上昇し、凝着を起こす恐れが常にあり、なじみ性も悪い。

ポーラスクロムめっき軸との組合せでは、ピンポイントタイプのほうがチャンネルタイプよりも軸受温度は低く、油膜厚さも厚い。また、ピンポイントタイプのほうがチャンネルタイプよりも黄銅の摩耗粉による目づまりは少なくすぐれている。

- (2) アルミニウム軸受とクロムめっき軸との組合せでは回転速度や荷重を増加させても焼付くようなことはない。また、ポーラスクロムめっき軸は軟らかいアルミニウム軸受を削るが、クロムめっき軸ではそのような恐れも少ない。

- (3) りん青銅軸受とクロムめっき軸との組合せでは焼付きやすく、荷重を増加させた場合に急に軸受温度が高くなり、油膜厚さが厚くてもあまりよい結果を示さない。しかしめっき軸のうちではピンポイントタイプポーラスクロムめっき軸で軸受温度が低く、油膜厚さが厚く最もすぐれている。

- (4) 含油軸受とクロムめっき軸との組合せではポーラスクロムめっき軸よりもクロムめっき軸の場合に油膜厚さは薄いですが、軸受温度は低くすぐれている。これは軸受面が多孔質であるため適当な給油が行なわれているにもかかわらず、軸のポーラスがかえって潤滑油の流れに悪影響を及ぼしているためではないかと考えられる。

- (5) ホワイトメタル軸受とクロムめっき軸との組合せでは荷重よりも送油量の軸受温度への影響が大である。クロムめっき軸とポーラスクロムめっき軸とでは

ポーラスクロムめっき軸のほうがよく、ポーラスクロムのタイプではピンポイントタイプのほうがチャンネルタイプよりも軸受温度は低く、油膜厚さも厚くてよい。

- (6) PTFE 軸受とクロムめっき軸との組合せでは、潤滑油のほとんどが水であったため送油量の多いほうが軸受温度をより低く保つことができる。荷重が増加し、送油量が少ない場合にクロムめっき軸は S 50 C 軸に比べて軸受温度が高く、しかも実験終了後の MICr 軸表面を観察すると、軸表面には段がつくほど摩耗が多かった。したがって、常時回転する軸には PTFE 軸受は不適當である。
- (7) 油穴の位置 $\theta = 120^\circ$ では荷重を増加させても軸受温度、油膜厚さへの影響は少ない。 $\theta = 240^\circ$ では荷重を増加させた場合、軸受温度よりも油膜厚さの変化が大きい。すべての油穴の位置について比べると $\theta = 0^\circ$ が最も悪く、 $\theta = 120^\circ$ と 240° では両者であまり相違はないが、荷重の変化に対して軸受温度、油膜厚さへの影響の少ない $\theta = 120^\circ$ のほうがすぐれていると思われる。
- (8) なじみ性の観点から検討すると、クロムめっき軸は初期なじみが悪いためならし運転を長くすることが望ましい。軸受材料としては第 2 章のケルメット軸受や本章の銅系含油軸受のほうが他の軸受よりもすぐれている。
- (9) ポーラスクロムのチャンネルみぞについて示すと、細いみぞで数多く分布しているほうが太いみぞで数少なく分布しているよりも軸受温度は低く、油膜厚さも厚くてよい。

ポーラスクロムめっきのチャンネルタイプとピンポイントタイプとでは、ピンポイントタイプのほうがどの軸受材料に対してもよい。そしてピットの大きさが小さく、多孔率で 40% ぐらいまでが適當と思われる。

したがって、軸にポーラスクロムめっきをする場合にはピンポイントタイプが適している。

文 献

1. D. Clayton : Proc. Inst. Mech. Engr., 155 (1946) 41.
2. 軸受潤滑便覧編集委員会 : 軸受・潤滑便覧, 日刊工業 (1961) 109.
3. 佐々木外喜雄, 杉本 豊, 長江 茂 : 日本機械学会誌, 55, 402 (1952) 463.
4. 岸 松平 : クロムめっき, 日刊工業 (1964) 82.
5. 肥田 昭, 市村雄弘 : 潤滑, 11. 10 (1966) 437.
6. 肥田 昭 : 近畿大学理工学部研究報告, 13 (1978-3) 91.
7. 肥田 昭, 市村雄弘 : 日本機械学会金沢地方講演論文集 (1966) 75.
8. 肥田 昭 : 潤滑, 21. 6 (1976) 384.
9. 肥田 昭 : 近畿大学理工学部研究報告, 13 (1978-3) 81.

第 4 章 往復動クロムめつき軸の軸受温度と潤滑

1. 緒 言

第 2 および 3 章では回転軸にクロムめつきおよびポーラスクロムめつきを施した場合、これらが軸受性能に及ぼす影響について検討したが、往復動軸についても回転軸と同様な傾向を示すかどうか調べておく必要がある。

本章では直径に対して長さの短い種々のクロムめつき軸と材質の異なる 5 種類の軸受（鋳鉄，鋼，黄銅，りん青銅およびアルミニウム）とをそれぞれ組合せて用いた。潤滑方法は油潤滑，油と空気の混合潤滑および空気潤滑とした。そして、各潤滑方法のもとでめつき軸を往復動させ、軸受の温度上昇，温度分布，油膜厚さなどを測定し，軸受温度に及ぼす潤滑方法とポーラスクロムのタイプの影響，油膜厚さに及ぼす軸と軸受材料の組合せの影響などについて検討した。また，往復動内燃機関のクロムめつきを施したシリンダとピストンリングに関する研究報告^{1,2,3)}の結果が本実験の結果と適合するかどうかを検討した。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

軸に往復動を与えるため，200 W，1700 rpm のモータにバリダイアプーリを取付け，V ベルトで図 4-1 に示したようなクランク軸を 1000 rpm で回転させることにより，軸受内にそう入した供試軸を連接棒を通じて 1 m/s の平均速度で 30 mm 往復動させる。

往復動中回転しないよう，供試軸は取付

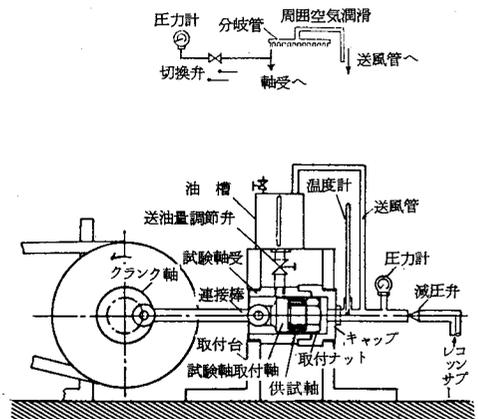


図 4-1 装 置

軸に2本のピンで止め、さらにナットで締付けて固定する。

2.2 供試軸と軸受の形状寸法

図4-2の形状寸法に作成したS50C (Hv 268)の供試軸の表面に第1章、表1-1の条件でめっきを施し、MICr軸、MICr

-P (chan)軸およびMICr-P (pit)軸を作成した。

めっき加工後、液体ホーニングで呼び寸法30mmφ、

表面あらさ0.4~0.8 μm R_{max}に仕上げた。MICr-

P軸表面を顕微鏡で直接観察し、ピンポイントタイ

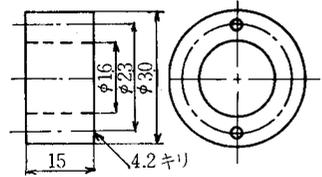


図4-2 供試軸

プについては1mm²当りのピット数、チャンネルタイプについてはチャンネルみぞ幅寸法を測定し、結果を後出の表4-2に示した。往復動部分(取付軸、供試

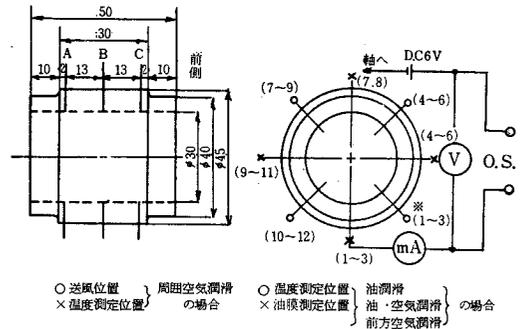
軸、座金、ナットなど)の重量は189

gである。

軸受は図4-3に示した形状寸法に
 鋳鉄(FC23)、鋼(SS50)、黄銅
 (BsBF)、りん青銅(PBB2)お
 およびアルミニウム(AIJ2)で作成した。

これらの材料の化学成分と硬さを表

4-1に示した。



○送風位置 } 間隙空気潤滑
 ×温度測定位置 } の場合
 ○温度測定位置 } 油潤滑
 ×油膜測定位置 } 油・空気潤滑 } の場合
 前方空気潤滑

図4-3 軸受の形状

表4-1 軸受材料の化学成分と硬さ

化学成分%	C	Si	Mn	P	S	Fe	硬さ(HRB)
軸受							
FC 23	3.66	1.81	0.53	0.200	0.086	残	79.95
SS 50	0.08	0.18	0.31	0.041	0.047	残	96.75
化学成分%	Cu	Sn	Pb	Zn	P		硬さ(HRB)
軸受							
Bs BF	59.12	0.44	1.46	38.48	-	-	63.75
PBB 2- $\frac{1}{2}$ H	94.23	4.64	-	-	0.05	-	91.75
化学成分%	Cu	Si	Mn	Zn	Fe	Al	硬さ(HRB)
軸受							
AIJ 2	3.72	0.24	0.38	0.13	0.45	残	72.50

軸受には温度測定のため1mmφ、深さ6.5mmの穴を軸方向に3列、円周方向に4点、計12箇所あけた。また油膜厚さ測定のため2mmφ穴を軸方向に3列、円周方向に4点計11箇所（送油穴位置を除く）温度測定位置と45°ずらせてあけた。

周囲から空気を送る軸受には上記の軸受と同様に温度測定用の穴を12箇所あけ、さらに送風のために1.5mmφ穴を軸方向に3列、円周方向に4点計12箇所、温度測定位置と45°ずらせてあけ、この穴に外径1.5mm、内径1mmの送風用銅管を取付けた。

軸と軸受の組合せ、軸受直径すきまおよびポーラスクロムめっきの多孔率を表4-2に示した。

表4-2 軸と軸受の組合せ

潤滑法		油, 油-空気, 前方空気			周囲空気		
軸	軸受	軸受すきま (μm)	多孔率 約 (%)	多孔率	軸受すきま (μm)	多孔率 約 (%)	多孔率
				みぞ幅, (μm) または ピット数(個/ mm^2)			みぞ幅, (μm) または ピット数(個/ mm^2)
S50C	FC 23	41.5	—	—	62.0	—	—
	SS 50	52.5	—	—	68.0	—	—
	BsBF	47.5	—	—	65.0	—	—
	PBB 2	45.0	—	—	—	—	—
	ALJ 2	40.5	—	—	62.8	—	—
MICr	FC 23	19.5	—	—	38.5	—	—
	SS 50	53.0	—	—	57.0	—	—
	BsBF	25.5	—	—	36.0	—	—
	PBB 2	31.0	—	—	37.8	—	—
	ALJ 2	19.0	—	—	35.6	—	—
MICr-P (channel)	FC 23	27.0	32	1.6~31.6	31.8	16	5.0~11.7
	SS 50	36.0	68	33.0~45.8	58.6	12	2.5~10.0
	BsBF	18.9	45	12.5~33.0	31.0	22	8.3~15.0
	PBB 2	41.0	18	4.2~14.2	31.1	18	3.3~15.0
	ALJ 2	30.8	19	4.2~15.0	30.0	18	5.8~12.5
MICr-P (pinpoint)	FC 23	49.0	48	122	35.0	39	99
	SS 50	54.0	58	146	59.1	31	80
	BsBF	36.0	52	131	32.0	46	120
	PBB 2	42.5	54	138	35.0	47	121
	ALJ 2	46.5	62	155	35.0	42	106

2.3 温度測定方法

温度測定は図4-3の軸受に設けた温度測定用穴に、長さ1000mmの銅(0.2mmφ)-コンスタンタン(0.3mmφ)熱電対を補正後取付けた。

各測定点の温度は多点測定切替用2段2ポール12接点スイッチを使用し、冷接点を通じてミリボルト計で測定した。測定後、補正mV-°C曲線で電圧を温度に換算した。測定順序は始動より図4-3のA列※位置よりA,B,C列、次にクランク軸側からみて時計回転方向の列をそれぞれ図中の番号順に10秒間隔で測定し、さらに10分後A列※位置より測定を繰返した。始動より30分間は測定しながらならし運転し、さらに続けて30分間、計1時間の温度測定を行った。

2.4 油膜厚さ測定方法

油膜厚さ測定は図4-3の軸受に設けた油膜厚さ測定用穴に1.0mmφ、長さ1000mmのエナメル被覆銅線を周囲と絶縁して取付け、図の電気回路と切替スイッチとを用いて行った。油膜厚さ測定と校正方法は第2章2.6節、2.7節に示した方法と同じである。

油膜厚さ測定は油潤滑の場合のみ行い、始動後30分、60分経過時の2回測定した。

各測定点の測定間隔は約10秒とした。

2.5 潤滑方法

潤滑方法は油潤滑、油-空気潤滑および空気潤滑とした。

油潤滑の場合は油槽にSAE30番モータオイルを入れ、油量調整弁で送油量が0.5あるいは1.0cc/minになるよう調節し、軸受上部より滴下しながら給油を行った。

油-空気潤滑の場合は圧縮機からの空気を空気だめに入れ、減圧弁でゲージ圧力1kg/cm²に調節し、図4-1に示したように軸受前側(クランクと反対側)に取付けたキャップ中央から空気を送る。これと同時に油槽上部にも空気を送って油面に圧力をかけ、潤滑油の滴下を行い、油-空気潤滑になるようにした。この

場合の空気流量は図4-1の圧力計とキャップ間の6mmφの管内にピトー管を
そう入して測定し、160 l/minの値を得た。したがって軸受内での平均空気速度
は3.7m/sと推定できる。

空気潤滑の場合は軸受前側に取付けたキャップの中央から空気を送る前方送風
方法と、図4-3の軸受周囲に取付けた内径1mmの銅管、12個所から空気を送る
周囲送風方法とを用いた。前方送風の場合は油-空気潤滑で用いた油量調節
弁を閉じ、空気だけを軸受に送った。周囲送風の場合は軸受前側に取付けたキャ
ップを取り除き、図4-1の分岐管と減圧弁側の管とを接続して空気を送った。
軸受に取付けた各送風管内の圧力は分岐管と各送風管の途中にT字管を取付け、
切換弁を用いて圧力計で測定した。空気量は分岐管の手前で測定し、油-空気潤
滑の場合と同じ160 l/minの値を得た。

3. 実験結果および考察

温度測定において、測定時の室温が異なると軸受、潤滑油、空気温度が異なり、
実験後の軸受温度をそのまま比較するのは不相当と考えられる。そこで実験期間
中の平均室温が約26℃であったので、始動前の温度を25℃に補正して図示し
た。なお、以下に示す軸受温度は軸受の各測定点における測定値を算術平均した
値である。

3.1 軸受温度に及ぼす潤滑方法の影響

往復動において、一般に滴下給油法が多く用いられているため、まず油潤滑の
場合の軸受温度を経過時間について示し、次に各潤滑方法における60分経過時
の軸受温度を示した。

図4-4に軸受材料別に油潤滑の場合の軸受温度を経過時間について示した。

鋳鉄軸受(a)において送油量1.0 cc/minのときS50C軸よりもMICr軸で軸
受温度は高いが、送油量が0.5 cc/minになるとS50C軸よりもMICr軸のほう
が軸受温度は低くなる。これは送油量よりもめっき軸のなじみの悪いことに原因

しているように思われる。MICr-P (pit) 軸ではいずれの送油量においても軸受温度は低い。

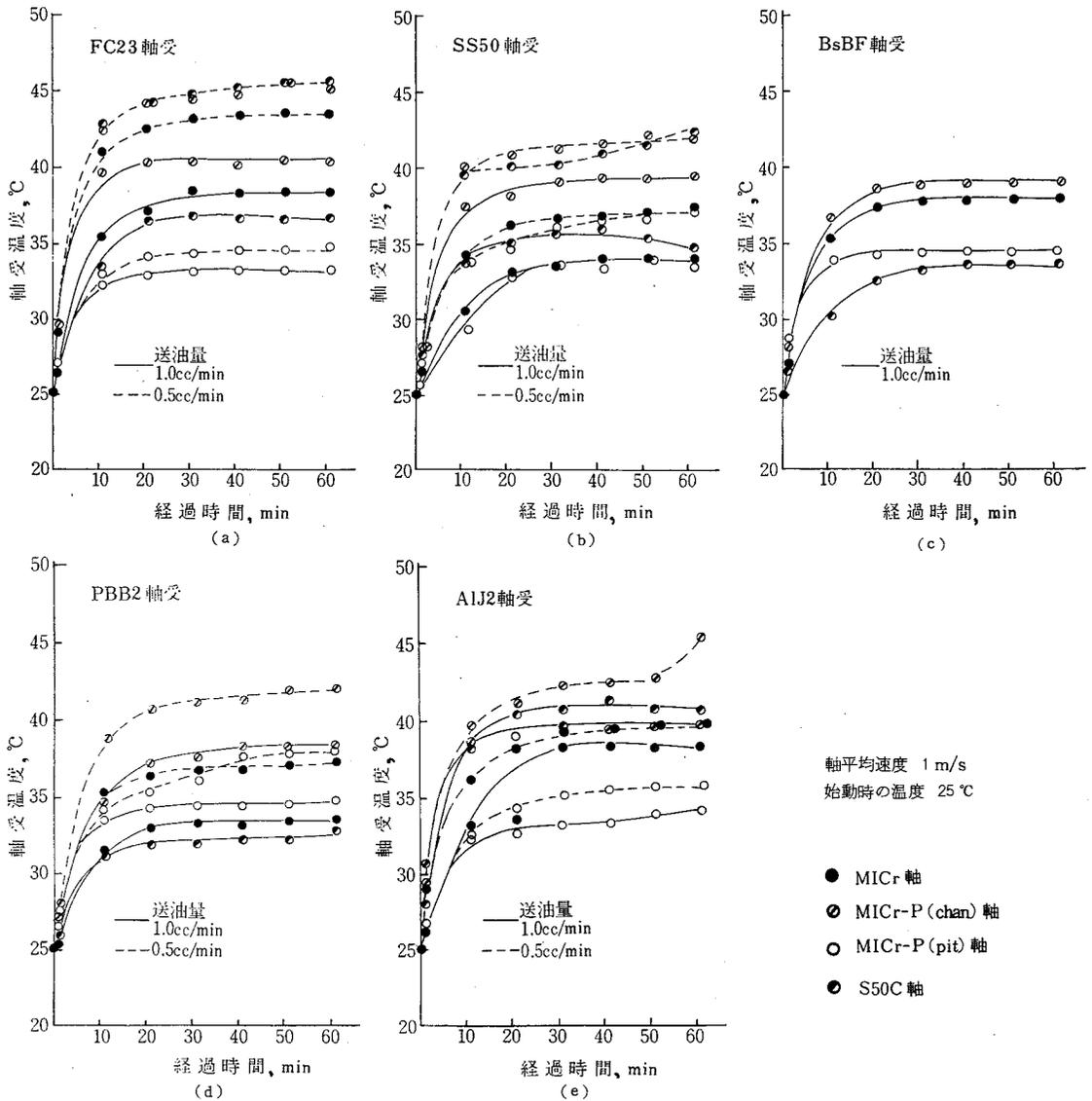


図 4-4 軸受温度と経過時間 (油潤滑)

鋼軸受 (b) において、送油量が 0.5 と 1.0 cc/min のいずれの場合も S 50 C 軸よりも MICr 軸、MICr-P (pit) 軸で軸受温度は低い。

黄銅軸受 (c) において、S 50 C 軸よりもめっき軸のほうが軸受温度は高い。しかし、めっき軸のうちで MICr-P (pit) 軸は S 50 C 軸の軸受温度と大差がない。

りん青銅軸受 (d) において、S 50 C 軸よりもめっき軸のほうが軸受温度は高く、めっき軸との組合せはよくないようである。

アルミニウム軸受 (e) において、送油量 1.0 cc/min の場合は S 50 C 軸よりもめっき軸のほうが軸受温度は低くてよい。

以上のごとく送油量が少ないとどの軸受においても軸受温度は高くなるが、軸の種類が軸受温度へ及ぼす影響は組合せる軸受の種類によって異なるようである。

油-空気潤滑あるいは空気潤滑の場合も経過時間に対する軸受温度上昇は上記図 4-4 と同様な傾向を示した⁴⁾。図 4-5 に 60 分経過時の各軸受温度上昇を潤滑方法別に示した。

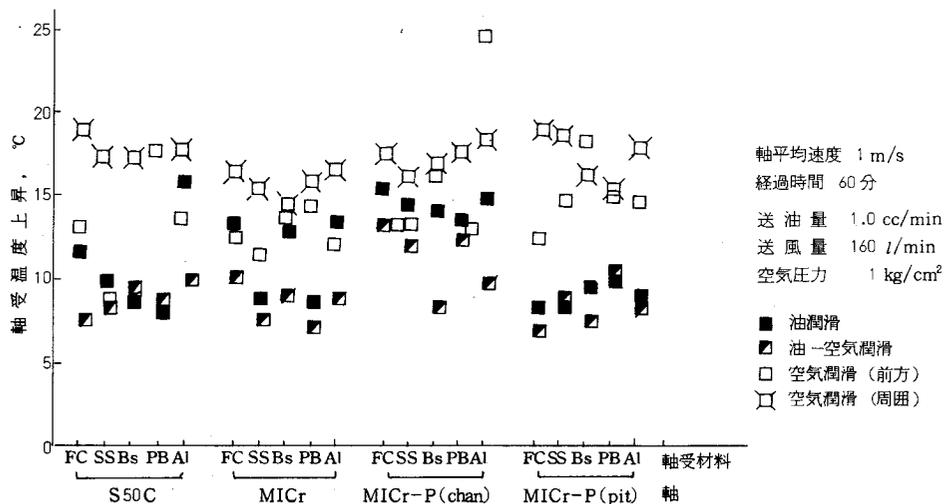


図 4-5 潤滑方法と軸受温度上昇

油-空気潤滑では、MICr 軸や S 50 C 軸と鋼あるいはりん青銅軸受の組合せや、MICr-P (pit) 軸と鋳鉄、黄銅、あるいはアルミニウム軸受の組合せで軸受温度が低い。この温度を低く保つ一因として、滴下した油が前方からの圧縮空気軸受表面に散布されるためと考えられる。

空気潤滑における前方送風と周囲送風を比べると、前方送風のほうが軸受温度は低い。これは軸と軸受間を通過する空気量の相違によるためと考えられる。

すなわち、前方送風では軸受一端に取付けたキャップからの送風がすべて軸と軸受間を通過し、後方（クランク側）から流出するのに対して、周囲送風では軸両端から空気が流出するため、軸と軸受間のすきまを通過する空気量が少なくなり、冷却効果が少なくなるためである。

一般に動圧空気軸受において、軸受すきまは油潤滑の1/2～1/5にするが⁵⁾、本実験では油潤滑の軸受すきまのままで行った。

このため、往復動の上、下死点において軸の傾きが多くなって軸受面をこすするため、軸受温度が高くなったものと思われる。特に、周囲空気潤滑は他の潤滑方法よりも軸受温度が高くなった。

以上の結果、油潤滑において、送油量をあまり多くしても往復動軸で潤滑油を軸受端から排出してしまい、軸受温度を低くする効果は少ないと思われる。

潤滑方法としては油-空気潤滑または油潤滑がよく、空気潤滑では前方から送風するほうが周囲から送風するよりもよいことが明らかとなった。

3.2 軸受温度に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響

図4-6に60分経過時の各軸受温度上昇を軸の種類について示した。

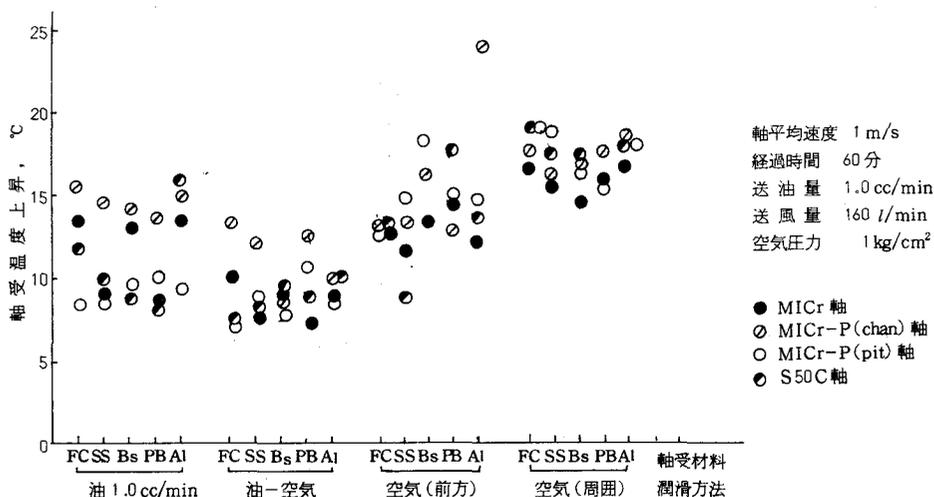


図4-6 ポーラスクロムのタイプと軸受温度上昇

油潤滑において、MICr-P (pit) 軸を用いると、黄銅とりん青銅軸受を除けばどの軸に対しても軸受温度は低い。前出の図 4-4 から送油量が 0.5 cc/min において MICr-P (pit) 軸の軸受温度は同様に低いことがわかる。一方、MICr-P (chan) 軸では軸受温度は全般に高い。特にアルミニウム軸受で送油量が 0.5 cc/min になると 50 分経過時に急に軸受温度が上昇していることが図 4-4 において認められた。

油-空気潤滑においても MICr-P (pit) 軸では鋼軸受、りん青銅軸受を除けば、油潤滑の場合と同様に軸受温度は低く、よい傾向を示す。一方、MICr-P (chan) 軸では黄銅軸受、アルミニウム軸受に対してはそれほど軸受温度は高くないが、その他の軸受では最も高い。そして油潤滑の場合と同様に S 50 C 軸、MICr 軸よりも高い軸受温度を示し、よくない。

空気潤滑においては油潤滑でよい結果を示した MICr-P (pit) 軸では MICr 軸よりも軸受温度が高くなる。油潤滑で MICr-P (pit) 軸よりも軸受温度の高かった MICr-P (chan) 軸では MICr-P (pit) 軸と同じ軸受温度かまたは低くなる。

以上のごとく油潤滑において、MICr-P (pit) 軸を用いると軸に保持されている油が潤滑を助け、軸受温度は MICr 軸よりも低くなったと思われる。

内燃機関のシリンダに MICr-P を用いた場合、潤滑油の消費量は少なくなるが多孔率の選定によっては焼付くこともある。そして MICr-P (pit) では初期摩耗は大であるが、なじみがよいという報告がある⁶⁾。また、MICr-P (chan) はシリンダヘッドへの油あがりが多いと報告されている⁷⁾。

本実験においても MICr-P (chan) 軸のほうが MICr-P (pit) 軸よりも軸端からの油の流出が多いことが観察された。この結果は MICr-P (chan) 軸では送風された圧縮空気によりチャンネルみぞに沿って潤滑油が押しだされるのに対して、MICr-P (pit) 軸ではピット中の油が容易にピットから排出されないためであると考えられる。

