

冷却衣服着用時の局所不快感に関する研究

お茶の水女子大学大学院 吉見直枝
(共同研究者) 早稲田大学 田辺新一
お茶の水女子大学 長谷部ヤエ

Local Discomfort on Wearing the Cooling Garment

by

Naoe Yoshimi, Yae Hasebe

Department of Human Environmental Engineering

Ochanomizu University

Shin-ichi Tanabe

Department of Architecture Waseda University

ABSTRACT

To evaluate the effect of cooling garment and the local discomfort by wearing it, subjective experiments were conducted. The chamber was conditioned at operative temperature of 33.3 °C, relative humidity of 37 %, and still air. Proposed cooling garment has ice bags in it. To prevent condensation and to keep comfortable surface temperature, cooling packs were insulated with the four layers of aluminum, styrene, vinyl sheets, and water absorptive fabric. Inner surface temperatures of this cooling garment was about 16.8 °C. Its cooling power at chest and back was measured by using thermal manikin and it was 33W/m². By wearing proposed cooling garment, skin temperature at chest and back decreased by about 3 °C, while at foot it showed a tendency to increase (p<0.1). Thermal, comfort and sweat sensations were closer to neutral conditions by wearing cooling garment, and it made thermal acceptability better. On the other hand, it was found out that the difference of thermal sensation in

the same body elicited the discomfort of local cooling. At design of cooling garment, it is important to take the distribution of local thermal sensation into consideration.

要 旨

高温環境下における冷却衣服の効果および人体を局所的に冷却することによる不快感の評価を行うことを目的とし、被験者実験を行った。実験に用いた冷却衣服は、ベスト型の衣服に潜熱蓄冷材および断熱容器からなる冷却パックを挿入し、胸および背中を冷却する構造である。冷却衣服の人体側の平均表面温度は16.8℃であり、冷却部位の冷却量は約33W/m²だった。被験者実験により、冷却衣服着用時の熱的快適性の評価を行った。その結果、冷却衣服の着用により、全身温冷感、快不快感、発汗感覚、熱的受容度などにおいて心理的効果があることが明らかとなった。しかし、身体に異なる温度分布が生じる際、その温冷感の差によって不快感が上昇することも示唆された。これらの結果より、身体を直接冷却する衣服を設計する際には、生理的な効果を制御するのみならず、身体の温冷感の差が大きくなるように考慮しなくてはならないことがわかった。

緒 言

高温環境下における快適な作業を可能にするための冷却機能を有する衣服を用い、その局所不快感を評価することを目的とした。冷却衣服とは、人間に最も近い外部環境である衣服に冷却機能を持たせたものである。人体を冷却することにより個別に高温作業環境対策を行うことができ、省エネルギー的にも効果が期待できる。

従来、冷却衣服に関する研究が、諸頭ら¹⁾、Bishopら²⁾、Duncanら³⁾、Pimentalら⁴⁾により行われており、冷却衣服が生理的負荷を低減し、

生産性を高める上で有効であると報告されている。しかし、従来の研究では、冷却衣服の有効性のみならず主眼をおくものが多く、着用により生じる不快感を評価した研究は少ない。本研究では、冷点密度が高く、冷感受性の高い躯幹部⁵⁾、⁶⁾を氷冷式で冷却する冷却衣服を用い、人体を局所的に冷却することによる不快感を評価することを目的とした。

1. 実験方法

1. 1 実験概要・被験者

高温環境下における冷却衣服の効果および、人体を局所的に冷却することによる不快感の評価を行うことを目的とし、被験者実験を行った。実験は夏季(7月)にお茶の水女子大学人工気候室にて、健康な大学生年齢の男性6名を被験者として行った。表1に被験者の身体的特徴を、図1に被験者実験風景を示す。

表1 被験者の身体的特徴

| Number | Sex | Age [year] | Height [cm] | Weight [kg] | Body Surface Area* [m ²] | Rohrer Index** [-] |
|--------|------|----------------|-----------------|----------------|---|--------------------------|
| 6 | Male | 22.5 (1.05) | 170.0 (4.00) | 60.3 (9.29) | 1.71 (0.12) | 122.6 (18.76) |

