

## カーボン系しゅう動材と鋼の摩擦特性に接触状態が及ぼす影響

Effect of contact conditions on the friction properties of a carbon-based sliding material and steel

岡山大（正）\*塩田 忠 岡山大・工（非）米澤 和真 岡山大・院（非）石本 惇

岡山大・院（非）松井 一真 岡山大（正）藤井 正浩

Tadashi Shiota, Kazuma Yonezawa, Atsushi Ishimoto, Kazuma Matsui, Masahiro Fujii

Okayama University

### 1. はじめに

カーボン材料は、熱的・化学的に極めて安定、高い耐熱性、軽量、などの特徴をもつため、様々な工業製品に応用されている。また、自己潤滑性を示すことから、固体潤滑材やしゅう動材としても多く利用されている。最近のトライボロジー分野では、ダイヤモンドライクカーボン（DLC）やナノダイヤモンドに代表されるナノカーボンの研究例も多い<sup>1)</sup>。さらに、耐酸化性、耐摩耗性、気密性の向上を目指した含浸処理カーボン材料や高強度・高弾性の C/C コンポジット材料など、複合材としての利用も多い。このような多種多様のカーボン材料をしゅう動材として利用するためには、それぞれのカーボン材料のトライボロジー特性を深く理解する必要がある。そこで本研究では、含浸処理カーボンしゅう動材と鋼の無潤滑下における摩擦特性について検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片

カーボン系しゅう動材として、リン酸化合物を含浸処理した等方性黒鉛を用いた。その材料を先端が円板形状（直径 6.9 mm と 4.5 mm）および球面形状（曲率半径 5.5 mm と 2.7 mm）のピンに加工した。（以降、それぞれを FC6.9, FC4.5, SP5.5, SP2.7 とする。）それぞれのピンの表面粗さを Table 1 に示す。相手材には、#1000 アルミナ質研磨材を用いたラッピングにより表面粗さ  $0.08\mu\text{mRa}$  程度に仕上げた SUJ2 軸受鋼ディスクを用いた。Figure 1 にディスク表面の SEM 像と EDS マッピングを示す。ディスク表面上の所々にアルミニウムと酸素が検出されており、研磨材のアルミナが埋め込まれるなどして一部残留していたと考えられる。

#### 2.2 摩擦特性の評価

本研究では、ピンオンディスク試験により摩擦特性を評価した。試験前に、ピンをイソプロパノール、ディスクをアセトンおよびイソプロパノールを用いて超音波洗浄した。摩擦試験は、ピン 1 本あたりの荷重を 13.5 N とし、すべり速度  $0.182\text{ m/s}$  で 2 時間毎に試験を休止しながら合計 14 時間、室温、大気中で実施した。試験後には、摩擦力の測定値を荷重で除して摩擦係数を算出し、ディスク表面に形成された移着膜の状態を光学顕微鏡観察、表面粗さ測定、ラマン分光分析により評価した。

### 3. 結果と考察

Figure 2 に試験時間に対する摩擦係数変化の測定結果を示す。試験開始直後の摩擦係数は、初期の接触面圧に依存して  $\text{FC6.9} < \text{FC4.5} < \text{SP5.5} < \text{SP2.7}$  の順に大きくなった。その後、先端が球面形状の SP5.5 ピンと SP2.7 ピンの場合、摩擦係数が急増して最大値を示した後、試験時間と共に徐々に減少して最終的にはほぼ一定値を示した。一方、先端が円板形状の FC6.9 ピンと FC4.5 ピンの場合は、試験時間と共に摩擦係数が僅かに増加し、最終的に一定値を示した。このように、ピン先端の初期形状に応じて摩擦係数は試験時間に対して異なる変化を示した。

