

2023 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：室内環境

研究期間：2023 年度

課題番号：23232009

研究課題名（和文）：発汗サーマルマネキンを用いた部位別の蒸発熱伝達率の測定

研究課題名（英文）：Measurement of evaporative heat transfer coefficients for individual human body segments using a sweating thermal manikin

研究代表者：森上伸也

交付決定額（当該年度）：250,000 円

※ページ数の制限はありません。

※成果等の説明に図表を使用していただいて構いません。（カラーも可）

※提出して頂いた成果報告書をホームページでの公開を予定しております。

1. 研究の目的

夏季の通風環境における温熱快適性を検討するためには、発汗および蒸発の影響を無視できない。一般的な人体温熱生理モデルにおける蒸発熱伝達率は、ルイスの関係を利用して対流熱伝達率から算出する。2021 年度から 2022 年度までの先行研究では人体正面からの風向角において立位および椅子座位における蒸発熱伝達率の測定を行ってきた。住空間や屋外などの実際の空間では、人体は様々な風向角に曝露される。

そこで本研究では、発汗サーマルマネキンを用いて人体側方および後方からの風向角における立位の蒸発熱伝達率を測定することを目的とする。

2. 研究の方法

2.1 実験条件

各部位の蒸発熱伝達率を測定するために通風型人工気候室と発汗サーマルマネキンを用いた実験を行った。表 1 に実験条件を示す。実験は発汗の有無による **Wet** と **Dry** の 2 条件を行った。蒸発によって低下する模擬皮膚温が気温よりも低くならないようにするため、**Wet** 条件の気温は 26℃とし、マネキン表面温度は 33℃とした。また、模擬皮膚温を熱電対で直接測定し、測定値を **Dry** 条件のマネキン皮膚温に設定した。これは **Wet** 条件で発汗によって低下する模擬皮膚温における対流と放射による熱伝達量を測定するためである。風速は 0.1m/s、0.5m/s および 1.0m/s の一定風とした。発汗量は模擬皮膚が十分に飽和するよう 1 時間あたり 500ml/m² とした。放射温度は成り行きとした。相対湿度は 60%とした。発汗サーマルマネキンの姿勢は立位とし、着衣は模擬皮膚のみとした。**Dry** 条件で測定した対流と放射による熱伝達量の測定結果を **Wet** 条件で測定した発熱量から差し引くことで、蒸発による熱伝達量を算出した。

表 1 実験条件

項目	Wet	Dry
気温 T _a [°C]	26	
壁面温度[°C]	26	
相対湿度[%]	60	
風速[m/s]	0.1, 0.5, 1.0 (180° は0.1と0.5のみ)	
マネキン表面温度[°C]	33	Wetの模擬皮膚温測定値
発汗量[ml/m ² ・h]	500	0
着衣	模擬皮膚	なし
風向角	180°（人体背面）, 270°（人体左側方）	

図 1 に風向角の設定と実験の様子を示す。風向角は人体正面にあたる風を 0° として本研究では背面からあたる風の 180° および左側方からあたる風の 270° の 2 種類で測定した。

