

暑熱曝露時の着衣を介しての蒸汗・発汗過程の推定に関する実験的研究

その1. 冬期における実験結果

岩崎 伸太郎^{*1}, 垣鏑 直^{*2}^{*1} 足利工業大学大学院修士課程, ^{*2} 足利工業大学教授・工博

**Experimental Study on dynamic change in sweating and evaporation
through clothing during hot Exposure
Part 1. Result of human experiment in winter**

Shintarou IWAZAKI^{*1}, Naoshi KAKITUBA^{*2},^{*1} Graduate Student, Graduate School of Eng., Ashikaga Institute of Technology
(g02304is@mail.ashitech.ac.jp)^{*2} Prof., Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng. (naoshi@ashitech.ac.jp)

ABSTRACT : In this study, human experiment was designed to observe dynamic change in sweating and evaporation through clothing during hot exposure. Four young male subjects were exposed to 40°C/50% for one hour following 28°C/50% for 30 min from late January, 2003 to late February. Subjects wore cotton T-shirt and half shorts. Electric resistances of clothing surface to estimate amount of water absorbed in clothing, clothing surface temperatures, evaporation rates from clothing surface, heat flow rates, sweating rates and skin temperatures at multiple points were continuously measured during exposure. In addition, body weight and rectal temperature were also measured. Upon heat exposure, increase in sweating rates, increase in amount of sweat absorbed in clothing, increase in evaporation from clothing surface, increase in heat gain to clothing surface and decrease in heat gain to the skin were observed.

1. 研究目的

人体と周辺環境との間の熱収支において、特に暑熱環境下では汗の蒸発による熱放散が重要になる。そのことに注目して、当研究室では裸体時での発汗反応やそれに伴う蒸汗量の時間変化などを実験的に検討してきた^{1), 2)}。

暑熱曝露時における着衣を介しての放熱過程は複雑であるが、曝露初期時から着衣層内気候が水蒸気で飽和されるまでを第1段階、発汗が皮膚面で蒸発できなくなり無効発汗となって着衣に吸収され、皮膚面から着衣面に蒸発面が移行するまでを第2段階、気温が皮膚温より低い場合は、着衣表面温度の低下により皮膚面と着衣表面の温度差が大となり、皮膚面では乾性放熱量、着衣面では湿性放熱量が増加するまでを第3段階と分類することができる。本研究は、これらのメカニズムを定量的に把握することを

目的に実験を行った。

2. 実験概要

実験は足利工業大学建築学科実験棟内の人工気候室にて平成15年1月下旬～2月下旬に行い、被験者は青年被験者4名を対象に行った。表1に被験者プロフィールを示す。室温の設定は、人工気候室の前室を温熱的中立な環境として28°C、主室を暑熱環境として40°Cに制御し、湿度は両室共に50%とした。また平均放射温度は室温と等しくなるようにし、周壁の内側をグレーのカーテンで囲んだ。また、気流は微風速域とした。図1に実験プロトコールについて示す。実験は生体リズムの影響を考え、すべての実験開始時刻を15時とした。被験者は前室にて30分間、椅座で曝露された後に主室への移動し、移動後は60分間、暑熱環境に椅座で曝露された。実験条件はパンツのみの裸体時と綿製のTシャツにハーフパ

パンツの着衣時の2条件とした。

心理反応として、全身温冷感を表2に示す7段階尺度で評価してもらい、実験中はオンラインで収録した。

裸体時と着衣時共に前額、上腕、胸、大腿、下腿での皮膚温、熱流量、発汗量を測定した。ただし、下腿の発汗量は測定しなかった。さらに代謝量、直腸温、体重減少量も測定した。裸体時では、前額、上腕、胸、大腿における皮膚面からの蒸汗量を測定し、着衣時では、上腕、胸、大腿の着衣面の蒸発量、着衣面の熱流量、着衣の表面温度、着衣内の温度、着衣内の湿度を測定した。ただし、上腕の着衣面の熱流量と大腿の着衣表面の温度を測定しなかった。

