

結晶配向電析鉛合金材料の軸受への応用と 軸受メタルの高性能化研究

Application for Crystal-orientated Lead Alloy Electrodeposits to the Overlay and
Studies of Increase in the Total Performance of Plane Bearings

辻 誠* 成 重 丈 志* 町 田 恭 一*
Makoto Tsuji Takeshi Narishige Kyouichi Machida
藤 沢 義 和*
Yoshikazu Fujisawa

要 旨

電解析出した Pb 合金の結晶配向性は、その析出層の形態と密接な相関性が有る。(hoo)面に配向させることにより Pb 合金電析層の表面は、潤滑油の濡れ性が向上した。その結果、軸受メタル用のオーバーレイ材料として結晶配向性析出層を適用することにより、摺動特性として重要な耐焼き付き性が従来のオーバーレイ材料と比較し、PV 値で 30% 以上向上した。

ライニング材料としての鉛青銅焼結層は、Cu-Sn 合金マトリックスの成分組成の最適化と Pb 相の微細化により強化をはかり、耐疲労強度を向上させた。

結晶配向 Pb 合金オーバーレイと強化ライニング材料の組み合わせにより単体試験及び実機試験において、従来の軸受メタルと比較して耐焼き付き性及び疲労や摩耗に対する耐久性に優れた軸受メタルが得られた。

ABSTRACT

The orientation of the electrodeposited Pb alloy crystal is related with morphology of the deposits. The orientated electrodeposits of Pb alloy consisting of the (hoo) plane has good wetness characteristics when combined with lubricants.

As a result, the adoption of orientated electrodeposits of Pb alloy for the overlay of bearings has given a 30% or more increase in the anti-seizure parameter PV than when conventional deposits are used for the essential sliding characteristics.

Meanwhile, the adoption of sintered lead-bronze alloy for the lining material of bearings has yielded a good fatigue and wear strength characteristics, which was obtained by a newly developed Cu-Sn alloy matrix and a decrease in the amount and the grain size of the Pb phase.

By combining these orientated Pb alloy overlay and the strengthened lining, high performance plane bearings were developed which has enhanced anti-seizure property and durability, as proved by component and engine firing tests.

1. ま え が き

昨今の自動車用ガソリンエンジンは、環境問題やエネルギー問題への配慮から、よりクリーンでかつ省資源にすぐれたものが求められ、従来以上に細部にわたる機能向上、すなわち高効率化技術が必要とされている。

いっぽう、エンジンの出力に対する取り組みは近年の傾向として、多バルブ化や過給システムの付加などにより、益々高出力化へと眼が向けられている。当社においても可変バルブタイミング・リフト (VTEC) システムの開発実用化により、高回転および高出力化が可能となり、エンジンとしてのより一層の性能向上を実現している。

今後のエンジン開発は、高効率化技術と高出力化技術の両面をバランスよく実現することが必要とされており、

一部の新しいエンジンでは、燃費と出力という見方でのバランスのとれた性能をもったエンジンが提示されている。高効率化技術および高出力化技術は、ともにエンジンの限界性を追求するという点において、どちらも設計技術と材料技術の両者を駆使した取り組みが望まれる。

特に運動系部品においては、すぐれた耐久性とフリクションロスの低減という二面の要素を同時に達成させることが要求される。その中でも駆動力の変換を行うクランクシャフトを支持する軸受メタルは、エンジン設計上、性能限界を決定する重要な部品のひとつである。

Fig. 1 は年次モデルエンジン毎のコネクティングロッド (以下コンロッド) 用の軸受メタルが受ける負荷の変遷を示す。近年のエンジンの高性能化により、摺動時の

負荷のパラメータであるPV値（見掛け面積×摺動速度）が年次モデル毎に上昇している。当社においては80年代末のVTECシステムの導入による負荷の増加に対して、軸受メタル設計技術の一環としてクランクシャフト軸部の面性状に着目し、ウルトラフィニッシュ加工技術の適用を基盤とした耐焼き付き潤滑技術⁽¹⁾の確立により量産化を可能にした。そして、引き続きさらなるエンジンの性能向上に対応させるために軸受メタル材料開発に着手して来た。軸受メタルは、Fig. 2に示すような材料の構成からなり、各々の材料が機能を分担している。

本研究では、ガソリンエンジン用軸受メタルの高性能化として不可欠な要素である耐焼き付き性に関して、オーバーレイ材料のPb合金層の結晶形態に着目し、結晶の析出配向性が焼き付き限界性能の向上に大きく寄与することを見出した。

本稿では、オーバーレイ材料における結晶配向性と軸

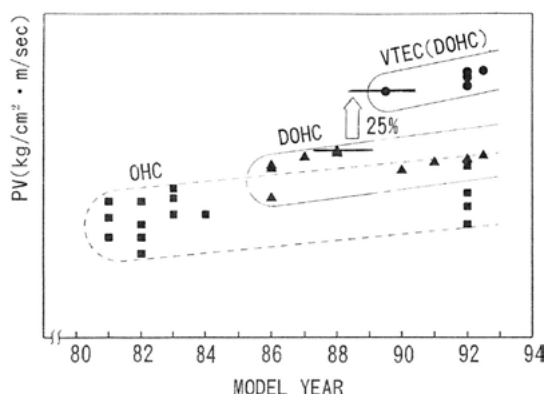


Fig. 1 Annual transition of the load to bearings for connecting-rods

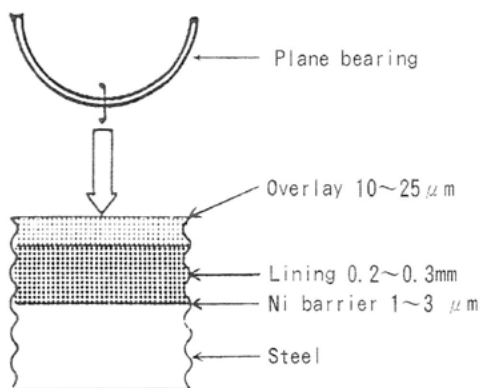


Fig. 2 Material construction of plane bearings

受メタル機能に係る材料特性について述べるとともに、軸受メタルとして総合的な性能向上を狙って耐疲労性を向上させたライニング材料についても一部紹介する。また、両者を組み合わせて開発した軸受メタルの総合評価として、単体性能試験およびエンジンでの実機性能試験を行い、従来より量産されている軸受メタルと比較した結果について報告する。

