

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 31 日

研究課題	アバカから生まれるセルロースナノファイバー（CNF）フィルムとその非破壊品質検査技術の開発	助成金額
		100 万円
助成名	若手研究助成	
ふりがな	ま とく	研究助成申請年度
研究者氏名	馬 特	2024 年度
所属機関	名古屋大学大学院生命農学研究科 生物システム工学研究室	研究期間
		2025 年 4 月-2026 年 3 月
役 職	助教	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要 研究背景と目的 アバカ（マニラ麻、学名: <i>Musa Textilis Nee</i>）は、バショウ科（<i>Musaceae</i>）に属する多年生植物で、フィリピン固有の植物である。アバカ繊維は強靱で軽く、ラフな素材感と繊細なデザインを柔軟に表現できるため、古くから農業、工業用ロープの主要原料として使用されてきた。しかし、1960 年代以降、合成繊維の台頭により、多くの天然繊維ロープが合成繊維製に取って変わられた。とはいえ、アバカ繊維特有の強度に優れ、他の素材と比べ屈伸性、耐久性に優れている利点があるから、合成繊維では出せない特定の機能を求められるロープ分野において未だに重宝されている。さらに、アバカの生命力が強く親株を残すことで半永久的に収穫が出来ることから、サステナビリティの観点からでも優れた原料の一つと言える。近年、経済的および環境的理由から、CNF はさまざまな科学および産業界の関心を引き付けている。アバカ繊維はその大規模生産の理想的な原材料とも言える。 先行研究では、2,2,6,6-テトラメチルピペリジン-1-オキシラジカル（TEMPO）という触媒を用いて、木材パルプ繊維を室温条件下で効率よくセルロース改質し、水溶媒でコーティングすることで透明な膜を形成することに成功した（Saito et al. Biomacromolecules 2007, 8, 8, 2485-2491）。一方、アバカは非木材植物材料であり、成長期間が短いことから、その利用可能性に対してますます注目が集まっている。また、アバカ由来のナノフィブリルは、直径約 20 nm の細いフィブリルが高い個別化率を持ち、比較的短い長さを示す特徴もある。このような木材対象の技術を非木材植物に適用できたら、森林資源への依存を減らし、持続可能な資源利用に貢献できる。しかし、透明な膜の形成過程では、目視による品質管理は非常に困難である。従来の物理・化学分析はほとんど破壊的な手法であり、さらに分析に時間がかかるという欠点がある。 本研究では、より簡便な処理でアバカパルプから CNF への抽出手法およびその過程の非破壊品質管理の分光イメージング技術の開発を行う。物質の内部の化学組成や物理構造に応じて変動する近赤外光の吸収・散乱

現象に由来するスペクトルデータを画素ごとに取得できる近赤外ハイパースペクトラルイメージング(NIR-HSI)分光法および機械学習をアバカパルプ由来の CNF フィルムの開発に融合させることで、最適な生産条件をより早く見つけることが期待できる。さらに、この品質の可視化研究を通じて、環境負荷の低減に貢献するフィルム製品の開発も促進されることが望まれる。

研究手法

アバカパルプの前処理およびナノセルロースの抽出： 2%のコンシステンシーを持つアバカパルプスラリーを、塩化カリウム-塩酸緩衝溶液を使用して pH2 で 2 %の亜塩素酸ナトリウムと混合し、一晚攪拌され、パルプを収集する。前処理されたアバカ繊維を pH10 に設定された炭酸ナトリウム-炭酸水素ナトリウム緩衝溶液で解繊する。さらに、臭化ナトリウム (1.0%)、TEMPO (0.16%) および次亜塩素酸ナトリウム (23mol/kg) を加え、連続的に攪拌し、曇った溶液が観察されるまで続ける。最後に、異なる乾燥条件によって高品質な CNF ファイルの作成を試みた。

熱分析： アバカパルプと CNF フィルムの熱特性は、示差走査熱量計を使用して特徴付ける。アバカパルプおよびキャスティング方法の代表的なサンプルは、30° C から 500° C の温度範囲で、10° C/min の昇温速度かつ窒素環境下で分析する。熱重量分析計を使用して、温度が質量に与える影響を測定した。

X 線回折 (XRD) 技術： X 線赤道回折プロファイルにかける。回折強度は 2° から 60° (2θ) の角度で記録する。結晶化度指数は Segal の方法を使用して測定した。

電子顕微鏡： アバカパルプとナノセルロースの形態分析は電子顕微鏡を使用して行った。

CNF フィルムの引張試験： CNF フィルムの物理特性は、厚さ試験器と分析天秤を使用して厚さおよび重量を評価する。3 つの試料グループを準備し、グループごとに 5 つの試験材料を用意した。サンプルは試験前に 23° C、湿度 50%の条件で 1 週間放置し、CNF フィルムの引張強度を測定した。

