

スポーツウェアにおける触覚と皮膚振動に関する基礎研究

文化学園大学 佐藤 真理子
(共同研究者) 同 伊豆 南緒美
同 松井 有子
名古屋工業大学 田中 由浩

Basic Study of Tactile Sensation and Skin Vibration on Sportswear

by

Mariko Sato, Naomi Izu, Yuko Matsui
Bunka Gakuen University
Yoshihiro Tanaka
Nagoya Institute of Technology

ABSTRACT

The purpose of this study was to collect basic data for use in developing more comfortable sportswear through the study of skin vibration and tactile sensations. Skin vibration was measured when eight healthy young women were asked to run their fingers along nine types of sportswear material (including a control) in both high-temperature and low-temperature environments. The collected vibration wave data was then subject to an FFT analysis to determine vibration strength and median frequency. As a result of looking at skin vibration in response to (1) the physical properties of the material, (2) skin characteristics, and (3) sensory evaluations, we were able to indicate a variety of frequency characteristics in the skin vibration data and identified a high degree of correlation between the frictional characteristics of the material and skin vibration strength. In comparing the two environments, we found large variations

in vibration strength in low-temperature condition and a tendency towards higher median frequency. Skin characteristics changed at low temperatures, which may have impacted the contact between the skin and materials. With the sensory evaluations, the study clearly demonstrated that the lower the vibration strength and the more low-frequency components were included in the vibration, the more readily the subjects felt smoothness, softness, and moistness; while the higher the vibration strength and the more high-frequency components were included in the vibration, the more readily they experienced roughness, stiffness, and dryness.

要 旨

スポーツウェアにおける皮膚振動と触覚に関する検討により、着心地の良いウェア開発に向けた基礎データの集積をはかった。健康な若年女性8名を対象に、高温及び低温環境下において、コントロールを含む9種のスポーツウェア素材を指先でなぞった際の皮膚振動測定を行い、得られた振動波をFFT解析し、振動強度と周波数中央値について検討した。皮膚振動と素材の物性、皮膚特性、官能評価との対応を検討した結果、素材により、皮膚振動には様々な周波数特性が示され、素材の摩擦特性と皮膚の振動強度に高い関係性が見出された。環境間の比較では、低温環境下での振動強度のばらつきが大きくなり、周波数中央値の高値傾向が示された。低温で皮膚特性が変わる等により、皮膚と素材との接触に影響を与えた可能性が考えられる。官能評価との関係については、振動強度が小さく、低周波成分を多く含んだ振動であるほど、なめらかさ・やわらかさ・しっとり感を、振動強度が大きく、高周波成分を多く含む振動であるほど、ざらざら感・かたさ・さらっと感を、感じやすいことが明らかとなった。

緒 言

スポーツウェアの着用時、ウェアと皮膚との接触による振動、身体動作による皮膚振動など、様々な

振動が着用者の身体に生じ、ウェアの着心地に関与すると考えられる。著者らはこれまで、スポーツウェア素材と皮膚の接触に着目し、スポーツウェアの摩擦に伴う不快さや皮膚ダメージについて報告してきた^{1,2,3)}。皮膚は最大の臓器とも言われ、一枚でつながっているため、対象との接触で生じた振動は、皮膚上を伝播し広がっていく。例えば指先で生じた伝搬振動の広がり、指根元や手首周辺まで到達すると報告されている⁴⁾。田中は、高分子圧電体のPVDFフィルムを用い、皮膚を伝搬する振動を検出するウェアラブルセンサを開発、自然な触覚を得ながら、皮膚と対象との間に生じる力学現象を同時に記録することを可能にした⁵⁾。本研究では、田中の開発したセンサを用い、皮膚を伝搬する振動の検出により、スポーツウェア素材の触覚について検討、より着心地の良いウェア開発に向けた基礎データの集積を目指す。

1. 方 法

1. 1 物性試験

1. 1. 1 試 料

試料は、9種のスポーツウェア素材とコントロールである綿添付白布の計10種とした。試料の一覧及び、布地の構成要素である諸元を表1に示す。

1. 1. 2 試験条件

温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $65 \pm 4\%$ の標準状態に

表 1 The list and parameters of the test samples

Sample	Fiber material	Density (/inch) Wale × Course (Warp) (Weft)	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	Porosity* (%)
a	Cotton 100%	82 × 70	0.25	106	73
b	Cotton 100%	55 × 35	0.58	174	81
c	Polyester 38% Acrylic 32% Rayon 21% Polyurethane 9%	33 × 47	0.41	145	73
d	Nylon 59% Cupra 31% Polyurethane 10%	50 × 45	0.44	140	74
e	Polyester 100%	14 × 12	0.71	247	75
f	Polyester 100%	27 × 20	0.52	130	82
g	Polyester 100%	44 × 47	0.66	179	80
h	Polyester 100%	6 × 7	0.39	81	85
i	Polyester 100%	27 × 22	0.60	170	79
j	Cotton 100%	(Warp) (Weft) 6 × 11	1.59	587	77

*Calculated by JIS L 1096

て試験を実施した。試料布は、JIS L 0217 の 106 法による洗濯を行い、標準状態の試験室内に放置し、恒量となった試料を使用した。

1. 1. 3 測定項目

マイクロスコープによる試料表面の観察、水分率、摩擦、剛軟度、透湿性、吸水性、最大吸水率、通気性、最大熱流束、計 9 項目の測定・評価を行った。

1) マイクロスコープによる試料面の観察

拡大倍率 50 倍に設定したハイグレードマイクロスコープ SZ-7000 (スカラ株式会社) を使用し、試料表面及び、裏面を拡大撮影した。

2) 水分率

JIS L 1096 の 8.10 水分率及び含水率に準拠し試験を行った。200mm×200mm に採取した試料片について、標準状態における質量 (乾燥前の質量: g) と、絶乾状態の質量 (絶乾質量: g) から次式により水分率を算出した。測定は 2 回行い、平均値を採用した。

$$\text{水分率 (\%)} = ((W_1 - W_2) / W_2) \times 100$$

W₁: 標準状態における、乾燥前の質量 (g)

W₂: 絶乾後の絶乾質量 (g)

3) 摩擦

KES-SE 摩擦感テスター (カトーテック株式会

社) を用い、平均摩擦係数 MIU 及び摩擦係数の平均偏差 MMD を測定した。各試料につき、表・裏、たて・よこ 2 回ずつ測定し、それぞれ平均値を採用した。

4) 剛軟度

JIS L 1096 の 8.21 剛軟度試験における、A 法: 45°カンチレバー法により測定を行った。たて・よこ各 2 回ずつ測定し、平均値を採用した。

5) 透湿性

蒸発カップ法を用い、ビーカーの水の蒸発による減少重量より透湿性を測定した。試料を被せないもの (ブランク) と、試料を被せたもの、各ビーカーの重量を、電子天秤にて測定開始から 3 時間までは 1 時間毎、最大で 24 時間計測し、その減少重量より、透湿量 (g/m²/h) を算出した。

