

素材と編構造の違いがソックスの温熱快適性に及ぼす影響について（第一報）

河村 奎太郎^{*1)}, 辻坂 敏之^{*1)}

The Effect of Differences in Materials and Knitting Structure on the Thermal Comfort of Socks (1st Report)

KAWAMURA Keitaro^{*1)}, TSUJISAKA Toshiyuki^{*1)}

本研究は、多種類の新素材と編構造の違いによるソックスの蒸発熱抵抗、熱抵抗を明らかにすることで、蒸れなどの不快感を軽減し、温熱快適性を保つソックス開発の指針となるための条件検討を目的とした。

9種類の素材と2または3種類の編構造を組み合わせた計26試料のソックスにおける温熱快適性の因子である吸湿率、放湿率、透湿度、通気度、試料厚さ、水分拡散速度、接触冷温感性を物性試験により調査した。

その結果、綿、シルク、麻などの素材によっては生地を薄くして平編みやメッシュ編み構造で作製することが蒸発熱抵抗や熱抵抗を小さくする要因の一つであることが確認された。主成分分析では、「熱移動特性」、「吸放湿度」、「水分の拡散速度」、「冷たさ」の4つの主成分が抽出された。各試料の主成分得点において、「綿平編み」および「シルク平編み（横編み）」が比較的高かった。また、「竹レーヨン平編み」については第1主成分以外において高い点数を示しており、夏季高温下においても冷涼感を保つ可能性が示唆された。

1. 緒言

靴下は衣類のなかでも一般的に奥にいくにつれ開口部がない構造をしており、他の衣服と比べて蒸れやすくなっている。換気には、開口部からのものと、生地を通るものがあり、それらが足の温熱快適性に寄与している。

生地を通るものからの換気には熱ストレスに関する特性として、蒸発熱抵抗と熱抵抗に分けられる。

蒸発熱抵抗の指標としては吸水速乾性、透湿度、吸放湿度がある。熱抵抗の指標としては通気性があり、これら蒸発熱抵抗と熱抵抗は、衣類素材の物性と構造によって左右されることが先行研究で規定されている¹⁾。

これまでソックスの部分的編構造の違いが温熱快適性に与える影響²⁾や、夏用靴下の設計と開発に向けた基礎的指針を導出することを目的とした研究³⁾は行われているものの、竹、和紙、葛和紙などの新たな天然素材等を用いて温熱快適性を比較検討した例はこれまでにない。

そこで、本研究では、新たな素材や編構造の組み合わせによって足の蒸れなどの不快感を軽減し、温熱快適性を保つソックス開発の指針となるための条件検討を目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料

試料となるソックスを表1に示す。

市販品の紳士および婦人用ソックスから、9種類の異なる素材と2または3種類の編構造を組み合わせ、計26試料のソックスにおける温熱快適性を物性試験にて調査した。

表1 試料ソックス

記号	素材と組成	編構造
A	綿100 %	平編み
B	綿100 %	メッシュ
C	綿100 %	パイル
D	綿(「SPOERRY ICE COTTON」)100 %	平編み
E	アイスロック綿100 %	メッシュ
F	綿(アイスコットン)90 %, ポリエステル9 %, ポリウレタン1 %	パイル
G	ポリエステル80 %, 綿20 %	平編み
H	ポリエステル60 %, ナイロン37 %, ポリウレタン3 %	メッシュ
I	ポリエステル90 %, 綿7 %, ポリウレタン3 %	パイル
J	ウール83 %, ナイロン16 %, ポリウレタン1 %	平編み
K	ウール77 %, ポリエステル18 %, ナイロン3 %, ポリウレタン2 %	メッシュ
L	ウール56 %, ポリエステル30 %, ナイロン13 %, ポリウレタン1 %	パイル
M	シルク91 %, ポリウレタン7 %, ポリエステル2 %	平編み (丸編み)
N	シルク100 %	平編み (横編み)
O	シルク70 %, ナイロン30 %	メッシュ
P	竹レーヨン80 %, ライクラ20 %	平編み
Q	竹レーヨン76 %, ナイロン17 %, ポリエステル5 %, ライクラ2 %	メッシュ
R	竹レーヨン67 %, 綿26 %, ポリエステル5 %, ナイロン1 %, ポリウレタン1 %	パイル
S	麻89 %, ポリエステル10 %, ポリウレタン1 %	平編み
T	麻64 %, ナイロン35 %, ポリウレタン1 %	メッシュ
U	麻82 %, ナイロン16 %, ポリウレタン2 %	パイル
V	和紙81 %, ポリエステル16 %, ナイロン2 %, ポリウレタン1 %	平編み
W	和紙49 %, ナイロン39 %, ポリエステル11 %, ポリウレタン1 %	メッシュ
X	和紙46 %, ポリエステル35 %, ナイロン17 %, ポリウレタン2 %	パイル
Y	綿44.5 %, 吉野葛和紙34 %, ナイロン14.5 %, ポリウレタン7 %	平編み
Z	綿44.5 %, 吉野葛和紙34 %, ナイロン14.5 %, ポリウレタン7 %	パイル

