

軸受メタルの疲れ強さ及び浸食について

前橋 正雄* 植田 靖夫* 高井 元弘*

Fatigue Strength and Erosion of Whitemetal of Journal Bearings

By

Masao MAEBASHI, Yasuo UETA and Motohiro TAKAI

Abstract

The series of fatigue tests of WJ2 (tin-base) and WJ7 (lead-base) whitemetal bearings which are commonly used for large sized bearings such as ship's stern tube bearings, were carried out under conditions of constant load amplitude by using 150 mm diameter large scale bearing test rig. The bearings tested had various thickness of whitemetal lining from 0.9 mm to 4 mm.

The cavitation erosion tests of whitemetal were also carried out by using a magnetostriction oscillator to vibrate specimens both in lubricating oil and in lubricating oil-water mixtures.

The main results obtained are as follows;

- 1) From the point of view of fatigue strength, WJ7 whitemetal was superior to the WJ2 whitemetal.
- 2) Under the test conditions of the thickness of whitemetal lining between 0.9 mm to 4 mm, the thicker became whitemetal lining, the more increased the endurance against fatigue damages both in WJ2 and WJ7 whitemetal bearings.
- 3) In this experiments, two kinds of fatigue crack initiated at the bearing surfaces. The axial crack propagated steadily to the test time increased, and had more influence on the fatigue damages of bearings than the circular crack which was saturated to grow.
- 4) According to the cavitation erosion tests, the weight loss by erosion of the lead-base whitemetal was larger than that of the tin-base whitemetal. In the test liquid of lubricating oil-water mixtures, the weight loss of the tin-base whitemetal increased fairly, but that of the lead-base whitemetal increased slightly.

1. まえがき

ホワイトメタル軸受は、アルミニウム合金や銅合金軸受に比べると一般的に負荷能力で劣るが、なじみ性、埋収性、非焼付き性など順応性にすぐれ、大形厚肉軸受の場合でも比較的微細で良好な組織が得やすいことから、各種機械用の小形軸受から船尾管軸受、中

間軸受など船用の大形軸受及び圧延機などの陸上機械の大形軸受として多く使用されている。

変動荷重をうける軸受では、油膜を介して繰返し応力が軸受メタルに働き、はく離や割れなどの疲れ破損を起こす。また、軸受メタルに浸食が生じるが浸食の要因としては、キャビテーションによって生じた気泡が圧力の急激な変動により崩壊するときに発生する衝撃波の繰返し及び、スクイズフィルムによる圧力と潤滑油の流出入によるせん断力の繰返しあげられる。

* 機関性能部

原稿受付：昭和55年11月13日

また、浸食は潤滑油やその溶解成分の蒸気圧が比較的高いとき、化学的性質に腐食性を伴うときに発生しやすいとされている。

比較的薄肉のホワイトメタルをライニングした軸受の疲れ強さに関する研究はかなり以前より行われており、いくつかの論文が発表されている¹⁻⁴⁾。そして、ホワイトメタルの肉が薄いほど疲れに対して強いことが一般に指摘されている。また、厚肉(1mm以上のものを呼ぶことにする)の軸受については、クロスヘッドピン軸受を目的とした揺動式軸受疲労試験機により調べた論文が発表されている^{5,6)}。しかし、回転式の軸受疲労試験機によりホワイトメタル軸受を調べた文献はほとんどみあたらない。

船尾管軸受にはすずをベースにしたものと、鉛をベースにしたホワイトメタルが一般に採用されており、その肉厚さは3~4mmが一般的となっている。この値は十分な技術的根拠のないまま、前例に従って採用されているのが現状であろう。このような厚肉の軸受が疲れ強さの面から、どのような評価にあるかを調べてみることは、船用軸受の設計資料としても有用であると思われる。

一方軸受メタルのキャビテーション浸食に関しては、磁わい振動法により液中で近接した平行2面間に振動を与え、2面間に生ずる浸食の機構とそれに関する液体の種類、すきまの大きさ、メタルのライニング厚さなどの因子について研究したものの^{7,8)}、回転軸に対して超音波振動を加えた円形試験片を近接させ、キャビテーション浸食について研究したものがある⁹⁾。すず基ホワイトメタル及び銅-鉛合金をライニングした試験片のライニング厚さに関してみると、いずれも小さいすきまでは、せん断力が主に作用するため、ライニング厚さが薄くなるほど表面のひずみが裏金により拘束され損傷が減少している。しかし、裏金の拘束効果はライニング厚さのごく薄い範囲にかぎられ、ライニング厚さが0.7mm以上においては損傷は一定である⁹⁾。

軸が回転している場合、キャビテーションの発生位置と浸食の発生位置は分離して考える必要があり、また、キャビテーションと浸食は、ともに油膜の正圧域にも、負圧域にも発生する、そして主として圧力上昇線上($dp/dx > 0$)で生じることが明らかにされている⁹⁾。

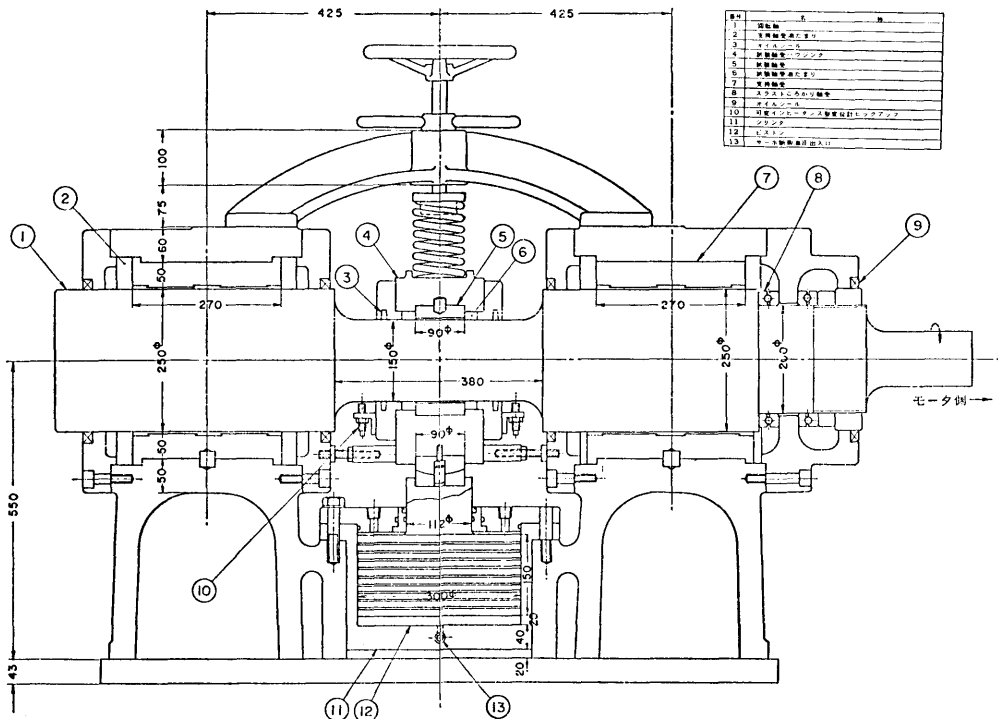


図-1 動荷重軸受試験機

船の軸系軸受の場合、変動荷重が比較的軽負荷で変動速度も小さいので、キャビテーション浸食は発生しにくいと思われるが、高負荷で衝撃的な変動荷重を受ける圧延機軸受などにおいては、キャビテーション浸食の発生することが十分考えられる。また、潤滑油に水などの比較的蒸気圧の高い成分が混入した場合、浸食は一段と発生しやすくなると予想される。

本研究では、すず基及び鉛基のホワイトメタルをライニングした軸受について、大形軸受疲労試験機により定時間型動荷重試験を行い軸受の疲れ強さを調べ、また、磁わい振動法により上記軸受メタルの耐浸食性を実験室的に調べたことについて2章に分けて以下に述べる。

2. 動荷重を受ける軸受の疲れ強さについて

大形の動荷重軸受試験により、すずベースのWJ 2及び鉛ベースのWJ 7のホワイトメタルをライニングした供試軸受に対して、一定条件の繰返し荷重を加え、疲れ試験を行い軸受メタルの損傷の進行過程をメタル材料、ライニング法及び肉厚さの関係において調べる。

2.1 試験装置及び軸受

図-1は試験に使用した動荷重軸受試験機を示す。試験機軸の駆動は75kW超分巻形可変モータにより減速機(減速比1/2.55)を介して行われる。繰返し荷重の与負荷機構は油圧作動による上下方向の片振り方式である。図-2は動荷重制御系統を示す。最大負荷は45トンで、繰返し周波数は0~10Hzで正弦波形である。試験軸受の最大幅は90mm、軸材はニッケル・クロムモリブデン鋼である。支持軸受と供試軸受の潤滑系統はそれぞれ独立していて、油温度調整が出来るように