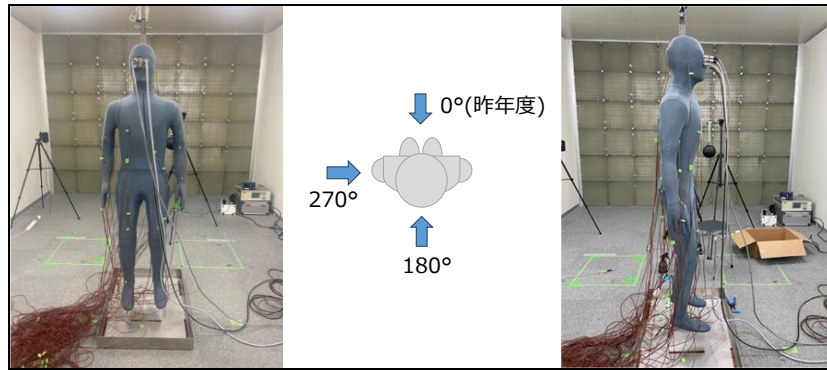


図 1 風向角の設定と実験の様子

2.2 測定機器と測定点

室内温湿度は小型温湿度計(おんどり)を用いて 1 分間隔で測定した。グローブ温度はグローブ球と T 型熱電対を用いて 1 分間隔で測定した。風速は超音波風速計を用いて 1 分間隔で測定した。図 2 にマネキン表面付近の熱回路を、表 2 に記号の説明を示す。Wet 条件の場合、模擬皮膚温は汗の蒸発によって発汗サーマルマネキン表面温度の設定値よりも低下するため、マネキンの 20 部位に熱電対を縫い付けて模擬皮膚温を 1 分間隔で測定した。熱電対は 1 部位あたり 2 点で計 40 点とした。蒸発熱伝達量は上述の通り、Wet 条件の総放熱量 Q_w から Dry 条件の総放熱量 Q_d を差し引くことで算定した。図 2 に測定点を示す。室内温湿度計、グローブ温度計および風速計を発汗サーマルマネキンから 1500mm 前方、床上高さ 1100mm に配置して測定した。

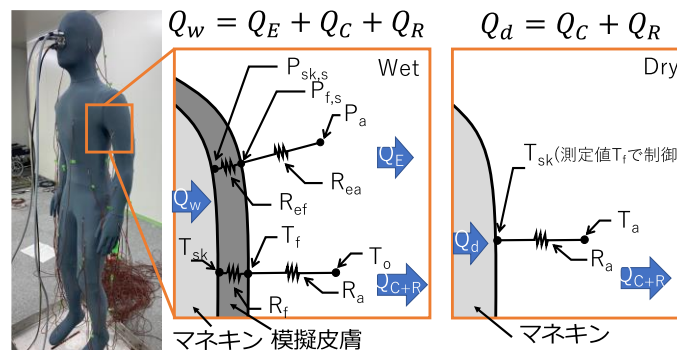


図 2 マネキン表面付近の熱回路

表 2 記号の説明

α_c	対流熱伝達率	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$	Q_r	放射熱伝達量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
α_e	蒸発熱伝達率	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{kPa}]$	Q_w	Wet条件の総放熱量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
P_a	周囲空気の水蒸気圧	$[\text{kPa}]$	R_a	空気の顕熱抵抗	$[\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}]$
$P_{f,s}$	Tfの飽和水蒸気圧	$[\text{kPa}]$	R_{ea}	空気の潜熱抵抗	$[\text{m}^2 \cdot \text{kPa}/\text{W}]$
$P_{sk,s}$	Tskの飽和水蒸気圧	$[\text{kPa}]$	R_f	模擬皮膚の熱抵抗	$[\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}]$
Q_c	対流熱伝達量	$[\text{W}/\text{m}^2]$	T_f	模擬皮膚温	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
Q_d	Dry条件の総放熱量	$[\text{W}/\text{m}^2]$	T_o	作用温度	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
Q_e	蒸発熱伝達量	$[\text{W}/\text{m}^2]$	T_{sk}	マネキン表面温度	$[\text{ }^\circ\text{C}]$

3. 研究成果

3.1 部位別の模擬皮膚温

図3に風向角 270° における Wet 条件の模擬皮膚温の測定結果を示す。R. Upper Arm および R. Hand は装置の故障で発汗が停止していたため除外した。風速が速くなるほど模擬皮膚温が低くなる傾向を示した。また風速 1.0m/s の条件では部位ごとの差が大きくなり、左半身の部位が右半身に比べて模擬皮膚温が低くなる傾向を示した。

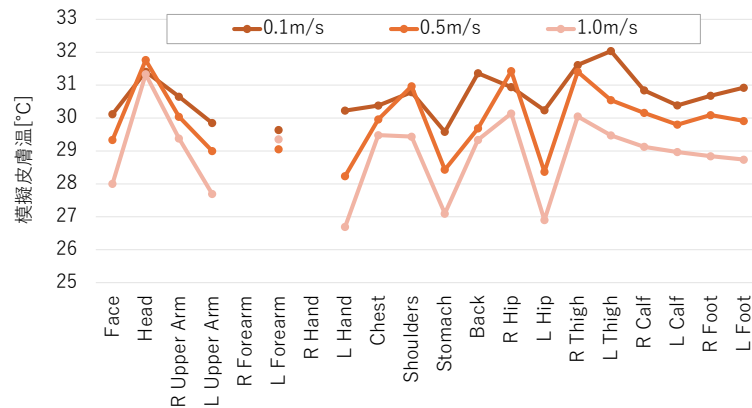


図2 風向角 270 度° における Wet 条件の模擬皮膚温

3.2 部位別の熱伝達量

風向角 270° における Wet 条件の総放熱量を図4に示す。総放熱量は風速が速くなるほど増加する傾向を示した。風向角 270° における部位別の顕熱伝達量を図5に示す。顕熱伝達量は風速によらず同様の傾向を示した。これは風速の速い条件では蒸発による熱伝達量が増加することで、皮膚温と気温の差が小さくなったためであると考えられる。