*Calculated by Takahira's Equation : $A=72.46W^{0.425} \times H^{0.725}$

**Rohrer Index = $W/L^3 \times 10^7$ () standard deviation

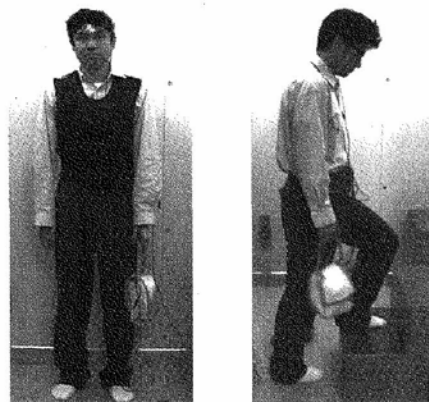


図1 被験者実験風景
(左：立位，右：踏み台昇降運動時)

表2 実験条件

| 実験条件 | 環境条件 | | 着衣条件 | |
|--------------|-----------|----------|------|------|
| | 作用温度 (°C) | 相対湿度 (%) | 作業服 | 冷却衣服 |
| Control | 33 | 40 | ○ | × |
| Cooling Vest | 33 | 40 | ○ | ○ |
| to = 28°C | 28 | 40 | ○ | × |

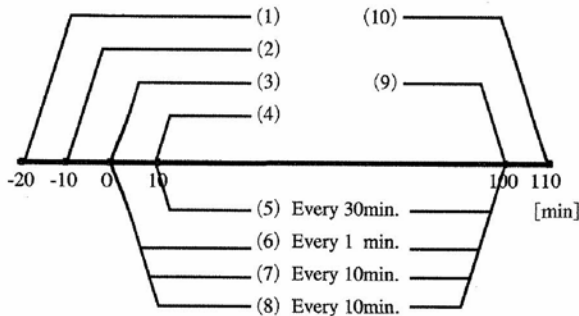
○は着用, ×は非着用を示す。

1.2 実験条件

実験条件を表2に示す。人工気候室は、高温作業環境を想定し作用温度33°C, 相対湿度40%, 静穏気流に制御し、冷却衣服の有無による比較を行った。また、作用温度28°Cにおいて作業着のみを着用する条件を加え、比較対象とした。冷却衣服は作業着の上から着用した。作業着として実験に用いた衣服組合せは、長袖ワイシャツ、半袖シャツ、ズボン、靴下である。サーマルマネキン⁷⁾を用い、作業着の基礎着衣熱抵抗値を測定したところ、0.88cloであった。

1.3 実験手順

図2に実験手順を示す。被験者は作用温度25°C, 相対湿度50%の前室に10分間安静の後、人工気候室に入室し、90分間の曝露実験を行った。被験者は実験環境への曝露期間中、機械保守作業を想定した1.4metの踏み台昇降運動を行った⁸⁾。被験者には飲水を許可し、飲んだ水の



- (1) Coming-in, Change Clothes, Weight (7) Vote
- (2) Armpit temperature, Questionnaire (8) Activity; 1.4met
- (3) Start of the Experiment (9) End of Experiment
- (4) Enter the Climate Chamber (10) Change Clothes, Weight
- (5) Weight, Cooling vest's feeling
- (6) Physiological and Environmental Measurements

図2 実験手順

量を測定した。

1.4 測定項目

生理的項目として、皮膚温8点(額, 上腕, 手, 胸, 背, 大腿, 下腿, 足), 衣内温湿度(胸, 背), 体重等の測定を行った。平均皮膚温(\bar{T}_S)は、気候馴化の式⁹⁾に従い算出した。次式に平均皮膚温算出式を示す。

$$\bar{T}_S = 0.07T_{forehead} + 0.15T_{upper\ arm} + 0.05T_{hand} + 0.18T_{chest} + 0.17T_{back} + 0.18T_{thigh} + 0.13T_{leg} + 0.07T_{foot} \quad 9)$$

心理的測定項目としては、温冷感, 快不快感, 熱的受容度, 発汗感覚, 冷却したい部位等についての申告を10分ごとに行った。図3に申告用紙を示す。

図3 申告用紙

1.5 実験に用いた冷却衣服

図4に実験に用いた冷却衣服を示す。ベスト型の衣服に潜熱蓄冷材および断熱容器からなる冷却パックを挿入し、胸および背中を冷却する構造である。表3に着衣本体に用いた素材の諸元

