

令和 8 年 10 月 22 日

色を落とさず、新しい色へ —超臨界二酸化炭素流体でポリエステル繊維を変色させ、 循環利用に道—

本研究成果のポイント

- ◆脱色せず、異なる色のポリエステル繊維を超臨界二酸化炭素流体（注 1）中で処理し、染料の移動・再分配によって均一な新しい色を形成する技術を開発しました。
- ◆繊維の色と混合比から、染料間の相互作用を考慮した配色モデルを構築し、変色処理後の色を高精度に予測できるようになりました。
- ◆水、追加の染料、有害な脱色薬剤をほとんど用いない直接変色により、有色ポリエステルの資源循環への応用が期待されます。

概要

福井大学カーボンニュートラル推進本部の任建華特命講師、工学系部門の田畑功研究員、廣垣和正教授の研究グループは、染色済みのポリエステル繊維を脱色せず、超臨界二酸化炭素流体の中で異なる色の繊維と一緒に処理することで、繊維内の染料を移動・再分配させ、均一な新しい色を形成する方法を開発しました。黄色、赤色、青色の繊維について、色の組合せと混合比を変えて処理した結果、二色および三色から多様な色を作り分けられることを確認しました。さらに、染料同士の相互作用を取り入れた配色モデルを構築し、処理後の色濃度を示す K/S 値（注2）の計算誤差を、代表的な3波長で従来の単純加算より大幅に低減しました。本成果は、繊維、染料、薬剤をできるだけ廃棄せず、有色ポリエステルを繊維から繊維へ循環利用する新しい選択肢を示すものです。今後は、古着などの廃棄繊維に含まれる多様な素材や染料への適用を検証します。

〈研究の背景と経緯〉

衣服や寝具など、私たちの暮らしを支える繊維製品は、原料の製造から染色、洗浄、乾燥まで、多くの工程でエネルギーや水を使います。使い終えた製品を再び資源として活用し、製造時の負担を減らすことは、繊維産業の省エネルギーと温室効果ガス排出削減、ひいてはカーボンニュートラルの実現に向けた重要な課題です。

ポリエステルは優れた性能と低コストから世界の繊維使用量の 59%以上を占め、その割合は年々増加しています。一方、世界では年間 9,200 万トンを超える繊維材料が着用後に廃棄されており、その約 9 割が埋め立てや焼却によって処分されています。これは大きな資源の浪費であるとともに、深刻な環境汚染の要因ともなっています。

廃棄繊維をリサイクルするには、染料を繊維から取り除くか、色の異なる繊維を同じ色に染め直す必要があります。しかし市販の染色製品は色落ちしにくいよう設計されているため、染料を繊維から分離することは容易ではありません。強力な酸化・還元反応を使えば染料を分解して脱色できますが、大量の薬品と水を消費するうえ繊維の強度を損なう欠点があります。また、ポリマーを一度モノマーに分解して再重合する方法もありますが、エネルギーやコストの面で実用化のハードルが高いのが実情です。

本研究グループは 30 年にわたり、繊維材料分野への超臨界二酸化炭素流体の応用研究に取り組んできました。超臨界二酸化炭素流体は、気体のような高い拡散性と液体のような高い溶解力をあわせ持つ状態の二酸化炭素です。1989 年にドイツの研究機関が染色媒体としての利用を始めて以来、水を使わない・薬品使用量が少ない・排出物が少ないという特長から、染色や機能加工への応用が進められてきました。

本研究グループはこれまでに、超臨界二酸化炭素流体中で染料が繊維の非晶領域（注 3）を移動し、繊維の発色の濃さを制御できることを見出しており、この現象を応用すれば、脱色を経ずに繊維の色を直接作り変えられるのではないかと考えました。そこでまず、染料の種類と濃度を制御した既知組成のポリエステル生地をモデル試料として、色変化のメカニズム解明と色合わせ予測モデルの構築に取り組みしました。