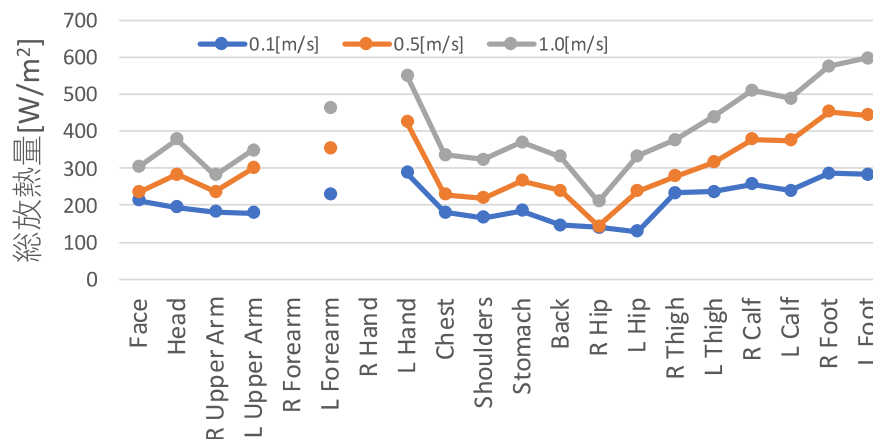


図4 風向角 270° における Wet 条件の総放熱量

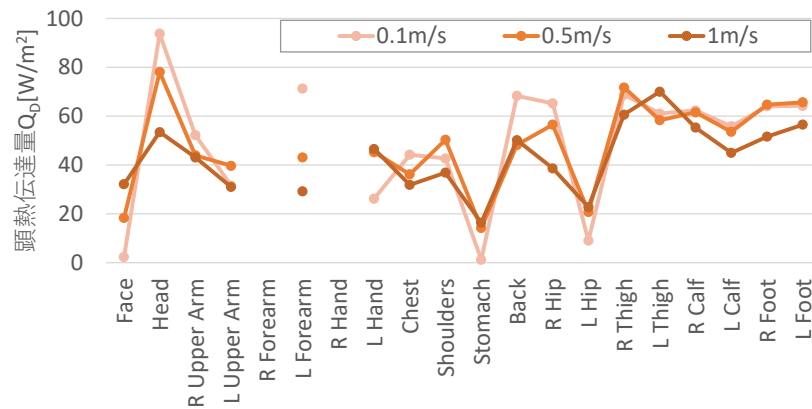


図5 風向角 270° における部位別の顕熱伝達量

図6に風向角 270° の部位別の蒸発熱伝達量を示す。蒸発熱伝達量は風速が速くなるほど増加する傾向を示した。また、Hand や Foot などの四肢における蒸発熱伝達量が増加する傾向を示した。風上にあたる左半身の蒸発熱伝達量は右半身よりも高くなる傾向を示した。

