

汗の蒸発過程における皮膚温・着衣温分布の非定常性状

○川上直紀¹⁾ 銚井修一¹⁾ 高田暁¹⁾
¹⁾京都大学Non-Steady Characteristics of Temperature Distribution of Skin and Clothing Surface
during the Evaporation ProcessNaoki KAWAKAMI¹⁾ Shuichi HOKOI¹⁾ Satoru TAKADA¹⁾
¹⁾Kyoto University

When we enter an air-conditioned room with a lot of sweat on the skin and in the clothing after working in a hot environment, for example, outdoors in summer, the sweat evaporates gradually and has influence on the heat balance of the human body in the transient state. Since the sweat does not exist uniformly on the surface, during the evaporation the distribution of sweat may cause temperature distribution even in a small surface area of the skin or the clothing. In this study, experiments using subjects are conducted. Several point data of skin or clothing surface temperatures obtained with the use of thermocouples are compared with the area data obtained with the use of an infrared camera.

Through this comparison, the relationship between the point data and the whole distribution is shown during the sweat evaporation. In addition, to address the problem of measuring skin and clothing temperature, the moisture capacity of surgical tape to fix a thermocouple is also investigated in this paper. It is shown that surgical tape with too much moisture capacity may cause a local delay in the moisture evaporation rate and a difference between the temperature at the sensor and the temperature to be measured in the sweat evaporation process.

1. はじめに

夏の屋外などの高温環境で活動し多量の汗をかくと皮膚表面や着衣に水分が付着し、その後空調された屋内へ移動したとき、その水分が徐々に蒸発して人体の熱収支に影響を与える。汗が蒸発する過程において、皮膚表面や着衣中の水分の分布、および着衣と皮膚の接触状況が時間的に変化し、皮膚温および着衣温の部位による差の原因となる可能性がある。

本研究では、被験者実験を行い、熱電対による数点の皮膚・着衣表面温を、赤外線カメラで得られた表面温と比較する。これにより汗が蒸発する過程において、皮膚温および着衣温の分布の非定常性状を把握し、汗の分布および着衣と皮膚の接触の影響を考察する。また、熱電対の固定に用いたテープの水分容量および水分移動抵抗が測定値に及ぼす影響を把握し、測定上の問題を検討する。

2. 実験概要

実験は 2000 年 7 月下旬に、京都大学工学部建築学科内の実験室で行われた。実験条件を表 1 に示す。被験者は健康な男子大学生 2 名である。被験者は、低温低湿室 (26℃、40%) と高温高湿室 (35℃、80%) に順に滞在した。着衣条件は、トランクスのみの場合と、半袖の T シャツ (綿 100%, 白) とトランクスの場合の 2 種類とした。被験者は各室で椅座安静を保つ。T 型熱電対 (0.2mm φ) を用いて着衣外側表面温 5 点および被覆部 (着衣に覆われた部位) の皮膚温 5 点、露出部 (着衣に覆われていない部位) の皮膚温 7 点、腋窩温を測定した。さらに鼓膜温、直腸温を専用熱電対センサーを用いて 10 秒おきに測定した。一方、赤

外線カメラで上半身前面の表面温度の測定を 1 分おきに行った (高温室では測定していない)。室空気の温湿度は、ロガー付き小型温湿度計 (T&D TR-72) を用いて測定した。また、人体から失われる水分量を知るために、電子天秤 (メトラートレド KCC150) を用いて体重を測定した。図 1 に実験スケジュールを示す。

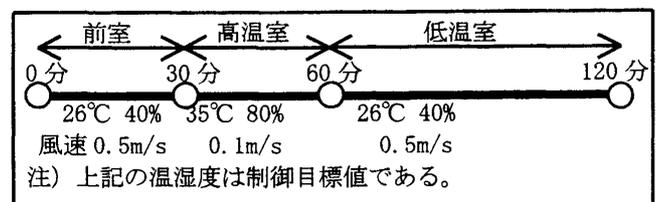


Fig.1 Experimental schedule

Table.1 Experimental conditions

	被験者	着衣条件
実験 1	K.M.	トランクスのみ
実験 2	M.S.	半袖の T シャツ、トランクス

3. 熱画像による温度データと熱電対による温度データの比較

3-1. 皮膚表面温度 (T シャツなしの場合)

