

単体試験装置によるエンジン用滑り軸受の 焼付き要因の解析

Analysis of Engine Plain Bearings Seizure by the Bearing Tester

町 田 恭 一* 牧 野 克 紀* 佐 藤 謙 次*
Kyoichi MACHIDA Katsunori MAKINO Kenji SATOH

要 旨

エンジン用滑り軸受の焼付き限界を決める要因を明らかにするために従来の軸受単体試験装置の問題点を改良した軸受単体試験装置の製作、実験モードの選定を行った。この試験装置を用いて自動車用エンジン軸受として用いられているオーバーレイ付き鉛合金軸受、アルミニウム合金軸受の焼付き試験を行なった。得られた実験データをもとに軸受油膜計算を行った所、オーバーレイ付き鉛合金軸受は最大油膜圧力によってオーバーレイの塑性流動が発生することにより限界が定まり、アルミニウム合金軸受は最小油膜厚さにより限界が定まることが明らかになった。

ABSTRACT

A bearing tester that improves the problems with conventional bearing tester was fabricated and experiment modes were selected in order to clarify factors determining the seizure limit of engine plain bearings. Using this tester, seizure tests were performed on copper-lead bearings with overlay and aluminum alloy bearings which are used as automotive engine bearings. Bearing hydrodynamics calculation was performed based on the obtained experimental data. These results clarified that the seizure limit for copper-lead bearings with overlay is determined by the occurrence of plasticity flow of the overlay due to the maximum oil film pressure, and that the seizure limit for aluminum alloy bearings is determined by the minimum oil film thickness.

1. まえがき

近年、自動車エンジンの滑り軸受にはエンジンにおける低フリクション化及び小型化、NVH 向上のためのクランク剛性向上による狭幅化、環境負荷低減のための鉛使用量の低減など、従来に無い厳しさが求められている^{(1)~(5)}。

このため、滑り軸受の成立性を判断する指標パラメータを明確にするため、軸受焼付き現象のメカニズム解明が必要となった。

しかしながら、従来の滑り軸受単体試験では軸受性能の相対比較レベルを脱しきれないことから、軸受の成立性を設計検討可能にするためには定量的な表現をする必要がある。このため新たな滑り軸受単体試験装置の製作と実験モードの選定を行なうことが必要になった。本論文ではこの新しい軸受単体試験装置の製作と実験モードの選定を行うことによって得られた焼付き現象のメカニズムに対する一考察を行った。

2. 従来の軸受試験装置の概要と問題点

Fig.1 に装置系統図、Fig.2 に試験軸受部分と荷重方向のしゅう動部分での温度測定方法、Fig.3(a)に荷重パターンを示す⁽⁶⁾。

試験は支持軸受により支持された丸棒軸に油圧による静荷重をかけていき、試験軸受コンロッドに示す軸受裏の温度、または軸受のフリクショントルクが既定値になった時点で試験終了する方法としている。軸受が完全に焼付きに至る前に装置を停止させるのは焼付き発生時の急激なストップトルクの発生による装置各部の損傷を防ぐためである。この装置の問題点は、

- ① 焼付き解析を行うのに焼付きが完全に発生しない段階で装置を停止させていること、
- ② 支持軸受の温度状態が試験軸受部の背面温度に大きく影響を与えてしまうこと、
- ③ 軸と軸受が片当りをしていないかを判断をする

