

# 室温変動を伴った冷房期の設定温度緩和が温熱環境の許容と発汗に及ぼす影響 Thermal Environment Tolerance and Perspiration by Relaxing the Temperature Setting with Room Temperature Fluctuation

○古藤 若菜 (立命館大学)      近本 智行 (立命館大学)      田中 哲平 (立命館大学)

Wakana KOTO\*1    Tomoyuki CHIKAMOTO\*1    Teppei TANAKA\*1

\*1 Ritsumeikan University

Air conditioning control systems that prioritize human factors have been developed to address the dual needs of thermal comfort and energy savings. This research aims to explore the relationship between thermal environment tolerance, perspiration, and thermal comfort in relation to fluctuations in room temperature. Experimental results demonstrate that the increased perspiration due to increased thermal sensation with short time lag can reduce thermal discomfort in fluctuating room temperature, considering physiological response. Furthermore, it was found that thermal sensation is significantly enhanced in conjunction with the sensation of sweating.

## 1. はじめに

執務者の快適感を損なわない範囲で温熱環境を変動させ、省エネを目指す空調制御手法が存在している<sup>文1)</sup>。近年ではヒューマンファクターに着目した制御手法が構築され、快適性と省エネの両立が求められている。亀山らは、快適状態から不快状態への一方的な室温上昇環境下における心理と発汗の関係について、発汗時には温冷感が大きく低下することを明らかにした<sup>文2)</sup>。矢田らは、空調機の特性と人体が温熱環境の変化に慣れる時間を考慮し、1周期20分での周期的な室温変動と心理の関係について被験者実験を実施した。そこで室温上昇時、下降時ともに、温冷感と快適感に負の相関があることを明らかにした<sup>文3)</sup>。しかし、発汗を伴う周期的な室温変動と温熱環境の許容の関係については明らかにされていない。発汗による体温調節機能を活かすことで、室温変動環境下において、暑熱側申告の減少と快適感の向上が期待できるのではないかと考える。

そこで、本研究では周期的な室温変動と心理・生理の関係に着目し、発汗を伴う周期的な室温変動が温熱環境の許容に与える影響と、周期的な室温変動環境における発汗と快適感の関係を明らかにすることを目的として被験者実験を行った。

## 2. 被験者実験概要

### 2.1 実験条件

本実験は2023年8~9月に立命館大学びわこくさつキャンパスの恒温恒湿室で実施した。環境測定には熱電対・温湿度計・風速計を用いた。Fig.1に実験室概要及び測定点を示す。被験者は健康な男子大学生5名、着衣量0.5clo、代謝量1.3met<sup>注1)</sup> 非喫煙者かつ標準体型<sup>注2)</sup> とした。

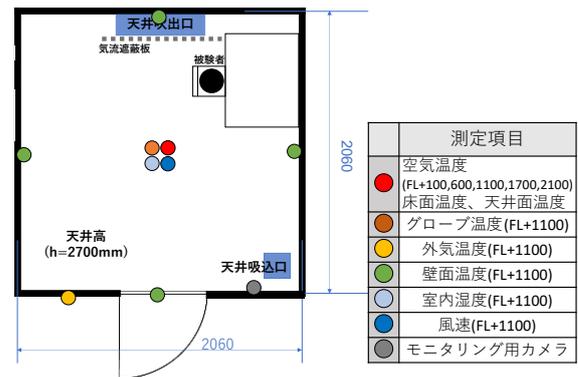


Fig.1 Laboratory Floor Plan and Indoor Environment Measurement Points

Table 1 Experiment Cases

	基準室内温度	周期	変動幅
CASE1	30°C	20分	±0.5°C
CASE2			0.0°C
CASE3	26°C		±0.5°C

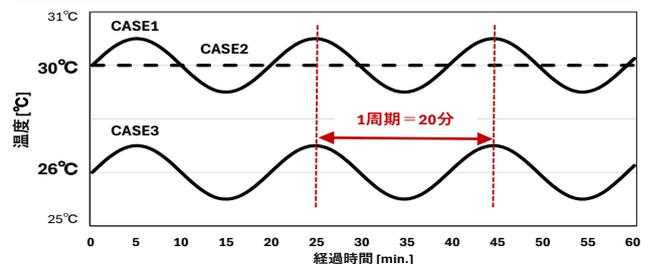


Fig.2 Experiment Cases



Fig.3 Experiment Schedule

## 2.2 実験 CASE

Table 1、Fig.2 に実験条件を示す。実験は各 CASE において、1 周期 20 分を 3 周期分 (=60 分間/CASE) 実施した。

## 2.3 実験スケジュール

Fig.3 に 1 人当たりの実験スケジュールを示す。サーカディアンリズムを考慮するため、実験は 1 日 1 CASE のみとした。登校により被験者の体温が上がっている可能性を考慮し、室内(実験室別室)での安静時間を設けた (30 分)。その後、実験 CASE の前に実験室環境に順応する時間を設けた (30 分)。

## 2.4 測定項目

実験室内外の環境測定に加え、以下の測定等を行った。

### 1) アンケート申告

各実験 CASE 実施中、被験者へ主観申告アンケート<sup>注3)</sup>を毎分実施した。温冷感・快適感・気流感・眠気感・湿度感の 5 項目を 7 段階、発汗感を 4 段階で申告させた。アンケート申告結果の分析時には、各被験者の個人差を考慮するため標準化<sup>注4)</sup>を実施し、全被験者における z-score の平均値を用いた。

### 2) 人体生理測定

皮膚表面温度は、ボタン型温湿度センサを用いて 30 秒間隔で測定した。Hardy-Dubois の 7 点法より前額部、前腕、手、腹、大腿、下腿、足の計 7 点を測定し、平均皮膚温度を算出した。また、被験者の胸部付近で衣服 (肌着) 内の温湿度を測定した。発汗量は汗腺の分布が多い前額部の皮膚表面温湿度から絶対湿度を算出し、30 秒前比での絶対湿度の増減値を  $\Delta$  発汗量として評価に用いた。なお、 $\Delta$  発汗量には皮膚からの不感蒸泄分が含まれている。

## 3. 実験結果

### 3.1 温熱環境

実験中における実験室内環境の平均を Table2 に示す。

#### 1) 室内湿度

全 CASE において、相対湿度が 40%~60% 内に収まっていることがわかった。これは快適範囲 (40%~60%) 内であったことから、アンケート申告には影響がない室内湿度であったといえる。

#### 2) 気流速度

全 CASE において、0.0~0.2 m/s の範囲内で風速が計測され、気流によるアンケート申告の影響はおおむね無いことが示された。

#### 3) 室内温度

全 CASE 中の居住域近傍における室温の実測平均値を Fig.4 に示す。夏季の気温上昇に伴い、実験室外の気温が上昇し、実験室内の温度に影響が及んだ。一部目標値よりも室温が変動しているが、おおむね想定通りの環境となっていることが確認された。

Table 2 Thermal Environmental Conditions

	相対湿度[%]	気流速度[m/s]
CASE1	51.2 ( $\pm 1.6$ )	0.12 ( $\pm 0.04$ )
CASE2	49.6 ( $\pm 0.8$ )	0.12 ( $\pm 0.02$ )
CASE3	51.4 ( $\pm 3.2$ )	0.09 ( $\pm 0.05$ )

平均 ( $\pm$ 標準偏差)

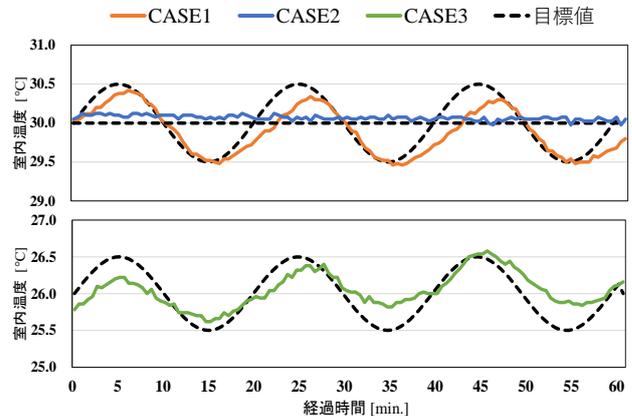


Fig.4 Air Temperature Results (FL+1100)

### 3.2 アンケート申告割合

#### 1) CASE 中の発汗感申告割合

Fig.5 に各 CASE 中の発汗感申告割合を表す。CASE1・2 では、発汗を自覚している割合がそれぞれ 74%、63% であり、CASE3 では、発汗を自覚していない割合が 99% であった。各 CASE 中において、CASE1・2 は発汗状態が優位であった一方、CASE3 は非発汗状態が優位であった可能性が示唆された。

#### 2) CASE 中の快適感申告割合

Fig.6 に各 CASE 中の快適感申告割合を示す。CASE1・2 では、快適側の申告割合がそれぞれ 13%、21% であり、同じ室温帯でも室温変動環境 (CASE1) と比べて、室温一定環境 (CASE2) のほうが快適側の申告割合が多いことが明らかになった。これは、室温上昇自体が執務者にとって不快であったことが考えられる。また、CASE3 では、快適側の申告が 83% であり、これは CASE3 (26°C $\pm$ 0.5) の室温変動が執務者にとって快適な環境であったことが考えられる。

#### 3) CASE 中の温冷感申告割合

Fig.7 に各 CASE 中の温冷感申告割合を示す。CASE1・2 では、暑熱側の申告割合がそれぞれ 87%、91% であり、CASE 間に大きな差は見られないことがわかった。CASE3 では、暑熱側の申告割合が 38% であり、冷涼側の申告割合が 47% であることがわかった。

したがって、発汗の自覚がある同じ室温帯の環境下では、室温上昇自体が不快側申告の増加に寄与する一方、室温変動の有無で温冷感申告は影響しないことが考えられる。

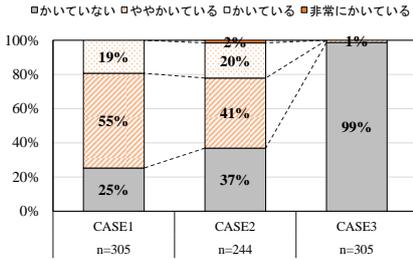


Fig.5 Total Sweating Sensation

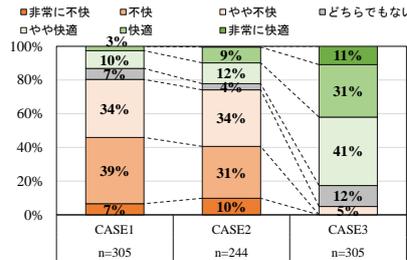


Fig.6 Total Thermal Comfort

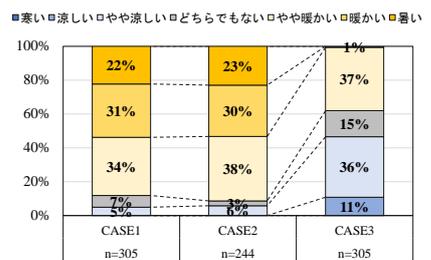


Fig.7 Total Thermal Sensation

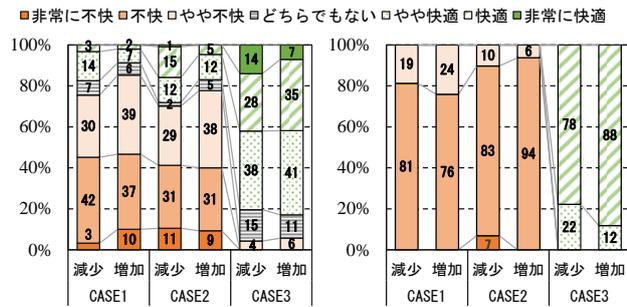


Fig.8 Relationship between Perspiration and Thermal Comfort  
(Left) All Subject (Right) Subject C

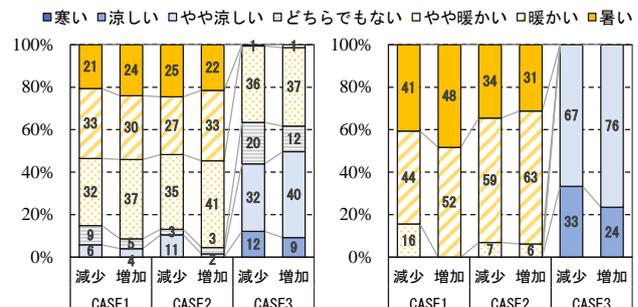


Fig.9 Relationship between Perspiration and Thermal Sensation  
(Left) All Subject (Right) Subject C

### 3.3 発汗を伴う周期的な室温変動と温熱環境の許容

#### 1) 快適感申告とΔ発汗量の関係

Δ発汗量の0以上の値をΔ発汗量増加群、0未満の値をΔ発汗量減少群の2群に群分けしたときの各CASEの快適感申告割合をFig.8に示す。

全被験者のΔ発汗量増加群と減少群を比較するとCASE1・2では、Δ発汗量増加群は減少群に比べて不快側の申告が増加し、快適側の申告が減少した。一方CASE3では、快適側の申告が増加傾向であることがわかった。被験者全体では室温変動の有無で明確な違いは見られなかったが被験者Cに着目すると、CASE1・3では、Δ発汗量増加群は減少群に比べて不快側の申告が減少し、快適側の申告が増加した。したがって被験者全体では、発汗が優位である環境下(CASE1・2)において、発汗量の増加で不快側申告の減少には寄与しないことが示された。しかし個人別では室温変動環境下(CASE1・3)において、発汗量の増加が生じた際に、僅かな時間遅れを伴って、不快側申告の減少や快適側申告の増加が生じたのではないかと考える。室温変動環境が発汗を介して不快感の減少と快適感の向上に寄与する可能性が示唆された。

#### 2) 温冷感申告とΔ発汗量の関係

Δ発汗量の0以上の値をΔ発汗量増加群、0未満の値をΔ発汗量減少群の2群に群分けしたときの各CASEの温冷感申告割合をFig.9に示す。

全被験者のΔ発汗量増加群と減少群を比較するとCASE1・2では、Δ発汗量増加群は減少群に比べて暑熱側の申告が増加し、冷涼側の申告が減少した。一方CASE3では、冷涼側の申告が増加傾向であることがわかった。また、被験者CのΔ発汗量増加群と減少群を比較すると

CASE1では、Δ発汗量増加群は減少群に比べて暑熱側の申告が増加し、CASE3では、冷涼側の申告が減少したことがわかった。したがって、被験者全体では、発汗を伴う環境下において、暑熱側申告の増加による発汗量の増加で、不快側申告の減少には至らなかった。しかし、個人別では室温変動環境下において、暑熱側申告の増加によって僅かな時間遅れを伴って、発汗量の増加が生じ、不快側申告の減少と快適側申告の増加が生じたと考える。

#### 3) 温冷感申告と発汗感申告の関係

発汗感申告の0以上の値を発汗の自覚有群、0未満の値を発汗の自覚無群の2群に群分けしたときの各CASEの発汗感申告と温冷感申告の関係をFig.10に示す<sup>注5)</sup>。発汗の自覚無群と有群を比較すると全CASEにおいて発汗の自覚有群は無群に比べて暑熱側申告が有意に増加することが明らかになり、暑熱側申告は室温変動の有無にかかわらず、発汗自覚時に有意に増加することが示された。

### 3.4 周期的な室温変動環境における発汗と快適感

#### 1) 室温変動に伴う温冷感・快適感の相関

Fig.11に室温上昇時の温冷感(上)と快適感(下)の関係を、Fig.12に室温下降時の温冷感(上)と快適感(下)の関係を示す。温冷感に着目するとCASE1・3では、室温上昇に伴い暑熱側の申告を、室温下降に伴い冷涼側の申告をした。室温帯にかかわらず、室温変動を知覚することが示された。CASE2では、同じ室温でも温冷感が変化することがわかり、これは発汗による体温調節機能が影響していることが考えられる。

次に、温冷感と快適感の相関をTable3に示す。CASE1では室温上昇時に負の相関(相関係数:-0.51)があり、室温下降時では強い負の相関(相関係数:-0.75)があること

がわかった。一方 CASE3 では、室温上昇時に強い負の相関（相関係数：-0.70）があり室温下降時に弱い負の相関（相関係数：-0.38）があることがわかった。したがって CASE1・3 を比較すると、室温上昇時では、非発汗状態が優位である環境下（CASE3）の方が暑熱側の申告の増加と快適側の申告の減少に強い相関がみられ、室温下降時では、発汗状態が優位である環境下（CASE1）の方が、暑熱側の申告の減少と快適側の申告の増加に強い相関があることがわかった。

4. まとめ

本研究では、発汗を伴う周期的な室温変動が温熱環境の許容に与える影響、周期的な室温変動環境における発汗と快適感の関係を探るために、被験者実験を実施し、以下の知見が得られた。

- 1) 被験者全体では発汗を伴う環境下において、暑熱側申告の増加による発汗量の増加で、不快感の減少には至らなかった。一方で、個人別では室温変動環境下において、暑熱側申告の増加による発汗量の増加で、不快感減少と快適感増加に寄与することが示唆された。これは人体生理学における応答性能が関与しており、暑熱側申告の増加に僅かな時間遅れを伴って、発汗量が増加し、不快側申告の減少と快適側申告の増加が生じたと考えられる。室温変動環境が発汗を介して不快感減少と快適感向上に寄与する可能性が示唆された。
- 2) 暑熱側申告は、室温変動の有無にかかわらず、発汗自覚時に有意に増加することが明らかになった。
- 3) 室温上昇時は、発汗状態より非発汗状態において室温上昇の知覚によって快適感減少し、室温下降時は発汗状態において、室温下降の知覚によって快適感が向上する可能性が示唆された。

注釈

- 注 1) 前日の睡眠時間は 8 時間以上確保させ飲酒は禁止とした。熱中症対策のため常温の水 500ml の水分補給を可能とし、実験中の飲水は自由とした。アンケート回答は毎分実施し回答後は体勢を崩す行為を避けるため用意した 100 マス計算を実施した。
- 注 2) BMI (=体重[kg]÷(身長[m])) 18.5 以上 25.0 未満
- 注 3) 温冷感とは 3:暑い・2:暖かい・1:やや暖かい・0:どちらでもない・-1:やや涼しい・-2:涼しい・-3:寒い、快適感とは 3:非常に不快・2:不快・1:やや不快・0:どちらでもない・-1:やや快適・-2:快適・-3:非常に快適の 7 段階評価とした。発汗感とは汗をかいているのかに対して 0:かいていない・1:ややかいている・2:かいている・3:非常にかいている、の 4 段階評価とした。
- 注 4) 標準化は平均 0、標準偏差 1 の尺度に変換した値であり、次式で算出した。z-score = (申告値-申告値平均)/標準偏差
- 注 5) 有意性の判定には Welch の検定を用いた。有意水準を p<0.050 とし有意水準を満たしている際に\*を記載した。

参考文献

- 文 1) 佐藤孝輔ほか:ゼロカーボン建築の実現可能性に関する研究:(第3報)ゼロエネルギーバンドの設定と冷暖房負荷及び空調用エネルギー削減可能量の試算、学術講演会論文集、平成 22 年(1)、pp689-692、2010-8
- 文 2) 亀山大介:夏季の室温上昇が人体生理と温熱環境の許容に及ぼす影響に関する研究、空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表論文集、A-7、2017
- 文 3) 矢田うさぎ:周期的に室温変動を与えた場合における室温変動への知覚と温熱環境への許容値の関係性評価、立命館大学大学院理工学研究科修士論文 梗概、2022

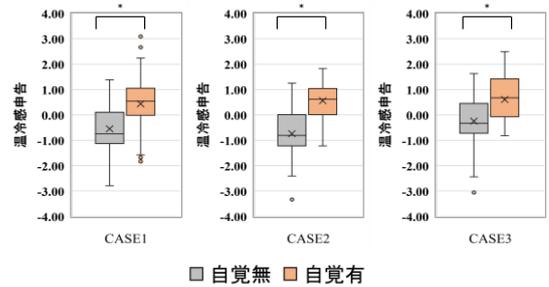


Fig.10 Thermal sensation

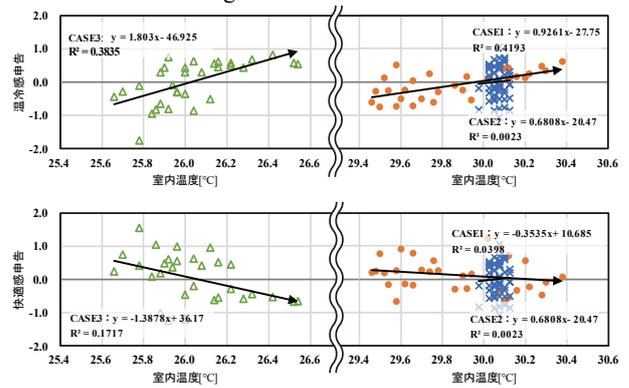


Fig.11 Room Temperature Rise : (Upper) Thermal Sensation (Lower) Thermal Comfort

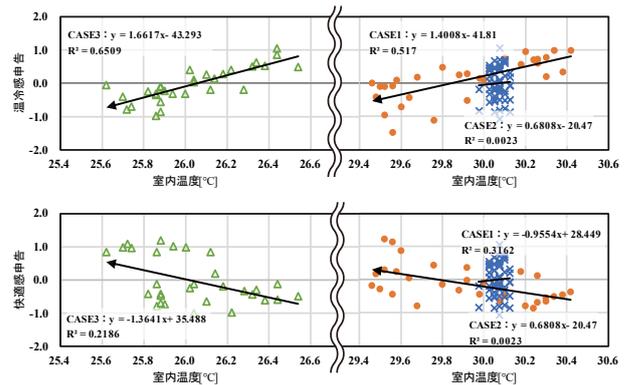


Fig.12 Room Temperature Fall : (Upper) Thermal Sensation (Lower) Thermal Comfort

Table3 Correlation between Thermal Sensation and Thermal Comfort

実験 CASE	室温	相関係数 (決定係数 R <sup>2</sup> )
CASE1 (30°C±0.5)	上昇時	-0.51 (0.26)
	下降時	-0.75 (0.49)
CASE2 (30°C±0.0)	一定時	-0.59 (0.46)
CASE3 (26°C±0.5)	上昇時	-0.70 (0.57)
	下降時	-0.38 (0.14)

温熱環境に多様性を持たせた執務空間における  
オフィスワーカーの環境選択と省エネに関する研究  
(第1報)夏期の『ムラ空調』の導入による快適性と執務場所選択に関するアンケート調査  
**Environmental Choice of Office Workers and Energy Conservation  
in Workplaces with Various Thermal Environments  
(Part 1) Questionnaire Survey on Comfort and Workplace Choice  
with “Uneven Air Conditioning System” in Summer**

田中 哲平 (立命館大学)      五明 遼平 (日建設計)      近本 智行 (立命館大学)  
田中 宏昌 (日建設計)      田辺 慎吾 (日建設計)

Teppeï TANAKA\*1 Ryohei ITSUAKI\*2 Tomoyuki CHIKAMOTO\*1 Hiromasa TANAKA\*2 Shingo TANABE\*2

\*1 Ritsumeikan University \*2 Nikken Sekkei Ltd.

Decarbonizing tenant buildings is critical in Japan, as most offices are leased and the adoption rate of Zero Energy Buildings (ZEB) is low. Office usage is shifting towards Activity-Based Working (ABW), blending physical and environmental factors to enhance worker comfort and engagement while aiming for energy conservation through natural energy. This study evaluates non-installation strategies, using existing HVAC and workers' thermal choices to improve comfort and efficiency. Results from an "Uneven Air Conditioning System" summer trial, including comfort, choice impact, and energy savings, are reported.

### はじめに

業務部門の脱炭素化が急務であり、特に築20年以上のテナントビルが多い我が国では<sup>※1</sup>、既存テナントビルの省エネへの取り組みが重要と考えられる<sup>※2</sup>。一方でオフィスでの働き方に着目すると、エリアごとに特徴を持たせた執務空間の中から、執務者が自由に働く場所を選択するActivity Based Working (ABW)の採用が注目されている<sup>※3,4</sup>。

本研究では、築20年のテナントビルに入居するN社のオフィスを対象に、ビル標準の空調設備の運用の工夫で、執務スペースに積極的にムラのある環境をつくりだし、ABWによる執務者の環境選択を組み合わせることで、生産性と省エネ性の向上を目指す新しい環境制御手法を検証する。本報では、連続的な大部屋の執務室において夏期ピーク時の温熱環境に平面的な多様性を持たせた『ムラ空調』を行い、その条件下での快適性、執務場所選択、省エネ効果を報告する。

#### 1. 建物概要

**Fig.1** に研究の対象とした建物の概要を示す。Gビルは大阪市内に位置する地上14階建て延床約32,000㎡のテナントビルであり、オフィス基準階貸室はFig.1のようになっている。N社は2023年5月にGビル5階～8階に入居し、現在、脱炭素推進やワークスタイル変革に向けた複数の実証実験を行っている。オフィスの勤務形態はABWである。

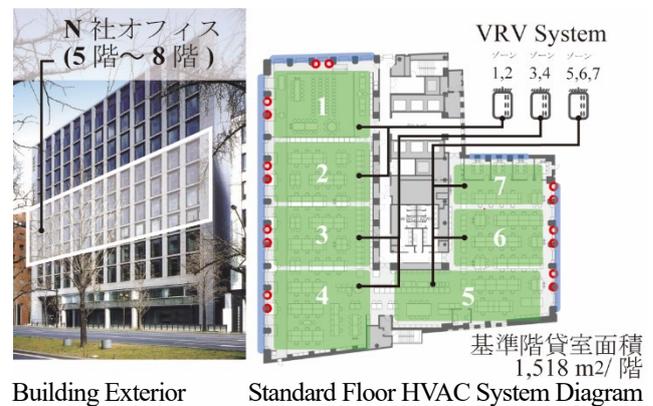


Fig.1 Building Summary

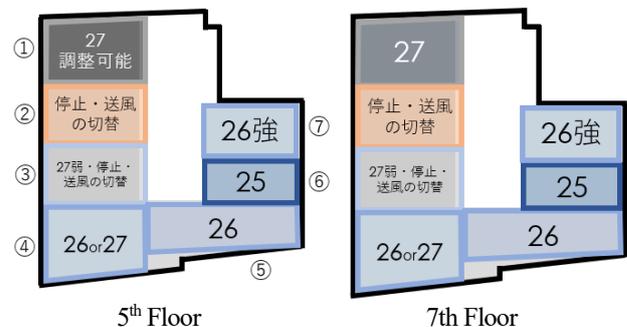


Fig.2 “Uneven Air Conditioning System” Floor Summary

## 2. 『ムラ空調』の概要

Fig.2 に本報で対象とした 2023 年夏期の『ムラ空調』の運用方式を示す。なお、本建物の空調方式は空冷ビルマルチエアコンであり、テナント区画ごとに設けられた床吹出空調用の室内機が建物コア側に設置されている。本研究では便宜上この 7 つのゾーンに Fig.2 に示すように①から⑦の番号を付した。また、比較的目標温度が高いゾーン（ゾーン①～④）を「緩和空調ゾーン」、比較的目標温度が低いエリア（ゾーン⑤～⑦）を「しっかり空調ゾーン」とした。

## 3. アンケート調査の概要『ムラ空調』の概要

### 3.1 アンケート調査の手法

Table1 にアンケート概要を示す。2023 年 8 月に一般的な均一空調で運用した週（8/7～10）と『ムラ空調』を導入した週（8/21～25）において、同様の気象条件の日をそれぞれの週で 2 日ずつ計 4 日選び、それぞれ朝 10 時～12 時と夕刻 16 時～18 時に 1 回ずつ、合計 8 回アンケートを紙面と口頭質問にて実施した。対象オフィスに勤務する 20 代から 60 代の男女約 240 名<sup>注1</sup>から計 880 サンプルを得た<sup>注2</sup>。

### 3.2 測定項目

#### 3.2.1 心理量

執務環境の満足度に関する、Table2 に示す項目のアンケート調査を実施した。環境に対する心理申告は 5 段階とした。

#### 3.2.2 執務場所選択要因と環境選択行動の有無

アンケート回答者の滞在位置の記録、さらにその執務場所を選択した要因、『ムラ空調』が環境選択に関わったか、の 2 項目についても併せて口頭で質問し回答を得た。

#### 3.2.3 環境測定

対象オフィスの天井には等間隔で室内環境測定センサが設置されている。

Table1 Questionnaire Summary

アンケート対象期間	2023/8/7～8/25		
アンケート日時	均一空調	8/9, 10	朝, 夕
	ムラ空調	8/22, 25	朝, 夕
アンケート対象階	5階, 7階		
アンケート回答者	20代から60代の男女約240名		
アンケート回答数	計880サンプル		

Table2 Questionnaire Detail

個人情報	社員番号, 名字		
環境 心理申告	温冷	寒い, やや寒い, どちらでもない, やや暑い, 暑い	
	気流感	不満, やや不満, どちらともいえない, やや満足, 満足	
	音	不満, やや不満, どちらともいえない, やや満足, 満足	
	明るさ感	不満, やや不満, どちらともいえない, やや満足, 満足	
	日射	不満, やや不満, どちらともいえない, やや満足, 満足	
場所選択	利用用途や環境選択の有無など記述		
滞在位置	アンケートを回答した地点を平面図にプロット		
回答時刻	回答時刻		

## 4. 結果の分析と考察

### 4.1 回帰モデルによる分析概要<sup>注3</sup>

環境選択の有無と関係する因子を定量的に提示することを目的に、Table3 に示す変数で回帰分析を行った<sup>注4</sup>。アンケート調査で得た値のほかに、対象オフィスから得た性別の情報を説明変数に加えた。場所選択の有無は、アンケート回答を得たワーカー一人ずつについて、期間を通して回答場所が同じだったワーカーを場所選択なし、期間中一度でも回答場所が異なったワーカーを場所選択ありとし、個人因子として変数とした。また平均温度は、ワーカー滞在位置情報に基づきゾーン内で最も近いセンサ位置での測定温度のアンケート対象時刻 2 時間の平均値を変数とした。

#### 4.1.1 目的変数と説明変数の相関分析

環境選択の有無と各説明変数の相関分析を実施した。結果を Table4 に示す<sup>注4</sup>。

「場所選択の有無」と「フロア」「ゾーン」の間に有意な相関関係を確認した。これはフロアやゾーンで場所選択の有無に差があることを示し、場所選択されやすいフロアやゾーンがある可能性が示唆された。

#### 4.1.2 説明変数同士の相関分析

モデルに投入する説明変数間の関係を確認し、多重共線性を考慮するため、説明変数同士の相関分析を実施した。結果を Table4 に示す。相関係数の絶対値が 0.40 以上となった説明変数の組を表中にレッドで示す。(明るさ感, 気流感)、(明るさ感, 音)、(日射, 音)、(日射, 明るさ感)の強い相関について、気流感、音、明るさ感、日射のアンケート回答が多くサンプルでほぼ一様であったことから、アンケート項目で 4 項目のうち最初に回答する気流感を制御変数とした偏相関分析の結果 (Table5)、相関係数が (明るさ感, 音)、(日射, 音)、(日射, 明るさ感)のそれぞれで、.413→.308、.442→.354、.478→.372 と小さくなった。すなわち、気流感が媒介変数となり、疑似相関が生じていたものと推察される。これは、回答時すぐに知覚して自認できる「温冷感」「気流感」の回答後に、すぐには知覚して自認しにくい「音」「明るさ感」「日射」の満足度の回答は深く考えずにその前の気流感の回答をそのまま記述し

Table3 Descriptive Statistics for Each Variable

	変数	平均値	標準偏差	標本数	
目的変数	場所選択の有無	[0:なし,1:あり]	0.320	0.468	664
	性別	[0:女性,1:男性]	0.520	0.500	664
	ムラ空調の有無	[0:なし,1:あり]	0.480	0.500	664
	時刻	[0:朝,1:夕]	0.500	0.500	664
説明変数	温冷感	[-2:寒い,-1,0,1,2:暑い]	0.01	1.16	664
	気流感	[-2:不快,-1,0,1,2:快適]	0.39	0.95	664
	音	[-2:不満,-1,0,1,2:満足]	0.46	1.04	664
	明るさ	[-2:不満,-1,0,1,2:満足]	0.38	1.11	664
	日射	[-2:不満,-1,0,1,2:満足]	0.53	1.00	664
	フロア	[1:5階,2:7階]	6.03	1.00	664
	ゾーン	[1,2,3,4,5,6,7]	4.23	1.555	664
	平均温度	[°C]	24.49	1.02	664

Table4 Correlation Analysis between Variables

	場所選択の有無	ムラ空調の有無	時刻	性別	温冷感	気流感	音	明るさ感	日射	フロア	ゾーン	平均温度
場所選択の有無		.021	-.040	-.055	.038	-.033	.008	.070	.043	.085*	-.195**	-.027
ムラ空調の有無			.007	-.045	.080*	-.073	.053	-.071	.009	-.075	.103**	.041
時刻				.064	.061	-.072	.004	-.010	-.011	-.001	-.036	.039
性別					.085*	.039	-.050	-.150**	-.078*	.051	-.092*	-.040
温冷感						-.097*	-.042	-.014	.000	-.046	-.022	-.067
気流感							.367**	.429**	.391**	.114**	.021	-.098*
音								.413**	.442**	.189**	-.090*	.057
明るさ感									.478**	.115**	-.146**	.057
日射										.083*	.022	-.020
フロア											.000	-.040
ゾーン												.103**
平均温度												

Table6 Regression Model

	偏回帰係数	標準誤差	有意確率
(定数)		.669	
ムラ空調の有無	0.108	.055	.067
時刻	-0.047	.036	n.s.
性別	-0.083	.036	.031
温冷感	0.057	.016	n.s.
気流感	-0.042	.019	n.s.
フロア	0.095	.018	.013
ゾーン	-0.205	.012	<.001
平均温度	-0.085	.028	n.s.

Table5 Floor Cross-Section Overview

制御変数	音	明るさ感	日射
気流感	音	0.308	0.354
	明るさ感		0.372
	日射		

たためと考えられる。このため、「音」「明るさ感」「日射」の回答は分析に適する結果ではないと考え、以降の分析では、「温冷感」「気流感」のみを扱う。

4.1.3 回帰モデルによる検討 (Table6)

モデルに投入する説明変数は、3.1.2項で除外した3変数以外の8変数とし、強制投入法によりモデルを構築した<sup>注5</sup>。場所選択の有無に最も影響を与える変数は「ゾーン」で、その次に影響を与える変数は「ムラ(の有無)」であった。ゾーン(Fig.2)が⑦から①に近づくに従って、場所選択されやすく、ムラなしよりムラありで場所選択されやすいという結果が得られた。これは、緩和空調ゾーン(①~④)では場所選択が行われている一方で、しっかり空調ゾーン(⑤~⑦)では場所選択がされておらず固定席化が起きている可能性が示唆された。さらに、均一空調(ムラなし)時よりもムラ空調(ムラあり)時で場所選択がされやすく、ムラ空調の導入が場所選択の促進に寄与している可能性が示唆された。

4.2 アンケート回答の温冷感とゾーン別滞在人数割合

前項で示す場所選択の有無で、ありとした回答を場所選択あり群、なしとした回答を場所移動なし群として群分け分析を実施した。2つの群それぞれについて、温冷感申告割合(Fig.4, Fig.5)とゾーン別滞在人数割合(Fig.6, Fig.7)を示す。

温冷感申告割合について、均一空調 Day2 とムラ空調 Day1 を比較すると(Fig.4, Fig.5)、場所移動なし群より場所移動あり群で暑い側申告の増加幅が大きい(前者が+8.0%、後者が+27.3%)。場所移動なし群のワーカーより場所移動あり群のワーカーが環境変化に敏感である可能性や温熱環境許容度が涼しい側にある可能性、温熱環境許容度が狭い可能性などが考えられる。

場所移動あり群の温冷感申告割合(Fig.5)とゾーン別滞在人数割合(Fig.7)を比較すると、暑い申告が大きく増加しているムラなし Day2 からムラあり Day1 ではそれほどゾーン間の移動は確認できない一方で、暑い申告が

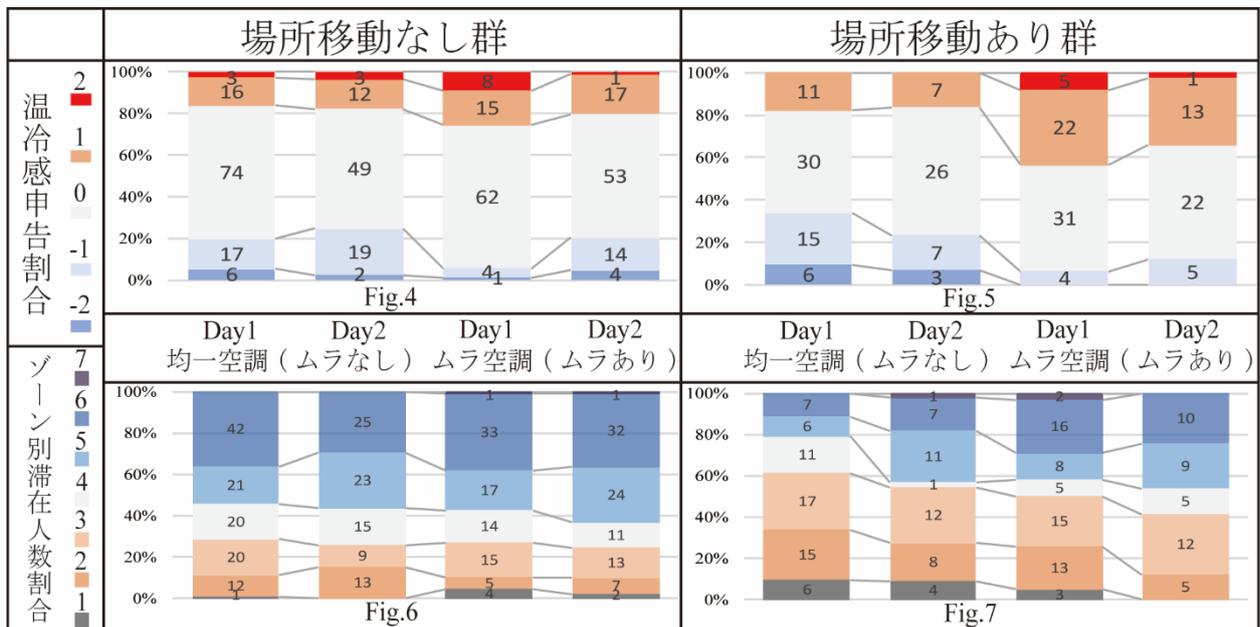


Fig.4~7 Grouping Analysis of Workplace Choice Availability

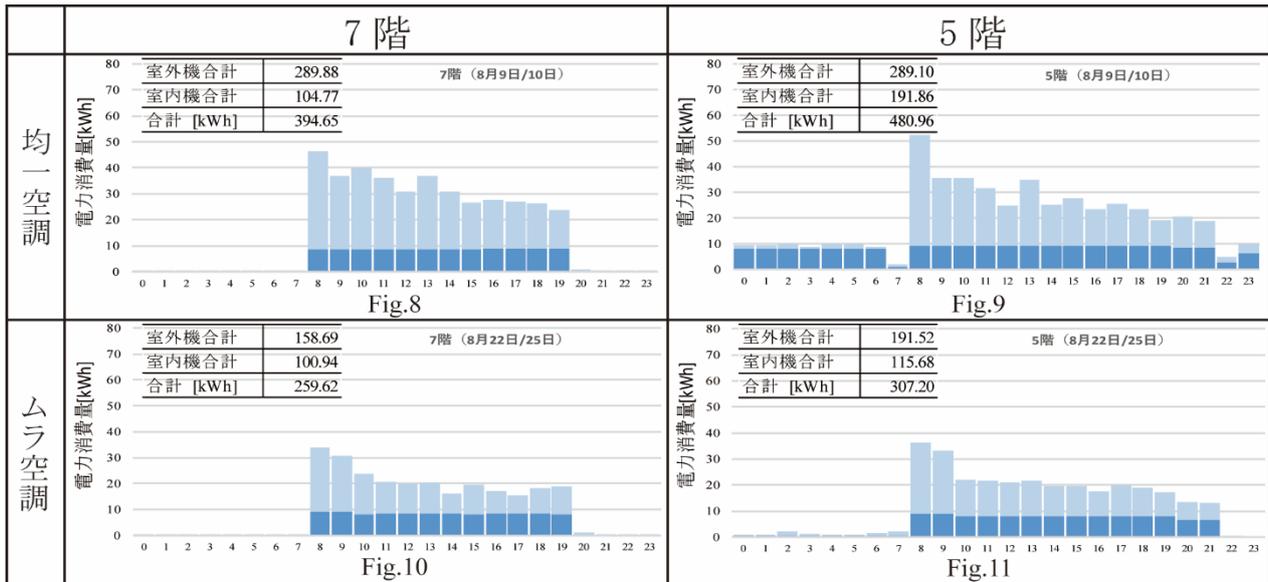


Fig.8~11 Air Conditioning System (ACS) Energy Consumption

減少しているムラあり Day1 から Day2 では、緩和空調ゾーンからしっかり空調ゾーンに社員が移動している可能性があり、同じエリアに滞在して不快に感じたのち滞在场所を変えて快適になった可能性が示唆された。なお、場所移動なし群では温冷感申告が変化してもゾーン間の移動は確認できなかった。

2つの群のゾーン別滞在人数割合(Fig.6, Fig.7)を比較すると、場所移動なし群はしっかり空調ゾーン(⑤~⑦)に多く、場所移動あり群は緩和空調ゾーン(①~④)が多い。従って、『ムラ空調』の導入(緩和空調による暑熱環境の導入)によって、暑い空間から涼しい空間への場所移動を促せていた可能性が示唆された。

### 5. 『ムラ空調』導入による空調エネルギー削減量

アンケート回答を得た(同様の気象条件の日である)4日間の室内機と室外機の消費電力を Fig.8~11 に示す。

均一空調(ムラなし、8/9・8/10の平均値)とムラ空調(ムラあり、8/22・8/25の平均値)の空調消費電力量は5階でそれぞれ481kWh、307kWh、7階でそれぞれ395kWh、260kWhとなり、5階で36%減、7階で34%減となった。

### 6. まとめと今後

本報では、夏期に導入した『ムラ空調』の導入効果について、その快適性と執務場所の選択に関するアンケート調査結果と分析結果、及び省エネルギー効果について報告し、以下の知見が得られた。

- 1) 回帰モデルによる分析の結果、緩和空調ゾーンでは場所選択が行われている一方でしっかり空調ゾーンは場所選択がされておらず固定席化が起きている可能性が示唆された。
- 2) 均一空調時よりもムラ空調時で場所選択がされやすく、ムラ空調の導入が場所選択の促進に寄与している可能性が示唆された。
- 3) ムラ空調の導入(緩和空調による暑熱環境の導入)に

よって、暑い空間から涼しい空間への場所移動を促せていた可能性が示唆された。

- 4) ムラ空調の導入によって、空調エネルギーが削減できることを確認した。

今後は、温冷感申告と室内温度との関係性や、マルチレベルモデルを適用した、性別や年齢などの個人属性間の差異あるいはゾーンやフロア間の差異と各属性内での測定値の差異を同時に分析する必要がある。また、ムラ空調の導入による場所移動が環境選択となっていたかを定量的に把握するための測定や調査が必要である。

### 謝辞

本研究の遂行にあたりアンケート調査にご協力いただいた皆様に深く感謝の意を表します。

### 注釈

- 注1 アンケート調査による実績値。ただし、全8回中の回答回数1回のみのワーカーもいれば、8回すべてのワーカーも含まれる。1人当たりの平均的な回答回数は3.7回。勤務形態がABWであるため、すべての社員の回答ではない。
- 注2 執務場所の滞在を確認したすべてのサンプルの数。これらのうち電話やWEB会議中でアンケート回答ができず執務場所のみを記録したサンプルは除外し、他回答に欠損がなかった664サンプルを分析に使用した。
- 注3 多変量解析統計ソフト IBM SPSS Statistics 29.0 を用いた。
- 注4 値は Pearson の積率相関係数を示す。\* $p < 0.050$ , \*\* $p < 0.010$ 、有意性のないものはグレーまたは n.s. で表記
- 注5 当初、相関分析により有意性のある説明変数を選択し回帰モデルに投入する予定であったが、有意性のある2変数を投入した回帰モデルの自由度調整済み決定係数 R2 値(採用した説明変数が目的変数ほどの程度説明できるかを示すモデルの適合度)が0.50未満であったことから、回帰モデルの説明変数は多重共線性が生じる可能性が高い変数を除いた8変数とした。なお、本報3.1.3項で採用したモデルの R2 値は0.62。

### 参考文献

- 文1 CBRE ウェブサイト  
[https://www.cbre-propertysearch.jp/article/office\\_buy\\_or\\_rent-vol1/](https://www.cbre-propertysearch.jp/article/office_buy_or_rent-vol1/), 東京23区内の上場企業1720社を対象とした2013年9月1日時点のデータ, 2024年2月14日閲覧
- 文2 環境省 リーディングテナント行動方針 HP, 2024年2月14日閲覧
- 文3 田中、近本ら: ABW 指向型オフィスにおける執務空間の違いが知的生産性と心理・生理量に及ぼす影響に関する研究(第1報)中間期及び夏期被験者実験の概要と模擬作業成績の結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9
- 文4 三木ら, 某インベーションオフィスにおける環境設備計画, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, B5, 2023.3.7
- 文5 海塩ら, マルチレベルモデルに基づく室温による家庭血圧への影響—冬季の室内温熱環境が血圧に及ぼす影響の実態調査(その2)—, 日本建築学会環境系論文集, 80巻715号 p.703-710, 2015

室内湿度の下限値の探究  
皮膚の顕微鏡画像に基づく肌理の特徴量の抽出  
Determination of Lower Limit of Indoor Humidity  
Extraction of Feature in Skin Texture Based on Skin Micrographs

○清水 健人 (神戸大学)

高田 暁 (神戸大学)

Taketo SHIMIZU\*1 Satoru TAKADA\*1

\*1 Kobe University

This study aims to clarify the relationship between the features of skin texture by 2-dimensional Fourier transform of microscopic skin images, and ambient humidity, through experiments in which subjects were exposed to changes in absolute humidity. Among the fineness and complexity of the skin texture, complexity was better correlated with humidity. Complexity in skin texture has potential for evaluating skin health status or aesthetic assessment due to quantitative measurement of fine irregularities.

## 1. はじめに

冬期には室内が低湿度となり [1,2]、皮膚や粘膜、目の乾燥や静電気の発生が示唆されている [3] が、人体側への影響に基づいた湿度の下限値は示されていない [4]。低湿度の場合、室内で加湿が行われるが、カビや結露の発生、加湿による負荷増大の懸念もあり、最小限とすることが望ましい。建築物環境衛生管理基準に相対湿度の下限値として 40% という数値が挙げられているが、その明確な根拠は示されていない。省エネルギーと健康・快適の両立を図る観点からは、湿度の下限値を現状より下げる可能性を探索することが重要であると思われる。居住者の乾燥感評価により必要最低限の湿度を明らかにするために行われた被験者実験では、低湿度 (相対湿度 10% 前後) でも乾燥していると申告した被験者が少数であったため、下限を示すには至っていない [5]。下限を決める際に多様な観点が考えられるが、本研究では、皮膚の健康の観点から、皮膚の肌理 (きめ) に焦点を当てる。

肌理とは、皮膚表面の細かな凹凸のことであり、皮溝と皮丘 (皮溝によって囲まれた部分) によって構成されている。肌理は皮膚科医の診断に用いられ [6]、加齢や保湿によって変化することが報告されている [7,8]。また、化粧品の有用性評価の指標として用いられている。医療・健康・美容分野での研究では、肌理は外観に対する主観的な評価が大半で、定量的な評価を行ったものは少ない [9]。定量的に評価したものと、主に表面粗さの指標 Ra, Rz, RSm (JIS B 0601) が用いられている。この指標はある部分の線的な (1次元の) 評価であり、面的な評価は十分でない。画像処理を用いた面的な評価方法が提案されている [10] が、レプリカの採取を伴うため、短時間かつ連続

的に測定することが困難である。そこで本研究では、皮膚の顕微鏡画像の解析により肌理の特徴量を抽出する。また、湿度をステップ変化させた環境に被験者を曝露する実験により肌理の特徴量と湿度との関係を明らかにすることを目的とする。

## 2. 画像解析による肌理の特徴量の抽出方法

### 2.1 画像解析の方法と原理

皮膚表面の顕微鏡画像の特徴を機械的に分析し、定量的に評価する手法として、顕微鏡画像に対して 2 次元 Fourier 変換 (Eq. (1)) を適用し、そのスペクトルを用いる方法を採用する。

$$\mathfrak{F}f = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f[x, y] \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{ux}{N} + \frac{vy}{M} \right) \right] \quad (1)$$

ただし  $N, M$  は画像の横幅と縦幅 [pixel]、 $x, y$  は画像中の座標 [pixel]、 $u, v$  は空間周波数 [cycle/image-size] (以下、[c/is]) である。信号が周期的であることを仮定している Fourier 変換では、画像端部の信号の不一致によるスペクトル漏れが発生する。そこで、窓関数として hamming 窓 (Eq. (2)) を適用することで端部での信号の不一致を抑制する。つまり窓関数と画素値の積  $wf$  を Fourier 変換し、 $\mathfrak{F}f$  の代わりに  $\mathfrak{F}(wf)$  を得る (Eq. (3))。

$$w(r) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos \frac{\pi r}{L}, & 0 \leq r \leq L \\ 0.08, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathfrak{F}(wf) = \mathfrak{F}w * \mathfrak{F}f \quad (3)$$

$r$  は画像中心からの距離 [pixel]、 $L$  は画像の幅 [pixel] である。 $\mathfrak{F}(wf)$  は複素数で表されるため、 $\mathfrak{F}(wf)$  から振

幅を取り出して信号強度 (対数表記) に変換し、

$$\varphi = \log|\mathfrak{F}(wf)|^2 \quad (4)$$

Min-Max-Scaling 法により正規化してパワースペクトル画像 (以下、PSP) を得る。

$$\varphi' = \frac{\varphi - \min \varphi}{\max \varphi - \min \varphi} \quad (5)$$

PSP には偏角の情報が含まれている。純に空間周波数ごとに議論するため PSP の中心から距離  $r$  [c/is] の同心円上の値を積算し、その面積で除することで偏角の情報を落としたパワースペクトル密度  $D[k]$  (以下、PSD) を算出した。この PSD を基本として肌理の特徴量を抽出する。

この画像解析は、顕微鏡画像の画素値を皮膚表面の凹凸とみなして Fourier 変換を用いて解析している。Fourier 変換は座標空間から周波数空間への写像である。周波数空間で用いられる空間周波数は、画像に含まれる構造の反復回数のことであり、例えば 10 c/is は画像全体で 10 回反復している構造 (空間の周期性を構成している任意の空間的な要素) が含まれていることを指す。本研究では空間の周期性は肌理、構造は皮溝や皮丘に当たる。つまり Fourier 変換により肌理を構成している構造の量をその長さや幅ごとに検討することで肌理を評価する。

## 2.2 肌理の特徴量

### (1) 肌理の細かさ

肌理の細かさ  $\alpha_f$  を以下のように定義する。

$$\alpha_f := \overline{D[u_S]} \cdot \overline{D[u_L]}^{-1} \quad (6)$$

$$\overline{D[u_a]} = \frac{1}{m-n} \sum_{k=n}^m D[k] \quad (7)$$

where  $n = u_a - \delta$ ,  $m = u_a + \delta$

ただし  $u_S, u_L$  は皮丘幅の大小 (添字は Small, Large) に対応する空間周波数 [c/is]、 $\delta$  は平均化する範囲 (定数) である。各人の皮丘幅は多様であるため、皮丘幅の基準となる空間周波数での PSD の比で評価する。この周波数帯域は評価対象が属する集団の皮丘幅に対応する空間周波数が全て範囲内となるように定める必要がある。

### (2) 肌理の複雑さ

皮丘内部には細かな凹凸が存在している。この細かな凹凸がどの程度存在しているかを肌理の複雑さとして定義する。Parseval の定理により空間周波数帯域  $[i, j]$  における原データ  $f$  の分散  $\text{Var}f$  への寄与率として肌理の複雑さ  $\alpha_c$  が以下のように表せる。

$$\alpha_c := \frac{\sum_{k=i}^j |\mathfrak{F}(wf)[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |\mathfrak{F}(wf)[k]|^2} \times 100 \quad (8)$$

## 3. 肌理の特徴量の解釈と湿度変化への応答の把握

### 3.1 実験方法

#### (1) 肌理の多人数調査

健康な成人の男女 92 名 (男性 58 名、女性 34 名、年齢 18–65 歳 [24.8±11.3 歳, mean±SD]) を対象に、被験者の手背部をデジタル顕微鏡 (AD-4113ZT Dino-Lite, AnMo Electronics Co.) で撮影し、肌理の細かさと複雑さに使用する空間周波数 (パラメータ) の同定を行った。

#### (2) 湿度変化による肌理の変化性状の測定

被験者は健康な成人、男女 7 名 (男性 5 名、女性 2 名、年齢 21–23 歳 [22.0±1.2 歳, mean±SD]) であった (以降 S1, ..., S7 と表記)。clo 値は 0.58–1.00 の範囲であった。人工気候室内の環境は気温を 23°C 一定とし、湿度を中湿度 (6 g/kg(DA), 34.4%rh)、低湿度 (2 g/kg(DA), 11.5%rh)、高湿度 (10 g/kg(DA), 57.0%rh) の順に変化させ、右手背部の顕微鏡による撮影と、皮膚血流量 (Laser doppler ALF21, ADVANCE Co.)、含水率 (Moisture Checker MY-808S, SCALAR Co.) の測定を行った (Fig. 1)。馴化時間として人工気候室へ入室後 30 分間、椅座姿勢で安静 (代謝率 1.2 met 程度) に過ごすよう指示した。曝露中、発汗を抑えるため、椅座安静を指示し、撮影時には撮影箇所が移動しないよう前腕部を指定した位置に固定するよう要請した。人工気候室内の環境は、温湿度/放射温度を温湿度ロガー (RS-14/RS-72Ui, ESPEC Co.)、風速を熱線風速計 (Model 6543, KANOMAX JAPAN Inc.) で記録した。

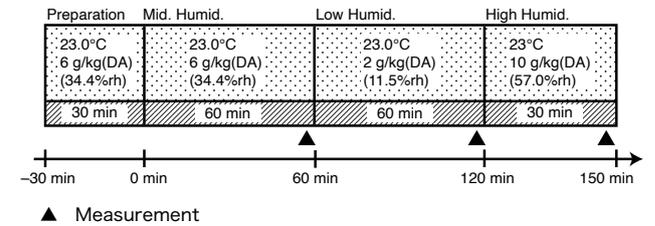


Fig. 1 Experimental protocol for response to humidity step changes

### 3.2 実験結果

#### (1) 肌理の多人数調査

撮影した顕微鏡画像から得られた肌理の細かさと複雑さは、いずれも正規分布に近かった (細かさ 0.967±0.002 (mean±SE)、複雑さ 40.23±0.018 (mean±SE)) (Fig. 2)。肌理の細かさのパラメータを同定するため、画像のピクセル数を数えることで皮丘幅を計測した。肌理の細かさに使用する空間周波数  $u_S, u_L$  は被験者の中での最小 (約 250  $\mu\text{m}$ ) と最大 (約 500  $\mu\text{m}$ ) とに対応させ、15, 30 とした。また、肌理の複雑さに用いる周波数帯域は皮丘と皮丘内部の凹凸とを十分に区別するため、皮丘より 3 倍程度細かい 90 c/is を基準とし、ピントのずれによる影響が少ない 300 c/is 以下の周波数となるよう [90, 290] とした。

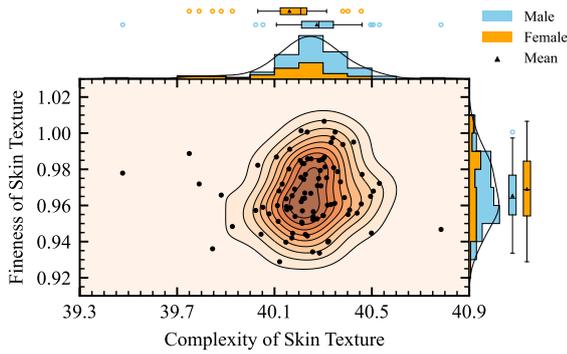


Fig. 2 Distribution in fineness and complexity of skin texture

(2) 湿度変化による肌理の変化性状の測定結果

人工気候室内の環境の経時変化を皮膚血流量とともに Fig. 3 に示す。風速  $0.27 \pm 0.02$  m/s (mean $\pm$ SD) で平均放射温度  $23.3 \pm 0.54^\circ\text{C}$  (mean $\pm$ SD) であった。気温はすべての実験において、 $23.2 \pm 0.44^\circ\text{C}$  (mean $\pm$ SD) であった。高湿度の条件だけ気温が上昇する傾向にあった。湿度は、中・低・高湿度のそれぞれの条件で平均  $5.05 \pm 0.12$ ,  $3.64 \pm 0.39$ ,  $8.53 \pm 1.46$  g/kg(DA) (mean $\pm$ SD) となった。ただし、S2, S4 の実験では湿度が高めとなった。皮膚血流量については実験開始後、低下する傾向があった。

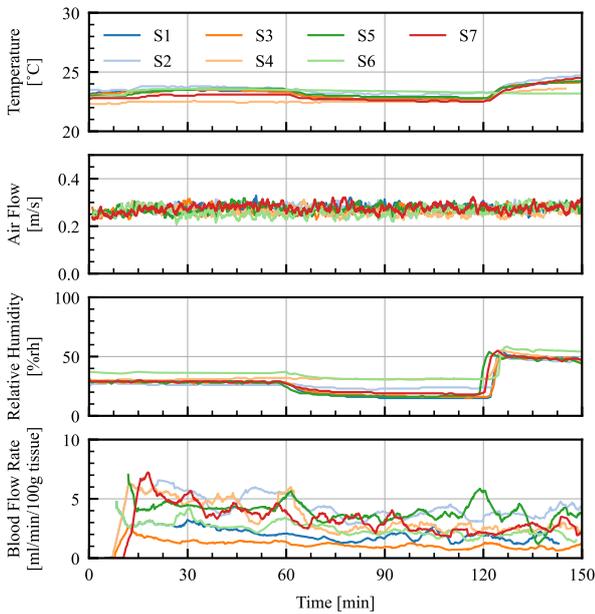


Fig. 3 Temporal fluctuations in ambient environment and blood flow rate

皮膚含水率の経時変化を Fig. 4 に示す。Sub2 を除き、低湿条件時 (実験開始から 120 分後) に測定した値は、中湿条件時 (実験開始から 60 分後) での測定値よりも低く、高湿条件時 (実験開始から 150 分後) の測定では回復していた。ただし、低湿条件時に含水率が低下し、その後高湿時の測定で中湿時の測定値を超えたのは S5, S6 の 2 名であった。

皮膚含水率と絶対湿度の関係を Fig. 5 に示す。湿度変化の順番によらず絶対湿度が高いと含水率も高くなる傾向が見られた。各人の含水率は多様であり、その差は絶対湿度変化によって生じた含水率変化幅よりも大きい。

絶対湿度と肌理の複雑さの関係を Fig. 6 に示す。全体として、絶対湿度が高いほど肌理の複雑さが減少する傾向が見られたが、中湿度から低湿度への過程と低湿度から高湿度への過程における肌理の変化の幅は異なっていた。各人の肌理の複雑さは皮膚含水率と同様に多様であった。絶対湿度と肌理の細かさの関係を Fig. 7 に示す。S4 を除き、肌理の細かさも絶対湿度の変化と連動して変化していたが、複雑さと比較すると相関は低い。肌理の特徴量と湿度/含水率との相関係数を Table 1 に示す。肌理の複雑さは絶対湿度と負の相関 (相関係数  $-0.431$ ) があるが、その他について明確な相関関係は認められなかった。

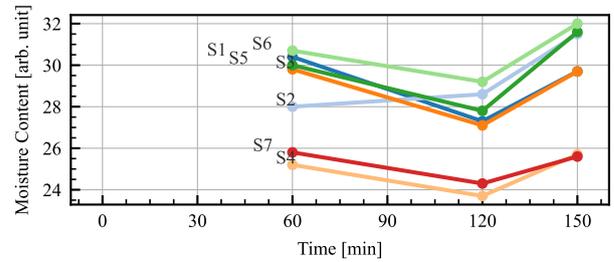


Fig. 4 Temporal fluctuations in moisture content

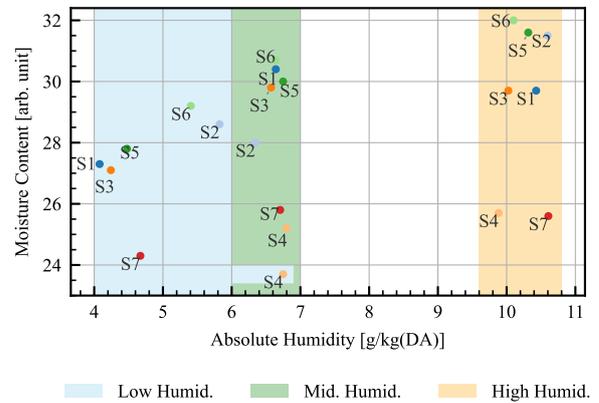


Fig. 5 Relationship between absolute humidity and moisture content

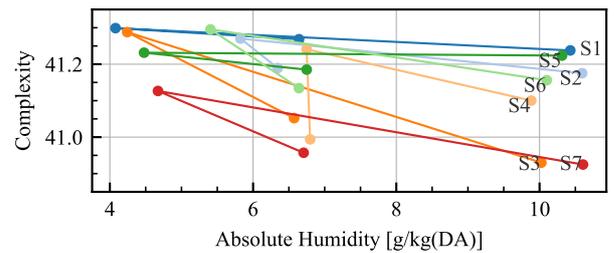


Fig. 6 Relationship between absolute humidity and complexity

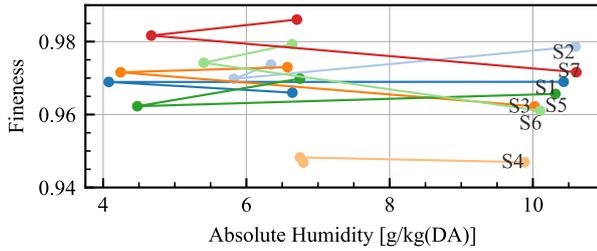


Fig. 7 Relationship between absolute humidity and fineness

Table 1 Correlation coefficient between feature in skin textures and environmental/human factors

Factors	Coef. of fineness	Coef. of complexity
Relative Humidity	-0.219	-0.431
Absolute Humidity	-0.202	-0.413
Moisture Content	0.245	0.242

4. 肌理の特徴量の健康指標としての可能性

中湿度から低湿度への変化の際に、肌理の複雑さは、増加した（湿度が低下しなかった S4 を除く）(Fig. 8)。皮膚含水率と肌理の複雑さの関係では、絶対湿度と連動した含水率の低下に伴い、肌理の複雑さが増加している (Fig. 9)。一方、低湿度から高湿度への変化の際にも、上記と逆の変化が生じていると言え、湿度と肌理の複雑さの対応関係が見られる。履歴の影響からか、2つの過程での単位絶対湿度あたりの複雑さの変化量は異なっているものの、肌理の複雑さが湿度変化に伴う皮膚の変動を表す指標となりうることを示唆している。

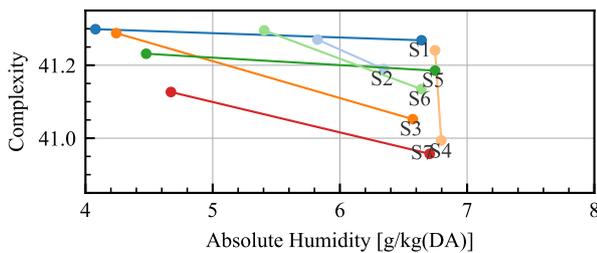


Fig. 8 Change in complexity from medium humidity to low humidity

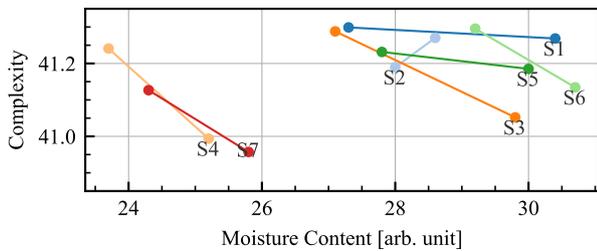


Fig. 9 Change in complexity and moisture content from medium humidity to low humidity

肌理の複雑さの増加は、皮丘表面の細かい凹凸（皮丘の3から10分の1の寸法）が増えることを意味しており、含水率が低下し、蒸発した分の体積が減少し、皮丘がしば

むことにより凹凸が増えると考えられる。皮膚科学分野で皮膚のバリア機能 [11] がしばしば議論されるが、肌理の複雑さとバリア機能の関連が今後明らかにされれば、健康指標としての可能性が広がると思われる。一方、皮膚の複雑さが代表する皮膚表面の数十 μm オーダーの凹凸の性状が皮膚の美しさと対応が得られれば、皮膚の美しさという視点による評価指標となる可能性が考えられる。

5. まとめ

皮膚表面の顕微鏡画像から画像解析により肌理の特徴量の抽出し、肌理の特徴量と湿度の関係を明らかにすることを目的として、23°Cの定温環境下において、絶対湿度を2, 6, 10 g/kg(DA) に変化させた被験者実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 肌理の特徴量として、「細かさ」と「複雑さ」を皮膚の顕微鏡写真を Fourier 変換し得られたパワースペクトル密度から定量的に定義した。
- 2) 肌理の細かさ、複雑さの両方が絶対湿度と連動して変化するが、肌理の複雑さの方が、絶対湿度の低下に伴い複雑さが増加するという傾向を明確に示した。
- 3) 肌理の複雑さは、皮丘の5分の1程度の細かい凹凸を定量的に把握することで、皮膚の健康状態の評価美的観点による皮膚の見た目の評価に利用する可能性があると思われる。

参考文献

- [1] H. Zhang *et al.*, 2010, Analysis of indoor humidity environment in Chinese residential buildings, *Building and Environment*, 45(10):2132-40
- [2] M. Kotol *et al.*, 2014, Indoor environment in bedrooms in 79 Greenlandic households, *Building and Environment*, 81:29-36
- [3] P. Wolkoff, 2018, Indoor air humidity, air quality, and health - An overview, *Int J Hyg Environ Health*, 221(3):376-90
- [4] ANSI/ASHRAE, 2020., ASHRAE standard: Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, (ASHRAE standard)
- [5] S. Takada, 2021, Study on the lower limit of indoor humidity subject experiments on psychological responses, *Indoor Air*, 31(1):250-63
- [6] 富田靖ら, 2013, 標準皮膚科学 第9版, 医学書院, 61-65
- [7] L. Li *et al.*, 2006, Age-related changes in skin topography and microcirculation, *Archives of Dermatological Research*, 297(9):412-6
- [8] S. Lueangarun *et al.*, 2019, The 24-hr, 28-day, and 7-day post-moisturizing efficacy of ceramides 1, 3, 6-II containing moisturizing cream compared with hydrophilic cream on skin dryness and barrier disruption in senile xerosis treatment, *Dermatologic Therapy*, 32(6):e13090
- [9] 小林宏ら, 2010, 画像解析による肌のキメの定量的指標の提案と実用化, *日本機械学会論文集 C 編*, 76(764):922-9
- [10] 林照ら, 1989, 加齢及び化粧品による表皮形態の変化, *日本化粧品技術者会誌*, 23(1):43-54
- [11] 溝口昌子ら, 2008, 皮膚の事典 朝倉書店, 25

## 皮膚乾燥特性の評価に向けた角層の水分拡散係数の同定 Determination of Water Diffusion Coefficient in Stratum Corneum for Evaluation of Skin Dryness Characteristics

田中 琴絵 (神戸大学)

高田 暁 (神戸大学)

Kotoe TANAKA\*1 Satoru TAKADA\*1

\*1 Kobe University

To evaluate the characteristics of skin dryness, we determined water diffusion coefficient in the stratum corneum by comparing measured values of skin moisture content change during a series of skin immersion in water, followed by drying with calculated values using a water transfer model in the stratum corneum. The water diffusion coefficient was optimized so that calculated values matched measured values. In most measurement cases, the rate of change in calculated values got closer to measured values when the diffusion coefficient was 5 times of literature value, and thus the diffusion coefficient was determined for the subject.