空気潤滑において、MICr-P 軸では軸と軸受間に介在する空気の流れが乱され

るためか、または常に乾燥摩擦状態に近い接触がなされ、ポラス面による軸受面の引かきが行われるため、軸受温度が高くなったと考えられる。

3.3 油膜厚さに及ぼす軸と軸受の組合せの影響

往復動軸と軸受の油膜厚さ測定においては、軸受の測定点上に軸の外周面が位置していなければ、油膜を通して流れる電流は小さくなり、油膜は厚く測定されることになる。

そこで測定値をできるだけ正確に比較するため各軸受の最小油膜厚さを用いるのが適当であると考え、図4-7に最小油膜厚さを軸と軸受の組合せ別に示した。

どの軸受に対しても MICr-P 軸の油膜厚さは S 50 C 軸、MICr 軸よりも厚く、ポラスクロムによる潤滑への効果が明らかである。黄銅軸受に対する MICr-P 軸は S 50 C 軸の油膜厚さとほとんど同じである。

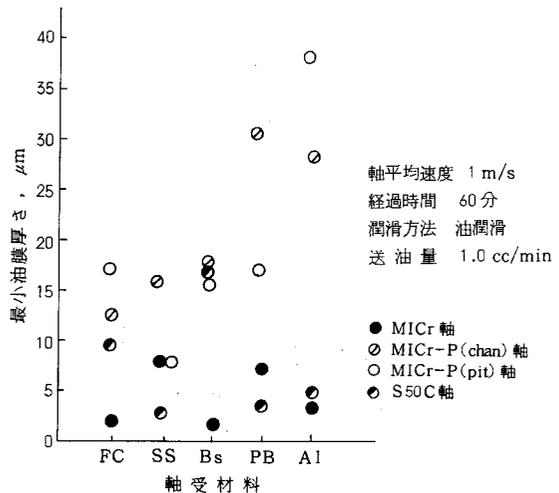


図4-4(d)に示したよう

図4-7 軸-軸受の組合せと油膜厚さ

に、りん青銅と MICr-P 軸の組合せでは油膜厚さが厚いのに軸受温度は高くなっている。またりん青銅と S 50 C 軸の組合せでは油膜が薄くても軸受温度が低い。

このように往復動軸受においては油膜が薄くても油の広がりやすい表面を有する軸受あるいは軸を用いるのがよいと思われる。

4. 結 論

- (1) 潤滑方法としては油-空気潤滑が油あるいは空気のみによる潤滑方法よりも軸受温度が低くてよい。油潤滑では送油量の多い 1.0 cc/min のほうが 0.5 cc/min の場合よりもよい。油膜厚さや軸受温度の測定結果からみると、送油量を

さらに多くしても軸受端からの油の流出が多くなるだけで、軸受の冷却にそれほど役立つと思えない。空気潤滑では周囲より送風すると軸受両端から空気が流出するのに対して、前方より送風すると軸受後方からのみ流出することになる。したがって、後者のほうが軸と軸受間を通過する空気量が多くなり、軸受を冷却したためにより結果を得ることができたと考えられる。

(2) ポーラスクロムめっき軸は油潤滑および油-空気潤滑においては回転軸の場合と同様により結果を示すが、空気潤滑においてはよくない。

ポーラスクロムめっきではピンポイントタイプがチャンネルタイプよりもすぐれているようで、この原因はポーラスクロムのタイプによる軸受すきま内の油の流出のしやすさに関係するようである。

(3) 本研究のように軸径に対して長さの短い軸では、軸受すきまを小さくし、軸受両端での軸の傾きを防ぐほうがよいと思われる。また空気潤滑にする場には油潤滑の場合の軸受すきまよりも小さくする必要がある。

(4) 軸受材料は本研究のような無負荷状態ではどれを用いても大差はないが、鉄鋼材料よりも非鉄金属材料のほうが、軸受温度が低く、油膜厚さが厚いためよいと思われる。

文 献

1. 山内俊平, 伊藤義典, 紙野康美: 日立造船技報, 21, 4(1960)193.
2. 清水三郎, 草間喜代松: 日本機械学会誌, 70, 581(1967)882.
3. 高橋堅太郎: 金属材料, 5, 10(1965)44.
4. 肥田 昭, 市村雄弘: 近畿大学理工学部研究報告 6号 (1971)77.
5. 軸受・潤滑便覧, 編集委員会編: 軸受・潤滑便覧, 日刊工業 (1961)75.
6. 小林重一: 金属材料, 5, 10(1969)59.
7. 伊藤義典: 内燃機関, 6, 3(1969)11.

第 5 章 ポーラスクロムのタイプと油膜形成

1. 緒 言

第 3 章では軸受温度あるいは油膜厚さに及ぼすクロムめっきのタイプの影響について述べ、ポーラスクロムのめっき軸が軸受の潤滑に対して有効であることを明らかにした。

この一原因として、めっき面上での油の広がり特性と軸受との間の油膜の形成状態がポーラスクロムめっき面においてすぐれていることが考えられる。

チャンネルタイプではチャンネルみぞが全表面に連結しているため油の広がりがよく、ピンポイントタイプではピットが油だまりとなり、油の広がりが悪いと考えられている¹⁾。したがって、これらの油の広がりを観察すれば、第 3 章の実験においてチャンネルタイプで油膜厚さが薄く、ピンポイントタイプで厚くなったことをいっそう明確にすることができる。

本章では表面あらしの異なるめっき試験片および粒度の異なる耐水研磨紙を用いて、油の広がり特性を調べた。またポーラスクロムめっき軸と透明アクリル樹脂軸受の組合せで油膜形成状態を調べた。

2. 実験装置および測定方法

2.1 供試材の形状寸法

第 1 章、表 1-1 の条件で直径 60 mm、厚さ 3.2 mm の表面あらしの同じ鉄板あるいは 50 mm 角、厚さ 10 mm の表面あらしの異なる鉄板に MICr, MICr-P (chan), および MICr-P (pit) のめっきを施した。前者の供試材は粒度の異なる研磨紙で仕上げ、後者の供試材は、特に表面あらしの小さいものだけ、さらにバフで仕上げた。そして両供試材とも超音波洗浄後使用した。

また、油の広がりに対する表面あらしの影響を調べるため、表 5-1 に示した

種々の粒度をもつ耐水研摩紙²⁾を用いた。耐水研摩紙は 110 ~ 150 g/m² の耐水処理したクラフト紙の表面に炭化けい素を接着したものである。

表5-1 耐水研摩紙の種類と粒度

研摩紙の種類(番)	400	600	800	1000
研摩材の粒径(μm)	40	28	20	16

(注) 粒径は参考資料である。

油膜形成を観察する場合は、第3章、表3-2に示したMICr-P軸(No.7~12)と図3-5の形状に製作した透明アクリル樹脂の軸受を組合せた。

樹脂系の軸受では軸受すきまを金属軸受の場合の3~4倍にとるのが普通であるから、軸受内径寸法は60.2mmとした。

2.2 油滴広がり面積の測定方法

油滴広がり面積を測定する場合は図5-1に示した装置を用いた。

油滴広がり面積(以下油滴面積という)は試験片表面上10mmの高さからピペットでSAE30番モータオイルを1滴(0.03cc)落とし、滴下後30秒、60秒後に写真撮影を行い、その後30分、60分後はノギスで油滴直径を測定した。また同じ方法で各研摩紙上に油を滴下し、1分、2分、10分経過後に写真撮影し、その後、1時間から6時間までは1時間ごとにノギスで油滴直径を測定し、油滴面積を算出した。

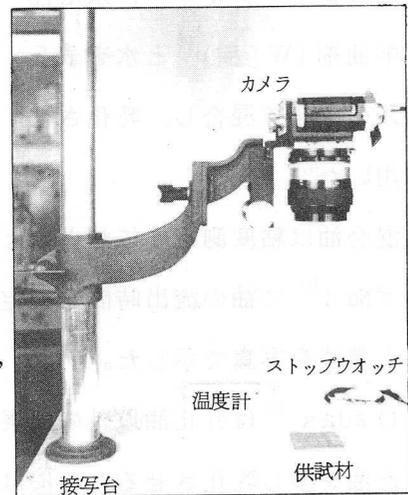


図5-1 装置

油1滴の量は直示天秤で測定する重量法と、メスシリンダで測定する容量法とで測定した。

その結果、油1滴の量は0.03ccで、その誤差は1.3%であった。

2.3 油膜形成の観察方法

油膜形成の観察には1/4PS、1800rpmのモータを駆動源として使用し、図5-2の供試軸を800rpmで回転させ写真撮影を行った。

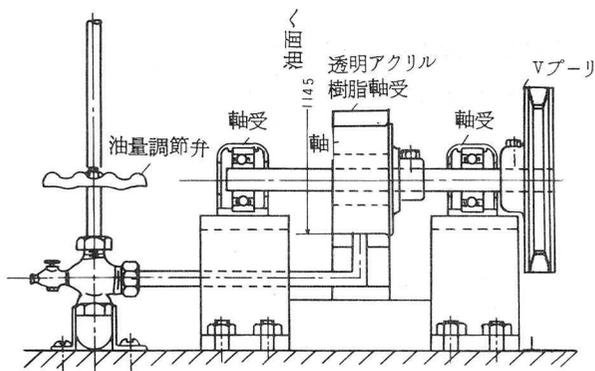


図5-2 装置

この場合、SAE 30 番モータオイルのみで潤滑すると軸と油の色合の識別が困難であったため、30 番モータオイルに水溶性切削油剤 (W1種)³⁾ と水を表5-2 の割合で混合し、乳化させて用いた⁴⁾。

混合油は粘度測定中に油と水とが分離または水が沈んでくるため、フォードカップ No. 4⁵⁾ で油の流出時間を測定して粘度の参考とした。図5-3 に乳化油の色合と濃淡を写真で示した。

Özdas⁶⁾ は乳化油以外の観察用潤滑油としてけい光染料を油に混入している。また油を少し乳化させるためには、微粉末の酸化チタンあるいはカルシウムを混入する方法もある。本実験では、できるだけ30 番モータオイルによく似た油性でしかも乳化させる方法を用いた。

送油量が多いと、軸の回転直後に軸受全面に潤滑油が行きわたり、軸の種類による油膜形成が判別できないので、送油量は 2.5 cc/min とした。

油膜形成の写真は、モータのスイッチを入れた瞬間と約 40 秒後の連続回転時に、供試軸の軸心の高さの位置に設置したカメラで撮影した。照明はけい光燈と

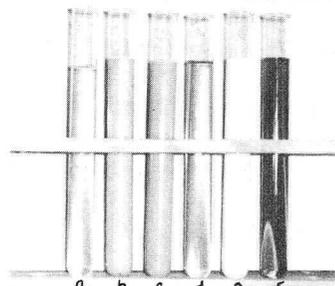


図5-3 油と乳化油

a: 水 30 番 切削油 蒸留水
 b: 乳化油 5 : 1 : 2
 c: 乳化油 7 : 1 : 2
 d: SAE 30番モータオイル
 e: 乳化油 0 : 1 : 5
 f: 切削油剤 (W1種)

表5-2 乳化油特性

種 別	乳化油に対する混合比	乳化時の フォードカップ No.4 流出時間 (15℃)	比 重
30 番 モータオイル	5	2 分 5 秒 5	0.909
切 削 油 剤	1	27 秒 5	0.905
蒸 留 水	2	10 秒 0	0.999
乳 化 油		3 分 28 秒 6	0.936

ストロボによった。

3. 実験結果および考察

3.1 油滴の広がり及びポラスクロムのタイプの影響

円板形状の試験片は表面仕上時に同心円状の旋削条こんが残る、条こんに沿って油が流れやすい傾向がある。そこで同心円状条こんのない研削した正方形試験片を主として使用した。

この場合、研削方向は油滴の広がりに対して影響を及ぼさず、常に円形の油の島が形成された。

図5-4に油滴面積の時間的变化を示した。

MICr 面上の油滴は滴下後ある程度広がった後、広がりほとんど停止する。

MICr-P (chan) 面上の油滴は滴下後すぐに広がり、MICr のように停止することなく試験片全表面に広がる。MICr-P (pit) 面上の油滴の広がり MICr-P (chan) よりも悪いが、MICr のように停止しないで徐々に試験片全表面に広がる。

実験時の室温や油温の相違は油の粘度を変えるため、油滴の広がりにはこれらの条件によって異なるので注意を要する。

MICr-P での油滴面積は MICr よりも大きいと報告されており⁷⁾、本実験の結果と一致する。さらに MICr-P の油滴面積はポラスクロムのタイプによって異なり、チャンネルタイプではピンポイントタイプよりも大きく、チャンネルみぞに沿って油が広がることが明らかとなった。

図5-5にめっき面上の油滴面積を表面あらさについて示した。

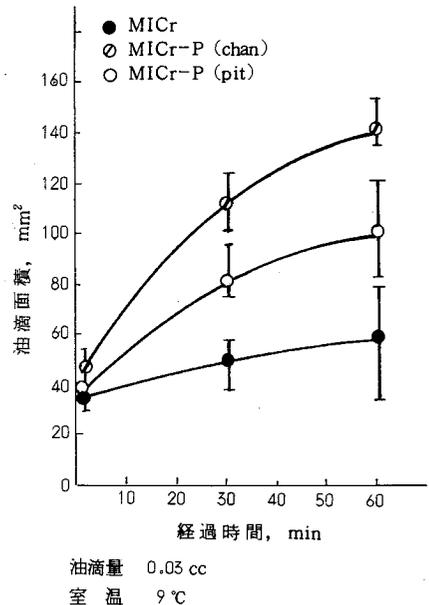


図5-4 経過時間と油滴面積 (めっき面上)

クロムめっき面上の油滴面積はポーラスクロムのタイプや表面あらさに影響されるようであるが、そのいずれに大きく影響されるかは明確ではない。表面あらさ $3 \sim 4 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ 程度まではあまりほど油滴面積は大きい。これ以上のあらさでは、油滴面積はあらさによってほとんど変わらない。また、あらさにかかわらず、ポーラス面ではチャンネルタイプのほうがピンポイントタイプよりも油滴面積は大きい。

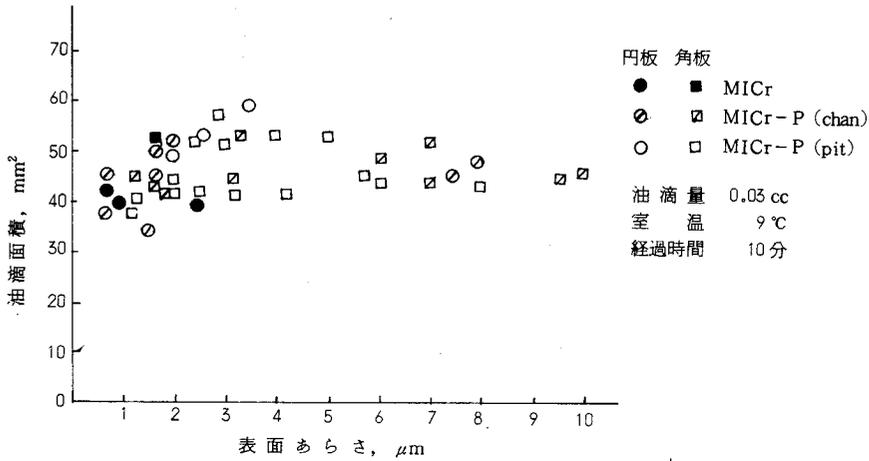


図5-5 表面あらさと油滴面積(めっき面上)

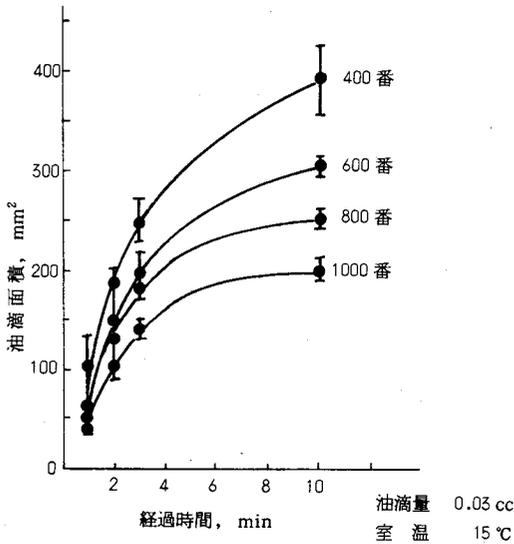


図5-6 油滴面積の時間的变化(研摩紙上)

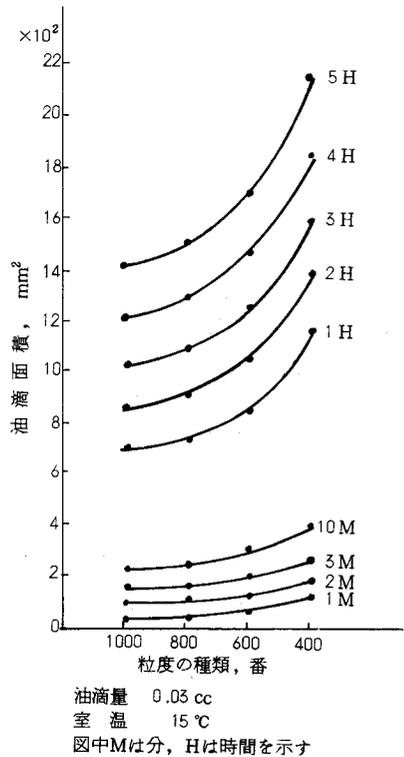


図5-7 研摩紙の種類と油滴面積

図5-6に耐水研磨紙上での油滴面積を経過時間について示した。

研磨紙の粒度(番)の順序で油滴面積は小さくなっている。すなわち、研磨材の粒度の小さいものほど油滴面積は小さい。

図5-7に耐水研磨紙の種類と油滴面積の関係を示した。

油の滴下後、油滴面積は増加し、粒度の大きい場合、5時間後の油滴面積は約2200 mm²になる。粒度の小さい場合、5時間後においても1400 mm²で、粒度が大きいほど油滴面積は大きいことが明らかとなった。

以上のごとく、めっき面上と研磨紙上における油滴の広がり、表面あらさに対して同じような傾向を示し、表面あらさが大きいと油滴の広がり大きい。ポーラスクロムめっきのように表面にみぞまたは穴があると油滴の広がりみぞまたは穴の形状で異なる。

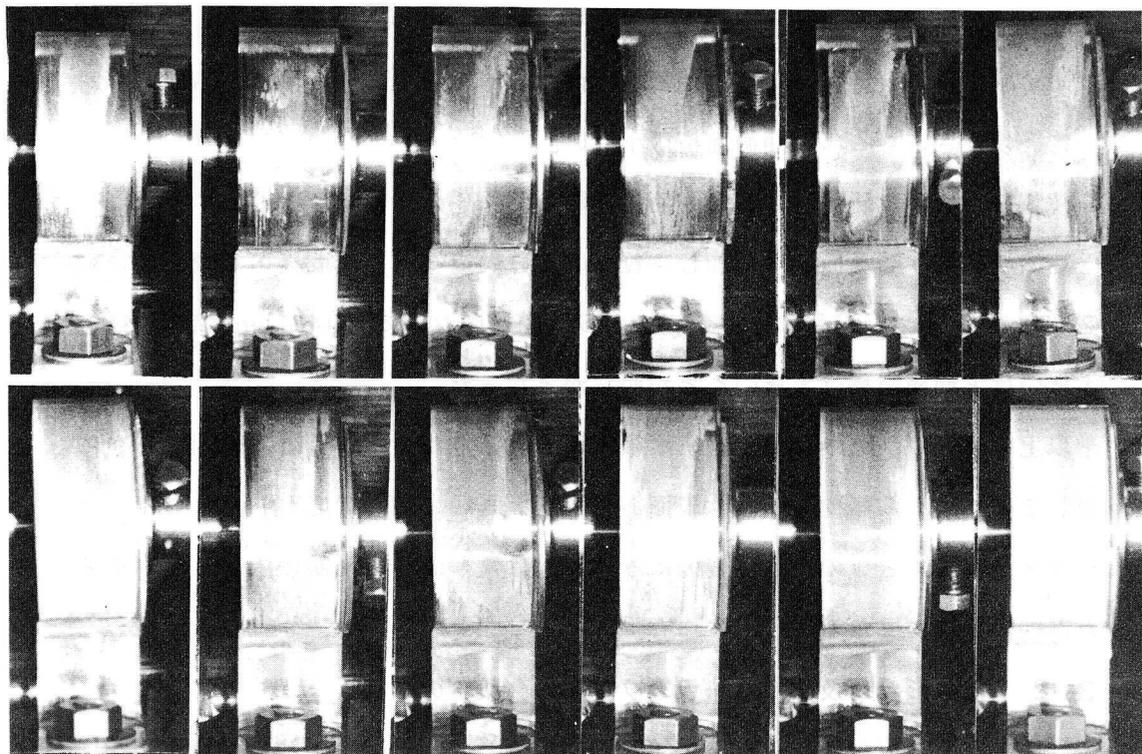
3.2 油膜形成に及ぼすポーラスクロムのタイプの影響

透明アクリル樹脂軸受とMICr-P軸を組合せ、乳化油を給油しながら軸を回転させた場合の油膜形成状態を図5-8に示した。

図5-8(a)に始動時の油膜形成状態を示した。写真上で白っぽい箇所ほど油膜が厚いことを示しており、写真観察から油膜形成状態がわかる。

MICr-P(chan)軸 No.7では中央に油が存在し、広がり悪く、油膜は下側で薄い。MICr-P(chan)軸 No.8軸では中央付近で部分的に油が存在するだけで油膜は最も薄い。MICr-P(chan)軸 No.9では中央より軸のつばの反対側によく油が広がっている。MICr(chan端)軸 No.10では軸受上部で油がよく広がっているが、軸のつば側で油膜は薄い。MICr-P(pit端)軸 No.11では軸受中央部から上部にわたり油膜が存在し、軸のつば側で薄い。MICr-P(pit)軸 No.12では油膜の広がりがよく、軸受上部で油膜厚さは最も厚い。

すなわち、始動時において、MICr-P(chan)軸ではチャンネル幅の異なるみぞが混在している軸のほうがみぞ幅の太いだけよりも油膜形成はよい(第3章表3-2参照)。MICr-P(pit)軸での油膜形成はMICr-P(chan)軸での油膜形



MICr-P(chan)軸 No.7 MICr-P(chan)軸 No.8 MICr-P(chan)軸 No.9 MICr-P(chan端)軸 No.10 MICr-P(pit端)軸 No.11 MICr-P(pit端)軸 No.12

図5-8 油膜形成 (上段(a):始動時,下段(b):約40秒後)

送油量 2.5cc/min 回転数 800 rpm 室温 15℃

成よりもよい。これは軸のピット中に入った油と軸表面の油とで油膜形成をするためと考えられる。軸の両端をエッチングしない軸は、軸の全表面をエッチングした軸に比べ、油の流出を防いでいるようではあるが、エッチングしていない部分の油膜は薄い。

図5-8(b)に始動後約40秒経過した時の油膜形成の状態を示した。

MICr-P(chan)軸 No.7では軸の全表面に油は広がるが、つば側より油が飛びだし、端でわずかに薄くなった。MICr-P(chan)軸 No.8では軸のつば側に油の切れた部分が生じ、軸受両端では油膜は薄い。MICr-P(chan)軸 No.9では軸の左下側に油の切れた部分があるが、左上側の油膜は比較的厚い。MICr-P(chan端)軸 No.10では軸のつば側に油の切れた部分があり油膜は中央部で厚いが両側になるほど薄い。MICr-P(pit端)軸 No.11では軸全面に油が薄く存在している。

MICr-P (pit) 軸 No.12 では No.11 軸よりも軸全面に油が厚く分布し、軸受両端の油膜厚さが中央部とほとんど同じであることがわかった。すなわち連続運転時においても始動時と同様にチャンネルタイプではチャンネル幅の異なるみぞが混在しているほうが、みぞ幅の太いだけのものよりも油膜形成はよい。また MICr-P (pit) 軸のほうが MICr-P (chan) 軸よりも、ピット中に油を多く保持して回転しているため、油膜が厚く、油の広がりもよい。

以上の結果は、第3章、第3節の油膜厚さ測定結果とよく一致している。

4. 結 論

- (1) 油滴の広がりには表面あらかさが小さいほど悪く、大きいほどよいが、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ R_{max} 以上になるとほとんど変わらない。あらかさが大きすぎると表面のくぼみに多量に油がたまり、広がりには寄与する油量が少なくなるためと考えられる。
- (2) ポーラスクロムめっき面での油滴の広がり状態からみると、チャンネルタイプで油は広がりやすく、したがって油膜は薄くなる。
- (3) ポーラスクロムめっき軸の油膜形成の観察から、ピンポイントタイプのほうがチャンネルタイプよりも油膜が厚く、軸受全面に分布する。
- (4) 電位差による油膜厚さの測定方法では、測定位置の油膜の情報しかわからないが、透明アクリル樹脂軸受を使用すると軸受全体の油膜形成状態を観察できる。しかし、長時間運転すると軸受温度が上昇し、熱膨張のため正確な観察は望めない。また乳化潤滑油の油性が実際に用いる油の油性と著しく異なる場合には、この方法は不適當であり、乳化油の作成方法を検討する必要がある。
- (5) 第3章の油膜厚さ測定結果と本章の油膜形成の観察結果とはよく一致し、第4章で示した油膜厚さに及ぼすポーラスクロムのタイプの影響をさらに明確にすることができた。

文 献

1. 岸 松平：クロムめっき，日刊工業（1967）131.
2. 日本規格協会：JIS R 6253（1971）.
3. 日本規格協会：JIS K 2341（1961）.
4. 肥田 昭，市村雄弘：潤滑，11，10（1966）437.
5. 日本規格協会：JIS K 5650（1961）.
6. M. N. Özdas : Trans. ASME, 5（1958）826.
7. E. Meyer-Rässler : Metalloberf., 3（1951）B 33.