〈研究の内容〉

本研究では、廃棄繊維に見立てたモデル試料として、代表的な 3 種類の分散染料（注 4）（黄・青・赤）で単色に染色し、染料組成を固定したポリエステル生地を用い、超臨界二酸化炭素流体中（温度 120℃、圧力 25MPa）で色変化処理を行いました。色の異なる生地を任意の質量比で重ね合わせて処理すると、加熱・加圧された二酸化炭素が繊維内部に浸透して繊維を膨潤させ、繊維の非晶領域に固定されていた染料を移動させます。染料は流体を介して繊維間で脱着・吸着を繰り返しながら再分配し、最終的にすべての生地が均一な新しい色へと変化することを確認しました。例えば黄色に染めた生地と青色に染めた生地を組み合わせると緑色の生地が得られ、その発色の濃さ（K/S 値）は、元の黄・青 2 枚の生地の K/S 値を波長ごとに足し合わせた曲線とほぼ一致しました。

さらに、黄・赤・青の 3 色の生地をさまざまな質量比で組み合わせると、得られた色の K/S 値を測定しました。その結果、個々の染料の K/S 値を単純に足し合わせた理論値よりも、実測値がわずかに低くなることを発見しました。これは、染料同士が繊維上で互いに影響し合っている（染料間相互作用）ためと考えられます。そこで、2 つの染料間の相互作用の大きさを表す係数を実験データから算出し、この相互作用を組み込んだ色合わせ予測モデルを構築しました。

このモデルにより、処理後の K/S 値の予測誤差（二乗平均平方根誤差）は、波長 410nm で 0.44 から 0.17、波長 530nm で 0.78 から 0.26、波長 680nm で 0.40 から 0.05 まで大幅に改善しました。この結果は、対象とする繊維の染料組成が分かれば、目的の色を作るための混合比率をあらかじめ精度よく設計できることを意味しており、今後、複数

の染料が混在する実際の廃棄ポリエステル繊維への応用が期待されます。また、処理の前後で繊維表面や断面の微細構造に変化は見られず、繊維の強度や形態を損なうことなく色だけを変えられることも確認しました。

〈今後の展開〉

本研究では、染料組成を制御した既知のポリエステル生地をモデル試料として、超臨界二酸化炭素流体による直接調色の原理と色合わせ予測モデルを確立しました。研究グループは次の段階として、複数の染料が混在し組成が未知である実際の廃棄ポリエステル繊維を対象とした処理実験を進め、本手法を実用的な廃棄繊維リサイクル技術へと発展させることを目指します。あわせて、実験条件（温度・圧力・処理時間など）の最適化や、小規模から実機規模へとスケールアップした処理装置による実証試験にも取り組みます。繊維産業は世界で 2 番目に環境負荷の大きい産業とされており、本技術は廃棄繊維の資源循環を促進し、繊維産業のカーボンニュートラル達成に貢献するものと期待されます。

