

寒冷環境下における人体-衣服系の熱・水分移動特性

—急激な環境温変化がある場合—

諸岡晴美, 諸岡英雄*

(富山大学教育学部, *奈良女子大学家政学部)

平成2年9月7日受理

Thermal and Water Transport Properties of Clothing Systems

in a Very Cold Environment

—In a Case of Sudden Ambient Temperature Change—

Harumi MOROOKA and Hideo MOROOKA*

*Faculty of Education, Toyama University, Toyama 930*** Faculty of Home Economics, Nara Women's University, Nara 630*

Three common skiing clothing systems (in three layers of underwear, ski undershirt, and ski-wear) were studied using three kinds of underwear to make clear the effect of clothing systems on human body. In this study simulation tests using THERMO LABO II were conducted under conditions approximated to actual wearing. The measurements were carried out at alternate ambient temperatures of -6 and 25°C .

The test results are summarized below:

(1) No difference in dry heat loss among three clothing systems was found. In insensible perspiration simulation tests, however, differences in heat loss among the systems were found and particularly the W-clothing system (comprising wool underwear) showed a larger thermal insulation effect at the low temperature.

(2) The C-clothing system (comprising cotton underwear) and the P-clothing system (comprising polypropylene underwear) after sweating showed a larger fall of temperature within the clothing than that of the W-clothing system.

(3) The tendency described above was strengthened with increasing perspiration, and in the C- and P-clothing systems increased dullness of the thermal sensation was found in the wearing tests.

(4) The test results show that the W-clothing system is the most suitable for wear at very low ambient temperatures.

(Received September 7, 1990)

Keywords: thermal and water transport properties 熱・水分移動特性, clothing system 衣服系, cold environment 寒冷環境, sweating 発汗, insensible perspiration 不感蒸泄, heat loss 熱損失量.

1. 緒言

氷点下となるような寒冷環境においては、屋外と暖房した屋内との間に 30°C 前後の大きな温度変化が生じることもまれではない。たとえば、冬季の電車やバスの乗降、デパートやスーパーへの出入りなど防寒着を着衣したまま、換言すると、寒冷環境下における着衣状態のま

ま温暖環境下へ入り、また寒冷環境下に戻るといった状況は日常茶飯事である。このような状況のもとでは、急激な温度変化が水分の相変換を引き起こし、これが衣服系の熱・水分移動特性に種々の影響をもたらすことが予想される。

寒冷環境下の衣服の熱・水分移動特性に焦点を当てた

近年の研究では、次のものがあげられる。Farnworth¹⁾は、防寒肌着として人気を得ている疎水性ポリプロピレン肌着の客観的裏付けを行うために親水性の綿肌着と比較しているが、発汗シミュレーション実験による熱損失量の測定からは両者の相違を見いだすことはできなかった。安田ら²⁾は、重ね布の水分移動に関するシミュレーション実験を行い、透湿性防水衣料の重ね着に用いられる肌着には吸湿性の高いもの（綿、羽毛、ウール）が適しているとしている。また、横山ら³⁾は、スキーウェアの內衣に関する着用実験を行い、スキーに適した衣服（內衣）の組合せは、①ウールのみ、②肌側に合成繊維、外側にウールの組合せに高い評価が得られたとしている。

本研究では、綿、ウール、ポリプロピレンの3種の肌着を用いて、その上に綿のスキーアンダーシャツ、スキーウェアを着用した3枚重ねの衣服系について、環境温が急激に変化した場合、肌着素材の水分特性が衣服系全体としての熱移動特性にどのような影響を及ぼすのか、また衣服内温度・湿度への影響はどうかなど、発汗量との関係において明らかにしたので報告する。

2. 実験方法

(1) 試料

用いた試料の詳細を Table 1 に示す。肌着、綿 100% のスキーアンダーシャツ、スキーウェアの3枚重ねで実験を行った。肌着は表に示すように、従来から用いられている綿、近年スキー用肌着として販売されているポリプロピレン、およびウールの3種で、肌着のみを替えた3種の衣服系について実験を行った。以後、綿肌着との組合せの場合をC衣服系、ポリプロピレン肌着との場合をP衣服系、ウール肌着との場合をW衣服系とする。

