

# 二酸化炭素排出量削減とサーキュラーエコノミーに貢献する セルロース繊維強化リサイクル樹脂の開発

材料・素材技術グループ 仙波 健、伊藤 彰浩、野口 広貴、横田 久幸、北川 和男  
エンブラ株式会社 田中 将平、原田 寿志  
株式会社横井製作所 横井 洋治、横井 慎一

## 要旨

二酸化炭素排出量削減とサーキュラーエコノミーに貢献するため、セルロース繊維強化リサイクル樹脂の開発に取り組んだ。セルロース繊維には、光合成により大気中の二酸化炭素が固定化されている植物由来のパルプ、マトリックスには繊維製品工場において未利用のまま廃棄されていた繊維をリサイクルしたポリアミド6 (rePA6) を使用した。これらをCNF強化プラスチックの一貫製造プロセスである「京都プロセス」により複合化した。得られたパルプ強化rePA6材料は、優れた力学的特性(曲げ特性)を有し、さらにガラス繊維強化rePA6と比較して耐摩耗性が優れていた。社会実装の可能性を検証するための生産機による成形試験においては、加工時の高温にも耐え、成形不良の無い良好な製品を得ることに成功した。

キーワード：セルロース繊維、サーキュラーエコノミー、リサイクル、耐摩耗性、ポリアミド樹脂

## 1. はじめに

耐腐食性及び軽量性を有するプラスチックは、自動車や航空機分野における金属の代替により、製品の長寿命化、燃費の向上を達成し、二酸化炭素排出量削減に大きく貢献している。その一方で、原料や生産工程における化石資源の使用、また耐腐食性及び軽量性により、プラスチックが分解されることなく海へ流出する海洋汚染が懸念されている<sup>1)</sup>。このように素材は見る側面によって大きくその立場と評価が変化する。全ての側面を満足する材料を得ることは難しいが、金属及びセラミックにないプラスチックの強みである軽量性及び加工性を維持しながらの高強度化、または再生可能資源の添加や生分解性などの低環境負荷機能を付与することが、これからのプラスチックには求められている。これらを実現するプラスチック用強化材としてセルロースナノファイバー(CNF)が注目されている<sup>2)、3)</sup>。植物由来のCNFは地球上に最も大量に存在するバイオマス繊維であり、ガラス繊維(2.5g/cm<sup>3</sup>)や炭素繊維(1.8g/cm<sup>3</sup>)よりも軽量(CNFの密度は1.5g/cm<sup>3</sup>)であり、その結晶構造により高弾性、高強度(鋼鉄以上)、低熱膨張(0.1ppm/K)、さらに生分解性を有する。高い性能と低環境負荷機能を備えることから、プラスチック強化繊維として有望である。

このような中、令和4~5年度の環境省「脱炭素革新素材セルロースナノファイバー普及のための課題解決支

援事業委託業務【ナノセルロースプロモーション(NCP事業)】では、想定される商品ごとに調製されたCNF強化プラスチックの成形技術支援を行い、CNF素材の社会実装を目指した<sup>4)</sup>。

本報告では、NCP事業の中で取り組んだセルロース繊維強化リサイクル樹脂の摺動部品への適用可能性の検証(図1)について報告する。ここでは実製品への早急な展開のため、強化繊維にはCNFではなく安価で入手容易なパルプ、そしてマトリックス樹脂にはサーキュラーエコノミーの観点からrePA6を使用した。これらの複合材料であるパルプ強化rePA6の力学的特性と摺動特性の評価、及び製品への成形試験を実施した。

## 2. 実験

### 2.1 材料

マトリックス樹脂には繊維工場において未利用のまま廃棄されていたPA6繊維をリサイクルしたrePA6(エンブラ(株)製)、強化繊維には漂白パルプを用い、パルプ強化rePA6(以下パルプ-rePA6)を作製した。比較材料としてガラス繊維(GF)20wt%強化rePA6(エンブラ(株)製、黒色グレード、以下GF-rePA6)を準備した。

