

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 しゅう動表面の酸化の影響

Effects of Oxidation of Sliding Surface on Tribological Characteristics of Aluminum Bronze Porous Materials

○正 吉田 浩之^{*1}, 金子 覚^{*2}

田浦 裕生^{*3}, 境野 恵理^{*1}

Hiroyuki YOSHIDA^{*1}, Satoru KANEKO^{*2},

Hiroo TAURA^{*3} and Eri SAKAINO^{*1}

^{*1} 株式会社ミツバ MITSUBA Corporation

^{*2} 三条市立大学 Sanjo City University

^{*3} 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, oil-impregnated porous aluminum bronze and tin bronze were exposed to a high temperature for a long time, and both materials were examined for changes in their tribological characteristics and sliding surfaces with a pin-on-disk friction tester and a chemical analysis instrument. The findings in this study are that oxides of the impregnated oil are formed on the sliding surface of each oil-impregnated porous material exposed to a high temperature, and tin bronze shows larger amount of oxides than aluminum bronze, and the formation of oxides contributes to decreasing the friction coefficient.

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

1. 結 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、材料および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、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車載電装品の材料として期待されている。

アルミニウム青銅に関する先行研究として著者らは、しゅう動材にアルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質体を用い、高温度下に放置した多孔質体のトライボロジー特性について解析し、多孔質体に含浸された潤滑油の酸化とトライボロジー特性との関係を明らかにした⁽¹⁾。一方で、アルミニウム青銅の酸化とトライボロジー特性との関係については未だ不明な点が多い。

そこで本研究は、アルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質体をしゅう動材として用い、高温度下に一定時間放置し、放置時間とともに変化するしゅう動表面の酸化の状態とトライボロジー特性との関係を実験的に解析し明らかにする。

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。

表 1, 2 にライダー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、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°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 μ 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 4 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。本文中の S 値の計算では放置後のディスクからの抽出油粘度 (図 2) を用いた。

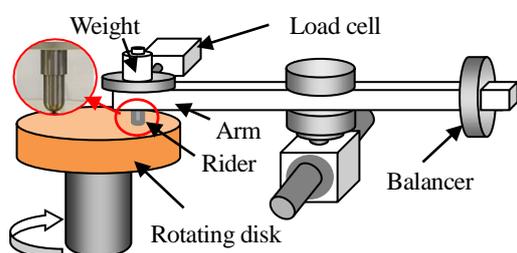


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

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 [μm]	0.02
Vickers hardness HV	780

Table 2 Specifications of disks

Disk material	<ul style="list-style-type: none"> Aluminum(10mass%) bronze Tin(10mass%) bronze
Diameter [mm]	40
Thickness [mm]	8.0
Permeability k 10^{-13} [m^2]	1.1~2.3
Relative density [%]	76

Table 3 Experimental conditions

Applied load W [N]	0.2, 0.5, 1.0, (1.5 WET)
Disk rotating speed U [m/s]	0.03, 0.11, 0.23, 0.34
Lubricating oil	PAO
Viscosity η_0 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	0.35 (@ 25°C)

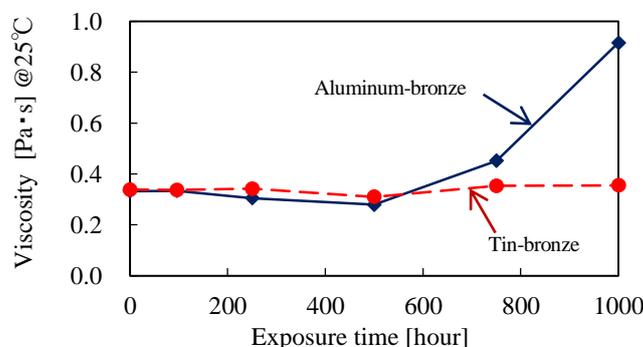


Fig.2 Viscosity η versus exposure time

3. 結果および考察

3・1 高温放置後のトライボロジー特性（摩擦係数）

図2は放置後の抽出油粘度 (@25°C) である。アルミニウム青銅に含浸された潤滑油は高温下での放置により酸化され⁽¹⁾、500h以降で粘度上昇を示す（潤滑油の酸化速度はスズ青銅よりも速い）。