熱電対で皮膚温を測定する際、熱電対を皮膚に取り付けるためにサージカルテープがよく用いられる。しかしながら、汗をかいた場合の測定時にはサージカルテープの水分特性が測定結果に影響を及ぼすことが考えられる。ここでは、皮膚への熱電対の取り付けの際、プラスチック製サージカルテープを用いて実験を行い、サージカルテープの水分特性が汗の蒸発時の測定結果に与える影響を把握する。

方法 図2のように、熱電対の取り付け位置近傍の点を任意に数個取り、これらの点における赤外線画像データの経時変化と熱電対で測定された温度の比較を行う。

結果 実験1における胸中央の皮膚温の経時的変化を図3に示す。赤外線画像により測定された熱電対周辺の皮膚温が67分までに温度低下を終えている。それに対してサージカルテープで固定された熱電対で測定された皮膚温は、低温室入室後73分まで低下を続ける。これは、テープ表面およびテープと皮膚の間にテープの無い部分より多くの汗が溜まっていたためと考えられる。また使用したテープには通気用の穴が多数あけられてはいるものの、糊が付いていることを考えると、ある程度の湿気抵抗として作用しているであろう。その抵抗によりテープの下で分泌された汗が、テープの無い部分と比べて、ゆっくりと蒸発するために温度低下時間が長くなっているとも考えられる。

また、熱電対データは赤外線画像データと比べ、発汗前および実験終了時においても約1°C低い。微細に見たときに、熱電対のセンサー部分がわずかに皮膚から離れ、皮膚とテープの間の微細な空隙の気温を測定している可能性がある。このために、熱電対データが低い値を示している事が考えられる。この要因については、今後詳細な確認が必要である。

以上の事より、汗が多量に存在する状況において、蒸発過程における皮膚温の測定にテープで固定された熱電対を用いる際には、テープの測定値への影響を避けることが難しいといえる。従って、汗の蒸発過程において、赤外線カメラで捉えることのできない着衣の下での皮膚温（被覆部皮膚温）を測定する場合などにおいて、その非定常過程のデータ解釈には注意を要する。

3-2. 着衣表面温度

着衣を身に付けて行われた実験2において、熱電対で測定された着衣表面温度と、熱電対を取り付けた位置における赤外線カメラで測定された着衣表面温度を図4, 5に示す。これらの図より、着衣表面温度について両者はよい一致を示している。汗により着衣は湿っていたが、熱電対を着衣に糸で縫い付ける方法をとっており、皮膚表面測定の際に見られたサージカルテープの影響がなかったため、熱電対データと赤外線データが一致したと思われる。

4. 表面温度分布の時間変化

方法 Tシャツ無しの実験1および有りの実験2について、上半身に図6のように胸、腹に約25cm×20cmの領域をとり、各領域内での温度分布を頻度で示す(図7,8)。以後、これらの領域をそれぞれ胸エリア、腹エリアと呼ぶ。発汗前、発汗後の各時刻に

