

# アルミニウム青銅多孔質材料のトライボロジー特性に及ぼす潤滑油の酸化劣化の影響

## Effects of Oxidative Deterioration of Lubricating Oil on Tribological Characteristics of Aluminum Bronze Porous Materials

○正 吉田 浩之<sup>\*1</sup>, 金子 覚<sup>\*2</sup>

田浦 裕生<sup>\*3</sup>, 境野 恵理<sup>\*1</sup>

Hiroyuki YOSHIDA <sup>\*1</sup>, Satoru KANEKO <sup>\*2</sup>,

Hiroo TAURA <sup>\*3</sup> and Eri SAKAINO <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 株式会社ミツバ MITSUBA Corporation

<sup>\*2</sup> 三条市立大学 Sanjo City University

<sup>\*3</sup> 近畿大学 KINDAI University

In recent years, there has been a demand for technology for achieving carbon neutrality. To meet this demand, technologies such as reduction of production energy, weight reduction of raw materials, and recycling have been studied for vehicle on-board electrical equipment. Aluminum bronze, which is one of the metal materials with low melting point and low density, has the properties that facilitate achievement of carbon neutrality. In this study, a porous aluminum bronze material was used for sliding parts, and a pin-on-disk friction test and a chemical analysis were conducted with the sliding material oxidized in a high temperature atmosphere. The effect of the exposure time of the sliding material on the tribological (friction) characteristics was experimentally investigated. The results showed that the viscosity of the lubricating oil impregnated in the porous aluminum bronze material was significantly changed with the exposure time, affecting the friction characteristics. Moreover, the oxidation product of this lubricating oil was adsorbed on the surface of the sliding part material, and resulted in a marked change of the friction characteristics.

**Key Words** : Aluminum bronze, Porous materials, Tribological characteristics, Oxidation product, Solubility parameter

### 1. 緒 言

カーボンニュートラルの達成に向け、車載電装品では軽量化、材料、生産エネルギーの削減、原材料のリサイクル化など数多くの新技術が検討されている。アルミニウム青銅は、強度があり、硬さも高く、耐食性、耐熱性、耐摩耗性に優れており、また、低融点、低密度金属であることからカーボンニュートラル達成のための材料として期待されている。車載電装品に用いられる部品材料には軽量化、低コストの観点から機構の簡素化が求められる。これらの要求に対応できる材料のひとつとして、アルミニウム青銅の多孔質体は着目されている。先行技術としては耐食性の良いアルミニウム青銅多孔質体の焼結含油軸受が既に一部で使用されている。一方で、初期的な耐食性および耐摩耗性の評価<sup>(1)</sup>はされているものの、耐久性（潤滑油の劣化）を考慮したトライボロジー（摩擦）特性解析の研究は著者らが知る限り無い。

そこで本研究は、アルミニウム青銅の多孔質体をしゅう動材に用いて、恒温環境下に一定時間放置し、多孔質体に含浸された潤滑油を時間とともに劣化させ、その劣化状態がトライボロジー特性に及ぼす影響を実験的に解析し、従来品であるスズ青銅の結果と比較することで、アルミニウム青銅の特徴を明らかにする。

### 2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。自由に回転できるアーム先端に設置したライダ（固定面）を回転ディスク（運動面）に押し付けてしゅう動される構成である。ライダは軸受鋼 SUJ2 製で、しゅう動面は半球面形状である。

アームは中間部の支点により、押し付け方向と水平方向の回転が可能である。ピンと反対側の端に取り付けられたバランス重りが無荷重の状態にしたのち、ピンの上部より分銅を用いて静荷重を負荷した。またアーム側面に取り付けられたピンを介してロードセルにより回転方向のトルクを測定した。ライダと回転ディスク間の電圧  $V_c$  を図2の回路を用いて測定した。得られた  $V_c$  より、分離度  $\tau (=V_c/V_a)$  を計算した。ここで  $V_a$  ( $\approx 1.0V$ ) はライダとディスクが非接触時の二面間の電圧で、 $\tau=1$  で絶縁状態、 $\tau=0$  で常時通電状態である。

表1, 2にそれぞれライダとディスクの仕様を示す。回転ディスクはアルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質体であり、表の範囲内で透過率が異なるディスクで実験を行った。ディスクは事前に潤滑油を真空中で含浸させた。表3に摩擦試験の条件および試験油の成分を示す。本研究では各条件において  $n=3$  回繰り返し測定し、計測データの平均値を実験値として用いた。得られた結果は、軸受特性数  $S (= \eta UL/W)$  を用いて整理する。

