

ベクトル放射温度計と照度計によるビニールハウス内の放射環境計測
Measurement of radiant thermal environment in plastic greenhouses
by vector radiation thermometers and illuminometers

○辻田 裕雅（大阪公立大学） 鍋島 美奈子（大阪公立大学）
西岡 正稔（大阪公立大学） 小倉 久弥（東レ建設株式会社）

Yuga TSUJITA*1 Minako NABESHIMA*2 Masatoshi NISHIOKA*2 Hisaya OGURA*3

*1 Osaka City University *2 Osaka Metropolitan University *3 TORAY CONSTRUCTION Co., Ltd.

This paper aims to measure the thermal environment in plastic greenhouses with heat protection by installing evaporative cooling panels. A measuring instrument is created using a cubic acrylic box with six vector radiation thermometers and six illuminance meters, and the radiation temperature and illuminance in each direction are measured. Since there is a correlation between solar radiation and illuminance, shortwave radiation can be estimated. It is shown that the instrument is useful for measuring longwave and shortwave radiation separately from each direction. The mean radiation temperature, MRT, is calculated by using the measured values and is compared with MRT calculated by using a globe thermometer to investigate their characteristics. In addition, the thermal sensation votes of 5 subjects are examined.

はじめに
ビニールハウス農業において、天候の影響を受けずに農作物を栽培できるメリットがある一方で、夏季には高温障害や農業従事者熱中症の恐れがある。ハウス内の温熱環境を改善する手法として、多くの手法が用いられてきたが、本研究では黒川ら¹⁾の提案する透湿性防水膜を用いた蒸発冷却パネルの設置に着目した。このパネルは、透湿性防水膜の内部に水を貯留し表面からの蒸発を促す構造であり、特徴として、水面を露出せず広範囲に蒸発面積を確保できることや、作業空間上部に設置することで日射遮蔽装置としても機能することが挙げられる。これをビニールハウス内に設置することで蒸発による暑熱緩和対策効果が期待できる。そこで、本研究ではこのパネルを設置するなどの暑さ対策を施したビニールハウス内で温熱環境の評価を行う。また、被験者への調査により人が感じる温熱環境の改善効果について評価を行う。
放射環境の計測を行う際、ベクトル放射温度計²⁾を作成し用いる。この測器は立方体の各面に長波長センサーと照度センサーの2種類のセンサーを取り付けることで、従来使用されてきた長短波放射収支計と比較して、安価でかつ1台で6面の計測できる。また、グローブ球を用いた放射環境計測ではできなかった長波と短波を分けて方向別に放射環境を分析することが可能になる。

1. 測器作成
温熱環境を計測・評価するにあたり、平均放射温度(MRT)は重要な温度指標である。MRTとは、周囲の全方

向から受ける熱放射を平均化した温度表示である。MRTを計測する方法はいくつか存在するが、現場調査ではグローブ球を用いることが一般的である。計測が容易であることが大きな利点であるが、時定数が大きく、また対流熱伝達による風速の影響を受けやすいという弱点が考えられる。

Table1 Sensors Specification

	Long-wave Sensor	Illumination Sensor
Name	MLX90614	BH1750FVI
Dimensions	32×24×8 mm	32×24×8 mm
Measuring Range	5.5~14 μm	1-65535 lx
Viewing Angle	90°	180°

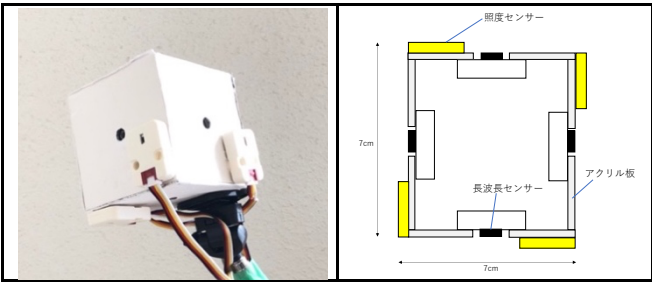


Fig.1 Image of Vector Radiation Thermometers (left)

Fig.2 Diagram of Vector Radiation Thermometers (right)

そこで本研究では、放射温度センサーと照度センサーを六面体に取り付けたベクトル放射温度計を作成し、放射環境の計測を行う (Fig.1)。本報で提案するベクトル放射温度計は高柳・土川ら²⁾のベクトル放射温度計を基に照度

センサーを追加したものである。放射温度センサーでは長波放射量を計測し、照度と短波放射量は比例関係にあることから、照度センサーで短波放射量を推定する。これにより、6方向の長波と短波の成分が既知となったMRTの算出が可能となる。

2. 実験概要

前述のベクトル放射温度計を用い、2022年9月11～13日に黒川らの提案する蒸発冷却パネルを設置したビニールハウス内で物理環境の計測を行なった。また、被験者への温冷感申告調査も実施した。

本実験は、京都府相楽郡精華町にあるビニールハウスD棟及びE棟にて行った。D、E棟両方ともにハウス天井付近には遮光率 50%の遮光ネットが設置されており、D棟の半分程度、高さ 2000mmの位置に蒸発冷却パネルを設置した。物理環境の計測項目は、乾球温度、相対湿度、グローブ温度、風速、日射量とベクトル放射温度計での放射温度と照度である。ベクトル放射温度計を用いた方法で各条件におけるMRTを算出し、従来の方法であるグローブ温度を用いて算出したMRTと比較を行うことで、それぞれの特徴を明らかにする。

被験者への調査では、実際に作業者が感じる作業環境の改善効果について検証するため、全身温冷感について温冷感申告値を用いて 9 段階で評価を得た。実験条件においてファンを設置する際は被験者に風が当たるようにして設置を行うこととする。被験者は実験参加に同意の得られた普段からビニールハウスで農作業を行なっている40代～70代の男性2名女性3名の計5名の方であった。

＜被験者実験の流れ＞

- ① 前室にて椅座安静(15分)
- ② D棟(p0n1f0)で立位滞在(15分)
- ③ 前室にて椅座安静(15分)
- ④ D棟(p2n0f0)で立位滞在(15分)
- ⑤ D棟(p2n1f1)で立位滞在(5分)

Table2 Experiment Conditions

Experiment No.	Shading Net	Evaporative Cooling Panel		Fan
		panel	Evaporation	
p0n1f0	○			
p2n0f0		○	○	
p1n0f0		○		
p2n0f1		○	○	○

※実験番号は、パネル無しを p0、設置(蒸発無し)を p1、設置(蒸発あり)を p2、遮蔽ネット無しを n0、ありを n1、被験者に向け設置したファン無しを f0、ファンありを f1 とする。



Fig3 Evaporative Cooling Panel

3. 結果と考察

3.1 物理環境計測

気温、グローブ球、パネル上での日射量の計測結果を Fig4 に、実験条件 p0n1f0 のベクトル放射温度計での計測結果を Fig5 に示す。Fig5 より、ベクトル放射温度計の上面の温度は遮光ネット表面温度を計測しており、平均 41.1℃であることがわかる。Fig4 より、ハウス内気温は平均 36.1℃なので、5.0℃程度遮光ネット表面温度が高くなっていることがわかる。また、Fig5 よりベクトル放射温度計上面の照度は 5472～37300klx の変動があり、この間の日射量は 242～435W/m² の変動があった。

これらの実測で得られた結果から従来のグローブ温度からとベクトル放射温度計からの二つの計測方法での平均放射温度の算出を行う。グローブ温度から算出する関係式を式1に、ベクトル放射温度計から算出する関係式を式2～4に示す。

$$MRT = \theta_g + 2.35\sqrt{v}(\theta_g - \theta_a) \tag{1}$$

$$L_i = \epsilon_{NCIR} \sigma T_i^4 \tag{2}$$

$$S_i = \alpha I_i \tag{3}$$

$$MRT = \frac{\sum_{i=1}^6 \sqrt[4]{(\epsilon_L L_i + \epsilon_S S_i) / \sigma}}{6} \tag{4}$$

θ_g : グローブ温度(℃), v : 風速(m/s), θ : 気温(℃), L_i : 長波放射量(W/m²), T_i^4 : 各面の放射温度(℃), ϵ_{NCIR} : センサーの放射率(=1), S_i : 短波放射量(W/m²) I_i : 各面の照度(lx), ϵ_L : 長波吸収率(=0.95), ϵ_S : 短波吸収率(=0.9), α : 回帰係数

Fig6 グローブ球とベクトル放射温度計から算出したMRTを示す。日射量推定の回帰係数は既往研究³⁾から $\alpha=0.0093$ を引用する。Fig6 より、ベクトル放射温度計の方が、時定数が小さい為、反応が早く値に差が生じているものの、温度変化の傾向も概ね一致していると言える。しかし、グローブ球とベクトル放射温度計の算出値に5℃程度の差が見られた。算出値に差が生まれた要因として、照度と短波放射量の関係式があると考えた。そこで、日射量推定の回帰係数を $\alpha=0.0140$ とし、MRTの再算出を行う。算出したMRTを計測時間で平均した値を

Table3 に示す。回帰係数を変更することで、MRT 平均値が 5.79℃小さくなり、グローブ球から算出した MRT 平均値とほぼ一致した。よって、日射量推定の回帰係数は改めて実測をおこない、算出し直す必要がある。

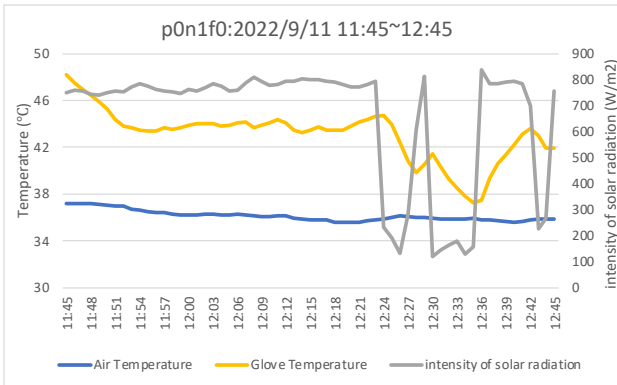


Fig.4 Measurement Results (p0n1f0 : 2022/9/11 11:45~12:45)

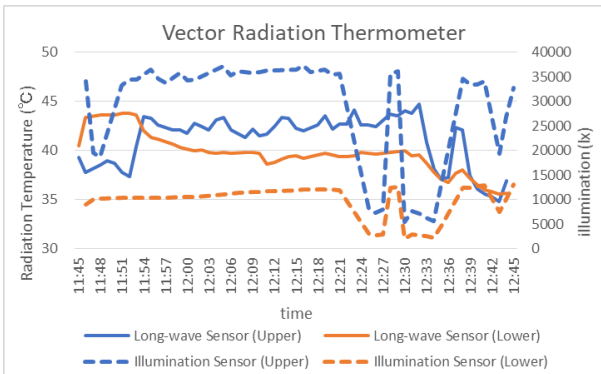


Fig.5 Measurement Results (p0n1f0 : 2022/9/11 11:45~12:45)

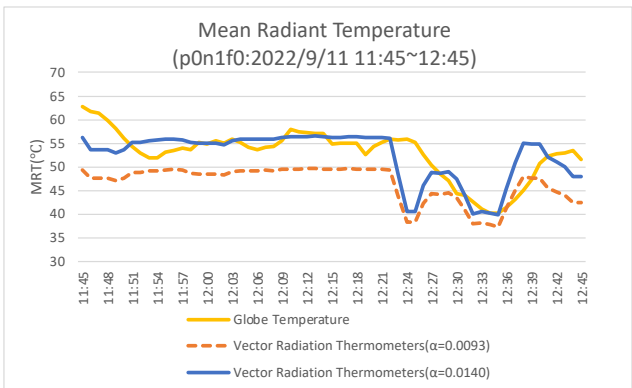


Fig.6 Mean Radiant Temperature (p0n1f0 : 2022/9/11 11:45~12:45)

Table3 Measuring Time Average of MRT (p0n1f0:2022/9/11)

9/11 11:45~12:45	Glove Temperature	Vector Radiant Temperature	
		$\alpha=0.0093$	$\alpha=0.0140$
MRT	52.8	46.6	52.4

3.2 被験者実験

被験者実験と同時にベクトル放射温度計での計測を行い、平均放射温度を算出する。算出した平均放射温度と気温、相対湿度、風速の実測値と代謝量 (1.2met = 69.84W/m²)、着衣量 (0.5clo) から標準有効温度 SET*を算

出した。実測により得られた平均値を **Table4** に、時系列データを **Fig.7** と **Fig.8** に、SET*と温冷感申告値(TSV)の関係を **Fig.9** に示す。実験条件 (p0n1f1, p2n0f0) の TSV は 15 分経過後の申告値である。

Table4 SET* Components

	Air Temperature	Mean Radiant Temperature	Relative Air Velocity	Relative Humidity
	[deg.C]	[deg.C]	[m/s]	[%]
p0n1f1	33.6	47.1	0.29	54.4
p2n0f0	34.2	40.3	0.31	52.9
p2n1f1	34.5	42.0	0.36	52.3

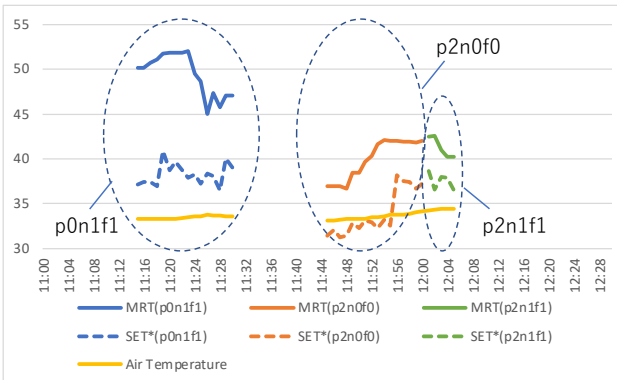


Fig.7 Result of Subject Experiments (2022/9/13 11:15~12:05)

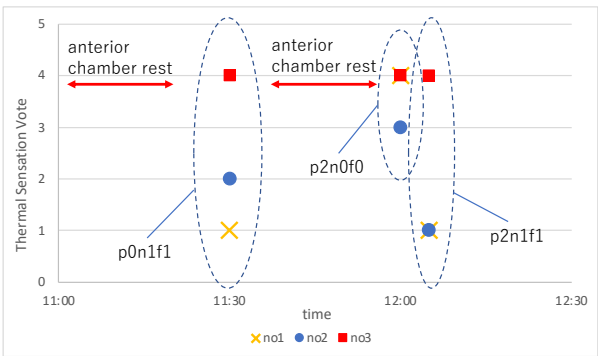


Fig.8 Result of Subject Experiments (2022/9/13 11:15~12:05)

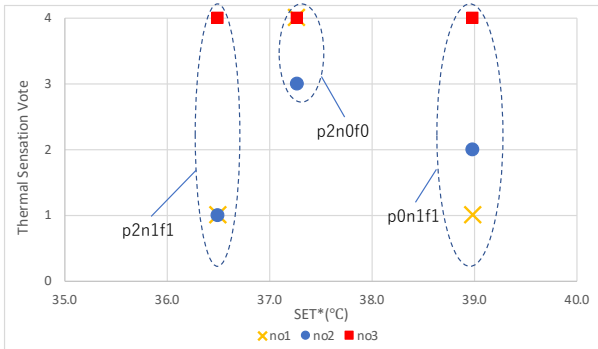


Fig.9 Result of Subject Experiments (2022/9/13 11:15~12:05)

被験者 no1,no2 の申告結果は実験条件変化に伴い、同様の傾向を示しているのに対して、被験者 no3 の申告結果

は条件に関わらず一定の値を示す結果であった。以降は、被験者 no1, no2 について考察する。実験条件（p0n1fl, p2n0f0）から蒸発冷却パネルの有無で比較すると、MRT は 6.8℃低下、SET*も 1.7℃低下したものの、TSV は上昇していた。これはファンの有無が体感温度に大きく影響していると考えられる。実験条件（p0n1fl, p2n1fl）から、ファンあり条件同士で比較すると、蒸発冷却パネルにより MRT は 5.1℃低下、SET*は 2.5℃低下したが、被験者 no1 の TSV は変わらず、no2 の TSV は 1 低いという結果になった。冷却パネルによる放射環境の改善効果は物理的には明らかでも、TSV の変化として観察することは難しいことがわかる。

また、Fig9 より SET*と温冷感申告値に明確な相関は見られなかった。今回の計測では、被験者に向けて設置した小型のファンありの実験条件で、被験者近傍での風速が計測できていなかったことがひとつの要因と考えられる。

4. 暑さ対策の評価

4.1 物理環境計測による評価

前章で仮に設定した日射量推定の回帰係数 α を用いて、蒸発冷却パネルを設置したハウス D 棟と、従来用いられている遮光ネットを設置したハウス E 棟との比較を行う。ベクトル放射温度計を用いて算出した MRT と上面の放射温度を Table5 に示す。

Table5 MRT of workspace

9/11 11:45~12:45	Vector Radiant Temperature	
	MRT	MRT of the upper side (Long-wave Radiation Temperature of upper side)
p2n0f0	43.7	77.3(35.7)
p0n1f0	52.4	78.7(41.2)

ベクトル放射温度計を用いて算出した MRT を計測時間で平均した値を比較すると、パネルを設置したハウスの方が低く 8.67℃の差が見られた。この差が生じた要因を方向別に分析すると、上面での長波放射温度は 35.7℃と 41.2 度で 5.42℃の温度差が見られるのに対し、長短波合わせた上面 MRT では 77.3℃と 78.7 度で 1.41℃の差しかなかった。これより、MRT に対する短波放射量の影響を、蒸発冷却パネルを設置したハウス D 棟の方が大きく受けていると言える。これはパネルによる日射遮蔽が不均一であり、透過率が高かったことが考えられる。

4.2 被験者への調査による評価

被験者 no1,no2 の申告結果より、蒸発冷却パネルのみを設置した条件が、一番温冷感申告値が大きく、暑いと感じる状況であったことが分かる。これに対し、比較的涼しいと感じる条件は、no1 の結果では遮光ネットとファ

ンの設置(p0n1fl)、蒸発冷却パネルと遮光ネット、ファンの設置(p2n1fl)の 2 条件と、no2 では条件 p2n1fl であった。蒸発冷却パネル、遮光ネット、ファンの 3 点を設置した条件 p2n1fl では MRT は一番小さい値を示し、3 名のうち 2 名が涼しいと感じる結果であった。

これらの結果より、蒸発冷却パネルの設置のみでは人体が感じる温冷感にほとんど変化が見られなかったが、小型ファンを被験者にあてた場合には温冷感が低下することがわかった。要因の考察として、蒸発冷却パネルの設置面積を遮光ネットの遮光率と等しく設置していたが、日射遮蔽が不均一であり直接日射が被験者に当たってしまっていたために、暑いと感じる状況であったと推測する。また、ファンは被験者がかく汗を蒸発潜熱として放熱するために、涼しいと感じる条件であったと推測する。

5. おわりに

5.1 本研究での到達点

- ・ベクトル放射温度計で計測を行なった結果、時定数の違いを考慮するとグローブ球と似た温度変化を捉えることが出来ていた。
- ・MRT の結果から、蒸発冷却パネルを設置することで遮光ネットを設置した環境と比較して、表面温度が下がり放射環境の改善効果を得ることができた。ただし、遮光ネットなしで蒸発冷却パネルを設置する場合は、設置間隔が広いとパネル下の作業者に日射があたり体感温度が上がってしまう恐れがある。
- ・被験者への調査から、蒸発冷却パネルの設置だけでは温冷感を改善することはできなかった。小型ファンを作業者に向けて設置することで改善できることがわかった。

参考文献

1) 黒川航太郎ほか：透湿性防水布を用いた蒸発冷却パネルに関する研究―(その 3)屋外暑熱環境下における暑熱緩和効果―日本建築学会大会学術講演梗概集 2021 年 9 月
2) 高柳幸奈ほか：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 令和 4 年度日本建築学会近畿支部研究発表会
3) 田中千尋：ビニールハウスにおける葉菜類の生育環境に関する研究―実測調査に基づく照度及び室温の推定― 大阪市立大学大学院 工学研究科 修士論文 2019 年 3 月

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援いただきました。ベクトル放射温度計の作成にあたりご協力を頂いた高柳幸奈さん、蒸発冷却パネルの設置をはじめとする実験準備、実施をサポートして下さいました黒川航太郎さん、被験者実験の際にご協力を頂いたビニールハウスで農業従事されている 5 名の方々に、記して謝意を示します。

夏季ビニールハウス内における透湿性防水膜蒸発パネルの熱的効果 Thermal Effects of Moisture Permeable Waterproof Membrane Evaporation Panel in Summer Greenhouse

○黒川 航太郎 (大阪市立大学)

西岡 真稔 (大阪公立大学)

鍋島 美奈子 (大阪公立大学)

小倉 久弥 (東レ建設株式会社)

Kotaro KUROKAWA*1 Masatoshi NISHIOKA*2 Minako NABESHIMA*2 Hisaya OGURA*3

*1 Osaka City University *2 Osaka Metropolitan University *3 Toray Construction Co., Ltd.

In this study, the evaporation cooling function of a bag-shaped moisture permeable waterproof membrane (evaporation panel) with a water was examined in a case study of its use for thermal environment control in summer greenhouse. We installed evaporation panels in the greenhouse and measured various items. As a result, about 144 g/m²h evaporated from the panel and surface temperature decreased by about 4.3°C. An analysis of the heat balance of the panels was also conducted, and it was inferred that longwave radiation has a significant effect on panel evaporation.

1. はじめに

夏季ビニールハウス内の気温は40°Cを超えることもあり、作物の生育不良を防止するためにも、ビニールハウス農業における高温対策は重要な課題である。そこで、比較的安価で効果がある熱環境調整手法として水の蒸発冷却作用を利用した蒸発冷房システムがある¹⁾。本研究では、ビニールハウス農業における高温対策として、筆者ら²⁾が提案する透湿性防水膜蒸発パネルの利用に着目する。これは、液水を通さず水蒸気のみを貯留する透湿性防水膜を袋状とし、その内部に水を貯留し、表面からの蒸発を促すものである。Fig.1のようにハウス上部にパネルを設置し、パネルの遮光・蒸発冷却によってハウス内で発生する顕熱量を減少させ、パネルからの蒸発により発生した水蒸気は換気扇で排気する仕組みである。本研究では、実際に夏季のビニールハウス内にパネルを設置し、ハウス内外の気温、日射量、パネル表面温度、蒸発量を測定した。そして、パネルの蒸発の有無が気温、表面温度に与える影響の分析や、パネルの熱収支に関する検討を行った。

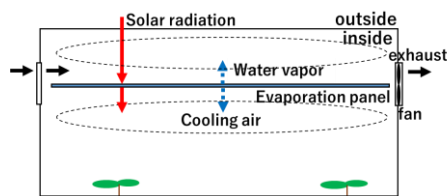


Fig.1 Mechanism of cooling in greenhouse by panel

2. 実測概要

2022/8/28、9/5、9/7、9/10、9/11、9/13に京都府相楽郡の国際電気通信基礎技術研究所敷地内にある高床式砂栽培が行われているビニールハウス2棟(高さ4m、幅6m、長

さ11m)を利用して測定を行った。Fig.2のように、一方のビニールハウスには何も設置せず(「パネルなしハウス」、もう一方のビニールハウスには北側の高さ2mの位置にパネル(幅150mm、長さ3000mm)を10枚設置する(「パネルありハウス」)。本来であれば、ハウス全体にパネルを設置することが望ましいが、本研究においては実測を簡易化するためのFig.2の赤枠部分を実験範囲としてパネルを設置した。このハウスに既設の遮光ネットの遮光率に合わせるために実験範囲のハウス床面積に対するパネルの面積率を0.5とした。パネル蒸発の有無による効果を比較する目的で8/28、9/10は「水なしパネル」、9/5、9/7、9/11、9/13はパネル内に水を供給した「水ありパネル」で測定を行った。なお、「水ありパネル」での測定の際は同一気象条件下でのパネル表面温度を比較するために、1枚のみ「水なしパネル」としている。測定項目及びセンサー位置についてTable.1、Fig.3に示しており、1分間隔で測定を行った。表面温度はパネル1枚のみを代表して測定する。代表日として、日射量大きい時間が長い8/28(給水なし日)と9/7(給水あり日)の結果を中心に述べる。

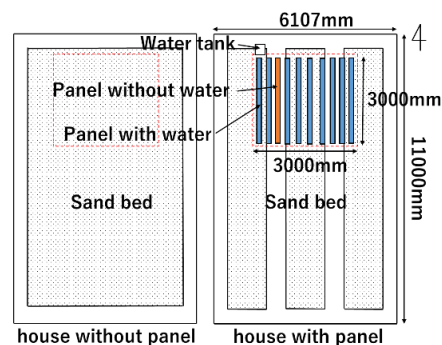


Fig.2 Ground plan of greenhouse for actual measurement

3. 実測結果

3.1 日射量

実験日における天候条件として、8/28 と 9/7 の水平面全天日射量の時刻変化を Fig.4、Fig.5 に示す。

3.2 気温

パネルの蒸発の有無によるハウス内気温を比較する。パネル給水あり日とパネル給水なし日の各ハウス内、屋外の気温の時刻変化を Fig.6、Fig.7 に示す(8/28 の屋外気温は欠測)。測定時間における「パネルありハウス」と「パネルなしハウス」の平均気温差は給水あり日、給水なし日ともにほぼ同程度(約 1.3℃)となっていた。そのため、蒸発によるハウス内気温上昇抑制効果は確認できなかった。パネルを設置した面積が小さく、十分な効果を得ることができなかったと考えられる。

3.3 蒸発量

蒸発量の実測値はパネルに水を供給するタンクの重量測定により求めた。パネルと給水用タンクを水で充填したチューブでつなぎ、サイフォンの原理によりパネルとタンクの水位を常に一定に保つ。パネルからの蒸発によってタンク内の水量が減少していくため、タンクの減少量を 10 分間隔で電子天秤により測定し、それを蒸発量の実測値とした。なお、蒸発量もパネル 1 枚を代表して測定した。蒸発量の実測値と、パネル表面温度・ハウス内気温・ハウス内相対湿度の実測値から式(1)を用いて算出した蒸発量の推定値を比較する。式(1)において R'_f は、別途測定した値である $5.33 \times 10^{-5} (\text{kg/kg}') \text{m}^2 \text{h/g}$ を用いる。一方で R'_c の実測は行えていないため、蒸発量の実測値と推定

値の値が一致する時の値として $1.02 \times 10^{-4} (\text{kg/kg}') \text{m}^2 \text{h/g}$ を用いた。Fig.8 を見ると、蒸発量の実測値と推定値が同じような傾向で推移しており、 R'_c の値によって蒸発量の実測値と推定値が一致することから、次で述べるパネル表面温度測定の妥当性を示すことが出来る。また、測定時間の平均で $144 \text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ 程度の蒸発量を得られていることが分かった。

$$E_c = \frac{1}{R'_f + R'_c} (x_s(t_{sp}) - x_a) \tag{1}$$

3.4 パネル表面温度

蒸発の有無によるパネル表面温度を比較する。Fig.9 にパネル下面表面温度・パネル直下気温の時刻変化を示す。「水ありパネル」下面表面温度は「水なしパネル」下面表面温度よりも約 4.3℃低下し、また、気温よりも約 1.6℃低下していた。蒸発によってパネル表面温度の上昇が抑制されていることを確認できた。

4. パネルの熱収支分析

日射量・気温・パネル表面温度・蒸発量の実測値を使用し、ビニールハウス内における「水ありパネル」の熱収支について分析する。なお、熱収支分析は日射量が大い 9/7 の 11 : 38 ~ 12:38 の 1 時間の平均値を用いて行った。

4.1 パネルの熱収支式

ビニールハウス内のパネルの熱収支の概念図について Fig.10 に示し、式(2)のような熱収支式で表す。ここでは、パネルに入射する熱量として、日射量と反射日射量のみを考えている。

Table.1 Measurement items			
Measurement items	Measuring instruments		Symbol
Solar radiation outside house	Pyranometer	MS802	I
Solar radiation above the panel in house		PCM-01N	I_{in}
Upper Surface temperature of panel	Type T		t_{sp1}
Bottom Surface temperature of panel			t_{sp2}
Temperature directly above the panel	Thermocouple	Type K (superfine)	t_{ap1}
Temperature directly below the panel			t_{ap2}
Temperature and humidity outside house	Temperature /Humidity sensor	HMP-110	t_a h_r
Temperature and humidity in house			$t_{a,in}$ $h_{r,in}$

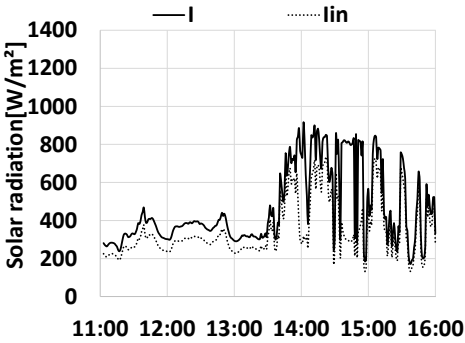


Fig.4 Time change of solar radiation (2022/8/28 day without water supply)

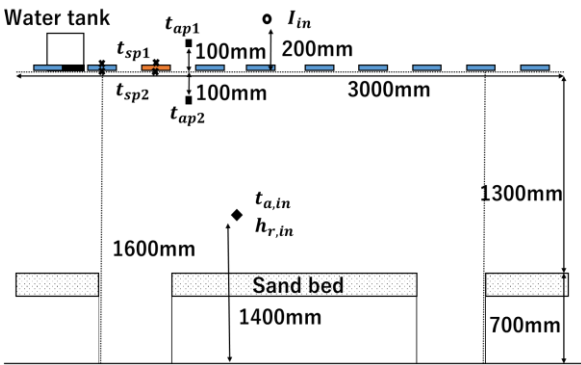


Fig.3 Sensor arrangement diagram

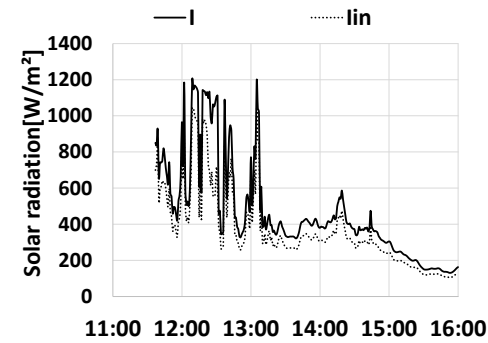


Fig.5 Time change of solar radiation (2022/9/7 day with water supply)

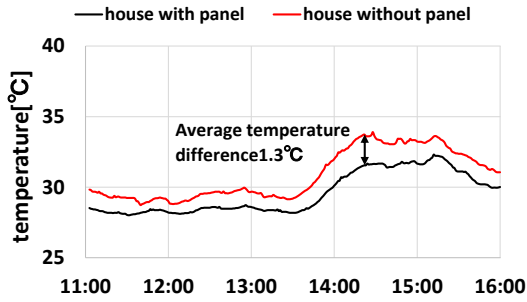


Fig.6 Time change of temperature
(2022/8/28 day without water supply)

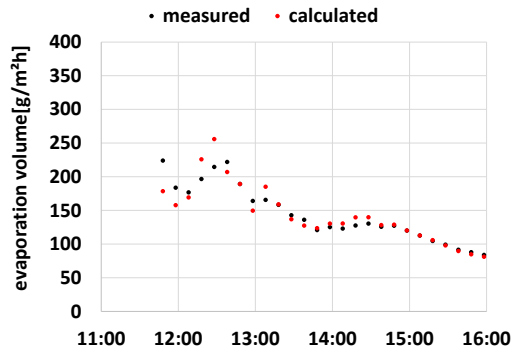


Fig.8 Measured and calculated evaporation volume
(2022/9/7 day with water supply)

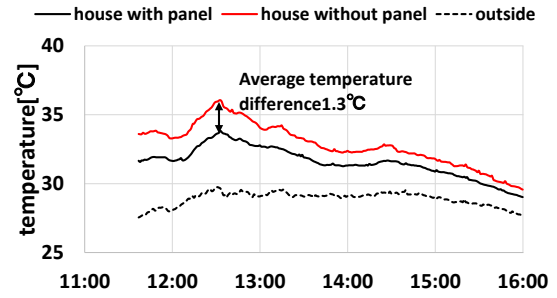


Fig.7 Time change of temperature
(2022/9/7 day with water supply)

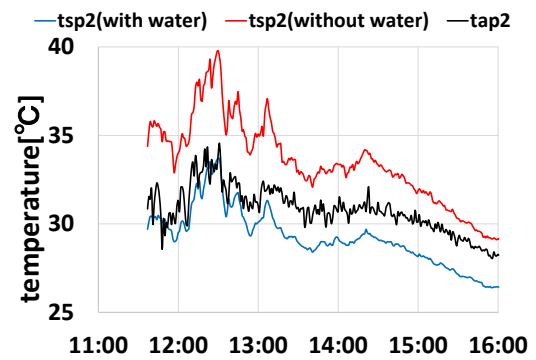


Fig.9 Time change of surface temperature of panel
(2022/9/7 day with water supply)

$$K_{p1} + K_{p2} - H_{p1} - H_{p2} - l_e E_m = 0 \quad (2)$$

$$\text{パネルへの日射量} \quad K_{p1} = a_{kp} I_{in} \quad (3)$$

$$\text{パネルへの反射日射量} \quad K_{p2} = (1 - A) \rho_{kg} a_{kp} I_{in} \quad (4)$$

$$\text{パネル上面からの顕熱} \quad H_{p1} = \alpha_{c,in} (t_{sp1} - t_{ap1}) \quad (5)$$

$$\text{パネル下面からの顕熱} \quad H_{p2} = \alpha_{c,in} (t_{sp2} - t_{ap2}) \quad (6)$$

4.2 熱収支結果

式(2)における各項の値と熱収支残差を Table.2 に示す。結果、 -143.6 W/m^2 の熱収支残差が生じた。Table.2 を見ると、パネルは日射をほとんど吸収しておらず、パネルが受け取った熱量に対して発生した蒸発潜熱量が多くなっている。このことから、パネルへの長波放射を考慮していないため熱収支残差が生じたと推察される。

Table.2 Value of each term and residual in equation (2)

Items[W/m ²]	value	Items[W/m ²]	value
Solar radiation	2.5	Latent heat	140.9
Reflected	0.1	Sensible heat from bottom of panel	-0.3
solar radiation		Residual error of heat balance	-143.6
Sensible heat from upper of panel	5.5		

4.3 熱収支残差に関する検討

熱収支残差が生じた原因として、式(2)ではパネルに入

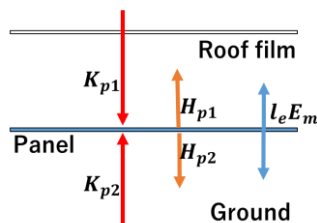


Fig.10 Heat balance of a panel

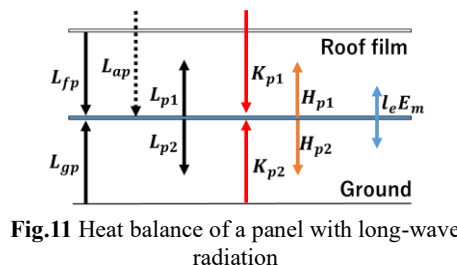


Fig.11 Heat balance of a panel with long-wave radiation

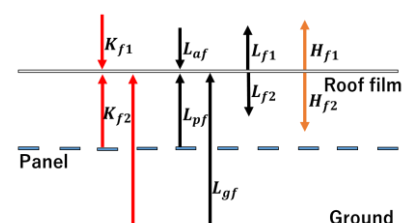


Fig.12 Heat balance of roof film

射する長波放射量を考慮できていないことが挙げられた。そこで、パネル上面、下面への長波放射を加えた熱収支の概念図を Fig.11 で示し、式(7)のような熱収支式で表す。式(7)について分析し、熱収支残差が少なくなるか検討する。なお、実測では、パネル蒸発の熱源は日射が主であると考えており、長波放射の測定を行っていないため、パネルに入射する長波放射量は推定によって求める。

$$K_{p1} + K_{p2} - H_{p1} - H_{p2} - l_e E_m + L_{fp} + L_{gp} + L_{ap} - L_{p1} - L_{p2} = 0 \quad (7)$$

フィルムからパネル

$$L_{fp} = \epsilon_{Lf} \epsilon_{Lp} \sigma (t_{sf} + 273.15)^4 \quad (8)$$

への長波放射量

床面からパネル

$$L_{gp} = \epsilon_{Lg} \epsilon_{Lp} \sigma (t_{sg} + 273.15)^4 \quad (9)$$

への長波放射量

フィルム

$$L_{ap} = \tau_{Lf} \epsilon_{Lp} \sigma (t_a + 273.15)^4 (0.526 + 0.0065 \sqrt{f_a}) \quad (10)$$

透過大気放射量

パネル上面から

$$L_{p1} = \epsilon_{Lp} \sigma (t_{sp1} + 273.15)^4 \quad (11)$$

の長波放射量

パネル下面から

$$L_{p2} = \epsilon_{Lp} \epsilon_{Lp} \sigma (t_{sp2} + 273.15)^4 \quad (12)$$

の長波放射量

(1) パネル上面への長波放射について

パネル上面への長波放射として、屋根面フィルムからの長波放射とフィルム透過大気放射量が考えられる。まず、フィルムからの長波放射量はフィルム表面温度によって決定するため、Fig.12 をもとに式(13)のようなフィルム熱収支式を立て、フィルム表面温度を求める。結果、フィルム表面温度は 36.0℃となり、これをもとに式(8)よりフィルムからの長波放射量を求めた。また、フィルム透過大気放射量は Brunt の式より算出した大気放射量にフィルムの長波放射透過率をかけることで求めた(式(10))。

$$K_{f1} + K_{f2} + L_{af} + L_{pf} + L_{gf} - L_{f1} - L_{f2} - H_{f1} - H_{f2} = 0 \tag{13}$$

フィルムへの日射量
$$K_{f1} = a_{kf} I \tag{14}$$

フィルムへの反射日射量
$$K_{f2} = a_{kf} \rho_{kp} I_{in} A + a_{kf} \rho_{kg} I_{in} (1 - A)^2 \tag{15}$$

大気放射量
$$L_{af} = \varepsilon_{Lf} \sigma (t_a + 273.15)^4 (0.526 + 0.0065 \sqrt{f_a}) \tag{16}$$

パネルからフィルムへの長波放射量
$$L_{pf} = \varepsilon_{Lf} \varepsilon_{lp} \sigma (t_{sp1} + 273.15)^4 A \tag{17}$$

床面からフィルムへの長波放射量
$$L_{gf} = \varepsilon_{Lf} \varepsilon_{lg} \sigma (t_{sg} + 273.15)^4 (1 - A) \tag{18}$$

フィルム上面からの長波放射量
$$L_{f1} = \varepsilon_{Lf} \sigma (t_{sf} + 273.15)^4 \tag{19}$$

フィルム下面からの長波放射量
$$L_{f2} = \varepsilon_{Lf} \sigma (t_{sf} + 273.15)^4 \tag{20}$$

フィルム上面からの顕熱
$$H_{f1} = \alpha_c (t_{sf} - t_a) \tag{21}$$

フィルム下面からの顕熱
$$H_{f2} = \alpha_{c,in} (t_{sf} - t_{ap1}) \tag{22}$$

(2) パネル下面への長波放射量について

パネル下面への長波放射として、ハウス床面からの長波放射が考えられる。しかし、蒸発潜熱や地中熱伝導などがあるため、熱収支から床面の表面温度を算出することは困難である。そこで、式(7)にフィルムからの長波放射量、フィルム透過大気放射量を代入し、熱収支が閉じるときの床面長波放射量より、床面表面温度を求める。それが妥当な値であれば、熱収支残差の原因は屋根面と床面からの長波放射にあると結論付けられる。結果、熱収支が閉じるときの床面表面温度は 59.0℃であり、床面表面温度として扱うには過度な温度となった。原因として、ビニールハウスは骨格となる鉄製のパイプで構成されているが、式(3)ではその骨格からの長波放射量が考慮できていないことが挙げられる。骨格からの長波放射量が床面からの長波放射量の中に含まれており、床面表面温度が過度な値となったと推察される。

5. おわりに

透湿性防水膜蒸発パネルをビニールハウスの熱環境調整に活用する事例について検討を行い、以下の結果を得た。

List of Symbols

Symbol	
A	Percentage of area of panels to ground area[-]
a_{kp}	Solar radiation absorption rate of panels[-]
a_{kf}	Solar radiation absorption rate of film[-]
E_c	Calculated evaporation[g/(m ² h)]
E_m	Measured evaporation[g/(m ² h)]
l_e	Latent heat of evaporation of water[J/g]
R'_c	Moisture transfer resistance[(kg/kg')m ² h/g]
R'_f	Moisture permeable resistance of membrane [(kg/kg')m ² h/g]
t_{sg}	Surface temperature of ground surface[°C]
t_{sf}	Surface temperature of film[°C]
$x_s(t_{sp})$	Saturated absolute humidity at t_{sp} [kg/kg']
x_a	Absolute humidity in the house[kg/kg']
α_c	Convective heat transfer coefficient outside house [W/(m ² K)]
$\alpha_{c,in}$	Convective heat transfer coefficient in house[W/(m ² K)]
ε_{lg}	Longwave emissivity of ground surface[-]
ε_{lp}	Longwave emissivity of panel[-]
ε_{Lf}	Longwave emissivity of film[-]
τ_{Lf}	Longwave radiation transmittance of film[-]
ρ_{kg}	Solar reflectance of ground surface[-]
ρ_{kp}	Solar reflectance of panel[-]
σ	Stefan-Boltzmann constant[W/(m ⁴ K)]

- 1) 「パネルありハウス」と「パネルなしハウス」の平均気温差は給水あり日、給水なし日ともに同程度であり、蒸発によるハウス内気温上昇抑制効果は確認できなかった。
- 2) 「水ありパネル」の表面温度は「水なしパネル」の表面温度よりも約 4.3℃低下し、ハウス内気温よりも約 1.6℃低下していた。また、パネルからは約 144g/(m²h)の蒸発がみられた。
- 3) パネル熱収支残差についての検討として、長波放射を加えた熱収支について考えたが、フィルムからの長波放射、フィルム透過大気放射、床面からの長波放射だけでは残差についての説明はつかなかった。他の要因として、ハウス骨格からの長波放射が考えられた。

参 考 文 献

1) 山口智治：特集 風と気流を利用する温室 パッドアンドファン冷房方式,日本風工学会誌,第 45 巻,第 1 号,13-16,2020 年 1 月
2) 黒川航太郎,西岡真稔,鍋島美奈子：透湿性防水膜を用いた蒸発冷却パネルの試作と屋外実験による暑熱緩和効果の検証,日本建築学会技術報告集,第 28 巻,第 70 号,1301-1306,2022 年 10 月

オフィスにおける温熱環境と乾湿感に関する調査
Survey on Thermal Environment and the Humidity Sensation in Offices

○河村 優果（武庫川女子大学大学院）
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 KAWAMURA*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

The purpose of this study is to determine the factors that influence the humidity sensation. An ordinal logistic regression analysis was conducted using the data obtained from the field surveys at the offices in Kansai region. The gender, sensitivity to heat, relative humidity, thermal sensation, sweating condition, environmental adjustment behaviors, and amount of clothing influence on the humidity sensation were investigated. The following was revealed about the degrees to which the humidity sensation is affected: men feel 3 times wetter than woman, the person who sensitive to heat felt 2 times wetter, the person who was clothed more felt drier, high humidity influenced sensation for the wetness.

1. はじめに

湿度は、温度と比べると日常生活の中で意識されることは少ないが、人の健康に大きな影響を与えており、室内の環境に応じて適切な湿度調整が求められる。

「湿っている」、「乾燥している」といった湿度の感じ方の評価である乾湿感に関して、年齢差¹⁾や男女差²⁾³⁾、気温⁴⁾、相対湿度⁵⁾、発汗⁶⁾との関係についての研究はあるが、その他の要因に関する研究事例は少ない。乾湿感に影響を与える要因については部分的にしか研究されておらず、それらの影響度も明らかになっていない。また、既往研究の多くは人工気候室で行った被験者実験の結果^{3)~6)}の比較であり、フィールド調査をもとにした乾湿感の研究は行われていない。

そこで本研究では、オフィスを対象としたフィールド

調査により、アンケートと環境測定を行い、得られたデータを統計的に分析することで、乾湿感に影響をおよぼす要因とその影響度を明らかにする。

2. 調査概要

調査は兵庫県と大阪府内の5棟のオフィスビルにおいて2021年9月～2022年11月に行い、649個の回答数が得られた(表1)。1ヵ月に1度、対象オフィスの執務中に訪問し、普段着や実際の作業環境で行った。調査項目を表2に示す。申告調査では、執務者に基本項目と調査時の主観評価項目をアンケート用紙に回答させた。温熱環

Table.1 Investigated buildings information

No	1	2	3	4	5
Location city	Nishinomiya	Nishinomiya	Nishinomiya	Nishinomiya	Ibaraki
Structure	RC	SRC	RC	RC	SRC
Research floor	B1F	4F	4F	1F	6F
Survey period	2021.11～ 2022.10	2021.10～ 2022.9	2021.9～ 2022.10	2021.9～ 2022.9	2022.4～ 2022.11
Number of respondents	36	13	11	16	48
Number of votes	212	50	43	114	230

Table.2 Survey items

Basic items	Environmental survey items
Gender	Air temperature (T_a)
Age	Relative humidity (RH)
Constitution	CO ₂ concentration
Cooling preference	Globe temperature (T_g)
Heating preference	Mean radiant temperature*
Frequently spent environment	Absolute humidity**
*Calculated from T_a and T_g . **Calculated from T_a and RH.	
Subjective evaluation items	
Modified thermal sensation	Air quality
Thermal preference	Fatigue
Thermal acceptability	Sweating condition
Humidity sensation	Metabolic rate
Humidity preference	Environmental adjustment behavior
Airflow sensation	Amount of clothing
Airflow preference	Thermal sensation

境調査については、執務者がアンケート回答中に、その付近に測定機器を設置し、一定時間後の測定値を記録した。

3. 単純集計結果

調査項目の単純集計を行い、データの特徴を概観する。

本研究において、目的変数とする乾湿感の月ごとの回答を図1に示す。湿潤側より乾燥側の回答が多かった。相対湿度の月ごとの測定結果、グローブ温度の月ごとの測定結果を図2、3に示す。オフィスでは温度幅は小さいが、相対湿度の変化が非常に大きくなっている。

4. 乾湿感に影響をおよぼす要因の検討

4.1 統計解析の方法

本研究では、乾湿感に影響をおよぼす要因とその影響

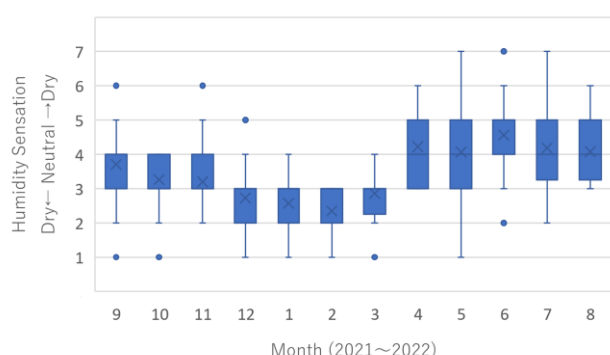


Fig.1 Variation of responses for the humidity sensation

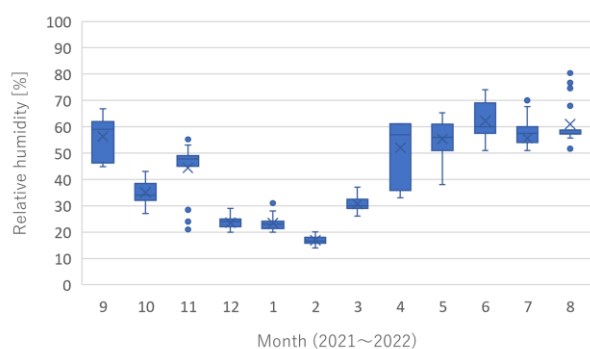


Fig.2 Variation of relative humidity

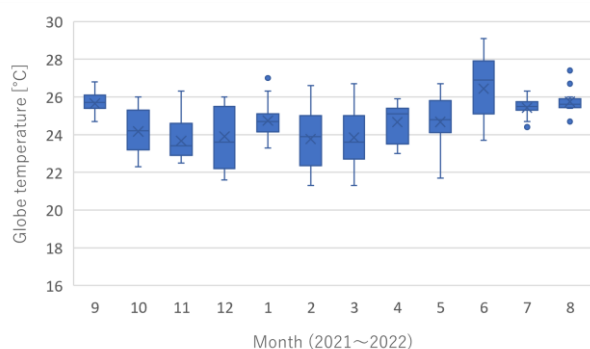


Fig.3 Variation of globe temperature

度を明らかにするために、多変量解析の手法として、順序ロジスティック回帰分析を用いた。多変量解析に用いる項目について記入不備のあった回答を除外し、630 件のデータを用いて解析を行った。

天井効果・床効果や多重共線性の確認、単変量解析による乾湿感との相関の確認を行い、多変量解析に用いる項目を抽出した。抽出結果を表3に示す。このうち、網掛けで示した16項目を多変量解析に用いることとした。

4.2 結果

多変量解析を行い、乾湿感に影響をおよぼしている要因とその影響度を求めた結果を表4に示す。性別、暑が

Table.3 Extraction results of items for multivariate analysis

Basic items		Environmental survey items	
Gender		Air temperature****	Globe temperature
		Relative humidity	Mean radiant temperature****
Age***		CO ₂ concentration***	Absolute humidity****
Constitution	Sensitivity to heat	Subjective evaluation items	
	Neither***		
	Sensitivity to cold		
	Prefer		
Cooling preference	Neither****	Modified thermal sensation	Air quality
	Dislike***	Thermal preference****	Fatigue ***
	Prefer***	Thermal acceptability	Sweating condition
	Neither***	Humidity preference**	Metabolic rate****
Heating preference	Dislike	Airflow sensation***	Amount of clothing
		Airflow preference****	Thermal sensation****
Frequently spent environment	Neutral ventilation		
	Air-conditioning		

Subjective evaluation items	
Environmental adjustment behavior to cool	Environmental adjustment behavior to warm
Ate/drank something cold	Ate/drank something hot ****
Washed hands/face*	Used a blanket over knees *
Rolled up shirt sleeves*	Put on a jacket*
Took off clothes*	Buttoned up own shirts*
Rolled up the hems of pants and skirts*	Moved to a location without air movement*
Used a paper fan*	Closed the doors and windows*
Used an electric fan*	Opened the blinds*
Opened the doors and windows*	Turned on the air-conditioning*
Closed the blinds*	Turned on the heater*
Turned on the air-conditioning*	Moved to a place with more sunlight*
Moved to a location not exposed to solar radiation*	Sat in closed posture*
Took off shoes*	Wore slippers*
Was barefoot*	Rubbed own hands together*
Sat down in open posture*	Used a heat pad*
Tied up own hair*	No action
No action****	Other*
Other*	

Asterisks in the table indicate the reason for exclusion.

*Floor effect.

**Synonymous with the objective variable.

***Univariate analysis showed no significant relationship between the hygro-thermal sensation.

****Multicollinearity with other items.

り(体質)、寒暑感、発汗、冷たいものを飲食した、暖かくするための行動は何もしていない、着衣量、相対湿度の8項目が、乾湿感への影響が有意にあることが明らかになった。

各要因の影響度はオッズ比から読み取ることができる。オッズ比は説明変数の値の増加が1のときの変化量を表す。今回の解析では、乾燥を1、中立を2、湿潤を3と設定したことから、数値が1より大きい場合は、湿潤に感じやすくなる程度が大きいことを示している。また、オッズ比の逆数は、乾燥を感じている程度を示す。たとえば、性別のオッズ比は2.85であり、これは女性に比べて男性の方が約2.9倍湿潤に感じやすいことを示している。他の要因に関しても、同様に影響度の解釈ができる。

また、定数項が有意であったため、今回検討した表3の項目以外にも、影響する項目が存在する。

5. 考察

性別、発汗、相対湿度は、既往研究²⁾³⁾⁵⁾⁶⁾においても、乾湿感との関係性が指摘されていたものである。これら以外の5項目(暑がり、寒暑感、冷たいものの飲食、暖かくするための行動の有無、着衣量)は、本研究により乾湿感との関係が示されたものである。それぞれについて考察する。

性別：女性に比べて男性の方が約2.9倍湿潤に感じや

すいという結果は、陳ら²⁾が実験により明らかにしている、高湿度環境において男性が女性よりも許容できない人が多い事実と一致する。これは、性別による乾湿感の差が出ているといえる。

発汗：松尾ら⁶⁾は、肌のべたつきの感じやすさと乾湿感の相関が高いことを示している。今回の結果で発汗が乾湿感の説明変数として有意であったのは、発汗が増加すると皮膚が湿った状態になりべたつきを感じるためであると考えられる。

相対湿度：相対湿度が高いほど湿潤に感じられる結果は、松本ら⁵⁾により実験的に示されている。今回の環境調査結果でも相対湿度との関係はいずれの説明変数よりも乾湿感との相関関係が強く、乾湿感に最も影響を与えている要因といえる。

寒暑感：寒暑感は、4月から9月は暑い側、12月から2月が寒い側と年間で差が見られた。今回は1年分の結果をまとめて分析したため、寒暑感の暑い側で湿潤に感じやすくなるのは、相対湿度の影響を受けていることが考えられる。ただ、寒暑感と相対湿度の相関係数は0.3程度であり高くはなく、また、寒暑感で暑い側でも乾燥に感じる人もいる。暑いと感じる状態は、体から熱を逃がす働きが機能しており、発汗が増えていると考えられる。そのため湿潤に感じやすいと考えられる。

暑がり(体質)：尾山ら⁷⁾は、暑がりの人はそうでない人よりも発汗量が多いことを示している。また、松尾ら²⁾は発汗が増加するほど湿潤に感じることを示している。これらの研究より、暑がりの人がより湿潤に感じやすいという結果は、発汗しやすいためであると考えられる。

冷たいものを飲食した(涼しくするための行動)：冷たいものを飲食したという回答は、4月から10月が中心であり、その時期のほとんどの測定で相対湿度30%以上を記録していた。冷たいものを飲食した回答は、他の要因との相関関係もいずれも低い。相対湿度や季節での分類が必要と考えられる。

暖かくするための行動は何もしていない(暖かくするための行動)：同様に、暖かくするための行動をしたという回答は、8月以外のすべての月で見られたが、10月から3月が特に多い。暖かくする行動は、寒さを感じたときに行われると考え、暖かくするための行動をしていない回答は、体が暖かい状態と考えられる。そのため、発汗量は多いことが予想され、湿潤に感じていると考えられる。

着衣量：相対湿度と相関が比較的に強いために、有意差がついた可能性もある。着衣量が増える(厚着である)ことは、肌部分では水分が保たれることにつながり、湿潤に感じると考えられ、本結果と矛盾する。着衣量が多いのは、冬期の低温の時期であり、この時期に低湿のデー

Table.4 Odds ratio of factors affecting hygro-thermal sensation

Items	Number (Ratio [%])			Odds ration	P value
	Dry	Neutral	Wet		
Gender					p <0.001
Women	253 (40.2)	121 (19.2)	65 (10.3)	1.00	
Men	53 (8.4)	73 (11.6)	65 (10.3)	2.85	
Sensitivity to heat					p <0.001
No	204 (32.4)	100 (15.9)	54 (8.6)	1.00	
Yes	102 (16.2)	94 (14.9)	76 (12.1)	1.85	
Modified thermal sensation					0.0090
Cold	74 (11.7)	16 (2.5)	9 (1.4)	1.00	
Neutral	178 (28.3)	145 (23.0)	48 (7.6)	1.54	
Hot	54 (8.6)	33 (5.2)	73 (11.6)	2.37	
Sweating condition					0.0381
No sweating	211 (33.5)	116 (18.4)	35 (5.6)	1.00	
Sweating	95 (15.1)	78 (12.4)	95 (15.1)	1.49	
Ate/drank something cold					0.0264
No action	270 (42.9)	147 (23.3)	77 (12.2)	1.00	
Action	36 (5.7)	47 (7.5)	53 (8.4)	1.56	
Environmental adjustment behavior to warm					0.0131
Action	113 (17.9)	17 (2.7)	12 (1.9)	1.00	
No action	193 (30.6)	177 (28.1)	118 (18.7)	1.91	
Amount of clothing					p <0.001
Increase by 0.1clo	-	-	-	0.86	
Increase by 1clo	-	-	-	0.22	
Relative humidity					p <0.001
Increase by 1pt	-	-	-	1.04	
Increase by 10pt	-	-	-	1.48	
Constant term	-	-	-	-	p <0.001

タが多いことが、結果に影響している可能性がある。また、冬期においては、着衣量が増えることで体部の保湿がある一方、周囲の相対湿度が低いため、着衣に覆われず露出される手や顔などで乾燥を感じる程度が相対的に高くなることも考えられる。高田ら³⁾が示す、肌で感じる乾燥感の影響が、着衣量が増えることで大きくなったとも考えられる。

年齢について差¹⁾が乾湿感に影響する要因であると示していたが、本研究では有意な影響を与えている要因にならなかった。既往研究では60～90代と20～30代の比較を行い、その差を示していたが、今回は20～60代が主な回答者であり、この範囲においては年齢による差はないといえる。

今回、定数項が有意なまま残ったため、本調査の調査項目・解析項目以外にも、乾湿感に影響をおよぼしている有意な要因が存在する。この未知の有意な要因として、空調モードや外気温が考えられる。

暑がり(体質)や寒暑感については、発汗との関係が考えられた。発汗状態と乾湿感の関係は、尾山ら⁷⁾が実験で示しており、今回の結果により実フィールドでもその傾向が示された意味は大きい。

また、最も乾湿感との関連が強い相対湿度の影響が考えられる項目もある。本研究では1年を通して考えたため、年間の相対湿度の差の影響を見ることができていない。相対湿度域を分けて分類することや、絶対湿度により分類することで、他の要因との関係を明らかにできる可能性がある。さらに、相対湿度の差は、今回データの個数の関係から分析対象にできていない空調モードや外気とも関係していることから、分類方法の検討が必要である。

乾燥と湿潤については、感じ方や反応機構が異なると考えられ、今回のように乾燥と湿潤の感覚を同軸で扱うことに限界があることがうかがえた。乾湿感を乾燥感と湿潤感に分けることも、研究の展開として考えられる。

6. おわりに

本研究では、乾湿感に影響をおよぼす要因とその影響の大きさを明らかにすることを目的として、オフィスでのフィールド調査においてアンケートと環境測定を実施し、得られたデータを用いて、乾湿感に影響する要因についての解析を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 多変量解析により、乾湿感に影響をおよぼしている要因は性別、暑がり、相対湿度、寒暑感、発汗、冷たいものを飲食した、暖かくするための行動は何もしていない、着衣量の8項目であることが明らかになった。
- 2) 男性は女性よりも約2.9倍、相対湿度は10ポイント増加すると約1.5倍、発汗によって約1.5倍湿潤に感じ

やすい。暑がりの人は、そうでない人に比べて約1.9倍、寒暑感は暑い側に移行することで約1.5倍、冷たいものを飲食すると約1.6倍、暖かくするための行動をしていない場合は約1.9倍湿潤に感じやすい。また、着衣量は、0.1clo増加すると約1.2倍乾燥を感じやすくなる。

現状、湿度調整は乾燥や湿気を感じてから個人で行っているが、このように湿気を感じやすい・乾燥を感じやすい人の条件について整理することで、感覚の鈍い人には、湿気や乾燥を感じていなくても積極的な湿度調整するように促すなど、オフィスの湿度環境改善の提案につなげることができる。

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、武庫川女子大学附属中学校高等学校、茨木市役所にご協力いただいた。ここに深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 姜燕、龍有二、香川治美:高齢者福祉施設における温熱環境と利用者および入居者の生理心理に関する研究:その2 通所施設における冬季および夏季の調査結果、日本建築学会環境系論文集、第73巻、第624号、pp.191～197、2008.2
- 2) 陳啓敏、中野慎哉、垣鏑直:相対湿度一定における心理・生理反応の日内変動の性差に関する実験的研究—高湿度条件の場合—、人間-生活環境系シンポジウム報告集、第42巻、pp.87～90、2018.12
- 3) 高田暁:低湿度条件下での乾燥感に関する被験者実験、人間-生活環境系シンポジウム報告集、第42巻、pp.113～116、2018.12
- 4) 田辺新一、堤仁美、鈴木孝佳:オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究 第1報 空気温度・相対湿度の組み合わせによる温冷感の違い、空気調和・衛生工学会論文集、109号、pp.1～9、2006.4
- 5) 松本泰輔、福田英司:全身温冷感中立付近の室温における湿度の温冷感、乾湿感ならびに快適感に及ぼす影響に関する実験的研究、日本建築学会技術報告集、第17巻第37号、pp.931～936、2011.10
- 6) 松尾朋浩、窪田英樹、竹内崇、堀井崇司、鎌田紀彦:夏期室内暑熱環境の評価(2)—空気の湿度感に関する一考察—、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.373～374、1997.9
- 7) 尾山誠、永村一雄、深井一夫:「暑がり」「寒がり」と発汗量、日本生気象学会雑誌、第30巻、第3号、p.150、1993

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 — Effect of solar shading on indoor thermal environment — (part1) Model experiments using bamboo blind —

○白川 智也 (大阪電通信大学)

添田 晴生 (大阪電通信大学)

Tomoya SHIRAKAWA*1 Haruo SOEDA*1

*1 Osaka Electro-Communication University

In this study, by clarifying the shielding effect and the energy saving effect of shielding such as bamboo blinds, we conducted a comparative study of shielding such as bamboo blinds in the natural environment for the purpose of promoting heat shielding measures. Experiments have shown that when a bright color is used, the performance as a solar radiation shield is inferior to that of a dark color, since solar radiation may be transmitted.