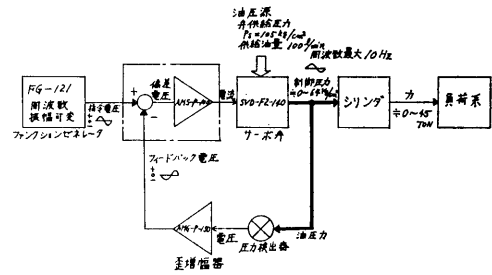


図-2 動荷重制御系統

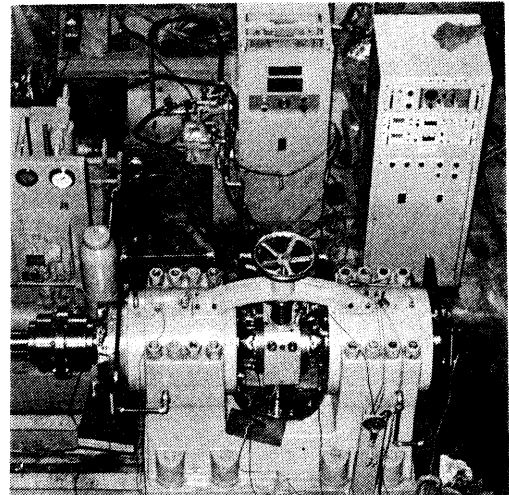


図-3 動荷重軸受試験機及び周辺機器

なっている。図-3は動荷重軸受試験機及び周辺機器の概観を示す。

図-4は供試軸受の寸法を示す。また、新品の軸受面の例としてWJ 7軸受を図-5に示す。供試軸受は内径150mm、外径200mm、幅60mmの半割形で裏金

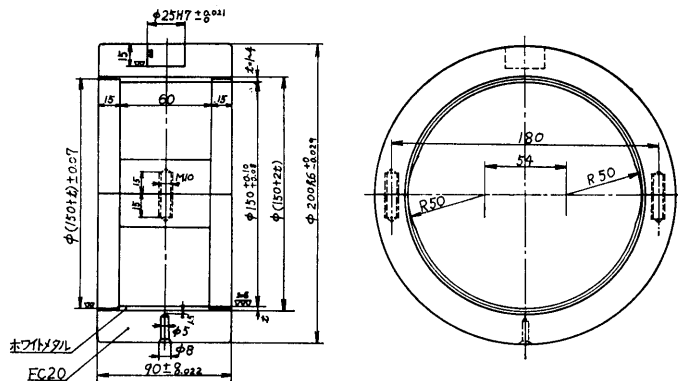


図-4 供試軸受

表-1 ホワイトメタルの化学成分と物理的性質

		化 学 成 分 %					密着強度	
		S_n	S_b	C_u	P_b	F_e	kg/mm ²	
WJ 2	P.W 220A	R	8.57	5.07	0.02	0.02	8.6	
	P.W 275A	R	8.60	5.04	0.02	0.02	9.2	
	P.W 300A	R	8.60	5.03	0.02	0.02	9.4	
	P.W 心 線	R	8.60	5.00	0.02	0.02	—	
	遠 心 鑄 造	R	8.72	5.47	0.04	0.02	6.6	
	配 合 値	R	9.5	5.3	0.02	0.02	—	
WJ 7	配 合 値		12.0	14.0	0.05	R	0.02	—

JIS H5401 物理的性質

	比 重	ブリネルかたさ		溶解開始 温度 °C	圧縮耐力 (0.125%) kg/mm ²	引張り強さ kg/mm ²	伸 び %	衝撃強さ シャルピー 値 kgm/cm ²
		20°C	100°C					
WJ 2	7.27	27.0	13.0	240	4.3	8.30	8.0	0.86
WJ 7	9.37	28.7	12.5	245	2.6	7.37	1.2	0.27

材質はF C 20, 油溝は左右の真横にある。受圧面に当たる軸受中央部裏金にはメタル温度計測用の孔が設けられている。軸受メタル材はWJ 2及び7で, メタルライニングはWJ 2については従来法の遠心鑄造によるものと, プラズマアーク溶接法により, WJ 7は遠心鑄造による。

メタルライニング厚さは0.9~4 mmである。なお, プラズマアーク溶接法 (P.W 手法またはP.A.W 手法と略称) は船用軸受, 圧延機用軸受, 発電機用軸受など大径軸受のメタルライニング法として開発されたものである¹⁰⁾。従来法の遠心鑄造では軸受径が大きくなると, それに伴い軸受裏金の肉厚も厚くなりホワイトメタルの凝固時間がながくなり, そのため鑄造組織は粗大化し, また偏析を生ずる恐れもでてくる。しかし, P.W 手法を採用すると組織の粗大化及び晶出物の偏析を防ぎ裏金との密着性も良好となる。

図-6はP.W 手法及び遠心鑄造によるWJ 2ホワイトメタルの鑄造組織を示す。また, 表-1はWJ 2及びWJ 7の化学成分と物理的性質を示す。ここで, WJ 2については密着強度試験及び化学成分分析用に別途試験軸受を製作し, 図-7に示す位置より試験片を採取し, 以下に示すところのシャルマーズ試験によ

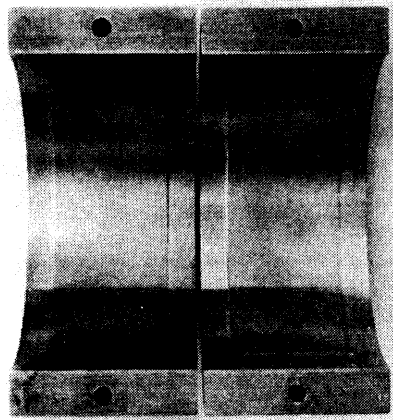


図-5 供 試 軸 受

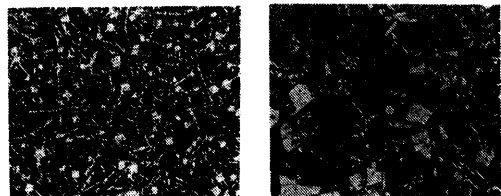


図-6 WJ 2の組織

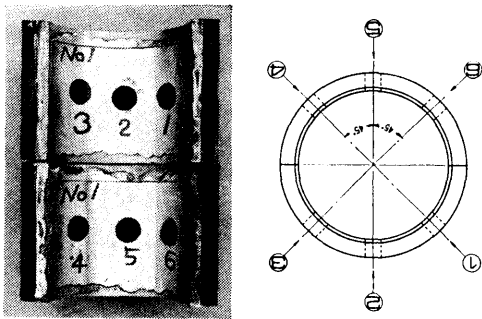


図-7 密着強度試験片採取位置

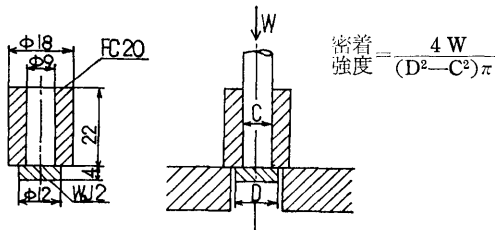


図-8 チャルマーズ試験と試験

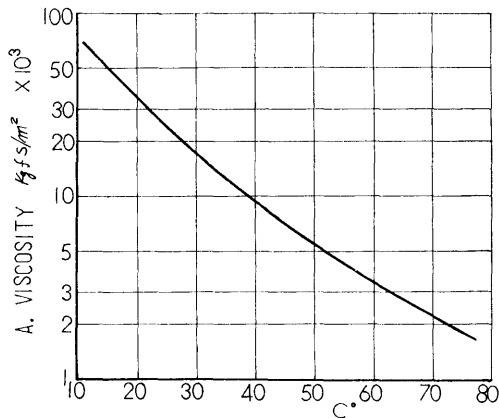


図-9 片潤滑油の粘度特性

り密着強度を調べた。図-8にチャルマーズ試験の概要を示す。密着試験用に採取した試験片は裏金部分を円筒に加工され、また、試験時裏金部が支持板に当たるようにホワイトメタル部分は裏金円筒外径より幾分小さく加工されている。

この円筒に対して丸棒を介して荷重を加え、裏金とホワイトメタルの接合面積に対するホワイトメタルのはく離荷重を測定し、密着強度を求めた。

2.2 試験条件及び試験方法

すべり軸受は使用開始後しばらく、大なり小なりご

く微細な部分が接触状態となりやすい。従って、初期運転中局部的には極めて高い接触圧力を受ける。軸受面が焼付き状態まで至らずにスムーズに塑性変形または摩耗によって形を変えて軸面との当たりができるように、本試験にはいるまゝにならし運転をする必要がある。供試軸受のなじみ状態は、供試軸受メタル温度及び潤滑油出入口温度を監視することによりある程度の判定ができる。