なお、肌着はいずれも市販品である。綿とポリプロピレン肌着については厚さのほぼ等しいものを選択したが、ウール肌着については厚さをそろえることはできず地厚なものとなっている。したがって、Table 2 の乾熱損失量（サーモラボIIを用い、熱板 36°C、環境温度 20°C で測定）は、ウール肌着が 102 W/m² と小さく、綿とポリプロピレン肌着はそれぞれ 151 W/m²、140 W/m² である。標準状態下での水分率、蒸発カップ法による透湿速度、5分後のウィッキング高さを Table 2 に示している。綿肌着は吸湿性が高くウィッキング性に富み、ポリプロピレン肌着は疎水性でかつウィッキング性に乏しく透湿速度は綿とほぼ同程度である。ウール肌着は、吸湿性が高く透湿性も他の2種に比べて大きいウィッキング性に乏しいという特徴をもつ。

(2) シミュレーション実験

サーモラボIIを用い、熱板を 36°C に設定した。Fig. 1 に示すように、熱板の上にはぬれた紙（水分率 200%）を置き、その上に孔をあけたビニルシート、さらにゴアテックスを置き、これを模擬皮膚とした。ビニルシートの孔は、ヒトの不感蒸泄量に相当する水蒸気量が放出するように、既報⁴⁾に基づきサーモラボIIの熱板の全表面積の 2.2% に相当する孔（0.6 cmφ の孔をできるだけ均等に分布するように 8 個）をあけた。これによる実際の水蒸気移動量は 0.244 g/(100 cm²・hr) であった。

肌着およびスキーアンダーシャツは、40°C の湯浴で洗浄し、自然乾燥後裁断した。肌着用布は、着用状態に近似させるために婦人の標準胸囲寸法⁵⁾と各肌着の胸囲寸法から、着衣時の伸長率と同様になるようにコース方向にそれぞれ綿肌着 10.8%、ウール肌着 17.1%、ポリプロピレン肌着 26.6% 伸長させ、内側寸法が 11.5 × 11.5 cm の板枠に両面テープで固定させて用いた。また、

Table 1. Samples

Sample	End use	Structure	Material (%)	Stitch density (cm ⁻¹)		Thickness (mm)	Weight (mg/cm ²)	Porosity (%)	
				Wale	Course				
C	Underwear	Interlock	Cotton	100	17.0	15.9	0.90	21.52	84.41
P	Underwear	1×1 rib	Polypropylene	100	14.5	9.8	0.90	17.72	78.32
W	Underwear	Plain	Wool/nylon 90/10		6.0	8.0	1.24	19.34	88.02
Su	Ski undershirt	Interlock	Cotton	100	16.0	15.5	0.78	20.53	82.90
S	Ski wear								
	Face		Nylon	100			1.42	28.81	
	Wadding		Polyester	100					
	Lining		Polyester	100					

Yearn type: spun.

寒冷環境下における人体-衣服系の熱・水分移動特性

Table 2. Thermal and moisture properties of samples

Sample	Dry heat loss (W/m ²)	Regain (%)	Water vapor transmission rate (g/(m ² ·hr))	Wicking height* (cm)	
				Wale	Course
C	151.2	7.02	19.95	7.05	6.00
P	140.0	0.15	20.81	0.38	1.50
W	102.0	11.01	25.92	0	0.35
Su	158.0	6.75	21.35	5.40	4.45
S	78.4				

* After 5 min.

