

人体熱モデルへの適用を目指した湿度変化に伴う発汗計測

勝田 駿平, 島崎 康弘, 野津 滋
岡山県立大学情報工学部人間情報工学科

Sweating Responses with Humidity Changes for Applications to Human Energy Balance Models

Shunpei KATSUTA, Yasuhiro SHIMAZAKI, Shigeru NOZU

Department of Human Information Engineering, Okayama Prefectural University.

Abstract: Subject experiments were conducted in order to understand sweating responses with humidity changes and to examine accuracy of the existing thermal comfort index. The focuses were on sweating characteristics and latent heat loss variations during two kinds of activity levels under moderate and high humidity conditions. Sweat rate tended to increase as humidity levels increased. Sweat rate at distal region tended to increase as activity levels increased. Temporal changes of human thermal load disagreed with psychological responses. Consequently, it was suggested that modification of ASHRAE's latent heat loss model would be necessary.

Key words: High humidity condition, Sweat rate, Latent heat loss, Regional effect, Psychological response

要旨: 湿度変化に対する発汗応答の把握および既存の温熱快適指標の精度検証を目的とした被験者実験を行った。異なる湿度環境下において2種類の運動強度における発汗特性および潜熱損失量に着目した。結果として、湿度上昇に伴い発汗量が増加する、運動強度が上がると身体四肢部の発汗量が増加する、ということが分かった。また、高湿度環境下において心理申告で得られた温熱的不快感と人体熱負荷量の不一致により、発汗蒸発に伴う潜熱損失量算出式の改良を要することが示唆された。

キーワード: 高湿度環境, 発汗量, 潜熱損失, 部位差, 心理応答

1. はじめに

発汗による冷却機能は人体の体温調節において重要である。しかし、高湿度環境下では汗の蒸発が抑制され、体温調節が困難になることが知られている(丹羽ら, 1978)。このように、湿度状況により人体温熱状態に及ぼす影響は異なる。Tsutsumi et al.(2006)は、被験者実験結果より、湿度変化による温熱快適感の変化を確認し、この理由として発汗量の変化を挙げている。持田ら(2008)は、被験者実験結果より、高温環境において温冷感に与える湿度の影響は高～中湿度域では大きく、中～低湿度域では小さいことや、等温感時のぬれ面積率と水蒸気圧の関係を報告している。

上記の研究では、発汗の部位差やタイミング、人体熱収支に及ぼす湿度の影響に関する報告はない。その上、人体に湿度感受器は存在しないとされ、湿度に対する影響を温熱的に捉える方法が未確立である。本研究では、湿度変化に伴う発汗量が人体温熱状態へ及ぼす影響を明らかにするため、異なる湿度環境下での発汗応答および潜熱損失量に関する調査を行い、人体熱モデルへの適用可能性および改良方法を検討する。

これらの結果を、設計段階での衣服やその周辺環境の快適性評価を可能とするための一助とする。

2. 方法

2.1 発汗の評価方法

発汗計測に関して、実験前後の体重減少量から総発汗量を算出する方法が多く用いられている。一方で、皮膚温や温熱刺激感受性(島崎ら, 2012)および汗腺数の部位差は報告されているため(菅屋ら, 1981)、本実験では身体装着型発汗計により局所発汗量と発汗のタイミングを計測する。発汗量は皮膚表面とセンサ内の湿度差を水分量に換算して求める。発汗計に用いる湿度センサ(Sensirion SHT21)は小型かつ高性能であり($\pm 2\%$ R.H. accuracy)、また反応時定数は8秒である。

人体熱収支(人体熱負荷)に関して、人体の温熱状態を知る重要な指標であり、環境情報だけでなく様々な生理量・熱物性などを考慮して以下の式(1)で表現される(島崎ら, 2009)。

$$F_{\text{load}} = M - W + R_{\text{net}} - C - E \quad (1)$$

ここで、 F_{load} は人体熱負荷量、 M は代謝量、 W は機械的仕事量、 R_{net} は正味ふく射量、 C は顕熱損失量、 E は潜熱損失量を表し、単位は全て $[W/m^2]$ である。

