

アルミニウム合金軸受の実用試験

井ノ内一雄*

Test on the Aluminium-Alloy Bearing

By

Kazuo Inouchi

Abstract

The test of aluminium-alloy bearings was performed using a bearing tester and test diesel engines. The bearing materials used for the test are 6% Sn aluminium base alloy and a newly developed 12% Sn aluminium-alloy of granular structure type and temper hardened.

The applicability of aluminium-alloy bearings to diesel engines was tested by applying them to the crank pin journal bearings.

From the test results, the following conclusions are obtained,

1. The load capacity of aluminium-alloy bearings is far superior to that of white metal and is comparable to that of copper-base Kelmet alloy bearings.
2. Aluminium-alloy bearings still have problems which have to be solved before applying to practical engines. These are;
 - (i) Quality control of lubricating oil...the filtering of the lubricating oil must be done perfectly.
 - (ii) Installation of bearing metals...the bearing metals must be fitted carefully to the bearing housing.
 - (iii) The bearing has to be constructed with good accuracy because initial breaking-in property is so poor.

目 次

| | | | |
|---------------------|----|----------------------------------|----|
| Abstract | 71 | 3.2.3 軸回転数..... | 76 |
| 1. まえがき..... | 72 | 3.2.4 軸受温度..... | 76 |
| 2. 試験目的..... | 72 | 3.2.5 軸受平均スキマ..... | 76 |
| 3. 軸受試験機による試験..... | 73 | 3.2.6 潤滑油および油量..... | 77 |
| 3.1 軸受試験機..... | 73 | 3.2.7 ρ および ρ_0 値..... | 77 |
| 3.1.1 供試軸受..... | 73 | 3.3 試験結果..... | 77 |
| 3.1.2 軸受試験機..... | 73 | 3.3.1 ホワイトメタル..... | 77 |
| 3.1.3 焼付き用スリーブ..... | 74 | 3.3.2 アルミ合金メタル..... | 77 |
| 3.2 試験方法..... | 76 | 3.4 考 察..... | 78 |
| 3.2.1 荷 重..... | 76 | 4. 機関適用試験..... | 81 |
| 3.2.2 負荷時間..... | 76 | 4.1 使用機関および運転方法..... | 81 |

* 機関性能部

原稿受付 昭和46年5月1日

| | |
|----------------|----|
| 4.2 使用軸受 | 82 |
| 4.3 試験結果 | 82 |
| 4.3.1 4 PS 機関 | 82 |
| 4.3.2 80 PS 機関 | 86 |

1. ま え が き

一般に、機関の軸受には種々のものがあって、使用場所、使用目的により、それぞれ最適材質のものが使われている。本文では、アルミニウム合金軸受に関し、当部所有の軸受試験機、およびテスト用ディーゼル機関を使用して二、三の試験を行なったので、その結果について報告する。併せてアルミニウム合金軸受の現況についてふれる。

2. 試 験 目 的

船用中形ディーゼル機関は、船舶の高速大出力化にともない、ここ数年来ますます高性能化が要求されている。すでに昭和39年3月の運輸省ならびに通産省指針によれば、「単位出力当り重量を10kgとする」、あるいは「平均有効圧力を12kg/cm²以上とする」とあり、その目的達成方法として高過給により、平均有効圧力の上昇を計ろうとする機関が増加している。最近では給気圧力比2.5~3.0、平均有効圧力18~20kg/cm²、あるいはそれ以上の機関も出現しつつある。このように給気圧力を高め平均有効圧力を上昇して、単位シリンダ容積当りの出力を増力した高性能機関では、必然的にシリンダ内の燃焼圧力は高くなり、その最高爆発圧力は130kg/cm²にも達している。この場合問題になってくるものの一つに、主軸およびクランクピン軸受があり、一般機関で最も多く使用されているホワイトメタルでも早や使用に耐えなくなっている。

現在船用高出力機関の軸受には、いわゆる3層メタル（鋼—鉛青銅—ホワイト）や4層メタル（鋼—鉛青銅—ホワイト—錫鉛オーバーレイ）が使用されている。本軸受は鋼裏金に鉛青銅を鑄込む技術が難しく、十分な温度管理を必要とする等の問題がある。また高速機関ではケルメット合金（銅—鉛）が多く使われるが、硬いのでクランク軸を硬化（焼入研磨）する必要があり、大形クランク軸では困難である。その他、高荷重軸受には銀系の鉛—インジウムオーバーレイの許容荷重350kg/cm²以上と云われるものもあるが、以上いずれも共通した難点は材料が乏しく高価なことである。

| | |
|---------|----|
| 4.4 考 察 | 88 |
| 5. 付 記 | 89 |
| 参考文献 | 90 |

したがって、これらに代る軽量、安価な軸受の出現は、機関の一そうの出力増加を期待する上で急務の一つとされている。以上のすう勢から、クランク軸を焼入れせずに使用でき、しかも上記高級諸軸受と同程度の疲労強度を有し、資源的に豊富で、製品価格がホワイトメタルの1/5以下ですむ、アルミニウム合金軸受の船用機関における使用可否の問題が検討されつつある。

機関の出力増強、小形軽量化に対するアルミニウム合金軸受の有利性は、手軽に入手できる材料中、

1. 負荷能力が大きい
 2. 硬化しない軸に使用できる
 3. 高温境界潤滑状態において他の軸受より非焼付性（溶着なしに金属同志が滑ること）が良好である。
 4. 耐食性が強いので、高温高压用に開発された最近の合成潤滑油が使用できる。
 5. 熱伝導性が良いので、格納されたスペース内での熱放散が早く、発熱することが少ない。
- 等のことが挙げられる。一方、欠点としては、
1. 熱膨脹係数が大きいので鉄製ケーシング内におさめられた場合、冷態始動時に比較的大きいスキマをとっておかなければ、高負荷運転時には軸スキマがなくなる。
 2. 初期なじみに劣り、使用中の表面に硬い酸化アルミナ相を生成した場合は、これがもろいため潤滑油にもち去られ、軸を摩耗させる恐れがある。
 3. 埋没性に劣るので、微細異物の噛み込みがない。そのため異物が潤滑油にもち去られ、潤滑油を劣化させるので、潤滑油の汙過を十分にしなければならぬ。
- 等のことが従来指摘されている。

これらの欠点のため、自動車機関ではかなり早くから採用されて来たにもかかわらず、船用機関では小形ブッシュ等を除いて、主要部分軸受として使用した例は皆無に近くその実績は見当らない。しかしながら、最近のアルミニウム合金軸受は上記の欠点を逐次改良し、特に船用機関用として調質したものが出現しており、使用者側としては実機適用上の諸性能を知りたいところである。

本文の試験では、代表的アルミニウム合金軸受の負荷能力を、軸受試験機において試験し、さらに最新の改良されたアルミニウム合金軸受をテスト用ディーゼル機関のクランクピンに適用して、その能力と問題点を調査することにした。

3. 軸受試験機による試験

3.1 軸受試験機

3.1.1 供試軸受

軸受試験機に使用した供試軸受はF社製のアルミニウム合金としては代表的な素材、6%錫—アルミニウム合金、B-750T5 および 750T5 (T5 処理: 熱処理 175°C, 16時間時効, 以下アルミと略す) より加工仕上げしたもので、これと比較のため錫基第2種ホワイトメタルについても試験を行なった。加工図は図1, および2に、仕上がり状態を写真1に示した。アルミ軸受の表面仕上げはバフ仕上げ等を行なわず旋削のままとしたが、表面荒さは JIS 1.6~2.5S 程度であった。ホワイトメタルの厚みは 0.7~0.8mm とした。

これらの機械的強度, 物理的性質, および化学成分を表1に示した。

3.1.2 軸受試験機

軸受試験機は当所設計のもので、周速, 最大荷重等は、船用機関を対照として定められた。試験機の概略を図3に示す。〔A〕は負荷部分であり、最大荷重 P は5,000 kg, 軸周速は駆動側モータプリーおよび軸側プリーを種々に組合わすことにより適当に変えることができる。同図中、主軸 a に焼付き試験用スリーブ S をはめ込み、試験用軸受 b をホルダ c におさめてケーシング d に組み込み、 b と S 間に荷重をかける。

荷重 W は荷重計のロッドをハンドル l を回わして引き下げることにより、アーム h , 調整ネジ e を介して軸受 b の下メタルにかかることになる。この時支点間距離から $P=10W$ となる。

