

# ウール・シルク両面編による紫根染編地の開発

## Development of shikon-dyed wool-silk double-faced knitted fabrics

福島県ハイテクプラザ 材料技術部 繊維・高分子科 大竹翔太 中村和由 遠藤悠都

紫根<sup>注1)</sup>を用いたシルクとウールの同浴染色<sup>注2)</sup>において、相対 K/S<sup>注3)</sup>帯域解析と主成分分析により、吸着量と素材間色差を統計的に分離し評価した。吸着量は温度に依存し、素材差は温度および媒染<sup>注4)</sup>条件の相互作用により制御可能であることが示された。両者は独立した設計指標として整理可能であり、均質化と差別化を目的に応じて選択できる染色条件の設計手法が有効であることを確認した。

Key words: 紫根、同浴染色、素材間色差、主成分分析、設計マップ

### 1. 緒言

天然染色は環境配慮型技術として再評価されているが、工程数の多さや廃液処理における環境への負荷が製品化の課題となっている。紫根染は青紫から深紫を発色する希少な天然染色であるものの、温度や pH、媒染条件の影響を受けやすく、再現性の確保が難しいとされている。媒染方法や染液条件が K/S 値や色差、堅ろう度に影響することが報告されており<sup>1)</sup>、さらに紫根染では染色温度が発色挙動に関与すること<sup>2)</sup>、抽出・温浴条件の違いが色調変化に影響することも指摘されている<sup>3)</sup>。一方、シルクとウールのように染着挙動の異なる素材を同一染浴で処理する同浴染色は、工程削減には有効であるが、「深色化(吸着量)」と「素材間色差」が同時に変動するため、設計変数が混同され、目的に応じた条件選択が困難とされてきた。他方、色差評価には CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ <sup>注5)</sup>) が広く用いられ、その計算法は国際規格として整備されている<sup>4)</sup>。また分光スペクトルに対する主成分分析 (PCA) 等の多変量解析を用いて、染色条件や色差を統計的に抽出する研究も進んでいる<sup>5)</sup>。そこで、本研究では紫根同浴染色において、吸着量と素材間色差を分離評価することで、両者を独立に制御可能な設計手法を確立することを目指し、染色条件を選定するとともに、同浴染色の設計可能性について検証した。

### 2. 試験方法

紫根色素はエタノール約 88[%] 溶媒中で、常温 24 時間以上抽出し染料液を調製した。シルク 100[%] (織度 280D) およびウール 100[%] (織度 2/60[Nm]) の両面編地の未染色布をソーピング後風乾し、pH5.5、浴比 1:100、染色時間 40 分の条件で同浴染色を行った。染色温度は 40、50、60、70、80[°C] の 5 水準、Al 媒染濃度は 0.2、0.5、0.8、1.0、1.5 [g/L] の 5 水準で後媒染を 30 分実施した。次に分光測色計 (Konica Minolta 製 CM-26dG) を使用し、D65 光源・10[°] 視野で Lab\*、 $\Delta E_{00}$ 、K/S スペクトル (400-700[nm])、及び光沢値を取得し、染色布の素材差と均質性を評価した。

### 3. 解析方法

未染色布を基準とした相対反射率を算出し、Kubelka-Munk 式に基づいて相対 K/S スペクトルへ変換した。これにより、素材固有の反射特性の影響を除去した後、染色条件による吸着量の差を比較検討した。主色素であるシコニン類は可視域 520[nm] に吸収ピークを持つが、単一波長に基づく評価では染色条件や素材差による吸着挙動を十分に捉えられない可能性があるため、本研究では図 1 に示す、ピーク強度に依存しない染着量変数として、相対 K/S スペクトルの吸収帯域 (500-560 [nm]) の積分値 (AUC) を採用し、帯域データを評価対象とした。

可視光領域 (400-700 [nm]) の中で、紫根色素の吸収特性を反映する 500-560 [nm] 帯域の相対 K/S スペクトルを説明変数として PCA を行い、第 1 主成分 (FAC1) を吸着量、第 2 主成分 (FAC2) を素材間色差 ( $\Delta E_{00}$ ) に対応する変数として解釈した。