各試験は、低荷重より段階的に静荷重を増加してならし運転を行い、疲労試験時と同等の平均軸受面圧の静荷重運転において、供試軸受メタル温度が一定状態になったところで動荷重を加えて疲労試験を行った。

軸回転数は 240rpm で、軸受面圧の繰返し全振幅は 314kg/cm² (軸受 7C-1, 7C-3, 7-5 については 280kg/cm²) であり、繰返し周波数は 8Hz とした。なお、この軸受面圧は軸受が受ける荷重を軸受の投影面積で除した値である。供試軸受の潤滑油は A S E 30 相当品のパラフィン系のストレートオイルで、入口油温度は 36~40°C とし、供給油圧は 0.1~0.3kg/cm² とした。図-9 に使用潤滑油の粘度特性を示す。

試験は 90~180 時間行い、20~45 時間ごとに運転を中断して供試軸受を取り出して、き裂、はく離、はみだし、当り状態、圧痕などの進行状況を顕微鏡及び目視により観察した。

また、供試軸受メタル温度及び支持軸受部の潤滑油温度を常時監視し、異常の上昇を認めたときは運転を中断して上記の観察を行った。なお、監視装置は監視温度が 80°C 以上になると運転停止命令を発する。

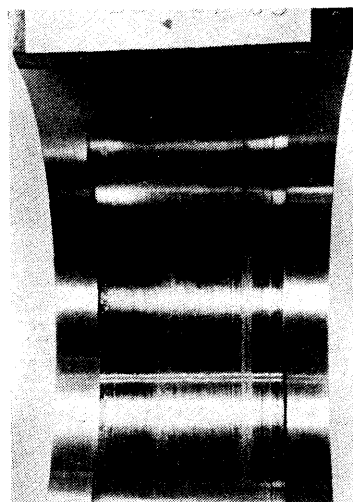


図-10 表面流動跡 2 P-3, 27.5hr

表-2 P.W手法 WJ 2軸受の損傷経過

WJ-2 プラズマアーク溶接 軸回転数240rpm 振動周波数 8 Hz 軸受面圧 157~471kg/cm ²							
2P-2 220A	肉厚 4.0mm	2P-3 300A	肉厚 3.5mm	2P-4 275A	肉厚 3.5mm	2P-1 275A	肉厚 2.0mm
30hr	※き裂3本発生	27.5hr	※表面流動発生	45hr	※き裂3本発生 (長さ1~3mm)	※き裂2本発生	
90hr	※き裂8本に増加 (すべて円周方向のき裂) ※メタル当り部分にうすいはん状模様発生	72.5hr	※き裂2本発生 ※引っかけ状のこん跡箇所発生 ※メタル当り面にうすいはん状模様発生	90hr	※き裂4本に増加 (長さ4~6mm)	※き裂5本に増加 ※軸方向き裂1本発生 (長さ3.5mm)	
120hr	※き裂ほとんど進展せず ※引っかけ状のこん跡箇所発生 ※うすいはん状分増加	117.5hr	※き裂4本に増加 ※引っかけ状のこん跡箇所増加	135hr	※き裂樹枝状に進展 (長さ6~11mm) ※引っかけ状のこん跡若干発生	※き裂8本に増加 ※軸方向き裂2本増加 (長さ4.5mm, 5.5mm) ※引っかけ状のこん跡発生	
		162.5hr	※き裂ほとんど進展せず	180hr	※き裂ほとんど進展せず	※軸方向き裂4本に増加 進展(長さ4.5mm→7.5mm, 5.5mm→11.5mm) ※軸方向き裂により二分されたすべり面に当りの差が発生	

表-3 遠心铸造 WJ-2軸受損傷経過

WJ-2 遠心铸造 軸回転数 240rpm 振動周波数 8 Hz 軸受面圧 157~471kg/cm ²							
記号 肉厚mm	(2C-1) 3.9	(2C-2) 1.9	(2C-3) 1.6	(2C-4) 1.6	(2C-5) 0.9		
試験時間 hr	※き裂2本発生 ※メタル当り面に光沢部分とうすいはん状部分発生	※き裂6本発生	※軸方向き裂多数発生 (両端より長さ15.5mmのき裂各1本発生, これをき裂, と仮称) ※メタル薄肉部にメタル隆起発生	※軸(方向き裂2本発生(長さ5.5mm, 19mm) ※き裂により当りの差が生ずる	※円周方向き裂。軸方向き裂多数発生 (軸方向き裂の長さ6~14mm) ※メタル薄肉部にメタル隆起発生		
45							
90	※き裂5本に増加	※き裂の増加及び進展なし	※き裂A, Bわずか進展(長さ17mm, 18.5mm) ※メタル隆起4箇所に増加	※軸方向き裂3本増加 ※き裂進展(長さ5.5mm→7mm, 19mm→21.7mm) ※メタル薄肉部に隆起1箇所発生	※軸方向き裂数少し増加(長さ10mm以上のき裂はほとんど進展せず) ※き裂により当りの差が一層強くなる		
135	※き裂9本に増加 (長さ4~8mm) ※はん状部分増加 ※引っかけ状のこん跡箇所発生	※軸方向き裂2本発生(長さ6mm, 10.5mm) ※軸方向き裂により当りの差が発生					
180	※き裂増加, 2本のき裂軸方向に進展 (長さ17mm, 22mm) ※き裂による当りの差が発生	※軸方向き裂4本に増加, 進展(長さ6~16.5mm)					

表-4 遠心鑄造 WJ 7 軸受の損傷経過(1)

WJ-7 遠心鑄造 軸回転数 240rpm 振動周波数 8 Hz 軸受面圧 157~471kg/cm ²						
記号 肉厚mm	7C-6	4.0	7C-4	2.0	7C-2	1.0
試験時間	※弱いなじみ現象 (正常摩耗) 発生		※軸受両端よりき裂多数発生 (長さ1~6mm)		※軸受両端より微小き裂多数発生	
45hr					※軸受端より6mm中心にはいった所より軸方向き裂1本発生	
90hr	※き裂1本発生 (長さ5mm) ※なじみによるぶいあめ色にくすんだ現象発生		※き裂数本増加		※軸方向き裂1本増加 (き裂Aと仮称, 長さ17mm) ※き裂Aにより二分されたすべり面の前後に当りの差が発生	
135hr	※き裂端部まで進展し, 側面が少しはみだす (長さ10mm) ※うすいはん状部分増加		※数箇所のき裂少し進展 ※引っかき状のこん跡少し増加		※き裂Aの長さ21.5mmに進展	
180hr	※き裂2本に増加 (長さ4, 10mm)		※き裂ほとんど進展せず ※引っかき状のこん跡少し増加		※き裂Aの長さ24mmに進展 ※軸受端付近のとき裂網状に発達端部メタルの一部脱落	

表-5 遠心鑄造 WJ 7 軸受の損傷経過(2)

WJ-7 遠心鑄造 軸回転数 240rpm 振動周波数 8 Hz 軸受面圧 110~392kg/cm ² (0~60hr) 同上 150~432kg/cm ² (60~180hr)						
記号 肉厚mm	7C-5	4.0	7C-3	2.0	7C-1	1.0
試験時間	※き裂1本発生		※き裂1本発生		※き裂6本発生 (長さ1~2mm)	
20hr						
40hr	※き裂3本に増加 (長さ3~8mm) ※表面流動発生 ※当り面が少し変色 (油やけ)		※変化なし			
60hr	※き裂4本に増加		※変化なし		※き裂9本に増加 (長さ1~22mm)	
100hr	※き裂10本に増加 ※強い当り面に引っかき状のこん跡発生		※き裂7本に増加		※き裂約20本に増加 (長さ2~3mm)でほとんどが円周方向き裂)	
140hr	※き裂少し増加, 1本のき裂軸方向に進展 (長さ軸方向に5mm)		※き裂14本に増加 (長さ2~4mm, ほとんどが円周方向き裂)		※軸方向き裂1本増加 (長さ7mm) ※強いき裂はみだし1箇所発生	
180hr	※き裂ほとんど進展せず ※引っかき状のこん跡増加				※軸方向き裂6本に増加 (長さ3~8mm)	

2.3 試験結果及び考察

表-2~5は動荷重まで試験した供試軸受の損傷経過を軸受メタル材料, 肉厚, ライニング法の関係において示す。

試験時のメタル温度は62~65℃であり, 平均軸受面圧を同一値とした静荷重運転時より2~3℃低い。これは, 動荷重下における軸受の潤滑状態が静荷重下における潤滑状態に比べ良好となるためである。

