

水の蒸発を利用した冷却衣服

富永 直斗¹⁾, 佐古井 智紀¹⁾

¹⁾信州大学

Cooling clothing apparatus using water evaporation

Naoto TOMINAGA¹⁾, Tomonori SAKOI¹⁾

¹⁾Shinshu University

Abstract: Air conditioning system increases electric power consumption significantly in summer. The recommended temperature setting for air-conditioned offices is 28 °C. However, more than 60% of people are dissatisfied in such an environment. We developed cooling clothing utilizing water evaporation. It has the potential to save energy, to provide thermal comfort, and to create an adjustable individual thermal environment. Water supply control was established by thermal load given in the comfort equation. We performed human subjects test in a student office at Shinshu University in summer. The subject felt wet discomfort and extreme local cooling for excessive water supply. So, we improved the water control strategy in which water supply is less than the evaporation capacity. As the result, wet feeling and discomfort decreased. However, we could not confirm the superiority of our cooling clothing compared to USB fan without it.

Key words: Clothing, Thermal comfort, Office, Personal cooling, Thermal environment

要旨: 夏期の冷房使用により、電力消費量が上昇する。オフィスの冷房の設定温度は 28℃が推奨されているが、その就労環境では 6 割以上の方が不満を抱えている。我々は、省エネルギー性、熱的快適性、個人差対応性を同時に実現するシステムとして、水の蒸発を利用した冷却衣服を試作した。供給する水分量は快適方程式によって与えられる熱負荷に基づき制御した。この冷却衣服の快適性、供給する水分量の妥当性を知る被験者実験を、28℃の夏期の執務空間において行った。水の蓄積により使用者が濡れによる不快を感じ、また、過度の局所冷却もみられた。水分供給が最大蒸発量と釣り合う新たな制御を作成し、再実験を行った。その結果、使用者の濡れ感および不快感が低下した。だが、本実験の環境においては、USB ファンのみを使用した場合に対して冷却衣服の優位性は見られなかった。

キーワード: 衣服、熱的快適性、オフィス、パーソナル空調、熱環境

1. はじめに

夏期において、冷房の消費電力を削減することは重要である。東京電力の最大供給能力 5000 万 kW に対し、夏期の東京での電力需要は 6000 万 kW に達し、電力不足は明らかである。また、冷房の電力量は、全使用電力の 1/6 程度を占め、ピーク時のオフィスでは全使用電力の 5 割を占める(経済産業省, 2011)。近年、冷房の設定温度を 28℃に設定することが推奨されているが、その就労環境では 6 割以上の方が不満を抱えている(日経ビジネスオンライン, 2007)。本研究では、熱的快適性、個人差対応性、省エネルギー性を同時に満足する冷却衣服システムを開発する。

2. 方法

2.1 システム概要

佐古井ら(2011)に基づき作成した冷却衣服システム

を図 1 に示す。小さなボトルから肌着外表面へ水を供給する。その水をデスクファンに用いて蒸発させ、気化熱により身体を冷却する。水の運搬には直流電源で駆動するモーターポンプを用いる。また、水を一様に肌着外表面へ拡散させるため中空糸膜を利用している。外表面での蒸発を促進するためにデスクファンを併用する。これにより、たとえ高湿環境であっても蒸発冷却を期待できる。

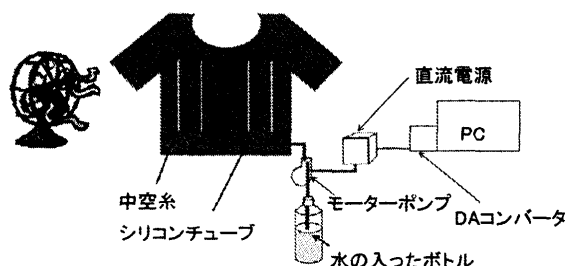


図 1 冷却衣服の概要

2.2 水分供給制御

モーターポンプを駆動する直流電源を PC から ON/OFF 制御した。ON 時のみ、6V を出力させた。“強(+3)”、“中(+2)”、“弱(+1)”、“切(0)”の 4 段階の出力を設けた。