次に、主成分得点に対し k-means 法 (k=3) を適用し、特に差別化領域の内部に、異なる特徴をもつ複数のタイプが存在することが確認された。得られた 3 クラスタのうち、低  $\Delta E_{00}$  側を Balanced、高  $\Delta E_{00}$  側の 2 つのクラスタを Contrast としてまとめ、判別分析 (LDA) により両群を分ける境界を求めた。

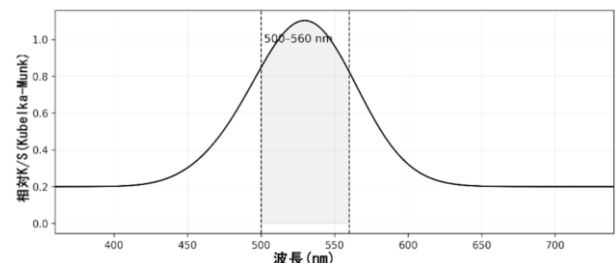


図 1 500-560[nm] 帯域の波長帯域積分値 (AUC<sup>注6)</sup>)

また色差の評価には CIEDE2000 色差式 ( $\Delta E00$ ) を用い、シルクとウールの素材間色差を定量的に比較した。これらの結果から、染色温度および媒染濃度が、吸着量と素材間色差に及ぼす影響を多変量解析し、同浴染色において、設計に用いる変数が互いに独立していることと、条件選択の有効性を確認した。

## 4. 結果と考察

### 結果①：設計指標の抽出

本研究では、PCA 第 1/2 主成分を FAC1/FAC2 と表記 (=PC1/PC2) する。図 2 に示す FAC1 (吸着量) と FAC2 (素材間色差) の散布図では、染色布は四象限に分布し、吸着量と色差が独立して変動する現象が確認された。FAC2 高値=低  $\Delta E00$  (均質) を示す。

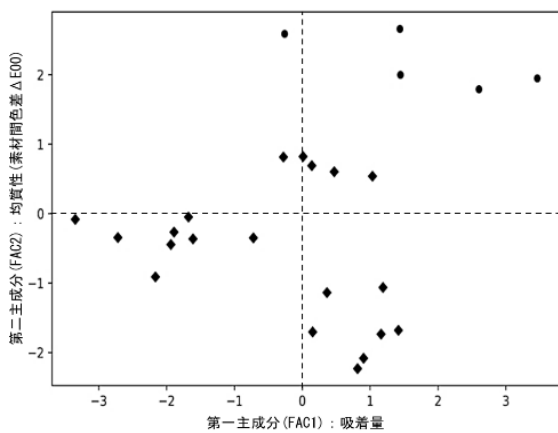


図 2 FAC1 (吸着量) と FAC2 (素材間色差)

右上象限には高吸着かつ  $\Delta E00$  の小さい均質領域が位置し、左上象限には低吸着ながら均質性の高い領域が分布する。一方、右下象限には高吸着でありながら素材間色差の大きい差別化領域が存在し、吸着量の増加が必ずしも均質化を伴わないことが示された。全体として、両変数の独立性が視覚的に確認された。

これにより、吸着量と素材間色差は相互に影響せず、それぞれ独立して調整できる可能性が示された。従来は深色化に伴い素材差が拡大すると考えられてきたが、この結果から媒染条件等により高吸着かつ均質、あるいは低吸着でも差別化といった多様な染色条件の選定が可能であることが示された。

### 結果②：温度による吸着量制御

図 3 に示す温度と FAC1 (吸着量) の関係を見ると、40 [°C] で高い正の FAC1 値が多く、深色化が進んでいるのに対し、50 [°C] 付近では値が 0 付近に集まり吸着量が中程度に安定した。60 [°C] では負側へ大きく分布し吸着量の低下が認められるが、70~80 [°C] では再び正側へ移行する傾向が見られ、温度に対し FAC1 は単調には変動しないことが確認された。ばらつきは温度帯ごとに異なり、FAC1 が複数要因の影響を受ける因子であ

