

## 100%セルロースナノファイバー(CNF)成形体の潤滑特性に及ぼす摩擦調整剤の影響

### Effects of friction modifiers on the tribological properties of 100% cellulose nanofiber molding

横国大(正) \*大久保 光 京工大(学) 中江 亮太 京工大(非) 射場 大輔 京工大(非) 山田 和志  
東理大(正) 佐藤 魁星 中越パルプ(非) 橋場 洋美 横国大(正) 中野 健 東理大(正) 佐々木 信也

Hikaru Okubo\*, Ryota Nakae\*\*, Daisuke Iba\*\*, Kazushi Yamada\*\*, Kaisei Sato\*\*\*,

Tomomi Hashiba\*\*\*\*, Ken Nakano\*, Shinya Sasaki\*\*\*

\*Yokohama National University, \*\*Kyoto Institute of Technology, \*\*\*Tokyo University of Science,

\*\*\*\*Chuetsu Pulp & Paper Co., Ltd.

#### 1. 緒言

近年、世界規模で深刻化する環境問題を背景として、環境調和を志向した工業製品の素材転換が進められている。とりわけ、生分解性・生物資源由来(バイオマス)素材の活用は、現代の大きな潮流であり、軸受・オイルシール等の摺動機械要素においてもその導入が検討され始めている。しかしながら、バイオマス素材の多くは、機械特性・熱安定性・寸法安定性・原料調達等の観点で問題を抱えており、機械要素への導入には多くの困難が伴う。

一方、次世代のバイオマス産業資材としてセルロースナノファイバー(cellulose nanofiber: CNF)の研究開発が進められている。CNFは、セルロース分子が集合したセルロースミクロフィブリルから構成されるファイバー状の構造体であり、鋼の5倍の高強度・1/5の低比重・低熱膨張率・高界面制御性を有したバイオマス材料である<sup>1)</sup>。筆者らは、従来バイオマス素材の欠点を克服したCNFの優れた特性に着眼し、CNF分散液を加圧成形することで得られる高強度、軽量、低熱膨張性及び高加工性を有するバイオマス摺動材料:「100%CNF成型体(以下、CNF成型体)」を創製した<sup>2)</sup>。前報において、CNF成型体のトライボロジー特性は、セルロースの有する豊富な水酸基構造と相手材料・雰囲気分子間のトライボケミカル反応を起因とするトライボフィルム形成及びセルロース構造の変態に支配されているものと推察した<sup>2)</sup>。このことは、摩擦場におけるCNF成型体の適切な界面構造の創製がそのトライボロジー特性に反映されることを意味し、最適な界面構造の形成によりCNF成型体の摺動材料としての可能性を拡張できるものと考えた。

本研究では、CNF成型体の高い界面制御性を利用したトライボロジー特性の向上を志向して、潤滑油中において摩擦材表面に吸着膜を形成することで摩擦低減効果を発揮する「無灰摩擦調整剤(organic friction modifier: OFM)」に着目した。本報告では、CNF成型体の潤滑特性に及ぼすOFMの影響について報告する。

#### 2. 実験方法

摩擦試験には、ボール・オン・ディスク型の摩擦試験機を使用した。Figure 1に摩擦試験機の概要図を示す。実験条件は、荷重10N、ヘルツ最大接触面圧約150 MPa(CNF-SUJ2)、試験温度50 °C、相対湿度50-70%、摺動速度10 mm/s、摺動時間60分の摩擦試験を行った後、摺動速度1.0, 10, 50, 100, 500 mm/sの各速度で10サイクル(ボールが10回転)の摩擦試験を行った。潤滑油には、低粘度合成基油(poly-alfa-olefin 4: PAO 4)を使用した。OFMには、グリセリンモノオレート(glycerol monooleate: GMO)をPAOに1.0 wt.%添加して使用した。Figure 2にGMOの化学構造式を示す。ボール(Φ19.05 mm)試験片には、SUJ2軸受鋼(HV750, Sa: 0.05 μm)を用いた。ディスク試験片(20mm×20 mm×t 5mm)には、SUJ2軸受鋼(HV750, ナノインデンテーション硬さ10 GPa, Sa: 0.1 μm,)及びCNF分散液(nanoforest, 中越パルプ工業, JP)から作製したCNF成型体(nanoforest-CMB, 中越パルプ工業, JP, 密度1.41g/cm<sup>3</sup>, Sa: 0.1 μm, ナノインデンテーション硬さ0.37 GPa)を用いた。摩擦面分析には、レーザー顕微鏡(OLYMPUS OLS5000, HITACHI, JP), 赤外分光分析(Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR, Nicolet iN10, Thermo Fisher Scientific, USA)を使用した。