2.2.1 快適方程式に基づく制御

供給水分量を快適な発汗および快適な皮膚温の関係 (Fanger, 1970) から決定した。評価環境を 29°C・60%RH、着衣として半袖 T シャツおよび、夏ズボン、下着、靴下、靴(基礎着衣熱抵抗 0.43 clo)を想定した。また、小型 USB ファンを併用するとし、風速として 0.8m/s を想定した。熱的に快適である条件は、産熱と式(1)、(2)によって与えられる中立温感に应じる皮膚温と発汗での放熱が釣り合うことである。

$$T_{sk,comf} = 35.7 - 0.0028(M - W) \quad (1)$$

$$E_{sk,comf} = 0.42[(M - W) - 58.15] \quad (2)$$

ここで、 M : 代謝量 [W/m²]、 W : 外部仕事量 [W/m²]、 $T_{sk,comf}$ 、 $E_{sk,comf}$: 中立温感に应ずる皮膚温 [°C]および発汗量 [W/m²]。

オフィスワーク時の平均代謝量は 81.4 W/m²(ISO 8996, 1990)であり、一般的な男性(体表面積 1.7m²)では 138.4W である。外部仕事は一般に無視できる。この時、式(2)の $E_{sk,comf}$ は 16.6 W である。つり合いを保つには、残りの 121.8 W をその他の方法(対流、放射、不感蒸泄、呼吸)で放熱しなければならない。対流と放射による放熱は気温と皮膚温の差に依存するため、気温の上昇とともに減少する。皮膚温と発汗が $T_{sk,comf}$ 、 $E_{sk,comf}$ にある一般的な男性では、29°C・60%RH の評価環境における産熱に対する放熱の不足分(熱負荷)はおおよそ 60W となる。熱負荷の増加は体温上昇、発汗の増加へ繋がり、身体に不快感をもたらす。この熱負荷を水分蒸発により相殺するための水分供給量を“中”と設定した。水の潜熱は 2417 J/g であるため、“中”制御での水分供給量は 84 ml/h(=1.4 g/min)である。“中”を基準とし、“強”では 1.5 倍の水分量、“弱”では 1/2 の供給量に設定した。

表 1 快適方程式に基づく出力制御

出力モード	準備期間 (0~20 秒)	動作期間 (20 秒後以降)
弱	連続	1.1 秒/分
中	連続	2.2 秒/分
強	連続	3.3 秒/分

2.2.2 最大蒸発量に基づく制御

環境条件を 29°C・60%、また、衣服外表面温度を 29°C、風速を 0.84m/s、胸の表面積を 0.1047m²(蔵澄, 1994)と想定した。胸の対流熱伝達率 h_c として大黒ら(2002)の式

を用いた。最大蒸発量 E_{max} は西ら(1981)の式(3)により算出した。なお、着衣時の衣服面積率を把握していないため、暫定的に衣服による面積増加を考慮せず計算した。結果として、水分供給は少なめに設定されることとなり、濡れによる不快が起こりにくくなる。

$$E_{max} = 16.5 h_c (P_{cl}^* - P_a) \quad (3)$$

ここで、 h_c : 対流熱伝達率 [W/(m²°C)]、 v : 風速 [m/s]、 E_{max} : 最大蒸発量[W/m²]、 P_{cl}^* : 衣服外表面温度における飽和水蒸気圧 [kPa]、 P_a : 水蒸気分圧 [kPa]。

式(3)の E_{max} は 19.4 W/m² であり、水の潜熱 2417 J/g を考慮すると供給すべき水分量は 28.9 g/h となった。この水分量を出力モード“強”に設定し、0.5 g/min で水を供給した。最大蒸発量に基づく制御ではこの“強”を基準とし、“中”、“弱”では 2/3、1/3 の供給量に設定した。