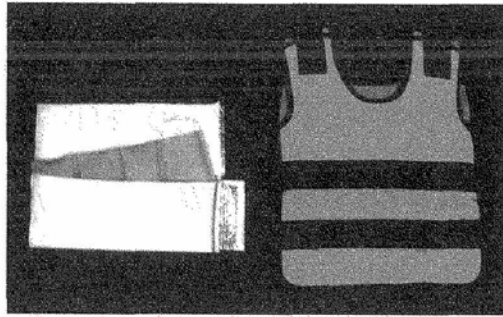


図4 冷却衣服

表3 冷却衣服本体部の素材の諸元

| 吸水性*1 (mm) | | 通気性*2 | 乾燥性*3 | 透湿性*4 |
|------------|----|-----------|-------|-----------------------|
| た | よ | (cc/cm/s) | (min) | (g/m ² ·h) |
| 126 | 96 | 173.9 | 120 | 304 |

*1 JIS L 1096 B法 (バイレック法), *2 JIS L 1096 A法

*3 JIS L 1096 A法準拠による

(試料: 20×20cm, 30分純水に浸漬後, 15秒間遠心脱水機で処理し, ライン乾燥で所定時間後毎に重量を測定)

*4 JIS L 1099 A-1法 (塩化カルシウム法)

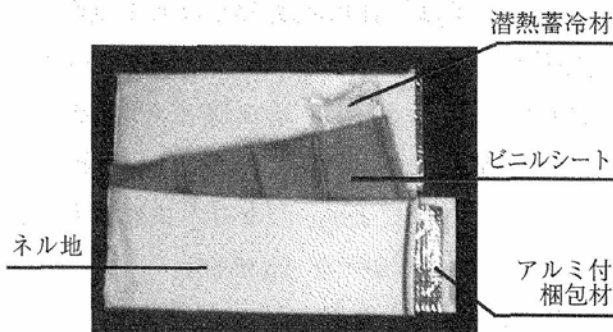


図5 冷却パック

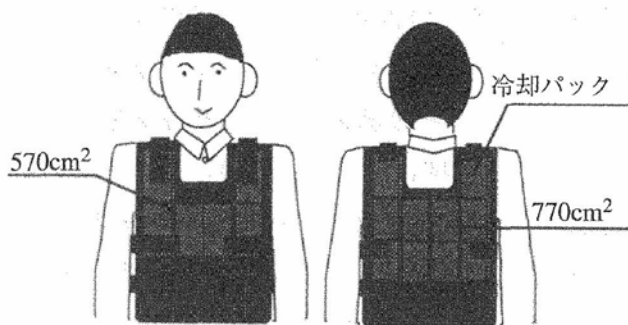


図6 冷却パックの配置

を示す。

図5に冷却パックの構造を示す。冷却パックは断熱容器および潜熱蓄冷材からなる。断熱容器は、結露水吸収用のネル地、結露水漏洩防止用のビニルシートおよび放射よけのためのアルミ

付き梱包材からなる。図6に冷却パックの配置を示す。潜熱蓄冷材(融点温度-1℃, 融解潜熱80kcal/kg)は、胸に120g/個のものを6個、背中に100g/個のものを10個配置した。冷却面積は胸部で約570cm², 背部で約770cm²だった。なお、冷却衣服全体の重量は、2,295gだった。

通常、衣服は熱抵抗としての役割を持つ。しかし、冷却衣服では、衣服内にアイスバックを挿入し熱を奪うため、熱抵抗値では評価を行うことができない。そのため、冷却衣服の冷却熱量を算出する必要がある。そこで、サーマルマネキンを用い、冷却衣服の冷却量測定を行った。作業着を着用させたサーマルマネキンが熱的定常状態に達したことを確認後、冷却衣服を着用させ、30分後に測定を行った。図7に冷却量算出方法の模式図を示す。

まず、冷却衣服を着衣していない作業着のみの全着衣熱抵抗値を用いて、冷却衣服着衣時の皮膚温における熱損失量を推定した。次に、推定した熱損失量と冷却衣服着用時の実際の熱損失量との差を、冷却衣服の冷却量(単位; W/m²)として算出した。

