

肌ざわりを可視化する —X線CTによる衣料用洗剤の性能評価—

関根 由可里*

1. はじめに

日用品、医薬品、機能性食品等、幅広い分野で生活に密着した製品を展開する中で、生活者に製品の性能や特徴を齟齬なく伝えることは重要であり、現象を直感的に伝える評価手法が担う役割は大きい。X線をプローブとするX線イメージングは、試料の内部構造を非破壊的に観察可能であることから、学術分野だけでなく医療分野や工業分野でも活用されている。中でもコンピュータトモグラフィ（CT）と呼ばれる計算手法により三次元的に試料を観察できるX線CTは、研究開発から製品検査まで幅広い分野の画像評価に適用されている。本稿では衣料用洗剤の性能評価において、X線CTを活用し製品プロモーションに繋げた事例について紹介する⁽¹⁾。

2. 衣料用洗剤の性能評価の経緯

近年、就業女性の増加や、花粉・PM2.5等による屋外環境の悪化に伴い、洗濯物を屋内で乾燥する、いわゆる“部屋干し”をする人の割合が高くなっている（2017年ライオン株式会社調査N=1400）。一方で「本当は毎回外干ししたい」と感じる生活者が9割を占め（2014年調査N=10000）、その理由として乾いたあとの仕上がりに期待する声も大きいことがわかった⁽²⁾。そこで生活者に好まれている目指すべき「触って実感できる晴れた日に外干しした洗濯物の乾き上がり（晴れ干し触感）」の特徴を見出すため、洗濯従事者を対象とした定量調査を行った。その結果、嗜好性の高い「晴れ干し触感」の特徴は、「ふっくら」と「カラッと乾いている」触感であることがわかり（図1）⁽²⁾、この「晴れ干し触感」を再現すべく、洗濯物がいつでも「カラッと乾いてふっくら」仕上がる衣料用洗剤を開発した。しかし、この「カラッと乾いてふっくら」した状態を直感的に伝える手法がなく、製品性能が顧客に伝わりにくいという課題があったため、製品性能をダイレクトに伝えるイメージの作成を目指し、処理洗剤違

いのバスタオルをX線CTで観察した。

3. 観察に用いるX線CT装置と観察条件

観察は株式会社リガク製のCT Labとnano3DXの2台で進めた。CT Labは管電圧が可変であることから有機物から軽金属まで観察ができ、さらに視野も広く設定できることから、大きく硬い試料の構造把握に有用である。一方、nano3DXは管電圧がターゲットにより固定されているものの、高分解能で観察できることから、試料の微細構造把握に活用される。今回は観察対象物に応じてCT Labとnano3DXを使い分け、イメージの作成を行った。

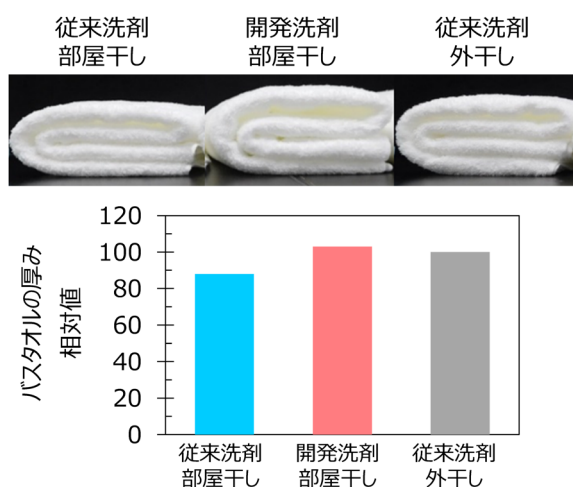
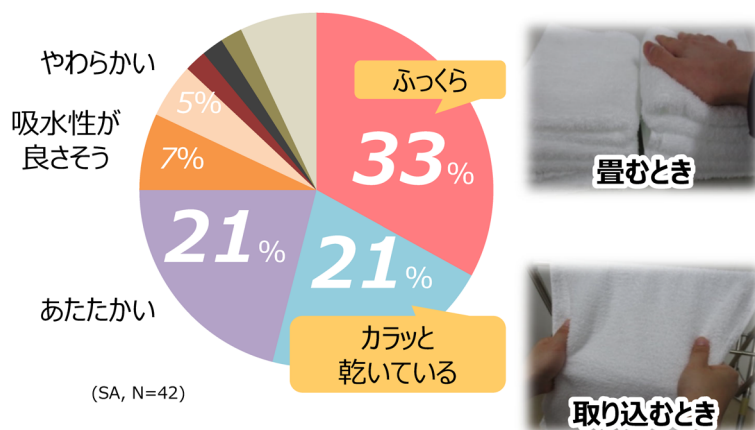
今回のイメージングでは「カラッと乾いてふっくら」仕上がる触感を感じ取りやすいと考えられるバスタオルに着目し、イメージを取得した。バスタオルは綿100%素材のものを使用し、CT Labでの観察は管電圧30 kV、管電流200 μ A、スキャン時間14分、フィルターなしで行った。また、nano3DXでの観察はターゲットCu（管電圧40 kV、管電流30 mA）、検出器L1080（1.1 mm/pixel）で行った。