6) 吸水性

JIS L 1907 繊維製品の吸水性試験方法の吸水速度法、バイレック法を用いた。たて方向・よこ方向それぞれに採取した試験片の上端を固定させ、下端を水に 10 分間浸漬、試験片内の水の上昇した高さを、開始より 15 秒、30 秒、60 秒以降は 60 秒毎に測定した。本実験では、試料の大きさに限りがあったことから、本来の JIS サイズとは

異なるサイズ (20mm×150mm) の試料を用いて実験を行った。

7) 最大吸水率

試料を水に浸漬させる前後の重量より算出した。試料片は100mm×100mmである。試料浸漬は20分以上、浸漬後は試験片を垂直状態にして3分間放置し、次式により最大吸水率を算出した。測定は2回行い、平均値を採用した。

$$\text{最大吸水率 (\%)} = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100$$

W_1 : 浸漬後重量 (g)

W_2 : 浸漬前重量 (g)

8) 通気性

KES-F8 通気性試験機 (カトーテック株式会社) を用い、各試料3回ずつ測定を行い、平均値を採用した。

9) 最大熱流束

KES-F7 サーモラボⅡ試験機 (カトーテック株式会社) を用い、接触冷温感に対応する最大熱流束 q_{max} を測定した。試料の表・裏ともに5回ずつ測定を行い、平均値を採用した。

1. 2 被験者実験

1. 2. 1 被験者

被験者は、健康な若年女性8名 (年齢 23.88 ± 3.60 才, 身長 159.75 ± 3.81 cm, 体重 55.13 ± 8.39 kg, BMI 21.71 ± 4.04) とした。

1. 2. 2 試料

1. 1 物性試験で測定した試料10種を、一辺が15cmの正方形に裁断、試料の表裏両面が触れられる状態になるように、試料片の4辺を厚紙に固定させた。試料を、実験24時間前に所定の温湿度に設定された人工気候室に入れ、実験時に試料布が恒常状態となるようにした。

1. 2. 3 環境条件

実験環境は、 $30^\circ\text{C} \cdot 70\%RH$ の高温環境及び、 $20^\circ\text{C} \cdot 65\%RH$ の低温環境の2条件とした。以後、図表では高温環境を High, 低温環境を Low で示す。

1. 2. 4 測定項目

測定項目は皮膚振動, 皮膚特性, 官能評価である。

1) 皮膚振動

皮膚振動計測には田中の開発したウェアラブル皮膚振動センサを用いた⁵⁾。このセンサは高分子圧電体の PVDF フィルムを用い、皮膚を伝搬する振動を検出するもので、試料表面をなぞった際の、指先より伝播する皮膚振動を計測することができる。センサを右手中指の第1関節と第2関節の間の指腹に装着し、示指, 中指, 薬指の3本指で対象表面をなぞった際の皮膚振動を計測した。布地のよこ方向へのなぞりをよこ, 布地のたて方向へのなぞりをたてとし、試料の左から右方へ指をスライドさせた。できる限り自然ななぞりを100mm/sで行わせ、圧力は被験者内一定とした。なぞる回数は各試料, 各方向4回ずつとし、10kHzのサンプリング周波数で計測を行った。

計測により得られた皮膚振動波について、数値解析ソフトウェア MATLAB (MathWorks, US) 及び、信号解析アプリケーション Signal Processing Toolbox (MathWorks, US) を用い、以下の3項目の解析を行った。

①パワースペクトル密度 (PSD)

なぞり開始時点より1秒間について、FFTによる周波数解析を行い、パワースペクトル密度 (以下, PSD) を算出した。

②振動強度 (PSDの総和)

周波数解析により得られた PSD について、その総和と粗さ感に関する既報⁶⁾を参考に、パチニ小体の感度帯を鑑み⁷⁾、100-500HzのPSDを合算したものを振動強度として検討した。

③周波数中央値

皮膚振動の周波数成分の特徴を表す1つのパラメータ⁸⁾として、周波数中央値を求めた。本研究では周波数帯域100-500Hz間の100Hzから500Hz, 500Hzから100Hzへ、それぞれPSDを合算していき、その合算値が凡そ同等となる地点

を周波数中央値とし、振動波の質を表す値として用いた。

2) 皮膚水分量

静電容量法を測定原理とする **Corneometer[®] CM825** (Courage + Khazaka, Germany) による測定を行った。測定部位は、右手中指の指腹とし、測定部位内の皮膚水分量をランダムに3回採取、平均値を採用した。

3) 皮膚粘弾性

Cutometer[®] Dual MPA580 (Courage + Khazaka, Germany) を用い、口径2mmのプロープ先端の開口部を右手中指の指腹に接触させ、450mbarの陰圧をかけ皮膚表面を5秒吸引、その後陰圧を解除し皮膚の吸引を開放、陰圧解除後3秒の計8秒、皮膚形状の変位を計測した。本研究では、陰圧をかけ始めてから0.1秒後の皮膚の初期ひずみ量 (U_e)、遅延的に起こるひずみ量 (U_v)、総ひずみ量 (U_f)、陰圧解除0.1秒後の瞬間的な回復量 (U_r) を計測し、 U_r/U_f 、 U_r/U_e 、 U_v/U_e の3つのパラメータを使用した^{9,10)}。 U_r/U_f 、 U_r/U_e はそれぞれ回復率を示しており、高値であるほど高い弾力性を有する。 U_v/U_e は初期ひずみ量に対する遅延ひずみ量の比率で、値が小さいほど皮膚変形が容易であることを示す。測定の際はランダムに3回測定し、平均値を採用した。

4) 皮膚温

安立計器株式会社の熱電対センサ及び、コンパクトサーモロガー **AM-8051E** を用いた。測定部位は右手中指とし、センサ温度と環境温度を平衡状態にさせた後、センサに測定部位を接触させた。センサを厚さ5mmのスチレンボードに固定させ、測定インターバルは1秒、計測開始から数十秒後のゆるやかな上昇を始めた際の皮膚温を代表値として採用した¹¹⁾。

5) 官能評価

SD法により、皮膚振動実験による試料表面のなぞりに対する官能評価を行った。評価項目は、

先行研究¹²⁾を参考に、ざらざらした-なめらかな、かたい-やわらかい、べたつく-べたつかない、しっとりした-さらっとする、あたたかい-つめたい、総合的に不快-総合的に快適、嫌い-好きの7項目の形容詞対とした。なぞりに際し、視覚的な影響を排除するため、被験者の手元を隠す衝立を設置した上で評価を行った。

1. 2. 5 実験手順

実験は、文化学園大学人工気候室Aにて実施した。実験衣には、綿96%、ポリウレタン4%の長袖・長ズボン及び、アクリル60%、レーヨン40%の起毛長袖インナー、綿・ポリエステル混紡のソックスを用いた。被験者は、実験室入室前に、公益財団法人日本食品衛生協会が推奨する基本の手洗い手順¹³⁾に沿って手洗いをを行い、入室後、皮膚振動計測用のセンサを装着、30分間の安静時間を設けた後に、十分ななぞり練習を行った。実験は皮膚水分量、皮膚振動、皮膚温、官能評価の4項目を1セットとし、被験者に対し試料をランダムに提示し、繰り返し行った。