表 2 E_{max} に基づく出力制御

出力モード	準備期間 (0~20 秒)	動作期間 (20 秒後以降)
弱	連続	0.28 秒/分
中	連続	0.56 秒/分
強	連続	0.84 秒/分

2.3 冷却衣服のプロトタイプ

図 2 に開発した冷却衣服を示す。冷却衣服には矩形の綿生地が取り付けられ、その内側に水を供給する中空糸を設置している。濡れによる不快感を防ぐため、T シャツの表地には吸水加工、裏地には撥水加工を施してある。

冷却部位は予備実験より決定した。胸および背を冷却した場合には、胸、背、全身の温冷感が低下した。胸のみの冷却時には、胸の温冷感のみが低下した。また、首周りの後ろ側に熱が籠るよう感じられた。背ではファンによる対流を受けないため蒸発がほとんど生じず濡れによる不快感が生じ易かった。背が水の供給部位としては不適切であることが窺えた。そこで、胸および首周りの後ろ側を冷却部位とした。

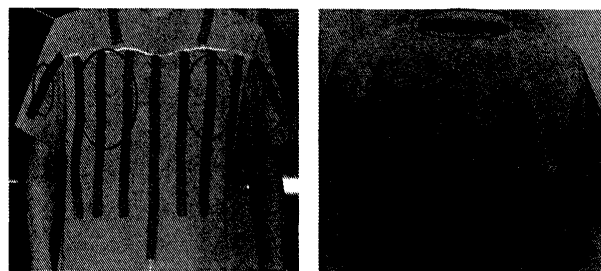


図 2 冷却衣服の試作品†

† 冷却箇所を赤い円で示す

2.4 実験

2012年7月30日～8月6日までの計6日間、信州大学の学生室において、男子大学生8名を被験者として冷却衣服の快適性、供給する水分量の妥当性を確認する実験を行った。環境の温湿度を白金測温抵抗体および静電容量式の感湿素子により、壁温、床温、天井温、上下温度分布をT型熱電対により計測した。図3、4に、部屋中央で計測した気温と相対湿度を示す。気温は総じてさほど変化していない。だが、湿度は40～60%で多少変化が見られる。温度分布に関する詳細なデータは割愛するが、実験中総じて均一な環境であったとは言えない。ドアの開閉や天候等の影響が考えられる。

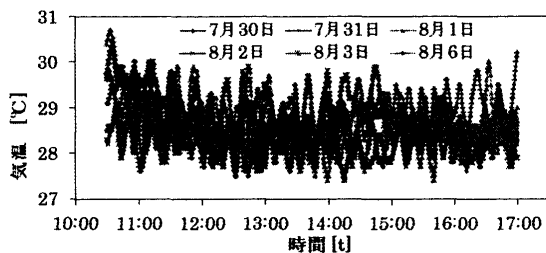


図3 実験環境の気温の時間推移

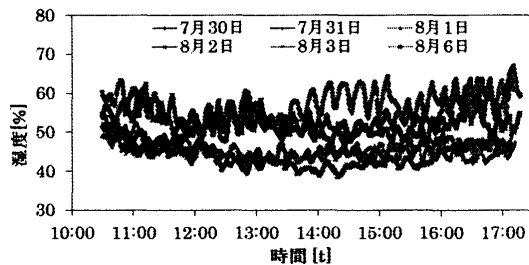


図4 実験環境の湿度の時間推移

蒸発を促進するためにデスクファンとして、“OFF”、“1”、“2”の3段階で出力を調整できる市販の小型USBファンを用いた。実験条件は(1)USBファンのみ使用する条件、(2)USBファンと冷却衣服の両方を使用する条件、計2条件とした。各被験者の暴露条件は1日につき1条件のみとし、それぞれの条件に1日4人ずつが、6時間暴露された。冷却衣服の制御として、7月30日～8月2日の4日間は快適方程式に基づく制御を採用し、8月3日、8月6日の2日間は、最大蒸発量 E_{max} に基づく制御を採用した。冷却衣服の出力、USBファンの出力、USBファンの位置は被験者に自由に変えさせた。通常の業務の間に、30分毎に官能検査を行い、全身および頭、胸、背における温冷感、不快感、濡れ感を評価させた。評価スケールを表2に示す。日常に即した条件下で実験を行うため、被験者の一時的な離席を認めたものの、最低8割以上の申告を行わせた。

