

# 繊維素材の風合い及び特性の可視化技術に関する研究（第1報）

## Study on Visualization Technology for the Hand and Properties of Textile Materials (Part 1)

材料技術部 繊維・高分子科 中島孝明 中村和由 小林慶祐 大竹翔太 遠藤悠都

多様化する衣服の快適性要求に応えるため、力学特性から機能性の発現傾向を探る解析を行った。紳士服地 13 種を対象に重回帰分析を行った結果、保温性や通気性は圧縮特性や摩擦特性の物理的構造に支配され、2 変数で高い適合度をもって傾向を説明できることが確認された。一方、吸水速乾性と接触冷感性は素材の性質に依存しており、機能性評価において構造依存型と素材依存型を切り分ける必要性が示唆された。

**Key words:** 風合い、KES、機能性予測、紳士服地、見える化

### 1. 緒言

近年、繊維業界では新素材や複合素材の採用が一般化しており、製品に求められる機能性も高度化・多様化している。風合いの評価手法である KES (Kawabata Evaluation System)<sup>1)</sup> は、誕生から約 50 年が経過し、織物の評価において確固たる地位を築いてきた。しかし、現代では編地が紳士服地に採用されるなど衣服環境が大きく変容し、また地球温暖化に伴う気候変化により、消費者が求める快適性の基準も変化している。

関連技術の現状を見ると、生地のも力学特性から、「ふくらみ」や「ぬめり」といった人が触れた際に感じる感性的な指標を予測する手法や、曲げやせん断の特性から生地のシルエット性やドレープ性を予測する技術については、これまで多くの検証がなされ、高い精度が確認されてきた。一方で、通気性や保温性といった機能性を、中間パラメータを介さず直接的に力学特性から予測する手法や、速乾性の定量的予測については未だ課題が多い。

本研究は、こうした背景を踏まえ、生地設計条件から風合い・機能性を網羅的に換算する手法の開発を目的としている。本報ではその第一段階として、紳士服地 13 種を対象に、KES 特性値を用いた機能性推定モデルの構築を試みた。特に、相関の強い複数の特性値群からステップワイズ法を用いて有効な変数を抽出することで、素材データに依存しない汎用的な予測モデルの可能性について検討した。

### 2. 実験

#### 2. 1. 使用試料

表 1 に示す市販の紳士服地 13 種類を試料とした。織物が 9 点、経編地が 4 点であり、素材はポリエステル (PET) 及びウール、PET とウールの混紡のいずれかであった。試料の混用率は、製品の組成表示から引用した。

単位面積当たりの質量 (目付:  $W$ ) は、標準状態で 2

回測定した平均値を示す。

表 1 測定に使用した紳士服地の組成

番号	組織	PET 割合 %	ウール 割合 %	目付 g/m <sup>2</sup>
#1	平織	50	50	153.0
#2	2/2 綾織	100	0	169.4
#3	2/2 綾織	45	55	197.4
#7	変則綾織	85	15	234.6
#8	変則斜子織	79	21	213.6
#4	ニット	100	0	216.7
#5	ニット	100	0	247.8
#6	ニット	100	0	209.5
#9	ニット	100	0	258.1
#11	2/1 綾織	0	100	160.4
#12	平織	0	100	179.5
#13	2/2 綾織	0	100	177.3
#14	2/2 綾織	0	100	174.7

#### 2. 2. 測定項目及び装置

##### 2. 2. 1. KES 測定

風合い特性の測定には、KES-FB シリーズ (カトーテック株式会社製) を使用し、引張、せん断、曲げ、圧縮、表面特性の各項目を 2 回ずつ測定し表 2 に示す物性値を得た。経緯方向を持つ物性値は経方向を「T」、緯方向を「Y」の添え字を付けて示す。

##### 2. 2. 2. 機能性測定

機能性評価項目として、表 3 に示す、保温性<sup>2)</sup>、通気性<sup>2)</sup>、接触冷感性<sup>3)</sup>、吸水速乾性<sup>4)</sup>、及びドレープ性<sup>2)</sup> の 5 項目を測定した。

接触冷感性は JIS L 1927 に準拠した接触冷感試験機 (profid 製) を用いて  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$  ( $BT = 40^{\circ}\text{C}$ 、 $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) の条件下で 5 回測定し、その平均値を算出した。

吸水速乾性は AATCC201 法に準拠した測定器 (ProDry James Heal 製) を用いて測定した。37  $^{\circ}\text{C}$  のホットプレート上、風速 1.5 m/s の条件下で 0.2 mL の水を滴下し、乾燥までの表面温度変化から乾燥速度 mL/h を算

事業名「デジタル技術を活用したものづくり企業のスマート化支援事業」

(繊維素材の風合い及び特性の可視化技術に関する研究)