方法が実験後の軸受の当り状態を見ることにのみよっていたことである。

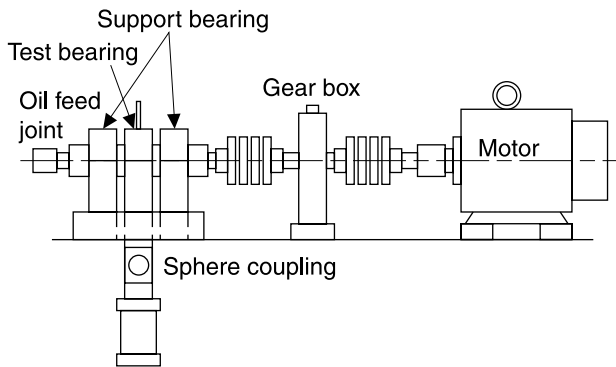


Fig.1 Conventional system of the equipment

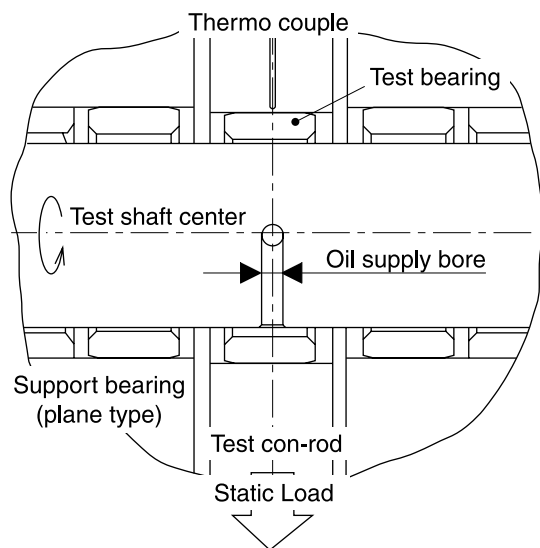


Fig.2 Conventional bearing part

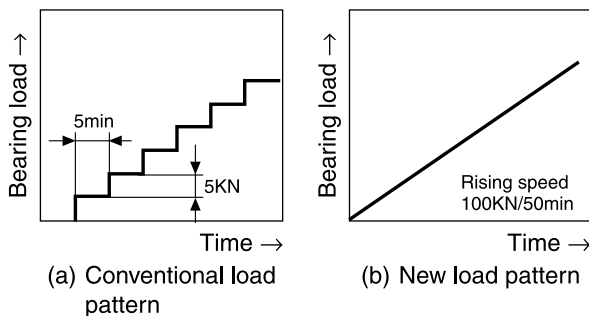


Fig.3 Bearing load pattern

3. 焼付き解析用単体試験装置

Fig.4 に新たに製作した装置系統図を、Fig.5 に試験軸受部分と荷重部分での温度測定方法を示す。この装置は以下の特徴を有する。

- ① モータと増速機の上にトルクリミッタクラッチを設けることにより軸受が完全に焼付く(軸受表面が溶融あるいは軸と軸受が凝着)まで試験を行うことができる。
- ② 支持軸受の温度状態の影響を極力小さくするために支持軸受を発熱の少ないローラ軸受とした。
- ③ 軸と軸受が片当りをしていないかを判断する方法として軸受幅方向に温度測定箇所を追加し、その温度バランスをモニターすることにより検知することができるようにした。また滑り面で発生している現象を把握するためのモニタとして、軸受滑り面近傍の温度を測定するという観点でシース熱電対を軸受背面に穴掘り込みして設けている。この方法により軸受の当りの状態を見なくても正確な軸の傾きの調整が可能になった。

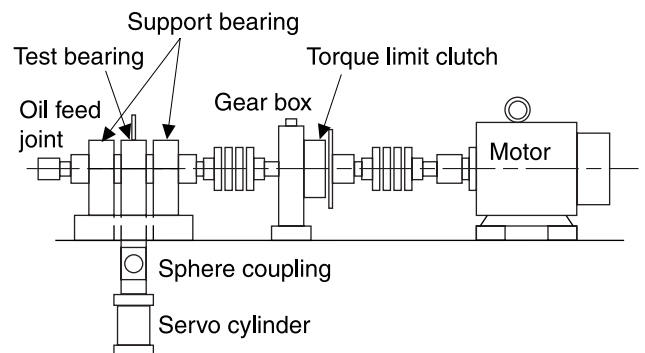


Fig.4 New system of the equipment

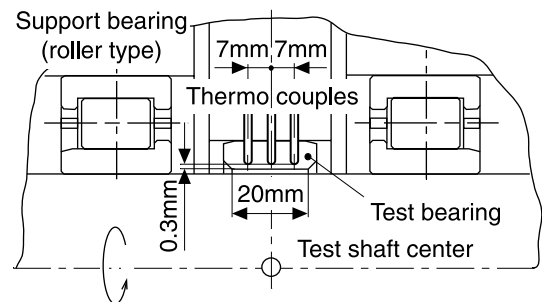


Fig.5 Developed bearing part

実験モードは従来のステップ荷重を付加していく方法ではなく、Fig.3(b) に示す直線的に荷重を付加していく方法とした。これは Fig.3(a) の場合、荷重をステップ状に上げた時に急激な温度上昇が生じて焼付きが発生することが観察されたこと、すなわちステップ荷重の大きさ、一定荷重保持時間によって焼付き荷重が異なることが明らかになったので、これによる影響を小さくするために直線的に荷重を上げていく方法を採用した。