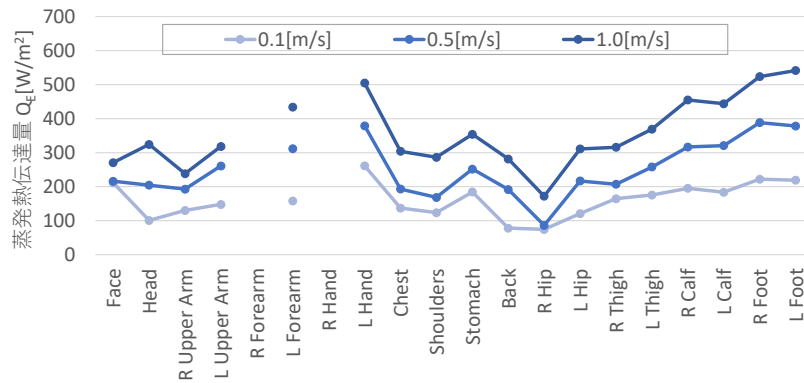


図6 風向角 270° の部位別の蒸発熱伝達量

3.3 部位別の蒸発熱伝達率

風向角 270° の部位別の蒸発熱伝達率を図7に示す。Hand や Foot は他の部位に比べて高い傾向を示した。また、風向角が 270° の場合、蒸発熱伝達率は左側の部位のほうが右半身に比べて増加傾向であった。図8に風向角ごとの蒸発熱伝達率を示す。0° のデータは先行研究の結果である。L. Upper Arm の蒸発熱伝達率は風向角 270° で 1.0 m/s の場合が最も高い値を示した。

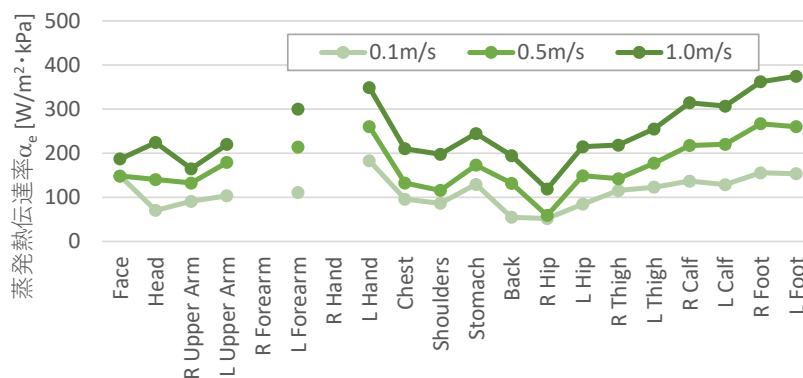
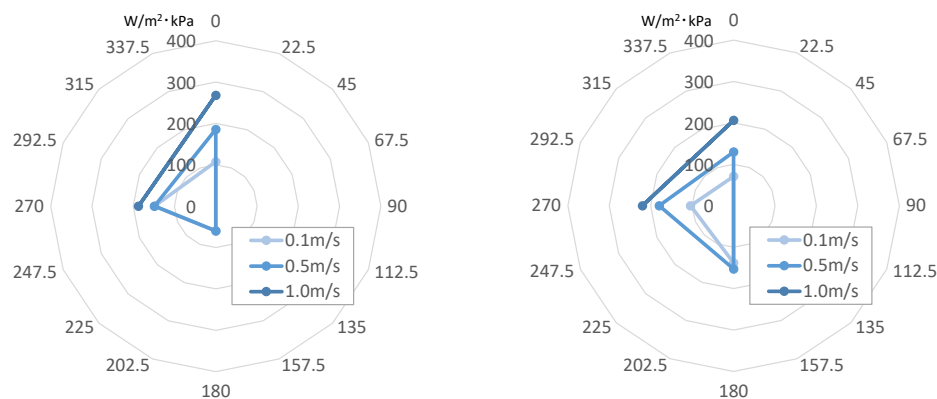


