

空調用冷温水熱融通システム最適運用技術の研究

サーマルグリット構築後の運転実態の把握と熱源機特性のモデル化

Research on optimization method in operation of heat interchange system among buildings
for air conditioningAnalyzing real operating conditions of the thermal grid system and modeling characteristics
of heat source equipment

○富岡 由貴 (大阪市立大学)

鍋島 美奈子 (大阪市立大学)

中尾 正喜 (大阪市立大学)

前田 浩行 (東京電力ホールディングス)

高橋 宜希 (大阪市立大学)

西岡 真稔 (大阪市立大学)

久保井 大輔 (東京電力ホールディングス)

Yuki TOMIOKA^{*1} Yoshiki TAKAHASHI^{*2} Minako NABESHIMA^{*1} Masatoshi NISHIOKA^{*1}Masaki NAKAO^{*1} Daisuke KUBOI^{*2} Hiroyuki MAEDA^{*2}^{*1}Osaka City University ^{*2}Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

A thermal grid system, TGS, which is the bidirectional heat interchange system among buildings for air conditioning was introduced to the exhibition hall. Energy saving effect was demonstrated by an optimization system in 2015, however now the site managers have chosen refrigerators to use based on their experience. This paper aims to improve the optimization system. The interview survey was conducted to the site managers to analyze operating data and understand current issues. As a result, estimation of the primary energy consumption has been improved by modeling of the refrigerators, and optimization constraint conditions have been formulated.

1. 研究背景・目的

近年、温室効果ガス削減にむけて空調設備の省エネルギー化が必要とされている。2015年に「サーマルグリットシステム(以降、TGS)」の実証実験が大阪の国際展示場で行われ、筆者らはこの施設でのTGSの導入による省エネ効果を明らかにした¹⁾²⁾。しかし、現在の国際展示場におけるTGSの運用方法は、2015年当時で使用していた最適化システムを使わず、当日の施設の利用状況及び運用状況に基づいて現場管理者が使用する熱源機を選択しており、最適化による一次エネルギー消費量削減の余地があると考えられる。

石那田ら³⁾はTGSにおける双方向性を持つ熱の流れを簡易に表現する熱量ベースモデルにおいて遺伝的アルゴリズムを用い、空調システム全体の一次エネルギー消費量が最小となる運用方法の算出を行う最適化手法を作成した。しかし、この手法は仮想街区での適用のみであり、実運用の現場では検証されていない。この熱量ベースモデルによる最適化システムを実際のTGSの運用現場に適用するためには、実運用で実行不可能な解は制約条件によって除外したい。また、現場の熱源機のエネルギー消費量を正確に推定できる特性式を作成することにより評価関数の精度向上が見込まれる。同時に計算時間の短縮も必要である。

本研究ではこの最適化手法を国際展示場に適用するため、現状の運転実態を把握し、制約条件の抽出・定式化及び評価関数の精度向上を目的とする。

2. 最適化手法

本研究最適化手法の計算プロセスをFig. 1に示す。熱量ベースモデルに熱源機負荷率と熱輸送率の組合せを複数作成したものを入力し、一次エネルギー消費量が最小になる組合せを繰り返し計算によって求める最適化手法となる。

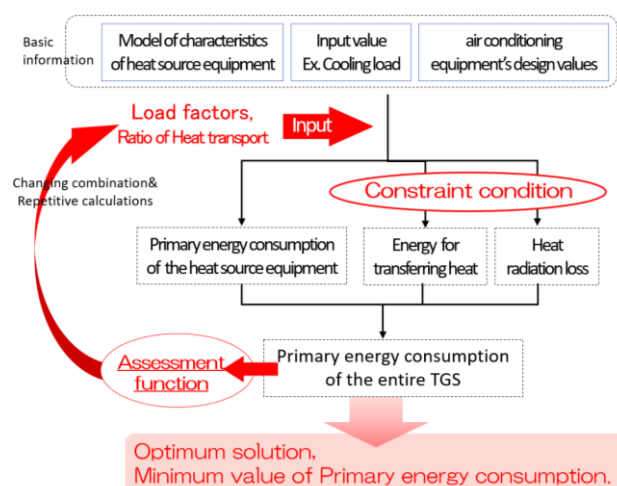


Fig. 1 Calculation process

ここにおける評価関数とは、
評価関数=熱源機の一次エネルギー消費量の総和+熱融通に要する搬送動力の総和
となっており、この評価値が最小になる熱源機負荷率と熱輸送率を最適解とする。本研究ではこのプロセスにおける制約条件と熱源機特性式を扱う。

3. 2019 年度夏季運用状況

昨年に 5 号館の吸収式熱源機が更新され、現在はその熱源機と全容量の 6%の容量であるターボ冷凍機を優先的に稼働し熱融通運転する形態をとっている。現状、現場管理者が稼働する熱源機を選択する際の判断基準として Table 1 の優先順位が決められている。高効率機の設置されている 6 号館では単独利用の機会が少なく 6 号館の負荷は建物の熱源で補い、高効率機である R606 で他建物への熱融通を行っている。そのため R606 は最優先熱源となり 6 号館熱源による他建物への熱融通の優先度は最も低い。

Table 1 Priority levels of heat sources.

Priority Levels	Heat Source
Top Priority	R606
Priority (Buildings2,5,6)	Each Building's Heat Source
Priority (Buildings4,1,3)	R501,R502
Priority (Buildings4,1,3)	R101・R301
Medium (Sopply To Loop)	R201
Lowest (Sopply To Loop)	R60X except R606

実際の運用を見ると Fig. 3 より、全号館使用時である 8 月 25 日 12:00 において R606 は熱量を供給しており 2 号館と 6 号館で各熱源を用いる単独運転を行っている。5 号館と 3 号館では単独運転を行いながら熱量を供給している様子が見られる。3 建物使用時の 9 月 3 日 13:00 では 5 号館での負荷が小さいため能力の小さい R502 を用いており、5 号館で余った熱量と R606 から供給される熱量によって 3 号館が冷却されている様子が見られた。以上の 2 日において Table 1 での優先順位に則った運用であることが確認できた。

4. 運用に関するヒアリング内容

国際展示場の現場管理者へ運用上の問題点・注意点に関するヒアリングを行い、制約条件抽出のための現在の空調設備の実態の把握を行った。

4.1. 2 号館

2 号館ではグリットポンプによる熱量の引き込みと建物の熱源機を同時に利用した場合グリットポンプが停止する。これはインバーターポンプと定速ポンプの並列利用による圧力負けが考えられた(Fig. 2)

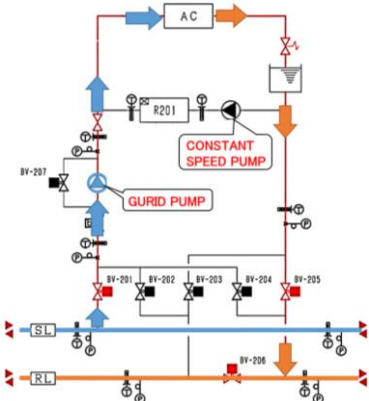


Fig. 2 Water flow state in Building 2 when demand heat from thermal loop

4.2. 熱量引き込み時

2 号館では熱量の引き込みのみの運用の際に展示場内の温度が充分に下がらず、利用者が熱いと感じた。5 号館においてはレストランの空調の効きが悪い様子が見られた。これらはグリットポンプの定格流量によって引き込む熱量に制限があり必要な熱量が補えていないことが考えられた。また、6 号館においてはヘッダの温度が下がりにくい傾向が見られた。

4.3. 熱量供給時

1,3 号館の熱源機と高効率機である R606 はそれぞれサーマルループに直結している。これらを同時に使用する場合、R606 の冷温水ポンプはインバーターポンプであり、その他は定速ポンプのためサーマルループを介して前者の圧力負けが発生する。そのためこれらを同時に使用する際には定速ポンプの流量を減少させるためバイパスを用いた送水経路に設定する必要がある。これにより TGS を扱ううえで流量を考慮することが重要であることがわかった。

5. 制約条件の抽出と定式化

既往研究²⁾においても制約条件は設定されていたが、空調設備の実態を踏まえた制約条件を追加することにより実運用で実行不可となる最適解をより多く排除することができる。本研究では前章のヒアリング結果より以下の制約条件を加えた。

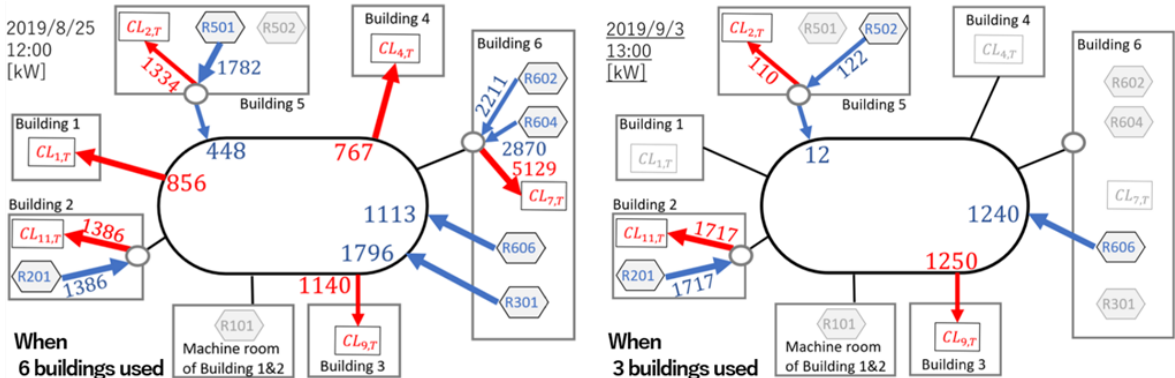


Fig. 3 Heat flow state at 8/25 12:00 & 9/25 13:00

- i. 建物内のインバーターポンプと定速ポンプの並列利用による圧力負けが考えられる場合、熱源稼働時の他建物からの熱量の引き込みを行う最適解を除外する制約条件
- ii. サーマルループから熱量を引き込む場合、グリットポンプの定格流量によって引き込む熱量に制限があるため定格流量を超える熱量の引き込みを行う最適解を除外する制約条件—(1)式
- iii. サーマルループへ熱量を供給する場合、送水する配管の径によって熱輸送量に制限がある。そのため各配管の最大熱輸送量を超える際には熱量の供給を行えない。よって最大熱輸送量を超える熱量の輸送を行う最適解を除外する制約条件—(2)、(3)式

$$mR_{GP} > m_{GP,i,T} \quad (1)$$

$$|QR_{N+i,T}| < \pi \times \left(\frac{d_{N+i}}{2}\right)^2 \times v \times \Delta t_T \times c \times \rho \quad (2)$$

$$|QL_{N+(i+1),T}| < \pi \times \left(\frac{d_{N+i}}{2}\right)^2 \times v \times \Delta t_T \times c \times \rho \quad (3)$$

mR_{GP}	: Rated flow rate of grid pump	[m ³ /h]
$m_{GP,i,T}$: Flow rate of grid pump	[m ³ /h]
c	: Specific heat of water	[J]/(g · K)]
ρ	: Density of water	(=1000kg/m ³)
Δt_T	: Differential temperature of heat source	(=5K)
d_{N+i}	: Internal diameter of piping	[m]
v	: Flow speed	(=2.5[m/s])
$QR_{N+i,T}$: Quantity of transfer heat	[kW]
$QL_{N+(i+1),T}$: Quantity of transfer heat	[kW]

6. グリットポンプの流量の算出

熱量ベースでは熱収支の計算を行っているため、冷温水の水量の収支が考慮されていない。冷温水の水量の収支が合っていないと熱源機や空調機での流量が過多となり温度差がつかず冷却能力の低下を起こす可能性がある。

また、現在の流量の計算では負荷側の温度差を 5℃固定としているが、インテックス大阪での実運転では温度差が変動しており 5℃でない場合がある。(Fig. 4)

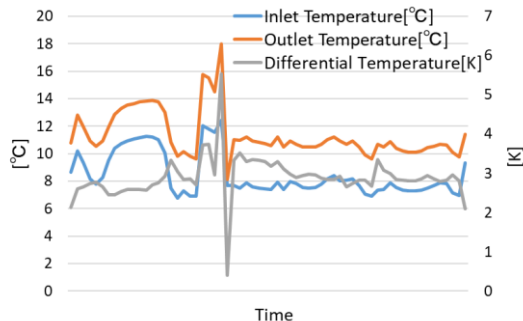


Fig. 4 Differential temperature of air conditioner of Building1

本研究では以下のような過程で冷温水の水量の収支と負荷側の温度差の変動を考慮しグリットポンプの流量を決定した。

- 1) まず入力値である冷房負荷と実測値の負荷側の温度差

から負荷側の流量を算出 (4)式

- 2) 負荷側の流量と熱源機によって冷却された流量の総和は等しい (5)式

- 3) 熱源機側の流量を負荷側の流量の総和を製造熱量で分配することによって求める。このとき全ての熱源機における温度差は等しいと仮定 (6)式

- 4) グリットポンプの流量は熱源機側の流量と負荷側流量との差により算出され、 $m_{GL,i,T} > 0$ のときサーマルループへ供給する流量、 $m_{GL,i,T} < 0$ ではサーマルループから引き込む流量となる (7)式

$$m_{CL,i,T} = \frac{CL_{i,T}}{c * \rho * \Delta t_{CL,i,T}} \quad (4)$$

$$\sum m_{CL,i,T} = \sum m_{S,i,T} \quad (5)$$

$$m_{S,i,T} = \sum m_{CL,i,T} \times \frac{Q_{i,T}}{\sum Q_{i,T}} \quad (6)$$

$$m_{GP,i,T} = m_{S,i,T} - m_{CL,i,T} \quad (7)$$

$m_{CL,i,T}$: Flow rate for cooling load	[m ³ /h]
$CL_{i,T}$: Cooling load	[kW]
$\Delta t_{CL,i,T}$: Differential temperature of air conditioner	[K]
$m_{S,i,T}$: Flow rate by heat source	[m ³ /h]

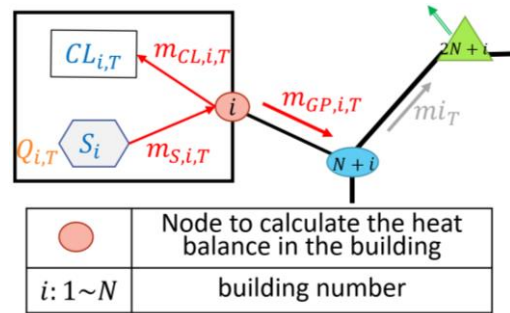


Fig. 5 The example of the flow rate of grid pump

7. サーマルループの流量の算出

評価関数の要素の一つである熱融通時の搬送動力を算出するためには前章で算出したグリットポンプの流量を用いて各サーマルループの流量を求める必要がある。この際、搬送動力を最小とするためには、全体流量が最小となる流路を選択する必要がある、等式制約付きの関数最小化問題に帰着する。このとき $i = 1$ において(8)、 $i = 2 \sim N$ において(9)の条件を満たし、かつ(10)が最小となる定数 a の値を求める。結果(11)によって定数 a が求まり $m_{i,T}$ から定数 a を引いた値がサーマルループの各配管における最小流量となる。

$$m_{GP,1,T} + m_{N,T} - m_{1,T} - 2a = 0 \quad (8)$$

$$m_{GP,i,T} + m_{(i-1),T} - m_{i,T} - 2a = 0 \quad (9)$$

$$y = \sum_{i=1}^N (m_{i,T} - a)^2 \quad (10)$$

$$a = \frac{\sum m_{i,T}}{N} \quad (11)$$

$m_{i,T}$: Flow rate of loop pipe assumed	[m ³ /h]
N	: Number of buildings	[-]

a :Fixed number

8. 熱源機特性の近似式

本研究では指数モデルを用いる。既往研究 ¹⁾では冷却水の要素が含まれておらず気象条件の変化に対応していなかったため研究ではそれを考慮した。指数モデルとは実測データを基準化し説明変数として用い、無次元の近似特性式として(12)の形を仮定したものである。LCEM ツールと同様に冷水温度や冷却水温度を考慮しながらも、計算過程がより少ないモデルとなっている。ターボ冷凍機では被説明変数を電力消費量とした。

作成した熱源特性式の精度確認のため、吸収式熱源機ではガス消費量推定時の RMSE を、既往研究 ¹⁾²⁾でサーマルグリッド導入効果算出に用いられたモデルと比較した。既往研究 ¹⁾は負荷率のみを独立変数としたモデルであり、既往研究 ²⁾は LCEM ツールが用いられ 5 つの独立変数と 16 個の回帰係数に加えメーカー値を考慮したモデルである。またターボ冷凍機である R606 の精度確認では、ターボ冷凍機用の LBL モデル ³⁾を比較対象とし消費電力での RMSE の比較を行った。この LBL モデルでは 3 つの独立変数と 3 個の回帰係数が含まれる。結果 LBL モデルではRMSE = 2.908、指数モデルではRMSE = 5.081となった。(Fig. 6, Fig. 7)本最適化手法では計算過程が少なく簡易なモデルである指数モデルでの電力消費量の推定を行う。

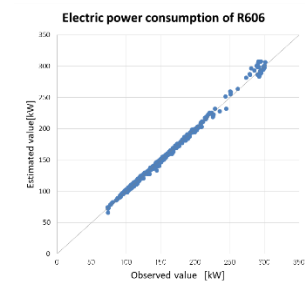


Fig. 6 LBL Model

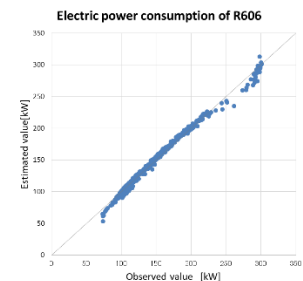


Fig. 7 Exponential Model

吸収式熱源機では Table 2 より、全ての吸収式熱源機において指数モデルの RMSE が最も小さくなり推定精度が高いことを示せた。モデルのパラメータ数においても指数モデルは少ないことから精度の高い熱源特性式を作成可能な手法であることが分かった。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{t_{Eva.out} + 273.15}{t_{Eva.out,0} + 273.15}^{a_1} * \frac{m}{m_0}^{a_2} * \frac{t_{Con.in} + 273.15}{t_{Con.in,0} + 273.15}^{a_3} * \frac{Q}{Q_0}^{a_4} \tag{12}$$

G :Gas consumption [Nm³/h]
 G_0 : Reference value of gas consumption [Nm³/h]
 $t_{Eva.out}$:Outlet temperature of hot and cold water [K]
 $t_{Eva.out,0}$:Reference value of outlet temperature of hot and cold water [K]
 m :Flow rate of hot and cold water [m³/h]
 m_0 :Reference value of flow rate of hot and cold water [m³/h]

$t_{Con.in}$:Flow rate of cooling water [K]
 $t_{Con.in,0}$:Reference value of inlet temperature of cooling water [K]
 Q :Quantity of heat [kW]
 Q_0 :Reference value of quantity of heat [kW]
 $a_1 \sim a_4$:parameters [-]

Table 2 The comparison result of RMSE[Nm³/h]

Heat Source	Number of data	Exponential Model	Previous Research1)	Previous Research2)	Previous Research5)
R101	63	7.059	9.741	12.347	
R201	471	4.288	7.904	6.136	
R301	53	8.181	10.975	21.654	
R501	333	4.825	6.211		
R502	46	6.601	20.465		
R602	52	12.409	18.891	27.067	
R604	162	20.989	35.066	51.497	
R606	513	5.081[kW]			2.908[kW]

9. まとめ

- ・ ヒアリングを行ったことにより今まで把握されていなかった国際展示場における TGS の運用実態を把握できた。
- ・ 実運用で実行不可な最適解を減らすため、現場における空調システムの実態を踏まえた制約条件を最適化手法に組み込むことができた。
- ・ 指数モデルが熱源機の種類を問わず熱源特性式を作成できることが分かった。
- ・ 指数モデルによって従来のモデルと比較して推定精度の高い熱源特性式を作成でき、評価関数の精度が向上した。
- ・ 今後最適化計算を行い今夏の運用方法と最適運用方法との比較から現状の改善の模索を行う。

参考文献

1) 田中ら「既存施設に導入されたサーマルグリッドシステムの省エネルギー効果・実運転データを用いた空調熱源システム運転特性の分析」空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会 A-45
2) 石那田ら「サーマルグリッドシステムにおける一次エネルギー消費量削減効果に関する研究—高効率冷凍機の共同利用運転時の効果—」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 第2巻 p145-p148,2017 年 9 月
3) 石那田ら「サーマルグリッド空調システム導入効果の評価手法に関する研究 (第 1 報)遺伝的アルゴリズムを用いた複数建物間の双方向熱融通最適化の検討」空気調和・衛生工学会近畿支部発表会 A-12
4) 横山ら「インテックス大阪 (展示場) におけるサーマルグリッドの適用と効果検証 (第 4 報) 最適化手法とその適用」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 pp.161-164, 2016 年 9 月
5) Michael Wetter, Wangda Zuo, Thierry S. Noudui, Xiufeng PangSorrell, Steve. "Modelica Buildings library" Journal of Building Performance Simulation 7(4) (2014): 253-270

謝辞

本研究を進めるにあたり、大阪市経済戦略局、大阪国際経済振興センター、鹿島建物総合管理 (株)、(株) NTT ファシリテーズエンジニアリングにご協力いただきました。また、(株) 安井建築設計事務所の小林陽一様より設計情報や関係する知識等、アドバイスを受けた。記して謝意を表します。

空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究

(第5報) 複数帯水層利用の検討

Study on Aquifer Thermal Energy Storage System for Space Cooling and Heating
- (Part 5) Examination of Using Multiple Aquifers -

○中谷 公亮 (大阪市立大学) 西岡 真稔 (大阪市立大学)
鍋島 美奈子 (大阪市立大学) 中尾 正喜 (大阪市立大学)

Kosuke NAKATANI*¹ Masatoshi NISHIOKA*¹

Minako NABESHIMA*¹ Masaki NAKAO*¹

*¹ Osaka City University

Aquifer Thermal Energy Storage System can be expected to have an energy-saving effect by keeping and recovering and utilizing building waste heat in an aquifer. In case of Aquifer Thermal Energy Storage System, the heat storage capacity is determined due to site restrictions. Therefore, in order to increase the heat storage capacity in the same area, we propose an aquifer thermal storage system using two aquifers stacked vertically. It shows that the heat storage capacity can be twice as large as that of the aquifer thermal storage system using one aquifer.

1. 研究背景・目的

1.1 研究背景

震災による電力供給不足を背景にエネルギー政策の見直しがされており、省エネルギーの社会の推進、再生可能エネルギー、未利用エネルギーの活用などが重要視されている。また、エネルギーの需要密度の高い大都市域は、その大部分が沖積平野に位置しており、その足元に広がる地下水で満たされた帯水層は熱的な利用価値が高い。そこで熱源井戸を構築する事で、帯水層を低価格・大容量の蓄熱槽とし、効率的に熱エネルギーを冷暖房の熱源として利用する帯水層蓄熱空調システムに着目した。

帯水層蓄熱空調システムは、地下水を冷暖房の熱源として利用するとともに、冷暖房時に発生する冷温排熱を地下水に与え、建物地下の帯水層に蓄熱し季節を跨いで利用することによって大幅な二酸化炭素排出量削減、省エネルギー効果が期待できる。また夏期においては、温排熱を地下水に付与することで、大気中に排出しないことからヒートアイランド現象の緩和策としても期待することができる。

1.2 研究目的

これまで 2016 年には兵庫県高砂市にある井戸を対象に実用を想定した大規模な蓄熱実験を行い、2017 年には大阪市うめきた地区において同様に蓄熱実験を行った。実験の結果、実用を想定した大規模な蓄熱でも 70%以上の熱回収率が得られる事を確認した。

日本の帯水層は諸外国に比べて帯水層が薄く、一層あたりの帯水層の蓄熱容量が小さい。蓄熱容量を超えて過度に蓄熱すると冷熱塊と温熱塊が熱干渉をおこし、熱的価値が低下することで蓄熱効率が低下する。そこで上下に隣接する帯水層を二層用いた帯水層蓄熱について、帯水層を二層用いた蓄熱方法とこれまで行われてきた帯水層一層を用いた蓄熱方法を比較し、その性能を検討する。二層の帯水層を用いることから名前を Doublet-Aquifer-Thermal-Energy-Storage-System (D-ATES) とする。区別するため、今まで行われてきた帯水層一層を対象にした ATES を Single-Aquifer-Thermal-Energy-Storage-System (S-ATES) とする。

D-ATES は帯水層を 2 層用いることで D-ATES の帯水層容積は S-ATES で用いる帯水層容積の 2 倍になる。その分蓄熱容量も増加し 2 倍になると考えられる。

そこで本研究の目的は D-ATES が S-ATES で賄うことのできる熱負荷量の 2 倍の負荷量を同等の COP で賄えることを示すことである。

1.3 D-ATES システム

D-ATES では上部帯水層と下部帯水層の水質等が異なるので、井戸閉塞の恐れがあるので帯水層の水を混合させてはいけな。よって、混合させないような設備システムにした。

D-ATES の例として Figure 1、Figure 2 に夏期の蓄熱方式イメージを示す。Figure 1 は S-ATES を 2 層それ

それぞれで行う方式である。Figure 2 は 2 層の帯水層それぞれに温熱を蓄える層か冷熱を蓄える層の役割を与え、温熱層と冷熱層に分離する方法である。両者それぞれに特質があるが、本研究では D-ATES 特有である Figure 2 の蓄熱方法を採用した想定で検討する。

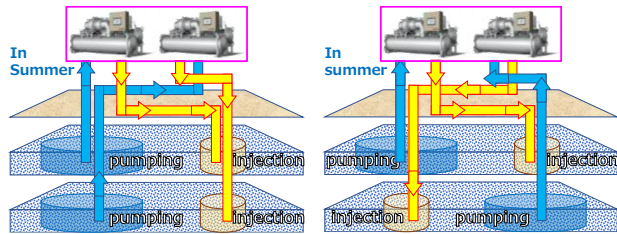


Figure 1 Example of D-ATES System

Figure 2 Example of D-ATES System

2. 帯水層円筒形モデル

大東ら⁽¹⁾は、Modelica 言語を用いたシミュレーションツール Dymola を用いて施設側設備と帯水層を組み合わせ総合的な S-ATES のシステム評価を行ってきた。本研究でもそれにのっとり研究を進めていく。Dymola には帯水層の温度応答を再現できるようなモデルがない。そこで伊藤ら⁽²⁾が作成した帯水層円筒形モデルによって、帯水層の温度応答を計算する。

D-ATES のシミュレーションを行うにあたり既往研究で用いられてきた帯水層モデルを拡張したのでその点を述べる。

既往研究では計算コストの軽量化と不透水層への伝熱量を微小とする仮定から不透水層は熱容量を持たないモデルとなっていた。本研究で検討する D-ATES の蓄熱方法では上部帯水層に温熱塊を蓄え中間不透水層を挟んで下部帯水層に冷熱塊を蓄える仕様になっている。ここで新たに考慮しなくてはならない点が上下部の帯水層に温度差が生じ中間不透水層への伝熱量が大きくなることで蓄熱損失が S-ATES よりも大きくなる懸念される。

そこで本研究では不透水層にも熱容量を加えシミュレーションに反映させることでより現実的なモデルを作成することにした。Figure 3、Figure 4 に既往研究との変更点がわかりやすいように S-ATES 用のモデルの改良前後のイメージ図を示す。Figure 4 は不透水層-帯水層-不透水層の 3 層になっているが層を追加することで不透水層-帯水層-不透水層-帯水層-不透水層の 5 層のモデルになり D-ATES のシミュレーションが可能である

Table 1 Initial condition of aquifer cylindrical model

Parameters	Unit	Value
Initial ground temperature	°C	18
Calculation range	m	200
Porosity	-	0.3
Approximate heat dispersion length	m	5
Upper Aquifer thickness	m	10
Lower Aquifer thickness	m	15
Aquifer Specific heat	J/(kg・K)	3180
Aquifer Thermal conductivity	W/(m・K)	3.5
Upper & lower Confining layer thickness	m	50
Middle Confining layer thickness	m	30
Confining layer Specific heat	J/(kg・K)	3060
Confining layer Thermal conductivity	W/(m・K)	1.28
Water Specific heat	J/(kg・K)	4180
Water Thermal conductivity	W/(m・K)	0.59

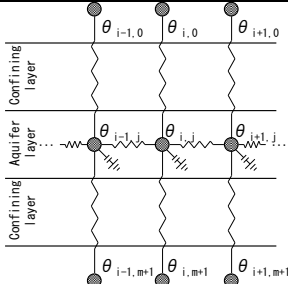


Figure 3 Heat transfer image of model before improvement

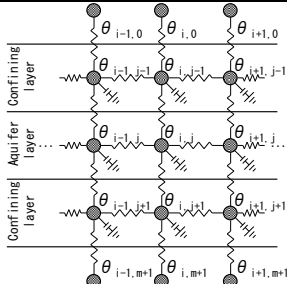


Figure 4 Heat transfer image of model after improvement

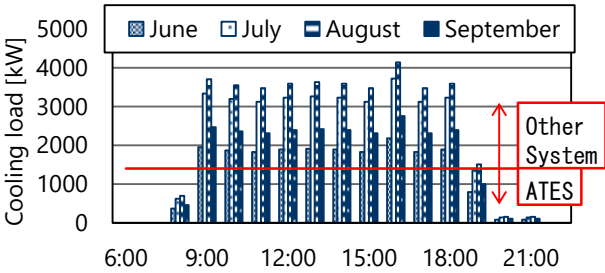


Figure 5 Cooling load in Summer

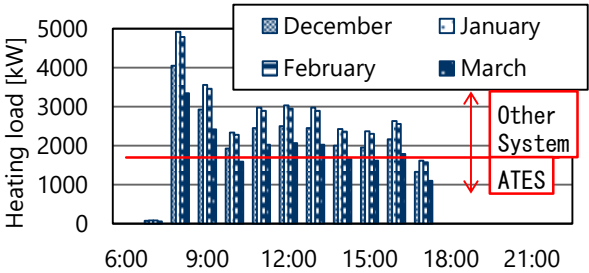


Figure 6 Heating load in Winter

3. D-ATES と S-ATES の性能比較条件

3.1 地盤条件

本研究ではうめきた地区の地盤特性を採用し、D-ATES の設備システムを構築したときの検討を行う。地盤条件は Table 1 の通りである。

3.2 熱負荷

本研究では、建物で発生する負荷うち稼働時間の長いベース部分の本システムで処理すると仮定した。そのため、延床面積 48000m²の業務施設を想定した。ベース部分以外の負荷は他の熱源システムで処理する。文献⁽⁴⁾の負荷原単位を参考に設定した夏期(6月~9月)の冷房負荷を Figure 5 に示す。また暖房負荷(12月~3月)についても、冷房負荷と同様に Figure 6 のように設定した。本研究では、Figure 5、Figure 6 の月ごとの負荷が毎日繰り返し続くと仮定してシミュレーションを行う。また Figure 14 のように 6~9 月は「冷房運転+温水蓄熱」、12~3 月は「暖房運転+冷水蓄熱」と「冷却塔蓄熱運転」を行う。

D-ATES では夏期は 1400 kW、冬期は 1700kW を賄う運転を想定する。S-ATES では D-ATES の負荷の半分の量の夏期は 700 kW、冬期は 850kW を賄う運転を想定する。

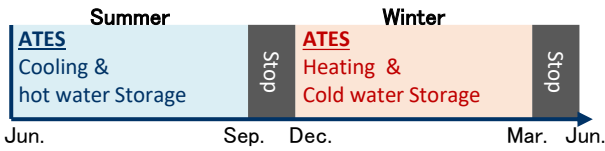


Figure 14 Annual operation

3.3 運転モード

S-ATES の運転モードは 3 つである。ここでは温熱を蓄えるため温水を還水する井戸を高温井戸、冷熱を蓄えるため冷水を還水するための井戸を低温井戸、常温の水を還す井戸を常温井戸と呼ぶ。また D-ATES の上部帯水層を用いた想定で帯水層厚は 10 m とする。モード S1 冷房運転 (Figure 11) : 低温井戸から水を汲み上げ、高温井戸に 23℃で還水するように流量制御を行う。上限下限流量に達した場合は温度は成り行き。モード S2 暖房運転 (Figure 12) : 高温井戸から水を汲み上げ、低温井戸に 13℃で還水するよう流量制御を行う。上限下限流量に達した場合は温度は成り行き。モード S3 冷却塔蓄熱運転 (Figure 13) : 暖房負荷のないかつ、外気湿球温度が 2℃以下ときに行う。高温井戸から水を汲み上げ低温井戸に還す。定流量で運転し、還水温度は成り行きとする。

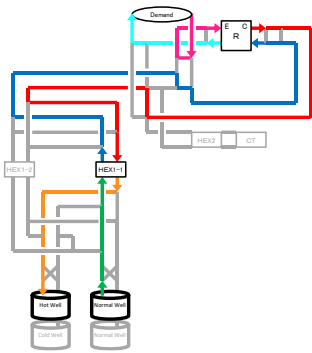


Figure 7 modeD1 First cooling + hotwater storage operation in First year's Summer

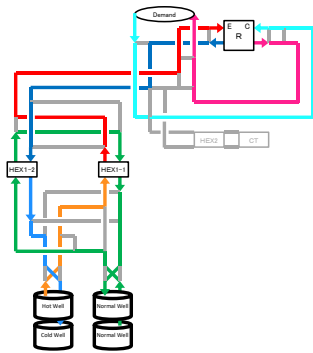


Figure 8 modeD2 Heating operation + coldwater storage in Winter

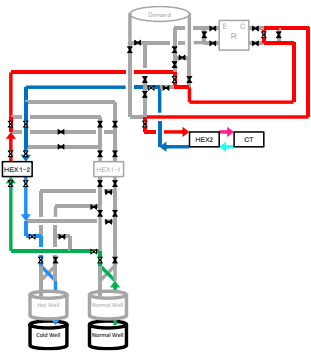


Figure 9 modeD3 Coolingtower coldwater storage in Winter

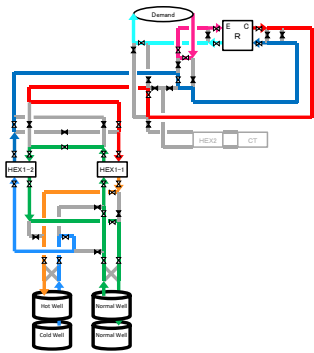


Figure 10 modeD4 Cooling operation + hotwater storage in after the second year's Summer

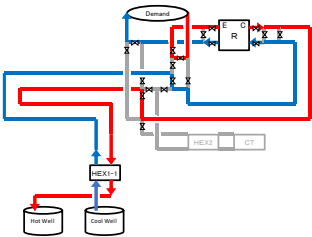


Figure 11 modeS1 Cooling operation + hotwater storage in Summer

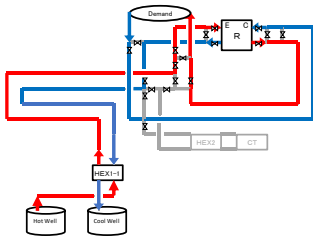


Figure 12 modeS2 Heating operation + coldwater storage in Winter

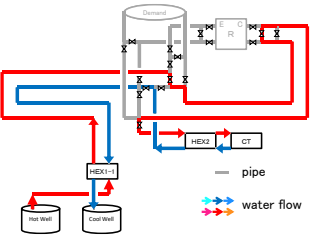
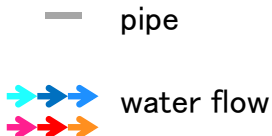


Figure 13 modeS3 Coolingtower coldwater storage in Winter



次に D-ATES の運転モードは 4 つである。

モード D1 初年度冷房運転 (Figure 7) : 初年度は帯水層内に冷熱が存在しないので上部帯水層のみを用いた運転となり、S-ATES と同じような運転になる。高温井戸には 23℃の温水を還水できるよう流量制御を行う。

モード D2 暖房運転 (Figure 8) : 夏の運転で温水が蓄熱されたので帯水層 2 層を用いる。上部帯水層は温水を汲み上げ常温水を還す。下部帯水層は常温水を汲み上げ 13℃の冷水を還水できるよう流量制御を行う。

モード D3 冷却塔蓄熱運転 (Figure 9) : 暖房負荷がないかつ、外気湿球温度が 2℃以下のときに行う。低外気温の大气と冷却塔を通じ熱交換を行い、下部帯水層において常温水を汲み上げ冷熱を付加した後低温井戸に還水する。夏の冷房負荷を担うこと、夏期冬期の流量や地中蓄熱量を平衡させる役割を持つ。定流量で運転し還水温度は成り行きとする。

モード D4 冷房運転 (Figure 10) : 初年度夏期運転のモード D1 は上部帯水層のみを用いたが、2 年目以降は冷熱が存在するため、下部帯水層も用いる。下部帯水層では冷水を汲み上げ常温水にして還水する。上部帯水層では常温水を汲み上げ 23℃の温水を還水できるよう流量制御を行う。

4. 結果

4.1 D-ATES と S-ATES の COP 比較

D-ATES と S-ATES の 2 年間運転を行ったときの COP 比較を行う。ここにおける COP は各期の熱源機、井戸ポンプ、熱源水ポンプや冷却塔の消費電力を足し合わせたものを各期の総熱負荷量で割ったものである。

各期の COP を Figure 15 に示す。Figure 15 を見ると、1 年目夏において D-ATES は S-ATES よりも COP が低い結果になった。1 年目夏は D-ATES は特殊な運転で S-ATES と同様の運転になるため負荷量が大きすぎたことが要因と考えられる。2 年目夏で比較すると D-ATES は S-ATES とほぼ同等の COP が得られていることから D-ATES 本来の運転であれば負荷量 2 倍は賄うことができることを示している。また冬においては 1 年目も 2 年目もほぼ同等の COP が得られている。

初年度夏の特殊運転を除き、D-ATES は S-ATES の賄うことのできる負荷量の 2 倍の負荷量を賄うことができ、D-ATES を導入することで同面積でより大きな蓄熱容量を得ることができる。そしてそれは、D-ATES を導入すれば S-ATES の 2 倍の省エネルギー効果があることを示している。

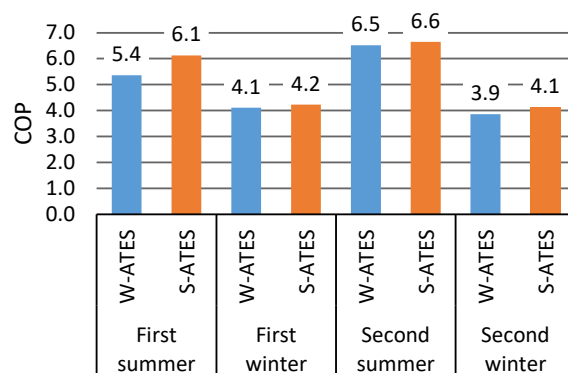


Figure 15 COP of each period of D-ATES and S-ATES

5. まとめ

2 層の帯水層を一体運用する D-ATES を提案し、数値解析を行った。その結果、2 倍の帯水層容積を用いると、S-ATES と同等の COP で 2 倍の熱負荷を賄うことができることを確認した。

なお、竹口ら⁵⁾は S-ATES の長期的運用のための蓄熱量・流量平衡の方法を示しているが、本研究は蓄熱量・流量平衡は考慮できていない。しかし、同様の方法が適用可能であるので、D-ATES でも長期運用のための蓄熱量・流量平衡の方法を整理することを今後の課題とする。

【謝辞】

本研究は、環境省の令和元年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「複数帯水層を活用した密集市街地における業務用ビル空調向け新型熱源井の技術開発」の一環で行った。中曽康壽氏をはじめ協力賜った皆さまに謝意を表します。

また本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19H02300 の助成を受けたものです。あわせて謝意を表します。

【参考文献】

- (1)大東ら:空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究-(第 3 報)季節間蓄熱における冬期冷却塔蓄熱と夏期冷水予冷の検討-,空気調和・衛生工学会論文集,2018 年 3 月
- (2)伊藤ら:帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究 - 帯水層の温度応答を予測する集中定数モデルの構築 -,空気調和・衛生工学会近畿支部発表論文集,2011 年,3 月
- (3)中谷ら:空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究 - 第 1 報 うめきた地区における地下水流速の推定と季節間蓄熱に及ぼす影響-,空気調和・衛生工学会論文集,2018 年 3 月
- (4)社) 空気調和・衛生工学会, CGS 設計に関する研究
- (5) 竹口ら:空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究(第 4 報)夏期・冬期の蓄熱量・流量を平衡させる運用方法の検討,空気調和・衛生工学会論文集,2018 年 3 月

自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システムの 実運用に向けた研究

(その 1) システム概要と設定温度緩和が快適性に与える影響の放射連成 CFD

Practical Use of Thermal Radiation Air Conditioning System from Thermal Storage Concrete Slab by
Using both Natural Energy and Heat Pump

(part 1) System Outline and Analysis of the Influence on Thermal Comfort that Leads to Calm Preset
Temperature by CFD Coupling with Radiation

○加藤 理奈子 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学) 土井 脩史 (京都橘大学)

小林 陽一 (安井建築設計事務所) 榎本 丈二 (安井建築設計事務所)

竹谷 俊成 (安井建築設計事務所) XU Jun (立命館大学)

Rinako KATO*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Shushi DOI*²

Yoichi KOBAYASHI*³ Jyoji ENOMOTO*³ Toshinari TAKETANI*³ XU Jun*¹

*¹ Ritsumeikan University *² Kyoto Tachibana University *³ Yasui Architects & Engineers, Inc.