〈参考図〉

図 1：有色ポリエステル繊維の「繊維から繊維へ」のリサイクル

(a) 従来技術、(b) 本研究

(a) 従来の「脱色－再染色」プロセス



(b) 超臨界CO₂流体(scCO₂)処理による直接変色

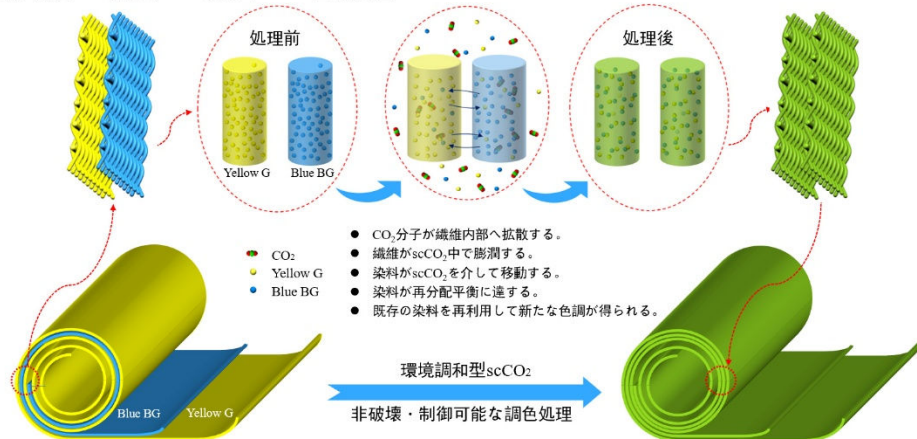
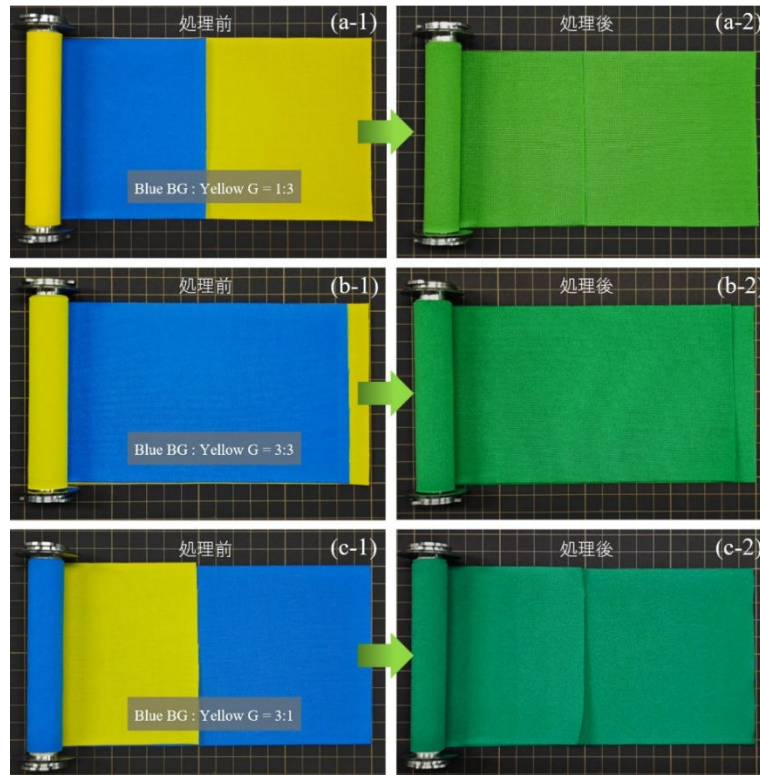


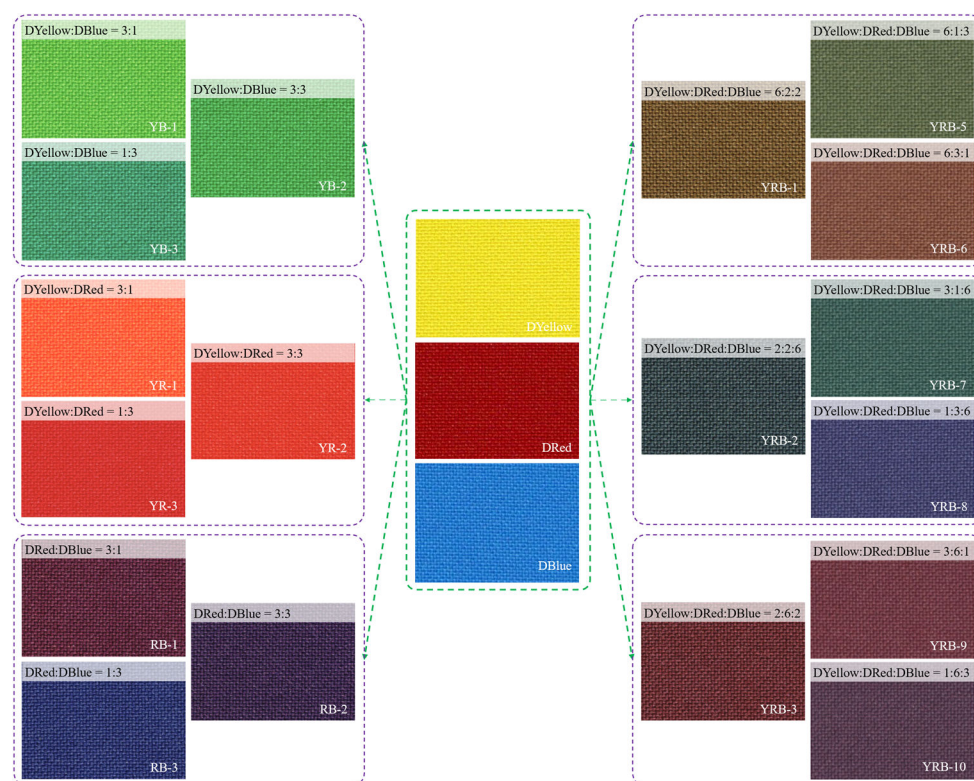
図 2：超臨界二酸化炭素流体変色処理の実例



青色に染色した生地と黄色に染色した生地を、青：黄の質量比を 1:3 (a)、3:3 (b)、3:1 (c) と変えて重ね合わせ、超臨界二酸化炭素流体で処理した。処理を行うと、染料は流体を介して繊維間で移動・再分配し、90 分間の処理を経て、いずれの質量比においても色むらのない均一な色の生地へと変化した。得られる緑色の濃淡は元の原料の比率に応じて異なり、青の割合が多い (c) ほど青みがかった深い緑色に、