1. 2. 6 統計解析

皮膚振動では、環境と試料の二要因で対応のある二元配置分散分析を行い、有意が認められたものについては **Bonferroni** 法による多重比較を行った。皮膚水分量・皮膚粘弾性・皮膚温については、得られた結果に対し、高温環境と低温環境で対応のある **t** 検定を行った。官能評価では、環境間の比較に **ウィルコクソンの符号付き順位検定** を、試料間の比較に **フリードマン検定** 及び **Scheffe** の対比較をそれぞれ使用した。各項目間の関係については、相関係数を算出し無相関の検定を行った。

1. 2. 7 倫理的配慮

実験実施にあたり、ヘルシンキ宣言に則り、被験者に本研究の趣旨、研究協力への任意性等を十分に説明し、同意を得て実施した。なお本研究は、所属大学研究倫理委員会の承認を得て行った。

2. 結果

物性試験により得られた結果を、表2に示す。

皮膚振動の結果を図1-3及び表3, 4に示す。

図1はPSDの結果例である。(a)では、0-200Hzの低周波にスペクトルが集中し、(b)では低周波のスペクトルが少ない傾向にある等、試料により、

皮膚振動の異なる様子が示された。

高温及び低温の両環境下における、各試料の振動強度について図2, 表3に示す。試料間の振動強度差は明らかで、中でも試料e, i, jで振動強度が有意に大きく、試料b, c, dでは有意に小さかった。また、環境間での有意な振動強度差は示されなかったものの、低温環境下における分散の

表2 All results of the sample's physical properties

sample	(Front)Moisture		Friction				Bending resistance		Moisture permeability amount(24h)	Water absorption(10min)		Maximum water absorption (%)	Air-flow Resistance (kPa·s/m)	q-max (W/cm ²)	
	regain	(Back)	MIU		MMD		(mm)			(mm)					
	(%)	(%)	Wale	Course	Wale	Course	Wale	Course	Wale	Course					
a	7.606	[Image]	(Warp)	(Weft)	(Warp)	(Weft)	(Warp)	31.00	718.471	(Warp)	(Weft)	175.530	0.205	0.207	
			0.760	0.780	0.275	0.420									49.00
			(Warp)	(Weft)	(Warp)	(Weft)									
0.750	0.730	0.425	0.540												
b	6.738	[Image]	0.975	0.950	0.380	0.370	31.00	16.50	629.299	84	58.5	294.539	0.173	0.173	
			0.985	1.020	0.380	0.125								0.167	
c	3.313	[Image]	0.870	0.955	0.310	0.370	18.00	10.00	769.427	0	0	123.262	0.127	0.169	
			1.195	0.880	0.435	0.240								0.162	
d	5.636	[Image]	0.820	0.850	0.540	0.405	11.50	18.50	710.828	79	78.5	251.584	0.123	0.241	
			1.955	0.725	0.775	0.620								0.184	
e	0.427	[Image]	0.540	0.730	0.510	0.685	23.00	27.00	670.064	109	138	175.056	0.018	0.178	
			0.570	0.910	0.710	0.625								0.142	
f	0.423	[Image]	0.615	0.830	0.225	0.390	23.50	20.50	662.420	114	109	301.912	0.019	0.161	
			0.670	0.965	0.250	0.460								0.121	
g	0.393	[Image]	0.800	1.250	0.300	0.360	21.50	20.00	677.707	123.5	140	355.294	0.132	0.145	
			0.925	1.420	0.345	0.410								0.120	
h	0.370	[Image]	0.805	1.160	1.605	1.215	23.50	16.00	830.573	119.5	125.5	357.642	0.003	0.122	
			0.975	0.860	1.070	0.320								0.117	
i	0.474	[Image]	0.720	1.205	3.950	0.705	24.00	20.00	723.567	130	127.5	232.420	0.023	0.121	
			0.665	0.675	1.095	1.325								0.152	
j	6.487	[Image]	(Warp)	(Weft)	(Warp)	(Weft)	(Warp)	46.00	619.108	(Warp)	(Weft)	175.385	3.220	0.116	
			1.005	0.985	0.715	0.900								65.50	
			(Warp)	(Weft)	(Warp)	(Weft)									0.145
			1.010	0.975	1.565	1.235									