We report outline of the thermal radiation air conditioning system, and CFD simulation result of the indoor environment which uses this system. Thermal radiation air conditioning system using both natural energy (underground heat and solar heat) and heat pump is one of the solutions for CO₂ reduction. In order to decide control target of temperature for the cooling and heating of this system, we analyze the indoor environment by CFD coupling with radiative and convective heat analysis. The result shows there is possibility to calm preset temperature to keep thermal comfort.

はじめに

平成 25～27 年度には、地中熱や太陽熱を採熱した水を、熱源を介さず直接躯体スラブ内に埋設した配管に通すことで熱利用を図る「地中熱・太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システム」(以下、前回システム)について、立命館大学・T 棟で実測によりシステムの性能評価を行った^{文1)}。その結果、単位面積当たりの CO₂ 排出削減量に関し、冷房時で 10.0kg-CO₂/m²年以上を達成し、安価な自然エネルギー利用システムを確立した。一方で、冷房時の地中採熱温度が十分に低くなかったため、他の空調システムを併用する必要性があり、また暖房時は朝方、太陽熱の供給温度が低いことで立ち上がり負荷が十分に除去できなかった。改善策として、ヒートポンプを導入することで安定した温度帯の冷温水を供給し、放射空調能力を向上させた。暖房時はこれに加え、太陽熱集熱器を増設することで、ヒートポンプと太陽熱給湯システムの選択制御を導入した。

本研究では、これらの対策を行ったシステムを「自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システム」(以下、本システム)と呼び、本システムのみで室内負荷処理を実現し、システムの効率向上と普及を目指す。

本報では、システム概要、及び本システムを導入した T 棟を対象とした CFD シミュレーションの結果を示す。CFD シミュレーションでは、空調パターンや設定温度緩和が快適性にどのような影響を与えるかを検討し、放射空調の最適な制御目標を決定するための知見を得ることを目的とする。

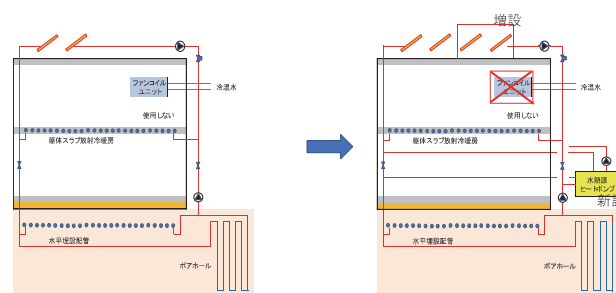


Fig.1 Overview of thermal radiation air conditioning system

1. 躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システム概要

1.1 対象建物概用

対象となる T 棟は 3 階 (低層棟) と 6 階 (高層棟) 建ての 2 棟連結型の理工学部研究棟である。本研究では、本システムが導入されている低層棟の実測及びシミュレーションを行う (Fig.2)。

1.2 システム概用

以前のシステムでは、配管とポンプを用いて地中熱を採熱し、熱源機を介さず躯体スラブに埋設した配管を用いて室内に直接放熱を行った。本システムでは制御性と立ち上がり時間の問題の改善のため、水熱源ヒートポンプの新設と、太陽熱集熱器の増設を行った（Fig.1）。

(1) 地中熱利用時

地中熱の採熱は、ボアホール（100m×3 本、36m×9 本）と建物下に設置した水平埋設配管を用いる。これを熱源とし、ヒートポンプを介して夏季は冷水を、冬季は温水を躯体スラブ配管に送水し、放射空調を行う。

(2) 太陽熱利用時

建物屋上に設置した集熱器によって集熱した太陽熱によって水を温める。この温水を直接躯体スラブ配管に送水し、冬季の放射空調を行う。太陽熱利用は昇温に時間がかかるため、立ち上がりはヒートポンプを利用し、日射取得量が 300MJ/m²に達すれば即座に太陽熱を利用する。

(3) ボアホール配管による季節間蓄熱

ボアホールに排熱を蓄熱する。夏季のはじめは暖房時冷排熱を、冬季の初めは冷房時温排熱をそれぞれ直接躯体スラブ配管に送水し、放射空調を行う。

2. CFD 解析

2.1 解析概用

CFD シミュレーションに関する手法・結果を示す。幅 9,800mm(X)×奥行 4,500mm(Y)×高さ 3,500mm(Z) の、T 棟低層棟 3 階の床面放射冷暖房式の研究室を解析対象とし、解析モデルを作成した（Fig.3）。放射空調の解析は従来の対流成分だけでは対応できないため、放射連成した解析を行い、室内の流れ、乱流、温度、輻射を考慮した定常解析を行った。また、対象室を 4 つのエリアに分け、放射パネル部分を①～③、放射パネルのないペリメーターゾーンの部分を④としている（Fig.4）。

2.2 解析ケース

Table 2 に解析ケースを示す。ここで、設定温度とは、FCU は吹出温度、放射空調は放射パネルの表面温度としている。解析は FCU のみ運転、放射空調のみ運転、放射空調とシーリングファンを併用運転のケースを想定し、それぞれ冷房時と暖房時の解析を行う。また、放射空調を用いたケースでは設定温度を厳しくしたケースと放射面の位置を天井にしたケースの検討も行う。

2.3 解析条件

解析条件を Table 1 に示す。解析における乱流モデルとしては、標準 k-ε モデルを用い、境界条件は対象研究室の実測結果から決定した。FCU の吹出吸込口に関しては一様に 600 m³/h としている。また、外調機の吹出口は換気回数を 2 回/h と想定して 300 m³/h としており、吸込口は自由流出としている。内部発熱は人体、PC、蛍光灯を

想定しており、放射の障害物として室の中央に机を設置した。

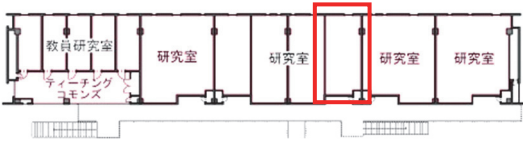


Fig.2 Targeted room for CFD analysis

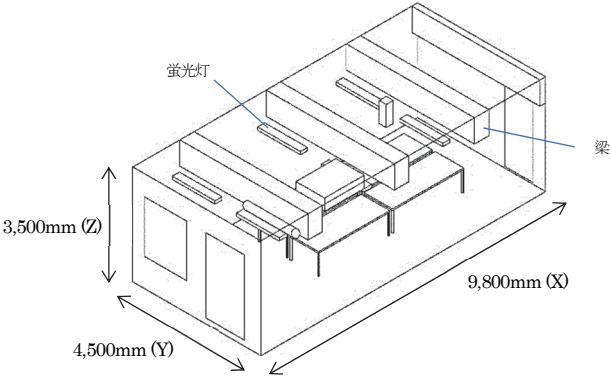


Fig.3 Analysis model

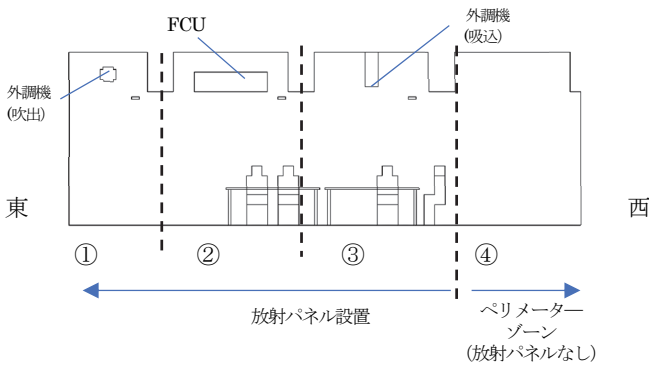


Fig.4 Analysis model (sectional view)

Table.1 Analysis condition

		冷房	暖房
流入量	外調機	300m ³ /h (25°C)	300m ³ /h (22°C)
	FCU	600m ³ /h (25°C)	600m ³ /h (26°C)
流出量		自由流出	
壁境界		温度対数則	
輻射率		0.9	
壁面温度	窓面	33°C	18°C
	壁面	27°C	21°C
	天井面	29°C	23°C
内部発熱		人体：50W/人 蛍光灯：25W/本 PC：20W/台	

Table.2 Analysis Case

冷房	空調パターン	設定温度	暖房	空調パターン	設定温度
case1	FCU	25°C	case5	FCU	26°C
case2-1		21°C	case6-1		28°C
case2-2	床面放射空調	23°C	case6-2	床面放射空調	27°C
case2-3		25°C	case6-3		26°C
case3	床面放射空調 シーリングファン	21°C	case7	床面放射空調 シーリングファン	28°C
case4	天井面放射空調	21°C	case8	天井面放射空調	28°C

3. 冷房時解析結果

温度・風速の解析結果を Fig. 5～10、1.1m高さの PMV を Fig. 11 に示す。

3.1 空調パターン

床面放射空調 (Fig.6) は床面付近に冷気だまりが発生しており、上下温度差が大きい。シーリングファンを併用することで上下温度差はある程度改善できるが、シーリングファン付近の気流感が強くなり、PMV が大きく低下するエリアがある (Fig.9)。一方、放射面を天井としたケース (Fig.10) では、冷気だまりの発生もなく、上下温度差も小さい。PMV もかなり向上している。冷房時に室内の快適性を最も維持できるのは天井放射のケースだと考えられる。

3.2 設定温度緩和

2℃ずつ設定温度を高くしていったが、居住域に当たる 1.8m 付近までの温度は床面付近を除いて大きく変化していない。風速・風向に関しても大きな変化はなく、PMV も 0.2～0.3 程度で変化が小さい。床面設定温度緩和に関しては、21℃→25℃への緩和も可能であると考えられる。

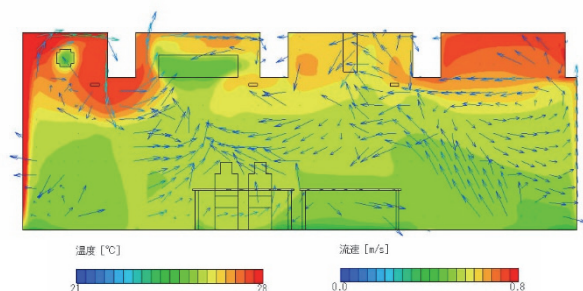


Fig.5 Case1 FCU_25°C)

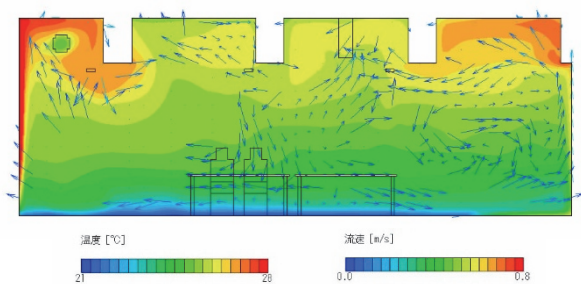


Fig.6 Case2-1 (Floor radiant air conditioning_21°C)

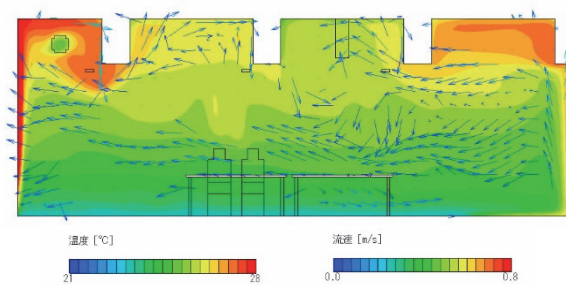


Fig.7 Case2-2 (Floor radiant air conditioning_23°C)

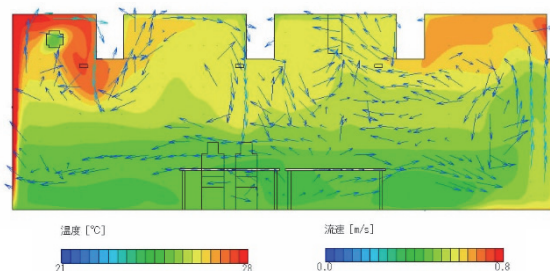


Fig.8 Case2-3 (Floor radiant air conditioning_25°C)

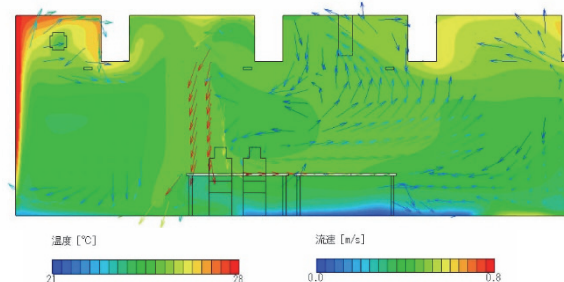


Fig.9 Case3 (Floor radiant air conditioning with ceiling fan_21°C)

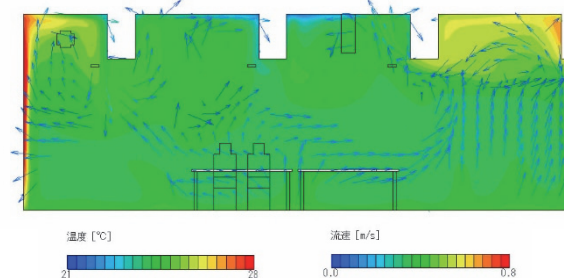


Fig.10 Case4 (Ceiling radiant air conditioning_21°C)

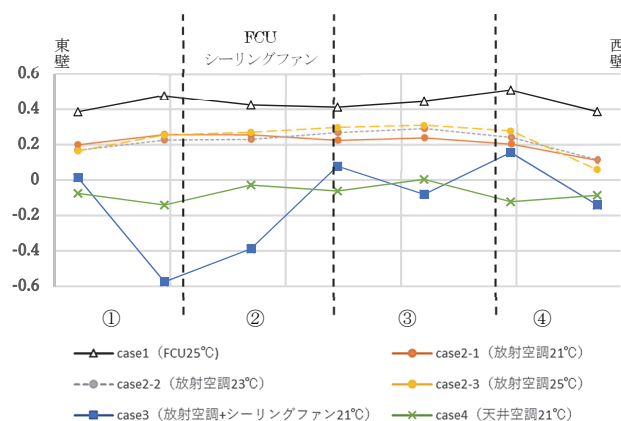


Fig.11 PMV (summer)

4. 暖房時解析結果

冷房時と同様に温度・風速の解析結果を Fig.12～17、1.1m高さの PMV を Fig.18 に示す。

4.1 空調パターン

床面放射空調 (Fig.15) は部屋の上部まで熱が伝達しているが、水平方向に温度差が大きくなっている。シーリングファンを併用することでこの水平温度差は小さくできる。一方、天井放射は暖気が天井付近にたまってしまいうため、暖房には適していない。

4.2 設定温度緩和

1℃ずつ設定温度を低くしたが、冷房時と比べて温度、風速・風向ともに室内環境が大きく変化している。また、温度を下げるほど、西窓面からの冷気の影響が室の中央付近まで出ている。床面放射空調単独での設定温度緩和は28℃→27℃が限界だと考える。

5. まとめ

本報では、自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システムの最適な制御手法の決定のため、運用パターンや設定温度緩和を行った場合のシミュレーションを行った。

(1) 空調パターン

冷房時は天井面、暖房時は床面が効果的であり、暖房時はシーリングファンを併用することで温度差が小さくなる。

(2) 設定温度緩和

冷房時は室内環境の変化が小さく、21℃→25℃の緩和も可能であると考えられる。暖房時は設定温度を変化させると室内環境が大きく変化し、窓面の冷気の影響も加味すると28℃→27℃の緩和が限界であると考ええる。

本研究は、環境省「平成31年度（令和元年度）CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システムに関する技術開発）委託業務」（研究代表者 近本智行）による。

参考文献

- 1) 近本・小林・関根他：地中熱・太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システムに関する研究（その1）～（その13）、空調調和・衛生工学会大会2014～2016、建築学会大会2014～2016（OS）

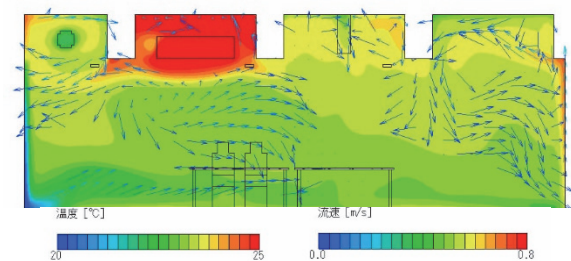


Fig.12 Case5 FCU_28℃

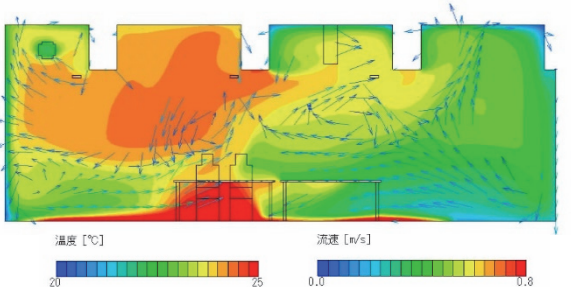


Fig.13 Case6 (Floor radiant air conditioning_28℃)

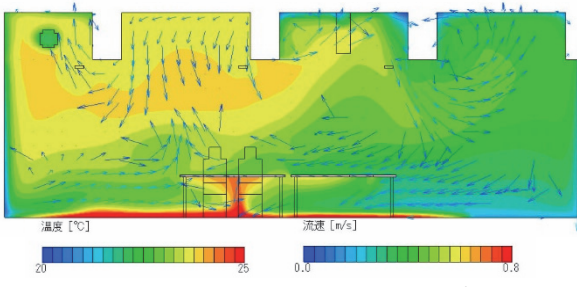


Fig.14 Case6-2 (Floor radiant air conditioning_27℃)

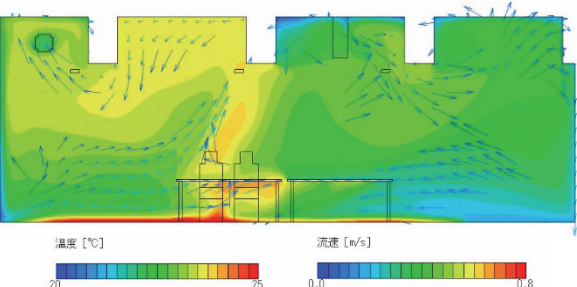


Fig.15 Case6-3 (Floor radiant air conditioning_26℃)

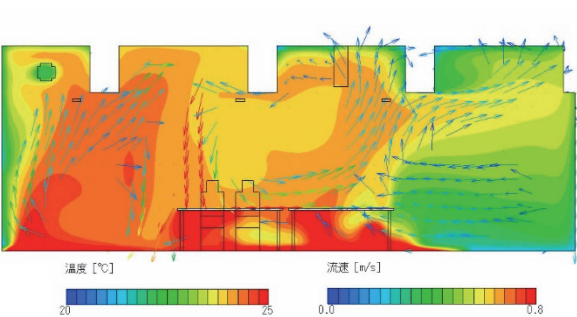


Fig.16 Case7 (Floor radiant air conditioning with ceiling fan_28℃)

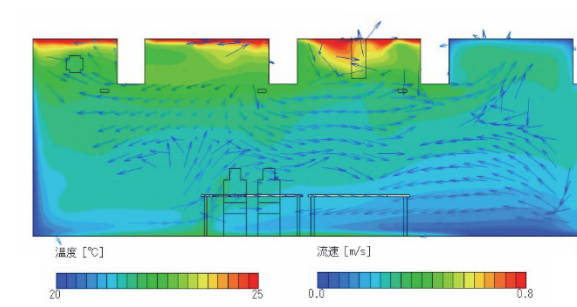


Fig.17 Case8 (Ceiling radiant air conditioning_28℃)

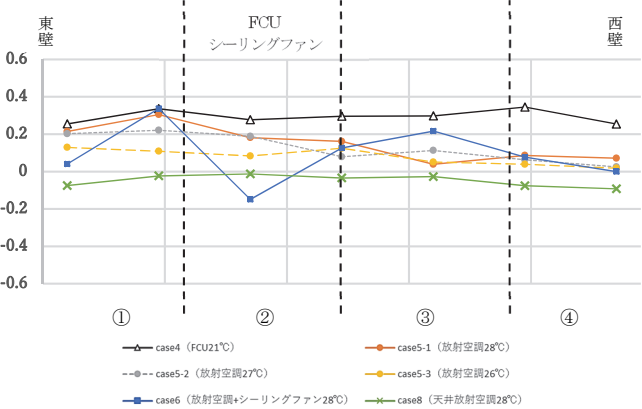


Fig.18 PMV (winter)

自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムの実運用に向けた研究
(その2) 実測に基づく放射及び対流空調の室内温熱環境と快適性の検討
Practical Use of Thermal Radiation Air Conditioning System from Thermal Storage Concrete
Slab by Using both Natural Energy and Heat Pump
(part 2) Evaluation of Indoor Thermal Environment and Thermal Comfort of Radiation Air
Conditioning System by Measurement using Actual Building

○XU Jun（立命館大学） 近本 智行（立命館大学） 土井 脩史（京都橘大学）
小林 陽一（安井建築設計事務所） 榎本 丈二（安井建築設計事務所）
竹谷 俊成（安井建築設計事務所） 加藤 理奈子（立命館大学）
Jun XU*1 Tomoyuki CHIKAMOTO*1 Shushi DOI*2 Yoichi KOBAYASHI*3
Jyoji ENOMOTO*3 Toshinari TAKETANI*3 Rinako KATO*1

*1 Ritsumeikan University *2 Kyoto Tachibana University *3 Yasui ARCHITECTS & ENGINEERS, INC.

This paper reports the outline of the verification of thermal comfort in the building using thermal radiation air conditioning system from thermal storage concrete slab by using both natural energy and heat pump. The measured indoor air temperature and radiant temperature distribution of radiant air conditioning system and FCU (convection air-conditioning) system show that radiant air conditioning system achieved comfortable indoor environment.

はじめに

本報は、前報^{文1)}に引き続き自然エネルギーとヒートポンプを併用するスラブ蓄熱放射冷暖房システムの実施事例である立命館大学・T棟を対象としたシステムの検証である。

本報では、放射空調方式及び対流空調方式が形成する室内温熱環境を把握することを目的とし、夏期・冬期における実建物実測を行い、室内温熱環境について比較・検証を行う。

1. 実測概要

1.1 実測対象研究室

本研究は、立命館大学・T棟の3つ研究室を対象とする (Fig. 1、Table1)。研究室 1-3 のスラブ埋設配管における天井放射と床放射の概要を Table 2 に示す。

1.2 実測期間・実測環境

実測期間は 2019 年 7 月 1 日～9 月 27 日、11 月 18 日～2 月 20 日の間であり、異なる運転状況における詳細な室内環境の検証を行った。3F 床面から 82mm、2F 天井面から 52 mmの位置にコイルが埋設されており、西側ペリメーターは、コイルが埋設されていない。

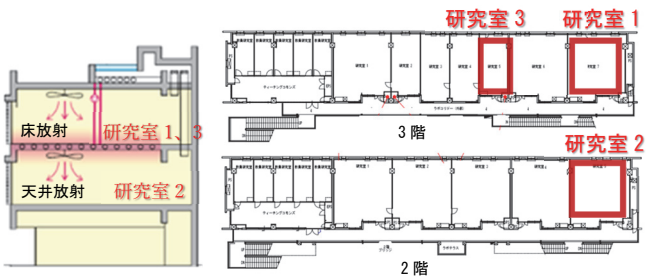


Figure1 Overview of laboratory of measurement

Table 1 Overview of laboratory of measurement

項目	研究室1	研究室2	研究室3
居室面積[m ²]	99	99	44
スラブ埋設配管面積[m ²]	79	79	39

Table 2 Overview of piping location

研究室	1	2	3
配管位置	スラブ埋設	スラブ埋設	スラブ埋設
放射面	床放射	天井放射	床放射

Fig. 2 に平面図・垂直方向の測定点を示す。測定項目は空気温度、各室の床・天井・壁・ガラスの表面温度、グローブ温度、スラブ内送水温度、空調機の吹き出し・吸い込み温度とし、5 分間隔で計測した。室内の垂直温度分布を把握するために、床表面(0mm)からの高さ 100mm、200mm、750mm、1100mm、1750mm、3140mm、3240mm、天井面(3440mm)の地点において空気温度と表面温度をボタン型温度計にて計測を行った。

Table 3 に実測ケースを示す。case1 は「放射空調のみ運転する」ケース、case2 は「放射空調運転＋シーリングファン(夏期下向き、冬期上向き)を運転する」ケース、case3 は「FCU のみ運転する」ケースである。

なお、対流空調は天井吊型 VVW 式対流空調を利用している。

2. 実測結果

2.1 夏期実測結果

(1) 代表点の室内温熱環境

Fig. 3, 4 に 8/20 case1(平均外気温度 29.2℃)、Fig. 5, 6 に 8/21 case2(平均外気温度 29.3℃)、Fig. 7, 8 に 8/3 case3(平均外気温度 30℃)における研究室 1、研究室 2 の室内温度の経時変化を示す。

スラブ表面温度は case1、2 の場合、放射冷房を使用することで、研究室 1 の床表面温度が 2～2.5℃程度低下し、研究室 2 の天井表面温度が 2.5～3℃程度低下した。全体的に天井表面温度の方が冷却されており、これはコイル埋設高さが天井表面に近いためである。

空気温度とグローブ温度は case1、2 の場合、研究室 1 でシステムの運転を通して 1℃程度下がり、グローブ温度は 10 時頃から空気温度を下回ったことから、放射温度が低くなったと考えられる。研究室 2 の室温は 26～26.5℃の間で振幅しながら推移しており、研究室 1 と比較して室内温度が 0.5℃程度高い。2 研究室とも安定した温熱環境が形成されていることが示された。また、case3 では、研究室 1、2 における空気温度とグローブ温度の差が 2～3.5℃程度生じたのに対し、case1、2 では、この差は見られず、放射冷房の効果が示された。

研究室内の垂直温度の分布については、case1、2 の

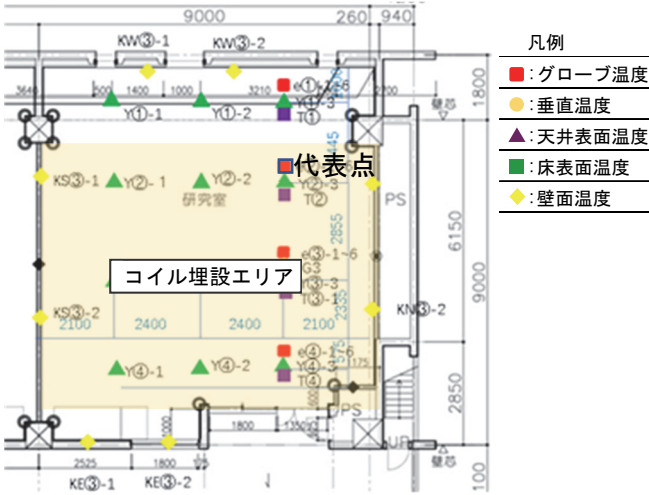


Figure 2 Measurement points of floor plan

Table 3 Measurement cases

	case1	case2	case3
空調方式	放射冷房	放射冷房＋シーリングファン	FCU

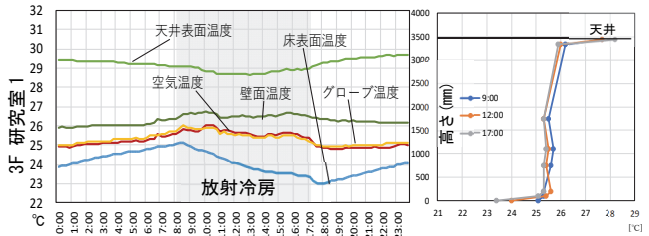


Figure 3 8/20 case1 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

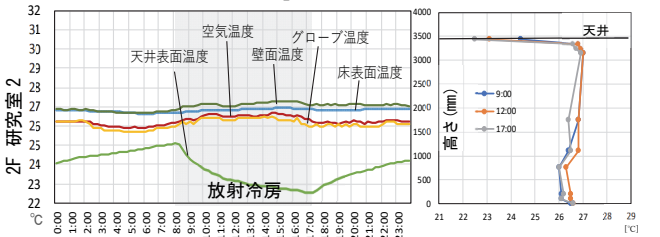


Figure 4 8/20 case1 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

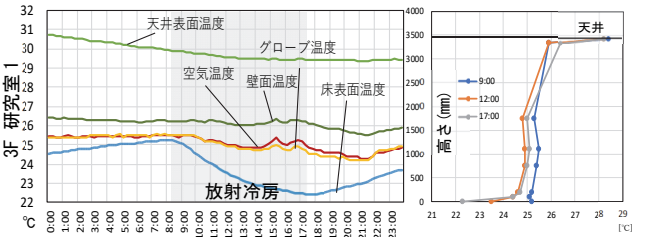


Figure 5 8/21 case2 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

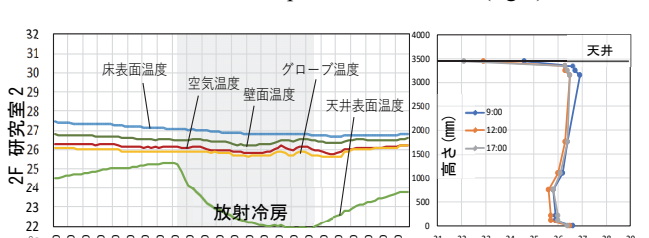


Figure 6 8/21 case2 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

研究室 1 は天井放射の研究室 2 より上下温度の差が大きかった。これは、研究室 1 が最上階であるため、屋上からの貫流熱により天井面の温度が高くなり、冷気が床付近に停滞するためである。また、シーリングファンを併用運転した case2 の場合、研究室 1・研究室 2 では上下温度分布の差が小さい。これは、研究室 1 が最上階であるため、天井付近の暖気を下にとっていくのに対し、研究室 2 では冷気の拡散が進むためである。

(2) システム単独運転(case1)における代表点の上下温度の変化

本システムは平日だけ運転し、週末にコイル送水を停止させる。冷房運転の開始時間は月曜日に 7:14 運転を開始し、火～金曜日は 8:14 運転開始にする。Fig. 9 に月曜日、雨の日(平均外気温度 25.5℃)、コイル送水温度 16.6℃、システムが 7:14～17:13 の間運転する際の上下温度分布、Fig. 10 に月曜日(平均外気温度 26.3℃)、晴れの日、コイル送水温度 16.4℃、システムが 7:14～17:13 の間運転する際の上下温度分布、Fig. 11 に水曜日、晴れの日、コイル送水温度 16.3℃、システムが 8:14～17:13 の間運転する際の上下温度分布を示す。放射冷房単独運転の場合、晴れの日には雨の日より室内温度の分布が激しくなっていた。また、運転開始時刻が早い場合、スラブ表面の冷却スピードに役立っていた結果が示されたが、月曜日は放射冷房の運転において出社直前の 7 時頃にスラブ表面温度が 25.5℃程度になっており、水曜日は出社直前の 7 時頃にスラブ表面温度が 24℃であり、これは冷熱がスラブに蓄熱した効果である。

2.2 冬季実測結果

(1) 代表点の温熱快適性

Fig. 12, 13 に 12/11 case1(平均外気温度 7.4℃)、Fig. 14, 15 に 12/10 case2(平均外気温度 7.5℃)、Fig. 16, 17 に 12/14 case2(平均外気温度 7.3℃)における研究室 1、研究室 2 の室内温度の経時変化を示す。床放射である研究室 1 では case1、2 の場合、空気温度が 22～24.5℃で推移している。また、グローブ温度が空気温度より 0.5～1℃高く推移し、床放射暖房の効果が見られた。

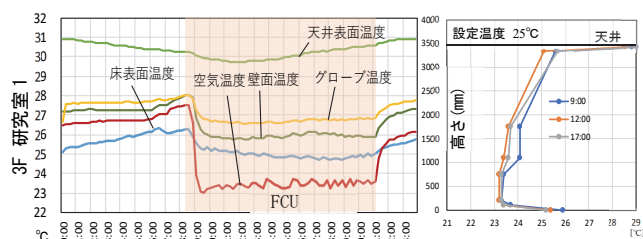


Figure 7 8/3 case3 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

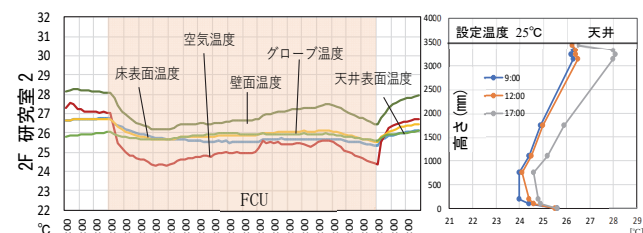


Figure 8 8/3 case3 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

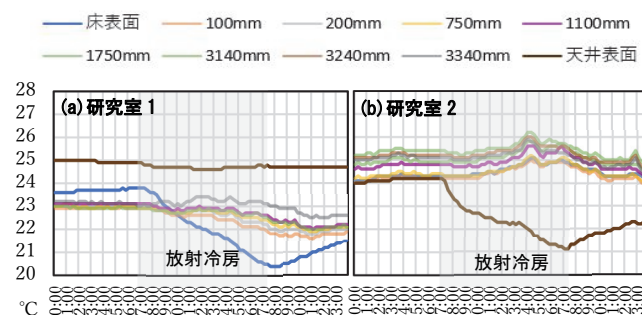


Figure 9 (a)(b)7/22(rain day) vertical temperature distribution

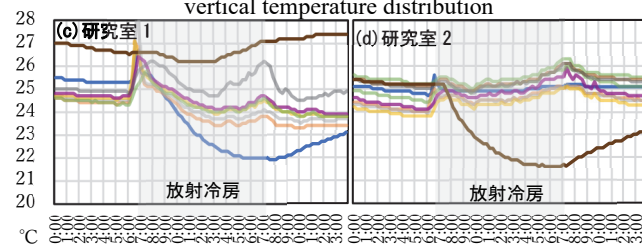


Figure 10 (c)(d)8/26(sunny day) vertical temperature distribution

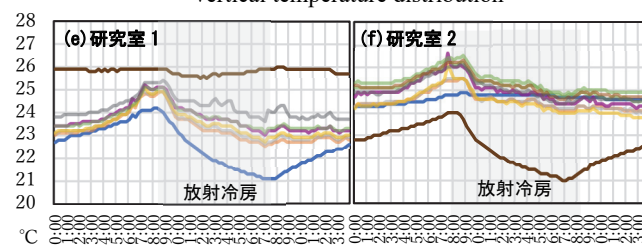


Figure 11 (e)(f)9/4(sunny day) vertical temperature distribution

天井放射である研究室 2 では、居住域にあたり、1750mm 地点の温度が低くなった。case1 の場合、空気温度が 22.5~23℃の間で推移している。グローブ温度は室温より約 2℃高くなっていたことから、天井からの放射熱が天井付近に溜まっており空気温度に伝えにくいと判断できる。case2 の場合、空気温度とグローブ温度の差が小さくなった。これは、case1 で天井付近に溜まっていた熱が上向きのファンの運転によって、自然対流が促進され、下に移動したためと考える。

3. まとめ

本研究では、自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムを導入したT棟を対象として、夏期・冬期における実測を行い、室内温熱環境の検証を行った。

- 1) 放射空調を運転した場合、対流空調運転時よりも上下温度差が小さくなり、快適性の高い冷暖房効果があることが確認された。
- 2) 放射冷暖房の運転において外気温度、天気状況の影響を受けやすく、システムの立ち上がりの時間が早ければ放熱スピードに効果がある。
- 3) 本システムの使用時のシーリングファンの併用は均一な温熱環境の形成に有効と考えられる。

本研究は、環境省「平成 31 年度（令和元年度）CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する技術開発）委託業務」（代表者 近本智行）にて実施したものである。

参考文献

文 1) 加藤、近本、土井、小林、榎本、竹谷、Xu：本報と同題（その 1）システム概要と設定温度緩和が快適性に与える影響の放射連成 CFD、空調調和・衛生工学会近畿支部、学術研究発表会、2020. 3 投稿中

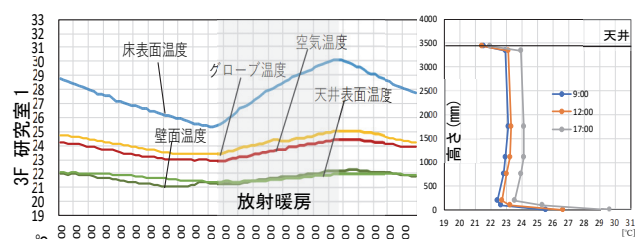


Figure 12 12/11 case1 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

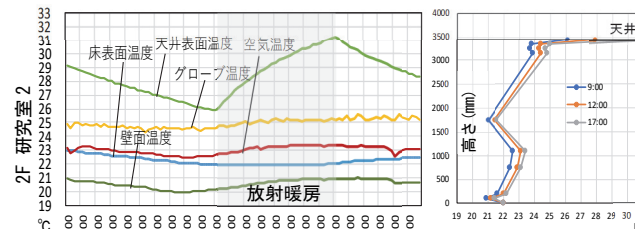


Figure 13 12/11 case1 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

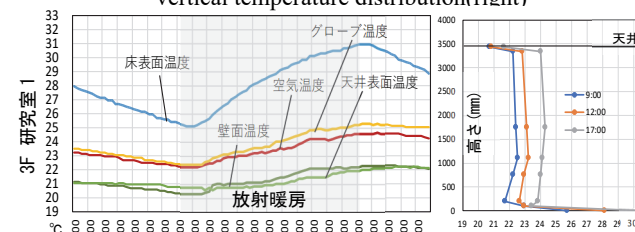


Figure 14 12/10 case2 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

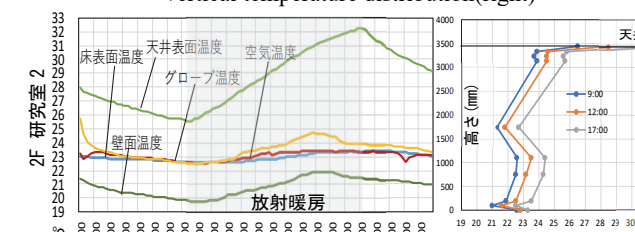


Figure 15 12/10 case2 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

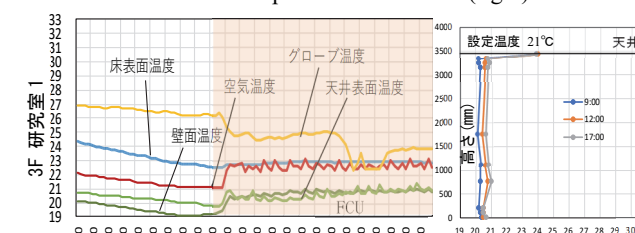


Figure 16 12/14 case3 Laboratory1 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

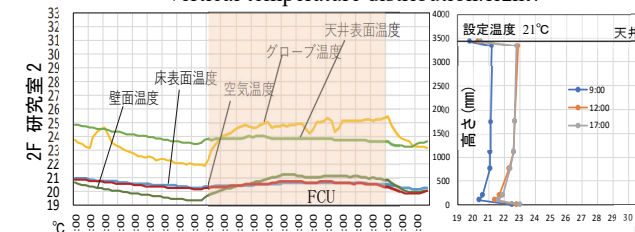


Figure 17 12/14 case2 Laboratory2 indoor temperature changing(left) vertical temperature distribution(right)

自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱式放射冷暖房システムの実運用に向けた研究
(その3) 庁舎建築における夏季冷房時のアンケート調査

Practical Use of Thermal Radiation Air Conditioning System from Thermal Storage Concrete Slab
by Using both Natural Energy and Heat Pump
(Part3) Questionnaire Evaluations at Government Office Building in Summer

○竹谷 俊成 (安井建築設計事務所) 小林 陽一 (安井建築設計事務所)
近本 智行 (立命館大学) 土井 脩史 (京都橘大学)
榎本 丈二 (安井建築設計事務所) XU Jun (立命館大学)
加藤 理奈子 (立命館大学)

Toshinari TAKETANI*¹ Yoichi KOBAYASHI*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*² Shushi DOI*³ Jyoji ENOMOTO*¹
Rinako KATO*²

*¹YASUI ARCHITECTS & ENGINEERS, INC *²Ritsumeikan University *³Kyoto Tachibana University

It is the purpose of this research to find optimum operating condition when we operate thermal radiation air conditioning system from the concrete slab. In this report, we measured room temperature and humidity and took a survey in summer at the government building where this system is introduced. As a result, we confirmed this system create no upper and lower difference and no air flow and that this system creat comfortable thermal environment

はじめに

既報¹⁾では地中熱、太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する技術の確立を行った。しかし、自然エネルギーのみを利用するため他の空調システムとの併用が必要であった。本研究ではヒートポンプを併用することにより室内負荷を「自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システム」(以下、本システム)のみでの処理を実現し、本システムの普及を目指す。また、本研究における具体的な業務は以下の通りである。

- ①躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システム単独による室内環境のシミュレーションに関する技術開発
- ②地中への季節間蓄熱効果の検討
- ③太陽熱集熱器とヒートポンプ運転の日射量による切替え運転制御
- ④既存建物用放射冷暖房システムの検討
- ⑤躯体スラブ放射冷暖房システムの冷房能力アップ時の結露対策効果の検討