〔B〕は給油系で潤滑油の加熱冷却および油圧, 給油量の調整ができる。

写真 2, 3, 4 はそれぞれ試験機全体, 軸および軸受 (温度計測用熱電対3本が見える), ならびにスリーブ

表1 供試軸受材の性質

| | 合金名 (鑄造法) | B750-T5 砂形鑄物 | 750-T5 砂形鑄物 | ホワイトメタル 置注ぎライニング |
|-----------------------------------|---|-----------------|----------------|---------------------|
| 機械的性質 | 引張り強さ kg/mm^2 | 18.9 | 14.0 | 8.3 |
| | 耐力 (0.2%) kg/mm^2 | 15.4 | 7.7 | 15.0 |
| | 伸び (%) 50.8mm | 2.0 | 8.0 | 8.0 |
| | 圧縮耐力 (0.2%) kg/mm^2 | 15.4 | 7.7 | — |
| | プリネルかたさ 500kg/10mm ポール | 65.0 | 45.0 | 28.0 |
| | せん断力 kg/mm^2 | 12.6 | 9.8 | — |
| | 疲労強さ 5×10^8 回 kg/mm^2 | 7.0 | — | — |
| 物理的性質 | 比重 | 2.88 | 2.88 | 7.3 |
| | 溶解温度 $^{\circ}\text{C}$ | 635 | 649 | 450 |
| | 電気伝導度 % IACS | 45 | 47 | — |
| | 熱伝導度 $\text{cal}/\text{cm sec } ^{\circ}\text{C}$ | 0.42 | 0.44 | 0.17 |
| | 平均線膨脹係数 $\times 10^{-6}$ | | | |
| | ($-50 \sim 20^{\circ}\text{C}$) | 21.4 | 21.6 | 22.03 |
| ($20 \sim 100^{\circ}\text{C}$) | 23.2 | 23.2 | — | |
| ($20 \sim 200^{\circ}\text{C}$) | 24.3 | 24.3 | — | |
| 化学的成分 (%) | Sn | 6.5 | 6.5 | 残部 |
| | Cu | 2.0 | 1.0 | 5.0~6.0 |
| | Ni | 1.2 | 1.0 | — |
| | Mg | 0.8 | — | — |
| | Sb | — | — | 8.0~10.0 |
| | Al | 残部 | 残部 | — |

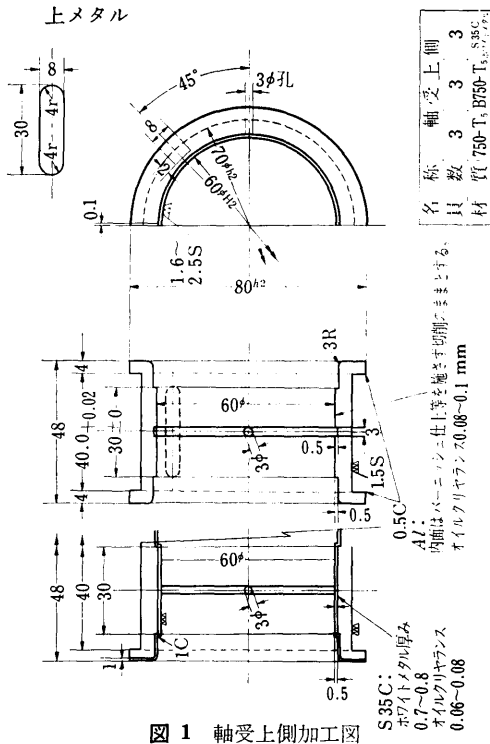


図1 軸受上側加工図

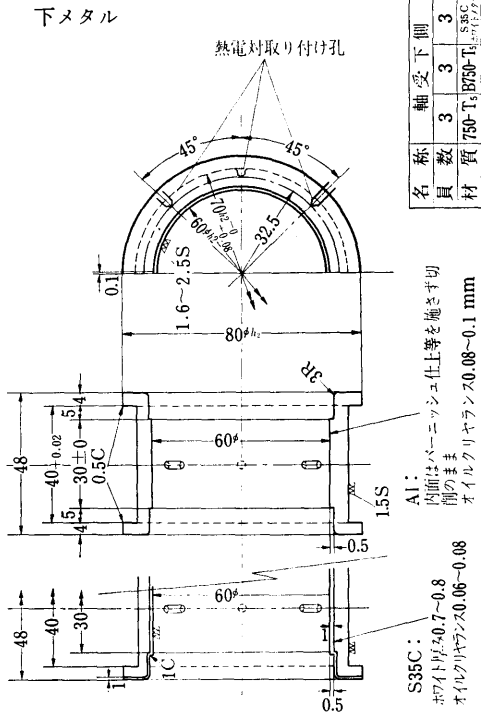
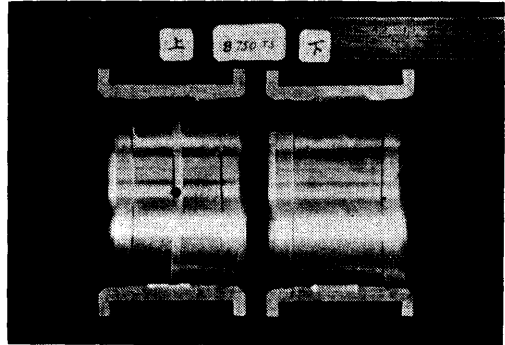


図2 軸受下側加工図

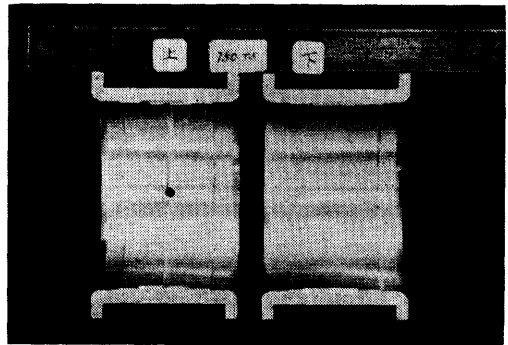
を示す。

3.1.3 焼付き用スリーブ

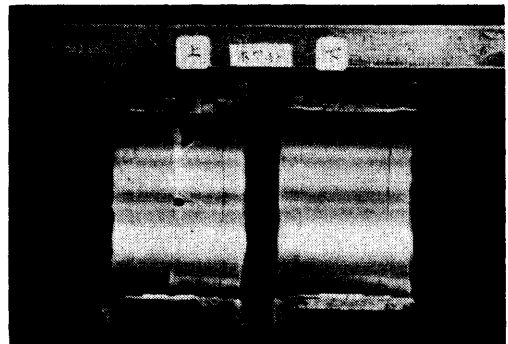
材質はS50C、かたさはブリネル $H_B=212\sim277$ であった。表面仕上げは現用クランクピン仕上げに合わせて、2.8~3.0Sのグラインダ仕上げとした。これは主軸を保護するためのものであり、主軸カラーに他端よりプッシュをネジ止めて位置ぎめする。



