

摺動用銅合金の高温環境下における摩擦摩耗特性

宮本勘史* 谷内大世* 鷹合滋樹* 藤井要*

摺動部品の高速化，高負荷化に対応した機械の使用拡大に伴って，高温環境における摺動部の摩擦摩耗特性の評価が注目されている。本研究では，アルミニウム系青銅合金を対象に，高温状態での測定が可能な試験機を用い，硬さと摩擦係数を評価し，摺動試験後の摩耗量を計測した。また，いくつかの銅系合金材料を対象として，摩擦係数および摩耗量の比較や，経時的に変化する摩擦面と発生した摩耗粉の観察を行った。その結果，温度の上昇に伴って摩擦係数および摩耗量は増加し，一方，硬さは減少する傾向がみられた。また，摩耗粉の大きさは摩耗が顕著となったとき粗大化しており，摺動状態の推察が可能であることが示された。

キーワード：銅合金，摩擦係数，摩耗，高温

Study on Friction and Wear Characteristics of Copper Alloys for Sliding Applications Under High-temperature Environments

Kanji MIYAMOTO, Taisei YACHI, Shigeki TAKAGO and Kaname FUJII

With the expansion of the use of machines that support higher speeds and loads, the evaluation of friction and wear characteristics of sliding parts in high-temperature environments has been attracting attention. In this study, aluminum-based bronze was used to evaluate the hardness and friction coefficient and to measure the amount of wear after sliding tests using a testing machine capable of measuring under high-temperature conditions. In addition, the coefficient of friction and the amount of wear were compared for several copper-based alloy materials, and the friction surfaces that changed over time and the wear debris generated were observed. The results showed that the coefficient of friction and wear increased with increasing temperature and that the hardness decreased. The size of the wear debris became coarser when the wear became more pronounced, and it was found that it was possible to infer the sliding condition.

Keywords : copper alloys, coefficient of friction, wear abrasion, high temperature

1. 緒 言

産業機械や建設機械などの摺動部品には銅合金が用いられることが多い。銅合金軸受などの部品では，摩擦係数が低いこと，摩耗量が少ないことが求められている。近年，使用環境の高速化，高負荷化による発熱による温度上昇，高温環境下での使用など，高温摩擦摩耗特性が注目されている^{1),2)}。しかし，室温での銅合金の摩擦係数，摩耗量を調査した例はあるが³⁾，高温環境下での摩擦係数，摩耗量の報告例はほとんどなく鉄系材料に限られている⁴⁾。本報告では，高温下での使用を目的とした銅合金を対象として，高温状態での測定が可能な試験機を用い，硬さと摩擦係数を評価し，摺動試験後の摩耗量を計測した。

また，摺動部品の状態監視し，適切に保全するには，

部品の劣化箇所やその程度を客観的に診断する必要がある。特に，摩耗量など劣化の程度の評価方法には部品の取り外し作業などが必要であり，多くのコストがかかる。したがって，簡便な試験によって摩耗の程度を見積もることができれば，より良い状態監視や保全につながると思われる。そのため，種類の異なる材質を対象に，摩擦係数，摩耗量を評価するとともに，経時的に変化する摩擦面と発生した摩耗粉の観察を行った。あわせて，摩耗試験で得られた摩擦係数および摩耗量と，摩耗粉の大きさの影響を考察した。

2. 試験方法

摩擦係数および摩耗量に及ぼす材質の影響を調査するため，表1に示す4種類の銅合金を用いた。アルミニウム系青銅合金の(CAC703)は高温環境での摺動材として一般に用いられており，本研究では25 °C，200 °C，

*機械金属部

400 °C, 600 °Cでの摩擦係数, 摩耗量の測定を行った。青銅合金(CAC403)および, 鉛青銅合金(CAC603)は一般に常温環境での摺動材に用いられており, 同材料の大きな違いは鉛(Pb)の有無である。比較材として, 配線機器などに用いられ, 摺動部材への利用は少ない黄銅合金のC2801を選択した。それぞれ25 °Cでの摩擦係数, 摩耗量の測定を行った。

実験に用いたボールオンディスク型摩擦摩耗試験機(THT・(株)アントンパール・ジャパン)を図1に, 試験条件を表1に示す。試験後に形状測定機(Form TalysurfPGI1200・テラー・ホブソン)を用いて, 試験片に形成された摺動円摩耗痕の断面形状を円の中心線上となる4か所を測定し, 摩耗断面積を算出した。摩耗量は摩耗断面積に摺動円の円周を乗じた値となるが, 摺動円の円周は同一であるため, 摩耗断面積を摩耗量として用いた。また, 試料の室温での硬さをマイクロビッカース硬さ試験機(HM-220D・(株)ミットヨ)を用いて試験力2.94 Nにて測定した。200 °C, 400 °C, 600 °C高温硬さは高温マイクロビッカース硬さ試験機(HTM-1200II型・(株)インテスコ)を用いて試験力4.9 N(0.5 kgf)にて測定した。また, 摩擦摩耗試験で発生した摩耗粉を電界放出型電子線マイクロアナライザ(JXA-8500FPlus・日本電子(株))にて, 摩耗痕を光学顕