2. オーバーレイ材料としての結晶配向性Pb合金層

2.1. オーバーレイの性能向上の考え方

軸受メタルの耐焼き付き性を左右する要因としては、軸受メタルの設計の際に基本となる、軸と軸受メタルの間で形成される潤滑油膜の厚さが最も重要である。実際には、軸および軸受メタルの真円度や円筒度そして表面性状などの精度不良や、静的ならびに動的な剛性不足に起因する形状変化によって局部的な油膜切れが発生し金属接触する。このような背景から、オーバーレイ材料の耐焼き付き性向上に対する従来の考え方は、Fig. 3に示すようにオーバーレイ自身を軟質化し、初期なじみ性と言われている軸と軸受メタルの摺動面が相互に習う機能を向上させることと、金属接触時の摩擦抵抗を低減させて発熱の抑制を狙いとした、自己潤滑性の向上に主眼を置いて来た。

以上の考え方から、近年Pb合金オーバーレイとしてInを添加したものが高性能エンジン用軸受メタルに適用され広く実用化されて来ている。

本研究を始めるにあたり、従来の材料開発の考え方と見方を変え、潤滑油と軸受メタル表面の相互作用という点に焦点を当て、局部的な金属接触が発生するような面圧を受けた場合においても、軸受メタル表面に潤滑油を確保出来るオーバーレイの材料上の特徴を出現させることに狙いを置いた。通常、機械加工などによる表面加工によっても、潤滑油の保持は可能であるが、焼き付きの起点となる微小部分の油膜切れに対しては効果が少ない。そこで、電析（金属析出）による表面の析出形態に着目し、Pb系合金電析層の微細な表面形態が電析条件により変化すること、並びに潤滑油保持に対して期待できそうな微細形態が得られること、さらに表面形態を変化させるパラメータが結晶の配向性であることから、結晶配向による微細表面形態と軸受メタル材料として要求される物性との関係について検討し、耐焼き付き性のすぐれた

$$IF(h00) = \frac{I(h00)}{\sum I(hkl)} \times 100(\%)$$

Fig. 4-cの析出層は、X線解析結果よりほとんどPb(h00)面の回折ピークしか認められず、(h00)面への配向度は上記の式により99.4%となる。同様にFig. 4-a, Fig. 4-bの析出層は、それぞれ配向度が20.7%、57.0%となる。

Fig. 5-a, Fig. 5-bに代表的な従来のPb合金オーバーレイの表面状態とX線回折図を示す。それぞれのPb(h00)面の配向度は、10~30%の範囲である。前述のFig. 4-cのPb(h00)配向層は、結晶グレインの構成および表面状態の点で、従来のオーバーレイと大きく異なっている。