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、さらに夏場の高熱化が予想される。高熱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いる。すだれは安価で設置収納が容易で、災害時にも簡単に用いることができる。また、最近ではすだれ以外に、プラスチックすだれやサンシェードなど様々な種類の遮蔽物があるが、すだれを含めて、それらの省エネルギー効果を明らかにされている研究例[1]があるが、まだ知見が少ないのが現状である。そこで、本研究では、すだれなどの遮蔽物の遮熱効果また省エネルギー効果を明らかにすることで、遮熱対策を促進させることを目的とする。

本報告では、模型実験により、すだれ、プラスチックすだれ、サンシェードを用いて比較実験を行った。

1. 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。熱電対の位置は模型の中心を T₁, T₄, T₆, 断熱材と地面の間を T₂, T₅, T₇, 地表を T₃, ガラス (高さ 350mm, 幅 200mm) の表面の中央部を T₉, T₁₀, T₈ 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。

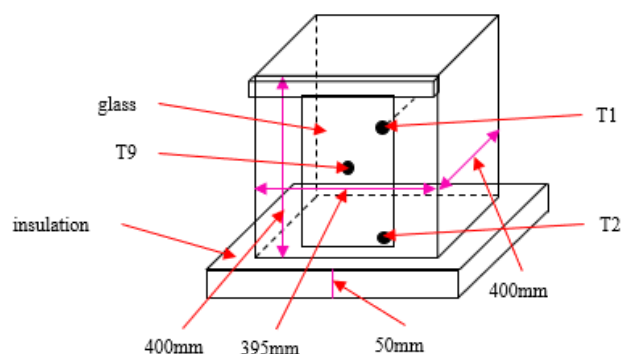


Fig. 1 model and Layout of thermocouple

2. 模型実験結果

2.1 複層ガラスと Low-E ガラスの比較実験

一般的に住宅やビルに使用される複層ガラスと、日射遮蔽型の Low-E ガラスを比較することにした。熱的性能は Low-E ガラスの方が優れているのは明らかであるが、実際どれくらいの温度差が出るのかを検証することにした。

実験で用いた複層ガラスの熱的性能は遮蔽係数 0.90、熱還貫流率 3.3W/(m²·K) あり、Low-E ガラスの熱的性能は遮蔽係数 0.44、熱貫流率は 2.5W/(m²·K) である。

模型実験の様子を Fig. 2 に示す。模型 1 (複層ガラス) と模型 2 (Low-E ガラス) として、2022 年 8 月 25 日から 8 月 29 日まで実験を行った。8 月 26 日の実験結果と D 号館屋上で実測した外気温と全天日射量を Fig. 3 に示す。

結果から、模型中心温度において大きな差異は見られ

なかった。5 日間における模型中心の最高温度を比較すると、模型 1（複層ガラス）を用いた場合で 44.3℃、模型 2（Low-E ガラス）を用いた場合で 43.3℃であり、最高温度の温度差は 1.0℃であった。

本実験では、薄曇りであり日射量も十分ではないということから、複層ガラスと Low-E ガラスではあまり性能差が見られなかった可能性がある。



Fig. 2 Model experiment of model 1 (double glazing) and model 2 (Low-E glass)

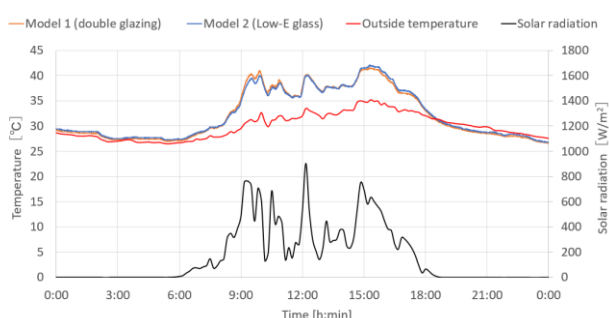


Fig. 3 Model test results for model 1 (double glazing) and model 2 (Low-E glass) on August 26, 2022 (central temperature)

2.2 日射遮蔽物の種類と色による比較検討

古くから遮熱対策として、すだれが用いられており、最近ではすだれ以外に、プラスチックすだれやサンシェードが用いられるようになってきた。これは日射遮蔽物が個々の住宅に合わせて使用できるように種類だけでなく色も明るめのものと暗めのものがある。本実験では、これらの比較実験を行いそれぞれの遮熱効果を明らかにしていくために、種類と色の比較実験を行うことにした。

2.2.1 すだれとプラスチックすだれ（明色）の比較検討

まずは、古くから用いられてきたすだれと、プラスチックすだれ（明色）の比較実験を行い、その様子を Fig. 4 に示す。模型 1（プラスチックすだれ明色）と模型 2（すだれ）と模型 3（遮蔽物無し）として、2022 年 11 月 2 日から 11 月 7 日まで実験を行った。11 月 3 日の実験結果を Fig. 5 に示す。以降の実験は、すべて複層ガラスを用いて実験を行った。

結果から、模型中心温度においてすだれの方がプラスチックすだれ（明色）よりも常に低い温度を示している。6 日間における模型中心の最高温度を比較すると、模型 1（プラスチックすだれ明色）を用いた場合で 30.5℃、模

型 2（すだれ）を用いた場合で 29.7℃、模型 3（遮蔽物無し）を用いた場合で 36.2℃であり、プラスチックすだれ（明色）を用いた場合、すだれを用いた場合よりも、0.8℃高かった。また、遮蔽物を用いなかった場合、すだれを用いた場合よりも、5.7℃高かった。プラスチックすだれ（明色）を用いた場合に模型中心温度が高かった原因としては、色が明るいためか、日射を透過している可能性が考えられる。

サーモグラフィカメラより、プラスチックすだれ（明色）の表面温度はすだれの表面温度よりやや低いことが確認される。これは色が明るいことにより、日射が反射、あるいは透過しているのではないかと考えられ、日射遮蔽物としてあまり良くないと考えられる。



Fig. 4 Model experiment of model 1 (bright colored plastic blinds), model 2 (bamboo blinds), and model 3 (no shields)

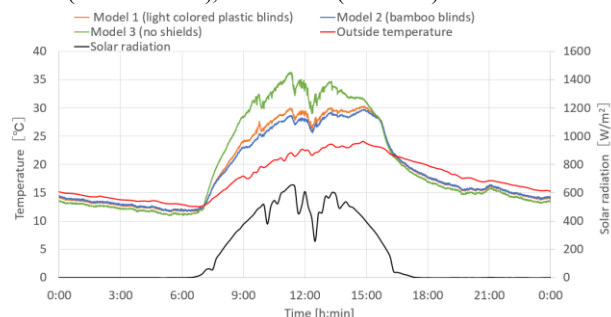


Fig. 5 Model test results for model 1 (light colored plastic blinds), model 2 (bamboo blinds), and model 3 (no shields) on November 3, 2022 (central temperature)

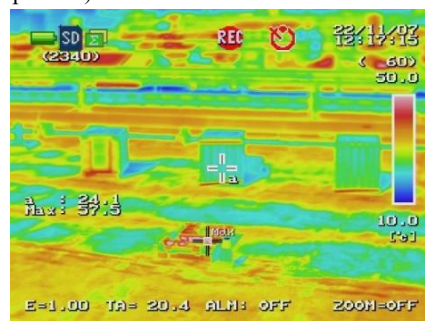


Fig. 6 Thermography camera of model 1 (bright colored plastic blinds), model 2 (blind blinds) and model 3 (no shields) at 12:17 on November 7, 2022

2.2.2 プラスチックすだれの色の違いによる比較検討

次にプラスチックすだれの色の違いによる比較実験を行い、その様子を Fig. 7 に示す。模型 1（プラスチックすだれ明色）と模型 2（プラスチックすだれ暗色）と模型 3

(遮蔽物無し) として、2022 年 10 月 18 日から 10 月 21 日まで実験を行った。10 月 20 日の実験結果を Fig. 8 に示す。

結果から、模型中心温度においてプラスチックすだれ (暗色) の方がプラスチックすだれ (明色) よりも常に低い温度を示している。4 日間における模型中心の最高温度を比較すると模型 1 (プラスチックすだれ明色) を用いた場合で 30.9℃、模型 2 (プラスチックすだれ暗色) を用いた場合で 30.1℃、模型 3 (遮蔽物無し) を用いた場合で 37.4℃であり、プラスチックすだれ (明色) を用いた場合、プラスチックすだれ (暗色) を用いた場合よりも、0.8℃高かった。また遮蔽物を用いなかった場合、プラスチックすだれ (暗色) を用いた場合よりも 6.3℃高かった。

サーモグラフィカメラより、プラスチックすだれ (明色) の表面温度はプラスチックすだれ (暗色) の表面温度より低いことが確認される。これは暗色の場合、熱を吸収しており、明色の場合、2.2.1 と同様の原因で日射が反射、あるいは透過しているのではないかと考えられる。

この結果からプラスチックすだれ (明色) を用いた場合透過して、模型内に直接日射が届いている可能性があり、プラスチックすだれ (暗色) を用いた場合熱を吸収して室内に影響を与えなかったと考えられる。

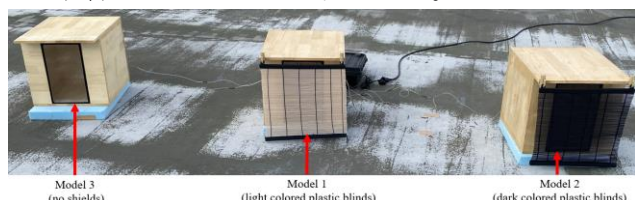


Fig. 7 Model experiment of model 1 (light colored plastic blinds), model 2 (dark colored plastic blinds) and model 3 (no shield)

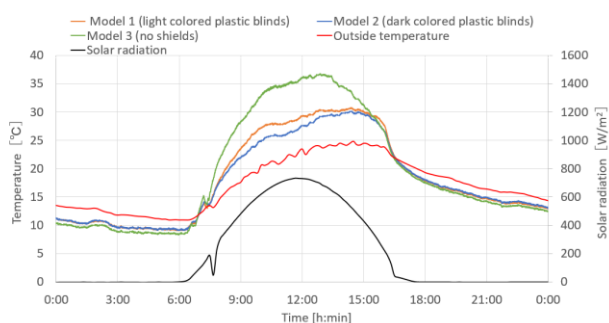


Fig. 8 Model test results for model 1 (bright colored plastic blinds), model 2 (dark colored plastic blinds) and model 3 (no shield) on October 20, 2022 (central temperature)

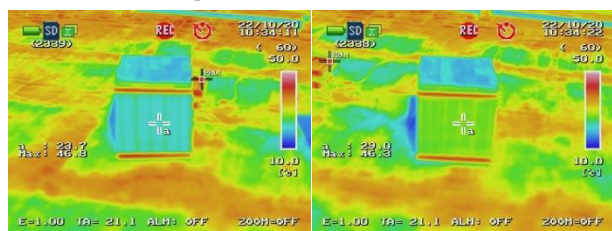


Fig. 9 Thermography camera of model 1 (light colored sunshade) and

model 2 (light colored plastic blinds) at 10:34 on October 20, 2022

2.2.3 サンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) の比較検討

次にサンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) の比較実験を行い、その様子を Fig. 10 に示す。模型 1 (サンシェード明色) と模型 2 (プラスチックすだれ明色) と模型 3 (遮蔽物無し) として、2022 年 11 月 24 日から 11 月 28 日まで実験を行った。11 月 25 日の実験結果を Fig. 11 に示す。

結果から、模型中心温度において大きな差異は見られなかった。5 日間における模型中心の最高温度を比較すると模型 1 (サンシェード明色) を用いた場合で 28.1℃、模型 2 (プラスチックすだれ明色) を用いた場合で 29.2℃、模型 3 (遮蔽物無し) を用いた場合で 34.4℃であり、プラスチックすだれ (明色) を用いた場合、サンシェード (明色) を用いた場合よりも、1.1℃高かった。13:00～16:00 の間、サンシェード (明色) の方がプラスチックすだれ (明色) より温度が低くなっているが、午前はわずかにサンシェード (明色) の方が高くなっている。以上から、サンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) の性能差があまりないと考えられる。また遮蔽物を用いなかった場合、サンシェード (明色) を用いた場合よりも 6.3℃高かった。

この実験結果から、サンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) は、同等の性能であると考えられる。



Fig. 10 Model experiment of model 1 (light colored sunshade), model 2 (light colored plastic blinds), and model 3 (no shield)

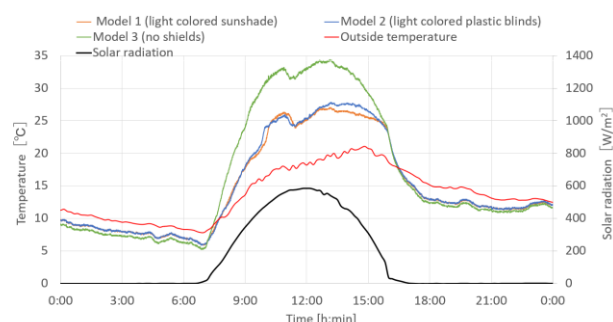


Fig. 11 Model test results for model 1 (light colored sunshade), model 2 (light colored plastic blinds), and model 3 (no shield) on November 25, 2022 (central temperature)

2.2.4 サンシェードの色の違いによる比較検討

次にサンシェードの色の違いによる比較実験を行い、

その様子を Fig. 12 に示す。模型 1 (サンシェード暗色) と模型 2 (サンシェード明色) と模型 3 (遮蔽物無し) とし、2022 年 11 月 15 日から 11 月 18 日まで実験を行った。11 月 16 日の実験結果を Fig. 13 に示す。

結果から、模型中心温度においてサンシェード (暗色) の方がサンシェード (明色) よりも常に低い温度を示している。4 日間における模型中心の最高温度を比較すると模型 1 (サンシェード暗色) を用いた場合で 25.8℃、模型 2 (サンシェード明色) を用いた場合で 26.7℃、模型 3 (遮蔽物無し) を用いた場合で 34.2℃であり、サンシェード (明色) を用いた場合、サンシェード (暗色) を用いた場合よりも、0.9℃高かった。また遮蔽物を用いなかった場合、サンシェード (暗色) を用いた場合よりも 8.4℃高かった。

サーモグラフィカメラより、サンシェード (明色) の表面温度はサンシェード (暗色) の表面温度より低いことが確認される。これはプラスチックすだれの色による比較検討の結果と同じ現象がサンシェードでも起きているのではないかと考えられる。

この結果から、プラスチックすだれの色による検討と同様の傾向が見られた。



Fig. 12 Model experiment of model 1 (dark colored sunshade), model 2 (light colored sunshade), and model 3 (no shield)

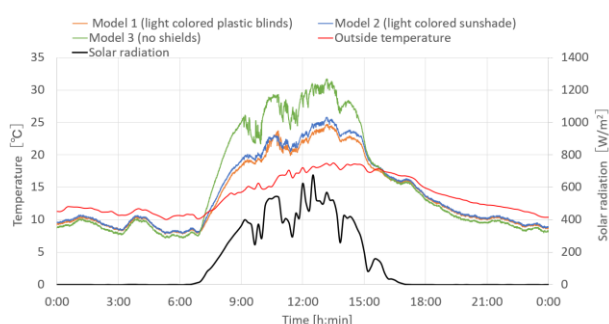


Fig. 13 Model test results for model 1 (dark colored sunshade), model 2 (light colored sunshade), and model 3 (no shield) on November 16, 2022 (central temperature)



Fig. 14 Thermal cameras of model 1 (dark colored sunshade), model 2 (light colored sunshade), and model 3 (no shield) at 13:26 on November 15, 2022

まとめ

本研究では、窓の外側に日射遮蔽物を設置し自然環境下の模型内の温度を測定し、比較検証を行った。その結果は以下通りである。

- (1) ガラスの比較検討を行った結果、薄曇りであり日射量も十分ではないということから、複層ガラスと Low-E ガラスでは性能差が見られなかった可能性がある。
- (2) 日射遮蔽物の種類の検討を行った結果、模型中心の最高温度がプラスチックすだれ (明色) よりも、すだれの方が 0.8℃低い結果が得られた。これは、プラスチックすだれの色が明るく、日射が反射、あるいは透過しているのではないかと考えられる。
- (3) 日射遮蔽物の色の違いによる検討を行った結果、プラスチックすだれとサンシェードともに暗色の模型中心の最高温度が低い結果が得られた。また、サンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) の比較検討の結果からサンシェード (明色) とプラスチックすだれ (明色) は同等の性能であると考えられる。

明色を用いた場合、日射が透過している可能性があるため、日射遮蔽物として暗色よりも劣るという結果であったが、実際に使用する際には照度も考慮すべきであるので、照度も計測する必要がある。

また、今後シミュレーションも行い、精度の検証を踏まえて、エネルギー消費の低減効果について明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] 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の節電効果の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.225-228, 2016 年

CFD 解析による LDK の空間構成と台所での熱中症リスクの評価

Evaluation of effect of LDK layout on heat stroke risk in a residential kitchen using CFD analysis

○鈴木 乙 葉 (奈良女子大学)

吉 田 伸 治 (奈良女子大学)

Otoha SUZUKI*1 Shinji YOSHIDA*1

*1 Nara Women's University

In this paper, we evaluated effects of space configurations of a kitchen in LDK on the hazard against heatstroke using CFD analysis. Four types of kitchen layout were examined in the present analysis: I row facing a wall with a partition (Case 1), I row facing a wall without a partition (Case 2), peninsula type layout (Case 3), and island type layout (Case 4). Meteorological data measured at Nara regional meteorological observatory were applied in the present analysis. Through the investigations, it was found that the thermal environment in the summer season degrades when installing the island type kitchen.

1. はじめに

近年、夏季の暑熱環境悪化に伴い、熱中症発症者は増加傾向にあり、そのなかでも令和 4 年の消防庁の統計によると¹⁾、熱中症発生場所は約 4 割が住宅内である。特に住宅内の台所は調理によって熱や湿気の発生があるにも関わらず、温熱環境を制御する空調設備がないため、暑熱障害を引き起こす危険性が懸念される。

しかし、台所における温熱・空気環境の評価に関する研究は、業務用厨房を対象としたものが多く、住宅を対象としたものは換気や冬季の温熱・空気環境に着目したものがほとんどである。

また、近年の住宅 LDK の空間構成は多様であり、その違いによる温熱環境の差が現れることが考えられる。そこで本研究では数値流体力学 CFD による LDK の空間構成の違いにおける住宅台所内の熱中症リスクを評価することを目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析対象

本解析では南面に窓を設けた 16 畳の仮想 LDK 空間 (7,280mm[X]×3,640mm[Y]×2,500mm[Z], X 軸: 南北方向, Y 軸: 東西方向) をモデルとする。

2.2 解析ケース

解析はキッチンレイアウト条件を変えて全 4 ケースの解析を行った。まず、基本ケースとして I 列背面型とし、リビングとダイニングキッチンとの間に隔壁を設けたものを case1 とする。case1 から隔壁を取り除いたもの

のを case2、キッチンレイアウトをペニンシュラ型にしたものを case3、アイランド型にしたものを case4 とする。解析対象の外観図、平面図、断面図をそれぞれ

Fig.1、Fig2、Fig3 に示す。

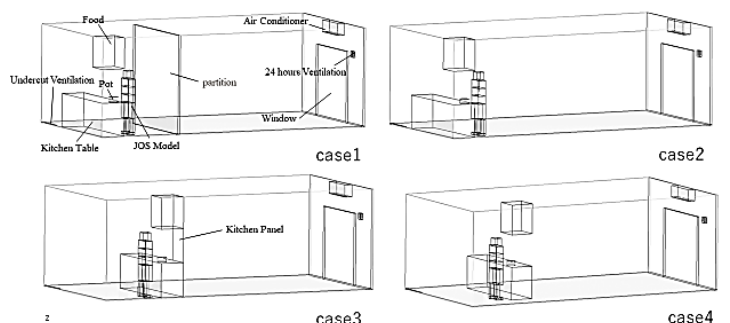


Fig.1 Outside Drawing

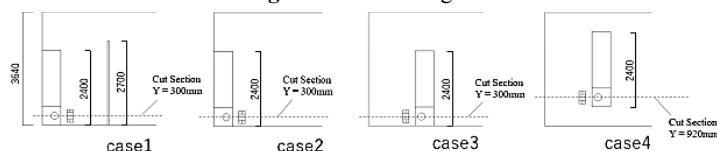


Fig.2 Floor Plan

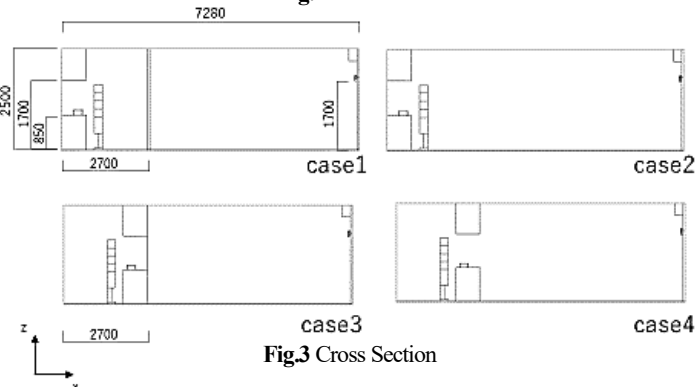


Fig.3 Cross Section

2.3 解析条件

本解析は、仮想のLDK空間を解析対象とするが、外部条件には過去3年で奈良県奈良市においてもっとも高い外気温を記録した2020年8月20日15時の37.8℃を設定した⁴⁾。計算条件はTable.1に示す。

Table.1 analysis condition

Wall Condition	Temperature	Xmin, Ymin, Ymax : temperature logarithmic law heat transfer, external temperature 32°C, emissivity 0.9 Xmax : heat conduction, external temperature 37.8°C Zmin : heat conduction, external temperature 32°C Zmax : temperature logarithmic law heat transfer, external temperature 30°C, emissivity 0.9
	convective heat transfer	surface of a pot : 100W/(m ² · K), moisture generation : 6.96 × 10 ⁻⁴ [kg/m ² · s]
Inflow Condition	24 hours Ventilation	60mm × 150mm × 150mm Qin = 100m ³ /h θ in = 37.8°C
	Undercut Ventilation	900mm × 20mm Qin = 200m ³ /h θ in = 32°C
Outflow Condition	Food	600mm × 600mm × 400mm Qout = 300m ³ /h
Heat Condition	Pot	100°C
	Human Body	JOS model
Air Conditioner	Size	Main Body : 200mm × 900mm × 300mm Outlet : 50mm × 900mm Inlet : 900mm × 300mm
	Outlet	Qin = 7.5m ³ /min
	Inlet	Qout = 7.5m ³ /min
Pot	Size	φ = 230mm, H = 110mm
etcetra		Initiation Temperature : 28°C

3. 解析結果

結果に示すベクトル分布図、コンター図の表示断面はcase1, 2, 3ではY=300mm, case4ではY=920mmの鍋・人体熱モデル中心で切断した面である。

3.1 気流・気温

Fig.4の気流に着目する。case1では、エアコンから出た気流はリビングから台所方向に向かって床付近を進み、隔壁にぶつかった後、鉛直・水平方向へと流れる様子が見

られる。鍋からの上昇流はフードにほとんど捕集され、わずかに台所の天井付近へと流れる。case2では隔壁がないため台所までエアコンの気流が進み、ぶつかった後鉛直方向に流れ、台所壁面方向と台所方向へ分かれる。case1同様鍋からの上昇流はほとんどフード捕集されるものの、捕集されなかった上昇流は台所へ届いたエアコンの循環気流と合流する。これが人体頭部、天井付近へと流れるため、気流がcase1よりも増速する。case3ではcase1と台所にたどり着くまでは類似しているが、調理台にぶつかった後は台所方向へ多く流れ、台所床方向へと進む様子が見てとれる。フード捕集される鍋からの上昇流が多いとともに、人体頭部付近での増速が見られる。case4ではエアコンから出た気流は、台所方向へと床付近を通って進み、調理台にぶつかった後はキッチンの人体頭部付近の高さまで流れ、循環している。また、鍋とリビングダイニングとの間に遮るものがないためにエアコンの気流が大きく作用し、鍋からの上昇流は人体顔付近を通してフード捕集される。

次に気温に着目する。case1では、台所天井付近にわずかに熱が溜まってはいるものの、鍋上昇流のフード捕集効率はいい、人体熱モデル周辺の気温が周囲に比べて高い。case2ではフードで捕集しきれなかった鍋上昇流による熱が天井付近に流れ、リビングダイニングへと進む様子が見てとれる。case3では人体熱モデル周辺においてcase1と似た特徴が見られるが、天井付近に溜まる熱は少なく、台所中心の気温もcase1と比べて低い。case4では鍋からの熱はエアコン気流に影響され、人体の顔付近へと流れ、フード捕集率も悪く、台所、リビングダイニングの両方向へと流れ、特に台所側にその傾向は強い。

次に、リビングダイニング中央と台所(人体熱モデルと調理台の間)の2地点における上下温度分布をFig.5に示す。各地点高さ0.1m, 0.6m, 1.1m, 1.6m, 2.1mの地点で比較する。

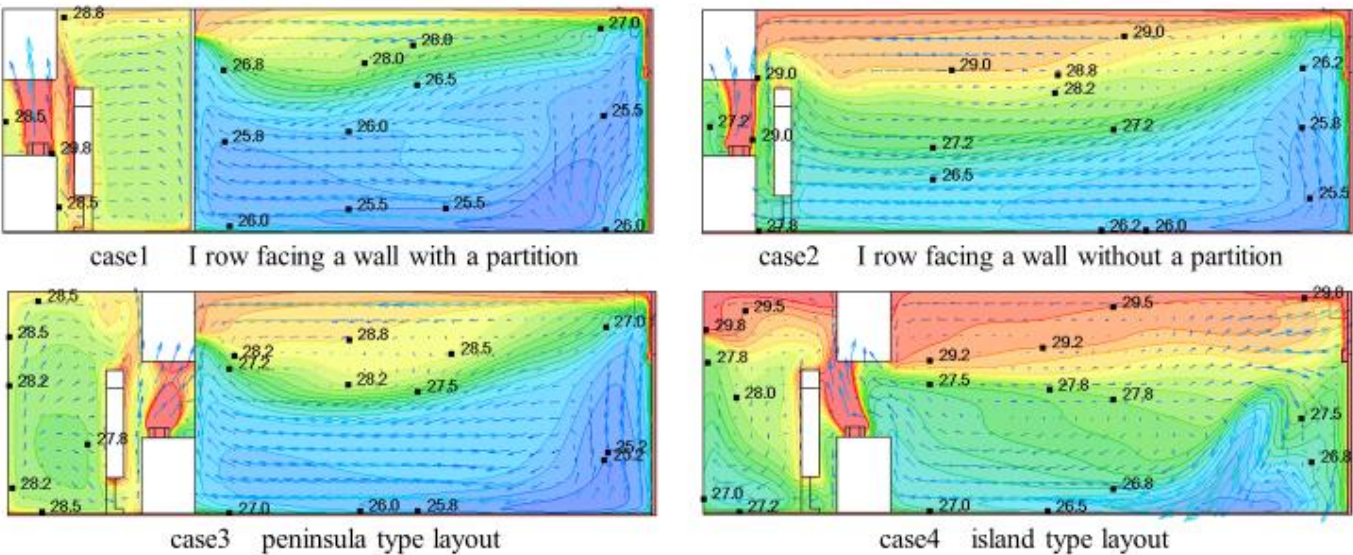


Fig.4 Air Flow・Temperature Distribution

リビングダイニングにおいてはおよそ高さに比例して気温が高くなっている。case2, 4では1.1mの地点においては比例関係をはずれて低いのは、両ケース共にフードとリビングダイニングとの間に遮るものがないケースであるため、エアコン airflow が関係していると考えられる。台所では case2 のみリビングダイニングと同様に天井に近づくにつれて気温が高い。case2 はリビングダイニングと台所の間の隔壁がないために同様の温度分布になっていると考えられるが、リビングダイニングに比べて2.1m地点での温度が高く、鍋からの熱の影響を大きく受けることがわかる。高さ1.6mまでは他のケースに比べて気温は低い。case1, 3, 4では人体熱モデルの頭部付近に位置する1.6mにおいて最も高く、case4でその傾向が強い。これは鍋からの熱が大きく人体側に流れているためだと考えられる。また、case3で最も上下温度差が小さい。

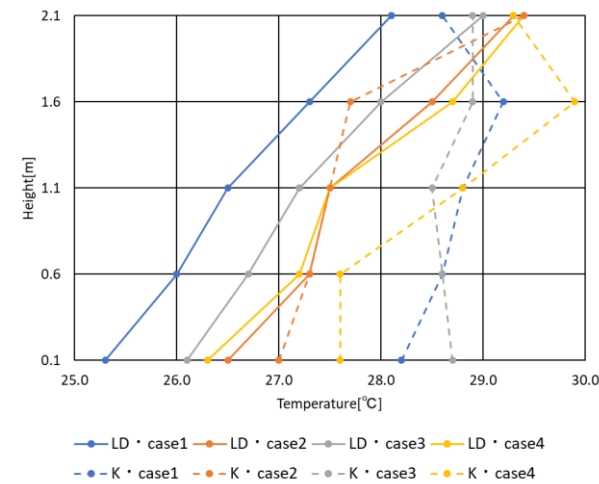


Fig.5 Upper and Lower Temperature Distribution Chart

3.2 MRT

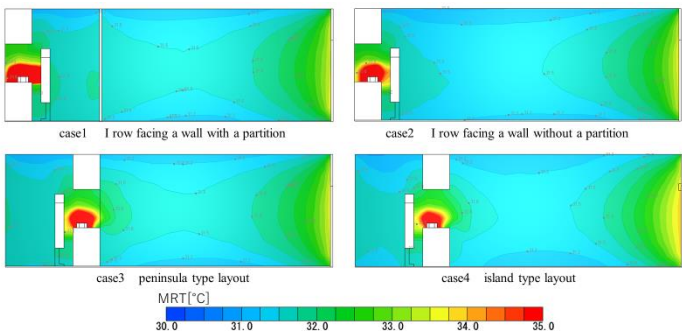


Fig.6 MRT Distribution

Fig.6より、MRTは鍋の影響によって人体熱モデル腹部付近で高くなっていることがわかる。中でもcase1でその傾向が強く、38.1°C、case2で34.2°C、case3で34.0°C、case4で33.7°Cと台所での作業者の鍋から受ける熱放射が大きいことがわかる。

3.3 皮膚温度

Fig.7をみると、全ケースにおいて頭や首の皮膚温度に対して鍋からの熱の影響を受けやすい胸から下が高

くなる傾向にあった。ケース間を比較すると、全身では大きく差は見られないものの胴に比べて末端部では差が生じた。case4において頭や首が高いものの全身でみると影響があまりないことから脚部の皮膚温度が全身には大きく影響すると考える。

Table2より、全身の平均皮膚温度では快適感覚の範囲内であるが、35°Cから温かさや暑さを感じ始めることから、部位ごとで見ると鍋の熱を受けやすい胸や腰は温かく、人によっては暑く感じる事がわかった。

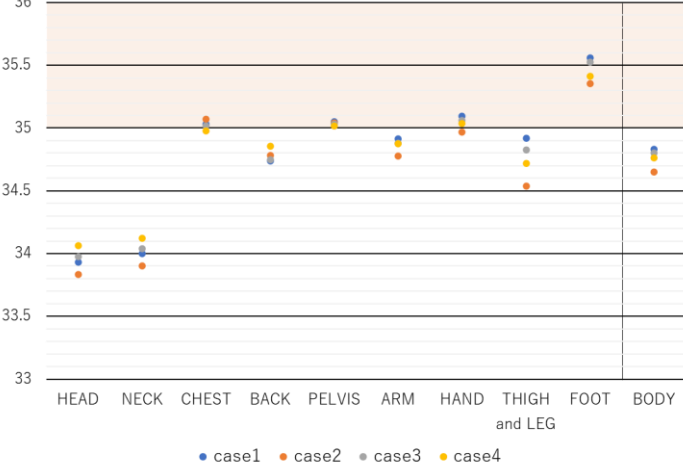


Fig.7 The Average Skin Temperature

Table2 Relation between Skin Temperature and Psychological Condition⁵⁾

皮膚温度	状態
45°C以上	皮膚組織の急速な損傷
43~41°C	灼けるような痛さ
41~39°C	痛みに移行する閾値
39~35°C	暑さの感覚
37~35°C	温かさを感じ始める
34~33°C	休息時に中立の感覚、快適感覚
33~32°C	2~4metで身体活動時、快適感覚
32~30°C	3~6metで身体活動時、快適感覚
31~29°C	いす座時、不快な寒さ

3.4 皮膚ぬれ率

Fig.8をみると、全ケース胸や背中、腰の胴体が他の部位に比べて平均皮膚ぬれ率が高く、ケース間ではcase2のみ低くその他ケースは大きな差は見られなかった。

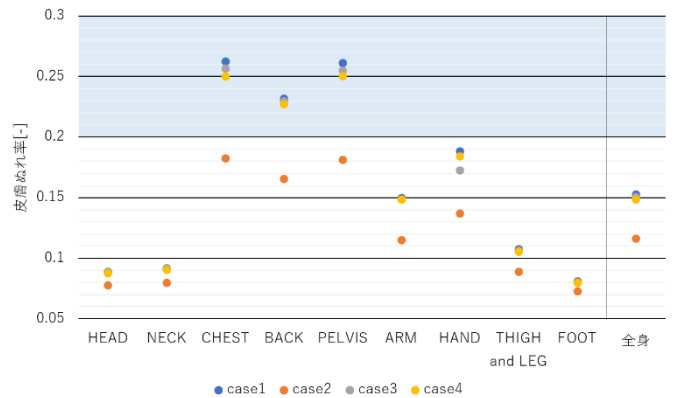


Fig.8 Skin Wettedness

早川，磯田，梁瀬ら⁶⁾の調査において皮膚ぬれ率と快適感の関係は、皮膚ぬれ率が0.2を超えると不快側の申告が増えることが報告されており、そのことから全身では不快感はあまりないと予想されるが、case1, 3, 4における胸や背中、腰に関しては部分的に不快さを感じる可能性があるといえる。台所での気温がcase2で最も低いことが大きく影響していると考ええる。

3.5 WBGT

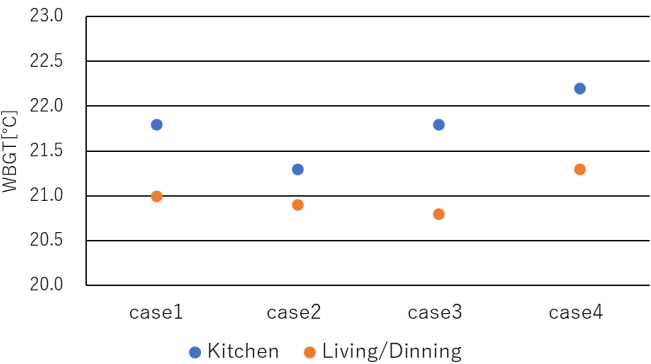


Fig.9 WBGT of Kitchen and Living Dining

Fig.9においてWBGTと生活活動の関係を表したTable3を見ると、今回の解析条件ではどのケースも「注意(WBGT25℃未満)」のレベルであった。

Table3 Guiding Principles of Daily Life

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31以上)	すべての生活活動で起こる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が高い。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28~31) ※1		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25~28) ※2	中等度以上の生活活動で起こる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に充分に休息を取り入れる。
注意 (25未満)	強い生活活動で起こる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

※1 28以上31未満、※2 25以上28未満を示します。

日本気象学会「日常生活における熱中症予防指針Ver.3」(2013)より

しかし台所とリビングダイニングを比較すると、隔壁のないcase2では差は少ないが、どのケースもリビングダイニングに比べて台所のWBGTが高く、case3において最大で1.0℃の差があり、リビングダイニングに比べて台所の熱中症リスクは高いといえる。特にcase4のアイランド型におけるWBGTは台所もリビングダイニングも高く、最も熱中症リスクが高いと考えられる。

4. まとめ

本解析ではLDKの空間構成の違いによる台所の熱中症リスクについて検討した。本解析により得られた知見を以下に示す。

- LDKの空間構成の違いに関わらず、台所における気温やWBGTがリビングダイニングに比べて高く、温熱環境が悪いことが示された。
- 皮膚温度、皮膚ぬれ率は全身では不快感が生じる値

ではなかったが、胸や背中、腰の鍋からの熱の影響を受けやすい部位に関しては高く、不快さを感じる可能性があることが示された。

- アイランド型でエアコン気流が影響して鍋からの上昇流がうまくフード捕集されず熱が天井付近に溜まる様子が顕著にみられ、WBGTも最も高い値を示しており、他の空間構成と比べて熱中症リスクは高いことが示された。

5. 今後の課題

今回はLDKの空間構成の違いにおける夏季の住宅台所の熱中症リスクを評価するにあたって、仮想のLDK空間を対象に解析を行った。今回のモデルの壁面条件は壁や床、天井の熱移動や熱伝導率を簡易的に設定したもので実際の住宅はより複雑であり、さらに今回は温度・気流・放射・湿度について解析を行ったが、日射については行っていない。また、解析部材の条件に関しても十分に検討できたとはいえない。今後は日射についても考慮したうえで、解析条件に関してはより実際の様子に近づけられるよう、実生活に近い空間や条件での実測を試みたい。

参考文献

- 総務省，消防庁：令和4年（5月から9月）の熱中症による救急搬送状況
- 近藤，阿部，藤野，太田：キッチンレイアウト・排気フード形状・暖房方式に着目したCFD解析-住宅厨房と隣接するリビング空間の温熱・空気環境に関する研究(第3報)，日本建築学会環境系論文集，第669号963-972，2011
- 有波，赤林，志賀，斎木，小前：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究(その3)，日本建築学会学術講演梗概集，2017
- 気象庁，過去の気象データ，奈良，2020/8/20
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_s1.php?prec_no=64&block_no=47780&year=2020&month=8&day=20&view=
- 社団法人空調調和・衛生工学会：快適な温熱環境のメカニズム-豊かな生活空間をめざして，丸善，1997
- 早川和代，磯田憲生，梁瀬度子：気温と強度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会学術報告集，第394号，pp.10-19，1988

室内温湿度場推定のための超音波式加湿器のモデル化と風洞実験による検証
Modeling of an ultrasonic humidifier for the estimation of indoor temperature and humidity
fields, and validation using wind tunnel experiments.

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

Yuki ISHIHARA*1 Naoto OOYA*1 Tomohito MATSUO*1 Hikari SHIMADERA*1 Akira KONDO*1
*1 Osaka University

In order to control the indoor thermal environment when using a humidifier, it is essential to accurately estimate the effects of the humidifier on ambient temperature and humidity. In this study, a phase change model originally developed for a meteorological model was modified and incorporated into a CFD model. The CFD model was validated by comparing it with wind tunnel experiments, in which the thermal environment with an ultrasonic humidifier was measured. The CFD model reproduced the tendency of temperature change associated with humidification though the temperature decrease was overestimated in some cases.

はじめに
冬季にヒートポンプ暖房を使用すると室内の相対湿度が低下する。低湿度の環境下では COVID-19 などのウイルスの不活化率が低下するほか、呼吸器官の防御機構に悪影響が及ぶため、感染症の拡大リスクが高まる¹⁾。そこで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上昇、温度を低下させるため、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考慮が必要となる。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用に修正してCFDモデルに導入するとともに、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. 風洞実験

風洞内に超音波加湿器を設置し、加湿器の風下内の温度変化を測定した。実験は大阪大学工学研究科研究用風洞で行った。本実験で用いた超音波加湿器の仕様は Table 1 に示す通りであり、加湿量は家庭用のものと比べて2倍

から3倍程度となっている。超音波加湿器の寸法を Fig. 1 に示す。吹出口は直径 60 mm の円である。風洞実験のレイアウト図を Fig. 2 に示す。風洞の寸法は x, y, z 方向に 9.5 m, 1.8 m, 1.8 m である。風洞入口に風速計と温湿度計を設置し、流入空気の状態を測定した。加湿器は風洞入口から 1.0 m の位置に設置した。温度の測定点は、x 方向について加湿器吹出口との距離が 0.10 m から 1.00 m までは 0.10 m 間隔で、1.00 m から 7.00 m までは 0.50 m 間隔で 22 点、y 方向について加湿器を中心として 0.40 m 幅、z 方向について高さ 0.20 m から 1.20 m の 1.00 m 幅とし、y, z 方向は 0.10 m 格子で測定した。実験は加湿量と風洞風速を変更して 4 ケース行った。実験時の条件を Table 2 に、実験の様子を Fig. 3 に示す。

Table 1 Properties of the ultrasonic humidifier

Size	width:290 mm, length:190 mm, heith:1120 mm			
Mode	1	2	3	4
Amount of humidification [mL/h]	380	550	740	850

Table 2 Experiment case

Caes name	Humidifier			Wind tunnel		
	Wind velocity [m/s]	Water temperature [°C]	Amount of humidification [g/h]	Wind velocity [m/s]	Air temperature [°C]	Humidity ratio [g/kg]
h1w0.5	0.74	23.2	389.3	0.49	24.9	13.5
h1w2	0.74	24.1	443.4	1.98	26.7	13.6
h3w0.5	0.74	24.5	897.7	0.49	25.8	13.4
h3w2	0.74	24.3	888.1	2.01	27.3	14.6

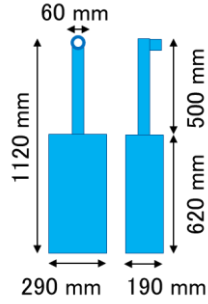


Fig. 1 Humidifier dimensions

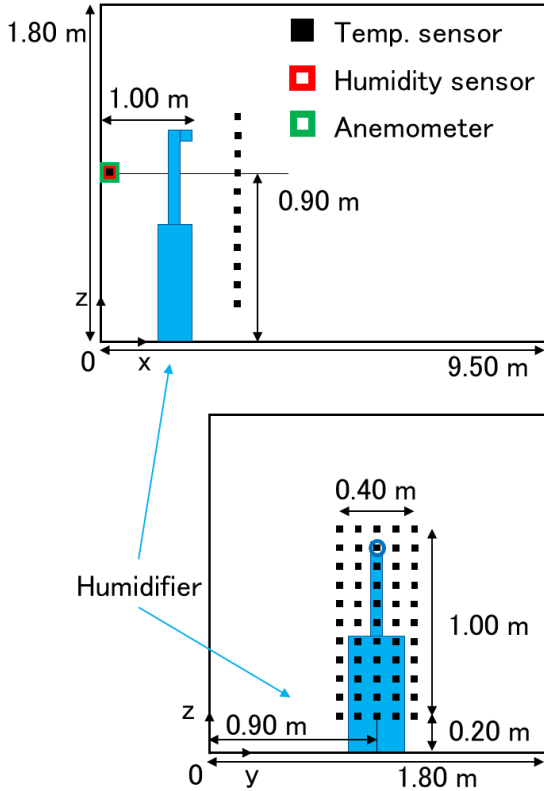


Fig. 2 Wind tunnel experimental layout

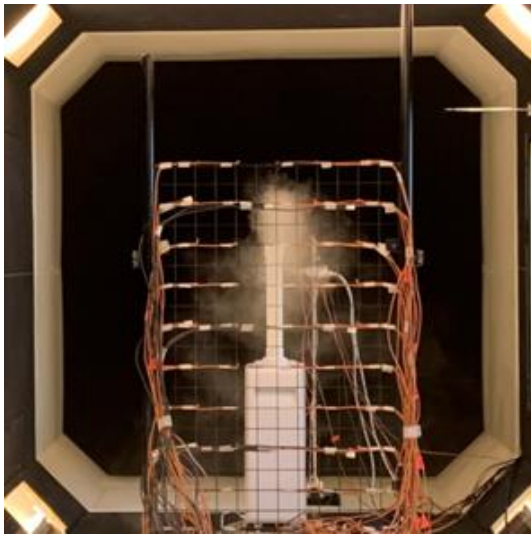


Fig. 3 Experimental scene

2. CFD モデル

2.1 相変化モデル

相変化モデルとして Kessler²⁾によって気象モデル向けに開発された相変化モデルを CFD モデルに組み込んだ。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、3相間の相変化を扱う。気象モデル向けの相変化モデルを室内温熱環境のモデルに移植するに当たり、原モデルにおける微小液滴の瞬時蒸発仮定を破棄し、微小液滴の存在量によって蒸発速度が変化するように変更した。モデル式を式(1)～(5)に示す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -v \cdot \nabla M - U_{rf} \cdot \nabla M + K_{eff} \nabla^2 M + AC + CC - EP_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -v \cdot \nabla m + K_{eff} \nabla^2 m - AC - CC - EP_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -v \cdot \nabla q + K_{eff} \nabla^2 q + EP_M + EP_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \cdot \nabla T + a_{eff} \nabla^2 T + \frac{1}{C_p \rho} (Q_p + Q_o) \quad (4)$$

$$EP_m = (q_{vs} - q) * \left(\frac{m}{m_0}\right)^{\frac{1}{3}} * f(T) * k \quad (5)$$

t は時間、 M は粗大液滴混合比、 m は微小液滴混合比、 q は水蒸気混合比である。 v は風速、 U_{rf} は粗大液滴の終端落下速度、 K_{eff} は実効拡散係数、 AC は微小液滴から粗大液滴へのオートコンバージョンを表す項、 CC は粗大液滴が微小液滴を捕集する効果、 EP_M は粗大液滴の蒸発項、 EP_m は微小液滴の蒸発項である。また、 a_{eff} は実効温度拡散率、 C_p は定圧比熱、 ρ は空気密度、 Q_p は相変化による潜熱発生量、 Q_o は外部からの加熱量、 q_{vs} は飽和水蒸気混合比、 m_0 は微小液滴混合比の初期値、 $f(T)$ は温度に関する補正項、 k は蒸発時間に関する係数である。

2.2 計算条件

モデルの検証のため、風洞実験を模擬する CFD シミュレーションを行った。シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を適宜修正して用いた。非圧縮性定常流れを仮定し、温度変化による浮力の影響を考慮するためにブジネス近似を導入した。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。計算領域は風洞を再現し、格子数は約 66 万である。超音波加湿器の吹き出し風速、水温、加湿量、及び風洞入口の風速、気温、乱流諸量、水蒸気混合比の境界条件には、風洞実験における測定値を用いた。風洞入り口の微小・粗大液滴混合比は 0 とした。

3. 結果

各ケースにおける温度分布の測定値と計算値を、加湿器からの距離が 1 m、2 m、3 m、4 m の 4 地点について Fig. 4 に、また測定面内の平均温度分布を Fig. 5 に示す。

なお、温度分布は風洞入り口からの温度低下量で表した。また加湿器の吹き出し口高さ周辺の熱電対では、熱電対の端子に液滴が付着したことで空気温度が正しく測定されていないと疑われる箇所が見られた。そのため、それらの位置については、**Fig. 5** の平均温度低下量の算出からは除外した。

測定面での温度変化分布によると、計算値と測定値の双方において、風洞風速が小さいケースの方が、温度低下が見られる部分の幅はより広がり、その中心位置の高さは低下した。これは、液滴の密度が上昇することにより蒸発による温度低下が激しくなること、また冷やされた空気の滞留時間が長くなるため、相対的に沈降及び拡散の寄与が増大することが原因だと考えられる。一方、風洞風速が大きいケースでは、冷気が沈む前に遠くまで運ばれる。風洞風速が小さいケース (**Fig. 4(a,c)**) での加湿器からの距離が 3 m, 4 m の地点に着目すると、計算値の方が拡散の影響が比較的弱い。

平均温度変化分布によると、風洞風速が大きいケースでは、平均の算出時に除外した部分に冷気がとどまっているため (**Fig. 4(b,d)**)、平均温度変化は小さくなった (**Fig. 5(b,d)**)。しかし、拡散により冷気が広がることで、風下ほど温度が低下する傾向が見られる。風洞風速が小さいケースでは、冷気の沈降及び拡散が大きいいため (**Fig. 4(a,c)**)、平均温度変化は大きくなった (**Fig. 5(a,c)**)。なお、温度低下のピークは加湿器から 3.0 m 離れた地点となっているが、これは液滴が 3.0 m 輸送されるまでの間に蒸発が完了し、以降は拡散により冷気が測定範囲の外に広がるためだと考えられる。

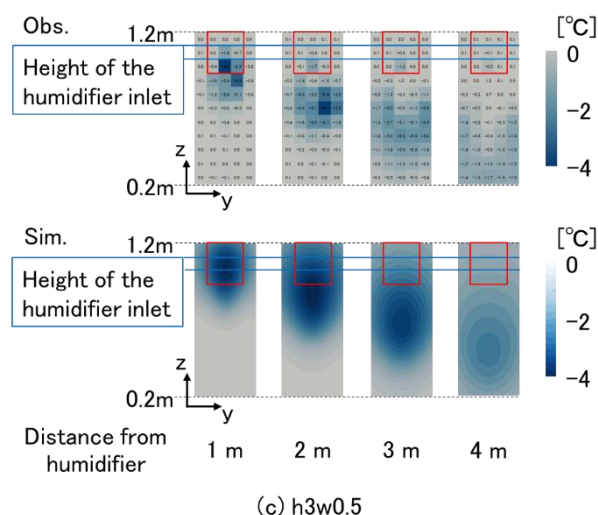
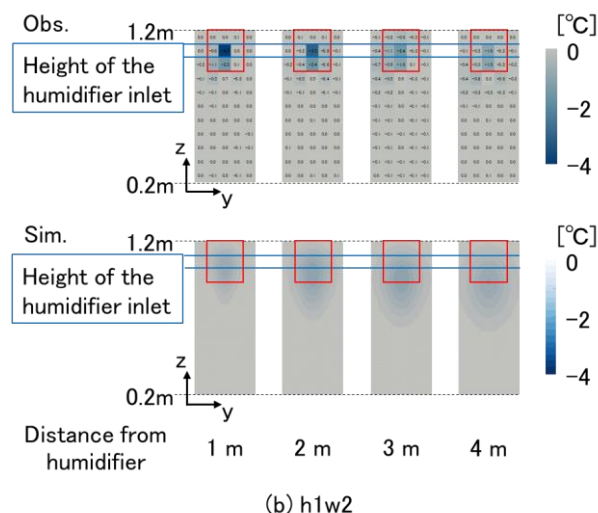
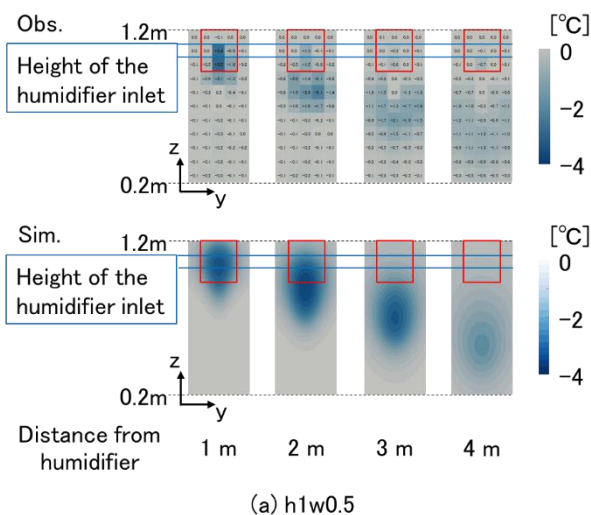


Fig. 4 Comparison of air temperature decrease in the experiment (upper) and the simulation (lower) of (a) h1w0.5, (b) h1w2, (c) h3w0.5, and (d) h3w2. (Red square shows the area in which the temperature might not measure correctly due to the adhesion of water droplets.)

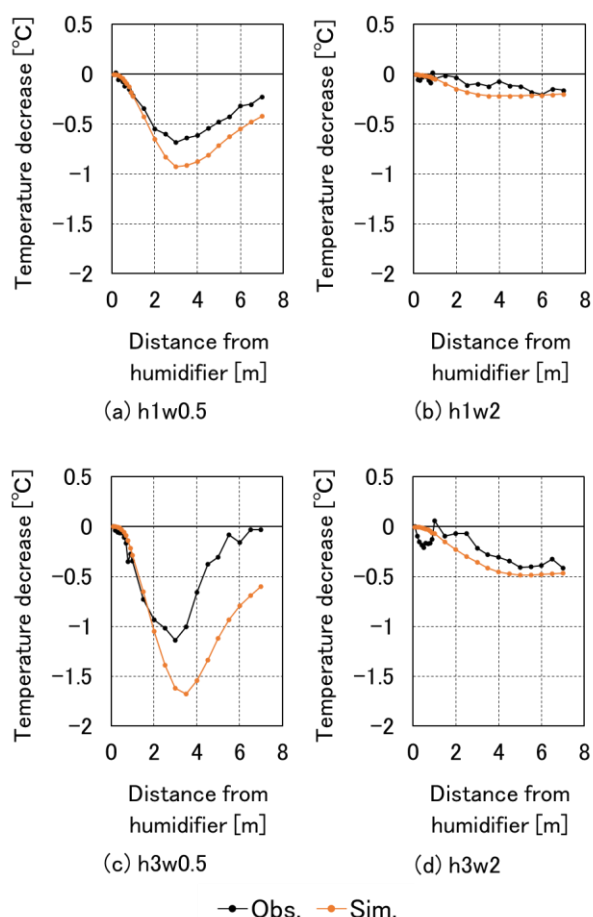


Fig. 5 Comparison of air temperature decrease averaged in observation slice in the experiment and the simulation of (a) h1w0.5, (b) h1w2, (c) h3w0.5, and (d) h3w2.

いずれのケースでもCFDモデルは平均温度変化の傾向を概ね再現したが、特に風洞風速が小さいケース (Fig. 5(a,c)) の、加湿器からの距離が2 m以降の部分において、温度低下の過大評価が顕著に見られる。これは、拡散の影響を過小評価したことで、冷気が測定面にとどまったためだと考えられる。この原因としては、超音波加湿器の吹出口における乱流エネルギーを過小評価した可能性や、プラントル数、微小液滴のシュミット数を過大評価した可能性が考えられる。

蒸発過程について検討するために、CFD計算の結果について、風洞の中央断面における温度変化分布と微小液滴混合比分布を Fig. 6, Fig. 7 に示す。なお、粗大液滴混合比分布については計算領域全域でほぼ0だったため割愛する。加湿量が多いケースの方が、単位体積空気あたりに供給される液滴量が多くなるため、温度低下は大きくなる。風洞風速が大きいケースでは、液滴の蒸発によって冷やされた空気の沈降があまり見られず、流れに沿って帯状の温度変化が見られた。また、微小液滴が蒸発する前に運ばれる距離は風洞風速が大きい方が長くなるが、風

速の違いによる到達距離の差は加湿量が多い方が大きくなった。これは、加湿量が多いほど超音波加湿器から放出される微小液滴が多くなるためだと考えられる。

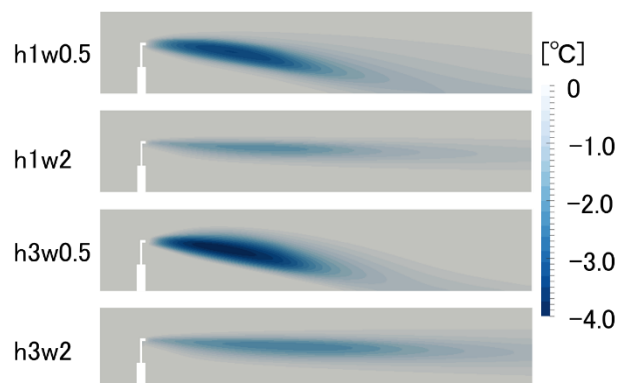


Fig. 6 Temperature decrease at the center of the wind tunnel

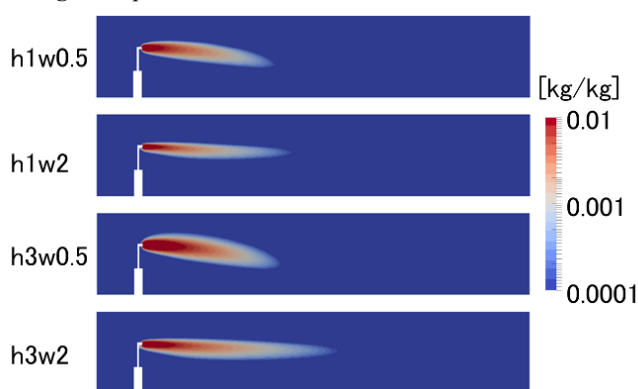


Fig. 7 Fine droplets mixing ratio at the center of the wind tunnel

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 風洞実験にて液滴の蒸発による温度変化を測定し、加湿量や風洞風速が与える影響を分析した。
- 2) 水の相変化モデルを導入した CFD モデルは、風洞実験で測定した温度変化の傾向を概ね再現したが、特に風洞風速が小さいケースで、測定面の平均温度低下を過大評価した。
- 3) CFD 計算の精度向上のためには、拡散過程の改善が必要となると考えられる。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 21K14303 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Takashi Kurabuchi, U. Yanagi, Masayuki Ogata, Masayuki Otsuka, Naoki Kagi, Yoshihide Yamamoto, Motoya Hayashi, Shinichi Tanabe, Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control, Japan Architectural Review, vol.4, pp.608-620, 2021.
- 2) Edwin Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, Vol.10, pp.1-84, 1969.

PCM による手足冷却が生理量変化に与える影響評価 Investigation of Effect of Limb Cooling by PCM on Physiological Changes

○肥田 弘明 (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)

Hiroaki HIDA*1 Atsumasa YOSHIDA*2 Shinichi KINOSHITA*3

*1 Osaka Prefecture University *2 Waseda University *3 Osaka Metropolitan University

The effect of limb cooling by PCM on physiological changes was examined by subject experiments and a human body thermal model. Experiments were conducted in an artificial climate chamber under two conditions: a basic condition (air temperature, relative humidity, and walking speed of 30°C, 50%, 4.0 km/h), and a high load condition (35°C, 60%, 4.0 km/h). Calculations using the human body thermal model were also performed under the same conditions. From the experiments and calculations, the positive effect of limb cooling by PCM was shown in core temperature, blood flow rate, and sweat rate under the high load condition.