第 6 章 軸受材料の凝着現象

1. 緒 言

第 2 章および第 3 章では硬質クロムめっき軸あるいはポーラスクロムめっき軸と各種の軸受（ケルメット，アルミニウム，黄銅，りん青銅，ホワイトメタル，銅系含油および PTFE）とを組合せ，実機に近い状態で実験を行い，軸受温度上昇および油膜厚さに及ぼす回転速度，荷重，あるいは送油量の影響などについて述べた。

その結果，めっき軸とケルメット軸受の組合せが最適で，黄銅あるいはりん青銅軸受の組合せは凝着または焼付を起こしやすいことが明らかとなった。

本章では 5 種類（銅，亜鉛，すず，鉛およびアンチモン）の純金属と，それらの合金試験片をクロムめっき軸あるいはポーラスクロムめっき軸と無潤滑のもとで摩擦させ，凝着現象を調べた。また実験中にクロムめっき軸の表面に割れが生じるのを観察したので¹⁾ クロムめっき軸およびポーラスクロムめっき軸を高温炉内に入れて，表面に割れの生じる温度を測定し，割れの状態についても観察を行った。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

図 6-1 に示した装置において，1.5 PS，1800 rpm のモータを駆動源として使用し，Vプーリを介して供試軸を 940 rpm で回転させた。

供試軸は試験片取付軸にナットで締付けて固定し，試験片は試験片保持台に取付ける。荷重は試験片一端にかぶせた負荷用キャップをばね秤を通じて引っ張ることによって負荷する。荷重の調節は負荷用ハンドルと微動調節ハンドルを回転させて行い，本実験では試験片を供試軸に 10 kg で押しつける。モータの始動時

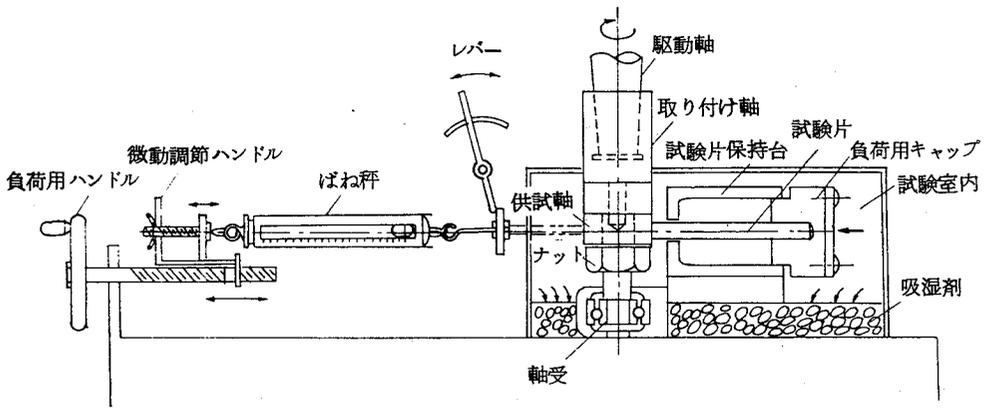


図6-1 装置

の回転速度は一定していないため、回転速度が一定になるまで負荷除去用レバーで供試軸と試験片が接触しないように保ち、所定の回転速度になれば負荷をかける。なお両接触面は湿度の影響を受けると凝着現象の測定が不正確になると考えられるため、乾燥剤で吸湿させた樹脂板の囲いの中で、供試軸と試験片を摩擦させた。

2.2 供試軸と試験片の形状寸法

供試軸は図6-2の形状にS50Cで作成し、表面に第1章表1-1の条件でめっきを施し、MICr軸、MICr-P(chan)軸およびMICr-P(pit)軸を作成した。めっき加工後、液体ホーニングで加工し、呼び寸法30mmφ、表面あらさ0.4~0.8μm R_{max}に仕上げた。

めっき厚さは磁力厚さ計で測定し、その値は平均0.102mmであった。

硬さは抜取検査方法によって同種類の供試軸を5個ずつ取りだし、測定した。

MICr軸あるいはMICr-P(pit)軸ではHv850~856、MICr-P(chan)軸ではHv875であった。

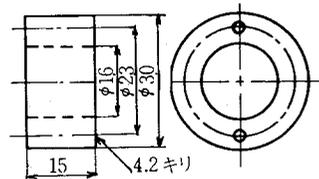


図6-2 供試軸

試験片は図6-3の形状に銅(A)あるいはりん青銅(F)丸棒を長さ75mmに切断し、端面を研磨紙1000番で仕上げた。

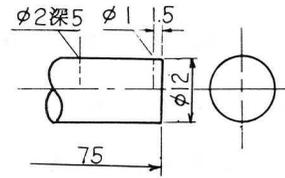


図6-3 試験片

表6-1に示した亜鉛、すず、鉛およびアンチモンの純金属試験片(B~E)とそれらの合金試験

片(G~Q)は、内径12mmの石英管の一端をセメントで固めた筒にそれぞれ熔融金属を流し込んで作成し、表面を上記と同じ方法で仕上げた。

軸と接触させる試験片の表面は実験前に試料研磨盤を用いて、研磨剤なしで水のみでのバフ仕上げを行った。ただし、銅とりん青銅試験片に対しては、研磨剤として酸化クロムと水を1:100の重量割合で混合した溶液でバフ仕上げを行い、最後に水のみでバフ仕上げを行った。これらの試験片の化学成分と硬さを表6-1に、そのうち、合金試験片の表面顕微鏡組織を図6-4にそれぞれ示した。

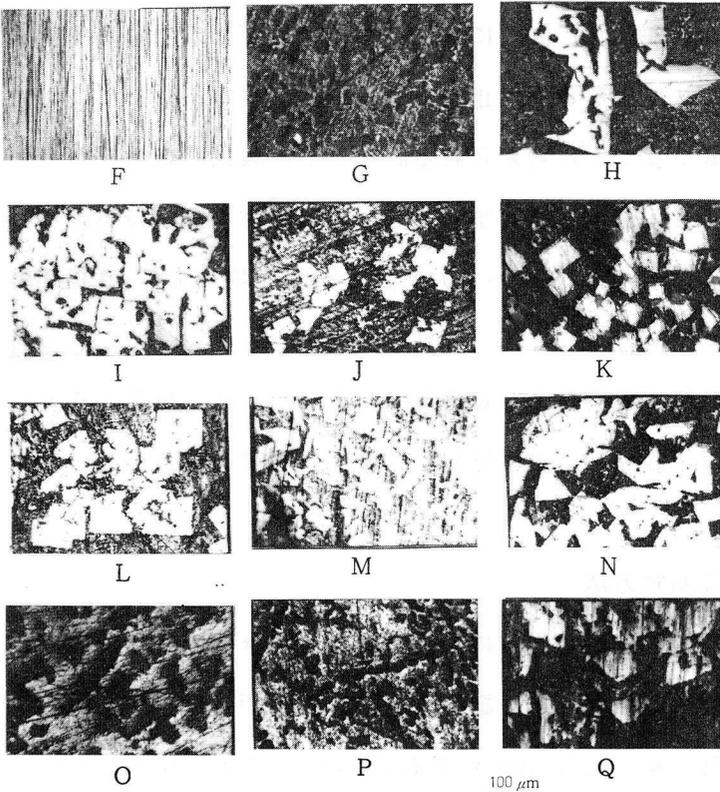


表6-1
試験片の化学成分と硬さ

試験片	化学成分 (Wt %)			硬さ Hv
A	Cu 99.94 以上			80.0
B	Zn 99.85 以上			63.0
C	Sn 99.95 以上			13.0
D	Pb 99.95 以上			6.3
E	Sb 99.95 以上			103.8
F	Cu 93.49, Sn 6.31 P 0.11			168.0
	Pb	Sb	Sn	Hv
G	90	10	0	20.8
H	70	30	0	28.9
I	50	50	0	68.6
J	70	10	20	17.7
K	60	20	20	22.6
L	65	20	15	62.6
M	60	30	10	35.2
N	55	40	5	74.2
O	50	0	50	13.4
P	40	Zn20	40	20.2
Q	78	16	6	27.6

図6-4 合金試験片の表面顕微鏡組織

試験片には温度測定のため、接触面より 1.5 mm の位置に、1 mm ϕ 、深さ 6 mm の穴をあけた。また実験中に試験片が回転しないように、接触面より 15 mm の位置に 2 mm ϕ 、深さ 5 mm の回り止め穴を設けた。

2.3 温度測定方法

試験片の温度測定は図 6-3 の試験片に設けた温度測定用穴に、長さ 1000 mm の銅 (0.2 mm ϕ) - コンスタンタン (0.3 mm ϕ) 熱電対を取付け、冷接点を通じてミリボルト計で測定した。測定後、補正 mV- $^{\circ}$ C 曲線で電圧を温度に換算した。

2.4 凝着現象の測定方法

バフ仕上げした試験片を、表面に傷があるかどうかを顕微鏡で観察した後、実験装置に取付ける。

試験片 A~F では、10 秒間供試軸と摩擦させて、試験片の温度測定を行い、停止させる。そして両接触面を観察し、表面に変化がなければ変化の生じるまで同じことをくり返す。この方法によると、停止時ごとに温度低下があり、このため表面状態が連続運転時と異なることが考えられる。そこで、表面間の状態が変化した温度まで連続摩擦させる方法でも測定する。A~F 試験片の測定においては、10 秒間ぐらいで凝着を起こすことが多かったため、G~Q 試験片では 10 秒間摩擦させた。

実験後の両摩擦面は顕微鏡で観察し、写真撮影を行う。その後、軸表面をガーゼで軽くふき、再び顕微鏡で観察して試験片材料の軸への移着、凝着あるいは目づまり状態を調べた。

2.5 めっき面の割れの測定方法

りん青銅試験片 (F) の凝着現象の測定中に、供試軸のめっき面にわずかな割れの発生を観察した。この割れの発生状態を調べるため、乾燥炉と電気炉を用いて、めっき厚さ 0.1 mm の MICr 軸および MICr-P 軸の割れと温度の関係について測定した。乾燥炉の温度を 50, 100, 150 $^{\circ}$ C に、また電気炉の温度を 200 $^{\circ}$ C ある

いは 300℃ にそれぞれ保ち、供試軸を 15 分間炉中に入れ、大気中で徐冷後、表面を観察する。まためっき厚さが割れに関係すると考えられるため、厚さ 0.065 mm のものについても同様の実験を行った。

MICr-P 軸は乾燥炉中の実験では割れの状態を正確に観察できなかったため、電気炉の温度を 30℃ から 18 分で 100℃ に、さらに 12 分で 200℃ まで上昇させ、その後大気中で徐冷後表面観察する方法を採用した。

表面の割れの判定においては、顕微鏡と目盛付レンズとを用いて、割れみぞ幅の測定を行った。

2.6 圧こん形状の観察

ポーラスクロムめっき軸のみぞあるいは穴の中に潤滑油が存在していないと、実験中に試験片材料による目づまりを起こすことが多い。この原因を調べるため、めっき軸を回転させないで、鉛試験片 (D) を 10 kg の荷重で押しつけて試験片表面へのポーラス模様の転写状態を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 試験片の温度上昇

めっき軸に純金属試験片材料が凝着を起こすまでの経過時間と試験片の温度を図 6-5 に示した。

MICr 軸に銅 (A) が凝着を起こすまでの時間は長く、それだけ試験

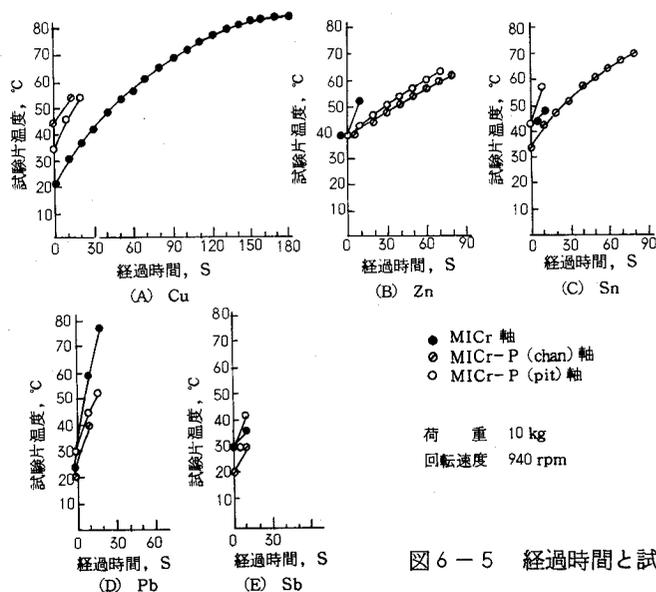


図 6-5 経過時間と試験片温度

片の温度は高くなる。

MICr-P (chan) 軸には 15 秒で、MICr-P (pit) 軸には 20 秒で銅が凝着を起こした。10～20 秒経過時の試験片温度は両軸とも MICr 軸よりも高い。

亜鉛 (B) は MICr 軸に短時間で凝着を起こし、10 秒後の試験片温度は MICr-P 軸よりも高い。MICr-P (chan) 軸あるいは (pit) 軸に対しては 70～80 秒後まで凝着を起こさない。

すず (C) は MICr 軸と MICr-P (pit) 軸に短時間で凝着を起こすが、MICr-P (chan) 軸には 80 秒後まで凝着を起こさない。

鉛 (D) はいずれの軸に対しても短時間で凝着を起こす。

MICr-P 軸では MICr-P (chan) 軸のほうが MICr-P (pit) 軸よりも凝着を起こしやすい。

アンチモン (E) は本実験で使用した材料のうち最も短時間で凝着を起こした。

同じ経過時間ごとの各試験片の温度を比較してみると、MICr 軸に対して、鉛と亜鉛は試験片温度が高く、MICr-P (chan) 軸に対しては銅が高い。また亜鉛よりもすずのほうが試験片温度が高い。

MICr-P (pit) 軸に対して、いずれの試験片も試験片温度は高いが、そのうちでは亜鉛が最も低い。

図 6-6 に各試験片の 10 秒経過後の温度上昇を示した。

合金試験片 (F～Q) において、MICr 軸での試験片温度上昇は MICr-P 軸に比べて低い。また MICr-P 軸のうちで、MICr-P (pit) 軸に対して G～J あるいは O 試験片の温度上昇は MICr-P (chan) 軸に対するよりも低い。その

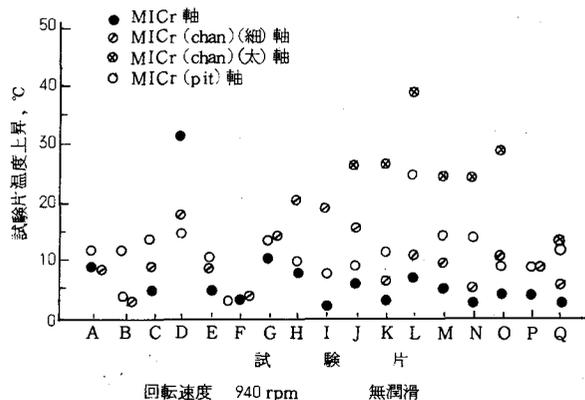


図 6-6 各試験片の 10 秒経過後の温度上昇

他の合金試験片では MICr-P (chan) 軸に対する温度上昇のほうが低い。

MICr-P (chan) 軸ではチャンネルみぞ幅の細いものと太いものが混在している軸のほうで、太いみぞ幅のみ存在している軸に対するよりも、試験片温度上昇は少ない。

3.2 純金属試験片の軸への凝着現象

試験片と供試軸の表面観察結果を表6-2に示した。

この表中に次節の合金試験片と供試軸の表面観察結果も記述し、各試験片あるいは供試軸をそれぞれ比較しやすくした。

表6-2 試験片と軸の表面観察結果

試験片	試験片の表面								めっき軸の表面								
	/MICr		/(chan)		/(chan太)		/(pit)		MICr		MICr-P(chan)		(chan太)		MICr-P(pit)		
	摩 耗		摩 耗		摩 耗		摩 耗		ガーゼでふく		ガーゼでふく		ガーゼでふく		ガーゼでふく		
	大	部分と周囲	大	部分と周囲	大	部分と周囲	大	部分と周囲	前	後	前	後	前	後	前	後	
Cu	A	小	美しい, 堆	小	美しい, 堆	-	-	小	美しい, 堆	着色	とれる	着色	かなり えはる	-	-	着色	かなり えはる
Zn	B	小	美しい, 堆	小	美しい, 堆	-	-	小	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	かなり えはる	-	-	目づまり	とれない
Sn	C	小	美しい, 堆	小	美しい, 堆	-	-	小	美しい, 堆	着色	とれない	目づまり	とれない	-	-	目づまり	とれない
Pb	D	中	美しい, 堆	中	美しい, 堆	-	-	中	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	かなり えはる	-	-	目づまり	とれない
Sb	E	小	美しい	小	荒れる, 堆	-	-	大	美しい	着色	かなり えはる	着色	かなり えはる	-	-	目づまり	かなり えはる
	F	小	荒れる	小	荒れる	-	-	小	美しい	割れる	とれない	移着	とれない	-	-	目づまり	とれない
Pb	G	中	美しい, 堆	大	条こん, 堆	-	-	大	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	とれる	-	-	移着	かなり えはる
+	H	小	美しい	大	美しい, 堆	-	-	大	荒れる	移着	とれない	移着	とれない	-	-	目づまり	とれる
Sb	I	小	美しい	中	荒れる	大	荒れる, 堆	小	美しい	着色	とれる	着色	かなり えはる	目づまり	とれない	着色	とれる
Pb	J	小	美しい	中	美しい, 堆	大	荒れる, 堆	中	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	とれない	目づまり	とれる	着色	とれる
+	K	小	美しい	中	荒れる, 堆	大	荒れる, 堆	大	美しい, 堆	移着	とれる	目づまり	とれる	目づまり	薄く	目づまり	とれる
Sb	L	小	美しい	中	美しい, 堆	大	荒れる, 堆	中	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	とれる	移着	とれない	着色	とれない
+	M	小	美しい	中	美しい	大	条こん, 堆	中	美しい	移着	とれる	目づまり	とれない	目づまり	とれる	着色	かなり えはる
Sn	N	中	美しい, 堆	中	条こん	小	美しい	大	美しい, 堆	着色	とれる	目づまり	とれる	目づまり	とれる	着色	とれない
	O	小	美しい	小	条こん, 堆	大	条こん, 堆	中	美しい, 堆	移着	とれる	目づまり	とれる	着色	とれない	着色	とれない
	P	小	美しい	中	条こん, 堆	大	条こん, 堆	小	美しい	着色	とれる	目づまり	とれる	移着	とれない	着色	かなり えはる
	Q	小	荒れる, 堆	大	条こん, 堆	大	荒れる, 堆	大	美しい, 堆	移着	とれる	移着	かなり えはる	移着	とれない	着色	とれる

(注) 堆: 摩耗部分の前方に試験片材料が堆積することを意味する。

この表からめっき軸に凝着の起こしやすい試験片材料あるいは目づまりの起こしやすい軸とその表面のポーラスクロムのタイプがわかる。

図6-7~6-11に純金属とめっき軸の摩擦後の表面を顕微鏡写真で示した。

銅試験片 (A) の場合を図 6-7 に示した。

MICr 軸表面には薄緑色に色がつく。これをガーゼでふくと、わずかに色は薄くなるがふきとれない。これは銅の微細な摩耗粉が酸化し、(a) の黒色部分のように凝着しているためである。試験片の表面には削り取られた摩耗粉が凝着している。

MICr-P (chan) 軸表面には茶かっ色の銅が凝着しており、ガーゼでふいてもとれない。これは摩擦により削り取られた銅が (b) のようにチャンネルみぞの中に埋め込まれているためである。試験片表面にはほぼ等間隔に傷がつき、そのとつ部分 (テスト前の表面に相当する) に粒状の銅が凝着している。

MICr-P (pit) 軸表面は薄い緑色になり、(c) のようにピット中に銅が埋め込まれる。試験片のほうはわずかに摩耗したが、その表面は美しい。

以上のごとく銅試験片とめっき軸の組合せでは、一般に軸は薄緑色から茶かっ色となり、銅試験片の摩耗した部分の回転方向前方にわずかに摩耗粉がついている。

亜鉛試験片 (B) の場合を図 6-8 に示した。

MICr 軸表面は薄く緑色になる。しかしガーゼでふきとると摩擦前の光沢が得られるような凝着である。試験片は (a) のように局部的に黒い部分ができているが、摩耗部分は比較的美しい。

MICr-P (chan) 軸は (b) のようにチャンネルみぞの部分に亜鉛の目づまりを起こすが、みぞ以外の軸表面への凝着は MICr 軸と同様にふきとれる。試験片は黒くすじがついた状態で摩耗している。

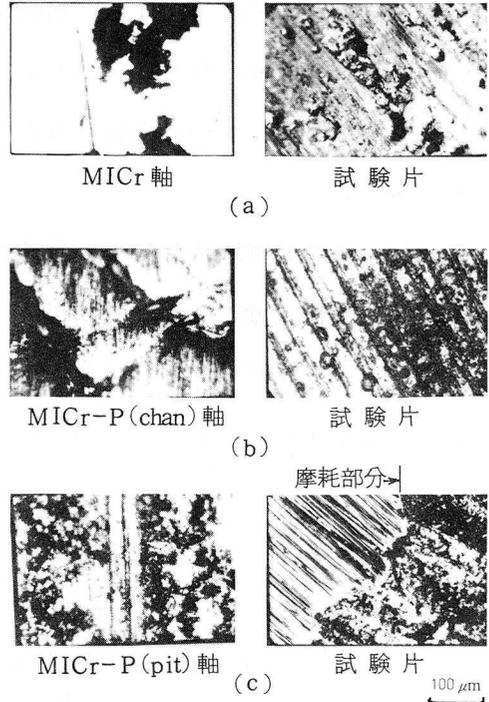


図 6-7 銅試験片と軸の摩擦後の表面

MICr-P (pit) 軸表面は(c)のようにわずかに目づまりをしている。試験片のほうの摩耗部分は美しい。

亜鉛試験片の摩耗部分の前方には波状に材料が盛りあがり、摩耗粉とならないため脱落しにくい。

すず試験片(c)の場合を図6-9に示した。

MICr 軸表面は(a)のように、すぐに光沢がなくなり、緑色、茶かっ色あるいは薄黒く色がつくことが多い。ガーゼで表面をふいてもとれず、また光沢も得られない。試験片は試験後すぐこげ茶色になった。

MICr-P (chan) 軸のチャンネルみぞは(b)のように目づまりを起こし、みぞがすずで埋め込まれている部分もある。試験片は摩耗部分に傷がつき、その横が非常に黒くなった。

MICr-P (pit) 軸の表面は、(c)のように、チャンネル軸表面よりも目づまりは少なく、この目づまりはわずかに緑色がかっている。試験片の摩耗部分の前方には波状に材料が盛りあがり、摩耗粉とならないため、落ちにくい。

鉛試験片(D)の場合を図6-10に示した。

MICr 軸表面は(a)のように薄い緑色または薄黒く色がつき、ガーゼでふくととれる場合と、とれない場合とがある。試験片のほうはおうつが多く、摩耗部分は非常に黒くなっている。

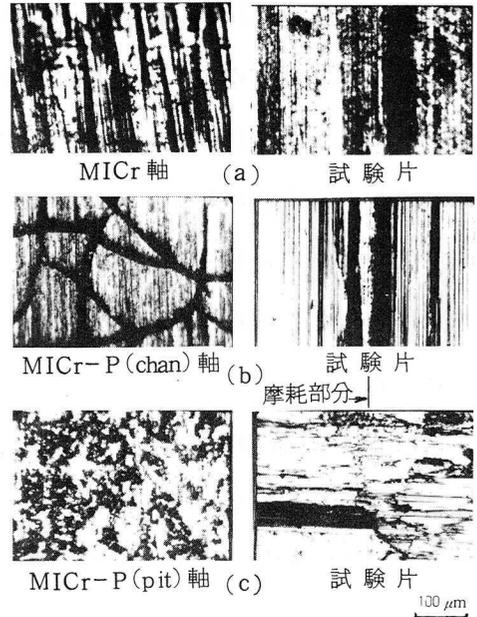


図6-8 亜鉛試験片と軸の摩擦後の表面

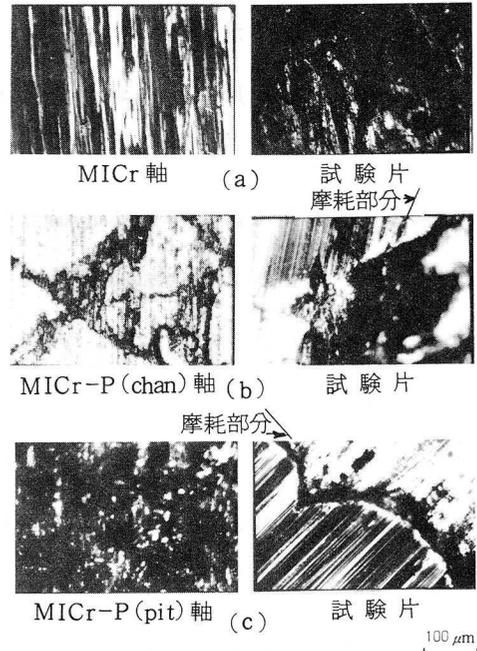


図6-9 すず試験片と軸の摩擦後の表面

MICr-P (chan) 軸の表面は (b) のようにチャンネルみぞの中に鉛の摩耗粉が埋め込まれ、わずかに緑色になる。ガーゼでふくと、表面の凝着物はわずかにとれるがみぞ中の目づまりはとれない。試験片のほうも非常に黒くなり摩耗部分には引かきこんがみられた。

MICr-P (pit) 軸表面は (c) のように少し目づまりを起こす。

鉛試験片は他のいずれの試験片よりも軟かく、延性を有するため、摩耗粉とならないで摩耗部の前方に波状に材料が堆積し、表面はすぐに黒くなる。

アンチモン試験片 (E) の場合を 図 6-11 に示した。

MICr 軸表面には (a) の黒色部分のように、アンチモンがわずかに凝着しているが、ガーゼでふくと完全にとれてもとの表面の光沢が得られる。これはアンチモンが常温大気中で酸化しにくいと考えられる。試験片は硬いため、摩耗は非常に少ない。

MICr-P (chan) 軸表面には (b) のようにアンチモンの凝着が多く、ガーゼでふきとればチャンネルみぞ中に埋め込まれた部分以外はふきとれる。試験片の摩耗は少ないが、摩耗部分は荒く削られている。

MICr-P (pit) 軸表面は (c) のようにかなりの目づまりを起こしているが、ア

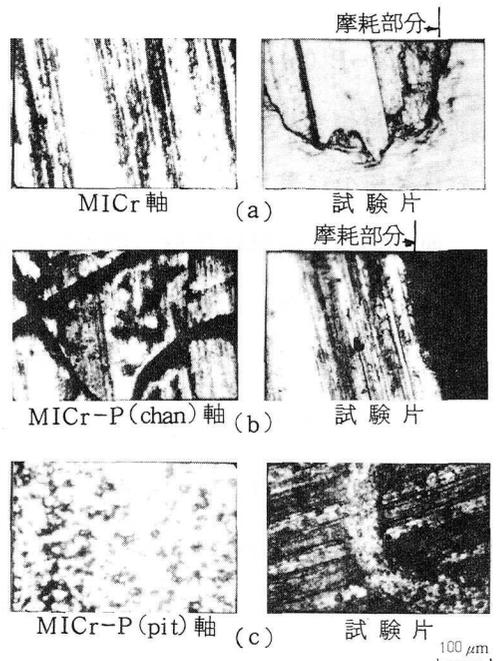


図 6-10 鉛試験片と軸の摩擦後の表面

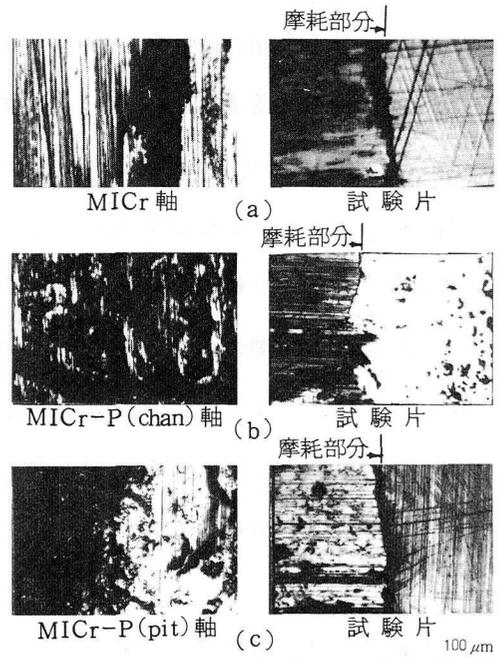


図 6-11 アンチモン試験片と軸の摩擦後の表面

ンチモンの凝着はない。また軸表面は研削したような光沢を生じ、輝面摩耗を起こしたものと思われる。試験片は大きな摩耗を生じているが、変色あるいは着色はみられない。

アンチモン試験片は硬いため、削りとられた摩耗粉は鉛試験片のように摩耗部分の前方に堆積しないで、ポーラスのみぞあるいは穴に入り込む。

純金属とめっき軸の組合せでは、MICr 軸に対してず試験片は凝着を起こしやすく、銅試験片は摩耗粉が酸化し、化学的なじみ性を作るように思われる。

MICr-P (chan) 軸では、いずれの試験片においても目づまりを起こしやすく、特にずがチャンネルみぞに多く入り込む。これはチャンネルみぞの角が軟かいず試験片を削り取るためである。試験片が鉛のように延性材料であれば摩耗粉とならないで摩耗部分の前方に盛りあがって波状に堆積する。延性材料でなければ、試験片材料は摩耗粉となって脱落する。