NIR-HSI 分光法による非破壊品質評価： CNF フィルムを NIR-HSI カメラとレーザー変位計を使用し、従来の物理・化学の手法によって得られた品質パラメーター(重量、厚さ、引張強度)を使って最適検量線の作成を行った。その後、分光画像処理および機械学習技術を融合させ、検量線の構築を試みた。さらに、UV 照射による改質および加速劣化実験を実施し、CNF フィルムの光劣化挙動および構造変化を解析、バイオマス由来フィルムの耐久性向上に向けた材料設計指針の構築を目指した。

研究成果：

アバカ繊維に対して TEMPO 媒介酸化処理を施し、一晚反応を行った結果、固形分濃度 2.23%を有する白色ゲル状物質が 46.7%の収率で得られた。得られた白色ゲル状物質を電子顕微鏡により観察したところ、アバカ繊維の直径が 16.28 μm から 3.12 nm まで減少しており、繊維長は 100~200 nm の範囲であったことから、セルロースナノクリスタル (CNC) が生成していることが確認された。

さらに、ナノセルロースフィルムを空気乾燥法 (CNC-VC) および真空乾燥法 (CNC-OD) により作製し、CNC 濃度がフィルムの物理的特性、形態特性、熱特性および機械的特性に及ぼす影響を評価した。FTIR 分析の結果、アバカ繊維、CNC-VC フィルムおよび CNC-OD フィルムはいずれもセルロース I 型に特徴的なスペクトルを示した。また、TEMPO 酸化により導入されたカルボキシル基に由来すると考えられる 1620 cm^{-1} および 1720 cm^{-1} の 2 つの特徴的な吸収ピークが観測された。さらに、カルボキシル基の導入によりセルロースの熱安定性が低下することが示された。X 線回折 (XRD) 測定の結果、CNC フィルムの結晶化度指数はアバカ繊維と比較して低下していた。機械特性評価では、CNC-VC フィルムは CNC 濃度 0.4%において最大引張強度 88.30 MPa を示した。一方、CNC-OD フィルムでは CNC 濃度 0.8%において最大引張強度 89.72 MPa を示した。

NIR-HSI を用いて、セルロースナノファイバー (CNF) フィルムの物性を非破壊で評価する手法について検討

した。CNF-VC フィルムおよび CNF-OD フィルムを対象とし、多変量解析手法である部分最小二乗回帰（PLSR）を用いて、NIR スペクトルからフィルム重量、厚さ、密度および引張強度の推定を試みた。その結果、フィルム重量および厚さについては決定係数（ R^2 ）が 0.87～0.98 と高い値を示し、高精度な非破壊推定が可能であることが明らかとなった。一方、引張強度については、NIR スペクトルとの相関が十分ではなく、高精度な推定モデルの構築は困難であった。以上より、NIR 分光法と PLSR を組み合わせることで、CNF フィルムの重量および厚さを迅速かつ非破壊で評価できる可能性が示された。一方で、機械特性の高精度推定には、画像情報や他のセンシング技術との融合が必要であることが示唆された。また、UV 照射が CNF フィルムの化学構造および機械特性に及ぼす影響をスペクトル上の変化を確認でき、CNF フィルムの耐候性向上に向けた材料設計指針を得ることができた。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

CNF フィルムは食品包装材や各種パッケージ材料分野への応用が期待される。近年、プラスチック廃棄物削減やカーボンニュートラル実現に向けて、生分解性材料や再生可能資源由来材料への関心が高まっている。一方で、バイオマス由来フィルムは機械強度や耐久性の不足、品質ばらつきが大きさが実用化の課題となっている。本研究で開発した CNF 強化 TPS フィルムは、従来の TPS フィルムより高い機械特性を有し、包装用途に必要な強度向上が期待できる。さらに、NIR 分光法と機械学習を組み合わせた非破壊品質評価システムを導入することで、製造工程における品質のリアルタイム監視が可能となり、不良品の発生抑制や生産ロスの低減に貢献できる。これにより、品質が安定した高機能バイオマスフィルムの効率的な製造が実現できると期待される。以上より、本研究成果は、環境負荷低減と高機能化を両立した次世代パッケージ材料の開発に貢献するとともに、持続可能な包装産業の実現に寄与することが期待される。

最後に、このたびのフジシール財団様からのパッケージ若手研究助成による多大なるご支援に対し、心より厚く御礼申し上げます。本助成のご支援により、有意義な成果を得ることができました。ここに深く感謝申し上げます。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

2025 年 5 月に神戸で開催された「11th World Congress on Advanced Materials」において、「Production of nanocellulose paper from abaca fibers」の題目で研究発表（共同研究者: Anniver Ryan Lapuz, Forest Products Research and Development Institute, Republic of the Philippines）