

# 低摩擦特性を有する自動車エンジン用すべり軸受の摺動特性

Tribological Property of Plain Bearing with Low Frictional Layer for Automotive Engine

籠原 幸彦                      高柳 聡                      岡戸 篤  
Yukihiko Kagohara      Satoshi Takayanagi      Atsushi Okado

大同メタル工業株式会社  
(Daido Metal Co., Ltd.)

## 1. 概要

近年の自動車エンジンにおける低燃費化への取り組みに対し、すべり軸受のフリクション低減が要求されている。これに基づき、鉛フリーアルミニウム合金軸受表面にサブミクロンオーダーの二硫化モリブデンを付着させた、低フリクション特性を有する新しい軸受が開発された。その軸受単体性能は、現在広く使用されている鉛フリーアルミニウム合金軸受に対し、起動摩擦係数 ( $\mu$ ) が 50%以上低く、また耐疲労性や耐焼付性などの基本特性は同等以上という評価結果が得られ、優れた特性が実証された<sup>(1)</sup>。本報では軸受材料およびその軸受性能を報告する。

## 2. はじめに

近年、自動車用エンジンでは、従来から追求されている高性能化、高機能化という性能面の要求に加え、地球環境の問題から CO<sub>2</sub> 削減、ELV 指令に基づく鉛などの環境負荷物質の削減等、環境面への対応が強く求められている。この要求に対し、排ガス低減、燃費低減、軽量化、コンパクト化が取り込まれ、エンジン用軸受には小型・幅狭化による高面圧化、低フリクション化、鉛フリー化等への対応が要求され、一層高い軸受性能が望まれている。

低フリクション化に対しては、表 1 に示す方策が考えられ、エンジンの作動状態において存在する各々の潤滑状態により対応がなされている<sup>(2)</sup>。流体潤滑領域とは通常作動時のごとく、軸と軸受の間に潤滑油膜が存在する状態で、混合・境界潤滑領域とはエンジン始動時やミスアライメントなどによる局所的な強当たり発生時など、軸と軸受が金属接触を起こし始める状態を言う。近年のエンジンにおいて、軸受寸法は限界まで小さく設計されており、併せて潤滑油が低粘度化される傾向が強く、通常作動時においても、例えばクランク軸の真直度傾向の水準が良くない場合など、油膜厚さが薄くなり金属接触頻度が増加し、混合・境界潤滑状態で使用される傾向がある。この場合、フリクションを増加させてしまう事になる。

このような背景に基づき、軸受材料の低 $\mu$ 化に取り組む、低フリクション軸受を開発するに至った。以下、開発された軸受とその軸受性能について報告する。

表 1 すべり軸受のフリクション低減方法<sup>(2)</sup>

潤滑状態	ねらい	方法
流体潤滑領域	油の剪断力低減	摩擦面積低減 ・軸径縮小 ・軸受幅縮小
		潤滑油粘度低減
混合・境界潤滑領域	潤滑油量低減 (オイルポンプ容量低減)	クラッシュリリーフ廃止 油溝長さ縮小
	油保持性向上	軸受表面微細形状 ・ポーリングメタル ・結晶配向オーバーレイ 軸表面微細形状
	油膜破断抑制	クラウニング加工 親油性の良い材料の適用 (濡れ性)
	低摩擦化	低 $\mu$ 材料の適用

## 3. 低フリクション軸受

### 3.1 コンセプト

一般的に、材料の $\mu$ 低減には固体潤滑剤を使用する事が有効である。軸受に固体潤滑剤を適用する技術として、アルミニウム合金軸受や銅合金軸受表面の樹脂コーティングが存在する<sup>(3)</sup>。これは樹脂バインダーに約 60vol% の二硫化モリブデン (MoS<sub>2</sub>) を分散させた、膜厚約 5 $\mu$ m のオーバーレイ層であり、軸と軸受合金との金属接触を回避させることで軸受表面に非凝着性を与えると共に、樹脂の弾性、塑性変形特性により軸受のなじみ性を向上させ、また含有する MoS<sub>2</sub> が軸へ移着するなどして $\mu$ を低減するなどの効果がある。

しかしながら、低 $\mu$ に重点を置く場合、このオーバーレイは樹脂との混合組織である為、MoS<sub>2</sub>の低摩擦特性を十分に活用できない可能性がある。