ることが推測される。

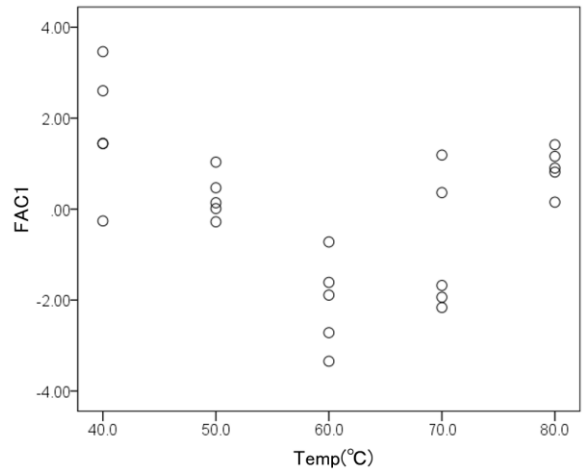


図 3 吸着量主成分 (FAC1) の温度依存性

FAC1 の非単調な変動は、温度が吸着量に対して、単純な比例関係でないことを示している。低温では染料の分解が少なく、繊維への吸着が進みやすい。一方、中温域では染着の平衡状態が変化し、一時的に吸着量が低下する可能性がある。さらに高温域では拡散速度の増加により再び吸着が促進される染色布も認められた。よって温度は吸着量を大きく左右するが、最適条件は単一ではなく、媒染条件との組合せによる設計が必要と推測される。

### 結果③：温度と FAC2 (素材間色差)

図 4 に示す温度と FAC2 (素材間色差) の関係を見ると、温度上昇に伴い、FAC2 が連続的に低下する傾向が確認された。40 [°C] では高い FAC2 値を示し、素材差が小さい均質状態を保つが、60~70 [°C] で中間領域へ移行し、80 [°C] では負側に大きく分布して素材差が顕著な状態を示した。各温度でのばらつきは小さく、温度が FAC2 を支配する主因子であることが示された。

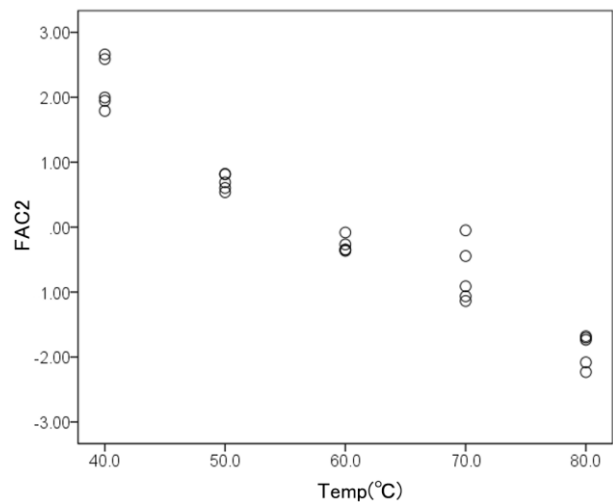


図 4 均質性主成分 (FAC2) の温度依存性

よって、温度条件により均質領域から差別化領域まで連続的な制御が可能であると推測される。FAC2の低下は、温度上昇により素材間の染まり方の違いが大きくなることを示している。高温では繊維の膨潤や染料の拡散が促進されるが、その影響の受け方は繊維素材ごとに異なるため、結果として色差が拡大する。一方、低温では拡散が緩やかで両素材の染着挙動が近づくことで、同じ色に見えやすくなる。よって温度は素材差を調整する重要な条件因子であり、均質性を保つには低温側、意匠的なコントラストには高温側を選択する設計手法が有効と考えられる。

#### 結果④：均質化と差別化の分離

図5に示すPCA散布図は、素材間色差 ( $\Delta E00$ ) を算出後、予備観察により定めた閾値 ( $\Delta E00 \leq 3$  をBalanced、 $\Delta E00 \geq 8$  をContrast) に基づいて群を分類し、その分布を主成分分析で得られた空間上に表示したものである。PC1 (吸着量) とPC2 (素材差) の二軸上で染色布は広く分布し、Balanced群とContrast群は主としてPC2方向に分離された。Balanced群はPC2の正側に位置し、 $\Delta E00$  が小さい均質領域を形成する。一方、Contrast群はPC2の負側に集中し、素材差が大きい差別化領域を形成した。両群はPC1方向にも点在するが、群分離は主にPC2によって分類され、吸着量と素材差を独立に扱う二軸設計の有効性が示された。