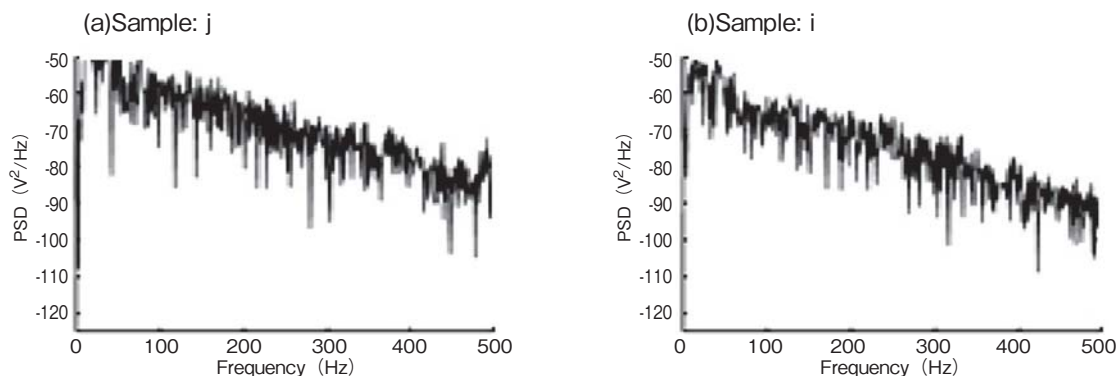


図1 The examples of FFT analysis results

大きくなる傾向がみられ、両環境間の分散係数についてt検定の結果、1%水準で有意差が得られた。周波数中央値では、試料e、iで値が有意に大

きかった(図3, 表4)。環境間の比較では、高温環境下と比し、低温環境下で値の大きくなる傾向が示されたが、有意差は得られなかった。

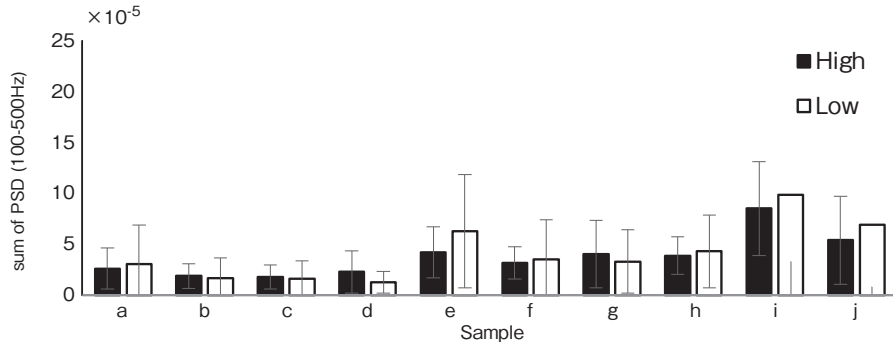


図2 The average of skin vibration intensity

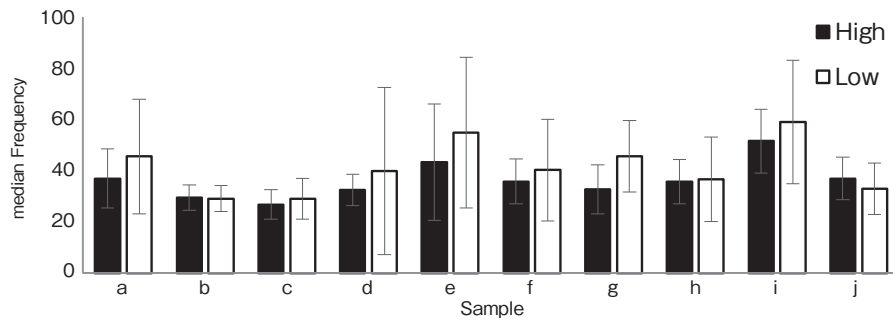


図3 The average of median frequency

表3 The statistics of skin vibration intensity

Analysis of variance:

Factor	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	P-value
sample	8.0.E-08	2.794	2.9.E-08	9.776	P<0.001 **
env	6.1.E-10	1	6.1.E-10	0.065	0.802
env* sample	3.6.E-09	2.794	1.3.E-09	0.436	0.715
Total	3.3.E-07	159			

Multiple comparisons:

Factor		Mean		DF	SE	Statistic	P-value
Sample 1	Sample 2	Sample 1	Sample 2				
a	i	2.8.E-05	9.2.E-05	6.3.E-05	1.0.E-05	6.048	P<0.001 **
b	i	1.8.E-05	9.2.E-05	7.4.E-05	1.0.E-05	7.065	P<0.001 **
b	j	1.8.E-05	6.2.E-05	4.4.E-05	1.0.E-05	4.176	0.002 **
c	e	1.7.E-05	5.3.E-05	3.6.E-05	1.0.E-05	3.415	0.038 *
c	i	1.7.E-05	9.2.E-05	7.5.E-05	1.0.E-05	7.153	P<0.001 **
c	j	1.7.E-05	6.2.E-05	4.5.E-05	1.0.E-05	4.265	0.002 **
d	i	1.8.E-05	9.2.E-05	7.4.E-05	1.0.E-05	7.067	P<0.001 **
d	j	1.8.E-05	6.2.E-05	4.4.E-05	1.0.E-05	4.178	0.002 **
e	i	5.3.E-05	9.2.E-05	3.9.E-05	1.0.E-05	3.738	0.012 *
f	i	3.3.E-05	9.2.E-05	5.8.E-05	1.0.E-05	5.570	P<0.001 **
g	i	3.7.E-05	9.2.E-05	5.5.E-05	1.0.E-05	5.246	P<0.001 **
h	i	4.1.E-05	9.2.E-05	5.1.E-05	1.0.E-05	4.862	P<0.001 **

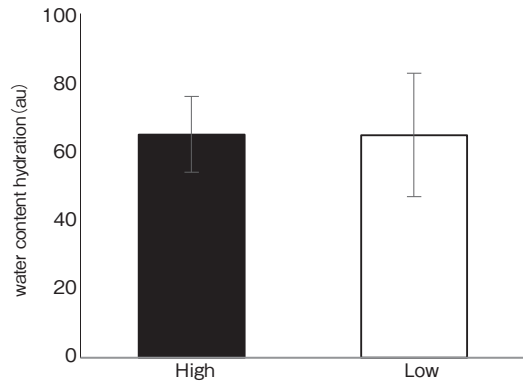


図4 The result of water content hydration

5.4℃ 高く, 1% 水準で有意差を得た (図 6). 皮膚特性項目間, および皮膚振動と皮膚特性の関係性について検討した結果を表 6 に示す. 皮膚水分量と皮膚粘弾性との間に負の相関が示され, 皮膚振動と皮膚特性に相関は認められなかった.

官能評価の結果を図 7 及び表 7-14 に示す. 官能評価項目における試料差については, 低温環境

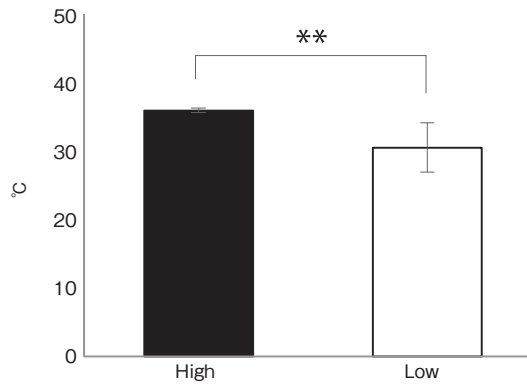


図6 The result of skin temperature

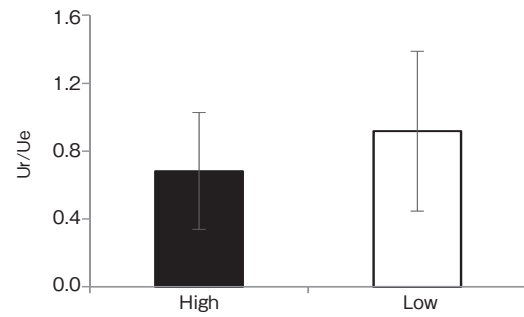
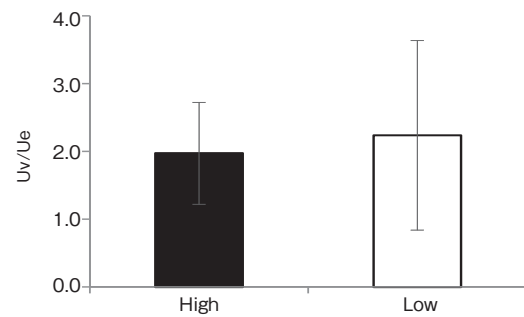
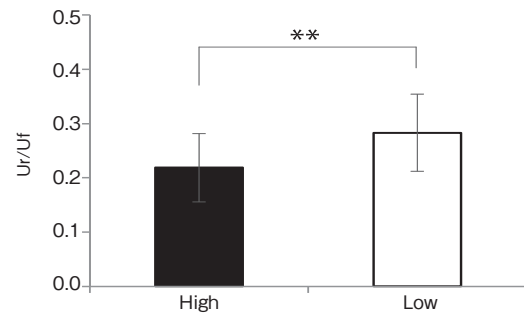


図5 Results of skin elasticity

(Upper: The ratio between immediate retraction and total distention, Middle: The ratio between delayed distention and immediate distention, Lower: The ratio of the immediate retraction to the immediate distention)

表 6 The correlation table between skin characteristics and skin vibration
[Upper triangle: Coefficient of correlation/ Lower triangle: *, P<0.05 **, P<0.01]