4. 「ふっくら」のイメージング

まず「ふっくら」のイメージングに際し、バスタオルの厚みに注目し解析を進めた。タオルを従来洗剤または開発洗剤で洗濯処理し、部屋干し（20°C、65%RH）したときのタオルの触感を評価した結果を示す（図2）。厚みは簡易評価として、一様に16折にしたタオル（140 cm×70 cm）の厚さを、デジマチックハイトケージ（株式会社ミットヨ製）を用いて評価した⁽³⁾。従来洗剤で処理し外干ししたタオルの厚みと比較すると、開発洗剤で処理し部屋干ししたタオルでは厚さが増し、一方、従来洗剤で処理し部屋干ししたタオルでは厚みが減ることがわかった。

開発洗剤で処理することで、部屋干しでもタオルの厚みが増加する現象を直感的に示すため、先述の方法で処理したタオルの繊維構造をCT Labおよびnano3DXで観察した。図3にタオルを2 cm四方に切り

*ライオン株式会社 研究開発本部 先進解析科学研究所



出し、CT Labで観察したCT画像を示す。灰色に見える部分がタオルであり、タオル地に特徴的な繊維束が輪を作るようなパイル糸も観察されている。パイル糸単独での構造をnano3DXで観察したCT画像も重ね合わせて示す（図3挿入部分）。従来洗剤で処理し部屋干ししたタオルでは繊維束が潰れ、捻じれが多く、パイル糸も倒れていることが判明した。一方、開発洗剤で処理し部屋干ししたタオルでは繊維束が膨らみ、繊維束間の空間が多く、パイル糸も立ち上がっていることがわかった。開発洗剤で処理したタオルと同様な現象が従来洗剤で処理し外干ししたタオルでもみられ、繊維束間の空間が空き、パイル糸が立ち上がるにより、バスタオルが「ふっくら」することが示唆された。

一般的に綿繊維は中空構造（ルーメン）と天然の撚れが作る繊維の隙間に空気を含み、柔らかく保湿性に富むと知られている⁽⁴⁾。さらに天日干しにより、天然撚れが変化し、ルーメン中の空気が膨張することで綿繊維が膨らむといわれていることから⁽⁴⁾、熱や風によりタオル表面のパイル糸の嵩高性が促進され、厚さが

