

2021 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：2021 年度
課題番号：21212008
研究課題名（和文）：暑熱環境における気流の乱れの強さが温熱快適性に与える影響に関する研究
研究課題名（英文）：Study on the effect of the turbulence intensity of airflow on thermal comfort in a hot environment
研究代表者：森上伸也（もりかみしんや）
交付決定額（当該年度）：425000 円

1. はじめに

CoVID-19 感染拡大防止のため、予定していた被験者実験を中止し、発汗サーマルマネキン（以下、マネキン）を用いた実験に変更した。実験では暑熱環境における温熱快適性を予測する際に利用する蒸発熱伝達率を測定した。

2. 研究の目的

夏期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、式(1)のようなルイスの関係を利用して対流熱伝達率から算出することが多い。

$$LR = \frac{\alpha_e}{\alpha_c} = 16.5[\text{K/kPa}] \quad (1)$$

ここで、LR はルイス係数[K/kPa]、 α_e は蒸発熱伝達率[W/m²·kPa]、 α_c は対流熱伝達率[W/m²·K]である。既往研究では人体温熱生理モデルや数値流体力学（CFD）解析等により人体の全熱放熱特性およびルイス係数を明らかにしている。また、人体部位別の着衣熱抵抗、着衣蒸発熱抵抗および着衣透湿係数を測定した研究もある。しかしこれまでの研究では風速がおおむね 0.5m/s 未満の静穏な環境を対象としているため、通風環境への適用についてはさらに検討の余地がある。高風速時の人体各部位における蒸発熱伝達率およびルイス係数について検討した研究は少なく、特に人体の各部位において検討した例は少ない。

そこで本研究では一定風環境においてマネキンを用いて裸体における部位別の蒸発熱伝達率とルイス係数を算出した。

3. マネキンを用いた実験の概要

3.1 実験条件

部位別の蒸発熱伝達率を測定するために人工気候室とマネキンを用いた実験を行った。表 1 に実験条件を示す。実験は東京工芸大学風工学研究センター2階にある通風型人工気候室で行った。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。風速は 0.1m/s、0.5m/s および 1.0m/s の一定風とした。マネキンの姿勢は椅子座とした。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。

Wet 条件における定常状態の皮膚表面の熱収支式を式(2)に示す。

$$M_e = E + C + R \quad (2)$$

ここで、M はマネキンの発熱量[W/m²]、E は蒸発による熱移動量[W/m²]、C は対流による熱移動量[W/m²]、R は放射による熱移動量[W/m²]である。また、発汗がない Dry 条件の場合における皮膚表面の熱収支式は式(3)である。

$$M_s = C + R \quad (3)$$

Wet 条件の総放熱量 M_e から Dry 条件の総放熱量 M_s を差し引くことで蒸発熱伝達量を算出する。

表 1 実験条件

項目	Wet	Dry
気温 T_a [°C]	26	26
壁面温度 [°C]	26	26
相対湿度 [%]	60	60
風速 [m/s]	0.1, 0.5, 1.0	0.1, 0.5, 1.0
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

3.2 測定機器と測定点

表 2 に測定項目および測定機器を示す。室内温湿度は小型温湿度計（おんどとり）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 5 秒間隔で測定した。風速はサーミスタ風速計を用いて 5 秒間隔で測定した。部位別の皮膚温および熱流量はマネキンのセンサーを用いて 1 分間隔で測定した。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 Wet 条件の総放熱量 M_e から Dry 条件の総放熱量 M_s を差し引くことで測定した。

表 2 測定項目および測定機器

測定項目	測定機器	メーカー等	所有	記録間隔	測定位置
室内温湿度	温度：サーミスタ 湿度：高分子膜抵抗 (おんどとり)	T&D	工芸大	1分	マネキン前方の床上 100, 600, 1100, 1700 [mm]
グローブ温度	ベルノン式 グローブ球150mm	柴田科学	工芸大	1分	マネキン前方 床上1100 [mm]
風速	超音波式 三次元風速計	カイジヨウ	工芸大	1分	マネキン前方 床上1100 [mm]
模擬皮膚温	T型熱電対	カイジヨウ	工芸大	1分	マネキン20部位×2(表裏)
皮膚温・発熱量	発汗サーマルマネキン	MTNW	工芸大	1分	マネキン20部位