人体からの潜熱損失量 E は発汗蒸発熱 E_{sk} 、不感蒸泄熱 E_{diff} 、呼吸蒸発熱 E_{res} の和として表している。なお、不感蒸泄とは発汗とは異なる汗腺から分泌される人間の感知できない程度の発汗のことをいう。発汗蒸発熱はASHRAE(ASHRAE, 2013)に基づき、血流モデルを用いて深部温と平均皮膚温から発汗量を算出している。呼吸蒸発熱および不感蒸泄熱は人体周囲の気温での飽和水蒸気圧 P_{sk}^* [Pa]、および蒸気圧 P_{air} [Pa]を用いて算出した。また、不感蒸泄はBrebner et al.(1956)のデータに基づき最大発汗量の6%として取り扱っている。

以下に算出式を示す。

$$E = E_{sk} + E_{diff} + E_{res} \quad (2)$$

$$E_{sk} = l(T_b - T_{b,set}) \exp((T_{sk} - T_{sk,set})/10.7) \quad (3)$$

$$E_{diff} = 0.06 E_{max} \quad (4)$$

$$E_{res} = 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_{air}) \quad (5)$$

$$E_{max} = 16.5 h_c (P_{sk}^* - P_{air}) \quad (6)$$

ここで、 l は蒸発潜熱 $[J/kg]$ 、 T_b は血流温度 $[K]$ 、温度 T の添え字setはその閾値、16.5 はLewis係数 $[N.D.]$ 、 h_c は対流熱伝達率 $[W/m^2/K]$ である。

2.2 実験

湿度変化に伴う発汗応答および潜熱損失量の変動を把握するため、温湿度が制御可能な人工気象室にて被験者実験を行った。なお、被験者は健康な20代の男子大学生8名とし、代謝による影響をなくするため、食後2時間以上空けて実験を行った。着衣条件は、半袖半裾のコンプレッションウェアで統一し、これら着衣による熱抵抗値は0.3 cloであった。環境条件は、気温30℃、湿度50%および80%の2条件とした。身体活動状態を立位安静および歩行(=4 km/h)とした。実験手順として実験開始15分前から被験者は測定場所に滞在し、センサ類の装着を行なった後の30分を実験時間とした。

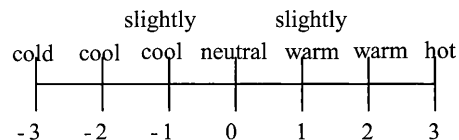
2.3 測定項目

環境情報として、気温および湿度(T&D TR-73U)、風速(Young CYG-81000)、短波放射量および長波放射量(EKO MR-60)を測定した。人体生理情報として、皮膚温はHardy-Dubois et al.(1938)の平均皮膚温算出法にならない、前額、上腕、腹、手甲、大腿、下腿、足甲の7点を、深部温として耳内温をそれぞれサーミスタ(日機装サーモ N542)で測定した。また、皮膚温測定と同様の7点の発汗量(Rousette Strategy SNT-200)を測定した。

代謝量は、呼吸代謝モニタリングシステム(S&ME VO2000)により酸素摂取量および二酸化炭素排出量を測定し、代謝量を算出した。心理情報として、温冷感(-3: 寒い~暑い: 3)、快適感(-2: 快適~不快: 2)、をASHRAEの指標(ASHRAE, 2013)に基づき、線型スケールに変換して測定した。Fig.1に申告書を示す。

なお、環境および生理情報は1分毎に、心理情報は2分毎に記録した。

[Thermal sensation]



[Thermal comfort]

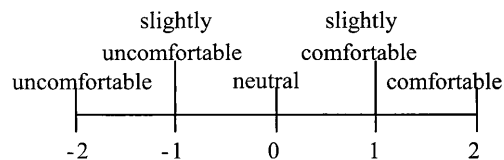
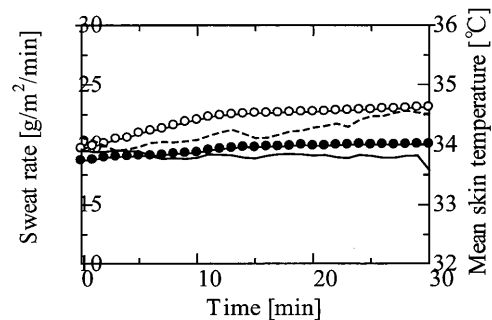


