

# 樹脂系複合材料を用いた摩擦材における摩擦・摩耗挙動の定量的評価

## Quantitative evaluation of friction and wear behavior in friction materials using resin composite material

群馬大院・理工(正)\*杉山裕秋 (正)川端柊也 (非)攪上将規 (正)上原宏樹 (非)山延健

小倉クラッチ(非)木菱隆志 (非)中島政哉 (非)長沼拓 (正)野澤淳一 (非)二宮崇行 (非)松本益幸 (非)金山典充  
(非)園部哲也

Hiroaki Sugiyama\*, Shuya Kawabata\*, Masaki Kakiage\*, Hiroki Uehara\*, Takeshi Yamanobe\*,  
Takashi Kibishi\*\*, Masaya Nakajima\*\*, Taku Naganuma\*\*, Junichi Nozawa\*\*, Takayuki Ninomiya\*\*,  
Yoshiyuki Matsumoto\*\*, Norimitsu Kanayama\*\*, Tetsuya Sonobe\*\*

Gunma University\*, OGURA CLUTCH CO.,LTD.\*\*

### 1. 緒言

摩擦材は現在、車のブレーキやクラッチなどに用いられ、高摩擦係数・低摩耗な性能を目指した開発が行われている。その中でも、繊維強化樹脂系複合材料 (FRP) に着目した摩擦材の開発について多くの研究が行われている。FRP は、軽量かつ成形加工が簡便で設計の自由度が高い樹脂と炭素繊維やアラミド繊維をはじめとした強化繊維を複合化した材料である。FRP の摩擦材は、樹脂、繊維、金属粉の組み合わせが基本的な構成成分となる。

先行研究<sup>1),2)</sup>では摩擦材の構成成分を樹脂・繊維・金属粉に単純化した樹脂系複合材料摩擦材について、各成分が摩擦・摩耗挙動に及ぼす効果について調査した。その結果、樹脂は移着による摩擦係数の向上、繊維は摩耗の抑制、金属粉は摩擦係数の向上とともに相手材の摩耗を示すことがわかった。このように構成成分の効果を定性的に評価できているが、摩擦係数の変化に伴う摩耗量の変化や表面の組成、形状変化などについて定量的な評価は行われていない。定性的な効果とともに定量的な観点から解析することで、摩擦・摩耗挙動の経時変化を支配する因子の解明につながると考えられる。

本研究では、構成成分が樹脂・繊維・金属粉からなる摩擦材における摩擦・摩耗挙動をボールオンディスク試験により評価し、摩擦進行に伴う摩耗量および摩擦面の変化を定量的に解析した。

### 2. 実験

#### 2.1 原料粉末の調製

原料として、フェノール樹脂 (ノボラック型)、アラミド繊維 (パルプ状)、酸化クロム ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 粉末の3成分を用いた。これらの原料をフェノール樹脂：アラミド繊維：酸化クロム=72：14：14 (wt%) の割合でミキサーで混合し、混合粉を調製した。

#### 2.2 摩擦材の作製

室温の金型に混合粉を均一に敷き詰め、空気抜きを行った後、予備成型を行った。得られた予備成型体をあらかじめ 165 °C に加熱した金型に入れ、空気抜きを行った後、面圧 150 kg/cm<sup>2</sup> で4分間加圧し本成型を行った。作製した成型体を金型から取り出し、室温まで徐冷した。その後、フェノール樹脂の硬化反応を完全に進行させるために、180 °C で4時間、次いで 200 °C で4時間の常圧アニール処理を行い、摩擦材とした。

#### 2.3 摩擦試験および摩擦・摩耗挙動の評価

作製した摩擦材に対しボールオンディスク型摩擦試験機を用いて摩擦試験を行った。装置概略図を Fig. 1 に示す。相手材として直径 4.7 mm の高炭素クロム軸受鋼ボールを用いた。試験条件は大気中、室温、摩擦試験の荷重を 29.4 N、摺動半径を 24 mm、回転速度を 100 rpm (摺動速度 251 mm s<sup>-1</sup>) とした。

摩擦試験後の摩擦材の摺動痕および相手材に対してレーザー顕微鏡観察を行い、形状観察とともに、摩擦進行に伴う摩耗量の変化を定量的に解析した。また、電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) を用いて摺動痕表面の形状観察および元素分析を行った。

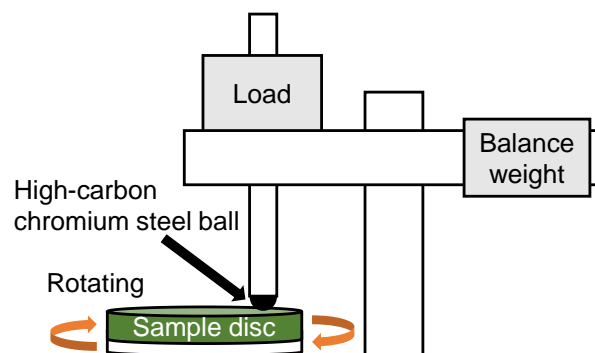


Fig. 1 Schematic illustration of ball-on-disk friction tester.

