

# 繰り返し洗濯が布帛に及ぼすダメージ観察および風合いの変化

## The effect of repeated washing to wear and tear of textile cloths

中村和吉・栗原 愛

Kazuyoshi NAKAMURA and Ai KURIHARA

### 緒言

衣類洗浄の主目的は、衣服に付着した汚れを除去することであるが、同時に布は洗濯によってダメージを受ける。衣類洗浄において汚れの除去量と布へのダメージ量は拮抗関係にあり、現在は洗浄効率60～70%で折り合っている(Hearle (1998), Muthu (2014))。これまでに洗濯がもたらす布帛へのダメージについての先行研究は、洗濯と布帛織糸のほつれ・脱落を定量化した研究や洗濯回数と風合い計測値との関係を示したものが報告されている(片山 (2003), 佐々木 (2011, 2014))。

しかし、巨視的現象である布の力学特性値変化と微視的現象である織糸間の緩みや繊維の破壊について、同一の試料を用いて検討を試みた例は少ない。そこで、本研究では同一試料布を用いて、複数回数の洗濯によって布にどのような巨視的・微視的ダメージが生じているのかを、布・織糸・繊維のレベルで観察したので報告する。

### 実験

#### 試料布

綿(平織)、綿・ポリエステル混紡(T/Cブロード)、ポリエステル(平織)、綿(メリヤス編)の4種を試料布として用いた。各布帛の諸元を表に示す。

表1 試料布帛の諸元

試料布	織密度(/cm)		撚り数(回/cm)		厚さ(mm)	重量(g/m <sup>2</sup> )
	たて	よこ	たて	よこ		
綿(平織)	59.7	27.4	26.3	28.3	0.24	122.2
混紡	58.4	27.9	26.6	25	0.22	116.0
PET	26.3	24.5	23.6	24.6	0.24	133.8
メリヤス	40.0		7.0		0.65	198.6

### 方法

綿Tシャツ(男性用Mサイズ)5枚の表裏に各4枚、計8枚の試料布(26cm×26cmに裁断しほつれが生じないようふちの始末を施した)を縫い付けた。

洗浄実験は、家庭用電気洗濯機（東芝AW702-HVP(H)）、洗剤（花王アタック）を標準使用量に相当する量を用い、浴比1:30、水温17~20℃、通常洗濯コースで10.20.30.40.50回の洗浄を行った。また、試料布40枚のうち20枚については洗濯終了後に柔軟仕上げ剤（花王社製「ハミング」：成分：二本鎖型陽イオン界面活性剤）を製品ラベルに記載されている使用方法、使用濃度に準じて浸けた後、脱水・自然乾燥した。

## 評価

### 1) 試料布重量・厚さの測定

各試料布について重量および厚さの測定を行い、洗濯回数による変化を調べた。重量はメトラートレド社製デジタル天秤で、0.1 mgまで、厚さはピーコック社製厚さゲージ（荷重0.49 N）で0.1mmまで求めた。

### 2) 力学的特性の測定

カトーテック社製KES法 (Kawabata-Evaluation System)を用いて、洗濯回数0, 10, 20, 30, 40, 50回の洗濯布、柔軟剤処理布の力学的特性について求めた。測定した各力学的特性値の名称、略号、意味等については表2に示す。

表2 KES測定で求める風合い特性値（略称）とその意味

特性	略称	特性値	値が大きいと
引 張 り	EM / %	伸度	伸びやすい
	LT	引張り特性の直進性	引張り剛性高い
	WT	引張り仕事量	伸びやすい
	RT / %	引張りレジリエンス	回復性高い
曲 げ	B / $\mu$ Nm	曲げ剛性	曲げかたい
	2HB / mN	曲げヒステリシス	曲げやすい
せん 断	G / Nm <sup>-1</sup>	せん断特性	せん断されにくい
	2HG	せん断ヒステリシス（小）	せん断歪みが戻りにくい
	2HG5	せん断ヒステリシス（大）	同上
表面 性状	MIU	平均摩擦係数	滑りにくい
	MMD	摩擦係数変動	ざらざらしている
	SMD / $\mu$ m	表面粗さ変動	幾何学的凹凸が大

### 3) 試料布表面の観察

日本電子株式会社製 走査型電子顕微鏡 JSM-6330F (FE-SEM) を用いて洗濯回数0, 10, 50回の洗濯布、洗濯→柔軟剤処理布について織り組織構造、織糸中の繊維集合形態、単繊維表面の観察を行った。