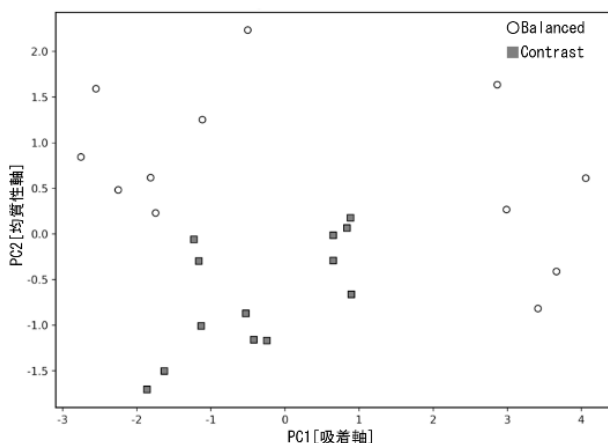


図5 PCA 散布図(PC1:吸着軸、PC2:均質性軸)

この結果から、同浴染色において吸着量 (PC1) と素材差 (PC2) は互いに影響せず、独立した設計要素として機能する可能性が示された。特に群分離がPC2に強く依存する点は、温度と媒染条件が素材間の色差制御に主要な役割を果たすことを示している。一方、PC1方向の分散は温度などの条件により深色化が調整可能であることを示す。このことから、同浴染色は単一の最適条件を決めるのではなく、目的に応じて均質化または差別化の領域を選択する設計手法として再定義できる。

#### 結果⑤：設計マップの有効性

図6に示す設計マップは、相対 K/S 帯域積分値 AUC (500-560 nm) を吸着量、Diff00\_UV100 ( $\Delta E00$ ) を素材間色差として作図したものである。AUC  $\times$   $\Delta E00$  空間の解析では、K=3 クラスタ分析により染色布は3群 (Cluster0-2) に分類された。

Cluster1は低  $\Delta E00$  領域に集約され、素材間色差が小さい均質領域を形成した。一方、Cluster0 および Cluster2は高  $\Delta E00$  側に分布し、吸着量の差異を持ちながら明確な素材差を示す差別化領域を構成した。これらを Balanced (Cluster1) および Contrast (Cluster0・2) として再分類すると、判別分析 (LDA) により両群は明瞭に分離され、群判別において  $\Delta E00$  が支配的因子として機能することが定量的に示された。

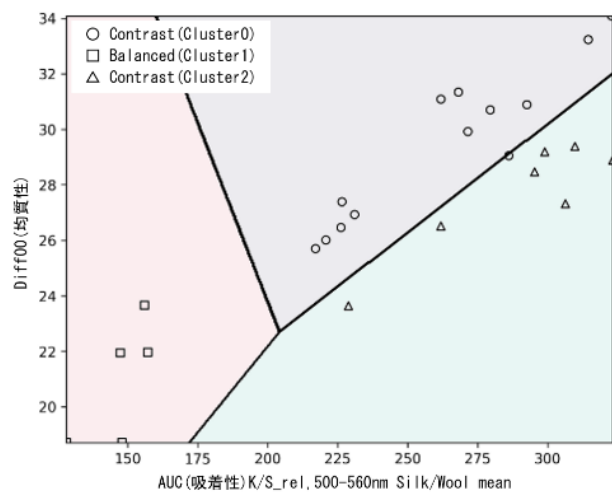


図6 AUC(吸着性)とDiff00(均質性)境界

さらに、K=3 クラスタ分析の結果、Contrast領域は吸着量の違いに応じて複数の領域を形成することが明らかとなった。具体的には、(高吸着・色差大) および (中吸着・色差大) という異なる設計条件が存在し、差別化条件が単一ではなく複数あることが確認された。

