

高回転エンジン用鉛フリー軸受の開発

Development of Lead-free Bearing for High-speed, High-load Engine

櫻井 輔*
Tasuku SAKURAI

白石 隆**
Takashi SHIRAISHI

要 旨

Hondaの高回転ガソリンエンジンをターゲットにした鉛フリー軸受の開発をおこなった。

開発手法としては既存のアルミ合金軸受表面に表面粗さと添加物粒子の配列比に着目した新樹脂コーティングを施すことで鉛フリー化を実現した。

新樹脂コーティング軸受で、従来の高回転エンジンに用いられる鉛基合金めっき軸受と同等以上の性能(耐焼付き性と耐疲労性)を達成した。

ABSTRACT

A lead-free bearing was developed for use in high-speed and high-load gasoline engines made by Honda.

The development method involved the application of a new resin coating material with optimized surface roughness and solid lubricant arrangement ratio to an existing aluminum alloy bearing surface, which realized a lead-free bearing.

The new resin coating bearings achieved performance (seizure resistance and fatigue resistance) equal to or better than that of the lead alloy plating bearings conventionally used in high-speed and high-load gasoline engines.

1. まえがき

最近のエンジン出力の増加および排気ガス規制への対応や燃費低減のため、軸受面圧は上昇し潤滑油膜厚さはより薄くなる傾向にあり、周速と面圧に代表される軸受環境は厳しくなっている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

自動車用高回転エンジンのコンロッド軸受としては、通常三層銅合金が用いられ、最表層には電気めっきによる鉛基合金めっき材を用いるのが主流である。

しかし、環境負荷物質である鉛については2011年7月からヨーロッパでELV(欧州廃車)指令が施行されるため、鉛基合金めっき材は使用不可になる。そうすると自動車エンジンに用いられている既存の鉛フリー軸受では、周速20 m/s以上の高回転エンジンでの耐久性が課題となる。鉛フリー化の懸案は、荷重変動に対する変形と、局部発熱時の溶

融および再凝固に対する復元を示すなじみ性が低下することである。鉛フリー化技術としては、鉛代替めっきやスパッタリングなどを用いる手法がある⁽⁵⁾が、めっきは廃液処理が課題である。また、スパッタリングは装置そのものが高価なため部品へ応用するとコストが課題となる。そこで耐焼付き性を鉛基合金めっき材同等以上をねらって表面粗さと添加物粒子の配列に着目した樹脂系コーティングを用いて、高回転エンジン仕様に耐え得る鉛フリー軸受を開発したので、その技術内容について報告する。

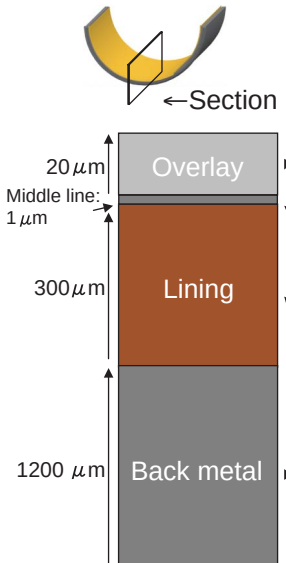
2. 高回転エンジン用軸受の開発コンセプト

Fig. 1に既存の鉛フリー軸受の使用領域を示す。Hondaでは周速20 m/s以上の高回転エンジンを量産しており、この領域で軸受に求められる要求特性としては

* 四輪R&Dセンター

** 本田技研工業株式会社

Table 1 Bearing specification comparison



	Lead alloy plating	New coating material
Material	Pb-4.5Sn-8.5In	MoS ₂ : 72 mass% ± 2 mass% + PAI
Thickness	20 μm	5 ± 2 μm
Surface form	—	(0,0,0) c axis arrangement
Material	Ni plating (1 μm)	—
Material	Cu-3.5Sn-15Pb	Al-7Sn-3.7Si-1.5Cu
Material	S20C	S20C