そこで、新しい低フリクション軸受のコンセプトを以下のように設定した。

- ・軸受合金は現在広く適用されている鉛フリーAl-Sn-Si合金(現行材)とする。
- ・軸受の摺動表面に樹脂バインダーフリーで MoS<sub>2</sub> を付着させ、軸受の $\mu$ を低減する。

・  $\mu$  以外の軸受特性は現行材と同等以上とする。

### 3. 2 軸受構造

上記コンセプトに基づき、鉛フリーAl-Sn-Si 合金軸受表面にバインダーフリーで  $\text{MoS}_2$  を付着させる技術として、特殊なショットピーニング技術<sup>(4)</sup>を採用した。 $\mu$  以外の軸受特性を低下させないよう、軸受の寸法、特に表面粗さを最小限に留める為、ショット条件を適正化した。

こうして開発された低フリクション軸受の表面組織を図1に示す。SEI 像において、切削仕上げの跡が観察されることから、表面粗さが殆ど変化していない事が分かる。また EPMA 像から  $\text{MoS}_2$  は表面全体に存在しており、その面積率は観察像視野に対し約 30%であった。

図2に軸受表面付近の断面組織を示す。SIM 像より、 $\text{MoS}_2$  はショット前に存在した軸受表面粗さの谷部に存在しており、その厚さはサブミクロンオーダーである。更に SIM 像では  $\text{MoS}_2$  の存在が確認できなかった図中白枠部について、TEM 観察を実施した結果、軸受合金表面に平行に配向した数 nm の  $\text{MoS}_2$  層が確認された。

### 3. 3 潤滑油との濡れ性

開発材と現行材の濡れ性を評価した。図3に評価方法の模式図 (JIS R3257 に準ず) を示す。表2の条件を用い、潤滑油を軸受表面に滴下させ、油の接触角を測定した。接触角が小さいほど濡れ性が高いと判断される。

試験結果を図4に示す。開発材は従来材に比べ接触角が小さく、高い濡れ性を示した。これは、開発材の軸受表面は親油性が良いとされている  $\text{MoS}_2$  で覆われている事、また部分的に存在するサブミクロンオーダーの  $\text{MoS}_2$  に存在する微小な隙間に油が入り込む事に起因すると考える。

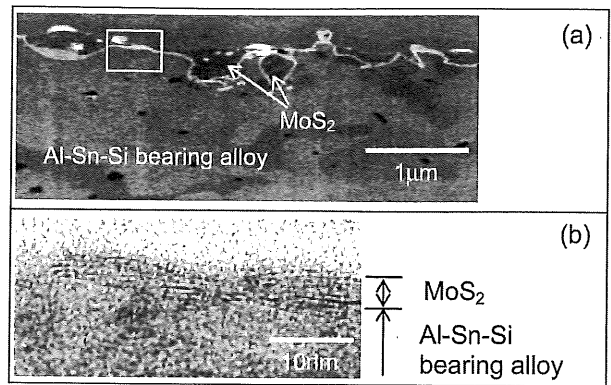


図2 開発材の断面組織  
(a)SIM 像, (b)TEM 像 ((a)の白枠部)

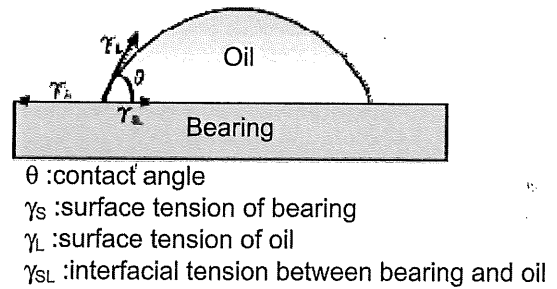


図3 濡れ性評価の模式図

表2 試験条件

Items	Dimensions	Units
Sample size	L30xW30xT2.0	mm
Lubricant(oil)	5W-30	-
Oil temperature	25	Degree-C
Oil drop volume	$1 \times 10^{-6}$	Liters
Time to measurement	1	sec

