

エンジン用すべり軸受を用いた低周速条件での性能限界に関する研究

Analysis of Operational Limits of Engine Journal Bearings Under Low-Circumferential Speed Conditions

大同メタル（正）*幸島 元彦 大同メタル（正）永田 真理 大同メタル（正）櫻井 真一

Motohiko Koushima*, Mari Nagata*, Shinichi Sakurai*

*Daido Metal Co., Ltd.

1. 背景と目的

気候変動が解決すべき社会課題となっている中、省エネルギー化のために摺動部の摩擦低減技術の重要性は増している。摺動部の摩擦低減には、軸と軸受間の摩擦を低減させるほか、軸受性能を見極め、摺動面積を減らす手法が採られる。そのため性能予測の重要性が増しており、理論解析技術も進化を続けている。理論解析は、試験結果との比較で行われることが多い。試験は、板などの基礎的な摺動試験や、軸受形状で行われる単体試験、実機を用いた実機試験などで行われる。しかし、基礎的な摺動試験においては、実際に使われる条件と異なるところで行われていることが多い。経済協力開発機構（OECD）の工業材料摩擦研究グループによってまとめられたソロモン線図¹⁾によると、周速 1.5m/s を境に焼付きの様相が異なっている。これは、点接触による実験結果であり、軸受の摺動形態（面接触）では同様の様相を示すか、確認ができていない。そこで本研究では、半割形状のエンジン用すべり軸受で試験を行い、損傷に至る過程を観察、考察して、ソロモン線図の結果との比較を行った。

2. 試験方法

2.1 試験片

供試材は、軸方向端面を平滑にし、試験による軸受の軸方向への形状の変化を測定できるようにした。端面の平滑加工は、湿式エメリー紙で研磨後に、アルミナを使い鏡面に仕上げた。自動車用のエンジン軸受として広く使われている Al-Sn-Si 合金軸受を使用した。

2.2 計測項目

試験中に計測した項目は、回転数、トルク（摩擦係数）、試験荷重、給油温度、排油温度、軸受温度（主荷重部の軸方向両端で計測）、AE 信号、接触電気抵抗などである。接触電気抵抗は、既報²⁾と同様の方法で油膜形成率として整理した。油膜形成率 1 の時が完全に浮上している状態、0 の時が接触している状態を表している。

2.3 試験条件

2.1 の手順で作製した試験軸受を軸受の単体試験機に組付け、試験回転数に到達後、20 秒ごとに 3.8kN 試験荷重をあげた。使用した試験機は ISO21866-1 に紹介されている試験機と同一のものである。軸受の背面温度が 200℃を超えた時、もしくは 100Nm を超えた時に試験機を停止させた。最大 94kN まで荷重を加え、この荷重まで損傷が発生しなかった時も試験機を停止させた。軸と軸受の間のクリアランスは 60 μ m とした。軸受は幅 5 mm、外径 56 mm、肉厚 1.5 mm（合金層 0.3 mm、裏金 1.2 mm）のものを使用した。試験機の最大荷重に制約があるため、性能限界を確認できるように軸受幅は 5 mm としている。潤滑油は 10W-30 のディーゼルエンジンオイルを使用し、給油温度 50℃、給油圧 0.1MPa とした。回転数は 90rpm（周速 0.25m/s）、900rpm（周速 2.5m/s）とした。