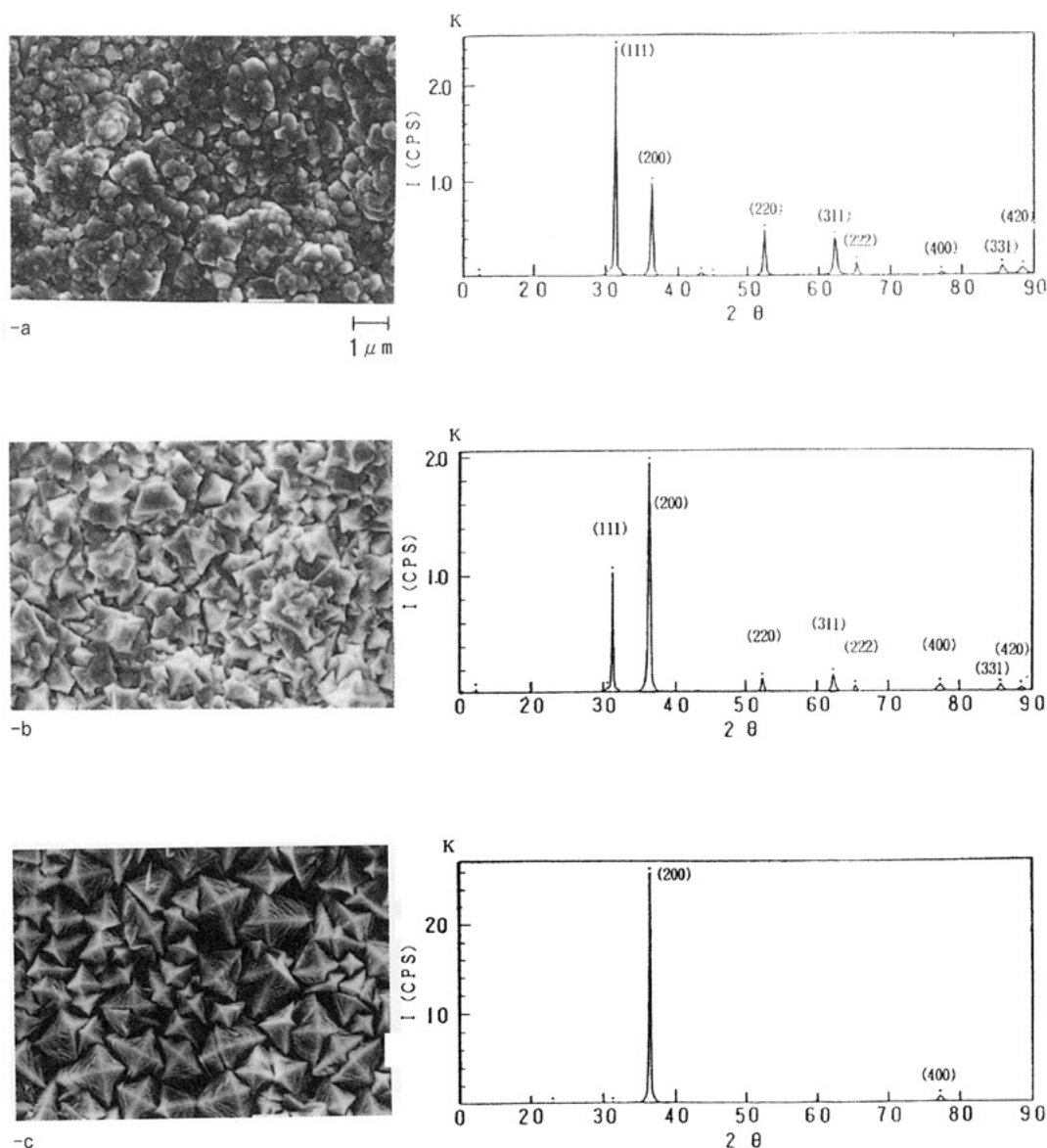


Fig. 4 Relationship between morphology by SEM (scanning electron microscopy) and texture by using XRD (X-ray diffraction)

Fig. 6にFig. 4-cのPb(h00)配向結晶層表面の斜傾図を示す。表面状態は、ピラミッド状の四角錐が連なって形成されており、高さは約 $1.5\mu\text{m}$ である。また想定される底辺長さは、約 $2\mu\text{m}$ であり比較的均一な形状である。