着衣面の温度分布はサーモカメラの画像から分析した。筆者らは概報³⁾にて電気抵抗値を測定することにより着衣の吸汗量を推定する方法について検討を行っており、今回も同様な方法により着衣への吸汗量の推定を行った。着衣表面の電気抵抗値はTシャツの場合は、胸、腹部、下腹部、背中、腰上部、腰下部、ハーフパンツの場合は下腹部、大腿、腰下部、大腿裏を測定した。

Table 1 subjects' physical characteristics

被験者名	年齢 [age]	身長 [cm]	体重 [kg]	体表面積 [m ²]	脂肪組織率 [N.D.]
A	23	167.1	69.2	1.76	0.36
B	22	175.7	66.7	1.8	0.36
C	22	177.0	70.5	1.85	0.37
D	22	168.0	85.7	1.93	0.43

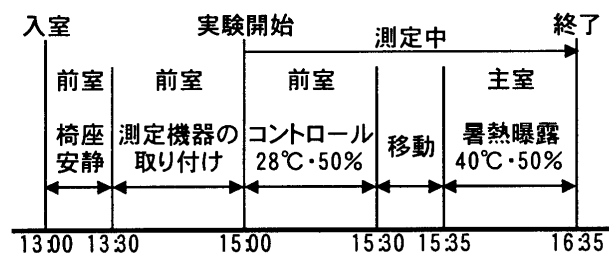


Fig.1 Experimental protocol

Table 2 Thermal Sensation Vote

全身温冷感
1. 暑い
2. 暖かい
3. やや暖かい
4. なんともない
5. やや涼しい
6. 涼しい
7. 寒い

3. 結果及び考察

3. 1 心理反応の結果

図2に全身温冷感の経時変化を示す。横軸は主室へ移動した時刻をゼロとした。前室においては両条件共に「なんともない」に近い申告を得られ、主室への移動開始から2～3分後に「暑い」に変化した。着衣時においては、主室移動後は温冷感の変化はあまり見られなかったが、裸体時においては、主室移動後30分ぐらいから「暑い」から「なんともない」の方に申告が変化する傾向を確かめた。

図3に曝露中の平均皮膚温と直腸温の経時変化を示しているが、裸体時と着衣時では有意な差は認められなかったことから、裸体時の曝露後半で温熱的中立側へ移行した理由は不明である。

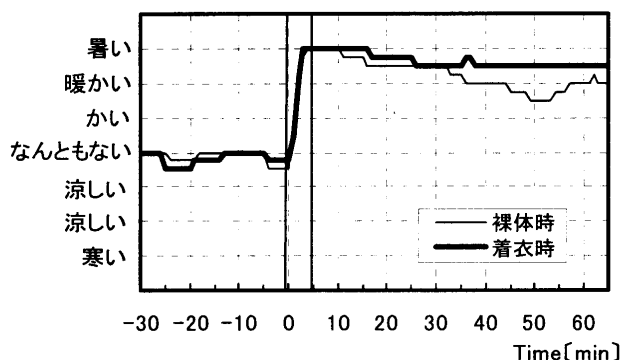


Fig.2 Change in Thermal Sensation

3. 2 生理反応の結果

図3に平均皮膚温 (T_{sk}) と直腸温 (T_{rec}) の経時変化を示す。部位別の皮膚温では、裸体時は前額が最も高く、下腿が最も低く、着衣時は胸が最も高く、下腿が最も低かった。暑熱曝露後は全ての部位で皮膚温の上昇が始まり、時間が経過と共に部位間の温度差がなくなった。直腸温は、事前観測時から着衣時で高かったが、暑熱曝露後は着衣条件に関わらず上昇していることを確かめた。これらの結果から、熱ストレスに関しては、着衣時と裸体時にあまり差がないことを確かめた。