図8に算出した冷却衣服の冷却量を示す。測定環境の作用温度が24℃から30℃の時、BackおよびChestの冷却量は約33W/m²であった。また、冷却部位に隣接しているPelvisでは約11W/m²であった。冷却量が負の値になっている部分についてはマネキンの着衣の仕方による測定誤差であると考えられる。

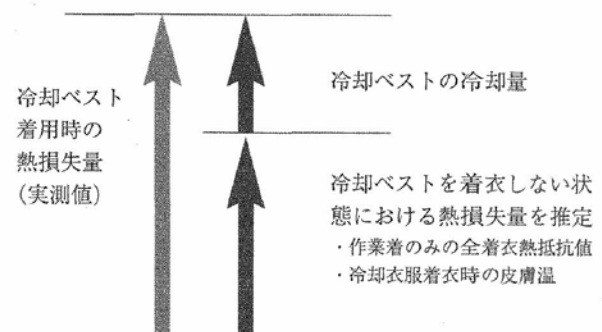


図7 冷却量算出方法

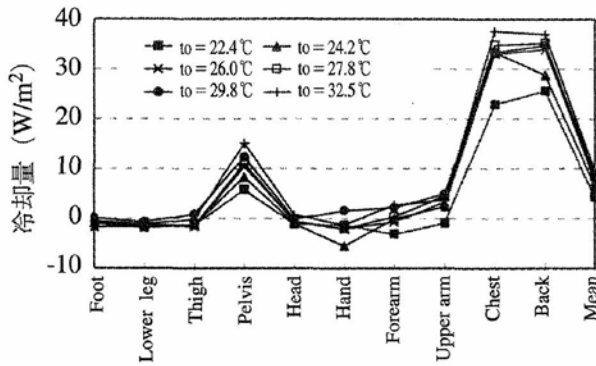


図8 冷却衣服の冷却量

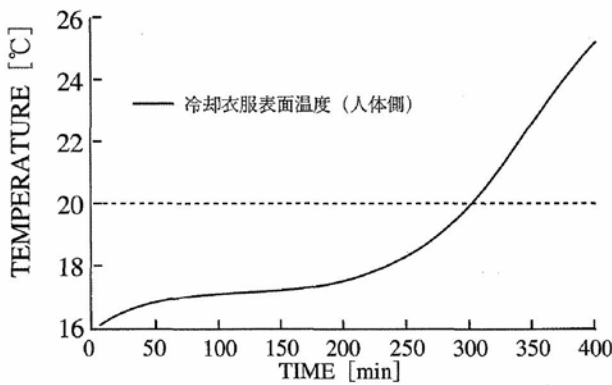


図9 表面温度の経時変化

冷却衣服の人体側表面温度の経時変化を、サーマルマネキンを用い測定した。作業着を着たサーマルマネキンが熱的平衡状態に達したことを確認し、作業着上から冷却衣服を着用させ、冷却衣服の人体側表面温度を銅-コンスタンタン熱電対を用いて測定した。図9に測定結果を示す。なお、このサーマルマネキンによる測定では潜熱移動を考慮していない。測定を行った環境の平均作用温度は32.8℃であった。1分目から120分目までの冷却衣服の人体側の平均表面温度は16.8℃であった。また、冷却衣服の人体側表面温度を20℃以下に保つ時間は、約300分間であった。

1. 6 統計解析

作用温度25℃、相対湿度50%の前室待機時(10分目)の値を前値、人工気候室入室後60分目の値を後値とし、後値と前値との間の変化量を算出した。各条件別の結果の比較にあたり、分散分析後、スチューデントt検定を行った。また、

生理・心理的データの各項目間の相関を解析する際には、人工気候室入室後のデータ(実験開始後20分目から100分目のデータ)を用いた。

2. 被験者実験結果・考察

2. 1 全身温冷感の変化量

図10に全身温冷感の変化量を示す。[Control]では、作用温度33℃の人工気候室に入室後60分間で温冷感の変化量で平均2.14上昇したが、冷却衣服着用時である[Cooling Vest]では平均1.17の上昇であり、冷却衣服の着用により、全身温冷感の上昇を有意に抑制することがわかった($p<0.01$)。