本報では上記の①に該当する報告を行う。具体的には、蓄熱放射冷暖房システムを導入した庁舎建築にて、夏期にて、温湿度測定を行った結果と庁舎ではたらいっている職員に対してアンケート調査を行った結果を報告する。また、次報では上記①と④に該当する内容の報告を行う。

1. 建物概要

対象となる建物概要を Table 1 に示す。本建物は新しく増築する新館と既存庁舎の本館からなり、互いに有効に連携する計画となっている。滋賀県高島市に位置しており、安曇川水系からの潤沢な地下水、卓越風、地中熱、自然採光など地域特性を極力活用した環境技術を導入し、環境負荷や将来の維持管理コストを抑えた計画としている。また、自然災害にも対応する市庁舎を目指し、ライフラインが途絶しても持続できる、災害対策拠点にふさわしい施設計画とする。

Table 1 Outline of the Building

構造：鉄骨造(耐震構造)	用途：事務所(庁舎)
基礎：直接基礎	
階数：地上3階、塔屋1階	
建築面積:1628.08 m ²	
延床面積：4,296.86 m ²	

2. 空調システム概要

夏期、中間期、冬期における空調系統図を Fig.1、Fig.2、Fig.3 にそれぞれ示す。

2.1 夏期の空調システム概要

躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムは各階の事務室等の主要な室に導入している。放射冷暖房用の金属強化ポリエチレン配管を、2 階床スラブ、3 階床スラブ、屋上床スラブに埋設している。放射冷暖房配管に井水熱を熱源とした水熱源ヒートポンプチャラーの冷水を循環し、放射冷房を行う。窓側についてはパッケージエアコンによる冷房も行い、パッケージエアコンは個別運転も可能とする。電力デマンドを押さえるため、室外機に散水機能を有する。外気は全熱交換器より取り入れ、外気処理空調機により冷却除湿する。室内の CO₂ 濃度により外気取り入れ量を制御し、空調機ファンをインバータ制御する。空調された外気は床下(OA フロア)より吹出す。屋上の断熱材はポリスチレンフォーム 100mm、外壁の断熱材はウレタン吹付 50mm の高断熱仕様、窓は複層ガラス窓と庇による日射遮蔽を行い、冷房負荷を低減する。

2.2 中間期の空調システム概要

中間期は屋上階段上部に卓越風(北西風)による換気開口を設け、自然換気を促進する。また、階段室上部に太陽熱を集熱する空間を設け、風のない日は温度差によるドラフトで自然換気を促進する。屋外と室内の温湿度を比較し、自然換気が有効な場合には執務室に「自然換気有効」の表示を出す。「自然換気有効」時は空調を停止する。室内にいる人は窓を開けて自然換気を行う。ただし、降雨時、強風時は自然換気を行わない。さらに、地下ピット内のクールアンドヒートピ

期に冷房が必要な場合はスラブ放射冷暖房配管に熱交換器を介して井水熱の冷水を直接循環し、放射冷暖房を行う。外気処理空調機は外気冷房を行う。ただし、自然換気により室内 CO₂ 濃度が維持できており、温熱環境も良好な場合は停止する。さらに、シーリングファンの気流により快適性を高める。窓は庇、天井の反射により自然光を取り入れ、照度センサーにより照明制御を行う。

2.3 冬季の空調システム概要

スラブ放射冷暖房配管に井水熱を熱源とした水熱源ヒートポンプチャラーの温水を循環し、放射暖房を行う。1 階床の温水式床暖房にも温水を循環する。

また、シーリングファンにより天井部にたまった暖気を吹き降ろす。

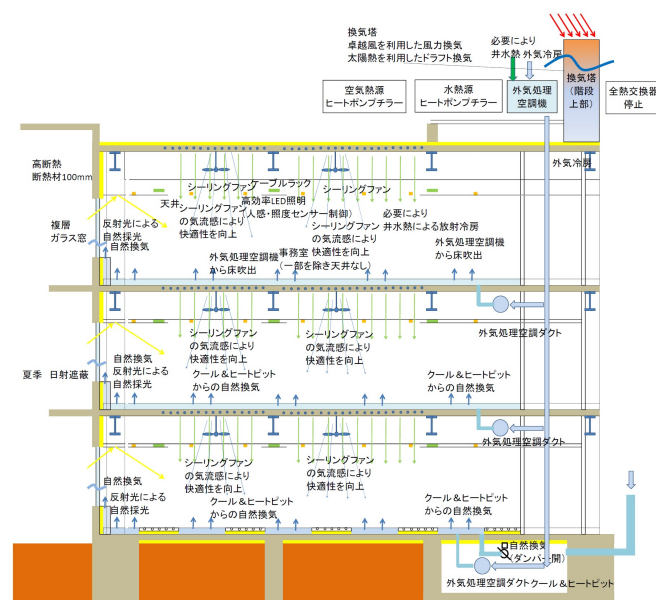


Fig.2 Air Conditioning System of the Building in interim period

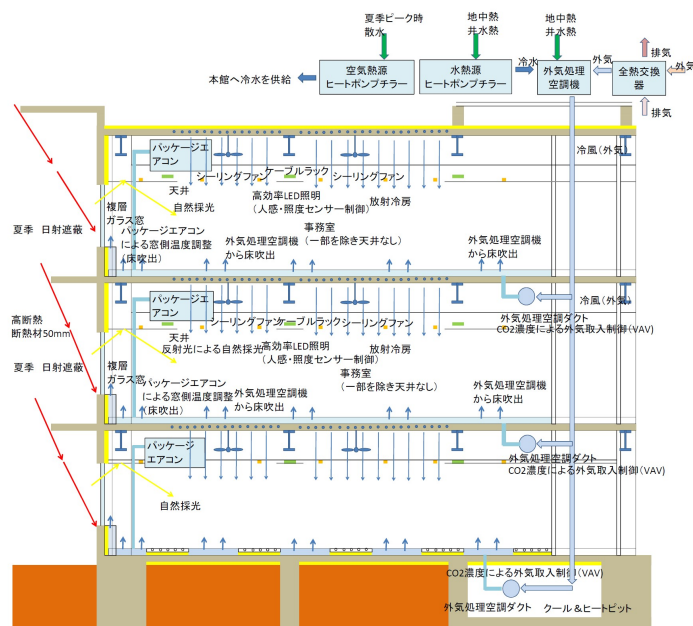


Fig.1 Air Conditioning System of the Building in summer

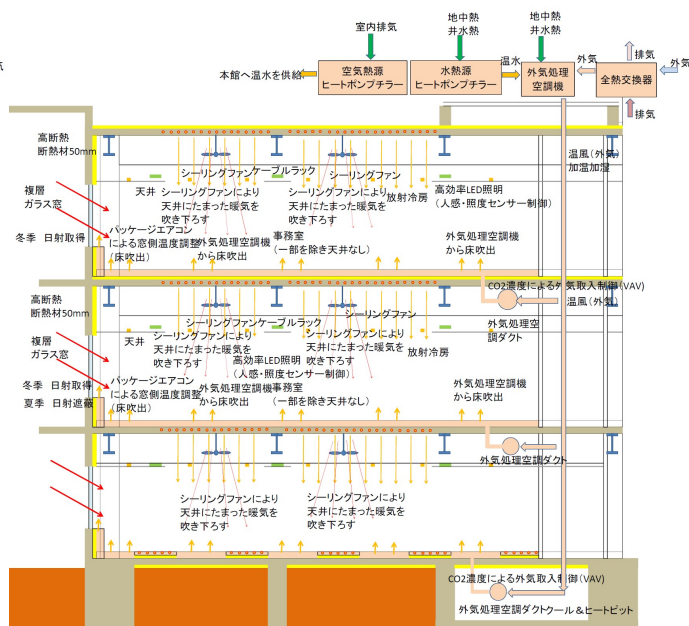


Fig.3 Air Conditioning System of the Building in winter

3. 夏期の使用状況

3.1 放射冷暖房の運転状況

躯体スラブ放射冷暖房システムの運転時間は、7:00～18:00とし、休日は運転を行っていない。また、スラブへの送水温度は15℃で運転を行った。

3.2 室内温湿度

8/5(月)～8/12(日)の中央監視装置で測定した各階の室内温湿度をFig.4に示す。温度については、2,3Fについては温度の変動がほとんど見られない結果となった。これは躯体スラブに冷熱が蓄熱されることが原因であると考えられる。1Fは温度の変動がみられるが、これは、エントランスから流入する外気の影響を受けやすいためであると考えられる。また、月曜日の温度に着目すると、0:00から23:00頃まで温度が下がり続けているのが分かる。これは休日明けであるため温度が下がるのに時間がかかっているためと考えられ、今後、運転時間を早める等の改善が必要と考えられる。いずれの日においても日中の温度は、1,2Fは26℃程度、3Fは28℃程度となっており、3Fは少し室温が高くなっていることが分かった。

4. アンケート調査

対象建物における温熱環境を調査するため、庁舎ではたらく職員133人を対象にアンケート調査を行った。調査期間は8月1日～8月29日までの約1か月間程度であり、運転条件は温湿度測定時と同様である。回答した職員の基本情報をFig.5、その他の結果をFig.6に示す。

Fig.6における暑さ、寒さの結果から、「涼しい」、「やや涼しい」、「どちらでもない」と回答した人が約6割を占めており、概ね良好な温熱環境を形成できていると言える。また、「寒い」と回答した人はほとんどみられず、

これは対流空調にみられるようなドラフトを感じるのではないためと考えられる。朝、昼、夕で比較すると、夕方に「暑い」、「暖かい」、「やや暖かい」と答えた人がやや少なくなる結果となった。これは温度測定でもみられたように、月曜日の朝に気温が少し高くなっていることなどが考えられる。そのため、休み明けは運転時間を早める必要があると考えられる。

また、「上下温度差」、「体に当たる気流」については「感じない」と回答した人が7割を占めており、上下温度差がなく、気流感を感じない環境が実現できていると考えられる。

「シーリングファン」の結果では、使わないと回答した人は5%しかみられず、非常によく使われていることが確認できた。

5. 最後に

本報では、庁舎建築における温湿度測定及びアンケート調査結果について報告した。今後はさらに詳細な温湿度測定、CFDによるシミュレーション、アンケートによる継続調査を行う予定である。

本研究は、環境省「平成31年度(令和元年度)CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業(自然エネルギーとヒートポンプを併用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する技術開発)委託業務」(代表者 立命館大学 近本智行)にて実施したものである。

【参考文献】

- 1) 地中熱・太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する研究(その1)～(その13): 空気調和・衛生工学会大会 2014～2016、建築学会 2014～2016 (OS)

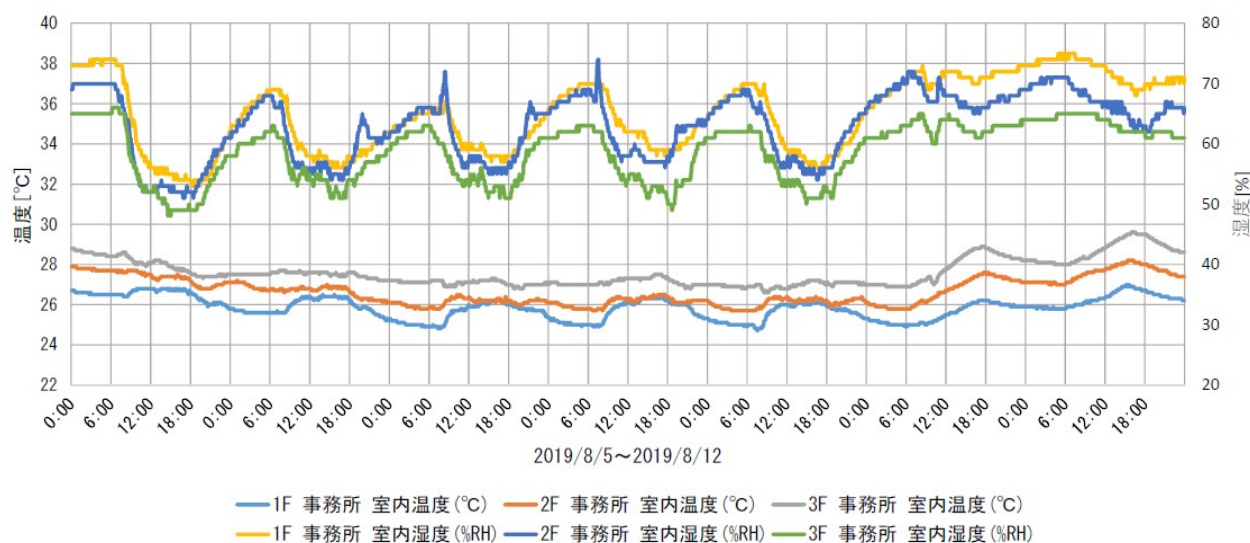


Fig.4 Time-dependent change of temperature and humidity

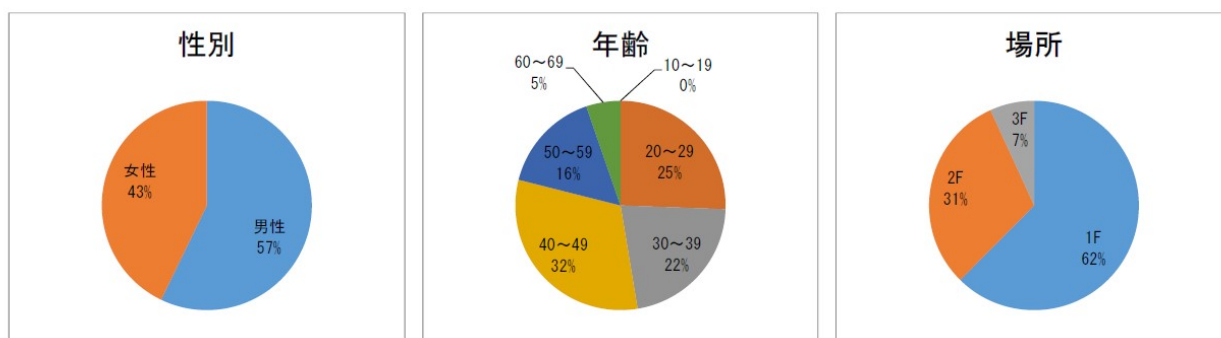


Fig.5 Questionnaire Results(Basic Information)

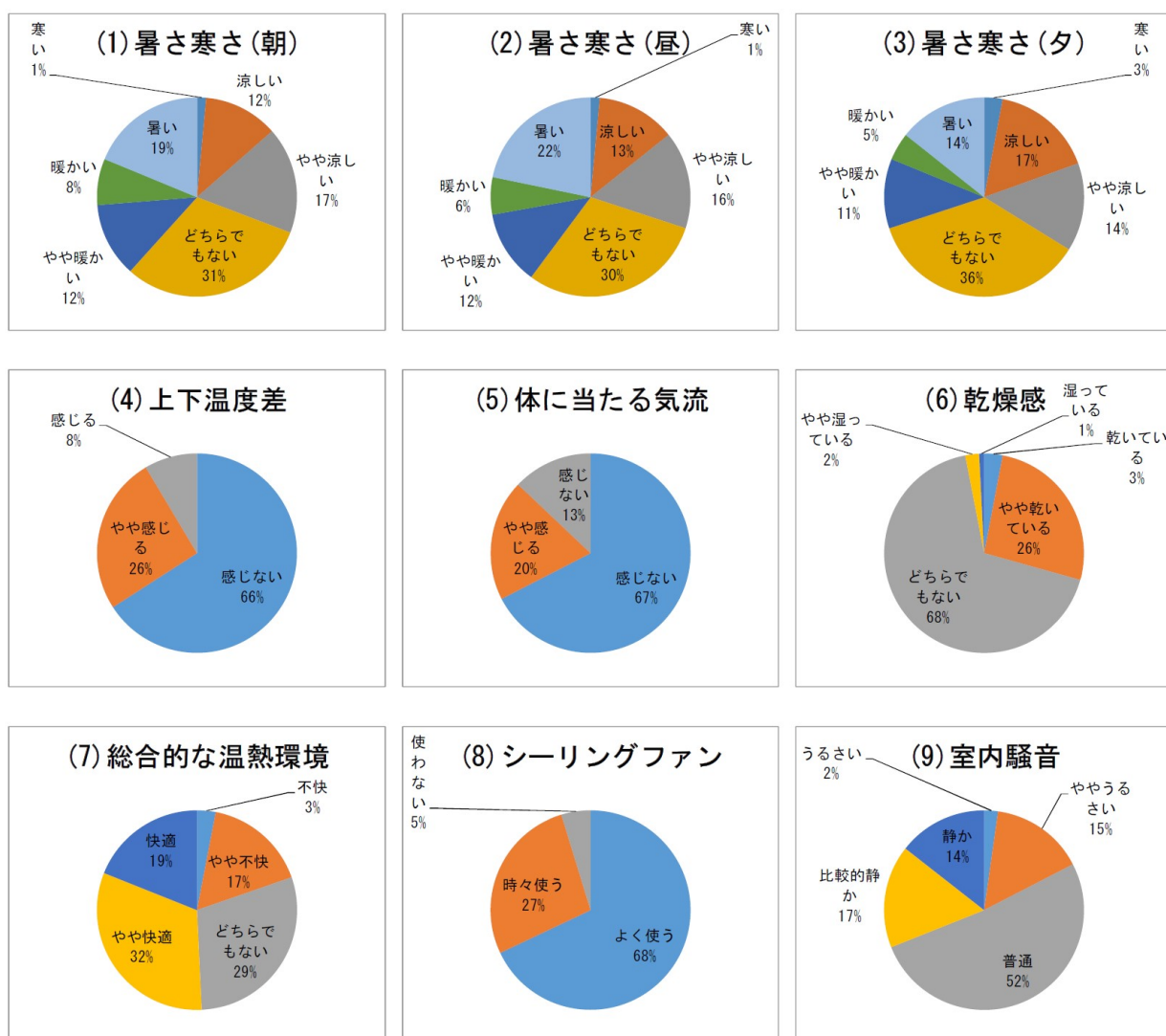


Fig.6 Questionnaire Results

コアンダ効果を利用したインダクションユニット空調システムの実測評価

Study on Air-conditioning System using Coanda effect

○西川 経太 (竹中工務店)

前田 龍紀 (竹中工務店)

山崎 将吾 (竹中工務店)

森元 和也 (新晃工業株式会社)

Keita NISHIKAWA*1

Tatsunori MAEDA*1

Shogo YAMAZAKI*1

Kazuya MORIMOTO*2

*1 TAKENAKA Corporation

*2 SHINKO Industries Ltd.

The purpose of study is to evaluate the new air outlet jointly developed with the aim of improving comfort, shortening a construction period and enhancing the value of design. In this paper, we report the optimum arrangement of the new air outlet by CFD Simulation and an indoor thermal environment.

1. はじめに

本建物では、従来の一般的な空調方式と比較して、快適性の向上、工期短縮および意匠的な付加価値を見出すことを目指して当社と新晃工業が共同開発したインダクションユニット吹出口を初めて実装した。本稿では、計画段階でのシミュレーションソフトによる吹出口の配置検証および夏期に実施した室内環境の実測評価について報告する。



Fig.1 Facade



Fig.2 Interior

1.1 建物概要

以下に建物概要、Fig.1、Fig.2、Fig.3 に建物写真、食堂平面図、食堂断面図を示す。

建築名称	神戸海星女子学院中学校・高等学校
	食堂・ロッカー棟
建築場所	神戸市灘区青谷町2丁目7番1号
用途	中学校・高等学校
敷地面積	31,087 m ²
建築面積	556.57 m ²
延床面積	757.75 m ²
構造種別	S・RC造
階数	地下1階 ロッカー室、 地上1階 食堂
建物高さ	6.34m
工事期間	2018年6月15日～2019年2月28日
建築主	学校法人 海星女子学院
設計・監理	竹中工務店
施工	竹中工務店

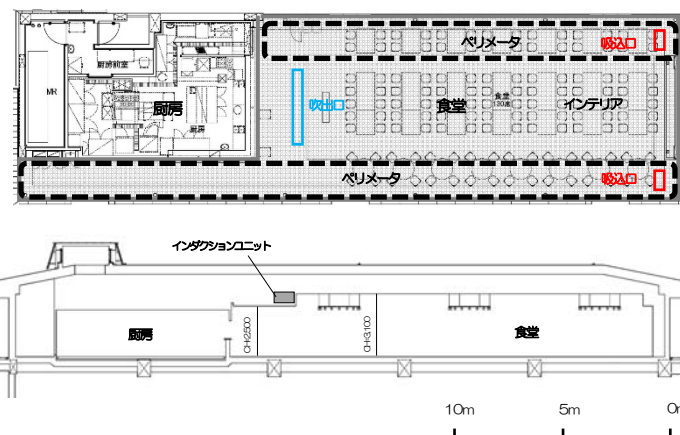


Fig.3 Floor plan and cross-section plan

1.2 空調システム概要

空調システムの概要をFig.4に示す。ペリメータ部は外気処理パッケージエアコン (OPAC) および天井隠蔽形パッケージエアコン (PAC) +ブリーズライン (BL) で室内負荷を処理している。インテリア部は直膨式エアハンドリ

ングユニット(AHU)の吹出し口にインダクションユニット(INU)を用いることで、吹出し温度を可能な限り低温とし、外気負荷の処理と余力による室内負荷処理を行っている。インダクションユニットにより折り上げ天井部から天井面に沿って吹出すことで、インテリア部のダクトレス化により、工期短縮かつ省人化を実現するとともに、意匠面においてもゆとりのある天井高(CH=3, 100 mm)の確保を可能にしている。インダクションユニットは誘引比 100%を確保し、かつコアンダ効果を利用することでダクトレス、ファンレスでも十分な距離到達と、室内負荷処理を目標にしている。

本建物では、インダクションユニットを3台並列に近接して配置することで、より広範囲かつ長距離に吹出すことを目指した。Fig.5にインダクションユニットの仕様、Fig.6に吹出口および機器の設置状況を示す。

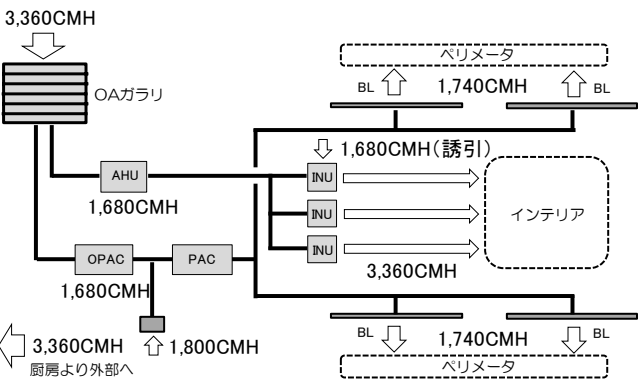
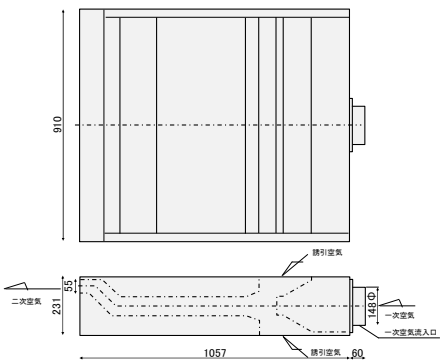


Fig.4 Air-conditioning system



型式	DD-1200-1
誘引方式	天井レタン
一次風量 (m3/h)	600 (基準風量)
	風量範囲：400～700
誘引比 (%)	100
二次風量 (m3/h)	1200
	(一次風量) × 2= (2次風量)
機器静圧損失 Pa	116
	(一次風量：600m3/h時)

Fig.5 Induction-unit specification



Fig.6 Outlet and Induction-unit

2. シミュレーションによる評価

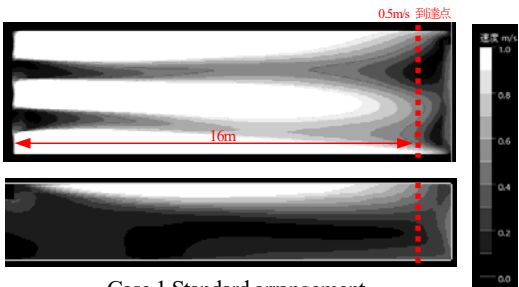
2.1 吹出口および吸込口の配置検討

計画段階においてシミュレーションソフト (Flow Designer) を用いて、インダクションユニットによる室内風速の検証を行った。

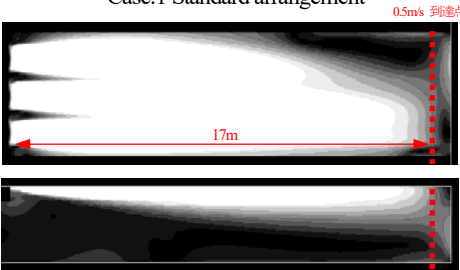
本来ユニット単体は、規定の性能を満足するため他の吹き出し口と一定以上離して設置することとされているが、近接して設置することによる相乗効果 (範囲、距離) をシミュレーションにて確認した。(Fig.7)

規定の離隔をとった標準配置 (Case.1) の場合は、天井面 (FL=3, 100mm) において風速が 0.5m/s 以下となるのが吹出口から 16m だったのに対し、ユニット同士を近接させて設置した近接配置 (Case.2) の場合は、吹出口から 17 m地点で同等の風速になることからユニット同士を近接させることでより遠方に吹出すことが可能であることが確認できた。

また近接設置の方が 0.5m/s 以上の範囲が広範囲にわたっており、隅々まで空調が行きわたっていることが確認できた。一方で断面を比較すると、標準配置よりも近接配置の方が、等速エリアが下方に広がっているが、居住域においては 0.3m/s 以下の風速となっていることから、本建物の形状、天井高においては、より遠方に吹出すことが可能な近接配置が適切であると判断した。また吸込口は、到達距離を延ばすため吹出口面とは反対の面に天井チャンバー用開口部を設けることとした。(Fig.3)



Case.1 Standard arrangement



Case.2 Proximity arrangement

Fig.7 Wind-speed distribution

3. 実測概要

3.1 実測期間

実測は2019年8/11(晴天日)に行った。測定ポイントは東西方向に3mの間隔をあけてペリメータとインテリアで計10か所(N01~N010)、高さ方向は500mm間隔で5か所、風速は6か所計測した。またグローブ温度および外部温湿度を1か所ずつ測定した。測定ポイントをFig.8およびTable.1に示す。

今回計測のパターンとして、食堂の空調システムのみが稼働している通常時をCase.1、吸込口の位置による効果を検証するため、前述のレタン開口を塞いだ状態をCase.2、厨房利用時(厨房の給排気ファンを稼働している状態)をCase.3としてそれぞれ計測を行った。(Table.1)

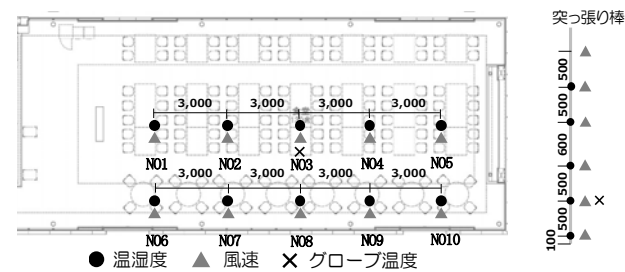


Fig.8 Measurement points

Table.1 Measuring method and Measurement points

	温度	湿度	グローブ温度	外部温湿度	風速
高さ方向測定点 (箇所)	5	5	FL+600のみ	—	6
平面測定点 (箇所)	10	10	1	1	10
合計	50	50	1	1	60

	空調	レタン開口	厨房給排気ファン
Case.1	○	○	×
Case.2	○	×	×
Case.3	○	○	○

4. 実測結果

4.1 室内温度分布

Fig.9にCase.1における測定ポイントごとの上下温度分布およびN01~N05の上下平均温度を示す。

FL+100mmとFL+1,100mmの上下温度差は各所最大でも1.0℃程度であり、ISOの基準値3℃を大きく下回っている。設定温度26℃に対して水平方向の平均温度との差は最大でFL+2200mmレベルの+1.0℃、最小はFL+100mmレベルの+0.6℃となった。また垂直方向の平均温度との差は最大でN03の+0.9℃、最小はN05の+0.4℃となっており垂直方向、水平方向いずれの場合も設定温度との

差が1.0℃以内になっていることから各測定ポイントにおいてムラなく空調空気が行き届いており設定温度付近の温度域になっていると考えられる。

Fig.10にCase.2,3における上下温度分布を示す。

FL+100mmとFL+1,100mmの上下温度差はCase.2で最大1.5℃、Case.3で最大1.2℃となっている。また水平方向の平均温度との差は最大でFL+1600mmレベルの+0.8℃となっており、Case.1と同様、温度環境は良好であった。

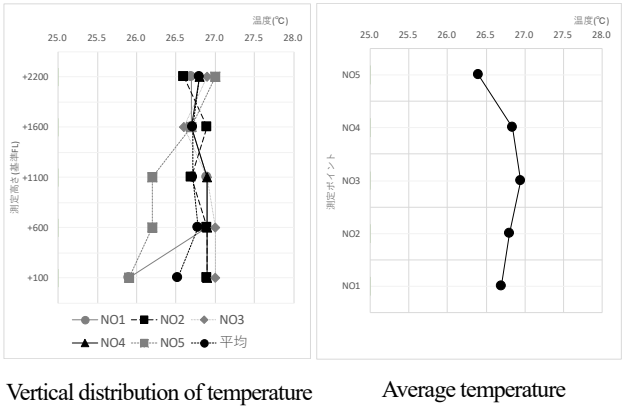


Fig.9 Vertical distribution of temperature (Case.1)

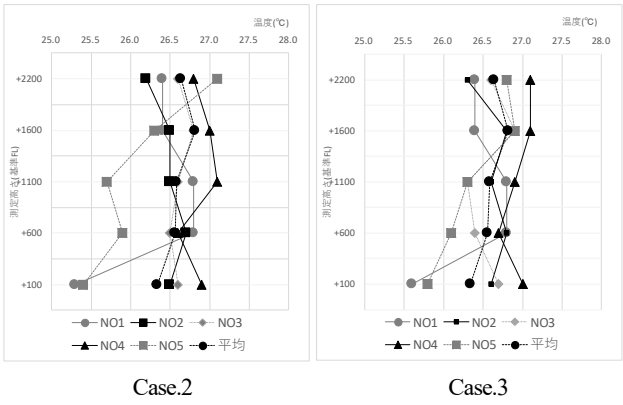


Fig.10 Vertical distribution of temperature (Case.2,3)

4.2 室内表面温度

サーモカメラにより天井面の温度を測定した。その様子をFig.11に示す。

吹出口から1.5m程度までは24~25℃程度となっており、室内温度測定ポイントであるN01では27℃程度、より吹出口から遠いN03、N05においてもいずれも27℃~28℃程度となっており、室内温度分布と同様に天井面もムラなく均一に冷却されていると考えられる。

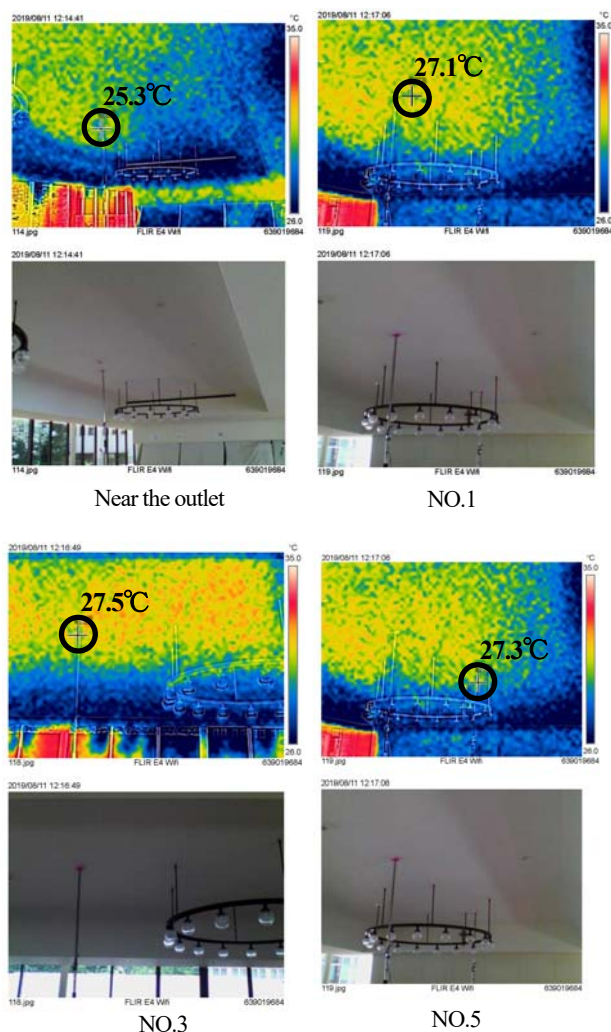


Fig.11 Surface temperature

4.3 室内風速分布

Fig.12 に Case.1 における測定ポイント毎の風速を示す。天井面 (FL=3, 100) において、吹出し口から 3m 地点 (NO1) の 1.7m/s を最大とし、徐々に風速を落としながら一番遠い 15m 地点 (NO5) で 0.2m/s となっている。またインテリアの居住域はすべての測定点 (NO1~NO5) において 0.3m/s 以下である。(居住域は FL+1, 800 までのエリアとしている。)

次に風速がある程度落ち着く NO3~NO5 の高さ方向の風速分布を Fig.13 に示す。NO3 では天井面で 0.5m/s 程度の風速があるものの、その他の高さでは居住域ではないが 0.3m/s 以下になっている。NO4、NO5 においては天井面よりも低い測定点において、若干ではあるが風速が大きくなっているポイントがある。このことからシミュレーションによる風速 (NO5 の地点で 0.5m/s を確保) には及ばなかったものの、NO4~NO5 の地点で気流が降下しながら 0.3m/s 以下の低風速で室内を循環していると考え

られる。よって、天井面よりも下部で風速が高くなるエリアはあるものの、シミュレーションの結果と同様、居住域においては上層の高速吹出の影響を受けず、ドラフトのほとんどない良好な空間であることが確認できた。

Fig.14 に Case.2,3 の NO3~NO5 の高さ方向の風速分布を示す。Case.2,3 どちらも NO3 において天井面よりも FL+2700 における風速が大きくなっており、Case.2 ではレタン閉塞、Case.3 では吹出方向とは反対の厨房への気流がそれぞれ影響し、Case.1 よりも早い時点で気流が降下しているものと考えられるが、居住域においてはどちらも 0.3m/s 以下となっており、Case.1 と同様ドラフトレスな空間であることが分かった。また Case.2 の結果より、吸込口を吹出口から離して設置したことが、到達距離を延ばすことに有効であったと考えられる。

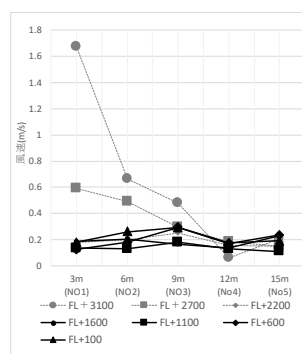


Fig.12 Wind velocity in Case.1

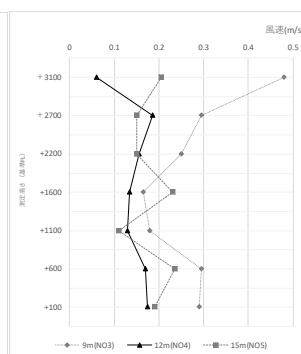
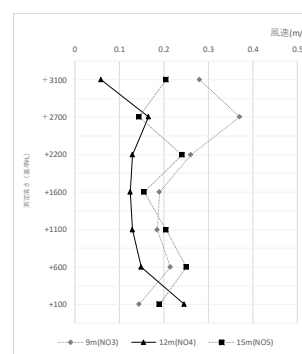
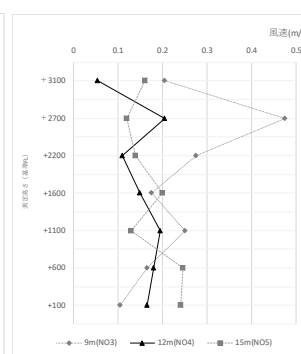


Fig.13 Vertical distribution of wind velocity in Case.1



Case.2



Case.3

Fig.14 Vertical distribution of wind velocity in Case.2,3

5.1 おわりに

本稿では、インダクションユニットの効果についてシミュレーションによる検証および室内環境の実測評価を行った。室の規模や形状による設置条件はあるものの、工期短縮、意匠性に加え快適性においても十分な効果が期待できる。

ボトムアップ手法を用いた業務施設電力需要推計

Estimation of electricity demand of the Japanese commercial building stock based on bottom-up engineering approach

○山下 皓太郎 (大阪大学) 山口 容平 (大阪大学) 金 範竣 (大阪大学) 秋沢 琴音 (大阪大学)
陳 何苗 (大阪大学) 北村 拓也 (大阪大学) 下田 吉之 (大阪大学)

○Koutarou Yamashita*1 Youhei YAMAGUTI*1 Bonjun KIM*1 Kotone AKIZAWA*1 Kanae TIN*1
Takuya KITAMURA*1 Yoshiyuki SHIMODA*1

*1 Osaka University

This paper developed an energy demand model of the Japanese commercial sector and estimated time-series electricity demand based on a bottom-up engineering approach using building archetypes. The building level estimation result was validated by using a measured electricity demand data. The model result was used to estimate the reduction in the power loss of transformers used in the commercial building stock.