Fig. 7はPb(h00)配向結晶層の断面組織を示す。電析による結晶成長は母材にほぼ垂直な方向に連続的な柱状結晶を形成している。

2.3. 結晶配向性 Pb 合金電析層の材料の特徴

Pb(h00)配向層の表面は、四角錐状の微細な凹凸を形

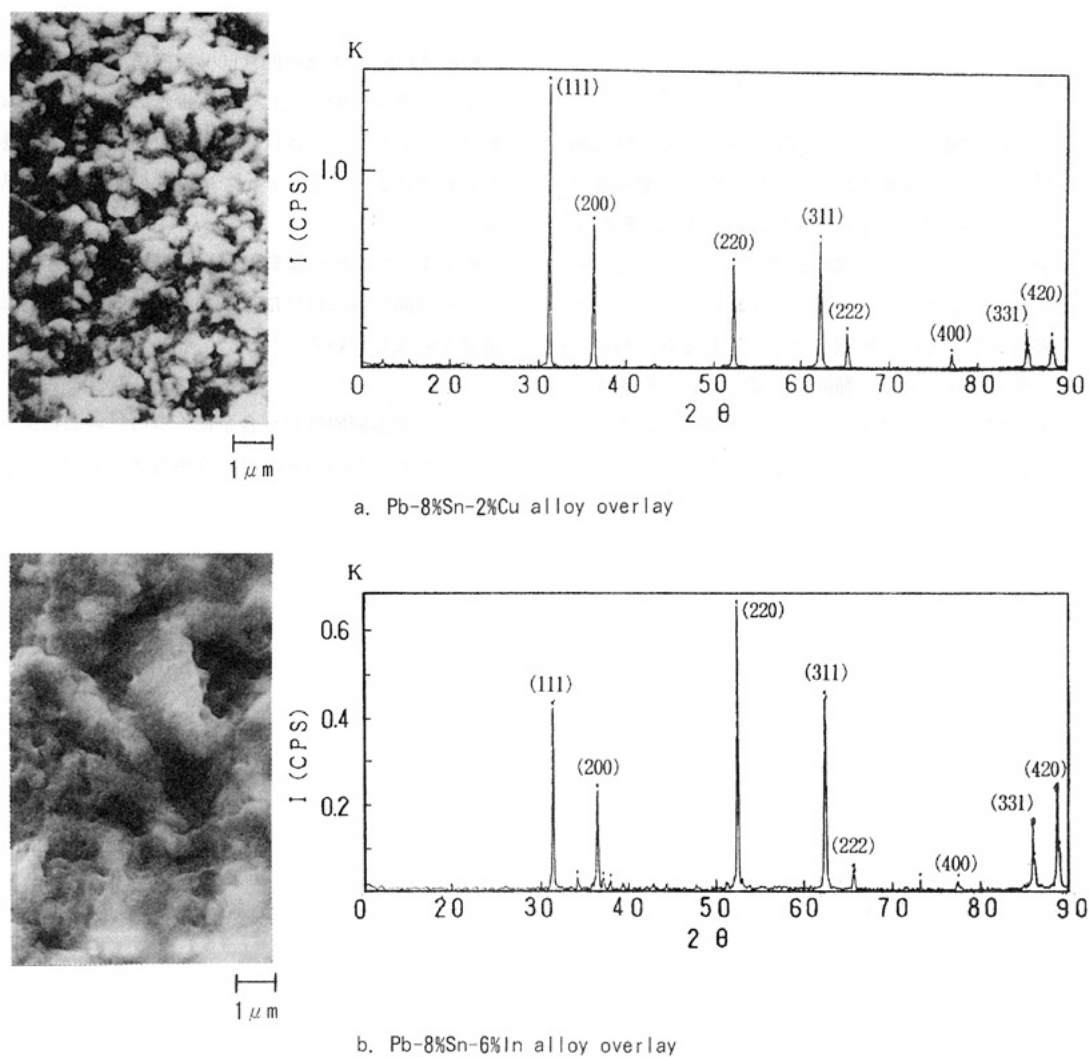


Fig. 5 SEM photographs and XRD pattern(Pb) of conventional overlay surface

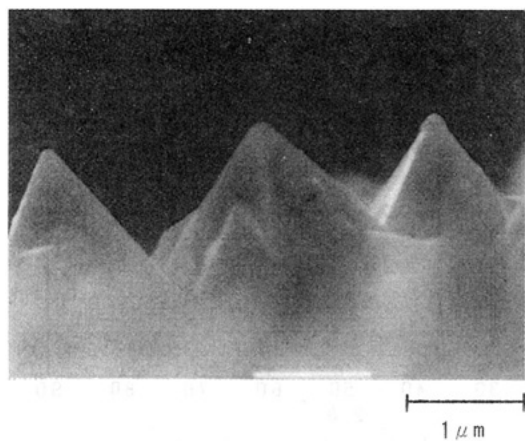


Fig. 6 SEM angle photograph of Pb(h00) high orientation surface

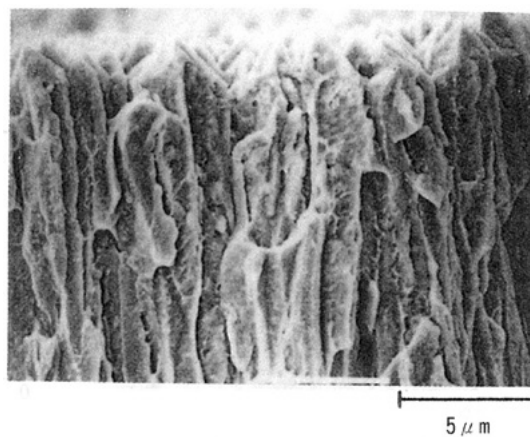


Fig. 7 SEM photograph of cross section of Pb(h00) high orientation layer

成しており、外観的にも潤滑油を保持しやすい機能を有するものと想定され、特に潤滑油との相互作用という観点から、表面機能としての濡れ性について検討した。測定方法は、ウィルヘルミ法を用い、Fig. 8に示す条件にて行った。濡れ性のパラメータは、表面への潤滑油による付着張力で表し、従来のオーバーレイに相当するPb(h00)配向度20.7%の低配向層と本研究で得られた

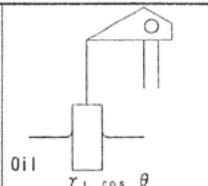
Method	 $F_W = \gamma_L \cos \theta = (F_A - V \cdot \rho \cdot g) / l$	
	θ : Contact angle ($^{\circ}$) v : Sample volume in the immersion section (cm ³) ρ : Liquid density (g/cm ³) l : Contact length between the sample and the liquid (cm) g : Acceleration of gravity (980 cm/s ²) F_A : Force acting to the sample (dyne)	
Condition	Test oil	10W-30
	Test piece	100×10×18t
	Thickness of plating	20 μm (both side)

Fig. 8 Method and conditions of wetness characteristic test

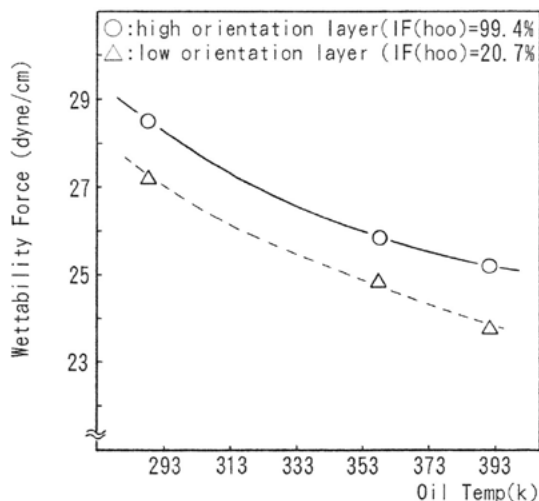


Fig. 9 Wetness characteristic of lubricant oil to Pb alloy surface

Pb(h00)配向度99.4%電析層を比較した。

Fig. 9に濡れ性試験結果を示す。Pb(h00)99.4%配向電析層は、20.7%配向電析層に比べ付着張力が大きく、特に潤滑油の温度が上昇するに従ってその差が顕著になっている。Pb(h00)配向が強くなることにより潤滑油の濡れ性が良くなると言える。これは、Pb(h00)配向での表面状態による実質表面積が大きなこと、配向結晶と潤滑油との結合性による表面特性と考えられる。

次に、表面特性の濡れ性の結果をもとに、Pb(h00)配向層の摺動特性について検討した。濡れ性と同様に従来材に相当するPb(h00)配向度20.7%の低配向層と配向度99.4%の開発材を摺動の基本特性を表すストライベック曲線にて比較および評価した。

試験方法と条件をFig. 10に、試験結果をFig. 11に示す。荷重の増加にともない潤滑状態が流体潤滑域から混合潤滑域へ移行する。Pb(h00)配向結晶層は摩擦係数(μ)の最小荷重ポイントが低配向層に比べ高荷重側にあり、混合潤滑域において広い荷重域を有している。また μ の最小荷重ポイントから焼き付きに至る境界潤滑域においても、同様に荷重域が広い。