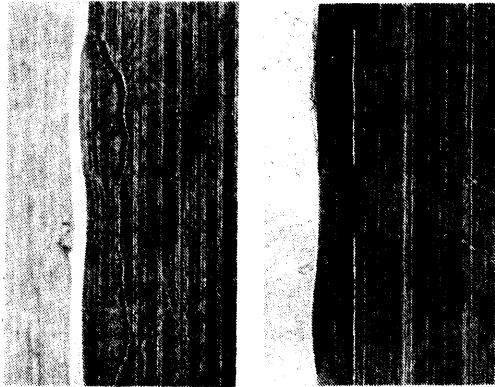


図-11 円周方向き裂例

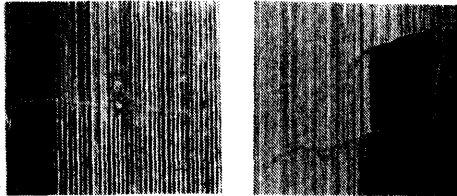


図-12 軸方向き裂例

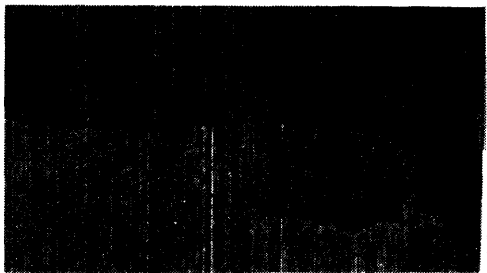


図-13 進展した軸方向き裂(1)

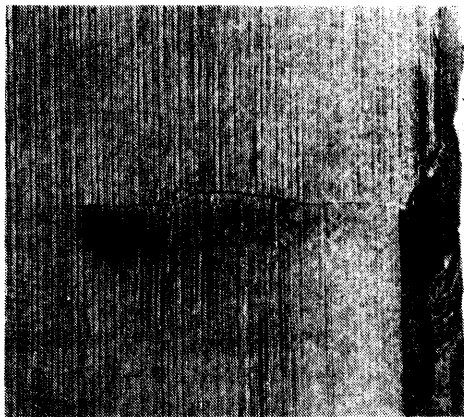


図-14 進展した軸方向き裂(2)

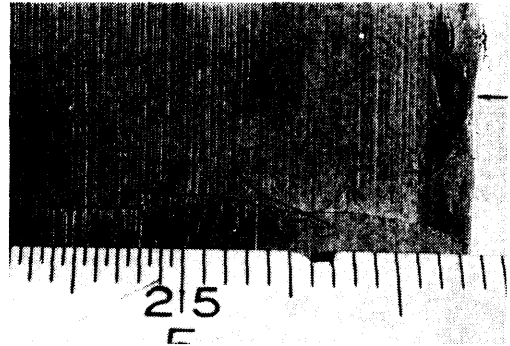


図-15 進展した軸方向き裂(3)

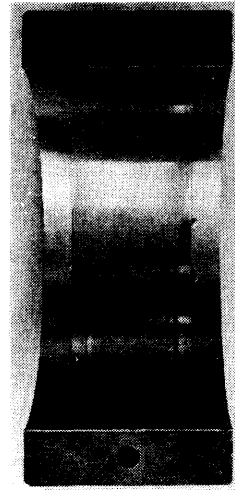


図-16 き裂の発生状況 2C-3 90hr



図-17 メタル隆起 2C-3 90hr

メタル温度の異常上昇による運転中断は、軸受 2 P-3 で一度発生した。すなわち、試験経過 27.5 時間で異常温度上昇により運転中断し、解放検査したところ、軸受面に表面流動（ワイピング）が発生してい

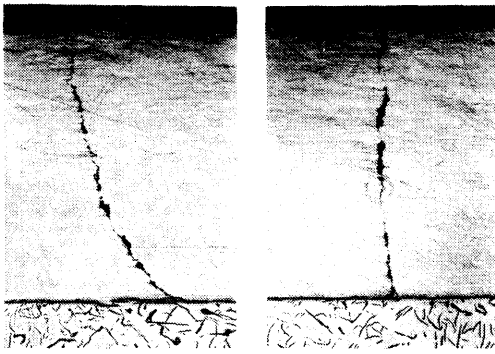


図-18 裏金に進展した軸方向き裂

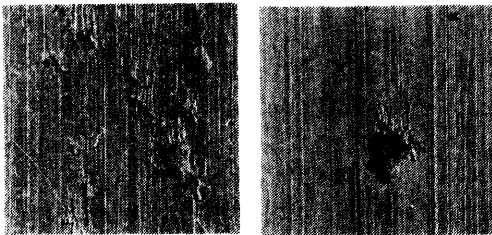


図-19 引っかけ状のこん跡例

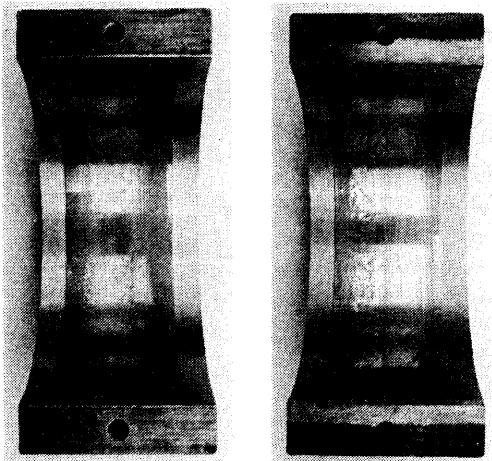


図-20 180時間試験後の軸受すべり面

た。図-10はその時の軸受面の流動状況を示す。また、そのときの温度状況を見ると、メタル内温度は非常停止する約15分以前より異常の上昇がみられた。動荷重時の潤滑状態は静荷重時より優位の状況下でありながら温度上昇が生じた原因としては、異物混入などにより軸と軸受間の潤滑状態のバランスが失なわれ、接触が生じたものと考えられる。

軸受すべり面に発生するき裂は、円周方向き裂と軸方向き裂に大別できる。前者は発生後応力緩和などに

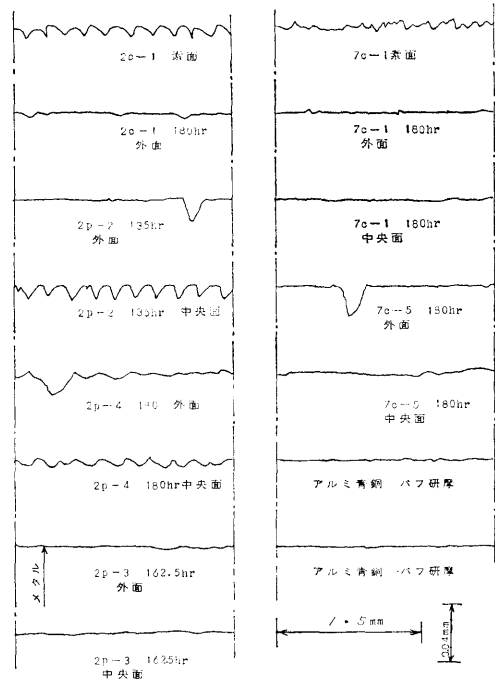


図-21 軸受の表面あらし

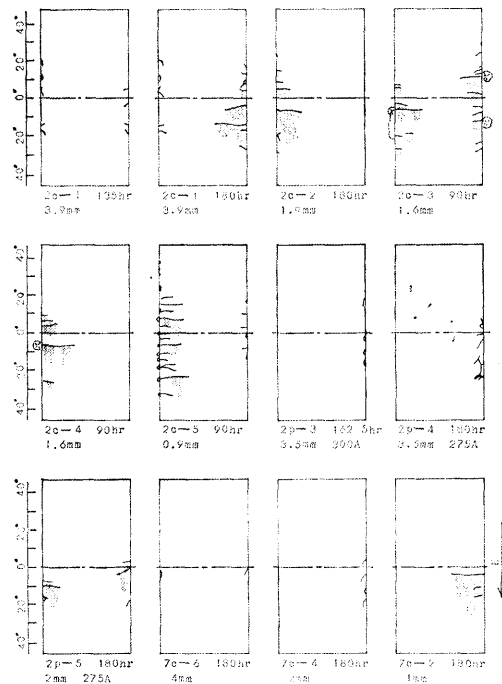


図-22 き裂の発生状況

よりあまり進展しないものが多い。しかし、後者は発生以後試験経過に伴い外面より中央に向かってほとんどが進展している。図-11は円周方向き裂例を、図-12は軸方向き裂例を示す。また、進展した軸方向き裂例を図-13~15に示す。