^{*1)} ローカルプロダクト科（現：繊維・毛皮革グループ）

2.2 実験方法

(1) 吸湿率および放湿率の測定

空の秤量瓶または実験試料入り秤量瓶を乾燥機に入れ、 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ で40分間乾燥させ、絶乾状態での重量を測定した。恒温恒湿機 EYELA KCL-2000（東京理化器械（株）社製）を用いて、 40°C 90%の設定で実験試料入り秤量瓶を入れ、3時間吸湿させ、吸湿率を求めた。その後、 20°C 65%に設定し、3時間放湿させ、水分率を求めた。放湿率は、式1の吸湿率から式2の水分率を差し引いた値とした。

$$\text{吸湿率}(\%) = \frac{(a \times W_{90} - W_{ds})}{W_{ds} - W_{db}} \times 100 \quad \cdot \cdot \text{式1}$$

$$\text{水分率}(\%) = \frac{(b \times W_{65} - W_{ds})}{W_{ds} - W_{db}} \times 100 \quad \cdot \cdot \text{式2}$$

$$a = 1 + \frac{W_{c90} - W_{cds}}{W_{cds}}$$

$$b = 1 + \frac{W_{c65} - W_{cds}}{W_{cds}}$$

W_{90} : 40°C 、90%で3時間吸湿させたあとの重量 [g]

W_{65} : 20°C 、65%で3時間放湿させたあとの重量 [g]

W_{ds} : 絶乾状態での実験試料入り秤量瓶の重量 [g]

W_{db} : 絶乾状態での秤量瓶のみの重量 [g]

W_{c90} : 40°C 、90%で3時間吸湿させたあとの補正用秤量瓶の重量 [g]

W_{c65} : 20°C 、65%で3時間放湿させたあとの補正用秤量瓶の重量 [g]

W_{cds} : 絶乾状態での補正用秤量瓶の重量 [g]

(2) 透湿度の測定

透湿カップ（（株）安田精機製作所社製）に予め乾燥させた塩化カルシウム（富士フイルム和光純薬（株）製）を入れ、その上に円形に切り取った試料を、表側を上にして乗せた。蜜蝋（富士フイルム和光純薬（株）製）にて生地を密閉した。 40°C 90%に設定した恒温恒湿機内にて73～78分間（ t 分間）吸湿させ、重量を測定した。これを①とする。再度 40°C 90%にて①と同じ時間吸湿させ、重量を測定した。これを②とする。式3より、試料と同じ重さに切った生地をブランクとして同じ時間吸湿させ、差し引いた後、60分間あたりの吸湿量に揃えて値を補正して透湿度を求めた。

$$\text{透湿度}(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) = \frac{(W_2 - W_1) - (W_{b2} - W_{b1})}{\frac{\pi r^2}{10000}} \times \frac{60}{t} \quad \cdot \cdot \text{式3}$$

W_1 : ①で測定した重量 [g]

W_2 : ②で測定した重量 [g]

W_{b1} : ①で測定したブランク重量 [g]

W_{b2} : ②で測定したブランク重量 [g]

r : 試料透湿部の半径 [cm]

t : 吸湿時間 [min]

(3) 通気度の測定

KES-F8-API 通気性試験機（カトーテック（株）社製）を用いて測定した。定流量空気を試料に送り、大気中へ放出、

吸引する時の通気抵抗（ R ）を測定し、式4より、JIS L1096 通気性 A 法（フラジール形法）に定義される通気度（ Q ）を算出した。各試料で5回ずつ測定し、その平均値を求めた。

$$Q = \frac{12.5}{R} \quad \cdot \cdot \text{式4}$$

Q : 通気度 [$\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$]

