

二酸化炭素で染色・機能加工 ～超臨界二酸化炭素で材料加工～

奥 林 里子^{1*}

Manufacturing with carbon dioxide - Material processing without using water -

Satoko Okubayashi^{1*}

概要

人類はこの150年余り、生存に必要な「衣」を人工的に作り出すことで、多くの二酸化炭素を排出し水を汚してきました。衣服の生産から着用、廃棄において、将来にわたり持続可能であるサステナブルファッションを目指し、地球温暖化の原因である二酸化炭素を有効活用する、水を使わない衣類の染色と機能加工の技術を紹介します。

1. はじめに

私たちの生活に不可欠な「衣」。産業革命以降、機械を使った大量生産により、誰でも簡単に安く買うことができるようになった。その一方で、大量消費、大量廃棄による原料（資源）やエネルギー使用の増加や、着用時間が短くなっていることから、現代のファッション産業は、環境負荷が非常に大きい産業と指摘されるようになり、国際的な課題となっている。この課題を解決するために、国が動き始めている。2021年に環境省が日本で消費される衣類の環境負荷を公表¹⁾すると、2022年には経済産業省が将来の繊維技術の方向性の一つとして、繊維のリサイクルを実現するための技術開発を促進すると明言した²⁾。2023年には、繊維リサイクルのための課題とその解決に向けた取り組みの方向性を示している³⁾。さらに、内閣府直轄で我々の生活になじみ深い消費者庁が、衣類の購入や保管、廃棄に関する消費者の意識を調査し⁴⁾、その情報を環境省と経済産業省と共有しながら、生活者の行動を変えサステナブルファッションを社会に広める活動を実施しようとしている⁵⁾。

我々は、経済産業省が示すサステナブルファッションに向けた一技術として、二酸化炭素を利用した無水技術開発に長年取り組んできた⁶⁾。国土交通省が提示する世界の水資源問題のおもな原因、「人口の増加」、「気候変動」、「水紛争」のうち、人口増加は生活用水だけではなく、発電や製造業の工業用水として使われる水量の増加を意味する⁷⁾。工業用水が増えれば、それだけ汚染された水の排出リスクも高くなり、汚染された廃水が川や海に流されれば、使うことが出来る水の量がさらに減ることとなる。水質汚染は生態系への影響も大きく望ましくない。すなわち、製造工程で水が使われなけれ

2024年9月6日受理。

¹⁾ ㊦611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 繊維機能融合化分野。

* E-mail: satoko_okubayashi@rish.kyoto-u.ac.jp

ば、水不足も水質汚染も起こらないこととなる。一方、地球温暖化をもたらす温室効果ガスのひとつである二酸化炭素⁸⁾については、引続き国連気候変動枠組条約締約国会議(COP)で排出規制など議論されているが、最近では資源として積極的に利用する「カーボンリサイクル」の開発・実装について、エネルギー資源庁がまとめている⁹⁾。二酸化炭素を利用する無水技術は、図1カーボンリサイクルのなかの4.その他：ネガティブ・エミッション¹⁰⁾に相当するが、その例をいくつか紹介する。

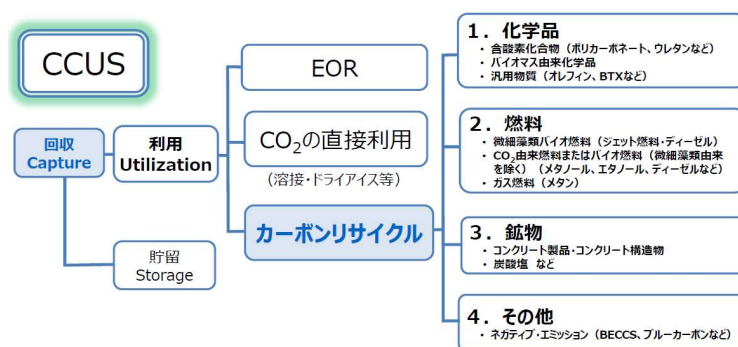


図1：CO₂を再利用する「カーボンリサイクル」⁹⁾

2.二酸化炭素でもものづくり

2.1 超臨界二酸化炭素とは

衣類を染色するには、一般的に染料、水、添加剤が必要とされる。無水染色では水の代わりに、高压容器内で温度31.1℃以上、水深約740mの圧力と同じ7.38MPa以上に加圧した二酸化炭素を使う。液化二酸化炭素を高压容器に入れると、図2の上部左のように二層に分かれているのが観察される。さらに液化二酸化炭素を容器に流し込みながら温度を上げると、やがて一層になりゆらゆら揺れる液体のような状態になる（液体ではない）。この高温高压の状態の二酸化炭素は超臨界二酸化炭素と呼ばれ、染色以外にもコーヒー豆からカフェインを取り除く抽出や、化粧品用ファンデーションに使われる微粒子の調製、スプレー塗装において有害な有機溶剤の代替希釈剤などとして幅広く利用されている¹¹⁾。