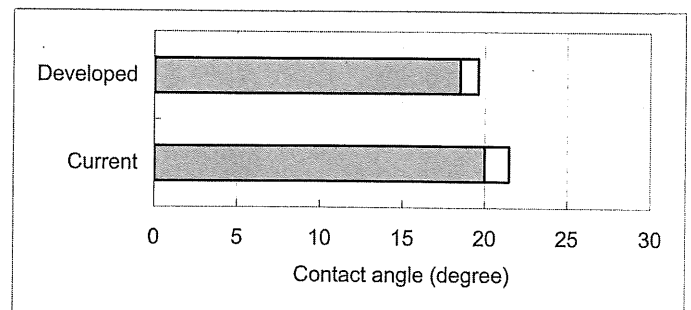


図4 濡れ性測定結果

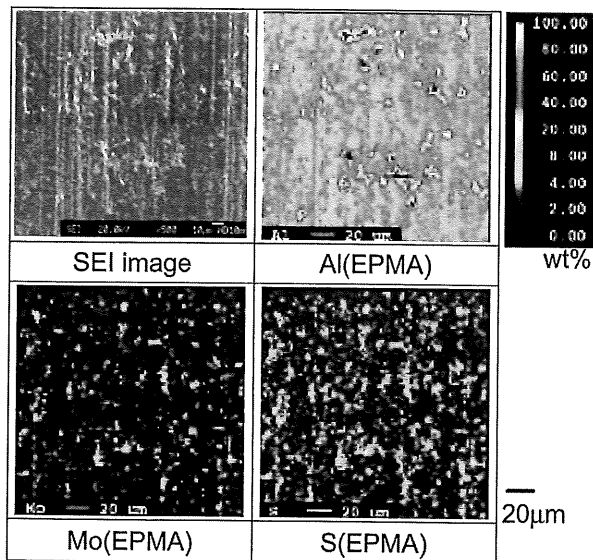


図1 開発材の表面組織

### 3. 4 非凝着性

基礎的なトライボ特性の一つである非凝着性を、スクラッチ試験で評価した。スクラッチ試験機の概略図を図5に、試験条件を表3に示す。圧子を軸受表面にセットし、ドライ条件で水平移動させながら徐々に荷重を掛け、圧子を軸受表面に潜り込ませて行く。押し込み荷重が

50N になるまで負荷させた時の摩擦係数を測定した。また、試験後の摺動表面を観察し、圧子表面については凝着の発生状況を、軸受表面については摩擦痕の状況を調査した。

図6にスクラッチ試験中の摩擦係数を示す。現行材は初期から高い値を示し、その変動が大きい。これに対し、開発材では変動が少なく、0.1以下で低い値を示した。

図7に試験後の摺動面観察結果を示す。従来材において、圧子表面にはアルミニウムが激しく凝着しており、軸受表面には激しい凝着摩擦痕が観察された。一方、開発材においては、圧子表面にアルミニウムの凝着は殆ど見られず、MoS<sub>2</sub>の転写が確認された。軸受表面はマイルドな摺動痕が付いており、試験前とほぼ同量 MoS<sub>2</sub> が観察された。これは圧子が押し込まれる際、摺動面に MoS<sub>2</sub> が存在する事で軸受の凝着摩擦が回避され、押し込み荷重により軸受表面が塑性変形した結果と考える。追加の評価として開発材に対し押し込み荷重 200N で試験を行ったが、荷重 50N の結果と同様凝着は発生しなかった。このように開発材の非凝着性は現行材に比べ飛躍的に向上している事が実証された<sup>(6)</sup>。

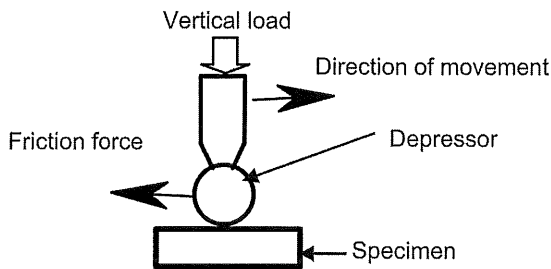


図5 スクラッチ試験の概略図

表3 スクラッチ試験条件

Item	Details	Unit
Scratch velocity	0.17	mm/sec
Load	50	N
Lubricant	Dry	-
Depressor	Shape	Ball
	Material	JIS SUJ-2
	Diameter	6
	Hardness	500-600
	Roughness	0.3 or less