Fig.6 にこの方法での再現性実験結果を示す。

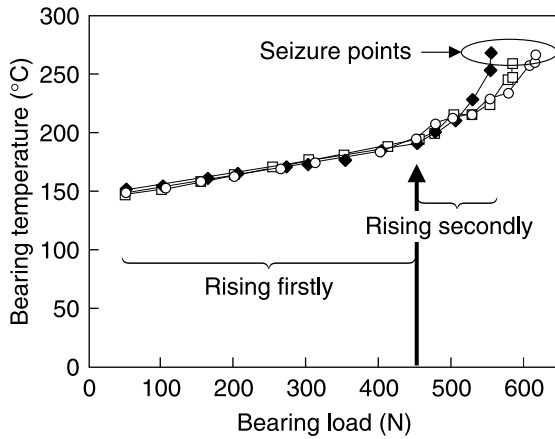


Fig.6 Confirmation test of the reappear-ability

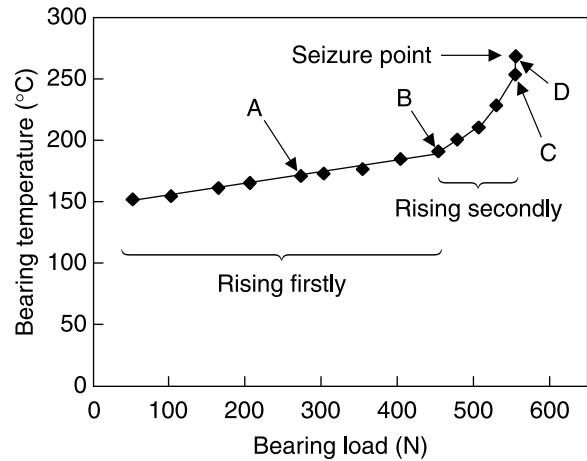


Fig.7 Temperature process of the Pb bearing

焼付き発生時の荷重は約 10%の差があるものの、温度上昇過程や温度が二次的に立上がるポイントはほぼ同一であると言える。

Table 1 に実験を行った条件一覧を示す。

Table 1 Tested condition

Shaft rotation speed	3 000 ~ 6 000 rpm
Feed oil temperature	35 ~ 140 °C
Feed oil pressure	300 KPa
Radial clearance	13 ~ 20 μ m
Oil SAE grade	10 W-30
Shaft surface roughness	0.8 S (Rmax)
Oil feed method	Shaft feed

軸受材質は自動車用軸受として一般的な鉛合金軸受とアルミニウム合金軸受で実験を行なった。

自動車用滑り軸受の構造は、強度部材である裏金にしゅう動性に優れたしゅう動材料が形成されている。しゅう動材料は大別して鉛合金のものとアルミニウム合金のものとに分けられ、それぞれの中でも要求性能によって幾つかに分類される。鉛合金軸受ではしゅう動層の最表面になじみ性の向上を目的とした軟質の鉛を主成分のオーバーレイが構成されるのに対して、アルミニウム合金軸受の多くはアルミニウムを主成分とした合金層 1 層で構成される。