	Water content hydration	Skin elasticity			Skin temperature	Sum of PSD	Median Frequency
		Ur/Uf	Uv / Ue	Ur/Ue			
Water content hydration		-0.284	-0.591	-0.592	0.099	-0.177	-0.306
Ur/Uf			0.160	0.589	-0.247	0.035	0.041
Skin elasticity Uv/Ue	*			0.882	-0.322	0.266	0.397
Ur/Ue	*	*	**		-0.350	0.265	0.250
Skin temperature						0.165	-0.201
Sum of PSD							0.006
Median Frequency							

下のあたたかい-つめたい, 高温・低温両環境下の総合的に不快-総合的に快適, 嫌い-好きにおいて, 有意差は得られなかった. 各評価項目の環境差については, 低温で, べたつく-べたつかないでべたつき感が減少, 高温では, しっとりする-さらっとするでしっとり感, あたたかい-つめたいであたたかさを感じる結果であった. ざらざら-なめらか, かたい-やわらかい, 総合的に不快-総合的に快適, 嫌い-好きの4項目で, 環境の違いによる評価の差はなかった. 各評価項目の相関では, ざらざら-なめらかとかたい-やわらかい, ざらざら-なめらかとしっとりする-さらっとする, かたい-やわらかいとしっとりする-さらっとする, 総合的に不快-総合的に快適と嫌い-好きの相関係数が大であった(表14).

皮膚振動と触感の関係性について検討した結果を表15に示す. 振動強度, 周波数中央値とも,

べたつく-べたつかない以外の項目で相関が認められ, 振動強度が小さく, 低周波成分を多く含んだ振動であるほど, なめらかさ・やわらかさ・しっとり感を, また振動強度が大きく, 高周波成分を多く含む振動であるほど, ざらざら感・かたさ・さらっと感を感じやすいことが明らかとなった.

3. 考察

衣素材の触り心地, 触覚に関する研究では, 従来, 対象物の物性値と, ヒトの感じている感覚量との対応付けがなされ, KESによる風合い評価等, 多くの研究成果が積み重ねられてきた^{14, 15)}. 触覚は皮膚と対象物との力学的相互作用に基づくもので, ヒトは自分の皮膚の変形や振動, 熱の移動等を通じて触覚を得ている. また, ヒトは触覚を基に運動(動作)を意識的・無意識的に変化させる. このような視点から本研究では, 対象と皮膚との直接の接触に干渉せず, 皮膚の振動を計測

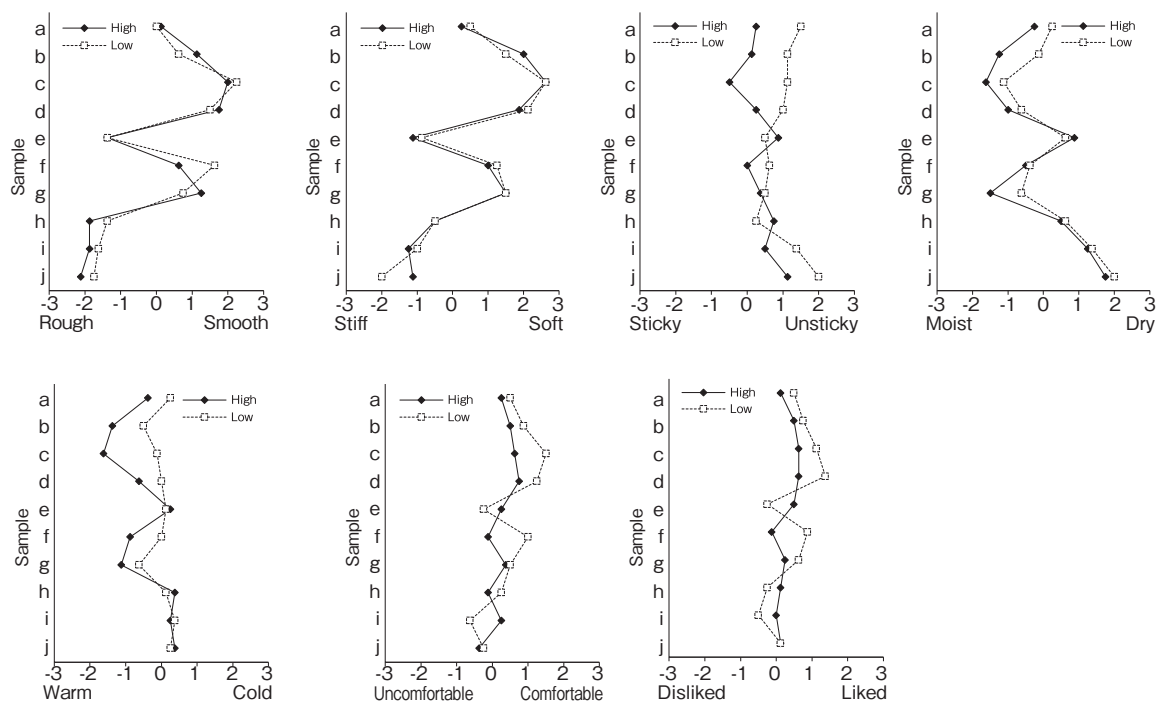


図7 The average of sensory evaluation results

表 7 The statistics of "Rough - Smooth"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	36.818	9	28.386	P < 0.001 **
Low	16.582	9	28.287	P < 0.001 **

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
High	a	c	0.125	2.000	1.875	0.427	4.388	0.002 **
	a	d	0.125	1.750	1.625	0.427	3.803	0.014 *
	a	e	0.125	-1.375	1.500	0.427	3.510	0.035 *
	a	h	0.125	-1.875	2.000	0.427	4.681	P<0.001**
	a	i	0.125	-1.875	2.000	0.427	4.681	P<0.001**
	a	j	0.125	-2.125	2.250	0.427	5.266	P<0.001**
	b	e	1.125	-1.375	2.500	0.427	5.851	P<0.001**
	b	h	1.125	-1.875	3.000	0.427	7.021	P<0.001**
	b	i	1.125	-1.875	3.000	0.427	7.021	P<0.001**
	b	j	1.125	-2.125	3.250	0.427	7.606	P<0.001**
	c	e	2.000	-1.375	3.375	0.427	7.898	P<0.001**
	c	h	2.000	-1.875	3.875	0.427	9.068	P<0.001**
	c	i	2.000	-1.875	3.875	0.427	9.068	P<0.001**
	c	j	2.000	-2.125	4.125	0.427	9.654	P<0.001**
	d	e	1.750	-1.375	3.125	0.427	7.313	P<0.001**
	d	h	1.750	-1.875	3.625	0.427	8.483	P<0.001**
	d	i	1.750	-1.875	3.625	0.427	8.483	P<0.001**
	d	j	1.750	-2.125	3.875	0.427	9.068	P<0.001**
	e	f	-1.375	0.625	2.000	0.427	4.681	P<0.001**
	e	g	-1.375	1.250	2.625	0.427	6.143	P<0.001**
f	h	0.625	-1.875	2.500	0.427	5.851	P<0.001**	
f	i	0.625	-1.875	2.500	0.427	5.851	P<0.001**	
f	j	0.625	-2.125	2.750	0.427	6.436	P<0.001**	
g	h	1.250	-1.875	3.125	0.427	7.313	P<0.001**	
g	i	1.250	-1.875	3.125	0.427	7.313	P<0.001**	
g	j	1.250	-2.125	3.375	0.427	7.898	P<0.001**	