1. はじめに

近年、太陽光発電、電気自動車の普及など、電力需給運用に大きな変化をもたらしている変化が生じている。これらの変化は、建築物における LED や各種省エネルギー技術の普及と併せて進展すると考えられ、将来における電力需給の不確実性は高い。このような背景から、将来における日本業務施設の電力需要の推計は電力需給の計画策定に重要な意味を持つ。一方、業務施設の電力需要に関する知見は十分に蓄積されていない。エネルギー需要に関する実態調査としては約 4 万件の業務施設から年間・月別の時間粒度でアンケート調査を実施した日本サステナブル建築協会の非住宅建築物の環境関連データベース¹⁾、数千件の業務施設の 1 時間粒度の電力需要データを公開した環境共創イニシアチブによる BEMS データ²⁾がある。一方で、これらの業務施設単位のデータでは業務部門全体での需要を想定することができない。都市や都市圏の単位で業務部門のエネルギー需要を推計した事例に岩船ら³⁾、山口ら⁴⁾によるものがあるが、電力需給運用の計画に必要な時刻別の電力需要についての推計精度は確認されていなかった。

以上の背景から、本研究は日本全国の業務部門を対象として、電力需要を推計するモデルを開発することを目的とする。以下では、2 章において開発したモデルの概要を説明し、3 章に精度の確認を行った結果を示す。最後に、モデルを用いたケーススタディとして、4 章において変圧器の効率向上によってもたらされる省エネルギー効果を推計した結果を示す。日本のトッランナー制度において、変圧器は 2006 年に対

象機器となり、2014 年に基準の更新が行われている。山本ら⁵⁾は柱上変圧器における変圧負荷を推計し、トッランナー制度導入による省エネルギー効果を定量化し、年間 2 百万トンの CO₂ 削減効果があると推計している。本研究では、業務施設で使用されている変圧器を対象とし、トッランナー変圧器への変換によってもたらされる省エネルギー効果を推計する。

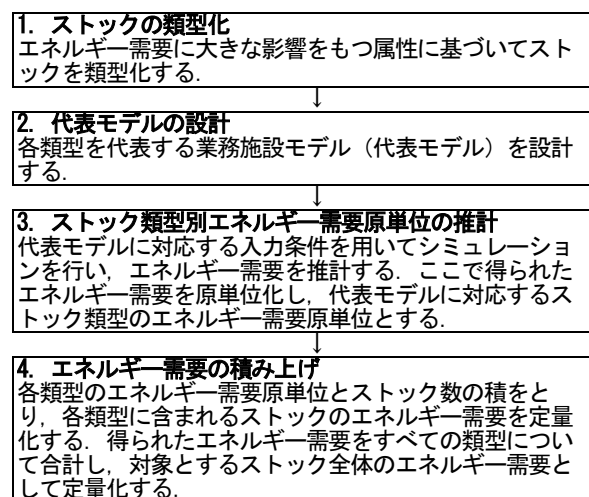


Fig. 1 Procedure to develop the energy demand model

2. 時刻別全国業務施設電力需要推計手法

2. 1 モデルの概要

エネルギー需要推計手順を Fig. 1 に示す。まず、対象とする業務施設を建物用途、立地、規模・業態、設備仕様により類型化する。建物用途として事務所、宿泊施設、医療施設の 3 用途を考慮し、立地は北海道、東北、関東、中部、北陸、近畿、中国、四国、九州、沖縄の 10 地域

とした。規模・業態として Table 1 に示す規模区分を考慮した。設備の一次側、二次側（空調機）の組み合わせにより 44 の区分を考慮した。手順 2 ではストック類型別に代表モデルを作成する。Table 2 に代表モデルの仕様を示す。代表モデルの設計方法は Kim ら⁶⁾ に詳しい。手順 3 では代表モデルを用いてエネルギー需要を推計し、結果を延床面積により原単位化する。推計には米国 DOE が開発した EnergyPlus8.6⁷⁾ を用いた。気象データは AMEDAS の 2014 年データ⁸⁾ を用いた。手順 4 では手順 3 で定量化された類型別エネルギー需要原単位を対応するタイプの延床面積と積和し、日本全国の業務施設におけるエネルギー需要を定量化する。類型別の延床面積の算出方法は秋沢ら⁹⁾ に詳しい。このような手順により、手順 2 における代表モデルの設計、手順 3 におけるシミュレーションによって業務施設でエネルギー需要が決定される構造を反映したうえで、手順 1 の類型化及び手順 4 の積み上げによって対象とする建築ストック全体でのエネルギー需要の定量化が可能となる。

Table 1 Classification of building by building size

Category	Total floor area	Category	Total floor area
CL1	Smaller than 200 m ²	CL6	5,000-10,000 m ²
CL2	200-500 m ²	CL7	10,000-20,000 m ²
CL3	500-1,000 m ²	CL8	20,000-50,000 m ²
CL4	1,000-2,000 m ²	CL9	50,000 m ² or larger
CL5	2,000-5,000 m ²		

2. 2 時刻別電力需要の推計

代表モデルの運用スケジュールについては、黄ら¹⁰⁾ のモデルを用いた。本モデルでは建物利用者を想定し、建物到着時刻、滞在時間数の頻度分布を用いてランダムに滞在スケジュールを決定する。代表モデルにおいて各建物利用者に特定の滞り場所を定め、照明、空調・換気は部屋の滞り者の有無により稼働の有無を決定した。コンセント機器は部屋の利用者数と滞り者数の比をスケジュールとして機器消費電力、内部発熱を決定

した。これらの稼働スケジュールは照明、空調、換気用の電力需要の決定に用いられる。このほか給湯、給排水用の電力需要を推計している。

一方で、本研究のモデルでは多種多様な待機電力や非常用・保安用などの電力需要を考慮できていない。これを本研究では人の滞在状況によらず常時一定で生じる電力需要と考え、ベース成分と呼ぶ。ベース成分は次節に示す実態データより与えることとした。

3. 代表モデルにおける電力需要精度検証

3. 1 精度検証の方法

比較対象とする実態データは、環境共創イニシアチブ (SII) が BEMS 補助事業の実績報告データ²⁾ として公開しているものである。これを SII データと呼ぶ。SII データは延床面積やなど BEMS を導入した事業所の属性と BEMS に蓄積された電力消費量を含む。ただし、利用マニュアルによると SII データには不整合や欠測等の理由により信頼性の低いデータが含まれているとの記述があることから、Table 3 に示す条件によりデータのスクリーニングを行い、事務所の標準的な性質に合致しないサンプルを分析から除外した。

3. 2 ベース成分

建物用途別の SII 実測値において、電力需要の月別時刻別平均値を算出し、その最小値をベース成分として抽出した。Fig. 2 は事務所、宿泊・医療施設におけるベース成分の分布を表す。横軸に示す延床面積 5 千 m² 未満の領域では縦軸に示すベース成分のばらつきが大きく、5 千 m² 以上ではばらつきが小さくなる傾向がみられた。本研究では 5 千 m² 以上の施設のベース成分の平均値を実態値として用いた。この数値は、事務所は 4.1 W/m²、宿泊施設は 9.0 W/m²、医療施設は 6.8 W/m² であり、ベース成分が観測された最頻月・時刻におけるシミュレーション結果と比較し、その差分をモデルにおける未特定分として電力需要推計結果に加算することと

Table 2 Specification of archetype building models

用途	項目	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8	CL9
事務所	延床面積[m ²]	132	349	726	1,447	3,258	7,089	13,873	31,238	190,202
	基準階床面積[m ²]	66	116	182	289	543	1013	1734	2840	6559
	階数	2	3	4	5	6	7	8	11	29
	フロア用途	事務所							事務所、貸会議室、飲食店、小売店	
宿泊施設	延床面積[m ²]	132	349	726	1,447	3,258	7,089	13,873	31,238	190,202
	基準階床面積[m ²]	66	116	182	289	543	1013	1734	2840	6559
	階数	2	3	4	5	6	7	8	11	29
	フロア用途	ロビー、客室			同左+飲食店				同左+小売店、宴会場	
医療施設	延床面積[m ²]	136	330	701	1,445	3,238	7,597	14,696	31,309	104,835
	基準階床面積[m ²]	68	110	234	364	648	1,266	2,449	4,473	6,989
	階数	2	3	3	4	5	6	6	7	15
	フロア用途	診療室、待合室、処置室			同左+病室		同左+手術室、食堂		同左+ICU	

した。この未特定分をベース追加分と呼ぶ。結果は事務所 2.2W/m²、宿泊施設 0W/m²、医療施設 3.7 W/m²である。この手法により推計の過少評価を改善する。ベース追加分の特定は今後の課題とする。

Table 3 Screening condition for SII data

指標	スクリーニング条件		
	事務所	ホテル	病院
年間電力一次エネルギー原単位[MJ/m ²]	DECC データ (日本サステナブル建築協会 ¹⁾) の 90%信頼区間		
年間最大電力需要原単位[W/m ²]	12[W/m ²]以上 ¹¹⁾	10[W/m ²]以上 ¹¹⁾	12[W/m ²]以上 ¹¹⁾
契約電力と年間最大電力需要の関係	年間最大電力需要<契約電力		
契約電力当たり年間電力需要(負荷率)	40%以下 ¹²⁾	50~60% ¹²⁾	50~60% ¹²⁾
夏期、中間期の電力需要	5月の電力需要<8月の電力需要		
夜間電力需要比率	60%以下 ¹³⁾	80%以下 ¹³⁾	60%以下 ¹³⁾

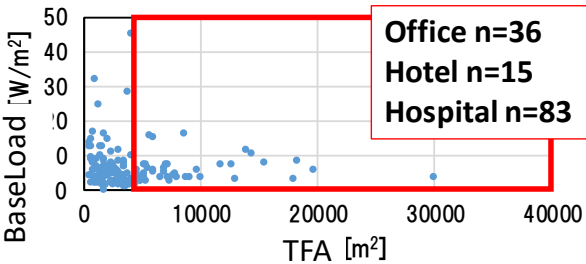


Fig. 2 Base load of SII buildings

3. 3 結果

東京都に立地する延床面積 5 千m²~1 万m²の区分 (Table 1 の CL6) の事務所ビルを例として、代表モデルの推計結果と SII データの平均値を原単位化して比較した。Fig. 3 は当該代表モデルにより推計された5月の平日、休日電力需要の時刻別平均値である。面グラフで推計値を示し、線グラフで SII データの同床面積区分における平均値を示す。エラーバーは標準誤差2つ分の範囲 (95%信頼区間) を示す。事務所ビルでは、モデルの推計結果はおおむね実態に近い挙動を示した。

3. 2 節に説明したベース追加分は図中の黒色の部分である。ベース追加分を考慮することにより、夜間の電力需要の過小推計が改善されている。

4. 日本全国の業務施設変圧器損失推計

4. 1 変圧器損失推計手法

一般的に、変圧器損失は負荷電流に無関係に発生する無負荷損と、負荷電流によって生じる負荷損に分類され、負荷損は負荷率の2乗に比例することが知られている。変圧器損失は(1)式で定量化される。

$$W_t = P_i + \alpha^2 P_c \quad (1)$$

W_tは全変圧器損失、P_iは負荷電流に無関係に発生する無負荷損、P_cは負荷電流によって発生する負荷損、α [-]は電力負荷率である。トッランナー基準の基準値は油入変圧器に対して 2006 年 4 月よりモールド変圧器に対して 2007 年 4 月より適用されている。その後 2014 年度 4 月より新たに第二次トッランナー基準が告示された (規格としては JEM1501:2012 等)。本研究では第二次トッランナー基準による効果を定量化するため、変圧器の仕様として Table 4¹⁴⁾ に 3 つのケースを用意し、損失電力量を推計した。なお、変圧器は年間最大電力需要が 50kW 以上の代表モデルで使用されているものとした¹⁵⁾。

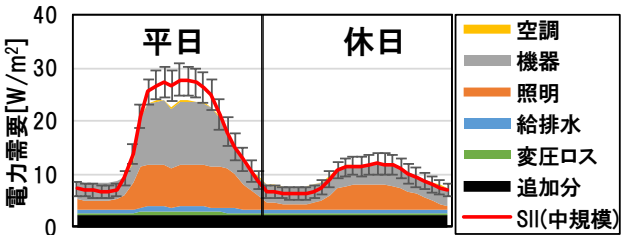


Fig. 3 Average electricity demand in May (CL6 office)

Table 4 Case on the energy efficiency of transformer

基準	負荷損	無負荷損
トッランナー以前変圧器 JIS C4306-1999	4,199 W	1,300 W
トッランナー以前変圧器 JEM1475 : 2000	3,751 W	910 W
トッランナー (2014) 変圧器 JEM1493 : 2013, JIS C4306-2013	3,150 W	497 W

4. 2 日本全国業務施設の変圧器損失推計結果

日本全国の事務所、宿泊・医療施設における時刻別変圧器損失を Fig. 4 に示す。変圧器の性能向上に伴って変圧器損失が減少している。年間での損失は従来型変圧器で 3.5TWh、トッランナー以前変圧器で 2.5TWh、トッランナー変圧器で 1.4TWh となった。この削減量を 2013 年の電力 CO₂ 排出係数 0.551kg-CO₂/kWh¹⁶⁾により換算した場合、従来型変圧器で 144 万 tCO₂、トッランナー以前変圧器で 101 万 tCO₂、トッランナー変圧器で 56 万 tCO₂であり、トッランナー基準の更新によりそれぞれ 87 万 t、45 万 t の CO₂ 排出量が削減されると推計された。Fig. 4 の時刻変動に注目すると、トッランナー基準更新による負荷削減効果は特に昼間の電力需要が大きな時間帯に表れている。これは変圧損失の負荷損が負荷率の二乗に比例することに起因する。この結果は、トッランナー制度による変圧器損失の低減は、冬期、夏期におけるピーク電力需要の削減に貢献すると示唆される。

5. まとめ

本論文では業務部門のうち、事務所、宿泊施設、医療施設のストックを対象として電力需要を推計するモデルの開発を行い、日本全国業務施設の時刻別電力需要を推計した。事務所ビルに関しては、ある程度実態値と整合性が高い需要の推計が行われていることを確認した。また、日本全国業務施設における変圧器による損失電力需要およびCO₂排出量を定量化したところ、電力需要が大きくなる冬期・夏期の昼間において特に電力需要削減効果が得られることがわかった。今後は本論文で考慮できていない建物用途の推計精度の確認、変圧器損失の推計を実施予定である。

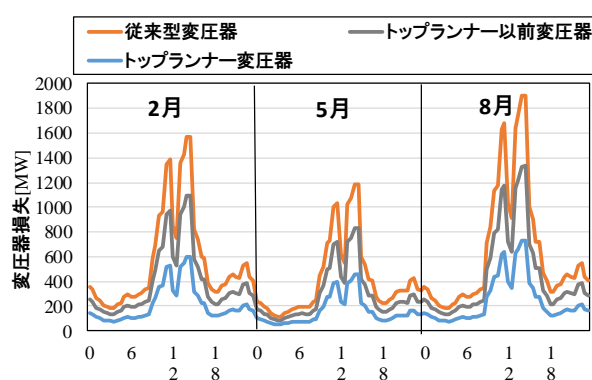


Fig. 4 Average loss in February, May and August

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H04463、JST CREST JPMJCR15K4 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 一般社団法人日本サステナブル建築協会; 非住宅建築物の環境関連データベース 2006 年度～2008 年度データ
- 一般社団法人環境共創イニシアチブ: 平成 23 年度「エネルギー管理システム導入促進事業費補助金」(BEMS) 実績報告データ, <https://www.ems-opendata.jp/> (最終アクセス日: 2020. 02. 18)
- 岩船由美子、山地憲治: 業務用建物における各種省エネルギー施策の総合的評価, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 121 (2001) No. 5, pp581-589.
- 山口容平, 下田吉之, 水野稔. 建築・設備ストックの集積状況を考慮した大阪市の民生業務部門エネルギー需要モデルの開発と温暖化対策の評価. 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻. No. 631. Pp. 853-862, 2009.
- 山本博巳, 高木雅昭, 山地憲治: 柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 128 巻, p. 885-892, 2008.
- Bumjoon Kim et. Al.: Urban building energy modeling considering the heterogeneity of HVAC system stock: A case study on Japanese office building stock, Energy and Building, 199 (2019), pp. 547-561
- EnergyPlus Version 8.6, U.S Department of Energy, 2016. 9 <https://energyplus.net/downloads> (最終アクセス日: 2020. 02. 18)
- 気象業務支援センター: 気象データベース・アメダス, ウェザートリー, 2014
- 秋沢ら: 業務施設における建築設備ストック経年変化のモデリング, 第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会論文集, 2019, pp331-336
- 黄雄明: 施設の利用状況を考慮した日本の民生業務部門エネルギー需要推計, 大阪大学大学院工学研究科修士論文 (未公開), 2018. 2
- 建築研究所: 各種の業務用建築物における内部発熱に関する調査, <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/176/7.pdf>. (アクセス日: 2020. 02. 21)
- 経済産業省資源エネルギー庁: 電力供給コスト等に関する調査～電力小売自由化制度導入における経済効果などの分析調査～, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/monitoring/pdf/jiyuka-seika.pdf. (アクセス日: 2020. 02. 21)
- 四国電力株式会社: 用途別節電事例集～具体的な節電方法とその効果～, <https://www.yonden.co.jp/press/re1205/data/pr002-01.pdf>. (アクセス日: 2020. 02. 21)
- 電気設備学会: 地球環境を考慮した電気設備, 第 10 章. 2003 年 9 月.
- 経済産業省: 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー基準部会 変圧器判断基準小委員会 最終取りまとめ, p38, 2011, https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/01_7_05_02.pdf, (参照日 2020/01/23)
- 環境省: 報道発表資料 温対法に基づく政府及び地方公共団体実行計画における温室効果ガス総排出量算定に用いる平成 25 年度の電気事業者ごとの排出係数等の公表について (お知らせ), 平成 26 年 12 月, <http://www.env.go.jp/press/19009.html> (アクセス日 2020. 02. 18)

V2H + LiB を持つ実験住宅における電力需給関係の検証

Verification of Electric Energy Supply-Demand by using Model House with V2H and LiB

○盧 宏泰 (立命館大学) 近本智行 (立命館大学) 土井脩史 (京都橘大学)

Hong-Tai LU*1

Tomoyuki CHIKAMOTO*1

Shushi DOI*2

*1 Ritsumeikan University

*2 Kyoto Tachibana University

In this research, we connected an electric vehicle (EV) to the model house's power system by Vehicle-to-Home system (V2H), allowed the model house to use EV's battery. In the first part of the study, we connected V2H to home-use Lithium-Ion Battery(LiB) and photovoltaic cells to study the energy flow between this triple-source-system. The result shows that at the moment loading on, V2H first responded, but then LiB started, supplied and absorbed almost all energy. In the second part, we simulated a 24hr-load. Without IoT control, LiB also supplied 90% of the power demand. Since the battery capacity of EV is much larger than LiB, find out how to control the output balance will be the next task.

はじめに

近年、特に東日本大震災以降、電力需給バランスが崩れやすく、大規模発電所に依存しすぎであるという問題が認識された。一方、再生可能エネルギーの利用促進が進んでいることもあり、現在、エネルギーの供給は特に住宅において、従来の集中型商用電源に限らず、太陽光パネルなど個別分散電源も多くなってきた。しかし、再生可能エネルギーの発電量は天候や季節に左右され、安定した電源とは言えないため、使いきれない余剰電力を一時的に貯め、供給不足時に放電するような電力制御は重要な課題となり、仮想発電所 (Virtual Power Plant、VPP) などの概念が生まれてきた。そのなかで、受/放電両方できる「蓄電池」は重要な役割が期待されている。

本研究は、電気自動車を「自走式蓄電池」と考え、太陽光発電 (PV) により充電させ、CO₂の排出量減少と交通利便性を両立させながら、V2H システム (Vehicle to Home System) によって建物と繋ぎ、VPP の実現を目指している。また、電気自動車が生産から離れた時を想定し、V2H と家庭用据置型リチウムイオン蓄電池 (LiB) を組み合わせる。しかし、V2H と LiB、PV と連携させた場合、電力供給の挙動は十分に実証されていない。本稿では、一般家庭の生活電力消費量を模擬した負荷をかけ、電力供給実態を調査する。また、V2H+LiB と LiB のみのケースを比べ、V2H の省エネ性能を検証する。

1. 研究概要・目的

本研究では、V2H システム (以下 V2H) を用いて実験住宅と電気自動車 (以下 EV) の蓄電池を繋ぎ、実験住宅に給電する。EV の蓄電池は、最大航続距離及びモーターの

瞬間出力を満たすため、家庭用据置型蓄電池 (以下 LiB) と比べて容量と瞬間出力がともに高く設計されている。しかしながら、通勤や外出など EV が V2H から離れた際、V2H は機能しなくなる。その際、余剰電力を調整するため、LiB と繋ぐ必要性が生じる。つまり、同時に 2 種類の蓄電池を電力系統に繋いでいる状態である。このシステムを用いて、人々の生活スケジュールに合う制御の仕組みを考え、エネルギーの最適な運用方法を探し出すことが本研究の最終目的である。

本稿では V2H 導入の初期段階を想定し、まずは BEMS・IoT 制御がない状態と考え、V2H と LiB との自己制御による給放電挙動を調査する。また、EV の大容量蓄電池により、商用電源を外し、自立の可能性を検証する。

2. 実験概要・装置

実験は、「瞬間負荷実験」と「生活シミュレーション実験」と二段階に分けて実施した。

第一段階では、瞬間及び短期間の負荷を与え、負荷の限界や瞬低・サージへの耐力などを試し、各機器と V2H を連続する時の安全性、または安定性を検証する。安定性を確認したうえ第二段階に進み、生活による発生する負荷を模擬して与え、長期運転実験によりシステム上の各機器の挙動を調査する。

実験系統組成は Fig.1 に示すように、3 種類の電源と 2 種類の蓄電池で構成されている。V2H は蓄電容量 40kWh の EV と接続し、定格出力 6kW の機種を用い、実験住宅 (以下 EMH) の動力盤に繋がっている。LiB は蓄電容量 12kWh、定格出力 3kW の機種を用い、動力盤に繋がっている。蓄電池以外は、商用電源と、定格出力 4kW の太陽光パネル

（以下 PV）と、定格出力 0.7kW の固体酸化物形燃料電池（以下 SOFC）を用い、主要なエネルギー源として動力盤に繋がっている。

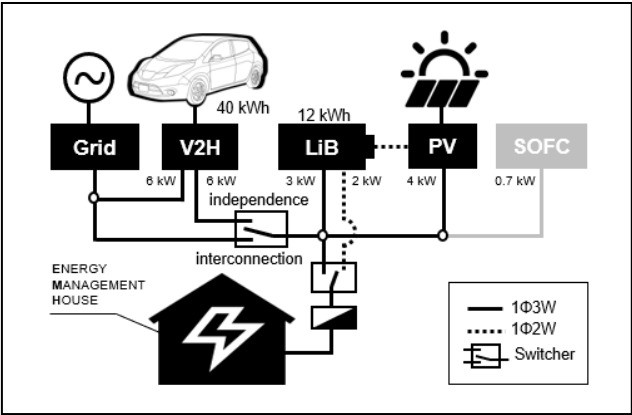


Fig.1 Composition of equipment

長期運転において、LiB の運転はグリーンモード（23：45～05：30 充電、05：30～23：45 放電）に設定する。V2H と PV は自動運転モードに設定する。

第一段階の瞬間負荷実験は 2019 年春期と夏期に滋賀県草津市立命館大学 BKC キャンパス内にある実験住宅において行われた。実験ケースを Table.1 に示す。まずは V2H、LiB、SOFC と PV を繋ぎ、1kW から 3kW まで負荷を上げて与えて、実験システムの安全性を確認した。さらに、再現性を確認するために、2 分間負荷をかけた後、瞬間停止させ、再度 2 分間安定させるという手順を 2 回繰り返した。可能な限り瞬間の挙動を知るため、1 秒毎の瞬間電力消費量を測った。本研究において SOFC は研究の対象ではないが、負荷を賄う際に起動が遅く、出力が徐々に上がり、またはすぐ止まれない特性を持ち、余剰電力が必ず発生し、考察はしやすいと予想される。そのため SOFC を接続したが、安全性を確認したうえ、連系のケースに SOFC を系統から外した。

Table.1 Instant Load Experiment Settings & Cases

DAY	WEATHER	Equipment Composition	SYSTEM	LOAD	CASE No.	INTERVAL
5/30		V2H + LiB + SOFC	Independence	1kW	VLS-S1	10 mins
				2kW	VLS-S2	10 mins
				3kW	VLS-S3	10 mins
8/12		V2H + LiB	Interconnection	1→2 →3kW	VL-I123	15 mins
SETTING: PV Connected in all cases	MEASUREMENT ITEM			PV Power Supply LiB Power Supply / Demand V2H Supply / Demand SOFC Supply Grid Supply / Reverse		
	RECORDING INTERVAL			1 sec.		
	ACCURACY			0.01 kW		
	START SOC			LiB SOC : 90% V2H SOC : 90%		

第二段階の生活シミュレーション実験は 2019 年 10 月 22 日から 11 月 11 日までの晴天日を選定し、実施した。平日と休日の消費実態が異なると想定し、実験ケースは Table.2 に示すように、「V2H 有・無」「連系・自立」「平日・休日」合計 7 ケースとした。5 秒毎瞬間電力消費量を測り、24 時間計測を実施した。消費量スケジュールは国民生活時間調査報告書¹⁾²⁾（NHK 放送文化研究所、2015）と社会生活基本調査³⁾（総務省統計局、2017）を参考にし、夫婦子供 2 人合計 4 人の家族をモデルとして、使う機器を想定し 15 分毎の消費量を算出した。模擬負荷は、エアコンと冷蔵庫、Wi-Fi ルーターについては負荷パターンが間欠であり模擬しにくいいため、実際の機器を使った。それ以外の負荷は白熱電球の組合せにより模擬した。

Table.2 Long Term Load Experiment Settings & Cases

DAY	WEATHER	Equipment Composition	SYSTEM	LOAD	CASE No.	INTERVAL
10/23		V2H + LiB	Interconnection	Weekday	VL-SW	24 hr
11/03				Holiday	VL-SH	
10/30			Interconnection	Weekday	VL-IW	
11/01				Holiday	VL-IH	
11/11		LiB ONLY	Interconnection	Weekday	L-SW	
11/09				Holiday	L-SH	
11/06			Interconnection	Holiday	L-IH	
SETTING: PV Connected in all cases		MEASUREMENT ITEM		PV Power Supply LiB Power Supply / Demand V2H Supply / Demand SOFC Supply Grid Supply / Reverse		
		RECORDING INTERVAL		5 sec.		
		ACCURACY		0.01 kW		
		START SOC		LiB SOC : 80% V2H SOC : 80%		

3. 実験結果 - 瞬間負荷における V2H、LiB の挙動

Fig.2~3 に瞬間負荷実験の結果を示している。Fig.2 からわかるように、PV が安定して発電する時 LiB は余剰電力をすべて吸収したが、1kW の負荷をかけると、その瞬間 LiB の充放電機能が一瞬に止まり、余剰電力はすべて V2H が代わりに吸収した。その後、LiB がまた充電を開始、SOFC も負荷に応じて発電を開始した。また、負荷を外した瞬間にも、LiB は同じく機能が一瞬に止まり、V2H も同様に余剰電力を吸収した。2 回目の再現性実験を行った時、負荷をかける途中で SOFC の発電が原因不明で止まり、ついでに LiB も止まって、V2H が余剰電力を吸収した。その原因は、SOFC が停止したと同時に LiB が瞬低を感じ、発電モードに変換するための停止だと考えられる。3kW の負荷をかけた場合 (Fig.3)、逆に PV だけですべ

ての負荷を賄えないため、V2H が先に不足分を賄い、LiB はその後に給電を始めた。負荷を外した時にも LiB より V2H が早く反応し、PV と SOFC の余剰電力を吸収した。SOFC を実験系統から外したケースにも、同じ挙動が発生した。V2H は負荷変動に対し、応答が早いことがわかった。

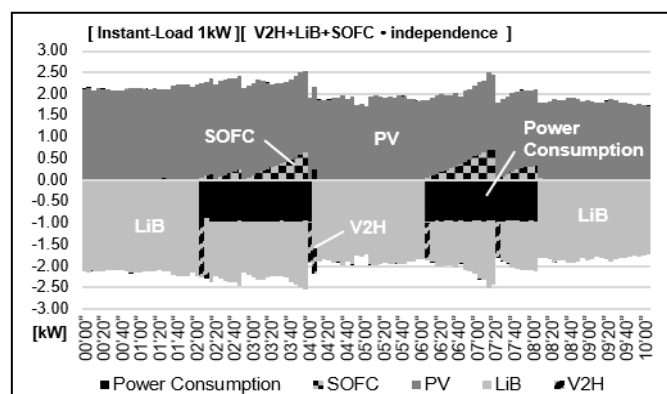


Fig.2 1kW・V2H+LiB+SOFC・Independent (VLS-S1)

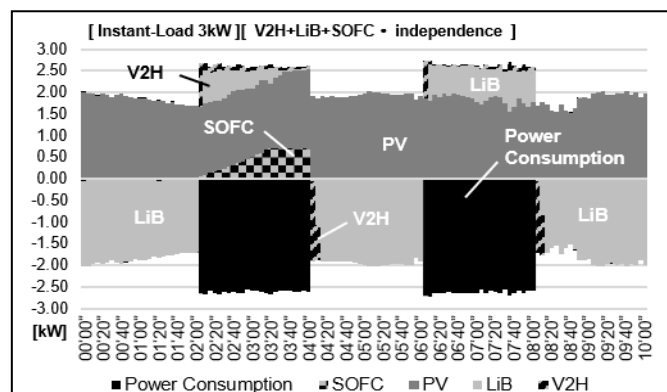


Fig.3 3kW・V2H+LiB+SOFC・Independent (VLS-S3)

4. 実験結果 - 長期運転における電力消費の実態

長期運転について、まずは「V2H+LiB・自立」と「LiBのみ・連系」のケースを比較すると、自立の状態で V2H の挙動は商用電源と殆ど同じであり、商用電源の代わりとなった。また、自立の状態で 2kW 以上の瞬間負荷をかけると、V2H を繋がない場合、LiB はすべての負荷を賄えなかったため、エラーになり停止し、停電となった。

全体的な電力消費量を見ると、平日の一日積算電力消費量は約 13.4kWh であり、休日は約 17kWh である。PV は実験棟の傍にある建物の影に影響されたため、10:30 から発電を始め、昼 13 時までの、僅か 2.5 時間しか発電できなかった。ピーク発電量は約 2.2kW である。また、PV の一日積算発電量は最大 6.3kWh であったため、中間期において一日すべての負荷を賄えないことがわかった。検証実験の結果により、単純に電気容量を計算すると、

12+40kWh の電池容量と 6.3kWh の発電容量を加え、合計約 58.3kWh であり、一日 15kWh の電力消費量とする場合、商用電源から受電せず、約 4 日自立運転できると推定される。

一日の時刻別の瞬間電力消費量について、Fig.4-5 にケース「VL-SW」、「VL-IH」の結果を示している。平日の電力消費は 06:00～07:00 の朝食前後に第一ピーク（瞬間負荷約 3.5kW）に向かう。18:00～19:00 の夕飯前後と 21:30～22:00 のお風呂前後に第二ピーク（瞬間負荷約 2.7kW）に向かう。休日は 11:00～12:00 の昼食前後に第一ピーク、17:00～18:00 の夕食前後と 20:30～22:30 のお風呂前後に第二ピークに向かう。電力消費需要と生活スケジュールを対照すると、需要のピークが発生する時点は大半在室であり、車はこれから使う、または当日も使わない状態である。従って、V2H はエネルギー源として、生活パターンに合わせ利用する可能性があると考えられる。

5. 実験結果 - 長期運転における V2H、LiB の挙動

放電挙動について、Fig.4-5 に結果を示している。LiB は 23:45 からともに充電が始まり、自立、連系にかかわらず、V2H が繋がっている場合、LiB の夜間充電をすべて V2H が賄った。LiB は夜間充電が完了しても、5:30 まで充電モードし続け、放電を行わないため、この間の負荷もすべて V2H が賄った。V2H は連系であるものの、夜間充電できず、放電し続ける。昼間には、V2H は自動充放電モード、LiB は放電モードに設定したが、PV による余剰電力ができた場合、LiB は先にすべての余剰電力を吸収し充電された。従って、LiB が昼間に充電 100% にならない限り、V2H は一日中放電のみ行う。

また、負荷を賄う出力の割合を見ると、二つ以上のエネルギー源がある場合には LiB が最も放電し、瞬間出力の 9 割を占めている。「V2H+LiB・連系・休日」のケースでは LiB が途中で残量がなくなり、その後 V2H が LiB に代わり出力した。同じケースで、LiB と V2H、商用電源と同時に出力する場合、LiB は 90～95%、V2H は 0～5%、商用電源は 5～10% の出力を占めている。負荷が 1.5kW 以下である場合では、LiB を除く出力には商用電源が殆どを占めた。その結果、V2H が繋がったすべてのケースにおいて、V2H は終了時点で、充電が約 40% 残っている (80%→40%)。EV の電費を 0.124 kWh/km とすれば⁴⁾、40% の充電量で約 130km 走ることができ、V2H と LiB の出力バランスが悪く、V2H の出力割合を高める制御が必要であると考えられる。

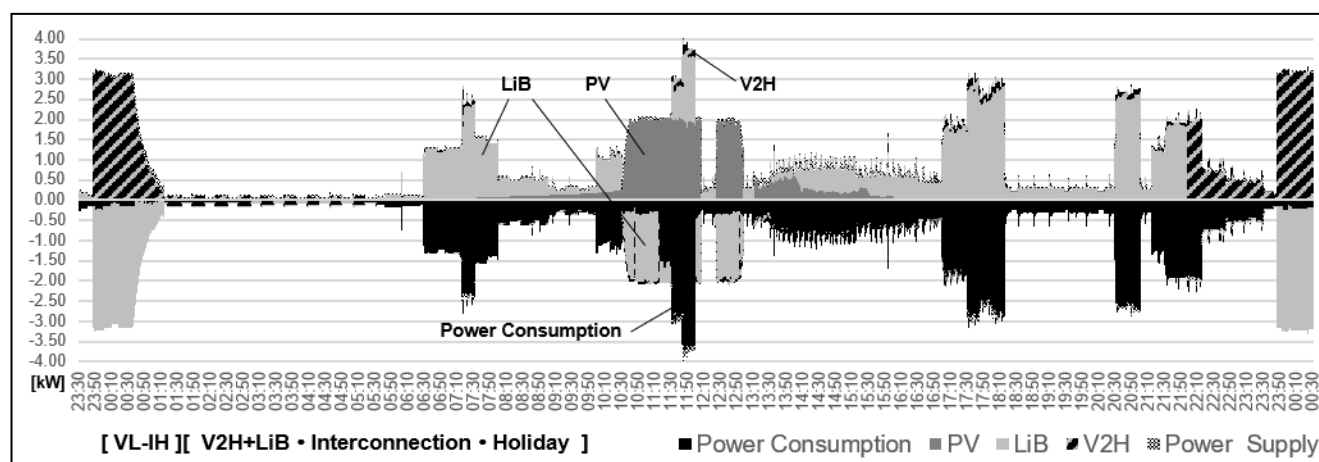


Fig.4 V2H+LiB Independence Weekday (VL-SW)

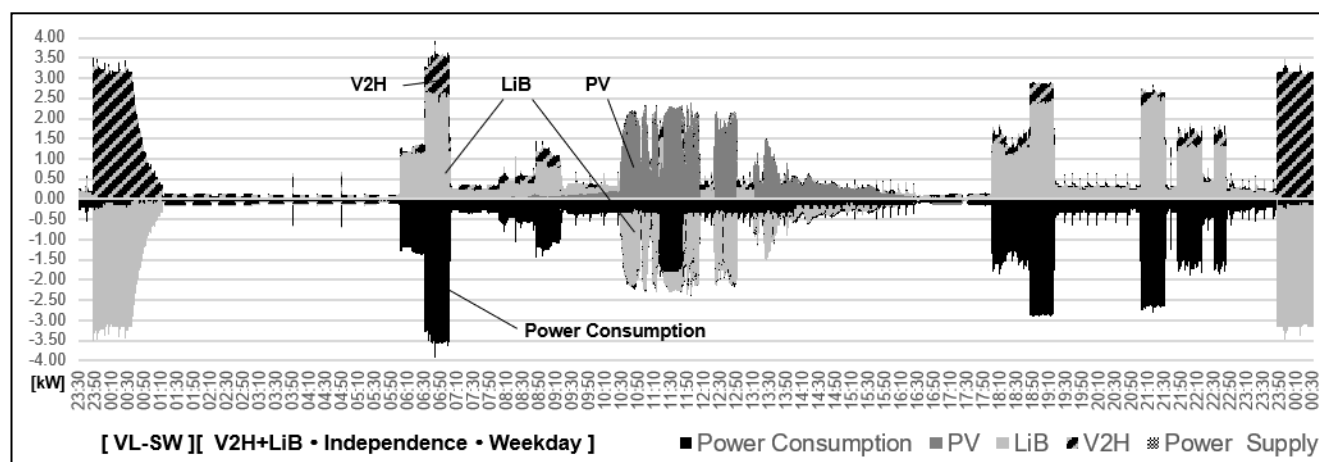


Fig.5 V2H+LiB Interconnection Holiday (VL-IH)

6. まとめ

本実験により、外部からの制御がない状態で、V2H と LiB、PV、商用電源を連続する時の各機器の挙動が検証できた。また、自立ケースの実験により、V2H+LiB からの供給だけで日常負荷を賄うことができることを確認した。結果として、まず V2H は商用電源の代わりとなり、昼間のピーク需要を賄い、デマンド制御ができたことを確認した。一方、V2H は夜間から放電し続け、充電モードに切り替わらないこともわかった。従って、V2H と LiB の連携運転を行う際に、夜間制御機能を検討する必要があると考えられる。また、LiB は、休日生活パターンの総負荷を賄えなかったが、V2H の出力が極めて低いため、LiB の容量が足りないと断言できない。今後 V2H の出力を調整し、V2H・LiB の最適容量を検討する必要もある。本稿では、住宅における給放電挙動を調査したが、EV の移動により住宅以外で充放電するシチュエーションも極めて多いので、EV の航続距離を含め、今後の課題として V2H と LiB の最適制御を検討していく。

謝辞

本研究は、ニチコン株式会社との共同研究である。また、LiB 自立運転の接続において、立命館大学建築都市デザイン学科の本間睦朗教授にご指導をいただいた。ここに衷心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) NHK 放送文化研究所 世論調査部；2015 年国民生活時間調査報告書、(2016)、p. 付表(1)~(9)、NHK 放送文化研究所
- 2) NHK 放送文化研究所 世論調査部；男女年層別時刻別行為者率、2015 年国民生活時間調査データ、(2016)、p. 1-12, 37-48、85-96、120-132、NHK 放送文化研究所
- 3) 総務省統計局；時間帯一全国・地域（調査票 A）第 5 表、平成 28 年社会生活基本調査、(2017)；
<https://www.stat.go.jp/data/shakai/2016/kekka.html>
(参照 2019. 10. 16)
- 4) 電気自動車 - 日産リーフ - 充電・航続距離；
<https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf/charge.html>
(参照 2019. 11. 28)

高断熱・高気密軸組パネル住宅の熱・湿気性状に関する研究 (その1) 窓・庇形状と外装材色等が室内熱・湿気性状に与える影響

Hygrothermal Simulations on a High Performing Single Family House with Traditional Timber Framed Modular Panels (Part 1) Influences of Window Shapes and Exterior Colors on Indoor Hygrothermal Qualities

○伍賀 誠治 (京都工芸繊維大学)

芝池 英樹 (京都工芸繊維大学)

Seiji GOKA*1 Hideki SHIBAIKE*1

*1 Kyoto institute of technology

In this manuscript, dynamic hygrothermal simulations occurred between multiple zones in a building which taken into account interactions with surrounding building envelope elements are numerically examined by using the windows application WUFI® Plus. The computational object is a two storied high performing single family house with traditional timber framed modular panels that was completed in Chiba Prefecture. Quantitative evaluations on sensible and latent heat components of air conditioning loads are compared for various combinations of window and overhang shapes, colors of exterior surfaces and moisture buffering infills in interzonal wall cavities.