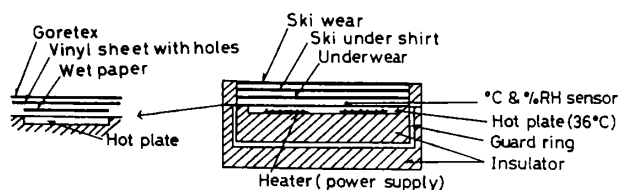


Fig. 1. Principle of the experimental apparatus

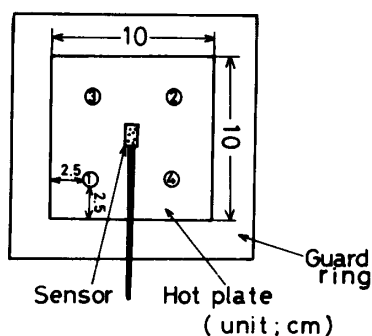


Fig. 2. Positions of water-injected hot plate

重ねた試料の周囲から熱が漏れるのを防ぐために、発泡スチロールの枠で囲った。

発汗は、マイクロシリンジを用いて液体水を5分ごとに4回 (Fig. 2の①～④の順に) 模擬皮膚上に注入することによってシミュレートした。1回の注入水分量を0.125, 0.250, 0.500, 1.000 mlの4とおり (これを以後、発汗レベル1, 2, 3, 4とする) とし、発汗量との関係において検討した。なお、上記の水分量は、全身均等に1時間発汗が継続したとして、それぞれヒト1人あたり (体表面積1.6 m²と仮定) の発汗量に換算すると240, 480, 960, 1,920 g/hrとなる。このように換算すると、発汗レベル3および4はかなり多い発汗量のように思われるが、局所的短時間の発汗量として0.5 ml/(100 cm²·5 min)あるいは1.0 ml/(100 cm²·5 min)はけっしてまれな発汗量ではないと考えられる。

実験は以下の手順で行った。まず、市販の冷凍庫を

-6°Cに調整し、この中に試料を設置したサーモラボIIを入れた。20分後冷凍庫内から25°Cの室内に取り出し、さらに20分間放置した後、5分ごとに4回、Fig. 2に示す順に水分を注入した。最後の注入から10分経過後に再び冷凍庫内に戻し、その間の過渡的な熱損失挙動ならびに衣服内温度・湿度をとらえた。温湿度センサーは、Fig. 2に示すように熱板のほぼ中央に設置した。

(3) 着用実験

シミュレーション実験の妥当性を検証するために、また着用感との関係を見るために若干の着用実験を行った。被験者は健康な成人女子2名 (22歳) で、1989年1月に実験を行った。上衣はシミュレーション実験と同様の肌着のみを替えた3枚重ね (肌着、スキーアンダーシャツ、ワンピース型スキーウェア) で、下衣はショーツ、綿ズボン下、スキーウェアであり、その他スキー用ソックス、スニーカ、スキー用革手袋を着用した。ゲレンデでスキー滑走をしたのち、暖房のきいたロッジ内で休息するといった行動パターンを繰り返すことを想定して、屋外 (3°C) で10分運動 (踏み台昇降24回/分)、暖房した室内 (25°C) で15分休息、屋外 (3°C) で10分運動 (踏み台昇降24回/分)、暖房した室内 (25°C) で5分休息のタイムスケジュールで行った。この間の胸部衣服内温度・湿度を経時的に測定する一方、被験者に対して着用感 (温感、湿潤感、触感、快適感) 評価を行った。また、実験前後の各衣服の吸汗量を測定した。

3. 結果および考察

(1) シミュレーション実験

シミュレーション実験の結果を Fig. 3～6 に示す。水分を注入した時間を矢印で示している。以下、各衣服系の熱損失量、衣服内湿度、衣服内温度について項目別に述べる。