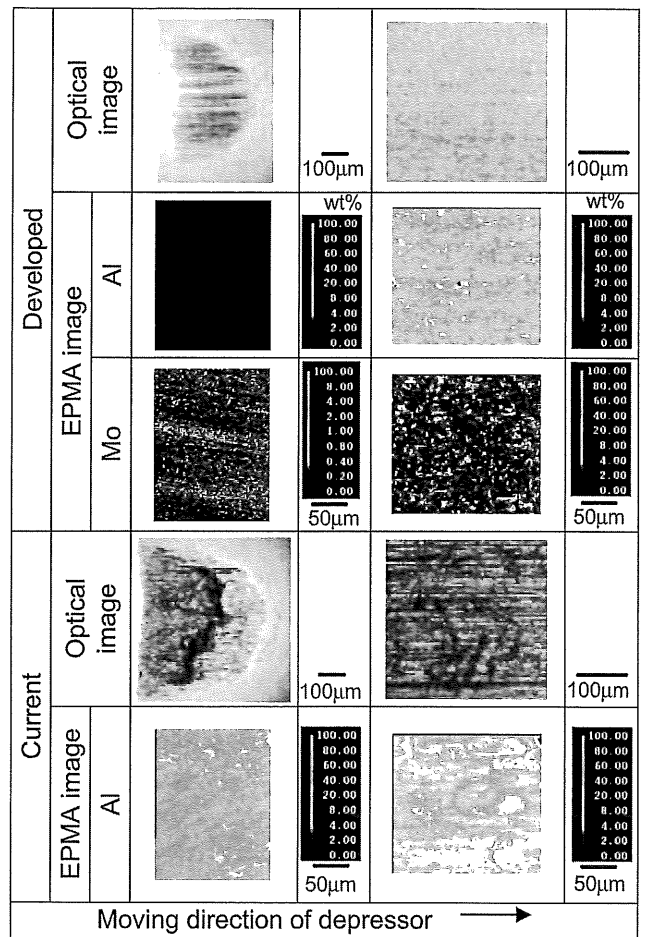
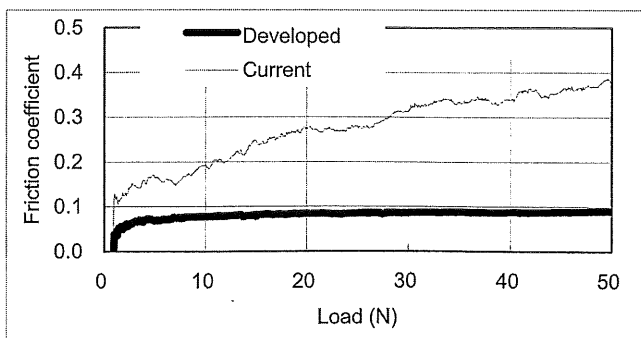


図7 スクラッチ試験後の摺動表面

#### 4. 軸受性能試験

##### 4.1 起動摩擦係数

軸受性能の評価として、まず摩擦係数を測定した。図8に試験機を、表4に試験条件を示す。実機でしばしば発生する金属接触状態をシミュレートさせる為、起動停止条件を採用し、軸と軸受間の油膜形成が不十分な状態となる、軸回転始動時の起動摩擦係数で評価した。

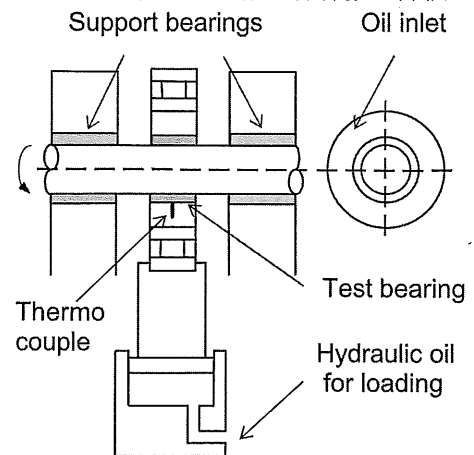


図8 起動摩擦係数測定 試験機概略図

表 4 試験条件

Items	Details	Units
Bearing size	ID38 x W20	mm
Load	4	MPa
Velocity	1.0	m/s
Lubricant	VG22	-
Oil inlet temperature	RT	-
Oil flow	2	ml/min.
Test duration	4	h
Operation	Start-stop condition	-
Shaft material	Hardened steel	-
Shaft roughness	1.0	Rz, $\mu\text{m}$