### はじめに

日本では冬期に空気の絶対湿度が低下し、乾燥による不快感が広く発生することが既往のアンケート調査<sup>1)</sup>で報告されており、主に加湿による対策が行われている。しかし、建物管理の観点からはエネルギー消費量・低温部における結露のリスクの増加を抑えるため、加湿量はなるべく少ないほうが良い。そこで、乾燥による不快感の生じない湿度の下限値が重要になるが、低湿度環境下における乾燥感の発生には個人差がみられ<sup>2)</sup>その値を明らかにすることを難しくしている。本研究では、乾燥感が訴えられる主要な体の部位のひとつである皮膚<sup>3)</sup>に着目する。そして、皮膚の乾きやすさにおける個人差が皮膚における乾燥感の感じやすさにおける個人差の一要因であるという仮定に基づき、皮膚の乾きやすさを評価することを目的とする。

皮膚の構造は、表面から表皮・真皮・皮下組織の3層構造になっており<sup>4)</sup>、周囲の環境に応じて含水状態が変化するのは、表皮中でもっとも皮膚表面近くに位置する角化が進んだ細胞により構成される角層(厚み20 $\mu$ mほど<sup>4)</sup>) (SC)である。空気に曝露された角層内においては、通常皮膚内部から皮膚表面に向かう水分流が生じている。この水分流は角層中の水分透過性の影響を受けて変化し、透過性が高いほど水分流は大きく、水分透過性が低いほど水分流は小さくなる。よって同等の水分供給の元では、角層の水分透過性が高いほうが皮膚は乾燥しやすと考えられる。角層の水分透過性については、人体から切り離した皮膚片を用いた (in vitro) 実験により定常状態における角層中の水分拡散係数のデータが報告されている<sup>5), 6)</sup>。また、Liらは、これらのデータをもとに水分拡

散係数を含水率の関数として表現し、これを用いた角層中の水分移動モデルを示している<sup>7)</sup>。

水分拡散係数には個人差があると考えられることから、本研究においては、角層中の含水率変化が明確に表れるよう濡れ刺激に対する皮膚含水率の経時変化を測定した実測値と、角層の水分拡散係数に基づく水分移動モデルを用いて解析した角層中の含水率分布の解析値を比較し、水分移動モデルの妥当性を検討するとともに、解析値の測定値に合致する角層中における水分拡散係数の同定を行う。本論文では、被験者1名に対する結果を示す。

### 1. 濡れ刺激に対する皮膚含水率変化の実測

皮膚を水に浸漬し、その後それが蒸発する過程(図1)について、被験者実験を行い、皮膚含水率を連続的に測定した。浸漬は5分、10分間の2通りとし、各3回ずつ行った。被験者は1名(22歳、女、軽度のアトピー性皮膚炎あり)である。用いた皮膚含水率の測定器(スカラ社 MY-808S)は静電容量式で、皮膚表面のある深さ領域までの平均含水率を測定していると考えられる。浸漬前後の皮膚含水率の経時変化を図2に示す。併せて測定時の平均温度・平均相対湿度を示している。

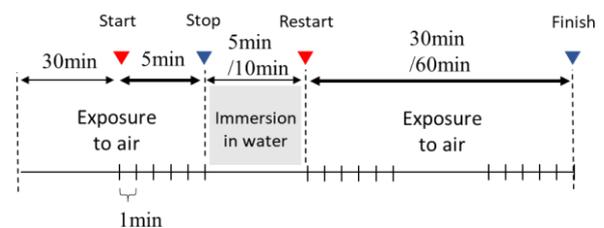


Fig. 1 Measurement schedule

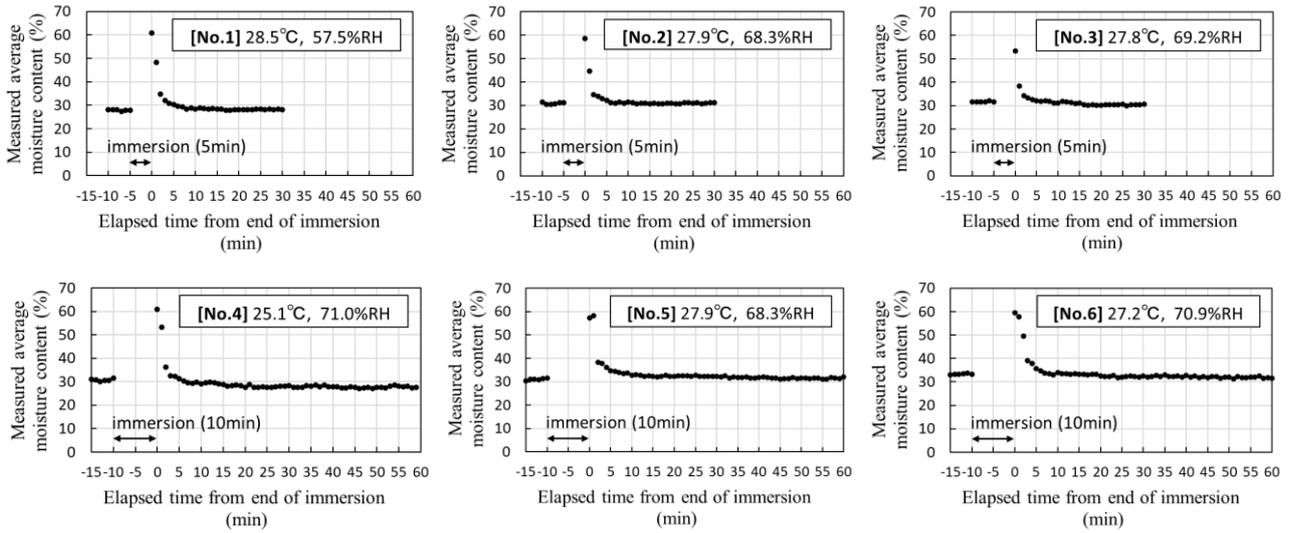


Fig. 2 Changes in skin moisture content measurements over time

実験時の室内の平均気温は 25.1~28.5°C、平均相対湿度は 57.5~71.0%であった。すべての実験で、浸漬前に 30%程度であった皮膚含水率は浸漬直後に 50~60%程度となる。その後皮膚含水率は急速に低下し、5、10 分間の浸漬に対し、それぞれ浸漬終了から 20~25分、28~42分程度で浸漬前と同程度の値で一定となった。

## 2. 角層膨潤収縮モデル<sup>7)</sup>を用いた皮膚含水率の解析

### 2.1 解析モデルと解析条件

皮膚の角層(SC)-顆粒層(GL)境界を原点、皮膚表面側を正とする 1 次元座標を導入し (図 3)、式(1)~(7)を用いて角層内の含水率分布を被験者実験の条件について解析した。初期条件として、実験開始時の温湿度での定常時含水率分布を与えた。

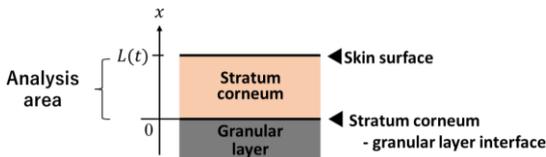


Fig.3 Analysis area of water transport and swelling model

#### ①水分収支式

$$\frac{\partial C_w(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial C_w(x,t)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

#### ②含水率と角層局所厚みの関係式

$$\delta(C_w) = \frac{\delta_{mem}}{1 - \frac{C_w}{\rho_w}} \quad (2)$$

#### ③角層-顆粒層境界条件

$$C_w(0,t) = C_{w,sat} \quad (3)$$

#### ④皮膚表面境界条件 (水浸漬時)

$$C_w(L(t),t) = C_{w,sat} \quad (4)$$

#### ⑤皮膚表面境界条件 (空気曝露時)

$$f(L(t),t) = \alpha'(\alpha_{wL(t)} \cdot P_{sat,skin} - RH_{air} \cdot P_{sat,air}) \quad (5)$$

#### ⑥皮膚表面における含水率と水分活性の関係式 (平衡含水率曲線)

$$\frac{V_L}{V_m} = \frac{ck\alpha_{wL(t)}}{(1 - k\alpha_{wL(t)})(1 - k\alpha_{wL(t)} + ck\alpha_{wL(t)})} \quad (6)$$

ただし、

$$V_L = \frac{\rho_w C_w}{\rho_{mem}(\rho_w - C_w)} \quad (7)$$

水分拡散係の値は式(8)<sup>7)</sup>により計算する

$$D \times 10^9 = 0.4331 - 0.3765e^{-9.6215C_w} + 0.00006428e^{12.673C_w} \quad (8)$$

計算に用いた数値は表 1 に示す通りである。

Table. 1 In the center over the table<sup>7)</sup>

$\rho_w$	1.0 [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{mem}$	1.3 [g/cm <sup>3</sup> ] <sup>8)</sup>
$V_m$	0.0386 [g/g] <sup>8)</sup>	$c$	4.39 <sup>8)</sup>
$k$	1/1.01 [-] <sup>8)</sup>	$C_{w,sat}$	0.78 [g/cm <sup>3</sup> ] <sup>9)</sup>
$\alpha' \times 10^{-9}$	2.257 [g/cm <sup>2</sup> · s · Pa]		

また  $C_w = 0$  における角層全体の厚みは 9.55 $\mu$ m<sup>9)</sup> とする。

## 2.2 解析結果

皮膚含水率の測定値が 0~70 の相対値で示されることから、得られた含水率分布の解析値について、皮膚表面からの距離に応じて計測器の測定特性<sup>10)</sup>に基づき重みづけを行って<sup>11)</sup>平均皮膚含水率を求め、実測値と比較する。図 4 に解析結果として、角層表面および各分割点 (含水率が一樣である時に角層-顆粒層境界と表面とを 4 分割した点) における含水率の解析値とともに、重みづけを行った平均皮膚含水率を示す。また、併せて解析に入力した温湿度条件の平均温度・平均相対湿度を示す。図 5 に平均皮膚含水率の解析値と皮膚含水率の測定値の比較を示す。ただし解析値、測定値ともに、浸漬直前を 0、直後を 1 として無次元化した値を示している。

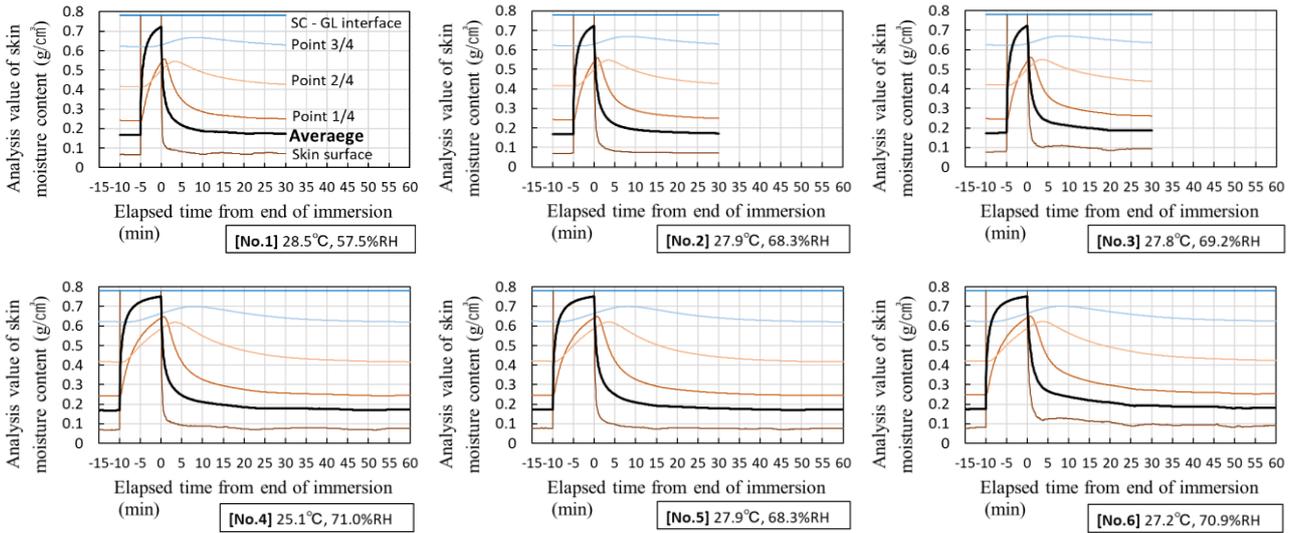


Fig. 4 Analysis value of content distribution in the SC and average skin moisture content (SC: stratum corneum, GL: granular layer)

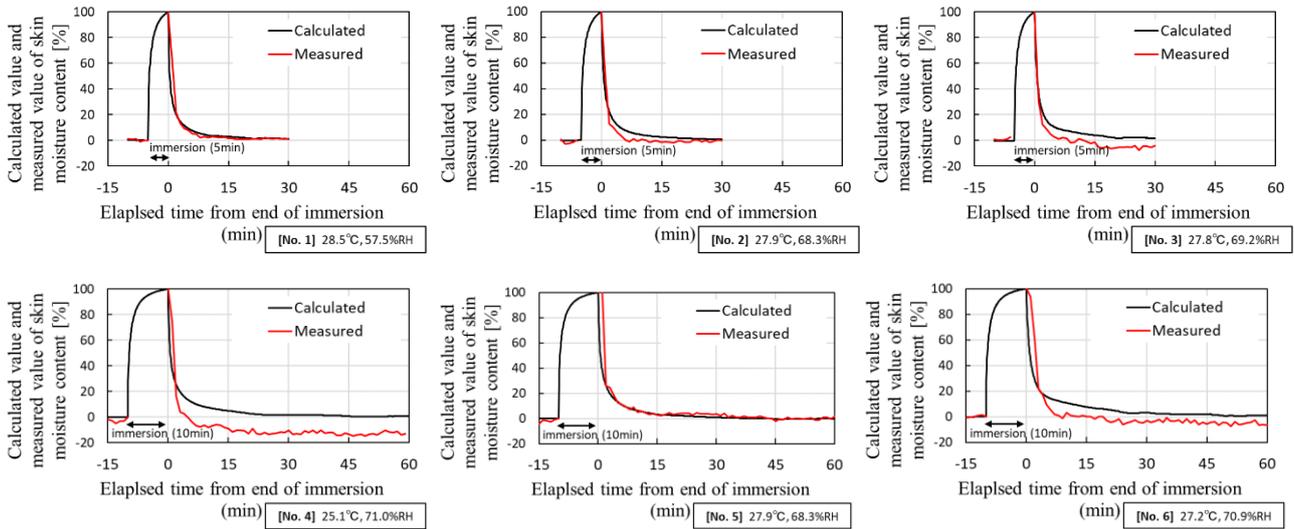


Fig. 5 Comparison of calculated value and measured value of skin moisture content

図 5 より、解析値と実測値について浸漬前後の含水率の経時変化の性状が一致している。ともに浸漬終了時(測定 No. 5 については浸漬終了 1 分後)に含水率が最大となり、その後時間の経過とともに下に凸な曲線を描きながら低下し、やがて一定の値をとる。一方、測定 No. 4 の測定値のように、浸漬後の定常時含水率が浸漬前より高くなる現象を解析では再現できなかった。外部刺激(濡れ)に対する含水率の過渡応答の速さは、測定結果に比べて解析結果のほうがやや遅くなった。

3. 角層中の水分拡散係数の同定

ここまでの解析では、角層中の水分拡散係数として  $L_i$  の測定値<sup>[7]</sup>を用いてきたが、より測定値に近い皮膚含水率の解析値を得る水分拡散係数を求める。測定 No. 2 の

温湿度条件のもとで、水分拡散係数を変化させた際の皮膚含水率の解析値を図 6 に示す。

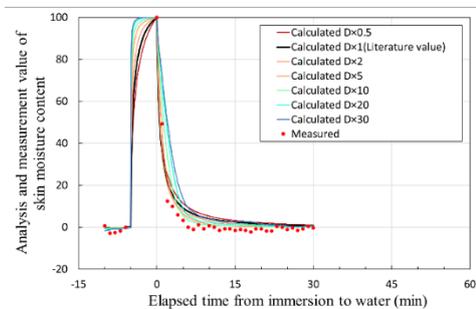


Fig. 6 Comparison of calculated value and measured value of skin moisture content (calculated with different water diffusion coefficient)  
 [Measurement case: No.2]

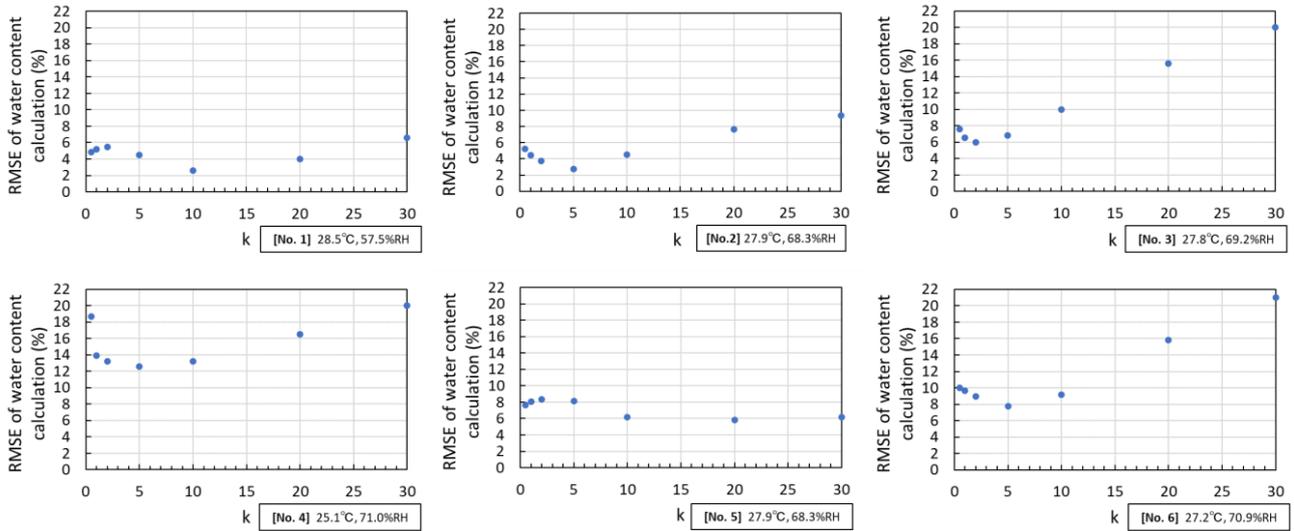


Fig. 7 RMSE of calculated moisture content according to water diffusion coefficient

図 6 より、水分拡散係数をもとの値から大きくすると、浸漬終了後の応答速度は速くなり、式(8) <sup>7)</sup>全体を 5 倍としたときには、過渡応答の速度が実測値と解析値でよく一致した。一方、さらに水分拡散係数を大きくすると、浸漬終了 5 分後付近から平均含水率の減少が鈍くなり、浸漬後の乾燥過程で平均皮膚含水率が一定値に至るまでの時間が長くなった。この傾向は他の測定条件に対しても同様にみられた。また、水分拡散係数を式(8) <sup>7)</sup>全体を  $k$  倍 ( $k = 0.5, 2, 5, 10, 20, 30$ ) した場合の、測定値と解析値 (浸漬前 5 分間、浸漬後 30 分間、1 分間隔) の二乗平均平方根誤差を図 7 に示す。No. 2, No. 4, No. 6 においては、水分拡散係数を 5 倍とした際に最も、誤差が小さくなった。一方 No. 1 の測定は 10 倍、No. 3 は 2 倍、No. 5 は 20 倍とした場合に最も誤差が小さくなり、測定ケースごとのばらつきがみられた。

#### 4. まとめ

皮膚を水に浸漬した後、水分が蒸発する過程での皮膚含水率が被験者実験により測定し、角層膨潤収縮モデルによって皮膚含水率の測定値の応答速度を再現する角層の水分拡散係数を同定した。複数回行った実験ごとによらつきはあるものの、角層の水分拡散係数を文献値より大きな値 (2~20 倍) とした際に、より測定値と合致する解析値を得られることを示した。

#### 記号表

$x$ : 位置 [cm],  $t$ : 時刻 [s],  $C_w$ : 含水率 [g/cm<sup>3</sup>],  $D$ : 水分拡散係数 [cm<sup>2</sup>/s],  $\delta(x, t)$ : 角層の局所厚み [cm],  $\delta_{mem}$ :  $C_w = 0$  における角層局所厚み [cm],  $\rho_w$ : 水の密度 [g/cm<sup>3</sup>],  $C_{w, sat}$ : 飽和含水率,  $L$ : 角層表面の位置 [cm],  $f$ : 水分流 [g/cm<sup>2</sup>·s],  $P_{sat}$ : 飽和水蒸気圧 [Pa],  $V_L$ : 平衡水分吸着量 [g<sub>water</sub>/g<sub>dry mem</sub>],  $c, k, V_m$ : 平衡含水率曲線の定数,  $\alpha_{wL(t)}$ : 皮膚表面の水分活性 [-],  $RH_{air}$ : 空気相対湿度 [-]

#### 参考文献

- 1) 高田暁. 乾燥感と室内温熱環境条件に関する基礎的研究. 日本建築学会環境系論文集. 2013; 78(693), pp. 835-840.
- 2) Takada S. Study on the lower limit of indoor humidity subject experiments on psychological responses. Indoor Air. 2021, 31(1), pp. 250-263.
- 3) 長谷川兼一, 増田早也花, 松本真一, 竹内仁哉, 松田賢. 居住空間における冬季の乾燥感と健康に関する調査研究 乾燥感の因果構造モデルの基礎的検討. 空調調和・衛生工学会大会 学術講演論文集. 2021, 第 7 巻 pp. 153-156.
- 4) 瀧川雅浩. 標準皮膚科学 第 9 版, 医学書院, 2010, pp. 4-29.
- 5) Blank, Irvin H, et al. The diffusion of water across the stratum corneum as a function of its water content. Journal of Investigative Dermatology. 1984, 82(2), pp. 188-194.
- 6) Johnson, Mark E., Daniel Blankschtein, and Robert Langer. Evaluation of solute permeation through the stratum corneum: lateral bilayer diffusion as the primary transport mechanism. Journal of Pharmaceutical Sciences. 1997, 86, 10, pp. 1162-1172.
- 7) Li X, et al. Dynamics of water transport and swelling in human stratum corneum. Chemical Engineering Science. 2015, 138, pp. 164-172.
- 8) Kasting, Gerald B., and Namrata D. Barai. Equilibrium water sorption in human stratum corneum. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2003, 92, 8, pp. 1624-1631.
- 9) Wang, Tsuo-Feng, Gerald B. Kasting, and Johannes M. Nitsche. A multiphase microscopic diffusion model for stratum corneum permeability. I. Formulation, solution, and illustrative results for representative compounds. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2006, 95, 3, pp. 620-648
- 10) スカラ株式会社, 小型高精度肌水分計の開発と測定について. 日本化粧品学会. 1996.
- 11) 開原典子, 高田暁, 松下敬幸. 室内湿度変化に対する皮膚含水率の非定常応答のモデル化. 日本建築学会環境系論文集. 2014, 79(697), pp. 233-239.

## 日射遮蔽物が室内熱環境に及ぼす影響

## (その3) 各種遮蔽物を用いた温度と照度の計測による模型実験

## Effect of solar shading on indoor thermal environment

## (Part 3) Model experiment by measuring temperature and illuminance using various

○白川 智也 (大阪電気通信大学)

添田 晴生 (大阪電気通信大学)

Tomoya SHIRAKAWA\*1 Haruo SOEDA\*1

\*1 Osaka Electro-Communication University

In this study, we aimed to clarify through simulation the effect of reducing power consumption of air conditioners and improving thermal comfort when using solar shading objects such as bamboo blinds. We conducted heat load simulation of the house with air conditioner model using weather data in Osaka. Power consumption was reduced by 31% for plastic blinds (light color) and 49% for plastic blinds (dark color), compared to without solar shading. It can be seen that thermal comfort is improved the most in the case of plastic blinds (dark color).

## はじめに

現在地球温暖化が進行しており、多くの地点で異常気象が観測されている。地球温暖化の影響により気温が上昇し、さらに夏場の高温化が予想される。高温化に伴い室内温度が上昇し、昨今、室内においても熱中症が増加しており、エアコンの使用とともに、省エネルギー化を図るためにも遮熱対策がますます重要になると考えられる。

住宅の遮熱対策として、古くからすだれが用いられており、研究例としては、すだれを用いた際のエアコンの電力削減効果について、約10年前に東京や東北地域において調べられている<sup>[1][2]</sup>が、高温化しつつある最近の大阪におけるエアコンの電力削減効果や熱的快適性の向上効果については調べられていない。

## 1. 研究目的

本研究では、すだれなどの各種日射遮蔽物を用いて模型実験を行い、その効果を調べ、さらに大阪におけるすだれなどの日射遮蔽物を用いた際のエアコンの電力消費量の削減効果ならびに熱的快適性の向上効果についてシミュレーションにより、明らかにすることを目的とする。

## 2. 模型実験条件

実際に用いた模型を Fig. 1 に示す。実験の方法として、模型（奥行き 400mm、幅 395mm、高さ 400mm）に夏至の太陽高度を考慮し、庇（長さ 75mm）を取り付けたものを3つ用意し、その下に断熱材（厚さ 50mm）を配置した。それぞれ模型1、模型2、模型3とした。T型熱電対の位置は模型の中心を T<sub>1</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>6</sub>、断熱材と地面の間を T<sub>2</sub>、T<sub>5</sub>、T<sub>7</sub>、地表を T<sub>3</sub>、ガラス（高さ 350mm、幅 200mm）の表面の中央部を T<sub>9</sub>、T<sub>10</sub>、T<sub>8</sub> に設置した。

設置場所は大阪電気通信大学寝屋川キャンパス D 号館

屋上で模型が他の設置物に日射が遮られないように考慮し、設置した。模型の木材はすべてファルカタ材（厚さ 13mm）を用いた。本実験で用いた日射遮蔽物はすだれ、プラスチックすだれ（明色）、プラスチックすだれ（暗色）、サンシェード（明色）、サンシェード（暗色）である。日射遮蔽物はそれぞれ高さ 400mm、幅 400mm の寸法である。

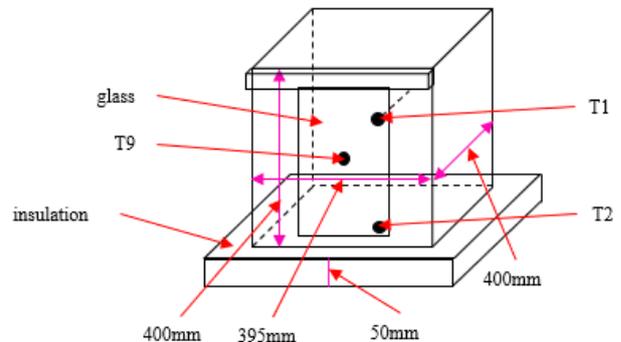


Fig. 1 model and Layout of thermocouple

## 3. 模型実験結果

## 3.1 某社遮蔽物とプラスチックすだれ色の違い

某社遮蔽物とプラスチックすだれの色の違いによる模型比較実験を行いその様子を Fig. 2 に示す。模型1（プラスチックすだれ暗色）、模型2（プラスチックすだれ明色）、模型3（某社遮蔽物）として、2023年12月2日から12月4日まで実験を行った。2023年12月2日の実験結果を Fig. 3 に示す。

プラスチックすだれの色の違いによる比較は前々報<sup>[3]</sup>で述べているが、プラスチックすだれ（明色）よりもプラスチックすだれ（暗色）の方が、温度が低く、遮蔽性能が高い。今回の実験結果においてもその傾向が見える。また某社遮蔽物とプラスチックすだれ（暗色）を比較した結果、

中心温度の最高温度では、プラスチックすだれ(暗色)の方が某社遮蔽物より 2℃高い結果となった。平均温度では、プラスチックすだれ(暗色)の方が某社遮蔽物より 1℃高い結果となった。



Fig. 2 Model experiment of model 1 (light colored plastic blinds), model 2 (dark colored plastic blinds) and model 3 (Certain company shield)

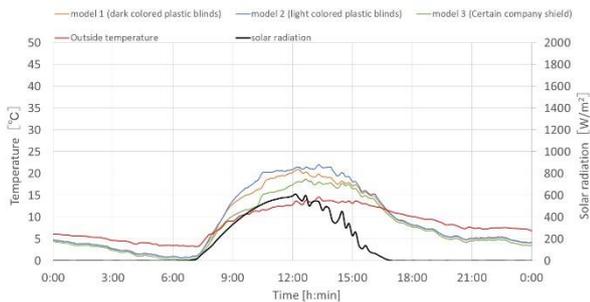


Fig. 3 Model test results for Model experiment of model 1 (light colored plastic blinds), model 2 (dark colored plastic blinds) and model 3 (Certain company shield) on December 2, 2022 (central temperature)

#### 4. 照度実験

##### 4.1 某社遮蔽物とプラスチックすだれの色の違い

照度センサー(GY-302 BH1750)を模型内部の中心部分に配置し、照度を計測する。模型実験と同じく最高照度と平均照度で比較を行う。

某社遮蔽物とプラスチックすだれの某社遮蔽物とプラスチックすだれの色の違いによる模型比較実験を行いその様子を Fig. 4 に示す。模型 1 (プラスチックすだれ暗色)、模型 2 (プラスチックすだれ明色)、模型 3 (某社遮蔽物) として、2023 年 12 月 19 日から 12 月 22 日まで実験を行った。2023 年 12 月 20 日の実験結果を Fig. 5 に示す。

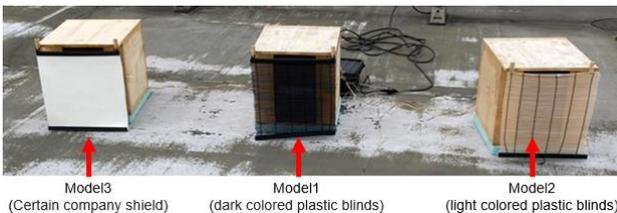


Fig. 4 Model experiment of model 1 (light colored plastic blinds), model 2 (dark colored plastic blinds) and model 3 (Certain company shield) illuminance

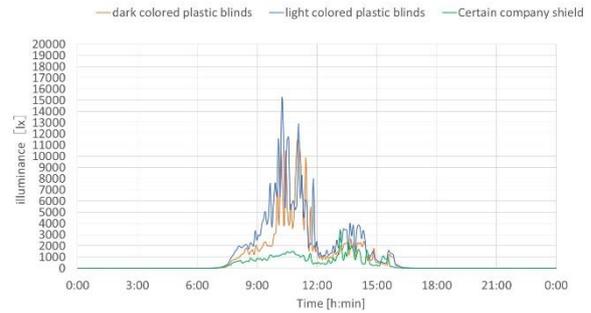


Fig. 5 Illuminance experiment results 2023/12/20

結果としては、最高照度は某社遮蔽物が 34381lx、プラスチックすだれ(暗色)が 114981lx、プラスチックすだれ(明色)が 151241lx となっている。平均照度は某社遮蔽物が 987 lx、天津すだれが(暗色) 3100 lx、プラスチックすだれ(明色)が 41281lx となっている。某社遮蔽物の遮熱性能は高いが、照度がプラスチックすだれ(暗色)の 1/3 程度になっており、明るさとしては十分であると考えられるが、今回の模型では模型の窓からすだれまでの距離が 70cm 程度であるが、その隙間から日射の拡散光が入ってきている可能性がある。模型のスケールからすると実際の住宅に置き換えたときに、大きな距離になっているため、今回の照度そのまま実際の住宅で得られると考えるのは難しいと考える。

#### 5. エアコンモデルを用いた住宅モデルのシミュレーション条件

熱負荷計算コード SCIENCE-Macro<sup>4)</sup>を用いてシミュレーションを行い、エアコンの電力消費量を算出し、すだれの省エネルギー効果や熱的快適性の影響を調べる。前報<sup>5)</sup>において、すだれを用いた模型実験に対してシミュレーションを行い、妥当性を検証している。

計算対象室として、Fig. 6 に示す日本建築学会標準住宅モデルの 1 階の 12 畳の LD 室を用いた。この住宅は木造充填断熱工法の平成 28 年省エネルギー基準相当として、南面と西面は外壁として外気に接し、東面と北面は内壁として隣室に接している。さらに南面に高さ 2000mm × 幅 1700mm の掃き出し窓が二つあり、西壁に高さ 1200mm × 幅 500 の腰高窓が二つある。また、添田ら<sup>6)</sup>が CFD を用いてルームエアコンを用いた室内の対流熱伝達率を調べており、南面、北面、床面、天井面、東面、西面の室内表面の対流熱伝達率はそれぞれ、4.99、6.66、8.12、3.59、4.39、4.94 W/(m<sup>2</sup>·K)の値を用いた。3 次元解析メッシュは、x × y × z = 8 × 13 × 14 としており、壁、床、天井の構成材料ごとに、3 分割として 1 次元熱伝導計算を行っている。

計算対象地域は大阪府寝屋川市として、計算期間は、7 月 1 日～9 月 30 日として、気象データは、2023 年の本実験

で測定した D 号館屋上の外気温、外気相対湿度、直達日射量、天空日射量、平均風速を使用した。ただし、D 号館屋上では、水平面全天日射量を測定しているが、宇田川・木村の直散分離式を用いて、直達日射量、天空日射量を算出している。エアコンは2016 年製の冷房定格 3.6kW のものを使用して、熱負荷、電力消費量、COP を算出した。ここでは、上野ら<sup>[7]</sup>の家庭用エアコンの熱源特性モデルを用いている。

またエアコンの設定温度は 27°C、エアコンの運転時間帯は、7 時～13 時、16 時～21 時として間欠運転とした。ただし、人体発熱や照明発熱などの内部負荷はここでは考慮していないが、外気負荷として 24 時間換気回数を 0.5 回/h とした。

熱的快適性指標 PMV について、人体を微小球と仮定し、衣服の熱抵抗値は 0.3clo、代謝量は 1met、気流速度は 0.05m/s として、ここではエアコンの気流は考慮せず、室内空間全体の平均 PMV を算出した。ただし、直達日射が直接微小球に到達する場合、日射の吸収率は 0.3 とした。

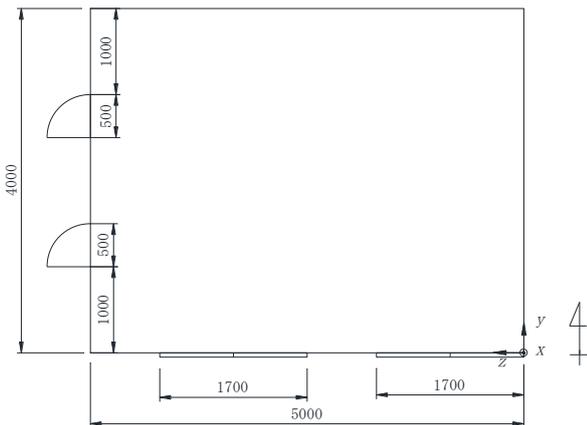


Fig. 6 Standard housing model LD room

6. エアコンを用いた住宅モデルのシミュレーション結果

6.1 室温のシミュレーション結果

ここでは、遮蔽物がない場合、プラスチックすだれ(暗色)、プラスチックすだれ(明色)の 3 ケースの計算を行った。

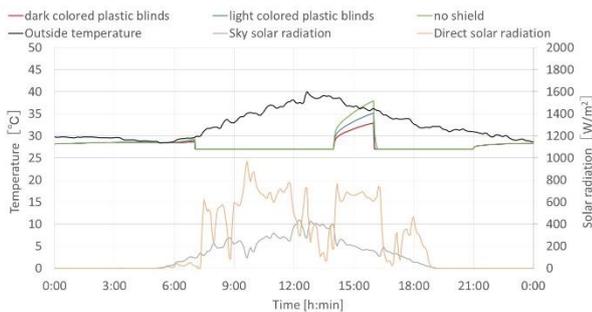


Fig. 7 Room temperature simulation results 2023/8/1

ただし、プラスチックすだれ(暗色)とプラスチックすだれ(明色)の日射透過率は事前にパラメータスタディからそれぞれ 0.1、0.5 と算出しており、それを用いた。Fig. 7 に 8 月 1 日の室内温度のシミュレーション結果を示す。

結果としては、7 時～13 時、16 時～21 時のエアコンが稼働している時間帯は温度が 27°C 一定になっており、13 時～16 時のエアコンが稼働していない時間帯ではプラスチックすだれ(暗色)、プラスチックすだれ(明色)、遮蔽物無し順に温度が高くなっていることが分かる。また 13 時～16 時では最高温度は遮蔽物無しが 38°C、プラスチックすだれ(明色)が 35°C、プラスチックすだれ(暗色)が 32°C となっており、この結果より、色の違いによって温度差が最大 6°C も生じるということが分かった。

6.2 エアコンの処理熱量のシミュレーション結果

Fig. 8 に 8 月 1 日のエアコンの処理熱量のシミュレーション結果を示す。

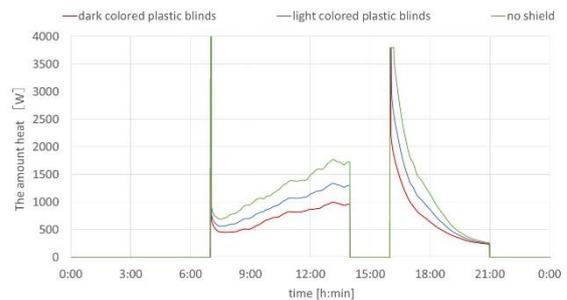


Fig. 8 Simulation results of the amount heat of air conditioner 2023/8/1

結果としては、エアコン起動時の処理熱量はエアコンの最大能力 4.1kW に近いことが分かる。7 時～13 時、16 時～21 時のエアコンが稼働している時間帯はプラスチックすだれ(暗色)、プラスチックすだれ(明色)、遮蔽物無し順に処理熱量が高くなっていることが分かる。7 月 1 日～9 月 30 日の積算をすると、プラスチックすだれ(暗色)は 484.7 kWh、プラスチックすだれ(明色)は 727.7 kWh、遮蔽物無しは 1034.2 kWh、となった。

遮蔽物無しの場合を基準とした場合、プラスチックすだれ(明色)は、処理熱量が基準の 30%削減となり、プラスチックすだれ(暗色)の場合は 53%となった。

6.4 エアコンの電力消費量のシミュレーション結果

Fig. 9 Fig. 8 に 8 月 1 日のエアコンの電力消費量のシミュレーション結果を示す。

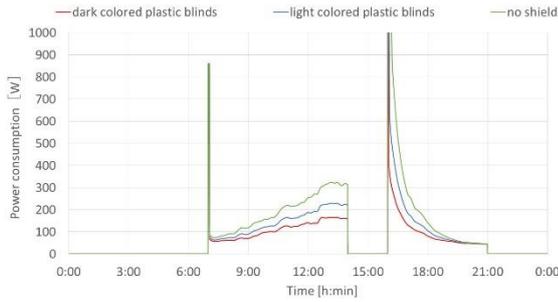


Fig.9 Simulation results of air conditioner power consumption 2023/8/1

結果としては、電力消費量はエアコンの処理熱に伴った傾向を示している。7月1日～9月30日の積算をすると、遮蔽物無しの場合、消費電力は151.5 kWh、プラスチックすだれ(明色)の場合、104.8kWh、プラスチックすだれ(暗色)の場合、74.9kWh となった。

遮蔽物無しの場合を基準とした場合、プラスチックすだれ(明色)は、消費電力が基準の31%削減となり、プラスチックすだれ(暗色)の場合は51%削減となった。Table 1に、エアコンの積算処理熱量と積算電力消費量とその割合をまとめて示す。

Table 1 Accumulated amount of heat by air conditioners, accumulated power consumption, and their reduction rate

	No shield	light colored plastic blinds	dark colored plastic blind
Accumulated amount of heat[kWh]	1034.2	727.7	484.7
Reduction rate[%]	-	30	53
Accumulated power consumption[kWh]	151.5	104.8	74.9
Reduction rate[%]	-	31	51

6.5 PMV のシミュレーション結果

Fig. 10 に 8 月 1 日の室内平均 PMV のシミュレーション結果を示す。

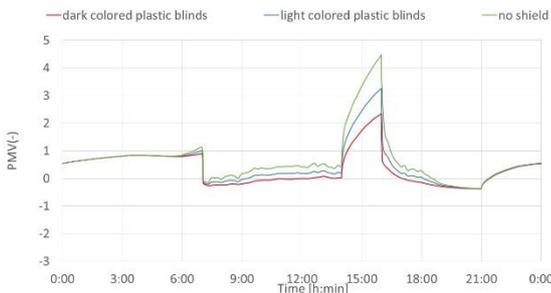


Fig. 10 Average PMV 2023/8/1

結果としては、7時～13時、16時～21時のエアコンが稼働している時間帯は、どのケースも PMV が±0.5 の範囲内に入っており、快適範囲であるが、13時～16時のエアコンが稼働していない時間帯に大きな違いが確認される。この時間帯は、人が不在の時間帯ではあるが、遮蔽物

がない場合、プラスチックすだれ(明色)、プラスチックすだれ(暗色)の PMV の最大値は、それぞれ、4.5、3、2 となり、PMV が 2 のときの温冷感「暑い」、3 のときは「非常に暑い」となっており、プラスチックすだれ(明色)、プラスチックすだれ(暗色)の順に暑さが緩和されており、プラスチックすだれ(暗色)の場合が最も熱的快適性が向上していることがわかる。

7. まとめ

13時～16時のエアコンが稼働していない時間帯では遮蔽物無しと比較したとき最大6℃差であった。また消費電力は遮蔽物無しを基準とした場合に、プラスチックすだれ(明色)が31%削減、プラスチックすだれ(暗色)の場合は49%削減となった。13時～16時のエアコンが稼働していない時間帯で、プラスチックすだれ(明色)、プラスチックすだれ(暗色)の順に暑さが緩和されており、プラスチックすだれ(暗色)の場合が最も熱的快適性が向上していることがわかった。

参考文献

- [1] 安岡絢子 (電力中研)ほか：すだれによるエアコン消費電力削減効果の実証とシミュレーションの妥当性検証, 日本建築学会大会, 2014年
- [2] 長谷川智：東北地方と新潟県に建つ住宅におけるエアコンの連続運転およびすだれによる夏期に節電効果の検討, 空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2016年, 第5巻
- [3] 白川智也, 添田晴生：日射遮蔽物が室内熱環境に及ぼす影響—(その1) すだれを用いた模型実験—, 空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2023年3月
- [4] 添田晴生, 鳴海大典, 羽原宏美：CFD 簡略化による熱負荷計算の精度向上に関する検討 第1報—SCIENCE—Macro の概要と SMASH との比較, 空調調和・衛生工学会論文集, No. 183 (2012-6), pp. 67-75
- [5] 白川智也, 添田晴生：日射遮蔽物が室内熱環境に及ぼす影響—(その2) すだれを用いた模型実験とシミュレーション—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1097-1098, 2023年9月
- [6] 添田晴生・鳴海大典：CFD 簡略化による熱負荷計算の精度向上に関する検討 第3報一定常時におけるルームエアコンを用いた室内の対流熱伝達率の与え方, 空調調和・衛生工学会論文集, No. 250 (2018-1), pp. 11-19
- [7] 上野剛・北原博幸・宮永俊之：家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 その1 冷房運転時モデル, 空調調和・衛生工学会論文集, No. 190 (2013-1), pp. 41-49

## 歩行者の日傘利用の暑熱環境緩和効果の評価に関する研究

## （その4）実測による日傘使用時の暑熱環境緩和効果の評価

## Study on evaluations of relaxation effects of utilizing a parasol for a pedestrian on thermal environment in outdoor spaces

## (Part4) Evaluations of adaptation effect for a pedestrian with a parasol on thermal environment in outdoor space by using a filed observation

○熊谷 今日子（奈良女子大学）

吉田 伸治（奈良女子大学）

Kyoko KUMAGAI\*1 Shinji YOSHIDA\*1

\*1 Nara Women's University

Due to the deterioration of thermal environment in outdoor spaces in summer seasons, behavioral adaptations of outdoor residents and pedestrians attract attention. In this paper, we analyzed the microclimate around a pedestrian with a parasol. From the results, We evaluated the relaxation effect of the thermal environment from the solar transmittance considering sky rate. By considering the sky coverage, we could evaluate the shading effect of the parasol itself. In the future, we plan to evaluate and study the thermal comfort of parasol users.

## はじめに

地球温暖化やヒートアイランド現象に伴い、夏季の屋外における暑熱環境が悪化している。よって、都市生活者個々の暑熱環境への適応策の実装が注目を集めている。この適応策の中で、日傘は最も実効的な手段として女性を中心に使用されている。最近では男性の利用者も増加傾向にある。日傘使用時の効果を実測により日傘が人体部位へ与える日射遮蔽効果の観点から暑熱環境緩和効果を明らかにした研究は渡辺ら<sup>1)</sup>により行われてきた。また吉田<sup>2)</sup>では天空率を考慮した日射透過率から暑熱環境緩和効果の評価を試みたものの、計測は1回のみだったため結果の再現性の観点からさらなる計測データの収集が必要である。本稿では追加の計測を行い暑熱環境の評価と、吉田<sup>2)</sup>で得られた結果との比較を行うことで日傘の日射遮蔽効果を改めて確認した。

## 1. 実測概要

## 1.1 実測場所・実測期間

Fig. 1 に実測位置を示す。日傘周辺の実測は、奈良女子大学の A 棟屋上で行った。A 棟は 3 階建てで南北に延びている。その屋上は周囲に視界を遮るものがなく、見晴らしがよい場所である。気象条件の測定場所は百葉箱と奈良女子大学の E 棟屋上で行った。E 棟屋上は A 棟屋上よりも高い場所に位置している。Fig. 2 に A 棟屋上での日傘と日傘周辺の実測風景を示す。

夏季における快晴時の屋上に測定を行った。実測期間は 2023 年 7 月 28 日と 8 月 10 日の 2 日間である。測定時間

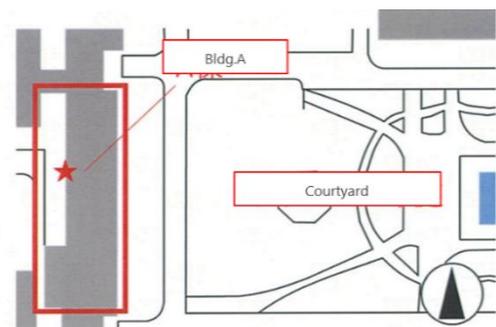


Fig.1 Measurement position



(1) Sunny place

(2) parasol

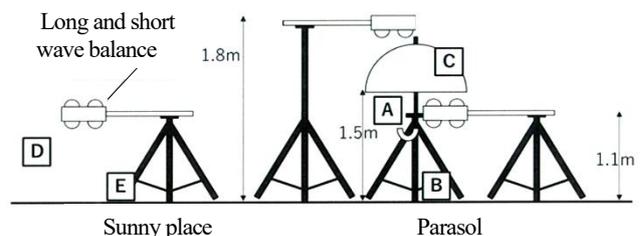


Fig.3 Layout of main measuring equipment

は両日ともに135分間とした。2023年7月28日は11時46分から14時1分まで、2023年8月10日は11時25分から13時40分までである。

1.2 実測方法・実測項目

Table1に計測項目を示す。Fig.3に主な機器の配置イメージを示す。日傘はA棟屋上の地面から約1.5mの高さで三脚に固定し、その内外の温熱環境、日射・長波長放射環境を実測した。長短波收支計も同様に、日向と日傘下では地面から1.1mの高さ、日傘上では地面から1.8mの高さで三脚に固定した。データの計測は1分間隔で行った。風速計のみ30分間隔で目視による計測を行った。

1.3 使用日傘

Table2に実測で使用した日傘の種類を示す。その日傘の写真をFig.4に示す。7月28日は、材質が特殊ラミネート加工を施されたポリエステル生地の日傘（SS）、色が黒色の日傘を使用した。8月10日は材質が綿90%と麻10%の布生地、色が黒色の日傘を使用した。したがって、7月28日のサマーシールドの日傘と8月10日の布の日傘を比較することで、材質の違いによる影響の評価を試みた。

1.4 天候状況

Fig.5に気象庁のデータ<sup>3)</sup>である奈良市における日照時間を示す。このデータは10分間隔で計測されている。両日とも日照時間が8分以上の割合が80%と高く、比較的晴天が続いている。7月28日は12時10分から12時半の30分間で、8月10日では12時50分から13時10分の30分間で曇天である。そのため、Fig.6に計測した時間帯における法線面直達日射量を示す。8月10日は法線面直達日射量が全て600W/m<sup>2</sup>以上であった。7月28日では多くの時間帯で600W/m<sup>2</sup>以上の晴天の値となるものの、12時半から13時10分頃の時間帯で約140W/m<sup>2</sup>程度の小さな値を示した。よって、法線面直達日射量が140W/m<sup>2</sup>未満のときを曇天とし、140W/m<sup>2</sup>以上のときを晴天とした。

Table 1 Measurement items

place	Measurement items
parasol	Global Horizontal Irradiance, long wave radiation, surface temperature, surface conduction heat amount, temperature, relative humidity, globe temperature, wind speed, earth surface temperature
Sunny place	Global Horizontal Irradiance, globe temperature, long wave radiation temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, earth surface temperature,
weather conditions	Global Horizontal Irradiance, horizontal sky radiation, long wave radiation, wind speed, wind direction
Stevenson Screen	temperature, relative humidity

Table 2 Actual measurement case

date	type	Outside color	inner color	material	length [cm]
July 28	summer shield(SS)	black	black	polyester	82.5
August 10	cloth	black	black	cotton90% hemp10%	71.8



(1) Summer Shield (7/28) (2) Cloth (8/10)

Fig.4 Types of parasols

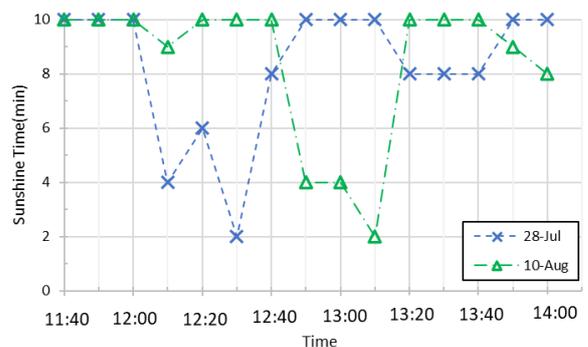


Fig.5 Sunshine Times in Nara city

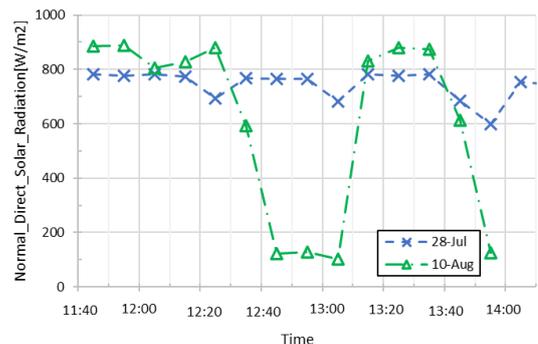


Fig.6 Normal Direct Solar Radiation

2. 日射透過率の算出方法

通常の日射透過率は、日傘内における太陽方向からの全日射量から日向における太陽からの全日射量を割ることで求められる。しかし、日傘内における太陽方向からの全日射量を計測するとき日傘外からの天空日射も含まれている。そのため、日傘外からの天空日射を取り除いた日射透過率を、天空率を考慮した日射透過率とする。ここで日傘下での天空率は約37%を使用した<sup>4)</sup>。

### 2.1 通常の日射透過率の算出方法

日傘のような日射遮蔽物の日射透過率  $\tau$  は式(1)のように推定される。

$$\tau = \text{ParaInSun} \downarrow / \text{SunnySun} \downarrow \quad \dots (1)$$

ここで  $\text{ParaInSun} \downarrow$  は日傘下での全天日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] である。 $\text{SunnySun} \downarrow$  は、日向の全天日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] である。

しかし、式(1)を用いて透過日射を推定する場合に、人体上方の日傘面の側方に広がる天空からの錯乱日射の取り扱いが課題となる。Fig. 7 に長短波収支計で計測される日傘下の日射の収支のイメージを示す。Fig. 7 によると、 $\text{ParaInSun} \downarrow$  は式(2)のようにモデル化できる。

$$\text{ParaInSun} \downarrow = I^* \times (1 - \varphi_{sky}) + I_{dH} \varphi_{sky} \quad \dots (2)$$

ここで、 $I^*$  は日傘生地を透過後に日傘下の日射計に入射する日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]、 $I_{dH}$  は水平面天空日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]、 $\varphi_{sky}$  は日傘下から上方を望むときの天空率 [-] である。

### 2.2 天空率を考慮した場合の日射透過率の算出方法

天空率を考慮した日射透過率  $\tau^*$  は式(3)となる。

$$\tau^* = \text{ParaInSun} \downarrow^* / \text{SunnySun} \downarrow^* \quad \dots (3)$$

式(4)より天空率を考慮した日向からの全天日射量  $\text{SunnySun} \downarrow^*$  は、通常の日向からの全天日射量  $\text{SunnySun} \downarrow$  から日傘生地を經由せず日傘下に直接入射する日射を取り除いたものである。式(5)より  $\text{ParaInSun} \downarrow^*$  も同様に示すことができる。

$$\text{SunnySun} \downarrow^* = \text{SunnySun} \downarrow - I_{dH} \varphi_{sky} \quad \dots (4)$$

$$\text{ParaInSun} \downarrow^* = \text{ParaInSun} \downarrow - I_{dH} \varphi_{sky} \quad \dots (5)$$

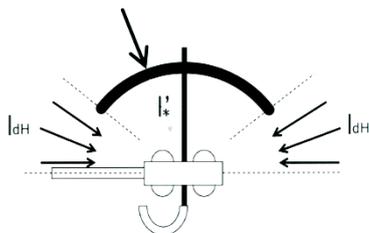


Fig.7 Separation of solar radiation under a parasol

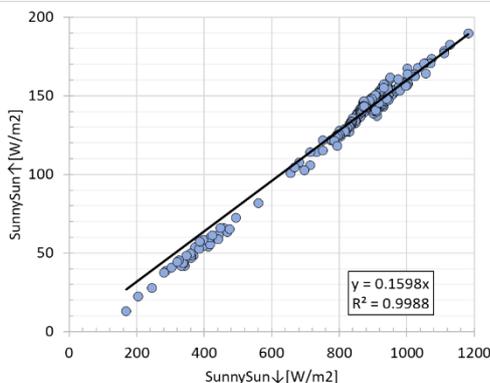


Fig.8 Relationship between SunnySun  $\uparrow$  and SunnySun  $\downarrow$  (July28 and August10, 2024)

### 3. 結果および考察

#### 3.1 日向における地面の日射反射

Fig. 8 に 2024 年 7 月 28 日と 8 月 10 日における日向からの全天日射量と日向からの全天日射量のデータの関係を示す。Fig. 8 より相関係数  $R^2$  が 0.9988 のため、強い相関が見られる。よって、計測対象の地表面(屋上面)の日射反射率が約 15% 程度の値を示すことがわかる。

#### 3.2 天空率の考慮による日射透過率への影響

##### (1) 全天日射量と日傘内日射量の関係

Fig. 9 に気象条件に相当する E 棟屋上の全天日射量と日傘内日射量の関係を示す。ここで Fig. 9 中の灰色は  $\text{ParaInSun} \downarrow$  を、白色は  $\text{ParaInSun} \downarrow^*$  に相当する。Fig. 9 の上の図は 7 月 28 日で日傘生地にサマーシールドを採用した場合である。Fig. 9 の下の図は 8 月 10 日で日傘生地に布を採用した場合である。

日傘生地にサマーシールドを採用した場合(7/28)は、天空からの全天日射が  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  程度の酷暑環境においても、 $\text{ParaInSun} \downarrow$  が約  $130 \text{ W}/\text{m}^2$  であるのに対し、 $\text{ParaInSun} \downarrow^*$  は約  $70 \text{ W}/\text{m}^2$  以下の小さい値にまで減少する。これより、サマーシールドにすることで日傘の生地に入射する日射を透過しづらくし、高い遮蔽効果があることがわかる。また、日傘下の全天日射計で計測される  $\text{ParaInSun} \downarrow$  の大半が日傘の遮蔽範囲外からの天空日射であることがわかる。

日傘生地に布を採用した場合(8/10)は、 $\text{ParaInSun} \downarrow$  が約  $200 \text{ W}/\text{m}^2$  程度であるのに対し、 $\text{ParaInSun} \downarrow^*$  は約  $140 \text{ W}/\text{m}^2$  以下と幅広く示しており、サマーシールドの日傘よりも多くの日射が透過することがわかる。

##### (2) 全天日射量と日射透過率の関係

Fig. 10 に全天日射量と日傘の日射透過率を示す。

日傘生地にサマーシールドを採用した場合(7/28)は、通常の日射透過率  $\tau$  が約 13% で、天空率を考慮した日射透過率  $\tau^*$  が約 8% である。これより、サマーシールドの日傘は日傘に入射された日射の大半を遮蔽することが可能であるとわかる。

日傘生地に布を採用した場合(8/10)は、通常の日射透過率  $\tau$  が約 30% で、天空率を考慮した日射透過率  $\tau^*$  が約 25% である。これより、布の日傘はサマーシールドの日傘よりも多くの日射を透過することがわかる。また布の日傘はサマーシールドの日傘よりも日射透過率  $\tau$ 、 $\tau^*$  のバラつきが大きい。これは、布生地の目の粗さと計測時間によって異なる日射入射角度が相互作用して影響したと考えられる。両日ともに天空率を考慮することで日射透過率  $\tau$  が約 5% 程度と大きく減少している。

#### 3.3 既往研究である吉田<sup>2)</sup>との比較

既往研究である吉田<sup>2)</sup>のデータを Fig. 11 と Fig. 12 に示す。Fig. 11 に、気象条件に相当する E 棟屋上の全天日

射量と日傘内日射量の関係を示す。Fig. 12に全天日射量と日傘の日射透過率を示す。まず、Fig. 9とFig. 11の晴天時で比較をする。サマーシールドの日傘の場合は、ParalSun↓が約130W/m<sup>2</sup>であるのに対し、ParalSun↓\*は約70W/m<sup>2</sup>以下の小さい値で同様の結果である。布の日傘の場合も、ParalSun↓が約200W/m<sup>2</sup>程度であるのに対し、ParalSun↓\*は約140W/m<sup>2</sup>以下となっており、こちらも同様の結果が得られたことがわかる。次に、Fig. 10とFig. 12の晴天時で比較をする。サマーシールドの日傘の場合は、通常の日射透過率τが約13%で同様の結果が得られた。しかし、天空率を考慮した日射透過率τ\*が今回の計測では約8%で、既往研究ではほぼ0%の数値とわずかに差がみられる。布を採用した場合は、通常の日射透過率τが約30%で、天空率を考慮した日射透過率τ\*が約25%と比較的同等の結果が得られた。また布の日傘はサマーシールドの日傘よりも日射透過率τ、τ\*のバラつきが大きいという点も同様の結果であった。今回の計測で曇天だった8月10日で比較する。サマーシールドと布ともに、既往研究ではバラつきがなく分布が固まっているが、今回の計測ではバラつきが見られた。

4. まとめ

- (1) 曇天時でも、日向下からの全天日射量が分かれば、天候に関わらず日向上からの全天日射量を推定できる
- (2) 日傘の生地がサマーシールドの場合、日傘に入射する日射を透過しづらくし、高い遮蔽効果がある

(3) 布の日傘は、サマーシールドの日傘よりも多くの日射が透過する

(4) 吉田<sup>2)</sup>での計測データと比較することで晴天時では再現性が高く精度が良いことがわかった。曇天時ではその傾向はみられなかった。

5. 今後の課題

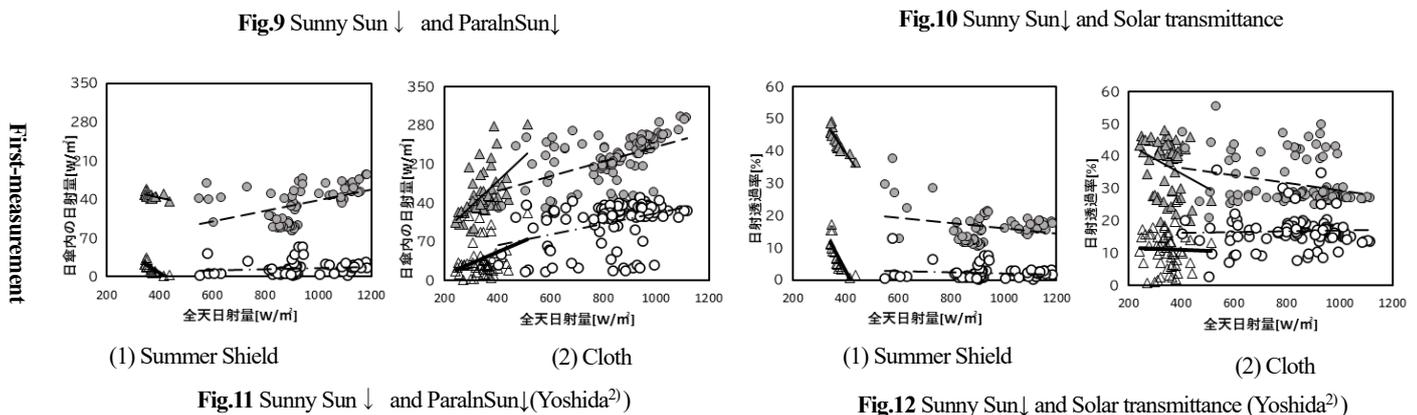
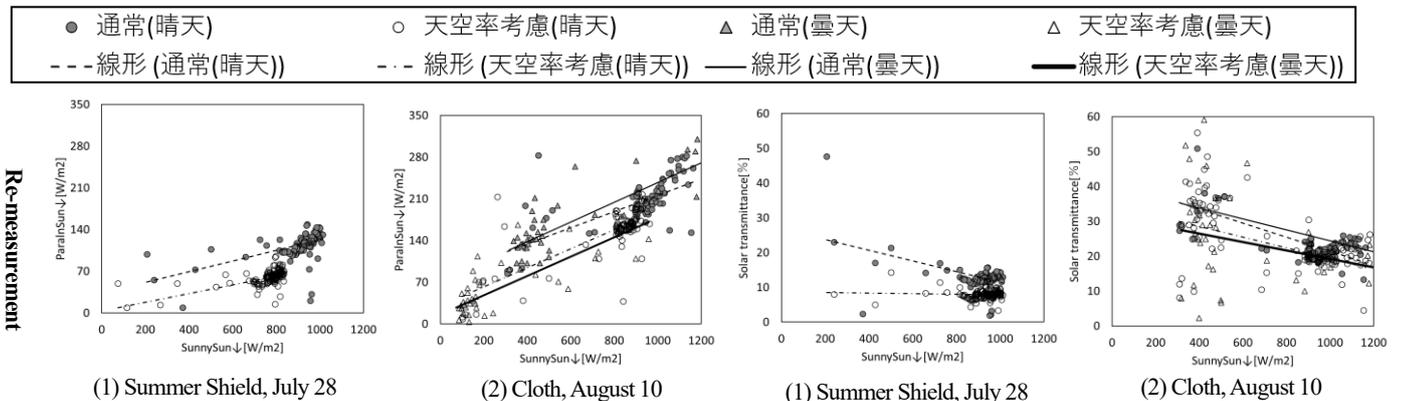
日傘は黒色で2種類の素材を使用した。今後は形状や色の異なる他種類の日傘の日射遮蔽性能の評価をする。

謝辞

本研究を進めるにあたり、高田恵里氏（大成建設、研究当時奈良女子大学卒論生）の多大な尽力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊慎一, 石井仁 (2020) : 日傘による暑熱環境緩和効果の実証的研究, 日生氣誌, 56巻, 4号, p133-144
- 2) 吉田伸治 (2023) : 歩行者の日傘利用の暑熱環境緩和効果の評価に関する研究(その1) 夏季暑熱環境緩和効果の分析のための実測, 令和5年度日本建築学会近畿支部研究発表会
- 3) 過去の気象データ検索 2023年 (10分ごとの値), 気象庁ホームページ  
[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=&block\\_no=&year=2023&month=8&day=10&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=&block_no=&year=2023&month=8&day=10&view=)
- 4) 高田恵里 (2022) : 実測による夏季の日傘使用における暑熱環境緩和効果に関する研究, 奈良女子大学卒業論文



## 深部温度の非侵襲測定の精度向上に関する考察

## Study on Accuracy Improvement of Non-invasive Measurement of Core Temperature

○横田 遥己 (大阪府立大学) 吉田 篤正 (早稲田大学) 木下 進一 (大阪公立大学)

Haruki Yokota\*1 Atsumasa Yoshida\*2 Shinichi Kinoshita\*3

\*1 Osaka prefecture University \*2 Waseda University \*3 Osaka metropolitan University

Measurements of core temperature are important for health management. Conventional methods directly measure rectal temperature, which is uncomfortable and difficult to measure daily. Therefore, in this study, we investigate the development of a non-invasive and continuous measurement device using Dual-Heat-Flux method. First, we confirmed through thermal analysis that the estimated core temperatures become inaccurate as ambient temperatures drop due to heat loss from the side of the device, and proposed a new measurement method that includes consideration of the heat loss. Subsequently, we confirmed in experiments that this method improves the accuracy of measurements over a wide ambient temperature range.

## 1. 緒言

深部温度の監視は熱中症や低体温症の予防として重要視されている。従来の測定ではセンサを測定部位に直接挿入する不快感を伴う侵襲的な方法がとられてきた。本研究では、非侵襲測定が可能な双熱流法をもとにした深部体温計測装置の開発を行う。この方法の主要な誤差原因と考えられる装置側面の熱損失を伝熱解析によって評価し、その熱損失を考慮した深部体温算出式を提案する。周囲気温が異なる条件で模擬実験を行い、その精度を検証する。

## 2. 測定方法の原理(双熱流法)

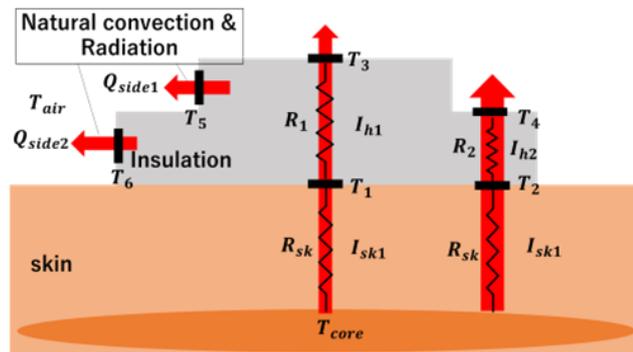


Fig.1 Outline of heat flow in dual-heat-flux method

 $T_{core}$  : 深部温度[K],  $T_1, T_2$  : 装置下面の温度[K] $T_3, T_4$  : 装置上面の温度[K]  $T_5, T_6$  : 装置側面の温度[K] $R_1, R_2$  : 断熱材の熱抵抗 [(m<sup>2</sup> · K)/W] $I_{sk1}, I_{sk2}$  : 皮膚を流れる熱流束[W/m<sup>2</sup>] $I_{h1}, I_{h2}$  : 断熱材を流れる熱流束[W/m<sup>2</sup>] $Q_{side1}, Q_{side2}$  : 装置側面から周囲外気へ向かう熱量[W]

異なる厚さの断熱材で皮膚を覆ったとき、図1のように皮膚と装置に熱流束が流れる。まず、皮膚を通る熱流束

について、式(1)が成り立つ。

$$T_{core} = \frac{I_{sk2}T_1 - I_{sk1}T_2}{I_{sk2} - I_{sk1}} \quad (1)$$

従来の双熱流法では、皮膚から断熱材を通っていく熱流束が1次元的であるという仮定を行う。

$$I_{sk1} = I_{h1} = (T_1 - T_3)/R_1 \quad (2)$$

$$I_{sk2} = I_{h2} = (T_2 - T_4)/R_2 \quad (3)$$

式(1)に式(2), (3)を代入して整理すると、

$$T_{core} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)}{S(T_2 - T_4) - (T_1 - T_3)} \quad (S = \frac{R_2}{R_1}) \quad (4)$$

式(4)が深部温度を求める式である。この式を用いると、装置表面温度を計測することで個人差がある皮膚の熱抵抗の情報なしに深部温度を算出することができる。しかし、実際には、熱流束が1次元的ではなく、装置側面からの熱損失 $Q_{side1}, Q_{side2}$ が存在しており、 $I_{h1} \neq I_{sk1}, I_{h2} \neq I_{sk2}$ となっており、それにより、深部温度の測定誤差が出る。先行研究<sup>1)</sup>では、側面の面積を小さくしたり、アルミカバーをすることで側面からの熱損失を減らしているが、本研究では、側面温度と雰囲気温度を測定し、側面からの熱損失を予測して深部温度算出式の補正を行う。

## 3. 伝熱解析による側面の熱損失の評価

## 3.1 伝熱解析手法

実験系の伝熱解析によって、側面からの熱損失を評価する。実験は皮膚を模した寒天で行う。装置、寒天ともに円筒で表せるので計算モデルは図2のようになる(軸対称)。軸対称の円筒座標系の3次元熱伝導方程式は式(5)のように表せる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

図3のように $r$ 方向に $i$ 番目、 $z$ 方向に $j$ 番目のグリッドを $(i, j)$ と表し、中心温度を $T_{(i,j)}$ として計算モデルの差分化近似を行う。式(5)の各項について、中心差分をとった式(6)を用いて陽解法で解く。

$$T_{(i,j)}^{t+\Delta t} = T_{(i,j)}^t + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c} \left( \begin{aligned} & \frac{1}{r_i} \frac{T_{(i+1,j)}^t - T_{(i-1,j)}^t}{2\Delta r} \\ & + \frac{T_{(i+1,j)}^t - 2T_{(i,j)}^t + T_{(i-1,j)}^t}{\Delta r^2} \\ & + \frac{T_{(i,j+1)}^t - 2T_{(i,j)}^t + T_{(i,j-1)}^t}{\Delta z^2} \end{aligned} \right) \quad (6)$$

境界条件は表1、初期条件は表2のように設け、各層の物性値を表3に示す。

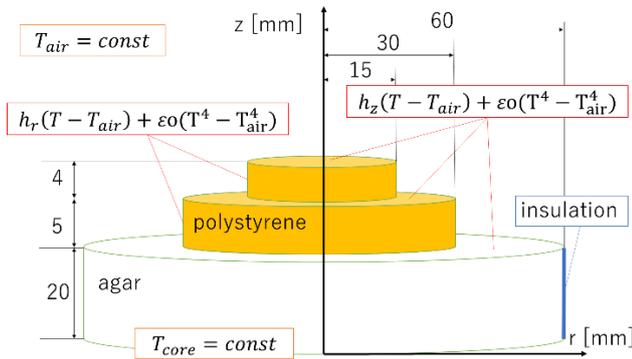


Fig.2 Calculation model

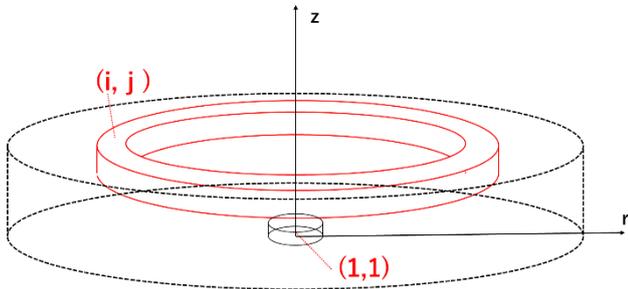


Fig.3 Position of each grid

Table 1 Boundary conditions at each position

Position	Boundary condition
Agar underside	Isothermal (37.0°C)
Side of agar	Insulation
Top of agar and device	Natural convection & radiation
Side of device	Natural convection & radiation
Between agar and device	Heat flux continuous

Table 2 Initial conditions at each position

Position	Initial condition
Agar other than underside	33.2°C
Agar underside	37.0°C(=const)
Device	$T_{air}$

Table 3 Physical properties of polystyrene foam and agar<sup>2,3)</sup>

Material	Polystyrene foam	Agar
Specific heat capacity (J/kg K)	1100	4020
Thermal conductivity (W/m K)	0.028	0.57
Density (kg/m <sup>3</sup> )	25	1040

### 3.2 側面からの熱損失

気温 20°C のとき、各面を通る熱量は図4のようになる。

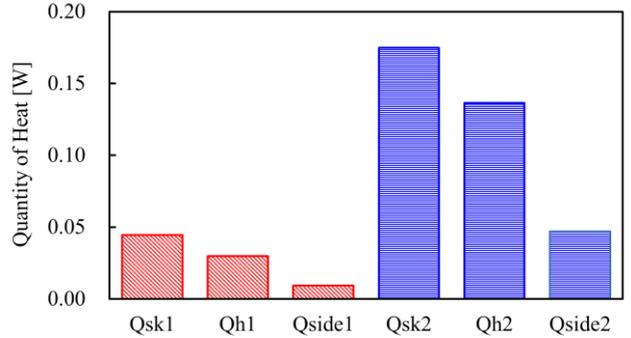


Fig.4 Numerically calculated quantity of heat passing vertically through the agar (Qsk1, Qsk2) and the device (Qh1, Qh2) and out the sides of the device (Qside1, Qside2)

### 3.3 側面の熱損失を考慮した深部温度算出式

双熱流法では、寒天を流れる熱流束が装置を流れる熱流束と等しい ( $I_{sk} = I_h$ ) と仮定しているが、3.2節で確認したように、側面からの熱損失が存在しており、 $I_{sk} > I_h$  となっている。そのため、装置内部を通る熱量  $I_h S$  と側面から周囲外気へ向かう熱量  $Q_{side}$  の和がすべて装置を鉛直方向に流れると考えた  $I_{ave}$  が  $I_{sk}$  と等しい (式(7), (8)) として双熱流法の式を解く。

$$I_{sk1} = I_{ave1} = \frac{I_{h1} S_1 + Q_{side1}}{S_1} \quad (7)$$

$$I_{sk2} = I_{ave2} = \frac{I_{h2} S_2 + Q_{side2}}{S_2} \quad (8)$$

$S_1$ : 厚い断熱材の上面面積 [m<sup>2</sup>]

$S_2$ : 薄い断熱材の上面面積 [m<sup>2</sup>]

式(7), (8)を式(9)に代入して深部温度を求める。

$$T_{core} = \frac{I_{sk2} T_1 - I_{sk1} T_2}{I_{sk2} - I_{sk1}} \quad (9)$$

ここで、修正された双熱流法でも  $T_1, T_2$  は変化しないと仮定する。なお、側面からの熱損失  $Q_{side}$  は、自然対流とふく射によって起こるとする。

$$Q_{side} = I_{side} S_{side} = \{h_r(T_{side} - T_{air}) + \varepsilon\sigma(T_{side}^4 - T_{wall}^4)\} S_{side} \quad (10)$$

$h_r$ : 側面の自然対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)],  $\varepsilon$ : 放射率

$S_{side}$ : 側面積 [m<sup>2</sup>],  $T_{side}$ : 装置側面温度 [K],  $T_{air}$ : 気温 [K]

$T_{wall}$ : 周囲温度 [K],  $\sigma$ : ボルツマン定数 [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]

側面の熱伝達率 $h_r$ については、L形発熱体の鉛直平板として $Nu$ 数を算出する。<sup>4)</sup>

$$Ra = \frac{g\beta(T_h - T_{air})(l)^3}{\nu\alpha} \quad (11)$$

$$Nu = 0.168Ra^{0.326} \quad (12)$$

$$h_r = \frac{Nu \cdot k}{l} \quad (13)$$

$Ra$ :レイリー数,  $Nu$ :ヌセルト数

$g(=9.80)$ :重力加速度[m/s<sup>2</sup>]

$\beta(=3.3 \times 10^{-3})$ :体積膨張率[1/K],  $l$ :装置厚さ[m]

$\nu(=1.59 \times 10^{-5})$ :動粘性係数[m<sup>2</sup>/s]

$\alpha(=2.25 \times 10^{-5})$ :熱拡散率[m<sup>2</sup>/s]

$k(=2.63 \times 10^{-2})$ :熱伝導率(空気)[W/K・m]

気温20℃における寒天を流れる熱流束 $I_{sk}$ と、装置内を流れる熱流束 $I_h$ と式(7),(8)で求められる熱流束 $I_{ave}$ を比較したのが図5である。図5より、 $I_{sk}$ に対する誤差は $I_h$ よりも $I_{ave}$ の方が20%ほど小さくなっている。誤差が0にならない理由は、断熱材底面と寒天の境界で熱流の一次元性が十分には担保されていないことによる。

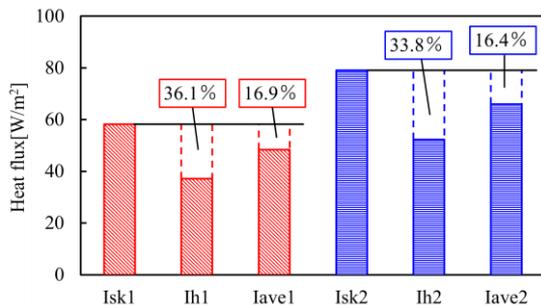


Fig.5 Numerically calculated heat flux passing vertically through the agar (Isk1, Isk2) and the device (Ih1, Ih2) and Heat flux through the vertical direction considering heat loss on the sides (Iave1, Iave2)

式(7),(8)を式(9)に代入して求められる深部温度をcorrectedTcore. 式(4)で求められる深部温度をbasedTcoreとすると、各気温におけるそれぞれの深部温度誤差は、図6のようになる。修正された双熱流法により誤差が小さく周囲気温の影響も小さいことが示された。

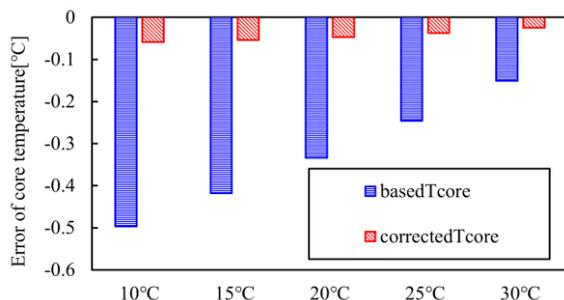


Fig.6 Comparison of core temperatures errors calculated using temperatures at each measurement point calculated numerically at each ambient temperature.