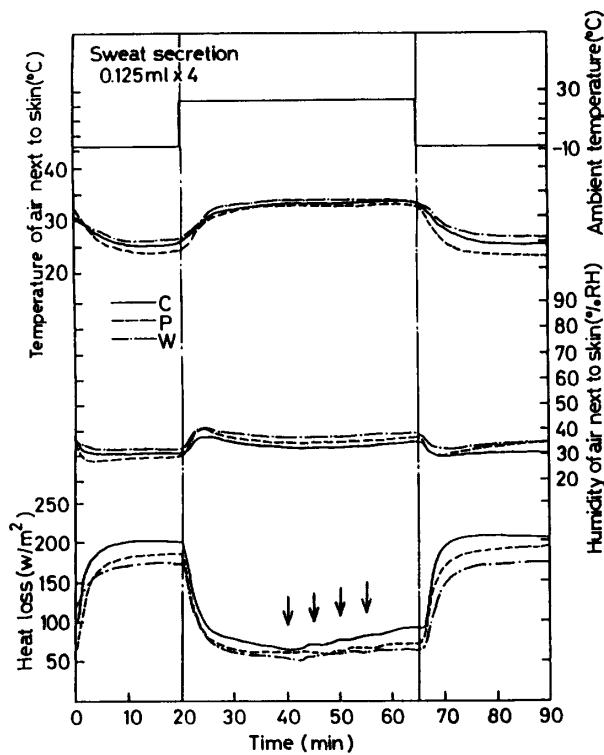


Fig. 3. Results of simulation tests (in the case of perspiration of 0.125 ml × 4)

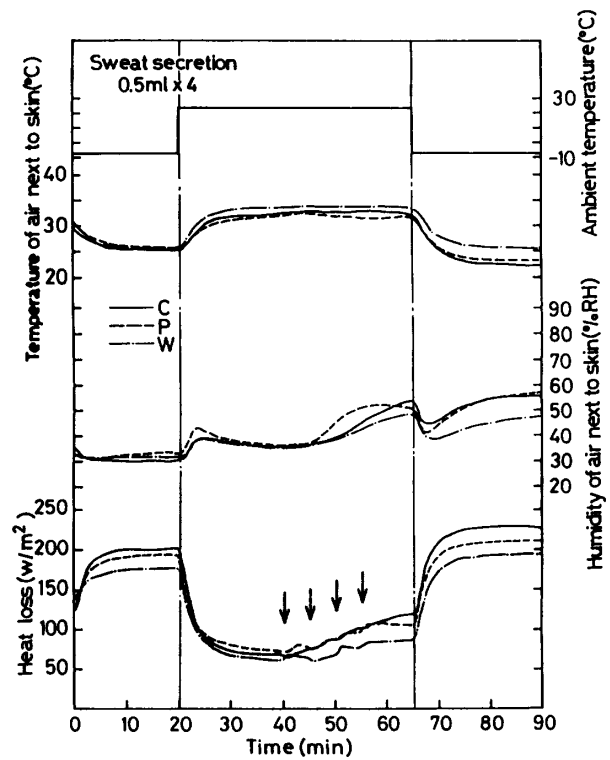


Fig. 5. Results of simulation tests (in the case of perspiration of 0.500 ml × 4)

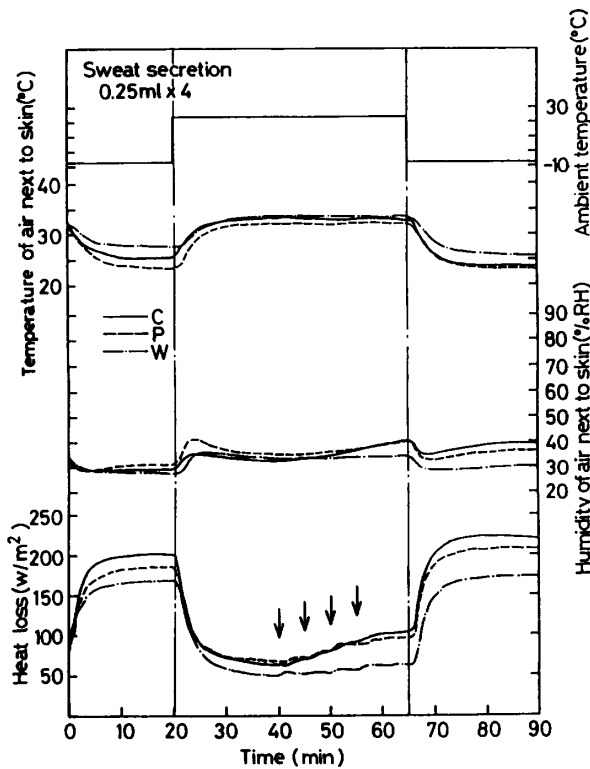


Fig. 4. Results of simulation tests (in the case of perspiration of 0.250 ml × 4)