#### 3. 実験結果

##### 3.1 摩擦試験結果

Figure 3にPAO及びPAO+GMO潤滑油環境下におけるCNF-SUJ2及びSUJ2-SUJ2ペアのμ-V特性を示す。Figure 3より、全ての組み合

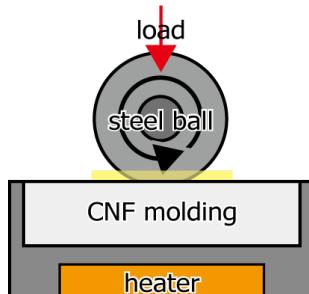


Fig. 1 Schematic of the tribometer

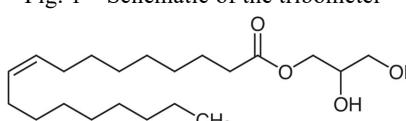


Fig. 2 Chemical structure of GMO

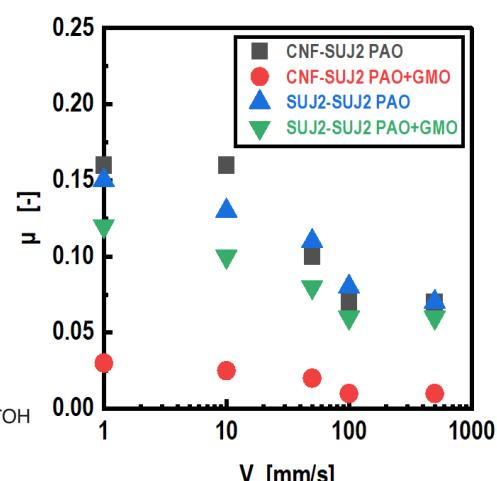


Fig. 3 μ-V curves for each pair

わせにおいて、低速度域 (1-10 mm/s) から中一高速度 (50-500 mm/s) の間で摺動速度の増加に伴う摩擦係数の低減が確認された。低速度域 (=境界潤滑領域) における GMO の摩擦低減効果に着目すると、CNF-SUJ2 ペアで 80% 程度、SUJ2-SUJ2 ペアで 20% 程度の摩擦低減効果が確認された。特に、PAO+GMO 潤滑油環境下における CNF-SUJ2 ペアでの摩擦係数は 0.015-0.025 であり、全速度域に渡って卓越した低摩擦性が確認された。

Figure 4 に各試験条件におけるディスク及びボールの摩耗量を示す。Fig.4(a)より、GMO 添加に伴う CNF 成型体の摩耗量の減少が確認された。SUJ2 と比較して CNF 成型体の摩耗量が GMO 添加の有無に関わらず 5-6 倍程度の数値を示したが、これは CNF-SUJ2 と SUJ2-SUJ2 ペアの接触面積の違いに起因するものである。一方、Fig.4(b)より、CNF 成型体の相手 SUJ2 ボールにおいて、GMO 添加に伴う著しい摩耗の低減が確認された。

#### 4. 摩擦面分析 (FT-IR)

Figure 5 に摩擦試験前後における CNF 成型体の全反射法 FT-IR スペクトルを示す。Figure 5 より、PAO+GMO 潤滑油の場合においてのみ 1720-1750 cm<sup>-1</sup> に C=O 伸縮振動に帰属されるピークが検出された<sup>3)</sup>。GMO が C=O 構造を有する事から、PAO+GMO 潤滑油中における CNF 成型体の摩擦面に GMO が吸着膜を形成したものと推察される。