## 結果と考察

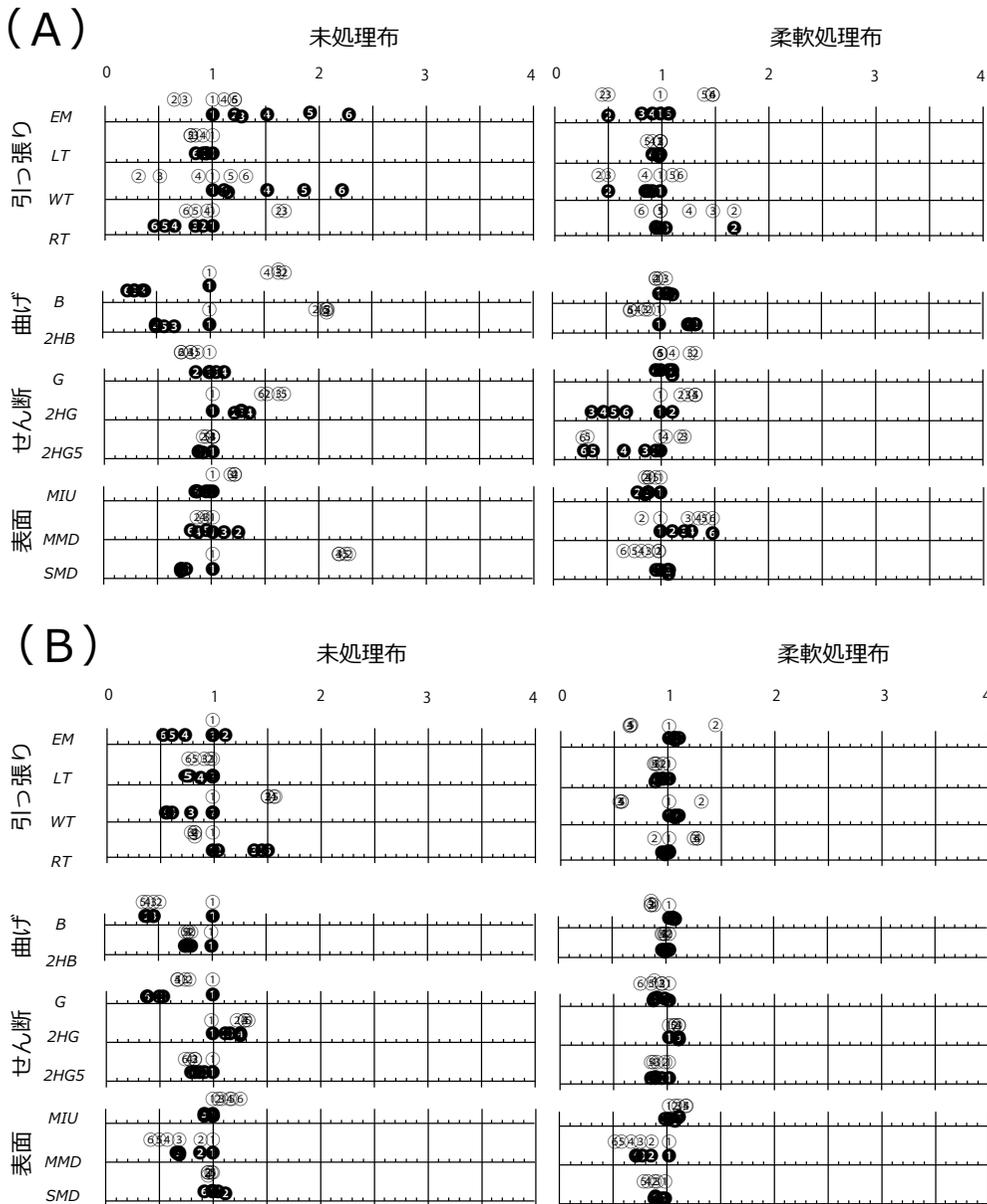
### 1) 洗濯回数増加にともなう各試料布帛の風合い変化

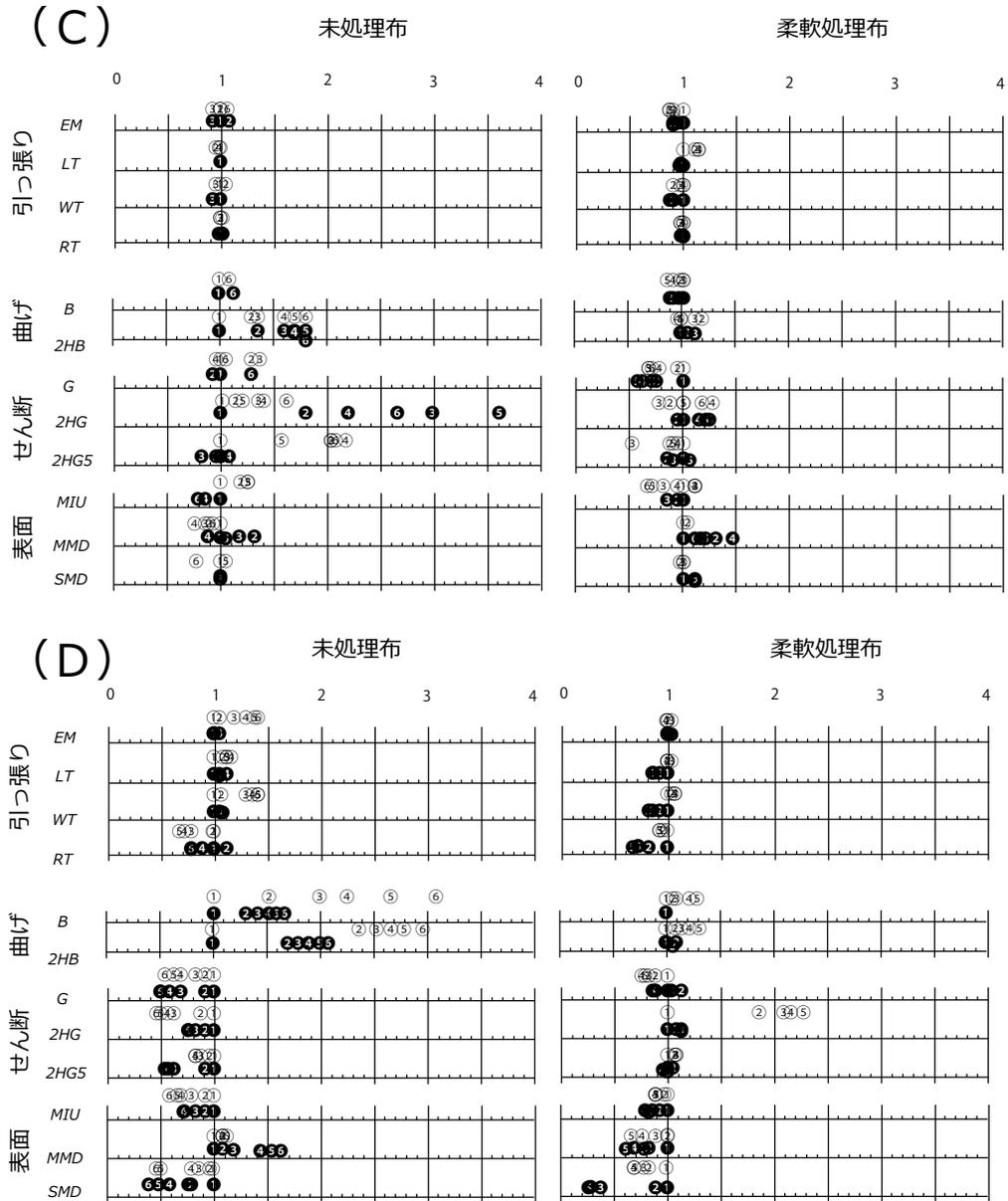
布帛は一次元構造体の織糸、編糸が摩擦力のみで二次元に交錯・展開した構造をとっている。ゆえに布帛の力学的性質は、変形に対する力の応答が非線形的であるとともに、ヒステリシス(履歴現象)を示す。また布帛はたて方向、よこ方向、ななめ方向に大きく性質が異なる異方性体である。これは金属板や樹脂フィルムでは得られない布帛独特の性能であり、布帛の性質を記述するには多くのパラメーターが必要である。これらの性能を利用して布帛を立体的（三次元）に構成することで、複雑な凹凸と可動域をもつ人体を緩やかに覆うことが可能となる。川端と丹羽らはこれらのパラメーターを、曲げ、せん断、圧縮、引張り、表面性状の5特性に整理して、布帛の風合いについての客観的評価を提唱した（KES法：川端（1973）、丹羽