#### 4. 模擬実験による測定精度の検討

##### 4.1 実験方法

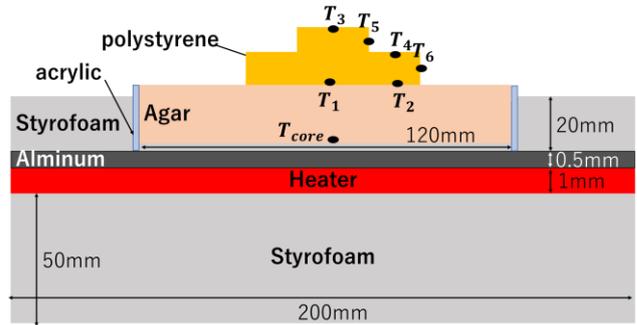


Fig.7 Schematic diagram of the experiment

図7のように、皮膚を模した寒天(水285gに対して寒天粉15g)をアクリル製の直径120mmのシャーレに約20mmの厚さで作成する。乾燥を防ぐため外気に直接接する寒天表面はサランラップで覆った。その上に厚さの異なる断熱材を固定した。シャーレを発泡スチロールで囲い、温度制御されたヒーター上に乗せた。ヒーターは抵抗加熱し、試験部の均一な加熱を測るためにアルミ板をヒーターとシャーレの間に差し込んだ。シャーレ直下のヒーターとアルミ板の間の温度をPID制御で一定にした。寒天底面の温度を真の深部温度とした。温度測定にはサーミスタを使用した。測定する温度は断熱材上下面で4点、側面は2点、気温2点、壁温2点とした。周囲温度を制御するために人工気候室内で実験を行う。

##### 4.2 風速の影響の検討

人工気候室内は気温の制御のため風が存在しており、実際に装置周りの風速を計測すると、 $u_{ave} = 0.3$  m/s程度であった。この風速での装置側面の $Re$ 数をそれぞれ求めると<sup>3)</sup>

$$Re_1 = \frac{u_{ave} l_1}{\nu} = \frac{0.3 \times 0.004}{1.59 \times 10^{-5}} \approx 75.4 \quad (14)$$

$$Re_2 = \frac{u_{ave} l_2}{\nu} = \frac{0.3 \times 0.005}{1.59 \times 10^{-5}} \approx 94.3 \quad (15)$$

$Re_1$ : 厚い断熱材側面のレイノルズ数

$Re_2$ : 薄い断熱材側面のレイノルズ数

$u_{ave}$ : 装置周りの風速 [m/s]

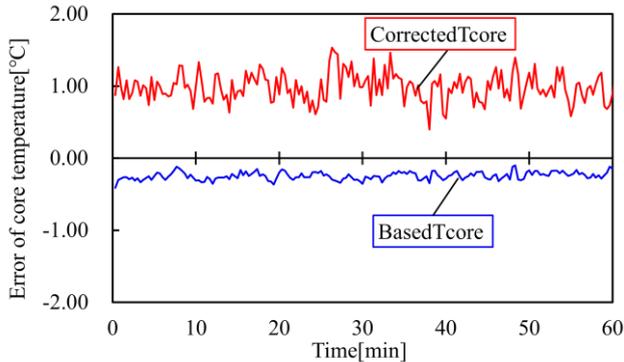
$l_1$ : 厚い断熱材厚さ [m],  $l_2$ : 薄い断熱材厚さ [m]

$44 < Re_1, Re_2 < 144$ が成立するのでこの範囲の $Re$ 数に対して成り立つ強制対流中に置かれた円柱側面の $Nu$ 数の算出式は

$$Nu = 0.48Re^{0.51} \left( \frac{T_{air} + T_{side}}{2T_{air}} \right)^{0.17} \quad (16)$$

式(16)を式(13)に代入して熱伝達率を求める。この熱伝達率を用いて算出したcorrectedTcoreとbasedTcoreの計測した寒天下温度との誤差を横軸時間で比較した図が

図8である。correctedTcoreの方が誤差は大きくなっている。その原因として考えられるのは、強制対流の熱伝達率を考える際、円柱に水平方向に流れる強制対流に対する実験式を用いているが、実際の実験の風では、風向、風速ともに時間的に変動しており、正しく強制対流熱伝達を評価できていないからであると考えられる。

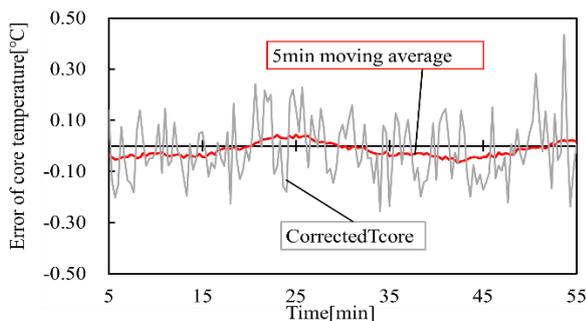


**Fig.8** Comparison of core temperature error calculated by the calculation formula that considers heat loss from the sides using the heat transfer coefficient of forced convection and the core temperature error calculated by the conventional formula.

#### 4.3 測定温度の揺らぎの検討

4.2節で強制対流下では正しく側面の熱損失が評価できないと分かった。そのため、装置周りを段ボールと人工気候室の壁で囲い段ボール上部を全体の1/4開けて実験を行う。空気の測定は段ボール内で行い、壁温の測定は段ボール内部側面と、段ボール内部の部屋の壁面で行う。

装置周りの風速を測定したところ0.01 m/s以下となっており、無風状態が作り出されており、装置側面で自然対流が起こっていると判断できる。算出深部温度の誤差は減ったが、測定温度の揺らぎによって算出深部温度の揺らぎが生じていた。これを解消する方法として計測温度を前後5分の移動平均をとりその値を用いて深部温度を算出する。前後5分移動平均データによる算出深部温度もとのデータで算出した深部温度を図10と比較し、十分算出深部温度の揺らぎが減ったことが確認された。

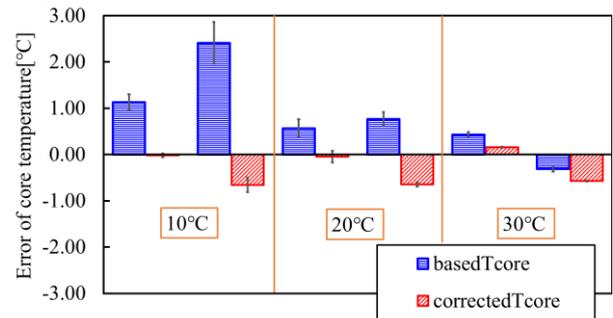


**Fig.10** Comparison of core temperatures calculated using the 5-min moving-average measured temperatures and the original

#### 4.4 各気温における測定精度

4.3節で前後5分移動平均が算出深部温度の揺らぎを防ぐのに有効であったためその方法で算出する。すべての気温域で算出深部温度の精度が向上しているか確認するため10°C, 20°C, 30°Cでそれぞれ2回ずつ実験を行う。

全実験の平均算出深部温度誤差をもとの双熱流法式で算出した深部温度の誤差と比較した。図11より、とりわけ低気温域において、算出深部温度の精度が上がったことが分かる。



**Fig.11** Comparison of the calculated core temperature error using the conventional formula and the calculated core temperature error using the formula with side correction for the experiments conducted twice at each temperature.

#### 5. 結論

数値解析と模擬実験によって、側面からの熱損失を考慮すると、広い気温域で深部温度測定精度が向上することが検証された。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた安田龍助教、実験のために人工気候室の使用を許諾して頂いた飛田国人准教授に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Ming Huang, Toshiyo Tamura, Zunyi Tang, Wenxi Chen, and Shigehiko Kanaya: "Structural Optimization of a Wearable Deep Body Thermometer: From Theoretical Simulation to Experimental Verification" Journal of Sensors Volume 2016(2015), Article ID 4828093
- 2) 日本熱物性学会編, 「新編熱物性ハンドブック」養賢堂, (2008) p. 527
- 3) 日本機械学会; 「伝熱工学資料 訂正第5版」日本機械学会 (2009), p34, 日本機械学会
- 4) 一宮 浩市, 滝口 裕正: 「L形発熱体からの非定常自然対流熱伝達の数値解析」: 空気調和・衛生工学会 論文集 23 巻 (1998) 69 号 p. 75-84

## ミスト噴霧を伴う暑熱対策設備の評価手法に関する研究 Study on the Evaluation Method of Heat Countermeasure Facilities Using Water Mist

○山口 和輝（大阪公立大学） 吉田 篤正（早稲田大学） 木下 進一（大阪公立大学）

Kazuki YAMAGUCHI\*1 Atsumasa YOSHIDA\*2 Shinichi KINOSHITA\*1

\*1 Osaka Metropolitan University \*2 Waseda University

Recent urbanization has worsened the heat in cities, leading to increased health issues like heatstroke. To deal with this, heat countermeasure facilities such as sunshades, fans and mist have been installed in urban areas. However, there is a lack of established methods to evaluate their effectiveness. This study focused on evaluating solar sunshade facilities with mist spray for heat mitigation. Wetting of instruments in misty environments complicates accurate measurement of temperature and humidity, so a new method using dry and wet gauze was devised. Results showed accurate measurements in environments without mist. Mist spraying led to temperature decrease and humidity increase, even in small areas. A modified model was used to predict human body response in mist environments, showing significant temperature differences with and without mist adhesion. Accurate facility evaluation requires careful measurement positioning due to variations in misty environments.

### 1. はじめに

近年、都市化が進む一方で、都市部の暑熱化が深刻化し、熱中症など人体への健康被害が増加している。その適応策として、日除けやファン、ミストなどの暑熱対策設備の開発と街中への設置が行われている。しかし現在、それらの対策設備の熱中症対策としての効果を示す明確な評価指標が存在しない。そこでミストを用いた暑熱対策設備の評価手法を検討した。ミストは水を微細な霧状にして噴射し、その気化熱を利用して噴霧域の局所冷却を測るものであり、心理量・表面皮膚温度に効果があることが報告されている。

ミストによる暑熱緩和効果の評価を行う上で、環境要素を測定するための測定機器が水に濡れてしまい、正確な測定を行うことが難しい点と、ミスト噴霧下の人体はミストによる濡れが発生する可能性があるため、疑似発汗効果による人体熱ストレス緩和効果も考慮しなければならない点が問題となる。

本研究では、ミストを用いた暑熱対策設備の暑熱緩和効果評価のため、ミスト噴霧環境における温湿度測定手法を考案し、検証を行った。さらにミスト噴霧環境における人体の生理応答を人体モデルを用いて予測した。

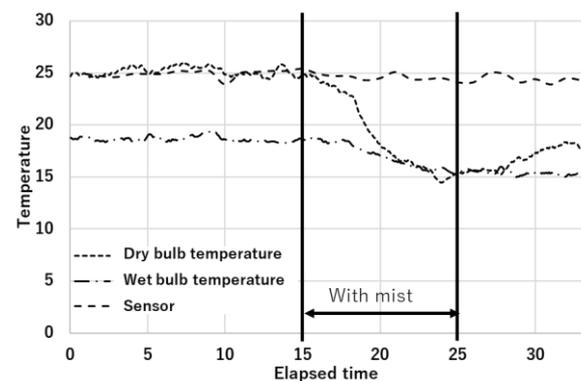
### 2. ミスト噴霧環境における温湿度測定の検討

大阪公立大学中百舌鳥キャンパスB4棟の中庭にて、1800mm×2700mm、高さ1700mmのテントを2張り、片方の一辺にミストノズルを設置し、2022年と2023年の8月～10月にかけて実験を行った。各実験において環境条件として、日向で放射計3台を用いて6方位放射・風速、テント

下でも放射量を測定した。

#### 2.1 温度センサを用いた測定

自作のラジエーションシールドを付属した熱電対を用いて乾球温度と湿球温度の多点測定を行った。



**Fig.1** Transition of dry and wet bulb temperatures measured by thermocouple and neighborhood air temperature measured by temperature and humidity sensor.

ミスト噴霧によって乾球温度の測定値は全体的に下がっていたものの湿球温度に大きな変化は見られなかった。またミストノズルから近い点では、図1のようにミスト噴霧中に乾球温度が湿球温度と等しくなっていた。ミスト噴霧停止後のミスト付着の無い温湿度センサによる気温の測定値と比較したところ、噴霧停止から10～15分間、熱電対で測定した乾球温度の値が気温よりも低い値を示していた。つまりミスト噴霧下の温湿度測定では、測定値が

センサへのミスト付着の影響を受けている。またWBGT計を用いたWBGTによる評価についても試みたが、同様の理由に加え、黒球温度が濡れの影響を受けるため測定が難しい。

2.2 ミスト噴霧下の温湿度測定手法

上記の問題点から、濡れを避けるのではなく濡れの状態を評価可能で測定点の濡れを許容できる次のような温湿度測定手法を考案した。100mm四方の6重にした黒色ガーゼ2個1対を用意し、一方を乾いた状態(乾ガーゼ)他方を常に十分に湿らせた状態(湿ガーゼ)をする。湿ガーゼは水を常に吸い上げるように設計し、濡れ率 $\beta = 1$ を保てるものとした。それらの表面温度を熱画像カメラによって遠隔で測定し、式(1)のガーゼの熱収支式からミスト雰囲気の温湿度を推定することを考える。

$$(1 - ref)S - \epsilon(\sigma T_s^4 - L) = h(T_s - T) + \beta h_e(q_{sat} - q) \quad (1)$$

ただし、 $ref$  : 日射反射率,  $S$  : 日射量,  $\epsilon$  : 赤外放射率,  $\sigma$  : ステファンボルツマン定数,  $T_s$  : ガーゼ表面温度,  $L$  : 赤外放射量,  $h$  : 対流熱伝達率,  $T$  : 気温,  $h_e$  : 湿気伝達率,  $\beta$  : 濡れ率,  $q_{sat}$  : ガーゼ表面温度 $T_s$ における飽和比湿,  $q$  : 比湿であり、ガーゼは十分に薄く熱伝導はないものと仮定した。日射量および赤外放射量はガーゼ面の宝仙方向に向けた長短波放射計により測定する。ガーゼの日射反射率および赤外放射率は別途測定により、それぞれ  $ref = 0.2, \epsilon = 0.8$ とした。

まずミスト噴霧の無い環境において別途温湿度センサによる測定値を使用して対流熱伝達率・湿気伝達率を算出する。次に、ミスト噴霧環境での乾ガーゼ・湿ガーゼの表面温度を用いて、ミスト噴霧環境での気温・湿度を割り出すことを考える。ただし乾ガーゼの濡れ率 $\beta$ は、ミスト噴霧のない環境では0と仮定できるが、ミスト噴霧環境では濡れが発生し0より大きな値となる。そこでミスト噴霧中の乾ガーゼの濡れ率を測定するために、噴霧停止直後においてその濡れ率の値は変化せず、周囲空気は素早く換気され外気の温湿度と等しくなるものと仮定し、式(1)に基づいて噴霧中の $\beta$ が求められる。それによって乾ガーゼ・湿ガーゼそれぞれの熱収支式を連立させてミスト噴霧環境での温湿度を求めることができる。

2.3 温湿度測定手法としての妥当性

この測定手法が温湿度測定法として使用可能か確認するために、ミスト噴霧の無い環境での測定を行い、同環境で測定した温湿度センサの値と比較した。ガーゼ面に対する放射量も測定した。結果を図2および3に示す。

気温の変化は十分な精度でとらえており、放射の弱い日陰で平均誤差0.1℃、放射の強い日向でも平均誤差は0.2℃である。

2.4 ミスト噴霧下での温湿度測定

ミスト噴霧環境における測定では、温湿度の分布についても調べるために図4のように乾湿ガーゼをミストノ

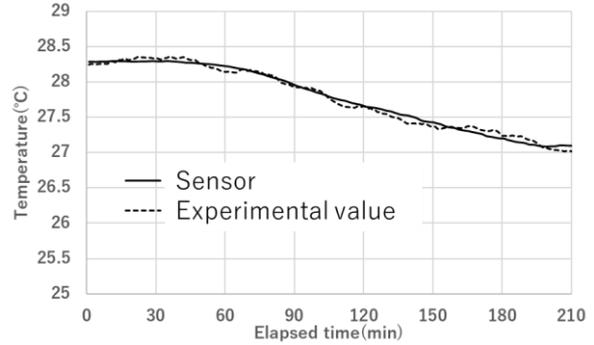


Fig.2 Transition of temperature measured by proposal method compared with that by temperature and humidity sensor in sunshade without mist spray.

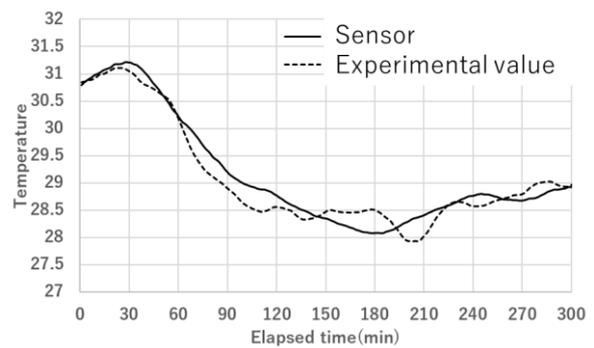


Fig.3 Transition of temperature measured by proposal method compared with that by temperature and humidity sensor in sunlight without mist spray.

ズルからの距離で $y=0.5m, 1.5m, 2.5m$ , 高さ $z=1.0m, 1.5m$ の計6点に設置し実験を行った。ミストの噴霧量は2条件で、9.42L/hと20.3L/hである。

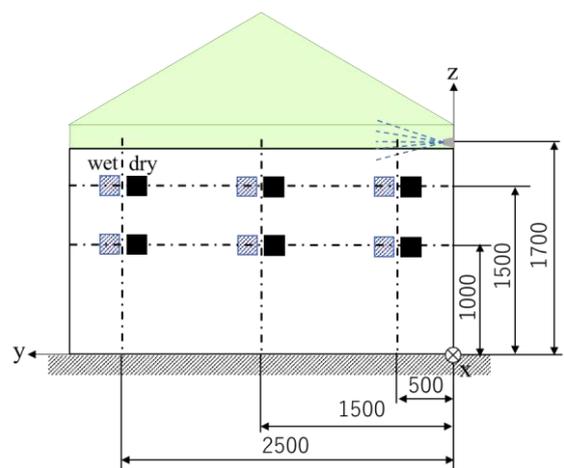


Fig.4 Experimental condition

各噴霧条件における各測定点で算出されたミスト噴霧中の温湿度の値を図5および6に示す。左上に示しているのは、テント外で測定した温湿度の値である。

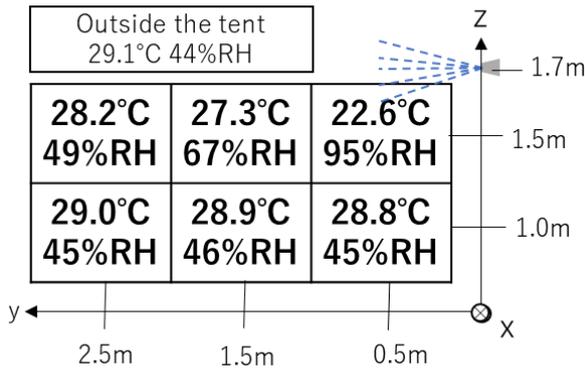


Fig.5 Measured results of temperature and relative humidity profile in spray flow rate 9.42L/h.

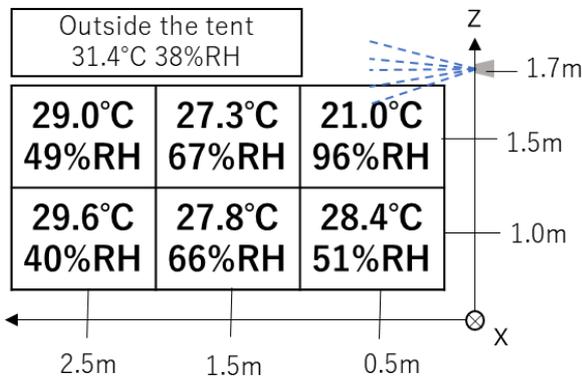


Fig.6 Measured results of temperature and relative humidity profile in spray flow rate 20.3L/h.

どちらの噴霧条件においても、外気と比較してミストによる温度低下・湿度上昇の効果を測定することができていた。今回測定を行った範囲は、テント下だけであり、比較的小さな環境で測定を行ったのだが、ミスト噴霧中は図のように大きく分布が形成される様子が見られた。また噴霧量の条件によっても差が見られ、噴霧量が大きいほど全体的にミストの効果が見られた。ミストノズルに近い点では、温度低下が非常に大きく、湿度も100%に近く、ほぼ飽和状態となっていた。また噴霧されたミストが上に飛ばされる様子が現場で見られ、実際に温度低下効果・湿度上昇効果も上部の測定点の方が大きく表れていた。

3. ミスト噴霧環境での人体生理応答予測

熱中症対策としての評価を行うためには、環境測定による結果だけでなく、その環境に存在する人間の生理応答についても考慮する必要がある。そこでOhら<sup>2)</sup>が人体の濡れを考慮できるよう改良した2nodemodelを用いて解析を行い、深部温度や表面皮膚温度の予測、そして環境値とモデル内の解析値である発汗量などからSET\*の計算を行った。

解析の条件として、十分な時間日向で過ごした人間が、暑熱対策設備内に入り、その後また日向に戻る状態を想定した。様々な暑熱対策設備が存在しているが、今回は日除け設備と日除けとミストの複合施設の条件について解析を行った。またミスト噴霧環境では、小さな空間であっても温湿度の分布が形成されるため、測定位置の違いによる差も見られるためにミストノズルから1.5mの距離と2.5mの距離における測定値を用いて、条件は、対策なし・日除けのみ・複合のミストノズルからの距離y=2.5m地点・複合のy=1.5m地点・そしてモデルの中での濡れの考慮の有無による差を見る為、複合のy=1.5m地点のミストによる濡れを考慮した条件も加え、計5つの条件について解析を行った。各条件の入力値を表1に示す。入力値は図6の実験データをもとに同水平距離の値を平均化して決定した。

Table 1 Input condition

Initial condition	Heat mitigation condition	Final condition
In the sun Temp: 31°C Humid: 38%RH MRT: 50°C Wetness: 0	Case1: In the sun 31°C,38%RH,50°C,0	In the sun Temp: 31°C Humid: 38%RH MRT: 50°C Wetness: 0
	Case2: tent 31°C,38%RH,45°C,0	
	Case3: tent+mist① 29°C,45%RH,44°C,0	
	Case4: tent+mist② 27.5°C,67%RH,42°C,0	
	Case5: tent+mist③ 27.5°C,67%RH,42°C,0.2	

暑熱対策条件の各条件の熱収支を図7、発汗量を図8に示す。全条件において、熱収支が負となり熱負荷が緩和しており、発汗量が減少する様子が見られた。日除けのみの条件では受熱量の減少によるものであった。日除けとミストの複合条件、つまり温度低下のある条件では、温度低下量による差はあるものの、どちらも受熱量減少に加え、顕熱損失の増加がみられた。さらにミストによる濡れを考慮した条件では、ミストの濡れによる疑似発汗効果の影響で、一部ミストの濡れによる潜熱量に置き換わることで発汗による潜熱が減少し、発汗量も大幅に減少する様子が見られた。図9および10から表面皮膚温度・深部温度についても同様に、熱負荷の低減によって暑熱対策条件下で値が低下する様子が見られ、ミストの濡れによる効果は特に表面皮膚温度に大きく現れる様子が見られた。またSET\*も熱負荷の低減が大きい条件ほど低下する様子がみられ、ミストによる濡れを考慮した条件では、日向に比べて5°C以上の低下がみられた。

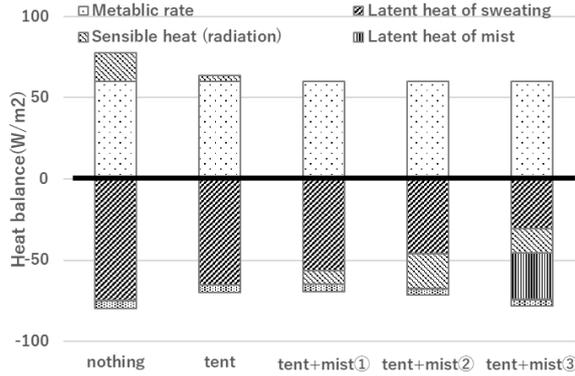


Fig.7 Human heat balance under heat countermeasure conditions

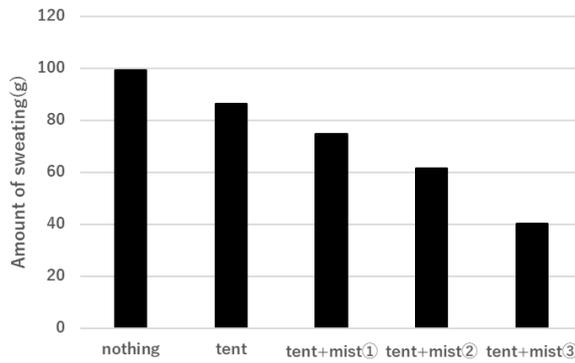


Fig.8 Amount of sweating under heat countermeasure conditions.

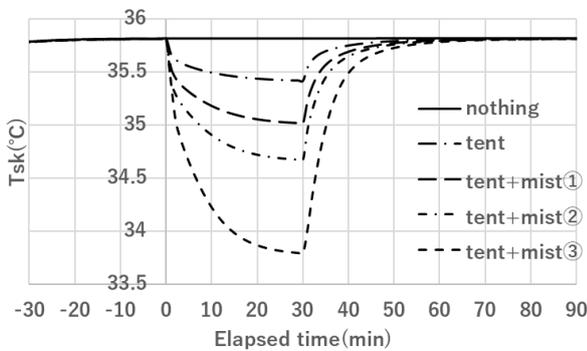


Fig.9 Transition of skin temperature in each condition

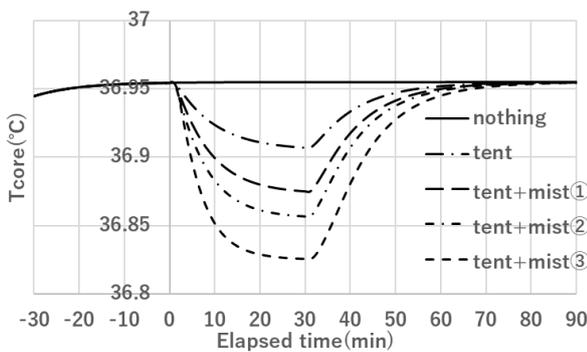


Fig.10 Transition of core temperature in each condition

Table 2 SET\* in each condition

case	SET*(°C)
nothing	30.3
tent	28.9
tent+mist①	27.7
tent+mist②	26.9
tent+mist③	23.8

4. まとめ

従来の測器を用いた温湿度測定手法では、センサへのミスト付着の影響で、ミスト噴霧環境での温湿度測定は困難である。本研究で考案されたミスト噴霧環境での温湿度測定手法を用いることで、ミストが完全に蒸発しきっていない環境においても温湿度の測定が可能となった。またミスト噴霧環境では一般的な環境と異なり、小さな空間においても温湿度分布が形成されるため、測定位置の決定が暑熱対策設備の評価の上で重要な要素である。特にミスト噴霧環境での被験者実験を行う際に被験者と温湿度測定位置が離れていた場合、その測定値は被験者を覆う環境と異なる可能性が高く、またその違いが人体の生理応答にも影響すると予測された。また人体モデルの使用において、暑熱対策条件の熱負荷の低減と発汗量の減少による人体熱ストレスの緩和が認められた。またミストによる濡れを考慮するかどうかによってSET\*で3度以上の差が生まれることとなったことから、人体の濡れによる疑似発汗効果は無視できず、ミスト噴霧環境の人体熱ストレスの評価のためには、人体への外部からの濡れを考慮できる人体モデルが必須と考えられる。

参考文献

- 1) 平田裕貴, 鍋島美奈子, 西岡真稔, 桑原浩平, 石丸泰, 堀口恭代, 「路面電車停留所における暑熱対策効果の検証-被験者実験による心理生理効果に関する研究-」, 環境情報科学学術研究論文集, 31, 2017, 149-154
- 2) W.Oh, R.Ooka, J.Nakano, H.Kikumoto, O.Ogawa, W.Choi, “Development of physiological human model considering mist wittedness for mist-spraying environments”, Building and Environment 180(2020) 106706.

駅前クールスポットにおける  
ベクトル放射温度計を用いた緑化プランターの評価  
**Evaluation of a Greening Planter in a Cool Spot near a Station**  
**Using Vector Radiation Thermometers**

○岡邊 怜也 (大阪市立大学) 高柳 幸奈 (大阪公立大学)  
鍋島 美奈子 (大阪公立大学) 西岡 真稔 (大阪公立大学)

Ryoya OKABE\*1 Yukina TAKAYANAGI\*2

Minako NABESHIMA\*2 Masatoshi NISHIOKA\*2

\*1 Osaka City University \*2 Osaka Metropolitan University

This paper aims to demonstrate the effectiveness of vector radiation thermometers through the evaluation of greening planters in cool spots near stations. The vector radiation thermometer in this study uses radiation temperature sensors and heat flow sensors to measure long-wave and short-wave radiation by direction by solving the heat balance formula on the surface of the heat flow sensor.

## はじめに

近年、都市部のヒートアイランド現象が進行しており、熱中症等の健康被害の増加が問題視されている。これに伴い、大阪府では猛暑対策の一環として「クールスポット」の創出が進められている。日射遮蔽屋根や緑化プランターなど、導入された対策の効果検証において、方向別の放射環境を把握することは重要である。高柳ら<sup>1)</sup>は方向別の放射環境を計測するためにベクトル放射温度計（以降、VRTと表記する）を試作し、VRTの各面の放射温度を単純平均し、移動平均と時間遅れを調整することで、グローブ温度が推測できることを示した。三野ら<sup>2)</sup>はクールスポットの長波放射と短波放射を分離計測するために、3種類のVRTを同時計測する方法について検討した。本研究では、VRTが暑熱環境の計測機器として一定の水準を満たすことを確認したうえで、VRTを用いてクールスポットにおける緑化プランターの影響度を評価することで、VRTの有効性を示すことを目的とする。

## 1. 研究概要

### 1.1 ベクトル放射温度計の概要

本報では前述の既往研究を参考に、一辺7cmの立方体アクリルケースを用いた2種類の計測器機を作成する。一方は各面に長波放射温度を計測するM5Stack用の放射温度センサーNCIR(視野角:90°,精度:±0.5°C,測定波長範囲:5.5~14μm)を内側から取り付けた機器であり、もう一方は各面に全放射量(長波放射量と短波放射量の和)の算出を目的として熱流計を貼付したものである(Fig.1)。外側には内部の温度上昇を防ぐため、日射不透過のアルミテープと、高反射率の白い画用紙を順に貼り付けている。実測では、これら2種類のベクトル放射温度計を併

用し、長波放射量と全放射量の差から短波放射量を算出する。全放射量は、熱流計表面における熱収支から算出する。以下、熱収支式のイメージ図をFig.2に、熱収支式での流入・流出熱量の算出式を式1,2に示す。

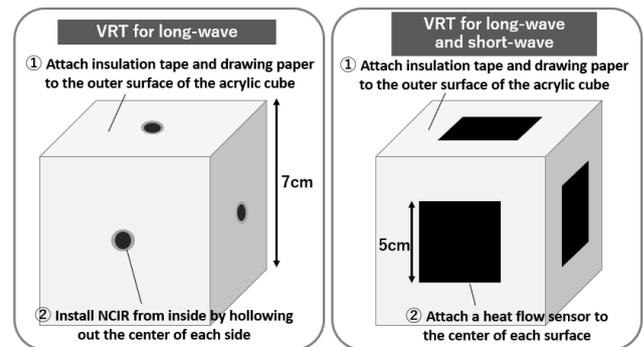


Fig.1 Image of Vector Radiation Thermometer

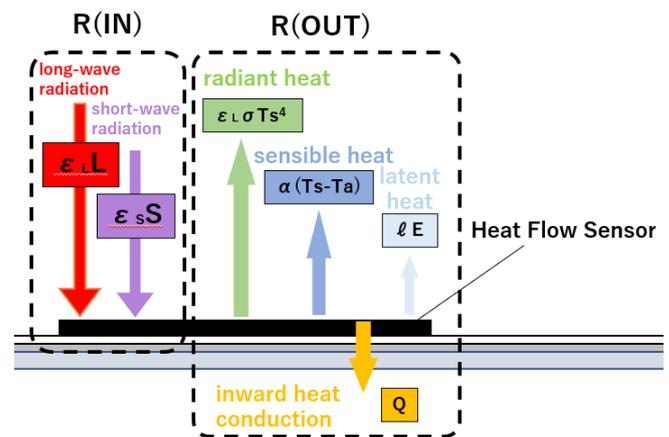


Fig.2 Surface heat balance of the heat flow sensor

$$R(IN) = \epsilon_L L + \epsilon_S S \tag{式 1}$$

$$R(OUT) = \epsilon_L \sigma T_s^4 + \alpha_c (T_s - T_a) + IE + Q \tag{式 2}$$

$R(IN)$ : 流入熱量[W/m<sup>2</sup>],  $R(OUT)$ : 流出熱量[W/m<sup>2</sup>],  
 $\epsilon_L$ : 熱流計の長波吸収率(0.95),  $L$ : 長波放射量[W/m<sup>2</sup>],  
 $\epsilon_S$ : 熱流計の短波吸収率(0.97),  $S$ : 短波放射量[W/m<sup>2</sup>],  
 $\sigma$ : ステファン=ボルツマン定数[W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)](5.67×10<sup>-8</sup>),  
 $T_s$ : 熱流計の内部温度[K],  $\alpha_c$ : 強制対流熱伝達率  
 [W/(m<sup>2</sup>K)],  $T_a$ : 気温[K],  $IE$ : 潜熱による熱移動量  
 [W/m<sup>2</sup>],  $Q$ : 内部方向への熱移動量[W/m<sup>2</sup>]

なお、ミスト散布装置がある場合、潜熱による熱移動量  $IE$  が発生するが、本報ではミスト散布のない条件下に限った分析をおこなうため、 $IE=0$  とした。

### 1.2 ベクトル放射温度計とグローブ球との相違点

グローブ球では全方向からの放射を黒球表面に受け、平衡状態のグローブ球内部温度を測定するため、時定数が大きく、10~15 分の平均的な放射環境を計測するのに適している。一方で、本報で提案する VRT は放射温度計と熱流計の 2 種類のセンサーを用いて比較的短時間の変動が計測でき、方向別かつ長波短波別の計測が可能である。

## 2. 学内検証

本研究では、事前にベクトル放射温度計の精度検証を学内で行い、効果的な活用方法や注意事項などを予め確認した上でクールスポットでの現地実測を行った。

### 2.1 熱流計の表面温度と内部温度の検証

顕熱による熱流出量の算出には熱流計表面温度が必要であるが、計測が困難なため、熱流計で計測する熱流計内部温度で代替が可能かを検証した(Fig.3)。実験結果より、表面温度は内部温度にほとんど等しく、代替可能であると判断した。

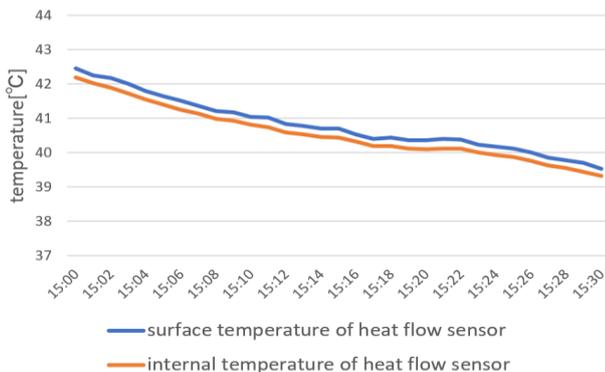


Fig.3 Temperature comparison between surface and interior of heat flow sensor

### 2.2 熱流計表面における熱収支式の検証

2 方向の長波と短波を精度よく計測可能な長短波放射

収支計(Kipp&Zonen 社製 CNR1)を用いて、熱流計表面における熱収支式が成立し、VRT から長波放射量・短波放射量を正確に測定できるか否かを検証した。実験結果より、長波放射量に関しては高い精度で測定が可能であることが確認できた(Fig.4)。一方で、熱収支残差として求まる短波放射量に関しては、熱流計で計測される内部方向への熱移動量の変動が激しく安定性に欠ける(Fig.5)。しかし、それぞれの機器で計測された短波放射量[W/m<sup>2</sup>]の 1 時間平均を比較すると、長短波放射収支計が 1814W/m<sup>2</sup>、VRT が 1805.6W/m<sup>2</sup> であることから、熱収支残差は小さく、熱収支式は閉じていることがわかる。

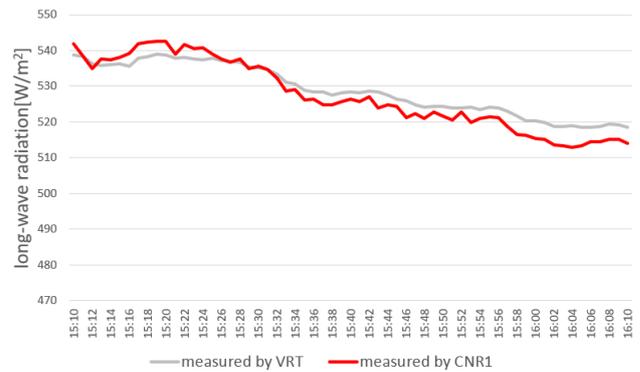


Fig.4 Comparison of long-wave radiation temperatures

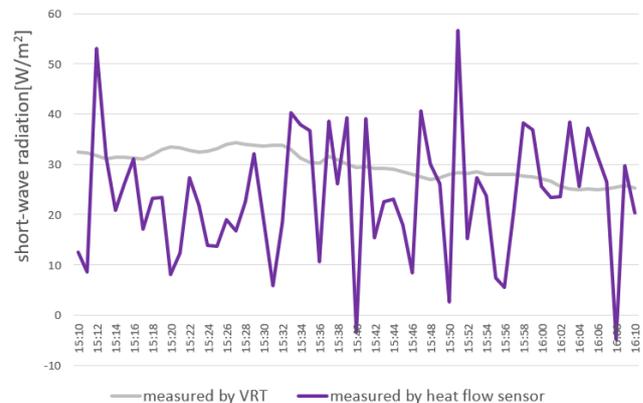


Fig.5 Comparison of short-wave radiation

### 2.3 計測機器による平均放射温度の差の検証

グローブ球から求める平均放射温度 MRT<sub>g</sub> と VRT から求める MRT<sub>v</sub> の関係性を検証し、ベクトル放射温度計の用途について考察を行った(Fig.6)。このとき、MRT<sub>v</sub> は 6 面それぞれの全放射温度を平均化したものであり、MRT<sub>v</sub> は狭義における MRT の定義とは異なるものである。実験結果より、グローブ球の MRT<sub>g</sub> と熱流計の MRT<sub>v</sub> とでは、1 時間程度の変化傾向は類似しているが、平均値が異なることや、時定数の影響で MRT<sub>g</sub> には遅れがあることから、MRT<sub>v</sub> は MRT<sub>g</sub> の代替として使用するのはなく、MRT の変化の要因分析の手段として用いることが有効であると考えられる。

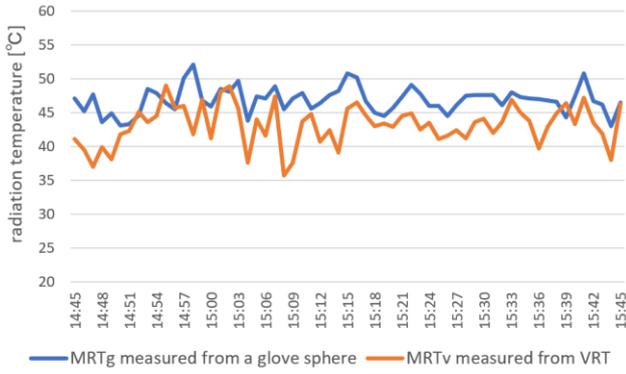


Fig.6 Comparison of Mean Radiation Temperature (MRT) measured by two kinds of method

2.4 放射温度センサーの精度と設置角度の検証

20°Cに設定した恒温恒湿槽にて、熱電対と10cm四方のラバーヒーター(約40°C)を用いて、放射温度センサー(M5Stack用の放射温度センサー-NCIR)の測定精度の検証を行った。放射温度センサーで計測される放射温度は、視野内の対象物の平均表面温度に等しいため、対象物の表面温度と視野角内形態係数から算出される推定値と放射温度センサーの実測値を距離別に比較することで検証した(Fig.7)。このとき、ヒーターは視野内の中央に正対して位置していた。また、放射温度センサーは形態係数の影響を大きく受ける上に、死角も存在するため、設置角度の違いが計測値に影響を与えることが想定される。この影響度についても検証を行った(Fig.8)。Fig.7より、測定精度は±約0.5°Cであると分かった。放射温度センサーの測定誤差範囲が0.5°Cであるため、想定範囲内であるといえる。また、Fig.8は距離別に正対置きと斜め置きの場合の値の差(ケース間差)を算出値と実測値のそれぞれで求め、プロットしたものである。推定値も実測値も同様の傾向を示しており、対象物からの距離が近いほど設置角度の影響は大きいと推定され、正対での設置が望ましいが、その誤差は許容できるものであると分かった。

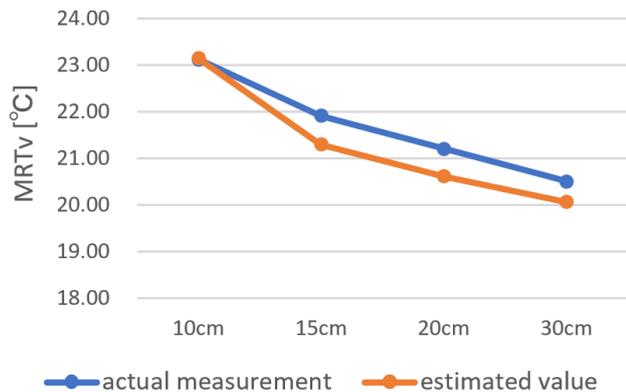


Fig.7 Accuracy of radiation temperature sensors by distance from objects

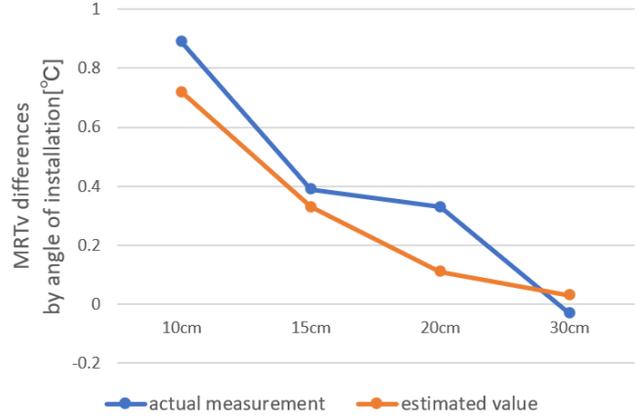


Fig.8 Differences in sensor installation angles by distance

3. 現地実測

3.1 現地実測の概要

本研究では、2023年8月上旬に金剛駅、三日市町駅、土師ノ里駅の計3地点で計測を行った(Fig.9-11)。本稿では、最も顕著に結果が現れた土師ノ里駅での計測に着目する。

各機器の設置場所については、暑熱対策ありの空間と対策なし空間にWBGT計(敦賀電機製401D)を各1台設置し、乾球、湿球、グローブ温度を計測するとともに、対策あり空間のなかで緑化プランターがある所とない所に、VRT2台1セットを順番に設置し、それぞれ30分間の計測を行った(Fig.11)。



Fig.9 Kongo Station



Fig.10 Mikkaichimachi Station



Fig.11 Vector Radiation Thermometer installation position at Hajinosato Station

3.2 現地実測の結果と考察(土師ノ里駅)

VRTを緑化プランターの前から緑化プランターのない所に移動したときの方向別の放射温度の推移グラフをFig.12に示す。緑化プランターはVRTの南側にあり、VRT移動時刻の11:40に南側の放射温度が急増していることから、緑化プランターによって南側の放射温度が抑制されていたことが推測できる。

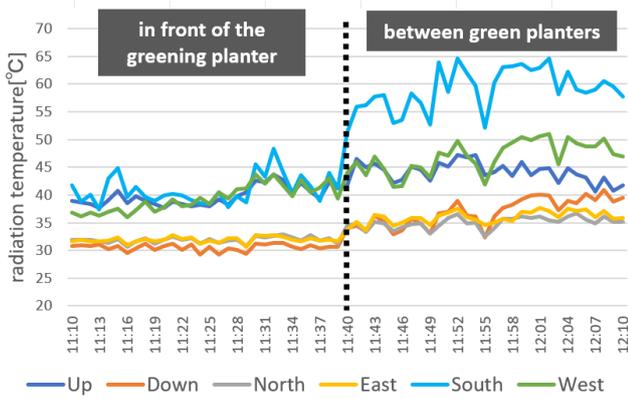


Fig.12 Transition of radiation temperature in each direction with or without greening planter (2023/8/16 11:10~12:10)

また、南方向での長波放射量と短波放射量の推移を Fig.13 に示す。11:40 を起点に主に短波放射量(日射量)が増加していることから 緑化プランター表面の蒸発散による長波放射の低減よりも、直達日射や反射日射の遮蔽による熱低減の方が大きな割合を占めていることがわかる。

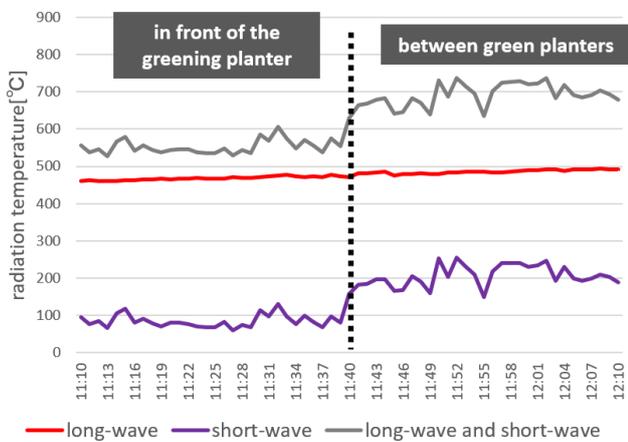


Fig.13 Transition of the breakdown of total radiation measured in the south direction (2023/8/16 11:10~12:10)

Fig.14 に対策あり地点と対策なし地点の WBGT の計測値から算出した MRT の計算値を示す。この結果から、時刻補正した MRTg(対策なし)が 70.0°C, MRTg(対策あり)が 43.7°C であることから、クールスポット対策の有無による 1 時間平均の MRTg 差は 26.3°C であることがわかる。MRTg の対策の有無による温度差のうち、緑化プランターによる効果が占める割合を MRTv の変化量から算出する。Table1 に、時刻補正をした MRTv(①緑化プランター有り)と MRTv(②緑化プランター無し)の差と方向別の内訳を示す。この結果から、緑化プランターの有無による MRTv 差は 5.8°C であり、緑化プランターの効果は 22.1% 程度と推測できる。

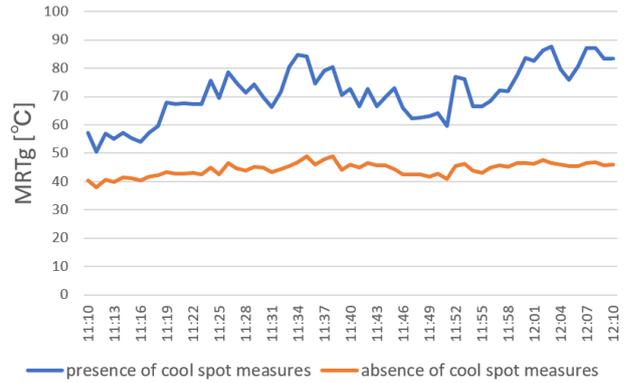


Fig.14 Differences in MRTg depending on the presence or absence of cool spot measures (2023/8/16 11:10~12:10)

Table1 Differences in MRTv breakdown by presence or absence of greening planter (2023/8/16 11:10~12:10)

	Up	Down	North	East	South	West	MRTv
①	39.8	30.7	32.0	32.0	41.3	39.5	35.9
②	42.8	35.8	34.0	34.9	57.2	45.5	41.7
②-①	3.0	5.2	2.0	2.9	15.9	6.0	5.8

[°C]

4. まとめ

本研究では、放射温度センサーと熱流計からベクトル放射温度計を作成し、駅前クールスポットの緑化プランターについての評価を行った。その結果、緑化プランターなど、特定方向にある対象物の放射熱の低減効果を評価する際に、ベクトル放射温度計が有効的であることを示した。また、複数の学内検証を行い、様々な面からベクトル放射温度計の測定精度について検証し、一定の水準を満たしていることを示した。

参考文献

- 1) 高柳幸奈, 土川忠浩, 近藤恵美: 車いす乗車者の体温調節支援のためのベクトル放射温度計の試作, 日本建築学会近畿支部研究報告集環境系, 62, pp.25-28, 2022
- 2) 三野慶輝, 高柳幸奈, 鍋島美奈子, 西岡真稔, 土川忠浩: 駅前クールスポットの温熱環境改善効果の計測ーベクトル放射温度計の活用方法の検討ー, 空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 52 巻 No.A-54, 2023 年

謝辞

本研究の現地実測を行うにあたり、大阪狭山市、藤井寺市、河内長野市の担当職員の方々には、ミスト等の実測環境の整備をはじめ、様々な面でご支援、ご協力を賜りました。記して謝意を表します。

## 超音波加湿器の室内温熱環境への影響を表現するための粒径分布を考慮した 水の相変化モデルの開発

### Development of the Water Phase Change Model Considering Droplet Size Distribution to Evaluate the Effect of Ultrasonic Humidifier on Indoor Thermal Environments.

○北浦 雄介 (大阪大学) 大屋 那央 (大阪大学) 石原 裕貴 (大阪大学)  
松尾 智仁 (大阪大学) 嶋寺 光 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Yusuke KITAURA\*1 Naoto OOYA\*1 Yuki ISHIHARA\*1

Tomohito MATSUO\*1 Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1

\*1 Osaka University

When an ultrasonic humidifier is used to control indoor humidity, the room temperature is decreased by the latent heat of vaporization of the droplets. Accurate estimation of the change of temperature and humidity considering the effect of vaporization is essential for controlling the indoor thermal environment. In this study, a CFD model incorporating a water phase change model with droplet size distribution was developed to estimate the temperature and humidity change due to the use of an ultrasonic humidifier, and wind tunnel experiments were conducted to validate the model. The CFD model reproduced the wind tunnel experiments approximately. Model parameters related to microdroplet evaporation were adjusted to estimate air temperature and humidity better. In addition, a lognormal droplet size distribution was selected to improve temperature estimation accuracy.

#### はじめに

室内の相対湿度は居住者の衛生に影響を及ぼす。冬季には特に、相対湿度が低いことによりウイルス飛沫が長時間空気中に滞留するため、インフルエンザや COVID-19 などの感染症の拡大リスクが増加する。室内の乾燥を防ぐため、超音波加湿器が用いられることがある。超音波加湿器から放出される微小な液滴は蒸発により湿度を増加し、気化熱により温度を低下させるため、加湿器を使用する室内の温熱環境を制御するためには加湿器が温湿度分布に与える影響の推定が必要となる。しかし、現状では水の相変化が生じている室内について、温度や相対湿度といった温熱環境を評価した研究は見当たらない。そこで本研究では、気象分野で用いられる相変化モデルを室内温熱環境解析向けに改良して CFD に導入した。モデル内の微小液滴の蒸発項は粒径分布に依存するため、粒径分布として一様分布と対数正規分布を用いた場合をそれぞれ検討し、検証のためモデルの計算値を風洞実験結果と比較した。

#### 1. 相変化モデル

相変化モデルとして気象分野で用いられる Kessler<sup>1)</sup>のモデルを導入した。このモデルは空気中の水分を水蒸気、重力沈降しない微小液滴、重力沈降する粗大液滴の3相に分類して扱う。超音波加湿器の影響評価においては、不飽和空気中に液滴が供給されるという大気中では起こり得ない現象を取り扱うため、Kessler<sup>1)</sup>のモデルをそのまま室内環境への適用することは不適切である。そのため、室内用 CFD への導入にあたり微小液滴の蒸発式を修正した。蒸発式は粒径分布の仮定が異なる2つのモデルを検討した。すなわち微小液滴の粒径分布が一様であると仮定した UPSD (Uniform Particle Size Distribution model)、粒径分布が対数正規分布に従うと仮定した LND (Logarithmic Normal Distribution model) である。UPSD の微小液滴の蒸発式を式 (1) に、LND の蒸発式を式 (2) に示す。

$$\frac{dq_v}{dt} = b * (q_{vs} - q_v) * \left(\frac{q_c}{q_{co}}\right)^\alpha * f(T) \quad (1)$$

$$\frac{dq_v}{dt} = b * (q_{vs} - q_v) * \left(\frac{S_c}{S_{c0}}\right) * f(T) \quad (2)$$

$q_{vs}$ は飽和水蒸気混合比,  $q_v$ は水蒸気混合比,  $f(T)$ は温度 $T$ に関する関数,  $q_c$ は微小液滴混合比,  $q_{c0}$ は代表微小液滴混合比 ( $2.0 \times 10^{-3}$  kg/kg),  $\alpha$ は微小液滴蒸発時の粒径・粒子数変化に関する係数,  $b$ は微小液滴の蒸発時間に関する係数,  $S_c$ は微小液滴表面積,  $S_{c0}$ は微小液滴表面積の代表値 ( $0.25 \text{ m}^2$ ) である。 $\alpha$ と $b$ はパラメトリック解析を行うことで風洞実験をよく再現するパラメータを探索した。探索は $\alpha = 0.33, 0.67, 1$  (UPSD),  $b = 0.5, 1, 1.5$  (UPSD, LND 共通) の範囲について行った。

2. 風洞実験条件・CFD 計算条件

風洞実験には大阪大学工学研究科 研究用風洞を用いた。風洞の寸法は 9.5 m, 1.8 m, 1.8 m である。風洞入口から 1.0 m の位置に超音波加湿器を設置し、加湿器風下の気温と液滴の粒形分布を測定した。気温は Fig.1 に示す位置に設置した熱電対で測定した。粒径分布は超音波加湿器から 0 m, 0.5 m, 1.0 m の 3 点に感水紙を設置し、感水紙の顕微鏡画像を画像処理することで取得した。実験は加湿量と風洞風速を変更して 4 ケース行った (Table 1)。実験ケース名は加湿量の大小を h3, 1 で、風洞風速の大小を w2.0, 0.5 で表している。

モデルの検証のため、実験を模擬する CFD シミュレーションを行い、測定値と比較した。シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を使い、非圧縮性定常流れを仮定した。浮力の考慮のためブシネスク近似を導入し、乱流モデルには標準 k-ε モデルを使用した。境界条件には風洞実験における測定値を用いた。

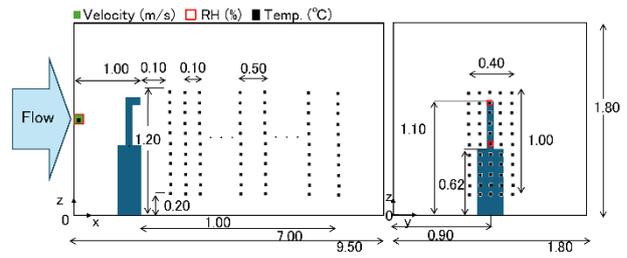


Fig. 1 Experiment layout

3. 測定結果・考察

実験ケースごとに風洞入口気温が異なるため、温度の測定結果は風洞入り口気温からの温度低下量として扱う。

各実験ケースについて、yz 面内の 9 (Fig.2) について、x 座標ごとの温度低下分布を Fig.3 に示す。いずれのケースでも加湿器吹き出し口に近い y 方向中央、z = 1.10 m の点である 8 番の x = 1.00 m 前後で温度低下のピークが見られた。h1w0.5 では加湿器から離れるにつれ測定点上部、中部、下部の順にピークが現れ、y 方向外側の点である 1 番、3 番、4 番、6 番で温度低下が見られた。これは冷えた空気が浮力によって下降したこと、液滴と空気が拡散したためと考えられる。h3w0.5 では h1w0.5 と同様の傾向が見られるが、h1w0.5 と比べて全体的に温度低下量が大きくなった。これは空気中の液滴量が多くなったことで蒸発量が増加したためと考えられる。1w2.0, h3w2.0 では 8 番で -5°C 程度の温度低下が見られたが、その他の測定点では温度低下は見られなかった。これは風速が大きいため液滴や空気が拡散、下降するより速く風下へ輸送されたためと考えられる。加湿量が増加すると温度低下量は大きくなった。これは空気中の液滴量が多くなり、蒸発量が増加したため

Table 1 Experiment case

Case name	Humidifier			Wind tunnel			
	Wind velocity [m/s]	Water temperature [°C]	Amount of humidification [kg/s]	Wind velocity [m/s]	Air temperature [°C]	Humidity ratio [kg/kg]	Turbulent kinematic energy [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
h3w0.5	0.74	24.5	$2.50 \times 10^{-4}$	0.49	25.8	$1.34 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-3}$
h1w0.5	0.74	23.2	$1.07 \times 10^{-4}$	0.50	24.9	$1.35 \times 10^{-2}$	$0.84 \times 10^{-3}$
h1w2.0	0.74	24.1	$1.22 \times 10^{-4}$	1.98	26.7	$1.36 \times 10^{-2}$	$7.3 \times 10^{-3}$
h3w2.0	0.74	24.3	$2.49 \times 10^{-4}$	2.01	27.3	$1.46 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-3}$

と考えられる。

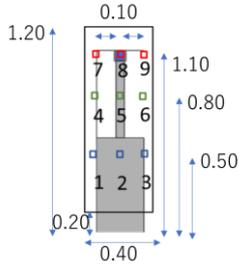


Fig. 2 9 measurement points in yz-plane

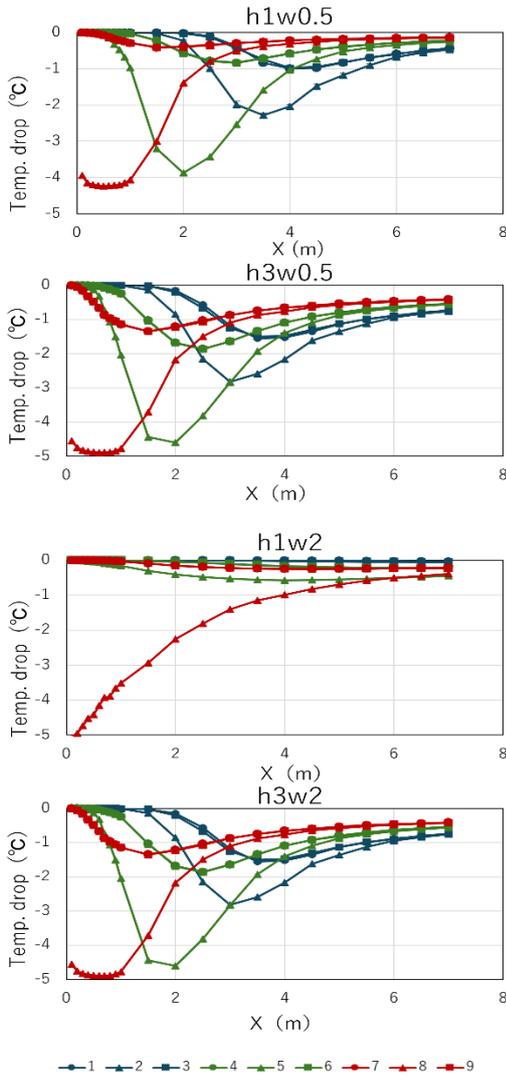


Fig. 3 Temperature drop for each measurement point in x direction

次に、粒径分布の測定結果について述べる。x = 0.00 m, 0.50 m, 1.00 m の 3 か所における液滴流れ中心について各実験ケースで測定した液滴半径のヒストグラムと、対数正規分布の近似曲線を Fig. 4 に、各距離、各実験ケースでの対数正規分布の近似曲線のパラメータ  $r_{med}$ ,  $\sigma$ , ヒストグラムと対数正規分布の

RMSE を Table 2 に、対数正規分布  $f(r)$  [1/m] の式を式 (3) に示す。加湿量が増えると粒径は大きくなった。これは液滴量が多くなると空气中で微小液滴の衝突・併合が起こりやすくなるためと考えられる。また、風速にかかわらず、加湿器から離れるほど粒径分布の幅が小さくなった。これは粒径が小さい液滴ほど粒径に対する表面積が大きく蒸発速度が増加するため、加湿器遠方における粒径の小さい液滴の存在比が減少しているためだと考えられる。距離や実験ケースによっては測定値と対数正規分布近似に差が発生した点があるが、粒径分布はおおむね対数正規分布で表せた。

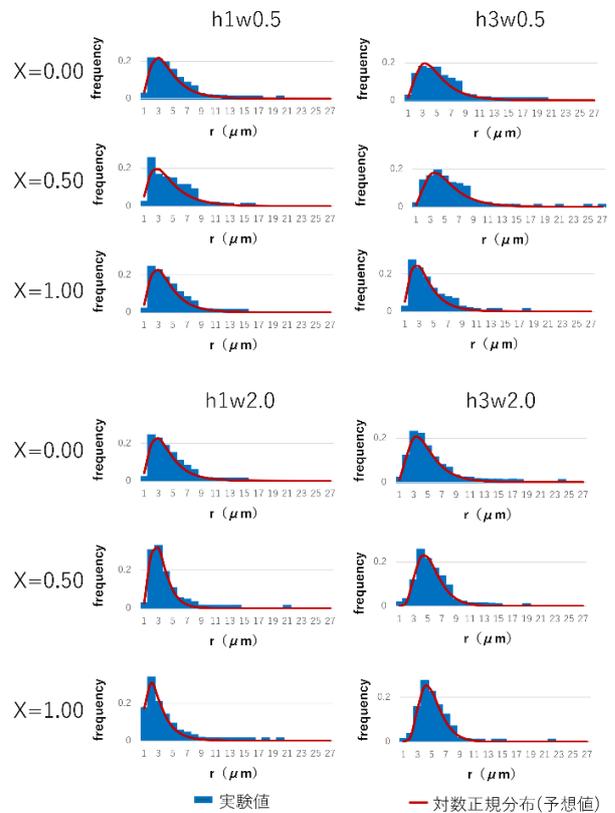


Fig. 4 Particle size distribution

Table 2  $r_{med}$ ,  $\sigma$ , and RMSE for each case

	x[m]	$r_{med}$ [μm]	$\sigma$	RMSE
h1w0.5	0.00	3.9	0.55	0.009
	0.50	3.9	0.61	0.020
	1.00	3.7	0.54	0.011
h3w0.5	0.00	4.4	0.52	0.009
	0.50	4.7	0.54	0.012
	1.00	3.4	0.53	0.013
h1w2.0	0.00	3.6	0.52	0.008
	0.50	3.1	0.42	0.005
	1.00	2.6	0.58	0.007
h3w2.0	0.00	4.3	0.50	0.004
	0.50	5.1	0.36	0.008
	1.00	4.8	0.36	0.007

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{r}{r_{med}}\right)^2\right) \quad (3)$$

4. CFD 計算結果・考察

測定値とパラメトリック解析結果の比較として風洞の中央断面 (y = 0.9 m) での各高さの温度低下を Fig. 5 に示す。各ケースともに、パラメータによって蒸発の動態が異なり、LND を用いて b = 1.0 としたケースが最も実験値とよく合致した。

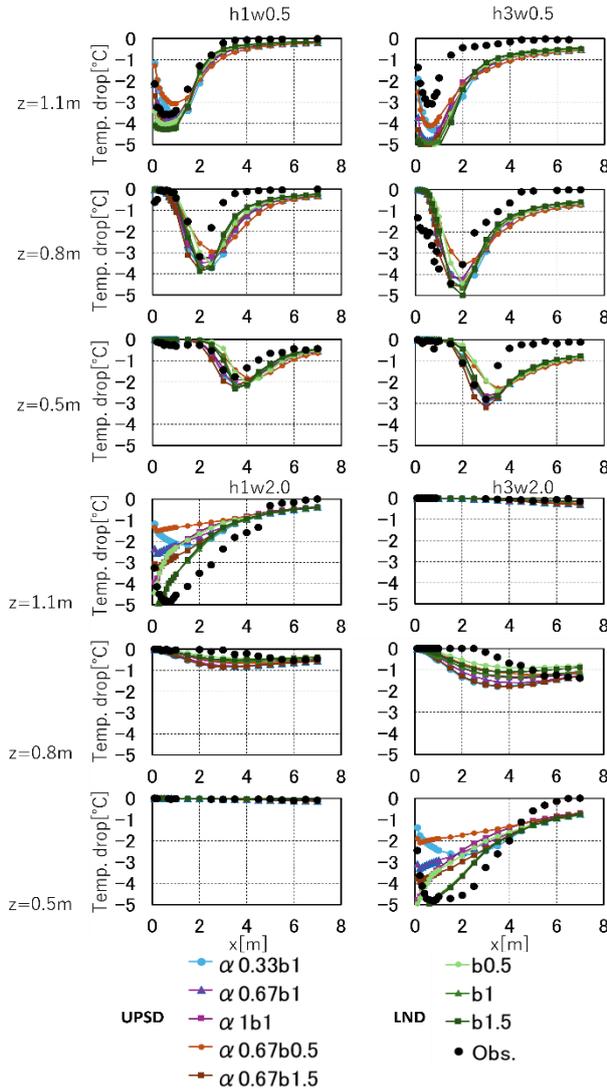


Fig. 5 Temperature drop in x direction

また温度変化の測定値とパラメトリック解析結果との RMSE を Table 3 に示す。この表から実験ケース全体として LNDb1 が最も測定値に近づいたといえる。また、加湿量と風速を変更した場合でも温度低下を良く再現した。LNDb1 での各ケースの風洞中央断面 (y = 0.9 m) における温度低

下分布、水蒸気混合比分布を Fig. 6 に示す。加湿量が多いほど広い範囲に微小液滴が広がり、それにより水蒸気、温度低下が増加した。また風速が大きいと液滴が広がらず、風下方向に細い液滴、温度低下分布となった。

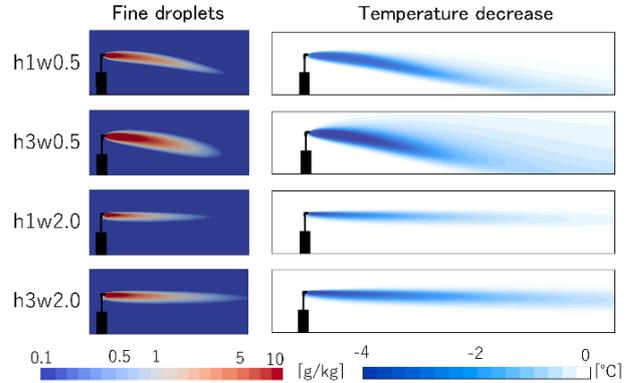


Fig. 6 Temperature drop and fine droplet distribution in the central cross section

Table 3 RMSE of temperature drop

		h1w0.5	h3w0.5	h1w2.0	h3w2.0	Ave.
UPSD	$\alpha$ 0.33b1	0.41	0.90	0.67	0.64	0.65
	$\alpha$ 0.67b1	0.36	0.92	0.57	0.49	0.59
	$\alpha$ 1b1	0.36	0.93	0.51	0.45	0.56
	$\alpha$ 0.67b0.5	0.43	0.89	0.79	0.70	0.70
	$\alpha$ 0.67b1.5	0.37	0.94	0.45	0.42	0.55
LND	b0.5	0.36	1.01	0.50	0.43	0.58
	b1	0.37	0.92	0.29	0.36	0.49
	b1.5	0.37	1.01	0.32	0.35	0.51

5. 結論

本研究では、超音波加湿器使用時の温熱環境変化を表現するために相変化モデルを導入し、風洞実験結果を用いてモデルのパラメータを検討した。本研究の結論を、以下にまとめる。

- 相変化を導入した CFD は各実験ケースの温度低下をおおむね再現した。
- 微小液滴の粒径分布に LND を用いることでモデルの再現性が向上した。

参考文献

1) Edwin Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, 10 (1969) 1-84

放射モデルを組み込んだ CFD モデルによる放射冷房使用時と対流空調使用時の  
室内温熱快適性の評価Evaluation of Indoor Thermal Comfort under Radiant Cooling Conditions Using Radiation-  
coupled CFD

○福知 奨一朗（大阪大学） 松尾 智仁（大阪大学）  
嶋寺 光（大阪大学） 近藤 明（大阪大学）

Shoichiro FUKUCHI\*1 Tomohito MATSUO\*1 Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1

\*1 Osaka University

This research conducted numerical simulations for comparatively evaluating indoor thermal comfort under conditions using a radiant cooling system and that using a conventional convective cooling system. Both cooling systems were adjusted to achieve the same operative temperature. The results showed that the radiant cooling system produced relatively uniform air and wall surface temperature distributions, while the convective cooling system produced air temperature stratification. In addition, because of the difference in air temperature distributions, the radiant cooling condition showed less spatial variation in PMV than the convective cooling condition. These results indicate that a radiant cooling system provides uniform thermal comfort.

