

# 難素材を高伸度化する弾性着衣の開発

## Development of elastic garments using elastic yarns derived from low-extensibility high-performance fibers

材料技術部 繊維・高分子科 中村和由 小林慶祐 大竹翔太 遠藤悠都

本研究では、弾性編地における衣服圧の発生機構を明らかにするため、ポリウレタン量 (PU) と実効ひずみ $\epsilon_{eff}$ <sup>①)</sup>に着目した。PU および $\epsilon_{eff}$ はそれぞれ衣服圧と正の相関を示すものの、単独ではばらつきが認められた。一方、 $PU \times \epsilon_{eff}$ と衣服圧の間には線形関係 ( $R^2=0.856$ ) が得られ、衣服圧は材料 (PU) と変形 ( $\epsilon_{eff}$ ) の積で説明可能であることが示された。その結果、衣服圧は  $p=k(PU \times \epsilon_{eff})$  と表され、衣服圧の発生機構を表す設計モデルとして有効であることが示された。

Key words: スーパー繊維、超高分子量ポリエチレン繊維<sup>②)</sup>、弾性着衣<sup>③)</sup>

### 1. 緒言

弾性編地は、医療用の着圧製品、スポーツウェア、日常衣料など幅広い分野で利用されており、衣服圧は快適性や機能性に直結するため、その適切な設計と制御が求められている<sup>1-4)</sup>。一般に衣服圧は縫製縮率によって調整されるが、縫製縮率は設計上の寸法指示であり、実際に装着された際の伸びを直接表すものではない<sup>5)</sup>。

一方、実効ひずみ $\epsilon_{eff}$ は装着時の周長と無荷重時の寸法差から求められる値であり、編地が実際にどの程度伸ばされているかを示す尺度として有効である<sup>6)</sup>。したがって、縫製縮率と実効ひずみ $\epsilon_{eff}$ は同一ではなく、衣服圧の設計と制御には両者を区別して扱う必要がある。しかし、これらを統一的に扱った定量的な設計手法は十分に整理されていないのが現状である。

### 2. 研究目的と目標

本研究の目的は、弾性編地における衣服圧の発生機構を整理し、材料特性と装着時の変形を統合的に扱う設計モデルを構築することである。特に、ポリウレタン量 (PU、以下 PU と呼ぶ) と実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ 、以下  $\epsilon_{eff}$  と呼ぶ) に着目し、両者が衣服圧に与える影響を分離・統合して評価することで、経験的に行われてきた衣服圧設計を定量的に表現することを目指す。また、得られた関係をもとに、衣服圧を予測・制御可能な設計モデルの構築を目的とする。具体的な研究目標は以下の四項目に取り組んだ。

- ①: PU が衣服圧に与える影響を検証する
- ②:  $\epsilon_{eff}$  が衣服圧に与える影響を検証する
- ③: PU と  $\epsilon_{eff}$  の組み合わせによる衣服圧の発生機構を検証する
- ④: 衣服圧の設計及び制御に有効な設計手法を提案する

### 3. 試験方法と加工・評価機器

#### 3. 1. 使用原料

使用した原料を表 1 に示す。

表 1 原料系一覧

呼名	内容
PE	超高分子量ポリエチレン繊維 商標名: イザナス (株東洋紡)
PU	ポリウレタン繊維 商標名: オペロン (株東レ・オペロンテックス)

#### 3. 2. 編地試作用加工糸と試作編地

表 1 の原料から表 2 の編地試作用加工糸を加工し、次に表 3 記載の自動丸編機により所定の試作編地を作製した。

表 2 編地試作用加工糸

糸加工方法	加工条件		draft 倍率	撚糸回数 [T/M]
	使用糸			
	芯糸 PE[D]	鞘糸 PU[D]		
シングルカ バーリング	30	10	1.5 1.9 2.5	700 (S)
		20		
		30		
		70		
		105		