一方、Balanced領域は低  $\Delta E00$  側に安定的にまとまり、均質化を再現できる染色領域として存在することが示された。よって本設計マップは、同浴染色において均質化または差別化を可能とする設計手法として位置づけられる。これらの結果①～⑤は、同浴染色における吸着量と素材間色差が独立した設計指標として整理可能であることを示し、両者を変数とする設計マップの有効性を裏付けるものである。

#### 5. 設計マップの検証

図7に示すContrast (Cluster0) 領域の染色布では、シルクとウールの間に明確な色調差が認められ、同浴処理であっても素材固有の発色特性が強く現れている。この領域は  $\Delta E00$  が高く、視覚的なコントラストが顕著であることから、素材差が明確に表れた領域と考えられる。Cluster0は高吸着側に位置し、両素材とも染

料の取り込みは十分であるが、繊維構造や化学的結合部位の違いにより発色挙動が異なり、結果として色相および明度差が拡大したと推察される。特にシルクの平滑なフィブロイン構造と、ウールのスケール構造およびアミノ基の多いケラチン構造の差異が、染料の固定状態や光散乱特性に影響し、素材ごとの発色差を増幅した可能性がある。

また、この領域では吸着量の増加が均質化につながらない可能性が示された。その結果、染料量を増加しても素材間の色差が必ずしも縮小しないことを示す結果となった。高吸着条件では、素材固有の染着の違いが明確に現れ、視覚的なコントラストが強まる傾向がみられる。

以上の結果より、Contrast (Cluster0) 領域は、同浴染色において素材差を視覚的特徴として活かす、意匠的設計に有効な染色領域であり、高吸着条件を利用した素材コントラストの選定が可能であると考えられる。



図7 Contrast (Cluster0) 領域

## 6. 結言

### 結論①：均質化条件の確立

媒染濃度および温度条件の組合せを制御することで、シルクとウールの色差 ( $\Delta E_{00}$ ) を3以下に抑制する均質化条件を選定できた。これにより、同浴染色においても素材間色差 (均質性) が設計可能であることが示された。

### 結論②：差別化設計の実現

媒染濃度を高め、温度条件と組み合わせることで  $\Delta E_{00}$  を最大9程度まで拡大でき、シルクとウールの素材感を活かした視覚的コントラストが設計可能であることが示された。

### 結論③：二軸設計技術の確立

温度は素材間色差 (FAC2) に対する主要因子であり、媒染条件との組合せにより素材差の調整が可能である。これにより、二軸設計に基づく設計マップから、同浴染色の条件選択を経験的最適化ではなく設計指向で行

うことが可能である。

## 参考文献

- 1) 媒染方法・媒染剤・染色液 pH が紫根染め絹布の色濃度・色相・彩度および堅ろう度に及ぼす影響. (J-STAGE)
- 2) 山崎光子, 小黒晴子. 紫根染の発色に及ぼす灰の種類と染色温度の影響について. 県立新潟女子短期大学研究紀要, 4, 37-42 (1967).
- 3) 新井清. 古代染色の化学的研究 第12報 紫根染めの改良について. (1983)
- 4) ISO/CIE 11664-6:2022. Colorimetry - Part 6: CIEDE2000 color-difference formula.
- 5) Celani, C.P. et al. Exploring elucidation of red dye mixtures on woolen textiles using FORS and chemometrics. Scientific Reports (2024).

## 用語解説

- 注1) 紫根: ムラサキ(シソ目ムラサキ科ムラサキ属)の根に由来する天然染料
- 注2) 同浴染色: 異なる素材を同一の染浴中で同時に処理する染色法
- 注3) K/S: Kubelka-Munk 理論に基づく反射率から算出される吸収/散乱比で、染色布の色の濃さを表す変数
- 注4) 媒染: 金属塩等により染料と繊維の結合を促進する処理
- 注5)  $\Delta E_{00}$ : CIEDE2000 式に基づく色差変数
- 注6) AUC: 相対 K/S スペクトルの 500-560 nm 帯域の積分値