- (1)耐荷重性と耐焼付き性
 (2)瞬間的な荷重に対してのなじみ性
 (3)油膜切れ時の固体潤滑性
 が挙げられる。

これらの要求特性に対して、開発した新樹脂コーティング軸受の仕様を Table 1 に示す。比較として従来材の鉛基合金軸受の仕様を示す。

新樹脂コーティング材は、アルミ合金軸受表面になじみ性の向上を目的としてポリアミドイミド(以下 PAI と略す)を、また固体潤滑性の向上を目的として二硫化モリブデン(以下 MoS₂ と略す)を一定量以上配合した。コーティング厚さは 5 ± 2 μm とした。耐荷重性に対しては表面粗さと MoS₂ の結晶方位に着目し、耐荷重性を高めた樹脂コーティング仕様を開発コンセプトとした。

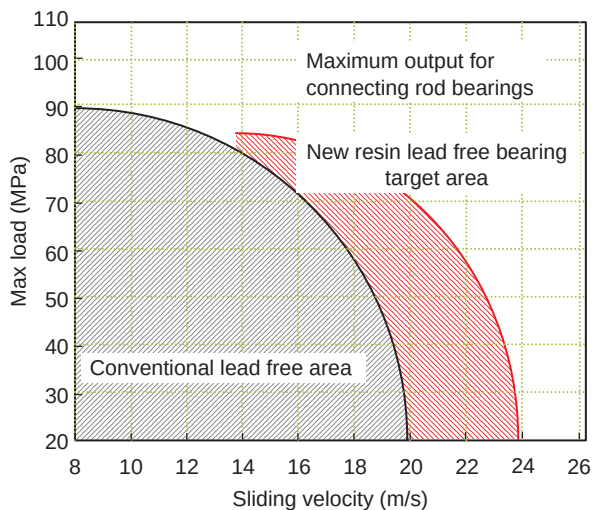


Fig. 1 Correlation of sliding velocity and max load

Table 2 Seizure test conditions

Sliding velocity	20 m/s
Bearing dimension	φ48 mm
Oil temperature	80 °C
Oil pressure	0.1 MPa
Clearance	65 μm
Loaded	3 kN step-up

3. 技術内容

3.1. 面粗度最適化による耐荷重性と耐焼付き性の向上

新樹脂コーティング材の耐焼付き性を検証するため Fig. 2 のような軸受試験装置を用い、静荷重単体試験をおこなった。軸受試験装置は軸を回転させ、変動荷重を与えて耐焼付き性および耐疲労性を単体で評価できる設備である。ここでは Table 2 に示す条件で樹脂コーティングの表面性状が耐焼付き性に与える影響を検証した。

耐荷重性を向上させるには、軸受表面に油膜を切らさないことが重要と考え、コーティングの表面粗さに着目した。結果を Fig. 3 に示す。表面粗さ(Rz_{JIS}⁽⁶⁾)が粗いほど耐焼付き性が低くなる。これは、急激な荷重変動などで瞬間的に油

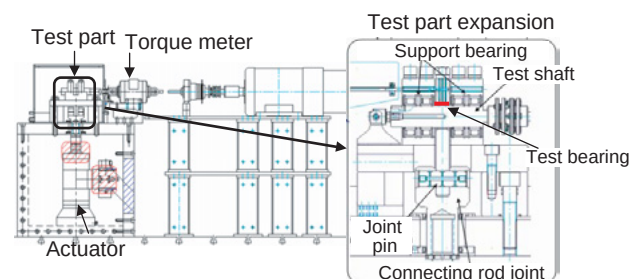


Fig. 2 Bearing rig tester

膜が切れて軸受とクランクシャフトが固体接触した場合、Fig. 4 の右側に示した SEM 表面観察結果のコーティング凸部(黒い点線部が頂点)が局部接触により発熱し、焼付きに至るためと考えられる。Fig. 4 の破線部垂直断面の凸形状を Fig. 5 に示す。一方、表面粗さが平滑な場合は耐焼付き性の目標を満足し、平滑性の効果は確認できた。