#### 3. 3. 加工および評価機器

加工および評価に使用した機器類を表 3 に示す。試験環境は、JIS L0105 に準拠。

表3 加工および評価機器

名称	用途	機器名
自動丸編機	編地試作(総針本数: 190 針、編成ゲージ: 20、シリ ンダー径: 3 インチ)	TN-21 (小池機械)
衣服圧計測機	衣服圧計測	MP160 (RX110) (Biopac 社製)

### 3. 4. 衣服圧の計測方法

衣服圧の計測には、  
図1に示す生体信号収録システム MP160 (BIOPAC Systems, USA) を用いた。圧力計測には圧力トランスデューサー TSD160B を接続し、柔軟型エアパックセンサー RX110 を受圧部として用いた。差圧方式により衣服圧(ゲージ圧)を計測し、基準ポートは大気開放とした。

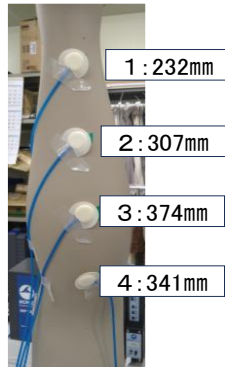


図1 衣服圧計測点と周長

校正は二点校正法により行い、ゼロ点は大気開放状態、高圧点は水柱静水圧により設定した。測定は各試料につき1分間連続計測し、サンプリング周波数は1 Hz とした。計測間隔はゼロ圧が安定するまで約5分確保した。2~5点平均値を初期圧 P とした(単位: cmH<sub>2</sub>O)。

### 3. 5. 定義式

本研究では、装着時の変形状態を表す尺度として実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) を用いた。実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) は、無荷重時の編地長さ  $L_0$  と、装着時の周長  $C$  の差から次式で定義される。

$$\epsilon_{eff} = \frac{C - L_0}{L_0}$$

ここで、 $L_0$  は自然長(無荷重時の長さ)、 $C$  は人体などに装着された際の周長を示す。

この定義式により、実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) は装着状態を直接反映するため、縫製縮率よりも実際の装着状態に基づいた変形量を評価することが可能となる。

また、衣服圧  $p$  は、材料特性と変形量の積によって決まると考え、以下の関係式で近似を行った。

$$p \approx k(PU \times \epsilon_{eff})$$

ここで、 $PU$  はポリウレタン量、 $k$  は比例係数を示す。係数  $k$  は曲率(半径)および編地構造を含む比例係数

である。

上式は、衣服圧が「PU材料の張力」と「実際の伸び」の積によって決まることを示す。衣服圧は編地に生じる張力に起因し、張力は材料特性と変形量に依存する両因子の連動により発生するため、積として表現することが妥当と判断した。

また上式は、張力  $T$  が材料特性( $PU$ )と伸長量( $\epsilon_{eff}$ )に比例するという仮定に基づく Laplace 則<sup>註4)</sup> ( $p \propto T$ )と整合するものである。

## 4. 結果と考察

### 4. 1. 材料効果 (PU→p)

図2にポリウレタン量 ( $PU$ ) と衣服圧 (Pressure、以下衣服圧  $p$  と呼ぶ) の関係を示す。

衣服圧  $p$  は、ポリウレタン量 ( $PU$ ) が増えるほど、全体的に高くなる傾向を示した。 $PU=20$  から  $70$ 、さらに  $105$  へと増加に伴い、衣服圧  $p$  は段階的に上昇しており、すべての試料で同様な傾向が示された。

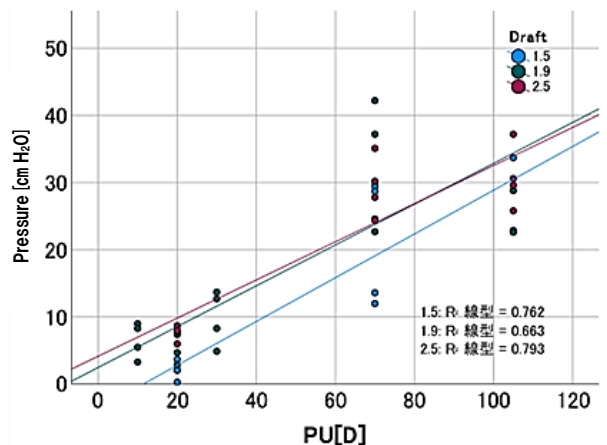


図2 ポリウレタン量 (PU) と衣服圧 (Pressure) および Draft 倍率の関係

一方で、draft の違いによる衣服圧  $p$  の差は一部に見られるものの、その影響は  $PU$  による変化に比べて小さく、衣服圧  $p$  は主に  $PU$  に支配されることが示された。