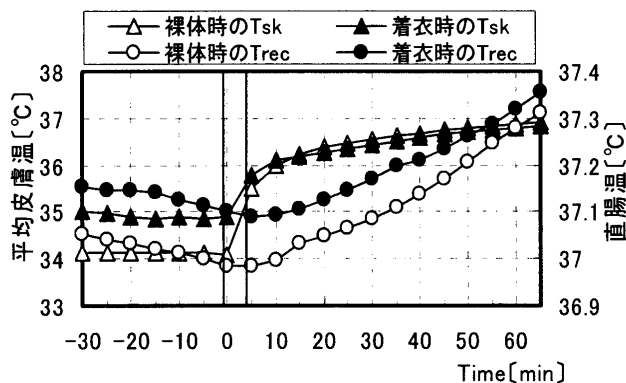


Fig.3 Change in mean skin temperature and rectal temperature

各部位の皮膚面の受熱量は裸体時と着衣時共に前額が最も大きく、下腿が最も小さかった。暑熱曝露開始後には、すべての部位の熱流量は負の値（受熱量）となり、裸体時、着衣時共に下腿が最も小さく、上腕が最も値が大きかった。また、曝露後の胸と上腕では、裸体時に比べると着衣時の方が低下量は少なかった。また、代謝量は着衣時よりも裸体時の方がやや大きかったが、暑熱曝露後の変化は少なかった。体重は暑熱曝露中継続的に減少したが、裸体時と着衣時で差は見られなかった。

図4に裸体時の発汗量、図5に着衣時の発汗量を示す。各部位の発汗量は、暑熱曝露開始後すべての部位で上昇し、潜時に差は見られなかった。また、裸体時では前額の発汗量が最も大きく、上腕が最も少なかった。着衣時は、裸体時と同様に前額が最も大きく、上腕が最も低い値となった。

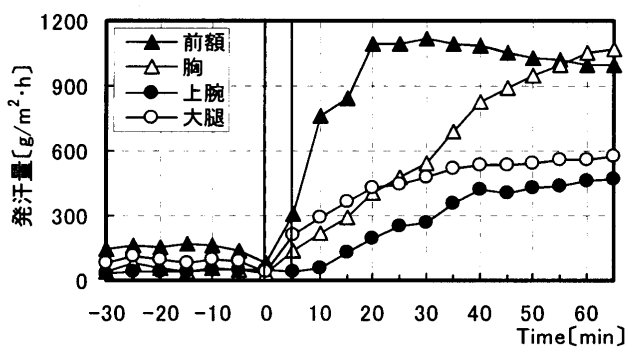


Fig.4 Change in sweating rates of nude subjects

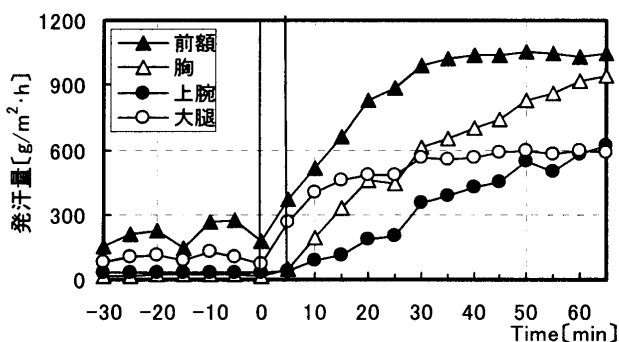


Fig.5 Change in sweating rates of clothed subjects

3. 3 着衣時の放熱過程

結果の一例として、図6に大腿部の発汗量と皮膚温と着衣内の湿度との経時変化を示す。発汗量は主室に移動開始直後から上昇が始まり、15分後には緩やかな上昇を示し、その後は変化が見られなくなった。皮膚温は暑熱曝露開始後から急な上昇が始まり、

その後は発汗量と同様に漸近的な上昇が見られた。また、着衣内の湿度は暑熱曝露開始から急激に上昇した。その後は緩やかな上昇の後に安定した。よって、軽装の場合、暑熱曝露から数分で着衣層内気候は水蒸気で飽和されることを確かめた。