試験後の各ピンの摩擦面を光学顕微鏡で観察したところ、

Table 1 Surface roughness of carbon pins

Pin	FC6.9	FC4.5	SP5.5	SP2.7
Surface Roughness, $\mu\text{mRa}$	1.5	1.7	1.2	1.3

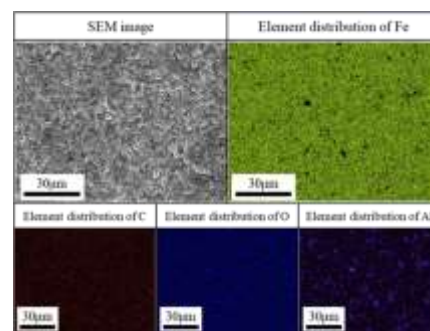


Fig. 1 SEM and EDS mapping images of SUJ2 disk polished with alumina abrasive

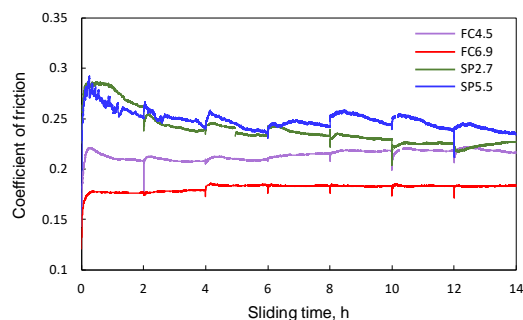


Fig.2 Friction behavior of carbon pins with different tip shape and size

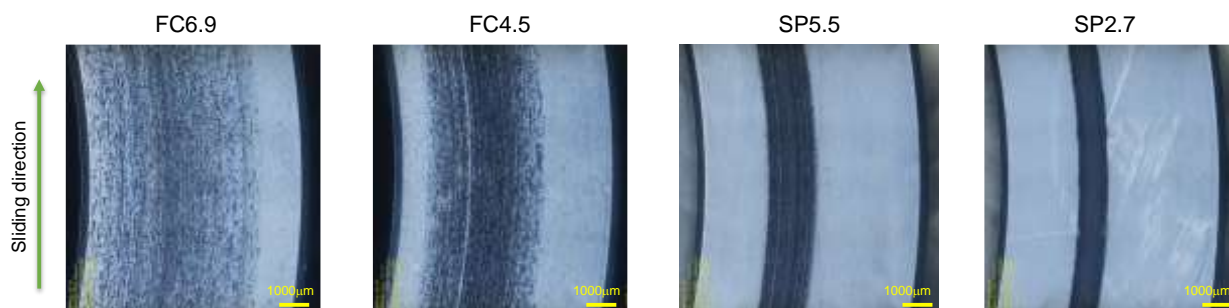


Fig.3 Optical microscope images of transferred films on SUJ2 disks after the sliding test