MICr-P (pit) 軸では、いずれの試験片においても目づまりは多いが、チャンネルタイプのようにみぞを埋めてしまうようなひどい目づまりは起こさないので、部分的に目づまりをする。

めっき軸に対して軸受材料を過度に硬くすることはなじみ性を悪くし、耐摩耗性をとぼしくする。なじみ性をよくするために表面に酸化膜、硫化膜あるいは塩化膜などの被膜を作ることが考えられるが²⁻⁴⁾、軸受を適当な硬さにするほうがよいと考えられる。次に種々の硬さの合金試験片とクロムめっき軸の凝着状態について示す。

3.3 合金試験片の軸への凝着現象

りん青銅試験片(F)と軸の摩擦後の表面を図6-12に示した。

MICr 軸表面にはりん青銅は凝着を起こしやすい。また軸表面のめっきの一部がはく離し、試験片に凝着した。そして(a)のように軸表面には顕微鏡でしか観察できないような割れが生じた。

MICr-P 軸では、軸表面に割れあるいははく離は生じないが、凝着や目づまり

が起こりやすく、チャンネルタイプのほうがピンポイントタイプよりもその傾向は大きい。図の (b) と (c) に MICr-P (chan) 軸と MICr-P (pit) 軸の目づまり状態をそれぞれ示した。

一般にりん青銅試験片の摩耗粉は微粉末となり、試験片には堆積しないで脱落するが、チャンネルタイプではみぞ中に摩耗粉がたまり、目づまりの原因になることがわかった。りん青銅と MICr 軸を組合せた場合は、めっき面にはく離が生じた。これは試験片の研摩時に用いた酸化クロムが試験片に付着し、そのため MICr 軸と凝着しやすくなったと考えられる。

この原因を調べるためりん青銅試験片の研摩方法を変えて凝着までの時間を測定した。その結果を図6-13に示した。りん青銅試験片のバフ仕上げに酸化クロムと水を1:100で混ぜた研摩剤を用いると、水のみでバフ仕上げするよりも速く凝着を起こす。

しかし、水のみでのバフ仕上げでは、仕上げるまでに時間がかかり、しかもバフの損傷はひどい。したがって、ある段階までは酸化クロムを用いて仕上げ、その後は水だけで仕上げる方法がよいと思う。

鉛とアンチモン合金試験片 (G~I) は MICr 軸に対して凝着を起こしたように見えることが多いが、軸表面をガーゼでふくと H 試験片以外は美しくなる。

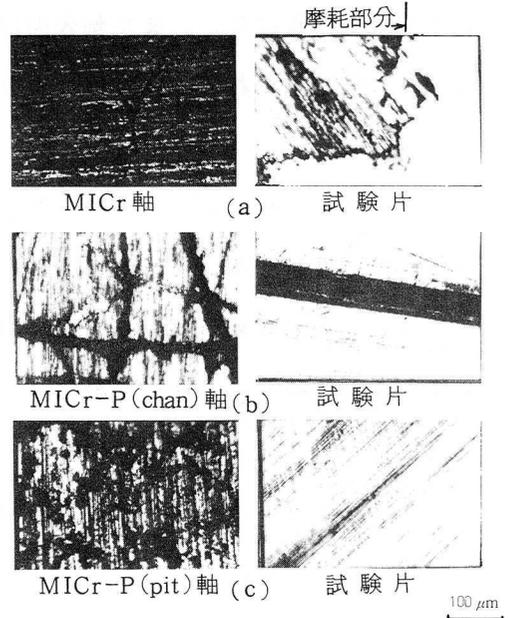


図6-12 りん青銅試験片と軸の摩擦後の表面

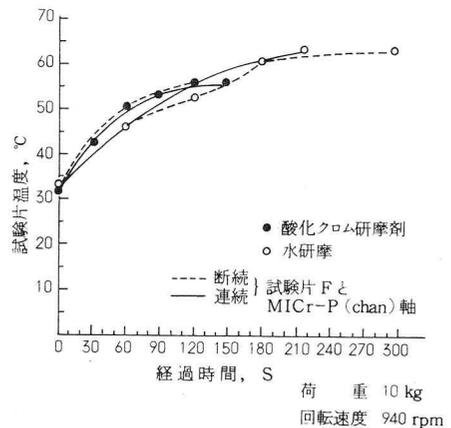


図6-13 研摩剤と凝着までの時間

図 6-14 に H 試験片と各軸の摩擦後の表面を示した。MICr 軸表面には (a) のように H 試験片の材料が凝着を起こしている。

MICr-P (chan) 軸では鉛の含有量が少なくなると、試験片の摩耗は少なくなった。摩耗部分の条こんはあらく、H 試験片では、(b) のように摩耗部分の前方に削り取られた材料が堆積する。チャンネルみぞ幅が大きくなると目づまりが多くなり、ガーゼでふいても美しくならない。

MICr-P (pit) 軸では試験片材料が凝着あるいは目づまりをしても表面をガーゼでふけば目づまり以外は取り除かれ美しくなる。

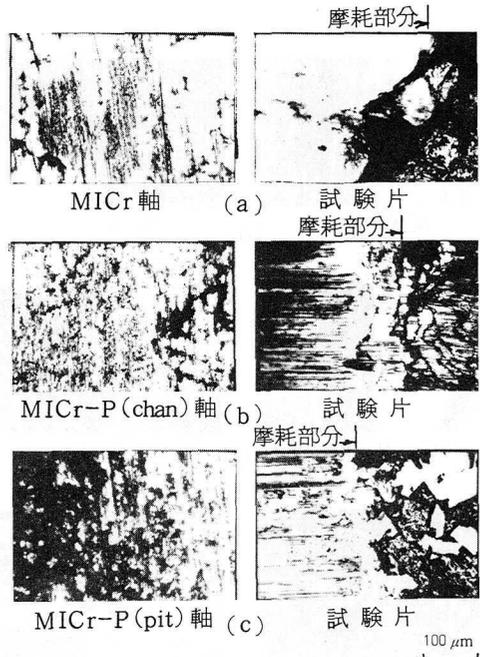


図 6-14 H 試験片と軸の摩擦後の表面 (Pb 70 %, Sb 30 %)

G あるいは H 試験片に生じた摩耗によるくぼみは I 試験片よりも大きい。また G あるいは I 試験片の摩擦面は H 試験片よりも美しい。

鉛-アンチモン-すず合金試験片 (J ~ Q) の摩擦では、MICr 軸にいずれの試験片材料が凝着しても、ガーゼでふきとれるがもとの光沢は得られない。

図 6-15 に L および P 試験片と軸の摩擦後の表面顕微鏡写真を代表的に示した。MICr 軸に対する試験片の摩耗はわずかであり、しかもその摩耗部分は N あるいは Q 試験片を除けば、非常に美しかった。

MICr-P (chan) 軸の目づまり状態は試験片材料によって異なるが、いずれの試験片と組合せてもチャンネルみぞは試験片の摩耗粉で埋められる。軸表面をガーゼでふけば M および Q 試験片以外は取り除ける。チャンネルみぞの太い軸では目づまりも多く、表面をガーゼでふいても簡単にとれないぐらい強く凝着を起こす。

試験片の摩耗は大きく、くぼみの底の部分にはチャンネルによる引かきのため、

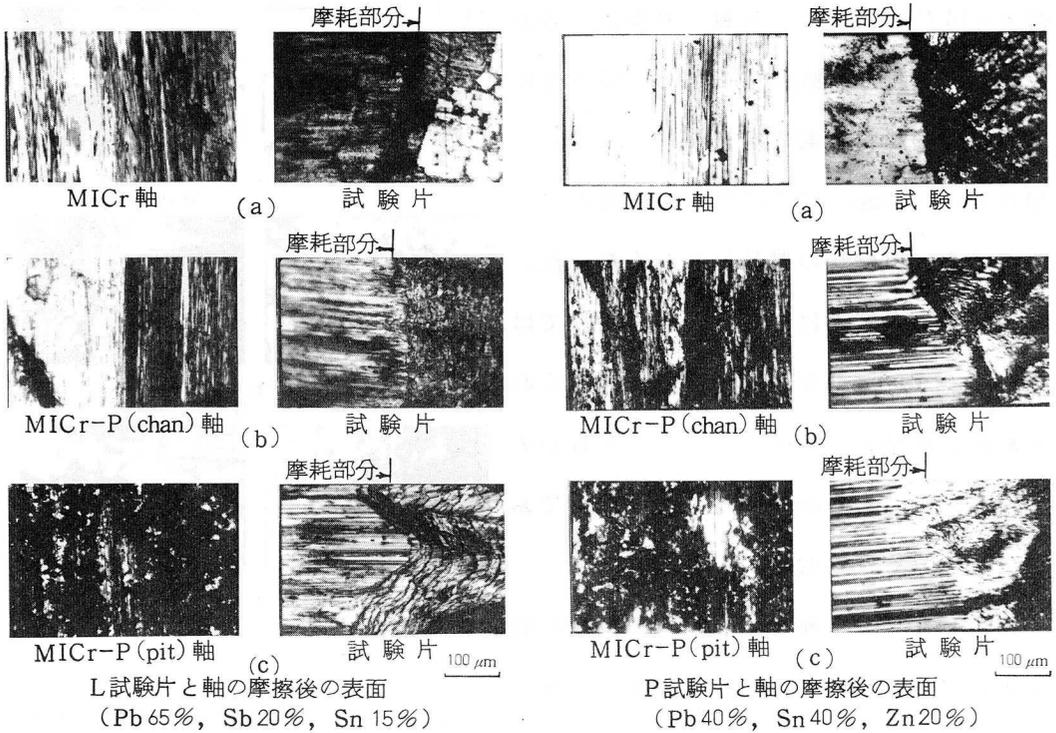


図6-15 摩擦面の顕微鏡写真

非常に荒く削り取られたような傷がつき、摩耗部分の前方には削り取られた試験片材料が波状に堆積する。

MICr-P (pit) 軸はもとの軸表面が黒いため、わずかな試験片材料が凝着しても非常に目だつ。その凝着物はガーゼでふきとれば、J、KあるいはQ試験片では、取り除くことができた。試験片の摩耗部分のくぼみは非常に美しく、MとP試験片では、摩耗部分の前方に波状に摩耗粉が堆積する。

以上のごとく、軟かい金属を多く含む試験片はMICr-P軸に対して目づまりの原因となり、また摩耗部分の前方には摩耗粉が堆積する。硬い試験片では摩耗粉が脱落し、チャンネルみぞのみぞ幅が大きいと目づまりを起こしやすい。

めっき軸に対する軸受はあまり軟かい金属 (Sn, Pb) よりも少し硬い金属 (Sb, Cu) のほうがよく、さらにその硬い中に軟かい金属が含まれているほうがなじみをよくし、よい結果が得られる。第2章において、ケルメット軸受がクロムめっき軸に対してよい結果を示したのは、上記のような化学成分を有している

ためと考えられる。

これらの材料を結晶構造から検討すると、クロムめっき軸が体心立方格子構造であるため、体心正方格子であるすずよりも面心立方格子である銅あるいは鉛のほうが凝着しにくいと考えられる。このことは、Sikorski の報告で、結晶構造が二面の凝着力を支配すると述べている⁵⁾ のと一致している。

3.4 軟質金属を軸へ押付けた場合の圧こん形状の観察

ポーラスクロムめっき軸のチャンネルみぞあるいはピンポイント穴に目づまりが多く生じたため、軸を回転させないで、鉛試験片を10 kg で押しつけ、その後試験片表面を観察した。その結果、図6-16 に示したごとく、それぞれの軸のポーラスクロムのタイ

プが鉛試験片表面に転写（とつの部分がみぞあるいは穴に相当する）されている。このように軸に軟かい試験片が押し込まれ、その状態で軸が

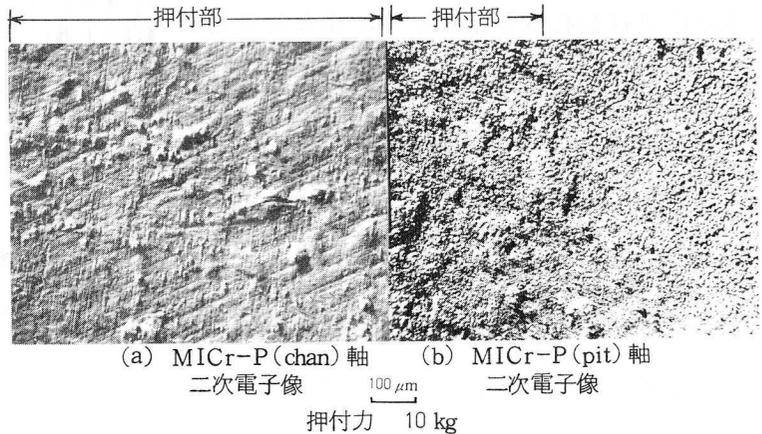


図6-16 鉛試験片へのポーラスクロムのタイプの転写状態

回転すると、みぞあるいは穴に入り込んだ部分は試験片表面から機械的に除去され、軸表面はすぐに目づまりを起こす。目づまりした材料は試験片と同種金属であるから、これらの接触部では凝着、移着、再移着などをくり返す。その結果試験片温度は上昇し、焼付きの過程をたどると考えられる。

3.5 温度によるめっき面の割れの現象

めっき厚さ0.1 mm のクロムめっき軸表面は、温度50℃では割れは生じなかったが、100℃では幅1.6 μm、また150℃では0.8 μmの割れみぞが観察された。この割れみぞ幅が100℃に比べて150℃において小さくなっているのは、150℃では割れみぞ数が増加しており、応力が一個所に集中しないで分散したためと思われる。

めっき厚さ 0.065 mm のクロムめっき軸を炉から取りだし、常温で 60 日放置後、その表面を顕微鏡で観察した。その結果を図 6-17 および表 6-3 に示した。

表 6-3 加熱温度と割れ

図 6-17 の 番号	加熱温度 (°C)	割れみぞ幅 (μm)
(a)	50	0.2
(b)	100	0.3
(c)	150	0.3
(d)	200	0.2
(e)	300	0.3

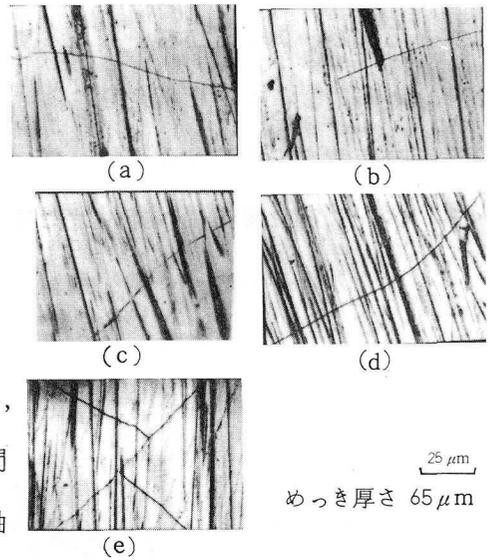


図 6-17 MICr 軸の割れ

軸表面には幅 0.2 ~ 0.3 μm の割れを生じ、300°C では割れ数が増加した。また放置時間と割れの生じる関係を調べた結果、めっき軸を炉から取り出した後、室温に近く(約 1 時間放置)になれば割れが生じることが観察できた。

つぎに、ポーラスクロムめっき軸のチャンネルタイプのみぞ幅が加熱温度に対して変化すると考えられるため、その状態についても観察した。

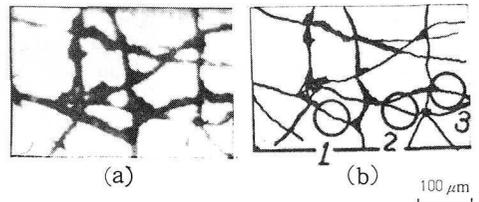


図 6-18 MICr-P(chan) 軸の割れ

炉に入れる前の温度 (30°C) における表面顕微鏡写真を図 6-18 (a) に、みぞ幅測定位置を (b) にそれぞれ示した。

100°C および 200°C 加熱後のみぞ幅の測定結果を表 6-4 に示した。

表 6-4 温度とチャンネルみぞ幅の変化 (μm)

測定位置	30 °C	100 °C	200 °C
1	11.6	15.0	14.2
2	2.5	3.3	2.5
3	15.0	25.0	15.0

みぞ幅は 30°C より 100°C あるいは 200°C に加熱するほうが広がるが、100°C と 200°C では 100°C において広い。これはクロムめっき軸の割れみぞ数が増加した場合のように、200°C では軸表面に別の割れが生じたか、あるいは測定点以外に存在するみぞ幅が変化したためと考えられる。

MICr-P (pit) 軸についても MICr-P (chan) 軸と同様の測定を行ったが、加熱による穴の広がりあるいは 1mm^2 当りのピット数の変化を観察することができなかった。

以上の結果、クロムめっき軸の割れみぞ幅はめっき厚さが厚いほどあるいは温度が高いほど大である。しかし温度がある程度高くなると割れみぞ数が増加し、みぞ幅は小さくなる。またチャンネルみぞ幅も温度とともに変化する。このような表面のミクロ的な割れ目に、くり返し応力がかかると軸が疲労破壊する恐れがある。しかも母材からの疲労の割れ目とめっき層の割れ目とが一致すると報告されているので⁶⁾ めっき表面の割れには注意する必要がある。

この割れによる軸表面のおうとつ部が軸受材料を引かく恐れがあるため、そのとつ部を取り除かねばならない。その一手段として、使用時の温度とほとんど同じ温度までめっき軸を加熱し、冷却後研削して使用するのがよい。めっき後の加熱において、 600°C までは密着力にほとんど影響しないがそれ以上加熱すると密着力は弱くなるため^{7,8)} これ以下の温度で扱うのがよい。

まためっき時に吸蔵された水素が母材の疲労強度を低下させると報告されているので⁹⁾、上記の加熱はこの水素を放出するのにも効果があると考えられる。

4. 結 論

- (1) ポーラスクロムめっき軸は、チャンネルみぞあるいはピット中に油を保持していないと目づまりを起こしやすく、特にチャンネルタイプでは、みぞ幅の大きいものほどその傾向は大きい。ピンポイントタイプでは局所的な目づまりをするのに対して、チャンネルタイプではみぞを埋めているような目づまりをする。
- (2) クロムめっき軸に対して、すずあるいはりん青銅は凝着を起こしやすい。銅あるいは鉛は試験片温度が高くなる傾向があるが、凝着力は小さい。特に鉛はなじみ性をよくする作用をしているように思われる。

- (3) ポーラスクロムめっき軸に対する軸受材料は、あまり軟かい金属よりも硬い金属のほうが軸により掘り起こされることが少なくよい。しかも硬い金属の中に軟かい金属が含まれているものはなじみ性をよくする作用がある。
- (4) 結晶構造から軸受材料を検討すると、クロムめっき軸が体心立方格子構造であるため、体心正方格子であるすずよりも面心立方格子の銅あるいは鉛のほうが結合しにくいことが実験からも明らかである。
- (5) クロムめっき軸を相手とする軟かい試験片のバフ仕上時には、酸化クロムを研磨剤として用いないほうがよいが、しかし用いた場合には、さらに水のみでバフ仕上げするほうがよい。
- (6) めっき面の割れはめっき厚さに関係し、薄いと割れやすく、温度がある程度高くなると割れみぞ数は増加するが、割れみぞ幅は小さくなる。
- (7) き裂によるとがった部分は軸受面を引かくと考えられる。したがって、使用時と同じ温度に軸を加熱し、冷却後研削する方法あるいは加熱は省略するが、研削時の冷却を少なくして高温で研削する方法で、使用時に割れかどが存在しないようにすることが望ましい。めっき後加熱することはめっき時に吸蔵された水素を放出するのにも役立つ。

文 献

1. 肥田 昭, 市村雄弘 : 潤滑, 14, 2 (1969) 70.
2. W. H. Spencer : Steel, 103 (1938) 60.
3. B. Joust : Metal Progr., 65 (1954) 76.
4. J. E. Jackson : J. SAE, 48 (1941) 28.
5. M. E. Sikorski : Wear, 7, 2 (1964) 144.
6. F. D. Rowe, J. B. Dance : Metal Progr., 53 (1948) 537.
7. 岸 松平 : 機械工業 (1962-8) 91.
8. 石田武男 : 金属, 別冊 (1965-3) 7.
9. S. Kocanda : Metalloberf., 15, 4 (1964) 101.

第 7 章 軸受材料の摩耗

1. 緒 言

第 6 章では、無潤滑下でクロムめっき軸あるいはポーラスクロムめっき軸と各種の純金属や合金試験片の凝着現象について述べた。その結果、クロムめっき軸に凝着の起こしやすい金属材料の種類が明らかとなった。

しかし無潤滑状態の摩擦では軟かい試験片がポーラスクロムめっき軸のチャンネルみぞあるいはピット中に入り、目づまりを起こすことが多い¹⁾。この現象は潤滑下においても生じるか調べる必要がある。

本章ではアムスラ式摩耗試験機を用いて、めっき軸と試験片を滴下潤滑あるいは油浴潤滑下で摩擦させ²⁾、試験片の温度上昇、摩擦係数あるいは摩耗量を測定した。試験片としては第 6 章と同じ材料の試験片あるいは黄銅、アルミニウム試験片を用いた。そのうち数種類の試験片については油浴潤滑下で垂直荷重一定の場合だけでなく、段階的に増加させた場合、さらに両場合とも試験片を軸方向に往復動させた³⁾ 場合についても測定を行い、めっき軸に適した軸受材料を調べた。

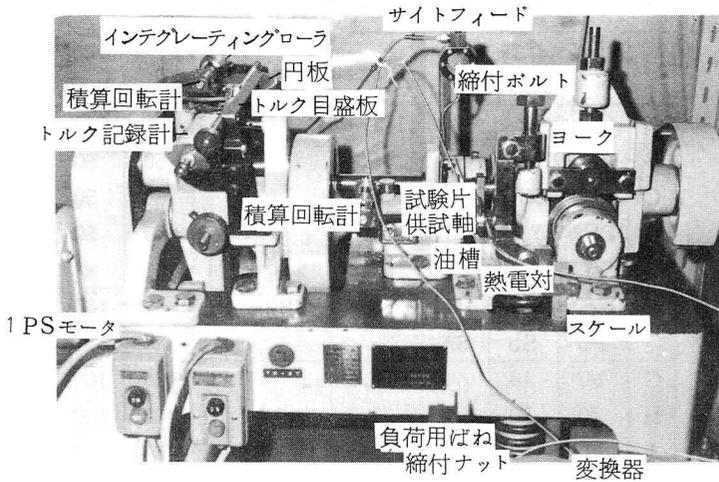
2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

試験機としてはアムスラ式摩耗試験機を用いた。試験機の概略を図 7-1 に、仕様を表 7-1 にそれぞれ示した。

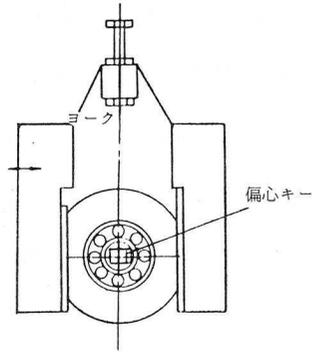
供試軸は下側の回転軸に取付け、250 rpm で回転する。試験片は上側に取付けて固定する。荷重はばね方式により、上側試験片を下側の供試軸に押しつけてかける。本実験での荷重は 50 kg (19.2 kg/cm^2) あるいは 100 kg (38.5 kg/cm^2) とした。

潤滑方法として、滴下潤滑法と油浴潤滑法を用いた。潤滑には SAE 30 番 モー



(a)

図7-1 摩耗試験機



(b) 往復動装置

タオイルを用い、滴下潤滑では歯車ポンプとサイトフィードにより、送油量を0.01 cc/minに、また油浴潤滑では供試軸が油に10 mm 浸るような油槽(35×100×100mm)を用いた。

2.2 供試軸と試験片の形状寸法

供試軸は図7-2の形状にS45C(Hv278)で作成し、第1章表1-1の条件でめっきを施し、軸の仕上り寸法が $40^{+0}_{-0.028} \phi$ めっき厚さ130 μm 、表面あらさ $1.2 \sim 1.5 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ になるよう研削加工を行った。

試験片の化学成分、硬さおよび実験時の荷重を表7-2に示した。

試験片の形状寸法を図7-3に示した。試験片A, F, RおよびSは板材から加工し、その他の試験片は砂型に溶融金属を流し込み、その後、機械加工をした。

表7-1 試験機の仕様

出力 (W)	750
回転速度 (rpm)	250
油槽容量 (cc)	350
負荷 (kg)	25 ~ 300
最大トルク (kg·m)	150
仕事量	測定可能

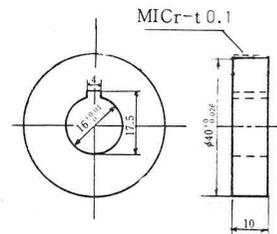


図7-2 供 試 軸

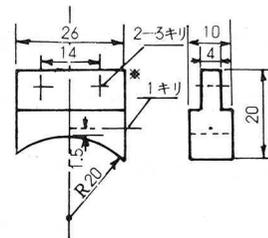


図7-3 試験片

試験片には温度測定のため供試軸と接触面下 1.5 mm の位置に 1 mmφ、深さ 13 mm の穴を※面からあけた。

試験片の接触面の仕上げには、図 7-4 に示した治具を用いる。治具の研磨紙用リングに耐水研磨紙

(1000番) を巻きつけ、治具を回転させ、その上に試験片を乗せて研磨紙仕上げをする。次にバフ用リングにバフを巻きつけ、第 6 章 3.3 節で研磨剤が凝着に影響を及ぼすことが明らかとなったため、研磨剤を用いないで、バフ仕上げをした。

研磨紙仕上げとバフ仕上げの両場合とも試験片の温度上昇を防ぐために、水溶性切削油剤と水を 1 : 100 の割合で混ぜた乳化油を用いた。

2.3 温度測定方法

試験片の温度測定は図 7-3 の試験片に設けた温度測定用穴に、長さ 1000 mm の鉄-コンスタンタン標準熱電対 (素線径 0.2 mm, SUS 保護管外径 1 mm) をそう入し、変換機を介して打点式多点自動温度記録装置で行った。記録装置の

表 7-2 試験片の化学成分, 硬さ及び実験時の荷重

試験片	化学成分 (wt %)			硬さ Hv	JIS 記号	荷重 (kg)	
	Pb	Sb	Sn			滴下	油浴
A	Cu 99.90 以上			175.0	CuP1-1/2H	100	100
B	Zn 99.85 以上			63.0		50	50
C	Sn 99.95 以上			13.0		50	50
D	Pb 99.95 以上			6.3		50	50
E	Sb 99.95 以上			103.8		100	×
F	Cu95.04, Sn6.76, P0.20			230.4	PBP2-1/2H	×	100
G	90	10	0	20.8		100	100
H	70	30	0	28.9		100	100
I	50	50	0	68.6		100	100
J	70	10	20	17.7		100	100
K	60	20	20	22.6		100	100
L	65	20	15	62.6		100	100
M	60	30	10	35.2		100	100
N	55	40	5	74.2		100	100
O	50	0	50	13.4		100	100
P	40	20	40	20.2		100	100
Q	78	16	6	27.6	100	100	
R	Cu 0.10, Mg 2.5, Cr 0.25, Zn 0.1, Mn 0.1, Al 残			99.7	A2 P1	×	100
S	Cu 60.20, Zn 39.79, Fe 0.006, Pb 0.005			113.8	BsP3-1/2H	×	100