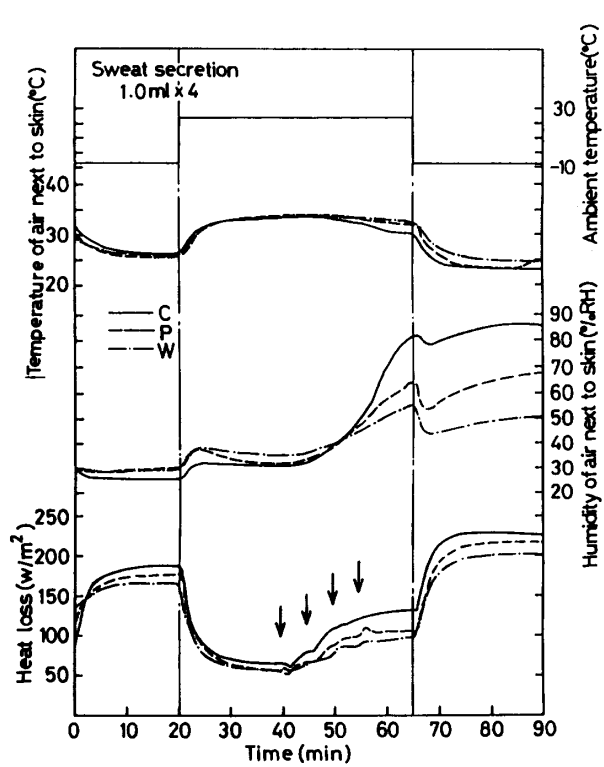


Fig. 6. Results of simulation tests (in the case of perspiration of 1.000 ml × 4)