### 2.2 複合化と試験片作製

rePA6とパルプの複合化には二軸溶融混練機(スクリーン径15mm、L/D=45)を用いた。混練設定温度は

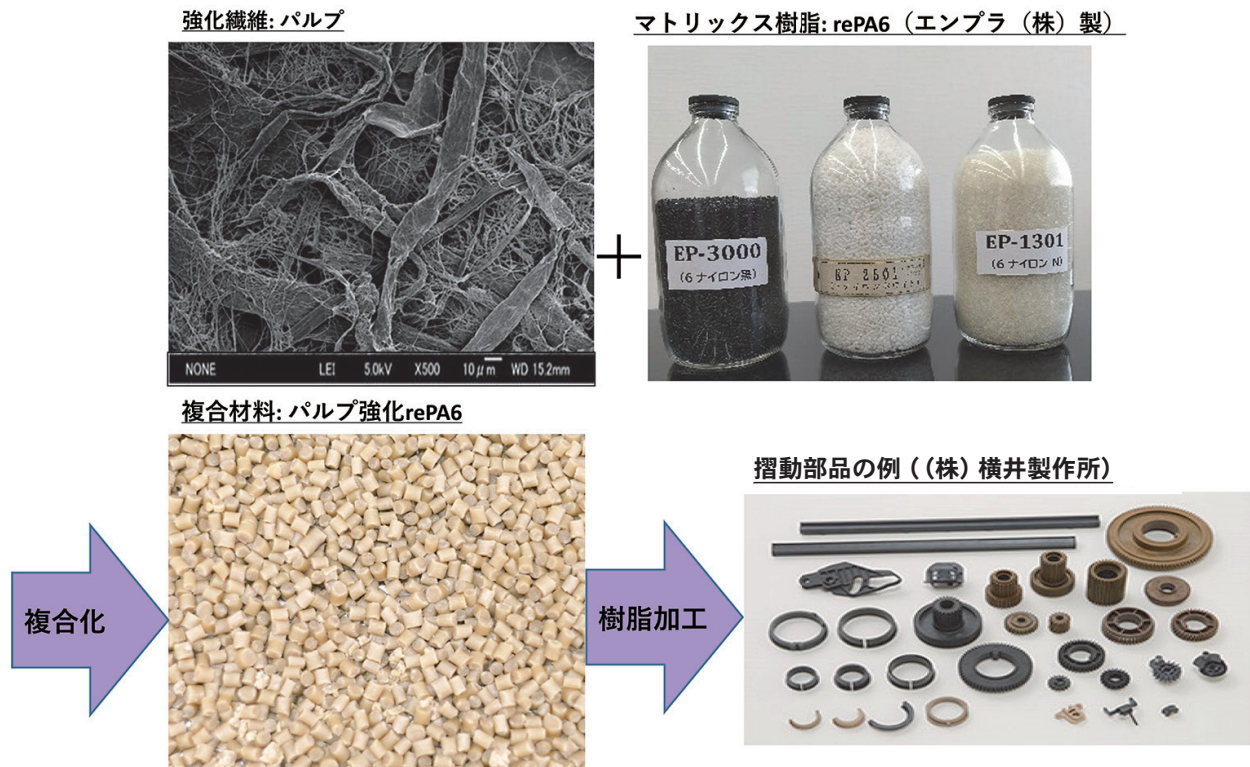


図1 セルロース繊維強化リサイクル樹脂の摺動部品への適用可能性の検証のイメージ

220℃である。得られたパルプ-rePA6、そして比較材料である非強化-rePA6、及びGF-rePA6をインラインスクリー式射出成形機（型締力7トン）により短冊形試験片（幅10mm、長80mm、厚4mm）に加工した。

### 2.3 評価（光学顕微鏡観察、曲げ試験、衝撃試験及び摺動試験）

光学顕微鏡観察では、短冊形試験片より小片を切り出し、熱プレスしたフィルムを作製した。なお、非強化-rePA6及びパルプ-rePA6は偏光モード、GF-rePA6は位相差モードにより観察した。

曲げ試験（三点曲げ試験）には、万能試験機を使用し、試験速度を10mm/min、支点間距離64mmの条件における曲げ弾性率及び曲げ強度を測定した。

衝撃試験には、Izod型試験機（ハンマー容量2.75J）を使用し、Izod衝撃強度を測定した。

摺動試験には、スラスト摩耗試験機を用いた。パルプ-rePA6及びGF-rePA6の短冊形試験片を熱プレスすることで1mm厚のプレート試験片を作製した。そのプレート試験片上でアルミ（A5052）製のリング（直径15mm）を回転数650rpm、負荷5N・mにて4時間回転させた。

試験前後のプレート試験片及びアルミリングの重量及

び高さ変化を測定した。

### 2.4 製品への成形試験

（株）横井製作所の生産用射出成形機を用いてパルプ-rePA6の成形試験を実施した。生産用射出成形機では多くの材料が必要となるため、2.1～2.3で使用したパルプ-rePA6と同組成の材料を、外部機関において作製した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 外観及び光学顕微鏡観察