## はじめに

従来の対流空調システムは熱輸送を対流熱伝達によって行い、室内の気温や風速を制御する。一方で、放射空調システムは熱輸送を放射熱伝達によって行い、室内の気温や放射温度を制御する。空調方式によって制御される要素が異なり、温熱快適性に差が生じると考えられる。これまでの研究では温熱快適性を主に気温や気流に注目しているものが多く、快適性指標を用いて放射空調システムと対流空調システムを比較したものは少ない。

そこで本研究では CFD シミュレーションによって、放射空調システムと対流空調システムを比較し、空調方式による違いが温熱快適性に及ぼす影響を測定実験による直接の評価が難しい要素まで含めて詳細に評価する。

## 1. 計算手法

## 1.1 CFD モデル

本研究では、OpenFOAM-4.0 を利用し CFD シミュレーションを行った。非圧縮性定常流れを仮定し、ブシネスク近似を用いて浮力を表現した。

## 1.2 固体壁面の境界条件

本研究では、室内側壁面表面温度は壁体内の熱伝導、壁面での放射・対流熱輸送の熱収支によって決定される変数として扱われる。そのため、壁面境界条件は室内側壁面ではなく、室外側の壁面に設定される（Fig.1）。定常条件を仮定しているため、壁体内の熱伝導を解くために必要

な物性値は壁体の熱伝導率と壁体の厚さである。壁体内の熱輸送は一次元熱伝導方程式として扱われ、熱伝導による熱流束が算出される。得られた熱流束と室内側壁面での放射・対流熱流束を考慮して熱収支を解き、室内側壁面の表面温度が算出される。

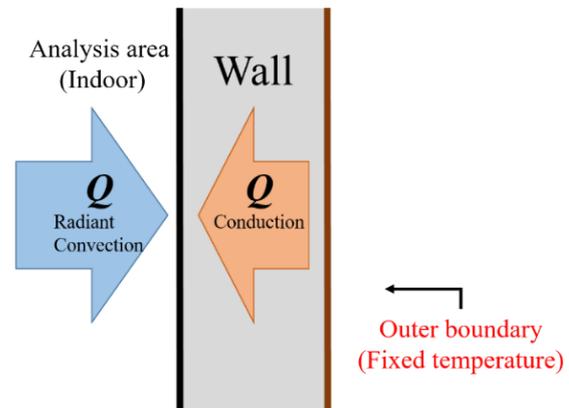


Fig.1 Boundary condition of walls

## 1.2 放射モデル

OpenFOAM-4.0 には形態係数を用いた放射モデルが搭載されているが、このモデルでは、固体の吸収率や反射率を考慮できない。そこで本研究では、面の幾何学的位置関係、放射率、吸収率、反射率、面での多重反射を考慮することのできる吸収係数放射モデルを導入した。

形態係数放射モデルは、形態係数と放射率・反射率を元

に放射による熱輸送量を求める手法である。形態係数は式(1)によって定義され、ある面  $j$  から出射される全放射流速のうち、別の面  $i$  に到達する放射熱流速の割合を表す。また、面からの放射熱流速は式(2)で与えられる。吸収係数放射モデルでは、形態係数を用いて吸収係数を算出しており、放射、吸収、反射、を考慮に入れて計算することができる。放射率が既知であり、かつ波長による変動がないと仮定し、式(3)、(4)に示す関係式から吸収率、反射率を算出した。式(5)は面  $i$  から出射される放射熱流速を表している。面  $i$  に入射する放射熱流速は吸収係数を用いて式(6)で表される。式(7)は吸収係数の定義式である。各式での記号の定義を **Table 1**、に示す。

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

$$Q_{ji} = \frac{A_j}{A_i} \varepsilon_i \varepsilon_j \sigma F_{ji} t_j^4 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \alpha \quad (3)$$

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4)$$

$$Q_{Ei} = \varepsilon_i \sigma t_i^4 \quad (5)$$

$$Q_{Ii} = \sum_j \frac{A_j}{A_i} D_{ij} Q_{Ej} \quad (6)$$

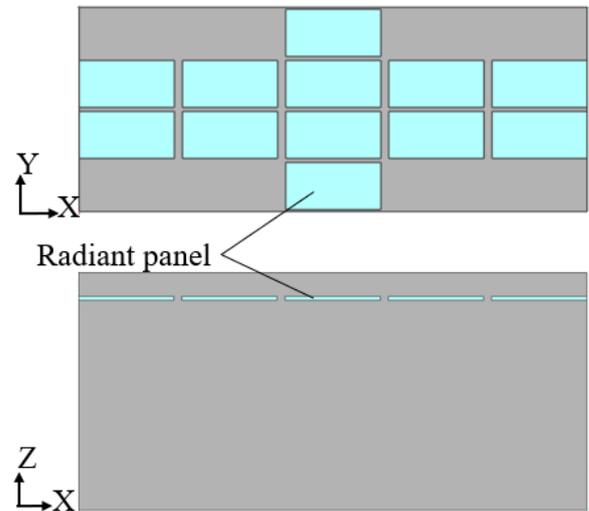
$$D_{ij} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (7)$$

**Table 1** Definition of the characters in equation (1)~(7)

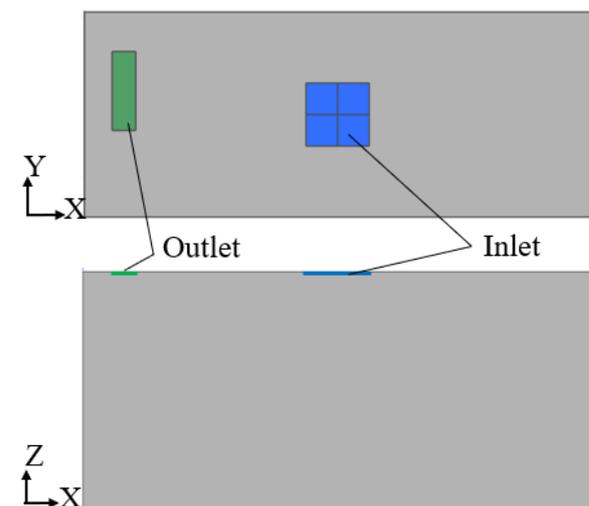
Character	Definition	Unit
$F_{ji}$	View factor	[-]
$A_i$	Area of surface $i$	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_j, \theta_i$	Angles formed by the line connecting the surface $i$ and $j$ and normal lines of surface $i$ and $j$	[°]
$r$	Distance between surface $i$ and $j$	[m]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\varepsilon_i$	Emissivity of surface $i$	[-]
$t_i$	Surface temperature of surface $i$	[K]
$\alpha_i$	Absorptivity of surface $i$	[-]
$\rho_k$	Reflectivity of surface $i$	[-]
$N$	Total number of surfaces	[-]
$Q_{Ei}$	Radiative heat flux emitted from surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Ii}$	Incident radiative heat flux to surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$D_{ij}$	Absorption factor matrix	[-]

### 1.3 計算条件

本研究では、Liao et al.<sup>1)</sup>による測定実験を参考に **Fig.2**, **Fig.3** に示す形状モデルを作成した。放射空調を稼働させたケースが **radiant** ケース、対流空調を稼働させたケースが **convective** ケースである。どちらの形状モデルも部屋の大きさは 6.4 m × 2.6 m × 3.0 m であり、壁に窓はなく、室内には居住者や照明などの熱源は存在しない。**radiant** ケースについては、床から高さ 2.5 m の位置に 12 枚の放射パネルが測定実験と同じ配置で取り付けられている。また、1 枚のパネルの大きさは 0.6 m × 1.2 m で、厚さは 0.01 m である。**convective** ケースについては、天井に 0.8 m × 0.8 m の大きさの吹き出し口と 0.3 m × 1.0 m の大きさの吸い込み口が取り付けられている。格子数は約 40 万である。



**Fig.3** Geometric model (radiant case)



**Fig.4** Geometric model (convective case)

**Fig.2**, **Fig.3** に示した形状モデルについて境界条件を設定し計算を行った。Liao-et-al の論文<sup>1)</sup>中で、壁、床、放射

パネルの放射率、放射パネルの表面温度については明記されているため、その値を使用し、それ以外の値は計算結果が測定結果と近くなるように設定した。radiant ケースについては室内の平均気温の計算結果が23°Cから25°Cの範囲になるように外壁面温度と熱伝導率を設定した。また、測定実験では両ケースで作用温度が等しくなるように空調を稼働させている。なお、作用温度の算出において、対流熱伝達係数と放射熱伝達係数は等しいものと仮定した。すなわち、作用温度は気温と MRT の平均値とした。本研究では、radiant ケースの結果から作用温度を算出し、作用温度がその値と等しくなるように convective ケースの吹き出し空気温度と吹き出し風速を設定した。また、吹き出し口について、吹き出し口を四分割し、それぞれの面に境界条件を設定することで、吹き出し口から外側四方向へ斜め下方向に空気が吹き出すようにした (Fig.4)。また、吸い込み口の吸い込み方向は鉛直上向きである。設定した境界条件を Table 2 に示す。

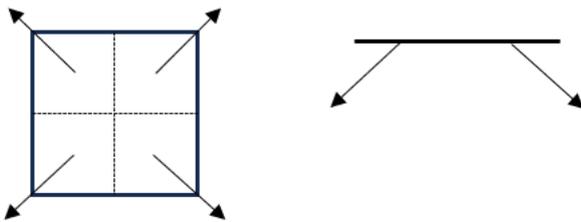


Fig.4 Inlet air direction

Table 2 Boundary conditions

Boundary	Value
Outer wall surface temperature [°C]	38
Radiant panel surface temperature [°C]	19
Inlet air temperature [°C]	17
Inlet air speed [m/s]	0.3 (X-component) 0.3 (Y-component) 0.3 (Z-component)
Outlet air speed [m/s]	0 (X-component) 0 (Y-component) 0.64 (Z-component)

#### 1.4 快適性指標

本研究では、熱的快適性の指標として PMV (予想平均温冷感申告) を用いた。これは、暑い～寒いまでの人の温冷感を+3 から-3 の数値で表すもので、PMV の絶対値が 0.5 以内であれば、不満足・不快を感じる人の割合は 10% となる<sup>2)</sup>。PMV を算出する際は、気温、風速、放射温度は CFD シミュレーション計算値を用い、相対湿度、着衣量、代謝量はそれぞれ 50%、0.6clo、1.2met と定数で与えた。

## 2. 結果と考察

両ケースにおける高さ 2.5 m 以下の空間の平均気温、MRT、作用温度を Table 3 に示す。同程度の作用温度となるように各空調を稼働させた際、radiant ケースでは、気温と MRT の差は 0.5°C となったが、convective ケースでは、気温と MRT に約 6.5°C の差が生じた。

部屋の中央 (Y=1.3 m) 断面における気温の分布を Fig.5 に示す。radiant ケースでは、部屋の中心部のパネル直下のエリアで周囲より気温が低くなったが、それ以外のエリアでは気温は均一であった。一方、convective ケースでは、温度成層が生じていた。

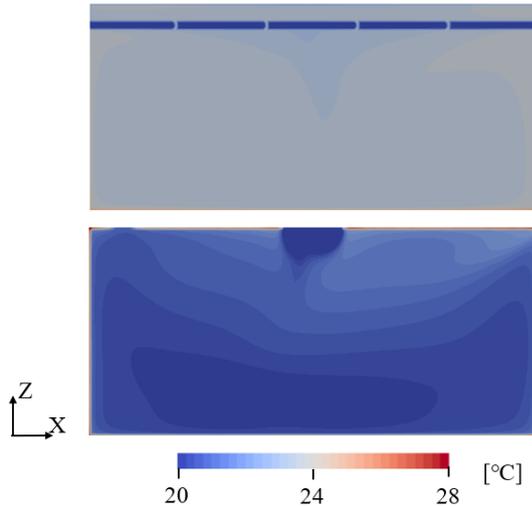
部屋の中央 (Y=1.3 m) 断面における MRT の分布を Fig.6 に示す。MRT 分布について、radiant ケースでは、放射パネルに近いほど MRT が低くなった。一方、convective ケースは吹き出し口と吸い込み口付近、吹き出し口の直下は周囲より MRT が低くなった。

部屋の中央 (Y=1.3 m) 断面における風速の分布を Fig.7 に示す。風速分布について、radiant ケースでは全体的に convective ケースよりも風速は小さかった。一方、convective ケースは、吹き出し口、吸い込み口、床付近、壁付近で風速が大きくなっていった。

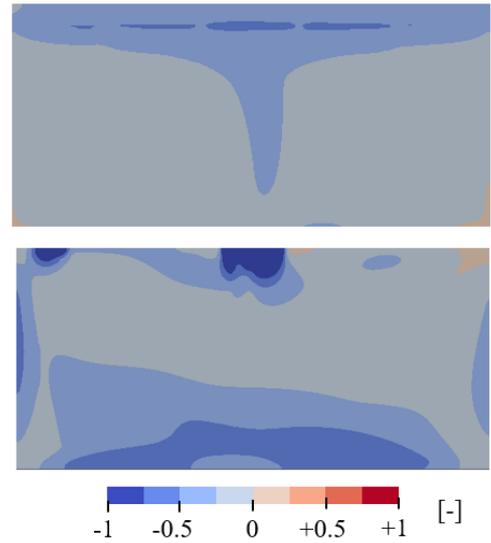
部屋の中央 (Y=1.3 m) 断面における PMV の分布を Fig.8 に示す。PMV 分布について、radiant ケースでは部屋の中心部のパネル直下のエリアで周囲より値が小さくなっていった。それ以外のエリアでは PMV の値は均一であった。一方、convective ケースでは吹き出し口・吸い込み口の周辺、床付近で PMV の値が局所的に小さくなっていった。どちらのケースの PMV 分布も温度分布と傾向が似ており、気温が低いエリアでは PMV の値も小さくなっていった。また、convective ケースの壁付近は PMV の値が小さく、風速が PMV に影響を及ぼしている。両ケースの PMV の値のばらつきに注目すると、radiant ケースよりも convective ケースのほうがばらつきが大きい。このことから、放射空調は室内の温熱快適性をより均一に保つことができるといことがわかった。

Table 3 Average air temperature, MRT and operative temperature

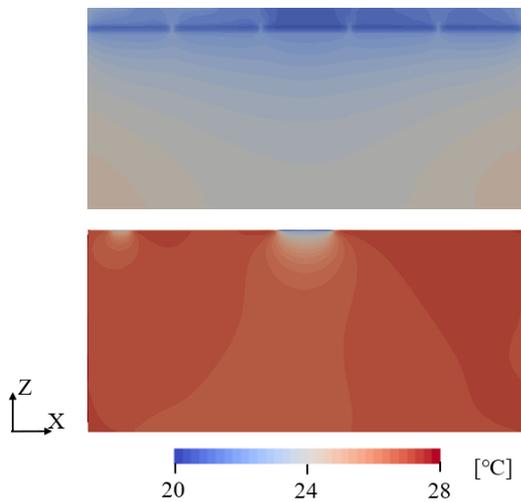
	Average air temperature [°C]	MRT [°C]	Operative temperature [°C]
Radiant case	23.5	24.0	23.7
Convective case	20.5	27.0	23.7



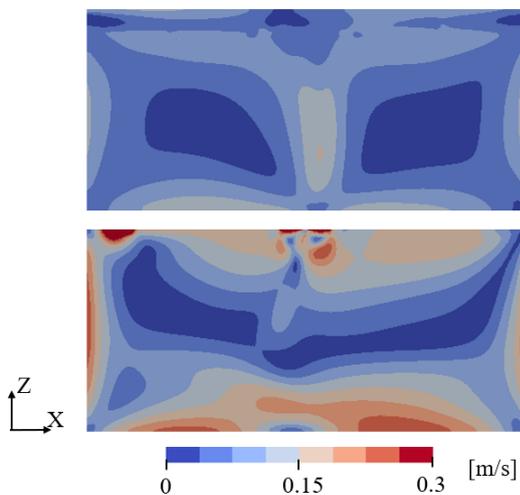
**Fig.5** Air temperature distribution  
(Upper: radiant case, Lower: convective case)



**Fig.8** PMV distribution  
(Upper: radiant case, Lower: convective case)



**Fig.6** MRT distribution  
(Upper: radiant case, Lower: convective case)



**Fig.7** Wind speed distribution  
(Upper: radiant case, Lower: convective case)

### 3. 結論

本研究では、放射空調使用時と対流空調使用時のシミュレーションを行い、作用温度が等しいという条件下で空調方式の違いが温熱環境に与える影響を評価した。以下にその結果を示す。

- 放射空調使用時は気温と MRT の差は小さくなるが、対流空調使用時は気温が低く、MRT が高くなった。
- 放射空調使用時は気温分布はおおむね均一であったが、対流空調使用時は温度成層が生じた。
- 放射空調使用時は放射パネルに近づくほど MRT が低くなり、対流空調使用時は主に吹き出し口の直下で MRT が低くなった。
- 風速は放射空調使用時よりも対流空調使用時のほうが大きく、特に床と壁付近で大きくなっていた。
- PMV 分布について、放射空調使用時は対流空調使用時よりも均一な温熱環境を実現できる。

### 参考文献

- 1) Wei Liao, Jinqing Peng, Yimo Luo, Yingdong He, Nianping Li, Yongga A: Comparative study on energy consumption and indoor thermal environment between convective air conditioning terminals and radiant ceiling terminals, Building and Environment, 2019, 108661, 2022
- 2) ANSI/ASHRAE Standard 55-2023

同一熱量条件としたときの局所気流が人体生理・心理反応に及ぼす影響

(その1) 被験者実験による高齢者と若年者および性差の比較

Effects of Local Airflow on Human Physiological and Psychological Reactions under the Same Amount of Heat, (Part1) Comparison of Elderly and Young people and Gender Differences through Subject Experiments

○濱 大智 (立命館大学)                      李 明香 (立命館大学)

馬場 智子 (三菱電機)                      逸見 憲一 (三菱電機)                      古橋 拓也 (三菱電機)

Daichi HAMA\*1 Myonghyang LEE\*1 Satoko BABA\*2 Kenichi HEMMI\*2 Takuya FURUHASHI\*2

\*1 Ritsumeikan University \*2 Mitsubishi Electric Corporation

This study shows we conducted experiments on local airflow in the laboratory with subjects under the same amount of heat and analyzed differences due to gender and age differences. As a result, elderly people were more likely than young people to feel cold when exposed to wind in low-temperature zones, but in high-temperature zones their thermal sensations were neutral, with no difference from younger people. Besides, in low-temperature local airflow, the thermal sensation of the cooling part has a high contribution rate to the thermal sensation of the whole body, and young people contribute more to the thermal sensation of the whole body than the elderly.

はじめに

近年、個人の快適性に対応して、局所的な部位に気流を当てることが可能となっており、局所部位に気流を与えることで、深部温度及び皮膚温度が上昇/低下し、より早く温熱的快適閾値に到達することが明らかになっている<sup>文1) 文2)</sup>。しかし、実験条件において人体に与える熱量が異なるため、その影響が大きく出た可能性が考えられる。また、室内では年齢、性別が異なる様々な属性の人が混在し、高齢者は若年者に比べて体温調節機能(皮膚血管の拡張/収縮の遅れ等)の応答性の違い<sup>文3)</sup>、女性は男性に比べて身体の抹消部に冷えの感度が大きく<sup>文4)</sup>、属性間で温冷感・快適感の評価に差があることが明らかになっている。そこで、本研究では、人体に与える熱量を同一条件として風温と風速の異なる局所気流環境下での被験者実験を若年者・高齢者、男性・女性に対して行い、発汗やふるえなどの人体生理および心理反応の属性間の違いを検討する。

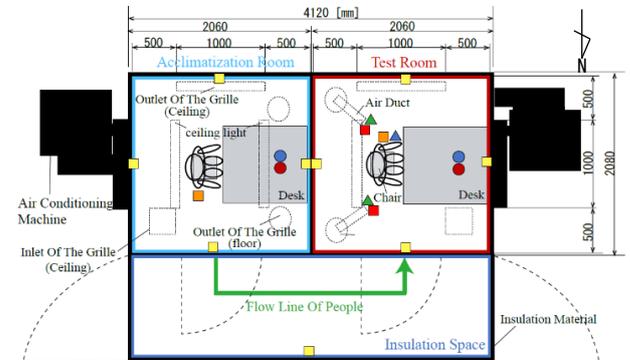
1. 被験者実験概要

1.1 実験室概要

本実験は、立命館大学びわこくさつキャンパス内の恒温恒湿室にて、2023年9月16~30日までの12日間、11月6~27日の14日間の計26日間実施した。Fig.1に示すように、縦2,080mm、横2,060mm、天井高2,700mmの部屋が2室設置されている。1部屋に、天井吹出が1箇所、床吹出が2箇所あり、空調機からの空気の流量を天井と床に分岐させるダクトのダンパにより吹出流量の割合を制御できる。また、2室の前室に断熱材<sup>注1)</sup>で覆われた断熱空間を設置し、2室間の移動経路での外気の影響を妨げ、人体の熱収支を馴化時のまま保つことを可能とした。

1.2 測定項目

温熱環境の測定点及び生理量の測定点を Fig1 に示す。皮膚温度はボタン型温度ロガーで額、胸部、上腕、手、大腿、下腿、足の計7点を測定し、Hardy-DuBoisの7点法により平均皮膚温度を算出した。



Usage Guides	Meas. Items	Meas. Points
	Temp. around Human Body	3 points (FL+100,+600,+1100) × 2 Rooms
	Wall Temp.	6 points (4 side faces(FL+1100), Ceiling,floor) × 2 Rooms
	Duct Opening Air Temp.	2 points
	Air Temp. Humidity	1 point(FL+1100) × 2 Rooms
	Radiation Temp. Air Vel.	1 point(FL+1100) × 2 Rooms
	Vel. around Human Body	3 points (FL+100,+600,+1100)
	Duct Opening Air Vel.	2 points

Usage Guides	Meas. Items	Meas. Points
	Skin Surface Temp.	7points(Forehead,Chest, Shoulder,Hand,Thigh,Leg, Foot)
	Deep Body Temp.	1 point(Eardrum)
	Sweat Rate	1 point(Forehead)
	Blood Flow	1 point(Hand)
	Heart Rate	1 point(Chest)

Fig.1 Measurement points of thermal environment and human body

Table 1 Experimental conditions

Case	Airflow properties	Air Temp.	Air Vel.	Part where airflow is applied
1	---	24°C	---	---
2	locality		1.8 m/s	Arm
3	---	30°C	---	---
4	locality		1.8 m/s	Arm

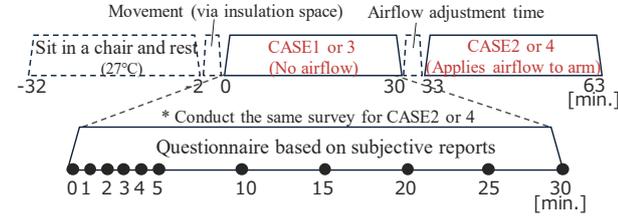


Fig.2 Experiment procedure

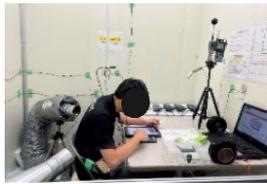


Fig.3 Experiment situation

Table.2 Questionnaire items

Thermal Sensation / Comfort Sensation / Shivering Sensation / Sweating Sensation  
Local Thermal Sensation (Face, Neck, Chest, Back, Arm, Hand, Waist/ Rear, Thigh, Leg, Foot) / Free Comments

1.3 実験手順および実験 Case

被験者は健康な 20~29 歳の男性 8 名、女性 6 名と 65~74 歳の男性 8 名、女性 6 名の延べ 28 名とし、前日は睡眠時間を十分に確保させ、飲酒・カフェイン、喫煙を禁止とした。着衣量は約 0.5clo (半袖+長ズボン) で統一した。実験 Case を Table.1 に示す。属性間で生理反応・心理反応に違いの出やすい温度条件を想定し、発汗予想の 30°C に対してふるえを想定した 24°C のそれぞれで気流のない環境と腕への局所気流のある環境に曝露する。また、Case1 と Case4 の全身に与える熱量を算出し<sup>注2)</sup>、同一熱量条件とした。実験手順を Fig.2 に示す。まず、夏期の環境に馴化させるために、27°C の馴化室にて 30 分間安静させた。次に、断熱空間を移動経路とし、試験室へ移動させた。その後、風なし Case で 30 分間、風あて Case で 30 分間、試験室に曝露した。その際、Table.2 に示す内容のアンケートを最初の 5 分間は毎分、その後 25 分間は 5 分ごとに実施させた。局所気流は Fig.3 に示すように、床吹出口にフレキシブルダクトを設置し、三脚で人体の腕の高さに固定し、再現した。

2. 実験結果

2.1 心理量の全体傾向

快適感と温冷感の全体の傾向を Fig.4 に示す<sup>注3)</sup>。快適感では Case1,4 が快適側、Case2,3 が不快側となった。温冷感では Case2 < 1 < 4 < 3 の順に暑い側となり、温冷感が中立側に近づくほど快適感は向上する傾向にある。また、Fig.5 に温冷感と発汗感ふるえ感の関係を示す。温冷感が寒い側の申告になるとふるえ感の申告が増える傾向が見られる。一方、30°C の Case3,4 の比較において、発汗感には温冷感に係わらず変化は殆ど見られなかった。また、Case4 において発汗感に変化は見られないが快適感では向上した。

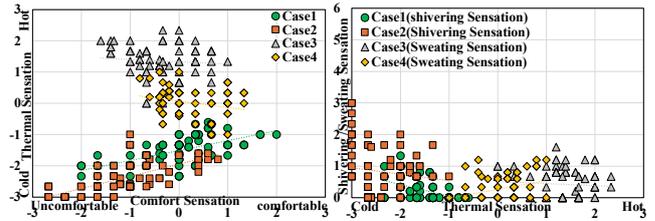


Fig.4 The relation between comfort sensation and thermal sensation  
Fig.5 The relation between thermal sensation and shivering sensation / sweating sensation

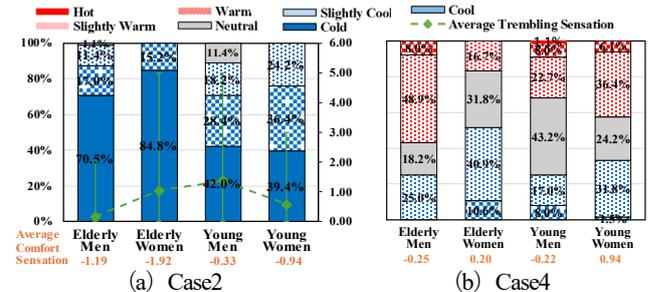


Fig.6 Percentage of thermal sensation response

Fig.6 (a) に、最も属性間で違いが見られた 24°C 風当ての Case2 の温冷感の申告割合を示す。温冷感において、若年者より高齢者の方が寒い申告が 2 倍程度見られた。Fig.6 (b) に、30°C 風当ての Case4 の属性間の温冷感の申告割合を示す。Case4 では全属性で温冷感はいずれも少し寒い申告となった。このことから、若年者と比べて高齢者は低温度帯での風あてにおいて寒いと感じる割合が多く、高温度帯での風あては、属性間で申告にバラつきが少なく中立側の申告となることが分かった。

2.2 皮膚温度の属性間比較

試験開始時を基準とした皮膚温度<sup>注4)</sup>の相対値を Fig.7 に示す。Case1 の平均皮膚温度 (Fig.7 (a)) は、高齢男性以外は大差がないが、高齢男性の皮膚温度が最も低減した。Case2 の平均皮膚温度の増減 (Fig.7 (b) の実線) の属性間の差は最大 0.125°C と小さく、属性間に大差は見られなかった。Case2 の局部冷却箇所に隣接する上腕の皮膚温度 (Fig.7 (b) の破線) は女性の方が男性よりも低減率が高い傾向にある。局所的に冷却した部位 (上腕~腕) は女性の方が冷えやすいが、全身では属性間に違いは無いと考えられる。Case3 の平均皮膚温度 (Fig.7 (c)) の上昇率は若年女性 > 若年男性 = 高齢男性 > 高齢女性であり、高齢者よりも若年者の方が、暑熱環境では皮膚温度が上昇しやすいと考えられる。Case4 では全体の傾向として一定の皮膚温度を保つ傾向にある (Fig.7 (d) の実線)。しかし、女性は風あて 10~15 分は低下傾向を見せるが、その後、中立に戻る傾向にある。この時、局部冷却箇所に隣接する上腕の皮膚温度 (Fig.7 (d) の破線) は風あて 12 分で低下が鈍化し、-0.25°C 付近で落ち着いている。

2.3 部位温冷感と全身温冷感の乖離

Fig.8,9 に高齢男性の Case2 における温冷感の経時変化を示す。部位温冷感の変動 (Fig.8) から部位ごとにばらつ

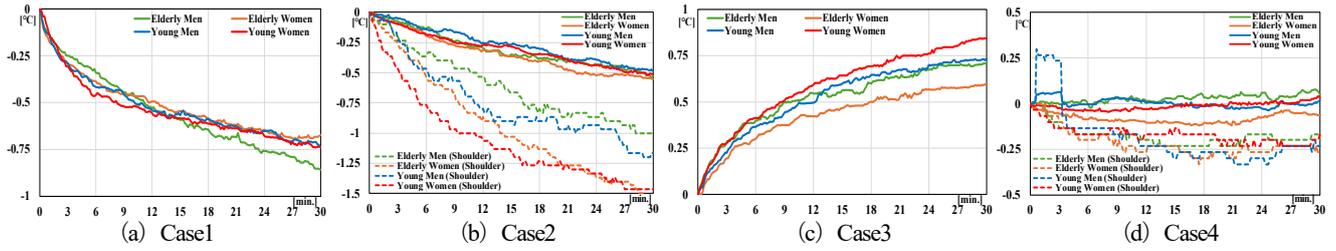


Fig.7 Skin surface temperature

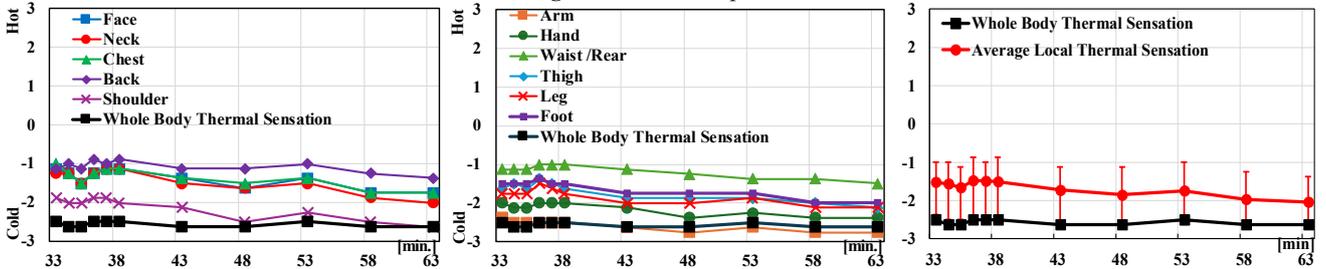


Fig.8 Elderly men\_Case2\_Local thermal sensation

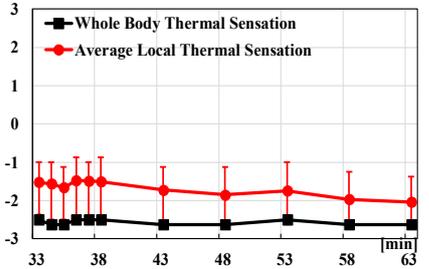


Fig.9 Elderly men\_Case2\_Average local thermal sensation

Average local thermal sensation

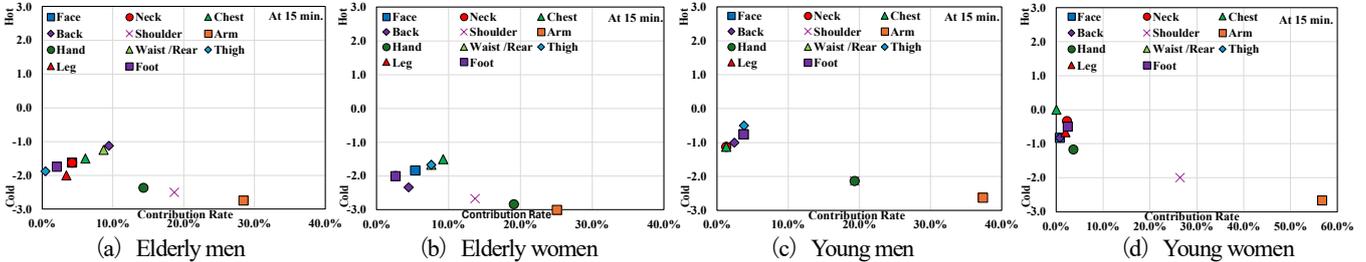


Fig.10 Contribution rate of local thermal sensation to whole body sensation (Case2)

きが見られ、部位温冷感の平均値と全身温冷感の変動 (Fig.9) から、部位温冷感の平均値と全身温冷感の間に乖離が生じていることが分かる。特に局所気流環境では、部位ごとの温冷感にばらつきが見られるため、全身温冷感の方が寒い側に寄っている。これは、特定の部位の温冷感が全身温冷感に強く影響を与えたからであると考えられる。Fig.10に、Case2における全身温冷感に対する部位ごとの温冷感の影響度として寄与率<sup>注5)</sup>を示す。この寄与率は、合計が100%となるように部位温冷感のばらつきの比率から算出した。どの属性も局所冷却部位の上腕から手にかけての温冷感の寄与率が高く、狙っていた腕へ局所気流を当てることができたことが確認できた。その中でも、前腕の寄与率が最も高く、高齢者よりも若年者の方が寄与率が高い。高齢者よりも若年者の方が前腕の温冷感が全身の温冷感に寄与したと考えられる。

2.4 発汗・ふるえ感の属性間比較

Fig.11にCase3及びCase4発汗量の積算値を示す。Case3での発汗量は若年者が高齢者よりも多く、男性の方が女性よりも多い。Case3に比べたCase4の発汗量の低減は、若年女性>高齢女性>若年男性>高齢男性の順に小さくなった。Case4の風あてに対する発汗量の低減に効果があるのは男性よりも女性かつ高齢者よりも若年者であった<sup>注6)</sup>。また、Case3,4の高齢女性の皮膚温度はその他の属性よりも低く (Fig.7)、発汗量も最も少なくなっている。

Fig.12にCase3とCase4の発汗と皮膚温度の相関を示す。Case3では皮膚温度と発汗量には強い相関は見られないものの、ある程度の相関は見られる。この時、高齢女性と若年者の皮膚温度はおおむね同じ温度で推移しているが、高齢女性の方が発汗量は少なく、体温調節機能の低下が考えられる。また、Case4では皮膚温度の変化は少ないが発汗量は増減しており、皮膚温度が定常状態であっても発汗量は変動することがわかる。この時、高齢男性の変動が最も大きい。

Fig.13にふるえ感の経時変化を示す。Case1では高齢女性と若年男性のみ最初の5分でふるえを知覚しており、Case2では最初の5分で高齢男性のみふるえを知覚しておらず、その後もふるえの知覚が遅いことが分かる。以上より、高齢女性と若年男性のふるえ閾値が低く、高齢男性のふるえ閾値が高いと考えられる。

2.5 重回帰分析による皮膚温度と発汗量の関係

生理量の中で最も発汗量に影響を与えたのは皮膚温度であると考え、どの部位の皮膚温度が最も発汗量に寄与したのかを重回帰分析により検討した。Table.3に、重回帰分析と単回帰分析による部位ごとの発汗量に対する影響度を示す。単回帰分析の影響度を単相関係数で、重回帰分析の影響度を偏回帰係数で示している。単相関係数の最も高い部位と偏回帰係数の最も高い部位の一致した部位を影響度の高い部位と考えると、高齢男性は胸と手、高

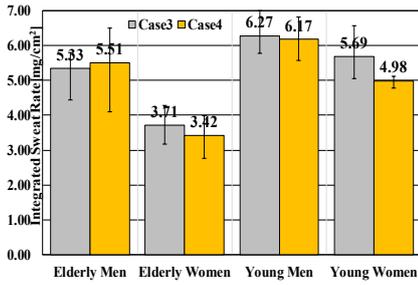


Fig.11 Integral sweat rate

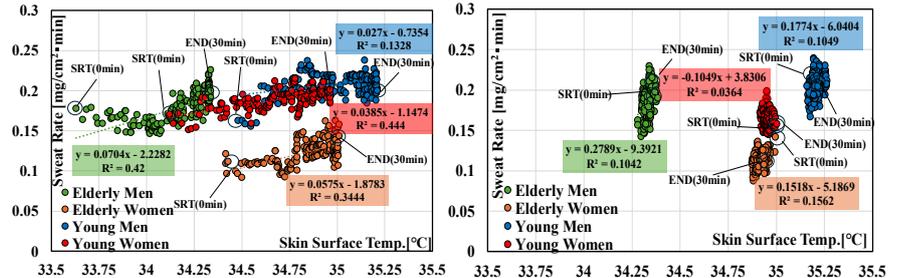


Fig.12 Relation between skin surface temperature and sweat rate

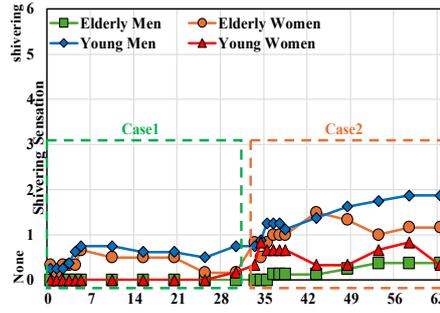


Fig.13 Shivering sensation (Case1, 2)

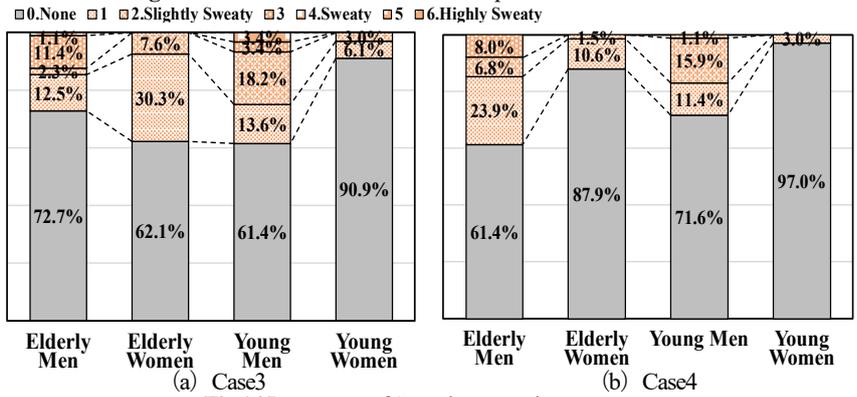


Fig.14 Percentage of Sweating sensation response

Table.3 Effect of skin surface temp. on sweat rate

Local Skin Surface Temp.	Elderly Men			Elderly Women			Young Men			Young Women		
	Simple Correlation Coefficient	Partial Regression Coefficient	R <sup>2</sup>	Simple Correlation Coefficient	Partial Regression Coefficient	R <sup>2</sup>	Simple Correlation Coefficient	Partial Regression Coefficient	R <sup>2</sup>	Simple Correlation Coefficient	Partial Regression Coefficient	R <sup>2</sup>
Forehead	0.076	0.0000	0.643	0.600	0.0000	0.364	0.540	0.0000	0.344	0.651	0.0000	0.455
Chest	0.685	0.0649		0.576	0.0000		0.364	-0.0126		0.661	0.0562	
Shoulder	0.639	-0.0952		0.582	0.0015		0.360	0.0552		0.656	-0.0223	
Hand	0.729	0.0608		0.587	0.0203		0.344	-0.0609		0.652	-0.0134	
Thigh	0.076	-0.0411		0.600	0.0858		0.540	0.1729		0.651	0.0434	
Leg	0.685	0.0000		0.576	-0.0287		0.364	0.0000		0.661	0.0000	
Foot	0.639	0.0000	-0.517	0.0009	0.360	0.0000	0.656	0.0000				

高齢女性・若年男性は大腿、若年女性は胸の皮膚温度が発汗量に影響を与えたことが分かった。高齢女性と若年男性は下半身に、高齢男性と若年女性は上半身に皮膚温度の上昇に伴う発汗量の上昇がみられた。Fig.14 に Case3 と Case4 の発汗感の申告割合を示す。発汗量の増減と同様に高齢男性以外は Case3 から Case4 で発汗感が減少しているが、高齢男性は増加していることが分かる。

3. まとめ

本研究では、同一熱量条件としたときの局所気流の実験室実験を実施し、属性間の違いを分析した。その結果、①同一熱量条件にそろえた Case1 と Case4 では温冷感が中立側に近づくにつれて快適側の申告が増加すること、②高齢者は低温度帯での風あてにおいて若年者より寒いと感じる割合が多く、高温帯では若年者と差異のない中立の温冷感申告であったこと、③低温度帯の局所気流は、その冷却部位の温冷感が全身の温冷感に影響を与え、高齢者よりも若年者の方がより全身の温冷感に寄与すること、④皮膚温度が女性の方が早く低下するため、風あてによる発汗量の低減率は男性よりも女性の方が高くなったこと、⑤ふるえ感、高齢女性、若年男性の閾値が低く、

高齢男性の閾値は高いこと、⑥30°C風なしの Case3 の発汗量に影響を与えた部位皮膚温度は、高齢女性と若年男性が上腿の下半身、高齢男性と若年女性が胸部の上半身となったことなどを明らかにした。

注釈

- 注1) 押出法ポリエチレンフォーム：t=50
- 注2) 熱量計算は次式を使用した。q=Q×ρ×ΔT×S(Q:熱量, Q:風量, ρ:空気比熱, c: 空気の比重, ΔT:気流と皮膚の温度差, S:温冷刺激を与える人体の表面積<sup>(5)</sup>)
- 注3) 夏期の属性ごとの平均と中間期のそれを合わせたデータとした。
- 注4) 夏期の実験では皮膚温度の測定に不備があったため、皮膚温度は中間期の結果を使用し、属性平均の数値を結果として示した。
- 注5)  $aTSA+bTSB+cTSC+dTSD+eTSE+fTSF+gTSG+hTSH+iTSI+jTSJ+kTSK=TS_{total}$ , TSA: TSB: TSC: TSD: TSE: TSF: TSG: TSH: TSI: TSJ: TSK = a: b: c: d: e: f: g: h: i: j: k, TS: Thermal Sensation, 小文字: 荷重係数, a, Aから順に顔, 首, 胸, 背, 肩, 腕, 手, 腰・尻, 大腿, 下腿, 足, 寄与率の例 (顔面):  $aTSATStotal*100$ , (首):  $bTSBTStotal*100$
- 注6) 高齢男性は Case3 に比べ Case4 で発汗量が増加しているが、これは高齢男性の分散が大きく、ある一人の発汗量が顕著となるためであると考え

参考文献

- 文1) 小崎, 他: 指向性気流・拡散性気流切換型吹出口を用いたパーソナル空調システムに関する研究 (その4) 局所気流が人体生理反応と温冷感に及ぼす影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.305-308, 2016年6月
- 文2) 辻健太, 李明香, 他: 住宅での生活行動時におけるエアコンの局所気流が人体の生理心理量に及ぼす影響 第1報 夏期の室内長期滞在時と帰宅時の被験者実験及びシミュレーション結果, 空調調和・衛生学会大会学術講演論文集(2020.9.9~30)
- 文3) 柄原裕, 他: 快適温度と加齢, Annals Physiol. Anthropol. 4(1): p87-90, 1985年
- 文4) 山崎文夫, 他: 局所皮膚冷却時の温度感覚と脳波の変化-男女差および冷え症の影響, 日生気誌 55(1):9-18, 2018年
- 文5) 田辺新一, 他: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発, 日本建築学会環境系論文集, 第599号, 31-38, 2006年1月

# 感染診察室・病室における気流シミュレーションによる気流性状・換気効率の確認 Confirmed Air Velocity and Ventilation Efficiency by Airflow Simulation in Infection Examination Rooms and Hospital Room

○村上 奈々子 (竹中工務店)      横山 喜宜 (竹中工務店)      萩平 隆司 (竹中工務店)

Nanako MURAKAMI\*1 Kiyoshi YOKOYAMA\*1 Takashi HAGIHIRA\*1

\*1 Takenaka Corporation

In this study, we conducted airflow simulations to confirm airflow properties and ventilation efficiency in an infectious disease laboratory and infectious disease ward from the perspective of infection risk.

Based on the results, we revised the plan to make it more effective.

## はじめに

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 拡大により、多くの医療施設で日常的に感染患者の受入れが行われてきた。通常診療を行いながらの受入れのため、他の患者や医療スタッフへの感染防止の観点から、病棟や外来エリアには、感染患者受入れ専用の病室や診察室、検査室等の整備が求められた。空調・換気計画にあたり、換気回数やフィルター種別等の仕様設定だけでなく、感染患者から医療スタッフ、感染患者受入対象室から共用部への気流、室全体の換気効率についても一般の病室・診察室等と比べ配慮が必要となった。

これまででは特殊な室以外、過去事例や実績等から室内機や給排気口の配置を平面的に決定していた。特に病室や診察室など簡潔な室では、立体的な検証や飛沫核濃度を考慮した検証が不足していたのが現状である。

そこで、一般的な空調・換気方式で計画した病室や診察室等における気流性状を確認するため、室内機配置やフィルター仕様、換気風量や制気口配置、パーテーションの有無等条件を変え、様々なケースで気流シミュレーションを行った。結果ごとに、感染対策の視点を踏まえた考察を行うことで一事例への適用だけでなく、様々な室条件での設計にも傾向を把握できる資料として活用できるものとした。

本報では、現在建設中の某総合病院における感染診察室や感染病室に対し気流シミュレーションを行い、気流性状や換気効率の検証を行った結果や、結果に基づき実際の空調・換気計画を見直した内容について報告する。

## 1. 概要

### 1.1 建物概要

某総合病院の建築概要を Table. 1. 1. 1、外観を Fig. 1. 1. 1 に示す。地域医療の中核を担う災害拠点病院であり、近畿圏の救命救急体制をとる医療機関の一つで



Fig.1.1.1 Perspective exterior

Table 1.1.1 Building outline

所在地	大阪市天王寺区
用途	病院 (総合病院)
構造・階数	鉄骨造
規模	地下1階、地上8階、塔屋2階 建築面積: 10,713.75m <sup>2</sup> 、延床面積: 58,754.22m <sup>2</sup>
病床数	約650床
主な室用途	地下1階: 放射線治療、放射線診断等 1階: 総合待合、救急、放射線検査、感染診察室、外来等 2階: 外来、病理等、3階: 集中治療、手術 4階: 中央材料、医局、5-8階: 病棟 (各階感染病室含む)

清浄度クラス	該当室種別	今回建物の対象室	最小風量のめやす		室内圧	給気最終フィルターの効率	
			外気量	室内循環風量		外気処理空調機	室内循環機器
IV	一般室	診察室、一般病室等	2回/h	6回/h	等圧	中性能フィルター	プレフィルター
V-1	汚染管理区域	感染診察室、感染病室	2回/h	12回/h	陰圧	中性能フィルター	中性能フィルター 感染診察室はHEPA
V-2	汚染管理区域 (全排気)	IR、解剖室等	全排気	12回/h	陰圧	中性能フィルター	-
V	拡散防止区域	WC、不潔リネン、汚物処理室、薬室等	-	10回/h	陰圧	-	-

Fig.1.1.2 Cleanliness class setting

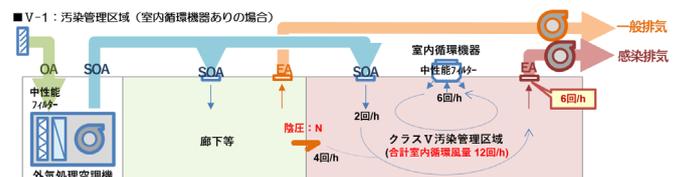


Fig.1.1.3 Contaminated area setting

ある。手術室を 16 室、集中治療室を 65 床備え、24 時間体制の高度集中医療を提供するとともに、感染症患者受入れにも対応した計画としている。

感染患者受入れ対象室の空調・換気計画においては、病院空調設備の設計・管理指針指針 (HEAS-02-2022) の清浄度クラス V ; 汚染管理区域に基づき、室用途に合わせて細分化した。感染診察室および感染病室は清浄度クラス V-1 に分類し、外気導入量は新鮮空気 2 回/h 換気 + パス 4 回/h 換気の計 6 回/h 換気、排気量は室外排気 6 回/h 換気 + 中性能フィルターによる室内循環 6 回/h 換気の計 12 回/h 換気の陰圧室と設定した。感染診察室はより確かな室内循環回数とするため HEPA フィルターを採用した。外気導入はすべて外気処理空調機にて給気する計画とした (Fig. 1. 1. 2, Fig. 1. 1. 3)。

### 1.2 感染診察室および感染病室の概要

感染診察室の建築プランおよび風量バランス図を Fig. 1. 2. 1 に示す。感染診察室は、待合室やスタッフ室を前室的に配置した。給気は、天井給気口からだけでなく、スタッフ室からパスにて 120m<sup>3</sup>/h 流入させ陰圧を形成した。感染診察室の室内機は天井カセット型の HEPA 付 FCU を採用し、660m<sup>3</sup>/h の循環風量とした。排気は、天井排気口より 190m<sup>3</sup>/h 排気する計画とした。

感染病室 (個室) の建築プランおよび風量バランス図を Fig. 1. 2. 2 に示す。4 床室の気流解析は 6 パターンにて検証済み<sup>1)</sup>のため本報では個室の報告を行う。平常時は新鮮空気 100m<sup>3</sup>/h を給気し、WC にて排気する計画。陰圧切替時は、病室内の感染排気系統にて 4 回/h 分 (160m<sup>3</sup>/h) の排気を追加し、計 6 回/h 分 (260m<sup>3</sup>/h) の排気を計画した。廊下からパスにて 160m<sup>3</sup>/h 流入させ陰圧を形成した。

## 2. 気流シミュレーション概要と結果

### 2.1 気流シミュレーション概要と解析ケース

感染診察室・感染病室 (個室) の室内気流分布や患者から医師への気流等の気流性状、室全体の換気効率を検証するため、気流シミュレーションを行った。解析には STAR-CCM (Siemens) の乱流モデルを用い、少ないメッシュ数で形状近似精度が高い非構造格子による定常解析を行った。解析モデル (ベース案: 某総合病院の設計時計画) と設定条件を Fig. 2. 1. 1 に示す。室内の温湿度等の条件に加え、患者から医師への飛沫核・呼気の影響を確認するため、飛沫核濃度<sup>2)</sup>および呼気排出濃度<sup>2)</sup>も設定した。

感染診察室の解析ケースを Fig. 2. 2. 1、感染病室 (個室) の解析ケースを Fig. 2. 2. 2 に示す。設計時計画であるベース案に対して改善案や各種影響を把握するため、

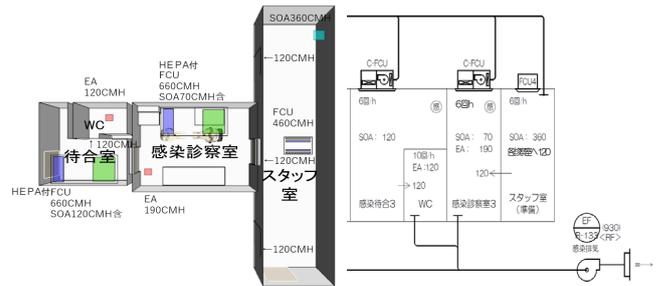


Fig.1.2.1 Infection examination rooms plan and air flow

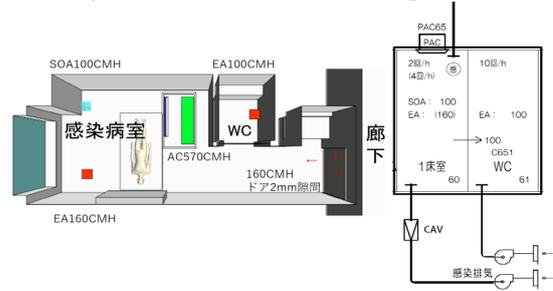


Fig.1.2.2 Infection hospital rooms plan and air flow

	感染診察室	感染病室
モデル	天井カセット型 HEPA付FCU 患者 医師 排気口 処置台	天井カセット型エアコン (中性能フィルター) 給気口 患者 感染用排気口 排気口
Case	CaseA-1	CaseB-1
室内環境	26°C/湿度成行	26°C/湿度成行
室内機	温度 26°C 風向 下向き30° フィルター HEPA	温度 26°C 風向 下向き30° フィルター 中性能 (JIS比色法65%)
[濃度] 飛沫核・呼気	[患者] 発話: 5.21L/min 0.299m/s、飛沫核: 620×10-9m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (計算上は1で与えた) 口: 17×17mm 32°C 咳: 22m/s (0.18sec)、飛沫核: 779×10-9m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> [医師] 吸気(鼻): 14.4L/min 0.0024m <sup>3</sup> /s、表面温度 32.7°C、CO <sub>2</sub> 34000PPM	

Fig.2.1.1 Simulation base type

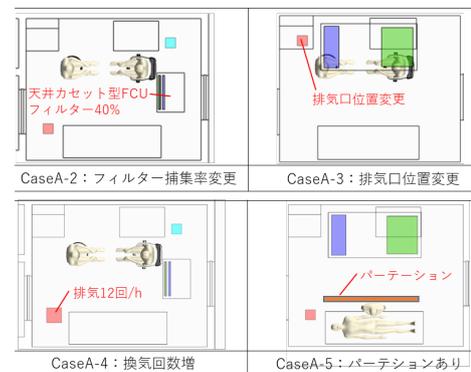


Fig.2.1.1 Analysis pattern of Infection examination rooms

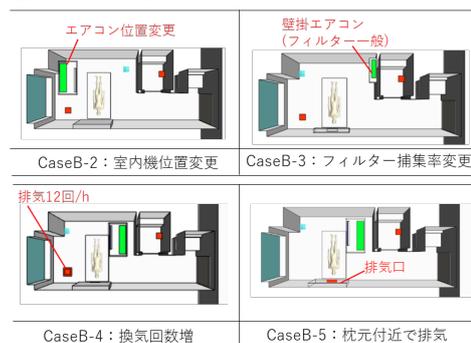


Fig.2.2.1 Analysis pattern of Infection hospital rooms

室内機の位置、フィルター捕集率、排気口の位置、換気回数を変え、診察室はパーティションの有無、病室（個室）は排気の位置を変えた各々5つのケースで解析を行った。

### 2.2 気流シミュレーション結果と考察

感染診察室の解析結果を Fig. 2.3.1、感染病室の解析結果を Fig. 2.3.2 に示す。

CaseA-1 ではFCU吹出口の誘因作用による気流によって医師側に飛沫が流れている。医師と患者との離隔をさらに300mm確保すると改善される結果が得られた。CaseA-2 では飛沫が十分に捕集されずに室内全体に拡散し、飛沫濃度が高くなっており、高濃度の飛沫が医師頭上を流れている。CaseA-3 では飛沫の拡散範囲が比較的広く、FCU吹出より医師前面に飛沫が流れる可能性がある。CaseA-4 では空気齢の状態は良くなるが、HEPAによる循環風量が低減したことから室全体の飛沫濃度が上昇し、高濃度飛沫の分布は医師上部まで拡散している。CaseA-5 ではスタッフ室戸隙間からの気流によって処置台上の患者からの飛沫が待合室側へ流れる傾向が見受けられた。

CaseB-1 では飛沫がベッド圏外へ流出する可能性があ

るものの、飛沫濃度は一様に低い。CaseB-2 では飛沫は一度窓側へと流れるが室上部の気流に沿ってベッド圏外へ流れる傾向がある。室形状の特性と室内機配置を窓側に寄せたことでCaseB-1より高濃度範囲が拡大した。CaseB-3 ではフィルター捕集率の低下により、飛沫は拡散され、室全体の飛沫濃度が一様に高くなる。CaseB-4 では換気量が増えたことにより空気齢が改善し、ベッド上の気流が窓側に向かい排気口に吸い寄せられ、室全体の飛沫濃度は下がる。CaseB-5 では枕元付近への排気の気流は生まれるが室内機による乱流の影響が上回るためCaseB-1と類似した結果となった。空気齢については、換気回数を増やしたA-4、B-4以外のどのケースも、概略で2回以上の換気風量が確保できており、室全体のよどみもないことが確認できた。

### 3. 気流シミュレーション結果に基づく計画の見直し

感染診察室については、ベース案（設計時計画）の気流シミュレーション結果から、HEPA付FCUの吹出口と吸込口の気流が患者と医師周辺の飛沫の流れに影響を及ぼすため、施工図（天井伏図）にて施工方法も考慮し、照明器具他設備とHEPA付FCUや給排気口の配置調整を行った。調整後の配置で再度気流シミュレーションを行い、

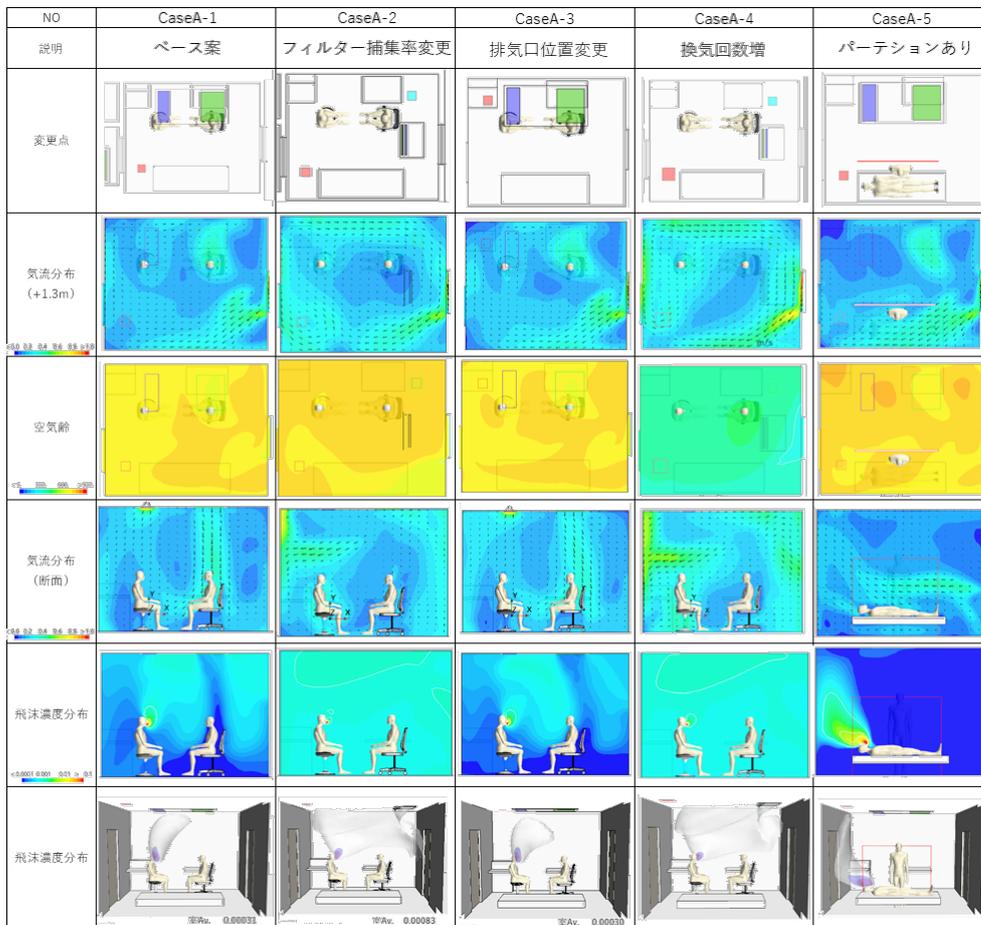


Fig.2.3.1 Analysis results of Infection examination rooms

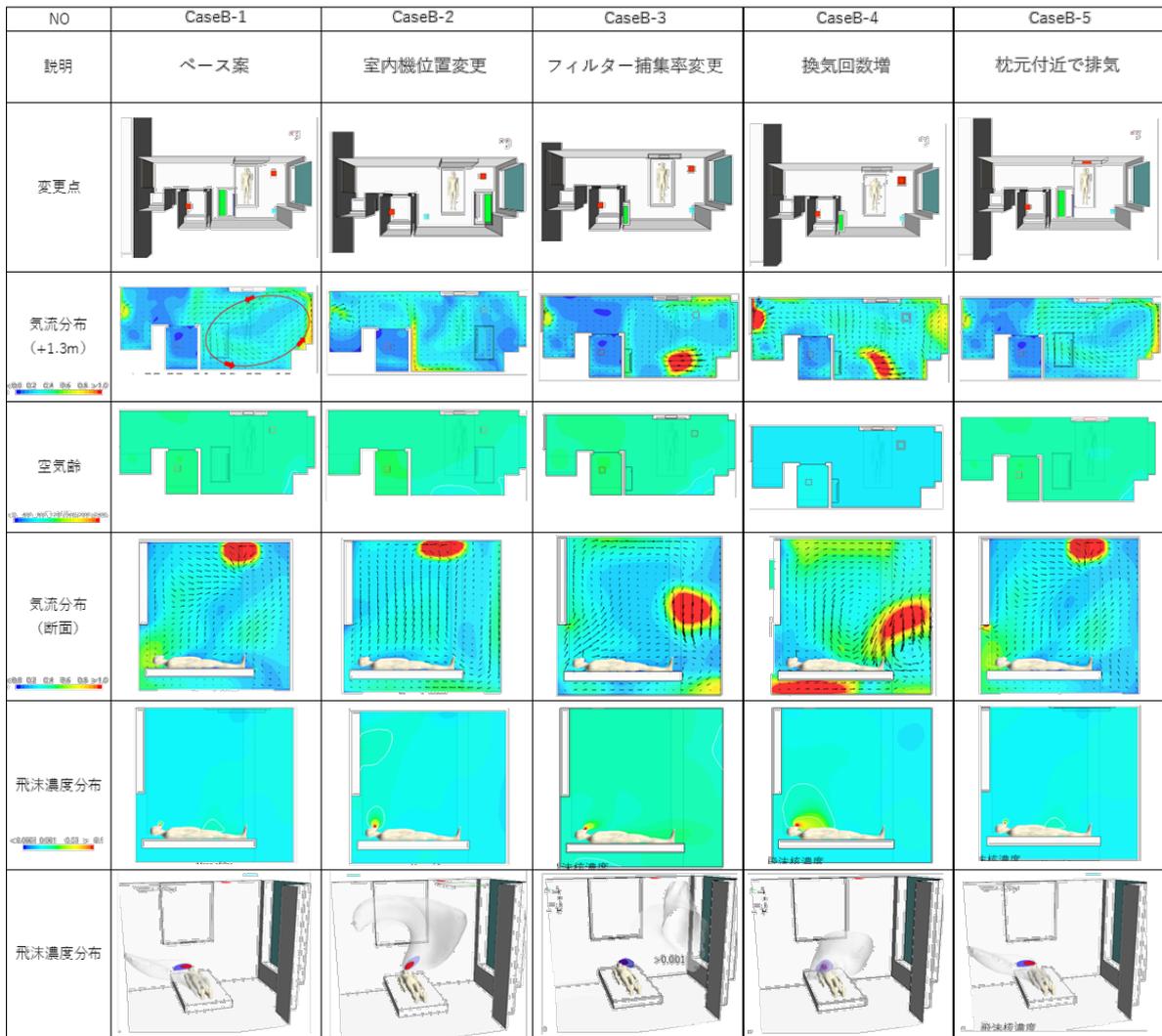


Fig.2.3.2 Analysis results of Infection hospital rooms

改善傾向が確認された結果 (CaseA-1') に計画を見直した。処置台での処置において、パーテーションの有無による影響を確認した結果 (CaseA-5)、患者から医師への飛沫の影響が少ない患者枕元を待合室側とすることで運用してもらうよう建築主へ報告した。(Fig. 3.1)

感染病室 (個室) は、ベース案 (設計時計画) の気流シミュレーションにおいて、飛沫濃度が一様に低い結果 (CaseB-1) となり、設計時計画の妥当性が確認できた。

#### 4. まとめ

某総合病院の感染診察室・感染病室 (個室) において、感染リスクという視点で気流性状・換気効率の確認のため、気流シミュレーションを行った。様々なケースでの検証結果を踏まえ、より効果的な計画に見直しを行った。ケースごとのシミュレーション結果は、感染対策という視点の考察を補足することで、様々な室条件の設計にも傾向を把握できる資料として活用できるものとした。今後は、気流シミュレーションの結果の確からしさを検証するため、建物完成後の実測調査を行う予定である。

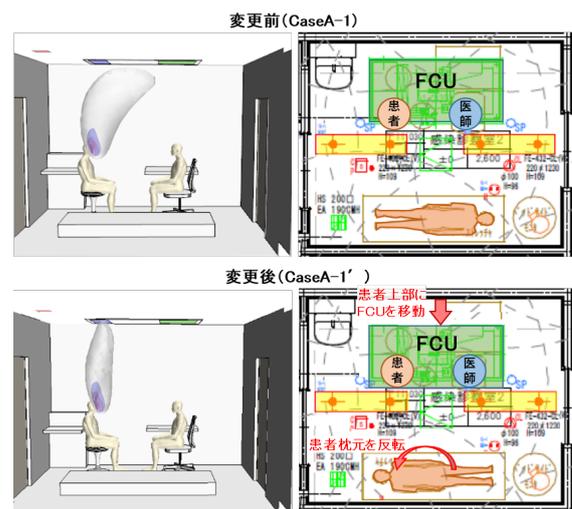


Fig.3.1 Review of infection examination room plan

#### 参考文献

- 1) 日浅ら: 「一般病棟におけるパンデミック時の感染リスクを低減する切替換気システムに関する検討(第1報) システム概要とCFD解析」 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, J-19, 2023
- 2) 張, 山中ら: 「診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価に関する研究 (その1)」, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-16, 2021

## 某大学における環境設備計画 Environmental facility planning in an university

○越村 翔（竹中工務店） 中井 奈保子（竹中工務店）  
君塚 尚也（竹中工務店）

Sho KOSHIMURA\*1 Nahoko NAKAI\*1 Naoya KIMIZUKA\*1

\*1 Takenaka Corporation

### 1. はじめに

本建物は、某大学の情報系、映像系の学部移転により計画された新築学舎である。他キャンパスや、地域、社会との連携拠点として「ソーシャル・コネクティッド・キャンパス」を施設コンセプトに掲げ、オープンイノベーションやDX化の推進を目指している。また近年、脱炭素社会実現への取り組みに加え、学び方の多様化、知的生産性の向上やウェルネスなどへの意識が高まる中、大学キャンパスにおいても従来のような画一的な施設整備からの脱却が求められる。そこで本計画では、様々な共創空間の創出や、多様化するキャンパス利用に応じた設備制御技術を導入することにより、新たな学び空間の実現と脱炭素の両立を目指した。