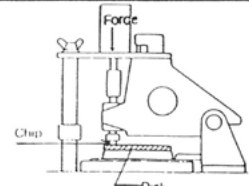
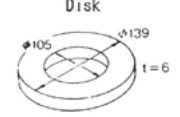
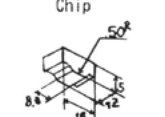
Test equipment		
Test pieces	Disk  • electro-plating at sliding side • steel substrate	Chip  • S48C steel with LCN • surface finish 0.8S
Condition	Revolution	940 rpm
	Load-step	9.8 N / 1 min
	Lub. oil	10W-30
	Temp. oil	373 K
	oil supply	150 ml/min

Fig. 10 Method and conditions of sliding characteristic test

以上のことから、Pb(h00)配向結晶層は従来のオーバーレイ材料に対して表面の濡れ性が向上し潤滑油との相互作用として、潤滑機能が向上する。その結果、各潤滑領域を高負荷側へ拡大できるようになり耐焼き付き性能が向上したと考えられる。

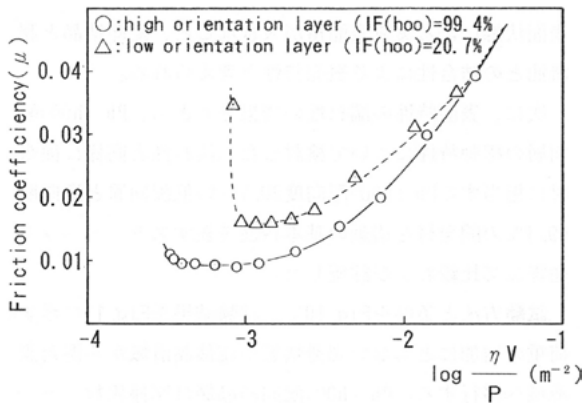


Fig. 11 Sliding characteristic of Pb (h00) orientated layer by stribek-curve

3. 耐疲労性向上ライニング材料

オーバーレイの基層となるライニング材料は、繰り返し荷重に対する耐疲労性が要求される。軸受メタルの性能を向上させるためには、ライニング材料の高性能化も必要不可欠な要素である。

3.1. ライニング材料の耐疲労性向上の為の材料設計

Cu系ライニング材料は、一般的に Cu-Sn-Pb の三元素系

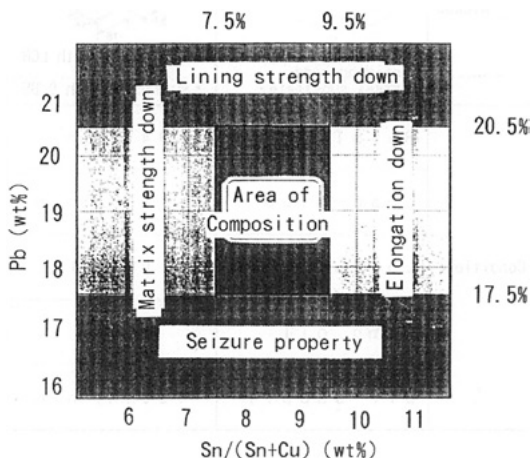


Fig. 12 Suitable area of chemical composition

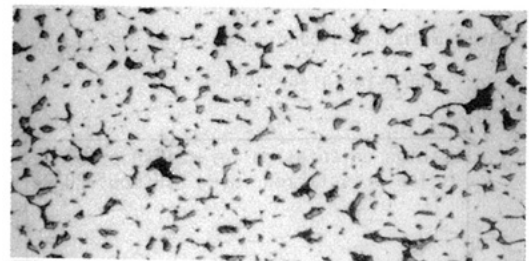
からなり、通称「鉛青銅材」と呼ばれており、工業的には裏金の圧延鋼板の上に粉末焼結法、または鋳造法にてパイメタル態に成形されている。現在では、量産性から自動車用軸受ライニング材の製法としては、粉末焼結法が主流となっており、本研究においても製法は粉末焼結法を前提とした材料設計を行った。

Cu-Sn-Pb 系焼結ライニング材料の組織構成は、合金化した Cu-Sn マトリックス相と、Cu-Sn 合金とは固溶しにくい独立した Pb 相からなり、従来の量産ライニング材料の基本的な成分組成は、Cu を基材として 21~25% Pb -1~5% Sn の組成となっている。

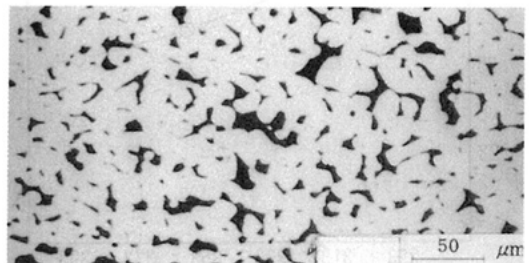
本研究で狙いとした耐疲労性向上の考え方は従来の焼結ライニング材を出発材とした下記の3項目である。

- (1) 組成的見地から強度の低下を引き起こす Pb 量の減少と Cu-Sn 合金マトリックスの増加。
- (2) Cu-Sn 合金マトリックスの強化を狙った、Cu-Sn 合金中の Sn 量の増加。
- (3) 組織の見地から、Pb 偏析による局部的強度低下を抑制する為の Pb 相の微細分散化。