実験では事前に、潤滑油を含浸したアルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質体の回転ディスクを  $100^\circ C$  に設定した恒温槽内でしゅう動表面が露出されるように放置した。一定時間後 (0h, 96h, 250h, 500h, 750h, 1000h) に取り出し、摩擦試験機に取り付けて試験を行い、摩擦係数  $\mu$  および分離度  $\tau$  と軸受特性数  $S$  との関係性を求めた。その際  $S$  の値を変化させるために、荷重  $W$  と回転速度  $U$  をそれぞれ2つの条件で変化させた。この一連の実験は、 $W$  と  $U$  の低い値から増加させる方法で行った。 $\mu$  および  $\tau$  と  $S$  との関係性を求めたのち、ヘキサン (98vol%) とアセトン (2vol%) の混合溶媒を用い、回転ディスク内の潤滑油を抽出したのち、混合溶媒を取り除いたものを、回転粘度計 (Brookfield 製 DV-III ULTRA) を用い粘度測定を行った。本文中の  $S$  値の計算では抽出油の  $\eta$  値を使用した。また、粘度測定後の抽出油の全酸価分析を行った。

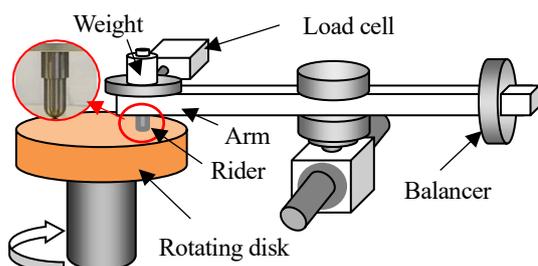


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

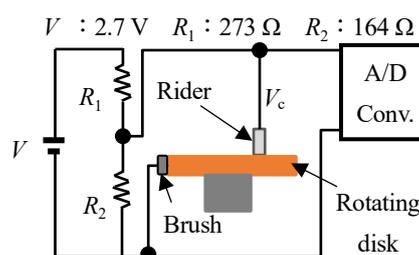


Fig.2 Measurement circuit

Table 1 Specifications of rider

Rider material	SUJ2
Curvature radius $R$ [mm]	2.8
Length $L$ [mm]	5.6
Width $B$ [mm]	5.6
Roughness $R_a$ [ $\mu m$ ]	0.02
Vickers hardness HV	780

Table 2 Specifications of disks

Disk material	• Aluminum(10mass%) bronze • Tin(10mass%) bronze
Diameter [mm]	40
Thickness [mm]	8.0
Permeability $k$ $10^{-13}$ [ $m^2$ ]	0.05~2.3
Relative density [%]	76~88

Table 3 Experimental conditions

Applied load $W$	0.5(DRY), 1.0, 1.5(WET) [N]
Disk rotating speed $U$	0.11, 0.23 [m/s]
Lubricating oil	PAO (Base oil)
Viscosity $\eta_0$	0.34 [Pa · s] (@25°C)

### 3. 結果及び考察

#### 3・1 放置後のトライボロジー特性（摩擦係数）

図3, 4に放置時間でまとめた $\mu$ と $S$ との関係を示す. 図3はアルミニウム青銅, 図4はスズ青銅の結果である. アルミニウム青銅の $\mu$ は, 測定した $S$ の範囲内において, 放置時間とともに上昇の傾向を示す. またその傾向は放置時間が500h以上で顕著になる. 一方, スズ青銅の $\mu$ は, アルミニウム青銅と異なり測定した $S$ の範囲内において, 放置時間とともに低下の傾向を示す. 一般に, ライダと回転ディスク間に十分な厚さの流体膜が形成されていれば, 放置時間に関係なく $\mu$ は $S$ により一つの曲線として整理される<sup>2)</sup>. しかし, 本実験のように回転ディスクが外部より給油されない状態で運転される場合は, ライダと回転ディスク間に十分な厚さの流体膜が形成されず流体潤滑と境界潤滑とが混在する混合潤滑状態での運転となる. 今回の結果ではライダと高温放置されたアルミニウム青銅およびスズ青銅の回転ディスク間の $\mu$ は $S$ により整理できないことは明らかであり, 流体粘度 $\eta$ 以外にも, しゅう動面の物性変化の存在が示唆された. そこで次項より, トライボロジー特性のパラメータである潤滑油（流体潤滑膜）および回転ディスク表面（境界潤滑膜）の状態を検討する.