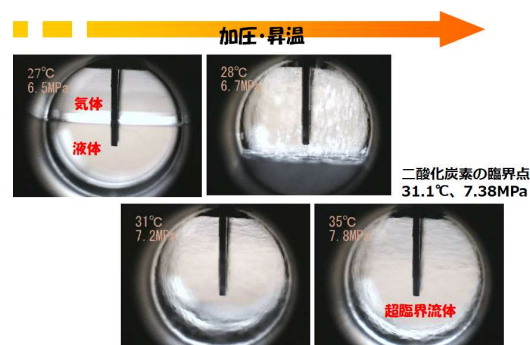


図2：臨界点近傍での二酸化炭素

2.2 従来技術との比較

超臨界二酸化炭素は多くのユニークな特性を持っているなか、染色では水の代わり以外に、圧力を大気圧に戻すと気体となる性質が低環境負荷の鍵となっている。すなわち、染色後に乾燥状態で布を容器から取り出すことができるため、そのあとの熱乾燥の工程が不要となり、工程全体の二酸化炭素排出を小さくすることができる。染色工程について、従来の水を用いた染色と二酸化炭素を利用する染色との違いを図3

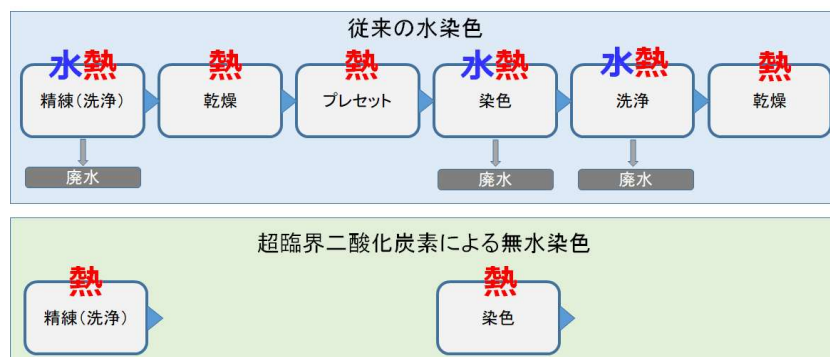


図3：水染色工程と超臨界二酸化炭素を用いた無水染色工程の比較

に簡単にまとめた。Tシャツ 1 枚を染めるために 25 L の水が使用されるとの報告があるが、この水の消費がなくなると同時に「廃水」もなくなり、さらに洗浄や乾燥が必要ないため、熱エネルギーすなわち二酸化炭素の排出も抑えられていることは一目瞭然である。染色では添加剤も必要がないため、経済的にも優しい加工である。最初の工程である精練（油や糊などの不純物を除去する工程）についても超臨界二酸化炭素で実施する研究が進められている¹²⁾。

2.3 水を使わず材料加工

超臨界二酸化炭素を用いた無水染色の実用例をいくつか紹介する。ファスナーのメーカーである YKK(株)は、環境配慮の活動の一環として超臨界二酸化炭素で染色した ECO-DYE®を商品展開している¹³⁾。なお、この商品は 2016 年のグッドデザイン賞を受賞している¹⁴⁾。一方、スポーツ用品メーカーである美津濃(株)は、DryDye®技術で作った環境にやさしい参加記念 T シャツを、2018 年の大阪マラソンでランナーに提供した¹⁵⁾。DryDye®は Tong Siang, LTD (タイ) の商標で、世界で初めて超臨界二酸化炭素染色の実用化に成功した企業である。詳細については Tong Siang のホームページ¹⁶⁾に掲載されているが、オランダ DyeCOO 製の超臨界染色機を導入し、1 日に最大 4000 kg の生地を染めている。

その他、研究室の成果を一部紹介する。図 4 には、超臨界二酸化炭素中でポリエステル用の染料で染めたポリプロピレン (PP) 布の写真を示す。水中では PP は染まらないが、超臨界二酸化炭素の中では PP が膨潤することで繊維のなかに隙間ができ、その隙間に染料が入るため染色が進む¹⁸⁾。 図