図 9 に起動摩擦係数測定結果を示す。現行材の  $\mu$  は初期高く、1.5 時間を越えると徐々に低下する傾向が見られた。これは起動停止運転により軸受が摩耗し、油膜形成が良好となる、すなわち、なじんだ状態になる為である。一方、開発材の  $\mu$  は初期から低く、また従来材に比べ早い時期、すなわち 0.5 時間を越えた辺りから急激に低下し、1.5 時間では従来材の半分以下となった。このように、開発材は短時間でなじみ、かつ低  $\mu$  を示す事が確認できた。

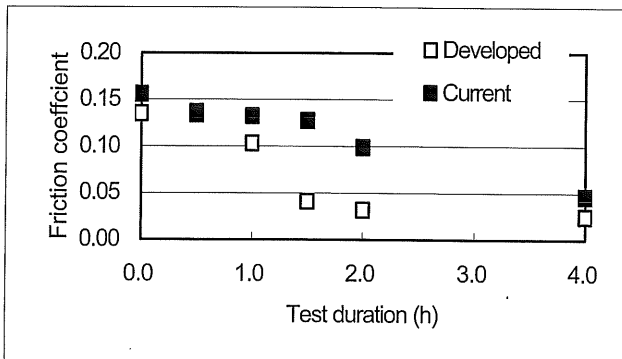


図 9 起動摩擦係数

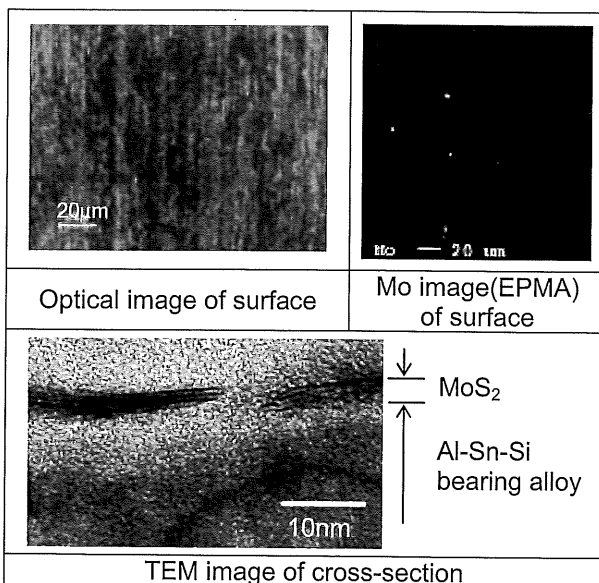


図 10 開発材の摺動面

開発材の  $\mu$  低減効果を考察する為、最も  $\mu$  に差が見られた 1.5 h における開発材の摺動面について、軸受表面の  $\text{MoS}_2$  残存状況を調査した。

図 10 に試験後の軸受表面組織と断面 TEM を示す。表面の EPMA 分析結果より、 $\text{MoS}_2$  は試験前に比べ大幅に減少しており、一部に点在しているのみとなっている。しかし、詳細な分析として TEM 像を見ると、試験前の軸受断面 (図 2) と同様、軸受合金表面に数 nm オーダーの  $\text{MoS}_2$  が観察された。

以上の調査結果より、開発材は以下のプロセスでなじみ時間短縮と低  $\mu$  が達成されたと考える。試験開始初期、軸受表面に存在する  $\text{MoS}_2$  と優れた濡れ性により、起動時、軸との金属接触が抑えられる。試験が進行するにつれ、軸受表面は摩擦され摩耗が進行するが、スクラッチ試験で見られたように、軸への凝着が最小限に抑えられながら摩耗する。この為、なじみはスムーズに進行し、なじみ時間が短縮されたと考える。また、摺動時、軸受表面に存在するサブミクロン厚さの  $\text{MoS}_2$  から摺動表面に  $\text{MoS}_2$  が連続的に供給され、軸受表面に数 nm 厚さで存在するようになる。これにより  $\text{MoS}_2$  の低摩擦効果が発揮され、低  $\mu$  を示したと考える<sup>(5)(7)(8)</sup>。