2. 2 全身快不快感の変化量

図11に全身快不快感の変化量を示す。[Control]では、作用温度33℃の人工気候室に入室後60分間で快不快感申告値は不快側へ平均1.60低下したが、冷却衣服着用時である[Cooling Vest]では平均0.73の低下にとどまり、冷却衣服の着用により、全身の不快感を有意に抑制することがわかった($p<0.05$)。

2. 3 熱的受容率

全被験者数6名に対する「熱環境を受け入れられる」側の申告をした人数の割合を熱的受容率とし、人工気候室入室後60分後の熱的受容率を算出した。その結果、人工気候室入室60分後の熱的受容率は、[Control]では16.7%、[Cooling Vest]では、66.7%、[to=28℃]では100.0%であった。したがって、高温の作業環境下において、冷却衣服の着用により、熱的受容度は、「熱環境を受け入れられる」側に改善されることが明らかとなった。

2. 4 発汗感覚の変化量

図12に発汗感覚の変化量を示す。発汗感覚の変化量は、作用温度33℃の人工気候室に入室後60分間で、[Control]では平均1.55上昇したが、冷却衣服着用時である[Cooling Vest]では

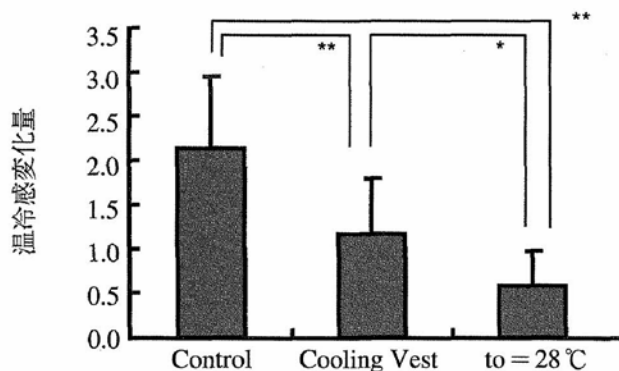


図10 全身温冷感の変化量 (入室後60分間)

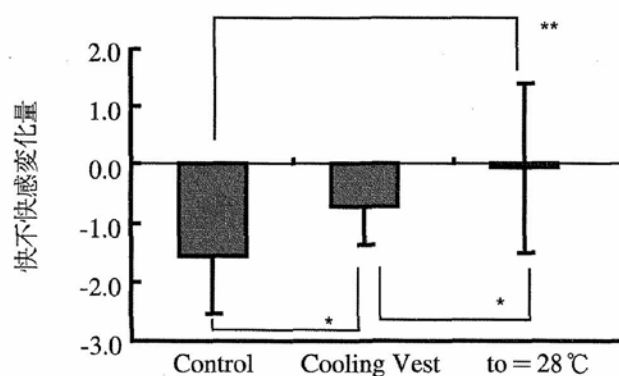


図11 全身快不快感の変化量 (入室後60分間)

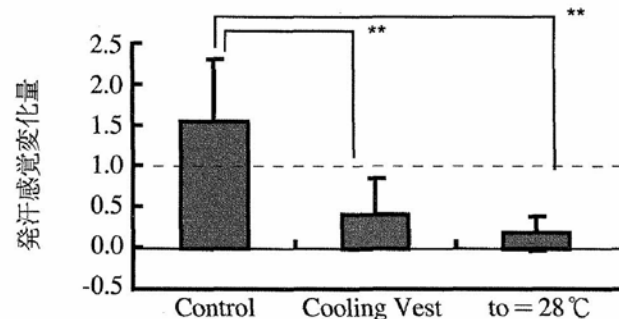


図12 発汗感覚の変化量 (入室後60分間)

平均0.44の上昇であり、冷却衣服の着用により、発汗感覚の上昇を有意に抑制する効果があることがわかった ($p < 0.01$)。

2.5 局所冷却による不快感

図13に、胸の温冷感と全身快不快感の相関を示す。また、同じ相関図上に、代謝量1.4metおよび作業服のみの着衣量0.88cloの条件下におけるPMV¹⁰⁾ およびDISC¹¹⁾を用いて、全身温冷感と全身快不快感との関係を予測した値を示す。

冷却衣服を着用していない条件の [Control]

および [to=28°C] では、予測値に従い、胸の温冷感が熱的中立に近づくにつれて、全身快不快感の値が減少し、快適に近い値となった。しかし、冷却衣服着用条件の [Cooling Vest] では、胸の温冷感が低くなるのにもない、全身快不快感は予測値よりも不快側に大きくばらついていることが明らかとなった。なお、背中でも同様の結果となった。