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。暑熱化に対する適応策として、局所冷却が挙げられ、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血流量を増加させることで放熱を促す特殊な血管がある。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おり、水冷による手掌冷却効果は報告されている¹⁾。しかし水冷は運動が制限されるため活用範囲に限られる。冷却材として、水ではなく保冷剤を用いることで実用性を高める可能性があるが、一般的な保冷剤では温度が低く、逆に血管を収縮させてしまうことや、冷刺激が強すぎることが問題であった²⁾。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)を用いて手足冷却を行う。

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2022年の9月～2023年の1月の10時から16時に大阪公立大学中百舌鳥キャンパスA15棟人工気候室(温熱環境生理実験室)で実施した。被験者は健康な男子学生2名で身長は185 cmと172 cm、体重は83 kgと74 kg、BMIは両者25であった。被験者において歩行運動実験を、運動終了後にPCMによる手足冷却を行う場合と行わない場合で2回実施し、生理量の測定結果の比較検討を行った。被験者は前日の夕食以降の食事を制限し、当日は実験場所に移動する前に気温25°Cに設定された待機室で30分間の座位安静をとり、食事及び運動の制

限を行った。生理量測定装置は待機室で装着した。また、被験者毎の体内の水分量を同等にするために排泄及び300 gの水分摂取を行い、実験時の服装としては着衣量0.3 cloの白色Tシャツ、白色半ズボン、サンダルで統一した。

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。環境順化後、運動負荷としてトレッドミルによる速度4.0 km/hの歩行運動を30分間行い、その後冷却時間として座位安静状態でPCMによる手足冷却を30分間行い、最後に回復時間として30分間の座位安静を行う実験を、真夏の平均的な環境条件に設定された基本条件として気温30°C、相対湿度50%、基本条件に対して人体への熱負荷を上げた高負荷条件として気温35°C、相対湿度60%の2条件で実験を実施した。冷却剤としては市販の12°CのPCMを両手足に4個使用した。手の冷却は冷却剤を握り、足の冷却は足裏とサンダルの間に挟むことで行った。測定項目は、環境要素として気温、相対湿度、PCM冷却剤の温度、生理要素として皮膚温度(7点)、深部温度(直腸温)、血流量(上腕)、発汗量(体重変化量)、心拍数、血圧を測定した。

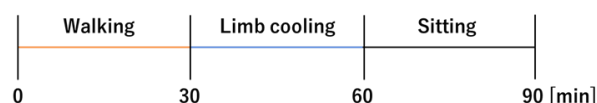


Fig.1 Protocol of subject experiment for limb cooling by PCM

2.3 実験結果

環境条件の測定結果は、基本条件で、気温が $30.8 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $45 \pm 1\%$ 、冷却剤の温度が $13.6 \pm 4.2^{\circ}\text{C}$ 、高負荷条件で、気温が $34.2 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $57 \pm 4\%$ 、冷却剤の温度が $15.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ であった。

図2に深部温度の測定結果を示す。運動開始時の深部温度に対する冷却終了時(経過時間0~60分)の深部温度変化の平均値で比較した。基本条件では冷却なしの場合に比べて冷却ありの場合の方が、深部温度上昇が 0.1°C 程度大きく、高負荷条件では深部温度上昇が 0.1°C 程度抑制された。高負荷条件ではPCMによる手足冷却によって熱負荷が軽減されたと考えられる。

図3に血流量の測定結果を示す。血流量は1分間の時間平均をとり、運動終了時の血流量を基準として、冷却終了時(経過時間30~60分)の血流量変化の平均値で比較した。基本条件では冷却なしの場合に比べて冷却ありの場合の方が血流量は小さくなり、高負荷条件では血流量変化に冷却による差異は見られなかった。基本条件では手足冷却による冷刺激により血管が収縮し、高負荷条件では環境による熱負荷が大きいため血管拡張による放熱の影響が大きく、手足冷却の冷刺激では血管が収縮しなかったと考えられる。

図4に発汗量の測定結果を示す。発汗量は冷却中(経過時間30~60分)の1分間当たりの体重変化量の平均値で比較した。基本条件では冷却なしの場合に比べて冷却ありの場合の方が15%程度増加し、高負荷条件では15%程度減少した。基本条件では深部温度上昇が冷却ありの場合の方が大きいことから、熱負荷が大きく発汗量も増加し、高負荷条件では深部温度上昇が冷却ありの場合の方が小さいことから、熱負荷が手足冷却によって軽減され発汗量が減少したと考えられる。

平均皮膚温度は運動開始時の平均皮膚温度に対する冷却終了時の平均皮膚温度変化の平均値で比較した。心拍数は1分間の時間平均をとり運動終了時の心拍数に対する冷却終了時の心拍数変化の平均値で比較した。両条件において平均皮膚温度、心拍数に手足冷却による差異は見られなかった。

基本条件のような熱負荷の小さい環境下において、PCMによる手足冷却を行うことで、冷刺激により血管が収縮し血流量が低下し、血流による放熱が小さくなり深部温度上昇が大きくなり、発汗量が増加したと考えられる。一方、高負荷条件では環境からの熱負荷が大きいため、手足冷却による冷刺激では血管が収縮せず、血流量が低下しないため、PCMによる手足冷却の効果によって熱負荷が軽減され、深部温度が約 0.1°C 低下し発汗量が減少したと考えられる。

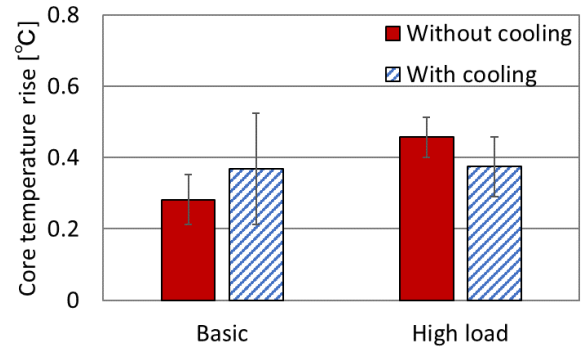


Fig.2 Effect of limb cooling by PCM on core temperature rise

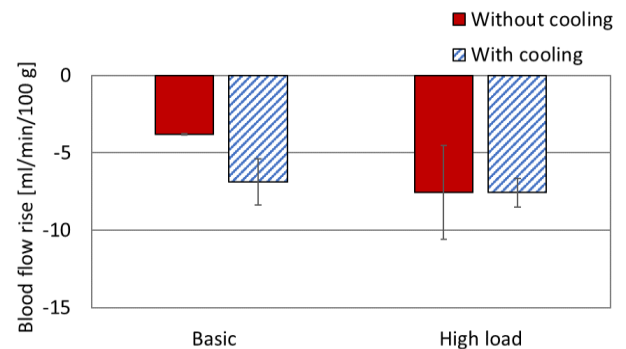


Fig.3 Effect of limb cooling by PCM on blood flow rise

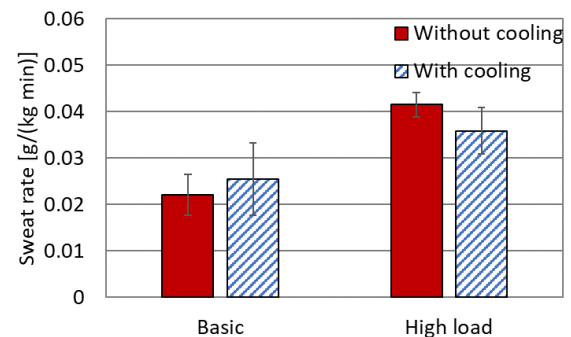


Fig.4 Effect of limb cooling by PCM on sweat rate

3. 冷却量の妥当性評価

高負荷条件において、手足冷却により運動終了後の深部温度上昇が 0.1°C 程抑制されたことの妥当性について、人体と冷却剤において理想的な条件を設定し、その冷却量によって評価した。人体と冷却剤の間に接触熱抵抗はなく、冷却剤と人体の表面がすべて断熱状態を仮定し、冷却剤の融解熱をすべて人体熱から奪う場合を想定すると、冷却剤による冷却量と人体の温度変化は式(1)で示される。

$$mh_f = MC\Delta T \quad (1)$$

m : 冷却剤の質量[kg] (=46.6 g) , h_f : 冷却剤の融解熱

[kJ/kg], M : 人体の質量[kg] (=70.0 kg), C : 人体の比熱 [kJ/kg/K] (=3.47 kJ/kg/K), ΔT : 人体の温度変化[K]

本研究で使用した PCM の融解熱は 214.2 kJ/kg であった。式(1)より

$$46.6 \times 10^{-3} \times 214.2 \times 10^3 = 3.47 \times 103 \times 70.0 \times \Delta T$$

$$\therefore \Delta T = 0.04 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

試算により PCM による冷却によって体温を 0.1℃低下させるには実験に使用した PCM では 3 個以上使用する必要があるとわかった。現在実験で使用した冷却材は 4 個であり試算と一致している。

4. 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³⁾。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℃の PCM による手足冷却については、冷却時間中、手足にあたる 4 部位の作用温度のみ 12℃と入力することで冷却を再現した。なお、着衣量は 0 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、179 cm, 79 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 5 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冷却ありの方が、基本条件では深部温度が 0.03℃程高くなり、高負荷条件は深部温度が 0.03℃程低くなった。

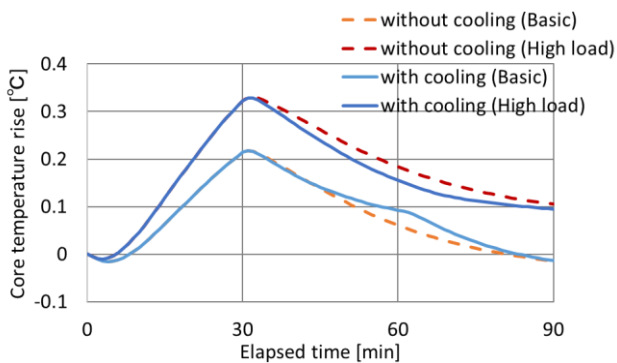


Fig.5 Calculation of effect of limb cooling by PCM on core temperature rise by JOS-3

5. 考察

本研究において、基本条件では手足冷却により血流量が低下し、深部温度が上昇し、発汗量が増加した。一般に気温が 29℃以上の暑熱環境においては皮膚血管が拡張され、皮膚血流の増加により全身の熱放散が促進され

る⁴⁾。また、手足などの四肢抹消部皮膚における皮膚血流は温、冷刺激による血流変化が著しい⁵⁾ことから、基本条件のような熱負荷の小さい環境下では冷刺激によって血流量が減少し、熱放散が抑制され、深部温度が上昇すると考えられる。

手足冷却の効果は皮膚温度及び深部温度が上昇し、AVA 血管が拡張され、血流量が増える場合に発揮され则认为られる。Khomeinok らの報告¹⁾では、10 分間 10℃の水による手掌冷却により深部温度が 0.5℃程低下しており、この報告において冷却開始時の平均皮膚温度 37℃、深部温度(直腸温)は 38℃と高い。本研究における基本条件では冷却開始時の平均皮膚温度が 33.2～33.4℃、深部温度は 37.2～37.3℃と低く、AVA 血管が十分に拡張されていない可能性がある。

一方、高負荷条件では冷却開始時の平均皮膚温度 35.0～35.3℃、深部温度は 37.3～37.4℃と基本条件より高く、AVA 血管が基本条件より拡張していると考えられ、冷却効果が出やすく、熱負荷の大きい環境下で冷刺激による血管収縮の影響は小さく、深部温度と発汗量を抑制することが示唆された。

以下に JOS-3 モデルで用いられている AVA 血管の開口率に関する式を示す。

$$O_{ava[i]} = 0.265 \cdot [T_{sk,whole} - \{T_{setpt,sk,whole} + \left(\frac{0.43}{0.997}\right)\}]$$

$$+ 0.953 [T_{cr,body} - \{T_{setpt,cr,body} - \left(\frac{0.1905}{0.0095}\right)\}]$$

$$+ 0.9126 \left(\begin{matrix} \text{Hand} \\ \text{Foot} \end{matrix} \right) \quad (2)$$

$O_{ava[i]}$: AVA 血管の開口率, $T_{sk,whole}$: 平均皮膚温度[℃], $T_{setpt,sk,whole}$: 平均皮膚温度の閾値[℃], $T_{cr,body}$: 胸、背、腰の深部温度の平均値[℃], $T_{setpt,cr,body}$: 胸、背、腰の深部温度の閾値の平均値[℃]

これに冷却終了時の平均皮膚温度、深部温度の計算結果を代入すると、基本条件では $O_{ava[i]} = 0.96$ (Hand), 0.64 (Foot), 高負荷条件では $O_{ava[i]} = 1.31$ (Hand), 0.99 (Foot) である。AVA 血管の開口率は 0～1 で表され、1 を超える場合は AVA 血管が最大限開いていることを示す。高負荷条件は冷却終了時においても、手で 100%, 足で 99% AVA 血管が開いているのに対し、基本条件では手で 96%, 足で 64% しか開いておらず、高負荷条件は基本条件よりも AVA 血管が十分に開口される状態であることがわかった。この開口率が十分に大きくなる環境下では、PCM による手足冷却の効果が出やすいことが示唆された。

図 6 と図 7 に各条件の血液による熱交換量の計算結果を示す。冷却なしの場合に比べて冷却ありの方が、

基本条件では血液循環により奪われる熱量が小さくなり、高負荷条件では大きい。これが手足冷却によって、基本条件で深部温度が上昇し、高負荷条件で深部温度が低下した要因であると考えられる。

手足冷却がより効果的な条件としては熱負荷の高い環境が考察された。そのため、JOS-3 モデルを用いて高負荷条件において長袖長ズボンを着用した場合(着衣量を 1 clo に変更)と夏の晴天日の屋外で実施した場合(作用温度を 50℃に変更)を想定し、深部温度の計算結果を図 8 に示す。手足冷却の効果として長袖長ズボンを想定した場合で 0.06℃程、屋外を想定した場合で 0.1℃程深部温度が低下した。着衣量が大きい場合や日射を受ける屋外の暑熱環境においては更なる冷却効果が期待される。

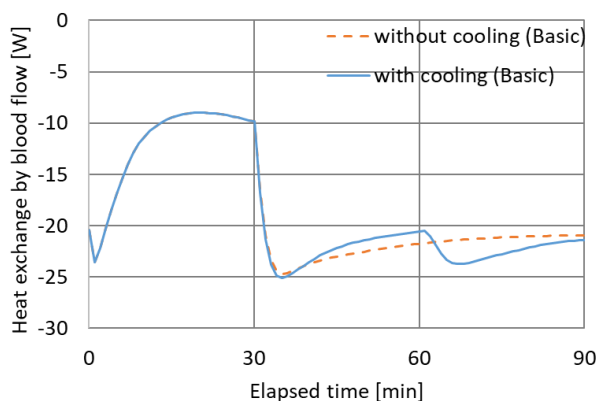


Fig.6 Effect of limb cooling by PCM on heat exchange by blood flow under the basic condition

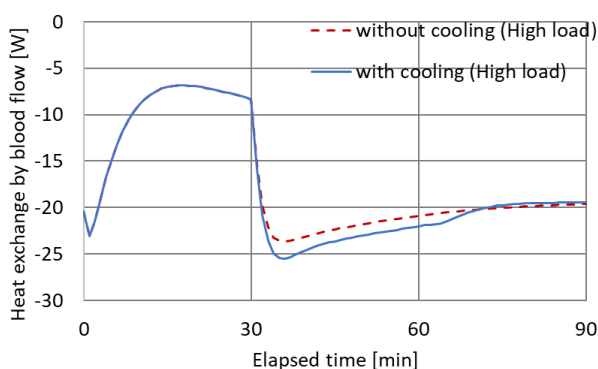


Fig.7 Effect of limb cooling by PCM on heat exchange by blood flow under the high load condition

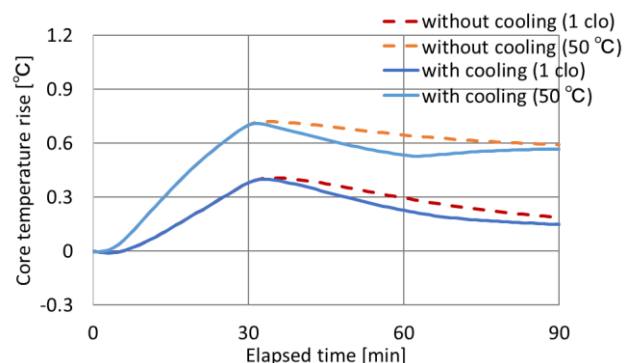


Fig.8 Effect of limb cooling by PCM on core temperature rise under two higher thermal load conditions

6. 結言

PCM による手足冷却効果は、熱負荷の大きい環境下では冷却中も AVA 血管が十分に拡張し、血液を冷やすことで深部温度は低下し、発汗量も減少する。一方、熱負荷の小さい環境下では手足冷却中に AVA 血管が収縮し、AVA 血流によって奪われる熱量が減少することで、深部温度が上昇し、発汗量が増加する可能性があるとする唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験に必要な人工気候室をお貸しいただいた大阪公立大学大学院現代システム科学研究科の飛田国人准教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Gennadi A. Khomenok, Amir Hadid, Orah Press-Bloom, Ran Yanovich, Tomer Erlich, Osnat Ron-Tal, Amir Peled, Yoram Epstein, Daniel S. Moran; "Hand immersion in cold water alleviating physiological strain and increasing tolerance to uncompensable heat stress", *European Journal of Applied Physiology*, 104(2008) 303-309.
- 2) 時澤健, 岡龍雄; 「相転移型蓄冷材料を用いた手足冷却」, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, 49(2019) 35-37.
- 3) Yoshito Takahashi, Akihisa Nomoto, Shu Yoda, Ryo Hisayama, Masayuki Ogata, Yoshiichi Ozeki, Shin-ichi Tanabe; "Thermoregulation model JOS-3 with new open source code", *Energy & Buildings*, 231, 110575(2021) 1-15.
- 4) Horiba Yosuke, Endo Shinya, Kamijo Masayoshi, Inui Shigeru, Takatera Masayuki, Shimizu, Yoshio; "Influence of the subjective thermal sensitivity and cooling temperature on the psychological and physiological local cooling response", *Journal of Textile Engineering*, 57, 6(2011) 153-161.
- 5) 入来正躬; 「体表面温度生理学」, 特集: サーモロジー, *Bio Medical Engineering*, 3, 7(1989) 9-15.

暑熱環境における生理反応の季節適応

－秋季と冬季の比較－

Seasonal Adaption of Physiological Reaction under Hot Environment,
Comparison between Fall and Winter Results

○上田 龍馬 (大阪府立大学)

安田 龍介 (大阪公立大学)

吉田 篤正 (大阪公立大学)

木下 進一 (大阪公立大学)

Ryoma UEDA*1 Ryusuke YASUDA*2 Atsumasa YOSHIDA*2 Shinichi KINOSHITA*2

*1 Osaka Prefecture University, *2 Osaka Metropolitan University

Physiological responses to the same hot environment in fall and winter were investigated by subject experiments using an artificial climate chamber and a human thermal model. The results of the subject experiments showed that the amount of perspiration was lower and the tympanic temperature increased more in winter than in fall. The human thermoregulation model analysis showed that setpoint temperature in core layer was estimated to be lower and the amount of sweating was higher in winter than in fall. Further study seems to be required on the estimation method of set point temperature and seasonal differences in sweating function.

1. 研究背景

近年熱中症患者の増加が問題となっている。人体の暑熱への適応として、暑熱順化と呼ばれる生理変化がある。これは体が一定期間暑熱曝露されることで起きる生理変化であり、発汗量の増加や血流の増加を通じて放熱機構の働きが向上する。順化の一型として、日常生活における暑熱曝露や寒冷曝露により体が暑さや寒さに適応能力をもつ季節順化と呼ばれる生理変化があり、人体の熱負荷に対する適応能力は年間を通して変動することが考えられる。総務省による調査¹⁾によれば、熱中症による救急搬送人員数と日最高気温の関係は5月から9月の間で時期により違いが見られるが、熱中症の発症にこの季節順化が影響していることを示唆している。

本研究では、人工気候室を利用した被験者実験により、暑熱順化が解消されたと考えられる秋季と冬季において、熱負荷を与えた際の生理応答を測定し、暑熱への適応能力がどのように変化するかを調べた。さらに、そのデータをもとに人体熱モデルにより両季節における暑熱応答をシミュレートし、実験結果と比較することで、モデルで表現される生理応答の妥当性について考察した。

4日の測定を秋季、12月7日から12月16日の測定を冬季とみなした。次の図1に大阪府堺アメダス測定局における、6月1日から12月31日までの日平均気温、日最高気温および日最低気温の推移を示す。なお、グラフは7日間の移動平均をとっている(日付は平均値の最終日)。実験開始前30日間の平均気温について、秋季は19.5℃、冬季は12.9℃であった。2002年から2022年の20年間の平均気温は16.7℃であり、実験時はそれぞれの季節に適応した身体であると判断した。



Fig.1 Air temperature at Sakai AMeDAS station

2. 実験概要

2.1 実験条件

被験者実験は大阪公立大学中百舌鳥キャンパス内の人工気候室(縦1.97 m, 横2.1 m, 高さ1.97 m)にて、22~24歳の男性3人を対象に行った(表1)。測定時期は2022年10月27日から12月16日であり、10月27日から11月

Table.1 Subject data

Subject	Height [cm]	Weight [kg]	Age	BMI	Experiment date
A	185	80	22	23.4	Nov. 4 / Dec. 15
B	176	83	23	26.8	Oct. 28 / Dec. 16
C	175	76	24	24.8	Oct. 27 / Dec. 7

表 2 に示す通り被験者が待機室と人工気候室を出入りすることで周囲温度のステップ状変化とみなした。出入りに要する時間は 30 秒程度であり,それを除く時間は座位安静状態にある。なお,相対湿度は人工気候室内でのみ制御可能であり 50%とした。

測定項目は皮膚温度(額, 上腕, 手背, 腹部, 大腿, 下腿, 足背), 直腸温度, 耳内温度, 血流量, 局所発汗量, 全身発汗量(体重)とした。測定間隔は皮膚温度, 直腸温度, 耳内温度を 10 秒, 血流量を 1 秒, 局所発汗量を 2 秒, 体重を 15 分とした。表 3 に測定機器の一覧を示す。

被験者は体調管理のために測定の前1週間前から25時までには就寝, 9 時までには起床する生活を続けるとともに, 測定前日はアルコール摂取を控えた。実験当日は起床から絶食とした。また, 測定開始の1時間前から 25℃に空調設定された待機室に入室し, 排せつ, 測器の装着および 300g の水分摂取を行った。実験中の服装は白色 T シャツ, 白色半ズボン, サンドル(0.3 clo)とした。

Table.2 Experiments protocol

Phase	Time (min)	Air temperature (°C)	Measuring point
1	0~30	25	Waiting room
2	30~120	38	Climate chamber
3	120~150	25	Waiting room

Table.3 Measurement instrument

Items	Instrument
Skin temperature [°C]	Gram / LT-ST08-12
Rectum temperature [°C]	Gram / LT-ST08-11
Tympanic temperature [°C]	TECHNO NEXT / DBTL-S
Blood flow [g/min/100g]	ADVANCE / ALF2
Sweat rate [g/min/m ²]	Rousette Strategy / SNT-200
Weight [g]	AND / GP-100K
Room temperature [°C]	T&D / RTR-53
Relative humidity [%]	T&D / RTR-53
Wind speed [m/s]	KANOMAX / ANEMOMASTER

2.2 環境要素の測定結果

周囲環境の変化の例として被験者 A の測定結果の例を示す。Ta は室温, RH は相対湿度を表す (秋季の相対湿

度は欠測)。また, 人工気候室内の風速は 0.1~0.4 m/s であった。図より, 人工気候室の室温は秋季と冬季ではほぼ同じであるが, 待機室の気温は秋季より冬季の方が 1 °C 程度低くなっている。

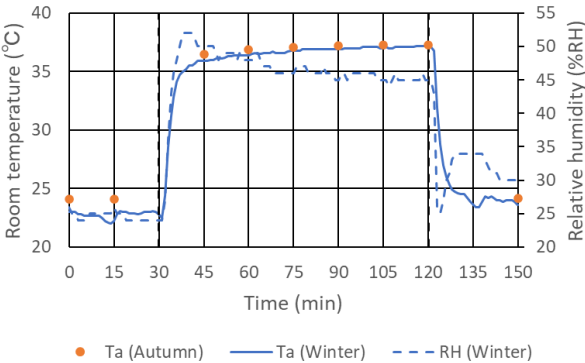


Fig.2 Variation of room temperature and relative humidity

2.3 生理量の測定結果

(1) 耳内温度

被験者 3 人の耳内温度の平均値を図 3 に示す。測定結果について, 0~30 分の冬季の耳内温度は秋季と比較して低い傾向がみられる(統計的に有意ではない)。一般に基礎代謝量は夏季に低く冬季に高いことが知られており²⁾, 深部温度は冬季の方が高くなることが予想されたが, 耳内温度は低くなる結果となった。また, 熱負荷を開始した 30 分時点で耳内温度が低下する様子が見られたが, これは熱負荷により血流量が増加し, 脳内の放熱が盛んになったことが原因であると考えられる。図 4 に血流量(被験者の平均値)の時間変化を示す。測定値は上腕の皮膚血流量であるが, 熱負荷開始時に 0~30 分間と比較して血流量が増加している様子が見られる。

熱負荷を与えたときの生理応答として, 45~120 分の間における耳内温度の上昇度と発汗量について被験者ごとの値を図 5 に示す。各被験者について見ると, 冬季の方が耳内温度の上昇幅が大きく発汗量は少ないことが一致している。また被験者全体の傾向からも耳内温度の上昇と発汗量には負の関係が見られ, 両者の相関係数は -0.79 であった (ただし統計的に有意ではない)。これは気温と体温が近く, 顕熱による放熱量の影響が小さいため, 発汗による潜熱放出量が体温上昇を支配していることによる。以上のことから, 冬季は秋季と比較して発汗量が小さく, 耳内温度が上昇しやすいと考えられる。

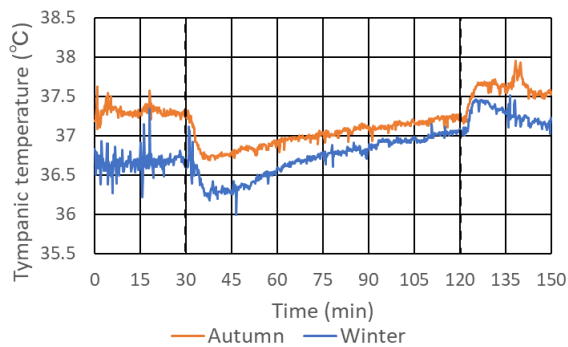


Fig.3 Variation of tympanic temperature

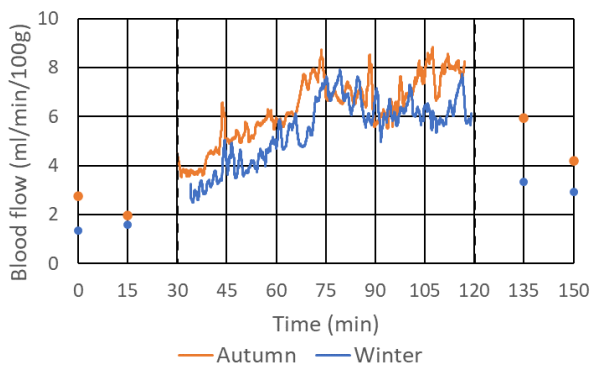


Fig.4 Variation of blood flow

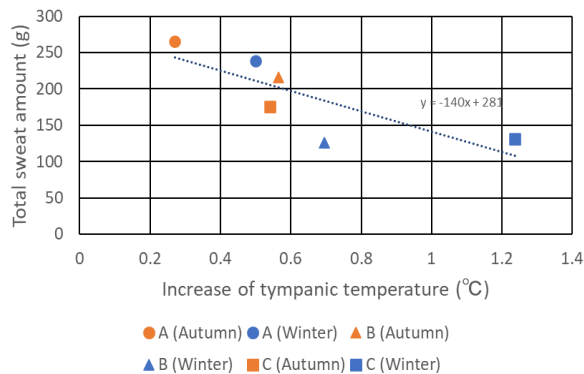


Fig.5 Correlation between increase of tympanic temperature and body perspiration

(2) 発汗開始時間と皮膚温度について
図 6 に局所発汗量の測定結果の例を示す(被験者 A)。測定部位は上腕である。局所発汗計では測定開始時点から多くのパルス状の発汗波が断続的に記録されているが、0-30 分の待機室在室中 (25℃) には実質的な発汗が生じていなかったため、この時間帯の発汗波の標準偏差の 2 倍 (0.12 g/min/m²) 以上の発汗波が初めて現れた時間を発汗開始とした。発汗開始時間と上腕の皮膚温度の関係を表 4 に示す。有意差はないが、秋季の方が冬季より早く発汗波が現れる様子が見られる。また、発汗開始時の

上腕の皮膚温度は冬季の方が高くなっており、発汗閾値は冬季の方が高温側にあり、発汗しにくくなっているといえる。

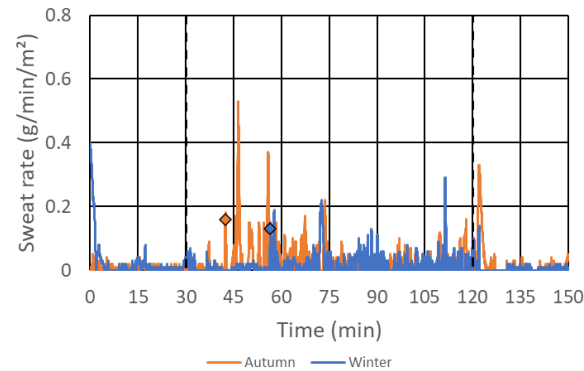


Fig.6 Variation of sweat rate (Subject A)

Table.4 Start time of sweating and shoulder skin temperature

Subject	Autumn		Winter	
	Time(min)	Tsh(°C)	time(min)	Tsh(°C)
A	42	34.81	57	35.49
B	46	35.36	75	35.70
C	84	36.34	92	36.79

3. 数値モデル解析

被験者実験で見られた暑熱負荷に対する生理応答の季節による違いが人体熱モデルでどの程度再現可能かを検証するため、被験者を対象に JOS-3 モデル³⁾を用いて解析を行った。手順としては、実験開始時(暑熱負荷前)の環境条件でモデルの生理パラメータを実験結果に合うよう調整した後、暑熱負荷を与えてモデルの応答の時間変化を被験者実験の結果と比較した。

3.1 解析方法

瀬川ら⁴⁾は夏季から秋季にかけて暑熱順化解消の要因として皮膚層と深部層のセットポイント温度の変化(0.2℃)および基礎代謝量の変化(10%)を仮定し、JOS-3 モデルを用いてこれらを調整することで暑熱環境に対する季節順化を表現しようと試みた。その結果、「基礎代謝量の変化の影響は小さく、一方、セットポイント温度の変化は発汗のタイミングおよび発汗量を通じて熱負荷に大きな影響を及ぼす」と述べている。そこで本解析では瀬川らにならい、皮膚層と深部層のセットポイント温度のみを調整することとした。解析の対象は被験者 A とした。

セットポイント温度の推定では、被験者実験で得られた 0~30 分の平均皮膚温度および直腸温度の平均値にモデルの計算結果が一致するように、試行錯誤的にセットポイント温度を求めた。環境条件は被験者実験に合わせ

て作用温度を秋季で 24 ℃，冬季は 22 ℃とした．相対湿度と風速は両季とも同じで 60%，0.2 m/s に設定し，10 時間計算を行った．

暑熱負荷条件のシミュレーションでは，上記で求めたセットポイント温度を用いて被験者実験と同等の実験プロトコルで環境条件を変化させた．作用温度は 0～30 分が 25 ℃，30～120 分は 38 ℃，120～150 分は 25 ℃とし，相対湿度は 60%，風速は 0.2 m/s とした．

3.2 解析結果と考察

被験者 A の秋季の皮膚層および深部層のセットポイント温度はそれぞれ 33.70 ℃，37.05 ℃であり，冬季はそれぞれ 34.55 ℃，36.92 ℃となった．中山ら⁵⁾によると，皮膚温度は暖候期に高く，寒候期に低くなるとされているが，モデルにおける皮膚層のセットポイント温度は冬季の方が高くなった．深部のセットポイント温度は，生理学の観点では年間を通じて変動しないとされているが，モデルにおいては冬季の方がわずかに低くなった．

暑熱負荷条件の計算結果について，頭部の深部温度と，1 分当たりの発汗量をそれぞれ図 7，8 に示す．頭部の深部温度は冬季の方が高く，また発汗量は冬季の方が大きくなったが，これは被験者実験とは逆の傾向である．モデルにおける発汗量はセットポイント温度と体温との差で決まるため，セットポイント温度が低いほど発汗量が大きくなる．また，モデルにおける計算では深部層のセットポイント温度の影響は皮膚層よりも大きいいため，深部層のセットポイント温度を推定する際，発汗量などを考慮に入れる方法も検討の余地がある．

また，被験者実験より冬季の発汗開始は秋季より遅く，発汗量が少ないことが示唆されたが，モデルの発汗機能には季節による違いが組み込まれていないため，熱負荷への応答が実際とは異なっていることが考えられる．したがって，この機能の季節差をモデルに組み込むことで人体の生理応答をより正確にシミュレートできる可能性がある．

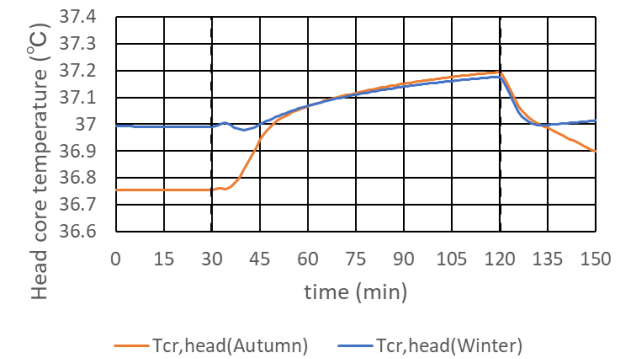


Fig.7 Variation of head core temperature

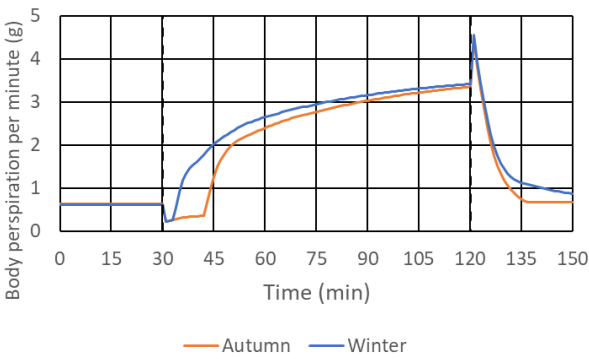


Fig.8 Variation of body perspiration per minutes

4. まとめ

被験者実験において，冬季の方が発汗量は小さく，また発汗閾値が高くなる結果が得られたほか，耳内温度の上昇幅は冬季の方が大きい傾向が見られた．既往の知見では，暑熱順化により発汗量や血流量の増加を通じて熱負荷への適応能力が強くなることが分かっているが，本被験者実験では順化の解消された秋季と冬季で比較することで，冬季は熱負荷への適応能力が弱まっている可能性が示唆された．

モデルを用いた解析については，セットポイント温度の推定に発汗量などを含めて検討することや，発汗機能の季節差をモデルに組み込むことで，より正確な生理応答のシミュレーションが可能であることが考えられる．

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁 HP，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/twoweek_netsu.html（2023/2/18 参照）
- 2) 松本ら；「熱帯暑熱環境への適応」，日生活誌，36(2) (1999) 65-69.
- 3) Takahashi et al., “Thermoregulation model JOS- 3 with new open source code”，Energy & Buildings, 231 (2021) 110575.
- 4) 瀬川ら；「季節順化が暑熱環境下の生理反応に及ぼす影響の基礎的検討」，空気調和・衛生工学会第 50 回近畿支部学術研究発表会論文集，(2022) A-42.
- 5) 中山ら；「温熱生理学」，中山昭雄編 第 1 版(1981) 500-501，理工学社

非侵襲的な深部温度の測定精度に関する検討

Examination of non-invasive measurement accuracy of core temperature

○新宮 宏教 (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)

Hironori Shinmiya*1 Atsumasa Yoshida*2 Shinichi Kinoshita*3

*1 Osaka Prefecture University *2 Waseda University *3 Osaka Metropolitan University

Observation of core temperature is important for human life activities. However, conventional methods are invasive and uncomfortable to the human body. Therefore, this study was based on Dual-Heat-Flux, which allows non-invasive measurement of core temperature. We aim to improve the accuracy of measurement in terms of heat transfer. As a result, the improvement in measurement accuracy was confirmed.

1. 緒言

深部温度の監視は熱中症や低体温症の予防に繋がる。従来の深部温度測定方法は侵襲的であり、不快感を伴う。そこで、非侵襲的に深部温度が計測可能な双熱流法¹⁾を基に、深部体温計の開発、測定精度の評価を行う。

2. 測定原理

体内深部から皮膚へと向かう熱流を図1に示す。ここでは熱流は一次元的であると仮定する。厚さが異なる断熱材で皮膚を覆い、定常状態が実現されると各上下面の温度差から、各断熱材を通過する熱流束を求めることができる。この場合、皮膚を通過する熱流束と断熱材を通過する熱流束が等しい。これらから、皮膚の熱抵抗の情報なしに深部温度を求めることができる。その結果を式(1)に示す。

$$T_{core} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)}{S(T_2 - T_4) - (T_1 - T_3)} \quad (S = \frac{R_2}{R_1}) \quad (1)$$

R_1, R_2 : 断熱材の熱抵抗値 [$m^2 \cdot K / W$]

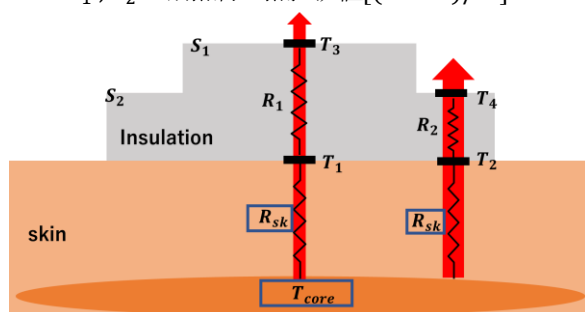


Fig.1 Outline of heat flow in dual-heat-flux system

3. 実験方法

皮膚を模した寒天をアクリル製のシャーレに作成して、その上に断熱材を固定する(図2)。温度測定にはサーミスタを使用した。周囲気温は空調機を用い、27°Cに制御した。

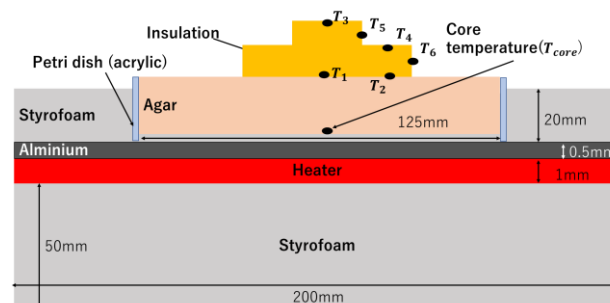


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

断熱材はポリスチレンフォームを使用し、寸法は半径15mm、厚さ9mmと半径30mm、厚さ5mmとした。測定は60分間行い、定常状態が確認できた実験終了前10分間のデータを用いて評価した。双熱流法は周囲気温による変化が測定精度に影響する。本研究ではその対策を施した。図3に深部温度の測定値とMethod A(提案法), Method B(従来法)による予測値の差平均と標準偏差を示す。共に精度向上が認められた。

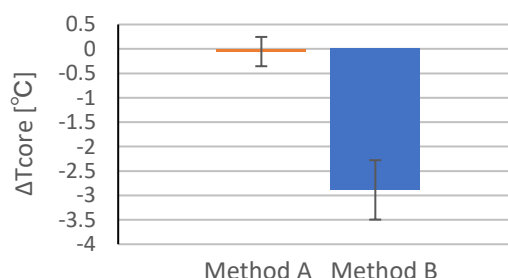


Fig.3 Comparison data of Method A and B

- 1) R.H. Fox et al, "A new method for monitoring deep body temperature from the skin surface" Clinical Science 44.1(1973):pp.81-86

駅前クールスポットの温熱環境改善効果の計測

(第1報) WBGT による対策有無の比較検証

Measurement of the effect of improving the thermal environment

for cool spots in front of stations

(Part 1) Comparative verification with and without measures by WBGT

○高柳 幸奈 (大阪公立大学)

三野 慶輝 (大阪市立大学)

鍋島 美奈子 (大阪公立大学)

西岡 真稔 (大阪公立大学)

Yukina TAKAYANAGI*1 Yoshiki MINO*2 Minako NABESHIMA*1 Masatoshi NISHIOKA*1

*1 Osaka Metropolitan University *2 Osaka City University

The temperature, humidity, wind velocity, black-bulb temperature, solar radiation, etc. were measured at the cool spots in front of stations installed as an adaptation measure to the heat island phenomenon. The measured data were compared and verified for each location and time. As a result, it was found that the effect of the countermeasure at location C was the greatest in 3 locations under the environment where mist evaporates appropriately and that the WBGT differences during cloudy weather were calculated to be larger than the other because of wetting sensors by spraying mist, which could lead to overestimation.

はじめに

近年進行しているヒートアイランド現象により都市部の高温化が進み、その影響として熱中症患者が増加している。ヒートアイランド現象への適応策として、暑熱環境対策が実施された場所や樹木や河川のそばなど、周辺よりも涼しく感じる場所をクールスポットと定義し、大阪府では森林環境税を活用した駅前広場などの猛暑対策事業として、クールスポットの整備が進められている。より効果的なクールスポットの創出にあたり、適応策としての効果を簡易的に評価し把握できる手法の確立は重要である。ランク付けが可能な評価システムとしてはCASBEE-HI²⁾があるが、これは暑熱環境対策の実施内容の有無や程度に伴う評価を行うものであり、実際にどの程度体感温度が低下するか温熱環境の実測結果を用いた評価方法ではない。また、松井ら³⁾はクールスポットの設置者を利用対象とした評価システム(CSLsys-G1)とさらに改善を加え被験者評価に関する重みを加えた評価システム(CSLsys-G2)の提案を行った。しかし、自然的要因が少なく小規模なクールスポットにこの評価システムが妥当であるかの検証がなされていない。そこで本研究では、現在検証がなされていないミスト噴霧だけではなく、暑熱環境改善設備(主にミスト噴霧、プランター緑化、日射遮蔽屋根)が複合的に設置されている駅前クールスポットを対象とし対策項目ごとの客観的かつ定量的な評価システムの確立を目指す。その第一段階として駅前クール

スポットでの現地実測を行い、得られた結果から湿球温度と自然湿球温度の違いを分析したうえで、場所ごと・時間ごとの比較を行う。比較結果からその差を生む要因について分析を行うことを目的とする。

1. 現地実測

ミスト噴霧による気温の低下や日射遮蔽による放射温度の低下など、設置した対策による効果検証を行うため気温、湿度、風速、黒球温度、日射量等の実測調査を行った。測定項目、測定機器をTable 1に示す。実測対象地は「令和2年度森林等環境整備事業(都市緑化を活用した猛暑対策事業)」の実績に係る評価及び令和3年度実測況について」から3地点(以下、地点A、地点B、地点C)を選定。

Table 1 Measuring items and sensor and instrument

Measurement item	Sensor	Measuring instrument
radiation temperature	Radiation temperature sensor	Vector radiation thermometer
	Globe ball(5cm)	Amenity
	Globe ball(15cm)	Logger(made by campbell)
temperature	Platinum temperature resistant body	Logger(made by campbell)
	Thermistor	Amenity
	Ultrafine thermocouple(Ttype)	Logger(made by Tand)
wind speed	Hot wire anemometer	Amenity
humid	Humidity sensor	Amenity
solar radiation	Thermo-hygrometer	Logger(made by campbell)
	Pyranometer	Logger(made by campbell)

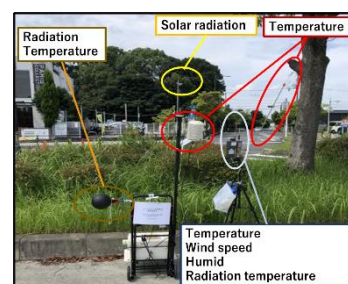


Fig.1 Measuring equipment

実測期間は各地点で2日間の測定日を設け、2022年8月18日14:30-15:00、19日12:00-13:00及び13:30-14:30、22日11:00-12:00及び13:30-14:30、23日10:40-12:00及び13:15-14:30、24日11:25-12:40、25日10:30-11:45の晴天時又は曇天時に行った。暑熱環境改善設備の有無(以下、対策あり・なし)による温熱環境の比較を行うため、対策あり・なしの2地点においてFig.1に示す測定機器を設置した。測定機器はグローブ球が南を向く方向に設置し、対策なしは常に測定機器が影にならない場所とした。

2. 結果と考察

本研究ではWBGTを評価指標として湿球温度と自然湿球温度の違いを分析した上で、クールスポットを場所毎、時間毎の比較検証を行う。また、その差が生まれた要因について測定時の温熱環境の違いや対策項目の効果の観点から考察を行う。WBGT算出の際にPMV計(京都電子社製 アメニティーメータ AM101)の測定値(乾球温度、相対湿度、風速、MRT)を使用する。黒球温度はPMV計(5cm黒球)では測定値として記録されないため、測定値MRTから公式ISO7726より15cm黒球温度を換算した値を用いる。これら測定値から算出した湿球温度(T_w)、自然湿球温度(T_{nw})を用いてWBGTを指標とした分析を行う。WBGTをそれぞれ $WBGT_w$ 、 $WBGT_{nw}$ と表記する。

2.1 湿球温度と自然湿球温度の比較

WBGTは定義上では「自然湿球温度」が用いられる。しかし、実際の現場では代用として「湿球温度」が簡易的に用いられている。湿球温度は自然湿球温度に比べ測定項目が少なく、測器設置の負担が少ない。そこで自然湿球温度と湿球温度の差の比較から湿球温度の値がWBGT算出の際に適当であるか考察を行う。各地点の1時間分の測定値(①地点A:8/22 13:35-14:35、②地点B:8/19 12:00-13:00、③地点C:8/18 14:30-15:30、以下①、②、③と表記)を抜粋し比較検証を行う。Fig.2は①、Fig.3は②、Fig.4は③のそれぞれ対策有無での $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ 、及び気温の変動を示す。Fig.5は①、②の $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ の対策有無の差を示す。Fig.6は地点Cの異なる時間帯(8/25 10:30-11:45、以下④と表記)での $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ の対策有無の差を示す。Fig.5とFig.6右図よりすべての地点において、温度差の大小はあるものの $WBGT_w$ より $WBGT_{nw}$ のWBGT差が大きい結果となった。②では $WBGT_w$ ・ $WBGT_{nw}$ ともに対策有無での差が見られ、特に $WBGT_{nw}$ ではおよそ2.3°CのWBGT差がみられた。③は②と同様、対策なしの $WBGT_{nw}$ が最も高いWBGT差を示し、 $WBGT_w$ で2°C、 $WBGT_{nw}$ で3.2°Cの温度差がみられた。Fig.2から、①は対策有無での気温差がほとんど見られず、 $WBGT_{nw}$ 対策なし、 $WBGT_{nw}$ 対

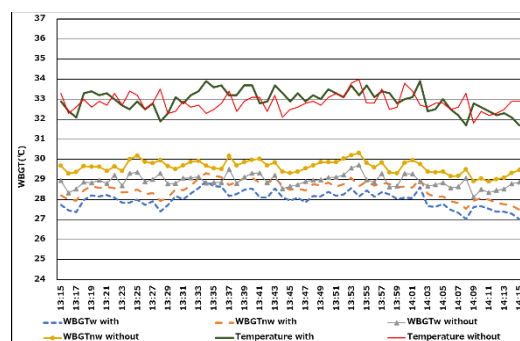


Fig.2 Variation in WBGT@A-spot(①2023/8/23 13:15-14:30)

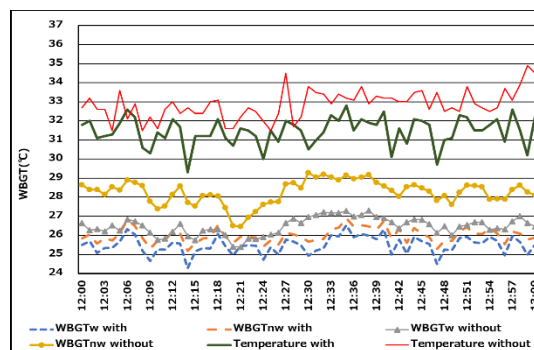


Fig.3 Variation in WBGT@B-spot(②2022/8/19 12:00-13:00)

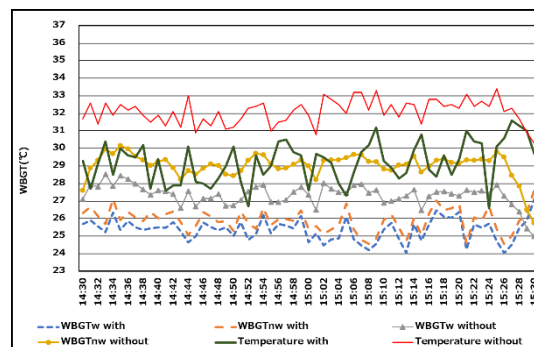


Fig.4 Variation in WBGT@C-spot(③2022/8/18 14:30-15:30)

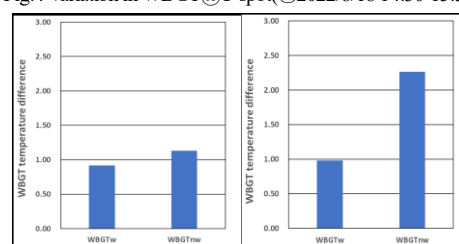


Fig.5 WBGT difference with and without countermeasures

(right:①, left:②)

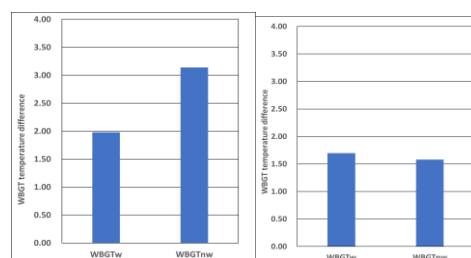


Fig.6 WBGT difference with and without countermeasures

(right:③, left:④)

策あり、 $WBGT_w$ 対策なし、 $WBGT_w$ 対策ありの順に温度が高いことが分かる。対策あり・なしともに $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ の差が $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 程度みられ、差は大きいとは言えない。Fig.5 より、対策あり・なしでの $WBGT$ 差も $0.8\sim 1^{\circ}\text{C}$ 程度と差が小さいことから、地点 A はミストの蒸発効果による気温の低減はほとんど観測できず、日射遮蔽等による MRT の低減は多少あるものの対策効果として大きいとは言えない。Fig.3 より、②地点 B は対策ありで多少の気温低下がみられ、 $WBGT$ は $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度低下した。 $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ の差が対策なしで 2°C と大きく (Fig.5 右図)、対策ありでは 0.5°C と温度差の違いが大きかった。対策なしでは直達日射等の影響で MRT が高くなり、対策ありでは日射遮蔽がしっかりできていたため、 $WBGT_w$ は $WBGT_{nw}$ に比べて MRT 差が出にくかったことがわかる。Fig.4 から③は対策有無での気温差、 $WBGT_w$ 差、 $WBGT_{nw}$ 差がすべて確認できた。地点 C はクールスポットが L 字型に配置されており、日射遮蔽屋根のほか外壁による側面の影がみられる。この形状によりミストが風に流されず滞留することから蒸発効果による気温低下が最も大きい。②、③ともに対策なしの日射が当たる環境下で $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ の差が大きい。

以上より、自然湿球温度は MRT の違いが $WBGT_{nw}$ 差に反映されるが、 $WBGT_w$ 差では MRT を考慮していないため、 $WBGT_w$ 差で評価すると、日射遮蔽の対策を過小評価する恐れがあると考えられる。

2.2 同地点における対策有無での比較

前章での自然湿球温度と湿球温度の比較を踏まえ、同地点での比較を行う。また、その差が生まれた要因について $WBGT$ 算出に必要である湿熱環境項目について考察する。前章でミスト噴霧の効果がみられた地点 C について、気象条件の違い③と④の結果から考察する。地点 C は広場を囲う壁と屋根による影がくられており、③の条件ではミストの蒸発効果が最も得られていた。同じ地点 C でも④は曇天時であり、湿度が高く、ミストが蒸発しにくく水滴として地面が濡れている状況であった。そのため設置した測器に水滴が付着し濡れた状態での測定となった時間もあった。Fig.7 は④における $WBGT_w$ と $WBGT_{nw}$ 及び気温の変動を示す。これらと Fig.4 の変動、Fig.6 の温度差について比較を行う。Fig.6 右図より④は $WBGT_{nw}$ と $WBGT_w$ の $WBGT$ 差がほとんどない。理由として曇天時の測定のため日射の影響が小さくなり、 MRT の影響が小さいことが考えられる。Fig.8 は③の、Fig.9 は④の対策有無での気温、黒球温度、湿球温度、自然湿球温度の変動を示す。Fig.8、Fig.9 より対策なしの黒球温度を比較すると、③は大きな温度変化は見られないが④では 32°C まで温度が下がっていることが分かる。2 地点で気温に大きな変化はないものの黒球温度の低下が大きく見られ、黒球がミ

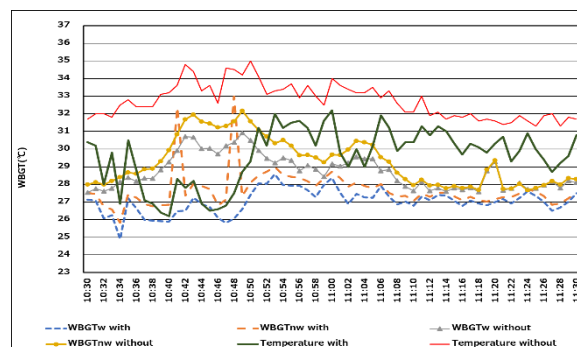


Fig.7 Variation in $WBGT@C\text{-spot}$

(④2022/8/25 10:30-11:45)

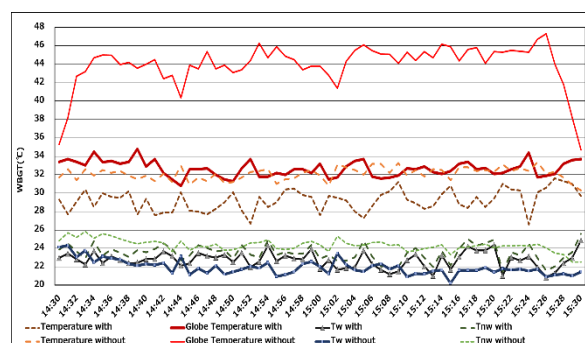


Fig.8 Variation in environmental element@C-spot

(③2022/8/18 14:30-15:30)

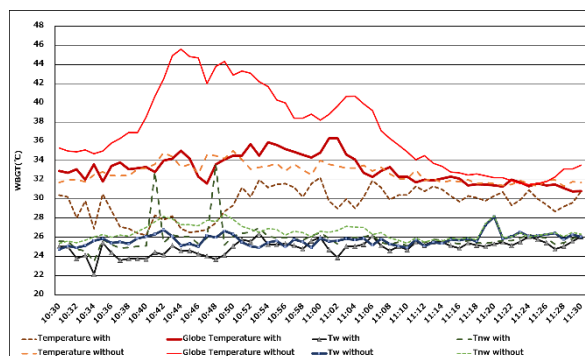


Fig.9 Variation in environmental element@C-spot

(④2022/8/25 10:30-11:45)

ストや雨で濡れていることが実測の中で確認できた。対策あり湿球温度を③、④で比較すると、③の湿球温度の方が 2°C ほど低く、顕著に変動を繰り返していることが読み取れる。さらに対策ありでの気温も減少と増加がみられる。ここから蒸発が盛んに行われるため湿度が一定の間隔で変化し、気温が一時的に低下しているといえる。一方で④は湿球温度の変動があまりなく、湿度が変化しにくい環境であったと考えられる。③は前述したとおり $WBGT$ 差が最も大きく出ており、クールスポットとしての効果は高く評価された。④は対策なしでも $WBGT_{nw}$ が 28 程度 (乾湿球温度 32°C 、相対湿度 65% 程度) で、危険な暑さ環境ではなかった。むしろ湿度が高く、蒸発がおこりにくい環境下でミストを晴天日と同様に噴霧したことで、適切な蒸発効果が得られていなかった。地点 C はク

ールスポットとしては成功しているが、ミスト発停の制御するための湿度センサーの位置を改善する必要がある。

2.3 WBGT 差の変動要因

Fig.10 から Fig.13 は縦軸に対策有無での WBGT 差、横軸に対策なし地点の WBGT_w、WBGT_{nw}、湿球温度、乾湿球温度差をプロットしたグラフである。地点 ABC すべての測定時間での結果から各項目と WBGT 差の関係とその傾向を考察する。Fig.10、Fig.11 より、WBGT_w、WBGT_{nw} と WBGT 差は比例関係にあり、WBGT_w より WBGT_{nw} の温度変動幅が大きく、近似式の傾きが大きくなることがわかる。また、地点 A が WBGT_w、WBGT_{nw} とともに高い位置にあるが、地点 C より WBGT 差が小さい位置に分布している。Fig.12 は湿球温度と WBGT 差の関係を示す。湿球温度と WBGT 差にはやや弱い比例関係がみられた。地点 A と地点 C の④条件で湿球温度が高く、④は曇天時の測定のため湿度が高く湿球温度が上昇していたと考えられる。地点 A で湿球温度が高いのは、対策なしでの MRT が高く湿球温度が上昇したと考えられる。Fig.13 は乾湿球温度差と WBGT 差の関係を示す。乾湿球温度差が大きい時に WBGT 差が大きくなる傾向はあるが、地点 C④は乾湿球温度差が低い時に WBGT 差のばらつきが大きい結果となった。この時黒球は過剰なミストで水滴が付着しており、WBGT 差が高く算出されることが分かった。

以上より、WBGT 差と 4 つ項目の関係から、地点毎の対策有無による WBGT 差の特徴を把握することができた。地点 A、B に比べて、地点 C は晴天時、曇天時ともに WBGT 差が大きい、曇天時では黒球温度が濡れていたために WBGT 差が高く算出されたと考えられる。

まとめ

本研究では以下 3 点について明らかにした。

(1) 湿球温度から算出する WBGT_w では MRT が考慮されないため、自然湿球温度から算出する WBGT_{nw} に比べ、日射遮蔽対策有無の WBGT 差が過小評価されることがある。

(2) 高い湿度環境でミスト噴霧されて黒球などのセンサーが、濡れた場合、WBGT 差が過大評価されることがある。

(3) 対策有無での WBGT 差と WBGT_{nw}、WBGT_w、湿球温度、乾湿球温度差との関係をグラフより、気象条件と WBGT 差の傾向をつかむことができた。

参考文献

- 1) 村上周三ら：ヒートアイランド現象緩和に関する評価システム CASBEE-HI の開発-評価システムの枠組みと概要(非住宅系建物の場合)-, 日本建築学会技術報告集第 23 号, p.247-252, 2006
- 2) 松井香奈ら：街中の屋外クールスポットを対象とした評価システムの開発 その 2 被験者実験による評価項目の選定と重み係数の検討, 空調調和・衛生学会近畿支部学術研究発表会論文集, 60 巻, pp.69-72, 2020

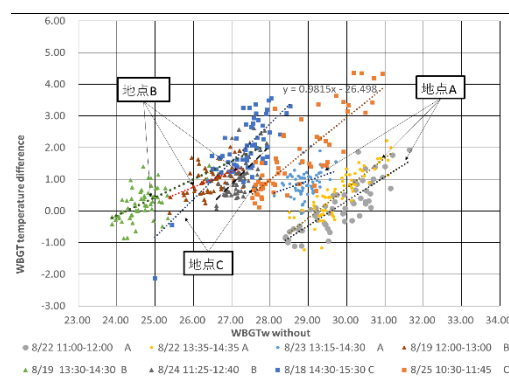


Fig.10 Scatter plots of WBGT difference and WBGT_w

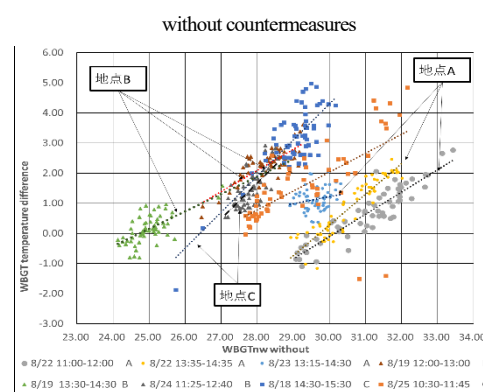


Fig.11 Scatter plots of WBGT difference and WBGT_{nw}

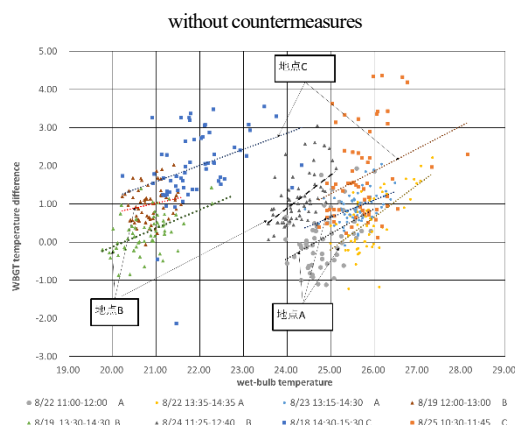


Fig.12 Scatter plots of WBGT difference and wet-bulb temperature

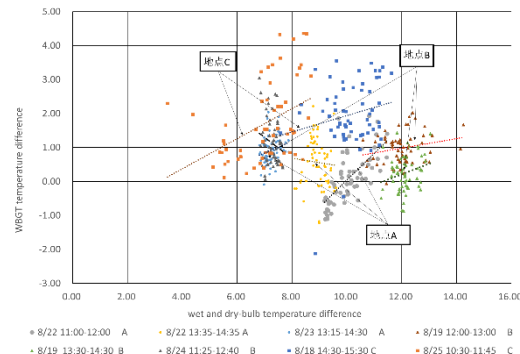


Fig.13 Scatter plots of WBGT difference and difference between dry-bulb temp. and wet-bulb temp.

駅前クールスポットの温熱環境改善効果の計測
(第2報) ベクトル放射温度計の活用方法の検討

Evaluation of thermal environment improvement effect of cool spots near stations:

Part2 Utilization method of vector radiation thermometers

○三野 慶輝 (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) 土川 忠浩 (兵庫県立大学)

Yoshiki MINO*1 Yukina TAKAYANAGI*2 Minako NABESHIMA*2

Masatoshi NISHIOKA*2 Tadahiro TSUCHIKAWA*3

*1 Osaka City University *2 Osaka Metropolitan University *3 University of Hyogo

The paper aims to measure the radiation environment by direction at cool spots near stations using vector radiation thermometers and to estimate the effect of improvements. Especially the effect of temperature reduction by evaporation of mist adhering to the surface of people and objects under mist spray. The sum value of latent heat of evaporation and heat storage was obtained from the heat balance equation of the blackbody tape surface on the vector radiation thermometer, and the cooling effect of the mist was measured based on the differences of each sum value with and without mist spraying.