1. はじめに

気候変動抑制は世界的な喫緊の課題であり、その解決法として住宅分野における温室効果ガス削減に大きな期待が寄せられている。建築外皮の高断熱・高気密化はその実現手段として有効であり、建物の高性能化・長寿命化に貢献し、持続可能な開発目標 (SDGs) にも即した環境負荷を抑制した開発を可能にする。しかし、空調機器との連携等を十分に考慮しないと冷房エネルギー消費量を増大させる恐れがある。期間蒸暑な気候が増々極端化する現況では、冷房・除湿負荷削減への設計時の配慮が必要不可欠である。一方で、居住者の健康増進・長寿に繋がる屋内温熱快適性の担保も重要であり、屋内温熱快適性と空調負荷削減は利害相反関係にあり、両立させるには複合コストの最小化を探ることになる。

ところで木造軸組パネル工法は、安定した品質と工期の大幅短縮、現場での施工技術者不足解消、総建設費削減等のメリットが見込まれ、最近工事関係者の注目を集めている。加えて近年の住宅形状の流行では、軒や庇、水切り等を突出させない比較的平坦な外表面構成が主流をなすが、風雨に対する外装材の保全および日射遮蔽の観点から、建物を延命させる上で不可欠な部材とみなせる。

上述のような背景を踏まえ、本報 (その1) では、木造軸組パネル工法を用いた総2階建て住宅モデルに関して、建物の非定常熱・湿気・空気質性状を数値予測できる WUFI® Plus を用いて、空調負荷 (顕熱・潜熱) を削減するための、窓面日射遮蔽方策、外装用鋼板色、調湿用充填材、顕熱もしくは全熱回収型換気システム等の組合せ効

果について検討する。全熱もしくは顕熱回収型換気システムの運用、窓・庇形状の最適化、外装色の変更等が空調負荷に与える複合効果を評価する。また、屋内温熱快適性 (PMV) とその維持に必要な空調負荷を比較し最小限のエネルギーで快適な屋内環境を維持できる方策を探究する。

2. 実在対象住宅と計算モデルの概要

計算では、Google SketchUp を用いて作成した検討対象の 3D マスモデルを、建物の非定常熱・湿気同時移動が検討できる WUFI® Plus 3.2^{1),2)} にインポートし、敷地・居住条件や計画された機器情報等を付与して評価する。検討対象とした千葉県東金市に新築された木造軸組パネル住宅は、1 辺 7.28m の総 2 階建て、延床面積が 106.0m²、室容積が 324.3m³、外皮面積が 277.6m² であり、大開口が南東を向く方位である (Fig.1)。屋根、壁、床、窓の熱貫流率は各々 0.111、0.177、0.248、1.31W/m²・K、外皮平均熱貫流率 (U_A 値) は 0.266W/m²・K である。モデル住宅のゾーニングは計算簡略のため居住域 1 ゾーンと非居住域 3 ゾーン (床下・階間・小屋裏) の計 4 ゾーンである。

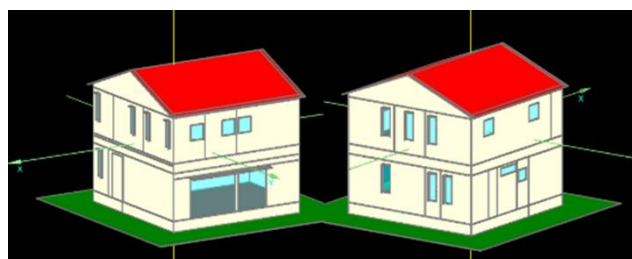


Fig.1 Overview of the model house in WUFI® Plus 3.2

3. 木造軸組パネル住宅の性能実測

気密性能、非居住域換気量、屋根・壁の日射反射率・長波長放射率の実測を行い、結果を WUFI® Plus の計算条件に反映させる。

ASTM E1827-96³⁾に基づき、加圧 50Pa 時の漏出量と減圧 50Pa 時の漏入量を測定した (Fig.2)。

$$Q = a\Delta P_n^{\frac{1}{n}} \quad \dots(1)$$

(1)式を用いてその平均値を求め、各種気密特性値を算出した。相当隙間面積 (C 値) は $0.69\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、圧力差 4Pa 時の平均漏気回数は $0.17 [1/\text{h}]$ であった。また圧力差 50Pa 時の、平均漏気回数は $1.06 [1/\text{h}]$ 、外皮単位面積あたりの漏気量は $1.23 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ であった (PHIUS+ 2018 の適合基準値: $0.91\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($<0.05\text{cfm}/\text{ft}^2$))。

検討対象住宅の屋根・壁と同じガルバリウム鋼板供試体を用い、各 2 色 (白・黒) 4 ケースについて日射反射率を測定した。周辺の反射日射の影響を排除するため、日射反射率が予め分かっている白および黒シートを設置した場合の測定も行い、シート未設置時の日射反射率を補正し、(2)式よりシート部分の日射反射率を推定する (Fig.3)。

$$\rho_n = \frac{\rho_w - \rho_b}{R_w - R_b} R_n + \frac{R_w \rho_b - R_b \rho_w}{R_w - R_b} \quad \dots(2)$$

日射反射率は、白色屋根: 66.7%、黒色屋根: 19.4%、白色壁: 68.0%、黒色壁: 22.9% であった。長波長放射率は、接触・非接触温度測定による簡易同定で 70% となった。

床下・階間・小屋裏の自然換気量を CO_2 の濃度減衰を利用して測定した (Fig.4)。

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-nt} \quad \dots(3)$$

(3)式を用いて換気回数 (n) を求め、既知の室容積から

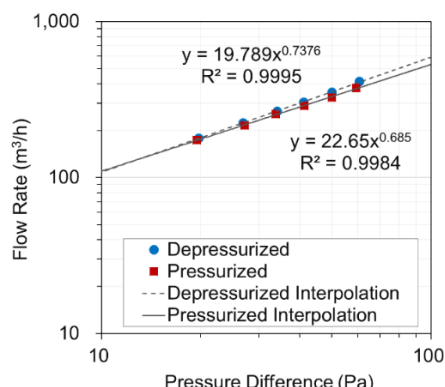


Fig.2 Relations between air flow rates and pressure differences

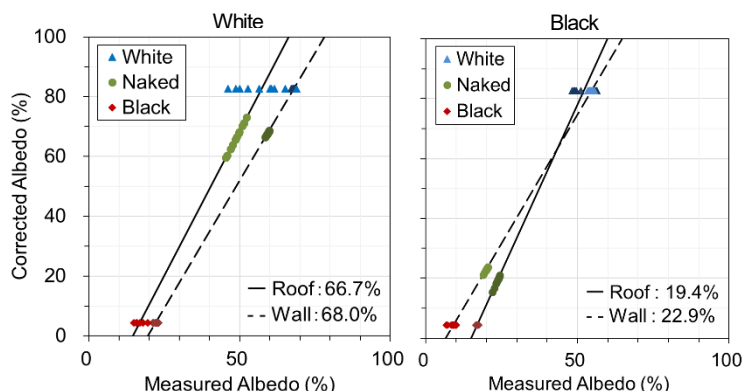


Fig.3 Measured albedo

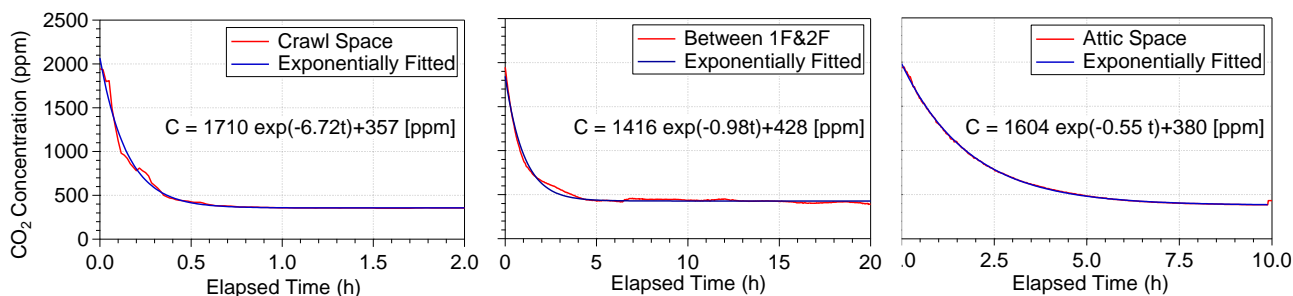


Fig.4 CO2 concentration decay

換気量を計算した。床下は外気とのみ換気するとした。床下換気回数は $6.72 [1/\text{h}]$ 、階間漏気回数は、外皮に対して $0.029 [1/\text{h}]$ 、隣接ゾーンに対して $0.95 [1/\text{h}]$ 、小屋裏の漏気回数は、外皮に対して $0.072 [1/\text{h}]$ 、隣接ゾーンに対して $0.48 [1/\text{h}]$ であった。

4. 計算条件

計算期間は 1 年間 (助走期間約 1 ヶ月経過後、11 月 1 日 1 時から翌年 10 月 31 日 24 時まで) とし、外界気象条件は横芝 (千葉県) の拡張アメダス標準年毎時値を用いる。内部負荷 (対流・放射熱、水蒸気量、 CO_2 量) に関しては、居住者を計 4 名 (夫婦、娘、息子) とし、IBEC が想定した住宅の毎時の生活スケジュール⁴⁾ と建物種類別居住者負荷発生量⁵⁾ から作成し、冬平日・冬休日・夏平日・夏休日・中間期平日・中間期休日の 6 パターンで設定する。PMV の算出では、着衣量は夏 0.5clo 、冬 1clo 、中間期 0.75clo 、エネルギー代謝率は通年 1.2met を用いる。換気には顕熱回収効率 70%、潜熱回収効率 40%⁶⁾ の全熱回収型第 1 種換気システム (ERV) を用いる。顕熱回収型第 1 種換気システム (HRV) を用いる場合はバイパス回路が機能するとする。外気温が 10°C 以上 23°C 以下の場合には熱回収を行わず、外気をそのまま取り入れ通常時の 2 倍の風量で換気する。また、室温度が $20\text{--}27^\circ\text{C}$ 、室相対湿度が 30–65% に収まるようにエアコンが適宜作動する。年間のエアコン電力料金は、冷房能力 2.8kW ・暖房能力 3.2kW の 2010 年度販売高効率機種 13 台の平均性能である、冷房 COP: 5.34、暖房 COP: 6.01 を用いて暖冷房エンタルピー量を電力量に換算し、東京電力の従量電灯 B プランの第 2 段階料金である $26 \text{円}/\text{kWh}$ を適用して求める。

5. 計算結果

総 2 階建て木造軸組パネル住宅の空調負荷（顕熱・潜熱）を削減するための、窓面日射遮蔽方策、外装用鋼板色、調湿用充填材、顕熱もしくは全熱回収型換気装置等の組合せ効果について検討した。

5.1. 庇・窓形状による効果

住宅南西面の窓に関して、縦長（1.37m×0.41m）と凡そ正方形（0.73m×0.77m）の 2 形状を設定し、その周囲に設置する庇（幅 15cm）の位置を変更して比較した（Fig.5）。窓形状と庇位置の組み合わせを Table.1 に示す。まず最も太陽高度の高い夏至（6/22）を代表日として南西壁面開口部の日射熱取得量を比較した（Fig.6）。庇がある場合、12 時までは同じ変化をたどるが、13 時以降は Case2 や Case5 のように庇が西側にあるほうが、庇なしに対しての熱取得の削減幅が大きかった。夏期の冷房負荷も他と比べ低く、Case5 は負荷発生時間も抑制し、年間の空調運用コストも 6 ケースの中で最も安価となった。また、窓形状を比較すると 13-14 時では正方形のほうが熱取得は少なく、15 時以降では縦長のほうが熱取得は少なかった。特に 16 時には Case2 は庇なしに対して 39.8%の削減ができた。太陽高度が高い時間帯は高さの低い窓と水平庇の組み合わせが効果を発揮し、逆に陽の傾いた時間帯は幅の短い窓と鉛直庇の組み合わせが効果を発揮できた。

5.2. 高反射材による空調負荷削減効果

外装材色に白色・黒色の 2 色を設定し、3. で測定した屋根・壁の日射反射率を用いて、外装材色の影響を検討する。Fig.7 は最高気温を観測する、7 月の住宅南西壁面（29.4m²）の授熱量を表している。各日のピーク時を比較すると、黒色壁面に対して、白色壁面は熱取得が 50%以下となっている。Table.3 より、黒色外装に対して白色外装

は、年間の積算冷房負荷は 25.4%、年間の冷房時間は 383 時間の削減ができた。しかし、冬でも熱取得量をカットしてしまうため、年間の積算暖房負荷は黒色外装に比べ、白色外装は 1.23 倍であり、暖房時間も 455 時間多くなっている。年間空調運用コストを比較すると白色外装のほうが 938 円安くなっており、年間では空調負荷削減に効果があるといえる。PMV（Fig.7）は、12 月から 3 月にかけて -0.5<PMV<0.5 の快適域を保っており、その期間外では 0.5 を超える期間が多くやや暑く感じられる。

5.3. 調湿材による空調負荷削減効果

Fig.9 に Hardwood、CelluloseFiber、WoodFiber、FiberGlass の平衡含水率曲線を示す。この中から調湿能力の高い部材として WoodFiber を選定し、間仕切り壁中空層に充填した場合、および中空とした場合の影響を比較する。間仕切り壁の総面積は 111.1m²で、中空層は厚さが 105mm である。換気システムは ERV と HRV を用いる。

中空時に対して充填時は、換気システムに関わらず顕熱負荷は減少するが、僅差である（Table.4）。Fig.10 は顕熱比（SHR）の散布であり、各赤線が基準となる SHR を表している。括弧内はその SHR を超える負荷の割合を示しており、図上ではその線より下側の分布がそれに該当する。ここでも間仕切り壁中空時と充填時は僅差であった。

充填の有無に関わらず HRV は ERV に比べ顕熱負荷が減り、年間空調運用コストも抑えられ、この 4 ケースでは間仕切り壁充填かつ HRV の時は最小となった（Table.4）。エアコンでの冷房・除湿の目安となる SHR=0.70 を超える負荷の割合も、HRV に対して ERV は中空時で 8.2%、充填時で 8.7%上昇し、エアコンの冷房・除湿支援効果を示した（Fig.10）。また、ERV では顕熱・潜熱負荷 0.5kW 付近の分布がなくなり潜熱負荷が抑制できたとみなせる。

Table.1 Window type and overhang position

Case	Window type	Overhang position
1	VerticallyLong	South, Top
2		West, Top
3		-
4	Square	South, Top
5		West, Top
6		-

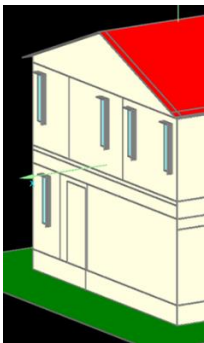


Fig.5 Overhang position (Case.1)

Table.2 Annual heating and air conditioning loads in window types and overhang positions

Case		1	2	3	4	5	6
Winter	Sensible heating load [kWh/m ²]	14.9	14.8	14.6	14.8	14.7	14.5
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	Total heating load [h]	1925	1904	1877	1913	1904	1866
Summer	Sensible cooling load [kWh/m ²]	19.2	19.1	19.5	19.0	19.0	19.4
	Latent cooling load [kWh/m ²]	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
	Total cooling load [h]	2485	2488	2505	2484	2476	2498
Accumulated conditioning cost [jpy]		18,812	18,717	18,848	18,665	18,616	18,738

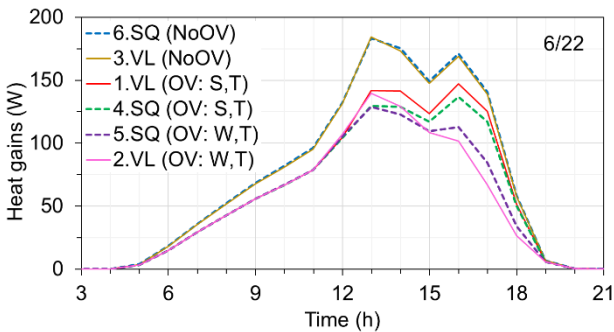


Fig.6 Hourly solar gains for SW windows on the summer solstice

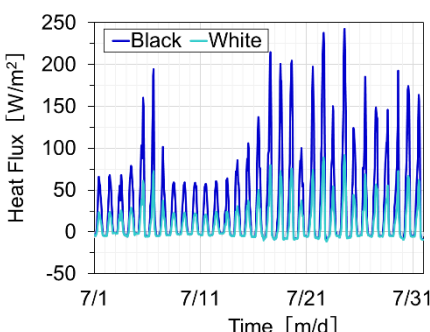


Fig.7 Heat Fluxes for SW exterior surfaces

6. まとめ

建物の非定常熱・湿気・空気質性状を数値予測できる WUFI® Plus を用いて、総2階建て木造軸組パネル住宅の空調負荷(顕熱・潜熱)を削減するための、窓面日射遮蔽方策、外装用鋼板色、調湿用充填材、顕熱もしくは全熱回収型換気装置等の組合せ効果について検討し、以下のことが分かった。

- 1) 住宅南西面に等面積の縦長もしくは正方形の2形状の窓を配置し、その周囲に付設する庇位置の影響を検討した。太陽高度が高い時間帯は、高さの低い窓と水平庇の組み合わせが有効で、陽の傾いた時間帯は幅の短い窓と鉛直庇の組み合わせが有利となる。
- 2) 白色もしくは黒色の外装用鋼板が空調負荷(顕熱・潜熱)に及ぼす影響を検討するため、屋根・壁用鋼板の日射反射率・放射率を実測し、計算条件に反映させた。黒色から白色へ変更すると、日射反射率が上昇することで、冷房期には住宅外表面での熱取得を抑制でき、年間空調負荷も削減できる。
- 3) 間仕切り壁中空層に、調湿性能の高い Wood Fiber を充填した場合、および中空とした場合の、影響を比較した。間仕切り中空時に対して充填時は、換気システムに関わらず減少傾向にあるが、空調負荷への影響は僅かである。間仕切り充填の有無に関わらず、HRV は ERV に比べ顕熱負荷が下がり、年間空調運用コストも抑えられる。間仕切り充填かつ HRV の組合せが、最も効果的である。エアコン冷房時の除湿能力上限の目安となる $SHR \geq 0.70$ を超える負荷の割合(発生時間数)も、ERV は HRV に対して中空時で 8.2%、充填時で 8.7%上昇し、エアコンでの冷房・除湿性能向上に寄与している。

Table.4 HRV and ERV effects on Annual heating and air conditioning loads with different moisture buffering capacities

		AL,HR+BP	AL,ER	WF,HR+BP	WF,ER
Winter	SHL [kWh/m ²]	12.1	14.9	11.9	14.8
	LHL [kWh/m ²]	0.9	0.3	0.7	0.1
	THL [h]	1678	1925	1660	1901
Summer	SCL [kWh/m ²]	17.2	19.2	17.1	19.2
	LCL [kWh/m ²]	4.9	3.8	4.6	3.5
	TCL [h]	2190	2485	2137	2473
AC cost [jpy]		17,361	18,812	16,945	18,557

Table.3 Annual heating and air conditioning loads for exterior surfaces

		Black	White
Winter	SHL [kWh/m ²]	14.6	18.0
	LHL [kWh/m ²]	0.3	0.2
	THL [h]	1875	2330
Summer	SCL [kWh/m ²]	19.3	14.4
	LCL [kWh/m ²]	3.8	3.8
	TCL [h]	2498	2115
AC cost [jpy]		18,699	17,761

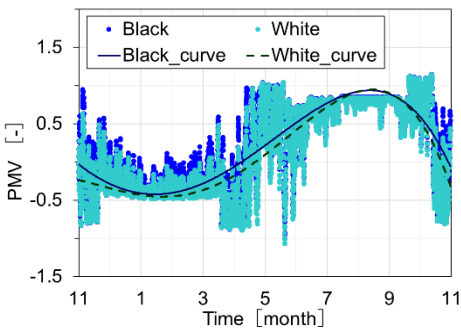


Fig.8 PMV profiles for exterior surfaces

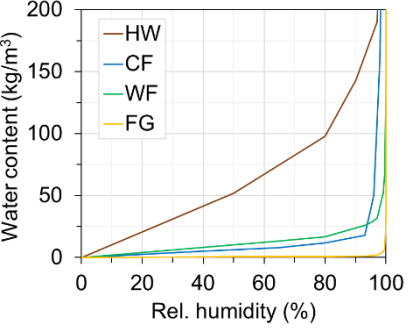


Fig.9 Sorption isotherm

参考文献

1) H.M.Künzel, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters, IRB Verlag, 1995.
2) H.M.Künzel, Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope, Solar Energy 78, 2005.
3) ASTM International, Standard Test Methods for Determining Airtightness of Building Using an Orifice Blower Door, 2007.
4) 財団法人建築環境・省エネルギー機構, 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説
5) K. Ahmed・J. Kurnitski・B. Olesen, Data in Brief, 15, 1030-1034, 2017.
6) Home Ventilating Institute, HVI-certified Products Directory, 2020.
7) 芝池英樹, 伍賀誠治, 水野上徹, RC造高断熱京町家の熱・湿気性状に関する研究(第1報) WUFI Plus による性能予測と気密測定結果, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-76, 2019.
8) 芝池英樹, 伍賀誠治, RC造高断熱京町家の熱・湿気性状に関する研究(第2報) 壁体の仕上げの違いが及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演, G-33, 2019.

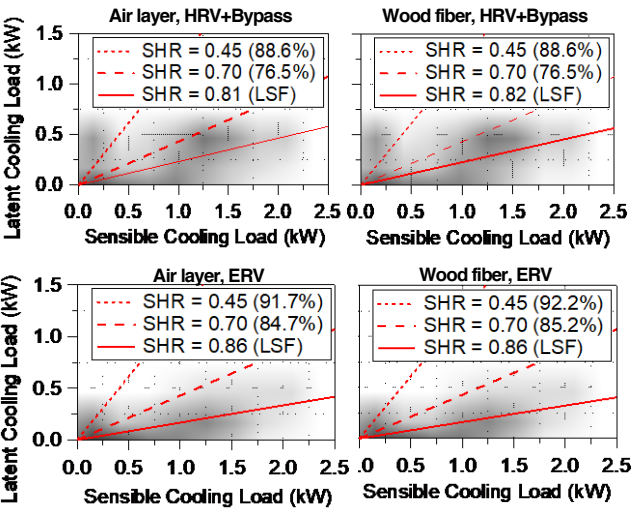


Fig.10 Relations between sensible and latent loads in summer

高断熱・高気密軸組パネル住宅の熱・湿気性状に関する研究 (その2) 多数室換気流路の影響

Hygrothermal Simulations on a High Performing Single Family House with Traditional Timber Framed Modular Panels (Part 2) Influences of Interzonal Air Flow Networks on Indoor Hygrothermal Qualities

○芝池 英樹 (京都工芸繊維大学)

伍賀 誠治 (京都工芸繊維大学)

Hideki SHIBAIKE *1 Seiji GOKA *1

*1 Kyoto institute of technology

Dynamic hygrothermal simulations occurred between multiple zones in a building which taken into account interzonal airflow networks are numerically analyzed by using the windows application WUFI® Plus with the airflow function. Influences of buoyancy, wind directions and velocities, and mechanical fans with the energy or heat recovery function as well are all investigated in the computations successfully. The computational object is a one story high performing house with traditional timber framed modular panels that will be constructed in Choshi. Quantitative evaluations on sensible and latent heat components of air conditioning loads are compared for mechanical ventilation systems including ERV and HRV.

1. はじめに

前報(その1)¹⁾では、各室換気量は実測もしくは仮定された値に基づき、一定値あるいは時系列値を建物の非定常熱・湿気予測の入力条件とし、空調負荷を削減するための各種建築的方策、および顕熱もしくは全熱回収型換気装置等の組み合わせ効果を検討した。しかし現実の各通気量は、屋内熱・湿気性状や屋外気候データとして与えられる風向・風速に依存し、熱・湿気・空気輸送の連成問題として解く必要がある。多数室の非定常熱・湿気・空気性状を数値予測できる Windows アプリケーション WUFI® Plus では、多数室換気計算機能により、通常の熱・湿気計算と同時に多数室間通気量も毎時刻で逐次予測できる。これは CONTAMN 内で使用されるモデル²⁾と同様で、圧力仮定による通気量収支計算法として実装されている³⁾。

本報(その2)では、木造軸組パネル工法を用いた平屋建て住宅モデルに関して、建物の非定常熱・湿気・空気質性状を数値予測し、顕熱あるいは全熱回収型換気装置、熱回収無しの第1種あるいは第3種換気装置が運用された場合、室間に生じる通気量の違いが、各室空調負荷(顕熱・潜熱)や下流室熱・湿気・空気質性状に与える影響を検討する。特に、顕熱あるいは全熱回収型換気装置運用時の多数室換気性状予測は、WUFI®Plus の多数室換気計算機能では直接求められず、排気の温・湿度時系列から次回給気の温・湿度時系列を生成し、繰り返し計算で収束させる方法を試行する。下流室の汚染質処理に必要な換気量も上流室に供給されるため、上流室空調負荷は増加し、下流室の熱・湿気・空気質環境は劣化する傾向が容易に想定されるので、どの程度の増加や劣化になるかを定量化する。

2. 計算モデルの概要

多数室換気計算では、比較的単純な換気回路網が構成できる以下のような平屋住宅を計算対象とする。検討対象とした千葉県旭市に新築予定の木造軸組パネル住宅は、7.28m×10.92mの総2階建て、延床面積が79.5m²、室容積が228.2m³、外皮面積が297.8m²であり、大開口が南を向く方位である(Fig.1)。屋根、壁、床、窓の熱貫流率は各々0.111、0.177、0.248、1.31W/m²・K、外皮平均熱貫流率(U_a 値)は0.216W/m²・Kである。モデル住宅のゾーニングは、居住域6ゾーンと非居住域2ゾーン(床下・小屋裏)の計8ゾーンである。また、顕熱あるいは全熱回収型換気装置の計算時には、給・還気以外は建物と完全に独立した外気・排・気処理室2ゾーンを追加する。

3. 多数室換気計算機能 (AFM) の収支式⁴⁾

多数室換気計算機能(以下 AFM と略称する)は、外皮構成要素の通気性能、風力、浮力および送風機動力を考慮して、建物構成要素全体の通気量を計算する。室内での汚染質濃度評価には必要不可欠のため、過去何年にも渡り、多数室換気計算法が色々と開発されて来ているが、考え方は概ね同じである。まず、室jから室iへの通気量 $F_{j,i}$ [kg/s]

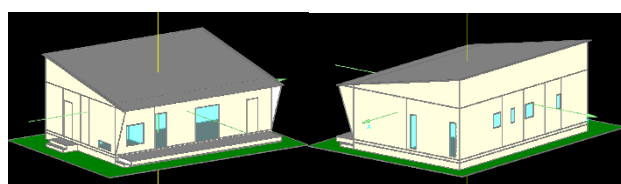


Fig.1 Overview of the model house in WUFI® Plus 3.2

は流路に沿った圧力損失 $P_j - P_i$ [Pa]の関数として得られ、

$$F_{j,i} = f(P_j - P_i) \quad \cdots (1)$$

室i内部の乾燥空気の質量 m_i [kg]は完全気体の状態方程式で与えられる。

$$m_i = \rho_i V_i = P_i V_i / RT_i \cdots (2)$$

ここで、 V_i 、 P_i 、 T_i は、各々室iの室容積[m³]、静圧[Pa]、絶対温度[K]を表し、 $R = 287.055$ [J/kgK] (乾燥空気のガス定数)である。

非定常解析では質量保存則により次式が得られる。

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \rho_i \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = F_i + \sum_j F_{j,i} \cdots (3)$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} \approx \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{P_i V_i}{RT_i} \right) - (m_i)_{t-\Delta t} \right] \cdots (4) \text{rflow}$$

ここで、 m_i は室iの乾燥空気の質量[kg]、室jと室i間の
通気量 $F_{j,i}$ [kg/s]は、正の場合は室j から室iへの、負の場
合は逆方向への流れを各々表し、 F_i は室iでの乾燥空気の
発生量> 0、もしくは消失量< 0である。このような乾燥

空気の発生量や消失量を考えず質量収支が概ね定常なら、

$$\sum_j F_{j,i} = 0 \cdots (5)$$

他方、非定常の時刻間で乾燥空気の密度変化を許す場合は、時間輸送量である発生量または消失量 F_i を利用する。

建物外皮は全て気密ではないと考える。異なる外皮要素を通過する空気流は、各時刻で各室圧力を仮定し、実際の内部気候と風圧を考慮して反復評価し多数室での換気質量収支を求める。複数要素を通過する質量流量は、各種気流性状を近似するべき乗則で評価する。各要素の気流性状を記述するパラメーター特性値を **Table.1** に示す。天井、間仕切り壁、室内建具等の外皮以外の要素は、Orme (1999) 付録 E に基づいて設定し、外皮に関しては前報 (その1) ¹⁾ で示した気密性能測定結果に準じて与えた。

4. 計算条件

計算期間、外界気象条件、内部負荷は、全て前報 (その1) ¹⁾ と同じ設定とした。換気装置としては、全熱回収型第1種換気システム (ERV)、バイパス回路のある顕熱回

Table.1 Airflow parameters adopted in WUFI® Plus 3.2

Building Component	Airflow parameters	Related to
Exterior walls	Flow coefficient 0.711 dm ³ /(s m ² Pan); Flow exponent 0.035	Wall area
Inner walls	Flow coefficient 0.52 dm ³ /(s m ² Pan); Flow exponent 0.67	Wall area
Floor	Flow coefficient 0.52 dm ³ /(s m ² Pan); Flow exponent 0.67	Crawl zone
Roofing	Flow coefficient 0.012 dm ³ /(s m ² Pan)Flow exponent 0.65	Roof sides
Windows, closed	Flow coefficient 0.001 dm ³ /(s m ² Pan); Flow exponent 0.711	Joint length
Windows, open	Discharge coefficient 0.6; not specified in cases	Opening area
Duct	Cross sectional area 0.01 m ² ; Hydraulic diameter 0.056 m	
	Roughness dimension 0.15 mm dynamic loss coefficient 0	

Table.2 Annual air conditioning loads for upstream three zones with Energy, Heat or No Recovery Ventilation Systems

Zones	↓ Performance items \ Cases →	AF_ERV	AF_HRV	AF_BV	NoAF_ERV	NoAF_HRV	NoAF_BV
1.MBR	Sensible heating load [kWh/m ²]	3.9	6.3	7.0	4.6	3.6	8.2
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3
	Total heating time [h]	2932	3096	3551	3293	3045	3873
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	1.5	1.6	1.3	1.3	1.4	1.1
	Latent cooling load [kWh/m ²]	1.0	1.0	1.1	0.8	1.0	1.3
	Total cooling time [h]	1890	2028	1453	1467	1596	1155
2.BR	Sensible heating load [kWh/m ²]	1.5	3.4	3.7	1.6	1.0	4.1
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	Total heating time [h]	1832	2456	2816	1999	1591	2991
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	2.9	3.1	2.3	2.3	2.5	1.9
	Latent cooling load [kWh/m ²]	1.1	1.1	1.2	0.8	1.0	1.1
	Total cooling time [h]	2784	2939	2097	1993	2171	1558
3.LDK	Sensible heating load [kWh/m ²]	6.1	10.8	11.7	25.5	23.0	33.7
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.4	0.4	0.4	2.1	2.4	2.4
	Total heating time [h]	1749	2328	2635	3426	3273	3798
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	8.9	9.3	7.3	6.1	5.5	5.5
	Latent cooling load [kWh/m ²]	2.2	2.2	2.3	5.6	6.0	7.0
	Total cooling time [h]	2374	2456	1818	1353	1423	1141
Accumulated conditioning cost [jpy]		14,722	19,224	18,486	24,249	23,099	31,713

第1種換気システム (HRV)、無回収第1種換気システム (BV)、自然給気口高さが異なる3種類の第3種換気システム (EVH・FL+2875mm、EVM・FL+1435mm、EVM・FL+300mm) をAFMで検討した。ただし、HRVの風量はバイパス回路の作動時も一定とした。AFM計算に用いたSA (NBVではOA) ファンおよびRA (NBV、EVH、EVN、EVLではEA) ファンの特性曲線を、各々Fig.2に示す。なお、第1種換気装置の各熱回収効率、空調時の設定温・湿度、エアコンの電力消費特性等も、前報 (その1)¹⁾と同じ設定とした。

5. 計算結果

ERV、HRV、回収無し第1種換気装置 (BV) による上流3室での空調に必要な年間の顕熱および潜熱負荷をTable.2に示す。ただし、ERV、HRVの計算結果は、熱回収の無いBVの排気 (EA) 時系列から求めた給気 (SA) 温・湿度時系列を初期値として、次回計算の給気 (SA) 温・湿度時系列を生成し、繰り返し計算で収束させており、計4回の繰り返し補正した給気 (SA) 時系列によるものである。HRVの排気 (EA) 温・湿度時系列の計算前後での二乗平均残差の平方根と対応する標準偏差の収束状況をFig.3に示す。3回程度の繰り返し計算で排気 (EA) 時系列は収束して安定しており、ERVも同様に収束している。

また、自然給気口高さが異なる3種類の第3種換気システム (EVH・FL+2875mm、EVM・FL+1435mm、EVM・FL+300mm) による上流3室での空調に必要な年間の顕熱および潜熱負荷をTable.3に示す。

Table.3 Annual air conditioning loads for upstream three zones with three Exhaust Ventilation Systems

Zones ↓ Performance items \ Cases →		AF_EVL	AF_EVM	AF_EVH
1.MBR	Sensible heating load [kWh/m ²]	10.1	9.6	9.6
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.5	0.4	0.4
	Total heating time [h]	3878	3907	4014
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	1.2	1.2	1.2
	Latent cooling load [kWh/m ²]	1.7	1.7	1.8
	Total cooling time [h]	1274	1283	1292
2.BR	Sensible heating load [kWh/m ²]	6.8	6.2	5.6
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.3	0.3	0.3
	Total heating time [h]	3483	3411	3237
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	2.0	2.0	2.1
	Latent cooling load [kWh/m ²]	1.6	1.6	1.6
	Total cooling load [h]	1773	1842	1964
3.LDK	Sensible heating load [kWh/m ²]	12.4	12.0	12.2
	Latent heating load [kWh/m ²]	0.6	0.5	0.5
	Total heating [h]	2791	2750	2741
	Sensible cooling load [kWh/m ²]	6.8	6.8	6.8
	Latent cooling load [kWh/m ²]	2.3	2.3	2.3
	Total cooling load [h]	1661	1676	1680
Accumulated conditioning cost [jpy]		22,105	21,365	21,254

毎時外気温が最高値、最低値を示す日を含む各3日間について、換気上流であるLDKでの温・湿度変動をFig.4に、換気下流となるWICでの温・湿度変動をFig.5に各々示す。AFMの計算結果は、各室で外気との換気結果が反映される通常計算の対応する結果に比べて、上流室への給気量が増えるため、空調負荷は増加し、下流室の温・湿度や空気質は劣化することを確認した。

6. まとめ

木造軸組パネル工法を用いた平屋建て住宅モデルに関して、建物の非定常熱・湿気・空気質性状を計算し、顕熱あるいは全熱回収型換気装置、熱回収無しの第1種あるいは第3種換気装置が運用された場合、室間に生じる通気量の違いが、各室空調負荷 (顕熱・潜熱) や下流室熱・湿気・空気質性状に与える影響を検討した。特に、ERVおよびHRV運用時の多数室換気性状予測のため、給気温・湿度時系列の繰り返し計算法の実用性を示した。

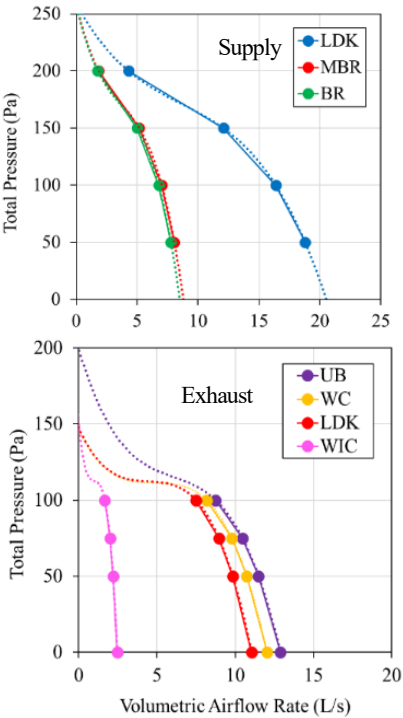


Fig.2 Performance curves for fans

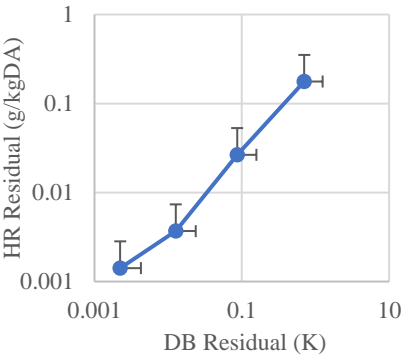


Fig.3 Convergence on EA residuals for HRV

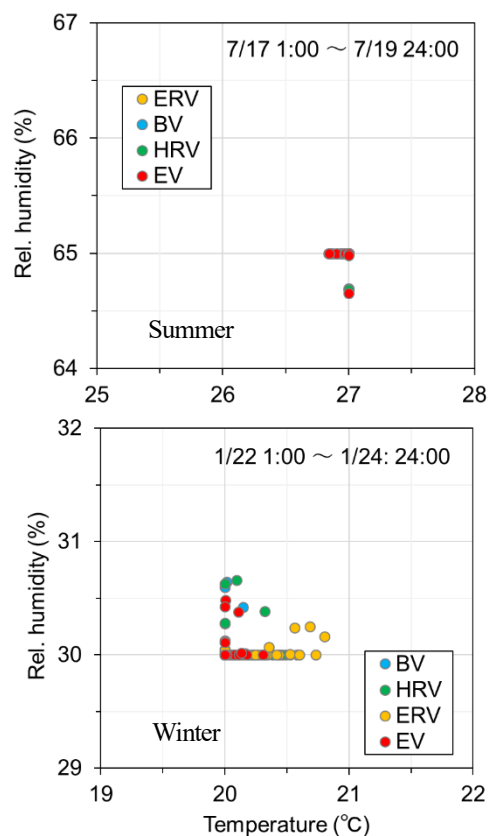


Fig.4 DB and RH trajectories for the upstream zone (LDK) in the extreme days of winter and summer

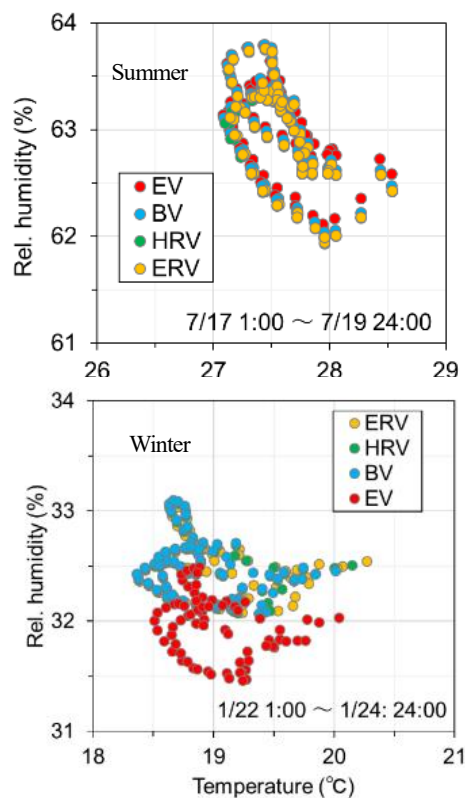


Fig.5 DB and RH trajectories for the downstream zone (WIC) in the extreme days of winter and summer

参考文献

1) 佐賀誠治, 芝池英樹, 高断熱・高気密軸組パネル住宅の熱・湿気性状に関する研究(その1) 窓・底形状と外装材色等が室内熱・湿気性状に与える影響, 近畿支部学術研究発表会論文集, A-30, 2020.

2) Walton, G. N., Dols, W. S., CONTAM 2.4c User Guide and Program Documentation. NISTIR 7251, National Institute of Standards and Technology. 2008.

3) Pazold, M., Antretter, F., Hygrothermische Gebäudesimulation mit MultizonenGebäudedurchströmungsmodell. Bauphysik, 35. (2), pp. 86-92, 2013.

4) Dols, W. S., Polidoro, B. J., CONTAM 3.2 User Guide and Program Documentation, NISTTN 1887, National Institute of Standards and Technology. pp. 253-254, 2015.

5) Orme, M., TN 51: Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations. AIVC Technical Note 51, 1999.

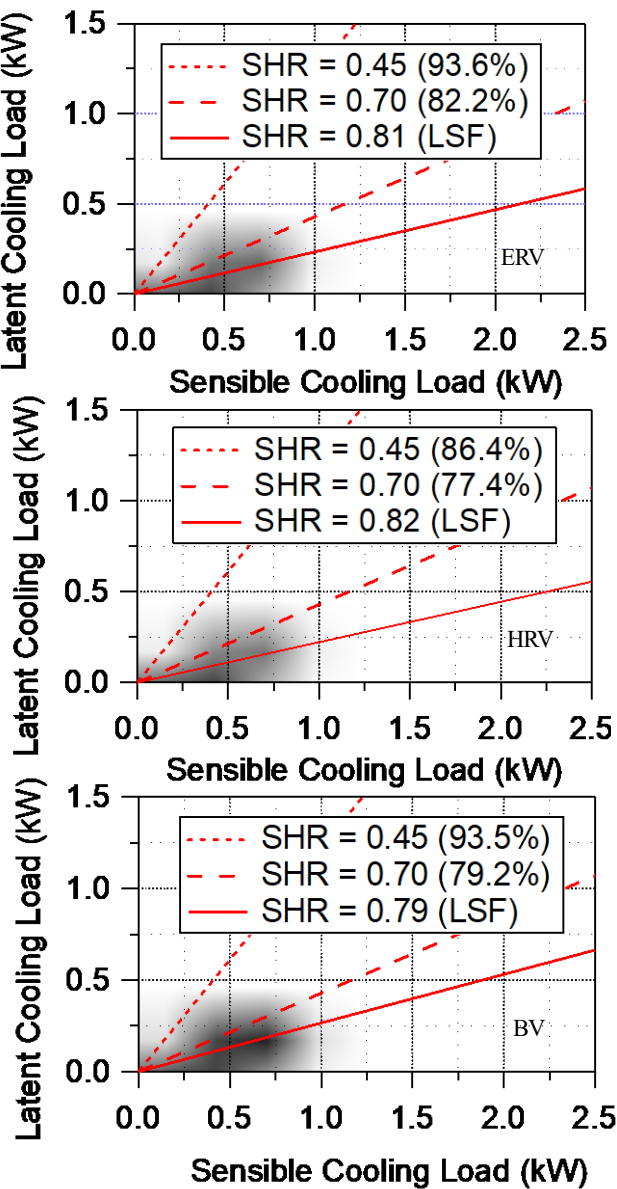


Fig.6 Relations between sensible and latent loads in summer for three types of balanced ventilation systems

人体表面の対流熱伝達率・圧力分布の CFD 解析手法に関する基礎的検討
Fundamental Study on CFD Simulation of Convective Heat Transfer Coefficient and
Static Pressure on Skin Surface

○桃 井 良 尚（福井大学） 山 本 新（福井大学）

Yoshihisa MOMOI*1 Shin YAMAMOTO*1

*1 University of Fukui

In an air-conditioned room, the airflow is an environmental factor that strongly affects the thermal sensation of a person, and it is very important to accurately predict the airflow around the human body. In this paper, CFD simulation on the pressure and heat flux on the human body surface was conducted and the effect of the surface mesh and the turbulence model on the accuracy of the calculation was examined.