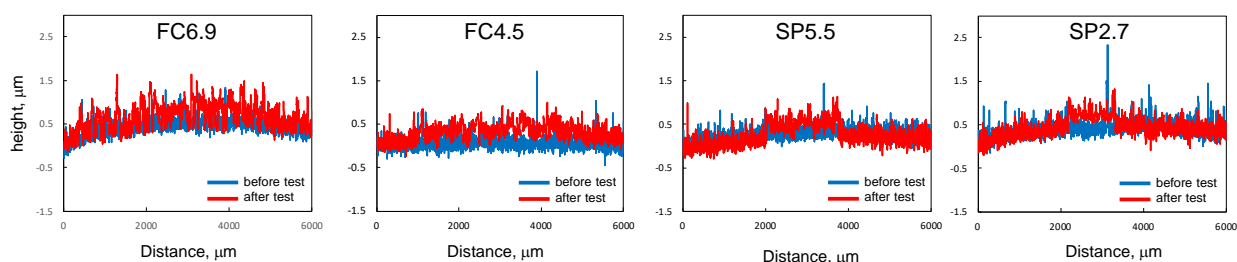


Fig.4 Cross-section profiles of the SUJ2 disks before and after the sliding test

FC6.9 ピンと FC4.5 ピンでは、ピン表面全面にしゅう動方向に筋状の摩耗痕が見られた。一方、SP5.5 ピンと SP2.7 ピンでは、球面先端が摩耗した円形の摩擦痕が見られ、それぞれの摩耗痕の直径は約 1.8 mm と約 1.1 mm であった。Figure 3 に試験後のディスク表面の観察結果を示す。いずれのディスク表面にもピン先端の摩耗痕直径と同程度の幅の移着膜が見られた。FC6.9 ピンと FC4.5 ピンを用いた場合、ディスク表面には不均一で薄い移着膜が付着し、SP2.7 ピンと SP5.5 ピンを用いた場合、ディスク表面には濃い移着膜が付着しているように見える。実際、Fig. 4 に示した試験前後の断面曲線から移着膜の平均膜厚を求めると、先端が円板形状の FC6.9 ピンと FC4.5 ピンを用いた場合よりも、先端が球面形状の SP2.7 ピンと SP5.5 ピンを用いた場合の方が厚かった。

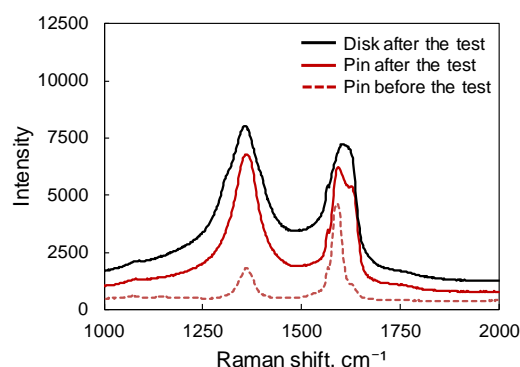


Fig. 5 Raman spectra of transferred film on disk, FC4.5 pin before and after the sliding test

Figure 5 に、試験前後の FC4.5 ピン表面とディスク上の移着膜のラマン分光スペクトルを示す。試験前のピン表面は、典型的な多結晶黒鉛のラマン分光スペクトルを示している<sup>2)</sup>。一方、ディスク上の移着膜は不定形炭素に見られるラマン分光スペクトルに類似しており、試験後のピン表面は両者を合成したようなスペクトルであった。

以上のことから、Fig. 2 に示された各ピンの摩擦係数変化は、次のように説明できると考えられる。先端が球面形状の SP2.7 ピンと SP5.5 ピンの場合、初期の接触面圧が高いため、試験直後からピンの摩耗と移着膜の形成が急激に進み厚い移着膜が形成され摩擦係数が急増する。しかし、先端が球面のため摩耗により接触面積が増加して接触面圧が下がる。それに伴ってピンの摩耗と移着膜の形成が徐々に進まなくなり摩擦係数が減少し一定となる。一方、先端が平板形状の FC6.9 ピンと FC4.5 ピンの場合、初期の接触面圧が低いため、ピンの摩耗と移着膜の形成が遅く、それに伴って摩擦係数が徐々に増加する。その後、ピンとディスクの両摩擦面に移着膜が形成されてカーボン同士の摩擦になると摩耗が抑えられ、摩擦係数の変化もなくなり一定値を示す。このように、Fig. 2 において各ピンで摩擦特性が異なったのは、接触面圧の変化と移着膜の形成過程が異なったためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、初期の表面形状が異なるリン酸化合物含浸カーボンしゅう動材と鋼の無潤滑下における摩擦特性を評価した。その結果、先端が平板形状と球面形状のピンでは、接触面圧の変化と移着膜の形成過程に応じて摩擦係数の変化挙動が異なったため、用途に応じて接触面形状を適切に選択する必要があると考えられる。

#### 文献

- 1) 大竹・高島：トライボロジー分野における炭素系材料とナノカーボン材料の発展，トライボロジスト，57，10 (2012)660.
- 2) 長田・垣花：ラマン分光法による炭素材料の評価－最近の測定技術とナノカーボンへの応用－，炭素，288 (2007)174.