はじめに

近年、都市部ではヒートアイランド現象が進行しており、熱中症などの健康被害が増加している。これに伴い、大阪府では森林環境税を活用した駅前広場などの猛暑対策事業として、クールスポット整備が進められている。

本研究では、主にミスト、プランター緑化、日射遮蔽屋根の対策技術が採用されることが多い駅前クールスポットの温熱環境改善効果を計測し、評価、改善案の検討を行うことを目的とする。また、計測の際、ベクトル放射温度計 (Fig.1) を導入することで、方向別の放射環境を計測し、日よけ屋根やプランター緑化の放射環境改善効果を評価する。また、複数台のベクトル放射温度計を用いることでミスト冷却の効果推定を試みる。ここで、ミスト冷却効果には、空気中で蒸発して気温を下げる効果と、人や物の表面に付着して蒸発し、表面温度を下げる効果があるが、主に後者を対象にする。

1. ベクトル放射温度計

1.1 ベクトル放射温度計の概要

高柳・土川らによって提案されているベクトル放射温度計¹⁾を参考に、一辺 7 cm の立方体アクリルケースの 6 面にそれぞれ長波の放射温度を測定する M5Stack 用非接触温度センサユニット NCIR (視野角: 90°、精度: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、測定波長範囲: 5.5~14 μm) を内側から取り付けた機器を作成する (Fig.2)。外側には内部の温度上昇を防ぐため、日射を透過しないアルミテープと、反射率の高い白い画用紙を順に貼り付けている。また、NCIR センサ上部に黒色テープを貼り、6 面の短波 (日射) と長

波を考慮した放射温度を小さい時定数で測定することができる。

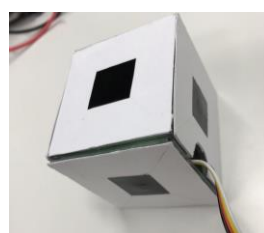


Fig.1 Vector radiation thermometer

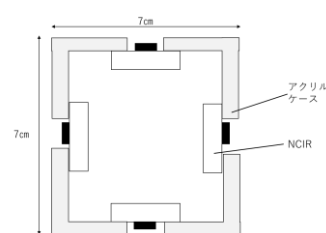


Fig.2 Cross section of vector radiation thermometer

ベクトル放射温度計を導入することで、グローブ球を用いて放射環境を計測する従来の方法では分からない方向別の放射温度をリアルタイムに計測することができる。また、方向別の放射環境を測定する際に用いられている長短波放射収支計を複数台使う方法²⁾よりも安価かつ容易に測定することができる。本研究では、黒体テープを貼らないベクトル放射温度計 1 台と、黒色と白色の黒体テープを貼ったベクトル放射温度計を 1 台ずつ、計 3 台をミスト噴霧下で使用し、測定される放射温度の違いから、黒体テープ表面の熱収支式からミスト冷却の効果である蒸発潜熱を推定する。

以下、ベクトル放射温度計の黒色黒体テープ、または白色黒体テープ表面の熱収支式を式 1~式 4 に示す。ミスト噴霧なしの場合は蒸発潜熱 $LE = 0$ となる。

・ミスト噴霧あり

$$\varepsilon_{pb}L + \varepsilon_{ps}S = \alpha_c(T_{sbw} - T_a) + \varepsilon_{pb}L\sigma T_{sbw}^4 + LE_{bw} + St_{bw} \quad (\text{式 1})$$

$$\varepsilon_{pw}L + \varepsilon_{ps}S = \alpha_c(T_{sww} - T_a) + \varepsilon_{pw}L\sigma T_{sww}^4 + LE_{ww} + St_{ww} \quad (\text{式 2})$$

・ミスト噴霧なし

$$\epsilon_{pbL}L + \epsilon_{pbS}S = \alpha_c(T_{sbd} - T_a) + \epsilon_{pbL}\sigma T_{sbd}^4 + LE_{bd} + St_{bd} \tag{式3}$$

$$\epsilon_{pwL}L + \epsilon_{pwS}S = \alpha_c(T_{swd} - T_a) + \epsilon_{pwL}\sigma T_{swd}^4 + LE_{wd} + St_{wd} \tag{式4}$$

$\epsilon_{pbL}, \epsilon_{pwL}$: 黒色、白色黒体テープの長波放射率 (0.95)、 ϵ_{pbS} : 黒色黒体テープの短波吸収率 (0.97)、 ϵ_{pwS} : 白色黒体テープの短波吸収率 (0.09)、 L : 長波放射量 (W/m²) 測定値、 S : 短波放射量 (W/m²) 上面のみ測定、他面は未知数、 α_c : 対流熱伝達率 未知数、 T_{sb}, T_{sw} : ベクトル放射温度計の測定値 (K) 測定値、 T_a : 気温 (K) 測定値、 σ : ステファンボルツマン定数 (5.67×10⁻⁸)、 St_b, St_w : ベクトル放射温度計内部への蓄熱量 (W/m²) 未知数、 LE_b, LE_w : 蒸発潜熱 (W/m²) 未知数

上記の熱収支式は未知数が多く連立方程式として解くことができないため、対流熱伝達率は理論式から算出することとし、ミスト冷却の効果推定は蓄熱量と蒸発潜熱の合計値（以後、 $LE+St$ と記載）を用いて考察する。

1.2 ベクトル放射温度計の検証実験

前述の方法で作成した3体のベクトル放射温度計について、2通りの精度検証①と②を行う。①使用した18個の放射温度計 NCIR の個体ごとの誤差を調べ、測定値の正確性を確認する器差実験と、②黒体テープを貼ったベクトル放射温度計が長波と短波を考慮した値をどの程度測定できているのかを調べる実験を行う。

NCIR の個体ごとの誤差を調べる器差実験①は、恒温恒湿槽内で行い、現地実測で使用した NCIR を6個ずつハブに取り付けたものを3個 (Hub3、4、5) の計18個の NCIR を使用し、恒温恒湿槽の内壁上面を向けて設置して行う (Fig.3)。また、恒温恒湿槽内にロガーに繋いだ熱電対を内壁上面に貼り付け、熱電対の測定値を真値として、NCIR の測定値との誤差の有無も同時に確認し、誤差を補正する式を算出する。現地実測を行ったときの環境下での NCIR 同士の誤差の有無を調べるため、恒温恒湿槽の内部環境は、温度30度、湿度50%と、温度40度、湿度50%の2条件で測定する。得られた補正式をTable 1に示す。

また、ベクトル放射温度計が、日射と長波の両方を考慮した放射温度をどの程度測定できているのかを調べる実験②では、自作ビニールハウス (Fig.4) 内にベクトル放射温度計 (黒色黒体テープ) と長短波放射収支計を設置し、上面の放射温度を測定する。建物屋上の日当たりの良い場所で、12月7日の午前12時から60分間測定を行った。

ベクトル放射温度計の測定値はTable1上記の表の補正式で補正を行い、各面ごとの誤差は生じないとして、代表の1面のみを測定する。長短波放射収支計とベクトル

放射温度計の測定した放射量を比較するため、長短波放射収支計の長波、短波放射量の測定値に黒色黒体テープの長波、短波放射率を掛けた値から放射温度を算出する (式3 左辺)。また、自作ビニールハウス内には微風 (0.5m/s) が生じているものとし、対流熱伝達成分を考慮するため式3に示す熱収支式より T_{sbd} の推定値を求める。ただし、ベクトル放射温度計への蓄熱成分 St および潜熱成分 LE は無視している。

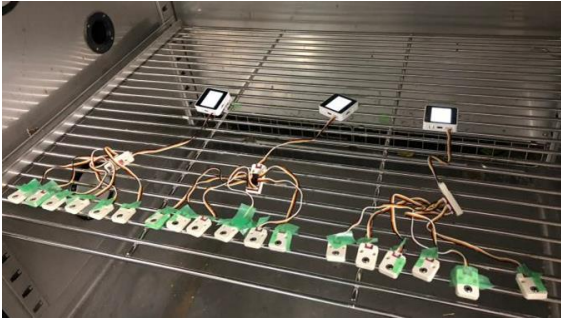


Fig.3 NCIR instrumental experiments
Table1 Correction Formula for Vector Radiation Thermometers

Hub3	0	y=1.2x-7.7	Hub4	0	y=1.2x-7.3	Hub5	0	y=1.2x-7.4
	1	y=1.2x-7.4		1	y=1.2x-7.3		1	y=1.2x-7.4
	2	y=1.2x-7.4		2	y=1.2x-7.2		2	y=1.2x-7.0
	3	y=1.2x-7.3		3	y=1.2x-7.3		3	y=1.2x-7.1
	4	y=1.2x-7.7		4	y=1.2x-7.3		4	y=1.2x-7.1
	5	y=1.2x-7.4		5	y=1.2x-7.5		5	y=1.2x-6.6
y : 熱電対測定値 (°C) x : ベクトル放射温度計測定値 (°C)								



Fig.4 Self-built plastic greenhouse

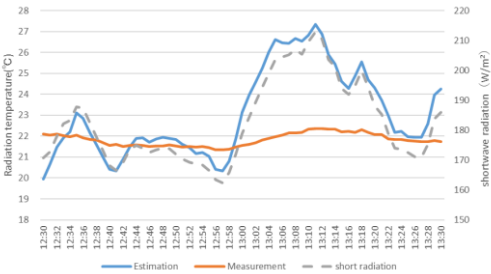


Fig.5 Comparison between estimations and measurements by vector radiation thermometer

Fig.5 は、長短波放射計の計測値から算出した放射温度推定値と、補正後のベクトル放射温度計の測定値を左軸で示し、短波放射量を右軸に示している。放射温度推定

値と短波放射量の変動は類似しているが、ベクトル放射温度計の測定値と短波の変動の形は異なっており、短波放射量の変動に追従していないことが分かる。この要因として、ベクトル放射温度計は、周辺からの長波と短波の放射量を一度黒体テープ面で吸収し、その黒体テープから放射される長波を測定しているため、長波に比べて変動の大きい短波の変動が捉えにくいことや、ビニールハウス内の温度上昇のセンサ基板への影響も考えられる。また、ベクトル放射温度計への蓄熱量を考慮できておらず、式3右辺の $LE_{bd} + St_{bd}$ の項を0として放射温度を算出したため、差が生じていることが考えられ、今後さらに検証方法も含めて詳細に検討する必要がある。

2. クールスポット実験概要

ミスト噴霧による気温の低下、日射遮蔽による放射温度の低下などを計測し、暑さ対策の有無による結果を比較することで、温熱環境改善効果を定量的に確認することを本実験の目的とする。本報では主にミスト噴霧効果について述べる。

測定点は、「令和2年度森林等環境整備事業(都市緑化を活用した猛暑対策事業)」の実績に係る「評価及び令和3年度実施状況について」に記載されている場所から3箇所(地点A、地点B、地点C)を選定し、2022年8月18日から8月25日に測定した。詳細は第1報を参照されたい。測定項目は、放射温度、気温、風速、湿度、日射量とし、第1報に示した測定機器類の他、ベクトル放射温度計3台と極細熱電対(φ0.125mm, K型)を用いた。

3. ミスト噴霧による冷却効果

現地実測の結果から、ミストが付着した際の温度変化、ミストの蒸発潜熱について評価を行う。

3.1 極細熱電対による測定

ミストが付着した際の温度変化は、極細熱電対を用いて短い間隔で空気中の温度を測定することによって確認する。晴天日でミストの蒸発が活発に生じていたと考えられるC駅(8/18 14:30~15:30)の地面から120cmの高さに設置した極細熱電対の測定値と自然通風シェルター内で計測した乾球温度、湿球温度をFig.6、Fig.7に示す。極細熱電対は5秒、乾球温度、湿球温度は1分間隔で測定している。湿球温度は相対湿度の計測値から算出した。

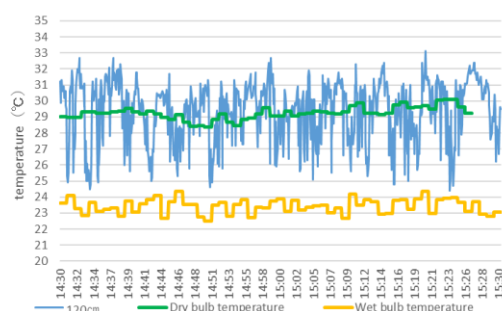


Fig.6 Comparison of temperatures every 5 seconds in cool spot (8/18 14:30~15:30)

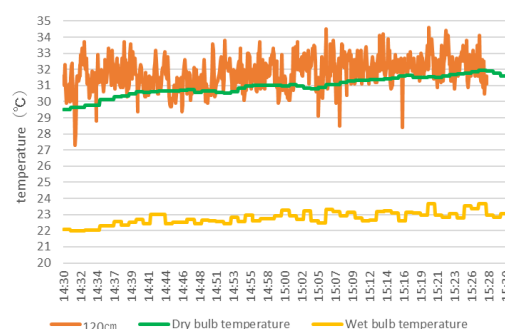


Fig.7 Comparison of temperatures every 5 seconds in non-cool spot (8/18 14:30~15:30)

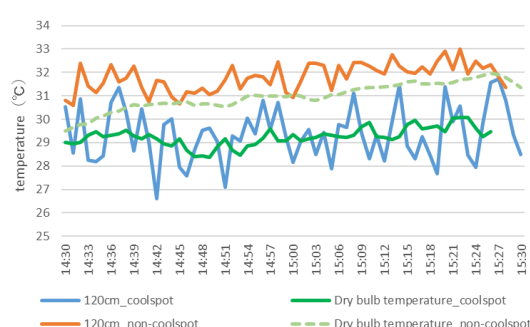


Fig.8 Temperature comparison with and without cool spot (8/18 14:30~15:30)

暑さ対策のある場所(以下、対策あり)、暑さ対策のない場所(以下、対策なし)のそれぞれについて、Fig.6、7は極細熱電対の測定結果(5秒間隔)を示し、Fig.8は極細熱電対、乾球温度の測定値を1分平均にしたものを示している。

Fig.6、7より、対策ありのミスト噴霧下では極細熱電対にミストが付着しているとき極細熱電対の値が大きく下がっており、湿球温度に近くなっていることから、極細熱電対が濡れと蒸発を繰り返していることが分かる。対策なしではミスト噴霧がないときは極細熱電対の測定値の変動は対策ありに比べて小さく、乾球温度よりやや高い温度で推移している。また、対策あり、対策なしのそれぞれについて、極細熱電対の平均値と標準偏差の値から変動係数を算出すると、対策ありで0.04、対策なしで0.02となった。ここから、対策ありのミスト噴霧下では濡れと蒸発を繰り返して変動係数が大きくなることがわかる。Fig.8より、対策ありの自然通風シェルター内の乾球温度と極細熱電対は平均29.2°C、平均29.3°Cとほぼ同等であったが、対策なしは平均30.9°C、平均31.8°Cと極細熱電対の方が高くなった。

以上より、対策ありのミスト噴霧下において極細熱電対を用いると蒸発の過渡的な変動を捉えることができ、自然通風シェルター内の乾球温度でも平均的なミスト噴

霧効果を捉えられていると言える。また、対策なしの極細熱電対は直達日射の影響で高めに計測されているため、対策あり・なしの比較は自然通風シェルター内の乾球温度差で評価の方がよいと判断できる。

3.2 ベクトル放射温度計による測定

日射遮蔽やミスト噴霧による暑熱対策を行った場所で3体のベクトル放射温度計を設置し、黒色黒体テープと白色黒体テープのベクトル放射温度計の熱収支の違いを明らかにしたうえで、ミストの有無による $LE+St$ の値を比較考察する。現地実測において同じ場所でミストの噴霧の有無を比較できる地点Bの8/22(ミスト噴霧なし)、23(ミスト噴霧あり)の測定値から算出した熱収支式の各項の値を1時間平均で以下に表す。

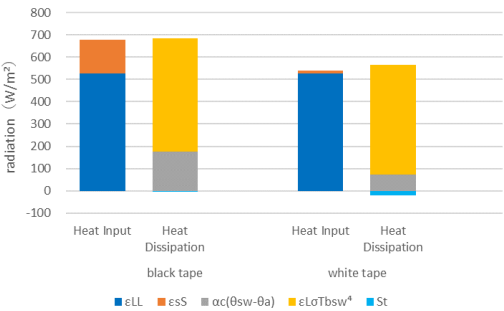


Fig.9 Value of each term(8/22 11:00～12:00 No mist spray)

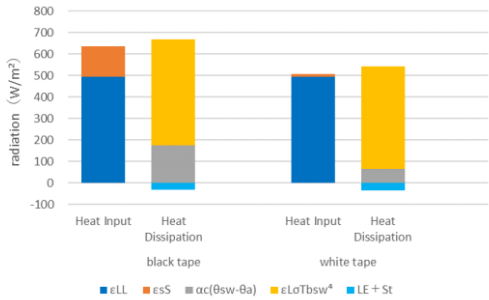


Fig.10 Value of each term(8/23 13:15～14:15 Mist spraying)

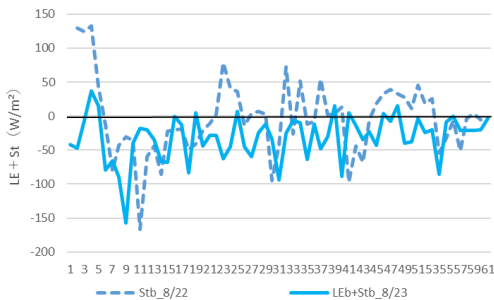


Fig.11 Time trend of LE_b+St_b with mist spraying

Fig.9、10は1時間平均の熱収支を、Fig.11は黒色黒体テープの $LE+St$ の時間推移を表している。

Fig.9より、ミスト噴霧がない日は蒸発潜熱 $LE=0$ であり、 St_{bd} 、 St_{wd} の値が -4 、 -20 W/m^2 と0に近い負の値になっており、入射熱と放熱のバランスはとれている。黒色テ

ープと白色テープは日射吸収率が0.97、0.09と大きく異なり、入射熱量の違いが生じている。また、黒色テープ St_{bd} より白色テープ St_{wd} の方がやや負の値が大きいため、ベクトル放射温度計内部の熱が僅かに奪われていると考えられる。ただし、今回は内部温度のモニターをおこなっていなかったため、検証はできなかった。

Fig.10より、ミスト噴霧がある日は $LE_{bw}+St_{bw}$ 、 $LE_{ww}+St_{ww}$ の値が -31 、 -35 W/m^2 とミスト噴霧がない日より大きな負の値となっており、蒸発潜熱として放熱が行われることで、ベクトル放射温度計内部の熱が奪われ蓄熱量が負となったと考えられる。

以上の結果から、 St 、 $LE+St$ を黒体テープ表面の熱収支式各項の値から算出することでミストの有無による値の変化を確認できており、間接的にミストの効果を測定することができたと考えられる。ただし、直接的に蒸発潜熱を明らかにできていないため、改良の余地があることがわかった。

4. まとめ

本研究では、駅前のクールスポットに設置されているミスト噴霧装置などの暑さ対策効果を極細熱電対や複数のベクトル放射温度計を用いて試算した。その結果、極細熱電対の5秒間隔の温度変化から、ミスト噴霧下の過渡的な現象を明らかにできた。また、ベクトル放射温度計の黒体テープ表面の熱収支式からミスト噴霧の有無による蒸発潜熱+蓄熱成分の違いを示した。

今後の課題として、ミスト噴霧による蒸発潜熱のみの値を定量的に求めるためには、ベクトル放射温度計内部の温度をモニターして蓄熱成分を把握するか、アクリル箱の表面に断熱材を塗布して内部に蓄熱をしないよう改良することが必要である。

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」令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会、25-28, 2022
- 2) 内田悠介、鍋島美奈子、西岡真稔；「歩行者空間における街路樹の放射温度低減効果の実測調査」日本建築学会大会学術講演会梗概集 環境工学 I，635-636, 2015

謝辞

本実測調査は大阪ヒートアイランド対策コンソーシアム都市デザインWGの活動の一環として実施した。黒体テープの日射吸収率および透過率の計測については、大阪産業技術研究所森之宮センター大江猛氏、吉村由利香氏にご協力いただいた。また現地実測調査については、大阪狭山市の宮崎剛志氏、藤井寺市の池田晃誠氏にご協力いただいた。記して謝意を表します。

遮光の有無と寝室環境および睡眠の質との関係

Relation between opaque curtain and thermal environment of bedrooms or sleep quality

○吉 見 周 (大阪市立大学)

梅 宮 典 子 (大阪市立大学)

Shu YOSHIMI*1 Noriko UMEMIYA*1

*1 Osaka City University

For this study, we used surveys of 770 nights administered to 137 residents of apartment complexes in Osaka city during 2015–2017 and 2019 in summer (July–September). The survey included sleep quality using the OSA sleep questionnaire, behavioral records kept at 30-min intervals (regarding use of air conditioning and opening and closing of windows), and bedroom temperatures recorded at 10-min intervals. We analyzed effects of opaque curtains on sleep quality and the thermal environment from 2 hr before bedtime to 4 hr after bedtime and from 1 hr before waking up to waking up time. Results of this study show that, in bedrooms with opaque curtains, the average room temperature before waking up does not differ from that in continuous use of AC even if AC is turned off at 4 hr after bedtime.

1. 背景と目的

日本では特に1990年代以降、熱帯夜数が増加している^{※1)}。熱帯夜にはおよそ4人に1人が睡眠中に中途覚醒している、との環境省の報告もある^{※2)}。冷房使用の睡眠への影響について、新井ら(2005)^{※3)}は、睡眠障害のない健康な成人男性を対象として被験者実験を行い、睡眠中の室温を一定に制御するより、V字型に制御する方が深睡眠時間が増加することを示した。垣鍔ら(2010)^{※4)}は、4人の青年を対象として人工気候室実験を行い、4種類の温熱環境下での睡眠の質を比較し、室温を就寝時に28℃より低めに制御して睡眠中に上昇させることが睡眠の質に効果的であったと述べている。

実際の寝室では、住戸の断熱性や方位、エアコンの設置位置や、就床前の冷房の使用など複数の要因が睡眠の質に影響する。例えば、実際の寝室では隣室のエアコンで寝室を冷房する場合が意外と多い。部屋が寝室専用とも限らない。床に寝る場合も多い。温熱環境以外の外光の変化も睡眠の質に影響する。

筆者らは夏季における睡眠の質の実態を明らかにすることを目的に、寝室の温熱環境測定と温熱環境調節、睡眠の質の調査を継続しておこなってきた。本研究は冷房を連続運転した晩を対象に、遮光カーテンの有無と1) 温熱環境、2) 睡眠の質、3) 温熱環境と睡眠の質の関係の違いを明らかにすることを目的とする。

2. 方法

大阪都市部の集合住宅を対象とし、各住戸連続7日、寝室温度は10分間隔、湿度は就床前と起床時に記録した。居住者には冷房や扇風機の使用、窓開・閉、寝室の

在室、睡眠の30分間隔の記録(冷房使用日誌)と、起床時に前晩の睡眠の質5段階15尺度(OSA)と温熱感覚申告をとった。2014年44戸、2015年44戸、2016年37戸、2017年63戸、2019年29戸のデータを収集した^{※1) 2)}。

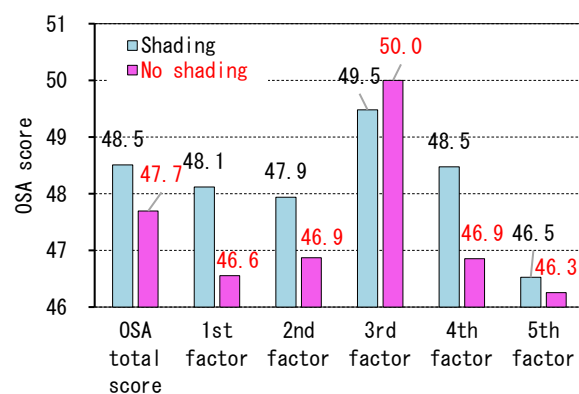
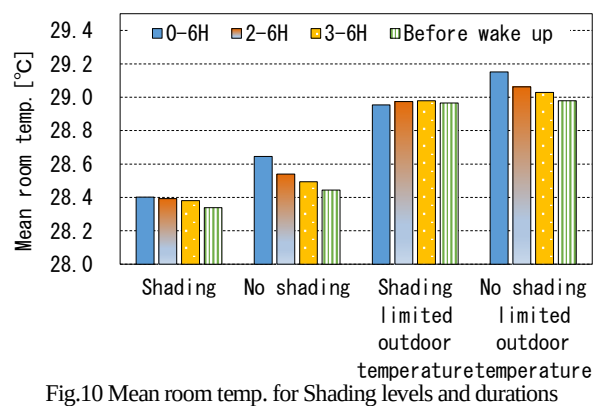
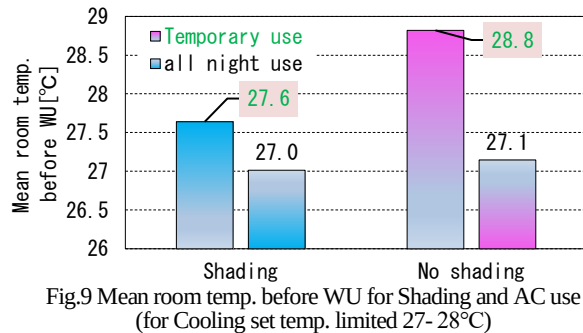
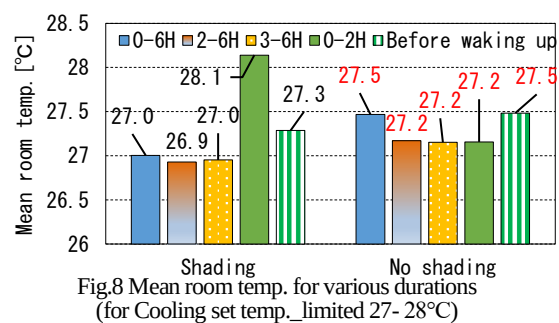
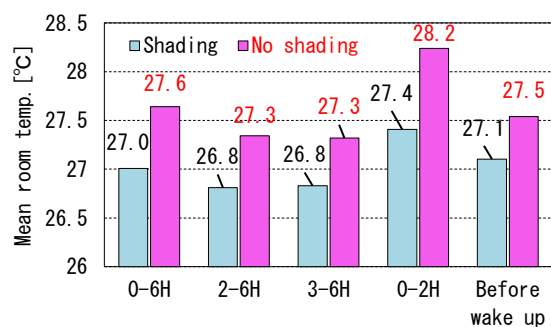
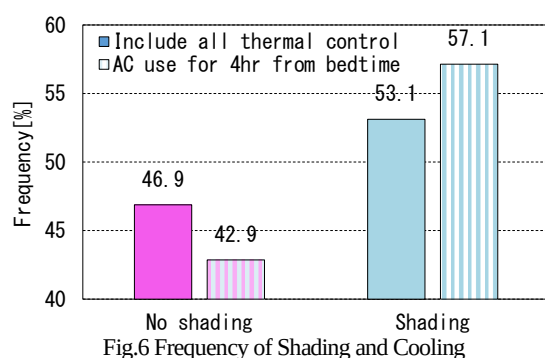
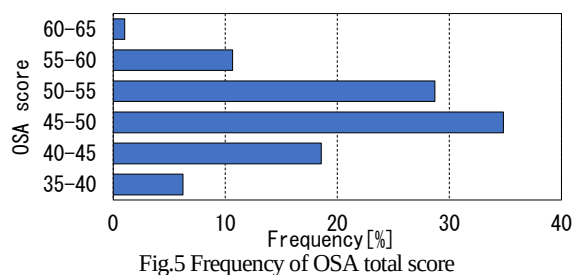
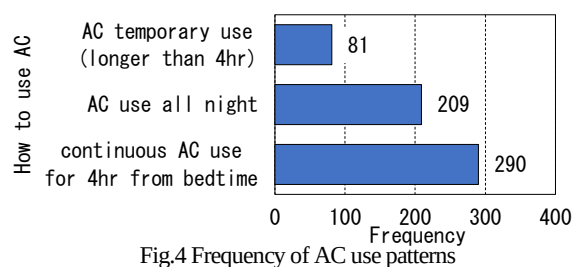
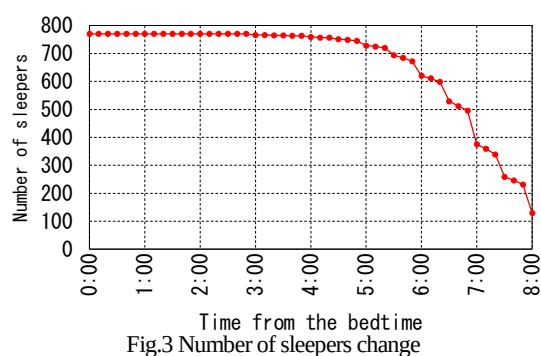
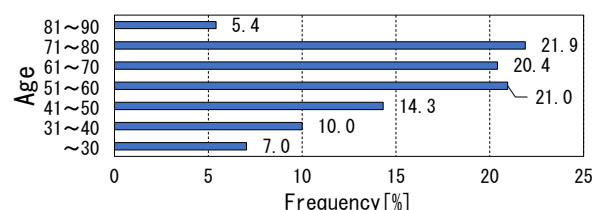
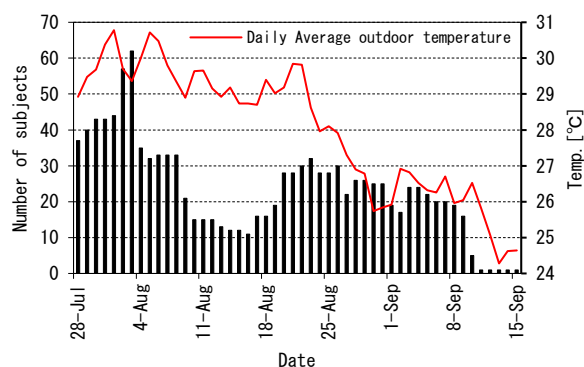
Fig.1に5年合計の日ごとの調査数と日平均外気温の5年平均値の推移を示す。夏全体に偏りなく調査している。

測定期間中に1) ストレス「非常にあった」、2) 健康「不良」、3) 睡眠の質が悪い側で理由が体調、4) 2歳以下の乳幼児と同室で就寝、5) 睡眠3時間以下、就床20時以前、起床3時以前の晩は除いた。さらに、OSA総合得点の上位下位5%ずつを除いたOSA総合得点36.6～60.4点の770晩を本研究の分析対象とする。

3. 分析対象の構成

分析対象は25～88歳、平均57.0±16.3歳の男性52名、女性85名である(Fig.2)。就床時刻は23:25±1:08、起床時刻は6:27±1:07、睡眠時間は7時間1分±1時間10分である(Fig.3)。就床から4時間後までの間において、窓閉鎖かつ扇風機不使用かつ冷房使用は290晩(全体の37.7%、以下「全時間冷房」)である。290晩のうち、睡眠全時間において窓閉鎖かつ扇風機不使用かつ冷房使用は209晩(全体の27.1%、以下「一晩中全時間冷房」)、「全時間冷房」であるが4時間以降にタイマー等で冷房停止は81晩(全体の10.1%、以下「タイマー使用(4時間以上)」)である(Fig.4)。

睡眠の質を表すOSA総合得点は、60.4～60点1.0%、55～59点10.5%、54～50点28.7%、45～49点34.7%、44～40点18.7%、39～36.6点6.4%で、平均48.6±SD5.3点である(Fig.5)。



4. 遮光カーテン

遮光カーテンを寝室に設置している「遮光あり(Shading)」は53.1% (361 晩)、「遮光なし(No Shading)」は46.9% (409 晩)である。この中で「全時間冷房」すなわち就床から4時間の間冷房を連続運転した晩は、「遮光あり」が58.0% (167 晩)、「遮光なし」が42.0% (121 晩)である(Fig.6)。なお遮光カーテンは遮光率99%以上と定義されているが、回答者の判断にゆだねている。

5. 就床時刻との関係による睡眠時間帯の区分

冷房発停の室温への影響を考慮し、個々の晩の就床2時間前を時刻0とし、就床時刻との関係で睡眠時間帯を区切る。「0-6H」は就床2時間前から就床4時間後までの睡眠のほぼ全時間、「2-6H」は就床から就床4時間後までの比較的安定した時間帯、「3-6H」は就床1時間後から4時間後までの安定した時間帯、「0-2H」は就床2時間前から就床までの冷房発停の影響が大きい時間帯、「起床前」は個々の晩の起床1時間前から起床までとする。

6. 遮光の有無と室温

6.1 時間帯による室温の違い

Fig.7に、時間帯別の寝室温を示す。就床前後では全ての時間帯において、遮光ありがなしより低い。「起床前」は遮光ありがなしより低いが、冷房設定温度は遮光ありがなしより低くなっている($p<.0001$)。

Fig.8に、設定温度の70.8%を占める27-28℃の晩について示す。就床前を含む0-6Hや0-2Hでは、遮光ありがなしより室温が低い($p=.0075$, $<.0001$)。遮光カーテンが日中の直射日光を防ぎ、冷房の効果を上げたと考えられる。一方、起床前後においては遮光の有無による室温の差はない。遮光では朝日の熱的影響が防げないと考えられる。

6.2 遮光の有無と就床から4時間以降の冷房使用

遮光ありのうち、就床から就床4時間後まで冷房を連続運転する「全時間冷房」は71.6% (63 晩)、就床から4時間は冷房し4時間以降タイマーなどで冷房が停止した「タイマー使用」は28.4% (25 晩)である。遮光なしのうち、「全時間冷房」は74.0% (71 晩)、「タイマー使用」は26.0% (25 晩)である。

Fig.9に遮光有無と「全時間冷房」/「タイマー使用」を組み合わせる室温を比較する。起床前1時間の室温は、冷房設定温度27-28℃の「タイマー使用」の晩では遮光の有無による差がない($p=.5862$)。「全時間冷房」の晩では遮光なしがありより低い($p=.0218$)。遮光なしでは「全時間冷房」が「タイマー使用」より低い($p<.0001$)、遮光ありでは「タイマー使用」と「全時間冷房」で差がない($p=.0218$)。すなわち、遮光によって冷房停止後も室温を低く維持できたと言える。

6.3 冷房を使用しない晩との比較

Fig.10に冷房を使用しない晩について、遮光の有無の

室温への影響を比較する。全ての時間帯において、遮光の有無によって室温に差はない。外気温が26-28℃台の晩に限っても、全ての時間帯において、遮光の有無によって室温に差はない。

7. 睡眠の質への遮光の影響

7.1 「全時間冷房」の晩と「タイマー使用」の晩

「全時間冷房」の晩では、OSA第1因子(起床時眠気)と第4因子(疲労回復)において、遮光ありが遮光なしより睡眠の質が高い(それぞれ $p=.0497$, $.0231$)(Fig.11)。

「全時間冷房」のうち冷房設定温度27-28℃の晩に限定すると、OSA総合、第1因子、第4因子のいずれも、遮光ありが遮光なしより睡眠の質が高い(それぞれ $p=.0386$, $.0088$, $.0027$)(Fig.12)。

冷房設定温度27-28℃の晩に限定して「全時間冷房」と「タイマー使用」を比較すると、遮光ありかつ「タイマー使用」の睡眠の質が最も高い(Fig.13)。すなわち、通常の冷房設定温度では、遮光し、就床から4時間まで冷房を連続運転し、さらに4時間以降に冷房を停止する場合の睡眠の質が最も高い。就床4時間以降に冷房を停止しても温熱環境は維持され、睡眠の質がよいと言える。

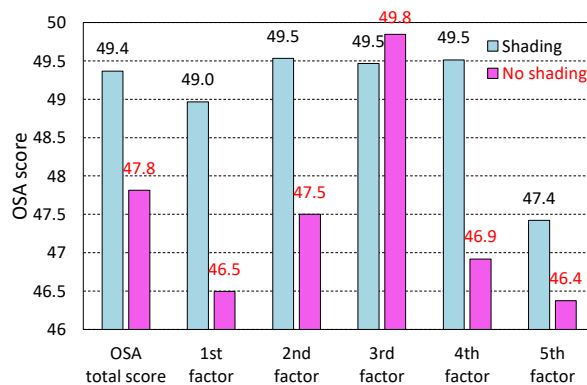


Fig.12 OSA score with Shading
(for Cooling set temp. limited 27-28°C)

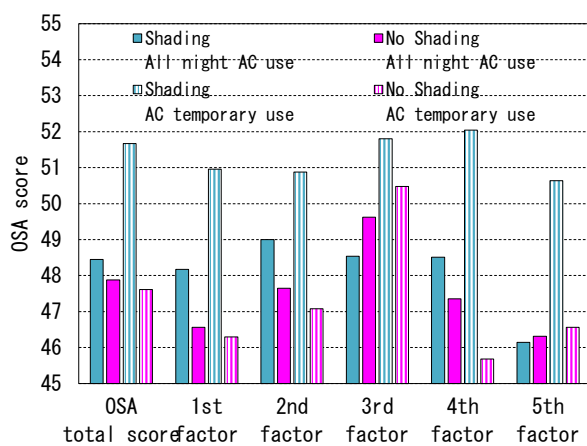


Fig.13 OSA score with shading and AC use
(for Cooling set temp. limited 27-28°C)

Fig.14に睡眠中の平均室温を27-28℃に限定し、「全時間冷房」/「タイマー使用」と遮光有無の組み合わせに対するOSA得点を比較する。「全時間冷房」の晩は、睡眠の質に遮光の有無による質に差がない。一方、「タイ

「遮光なし」の晩は、第3因子において遮光なしがありより睡眠の質が高い ($p=.0304$)。

Fig.15 は冷房設定温度 28℃台で「全時間冷房」し、起床前1時間における室温平均値が 28℃台の晩について、遮光の有無による OSA 得点を比べている。冷房発停も室温も同条件のもとにおいて、遮光ありがなしより OSA 総合、第2因子(入眠と睡眠維持)が高い ($p=.0241, 0.045$)。温熱環境以外の要因が睡眠の質に影響した可能性を示す。遮光の室内の光環境への影響が考えられる。

7.2 冷房を使用しない晩との比較

冷房を使用しない晩について、遮光の有無によって OSA 各因子得点を比較すると、第3因子(夢見)においてのみ遮光ありがなしより睡眠の質が高い ($p=.0004$) (図略)。Fig.16 に睡眠時平均外気温において全体の 80.0% を占めている 26-28℃台に限定した場合の遮光の有無での OSA 得点の比較を示す。OSA 総合点、第1因子、第2因子、第4因子において、遮光ありが遮光なしより睡眠の質が高い ($p=.0477, .005, .0275, .0069$)。冷房を使用しない晩では、夢見以外は遮光ありがなしより睡眠の質が高いと言える。

温熱環境が安定する 3-6H において睡眠時の室温が 27-28℃である晩の OSA 得点を示す。どの因子も遮光の有無による差は有意ではない。すなわち冷房しない場合に寝室の温熱環境が同等であれば、睡眠の質に遮光の有無による差はない。

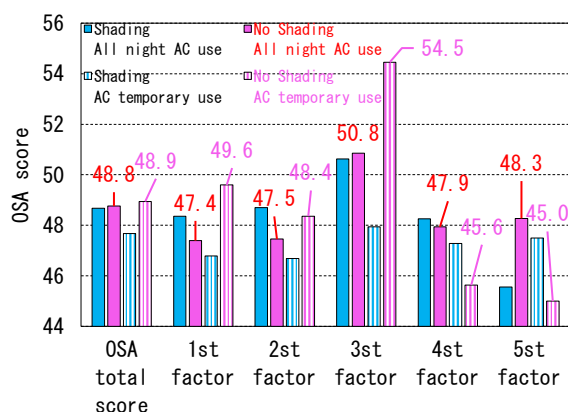


Fig.14 OSA scores by Shading and AC use
(for Room temp. limited 27-28℃)

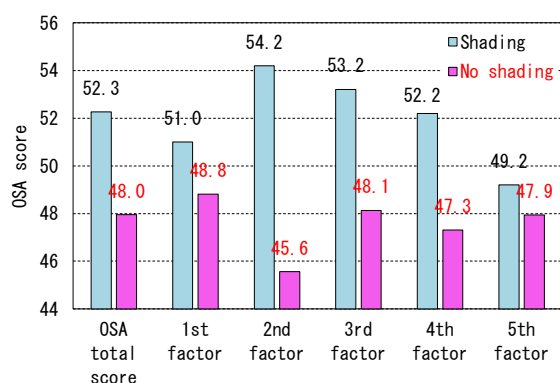


Fig.15 OSA total score with Shading for AC use all night
(for Cooling set temp. limited 28℃)

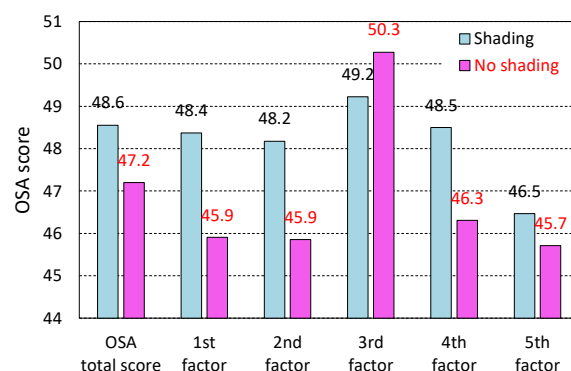


Fig.16 OSA score without AC use
(for Outdoor temp. limited 26-28℃)

8. 結論

大阪の集合住宅137戸770晩の寝室の温熱環境測定と、冷房・通風・扇風機の使用と睡眠の時間帯の30分単位での申告や睡眠の質の調査をおこなって、寝室の遮光の有無に着目して、起床前の冷房使用別や睡眠時間帯別に、寝室温熱環境と睡眠の質について以下を明らかにした。

- 1) 就床から就床4時間後まで冷房を使用する場合では、遮光がある場合はない場合より、就床2時間前-就床や、就床2時間前-就床4時間後における室温平均値が低い。
- 2) 遮光する場合、就床から起床まで冷房を連続使用する晩と、就床から4時間以降に冷房を停止する晩のあいだで、起床前1時間の室温には差がない。
- 3) 冷房を使用しない晩の室温には、遮光の有無による差がない。
- 4) 冷房設定温度が 27-28℃であれば、遮光して就床4時間以降に冷房を停止する晩の睡眠の質が最も高い。
- 5) 冷房設定温度 28℃で就寝から起床まで冷房連続使用する場合、起床前1時間の平均室温が 28℃台であれば、遮光するほうが OSA の総合得点、入眠・睡眠維持因子の得点が高い。
- 6) 冷房を使用しない晩は、外気温が 26~28℃台であれば、遮光するほうが OSA の総合得点、起床時眠気因子、入眠・睡眠維持因子、疲労回復因子の得点が高い。

参考文献

- 1) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
 - 2) 環境省: 気温の上昇が睡眠に及ぼす影響、ヒートアイランド対策の環境影響等に関する調査業務報告書, 1-50, 2009年2月
 - 3) 垣内直、川島庸: 体温のサーガディアンリズムを考慮した夏季の睡眠時の温熱環境条件の評価, 体温のサーガディアンリズムを考慮した夏季の睡眠時の温熱環境条件の評価, 2010年
 - 4) 新井潤一郎: 温熱環境制御による快眠誘導 睡眠中の環境温度の動的制御による「深部体温」, 「睡眠深度」コントロール, 日本生理人類学会誌, 特別号(1) 第53回大会要旨集, 長崎2005年6月
 - 5) 山本ら: 中年・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
 - 6) 日本気象学会編, 日常生活における熱中症予防指針, Ver.3, 2021年3月
- 注
1) 2019年調査は29住戸のうち戸建住宅が19戸含まれるが、本研究では戸建て住宅は除いて分析した。2) 複数年協力いただいた住戸があり、17戸が2年、18戸が3年協力している。

ABW 指向型オフィスにおける空調設備の運用実績 Operational performance of air conditioning systems in ABW- office

○富岡 雅弘 (竹中工務店)

小林 佑輔 (竹中工務店)

Masahiro TOMIOKA *1

Yusuke KOBAYASHI *1

*1 Takenaka Corporation

This study reports on the operational performance of air conditioning systems in ABW-oriented offices. The analysis showed that ABW enables workers to autonomously and spontaneously select the optimal location for their work according to their work environment, functions, and comfort requirements, and that architectural and environmental facility planning for ABW has the potential to reduce energy consumption compared to standard buildings.

はじめに

オフィスビルに求められる環境性能は省エネルギー性に加えてオフィスワーカーの知的創造、健康・快適性への配慮など範囲が拡大している。Activity-Based-Working (以下 ABW) 指向型のオフィスは業務環境・機能や快適性要求に応じて、ワーカーが自律自発的に最適な場所を選択して働くことができる。一方、ABW 指向型オフィスにおけるエネルギー消費量実績などや空調設備の運用実績の報告は少ない。そこで本研究では ABW 指向型オフィスにおける空調設備の運用実績について報告する。

1. 建築計画概要

本研究の評価対象は大阪府内に立地する延床面積約 12,000m² の ABW 指向型オフィスビルである。Fig.1 に外観写真を示す。上下階をずらした積層型の断面構成であり、階ごとに堀の深い軒やプライバシーに配慮した閉鎖的なバルコニー、開放的なテラスが配置されている。Fig.2 に内観写真を示す。建物内外に計画した様々な場について社員が自由に働く場所として選択可能であり、さらに社員同士や来訪者との自発的な交流を促進する場としての機能を有する。

北面開口部は高性能 Low-E ペアガラス及びバルコニー部の水平庇により日射遮蔽性能を高めており、南面は高断熱サンドイッチパネルにより外皮性能を高めている。建物全体の外皮性能を示す BPI は 0.78 である。

2. 環境設備計画概要

Fig.3 に環境設備計画の概念図を示す。北側外周部に計画した庇・垂れ壁・開口形式・トップライトは自然光による「明るさのむら」を作り出す。明るさによって働く場の印象も変わり、その時の気分に合わせて場所を選択することができる。自然換気はトップライト及び 1 階に自然換気開口を計画し、室内外の環境計測による自動開閉制御により自然換気の効果を高めている。事務室は直天井であり、天井吊り下げのレースウェイに高効率 LED 照明 (設計照度は 600lx) を計画し、開口部周辺に計画した明るさ

センサにより照明エネルギーを抑制する。事務室エリアの空調設備として高顕熱運転が可能な電気式ヒートポンプビル用マルチを導入している。冷房時について機器発熱 (顕熱) が少ない場合は冷媒の蒸発温度を上げて圧縮機のエネルギーを抑える。ペリメータ側はビルトイン型室内機、インテリア側は天井カセット型室内機とし、空気搬送動力を抑えた計画としている。CO₂濃度に応じた換気風量制御により、外気負荷を低減する。



Fig.1 Exterior view



Fig.2 Interior view

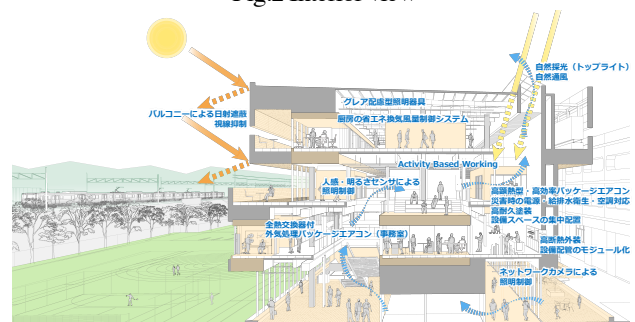


Fig.3 Environmental and MEP plan

3. 事務室、共用部の電力消費量実績

Fig.4に事務室フロアの平面図を示す。東西に事務室、中央部に共用部を配置している。事務室のコンセント容量は西側が 50VA/m²、中央が 36VA/m² 東側が 80VA/m² である。社員は事務室、共用部問わず自由に働く場所を選択している。

Fig.5、Fig.6、Fig.7に2021年11月～2022年10月平日における西側事務室、中央共用部、東側事務室の電灯負荷による時刻別年間電力消費量実績を示す。西側事務室の最大最小幅が中央部分、東側事務室にくらべ小さい。これは自席に滞在して業務をする社員が多いことが理由として考えられる。中央共用部は8時から11時の値が高くなる。これは出勤から11時にかけて中央共用部を利用する社員が多くなるためと考えられる。14時から17時の時刻変動は小さいことから、コラボエリアや会議室 MTG エリアの活用が定常的に利用されたと推察される。加えて中央共用部のコンセント容量が3つのエリアで最小なのに対し平均値が高いことから利用度が高いことが想定される。これらより社員は中央共用部を積極的に活用していることがうかがえる。

Fig.8に事務室フロアの一次エネルギー消費量内訳を示す。室内機の電力消費量は各エリアについて概ね同等であるが、照明、コンセント、室外機は東側事務室が最も多い。東側事務室は高負荷機器が集中配置しており稼働が多いことが理由として考えられる。

4. 空調設備の運用実績

Fig.9に事務室フロアの空調ゾーニングを示す。東西に高顕熱運転が可能な機器を導入し、中央共用部は部屋ごとの冷暖需要に対応するために冷暖同時型の機器を導入している。Fig.10に事務室フロアにおける空調設備の月別電力消費量実績を示す。暖房時期の1月が最も電力消費量が多く、室内機の電力消費量は変化がない。北面が開口部、南側が高断熱サンドイッチパネルにより構成された外装計画であるため、冬期の暖房負荷が大きく、夏期の冷房負荷が小さいことが理由と考えられる。

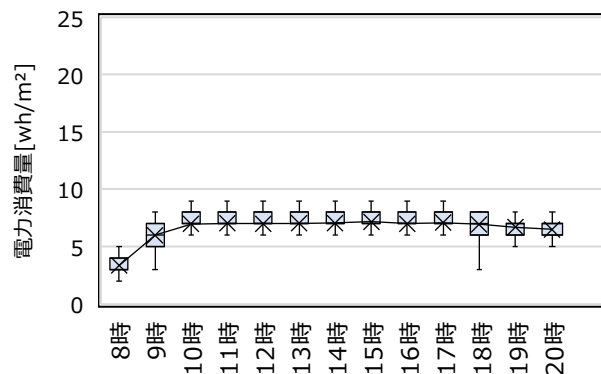


Fig.5 Annual electricity consumption (West side)

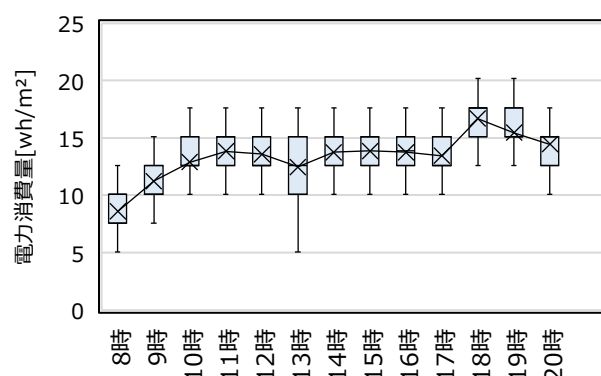


Fig.6 Annual electricity consumption
(Central public workspace)

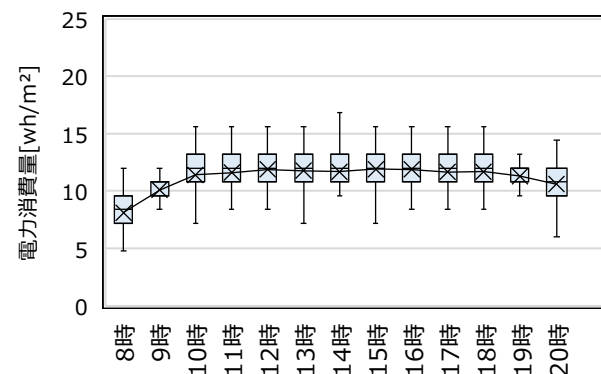


Fig.7 Annual electricity consumption (East side)

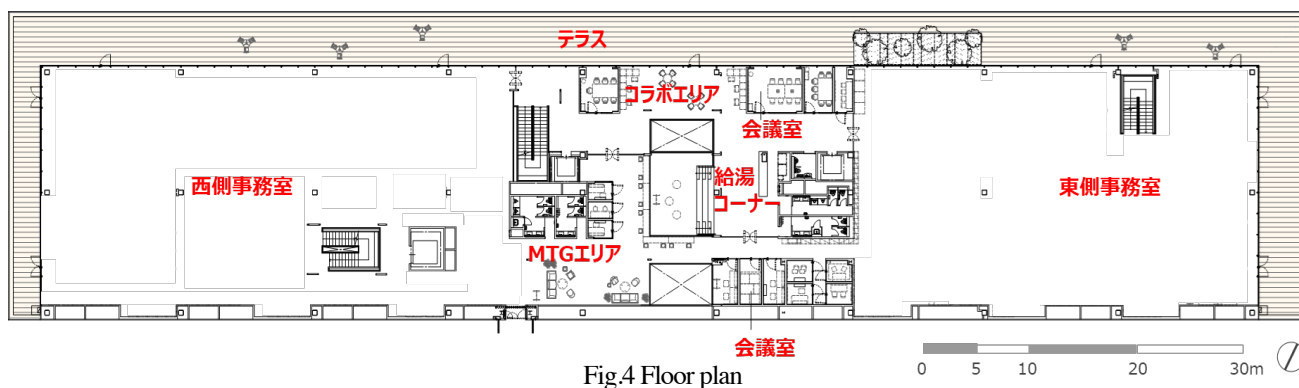


Fig.4 Floor plan

5. 高顕熱運転実績

5.1 概要

高顕熱運転とは冷房運転中の室内ユニットを流れる冷媒の蒸発温度を上げて圧縮機の冷媒圧縮に要するエネルギーを抑えることができる運転状態を指している。

本計画では外気処理ユニットによる目標絶対湿度と室内湿度の情報（潜熱負荷）をもとに、目標蒸発温度の「高（Hi）」「低（Lo）」を切り替えている。加えて、室内ユニットによる設定温度と室内吸込温度の情報（顕熱負荷）をもとに、目標蒸発温度を可変させている。設定温度と室内吸込温度の差が小さい（すなわち顕熱負荷が低い）場合に蒸発温度を上げる。一方、差が大きい場合には目標蒸発温度を下げることににより室内顕熱負荷処理を優先している。

本章は事務室における 2022 年 8～10 月の高顕熱機器実績値を示す。運転時間の計測方法は機器内部に設置されているセンサ等の運転データ計測により行っている。

5.2 運転実績

Fig.11 に室外機運転時間と圧縮機運転比率を示す。冷房運転での室外機運転時間は圧縮機停止時も含めた総運転時間を示している。中間期に移行するにつれて冷房負荷が小さくなるため圧縮機運転比率は減少傾向である。8 月、9 月の室外機運転時間は西側と東側に差はないが、圧縮機運転比率は東側が小さい。これは東側の空調負荷は大きい変動が大きいためサーモ OFF の頻度が多いことが理由と考えられる。

Fig.12 は蒸発温度目標に対する蒸発温度実績の運転時間を示す。運転時間合計は圧縮機運転時間を指している。夏季（8, 9 月）と中間期（10 月）の蒸発温度は中間期に移行すると蒸発温度帯（低）の割合がやや大きくなるが、概ね一定の割合で推移している。

Fig.13 に空調一次エネルギー消費量実績値を示す。設計値は建築物エネルギー消費性能算定プログラム（WEBprogram）により求めた。各エリアの実績値は設計値を下回り、特に東側事務室は大幅に下回る。夏季、中間期を問わず蒸発温度制御が機能的に働き、空調エネルギーの削減に貢献していると見られる。

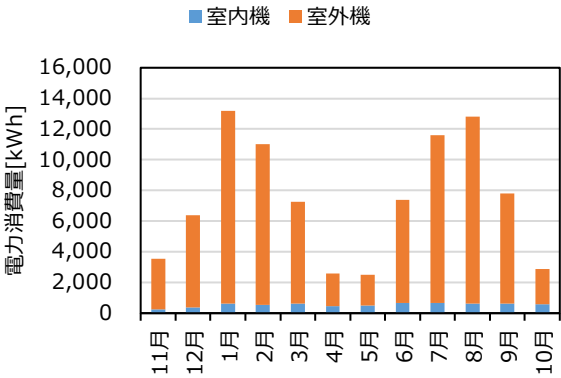


Fig.10 Monthly Electricity Consumption(A/C)

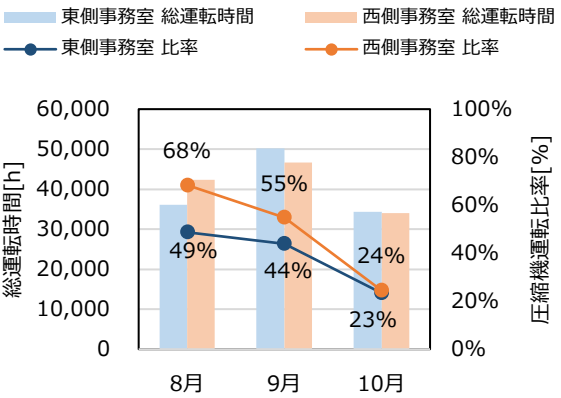


Fig.11 Outdoor unit operation time and compressor operation ratio

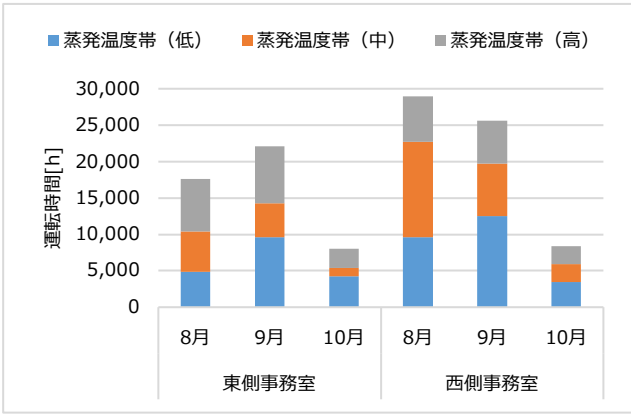


Fig.12 Operating time accumulation by evaporation temperature

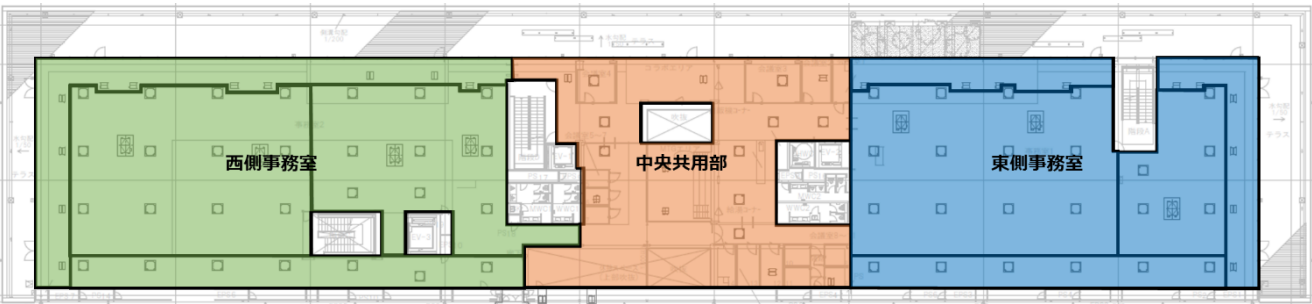


Fig.9 Air-conditioning zoning

6. 建物全体の一次エネルギー消費量

Fig.14 に月間一次エネルギー消費量実績値を示す。室外機動力を除いた一次エネルギー消費量は年間を通じて概ね一定で推移している。一方、室外機動力の変動は月により変動が大きく、建物全体の一次エネルギー消費量の変動に大きく寄与している。

Fig.15 に年間一次エネルギー消費量構成を示す。電灯(照明、コンセント、空調ファン関係)が 50%以上、室外機動力が 27%程度を占めている。

Fig.16 に年間一次エネルギー消費量比較を示す。基準値及び設計値はWEBprogramにより求めた。基準値、設計値、実績値いずれもコンセント負荷を含めて比較している。ただし、厨房、サーバー室に関わる一次エネルギー消費量はWEBprogram の基準値、設計値に含まれないため、実績値から除外して比較している。基準値と比較して設計値は 42.9%減、実績値は 40.5%減であった。本計画では CO₂ 濃度に応じた換気風量制御を備えているが、感染症対策として制御 OFF とし、外気導入量を最大量として供給して運用している。制御 ON の場合には外気導入量を抑えることができるため、大幅な省エネルギーにつながると見られる。

7. まとめ

本研究ではABW指向型オフィスにおける空調設備の運用実績に加えて、電力消費量実績および建物全体の一次エネルギー消費量実績について示し、以下の知見が得られた。

- 1) 電力消費量実績から、社員は事務室、共用部問わず自由に働く場所を選択した結果、エリアにより時刻変動が異なる傾向が見られた。特に社員は中央共用部を積極的に活用している傾向が見られた。
- 2) 掘の深い軒やバルコニー、開放的なテラスが配置された北側開口部と南側の高断熱外装により構成された建築計画により、冬期の暖房負荷が大きく、夏季の冷房負荷が小さい傾向が見られた。
- 3) 事務室エリアの高顕熱運転が可能な電気式ヒートポンプビル用マルチは夏季、中間期を問わず顕熱負荷の変動に応じて蒸発温度制御が機能的に働き、空調エネルギーの削減に貢献した。
- 4) 建物全体の一次エネルギー消費量実績値は電灯(照明、コンセント、空調ファン関係)が 50%以上、室外機動力が 27%程度を占めており、基準値より 40.5%減であった。

ABW に対応した建築、環境設備計画は標準的な建物と比較してエネルギー消費量を抑制できる可能性が示された。

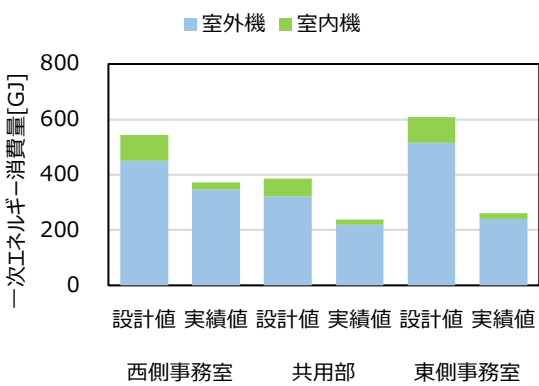


Fig.13 Actual primary energy consumption (A/C)

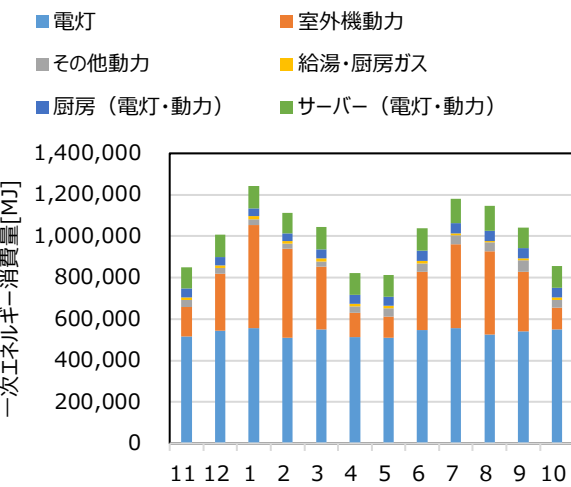


Fig.14 Actual Monthly Primary Energy Consumption

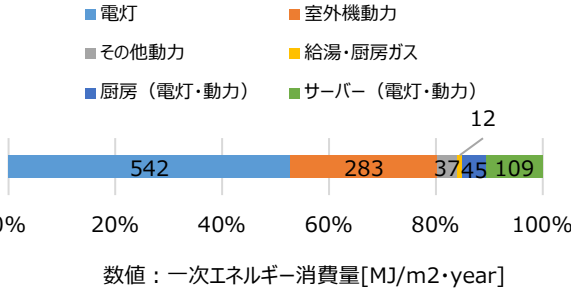


Fig.15 Annual Primary Energy Consumption Composition

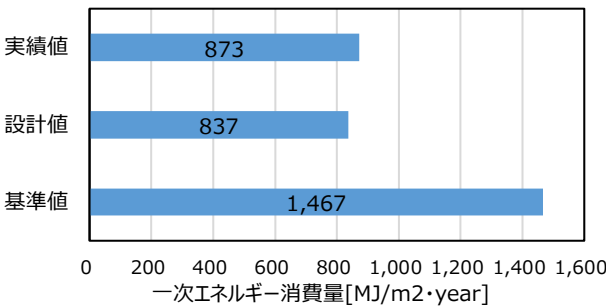


Fig.16 Annual primary energy consumption

某イノベーションオフィスにおける環境設備計画

Environmental facility planning in a innovation office

○三木 僚子（竹中工務店） 増田 恭大（竹中工務店）
Ryoko MIKI*1 Yasuhiro MASUDA*1
*1 Takenaka Corporation

1. はじめに

本建物は、某企業の自社ビルとして計画されたイノベーションオフィスである。新規開発プロジェクトの拠点としての役割を担う。地域市民が利用可能な施設を内包し、「企業と市民・地域が“つながる“ことで“健康的な暮らし”を体験・共有する場をつくる」を施設コンセプトに掲げ、健康とイノベーションを目指す取り組みを行っていく。近年、脱炭素社会実現への取り組みに加え、働き方改革、知的生産性の向上やウェルネスなどへの意識が高まっている中で、オフィスにおいても様々な技術が開発・導入されている。本建物でも、執務者が仕事内容に応じて最適場所を選択して執務することで知的生産性の向上を図る ABW(Activity Based Working)の考え方を取り入れ、建築・設備計画に反映している。

そうしたことから、「健康・知的生産性の向上と脱炭素社会への取り組みに両立」を環境コンセプトとして、執務者の心と体を整える健康オフィスを実現する ABW に配慮した設備計画、脱炭素を実現する先進的な空調システムに取り組んでいる。本報では、計画概要と設備計画について報告する。

2. 建築概要

建物概要を Table.1 に示す。本建物はスキップフロアで、吹抜を介して1～3 階がひとつながりの空間となっている (Fig.1)。断面構成を Fig.2 に示す。1 階に一般市民が利用できるクリニック・カフェ・ヘルスケアスタジオ、2 階にイベントが出来るセミナースタジオ、協業企業との交流ができる共創スタジオ、事業を紹介する展示スペース、3 階にオフィスという構成となっている。

Table.1 建築概要

建 築 地	大阪府摂津市
主 要 用 途	事務所、飲食店・クリニック
敷 地 面 積	3, 663. 61㎡
建 築 面 積	1, 937. 94㎡（設計時）
延 床 面 積	4, 745. 38㎡（設計時）
構 造	S造
規 模	地上4階
最 高 高 さ	19. 300m
工 期	2022年6月1日～2023年6月30日

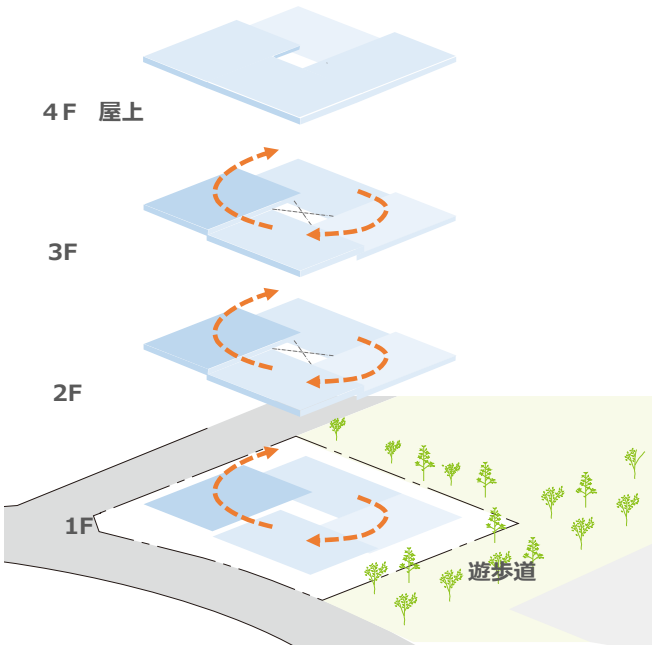


Fig.1 建物構成

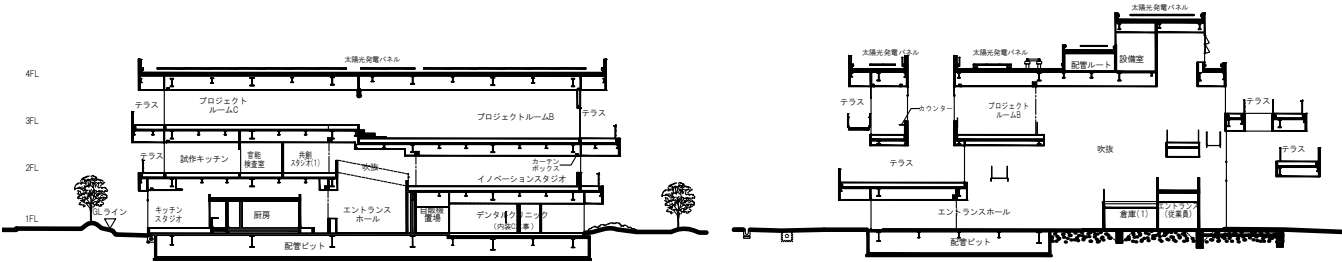


Fig.2 断面図

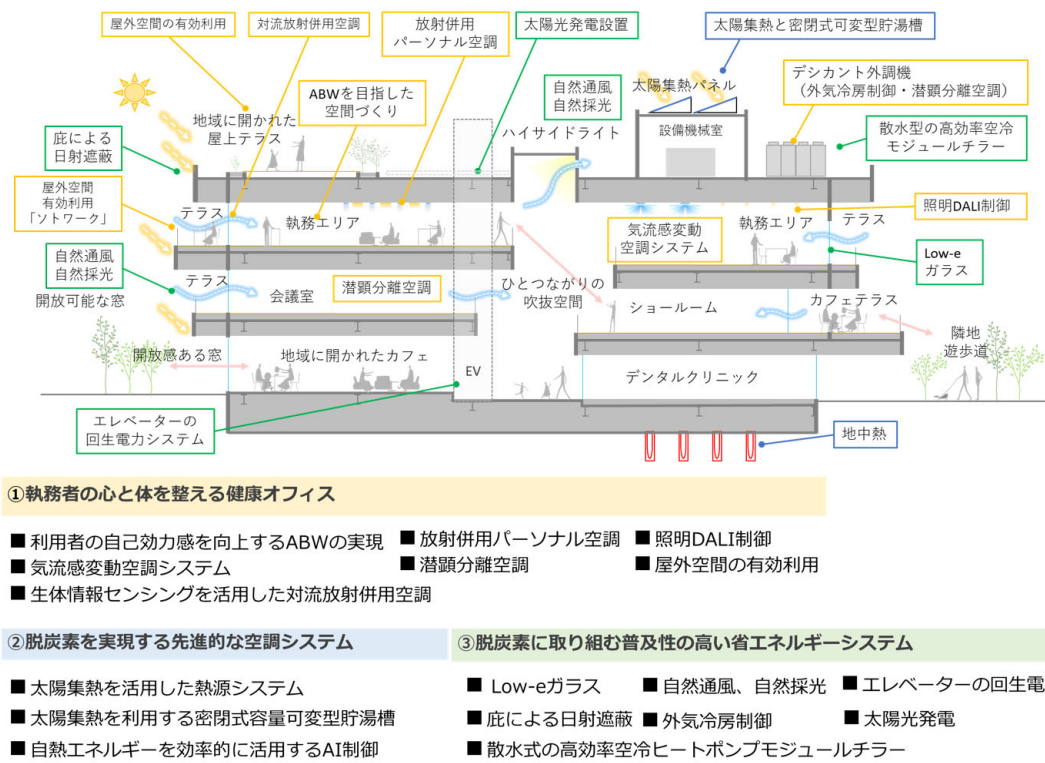


Fig.3 健康・知的生産性向上と脱炭素社会への取り組み

3. 設備概要

設備概要を Table.2 に示す。また、本計画における健康・知的生産性向上と脱炭素社会への取り組みを Fig.3 に示す。ABW への配慮だけでなく、省 CO₂・省エネルギーにも配慮した設備計画になっている。

4. 執務者の心と体を整える健康オフィスを実現する ABW に配慮した設備計画

本建物では、執務者が自身の好みに応じて最適な場所を選択して執務することで、知的生産性の向上を図る ABW の考え方が取り入れられている。3 階のオフィスでは、4 つあるプロジェクトルームごとにそれぞれ異なる空間のテーマが設けられている。温熱環境・光環境のシミュレーション結果をもとにプロジェクトルーム A はガレージエリア、B はバイオフィックエリア、C はベースキャンブ、D はラウンジエリアと性格付けを行った建築計画としている (Fig.4)。このような ABW の事例は増加傾向にあるが、これまでハード面での対応は選択制のある家具計画のみが行われる事例が多かった。本建物では、設備計画においても ABW の方針を踏襲し、執務者の満足度の向上を意図して好みの場所を自由に選択できる均質でない快適空間を目指した計画としている。また、執務者の生体情報を取得して制御に活用することで、執務者の快適性向上を図っている。

Table.2 設備概要

電気設備	受電方式	高圧 3 Φ 3W 6600V
	非常発電	ディーゼル 25kVA
空調設備	電灯	執務室：500Lx 照明制御 (DALI 方式)：昼光制御、人感制御
	熱源	空冷ヒートポンプチラー 354 kW 太陽集熱、地中熱、空冷 PAC エアコン
	空調	執務室、会議室、カフェ、エントランス等：単一ダクト方式 ペソメーターゾーン、クリニック等：ファンコイルユニット
	換気	守衛室、救護室：空冷パッケージエアコン カフェ・エントランス等：空調機 執務室・会議室等：デシカント外調機 守衛室・救護室：全熱交換器
	中央監視	BACnet
給排水衛生設備	給水	直結増圧給水方式
	給湯	ミニキッチン・トイレ洗面：電気温水器
	排水通気	汚水・雑排水系統、厨房排水系統
	消火	屋内消火栓、送結送水管
昇降機		乗用：15 人乗×1 台