表1 各試料の材質, 金属組織と主な使用用途

材質	金属組織	主な使用用途
CAC703	$\alpha+\delta$	軸受, ポンプ部品, 船用プロペラなど
CAC403	$\alpha+\beta$	軸受, ポンプ部品など
CAC603	$\alpha+\beta+\text{Pb}$	軸受など
C2801	$\alpha+\beta'$	配線器具部品, 計器板など

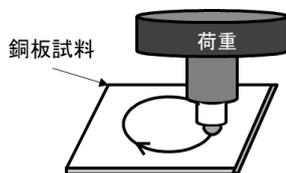


図1 ボールオンディスク型摩擦摩耗試験の模式図

表2 摩擦摩耗試験の条件

摺動円半径[mm]	2
摺動速度[mm/s]	100
荷重[N]	10
摺動距離[m]	150
相手材(ボール)	SUJ2(25°C) Al ₂ O ₃ (200,400,600°C)

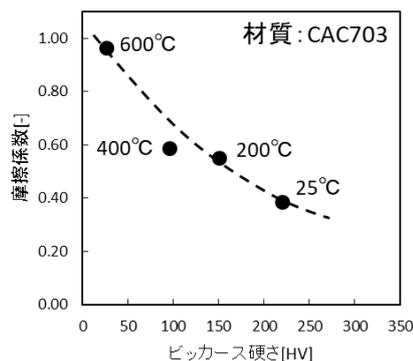


図2 CAC703における摩擦係数-硬さの温度依存性

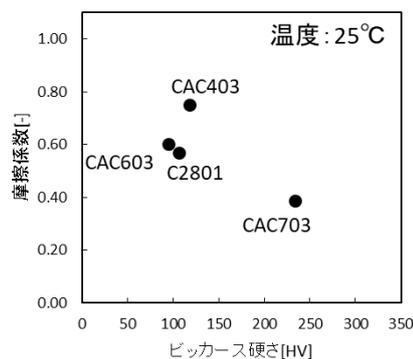


図3 異なる材質の摩擦係数-硬さの関係

微鏡(VHX-6000・(株)キーエンス)にてそれぞれ観察を行った。

3. 結果と考察

3. 1 摩擦係数

図2に高温環境の摺動部品に用いられるアルミニウム系青銅合金(CAC703)の25 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °Cにおける摩擦係数と硬さの関係をプロットした結果を示す。試験温度が上昇すると, 硬さは減少し, 摩擦係数は増加する傾向を示した。摩擦係数は硬さの増加によって減少し, さらに, その関係は一つの曲線で表すことができる。葉山ら³⁾は, 銅合金の常温での摩耗において, 硬さが小さくなることで接触点の変形が大きくなり, 凝着が生じやすくなることで, 摩擦係数が増加すると報告している。高温での摩耗も同様に, 熱による硬さの減少により, 摩擦係数が増加したと推察される。

次に, 摩擦係数に及ぼす材質の影響を調査するため, 表1に示す試料における25 °Cでの摩擦係数と硬さの関係をプロットした結果を図3に示す。CAC603はCAC403に比べ摩擦係数が小さい。これは鉛による潤滑作用がはたらき⁷⁾, 摩擦係数が減少すると考えられ

る。また、CAC703は他の試料に比べ摩擦係数が低い。これは高温での摩擦試験と同様に、硬さが大きいため、摩擦係数が減少していると考えられる。

以上より、摩擦係数は金属組織や試験温度によって変化する硬さとの相関があることが明らかとなった。

3. 2 摩耗量と摩擦面・摩耗粉

図4にCAC703の25℃、200℃、400℃、600℃における摩耗量と硬さの関係を示す。25℃から400℃までは、硬さと摩耗量は1つの曲線で表すことができたが、600℃ではその曲線から外れた傾向を示した。

図5に試験後に採取した摩耗粉の電子顕微鏡像を示す。25℃での摩耗粉の大きさは10μm以下であり、200℃および400℃での摩耗粉は10~50μm程度の大きさであった。一方で600℃での摩耗粉は500μmを超えていた。600℃では材料硬さが低下し、接触点の変形が大きくなり、摩耗粉が結合、粗大化する凝着が生じたと考えられる。