寒冷環境下における人体-衣服系の熱・水分移動特性

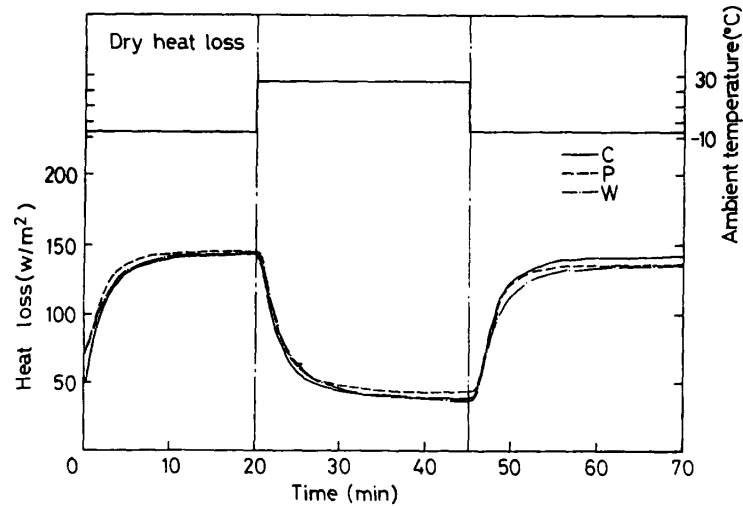


Fig. 7. Dry heat loss of three clothing systems

1) 熱損失量について

i) 不感蒸泄の場合：実験開始から40分までの挙動については、不感蒸泄を想定した水蒸気移動のみが存在する場合であるので、厳密には Fig. 3~6 までの挙動は同じでなければならない。実験開始から20分までの、 -6°C についてみると、多少測定値に差異がみられるものの C 衣服系、P 衣服系、W 衣服系の順に熱損失量が大きい傾向がみられる。これは、Table 2 の肌着自身の熱特性によるものでないことは Fig. 7 より明らかである。Fig. 7 は、各衣服系について乾熱損失量を測定したものである。肌着1枚のみで測定した場合には乾熱損失量に明らかな差異がみられたが、3枚重ねでは低温下においても常温下においても衣服系間にほとんど差はみられず、ほぼ同一の挙動を示している。すなわち、乾熱損失量の測定 (Fig. 7) ではわからない保温性の違いがヒトの不感蒸泄を想定した水蒸気移動を伴う場合 (Fig. 3~6) にみられることから、肌着素材の水分特性が保温性に影響をおよぼすことがわかった。

25°C の温度内に移してもほぼ同様の結果が得られているが、 -6°C の場合よりも衣服系間の差が小さい。この環境温による相違を確かめるために、さらに低温の -18°C と 23.5°C の定常状態で不感蒸泄を想定した実験を行った。その結果、C 衣服系と P 衣服系はほぼ同様であり、W 衣服系が最も熱損失量が小さく、両者の差は常温下で 7 W/m^2 であるのに対して、低温下では 23 W/m^2 であることがわかった。これをヒト (体表面積 1.6 m^2 と仮定) 1人あたりに換算すると、両者の差は低温下で約 37 W ($=23 \times 1.6$) となる。したがって、たとえば、冬山を歩く場合など長時間低温環境内にいな

ければならない状況を考えると、両者の差は5時間で 185 W 、さらに10時間で 370 W と概算され、長時間になるほどウール肌着着用 of 保温性効果が明瞭になると推察される。

ii) 発汗の場合：発汗レベル1ではC衣服系のみで熱損失量の増加がみられ、他の2種の衣服系にはほとんど増加はみられない。発汗レベル2ではC衣服系とP衣服系で増加がみられ、W衣服系では発汗レベル3で初めて熱損失量の増加がみられる。発汗レベル4ではすべての衣服系で熱損失量の増加がみられ、その増加分 (発汗後熱損失量 - 発汗前熱損失量) を実験時間60~65分についてみてみると、C衣服系で約 67 W/m^2 、次にP衣服系で 48 W/m^2 、W衣服系で 37 W/m^2 となっている。すなわち、ウィッキング性の大きい肌着素材ほど衣服系全体の熱損失量の増加が大きいことが明白であり、とくに発汗レベルと熱損失量の増加との関係がとらえられた。また、発汗レベル2で最もW衣服系と他の2種の衣服系との差が大きく、これより発汗量が多くても少なくとも差が小さくなることもわかった。

iii) 発汗後再び低温環境下に移動した場合：発汗後低温環境下に移動した場合の熱損失量は、発汗前低温下での熱損失量と発汗による熱損失量の増加分の和であるはずである。ところが、発汗後の低温下での熱損失量は、両者の和より少ないという結果が得られている。これは、スキーウェア外表面の水分が氷結して気孔をふさいだためと考えられ、このことにより潜熱移動が減少したものと考えられる²⁾。また、前述の i), ii) の場合と同様、W衣服系が最も熱損失量が少なく、発汗レベル2でC衣服系、P衣服系との差が最も大きいことなどがわかる。

以上、Farnworth¹⁾と同様にC衣服系とP衣服系との間に大きな違いはみられなかったが、W衣服系との間に熱損失量の大きな相違がみられること、また安田²⁾は透湿防水布の下に着用される肌着には吸湿性の高いものがよいとしているが、ともに親水性の肌着からなるC衣服系とW衣服系の間には明白な相違がみられることなどが明らかとなった。