以上の単体焼付き試験結果から、コーティング後の表面粗さは目標焼付き面圧を満足する $Rz_{JIS} : 2.5 \mu\text{m}$ 以下に設定した。

3.2. 配列比最適化による耐荷重性と耐焼付き性の向上

Fig. 6 に示すように MoS_2 には結晶方位のミラー指数で示す a, b 軸を軸受円周方向とすると、これらの方向にはへき開性が有ることが知られている。これらの軸に垂直な軸受円心方向の c 軸方向には、耐荷重性に優位性を持つことが期待される。ここでは MoS_2 粒子の c 軸を揃えることで耐荷重性の向上をねらい、 MoS_2 粒子が規則正しく配列する

割合(配列比)に着目した。静荷重単体試験結果を Fig. 7 に示す。配列比と焼付き面圧には正の相関があるという結果を得た。これは MoS_2 が六方晶型の層状結晶構造をとるため、層間の硫黄同士の結合が弱く、せん断力が加わると a, b 軸方向、すなわち軸受円周方向にはへき開しやすい傾向があるからである。一方、モリブデンと硫黄の結合は強固で c 軸(0,0, ℓ)面は耐荷重性に優れた特性を持つことから、規則正しく配列した MoS_2 粒子のへき開性が良好な固体潤滑性を示すためと考えられる。 MoS_2 粒子を配列させるため、コーティング塗布後に鱗片状の MoS_2 粒子が平準化するように塗布条件を設定し、配列比の設定は 80%以上とした。

軸受試験装置で周速: 17.5 - 25.0 m/s までの静荷重単体試験をおこない、耐焼付き性を検証した。鉛基合金めっき材と比較した結果を Fig. 8 に示す。低周速域から高周速域まで鉛基合金めっき材と同等以上の耐焼付き性を得ることができた。これは特に MoS_2 粒子の配列比を 80%以上に設定