情報系、映像系の学部の新学舎であることから「デジタルツインを活用した省CO<sub>2</sub>とイノベーションを両立する次世代型エコキャンパス」を環境コンセプトとし、リアルタイムの建物情報を利用して、建物の最適運用と、情報の見える化による施設利用者の行動促進を行うシステムを構築した。また、キャンパス内の他棟との熱源融通などにより、新学舎だけではなくキャンパス全体での脱炭素にも配慮した計画とした。

本報では、計画概要と設備計画について報告する。

### 2. 建物概要

建物概要をTable.1に示す。本建物は、低層階に全学部で利用できる教室や食堂を配置し、各所にコネクティッドラーニングcommonsを設けることで、学生が自由に学習空間を選択できる計画としている。学外や地域の方が利用可能な様々な共創スペースを配置することで、学外連携の促進を行う。4～9階は情報系、映像系の学部の研究エリアとなっており、斜めに貫く大きな吹き抜け空間を有し、周囲のラウンジエリアとともに、イノベーションの活性化を図る空間となっている。また、外部空間として、1～4階まで吹き抜ける大きな半屋外空間を配置し、各階吹き抜け周囲にはテラスとの接続があり、自然の光・風・緑を感じられ、地域との交流とウェルビーイングを高める空間を創出している。

Table1 建物概要

建築地	大阪府茨木市
主要用途	大学
敷地面積	98,331.83㎡
建築面積	7,711.98㎡
延べ床面積	47,096.00㎡
構造	S、SRC
規模	B- F9 P-
最高高さ	42.56m
工期	2022/6/1～2024/02/29

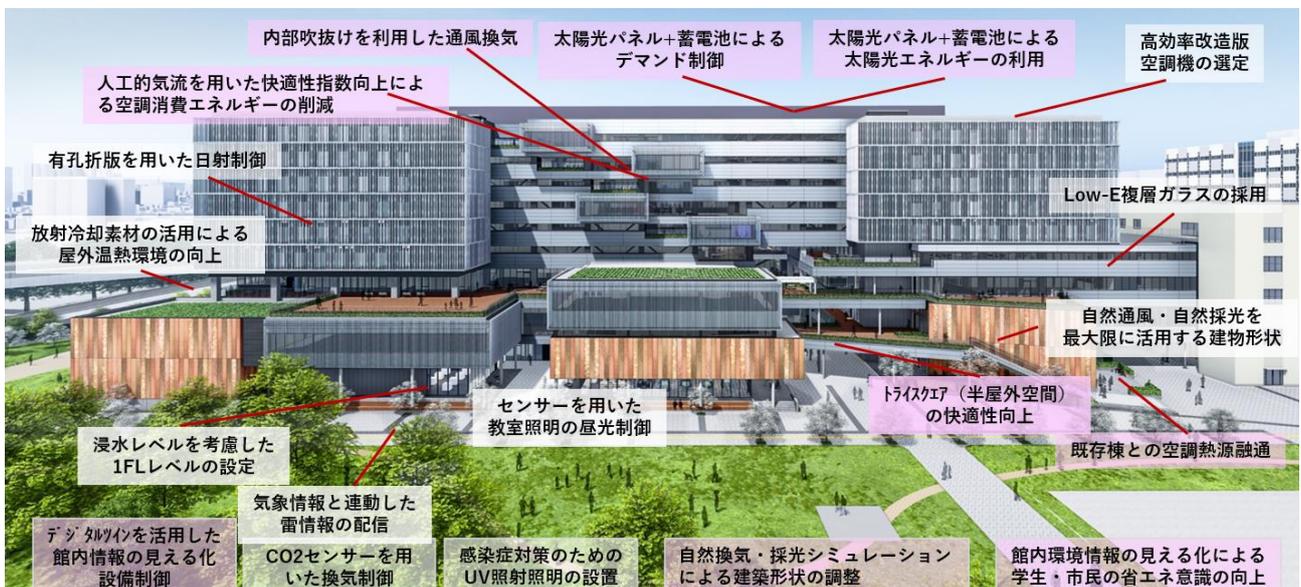


Fig.1 環境設備計画概観

### 3. 設備概要

設備概要を Table2 に、環境設備計画概要を Fig.1 に示す。コンピューショナルデザイン、自然エネルギーの積極的活用に加えて、リアルタイムの建物情報を利用した設備の最適制御による環境負荷低減を目指した。

### 4. デジタルツインを活用した設備最適制御と建物情報の見える化

多種多様なセンサにより館内の人員情報、環境情報を収集し、リアルタイム情報の利活用を司る「デジタルツイン」を構築している。デジタルツインを活用した設備最適制御と見える化について概略図を Fig.2 に示す。

#### 4.1 設備最適制御

食堂、教室、コネクティッドラーニングcommons、イノベーションラウンジを対象に、画像センサ・環境センサを設置しており、画像センサでは人員や人流を、環境センサでは温湿度・放射温度・風速・CO2濃度をセンシングしている。これらのセンサで収集した情報をもとに、各エリアの人員情報や環境情報を中央監視システムに取り込み、空調設備・換気設備の制御を行っている。通常の大学では、教室の定員分の換気を行うが、本計画では、画像センサから得た人数カウント情報に応じて風量制御を行うため、例えば 300 名教室が 50 名利用の場合などは大幅な熱負荷削減を行うことが可能である。

### 4.2 見える化アプリの開発

前述のセンサで収集した人員や環境情報は、本計画で開発した見える化アプリにより確認することが可能となっている。混雑度マッピング・空室マッピング・快適度マッピングの3種を実装しており、学生は個人の端末で自習スペースの混雑状況や食堂の利用状況を知ることができ、運用においては清掃計画や昼食の提供計画などに活用することが可能となる。また、環境の見える化を行うことにより、快適度に応じた学生の移動を促し、省エネ・環境意識の向上を図る計画としている。

Table 2 設備概要

電気設備	受電方式	高圧3φ3W
	非常発電	ディーゼル 300kVA
	電灯	教室・研究室：500lx 照明制御・昼光・人感
	中央監視	BACnet
	その他	太陽光発電設備・蓄電池設備
空気調和設備	熱源	空冷ヒートポンプチャラー 空冷PACエアコン 既存熱源の融通
	空調	1~3F：ファンコイルユニット 4~9F：空冷パッケージエアコン 大教室・スタジオ：エアハンドリングユニット
	換気	大教室・スタジオ：全熱交換器付エアハンドリングユニット その他居室：全熱交換器
給排水衛生設備	給水	受水槽式 井水利用
	給湯	電気・ガス
	排水通気	汚水・雑用水系統、厨房排水系統
	消火	屋内消火栓、連結送水管
昇降機	常用：15人乗×4台 非常用：17人乗×2台、27人乗×1台	



Fig.2 デジタルツインを活用した設備最適制御・見える化

5. 快適性指数 SET\* による省エネ制御

学内外との交流とイノベーションの促進を行う特徴的な空間として、屋内・屋外に大きな吹き抜け空間が設置されている。屋外は夏期での温熱環境に課題があり、屋内では大空間への空調による大幅なエネルギー消費が課題となる。そのため本計画では、吹き抜けに大型のシーリングファン (Fig.3) を設置し、気流制御を行うことで、快適性指数 SET\* による回転数制御を導入した。吹き抜け空間の断面とシーリングファンの配置概略を Fig.4 に示す。環境センサ (温度、湿度、放射温度、風速) (Fig.5) 情報により演算された SET\* に応じてシーリングファンを制御することで、屋外では快適性の向上と、屋外吹き抜け空間の利用促進、屋内では空調でのエネルギー消費の大幅な削減に貢献している。Fig.6 にシーリングファン制御のフローを示す。シーリングファンの回転数はそれぞれの機器で 5 段階に設定可能な仕様とし、目標とする SET\* に向けて回転数を制御する。屋内吹き抜けの場合、最大の回転数で運転しても目標とする SET\* に到達しない場合は空調を運転させる制御とした。本制御システムにより中間期における非空調期間の拡大と夏期における空調稼働時間、消費エネルギーの削減が可能となる。



Fig.3 大型シーリングファン

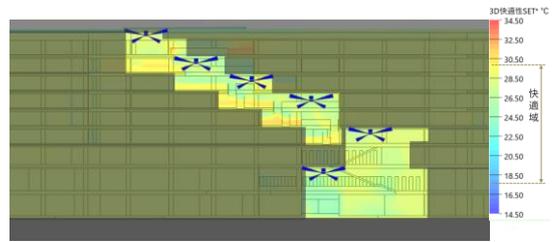


Fig.4 吹き抜け空間断面・シーリングファン配置



Fig.5 各種センサ

6. ビル OS の実装とアプリケーションとの接続

本計画では建物情報の有効活用と更なる拡張を目指し、ビル OS として、クラウド型のデータプラットフォームを構築している。従来の中央監視設備で取得可能な建築設備の発停や状態監視などの情報に加え、建物でセンシングした人流、環境情報を取り込んでいる。オープンな通信規格で構築することにより、様々なアプリケーションとの接続が可能となっている。本計画では、建物情報の見える化アプリと接続し、学生や施設利用者が個人端末で手軽に建物情報を取得することを実現する。大学が活用している教室予約システムとの連携もっており、教室利用のスケジュールに応じて自動で空調の発停を行うシステムが実現可能となっている。その他、ロボット連携や警備システム、清掃計画との連携など、建物ユーザが将来的に実装するシステムとの連携も可能であり、大学での研究にも活用可能となる。本データプラットフォームの導入により、建物情報が様々な場面で有効活用され、建築設備の最適制御だけでなく、ローコストオペレーションや研究活用といった新たな領域での貢献が期待される。



Fig.6 シーリングファン制御フロー

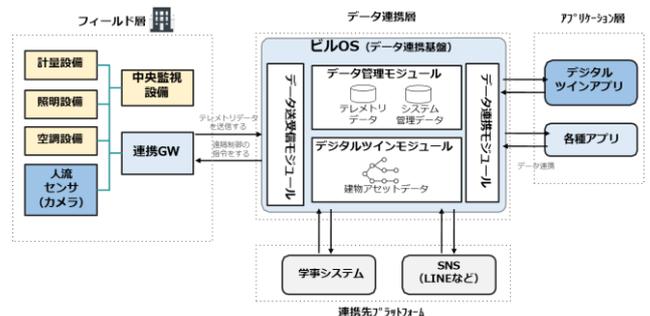


Fig.7 クラウド型データプラットフォーム

### 7. 環境制御とレジリエンス性を備えた多機能な外装システム

Fig.8 に示すような有効折板を用いて日射制御を行っている。折板の山型形状を活かし、方位に応じて開孔率や山型の取付ピッチをコンピューシヨナルデザインにより最適化を行っている。(Fig.9) 本外装システムにより、日射負荷の50%が低減され、空調負荷の大幅な低減に貢献している。眺望を確保しつつ日射や採光、近隣からの視線をコントロールすることで、環境性能と意匠性を満足する先導的なデザインの外装を実現した。(Fig.10)

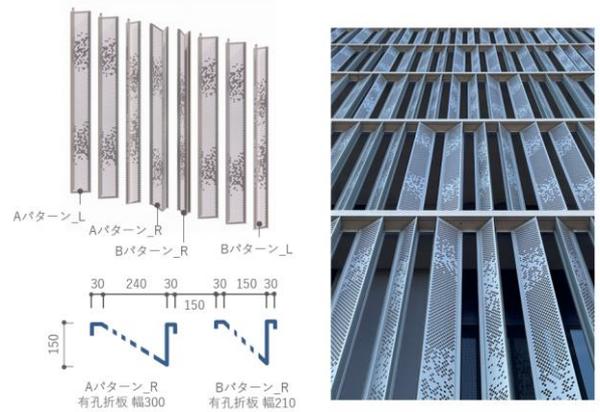


Fig.8 有効折板

### 8. 既存棟とのエネルギー融通

キャンパス内の既存冷温水配管を新棟に取り込むことで、既存棟との熱源融通を行っている。概略図をFig.11 に示す。本キャンパスでは、市民開放施設等でのイベントの有無によって必要な熱量が大きく異なるため、余剰熱源の活用が可能となる。既存棟の熱需要を監視しながら新棟の熱源の運転制御を行うことで熱源機器の最適な運用が可能となり、新棟だけでなく、キャンパス全体の省CO2に貢献している。

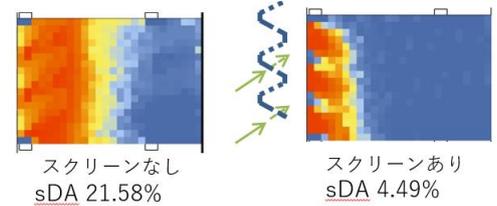


Fig.9 コンピューシヨナルデザインによる日射検討

### 9. まとめ

本建物は、BELS 認証★★★★★を取得しており、標準建物と比較し40%のエネルギー削減を試算している。また、自治体版CASBEE 建築評価認証において竣工時Sランクの予定である。今後は、運用データ収集や導入した技術の検証を実施していく予定である。

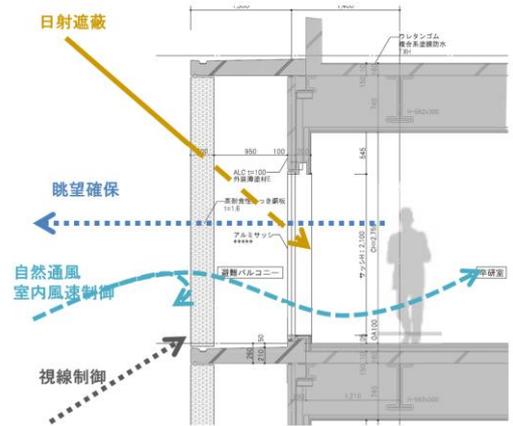


Fig.10 外装システム

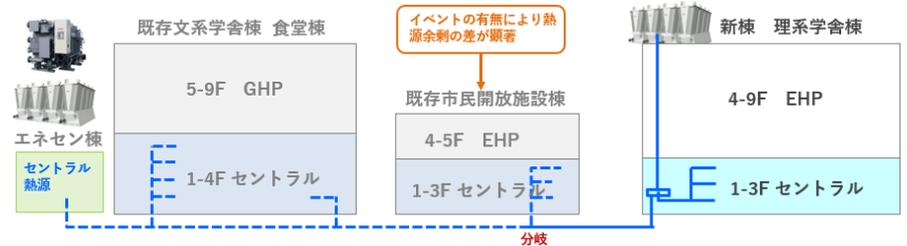
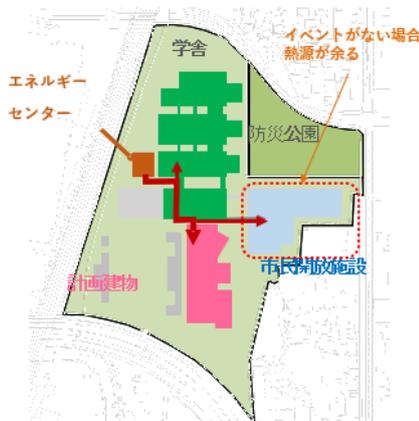


Fig.11 既存棟とのエネルギー融通

## 透析室における個別吹出口を設置した微風速空調の夏季実測結果とアンケート調査 Summer measurement results and questionnaire survey of low-speed air conditioning and individual outlets installed in dialysis rooms

○佐々木 麻衣（竹中工務店） 萩平 隆司（竹中工務店）

Mai SASAKI\*1 Takashi HAGIHIRA\*1

\*1 Takenaka Corporation

We verified the effectiveness of an air conditioning plan that takes into account the thermal sensation of dialysis patients. Temperature and wind speed were measured to ensure that the indoor environment was as planned. Furthermore, we conducted a questionnaire among patients and staff to verify the subjective effects. The indoor environment has been significantly improved compared to the previous dialysis room, with improved thermal sensation and air flow.

### はじめに

慢性透析患者は週3日程度、1日約4時間の処置が必要であり、治療中はベッド上で安静に過ごすことになる。腎臓機能低下や合併症に伴い、健康な人と温熱感覚が異なっている<sup>1)</sup>ため、気流を抑えた空調が推奨されている<sup>2)</sup>。これまで、天井からの放射空調やカウンターからの吹出等様々な空調方式が実施されてきた。一方で、気流を抑えた空調は空間を均質な温熱環境にはするものの、患者の冷温感の違いに対応することは難しい。そこで、気流感を抑えた微風速空調をベースとし、ベッド毎に個別操作可能な吹出口を設置することで解決を目指した。

本報では空調システムや導入建物の概要と竣工後実施した夏季気流等実測結果、患者・医療スタッフへのアンケート結果について報告する。

### 1. 概要

#### 1.1 建物概要

今回報告する空調システムを導入した建物概要をTable.1.1.1に示す。本病院は外科、内科、整形外科等を有する総合病院で既存棟2棟（本館・新館）に加え、今回2階に透析室のある東新館を増築した。東新館は救急・透析・ICU・手術室等で構成されており、透析は主に入院患者を受け入れている。

#### 1.2 透析室・空調システム概要

東新館は透析室を含めた建物全体を空冷ヒートポンプエアコンによる空調とした。空調ゾーニングは負荷傾向が異なる窓際ペリメータとインテリアに分け、さらにインテリアでは患者が治療を受ける「透析ベッドエリア」と医療スタッフが準備・事務作業を行う「スタッフエリア」でエリア分けを行った（Fig.1.2.1）。スタッフエリアは活動的なスタッフに対し、気流感も得られる天井カセット形室内機による空調方式とし、透析ベッドエリアには個別吹出口を設置した微風速空調を採用した。微風



Fig.1.1.1 建物外観

Table.1.1.1 建物概要（東新館）

所在地	京都市伏見区
用途	病院（総合病院）
構造・規模	RC造 地上4階
規模	敷地面積：8,623.84m <sup>2</sup> 建築面積：9,84.40 m <sup>2</sup> 延床面積：3,904.51 m <sup>2</sup>
室用途	1F：救急、中央処置、診察室、薬局テナント 2F：透析室（37床/個室3床） 3F：ICU（10床/個室2床） 4F：手術室（4部屋）

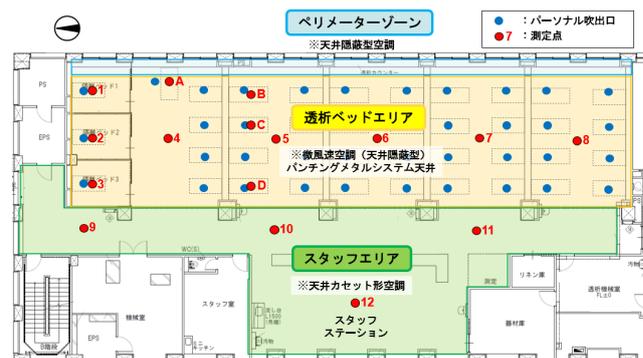


Fig.1.2.1 2階透析平面図

速空調では機械室に設けた床置型室内機から天井裏チャンパーに吹き出した空調空気を、金属製パンチングメタルのシステム天井パネル面より風速を抑えて吹き出している。ベッド上 (FL+700mm) の目標風速は人がドラフトを感じない0.15m/s以下として設計した。還気 (RA) はベッド頭側の透析カウンター下部に設け、室全体の温度分布に配慮した。ペリメータは別系統としており、患者へ気流が当たらない位置に吹出口を調整している。患者の温冷感の個人差にはベッド毎に1台のファン付きパーソナル吹出口を天井面に設置することで対応した。暑いと感じる患者に対し、気流を当てることで体感温度を下げる効果を狙っている。パーソナル吹出口は30CMH/台で吹出し、ベッド上で風速0.4m/s程度になる位置に設置した。製品自体は、強・中・弱の3段階に切替可能であるが、実際の運用を視野に入れ、“中”で固定することを医療スタッフと協議した。パーソナル吹出口は透析カウンターに設置したスイッチより、患者自身でON/OFF操作ができるようにしている。スタッフエリアにはパーソナル吹出口の集中スイッチを設置し、透析室全体のパーソナル吹出口を一斉に運転することで、空調の立ち上がり時間短縮のためのウォーミングアップ運転にも利用した。

**2. 実測・アンケート概要**

竣工時の性能検証を目的に、開院前の7月に温度、風速の実測、サーモカメラの撮影を行った。実測の測定点は透析ベッドエリアとスタッフエリアの代表点とした。調査時期が夏季であるため、空調は冷房運転をした。また、開院後の9月に患者・医療スタッフを対象としたアンケートを行った。

**(1) 温度**

設計値通りの室温、室全体の温度分布を確認するため、透析ベッドエリアのベッド位置 (FL+700mm) と通路 (FL+1400mm)、スタッフエリア (FL+1400mm) の各測定点で温度測定を行った (Fig. 1. 2. 1)。また、空間の温度分布を視覚的に確認するため、サーモカメラでの撮影も行った。温度計は CLIMOMASTER Mode 6501A0、サーモカメラは Ex シリーズ E4 を使用した。

**(2) 風速**

気流 (風速) については温度測定点と同様の位置と天井面 (FL+2500mm) の測定を行った。また、パーソナル吹出口の効果を確認するため、該当ベッドのパーソナル吹出口1台を利用した際の吹出口付近 (FL+2500mm)、ベッド上 (FL+700mm) の風速を測定した。風速計は CLIMOMASTER Mode16531 を使用した。

**(3) アンケート**

室内環境の実態を把握するため、患者・スタッフを対象に温冷感、快適感、気流感、パーソナル吹出口の運用に関するアンケートを行った。アンケートは対象者が新しい透析室に慣れると予想される、運用開始1か月後の

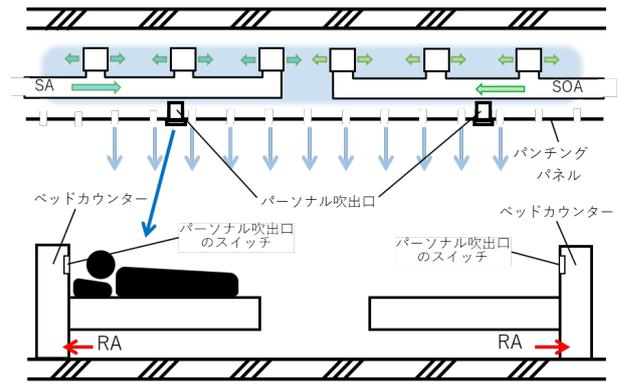


Fig.1.2.2 空調システム概要図

Table.1.2.1 実測概要

透析エリア	
空調	常時26℃設定。パンチングパネルより空気が染み出す微風速空調。ベッドカウンター足元よりRAを取り、柱型RAチャンパー内の温度センサーで制御。 (スタッフ室は4方向天井カセット形を均等配置) PAC (設定温度) 26.0℃ (吹出温度) 18.2℃ OPAC (設定温度) 21.0℃ (吹出温度) 21.4℃
パーソナル吹出口	患者の体調に合わせて使用可能なファン。 天井の空調空気が患者胸元あたりに吹き下ろされる。
換気	給気はOPACより24時間運転。排気はOPAC連動。 スタッフステーション側と各諸室の天井より排気。

Tab.1.3.1 測定値 (温度・風速)

室名	No.	測定値				
		FL+700 (ベッド座位)		FL+1400 (立位)		FL+2500 (天井)
		温度 乾球 °C	風速 m/s	温度 乾球 °C	風速 m/s	風速 m/s
隔離ベッド1 (通常時)	1	25.7	0.05	25.7	-	0.03
隔離ベッド1 (PS併用時)	#	-	0.50	-	-	3.98
隔離ベッド2 (通常時)	2	25.7	0.02	25.7	-	0.03
隔離ベッド2 (PS併用時)	#	-	0.53	-	-	3.80
隔離ベッド3 (通常時)	3	25.8	0.01	25.7	-	0.02
隔離ベッド3 (PS併用時)	#	-	0.40	-	-	4.00
透析室	4	-	-	25.7	0.02	-
透析室	5	-	-	25.7	0.03	-
透析室	6	-	-	25.6	0.05	-
透析室	7	-	-	25.5	0.03	-
透析室	8	-	-	25.6	0.02	-
廊下	9	-	-	25.8	0.01	-
廊下	10	-	-	25.8	0.05	-
廊下	11	-	-	25.5	0.02	-
スタッフステーション	12	-	-	25.6	0.10	-
透析室 (通常時)	A	26.0	0.15	-	-	0.02
透析室 (PS併用時)	#	26.3	0.20	-	-	3.90
透析室 (通常時)	B	26.0	0.05	-	-	0.02
透析室 (PS併用時)	#	26.1	0.22	-	-	3.90
透析室 (通常時)	C	26.0	0.04	-	-	0.02
透析室 (PS併用時)	#	26.1	0.30	-	-	2.50
透析室 (通常時)	D	26.0	0.03	-	-	0.02
透析室 (PS併用時)	#	26.1	0.30	-	-	3.70

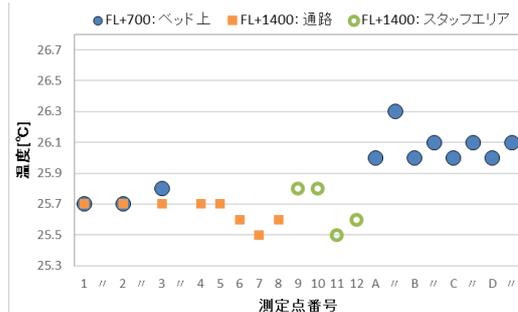


Fig.1.3.1 各測定点における室内温度

9月25日～29日の期間に実施した。

### 3. 実測結果

#### 3.1 温熱環境測定

各測定点の温度・風速の結果を Fig. 1. 3. 1、Table. 1. 3. 1 に示す。各測定点の温度は $26^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲で分布し、設計温度通り、かつ、温度ムラが少ないことを確認できた。場所における特徴として、各ベッド上温度は $25.7 \sim 26.0^{\circ}\text{C}$ 、通路で $25.5^{\circ}\text{C} \sim 25.7^{\circ}\text{C}$ 、通路・スタッフで $25.5 \sim 25.8^{\circ}\text{C}$ となり、空調効果のある天井面から遠いベッド上で若干温度が高くなる結果となった。Fig. 3. 1. 2、Fig. 3. 1. 3のサーモカメラ画像からも、室全体の温度は均一になっていることが確認できた。また、天井表面温度は吹出口温度より室温に近くなっていることを確認した。

#### 3.2 風速測定

風速は全測定点において目標値である $0.15\text{m/s}$ 以下を実現し、計画通りになっていることを確認できた。ほとんどの測定点では $0.05\text{m/s}$ 以下となっているため、目標以上に気流が抑えられているといえる。一部、ペリメータに設置されたベッドでは、他の測定点と比べ風速は早くなるが、 $0.15\text{m/s}$ に抑えられているため、窓際のドラフトも最小限に抑えられていることも確認できた。

パーソナル吹出口運転の際はベッド上で $0.20 \sim 0.53\text{m/s}$ 程度の気流が得られた。特に $0.40\text{m/s} \sim 0.53\text{m/s}$ の気流を得られた個室ベッドは部屋が狭いため、気流を乱す要素が少なく、患者の胸の位置まで安定した気流を届けることができたと考えられる。大空間である透析ベッドエリアの風速は周辺状況の影響を受けるためか、若干遅くなる傾向にある。また、パーソナル吹出口は極小範囲への気流創出を想定しているため、多少の測定誤差もあると考えられる。

スタッフエリアにおける風速は廊下で $0.01 \sim 0.05\text{m/s}$ 、スタッフステーションで $0.10\text{m/s}$ となった。廊下は2方向の天井カセット形室内機を配置しているため、測定点と空調位置によって若干の差がみられるが、 $0.15\text{m/s}$ 以下の比較的気流の抑えられており、隣接している透析ベッドエリアへの気流の影響も少ないと考えられる。スタッフステーションでは $0.10\text{m/s}$ と風速を比較的早くすることができ、設計意図通り透析ベッドエリアよりも気流感のある執務空間になったといえる。

#### 3.3 アンケート結果

アンケートは基礎情報の回答があるものを有効回答とした患者39名、スタッフ22名の結果を解析した。患者詳細情報は Fig. 3. 3. 1 に示す。

##### (1) 温熱環境

温冷感については56%が“ちょうどよい”と回答しており、患者の半数以上に対して快適な温熱環境にできた。今回気流を抑えることを目指した空調空間のため、暑さ

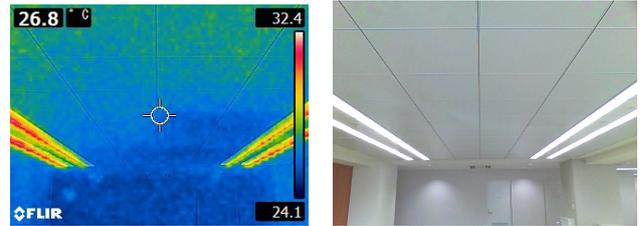


Fig.3.1.2 サーモカメラにおける天井写真

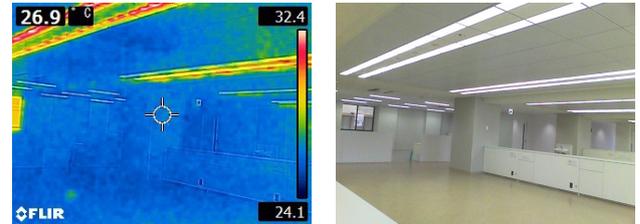


Fig.3.1.3 サーモカメラにおける室内写真



Fig.3.3.1 患者の基礎情報

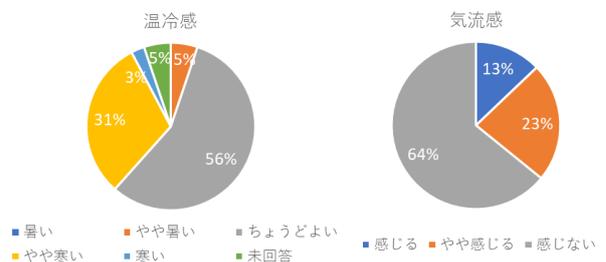


Fig.3.3.2 温冷感申告 (患者)

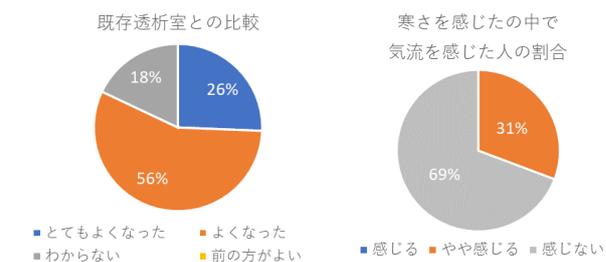


Fig.3.3.3 気流感申告 (患者)

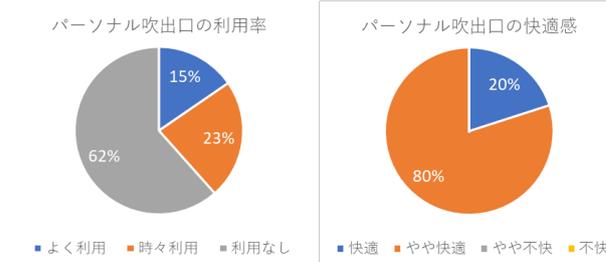


Fig.3.3.4 パーソナル吹出口の利用率と快適感申告 (患者)

を訴える人もいと予想されたが、数%にとどまり、暑さを感じる人は少なかった。一方で、“やや寒い”“寒い”の回答は一定数あったため、今後の運用では空調の設定温度を現状よりも上げることで解決できると考えられる。

## (2) 気流感

気流感では気流を“感じない”人が半数以上を占め、ベッド上で気流を感じにくい空間を実現できているといえる。一方で、“感じる”“やや感じる”の回答も一定数いる。しかし、気流を感じる人は窓際、廊下側、透析エリア中央と同程度の割合で回答しており、位置による特徴的な傾向はみられないことから、気流を感じるとる感度は個人の差による影響が強いと予想される。

## (3) 空調計画の総合評価

既存透析室の温熱環境比較調査では“とてもよくなった”“よくなった”の回答が8割以上を占めた。ヒアリングからも気流が抑えられ、温熱環境に対する要望が減ったとの声があったため、既存の天井室内機から吹き出す空調方式よりも快適になったことが確認できた。

また、温冷感と気流の関係性に注目すると、寒さを感じる人の69%が「気流は感じないが、寒さを感じる」と回答しており、温度から寒さを感じる人が多いことがわかる。このことから、気流を抑えるだけでなく、室内の設定温度を高め設定する必要があることが示唆された。

## (4) パーソナル吹出口の評価

パーソナル吹出口は患者のみ認知度調査と使用状況、使用感についてのアンケートを行った。まず、認知度調査では“知らない”が69%と認知度が低い。ヒアリングによると、暑さを感じやすい患者のみ説明を行い、自身の体調に合わせた使用を促していることが分かった。そのため、存在自体を知らない患者が多く、今後認知度が上がった際に再確認を行いたい。

現状、パーソナル吹出口の認知者の利用率は38%と低い。これは温冷感で“ちょうどよい”と答えている人が半数を超えているため、利用する機会が少ないことによるものだと考えられる。ヒアリングからも同様の回答が得られた。一方で、暑さを感じてパーソナル吹出口を使用した人の気流の快適感“快適”、“やや快適”の回答が100%だったことから、パーソナル吹出口は温冷感の個人差を補う設備としての有効性を確認できた。温冷感で“寒さ”を感じる回答が34%であったこととパーソナル吹出口の有用性から、室全体の設定温度を上げ、暑さを感じる患者にのみパーソナル吹出口で対応することで多くの患者の快適性の向上が見込めると予想される。

## (5) スタッフと患者の比較

Fig. 3.3.6 に患者とスタッフの温冷感と気流感の割合を示す。スタッフの温冷感は“暑い”“やや暑い”が多いう結果となった。一方、患者は“ちょうどよい”

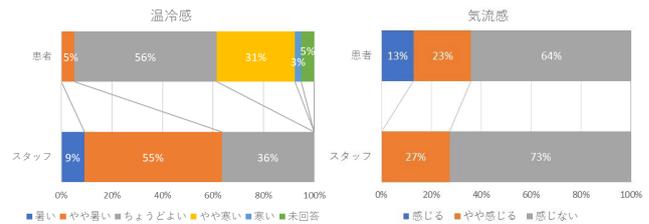


Fig.3.3.6 患者とスタッフの温冷感・気流感申告の比較

の回答が多かったことから、活動量の多いスタッフは患者に合わせた空調計画では暑さを感じる傾向にある。

スタッフの気流感は“感じる”“やや感じる”の回答が27%となり、患者よりも気流を感じる人が減少した。また、気流感の快適性では不快感を訴える回答はなく“快適”、“やや快適”で100%の回答になったことから、スタッフにとって、気流は快適性向上効果があるといえる。スタッフは温冷感調査で患者よりも暑さを感じている人の割合も多いことから、透析患者に合わせた空調計画の場合、スタッフエリアは気流感のある空調計画にすることで快適性が上がることが示唆された。

## 4. まとめ

本報では透析患者の温熱感覚に配慮した空調計画を行い、その効果の検証を行った。

温度と風速の測定より、設計値通り、かつ、室内の温度ムラの抑制と気流の低減が確認できた。

アンケートでは患者の温冷感と気流感の快適性が向上し、既存透析室よりも快適な室内環境に改善されたことが示唆された。気流感と温冷感の関係では寒さを感じた人の中の半数以上は気流を感じないにも関わらず、寒さを感じていたことから、部屋全体の設定温度を上げる必要があるといえる。パーソナル吹出口は利用者の満足度が高かったことから、部屋全体の設定温度を上げ、補助的にパーソナル吹出口を利用する運用が効果的であると予想される。

スタッフは暑さを感じやすく、気流によって快適性を感じる傾向にあり、患者との温冷感・気流の快適感に違いが大きく表れた。このことから、患者に合わせた温熱環境下ではスタッフエリアのみ気流感のある空調計画にすることで快適性が向上するといえる。

### 【謝辞】

本研究の実施にあたり、多大なご協力をいただきました蘇生会病院職員の皆様、患者の皆様へ感謝申し上げます。

### 【参考文献】

- 田辺新一ら:「人口透析室における患者と医療スタッフの熱的快適性に関する研究 (その4) 糖尿病、閉塞性動脈硬化症患者の熱的快適性」日本建築学会大会学術講演梗概集,2011
- 一般社団法人日本医療福祉設備協会:「一般社団法人医療福祉設備協会企画 病院設備設計ガイドライン(空調設備編)」,一般社団法人日本医療福祉設備協会,2022年

## プレキャストコンクリート製ダクトの性能検証に関する評価 Evaluation of Precast Concrete Ducts for Performance Verification

○小林 佑輔 社本 光気 佐藤 実

Yusuke KOBAYASHI \*1 Koki SHAMOTO \*1 Minoru SATO \*1

\*1 Takenaka Corporation

Precast concrete construction is one of the methods to improve labor productivity in the construction industry. In this study, we conducted a condensation test, a pressure loss test, and an airtightness evaluation to verify the performance of ducts composed of precast concrete members. We report on the evaluation results.

### はじめに

建設業界において、労働力人口減少に対応するため労働生産性を向上させる様々な工法が提案されている。プレキャストコンクリート工法は、規格化されたコンクリート部材を事前に工場にて製作し、建設地で組み立てる工法である。本研究ではプレキャストコンクリート部材で構成したダクトの性能検証（結露、圧力損失、漏気）に関する評価について報告する。

### 1. 計画概要

本研究の評価対象は換気用ダクト、排煙用ダクトを対象とする。Fig. 1 に系統図を示す。換気用ダクトは外気処理空調機を屋上に設置し、各階対象室に対して外気および排気の枝ダクトを接続するダクト系統の縦ダクトとする。排煙用ダクトは排煙機を屋上に設置し、各対照室に対して枝ダクトを接続するダクト系統の縦ダクトとする。

プレキャストコンクリート製ダクトについて、従来の鋼製ダクトと比較した際に材料費および工費を勘案した費用対効果を得るためには大量生産が前提となる。そのため、建物用途は同一サイズのダクト数量が多いホテル用途を想定した。

### 2. 試験体概要

試験体概要を Fig. 2 に示す。試験体 A は換気用ダクトを想定しており、内部に断熱材として 25mm 厚のスタイロ材を貼付している。また、外気および排気の 2 系統に対応した一体型のダクトを想定した。試験体 B は排煙用ダクトを想定しており、内部に 0.5mm 厚の鉄板を貼付している。

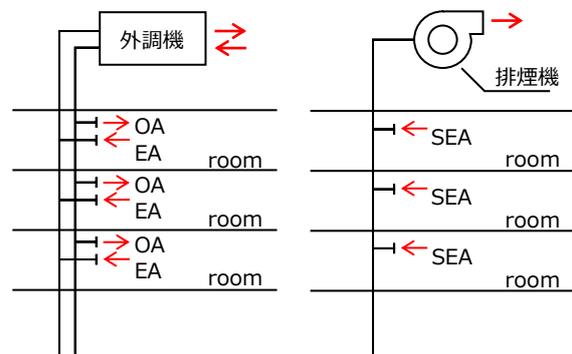


Fig.1 System diagram (Left: ventilation, Right: smoke exhaust)

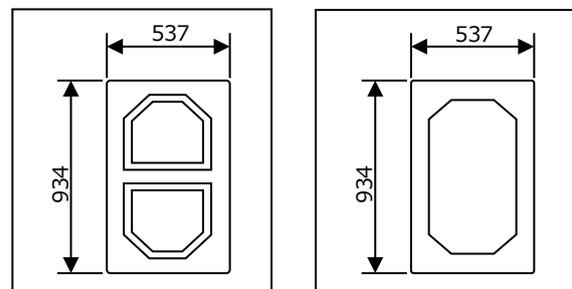


Fig.2 Specimen: Front view (Left: A, Right: B)

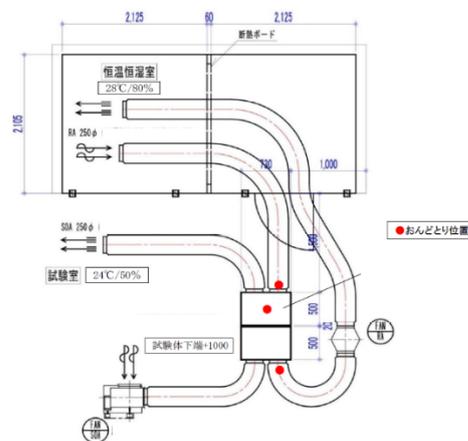


Fig.3 Test equipment overview

### 3. 結露試験

#### 3.1 試験目的と概要

結露試験は換気用ダクトについて、温湿度が異なる気流を通風することにより、試験体表面及び接続部の結露の有無を確認することを目的とした。

試験装置概要を Fig. 3 に示す。恒温恒湿室にて温湿度を調整した空気を送風し RA 系統の気流とした。試験室内の温湿度を調整し、試験室内の空気を送風し SOA 系統の気流とした。風量調整は FAN 側のインバーターにて風量制御を行った。

温湿度設定条件を Table1 に示す。また、熱電対位置を Table2 及び Fig. 4, 5 に示す。温湿度の変動が小さく安定した状態から 6 時間後に、試験体接続部の内部結露及び外部結露の有無を確認した。また、RA 側の外周部ガスケットからシール外側までの温度を計測し、温度差を確認した。

#### 3.2 試験結果および考察

各熱電対の温度推移を Fig. 6~8 に示す。また、各設定環境の温湿度の推移を Fig. 9 に示し、RA の入口・出口温湿度の推移を Fig. 10 に示す。今回の温湿度条件下ではダクト表面に結露は見られなかった。一方、中央部ガスケットの RA 側側面に結露が見られた。6 時間では滴下までは至らず、紙ワイパーにて触れた際に湿りを確認した。その他箇所については、結露は見られなかった。

Table1 Temperature and humidity setting conditions

SOA 側空気 (周囲空気)		RA 側空気	
温度 (°C)	湿度 (%)	温度 (°C)	湿度 (%)
24	50	28	80

Table2 Thermocouple position

熱電対位置	RA 側	SOA 側
中央部ガスケット	①	⑦
スタイロ表面	②	⑧
外周部ガスケット内面	③	⑨
外周部ガスケット外面	④	⑩
シール外側	⑤	⑪
試験体外面	⑥	⑫

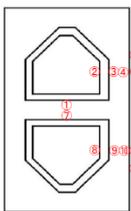


Fig.4  
Thermocouple

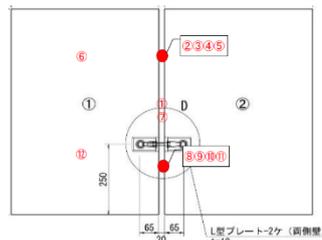


Fig.5  
Thermocouple

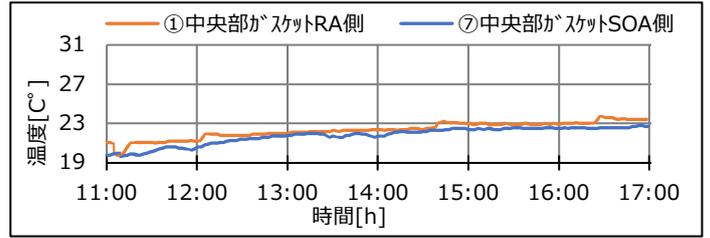


Fig.6 Central gasket surface temperature transition

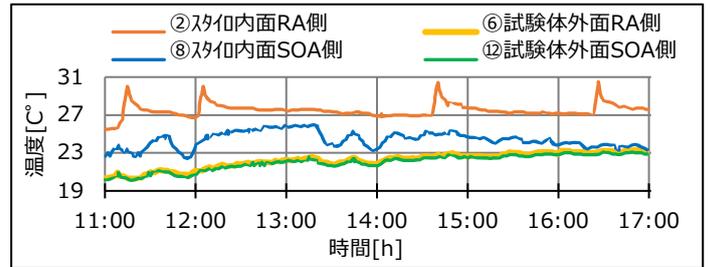


Fig.7 Pca surface temperature transition

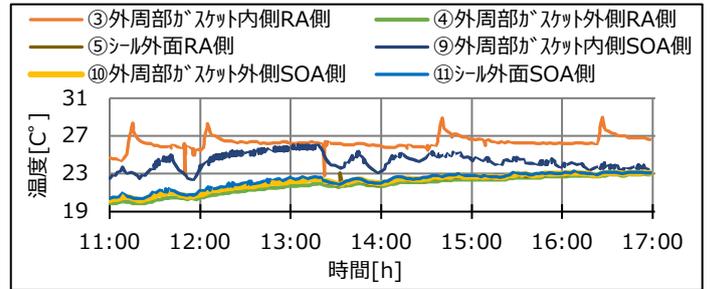


Fig.8 Peripheral gasket and seal surface temperature transition (RA side)

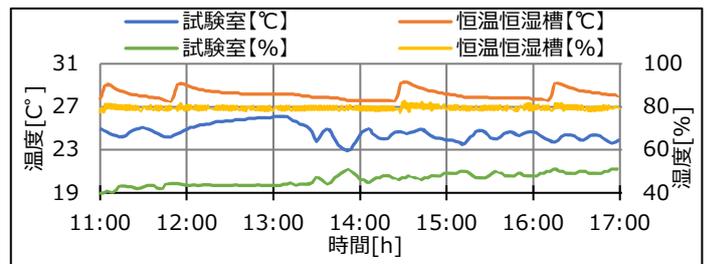


Fig.9 Test room and temperature and humidity testing chamber temperature and humidity transitions (for reference)

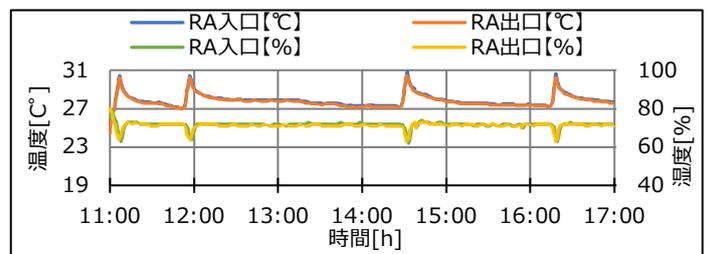


Fig.10 RA inlet and outlet temperature and humidity transitions (for reference)

4. 圧力損失試験

4.1 試験目的と概要

圧力損失試験はダクト内の流体の圧力損失を測定し、その特性把握を目的とした。試験装置概要図を Fig. 11 に示す。試験体の両端に整流ダクトを設けてファンからの気流を整流とした。風量は、吹出口の風速を風速計で測定し風速と吹出口断面積から算出した。風速はダクト断面から9点を各10秒間測定し、その平均値とした。圧力損失は、試験体前後の圧力差を微差圧計で測定した。また、試験体単体の圧力損失測定後に試験体2基接続時の圧力損失を測定し、それぞれの圧力損失を比較し継ぎ目材の影響を確認した。風速条件は、P-Q 曲線作成のために3点以上の風速で測定した。風速は換気用ダクト、排煙用ダクトいずれも5~14m/sの間で3点以上とし、Table. 3の風速条件および適宜必要な風速条件で測定した。

4.2 試験結果および考察

本試験で得た風速と圧力差を風量と圧力差の関係に直し、P-Q 曲線を作図した。その結果を Fig. 12~Fig. 15 に示す。試験体ダクトは多角形につき、ダクト径を円相当長に変換し摩擦損失係数を算出した。比較の参考値として四角形鉄板ダクトの風量と圧力差の関係と摩擦損失係数を併用した。

試験体 A (換気用) の最大摩擦損失係数は 0.026 であり、鉄板ダクトの 1.24 倍の値となった。試験体 B (排煙用) の最大摩擦損失係数は 0.079 であり、鉄板ダクトの 4.16 倍の値となった。試験体内部のコーナー部分には、隅切りを設けているが、この隅切りが矩形管路の軸方向に垂直な流れ (二次流れ) をもたらし、乱流による圧力損失増大による影響と想定される。

一方、試験体単体試験と試験体2基の接続試験を比較すると摩擦損失係数が同等であった。これにより、継ぎ目による影響はないとみられる。

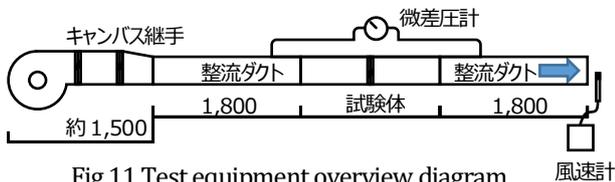


Fig.11 Test equipment overview diagram

Table3 Wind speed conditions

試験体種類	断面積	風速	風量
	(m <sup>2</sup> )	(m/s)	(m <sup>3</sup> /h)
試験体 A 換気用ダクト	0.091	5	1,638
		9	2,948
		14	4,586
試験体 B 排煙用ダクト	0.295	5	5,310
		7	7,434
		10	10,620
		14	14,868

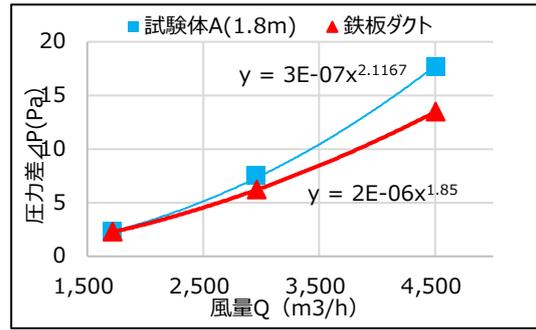


Fig.12 Test result (P-Q diagram)

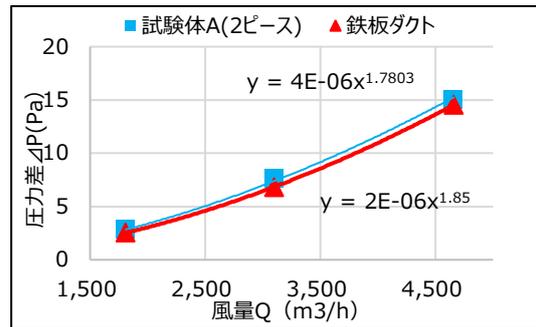


Fig.13 Test result (P-Q diagram)

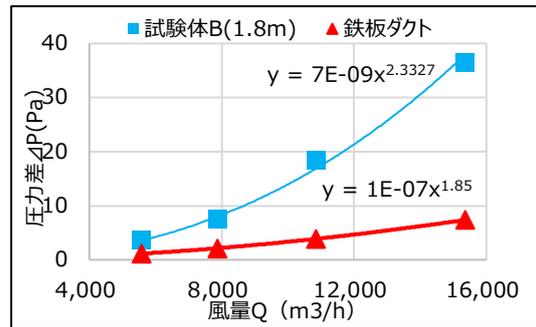


Fig.14 Test result (P-Q diagram)

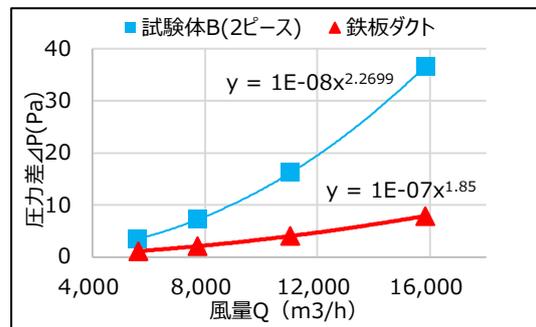


Fig.15 Test result (P-Q diagram)

5. 気密性評価

4.1 試験目的と概要

気密性評価は試験体接続部について、空気漏れ性能を確認することを目的とした。試験概要概念図を Fig. 16 に示す。試験体接続部は空気漏れ対策として継ぎ目材を周囲に設置した。コンプレッサーから圧縮空気を圧力調整バルブ・流量計を介し試験体に流入させる。試験体内を測定条件の圧力を一定に保つよう圧力調整バルブ、逃し弁で調整する。圧力は微差圧計にて読み取る。この時の漏れ量を流量計にて測定し、これをダクトの継目部の漏れ量とした。ダクトの継目部の空気漏れ有無をガス漏れ検知スプレーで目視確認した。

4.2 試験結果および考察

Fig. 17 に試験体接続部の空気漏れ量を示す。ダクトの継目部の空気漏れ量は、接続部の長さ当たりの空気漏れ量として評価した。

試験体 B(排煙用)の継目部の空気漏れ量は、N シールの基準に対して平均約 1/380 以下の結果を確認し、試験体 A(換気用)の継目部の空気漏れ量は、N シールの基準に対して平均約 1/80 以下の結果を確認した。どちらの試験体も空気調和・衛生工学会基準の N シールの制限空気漏れ量を大幅に下回る空気漏れ量である事を確認した。ダクト継目部にガス漏れ検知スプレーによる目視確認について、空気漏れは見られなかった。

6. 総括

本研究ではプレキャストコンクリート製ダクトの性能検証を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 結露試験では、表面の結露は見られず、内部において一部湿りが見られた。
- 2) 圧力損失試験では、一般ダクトと比較して Pca ダクトは最大摩擦損失係数が大きく、換気用は 1.24 倍、排煙用は 4.16 倍であった。
- 3) 気密性評価では、試験体接続部における空気漏れは見られなかった。

実運用の際は、圧力損失の低減と結露発生抑制について検討の余地がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、フジモリ産業(株)の皆様には多大なご協力をいただき、深く感謝の意を表す。

Table4 Measuring conditions

測定圧力 Pa								保持時間 min	接続部箇所
100	500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	1	1

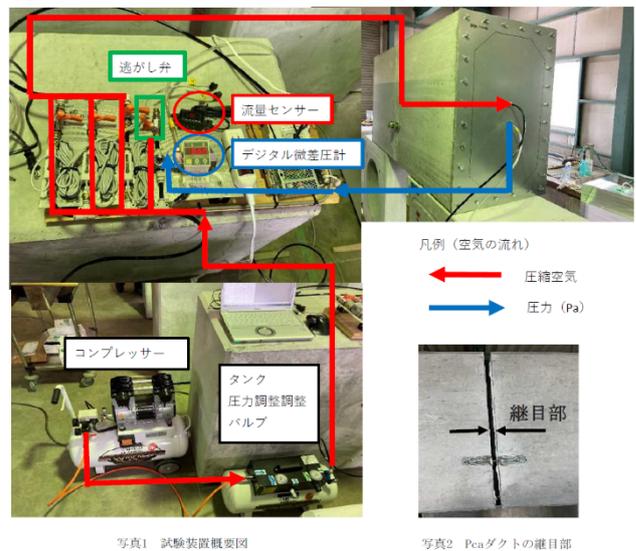


Fig.16 Overview diagram of the test equipment and details of the joints

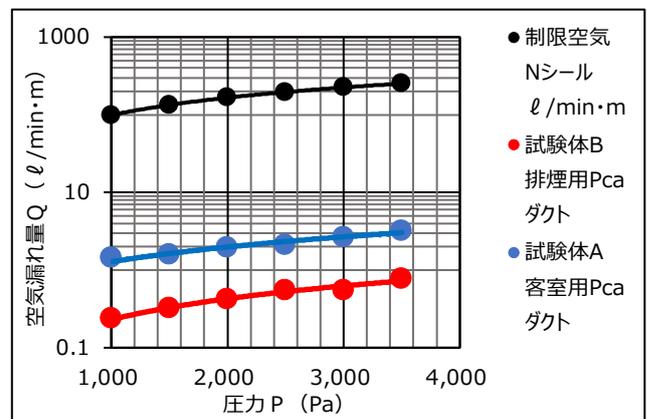


Fig.17 Amount of air leakage at Pca duct joints

## リニューアルによる都市型中規模オフィスの ZEB 化に関する報告 Study on ZEB Conversion of Urban Medium-Sized Offices through Renewal

正会員 ○川村 圭（大成建設） 正会員 湯浅 孝（大成建設）  
正会員 安藤 直也（大成建設） 正会員 富田 峻亮（大成建設）  
Kei KAWAMURA \*<sup>1</sup> Takashi YUASA\*<sup>1</sup> Naoya ANDO \*<sup>1</sup> Shunsuke TOMITA \*<sup>1</sup>  
\*<sup>1</sup> TAISEI CORPORATION

### はじめに

本計画は、竣工して30年以上経つ関西ビルを、入居者の移転を伴わない工法により ZEB 化するリニューアル工事である。関西ビルは1992年にI期棟が竣工、1998年にII期棟が竣工した都市型中規模オフィスビルである。外装のリニューアルによる断熱強化・高機能化（PASSIVE性能の強化）と設備機器の高効率化・エネルギー消費量の削減（ACTIVE性能の強化）の2つの側面より建物全体での ZEB 化に取り組み、意匠・構造・設備が三位一体となった計画を実現している。（写真1、表1参照）

### 1. 外装のリニューアルによる断熱強化・高機能化

外壁・開口部の断熱強化に加え、南面の直射日光を遮り、創エネルギーと緑化を行う多機能外装ユニットを新設した。ユニットは、2段のルーバーで構成される。上段はルーバーにより室内への直射日光を遮り、ルーバー上面に透過性のある太陽光発電ガラスを設けることで、日射遮蔽と創エネルギーを両立させた。下段には植栽ユニットを設置し、執務者のウェルネス効果に配慮した。（図1、図2参照）

### 2. 設備機器の高効率化とエネルギー消費量削減の工夫

#### 2.1 空調システム概要

I期棟は、空冷ヒートポンプモジュールチラーによる中央熱源方式、II期棟は、空冷ヒートポンプパッケージエアコンによる個別空調方式とした。I期棟は、中温冷水（11℃→19℃）を採用し、冷房時に熱源が高COP運転できる計画とした。また、密閉式クッションタンクを設け、ZEBの年間ピークとなる冬期の立上げ負荷を低減させる蓄熱によるピークカットを行うシステムとした。

#### 2.2 薄型放射空調ダクトの開発と導入

熱伝導率の高いアルミパネルと段ボールダクトを組み合わせることで薄型の放射ダクトを構成し、パネル内部へ空調機からの吹出空気を送風することで空気式の放射空調を行うシステムを開発した。軽量の段ボールダクトを使用することで、リニューアル工事における労働負荷削減に寄与する。（図3参照）

#### 2.3 AI・クラウドを活用した空調制御システムの導入 エネルギー消費量が最小となる運転モードを各設備機



写真1 外観

表1 建物概要

用途	事務所
工期	2022年4月～2023年3月
敷地面積	1,956.60m <sup>2</sup>
建築面積	1,427.28m <sup>2</sup>
延床面積	13,651.56m <sup>2</sup>
最高高さ	37.4m
構造	RC造+S造
階数	地下2階、地上9階、塔屋1階
竣工時期	(I期棟)1992年 (II期棟)1998年
BEI (改修後)	0.37 (その他含まず) ZEB Ready



図1 多機能外装ユニット

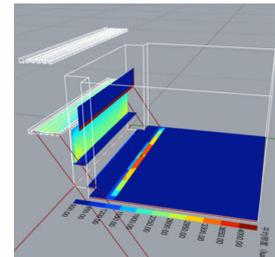


図2 最適化計算

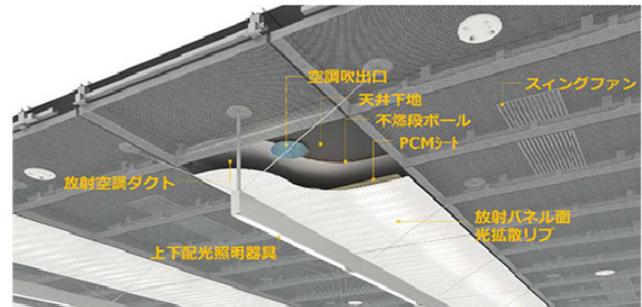


図3 薄型放射空調ダクト 概要

器へ指示する AI とクラウドを活用した空調制御システムを導入した。センサー類や気象予報等から情報を収集し、熱負荷予測を行うことで最適な運転台数や送水温度の指示を出すことできる。

### 3. まとめ

本計画では、基準一次エネルギー消費量 1,260.68MJ/(m<sup>2</sup>・年) から 63%以上削減した 466.284MJ/(m<sup>2</sup>・年) とした計画を行い、ZEB Ready (BEI=0.37 (その他含まず)) の認証を取得することができた。

#### 【謝辞】

本報告にあたり、立命館大学近本研究室の皆様には多大なるご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## オフィスにおける空調モード別の寒暑感に影響する要素の分析 Analysis of Factors Influencing Thermal Sensation in Offices by Air Conditioning Mode

○ 森本 優花 (武庫川女子大学)      宇野 朋子 (武庫川女子大学)  
波多江 崇 (中国学園大学)      都築 和代 (関西大学)  
今川 光 (大阪工業大学)

Yuka MORIMOTO\*1, Tomoko UNO\*2, Takashi HATAE\*3

Kazuyo TSUZUKI\*4, Hikaru IMAGAWA\*5

\*1 Mukogawa Women's University of Architecture Graduate School \*2 Mukogawa Women's University

\*3 Chugoku Gakuen University \*4 Kansai University \*5 Osaka Institute of Technology

This study aims to identify the factors affecting various degrees of thermal sensation. Data acquired from surveys in Kansai offices were analyzed using ordinal logistic regression. Results showed that 7 FR, 7 CL, and 6 HT items influenced thermal sensation. However, the factors and their impact varied depending on the air conditioning mode. Additionally, factors such as "air flow preference," "sweating condition," and "glove temperature" significantly correlated with thermal sensation across all modes. Moreover, factors that have a particularly strong impact on thermal sensation are "sweating condition" during FR and CL, and "overall comfort" during HT.

### はじめに

近年注目されている CASBEE-ウェルネスオフィス (CASBEE-WO)<sup>1)</sup>や2014年10月に運用が開始された WELL 認証<sup>2)</sup>の需要は年々増加している。とくに、WELL 認証ではオフィスの重要な評価項目として熱的快適性注が挙げられており、適応モデルやPMVによる評価基準が設けられている。

快適温度(快適と感じる室内温度)に関するフィールド調査は海外において数多く行われており、さまざまな国のオフィスでのフィールド調査から快適温度が地域により異なることがわかっている。気候の違いによる影響がみられ、とくに、アジア人とヨーロッパ人では快適温度が異なることがわかっている<sup>3)</sup>。海外の研究により提案された外気温度から自然換気のオフィスビルにおける快適温度(熱的中立温度)を予測するモデルとして、アダプティブモデル<sup>4)</sup>が開発され、快適な温度は1つではなく、外気温度(もしくは外気の移動平均温度)に比例して、ある程度の幅をもつと考えられている。さらには、体質や空調モード、季節によって快適性や幅が異なってくることもわかっている<sup>5)~9)</sup>。国や地域によって快適温度が異なり、適応モデルは海外のフィールド調査をもとに提案されたものであることから、日本でも同様に利用可能であるかを検証する必要がある、日本における熱的快適性の適応モデルの構築が求められている。

適応モデルの開発においては、人の温冷感や快適感に

影響するさまざまな膨大なデータが集められており、環境要素や感覚要素などの関係性が示されてきているが、多くはそれぞれ個々の関連性を示すにとどまっている。これらの膨大なデータを統計的に分析することで、温熱環境の決定要素が明らかになると考えている。

そこで本研究では、フィールド調査で得られたデータをもとに、「寒暑感」に着目して、それに影響を与える要因とその影響度を明らかにすることを目的とする。

### 1. 調査概要

兵庫県西宮市と大阪府大阪市・茨木市のオフィス、計6棟(表1)を対象に、月に一度程度、各オフィスビルを訪問し、執務者に対してアンケート調査と執務空間の環境測定が並行して実施された<sup>10)</sup>。本報では2021年9月から2023年3月までのデータを用いた分析結果を示す。アンケート調査では、基本項目(A)と主観評価項目(B)についての調査結果があり、既報<sup>9)</sup>と同様に、データの整理、着衣量、代謝量の算出を行った。また、実測項目(C)は、アンケート調査時に得られたデータを整理し、このうちグローブ温度と平均放射温度は実測値より算出した。また、屋外環境調査項目(C')は、気象庁の枚方市のデータを入手し、移動平均外気温は計算により求めた。

今回の分析対象とする項目を表2に示す。空調モードは既報<sup>3)</sup>と同様に、非空調時(フリーランニング:FR)、

冷房時(クーリング:CL), 暖房時(ヒーティング:HT)の  
3つの空調モードに分類して分析する。

Table 1 Investigated buildings information

No	City	Structure	Research floor	Survey period	Number of votes
1	Nishinomiya	RC	4	2021.9~2022.1	50
2	Nishinomiya	RC	1	2021.9~2022.9	114
3	Nishinomiya	SRC	4	2021.1~2023.1	59
4	Osaka	SC/S	28	2021.11~2023.1	170
5	Nishinomiya	RC	B1	2021.11~2022.1	220
6	Ibaraki	SRC	6	2022.4~2023.3	353

Table 2 Contents of the questionnaire used in the survey

A Basic			
2	Gender	8	Cooling preference
3	Age	9	Heating preference
4	Height	10	Sensitivity to the Noise
5	Weight	11	Sensitivity to the Smell
6	Exercise Time per Day	12	Usual environment condition
7	Constitution		
B Subjective Evaluation			
1	Modified Thermal Sensation	12	Air Quality
2	Thermal Preference	13	Ease of Work
3	Thermal Acceptability	14	Fatigue
5	Humidity Sensation	15	Sweating Condition
6	Humidity Preference	16	Activity in the last 15min → Metabolic rate
7	Airflow Sensation	18	Occupant Behavior Adapted to Experience Coolness
8	Airflow Preference	19	Occupant Behavior Adapted to Experience Warmth
9	Overall Comfort	21	Clothing Condition
10	Brightness Sensation	22	Thermal sensation
11	Brightness Preference		
C Environmental Survey		C' Outdoor Environmental Survey	
4	CO2 concentration	1	Running Mean Outdoor Temperature (Trm)
5	Air temperature (Ta)	2	Daily Mean Temperature
6	Relative Humidity (RH)	3	Daily Mean Maximum Temperature
7	Globe temperature (Tg)	4	Daily Mean Minimum Temperature
8	Mean radiant temperature*		

\*Calculated from Ta and Tg.