図3, 4に放置時間でまとめた μ 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。測定した S の範囲内において、アルミニウム青銅の μ 値は、放置時間の増加にともないわずかながら低下の傾向を示す。この傾向はスズ青銅に比べ緩やかであり、 μ の安定性という点で優れている。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 μ は S により一つの曲線として整理される⁽²⁾。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 μ は S により整理できないことは明らかであり、流体粘度 η 以外に、回転ディスクしゅう動表面の状態の変化が示唆された。

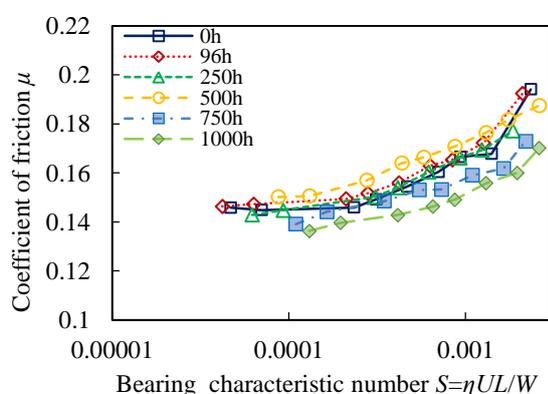


Fig.3 Relationship between the coefficient of friction μ and bearing characteristic number S of aluminum-bronze

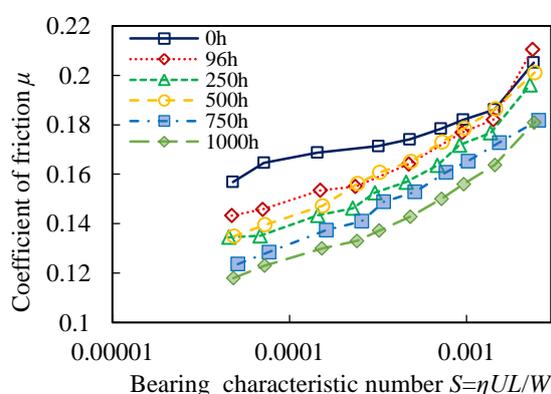


Fig.4 Relationship between the coefficient of friction μ and bearing characteristic number S of tin-bronze

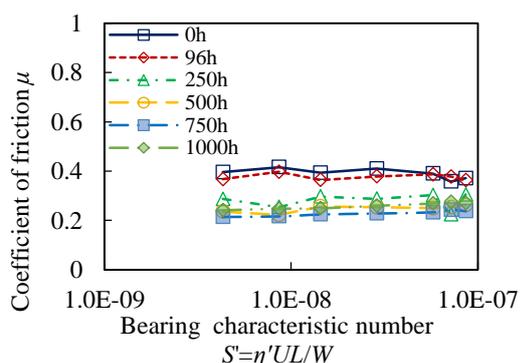


Fig.5 Relationship between the coefficient of friction μ and bearing characteristic number S' of aluminum-bronze

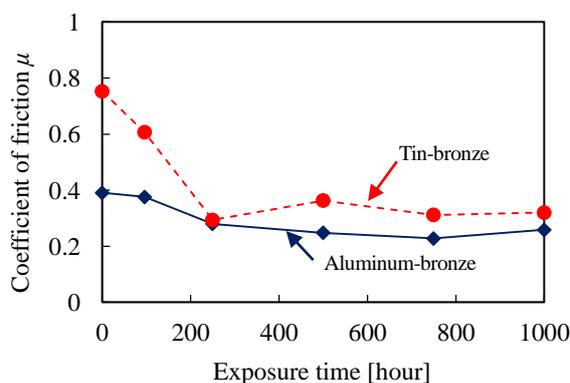


Fig.6 Coefficient of friction μ versus exposure time

3・2 境界潤滑状態での摩擦係数

回転ディスク内の潤滑油をヘキサン（98vol%）とアセトン（2vol%）の混合溶媒にて抽出し、3・1項と同様の実験（ W は0.2, 0.5, 1.0N）を行うことでDRY条件（境界潤滑状態）での μ を求めた。図5は放置時間でまとめたアルミニウム青銅の μ と $S'=\eta'UL/W$ （ η' : 気体粘度 $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ）との関係である。 μ は S' に依らず一定の値を示す。図6は放置時間毎の μ の平均値と放置時間との関係である。アルミニウム青銅の μ の平均値は放置時間