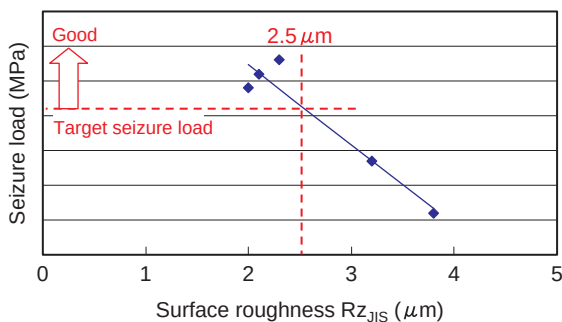


Fig. 3 Seizure resistance and surface roughness

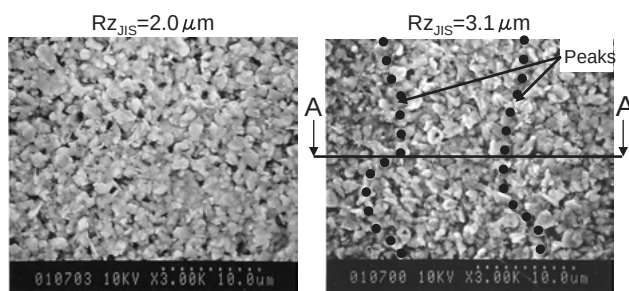


Fig. 4 SEM images of MoS_2 coating surface

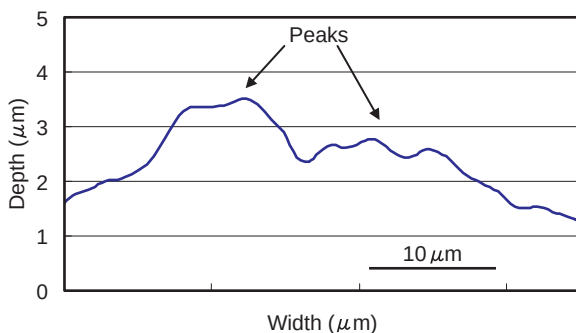


Fig. 5 A-A cross section

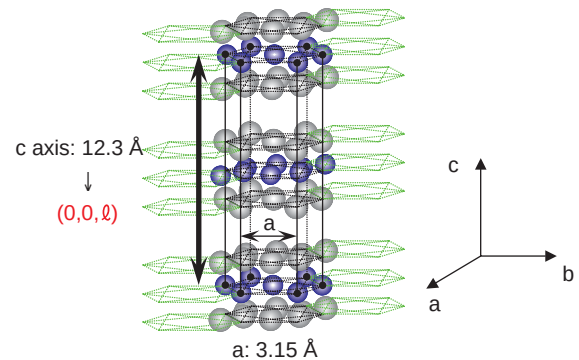


Fig. 6 MoS_2 crystal structure

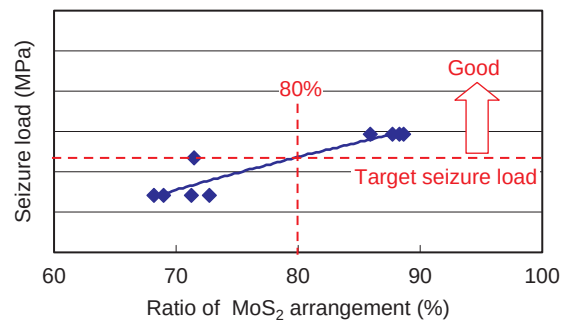


Fig. 7 Seizure resistance and MoS_2 arrangement ratio

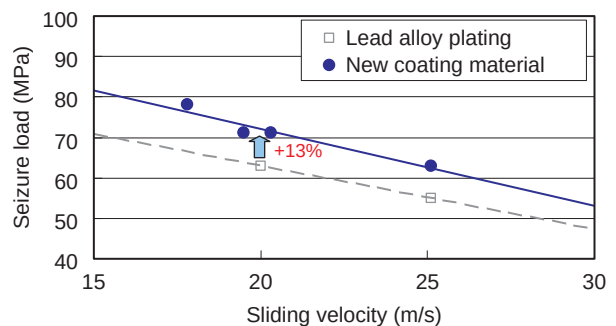


Fig. 8 Seizure resistance and sliding velocity

Table 3 Fatigue test conditions

Sliding velocity	23.3 m/s
Bearing dimension	φ48 mm
Oil temperature	100 °C
Oil flow-rate	1 L/min
Clearance	75 μm
Loaded	100 MPa × 300 Hz sine wave

したことで、耐荷重性が向上した効果と考えられる。

また、軸受試験装置を用いた単体疲労特性は Table 3 に示すような条件下でテストした。繰り返し回数 1×10^7 回まで比較した結果、鉛基合金めっき軸受同等以上の耐疲労強度を得た。これは特に表面粗さを平滑にしたため、クランクシャフトと軸受との固体接触を伴うたたかみが抑えられ、油膜切れが起こりにくくなり、局所的な固体接触による発熱を抑えることができたためと考えられる。

3.3. 瞬間的な荷重変動に対してのなじみ性

高周速下において、軸受最表面に瞬間的な荷重がかかった場合、焼付かずになじむには最表層の耐熱性と、変形能つまり伸びと強度が鉛に近いことが求められる。

Fig. 9 に樹脂のアミド基率とガラス転移温度の関係を示す。アミド基率が高い樹脂では耐熱性に課題があると考え、自動車技術会にて報告されているように⁽⁷⁾耐熱温度が鉛に近い(鉛の融点327 °C)アミド基率の低い樹脂(PAI)を選定した。次に、Fig. 10 に200 °Cでの樹脂の伸びと強度の関係を示す。先に選定した耐熱性が高い樹脂の伸びは、鉛の半分以