(1997))。KES法による布帛の風合い評価は標準的な表現方法とされ、本研究もこの方法に準じて試料布の評価を行った。

各試料布の風合い計測結果を図1に示す。図は平織布(綿, 混紡, ポリエステル)および編布(綿メリヤス)について、引っ張り, 曲げ, せん断, 表面特性値を求め、未洗浄時における値(図内①および●)で除して各洗浄回数との関係を相対化したものである。圧縮特性については本研究に用いた試料布がいずれも薄手であることから、測定を行わなかった。

図1 各試料布の洗濯回数増加にともなう風合い計測値(相対化)の変化  
 (A: 綿平織, B: 混紡平織, C: ポリエステル, 平織 D: 綿メリヤス)  
 ○数字は布帛の縦方向、●数字は横方向の値を示す。





【綿平織布 (図 1(A))

<引っ張り特性>

柔軟剤未処理試料布では洗濯回数の増加にともなって、各特性値が布帛にダメージが加わっている結果を示している。柔軟剤を添加すると、洗濯回数10～30回までは柔軟剤の添加による変形からの回復が認められるが、40、50回では効果が消失してダメージを受けたままの状態となっていることがわかった。

<曲げ特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、横糸方向では曲げ剛性 (G)、ヒステリシス (2HB) とともに増加して曲げ柔らかくなることがわかった。縦糸方向では反対に曲げ堅くなることから、縦糸の洗濯に

よる収縮が進行していると考えられる。柔軟剤処理した試料布では、各特性値の低下が抑制され、効果が確認できた。

#### <せん断特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、各特性値（G, 2HG, 2HG5）ともに布へのダメージが増加している傾向を示している。柔軟処理を施すと、せん断特性（G）はわずかに増加傾向を示しせん断されにくくなることから、繊維表面や織糸の交錯点に吸着した柔軟剤が「糊付け剤」と同様の効果を表していると考えられる。変形ヒステリシス（2HG, 2HG5）は横糸方向の変化が顕著に表れていることから、縦糸は洗濯収縮による剛性増加が発現するも、横糸に柔軟効果が得られていることがわかる。

#### <表面特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、平均摩擦係数（MIU）のわずかな増加が見られることから、表面の平滑性がわずかに低下していることがわかる。摩擦係数変動（MMD）の増加も小さく、布帛の「ざらつき」も大きな変動を得ていない。しかし、幾何学的表面凹凸を示す表面粗さ変動（SMD）は縦糸方向で増加している。SMDは目視可能な凹凸（シワ）の程度を意味し、繰り返しの洗濯によって、布帛の表面は無数のシワが縦方向を中心に増加しているのを示している。

柔軟剤の添加による表面特性の変動はそれほど大きくならない。しかし、SMDについては柔軟剤添加により初期値を下回る結果を得た。SMDは上述のように洗濯によって生じたしわの程度を示しており、柔軟剤添加によってシワが部分的に解消していることを表している。

### 【混紡平織布（図1(B)）】

#### <引っ張り特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、伸度、引っ張り特性の直進性、引っ張りレジリエンスともに増加を続け、性能の劣化が進んでいることがわかった。柔軟処理した布では、各特性値の増加が抑制され添加の効果が認められた。

#### <曲げ特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、曲げ剛性、ヒステリシスともに低下が進行して性能劣化が確認された。柔軟剤処理した試料布では、各特性値の低下が抑制され、効果が確認できた。

#### <せん断特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、せん断変形への抵抗が減少し性能劣化が確認できた。柔軟剤処理した試料布では、各特性値の低下が抑制され、効果が確認できた。

#### <表面特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、表面は滑りにくくなり、表面のざらつきおよび表面幾何学的凹凸は減少する。これは試料布がダメージを受けて布の膨らみが減じていること示している。これは後述するポリエステル繊維にも同様の結果を得ていることから、綿繊維と共存しているポリエステル繊維が洗濯によるダメージを軽減していると考えられる。