出し吸水速乾性の指標とした。

ドレープ性は、JIS L 1096 8.21.7 G法（ドレープ係数法）に準拠したドレープ台を作成し、頂点方向から撮影した画像を用いて、試料投影面積（ $A_d$ ）を画像処理ソフト「ImageJ」により算出し、次式からドレープ係数を求めた。

$$\text{ドレープ係数} = (A_d - S_1) / (S_2 - S_1)$$

( $S_1$ : 試料台面積、 $S_2$ : 試料面積)

また、力学特性以外の特性値として、空隙率を次式から算出した。

$$\text{空隙率} = 1 - (W/T0/d)$$

( $W$ : 目付、 $d$ : 繊維の比重)

表2 KES物性値の記号と特性

記号	特性	単位	経/緯
引張	$LT$	引張り荷重—伸びひずみ曲線の直線性	-
	$WT$	引張り仕事量	gf・cm/cm <sup>2</sup> 有
	$RT$	引張りレジリエンス	%
	$EMT$	最大伸長ひずみ	%
曲げ	$B$	曲げ剛性	gf・cm <sup>2</sup> /cm 有
	$2HB$	ヒステリシス幅	gf・cm/cm
せん断	$G$	せん断剛性	gf/cm・degree
	$2HG$	$\phi=0.5^\circ$ におけるヒステリシス幅	gf/cm 有
	$2HG5$	$\phi=5^\circ$ におけるヒステリシス幅	gf/cm
圧縮	$LC$	圧縮荷重—圧縮ひずみ曲線の直線性	-
	$WC$	圧縮仕事量	gf・cm/cm <sup>2</sup>
	$RC$	圧縮レジリエンス	%
表面	$MIU$	平均摩擦係数	-
	$MMD$	摩擦係数の平均偏差	-
	$SMD$	表面粗さ	$\mu\text{m}$
	$TO$	圧力 0.5gf/cm <sup>2</sup> における厚さ	mm
$TM$	圧力 50gf/cm <sup>2</sup> における厚さ	mm	

表3 機能性の評価項目

機能性	参考規格/条件	使用機器	測定値
保温性	JIS L 1096 A法	保温性試験機 (435531-14)	保温率[%]
		東洋精機製	2回測定
通気性	JIS L 1096 A法	FX3340 TEXTTEST 製	通気度[cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /s] 5回測定
接触冷感性	JIS L 1927 を $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ で実施	PF-QMM-01 profid 製	qmax[W/m <sup>2</sup> ] 5回測定
吸水速乾性	AATCC201 法	ProDry James Heal 製	乾燥速度[mL/h] 2回測定
ドレープ性	JIS L 1096 の 8.21.7 G法	自作装置	ドレープ係数 2回測定

## 2. 3. 解析手法

KES 特性値 (29 種)、目付、空隙率、PET の混用率 (PET 割合) を説明変数、機能性項目 5 つをそれぞれ目的変数として、ステップワイズ法を用いた重回帰分析を実施した。モデルの変数選択基準は、投入基準を  $p < 0.05$ 、除去基準を  $p > 0.10$  に設定した。

統計解析には IBM SPSS Statistics 及びプログラミング言語 Python を用い、自由度調整済み決定係数 (補正  $R^2$ )、モデル全体の  $p$  値、説明変数の標準化偏回帰係数  $\beta$ 、多重共線性は分散拡大要因 (VIF) を指標としてモデルを評価した。

## 3. 結果と考察

### 3. 1. 各機能性と力学特性値の相関

図 1 に説明変数と目的変数の相関分析の結果を示す。力学特性と機能性の間における相関分析の結果では、ドレープ性は B-Y (緯方向の曲げ剛性) と高い相関を示し、その他の機能性においても複数の力学特性値と有意性が確認できた。一方で、接触冷感性については、力学特性との間に有意性が確認できなかった。