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
Low	a	c	0.000	2.250	2.250	0.591	3.806	0.013 *
	b	i	0.625	-1.625	2.250	0.591	3.806	0.013 *
	b	j	0.625	-1.750	2.375	0.591	4.017	0.007 **
	c	e	2.250	-1.375	3.625	0.591	6.131	P<0.001**
	c	h	2.250	-1.375	3.625	0.591	6.131	P<0.001**
	c	i	2.250	-1.625	3.875	0.591	6.554	P<0.001**
	c	j	2.250	-1.750	4.000	0.591	6.766	P<0.001**
	d	e	1.500	-1.375	2.875	0.591	4.863	P<0.001**
	d	h	1.500	-1.375	2.875	0.591	4.863	P<0.001**
	d	i	1.500	-1.625	3.125	0.591	5.286	P<0.001**
	d	j	1.500	-1.750	3.250	0.591	5.497	P<0.001**
	e	f	-1.375	1.625	3.000	0.591	5.074	P<0.001**
	e	g	-1.375	0.750	2.125	0.591	3.594	0.027 *
	f	h	1.625	-1.375	3.000	0.591	5.074	P<0.001**
f	i	1.625	-1.625	3.250	0.591	5.497	P<0.001**	
f	j	1.625	-1.750	3.375	0.591	5.708	P<0.001**	
g	h	0.750	-1.375	2.125	0.591	3.594	0.027 *	
g	i	0.750	-1.625	2.375	0.591	4.017	0.007 **	
g	j	0.750	-1.750	2.500	0.591	4.228	0.003 **	

表 8 The statistics of "Stiff - Soft"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	19.320	9	28.338	P<0.001 **
Low	13.118	9	28.283	P<0.001 **

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
High	a	c	0.250	2.625	2.375	0.526	4.514	0.001 **
	b	e	2.000	-1.125	3.125	0.526	5.940	P<0.001**
	b	h	2.000	-0.500	2.500	0.526	4.752	P<0.001**
	b	i	2.000	-1.250	3.250	0.526	6.177	P<0.001**
	b	j	2.000	-1.125	3.125	0.526	5.940	P<0.001**
	c	e	2.625	-1.125	3.750	0.526	7.128	P<0.001**
	c	h	2.625	-0.500	3.125	0.526	5.940	P<0.001**
	c	i	2.625	-1.250	3.875	0.526	7.365	P<0.001**
	c	j	2.625	-1.125	3.750	0.526	7.128	P<0.001**
	d	e	1.875	-1.125	3.000	0.526	5.702	P<0.001**
	d	h	1.875	-0.500	2.375	0.526	4.514	0.001 **
	d	i	1.875	-1.250	3.125	0.526	5.940	P<0.001**
	d	j	1.875	-1.125	3.000	0.526	5.702	P<0.001**
	e	f	-1.125	1.000	2.125	0.526	4.039	0.006 **
	e	g	-1.125	1.500	2.625	0.526	4.990	P<0.001**
	f	i	1.000	-1.250	2.250	0.526	4.277	0.003 **
	f	j	1.000	-1.125	2.125	0.526	4.039	0.006 **
	g	h	1.500	-0.500	2.000	0.526	3.802	0.014 *
	g	i	1.500	-1.250	2.750	0.526	5.227	P<0.001**
	g	j	1.500	-1.125	2.625	0.526	4.990	P<0.001**

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
Low	a	c	0.500	2.625	2.125	0.583	3.646	0.023 *
	a	j	0.500	-2.000	2.500	0.583	4.289	0.003 **
	b	e	1.500	-0.875	2.375	0.583	4.075	0.005 **
	b	h	1.500	-0.500	2.000	0.583	3.431	0.046 *
	b	i	1.500	-1.000	2.500	0.583	4.289	0.003 **
	b	j	1.500	-2.000	3.500	0.583	6.005	P<0.001**
	c	e	2.625	-0.875	3.500	0.583	3.646	P<0.001**
	c	h	2.625	-0.500	3.125	0.583	5.361	P<0.001**
	c	i	2.625	-1.000	3.625	0.583	6.219	P<0.001**
	c	j	2.625	-2.000	4.625	0.583	7.935	P<0.001**
	d	e	2.125	-0.875	3.000	0.583	5.147	P<0.001**
	d	h	2.125	-0.500	2.625	0.583	4.504	0.001 **
	d	i	2.125	-1.000	3.125	0.583	5.361	P<0.001**
	d	j	2.125	-2.000	4.125	0.583	7.077	P<0.001**
e	f	-0.875	1.250	2.125	0.583	3.646	0.023 *	
e	g	-0.875	1.500	2.375	0.583	4.075	0.005 **	
f	i	1.250	-1.000	2.250	0.583	3.860	0.011 *	
f	j	1.250	-2.000	3.250	0.583	5.576	P<0.001**	
g	h	1.500	-0.500	2.000	0.583	3.431	0.046 *	
g	i	1.500	-1.000	2.500	0.583	4.289	0.003 **	
g	j	1.500	-2.000	3.500	0.583	6.005	P<0.001**	

表 9 The statistics of "Sticky – Unsticky"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	0.502	9	28.423	0.861 -
Low	1.194	9	28.141	0.337 -

表 10 The statistics of "Moist – Dry"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	19.195	9	28.408	P<0.001 **
Low	8.897	9	28.295	P<0.001 **

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
High	a	j	-0.250	1.750	2.000	0.466	4.294	0.002 **
	b	e	-1.250	0.875	2.125	0.466	4.562	P<0.001 **
	b	h	-1.250	0.500	1.750	0.466	3.757	0.016 *
	b	i	-1.250	1.250	2.500	0.466	5.367	P<0.001 **
	b	j	-1.250	1.750	3.000	0.466	6.441	P<0.001 **
	c	e	-1.625	0.875	2.500	0.466	5.367	P<0.001 **
	c	h	-1.625	0.500	2.125	0.466	4.562	P<0.001 **
	c	i	-1.625	1.250	2.875	0.466	6.172	P<0.001 **
	c	j	-1.625	1.750	3.375	0.466	7.246	P<0.001 **
	d	e	-1.000	0.875	1.875	0.466	4.025	0.006 **
	d	i	-1.000	1.250	2.250	0.466	4.830	P<0.001 **
	d	j	-1.000	1.750	2.750	0.466	5.904	P<0.001 **
	e	g	0.875	-1.500	2.375	0.466	5.099	P<0.001 **
	f	i	-0.500	1.250	1.750	0.466	3.757	0.016 *
f	j	-0.500	1.750	2.250	0.466	4.830	P<0.001 **	
g	h	-1.500	0.500	2.000	0.466	4.294	0.002 **	
g	i	-1.500	1.250	2.750	0.466	5.904	P<0.001 **	
g	j	-1.500	1.750	3.250	0.466	6.977	P<0.001 **	