#### 4. 2 焼付試験

次に、軸受の重要特性の一つである耐焼付性を単体試験で評価した。図 11 に試験機を表 5 に試験条件を示す。試験軸受にステップアップ荷重を負荷し、焼き付かない最大面圧で評価した。軸受背面温度が  $200^\circ\text{C}$  を超えた場合を焼付と判定した。

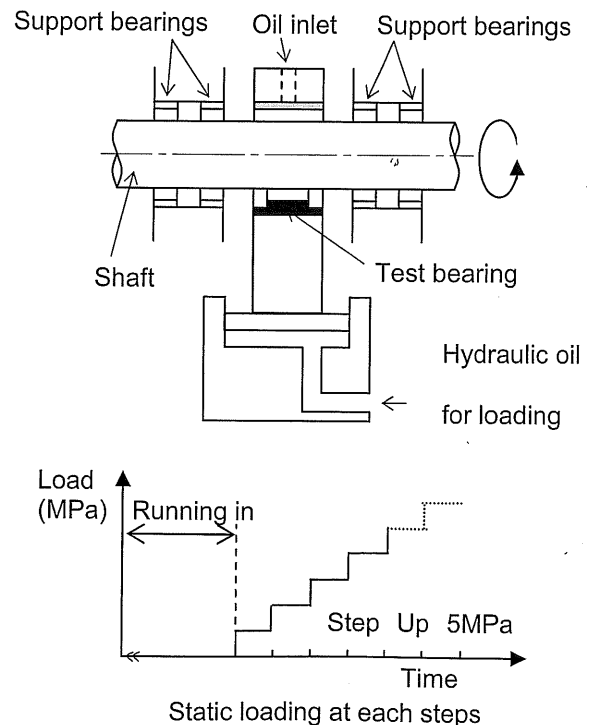


図 11 焼付試験機概略図

表5 焼付試験条件

Items	Details	Units
Bearing size	ID53 x W17	mm
Velocity	20	m/s
Lubricant	VG22	-
Oil inlet temperature	100~110	Degree-C
Oil flow	150	ml/min.
Shaft material	Steel	-
Shaft roughness	1.0 $\mu$	Rz, $\mu$ m

表6 疲労試験条件

Items	Details	Units
Bearing Size	ID53 x W17	mm
Revolution	3250	rpm
Velocity	9.0	m/s
Lubricant	SAE 20	-
Oil Inlet temperature	100	Degree-C
Oil supply pressure	0.49	MPa
Test time	20	h
Shaft : material	Steel	-
: roughness	1.0	Rz, $\mu$ m
: hardness	50-60	HRC

図12に試験結果を示す。開発材は従来材が焼付きと判定された荷重でも焼付に至らなかった。同じ面圧における試験中の軸受背面温度を比較すると、開発材は従来材に比べ、約7°C低かった。これは開発材の $\mu$ が低く、摺動による発熱が抑制された為と考える。これにより、開発材は高い面圧まで焼付に至らなかったと考える。

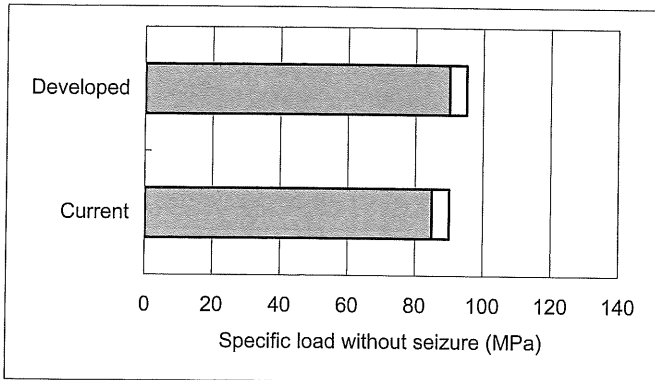


図12 焼付試験結果

#### 4.3 疲労試験

最後の評価として、軸受の耐疲労性を図13に示す試験機と表6に示す試験条件で評価した。試験軸受に規定の動荷重を負荷させ、軸受に疲労クラックの発生しない最大面圧で評価した。