以上の考え方をもとに、成分の調整及び製法条件の最適化によって得られた成分範囲を Fig. 12 に、また組織状態を Fig. 13-a に示す。従来材の組織状態 Fig. 13-b に比べ Pb 相が減少し、かつ微細化している。



a. New lining material (Cu-7%Sn-19%Pb)



b. Conventional lining material

Fig. 13 Micrographs of sintered Cu-Sn-Pb alloy lining material

3.2. 開発ライニング材の物性

Table 1 に開発材の物性を、代表的な従来材と比較して示す。従来材に比べ静的強度および硬さが向上している。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of lining materials

		New material lining	Conventional material lining
Composition (wt%)	Pb	19.0	23.5
	Sn	7.0	3.5
	Cu	Bal.	Bal.
Tensile strength (Mpa)		285	185
Elongation (%)		1.7	1.5
Adhesive strength (Mpa)		187	148
Hardness (HmV100g)		104	75

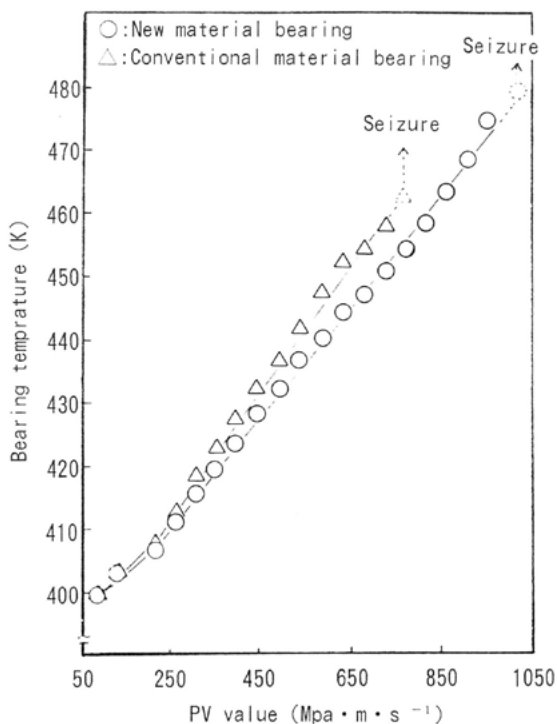


Fig. 14 Anti-seizure limit of bearing

4. 軸受メタル性能

4.1. 単体性能試験

4.1.1. 試験方法と条件

研究の結果から得られた結晶配向オーバーレイ材料とライニング材料を組み合わせた軸受メタルを試作し、軸受メタルとしての性能を単体性能試験機により評価した。比較用として従来タイプの軸受メタルはPb-Sn-In系オーバーレイと従来ライニング材を組合せた高性能エンジン用のものを使用した。

試験方法としては、耐焼き付き性能を静的ステップアップ荷重方式で、また耐疲労性能を動的定荷重方式で実施した。各々の条件をTable. 2およびTable. 3に示す。

4.1.2. 耐焼き付き性試験結果と考案

耐焼き付き現象の発生を判定するために軸受メタルの背面温度を測定し、荷重のステップアップでの負荷による軸受メタルの背面温度が急激に立ち上がったポイントを焼き付きと判断し、その手前の焼き付かないステップの荷重を用いて、PV値を求め耐焼き付き性を示す限界性能値とした。

Fig. 14 に軸受メタルの負荷に対する背面温度特性と耐焼き付き限界PV値を示す。

この結果、開発軸受メタルは従来の軸受メタルに対し耐焼き付き性が限界PV値で約35%向上した。また軸受メタル負荷の増大による背面温度の上昇は、油膜厚さの減少による油膜の剪断と局部的な金属接触によるものと考えられるが、開発軸受メタルは、従来軸受メタルに対し相対的に軸受メタルの背面温度の低下が認められる。これらは、開発軸受メタルの結晶配向オーバーレイ表面形状による潤滑油保持性の向上と考えられ、性能向上は表面の潤滑油の濡れ性に起因しているものと推測される。

4.1.3. 耐疲労性試験結果と考案

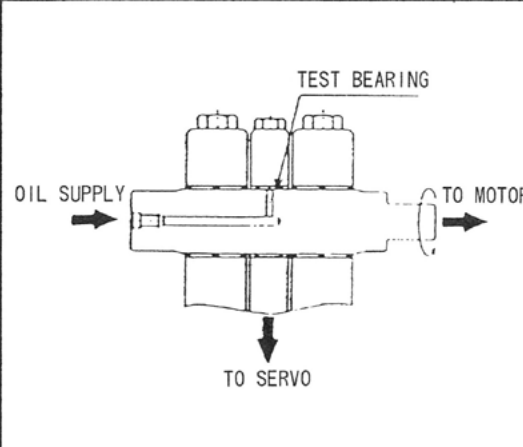
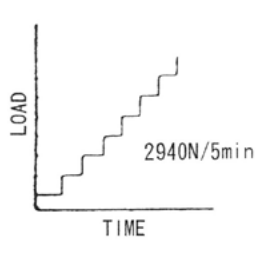
耐疲労性の評価としては、規定の荷重の繰り返し回数(10^7 回)後のライニング部の表面及び断面の200倍拡大観察結果より、破損が発生しない限界荷重を用いてその時の見掛けの面圧を求め耐疲労限界面圧とした。

Fig. 15 に試験結果を、Fig. 16 に試験終了時の断面組織を示す。

新たなライニング材料の開発により高強度化と高硬度化が可能となり開発軸受メタルは従来の軸受メタルと比較し、ライニング材の耐疲労限界面圧が35%以上向上した。

これにより、材料設計におけるマトリックス強化とPb

Table 2 Seizure test

	
Load step up pattern	
Test conditions	
Bearing size	$\phi 50 \times 18.6 \times 2t(\text{mm})$
Revolution	6000rpm
Lubricant oil	10W-30
Oil inlet temp.	393K(120°C)
Oil pressure	0.29Mpa (3kg/cm ²)
Oil clearance	30 μm
Shaft material	S48C/LCN
Shaft roughness	0.8 $\pm$ 0.1S