(注) 荷重欄の×印は実験を行っていない。

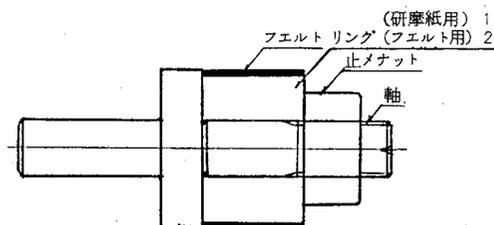


図 7-4 試験片仕上用治具

打点間隔は 60 秒で、紙送り速度は 300 mm/h とした。

潤滑油の温度測定は上記と同様の熱電対を用い、油タンク中に浸し、変換器を介して上記の自動温度記録装置で行った。

2.4 摩擦係数の測定方法

回転する供試軸（下側）と固定試験片（上側）の間に生じたトルクはトルク計の指針の移動距離となって表われ、記録筒に巻きつけた用紙にペンで記録される。そしてトルク装置と直結している仕事量測定装置で仕事量を読みとる。

仕事量測定装置は図 7-1 (a) に示したように回転する円板上に乗っているインテグレーションローラ（副尺使用で 1/100 回転まで測定可能）と積算回転計からなっている。この積算回転計の読みから次式で摩擦係数を算出し、求める。

$$\mu = \frac{W}{2\pi r NP}$$

μ : 摩擦係数

W : 仕事量測定装置の読み (kg-m)

r : 供試軸の半径 (m)

N : 供試軸の総摩擦回数 (回)

P : 試験片に加えた接触垂直荷重 (kg)

荷重を段階的に増加させた場合は、増加後 1 万回転時の仕事量を読みとり、その負荷時における摩擦係数を求めた。

2.5 摩耗量の測定方法

供試軸と試験片の摩耗量は実験前後の重量を直示天秤（秤量 160 g，読取限度 0.05 mg）で測定し算出した。

合金試験片の摩耗量 (mg) は各合金の混合割合と純金属の密度から mm³ に換算した。

2.6 負荷の方法

負荷は、図 7-1 (a) に示した締付ボルトおよびナットを締付け、負荷用ばねを圧縮し、その荷重をヨーク端にかけ、試験片を供試軸に押しつけてかける。その値はスケールで読みとる。滴下潤滑あるいは油浴潤滑における試験片 (B~D) に対しては荷重を 50 kg とし、その他の試験片に対しては 100 kg とした。したがって見かけの接触圧力では 19.2 kg/cm²，あるいは 38.5 kg/cm² となる。油浴潤

滑で荷重を段階的に変化させる場合は図7-5および図7-6(a)に示したごとく、1万回転ごとに25 kg (9.6 kg/cm^2) ずつ増加させ100 kg (38.5 kg/cm^2) で4万回転まで連続回転させる。垂直荷重一定の場合は図7-6(b)のごとく、荷重50 kgで5万回転まで連続回転させる。さらに往復動を加える場合は図7-1(b)のカム軸に偏心用キーを用いて2 mm 偏心させ、この軸の回転によって試験片を軸方向に4 mm、300回/分 往復動させる。図7-6(c)あるいは(d)のごとく、試験片に往復動を加えると常に新しい相手面を摩擦することになり、初期の摩耗がいつまでも続く^{4,5)}。

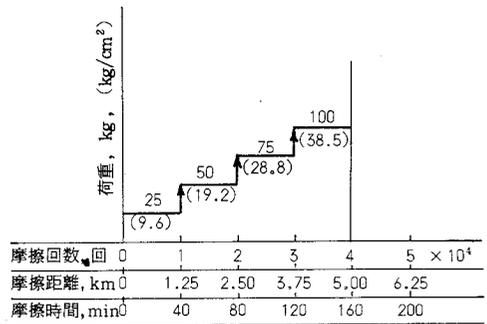


図7-5 段階的に負荷する場合の荷重と摩擦回数、摩擦距離、摩擦時間の関係

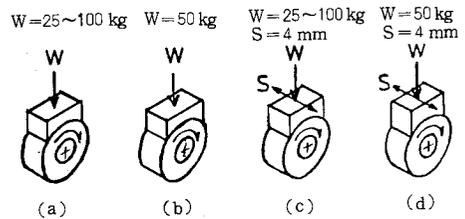


図7-6 負荷と往復動

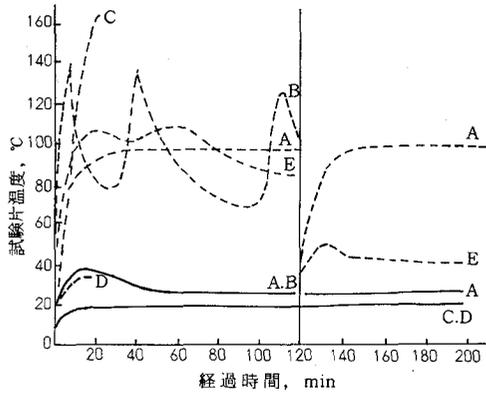
2.7 摩耗面の観察

実験後の供試軸と試験片の摩耗面は主として金属顕微鏡で観察した。また負荷を段階的に増加させた場合あるいは試験片を軸方向に往復動させた場合に MICr-P 軸の目づまりが多く生じたので、その目づまりした試験片材料の成分を調べるため、XMA 観察も行った。

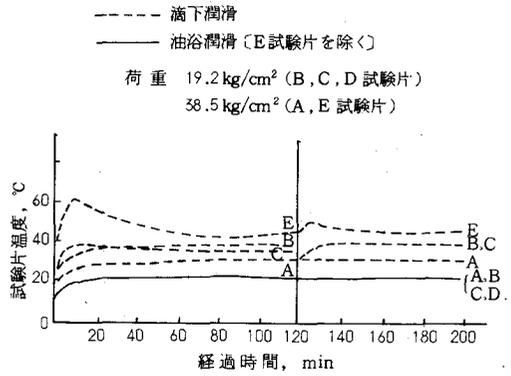
3. 実験結果および考察

3.1 温度上昇に及ぼす潤滑方法の影響

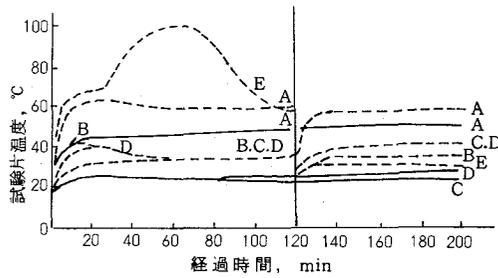
図7-7 に軸別に純金属試験片の温度を、また図7-8 に合金試験片の温度をそれぞれ示した。



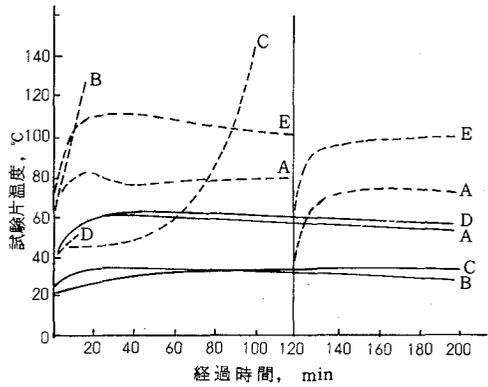
(a) S45C軸の場合



(b) MICr軸の場合



(c) MICr-P (chan)軸の場合



(d) MICr-P (pit)軸の場合

図7-7 純金属試験片の温度

滴下潤滑の場合は、摩耗量測定のために摩擦回数3万回（120分経過）で試験機を停止させたので一時温度は低くなるが、測定再開後約20分でなじみ性のよい試験片では停止前の温度にもどる。しかしなじみ性の悪い試験片では、停止前と同じような温度上昇過程をたどるが、その温度は低い。

経過時間に対する試験片温度が低く、しかも速く定常状態になればなじみ性が最もよく、高くても速く定常状態になればよい。図7-7(d)の滴下潤滑におけるはず試験片のように、急に温度が上昇する場合は最もなじみ性が悪く、(a)の滴下潤滑における亜鉛試験片のように温度が上昇、下降をくりかえす場合が次に

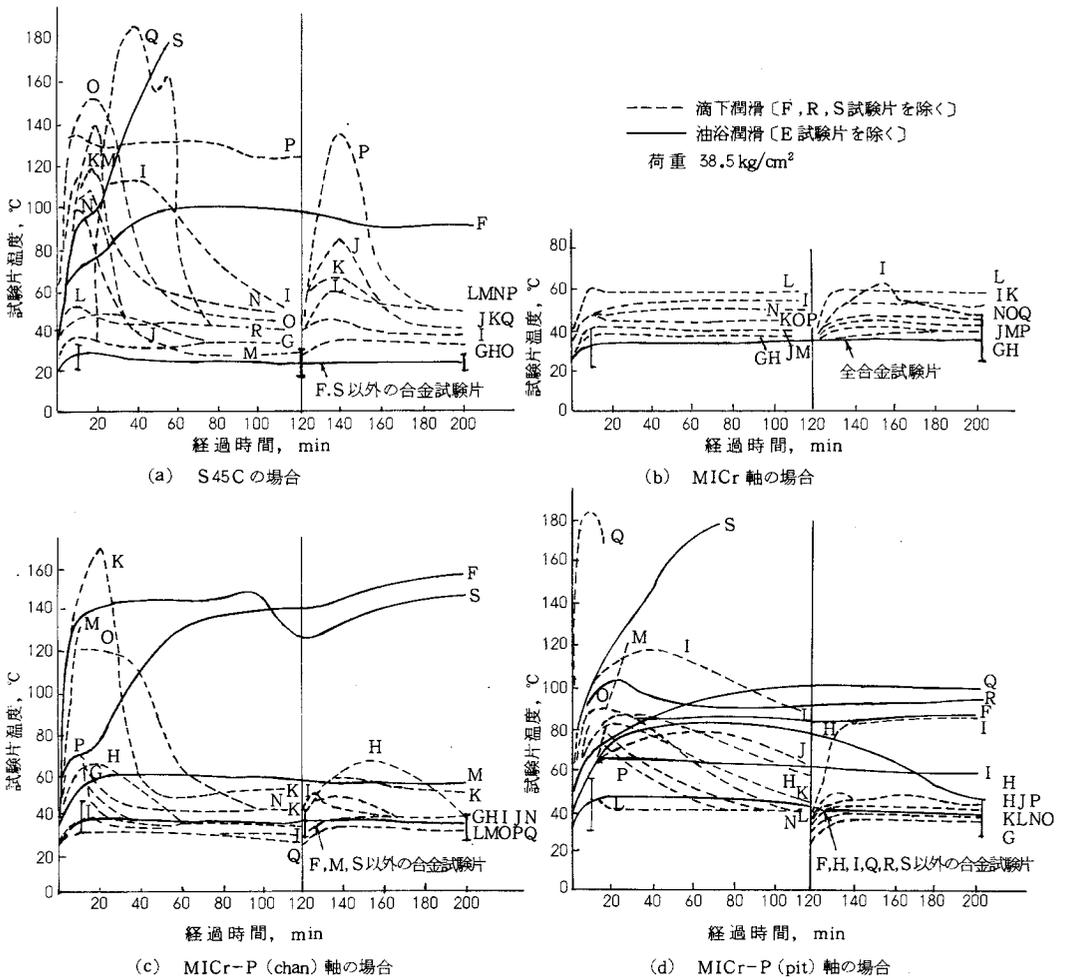


図 7-8 合金試験片の温度

悪い。

滴下潤滑と油浴潤滑とでは、油浴潤滑のほうが試験片温度は低く、しかも速く定常状態になる。特に、油浴潤滑下における合金試験片は試験片の温度範囲で示したように、一部の試験片以外はいずれの試験片においても温度に大差はない。

試験片材料としては、鉛がいずれの潤滑方法においても、またいずれの軸に対してもなじみ性がよい。

3.2 温度上昇に及ぼす負荷方法の影響

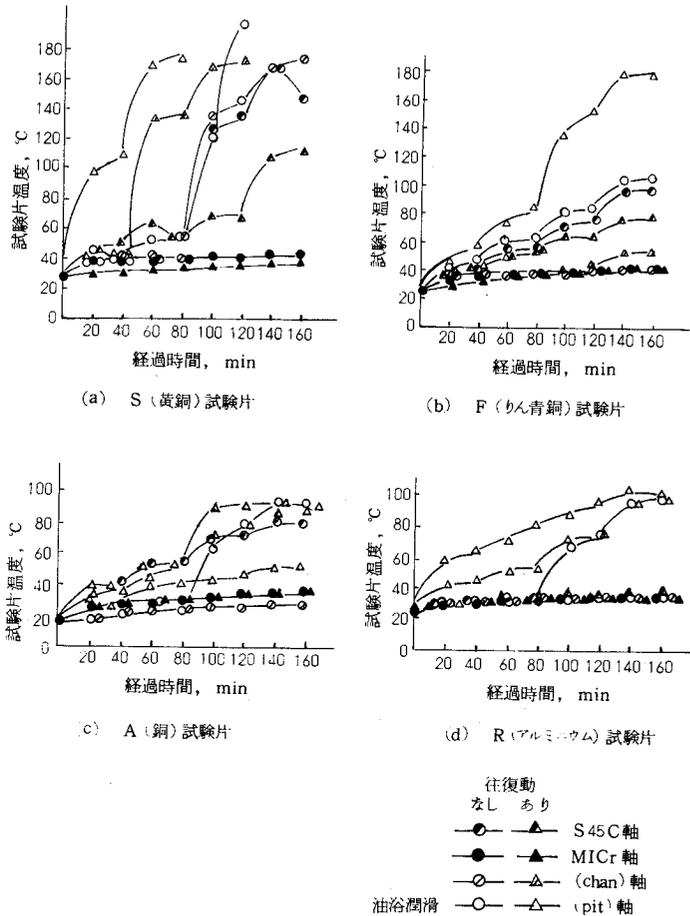
荷重を段階的に増加させた場合とさらに往復動を加えた場合の各試験片温度を図7-9に示した。

MICr 軸では、いずれの試験片に対しても荷重を増加させるごとに温度はごくわずか高くなるが、急激な温度上昇はしない。

MICr-P軸では、MICr-P (chan) 軸に対してりん青銅が、MICr-P (pit) 軸に対して銅試験片が、温度

は低くてよい。さらに往復動を加えた場合でも、MICr 軸ではほとんど試験片の温度は変わらないが、MICr-P軸ではいずれの試験片においても試験片温度は上昇する。黄銅試験片では $50\text{ kg (}19.2\text{ kg/cm}^2\text{)}$ 、その他の試験片では $75\text{ kg (}28.8\text{ kg/cm}^2\text{)}$ の荷重を加えると、温度は急に上昇する。

垂直荷重 50 kg 一定の場合とさらに往復動を加えた場合の摩擦回数 5 万回時の試験片温度を図7-10に示した。



荷重 9.6 kg/cm^2 を 40 分ごとに段階的に増加

図7-9 試験片の温度

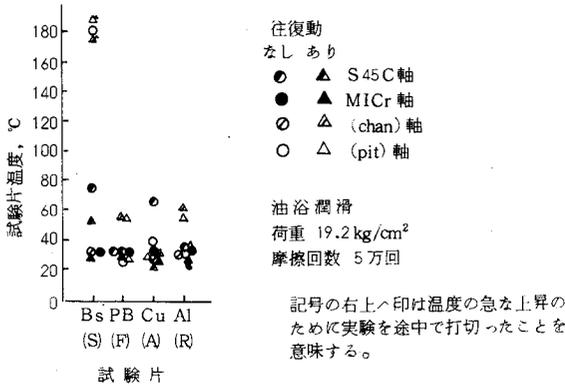


図7-10 試験片温度

めっき軸に対して銅試験片は、往復動を加えても試験片の温度がほとんど変わらない。黄銅試験片とMICr-P軸との組合せでは、試験片温度は非常に高くなり、焼付の生じることがある。

3.3 摩擦係数に及ぼす潤滑方法の影響

図7-11に供試軸と各試験片を組合せた場合の滴下潤滑あるいは油浴潤滑における始動時より5万回転までの平均摩擦係数を示した。

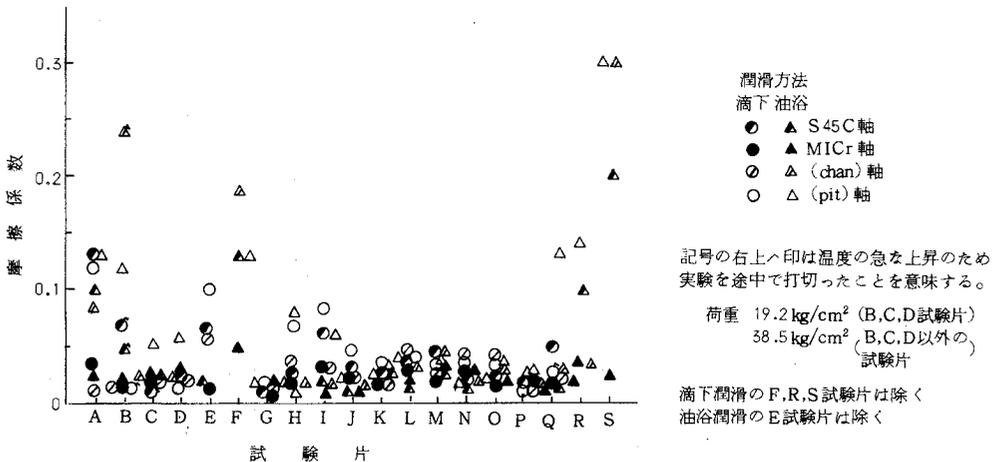


図7-11 摩擦係数 (滴下あるいは油浴潤滑の場合)

一般に油浴潤滑のほうが滴下潤滑よりも摩擦係数はわずかに大きい。

油浴潤滑では供試軸が油中に浸っているので、本実験の測定方法によるときは油の粘性が回転軸に影響を与えるため摩擦係数が大きいと考えられる。

材料別では鉛を多く含んでいる試験片(G~I)のほうがずずを含んでいる合金試験片(J~Q)よりも摩擦係数は低い。油浴潤滑における銅合金試験片の摩擦係数は、銅以外の合金試験片よりも大きく、特に黄銅あるいはりん青銅試験片が大きい。

3.4 摩擦係数に及ぼす負荷方法の影響

図7-12に荷重を段階的に増加させた場合の各試験片の摩擦係数を示した。

一般的に摩擦係数は始動時のほうが大きく徐々に小さくなる。いずれの試験片に対してもMICr軸との組合せは、荷重に関係なく摩擦係数が低くてよい。

S45C軸あるいはMICr-P軸の組合せでは、荷重による影響が大きい。荷重を段階的に増加する場合は、供試軸と試験片とのなじみができかけた時に荷重を増加させるため、常に初期摩耗の状態をくり返し、軸の種類によって摩擦係数が大きくなると思われる。

MICr軸では往復動を与えても摩擦係数に大きな影響を及ぼさないが、MICr-P軸ではポラスのみぞあるいは穴に軟かい試験片が入り込んだり、摩耗粉で目づまりが生じたりして、摩擦係数が増加したと思われる。しかし銅試験片とMICr-P (pit)軸との組合せのように往復動を加えても、摩耗初期に速くなじみができた場合には荷重の増加に対しても摩擦係数は大きくならないでよい結果を示すこともある。したがって、MICr-P軸では摩耗初期において、摩耗粉の除去あるいは温度上昇に注意をする必要がある。

図7-13に荷重50kg(19.2kg/cm²)の場合の摩擦係数を示した。

いずれの試験片においても摩擦係数の高低が図7-10の温度の高低と同じ傾向を示し、摩擦係数と温度が直接関係していることがわかる。

MICr軸に対してはいずれの試験片もよい。

図の摩擦係数が0.01~0.10の範囲にあることから潤滑状態は境界潤滑あるいは混合潤滑の領域⁶⁾にあると推定できる。

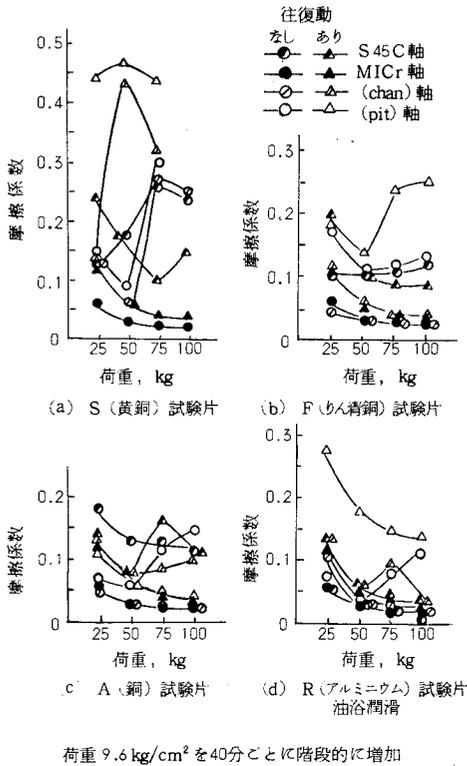


図7-12 摩擦係数

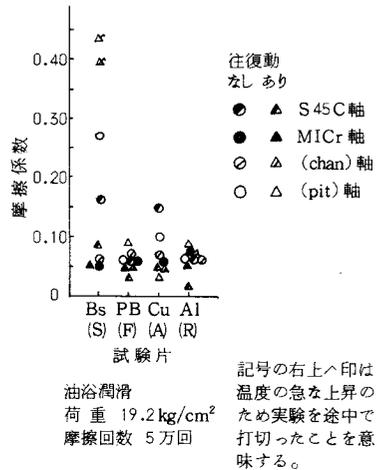


図7-13 摩擦係数

3.5 摩擦量に及ぼす潤滑方法の影響

図7-14に摩擦回数5万回までの各試験片の摩擦量を示した。

ほとんどの試験片材料において、試験片の摩擦量はMICr軸との組合せでは最も少なく、MICr-P軸とでは多い。本研究の摩擦量は0.1~10の範囲に多く、比摩擦量で示せば $1.6 \times 10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{kg} \cdot \text{mm}$ に相当する。この値は各種の材料の摩擦について調べた報告と⁷⁾一致している。

MICr-P軸と試験片の組合せで、摩擦量が多くなったのは、第6章3節あるいは4節で述べたごとく、MICr-P軸が軟かい試験片で埋め込まれ、軸の回転によって軟かい試験片が機械的破壊を起こし、摩擦量を増加させたと考えられる。

滴下潤滑では、潤滑後の油が油受けに落ちる時に、摩擦粉は油に混って除去されるが、油浴潤滑方法では摩擦粉が油タンクの中に残る。そして摩擦粉の混じっ

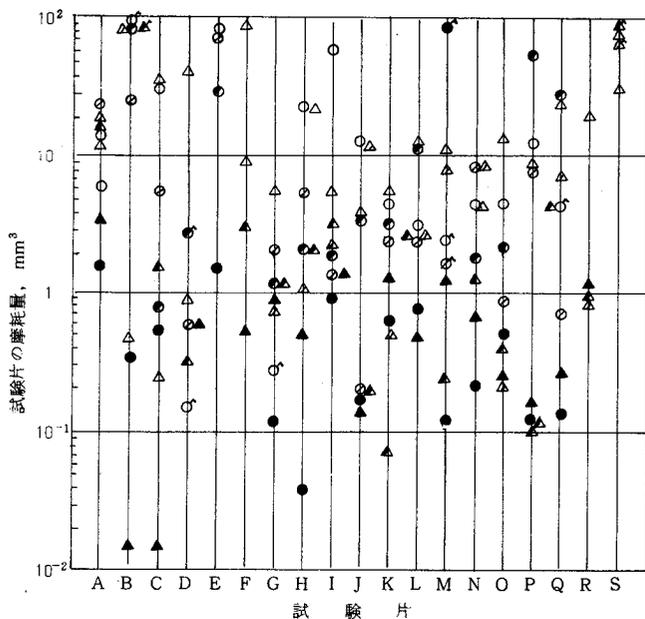


図7-14 試験片の摩耗量

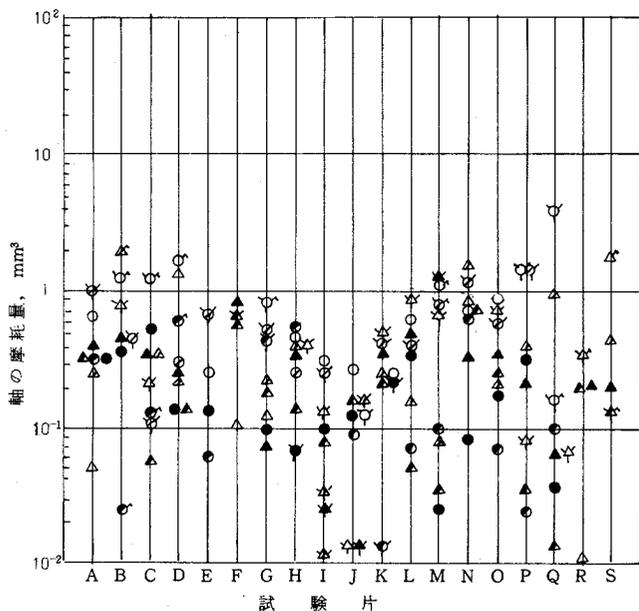


図7-15 供試軸の摩耗量

た油で潤滑するためか、試験片の摩耗あるいは MICr-P 軸の目づまりが生じやすい。

図 7-15 に供試軸の摩耗量を示した。

MICr-P 軸は実験後の軸の重量が増加することが多い。この重量増加の原因は、油がチャンネルみぞあるいはピット穴へ浸入、摩耗粉による目づまりあるいは試験片材料の凝着などが考えられる。しかし実際にはこれらの現象が重なっていると思われる。したがって、重量測定あるいは顕微鏡観察だけでこの現象を区別するのは困難である。ほとんどの軸の摩耗量は $0.02 \sim 1.0 \text{ mm}^3$ の範囲にあり、図 7-14 の試験片の摩耗量に比べれば少ない。

軸の目づまりは、滴下潤滑では MICr-P (chan) 軸に、油浴潤滑では MICr-P (pit) 軸に多い。

軸の重量増加の少ない相手材料は、単体金属では銅 (A)、鉛 (D) あるいはアンチモン (E) で、Pb+Sb+Sn 合金では N (Pb : 55%, Sb : 40%, Sn : 5%) である。

この N 試験片で軸の重量増加が少なかったのは Pb+Sb+Sn 合金試験片の中で最も Sn の含有率が少なく、しかも硬さが大であるためと思われる。

以上のごとく、MICr-P 軸の潤滑下における摩耗量は正確に測定することが困難であり、相手材料を調べるための参考程度としかならなかった。

3.6 摩耗に及ぼす負荷方法の影響

図 7-16 に荷重を段階的に増加させた場合の各試験片の摩耗量を示した。

MICr-P 軸との組合せで、試験片に往復動を加えた場合、銅試験片と MICr-P (pit) 軸の組合せ以外はいずれの組合せも摩耗量は多い。すなわち、荷重を増加させて往復動を加える場合には銅が MICr-P (pit) 軸に適している。

図 7-17 に荷重 50 kg (19.2 kg/cm^2) の場合の各試験片の摩耗量を示した。試験片に往復動を加えた場合にアルミニウム試験片以外はいずれの試験片も MICr 軸と組合せれば、他の軸と組合せるよりも摩耗量は少ない。特に銅あるいはりん青

銅試験片の摩耗量は少ない。

一方 MICr-P 軸の摩耗量の測定では、チャンネルみぞあるいはピット穴へ潤滑油や摩耗粉が入るため、実験後の軸の重量が増加することが多い。MICr-P 軸のみぞあるいは穴に保持する油量を求めることができれば摩耗量は比較的正確に測定できる。そこで、この油量測定が可能かどうか調べるため、次の実験を行った。まず MICr-P (pit) 軸を超音波洗浄後、油中に 10 分間浸し油を含ませる。その後再び超音波洗浄を行い含ませた油が完全に除去されるかどうか個々の重量測定で調べる。その結果、油は完全には除去されていないことが判明した。したがって軸に含まれる油量測定は不可能であるため、真の軸の摩耗量を測定することは困難であることが明らかとなった。