軸方向き裂は、その進展に伴って金裏とメタル間のはく離を誘起し、すべり面の当たりに差が発生している。さらに、軸受2C-3, 2C-4, 2C-5では軸受の幅を60mmにするために加工した軸受両端のメタル肉厚の薄い部分に、メタルの隆起が生じている。これは軸方向き裂より浸入した高压の油膜圧が、裏金とメタルのはく離によって生じた隙間に力を及ぼし押し上げたものである。図-16は軸受2C-3のき裂と隆起の発生状況を示す。図-17はそのメタル隆起を示す。図-18は軸受2C-4のメタル受圧部円周方向断面における軸方向き裂の裏金方向への進展状況を示す。また、試験時間の経過に伴い図-19に示すような引っかけ状のこん跡が発生する場合もある。この原因としては、ホワイトメタル表面に働く繰返し摩擦などによる疲れでメタルの一部がはく離し、脱落したことが考えられる。

図-20は180時間試験後における供試軸受すべり面の状況を示す。図-21は軸受すべり面の表面あらさを硬化剤を使用してすべり面を転写させ、触針式あらさ計により計測したものである。比較検討のためバフ研磨状態でのあらさも列記した。試験後における軸受すべり面のあらさをみると、荷重負担のきびしい外面は、加工時のとつ部が完全に消され、バフ研磨のものに近い状態までなめらかになっている。しかし、WJ 2軸受の中央部は外面ほどにはなっていない。

図-22は受圧側すべり面に生じたき裂の発生状況を軸受の展開面に示す。き裂は油膜圧力の高い領域を中心として片当りの強い外面で多く発生している。き裂の発生が一方に片寄っているものがあるが、この原因として、試験軸受の仕上げり具合、組込み状態が微妙に作用して、アライメントが変化した結果、荷重の不均一性が生じたことが考えられる。

(1) メタルライニングと肉厚について

WJ 2のP.W手法の軸受についてみると、アーク電流の大小により多層盛時の層間の熔融程度、メタル組織状態とそれに伴う裏金との密着性など若干異なることが実証されている¹⁰⁾。しかし、表-2に示したように、2P-2, 2P-3及び2P-4の軸受ではあまり差が生じていない。

肉厚3.5mmの2P-3及び2P-4と肉厚2mmの2P-1を比較すると、き裂の点で明らかな差が現われている。軸受2P-1は試験経過90時間で軸方向き裂が発生している。2P-1及び2P-4では180時間経過後においても軸方向き裂は発生していない。

WJ 2の遠心铸造軸受についてみると、肉厚の比較的薄い2C-3, 2C-4, 2C-5では、試験経過45時間ですでに軸方向き裂が大きく進展している。しかし、肉厚3.9mmの2C-1は、135時間経過まで軸方向き裂が発生していない。肉厚が同程度の2C-2と2C-5の損傷過程についてみると、ほぼ同じ経過になっている。また、2C-1と2C-3または2P-4を比較すると後者がややすぐれている。

(2) メタル材料と肉厚について

すずベースのWJ 2及び鉛ベースのWJ 7軸受は、いずれも肉厚優位の結果となっている。

各軸受の損傷程度を判定する一方法として、軸方向き裂の長さの総計を求めて整理すると表-6となる。

また、図-23は軸方向き裂の進展度を動荷重繰返し数とメタル肉厚の関係で整理したものである。WJ 2はWJ 7と比べて耐圧縮性、耐食性、引張り強さなどにおいてすぐれている。しかし、図-23に示すように高荷重下での動荷重に対する疲れ強さは、むしろ鉛ベースのWJ 7軸受がすぐれている。

メタルの組織をみると、WJ 2とWJ 7では結晶が異なる。すなわち、鉛ベースのWJ 7は比較的等方性であるが、すずベースのWJ 2は異方性であるからメタル温度の変化に伴う熱応力はWJ 7に比べて大きく、そのためき裂が発生しやすいと思われる。また、WJ 7はWJ 2よりなじみ性にすぐれていて、片当り

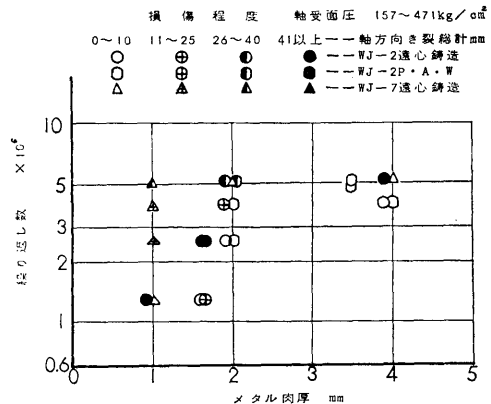


図-23 メタル肉厚と繰返し数

表—6 軸方向き裂の長さの総計

記号	材料	ライニング	肉厚 mm	軸受面圧 kg/cm ²	軸方向き裂の長さ／試験時間の総計 mm/hr	繰返し数×10 ⁴
2C—1	WJ—2	遠心鑄造	3.9	157~471	0/135 44.5/180	518
2C—2	"	"	1.9	"	0/90 16.5/135 33/180	"
2C—3	"	"	1.6	"	60.5/45 79.5/67.5 85/90	259
2C—4	"	"	1.6	"	24.5/45 51.2/90	"
2C—5	"	"	0.9	"	100.5/45 115/90	"
2P—2	"	P. A. W 220A	4.0	"	0/135	345
2P—3	"	P. A. W 300A	3.5	"	4.0/27.5 7.5/72.5 7.5/162.5	468
2P—4	"	P. A. W 275A	3.5	"	0/135 0/180	518
2P—5	"	"	2.0	"	0/45 3.5/90 10/135 29/180	"
7C—6	WJ—7	遠心鑄造	4.0	"	0/180	"
7C—4	"	"	2.0	"	0/180	"
7C—2	"	"	1.0	"	0/45 17/90 21.5/135 30/180	"
7C—5	"	"	4.0	110~392 (0~ 60hr) 150~432 (60~180hr)	0/100 5/140 6/180	"
7C—3	"	"	2.0		0/140	403
7C—1	"	"	1.0	"	0/100 7/140 30/180	518

軸回転数 240rpm 振動周波数 8 Hz

をやわらげ、メタルに加わる繰返し表面摩擦力を分散させるので疲れ強さに対して有利であると思われる。

軸受メタルの疲れ破壊を誘起する主な応力として、軸受メタルに加わる曲げ応力と軸受メタルの表面に働く繰返し摩擦力があげられる。繰返し動荷重下で試験された軸受メタルにおいて、軸受面の両端付近でき裂が多く発生しているのは、高荷重を受けた軸が弾性変形を生じてたわみ、軸受面両端付近で近く接触または境界潤滑状態に近い片当り状態となって、著しい摩擦力が繰返し働くための疲れによるものと考えられる。

また、軸受メタル肉厚を減少させると裏金強度が作用して圧縮強度は増大する。しかし、肉厚が薄くなると軸受の変形能力が低下するため片当り状態が強くなる。そのため軸受面両端付近でき裂が多く発生することになり、そこを起点として疲れ破損が進行しやすくなると考えられる。

(3) 軸受径、繰返し数、負荷条件について

供試軸受直径150mmは揺動式を含めても、すべり軸受の疲労試験機用としては最大級にはいる。試験機

の大形化により軸受直径が1mにも及ぶ実機の軸受と試験軸受との寸法差をできるだけ小さくすることができた。反面、負荷の繰返し速度、高負荷での運転維持について制約を受けた。

この種の疲れ試験には多くの時間を要するので、当試験においては定時間型動荷重試験(180時間、繰返し数 5.2×10^6)を採用した。従って、供試軸受のなかには、ほとんど疲れ損傷が生じないままで試験を終了しているものがある。これらの点については、試験時間の延長による繰返し数の増加、または、試験機の改造による負荷条件のか酷化した試験により更に追求する必要があると考える。

当試験の負荷条件は、寸法効果のある程度考慮したとしても、実船の船尾管軸受や中間軸受で想定される条件よりはるかに高荷重下である。従って、この方面での使用上において、潤滑状況が良好であれば、疲れ破損の危惧はほとんどないと考える。しかし、すず及び鉛は低溶融点金属であるので、メタル温度の上昇とともに抵抗力、耐疲れ性が低下することが実験的に明