図14に試験結果を示す。開発材は従来材と同等の耐疲労性を示した。

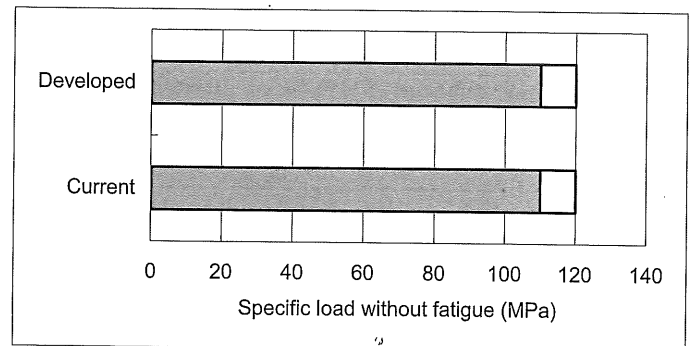


図14 疲労試験結果

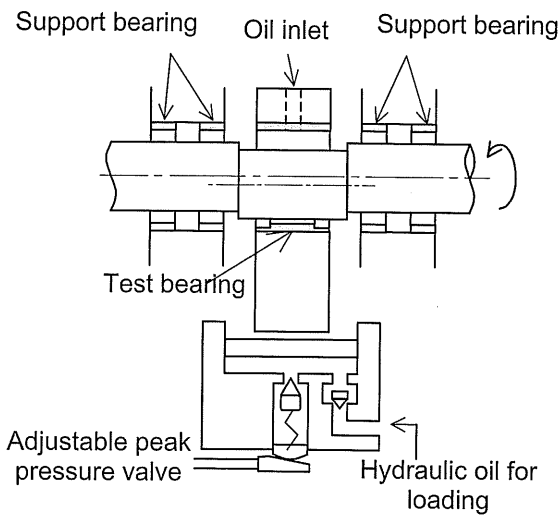


図13 疲労試験機概略図

以上の単体試験結果より、本開発材はフリクション低減により低燃費を追求する自動車エンジン用軸受に適用出来得る軸受性能を有していると考えられる。

#### 5. まとめ

(1) 樹脂バインダーなしで MoS<sub>2</sub> を軸受表面に付着させた鉛フリーAl-Sn-Si 合金軸受が開発された。MoS<sub>2</sub> は、軸受表面全体にナノメートルオーダーで存在し、かつ軸受の表面粗さ谷部にサブミクロン厚さで存在する。

(2) 開発材は現行の鉛フリーAl-Sn-Si 合金軸受に比較し、優れた濡れ性を示した。

(3) 基礎的なトライボ特性の評価の内、非凝着性をドライ条件下でのスクラッチ試験で評価した。開発材は現行材に比べ優れた非凝着性を示した。

(4) 軸受単体試験を用い、軸受の起動摩擦係数を測定した。開発材は現行材に比べ、早期に摩擦係数が低減し、かつ大幅に低い値を示した。

(5) 開発材の基本特性の評価として、焼付試験、疲労試験を実施した。耐焼付性は現行材より向上し、耐疲労性は現行材と同等であった。

#### 参考文献

1. Y.Kagohara, et al “Basic Characteristics of Lead-free Aluminum Alloy Bearings with Low Frictional Property of Adhered Molybdenum Disulfide”, SAE No.2007-01-1570
2. A.Okado, et al “Energy Saving and Tribology in Plain Bearings”, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.51, No.5(2006), 347-352
3. T.Tanaka, et al “Studies on Lead-free Resin Overlay for Engine Bearings”, SAE No.2006-01-1104
4. H.Ogihara, “Research into Surface improvement for Low Friction Pistons”, SAE No.2005-01-1647
5. Y.Kagohara, et al “Basic Characteristics of Lead-free Aluminum Alloy Bearings with Directly Adhered Molybdenum Disulfide Surface Layer for Reduced Friction of Automotive Engine”, Proceedings of 35<sup>th</sup> Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2008
6. 羽根田、籠原、高柳、田中 トライボロジー会議予稿集 (名古屋 2008-9、p101-102)
7. E.Rabinowicz, “Friction and wear of materials”, A Wiley-Interscience Publication, 1995
8. 高柳、籠原、羽根田、藤田 トライボロジー会議予稿集 (名古屋 2008-9、p15-16)