はじめに

室内空調において、気流は人間の温冷感に強く影響を及ぼす環境要素であり、積極的に利用することで体感温度の低減効果が得られる¹⁾。一方で、ドラフト(望まれない局所気流)による不快感の原因となる。しかし、気流感や気流暴露時の人体表面における人体表面での熱流分布などを詳細に把握した研究はあまり多くない^{2), 3), 4)}。本研究では、「気流感」が主に人体表面の微気流や気流による圧力及び対流熱伝達量によって生じると考え、人間の気流に対する感覚知覚メカニズムを解明することを最終目標とし、対流型空調利用時における快適性の向上を図ることを目的とする。本報では、人体表面の圧力・熱流について CFD 解析手法の検討を行うとともに、得られた解析結果について考察を行う。

1. 人体表面メッシュが解析結果に及ぼす影響

1.1 解析概要

一様流中に座位状態で静止する人体を対象とし、人体周辺の気流解析を行った。人体形状には、伊藤ら⁵⁾の Virtual Manikin（以下 VM と記す）と、サーマルマネキン（京都電子製 THS-117S/217S、以下 TM と記す）の2種類の形状を用いた。2種類の人体形状とも TM の部位に合わせた 17 部位に部位分割し、部位ごとに評価した。既往研究⁶⁾との比較のため、解析空間は Fig. 1 に示す大阪大学の人工気候室を想定した 4m×4.1m×2.2m の空間とし、室中央部に VM または TM を配置した。Fig. 2 に VM 及び TM の人体形状及び部位分割を示す。また、Table1 に人体各部位の面積及び解析で用いた表面温度を示す。Table2 に一様流暴露時の基本解析条件を示す。Table3 に解析ケースを示す。適切なメッシュについて検討を行うため、境界層要素の第一層目の厚さと境界層全体の厚さ（境界層分割総数）をパラメータとして CFD 解析を行った。Fig. 3 に解析空間全体のメッシュ分割を示す。

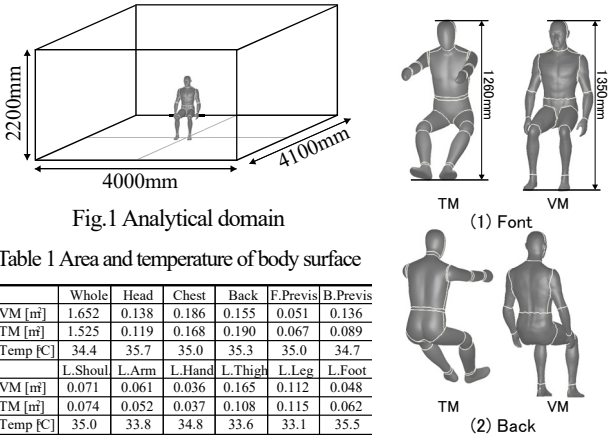


Fig.1 Analytical domain

Table 1 Area and temperature of body surface

	Whole	Head	Chest	Back	F.Prev	B.Prev
VM [m ²]	1.652	0.138	0.186	0.155	0.051	0.136
TM [m ²]	1.525	0.119	0.168	0.190	0.067	0.089
Temp [°C]	34.4	35.7	35.0	35.3	35.0	34.7
	L.Should	L.Arm	L.Hand	L.Thigh	L.Leg	L.Foot
VM [m ²]	0.071	0.061	0.036	0.165	0.112	0.048
TM [m ²]	0.074	0.052	0.037	0.108	0.115	0.062
Temp [°C]	35.0	33.8	34.8	33.6	33.1	35.5
	R.Should	R.Arm	R.Hand	R.Thigh	R.Leg	R.Foot
VM [m ²]	0.071	0.061	0.036	0.165	0.112	0.048
TM [m ²]	0.074	0.052	0.037	0.108	0.115	0.062
Temp [°C]	34.9	34.0	35.0	33.7	33.2	35.7

Fig.2 Human shape and body segments

Table 2 Simulation conditions

CFD Code	Cradle SCRYU/Tetra V14
Algorithm	SIMPLEC
Inflow Boundary	$U=1.0\text{ m/s}$, $T=28.0^\circ\text{C}$
	$TI=0\%$ $TF=10\%$
	$k=0.0001$, $\varepsilon=0.0001$ $k=3/2(U \times TI)^2$, $\varepsilon=C_\mu \times k^{3/2}/l$ $C_\mu=0.09$, $l=1.4\text{m}$
Outflow Boundary	$P=0\text{ Pa}$
Wall and Human Body Boundary	Velocity: noslip, Temperature: measured value

Table 3 Calculation cases

Human body shape	Virtual Manikin								
Thickness of the first mesh for boundary layer	0.25mm					0.50mm			
Number of layers	4	11	14	20	26	4	9	14	20
Total thickness of boundary layer	1.16	4.63	6.99	14.3	27.3	4.74	6.79	14.0	28.6
Averaged y for whole body	1.79	1.68	1.68	1.67	1.67	3.27	3.25	3.24	3.24
Number of total meshes	55million					25million			
Expansion ratio of meshes	1.1								

1.2 解析結果

Fig. 4 に境界層要素の厚さと対流熱伝達率(以下 CHTC と記す)との関係を示す。解析結果から、境界層要素全体の厚さが厚いほど CHTC が小さくなるが、全体の厚さが 15mm 程度より厚くなると CHTC の値はほぼ変化しないことが分かる。Fig. 5 に VM の鼻の表面の温度勾配を示す。全体の厚さが 5mm 程度より厚い場合、人体表面から第一

層目のメッシュ厚さが0.25mmと0.5mmの場合で人体表面の温度勾配はほぼ一致した。解析精度及び解析負荷の観点から、本研究の解析では、境界層一層目の厚さを0.5mm、全体の層数を14層(13.987mm)とすることとした。なお、向らの解析結果⁷⁾(Fig.4中の×印)と比較しても、ほぼ同様の結果が得られていた。

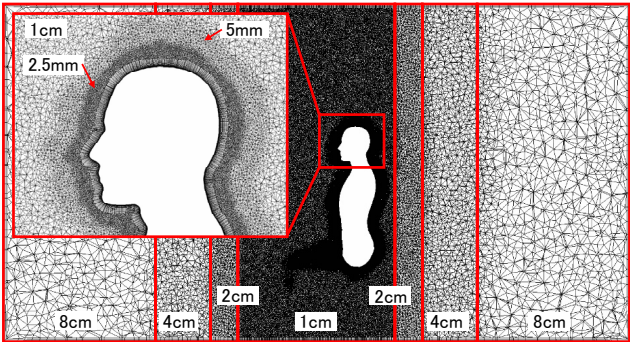


Fig.3 Mesh and octree layout

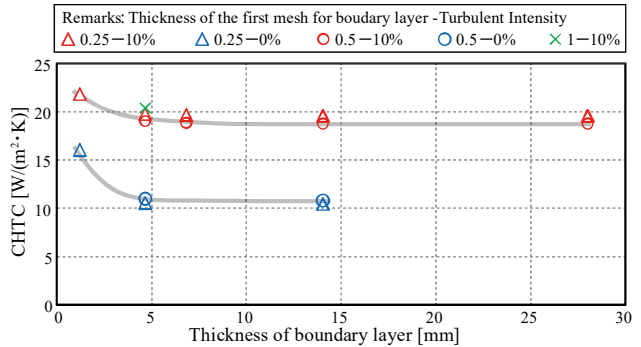


Fig.4 Averaged CHTC for whole body with thickness of boundary layer

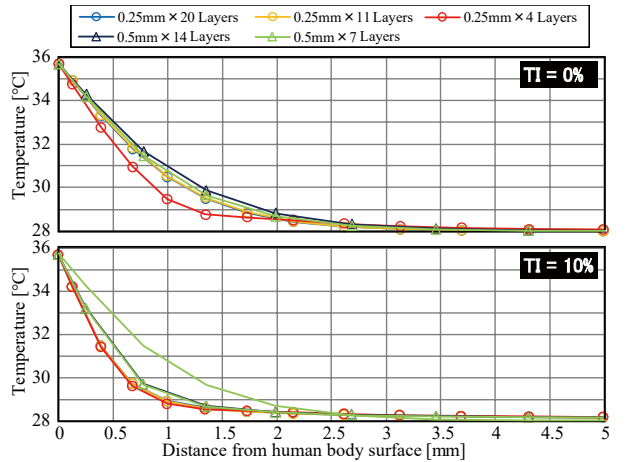


Fig.5 Vertical temperature profile on nose surface

2. 乱流モデルが解析結果に及ぼす影響

2.1 解析概要

人体暴露気流の風向及び気流の乱れの有無をパラメータとして定常及び非定常解析を行った。定常解析には4種類のRANSモデルを用い、非定常解析にはLES(ダイナミック・スマゴリンスキー・モデル: DSM)を用いた。ただし、LESについては流入風の乱れの設定が困難であったため、乱れの無い条件のみ非定常解析を行った。

Table4に解析条件を示す。表中以外の条件については、Table2と同様である。Table5に解析ケースを示す。

Table 4 Simulation conditions

Algorithm	Steady flow	Unsteady flow
Turbulence model	Low-Re k-ε (AKN) SST k-ω RNG k-ε Realizable k-ε	LES (DSM: Dynamic Smagorinsky Model)
Time step	—	0.004s (250Hz)
Discretization scheme for convection term	QUICK	
Number of total meshes	30million	

Table 5 Calculation cases

	Case-F0	Case-U0	Case-F10	Case-U10
Airflow direction	Foward	Upper	Foward	Upper
Turbulent Intensity	0 %		10 %	

2.2 解析結果

Fig.6及びFig.7に、それぞれ流入風の乱れがない条件での表面CHTCと圧力分布及び部位ごとの面積加重平均値を示す。同様に、Fig.8及びFig.9に流入風の乱流強度が10%の解析結果を示す。

(1) 風向及び気流の乱れの有無についての検討

CHTC分布では、顔や末端部などで局所的に大きな値が見られる。しかし、風向による全身平均値の差異はほとんど見られない。気流が乱れているCase-F10、U10に比べ、乱れの無いCase-F0、U0では風上側と風下側の値の差異が小さく、気流の乱れによる影響が見られる。また、圧力分布では、負圧側の範囲が広く、面積加重平均すると全条件で全身平均値は0Pa以下であった。正面気流条件に比べ上方気流条件の全身平均値が0.2Pa程度大きく、風向による影響が見られる。気流の乱れによる全身及び各部位の平均値の差異はほぼ見られない。

(2) 乱流モデルについての検討

Case-F10、U10について、乱流モデルによる影響が顕著に見られる。CHTCの全身平均値は、Realizableで最大、SSTで最小となり、その差異はCase-F10で約4.5W/(m²·K)、Case-U10で約10W/(m²·K)であった。Case-U10ではRealizableにおいて極端な過大評価が見られる。圧力の全身平均値は、SSTで最大、RNGで最小となり、その差異は約0.1Paであった。Case-F0、U0について、CHTC、圧力ともに乱流モデルによる影響は小さい。

3. まとめ

本報では、人体表面の圧力・熱流についてのCFD解析を行い、表面メッシュ及び乱流モデルについて検討を行い、境界層厚さが解析結果に影響を及ぼすため15mm程度は必要であることと乱流モデルによる解析結果の差異を示した。今後、人体周辺のCHTC及び圧力分布について実験を行う予定である。

謝辞 本研究は、2019年度JSPS科研費(基盤研究C19K04725)の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

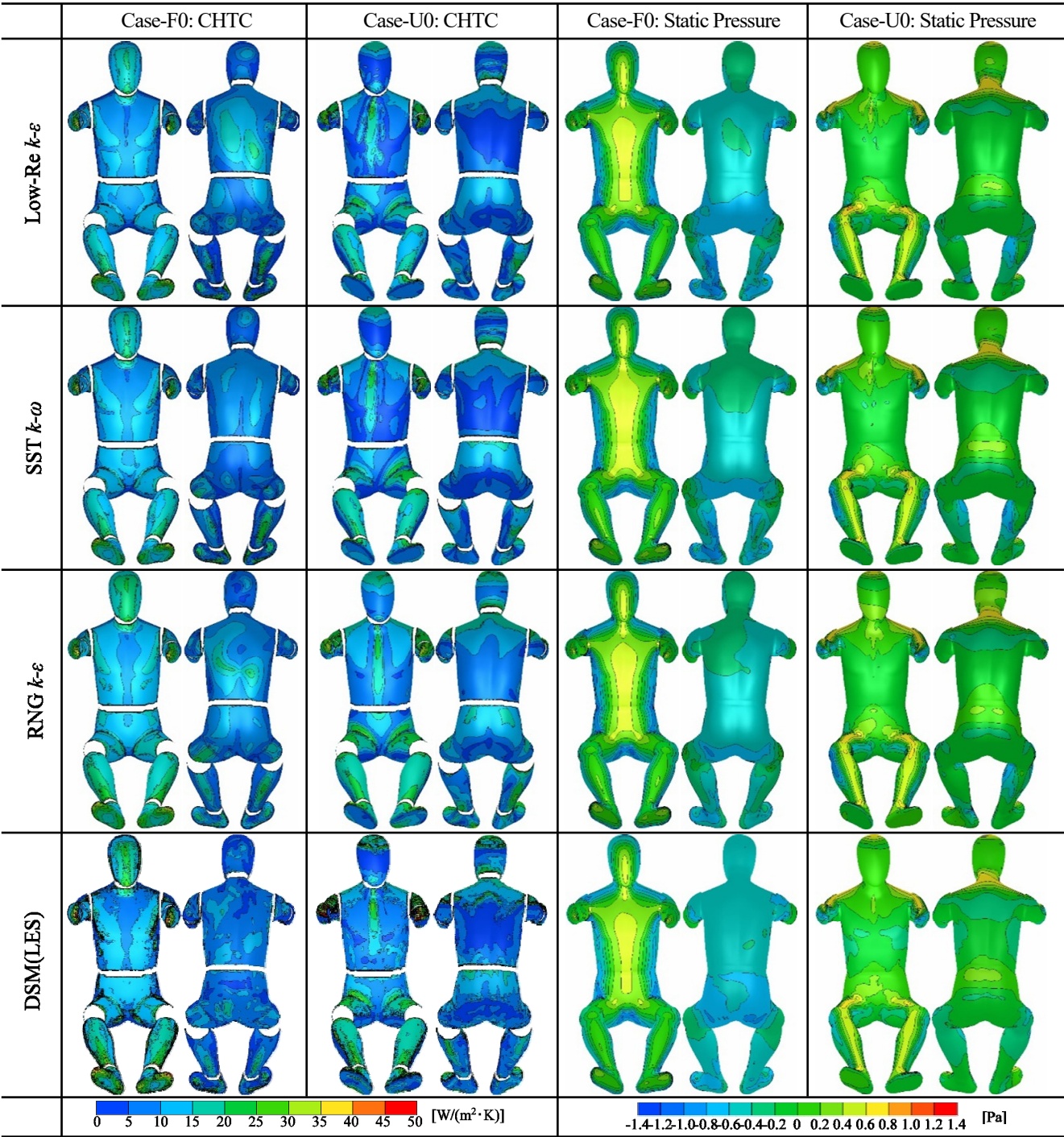


Fig.6 Distributions of CHTC and static pressure on human body surface (TI=0%)

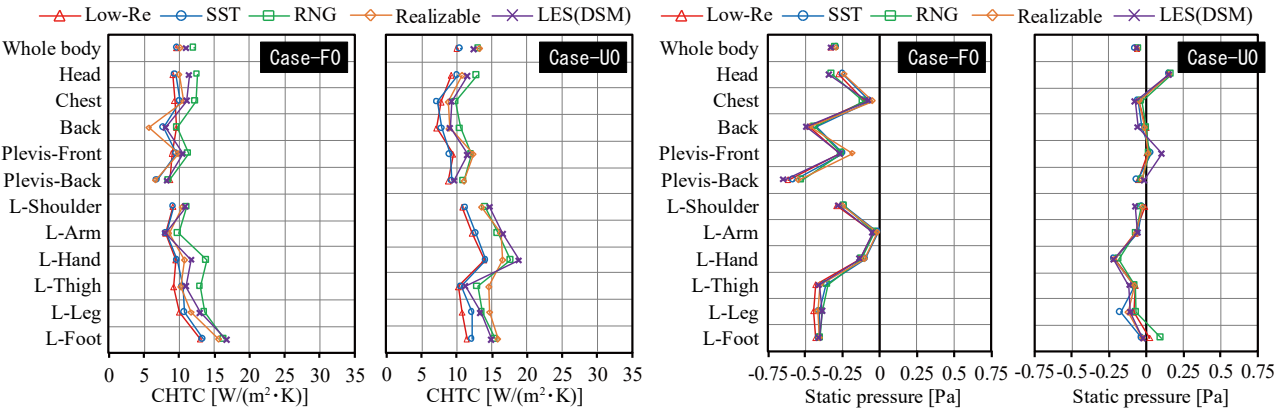


Fig.7 Area weighted average profile of temperature and static pressure for each human body surface (TI=0%)

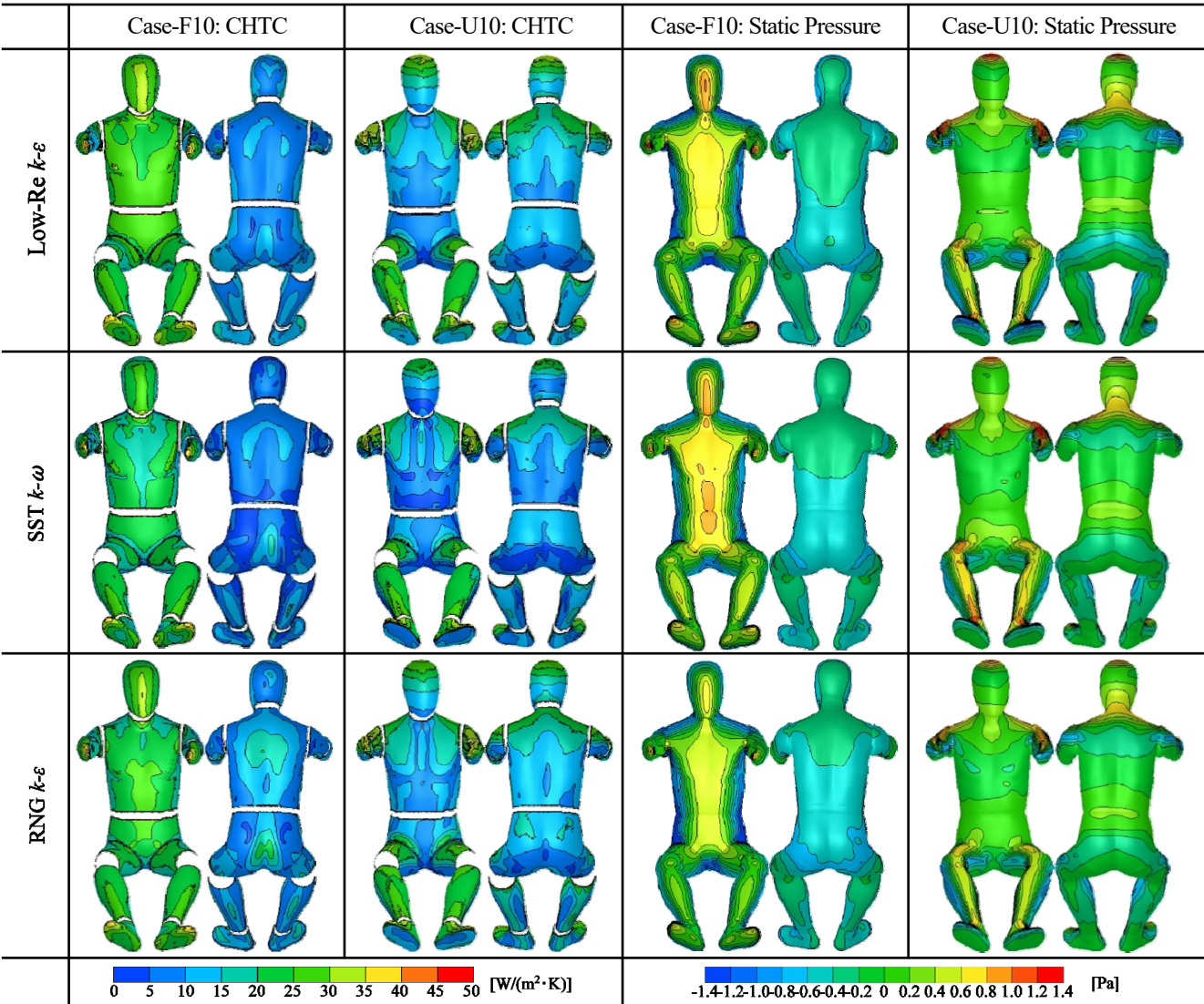
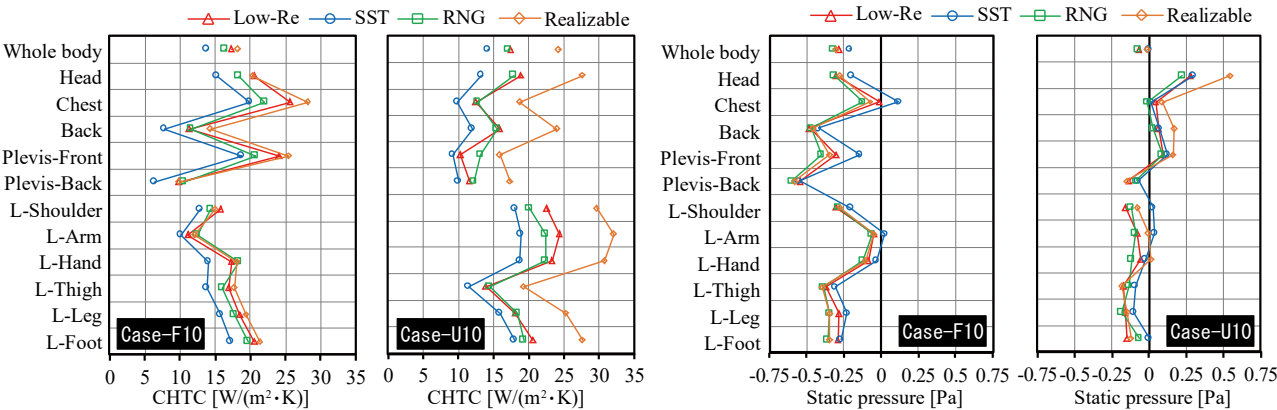


Fig.8 Distributions of CHTC and static pressure on human body surface (TI=10%)



参考文献

1) ANSI/ASHRAE, ASHRAE STANDARD55- 2017 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

2) 窪田英樹, 山田則行, 水野正弘:「気流感」に関する研究(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集. 計画系, pp. 455-456, 1976. 8

3) 梅宮典子, 松浦邦男: 夏季通風時における気流感知にかかわる室内気流速の統計的性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp. 613-614, 1992. 8

4) Chanhngakham Phonesavanh, 本間宏: 局所気流の感知に関する被験者実験について(その 1) 予備実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 395-396, 2001. 9

5) 伊藤一秀, 堀田太郎: 数値解析用 Virtual Manikin のグリッドライブラリ作成, 空気調和・衛生工学会論文集 31 巻 113 号, pp. 27-33, 2006. 8

6) 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 森井祐介, 古賀修, 一谷匡陸, 宮本征一: シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整手法に関する研究(その 6) サーマルマニキンによる人体各部位の対流熱伝達率測定に基づく 65MNET*の算出, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 709-710, 2013. 8

7) 向雄基, 伊藤一秀, 林徹夫: Virtual Manikin を対象とした人体表面各部位の対流熱伝達率データベース(第一報) 座位形状・鉛直方向気流を対象とした対流熱伝達率データ, 日本建築学会九州支部研究報告 47 号, pp. 297-300, 2008. 3

複合的な室内環境条件における知的生産性の向上と省エネルギーの両立を目指した研究
（第二報）実執務空間における空調改修前後の比較評価分析
Study on the Compatibility between Improvement of Intellectual Productivity and Energy Saving
in Complex Indoor Environment Conditions - Part 2 Comparative Analysis for Evaluation results
of Before and After Air-Conditioning Renovation in the Actual Office Space

○松岡 紗矢佳（関西電力） 山 口 弘 雅（関西電力）
田 中 宏 明（日建設計） 藤 井 拓 郎（日建設計）
山 口 峻 （日建設計） 林 立 也（千葉大学）
曹 立 嫻（千葉大学） 今里 日向子（千葉大学）

Sayaka MATSUOKA*¹ Hiromasa YAMAGUCHI*¹ Hiroaki TANAKA*² Takuro FUJII*²
Takashi Yamaguchi*² Tatsuya HAYASHI*³ Lishyan TSAO *³ Hinako IMAZATO *³
*¹ The Kansai Electric Power Co, Inc *² Nikken Sekkei Ltd *³ Chiba University

The authors conducted a questionnaire survey and a test of simple task to consider the effect on productivity and wellness of indoor physical environment changed by building renovation. As the result of analysis, however productivity was comparable as there were no major changes in the office room, it was confirmed evaluation on wellness was improved obviously.

はじめに

近年、企業の競争力向上、従業員のメンタルヘルス損失防止の観点等から、組織の知的生産性（以下、生産性）向上が重要であるとの認識が高まりつつある。一方で、オフィスの設計及び施設運用において生産性の向上効果を客観的手法により定量的に評価した事例は少ない。また、業務部門における抜本的な省エネルギーの推進は喫緊の課題であるが、省エネルギー対策が生産性の低下につながる場合もあり、生産性と省エネルギー性を両立させる技術の確立が求められている¹⁾。そこで、既報²⁾では執務者の生産性に関して最適な室内環境を検討することを目的に、複数の空調・照明設備の設定条件下において、オフィス空間の室内環境計測とアンケート調査を実施した。本報では、建物改修により変化した室内環境が生産性・健康性に与える影響を検証するために実施した被験者実験とアンケート調査の結果を報告する。

1. 調査建物の概要

2018 年および 2019 年の夏期に某企業のオフィスを対象として、室内環境実測、主観アンケート調査および単純作業成績の被験者実験を実施した。対象建物は、2018 年秋～2019 年春に既存建物の空調・照明設備更新とトイレ・会議室等の改修、そして建物の増築を実施している。

調査対象建物の概要を表 1 に、内観を図 1 に、代表フロア（2 階）の平面図を図 2、3 示す。改修前の空調・換気システムは、エアハンドリングユニット（冷暖房・換気）とパッケージエアコン（冷暖房）により構成される。改修

後はパッケージエアコンにて冷暖房を、全熱交換器にて換気を行う。

表 1 改修前後の建物概要

		改修前 新館	改修後	
			新館	増築館
建設年		1979年	同左	2018年
構造		RC造	同左	同左
階		地上3階 地下1階	同左	地上3階
延床面積		1,281 m ²	同左	420 m ²
空調方式		AHU +PACエアコン	PACエアコン	
換気方式		AHU	全熱交換器	
照明方式		蛍光灯	LED照明（調光可）	
断熱仕様	壁	断熱なし	同左	断熱なし
	屋根	硬質ウレタンフォーム吹付け（t=25）	同左	同左 ※t=20
	窓	西面 熱線吸収線ガラス +日射調整フィルム	複層ガラス +日射調整フィルム	複層ガラス
		東面 熱線吸収線ガラス	同左	



図 1 改修前後の内観

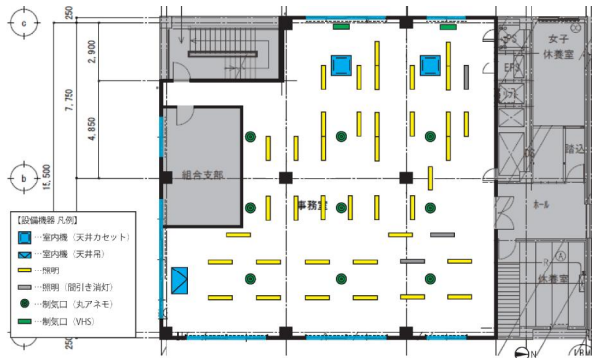


図2 改修前2階平面図

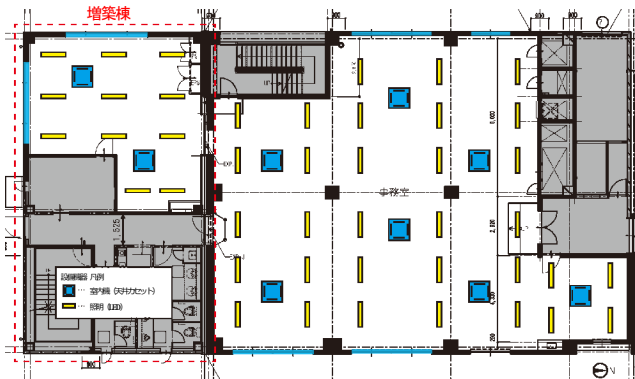


図3 改修後2階平面図

2. 室内環境実測

表2に調査期間と室内環境設定条件を示す。2018年、2019年ともに実測期間の前半（条件①）は空調温度・照度の設定を普段どおりとし、後半（条件②）は快適側の設定条件に変更した。計測項目は表3のとおりである。実測データの分析から2018年、2019年ともに条件変更により室内環境を快適側に变化させるといふ趣旨を満足できる程度に室内環境の調整を行えたことを確認した。

表2 室内環境設定条件

改修前：2018年度		改修後：2019年度	
実測対象エリア		1階、2階 執務エリア	
実測時間帯		同左	
条件		条件①	条件②
室内環境	空調設定温度 [℃]	25.0 (2018年の通常設定)	23.0 (条件① -2.0℃)
	相対湿度 [%]	成り行き	成り行き
	机上面照度 [lx]	成り行き (調光不可)	500 (条件① +250 lx)
	室内環境実測期間	7/18(水)～7/27(金) の平日8日間	7/30(火)～8/9(金) の平日9日間

表3 計測項目

室内計測項目		計測高さ (m)	計測日
室内	温度、湿度、CO ₂ 濃度、騒音値	机上面高さ	連続
	気流速、照度		代表日
	上下温度分布		連続
	PMV		連続
室外	温度、湿度	1.1	連続
	CO ₂ 濃度		代表日

3. 被験者実験

3.1 実験内容

2018年、2019年の調査とも、各条件の代表日に執務室内の打ち合わせスペースにて、被験者4名を対象にタブ

レット端末を用いた三桁加算を45分間、2セット行った。実験中には、各被験者に対して、ストレス指標であるLF/HF、集中度の代替指標である頭部動作の非安定率の計測を実施した。作業終了後には環境満足度、作業への影響度を評価するアンケートに回答してもらった。

3.2 実験結果

表4に2019年における被験者数実験の結果をまとめる。環境条件の変更により正答数が増加したほかアンケートの評価項目で向上結果が確認できた。なお、2018年の調査でも同様の傾向が見られた。

表4 2019年被験者実験結果のまとめ

被験者	環境条件	三桁加算作業成績			環境満足度 ^{※1}			ストレス	集中度
		正答数	平均解答時間	正答率	温熱環境	空気環境	光環境	LF/HF	非安定率
		[問/45min]	[s/問]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
被験者1	条件①	485	5.3	95.1	-0.5	0.0	-1.0	1.16	0.30
	条件②	565	4.5	96.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.93	0.03
被験者2	条件①	430	6.0	93.9	0.5	0.5	1.5	2.37	4.72
	条件②	529.5	4.9	95.1	-1.0	0.0	0.5	1.25	0.13
被験者3	条件①	512	5.2	96.0	-1.5	-0.5	-0.5	2.63	1.14
	条件②	586	4.5	96.3	1.0	1.0	2.0	1.83	1.73
被験者4	条件①	742	3.6	97.6	-1.0	-1.0	1.0	2.08	0.92
	条件②	766	3.5	98.1	1.0	1.0	1.0	1.46	0.01

※1 環境満足度：-2：不満～0：どちらともいえない～2：満足
※2 条件②にて向上した項目を青色ハッチング、低下した項目を灰色ハッチング

3.3 改修前後の比較

改修前後とも実験に参加した被験者が2名（表4の被験者1,3）いたため、この2名の結果を用いて改修前後の正答数の変化を分析した。なお、計算ソフト改良の影響で改修前よりも改修後の難易度が若干高くなったことから、改修前後の比較に際して正答数の補正を行っている。

図4に各条件における被験者の正答数を示す。被験者3は正答数が室内環境の影響を受けやすく、被験者1は影響を受けにくいと推察される。被験者3においては各条件における正答数が改修後に向上したが、被験者1では同様の傾向は見られず、今回の実験では建物の改修効果による生産性の向上効果は明瞭には表れなかった。これは、今回の改修対象が主に空調・照明設備、トイレ、会議室であり、執務スペースの空間環境（内装、什器、広さ等）に大幅な変更がなかった点、また温熱環境・光環境が改修前から比較的良好な状態を維持していた点が影響していると考えられる。

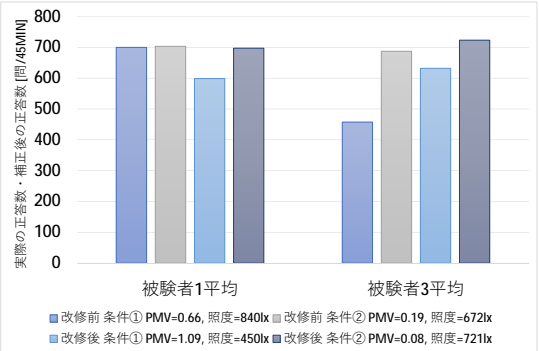


図4 正答数比較

4. アンケート調査

4.1 アンケート内容

各設定条件の代表日に、執務者にアンケートをメールで配信し、実測期間中の執務空間や勤務状況等について Web 上に匿名で回答してもらった。アンケート内容は次のとおりである。

(1) CASBEE-オフィス健康チェックリスト（以下、CASBEE-OHC）：一般社団法人日本サステナブル建築協会により開発された主観評価ツールである CASBEE-OHC を用いて執務者の満足度、健康感の評価を行った。改修前は通常版（51 項目）を使用した回答者の負担軽減のため改修後は簡易版（16 項目）を用いており、通常版・簡易版で共通する項目の結果を用いて改修前後の比較を行う。

(2) 主観作業効率・安全安心アンケート：執務者の最近 1 年の作業効率およびレジリエンス（災害、緊急時における建物の安全性・信頼感）に関する主観評価を回答してもらった。スマートウェルネスオフィス研究委員会の報告³⁾では建物のレジリエンスはオフィスにおける知識創造、健康・快適、エネルギー・資源の基となる根幹の部分であるとされているため、本調査でもレジリエンスに関する質問項目を設けた。

(3) 執務環境・生産性アンケート：執務空間の温熱環境、空気環境、光環境および音環境に対する主観的な満足度を回答してもらった。また室内環境が業務の生産性へ及ぼす影響度について、それぞれ 5 段階で評価してもらった。

4.2 アンケート結果

(1) CASBEE-OHC

図 5 に改修前後の CASBEE-OHC の評価結果を示す。CASBEE-OHC の評価結果は改修後に向上していることが確認された。図 6 にポジティブ要因、図 7 にネガティブ要因に関する質問と回答の割合を改修前後で比較して示す。ポジティブ要因に関しては、改修前はマイナス評価である「まったく当てはまらない」という回答が 60 %以上を占めていた 1、2、5、6 の質問に関して、改修後は「まったく当てはまらない」の割合が低下し、プラス評価である「やや当てはまる」の割合が増加した。一方、ネガティブ要因については、改修前はマイナス評価である「よくある」という回答が 60 %以上を占めていた 10、11、13、14、15 の質問に関して、改修後は「よくある」の割合が低下し、プラス評価である「ない」、「めったにない」の割合が増加した。これらは増築・改修により設備が更新されたこと、トイレ・会議室が充実したことによる影響が直接的に表れた結果だと考えられる。

オフィスの健康性は改修により全体的に向上していることが確認できたが、ポジティブ要因に関する質問に対する評価が全体的に低めであった。今後、それらのポジティブ要因を付与するような工夫を行うことにより、当該

建物の健康性はさらに向上し、付随して生産性も向上する可能性が考えられる。

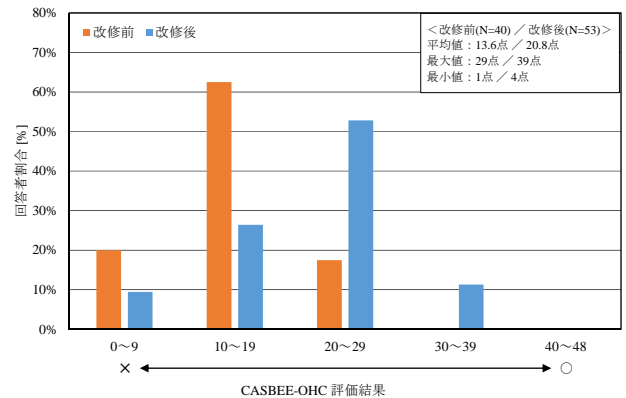
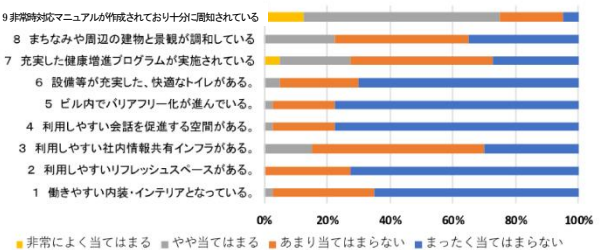


図5 改修前後のCASBEE-OHCの度数分布

【改修前の評価結果】



【改修後の評価結果】

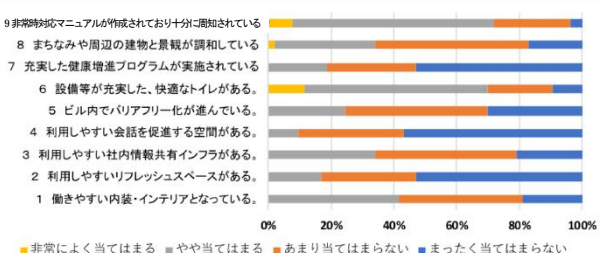
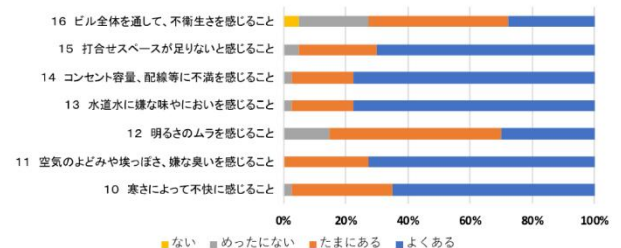


図6 ポジティブ要因に関する質問と回答割合

【改修前の評価結果】



【改修後の評価結果】

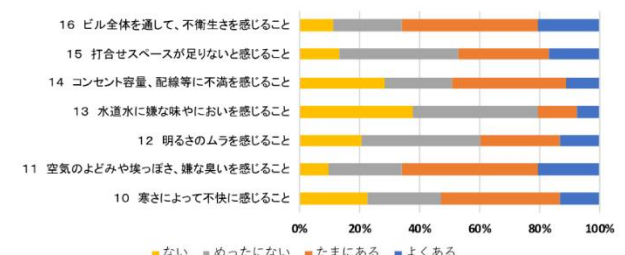


図7 ネガティブ要因に関する質問と回答割合

(2) 主観作業効率・安全安心

図8に改修前後の主観作業効率の点数分布を示す。改修前後の主観作業効率評価の平均値は改修前後でほぼ同等であった。被験者実験の結果と同様、執務スペースの空間環境に大きな変化がなかったことから、作業効率には直接的な影響が表れなかったと推察される。

図9に改修前後の主観安全・安心評価の点数分布を示す。改修前後の主観安全・安心評価の平均値は改修後に向上していることが確認された。耐震性や設備多重化等の直接的なレジリエンス対策を施したわけではないが、増築・設備改修の他、トイレ・会議室を充実させたことが建物全体としての安心に繋がった結果だと考えられる。

(3) 室内環境満足度・生産性への影響度

図10に改修前後における各室内環境に対する満足度と、生産性への影響度の回答結果をまとめる。改修前後ともに環境条件の変更により環境満足度、生産性への影響度が向上することが確認された。特に温熱環境・空気環境に対する満足度が向上していた。

(4) 相関比較

表5に改修前後のCASBEE-OHC、主観作業効率、主観安全・安心の評価結果の相関を示す。改修前はCASBEE-OHCと主観作業効率の間に相関があったが、改修後には相関は確認されなかった。これは、CASBEE-OHCは改修によりネガティブ要因に対する評価が改善した影響を受け全体の評価点数が向上したが、主観作業効率は改修前後で変化がなかったためである。このことから、改修前のオフィスの健康性は主観作業効率に悪影響を与えるほど低かったが、改修による改善により主観作業効率に与える影響が小さくなったと考えられる。また改修前後のどちらにおいても主観作業効率と主観安全・安心の間には相関があり、レジリエンスを生産性の基礎とするスマートウェルネスオフィスの概念と同様の傾向が確認された。

6. まとめ

被験者実験結果および執務者対象のアンケート結果において改修前後の正答数・主観作業効率に明確な差は表れなかった。これは執務スペースの空間環境に大幅な変化がなかったこと、改修前から室内温熱環境が比較的良好な状態を維持していたことが影響したと推察される。一方で、建物のレジリエンスや健康性に関するアンケート結果は改修後に明確に向上した。建物のレジリエンスや健康性は労働者が最大限の能力を発揮するための基盤であり、生産性への直接的な効果は見えなくとも間接的には生産性に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 金子ら、複合的な室内環境条件における知的生産性の向上と省エネルギーの両立を目指した研究（第1, 2報）、空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集、p389-396、2018（名古屋）
- 2) 妹尾ら、複合的な室内環境条件における知的生産性の向上と省エネルギーの両立を目指した研究（第1報）空調調和・衛生工学会近畿支部研究発表会論文集、

2019.3

3) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会：第2回 スマートウェルネスオフィスシンポジウム「スマートウェルネスオフィスの推進」-実現される新しいウェルネス価値とその評価-

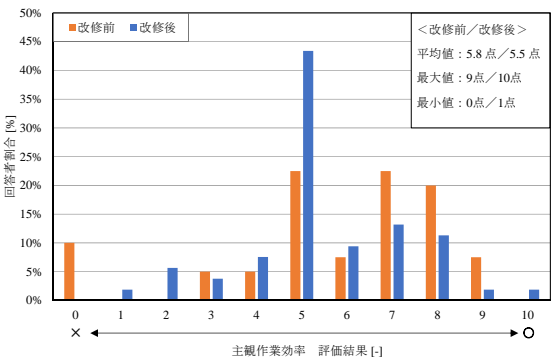


図8 主観作業効率の点数分布

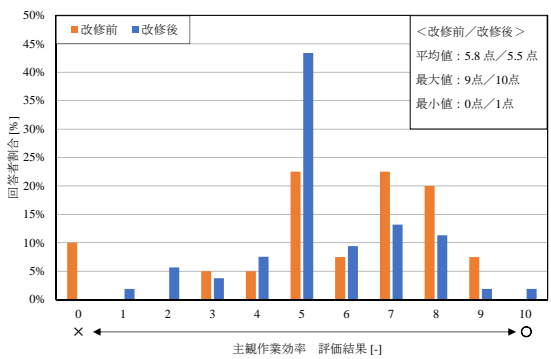


図9 主観安全・安心評価の点数分布

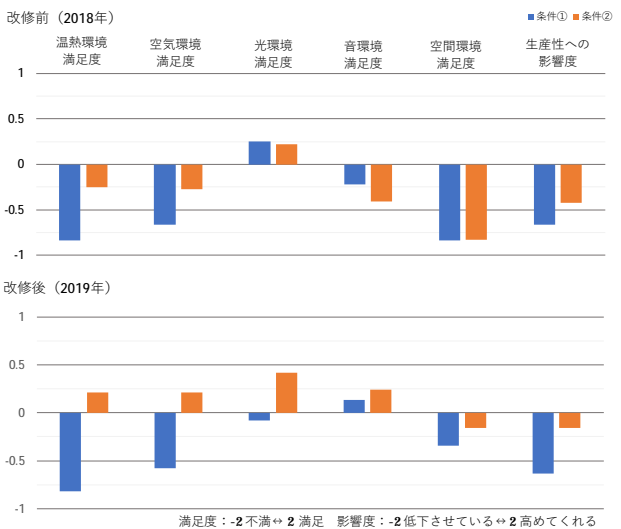


図10 各室内環境に対する満足度と生産性への影響度の結果

表5 CASBEE-OHC、主観作業効率、主観安全・安心の相関

	相関係数R	CASBEE-OHC	主観作業効率	主観安全・安心
改修前	CASBEE-OHC	1.00		
	主観作業効率	0.43***	1.00	
	主観安全・安心	0.69***	0.38**	1.00
改修後	相関係数R	CASBEE-OHC	主観作業効率	主観安全・安心
	CASBEE-OHC	1.00		
	主観作業効率	0.05	1.00	
	主観安全・安心	0.31**	0.47***	1.00

※ ***=p<0.01, **=p<0.05, R=0.4以上の場合赤字で表示

事務作業時および休憩時における心理・生理反応の経時変化特性と知的生産性
(その1) 休憩時におけるラベンダーの香り付加の効果
Workplace Productivity and Change of Psychological and Physiological Response
during Simulated Office Work and Break Time
(Part1) Effects of Lavender Aroma Oil during Break Time

○近藤 弘基 (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) 池田 馨 (パナソニック株式会社)
伊藤 雅人 (パナソニック株式会社) 丸山 博 (パナソニック株式会社)
Koki KONDO*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Narae CHOI*¹ Akihisa TAKEMURA*²
Tomohiro KOBAYASHI*¹ Kaoru IKEDA*³ Masato ITO*³ Hiroshi MARUYAMA*³
*¹ Osaka University *² Setsunan University *³ Panasonic Corporation

Some companies have started to improve not only comfort and health of occupants but also workplace productivity. It is necessary to clarify the relationship between the indoor environment and workplace performance, but the physiological responses of occupants toward the indoor environment are still not clear. This study ultimately aims to examine the psychological and physiological effects of the indoor environment on workplace productivity. This study focused on the break time between office work in terms of effect of the relaxation on workplace productivity. In addition, the lavender essential oil was atomized during break time.