R : 通気抵抗 [$\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}$]

(4) 試料厚さの測定

KES-FB3 圧縮試験機（カトーテック（株）社製）を用い、押圧荷重 0.98 kPa における厚さを測定し、5カ所の平均値を算出した。

(5) 水分拡散速度の測定

40 mm × 80 mm の試料片の表側に、蒸留水 200 μL を滴下した。滴下時 0 分を 1 回目とし、1 試料片ごとにつき 5 分おきに 90 分間の計 19 回重量を測定した。式5より、 $n=18$ の平均値として、1 分間における水分拡散速度を算出した。

$$\text{水分拡散速度}(\text{mg}/\text{min}) = \frac{\sum_{k=1}^n (W_k - W_{k+1})}{n} \times \frac{1000}{5} \quad \cdot \cdot \text{式5}$$

n : 2回目以降の測定回数

W_k : k 回目に測定したときの重量 [g]

W_{k+1} : $k+1$ 回目に測定したときの重量 [g]

(6) 接触冷温感性の測定

サーモラボ II 型（カトーテック（株）社製）を用い、JIS L1927 に準拠して測定した。温度差 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 。評価指標は $q_{\text{max}}(\text{W}/\text{cm}^2)$ とした。各試料で3回ずつ測定し、その平均値を求めた。

(7) 測定環境

測定環境は、いずれも 20°C 65% に温湿度を設定した室内にて行った。

1. 結果および考察

3.1 測定結果および相関図

表2に吸湿率、放湿率、透湿度、通気度、試料厚さ、水分拡散速度、接触冷温感性の測定結果一覧を記載する。相関係数の絶対値が 0.4 以上であった測定項目の組み合わせとして、図1に放湿率—吸湿率の相関図を、図2に試料厚さ—通気度の相関図を、図3に試料厚さ—透湿度の相関図を示す。

図1より、最も相関係数（ R ）の絶対値が大きかったのは放湿率—吸湿率（ $R=0.815$ ）であり、吸湿率の高い素材ほどよく放湿する傾向がみられた。吸湿率が高く、かつ放湿率も高かった素材としては、綿、シルク、竹レーヨン、麻、和紙、葛和紙であり、靴下内をさらさらに保ちやすい素材と考えら

れた。

試料厚さと通気度の関係を図2に示した。厚さ1.5mm以下の試料では、1.5mmを超える試料に比べ、通気度が5~6倍以上高いものが確認された。また、厚さ1.5mm以下の試料では負の相関($R=-0.506$)が示唆され、綿、シルク、麻などの素材では、生地を薄くし、平編みやメッシュ編み構造

とすることが、蒸発熱抵抗および熱抵抗を低減する要因の一つと考えられた。

図3に試料厚さと透湿度の関係を示した。透湿度は厚さに依存した明確な変化を示さなかった。このことから、透湿度には厚さだけでなく、メッシュ編みなどの編構造も影響していると考えられた。

表2 測定結果一覧

記号	吸湿率 (%)	放湿率 (%)	透湿度 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	通気度 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	厚さ (mm)	水分拡散速度 (mg/min)	接触冷温感性 (W/cm^2)
A	13.7	2.76	314.3	533.4	0.432	0.571	0.090
B	11.4	2.02	322.6	535.8	0.581	0.383	0.051
C	9.9	1.81	295.4	64.1	2.067	0.437	0.062
D	10.1	1.66	318.4	175.3	0.816	0.691	0.053
E	6.8	0.99	324.8	52.1	1.209	0.648	0.089
F	9.6	1.33	302.7	62.7	3.064	0.609	0.106
G	2.7	-0.35	307.6	64.7	1.234	0.379	0.075
H	1.9	-1.17	272.7	436.3	0.870	0.446	0.062
I	2.7	-0.14	261.7	30.1	3.289	0.883	0.075
J	13.2	2.35	298.1	68.9	1.455	0.311	0.062
K	12.1	1.93	325.2	258.1	1.340	0.864	0.089
L	9.5	1.47	275.7	32.6	2.630	0.798	0.060
M	11.4	2.67	290.5	31.7	2.127	0.396	0.076
N	12.5	2.70	310.9	140.8	1.268	0.795	0.077
O	8.9	2.23	344.7	510.9	1.009	0.585	0.074
P	15.8	1.07	280.1	22.8	1.070	1.037	0.108
Q	10.7	1.90	291.5	136.0	0.773	0.435	0.092
R	16.0	2.49	257.8	37.4	3.126	0.515	0.090
S	13.2	2.78	289.1	252.3	1.174	0.702	0.027
T	11.0	2.37	279.6	644.7	1.236	0.609	0.073
U	13.0	2.39	268.8	65.2	2.553	0.443	0.067
V	13.3	3.14	311.0	87.3	1.496	0.608	0.085
W	8.0	1.75	261.9	130.9	1.180	1.028	0.044
X	9.3	2.23	237.9	60.8	2.190	0.839	0.098
Y	11.6	2.72	285.1	73.0	1.108	0.763	0.088
Z	11.2	2.69	314.0	55.6	3.188	0.341	0.087