## 2. フィールド調査の単純集計結果

この期間の調査データ数は966件で、調査時の空調モードごとに得られた回答数はFRが306件、CLが313件、HTが342件であり、不十分な回答が5件あった。

本研究で分析するデータには、温度の感覚に対する申告として「温冷感」と「寒暑感」がある。快適性を含む心理的な「涼しい」「暖かい」を除き、物理的環境に対する感覚を評価する「寒暑感」を対象とすることとした。

目的変数とする「寒暑感」は、各空調モードでも「4. どちらでもない(中立)」が最も多く、半数以上を占める(図1)。FRの申告は「寒い(申告1~3)」側に比べて「暑い(申告5~7)」側の方が多く、CLは「暑い」側、HTは「寒い」側が多かった。また、全体の57.5%が快適範囲(申告3~5)で執務者の半数以上はオフィスの室内環境を快適だと感じていたことがわかる。

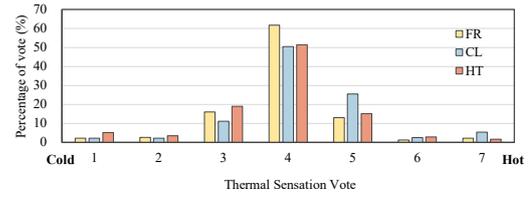


Fig.1 Variation in the thermal sensation votes categorized based on the mode

## 3. 寒暑感に影響を及ぼす要因の検討

### 3.1 統計解析の方法

本研究では、「寒暑感」に影響をおよぼす要因とその影響度を明らかにするために、多変量解析を行った。ここでは、目的変数が順序尺度であるため、順序ロジスティック回帰分析を用いる。多変量解析の実施にあたり、データの整理や有効性の確認などを行い、分析に用いる項目の抽出を行う必要がある。図2に示す流れで統計解析のデータを整理し、説明変数とする項目(表3)を決定した。

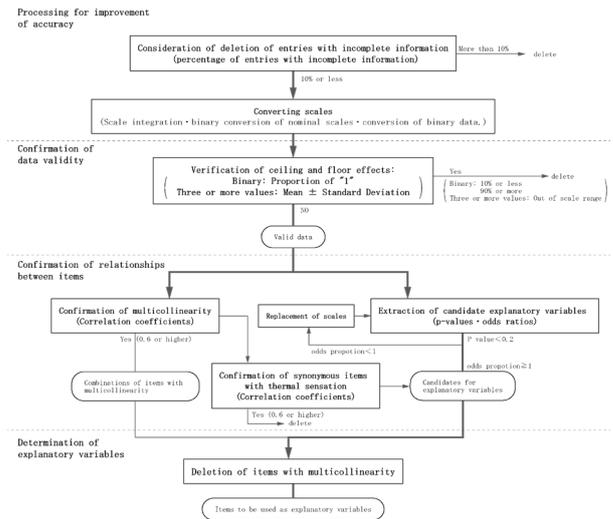


Fig.2 Data processing workflow

Table 3 Contents used in multivariate analysis

	FR	CL	HT
A-2 Gender(man)	○		○
A-3 Age	○		
A-5 Weight		○	
A-7-a Constitution (Sensitivity to Heat)		○	
A-7-c Constitution (Sensitivity to Cold)	○		○
A-8-a Cooling preference (Like)		○	
A-8-b Cooling preference (Neither)			○
A-8-c Cooling preference (Dislike)*		○	○
A-9-a Heating preference (Like)		○	
A-9-c Heating preference (Dislike)			○
A-11 Sensitivity to the Noise		○	○
B-3 Thermal Acceptability			○
B-5 Humidity Sensation			○
B-6 Humidity Preference	○	○	
B-7 Airflow Sensation	○		○
B-8 Airflow Preference	○	○	
B-9 Overall Comfort	○		○
B-11 Brightness Preference		○	○
B-12 Air Quality	○	○	○
B-13 Ease of Work			○

B-14 Fatigue			○	
B-15 Sweating Condition	○	○	○	○
B-16 Metabolic rate	○	○	○	○
B-18-a Ate/Drank something cold	○	○	○	○
B-18-d Rolled up sleeves	○	○	○	○
B-18-g Used an electric fan	○	○	○	○
B-18-p Did not do anything	○	○	○	○
B-19-a Ate/Drank something hot				○
B-19-b Used a blanket over knees				○
B-19-o Did not do anything	○	○	○	○
B-21 Clothing Condition	○	○	○	○
C-4 CO2 Concentration		○	○	○
C-6 Relative Humidity	○	○	○	○
C-7 Globe temperature	○	○	○	○
C'-1 Running Mean Outdoor Temperature	○	○	○	○
C'-2 Daily Mean Temperature	○	○	○	○
C'-3 Daily Mean Maximum Temperature	○	○	○	○
C'-4 Daily Mean Minimum Temperature	○	○	○	○

3.2 順序ロジスティック回帰分析の結果

順序ロジスティック回帰分析による多変量解析を行い、「寒暑感」に影響をおよぼす要因とその影響度を求めた。その結果を表 4 に示す。オッズ比の大きさは各要因の影響度の大きさを示す。

判別の中率は、FR は 75.3%、CL は 74.4%、HT は 73.2% であった。また、定数項の p 値が 0.01 未満となり、本調査の調査項目・分析項目以外にも「寒暑感」に影響を及ぼしている有意な要因が存在することを示している。

Table 4 Odds ratio of factors affecting thermal sensation

Items	Odds ration		
	FR	CL	HT
A-8-a Cooling preference			
dislike		1.00	
like		1.90 *	
B-8 Airflow Preference			
A bit less air movement	1.00	1.00	1.00
No change	5.58 **	3.24 **	4.29 **
A bit more air movement	31.1	10.5	18.4
B-9 Overall Comfort			
uncomfortable		3.16 **	1.00
comfortable		1.00	7.06 **
B-12 Air Quality			
Good			1.00
Bad			2.23 **
B-15 Sweating Condition			
No Sweating	1.00	1.00	1.00
Sweating	9.95 **	4.93 **	6.59 **
B-16 Metabolic rate			
Increase by 1met	1.99 *		
B-18-a Ate/Drank something cold			
No action	1.00		1.00
Action	2.18 *		5.91 **
B-18-d Rolled up sleeves			
No action	1.00		
Action	2.83 *		
B-18-p Did not do anything			
Action		1.00	
No action		1.89 *	
C-7 Globe temperature			
Increase by 1°C	1.82 **	1.38 *	1.50 **
C'-1 Running Mean Outdoor Temperature			
Decrease by 1°C		0.90 *	
C'-3 Daily Mean Maximum Temperature			
Increase by 1°C	0.86 **		
Constant term			

\* : P<0.05 \*\* : P<0.01

4. 考察

本研究では、「寒暑感」に影響をおよぼす要因が明らかになった。その要因は空調モードによって異なり、すなわち、空調モードごとに暑さに影響与える要因、影響度は変化すると考えられる。

「寒暑感」との関係が示された項目について、空調モードごとに考察する。

A-8-a 冷房(好む) : CL のみ有意な関係がみられた。HT に暖房に対する好みが出てこないことは、「寒暑感」に関しては、冷房に対しての個人差が大きいと考えられる。

B-8 気流の要望 : すべての空調モードで有意な関係がみられた。「暑い」側になると「気流を強くしてほしい」人が増加する。

B-9 快適感:空調時(CL と HT)に有意な関係がみられた。とくに HT はほかの要因と比較してオッズ比が大きく、「寒暑感」への影響が大きといえる。「快適感」が暑さ寒さを決定する要因となっているのは、「空調しているのに暑い、または寒い」といったような空調があるという思い込みによるものと考えられる。

B-12 空気質 : HT のみ有意な関係がみられた。

B-15 発汗状態:すべての空調モードで有意な関係がみられた。また、FR と CL は、ほかの要因と比較してオッズ比が大きく、「寒暑感」への影響が大きといえる。

B-16 代謝量 : FR のみ有意な関係がみられた。

B-18-a 冷たいものを飲食した : FR と HT のみ有意な関係がみられた。これは HT に「涼しくするための行動」の影響がみられたことは、暖房が過剰であったことが原因であると考えられる。

B-18-d シャツの袖をまくった : FR のみ有意な関係がみられた。空調時(CL と HT)において環境調整行動が「寒暑感」との影響のある項目として顕著に表れなかったことは、空調していることによって人間側からの調整行動を行わずとも過ごせる環境になっていることが考えられる。

B-18-p 何もしていない : CL は何かしらの冷行動をとっているが、HT における暖行動はみられない。

C-7 グローブ温度 : すべての空調モードで有意な関係がみられた。FR のオッズ比が大きく、これは FR では外気温上昇期の春季と下降期の秋季のデータが含まれていることが影響していると考えられる。また、CL は暑さの影響が小さく、CL では体が暑さに順応している可能性が考えられる。

C'-1 移動平均外気温 : CL のみ有意な関係がみられた。

C'-3 最高日平均外気温 : FR のみ有意な関係がみられた。

環境調整行動と着衣量に関して、本来人間は外部環境が変化すると発汗や震えなどの自律的体温調節や、衣類の着脱、冷暖房の使用、暖かいものや冷たいものの飲食などによる行動的体温調節によって中立な状態を無意識、

意識的に保っている。しかしオフィスを対象とした本研究では、「着衣量」はFRとHTのみ単変量解析において有意な関係が見られたものの多変量解析では見られなかった。また、ほかの環境調整行動は、空調モードごとに異なる行動が単変量解析で有意な関係として現れたが、多変量解析では、CLは何かしらの行動をとっていることが有意であったのに対して、HTでは「寒暑感」との影響が顕著に見られなかった。したがって、空調利用による受動的な適応行動によって、能動的な適応行動せずとも熱的快適性が得られる環境となっていることが考えられる。

室内の温度に関して、「グローブ温度」はすべてにおいて「寒暑感」と有意な関係があるが、外気温に関してはオッズ比が1未満となったことから「寒暑感」への影響は小さい。しかしながら、それぞれの空調モードで外気要素との関係があることが示された。ASHRAEなどの適応モデルでは月平均外気温度に基づき快適温度を算出しているが、最高値や平均値との対応が空調モードにより異なることが示唆される。

定数項はどの空調モードにおいても有意であったため、本研究では考慮できていない項目が要因として存在するといえる。

FRは外気温上昇期の春季と外気温下降期の秋季でさらに分類したほうが、より他の要因との関係を明らかにできる可能性がある。また、「寒暑感」の影響として直接影響があるとはいえない質問項目や、外気温度など分類方法の検討が必要である。さらに、多重共線性の生じる組み合わせのうち、説明変数から除外した項目についても同様に「寒暑感」への影響があると考えられる。

順序ロジスティック回帰分析は、説明変数の値が1変化するることによって目的変数の値がどれだけ変化するかの一方向の分析である。心理的状態の順序が考慮できないため環境調整行動に関して、環境調整行動を行ったから暑く/寒く感じたのか、暑い/寒いと感じたから環境調整行動を行ったのかの関係性をみるためにはさらなる検討が必要である。

## 5. おわりに

本研究では、「寒暑感」に影響をおよぼす要因とその影響度を明らかにすることを目的として、オフィスにおけるアンケートと環境測定を実施して得られたデータから「寒暑感」に影響する要因の分析を順序ロジスティック回帰分析により行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 「寒暑感」への影響がある項目は、FRは7項目、CLは7項目、HTは6項目であった。また、その項目と影響度は空調モードにより異なる。
- 2) すべての空調モードで「寒暑感」への有意な関係がみられた項目は、「B-8 気流の要望」、「B-15 発汗状態」、「C-7 グローブ温度」であった。

- 3) 「寒暑感」への影響が非常に大きい要因は、FRとCLでは「B-15 発汗状態」、HTは「B-9 快適感」であった。

## 謝辞

本研究は科研費基盤研究(B)(21H01496-1)の助成を受けたものである。フィールド調査において、武庫川女子大学、株式会社プロアシスト他に調査にご協力いただいた。ここに深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会: スマートウェルネスオフィス研究委員会報告書, p105, 2016. 3
- 2) Green Building Japan, WELL BUILDING STANDARD (日本語版) [https://www.gbj.or.jp/well\\_japanese20170821/](https://www.gbj.or.jp/well_japanese20170821/), (参照 2024/02/16)
- 3) Genjo K., et al. 2023. Development of adaptive model and occupant behavior model in four office buildings in Nagasaki, Japan. *Energies*, 16(16):6060.
- 4) ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2020. 7
- 5) 中西温菜ほか: 日本のオフィスビルにおける熱的快適性の適応モデルの開発とメカニズムの解析 その7: 長崎地域のオフィスビルに関する調査概要と適応モデルの調査結果, 日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, p1045-1046, 2022. 9
- 6) 大木萌々華ほか: 日本のオフィスビルにおける熱的快適性の適応モデルの開発とメカニズムの解析 その8: 長崎地域のオフィスビルにおける属性別快適温度の検討, 日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, p1047-1048, 2022. 9
- 7) 田中千聖ほか: 日本のオフィスビルにおける熱的快適性の適応モデルの開発とメカニズムの解析 その9: 北海道地域のオフィスビルにおける適応モデルの検討, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, p633-634, 2023. 9
- 8) リジャルH.B.ほか: 日本のオフィスビルにおける熱的快適性の適応モデルの開発とメカニズムの解析 その10: 愛知県の適応モデルの開発, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, p635-636, 2023. 9
- 9) 大木萌々華ほか: 日本のオフィスビルにおける熱的快適性の適応モデルの開発とメカニズムの解析 その15: 長崎地域のオフィスビルにおけるモード別・体質別快適温度, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, p645-646, 2023. 9
- 10) 河村優果ほか: オフィスにおける温熱環境と乾湿感に関する調査, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2023. 3

## 足裏への局所冷却による生理応答の変化 Changes in physiological response by local cooling to the sole of foot

○白川 裕貴（大阪府立大学） 吉田 篤正（早稲田大学） 木下 進一（大阪公立大学）

飛田 国人（大阪公立大学） 河端隆志（関西大学）

Yuki Shirakawa\*1 Atsumasa YOSHIDA\*2 Shinichi KINOSHITA\*3

Kunihito Tobita\*3 Takashi Kawabata\*4

\*1 Osaka Prefecture University \*2 Waseda University \*3 Osaka Metropolitan University \*4 Kansai University

The effects of cooling to the sole of the foot by coolants set at various temperatures on physiological changes were examined by subject experiments and a human body thermal model. Experiments were conducted in an artificial weather room at air temperature of 35°C, humidity of 60%, and walking speed of 6.0 km/h. Calculations using the human body thermal model were also performed under the same conditions. Experiments and calculations showed that cooling the feet with a cooling material had a positive effect on trunk temperature and perspiration rate in a hot environment.

### 1. 緒言

近年ヒートアイランド現象により都市空間の暑熱化が進行している。それに伴ってスポーツ活動時や日常生活、建設現場などの労働環境での熱中症の発生が頻繁に観察されている。<sup>[1][2]</sup> こういった熱中症リスクの増加を抑制するためには空調設備などによる冷却が必要になるが、スポーツや建設現場の多くは、屋外環境において負荷の高い運動を伴うため、熱中症リスクは非常に高い。こうした屋外環境では空調設備による冷却が活用できないため、ファン付き作業服やミスト噴霧、小型冷却材による局所冷却などの冷却法が提案されている<sup>[3][4][5]</sup>。こういった冷却法では冷却部位によって冷却効果が異なるという報告もある<sup>[6]</sup>。部位ごとで冷却効果が異なる中で、暑熱下における効果的な冷却部位として手足が注目されている。掌や足裏にはAVA（動静脈吻合）血管と呼ばれる、体温が上昇したときに拡張し冷えた血液を体内へ戻すことで放熱を促す特殊な血管がある。AVA血管は毛細血管に比べて拡張時の内径が著しく大きいため、拡張時は血流量を増加させ、核心部の熱を皮膚表面に運び出し環境に放熱するために重要な役割をしている<sup>[7]</sup>。AVA血管のある部位を冷却することで冷えた血液を体内に循環させ深部温度を下げる効果が期待されている。また、AVA血管を冷却して深部温度を下げることにより視床下部<sup>[8]</sup>が体から熱を逃がしたくないという人体の恒常性が働くことから、交感神経系を調節し、血管を収縮させることで体表面からの熱損失を防ぎ、体表面の温度変化を抑えている。また、発汗は皮膚表面の温度が高いほど発汗が促進される傾向にあるため、体表面の温度の上昇を抑えることで発汗も

抑えることになる。

そこで本研究では、相転移温度が12°Cの相転移型蓄冷材料（Phase-Change Materials, PCM）、そしてさらに温度の低い約-10°CのIce Packを用いて足裏への冷却を行い、冷却温度を変えた場合の生理応答の変化を被験者実験を通じて確認していく。

### 2. 被験者実験による評価

#### 2.1 被験者実験と実験条件

実験は2024年1月から2月に午前9:30~12:30と13:00~16:00に分けて、中百舌鳥キャンパスA15棟の人工気候室で行った。この際、実験の実施の時間帯は被験者ごとに統一するようにした。被験者は健康な成人男性5人を用意し、平均身長172.2±8.5cm、体重65.8±14.14kgであった。生理量測定装置は人工気候室内で装着した。被験者毎の体内の水分量を同等にするために排泄及び300gの水分摂取を行い、実験時の服装としては着衣量0.3cloの白色Tシャツ、白色半ズボンで統一し、危険性を考慮して運動靴を着用した。

#### 2.2 実験方法

実験プロトコルを図1に示す。実験場所に移動後、深部体温をモニタリングしながら最低30分間の座位安静をとり、身体を環境に順化させてから実験を開始した。人工気候室は気温35°C湿度60%に設定し、30分間時速6km歩行、その後30分間座位の状態ですら冷却、その後30分間は座位安静状態を取り、冷却の時間帯に冷却なし、PCM冷却(12°C)、極低温冷却(-10°C)の3条件に分けて

実験を行った。冷却剤としては市販の相変化温度 12°C の PCM (商品名: コアクーラー, 販売元: DESCENTE 株式会社) を足に 2 個使用し, 足裏と地面に敷いたグラスウールの断熱材の間に挟むことで行った。極低温冷却材に関しては成型ブロー容器保冷剤 (商品名: ADDCOLD®-45, 販売元: 株式会社エイディー ディー) を用いて PCM 冷却材と同様にして行った。測定項目は, 環境要素として気温, 相対湿度, 生理要素として皮膚温度 (7 点), 深部温度 (直腸温), 皮膚血流量 (上腕), 発汗量 (体重変化量), 心拍数, 血圧を測定した。体重と血圧は, 運動開始直前, 30, 60, 90 分後の 4 回測定した。

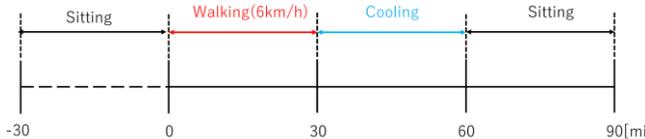


Fig.1 Protocol of subject experiment for sole of foot cooling

### 2.3 実験結果

平均皮膚温度に関しては, 冷却開始前と冷却後での温度で比較したところ, 冷却の有無によつての差は見られなかったが, 冷却終了後には PCM 冷却と極低温冷却の実験が冷却なしの実験に比べて少し温度は減少していった。30~60 分の範囲ではすべての実験において有意差は見られなかった。60~90 分の範囲では PCM 冷却と冷却なしの間では有意差は見られなかったが, それ以外では有意差は見られた。

図 2 に深部温度の測定結果を示す。深部温度に関しては, 実験中における運動終了時 (30 分) と実験終了時 (90 分) の深部温度の上昇値を引いた値を比較すると, 冷却なしの時と比べて PCM 冷却を行った場合は被験者全員の深部温度が減少した。また, それぞれの実験において運動終了後も深部温度は上昇し続けており, 温度上昇が抑えられる時間は極低温冷却, PCM 冷却, 冷却なしの順に早かったという結果が得られた。30 分~90 分の範囲ではどの実験も有意差ありとなった。30 分~60 分の範囲でもどの実験も有意差ありとなった。

発汗量のグラフは図 3 に示した。ここでの発汗率とは

$$\text{発汗率} \left[ \frac{g}{kg \cdot \text{min}} \right] = \frac{30 \text{ 分間の体重変化量} [g]}{\text{実験開始時} (0 \text{ 分}) \text{の体重} [kg]} \times \frac{1}{30 [\text{min}]}$$

として評価していく。

cooling の段階では, PCM 冷却を行った際の発汗率が他の実験に比べて大きいものになっている。sitting の段階で PCM 冷却及び極低温冷却の発汗率が cooling の時に比べて低下している減少率が大きいという結果が得られていることから, 冷却を行うと次第に発汗は抑えら

れていっている。また, 冷却によつて体温が低下したことから, 発汗はもう不要であると身体が判断し, 発汗を抑えているため, sitting では冷却を行った際の発汗率が小さくなったのだと考えられ, 冷却効果はあると考えた。冷却なしと極低温冷却の sitting, PCM 冷却と極低温冷却の sitting では有意差が見られ, それ以外の箇所では有意差は見られなかった。

皮膚血流量のグラフは図 4 に示した。皮膚血流量に関しては, 冷却を行った PCM 冷却と極低温冷却の方が, 冷却なしの時よりも運動終了後の血流量が減っており, 血管が収縮している事が予想される。30 分~90 分の範囲において, PCM 冷却と冷却なしの間では有意差は見られなかったが, それ以外では有意差が見られた。60 分~90 分の範囲ではすべての実験において有意差が見られた。

心拍数のグラフは図 5 に示した。心拍数に関しては, 冷却開始からの部分に目を向けると冷却なしの時と比べて PCM 冷却と極低温冷却を行った時の方が心拍数は減少しているという結果が得られた。30 分~60 分, 60 分~90 分の範囲ではすべての実験において有意差は見られた。

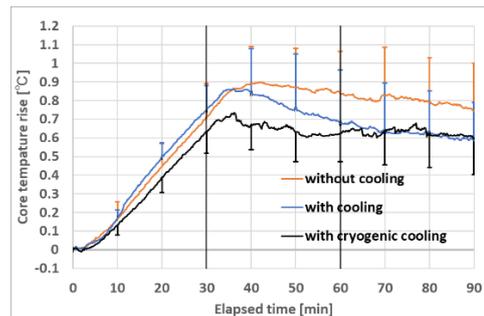


Fig.2 Effect of limb cooling on core temperature rise

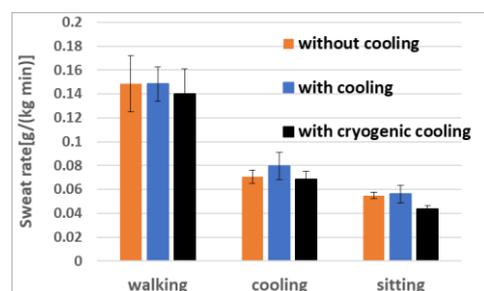


Fig.3 Effect of limb cooling by PCM on sweat rate

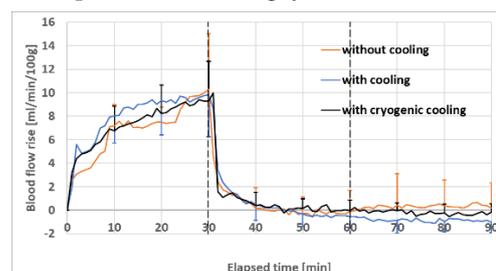


Fig.4 Effect of limb cooling on blood flow rise comparison

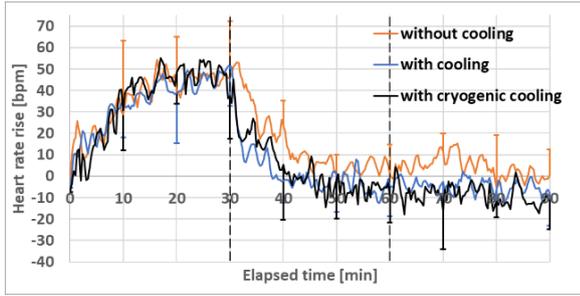


Fig.5 Effect of limb cooling on Heart rate rise comparison

3. 人体熱モデルによる評価

PCM による手足冷却について、人体熱モデルを用いた検討を行った。本研究では人体熱モデルとして JOS-3 モデルを使用した<sup>3)</sup>。このモデルは AVA 血管による熱放散機能も反映しているため、本研究で使用した。計算は被験者実験と同様の条件で行い、計算間隔は1分で計算を行った。また 12°C の PCM による手足冷却については、冷却時間中、足にあたる 2 部位の作用温度のみ 12°C と入力することで冷却を再現した。極低温冷却でも同様に冷却時間中の足にあたる 2 部位の作用温度のみ -10°C と入力して再現した。なお、着衣量は 0.3 clo とし、身長と体重は被験者実験を行った被験者の平均値、172.2 cm、65.8 kg を入力値とした。

実験では深部温度として直腸温度を測定したことから、腰の深部温度変化を比較した。図 6 に腰の深部温度の計算結果を示す。被験者実験同様に、冷却なしの場合に比べて PCM 冷却を行った時の方が、深部温度が 0.025°C 程低くなったが、極低温冷却に関しては被験者実験の結果とは異なり、冷却ありの時よりも深部温度が低くなっており、冷却なしと比較しても 0.035°C 程低くなっていた。

さらに図 7 に発汗率の計算結果を示す。まず、発汗率とは冷却なし、PCM 冷却、極低温冷却の順番に発汗量が多くなっており、冷却の強さが強いほど発汗を抑えられているという結果が得られた。つまり、JOS3 の計算結果においても足を冷却させることで発汗が抑えられ、深部温度の上昇を防ぐことができるという結果になった。

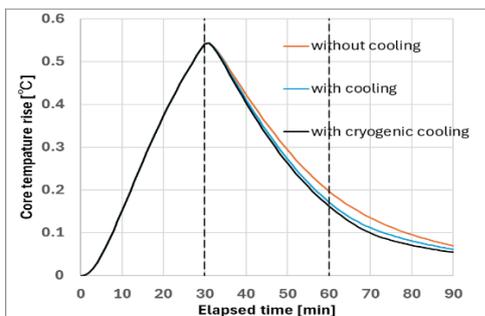


Fig.6 Calculation of effect of limb cooling on core temperature rise by JOS-3

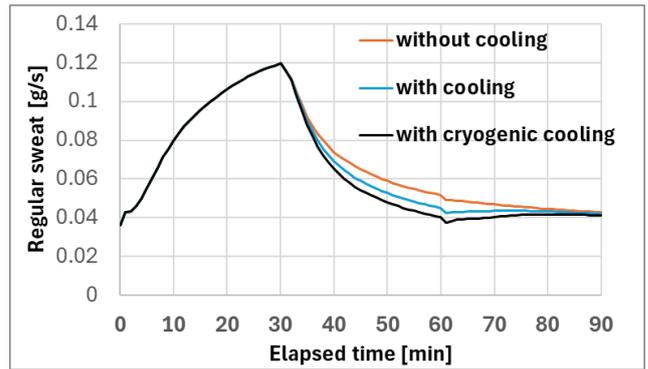


Fig.7 Calculation of effect of limb cooling on sweat rate by JOS-3

4. 考察

被験者実験において発汗量と深部温度の変化の関係に目を向けると、深部温度上昇が抑えられる時間は極低温冷却、PCM 冷却、冷却なしの順に早く、30 分～60 分の間に下がった深部温度は冷却ありの実験の方が冷却なしの実験よりも大きくなっている。これらを踏まえると PCM 冷却では、血液が冷やされて深部温度が下がろうとはするがその効果は極低温冷却ほどではなく、身体の恒常性から、交感神経系が作用し<sup>8)</sup>、深部温度を下げる働きによって発汗が促進され、汗の蒸発熱によって体温を下げる働きが盛んになり、他の実験に比べて発汗率が大きくなったと予想される。

また、運動開始直前(0 分)、運動終了直後(30 分)、冷却終了直後(60 分)、実験終了時(90 分)に計測した血圧と、その瞬間の血流量を用いて皮膚血管コンダクタンスを算出した。血管コンダクタンスは、値が大きいほど血流が流れやすいことを意味する。ここでの皮膚血管コンダクタンスとは、

$$\text{皮膚血管コンダクタンス} = \frac{\frac{\text{ml}}{\text{min}} \left[ \frac{\text{血流量}}{100\text{g}} \right]}{\text{平均血圧} [\text{mmHg}]}$$

として評価していく。その結果を表 1 に示す。この皮膚血管コンダクタンスの値にはそれぞれ有意差は見られなかった。今回行った 3 つの実験では共通して運動終了後(30 分)に一番血管コンダクタンスの値が大きくなるという結果が得られた。しかしながら、冷却なしの実験を行った際は冷却終了時(60 分)の時と実験終了時(90 分)の時の血管コンダクタンスを比較すると実験終了時の時の方が皮膚血管コンダクタンスの値が大きくなっているのに対し、PCM 冷却、極低温冷却といった、足裏への冷却を伴った実験においては冷却終了時と実験終了時の血管コンダクタンスの値を比較すると時間が経つにつれ値は小さくなっていくという結果が得られた。つまり冷却によって血管が収縮していることを意味しており、それによって

体表面からの熱損失を防ぎ、体表面の温度変化を抑えている。また、発汗は皮膚表面の温度が高いほど発汗が促進される傾向にあるため、体表面の温度の上昇を抑えることで発汗も抑えられる。このような結果から、足裏への冷却を行うことで血管収縮が起こっており、それに伴って発汗が抑えられていっていると考えられる。

**Table1** Cutaneous vascular conductance [(100g・ml)/(min・mmHg)]

	without cooling	with cooling	with cryogenic cooling
0min	0.035±0.0086	0.037±0.014	0.021±0.0049
30min	0.14±0.050	0.15±0.054	0.122±0.033
60min	0.029±0.012	0.029±0.018	0.023±0.0080
90min	0.033±0.016	0.024±0.018	0.019±0.0054

また、JOS3 モデルを用いて血流による熱交換量を試算した。図9に各条件の血液による熱交換量を示す。この時、熱交換の値は以下のような式を用いて算出した。

$$\text{熱交換量} = 1.067 \times \text{BFcrPelvis} \times (\text{TarPelvis} - \text{TcrPelvis} + \text{TvePelvis} - \text{TcrPelvis})$$

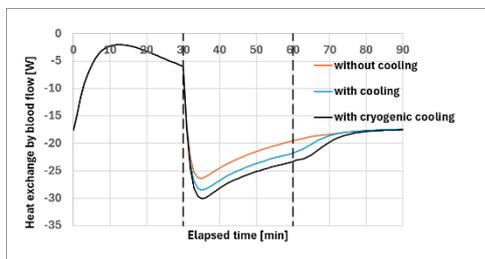
BFcrPelvis:腰部の深部層の血流量

TarPelvis:腰部の静脈層の温度

TcrPelvis:腰部の深部層の温度

TvePelvis:腰部の動脈層の温度

その結果、冷却なしの場合に比べて冷却ありの場合の方が、血液循環により奪われる熱量が大きくなっている。これが足裏の冷却によって、深部温度が低下した要因であると考えられる。同様に極低温冷却の際にも、血液循環により奪われる熱量が他の二つの実験と比較しても一番大きくなっており、それに伴って深部温度に関しても一番低下していたことから、足裏の冷却による効果がよく見られたものになっていた。



**Fig9** Calculation of effect of heat exchange of blood flow

## 6. 結言

足裏への局所冷却によって、極低温冷却、PCM 冷却、冷却なしの順に運動後の深部温度上昇の抑制が早くなっていった。また、冷たい血液が体を巡り、深部温度の低下、そして冷却による血管収縮から発汗量の抑制が極低温冷

却では確認できた。PCM 冷却では発汗量の抑制の傾向が見られるのが遅かったため、冷却中 (30~60 分) の時間帯では血液による冷却が極低温冷却の時ほど働いておらず、身体の恒常性から深部温度を下げようとする働きによって発汗が促進され、汗の蒸発熱によって体温を下げる働きが盛んになり、他の実験に比べて発汗率が大きくなったと予想される。つまり、冷却温度によって身体へかかる冷却効果が変化し、冷却量が大きいほど身体へかかる熱負荷がより軽減されるというものになった。

## 参考文献

- [1] 芳田哲也; 「日本における熱中症予防研究」, 日本生気象学会雑誌, 52(2) (2015) 97-104.
- [2] 小山智幸, 松藤泰典, 小山田英弘, 山口謙太郎; 「暑熱環境における建設災害の発生傾向に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号(2006) 17-21.
- [3] 山崎慶太, 菅重夫, 栗原浩平, 濱田靖弘, 朱楚奇, 中野良亮, 小林宏一郎, 高橋直; 「人工気候室での模擬作業がファン付き作業服を着用した建築作業員の生理・心理反応に及ぼす影響」, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 748 号(2018) 545-553.
- [4] 三坂育正, 李亜娟, 瀧澤恒太, 根井勇太; 「暑熱環境下におけるクールスポットの温熱環境と熱ストレス低減効果に関する研究」, 環境情報科学学術研究論文集, 35(2021) 125-130.
- [5] 西原直枝, 長谷川ヤエ; 「局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差」, 日本生気象学会雑誌, 39(4) (2003) 107-120.
- [6] Young AJ, Sawka MN, Epstein Y, Decristofano B, Pandolf KB; “Cooling different body surfaces during upper and lower exercise”, Journal of Applied Physiology, 63(1987) 1218-1223.
- [7] 平田耕造; 「動静脈吻合(AVA)血流と四肢からの熱放散調節」, 日本生気象学会雑誌, 53(1) (2016) 3-12.
- [8] 中山昭雄; 「温熱生理学」, 理工学社, 1981, 148, 483-484.

## 室内温熱環境と作業効率に関する研究 局所気流が創造作業時の人体反応に及ぼす影響

### The study on indoor thermal environment and occupants' performance The effect of local airflow on creative work, physiological responses, and thermal sensations

○木下 陽太（関西大学） 比果 篤紀（関西大学） 都築 和代（関西大学）

Yota KINOSHITA\*1 Atunori HIGA\*1 Kazuyo TSUZUKI\*1

\*1 Kansai University

Effects of local airflow to the upper body on the creative work and thermal comfort were investigated. A total of 10 university students participated, 6 men and 4 women. Mind Map were used for the creative work. We set up the room temperature at 25°C and 27°C, and the participant was exposed to the local airflow of 1.8m/s to the upper body. The men's performance on the creative work was the highest by the local airflow on the upper body at 25°C, while they felt colder and more uncomfortable with lower mean skin temperature.

#### はじめに

近年、室内環境と作業効率との関係に注目した研究が多く行われている。しかし、既往研究には作業効率と室内温熱環境のうち、気流に着目した研究の数は少ない。

そこで、本研究の目的として、室内温熱環境のうち、気流と温度がどのような程度の際に作業効率が向上や低下し、心理反応や生理反応がどのようになるかを明かすことを目的とする。本報では、創造作業について報告する。

#### 1. 実験概要

本実験は2023年9月10日～10月11日の期間において実施し、実験場所は関西大学の第6実験棟建築環境工学温熱実験室で実施した。被験者は健康な大学生10名（男性6名、女性4名）であり、被験者には適切な報酬を支払った。Fig.1に実験のスケジュールを示す。

##### 1.1 実験条件

実験条件をTable1に示す。実験室内の室温について、実験室内の2台のエアコンを使用し、各条件の設定温度になるように制御した。ファンはKEYNICEのUSB充電式

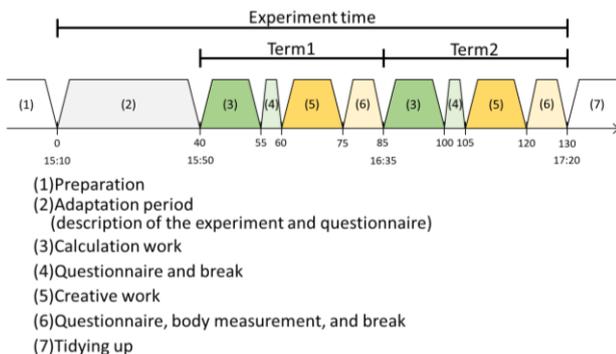


Fig.1 Experiment schedule

クリップ卓上扇風機KN-618を使用し、ファンの風の風速が顔の位置でおおよそ1.85m/sとなる設定を使用した。

##### 1.2 被験者

1度の実験で1名から4名の被験者が参加し、被験者の服装は襟なしの半袖、袖がないシャツまたはキャミソール、長ズボン、下着、靴下、スニーカーとした(0.42clo)。被験者には実験前日にそれぞれが適した睡眠を取って来てもらい、実験当日は激しい運動をしてくることをやめてもらった。また、被験者が2日連続して実験に参加することを避けた。実験風景をFig.2に示す。

##### 1.3 測定項目

###### 1.3.1 物理環境

Table2に測定項目と測定間隔を示す。室温は各机4点(0.1m, 0.6m, 1.1m, 1.7m)を測定し、監督者がロガーのモニターにより常時確認し、温度制御を行った。Fig.4に実験室内の測定場所と作業場所を示す。

###### 1.3.2 生理量

測定器具の装着には医療用テープを用いた。皮膚温は8部位(額、上腕、胸、背中、手の甲、指先、上腿、下腿)にセンサを取り付ける。手の甲と指先は被験者の利き手と反対側の手に装着した。平均皮膚温について、本研究では背中中の皮膚温も考慮し、式(1)より算出した。

Table1 Condition

Condition	Explanation of the condition
25°C(UF)	Upper fan at 25°C
25°C(NF)	No fan at 25°C
27°C(UF)	Upper fan at 27°C
27°C(NF)	No fan at 27°C



Fig.2 Scene of the experiment

$$\text{平均皮膚温} = 0.3 \times \left( \frac{\text{左胸} + \text{背中}}{2} + \text{左上腕} \right) + 0.2 \times (\text{左上腿} + \text{左下腿}) \quad (1)$$

### 1.3.3 心理量

心理量は寒暑感(1 非常に寒い~7 非常に暑い)、気流感(1 非常に風が弱い~7 非常に風が強い)、熱的快適感(1 非常に不快~6 非常に快適)、気流的快適感(1 非常に不快~6 非常に快適)のほかに、適温感、冷えの有無、湿度感、適風感、全身の総合的な快適感、気流を当てたい部位、疲労感、仕事のしやすさ、発汗感、明るさ感、環境全体の許容度とし、順応期間中と各 Term の各作業後の休憩中にアンケートにより申告してもらった。寒暑感と熱的快適感(1 非常に不快~6 非常に快適)は全身、上半身、下半身について、気流感と気流的快適感(1 非常に不快~6 非常に快適)は全身、上半身について回答してもらった。被験者の負担を軽減するため、気流感と気流的快適感(1 非常に不快~6 非常に快適)はファンの風を頭部にのみ当てるため、全身と上半身のみに絞り、明るさ感は順応期間中と Term2 創造作業後、気流を当てたい部位は Term2 創造作業後のみ申告してもらった。

### 1.3.4 作業項目

作業項目は計算作業と創造作業を行った。計算作業は A4 用紙の 3 桁掛ける 2 桁の乗算の問題を行い、創造作業はマインドマップである。マインドマップとは与えられた単語から連想される単語を可能な限り多く書き出す作業であり、時間内に回答した単語の数(有効回答数)で評価する。1 つの題の中で同じ単語を書いた場合はその単語のどちらか一方を有効回答数から省いた。本研究では、A4 用紙の中心に題が書かれており、その題から連想される単語を可能な限り多く書いてもらった。Fig.3 にマインドマップの例を示す。

また、各作業の成績について、既往研究<sup>1)</sup>を参考にし、個人の能力を考慮し、正規化成績を利用した。正規化成績の

算出方法を式(2)に示す。

$$\text{正規化成績} = 50 + 10 \times \left\{ \frac{(\text{その回の有効回答数} - \text{個人の有効回答数の平均})}{\text{個人の標準偏差}} \right\} \quad (2)$$

## 1.4 統計解析

各条件において一元配置分散分析法を行い、性別については t 検定を行った。統計解析には IBM SPSS Statistics を使用した。

## 2. 実験結果

### 2.1 物理環境

Table3 に室温が 25℃と 27℃の場合における実験に使用した全ての机の実験時間中の室温とグローブ温度の平均を示す。Table4 に人がいない状態でのファンの有無による風速の平均を示す。

### 2.2 生理量

Fig.5 に全ての Term の創造作業時間中の性別の平均皮膚温の平均を示す。創造作業時間中の平均皮膚温の平均は男性と女性のどちらも 27℃(NF)条件が最も高く、25℃(UF)条件が最も低くなっていた。平均皮膚温の性別について t 検定では有意差は見られなかった。

### 2.3 心理量

心理量の有意差に関しては、全身のみを示す。

#### 2.3.1 寒暑感

Fig.7 に全ての Term の創造作業後の性別の寒暑感の平均を示す。男性と女性のどちらも全身と上半身で差異は小さくなっていた。下半身は男性と女性のどちらも全身と上半身に比べ概ね高くなっていた。全身と上半身は男性では 25℃(UF)条件でおおよそやや寒いとなり、27℃(NF)条件でおおよそ中立状態となっており、25℃(NF)条件と 27℃(UF)条件では 25℃(NF)条件の方が全身と上半身の寒暑感が高くなった。全身と上半身は女性では 25℃(UF)条件がおおよそ寒い程度となり、27℃(NF)条件でおおよそ中立状態となっており、25℃(NF)条件と 27℃(UF)条件では 25℃(NF)条件の方が全身と上半身の寒

Table2 Measurement items and interval

Types of measurements	Measurement items	Measurement interval
Physics	Room temperature [°C]	10s
	Globe temperature [°C]	10s
	Indoor relative humidity [%]	1min
	Wind speed [m/s]	10s
	Carbon dioxide concentration [ppm]	1min
	Illuminance on desk [lx]	1min
	Outside temperature [°C]	1min
	Outdoor relative humidity [%]	1min
Physiology	Skin temperature [°C]	30s
	LF/HF [-]	30s
	Intracortical temperature [°C]	Before the start of Term1 After the end of Term2
	Amount of sweating [g/(col · h)]	After the creative work of each Term

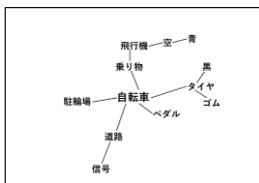


Fig.3 Mind Map

Table3 Result of room temperature and globe temperature

	Height[m]	1.1 (Globe temperature)				
		0.1	0.6	1.1	1.7	1.1
25°C	Temperature[°C]	24.7	24.7	24.9	25.1	25.9
	SD	0.86	0.83	0.74	0.67	0.62
27°C	Temperature[°C]	26.3	26.8	27.1	27.2	27.2
	SD	0.88	0.61	0.58	0.72	0.49

Table4 Result of wind speed

	Place	1.1					
		1.1m	Face	Chest	Right hand	Left hand	Underfoot
UF	Wind speed[m/s]	0.14	1.85	0.21	0.15	0.14	0.19
	SD	0.11	0.14	0.12	0.10	0.10	0.13
NF	Wind speed[m/s]	0.14	0.15	0.15	0.14	0.13	0.14
	SD	0.19	0.15	0.17	0.21	0.18	0.19

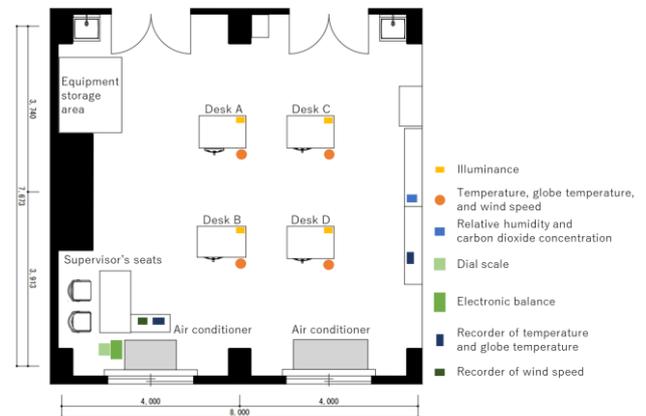


Fig.4 Measurement items and work areas in laboratory

暑感は高くなった。全身の寒暑感の性別についての t 検定では有意差(p=0.048)が見られた。

2.3.2 気流感

Fig.8 に全ての Term の創造作業後の性別の気流感の平均を示す。男性と女性のどちらも全身と上半身で差異は小さくなっていった。男性と女性のどちらも全身と上半身でファンがある条件でおおよそやや風が強くなり、ファンがない条件で風が弱い側となった。全身の気流感の性別についての t 検定では有意差は見られなかった。

2.3.3 熱的快適感

Fig.9 に全ての Term の創造作業後の性別の熱的快適感の平均を示す。男性と女性のどちらも全身と上半身で差異は小さくなっていった。下半身は男性では全身と上半身に比べ概ね高く、全ての条件で快適側となっており、女性では 25°C(UF)条件を除き、全身と上半身に比べてやや低く、快適側となっていた。男性と女性のどちらも全身と上半身で 25°C(UF)条件で最も不快側、25°C(NF)条件で最も快適側となった。全身の熱的快適感の性別についての t 検定では有意差(p=0.046)が見られた。

2.3.4 気流的快適感

Fig.10 に全ての Term の創造作業後の性別の気流的快適感の平均を示す。男性と女性のどちらも全身と上半身で差異は小さくなっていった。男性と女性のどちらも全

身と上半身でファンがある条件では不快側になり、ファンがない条件では快適側となった。全身の気流的快適感の性別についての t 検定では有意差(p=0.015)が見られた。

2.4 創造作業

Fig.6 に全ての Term の性別のマインドマップの正規化成績の平均を示す。男性に関しては、マインドマップの正規化成績が 25°C(UF)条件で最も高く、27°C(UF)条件で最も低くなり、25°C(UF)条件と 27°C(UF)条件に有意差(p<0.001)、25°C(UF)条件と 27°C(NF)条件に有意差(p=0.042)が見られた。女性に関しては、マインドマップの正規化成績は条件間に有意差がないものの、25°C(NF)条件で最も高くなり、27°C(UF)条件で最も低くなった。マインドマップの正規化成績の性別についての t 検定では有意差は見られなかった。

2.5 心理量と創造作業

Fig.11~Fig.13 に全ての Term の創造作業後の性別の上半身の寒暑感、上半身の熱的快適感、上半身の気流的快適感と全てのTermの性別のマインドマップの正規化成績を示す。マインドマップの正規化成績が 60 以上の比較的成绩が高い条件について、男性では 25°C(UF)条件が多く分布しており、女性では 25°C(NF)条件がやや多く分布しており、マインドマップの正規化成績が 40 以下の比較的成绩が低い条件について、男性と女性のどちらも 27°C

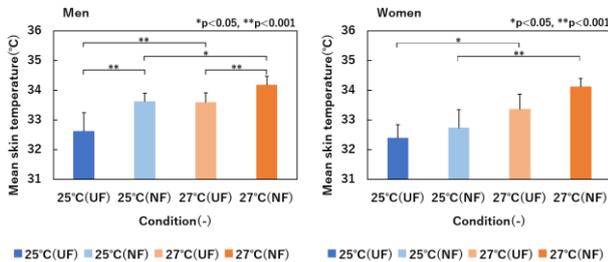


Fig.5 Average of mean skin temperature

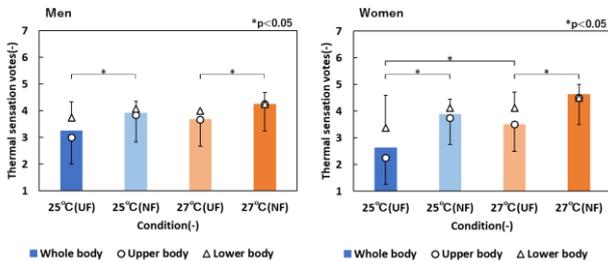


Fig.7 Average of thermal sensation votes

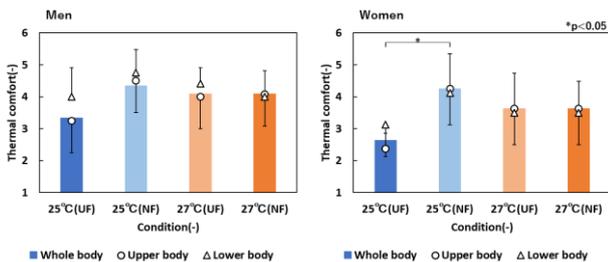


Fig.9 Average of thermal comfort

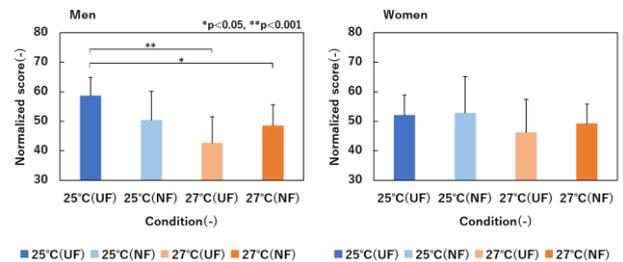


Fig.6 Average of Mind Map normalized scores

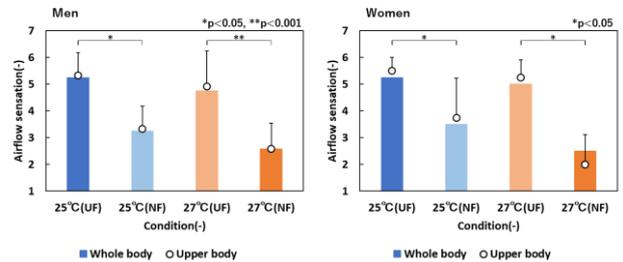


Fig.8 Average of airflow sensation

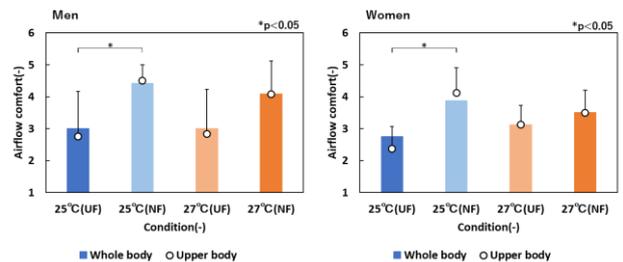


Fig.10 Average of airflow comfort

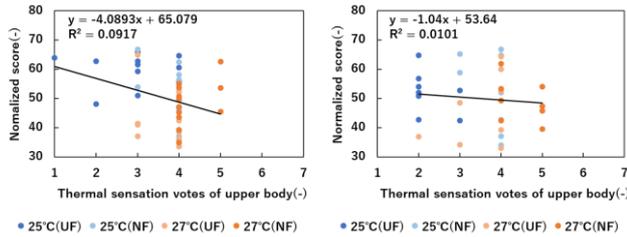


Fig.11 Thermal sensation votes of upper body and Mind Map

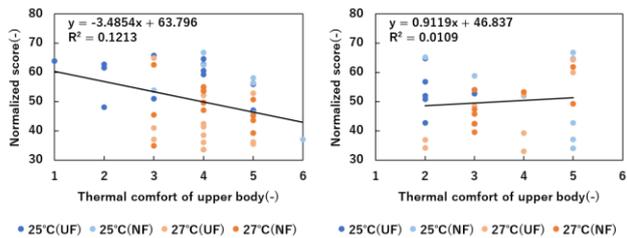


Fig.12 Thermal comfort of upper body and Mind Map

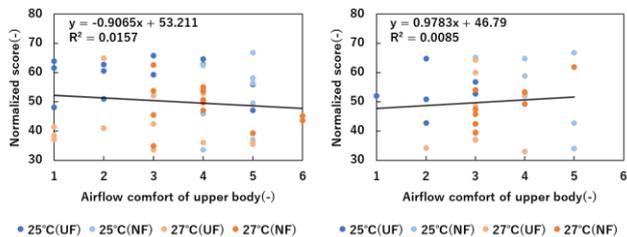


Fig.13 Airflow comfort of upper body and Mind Map

(UF) 条件が多く分布している結果となった。

### 3. 考察

男性では上半身の寒暑感とマインドマップの正規化成績に負の相関( $r=-0.30$ )があり、マインドマップの正規化成績が高いほど上半身の寒暑感は寒い側となる傾向が見られた。男性では上半身の熱的快適感とマインドマップの正規化成績に負の相関( $r=-0.35$ )があり、マインドマップの正規化成績が高いほど上半身の熱的快適感是不快側となる傾向が見られた。さらに、男性はマインドマップの正規化成績が最も高くなった25°C (UF) 条件は27°C (UF) 条件、27°C (NF) 条件との間に有意差が認められており、寒暑感是最も寒い側で熱的快適感が不快側となっていた。一方、マインドマップの正規化成績が最も低くなった27°C (UF) 条件で寒暑感はおおよそ中立状態、熱的快適感が快適側となっていた。岩城ら<sup>1)</sup>の研究では、男性のマインドマップの正規化成績は条件間に有意差が見られず、そのうえ、男性はマインドマップの正規化成績が室内上部を25°C、下部を28°Cにした条件で最も高く、この条件での全身の温熱快適性は快適側の申告が多く、マインドマップの正規化成績が室内上部を28°C、下部を25°Cにした条件で最も低く、この条件での全身の温熱快適性はどちらでもないという申告が多くになっており、本研究と男

性は異なる結果であった。

女性に関して、マインドマップの正規化成績は条件間に有意差が見られなかったが、岩城ら<sup>1)</sup>の研究では、条件間に有意差が見られた。本研究での女性はマインドマップの正規化成績が最も高くなった25°C (NF) 条件と最も低くなった27°C (UF) 条件で寒暑感はおおよそ中立状態、熱的快適感が快適側となっていた。一方、岩城ら<sup>1)</sup>の研究では、女性はマインドマップの正規化成績が室内上部を28°C、下部を25°Cにした条件で最も高く、この条件での全身の温熱快適性は快適側の申告が多く、マインドマップの正規化成績が室内上部下部共に28°Cにした条件で最も低く、この条件での全身の温熱快適性は不快側の申告が多くなっており、本研究と女性はマインドマップの正規化成績が高い場合の全身の熱的快適感は一貫していた。

石橋ら<sup>2)</sup>の研究では、マインドマップの成績が高い場合に男性と女性のどちらも快適感がおおよそやや快適程度になっており、本研究と異なる結果であった。

### 4. まとめ

本研究は男性6名、女性4名の計10名の大学生を対象とし、室内温熱環境と作業効率に関する被験者実験を行った。

- 1) 創造作業において、男性は25°C (UF) 条件で、女性は25°C (NF) 条件で作業成績が高く、男性と女性のどちらも27°C (UF) 条件で作業成績が低かった。
- 2) 本研究の条件では、男性の創造作業成績は25°C (UF) 条件と27°C (UF) に有意差( $p<0.001$ )、25°C (UF) 条件と27°C (NF) 条件に有意差( $p=0.042$ )があったが、女性の創造作業成績は条件間に有意差が見られなかった。
- 3) 本研究では、男性にのみ寒く不快側の条件で創造作業成績が最も高くなったが、既往研究<sup>1)2)</sup>では、男性と女性のどちらも快適側の申告で創造作業成績が最も高くなった。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、実験に被験者として参加していただいた方々に心より感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 岩城朱美, 秋元孝之, 古橋拓也: 知的生産と作業効率向上に適した上下温度差と局所気流に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 84巻, 764号, pp. 927-936, 2019
- 2) 石橋良太郎, 下山みずか, 渡邊敏基, 高橋祐樹, 横江彩, 齋藤輝幸, 田中英紀: 生活リズムを考慮したオフィスの室温変化が執務者の生理・心理・作業効率に与える影響(その1): 冷房期の被験者実験結果, 日本建築学会環境系論文集, 88巻, 805号, pp. 162-173, 2023. 3. 1

## インドネシアにおける寝室の温熱環境と温熱快適性の実態調査研究

**Exploratory field study on the indoor thermal environment of bedrooms and thermal comfort of residents in Indonesia**

ルーク シダルタ ウィラジャヤ (関西大学) 都築和代 (関西大学)

ウィウィック ブディアワン (ディポネゴロ大学)

Luke Sidharta WIRAJAYA\*1 Kazuyo TSUZUKI\*1 Wiwik BUDIAWAN \*2

\*1 Kansai University \*2 Diponegoro University

The increasing use of air conditioners in Indonesia is driven by the need for comfort in hot weather, impacting energy consumption and the environment, making the weather in Indonesia hotter in each year. This research focusses on the bedroom environments in Semarang, investigating factors that influence thermal comfort. Data collected from 14 residents aged 18-25 in August 2023 revealed temperature ranges between 22-31°C, humidity levels of 35-65%, wind speeds of 0.02-0.16 m/s, and clothing insulation levels ranging from 0.2-0.5 clo. In particular, 76% of the collected data fall within the comfort temperature range defined by the recent new recommendation.

**1. Introduction**

In the pursuit of sustainable living and the enhancement of occupant well-being, an in-depth comprehension of indoor thermal environments within residential spaces emerges as a critical aspect of architectural and environmental considerations. This research endeavors to undertake an extensive exploratory field study, with a specific focus on the thermal conditions prevalent in bedrooms throughout Indonesia. The country's tropical climate, marked by its unique climatic challenges, necessitates a nuanced examination to discern the factors influencing optimal thermal conditions within residential settings. By employing a multifaceted approach, integrating advanced environmental monitoring techniques and resident feedback mechanisms, this study aims to unravel the intricate interplay of variables shaping thermal comfort experiences.

As the times changing and the temperature becoming hotter, of course the standard thermal comfort is also changing as it said in Karyono, T.H. research. In 2015 Karyono, T.H. [3] proposed simple comfort predictor that is limited in its application to a certain range of average daily temperatures, between 24 and 29 °C. This paper attempts to renew the data in residential bedroom.

**2. Methods**

Thermal measurements and thermal comfort surveys were conducted in the bedrooms of 14 university students in Semarang, Indonesia in August 2023.

Generally, an AC unit is installed in participants' bedrooms, but there is still 1 or 2 people who only use a standing fan in their room.

**Table 1** shows the survey periods and the gender, number and physical characteristics of the participants, which were conducted for approximately 1 month in August 2023. The indoor air temperature, relative humidity and wind speed were measured in each of participants bedrooms, the sensors were left away from direct sunlight but besides and in the same height as participants head when sleeping, at 1 minute intervals using data loggers (**Table 2**). The number of participants was 9 men and 5 women. The participants were asked to respond to the questionnaire in the morning and at night for three days.

The questionnaire survey was conducted in English before and after the sleeping period for three nights. **Table 2** shows the measurement tool used in this survey and **Table 3** shows the subjective sensation scales that are being used, which is ASHRAE scale that is being used to evaluate the thermal sensation vote (TSV), thermal preference, comfort sensation vote (CSV), humidity sensation vote (HSV) and wind sensation vote (WSV). The clothing insulation data was collected using scale in **Fig. 1**. Total collected data is 72 sets of thermal comfort votes. The hourly outdoor air temperature and relative humidity were obtained from meteorological station in Semarang, Indonesia.

Table 1 Participants Data

Date	Sex	Number of people	Age (year)	Height (Cm)	Mass (Kg)	Fl.	Area (m2)	People	Bedding type	Clo. when sleep
2023/08/01-	Male	9	23	168	69	2	21	2	1	2
2023/08/27	Female	5	23	156	54	2	22	2	1	3

Table 2 measurement tool

Parameter Measured	Trade Name	Range	Accuracy
Air Temperature, RH, Co2	TR-74Ui	0 – 55 C, 10 to 95% RH	±0.5 C, ±5%RH
Air Temperature, RH	TR 76Ui	0 – 55 C, 10 to 95% RH	±0.5 C, ±5%RH
Wind Speed	Kanomax	0.1-30 m/s	

Table 3 Questionnaires for thermal comfort survey.

No.	Thermal Sensation Vote (TSV)	Comfort Sensation (CSV)	Vote	Wind Sensation Vote (WSV)	Vote	Humidity Sensation (HSV)	Vote
1	Cold	Very uncomfortable		Weak		Very Dry	
2	Cool	Uncomfortable		Slightly Weak		Dry	
3	Slightly cool	Slightly uncomfortable		Neutral		Slightly Dry	
4	Neutral (Neither)	Slightly comfortable		Slightly Strong		Neutral	
5	Slightly Warm	Comfortable		Strongest		Slightly Humid	
6	Warm	Very comfortable				Humid	
7	Hot					Very Humid	

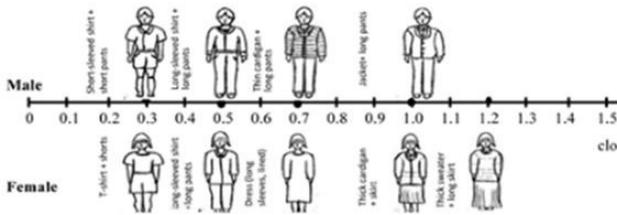


Figure 1 Clothing insulation questionnaire

This study employs Free Running (Fr) and Cooling (CL) modes, where natural ventilation and cooling are commonly accessible in most homes. Data will be categorized as follows: if Ac was employed during the assessment period, it will be labeled as Cooling Mode (CL). If occupants relied solely on standing fans or did not utilize any cooling method, the data will be classified as Free Running mode (FR).

2. Results and Discussion

2.1 Thermal Condition and Comfort Responses

Fig. 2 and Fig. 3 show the Indoor and outdoor temperature, humidity, the outdoor temperature (Ta) ranged from 21°C to 36°C and for average indoor temperature (Ta) we see from 24°C to 32°C, about the same as average outdoor temperature. In Figure. 3 show the average outdoor and indoor humidity, which for outdoor humidity (Rh) ranged from 60% to 75% and for indoor humidity ranged (Rh) from 35% to 63%.

(1) Participants' bedroom thermal conditions

The researcher uses a bedroom for parameter research in indoor thermal condition which is why the timing that was used for this research is and as explained above. All data were divided into 2 modes that are common in Semarang, Indonesia, which is FR (Free running modes) and CL (Cooling modes) (Table 4 and Table 5) show the average temperature for men

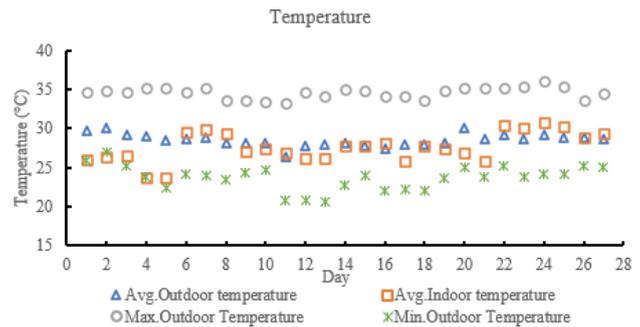


Figure 2 Indoor and outdoor temperature comparison

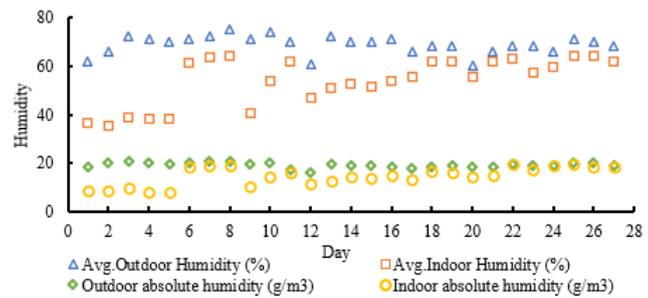


Figure 3 Outdoor and indoor humidity comparison

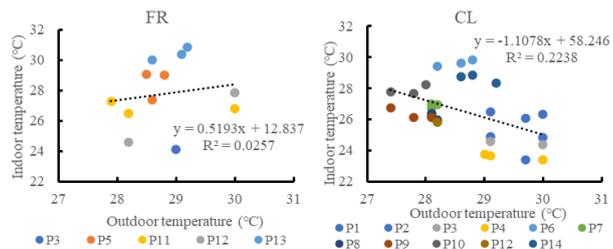


Figure 4 Indoor and outdoor air temperature relations

is 28.4°C and women is 26.9°C which is lower, the same as its humidity in 58.6% and 52.5% respectively that also lower for women.

Table 4 Average temperature during sleep period

Mode	FR			CL		
	n	Mean (°C)	S.D.	n	Mean (°C)	S.D.
Men	8	28.4	2.0	19	25.8	1.7
Women	3	26.9	0.4	12	27.6	1.4

Table 5 Average humidity when sleep period

Mode	FR			CL		
	n	Mean (%)	S.D.	n	Mean (%)	S.D.
Men	8	58.6	8.4	19	46.9	9.8
Women	3	52.5	2.5	12	49.9	9.8

**Figs. 4 and 5** show the relationship between indoor and outdoor temperature and humidity for each mode, which in Fig.4 we can see that the temperature has an inverse relationship for each mode, while in **Fig. 5** we see a similarity between each mode, that outdoor temperature does not have much effect on humidity inside.

**Fig. 6** shows in FR modes indoor wind speed very much and is affected by outdoor wind speed, and if we relate it with **Fig. 4** and **Fig. 5** show that wind speed did affect temperature but did not have much effect on humidity. **Fig. 7** shows that in both modes the participants use clothing between 0.2-0.5 clo.

**(2) Thermal Acceptance**

Thermal acceptance was evaluated by the questionnaire; acceptable or unacceptable. Even if someone perceives a certain thermal sensation, they may still accept the conditions if it aligns with their expectations. This research data show that almost all of participants accept the thermal condition in their respective room, only one person in one day that said its unacceptable.

**(3) Sensation Vote (SV)**

**Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10** and **Fig. 11** show thermal, comfort, humidity, and wind sensation vote respectively. **Fig. 7** and **Fig. 11** show in both modes related linear which in this case, majority of the vote already in SV scales 3 and 4 slightly cool or windy and neutral. On the contrary, **Fig. 9** and **Fig. 10** show inverse relation in both modes but still in the range of SV 3-5 which is slightly worse and neutral.

**2.2 Comfort temperature Estimation**

**(1) Regression Methods**

Regression methods is used to determine the comfort temperature, humidity and wind speed standard. Fig. 8 provides us with the regression for temperature:

FR  $y = 0.1561x - 1.1741$  and CL  $y = 0.0773x + 1.7872$

Moreover, based on the vote in **Fig. 8**, we can see the range of the vote for FR mode is 2-4, and for CL mode is 3-5, if we use the regression method it becomes FR mode 20.33 - 26.73 and CL mode 15.68 - 41.56.

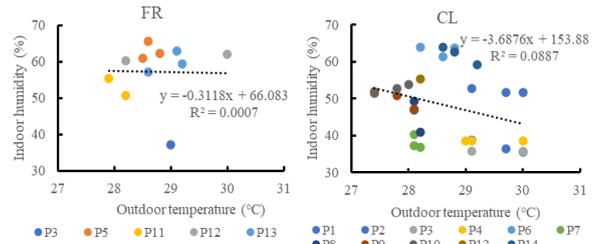


Figure 5 Indoor and outdoor air humidity

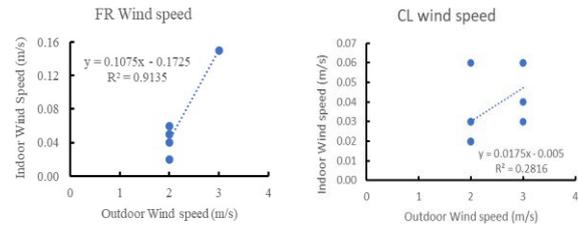


Figure 6 Indoor and outdoor wind speed relation in FR modes

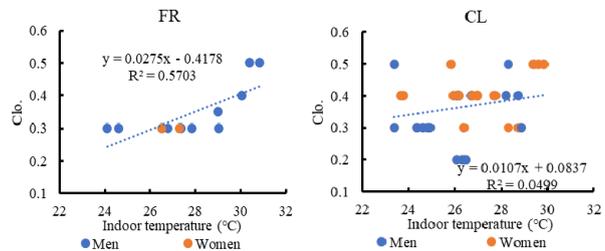


Figure 7 Indoor temperature and clothing

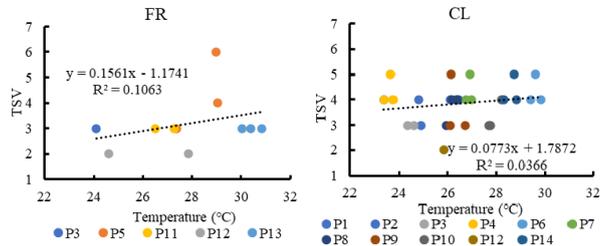


Figure 8 Thermal sensation vote and indoor temperature

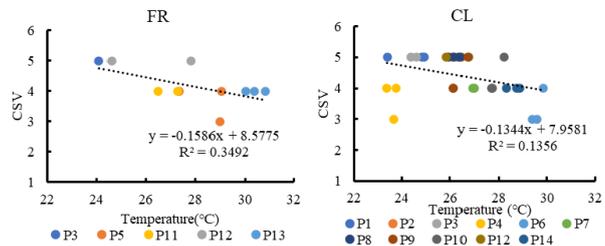


Figure 9 Each mode comfort sensation vote and temperature

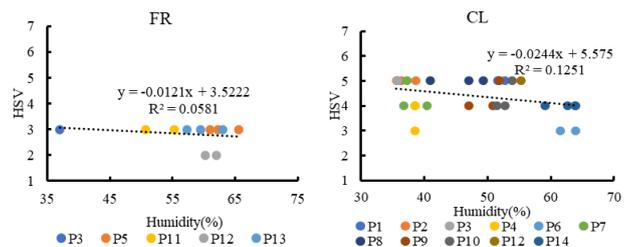


Figure 10 Each mode comfort sensation vote and humidity

**Comparison between each standard**

Table 6 Comparison of comfort temperature with previous research.

Country	Reference	Temp. for T <sub>c</sub> (°C)	Comfort temp, T <sub>c</sub> (°C)
Indonesia	This study (FR mode)	T <sub>cf</sub>	26.7-33.1
Indonesia	This study (CL mode)	T <sub>cl</sub>	15.7-28.6
Indonesia	Old Comfort Standard [1]	T <sub>c</sub>	21.5 - 25.5
Indonesia	Karyono, T.H. [3]	PCT	24 - 29
	ASHRAE Standard55 [4]	T <sub>c</sub>	23.5 - 26

In order to clarify the differences in comfort temperatures shown in **Table 6**, the comfort levels for each mode range of SV scales 3 and 4 were considered here. In fact, the average data in **Tables 4** and **5** are closer to scale 3, which is slightly cooler, more humid, and windier than the neutral state SV (4). This result may indicate that the comfort temperature is getting hotter each year. Whereas in **Fig. 12** show comparison between TSV and CSV which is inversely proportional with each other, the hotter it is the more uncomfortable for the participants. (TSV scale from cold to hot (1-7) and CSV scale from very uncomfortable to very comfortable (1-6)).

**Fig. 13** illustrates that the majority of the data falls within the range of thermal comfort; it is noteworthy that approximately 76.1% data points already in the range of thermal comforts.

**3. Conclusion**

Thermal environmental survey was carried out to investigate thermal environmental variables and thermal comfort sensations of 14 participants aged 18-25 for three nights in their residential buildings in Semarang region, Indonesia in August 2023.

- 1) For FR mode, the rise of outdoor temperature affects indoor temperature to rise too, but has little effect on indoor humidity.
- 2) In CL mode, the higher the outdoor temperature, the lower the indoor temperature tended to be, and in FR mode, the higher the indoor temperature, the greater the clothing insulation.
- 3) From regression methods, there is a significant change in Indonesian comfort temperature, which is from 24°C - 29°C (2015) to 26.7 - 33.1°C in FR mode and 15.7 - 28.6°C in CL mode (2023).
- 4) The participants proved to be generally satisfied with the thermal environment of their dwellings. This was due to the fact that the humidity was not so high, it was less than 65% though outdoor humidity was at around 70%.
- 5) From psychrometric chart, 76% data of this study were in the range of comfort temperature determined by Karyono, T.H.[3].

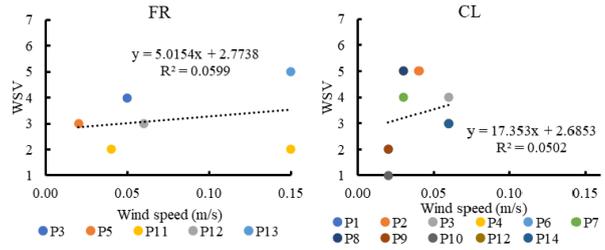


Figure 11 Each mode comfort sensation vote and wind speed relation

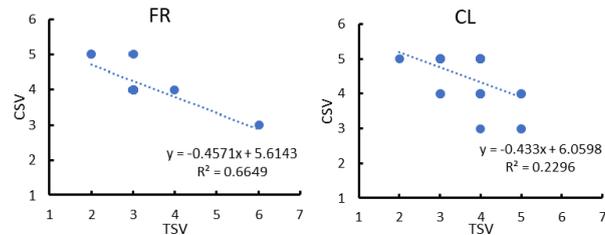


Figure 12 Each mode comfort sensation and thermal sensation vote

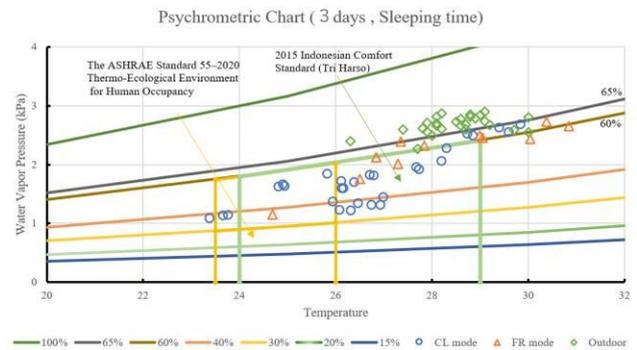


Figure 13 Psychrometric chart outdoor and during sleep temperature

**References**

- [1] Badan Standardisasi Nasional (BSN). Standar Nasional Indonesia-SNI 6390:2011 Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung; BSN: Jakarta, Indonesia, 2011.
- [2] Humphreys, M.A. Thermal Comfort Requirements, Climate and Energy. In Proceedings of the 2nd WREC Conference, Reading, UK, 13–18 September 1992; pp. 1725–1734.
- [3] Karyono, T.H. Predicting Comfort Temperature in Indonesia, an Initial Step to Reduce Cooling Energy Consumption. *Buildings* **2015**, *5*, 802-813.
- [4] ASHRAE Standard 55; Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2023.
- [5] M.A. Humphreys, H.B. Rijal, J.F. Nicol, Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors: new insights and an extended database, *Build. Environ.*, *63* (2013), pp. 40-55
- [6] Rijal, H.B.; Humphreys, M.A.; Nicol, J.F. Effect of Humidity on the Comfort Temperature in Japanese Houses during the Summer Season. In Proceedings of the 2015 TAU Conference on Mitigating and Adapting Built Environments for Climate Change in the Tropics, Jakarta, Indonesia, 30–31 March 2015.

# 夏季睡眠時の温熱環境と疲労回復の関係-冷房使用と通風利用の比較-

## Relationship between thermal environment and fatigue recovery in summer sleep

### - Comparison of air conditioning use and ventilation use -

○辻 彩 楓 (大阪市立大学)      梅 宮 典 子 (大阪市立大学)

Sayaka TSUJI\*1    Noriko UMEMIYA\*1

\*1 Osaka City University

In recent years, tropical nights and deaths caused by heatstroke have increased in summer. Air conditioner use is recommended during sleep, but there is no clear statement on how to use it. Results of earlier studies have indicated that sleeping with windows open improves sleep quality. After measuring the temperature and humidity and conducting questionnaire surveys about summer sleep, we compared sleeping practices with the windows open and with cooling all night, particularly emphasizing fatigue recovery. Results show that, for fatigue recovery, it is better to sleep with windows open when the outside temperatures are lower than 28°C, and to set the air conditioner to 29°C or 30°C when the outside temperatures are higher than 28°C.