B 750-T5



750-T5



ホワイト2種

写真1 使用前各軸受

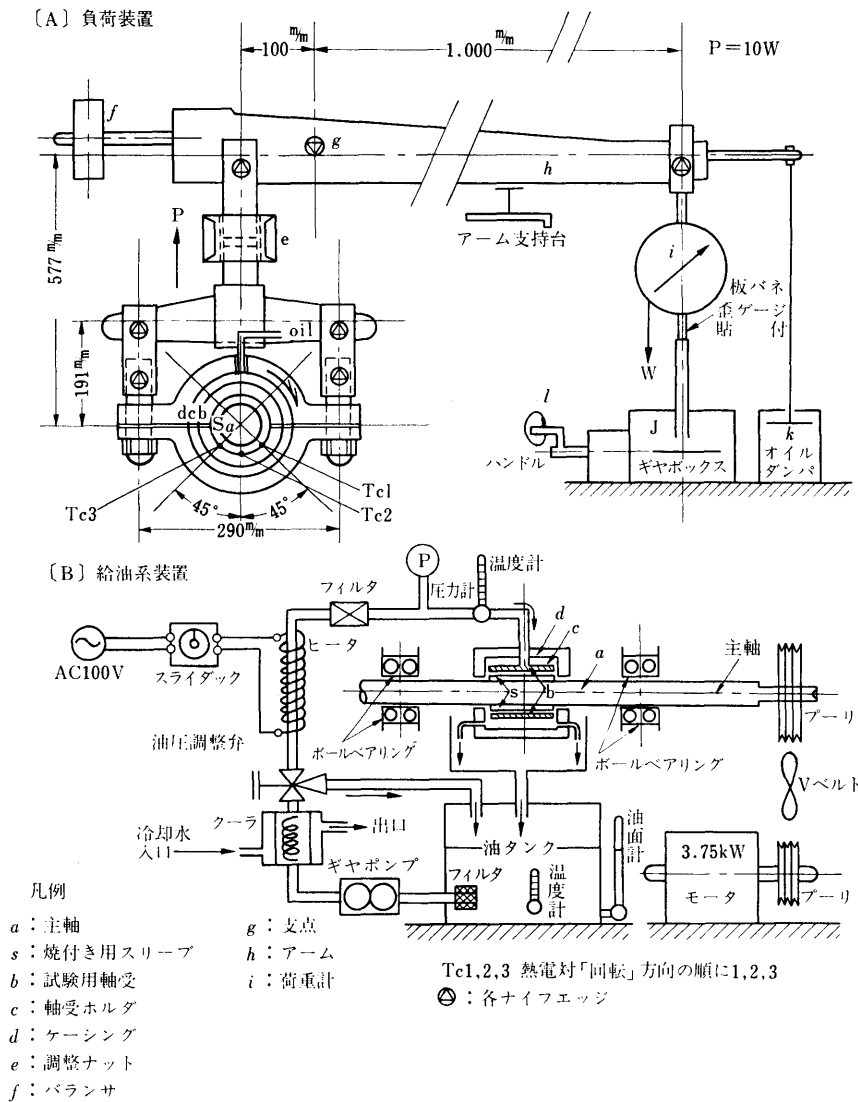


図3 軸受試験機概略図

写真 2
軸受試験機

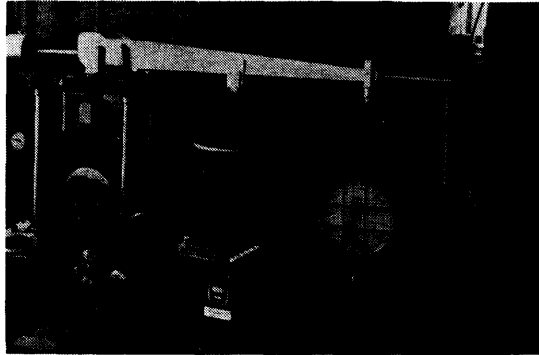


写真 3
軸



写真 4
スリーブ

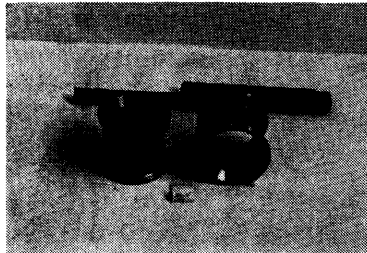


写真 2.3.4 試験, 軸, スリーブ

3.2 試験方法

本試験に入る前に、ホワイトおよびアルミ軸受により、数回の予備試験を行ない試験条件を定めた。

3.2.1 荷重

荷重は焼付けを生ずるまで 500 kg ごとに増量し、本試験機の最大荷重 5,000 kg に至る。

3.2.2 負荷時間

各荷重ごとに 10 分間とした。大略負荷上昇後 2~3 分で、荷重および軸受温度は平衡に達した。

3.2.3 軸回転数

ホワイトメタルは軸回転数 880 rpm (周速 $v=2.7$ m/sec) および 1,900 rpm (周速 $v=6.3$ m/sec) としたが、

(214)

アルミメタルは 1,900 rpm のみとした。

3.2.4 軸受温度

図 2 軸受下側加工図に示す表面より、2.5 mm 下に芯線 0.3ϕ mm の銅-コンスタンタン線を熱電対として、油の吸い込み側から回転方向にしたがい、TC-1, 2, 3 として軸受裏側に溶接した。アルミ系の場合、ハンダフラックスはスタノール No. 880 を用いた。

3.2.5 軸受平均スキマ

アルミ系の場合 1.5/1,000 D, ホワイトは 1.0/1,000 D とした。(ただし D: スリーブ外径 60 mm)。したがってそれぞれ 9/1,000 mm および 6/1,000 mm になるよう軸受および軸スリーブを組合わした。これ

らは一般にアルミ系およびホワイトに推奨されている値である。

3.2.6 潤滑油および油量

試験に用いた潤滑油は SAE 30 無添加剤の内燃機関油の新油と、これをディーゼル機関で 200 時間程度使用した使用油を試験油とした。表 2 にその性状を示すが、使用油の方は粘度が落ち、残留炭素分が増しているため、機関燃焼室からの燃焼残渣が混入しているものと思われる。給油系の油タンク出口には 100 メッシュのゴーズワイヤを使用した。

油量は流動油膜の状態に対する最小潤滑油供給速度を、一方向ジャーナル軸受に関する次の実験式⁽¹⁾より算出した。これを基準として油量を調節したが、本試験機の場合最小油量は 0.2 cc/分となったが、これに見合う油圧は 0.2 kg/cm² となった。給油温度は入口を 40±1°C におさえるように調節した。

$$\text{算式 } Q_{\min} = K \cdot v \cdot r \cdot m \cdot l$$

| | | | |
|-----|------------|-------|---------------------------|
| ただし | Q_{\min} | 最小給油量 | in ³ /sec |
| | v | 周速 | in/sec |
| | r | 軸の半径 | in |
| | m | 間隙比 | in/in |
| | l | 軸受の長さ | in |
| | K | 係数 | $K = 0.043 + 0.0000185 p$ |
| | p | 荷重 | Lb/in ² |

表 2 使用潤滑油性状表

| | 新油 | 使用油 |
|---------------------------------|--------|-------|
| 比重 $d_{4}^{15^{\circ}\text{C}}$ | 0.8972 | 0.901 |
| 引火点 $^{\circ}\text{C}$ | 264 | 230 |
| 粘度 Cst 37.8°C | 158.8 | 117 |
| 98°C | 14.7 | 12 |
| 残留炭素 % | 0.2 | 1.44 |

3.2.7 p および p_0 値

軸受投影面積当り荷重 p kg/cm² および周速 $v=6.3$ m/sec における p_0 値は表 3 のように計算される。

計測は、軸回転数 rpm, 荷重 W kg (荷重計板バネに歪ゲージ貼付) および軸受温度 Tc-1, 2, 3 を電磁オ

ッシロに入れ、連続記録した。他に油出入口温度、油圧計、油量を測定し運転条件を一定に保つように調節した。

3.3 試験結果

3.3.1 ホワイトメタル

次の a, b, c 3 試験の結果は以下のとおりである。油は新油のみ使用した。

a. 軸回転数 880 rpm ($v=2.7$ m/sec), 給油圧 1 および 0.2 kg/cm²

給油圧 1 kg/cm² および 0.2 kg/cm² とも最大荷重 $P=5,000$ kg において焼付かなかった。 p_0 値では $278 \times 2.7=750$ 程度になるが、短時間では焼付かないことが分った。

b. 軸回転数 1,900 rpm ($v=6.3$ m/sec) 給油圧 1 kg/cm²

給油圧 1 kg/cm² において $v=6.3$ m/sec に上昇したところ、 $P=4,000$ kg にて音響を発し始めたので停止、分解調査の結果は下メタルの一部が溶融していた。

$p_0=1,384$ に相当する。その状態は写真 5 に示した。

c. 軸回転数 1,900 rpm ($v=6.3$ m/sec) 給油圧 0.2 kg/cm²

給油圧を最小油量の 0.2 kg/cm² に下げた結果は、 $P=3,500$ kg にて火焰を発し完全に溶融した。この時の温度上昇は図 4 に、状態は写真 6 に示した。最高温度は Tc-2 が 312°C を示した。

3.3.2 アルミ合金メタル

次の a, b, c, d 4 試験の結果は以下のとおりである。油は新油および使用油で行なった。

本試験以外に予備試験として、 $P=5,000$ kg において油圧を 1 kg/cm² から 0.5 kg/cm² まで漸減させる試験を行なったが、油圧が多い場合は焼付きに至らないことを確認した。

a. B 750-T5 材, 新油

$P=3,500$ kg から金属接触音を発し、振動し始めたが、なお荷重を増して行ったところ、 $P=5,000$ kg においても焼付きには至らなかった。最高温度は Tc-2 が 158°C を示した。その温度上昇状況を図 5 に、分解後の状態を写真 7 に示した。下部軸受の両縁ならば

表 3 p および p_0 値

| $P \times 10^3$ kg | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 |
|------------------------|------|------|------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| p kg/cm ² | 27.8 | 55.6 | 83.4 | 111.2 | 139 | 166.8 | 194.6 | 222.4 | 250.2 | 278 |
| p_0 ($v=6.3$ m/sec) | 173 | 346 | 519 | 692 | 865 | 1038 | 1211 | 1384 | 1557 | 1730 |

にスリーブ両縁に強いあたりの光沢が見られるにとどまっていた。

b. 750-T5 材, 新油

B材と同じく、 $P=3,500\text{ kg}$ から金属接触音を発したが、 $P=5,000\text{ kg}$ においても焼付きには至らなかった。

最高温度は Tc-3 が 137°C を示した。温度上昇状況を図 6 に、分解後の状態は写真 8 に示した。下部軸受の中央部および両縁に強い条こんがあった。スリーブの方も B 材と同程度のあたりがあったが、軸からスリーブを分離する際、損傷を与えたので、スリーブの写真は除外した。

c. B 750-T5, 使用油

$P=5,000\text{ kg}$ 上昇後、約 8 分にして急激に焼付きを生じ、試験機の回転を停止させてしまった。その温度上昇は図 7 に、分解後の状態を写真 9 に示した。

下部軸受の中央部に軸回転方向のひっかき摩耗こんがあり、表面は全く乾燥して油膜切れを示していた。スリーブ全周には強いあたりの光沢を示し条こんがあった。図 7 に見られるように、 $P=3,500\text{ kg}$ にて一時音響激しく焼付きの傾向を見せたが、再び温度は下降し $P=5,000\text{ kg}$ まで持続した。

d. 750-T5, 使用油

$P=3,500\text{ kg}$ 上昇後約 3 分にして、急激に焼付きを生じ、軸の回転を停止させた。その温度上昇は図 8 に、分解後の状態は写真 10 に示した。下部軸受は前試験 c の時と同様の摩耗こんが見られ、スリーブ上にも強いあたりがあった。軸受表面上の油膜切れは c と同様で全く乾燥していた。