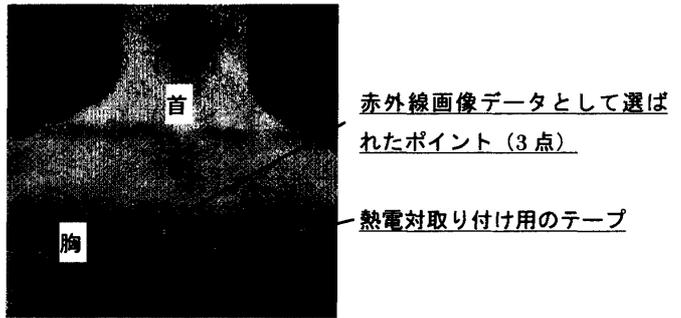


Fig.2 Thermograph of chest

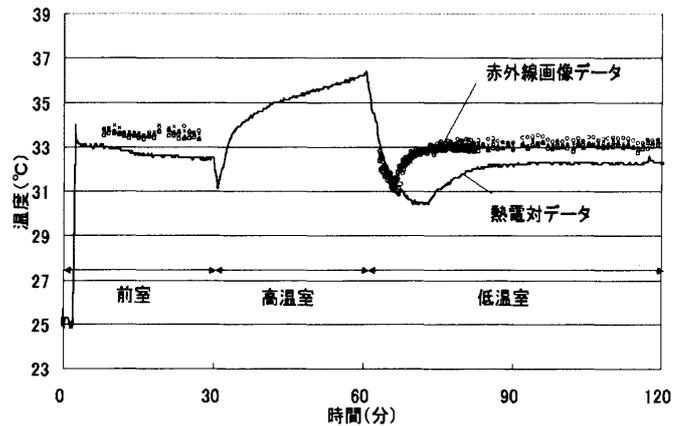


Fig.3 Change in Skin temperature with time (middle chest : exp.1)

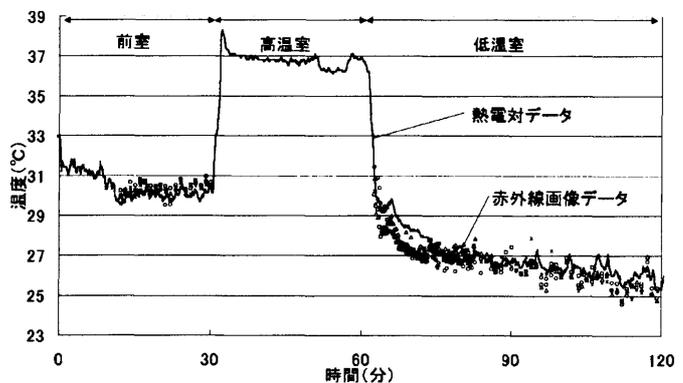


Fig.4 Change in Clothing temperature with time (middle chest : exp.2)

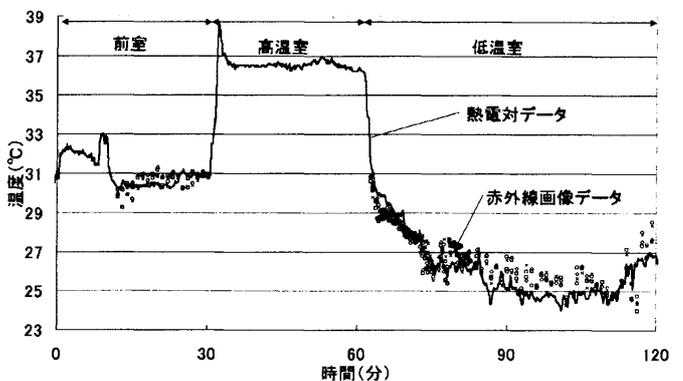


Fig.5 Change in Clothing temperature with time (left chest : exp.2)

におけるエリア内での温度分布について検討する。

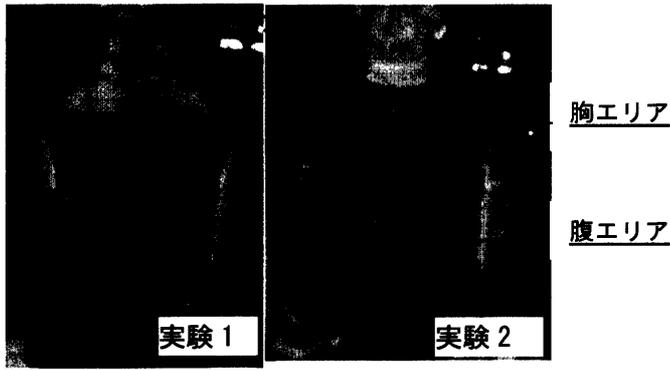


Fig.6 Thermograph of front trunk (四角形は選ばれた領域)