### 【ポリエステル平織布（図1(C)）】

#### <引っ張り特性>

縦糸方向、横糸方向ともに洗濯回数増加が原因となる著明な変動は見られなかった。

#### <曲げ特性>

未処理の2HB変化が大なのを柔軟剤で小さくできた。

#### <せん断特性>

洗濯回数の増加に従いせん断特性（G）値は増加するのが読み取れる。柔軟処理では洗濯回数30回まではGの①および①より低位への変化(柔軟化)が認められるが、40回以上ではGは増加に転じて洗濯回数とともに増加する。すなわち、柔軟剤添加によるせん断変形回復効果は明らかではあるが、繰り返し洗濯回数が多くなると繊維や交錯点でのダメージが強くなるため柔軟剤でも回復できなくなることを示している。ヒステリシス2HG等は処理前では大きい変化を示したものが、処理後では総じて低い変化となった。すなわち

ヒステリシスを軽減するのは織糸の交錯点での摩擦が軽減していることを示している。

#### <表面特性>

いずれの表面特性値も変化は小さく、かつ柔軟剤添加の有無による変化は見られなかった。これはポリエステル繊維に柔軟剤が作用しないのか、ポリエステル繊維の表面に洗濯によるダメージが生じていないのか、風合い計測だけでは判断ができない。

### 【綿メリヤス編布 (図1(D))】

#### <引っ張り特性>

各値ともに大きな変動は見られなかったが、柔軟剤添加の試料はこの傾向が強いことがわかる。

#### <曲げ特性>

曲げ剛性 (B)、曲げヒステリシス (2HB) ともに柔軟処理をしない試料では洗濯回数の増加にともない曲げ堅さが顕著に増加している。柔軟処理布では両値とも変動が小さくなることから、柔軟処理によって編糸どうしの摩擦が軽減され、曲げ変形からの回復も容易になることがわかる。

#### <せん断特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともないせん断特性 (G)、せん断ヒステリシス (2HG, 2HG5) いずれもが、初期の値 (①, ②) を下回っている。すなわち、洗濯によるダメージにより剛性が低下していることが考えられる。柔軟処理布では2HGに増加が見られた、これは柔軟剤が繊維および編糸の交錯点に吸着することで「糊付け」の効果が発現したと考えられるが、大変形の2HG5では変動が小さくなることから「糊付け」の効果は小変形の範囲でのみ発現していると考えられる。

#### <表面特性>

柔軟剤未処理布では洗濯回数の増加にともない、平均摩擦係数 (MIU) の減少が見られる。一方で、摩擦係数変動 (MMD) は大きくなっていき、幾何学的表面凹凸は減少する。これは織布でも同様に見られるが、メリヤスのような甘然り糸から構成される編布については変化が顕著に現れている。繰り返しの洗濯によってダメージを受けた試料布は布の膨らみを減じ潰れてしまい幾何学的凹凸および平均摩擦係数は低下していく。

MMDは平均摩擦係数の標準偏差であり、表面粗さ変動 (SMD) 測定で使用する接触子の10倍長の接触部分で測定するため、ミリメートル単位の短周期となる微細な凹凸 (ざらつき) を示すことができる。すなわち、繰り返しの洗濯によって、布帛の表面はダメージを受け繊維の脱落や織糸のゆがみなどが増加してざらつきの程度も増加する。一方で柔軟剤の添加による表面特性の変動はそれほど大きくならない。しかし、MMDについては柔軟剤添加により初期値を下回る結果を得た。MMDは上述のように洗濯によって生じたざらつきの程度を示しており、柔軟剤添加によってシワが部分的に解消していることを表している。

これらの測定結果と考察をまとめると以下の通りとなる。

- ① 布帛は洗濯によってダメージを受け、はじめは織糸の収縮等により剛性が増加し、ごわついた風合いを与える。洗濯回数を増加させていくと、ダメージが深化して布帛の剛性低下が生じ、柔らかい風合いに変化する。本研究で使用した試料布ではこれらの傾向は、綿メリヤス編布 > 綿平織布 > 混紡布 > ポリエステル布の順になる。
- ② 柔軟剤の添加は織糸、編糸ともに移動性を向上させ、ダメージを軽減するように作用する。ダメージの軽減は織布では、横糸 > 縦糸となる。また、洗濯回数増加によって多量に形成する目視で確認できるシワを軽減できる。
- ③ 柔軟剤の効果が強く表れるのは、綿メリヤス編布 > 綿平織布 > 混紡布 > ポリエステル布の順になる。