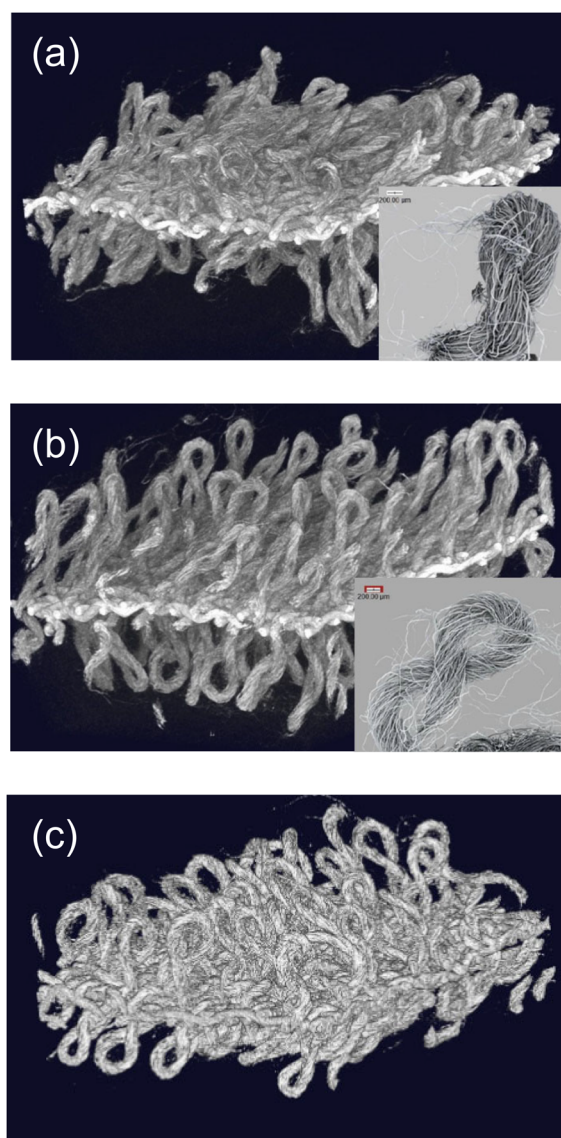


図3. 異なる洗剤・乾燥条件で処理をしたバスタオルのX線CT像。
（挿入図）パイル糸単独のX線CT像、(a) 従来洗剤処理・部屋干し、(b) 開発洗剤処理・部屋干し、(c) 従来洗剤処理・外干し。

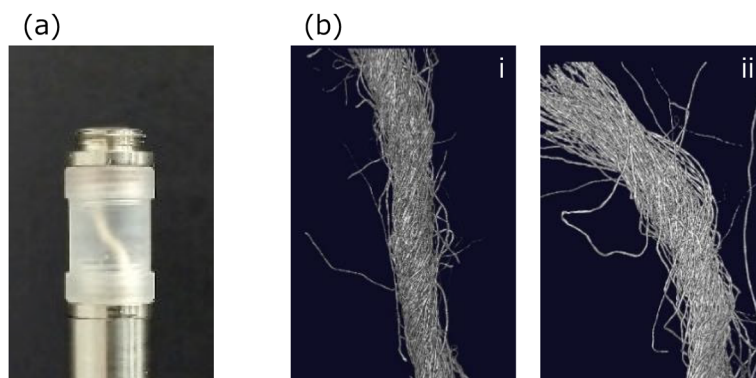


図4. 異なる洗剤で処理をした1本の繊維束のX線CT像。
(a) 試料マウント方法, (b) -i 従来洗剤・部屋干し, (b) -ii 開発洗剤・部屋干し。

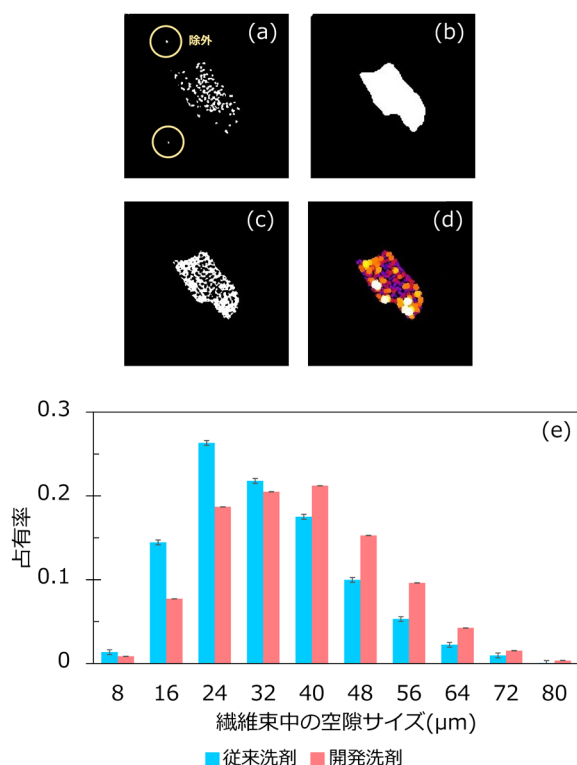


図5. 異なる洗剤で処理をした1本の繊維束中の空隙サイズの定量。
(a)～(d) 空隙サイズ算出手順, (a) 繊維束から大きく外れる単繊維の除外, (b) 繊維束部分のマスキング, (c) 単繊維部分を重ね合わせ, (d) 空隙の抽出, (e) 1本の繊維束中の空隙サイズの占有率。