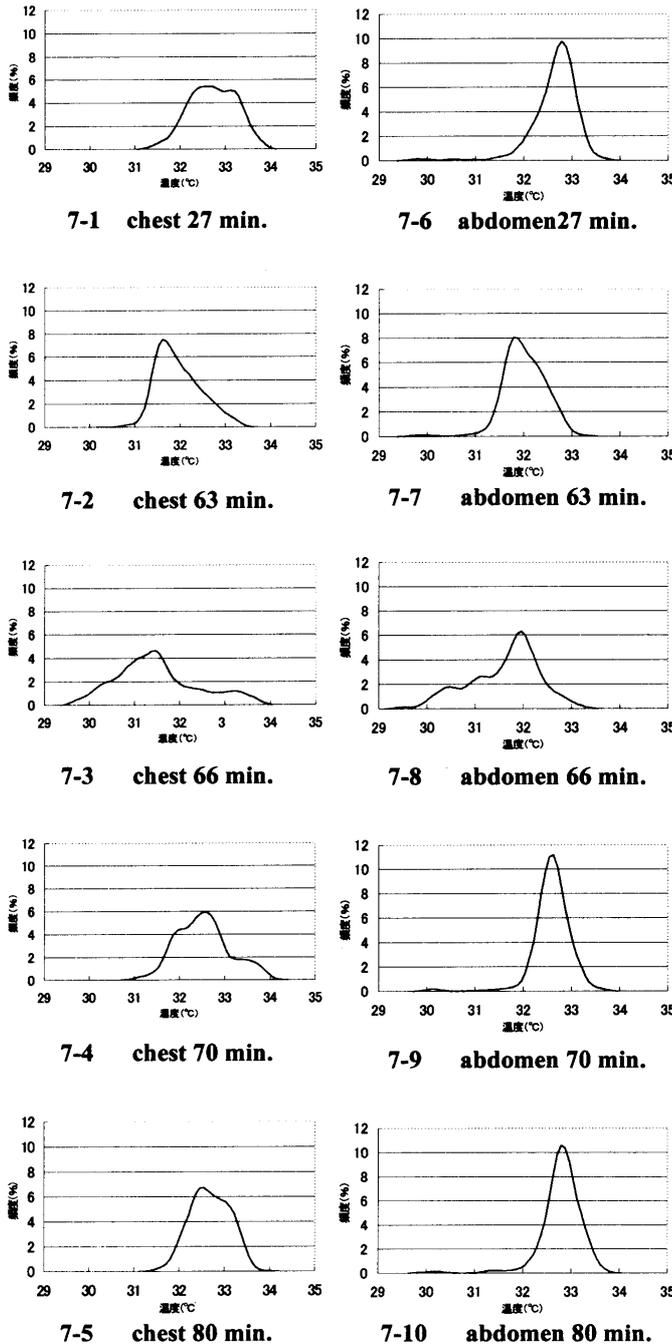


Fig.7 Skin temperature distribution; frequency distribution in chosen area (exp.1:without T-shirt)

4-1. Tシャツ無しの上半身皮膚温 (実験 1)

発汗前における頻度分布は、胸エリアにおいて概ね 2°C の範囲に分布している。これは場所による温度差と考えられる (図 7-1)。腹エリアは約 1.5°C と比較的狭い範囲に分布している (図 7-6)。

60 分に汗が蒸発を開始した直後から、皮膚表面温度は胸エリア、腹エリアともに低下し 66 分には胸エリアで約 4°C、腹エリアで約 3°C と広く分布している (図 7-3,7-8)。各エリアにおいて比較的高温の場所は、皮膚表面の汗の蓄積量が少なく、比較的低温の場所は蓄積量が多かったと考えられる。

胸エリア、腹エリア共に 80 分には、発汗前における温度分布状態に戻る (図 7-5,7-10)。この時点までに皮膚表面の汗は、ほぼ完全に乾燥してしまっていると考えられる。