図14に胸の局所快不快感と全身快不快感との関係を示す。胸の局所快不快感と全身快不快感との相関分析を行うと、全条件とも危険率1%で有意に相関が認められた。冷却衣服を着用していない [Control] における相関係数は、0.82であった。一方、冷却衣服着用時である [Cooling Vest] では、胸の快不快感が0 (快適) に近くても、全身の快不快感が不快側にばらついており、相関係数は0.41となり、[Control] よりも小さかった。背中でも同様の結果が得られた。

これらの結果より、局所的に冷却されることにより、全身の不快感が生じている可能性があると考えられる。これは、冷却ベストを着用した時の感想を自由記述方式で調査した際に得られた、「冷却部位のみが冷たく、その他の部位が暑い」という意見¹²⁾とも一致している。したがって、身体を直接冷却する衣服を設計する際には、生理的な効果を制御するのみならず、身体の温冷感の差が大きくなるように心理的な面も考慮しなくてはならないと考えられる。

2.6 全身温冷感と局所温冷感の差

図15に全身および胸の局所温冷感の感覚差と、全身快不快感との関係を示す。図中に冷却衣服着用時 [Cooling Vest] の条件におけるデータの近似曲線を示す。[Cooling Vest] では、全身温冷感と局所温冷感との温冷感差が大きくなるのに従い、全身の快不快感の申告値が低下し、不快感が高まる傾向があった。身体に異なる温冷感が分布する時、その温冷感の差が大きくな