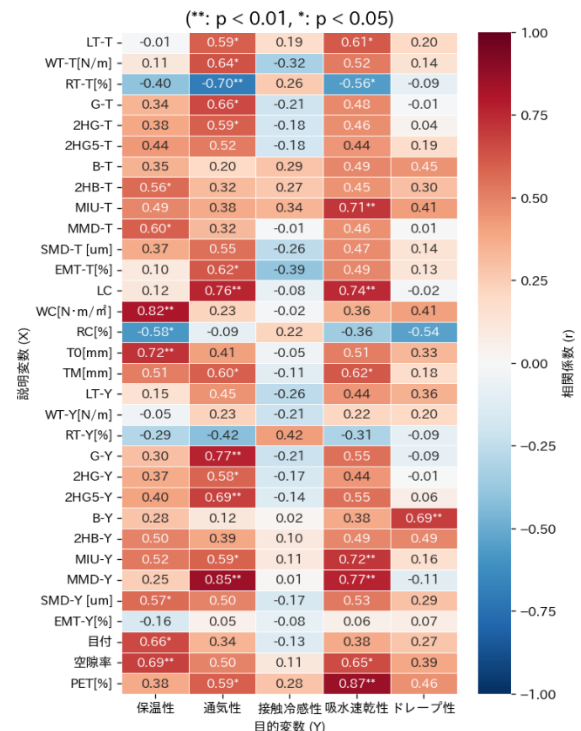


図 1 説明変数と目的変数の相関分析の結果

### 3. 2. 統計的選択に基づく回帰モデルの妥当性

本研究の目的は、機能性を完全に予測する数式を作成することではなく、機能性発現に関わる主要な傾向と物理的要因を抽出することである。試料数が 13 種である状況下で多数の変数を投入すると、ノイズの影響が大きくなり、解釈が困難になることが考えられる。したがって、過学習を避けつつ各力学特性の寄与を明

確に考察できるよう、説明変数を主要な2変数に限定した回帰分析を採用した。

表4に KES 特性値 (29 種)、目付、空隙率を説明変数として、ステップワイズ法を用いた回帰分析の結果を示す。

本解析では、図1における相関係数が必ずしも高くない変数が、第2変数としてモデルに採用されるという結果が得られた。また、力学特性との間に有意な相関が認められなかった接触冷感性を除く4つの機能性において、わずか2つの説明変数から補正 $R^2$ が0.63~0.81と高い適合度を持つ予測モデルが構築された。

表4 2変数による重回帰モデルの概要  
(\*\*: $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ )

目的変数	説明変数	標準化偏回帰係数 $\beta$	VIF	補正 $R^2$	モデル $p$ 値
保温性	B-Y	-0.472*	1.797	0.75	<0.001
	WC	1.133**			
通気性	MMD-Y	0.725**	1.148	0.81	<0.001
	EMT-T	0.359*			
吸水速乾性	MMD-Y	0.554*	1.355	0.68	0.0014
	MIU-T	0.428*			
ドレープ性	B-Y	1.077**	1.705	0.63	0.0030
	RT-T	0.605*			

保温性においては、単独で最も高い正の相関 ( $r = 0.82, p < 0.01$ ) を示した「WC (圧縮仕事量)」に加えて、単独では相関が低い「B-Y ( $r = 0.28$ )」が負の寄与 ( $\beta = -0.472$ ) として採用され、補正 $R^2 = 0.75$ となった。保温性は一般に不動空気層の体積に依存するため、厚みや空隙率との相関が想起され、実際にWCが主要因として抽出されたことは妥当であると考えられる。一方で、統計的にB-Yが負の第2変数として選ばれた理由は、単なる曲げにくさを示すだけでなく、繊維構造の拘束状態を間接的に反映しているためと考えられる。B-Yが大きい生地は、糸同士が密に交錯し、繊維充填率が高い状態であると推察される。このような緻密で動きのない構造は不動空気層を保持することが難しく、結果として熱が逃げやすい構造的特徴を持つと考えられる。

通気性においては、高い正の相関を示した「MMD-Y (緯方向の摩擦係数の平均偏差:  $r = 0.85, p < 0.01$ )」および「EMT-T (経方向の最大伸長ひずみ:  $r = 0.62, p < 0.05$ )」が採用され、補正 $R^2 = 0.81$ となった。通気性の決定要因として厚みではなく表面特性や伸長性が選択された理由は、これらが生地空隙構造の配置や維持力を間接的に反映しているためと考えられる。MMD-Yは表面の凹凸や組織の粗密 (つまり糸間の隙間の多さ) を、EMT-Tは引張負荷時における組織の開きやす

さをそれぞれ評価しており、これらが繊維間の空気の流れやすさを支配する主要因子として機能したと推察される。

吸水速乾性では、MMD-Y ( $r = 0.77, p < 0.01$ ) にMIU-T (経方向の摩擦係数:  $r = 0.71, p < 0.01$ ) を加えた2変数モデルで補正 $R^2 = 0.68$ に達した。吸水速乾性は、滴下した水分を毛細管現象によっていかに素早く面的に拡散させられるかがポイントとなる。この点において、水滴の接触面積を増大させる表面の微細な凹凸と摩擦係数を示す変数 (MMD 及びMIU) が説明変数として選択されたことは、物理的メカニズムとしても素直な結果であると考えられる。

ドレープ性の解析では、相関の高いB-Y ( $r = 0.69, p < 0.01$ ) に続き、単独では相関の低い「RT-T (経方向の引張回復率:  $r = -0.09$ )」が採用された。これは、RT-TがB-Yとは異なる独自の情報を保持しており、ドレープのひだを形成し維持する上で不可欠な、モデルの直交成分として機能したためと考えられる。

