

貧潤滑下における窒化処理 FCD 鋳鉄と銅合金との焼付き過程の解明

Clarification of Seizure Process Between Nitrided FCD Cast Iron and Copper Alloy Under Poor Lubrication

富山県立大・工（学）*山本 美空 富山県立大・工（正）宮島 敏郎

コマツ（正）大滝 悟嗣 コマツ（非）佐藤 正彦 コマツ（非）井関 利幸

Miku Yamamoto*, Toshiro Miyajima*, Satoshi Otaki**, Masahiko Satou**, Toshiyuki Iseki**

*Toyama Prefectural University, **Komatsu Ltd.

1. 緒言

近年、建設機械の油圧モータの高効率化およびダウンサイジング化に伴い、しゅう動部にかかる負荷が大きくなっており¹⁾、しゅう動部での焼付きの発生が問題となっている。様々な研究者により、焼付き過程を観察する研究²⁾などが進められている。著者らも、FCD 鋳鉄（以下、鋳鉄）と銅合金の摩擦・摩耗試験や in-situ 観察等^{3,4)}を進めており、鋳鉄試験片の窒化処理の有無の影響では、窒化試験片のみ焼付きがみられた。

そこで、本研究では、焼付き要因をより詳細に検討するため、窒化処理を施した鋳鉄試験片に対して、銅合金を相手材とする摩擦・摩耗試験を行った。試験中における摩擦力・垂直荷重の詳細な推移状況の考察、摩擦表面の in-situ 観察、試験後鋳鉄のレーザー顕微鏡と、走査型電子顕微鏡（SEM）観察およびエネルギー分散型 X 線分析（EDS）、試験前後の銅合金表面の触針式粗さ測定器での断面形状測定の結果を総合し、貧潤滑下における窒化処理鋳鉄と銅合金との焼付き過程を明らかにする。

2. 供試材料

試験片には、大きさ 15 mm×5 mm、厚さ 7 mm の鋳鉄^{3,4)}を用いた。相手材には、直径 134 mm、厚さ 6 mm の銅合金円板³⁾を用いた。銅合金円板には、直径 10 mm の観察穴を設け、その観察穴にガラス円板を挿入して接着することで鋳鉄表面の in-situ 観察窓とした。ガラス円板の厚さは、銅合金の摩耗を考慮して、穴の深さよりも薄くした。

3. 試験装置および試験方法

試験機には、本研究室で構築した一方回転型摩擦状態可視化装置³⁾を使用した。本試験機では、鋳鉄試験片と銅合金円板を接触させてステージを回転させることにより、鋳鉄と銅合金との間で摩擦を発生させる。本試験では、ステージの回転速度を 120 min⁻¹、しゅう動痕中心直径を 80 mm、鋳鉄支持部とおもりを合わせた垂直荷重を約 203 N とし、250 回転プログラムを繰り返す試験を行った。摩擦面温度を実機に近づけるため、鋳鉄支持部のシーブヒーターは 110 °C に加熱した。潤滑状態は、銅合金円板鋳鉄軌道上に 2 μL の油圧モータ作動油を滴下し、鋳鉄支持部自重のみで 1 回転させて伸ばした状態とした。また、焼付きやすくするために、試験開始前と 2000 回転後、および 10000 回転後に、摩耗粉を模擬した銅合金粉を銅合金の円板上に散布した。

試験中は、6 軸力覚センサを用いて鋳鉄支持部にかかる垂直荷重と摩擦力を計測した。計測したデータはデータロガーを用いてサンプリング周期を 2 ms として記録した。また、決まった回転位置でのトリガー信号により静止画を取り込み、in-situ 観察した。その際、鋳鉄表面を 150 倍、銅合金表面を 60 倍で撮影した。

