

# 高濃度セルロースナノファイバー成形体の境界潤滑特性に及ぼす繊維構造の影響

Effects of fiber characteristics on boundary lubrication properties of concentrated cellulose nanofiber moldings

東理大（学）\*丸尾 理月 東理大（正）佐藤 魁星 横国大（正）大久保 光

横国大（正）中野 健 東理大（正）佐々木 信也

Rizuki Maruo\*, Kaisei Sato\*, Hikaru Okubo\*\*, Ken Nakano\*\*, Shinya Sasaki\*

\*Tokyo University of Science, \*\*Yokohama National University

## 1. 緒言

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めたセルロースマイ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。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、100% の CNF 分散液を加圧成形することで得られる高強度かつ軽量のバイオマス摺動材料：「高濃度 CNF 成型体」を創製した<sup>1)</sup>。先行研究では、CNF の高い界面制御性に着眼し、高濃度 CNF 成型体の界面構造を摩擦場で動的に制御することで、とりわけ「境界潤滑領域」で優れたトライボロジー性能を発現することが報告されている<sup>2)</sup>。一方、CNF は「繊維」故に、その調整条件に依存して「繊維径」・「繊維配向」が変化する。繊維構造は、高濃度 CNF 成型体の機械・化学的な特性に大きく影響することが予想されることから、これらの繊維構造を自在に制御することで、そのトライボロジー特性の制御が実現可能であるものと考えた。

本報では、高濃度 CNF 成型体のトライボロジー応用を志向して、その繊維構造が高濃度 CNF 成型体のトライボロジー特性、とりわけ境界潤滑領域の摩擦性能に及ぼす影響について調査した結果を報告する。

## 2. 実験材料及び方法

水中カウンターコリジョン法にて調整した CNF 水分散液を用いて、圧縮脱水成形により高濃度 CNF 成型体を作製した。繊維構造の影響を評価するため、水中カウンターコリジョンの試行パス数を変更することで、異なる繊維径の CNF 水分散液から成形した二種の高濃度 CNF 成型体（coarse/fine）を作製した。また、高圧成形時の圧力の負荷方向に対して成型体の切り出し面を変更することで、繊維配向の異なる二種の高濃度 CNF 成型体（in-plane/out-of-plane）を作製した。なお、繊維径の異なる CNF 成型体は二種ともに in-plane 配向の成型体として調整し、配向方向の異なる CNF 成型体は二種ともに coarse-CNF を利用して作成した。すなわち、本研究では 3 種類の高濃度 CNF 成型体：“coarse-in-plane”、“fine-in-plane”、“coarse-out-of-plane”を使用した。CNF 分散液、CNF 成型体及び CNF 繊維径の異なる CNF 繊維の各光学像を図 1 に示し、各高濃度 CNF 成型体の諸特性を表 1 に示す。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。ボール試験片には直径 19.05 mm の SUJ2 軸受鋼（ビッカース硬さ HV750、表面粗さ Sa: 0.05  $\mu\text{m}$ ）、試験条件は荷重 10 N、CNF-SUJ2 間の最大ヘルツ接触面圧 約 140 MPa、試験温度 80  $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 75–85%、摺動速度 1, 3, 10, 30, 100 mm/s とした。まず、高速度域から減速しつつ各速度で 10 サイクル間（ボールが 10 回転）の摩擦力の計測を実施した。その後、10 mm/s で 100 サイクル間（なじみ試験）の摩擦力を計測し、再度高速度域から減速しつつ各速度で 10 サイクル間の摩擦力の計測を実施した。潤滑油には、合成基油である poly- $\alpha$ -olefin 4（PAO 4）を使用した。なお、摩擦前後の各成型体の表面物性を原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy: AFM, Multimode 8, Bruker, USA）により調査した。