3.4 考察

以上の試験結果から、使用油による軸受温度上昇の

傾向は新油の場合と近似的であることを知った。また使用油の場合新油より低い軸受温度であるにもかかわらず焼付きを起こしていることは、熱膨脹（クリアラン

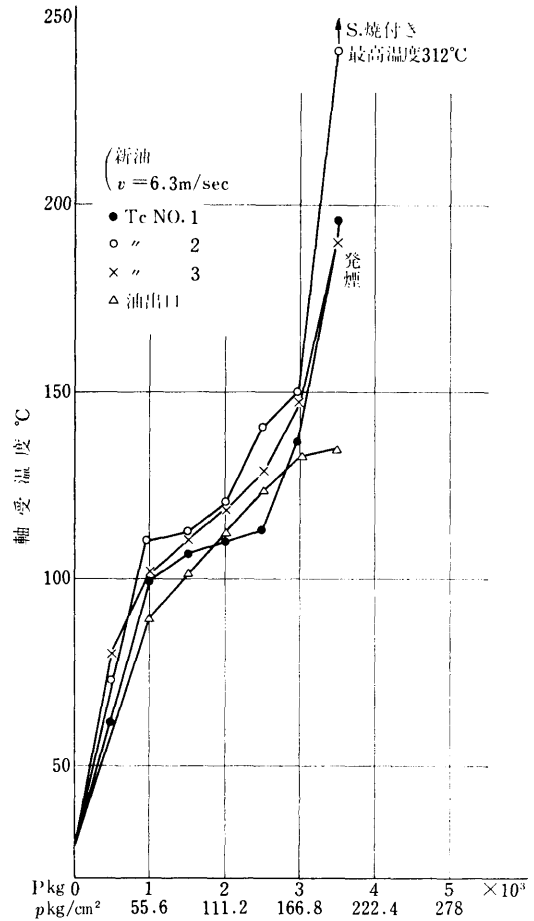


図 4 ホワイト焼付き温度

表 4 各種軸受材の疲労限度と負荷能力

| 軸 受 材 | 形 状 | 疲労限 kg/cm^2 | 負 荷 能 力 kg/cm^2 | |
|------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | 運 用 温 度 | |
| | | | 常 温 | 150°C において |
| 裏金つき錫基 ホワイトメタル | 合金厚さ 0.38 mm 0.1 mm | 350 | 112 | 100 |
| | | 490 | 154 | — |
| 裏金つき三層 銅, 鉛, 合金 | 鉛, 錫メッキ層厚さ 0.038 mm | 616 | 196 | 140 |
| 裏 金 つ き 銅, 鉛 合 金 | 合金成分 銅 70/鉛 30 | 770 | 238 | 180 |
| 裏金つき網状 20 %錫, アルミ合金 | 合金厚さ 0.38 mm | 980 | 280 | 254 |

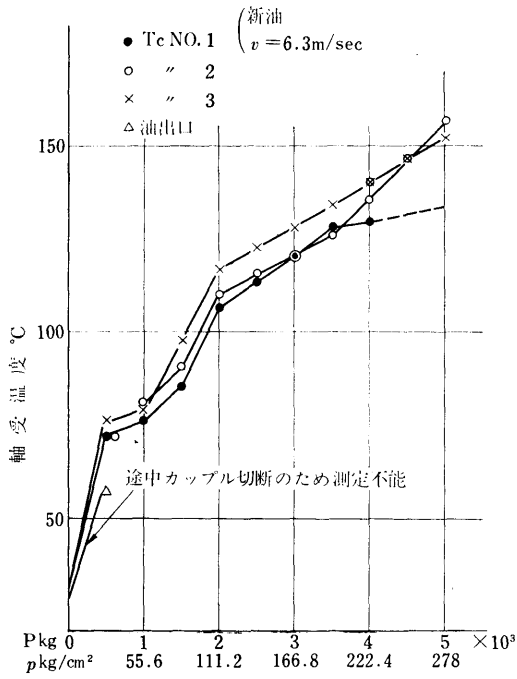


図 5 B 750-T5 焼付き温度

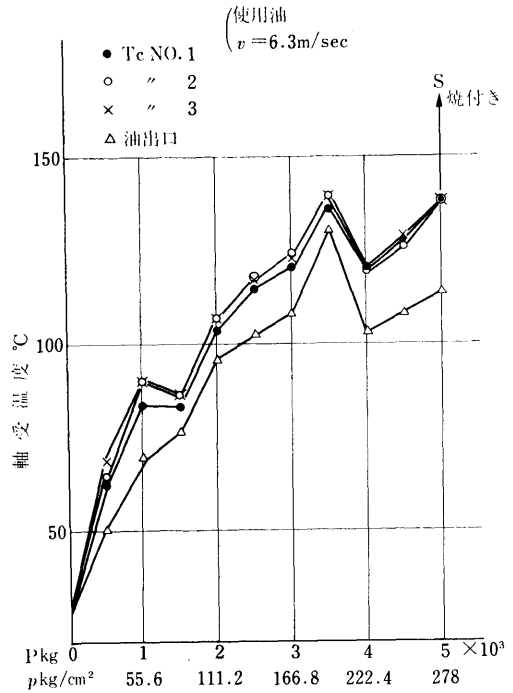


図 7 B 750-T5 焼付き温度

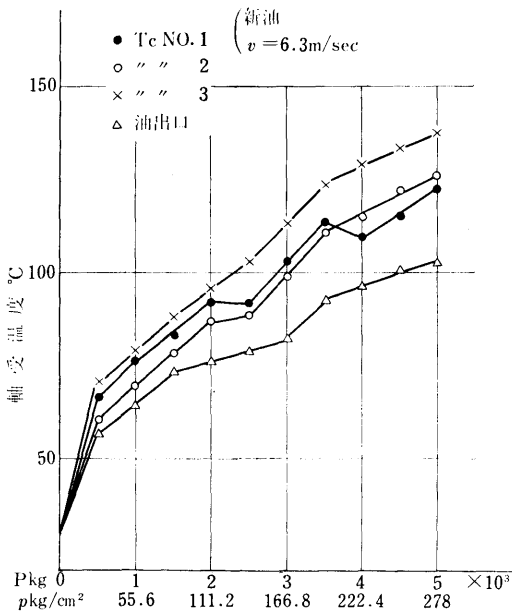


図 6 750-T5 焼付き温度

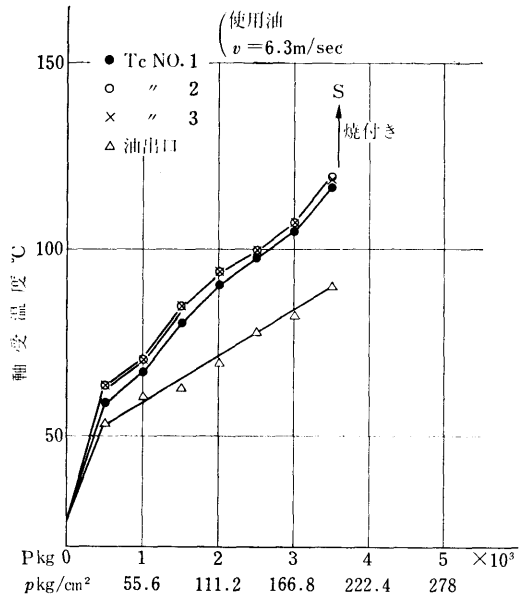


図 8 750-T5 焼付き温度

ス不足)による停止とは考え難く、やはり使用中の微小異物に対する吸収力不足(象嵌性に劣る)による油膜切れの結果と考えられる。

ホワイトと比較すれば、はるかに非焼付性に優れており負荷能力の高いことは試験結果の示すとおりである。B 750 T-5, 750 T-5 間の差は認められなかつた。

た。

一般に云われるように、アルミ系軸受の油の選択性、汙過の重要性は使用油の時に新油より負荷能力が低下したことより、再認識した。表4は公表されている各種軸受材の疲労限度と負荷能力を示すものであるが、本試験の結果とかなり近似していた。

写真 5

新油 ホワイト
給油圧 1 kg/cm²

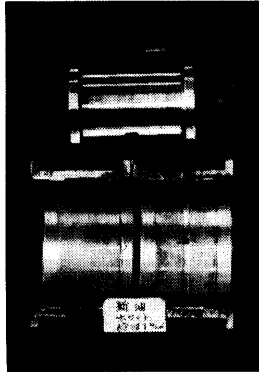
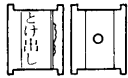


写真 6

新油 ホワイト
給油圧 0.2 kg/cm²

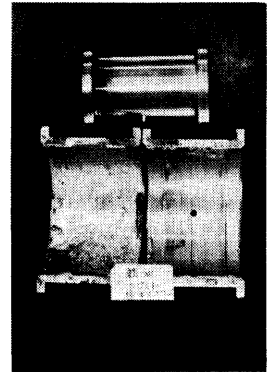


写真 7

新油 B 750 T5
給油圧 0.2 kg/cm²

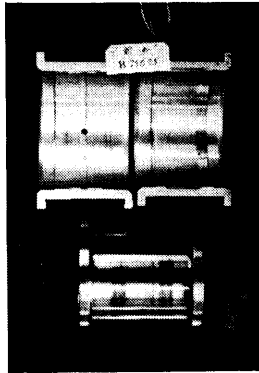
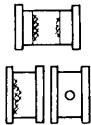