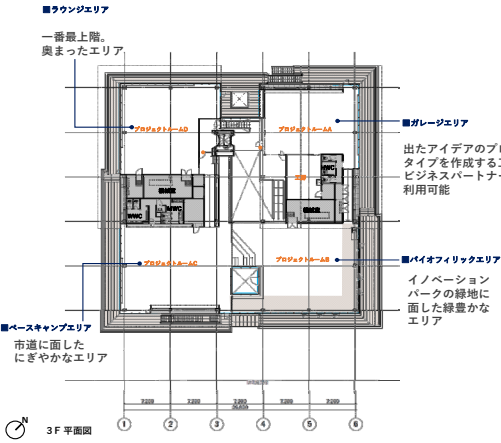


Fig.4 プロジェクトルーム ABW 計画

4.1 ABW に配慮した空調計画

既往の研究¹⁾から、温熱環境・空気環境・空間の満足度と知的生産性への影響度に相関関係がみられた。知的生産性の低下に寄与する環境要因の中で温熱環境は大きな割合を占めており、知的生産性への影響度と温熱環境満足度の相関が高くなる可能性が示された。

これらのことから、家具・建築空間だけでなく、温熱環境についても執務者に選択制を持たせることで、満足度・知的生産性が向上する可能性が考えられる。

本建物の3階オフィスではエリアごとに異なる空調方式を採用している (Fig. 5)。

プロジェクトルームA・Bでは気流感変動空調制御システムを採用している。吹出口からの風量・温度を周期的かつ強制的に変化させることにより、執務者に気流感を与え、快適性を高める計画としている (Fig. 6,7)。また、執務者の生体情報によって室内負荷から算出される基準給気風量に対して風量を増段する制御も設けている。

プロジェクトルームCでは、執務者の生体情報を活用した放射・対流併用空調システムを採用している。空気式放射空調をベースとしながら、執務者の生体情報によって放射用と対流用の VAV 風量の調整やアンビエントファンの運転を可能な計画としている。 (Fig. 8)

プロジェクトルームDでは、放射併用パーソナル空調を採用している。水式放射空調で放射環境を整えると同時に、個人で操作可能なパーソナルファンにより自己効力感のある空調を実現し、快適性の向上を図っている。また、エリア内のパーソナルファンの稼働台数により、室内温度を可変させる制御を設けている (Fig. 9)。

このようにエリア毎に異なる空調を採用し、執務者が好みに合わせて自由に選択をすることができる計画としている。

4.2 ABW に配慮した照明計画

照明計画においても ABW の考えを踏襲し、ダウンライト・直管などエリア毎に異なる器具や配置計画を行っている。また、バイオフィリックエリアであるプロジェクトルームBにはサーカディアン照明を導入し、エリア毎に特色のある照明計画としている。

4.3 ABW を促進する見える化システムの採用

本建物では、温湿度センサーやビーコンの情報を活用し、エリアごとの温湿度や混雑度をディスプレイに表示している。温熱環境の見える化、混雑度の見える化を行うことで、執務者の場所選別に役立てることができる。屋外の快適性についても指数で表示を行い、建物周囲を囲むテラス空間の有効利用を促している。また、アプリを用いて生体情報を活用したストレス度の見える化も行

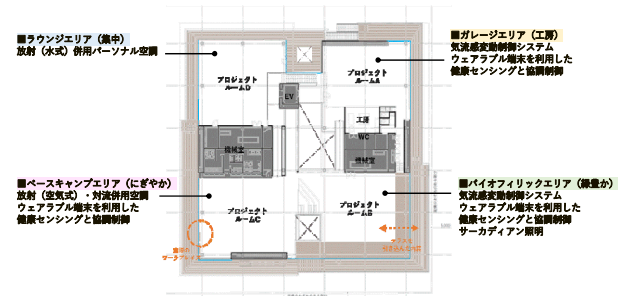


Fig.5 エリア別の空調方式

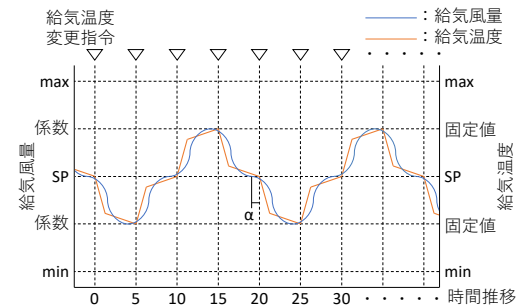


Fig.6 気流感変動空調制御システム制御概念図

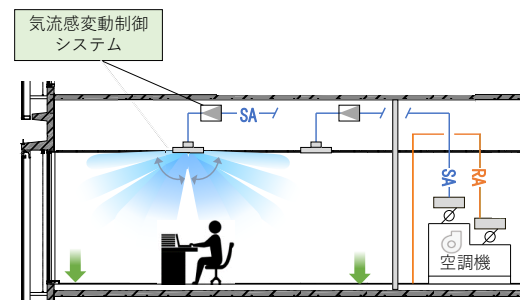


Fig.7 気流感変動制御イメージ図

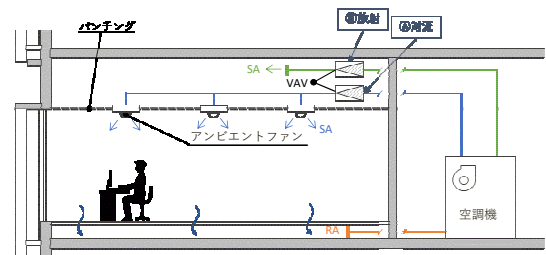


Fig.8 放射・対流併用空調システム

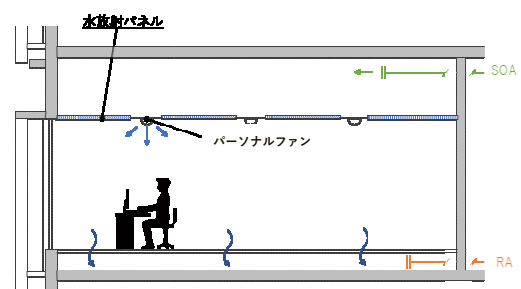


Fig.9 放射併用パーソナル空調

っており、執務者の場所選びの動機付けを支援する計画としている。

5. 脱炭素を実現する先進的な空調熱源システム

脱炭素の実現に向け、本建物では地中熱と太陽熱を活用している。熱源システム概念図を Fig.10 に示す。

地中熱はボアホールダブルUチューブ方式を採用している。直送利用で、放射パネルとデシカント外調機のプレ・アフターコイルへの送水が切り替えられる計画としている。太陽集熱は真空2重ガラス管方式を採用しており、冬期には暖房、夏季にはデシカント外調機の再生熱に利用している。これにより、地中熱・太陽熱を年間通して利用可能な熱源システムとしている。地中熱・太陽集熱が取得できない場合には、空冷ヒートポンプモジュールチャラーで対応している。また、これらの自然エネルギーをより有効に活用するため、以下の取り組みを実施している。

5.1 太陽集熱を有効利用する密閉式容量可変型貯湯槽
太陽集熱をより多く利用するため、集熱量が少ない場合でも、利用可能温度まで槽内温度を上昇させる工夫を行っている。概念図を Fig.11 に示す。貯湯タンクの必要容量を分割し、小容量タンクを組み合わせる制御を行っている。集熱するタンクを順次バルブで切替え、放熱側も同様に1槽ずつタンクを切替えている。

5.2 自然エネルギーを効率的に活用するAI 制御
エネルギー消費量の最適化を目指し、自然エネルギーの予測も含めたAI 熱源制御の構築を計画している。概念図を Fig.12 に示す。建物の使用状況から負荷予測を行い、気象条件等によって取得量が変化する自然エネルギーをより省エネルギーに寄与するタイミングで効率的に活用することを可能としている。また、空冷ヒートポンプモジュールチャラーの送水温度も AI 制御により変更することで、熱源システム全体での省エネルギー性能の向上を図っている。

6. まとめ

本建物は、BELS 認証★★★★★ Nearly ZEB を取得しており、標準建物と比較し約 52%のエネルギー削減と太陽光発電パネルによる約 23%の創エネルギーと試算している。また、CASBEE 建築評価認証において、S ランク（着工時）も取得している。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。

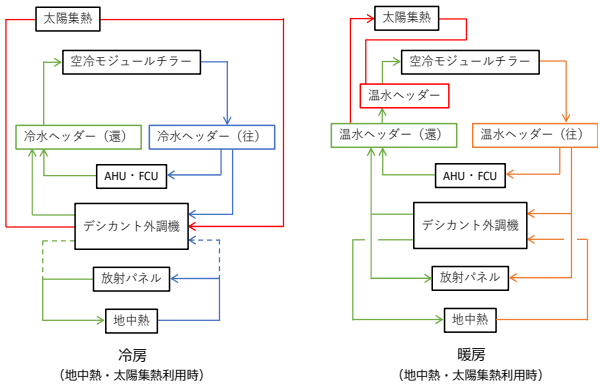


Fig.10 熱源フロー概念図

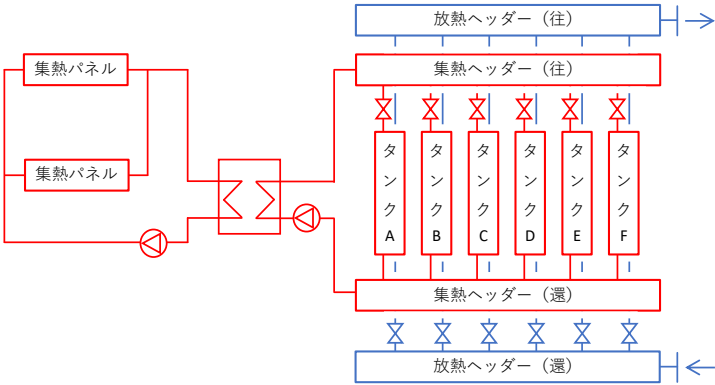


Fig.11 密閉式容量可変型貯湯槽の概念図

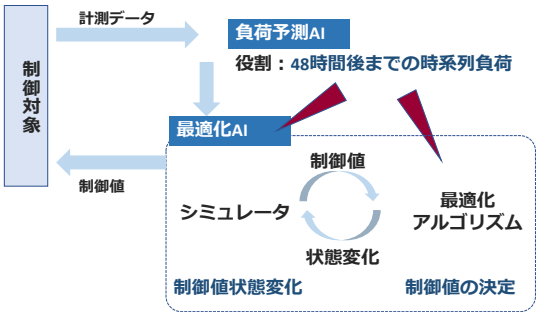


Fig.12 AI 制御の概念図

【参考文献】

1) 妹尾ら：オフィスの複合的な室内環境条件の改善による知的生産性および健康性の向上に関する研究（第1報）実務空間における知的生産性に関する夏季の主観および客観評価分析 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2019, 9

木質系オフィスにおけるダブルスキン内温度の実測結果検証
Verification of Measurement Temperature Data in Double-skin of the Wood-based Office

○小山 健太郎（竹中工務店） 尾崎 空奈（竹中工務店）
松本 健（竹中工務店）

Kentaro OYAMA*1 Sorana OZAKI*1 Ken MATSUMOTO*1

*1 TAKENAKA CORPORATION

はじめに
本稿では、建物全周にダブルスキンを有する木質系オフィスにおいて、ダブルスキン内温度実測の検証を行った。ダブルスキン内及び外気温の計測結果について、夏期として8月度、冬期として12月度の2021年、2022年それぞれの検証を行った。

1. 建物概要¹⁾

1.1 建築計画

建物の外観パースをFig. 1、基準階内観写真をFig. 2、基準階平面図をFig. 3に示す。Fig. 3は、紙面上方が北である。計画建物は、基礎免震構造を有し、アイランド型コアの耐震壁・仕上げ材に直行集成材を用いた鉄骨・木造のハイブリッドオフィスである。6階建ての1、2階には会議室、3～6階はオフィスのフロア構成となっている。



Fig. 1 外観パース



Fig. 2 内観写真

1.2 設備計画

Table 1に計画建物の設備概要を示す。空調熱源は電気式ヒートポンプエアコンとし、640×640 グリッドのオフィス天井には、システム天井用4方向天井カセットを採用した。南面ペリメータ部となるホワイエには、埋込ダクト型のパッケージエアコンを採用している。



Fig. 3 基準階平面図

Table 1 設備概要

電 気	受変電設備	高圧6,600V 60Hz 動力トランス：300kVA、電灯トランス200kVA
	照明設備	オフィス：システム天井LED照明 共用部：LEDダウンライト
	その他設備	業務用放送設備（アンプ既存利用） 研修室他AV設備 デジタルサイネージ設備 自動火災報知設備
空 気 調 和	熱源	電気式空冷ヒートポンプエアコン（EHP）
	空調	オフィス：システム天井用天井カセット 共用部：隠蔽ダクト型天井カセット
	換気	オフィス：調湿型外気処理機 会議室・研修室：全熱交換器 喫煙室：排気ファン
	排煙	機械排煙
衛 生	給水設備	受水槽＋加圧給水方式（既存利用）
	給湯設備	貯湯式小型電気温水器
	排水設備	汚水・雑排水合流方式（敷地内雨水分流）
	衛生器具	各所ユニットトイレ
昇降機		乗用 900kg 13人乗 60m/min 2台

1.3 ダブルスキン詳細

Fig. 4 に、ダブルスキンの1フロアの断面詳細を示す。計画建物は、6階建てであり、2階底部から6階頂部までが、四周ダブルスキン構造となっている。室内側のガラスに Low-E 6mm の複層ガラス、屋外側にフロート 15mm ガラスとし、屋外側ガラスと室内側ガラスの間に中間色ブラインドを設置している。Low-E ガラスは長時間高温状態となると性能が劣化すると言われており、70℃が閾値となる。各階の床部分は、集成材パネルのメンテ床となっており、自然通気スリットを設け、年間を通じて温度差換気が行われている計画とした。

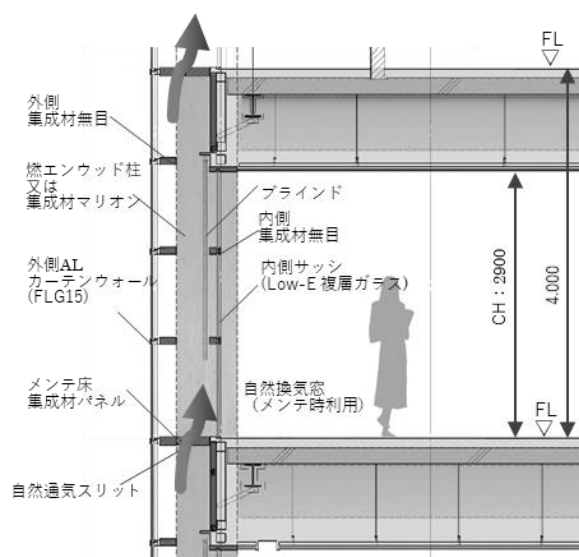


Fig. 4 ダブルスキン詳細図

2. 夏期の計測結果（2021年-2022年）

2.1 8月度1か月の計測結果

Fig. 5 に、2021年、2022年それぞれの各方位の8月度1か月の時刻別温度計測結果を示す。夏期の代表として、8月の結果とした。2021年、2022年それぞれの共通事項として、南北の温度よりも、東西の温度の方が、最高温度が高い結果となった。夏期の日射量は、南北面よりも午前中の東面、午後の西面の方が多いため、ダブルスキン内のブラインドによってダブルスキン内が暖められた結果が表れていると考えられる。いずれの年においても、ガラスの閾値 70℃には到達していないことが確認された。ダブルスキンの最低部2階と頂部6階との温度差は、ダブルスキン内が最高温度になっている 2021/8/5 で 16.4℃、2022/8/6 で 19.4℃となった。

2.2 8月度計測結果の3日間抜粋

Fig. 6 に、2021年8月5～7日、2022年8月13～16日の時刻別の温度推移を示す。前述した通り、方位毎の夏期の日射量の傾向が、温度の傾向と合致している。ま

た、夜間には、各方位、2階・6階も外気温とほとんど温度差が生じない結果となった。本建物の運用は、夏期は特にダブルスキン内のブラインドを下ろしていることがほとんどであり、ダブルスキン内の温度が、日射量によって影響していることがこのことから分かる。

3. 冬期の計測結果（2021年-2022年）

3.1 12月度1か月の計測結果

Fig. 7 に、2021年、2022年それぞれの各方位の12月度1か月の時刻別の温度計測結果を示す。冬期の代表として、12月の結果とした。夏期は、日射量の方位別の傾向が最高温度に表れたが、冬期は各方位の温度差が夏期ほどは生じておらず、日射量の多い南面が東西面よりも最高温度が低い結果となった。南面は、共用部の眺望を優先し、ブラインドを上げた状態としていたことが多いため、ダブルスキン内で日射による発熱が生じず、温度上昇が大きくなかったと推測される。また、ガラスの閾値となる 70℃には到達しない経過となった。

3.2 12月度計測結果の3日間抜粋

Fig. 8 に、2021年12月10～12日、2022年12月2～5日の時刻別の温度推移を示す。前述した通り、日射量の傾向が温度に表れていない。一般的には、冬期の日射量は、南>東・西となるが、南面のブラインドが下りていないことが影響し、南面の温度上昇が少なかったと考えられる。西面の温度が、東面に比べて高くなる傾向が3日間共にみられる。日射量としては、東面と同程度のはずだが、温度差が生じた要因として、計画建物のダブルスキンは全周が一体空間となっている。そのため、南面が午前中から緩やかに温度上昇している空気が西面にも流れ込み、直達日射が発生する午後から南面と温度差がついて温度上昇につながったと考えられる。

4. まとめ

本検証では、木質系オフィスビルにおけるダブルスキン内の温度計測結果について、2021年、2022年の夏期（8月）、冬期（12月）の結果を示した。ガラスの性能劣化となる 70℃には到達していないことを確認し、日射量によってダブルスキン内の温度が多大な影響を受けることを確認した。

参考文献

- 1) 小山、松本 ダブルスキンを有するオフィスの設備計画
空気調和・衛生工学会 近畿支部 第51回学術研究発表会

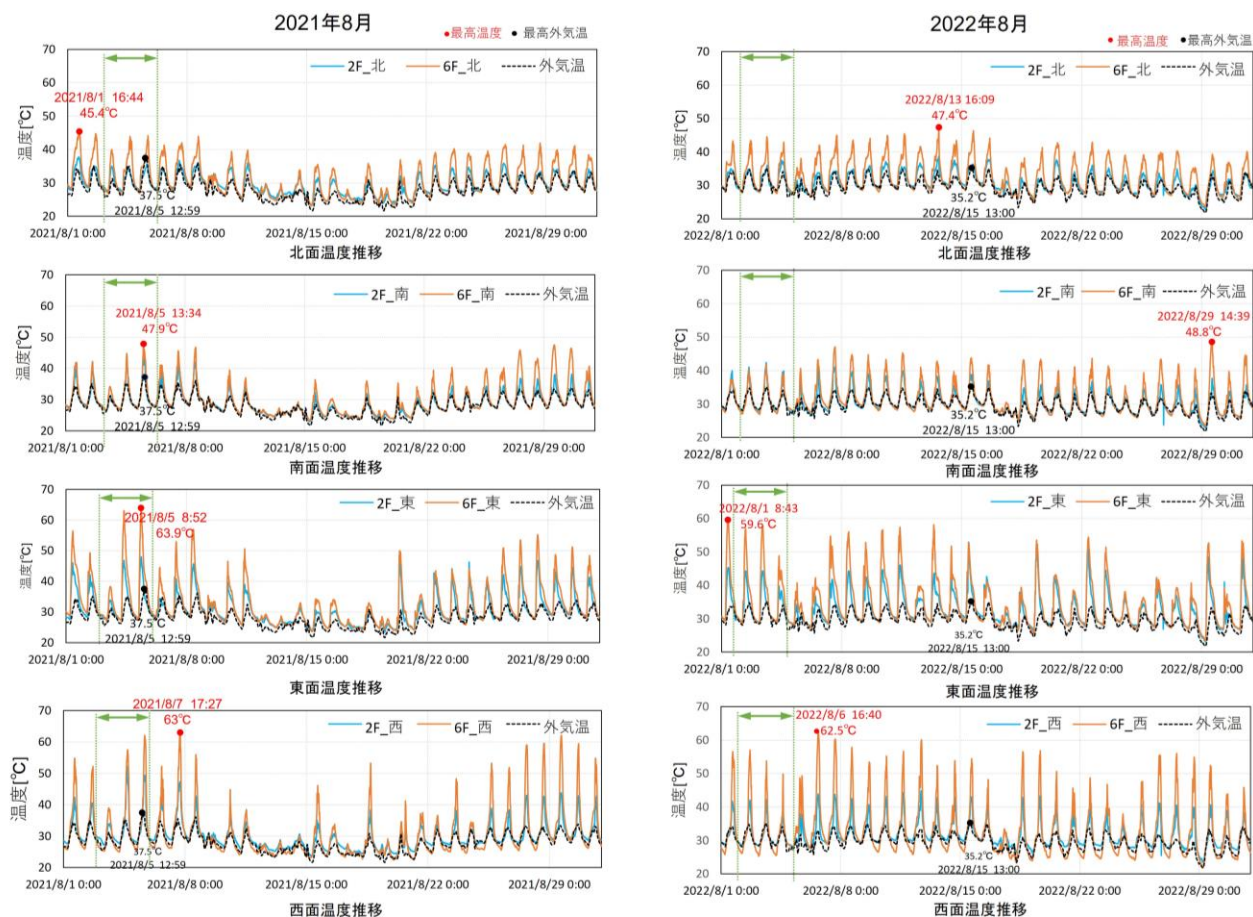
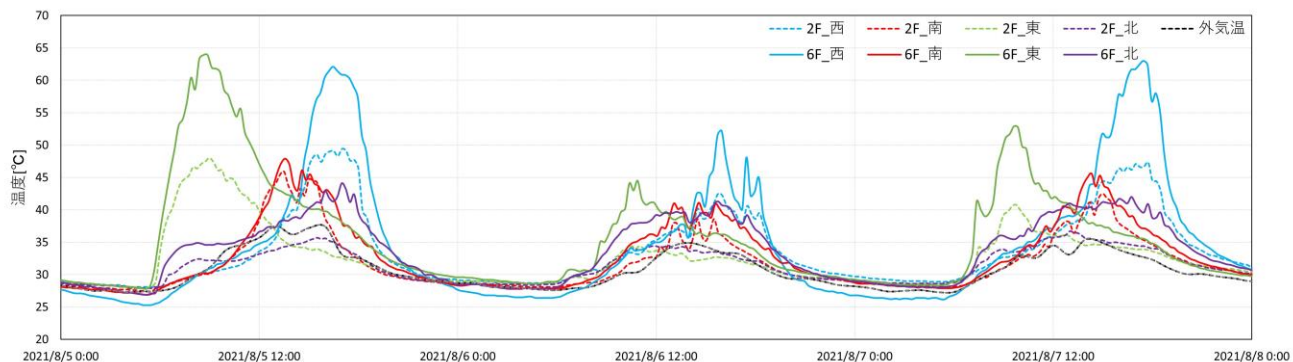
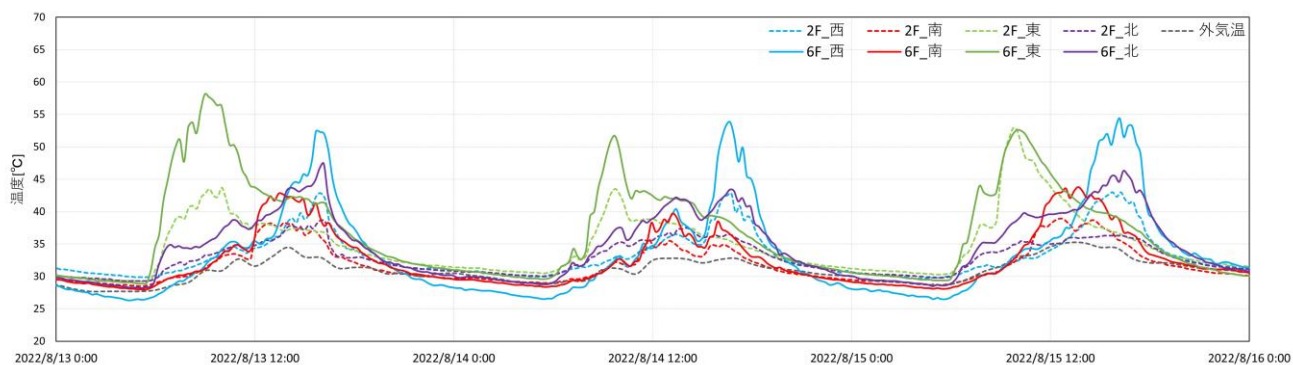


Fig. 5 夏期8月度の各方位・時刻別温度計測結果



内部温度推移 (2021/8/5-2022/8/7)



内部温度推移 (2022/8/13-2022/8/16)

Fig. 6 夏期温度計測結果の3日間抜粋

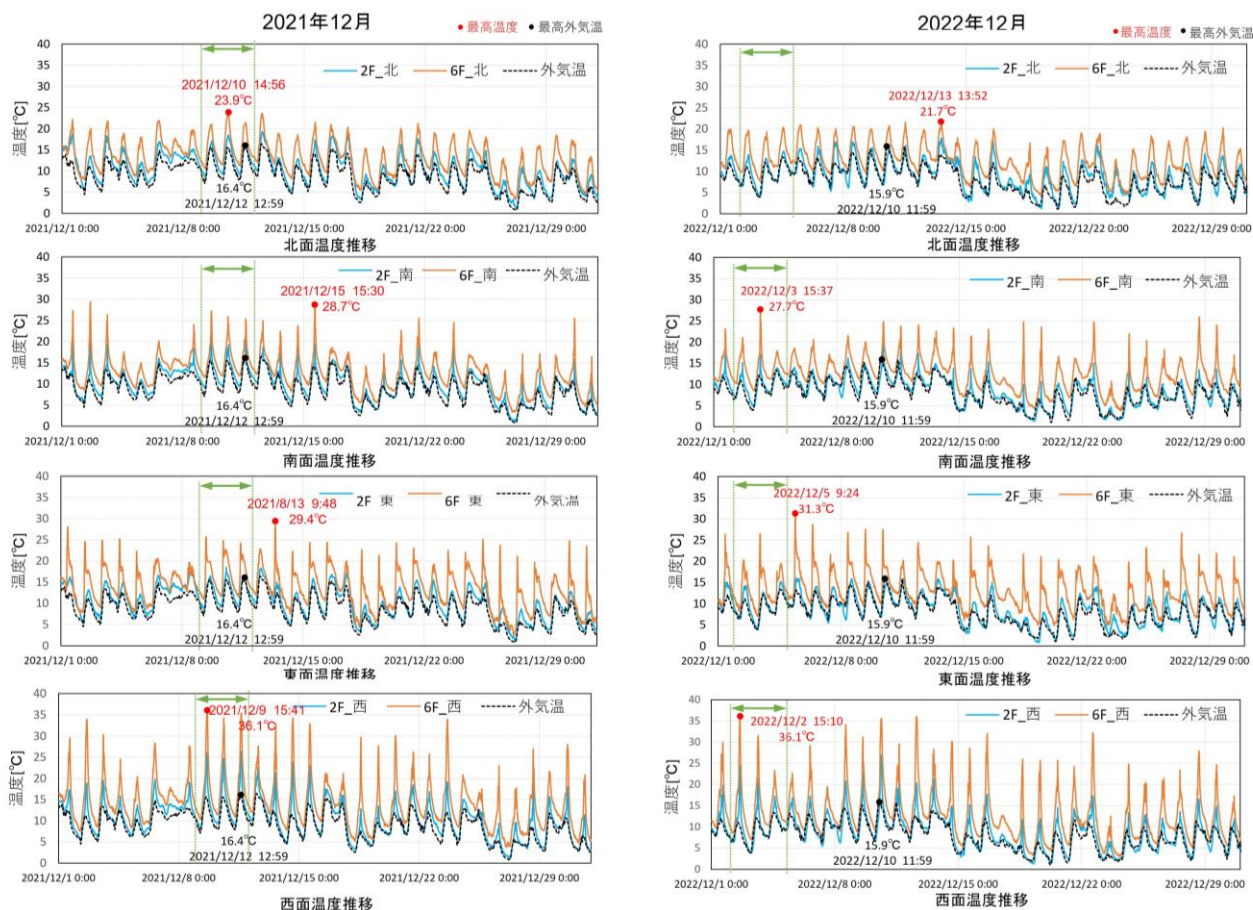
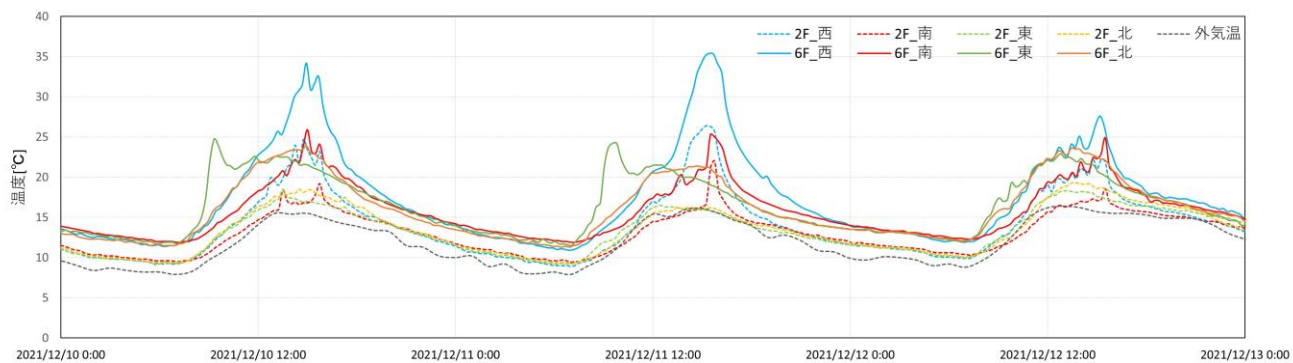
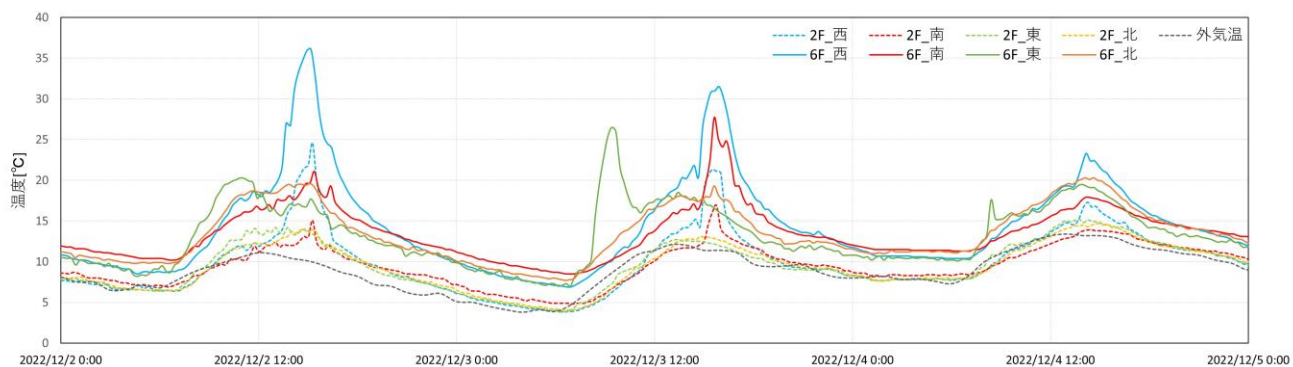


Fig. 7 冬期12月度の各方位・時刻別温度計測結果



内部温度推移 (2021/12/10-2021/12/12)



内部温度推移 (2022/12/2-2022/12/15)

Fig. 8 冬期温度計測結果の3日間抜粋

某国際高級ホテルの設備概要及び省エネ認証評価対応について Facilities planning for international luxury Hotel and the Energy Efficiency Rating

○田中 健人（竹中工務店）

正木 保弘（竹中工務店）

Kento TANAKA*1 Yasuhiro MASAKI*1

*1 TAKENAKA Corporation

はじめに

本計画は、ZEB Oriented の達成を目標に掲げている高級ホテルである。地域の歴史や文化・風土といった魅力を積極的に取り入れ、かつ、環境負荷の低減、省エネルギーによるランニングコストの低減や高いBCP 対応を有する高い快適性を備えたホテルを計画している。

本稿では、計画段階での、設備計画の特徴とエネルギー削減を実現するために導入する省エネルギー技術や建築物省エネルギー性能表示制度についての取り組みについて報告を行う。

1. 全体計画

1. 1 建築・設備計画の特徴

延床面積	: 39,000 m ² （容積率 690%）
構成	: 地下 3 階、地上 20 階 S 造
構造	: (地下 RC・SRC)
用途地域	: 商業地域（主用途 ホテル）
受電方式	: 高圧 1 回線受電
非常用発電機	: 1,250kVA（A 重油 18,000L）
常用発電機（CGS）	: 400 kW（中圧ガス）
空調熱源	: EHP チラー・GHP チラー・ 排熱投入型吸収式冷温水機
空調方式	: FCU・AHU
換気方式	: OHU・AHU
給湯方式	: 潜熱回収ボイラー

220 室強の客室を有しスパ・プール・フィットネスエリアや、バーやレストラン、MICE にも対応した会場・チャペルなどフルサービスホテルの計画である。

1. 2 設備計画の特徴

電源構成は、通常の電力供給に加え、常用発電機（以降 CGS）を設置している。停電時は、非常用発電機及び CGS を稼働させ発電余力に応じて、あらかじめ決められた保安負荷を投入可能としている。BCP 対応は約三日間を可能としている。

熱源構成は、空調ベース負荷の負担として、CGS 排熱利用の排熱投入型吸収式冷温水機を設置し、空調ピーク負荷の負担として、EHP チラー及び、GHP チラーを設置し

ている。また BCP の観点で、GHP チラーの割合は、EHP チラーと GHP チラーの合計能力の 40%以上としている。

給湯熱源は、潜熱回収温水器、及び CGS からの発電排熱としている。潜熱回収温水器および貯湯槽は、各ゾーンに複数台設置した冗長構成としている。

2. 省エネ計画・ZEB 認証

高い快適性・BCP 対応が重視される本計画であるが、各設備の環境性能向上技術を計画に盛り込み、ホテル用途で ZEB Oriented（BEI 値 0.7 以下）を目指している。

建物の外装には、採光が不要な箇所は高断熱パネルを採用した、採光部は開口面積を最小限に抑えながら十分な採光と眺望が得られる高透過 Low-E 複層ガラスで構成し、眺望・採光・断熱性を確保している。

設備側の施策としては、空調負荷となる建物内外からの要因を最小化し、空調容量を軽減した。そして、予備機の考え方、照明・空調制御を整理することにより、エネルギー量を削減した。自動制御については、室内の CO2 濃度に応じて換気量を制御し外気導入による空調負荷を低減させた。そして、本件ではエネルギー見える化設備も導入を予定しており、運用での省エネ実現をサポートし、省エネ性・快適性の双方を満足する計画としている。

また、省エネ計算上有利となるようにした点がある。まず一点目はプール・ジャグジー・水風呂などの循環加熱量を空調熱源と共用することで、循環加熱量分を熱源容量から差し引き計算を行った。こちらは熱源の冗長化にも寄与している。二点目は、各室のエアバランス・エアフローを検討し、地下駐車場の換気方式を第三種機械換気方式とすることで、「工場等の屋外駐車場」扱いにし省エネ計算上有利にした。上記二点は一例であるが、様々な環境配慮項目・計算手法を盛り込み、費用対効果を施主と協議をしながら、ZEB Oriented（BEI 値 0.7 以下）取得見込みである。

3. まとめ

某国際高級ホテルの設備計画と省エネ認証評価の計算手法の事例を示した。快適性を追求すると設備負荷が大きくなるため、認証取得のための手法と運用面での実用的な省エネ方策の両面を考慮する必要があると考える。

アリーナ建築における ZEB Ready 実現に向けた省エネ手法に関する技術報告

Technical report on energy-saving methods for achieving ZEB Ready in arena architecture

○杉山 侑司（安井建築設計事務所）

小林 陽一（安井建築設計事務所）

福谷 周（安井建築設計事務所）

Yuji SUGIYAMA*1 Youichi KOBAYASHI*1 Hiroshi FUKUTANI*1

*1 Yasui Architects & Engineers, Inc.

1. はじめに

サロンパスアリーナは、久光製薬株式会社子会社である SAGA 久光スプリングス株式会社が運営する女子バレーボールチーム「久光スプリングス」の練習拠点として佐賀県鳥栖市に建設されている。バレーボールの国際試合基準のタラフレックスを敷設することに加え、各種イベントにも対応できる総合的な施設である。本アリーナは2階建て、延べ面積約8,500 m²であり、練習や各種イベントを行うメインアリーナと一般利用できるサブアリーナを有している。メインアリーナは1階に移動観客席、2階に固定席があり、最大収容人数は1,500人である。

久光製薬株式会社は地域協調・社会貢献に重きを置いており、取り組みの一環としてはZEB Readyを目指した。

2. 省エネルギー手法

2.1 大空間における省エネルギー技術

大空間は空調負荷が大きく、エネルギー消費量が膨大となるため、省エネルギーを図る際の大きな要素になる。

空調システムの概要としてメインアリーナは1階系統に送風量15,000 m³/h×2台の空調機、2階観客席系統に送風量19,000 m³/h×2台の空調機による可変風量方式を採用している。空調機の制御は温湿度、収容人数によるCO₂濃度を計測し、不要な外気導入を抑制している。

1階系統の給気は気流が競技に影響しないよう、また、冬期の底冷え防止に配慮し、ノズル吹出及びアリーナ2重床内に吹出することで床放射冷暖房を行い、ダクトを介してアリーナ空間に供給する方式に分割している。還気は移動観客席の収納スペース床面スリットを通り空調機に戻している。2階系統は座席下より吹き出すことで居住域空調としており、還気はアリーナ四隅に設置している換気塔のスリットを通り空調機に戻している。

また、アリーナ上部には、冬期の暖房立ち上がり効果を高め、大空間の温度分布を均一化する目的でサーキュレーターファンを設置している。

中央熱源は高効率の運転が可能で省エネ性能の高い散水型空冷モジュールチラーを採用し、変流量制御を行っている。空調機は全熱交換器を組み込むことで外気負荷を低減させ、省エネルギー性能を向上させている。

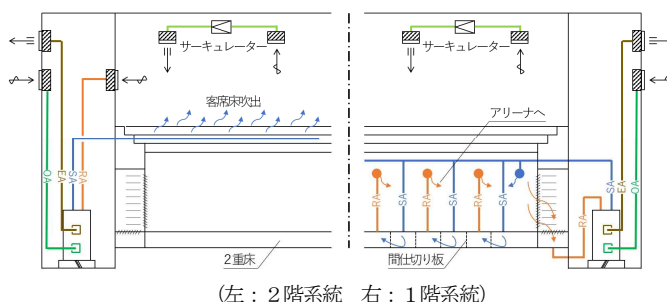


図1. メインアリーナ空調フロー図

2.2 その他省エネルギー技術

アリーナ以外の一般諸室やロッカールームには省エネルギー性能の高い電気式HPエアコンと外気負荷を低減させる全熱交換器を採用している。室内機及び全熱交換器は消費電力を考慮し、原則カセット型を採用した。

給湯は高効率型業務用ガス給湯器を採用し、シャワー室や浴室、厨房等給湯量の多い施設であるため、使用時間や用途で系統分けをしている。

ZEB Readyの計算としては対象外であるが、環境配慮として太陽光発電パネル(60KW)をアリーナ屋根面に設置している。また水資源の節約を目的として雨水再利用設備を採用し、中水として便所洗浄水や屋外散水に使用している。想定年間雑用水使用量は6,500 m³であり、雨水利用により約46%の上水を削減することが可能である。

3. ZEB Readyの計算結果と認証

上記で示した省エネルギー技術を用いてエネルギー消費性能計算プログラムの標準入力法にて算出したところ、BEI値は0.46となり、ZEB Readyの認証を受けている。これは標準的な同施設と比較すると54%の省エネが実現出来ていることを指す。体育館やアリーナのZEB Ready到達は事例としてはまだ希少である。

4. さいごに

アリーナ建築における取り組みを紹介した。本アリーナでは種々の技術的なZEB化手法を採用することでZEB Readyを達成しており、今後サロンパスアリーナを参考にZEB建築が普及することを期待する。

夏季に窓を開けて寝る場合の睡眠の質
Summer sleep quality with natural ventilation

○宮下 篤也（大阪市立大学） 梅宮 典子（大阪市立大学） 吉見 周（大阪市立大学）

Atsuya MIYASHITA*¹ Noriko UMEMIYA*¹ Shu YOSHIMI*¹

*¹ Osaka City University

Tropical nights in summer have increased in recent years. Earlier studies have indicated that people who sleep with windows open tend to have better sleep quality than those who use air conditioners. We can elucidate the reasons for this. The method consisted of a 7-day questionnaire survey and measurements of the temperature and humidity in the subject's bedroom during sleep. In conclusion, findings show that the bedroom WBGT is inferior with the window open. However, respondents with open windows who answered that they were unconcerned about sunlight or heat in the bedroom scored higher on the OSA.

1. 背景と目的

都市化が進んでいく現代においてヒートアイランド現象に伴う気温上昇は問題となっている。大阪では熱帯夜が増え、夏季に睡眠の質を確保するのが困難になっている。熱中症予防のために冷房使用が推奨されているが、睡眠時は冷房使用よりも自然通風のほうが睡眠の質が良いという調査結果もある。そこで本研究は寝室の温熱環境測定と冷房使用日誌、OSA 睡眠調査にもとづいて、睡眠時に窓を開放して寝る場合の 1) 温熱環境、2) 温熱感覚、3) 個人、住戸、寝室属性、環境意識と OSA 得点の関係を分析したので報告する。

2. 調査方法

大阪市と近郊の家族向き集合住宅居住者（2014 年 44 人、2015 年 44 人、2016 年 37 人、2017 年 34 人、2019 年 29 人、2021 年 11 人、2022 年 13 人）を対象とした寝室温熱環境測定と睡眠アンケートを分析する。調査は 7 月末から 9 月まで夏季の全期間に調査をおこなった。

寝室の温度（10 分間隔）と湿度は連続 7 日測定し、冷房や扇風機の使用、窓開・閉、寝室の在室、「冷房使用日誌」（30 分間隔）と OSA 睡眠調査）と温熱感覚の申告（起床時）を取り、住戸属性や、居住者属性も調査した。温熱環境記録に問題がない 206 戸のべ 1143 晩のうち、1) ストレスが「非常にあった」、2) 健康状態が「不良」、3) 睡眠が悪い側で、悪い理由が温熱環境以外、4) 2 歳以下の子と就寝を除き、165 戸の 817 晩を分析する。

Table1 Definition of WO and AC

	Acts of regulating the thermal environment during sleep	27 patterns
WO (n=198)	No air conditioning, windows open (including temporary use), fan use or not.	xox xoo xot xtx xto xtt
AC (n=191)	Full-time air conditioning, no windows open, no fans	oxx

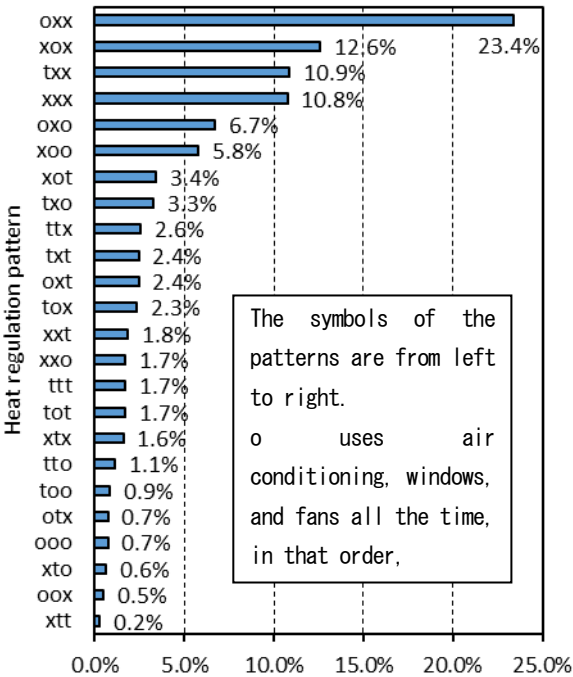


Fig.1 Frequency of thermal control use during summer

3. 温熱調節パターンの出現割合

冷房、窓、扇風機の使用を温熱環境調節行為として睡眠時における全時間使用(o)、一時使用(t)、不使用(x)の組み合わせ 27 パターンの出現状況を図 1 に示す。記号は左から冷房、窓、扇風機を示す。oxx(冷房全時間使用、通風不使用、扇風機不使用)が 198 晩(23.4%)、xox(冷房不使用、通風全時間使用、扇風機不使用)が 103 晩(12.6%)、txx(冷房一時使用、通風不使用、扇風機不使用)が 89 晩(10.9%)と多い。以下、表 1 に定義する窓を開放して寝る WO(198 晩)と全時間冷房の AC(191 晩)を比較する。

4. 睡眠の質

各因子の OSA 得点の平均値±標準偏差は、第 1 因子(起床時眠気)は W051.6±6.5、AC49.1±6.3。第 2 因子(入眠・睡眠維持)は W051.4±7.4、AC50.2±7.3。第 3 因子(夢見)は W054.3±6.8、AC51.9±7.4。第 4 因子(疲労回復)は W052.1±7.0、AC50.0±5.7。第 5 因子(睡眠時間)は W049.6±7.4、AC48.1±7.4。総合得点は W051.4±4.6、AC49.6±4.5。すべての因子で W0 が AC より良い(それぞれ $p=.0003, .1188, .002, .0031, .0469, .0003$)。

5. 温熱環境と温熱感覚

睡眠時の温熱環境の平均値±標準偏差は、室温は W028.8±1.6℃、AC26.4±1.5℃、外気温は W026.5±2.2℃、AC27.2±1.5℃、室温湿度は W067.2±7.2%、AC60.7±10.1%。外気湿度は W077.2±6.4%、AC67.2±7.2%である。室内 WBGT の出現頻度を図 2 に示す。室内 WBGT は W026.3±1.8℃、AC23.4±1.7℃で、28℃以上が 3 割近い。室温、室温湿度、室内 WBGT は W0 が有意に高く(ともに $p<.0001$)、外気温は W0 が有意に低い($p=.0004$)。

温冷感、熱的快適感、湿度感はいずれも $p<.0001$ で差があり、W0 が AC より暑く、快適で、湿っている。

W0 は寝室の睡眠時平均 WBGT が高いと暑く感じるが($R^2=0.2438$)、AC は WBGT と温冷感に関係がない($R^2=0.0027$) (図略)。

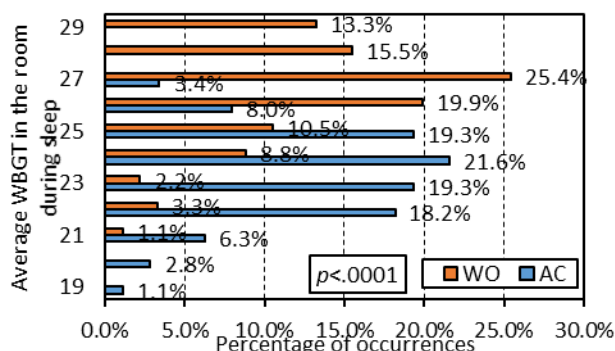


Fig.2 Frequency distribution of WBGT

6. 個人属性、住環境、寝室環境と OSA 得点

6.1 単純集計

年齢は W059.6±sd13.8 歳、AC52.7±15.6 歳で W0 の方が高い($p<.0001$)。男女比は W0 と AC に差はない($p=.668$)。職業は W0 が働いていない人の割合が少ない($p<.0001$)。年収は W0446.8±sd189.7 万、AC547.3±sd297.9 万で W0 の方が低い($p=.0151$)。体質は $p<.0001$ で W0 が AC より暑さ耐性がある、風邪をひかない、喫煙しない、ストレスがない、時間の余裕がある、お金の余裕がない。また W0 は ac より体力がある($p=.0035$)、食事時間が規則的($p=.0037$)、運動習慣がある($p=.0015$)、心の余裕が無い

($p=.0083$)。体型、生活の型、生活時間の規則性、飲酒の習慣、発汗や冷え性の傾向には差がない。

住戸方位は W0 に西向きが 27.2%と多く、AC に南向きが 73.9%と多い($p<.0001$)。竣工年から推定した住宅の断熱水準は W0 と AC で差がない($p=0.186$)。居住階数は W05.7±3.5 階、AC5.8±3.3 階と差がない($p=0.6801$)。住戸の住環境主観評価のうち、 $p<.0001$ で、W0 が AC より結露、カビ、虫が少なく、上下階や隣戸の騒音が静か、外からの視線が気にならない、防犯を気にしていない、通風だけで暑さをしのげる。また W0 は AC より日当たりが良い($p=.021$)、暖房が効きにくい($p=.0013$)、においがこもりにくい($p=.0053$)。風通し、ベランダからの眺め、外の空気、冷房の効きやすさ、日射熱の煩わしさ、窓からの日ざし、外の騒音、満足度には W0 と AC で差がない。

寝室の住環境主観評価のうち、 $p<.0001$ で、W0 が AC より風通しが良い、日当たりが良い、冷房が効きやすい、外の騒音が静か、上下階や隣戸の騒音が静か、防犯を気にしない、寝室満足度が低い。また W0 は AC よりにおいがこもりにくい($p=.0308$)、カビが発生しにくい($p=.0009$)、日射熱が煩わしくない($p=.0149$)、外からの視線が気にならない($p=.0006$)。ベランダからの眺め、暖房の効きやすさ、結露の発生頻度、窓からの日ざし、虫の多さには W0 と AC で差がない。

居住者の環境意識のうち、 $p<.0001$ で、W0 が AC より外とのつながりを感じたい、自然の暮らしに憧れる、暑さは気の持ちようで変えられる。また W0 は AC より暑さ寒さに敏感でない($p=.0043$)、環境に優しい商品を使用($p=.027$)、原発に頼りたくない($p=.0035$)、地球温暖化問題に関心がある($p=.0094$)、電気料金の値上げ値下げが気になる($p=.0283$)。こまめな温度調節、節水節電の心がけ、自宅の省エネに気配り、2011 年の震災以降の節電意識、都市高温化の実感には W0 と AC で差がない。

8 月の電気料金と 5 月の電気料金の差は、W02,065 円、AC4,253 円と W0 が AC より少ない($p<.0001$)。

6.2 OSA 得点の比較

「調査前 2 週間の気分」を示す POMS は、W03.6±sd4.6 点、AC5.1±sd5.5 点で、W0 が AC より気分がよい($p=.00292$)。一方で POMS を 3 段階に分けた時の得点上位 (POMS-3~2) の OSA 総合得点の平均値は W052.3±sd5.3、AC50.1±sd4.3 で、 $p=0.06$ で、AC が W0 より気分が良い。

図 3 に個人属性ごとの OSA 総合得点を示す。4 本の折れ線は W0 や AC でその属性の図に示す表現の側に当てはまる場合と当てはまらない場合の OSA 総合得点の平均値を示す。図の*は 5%、**は 1%有意水準で W0 の OSA 得点に、★は 5%、★★は 10%有意水準で AC の OSA 得点に差があることを示す。

時間の余裕、お金の余裕、心の余裕がある、ストレスがない、冷え性ではない人は W0 を選択すると OSA 得点が

高い。よく風邪をひく、生活時間や食事時間が不規則、汗かき、の人はACを選択するとOSA得点が低い。

図4に住戸属性ごとのOSA総合得点を示す。住環境の風通し、日当たり、ベランダからの眺め、冷暖房の効きが良い、虫が少ない、防犯を意識、不満が少ない、ベランダが南向き、竣工1992年以降、防犯を意識している住戸はWOを選択するとOSA得点が高い。カビが発生しやすい住戸はACを選択するとOSA得点が低い。

図5に寝室属性ごとのOSA総合得点を示す。寝室環境のベランダからの眺め、暖房の効き、日射光と日射熱の遮蔽が良い、外の騒音がうるさい、外からの視線が気にならない、防犯を意識している、隣戸の騒音が静かな寝室ではWOを選択するとOSA得点が高い。カビが発生しやすい寝室はACを選択するとOSA得点が低い。

図6に環境意識ごとのOSA総合得点を示す。暑さ寒さに敏感でない、節電意識が低い、自宅の省エネに興味がない、電気料金の変動が気にならない人がWOを選択するとOSA得点が高い。

7. 結論

大阪市と近郊の家族向き集合住宅居住者212人を対象に、寝室の温熱環境を測定し、睡眠の質のOSA調査を行って、得られた1095晩のうち窓を開放して寝た781晩のうち窓を開放して寝た198晩を就床から起床まで冷房を使用した191晩と比較して、以下を明らかにした。

- 1) 窓を開放して寝るほうが閉めて冷房するより、睡眠の質が高く、寝室の睡眠時平均の室温、湿度、WBGTが高く、温熱感覚は暑く熱的に快適で湿っている。
- 2) 窓を開放して寝る住戸は、西向きが多く、結露、カビ、虫が少なく、隣戸が静か、外の視線が気にならない、

防犯を気にしていない。居住者の年齢は高く、有職が多く、年収が低く、暑さ耐性があり、風邪をひかず、ストレスが無く、時間の余裕があり、お金の余裕が無い。「室内にいても外とのつながりがあるのがいい」、「山小屋のような自然の暮らしに憧れる」、「暑さ寒さは気の持ちようで変えられる」と考え、POMSで測定した調査中の気分状態がよい。8月と5月の電気料金の差が小さい。

- 3) 窓を開放して寝ることとa)住戸の風通し、眺望、外気清浄、冷房の効き、日射熱や日ざしの遮蔽、騒音、b) 寝室の眺望、暖房の効き、結露、日ざしのまぶしさや日射熱の煩わしさ、虫の多さ、c) 居住者の体型、朝型夜型、生活時間の規則性、発汗や冷え性、節水や節電の意識・習慣、自宅の省エネへの興味関心、都市高温化の実感には関係がない。
- 4) 居住者が「心のゆとりがある」、「お金のゆとりがある」、「時間のゆとりがある」、冷え性、ストレスがない、「暑さ寒さに敏感でない」、自宅の省エネに興味関心がない場合、住戸は断熱性が高く、「日当たりが良い」場合、寝室が「日ざしがまぶしくない」、「日射熱が煩わしくない」、寝室の「防犯に気をつけている」場合は、窓を開放して寝るほうが睡眠の質が高い。

参考文献

- 1) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/himr_tminGE25.html「大阪の熱帯夜数」2023年2月14日閲覧
- 2) 山形胡桃ら：盛夏季における就寝時および起床時までの寝室温熱環境の変化と温熱感覚や睡眠の質との関係、平成30度（第47）空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、A-65、2018年3月

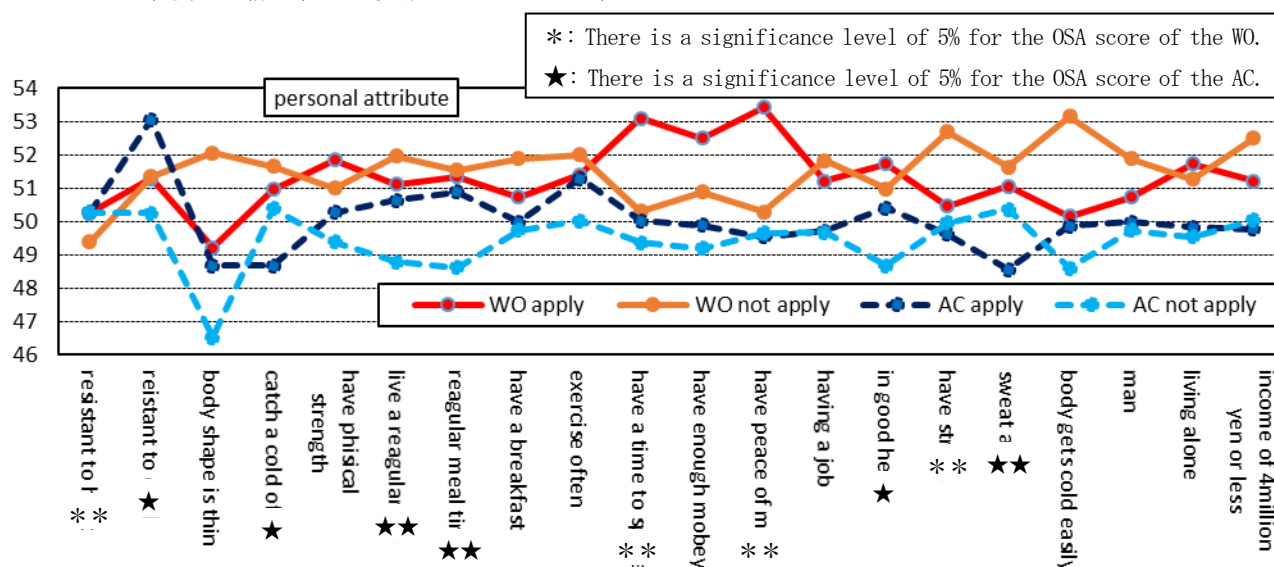


Fig.3 Personal attributes and OSA overall score

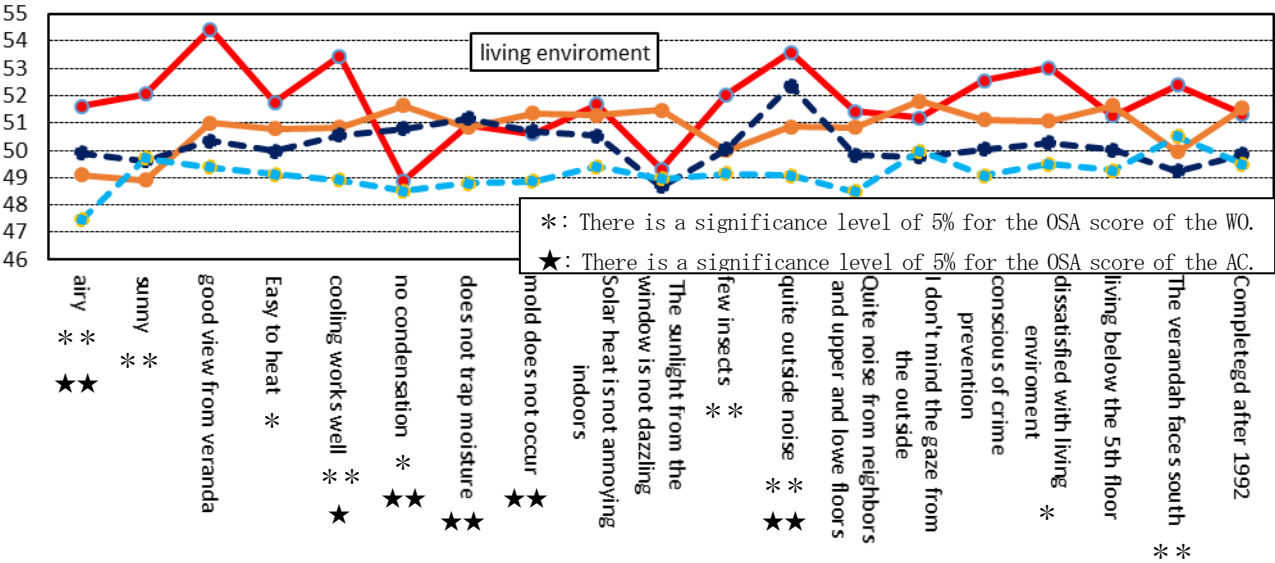


Fig.4 Living environment and OSA overall score

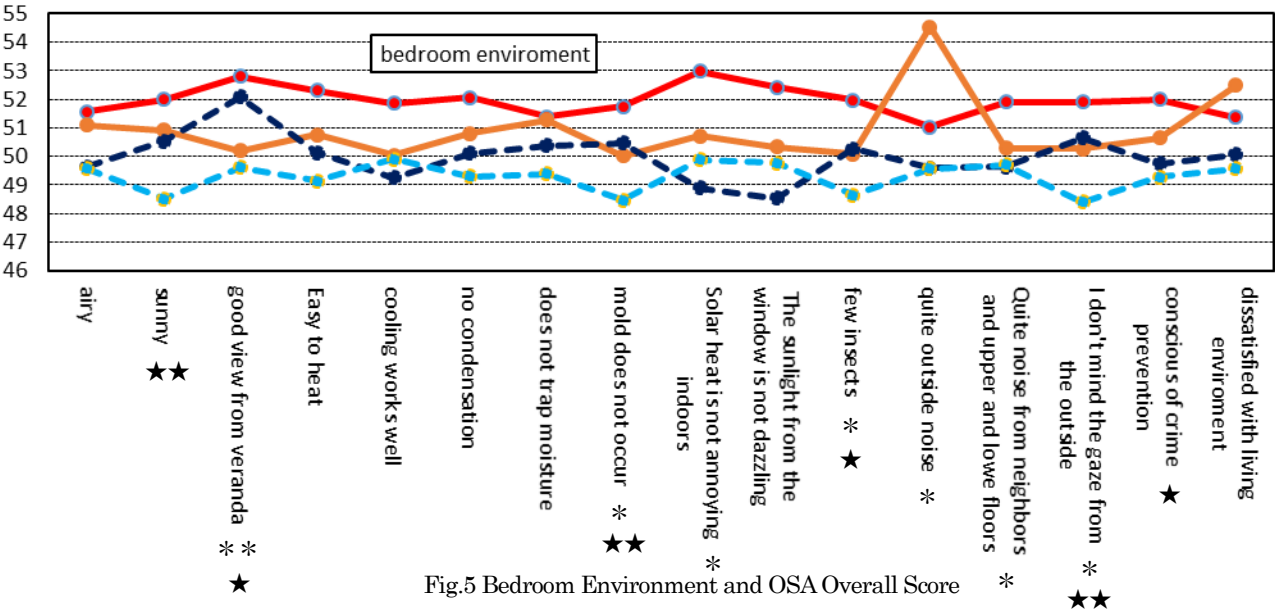


Fig.5 Bedroom Environment and OSA Overall Score

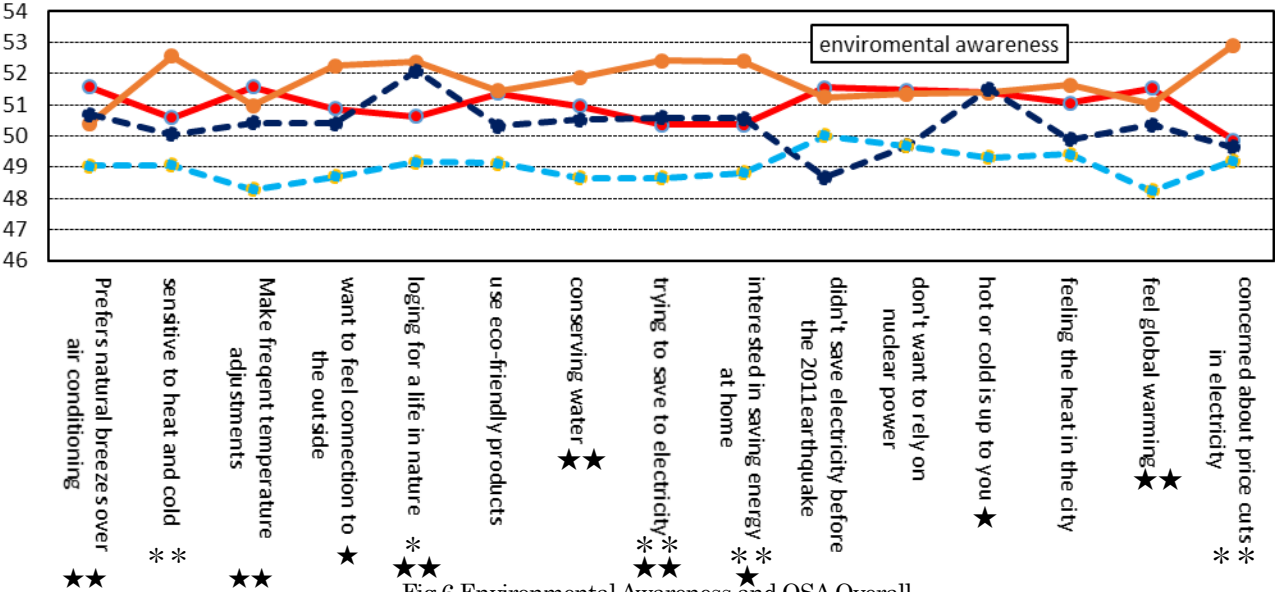


Fig.6 Environmental Awareness and OSA Overall

冷房と扇風機の使用頻度がともに高い住戸の住戸属性 Dwelling unit attributes for units with both high cooling and fan use

○朝岡 勇登 (大阪市立大学) 梅宮 典子 (大阪市立大学)

平本 詩織 (大阪市立大学) 孫 琳 (大阪市立大学)

Yuto ASAOKA*¹ Noriko UMEMIYA*¹ Siori HIRAMOTO*¹ Lin SUN*¹

*¹ Osaka City University

Synopsis : Numerous studies have specifically examined primarily cooling and natural ventilation, but few have emphasized investigations of fans. Therefore, the author used five questionnaires to investigate factors leading to the combined use of cooling and fans. The results revealed that 1) the pattern of combining air conditioning use with other adjustment behaviors is mainly selected in recent years, and 2) the combination of a fan with cooling was found to be related to solar heat, solar glare, thermal sensation, and thermal comfort. These items were interrelated in the window directions.