図2に短冊形試験片の外観を示す。非強化-rePA6はPA6のナチュラル色である白色、GF-rePA6は黒色グレードであるため黒色の試験片となった。パルプ-rePA6は220℃という高い設定温度において混練及び射出成形したため、セルロースの劣化による着色が懸念されたが、淡いベージュ色程度の着色であった。

図3に各材料の光学顕微鏡観察像を示す。非強化-rePA6の低倍率像では高次構造を観察できなかったが、高倍率像ではPA6の球晶が白い斑模様として観察された。GF-rePA6の低倍率像ではGFを明確に識別することが困難であったが、高倍率像では直径20μm程度のGFが観察された。パルプ-rePA6の低倍率像及び高倍率像

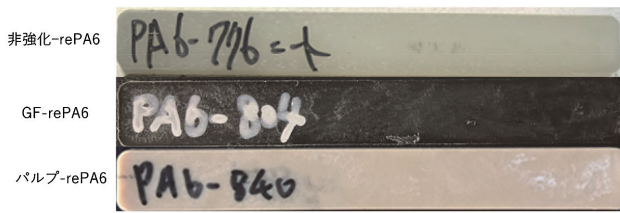


図2 短冊形試験片の外観

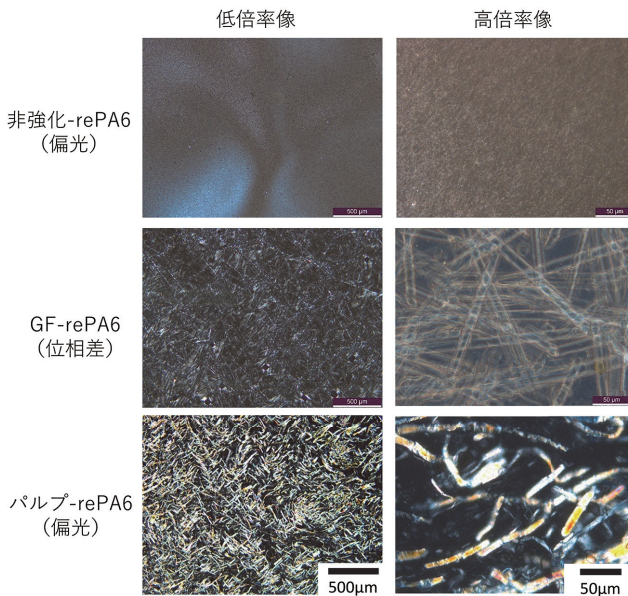


図3 光学顕微鏡観察像

においては、パルプを鮮明に観察できた。パルプは全般的にGFよりも細く、短い繊維として分散していた。

### 3.2 曲げ試験及び衝撃試験

表1に各材料の曲げ特性及び衝撃特性を示す。GF-rePA6は非強化-rePA6と比較して、曲げ弾性率が約3倍(2090→6120MPa)、曲げ強度が2倍以上(83.1→181MPa)、衝撃強度は約1.4倍(6.70→9.32kJ/m<sup>2</sup>)となり、力学的特性が大きく向上した。一方パルプ-rePA6は非強化-rePA6と比較して、曲げ弾性率が約2倍(2090→4000MPa)、曲げ強度が約1.5倍(83.1→114MPa)、衝撃強度は約半分(6.70→3.54kJ/m<sup>2</sup>)となった。つまりパルプとの複合化により、曲げ特性は向上し、衝撃強度は低下した。

表1 各材料の曲げ特性、衝撃特性及び摺動特性

材料の概要	曲げ試験		Izod衝撃試験	摺動試験			
				アルミリング		プレート試験片	
	弾性率(MPa)	強度(MPa)	衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> )	重量変化量(g)	高さ変化量(mm)	重量変化量(g)	高さ変化量(mm)
非強化-rePA6	2090	83.1	6.70	未測定			
GF-rePA6	6120	181	9.32	-0.022	-0.633	-0.005	-0.350
パルプ-rePA6	4000	114	3.54	0.000	0.000	0.000	0.000