#### 5. 察察

CNF 成型体と OFM (GMO) の組み合わせにより、著しい摩擦低減効果及び摩耗低減効果が確認された。とりわけ、境界潤滑領域の摩擦低減効果は著しく、油潤滑下における CNF 成型体の摩擦特性の改善に OFM が有効であることが示された。先行研究より、セルロース表面は官能基付与が容易な素材として知られている<sup>3)</sup>。FT-IR 分析により、CNF 成型体の摩擦面にて GMO 吸着膜の形成を示唆する C=O 結合の明瞭なピークが確認されたことから、CNF 表面で摩擦励起の官能基変性が進行し、摩擦の低減に寄与したものと推察される。

#### 6. 結言

本研究では、潤滑油環境下における CNF 成型体のトライボロジー特性に及ぼす OFM の影響及びその摩擦面構造について調査した。その結果、以下の知見を得た。

1. CNF 成型体は GMO 添加油中において著しい摩擦低減効果を示す。

2. GMO 添加油中で摩擦後の CNF 成型体表面は GMO による官能基変性が進行しており、それに伴う GMO 吸着膜の形成が CNF 成型体の摩擦低減効果に寄与したものと推察される。

本研究により、CNF 成型体が OFM との組み合わせにより卓越した摩擦特性を発現することが明らかとなった。今後は、CNF 成型体のさらなる潤滑機構の解明とそれに基づく CNF 成型体のバルク・界面設計を見直すことで、成形体の低摩擦・低摩耗化に向けた設計指針の確立を目指す。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K20402 の助成を受けたものです。本研究で使用した添加剤は株式会社 ADEKA より提供して頂いたものです。福岡大学 八尾滋教授には研究遂行上の有益な助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

#### 文献

- 1) Amita Sharma et. al., Biotechnol. Rep., 21 (2019) 1-15.
- 2) 大久保ら : 100%セルロースナノファイバー (CNF) 成型体のトライボロジー特性に関する研究, トライボロジー会議 2021 秋松江, E37.
- 3) Umesh P. Agarwal Cellulose I crystallinity determination using FT-Raman spectroscopy: univariate and multivariate methods, Cellulose (2010) 17:721–733 DOI 10.1007/s10570-010-9420-z

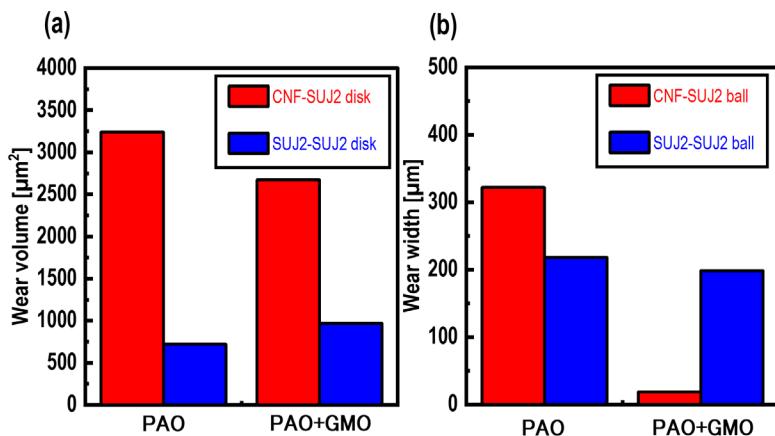


Fig. 4 Wear volumes of (a) the CNF and SUJ2 disks and (b) SUJ2 ball

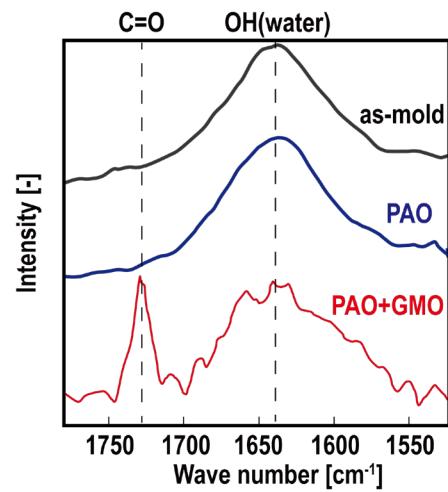


Fig. 5 FT-IR spectra of the as-mold and worn surfaces of the CNF molding