4. 軸受材料別の焼付き実験結果

4.1. 鉛合金軸受の焼付き特性

Fig.7 に鉛合金軸受の荷重に対する焼付き発生までのしゅう動面温度の測定結果の一例を示す。

Fig.8 は Fig.7 図中の各指示ポイントで装置を停止させ、軸受表面の当りの特徴を観察した模式図である。

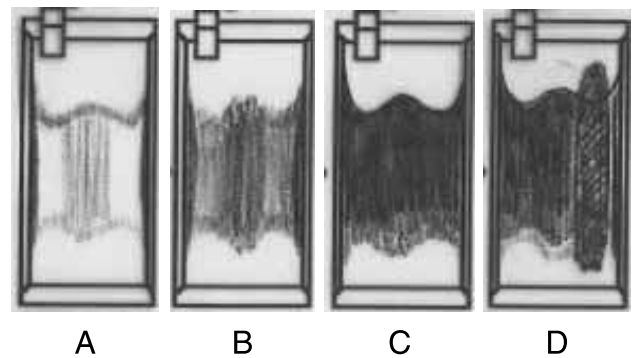


Fig.8 Characteristic of bearing surface of Pb bearing

各ポイントでの特徴は、

A: 温度が直線的に上昇している途中での状態

かすかな当りが認められる。この当りの発生は軸と軸受がメタルコンタクトすることにより発生していると考えられる。

B: 温度が直線的に上昇している最終近辺での状態

全体的に強く当たりが発生する。

C: 温度が二次的に上昇している途中での状態

より強い当たりが全体的に発生するが、A, Bの当りは上流, 下流ともに引っかき傷のような状態であるのに対して、当り下流部分でのオーバーレイの塑性流動による流れが明確に観察される。これはオーバーレイの熔融温度以前に発生している現象であり物理的に塑性流動していることを示している。

D: トルククラッチ切断後の状態

オーバーレイの熔融による流れが発生する。

これらのことから、温度上昇が直線的な範囲では軸受しゅう動面のメタルコンタクトによる当りが進行するとともに温度は荷重に対し直線的に上昇し、B点を境として温度が二次的に上昇しオーバーレイの塑性流動が発生するものと考えられる。

次にさまざまな条件での焼付き発生状況を調べるために Fig.9 に油温, メタルクリアランス, 軸回転数を変化させたときの荷重に対する滑り面温度の変化を示す。

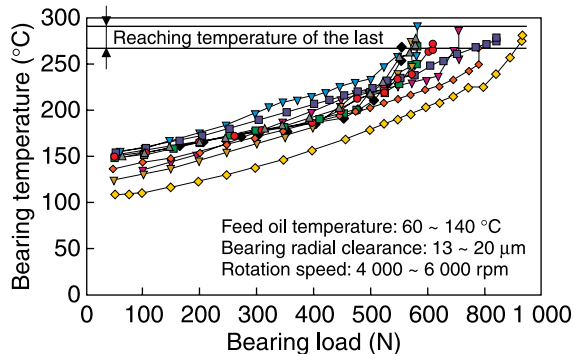


Fig.9 Parametric study of oil temperature, radial clearance and rotation speed on Pb bearing

同一荷重でもパラメータの影響により測定温度に差が生じている。焼付き発生荷重はそれぞれ異なるものの、最終的な到達温度は全て一定の温度範囲に達していることがわかる。これは最表面層のオーバーレイの融点に対応しているものと考えられる。

4.2. アルミニウム合金軸受の焼付き特性

Fig.10 はアルミニウム合金軸受の焼付き発生に到るしゅう動面温度の測定結果を示す。Fig.11 は鉛合金軸受と同様にしゅう動面の当りの特徴を観察した模式図である。