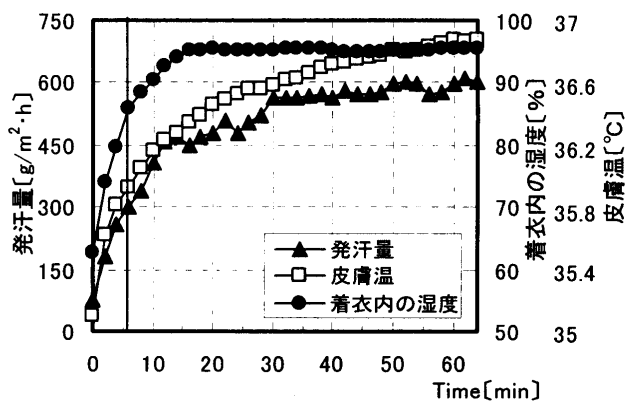


Fig.6 Change in humidity in clothing microclimate, skin temperature and sweating rate at thigh

図7に大腿部の発汗量と皮膚温と吸汗量の経時変化を示す。吸汗量は移動開始時から急激に上昇し、その後は漸近しながら安定する変化を示した。発汗量との経時変化を比較すると、変動のパターンが近似していることから、発汗量の発現後、時間遅れなく汗が着衣に吸収されたことがわかる。

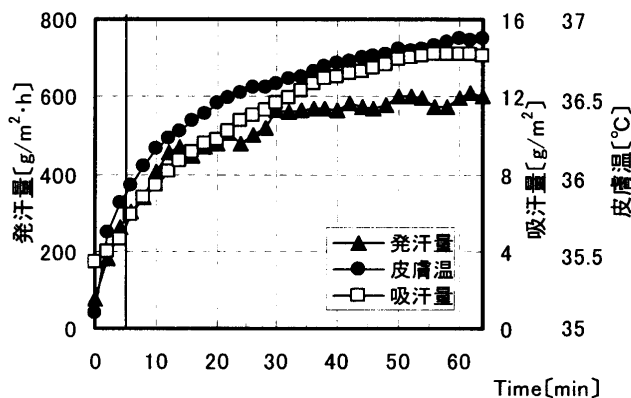


Fig.7 Change in amount of sweat absorbed in clothing, skin temperature and sweating rate at thigh

図8に大腿部の吸汗量と着衣面の蒸発量の経時変化を示す。着衣面の蒸発量は暑熱曝露開始から8分後に上昇が始まり、35分後から漸近的に変化していることを確かめた。吸汗量と比較すると吸汗量の増加の約10分後に着衣面の蒸発量の上昇が見られたことから、軽装の場合、着衣に吸収された汗が着衣面から蒸発するまで10分前後の時間遅れがあるこ

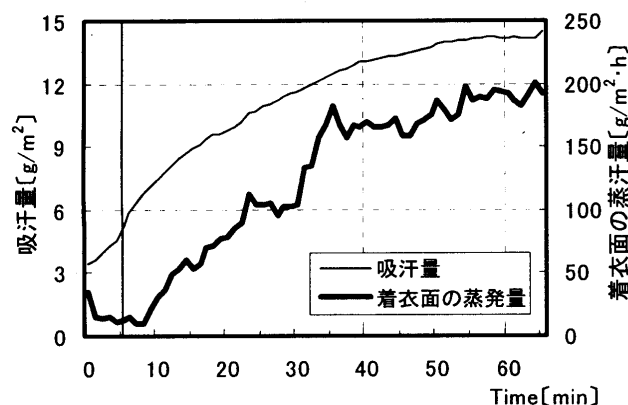


Fig.8 Change in evaporation rate from clothing surface and amount of sweat absorbed in clothing at thigh

とを確かめた。図9に大腿部の着衣面の蒸発量と着衣面の受熱量の経時変化を示す。受熱量は暑熱曝露開始後の変化は著しいが、曝露開始14分後から緩やかに大きくなる傾向が見られた。曝露開始14分後の着衣面からの蒸発量と受熱量の変化に注目すると、蒸発量の上昇と共に受熱量が大きくなる傾向が見られる。着衣面からの蒸発潜熱により、着衣の表面温度が低下したため着衣表面温と気温の差が大きくなり、結果的に受熱量が大きくなったと推測される。着衣面からの蒸発量の増加に伴い、着衣面の受熱量は5分前後遅れて増加する現象を確かめた。