5 には、ポリエステルなどの汎用繊維と比較して強度が高く寸法安定性が良いことから、金属の代替としてケーブルやワイヤーに用いられているポリアリレートの、超臨界二酸化炭素染色の結果を示した。左から、未染色ポリアリレート繊維、水を用いポリエステル用染料で染めたポリアリレート、右には超臨界二酸化炭素で同じ染料で染めたポリアリレート繊維を示した。水では、繊維表面に物理的に染料が留まる汚染が見られるものの染まっておらず、超臨界二酸化炭素を用いると染まることが分かる。原理は PP の超臨界染色と同じと考えられている。ポリアリレート繊維と同じく高強度繊維として知られる超高分子量ポリエチレン繊維の染色結果を、図 6 にまとめた。横軸は染色時間、縦軸の K/S は見かけの色強度を表す数値で、大きいほど人間の目には濃く見えることを意味する。●の水染色では、3 時間後の染色においても K/S 値が 0.6 程度と



図 4：超臨界二酸化炭素で染色された PP 布帛¹⁸⁾



図 5：超臨界二酸化炭素で染色されたポリアリレート繊維

低い、▼の超臨界二酸化炭素染色ではその値が3倍に増加し、さらに有機溶剤デカリンを少量加えるとその倍になることが分かる。これらも原理はPPやポリアリレート繊維と同じで、超臨界二酸化炭素中、特にデカリンを加えた場合には繊維が柔らかくなり（結晶化度が低下し）、染料がより入りやすくなっている¹⁹⁾。次に、超臨界二酸化炭素染色の原理を応用し、染料の代わりに機能剤と呼ばれる化合物を繊維の中への注入を試みた。ポリエステル（PET）布を超臨界二酸化炭素中にてポリエチレングリコール（PEG #1000）で処理し、インクで着色した水を一滴落とした際の様子を図7に示す²⁰⁾。PEG #1000 で処理していないPET布（左）では、インクが広がっていないのに対して、処理した右側の布では広がっている、すなわち水に濡れていることが分かる。これは、PET布の染色と同じように、超臨界二酸化炭素中ではポリエステルが膨らみ、化合物であるPEG #1000 が中に入ったことで、布の表面が水に濡れやすくなったためである。汗を吸いにくいPETのTシャツなどをこの方法で加工すれば、汗をよく吸う快適な衣類へと変えることができる。