$PU$  は編地構造の中でゴムのように動き、引き戻す力(張力)を生む役割を担う。そのため、 $PU$  が多いほど強い張力が発生し、結果として衣服圧  $p$  が高くなると考えられる。

図2の結果は、衣服圧  $p$  が主に  $PU$  材料の特性に左右されることを示している。また、draft の影響が小さいことから、衣服圧  $p$  を設計する際は、まず  $PU$  を決め、その後に draft で微調整する方法が有効と考えられる。

#### 4. 2. 変形効果 ( $\epsilon_{eff} \rightarrow p$ )

図3に実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) と衣服圧 (Pressure) の関係を示す。

実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) が大きくなるにつれて、衣服圧  $p$  が高くなる傾向が見られた。同じPU条件でも、 $\epsilon_{eff}$ が増えると衣服圧  $p$  は上昇するが、その関係はPUほど明確ではなく、同じ $\epsilon_{eff}$ でも衣服圧  $p$  にばらつきが見られた。特にPU織度が小さい場合には変動が大きく、 $\epsilon_{eff}$ だけでは衣服圧  $p$  を十分に説明できないことが示された。

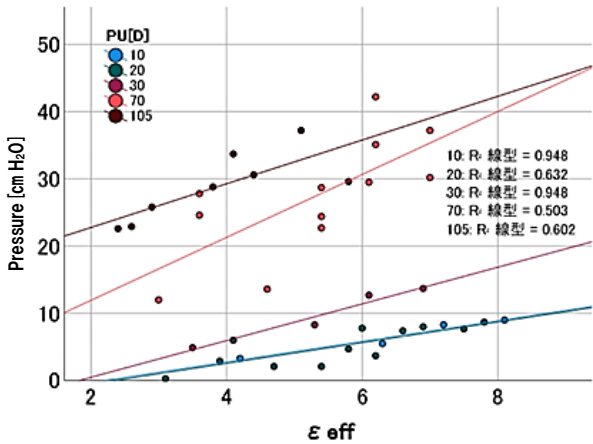


図3 実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) と衣服圧 (Pressure) およびポリウレタン (PU) の関係

実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) は、実際にどれだけ生地が引き伸ばされているかを表す尺度であり、装着状態を反映している。実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) が大きいほど張力が増えるため、衣服圧  $p$  が高くなるという結果は自然な挙動と判断される。ただし、実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) だけでは衣服圧  $p$  を説明できないことから、材料特性と合わせて考える必要があり、実効ひずみ ( $\epsilon_{eff}$ ) は単独ではなく他因子と組み合わせて衣服圧  $p$  を評価する必要があることが示された。

#### 4. 3. 相互作用 ( $PU \times \epsilon_{eff} \rightarrow p$ )

図4に  $PU \times \epsilon_{eff}$  と衣服圧 (Pressure) の関係を示す。 $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  の積 ( $PU \times \epsilon_{eff}$ ) を用いると、衣服圧  $p$  との間に非常に強い直線関係が得られた ( $R^2=0.856$ )。単独因子ではばらついていた衣服圧  $p$  が直線上にまとまり、 $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  の積により衣服圧  $p$  が説明可能であることが示された。回帰式は  $p=0.072(PU \times \epsilon_{eff})-0.721$  で表され、全体として高い一致を示した。

$PU \times \epsilon_{eff}$  は、「引き戻す力 (張力)」と「実際の伸び」を同時に表す尺度である。この両因子の積をとることで、衣服圧  $p$  の変化が説明可能であると考えられる。よって、衣服圧  $p$  は材料単独、また変形単独でも決まらず、両因子の連動で決まることから、図4の結果は、衣服圧  $p$  の設計と制御に応用できる関係式であること