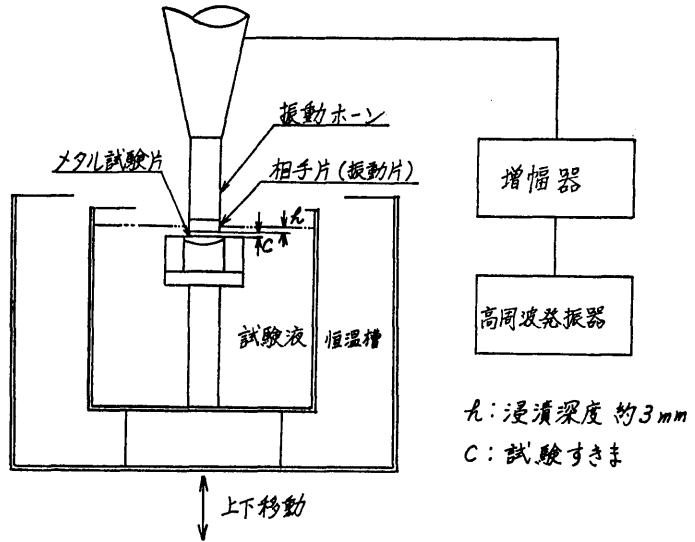
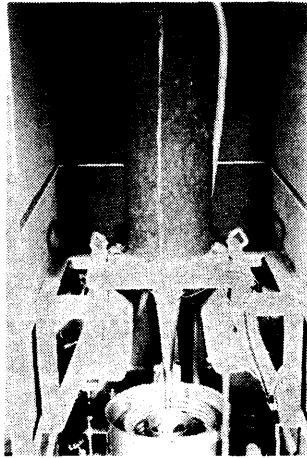


図-24 試験装置概略及び計測部

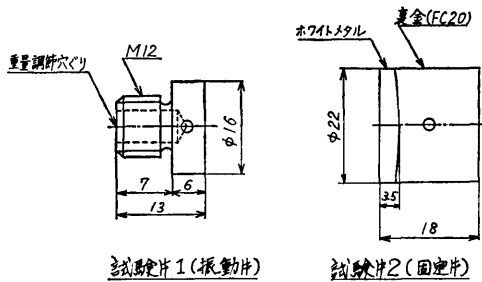


図-25 試験片

らかにされているので、この点に留意する必要がある。

3. 軸受メタルの浸食について

材料間の耐キャビテーション・エロージョン性を実験室的に調べる方法として、試験時間が短く、再現性のすぐれている磁わい振動法により、すず基ホワイトメタル(WJ1, WJ2)と鉛基ホワイトメタル(WJ7)の耐浸食性の比較、潤滑油に水が混入した場合の影響について調べる。

3.1 試験装置及び試験方法

試験装置の概略と計測部を図-24に示す。500Wの磁わい振動法によるキャビテーション・エロージョン試験装置で、共振周波数6.5kc/sのニッケル振動子を使用し、振動ホーン先端に直径16mmの試験片1

(振動片)を取付け振動面とし、メタル試験片2は振動面に対して平行に取付ける。

図-25は試験片の形状と寸法を示す。試験片2は図-4に示す軸受と同型に製作したものより加工し、その材質はすず基ホワイトメタルのWJ1及びWJ2と鉛基ホワイトメタルのWJ7を遠心铸造(C.C)した3種とWJ2をプラズマアーク溶接施工(P.W)した1種である。

なお、WJ1は、WJ2の化学成分に比べS₀及びC_uの添加量が若干少なくなっているが、物理的性質はWJ2のそれに大体似ている。

試験片1は船用軸材として使用されているSF45材より加工した。各々の試験面は鏡面仕上げとした。試験片1の浸漬深さは約3mmとし、メタル試験片とのすきまは恒温槽を上下移動することにより調整した。

試験液には、パラフィン系ストレートタイプの船用潤滑油(SAEエンジン油30相当品でその粘度は図-9に示す)を使用し、混合用水としてはイオン交換水を用いた。油中水は予め攪拌機によって十分混合し、エマルジョン化してから試験液とした。試験液温度は25°Cとし、試験片1の振幅は75μ、振動数は6.5kc/s一定にして各試験を行い、試験液の取換えは30分ごとに行った。

試験片の重量減少量の計測は10分(損傷大なる場合)または30分ごとに試験を中断して、測定感度0.1

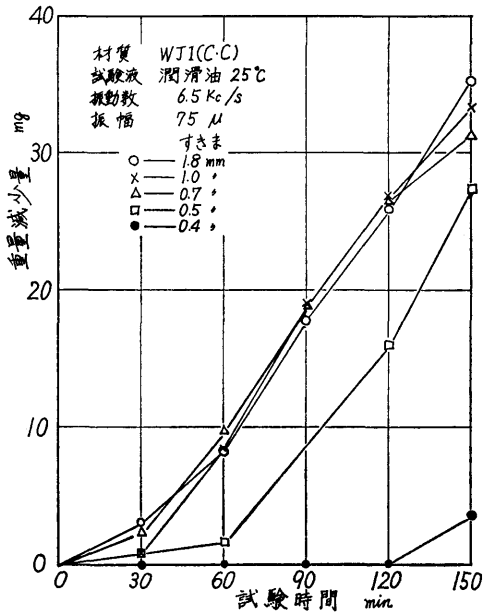


図-26 WJ 1 の重量減少量

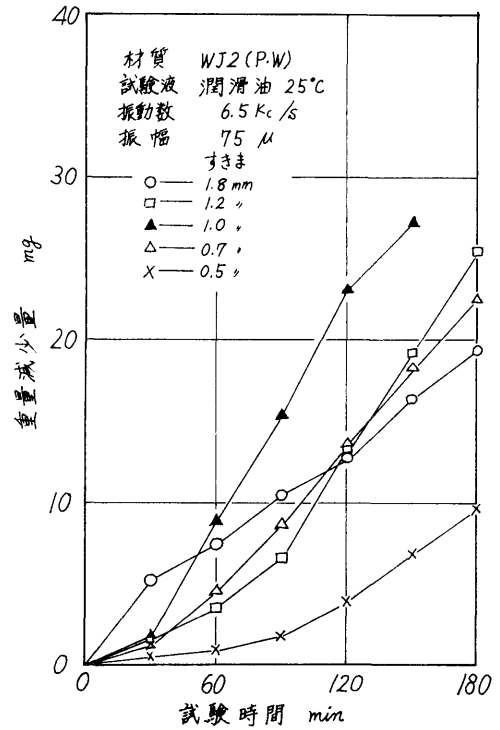


図-28 WJ 2 (P.W) の重量減少量

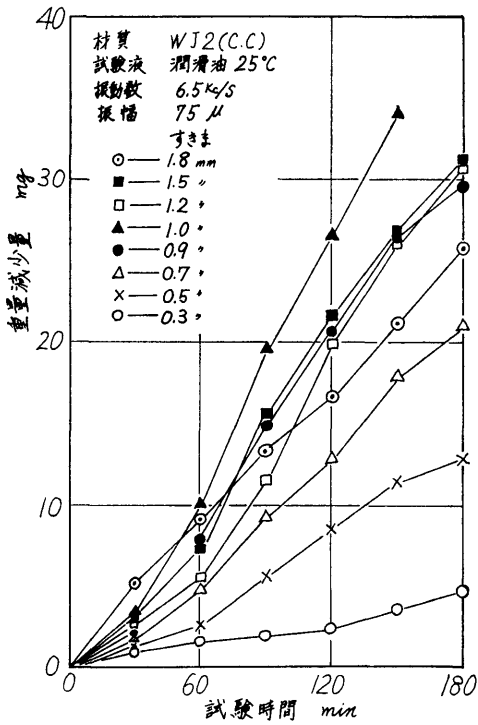


図-27 WJ 2 の重量減少量

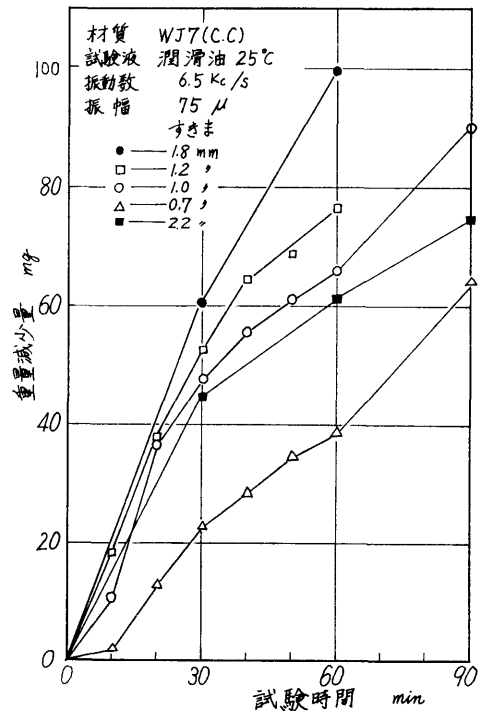


図-29 WJ 7 の重量減少量

WJ1(C-C)					
mm,mg,min	0.5, 27.4, 150	0.7, 31.1, 150	1.0, 33.3, 150	1.8, 35.3, 150	
WJ2(C-C)					
mm,mg,min	0.3, 4.65, 180	0.7, 20.95, 180	1.0, 30.4, 150	1.2, 31.7, 180	1.8, 25.8, 180
WJ7(C-C)					
mm,mg,min	0.7, 56.1, 90	1.0, 84.4, 90	1.2, 76.3, 60	1.8, 99.7, 60	2.2, 75.1, 90