Fig.1 Questionnaires for thermal sensation and thermal comfort

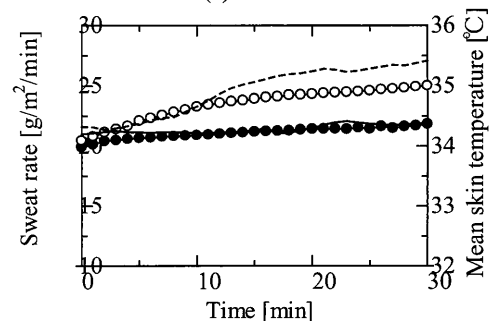
3. 結果・考察

3.1 発汗量と平均皮膚温

発汗量と平均皮膚温の経時変化をFig.2に示す。なお、



(a) 50% R.H.



(b) 80% R.H.

●—Sweat rate (standing) —●—Mean skin temperature (standing)
○—Sweat rate (walking) —○—Mean skin temperature (walking)

Fig.2 Temporal changes in sweat rate and mean skin temperature under (a) moderate and (b) high humidity conditions

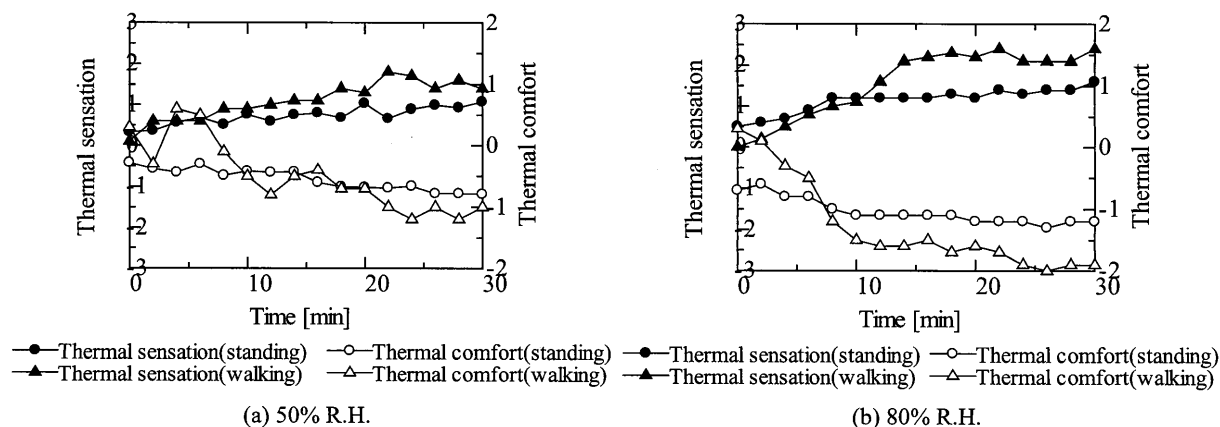


Fig.3 Temporal changes in thermal sensation and thermal comfort under (a) moderate and (b) high humidity conditions