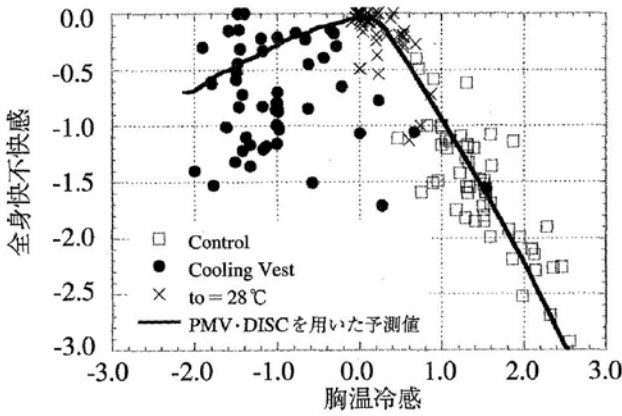


図13 胸温冷感と全身快不快感

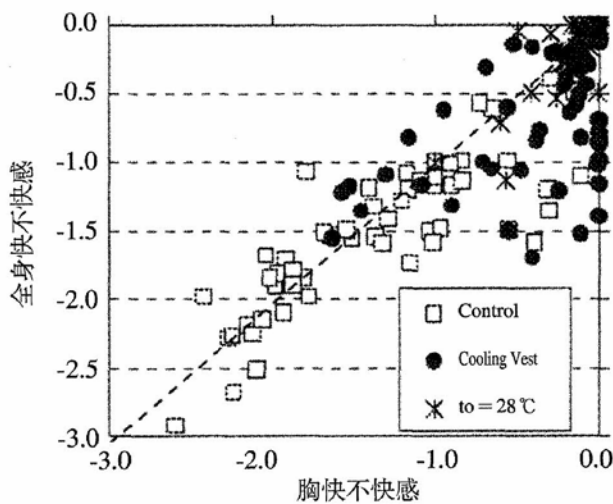


図14 全身快不快感と局所快不快感

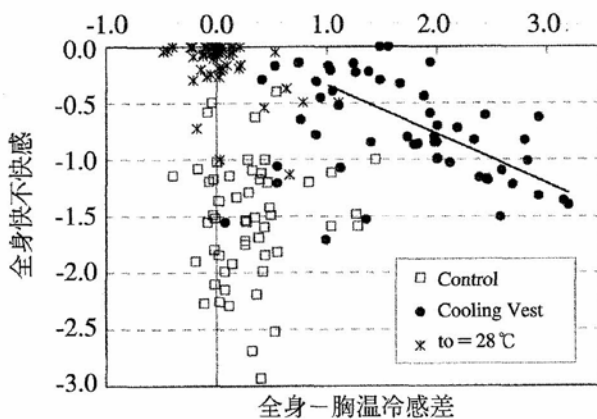


図15 全身-胸温冷感の感覚差と全身快不快感

ると、全身の快不快感が低下することが明らかとなった。

2.7 皮膚温

図16に身体各部位の皮膚温（21～100分目の平均値）を示す。冷却衣服の着用により、胸および背中中の皮膚温は約3℃低下した。

また、作用温度25℃、相対湿度50%の前室待機時（1～10分目）の平均値を前値、人工気候室入室後61～70分の平均値を後値とし、前値と後値との間の各部位皮膚温の変化量を算出した。冷却衣服の有無によって冷却していない部位の皮膚温の変化量が異なるかどうかの検定を行った。その結果、冷却衣服を着用することにより、足の皮膚温の上昇量が大きくなる傾向が認められた ($p<0.1$)。これは、高温環境下で体幹部を冷却していることに関係していると考えられる。通常、高温環境下において、身体は皮膚血流量を増加することにより体温調節を行っている。しかし、冷却衣服着用時では体幹部の大部分を冷却するため、冷却されている部位では、熱を逃がさないように皮膚血流量が少なくなると考えられる。そのため、その代償反応として、冷却さ

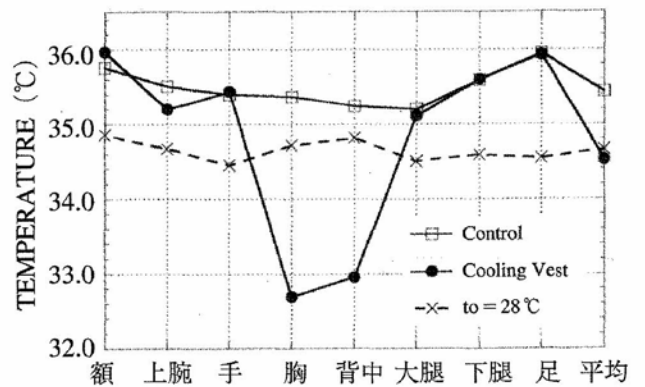


図16 体の各部位の皮膚温

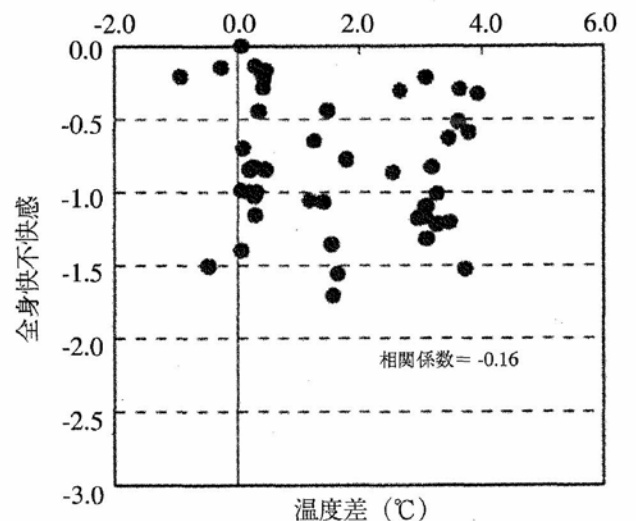


図17 平均皮膚温・胸皮膚温差と快不快感

れていない末梢部分の皮膚血流量を増加させてバランスをとり、結果として足の皮膚温が上昇したことが考えられる。しかし、足以外の部位では、皮膚温の変化量に有意な差が認められなかったことから、さらなる検討が必要である。

2. 8 平均皮膚温と胸局所皮膚温の差

図17に平均皮膚温と冷却部位である胸の皮膚温との間の温度差が、全身の快不快感に与える影響を示す。平均皮膚温と胸皮膚温の温度差と全身快不快感との間に有意な相関関係はみとめられなかった。

3. 総括

本研究では、高温環境下における冷却衣服の効果および、人体を局所的に冷却することによる不快感の評価を行うことを目的とし、被験者実験を行った。

実験に用いた冷却衣服は、ベスト型の衣服に潜熱蓄冷材および断熱容器からなる冷却バックを挿入し、胸および背中を冷却する構造である。サーマルマネキンに冷却衣服を着用させ冷却衣服の人体側の表面温度を銅-コンスタンタン熱電対を用いて測定したところ、平均16.8℃だった。また、冷却部位の冷却量は約33W/m²だった。