図6に摩耗痕の光学顕微鏡像を示す。摩耗痕は全て相手材(ボール)の移動方向に沿って線条痕が観察された。摩耗痕の25℃では輪郭が明瞭に観察されるが、200℃および400℃では輪郭に乱れが生じ、600℃では輪郭が確認できないほど乱れていた。また、400℃および600℃の摩耗痕中央部には、相手材(ボール)の移動方向に沿って、非連続的な凹凸模様が観察された。

図7に摩耗痕の断面プロファイルを示す。25℃、200℃では滑らかな摩耗痕であるのに対し、400℃、600℃では摩耗痕に凹凸が観察され、図6で観察された摩耗粉の付着と剥離によって生じた凹凸であると考えられる。

以上の結果から、600℃では摩耗痕に粗大化した摩耗粉が付着し、摩耗断面積が見かけ的に減少したと推察される。

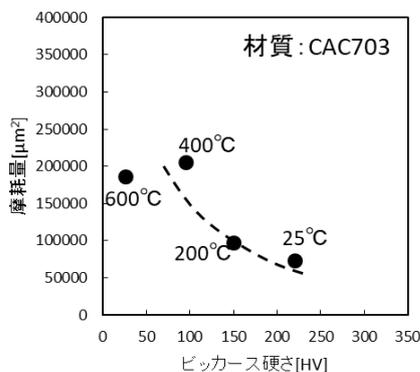


図4 CAC703における摩耗量-硬さの温度依存性

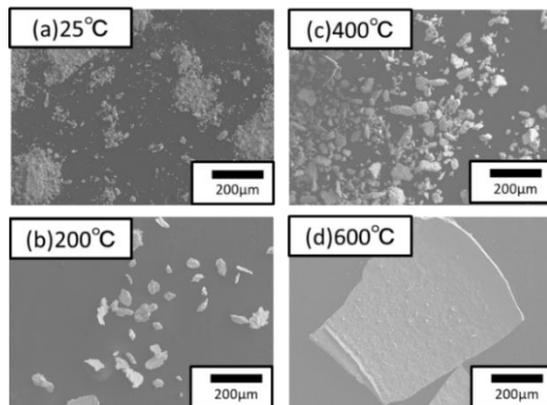


図5 CAC703における各試験温度の摩耗粉の電子顕微鏡像

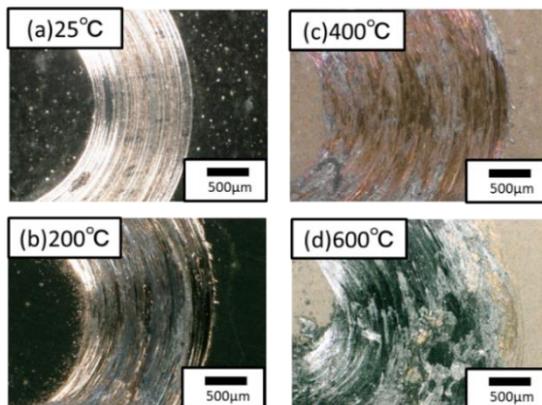


図6 CAC703における各試験温度の摩耗痕の光学顕微鏡像

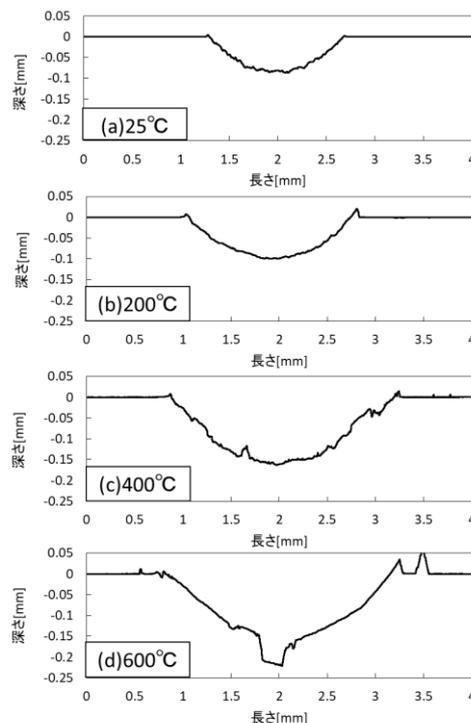


図7 CAC703における各試験温度の摩耗痕の断面プロファイル

また、硬さと摩耗量に曲線関係を示す25 °C～400 °Cの範囲では摩耗粉は10～50 μmの大きさであり、摩耗量が曲線関係から外れた600 °Cでは、摩耗粉が500 μm以上と粗大化していた。つまり、摩耗粉の大きさは凝着などのメカニズムと、それによる摩耗量の違いを反映していると考えられる。