図 1 に測定点を示す。室内温湿度、グローブ温度および風速を発汗サーマルマネキンから 1500mm 前方、床上高さ 1100mm に配置して測定を行った。

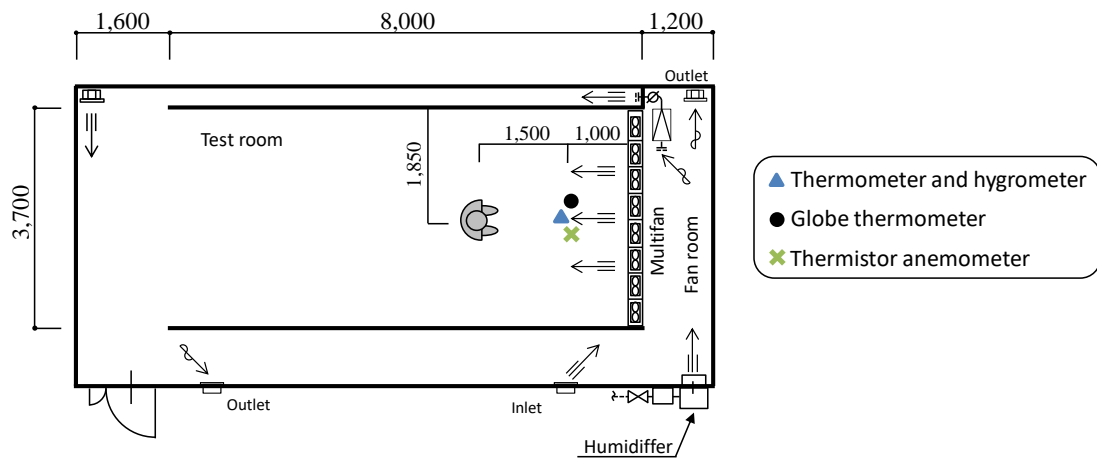


図 1 測定点

3. 研究成果

Wet 条件の総放熱量 M_e から Dry 条件の総放熱量 M_s を差し引くことで蒸発熱伝達量を算出し、式(4)から蒸発による熱伝達率を算出する。

$$E = \alpha_e(P_{sk} - P_a) \quad (4)$$

ここで、 P_{sk} は模擬皮膚温による飽和水蒸気圧[kPa]、 P_a は空気の水蒸気圧[kPa]である。図2に部位別の蒸発熱伝達量を示す。Foot、Handなどの四肢の蒸発熱伝達量が他の部位よりも高く、風速が速くなるにつれて高くなる傾向を示した。Head、Backなどの蒸発熱伝達量は風速によらず一定となる傾向を示した。

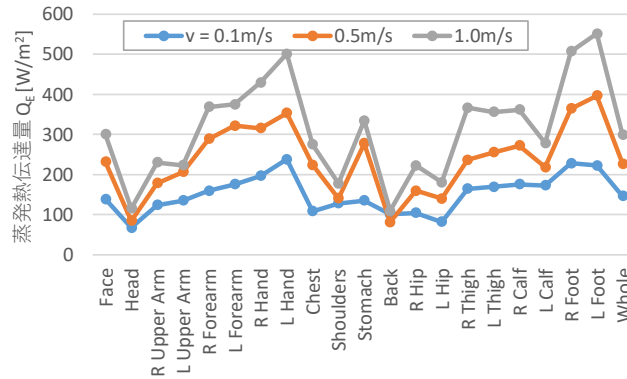


図2 部位別の蒸発熱伝達量

図3に部位別の蒸発熱伝達率を示す。Forearm、Hand、Footなどの蒸発熱伝達率は他の部位に比べて高い傾向を示した。風速が速くなるほど各部位の蒸発熱伝達率が大きくなる傾向を示した。

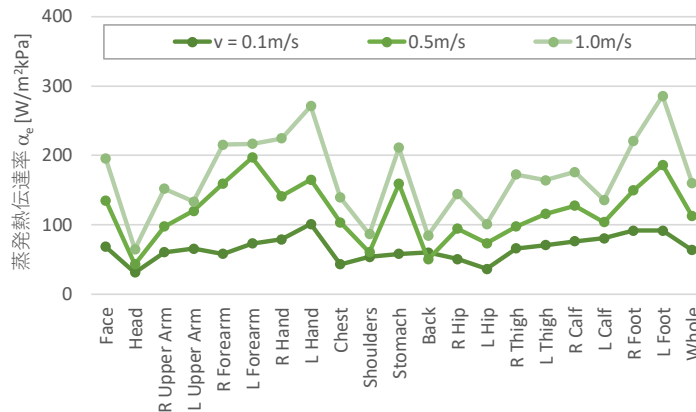


図3 部位別の蒸発熱伝達率

図4に風速と全身における蒸発熱伝達率の関係を示す。全身の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次式(5)から求めた。

$$\alpha_e = B \cdot v^n \quad (5)$$

表3に部位別の蒸発熱伝達率算出式の係数を示す。Forearm、Hand、Footなどの四肢部が高く、Head、Chest、Backなどの躯体部や風下側に位置する部位が低くなる傾向を示した。