#### 1. 背景と目的

近年熱帯夜数が増加し夏季の睡眠の質の確保が難しくなっている。熱中症予防のため適切な冷房使用が推奨されているが<sup>1)</sup>、睡眠時は自然通風の方が冷房使用より睡眠の質<sup>2)</sup>が高いという調査報告もある<sup>3)</sup>。

本研究は夏季睡眠時に通風を利用する晩と終夜冷房使用のみの晩に着目し、1) 温熱環境調節に関する要因、2) OSA 疲労回復得点と温熱環境の関係を比較する。

#### 2. 方法

##### 2-1 測定調査と申告調査

大阪の集合住宅 242 戸 (2014 年 44 戸、2015 年 44 戸、2016 年 37 戸、2017 年 63 戸、2019 年 29 戸<sup>注1)</sup>、2021 年 11 戸、2022 年 14 戸) を対象に 7 月末から 9 月末まで 1 住戸 7 日ずつ寝室の温湿度測定と睡眠に関する申告調査を実施した。7 年間合計の日別調査数と日別平均外気温を **図 1** に示す。被験者は冷房や扇風機の使用、窓開放、睡眠、および寝室の在室を 30 分間隔で、OSA 睡眠評価や温熱感覚、睡眠方法や温熱環境調節方法を起床時に申告した。住戸や寝室属性と住環境評価、および体質、生活状況、環境意識にも回答した。

被験者は女性 60.7%、有職 58.7%、年齢は平均 57.4 ± s. d. 15.6 歳で分布を **図 2** に示す。温熱環境が適切に記録されたと確認できた<sup>注2)</sup> 165 戸の 817 晩を分析する。

##### 2-2 温熱環境調節パターンの分類

冷房、通風、扇風機の使用を温熱環境調節行為としてそれぞれ全時間使用(○)、一時使用(△)、不使用(×)の組み合わせに分け 27 パターンに分類し、出現頻度を **図 3** に示す。そのうち **表 1** のように全時間冷房かつ窓閉鎖

かつ扇風機不使用 (○××) の晩を AC (191 晩)、冷房不使用かつ窓を一時的でも開放 (×○○、×○△、×○×、×△○、×△△、×△×) の晩を W0 (198 晩) と定義し AC と W0 を比較する。

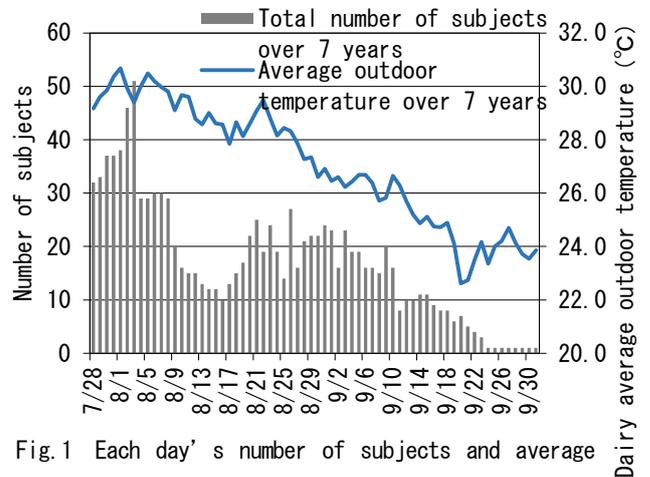


Fig.1 Each day's number of subjects and average outdoor temperature (2014~2022)

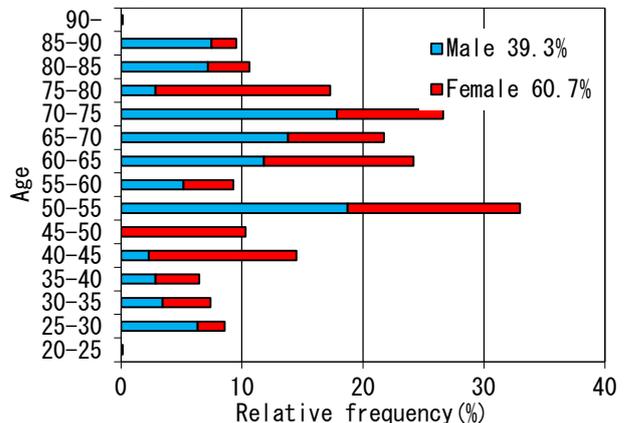


Fig.2 Age distribution by gender

Table 1 Definition of WO and AC

Definition	Thermal environment adjustment acts during sleep	Applicable patterns
WO (N=198)	No-air conditioning, windows open (including temporary use)	×○○, ×○△, ×○×, ×△○, ×△△, ×△×
AC (N=191)	Full-time air conditioning, no-windows open, no-fans	○××

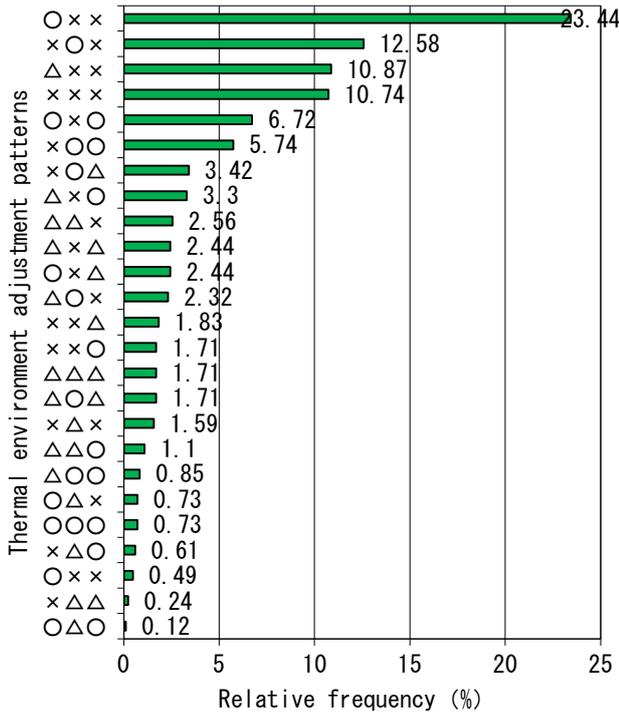


Fig.3 Frequency distribution of thermal control use patterns

3. WO と AC の OSA 睡眠評価得点の比較

OSA 睡眠評価各因子の得点を WO と AC で比較した結果を図4に示す。各因子の平均得点±標準偏差は、第1因子(起床時眠気)はWO51.7±s.d. 6.5点、AC49.2±s.d. 6.4点、第2因子(入眠と睡眠維持)はWO51.4±s.d. 7.5点、AC50.3±s.d. 7.4点、第3因子(夢み)はWO54.3±s.d. 6.8点、AC52.0±s.d. 7.5点、第4因子(疲労回復)はWO52.1±s.d. 7.1点、AC50.1±s.d. 5.8点、第5因子(睡眠時間)はWO48.7±s.d. 9.3点、AC48.1±s.d. 8.9点である。起床時眠気因子、夢み因子、疲労回復因子の得点はWOがACより有意に高く(それぞれ  $p=0.003$ ,  $p=0.023$ ,  $p=0.038$ )、入眠と睡眠維持因子、睡眠時間因子の得点はWOとACに差がない。OSA 総合得点はWO51.4±SD4.7点、AC49.7±SD4.6点、WOがACより有意に高い ( $p=0.003$ )。標準偏差は4.6~9.3で因子間に差はない。

睡眠には疲労回復の効果が期待されていることから、本研究では第4因子(疲労回復)に着目し分析する。

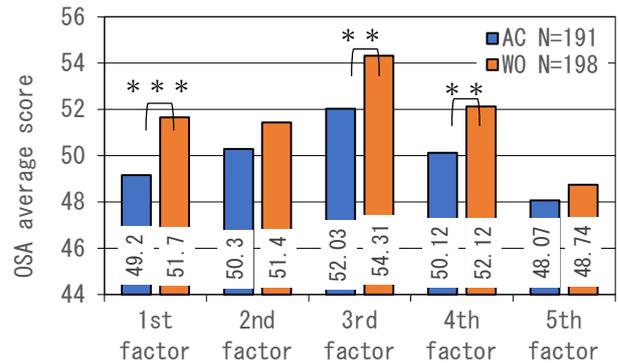


Fig.4 Comparison of OSA average score

※  $p<.001$ :\*\*\*,  $p<.01$ :\*\*,  $p<.05$ :\*

4. WO/AC 選択に係る要因

4-1 体質・生活状況・環境意識

WOの方がACより「暑さに強い」、「ストレスがない」、「お金のゆとりがない」、「夏はできるだけ冷房に頼らず自然の風で過ごしたい」( $p<.0001$ )。また、「風邪をひかない」( $p=0.0080$ )、「体力がある」( $p=0.0079$ )、「室内でも外のつながりが感じられる方がよい」( $p=0.0349$ )、「山小屋などの自然の中の暮らしにあこがれる」( $p=0.0039$ )、「暑さ寒さは気の持ちようで変えられる」( $p=0.0002$ )。冷え性や発汗傾向、心や時間のゆとりはWOとACで分布に差がない。

4-2 住戸や寝室の住環境評価

住戸ではWOの方がACより「日当たりが良い」、「カビが少ない」、「上下階や隣戸からの騒音が静か」、「防犯に気をつけていない」( $p<.0001$ )。寝室ではWOの方がACより「風通しが良い」、「上下階や隣戸からの騒音が静か」( $p<.0001$ )。また、「日当たりが良い」( $p=0.0007$ )、「冷房が効きやすい」( $p=0.0013$ )、「湿気や匂いがこもりにくい」( $p=0.0052$ )、「カビが少ない」( $p=0.0006$ )、「日射熱が煩わしくない」( $p=0.0086$ )。WOの方がACより住環境が良いと評価される。住棟外部の騒音や外気の清浄度、視線の意識にはWOとACで差がない。

4-3 室外温熱環境

睡眠時の平均外気温、平均外湿度に対するWO、ACの出現頻度を図5に示す。外気温に対してはWOとACで分布に差があり( $p=0.0013$ )外気温が高いほどACが選択されるが、外湿度に対してはWOとACで差がない( $p=0.2362$ )。

月ごとの外気温、外湿度に対するWO、ACの分布を図6~8に示す。7月と8月は外気温に対しWOとACで分布に差がないが(それぞれ  $p=0.5579$ ,  $p=0.1923$ )、9月は外気温に対し分布に差があり( $p=0.0066$ )外気温が高いほどACが選択される。外湿度に対してはどの月もWOとACで分布に差がない(それぞれ  $p=0.6725$ ,  $p=0.2229$ ,  $p=0.0791$ )。7月、8月の盛夏期には室外温熱環境に依らずWOかACかが選択されるが、9月になると外気温によってWOかACかが選択されるようになる、と言える。

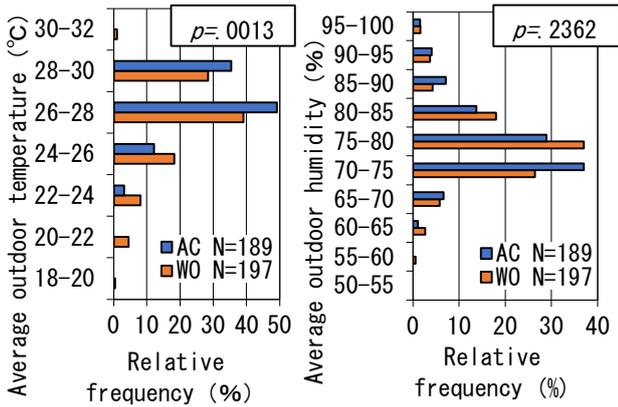


Fig. 5 Relative frequency of outdoor thermal environment

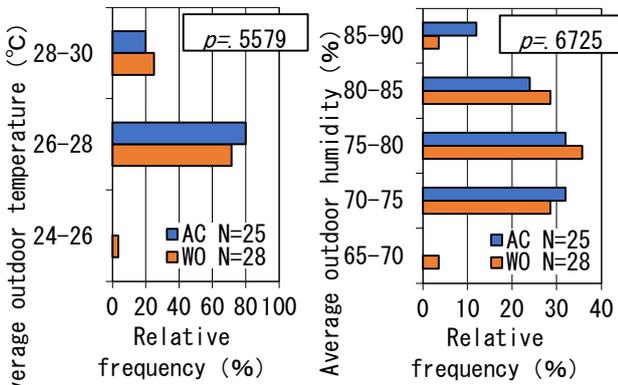


Fig. 6 Relative frequency of outdoor thermal environment in July

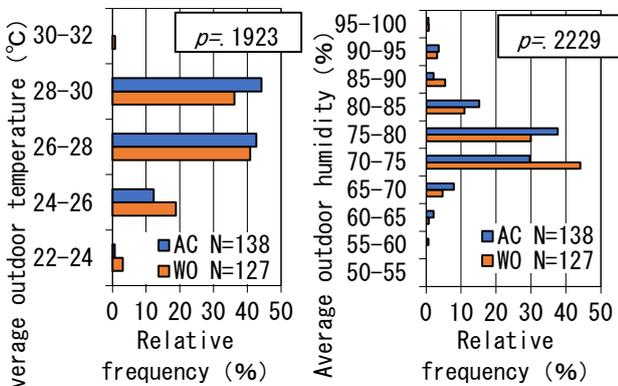


Fig. 7 Relative frequency of outdoor thermal environment in August

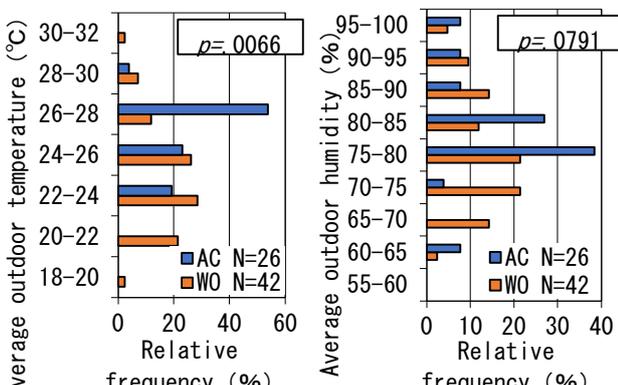


Fig. 8 Relative frequency of outdoor thermal environment in September

5. 温熱環境と OSA 疲労回復得点の関係

睡眠時平均室温（以後室温）は W026.4±s. d. 1.8℃、AC23.5±s. d. 1.7℃、平均室温湿度は W067.3±s. d. 7.3%、AC60.8±s. d. 10.1%で、温湿度とも WO が AC より高い ( $p < .0001$ )。睡眠時平均外気温（以後外気温）は W026.5±s. d. 2.2℃、AC27.2±s. d. 1.5℃で WO より AC が高く ( $p = .0002$ )、平均外湿度は W077.2±s. d. 6.5%、AC77.2±s. d. 6.5%で差がない。室内外で WO は温度と湿度に相関があり（それぞれ  $R^2 = .6547, .2820$ ）、AC は相関がない（それぞれ  $R^2 = .0005, .0279$ ）（図 9、10）。

WO は室温階級のあいだで疲労回復得点（以後得点）に差がなく、AC は室温が高いほど得点が高く 28-30℃で WO を上回る。室温湿度階級のあいだでは WO、AC とともに得点の差がない。WO は外気温 20-22℃で得点が高く、それ以上の外気温では得点に差がない。AC は外気温が高いほど得点が高い。WO は外湿度階級のあいだで得点に差がなく、AC は外湿度が低いほど得点が高い（図 11）。

外気温が 28℃未満と 28℃以上で WO と AC を比較すると、28℃未満では WO の方が AC より得点が高い。AC は 28℃以上の方が 28℃未満より得点が高い（図 12）。

AC 冷房設定温度は室温と相関があり ( $R^2 = .3829$ )、得点が最も良い室温 28-30℃に対応する設定温度は 29-30℃である。冷房設定温度は外気温とは相関がない ( $R^2 = .0017$ )（図 13）。

疲労回復は、睡眠時平均外気温が 28℃未満であれば通風利用が良く、28℃以上であれば設定温度を 29℃か 30℃にして冷房するのが良い、と言える。

6. 結論

大阪の 165 戸 817 晩における夏季睡眠時の温湿度と睡眠申告調査のうち、通風を利用する W0197 晩と終夜冷房のみ使用する AC189 晩を比較し以下を明らかにした。

- 1) 暑さに強い、経済的余裕がない、ストレスがない、自然志向が強い居住者は、また住戸や寝室の日当たり、風通し、カビ発生、湿気や匂い隣戸の騒音に問題がない住戸や寝室は AC より WO を選択する。冷え性や発汗傾向、心や時間のゆとり、住棟外部の騒音や外気の清浄度は WO/AC 選択と関係しない、
- 2) 盛夏期は睡眠時平均外気温と WO/AC 選択は関係ない。
- 3) OSA 疲労回復得点は、
  - a) 睡眠時平均室温と WO の晩では関係がないが AC の晩では正の相関がある、
  - b) 睡眠時平均室温が 28-30℃（冷房設定温度 29-30℃相当）の晩では AC が WO より良い、
  - c) 睡眠時平均外気温が 28℃未満の晩では WO が AC より、28℃以上だと AC が WO より良い。

注 1) 2019 年調査は 29 戸のうち戸建て住宅 19 戸を含む。

注 2) センサー設置位置の不良が主な原因であった。

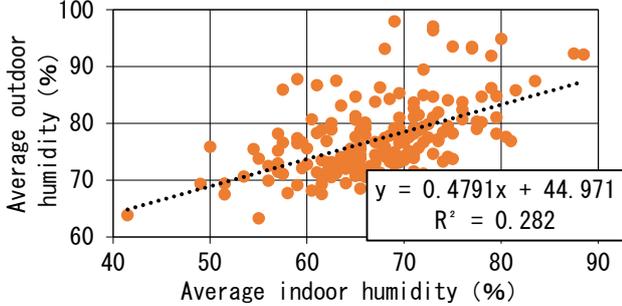
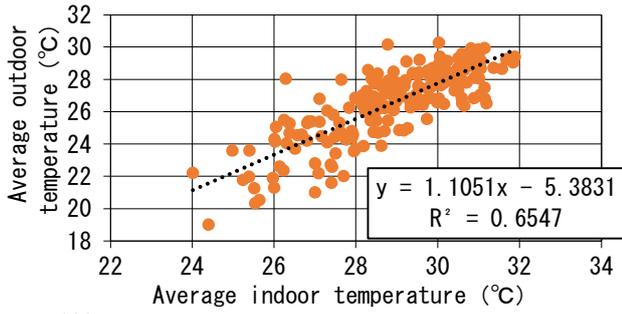


Fig. 9 Relationship between indoor and outdoor thermal environments (WO)

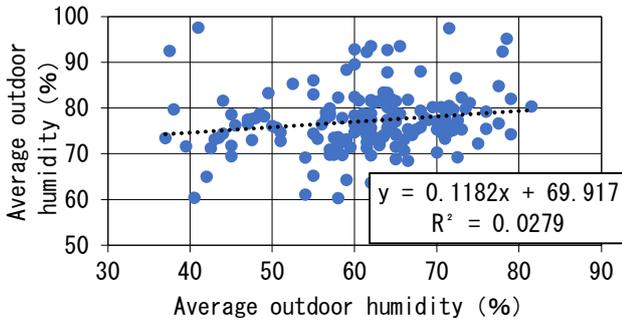
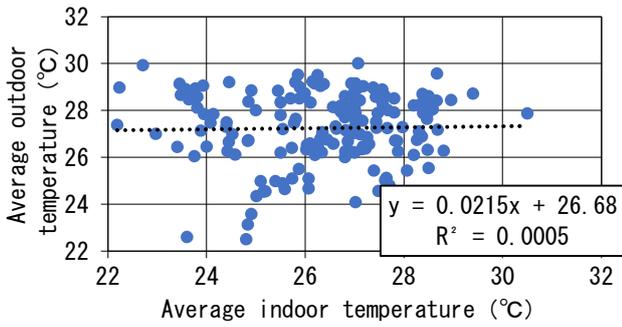


Fig. 10 Relationship between indoor and outdoor thermal environments (AC)

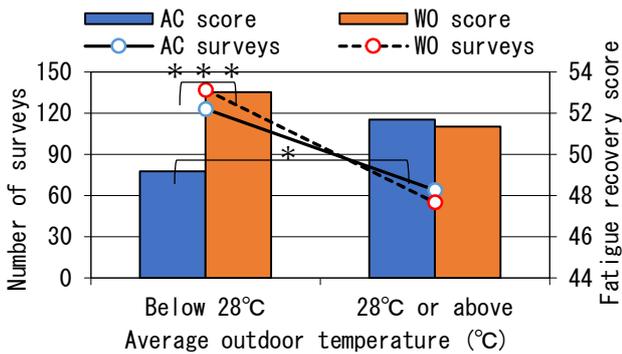


Fig. 12 Comparison between lower than 28°C and higher than 28°C

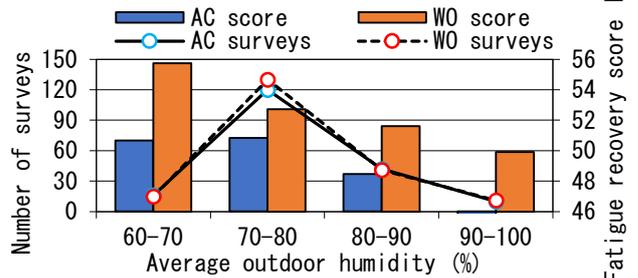
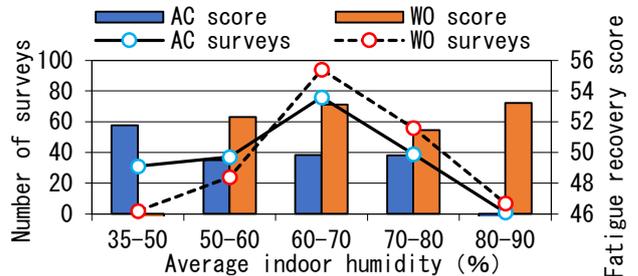
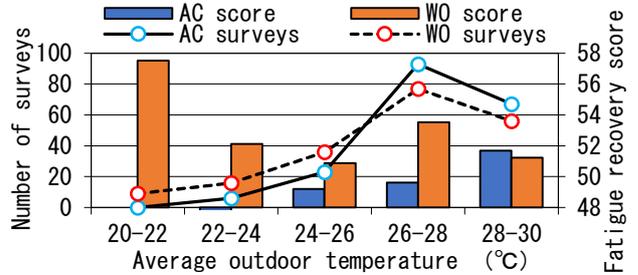
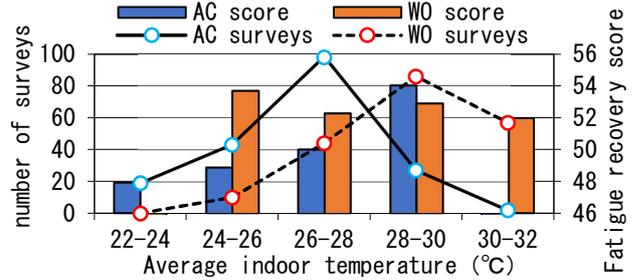


Fig. 11 Number of surveys and fatigue recovery score for thermal environments

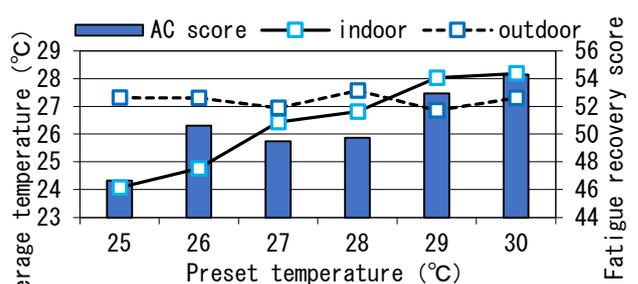


Fig. 13 Average temperature and fatigue recovery score for preset temperature (AC)

参考文献

- 1) 2017年日本生気象学会:日常生活における熱中症予防指針 V.4、12、2022年
- 2) 山本由華史ら: 中高年・高齢者を対象としたOSA 睡眠感調査票(MA版)の開発と標準化、脳と精神の医学10、401-409、1999年
- 3) 橘良樹ら: 夏季の寝室における冷房や通風利用パターンによる睡眠の質の違い、空衛・近畿・論文集、A-56

# 自然換気及び室内緑化が在室者の快適性・知的生産性に及ぼす影響 (その1) 環境条件と心理評価に関する検討

## The Effects of Natural Ventilation and Indoor Greening on the Comfort and Intellectual Productivity of Occupants (Part 1) Consideration on Environmental Conditions and Psychological Evaluation

○射矢 航我 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (東洋大学)  
山澤 春菜 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学) 長續 仁志 (大林組) 宗 菜津未 (大阪大学)  
Kouga IRUYA<sup>\*1</sup> Toshio YAMANAKA<sup>\*1</sup> Narae CHOI<sup>\*2</sup> Haruna YAMASAWA<sup>\*1</sup>  
Tomohiro KOBAYASHI<sup>\*1</sup> Hitoshi NAGATSUGU<sup>\*3</sup> Natsumi SO<sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup> Osaka University <sup>\*2</sup> Toyo University <sup>\*3</sup> Obayashi Corporation

In recent years, biophilic design which incorporates nature into the indoor environment has been attracting attention to improve the comfort and productivity of occupants. Natural ventilation and indoor greening are representative examples of their, and many studies have been conducted on their effects. However, there are not many studies that mention the effects of the combination of multiple elements. This report presents an overview of the subject experiment conducted in this study, measurement items, experimental room characteristics and psychological evaluation on comfort.

### はじめに

近年、在室者の快適性や生産性の向上のため、室内環境に自然を取り入れるバイオフィリックデザインが注目されている。在室者が自然を感じることによって、作業性の向上やストレスの軽減といった効果が期待される。自然換気や室内緑化はこれらの代表例であり、その心理的効果については多くの研究が行われている<sup>1)</sup>。しかし、複数の自然的要素が組み合わさった際の効果について言及されているものはあまり多くは無い。

本研究では、自然換気と室内緑化を同時に用いた際の在室者の快適性と知的生産性への影響を解明することを目的とし、被験者実験を行った。本報では、本研究で行った被験者実験の概要と測定項目、物理環境測定結果、快適性に関する心理評価の結果について報告する。

パネルは、18歳～27歳の本学学生92人(男性53人、女性39人)を採用した。パネルには適切な謝礼を支給した。

実験条件を **Table 1** に示す。実験条件は4条件あり、機械換気・室内緑化無し (Mechanical Ventilation、以下 MV) で21人、機械換気・室内緑化有り (Mechanical Ventilation-green、以下 MV-g) で25人、自然換気・室内緑化無し (Natural Ventilation、以下 NV) で24人、自然換気・室内緑化有り (Natural Ventilation-g、以下 NV-g) で22人をパネルとした。1回の実験の参加人数は2人から4人と不統一であった。実験の実施時間と実施条件を **Table 2** に示す。実験の様子を **Fig.2**、**Fig.3** に示す。

### 1. 実験概要・測定項目

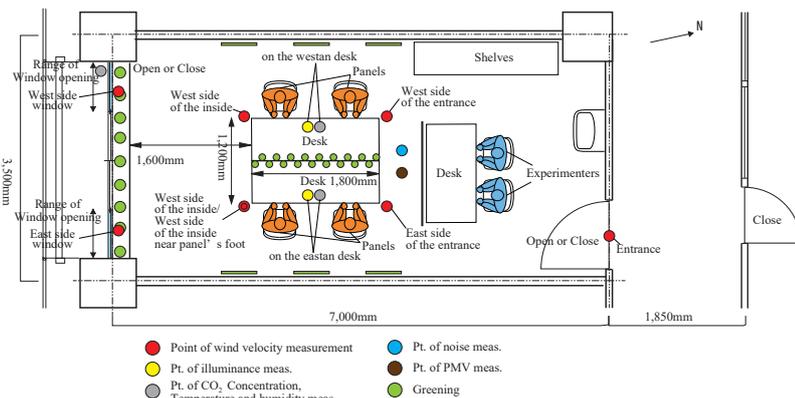
実験は本学吹田キャンパス S1 棟 716 室で実施された。実験室の平面図と物理環境測定点及び名称を **Fig. 1** に示す。実験期間は2023年10月10日～11月2日であった。

**Table 1 Conditions of the experiment**

Case	Window state	Greening	The number of participants
MV	Close	Absence	21
MV-g	Close	Presence	25
NV	Open	Absence	24
NV-g	Open	Presence	22

**Table 2 Schedule of the experiment**

	10/8	10/9	10/10	10/11	10/12	10/13	10/14
8 : 50-10 : 20			Case MV-g	Case NV	Case NV-g	Case MV	
10 : 40-12 : 10			Case NV-g	Case NV	Case NV-g	Case NV	
13 : 20-14 : 50							Case NV-g
15 : 20-16 : 50							
	10/15	10/16	10/17	10/18	10/19	10/20	10/21
8 : 50-10 : 20		Case MV-g	Case MV	Case MV			
10 : 40-12 : 10				Case MV	Case MV-g	Case MV-g	
13 : 20-14 : 50		Case NV			Case NV-g		
15 : 20-16 : 50					Case NV-g		
	10/22	10/23	10/24	10/25	10/26	10/27	10/28
8 : 50-10 : 20		Case MV		Case MV-g	Case MV		
10 : 40-12 : 10			Case MV	Case MV-g			
13 : 20-14 : 50			Case NV			Case NV	
15 : 20-16 : 50							
	10/29	10/30	10/31	11/1	11/2		
8 : 50-10 : 20		Case MV-g					
10 : 40-12 : 10				Case MV	Case MV-g		
13 : 20-14 : 50				Case NV			
15 : 20-16 : 50							



**Fig. 1 The plan of the experimental room**



Fig. 2 Experiment without greening



Fig. 3 Experiment with greening

実験のタイムスケジュールを Fig. 4 に示す。入室後実験説明をし、個人属性のアンケートを行った。それらの時間を含め、30 分間の安静時間を設けた。また、安静時間の初めの 10 分間でパネルには俳句を作成させた。安静後、室内環境に関するアンケートを行い、集中力を測る d2 テスト (作業 A) を 6 分間実施した。d2 テストの作業性に関するアンケートを行い、生産力テスト (作業 B) を 10 分間実施した。その後、生産力テストの作業性に関するアンケートを行い、グループワーク (作業 C) を 15 分間実施した後、グループワークに作業性に関するアンケートを行い実験終了とした。

実験時の物理環境測定項目を Table 3 に示す。CO<sub>2</sub> 濃度・温度・湿度はパネルの作業机机上面で測定した。風速は各パネル近傍 FL+1100 mm で 4 点に加え、窓側パネル 1 名の足元高さ FL+100 mm で 1 点、各窓・扉の上下左右の中央点で 1 点ずつの計 8 点とした。騒音と PMV は FL+1100 mm とした。

心理評価項目を Table 4 に示す。自然換気と室内緑化が在室者の快適性や作業性に与える影響を調査するために、温冷感や気流感等自然換気に関連した項目だけでなく、においや明るさ、音等の自然換気に伴うと思われる環境特性、また室内緑化の影響などによる実験室内の印象、作業に対する項目などを調査した。パネルの状態をみるために、自覚症状調べ 25 項目<sup>2)</sup>を採用した。

2. 物理環境測定結果

Fig.5 に各条件の PMV、騒音レベル、照度、CO<sub>2</sub> 濃度、温度、相対湿度及び風速の経時変化を 1 分平均値にて示す。Fig.5 (i) に示す PMV は自然換気が行われていない条件 MV、条件 MV-g では常に上昇傾向にあり、自然換気が行われている条件 NV、条件 NV-g は変動が小さかった。自然換気による気流の有無により差が生まれたと考えられる。Fig.5 (ii) に示す騒音は作業で音が発されない時間帯における騒音レベルの下降幅が自然換気が行われていない条件 MV、条件 MV-g に比べて自然換気が行われている条件 NV、条件 NV-g では小さかった。これより、窓を開けることにより外部音が入っていることで騒音レベルが上がると考えられる。Fig.5 (iii) に示す照度は条件 NV が全体の中では一番大きな値を示しており、1750lx 程度であった。次いで条件 MV が 1350lx 程度であった。条

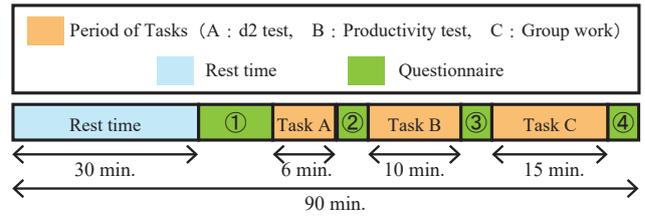


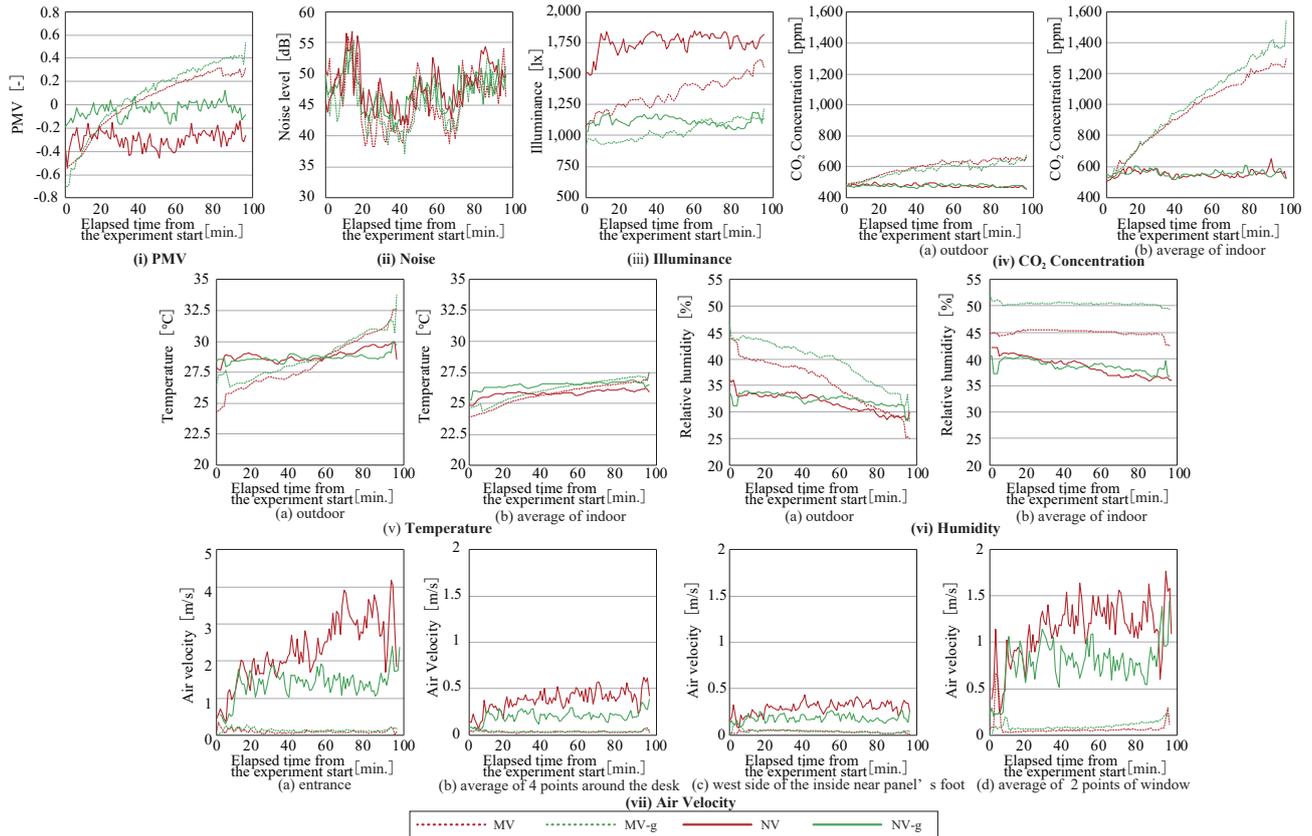
Fig. 4 Timetable of the experiment

Table 3 Measurement items of physical environments

Contents	Device
CO <sub>2</sub> Concentration, Temperature, humidity	T & D Co., TR-76Ui
Illuminance	Co., TR-74Ui
Air velocity	KANOMAX JAPAN Inc., Climomaster anemometer MODEL6501series, Anemomaster anemometer SYSTEM6244, Air Flow Transducer Model6333
Noise	RionCo., L-52
PMV	Kyoto Electronics Manufacturing Co., Am-101

Table 4 Contents of questionnaire

Contents of Questionnaire	scale	Questionnaire No.						
		①	②	③	④			
Environmental characteristics of the room	Sensitivity	Brightness of the whole room	7pts.	Bright~Dark	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Thermal	7pts.	Cold~Hot	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Dryness of the air	7pts.	Humid~Dry	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Freshness of the air	7pts.	Fresh~Stuffy	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Sound	7pts.	Noisy~Quiet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Degree of sensitivity	Current of the air	4pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Direct sunlight	4pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Brightness of the nature sunlight	4pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Comfort	Odor	4pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Odor	7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Current of the air		7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Brightness		7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Sound		7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Thermal comfort		7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Satisfaction	Overall comfortableness	7pts.	Comfortable~Discomfortable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Brightness	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Thermal environment	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Air quality	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Current of the air	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Sound	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Surroundings	Overall comfortableness	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Liveliness	7pts.	Lively~Inert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Esthetics	7pts.	Refined~Unrefined	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Openness	7pts.	Opened~Closed	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Familiarity	7pts.	Familiar~Unfamiliar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Calmness	7pts.	Calmned~Uncalmned	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Satisfaction	Overall satisfaction of scenery	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Overall satisfaction of impressions	7pts.	Satisfied~Unsatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Thoughts	About current of the air	Free writing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	About sound	Free writing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	About brightness	Free writing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	About odor	Free writing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	About scenery	Free writing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Indoor greening	Amount of plant	10pts.	Nogreening~Numerous	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Plant desirability	10pts.	Undesirable~Desirable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Feeling Nature	10pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Overall	Natural Factors (Thermal, Humidity, Sound, Current of the air, vision, odor, Brightness)	10pts.	Sensitive~Insensitive	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Degree of fatigue	7pts.	Not tired at all~Very tired	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Degree of relaxation	7pts.	Relaxed~Stressed	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Easeiness of tasks	Subjective checkup	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Easiness of relaxation	7pts.	Relaxed~Stressed	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Easiness of tasks	7pts.	Easy~Difficult	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Mood	Concentration on the tasks	7pts.	Easy~Difficult	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Imagination	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Idea	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Amount of speech	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Conversations with other participants	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Cooperation with other participants	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Lively discussions	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Easiness of talking	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Active participation	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Obstacles due to participation of acquaintances	5pts.	Applicable~Not applicable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Acceptability	Tasks	4pts.	Acceptable~Unacceptable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Usability of the work	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Impression of the room	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Amount of plant	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Plant desirability	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Feeling nature	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Brightness	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Sound	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Thermal environment	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Fresh air	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Importance	Current of the air	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Odor	7pts.	Important~Unimportant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	



**Fig. 5 Time variation of PMV, noise, temperature, humidity, air velocity and illuminance in each condition of MV, MV-g, NV, NV-g**

件 MV-g と条件 NV-g は同程度で 1100lx 程度であった。これは、実験日ごとによる天気の影響したと考えられる。**Fig.5 (iv)** に示す室内 CO<sub>2</sub> 濃度は条件 MV、条件 MV-g では終始上昇し、条件 NV、条件 NV-g では変動が小さかった。これにより、機械換気と自然換気の換気量に差があるということがわかる。**Fig.5 (v)** に示す室内温度は条件によらず 23.5°C ~ 27.5°C に収まっていた。**Fig.5 (vi)** に示す室内湿度は条件 MV、条件 MV-g ではほとんど変化しなかった。これは、窓を閉めていたことが起因すると考えられる。**Fig.5 (vii)** に示す風速は、自然換気が行われていない条件 MV、条件 MV-g ではほとんど気流は計測されなかった。自然換気が行われている条件 NV、条件 NV-g では気流がみられ、条件 NV では 0.4m/s 程度、条件 NV-g では 0.2m/s 程度であった。

### 3. 室内環境に関する心理評価の結果と考察

心理評価の結果を **Fig.7~Fig.12** に示す。

#### 3.1 自然換気による差がみられた項目

**Fig.7** に統計検定の結果、自然換気による差がみられた項目を示す。**Fig.7(i)** より、自然換気をすることにより、温冷感が下がり温熱環境の快適さと満足度が向上する傾向が示された。これは **Fig.5 (i)** で示した通り、自然換気をすることで発生する気流により PMV の変動が小さかったことが原因であると考えられる。**Fig.7(ii)** (a) より、窓を開けた条件では気流感が発生していたことがわ

かる。一方で、**Fig.7(ii)** (b) (c) より、気流に対する快・不快度や満足度に大きな差はなかった。**Fig.7(iii)** より、空間に開放的な印象を感じる度合いに、自然換気の有無による有意差がみられた。これより、自然換気で窓を開けることで気流や音などの影響により開放的な印象になることが示唆された。**Fig.7(iv)** より、自然を感じる要因として温度、湿度、音、気流の度合いに自然換気の有無による有意差がみられた。このことから、自然換気をすることにより多くの環境要素を感じるという傾向が示された。

#### 3.2 室内緑化による差がみられた項目

**Fig.8** に統計検定の結果、室内緑化による差がみられた項目を示す。**Fig.8 (a)** (b) (c) より植物の量に差がある項目では条件 MV-g と条件 NV-g では、自然を感じる度合いが向上し、**Fig.7** に示した要素より自然を感じる度合いが大幅に向上していることがわかる。これより、在室者は視界から自然を取り入れることにより、自然を感じやすいという可能性が示唆された。**Fig.5(iii)** より、条件 MV-g と条件 NV-g では室内照度平均が小さいということがわかるが、**Fig.8 (d)** では条件 MV-g と条件 NV-g で光で自然を感じる度合いが向上しているということがわかる。これより、室内緑化により光で自然を感じる度合いが向上していることがわかる。植物があることによって、在室者にとって室の光が増しているように感じる可能性が示唆された。

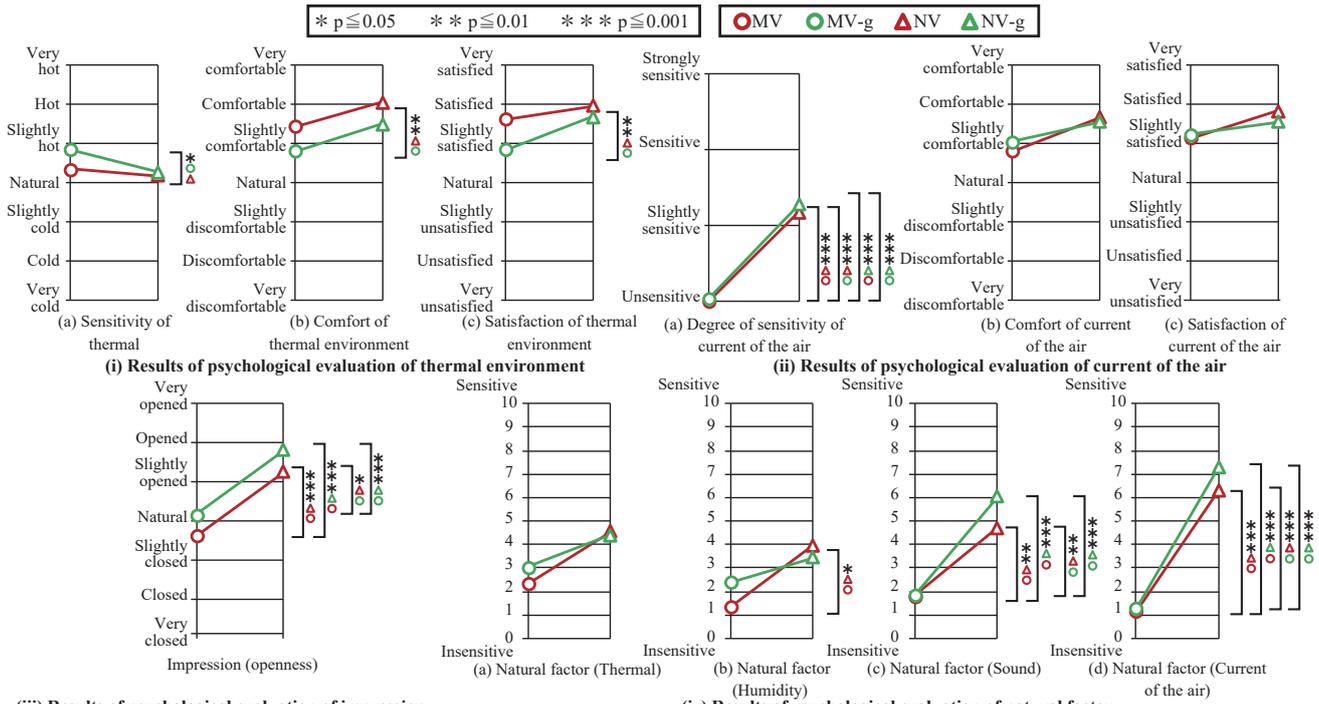


Fig. 7 Psychological evaluation results with differences in natural ventilation

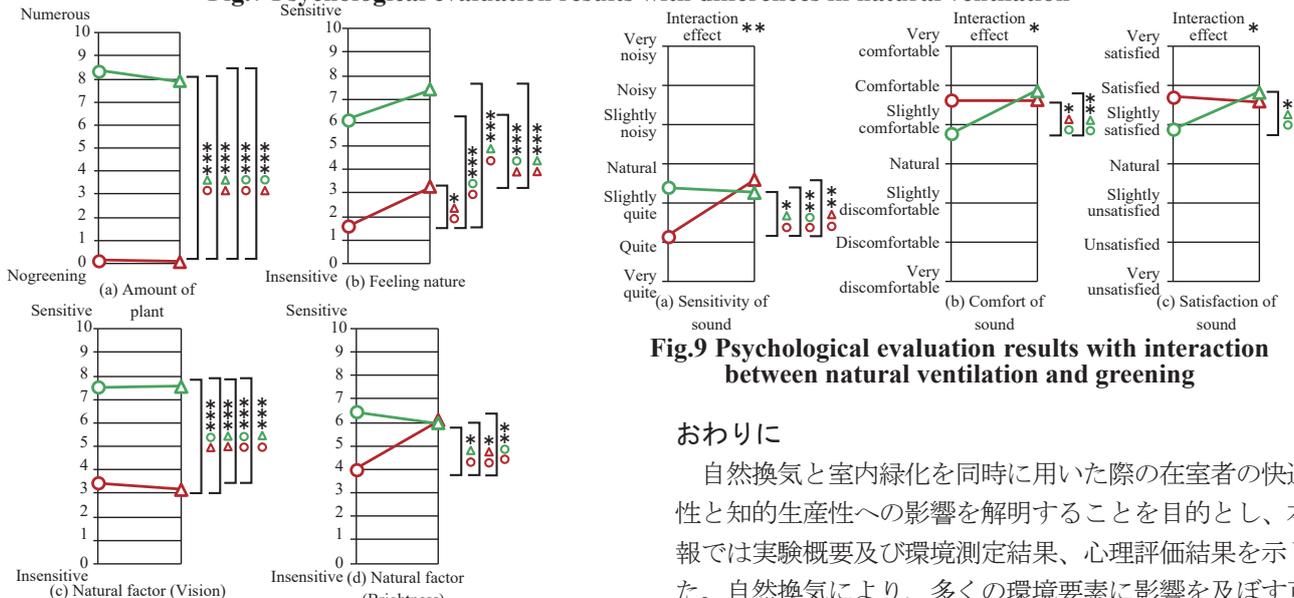


Fig. 8 Psychological evaluation results with differences in greening

3. 3 自然換気と室内緑化の交互作用がみられた項目

Fig. 9 に統計検定の結果、自然換気と室内緑化の交互作用がみられた項目を示す。Fig. 5(ii) では自然換気の場合 NV と条件 NV-g で騒音レベルが上がっていると述べたが、Fig. 9 (a) をみると条件 MV-g が条件 NV と条件 NV-g と同程度の音環境となっている。また、Fig. 9 (b) (c) をみると、条件 MV-g において音環境の快・不快度と満足度がともに低下していることがわかる。このことから、室内緑化は自然換気と複合せず用いると、音環境の快適性が低下する可能性が示された。これは、室内に植物があることで、在室者が小さな作業音などにも敏感になってしまい、快適性が損なわれるという可能性が考察される。

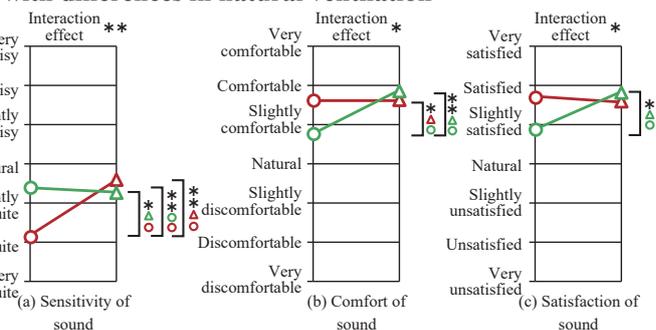


Fig. 9 Psychological evaluation results with interaction between natural ventilation and greening

おわりに

自然換気と室内緑化を同時に用いた際の在室者の快適性と知的生産性への影響を解明することを目的とし、本報では実験概要及び環境測定結果、心理評価結果を示した。自然換気により、多くの環境要素に影響を及ぼす可能性が示唆された。室内緑化によ在室者は視覚から多くの自然を感じる可能性が示された。室内緑化のみを用いた室では、音環境の快適性を低下させる可能性が示された。しかし、自然換気と複合して用いることで快適性が維持される可能性も示された。次報にて、作業結果と作業性に関する心理評価の結果を示す。なお、本研究は大阪大学工学研究科倫理委員会の承認を得て実施した。

—謝辞—

本研究は、株式会社大林組との共同研究であり、関係者各位に謝意を表します。

—参考文献—

- 1) 大野ら：自然換気時の RC 集合住宅と伝統的町家における居心地に関する研究 (その 3) 環境の違いに対する心理・生理学的検討, 令和 5 年 (第 53 回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2023, 3
- 2) 酒井一博：日本産業衛生学会産業疲労研究会撰「自覚症しらべ」の改訂作業 2002, 労働の科学, pp. 295-298, 2002

### 自然換気時及び室内緑化が在室者の快適性・知的生産性に及ぼす影響 (その2) 知的生産性に関する検討

## The Effects of Natural Ventilation and Indoor Greening on the Comfort and Intellectual Productivity of Occupants (Part 2) Consideration on Intellectual Productivity

○宗 菜津未 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (東洋大学)  
山澤 春菜 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学) 長續 仁志 (大林組) 射矢 航我 (大阪大学)  
Natsumi SO<sup>\*1</sup> Toshio YAMANAKA<sup>\*1</sup> Narae CHOI<sup>\*2</sup> Haruna YAMASAWA<sup>\*1</sup>  
Tomohiro KOBAYASHI<sup>\*1</sup> Hitoshi NAGATSUGU<sup>\*3</sup> Kouga IRUYA<sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup> Osaka University <sup>\*2</sup> Toyo University <sup>\*3</sup> Obayashi Corporation

Natural ventilation in an office space can have an effect not only on ventilation but also on the psychology and intellectual productivity of the occupants. Opening a window generates air currents, allows people to hear outside sounds, smells, and look at the outside scenery. By creating a connection to the outside, it is stimulating for the occupants. On the other hand, even without natural ventilation, indoor greening can make occupants feel nature. Therefore, this study examined the effects of combining natural ventilation and indoor greening on psychological evaluation and intellectual productivity.

#### はじめに

前報でも述べた通り、自然換気と室内緑化それぞれが与える影響についての研究は多く行われている一方で、2つの要素を組み合わせた事例は少ない。そこで本研究では、自然換気と室内緑化の複合効果が在室者に与える影響について被験者実験で調査した。前報では<sup>1)</sup>、本研究にて行った実験の概要と心理評価の結果について報告した。本報では、室内環境が作業成績や作業に関連する心理評価に与える影響について報告する。

#### 1. 実験概要・測定項目

Fig.1 に実験スケジュールを示す。実験概要や測定項目については前報で述べた通りである。

#### 2. 各作業の概要

作業 A の d2 テスト<sup>2)</sup> の用紙の例を Fig.2 に示す。d2 テストは上下に 1~4 個の点が付いた d と p の 47 文字、14 行で構成されており、パネルは各行 12 秒で点が 2 個付いた d の文字のみに斜線を引く。成績は、達成率 (総回答数 ÷ 総数) 及びミス率 ((見落とし数 + 誤答数) ÷ 総回答数) の 2 項目で評価した。本実験では d2 テストを 2 枚連続で行い、次の用紙を準備す

る時間を 12 秒に設定した。なお、成績を集計するにあたって、ミス率の高さが上位 5% のパネルの成績は除外した。

作業 B の生産力テスト<sup>3)</sup> の回答用紙の例を Fig.3 に示す。「新しい〇〇 (題) を考えてください」という形式で出題し、制限時間 10 分で思いつく限りの案を箇条書きで回答させた。採点は実験者の計 2 名で行い、1つの回答に対して「新奇性」「適切性」の 2 項目を 0~4 の 5 段階で評価した。1つの案に対する「新奇性」「適切性」の得点の合計を算出したのち、回答された案の数だけ加点方式で足し合わせた。その後、採点者 2 名の平均得点を算出した。1枚の回答用紙に「ノート」「皿」「てぶくろ」の 3 題あるため、3つの題の得

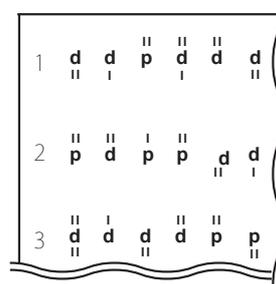


Fig.2 Paper of Task A

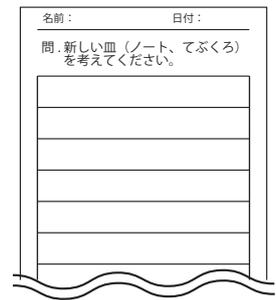


Fig.3 Paper of Task B

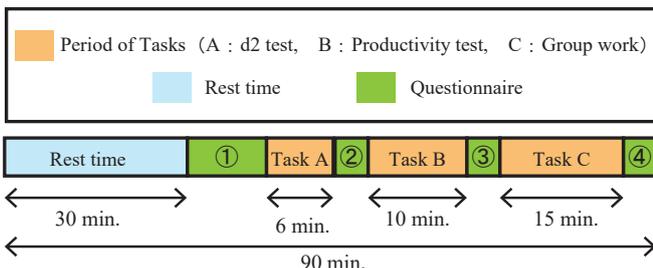


Fig.1 Timetable of the experiment

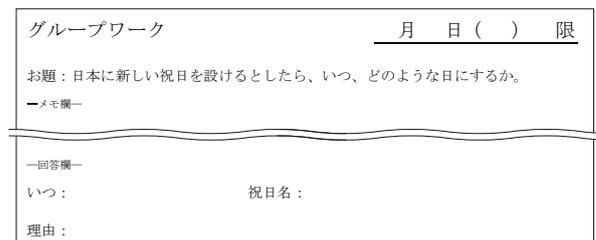


Fig.4 Paper of Task C

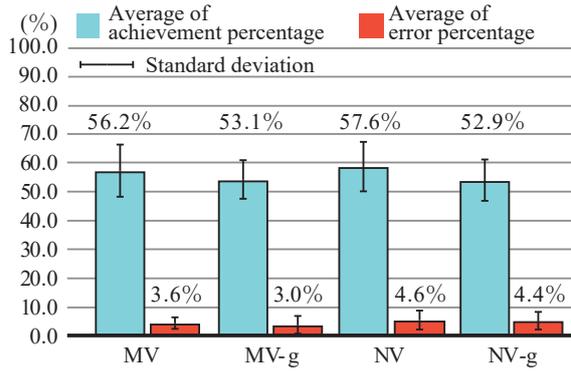


Fig.5 Average score of Task A (d2 test)

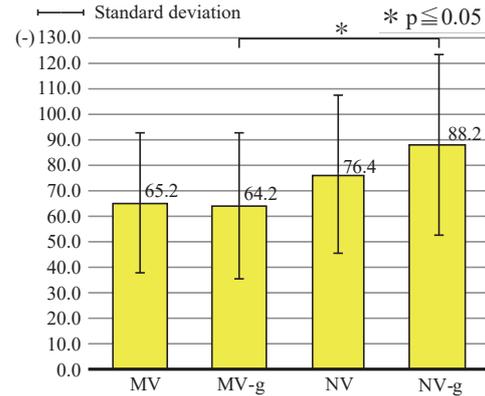


Fig.8 Average score of Task B (productivity test)

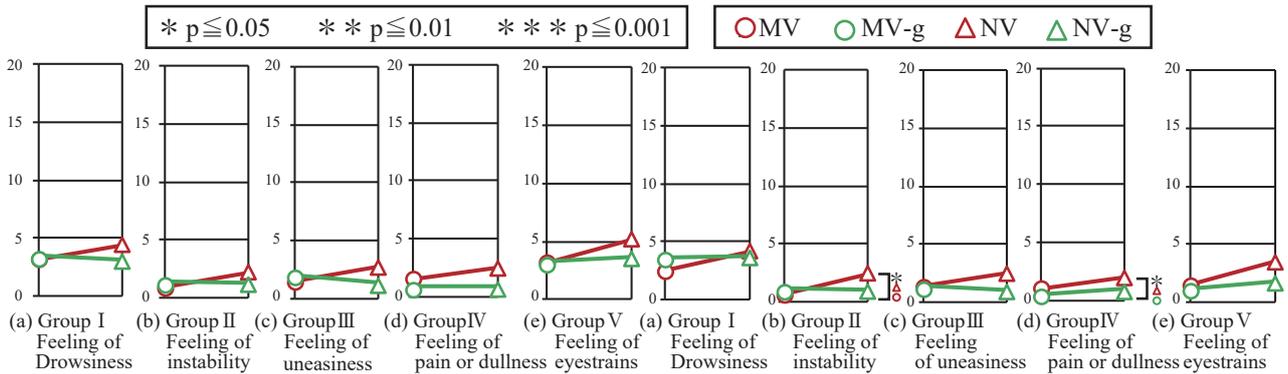


Fig.6 Result of "Jikaku-shou shirabe" after Task A (mean value of all panels)

Fig.9 Result of "Jikaku-shou shirabe" after Task B (mean value of all panels)

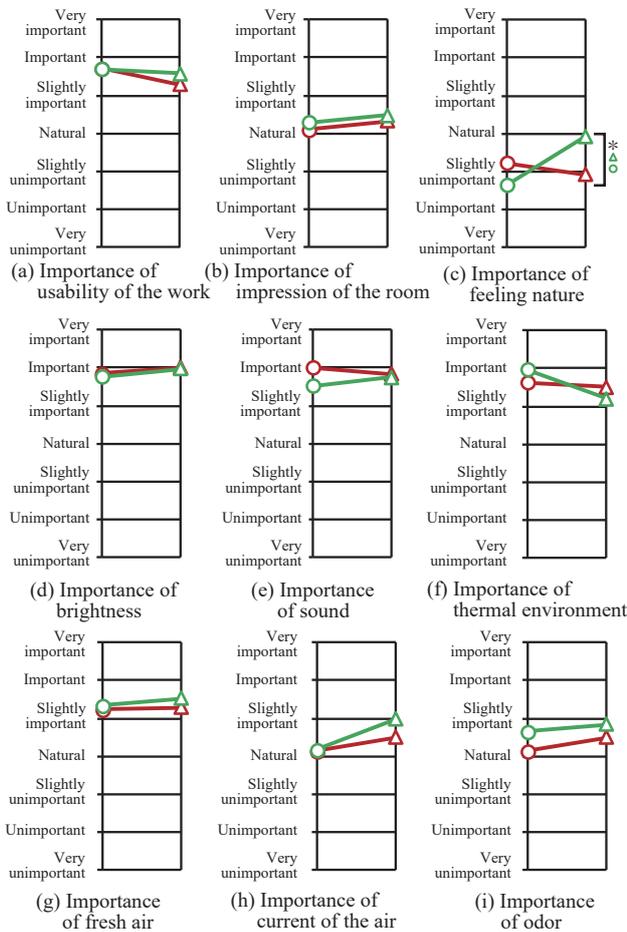


Fig.7 Result of subjective evaluation after TaskA (mean value of all panels)

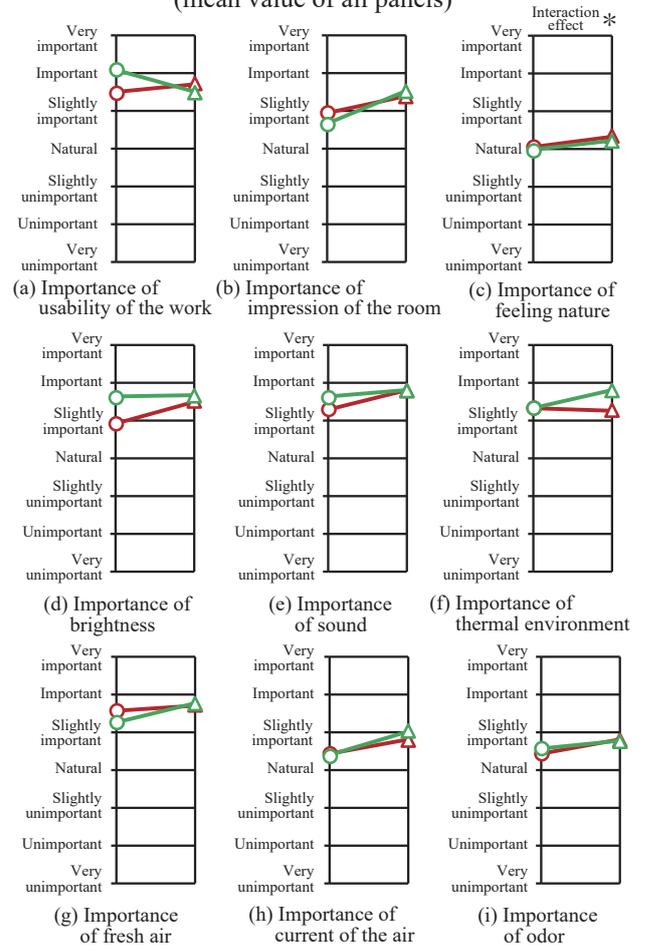


Fig.10 Result of subjective evaluation after TaskB (mean value of all panels)

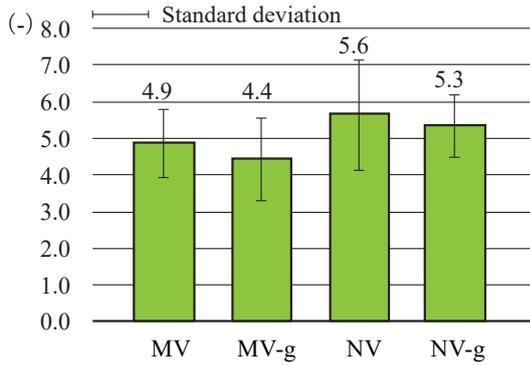


Fig.11 Average score of Task C (mean value of all panels)

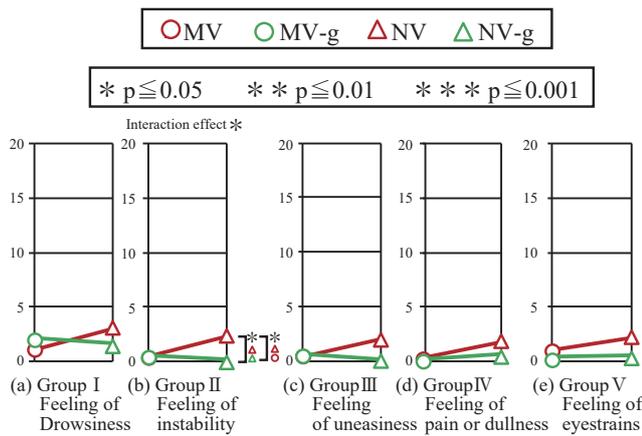


Fig.12 Result of "Jikaku-shou shirabe" after Task C (mean value of all panels)

点の合計点を 1 人当たりの総得点とした。

作業 C のグループワーク<sup>4)</sup>の回答用紙の例を Fig.4 に示す。グループワークでは、「日本に新しい祝日を設定したらいつどんな日が良いか」という題に対して、15 分間パネル全員で話し合い、最終的に 1 つの案を回答させた。回答には「いつ」「何の日」「その日を設定した理由」の 3 点を回答させた。採点は生産力テストと同じ方法で行った。

### 3. 作業結果と作業後の心理評価の考察

#### 3.1 作業 A (d2 テスト)

条件ごとの d2 テストの達成率とミス率の平均値を Fig.5 に示す。達成率は高いほど、ミス率は低いほど良いが、どちらの項目においても有意差は見られなかった。この理由として、d2 テストは手元に集中して行う作業のため、室内の環境の差異はあまり影響しなかったことが考えられる。

d2 テスト後の自覚症調べの条件ごとの平均値を Fig.6 に、その他の心理評価の条件ごとの平均値を Fig.7 に示す。Fig.6 より、d2 テスト後の自覚症しらべの結果に有意差は無かった。Fig.7 (c)「滞在空間に自然を感じる度合いの重要度」の条件 MV-g と条件 NV-g の間に有意差が見られた。また分散分析の結果、自然換気条件と室内

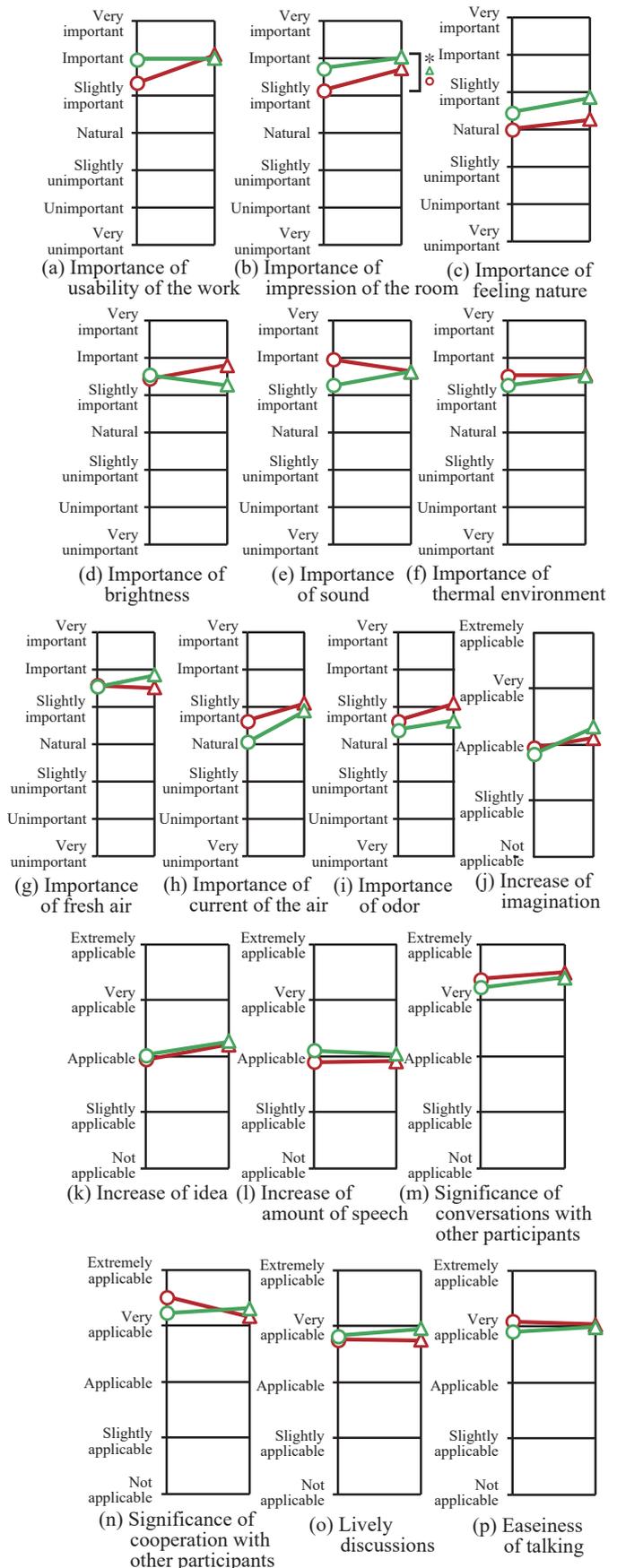


Fig.13 Result of subjective evaluation after Task C (mean value of all panels)

緑化の交互作用効果が見られた。このことから、自然換気条件と室内緑化の片方だけでは影響を与えない一方で、同時に作用することで相乗効果を生み、より重要と感じさせる可能性が示唆された。(h)「風の感じ方の重要度」の分散分析の結果において、自然換気の有無に有意差が見られた。このことから、風を感じる場合は、「風の感じ方の重要度」が高まる可能性が示された。

### 3.2 作業B (生産力テスト)

条件ごとの生産力テストの総得点の平均値を Fig.8 に示す。自然換気を行わなかった条件 MV と条件 MV-g で総得点が低く、自然換気を行った条件 NV と条件 NV-g で総得点が高かった。さらに、自然換気を行った条件の中でも、室内緑化を施した条件 NV-g において最も総得点が高く、最も得点差の大きかった条件 MV-g と条件 NV-g の間には有意差が見られた。この理由として、生産力テストは想像力を必要とする作業のため、自然換気による触覚、聴覚への刺激や、室内緑化による視覚への刺激がパネルの思考に良い影響を与えた可能性が考えられる。

作業B後の自覚症調べの条件ごとの平均値を Fig.9 に、その他の心理評価の条件ごとの平均値を Fig.10 に示す。Fig.9 (b)「II群 不安定感」では条件 MV と条件 NV 間、(d)「IV群 だるさ感」では条件 MV-g と条件 NV 間に有意差が見られた。また分散分析の結果、(d)「IV群 だるさ感」においては室内緑化の影響が見られた。このことから、室内緑化が心身の状態に高評価を与える可能性が示唆された。Fig.10 の項目では有意差は見られなかった。このことから、室内環境は生産力テストの成績には影響を及ぼすが、心理にはあまり影響を及ぼさない可能性が示された。

### 3.3 作業C (グループワーク)

条件ごとのグループワークの得点の平均値を Fig.11 に示す。平均値の多少の差は見られるものの、有意差は見られなかった。原因として、全 29 回答のうち 24 回答は 6 月に設定しており、梅雨や水、夏至に関する日など似通った回答が多かったことが挙げられる。さらに、成績集計の方式にも改善の余地はあると考える。

作業C後の自覚症調べの条件ごとの平均値を Fig.12 に、その他の心理評価の条件ごとの平均値を Fig.13 に示す。Fig.12 (b)「II群 不安定感」の条件 MV と条件 NV の間、条件 NV-g と条件 NV の間に有意差が見られた。また分散分析の結果、室内緑化の影響と、自然換気と室内緑化の交互作用効果が見られた。このことから、室内緑化はグループ中の心身の状態に良い影響を与え、自然換気が加わることでさらに良い影響を与える可能性が示唆された。Fig.13 (b)「空間の印象の重要度」の条件 MV と条件 NV-g の間に有意差が見られた。また、分散分析の結果、自然換気の影響と室内緑化の影響のそれ

ぞれに有意差が見られた。このことから、グループワークにおいては、自然換気や室内緑化によってもたらされる印象に意識が向かい、重要と感じる可能性が示された。Fig.13 (j) ~ (p) の項目はグループワークを対象にした設問であり、グループワーク中の印象に関する項目である。どの項目においても有意差は見られず、グループワークの過程に室内環境は大きく影響していない可能性が示唆された。この原因として、多くのグループが同じような話し合いの内容を行っていたのが挙げられるため、適切な題の設定によって改善される可能性がある。

### おわりに

本報では、知的生産性と各作業後の心理評価の考察を行った。知的生産性に関しては、d2 テストのような、周囲を見ずに手元に集中して行う作業では、室内の環境は成績に影響しない可能性が示唆された。一方で、心理評価では「滞在空間に自然を感じる度合いの重要度」に交互作用効果が見られたため、自然換気と室内緑化を組み合わせることで、より重要であると感じさせる可能性が示された。生産力テストのようなじっくり考える作業では、自然換気や室内緑化による刺激が思考を促進し、成績を向上させる可能性が示された。また、室内緑化が心身の状態に高評価を与える可能性が示唆された。グループワークのような、他者とコミュニケーションをとりながら行う作業では、本実験においては有意差が見られなかった。しかし、成績集計や題の設定に改善の余地があるため、今後の課題である。一方で、自覚症しらべの「不安定感」では室内緑化が良い影響を与え、自然換気が加わることでさらに良い影響を与える可能性が示唆された。「空間の印象の重要度」には条件 MV と条件 NV-g の間に有意差があり、心理評価には影響を及ぼす可能性が示された。

今後は、作業成績の評価により公平性を持たせる方法を検討し、分析を進めていく予定である。なお本研究は、大阪大学工学研究科倫理委員会の承認を得て実施した。

### 一謝辞一

本研究は、株式会社大林組との共同研究であり、関係者各位に謝意を表します。

### 一参考文献一

- 1) 射矢ら：自然換気及び室内緑化が在室者の快適性・知的生産性に及ぼす影響(その1) 環境条件と心理評価に関する検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表論文集, 2024.3 (掲載予定)
- 2) 平井ら：Brinckenkamp, R., Zillmer, E.: d2 Test of Attention, Hogrefe & Huber Publishers, 1998
- 3) 黒木ら：高層オフィスビルにおける分散型ワークスペースの知的生産性・快適性に関する研究(その3) 各ワークスペースでの知的生産性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.47-48, 2014
- 4) 掛井ら：ICTを導入した学習環境においてディスプレイの配置がグループワークへ与える影響 PBL のための学習環境の開発に関する研究(その2) 日本建築学会計画系論文集第 83 巻第 753 号, 2018.11

知覚空気汚染質に対する嗅覚の順応・回復過程に関する基礎的研究

(その1) 体臭に対する嗅覚順応の変化特性

Basic Study on Olfactory Adaptation and Recovery Process to Perceived Air Pollutants

(Part1) Olfactory Adaptation to Body Odor

○福本 柊一郎 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学) 山澤 春菜 (大阪大学)  
 竹村 明久 (摂南大学) 小林 知広 (大阪大学) 川口 由莉 (大阪大学)

Shuichiro FUKUMOTO\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Narae CHOI\*<sup>2</sup> Haruna YAMASAWA\*<sup>1</sup>

Akihisa TAKEMURA\*<sup>3</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Yuri KAWAGUCHI\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup>Osaka University \*<sup>2</sup>Toyo University \*<sup>3</sup>Setsunan University

Body odor, the major indoor odor, is the reference value for calculating the required ventilation in a room. However, the olfactory response of body odor changes over time due to the phenomenon of olfactory adaptation, in which the sense of smell becomes weaker after prolonged sniffing of an odor. In this study, we conducted an experiment using carbon dioxide concentration conditions to investigate the characteristics of the adaptation and recovery process of the sense of smell in body odor. As a result, the olfactory adaptation characteristics could be classified into several types depending on the panel and carbon dioxide concentration conditions.