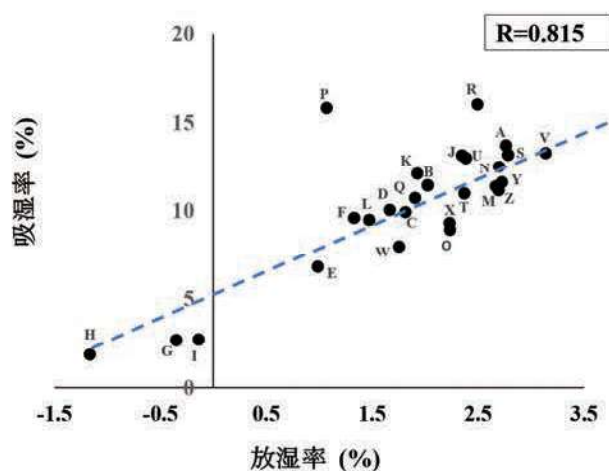


図1 放湿率と吸湿率との相関図

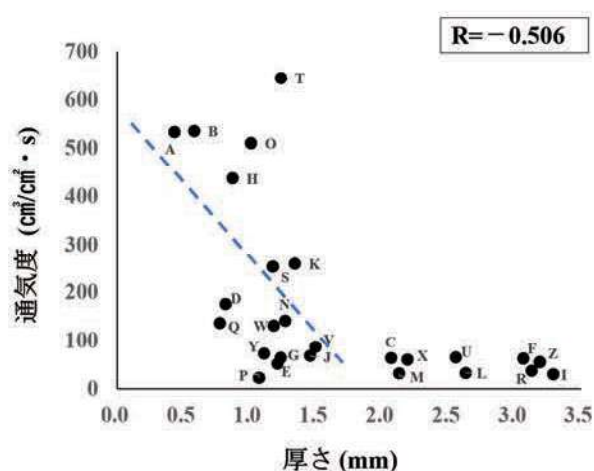


図2 試料厚さと通気度との相関図

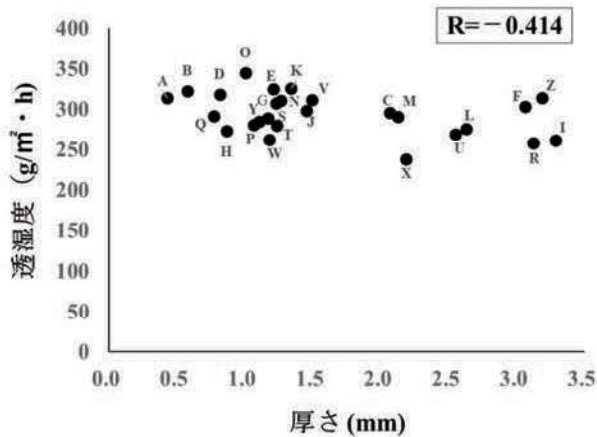


図 3 試料厚さと透湿度との相関図

3.2 主成分分析

主成分分析を行って総合特性値に要約した。主成分の選定条件は累積寄与率 80%以上とした。このとき変数として表 2 の測定値を用いた。寄与率は、第 1 主成分においては 29.2%，第 2 主成分では 26.3%，第 3 主成分では 15.5%，第 4 主成分では 13.7%であった。表 3 に主成分ごとの測定項目別負荷量を示す。第 1 主成分の主成分負荷量において、「通気度」と「透湿度」が正の係数として影響が大きく「厚さ」が負の係数として影響が大きいため「熱移動特性」に関連する主成分と考えられる。第 2 主成分は「吸湿率」，「放湿率」が正の係数として影響が大きいため「吸放湿度」に関連する主成分と考えられる。第 3 主成分は「水分拡散速度」が正の係数として影響が大きいため「水分の拡散速度」に関連する主成分と考えられる。第 4 主成分は「接触冷温感性」が正の係数として影響が大きいため「冷たさ」に関連する主成分と考えられる。