A: 温度が直線的に上昇している最終近辺での状態

全体的に強く当たりが発生する。これは鉛合金軸受の場合と同様である。

B: トルククラッチ切断後の状態

鉛合金軸受の場合には表面オーバーレイが溶融した様相を呈するのに対し、中央縦傷の部分で表面がささくれ立ったしゅう動アルミニウム合金の凝着による流れが発生する。

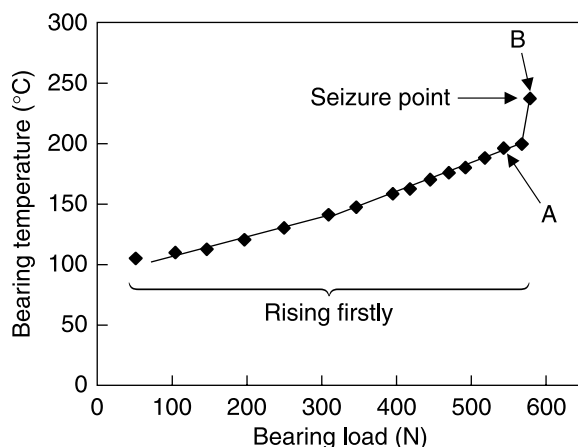


Fig.10 Temperature process of the Al bearing

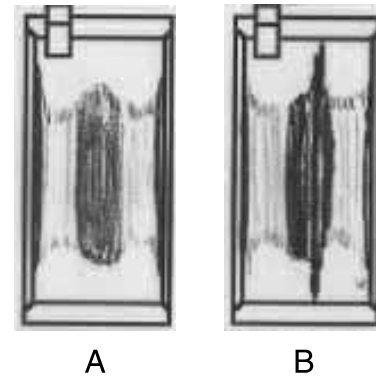


Fig.11 Characteristic of bearing surface of Al bearing

Fig.12 に回転数, 油温, メタルクリアランスをパラメータとして変化させた時の焼付きに到る過程を示す。

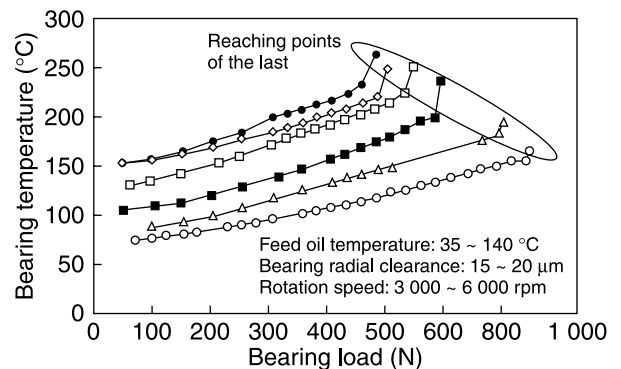


Fig.12 Parametric study of oil temperature, radial clearance and rotation speed on Al bearing

鉛合金軸受と比較すると、アルミニウム合金軸受は荷重に対して

1. 一次の温度上昇が終わると直ちに焼付くこと、
2. アルミニウム合金の融点と関係無く軸との凝着が発生すること、
3. 焼付き限界荷重は滑り面温度と相関性がないことがわかった。

5. 焼付き原因の解析

5.1. 計算条件

焼付き原因を解析するために実験条件を入力値(荷重, しゅう動面温度)とした軸受油膜計算を行った。

計算方法は剛体軸受計算で mobility 法⁽⁷⁾を使った。実験上の軸側給油穴, レモン形状, リーフ形状は考慮していない。

Fig.13 に計算入力のための読取りポイントを示す。

鉛合金軸受は Fig.13(a) において温度が二次的に上昇する前の立上り始めの値を使った。これは温度が二次的に上昇する原因を把握するためである。

アルミニウム合金軸受は温度が急激に立上がり焼付きが発生する直前での値を使った。

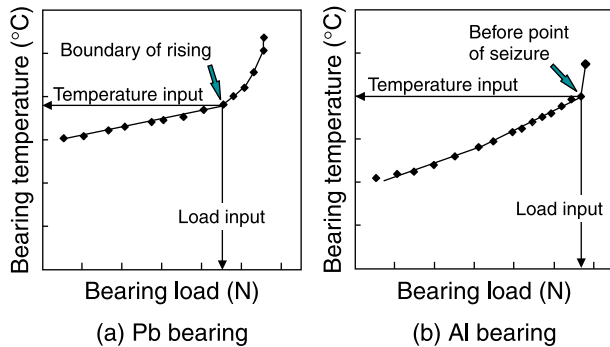


Fig.13 Definition point of calculation

5.2. 計算結果

Fig.14 に軸受油膜計算結果を示す。図中に標準の鉛合金材料と In(インジウム)を添加することにより標準の鉛合金材料よりもオーバーレイを軟質化した Pb + In 材の2種類の鉛合金材料を追加で示した。

Table 2 に実験を行なった軸受表面の硬さを示す。

Table 2 Bearing surface hardness

Material	Scale	Value
Pb bearing	HMV10g	13 ~ 17
Pb + In bearing	↑	10 ~ 13
Al bearing	HV5g	42