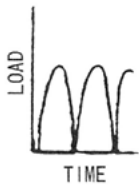
の微細分散化における効果を実証できた。

4.2. エンジンでの実機性能試験

4.2.1. 試験方法と条件

実機性能試験に供した軸受メタルは、材料を単体性能試験の供試メタルと同一とし、寸法諸元のみ試験エンジン用軸受メタルに合わせて試作したものを使用した。供試軸受メタルの寸法諸元を Table. 4 に示す。見掛け面圧を増大させるために軸受メタル幅を標準幅に対して削減

Table 3 Fatigue test

Dynamic load cycle pattern	
Test conditions	
Bearing size	$\phi 50 \times 18.6 \times 2t(\text{mm})$
Revolution	3000rpm
Lubricant oil	10W-30
Oil inlet temp.	373K(100°C)
Oil pressure	0.44Mpa(4.5kg/cm ²)
Oil clearance	50 μm
Shaft material	S48C/LCN
Shaft roughness	0.8 $\pm$ 0.1S

した。

試験は、直列4気筒1.6L DOHC 16バルブVTECエンジンを使用し、負荷条件の厳しいコンロッド軸受メタルに開発軸受メタルを組み込み評価した。

4.2.2. 耐焼き付き性試験結果

耐焼き付き性能試験をエンジンの回転数ステップアップ方式で実施し、クランクシャフトのコンロッド支持軸の表面から0.5mmの部分に埋め込んだ熱電対による軸の温度測定を行い、急激な温度の立ち上がったポイントを焼き付きと判断し、その手前の焼き付きかないステップの回転数を耐焼き付き限界回転数として表した。

Fig. 17 にエンジン回転数とコンロッド支持軸の温度特性および限界回転数を示す。

開発軸受メタルは、従来軸受メタルに対して500rpmの高回転化が可能となり、コンロッド軸受メタルでの計算PV値で推定すると20%以上の性能向上と言える。

回転数のステップアップによる開発軸受メタルを使用

したコンロッド支持軸温度の特性は、従来の軸受メタルと比べ相対的に低い傾向にあり、単体性能試験の軸受メタル背面温度の傾向と同様である。

4.2.3. 総合耐久性試験結果

耐久性試験として、軸受メタルにとって最も厳しい条件のひとつである回転変動をともなうアイドル回転から7600rpmまでの全開加減速モードを選定し、総合的な耐久性を評価した。供試した開発軸受メタルはモード最高回転数からの限界PV値計算を行い標準幅に対し25%削減したものを使用した。

全開加減速の繰り返し数を3000回行いその結果、焼き付きや疲労などに起因する問題の発生はなく、エンジン機能として十分な結果を得た。Fig. 18に耐久後の軸受メタル中央部の表面状態を示す。

軸のたわみやコンロッドの傾きなどにより通常軸受メタルとして最も接触しやすい軸受メタルの両サイド部については、なじみ効果からオーバーレイ表面の四角錐体は消滅している。いっぽう、荷重を受ける軸受メタル中央部については、四角錐の頂点部は消滅し平坦な形状となっているものの初期表面の特徴を残している。

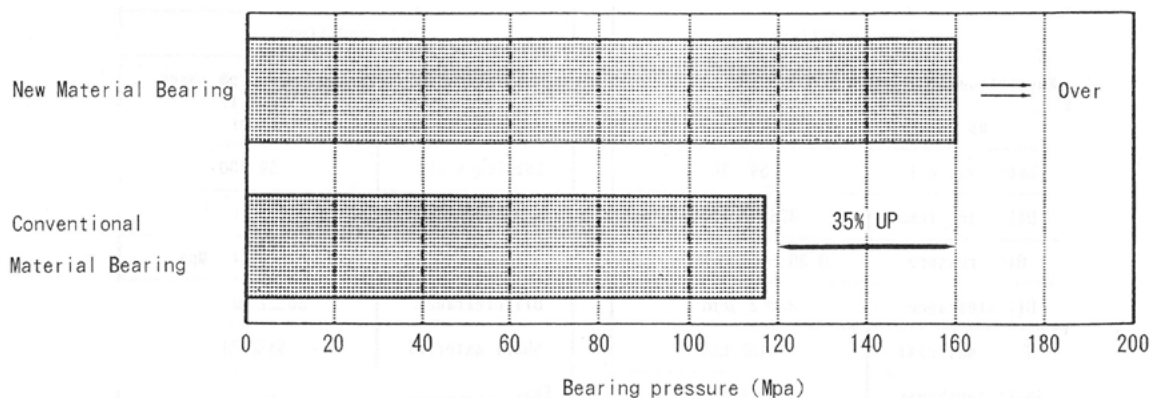
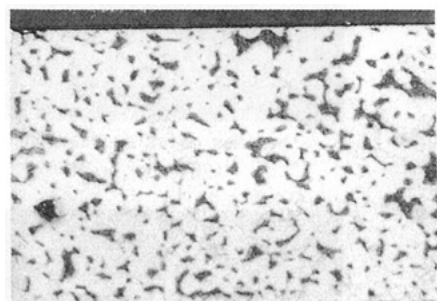
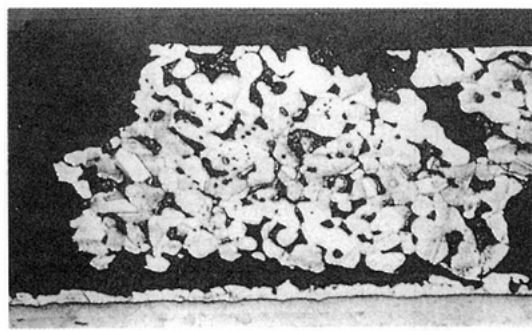


