

界面の密着性を向上させたバイメタルの摩擦特性評価 -青銅合金に含有される硫化物の影響-

Evaluation of tribological properties of bimetal with improved interfacial adhesion
-Effects of sulfides including bronze-

関西大（院）（学）*森本 翔太 関西大・シス理（正）佐藤 知広 関西大・シス理（非）宅間 正則
関西大・シス理（非）齋藤 賢一 関西大・シス理（非）高橋 可昌 栗本鐵工所（正）穴戸 了

Shota Morimoto*, Tomohiro Sato**, Masanori Takuma**,

Ken-ichi Saitoh**, Yoshimasa Takahashi**, Ryo Shishido***

*Graduate School of Kansai University, **Kansai University, ***Kurimoto, Ltd.

1. 緒言

摺動部材の製造方法の一種であり異種金属を複合化させる方法として、拡散接合という技術がある。拡散接合は材料の融点以下の温度で行う接合法である⁽¹⁾ことから、高融点金属の複合化も容易であり、合金化などの他の複合化技術と比較して製作工程におけるコスト削減や効率化が期待できる。

その摺動部材には優れた摩擦・摩耗特性、潤滑性、および耐久性を有する青銅合金が広く用いられてきた。特に鉛青銅は、その優れた摺動特性から多用されてきたが、近年では環境負荷や人体への影響を考慮し、ELV 規制や RoHS 指令により鉛の使用が制限され、世界規模で鉛フリー化が推進されている。

鉛の代替材料として、固体潤滑剤としての利用が期待される層状結晶構造物質、特に硫化物が注目されている。硫化物はその層状結晶構造が摺動面と平行にせん断されることで、低い摩擦係数を発現する。これにより、摺動部材において優れた潤滑効果を発揮し、摩擦や摩耗を低減することが可能となる。さらに、硫化物は豊富な資源を有し、毒性が少なく、熱安定性も高いため、潤滑性・環境適合性・耐熱性などの観点から鉛の代替材料として注目されている。

本研究では、原料粉末として水アトマイズ粉末を用いた。水アトマイズ粉末は、その微細かつ球状の粒子形状により高い充填効率を有しており、成形段階での高密度化に貢献する。本研究では、製造工程で硫化物が均一に分散されたプレアロイ型の水アトマイズ粉末を使用し、これを用いて作製した成形体の焼結性および機械的特性を評価する。

2. 実験方法

本研究では、バイメタル構造軸受材料への応用を目指し、硫化物分散青銅粉末と鋼板を組み合わせた試験片を作製した。焼結には還元ガス雰囲気（N₂ 95% : H₂ 5%）を用いた。N₂は入手しやすさ、環境への優しさ、酸化被膜の少ない金属粉末の開発に多く使用されている。H₂は強く還元性、脱酸・脱水作用による酸化防止に効果がある。本研究は、自動車エンジンや建設機械の関節部などに用いられるバイメタル構造軸受材料への応用を想定している。この目的のため、硫化物が分散された青銅合金粉末と鋼板を組み合わせバイメタル構造の形成を試みた。本研究では日本アトマイズ加工株式会社製の「BB-ic101010」を使用した。特徴は、粒径・形状の調整、均一な組織、低コスト生産である。

観察および分析用の試験片に寸法は、縦 10mm、横 20mm、高さ 7mm の平板試験片を作製した。基材となる鋼板（S25C、S35C、S45C、S55C）は、焼結前に粉末散布面をエメリー紙 80 番、220 番、400 番、600 番、1000 番、1200 番、2000 番で研磨後、鏡面研磨/バフ研磨には粒度が 0.3 μm 程度のアルミナスラリーを用いて研磨し、超音波洗浄を行った。この表面に厚さ 3mm で銅合金粉末を散布し、焼結温度を 600℃から 800℃まで 100℃刻みで変化させ試験片を作製した。結果的に今回の条件では鋼材と硫化物分散青銅の界面で剥離したため鋼材表面に対して SEM 観察および EDS 分析を行った。