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
Low	b	j	-0.125	2.000	2.125	0.581	3.658	0.022 *
	c	i	-1.125	1.375	2.500	0.581	4.303	0.002 **
	c	j	-1.125	2.000	3.125	0.581	5.379	P<0.001 **
	d	i	-0.625	1.375	2.000	0.581	3.443	0.044 *
	d	j	-0.625	2.000	2.625	0.581	4.518	0.001 **
	f	j	-0.375	2.000	2.375	0.581	4.088	0.005 **
	g	i	-0.625	1.375	2.000	0.581	3.443	0.044 *
	g	j	-0.625	2.000	2.625	0.581	4.518	0.001 **

表 11 The statistics of "Warm – Cold"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	7.306	9	28.404	P<0.001 **
Low	1.286	9	28.324	0.287 -

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
High	b	e	-1.375	0.250	1.625	0.455	3.570	0.029 *
	b	h	-1.375	0.375	1.750	0.455	3.845	0.012 *
	b	i	-1.375	0.250	1.625	0.455	3.570	0.029 *
	b	j	-1.375	0.375	1.750	0.455	3.845	0.012 *
	c	e	-1.625	0.250	1.875	0.455	4.120	0.005 **
	c	h	-1.625	0.375	2.000	0.455	4.394	0.002 **
	c	i	-1.625	0.250	1.875	0.455	4.120	0.005 **
	c	j	-1.625	0.375	2.000	0.455	4.394	0.002 **

表 12 The statistics of "Uncomfortable – Comfortable"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	0.531	9	28.380	0.839
Low	2.623	9	28.394	0.024 *

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
Low								-

表 13 The statistics of "Disliked – Liked"

Welch's test:

env	F-value	DF1	DF2	P-value
High	0.320	9	28.302	0.962
Low	2.340	9	28.412	0.041 *

Multiple comparisons:

env	Factor		Mean		DF	SE	Static	P-value
	sample1	sample2	rank1	rank2				
Low								-

表 14 The correlation table of sensory evaluation
[Upper triangle: Coefficient of correlation/ Lower triangle: *, P<0.05 **, P<0.01]

	Rough – Smooth	Stiff – Soft	Sticky – Unsticky	Moist – Dry	Warm – Cold	Uncomfortable – Comfortable	Disliked – Liked
Rough – Smooth		0.7623	-0.1786	-0.6688	-0.3290	0.3747	0.3355
Stiff – Soft	**		-0.1905	-0.6294	-0.3852	0.2824	0.2554
Sticky – Unsticky	*	*		0.3537	0.3577	0.3557	0.3953
Moist – Dry	**	**	**		0.3572	-0.1662	-0.1206
Warm – Cold	**	**	**	**		0.1429	0.1125
Uncomfortable – Comfortable	**	**	**	*			0.9031
Disliked – Liked	**	**	**			**	

表 15 The correlation between skin vibration intensity, median frequency and sensory evaluation
[Upper triangle: Coefficient of correlation/ Lower triangle: *, P<0.05 **, P<0.01]

	Rough – Smooth	Stiff – Soft	Sticky – Unsticky	Moist – Dry	Warm – Cold	Uncomfortable – Comfortable	Disliked – Liked	Skin vib	Median frequency
Rough - Smooth		0.962	-0.393	-0.921	-0.704	0.807	0.727	-0.767	-0.527
Stiff - Soft	**		-0.445	-0.943	-0.727	0.790	0.714	-0.813	-0.546
Sticky - Unsticky		*		0.620	0.701	-0.130	0.051	0.352	0.246
Moist - Dry	**	**	**		0.822	-0.678	-0.56	0.771	0.526
Warm - Cold	**	**	**	**		-0.310	-0.24	0.550	0.571
Uncomfortable - Comfortable	**	**		**			0.902	-0.741	-0.454
Disliked - Liked	**	**		*		**		-0.739	-0.460
Skin vib	**	**		**	*	**	**		0.719
Median frequency	*	*		*	**	*	*	**	

可能な、田中の開発したセンサを用い、皮膚状態も反映した皮膚振動データを取得、その際の官能評価値と突き合わせての検討を試みた。

被験者実験における皮膚振動波をFFT解析し、得られたPSDの結果例から、試料により、皮膚振動に様々な周波数特性の示される様子が観察された(図1)。

テクスチャの粗細の知覚は、凡そ200μmを境界として、それより大きなマクロな粗さは、試料の弁別になぞり動作を必要とせず、その弁別能力は、なぞった場合と静的に触った場合とで変わらないとされる¹⁶⁾。一方、200μmより小さいマイクロな粗さについては、その弁別になぞり動作を必要とし、特にパチニ小体はその知覚に大きく寄与すると報告されている¹⁷⁾。そこで本研究では、パチニ小体の感度帯を鑑み⁷⁾、解析する周波数帯域を100-500Hzとした。また、PSDの総和と粗さ感に関する既報⁶⁾を参考に、100-500HzのPSDを合算し、振動強度として評価した。

高温環境下及び低温環境下における振動強度の試料比較では、試料e, i, jで有意に大、試料b, c, dで有意に小の結果を得た(図2, 表3)。試料間の振動強度差は、試料表面の凹凸にその一因があると考えられる。振動強度の大きい試料e, i, jの表面には、織・編構造によって生じた凹凸が存在する(表2)。物性試験結果との相関において、振動強度とMMDたてとの間に有意な正の相関を得た(表5)。ざらつき感を示すMMDの値が高い素材を触った際、触れている皮膚の振動強度は大きくなることが明らかとなった。先行研究においても、対象物の表面粗さが小さいほど振動強度が低下するとの報告がなされており^{18,19)}、スポーツウェア素材を対象とした本研究でも、同様の傾向が確認できた。また、環境間での振動強度の比較で、有意差は示されなかったものの、低温環境下における分散が大きくなる傾向が示された。

周波数中央値については、低周波側からと高周波側から、それぞれPSDを合算していき、その

合算値が同等となる値を算出したため、低周波成分を多く含むほど低い値を、高周波成分を多く含むほど高い値を示すことになる。計算の結果、試料 e と i で値が有意に大きく、高周波成分を多く含んだ振動であると示された（図 3, 表 4）。物性試験結果との相関においては、周波数中央値と MIU たてとの間に有意な負の相関、吸水量（10 分）よことに有意な正の相関を得た（表 5）。すべりやすさを示す MIU 値が低く、短時間の吸水大の素材ほど、高周波成分が多く含まれた振動となり、周波数中央値が大きくなることが明らかとなった。また、環境間での周波数中央値の比較では、有意差は得られなかったものの、低温環境下で値の大きくなる傾向が示された。