図-30 主な試験片の浸食状況

mg のてんびんで行った。

3.2 試験結果及び考察

WJ 1, WJ 2 及び WJ 7 の遠心鋳造と WJ 2 のプラズマアーク溶接の 4 種について、すきまを変えて油中におけるホワイトメタルの耐浸食性を試験した結果を図-26~29 に各々の重量減少量で示す。

図-30 は主な試験片の浸食状況を示す。また、図-31 は WJ 2 (P.W) の浸食断面状況を示す。浸食はメタル材質に関係なく、すきまが小さいところでは輪状になっていて、すきまが大きくなるにつれてその輪は内側に太くなり 1.8~2.2mm では、円状になっている。

浸食の主因をなすものは、気泡の崩壊による圧縮力の繰返しであるが、すきまの小さいところでは油の流入によるせん断力の繰返しが加わる。すきまが小さくなると試験面の中央近辺は、フィクストキャビテーションが発生し、気泡が大きくなり、そのクッション作用のために崩壊しにくくなる。また、試験面に働くせん断力はすきまが小さいほど大きく、振動面外周で最大となる。それ故、図-30 に示すようにすきまの小さいところでは輪状に浸食されることになる。

図-31 の浸食状況を見ると、浸食によるピットが各々連なり、一部においては粒子が脱落している。しか

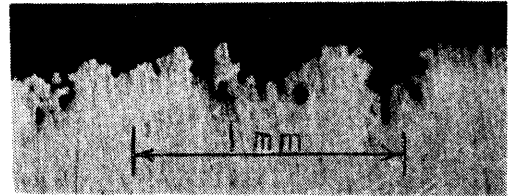


図-31 WJ 2 (P.W) すきま 1 mm, 浸食断面写真

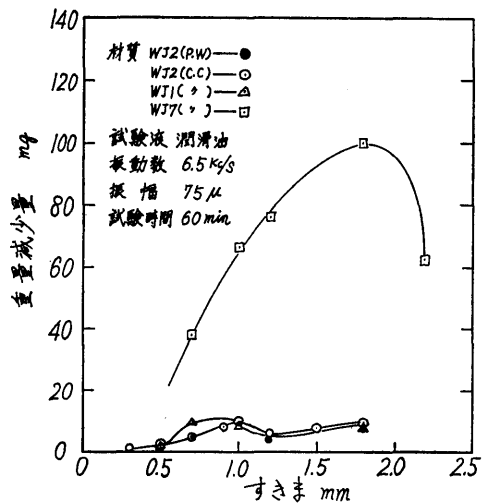


図-32 すきまに対する重量減少量分布

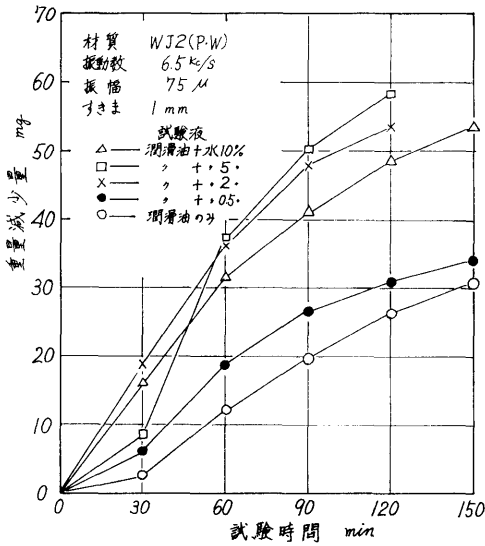


図-33 水混入時における重量減少量

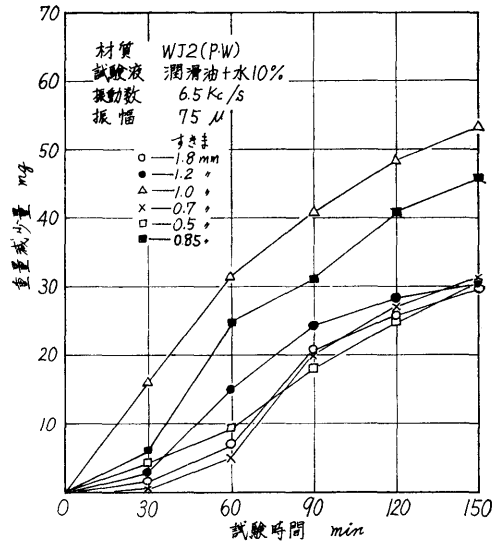


図-35 10%水混入時における重量減少量

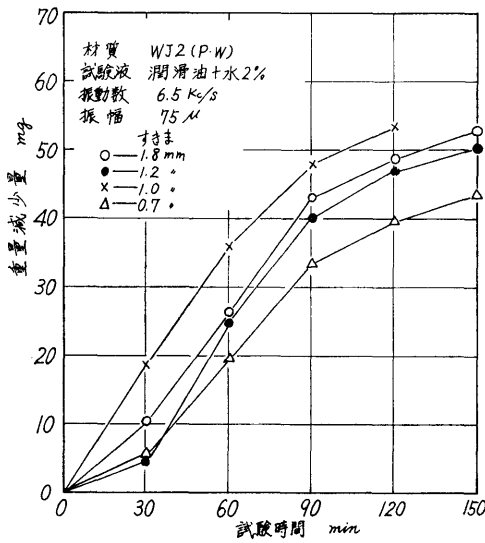


図-34 2%水混入時における重量減少量

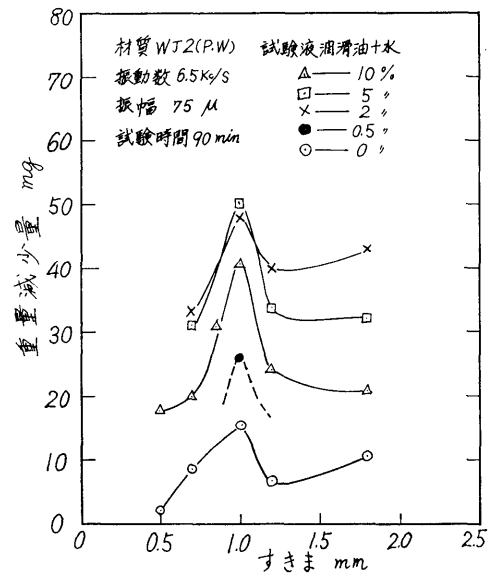


図-36 水混入時のすきまに対する重量減少量

し、メタル肉厚が大きいのでき裂は生じていない。
 図-32はすきまに対する重量減少量分布を示す。W J 1, W J 2はすきまの1mm付近にピークが存在しているが、W J 7は1.8mm付近にピークがある。
 耐浸食性をみると、鉛基ホワイトメタルはすず基ホワイトメタルと比べてかなり悪い。例えば、すきま1mmの試験時間分における重量減少量を比較するとW J 1またはW J 2の約7倍となっている。

図-33はW J 2(P.W)について、すきま1mmとして潤滑油に水を混入させ、この油中水を試験液として耐浸食性を調べた結果である。

図-34, 35は2%及び10%水混入時における重量減少量をすきまをパラメータとして示す。水混入時の浸食状況をすきまに対して整理すると図-36のようになる。また、すきま一定として水混合率と一定時間にお

ける重量減少量で整理すると図-37となる。

潤滑油に水を混入すると、粘度は低下する。試験液の粘度が低くなると重量減少率のピークは、すきまの小さい方向に移動する結果が報告されているが⁷⁾、本試験範囲ではピークの移動は認められない。

図-38はWJ 2 (P. W) 試験片の浸食状況を示す。油中水の場合、水混入割合の増加に伴い重量減少率も連続的に上昇する傾向にあるものと予想された。しかし、10%水混入時は2~5%水混入時よりも重量減少率は小さくなっている。この主原因として、液体の蒸気圧があげられる。すなわち、液体の蒸気圧が高くなるに従ってキャビテーションは発生しやすくなるにもかかわらず、蒸気圧が50~100mmHg以上になると、気泡の崩壊速度が減少して衝撃圧力が低下する。そのためフィクストキャビテーションが増加し、重量減少量は急に低下する現象が明らかにされており¹¹⁾、この現象が作用したことが考えられる。