また、摩擦特性評価用の試験片の寸法は、縦 40mm、横 38mm、高さ 6mm の平板試験片である。基材となる鋼板（S45C）は、エメリー紙 80 番で研磨後、超音波洗浄を行い、最終的に表面粗さ Ra を約 0.613 μm 程度に調整した。表面に厚さ 3mm で銅合金粉末を散布し、焼結温度は青銅系の状態図と先行研究を参考に、800℃に設定した。昇温時間と保持時間は、いずれも 60 分とした。これらの試験片の中から本稿では観察および分析用の試験片の結果について述べる。

3. 実験結果

3.1 温度変化によるバイメタル材の密着性および元素分布に与える影響

焼結温度を 600℃から 800℃まで 100℃刻みで、変化させ、鋼材（S45C）の剥離表面を 1000 倍で EDS 分析した際の簡易定量結果を Table 1 に、その元素スペクトルを Fig. 1 に示す。結果から、焼結温度の上昇に伴い、鋼材表面の Fe の mass%は減少し、硫化物分散青銅の主成分である Cu と Sn、S の mass%が増加した。これは、焼結前の粉末中の硫化物が、焼結中に鋼材と青銅の界面へ移着したためと考えられる。先行研究により、この剥離は焼結前の粉末中に分散していた硫化物が、焼結時に接合部の空隙に拡散・移着し、脆弱な化合物層を形成するためとされており、S は、FeS や CuS といった脆弱な化合物層を形成し、これが接合強度を低下させると考えられる⁽³⁾。また、焼結温度の上昇は S の移

着を促進し、接合界面への S の移着を加速させる。この S の偏析が、界面における原子間の結合を弱め、脆性的な破壊を引き起こしたと考えられる。

Table 1 Comparison of EDS analysis at each sintering temperature for S45C

| | Fe, mass% | C, mass% | Cu, mass% | Sn, mass% | S, mass% | Total, mass% |
|-------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|--------------|
| 600°C | 97.84 | 0.82 | 0.38 | 0.05 | 0.91 | 100 |
| 700°C | 74.75 | 1.23 | 17.71 | 0.12 | 6.19 | 100 |
| 800°C | 36.32 | 2.39 | 45.38 | 0.72 | 15.19 | 100 |

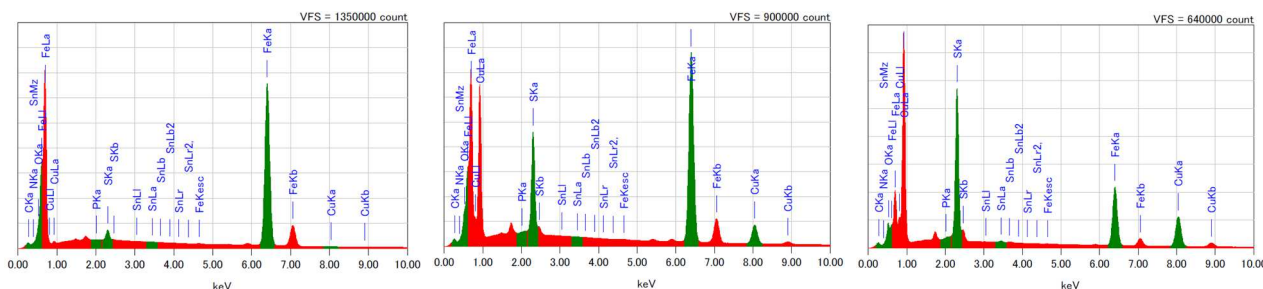


Fig. 1 Comparison of EDS analysis at each sintering temperature for S45C (left:600°C, center:700°C, right:800°C)

3.2 鋼板変更によるバイメタル材の密着性および元素分布に与える影響

焼結温度を 800°C に固定し、鋼材 (S25C, S35C, S45C, S55C) の剥離表面を 1000 倍で EDS 分析した際の簡易定量結果を Table 2 に、その元素スペクトルを Fig. 2 に示す。結果から、鋼材の炭素量が増加するにつれて、鋼材の剥離表面の硫化物分散青銅の残留量が増加している。鋼材の炭素含有量が増加すると、Cu の拡散係数が減少する⁽⁴⁾。これは、それらの元素が鋼材と青銅の直近の界面に集中して蓄積されるためと考えられる。この拡散の阻害により、剥離した鋼材表面で検出される Cu, Sn, S の量が増加する。これらの元素が、その後の破壊時に剥離する界面層に濃縮されているため、このような結果になったと考えられる。