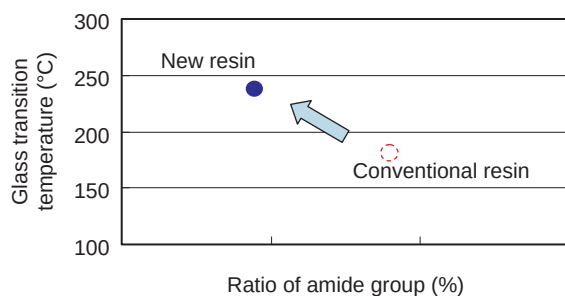


Fig. 9 Correlation of amide ratio and glass transition

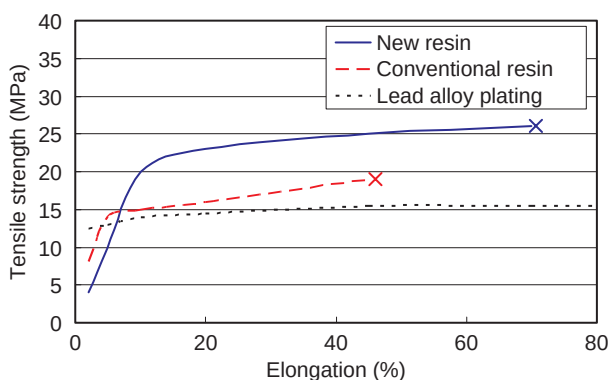


Fig. 10 Correlation of elongation and strength at 200 °C

下であるが、改良された PAI は鉛同等の伸びを持つことが知られている。

3.4. 油膜切れ時の固体潤滑性

固体潤滑性に対しては、油膜切れ時のしゅう動性能を保証するため、3種の固体潤滑剤の中から適合性の確認をおこなった。Fig. 11に示すようなスティックスリップ試験をおこない、Fig. 12の結果から試験後の相手材の表面粗さが小さく、へき開性を持つ MoS_2 で良好な結果を得た。また配合量は、自動車技術会で報告されているとおり⁽⁷⁾、 MoS_2 コーティング処理した試験片と鋼球の摩耗量測定から設定した。Fig. 13の試験結果は、 MoS_2 の配合量が72 mass%のときに、鋼球の摩耗量が低くなることを示した。以上から樹脂コーティングに配合する添加物粒子は MoS_2 とし、配合量は72 mass%とした。

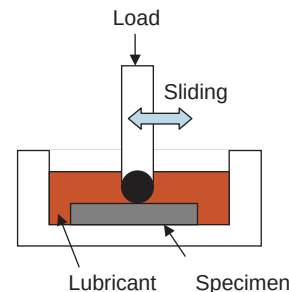


Fig. 11 Stick-slip tester

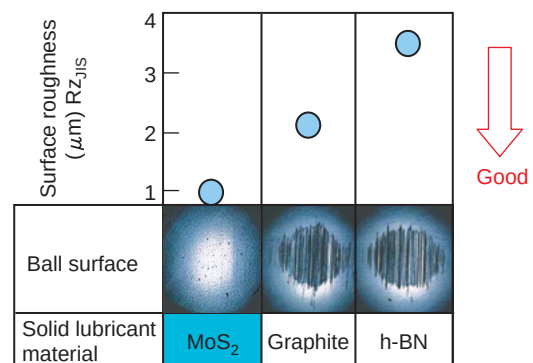
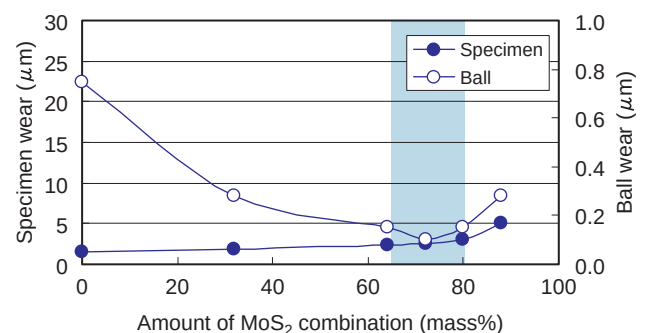


Fig. 12 Correlation of solid lubricant material and surface roughness

Fig. 13 Correlation of MoS_2 combination and wear

4. 軸受耐久性の確認

4.1. コーティング摩滅後耐焼付き性検証

最表面の新樹脂コーティング材が摩滅したことを想定した耐焼付き性の確認をおこなった。Table 2に示した各条件で、コーティングが摩滅した後のライニングの露出率との関係を確認した。Fig. 14は新樹脂コーティング軸受が鉛基合金めっき軸受以上の耐焼付き性を持つことを示す。これは、最表層とライニング間の接着層の有無が影響しているものと考えられる。鉛基合金めっき軸受には、最表層中の錫とライニング中の錫との相互拡散防止と、めっき密着性向上を担って、 $1\mu\text{m}$ のニッケルめっき層がある。このニッケルめっき層はしゅう動特性が低く、露出すると焼付き性は低下する。新樹脂コーティングは最表層とライニング間の中間層が無い場合、コーティングが摩滅してもしゅう動特性が保持されるようなアルミ合金ライニングが使用可能となった。