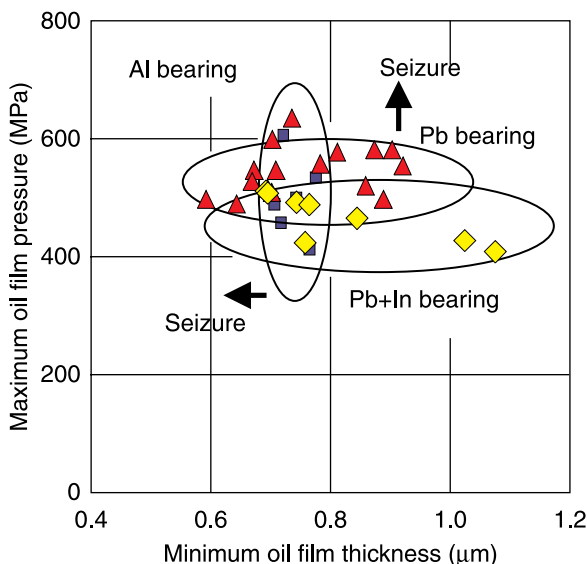


Fig.14 Calculation result

横軸に最少油膜厚さ、縦軸に最大油膜圧力として整理を行うと、鉛合金軸受は横並びの分布を示し、アルミニウム合金軸受は縦並びの分布を示すことがわかる。

これは鉛合金軸受の場合、最大油膜圧力が過大になるとオーバーレイの塑性流動が発生することによって温度が二次的に上昇し焼付きに到ることを示している。

また、Inを添加して軟質化した軸受の方がより低い最大油膜圧力でオーバーレイの塑性流動が発生していることも上記の焼付き原因を裏付けるものである。

6. まとめ

従来の軸受単体試験装置の問題点と試験モードの改良を行なうことにより軸受焼付きメカニズムの一端を定量的に明らかにすることができた。

1. オーバーレイ付き鉛合金の軸受材料は軸と軸受の間に発生する最大油膜圧力によってオーバーレイの塑性流動が発生し焼付きに到ると考えられる。
2. アルミニウム合金の軸受材料は軸受表面に鉛合金材料のように軟質のオーバーレイが無いため油膜圧力に対する限界性は示すことはなく、最少油膜厚さに対する限界性を示し焼付きに到ると考えられる。

油膜厚さの幅広い範囲で最大油膜圧力に対して限界性を示すということは最大油膜圧力が軸受を設計する上で最小油膜厚さとともに焼付き限界を定める判断指標となり得ることが明らかになった。

参考文献

- (1) 松久博一, 山本康一, 坂本雅昭, 田中正: 高速高荷重エンジンにおける三層滑り軸受の焼付き限界向上, トライボロジスト, Vol.39, No.9, p.792-799 (1994)
- (2) 橋爪克幸, 熊田喜生, 木村好次: エンジン用マイクログループすべり軸受の性能, 自動車技術会学術講演会前刷集 955, p.117-120 (1995)
- (3) 熊田喜生, 橋爪克幸, 木村好次: マイクログループすべり軸受特性の研究(第二報), 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集(金沢 1994-10), p.289-292
- (4) 道岡博文, 不破良雄, 石川日出夫, 野村謙太郎: 高面圧軸受材料の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 955, p.121-124 (1995)
- (5) Higuchi,T., Sato,Y., Yamada,T., and Ozaki,K.: A Study of Three Layer Copper-Lead Bearings Without Nickel Barrier, SAE paper 970214
- (6) Fujisawa,Y., Tsuji,M., Narishige,T., and Machida,K.: Application of Crystal-Orientated Lead Alloy Electrodeposits to the Overlay of Bearings, and Studies on Increasing Plane Bearing Performance, SAE paper 932902

- (7) Booker, J.F.: Dynamically-Loaded Journal Bearings:
Numerical Application of the Mobility Method,
Transactions of the ASME, p.168-176 (JANUARY 1971)

■ 著 者 ■



町田 恭一



牧野 克紀



佐藤 謙次