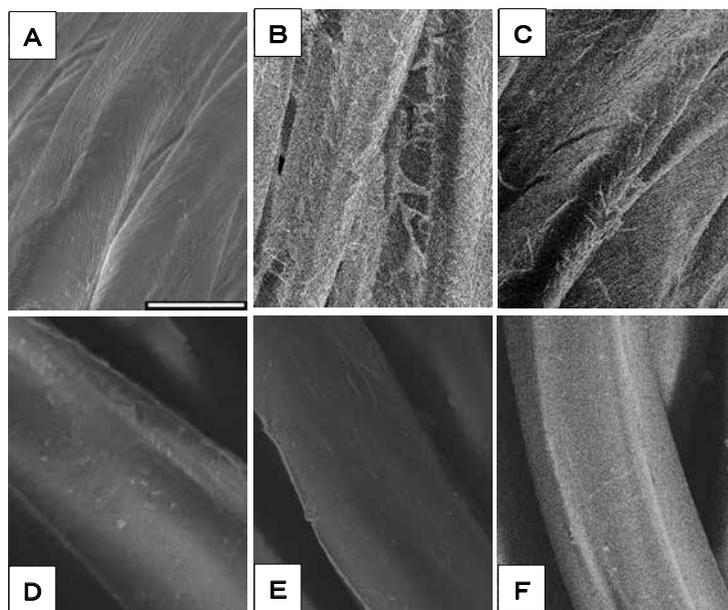
## 2) ミクロとマクロなダメージとの相関

KES法は布帛、織糸レベルでの種々特性値を組み合わせて風合い評価を行うが、布帛はさらに繊維→高分子へ至る微視的構造も有している。そこで本研究では、試料布の電子顕微鏡観察を行い、単繊維レベルで生じる微細な構造変化の有無を観察した。結果を図2に示す。

図2 各試料布のFE-SEM像 (bar: 10  $\mu$ m)

A～C: 綿平織布の未処理, 洗濯50回, 洗濯50回+柔軟剤処理

D～F: ポリエステル布の平織布の未処理, 洗濯50回, 洗濯50回+柔軟剤処理



図は綿平織布, およびポリエステル平織布の洗濯回数0, 50回におけるFE-SEM像である。いずれも単繊維レベルに拡大している。図2(A)では綿繊維の表面は平滑で, 繊維長軸方向に対して斜めに直径100nm程度の繊維束(マイクロフィブリル)が集合して繊維を構成しているのが確認できる。洗濯回数50回の試料(図2(B))では, マイクロフィブリルが繊維本体から剥離し, 遊離しているのが観察された。他の洗濯回数での試料観察から, マイクロフィブリルの遊離は洗濯回数の増加とともに増えていることがわかった。洗濯の都度柔軟剤を施した試料図2(C)はある程度のダメージは生じているものの, マイクロフィブリルの乖離・遊離数は少なかった。これは柔軟剤によってマイクロフィブリルの乖離が抑制ないし補修がなされていることが示唆されている(Nakamura (2013))。これらの結果は図2(A, B)で示した風合い計測の結果とよく適合していることがわかる。

一方, ポリエステル繊維図2(D～F)は洗濯回数増加によって, マイクロフィブリルの剥離は見られないが, 一部繊維表面が剥離, 脱落して繊維表面が粗くなったり, 繊維本体に亀裂が生じているケースが観察された。また, 図では示していないが, 綿メリヤス編布は同じ綿素材でありながら, ダメージの程度は軽度であった。これはメリヤス布を構成する編糸の捻り数が少なく繊維間の空隙が大きく取ることができたためであると考えられる。また, 混紡布では, 綿繊維とポリエステル繊維が短繊維の単位で混在しているため, 綿繊維どうしでの摩擦が生じにくく綿繊維のダメージは綿平織試料布よりも軽度であった。

以上よりSEM像だけの判断となるが, ダメージの程度は綿平織>綿メリヤス>混紡>ポリエステルの順であった。

本研究では, 繊維表面からのマイクロフィブリルの剥離や繊維表面の剥離をミクロなダメージと定義し, 洗濯回数の増加における剥離数変化とKES特性値変化間の相関について検討を試みた。結果を表3に示す。