### 3. 結果および考察

#### 3.1 摩擦材の摩擦挙動

作製した摩擦材に対して摩擦試験を行った。ディスクの回転数に対する摩擦係数の変化を Fig. 2 に示す。回転数 15000 回から 18000 回における平均摩擦係数は 0.249 であった。摩擦初期の 1000 回転では振幅が大きく、4000 回転付近まで摩擦係数は上昇し、4000 回転付近でピークを示した。ピーク以降は安定した高摩擦係数を示した。

#### 3.2 摩擦進行に伴う摩耗量の変化

そこで、摩擦初期（回転数 0~1000 回転）、前期（回転数 0~4000 回転）、後期（回転数 0~18000 回転）について、摩擦進行に伴う摩擦・摩耗挙動の変化を定量的に解析した。各回転数での摩擦試験後の摩擦材の摺動痕および相手材ボールに対してレーザー顕微鏡を用いて摩耗体積を測定し、摩擦材および相手材の摩耗率を算出した。その結果を Table 1 に示す。摩擦進行に伴い摩擦材および相手材の摩耗体積は増加した。摩耗率の変化を見ると、摩擦材では摩擦初期に最大を示し摩擦進行に伴い低下しているのに対して、相手材では摩擦進行に伴い上昇していた。よって、摩擦進行に伴い摩擦材の摩耗は減少する一方、相手材の摩耗が増加していることがわかった。

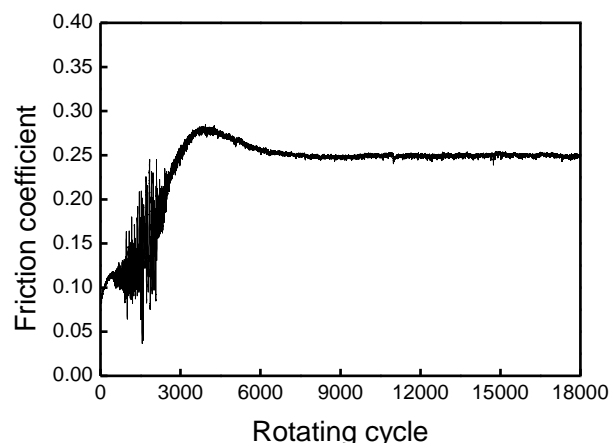


Fig. 2 Change in friction coefficient with rotating cycle.

Table 1 Wear volume and wear rate for friction material and ball at different rotating cycles.

Cycle	Wear volume (mm <sup>3</sup> )	Wear rate (×10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /Nm)	Wear volume (ball) (mm <sup>3</sup> )	Wear rate (ball) (×10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> /Nm)
0~1000	0.348	4.89	0.005	0.72
0~4000	0.999	2.61	0.044	1.12
0~18000	3.695	1.88	0.315	1.58

#### 3.3 摩擦進行に伴う摺動痕の元素分析評価

各回転数での摺動痕における表面形状および構成成分変化を評価するため、各回転数の摺動痕に対して EPMA 測定を行った。得られた形状像および元素マッピング像を Fig. 3 に示す。形状像から摩擦進行に伴い摺動痕の幅が広がり、表面形状が変化していることがわかる。元素マッピング像を見ると、摺動痕に鉄のピークが観察されることから、相手材の鉄が移着していることがわかる。また、鉄のピークと同じ場所に酸素のピークも存在していることから、摺動痕表面には酸化鉄を含む層が形成されていると考えられる。摩擦初期では微細な分布であったが、摩擦の進行に伴い凝集され引き延ばされていた。また、摩擦進行に伴い鉄のピークが強く炭素のピークが弱くなったことから、相手材の摩耗、移着が進んだと考えられる。これらの結果から、前期の摩擦係数のピークまでは摩擦材の摩耗が顕著に発生し、摺動痕に相手材の鉄を含む摩耗粒子が点在していると考えられる。後期の高摩擦係数は相手材の鉄をさらに取り込みつつ摩耗粒子が凝集、摺動痕全体に引き延ばされて鉄を含む台地を形成することで、摩擦材の摩耗は減少し安定した高摩擦係数を示したと考えられる。

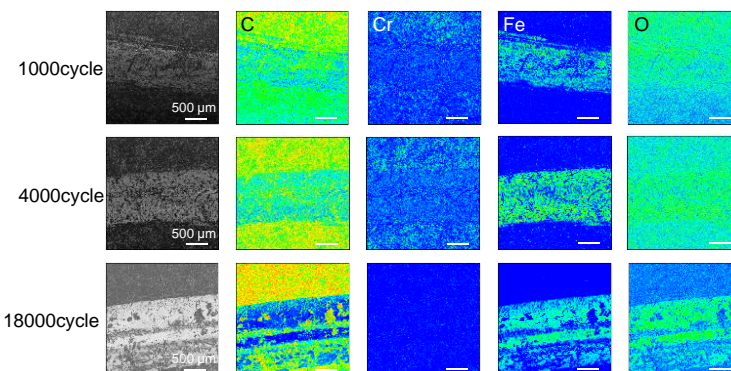


Fig. 3 EPMA images and elemental mapping images of C, Cr, Fe, and O for wear marks obtained at different rotating cycles.

### 4. 結論

本研究では、構成成分を樹脂・繊維・金属粉に単純化した摩擦材の摩擦・摩耗挙動をボールオンディスク試験により評価した。摩擦開始とともに摩擦係数は上昇し、ピークを示した後、安定した高摩擦係数を示した。そこで、摩擦進行に伴う摩耗量の変化を定量的に解析したところ、摩擦進行に伴い摩擦材の摩耗率は減少するのに対して、相手材の摩耗率は増加していることがわかった。摺動痕の元素分析を行った結果、摩擦開始とともに相手材である鉄を含む摩耗粒子が摺動痕に移着し、摩擦が進行するにつれて相手材を取り込みながら引き延ばされ鉄を含む台地を形成することで摩擦係数の安定化につながることがわかった。

### 文献

- 1) 鈴木翔太, 他, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集, F7 (2020).
- 2) 鈴木翔太, 他, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集, E35 (2021).