写真 8

新油 750 T5
給油圧 0.2 kg/cm²

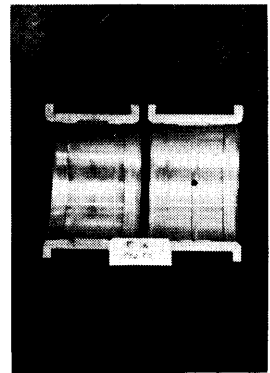
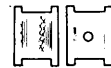


写真 9

使用油 B 750 T5
給油圧 0.2 kg/cm²

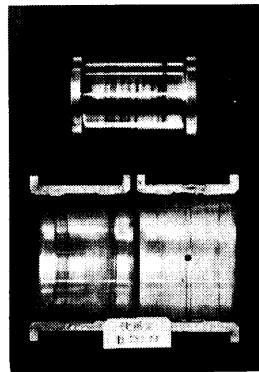
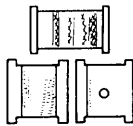


写真 10

使用油 750 T5
給油圧 0.2 kg/cm²

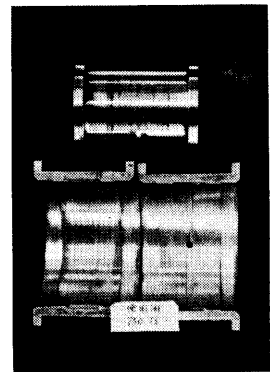
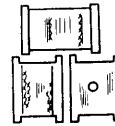


写真 5~10 試験後の各軸受状態

4. 機関適用試験

4.1 試験機関および運転方法

試験に使用した機関は表7に示す要目の、ヤンマ SS 4、および新三菱神戸製 1 G 27.5/40 機関である。

表 5 機関主要目

| 機 関 名 称 | ヤンマ SS-4 | 新 三 菱 1 G 27.5/40 |
|-----------------------------|--|----------------------|
| 機 関 形 式 | たて形船用4サイクル 単動ディーゼル機関 | |
| シリンダ数 | 1 | 1 |
| シリンダ直径 mm | 95 | 275 |
| ピストン行程 mm | 150 | 400 |
| 連続最大出力 PS | 4 | 80(無過給時) |
| 連続最大毎分回転数 rpm | 750 | 500 |
| 正味平均有効圧力 kg/cm ² | 4.5 | 6.1(無過給時) |
| 燃 焼 方 式 | 予燃焼室式 | 直接噴射式 |
| 注 油 方 式 | 強制循環式 | 同 左 |
| 冷 却 方 式 | 強制水冷式 | 同 左 |
| 使 用 燃 料 油 | A 重油 (d ₄ ¹⁵ C=0.85) | |
| 使 用 潤 滑 油 | 昭和石油バロット SAE 30 | |
| クランクピン直径 mm | 58 | 180 |
| 同 上 材 質 | FC 40 C | SF 50 |

(注) 以下、SS 4 を 4 PS 機関、1 G 27.5/40 を 80 PS 機関と呼ぶ

機関使用の主目的は、変動荷重を受けた場合のアルミ合金軸受の状態調査にある。最初、小形で P_{me} の低い 4 PS 機関において、クランクピン軸受スキマを 3 種類変更したものを用意し、連続各 100 時間の全力運転 (750 rpm, 4 PS) を計画した。4 PS 機関の場合、分解組立てが容易 (復旧に半日) なので、途中潤滑油補給のため機関を停止した時、ピストン抜きを行ない、クランクピンおよび軸受の状態観察と寸法計測を行ない安全をはかりながら運転した。

本機の運転で特に異常を認めず、安全であることを確認したので、より大形で過給運転もできる 80 PS 機関の運転を計画した。

80 PS 機関の場合は夜間連続運転は不可能なので、昼間のみ断続運転となったが (他試験目的の運転と併用)、そのため摩擦にとって好ましくない冷態始動ならびに停止の回数が増えたことになり、軸受にとっては厳しい条件で運転したことになる。運転総計時間は 100 時間を目標とした。この種機関テストでは、約 20 時間で初期摩擦の時期を過ぎ、後は正常摩擦領域に

入ると云われる。クランクピン軸受のスキマ等は 4 PS 運転を参考にして定めた。

いま、80 PS 機関のクランクピン軸受圧力を爆発圧力を対象として計算すると、 p および p_v 値は、

$$p = F_c / d_c \times l$$

$$F_c = \frac{\pi}{4} D^2 \times P_{max}$$

$$v = \frac{\pi}{60} n \times d_c$$

ただし、

$$\left. \begin{array}{ll} d_c = \text{軸受内径} & \text{cm} \\ l = \text{軸受有効長さ} & \text{cm} \\ p = \text{単位投影面圧力} & \text{kg/cm}^2 \\ F_c = \text{爆発全圧力} & \text{kg} \\ P_{max} = \text{爆発圧力} & \text{kg/cm}^2 \\ D = \text{ピストン直径} & \text{cm} \\ v = \text{平均クランクピン} \\ & \text{円周速度} & \text{m/sec} \\ n = \text{機関毎分回転数} & \text{rpm} \end{array} \right\}$$

において、

$$P_{max} = 60 \sim 100 \text{ kg/cm}^2, n = 500 \text{ rpm に対し,}$$

| P_{max} | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|-----------|-------|-----|-------|-------|-------|
| p | 179.5 | 210 | 240 | 269 | 300 |
| p_v | 843 | 985 | 1,125 | 1,262 | 1,410 |

となる。

一方、軸受試験機で得られた静荷重下のアルミ合金軸受は、本試験機の最大荷重 $P = 5.0 \times 10^3 \text{ kg}$ 、 $p_v = 1,730$ において、油圧 0.5 kg/cm^2 以上では焼付きを示さなかった。(3.3.2 参照) しかしホワイトメタルは油圧 1 kg/cm^2 $P = 4.0 \times 10^3 \text{ kg}$ $p_v = 1,384$ において焼付いている。変動荷重下の機関運転状態と静荷重下の軸受試験機結果とは一義的に対比することはできないが、一応アルミ合金軸受は過負荷運転にも使用できるものと考え、本機の運転では無過給の時の船用特性試験法による負荷上昇のくり返しのみでなく、 P_{max} が 90 kg/cm^2 程度に達する 130~150% 過給運転も後半では行なった。各寸法計測は 100 時間運転終了後に機関のピストン抜きを行ない総分解して行なったが、一旦軸受を軸より取り外し、軸受のみをクランクピンボルトにて再組立てしても、その締め付け加減により内径計測は再現性がなく 1/100~2/100 程度の誤差をとまうので参考値にとどめた。4 PS の場合は小径のため、計測のやりやすさもあって再現性はあった。

4.2 使用軸受

4 PS, 80 PS 両機関のクランクピン軸受に使用した軸受の材質は、クランクピン材質を考慮した 12% Sn 含有のアルミ合金である。本材は特にディーゼル機関の非焼入クランクにも使用可能のように、強度は落とさず硬度を調質した改良形のK社製、粒状錫含有金形鋳造品である。

本材の諸性質を表 6 に示す。

表 6 12% Sn アルミ軸受材の性質

| 機械的強度 | 引張強さ | 伸び | 衝撃強さ | 疲労強さ | 硬 さ | |
|---------|-------------------------------|------|------------------------------------|---|----------------------------|------|
| | kg/mm ² | (%) | kg/mm ² | (2×10^8) kg/mm ² | | |
| (備考) | 21 | 3.3 | 4.25 | 8.6 | 59 | |
| | JIS B 77024 号試片 万能試験機 | | JIS Z 22024 号試片 シャルピ ー試験機 | | 森式疲労 試験機 ブリネル 硬度計 | |
| 物理的性状 | 線膨脹係数 | | 熱伝導度 | | 比重 | |
| | (20~200°C) × 10 ⁻⁶ | | cal/cm·sec °C | | | |
| | 24.20 | | 0.481 | | 2.75 | |
| 化学成分(%) | Sn | Cu | Si | Ni | Al | etc. |
| | 12.00 | 3.60 | 0.20 | 0.50 | 残り | |

本材から 4 PS および 80 PS 機関のクランクピン軸受として、図 9 および 10 に示す寸法のものを作製した。

軸受表面仕上げは旋盤加工のままで 6 S 程度であった。軸受スキマはそれぞれ表 7 のようにとったが、さらにライナシムの増減により微調節した。

表 7 供試軸受の寸法

| 機関 | 軸受 No. | 軸受内径 mm | 軸基準寸法 | 備 考 |
|-------|--------|---------------|-------|----------|
| 4 PS | No. 1 | 58.126 ± 0.01 | 58 φ | ホワイト使用 |
| " | No. 2 | 58.157 " | " | 基準スキマ |
| " | No. 3 | 58.178 " | " | 同上 25% 増 |
| | | | | 同上 50% 増 |
| 80 PS | No. 4 | 180.20 ± 0.01 | 180 φ | 同上 25% 増 |
| | No. 5 | | | |

潤滑油の汙過は特別な装置を付加せず機関付属の H 形フィルタおよびクランクケース内油出口のゴーズワイヤを点検して清掃するにとどめた。潤滑油は両機関とも各試験ごとにクランクケース油を新しく入れかえた。品番は SAE 30 相当のディーゼル機関油を用いた。

使用燃料油は 4 PS 機関は A 重油、80 PS 機関は他

(220)