表3 洗濯によって生じた各試料布帛表面のマイクロダメージと各風合い計測値との相関

		WT	B	G	MIU
綿 (平織)	未処理	-0.292	0.659	-0.739	0.814
	柔軟処理	0.142	-0.999	-0.152	-0.015
混紡	未処理	0.858	-0.808	-0.912	0.406
	柔軟処理	-0.785	-0.531	-0.998	0.630
ポリエステル	未処理	0.994	0.995	-0.088	0.953
	柔軟処理	-0.974	-0.614	-0.575	0.875
綿 (メリヤス編)	未処理	0.873	1.000	-0.934	-0.979
	柔軟処理	1.000	1.000	-1.000	-1.000

表3はマイクロダメージ数とこれに対応する各風合い計測値との相関係数を求めたものである。マイクロダメージの数は以下の手順で概算した。すなわち、洗濯回数0, 10, 50回における各試料布帛のFE-SEM画像(同一倍率で撮影)から、乖離したマイクロフィブリル数を目視により求め、織り糸内の繊維数と織り密度を乗じて布帛1平方センチメートルあたりの乖離したマイクロフィブリル数とした。SEM像から求められるマイクロフィブリル数は見えている範囲内を計数しているため、必ずしも全数とは言えないが、各試料間の相対的な差異を知る程度の知見は得られると考える。

表より綿平織においては、マイクロダメージ増加と洗濯回数間に相関は見られない。これは平織組織内の綿繊維本体から乖離するマイクロフィブリルが他の組織よりも多く、マイクロフィブリルどうしの絡み合い等による繊維どうしの拘束が生じていると考えられる。そのため繊維表面上の摩擦増加に加えて、繊維間の拘束に伴う織糸の移動性低下等が併発してこれも性能変化に影響を与えることで、低相関の結果を得たと考える。

柔軟剤の添加は曲げのみについて負の高相関を得た。すなわちダメージが増加したとしても、柔軟剤の添加によって曲げやわらかくなることが示された。それ以外の組織についてはおおむねマイクロのダメージ数とマクロな機器測定値との間に高い相関があることがわかった。

PET布はSEM観察像から洗浄回数増加にともなうマイクロフィブリルの剥離はほとんど促進されていないことがわかり、機器測定値との相関が著しく低くなった。混紡、PETについては、混紡布を綿とPETの混合物と見なし、織糸内の綿とPET繊維が混合して存在していることで綿平織布の結果にあるような綿繊維どうしのマイクロフィブリルを介した拘束が生じなくなるため、相関係数が高くなる。

メリヤス編みについては、表よりマイクロダメージの増加と測定値には相関が見られることが示された。

以上より、マイクロダメージの累積がマクロダメージに繋がることが考えられるが、実際の布帛のダメージはマイクロフィブリルの乖離以外にも織糸からの繊維脱離、織り糸・編み糸の解熱、編み構造の変形があるため、これらを総括した検討が今後必要になる。

## 謝辞

KES法による風合い計測は鋤柄佐千子教授(京都工芸繊維大学大学院)、FE-SEM観察では新潟県工業技術総合研究所下越技術支援センターのご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

「風合い軽量のための布のキャラクタリゼーションおよびその計測システムについて」  
川端季雄, 日本繊維機械学会誌, vol.26 (1973), 721-728

「アパレル科学」  
丹羽雅子編著, 朝倉書店, (1997)

「Atlas of Fibre Fracture and Damage to Textiles」  
J. W. S. Hearle, B Lomas, W D Cooke, Elsevier, (1998)

「MA 値による機械作用の評価」  
片山倫子, 船橋良, 藤川尚子, 小澤玲子, 日本家政学会誌, vol. 54 (2003), 477-483

「衣料用洗剤の洗浄力と風合いへの影響」  
佐々木麻紀子, 瓦吹由貴, 藤居真理子, 東京家政学院大学紀要, vol.51(2011), 45-52

「Adsorption of double-chain surfactant on to substrate surface」  
Kazuyoshi Nakamura, Sakurako Takagi, Proceedings of the 4th Asian Symposium of Advanced Materials, F16, (2013)

「洗濯用洗剤の洗浄性」  
佐々木麻紀子, 角田薫, 藤居真理子, 東京家政学院大学紀要, vol.54(2014), 41-47

「Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing: Environmental and Social Aspects of Textiles and Clothing Supply Chain」  
Subramanian Senthilkannan Muthu, Springer, (2014)