に依らずスズ青銅の μ の平均値よりも低く、変化は小さい。これらのことは、放置後のアルミニウム青銅とスズ青銅のしゅう動表面の状態の違いを示唆する。

3・3 回転ディスクのしゅう動表面の状態

アルミニウム青銅とスズ青銅の回転ディスクしゅう動表面の状態をFT-IR (Thermo Scientific 製 Nicolet iS10 FT-IR, Ge プリズム, ATR 法) 分析により測定する。図7, 8はアルミニウム青銅とスズ青銅の測定結果である。図中A (1800cm^{-1}) からB (1100cm^{-1}) の範囲は、 $-\text{CH}_2$ 基 (主に PAO 油由来), R-COO-基 (酸化劣化生成物由来) 等の有機化合物特有の振動スペクトル⁽³⁾である。図9にAからBの範囲の波形面積 (存在量) と放置時間との関係を示す。アルミニウム青銅において有機化合物特有の波形面積は狭く、また、放置時間の増加にともなう変化は小さい。

次に、同回転ディスクのしゅう動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 $100\times 100\mu\text{m}$) 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酸素の質量濃度 O-con.を測定した。図10はしゅう動表面のO-con.と放置時間との関係である。アルミニウム青銅のO-con.は、放置時間に依らず7~8mass%を示す (金属酸化物)。一方、スズ青銅のO-con.は、750h まで一定の割合で増加したのち (潤滑油の酸化による増加と推定)、アルミニウム青銅のO-con.と同じになる。