4. 試験結果および考察

4.1 鋳鉄表面の in-situ 観察結果

鋳鉄表面の in-situ 観察結果の一部を Fig. 1 に示す。画像下の数字は回転数を示す。鋳鉄表面では、しゅう動に伴い、酸化による黒色化が進行し、その後、銅合金の移着による黄銅色がみられるようになった。銅合金が移着した箇所では、酸化と新たな移着を繰り返しながら内周側に向かって進行した。13635 回転目と 13636 回転目の観察結果に注目すると、黒鉛周りが大きく破碎し（赤丸）、破碎によって生じた新生面に銅合金が移着している様子もみられた。

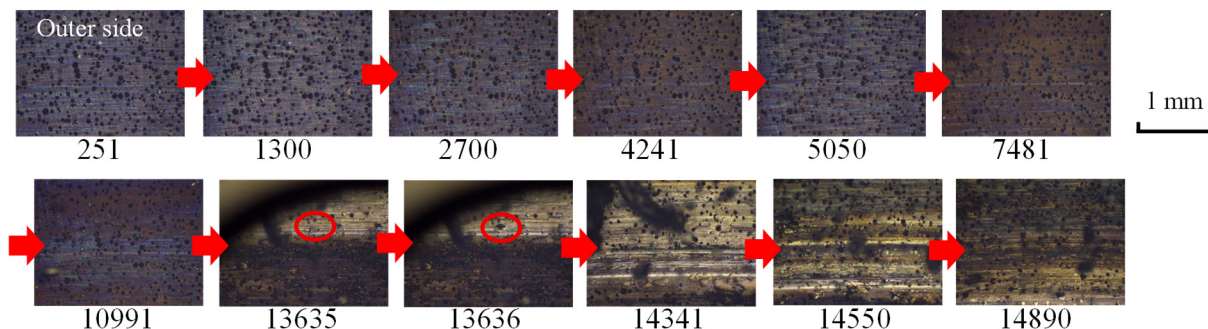


Fig. 1 In-situ images of the worn surface of cast iron

4.2 摩擦力・垂直荷重の推移

鋳鉄試験片の in-situ 観察結果において黒鉛周りに破砕がみられた 13635 回転目を含む 13633 回転から 13637 回転における摩擦力 F_y と垂直荷重 F_z の推移を Fig. 2 に示す。焼付きが発生することにより、 F_y 、 F_z ともに 1 回転毎に周期的な変動がみられる。特に、 F_z の推移に注目すると、13635 回転目と 13636 回転目において、他の回転時における推移よりも振幅が長くみられた。これは、摩擦表面において、鋳鉄表面の黒鉛周りが破砕し形成された摩耗粉を噛み込んだことにより、 F_z 方向に振動したためと考えられる。

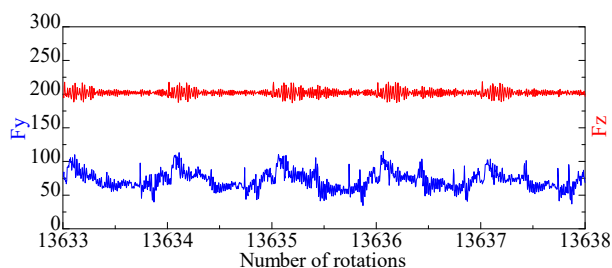


Fig. 2 Variation of the F_y and F_z as a function of number of rotations

4.3 鋳鉄表面の SEM 観察・EDS 分析結果

焼付き形態を明らかにするため、試験終了後の鋳鉄表面における黒鉛周りの状態をより詳細に SEM 観察と EDS 分析を行った。Figure 3 に、in-situ 観察で破砕がみられた黒鉛部（上段）と、銅合金の移着と破砕がみられた箇所（下段）における、2 次電子像と反射電子像の合成 SEM 画像および EDS 分析のマッピング画像を示す。上段の箇所では、大きな浅い窪みが形成されており銅合金が移着していた。この移着した銅合金上から Fe が検出されたことから、鉄由来の摩耗粉が存在していることもわかった。

以上の結果、黒鉛周りのフェライト組織の破砕によって生じた破砕片による摩耗や、黒鉛部および破砕によって生じた窪みに埋没した銅合金が起点となり、さらなる銅合金の凝着・移着を進行させ、焼付きに至ったと考えられる。