図7 風向角 270° の部位別の蒸発熱伝達率



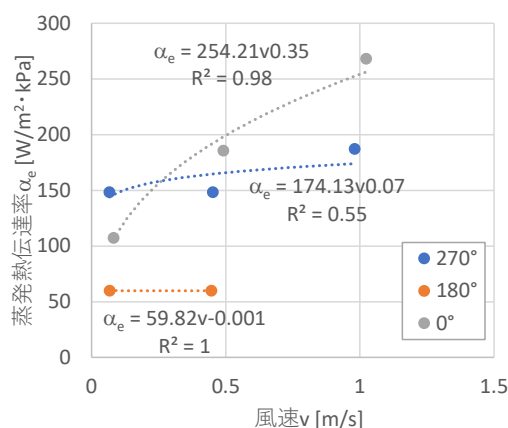
(1) Face

(2) L. Upper Arm

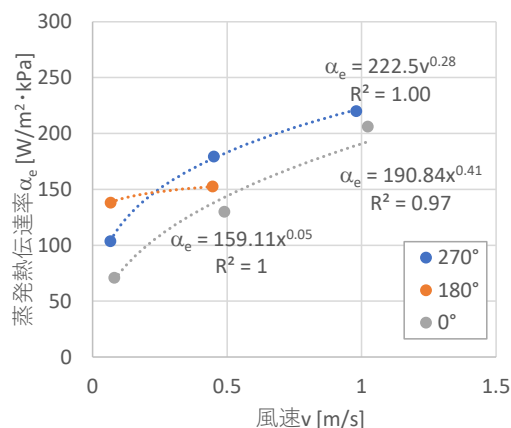
図 8 風向角ごとの蒸発熱伝達率

3.4 風速と蒸発熱伝達率の関係

図 9 に Face と L. Upper Arm における風速と蒸発熱伝達率の関係を示す。蒸発熱伝達率は風速が速くなるほど大きな値となる傾向を示した。実験回帰式は風速と対流熱伝達率の関係式を求める一般的な方法と同様に対数近似の式から求めた。Face の蒸発熱伝達率は風下側に位置するため、風速によらず一定となる傾向を示した。



(1) Face



(2) L. Upper Arm

図 9 風速と蒸発熱伝達率の関係

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

- 1.
- 2.

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 岩崎恵悟、森上伸也：発汗サーマルマネキンを用いた部位別の蒸発熱伝達率の測定 その 3 風向角の影響、日本建築学会学術講演会（関東）、2024 年 8 月発表予定

〔図書〕(計 0 件)

- 1.

2.

〔その他，産業財産権，ホームページ等〕

1.

2.

5. 研究組織

(1) 研究代表者

森上伸也 豊田工業高等専門学校

(2) 研究分担者

1. 山本佳嗣 東京工芸大学

2. 塚本健二 佐藤工業株式会社

3. 岩崎恵悟 豊田工業高等専門学校

6. 要約(Abstract, 英文)

Research Theme: Measurement of evaporative heat transfer coefficients for individual human body segments using a sweating thermal manikin

Representative Researcher (Affiliation): Shinya Morikami (National Institute of Technology, Toyota College)

Summary・Figures

The study focuses on examining thermal comfort in summer ventilation environments, where the effects of sweating and evaporation are significant. The study involves measuring the evaporative heat transfer coefficient on a standing thermal manikin exposed to wind from various directions, including from the side and back.

The experiments were conducted in climate controllable wind tunnel of Tokyo Polytechnic University. Evaporative heat transfer coefficient was measured by wet and dry conditions for separating from measured heat loss to latent and sensible heat.

Evaporative heat transfer rates also increased with higher wind speeds, particularly on the limbs and left side of the body, which was more exposed to the wind. The regression formula of evaporative heat transfer coefficients α_e was suggested following equation by based on typical prediction formula of convective heat transfer.

$$\alpha_e = B \cdot v^n$$

Where, v is mean air velocity[m/s], B and n are coefficients [ND].

It is considered to better that evaporative heat transfer coefficient is calculated from this equation and these coefficients directly than calculated from the Lewis ratio and convective heat transfer coefficient.

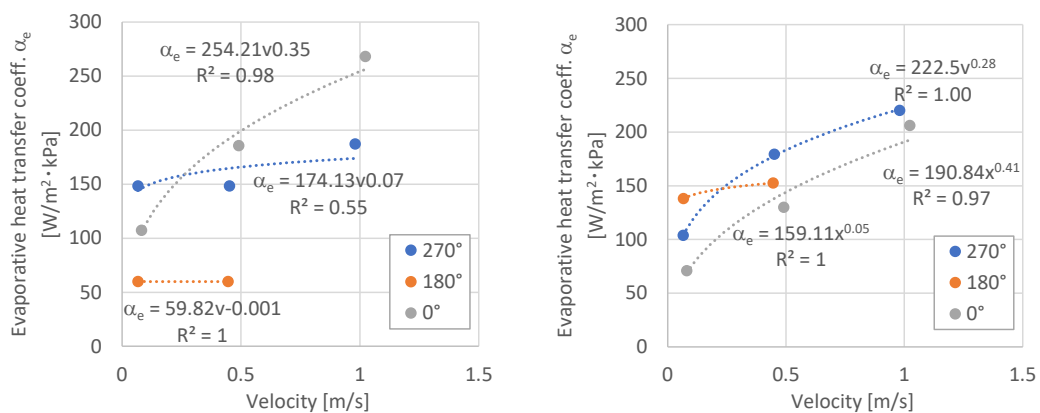


Figure 1 Relationship between Velocity and Evaporative heat transfer coefficient