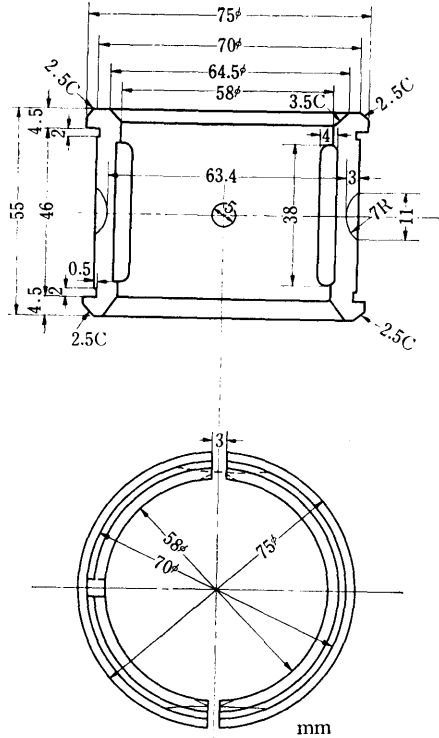


図 9 SS 4 クランクピンメタル

目的の試験と併用したため、A 重油および B 重油も使用した。

4.3 試験結果

4.3.1 4 PS 機関

表 11 の軸受 No. 1, 2 につき軸および軸受の摩耗寸法計測結果は、それぞれ表 8, 9 に示した。また 100 時間運転後の状態を運転前のものと併せて写真 11, 12, 13 に示した。

クランクピンの摩耗は No. 1, 2 運転とも 0 であった。

軸受の摩耗は No. 1 の場合、最大 1/100 mm であったが、No. 2 の方は写真 13 に見られるように上メタル油孔中央にひっかききずがあり、上下メタルの合わせ面が凹んでいた。合わせ面の凹みは、軸受背面とバックメタル内面間のインタフィアレンスフィットを適正にするために、軸受に寸法変化を与える“クラッシュ”が、小径のためかえて与え難かったためと思われる。そのため摩耗量が 7/100 mm も生じたところがあった。両運転の結果から、さらにクリアランスの大きい No. 3 の運転はその必要を認めず中止した。

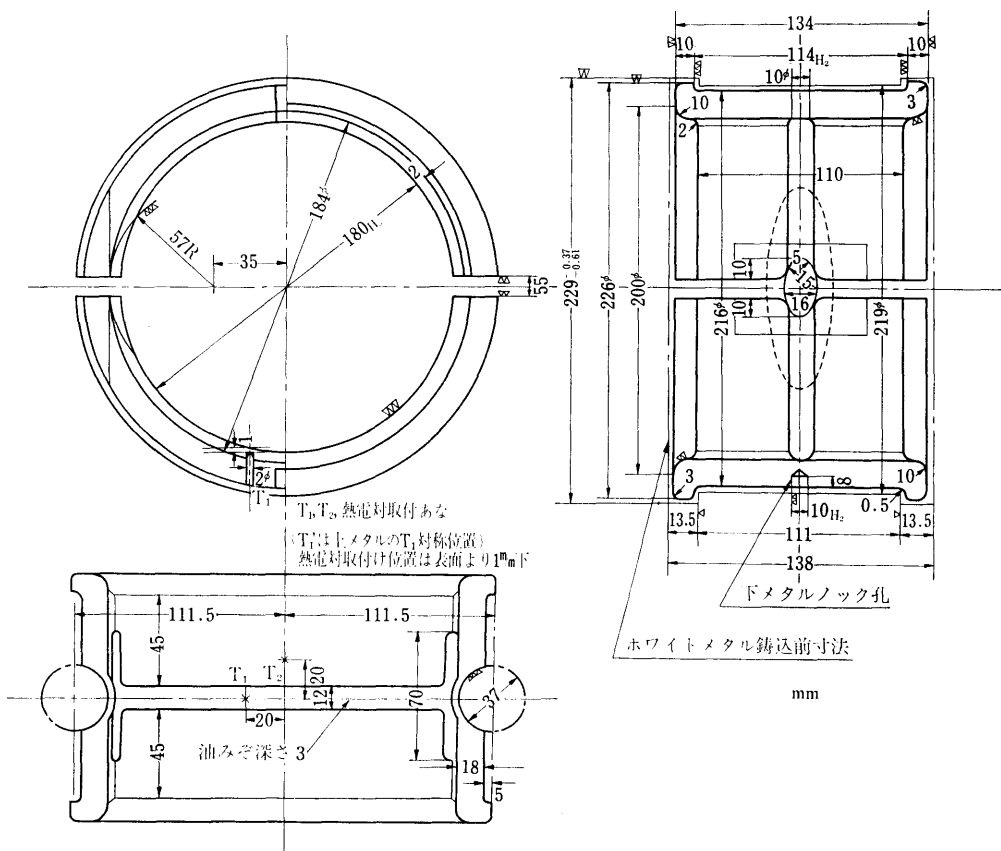


図 10 80 PS クランクピンメタル

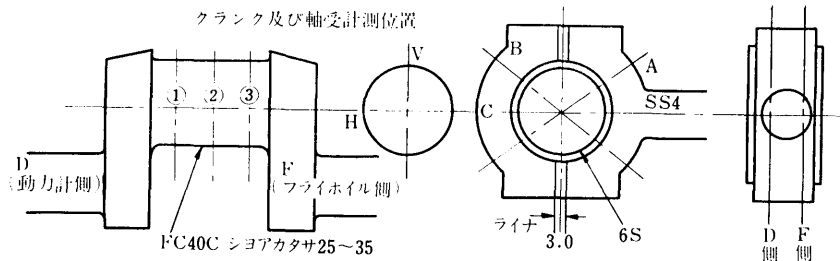


表 8 4 PS No. 1 軸受 100 Hr 運転寸法計測

| 運転時間 | クランクピン | | | クランクメタル | | | 備考 | | |
|--------------|--------|-------|---|---------|---|-------|-------|-------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | A | | B | C |
| 0 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.13 | 58.13 | 58.12 | クランク軸偏耗限度 $\leq 0.1 + \frac{5}{10,000}d$ = 0.13 mm 基準スキマ $\leq \frac{2}{1,000}d$ = 0.12 mm d: 軸直径 |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.13 | 58.13 | 58.12 | |
| 12 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.13 | 58.13 | 58.12 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.13 | 58.13 | 58.12 | |
| 62 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.14 | 58.14 | 58.12 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.14 | 58.14 | 58.12 | |
| 100 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.14 | 58.14 | 58.12 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.14 | 58.14 | 58.12 | |
| 差 62-0 Hr | V | 0 | " | " | D | 0.01 | 0.01 | 0 | |
| | H | 0 | " | " | F | 0.01 | 0.01 | 0 | |
| 100-0 Hr | V | 0 | " | " | D | 0.01 | 0.01 | 0 | |
| | H | 0 | " | " | F | 0.01 | 0.01 | 0 | |

表 9 4 PS No. 2 軸受 100 Hr 運転寸法計測

| 運転時間 | クランクピン | | | クランクメタル | | | 備考 | | |
|--------------|--------|-------|---|---------|---|-------|-------|-------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | A | | B | C |
| 0 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.12 | 58.19 | 58.11 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.12 | 58.19 | 58.19 | |
| 65 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.15 | 58.19 | 58.14 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.17 | 58.19 | 58.19 | |
| 100 Hr | V | 57.92 | " | " | D | 58.18 | 58.19 | 58.18 | |
| | H | 57.92 | " | " | F | 58.18 | 58.19 | 58.19 | |
| 差 65-0 Hr | V | 0 | " | " | D | 0.03 | 0 | 0.03 | |
| | H | 0 | " | " | F | 0.05 | 0 | 0 | |
| 100-0 Hr | V | 0 | " | " | D | 0.06 | 0 | 0.07 | |
| | H | 0 | " | " | F | 0.06 | 0 | 0 | |

表 10 4PS 運 転 成 績

負荷一定 100 Hr 連続運転 使用燃料油A重油 $d_{4}^{15} 0.847$
 使用潤滑油 昭石パロット SAE 30

| 回転数 rpm | 動力計 荷重 kg | 軸出力 PS | 燃 料 消費率 g/PS/Hr | 冷却水 使用率 l/PS/Hr | 各 部 温 度 °C | | | | 爆発圧力 P_{max} kg/cm ² | 排気色 |
|------------|-----------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|----------------|------------|------------|--------------------------------------|-----|
| | | | | | 排 気 °C | 潤滑油クラ ンクケース | 冷却水 入 口 | 冷却水 出 口 | | |
| 752 | 10.4 | 3.91 | 244 | 25 | 325 | 37 | 9 | 34 | 50 | なし |