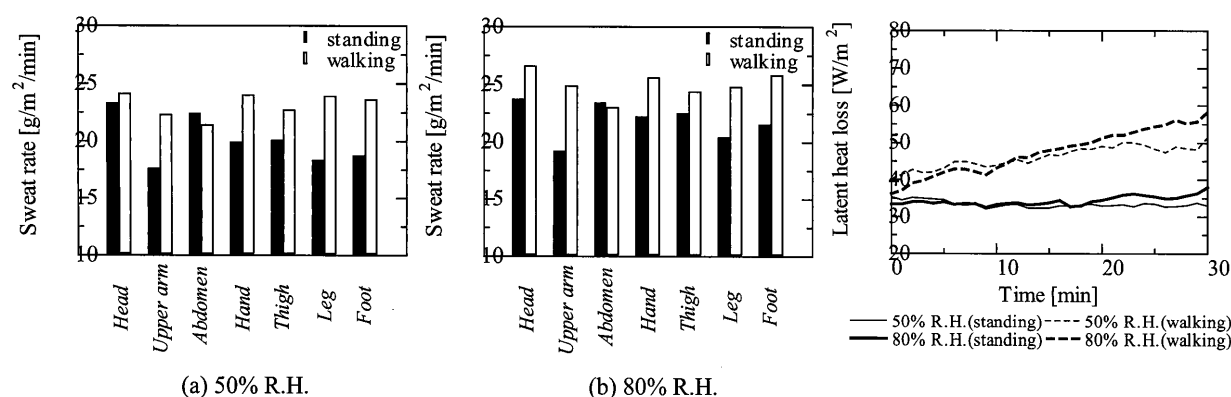


Fig.4 Sweat rate distributions under (a) moderate and (b) high humidity conditions

Fig.5 Temporal changes in latent heat loss under moderate and high humidity conditions

発汗量は測定箇所7部位の平均値とした。

立位安静時には両湿度環境下とも発汗量と平均皮膚温は若干増加した。これは、日射による受熱および代謝量増加による産熱がないため、体温を一定に保つための発汗による放熱を促す必要がなかったためである。一方、歩行時には両湿度環境下とも発汗量と平均皮膚温ともに増加し、特に湿度80%環境下では、平均皮膚温の増加が顕著にみられた。これは、高湿度環境下では汗の蒸発速度が低下することで放熱が妨げられ、皮膚温上昇と共に発汗が促進したためである。

3.2 心理申告

温冷感、快適感の経時変化を Fig.3 に示す。

両湿度環境下とも、時間経過と共に温冷感は増加し、快適感は減少した。気温 30℃一定であっても、湿度80%環境下では温冷感はより「暑い」へ、快適感はより「不快」へと近づき、温熱的不快感を申告している。また、実験開始10分間における快適感を身体活動状態別に着目すると、立位安静時よりも歩行時の方がより「快適」であると申告している。これは、10分以降歩行時の快適感が下回るものの、立位安静から歩行へと切り替わる際に生じる、姿勢変化に伴う対流による放熱の増加が原因であると考えられる。

3.3 発汗部位差

発汗量の部位差を Fig.4 に示す。なお、各部位の発汗量は実験30分の平均値とした。

湿度条件の違いに関して、高湿度環境下では計測箇所全ての発汗量が多かった。また、身体活動状態の違いに関して、腹部のみ立位安静時よりも歩行時の発汗量が低い値をとっている。その上、立位安静時での発汗量は前額、腹が多く、上腕、下腿が少なかったのに対し、歩行時では、手甲、下腿、足甲が多く、腹が少なかった。これは Takano et al.(1996)の結果と一致する。歩行時における各部位の動作の違いとして、四肢部は常に上下、前後と動くのに対し、躯幹部の腹は動きが小さく対流による影響が四肢部よりも小さい。

よって、人体動作が身体各部位に及ぼす対流伝達率および蒸発熱伝達率に及ぼす影響についての調査を要することが示唆された。

3.4 潜熱損失量 E

潜熱損失量の経時変化を Fig.5 に示す。身体活動状態別に比較すると、立位安静時よりも歩行時の方が潜熱損失量の値は大きく、放熱を促していることがわかる。しかし、湿度環境別に比較すると、両身体活動状態とも同程度の損失量であった。このことは、高湿度環境

下では潜熱損失量が減少することで人体熱負荷が増加するという原理と、3.2 節で述べた温熱的不快感の増加に追従できていない事を意味する。また、潜熱損失量の内訳について、高湿度環境下では不感蒸泄熱と呼吸蒸発熱は減少したのに対し、発汗蒸発熱のみ増加した。ASHRAE のモデルでは、発汗蒸発熱は皮膚温の指数関数となっており、皮膚温変化に依存して決定され湿度環境に依存しない。また、実験中に無効発汗が生じていることが目視で確認されており、既存の算出式は発汗蒸発に対する無効発汗(蒸発効率)が適切に考慮されていないと考えられる。したがって、発汗蒸発熱算出式の改良を要することが示唆された。