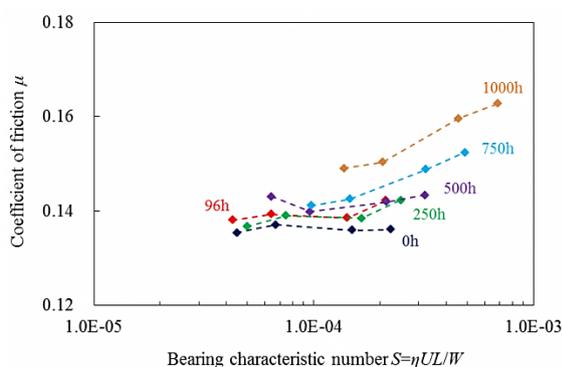


Fig.3 Relationship between the coefficient of friction  $\mu$  and bearing characteristic number  $S$  of aluminum-bronze

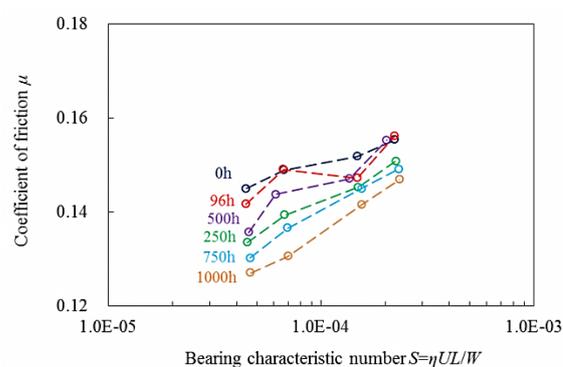


Fig.4 Relationship between the coefficient of friction  $\mu$  and bearing characteristic number  $S$  of tin-bronze

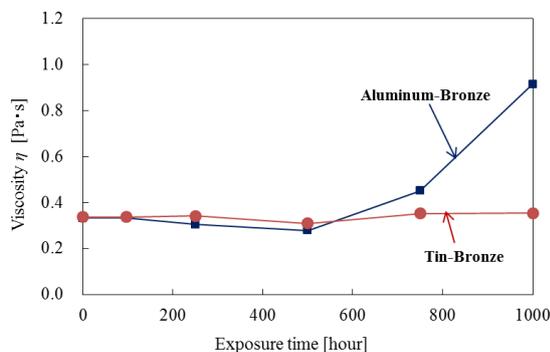


Fig.5 Viscosity  $\eta$  versus exposure time

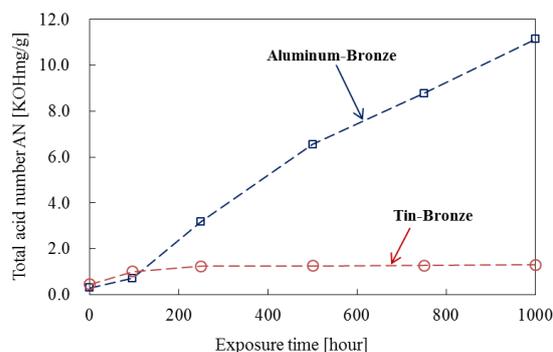


Fig.6 Total acid number AN versus exposure time

#### 3・2 抽出油粘度と回転ディスク表面の状態

図5, 図6にそれぞれ一定時間放置後の回転ディスクの抽出油粘度 $\eta$ および全酸価AN (JIS K2501に準じる)と放置時間との関係を示す. 放置時間の500h以上の経過でアルミニウム青銅の $\eta$ は増加の傾向を示す. 一方, スズ青銅の $\eta$ は放置時間1000hまでは概ね一定値を示す. アルミニウム青銅のANは放置時間の経過とともに概ね一定の割合で増加する. 一方, スズ青銅のANは, 放置時間1000hまでは概ね一定値を示す.

次に、潤滑油抽出後の回転ディスクの表面を電界放出型走査電子顕微鏡 FE-SEM (JEOL 製 JSM-7900F, 加速電圧 5kV, 測定範囲 100×100μm) およびエネルギー分散型 X 線分析装置 EDS を用いて、酸化物の主元素である炭素 C (潤滑油中の成分) と酸素 O (大気中の成分) との質量濃度-con.を分析した. 図 7, 図 8 に各回転ディスク表面の C-con および O-con.と放置時間との関係を示す. アルミニウム青銅の場合, C-con.は, 放置時間 500h まで概ね一定値 3mass%を示すが, その後は放置時間とともに増加する. 一方, スズ青銅の場合, 放置時間の経過とともに概ね一定の割合で増加する. O-con.は, アルミニウム青銅では, 放置時間 1000h までは概ね一定値 (7~8mass%) を示す. 一方, スズ青銅では, 放置時間の経過とともに概ね一定の割合で増加する.