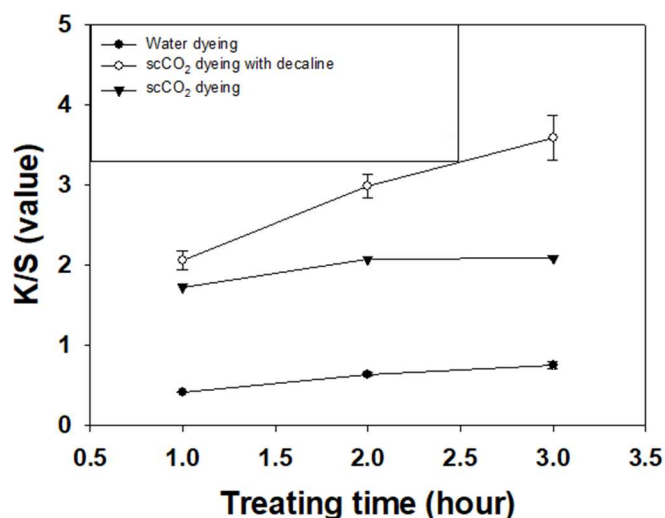


図6：超高分子量ポリエチレンの染色におよぼす媒体の影響¹⁹⁾

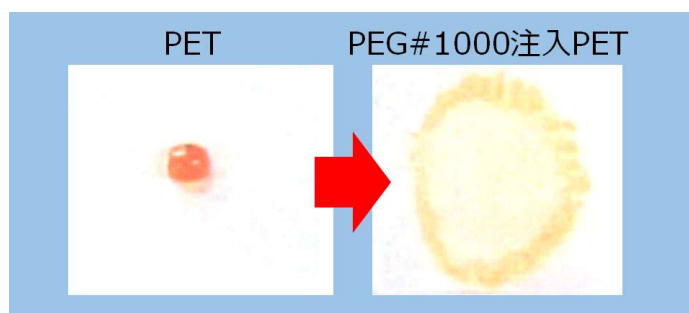


図7：超臨界二酸化炭素中でPEG処理したPET布上のインク滴²⁰⁾

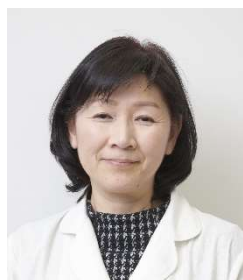
3. おわりに

世界が、国が推し進めるサステナブルファッションを達成するために無水技術を探求することは、まさに生存圏研究所が目標に掲げるところの「環境保全と調和した持続的社会的基盤となる先進的科学技術の探究」であろう。今回はものづくりの観点から無水技術の有用性を報告したが、装置が高額、厳しい高圧ガス取扱の法規制、操作の再現性の低さ、限られた繊維素材のみで有効など、まだまだ発展途上の技術である。しかし、この方法はプロセスそのもののカーボンフットプリントが低いだけでなく、古着など使用済み繊維製品を新しい製品の原材料として再び利用するリサイクルに活用できれば、よりカーボンニュートラルに大きく貢献することが期待される。今、私達が着ている衣類を原料として繊維に作り直すには、実は「色」が大きな壁となっている。この無水技術を用いて古着を白い繊維に戻すことが出来ればリサイクルの幅が広がるため、脱色についても研究が進められている。また、どの程度環境負荷が低いプロセスなのかを評価するため、ライフサイクルアセスメントが検討されている。一昔前は擦っても洗濯しても落ちない染色が求められたが、今では使用時は色落ちせず、或る条件下におけば時限付で色が落ちるようなプロセスが求められている。時代が変わればものづくりの定義も変わる。

参考文献

- 1) 環境省のHPより, https://www.env.go.jp/policy/sustainable_fashion/, 2024年8月22日閲覧.
- 2) 経済産業省のHPより, <https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220518005/20220518005.html>, 2024年8月22日閲覧.
- 3) 経済産業省のHPより,
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/resource_recycling/20230928_report.html, 2024年8月22日閲覧.
- 4) 消費者庁のHPより,
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_education/public_awareness/ethical/investigation/.
- 5) 消費者庁のHPより,
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_education/meeting_materials/review_meeting_005/, 2024年8月22日閲覧.
- 6) 後藤元信編著, 躍進する超臨界流体技術, II編材料調製プロセス, 超臨界流体染色, コロナ社発行, 2014, pp.131-151.
- 7) 国土交通省のHPより, https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000021.html, 2024年8月22日閲覧.
- 8) 気象庁のHPより, https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_tour.html, 2024年8月22日閲覧.
- 9) 資源エネルギー庁のHPより, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_recycling2021.html, 2024年8月22日閲覧.
- 10) 資源エネルギー庁のHPより, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_recycling.html, 2024年8月22日閲覧.
- 11) 後藤元信編著, 躍進する超臨界流体技術, まえがき, コロナ社発行, 2014.
- 12) Ghanayem, H., Okubayashi, S., Water-free dewaxing of grey cotton fabric using supercritical carbon dioxide, *Journal of Supercritical Fluids*, 174, 105264, 2021.
- 13) YKK(株)のHPより, <https://ykkdigitalshowroom.com/jp/item/58/>, 2024年8月22日閲覧.
- 14) 公益財団日本デザイン振興会のHPより, <https://www.g-mark.org/gallery/winners/9dd86f00-803d-11ed-af7e-0242ac130002>, 2024年8月22日閲覧.
- 15) Mizuno Facebook より,
<https://www.facebook.com/mizuno.japan/photos/a.253957634652674/1948853765163044/?type=3>, 2024年8月22日閲覧.
- 16) Tong Siang, LTD のHPより, <https://www.drydyefabric.com/technology>, 2024年8月22日閲覧.
- 17) DyeCOOのHPより, <https://dyecoo.com/contact/>, 2024年8月22日閲覧.
- 18) 堀照夫, 宮崎慶輔, ポリプロピレン繊維の染料開発および染色技術, *Journal of the Japan Society of Colour Material*, 94(2), pp.35-39, 2021.
- 19) Ma, J., Elmaaty, T.-A., Okubayashi, S., Effect of Supercritical Carbon Dioxide on Dyeability and Physical Properties of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fiber, *Autex Research Journal*, 19(3), pp.228-235, 2019.
- 20) Hori, T., Baba, T., Tabata, I., Hirogaki K., Hisada, K., Okubayashi, S., Impregnation of polymer compounds into fibers using supercritical carbon dioxide, *Journal of Fiber Science and Technology*, 66(3), pp.70-73, 2010.

著者プロフィール



奥林 里子 (Satoko Okubayashi)

＜略歴＞ 1996 年福井大学工学研究科博士課程修了（博士(工学)）／同年熊本大学工学部助手／2001 年ドレスデン工科大学・インスブルック大学・福井大学ポスドク／2007 年京都市芸繊維大学工芸科学研究科准教授／2017 年同大学教授・京都大学生存圏研究所特定教授、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞グリーンケミストリーによるサステナブル材料創成の研究