3.5 発汗蒸発熱 E_{sk} の改良方針の検討

Fig.3 と Fig.5 より、高湿度環境下において温熱的不快感を申告しているのに対し、人体熱負荷値に組み込まれる潜熱損失量が湿度条件の違いに追従していない。これは、潜熱損失量に含まれる発汗蒸発熱の算出に、深部温および皮膚温変化が支配的要素として与えられていることが原因である。無効発汗を考慮するためには、人種や生活環境による汗腺数および中立温度(温冷感申告が中立時の温度)の違いについて論ずるよりも、大気中および皮膚表面の水分量(絶対湿度)勾配などの蒸発効率に関与する変数を直接的に式に組み込むことが重要であると考えられる。したがって、蒸汗による放熱メカニズムをより詳細に検討し、湿度変化に対応するモデルの改良に取り組む。

4. 結論

本研究は、湿度変化に対する発汗応答の把握および既存の温熱快適性指標の適用性の検証を目的とした被験者実験を行った。環境条件を気温 30 °C一定、湿度 50%、80%の2条件を設定し、それぞれの環境下における身体活動状態を立位安静と歩行の2条件とした。

以下に総括を記す。

- 1) 運動強度が上がると、両湿度環境下とも発汗量と平均皮膚温が増加した。特に高湿度環境下では、発汗蒸発による放熱が抑制され平均皮膚温の増加が顕著にみられた。
- 2) 湿度および運動強度が上がると、温冷感が増加し、快適感が減少した。そのことより温熱的不快感が高くなることが示された。しかし、歩行開始時のみ立位安静時よりも温熱的不快感が低かった。
- 3) 発汗の部位差として、運動強度があがると前額、腹といった軀幹部よりも上腕、手甲、下腿、足甲といった四肢部の発汗量が著しく増加した。
- 4) 運動強度が上がると、潜熱損失量は増加したが、湿度の違いによる変動はみられなかった。
- 5) ASHRAE モデルに基づく潜熱損失量と心理申告の関

係を示し、発汗蒸発熱算出式の改良方針について検討した。

謝辞 この研究を進めるにあたり、被験者として協力いただいた岡山県立大学の学生に感謝の意を示す。

5. 文献

- 丹羽健市, 中山昭雄 1978. 高湿度環境における運動時の体温調節. 体力科学. 1(27):11/18.
- Tsutsumi, H., Tanabe, S., Harigaya, J., Iguchi, Y. and Nakamura, G. 2007. Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment. Building and Environment. 42(12):4034/4042.
- 持田徹, Berglund, L.G., 堅田兼史, 佐古井智紀, 長野克則, 嶋倉一實, 吉野博 1999. 暑暖領域における温熱感に及ぼす湿度の影響. 空気調和・衛生工学会論文集. (72):67/74.
- 島崎康弘, 吉田篤正, 佐藤正一郎, 森田武志 2012. 接触熱刺激による局所冷却が温冷感に与える影響. Thermal Science and Engineering. 20(40):61/67.
- 菅屋潤壺, 小川徳雄, 朝山正巳, 宮側敏明 1981. 温熱性発汗発現の部位差と発汗能との関係. 日本生気象学会誌. 18(2):72/79.
- 島崎康弘, 吉田篤正, 木下進一 2009. 人体熱負荷量に基づく温熱快適性指標の提案. 日本冷凍空調学会論文集. 1(26):113/120.
- ASHRAE 2013. ASHRAE Handbook -Fundamentals-, ASHRAE.
- Brebner, D.F., Kerslake, M.D. and Waddell, J.L. 1956. The diffusion of water vapor through human skin. Journal of Physiology. (132):225/231.
- Hardy, J.D. and Dubois, E.F. 1938. The technique of measuring of radiation and convection. Journal of Nutrition. (15):461/475.
- Takano, S., Kondo, N., Shibasaki, M., Aoki, K., Inoue, Y. and Iwata, A. 1996. The Influence of Work Loads on Regional Differences in Sweating Rates. Japanese Journal of Physiology. (46):183/186.
- <連絡先>**
 勝田駿平
 〒719-1197 岡山県総社市窪木 111
 岡山県立大学情報工学部人間情報工学科
 c324014b@ss.oka-pu.ac.jp