図8に各試料の25 °Cにおける摩耗量と硬さの関係をプロットした結果を示す。なお、図8には図4の600 °Cを除くプロット点で求めた曲線を追加した。摺動用銅合金のCAC403, CAC603, CAC703は、図4で求めた曲線の周辺にプロットが存在した。鉛を含むCAC603は鉛のないCAC403に比べ、摩耗量が小さく、鉛による潤滑作用の効果であると考えられる。また、摺動用銅合金でないC2801は曲線から外れ、摩耗量は極端に大きな値を示した。

摩耗試験後に採取した摩耗粉の電子顕微鏡での観察結果を図9に示す。CAC403, CAC603, CAC703では摩耗粉が10 μm以下のものが多く観察されたが、C2801では100 μm以上のものが多く観察された。この摩耗粉は、600 °Cで摩耗試験を行った図5(d)の摩耗粉と同様に、発生した摩耗粉が結合し、粗大化したと思われる。しかし、断面プロファイルに凹凸がないことから、摩耗粉の摩耗痕への付着は少ないと考えられる。C2801は一般に摺動部品に用いられる銅合金ではないため、摺動

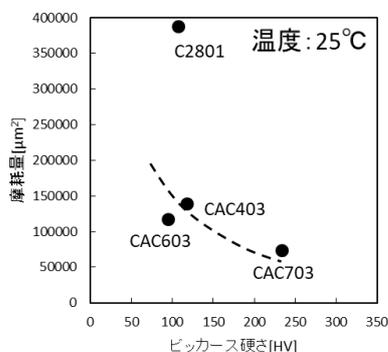


図8 各銅合金における摩耗量-硬さの関係

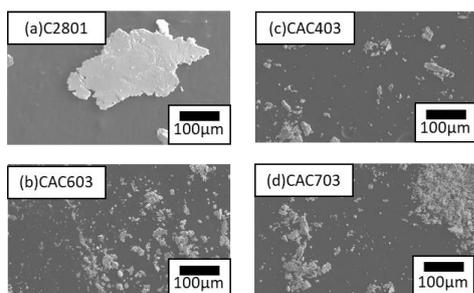


図9 各銅合金における摩耗粉の電子顕微鏡像

用銅合金に限った場合、摩耗量も摩擦係数と同様に、金属組織や温度によって変化する硬さとの相関がみられた。また、摩耗粉が大きい場合は、摩耗量が著しく大きく、適切な摺動状態が得られていないことが確認できた。したがって、摩耗粉観察から摺動状態の推察が可能であることが示された。

4. 結 論

本研究では、高温下における摩擦係数、摩耗量の変化を調査するため、アルミニウム系青銅合金(CAC703)を用いて200 °C, 400 °C, 600 °Cでの評価を行なった。

また、青銅合金(CAC403)、鉛青銅合金(CAC603)、黄銅合金(C2801)の室温での摩擦係数を測定し、硬さとの関係を調査し、また、摩耗粉の観察を行い、摩耗量との関係を調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1)今回使用した銅合金の高温下における摩擦係数および摩耗量は温度によって変化し、硬さとの相関がみられた。特に、硬さの減少により摩擦係数および摩耗量は増加した。
- (2)摩耗粉の観察から摺動状態の推察が可能であることが示された。高温下の摺動では摩耗の進行に従い摩耗粉の大きさは粗大化する。また、室温下における摩耗量が著しいC2801においても摩耗粉は他の銅合金に比べ、粗大な傾向を示した。

参考文献

- 1) 澤田俊之, 池田裕樹. 青銅系焼結軸受合金に添加する黒鉛分散Co基硬質粒子の開発, Sanyo Technical Report. 2012, vol. 19, no.1, p.32-37.
- 2) 大豊工業, 山田農和, 洪秀明. 高温耐摩耗性に優れた銅系軸受材料, 特開2003-147458.
- 3) 葉山房夫. 銅合金の摩耗機構. 精密機械. 1963, vol. 29, no. 5, p. 377-382.
- 4) 川本信, 岡林邦夫. 鋳鉄の摩耗特性と摩擦面温度の関係. 日本金属学会誌. 1973, vol.37, no.3, p. 350-356.
- 5) 社団法人日本機械学会. 日本機械学会標準 摩耗の標準試験方法(JSME S 013-2010).
- 6) 出水敬, 白川信彦. 摩擦・摩耗における評価方法とその評価事例. 大阪府立産業技術総合研究所報告. 2002, vol. 16, p. 29-33.
- 7) 野尻輝治, 葉山房夫, 雄谷重夫. 鉛青銅の鋳造組織と摩耗性質の関係. 日本金属学会誌. 1970, vol. 34, no. 1, p. 45-51.