増したことで「ふっくら」触感を増長すると考えた。そこでタオル繊維束の構造を詳細に観察し、「ふっくら」触感に繋がる繊維束中の空気について考察することとした。

従来洗剤または開発洗剤で処理し、部屋干ししたタオルから1本の繊維束をピンセットで抜き取り、5 mmの長さに切断したものを両面テープで試料台に固定し(図4(a)), nano3DXで観察した。その結果を図4(b)に示す。従来洗剤で処理した繊維束(図4(b)-i)と比較し、開発洗剤で処理した繊維束(図4(b)-ii)は太く

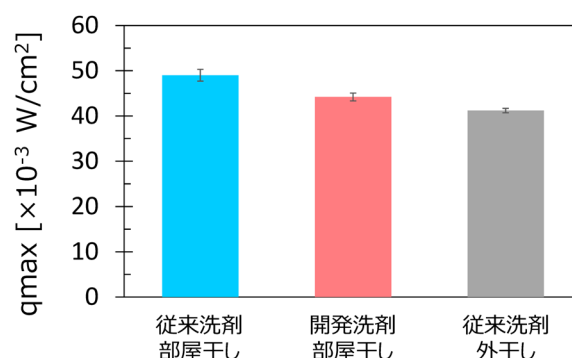


図6. 異なる洗剤で処理をしたパスタオルの最大熱流束評価。

なっていることがわかる。これは開発洗剤に配合された機能性基剤が単繊維の性質を変え、繊維束内に空気を含むようになったと考えている。その繊維束内の空気(空隙)を定量的に評価するため、3次元CT画像断面図から繊維束に該当する単繊維を抽出し(図5(a)), 繊維束部分をマスキングしたのち(図5(b)), 単繊維部分を重ね合わせ(図5(c)), 空隙を抽出、大きさ毎に色分けして表示した結果を、図5(d)に示す。さらに解析の結果を繊維束中の空隙サイズ分布として図5(e)に示す。占有率をみると、従来洗剤では空隙サイズの中央値が $30.0 \mu\text{m}$ であるのに対し、開発洗剤では $37.8 \mu\text{m}$ と単繊維間の距離が広がっていることがわかった。このことから開発洗剤で処理すると、単繊維間の距離が広がり、繊維束が潰れずにパスタオルの厚みが増し、「ふっくら」した仕上がりになることが示唆された。

5. 「カラッと乾く」のイメージング

次に「カラッと乾いている」状態を示唆するイメージングを試みた。「寒い冬の洗濯物はいつまでも乾いていないように感じる」等の生活者実感から、接触冷温感が「カラッと乾く」実感に繋がると考え、最大熱流束 q_{max} をサーモラボIIB型精密迅速熱物性測定装置KES-F7(カトーテック株式会社製)を用いて測