試料数は限定的であり、現時点では紳士服地に特化した傾向ではあるものの、力学特性値の組み合わせによって特定の設計因子を介さずとも、多面的な機能性を一括推定できる可能性を示した点において、本解析結果は新たな知見を提供できるものと考えられる。

### 3. 3. 素材データ依存性の検討

続いて、生地の機能性が素材の化学的性質 (PETの混紡率) と物理的構造 (KES 特性値) のいずれに強く依存しているかを検証するため、PET割合を説明変数として強制投入し、残りの変数をステップワイズ法で選定したモデル (表5) を構築し、力学特性値と物理特性値のモデル (表4) と比較検討した。

表5 PET割合を強制投入した回帰モデルの概要  
(\*\*: $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ )

目的変数	説明変数	標準化偏回帰係数 $\beta$	VIF	補正 $R^2$	モデル $p$ 値
保温性	PET	-0.189	1.591	0.63	0.003
	WC	0.935*			
通気性	PET	0.036	1.827	0.68	0.001
	MMD-Y	0.829*			
接触冷感性	PET	0.660*	1.337	0.40	0.031
	RT-Y	0.748*			
吸水速乾性	PET	0.865**	1.000	0.73	<0.001
ドレープ性	PET	0.979**	1.827	0.45	0.021
	MMD-Y	-0.771*			

解析の結果、機能性によって決定要因が明確に二極化する興味深い結果が得られた。

第一に、素材 (PET 割合) への依存性が高い機能性として吸水速乾性と接触冷感性が挙げられた。表 4 の純粹なステップワイズ法では、接触冷感性において有意な予測モデルを構築できなかったが、表 5 で PET 割合を強制投入した結果、初めて有意なモデル ( $p = 0.031$ ) が成立した。

また吸水速乾性においては、PET 割合の寄与 ( $\beta = 0.865$ ) が圧倒的であり、他の KES 特性値は追加されなかった。これらの機能性は、熱移動や水分移動に関わる特性であり、力学的な生地構造よりも、素材自体が持つ固有の熱伝導率や疎水性に決定的に支配されていることを示唆している。

第二に、素材よりも力学・構造特性への依存性が高い機能性として保温性と通気性が確認された。表 5 において PET 割合を強制投入したにもかかわらず、保温性における PET の寄与は有意性が認められず、主役は依然として圧縮特性 (WC) であった。

通気性においても PET の寄与はほぼゼロ ( $\beta = 0.036$ ) であり、摩擦特性 (MMD-Y) が支配的であった。これは、これらの機能性が素材の種類そのものよりも、糸の交錯や空気層の厚みといった生地構造的設計によって自在にコントロール可能であることを示している。

以上の結果から、生地開発においてはすべての機能性を力学特性のみで制御しようとするアプローチには限界があり、目的に応じて素材選定を優先すべき機能性と構造設計を優先すべき機能性を明確に切り分ける必要があると考えられる。

## 4. 結言

紳士服地 13 種を対象に、KES 特性値及び物理特性値から主要な 5 つの機能性を予測するモデルの構築、および素材依存性の検証を行い、以下の知見を得た。

ステップワイズ法を用いた重回帰分析の結果、保温性、通気性、吸水速乾性、ドレープ性の 4 項目については、力学的特性値の中からわずか 2 変数を選択するだけで、高い精度 (補正  $R^2 = 0.63 \sim 0.81$ ) で機能性を推定できるモデルを構築できた。多変量解析により、単独での相関が低い変数であっても、互いの情報を補完し合うことで予測精度向上に寄与することが確認された。

PET 混用率を強制投入したモデルとの比較から、機能性の発現メカニズムが構造依存型と素材依存型に大別できた。

保温性や通気性は素材の化学的性質よりも圧縮特性や表面の摩擦・凹凸といった物理的な生地構造に強く支配されていることが示唆された。

一方で、熱移動や水分移動に関わる接触冷感性と吸

水速乾性は、力学特性値による構造的アプローチの限界を示し、PET の熱伝導率や疎水性といった素材固有の性質に極めて強く依存していることが統計的に明らかとなった。

今後は本報で得られた換算手法を基盤とし、アパレル 3DCAD や CAE を用いたデジタル空間における風合いの可視化技術へと展開する予定である。

## 参考文献

- 1) 川端季雄 著. 風合い評価の標準化と解析. 第 2 版, 日本繊維機械学会風合い計量と規格化研究委員会, 1980.
- 2) JIS L 1096: 2010, 織物及び編物の生地試験方法.
- 3) JIS L 1927: 2020, 繊維製品の接触冷感性評価方法.
- 4) AATCC TM201-2012:2014, Test Method for Drying Rate of Fabrics: Heated Plate.