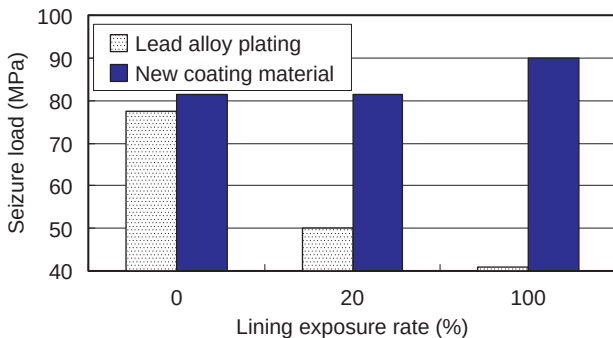


Fig. 14 Seizure resistance of lining exposure rate

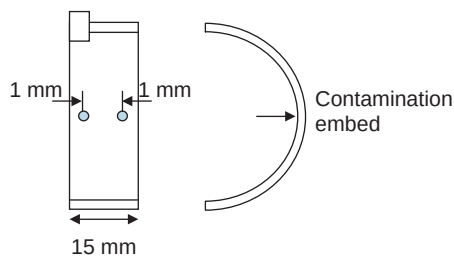


Fig. 15 Contamination trap position

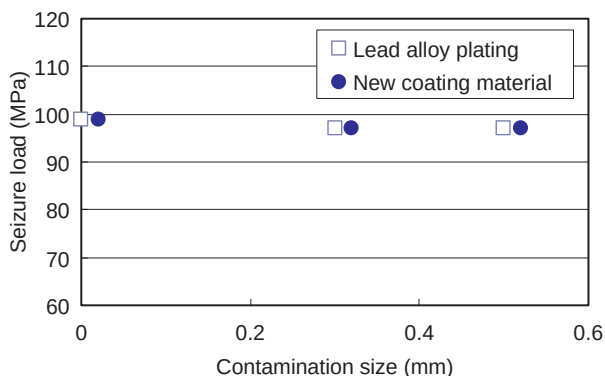


Fig. 16 Seizure resistance and contamination size

Table 4 Contamination toughness test conditions

Sliding velocity	20 m/s
Bearing dimension	$\phi 48\text{ mm}$
Oil temperature	$140\text{ }^{\circ}\text{C}$
Oil pressure	1.0 MPa
Clearance	$60\text{ }\mu\text{m}$
Loaded	3 kN step-up

4.2. 異物に対する耐焼付き性検証

エンジン内の異物に対する耐焼付き性を確認した。軸受試験装置を用いてテストした条件を Table 4 に示す。異物が軸受の性能に対して影響をおよぼすのはしゅう動面に埋収した時と考え、Fig. 15のようにしゅう動面直上に異物を埋収する方法で焼付き試験をおこなった。

異物は実際のクランクシャフトの加工時の切粉を採取し、長径方向の長さでサイズを選別した。異物サイズ 0.5 mm まで耐焼付き性が鉛基合金めっき材と変わらないという結果(Fig. 16)を得た。これはバインダ樹脂の伸び特性、表面面粗度、 MoS_2 粒子の配列比を上げることにより、固体潤滑を含むなじみ性が鉛基合金めっき軸受同等になったためである。