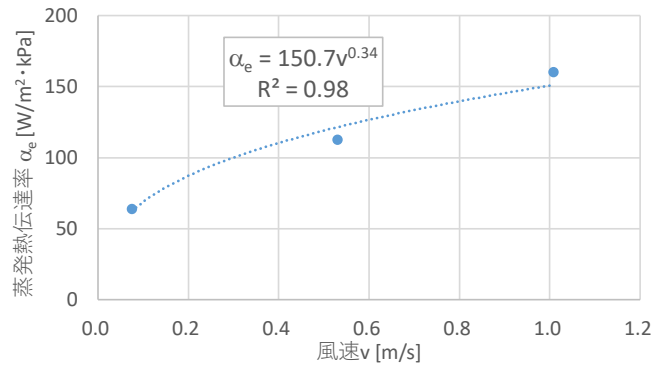


図 4 風速と蒸発熱伝達率の関係

表 3 蒸発熱伝達率算出式の係数

部位	B	n	部位	B	n
Face	185.2	0.39	Back	69.0	0.08
Head	58.2	0.25	R Hip	133.4	0.38
R Upper Arm	137.1	0.33	L Hip	97.5	0.38
L Upper Arm	137.3	0.28	R Thigh	147.5	0.33
R Forearm	216.8	0.51	L Thigh	153.3	0.31
L Forearm	233.8	0.44	R Calf	166.4	0.31
R Hand	203.6	0.38	L Calf	126.9	0.18
L Hand	240.2	0.35	R Foot	203.1	0.32
Chest	138.3	0.45	L Foot	265.9	0.42
Shoulders	77.2	0.15			
Pelvis	213.6	0.50	Whole	150.7	0.34

図 5 に部位別のレイス係数を示す。レイス係数を求めるにあたり、部位別の対流熱伝達率は既往研究の算出式から求めた値を使用した。米国暖房冷凍空調学会 ASHRAE では蒸発熱伝達率は対流熱伝達率からレイス係数 16.5[°C/kPa]を用いて算出する式(6)を提案している。

$$\alpha_e = a_c \cdot LR \quad (6)$$

本研究結果では風速が 0.5m/s 以上の強制対流の条件においてはおおむね 16.5 に近い値を示しているが、0.1m/s の条件では全ての部位で 16.5 よりも高い値を示した。これは気流が小さい場合、対流現象と蒸発現象の相似性が弱く、他の要因が支配的であることを意味すると考えられる。文献でも同様のことが示唆されている。

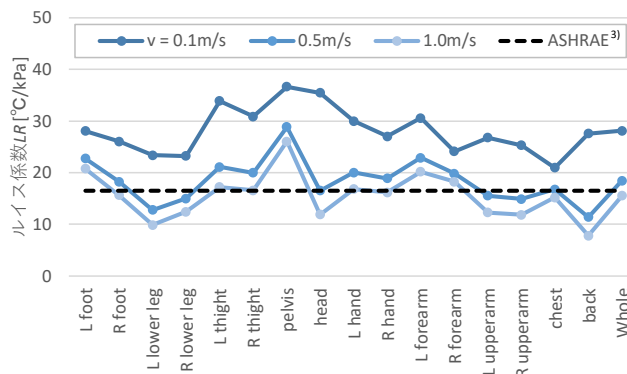


図 5 部位別のレイス係数

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)

[学会発表] (計 1 件)

1. 森上伸也、永瀬瑠真、水谷国男、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、2022年度日本建築学会学術講演会大会 (発表予定)

[図書] (計 0 件)

[その他, 産業財産権, ホームページ等]

1. Shinya Morikami, Study on heat transfer coefficient of evaporation by part of human body, International Workshop on Infectious Disease and Airflows around Human Body, 2022.Feb.

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 建築学科 准教授

(2) 研究分担者

1. 水谷国男 東京工芸大学 工学部 建築学科 教授

2. 永瀬瑠真 豊田工業高等専門学校 建築学科 学生

6. 要約(Abstract, 英文)

Research Theme: Study on thermal comfort for turbulence intensity of air flow under hot environment

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

Summary・Figures

In order to prevent the spread of CoVID-19 infection, the planned subject experiment was canceled and an experiment using a sweating thermal mannequin was conducted. In the experiment, the heat transfer coefficient of evaporation used to predict the thermal comfort in a hot environment was measured.

Traditionally, Japanese residents have used to live using cross-ventilation and sprinkling water for energy-saving and comfort in the summer. In this study, it was investigated the indoor thermal environment under the cross-ventilated environment. The evaporative heat transfer coefficient of local human body was investigated by the sweating thermal manikin experiment.

- Evaporative heat transfer coefficients were calculated by experiment on sweating thermal manikin and directly measuring fabric skin temperature method.
- Evaporative heat loss coefficient of whole body was suggested by experimental regression formula as follows;

$$\alpha_e = 150.7 \cdot v^{0.34}$$

- It was found that the Lewis Ratio varied under low air velocity conditions.

Segment	B	n	Segment	B	n
Face	185.2	0.39	Back	69.0	0.08
Head	58.2	0.25	R Hip	133.4	0.38
R Upper Arm	137.1	0.33	L Hip	97.5	0.38
L Upper Arm	137.3	0.28	R Thigh	147.5	0.33
R Forearm	216.8	0.51	L Thigh	153.3	0.31
L Forearm	233.8	0.44	R Calf	166.4	0.31
R Hand	203.6	0.38	L Calf	126.9	0.18
L Hand	240.2	0.35	R Foot	203.1	0.32
Chest	138.3	0.45	L Foot	265.9	0.42
Shoulders	77.2	0.15			
Pelvis	213.6	0.50	Whole	150.7	0.34