4-2. Tシャツの表面温 (実験 2)

発汗前における頻度分布は胸エリア、腹エリアともに比較的狭い領域に分布している。胸エリアにおいて 2 つの山が見られるが、これは、着衣と皮膚が接触している部位と接触していない部位の温度差であろう (図 8-1,8-8)。

60 分に汗が蒸発を開始した後において、胸エリア、腹エリアともに全体的に 110 分頃まで低下を続ける (図 8)。これは、着衣中の水分が多く、蒸発が続いたためである。しかしながら、その分布形状の変化には両エリアで違いが見られる。

目視による観察結果より、胸エリアは着衣に比較的均一に水分が付着していた。また、蒸発過程の初期において全体的に着衣と皮膚が接触していたが、次第に離れて 90 分以降離れている部分が多くなっていることが観察された。この領域では、蒸発過程の初期から比較的狭い温度範囲を保ったまま低下を続け、着衣が離れていたと考えられる 90 分以降もエリア内温度の分布幅が終始変わらないので、皮膚と着衣との距離が一樣だったと考えられる。

腹エリアは、不均一に水分が着衣に付着しているのが観察された。また、蒸発過程の初期には着衣が部分的に皮膚に接触し、着衣にしわが多く観察された。このため、蒸発過程初期の分布が比較的広い温度範囲にわたっていると考えられる (図 8-9,8-10)。また、この領域においても時間の経過と共に着衣と皮膚が離れていく様子が観察された。これに伴って、着衣表面温度も低くなり、狭い温度域に集中すると考えられる (図 8-11~14)。

4-3. 着衣表面の各エリアにおける熱電対データ

実験 2 においては、胸中央、胸左、腹中央の 3 箇所熱電対による測定を行った。胸中央、胸左での熱電対データは胸エリアの、腹中央の熱電対データは腹エリアの赤外線画像データと比較することがで