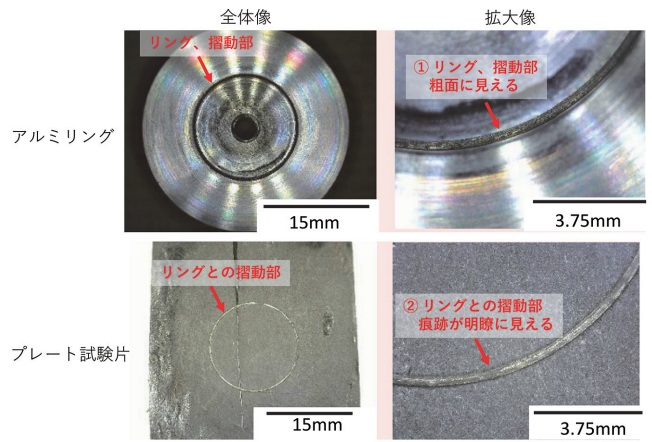


図4 GF-rePA6のスラスト摩耗試験後のアルミリングとプレート試験片

### 3.3 摺動試験

図4にGF-rePA6のスラスト摩耗試験後のアルミリングとプレート試験片の外観写真を示す。アルミリングは粗面化し(図4の①)、プレート試験片はアルミリングとの接触による痕跡が明瞭に形成されていた(図4の②)。図5にパルプ-rePA6のアルミリングとプレート試験片の外観写真を示す。GF-rePA6と比較し、アルミリングの粗面化は抑制され(図5の①)、プレート試験片は痕跡が目立たなかった(図5の②)。

表1に摺動試験後のアルミリング及びプレート試験片

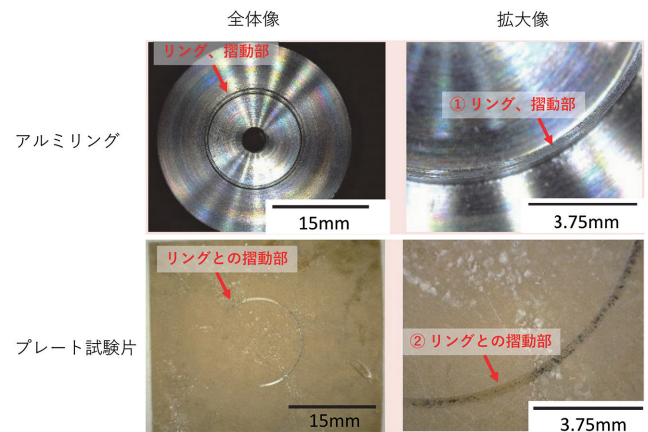


図5 パルプ-rePA6のスラスト摩耗試験後のアルミリングとプレート試験片



図6 ローラー部品の外観（(株)横井製作所）

の重量変化量及び高さ変化量を示す。GF-rePA6のアルミリング及びプレート試験片では、いずれも摩耗により重量減少と高さの変化が見られた。それに対してパルプ-rePA6では、重量及び高さは変化しなかった。

### 3.4 製品への成形試験

図6に(株)横井製作所の生産用射出成形機を用いて作製した成形品の外観を示す。成形品はコンベヤー用ローラー（外径約20mm、長さ約50mm）である。二重円筒であり内側の円筒と外側の円筒を6本の柱でつないだ構造である。充填不良、フローマーク、クラック、バリ、焼けなどの成形不良は無く、良好な製品を得ることができた。このローラーは、工場などのコンベヤーにおいて使用されるため、高い耐久性や耐摩耗性が要求される。表1に示したように、パルプ-rePA6では曲げ特性が向上し、さらに優れた耐摩耗性を有することから、ローラー部品の長寿命化が期待できる。

## 4. まとめ

本報告では、パルプ-rePA6の摺動部品への適用可能性を検証するため、その力学的特性及び摺動特性を評価した。曲げ特性及び耐衝撃性はGF-rePA6に及ばなかったが、耐摩耗性は優れていた。この特徴を活かせる用途として、コンベヤー用のローラー部品を選定し、生産機により成形試験を実施したところ、成形加工性に問題ないことが確認できた。本材料は、パルプ及びrePA6を構成材料とすることから、二酸化炭素排出量削減とサーキュラーエコノミーに貢献することが期待でき、さらに安価である。今後、これらの特徴をさらに高度化すると

ともに、サプライチェーンの構築を目指していきたいと考えている。

### 謝 辞

本研究は、環境省「令和5年度脱炭素革新素材セルロースナノファイバー普及のための課題解決支援事業委託業務」において実施した。関係各位に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) R. Stafford, P. J. S. Jones: *Marine Policy*, 103, 187-191 (2019).
- 2) 矢野浩之: 日本ゴム協会誌, 85 (12), 376-381 (2012).
- 3) K. Abe et al.: *Biomacromol.*, 8 (10), 3276-3278 (2007).
- 4) <https://cnf-ncp.net/>