被験者実験により、冷却衣服着用時の熱的快適性の評価を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

1) 冷却衣服の着用により、全身温冷感の上昇および全身の不快感を有意に抑制した。発汗感覚の上昇を有意に抑制した。また、熱的受容度を「受け入れられる」側に改善する効果があった。

2) 冷却衣服着用時の冷却部位の温冷感と全身快不快感との関係について、PMVおよびDISC（代謝量1.4met、着衣量0.88clo）を用いて予測した値と比較した。その結果、冷却部位の温冷感が低くなるのに伴い、全身快不快感は、

予測値よりも不快側に大きくばらついた。したがって、局所的に冷却されることにより、全身の不快感が生じている可能性が示唆された。

3) 冷却衣服を着用している際、全身温冷感と局所温冷感との温冷感差が大きくなるのに伴い、全身の快不快感の申告値が低下し、不快感が高まる傾向があった。しかし、平均皮膚温-冷却部位の局所皮膚温の温度差と全身快不快感との間に相関関係は認められなかった。これらの結果から、冷却衣服着用によって、身体に異なる温度分布が生じる際、その皮膚温差よりも温冷感の差によって全身の快不快感が低下することが示唆された。

4) 冷却衣服の着用により、冷却部位である胸および背中皮膚温は約3℃低下した。一方、冷却衣服を着用することにより、足の皮膚温の上昇量が大きくなる傾向があった。足以外の部位では、皮膚温の変化量に有意な差は認められなかった。

以上のことより、高温環境下における冷却衣服の着用は、全身温冷感、快不快感、発汗感覚などにおいて心理的效果があることが明らかとなった。しかし、身体に異なる温度分布が生じる際、その温冷感の差によって不快感が上昇することが示唆された。

謝辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して助成をいただいた財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。また、本研究の一部はNTTファシリティーズとの共同研究でなされました。ここに記し感謝いたします。本研究を遂行するにあたり、多大なるご協力をいただいた、お茶の水女子大学大学院生、高木理佐様、山本ゆう子様に深謝いたします。本研究に被験者として参加して下さった方々へ、心から御礼申し上げます。

文 献

- 1) 諸頭昌和, 菊本誠, 大隅正人, 酒井貴史, 萩原素雄, 木村哲彦, 高山忠雄, 多屋秀人; 体温自動調節器に関する研究, 第12回人間-熱環境系シンポジウム報告集, pp.131-133 (1988)
- 2) P. A. Bishop, S. A. Nunneley, J. R. Garza, S. H. Constable; Comparisons of air vs.liquid microenvironmental cooling for persons performing work while wearing protective, Trends in ergonomics/human factorsV, (Elsevier Science Publishers, Amsterdam) , pp.433-440 (1988)
- 3) J. R. Duncan, S. A. Konz; Industrial and laboratory evaluations of personal dry-ice cooling, AIIE transactions, Vol.10, No.2, pp.131-138 (1978)
- 4) N. A. Pimental, H. M. Cosimini, M. N. Sawka, C. B. Wenger; Effectiveness of an air cooled vest using selected air temperature and humidity combinations, Aviation, Space, and Environmental Medicine, 58, pp.19-24 (1987)
- 5) 李, 田村; 人体表面の温度分布 (第1報) 冷点分布密度の部位差, 人間と生活環境, 2 (1) , pp.30-36 (1995)
- 6) 李, 田村; ヒトの冷感受性の部位差について, 日本家政学会誌, Vol.46, No.11, pp.1081-1090 (1995)
- 7) 田辺, 長谷部; 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.448, pp.1-8 (1993)
- 8) 田辺, 今村, 蔭, 鈴木; オフィスにおける湿度が熱的快適性に与える影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.685-688 (1995)
- 9) 中山昭雄編; 温熱生理学, 理工学社 (1981)
- 10) ISO-7730 ; Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort (1993)
- 11) ASHRAE Handbook 1997 FUNDAMENTALS
- 12) 田辺, 小林, 吉見, 羽山, 小松; 通信機械室における快適作業環境維持のための冷却ベストに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会 (東京) , pp.481-484 (1997)