が示された。

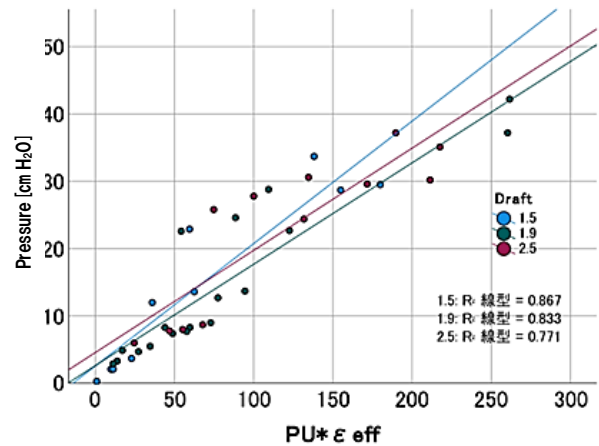


図4  $PU \times \epsilon_{eff}$  と衣服圧 (Pressure) および Draft 倍率の関係

#### 4. 4. 衣服圧 $p$ の設計モデル ( $\epsilon_{eff} \times PU \rightarrow p$ )

図5に  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  を軸とした衣服圧  $p$  の設計モデルを示す。

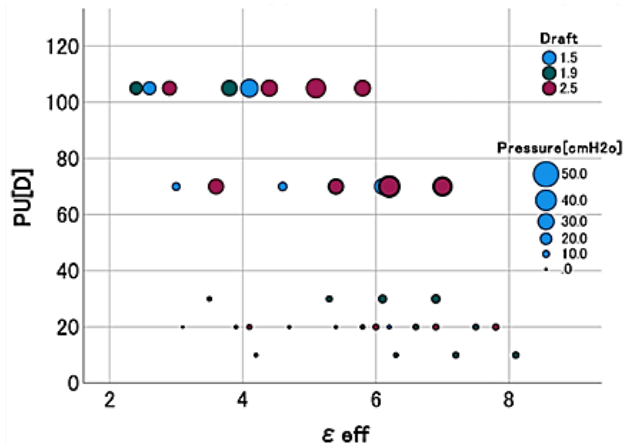


図5  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  を軸とした衣服圧  $p$  の設計モデル および Draft 倍率と衣服圧  $p$  の関係

両因子が大きくなるほど、衣服圧  $p$  は高くなる傾向が得られた。特に  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  が共に大きい領域では高い衣服圧  $p$  が集中し、両方が小さい領域では低い衣服圧  $p$  となった。また draft による違いは見られるものの、全体の傾向は共通しており、衣服圧  $p$  が2つの因子で整理できることが示された。

よって、 $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  を組み合わせることで、どの程度の衣服圧  $p$  になるかを予測できるため、経験則に頼らない設計が可能になる。また draft は細かい調整に関わる要素であり、基本的な衣服圧  $p$  は  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  で決まると考えられる。このことから、図5は目標衣服圧から必要な  $PU$  および  $\epsilon_{eff}$  を逆算可能な設計モデルとして利用できることが示された。

#### 4. 5. 構造効果 (draft)

図6に構造因子 (draft) が衣服圧  $p$  に及ぼす影響を示す。

draftの違いにより、衣服圧  $p$  に変化が見られたが、その影響は  $PU$  や  $\epsilon_{eff}$  と比較して相対的に小さい傾向を示した。同じ  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  の条件でも衣服圧  $p$  に多少の差はあるものの、全体として類似傾向を示し、大きな変化は見られなかった。draftは編地の構造に関わる要素であり、衣服圧  $p$  に対して二次的に働くと考えられる。