MICr-P 軸の摩耗量測定では、軸の重量増減から凝着か摩耗かを大別し、重量が増加した軸に対しては顕微鏡あるいは XMA で観察し、その増加が相手試験片の移着か油によるものかを検討するのがよい。

3.7 摩耗面の観察

本実験に使用した供試軸あるいは試験片の数が多く、しかもそれらの組合せも多いため、特にめっき軸に凝着の起こしやすい黄銅試験片と組合せた場合の MICr-P (chan) 軸の XMA 写真を図 7-18 に示した。

図の (a) は MICr-P (chan) 軸の二次電子像 (SEI) で、(b) は Cr-K α 線

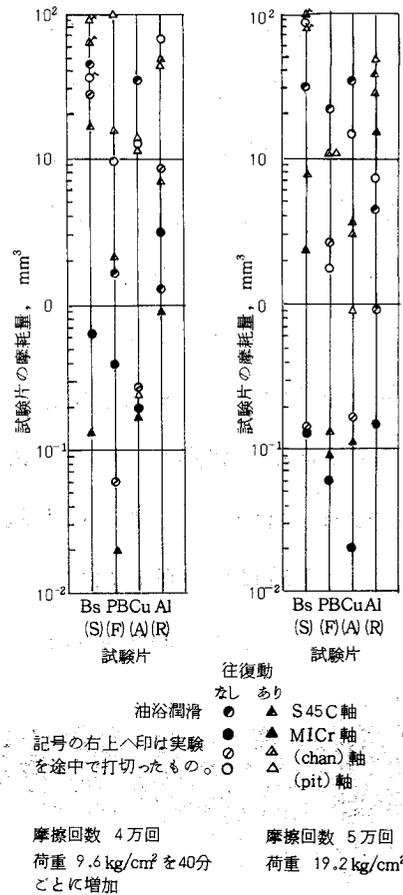
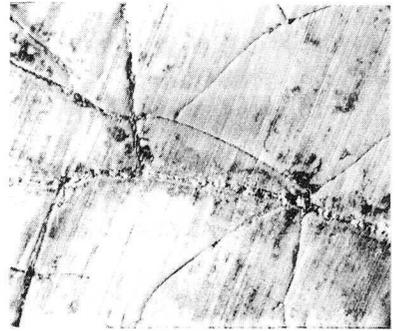


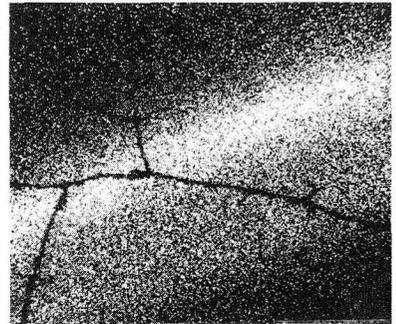
図 7-16 摩耗量 図 7-17 摩耗量

像で、(c)はCu-K α 線像である。(c)の写真から、軸のみぞ中に銅が入り込んでいることがよくわかる。このようにポーラスのみぞあるいは穴に相手材料が入り込むと、移着、再移着をくり返し、試験片の摩耗が増加する。

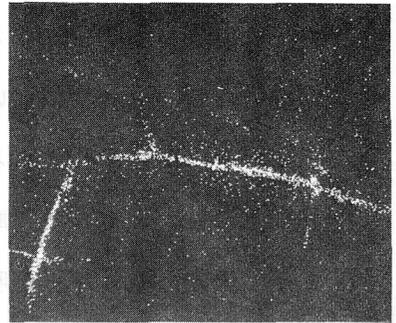
軸の目づまり深さを調べるため、供試軸をレジノイドブレードを用いて切断し、研磨紙で切断面を仕上げ、超音波洗浄した。その切断面をXMAで観察し図7-19に示した。その結果、目づまりしたものが試料作成時あるいは洗浄時に取り除かれていることが判明し、目づまり深さを測定することはできなかった。



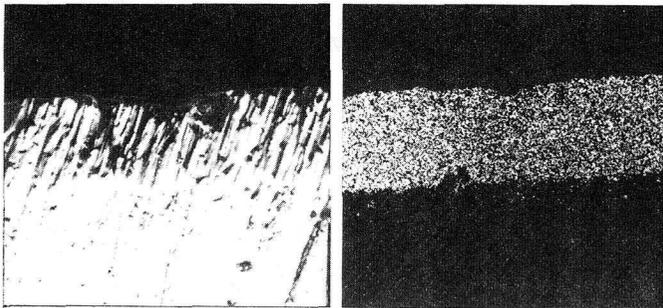
(a) 二次電子像



(b) Cr-K α 線像



(c) Cu-K α 線像 100 μ m



(a) 二次電子像 50 μ m (b) Cr-K α 線像
荷重9.6kg/cm²を40分ごとに段階的に増加、往復動なし
図7-19 MICr-P (chan)軸の切断面

(c) Cu-K α 線像 100 μ m
荷重9.6kg/cm²を40分ごとに段階的に増加、往復動なし
図7-18 黄銅/MICr-P (chan)軸の摩擦後の軸のXMA写真

めっき軸へ凝着しやすい材料は種々の材料の凝着の難易についての報告と⁸⁾一致している。しかし、ポーラスクロムめっき軸に対しては、凝着の問題だけでなく硬さと延性が目づまりに関係してくる。

4. 結 論

(1) 本実験の滴下潤滑法あるいは油浴潤滑法では、供試軸と試験片の間に潤滑油

- が介在しにくく、摩擦係数の測定から、境界潤滑あるいは混合潤滑とみなせる。
- (2) 経過時間に対する試験片の温度が低く、しかも速く定常状態になる試験片材料が最もなじみ性がよく、少し温度が高くても速く定常状態になればよい。したがって、クロムめっき軸に対する軸受材料としては銅あるいは鉛がよく、ポーラスクロムめっき軸に対しては試験片材料の硬さが目づまりに関係するので、硬い銅となじみのよい鉛の合金（ケルメット）がよいと思われる。
- (3) 回転軸上の試験片に負荷をかけ、さらに往復動が加えられる場合は、負荷を段階的に増加するよりも一定に保つほうが、温度、摩擦係数あるいは摩耗量が小さくてよい。
- (4) 摩擦回数5万回における摩耗量はいずれの試験片においても約 $0.10 \sim 10 \text{ mm}^3$ ($1.6 \times 10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{kg} \cdot \text{mm}$) であり、クロムめっき軸に対しては銅がよい。
- (5) クロムめっき軸は試験片に往復動が加わっても、ほとんど摩擦係数あるいは摩耗量に影響を及ぼさないが、ポーラスクロムめっき軸では影響があり、複雑な摩耗現象により、ポーラスクロムめっき軸の重量はかえってわずかに増加する。この重量増加の原因はポーラスのみぞあるいは穴に油や摩耗粉が入るためである。したがって、ポーラスクロムめっき軸の潤滑下における摩耗量は正確に測定することは非常に困難である。
- (6) 滴下潤滑法において、試験片の摩耗粉は潤滑後の油と共に落下し排出されるが、油浴潤滑では摩耗粉が油中に残り、軸の目づまりが多くなる。滴下潤滑ではチャンネルタイプポーラスめっき軸のチャンネルみぞに、油浴潤滑ではピンポイントタイプポーラスクロムめっき軸のピット穴に試験片材料が入り込み、目づまりを起こす。
- (7) クロムめっき軸あるいはポーラスクロムめっき軸に対する軸受材料としては、銅と鉛が適し、すず、黄銅あるいはりん青銅などは不適當である。

文 献

1. 肥田 昭, 市村雄弘 : 潤滑, 14, 2 (1969) 70.
2. 肥田 昭, 市村雄弘 : 日本機械学会関西支部講演論文集 (1971) 127.
3. 肥田 昭, 築添 正 : 日本機械学会北陸信越支部講演論文集 (1977) 118.
4. T. Sasada : Proc. 15th Jap. Congr. Mat. Res., 1971 (1972-3) 1.
5. 佐田登志夫 : 機械学会論文集, 24 (1958) 407.
6. 築添 正 : 日本機械学会関西支部第 69 回講習会 (1976) 1.
7. 佐藤準一 : 日本潤滑学会シンポジウム, 1~9 (1970~1977).
8. E. Rabinowicz : Proc. Int. Solid Lub. Symposium (1975) 84.

第 8 章 他のめっき軸との比較

1. 緒 言

第 7 章では、滴下あるいは油浴潤滑下におけるクロムめっき軸やポーラスクロムめっき軸と各種の材料とを組合せた場合の摩耗について述べた。その結果、クロムめっき軸に対する軸受材料としては、銅あるいは鉛がよいことが明らかとなった。

本章では、クロムめっき軸と組合せのよい銅を用いて、摩耗現象をさらに詳細に調べると共に、クロムめっきの代わりとして用いられようとしている西独で開発されたナトリウムボラナート (NaBH_4) を還元剤とする無電解化学ニッケルめっき (ニボジュールめっき) についても摩耗試験を行った。

試験機としては、アムスラ式摩耗試験機とこの試験機の 4 倍の回転速度をもつ試作摩耗試験機とを用いて、試験片の温度上昇、摩擦係数あるいは摩耗量の測定や、摩耗面の顕微鏡あるいは X 線マイクロアナライザによる観察などから両めっき軸と銅試験片の摩耗現象の相違について比較検討した。

2. 実験装置および測定方法

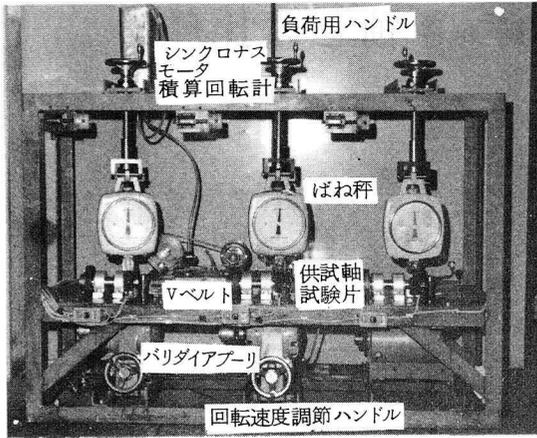
2.1 実 験 装 置

試験機としては第 7 章 2.1 節で述べたアムスラ式摩耗試験機と試作摩耗試験機を用いた。

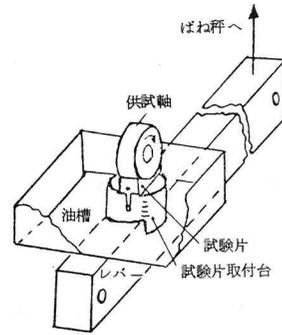
図 8-1 に試作摩耗試験機の概略図を、また表 8-1 にアムスラ式摩耗試験機 (A) と試作摩耗試験機 (B) の概要を比較した。

アムスラ式摩耗試験機は第 7 章 2.1 節と同じであるため説明を省略し、試作摩耗試験機について説明する。

A 試験機では、回転速度が 250 rpm であるため、数多くの実験を行うには時間



(a)



(b)

図 8-1 B 試験機

がかかること、また上下部試験片間の潤滑が下に取り付けられた供試軸の回転により行なわれているため、十分でないことなどが主な欠点である。

これらを改良するために、B試験機では、回転速度を 1000 rpm に、また試験片は油中に浸るよう供試軸の下側に取付けるようにした。

駆動方法は図 8-1 に示したごとく 200 W、1800 rpm のモータを駆動源として使用し、モータ軸にバリダイアプリーを取付けVベルトを介して供試軸を 1000 rpm で回転させた。回転速度は光電式回転計を用いて測定した。

負荷はばね方式で、図 8-1 (b) のごとくレバー上に乗せた油槽中の試験片がばね秤を介して負荷用ハンドルで上方に引きあげられ、供試軸を下側から押しつけて負荷する。MICr 軸に対しては 50 kg (19.2 kg/cm^2)、ニッケルめっき軸に対しては 25 kg (9.6 kg/cm^2) とした。

摩擦回数は 1, 2, 3, 5, 7.5, 10, 15, 20 万回とした。

A試験機における負荷は 100 kg (38.5 kg/cm^2) で、摩擦回数は 1, 3, 5, 10,

表 8-1 試験機の概要

項目	試験機	A	B
出力 (W)		750	200
回転速度 (rpm)		250	1000
油槽容量 (cc)		350	110
供試軸		下	上
試験片		上	下
仕事量測定		可	否
温度測定		自動記録	デジタル
熱電対		I-C	I-C

15万回とした。

摩擦回数と摩擦距離の関係を図8-2に示した。

摩擦回数 回	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	$\times 10^4$
摩擦距離 km	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	
摩擦時間 min	0	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800	A試験機
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	B試験機

図8-2 摩擦回数、摩擦距離、摩擦時間の関係

潤滑方法は、両試験機とも油槽にSAE30番モータオイルを所定量(表8-1)入れて用い、油浴潤滑とした。B試験機で長時間測定する場合に限り、油槽温度と同温度に加熱した油を油槽に補充して常に油面を一定に保った。

2.2 供試軸のめっき方法と試験片の形状寸法

供試軸の形状寸法は第7章2.2節と同じである。

MICrめっきは第1章表1-1の条件で、無電解化学ニッケルめっきは表8-2の条件でそれぞれ行った。

表8-2 無電解化学ニッケルめっきの条件

項目	条件	単位	標準	範囲
ニボジュールA-5X		cc/l	200	
ニッケル		g/l	7.5	1.5~8.0
カセイソーダ		g/l	40	30~60
安定剤 SA		mg/l	40	20~60
還元剤 A-1098		g/l	0.45	0.65~0.25
pH 値				≥ 14
めっき温度		°C	90	85~95
表面積/めっき液量		dm ² /l	1~3	≥ 0.3
析出速度		$\mu\text{m/h}$	25~30	10~60

この無電解化学ニッケルめっきは、西独バイエル社が開発し、ニボジュールめっきと呼ばれ、我が国においても数社がこのめっきを行っている¹⁾。

表8-2に示したごとく、従来のニッケルめっきと異なる

点はボロンを添加させた還元剤を用いていること、まためっき後の熱処理によってめっき膜の硬さが自由に得られることである。

ニボジュール皮膜組成はNi: 90~95%, B: 5~7%であると報告されている²⁾。

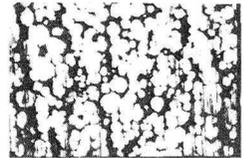
供試軸のめっき厚さは仕上り寸法で 0.1mm とした。供試軸はめっき加工後 600 番と石で、削り代 12 μm として研削仕上げを行い、表面あらさ 1.3 ~ 1.5 μm R_{max} とした。

ニボジュールめっき軸の表示方法についての規格はないため、本章の文中では下記のとおり表示する。

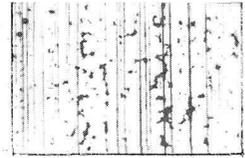
NiB 軸 熱処理を行わないニボジュールめっき軸

NiB-H 軸 熱処理を行ったニボジュールめっき軸

本研究に用いた NiB-H 軸の熱処理は次の 2.3 節で得た結果から、温度を 370 $^{\circ}\text{C}$ 、時間を 60 分と定め、熱処理後大気中で徐冷した。その表面顕微鏡写真を 図 8-3 に示した。



NiB 軸



NiB-H 軸

100 μm

図 8-3

ニボジュールめっき軸

試験片材料は MICr 軸、NiB 軸あるいは NiB-H 軸のいずれの軸に対しても銅（タフトピッチ銅板 TCuP）を用い、その形状寸法および加工方法などは第 7 章 2.2 節と同じである。

本研究に用いた供試軸と試験片の硬さ、表面あらさおよびめっき厚さを表 8-3 に示した。

表 8-3 供試軸と試験片
(硬さ、表面あらさ、めっき厚さ)

項目	軸・試片	MICr	NiB	NiB-H	TCuP
硬さ (Hv)		977	746	973	94
めっき厚さ (mm)		0.12	0.14	0.12	
表面あらさ R_{max} (μm)		1.5	1.5	1.3	1.0

(注) 硬さ測定時の荷重

供試軸は 300 g、試験片は 100 g

2.3 熱処理の方法

ボロンはごく微量の添加で鋼の焼入硬化能をいちじるしく増大させることは周知のとおりであり、また他の金属に添加しても同様の効果がある。

したがって NiB めっき軸では皮膜組成から、めっき析出後熱処理温度と時間を変化させ、使用に適した硬さを得ることができる。そこで熱処理温度と時間の硬さに及ぼす影響を調べるためマツフル炉を用いて実験を行った。

熱処理温度は 150 $^{\circ}\text{C}$ と 300 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ の範囲を 50 $^{\circ}\text{C}$ ずつ変化させる計 8 種類とし、

時間は 20～80 分の範囲を 20 分ずつ変化させる計 4 種類とした。試験片はそれぞれの温度と時間で加熱し、大気中で徐冷後、硬さ測定を行った。

2.4 温度測定方法

試験片にあけた直径 1 mm の穴に第 7 章と同じ、鉄-コンスタンタン熱電対をそう入し、A 試験機の場合は変換器を介して打点式自動温度記録計で記録させ、B 試験機の場合はデジタルマルチ温度計を用いて測定した。B 試験機での測定間隔は 10 秒とし、試験片温度が安定すれば 1 分とした。

2.5 摩擦係数の測定方法

A 試験機の場合は第 7 章 2.4 節と同じ方法で測定する。

B 試験機の場合は測定できない。

2.6 摩耗量の測定方法

両試験機に用いた供試軸あるいは試験片の摩耗量は第 7 章 2.5 節と同様に実験前後の重量を直示天秤で測定して求めた。

両試験機とも、各摩擦回数に対して、供試軸と試験片をそれぞれ 3～5 個使用し、実験時におけるばらつきについても調べた。

2.7 摩耗面の観察

実験前後の供試軸あるいは試験片の摩耗表面を金属顕微鏡で観察し、傷の有無を調べる。特に実験後、片当り、傷、凝着、焼付あるいはめっき層のはく離などの変化が生じた場合には、写真撮影を行った。また凝着あるいはめっき層のはく離した場合には XMA で凝着金属を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 硬さに及ぼす熱処理温度と時間の影響

図 8-4 に NiB 軸のめっき析出後の熱処理温度と時間によるめっき面の硬さの変化を示した。析出後の硬さは平均 Hv 746 である。熱処理温度 150℃ では処理時間を長くしても急に硬さは変化しないで Hv 800 になる。

しかし熱処理温度が 300℃ から 500℃ では、40 分までは時間とともに硬さは増し、その後あまり変化はない。温度 500℃ では 400℃ の場合よりも硬さは低くなり、550℃ あるいは 600℃ では熱処理時間とともに硬さは析出時よりも低くなり、純ニッケルの硬さに近づく。硬さが増すのは、面心立方格子の Ni と斜方格子の Ni₃B とからなる混合物を生成しているためと考えられている³⁾。

図 8-5 に熱処理後の NiB 軸表面を顕微鏡写真で示した。温度が高くなると表面は非常に微細な組織となる。

NiB 軸を長時間高温に保つと皮膜中のボロンが素地に拡散して Fe₂B を形成すると考えられている⁴⁾。

一般の使用に適した熱処理温度と時間は 360 ~ 380℃, 40 ~ 60 分の範囲にある。

3.2 試験片温度に及ぼすめっき軸の影響

A 試験機あるいは B 試験機において、MICr 軸、NiB 軸あるいは NiB-H 軸と銅の各組合せにおける試験片の

温度上昇は摩擦回数に関係なく同様な傾向を示すため 図 8-6 に最も摩擦回数が多い試験片の経過時間に対する温度上昇の一例を示した。

A 試験機において、NiB-H 軸 では始動時から 40 ~ 80 分までは急激な温度上昇を示すが、その後徐々に低くなり、4 時間以後はほとんど定常状態になる。この急激な温度上昇中に、凝着を起こすことが多い。

MICr 軸 では始動時から温度上昇は低く、しかも速く定常状態になる。その値は NiB-H 軸 よりもはるかに低い。

B 試験機において、NiB-H 軸 での試験片温度上昇は A 試験機とほとんど同じ

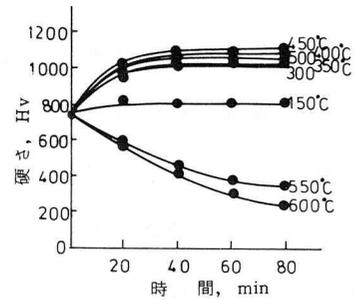


図 8-4 熱処理と硬さ

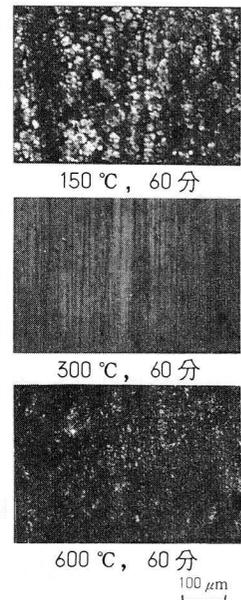


図 8-5 熱処理後の表面

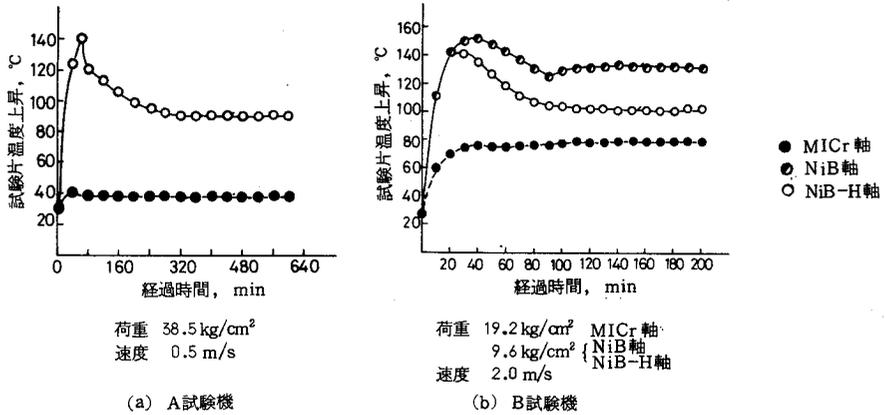


図 8-6 経過時間と試験片温度上昇

で、MICr軸では約2倍になっている。これを pV 値 (荷重: p kg/cm², 速度: V m/s) で比べると、NiB-H軸では両試験機とも pV 値は同じで、MICr軸では、B試験機での pV 値がA試験機の2倍である。

図 8-7 に各所定摩擦回数時における試験片の温度を示した。

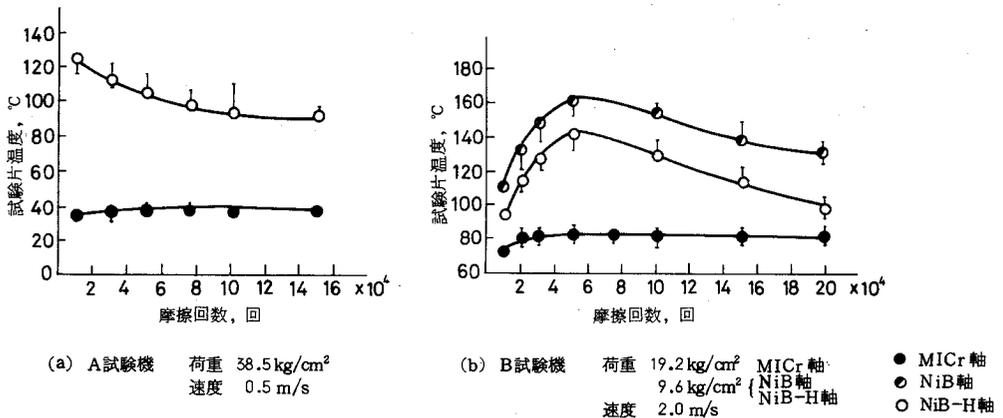


図 8-7 各摩擦回数時における試験片温度

各摩擦回数ごとに供試軸と試験片を取換えているため、試験片温度にばらつきがある。したがって、そのばらつき範囲も図中に示した。

所定摩擦回数までの温度上昇の傾向は 図 8-6 と同じ傾向を示す。

A試験機において、NiB-H軸での試験片温度は、摩擦回数の少ない場合の温

度上昇が比較的低いため、摩擦回数が増加しても速く定常状態になる。

B試験機において、NiB軸あるいはNiB-H軸での試験片温度は、摩擦回数6万回ぐらいまでは高くなり、その後低くなる傾向がある。

NiB軸とNiB-H軸とではNiB-H軸での試験片温度が低い。しかし両軸とも試験片温度が140～160℃の高温になることは局部的に焼付く危険性がある。

MICr軸での試験片温度は、A、Bいずれの試験機を使用しても、NiB軸あるいはNiB-H軸の場合よりも低い。またB試験機でのpV値はA試験機の2倍で、試験片温度も2倍になっている。しかし最高温度は90℃以下であるため焼付を起こさない。

3.3 摩擦係数に及ぼすめっき軸の影響

A試験機で測定した摩擦係数の値を図8-8に示した。

MICr軸での摩擦係数は0.025で摩擦回数が増加してもほとんど変わらず、境界潤滑あるいは混合潤滑の領域にある⁵⁾。

NiB-H軸での摩擦係数は摩擦初期において大きく、摩擦回数8万回ぐらいからは一定となる。しかしその値は0.12ぐらいで無潤滑あるいは

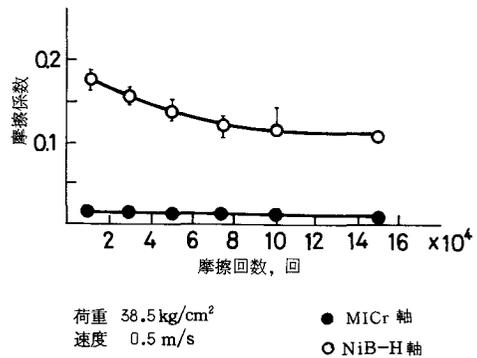


図8-8 摩擦回数と摩擦係数 (A試験機)

は境界潤滑の領域にある。このようにMICr軸の摩擦係数は、NiB-H軸の約1/5で両者の潤滑状態の相違が明らかである。

3.4 摩耗量に及ぼすめっき軸の影響

本研究では試験機あるいは供試軸の種類で負荷が異なるため摩耗量を比摩耗量 (mm³/kg·mm)で示し、比較する。この比摩耗量の値は、始動時から所定摩擦回数までの摩耗量を荷重と距離で徐した値である。

図8-9～図8-13に摩擦回数と比摩耗量について示した。

各摩擦回数ごとに供試軸と試験片を交換し、しかも各摩擦回数に対して数個の実験結果を得ているため、摩耗量にばらつきがある。したがってそのばらつき範囲も図中に示した。

図8-9にA試験機におけるMICr軸と銅試験片の比摩耗量を示した。

銅の比摩耗量は 10^{-10} mm³/kg·mm のオーダーにあり、摩擦回数の増加に対してほとんど変わらない。MICr軸の比摩耗量は摩耗初期において 10^{-9} mm³/kg·mm のオーダーであるが、その後は徐々に小さくなり 10^{-10} mm³/kg·mm のオーダーとなり非常にすぐれた耐摩耗性を示す。

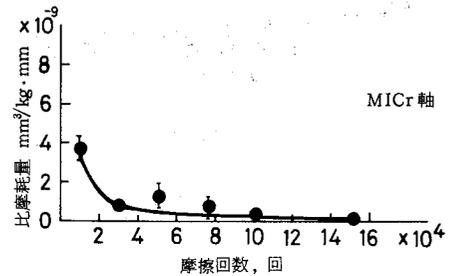
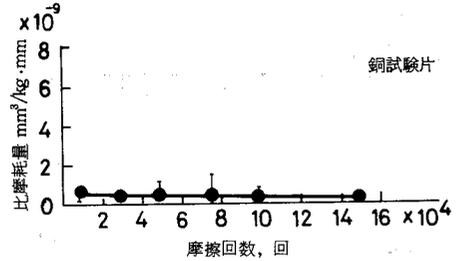
このようになじみ性ができるまでの摩耗量は大きいですが、凝着は起こさない。