5. 実機適合性確認

開発した新樹脂コーティング軸受の実機適合性を検証するため、3.7 L V6 エンジンを用いた。実機耐久試験を実施

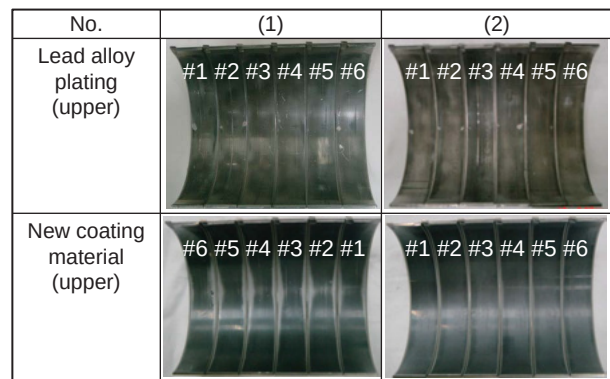


Fig. 17 Appearance of bearings after engine test

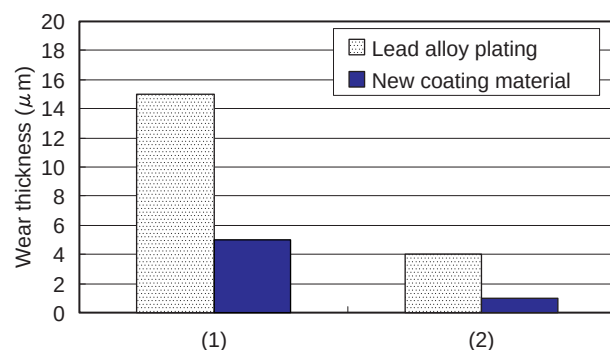


Fig. 18 Wear of durability test

Table 5 Engine test conditions

Engine	3.7L V6 gasoline	
No.	(1)	(2)
Rotations	6200 rpm*WOT	6800 rpm*WOT

し、検証部位はコンロッド軸受にて確認をおこなった。エンジン全負荷条件(WOT)を Table 5 に示す。

試験後の軸受外観を Fig. 17 に示す。いずれの試験においても軸受のしゅう動面は良好で焼付きや疲労によるクラックの発生はなかった。また、軸受ダメージについて摩耗量を Fig. 18 に示す。条件(1)では $4 - 5 \mu\text{m}$ 、(2)では $1 - 2 \mu\text{m}$ であり、鉛基合金めっき軸受と比較しても良好な耐摩耗性を有しているという結果を得た。

6. まとめ

- (1) 耐荷重性と耐焼付き性向上のために、新樹脂コーティング材の表面面粗度と MoS_2 粒子の配列比に着目し、表面面粗度: $Rz_{\text{JIS}} = 2.5 \mu\text{m}$ 以下、 MoS_2 配列比: 80%以上に設定した。
 - (2) 新樹脂コーティング軸受の異物混入時の耐焼付き性を検証し、異物サイズ: 0.5 mm(最大長)まで鉛基合金めっき材と変わらない耐焼付き性を得られた。
 - (3) 新樹脂コーティング軸受は実機耐久試験において焼付きの発生、および疲労によるクラックは発生せず、従来の鉛基合金めっき軸受と同等以上の結果を得た。
- 以上より、高回転エンジン用鉛基合金めっき材同等以上の性能を持つ新樹脂コーティング鉛フリー軸受を開発し、2008 年モデル ACURA RL のコンロッド軸受へ適用した。

参考文献

- (1) 三原健治, Werner Shubert, Klaus Deicke, Rolf Reinicke, Klaus Damm: 高負荷エンジン用鉛フリースパッタ軸受の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.148-08, p.15-18(2008)
- (2) 町田恭一, 高橋伸一, 上嶋英夫, 藤木賢治: 新しい軸受シミュレーション装置によるエンジン軸受評価方法の提案と高効率化, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.131-139
- (3) 金山弘, 川上真也, 郷原千明, 不破良雄, 道岡博文: 固体潤滑オーバーレイ付きエンジン用すべり軸受材料の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.976, p.141-144(1997)
- (4) 後藤保明, 富川貴志, 須賀茂幸: 高速エンジン軸受用鉛オーバーレイの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.66-01, p.9-12(2001)
- (5) 神谷荘司, 富川貴志, 後藤保明, 本田文洋: 高周波ス

パッタリングにより作製した Ag-Sn 合金膜の摩擦特性, トライボロジスト, 第 45 巻, 第 2 号, p.158-165 (2000)

- (6) 日本規格協会編 JISハンドブック, 46, 機械計測, p.636 (2007)
- (7) 壁谷泰典, 川越公男, 不破良雄, 斉藤康之: 高速・高面圧用固体潤滑オーバーレイの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.9-06, p.1-4(2006)

■ 著 者 ■



櫻井 輔



白石 隆