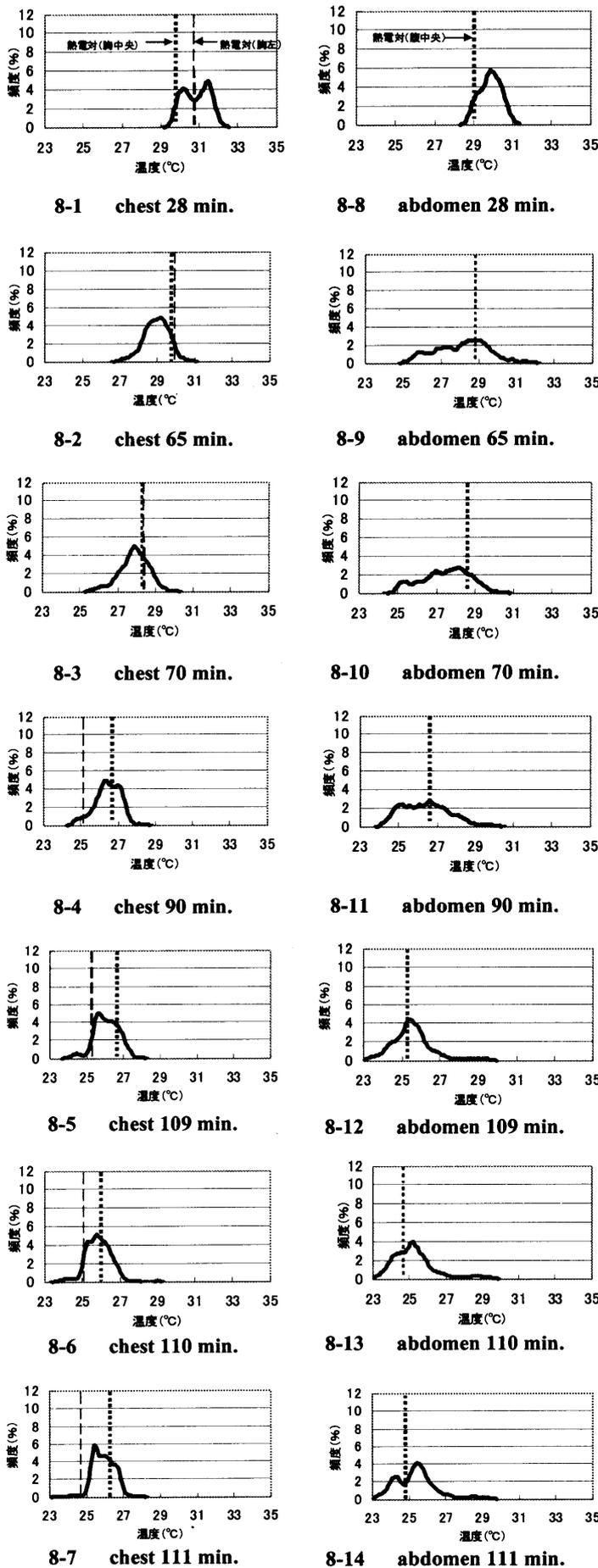


Fig.8 Clothing temperature distribution ; frequency distribution in chosen area (exp.1:with T-shirt)

きる。これにより熱電対で測定していた点の温度がその部位における温度分布の中でどこに位置するかを検討する。

腹における熱電対データは、発汗前に低い温度域に位置している。それが発汗後 70 分までは比較的高い温度域に位置し (図 8-9,8-10)、それ以降は比較的低い温度域に移行する。これは熱電対を取り付けた部位の着衣が、接触している状態から離れた状態に変化したためと考えられる。110 分前後で、分布上の位置は時間毎に約 0.5°C 変化しており (図 8-12~14)、身動き等によって着衣との距離が変動している影響と考えられる。

胸における 2 つの熱電対データは、発汗前に左が平均値付近、中央が低い温度域に位置している。それが発汗後には、中央が 110 分まで平均値近くで推移しているのに対し、左は 90 分以降低い温度域に位置している (図 8-5~7)。この時、胸左の着衣と皮膚が大きく離れた状態であったと考えられる。

5. まとめ

赤外線放射カメラおよび熱電対を用いて、皮膚表面および着衣表面の温度測定を行い、汗の蒸発過程における、皮膚温および着衣温分布の時間変化について検討した。

T シャツ無しの実験において汗が蒸発する過程では、汗の蓄積量の差による皮膚温度分布が生じることを示した。

T シャツを身に着けた実験においても、汗の分布による蒸発速度、さらに皮膚と着衣の接触状況の違いにより、広範囲な分布形状を生ずることを示した。また、熱電対で測定された点の温度情報がその部位の中でどこに位置するかを示し、その点における皮膚と着衣の接触状況を推定した。

また、多量の汗が蒸発する過程における皮膚温の測定に関わる問題点として、熱電対を取り付けるサージカルテープの影響を赤外線画像データとの比較により検討した。テープと皮膚の間に溜まる汗の挙動により、本来測定すべき皮膚温とは性質の異なるデータを得る場合があることを確認した。

本研究の一部は、文部省平成 12 年度科学研究費補助金 (奨励研究 (A) 12750528) の助成を受けた。

参考文献

- 1) 高田ら: 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答 (その 8,9), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.429-432, 2000.
- 2) 田村ら: クラスタ分析および主成分分析による皮膚温測定部位の選択, 家政誌, pp.862-870, 1984.
- 3) 中橋: 体型別差異による皮膚温分布に関する研究 (第 2 報), 家政誌, pp.697-705, 1979.
- 4) 渡辺ら: 22~34°C 環境温度条件下における成人女子の全身および体躯分別平均皮膚温の変動, 家政誌, pp.742-746, 1980.
- 5) R. Bowling Barnes: Thermography of the Human Body, Science, pp.870-877, 1963.
- 6) D. J. Watmough: The Thermal Scanning of a Curved Isothermal Surface: Implications for Clinical Thermography, Phys. Med. Biol., pp.1-8, 1970.