1. 研究の背景と目的

扇風機はエアコンに比べ電力使用量が格段に少なく、節電効果が期待できる。2011年3月に発生した東日本大震災のあと、4月には扇風機の販売台数が増加し始め、夏の電力需給の逼迫から政府によって節電が呼びかけられると、売り切れる店舗が続出した。2011年の扇風機輸入台数は2010年の2.25倍に急増している¹⁾。2011年以降も家庭の扇風機所有台数は減っていない²⁾。

気流を上げることによる暑熱感の緩和について英国のD.A.MacIntyre(1978)³⁾は、男女11人を対象に22℃～30℃の実験室で気流評価実験をおこない、気温28℃までは気流によって熱的不快感を軽減できると述べている。

酒井ら(2007)⁴⁾は、WEBアンケートで収集した全国の3981人について、地域によっては扇風機はエアコンより1日の使用時間が長く、在室時間に対する使用時間の割合も10～20%高いことを示した。岩井ら(2018)⁵⁾は長野県、山梨県、新潟県の193住戸を対象に節電に関する調査を実施して、「冷房に扇風機を併用する」住戸が多いと明らかにした。筆者ら(2020)⁶⁾は扇風機が通風や冷房と併用されることが多いことを明らかにした。本報は縦断的調査と最新の調査にもとづき、冷房の使用頻度のみ高い住戸と冷房と扇風機の使用頻度がともに高い住戸について、住戸属性、居住者属性、エネルギー使用の比較をおこなったので報告する。

2. 方法

縦断的調査(以降、調査A)として、2004年、2011年および2017年に大阪市住吉区周辺の6～14階建て、片廊下型の家族向け集合住宅の3年とも同じ住棟26棟にア

ンケート票を配布し、2004年257通、2011年185通、2017年191通の計633通を回収した(回収率16.3%、11.1%、10.4%)。またその後の使用状況の調査として(以降、調査B)2021年に大阪市住吉区、2022年に大阪市阿倍野区周辺の集合住宅にアンケート票を配布し、2021年は計30棟に対して189通、2022年は計18棟に対して129通の計318通を回収した(回収率9.0%、12.8%)。

調査項目は1)住戸属性(窓方位や築年や居住階数、風通しや日当たりや騒音などの居住者による住環境評価)、2)居住者属性(年齢・性別・職業と、暑さ耐性・などの体質や健康状態、節電習慣・環境配慮意識・自然指向性、環境問題への関心などの環境意識)、5)8月及び5月の電力使用量、冷房、扇風機、自然通風の使用状況ほかである。本研究は5年の調査データを合計して分析を行う。

3. 調査対象の構成

居住階は平均6.3±SD3.7階、面積は50～69㎡が54.5%、居間を含め4室が69.6%、南向き64.7%・東向き34.7%・西向き32.2%、竣工は平成3年以前26.0%、平成4～10年41.4%、平成11年以降32.6%で、回答者は56.8±15.8歳、世帯人数2.4±1.1人、女性62.9%、有職36.7%・無職43.1%・主婦20.2%である。

4. 温熱環境調節パターンの出現頻度(図1)

人数比が均等に近くなるように、扇風機や冷房の使用程度(以降EF、AC)の「非常によく使う」と「よく使う」を「○:使う」、それ以外の3カテゴリーを「×:使わない」とし、起床中の通風利用程度(以降、NV(A))は「開が多い」を「○:開」、それ以外の3カテゴリーを「×:閉」、

就寝中の通風利用程度(以降、NV(S))は「開が多い」と「日によって異なる」を「○:開」、それ以外の2カテゴリーを「×:閉」とする。4種の調節行為の組み合わせを○○××のように表し、○or×による16パターンの出現頻度をfig.1に示す。○×は左から順にEF、AC、NV(A)、NV(S)を示す。調査Bのほうが冷房を使うパターンが多い。以下、EF○・冷房○・通風××(以降「EF○」)とEF×・冷房○・通風××(以降「EF×」)を比較する。

5. 扇風機の使用に関する項目(単独)

5.1 住戸属性(図2)

窓方位は窓がその方位に面しているかどうかを2択で尋ねた。東に窓「面していない」はEF○が68.2%、EF×は57.6%で、EF○が×より面していない傾向がある($p=.0799$)。窓方位西や南はEF○と×で差がない。

部屋数「3室」はEF○が26.3%、EF×が15.2%で、EF○が×より多く、「2室」及び「4室」はEF○が0.7%・66.5%、EF×が4.8%・70.5%で、EF○が×より少ない傾向がある($p=.0658$)。しかし平均室数にはEF○とEF×のあいだで差がない。住戸面積、居住階、断熱水準は、EF○とEF×のあいだで差がない。

5.2 住環境評価(図2)

日射熱「煩わしい」はEF○が33.1%、EF×が21.7%で、EF○が×より煩わしい($p=.0452$)。日射熱が煩わしいほうが冷房に扇風機を併用する。

日差し「眩しい」はEF○が29.4%、EF×が12.4%で、EF○が×より眩しい($p=.004$)。日差しが眩しいほうが冷房に扇風機を併用する。「日当たり」、「冷房の効き」、「風通し」は、EF○とEF×のあいだで差がない。

5.3 温熱感覚

「お宅の夏の暑さ」は調査Bで、暑いから涼しいまで7段階で尋ね、暑い側、中立側、涼しい側に集約すると、室内の夏の暑さ「暑い側」はEF○が83.3%、EF×が97.9%で、EF○が×より暑くない($p=.0442$)。冷房に扇風機を併

用する住戸は暑くない、または暑くない住戸では冷房に扇風機を併用する、と言える。

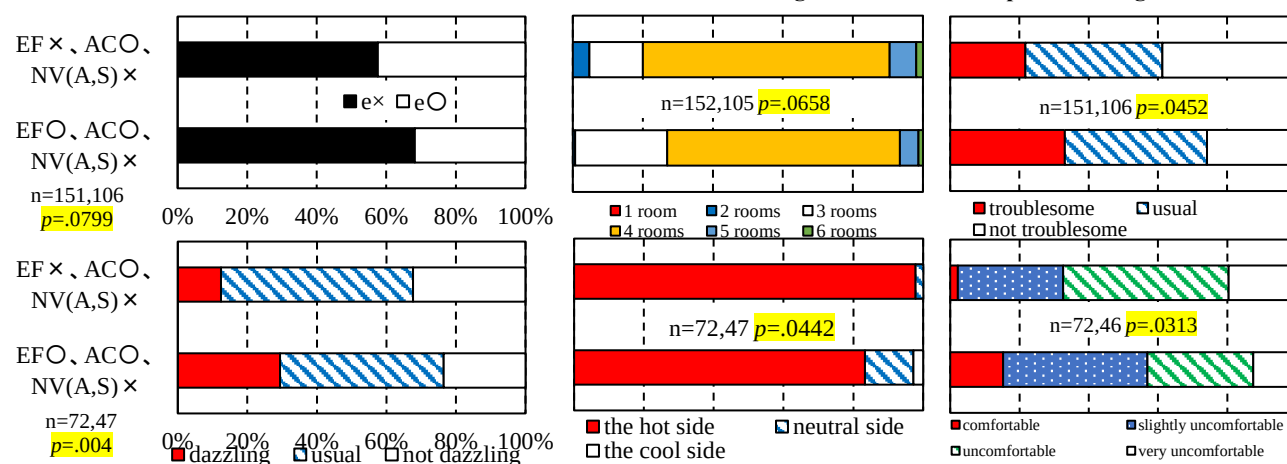
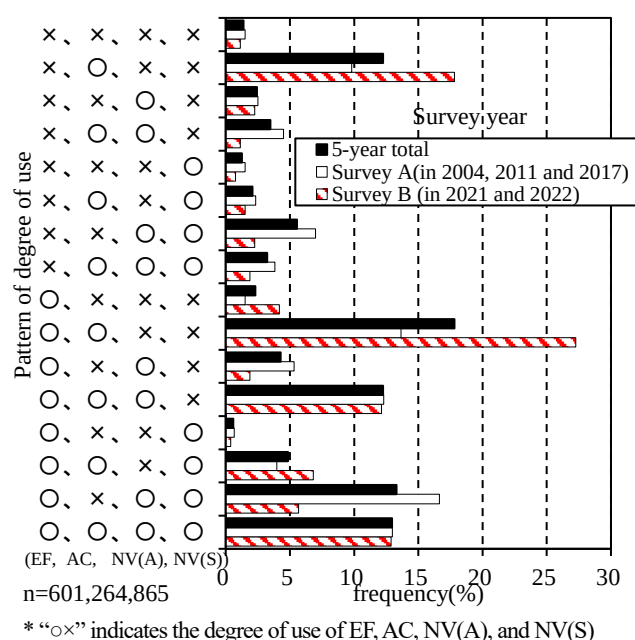
住戸の熱的快適感は調査Bで、快適から非常に不快まで4段階で尋ねた。住戸の熱的快適感「快適」はEF○が15.3%、EF×が2.2%で、EF○が×より快適である($p=.0313$)。冷房に扇風機を併用する住戸のほうが快適、または熱的に快適な住戸では冷房に扇風機を併用する、と言える。

5.4 居住者属性

年齢、性別、職業、体質のうち、EF○とEF×のあいだで差がある項目はない。環境意識のうち、節電「かなり心がける」はEF○が17.7%、EF×の7.1%で、EF○がEF×より多い傾向がある($p=.0648$; 図略)。節電意識以外の環境意識には、EF○とEF×のあいだで差がない。

5.5 エネルギー使用

8月と5月の電力使用量、冷房使用量(8月と5月の電



力使用量の差)、冷房設定温度のいずれも、EF○と EF×のあいだで差がない。

以上より関係の強いものから順にまとめると、日差しが眩しい、室内が熱的に快適、室内が暑くない、日射熱が煩わしい、節電意識がかなり高い、東に窓が面していないと冷房に扇風機を併用する。

6. 扇風機併用に関係する項目の掛け合わせ (図 3~5)

5 章で EF○EF×のあいだで差があった項目を詳しく調べるために、項目どうしを掛け合わせる。図では 2 択で尋ねた項目は○×、3 択は○△× (温冷感 Warm と Cool、熱的快適感 ○ (快適)、△ (少し不快)、× (不快+非常に不快) で示す。

6.1 窓方位と日射熱 (図 3)

窓方位 (2 択) と日射熱 (3 択) は $2 \times 3 = 6$ 択となる。図 3 では窓方位東は e、日射熱は sh で示す。「東に窓なしかつ日射熱煩わしい」は EF○が 19.6%、EF×が 10.4%で、EF○が×より多い傾向がある ($p=.0734$)。窓方位西や南は、EF○と EF×とで差がない。

6.2 窓方位と日差しの眩しさ (図 3)

窓方位 (2 択) と日差しの眩しさ (3 択) は $2 \times 3 = 6$ 択となる。図 3 では窓方位南は s、東は e、西は w、日差しの眩

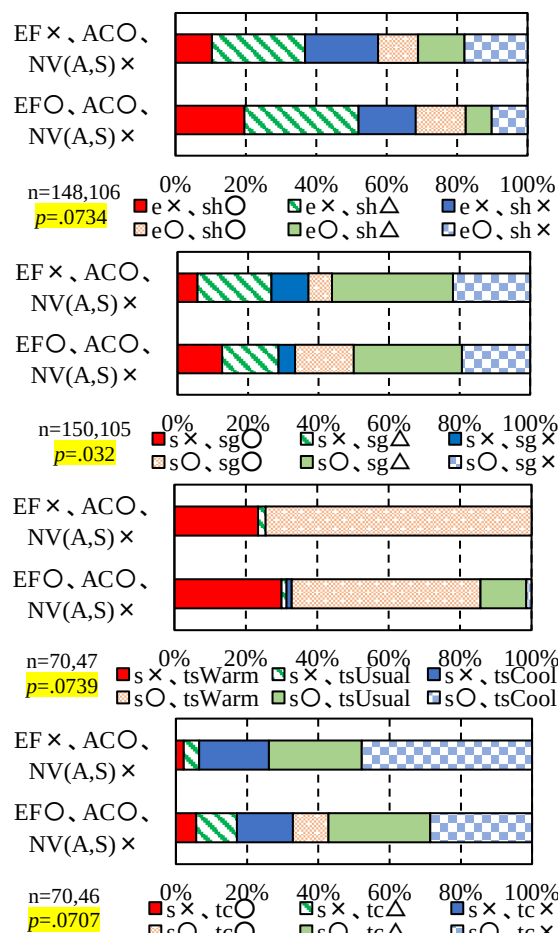


Figure3. Window direction and other Factors related to using/not using fans together AC use

しさは sg で示す。EF○が×より窓方位に関わらず「日差し眩しい」が多い ($p=.032, =.0005, =.0229$)。

6.3 窓方位と温冷感 (図 3)

窓方位 (2 択) と室内の夏の暑さ (3 択) は $2 \times 3 = 6$ 択となる。図 3 では窓方位南は s、東は e、西は w、室内の夏の暑さは ts で示す。EF×が○より「南に窓あり・暑い」は EF○が 52.9%で EF×が 74.5%、「東に窓なし・暑い」は EF○が 42.9%で EF×が 59.6%、「西に窓なし・暑い」は EF○が 47.1%、EF×が 74.5%で EF×が○より多い (それぞれ、 $p=.0739, =.0787, =.0289$)。

6.4 窓方位と住戸の熱的快適感 (図 3)

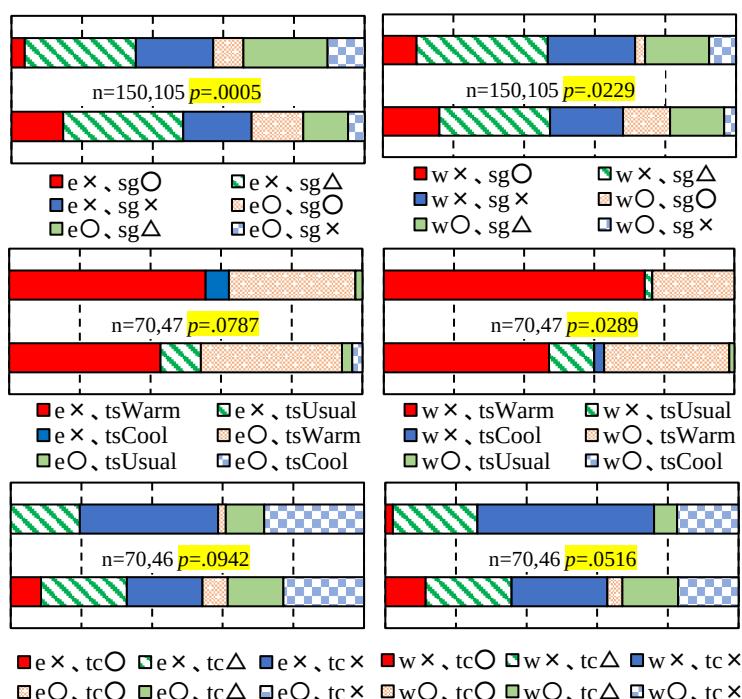
窓方位 (2 択) と住戸の熱的快適感 (3 択) は $2 \times 3 = 6$ 択となる。図 3 では 窓方位南は s、東は e、西は w、住戸の熱的快適感 tc で示す。EF×が EF○より「南に窓ありかつ不快」は EF○が 28.6%で EF×が 47.8%、「東に窓なしかつ不快」は EF○が 21.4%で EF×が 39.1%、「西に窓なしかつ不快」は EF○が 27.1%、EF×が 50.0%で EF×が○より多い (それぞれ、 $p=.0707, =.0942, =.0516$)。

6.5 温冷感と日射熱の煩わしさ (図 4)

室内の夏の暑さ (3 択) と日射熱 (3 択) は $3 \times 3 = 9$ 択となる。図 4 では温冷感 ts、日射熱 sh で示す。「暑いかつ日射熱が煩わしい」は EF○が 31.0%、EF×が 17.0%で、EF○が EF×より多い傾向がある ($p=.06$)。暑くかつ日射熱が煩わしい場合に扇風機を併用する、または、扇風機を併用する場合は暑くかつ日射熱が煩わしい、と言える。

6.6 温冷感と日差しの眩しさ (図 4)

室内の夏の暑さ (3 択) と日射熱 (3 択) は $3 \times 3 = 9$ 択とな



る。図4では室内の夏の暑さはts、日差しの眩しさはsgで示す。「暑いかつ日差し眩しい」はEFOが29.2%、EF×が12.8%でEFOがEF×より多い($p=.0377$)。暑くかつ日差しが眩しい場合に扇風機を併用する、または、扇風機を併用する場合は暑くかつ日差しが眩しい、と言える。

6.7 住戸の熱的快適感と日射熱の煩わしさ (図5)

住戸の熱的快適感(3 択)と日射熱(3 択)は3×3=9 択となる。図5では住戸の熱的快適感tc、日射熱shで示す。「不快かつ日射熱が煩わしい」はEFOが25.4%、EF×が17.4%で、EFOがEF×より多い($p=.0141$)。熱的に不快でかつ日射熱が煩わしい場合に扇風機を併用する、または、扇風機を併用する場合は熱的に不快でかつ日射熱が煩わしい、と言える。

6.8 住戸の熱的快適感と日差しの眩しさ (図5)

住戸の熱的快適感(3 択)と日差しの眩しさ(3 択)は3×3=9 択となる。図5では住戸の熱的快適感tc、日差しの眩しさsgで示す。「不快かつ日差し眩しい」はEFOが20.8%、EF×が10.9%で、EFOがEF×より多い($p=.0182$)。不快かつ日差しが眩しい場合に扇風機を併用する、または扇風機を併用する場合に不快かつ日差しが眩しい、と言える。

6.9 住戸の熱的快適感と断熱性 (図5)

住戸の熱的快適感(3 択)と断熱性(3 択)は3×3=9 択となる。図5で住戸の熱的快適感tcで示し、断熱性は竣工年H3とH11で分割する。「不快かつH4～H10」はEFOが14.1%、EF×が37.0%で、EF×がEFOよりが多い傾向がある($p=.0912$)。不快かつ新省エネルギー基準の住戸の場合、扇風機を併用しないと言える。

以上より、窓方位と日差しの眩しさ、住戸の熱的快適感と日射熱関係、温冷感と窓方位西・日差しの眩しさは冷

房に扇風機を併用する/しないに強く関係する。

7. 結論

大阪都市部の家族向き集合住宅 951 戸を対象に 2004 年～2022 年における調査をもとに、冷房のみ使用する住戸と冷房に扇風機を併用する住戸を比較した結果、1) 室内で日差しが眩しい、室内が熱的に快適、室内が暑くない、室内で日射熱が煩わしいと併用する 2) 節電をこころがけている、東に面する窓がないと併用する傾向がある、3) 住戸の面積、居住階、断熱水準、居住者の年齢、性別、職業や、冷え性や暑さ耐性などの体質、環境配慮意識、節電習慣は、単独では扇風機の併用と関係しない、4) エネルギー使用量に有意な差はない、5) 室内が暑い人や不快である人のみに注目すると、日射に関する評価が悪い人が冷房に扇風機を併用し、日射に関する評価が良い・普通である人は扇風機を併用せず冷房のみ使用することを明らかにした。

参考文献 1)財務省貿易統計、2)朝岡ら：扇風機の所有台数に関する住環境要因、第51回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、A-43、2021年、3)D.A.MacIntyre：Preferred air speeds for comfort in warm conditions, 1978(2), 264-277、1978年 4)酒井ら：H-6 アンケートによる一般家庭での冷房使用実態調査：(第2報)居間の冷房使用実態と冷房エネルギー消費量の分析、空気調和・衛生工学会大会論文集、第2巻、pp. 1439-1442、2007年 5)岩井ら：震災前後の長野県、山梨県、新潟県における戸建て住宅のエネルギー消費量と節電実態に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第83巻、pp. 87-96、2018年、6)朝岡ら：夏季の住宅における冷房、扇風機、および自然通風の使用程度の相互関係、第50回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、A-43、2020年

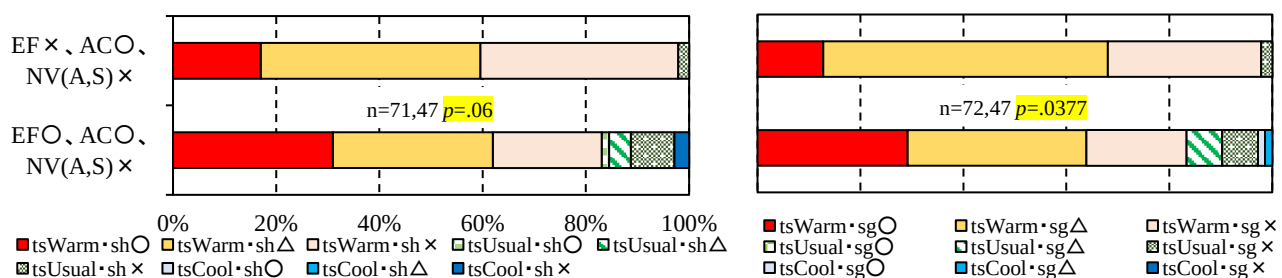


Figure 4. Thermal sensation and other Factors related to using/not using fans together AC use

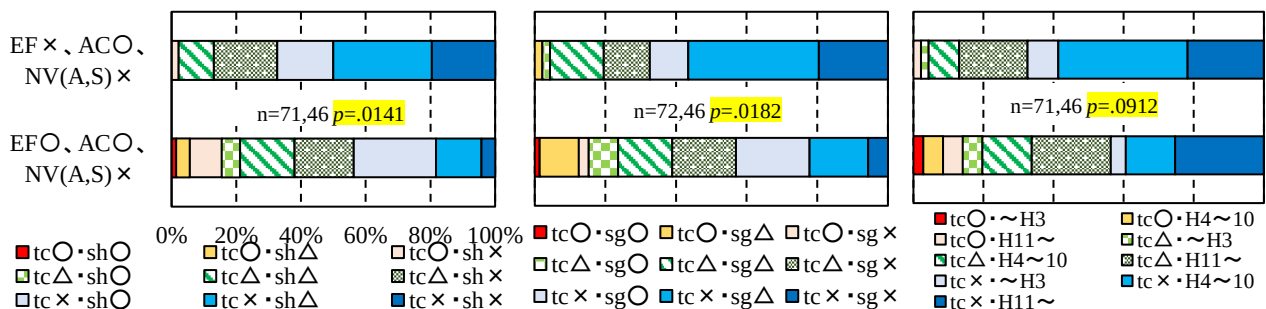


Figure 5. Thermal comfort and other Factors related to using/not using fans together AC use

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 1) 被験者実験概要と実験結果

Stay Comfort in RC Apartment Building and Traditional Townhouses during Natural Ventilation (Part1) Subjects Experimental Summary and Results

○長續 仁志 (大林組) 山中 俊夫 (大阪大学)

崔 ナレ (大阪大学) 竹村 明久 (摂南大学)

小林 知広 (大阪大学) 宗 菜津未 (大阪大学)

大野 成陽 (大阪大学)

Hitoshi NAGATSUGU*1 Toshio YAMANAKA*2 Narae CHOI*2 Akihisa TAKEMURA*3

Tomohiro KOBAYASHI*2 Natsumi SO*2 Shigeharu OHNO*2

*1 Obayashi Corporation *2 Osaka University *3 Setsunan University

Natural ventilation has long been practiced in Japan, and it has attracted attention in recent years from the perspective of carbon neutrality and as a preventive measure against infectious diseases. The purpose of this study is to understand the factors affecting the coziness of residents during natural ventilation from psychological and physiological points of view. In this paper, we present a summary and results of human subject experiments conducted in a room of a traditional townhouse where natural ventilation has a significant influence and in a room of a regular RC apartment building.

はじめに

日本では古くから夏の暑熱対策で通風が行われてきたが、空調技術の発展により、自然換気を行わない建物が増加してきた。そして近年はカーボンニュートラルや感染症対策の手段として自然換気の注目が高まっており、自然換気建物の性能検証や CFD 解析等の研究は多く見られる¹⁾。一方、自然換気時における在室者の快適性を心理・生理学的観点からアプローチした知見は多くないと言える。また、機械空調と比して自然換気の大きな利点は省エネルギーであり、さらに屋外の風を取り入れるが故の外部環境との繋がりが生じることが挙げられる。例えば伝統的町家建築の居心地の良さは、自然換気による気流以外の、視覚や聴覚を含めた総合環境評価によるものと想像できる。

本研究は、自然換気時における在室者の快適性へ影響の与える要因を心理・生理学的観点から解明することを目的としている。本報では、伝統的町家の書斎及び一般的な RC 造集合住宅の一室を対象とし実施した被験者実験の概要と結果について報告する。

1. 実験概要

実験は大阪市内に位置する伝統的町家である適塾 1 階の書斎 (Fig. 1) 及び一般的な集合住宅 (〇社社員寮) 5 階の一室 (Fig. 2) で実施された。実験期間は 2022 年 10 月 24 日から 11 月 24 日であった。実験時の様子を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。

被験者は、大阪大学学生の女性 3 名及び男性 1 名の計 4 名 (21 歳～23 歳) を採用した。採用時にスクリーニングとして接触抵抗値の事前確認を行い、支障なく計

測できた被験者のみを採用した。被験者へ適切な謝礼を実験各日ごとに支給した。

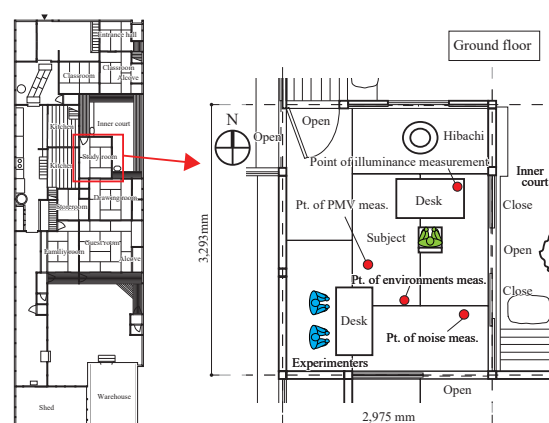


Fig. 1 The Plan of the Townhouse

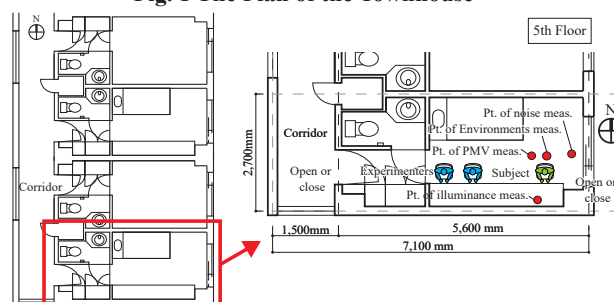


Fig. 2 The Plan of the Apartment

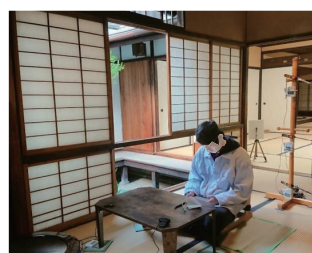


Fig. 3 Experiment in the Townhouse

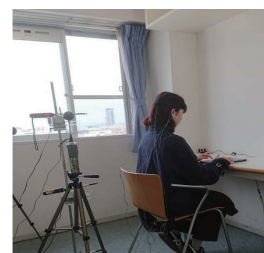


Fig. 4 Experiment in the Apartment

Table 1 Conditions of the Experiment

Case	Exp. Room	Window state	Exp. times
Top	Townhouse	Open(on Natural ventilation)	4 times/pers.
Aop	Apt. building		2 times/pers.
Acl		Close	2 times/pers.

Table 2 Measurement Items of Physical Environments and Physiological Parameters

Classification	Contents	Position	Device
Physical environment	Indoor temp., humidity	FL+100,600,1100	T&D Co., TR-76Ui
	Illuminance	On the desk	Co., TR-74Ui
	Noise	Top:FL+600, Aop,Acl:FL+1100	Rion Co., NL-52
	Air velocity	FL+100,600,1100	Testo, Smart probe testo 405i
Physiological	PMV	Top: FL+600, Aop,Acl: FL+1100	Kyoto Electronics Manufacturing Co., AM-101
	Brain waves	2 pt. on the back of head, 2 pt. on the frontal pole	Miyuki Giken Co., MP208
	Heat rate, chest temp.	Chest	TDK Co., Silmex Bar type Lite

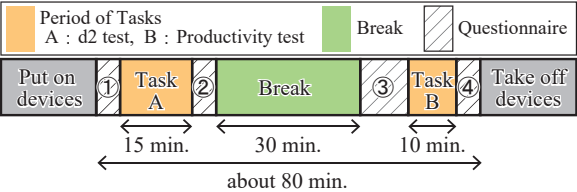


Fig.5 Timetable of the Experiment

実験条件を Table 1 に示す。町家書斎の自然換気実施時 (以下条件 Top)、社員寮の一室の自然換気実施時 (以下条件 Aop) 及び社員寮の一室の窓全閉時 (Acl) の 3 条件とした。いずれの条件も機械空調を行っていない。一人当たりの実験回数は、Top を 4 回、Aop を 2 回、Acl を 2 回の合計 8 回である。同じ被験者で各条件が連続しないよう実験を行った。

実験スケジュールを Fig. 5 に示す。被験者は実験室入室後、実験説明を受けたのち心拍計及び脳波計を装着した。その後 1 回目のアンケート回答を行い、温冷感の調節 (上着着用、ブランケットの貸し出し、風通し調節の有無) を確認し、続けて集中力を測る d2 テスト²⁾ (作業 A) を 15 分間実施した。d2 テスト終了後、2 回目のアンケート回答を行い、再び温冷感調節の確認を実施し、30 分間の休憩を取らせた。休憩時は携帯電話等の使用を禁止し、リラックスして過ごすよう指示した。休憩後 3 回目のアンケート回答を行い、温冷感調節の確認し、続けて発散的思考力を測る生産力テスト³⁾ (作業 B) を 10 分間実施した。その後、4 回目のアンケート回答を行い、機器を取外して実験終了とした。

各条件において被験者を外の景色等、屋外環境を感じやすい位置に座らせた。Fig. 1~4 に示した実験室の特性を考慮して、条件 Top は座椅子に、条件 Aop 及び Acl は椅子に座らせた。

実験時の物理環境測定項目及び生理量測定項目を Table 2 に示す。

温湿度及び風速は FL+100、600、1100mm の各 3 点、照度は被験者の作業机机上面、騒音及び PMV は被験者頭部位置とし、条件 Top では FL+600、条件 Aop 及び Acl では FL+1100 とした。

生理量は、心拍数、胸部温度及び脳波を測定した。心拍数及び胸部温度は、被験者胸部にワイヤレス端末を装着させて測定した。脳波測定は、国際式 10 - 20 法に従い、O 1 及び O 2 (後頭部)、FP1 及び FP2 (前頭極) の 4 点を採用した。

次に、アンケート項目を Table 3 に示す。本研究の目的は自然換気時における在室者の快適性へ影響の与える要因を心理・生理学的観点から解明することであるた

Table 3 Contents of Questionnaire

Contents of Questionnaire		Scale	
Environmental characteristics of the room	sensitivity	Brightness of the whole room	7 pts. Bright ~ Dark
		Thermal	7 pts. Cold ~ Hot
		Dryness of the air	7 pts. Humid ~ Dry
		Freshness of the air	7 pts. Fresh ~ Stuffy
	Degree of sensitivity	Sound	7 pts. Noisy ~ Quiet
		Current of the air	4 pts. Sensitive ~ Insensitive
		Direct sunlight	4 pts. Sensitive ~ Insensitive
		Brightness of Natural sunlight	4 pts. Sensitive ~ Insensitive
	Comfort	Odor	4 pts. Sensitive ~ Insensitive
		Odor	7 pts. Comfort ~ Discomfort
		Current of the air	7 pts. Comfort ~ Discomfort
		Brightness	7 pts. Comfort ~ Discomfort
Impressions of the room	Satisfaction	Sound	7 pts. Comfort ~ Discomfort
		Thermal comfort	7 pts. Comfort ~ Discomfort
		Overall Comfortableness	7 pts. Comfort ~ Discomfort
		Brightness	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
	Satisfaction	→ Reason of dissatisfaction	Free writing
		Thermal environment	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
		→ Reason of dissatisfaction	Free writing
		Air quality	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
	Satisfaction	→ Reason of dissatisfaction	Free writing
		Sound	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
		→ Reason of dissatisfaction	Free writing
		Overall Satisfaction of the Environment	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
Overall	surroundings	Liveliness	7 pts. lively ~ Inert
		Esthetics	7 pts. Refined ~ Unrefined
		Openness	7 pts. Opened ~ Closed
		Familiarity	7 pts. familiar ~ Unfamiliar
	Ambient nature	Caltness	7 pts. Calmed ~ Un-calmed
		Sense of Nature, Season	4 pts. Sensitive ~ Insensitive
	Satisfaction	Overall Satisfaction of Scenery and Impression	7 pts. Satisfied ~ Unsatisfied
		Comments	Free writing
		Current of air, Sound, Blightness, Odor, Scenery	Free writing
	Easiness of tasks	Degree of fatigue	7 pts. Not tired at all ~ Very tired
		Degree of relaxation	7 pts. Relaxed ~ Stressed
		Easiness of relaxation	7 pts. Relaxed ~ Stressed
		Simple task (d2 test)	7 pts. Easy ~ Difficult
Acceptability	Tasks	istributed task (Productivity test)	7 pts. Easy ~ Difficult
		Concentration on the tasks	7 pts. Easy ~ Difficult
		Simple task (d2 test)	4 pts. Acceptable ~ Unacceptable
		Divergent task (Productivity test)	4 pts. Acceptable ~ Unacceptable
	Importance	Usability of the work	7 pts. Important ~ Unimportant
		Impression of the room	7 pts. Important ~ Unimportant
		Overall environment	7 pts. Important ~ Unimportant

Table 4 Contents of Productivity Test

Order of Experiments	Theme		
1	Trash can	Hanger	Bag
2	Umbrella	Earphone	Mask
3	Bed	Tape measure	Mug
4	Notebook	Gloves	Plate
5	Shoes	Pen	Dining table
6	Camera	Piggy bank	Bath salts
7	Purse	Wardrobe	Bandages
8	Cap and Hat	Spoon	Vacuum cleaner

め、温冷感や気流感等自然換気に関連した項目だけではなく、においや明るさ、音等の環境特性、実験室内及び屋外空間の印象、作業に対する項目などを調査した。

また、作業 A 及び B の内容と評価項目は以下のとおりである。作業 A の d2 テストは、集中力と反射神経を測定する目的としたテストで、上下に 1 から 4 つの点が付いた「d」と「p」のうち、点 2 つが付いた「d」のみを選択するテストである。横 47 文字、縦 14 行で構成されており、テスト 1 試行は各行 12 秒の制限で 14 行続けて解答する。本実験では、15 分間の間に各試行 12 秒のインターバルを挟んで 5 試行実施した。d2 テストは、回答数及びミス率を評価項目とした。

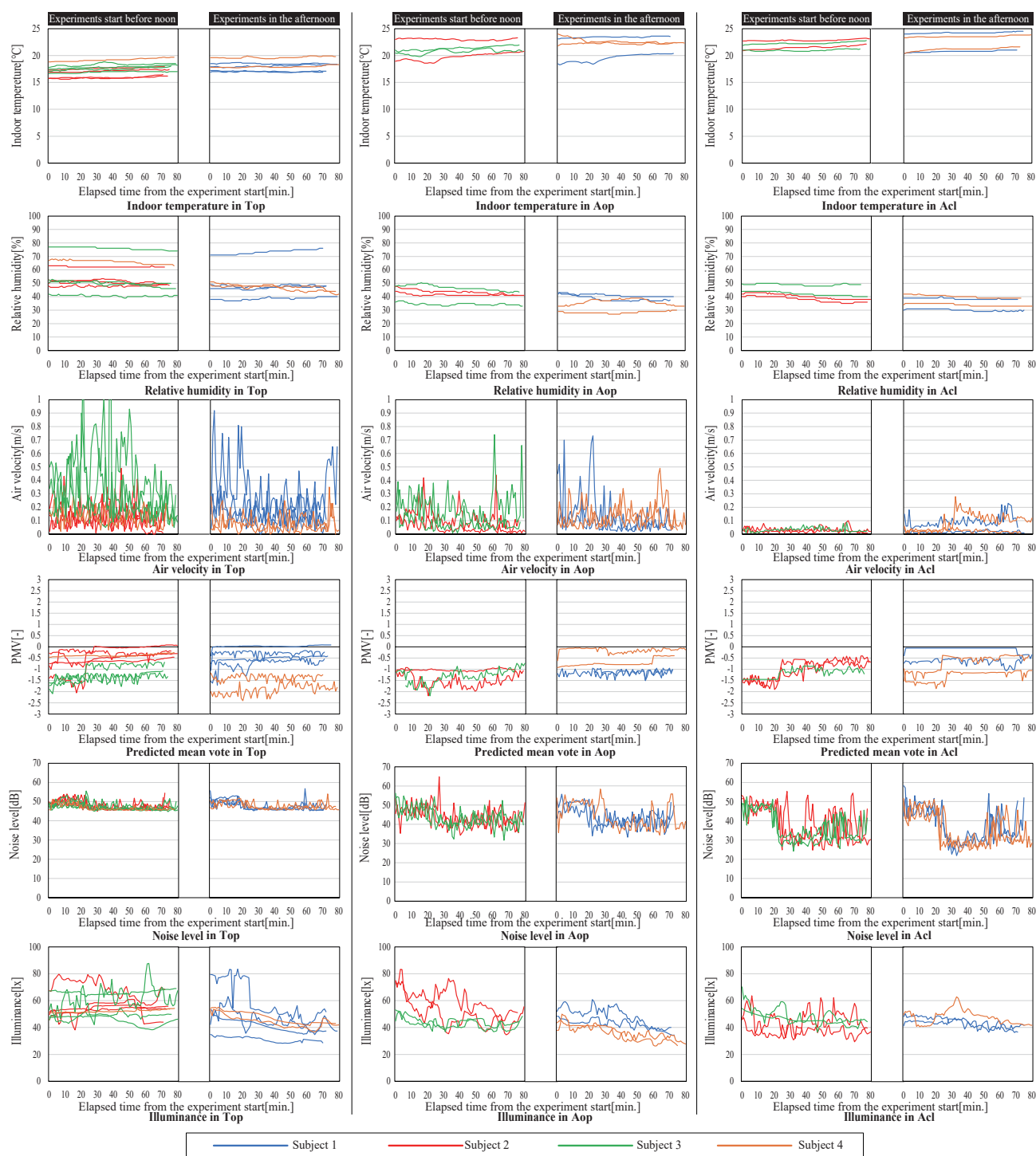


Fig.6 Time Variation of Indoor Temperature, Humidity, Air Velocity, Noise and Illuminance in Each Condition of Top, Aop, Acl

作業 B の生産力テストは、創造性のパフォーマンスを定量化する目的で開発されており、「新しい〇〇を考えてください」という問いに対し、被験者が自由に回答する形式である。本実験では 1 施行において 3 題の問題が与えられ (Table 4)、10 分間の制限時間内に何個でも回答させた。評価項目は新規性及び適切性の 2 項目とし、実験者自らが評価した。

2. 実験結果

Fig. 6 に各実験それぞれの室内温度、相対湿度、風速、騒音レベル及び照度の経時変化を 1 分平均値にて

示す。実験実施時間帯が午前、午後と分かれているため、各実験時間帯で分類し、条件ごとに実験中の環境条件での差異を確認する。被験者 1 及び 4 は午後、被験者 2 及び 3 は午前での実験が多くを占めている。

2.1 測定結果

2.1.1 室内温度

いずれの条件においても、実験開始から大きな変動は見られず、午前午後の時間帯の差異もみられなかった。条件ごとの差は、Top が 20℃以下であったのに対し、Aop 及び Acl は 2 回を除いて 20℃を超えていた。

2.1.2 相対湿度

室内温度同様にいずれの条件においても、実験開始から大きな変動は見られなかった。時間帯による差異は、Topにおいて午前の日ごとのばらつきが大きく、Aclにおいて午後の値がやや低い結果となった。条件ごとの差異は、Topは50%程度が多くを占め、40%から約80%まで実験ごとに差異があるのに対し、Aop及びAclは40%から50%付近で実験ごとの差異は小さい結果となった。

2.1.3 風速

Topが最も日変動が大きく1.0m/sを超える時間もあり、次いでAop、Aclという結果となった。時間帯による差異は、Topは午前の、Aclは午後の変動が大きく、Aopは大きな差異は見られなかった。条件ごとの差異は、Topは最も風速が大きく、0.5m/sを超える時間帯も見られた。Aopは0.5m/sを超える時間帯も見られたが、Topと比較すると低風速であり、0.3m/s以下の範囲で推移していた。Aclは、午前は1条件を除いて0.1m/s以下であったが、午後は0.1m/sから0.2m/sの値を示していた。

2.1.4 PMV

PMVは、代謝量を座位安静時として1.0met、clo値は実験中の着衣調節を考慮して計算した。日変動はいずれの条件もみられなかったが、被験者2の条件TopやTclに実験途中でのPMV+1程度の増加がみられた。時間帯による差異は、条件Aop及びAclは午後の方が高い値を示した一方、条件Topは午後の方が低い値を示した。条件ごとの差異は、Aclが最も温暖側であったがいずれの条件も冷涼側のPMVとなり、特に条件Topは-2程度の値を示した。

2.1.5 騒音レベル

Topは実験開始から大きな変動は見られなかったが、Aop及びAclは実験途中に低下し、再度上昇する結果となった。時間帯による差異は、いずれの条件でも見られなかった。条件ごとの差異は、Topは50dB程度で推移していたが、Aopは40dBから50dBの間で、Aclは30dBから50dBの間で変動していた。

2.1.6 照度

照度は各実験日でばらつきが大きく、一貫の傾向は見られなかった。時間帯による差異は、全体として午後の方がやや低い値を示した。条件ごとの差異は、TopとAop及びAclで大きな違いが見られた。Topは100lx以下であったのに対し、Aop及びAclは700lxから1500lxの時間が多く、実験室による照度の差異が見られた。

2.2 風速及び室内温度の上下分布

Fig. 7に代表日の風速及び室内温度の上下3点 (FL+100, 600, 1100) の1分平均値を示す。代表日は、自然換気の影響が最も大きいと考えられる上下3点の平均風速が最大となる日を選んだ。

Topは、いずれの高さも風速変動が大きく、床面に近いほど大きい風速を示した。一方、室内温度は上下によ

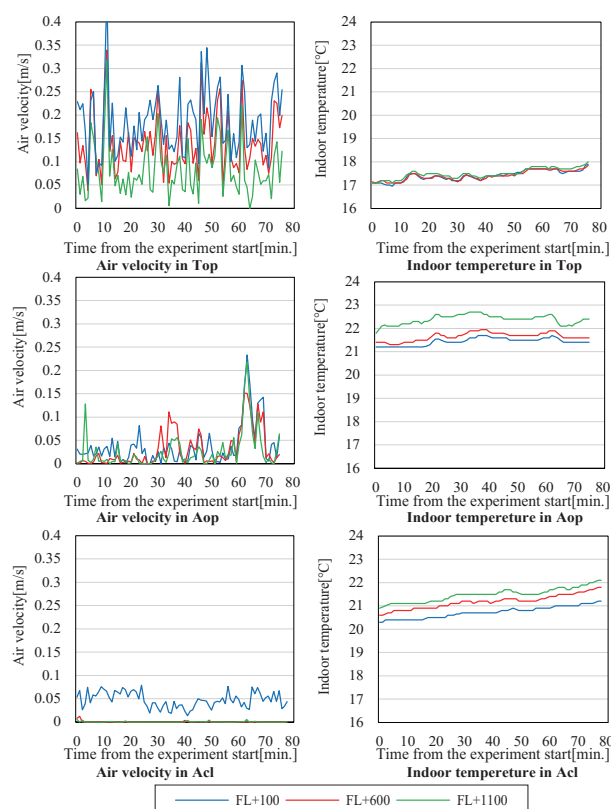


Fig.7 Time Variation of Three Points (FL+100, 600, 1100 above and below the Air Velocity and Indoor Temperature)

る差異はみられなかった。

Aopは、風速の時間変動はあるものの、測定高さや風速に一貫した傾向はみられなかった。一方、室内温度はFL+1100が最も高い値となり、FL+100と1℃～2℃の差異が見られた。

Aclは、FL+600、+1100は0m/sであり、床面近くのFL+100のみ0.05m/sの微風を計測した。室内温度は、Aopと同様にFL+1100が最も高い値を示し、FL+100と1℃程度の差異が見られた。

おわりに

自然換気時における在室者の快適性へ影響する要因を心理・生理学的観点からの解明を目的とし、本報では歴史的町家及びRC造集合住宅における被験者実験概要及びその環境測定結果を示した。次報にて、実験結果の詳細分析を示す。なお、本研究は共同研究先の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

本研究にて実験施設を提供頂いた適塾並びに適塾記念センター関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林：我が国における建物の自然換気及び通風に関する研究の130年の歴史，日本建築学会環境系論文集，Vol.83, No.751, pp.749-759, 2018
- 2) 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（近畿），pp.47-48, 2014

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 2) 被験者の違いに対する心理・生理学的検討

Stay Comfort in RC Apartment and Traditional Townhouses during Natural Ventilation (Part 2) Psychological and Physiological Considerations for the Difference between Subjects

○宗 菜津未 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学)

竹村 明久 (摂南大学) 小林 知広 (大阪大学) 大野 成陽 (大阪大学)

長續 仁志 (大林組)

Natsumi SO^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Narae CHOI^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*2}

Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Shigeharu OHNO^{*1} Hitoshi NAGATSUGU^{*3}

^{*1} Osaka University ^{*2} Setsunan University ^{*3} Obayashi Corporation

There is a wide variety of factors that affects the comfort of natural ventilation in a house, including airflow, room temperature, outside sound, natural light, smells, and outside views. In this study, the effects of these factors on the psychological and physiological responses of occupants were investigated through subject experiments. Experiments were conducted in two locations. One is a traditional townhouse "Tekijuku" and the other is a general apartment building. This report discusses the psychological evaluation and EEG characteristics of each subject.

はじめに

住宅における自然換気は室内の換気効果があるだけでなく、在室者に快適さをもたらす。その要因は、室温、風、音、自然光、におい、外の景色など多岐に渡る。また、住宅の中でも、伝統的町家建築における自然換気と現代の一般的なマンションにおける自然換気では快適性が異なると考えられる。本研究では、伝統的町家建築である「適塾」と一般的なワンルームマンションで被験者実験を実施し、のんびりとした休憩や学習を模擬した作業を行わせた。その際に被験者の心理量や脳波を測定し、住宅における自然換気が在室者に与える影響について検討した。前報では¹⁾、本研究にて行った実験の概要と実験中の環境データについて報告した。本報では、被験者ごとの心理量、脳波、作業成績の特徴について報告する。

1. 実験概要・測定項目

Fig.1 に実験スケジュールを示す。概要については前報で述べた通りである。

2. 脳波の測定結果と考察

生理反応を定量化する目的で、脳波 ((株) ミュキ技研、ポリメイトミニ AP108 およびポケット MP208 を使用) を測定した。脳波は国際式 10-20 法に従い、O1・O2 (後頭部)、Fp1・Fp2 (額部) を測定し、高速フーリエ変

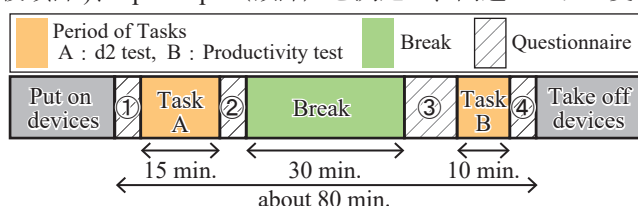


Fig. 1 Timetable of the Experiment

換を施して α 波 (8 ~ 13 Hz) と β 波 (13 ~ 30 Hz) のパワー値 (μV^2)、 β 波のパワー値を α 波のパワー値で割った β / α を求めた。なお、作業課題時などの集中が必要なときに β / α は増加する²⁾とされる。前報¹⁾に示した条件に、Top ○ という形で、○には同一条件で何回目に行った実験かを記載する。

Fig.2(a) ~ (d) に、被験者 1 ~ 4 の条件 Top1 ~ 4 の β / α を示す。これらは全て O1, O2 の平均値を 1 分間で平均したものである。一般的には被験者が心身ともにリラックスすると α 波が発生し、 β 波が抑制されるため、 β / α は低下するとされている。**Fig.2(a) ~ (c)** より、被験者 1 ~ 3 は β / α が休憩時にわずかに低下している。一方で、**Fig.1(d)** より、被験者 4 のグラフは休憩時に β / α が大きく低下している。このように、同じ休憩状態であっても、リラックスしている様子が脳波に表れる程度は個人によって大きく異なる。

Fig.3(a) ~ (d) に被験者 1 ~ 4 の条件 Top の α 波のパワー値の経時変化を示す。**Fig.3(c)** より、被験者 3 は休憩時においても α 波のパワー値の大きな変化は見受けられないが、**Fig.3(d)** より被験者 4 は休憩時に大きく増加している。**Fig.3(a)(b)** より被験者 1 と 2 の結果も被験者 3 と同じようにあまり変動がなかったことから、被験者 4 は休憩中に α 波が強く発生するという特徴があることが確認された。また、被験者 2 や被験者 3 の Top の α 波はおおむね 2~5 μV^2 の範囲で変動しているが、被験者 4 の Top の α 波は 5~12 μV^2 程度の範囲で変動しており、 α 波の絶対的な量にも大きな個人差が見られる。

Fig.4(a) ~ (b) に被験者 1 ~ 4 の条件 Aop の β 波のパワー値の経時変化を示す。**Fig.4(a)** より、被験者 1 は β 波のパワー値がほぼ変化していないのに対して、

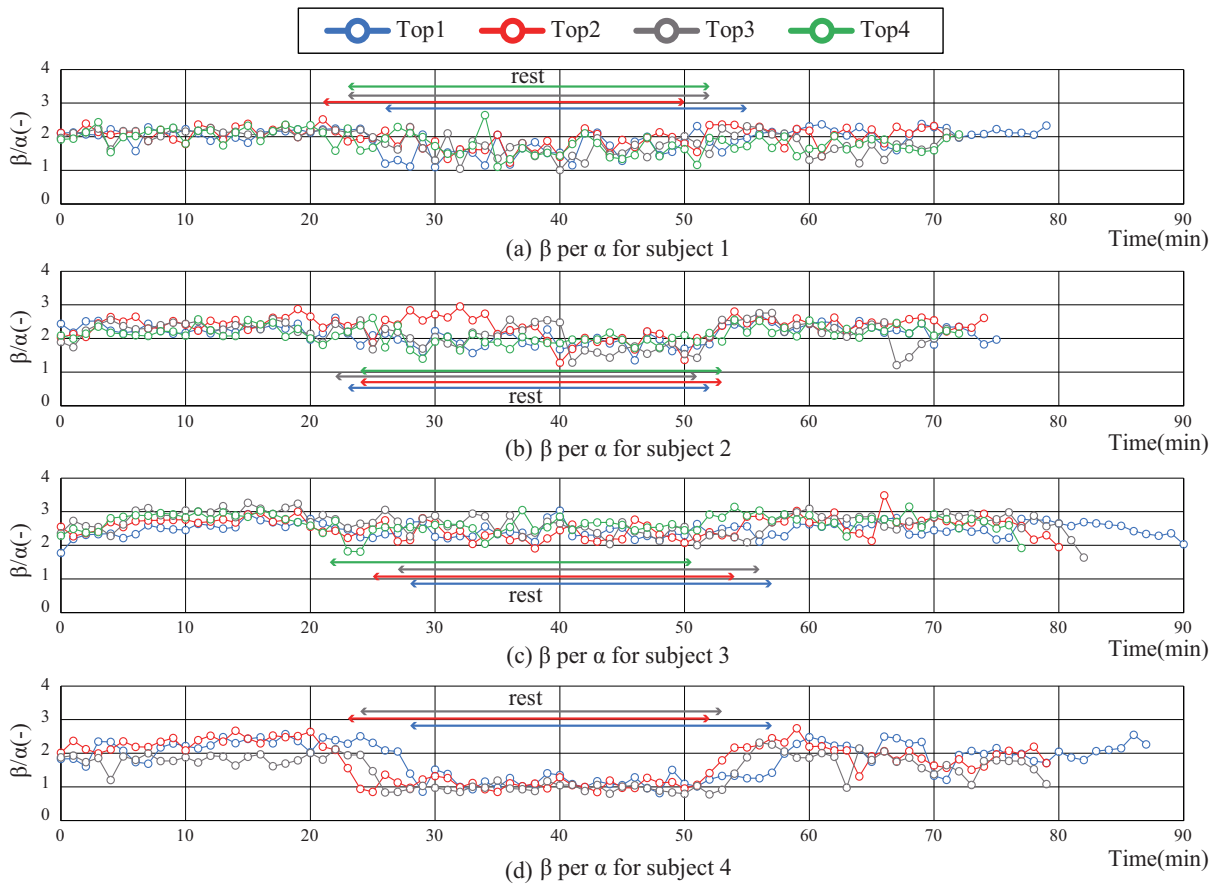


Fig.2 β per α (Top1~Top4)

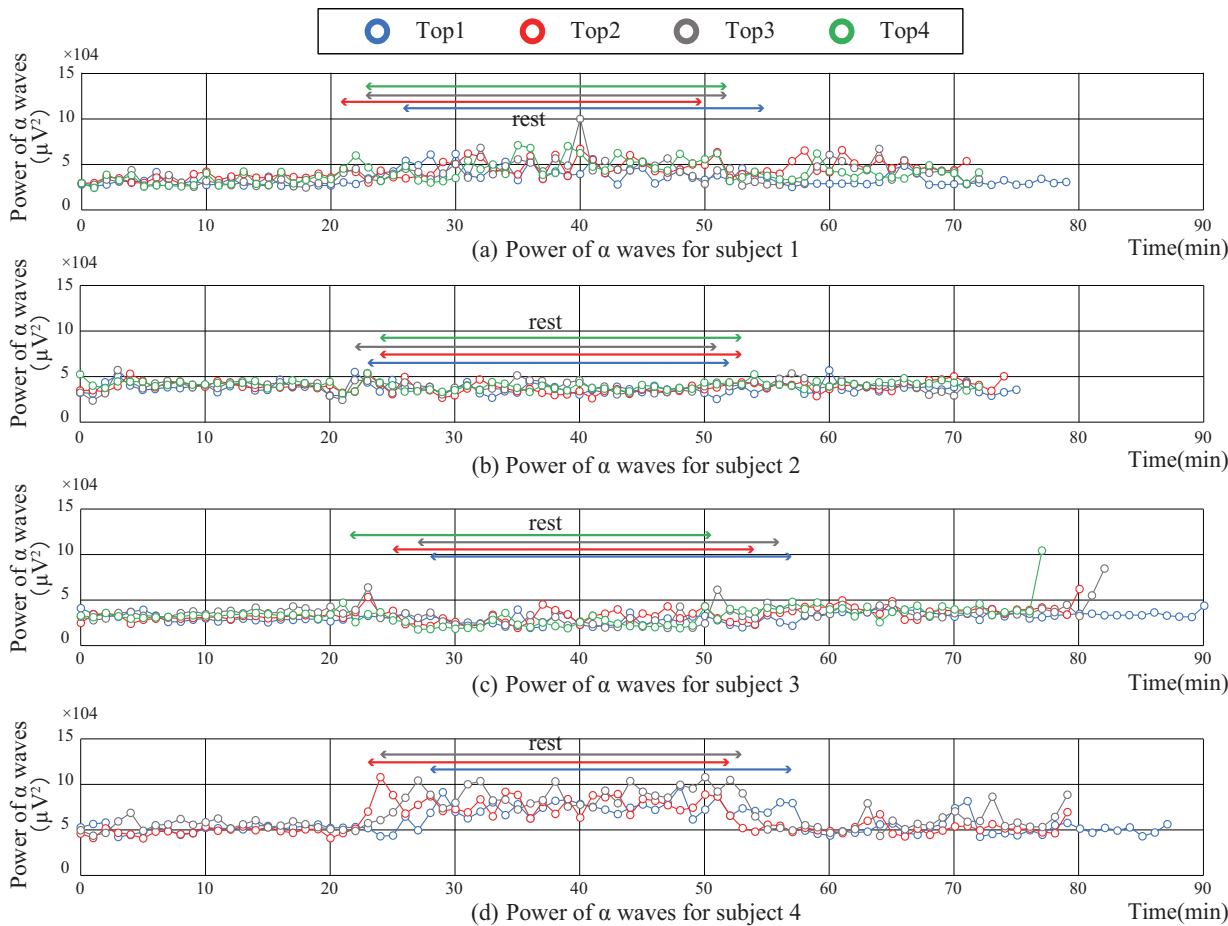


Fig.3 Power of α wave(Top1~Top4)

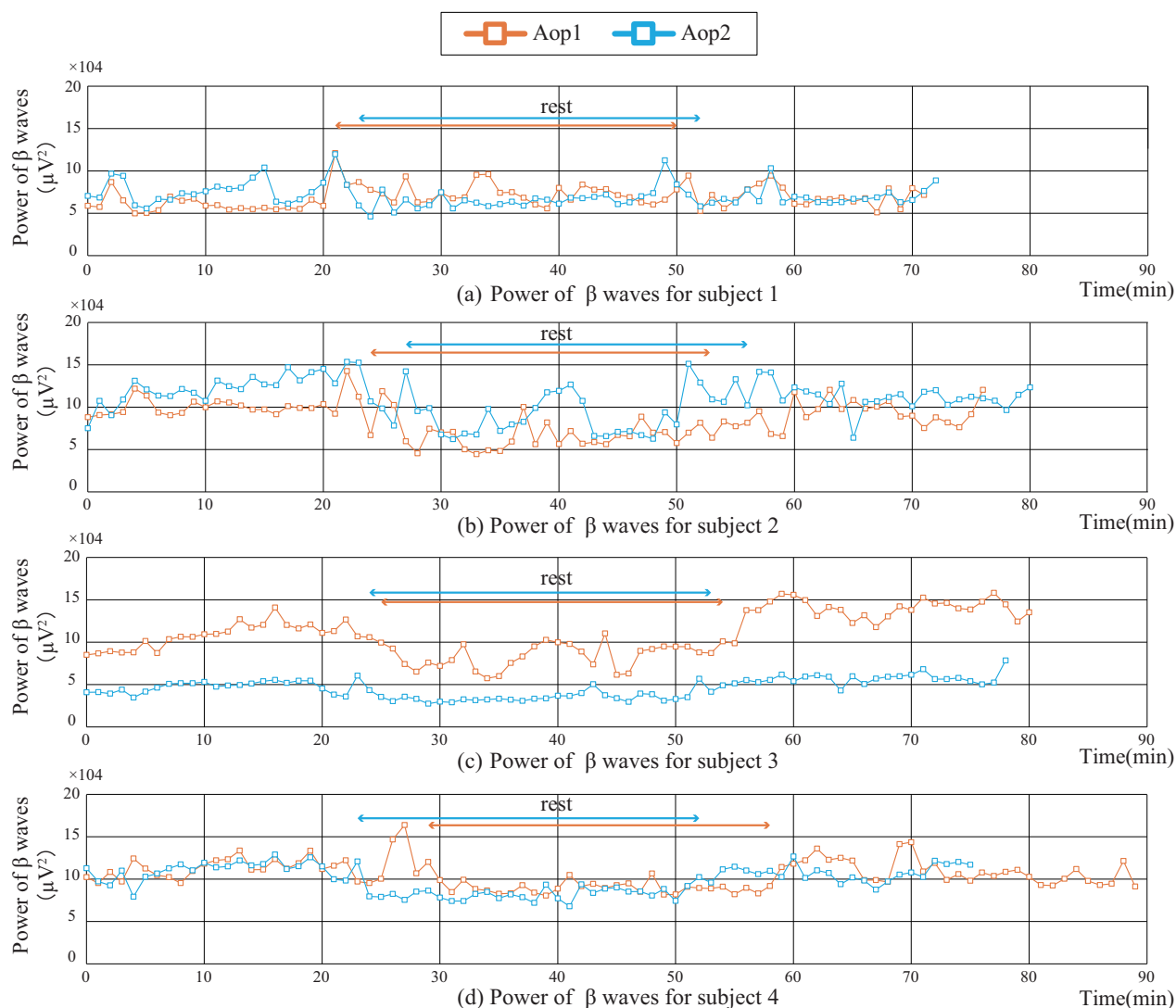
Fig.4 Power of β wave(Acl1~Acl4)

Fig.4(b)～(d)より、被験者2～4は休憩中に β 波のパワー値が低下している。このことから、被験者1はリラックスしても β 波のパワー値が大きく変化しない特徴がある可能性が示された。

3. 心理評価の測定結果と考察

4回の心理評価において、空間の環境要素について、空間の印象について、作業のしやすさについてなどの項目を回答させた。本報では、その中でも各被験者を特徴付ける項目を抜粋して報告する。

Fig.5(a)～(d)に被験者1～4の作業性(A)と集中度(A)及び作業性(B)と集中度(B)の全8条件の回答の平均を示す。(A)はd2テスト後、(B)は生産力テスト後の回答である。Fig.5より、被験者1は作業性と集中度のどちらにおいても(B)の方がしやすいという回答をしており、被験者1にとって、素早く情報処理を行うd2テストよりもじっくり考える生産力テストの方が取り組みやすい可能性が示された。

Fig.6に被験者3の条件Top1～4の音環境の快不快度の回答を示す。グラフより、早い時期に実験を行った

条件Top1から遅い時期に実験を行った条件Top4にかけて徐々に評価が不快な方向に寄っていることが分かる。また、音に関して感じたことの自由記述より、全4回いずれも近隣の工事に伴う騒音を感じていたようだが、回を重ねるごとに「静かにしてほしい」等の記述も見受けられる。このことから、被験者3は、最初はあまり気にならなかった音でも徐々に気になって不快に感じていく傾向がある可能性が示された。

Fig.7(a)～(d)に被験者ごとの全実験日程の1分間のPMVの経時変化を、Fig.8(a)～(d)に温冷感の推移を示す。なお、met値は1.0、clo値は服装の着脱に応じて適宜変化している。Fig.7より、全体を通して条件TopにおいてPMVは低く、これは開口部の多さが関係していると考えられる。Fig.7(a)(b)、Fig.8(a)(b)より、被験者1と被験者2に関してはPMVの変動と温冷感の変動が大方一致していると考えられる。Fig.8(c)(d)より、被験者3と被験者4は1回の実験の中で、温冷感の評価が徐々に寒い側に寄っていく傾向が見られた。Fig.7(c)、Fig.8(c)より、PMVの値は条件Aop1が最も低いように見えるが、温冷感に着目すると、Aop1ほどPMVが低くない

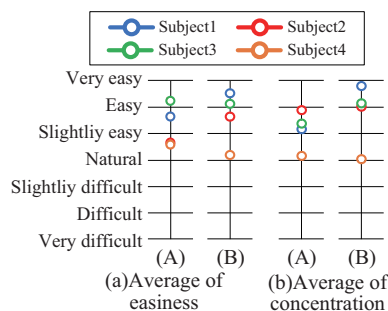


Fig.5 Easiness and concentration of tasks

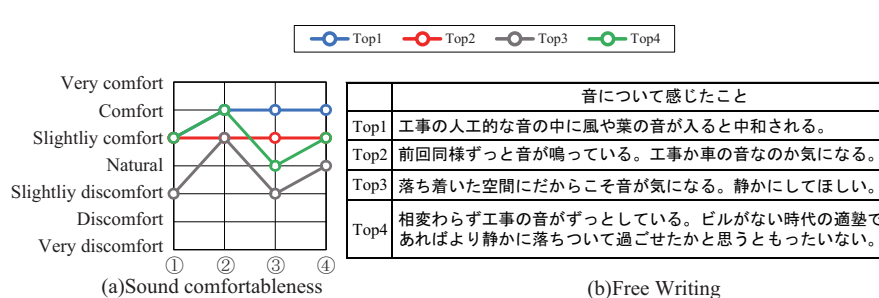


Fig.6 Result of subjective evaluation about sound(subject3)

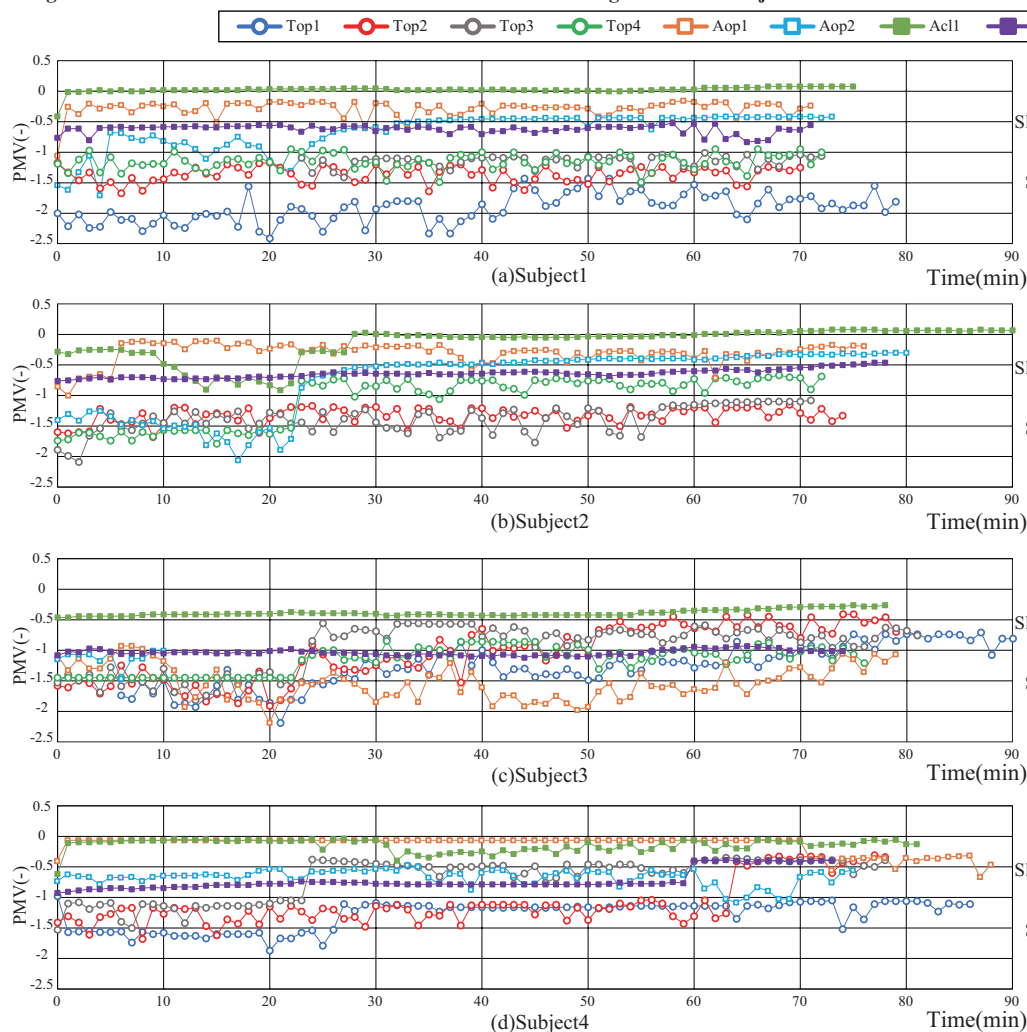


Fig.7 Predicted mean vote

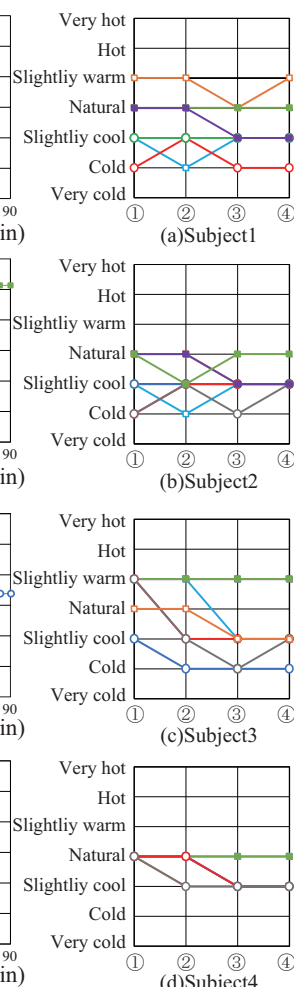


Fig.8 Thermal sensation

条件 Top1 や条件 Top3 でより寒い側の回答となっている。Fig.8(d) より、被験者 4 は温冷感の評価の幅が狭く、温冷感に対する許容度が高い可能性が考えられる。

おわりに

本報では、脳波と心理評価における被験者ごとの傾向や特徴について報告した。脳波においては、全体的に休憩時に β / α は低下したが、その要因は被験者によって異なっていた。心理評価においては、各被験者の性格や感じ方で特徴のある項目も異なる結果となった。したがって、一般化を進める上では、個人差に注意を払いながら進めていく必要がある。

次報にて、住宅や窓開閉条件による実験結果の違いについて報告する。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。

—謝辞—

本研究は、株式会社大林組との共同研究であり、関係各位に謝意を表します。

本研究にて実験施設を提供頂いた適塾、適塾記念センター及び大林組花壇寮関係者各位に謝意を表します。

—参考文献—

- 1) 長瀬ら：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 1) 被験者実験概要と実験結果, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表論文集, 2023.3 (掲載予定)
- 2) 平井ら：簡易脳波計による学習時の思考と記憶の比較分析, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, pp.1441-1446, 2013.7

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

Stay Comfort in RC Apartment Building and Traditional Townhouses during Natural Ventilation

(Part3) Psychological and Physiological Considerations for Environmental Differences

○大野 成陽 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
 崔 ナレ (大阪大学) 竹村 明久 (摂南大学)
 小林 知広 (大阪大学) 宗 菜津未 (大阪大学)
 長續 仁志 (大林組)

Shigeharu OHNO^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Narae CHOI^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*2}

Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Natsumi SO^{*1} Hitoshi NAGATSUGU^{*3}

^{*1} Osaka University ^{*2} Setsunan University ^{*3} Obayashi Corporation

With the recent spread of novel coronavirus infections, natural ventilation has been the focus of much attention. However, few studies have investigated the comfort in the rooms of houses during natural ventilation from the aspect of physiological quantities. In addition, it is thought that there are differences in comfort between natural ventilation in general apartment building and traditional townhouse, where occupants can strongly feel the nature outside.