写真 11 SS 4 機関クランクピンメタル運転前

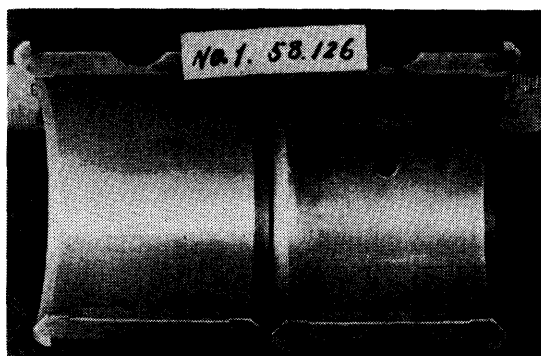


写真 12 No. 1 運転後

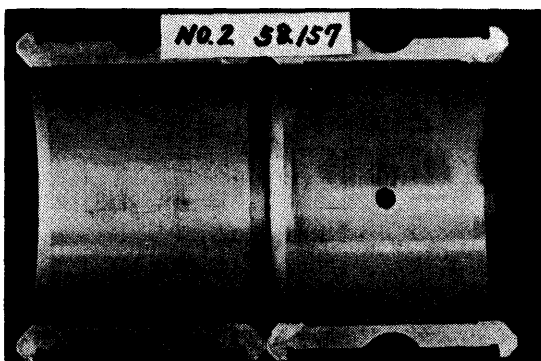


写真 13 No. 2 運転後

機関運転状態は表 10 に示した。

4.3.2 80 PS 機関

4 PS 機関の試験結果から判断すれば、No. 2 より No. 1 の方が好結果を示し、特にクリアランスを多くとる必要がないようであるが、本機の場合過給運転も行なうので、ホワイトメタル基準スキマより 20~25% 多くとることにした。表 7 の軸受 No. 4 につき、軸および軸受の 100 時間運転後の摩耗寸法計測を表 11 に、状態を写真 14 に示した。写真 14 に見られるように、条こんおよびはんこんを上下メタルに生じ、そのため軸の方にも多少の肌荒れを生じていた。この原因は、運転中の軸受温度計測および軸受圧力計測のためのリード線の切れ端や接着剤がクランクケース内の油に落下混入し運転前の清掃にもかかわらず、油とともに送り込まれたようである。軸受を切断して噴み込み異物を分析した結果、多量の Cu⁺⁺、Be⁺⁺ 等が検出されている。

したがって軸の方に 4/100 mm もの摩耗を生じたところがあり、4 PS 機関における結果と一致しないため、(4 PS のクランクピンは FC 40、80 PS は FC 50 を使用しているので 80 PS の軸摩耗は当然 0 と推定した。) 軸受 No. 5 を使用して再度運転を行なうことにした。この場合、潤滑油の管理としては、H 形オイルフィルタ内の金網を新品と取り換え、約 20 時間毎にフィルタ内を清掃することにした。過度の潤滑油管

理は実際的でないと考えたためである。

運転状態は表 13 に示したが、大略 500 rpm、80 PS を全力とする船用特性試験のくりかえしが多く、各分力 30 分、全力 1 時間、計平均 2.5 時間を 1 サイクルとする発停回数 42、総回転数 2,640,900 Rev. 総計 104 時間の運転となった。これには、50% 過給 120 PS 運転 4 時間が含まれた。運転後の寸法計測を表 12 に、状態を写真 15 に示した。それによれば上下合わせ面の逃がし部分に強いあたりが見られ、下メタルには鑄巣ホールが 2、3 生じていたが、おおむね正常であった。

心配されたクランクピンの摩耗はなかった。軸受摩耗量は再現性がないため計測を中止した。理由は前述のとおりである。

鑄巣については、表面摺動面および表面 3 mm 下を顕微鏡写真 (倍率 100 倍) により調査したが深部には達していないようであった。写真 16 は表面を、17 は 3 mm 下を示すが、それらは、細い組織であり、十分マトリックスが連結していることを示している。しかし Sn が十分球状化はしておらず、粒状にとどまっていることも見られる。写真 17 の黒点は球状化のための添加物 Cu、Ni 等を示し均一分布していることが分る。

なお、運転中の軸受温度計測値は表 14 に示した。

80 PS 機関の温度計測装置の写真 18、19 に示した。

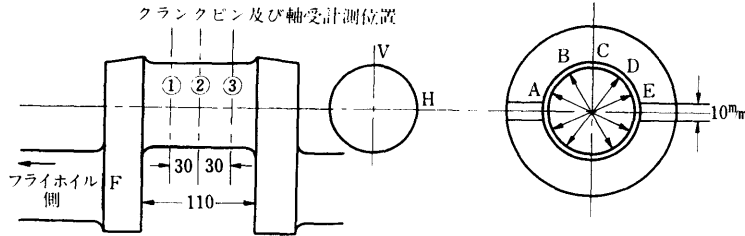


表 11 80 PS No. 4 軸受 100 Hr 運転寸法計測

| 時 間 | ク ラ ン ク ピ ン | | | ク ラ ン ク メ タ ル 180+x/100 | | | | | 備 考 | | |
|--------|-------------|--------|--------|-------------------------|---|---------------|----|----|-----|----|--|
| | V | 1 | 3 | 3 | A | B | C | D | | E | |
| 0 Hr | V | 179.84 | 179.88 | 179.84 | F | 15 | 23 | 26 | 15 | 21 | クランク軸 偏耗限度 0.24 mm 基準スキマ 0.33 mm 積算回転数 2,634,300 110 時間 |
| | H | 179.87 | 179.92 | 179.88 | D | 11 | 20 | 28 | 21 | 14 | |
| 100 Hr | V | 179.80 | 179.88 | 179.84 | F | 痕 の た め 測 定 略 | | | | | |
| | H | 179.87 | 179.92 | 179.88 | D | 痕 の た め 測 定 略 | | | | | |
| 100-0 | V | .04 | 0 | 0 | | | | | | | |
| | H | .0 | 0 | 0 | | | | | | | |

表 12 80 PS No. 5 軸受 100 Hr 運転寸法計測

| 時 間 | ク ラ ン ク ピ ン | | | | 備 考 |
|--------|-------------|--------|--------|--------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| 0 Hr | V | 179.80 | 179.88 | 179.84 | メタル寸法は一旦分解後再組立しても復旧困難でクランクピンボルト締め加減により変化するので測定略。 積算回転数 2,640,900 104 時間 |
| | H | 179.87 | 179.92 | 179.88 | |
| 100 Hr | V | 179.80 | 179.87 | 179.84 | |
| | H | 179.87 | 179.92 | 179.87 | |
| 100-0 | V | 0 | 0.01 | 0 | |
| | H | 0 | 0 | 0.01 | |

表 13 80 PS 機 関 運 転 成 績

| 負荷 | 回転速度 | 動力計荷重 | 軸出力 | 燃料消費率 | 給気温度 | 排気温度 | 潤滑油 | | | 冷 却 水 | | | | 爆発圧力 | 備 考 | |
|-----|------|-------|------|---------|------|------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|------|---------|--------------------|-----|
| | | | | | | | 給油圧 | クーラ入口 | クーラ出口 | 給水圧 | クーラ入口 | クーラ出口 | 機関出口 | | | 使用率 |
| % | rpm | kg | PS | g/PS/Hr | °C | °C | kg/cm ² | °C | °C | kg/cm ² | °C | °C | °C | l/PS/Hr | kg/cm ² | |
| 25 | 316 | 32 | 20.3 | 210 | 14 | 195 | 0.7 | 23 | 16 | 0.9 | 16 | 17 | 27 | 52.2 | 54.8 | |
| 50 | 397 | 51 | 40.5 | 178 | " | 272 | 0.8 | 25 | 17 | 1.1 | " | " | 33 | 26.1 | 54.8 | |
| 75 | 452 | 66 | 59.8 | 172 | " | 394 | 0.9 | 27 | 20 | 1.3 | " | " | 36 | 17.7 | 56.8 | |
| 100 | 500 | 80 | 80. | 175.5 | " | 512 | 0.9 | 29 | 20 | 1.3 | " | " | 42 | 13.2 | 59 | |
| 150 | 500 | 120 | 120 | 176 | " | 560 | 1.0 | 32 | 20 | 1.3 | " | " | 46 | 10.1 | 80 | |

表 14 クランクピンメタル温度

| 負荷 (%) | 上メタル | 下メタル | 下メタル | 備 考 |
|--------|------------------|----------------|----------------|---|
| | T ₁ ' | T ₁ | T ₂ | |
| 25 | 27 | 30 | 35 | 使用熱電対 Al-Chr 素線径 0.25 mm 取付位置は図10に示す。先端は表面より 1 mm 下に溶接 () 内は運転停止直後の計測値 |
| 50 | 39 | 42 | 48 | |
| 75 | 45 | 48 | 50 | |
| 100 | 50 | 53 | 56 | |
| 150 | (52) | (55) | (60) | |

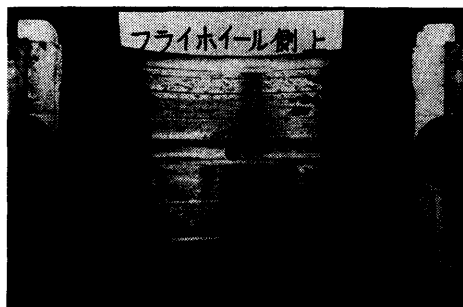


写真 14 80 PS No. 4 運転後

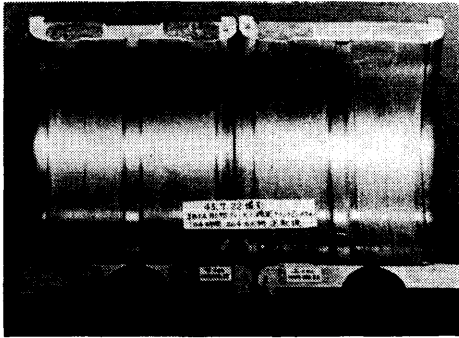
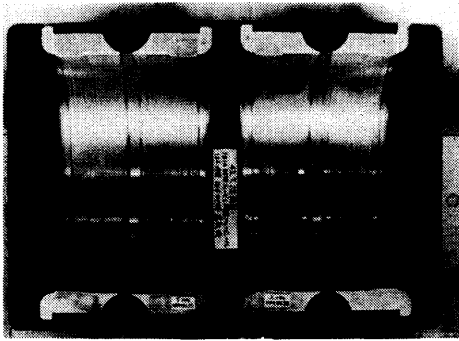