2) 衣服内湿度について

不感蒸泄の範囲内では衣服系間の相違はほとんどみられず、低温下で約30%、常温下ではやや高く約35%である。また、発汗による湿度上昇は、発汗レベル1ではみられず、発汗レベル2ではC衣服系、P衣服系についてわずかな上昇がみられる。発汗レベル3では3種の衣服系について湿度上昇が認められ、発汗レベル4では衣服系間に明白な相違があらわれている。発汗レベル4についてみると、C衣服系では発汗後急速な湿度上昇がみられ、実験開始90分後には約85%にも達している。次にP衣服系の上昇が大きく65~70%、W衣服系では約50%と最も低い。P衣服系が予測したよりもかなり湿度が低いのは、既報⁶⁾で述べたように肌着素材のみならず衣服の組合せ方法にも依存するため(綿のスキーアンダーシャツとの組合せだったため)と考えられる。

3) 衣服内温度について

衣服系別には Fig. 3, 4 ではW衣服系、C衣服系、P衣服系の順にやや温度が高いが、Fig. 5, 6 ではほとんど差異が認められず、低温環境下では衣服内温度はほぼ25°C、常温環境下では32~34°Cの衣服内温度を示している。しかしながら、発汗後の挙動をみると、発汗レベル1では特に変化は認められないが、発汗レベル2ではC衣服系の温度が発汗後低温下で急激に低下しており、P衣服系と同程度まで低下している。さらに、発汗レベル3ではP衣服系よりやや低くなっている。発汗レベル4では発汗直後からC衣服系において温度低下が認められる。これに対して、W衣服系では発汗後の低温下移動時の衣服内温度の低下速度が緩やかであり、他の衣服系に比べて2~3°C高い。

熱板を常に36°Cに保持するよう供給熱量を制御する、いわゆる恒温法では衣服内温度の素材間の相違は検出しにくいということを既報⁷⁾で報告したが、本報のような低温下での実験では、衣服内温度への影響も比較的明白にとらえられることが新たにわかった。

(2) 着用実験結果との対応

被験者Nについての結果を Fig. 8 に示す。概略的にみてC衣服系において最も湿度が高く、次にP衣服系、W

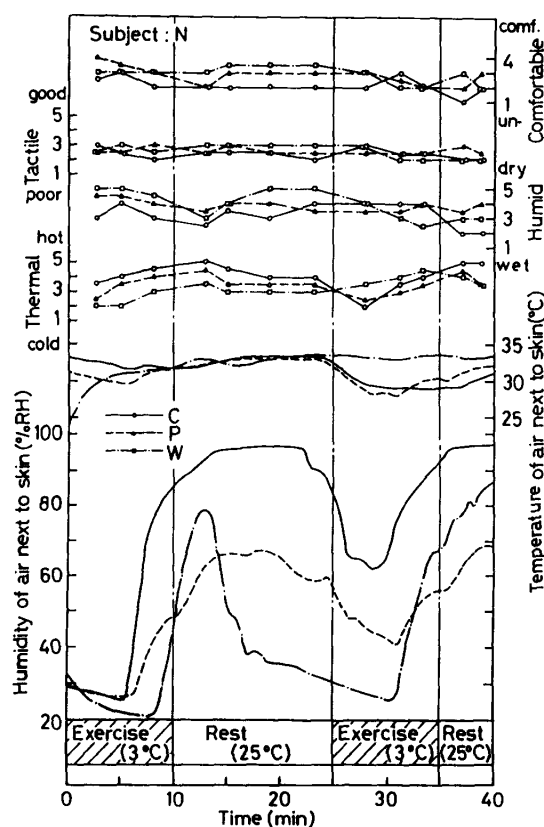


Fig. 8. Results of wearing tests (on subject N)

衣服系であり、シミュレーション結果と同様の傾向を認めることができる。湿潤感への影響をみてみると、これは、数値の高いほど乾いていることを示しているが、ほぼ衣服内湿度と対応しているようである⁸⁾。また、発汗後再び屋外に移動した際に、W衣服系では衣服内温度の低下が認められないにもかかわらず、C衣服系およびP衣服系において4~5°Cもの大きな温度低下がみられる。この低下は、シミュレーション実験で予測されたよりも大きい。また、これに伴って温感の急速な低下が認められる。触感では、W衣服系はちくちくし触感が悪いと申告されたが、図からは他の衣服系との間に評価値の大きな差異はみられない。総合的な快適感、とくに休息時(運動回復期)のW衣服系にもっとも高い評価が得られている。