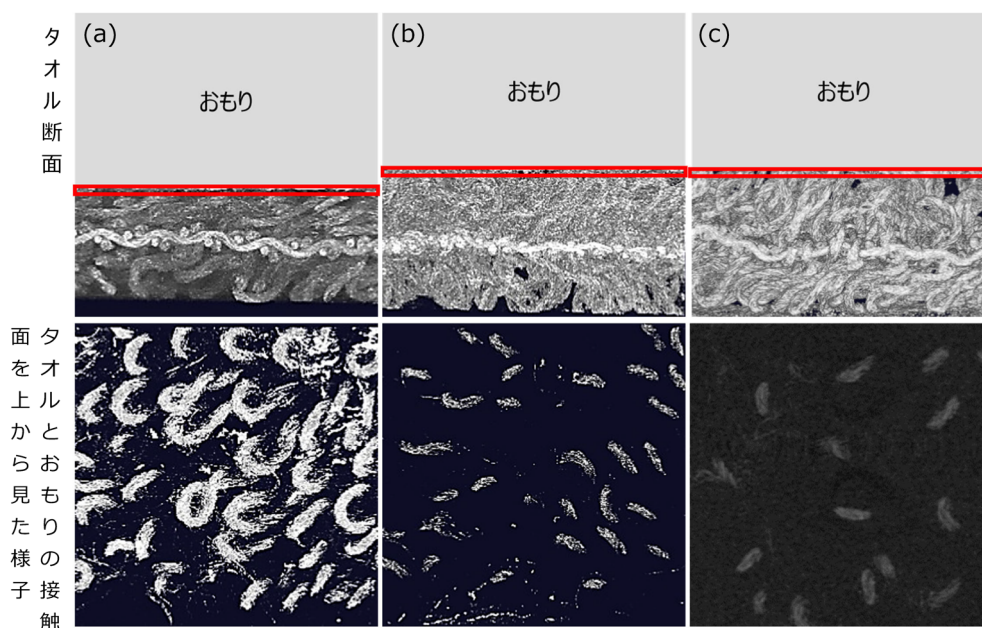


図7. 異なる洗剤・乾燥条件で処理をしたバスタオルにおもりを乗せたときのX線CT像。
(a) 従来洗剤・部屋干し, (b) 開発洗剤・部屋干し, (c) 従来洗剤・外干し。

定した⁽³⁾。その結果、図6に示すように開発洗剤で処理し部屋干ししたバスタオルでは、従来洗剤で処理し部屋干ししたものと比較し、熱の移動量が少ないことがわかった。さらに開発洗剤で処理したタオルは部屋干しであるにも関わらず、従来洗剤で処理し外干ししたものと熱移動量が近いことを確認した。qmaxはその値が大きいほど触って冷たい、値が小さいほど触って温かいことを示す。このことから開発洗剤で処理することで、タオルを触ったときに「カラッと乾く」触感に繋がると考えた。

このタオルを触ったときのタオルから手へ流れる熱移動を直感的に示すため、接触面積のイメージングを試みた。タオルと手の温度差が同じ場合、熱移動量は接触面積に比例する。そこで、タオル上に軽く触れた時を想定した2.7 g/cm²のおもりを乗せX線CTを撮影し、おもりとタオル繊維束の接触状態を観察した。その結果、開発洗剤で処理し部屋干ししたタオルでは、従来洗剤で処理し部屋干ししたものと比較し、おもりによるタオルの沈み込みが小さく、おもりと接触面積も小さいことがわかった(図7)。これは従来洗剤で処理し外干ししたタオルと同様の傾向であり、開発洗剤で処理することにより、バスタオルの繊維束形状が潰れずに手との接触面積が小さくなり、さらに最大

熱流束が小さいことから、「カラッと乾く」触感に繋がることが示唆された。

6. おわりに

今回、X線CTにより衣料用洗剤の製品性能である「カラッと乾いてふっくら」仕上がる状態をダイレクトに伝えるイメージを作成した。製品性能を科学的根拠に基づき提示し、かつ直感的に製品価値を伝えるイメージを作成することで、生活者に理解されやすい製品プロモーションが可能になる。今後もさまざまな機器や物理化学的な指標を用いてダイレクトイメージング技術の活用を進め、生活者の日常をアップグレードする日用品の提供を目指していく。

参考文献

- (1) 松永由可里, 田中藍, 筒井拓也, 柿澤恭史: 第79回分析化学討論会講演プログラム集, (2019), 51.
- (2) 田井亜衣子, 桶田翔太, 寺林剛, 田中藍, 河野洋一郎, 増井宏之, 西松豊典, 金井博幸: 繊維学会予稿集, **73** (2018), 207.
- (3) 西松豊典, 金井博幸, 藤原恵, 高橋恭平, 岸根延幸, 藤田初芽, 古田麻子, 升川綾子: *Journal of Textile Engineering*, **60** (2014), 91–98.
- (4) 白井汪芳: 繊維学会誌, **59** (2003), 191–195.