Table 2 Comparison of EDS analysis for each steel material at 800°C

| | Fe, mass% | C, mass% | Cu, mass% | Sn, mass% | S, mass% | Total, mass% |
|------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|--------------|
| S25C | 41.71 | 6.82 | 38.76 | 0.42 | 12.29 | 100 |
| S35C | 44.97 | 3.38 | 38.14 | 0.37 | 13.13 | 100 |
| S45C | 36.32 | 2.39 | 45.38 | 0.72 | 15.19 | 100 |
| S55C | 33.49 | 2.87 | 47.99 | 0.96 | 14.71 | 100 |

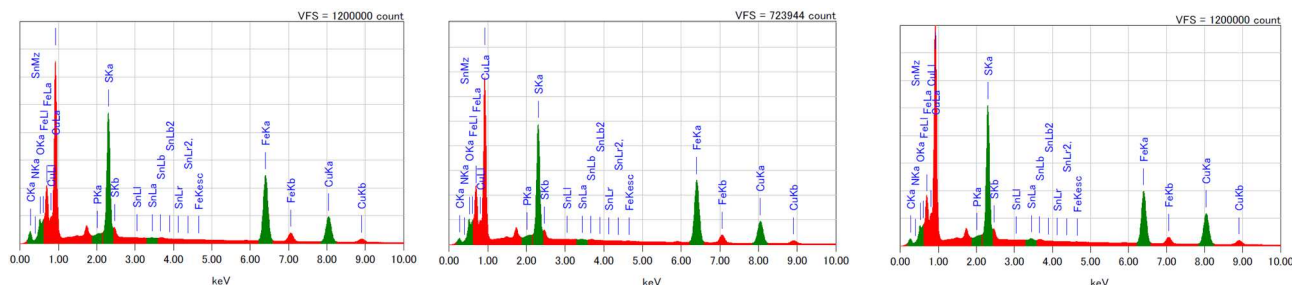


Fig. 2 Comparison of EDS analysis for each steel material at 800°C (left:S25C, center:S35C, right:S55C)

4. 結言

本研究では、焼結温度および鋼材炭素量が鋼材と硫化物分散青銅のバイメタル材の焼結性および機械的特性に与える影響について調査した。EDS 分析の際の簡易定量の結果、以下の点が明らかになった。

焼結温度の上昇は、剥離した鋼材表面の Cu, Sn, S といった青銅成分の残留量を増加させた。これは、高温下で Cu, Sn が鋼材界面へ移着し、S が界面へ移着したためと考えられる。S の移着は、脆弱な化合物層を形成し、原子間の結合を弱めることで、接合強度の著しい低下と脆性破壊を引き起こしたと推察される。

また、鋼材の炭素量増加に伴い、剥離表面における硫化物分散青銅の残留量が増加した。これは、高炭素鋼における 800°C での Cu 拡散係数減少により、Cu, Sn, S が鋼材界面に蓄積したためである。結果として、これらの元素が濃縮された界面層で破壊が生じ、剥離表面で Cu, Sn, S の増加が確認された。

5. 文献

- (1) 大橋 修：“拡散接合の現状と将来”，鉄と鋼，72 号，(1996)，p.27.
- (2) 日本アトマイズ加工：製品情報，<<https://www.atomize.co.jp/product/index.html>>，(参照：2025 年 7 月 17 日)
- (3) 山下 恭平：“硫化物分散青銅と鋼板で構成されたバイメタルの接合性評価”，関西大学卒業論文，(2024)，p.29.
- (4) Huirong Li, Tao Ma, Yueying He and Yungang Li：“Research on the Diffusion Behavior of Cu in Low-Carbon Steel under High Temperatures”，Crystals，(2022)，p.2.