次に、肌着、スキーアンダーシャツの吸汗量および体表面の付着汗量を Table 3 に示す。C衣服系では肌着とスキーアンダーシャツにほぼ同量の汗が吸収されている。P衣服系では当然のことながら吸汗量がほぼ0で、スキーアンダーシャツにやや多く含まれている。合計汗量が少ないのは、落下および蒸発汗量を含めていないためと思われる。W衣服系では肌着の吸汗量が最も大きく、

寒冷環境下における人体-衣服系の熱・水分移動特性

Table 3. Water content of each clothing and quantity of sweat remaining on skin

Clothing system	Water content (g)			
	Underwear	Ski undershirt	Skin	Total
C	2.82	3.33	0.64	6.79
P	0.07	1.54	0.42	2.03
W	4.40	2.28	0.16	6.84

皮膚付着汗量が最も少ないことがわかる。

さらに、被験者の生理的影響を調べるために実験中の心拍数の経時変化および実験前後の血圧を測定したが、明瞭な差はみられなかった。

なお、被験者Kについては、発汗量が少なく（今回は残念ながら測定機がないために、体重減少量を測定できなかったが）各衣服系間に明瞭な差をみいだすことができなかった。このことは、シミュレーション実験でも明らかのように、衣服内温度・湿度の衣服系間の差が発汗量に依存するためと思われる。

以上、衣服内温度ならびに湿度はシミュレーション実験の結果とほぼ対応しており、シミュレーション実験の妥当性が検証されると同時に着用感への影響がとらえられた。このことより、今後本研究で用いたシミュレーション実験の結果から着用感の予測が可能であると考えられる。

4. 結 語

寒冷期に暖房室内外を移動するといった状況を想定して、シミュレーション実験を行い、人体-衣服系の熱・水分移動特性への影響をとらえた。また、着用実験によってシミュレーション実験の妥当性を検証するとともに着用感への影響についてもとらえた。結果は、次に示すとおりである。

(1) 乾熱損失量では認められない衣服系間の相違が水蒸気移動を伴う場合に認められ、とくに低温環境下においてW衣服系の保温性効果の大きいことが定量的に明ら

かとなった。

(2) 発汗レベル2で、W衣服系と他の衣服系との熱損失量の差が最も大きかった。

(3) 発汗後低温下での熱損失量は、発汗前低温下の熱損失量と発汗による熱損失量増加分の和より小さいことがわかった。

(4) 発汗による湿度上昇は、C衣服系が最も大で、次にP衣服系であり、W衣服系が最も低かった。

(5) C衣服系とP衣服系において、発汗後低温下で衣服内温度が大きく低下し、この傾向は、発汗量の増加とともに大きくなった。また、これによる温感の低下が着用実験によって明らかとなった。

(6) 以上のことより、寒冷環境下においてはW衣服系が最も適切であることがわかった。

引 用 文 献

- 1) Farnworth, B. and Dolhan, P.A.: *Text. Res. J.*, **55**, 627 (1985)
- 2) 安田 武, 井尻登喜子: 織消誌, **27**, 31 (1986)
- 3) 横山宏太郎, 松浦仁美, 安達佳代, 三戸口牧子: 武庫川女大紀要, 被服編, **34**, 被31 (1986)
- 4) 諸岡英雄, 永島りさ子: 家政学研究, **33**, 2 (1987)
- 5) 文化服装学院編: 文化ファッション講座 婦人服I, 文化出版局, 東京, 70 (1987)
- 6) 諸岡晴美, 諸岡英雄: 家政誌, **42**, 635 (1991)
- 7) 諸岡晴美, 島田美乃里, 松川三郎: 富山大教育学部紀要B理科系, **37**, 69 (1989)
- 8) 諸岡晴美, 丹羽雅子: 家政誌, **30**, 320 (1979)