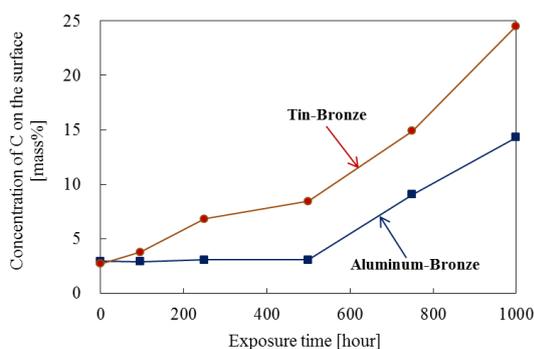


Fig.7 Concentration of carbon on the surface versus exposure time

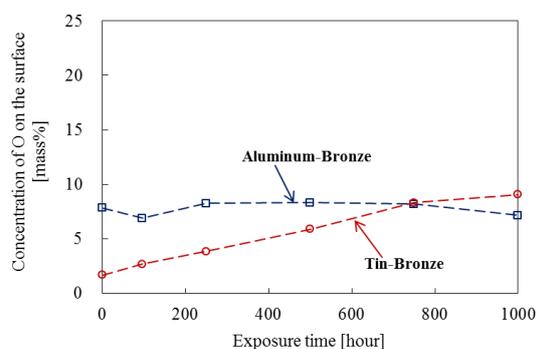


Fig.8 Concentration of oxygen on the surface versus exposure time

### 3・3 含浸油抽出後の回転ディスクのトライボロジー特性 (分離度)

潤滑油抽出後の回転ディスクを用いて, 潤滑油がないドライ環境下における  $\tau'$  の値を実験的に測定し, 流体膜以外の潤滑膜の状態が  $\tau'$  に及ぼす影響を検討する. 図 7 および図 8 にそれぞれアルミニウム青銅の場合とスズ青銅の場合の  $\tau'$  と軸受特性数  $S'=\eta_1 UL/W$  との関係を示す. なお, ここでは  $\eta_1$  は気体粘度  $1.8 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$  としている. アルミニウム青銅の各放置時間のライダと回転ディスクの  $\tau'$  は  $\tau'=0.08 \sim 0.13$  の値を示す. 一方, スズ青銅では, 0h の  $\tau'$  値が最も低く, 96h で上昇し, 96h から 750h まで概ね一定値を示した後, 1000h で再び上昇する.

本結果と 3・2 項の結果からドライの環境下ではアルミニウム青銅の回転ディスク表面はスズ青銅に比べ, 酸化による変化が小さく長時間安定した通電 (表面) が維持される.

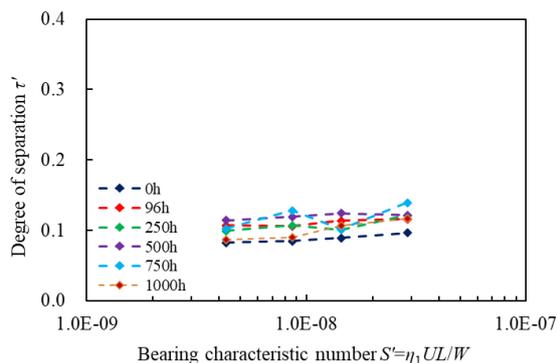


Fig.9 Relationship between the degree of separation  $\tau'$  and bearing characteristic number  $S'$  of aluminum-bronze

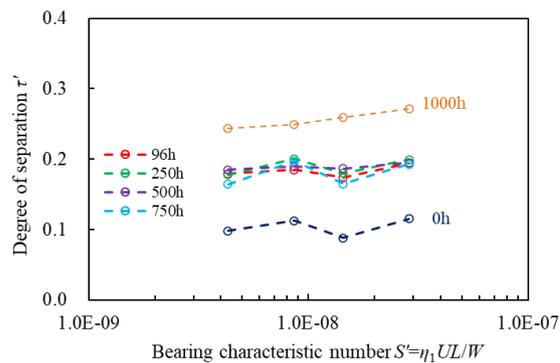


Fig.10 Relationship between the degree of separation  $\tau'$  and bearing characteristic number  $S'$  of tin-bronze