図8-10にA試験機におけるNiB-H軸と銅試験片の比摩耗量を示した。銅の比摩耗量は摩耗初期において大きいですがその後徐々に低くなり 10^{-9} mm³/kg·mm のオーダーになる。

一方、NiB-H軸は軸が摩耗するよりも、銅が軸に凝着を起こす。このために銅の比摩耗量も大きくなったと考えられる。

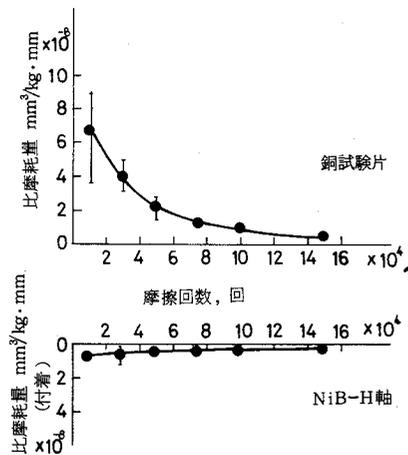
図8-11にB試験機におけるMICr軸と銅試験片の比摩耗量を示した。

銅の比摩耗量は 10^{-9} から 10^{-10} mm³/kg·



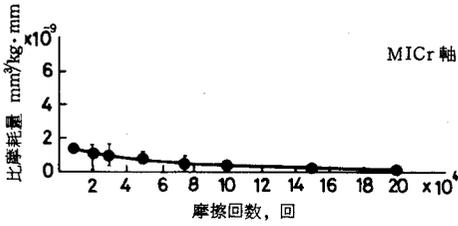
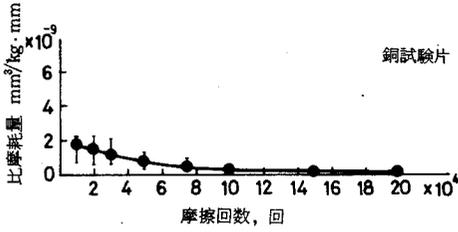
荷重 38.5 kg/cm²
速度 0.5 m/s

図8-9 Cu/MICr軸の比摩耗量 (A試験機)



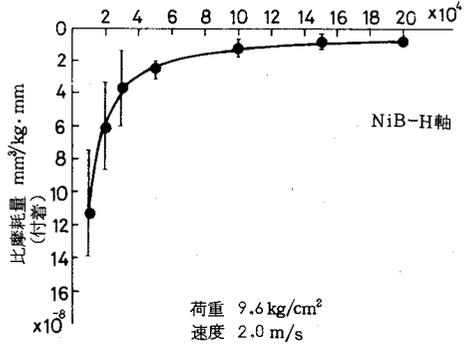
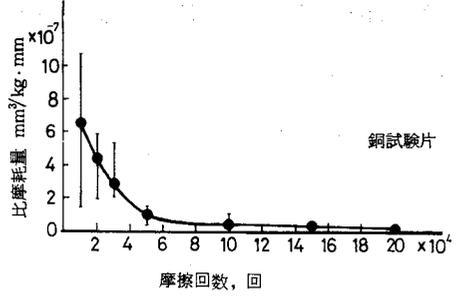
荷重 38.5 kg/cm²
速度 0.5 m/s

図8-10 Cu/NiB-H軸の比摩耗量 (A試験機)



荷重 19.2 kg/cm²
速度 2.0 m/s

図 8-11 Cu/MICr 軸の比摩耗量 (B試験機)



荷重 9.6 kg/cm²
速度 2.0 m/s

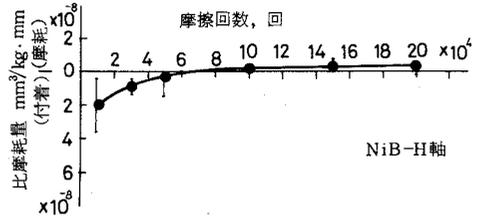
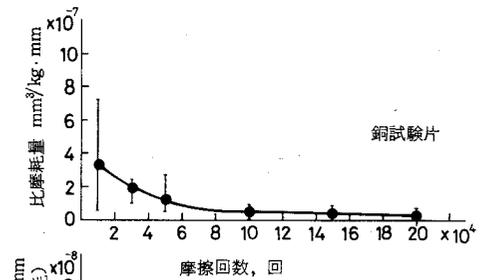
図 8-12 Cu/NiB-H 軸の比摩耗量 (B試験機)

mm のオーダへと摩擦回数の増加ともななって減少する。

MICr 軸も銅の場合と同様な傾向を示し、しかも比摩耗量の値もほとんど同じである。

図 8-12 に B 試験機における NiB-H 軸と銅試験片の比摩耗量を示した。

銅試験片の比摩耗量は摩擦回数が増加すると低い値となるが、初期摩耗において、ばらつきが多く、 10^{-7} mm³/kg·mm のオーダとなり、この値から無潤滑あるいは境界潤滑領域にあるとみなせる。



荷重 9.6 kg/cm²
速度 2.0 m/s

図 8-13 Cu/NiB 軸の比摩耗量 (B試験機)

NiB-H 軸は摩耗するよりも銅が凝着を起こし、軸の重量は増加する。

図8-13にB試験機におけるNiB軸と銅試験片の比摩擦耗量を示した。

銅試験片の比摩擦耗量は 10^{-7} から 10^{-8} mm³/kg・mmのオーダーへと摩擦回数が増加ともなっていて減少する。

NiB軸は図8-12のNiB-H軸と同様に摩擦するよりも銅が凝着を起こす。しかし、熱処理をしないNiB軸のほうは摩擦回数5万回までは凝着を起こすが、その後移着-再移着-脱落という現象をくり返し、凝着から摩擦へと変ることに注目すべきである。

以上のごとくNiB軸とNiB-H軸の比摩擦耗量は銅の凝着のため明らかでない。

MICr軸、NiB軸およびNiB-H軸と銅の凝着に関しては、MICr軸と銅が凝着を起こしにくく⁶⁾、ニッケルと銅は相互溶解度が高く、凝着を起こしやすい⁷⁾、また一般金属を組合せた場合の親和性の良否についての報告⁸⁾などによく一致する。したがって、めっき軸であっても、その表面材料を一般金属とみなし、上記の研究結果を参考にすることができる。

結晶構造から検討すると、ニボジュールめっき軸が面心立方格子構造であり、銅試験片が面心立方格子であるため、凝着を起こしやすいと考えられる。

3.5 摩擦面の観察

図8-14にA試験機における摩擦回数15万回時の供試軸および試験片の摩擦面を顕微鏡写真で示した。

MICr軸表面には銅の凝着はなく、摩擦方向に条こんが残っているだけである。

NiB-H軸表面には銅の凝着が摩擦方向に多く起きている。

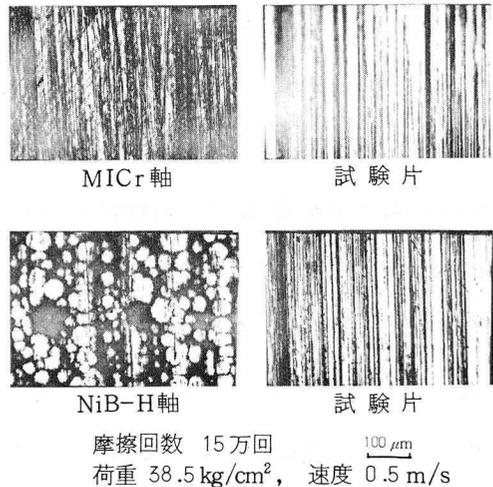


図8-14 軸と試験片の摩擦面 (A試験機)

図8-15にB試験機における20万回転時の供試軸および試験片の表面顕微鏡写真を示した。

MICr 軸表面は使用前とほとんど変化がなく、銅試験片の摩耗部分も摩擦方向に条こんだけが残っている。

NiB-H 軸表面には茶かっ色となった銅が凝着している。銅試験片の摩耗部分はいちり条こんあるいはむしりが生じた。

NiB 軸の表面は NiB-H 軸と同様に銅の凝着が起こるが、NiB-H 軸よりも凝着は少ない。

以上のごとく表面顕微鏡写真でも MICr 軸と NiB 軸あるいは NiB-H 軸を比べることができるが、さらに凝着あるいは移着を確認するため、B 試験機で行った摩擦回数 1 万回の供試軸と試験片を再び使用して 19 万回 (計 20 万回) 摩擦させた。その

結果 NiB 軸のめっき層がはく離を起こした。めっき軸におけるはく離は最も悪い現象であるため、この面を XMA で観察し、図 8-16 に示した。

(a) は NiB 面とめっきがはく離した素地面 (S 45C) を二次電子像で示した。(b) は Ni-K α 線像で、素地にも Ni の摩耗粉が存在している。(c) は Fe-K α 線像で、完全に Ni がはく離している。(d) は B-K α 線像で、NiB 面に B が存在していることを確認した。(e) は Cu-K α 線像で、銅がめっき面に多く分布している。これからも、凝着の多かったことが明らかである。

図 8-17 は銅試験片への Ni の凝着を調べたものである。(a) は二次電子像である。(b) は Ni-K α 線像で、銅の表面には Ni が存在していないことを確認した。

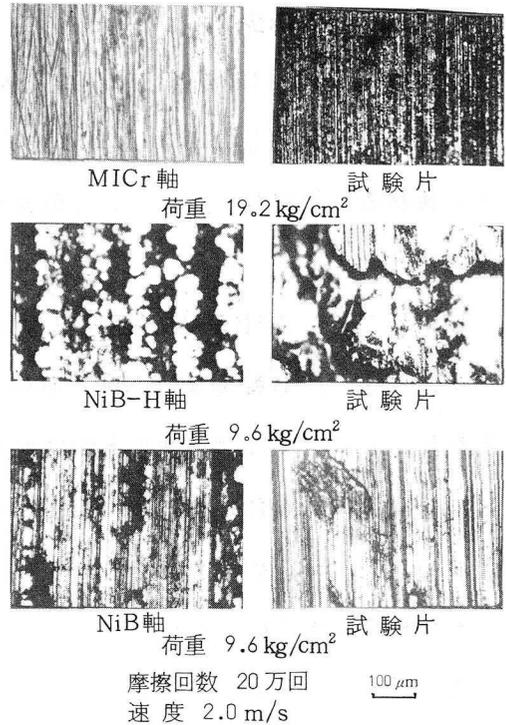


図 8-15 軸と試験片の摩耗面 (B 試験機)

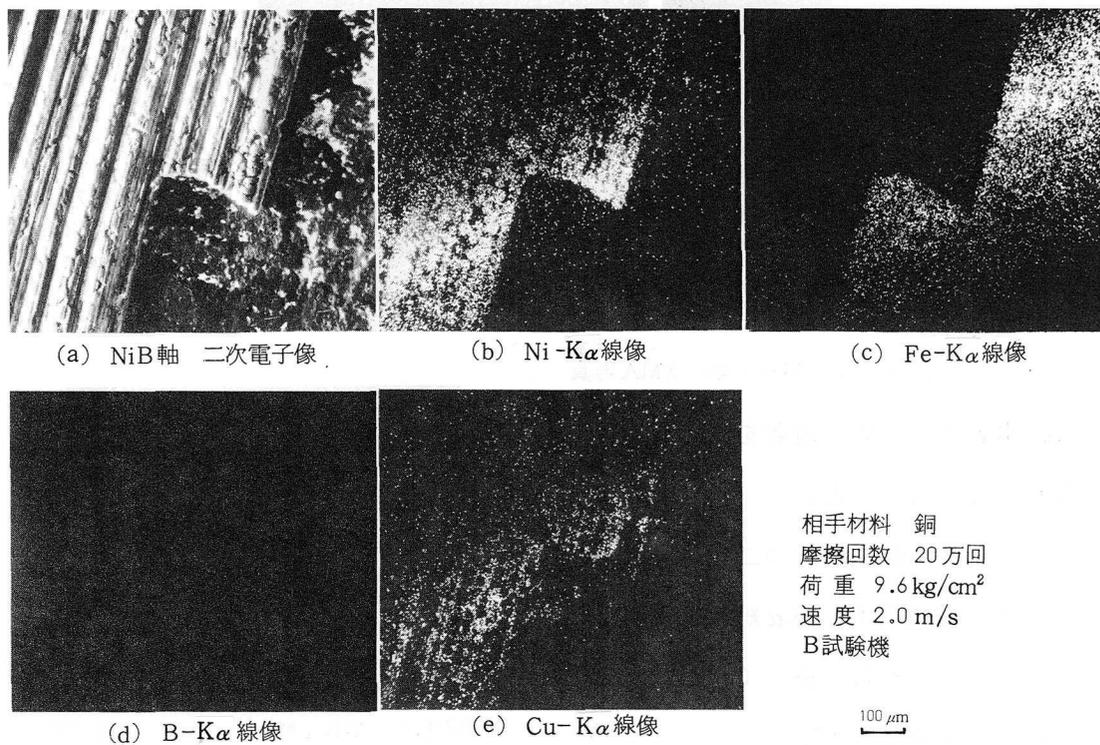


図 8 - 16 NiB軸の XMA 写真

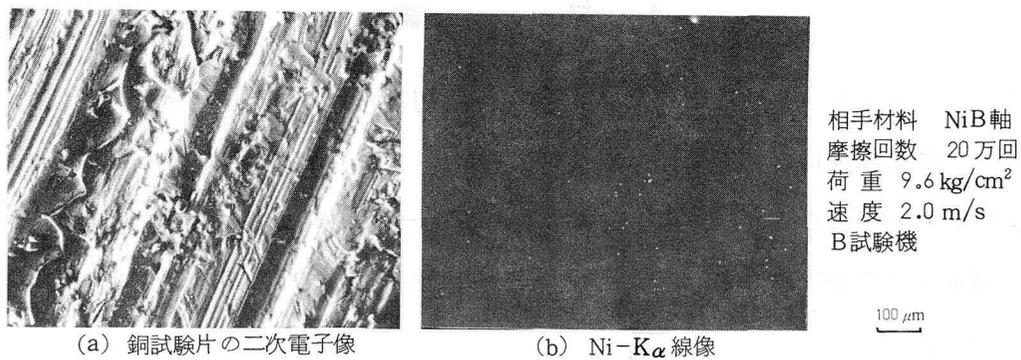
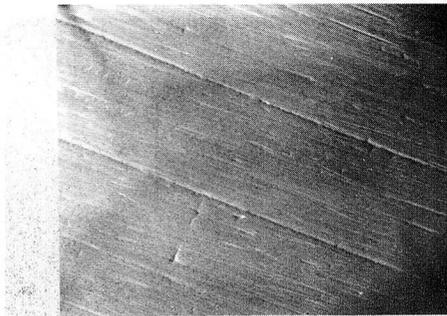


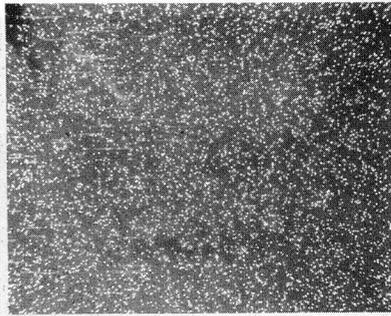
図 8 - 17 銅試験片の XMA 写真

図 8 - 18 に MICr 軸の摩擦回数 20 万回時の表面を XMA で観察し、示した。

(a) は MICr 軸の二次電子像で、(b) は Cr-K α 線像である。この表面を



(a) MICr 軸の二次電子像



(b) Cr-Kα線像

相手材料 銅
 摩擦回数 20万回
 荷重 19.2 kg/cm²
 速度 2.0 m/s
 B試験機

100 μm

図8-18 MICr 軸の XMA 写真

Cu-Kα 線像で銅の凝着を調べたが、銅は存在していなかった。

図8-19 に銅試験片の二次電子像を示した。この表面を Cr-Kα 線像で銅への凝着について調べたが、全く Cr が凝着していないことを確認した⁹⁾。



相手材料 MICr 軸 荷重 19.2 kg/cm²
 摩擦回数 20万回 速度 2.0 m/s
 B試験機

100 μm

図8-19 銅試験片の XMA 写真

4. 結 論

- (1) ニボジュールめっき軸の熱処理時間と温度は 370 ~ 380 °C, 40 ~ 60 分がよく、熱処理後は大気中で徐冷すればよい。
- (2) クロムめっき軸と銅の組合せは、ニボジュールめっき軸と銅の組合せよりも温度上昇で 20 ~ 50 °C, 摩擦係数で 1/10, 比摩擦量で 1/100 低く、すぐれている。
- (3) ニボジュールめっき軸と銅の組合せは常に凝着あるいは焼付を起こしやすく、クロムめっき軸の代わりとして同じ軸受に用いることはできない。
- (4) 結晶構造から検討すると、ニボジュールめっき軸が面心立方格子であり、銅試験片が同じ面心立方格子であるため凝着を起こしやすいと考えられる。

文 献

1. 小島隆司：ウエムラジャーナル， 12， 1 (1971) 32.
- 2,3. L. J. E. Hofer, J. F. Shultz, R. D. Panson, R. B. Anderson：
Inorg, chem., 3, 12 (1964) 1783.
4. 金属学会編：金属便覧，丸善 (1964-3) 447.
5. 築添 正：日本機械学会関西支部第 69 回講習会 (1976-7) 1.
6. 肥田 昭，市村雄弘：潤滑， 14， 2 (1969) 70.
7. 笹田 直，野呂瀬進，三科博司：潤滑， 22， 3 (1977) 169.
8. E. Rabinowicz, S. P. Loutrel：Proc. of Int. Solid. Lub. symp.
Tokyo (1975) 84.
9. 肥田 昭，市村雄弘：潤滑， 23， 6 (1978) 414.

第 9 章 試験片の形状と摩耗

1. 緒 言

第 7 章および第 8 章では、くら形試験片を供試軸の上に乘せて摩耗試験を行い、めっき軸に適した軸受材料を調べた。

しかし、くら形試験片では、潤滑油が供試軸と試験片間に介在しにくいいため、油浴潤滑であるにもかかわらず境界あるいは混合潤滑状態になっている。また、実用の軸と軸受とは異なった接触状態で実験を行っていることになる。

したがって、実験室で得られた結果を実用に十分活用することができず、実用時に再び実機テストを行うことが多い。

本章では、できるだけ実用機械に近い状態で、軸と軸受の摩耗試験が行えるように試験片の形状をリング形に変えて、軸受すきまのある状態で摩耗試験を行った。

試験機としては、第 7 章あるいは第 8 章で用いたアムスラ式金属摩耗試験機を主として用い、さらに実機に近い摩耗試験機を試作して用い、試験片の温度上昇、摩擦係数あるいは摩耗量の測定から、摩耗に及ぼす試験片形状の影響について主として調べた。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

アムスラー式摩耗試験機 (A) による測定方法については第 7 章 2 節と同じであるため省略し、試作摩耗試験機 (C 試験機) について述べる。なお、第 8 章記載の B 試験機は用いない。

図 9-1 に示したごとく、1 PS、3800 rpm のモータを駆動源として使用し、V ベルトを介して主軸を 1850 rpm で回転させる。主軸と供試軸取付軸の間にト

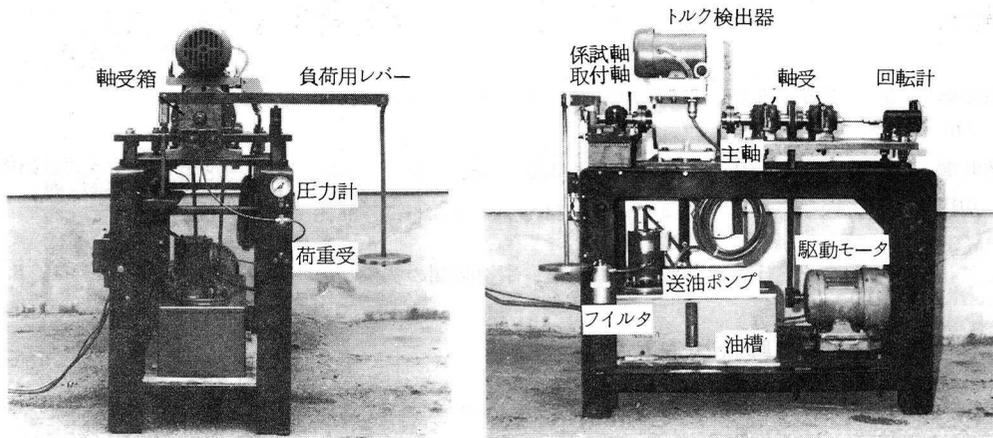


図9-1 試作摩耗試験機（C試験機）

ルク検出器を取付ける。

供試軸は、供試軸取付軸の先端にキーと止めナットで固定し、この軸にリング形試験片（軸受）を差し込み、軸受箱をかぶせる。

負荷はレバー方式で、軸受箱の上部に取付けたアームの一端を支点とし、他端に重錘を吊し、試験片を軸に押し付けて荷重を加える。

潤滑にはSAE 30番モータオイルを用い、送油ポンプで試験片下部に設けた油穴より送油する強制潤滑方法を用いた。

本研究では負荷を80kg（20kg/cm²）、送油量を9cc/minとした。摩擦回数は10万回とし、累積摩耗試験で総摩擦回数30万回あるいは連続30万回とした。

アムスラ式摩耗試験機においては、負荷を100kgとし、潤滑方法を油浴潤滑とした。この負荷の値は、試験片形状がリング形では軸受圧力計算式 $p = W/d \cdot l$ （ p ：軸受圧力， W ：荷重， d ：軸受直径， l ：軸受幅）により算出すると25kg/cm²となり、くら形では38.5kg/cm²となる。

摩擦回数は5万回あるいは10万回とし、累積摩耗試験で総摩擦回数を30万回あるいは50万回とした。

各試験機における摩擦回数，摩擦距離，摩擦時間の関係を図9-2に示した。

摩擦回数 回	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	$\times 10^4$
摩擦距離 km	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	
摩擦時間 min	0	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800	アムスラ式試験機 (A試験機) 試作試験機 (C試験機)
	0	10.8	21.6	32.4	43.2	54.0	64.9	75.7	86.5	97.3	108.1	

図 9-2 摩擦回数，摩擦距離，摩擦時間の関係

2.2 供試軸と試験片の形状寸法

供試軸の形状寸法は第 7 章 2.2 節と同じであるが，試験片との関係を理解しやすくするために図 9-3 に示した。

表面の MICr めっきは第 1 章表 1-1 の条件で行った。

試験片の形状寸法を図 9-4 あるいは図 9-5 それぞれ示した。

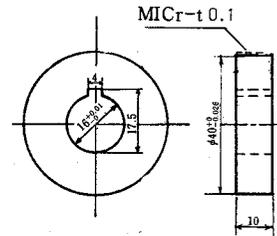


図 9-3 供試軸

図 9-4 のくら形試験片は第 7 章あるいは

第 8 章と全く同じ形状寸法で，材質および加工方法も同じである。

図 9-5 のリング形試験片は銅棒 (T CuB 1-1/2 H) を旋削加工で仕上げ，軸との接触面は耐水研磨紙 1000 番で仕上げた。

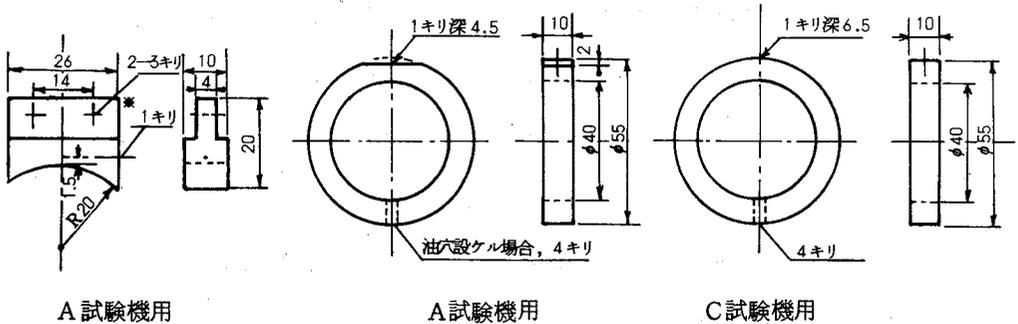


図 9-4 くら形試験片

図 9-5 リング形試験片

試験片の表面あらさは、くら形で $5.5 \sim 10 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ ，リング形で $8 \sim 22 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ である。硬さは、両形とも Hv 94 ~ 95 である。

図 9-6 に軸と試験片の接触状態を示した。(a~c) はくら形試験片の場合で、(d~f) はリング形試験片の場合である。

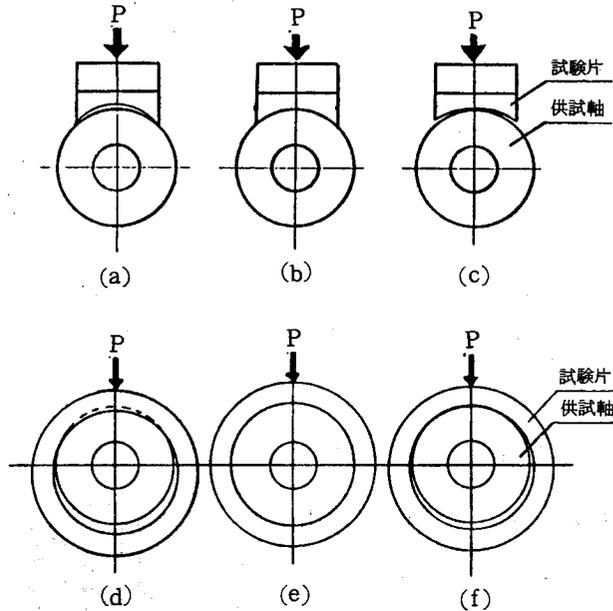


図 9-6 供試軸と試験片の接触状態

くら形試験片をバフ仕上げする場合に、(a)~(c) の中で、ほとんどの実験者は (b) のように軸と試験片が完全に接触するように加工すると思う。この

接触状態を (d~f) のリング形試験片に対応させると (e) の状態となり、軸と試験片間にすきまがなく、軸は回転できなくなる。実用の軸と軸受では、必ず軸受すきまがある状態 (f) で、軸と試験片 (軸受に相当する) は線接触をしている。この状態で軸受が摩耗すると (d) の破線で示したようになる。

すなわち図の (b) はリング形試験片の摩耗後の状態 (d) で、(c) はリング形試験片の実験前 (f) の状態である。したがって従来のくら形では (b) と (c) とが入れ替った状態である。

実用機械では、始動時の潤滑の良否が軸受寿命に及ぼす影響は大きい。したがって、実用に準じた実験をするために、くら形試験片の他にリング形試験片を作成した。

本研究での供試軸とリング形試験片の取付すきま (軸受すきま) は $30 \mu\text{m}$ とした。

2.3 温度測定方法

試験片温度は、リング形あるいはくら形試験片に設けた温度測定用穴に、熱電対（鉄-コンスタンタン、保護管外径 1 mm.）をそう入し、A 試験機の場合は第 7 章あるいは第 8 章と同じ方法で、試作機（C 試験機）の場合はデジタルマルチ温度計を用いて測定した。C 試験機での測定間隔は 10 秒とし、試験片温度が安定すれば 1 分とした。