皮膚特性においては、皮膚水分量の環境間での有意差は示されなかった（図 4）。高温環境下では熱放散のために発汗が生じ、皮膚水分量の増加が観察される^{20,21)}。しかし、本研究での測定部位が指腹であるため、値に影響がなかったと考えられる。皮膚粘弾性では、回復率を示すパラメータ (Ur/Uf 及び Ur/Ue) の値が低温環境下で高くなる傾向が示された（図 5）。両パラメータは、高値であるほど高い弾力性を意味し、低温環境下で中指指腹の弾力性が増加することを示している。上述の皮膚振動の環境間比較において、振動強度が、低温環境下におけるばらつき大、周波数中央値が、低温環境下の高値傾向を示したのは、低温で指が固くなり、皮膚特性が変わることで、振動強度や周波数中央値に影響を与えたと考えられる。

皮膚特性項目間の関係において、皮膚水分量と皮膚粘弾性との間に負の相関が示された（表 6）。皮膚水分量が多くなるほど皮膚の変形が容易かつ弾力性が低下すると考えられる。上述の、短時間の吸水大の素材で、高周波成分が多く含まれる振動になるとの結果（表 5）と合わせて、皮膚と素材の水分量が、接触状態に影響を与えることを示していると考えられ、今後、さらなる検討を要する。

官能評価においては、低温環境下のあたたかい-つめたい、高温・低温両環境下の総合的に不快-総合的に快適、嫌い-好き、以外のすべての評価項目で有意な試料差が得られ、各評価項目の環境間比較では、低温で、べたつく-べたつかないでべたつき感が減少、高温では、しっとりする-さらっとするでしっとり感、あたたかい-つめたいであたたかさを感じる結果であった（図 7 及び表 7-13）。皮膚振動との関係性については、振動強度、周波数中央値共、べたつく-べたつかない以外の項目で相関が認められ、振動強度が小さく、低周波成分を多く含んだ振動であるほど、なめらかさ・やわらかさ・しっとり感を、振動強度が大きく、高周波成分を多く含む振動であるほど、ざらざら感・かたさ・さらっと感を感じやすいことが明らかとなった（表 15）。触感との相関は、周波数中央値よりも振動強度でより強く、振動強度が触感と高い関係性を持つと考えられる。振動強度との相関係数は、ざらざら-なめらか (-0.767, $p<0.01$)、かたい-やわらかい (-0.813, $p<0.01$)、しっとりする-さらっとする (0.771, $p<0.01$)、総合的に不快-総合的に快適 (-0.741, $p<0.01$)、嫌い-好き (-0.739, $p<0.01$) において高値を示した。これまでの報告において、粗さ感と振動強度の対応関係は検討されてきたが¹⁸⁾、本研究により、振動強度がスポーツウェア素材の粗さ・かたさ・しっとり感・快適感・嗜好と対応することが明らかとなった。

4. 結 語

スポーツウェア素材を指先で触れた際、そこに生じる皮膚振動に着目し、素材と皮膚の特性、官能評価との関わりを探った。皮膚振動波を周波数解析して得られた振動強度及び周波数中央値と、素材の物性、温熱環境条件、被験者の皮膚特性、素材の触感とに関係性が見出され、皮膚振動の検討がウェアの着心地追究に資する可能性が示された。

謝 辞

本研究に助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝致します。被験者としてご協力頂きました皆様、実験にご協力頂きました研究室の先生方に深謝致します。

文 献

- 1) 佐藤真理子, 有泉知英子, 須田理恵, 剣道着における素材とデザインが衣服内気候と皮膚摩擦, パフォーマンスに及ぼす影響, デサントスポーツ科学, **33**, 75-85(2012)
- 2) 佐藤真理子, 田村照子, スポーツウェアのトライボロジー, トライボロジスト, **58**(1), 10-16(2013)
- 3) 徐賢敏, 佐藤真理子, 田村照子, 松井有子, 井川正治, スポーツウェアによる皮膚摩擦の実態と摩擦条件が皮膚表面微細三次元構造に及ぼす影響, 日本繊維製品消費学会誌, **58**(10), 53-61(2017)
- 4) Y. Shao, V. Hayward, and Y. Visell, Spatial patterns of cutaneous vibration during whole-hand haptic interactions, *PNAS*, **113**(15), pp. 4188-4193(2016)
- 5) Y. Tanaka, D. P. Nguyen and A. Sano, Wearable skin vibration sensor using a PVDF film, *Proceedings of the IEEE World Haptic Conference*, pp. 146-151(2015)
- 6) M. Natsume, Y. Tanaka, W. M. Bergmann Tiest, and A. M. L. Kappers, Skin vibration and contact force in active perception for roughness perception, *Proceedings of 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 1479-1484(2017)
- 7) E.R. Kandel, J.H. Schwartz and T.M. Jessell "Principles of neural science 4th edition" McGraw-Hill, *New York*(2000)
- 8) K. Kimura, M. Natsume, Y. Tanaka, Influence of scanning velocity on skin vibration for coarse texture, *Proceedings of the EuroHaptics 2018 Conference*, pp. 246-257(2018)
- 9) A. B. Cua., K.-P. Wilhelm. and H. I. Maibach., Elastic properties of human skin: relation to age, sex, and anatomical region, *Archives Dermatological Research*, **282**(5), 283-288(1990)
- 10) 長崎美美, 村上泉子, 見た目年齢判断に影響する要因—30代と40代女性の素顔での検討—, 日本化粧品技術者会誌, **50**(1), 17-24(2016)
- 11) 今井順子, 米田守宏, 丹羽雅子, 接触冷温感の評価のための官能試験, 繊維製品消費学会誌, **28**(20), 414-422(1987)
- 12) 須田理恵, 田村照子, 肌着素材の肌触りに及ぼす気温の影響-手触りによる評価-, 繊維製品消費学会誌, **47**(8), 471-478(2006)
- 13) 公益社団法人日本食品衛生協会, 手洗いマニュアル http://www.n-shokuei.jp/eisei/sfs_tearai.html
- 14) 西松豊典, 繊維(テキスタイル)製品の「着心地」を数値化するには, 繊維学会誌, **75**(6), 313-318(2019)
- 15) 井上真理, 繊維製品の肌触り—感覚の計測・評価—, 繊維製品消費科学, **58**(1), 39-43(2017)
- 16) M. Hollins, S. R. Risner, Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Percept Psychophys.*, **62**(4), 695-705(2000)
- 17) S. Bensmaïa, M. Hollins, Pacinian representations of fine surface texture. *Percept Psychophys.*, **67**(5), 842-854(2005)
- 18) M. Natsume, Y. Tanaka, A. Sano, Skin-propagated vibration for roughness and textures, *Proceedings of the World Automation Congress 2016*, No.1570256175 (6 pages) (2016)
- 19) B. Delhay, V. Hayward, P. Lefevre, and J. L.Thonnard, Texture-induced vibrations in the forearm during tactile exploration], *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, **6**(37) (2012)
- 20) N. Nakagawa, S. Sakai, M. Matsumoto, K. Yamada, M. Nagano, T. Yuki, Y. Sumida and H. Uchiwa, Relationship Between NMF (Lactate and Potassium) Content and the Physical Properties of the Stratum Corneum in Healthy Subjects, *The Journal of investigative dermatology*, **122**(3), 755-763(2004)
- 21) 田上八朗, アトピー性皮膚炎と皮膚のバリア機能, アレルギー, **54**(5), 445-450(2005)