3. 試験結果

Figure 1 は、横軸に試験の経過時間、縦軸に、試験中の接触電気抵抗測定結果から得られた油膜形成率、試験荷重、トルクから換算した摩擦係数、軸受温度、排油温度、給油温度の変化を示した。周速が遅いため、油膜の形成状況は良くなく、油膜形成率は、2.5m/s の条件でも 0.5-0.8 前後であり、荷重の増加とともに低下している。周速 0.25m/s の条件では、荷重が低い時で 0-0.3 程度、荷重が高くなると 0-0.2 程度であった。摩擦係数は、周速 2.5m/s の条件では、右下がりの傾向が続いており、流体潤滑下にあるものと考えられる。一方で周速 0.25m/s の条件では、荷重の低いところで摩擦係数の変化点があり、荷重の増加とともに摩擦係数が増加していることから、混合潤滑の条件にあったものと考えられる。いずれの周速条件でも摩擦係数が急激に立ち上がっており、この時軸受温度も急上昇していた。試験後の軸受は、内面が著しく荒れており、再使用できるような状態ではなかった。したがって、焼付きが生じたと判断される。排油温度に着目すると、軸受の温度の上昇に伴い、増加していた。軸受の使用状況（性能に対する過酷さ）を知る指標として、有効と考える。

Figure 2 にアコースティックエミッション信号（AE 信号）の計測結果から算出された荷重に対する RMS 値の変化を示す。RMS 値は、試験荷重の変化とともに上昇している。AE 信号の RMS 値は塑性変形と関係があり³⁾、軸受到塑性変形が生じている事を示唆している。周速 2.5m/s の条件では、軸受温度が上昇し、軸受合金の強度が低下して、著しい塑性変形が生じ、焼付きに至ったものと考えられる。

周速 2.5m/s の条件で荷重を 42kN で試験機を停止させ、軸受合金の変形を確認した。Figure 1 の焼付き試験結果から

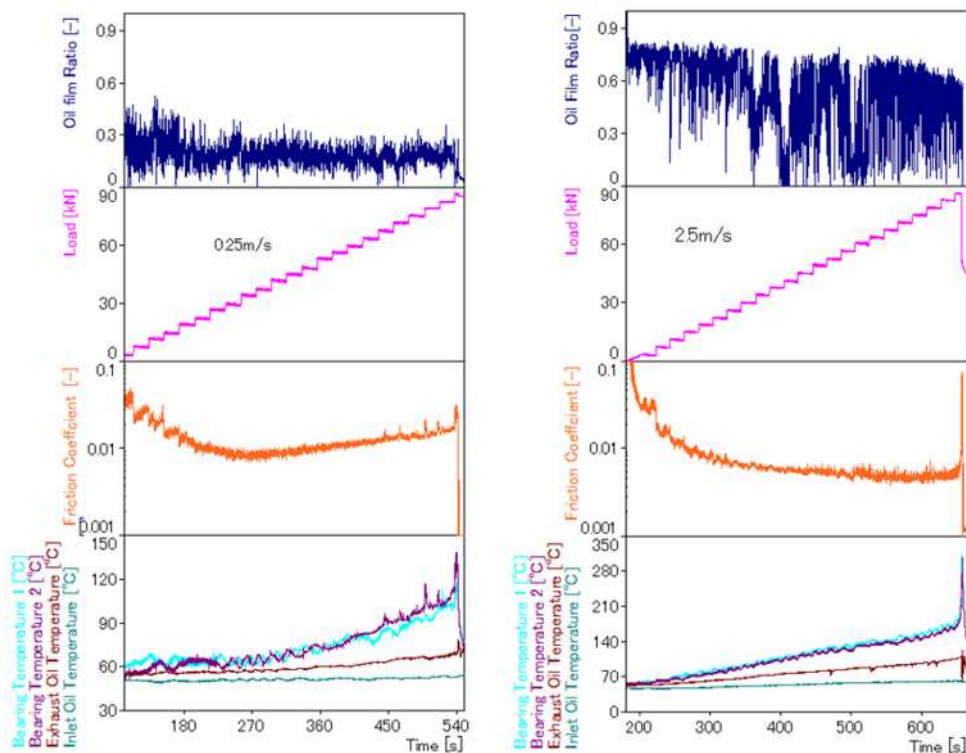


Fig.1 Measurement results during the test (left: 0.25m/s, right: 2.5m/s)