黄の割合が多い（a）ほど黄緑色に近い明るい緑色になった。この結果は、染め分けた生地を混合比率を調整することで、狙った色合いへ精密に調色できることを裏付けている。

図 3：二色系・三色系の染料配合で得られる多様な発色



中央の 3 枚は処理前の単色生地（上から黄色：DYellow、赤色：DRed、青色：DBlue）である。これらを 2 色または 3 色の組合せで質量比を変えて重ね合わせ、超臨界二酸化炭素流体で処理すると、周囲に示すように多様な色合いの生地が得られた。黄と青の組合せでは緑系、黄と赤の組合せでは橙系、赤と青の組合せでは紫系の色に変化し、3 色を組み合わせた場合には、混合比率に応じてオリーブ色、濃緑、ワインレッドなど、より幅広い色相の生地が得られた。この結果は、あらかじめ用意する染料の種類と混合比率を選ぶことで、狙った色合いを幅広く作り分けられることを裏付けている。

図 4：色とりどりの廃棄繊維を単一色へ — 循環利用イメージ図



様々な色に染まった廃棄ポリエステル繊維であっても、超臨界二酸化炭素流体で処理すれば、繊維間で染料が移動・再分配し、目的とする単一の色へと均一にそろえることができる。これにより、色ごとに選別する手間や脱色工程を経ることなく、廃棄繊維を同じ色の再生資源としてまとめて再利用できるようになり、繊維から繊維への循環利用（リサイクル）を後押しすることが期待される。（本図は本技術が目指す将来の応用イメージであり、本研究では染料組成を制御したモデル試料を用いて原理を実証した）

〈用語解説〉

注 1 超臨界二酸化炭素流体 (scCO₂)

二酸化炭素の温度と圧力が臨界点（約 31℃、7.38 MPa）を超えた流体。気体に近い拡散性と液体に近い密度・溶解能力を持つ。これらの性質は温度・圧力により変化する。

注 2 K/S 値

布の反射率から求める色濃度の指標。値が大きいほど、一般に色が濃いことを示す。本研究では 360～740 nm の反射率を 10 nm 間隔で測定した。

注 3 非晶領域

ポリエステル分子鎖が規則正しく並ばず、比較的動きやすい領域。分散染料は主としてこの領域に存在する。

注 4 分散染料

水に溶けにくい合成繊維用の染料。微細な状態でポリエステル内部へ拡散し、非晶領域に保持される。

〈論文タイトル〉

Sustainable and Predictable Color Change of Dyed Polyester Fibers through Supercritical Carbon Dioxide Fluid Treatment

超臨界二酸化炭素流体処理による染色ポリエステル繊維の持続可能かつ予測可能な色調変化

〈著者〉

Jianhua Ren 任 建華（カーボンニュートラル推進本部 特命講師）

Isao Tabata 田畑 功（福井大学 学術研究院工学系部門 繊維先端工学領講座 研究員）

Kazumasa Hirogaki 廣垣 和正（福井大学 学術研究院工学系部門 繊維先端工学講座 教授）

〈発表雑誌〉

雑誌名: Journal of Supercritical Fluids

（カタカナ表記：ジャーナル・オブ・スーパークリティカル・フルーイズ）

（2026 年 5 月 29 日に掲載）

雑誌掲載の場合：237 (2026), 107053

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844626001695>

DOI 番号：10.1016/j.supflu.2026.107053

〈研究支援〉

プロジェクト（１）： 令和７年度 福井大学カーボンニュートラル推進本部

実証実験研究助成 「資源循環繊維産業を実現する超臨界染色・脱色加工とリサイクル技術の総合的開発」

プロジェクト（２）： 令和７年度 福井大学繊維・マテリアル研究センター

一般研究助成 「超臨界二酸化炭素流体を用いた着色ポリエステル繊維による持続可能かつ制御可能な調色に関する研究」