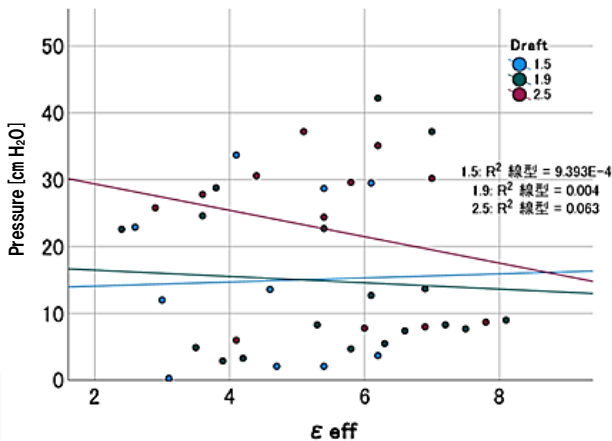


図6 構造因子 (draft) が衣服圧  $p$  に及ぼす影響

図6の結果から、衣服圧  $p$  の大きさは主に  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  が支配的であり、draftはその値を微調整する役割を持つと考えられる。以上の結果より、衣服圧  $p$  の設計と制御においては、まず  $PU$  と  $\epsilon_{eff}$  で衣服圧  $p$  を決定し、その後 draft で微調整する段階的設計が有効であると推察される。

#### 5. 結言

##### ①材料効果 ( $PU$ )

$PU$ が増加すると衣服圧  $p$  は明確に上昇し、全試料で同様の傾向が示された。衣服圧  $p$  の変化は  $PU$  によって大きく支配されており、主因子であることが示された。

##### ②変形効果 ( $\epsilon_{eff}$ )

$\epsilon_{eff}$ の増加に伴い衣服圧  $p$  は上昇する傾向を示したが、同一条件でもばらつきが見られ、 $\epsilon_{eff}$ 単独では衣服圧  $p$  を十分に説明できないことが示された。

##### ③相互作用 ( $PU \times \epsilon_{eff}$ )

$PU \times \epsilon_{eff}$ と衣服圧  $p$ の間には強い直線関係が得られ、ばらついていたデータが一つに整理された。衣服圧  $p$ は編地に生じる張力に起因し、張力は材料特性と変形

量に依存するため、材料と変形の組み合わせで説明できることが示された。

##### ④構造効果 (draft)

draftによる衣服圧  $p$ の変化は示されたが、その影響は  $PU$  や  $\epsilon_{eff}$  に比べて小さく、主因子ではなく二次因子として作用することが示された。

本研究では、弾性編地における衣服圧設計を実用域で最適化する前段階として、広範囲の実効ひずみ条件で予備実験を行った。変形条件の範囲を意図的に拡張することで、 $PU$ 、draft、 $\epsilon_{eff}$ 、 $PU \times \epsilon_{eff}$ の寄与と相互作用を把握し、実用域の設計に必要な設計モデルの構築を目的とした。今後は、実効ひずみの実用域を対象を絞り、設計・試作・評価へ移行する。

#### 参考文献

- 1) 中村和由, 小林慶祐, 石井瑞樹, 東瀬慎. 弾性編地の開発と評価に関する研究. 令和5年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2024.
- 2) K. Makabe et al., "Clothing pressure and human physiological responses," Textile Research Journal, 1992
- 3) 小林 茂雄: 衣服圧に関する研究 (第1報), 繊維製品消費科学, 11(3), 134-140 (1970).
- 4) 日本繊維製品品質技術センター (QTEC) 衣服圧関連技術資料
- 5) JISL1096 織物及び編物の試験方法 (衣服圧関連)
- 6) S. Kawabata, "The Standardization and Analysis of Hand Evaluation," 2nd Ed., 1980

#### 用語解説

- 注1) 装着時の周長と無荷重長との差から定義されるひずみで、実際の着用状態における伸長を直接反映する変形尺度。
- 注2) 分子量が100万を超え、ゲル紡糸という方法により製造されるポリエチレン繊維。軽量性、高強度、高耐薬品性、高熱伝導性などの特徴を持つ。
- 注3) 伸縮性材料により身体に密着し、圧力を付与する衣服で、医療やスポーツ用途において圧制御と機能性を目的とする。
- 注4) 円筒表面の内圧と張力の関係を示す法則で、圧力は表面張力に比例し曲率半径に反比例する関係で表される。