In this study, we conducted a subjective experiment to clarify the comfort of occupants in a naturally ventilated house in the view of a psychological and physiological point. In this paper, we report on the effects on the subjects of environmental differences such as housing and window opening/closing conditions.

はじめに

昨今の新型コロナウイルス感染症の感染拡大に伴い、自然換気に注目が集まっている。しかし、自然換気時の住宅室内における居心地について生理量の側面から研究しているものは少ない。また、一般的な集合住宅と、外部の自然を強く感じることのできる伝統的町家建築における自然換気では、居心地にも違いがあると考えられる。

本研究では、自然換気時の住宅室内における在室者の居心地を心理・生理学的な観点から解明することを目的として被験者実験を実施した。本報では、住宅及び窓開閉条件の違いが被験者に与える影響について報告する。

1. 実験概要

実験概要は前報¹⁾で述べた通りである。実験スケジュールを Fig. 1 に示す。

2. 測定項目

測定項目は前報¹⁾で述べた通りである。

3. 脳波測定結果

被験者 1、2、3、4 の国際式 10-20 法に基づいた測定点、後頭部の O1、O2 において測定された β / α の平均を作業 A 時、休憩時、作業 B 時において平均した状態別平均を、Fig. 2、Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5 に示す。心身ともに落ち着いた状態及び閉眼時の脳波を α 波 (8 ~ 13 Hz

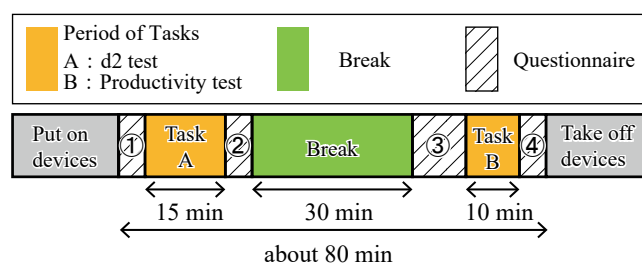


Fig. 1 Timetable of the Experiment

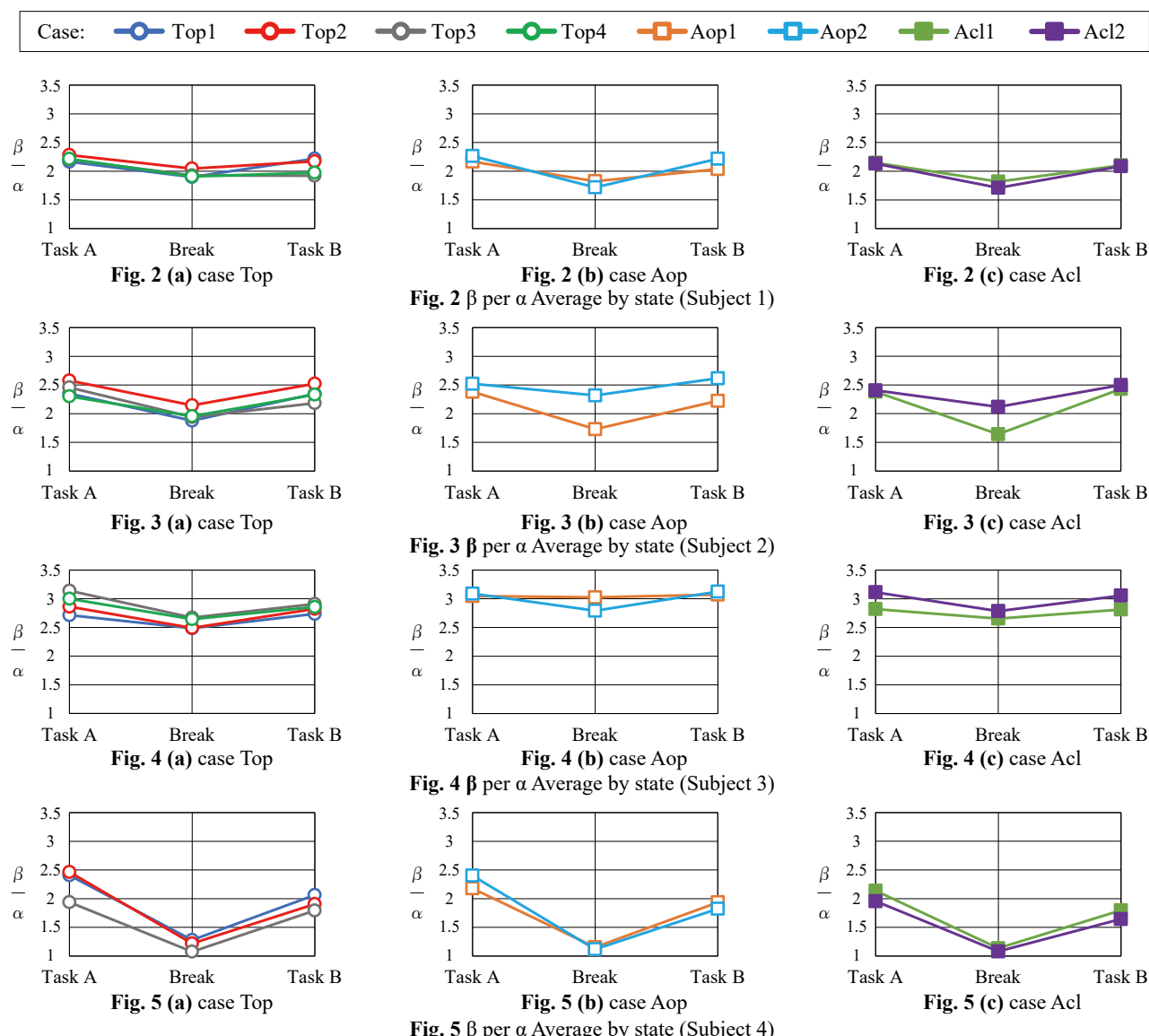
のパワーの平均値)、緊張・興奮時に出現する脳波を β 波 (13 ~ 30 Hz) と定める²⁾。

3.1 被験者 1 の傾向

殆どの条件において作業 A 時に比べて休憩時に β / α が低下する傾向が見られた。条件 Top では全ての条件で減少量が安定しているが、条件 Aop では Aop1 であまり減少しておらず、条件ごとに変動していた。減少量を比べた時、先述した通り安定はしていないが条件 Aop でより休憩時に β / α が低下している傾向が見られた。従って住宅の違いにより、町家条件では安定したリラクセスができ、集合住宅条件では安定はしないが窓を開放することでよりリラクセスできる可能性が示唆された。

3.2 被験者 2 の傾向

全条件で休憩時に β / α が減少する傾向が見られた。条件 Top では安定して減少しているが、条件 Aop、Acl には減少量が安定していない。従って、住宅の違いによる影響により町家条件で安定してリラクセスできた可能性が示唆された。しかし、条件 Aop、Acl において安



定はしていないが、条件 Top よりも減少している条件があるため、被験者 2 は場合によっては集合住宅条件でよりリラックスできる可能性が示唆された。

3.3 被験者 3 の傾向

全条件において同程度の値で、殆どの条件で休憩時に作業 A 時よりも減少していた。しかし、条件 Top である程度安定して減少しているのに対して、条件 Acl では比較的減少量が小さい。また、条件 Aop では条件 Aop2 ではある程度減少しているものの条件 Aop1 では殆ど低下しておらず、条件間で差が生まれていた。従って住宅の違いにより町家条件では安定してリラックスができ、窓開閉条件により自然換気時には安定しなかったがよりリラックスできる可能性が示唆された。

3.4 被験者 4 の傾向

全条件で作業 A 時から休憩時にかけて β / α が減少する傾向が見られた。しかし、条件 Acl で条件 Top、Aop に比べて比較的減少量が小さい傾向が見られた。従って条件 Top、Aop では条件 Acl に比べて休憩時にリラックスしていた可能性が示唆された。

3.5 全体の傾向

個人差が多く見られたが、被験者 1、被験者 2、被験者 3 において、条件 Top で作業 A 時から休憩時にかけの減少量が安定しているのに対して、条件 Aop、Acl で比較的不安定、もしくは減少値が小さい傾向が見られたため、住宅の違いによる影響で条件 Top で休憩時により安定してリラックスできる可能性が示唆された。また、被験者 1 と被験者 4 において休憩時の減少値が条件 Acl に比べて条件 Aop でより減少している傾向が見られたため、窓開閉条件による影響で条件 Aop においてより休憩時にリラックスできる可能性が示唆された。

4. 心理評価

被験者 1、2、3、4 における自然光による明るさ、気流感、自然を感じる程度、周囲の印象（開放性）の結果を Fig. 6、Fig. 7、Fig. 8、Fig. 9 に示す。

4.1 被験者 1 の傾向

Fig. 6 より、条件 Top に比べて条件 Aop、Acl でより自然光による明るさを感じていた。Fig. 7 より、気

流感において条件 Acl で感じる程度が低く、次に条件 Aop、条件 Top でより気流を感じていた。**Fig. 8** より、条件 Aop、Acl に比べて条件 Top でより自然を感じていた。**Fig. 9** より、条件 Top で開放的に感じており、条件 Aop、Acl では条件 Aop で比較的開放的に感じていた。

4.2 被験者 2 の傾向

Fig. 6 より、条件 Top に比べて比較的 condition Aop、Acl で自然光による明るさを感じていた。**Fig. 7** より、条件 Acl に比べて条件 Top、Aop でより気流を感じていた。**Fig. 8** より、条件間に大きな差は見られないものの、条件 Top1 でより自然を感じていた。**Fig. 9** より、条件 Top でより開放的と回答しており、条件 Aop、Acl では、条件 Aop で比較的開放的と回答をしていた。

4.3 被験者 3 の傾向

Fig. 6 より、条件間に大きな差は見られないものの、条件 Aop、Acl で比較的 natural light を感じていた。**Fig. 7** より、条件 Acl に比べて条件 Top、Aop で気流を感じていた。**Fig. 8** より、条件 Aop、Acl に比べて条件 Top でより自然を感じていた。**Fig. 9** より、条件 Acl で閉鎖的に感じており、条件 Top、条件 Aop では条件 Aop でより開放的に感じていた。

4.4 被験者 4 の傾向

Fig. 6 より、条件 Acl に比べて条件 Top、Aop で比較的自然光を感じていた。**Fig. 7** より、条件 Acl に比べて条件 Top、Aop で気流を感じていた。**Fig. 8** より、条件間に大きな差は見られないものの、条件 Top1 で自然を感じていた。**Fig. 9** より、条件 Top で開放的に感じており、条件 Aop、Acl では条件 Aop でより開放的に感じていた。

4.5 全体の傾向

個人差が大きく見られたものの、住宅の違いにより、町家条件ではより自然を感じることができ、より開放的に感じる可能性が示唆され、集合住宅条件では自然光をより感じる可能性が示唆された。また、自然換気時には気流を感じ、より開放的に感じる可能性が示唆された。

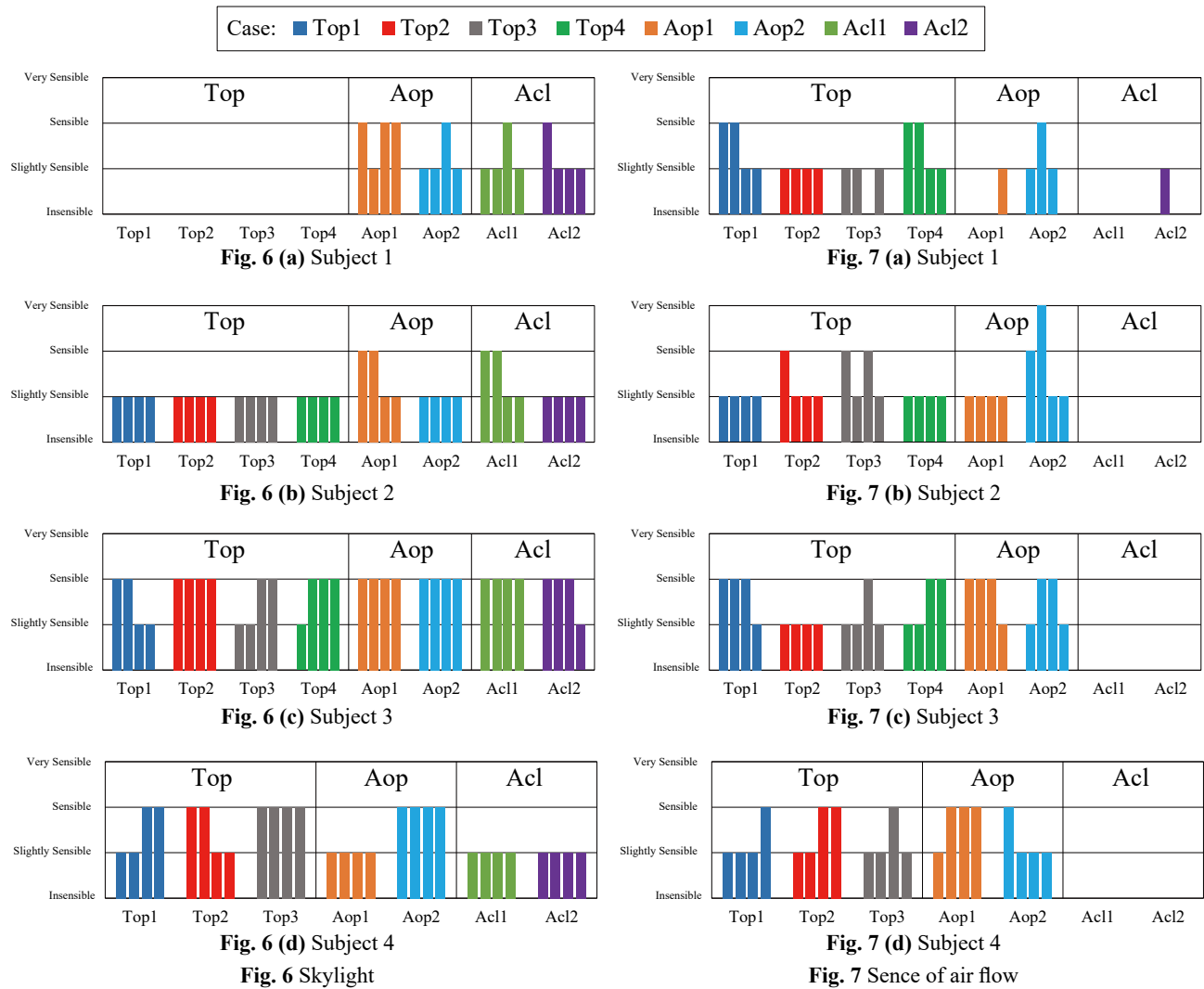
5. 脳波と心理評価の関係

5.1 被験者 1 の傾向

Fig. 2、**Fig. 6**、**Fig. 7** より、全条件において自然光、気流を強く感じている条件 Aop2 で他条件に比べて休憩時に β / α が低下していた。

5.2 被験者 2 の傾向

Fig. 3、**Fig. 6** より、条件 Aop、Acl において自然光



Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 6 (b) Subject 2

Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 7 (b) Subject 2

Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 6 (c) Subject 3

Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 7 (c) Subject 3

Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 6 (d) Subject 4

Very Sensible

Sensible

Slightly Sensible

Insensible

Top

Aop

Acl

Top1

Top2

Top3

Top4

Aop1

Aop2

Acl1

Acl2

Fig. 7 (d) Subject 4

Fig. 6 Skylight

Fig. 7 Sence of air flow

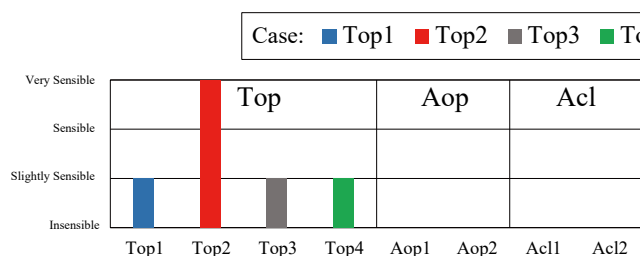


Fig. 8 (a) Subject 1

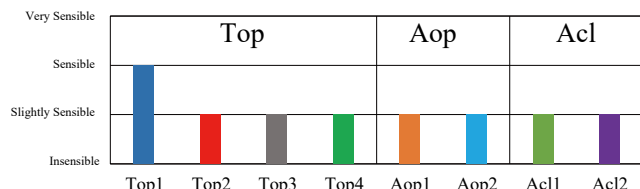


Fig. 8 (b) Subject 2

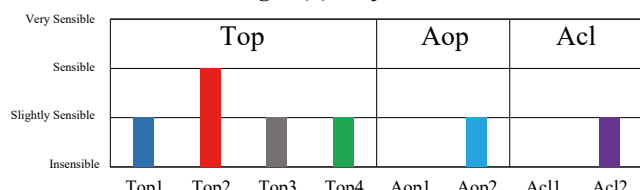


Fig. 8 (c) Subject 3

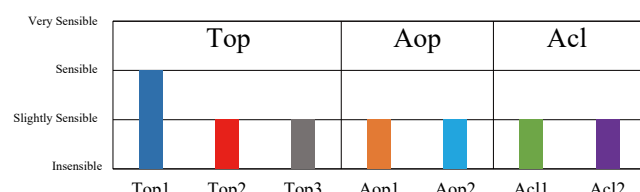


Fig. 8 (d) Subject 4

Fig. 8 Sense of Nature

の明るさをより感じると回答した条件 Aop1、Acl1 で休憩時に β / α が低下していた。条件 Top に比べ条件 Aop、Acl で自然光の明るさを感じる傾向が見られた。

5.3 被験者 3 の傾向

Fig. 4、Fig. 8 より、条件 Aop、Acl において、自然をより感じると回答した条件 Aop2、Acl2 で休憩時に β / α が低下していた。また、自然を感じる程度において「やや感じる」以上を安定して回答した条件 Top では、休憩時に β / α が安定して低下していた。

5.4 被験者 4 の傾向

Fig. 5、Fig. 9 より、条件 Aop、Acl において、周囲の印象（開放性）の評価が比較的開放的であった条件 Aop2、Acl1 において休憩時に β / α が低下していた。また、Fig. 9 より条件 Aop、Acl に比べ条件 Top で周囲の印象（開放性）の評価がより開放的であった。

5.5 全体の傾向

個人差が多く見られたが、住宅の違いにより、町家条件では印象の評価が向上することで、集合住宅条件では自然光による明るさを感じることで休憩によりリラックスできる可能性が示唆された。また、窓開閉条件による影響で自然換気時に気流を感じ、周囲が開放的な印象となることで、よりリラックスできる可能性が示された。

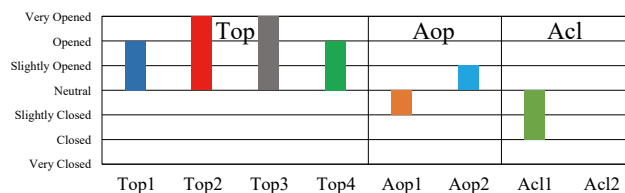


Fig. 9 (a) Subject 1

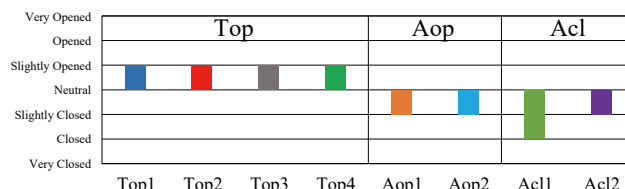


Fig. 9 (b) Subject 2

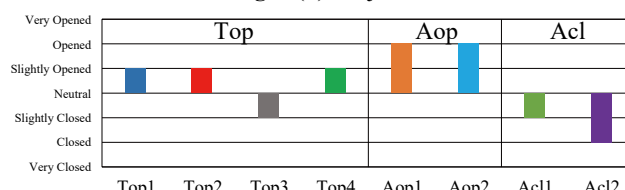


Fig. 9 (c) Subject 3

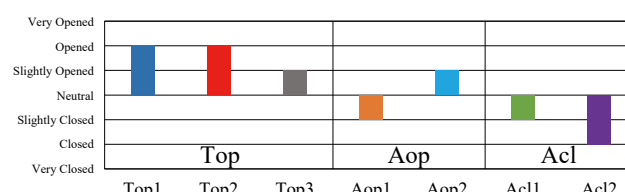


Fig. 9 (d) Subject 4

Fig. 9 Openness

6. おわりに

本報では自然換気時の居心地について、住宅及び窓開閉条件の違いが被験者に与える影響を心理・生理学的な観点から考察した。結果より、伝統的町家では周囲の印象評価が向上し、また、自然を感じられることでよりリラックスできる可能性が示唆された。一般的な集合住宅では自然光を感じられることでよりリラックスできるが、伝統的町家に比べてリラックス度が安定しない可能性が示された。また、自然換気を行うことで気流を感じ、周囲が開放的な印象となることでよりリラックスできる可能性が明らかになった。今後はより詳しくデータを解析し、更に自然換気時の居心地を心理・生理学的な観点から解明していく予定である。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。

—謝辞—

本研究は、株式会社大林組との共同研究であり、関係各位に謝意を表します。

本研究にて実験施設を提供頂いた適塾、適塾記念センター及び大林組花壇寮関係者各位に謝意を表します。

—参考文献—

- 1) 長瀬ら：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 1）被験者実験概要と実験結果，令和 5 年度（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，掲載予定
- 2) 仁科，中本：観葉植物，花，香りが人間に及ぼす生理・心理的効果の脳波および SD 法による解析，日本建築学会計画系論文集，1998 年 63 巻 509 号 p. 71-75

休憩空間における室内環境変化が在室者のリラックス・リフレッシュ効果に与える影響
（その 5）環境選択権の有無が在室者の心理・生理反応と知的生産性に及ぼす影響

Influence of Indoor Environment Changes in Relaxation Space
on Relaxation and Refreshment Effects of Occupants
(Part 5) Option of Indoor Environmental
on Psychological and Physiological Responses and Productivity

○藤江 智暉（大阪大学） 山中 俊夫（大阪大学）
崔 ナレ（大阪大学） 竹村 明久（摂南大学）
小林 知広（大阪大学）

Tomoki FUJIE*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Narae CHOI*¹
Akihisa TAKEMURA*² Tomohiro KOBAYASHI*¹
*¹ Osaka University *² Setsunan University

Recently, the importance of human health and well-being has been emphasized, as in the case of the WELL Building Standard. In office design, the environmental design of break spaces is attracting attention because taking effective break can enhance workplace productivity. This study aims to investigate the option of the change in the indoor environment during break on occupants' performance. Both the psychological and physiological responses of panel were observed under five different conditions of indoor break environment and the responses without break were also examined for comparison.

はじめに

近年、WELL 認証の様に人間の健康面が重要視される傾向が続き、オフィスでの休憩空間の必要性が増している。休憩空間の室内環境に関しては、既に研究¹⁾が行われているが、休憩空間での環境選択権が利用者の心理・生理や作業効率に及ぼす影響についてはまだ解明されていない。本研究は、在室者の快適性・生産性が向上する休憩環境の提案を目的とし、本実験では、休憩空間の照明・におい・気流環境に着目し、その複合環境などが利用者の心理・生理反応および休憩後の作業効率に与える影響の検討を目的とする。前報²⁾では、休憩終了時に、リフレッシュ度向上を目的とした環境変化を行い、休憩中の環境変化の有無が利用者の心理・生理・知的生産性に与える影響を調べた。しかし、実験者側で設定した室

内環境で実験を行ったため、急な環境変化を不快に感じる利用者也見られた。そこで、本報では利用者が休憩時の環境を設定できる条件を加え実験を行い、環境選択権の有無が与える影響について調べた結果を報告する。

1. 実験概要

実験は本学学内の実験室で行った（Fig. 1）。パネルには本学学生の男性 6 名（19～22 歳）を採用した。実験スケジュールを Fig. 2 に示す。本実験では 2 回の作業の間に 10 分間の休憩時間を設け、休憩空間のにおい・照明・気流環境の変化が休憩中のパネルの心理・生理反応に及ぼす影響を調べた。実験条件を Table. 1 に示す。リラックスすることを目的で設定した環境で 10 分間過ごす条件を Relax 条件とし、室内環境条件を実験者側で決め

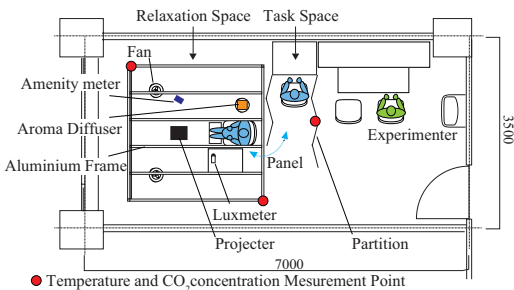


Fig. 1 Experimental room plan

Table. 1 Environmental conditions of each phase

	Relax				Refresh			
	Illuminance(lx)	Color Temperature(K)	Wind(m/s)	Odor	Illuminance(lx)	Color Temperature(K)	Wind(m/s)	Odor
Task(1)(2)(3)								
Relax-fix(Rf)	100	3500	Calm	No Aroma				
Relax-control(Rc)	Environment Control							
Relax-fix&Refresh-fix (Rf&Ff)	100	3500	Calm	No Aroma	3700	5700	1.06	Peppermint
Relax-fix&Refresh-control (Rf&Fc)	100	3500	Calm	No Aroma	Environment Control			
Relax-control&Refresh-control (Rc&Fc)	Environment Control				Environment Control			

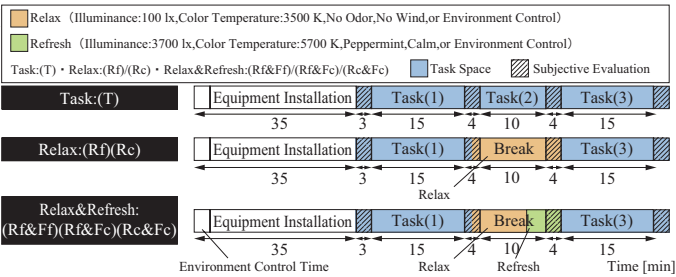


Fig. 2 Experimental process of each case

Table. 2 List of measurement items

Contents	Item
Environment	Temperature・Humidity・CO ₂ concentration
Psychological Reaction	Relax Level・Refresh Level・Fatigue Level
	Two-Dimensional Mood Scale (Stability・Activity)
	Odor Intensity・Odor Pleasantness Level・Thermal Comfort
	Brightness・Glare・Wind comfort hedonics
Physiological Reaction	Indoor environment comfort hedonics
	Electroencephalogram
Task	Achievement Rate・Error Rate of d2 test

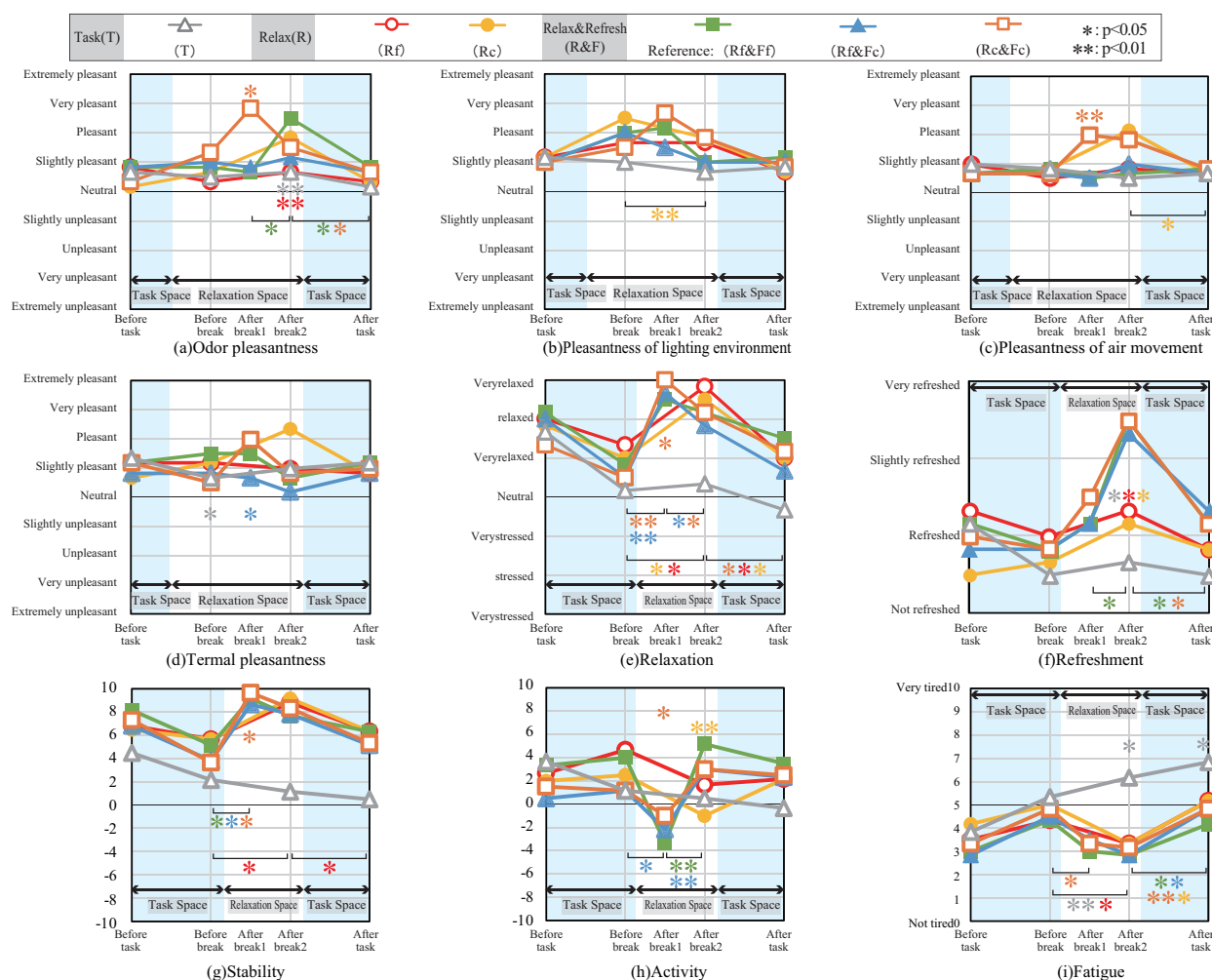


Fig. 3 Result of subjective evaluation (mean value of all panels)

た条件を Rf (Relax 固定)、パネルが選択した条件を Rc (Relax 選択) とする。10 分間の休憩の間、最初 8 分はリラックスするが、最後の 2 分はリフレッシュし、覚醒した状態で次の作業に入れるように環境を変化させた条件を Relax & Refresh 条件とする。全ての環境を実験者側で決めた条件 (Relax 固定 & Refresh 固定) を Rf & Fc とし、パネルが 2 分間の Refresh 時の環境のみを選択できた条件 (Relax 固定 & Refresh 選択) を Rf & Fc、両方ともパネルが選択した環境に設定した条件 (Relax 選択 & Refresh 選択) を Rc & Fc とする。また、比較のために、10 分間の休憩なしで作業を続けた作業条件 (条件 T) を追加し、計 6 条件で実験を行った。実験開始後、パネルは休憩空間にて室内環境を 10 分間調整しながら、Rc 及び Fc の環境条件を設定する。その後、作業空間に移動し、生理反応測定機器を装着した後、1 回目の心理評価を行った。合計 15 分間作業 (作業 (1)) を実施した後、2 回目の心理評価を行い、休憩空間で 10 分間休憩を行った。休憩終了後、3 回目の心理評価を実施した。ただし、2 分間のリフレッシュ休憩が入っている条件では、リラックス休憩時を思い出した心理評価も実施した。

実験室に関しては、日光の影響を避けるため、窓は遮光フィルムで覆った。作業空間は机上面照度を 750lx、

色温度 3500K に統一し、実験者が見えないようパーティションで区切った。休憩空間には照度と色温度が変更可能な電球を取り付けた。リラックス状態の休憩環境は顔面照度 100lx、色温度 3500K、におい噴霧無し、気流無しの条件で統一した。心理生理反応の測定項目を Table. 2 に示す。生理反応として、脳波 ((株) ミュキ技研, MP208) を測定し、心理反応としてアンケートを回答させた。脳波は国際法 10-20 法に従い、O1.O2(後頭部)、Fp1.Fp2(前頭部) を測定した。

2. 実験結果と考察

2.1 心理量測定結果と考察

心理量の結果を、Fig. 3 に示す。室内環境の快不快度やおいの快不快度 (Fig. 3(a) ~ (d)) より、条件 (Rc&Fc) において、リラックス中、リフレッシュ後について高い評価が見られた。よって、休憩中の環境を選択することが、固定された環境で過ごす場合よりも、休憩空間の室内環境を快適に感じる可能性が示された。また、リフレッシュしやすさ (Fig. 3(f)) より、条件 (Rf&Ff) については休憩前から作業後にかけて有意差がみられ、休憩中に大きく環境を変化させることで休憩中十分にリフレッシュできる可能性が示された。リラックス度、リフレッシュ度 (Fig. 3(e), (f)) について条件 (Rc&Fc) では、リ

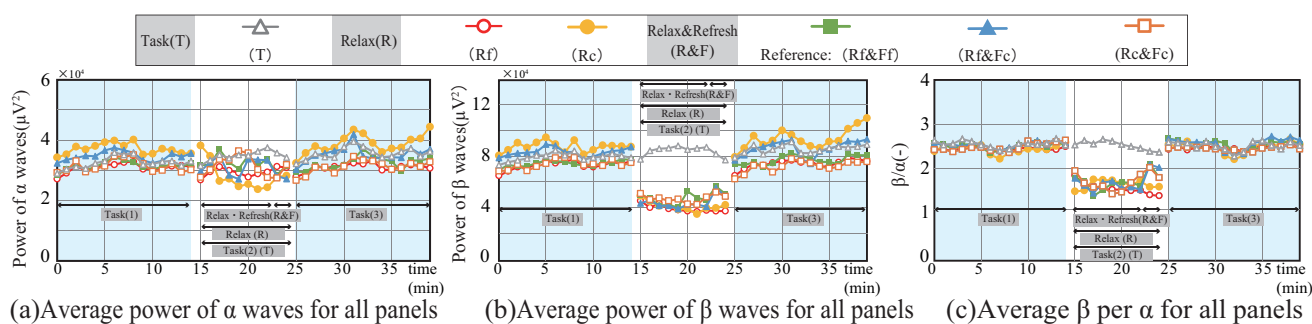


Fig. 4 Average EEG of O for all panels

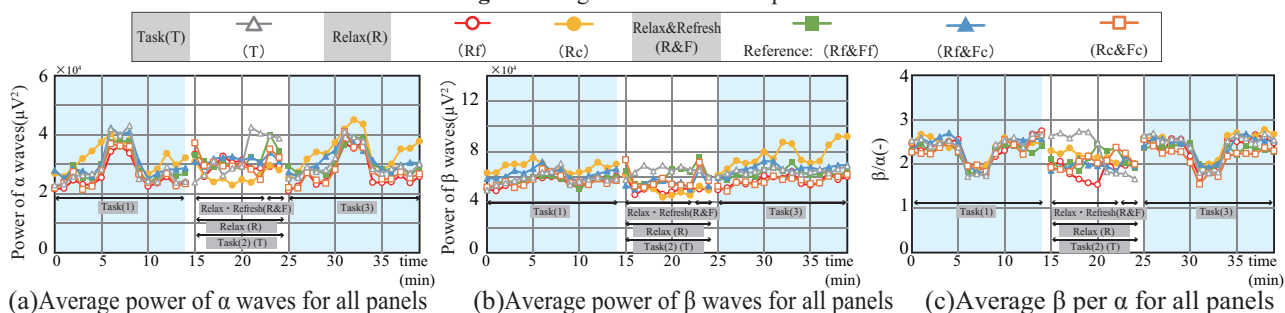


Fig. 5 Average EEG of Fp for all panels

ラックス中、リフレッシュ後において高評価がみられた。特にリラクセス度では有意差も見られており、安定度 (Fig. 3(g)) についても、同様に条件 (Rc&Fc) において有意に高い評価が見られた。よって、休憩中の環境を選択することが休憩空間で利用者をリラクセスさせやすくなる可能性が示された。活性度 (Fig. 3(h)) について、条件 (Rf&Ff)、(Rf&Fc) では活性度がリラクセスからリフレッシュにかけて有意に上昇しており、休憩終了時に利用者がリフレッシュできるように室内環境を変化させることによって利用者が活性化していた可能性が示された。疲労度 (Fig. 3(i)) について、条件 (T) では、他条件と比較して実験中有意に値が高いことから休憩することが作業後の疲労度の軽減につながる可能性が示された。

2.2 生理量測定結果と考察

脳波はFFTを施して α 波 (8 ~ 13 Hz) と β 波 (13 ~ 30 Hz) のパワー値 (μV^2)、 α 波および β 波のパワー値を α 波と β 波、 θ 波 (4 ~ 8 Hz)、 δ 波 (0.5 ~ 4 Hz) それぞれのパワー値の総和で割った α 波含有率、 β 波含有率、 β 波のパワー値を α 波のパワー値で割った β/α を求めた。なお、作業課題時などの集中が必要となときに β/α は増加するとされる。

考察にあたっては、全条件で、作業 (1) の評価はいずれの条件でも環境条件は同じであることから比較対象とせず、作業 (1) 以降の評価のみ条件間比較を行った。

O1・O2の脳波の β/α の平均のパネル平均、 α 波のパワー値のパネル平均、 β 波のパワー値のパネル平均を Fig. 4、それぞれのFp1・Fp2の脳波の平均を Fig. 5に示す。脳波は実験中連続測定 (1000Hz) しており、1分毎に平均した値を示している。プロットは1分間平均を示しており、0 ~ 14点目は作業 (1)、15 ~ 22点目はリラクセス、23 ~ 24点目はリフレッシュ (条件 (Rf)、(Rc))

では15 ~ 24点目はリラクセス、条件 (T) では15 ~ 24点目は作業 (2)、25 ~ 39点目は作業 (3) である。

既往研究と同様に、脳波Oの β/α (Fig. 4(c)) の値がd2テスト時に比べて休憩時では減少しており、パネルは休憩時はリラクセスしていたと考えられる。また、条件 (Rf&Ff)、(Rf&Fc) は条件 (Rf)、(Rc) と比較して、 β/α 、 β 波パワー値 (Fig. 4(b)、(c)) の値がリフレッシュ開始時に上昇しており、室内環境を変化させた影響により、パネルが覚醒状態になっていた可能性が考えられる。一方で、脳波Fpの β/α (Fig. 5(c)) から作業の途中で値が大きく低下していた。また、この原因として α 波パワー値 (Fig. 5(a)) が作業時間中の数独を解いている間上昇していることが認められ、数独作業中に解くことによって前頭部の脳波の α 波パワー値が上昇することが示された。しかし、脳波Oについてはこの現象は見られず、脳波OとFpで異なる結果が得られ、同じ行動でも脳波の測定部位によって異なる反応を示す可能性が分かった。

2.3 作業成績結果と考察

本実験では作業としてd2テストと数独を行った。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、文字の上下の点が合計2つのdの文字に斜線で印をつける。テスト1回の内容は、各行12秒の制限時間で14行続けて実施する。作業 (1)、作業 (2)、作業 (3) における作業時間中のスケジュールは以下の通りである。作業 (1)、(3) ではd2テストを2回解かせた後に、数独を行い、その後d2テストを再度2回解かせた。作業 (2) ではd2テストを1回解かせた後に、数独を行い、その後d2テストを再度1回解かせた。これらを組み合わせ、条件 (T) ではd2テスト10回、条件 (T) 以外ではd2テストを8回実施した。

d2テストは、達成率及びミス率で評価した。達成率

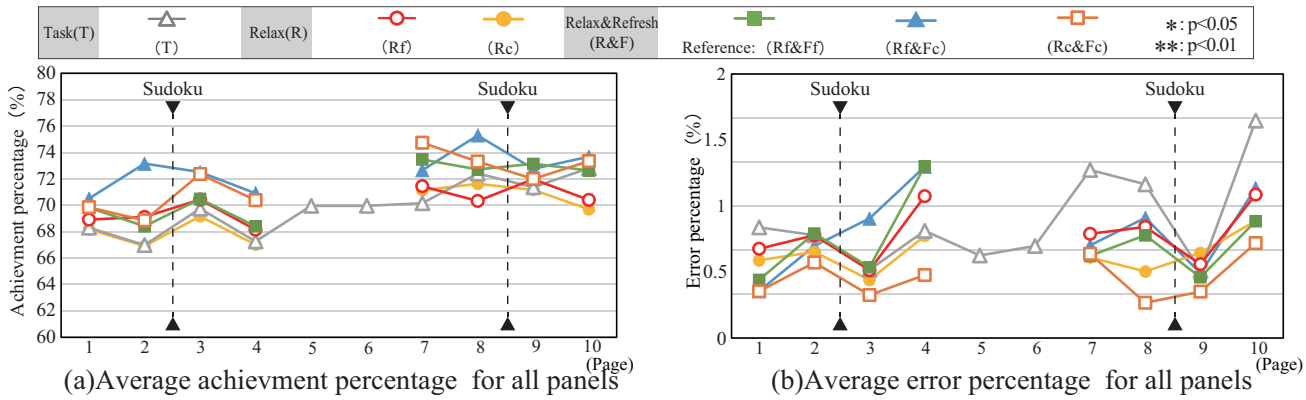


Fig. 6 Average achievement/error percentage for all panel

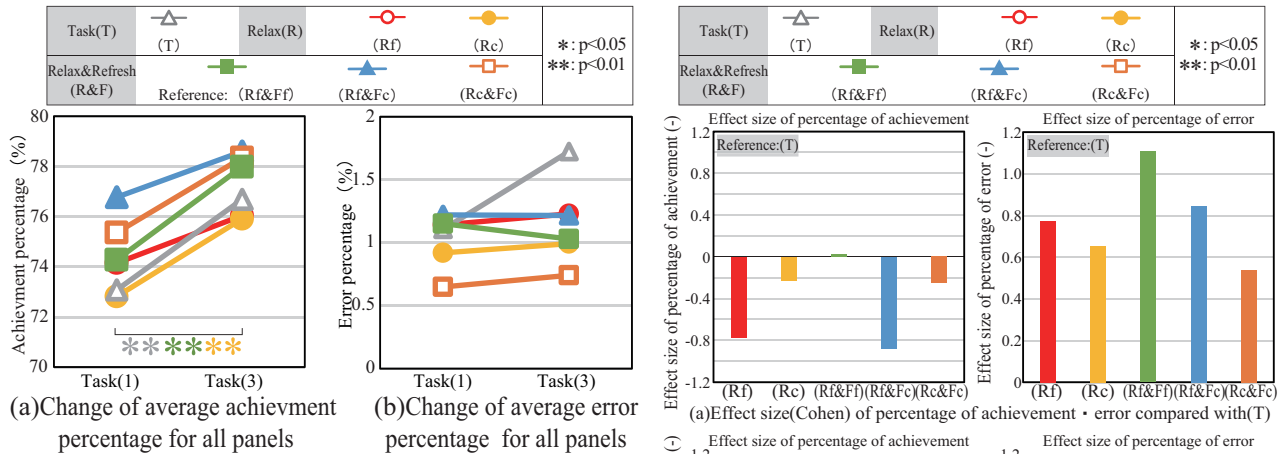


Fig. 7 Change of Average achievement/error percentage for all panel

とは、総回答数を総文字数で割った値、ミス率は間違えた文字数を総回答数で割った値を d2 テスト 1 枚ごとに算出し、各条件で全パネル平均したものを結果として採用した。考察にあたっては、条件 (Rf&Ff) と他の条件間、作業 (1) での d2 テスト 4 回の成績の平均値を前半平均、作業 (2) での d2 テスト 4 回の成績の平均値を後半平均として前半と後半の平均の間で t 検定を行った。

Fig. 6 に作業成績として d2 テスト 8 回 (条件 (Rf)(Rc) (Rf&Ff)(Rf&Fc)(Rc&Fc))、または 10 回 (条件 (T)) の達成率、ミス率を示す。また、達成率とミス率の作業前半の平均値と作業後半の平均値の比較を行った結果を Fig. 7 に示す。達成率 (Fig. 7(a)) では、作業 (1) と作業 (3) について、条件 (T)、(Rc)、(Rf&Ff) では有意に達成率が上昇していた。一方で、ミス率 (Fig. 7(b)) では条件 (T) について、他条件と比べて上昇しており、作業の合間に休憩しないことが作業のミス率に影響する可能性が示された。達成率とミス率の前後半平均の比率について条件 (T)、条件 (Rf&Ff) を基準にして算出した各条件の効果量の結果を Fig. 8 に示す。効果量とは効果の大きさを統計的に表す指標で、帰無仮説が正しくない程度を量的に表している。本研究では、作業成績に対する作業の有無と、環境選択権の有無の差を検討するため、群の平均値の差を標準化した効果量である Cohen の d を用いた。条件 (T) を基準にしたミス率の効果量 (Fig. 8(a)) では全条件で一定の効果量がみられ、休憩することがミス率

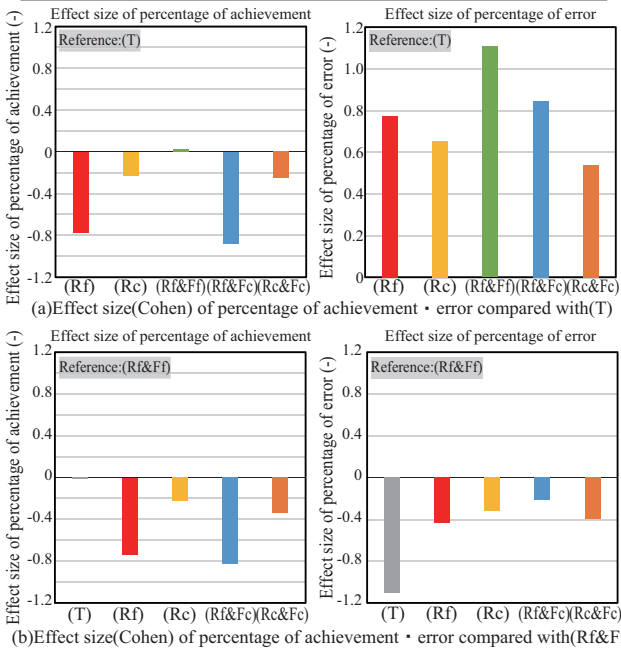


Fig. 8 Effect size (Cohen) of percentage of achievement and error

の抑制に影響する可能性が示された。また、条件 (Rf&Ff) を基準にした達成率・ミス率の効果量 (Fig. 8(b)) では全条件である程度の負の効果量が認められ、休憩中の環境を選択することや、休憩中の環境を変化させることが作業成績に与える影響は大きくないことが示された。

3. おわりに

本報では作業間の休憩中の環境選択権の有無による生理反応・作業成績への影響について報告した。休憩中において・照明・気流環境の選択がパネルに心理的に良い影響を与える可能性が示された。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。

【参考文献】

- 1) 伊藤稔: 休憩時の照明環境がリラックス度に与える影響の検証, 同志社大学ハリス理化学研究報告 59(4), pp.211-216, 2019,1
- 2) 藤江ら: 休憩空間における室内環境変化が在室者のリラックス・リフレッシュ効果に与える影響 (その 4) 照明・気流・において環境の変化時の生理反応及び知的生産性, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集 ,pp.17-20, 2022.9

ペアリング消臭試行における想起するにおい名に関する研究

Study on Conjuring Name of Odor in Case of Pairing Deodorization Trial

○ 竹村 明久（摂南大学） 木野元 俊介（摂南大学）

Akihisa TAKEMURA Shunsuke KINOMOTO
Setsunan University

There is significantly less knowledge about pairing deodorization method, which is a method for improving the comfort of the malodor by adding chemical substances so that the sniffers perceive it as a different smell. We conducted the experiment that the thirty participants sniffed three malodors and nine mixed odors and so on. It was investigated what smells the participants judged to be, and consequently, was revealed there was slightly relationship between the odor impression and the pairing effect, and the part of the mechanism for recognizing participants' odor sources.