表 3 主成分負荷量一覧

	第 1 主成分 (熱移動特性)	第 2 主成分 (吸放湿度)	第 3 主成分 (水分の拡散速度)	第 4 主成分 (冷たさ)
吸湿率	0.28	0.90	0.13	-0.07
放湿率	0.37	0.86	0.04	-0.22
透湿度	0.70	<0.05	-0.34	0.40
通気度	0.76	-0.29	0.17	<0.05
厚さ	-0.76	0.26	-0.37	-0.20
水分拡散速度	-0.31	0.06	0.87	0.23
接触冷温感性	-0.32	0.36	-0.16	0.81
寄与率(%)	29.2	26.3	15.5	13.7
累積寄与率(%)	29.2	55.5	71.0	84.7

4 つの主成分で累積寄与率 80%以上を示し、各主成分の寄与率も比較的均等であったことから、本試料群は複数の特性が関与する複雑な構造を有することが分かった。次に、各試料の主成分得点を表 4 に示した。

表 4 主成分得点一覧

記号	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
A	2.42	0.68	0.37	0.93
B	2.83	-0.74	-0.34	-0.66
C	-0.23	-0.10	-0.93	-0.86
D	1.09	-0.66	0.47	-0.25
E	-0.08	-0.95	-0.46	1.45
F	-1.53	0.42	-1.13	1.24
G	-0.49	-2.76	-1.38	0.61
H	-0.07	-4.04	-0.16	-0.14
I	-3.21	-1.99	0.34	-0.05
J	0.64	0.65	-1.09	-0.97
K	0.71	0.43	0.72	1.38
L	-1.51	-0.17	0.49	-0.90
M	-0.29	0.92	-1.13	-0.58
N	0.58	0.92	0.69	0.40
O	2.37	-0.60	-0.27	0.82
P	-1.06	1.14	1.85	1.86
Q	0.41	0.15	-0.50	0.64
R	-1.58	2.13	-0.60	-0.66
S	1.25	0.24	1.15	-2.21
T	1.48	-0.21	0.76	-0.36
U	-0.79	1.00	-0.69	-1.36
V	0.55	1.50	-0.22	0.36
W	-0.68	-0.87	2.36	-1.23
X	-2.18	0.70	1.06	0.13
Y	-0.15	0.97	0.79	0.49
Z	-0.48	1.22	-2.16	-0.07

さらに、主成分得点を詳細に評価した結果、4 つの主成分のいずれにおいても比較的高い値を示し、温熱快適性を総合的に満たしていた試料は、A の「綿平編み」と N の「シルク平編み（横編み）」であった。そこで、主成分得点を視覚的に評価するため、各主成分の最小値が 0 となるよう平行移動を行い、レーダーチャートとして図 4 に示した。また、各主成分得点の平均値についても併せて示した。

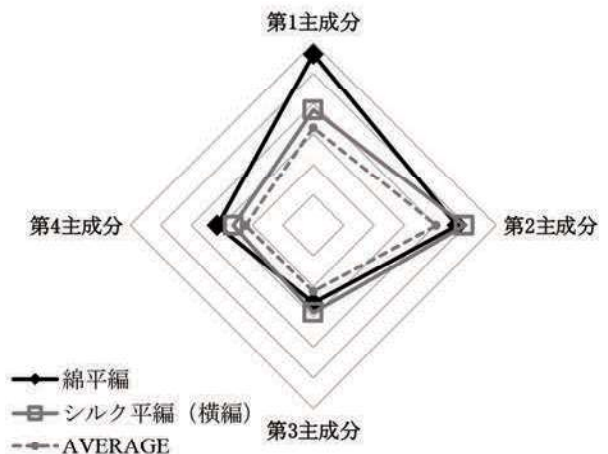


図 4 「綿平編み」と「シルク平編み（横編み）」

一方, 第1主成分および第2主成分の主成分得点に着目すると, Aの「綿平編み」とVの「和紙平編み」が突出した値を示していた。このことから, これらの素材を組み合わせた平編み, あるいは横編みソックスの物性についても, 今後の調査対象として有望であることが示唆された。同様のレーダーチャートを図5に示した。