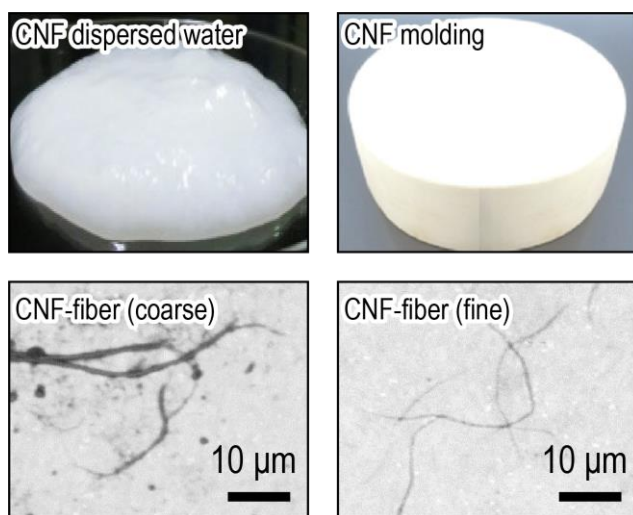


図 1 CNF 分散液（左上）、成型体（右上）、各繊維（下段）

表 1 各 CNF 成型体の諸特性

	coarse-in-plane	fine-in-plane	coarse-out-of-plane
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	$0.5 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.2$
Hardness [GPa]	0.3	0.26	0.3
Young's modulus [GPa]	7.1	5.7	11
Crystallinity [%]	75	80	75

### 3. 実験結果と考察

図2になじみ試験前後の各 CNF 成形体の摩擦－摺動速度依存性を示す。なじみ試験前の場合（図2(左)），低速度域（ $V < 10$  mm/s）では out-of-plane-coarse が僅かに低摩擦係数を示したものの，各成形体間で顕著な摩擦性能の差は確認されなかった。高速度域（ $V > 10$  mm/s）では，in-plane-coarse と out-of-plane-coarse ではほぼ同等の摩擦係数を示した一方，in-plane-fine では比較的 low 速度域から弱特性を示し，他成形体と比較して同速度で低摩擦係数を示した。なじみ試験後の場合（図2(右)），低速度域（ $V < 10$  mm/s）の各成形体の摩擦係数に顕著な差異が確認された。in-plane-coarse と in-plane-fine では，なじみ前と比較して高摩擦係数を示した一方，out-of-plane-coarse ではなじみ前後では摩擦係数に顕著な差異は確認されなかった。従って，CNF 繊維の配向方向が高濃度 CNF 成形体の摩擦性能に顕著な影響を及ぼすことが確認された。図3と図4に in-plane-coarse-CNF 成形体と out-of-plane-coarse-CNF 成形体の摩擦試験前後の AFM 凝着力像を示す。図3より，in-plane-coarse では，摩擦前では，繊維状の凝着力の分布が確認された一方，摩擦後には繊維状の凝着力分布が消失し，凝着力の高い明領域が拡大した。一方，out-of-plane-coarse では摩擦前後の凝着力変化は僅かであり，in-plane-coarse と比較して低凝着性を示した。CNF 繊維は C 軸方向（繊維軸方向）に対して垂直に方向に多数の水酸基構造を有している。すなわち，in-plane-CNF 成形体では官能基が摩擦面側に露わになっており，この界面構造が高凝着性を示したものと推定される。一方，out-of-plane-CNF 成形体では，理想的には C 軸に配向した繊維が摩擦面に露わになっており，表界面における水酸基の寄与が小さく，低凝着性を示したものと推定される。摩擦前後の摩擦力・凝着力変化については，CNF 繊維の「解繊」に起因する表界面における水酸基の増加によるものと推定されるが，その詳細は今後の検討課題とする。

### 4. 結言

本報では，高濃度 CNF 成形体の境界潤滑特性に及ぼす繊維構造の影響について調査した。その結果，CNF 繊維配向が成形体の摩擦特性に顕著に寄与することを明らかとした。詳細なメカニズムについては，今後の検討課題とする。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K20402・24K17195 の助成を受けたものです。CNF サンプルをご提供いただいた中越パルプ工業株式会社 橋場 洋美様にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

### 文献

- 1) H. Okubo et. al.: Tribol. Lett., 71, 83 (2023) 1–10.