図-39はWJ 7について、試験液として潤滑油に水を混入した場合における浸食量増加状況を示す。試験は重量減少率の最大値を示す。すきま1.8mmとして

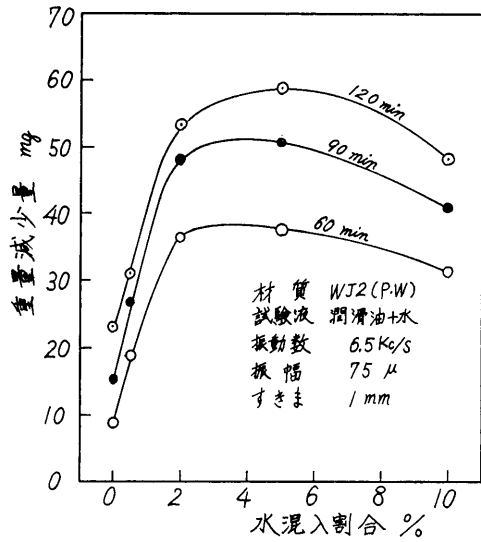


図-37 水混入による重量減少量の変化

行った。

WJ 2の場合、重量減少量に対する水混入の影響度

WJ2 (P.W)				
mm, mg, min	0.7, 22.4, 180	1.0, 31.1, 150	1.2, 25.4, 180	1.8, 19.3, 180
WJ2 (P.W) L.O+水5%				
mm, mg, min	0.7, 37.4, 150	1.0, 58.6, 120	1.2, 38.9, 120	1.8, 46.0, 120
WJ2 (P.W) L.O+水10%				
mm, mg, min	0.7, 31.2, 150	1.0, 53.5, 150	1.2, 30.6, 150	1.8, 30.0, 150

図-38 WJ 2 (P. W) 水混入時の浸食状況

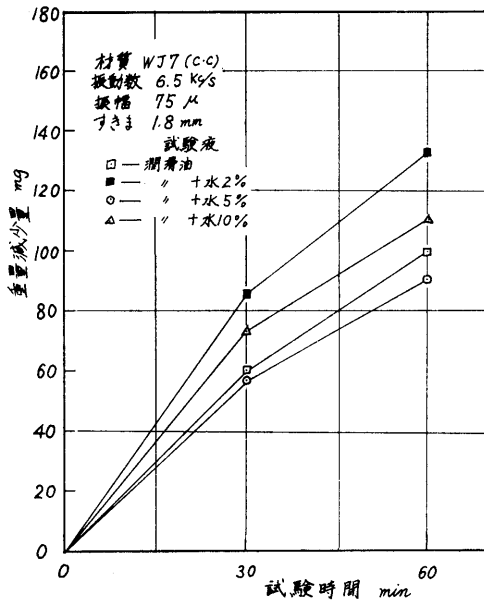


図-39 WJ 7 の水混入時における重量減少量

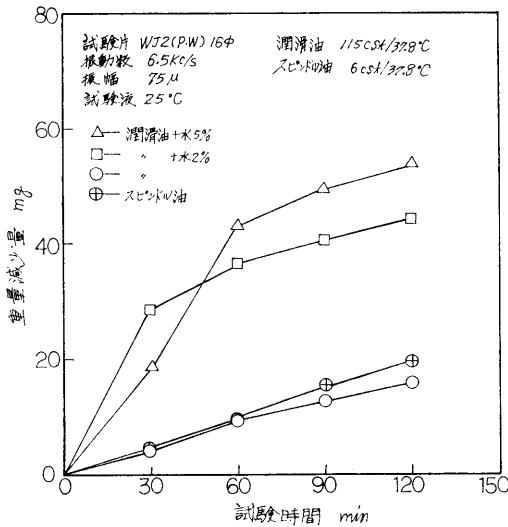


図-40 WJ 2 (P.W) 振動片の重量減少量

はかなり大きく、水 2～5%混入時は潤滑油時の 3～4 倍に増加している。しかし、WJ 7 のときはその影響度は小さい。なお、各々の試験において、試験片 1 の損傷はほとんど認められなかった。

また、図-25に示す試験片 1 (振動片) として軸受より切り出し加工した WJ 2 (P.W) 試験片について、固定片をつけずに試験液の粘度及び水混入時の影

響を調べた結果を図-40に示す。スピンドル油中における重量減少量は船用潤滑油中の値より若干大きくなっている。また、水 2～5%混入時の重量減少量は潤滑油時の値の 4～5 倍に増加している。近接平行 2 面に生ずる浸食の場合と増加割合が大体似ている。

以上に述べた磁わい振動法による結果は、試験時間が短く、キャビテーション力が大きいため腐食の影響はほとんどなかったと考えられるが、実機においては腐食疲れがかなり付加されると思われる。

4. まとめ

軸直径 150mm の動荷重軸受試験により、ホワイトメタル肉厚 0.9～4 mm の組の軸受について、一定条件の繰返し荷重を加え疲れ試験を行い、また、磁わい振動法により浸食試験を行った。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) 軸受メタルのライニング厚さを 0.9～4 mm に変えた場合の疲れ強さは、WJ 2 及び WJ 7 のいずれにおいてもメタルの厚い方が耐久性のあることが確認された。

(2) 鉛基とすず基メタルの疲れ強さの比較では、鉛基の WJ 7 の方がすず基の WJ 2 に比べて疲れ強さの面ではすぐれている結果が得られた。

(3) 本実験においては、軸受面に生じたき裂のうち、軸方向き裂は試験時間の経過に伴い進展しやすく、軸受メタルの損傷に及ぼす影響も大きい。しかし、円周軸方向き裂はあまり進展しない。

(4) 鉛基ホワイトメタルはすず基ホワイトメタルと比べてかなり浸食されやすい。

(5) 潤滑油に水が混入した場合、すず基ホワイトメタルでは浸食量が増加するが、鉛基ホワイトメタルではあまり増加しない。

(6) 潤滑油に水が混入した場合、その混入割合が大きくなっても浸食量は連続的に増加しない。

(7) P.W 手法の軸受は従来法である遠心鋳造法の軸受と比べ浸食されにくく、疲れ強さの点においてもすぐれている。

本試験の遂行にあたり、多大な御協力と貴重な御助言を頂いたスタンダードメタル工業㈱の高田昌延社長に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 曾田範宗, 宮原儀芳: 動荷重をうけるすべり軸受

- の疲れ破損：日本機械学会誌，第62巻，第482号，1959年3月
- 2) 宇田川延寿，福岡辰彦：アルミニウム合金軸受の進歩：機械の研究，第27巻，第1号，1975年
 - 3) 遠藤吉郎他：油中におけるライニングした軸受メタルの疲れき裂の進展：日本機械学会論文集，37巻，300号，昭和46年8月
 - 4) Eric R. Braithwaite: Lubrication and Lubricants: 1967
 - 5) 朝鍋定生：2 サイクル船用機関クロスヘッドピン軸受の実験的研究：内燃機関，5巻，6号，1966年
 - 6) 山田勝哉他：船用大形ディーゼル機関のクロスヘッド軸受に適用される錫-アルミニウム軸受の開発：石播技報，第13巻，6号，昭和48年11月
 - 7) 遠藤吉郎他：液中で振動する近接平行2面間の浸食（とくに軸受メタルの損傷について）：日本機械学会論文集，32巻，237号（昭41-5）
 - 8) 遠藤吉郎他：軸受メタルの油膜による浸食：日本機械学会論文集，33巻，253号（昭42-9）
 - 9) 曾田範宗他：回転軸に対する円板のキャビテーション浸食について（第1報，第2報）：日本機械学会講演論文集，No. 740-4
 - 10) 日本船用機器開発協会事業報告，48-15，昭和49年3月
 - 11) R. W. Wilson etc.: Cavitation of Metal Surfaces in Contact with Lubricants: IME 707 (1957)
 - 12) 森早苗：すべり軸受最近の話題：機械の研究，第28巻，5号，1976年
 - 13) 高田昌延：すべり軸受用高S_n基ホワイトメタル：日本船用機関学会誌，第12巻，1号，昭和52年
 - 14) 曾田範宗：軸受：岩波全書
 - 15) 森早苗：すべり軸受：幸書房
 - 16) A. Cameron: The Principles of Lubrication: 1966
 - 17) W. Hilgers: Lagermetalle: 1970
 - 18) M. P. E. Desvaux: Development of a high-tin Aluminium Plain Bearing Material: Tribology, April 1972
 - 19) D. Scott, etc.: Plain Bearing Materials and The Investigation of Their Failure: NEL Report No. 539, 1973
 - 20) 森早苗：内燃機関軸受のエロージョン：潤滑，第17巻，第4号（1972）
 - 21) 遠藤吉郎：金属材料の表面損傷：機械の研究，第27巻，第1号（1975）
 - 22) 栄幸雄：キャビテーション・エロージョンについて：防食技術，第32巻，第1号（昭32-1）
 - 23) P. G. Kessel: Cavitation Phenomena of Stern-tube Bearings: Journal of ship Research, March 1966
 - 24) Lutz, O Kavitation in Gleitlagern: Antriebs-technik, 12 (1973) Nr. 9
 - 25) 下山三郎：キャビテーション・エロージョン試験法について：第19回腐食防食討論会論文集，1972