写真 15 80 PS No. 5 運転後

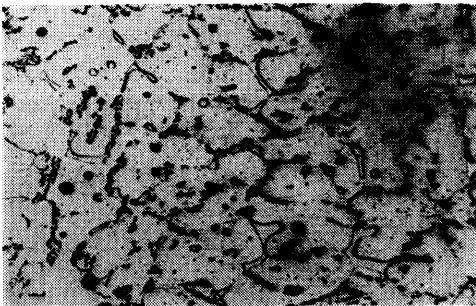


写真 16 摺動表面組織 ×100

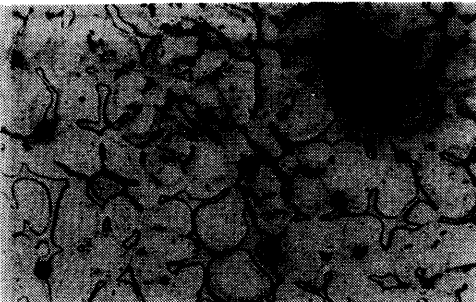


写真 17 表面より 3mm 下組織 ×100

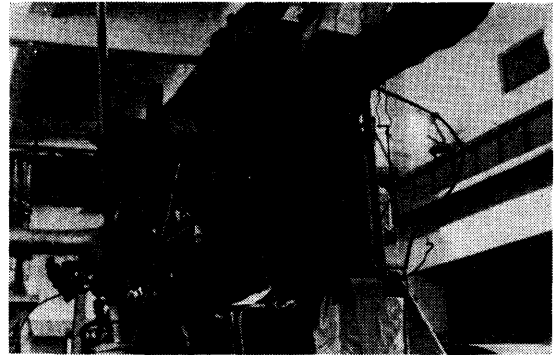


写真 18 1 G 27.5/40 80 PS 機関



写真 19 同上メタル温度計測装置

4.4 考察

4 PS, 80 PS 両機関のクランクピン軸受にアルミ合金軸受を適用した結果, 次のことが云える。

1. 初期なじみがない。所定スキマに設定したつもりであったが, 全周にわたってはところどころやや狭いか所があり, そのような所にざらつき摩耗を生じていた。これより生ずる摩耗粉は酸化アルミナ Al_2O_3 を含み, これはもろいため軸受表面より脱落し油中に懸濁し, 軸に悪影響を及ぼすものである。軸受試験機による焼付き状態では経験したが, 今回の試験では油が銀濁することはなかった。

2. 裏金との密着性を正常に保つために製作寸法精度を良好にする必要がある。そうしなければ, 心狂いの恐れがある。180φ (80 PS 機関用) 程度の大きさになると, 裏金への取付けにかなりの困難を感じた。

3. “クラッシュ”は適正でなければならない。過度につけると, 膨脹により内面に押し出され両サイド面のスキマがきつくなり, クランクピンボルト孔加工側が薄いため, その辺から破壊する恐れもある。

4. 埋没性が不足している。異物吸収性に劣るので

潤滑油の管理はホワイトメタルより嚴重でなければならぬ。メンテナンスを考えるなら、やはりバイパスフィルタのような別途のフィルタリングを考慮する必要がある。

5. 硬度および弾性率は所期（使用条件）の荷重に耐え得る限りにおいて、できるだけ低くすべきであるが、非焼付性を損わず、初期なじみを良好にするには、やはりオーバーレイを施して使用すべきであろう。

5. 付 記

以上の試験結果から、一応アルミ合金軸受の負荷能力と機関適用時の注意事項等を知ることができたが、同軸受の使用は今に始まったものではない。我国の場合は第2次世界大戦の末期、すでに航空機用としてとりあげられ、Al-Cu-Sn 三元系合金が軍で使用されている。これをソリッドで使用する場合は機械的強度を増すため、肉厚を厚くする必要があり、しかるに熱膨脹が大きく油スキマが減少するため、始動前のスキマを大きくしなければならず、低負荷運転では大きい音を発する程であったと云われる。この欠点を補うには、アルミ合金を鋼裏金に薄く溶着させることが考えられるが、鉄-アルミの境界層には、アルミ-鉄のもろい合金層が生じ剝離しやすく、油孔をふさぐ心配がある。そのためバイメタル状のアルミ合金軸受は実用面で成功せず今日に至っている。

欧米においても我が国とほぼ同様の過程をたどっている。英国では1936年、5~7% Sn 入り合金を開発したが、この種5~7% Sn 合金では二つの相反する条件を満たすことはできなかった。すなわち、非焼付性の改善、および軸受強度の増加のためには、前者はSn等の低融点金属の添加量を増すこと、後者は減らすことが要求される。Al-Sn 合金状態図によれば、Al と Sn はほとんど固溶せず、むしろCu-Pb系合金（ケルメット）同様混合しているような状態である。Al-Sn 2元系合金は250°C以上においてSnは溶湯状態になり、膨脹して表面に析出してしまうため、それでは軸受として使用できないことは、明らかである。

ロールスロイス特許の8~19% Sn^{(2),(3)}合金も、10% Sn以上ではAlのマトリックスがSnによって不連続に分離するため、耐久強度の低下はまぬかれなかった。

米国⁽⁴⁾に於て、現在使用されている代表的なものは6.5% Sn+1% Cu (1~2.5% Ni)+残Al (ALCOA社)と云った形のSn 5~7%のもので、新しいものではな

い。

従って、改善目標は「非焼付性のために高Snを有し、耐久強度が低下しないためにはAl相が連続する」ものであることにしほられ、その開発技術の方法としては冶金学的に種々の他種金属を添加することが試みられた。

英国のアルマ研究所とグレンシアメタル社の共同研究になる、いわゆる網状20% Sn合金が開発されたのは約10年前である。Al相が網状に連続し、SnはAl相の粒界をとりまくことなくAl素地中に分散分布しているため、負荷に対する耐久性が向上したと云われるものである。

今回、本文の機関試験に使用したものは、12% Sn粒状合金とでも称するもので、網状組織をさらに改善するため、Zr, Ca, Mg, Ti等の添加により⁽⁶⁾K社がSnの粒状化を計ったものである。粒状組織により、伸び衝撃強さ、疲労強さは幾分改善されたが、Al系軸受の本質的な諸特性は失われるものでなく（改善されず）、機関の機構の一部として使用する場合は、その諸特性を十分熟知の上で適用しなければ、忽ちその欠陥を露呈することになる。

現在、国の内外を問わず自動車機関では、主要部軸受にAl合金を採用したものは多数ある。一時スクータのコンネクテングロッドそのものをアルミ合金で製作し、その大、小端部の孔をそのままピン軸受として使用したもののすらあった。

最近船用機関においても高負荷対策と軽量化の必要性から、テスト使用を行なっているものを見かける。その例としては、グレーシャ社製アルミメタル使用の神鋼造機Z312機関⁽⁶⁾や富士ディーゼル工業⁽⁷⁾の6MD (26×750 rpm 2,120 PS, Pme 25 kg/cm²) 機関でのテストがあり、大形ではI.H.I.⁽⁸⁾のSulzer 7 RD 68形ディーゼル機関のクロスヘッド軸受にアルミ製シエル形が組込まれ、2,217時間の実船実験を行なっている。その開放調査(45年4月)によれば、良好な結果であったと報じている。

アルミニウム合金軸受の改良は関係会社により今後とも続行されるものと思うが、現状でも決して使用できないものでないことは上記の諸試験例から明らかである。むしろその特性を十分承知の上、いかに使うかが問題と思われる。

終りに、試験材を提供していただいた古河アルミ工業K.K. およびK.K. 金剛コルメット製作所の関係者の方々、ならびに軸受試験機取扱使用に示唆をいた

いた当部稲見技官，機関運転計測に協力された塩出技官等に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) DD. Fuller, ASME Trans. Aug. 1956 Vol. 78
- (2) E.W. Hives: Rolls Roys Eng. Data 46 (1940) 106
- (3) 森崎延一，新しい高性能軸受，大同メタル KK 資料 L 669
- (4) アルミニウム軸受，古河アルミ K.K. 開発資料 No. 20
- (5) 船用機関の軽量軸受合金の開発事業報告書，日本船用機器開発協会，42.3
- (6) Z-312 機関アルミメタル試験報告書，神鋼造機資料 No. FR 2027 37.12
- (7) ディーゼル機関の2段過給方式の開発事業報告書，日本船用機器開発協会，44.3 pp. 6
- (8) 山田・田中・増田，IHL-Sulzer 大形ディーゼル機関における問題点とその対策，石川島播磨技報 45.10 pp. 64