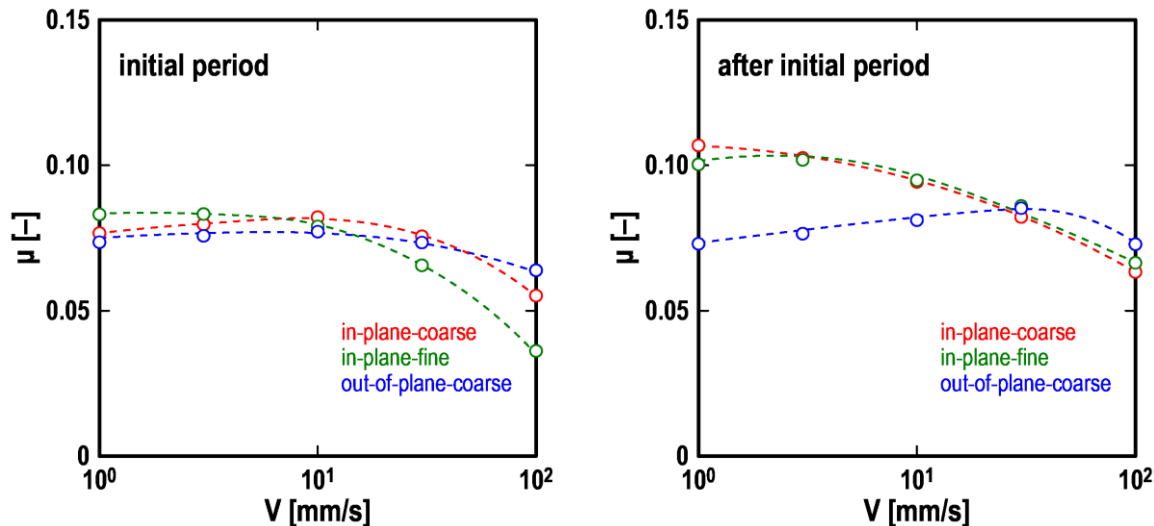


図2 摩擦係数の速度依存性：なじみ試験前（左）・なじみ試験後（右）

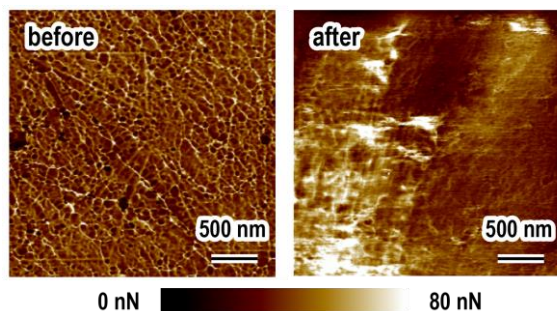


図3 ナノ凝着力像：摩擦前（左）・摩擦後（右）  
(in-plane-coarse-CNF)

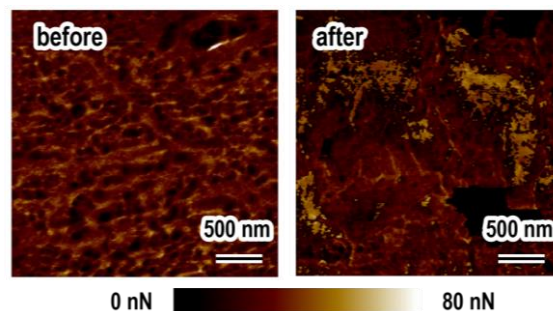


図4 ナノ凝着力像：摩擦前（左）・摩擦後（右）  
(out-of-plane-coarse-CNF)