以上のことから、アルミニウム青銅およびスズ青銅の回転ディスク表面に生成した金属酸化物や潤滑油由来の酸化物は μ 値を低下させる因子のひとつといえる。

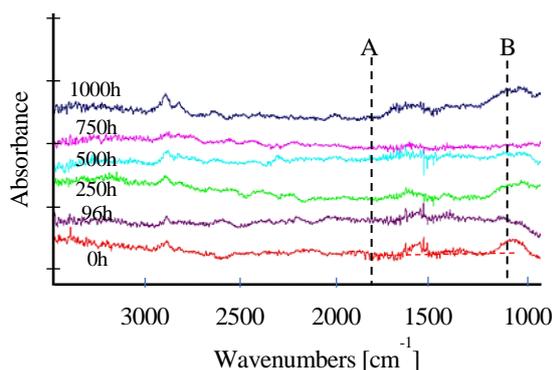


Fig.7 Infrared transmittance waveform of aluminum-bronze

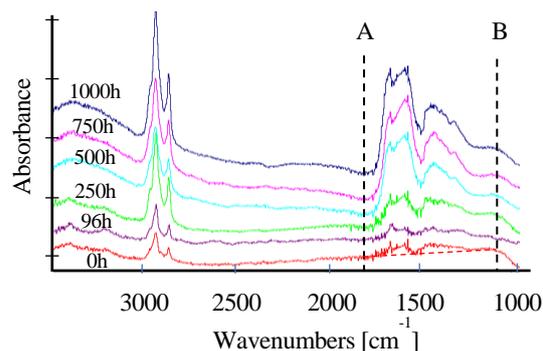


Fig.8 Infrared transmittance waveform of tin-bronze

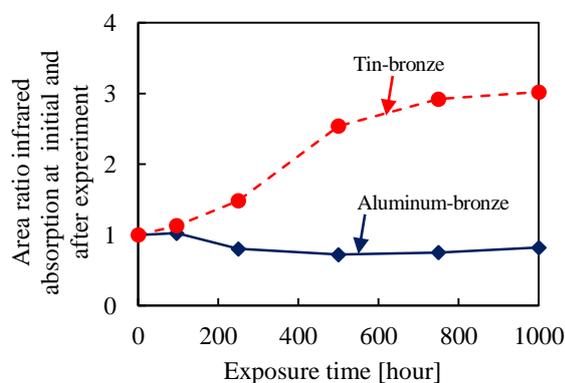


Fig.9 Area of infrared transmittance from 1000cm^{-1} to 1800cm^{-1}

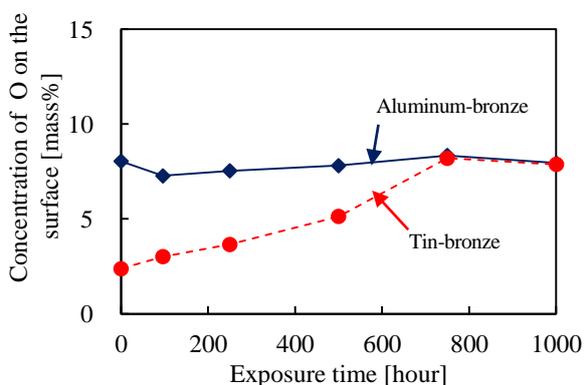


Fig.10 Concentration of oxygen on the surface versus exposure time

3・4 潤滑油と放置後の回転ディスクの接触角

回転ディスクしゅう動表面の潤滑油とのぬれ性（接触角 θ ）から、しゅう動表面の状態と μ との関係を検討する。図 12 は放置後のディスクに未使用潤滑油 5 μ L 滴下時の接触状態の代表例である。図 11 は図 12 の画像から求めた θ と放置時間との関係である。アルミニウム青銅の θ は放置時間に依らず概ね一定値を示す。一方、スズ青銅の θ は緩やかな減少傾向を示す。

しゅう動表面の酸化は接触角を減少させ（ぬれ性の向上）、混合潤滑状態における流体潤滑膜の修復性を向上させる（ぬれ性は潤滑油膜の修復性に影響する）⁽⁴⁾。このことから、一定の θ を示すアルミニウム青銅の潤滑油膜の修復性は変わらず、変化の小さい μ 値を示したものと推測する。

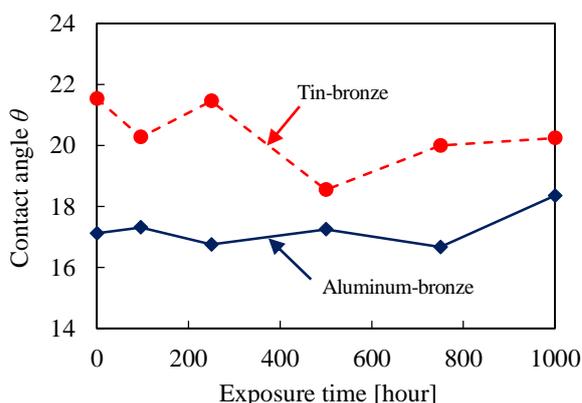


Fig.11 Contact angle θ versus exposure time

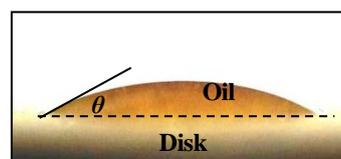


Fig.12 Contact angle θ

4. 結 言

アルミニウム青銅およびスズ青銅の多孔質体を用い、100 $^{\circ}$ Cの高温下にて一定時間放置し、含浸された多孔質体を時間とともに酸化させ、その酸化の状態が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. アルミニウム青銅およびスズ青銅の摩擦係数 μ は、測定した軸受特性数 S の範囲内において、放置時間の増加にともない低下する。また、その変化はアルミニウム青銅の方が小さい。
2. 境界潤滑状態でのアルミニウム青銅の μ 値はスズ青銅の μ 値に比べ放置時間に依らず低い。
3. アルミニウム青銅のしゅう動表面は初期から一定量の酸化状態が形成され、その状態が長時間維持される。一方、スズ青銅のしゅう動表面は放置により潤滑油に起因した酸化物が生成、放置時間の増加にともない生成物も増加する。
4. 回転ディスクしゅう動表面の酸化および潤滑油の酸化物の生成は μ 値を低下させる。

文 献

- (1) 吉田浩之, 金子覚, 田浦裕生, 境野恵理, “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”, [No.22-1] 日本機械学会 2022 年度年次大会 DVD-ROM 論文集 [2022.9.11-14, 富山大学].
- (2) Cameron, A., Morgan, V. T. and Stainsby, A. E., Proc. Instn. Mech. Engrs., 176-28 (1962), 761.
- (3) 堀口博, “赤外吸光図説総覧”, 三共出版, 第 9 刷 (2007), pp. 17,214.
- (4) 山本雄二, 兼田楨宏, “トライボロジー”, 理工学社, 第 1 刷(1998), pp.16-18.