はじめに

近年、オフィスなどの設計では、居住者の快適性や健康性だけでなく、知的生産性の向上を図る動きがある。知的生産性の向上を達成するためには、室内環境と個人のパフォーマンスの関係を明らかにする必要があるが、室内環境が人体に及ぼす影響は曖昧である。そこで本研究では、最終的に室内環境が及ぼす知的生産性に対する心理学的および生理学的影響を調べることを目的としている。本報では、休憩時のリラックス効果が知的生産性に影響を及ぼす可能性があると考え、休憩前と休憩後にd2テストを行わせることで、知的生産性の客観的評価を行った。また、作業間休憩時にラベンダー精油を噴霧して、おおいの効果も同時に検討した。

1. 実験概要

実験は、Fig. 1に示す実験室で2019年12月10～26日の内、10日間で実施した。被験者には、21～24歳の学生10名(男性6名、女性4名)を採用した。1人の被験者に対し、におい無し・ラベンダーの2条件を実施した。生理反応への影響を考慮して、実験は2日連続で同じ時間に実施した。また、実験の順番による影響を考慮して、初回がにおい無し条件と初回がラベンダー条件の被験者が5名ずつとなるようにした(Table 1)。

本研究のにおい条件として、リラックスへの影響の観

点から、副交感神経を優位にする¹⁾ラベンダーを採用し、精油を用いて噴霧した。また、比較のために水道水を噴霧するにおい無し条件も行った。噴霧には精油用噴霧器((株)生活の木, アロマ圧縮空気式)を用い、弱モード(10秒噴霧、50秒休止の繰り返し)で噴霧した。
本研究では、事務作業を模擬したタスクとしてd2テスト²⁾を用いた。d2テストは集中力と反射神経を測定するためのテストの1つである。テスト1回の内容は、上下に1～4個の点が付いたdとpの47文字、14行で構成されている(Fig. 2)。テスト方法は、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もので、各行12秒の制限時間を設け、14行続けて実施した。

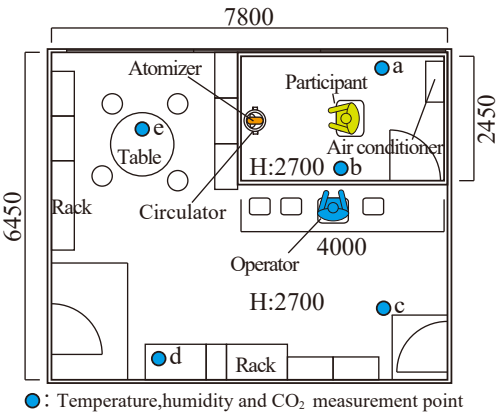


Fig. 1 Experimental chamber plan

Table 1 Schedule of the experiment

	12/10 (Tue.)	12/11 (Wed.)	12/12 (Thu.)	12/13 (Fri.)	12/18 (Wed.)	12/19 (Thu.)	12/20 (Fri.)	12/24 (Tue.)	12/25 (Wed.)	12/26 (Thu.)
9:00~10:30			Participant3	Participant3		Participant8	Participant8	Participant9	Participant9	
11:00~12:30			Participant4	Participant4					Participant10	Participant10
14:30~16:00	Participant1	Participant1	Participant5	Participant5	Participant6	Participant6				
16:30~18:00		Participant2	Participant2		Participant7	Participant7				: Lavender

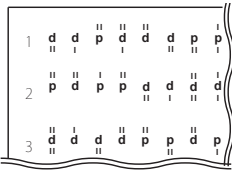


Fig. 2 A part of d2 test

[1] Relaxation rating scale

Very stressful	Stressful	Slightly stressful	Neutral	Slightly relaxed	Relaxed	Very relaxed
-3	-2	-1	0	1	2	3

[2] TDMS

		Not at all	A little	Slightly	Moderately	Quite a bit	Extremely
ア	Calm	0	1	2	3	4	5
イ	Irritated	0	1	2	3	4	5
ウ	Lethargic	0	1	2	3	4	5
エ	Energetic	0	1	2	3	4	5
オ	Relaxed	0	1	2	3	4	5
カ	Nervous	0	1	2	3	4	5
キ	Listless	0	1	2	3	4	5
ク	Lively	0	1	2	3	4	5

[3] Odor intensity

No odor	Slight odor	Moderate odor	Strong odor	Very strong odor	Overpowering odor
0	1	2	3	4	5

[4] Odor preference

Extremely unpleasant	Very unpleasant	Unpleasant	Slightly unpleasant	Neutral	Slightly pleasant	Pleasant	Very pleasant	Extremely pleasant
-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

[5] Odor pleasantness

Dislike extremely	Dislike very much	Dislike moderately	Dislike slightly	Neutral	Like slightly	Like moderately	Like very much	Like extremely
-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

Fig. 3 Scales for subjective evaluations

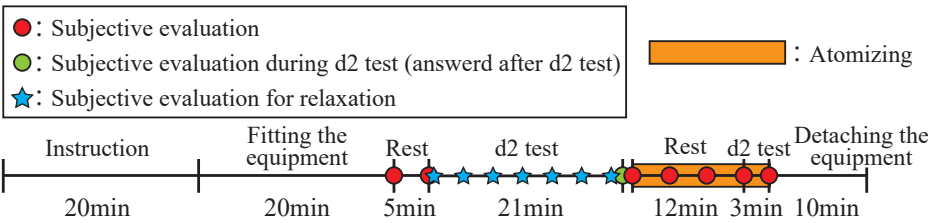


Fig. 4 Time schedule

生理反応を定量化する目的で、心拍数・鼻先と額の皮膚温・呼吸・脳波を測定した。また、心理反応を定量化する目的で、リラックスに関する2種類の主観評価およびにおいに関する3種類の主観評価を測定した。各主観評価項目を Fig. 3 に示す。リラックスに関する主観評価は、リラックスについての7段階尺度および二次元気分尺度 (TDMS)³⁾(アイエムエフ(株)、TDMS-ST for academic を使用) を用いた。TDMS は8項目を6段階の尺度で回答するもので、安定度と活性度を同時に測定

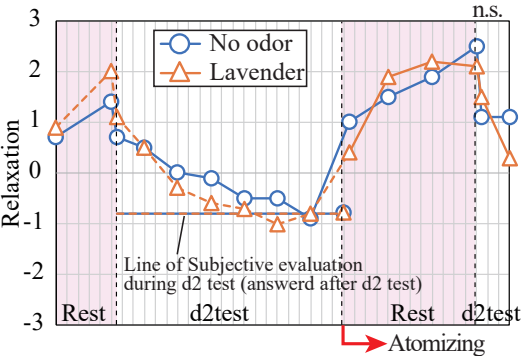


Fig. 5 Subjective evaluations for relaxation

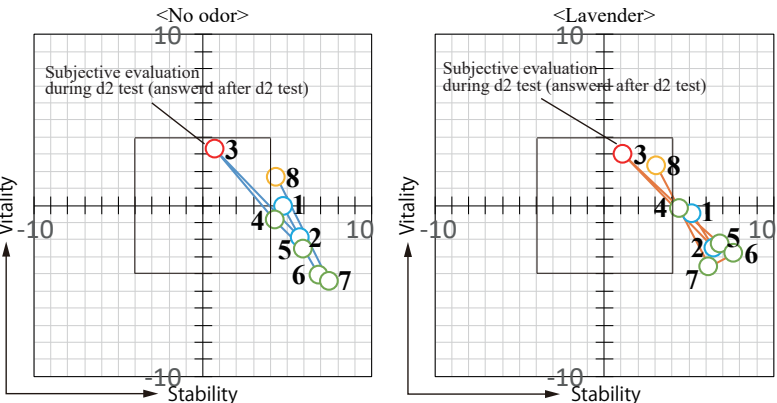


Fig. 6 Subjective evaluations of TDMS

でき、安定度と活性度は各項目の値から以下の式で算出できる。

安定度 = (落ち着いた)

+ (リラックスした)

- (イライラした)

- (ピリピリした)

活性度 = (活気にあふれた)

+ (イキイキした)

- (無気力な)

- (だらけた)

また、においの主観評価として、臭気強度・快不快度・嗜好度を採用した。主観評価はすべて口頭で回答させた。

実験のタイムスケジュールを Fig. 4 に示す。実験中、被験者はリクライニング椅子にかけさせ、安静時はプロジェクターで投影した自然風景(森林・川のせせらぎ)を視聴させた。最初の d2 テスト時は7回連続で実施し、後の d2 テスト時は1回実施した。また、d2 テスト間の安静時の主観評価は4分おきに実施した。

2. 実験結果

2.1 物理環境

物理環境として、Fig. 1 に示す各測定点の測定期間中の平均値および標準偏差を Table 2 に示す。CO₂ 濃度の減衰から算出した実験室小部屋および大部屋の換気量はそれぞれ約 40m³/h、約 85m³/h だった。また、d2 テストを行う作業面の照度は約 175lx だった。

Table 2 The result of environment

	Point a	Point b	Point c	Point d	Point e
Temperature [°C]	21.5±1.5	22.3±1.5	22.4±1.3	23.4±1.0	22.2±1.3
Humidity [%]	44.5±4.6	43.5±4.3	37.2±5.2	36.9±5.2	39.2±6.0
CO ₂ [ppm]	889±104	901±96	784±95	771±97	765±98

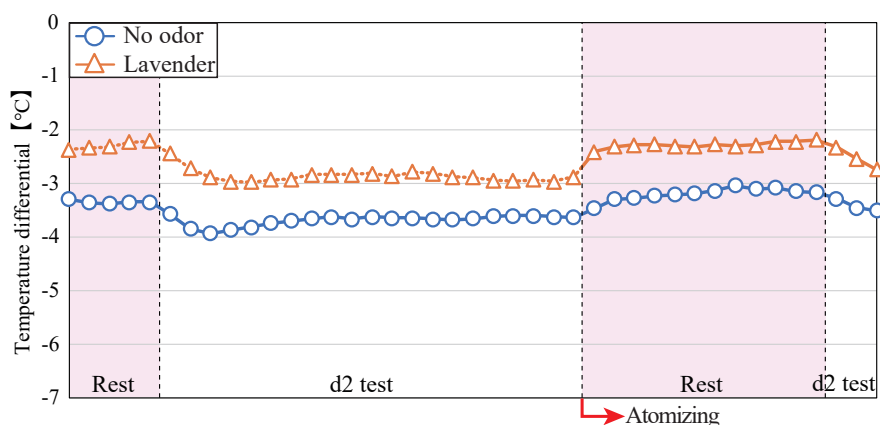


Fig. 7 Temperature differential between nose and forehead

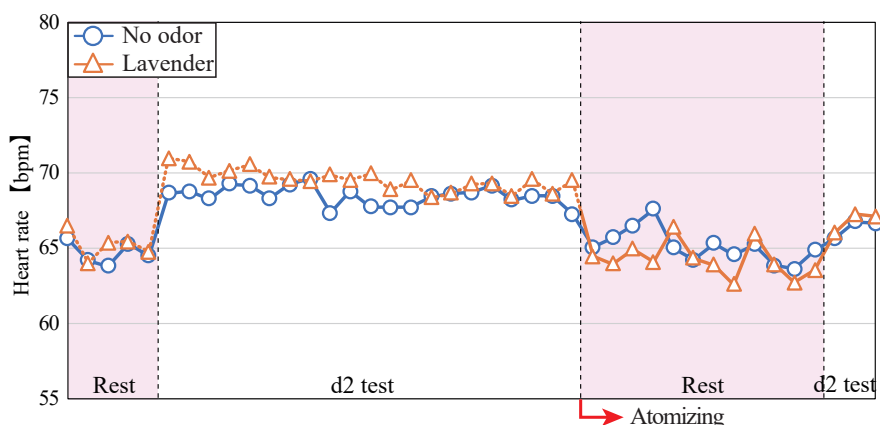


Fig. 8 Heart rate

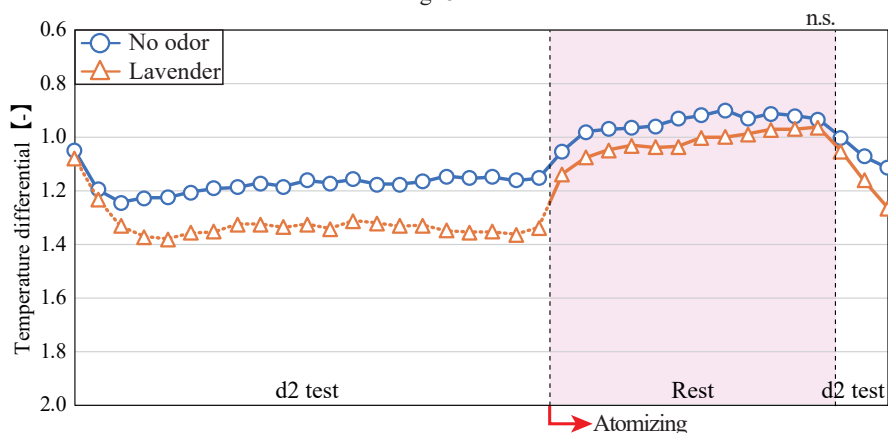


Fig. 9 Normalized Temperature differential between nose and forehead

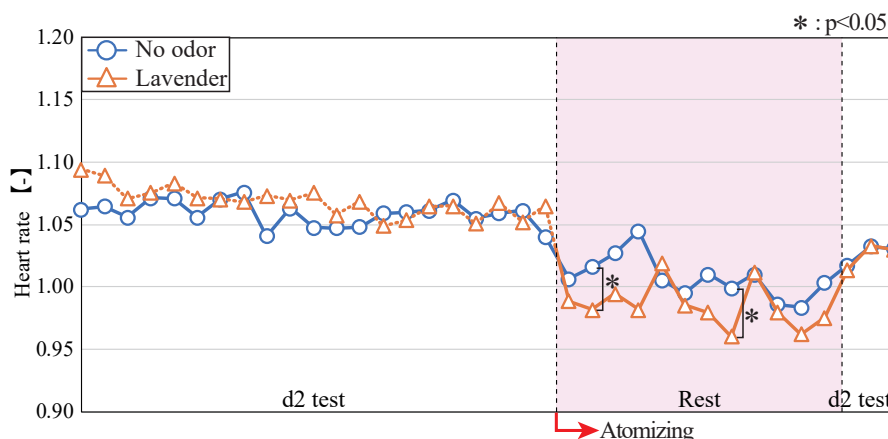


Fig. 10 Normalized heart rate

2.2 心理反応結果

リラックスに関する主観評価を全被験者で平均した結果を Fig. 5 に示す。d2 テスト後の安静時の各主観評価に関して、「におい無し」の値と「ラベンダー」の値との間で t 検定を行った。リラックス評価は、安静時と d2 テスト時で大きな差が見られた。また、安静時の「におい無し」と「ラベンダー」との間に有意差は無く、においによる大きな効果は見られなかった。また、TDMS の値を全被験者で平均した結果を Fig. 6 に示す。図中のプロット横にある番号は、主観評価を行った順番を示している。TDMS の結果を見ると、安静時は安定度が上昇していき活性度は下降していく傾向が見られた。また、安静から d2 テストに変わると安定度は下降し、活性度は上昇する傾向が見られた。においの有無による大きな違いは見られなかった。

2.3 生理反応結果

鼻額皮膚温度差を全被験者で平均した結果を Fig. 7 に示す。皮膚温度は実験中連続測定 (200Hz) しており、結果では 1 分毎に平均した値を示している。鼻皮膚温度は作業によるストレス負荷に伴っての変動が大きく、額皮膚温度は変動が小さい。そして鼻皮膚温度はリラックス状態に向かうにつれて上昇していく⁴⁾。そのため、周辺環境の温度が皮膚温度に及ぼす影響を排除するために鼻と額の皮膚温度差をとった。結果を見ると、d2 テスト時に比べて安静時は鼻先皮膚温度が高くなっていた。また、心拍数を全被験者で平均した結果を Fig. 8 に示す。心拍数は、心電を実験中連続測定 (200Hz) しており、心電の R 波の間隔 (RRI) を解析して、1 分毎の心拍数を算出した。一般に、ストレス負荷があるほうが RRI が短く心拍数が大きい⁵⁾。結果を見ると、d2 テスト時に比べて安静時は心拍数が大きくなっ

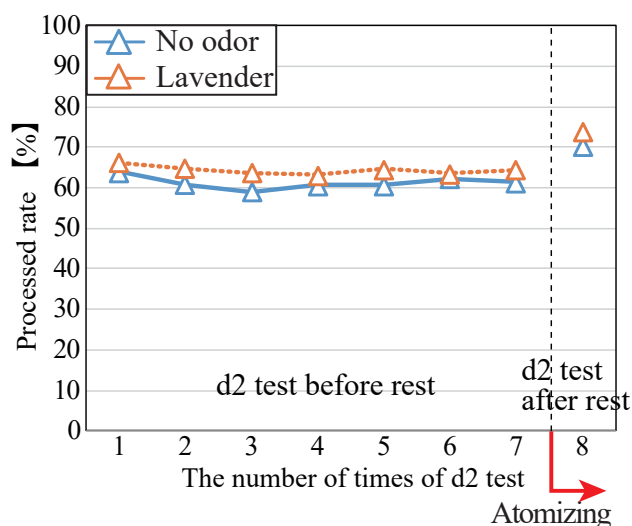


Fig. 11 The result of processed rate

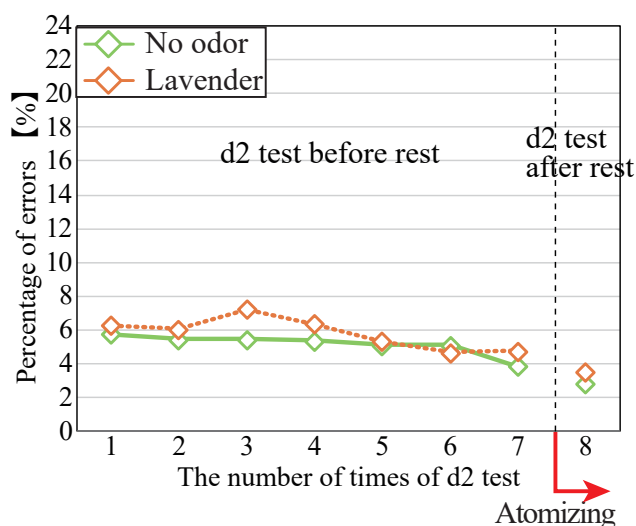


Fig. 12 The result of percentage of errors

ていた。被験者の状態の変化に伴って皮膚温度や心拍数は変化することが示唆された。しかし、皮膚温度と心拍数は被験者や実験日によって値が異なっており、これらの影響を排除するために、最初の安静時の5分間を平均した値で各値を基準化した。基準化した鼻額皮膚温度差および心拍数の結果をFig. 9、Fig. 10に示す。また、d2テスト後安静時の値に関して、「におい無し」の値と「ラベンダー」の値との間で分散の異なる2標本を対象としたt検定を行った。皮膚温度結果は、においの噴霧していないd2テスト時で「におい無し」と「ラベンダー」の間で差が見られた。また、d2テスト後からの基準化皮膚温度差で、「におい無し」と「ラベンダー」の間で有意差は見られなかった。心拍数の結果は、においの噴霧していないd2テスト時で「におい無し」と「ラベンダー」の値は概ね一致していた。また、d2テスト後からの基準化心拍数に関して、安静2分時と8分時で「におい無し」と「ラベンダー」の間に有意差が見られた。

2.4 d2テスト結果

d2テストの成績は、達成率(総回答数÷総数)及びミス率((見落とし数+誤答数)÷総回答数)で評価した。達成率およびミス率を全被験者で平均した結果をFig. 11、Fig. 12に示す。結果を見ると、達成率・ミス率ともに、1回目から7回目まではほとんど変化がなかった。これは、d2テストの習熟の影響とd2テストの連続施行による疲れの影響が相殺されたためであると考えられる。また、d2テスト後安静の後、つまり8回目のd2テスト成績は達成率・ミス率ともに7回目よりも大きく向上していた。休憩によって疲労状態から回復し、d2テスト自体には習熟しているためこのような結果になったと考えられる。においを噴霧している8回目のd2テスト成績に関しては、「におい無し」と「ラベンダー」にはわずかな差異があるが、7回目の成績からの向上率はほとんど一致していた。

おわりに

本報では、心理・生理反応および知的生産性を定量化する目的で測定した、リラックスに関する主観評価・TDMSの結果、鼻額皮膚温度差・心拍数の結果、およびd2テスト成績の結果を報告した。リラックスに関する主観評価は安静時とd2テスト時で大きな差が見られた。また、安静時の「におい無し」と「ラベンダー」との間に有意差は無かった。TDMSに関してにもにおいの有無による大きな違いは見られなかった。皮膚温度差・心拍数ともに安静時とd2テストの間では違いが見られた。また、皮膚温度差は「におい無し」と「ラベンダー」の間で有意差が無かったが、心拍数はd2テスト後安静の2分時・8分時の「におい無し」と「ラベンダー」の間に有意差があった。d2テスト成績は、安静後の成績が向上した。また、においの有無による大きな違いは見られなかった。

【参考文献】

- 1) 浅野智絵美, 伊藤輝子, 川野直子: グレープフルーツおよびラベンダーの匂い刺激による生理・心理機能への影響, 日本味と匂学会誌, Vol.16, PP. 633- 636, 2009. 12
- 2) Brinckenkamp, R. and Zillmer, E. : d2 Test of Attention, Hogrefe & Huber Publishers, 1998
- 3) Sakairi, Y., Nakatsuka, K. and Shimizu, T.: Development of the Two-Dimensional Mood Scale for self-monitoring and self-regulation of momentary mood states, Japanese Psychological research, 55, pp. 338- 349, 2013
- 4) 吉田倫幸, 菊本誠, 松本和夫: 白色雑音に対する鼻部皮膚温と主観的状态の対応, 生理心理学と精神生理学, 13(1), pp. 29- 38, 1995
- 5) 松本佳昭, 森信彰, 三田尻涼, 江鐘偉: 心揺らぎによる精神的ストレス評価法に関する研究, ライフサポート学会, 22, pp. 105- 111, 2013

中間領域を持つ建物における夏期の作業性と中間期の居場所選択に関する実験的研究
Experimental Study of Productivity and Environment of Occupied Zone
in the Building with Intermediate Space

○大野玉花（立命館大学） 近本智行（立命館大学） 土井脩史（京都橘大学）
Tamaka OHNO*1 Tomoyuki CHIKAMOTO*1 Shushi DOI*2

*1 Ritsumeikan University *2 Kyoto Tachibana University

Intermediate space is connect outside and inside and it enables to adjust environment of occupied zone. To clarify significance of Intermediate space, practical experiment of productivity and self environment selection was done in the building with Intermediate space. The character of Intermediate space has possibility to adopt as ABW and place which can promote resident's self environment selection.

はじめに

近年、働き方改革などの推進などに伴い、働く環境そのものが見直されている。例えば、執務者が仕事内容に合わせて時間と場所を選択するABW(Activity Based Working)^{文1)}や、オフィス外でも休暇を楽しみつつ働くワーケーション(Work×Vacation)^{注1)}といった概念が注目されようになり、仕事内容や時間に合わせた多様な居場所や環境を有するオフィスの計画が求められている。

一方、我が国の伝統的住宅では、外部空間と内部空間の繋がりが重視され、縁側や土間などの「中間領域^{注2)}」が居住者の生活の中で重要な役割を担ってきた。中間領域を介して外部空間の環境を内部に取り入れることにより、居住者の多様な生活行為を受け入れることが可能であった。筆者らは、中間領域を持つ住宅を研究対象として、温熱環境や居住者の生活行為に関する調査を行ってきた。その結果、中間領域によって外部から内部にかけて段階的な温熱環境が実現していること、季節変化や行為に応じて選択的に居場所を変更させた生活が行われていること等を報告してきた^{文3) 文4)}。

本研究では、上記のような中間領域の性質がABW等の環境や居場所を選択する働き方においても有効ではないかと考えた。そこで、縁側や土間空間といった中間領域を持つ京町家を対象とした被験者実験を行うことで、中間領域が作業性や居場所の選択行動に与える影響を検証することを目的とした。

なお、作業性については、温熱環境が厳しい夏期でも外部環境を取り入れた空間の可能性を検証した。居場所選択は、快適性が温熱のみに依存しすぎず、選択の余地の大きい中間期に実験を行った。

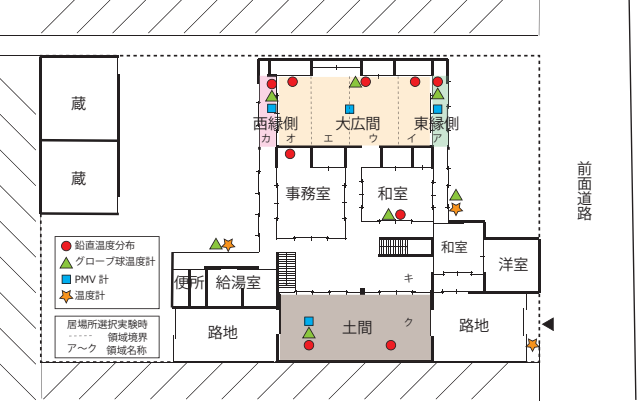


Table.1 Target zone

	東縁側	大広間	西縁側	土間
写真				
広さ	床面積 2.8㎡/高さ 2.6m	床面積 29.6㎡/高さ 2.8m	床面積 2.8㎡/高さ 2.6m	床面積 29.6㎡/高さ 約 5.5m
視界	緑視率 43.9%(夏) / 奥行 4.6m	緑視率 0%(夏) / 奥行 1.8m	緑視率 19.2%(夏) / 奥行 7.5m	緑視率 0%(夏) / 奥行 1.8m
什器	イス×/座布団○/机×	イス×/座布団○/机○	イス× 座布団○/机×	イス○(背もたれ×)/机×
透過性 (実験時)	建具全開/空調×/照明× 光・風・音を全て透過する。	建具全開/空調×/照明× 光・風・音を全て透過する。	建具全開/空調×/照明× 光・風・音を全て透過する。	建具全開/空調×/照明× 光・風・音を全て透過する。
透過性 (平常時)	ガラス障子を閉めると風は遮蔽される。	ガラス障子を閉めると風のみ遮蔽、障子も閉めると光・風を遮蔽。	ガラス障子を閉めると風は遮蔽される。	路地との境界にある戸を開けると、光・風を遮断。
備考	東庭と大広間を繋ぐ中間領域。室外機があり冷房時は温風を受ける。	東縁側と西縁側の中間領域に挟まれた内部空間。	西庭と大広間を繋ぐ中間領域。西庭は東庭に比べ、面積が広い。	玄関口から入ってすぐの中間領域。景色は見えないが、天井が高い。

1. 対象建物概要

本研究では京都市上京区にあり、現在はシェアオフィスとして活用されている京町家を対象とした。一般的に、京町家には縁側や土間等の内部空間と外部空間を繋ぐ中間領域があり、外部環境との距離を調節できる。さらに、住まい方としては建具の開閉等により居住者の意思で繊細な環境選択が行われてきた。本京町家 (Fig.1) は、東西に庭を有し、その内側に縁側、さらにその内側に大広間がある。南側には吹抜けを有する土間を持つ。東西の縁側、土間を3種類の間領域と位置づけ、中間領域に挟まれた大広間を加えた計4か所を主な対象とした。主な対象場所を表1に示す。

2. 作業性に関する実験

2.1 被験者実験概要

8月22日・23日の朝・昼・夕の3つの時間帯に2種類のテスト及びアンケート (Table.2) を実施した。また、被験者実験日を含む8月21日～28日まで、温熱実測を行った。測定箇所は図1に示す。

テストは、情報処理・知識処理・知識創造の3階層の知識創造^{文5)}に主に関わる「収束的思考」「拡散的思考」を対象とした。収束的思考を測るために2桁×1桁の100マス計算を、拡散的思考を測るために日常品の用途を考えるテスト^{注3)}(以下、創造テストと示す) (Table.3)を行った。2種類とも、成績は普段に比べて発揮できた力を対象とするため、各テストの偏差値-全テストの偏差値の平均を個人毎に算出した。被験者は3～4名×4チームの大学生・大学院生14名で、時間帯によってチーム毎に場所を移動してもらった。実験スケジュールをFig.2に示す。

2.2 作業性の結果

個人のテスト成績と及び各場所での温熱環境をFig.3に示す。2種類共にPMVと成績の相関はみられなかった。しかし、場所の違いによる成績の傾向が見られた。土間での創造テストは、PMVがどの時間帯も他の3箇所より低かったにも関わらず、全ての被験者が個人の全テスト平均を下回り、普段の力を発揮できなかった。アンケートによると土間のみ暗かったとの申告があり緑視率^{注4)}も小さく、明るさや開放感が拡散的思考力に影響していたと考えられる。また、2種類のテスト成績は同じ時間・場所でも正反対の結果となるケースもあったことから、作業内容に応じた空間が重要だと考えられる。

3. 居場所選択に関する実験

3.1 被験者実験概要

9月27日に、対象建物を庭との距離を軸に8つに分け (Fig.1) 被験者に快適な場所を3回選んで滞在し

てもらった。また、実験場所として想定した8か所について、9月21日～10月16日まで温熱実測を行った。被験者は大学生・大学院生5名×2チームの10名 (男子6名・女子4名) である。時間による分析を行うために、朝・昼・夕方の3つの時間帯で全く同じ実験を行った。実験スケジュールはFig.4に示す。実験中は、場所毎に発生する自然な行為を見るため、行為・姿勢を指定していない。

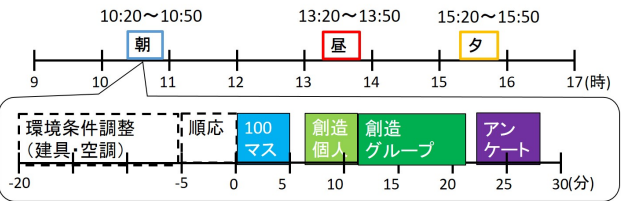


Fig.2 Time table of productivity experiment

Table.2 Questionnaire items

カテゴリー	内容	評価方法
環境的項目	暑さ・風・日差し・明るさ・壁・におい・音 暑さ(暑い/寒い)・風(感じる/感じない)・日差し(感じる/感じない)・明るさ(明るい/暗い)・におい(感じる/感じない)・音(感じる/感じない)	(満足/不満足)7段階選択式 0を中立とする7段階選択式
空間的項目	平面の広さ・天井の高さ・景色・インテリアの素材・インテリアの色	(満足/不満足)7段階選択式
全体に関して	全体満足度 したい行為・引き続き滞在したい時間 気持ち良い事・不快な事	自由選択式 自由選択式
場所選択に関して	滞在した場所・場所移動の軌道 場所を選んだ理由	平面図に書き込み式 自由記述式

Table.3 Contents of idea test and evaluation method

評価軸	評価方法	配点
①流暢性	回答の個数	15点
②柔軟性	回答内容のカテゴリーの多様さ (例:鉛筆→「書く」「突き刺す」「転がす」であれば3点)	10点
③独創性	素点3点+被験者10人中3人以下しか答えていない回答1個につき1点×該当個数 +被験者10人中1人しか答えていない回答1個につき2点×該当個数	10点
④緻密性	1つの回答に対し、5W1Hの内容 or 絵があれば○。 ○が3つ未満→3点、○が3～4個→4点、○が5つ以上→5点	5点

お題	ダミー-1	朝	昼	夕	ダミー-2	ダミー-3
	レンガ	A4用紙	鉛筆	ピンポン玉	おたま	レジ袋

時間帯	朝	昼	夕
100マス計算	31.6°C/2.3, 30.5°C/2.2, 33.0°C/2.7, 34.3°C/2.9	32.7°C/2.6, 35.8°C/3.0, 34.1°C/2.8	32.8°C/2.6, 35.9°C/3.0
創造テスト	30.7°C/1.8, 30.5°C/2.2, 33.0°C/2.7, 34.3°C/2.9	32.1°C/2.2, 32.7°C/2.6, 35.8°C/3.0, 34.1°C/2.8	32.3°C/2.2, 32.8°C/2.6, 35.9°C/3.0

凡例: 大広間, 西縁側, 東縁側, 土間. 記号は、各被験者のテストが普段と比べて発揮できた力 (その回の成績-全ての回の個人偏差値平均) を示す。
● 3以上, ▲ -3以上未満, ○ 0以上3未満, ■ -3未満
※口の中の数字は、実験中の1100mm高さ温度 (°C) とPMV値と風速 (m/s) を示す。

Fig.3 Result of calculation test and idea test

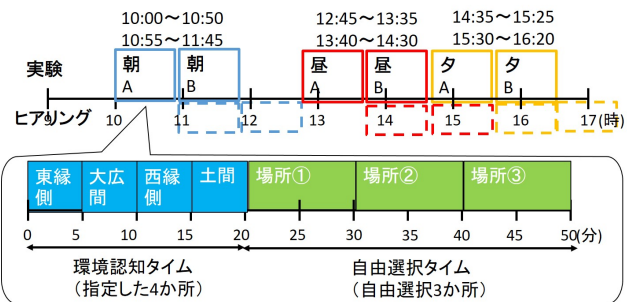


Fig.4 Time table of self environment selection

3.2 結果

(1) 居場所選択の理由

Fig.5 に、居場所選択の理由と理由同士の関係を示す。環境的項目が4種類、空間的項目が6種類の計10種類のコメントに分類できた。関係性を示す矢印の殆どは庭との距離に関わるもので、庭との距離感が空間的項目にも環境的項目にも影響を与える事が確認された。温熱環境・光環境については、「庭から近い」→「風を感じる」「明るい」、「庭から遠い」→「風を感じない」「暗い・明るすぎない」と距離に応じて反対の環境的項目に繋がった。

庭との距離感を調節する事により、多様な環境に開するニーズに応える事ができると考えられる。さらに環境的項目を詳しく見ると、温熱環境については、「風」の記述が「温度」の記述より多数あった事より、温度より風の方が選択に影響を与えたと考えられる。また、「床」「木」などの素材に関するコメントが見られ、素材感も温冷感に影響を与えたと考えられる。光環境については、「明るさ」は自然光や照明、「まぶしさ」は日射など、異なる光の種類に対する記述が確認された。

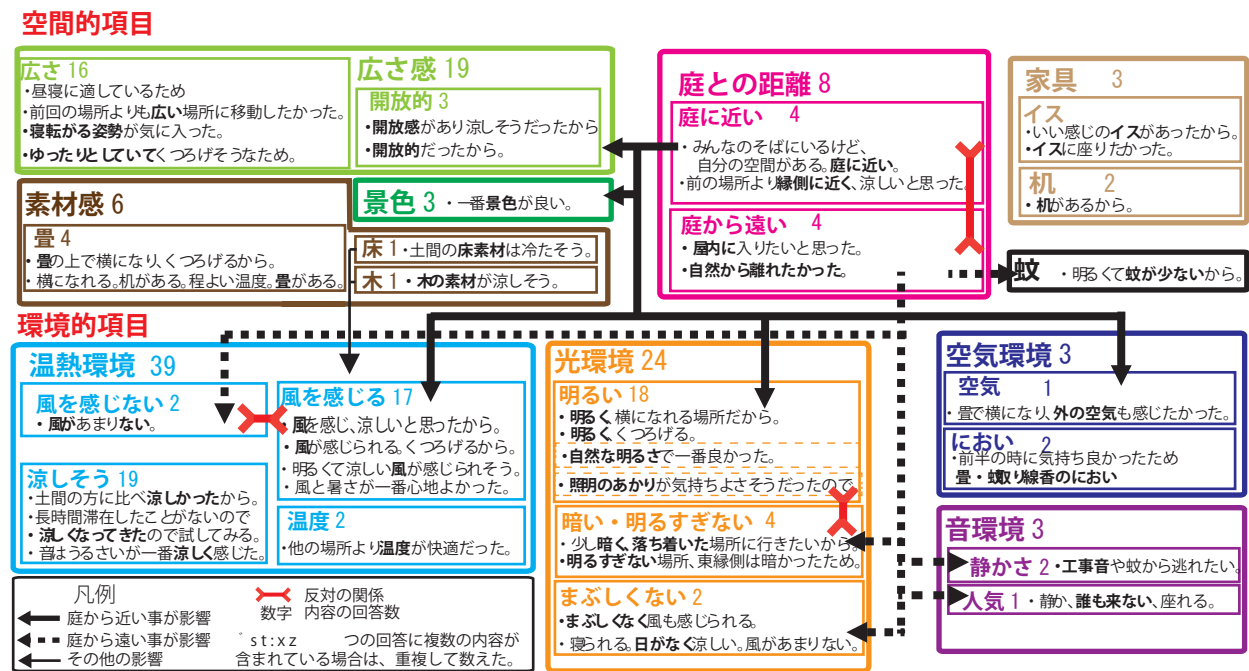


Fig.5 Reason of self environment selection

10:00			12:00			13:00			15:00			15:00			夕						
被験者	平面モデル			コメント			平面モデル			コメント			平面モデル			コメント					
d	27.4℃ 0.7 0.4m/s	26.8℃ 0.9 0.1m/s	27.6℃ 0.7 0.4m/s	1 前	明るく、横になれる場所だから。横にならなから和を感じられる。外と内が繋がっており、キャンプみたいで良い。寝返りを打つほどのスペースがないのは残念。			28.3℃ 0.9 0.4m/s	27.6℃ 1.1 0.1m/s	27.8℃ 0.8 0.4m/s	1 前	明るくて風を感じられるから。風がなくあまり涼しくなかった。			27.9℃ 0.8 0.4m/s	27.7℃ 1.1 0.1m/s	28.2℃ 0.9 0.4m/s	1 前	朝よりも涼しいから。天井が高く、開放的。人通りがある。風がほとんど吹いていない。		
				2 前	畳の上で横になり、くつろげるから。たたみのにおいで快適に感じる。電気の明るさしがなく、少し暗い。						2 前	オ(大広間外・西)よりも涼しい。気温が低い感じ。風もオ(大広間外・西)よりあり心地よい。工事の音がうるさい。						2 前	風があったから。風があり、涼しい。		
				後							後							後			
	[26.3℃/0.8/0.1m/s]			3 前	畳の上で横になりたくて、外の空気も感じられたから。たたみのにおいで、外の空気を感ぜられる。			[27.2℃/1.0/0.1m/s]			3 前	音はうるさいが、一番涼しく感じた。日本庭園って感じが良い。一番風を感じ、涼しい。工事の音がうるさい。			[27.4℃/1.0/0.1m/s]			3 前	西寄りの方が涼しいと思ったから。風が吹いていて少し気持ちが良い。太陽光が入ってこない。		
f	28.4℃ 0.9 0.4m/s	27.3℃ 1.1 0.1m/s	28.1℃ 0.9 0.3m/s	1 前	室内が涼しう、風が抜けそう。明るさがちょうどよい。たまたま風が抜ける。蚊取り線香のにおいが不快。			28.2℃ 0.9 0.4m/s	27.7℃ 1.1 0.1m/s	28.7℃ 0.9 0.3m/s	1 前	これまでに選んでいなかったため。空間の広さが良かった。少し暑い。無風。暗い。			27.3℃ 0.7 0.5m/s	27.4℃ 1.0 0.1m/s	28.9℃ 0.8 0.3m/s	1 前	ア(東縁側)〜ウ(大広間内・東)は行ったことがなく、初めてみたかつ、湿度・風量とも適切。少し暗い。蚊がいた。工事の音が大嫌い。		
				2 前	明るさ、風の強さを求めている。たまたま風が抜ける。蚊取り線香のにおいが不快。						2 前	明るく、風が吹きそうだったから。空間が広い(物が無い)。天井が高い。暑い。						2 前	工事音や蚊から逃れるため。湿度が適切。少し暗い。		
				後							後							後			
	[26.7℃/0.9/0.1m/s]			3 前	より涼しい場所を求めて(土間の床素材は冷たいと考えた)。風通しも良いと考えた。たまたま風が吹くが、思ったより吹かず、少し暑かった。虫がいた。			[27.3℃/1.0/0.1m/s]			3 前	自然から離れたかった。空間が広く広々としていて。少し暑い。無風。			[27.3℃/1.0/0.1m/s]			3 前	ア(東縁側)ウ(大広間内・東)に滞在した温度は快適だったから蚊がいたので一番外部から離れた。温度が適当。じめった印象。やはり蚊がいた。		
凡例																					
カ オ エ ウ イ ア																					
西縁側 大広間 東縁側																					
キ 土間																					
左の図は平面図をモデル化したものである。																					
● 被験者が滞在し、最も快適だった場所																					
■ 被験者が滞在し、不快だった場所																					
▲ 快適・不快以外に被験者が滞在した場所																					
※記号の中の数字は、被験者が回答した順番																					
※□の中の数字は、実験時間帯の温度/PMW/風速平均を示す。																					
※コメント「前」は、各居場所に滞在する前の「その場所を選んだ理由」、																					
「後」は滞在後の「快適だった事」「不快だった事」への回答である。																					