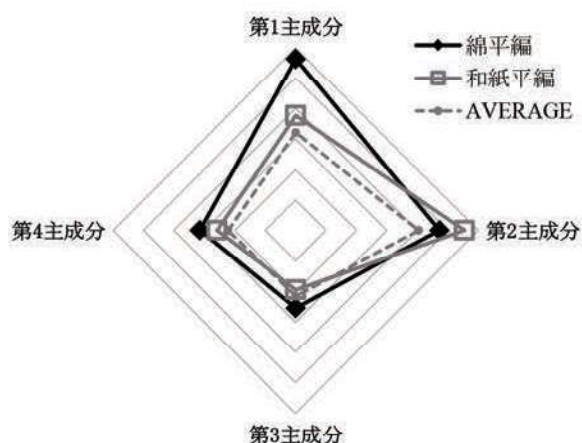


図5 「綿平編み」と「和紙平編み」

また, Pの「竹レーヨン平編み」は, 第1主成分以外において高い主成分得点を示していたことから, 夏季高温環境下においても冷涼感を維持できる可能性が示唆された。今後は, 官能評価との相関についても詳細に検討していく必要があると考えられた。同様に, レーダーチャートを図6に示した。

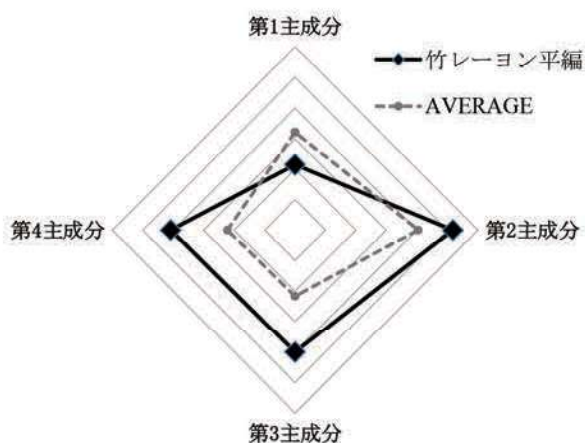


図6 「竹レーヨン平編み」

4. 結言

本研究では, 多種類の新素材と編構造の違いによるソックスの蒸発熱抵抗, 熱抵抗を明らかにすることで, 蒸れなどの不快感を軽減し, 温熱快適性を保つソックス開発の指

針となるための条件検討を目的とした。9種類の素材と2または3種類の編構造を組み合わせ, 計26試料のソックスを物性試験により比較を行った結果, 以下の条件が得られた。

(1) 厚さ1.5 mm以下の試料では, 1.5 mmを超える試料に比べ, 通気度が5~6倍以上高いものが確認された。綿, シルク, 麻などの素材によっては, 生地を薄くし, 平編みやメッシュ編み構造とすることが, 蒸発熱抵抗および熱抵抗を低減する要因の一つと考えられた。透湿度には厚さだけでなく, メッシュ編みなどの編構造も影響していると考えられた。

(2) 主成分分析の結果, 「薄くて通気や透湿のしやすい」構造で, 「吸放湿度」のある素材が温熱快適性において重要であると考えられた。「綿平編み」と「シルク平編み(横編み)」が比較的温熱快適性を有すると考えられた他, 「竹レーヨン平編み」についても第1主成分以外の主成分得点が高く, 冷涼感を有することが示唆された。

参考文献

- 1) Thomas E. Bernard et al., Prediction of WBGT-based clothing adjustment values from evaporative resistance, *Industrial Health*, 55, p.549-554, 2017
- 2) 辻坂敏之, 北村栄治, 三木靖浩, ソックスの部分的編構造の違いが温熱的快適性に与える影響, 奈良県工業技術センター研究報告, No.38, 1-5, 2012
- 3) 玉石七海, 坂下理徳, 森本鈴香, 諸岡晴美, 河越恒夫, 星裕二郎, 夏用靴下の素材および編構造が熱・水分移動特性に及ぼす影響, 繊維製品消費科学, Vol.65 (2), p.119-127, 2024