被験者の着衣量は、半袖Tシャツ、夏ズボン、下着、靴下、靴の約0.43cloである。USBファンのみを使用す

る条件では被験者自身のTシャツを、冷却衣服とUSBファンを使用する条件ではあらかじめ著者らが用意したTシャツを用いた。

表3 評価スケール

温冷感	不快感	濡れ感
+3: 暑い	+3: とても不快	+3: とてもある
+2: 暖かい	+2: 不快	+2: ある
+1: やや暖かい	+1: やや不快	+1: ややある
0: 中立	0: 快適	0: ない
-1: やや涼しい		
-2: 涼しい		
-3: 寒い		

3. 結果・考察

図5～8に冷却衣服使用時の胸の温冷感、全身の温冷感、濡れ感、不快感を、図9に冷却衣服の動作状況を、図10にUSBファンのみを使用したときの温冷感を示す。なお、図9の冷却衣服の動作状況では、便宜的に順序尺度を間隔尺度に置き換え、全体の傾向を示している。上述のように被験者の一時的な離席を認めたため、時間により申告データ数も変化している。

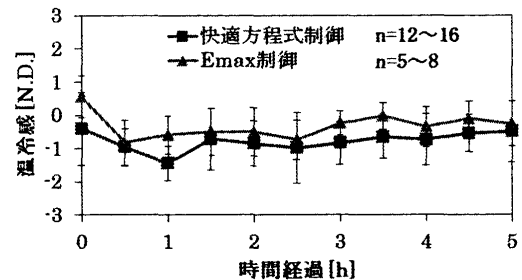


図5 胸における温冷感の時間推移(冷却衣服)

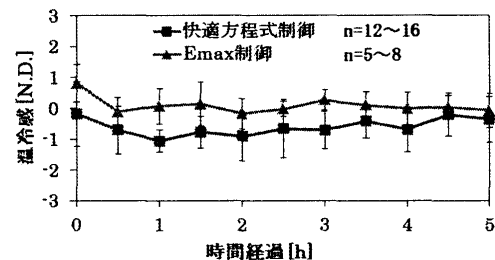


図6 全身における温冷感の時間推移(冷却衣服)

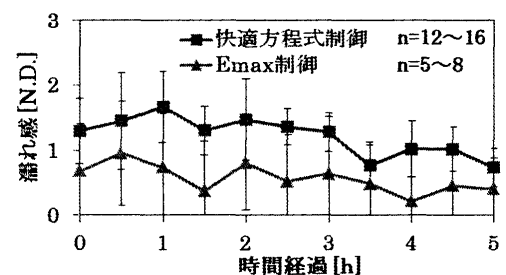


図7 胸における濡れ感の時間推移(冷却衣服)

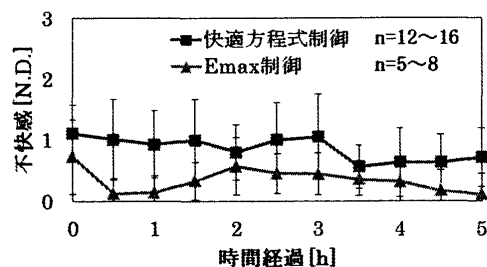


図8 全身における不快感の時間推移(冷却衣服)