1. はじめに

ペアリング消臭は変調法¹⁾とも呼ばれ、悪臭成分に異なるにおい成分を付加して総合的に異なるにおいであると認識させて不快感を改善する手法である。この手法は、悪臭除去を伴わない点がマスキング消臭と同一だが、悪臭を覆う高濃度での空間噴霧は必要とせず、付加したにおい成分との混合臭としての総合的な評価が悪臭と異なることに主眼が置かれる点が特徴である。付加後に想起させたいにおい成分の構成が既知で、悪臭がその構成成分の一部であることが実施の前提になるが、公開されたペアリング消臭に関する研究は多くはなく²⁾、基礎資料が著しく少ない現状にある。また、におい名の認識には必ずしも一定のにおい成分が完備されなくとも評価者が「それっぽい」と認識できることも経験的に知られている。ペアリング消臭を今後活用するにあたっては、基礎データ整備と、検臭時のにおい名の認識に関するさらなる知見が不可欠である。本研究では、3種の生活悪臭のペアリング試行を実施して、印象評価とにおい名認識の関係を把握することを目的とする。

2. 実験概要

実験は2022年11月7～24日に会議室（温湿度：19.1～23.8℃、33～50%RH）にて31名の学生に実施して、1名の嗅覚検査不合格者

を除いた30名（男性19、女性11名：平均21.6歳）で分析することにした。

においては「悪臭（ML0）」3条件（イソ吉草酸 Ia：第一薬品産業、アセトアルデヒド Aa、ジアセチル Da：和光純薬）、「悪臭」に1種ずつ付加した「ペアリング臭（PAR）」3種について3濃度段階を用意した9条件（バニラエッセンス v1～3：浅古香料化学、酢酸エチル e1～3、酢酸イソペンチル i1～3：和光純薬）と、それらの「混合臭（MIX）」9条件（Ia_v1～3、Aa_e1～3、Da_i1～3）、そして混合後に目指したにおいモデルとして「想定臭（TRG）」3条件（チョコレートエッセンス Ch、アオリンゴエッセンス Ae、バナナエッセンス Be：浅古香料化学）を設けた総計24条件とした。提示試料は試料採取袋（PET製10L：近江オドエアーサービス）に注入した原臭を活性炭槽を通した室空気で希釈して作製した。各濃度は表1に示す。

実験はML0条件とPAR条件の1stフェーズ、TRG条件の2ndフェーズ、MIX条件の3rdフェーズの順に実施し、フェーズ内でラテン方格にて試料提示順を決定した。1stフェーズでは、

Table 1 Odor conditions and each concentration

Malodor	[MLO]	Paring odor	[PAR]	Target odor	[TRG]
Isovaleric acid	[Ia] 0.11 [ppm]*	Vanilla ess.	[v1] 2.3×10^8 [-]	Chocolate ess.	[Ch] 7.3×10^5 [-]
Acetaldehyde	[Aa] 0.20 [ppm]		[v2] 9.7×10^8 [-]	Aoringo ess.	[Ae] 9.7×10^3 [-]
Diacetyl	[Da] 17 [-]		[v3] 1.3×10^8 [-]	Banana ess.	[Be] 5.5×10^4 [-]
		Ethyl acetate	[e1] 0.38 [ppm]		
			[e2] 1.1 [ppm]		
			[e3] 3.8 [ppm]		
		Isoamyl acetate	[i1] 0.025 [ppm]		
			[i2] 0.074 [ppm]		
			[i3] 0.25 [ppm]		
(Odor concentration [-], *: Theoretical concentration)					
Mixed odor		[MIX]			
Isovaleric acid	× Vanilla ess.	[Ia_v1], [Ia_v2], [Ia_v3]			
Acetaldehyde	× Ethyl acetate	[Aa_e1], [Aa_e2], [Aa_e3]			
Diacetyl	× Isoamyl acetate	[Da_i1], [Da_i2], [Da_i3]			

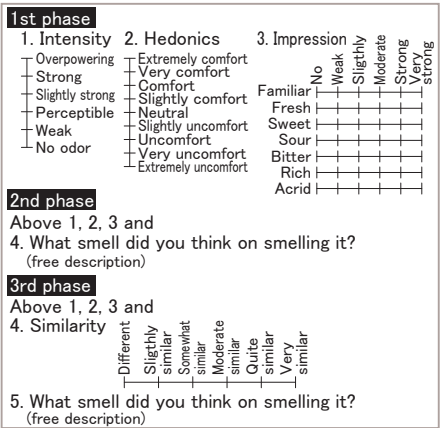


Figure 1 Scales

評価項目はにおいの強さ、快・不快と印象（親しみやすさ、さわやかさ、甘さ、酸っぱさ、苦さ、深み、ツンとした）とした。2nd フェーズでは、上記に加えて検臭して認識したものを自由記述で回答させた。3rd フェーズの混合臭提示時には、対になる想定臭袋も検臭して確認させて、上記に加えて混合臭と想定臭の類似度を評価させた。評価項目を図 1 に示す。

3. 結果と考察

3.1 におい条件の評価傾向

図 3～10 に、全条件のにおい評価を示す。横軸はにおい条件、縦軸は各評価尺度とし、プロットで平均評価、円の面積で度数を示した。図 3 のにおいの強さ評価は、Ia と v の混合試行では MIX 評価は MLO と PAR の中間ないしは PAR に近い評価だったが、Aa と e、Da と i の混合試行では MIX 評価が MLO と PAR より高い条件が散見された。また、TRG 評価は Ia と v の混合試行では Ch がいずれの条件より著しく低かった。Aa と e、Da と i の混合試行でも、MIX 評価よりは TRG 評価は低い傾向だった。

図 4 の快・不快評価は、MLO の 3 条件のうち Ia は不快側評価だったものの、Aa と Da は中庸に近かった。PAR の 3 × 3 条件のうち v と i は快側で、e は中庸程度だった。MIX 評価は、Ia と v の混合試行では MLO と PAR 評価の中間程度で不快感は MLO より改善したものの Ia_v3 以外は不快側評価だった。Aa と e、Da と i の混合試行では、いずれも中庸付近の評価だった。TRG 評価は 3 条件と

もわずかに快側評価だった。

図 4 の印象「親しみ」評価は、MLO の 3 条件のうち Aa と Da では「かすかに感じる」程度の評価だった。PAR の 3 × 3 条件のうち v と i は「軽度を感じる」程度だったが、e は「かすかに感じる」程度で MLO である Aa と同等だった。MIX 評価は Ia と v、Da と i の混合試行では MLO と PAR 評価の中間程度だったのに対し、Aa と e の混合試行では MLO と PAR 評価より高い評価だった。これは、評価者が混合臭に対して異な

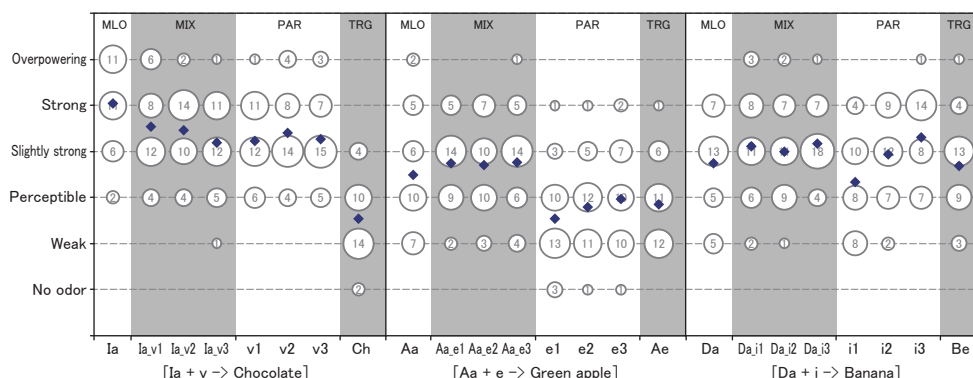


Figure 2 Mean and frequency of odor intensity

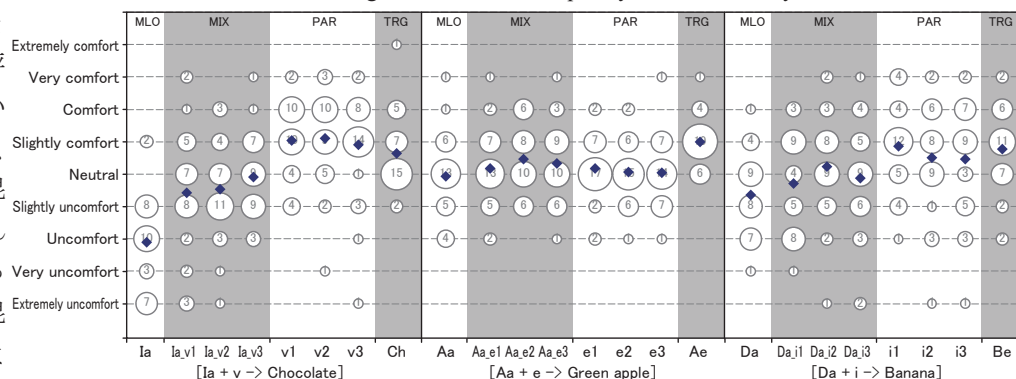


Figure 3 Mean and frequency of odor hedonics

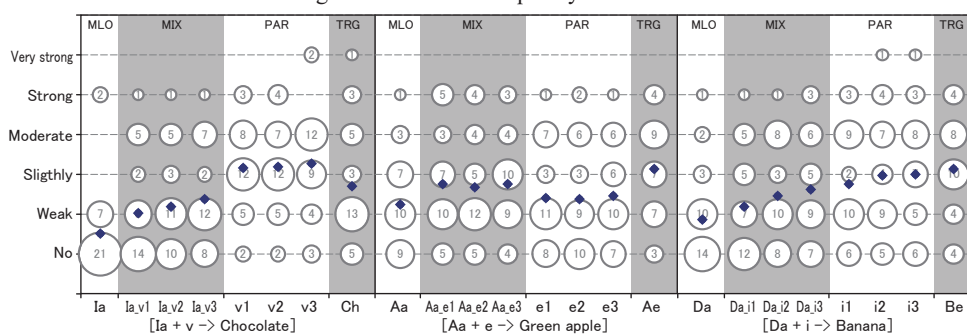


Figure 4 Mean and frequency of impression "familiarity"

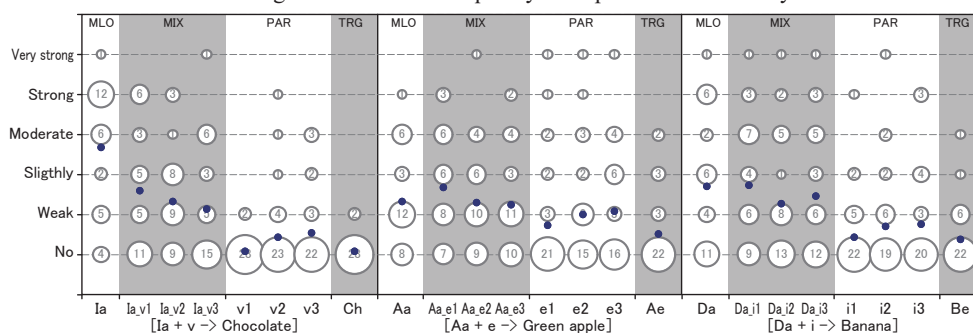


Figure 5 Mean and frequency of impression "freshness"

る発生源を想起した可能性を示唆すると考える。

図5の「さわやかさ」評価は、MLOは高くTRGは低い評価だった。PARはeがvとiよりやや高いものの「かすかに感じる」程度だった。MIX評価はIaとvの混合試行ではMLOとPAR評価の中間程度で、他の2試行ではMIXがMLO評価と同等だった。

図6の「甘さ」評価は、MLOで低くTRG評価は比較的高かった。PAR評価はvで「強く感じる」程度と非常に高く、続いてiも比較的高かったがeは低くMLOのAaと同程度だった。MIX評価はIaとv、Daとiの混合試行ではMLOとPAR評価の中間程度で、Aaとeの混合試行ではMLOとPARが同程度だったためかMIX評価も両者と同程度だった。

図7の「酸っぱさ」評価は、MLO評価は3条件とも「軽度を感じる」程度で、TRG評価は対になるMLOより低評価だったが、Aaとeの混合試行ではAaとAeは比較的近い評価だった。PAR評価はvでほぼ「感じない」だったが、eとiは「かすかに感じる」程度だった。MIX評価はMLOとPAR評価の中間かMLOに近い傾向だった。

図8の「苦さ」評価はIaとv1、v2が「かすかに感じる」程度であるほかはほぼ「感じない」だった。

図9の「深み」評価は、MLO評価は3条件とも「かすかに感じる」で、TRGと近い評価だった。PAR評価はvで高かったが、eとiはMLOと同程度だった。

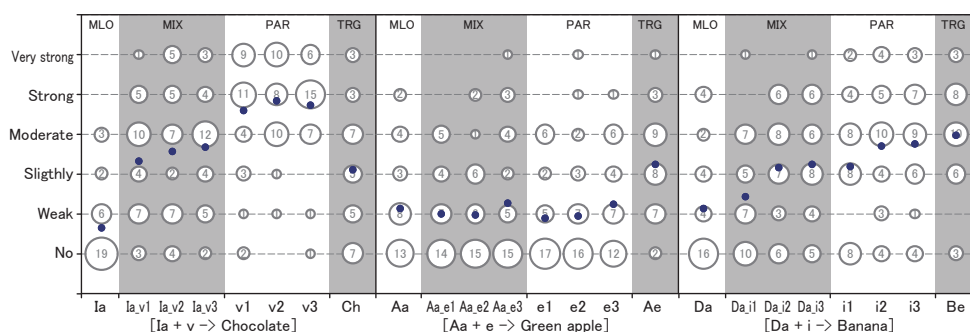


Figure 6 Mean and frequency of impression "sweetness"

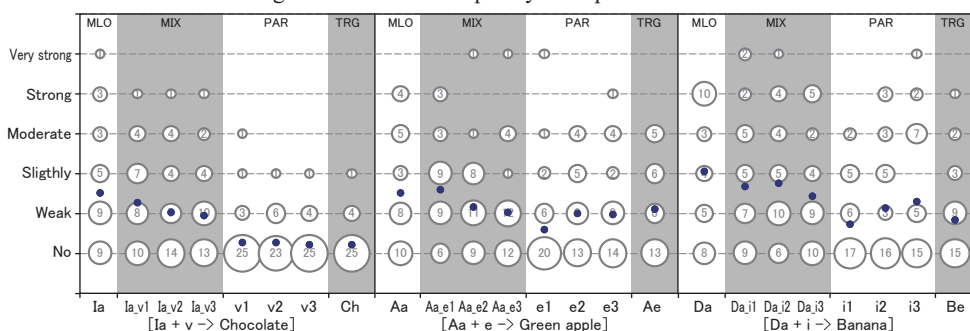


Figure 7 Mean and frequency of impression "sourness"

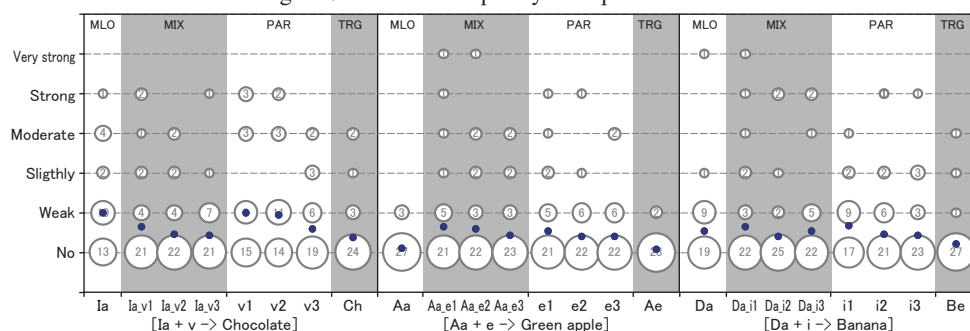


Figure 8 Mean and frequency of impression "bitterness"

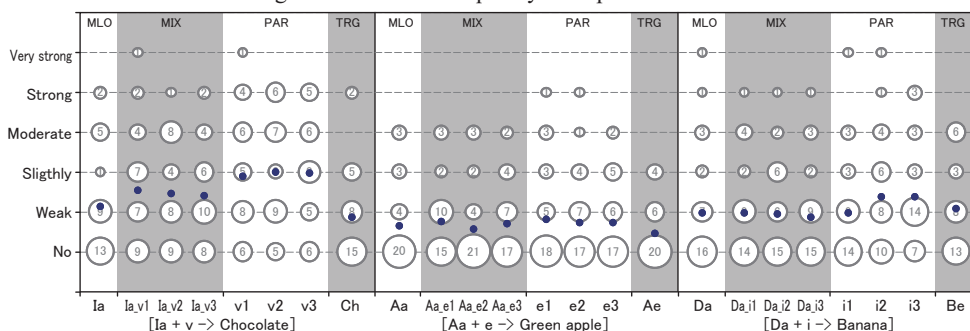


Figure 9 Mean and frequency of impression "richness"

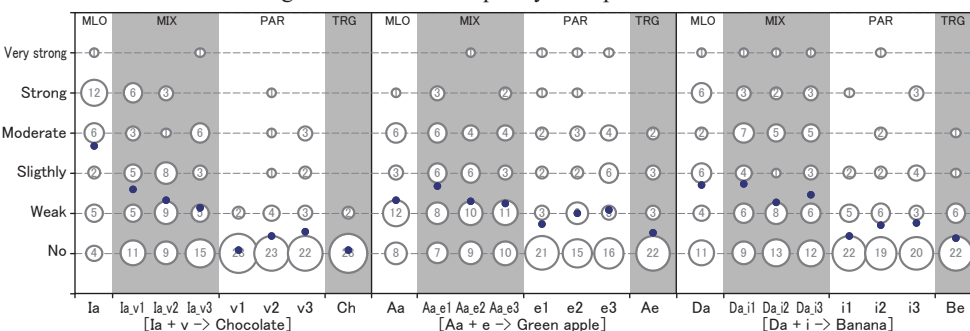


Figure 10 Mean and frequency of impression "acidity"

MIX評価はMLOとPARの中間程度だった。

図10の「ツンとした」評価は、MLO評価ではIaが「感じる」程度と高く、DaとAaでは「軽度を感じる」程

度だった。TRGは3条件とも「感じない」で、PAR評価もeのみわずかに感じられたもののほぼ「感じない」だった。MIX評価は、Iaとvの混合試行ではMLOとPAR評価の中間程度だったが、他の2試行ではMLO評価と同程度だった。

3.2 MIXとTRGの類似度評価

図11にMIXとTRGの類似度評価を示す。横軸はMIX条件、縦軸が類似度尺度とした。プロットは平均値を、円の面積で度数を示す。MIX条件間の多重比較を実施したが有意差は検出されなかった。Daとiの混合試行では他の2試行よりわずかに高い傾向だが、類似度は総じて高くなかった。図4～10の印象評価のうち、Daとiの混合試行ではMIXとTRGが類似し、他の2試行で異なる項目は見当たらず、両者の印象の類似が類似度評価に影響するかはわからなかった。

3.3 MIX試料の発生源認識

MIXとTRG試料には、検臭して想定した発生源名を自由記述で回答させた。その結果を実験者が分類して図12に示す。横軸はTRGとMIX条件、縦軸は回答度数を示す。TRG試料は市販の食品香料としたが、ChとAeは正答が25%程度で最高のBeでも2/3だった。MIX試料では、Iaとvの混合試行はいずれの混合比の場合にもChと同程度の正答率だった。両条件は「バナナ」回答も同程度だったが、MIXの方が「バナナ」と「悪臭」が多く見られ、特に「悪臭」はChでは見られない回答だった。Ia_v2の「病院」も特徴的だった。Aaとeの混合試行では、Aa_e1はAeよりやや低い正答率だったが、eの混合比が高い方が正答率が低かった。反対に、「接着剤」回答はeの混合比が高い方が多く見られ、e（酢酸エチル）の混合比が高い影響だったことがわかる。「接着剤」回答はAeでは見られなかったことから、これが図11の類似度が高くなかった理由だったと推定される。Daとiの混合試行では、MIXの「バナナ」回答は50%程度あって、Beに比較的近かった。「悪臭」と「接着剤」はBeになくMIXに見られた回答だった。

多様な生活空間の悪臭に対してペアリング消臭を行う状況を考えて、比較的単純化したペアリング臭が要求され、完全に想定臭であるとは認識されなくとも、認識する発生源が元の悪臭ではない状況が求められると考える。図12におけるIaとv、Daとiの混合試行のように、悪臭を想定する回答者

が少数であればペアリング消臭は成功とするのが現実的と考えられる。一方で、Aaとeの混合試行のように接着剤が多く回答された状況は避けたい状況と考えられるが、図4～10の印象評価を振り返ると、MIXとPAR評価が比較的近かったことからMIXで酢酸エチルの接着剤様が卓越したことから、MLO（アセトアルデヒド）とPAR（酢酸エチル）の評価がかなり類似したことの2点がMIXに化学物質を想起させた可能性があり、MLOとPARの印象が異なる試料同士でのペアリングが有用ではないかと予想された。一方で、Aaとe、Daとiの混合試行は単一化学物質であったものの、図12に示したように食品香料に比較的近い割合の発生源認識が得られたことから、においの印象の特徴を把握することで非常に少数の化学物質でも、ある程度の発生源認識の変化を期待できる一端を示すことができたともいえる。今後、印象評価を軸にした混合組合せについても検討を進める必要がある。

4. おわりに

本報では、3種の単一化学物質を生活悪臭とみなし、食品香料または単一化学物質でのペアリング試行を行い、においの印象を軸に発生源認識、および想定臭との類似度の側面から混合臭に対するにおい評価を検討した。引続き、印象を軸にパラメトリックに整理した組合せでケーススタディを進める必要がある。

参考文献

- 1) 光田恵, 岩橋尊嗣, 棚村壽三: きちんと知りたいにおいと臭気対策の基礎知識, 日刊工業新聞社, pp. 142-143, 2018
- 2) 例えば, 日浦遼介, 高村秀紀: 老人ホームのおむつ保管室における消臭剤の効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 21-24, 2022

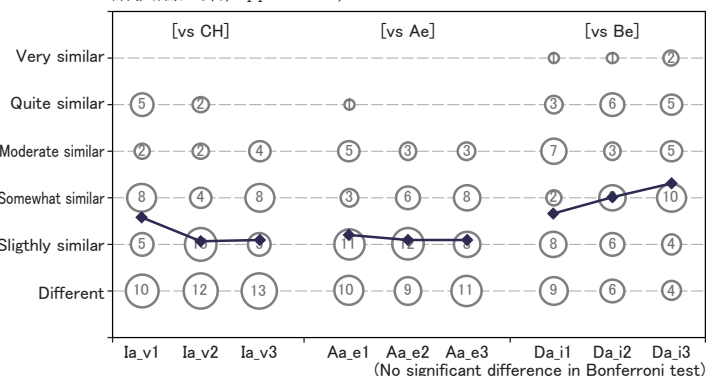


Figure 11 Comparison of similarity among MIXs and TRG

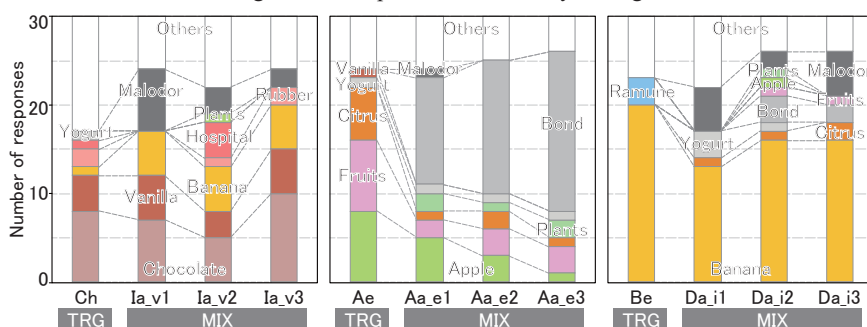


Figure 12 Comparison of smell name on sniffing among smell conditions

香り環境下における学習効率に関する研究

(その 10) 精油噴霧時の臭気濃度と香りの心理評価特性

Learning Performance in Odor Environment with Aroma Oils

(Part10) Odor Concentration and Psychological Evaluation under Aroma Oils Spraying

○福本 柊一郎 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学)

竹村 明久 (摂南大学) 小林 知広 (大阪大学) 山口 剛毅 (大阪大学)

Shuichiro FUKUMOTO^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Narae CHOI^{*1}Akihisa TAKEMURA^{*2} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Koki YAMAGUCHI^{*1}^{*1}Osaka University ^{*2}Setsunan University

In this study, we have investigated the effects of odors on learning spaces. In this report, we conducted an experiment to investigate the effects of different odor concentrations on psychological evaluation. Measurement odor concentrations and psychological evaluation of odor under different odor concentration conditions with 10 kinds of essential oils. In the psychological evaluation measurement, panels were asked to respond to the evaluation under the normal condition and the evaluation under the assumed learning. As a result, the evaluation tended to be more severe during the assumed learning condition than during the normal condition.

1. はじめに

建物の環境性能に関する総合評価指標として利用が進む Well 認証では、建物の環境・エネルギー性能の評価に加え、利用者の健康・心理状態を評価項目としてあげている。近年、建築環境によって省エネ性や温熱快適性だけでなく、利用者の健康や心理状態を向上させることが求められつつある。そのような社会背景の中で「香り」は在室者のリラックス効果や作業効率の向上¹⁾を促す室内環境の新たな付加価値として注目されている。

そこで、本研究では、未だに香りの適用例が少ないとされる学習空間に着目し、香りが学習空間の在室者の心理に及ぼす影響を調査してきた。昨年度に大学自習室で行った既往研究²⁾では、臭気強度の違いによる香りの評価への影響がみられた。本報では既報で用いた精油の臭気濃度測定および臭気濃度と心理評価の関係に関する実験の結果を報告する。

2. 実験概要

本実験は 2022 年 11 月～12 月の期間で実施し、本学学生 12 名 (男性 6 名、女性 6 名、22～24 歳) をパネルとし、いずれのパネルも喫煙習慣はなかった。パネルには、参加時間に応じて適切な報酬を支払った。

精油は、既報²⁾で使用された、レモン (LE)、ローズマリー (RM)、ペパーミント (PM)、ラベンダー (LA)、ヒノキ (CY)、ゼラニウム (GE)、ユーカリ (EU)、ベルガモット (BE)、ティートリー (TT) と比較としてこれらの香りと質が異なるジンジャー (GG) の合計 10 種類 (生活の木製) を選定した。

本実験では、初めに精油を用いて各香りの原臭を作成し、臭気濃度測定を Fig.1 に示す実験室 1 にて行った。測定の結果をもとに臭気濃度条件を設定し、各香りの臭気濃度が心理評価に及ぼす影響を Fig.2 に示す実験室 2 にて行った。各測定はそれぞれ、室由来のにおいの影響を考慮して換気を十分行い、実施した。

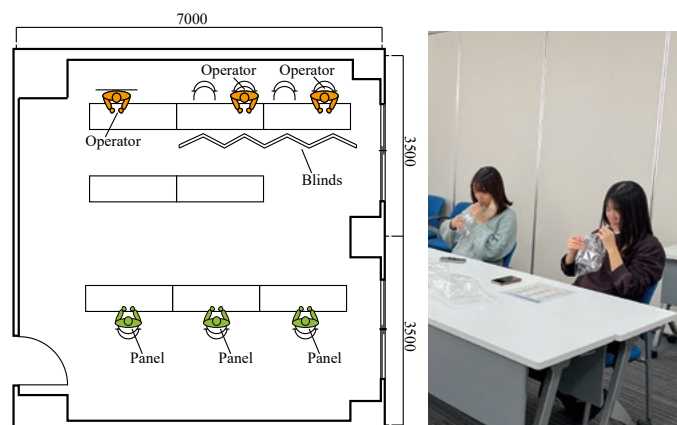


Fig.1 Experiment Room 1

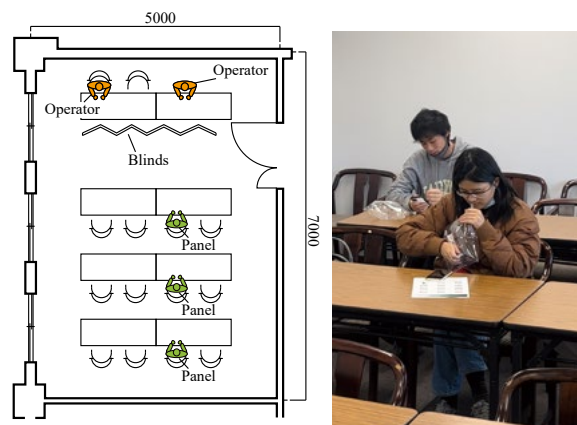


Fig.2 Experiment Room 2

2.1 臭気濃度測定

本実験では、公定法の三点比較式臭袋法に準じて、各精油を用いて作成した原臭の臭気濃度測定、すなわち各精油の閾値測定を行った。臭気濃度測定前に全パネルに対して嗅覚検査 (T&T オルファクトメータ) を実施し、パネルの嗅覚が正常であることを確認した。

原臭は竹村らの実験³⁾を参考に無臭空気を充填した10Lの試料採取袋 (PET 製、近江オドエアーサービス) に精油を0.14mL 注入したのち、十分に揮発させて作成した。同様に無臭空気を充填した3つの3L におい袋の一つに所定の希釈倍数となるように原臭を注入後、におい袋3つをパネルに提示し、においがある袋の番号及び臭気強度を回答させた。希釈倍数はパネルの疲労を考慮し3倍系列とした。臭気濃度算定時には、パネルの当日の体調や誤回答の可能性を考慮して、全パネルの閾値の上下20% ずつをカットした。

各香りの臭気濃度測定結果を **Table1** に示す。性別間で閾値に有意な差が見られた香りはなく、香りの検知能力に関しては男女差が少ない可能性が示された。

Table 1 Odor Concentrations

	Odor concentration		
	Male	Female	Total
LE	2.34×10^5	7.41×10^5	3.09×10^5
RM	7.41×10^7	2.34×10^8	1.12×10^8
PM	7.41×10^6	9.77×10^6	8.51×10^6
LA	5.50×10^6	9.77×10^6	6.31×10^6
CY	3.09×10^5	3.09×10^5	2.69×10^5
GE	5.50×10^6	1.74×10^6	3.09×10^6
EU	5.50×10^8	7.41×10^7	1.51×10^8
BE	4.17×10^6	9.77×10^6	7.41×10^6
TT	9.77×10^5	1.74×10^5	3.55×10^5
GG	4.17×10^5	4.17×10^6	9.77×10^5

2.2 心理評価測定

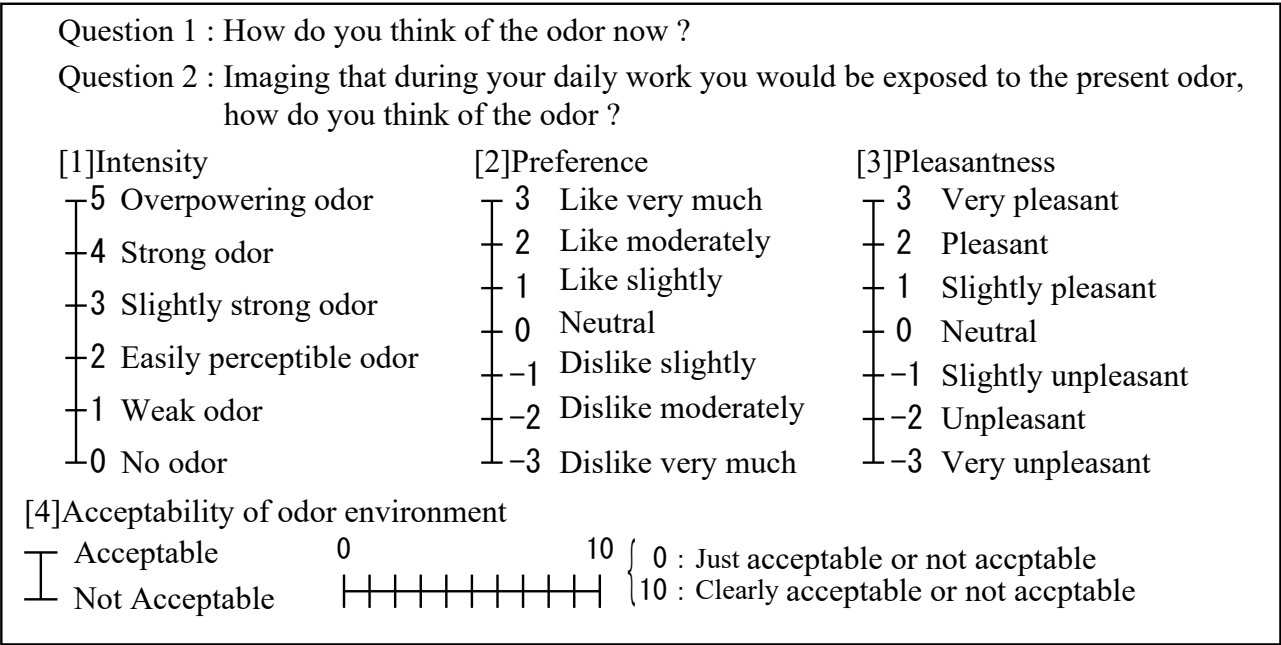
各香りの臭気濃度が心理評価に及ぼす影響を調査するため、臭気濃度測定の結果をもとに、希釈倍数が10⁵ 倍の臭気濃度が10 程度になるように10 倍または100 倍系列で臭気濃度条件を5 段階で設定した。臭気濃度条件の詳細を **Table2** に示す。また、パネルは臭気濃度測定に参加したパネルと同様とした。

パネルに試料を提示する際は、嗅覚疲労を考慮して1.5 分以上提示間隔をあけ、順序効果を低減するため、ラテン方格に基づき作成した提示順で評価させた。

評価項目は臭気強度 (6 段階尺度)、嗜好度 (7 段階尺度)、快不快度 (7 段階尺度)、受容度 (強制二者択一方式で選択後、11 段階で程度を回答) の4 項目とした。また、Fanger らの実験⁴⁾を参考に各項目において「今の袋のにおいに関する質問です。」及び「あなたがこのにおいのする室内で毎日学習すると想像してください。」といった評価の条件を設定し、通常時と学習想定時の2つの状況における心理評価を回答させた。評価項目の詳細を **Fig.3** に示す。

Table 2 Conditions of Odor Concentrations

	Dilution ratio from original odor				
	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	1
LE	3.09	3.09×10	3.09×10^2	3.09×10^3	3.09×10^5
RM	11.20	11.20×10	11.20×10^2	11.20×10^3	11.20×10^5
PM	8.51	8.51×10	8.51×10^2	8.51×10^3	8.51×10^5
LA	6.31	6.31×10	6.31×10^2	6.31×10^3	6.31×10^5
CY	2.69	2.69×10	2.69×10^2	2.69×10^3	2.69×10^5
GE	3.09	3.09×10	3.09×10^2	3.09×10^3	3.09×10^5
EU	15.10	15.10×10	15.10×10^2	15.10×10^3	15.10×10^5
BE	7.41	7.41×10	7.41×10^2	7.41×10^3	7.41×10^5
TT	3.55	3.55×10	3.55×10^2	3.55×10^3	3.55×10^5
GG	9.77	9.77×10	9.77×10^2	9.77×10^3	9.77×10^5



3. 実験結果と考察

3.1 各香りの臭気濃度と臭気強度の関係

各香り条件の臭気濃度と臭気強度の関係を Fig.4 に示す。プロットは臭気濃度条件ごとの臭気強度の平均値を示す。既往研究³⁾で示されたように本実験においても全ての香り条件で臭気濃度の対数値と臭気強度との間に線形関係がみられた。近似曲線の傾きも GE 条件以外では 0.3 程度と香り条件間で臭気濃度と臭気強度との関係に大きな差は見られなかった。しかし、GE 条件では低濃度条件と高濃度条件との両方で臭気強度の評価がばらつき、他の香り条件と異なる傾向がみられた。

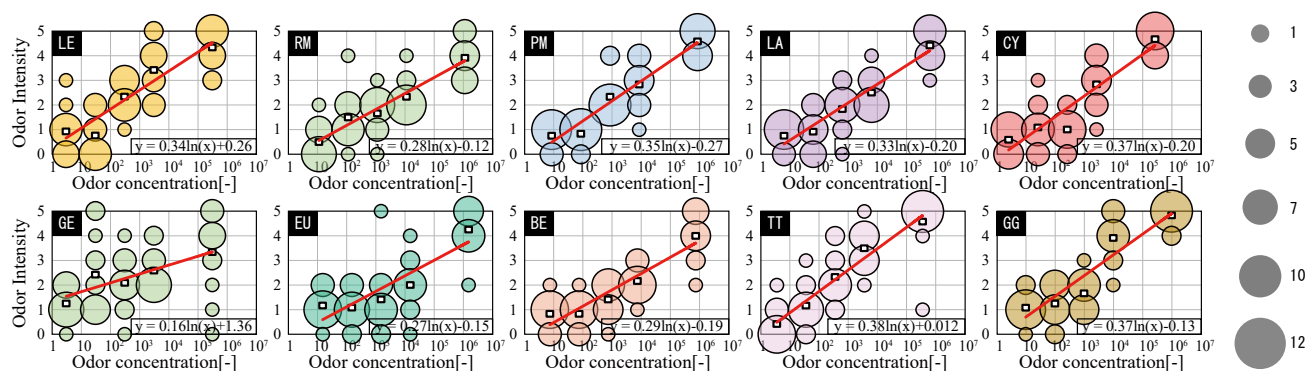


Fig.4 The Relationship between Odor Concentration and Intensity

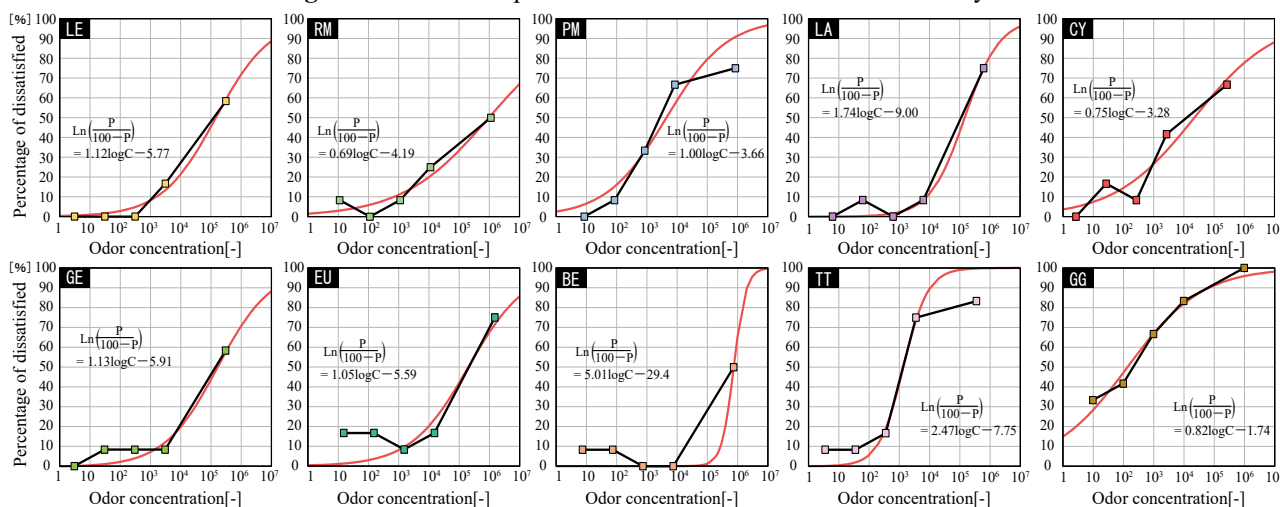


Fig.5 The Relationship between Odor Concentration and Dissatisfied (Normal condition)

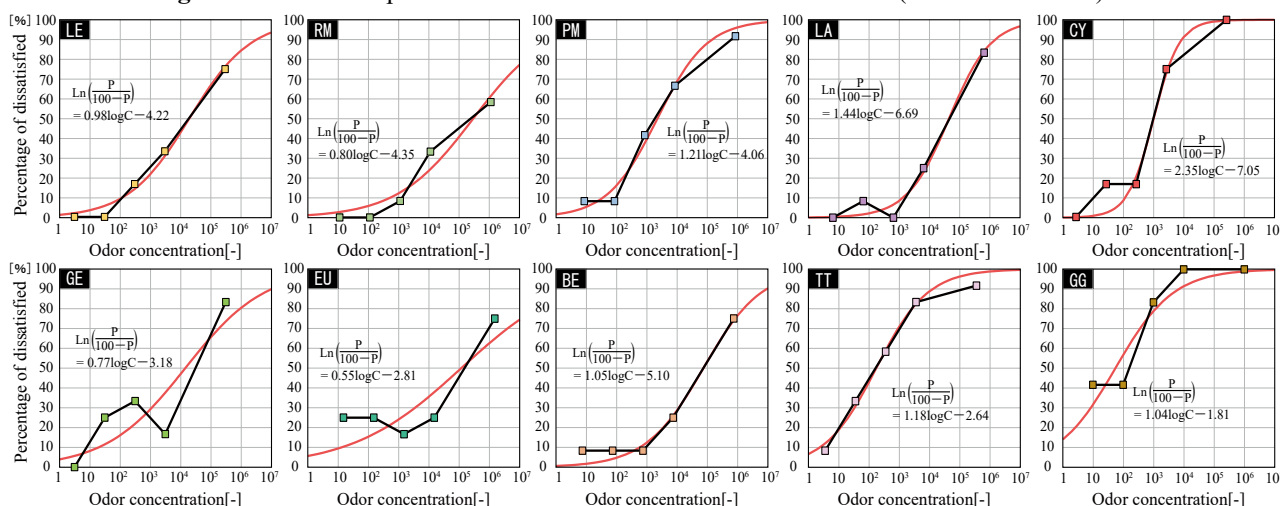


Fig.6 The Relationship between Odor Concentration and Dissatisfied (Assuming learning condition)

3.2 各香りの臭気濃度と非容認率の関係

各香り条件の臭気濃度と非容認率の関係について通常時の評価結果を Fig.5 に学習想定時の評価結果を Fig.6 に示す。図中の曲線は臭気濃度条件ごとの非容認率について回帰したロジットモデルに基づく回帰線を示す。通常時の評価では全香り条件で臭気濃度が高くなるにつれて非容認率が上昇する傾向がみられたが、GG 条件以外の既往研究²⁾で使用した香り条件では最高の濃度条件においても受け入れられるパネルが存在した。一方で、学習想定時の評価では CY 条件において非容認率が 100% に達し、他の条件でも非容認率の上昇がみられた。

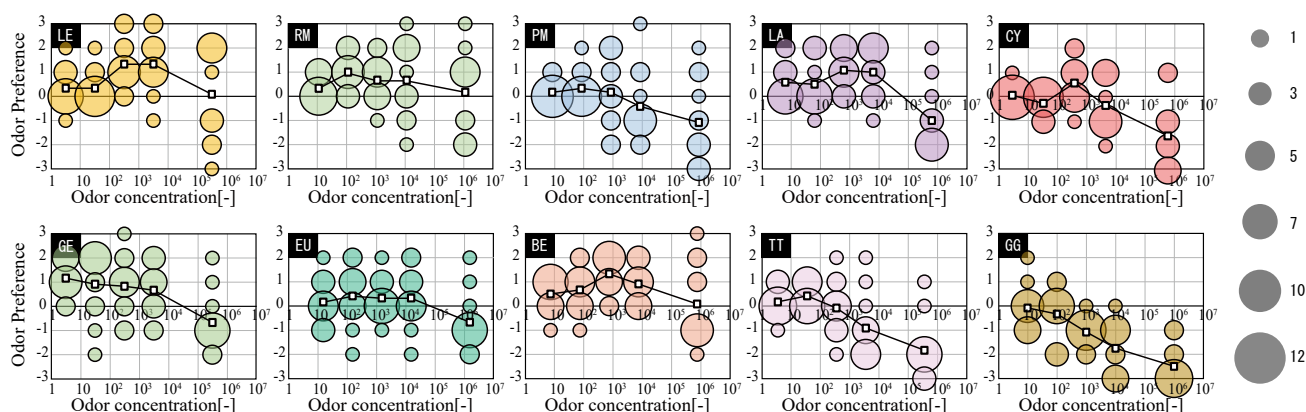


Fig.7 The Relationship between Odor Concentration and Preference (Normal condition)

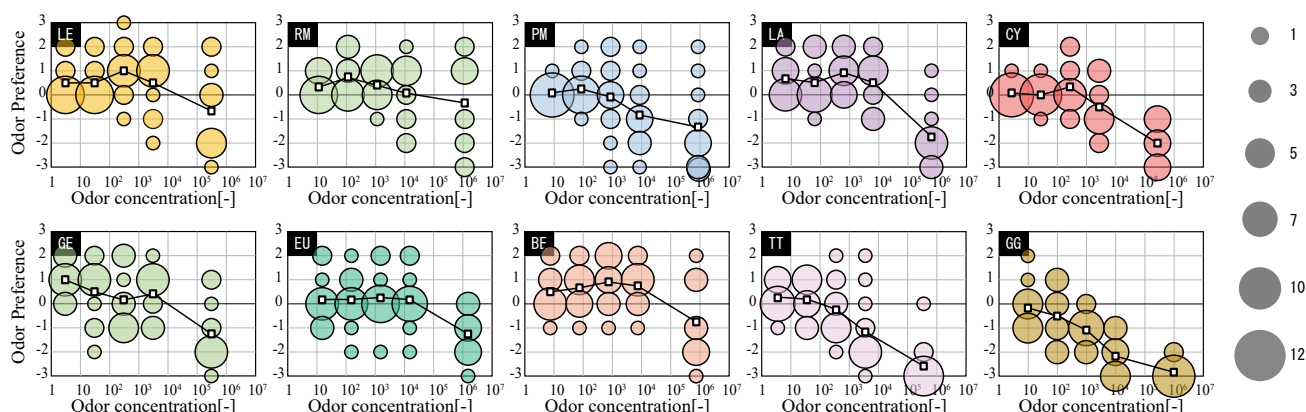


Fig.8 The Relationship between Odor Concentration and Preference (Assuming learning condition)

3.3 各香りの臭気濃度と嗜好度の関係

各香り条件の臭気濃度と嗜好度の関係について通常時の評価結果を Fig.7 に、学習想定時の評価結果を Fig.8 示す。プロットは臭気濃度条件ごとの嗜好度の平均値を示す。通常時の評価では、LE、LA、BE 条件といった昨年度の既往研究²⁾で嗜好度が比較的高かった香り条件において、嗜好度が高濃度、低濃度、中濃度の順で高くなる「への字」型のグラフとなった。一方で、その他の香り条件では臭気濃度が高くなるにつれて、嗜好度が低下する傾向が多く見られた。また、「への字」型のグラフ傾向がみられた LE、LA、BE 条件では最高濃度条件以外ではほとんど全てのパネルが好き側の嗜好度評価をしていることから、アロマの間欠噴霧によって香りの濃度が変化していた既報の研究²⁾においても、比較的高い嗜好度が高い結果につながった可能性が示唆される。

通常時の最高濃度条件に対する嗜好度評価では受容度評価と同様、GG 条件以外の香り条件では最高濃度においても好き側の評価を行うパネルが見られた。このことから、一般的に建築空間に導入されるような良い香りであってもにおいが強い場合には評価が個人差に影響される可能性が高いことが示唆された。

学習想定時の評価では、全臭気濃度条件で通常時の評価と比較して、嗜好度が低下する傾向がみられ、「への字」型の傾向についても減少した。要因としては、学習空間で毎日、長時間嗅ぐことを想定したことが考えられる。

4. おわりに

本報では、香りの臭気濃度の違いが心理評価に及ぼす影響を調べるため、10 種類の精油を用いて、臭気濃度測定及び臭気濃度条件を設定した香りの心理評価測定を行った。心理評価測定においては、通常時の評価に加え、学習想定時の評価も同時に行ったが、学習想定時は通常時に比べ評価が厳しくなる傾向が見られた。

次報では、本報で測定した精油の臭気濃度の結果をもとに、実際の自習室で香りを噴霧し、香りの種類と噴霧期間が学習空間の在室者の心理に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

【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) 高橋、加藤、樋口、石黒、天野、谷：香り・においが知的作業時・安静時の執務者の心理・生理に与える影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.453-456、2010.9
- 2) 福本、山中、崔、竹村、小林：大学自習室における香り噴霧が在室者の室内環境及び学習効率の主観評価に及ぼす影響に関する検討、第 35 回におい・かおり環境学会講演要旨集、pp.24-25、2022.09
- 3) 竹村：濃度をパラメータとしたアロマ精油のかおり評価特性(その 2) 閾値測定と回帰モデルに基づく心理評価傾向の把握、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.93-96、2016.09
- 4) Fanger, Lauridsen, Bluyssen and Clausen: Air Pollution Sources in Offices and Assembly Halls, Quantified by the olf Unit, Energy and Buildings, pp.7-19、1988.12

香り環境下における学習効率に関する研究 (その 11) 精油噴霧下の大学自習室における香りの種類と噴霧期間が 在室者の心理に与える影響

Learning Performance in Odor Environment with Aroma Oils (Part11) Impact of the Type of Aroma Oils and Spray Duration on Psychology of Occupants in a Study Room Sprayed with Aroma Oils

○山口 剛毅 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学)
竹村 明久 (摂南大学) 小林 知広 (大阪大学) 福本 柊一郎 (大阪大学)

Koki YAMAGUCHI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Narae CHOI*¹

Akihisa TAKEMURA*² Tomohiro KOBAYASHI*¹ Shuichiro FUKUMOTO*¹

*¹Osaka University *²Setsunan University

While odor is a decisive factor for evaluating perceived indoor air quality, its effects on human responses and performance have yet to be revealed. In this study, the effects of odors on learning spaces were investigated, to find efficient spraying methods of odor. In this paper, the results of subjective evaluation for students who used the self-study room where the odor was sprayed were analyzed. The room was divided into three parts (short term booth, blend booth and long term booth) for experiment. As a result, it was suggested that a blend of aromas might improve the evaluation.

1. はじめに

近年、健康で快適な室内環境の提供が求められており、においては室内空気質にとって重要な要素の1つであると言われている¹⁾。本研究では、未だに香りの導入例があまり見られない学習空間に着目し、適した香りの導入方法の提案を目的としてパネル実験により検討を行う。既報²⁾では本学自習室において香りの種類および噴霧間隔に着目したパネル実験を行い、ラベンダーの香りでも30分に1度の噴霧を行った際に主観評価、学習効率ともに高い評価が得られた。しかし、噴霧されたアロマの臭気強度が異なり、主観評価に影響を与えている可能性が考えられた。そこで本年度は臭気強度をそろえたアロマ噴霧を行うために予備実験を行い、前報でその結果と考察の報告を行った。本報では、既報に引き続き同自習室において試験的にアロマを噴霧させ、香りの種類及び噴霧期間が室内環境及び学習効率に及ぼす影響について考察した結果を報告する。

2. 実験概要

本実験は2023年1月16日～1月31日にかけて、本学箕面キャンパスの自習室にて実施した。パネルについては自習室を利用する外国語学部の学生を対象に募集し、1時間以上の自習室の利用を参加条件とした。パネルにはGoogleフォームでの回答の際にインフォームドコンセントによる同意を得て、適切な報酬を支払った。

自習室の平面図をFig.1に示す。自習室内は薄いカーテンにより席がおおまかに分割されており、日ごとにアロマを変えて噴霧を行う「日替わり席」、期間中同じアロマを噴霧する「長期席」、それらの間に位置する「ブレンド席」と設定し考察を行う。また、自習室は細長い平面形状のため、図中の2箇所にディフューザー（アットアロマ社製、all-in-one-type）及びサーキュレータ（ダイキン工業社製、MPF08WS-W）を設置し、アロマの噴霧と攪拌を行った。使用したディフューザー及びサーキュレータとその配置をFig.2に示す。

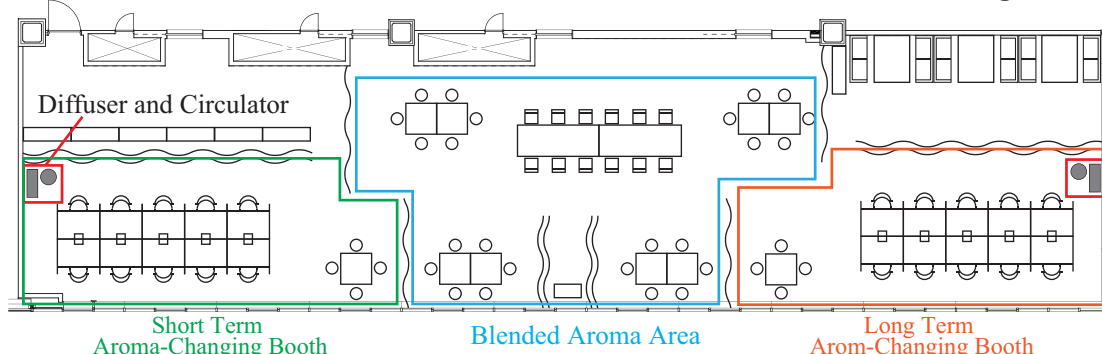


Fig. 1 Plan of study room



Fig. 2 Diffuser and circulator

2.1 実験条件

本実験では、香りの種類と噴霧期間をパラメータとして実験条件の設定を行い、日替わり席のディフューザーから噴霧するアロマは1日1条件、長期席では期間中1条件を実施した。実施条件の詳細を **Table 1** に示す。

日替わり席で使用したアロマについては、既報²⁾で用いたレモン (LE)、ローズマリー (RM)、ペパーミント (PM)、ラベンダー (LA)、ヒノキ (CY)、ゼラニウム (GE)、ユーカリ (EU)、ベルガモット (BE)、ティートゥリー (TT)、の計9種類とした。また、比較のために事前に香りの噴霧を行わないことを告知しない無臭条件 (N_CO 条件) と告知を行う無臭条件 (CO 条件) を設定した。噴霧は30分に1度行い、1度の噴霧秒数は予備実験により臭気強度が「らくに感知できるにおい」程度となるように各アロマで設定した。長期席において噴霧を行うアロマは、既報で嗜好度が高く、非容認率が低かった LA を選定した。ブレンド席では長期席から噴霧する LA と日替わり席から噴霧するアロマが混合していると考えて考察を行った。

Table 1 Experimental conditions

Aroma Condition	Time of Spraying [sec]	Number of Panels			
		Male	Female	Non-answer	Total
Lemon (LE)	60	3	7	0	10
Rosemary (RM)	30	4	8	0	12
Peppermint (PM)	12	4	8	0	12
Lavendar (LA) (Short Term Aroma-Changing Booth)	18	2	8	0	10
Lavendar (LA) (Long Term Aroma-Changing Booth)	18	9	43	1	53
Cypress (CY)	60	0	11	0	11
Geranium (GE)	45	0	12	1	13
Eucalyptus (EU)	50	1	8	0	9
Bergamot (BE)	30	2	10	0	12
Tea Tree (TT)	35	0	10	0	10
Control Not Announced (N_CO)	-	1	7	0	8
Announced Control (CO)	-	1	10	0	11

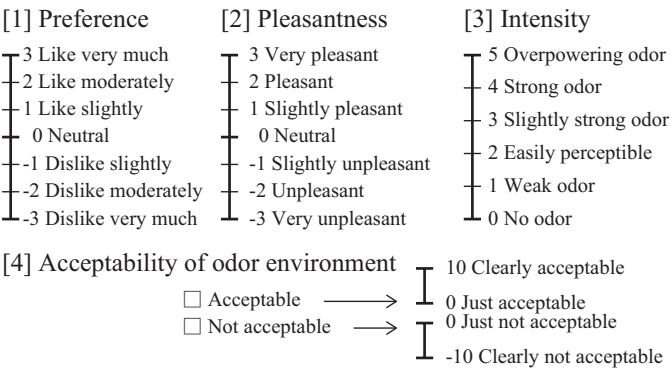


Fig. 3 Subjective evaluation scales for odor

2.2 主観評価項目

本実験では自習室の入室時と退室時の2回、Google フォームにより香りについてと香り環境下で行った作業について主観評価を行う。主観評価項目を **Fig.3**、**Fig.4** に示す。入室時はパネルの属性に加え、香りに対する評価項目として嗜好度、快不快度、臭気強度、受容度の4項目について評価させた。退室時は香りに対する4項目に加え、学習効率についての評価として捗り度、疲労度、体感時間の3項目についても評価させた。

3 結果・考察

3.1 香り環境に対する非容認率及び受容度

各条件における香り環境に対する受容度の結果を **Fig.5** に示す。また、図中の縦線分は標準偏差を示す。日替わり席では RM 以外のアロマ条件で非容認率が 0% という結果となったが受容度の評価は PM が最も低く、TT や BM が高い結果となった。RM と PM はどちらもハーブ系に分類されるアロマであり関連性が見られる。長期席では、参加回数が3、4、5回において人数が明らかに少なく、4回参加者の非容認率25%は人数が少なく個人の影響が大きくなったためだと考えられる。1回目、2回目においては非容認率が6~8%見られたが、日本建築学会の臭気基準が定める空間の臭気の許容限界の20%と比べると十分低い値だと言える。受容度に着目すると参加回数が増えるごとに評価が微小ながら低下しているが3回参加した5人の評価の推移は大きな変化はなく、有意差も見られなかった。受容度においては長期曝露による順応の影響はあまり見られなかったが、パネル数を増やした検討が必要である。

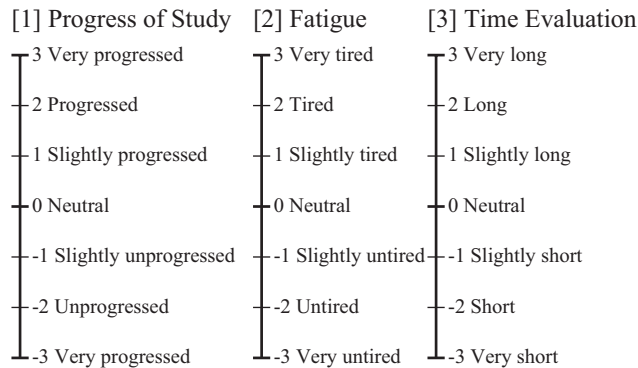


Fig. 4 Subjective evaluation scales for learning performance

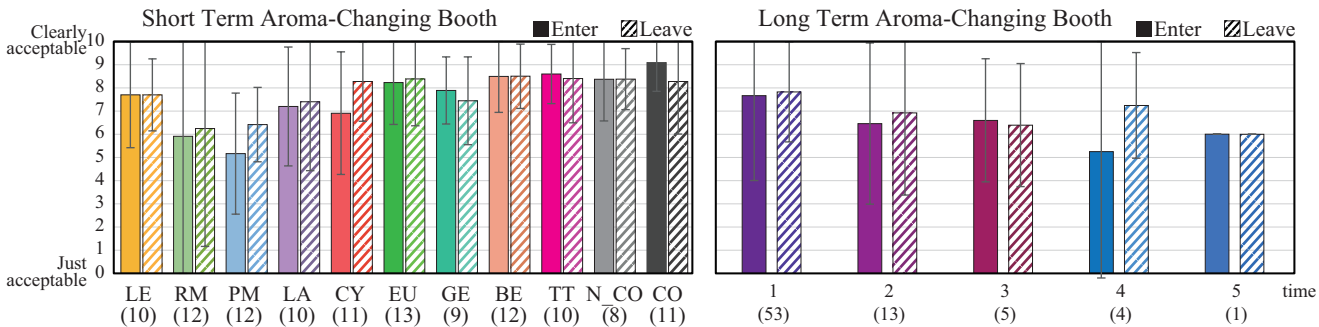


Fig. 5 Acceptability of odor environment

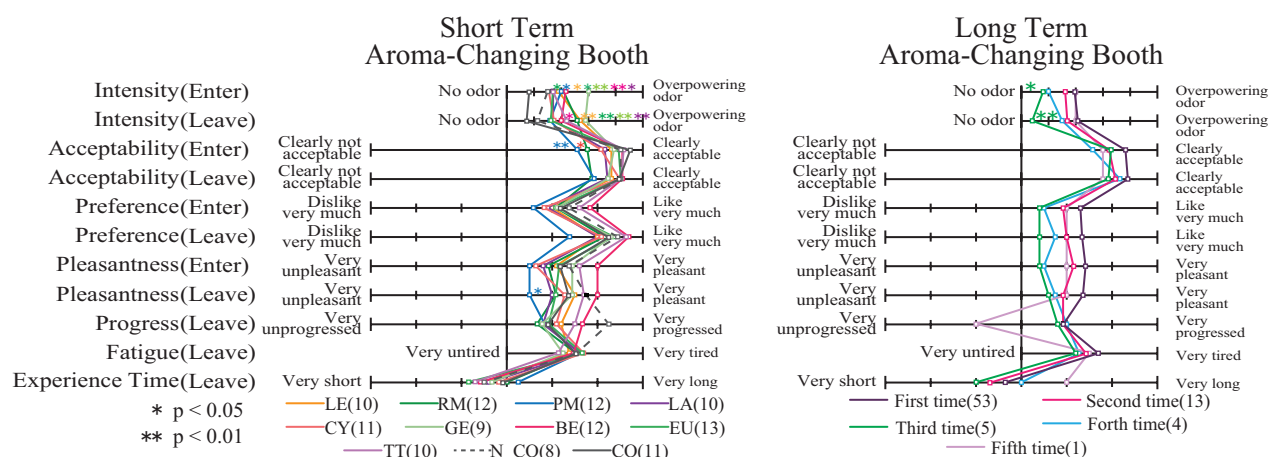


Fig. 6 Results of subjective evaluation (Short Term Booth and Long Term Booth)

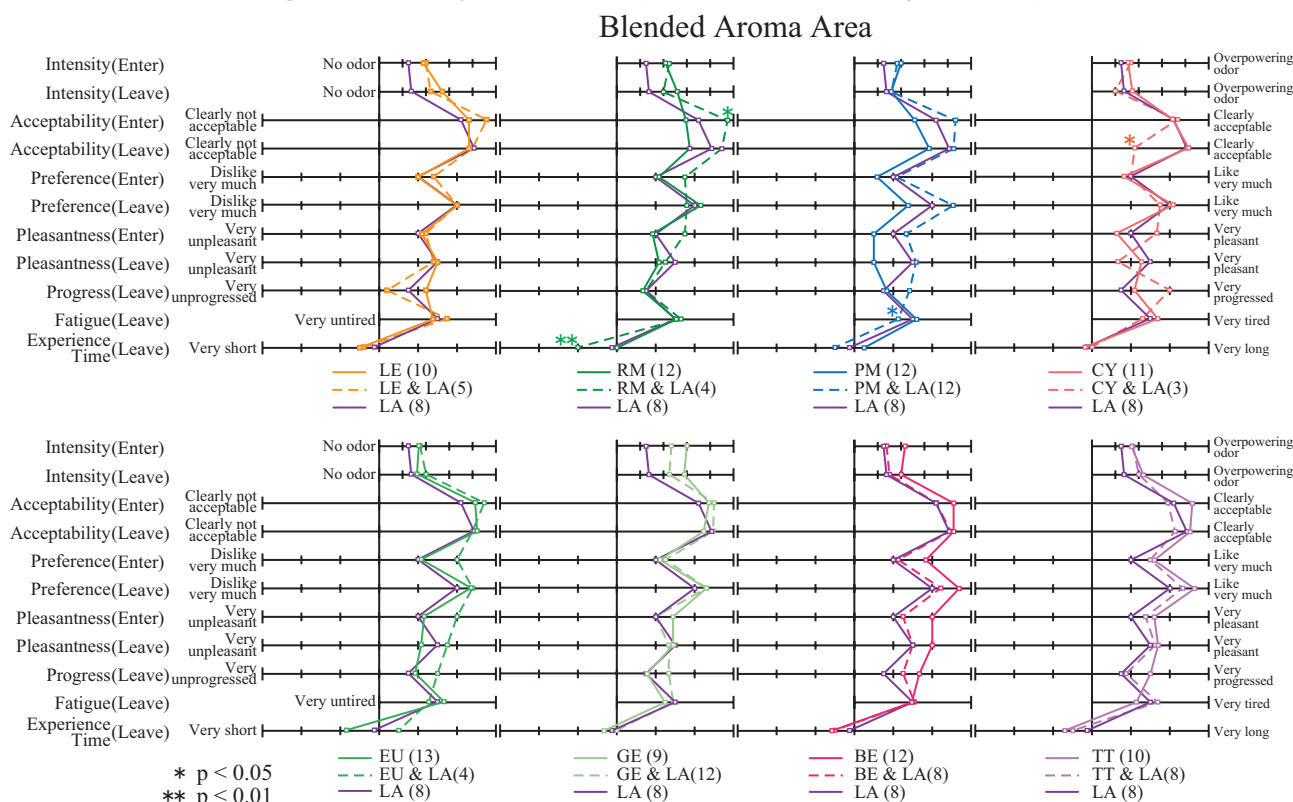


Fig. 7 Results of subjective evaluation (Blend Booth)

3.2 各条件における主観評価の平均値の比較

各条件における主観評価の平均値の比較を Fig.6 に示す。また CO 条件の平均値と比較した T 検定の結果についても図中に示す。日替わり席では BE や TT において評価が全体的に上昇し、各項目で上位の結果となった。一方、PM や RM においては評価が低下し、PM の受容度の評価ではマイナス側に有意差が見られた。N_CO 条件ではアロマ噴霧を行わなかったにもかかわらず、臭気強度が 1 を超える結果となり、撓り度の評価においては評価が大きく上昇した。CO 条件よりも臭気強度の評価が高いことから、室の背景臭の影響だけでなくアロマが存在しているという思い込みによる影響があると考えられる。長期席では臭気強度の評価で 1 回目と比較し、3 回目の評価が有意に低下した。全体的な評価は 1 回目の評価が高く、長期的曝露における順応の影響が考えられる。

3.3 香りのブレンドが主観評価に及ぼす影響

本自習室では長期席で LA、日替わり席で 9 種類のアロマ噴霧を行い、室中央部の席では両側の香りが混合されていたと想定した。そこで、ブレンド席における主観評価に着目し、日替わり席の主観評価及び 2 箇所から LA を噴霧した日のブレンド席の評価との比較を行った。その結果を Fig.7 に示す。RM や PM、EU では全体的な評価の上昇が見られた。特に RM の受容度、体感時間及び PM の疲労度において有意差が見られた。一方で BE や TT では全体的に評価の減少が見られたが有意差は見られなかった。しかし、ブレンド席において実際にどの程度の割合でアロマが混合されていたかは不明である。今後、トレーサーガスを用いた席ごとの濃度測定を行い詳しく検討する必要があるが、ブレンドの方法によって、個々で噴霧を行う際の評価よりも学習環境に適した評価になる可能性が示唆される。

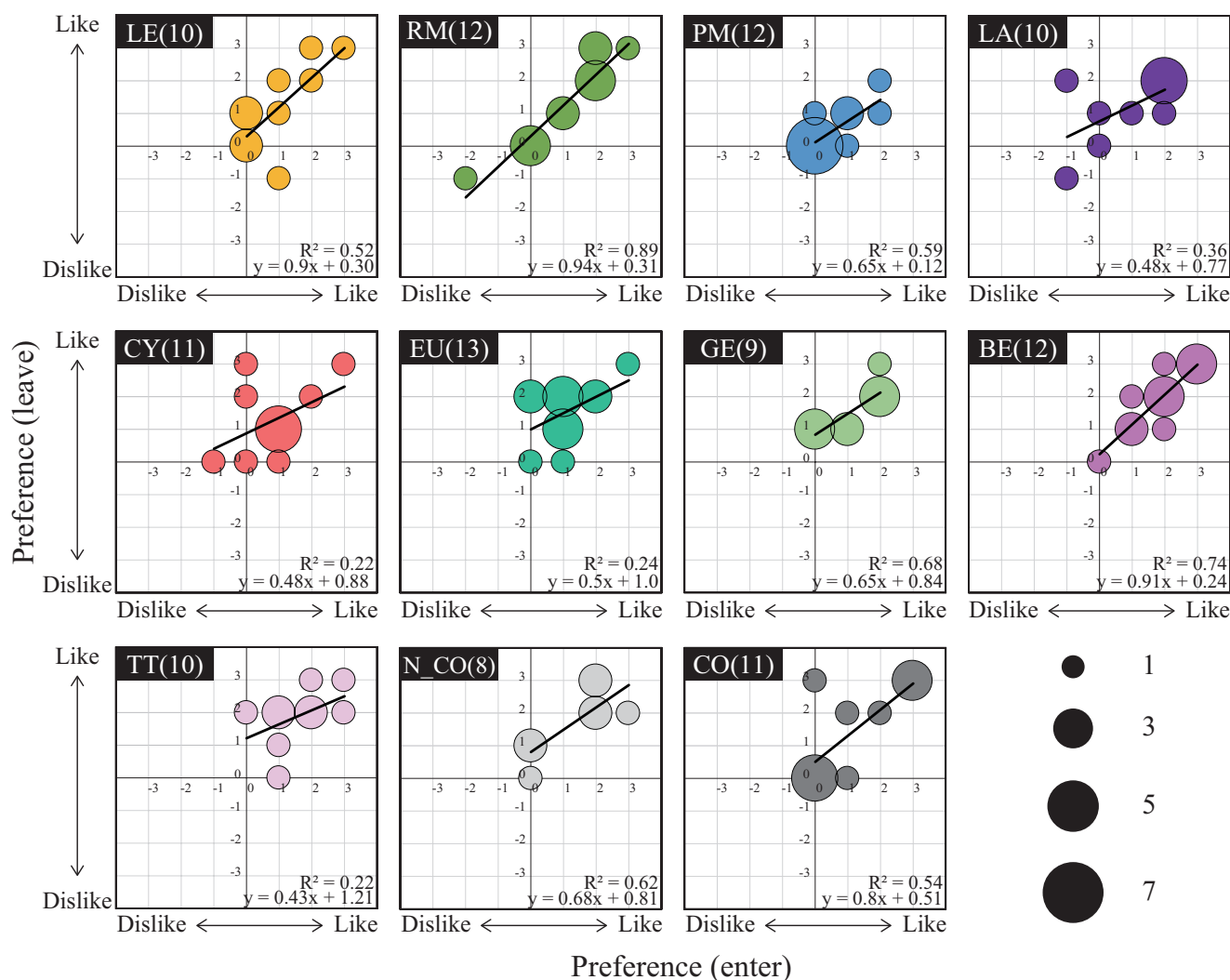


Fig. 8 The relationship between preference at the time of entering and leaving

3.4 入退室時の嗜好度の推移

既報²⁾において嗜好度と撈り度には正の相関が見られることは報告されている。本実験でも同様の相関が見られ、本報では嗜好度における入室時と退室時の評価の比較の結果を報告する。日替わり席における入室時と退室時の嗜好度の関係を Fig.8 に示す。全アロマ条件で回答はおおよそ $y = x$ の直線上に分布が見られるが、やや入室時と比較して退室時の評価が上昇する傾向が見られる。これは無臭条件でも同様の結果となることから、アロマが嗜好度及び撈り度に悪影響は与えていないといえる。TT では参加者の8割が退室時の評価で「好き」以上の回答をしており、撈り度の評価も N_CO 条件に次いで2番目の評価となったことから長期的な噴霧が期待できる。一方、嗜好度の評価が最も低かった PM は「どちらでもない」に評価が集まり、撈り度も低い評価となったため自習室噴霧に適していない可能性が示唆される。CO 条件においては評価が「どちらでもない」と「非常に好き」の部分に集中した。これは無臭条件を好むパネルの存在がいることを表しており、実際に学習空間に導入する際にはアロマ噴霧を行わない空間も設置する必要があると考えられる。

4 おわりに

本報では、前報で測定した精油の臭気濃度の結果をもとに、香りの種類と噴霧期間に着目して、自習室においてパネル実験を行った。無臭条件と比較すると、評価が上昇するアロマと減少するアロマが見られ、学習空間においては噴霧するアロマの選定が重要だと考えられる。また、個々で噴霧した際に低い評価となったアロマも適切なブレンドを行うことで学習空間に適したアロマになる可能性があることが示唆された。今後は、パネル数を増やした検討や、ブレンドの特性に関する検討が必要であると考えられる。

【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) P. Wargocki, H.N. Knudsen, A. Rabstajn, A. Afshari :Measurements of perceived air quality: correlations between odor intensity, acceptability and characteristics of air Healthy Buildings 2009 : Proceedings of the 9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition (2009)
- 2) 福本、山中、崔、竹村、小林: 大学自習室における香り噴霧が在室者の室内環境及び学習効率の主観評価に及ぼす影響に関する検討、第35回におい・かおり環境学会講演要旨集, pp.24-25, 2022.09