1. はじめに

人が室内において日常的に曝露されている代表的な臭気のひとつが体臭である。体臭濃度の代替指標とされる室内のCO<sub>2</sub>濃度は必要換気量を算定時の基準として採用されており、建築物衛生法では、在室者の呼気によって増加する室内CO<sub>2</sub>濃度を1000ppm以下と定めている。また、建築物衛生法による規定は外来者が入室したときに感じる臭気質に対する評価を参考に決定されている。しかし、嗅覚に関しては、長時間同じにおいを嗅ぎ続けると次第ににおいを弱く感じ

るようになる順応現象が生じることが明らかになっており<sup>1)</sup>、必要換気量を設定する際の室内CO<sub>2</sub>濃度1000ppmという基準は場合によっては過剰な換気を促しかねない。したがって、体臭への長時間曝露時の嗅覚応答特性を調査することは、快適かつ省エネルギーな室内環境設計の構築に有用であるといえる。

そこで、本研究では、体臭に対する嗅覚順応・回復の変化特性を把握するため、被験者実験にて嗅覚に関する経時的な主観評価を測定した。

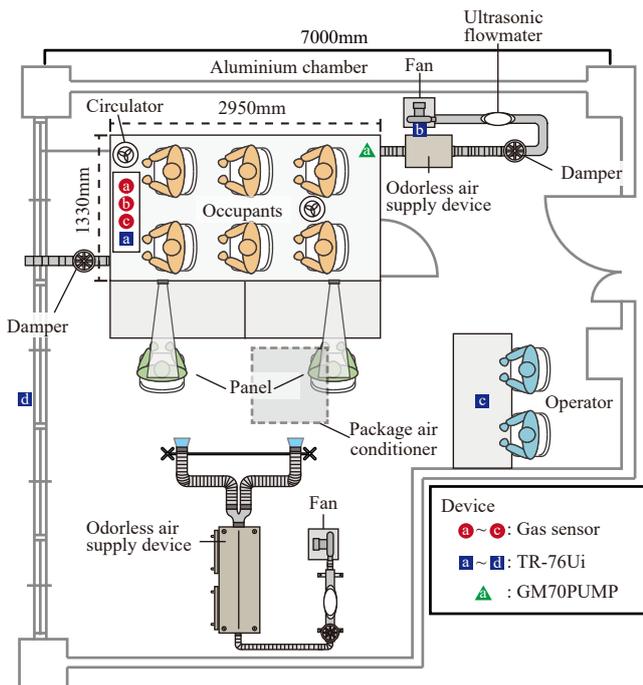


Fig.1 Experiment room

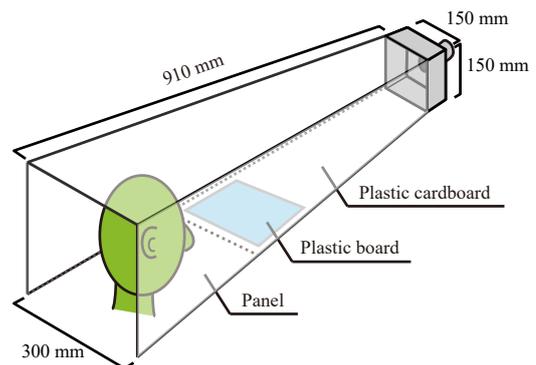


Fig.2 Detail of sniffing Duct

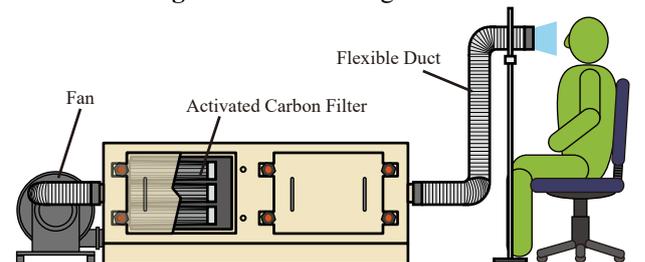


Fig.3 Odorless air supply device

Table 1 Date of experiment and participating panels

Middle concentration case					High concentration case				
Date	Time	Panel	Average of CO <sub>2</sub> concentration	Flow rate per person	Date	Time	Panel	Average of CO <sub>2</sub> concentration	Flow rate per person
2023/11/24	10:40~12:30	1,2	2676.6 ppm	6.65 m <sup>3</sup> /h	2023/12/5	14:30~16:20	6,11	5364.4 ppm	3.43 m <sup>3</sup> /h
	15:30~17:10	3,4	3031.1 ppm	6.53 m <sup>3</sup> /h	2023/12/6	10:45~12:40	5,7	4893.4 ppm	3.42 m <sup>3</sup> /h
2023/12/12	10:15~12:00	5,6	2704.0 ppm	7.15 m <sup>3</sup> /h	2023/12/8	10:45~12:35	1,10	4717.8 ppm	3.42 m <sup>3</sup> /h
2023/12/14	10:10~12:00	7,8	2704.4 ppm	7.08 m <sup>3</sup> /h	2023/12/14	14:45~16:40	4,9	5259.3 ppm	3.58 m <sup>3</sup> /h
2023/12/19	10:40~12:20	9,10	2685.1 ppm	6.62 m <sup>3</sup> /h	2023/12/15	10:45~12:35	3,8	4906.5 ppm	3.58 m <sup>3</sup> /h
	14:40~16:40	11,12	3023.5 ppm	6.67 m <sup>3</sup> /h	2023/12/18	14:15~16:05	2,12	4996.5 ppm	3.60 m <sup>3</sup> /h

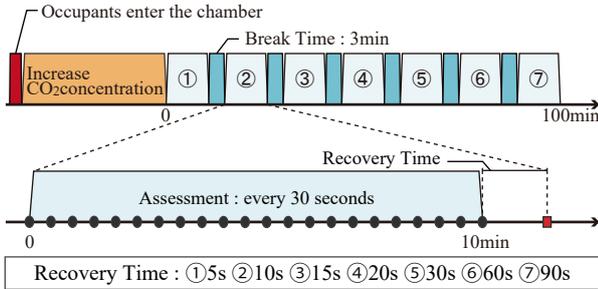


Fig.4 Experimental time schedule

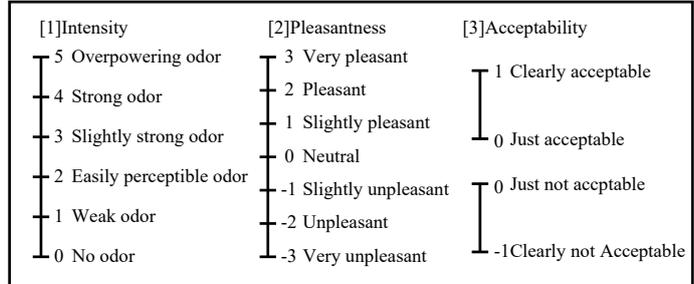


Fig.5 Subjective evaluation scales

2. 実験概要

本実験は2023年11月～12月の期間、大阪大学吹田キャンパス AR 棟 725 室（以下、実験室）にて行った。実験室平面図を Fig.1 に示す。

実験室には容積 7.65m<sup>3</sup> のアルミチャンバー（以下、チャンバー）を設置し、臭気発生は全てチャンバー内で行った。本実験では、体臭発生源として在室者 6 名をチャンバー内に入室させ、体臭濃度を均一にするため、サーキュレーターを 2 台稼働した。またチャンバー内には無臭空気による給気を行った。

パネルはチャンバーに接続した正四角錐状の箱（以下嗅ぎダクト）に頭を入れ、におい評価を行う。嗅ぎダクトの詳細を Fig.2 に示す。パネルが嗅覚の回復を行う際は、実験室内に設置した無臭空気供給装置を使用した。無臭空気供給装置の詳細を Fig.3 に示す。

実験中は Fig.1 に示す測定点において小型 CO<sub>2</sub> 温度計（T&D 社製、TR-76Ui）による CO<sub>2</sub> 濃度及び温湿度の測定、フィガロ技研製 TGS2600、TGS2602、TGS2603 によるガス濃度の連続測定を行った。

パネルは、非喫煙者である本学学生 12 名（男性 10 名、女性 2 名、21～25 歳）を採用し、パネル全員に嗅覚試験（T&T オルファクトメータ）を行い、正常な嗅覚を有すると認められた。パネルには実験参加時間に応じて適切な報酬を支払った。

2.1 実験条件

本実験では、体臭濃度の代替指標とされる室内 CO<sub>2</sub> 濃度について、労働衛生安全規則により定められた許容濃度 5000 ppm を参考に条件を決定した。チャンバーへの給気量を調整することで体臭濃度による条件を設定し、在室者一人当たり約 7m<sup>3</sup>/h で換気し、室内 CO<sub>2</sub> 濃度を 2650 ppm 程度で定常させる中濃度条件、一人当たり約 3.5m<sup>3</sup>/h で換気し、室内 CO<sub>2</sub> 濃度を 5000 ppm 程度で定常させる高濃度条件の 2 条件とした。

各条件を行った実験日程の詳細を Table1 に示す。

2.2 実験手順

実験のタイムスケジュールを Fig.4 に示す。初めに、在室者をチャンバー内に入室させ、実験条件の CO<sub>2</sub> 濃度で定常状態となった後、パネルは実験室内に入室し、におい評価を行った。本実験では嗅覚反応における順応及び回復過程に着目し、各過程における臭気評価の挙動を測定する。パネルは嗅ぎダクトに頭を入れ、10 分間で 30 秒ごとに計 21 回の評価を行った後、無臭空気供給装置から出る空気を指定秒数間嗅いで嗅覚の回復を行い、再び嗅ぎダクトの中に頭を入れて 22 回目の評価を行う。以上の工程で、嗅覚の回復時間をそれぞれ 5 秒、10 秒、20 秒、30 秒、40 秒、60 秒、90 秒の 7 段階で変更し、順応過程及び回復過程における嗅覚応答を測定する。また、回復時間を変更する各段階間には嗅覚の回復を行うためパネルに無臭空気供給装置から出る空気を 3 分間吸引させた。

実験中、パネルには嗅ぎダクトと無臭空気供給装置との移動間で可能な限り呼吸をしないことと、臭気を評価する際は鼻呼吸を行うことを指示した。

2.3 評価項目

評価項目は臭気強度（6 段階）、快不快度（7 段階）、受容度（二者択一）の 3 項目とした。パネルは評価用紙の各項目における数直線上の自由な位置に斜線を引き、斜線と各項目の最低評価からの距離で結果を算出した。評価項目の詳細を Fig.5 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 各パネルの臭気強度評価結果

臭気強度における各パネルの順応過程の評価平均値及び回復過程の評価を Fig.6 に示す。

順応過程における臭気強度変化について、齊藤ら<sup>2)</sup> はトリメチルアミンの持続提示による臭気強度の時間依存性から嗅覚特性による分類を行った。嗅覚特性による分類の傾向は、本実験における結果においても確認され、中濃度条件においてはパネル 2、3、5、6、7、

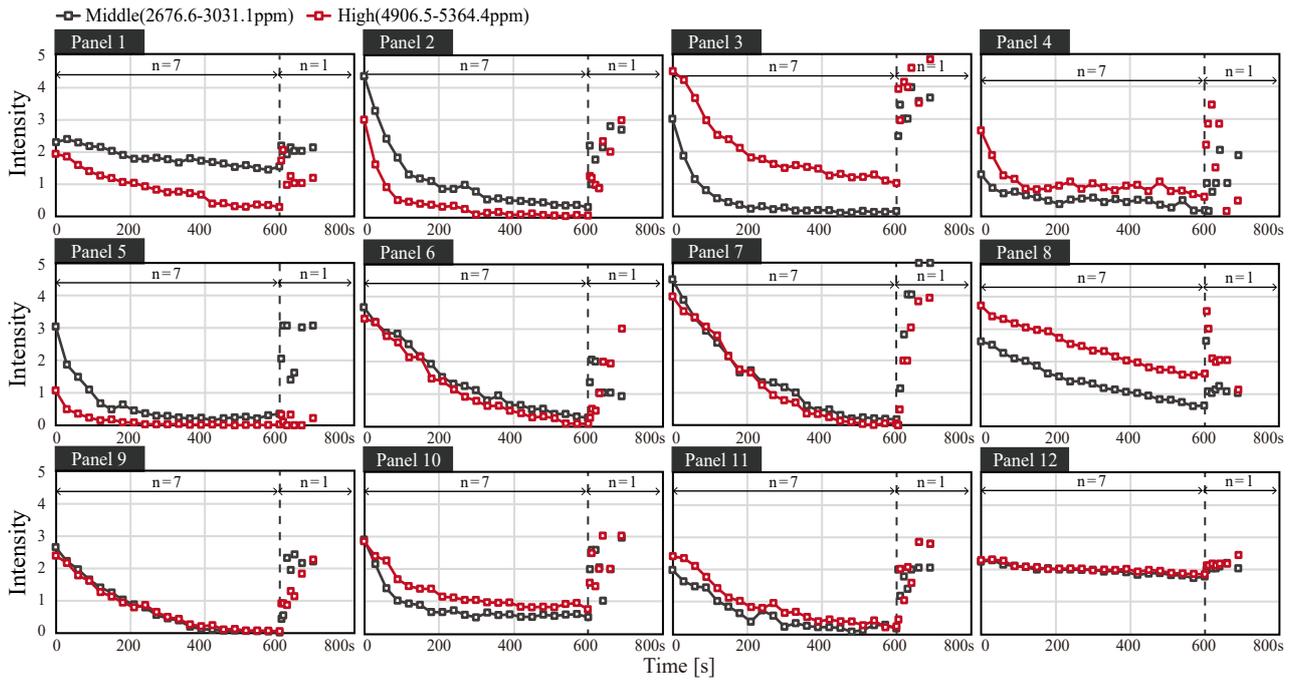


Fig.6 Odor intensity for Middle concentration case and High concentration case

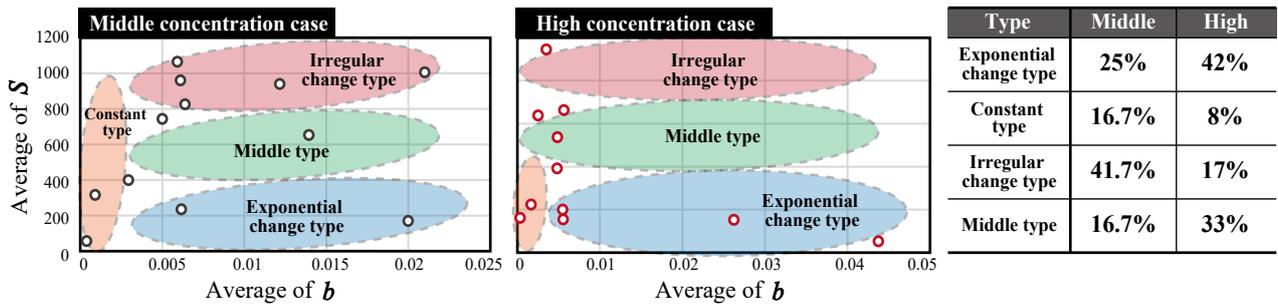


Fig.7 The relationship between average of  $b$  and average of  $S$

8、9、10、11に指数関数型、パネル1及びパネル12において不変型の傾向が見られた。また中濃度条件の回復過程においては、順応過程に比べて変動は大きいものの回復時間が長くなるにつれて臭気強度が上昇し、嗅覚が回復する傾向が多くのパネルに見られた。しかし、パネル1、6、8、9については回復過程において回復時間が短い段階で臭気強度が大きく上昇し、その後回復時間が増加しても臭気強度の大きな上昇は見られなかった。この傾向は回復過程においても指数関数型や不変型等の回復特性が存在することを示唆している。

条件間における比較では、中濃度条件よりも高濃度条件で高い臭気強度評価を行っているパネル、反対に中濃度条件で高濃度条件時よりも高い臭気強度を評価しているパネル、もしくは両条件で同程度の評価を行っているパネルが偏りなく見られ、換気量の増加によって体臭強度は必ずしも減少しない結果が得られた。この結果から、体臭の臭気強度評価に対して、湿度やパネルの体調といった体臭濃度以外の要因が影響を及ぼしたことが考えられる。

順応過程における評価特性の分類に関して、順応過程における評価は各評価時間において7回の評価の平

均値を示すため、特に変動型のパネルにおいては評価を平均することでその傾向が弱くなる可能性がある。そこで、長期的な臭気曝露により、臭気強度は指数関数的に減衰すると仮定し、Equation1に示す式における定数  $a$ 、 $b$  を各条件における7回の順応過程で最小二乗法により同定を行い、 $b$  の平均値  $\bar{b}$ 、残差平方和平均値  $\bar{S}$  を用いて嗅覚特性の分類を行う。

$$I(t) = a \cdot e^{-bt} \quad \text{Equation1}$$

各条件における  $b$  の平均値  $\bar{b}$ 、残差平方和平均値  $\bar{S}$  の関係と嗅覚特性の分類結果を Fig.7 示に示す。 $\bar{S}$  の値が大きいほど、近似式からの残差が大きく評価が変動していることを示しており、 $\bar{b}$  が大きく、 $\bar{S}$  が小さいほど Equation1 に近似しており、減衰型の特性を示す。中濃度条件では減衰型 25%、不変型 16.7%、変動型 41.7%、中間型 16.7%、高濃度条件では減衰型 42%、不変型 8%、変動型 17%、中間型 33% に分類できた。中濃度条件において最も多かった変動型に関しては平均値による結果からは見られなかったことから、嗅覚特性の分類において指数関数による近似式を用いた検討は有用であるといえる。また、体臭濃度条件によって嗅覚特性の分類構成が異なることから、

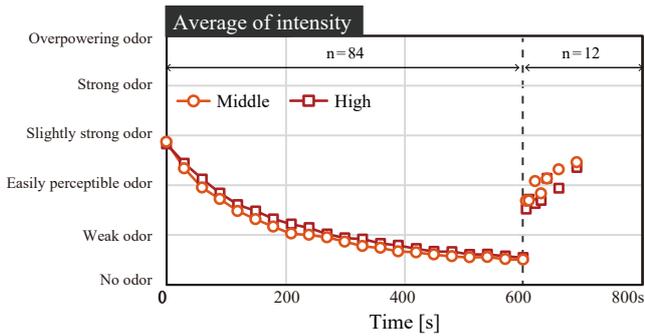


Fig.8 Average of odor intensity

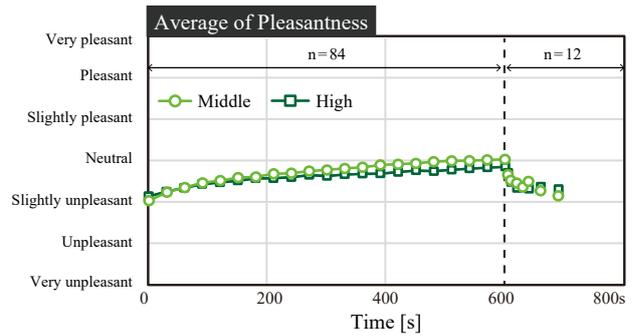


Fig.9 Average of pleasantness

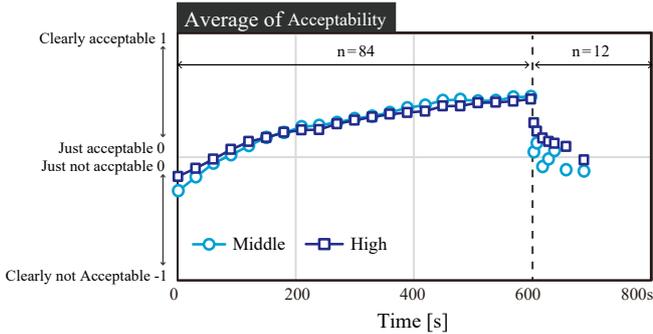


Fig.10 Average of acceptance of odor

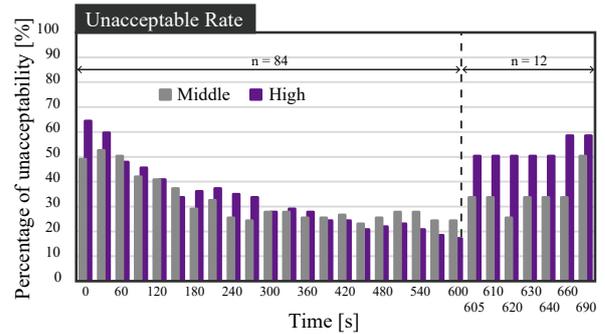


Fig.11 Non-acceptance rate

同様の臭気であっても強度によって嗅覚特性の分類による型は異なることが示唆された。

### 3.2 嗅覚順応における CO<sub>2</sub> 濃度と臭気強度との関係

各条件における臭気強度の全パネルの評価値平均を Fig.8 に示す。臭気強度の評価に関しては濃度条件間で順応過程及び回復過程の両過程においてほとんど大きな差は見られなかった。CO<sub>2</sub> 濃度は体臭濃度の代替指標としても使用されることから、CO<sub>2</sub> 濃度が上昇することにより、特に順応過程開始時の臭気強度に差が生じることが予測できた。しかし、本実験においては低い側の濃度条件である中濃度条件における評価平均値の方が微量ながら高い値となった。この結果から、CO<sub>2</sub> 濃度を体臭濃度の代替指標として比例関係的に表現することに対する限界があること、全パネルが2条件を同じ順序では行っていないことから実験時のパネルの体調や在室者の体調が評価に影響を及ぼした可能性が考えられる。

### 3.3 嗅覚順応における CO<sub>2</sub> 濃度と快不快度との関係

各条件における臭気強度の全パネルの評価値平均を Fig.9 に示す。快不快度についても臭気強度と同様に濃度条件の違いによる傾向の差は見られなかった。一方、両条件において順応過程で時間が経過するにつれて不快側の評価から、快でも不快でもない中立的な評価への変化が見られた。順応過程が進むことで臭気強度が無臭側に変化し、快不快度の評価がその影響を受けたものと考察できる。回復過程における快不快度の変化は順応過程によるものと逆の傾向を見せ、回復時間が長くなるにつれて快不快度が低下した。しかし、順応過程よりも回復過程における傾向の方が変化の傾きが大きく、順応過程と回復過程の快不快度評価の変化において進行速度の違いが見られた。

### 3.4 嗅覚順応における CO<sub>2</sub> 濃度と受容度及び非容認率との関係

各条件における受容度の全パネルの評価値平均及び非容認率を Fig.10、11 に示す。ここで、非容認率とは評価項目の受容度において「受け入れられない」側の評価を行ったパネルの割合を表す。受容度についても臭気強度、快不快度と同様に濃度条件の違いによる傾向の差は見られなかった。両条件、受容度の評価に関しては、順応過程の初期は受容度が低い値を示すのに対して、時間を追うごとに受け入れる側へと変化し、非容認率については順応時間が進行するにつれて低下が見られた。これは、臭気強度が順応過程で減少することにより、臭気に対する評価が無臭空気に対する評価を行っている状態に近づくことで、受容度の評価についても影響を受けることが考えられる。

### 4. おわりに

本報では、体臭における嗅覚の順応・回復過程における嗅覚特性を調べるため、給気量の調整による室内 CO<sub>2</sub> 濃度条件を用いた被験者実験を行った内容について述べた。次報では、体臭同様、室内における主要な臭気である建材臭についての嗅覚順応特性について調査した実験結果を報告する。

#### 【謝辞】

本研究は、ダイキン工業(株)との共同研究であり、関係各位に謝意を表します。また、実験に参加していただいた本学学生の皆様に感謝いたします。

#### 【参考文献】

- 1) Ulf Berglund: "DYNAMIC PROPERTIES OF THE OLFACTORY SYSTEM", Annals of the New York Academy of Sciences, Volume 237, Odors: Evaluation, Utilization, and Control pages 17-27, September 1974
- 2) 齊藤幸子、綾部早穂、小早川達: 持続臭気の時間依存強度と知覚特性の関係、におい・かおり環境学会誌、39(6)、pp.399-407、2008

## 知覚空気汚染質に対する嗅覚の順応・回復過程に関する基礎的研究

## (その2) リノリウム床材からの発生臭気に対する嗅覚順応の変化特性

## Basic Study on Olfactory Adaptation and Recovery Process to Perceived Air Pollutants

## (Part2) Olfactory Adaptation to Odors Generated from Linoleum Flooring

○川口 由莉 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (東洋大学) 山澤 春菜 (大阪大学)

竹村 明久 (摂南大学) 小林 知広 (大阪大学) 福本 柗一郎 (大阪大学)

Yuri KAWAGUCHI\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Narae CHOI\*<sup>2</sup> Haruna YAMASAWA\*<sup>1</sup>Akihisa TAKEMURA\*<sup>3</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Shuichiro FUKUMOTO\*<sup>1</sup>\*<sup>1</sup>Osaka University \*<sup>2</sup>Toyo University \*<sup>3</sup>Setsunan University

In this study, we conducted an experiment using linoleum flooring to investigate the characteristics of the adaptation and recovery process of the sense of smell in linoleum. Linoleum is made of natural materials and is a material that meets society's needs. As a result, the influence of building material odors cannot be ignored in the design of indoor environments, because the olfactory characteristics of humans differ depending on the odor. In the future, we intend to study the effects of different air supply volumes in order to obtain more accurate olfactory characteristics of the sense of smell in linoleum.

## 1. はじめに

室内は在室者から発生する体臭や建材臭など様々なにおいであふれている。前報<sup>1)</sup>では体臭に対する嗅覚特性を調査したが、室内環境設計において建材臭の影響も無視できない。そこで、本報では建材の中でもリノリウム床材からの発生臭気を対象として調査を行う。「リノリウム」は亜麻仁油や石灰石、木粉、ロジンなどの天然素材から作られる素材である。リノリウムの主原料である亜麻仁油には抗菌作用があり、病院の床材としてよく用いられている。また、土に埋

めると自然へ還っていくほどの生分解性もあるため、SDGs への取り組みが本格化している現代社会のニーズにマッチした建材であるといえる。しかし、リノリウムを使用する際のデメリットとしてしばしば特有の臭気による問題が挙げられる。この臭気は揮発性有機化合物 (VOC) によるもので、通気を確保しにおいを減少させる必要があるとされている。リノリウムの利用が拡大されるなかで、発生臭気に対する嗅覚の反応特性について調査することは有用であるといえる。本報では、リノリウム床材からの発生臭気を対象として被験者実験にて経時的な主観評価の測定を行った。

## 2. 実験概要

本実験は前報と同様の実験室で2024年1月17日、18日の2日間実施した。実験室平面図をFig.1に示す。測定項目はCO<sub>2</sub>濃度、温度、湿度、ガス濃度である。パネルは前報の体臭実験と同様の、本学学生12名(男性10名、女性2名、22~25歳)を採用し、参加時間に応じて適切に報酬を支払った。実験日時、参加パネル、給気量測定結果をTable 1に示す。

## 2.1 実験条件

本実験では、臭気発生源としてリノリウム床材3m<sup>2</sup>を使用し、アルミニウムチャンバー内のラック上

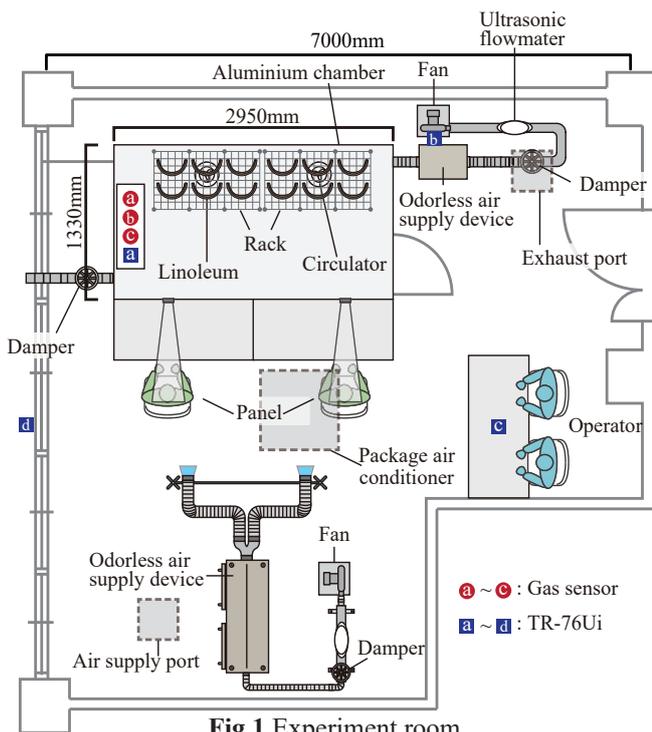


Fig.1 Experiment room



Fig.2 Flooring sheet made of linoleum

へ並べて設置した。使用したリノリウム床材を Fig.2 に示す。におい物質発生量を維持するため、実験日ごとに新しく切り分けたリノリウム床材を使用した。また、におい物質がチャンバー内で均一に広がるよう、ラックの下にサーキュレーターを2台設置した。

給気量は前報の体臭実験高濃度条件と同様の 20 m<sup>3</sup>/h とした。事前実験においてリノリウム床材 3 m<sup>2</sup> をチャンバー内に設置し、給気量 20 m<sup>3</sup>/h でガスセンサの測定を行ったところ、前報の体臭実験における高濃度条件と近いセンサ値を得ることができた。

2.2 実験手順・評価項目・測定項目

実験は前報の体臭実験と同様である。実験のタイムスケジュールを Fig.3 に示す。評価項目についても前報の体臭実験と同様で、臭気強度、快不快度、受容度の3項目とした。評価項目の詳細を Fig.4 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 各パネルごとの臭気強度評価結果

各パネルのリノリウム条件と体臭実験における高濃度条件の臭気強度評価結果を Fig.5 に示す。縦軸が臭気強度を、横軸が時間を示す。0~600 s が順応過程の測定結果であり、7セットの評価平均値を示す。600~690 s は回復過程の測定結果である。

まず、リノリウム実験における結果をみる。パネル 1,4 を除いて全てのパネルが「若干強いにおい」で評価であった。パネル 1,4 についても「らくに感知できるにおい」の評価であることから、今回使用したリノリウム床材 3 m<sup>2</sup> から十分な臭気が発生したことを確認できた。しかし、順応過程において「無臭」の評価を行ったパネルがいなかったため、順応時間 10 分に対してにおい物質の濃度設定が高い可能性が示唆

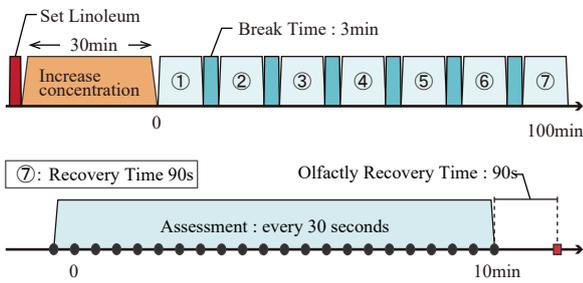


Fig.3 Experiment time schedule

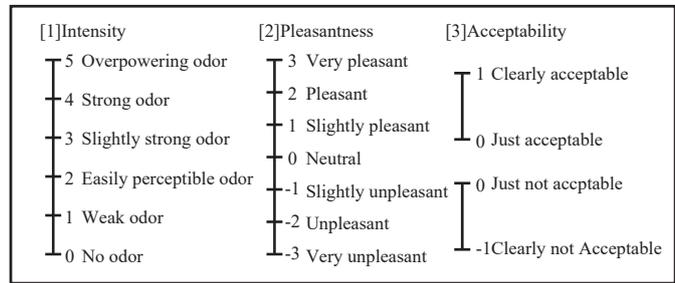


Fig.4 Subjective evaluation items

Table 1 Date of experiment , participating panel and flow rate

Date	Time	Panel	Flow rate	Date	Time	Panel	Flow rate
2024/1/17	14:00~15:40	3,10	20.1 m <sup>3</sup> /h	2024/1/18	11:00~12:40	11,12	20.0 m <sup>3</sup> /h
	15:40~17:20	6,8	20.1 m <sup>3</sup> /h		13:00~14:40	4,7	20.1 m <sup>3</sup> /h
	17:20~19:00	1,5	20.1 m <sup>3</sup> /h		14:40~16:20	2,9	20.1 m <sup>3</sup> /h

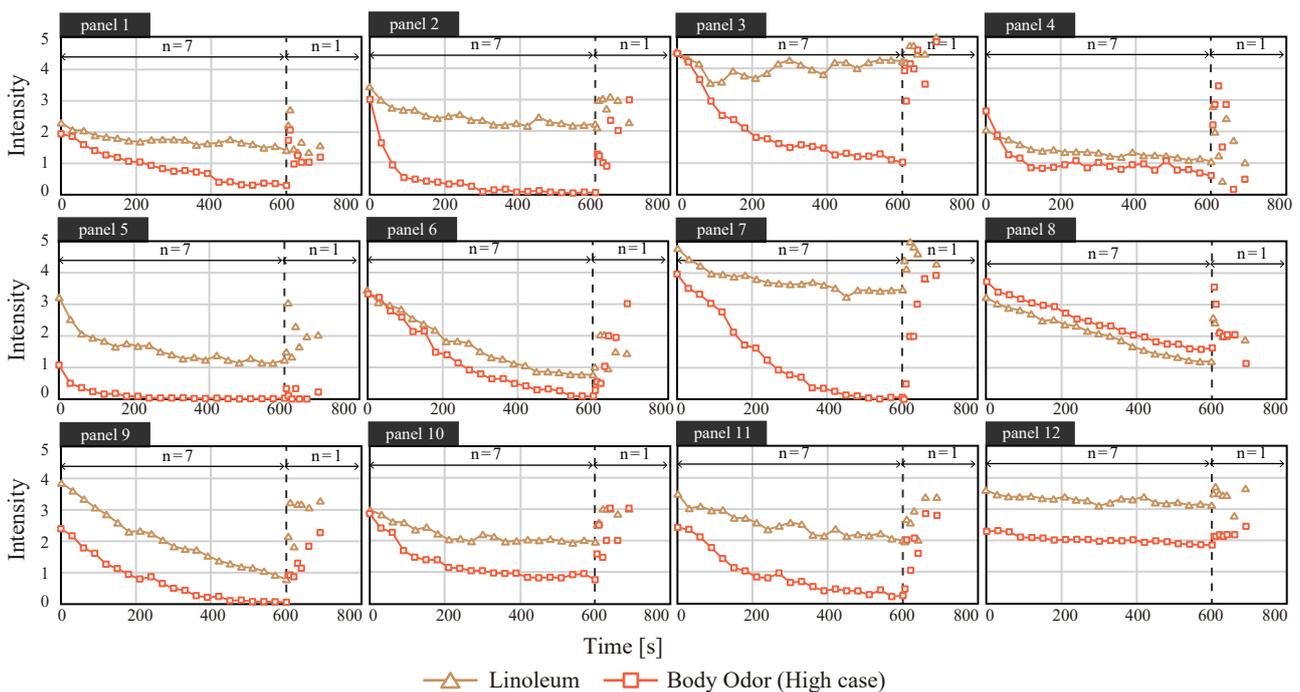


Fig.5 Variation of odor intensity for linoleum and body odor(High concentration case)

された。回復過程では、パネル1,2,4,5,7では、回復時間5秒と90秒で、回復時間が長い90秒の方が臭気強度が低い結果となった。以上の結果より、順応・回復の両過程において、前報の結果と同様にリノリウム条件でも嗅覚特性を型で分類することができた。

次に、体臭高濃度条件とリノリウム条件の結果を比較する。順応過程では、パネル4,8,9,12は両条件において同じような特性を示した。パネル1,2,3,6,10では、評価開始直後の臭気強度は両条件でほぼ等しいが、10分後の順応後には体臭高濃度条件の方が大きく低下し、無臭に近い評価となった。回復過程では、パネル1,8,11,12は体臭高濃度条件とリノリウム条件で似た特性がみられたが、それ以外のパネルは異なった特性が見られた。このように、体臭高濃度条件とリノリウム条件で各パネルの型は一致せず、においの質によって嗅覚特性が大きく異なる可能性が示唆された。

3.2 パネルごとの快不快度と受容度評価結果

各パネルの快不快度と受容度の評価結果を Fig.6 に示す。臭気強度の結果と同様に、0~600 s が順応過程を、600~690 s が回復過程を示す。快不快度の評価結果を見ると、パネル7は評価が徐々に上昇しているが、それ以外のパネルはほぼ変化しなかった。リノリウム床材からの発生臭気に対しては、快不快度に嗅覚

の順応はあまり影響しない可能性が示唆された。また、パネル3は「非常に不快」で評価を行っている一方で、パネル6.9は「やや快」の評価であった。リノリウムからの発生臭気に対する快不快度評価には個人差が生じる可能性が示唆された。

受容度では、快不快度と同様に評価があまり変化しないパネルが多く見られたものの、時間が経つにつれて評価が上昇していた。したがって、受容度は快不快度よりも嗅覚の順応の影響を受けることが示された。また、快不快度と同様に、パネル3は「あきらかに受け入れられない」の評価であったが、パネル6は「あきらかに受け入れられる」の評価であった。快不快度よりもより極端な差がみられたため、快不快度よりも受容度の方が評価に対する個人差があらわれると考えられる。回復過程では、5秒の回復後に急激に評価が下がるパネルが多く見られた。臭気強度の結果から回復時間5秒で嗅覚が急激に回復するパネルが多かったため、においを強く感じるようになり、受容度の評価が低下したと考察できる。

快不快度と受容度評価の関係性についてみる。パネル1,2,3,4,7,11で強い正の相関がみられた。よって、体臭と同様に、リノリウム床材からの発生臭気に対しても、嗅覚の順応により快側の評価に近づき、においを受け入れられるようになることが示された。

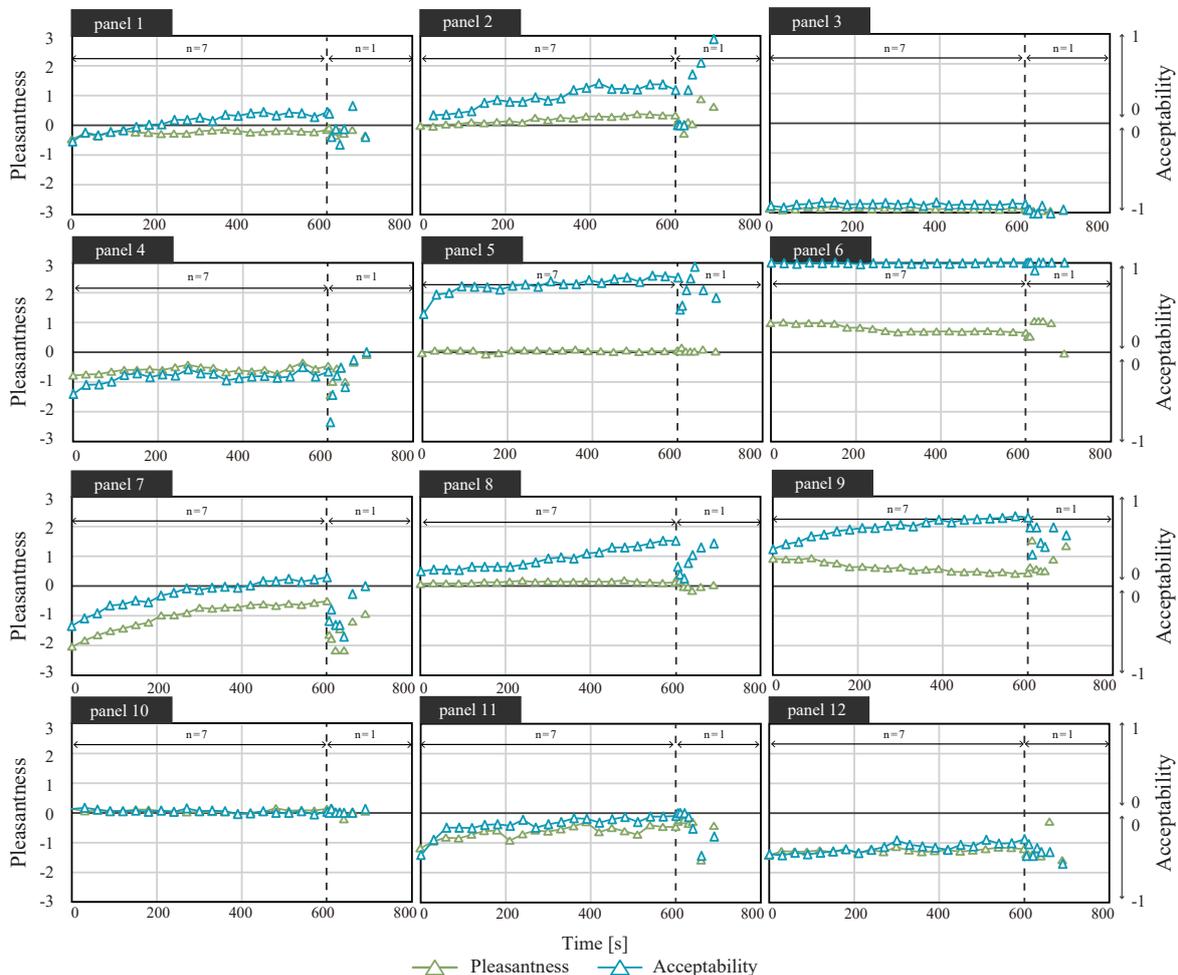


Fig.6 Variation of pleasantness and acceptance of odor for linoleum

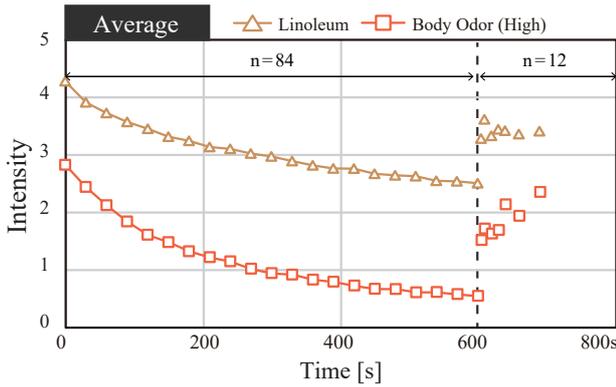


Fig.7 Average of odor intensity for linoleum and body odor(High concentration case)

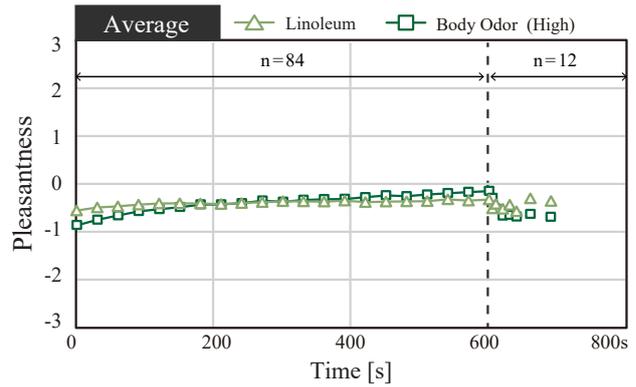


Fig.8 Average of pleasantness of odor for linoleum and body odor(High concentration case)

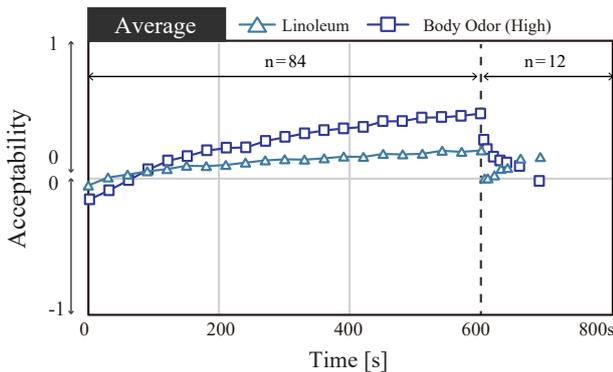


Fig.9 Average of acceptance of odor for linoleum and body odor(High concentration case)

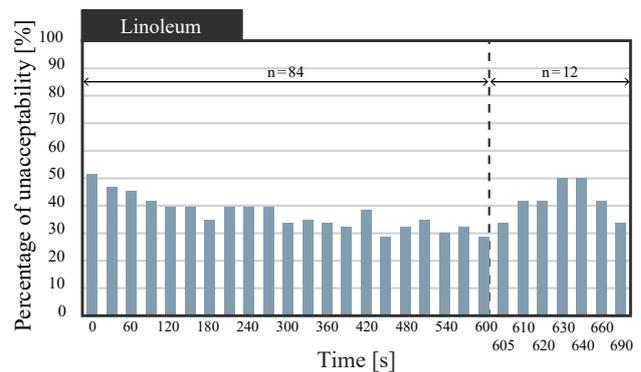


Fig.10 Non-acceptance rate for linoleum

### 3.3 各評価項目の全平均と非容認率

リノリウム条件と体臭高濃度条件における全パネル評価値を平均した結果を Fig.7~Fig.9 に示す。Fig.7 が臭気強度、Fig.8 が快不快度、Fig.9 が受容度の評価結果である。臭気強度の結果では、リノリウムの方が臭気強度が高い値となった。従って、6人のヒト由来のにおいよりも、3 m<sup>2</sup> のリノリウム床材からの発生臭気の方が強いことが示された。チャンバーの床面積は約 4 m<sup>2</sup> であることから、室内のにおい環境に対して、建材臭が大きな影響を与えることが示された。順応過程においては、においを嗅ぎ始めた直後と 10 分経過後の評価値の差についてリノリウム条件と体臭条件で有意な差が認められた。よって、リノリウム床材からの発生臭気の方が体臭よりも順応しにくいと考えられる。

快不快度・受容度では結果に差は見られず、リノリウム条件の方が評価が変動しないことが示された。従って体臭よりもリノリウム床材からの発生臭気の方が、嗅覚の順応の影響を受けにくいと考えられる。

リノリウム条件における非容認率の結果を Fig.10 に示す。非容認率とは、受容度の評価について「受け入れられない」と回答したパネルの割合を示している。非容認率は順応過程では徐々に低下したもののその変化は小さかった。回復過程では、回復時間が長くなるほど非容認率が上昇したが、回復時間 60s と 90s で低下した。より正確な評価を行うため、順序効果の影響を考慮し実験を実施する必要がある。

### 4. おわりに

本報では、リノリウム床材からの発生臭気に対する嗅覚特性を把握するため、被験者実験にて経時的な主観評価測定を行った。体臭と同様に、リノリウム床材からの発生臭気に対しても、順応・回復の両過程において嗅覚特性を型で分類できる可能性が示唆された。

快不快度・受容度の結果より、嗅覚の順応により快側の評価に近づき、においを受け入れられるようになることが示された。しかし、リノリウム条件では体臭高濃度条件よりも評価があまり変動しなかったことから、体臭よりも快不快度と受容度への順応の影響は小さいと考えられる。

このように、被験者実験の結果から臭気によってヒトの嗅覚特性が異なることが示され、室内環境設計において建材臭の影響を無視できないことが示唆された。今後はより正確な嗅覚特性の把握のため、給気量を変えた検討を行っていく所存である。

### 【謝辞】

本研究は、ダイキン工業(株)との共同研究であり、関係各位に謝意を表します。また、実験に参加していただいた本学学生の皆様に感謝いたします。

### 【参考文献】

- 1) 福本、山中、崔、山澤、竹村、小林、川口：知覚空気汚染質に対する嗅覚の順応・回復過程に関する基礎的研究(その1) 体臭に対する嗅覚順応の変化特性、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 (2024年3月掲載予定)

# 都市の熱環境計画に向けた 人流特性把握のための時系列人流データ分析 A Study on Pedestrian Flow Characteristics by Time-Series Data Analysis for Urban Thermal Environment Planning

○早川 大地 (神戸大学)      竹林 英樹 (神戸大学)  
Taichi HAYAKAWA\*1    Hideki TAKEBAYASHI\*1  
\*1 Kobe University

In this study, we analyzed pedestrian flow data at 116 locations in Kobe's Sannomiya district, provided by Kobe city, with the intention of utilizing it for urban thermal environment planning and infrastructure planning. Based on the time-series data analysis, the characteristics of pedestrian flows at each location were categorized into four clusters, then the measurement points in Sannomiya district were classified into three zones. A useful analysis method for multi-site and multi-time data sets for urban thermal environment planning and infrastructure planning was presented.

## 1. はじめに

近年、IT技術の普及により人流データが計測、利用されるようになり、新型コロナウイルス流行を契機にその重要性が広く認識されるようになった。これらのデータは一般に公開されるものも増えており、交通機関や商業施設などでの利用のほか、都市熱環境の分野でも利用の可能性が検討されている<sup>1)</sup>。ただし、これらのデータの多くはGPSデータや携帯電話の位置情報を用いたものであり、より具体的な熱環境計画やインフラ計画に際しては、カメラやセンサーにより計測された人流の絶対量データの利用が望ましい。

本研究では、都市の熱環境計画やインフラ計画への人流データの活用を想定し、神戸市より提供された三宮地区の116地点の通過人数の赤外線センサーによるデータを用いて、時系列特性や空間分布の特徴を分析した。具体的には、通過人数の時系列データをクラスター分析し、分類結果の特徴を考察することで、通過人数に影響を与える要因を分析し、各地点における人流データの時刻変化の特徴から対象地域全体の空間分布の特徴を考察した。

## 2. 分析の概要

### 2.1 分析データの概要

本研究では、神戸市と連携して関西電力株式会社が赤外線センサーを用いて計測されている通過人数のデータを用いた。図1に計測箇所を示す。分析対象期間は2022年4月1日～2023年3月31日の一年間で、一時間ごとの通過人数のデータである。各地点でセンサーの停止やデータの欠損が確認された日は分析対象外とした。

### 2.2 分類方法

各日一時間毎の通過人数を24次元の多変量データとみなしてクラスター分析を行った。出発行列には相関行列を用いた。固有値が1以上になる主成分を採用した。次に主成分得点を計算し、その得点を用いて階層クラスター分析を行った。サンプル間距離にはユークリッド距離を用い、グループ間平均連結法により分類した。得られたデンドログラム(樹形図)より、3～10個のグループ数となるように一定の距離で線引きを行い、グループに分類した。

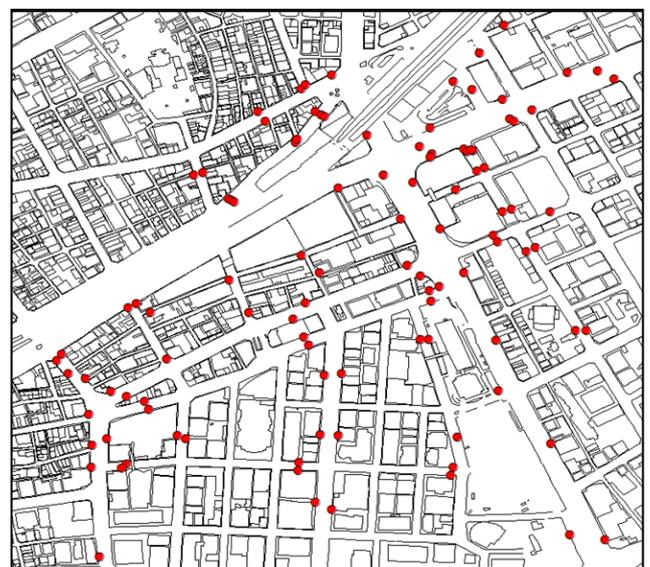


Fig.1 Infrared sensor mounting position

### 3. 通過人数の時刻変化の分類

#### 3.1 分析結果の整理手法

先行研究<sup>2)</sup>では、三宮地域の9地点において同様のクラスター分析を行った。その結果、朝夕の通勤、通学時にピークを持つ平日型のクラスターと、日中14時~16時にピークを持つ休日型のクラスター、が主に出現した。今回の116地点の分析においても、平日クラスター、休日クラスターが分類された。

#### 3.2 分類結果の特徴

クラスター分析結果の例(地点54, 40, 23)を図2~7, 表1~3に示す。平日クラスターを黒実線、休日クラスターを青破線、平日・休日の区別がなく多くの日数が含まれるクラスターを水色実線、平日・休日の区別が困難な混在クラスターを橙一点鎖線で示す。

地点54は駅から離れており、一日を通して人流が少なく、多くの日数がクラスター1に集約された。

地点40は三宮中心部の南北道路に位置しており、特に午前8時の通行人数差により平日クラスターと休日クラスターに分類され、人流の大小によりさらに分類された。

地点23は元町駅の南に位置し、ピーク出現時刻の差により平日クラスター、休日クラスターに分類されたが、平日と休日双方の特徴を持つ混在クラスターも出現した。

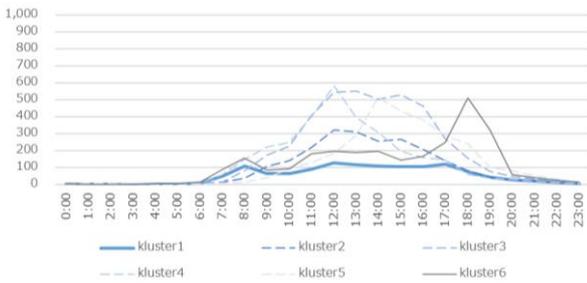


Fig.2 Cluster classification results at measurement point 54

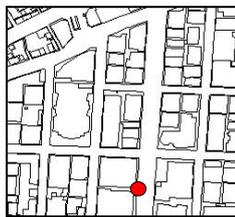


Fig.3 Location of measurement point 54

Table.1 Composition of clusters at measurement point 54

kluster number	weekday (days)	holiday (days)	total (days)
1	239	96	335
2	0	12	12
3	0	5	5
4	2	2	4
5	0	1	1
6	3	0	3

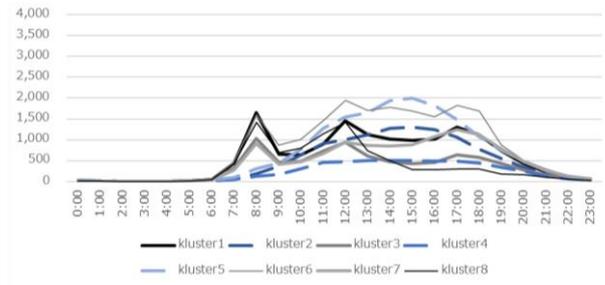


Fig.4 Cluster classification results at measurement point 40

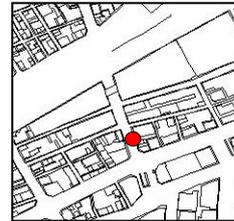


Fig.5 Location of measurement point 40

Table.2 Composition of clusters at measurement point 40

kluster number	weekday (days)	holiday (days)	total (days)
1	144	0	144
2	0	71	71
3	77	13	90
4	3	16	19
5	4	14	18
6	2	0	2
7	10	5	15
8	5	0	5

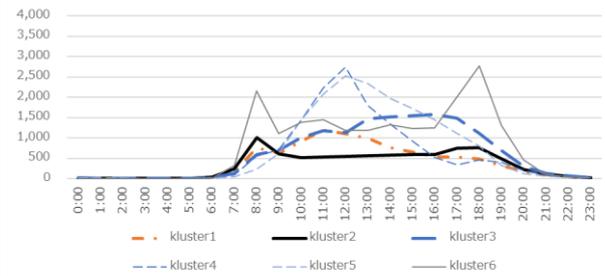


Fig.6 Cluster classification results at measurement point 23

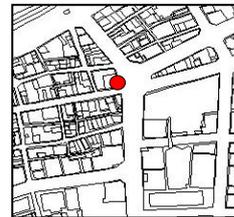


Fig.7 Location of measurement point 23

Table.3 Composition of clusters at measurement point 23

kluster number	weekday (days)	holiday (days)	total (days)
1	55	42	97
2	167	29	196
3	20	39	59
4	1	4	5
5	0	5	5
6	2	0	2

#### 4. クラスタ構成割合による地点の分類

##### 4.1 分析結果の整理

各地点のクラスタ分析を、平日・休日の区別がないクラスタ、平日クラスタ、休日クラスタ、その他混在クラスタに集約した (図8)。各地点で最も構成割合の大きいクラスタから降順に並べている。

計測点を3つのパターンに分類した (図9~11)。各地点の日平均通行人数をパターンごとに色分けし、降順に並べた (図12)。

##### 4.2 クラスタ構成割合に基づく分類

図9に主に水色で示す地点では、平日・休日の区別がないクラスタが80%以上である。この地点は平日・休日の区別のない地点とし、図12には水色で示した。これらの地点では日平均通行人数が小さい。

図10に黒色と青色で示す地点では、ほぼ平日クラスタと休日クラスタに分類された。この地点は平日・休日で分類される地点とし、図12には黒色で示した。これらの地点数が最も多く、日平均通行人数の中央値付近に集中している。

図11に黒色、青色、赤色で示す地点では、平日クラスタ、休日クラスタ、その他混在クラスタに分類された。平日、休日による人流の差はあまり顕著ではなく、他の要因により新たなクラスタが形成されたと考えられる。この地点は平日・休日・その他として分類される地点とし、図12にはオレンジ色で示した。これらの地点では日平均通行人数が大きい。

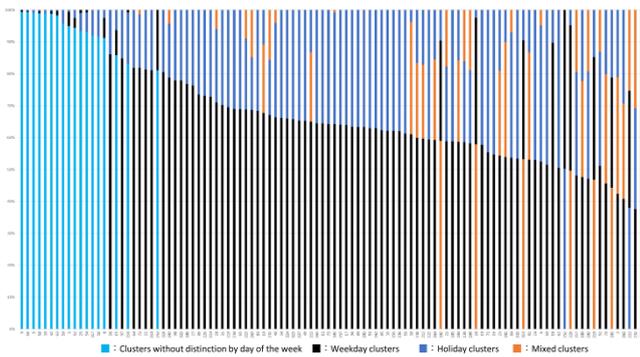


Fig.8 Cluster composition ratio at each measurement point

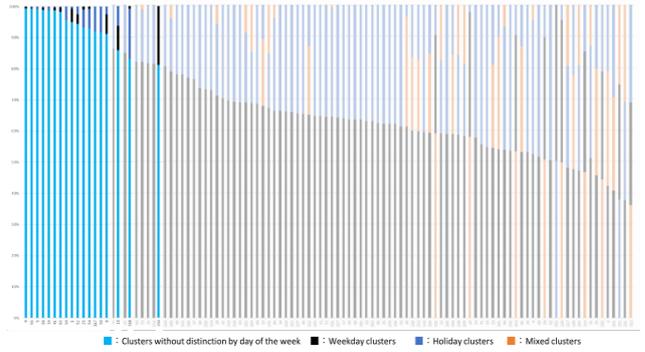


Fig.9 Measurement points that were not classified (blue bar)

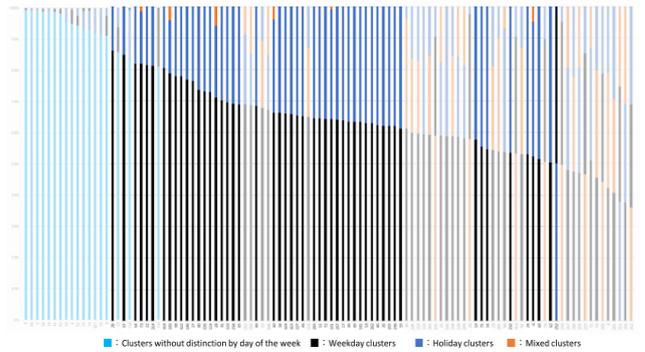


Fig.10 Measurement points classified by weekdays and holidays (black and blue bar)

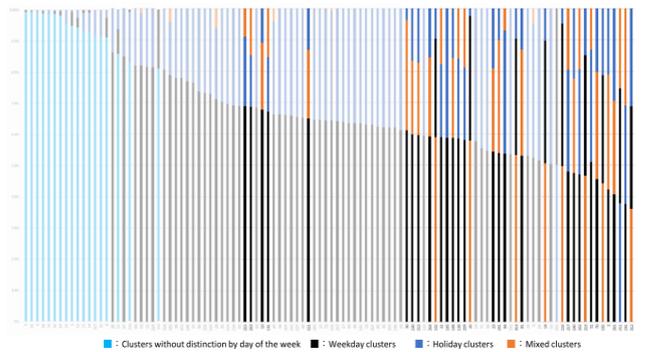


Fig.11 Measurement points classified by weekdays, holidays, and others (black, blue, and red bar)

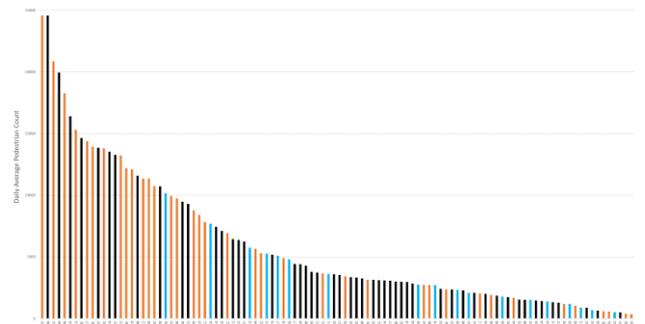


Fig.12 Daily average pedestrian flow at each measurement point

#### 4.3 クラスタ分類結果の空間分布の考察

人流データの空間分布の特性を考察するために、上記3パターン(赤色: 区別なし, 青色: 平日・休日, 黄色: 平日・休日・混在)を地図上に示した(図13). 三宮駅・元町駅に近い測定点は(黄色: 休日・平日・その他)が多く, 駅から離れると(青色: 平日・休日)となり, さらに離れると(赤色: 区別なし)となる. 日平均通行人数に応じてプロットの大きさを変更して重ね合わせた(図14). 通行人数は駅から離れると小さい.

以上より, 駅から離れると通行人数が少なくなり, 人流の特徴に平日・休日の区別が表れない. 駅から少し離れた箇所では, 通勤や通学の影響で平日と休日の特徴が表れる. 駅に近い箇所では, さらに別の要因による人流の時間変化の特徴が確認される.

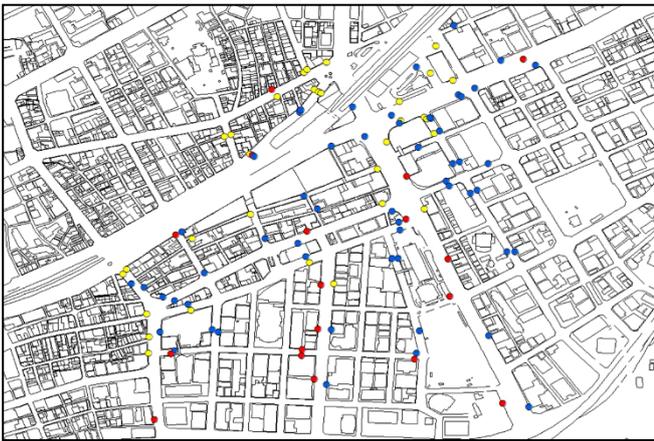


Fig.13 Classification of measurement points (red: no distinction, blue: weekday and holiday, yellow: weekday, holiday, and others)

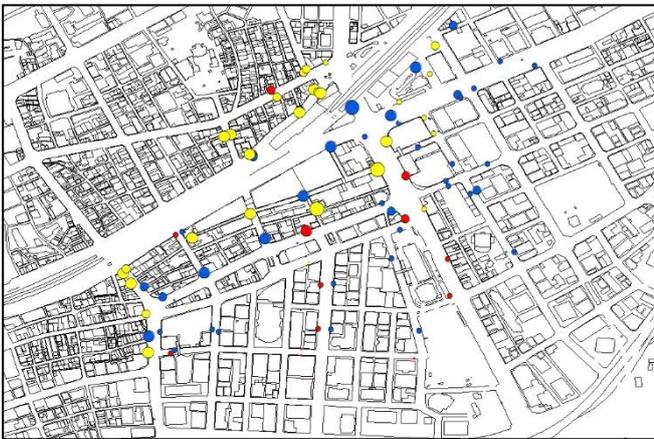


Fig.14 Classification and daily average pedestrian flow at measurement points (red: no distinction, blue: weekday and holiday, yellow: weekday, holiday, and others)

#### 5. まとめ

本研究では, 神戸市より提供された三宮地区の116地点の通過人数のデータ(人流データ)を用いて, 時系列特性や空間分布の特徴を分析した. 具体的には, 通過人数の時系列データをクラスタ分析し, 分類結果の特徴を考察することで, 通過人数に影響を与える要因を分析し, 各地点における人流データの時刻変化の特徴から対象地域全体の空間分布の特徴を考察した.

各地点の分類結果は, 平日・休日の区別がないクラスター, 平日クラスター, 休日クラスター, その他混在クラスターに集約された. 空間分布は, 駅から遠く通行人数が少ない地点では平日と休日の区別がつかず, 駅から少し遠く通行人数が中程度の地点では平日と休日に区別され, 駅に近く通行人数が大きい地点では平日と休日に加えてそれらの特徴が混在する日も区分された.

以上より, 多時刻, 多地点の人流データの統計分析とその特徴の考察より, 人流の時空間特性を整理する方法が提示された.

今回の分析結果に基づくと, 駅から遠い地点では人流が小さいため熱環境計画の優先度は低く, 時間変化の特徴も限定される. 駅に近い地点では人流が大きいため熱環境計画の優先度は高く, 平日, 休日, 混在の時間変化の特徴への配慮が必要である, と考察された. また, 災害発生時の一時避難者の推定やそれに基づくインフラ計画の検討などへの利用も想定される.

謝辞: 本研究は神戸市建設局との共同研究の一環として人流データの提供を受けて実施した. 協力頂いた関係者の皆様に謝意を評します. 本研究は JSPS 科研費 JP22H01651, 大成学術財団の助成を受けた.

#### 参考文献

- 1) 熊倉永子, 足永靖信, 上野貴広, 都市の温熱リスクに関する研究その2, 人流ビッグデータを用いた暴露人口の算出, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022
- 2) 早川大地, 竹林英樹, 神戸市のオープンデータを用いた都市における人流データの分析手法の検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2023