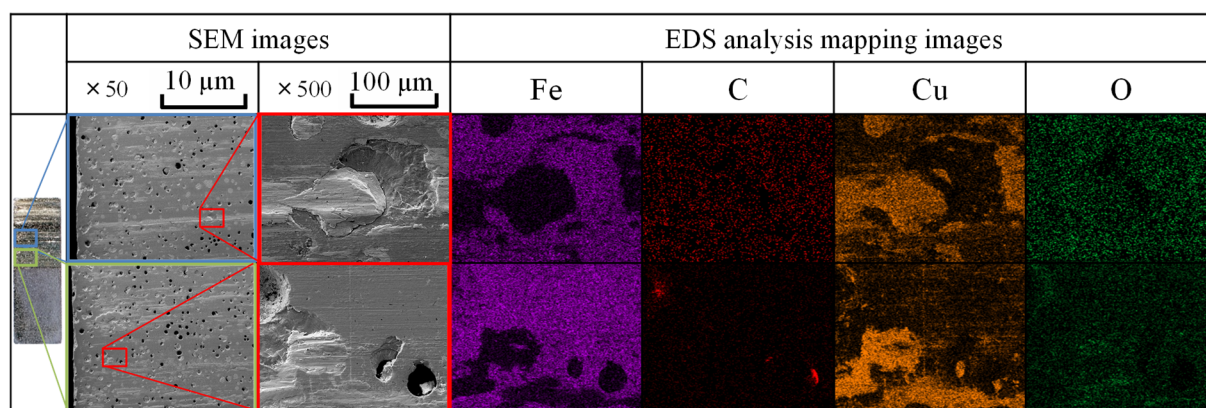


Fig. 3 SEM images and EDS analysis mapping images of the worn surface of cast iron (after 15000 rotations)

5. まとめ

本試験では、窒化処理を施した鋳鉄試験片を用いて、貧潤滑下において摩耗粉に見立てた銅合金粉を摩擦軌道に混入させることで、実機に近い過酷なしゅう動環境を模擬した実験を行った。その結果、鋳鉄表面では、銅合金の移着と黒鉛部周りの破砕、破砕によって生じる鋳鉄新生面への銅合金の凝着が発生することがわかった。また、黒鉛周りが破砕し、摩耗粉として摩擦表面に介在することにより、摩擦表面での摩耗粉の噛み込みが生じ、これに起因した振動が生じることがわかった。さらに、試験後の鋳鉄摩耗面を SEM 観察と EDS 分析をすることで、黒鉛周りで生じた破砕により、窪みが形成されることや、新生面であるこの窪み部に銅合金が凝着していることを明らかにした。

6. 結言

- (1) 焼付きが生じると、摩擦力 F_y と垂直荷重 F_z ともに変動がみられることを明らかにした。
- (2) 窒化処理を施した鋳鉄では、しゅう動に伴い黒鉛周りで破砕が生じることがわかった。
- (3) 鋳鉄表面において黒鉛周りのフェライト組織の破砕が生じることにより、摩擦表面では摩耗粉の噛み込みが生じ、振動が発生することを明らかにした。
- (4) 鋳鉄表面の黒鉛周りが破砕することにより形成された窪み部では、銅合金の凝着が生じやすいことがわかった。

文献

- 1) 坂間：油圧技術の動向と展望，カヤバ株式会社 論説，KYB 技報，第 56 号，2018-4（2018）2-5。
- 2) 八木：各種その場観察方法による焼付き過程の理解，トライボロジスト，vol.64，no.5（2019）294-301。
- 3) 山本・宮島・大滝・井関・佐藤：貧潤滑下における FCD 鋳鉄と銅合金との摩擦・挙動観察，日本トライボロジー会議 2024 秋 名護，（2024），B31。
- 4) 山本・宮島・大滝・井関・佐藤：貧潤滑往復摺動下における FCD 鋳鉄表面の油・空気・銅合金粉の挙動観察，日本トライボロジー会議 2024 秋 名護，（2024），B32。