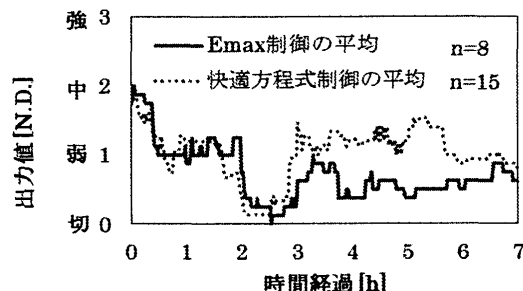


図9 被験者による冷却衣服の出力選択の推移

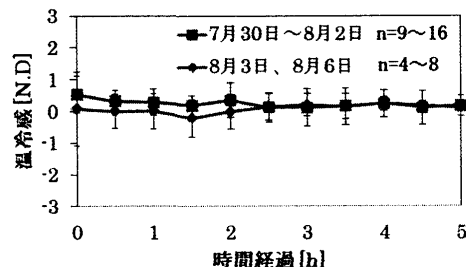


図10 全身の温冷感の時間推移(USB ファン)

図5および図6より、胸と全身の温冷感、快適方程式に基づく制御の方が低くなっており、 E_{max} に基づく制御の方がより中立(± 0)に近い値となった。図7に見られるように、 E_{max} に基づく制御では濡れ感が低くなった。図8より、 E_{max} に基づく制御では不快感も少なく、使用者にとって E_{max} に基づく制御の方が好ましかったことが見て取れる。図9を見ると、出力はどちらの制御においても弱(+1)程度で推移しており、被験者は冷却衣服の出力を抑えていたと言える。

図10より USB ファンのみを使用した場合の温冷感は7月30日~8月6日までの計6日間を通じて、ほぼ中立(± 0)で安定していたと言える。本実験の環境では USB ファンのみで十分な冷却力が得られており、USB ファンのみを使用した場合に比べて冷却衣服の優位性は見えてとれなかった。

4. まとめ

夏期のオフィスにおいて省エネルギー性、熱的快適性、個人差対応性を同時に満たすため、水の蒸発を利用した冷却衣服を開発した。このシステムでは、胸および、肩、首周りの後ろ側の衣服外表面に水を供給し、小型 USB ファンを併用して水の蒸発を促進する。“強”

～“切”の4つの水分供給出力を設け、使用者が出力を自由に選択する。

信州大学内の冷房設定温度 28℃の学生室において被験者実験を行った。供給水分量の制御は快適方程式に基づくものではなく、最大可能蒸発量を基づき行うことが望ましいとの結果が得られた。しかし、この温度条件では USB ファンのみでも十分な冷却力があり、冷却衣服の優位性は見られなかった。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究、佐古井智紀、課題番号 24656335)によりました。信州大学繊維学部の高橋正人准教授、乾滋准教授、堀場洋輔助教、岡田和徳氏、小山創氏、石井僚太氏には、実験にあたり貴重なご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。帝人ファイバー株式会社の堀川直幹様には、衣服の作成にあたり多くの生地を提供頂きました。深く感謝申し上げます。

5. 文献

- Fanger P.O. 1970. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Garbagenews.com <http://www.garbagenews.net/archives/942832.html>
- ISO 8996 : 1990. Ergonomics – Determination of metabolic heat production
- Masayuki OGURO. 2002. Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions, J. Archit. Plann. Environ. Eng, AIJ, No.561, pp. 21-29
- Sakoi T, Melikov A.K, Bolashikov Z, Morikawa H, and Iwaki K. 2011. Use of clothing for body cooling for body cooling by evaporation. In: Proceedings of INDOOR AIR 2011, Austin, USA, 428.
- 西安信 1981、人体と環境との熱交換、温熱生理学 (中山昭雄編)、理工学舎、pp. 33-72
- 蔵澄美仁、堀越哲美、土川忠浩、松原斎樹 1994 - 日本人の体表面積に関する研究、日本生気象学会雑誌、31 卷(1 号)、pp5-29
- 経済産業省. http://www.meti.go.jp/earthquake/electricity_supply/0513_electricity_supply_03_01.pdf

<連絡先>

連絡先氏名 富永 直斗

住所 長野県上田市常田 3-15-1

所属 信州大学大学院・理工学系研究科

E-mail アドレス 12fm216g@shinshu-u.ac.jp