焼付きが発生する荷重に対し中間付近の荷重とした。Figure 3 は、レーザー顕微鏡で高さ変化を観察した結果である。試験前には軸受側面（裏金と合金）を平坦に仕上げた。試験後の合金は、裏金の端面より軸方向へ $10\mu\text{m}$ 以上の変形（凸形状）がみられる。試験時間の経過とともに増加する試験荷重に対して、油膜を介して合金が塑性変形したと考えられ、Fig.2 の AE 測定結果で示唆される結果と同様であった。小川⁴⁾は、運転中の油膜圧力によって、軸受合金の塑性変形の発生の可能性を指摘し、塑性変形を考慮した計算を行っている。油のせん断発熱により軸受の温度が上昇し、軸受合金の強度が低下すれば、塑性変形の発生も考えら

れる。今回、計測ができたのは軸方向への変形のみであるが、肉厚方向、円周方向にも塑性変形により形状の変化が起きている可能性が高い。よって、軸受の性能計算を行う際にも、このような形状の変化を加味しなければ、正確な予測を困難にするものと考えられる。

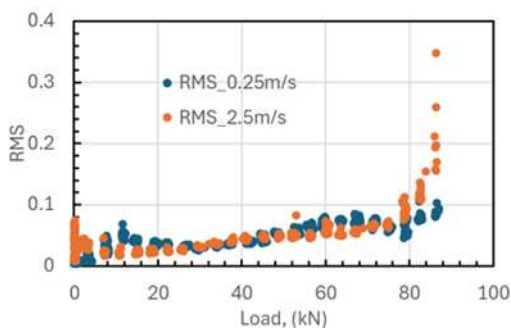


Fig.2 Relationship between test load and RMS value of AE signal

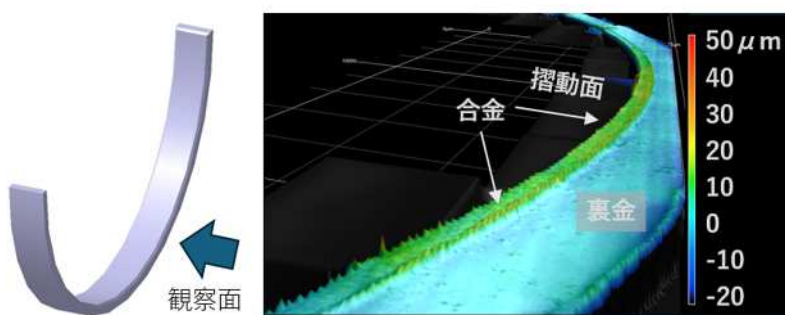


Fig.3 Measurement results of the axial deformation of the bearing at a circumferential speed of 2.5 m/s using a laser microscope

4. まとめ

Al-Sn-Si 系のエンジン軸受を用いた今回の試験条件においても、Salomon 線図のように周速 0.25m/s では境界・混合潤滑を経た二段階の遷移により焼付きに至り、周速 2.5m/s の条件では流体潤滑から境界・混合潤滑を通過するが熱暴走状態にあるため潤滑状態を維持できずに焼付きに至った。AE 信号や排油温度の変化が、損傷の兆候を示す有効な指標となる可能性がある。軸受合金は流体潤滑下において塑性変形により形状変化が生じており、本試験条件の範囲では塑性変形を考慮しないと性能予測に影響する。

文献

- 1) G. Salomon: Failure criteria in thin film lubrication — the irg program, Wear, 36, 1 (1976) P.1-6.
- 2) M. Koshima, T. Tamura, H. Itoigawa and M. Nagata: A new real-time condition monitoring method for engine bearings, CIMAC CONGRESS 23, June, (2023) No.295.
- 3) 岸輝雄: AE 技報の現状と将来, 軽金属, Vol.31, No.4, (1981) P266.
- 4) 小川 靖之: ジャーナル軸受の軸受面の塑性変形に関する数値的検討, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814(2014). DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0174