### 3・4 全酸価 AN (潤滑油劣化のパラメータ) および境界潤滑膜とトライボロジー特性

図 11 および図 12 に潤滑油の劣化のパラメータ AN および回転ディスク表面の境界潤滑膜の生成パラメータである C と O の総質量濃度 C,O-con. と  $\mu$  (図 3, 4 で使用した各放置時間の 4 つの値の平均値) および  $\mu'$  (3・3 項目の条件での各放置時間の 4 つの値の平均値) との関係を示す. アルミニウム青銅の  $\mu$  および  $\mu'$  は AN および C,O-con. の両者の影響を受け,  $\mu$  および  $\mu'$  はそれぞれ AN および C,O-con. の線形関数で近似される. 一方, 図 5, 図 6 に示すように潤滑油の性状変化(酸化劣化)の少ないスズ青銅の摩擦係数  $\mu'$  はおもに C,O-con. に影響を受け,  $\mu'$  は 10mass%以下の範囲では C,O-con. の増加とともに低下し 10~35mass%付近の範囲では概ね一定値となる.

これらのことから, 図 3 に示したアルミニウム青銅での放置時間の経過にともなう  $\mu$  の上昇は潤滑油の酸化劣化に起因し, 図 4 に示したスズ青銅での放置時間にともなう  $\mu$  の低下は回転ディスク表面酸化により生成する C, O を主成分とする潤滑膜によるものと推定される.

よって, アルミニウム青銅の多孔質材の放置時間の経過にともなう潤滑油の酸化劣化を抑えることができれば, トライボロジー特性変化の少ない長寿命のしゅう動材料として使用できる可能性が示唆された.

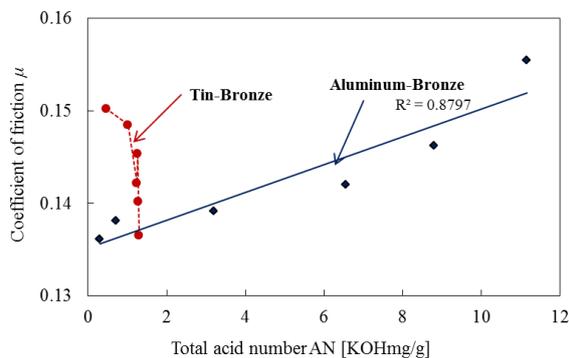


Fig.11 Total acid number AN versus coefficient of friction  $\mu$

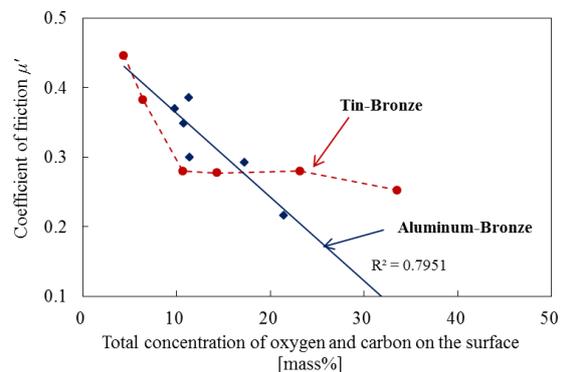


Fig.12 Total concentration of oxygen and carbon on the surface versus coefficient of friction  $\mu'$

#### 4. 結 言

アルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質材をしゅう動部に用い, 100°C恒温環境下に一定時間放置し, 多孔質に含浸された潤滑油を時間とともに劣化させ, その劣化の状態がアルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質材のトライボロジー特性に及ぼす影響を実験的に調べた結果, 以下の知見が得られた.

1. アルミニウム青銅の  $\mu$  は, 放置時間とともに上昇の傾向を示す. またその傾向は放置時間が 500h 以上で顕著になる. 一方, スズ青銅の  $\mu$  は, アルミニウム青銅と異なり, 放置時間とともに低下の傾向を示す.
2. 放置時間の経過とともにアルミニウム青銅に含浸された潤滑油は劣化され  $\eta$  および AN の増加を示す. 一方, スズ青銅に含浸された潤滑油の劣化は見られず,  $\eta$  および AN は概ね一定値を示す.
3. 各放置時間に関係なくアルミニウム青銅の場合, 潤滑油抽出後の分離度  $\tau$  は概ね一定値を示す. 一方, スズ青銅では, 放置時間の経過により  $\tau$  は上昇の傾向を示す (ただし, 変化の小さい時間帯を持つ).
4. アルミニウム青銅の  $\mu$  は AN と C,O-con. に, スズ青銅の  $\mu$  は C,O-con. に影響される.

#### 文 献

- (1) NTN, 自動車商品ガイドブック, CAT No.8027/JE.
- (2) Cameron, A., Morgan, V. T. and Stainsby, A. E., *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 176-28 (1962), 761.