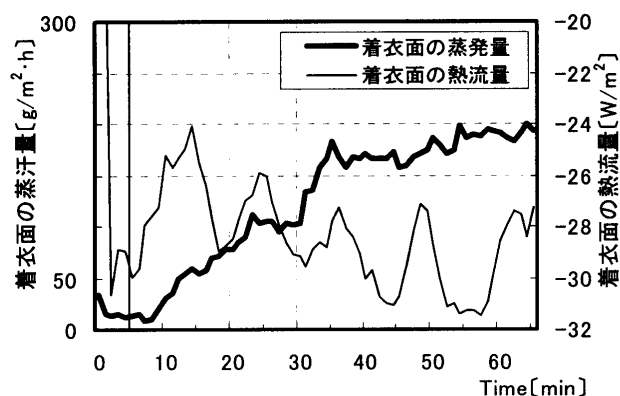


Fig.9 Change in dry heat loss from clothing and evaporation rate from clothing surface at thigh

図10に大腿部の着衣面の熱流量と皮膚面の熱流量の経時変化を示す。皮膚面の受熱量は着衣面の受熱量と同様に暑熱曝露開始後は不安定となるが、曝露25分後には安定し、緩やかに低下した。着衣面と皮膚面からの受熱量を比較すると、着衣面からの受熱量が増加することにより、皮膚面からの受熱量は低下することを確かめた。これは着衣表面温の低下

により皮膚温と着衣表面温の差が小さくなり、結果的に皮膚面の受熱量が低下したと推定できる。着衣面の受熱量が増加してから約10分遅れて皮膚面の受熱量が低下する現象を確かめた。

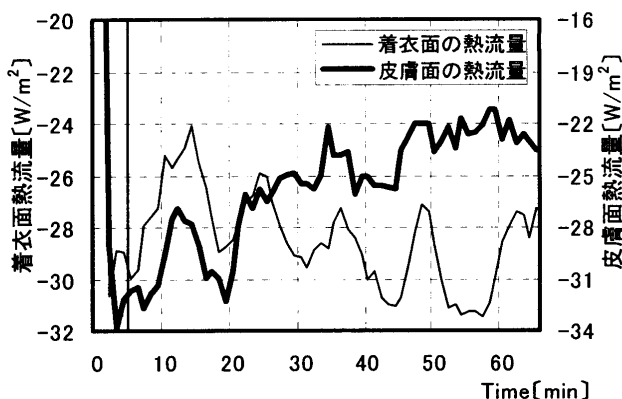


Fig.10 Change in heat flow from skin surface and that from clothing surface at thigh

4. まとめ

暑熱曝露した時の着衣を介しての放熱過程を定量的に評価した。その結果を以下に列挙する。

- 1) 暑熱曝露の約10分後には着衣内気候は水蒸気で飽和した。
- 2) 発汗は時間遅れなく着衣に吸汗された。
- 3) 着衣に吸収された汗は、約10分前後の時間遅れで着衣面から蒸発した。
- 4) 着衣面の受流量は、着衣面からの蒸発量の増加が発現した約5分後に増加した。
- 5) 皮膚面の受熱量は、着衣面の受熱量の増加が始まってから約10分遅れで低下する現象を確認した。

謝辞

実験に協力して頂いた被験者に深謝致します。また、本研究は科研費（基盤研究B#14350310）の助成を受けたことを明記する。

《参考文献》

- 1) 垣内直他:局所蒸汗量と局所発汗量の同時測定と局所蒸発熱伝達率算出法,日本建築学会計画系論文報告集,第464号: pp. 65-70, 1994
- 2) 岡村篤信他:暑熱曝露時の蒸汗・発汗反応の季節差に関する実験的研究 日本建築学会大会梗概集, D-1, pp.773-774, 2002
- 3) 岩崎伸太郎他:着衣の吸汗量の推定に関する実験的研究,日本建築学会大会梗概集, D-2, pp.465-466, 2003