2.4 摩擦係数の測定方法

A 試験機の場合は第 7 章あるいは第 8 章 2.4 節と同じ方法で測定する。

C 試験機の場合は主軸と供試軸取付軸の間に取付けたトルク検出器とトルクメータにより測定する。

トルク検出器の構造は図 9-7 に示したように検出外、内歯車および検出コイルなどからなっている。

中空胴に取付けられた検出内歯車に、相対的回転が生じると、各々の検出コイルに誘起電圧が発生する。これを信号出力とし、左右

の信号間の位相差を検出することによってトルクをデジタルトルクメータにより測定する。

この値から摩擦係数を次式で求める。

$$\mu = T/Wr$$

μ : 摩擦係数

T : 摩擦トルク (kg・mm)

W : 荷重 (kg)

r : 供試軸の半径 (mm)

2.5 摩耗量の測定

両試験機に用いた供試軸あるいは試験片の摩耗量は、第 7 章 2.5 節と同様に実験前後の試験片重量を直示天秤で測定して求めた。

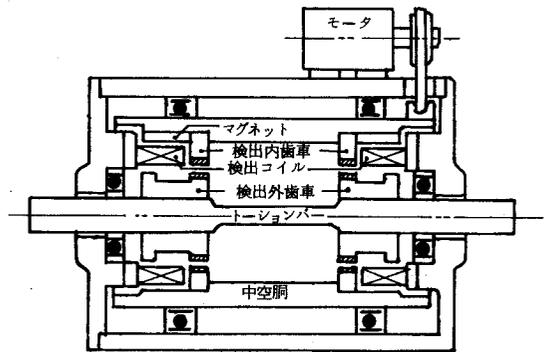


図 9-7 トルク検出器の構造

両試験機とも、各摩擦回数に対して供試軸あるいは試験片をそれぞれ3～5個使用し、測定値のばらつきについても調べた。

2.6 実接触面積の測定方法

リング形試験片を軸受と考えるならば、試験片の幅は軸受幅となる。

前出の式 $p = W/dl$ において、軸受幅 l は見かけの接触長さであり、これを補正するために、軸方向の表面あらさを測定する。この方法は表面あらさの測定から実接触面積を求めている¹⁾方法を軸方向にだけ用いたものであり、円周方向の表面あらさは無視した。すなわち、軸方向の表面あらさを所定摩擦回数ごとに測定し、とつ部（島）全体の長さ l' を求め、実接触面積 $A = d'l'$ を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 温度に及ぼす試験片形状の影響

図9-8に、A試験機における摩擦回数とリング形試験片温度を示した。

負荷 25 kg/cm^2 と 12.5 kg/cm^2 とでは、ほとんど変わらない。

図9-9に摩擦回数30万回までのリング形試験片とくら形試験片の温度を比較した。

両試験片の接触状態が異なり、接触圧力も異なるが、試験片温度はほとんど同じである。

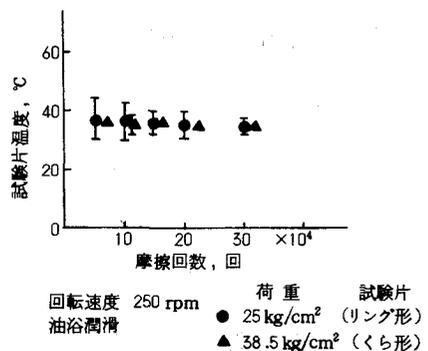
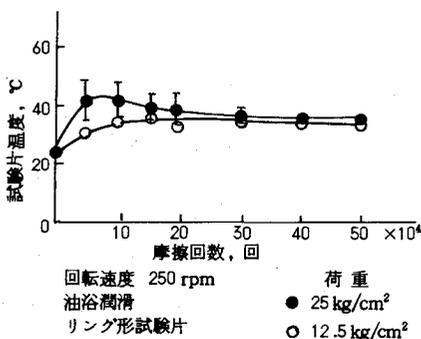


図9-8 摩擦回数と試験片温度 (A試験機)

図9-9 試験片の形状と温度 (A試験機)

図9-10に試作機（C試験機）における摩擦回数と試験片温度を示した。

負荷 10kg/cm^2 と 20kg/cm^2 とでは後者の試験片温度が約 10°C 高い程度で、あまり大差はない。摩擦回数20万回ぐらいまでは試験片温度は高くなるが、その後わずかに低くなる。しかし連続30万回転までの測定において、軸受箱の温度が定常状態になれば、軸受温度も安定し、負荷 20kg/cm^2 で約 60°C ~ 70°C となる。この値は第8章図8-6のB試験機（回転速度 1000rpm ，油浴潤滑，くら形試験片，荷重 19.2kg/cm^2 ，くら形試験片）の場合と同じぐらいである。

3.2 摩擦係数に及ぼす試験片形状の影響

図9-11にA試験機におけるリング形試験片の摩擦回数と摩擦係数を示した。

摩擦係数の値は、負荷の小さいほうが大きくなっている。これは試験片と軸の接触が荷重の加えた部分だけでなく、他の部分でも生じているものと思われる。

図9-12に摩擦回数30万回までのリング形試験片とくら形試験片の摩

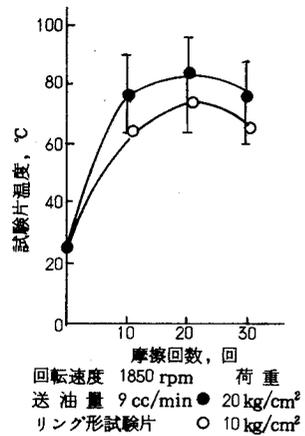


図9-10 摩擦回数と試験片温度 (C試験機)

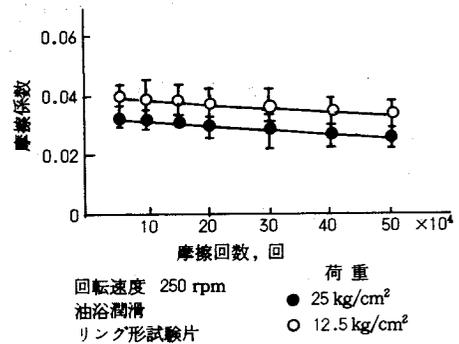


図9-11 摩擦回数と摩擦係数 (A試験機)

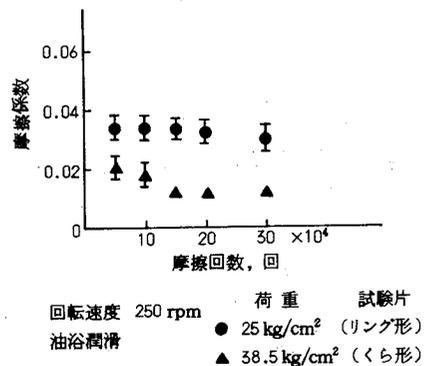


図9-12 試験片の形状と摩擦係数 (A試験機)

擦係数を比較した。

リング形での摩擦係数はくら形の約 1.5 ～ 3 倍である。これは、軸とリング形試験片の間（軸受すきま）に潤滑油が存在し、油の粘性によるためと考えられる。

図 9-13 に C 試験機における摩擦回数と摩擦係数を示した。

摩擦係数は摩擦回数が多くなるに従ってわずかに小さくなる。この値と前出の図 9-11 を比べると、わずかに C 試験機のほうが摩擦係数は小さい。

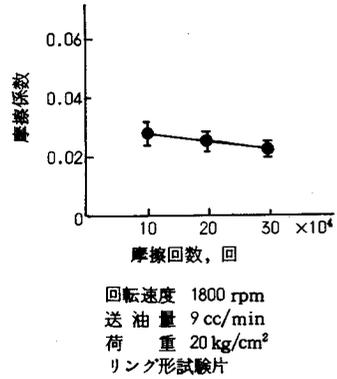


図 9-13 摩擦回数と摩擦係数 (C 試験機)

3.3 摩擦量に及ぼす試験片形状の影響

図 9-14 に A 試験機におけるリング形試験片の摩擦回数と比摩擦耗量を示した。摩擦回数の少ない場合の比摩擦耗量の値は大で、しかもばらつき範囲も大きい。

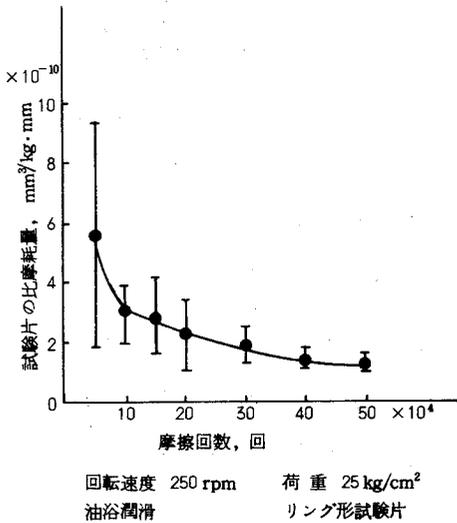


図 9-14 摩擦回数と試験片の比摩擦耗量 (A 試験機)

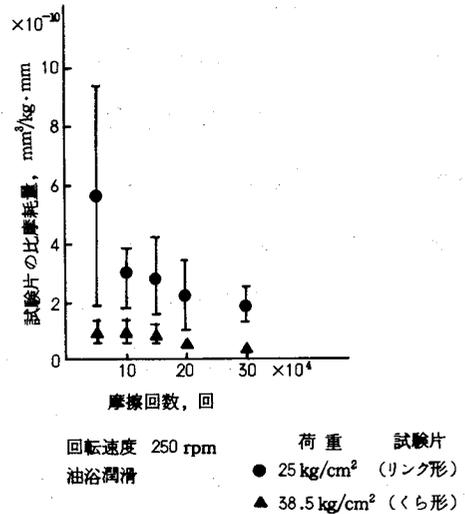


図 9-15 試験片の形状と比摩擦耗量 (A 試験機)

しかし摩擦回数が多くなると徐々に比摩擦量は少なくなる。表面あらしの大きい場合は初期摩擦が多く、図のばらつき範囲の高いほうの値になる。

図9-15に摩擦回数30万回までのリング形試験片とくら形試験片の比摩擦量を比較した。

リング形試験片のほうがくら形試験片よりも比摩擦量は大で、これは接触面の表面あらしがリング形のほうが大であるためと思われる。

図9-16にC試験機における摩擦回数と比摩擦量を示した。

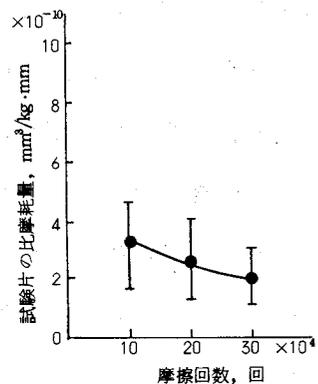
摩擦回数の増加に従って比摩擦量は少なくなるが、ばらつき範囲はあまり変わらない。この値を前出の図9-14と比べると、わずかにA試験機における値のほうが小さい。

図9-17にA試験機における軸の摩擦回数と比摩擦量を示した。

軸の比摩擦量が前出の図9-14の試験片の比摩擦量よりも多く、めっき軸の初期摩擦の大きいことが²⁾本実験でも明らかである。

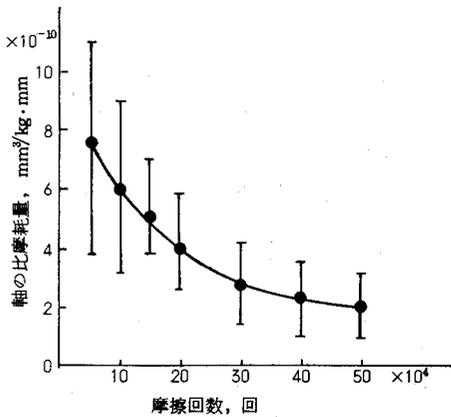
図9-18に摩擦回数30万回までのリング形試験片とくら形試験片を用いた場合の軸の比摩擦量を比較した。

リング形での軸の比摩擦量は摩擦回数15万回以上でも 10^{-10} のオーダーであるが、くら形では 10^{-11} のオーダーとなる。これは軸の真の摩擦距離がくら形に比べて大であるためと思われる。この真の摩擦距離とは、相手試験片と真に接触する距離のことで、くら形のほうがリング形よりも接触長さが短いため、軸の摩擦距離は短いことになる。すなわち、くら形での軸の摩擦距離はリング形での $1/4.5$ が真の摩擦距離になる。言い換えれば pin on cylinder 形式では、常に軸のほうが有利に取扱われていることになる。



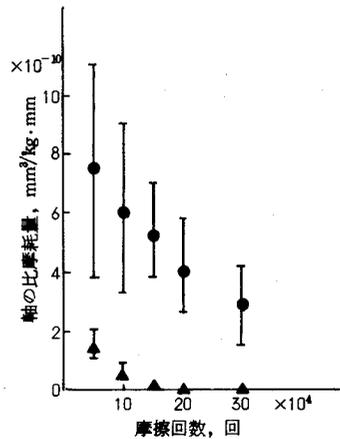
回転速度 1850 rpm
送油量 9 cc/min
荷重 20 kg/cm²
リング形試験片

図9-16 摩擦回数と試験片の比摩擦量 (C試験機)



回転速度 250 rpm
油浴潤滑
荷重 25 kg/cm²
試験片：リング形

図 9-17 摩擦回数と軸の比摩耗量 (A試験機)



回転速度 250 rpm 荷重 試験片
油浴潤滑 ● 25 kg/cm² (リング形)
▲ 38.5 kg/cm² (くらは形)

図 9-18 試験片形状と軸の比摩耗量 (A試験機)

図 9-19 に C 試験機における摩擦回数と軸

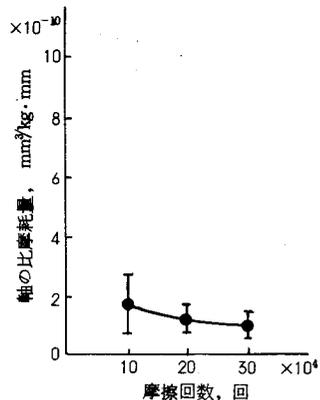
の比摩耗量を示した。

軸の比摩耗量は非常に少なく、A 試験機における状態と異なり、試験片の比摩耗量よりも軸の比摩耗量のほうが小さくなっている。これは、A 試験機では油浴潤滑のため摩耗粉が除去されにくい、C 試験機では強制潤滑により摩耗粉が洗い流されるためではないかと推察する。

軸の比摩耗量の値を前出の 図 9-17 と比べると約 1/3 で、ばらつき範囲も少ない。

3.4 接触面圧に及ぼす試験片形状の影響

リング形試験片とくらは形試験片とでは、前出の 図 9-6 のごとく接触状態が異なる。リング形試験片あるいはくらは形試験片の見かけの接触面圧力は、それぞれ



回転速度 1850 rpm
送油量 9 cc/min
荷重 20 kg/cm²
試験片：リング形

図 9-19 摩擦回数と軸の比摩耗量 (C試験機)

(1), (2) 式で求められる³⁾

$$p_1 = W/dl \quad (1)$$

$$p_2 = W/bl \quad (2)$$

(1), (2) 式において, $d > b$ である

から $p_1 < p_2$ となる。

リング形試験片幅 l の実接触面長さを表面あらさの測定より求めると (1) 式

は

$$p'_1 = W/d \sum_{i=1}^n l_i \quad (3)$$

で表せる。

この計算式で各摩擦回数ごとの実接

触面圧力を求め、摩擦回数と実接触面圧力の変化を図9-20 および 図9-21 に示した。

図9-20 はA試験機の場合で、表面あらさの大なる試験片は、初期摩擦が大で

p_1 : リング形試験片の見かけの接触面圧力 (kg/cm^2)

p_2 : くら形試験片の見かけの接触面圧力 (kg/cm^2)

W : 荷重 (kg)

d : リング形試験片の内径 (cm)

l : 試験片の幅 (cm)

b : くら形試験片の長さ (cm)

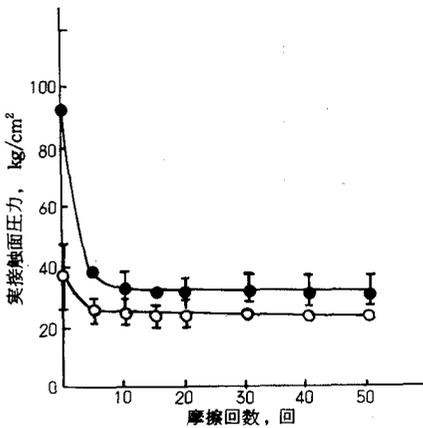
p'_1 : 実接触面圧力 (kg/cm^2)

W : 荷重 (kg)

d : リング形試験片の内径 (cm)

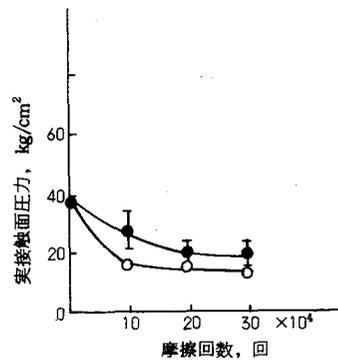
n : 接触点の数

l_i : 接触点一個の長さ (cm)



回転速度 250 rpm 荷重
油浴潤滑 ● 25 kg/cm^2
リング形試験片 ○ 12.5 kg/cm^2

図9-20 摩擦回数と接触面圧力
(A試験機)



回転速度 1850 rpm 荷重
送油量 9 cc/min ● 20 kg/cm^2
リング形試験片 ○ 10 kg/cm^2

図9-21 摩擦回数と接触面圧力
(C試験機)

あるが荷重に耐えられる表面あらさになると、実接触面圧力も一定となる。負荷が小さいと実接触面積が小さくてよいから、図のように実接触面圧力が低い値を示す。

図9-21はC試験機の場合で、(1)式で求めた見かけの接触面圧力と(3)式で求めた値とが一致し、荷重に耐えるだけの接触面長さになったことがわかる。

摩擦による表面あらさの変化の一例を図9-22に示した。

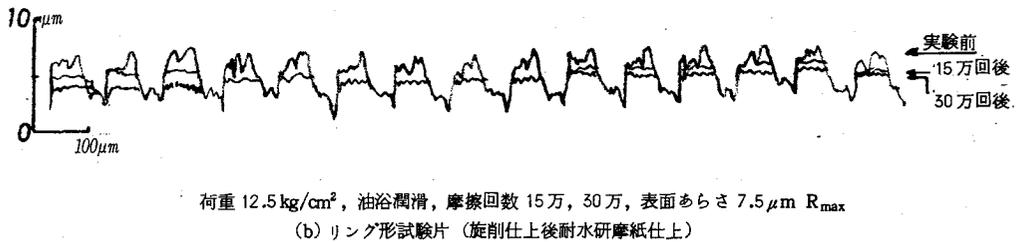
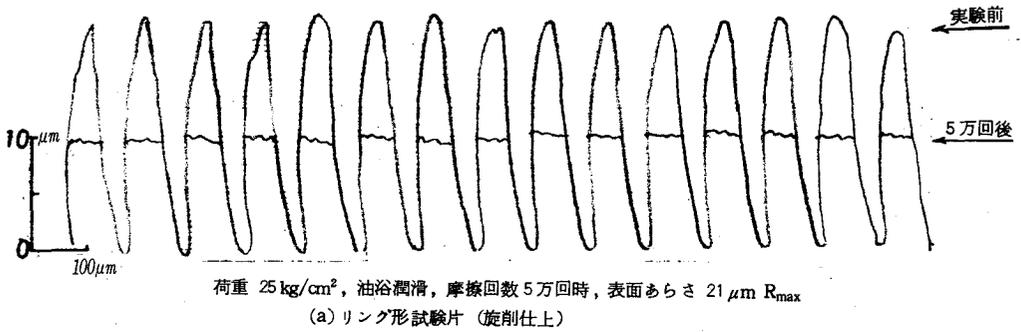


図9-22 摩擦と表面あらさの変化 (A試験機)

(a),(b)に摩擦前後の表面あらさ測定結果を重ねて示した。(a)のごとく旋削時の表面あらさが大であると、初期摩耗は大きいですが、深いみぞは残っている。このみぞは円周方向に続いているため、油浴潤滑では油みぞを軸受面に多く設けたような状態になり、油膜形成をよくすると同時に軸受の冷却効果もある。

(b)のごとく旋削後、耐水研摩紙で仕上げると、図のごとく摩耗が少なく、表面が速く美しくなる。15万回～30万回までの摩耗はわずかで、(a)と同様に油

だまりとなる研削みぞは残っている。

以上の結果、リング形試験片の旋削時の表面あらさは大でもよいが、研磨紙仕上げによる接触面の表面あらさは小さくすることが望ましい。

リング形試験片とくら形試験片の加工では、くら形試験片のほうが同じ表面あらさに仕上げやすく、リング形試験片では穴にテーパがつきやすい。したがって、くら形試験片を用いてリング形と同様な接触状態で実験を行うためには、くら形試験片の円弧の部分を軸の半径よりもわずかに大きく加工すればよい。

リング形試験片の利点は、実用機の軸受と同じような接触状態が得られること、円周のどの位置からでも送油ができ、しかも送油量を変えて実験が行えることである。欠点は試験片の研磨紙仕上げが容易でなく、摩耗面の顕微鏡観察ができないことである。

4. 結 論

- (1) リング形試験片とくら形試験片とでは、温度はそれほど顕著な相違がない。
しかし、くら形試験片のほうが接触面の仕上げが容易で、美しい表面が得られるため、摩耗量では少なくなる。
- (2) 試験片を負荷に耐えられる最小の実接触面積が得られるような表面あらさに仕上げると、初期摩耗は少なくなる。
- (3) アムスラ式摩耗試験機で、油穴位置あるいは送油量を変えて実験を行う場合に、リング形試験片のほうが適している。
- (4) リング形試験片を用いた試作摩耗試験機は実機に似た軸受の摩耗試験を行うのに適している。なお、アムスラ式摩耗試験機においても同じことがいえる。
- (5) リング形試験片の欠点は接触面の研磨紙仕上げが容易でなく、実験後の摩耗面の観察をする場合に試験片を切断しなければならないことである。
- (6) くら形試験片をリング形試験片と同様な接触状態にするためには、くら形試験片の半径を軸の半径よりもわずかに大きく加工すればよい。

文 献

1. 築添 正：潤滑，13，3（1968）101.
2. 岸 松平：クロムめっき，日刊工業（1967）197.
3. 益子正已：機械設計，養賢堂（1971）170.

総 括

過酷な条件下の軸受において、クロムめっき軸を使用することが多い。そこで摩擦、摩耗特性の観点から、クロムめっき軸に適する軸受材料の種類、クロムめっき軸と他のめっき軸との比較あるいは試験片形状の摩耗に及ぼす影響などについて調べた。

これらの一連の研究成果の結論は各章の終りにおいて述べたとおりであるが、その所論を要約すれば次のとおりである。

第1章では、クロムめっきの方法あるいはめっき層の諸性質について調べた。その結果、めっき浴の管理を十分行い、電流密度とめっき浴の温度を制御することによって工業用クロムめっきあるいはポーラスクロムめっきが得られる。そして、めっき後の洗浄方法は超音波洗浄あるいは水洗しながら表面をブラシでこするのがよい。まためっきの密着性は表面あらさの小さいほどよく、ポーラスクロムめっきの多孔率は厳密に決定するのは困難であることなどが明らかとなった。

第2章では、めっき軸とケルメット軸受を用いた場合の軸受温度分布と油膜厚さについて調べた。

その結果、始動後10～30分までは軸受温度上昇が急であることから、温度上昇に注意すれば破損を未然に防ぐことが可能である。

クロムめっき軸とポーラスクロムめっき軸とでは、ポーラスクロムめっき軸のほうが軸受温度も低く、油膜厚さも厚くすぐれている。

第3章では、ポーラスクロムめっきのタイプと各種の軸受材料の良否について調べた。

その結果、ピンポイントタイプがチャンネルタイプよりもすぐれており、軸受材料としては銅系含油、アルミニウムおよびケルメットがクロムめっき軸に対して焼付を起こしにくく、黄銅、りん青銅およびテフロンは焼付を起こしやすいこと

が明らかとなった。またポーラスクロムめっき軸の多孔率が大きいと軟かい軸受を引かくことがあるので、多孔率は40%ぐらいまでが適当である。

第4章では、往復動軸にクロムめっきを施した場合の潤滑について調べた。その結果、油と空気の混合潤滑は軸受面に油を散布するため軸受温度を低く保つことができる。送油量は1.0 cc/min以上にしても軸受両端面からの油の排出が多くなるだけで、軸受の冷却にあまり効果がない。軸の種類では、油あるいは油-空気潤滑に対してピンポイントタイプポーラスクロムめっき軸が、空気潤滑に対してはクロムめっき軸が、それぞれよい。なお、空気潤滑での軸受すきまは小さいほうが、軸受両端での軸の傾きが少なくよい。

第5章では、ポーラスクロムめっきのタイプと油膜形成について調べた。その結果、クロムめっきよりもポーラスクロムめっきのほうが油滴の広がりはよく、さらにチャンネルタイプのほうがピンポイントタイプよりもよい。しかし、油膜厚さは薄くなる。透明な軸受を用いると、軸受全体の油膜形成状態が観察でき、しかも第3章の電位差法による油膜厚さ測定結果とよく一致した。

第6章では、クロムめっき軸と軸受材料の凝着について調べた。その結果、第3章と同様にクロムめっき軸に対して、りん青銅あるいはすずが凝着を起こしやすく、銅あるいは鉛が凝着を起こしにくい。さらに、ポーラスクロムめっき軸のみぞあるいは穴に油が存在していなければ、目づまりを起こすことが明らかとなった。さらに結晶構造から検討すると、クロムめっき層が体心立方格子であるため、軸受材料は体心立方格子のすずよりも面心立方格子の銅あるいは鉛が凝着を起こさなくてよい。すなわち、第2章でのケルメットがクロムめっき軸に適していることと一致する。

第7章では、潤滑下でのクロムめっき軸と軸受材料の摩耗について調べた。その結果、油浴潤滑であっても、境界あるいは混合潤滑で実験を行っていることが明らかとなり、第3章あるいは第6章と同様、クロムめっき軸に対して、銅あるいは鉛がすぐれている。

第8章では、クロムめっき軸の代用として用いられようとしているニボジュールめっき軸とクロムめっき軸とを比較して調べた。

その結果、クロムめっき軸を用いると、銅は凝着あるいは焼付を起こさないが、ニボジュールめっき軸を用いると負荷が少なくても凝着あるいは焼付を起こし、しかも温度上昇、摩擦係数あるいは摩耗量ともにクロムめっき軸の場合よりも大である。結晶構造から検討すると、ニボジュールめっき層が面心立方格子であり、軸受材料の銅が同じ面心立方格子であるため凝着を起こしやすいと考えられる。したがって、銅軸受に対しては、クロムめっき軸の代用としてニボジュールめっき軸の使用は不適當であることが明らかとなった。

第9章では、試験片の形状と摩耗について調べた。

その結果、リング形試験片はくら形試験片よりも実用に近い状態で摩耗試験ができ、しかも送油量あるいは油穴位置を変化させて試験を行う場合に適している。

なお、試作摩耗試験機は今後十分活用できることが確認できた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、終始御懇篤な御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学 築添正教授に衷心から感謝を申し上げます。

また論文を校閲していただきました大阪大学 山田朝治教授，井川直哉教授ならびに大阪大学精密工学科の諸先生方に厚く感謝の意を表します。

また種々御教示を賜りました神戸大学 鳴瀧良之助教授に，日頃から有益な御助言，御協力をいただきました大阪大学 久門輝正助教授，坂本亨，大前伸夫諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本研究は近畿大学において行ったもので，研究期間中御指導御便宜をはかっていただきました近畿大学 木島茂教授を始め，XMA 写真に対し御協力いただいた荻野邦彦助手ならびに機械工学科の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

さらに本研究に使用しました工業用クロムめっきに対して永年に互り御援助と御協力を賜りました特殊機化工業株式会社 古市修次会長，高浜禎工場長，市村雄弘課長に深く感謝の意を表します。