Fig. 15 Fatigue strength as limit pressure of bearing



a. New material bearing
after 10^7 cycles at 160 Mpa

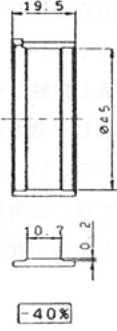


b. Conventional material bearing
after 10^7 cycles at 130 Mpa

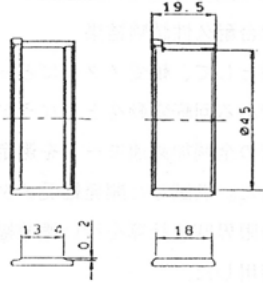
Fig. 16 Micrographs of cross section after fatigue test of bearing

Table 4 Specification of bearings and condition of engine firing test

a. Seizure test

Specification of bearing	
Test conditions	
Revolution step up pattern	250 rpm/15 min
Lubricant oil	5W -30
Oil inlet temp	373 ~ 415 K
Oil pressure	0.39 ~ 0.48 Mpa
Oil clearance	$30 \pm 2 \mu\text{m}$
Shaft material	S48C/LCN
Shaft roughness	0.4 S

b. Durability test

Specification of bearing	
Test conditions	
Load cycle pattern	750 $\leftrightarrow$ 7600rpm /3sec (w. o. t) (holding for 60sec)
Lubricant oil	5W -30
Oil inlet temp	398 ~ 408 K
Oil pressure	0.12 ~ 0.48 Mpa
Oil clearance	$30 \pm 2 \mu\text{m}$
Shaft material	S48C/LCN
Shaft roughness	0.4 S

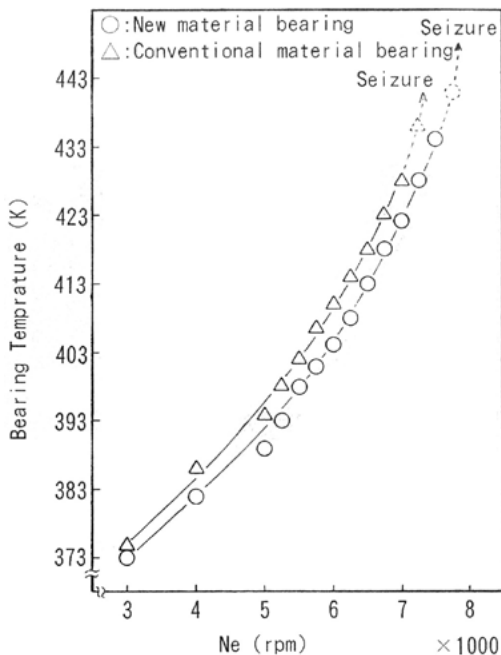
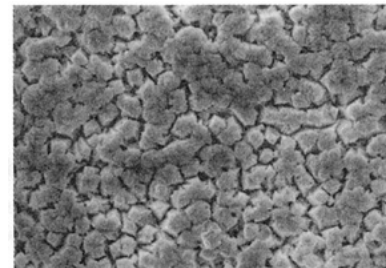


Fig. 17 Anti-seizure limit of bearing by engine firing test



a. New material bearing (25% down width)



b. Conventional material bearing (standard width)

Fig. 18 SEM photographs of bearing surface after durability test

5. ま と め

(1) 軸受メタル材料としてオーバーレイに Pb(h00) 配向結晶電析層の適用より、表面特性による潤滑油の濡れ性が向上し、耐焼き付き性が向上することが明らかになった。

(2) 合金設計および組織の最適化により耐疲労性にすぐれたライニング材料が開発でき Pb(h00) 配向結晶オーバーレイ材料との組み合わせによりこれまでになく高い負荷で使用できる軸受メタルが得られた。

(3) 本開発軸受メタルは、すでに F-1 用 V12 エンジンにおいて 1991 年のハンガリーグランプリより適用され、エンジンの高出力化と耐久性の両面から性能の高さが実証されている。今後はレース用エンジンへの適用で得られた知見を生かし、量産車への拡大展開を計って行きたい。

6. 謝 辞

本研究を進めるに当たり、めっき技術において御協力を頂いた㈱キザイの方々、並びに軸受メタルの試作にお

いて多大な御協力を頂いた大同メタル工業㈱の方々に深く感謝致します。

最後に、本研究の途上で亡くなられた共同研究者である故田中俊明氏に哀悼の意を表します。

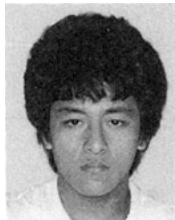
7. 参 考 文 献

- (1) Maruya, Nagashima, Yamamoto and Oyama; HONDA R&D Technical Review Vol.2, 202 (1990)
- (2) T. Watanabe; Journal of Surface Finishing Society of Japan Vol.40 (11) 1221 (1989)
- (3) R. FIRATESI, Roventi, M. Maja and N. Penazzi; Journal of Applied Electrochemistry 14 505 (1984)
- (4) Jong-Sang Kim, Su-Il Pyun and Hyo-Geun Lee; Plating and Surface Finishing July 89', 50
- (5) K. S. Willson and J. A. Rogers; Tech. Proc American Electroplaters Society 51, 92 (1964)

■ 著 者 ■



町 田 恭 一



成 重 丈 志



町 田 恭 一



藤 沢 義 和