Fig.6 Selected place and comments of individual subject

(2) 個人の重視タイプ別の分析

被験者ごとに重視する内容に傾向があった。Fig.6 は個人が選択した場所とその場所でのコメントを抜粋したものである。被験者 d は昼と夕方全ての回で「涼しさ」「風」などのコメントがあり、温熱環境を重視していた。しかし、昼と夕方を比べると選択理由は同じであるにも関わらず、異なる場所を選択した。適切な温熱環境を調整した結果だと考えられる。被験者 d と同様の温熱環境に関するコメントは、女子に比べて男子に多く、男子は温熱環境を重視しやすかった。被験者 f は比較的珍しいケースであるが、「音」「蚊」から逃れ、自然から離れたいたいというコメントが多かった。実際に f が滞在し最も快適だった場所は、全ての回で庭から遠い場所だった。被験者 d と被験者 f は、重視内容も選択した場所も全く異なるが、中間領域によって個人にあった場所が選択されていると言える。

(3) 選び方のパターンについて

Fig.7 に被験者の滞在場所、一番快適と答えた場所の理由を示す。居場所選択には不快な要素を避ける選び方と、快適な要素を優先する選び方があり、時間によって2つの重みが増減する事が読み取れた。例えば、昼の被験者の最も快適な場所は大広間が多く、コメントでは「蚊 (b)」「風 (g)」「明るくなりすぎない (g)」など、外の不快な影響を受けにくい事が評価された。一方、夕方は「草の揺れ (b)」「照明の雰囲気 (h)」「虫の音 (j)」等視覚や聴覚を通じた快適さを評価する意見が多く、個人の好みに合った快適な要素を選択していると考えられる。

4. まとめ

(1) 温熱環境が厳しい中でも、場所によって作業性に違いが現れた。拡散的思考には、明るく開放的な空間が向くこと、2種類の作業では同じ時間・場所

でも成績が異なる事を明らかにした。中間領域は居住者の作業に応じ場所を選択できる事に意義がある。

(2) 温熱環境が比較的安定した中間期において居場所選択の実験を行った結果、選択要因は主に3つあった。1つ目に環境的項目、2つ目に個人の重視内容、3つ目に時間ごとの優先事項である。環境的項目は特に温熱環境と光環境が重要であり、時間ごとの優先事項は不快要素を避ける事を優先する場合と快適要素を得る事を優先する場合が確認された。中間領域の居場所選択には複数の選択要因が絡み合うため、複数の性質を持った空間が必要だと考えられる。

【注釈】

注1) 2019年11月ワーケーションの全国的普及・促進を目的に全国65自治体が集まり「ワーケーション自治体協議会」が発足された。

注2) 参考文献2によれば、一般的に中間領域とは「2つ以上の要素が混ざり合うもの」として定義づけられており、建築空間のみならず思考や社会システムなどのあらゆる事象を含んだものとされている。特に建築空間に関しては、内部空間と外部空間の混ざり合うもの、公的空間と私的空間の混ざり合うものという2つの観点から定義づけられている。本研究では、建築環境と作業や居場所選択との関係を扱うことから、内部空間と外部空間の混ざり合うものを中間領域と捉え、研究を実施している。

注3) 物の用途を考えるテストとは Guilford, J. P. (1967) が考案した「Alternative Uses Task」である。

注4) 緑視率は、各場所において指定した座り方で座った場合の正面の写真から算出した。

【参考文献】

- 文1) Worthington, J. (Ed): Reinventing the Workplace, Architectural Press, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997
- 文2) 住宅・都市整備公団, (財) 日本建築センター: 中間領域に関する研究, 1984
- 文3) 土井脩史, 高田光雄, 近本智行他: 京町家における部分断熱改修に関する研究その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015. 9
- 文4) 高田光雄, 近本智行, 土井脩史他: 集合住宅の中間領域に関する研究その1~8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015~2018
- 文5) 国土交通省「知的生産性研究委員会報告書」2009年3月

【謝辞】本研究は、科学研究費助成事業（若手研究，19K15181，代表：土井脩史）による助成を受けて実施した。

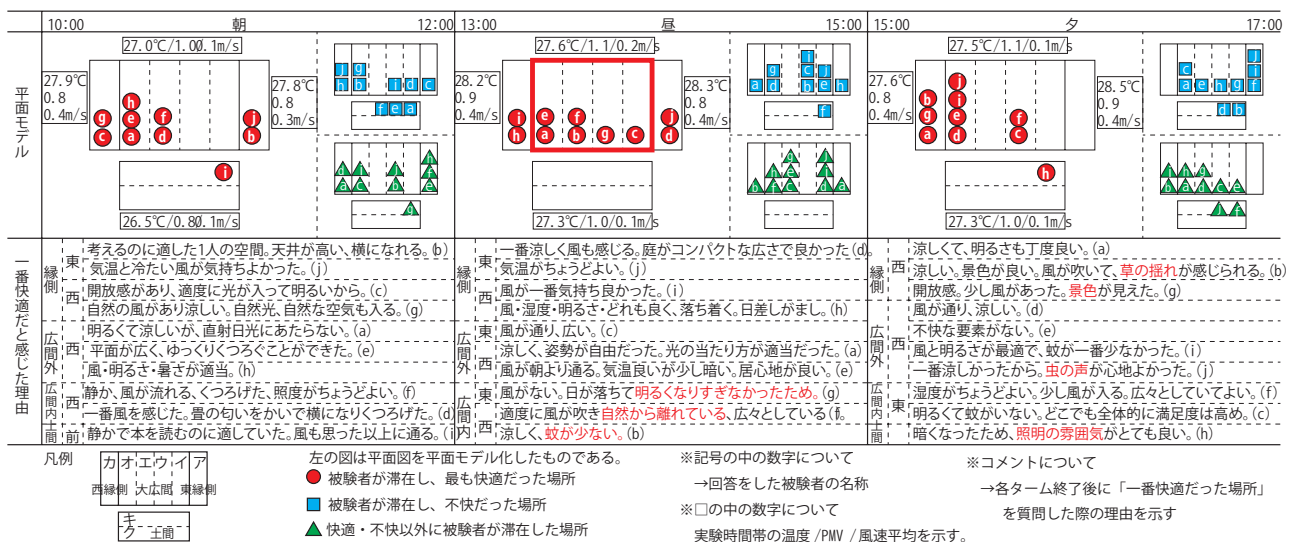


Fig.7 Selected place and comments of all subjects

学習時を想定した香りが集中力に及ぼす影響

Effect of Aroma on Attention in Learning

○ 竹村 明久（摂南大学） 中村 豪佑（摂南大学）

Akihisa TAKEMURA* Kosuke NAKAMURA*

* Setsunan University

It is very practical if the diffused aroma recover our concentration in learning. Twelve participants performed the mental work which was reading review papers assuming learning situations. In the first part of reading phase, no aroma was diffused in the experimental room. In the middle break and the second phase, aromas those were the pink grapefruit, the spearmint and the vetiver were diffused. It was investigated about the achievement rate, the error rate, the number of eyeblink and psychological votes. Consequently, it was revealed that the hedonics evaluation of aroma might be effected on the achievement rate of mental work and the concentration.

1. はじめに

作業効率への香りの影響に関する研究例が増す中
にあって、知的作業に関する香りの疲労回復効果に
関する研究はまだ非常に少ない。今後の香りの活用
に向けて、長時間の学習を想定した状況下で、精神
的な疲労状態からの回復に香りが及ぼす影響を明ら
かにできれば有意義である。本報では、精神的疲労
状態の実験参加者が休憩後の知的作業に向けた休
憩および作業時に香りが空間にあった場合の作業成
績や心理生理量を基に香りの影響を把握すること
を目的とする。

2. 実験概要

実験は、2019年11月8日～12月10日に気温
17.2～25.8℃、相対湿度22～61%の会議室で
実施した。香りはアロマオイルの付加が可能な超
音波加湿

器（HF-1441）を用いて実験参加者から300mm
の位置から室中に散布し、試料は水のみ（100mL
以下 Ctr）、グレープフルーツピンク（GP）、ス
ペアミント（SM）、ベチバー（VT、以上いづれ
も ease aroma shop で購入）の3種4条件とし
て、精油は機材の指定通り0.1mLをミストの通
過部に置くことで噴霧した。実験スケジュールは
図1の通りで、香り噴霧前の会議室への入室後
に心理評価と疲労状態をつくるための1回目の
論文読み課題を行った。続いて香り噴霧を開始
と同時に1分間の休憩を行ったのち、2回目の
論文読み課題と内容の確認テストを行い、再度
心理評価を

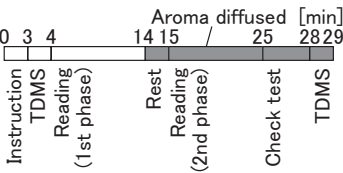


Figure 1 Schedule

Table 1 Papers for reading task

No.	Characters	Characters	Review paper
1	19,670	9,960	阿部生雄：スポーツ史におけるイデオロギーと無意識：概念史、人物史、制度史、体育史研究 第35号，pp.1-11，2018 I. Abe : Ideology and Unconscious in Sport History: Conceptual History, Confirmed Ideology, and Institutionalization, Japan journal of the history of physical education and sport vol.35, pp.1-11, 2018
		9,710	三上理沙子ほか：歯科領域における半導体レーザーを用いた Low-Reactive Level Laser Therapy による組織の治癒・再生の促進－基礎及び臨床研究のレビュー－，日本レーザー医学会誌 第40巻 第1号，pp.15-29，2019 R. Mikami et al. : Promotion of Tissue Healing and Regeneration with Low-Reactive Level Laser Therapy Using Diode Lasers in Dental Field: Review of Basic and Clinical Research, Journal of the Japan Society for Laser Surgery and Medicine vol.40 No.1, pp.15-29, 2019
2	19,568	12,041	藤井健吉ほか：レギュラトリーサイエンス（RS）のもつ解決志向性とリスク学の親和性－薬事分野・食品安全分野・化学物質管理分野の事例分析からの示唆－，日本リスク研究学会誌 第27巻 第1号，pp.11-22，2017 K. Fujii et al. : Solution-Focused Approach of Regulatory Science and Its Compatibility with Risk Science: Practical Suggestion from Case Studies on Pharmaceutical Affairs, Food Safety and Chemical Management, Japanese Journal of Risk Analysis Vol.27 No.1, pp.11-22, 2017
		7,527	高山一夫：医療・福祉政策研究への経済学からのアプローチ－米国トランプ政権の医療制度改革を事例に，医療福祉政策研究 第2巻 第1号，pp.37-46，2019 K. Takayama et al. : Healthcare policy research and economics: a political economy analysis of the Trump administration healthcare reform, Journal of Health and Welfare Policy Vol.2 No.1, pp.37-46, 2019
3	19,006	6,410	伊藤一志：培養基材の3次元表面構造による細胞応答，日本素材物性学会誌 第28巻 第1/2号，pp.1-5，2017 K. Ito : Cell Reactions to Surfaces with Multiscale Structures on Cell Culture Substrates, Journal of the Society of Materials Engineering for Resources of Japan Vol.28 No.1/2, pp.1-5, 2017
		12,596	高野徹：福島県の甲状腺がんの過剰診断－なぜ発生し、なぜ拡大したか－，日本リスク研究学会誌 第28巻 第2号，pp. 67-76，2019 T. Takano : Overdiagnosis of Thyroid Cancer in Fukushima, Japanese Journal of Risk Analysis Vol.28 No.2, pp.67-76, 2019
4	19,853	9,631	崔株林：韓国における住宅市場の変化と木材需要，林業経済 第59巻 第9号，pp. 17-27，2006 S. Choi : The Change in Housing Market Conditions and Timber Demand in Korea, Forest Economic Research Institute Vol.59 No.9, pp.17-27, 2006
		10,222	内藤貴司ほか：脊髄損傷者の体温上昇抑制に有効な身体冷却法の検討，体育学研究 第63号，pp.1-11，2018 T. Naito et al. : Effective cooling strategies to attenuate the increase in body temperature in humans with spinal cord injury, Japan Journal of Physical Education, Health and Sport Sciences vol.63, pp.1-11, 2018

行って終了とした。着席以降実験終了まで、集中力に関する生理量の簡易測定のために眼鏡型測定器 (JINS MEME ES) を用いて眼電位と頭部の加速度と向きを測定した。

論文読み課題は実験参加者の専門外の分野から表1の総説8編を設定して文字数がほぼ一致するように4グループに分けて香り4条件で偏りが無いよう順不同に割り当てて提示した。読む際にはabstractなどの英文や図表は飛ばして読むこととして、1回目の制限時間で読み進んだ位置に印をつけて、2回目はその続きから開始させた。読後に確認テストがあることは事前に伝えた。確認テストは五者択一の間を1編あたり10問作成し、1回のテストで20問が提示された。成績優秀者にはインセンティブがあることを事前に伝えて動機づけとした。

心理評価は図2に示す香りの強さ、快不快、TDMS-ST¹⁾を参考にした気分評価8項目と眠さ感とし、2回目の申告時のみ作業に集中できたかについても回答させた。

実験参加者は裸眼かコンタクトレンズ着用者で嗅覚検査合格済の12名(女4名、男8名、平均22.4歳)で、候補者のうち予備検討で眼鏡型測定器の測定値が得られにくい者を除いた。実験は1回あたり最大で同時に2名以内で実施した。なお、実験参加者には適切な報酬を支払った。

3. 結果と考察

3.1 香りの強さと快不快

図3に香りの強さ評価を示す。横軸は香り4条件と作業前後の申告であること、縦軸は臭気強度尺度である。1回目の申告では香り噴霧前であるので「やっと感知できるにおい」以下が大半で、香り噴霧後の2回目では噴霧開始14分後にもかかわらず「強いにおい」評価が多い。3精油の評価は概ね同等で、香りの強さの差は以下の考察に影響しないと判断した。

図4に快不快評価を示す。横軸は香り4条件で縦軸は快・不快度尺度である。GPは快側、SMはCtrとほぼ同等の中庸、VTはやや不快側であり、3精油の特徴として以下の考察では注

目することにした。

3.2 読了文字数と確認テスト正解率

読了文字数には句読点等の記号や引用文献番号も含めた。1名が4条件とも全文字を読了したが、残り時間が2分程度以内であったため分析に含んだ。図5に読了文字数を示す。横軸は香り4条件と作業フェーズ、縦軸は臭気強度尺度である。図中の縦線分で示した標準偏差の長さからわかるように非常に個人差が大きく平均値の傾向は読み取りにくい、VTでは香り噴霧後の方がやや向上する可能性がうかがえた。読了文字数の2回目と1回目の比の対数値を図7に示した。横軸は香り4条件を、縦軸は読了文字数の2回目と1回目の比の対数値で示した。分散分析による有意差は検出されず効果量 η_p^2 も小さかったものの、GPとVTではある程度の差異が見られ、SMも含めて図4の快不快評価と相関がある可能性が示唆された。

確認テスト正答率の算出には読了文字数に該当するまでの設問数の12名分の和を分母、正答数の12名分の和を分子とした。図7に正答率を示す。横軸は香り4条件を、縦軸は上記手法で算出した正答率である。VTでわずかに高いものの、ほぼ50%程度で一定の傾向は読み取れなかった。

3.3 瞬目数による集中力低下傾向の読取り

眼鏡型測定器では眼電位の時間変動を測定でき、スマートフォン端末に転送できる。この測定画面を録画して、電位変動を目視で数え上げて瞬目の起こった

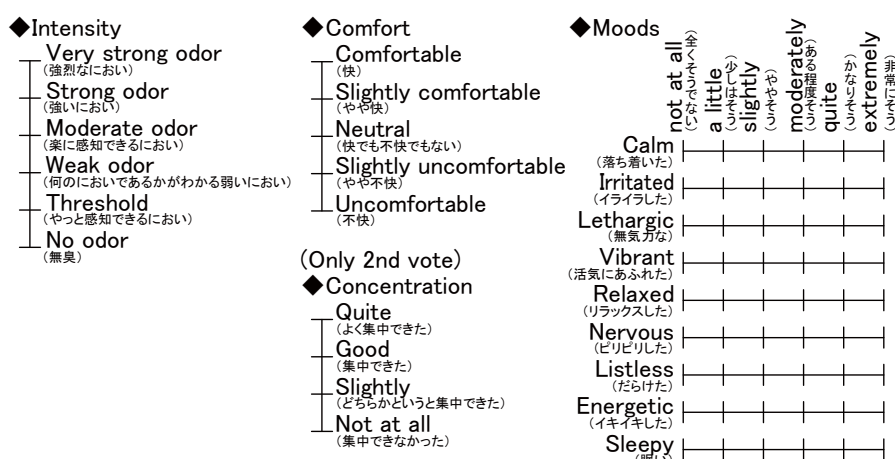


Figure 2 Evaluation scales

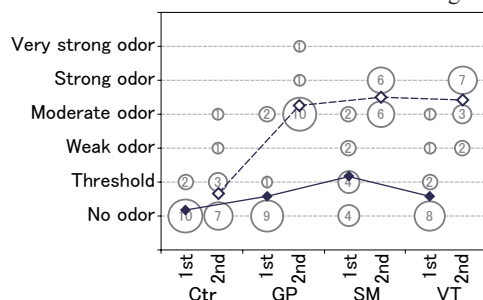


Figure 3 Intensity evaluation

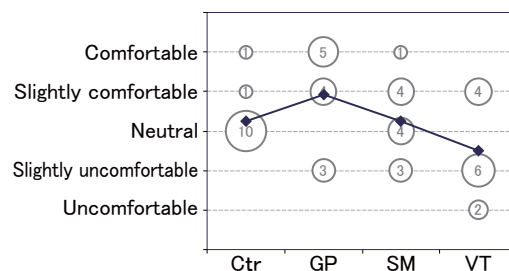


Figure 4 Hedonics evaluation

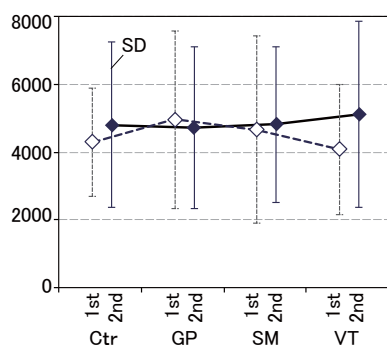


Figure 5 Number of read characters

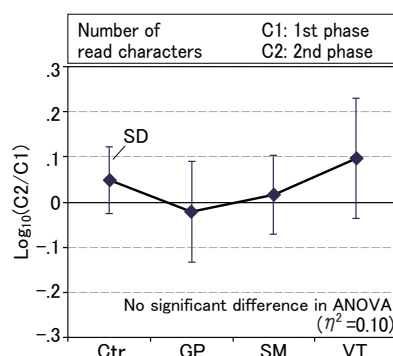


Figure 6 Ratio of read character numbers

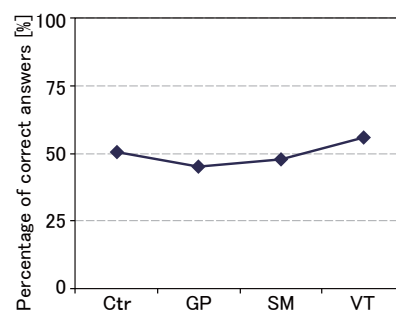


Figure 7 Percentage of correct answers

時刻を記録した。集中力の低下で瞬目数が増加するとされている²⁾ことから、集中力の状況を条件間比較すべく図8に瞬目数を示す。横軸は香り4条件と1回目、2度目の作業時の時間区分であることを示す。縦軸の瞬目数は、60秒間に起こった瞬目数を1回目作業については開始から9分間、2回目作業については休憩終了後から9分間について10秒移動平均値を求めたのち、それら計55データの平均値で示した。いずれも縦線分で示した標準偏差は大きい、1回目より2回目の方が瞬目数は多いことがわかる。一方で、VTのみ2回目の上昇幅が小さいことが読み取れた。そこで、図9で2回目と1回目の瞬目数比を示した。横軸は香り4条件を、縦軸は瞬目数の2回目と1回目の比の対数とした。分散分析の有意差は検出されず、効果量も0.04と小さかったものの、VTが他の条件よりやや低い傾向が確認できた。図4の香りの快不快評価の傾向と合わせて考えると、不快と評価された香り(VT)の方が快評価の香り(GP)より集中力の低下を防ぐ可能性が見い出せた。

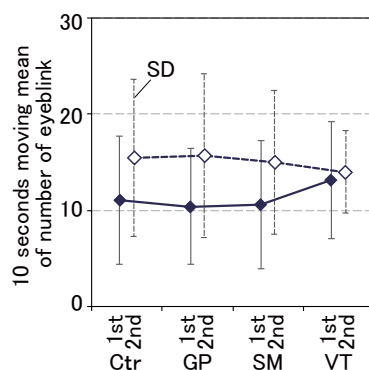


Figure 8 Number of eyeblink

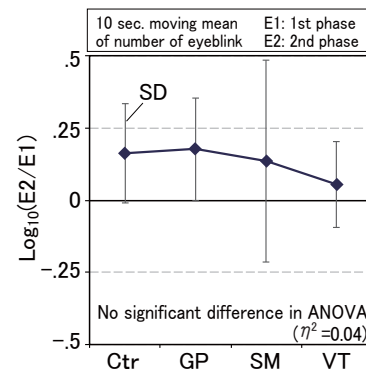


Figure 9 Ratio of 1st phase to 2nd phase of eyeblink number

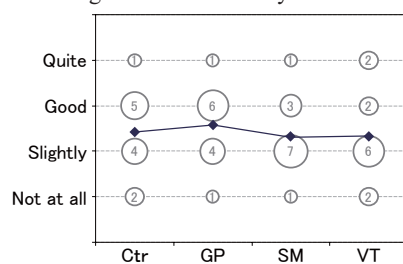


Figure 10 Evaluation of concentration

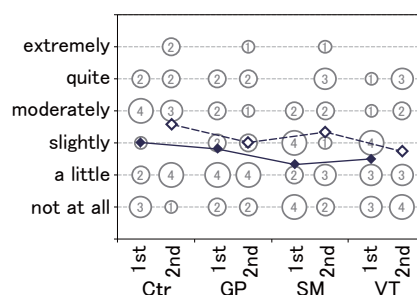


Figure 11 Evaluation of sleepy

3.4 集中の度合いと眠気の評価

実験終了前に1回のみ申告させた作業への集中度合の自己申告を図10に示す。横軸は香り4条件、縦軸は程度の尺度で示した。最頻値はCtrとGPがSMとVTより高いが平均値ではほとんど差異はなかった。図9の傾向と比較して相関が推測される関係ではないことから、瞬目数が集中力との相関が高いことが真とするならば、作業を振り返って行わせる集中力に関する自己申告はあまり精度が高くないと推定される。

眠気感の評価を図11に示す。横軸は香り4条件、縦軸は程度の尺度で示した。程度の大小はあれど、いずれの香り条件でも作業前の1回目より全作業終了後の2回目の方が眠気は高く感じられた。GPとVTは

2回目と1回目の差異が小さく、SMでは大きかった。SMはミント香で一般的には眠気防止などに用いられることが多いが、ここでは反対の傾向だった。また、2回目の評価の特徴として「ややそう」評価が少なく、評価が高い側と低い側に二分化されたことが挙げられる。作業による疲労から眠気を感じる場合と、作業によって興奮状態になる場合があったと推測される。

3.5 TDMS 尺度の評価

図12に気分評価の8項目を示す。横軸は香り4条件と評価のタイミング、縦軸は尺度の程度表現語で示した。TDMS評価項目は、発行元¹⁾から8評価項目の評価値の加減算によって活性度-安定度関係を求めることができるとされている。図12では8項目を安定度算定にて正值で扱われる「活気にあふれた」、「イキイキした」と負値で扱われる「無気力な」、「だらけた」、そして活性度算定にて正值で扱われる「落ち着いた」、「リラックスした」と負値で扱われる「イライラした」、「ピリピリした」に分類して図示した。

図中の縦線分は標準偏差を示し、図中の各項目の4つの香り条件間の分散分析ではいずれも有意差は検出されなかった。図中には同比較における効果量も併記した。同図中の条件間の評価傾向は概ね類似し、近い内容の評価させたことがわかる。「イライラした」と「ピリピリした」はいずれの条件でも評価された程度は非常に低かった。

発行元¹⁾の手法に倣って平均評価を用いて算出した活性度-安定度関係を図13に示す。横軸は安定度得点、縦軸は活性度得点であり、発行元¹⁾によれば右上がり方向の軸が快適度、右下がり軸が覚醒度である。プロットに付く縦横線分は標準偏差を示す。1回目の図上の座標を香り4条件間で比較すると、いずれも安定度が正でCtrとGPでは活性度が正、SMとVTでは負だった。分散分析で有意差は見られず、効果量 η^2 は安定度で0.07、活性度で0.05と小さかった。実験開始前の気分の日間個人内変動が存在することは予測できることだが、これらの評価項目についてはそれほど大きな変動は見られなかったことがわかる。2回目について香り4条件間で比較すると、いずれも安定度が正でGPとSMでは活性度が正、CtrとVTでは負だった。分散分析の有意差は検出されず、効果量 η^2 は安定度で0.14、活性度で0.10と小さかった。香りの有無にかかわらず、変動内範囲での平均値だったと判断される。

日内における1回目から2回目への座標の推移は、(安定度, 活性度)で表すとCtr(+0.92, -1.08)、GP(-0.17, +0.67)、SM(+0.25, +1.33)、VT(-1.75, +0.42)だった。1回目から2回目への変動を快適度-覚醒度軸で読み取ると、Ctrでは快適度は変化なく覚醒度のみが低下し、GPではわずかに快適度も覚醒度も上昇したものの差異は非常に小さく、SMでは快適度も覚醒度も上昇したがGPより快適度上昇の傾向がやや高く、VTでは快適度がわずかに低下し覚醒度は上昇した。GpとSMより覚醒度上昇の傾向が強く見られた。これより、作業前後の気分変動傾向は香りの種類に依存することが示唆されたが、図4の香りの快不快評価との関係は薄いと推測された。

4. おわりに

学習状況を想定した知的作業を実験参加者に課し

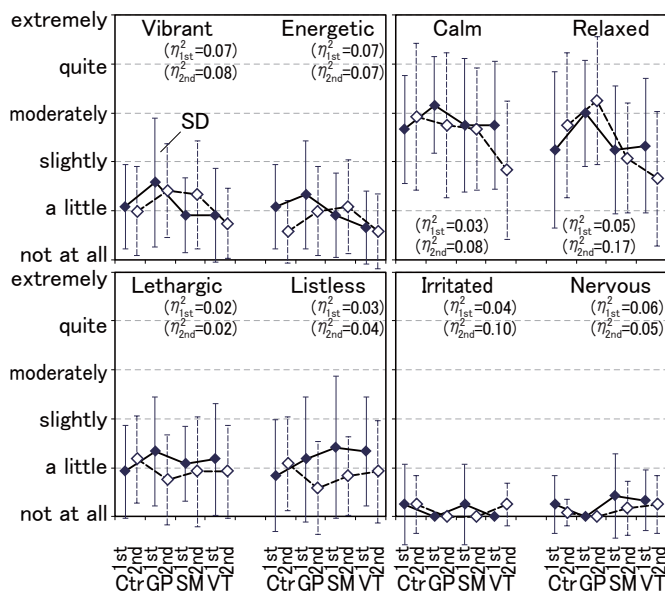


Figure 12 Evaluation of TDMS scales

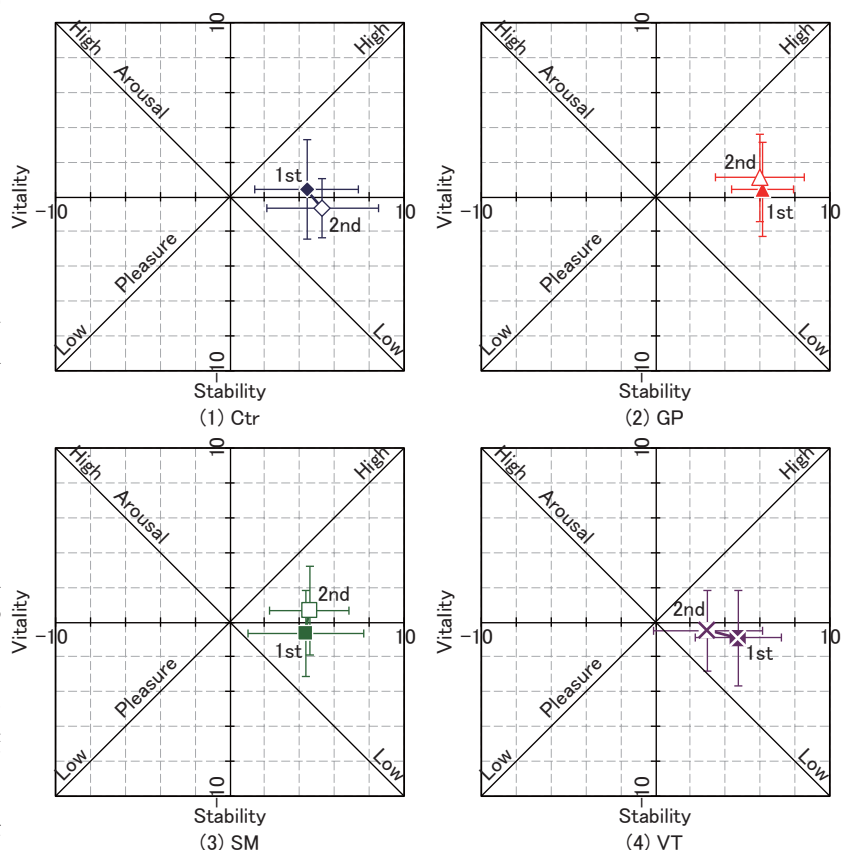


Figure 13 Relationship between arousal and pleasure based on TDMS

て、休憩以降に噴霧した香りの各種指標への影響を検討した。ベチバーで作業後の瞬目数増加を抑制できる可能性は示唆されたほか、香りの快不快評価が作業の達成度や瞬目数すなわち集中力低下に影響する可能性が示唆されたが、さらなる詳細な検証が必要と考えられた。

参考文献

- 1) TDMS 手引き～二次元気分尺度～, アイエムエフ, 2009
- 2) 桶谷ほか: 瞬きと脳波および皮膚電位との相関解析による居眠り判定基準の検討, 電子情報通信学会報 第107巻 第72号, pp. 17-20, 2007

間欠噴霧される香りの評価と作業効率に及ぼす影響 (その 1) 香りの強さの順応状態評価に関する検討

Evaluation of Adaptation and Effect of Intermittently Sprayed Aroma on Mental Work Performance (Part1) Index of Adaptation Based on Real Time Intensity Evaluation

○ 南田 高希 (摂南大学) 竹村 明久 (摂南大学) 脇山 雄多 (パナソニックエコシステムズ)
杉本 泰世 (パナソニックエコシステムズ) 七塚 輝 (摂南大学)

Koki MINAMIDA^{*1} Akihiisa TAKEMURA^{*1} Yuta WAKIYAMA^{*2}

Yasuyo SUGIMOTO^{*2} Hikaru NANATSUKA^{*1}

^{*1} Setsunan University ^{*2} Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.

Exposed aroma at interval so as to feel all the time, due to this will be able to improve mental work performance. Therefore, the method of aroma exposure which could reduce the adaptation was considered. The experiments were carried out conditions in which different concentrations and different intervals between aroma sprays. Real time intensity evaluation was approximated based on exponential function, thus it converged to constant term. Constant term was considered as adaptation index. Consequently, higher concentration condition and longer interval condition resulted in high intensity evaluation.

1. はじめに

近年、働き手が減少する中で知的生産性の向上が求められ、香りの活用が期待されている。一方で、オフィス空間ではこれまでに香り空調の導入が何度も進められてきた。しかし、従来の香り空調は空間全体に香りを拡散させるため、嗅覚順応の影響により香りを持続的に知覚させることが難しく、作業性向上に十分な効果が発揮できないのではないかという問題があった。そこで、本研究は嗅覚順応の低減が見込める曝露方法として間欠曝露方法に着目し、異なる香り噴霧間隔及び濃度条件間の連続香り適応の指標強度評価の比較に基づく順応状態の評価方法の検討を行った。

2. 実験概要

実験は 10.5 m³ (2m × 2.5m × 2.1mH) の PET 製フィルムで覆われた室内で 2 台の送風機 (風速約 0.2 ~ 0.3m/s : パナソニック F-BP25T) から 1m 離れた位置に実験参加者 2 名を着座させて実施した。実験室の平面図と断面図を図 1 に示す。香り試料にはオレンジスイート (以下 OR) と吉野ひのき精油 (以下 CY、共にインセント社) の 2 種を設定し、送風機内にある 0.1 ~ 0.9s 間で香り噴霧時間を設定できる機器から噴霧した。予備検討として、実験で用いる香りの濃度と噴霧時間の選定を行った。香り試料の精油を無水エタノール

ルで 3 段階に希釈 (OR:10, 20, 40% CY:5, 20, 40%) し、香りを噴霧する時間を 5 段階 (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8s) とし、これらを組み合わせた条件を 14 名に対して噴霧し、図 2 に示す評価尺度を用いて強度評価を行わせた。その結果を図 3 に示す。横軸は香り噴霧の時間を、縦軸は強度評価尺度を示す。OR、CY のどちらも濃度が高いほど評価が高かったが、OR の 10% と 20% では

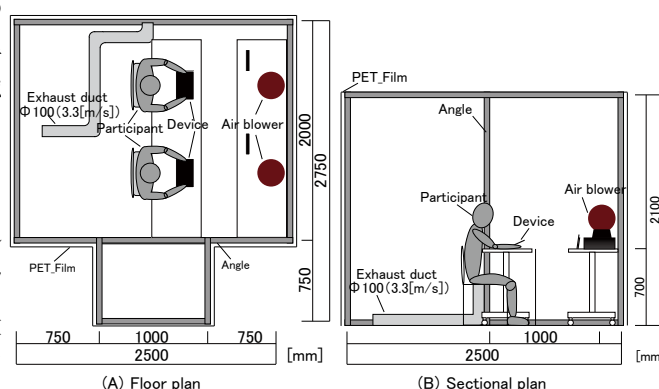


Figure 1 Laboratory plan

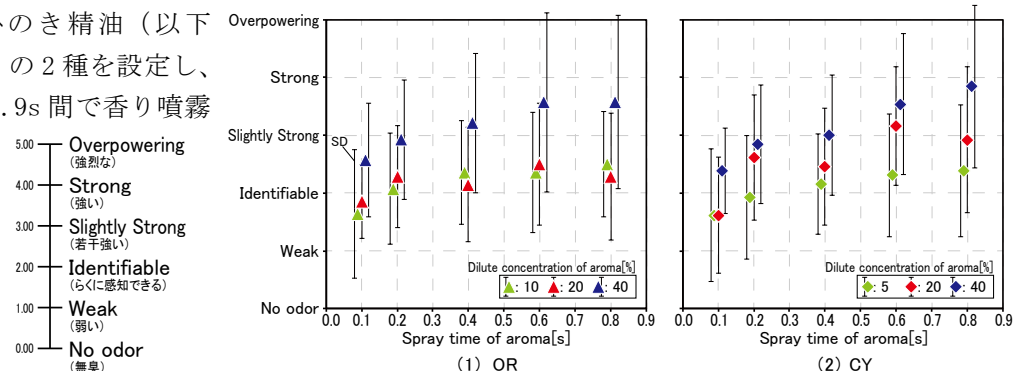


Figure 2 Scale of intensity

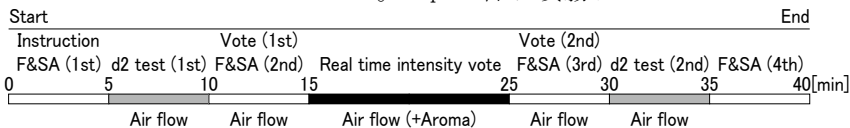
Figure 3 Relationship between spray time and intensity

ほとんど差異がなかった。また、CY の 5% と 20% における 0.1s 噴霧の評価がほぼ一致したことから、噴霧時間が極端に短い場合、香り噴霧と呼吸における吸引とのタイミングにずれが生じ、意図した評価より低い評価となる可能性が示唆された。そのため、CY の濃度条件間の評価に差が見られた 0.4s の噴霧時間で実験を行うこととし、濃度は OR と CY とともに 5% (記号 L), 20% (M), 40% (H) の 3 条件で行うこととした。また、香りの噴霧間隔については参考となる文献が見当たらなかった。そのため、嗅覚の順応状態から回復する時間は一般的には一瞬と言われていることから、比較的短い 10s 条件 (記号 s) を最短の噴霧間隔とし、十分長い時間である 60s (l)、これらの間である 30s (m) の 3 条件を香りの噴霧間隔として設定し、濃度条件と間隔条件を組合せた 5 条件を間欠条件と設定した。さらに、Mm 条件と同程度の臭気強度となるようアロマディフューザー (生活の木製) を用いて室内に香りを充満させ、実験参加者への連続曝露を意図した Adp 条件と香り発生を全く行わない Ctr 条件を設けた。条件を表 1 に示す。表中の Lm から Adp の 6 条件は 2 種の精油について実施したため、実験参加者は異なる日に計 13 条件の実験に参加した。また、実験者の都合で Ctr を含む OR の各条件での実験後に CY の各条件で実験を行った。実験の流れを図 3 に示す。Adp 条件を除いた条件での実験で、送風機からの気流は連続曝露とした。10 分間の香り噴霧時は図 2 で示した阪大尺度の臭気強度評価をツールデバイスを用いて連続的に評価させた。このツールデバイスは、画面に表示される香り強度評価尺度上に左右に動かせるスライドバーがあり、実験参加者にはこのスライドバーに指を載せ評価させた。評価尺度には「無臭」が 0.00、「強烈なにおい」が 5.00 と 1 段階ごとに数値が示されており、評価時の数値も視覚的にフィードバックされるように画面上に表示される。また、1 秒ごとに 0.01 単位で評価値が記録される。なお、記録

Table 2 Conditions

Symbol	Condition	
	Concentration [%]	Interval [s]
Lm	5	30
Ms	20	10
Mm	20	30
MI	20	60
Hm	40	30
Adp	*	-
Ctr	-	-

*: Aroma filled the room to the same intensity as Mm



の開始と終了は実験者が指示した。香りの噴霧前後には 5 分間の知的作業と心理評価を行わせ、知的作業前後には生理量の測定も行った。Adp の香り噴霧は

室内に香りを充満させる必要があるため、実験室が設けられた室内にて知的作業、心理評価、生理量の測定を行わせた。知的作業、心理評価、生理量の検討は次報¹⁾で述べる。実験日時は 2019 年 10 月 16 日から 12 月 16 日で、室内の温湿度は 13.7 ~ 26.1℃、26.4 ~ 80.0%RH だった。実験室の換気量は Adp の香り曝露時を除き、93 m³/h 程度だった。なお、実験参加者は 14 名 (男性 6 名、女性 8 名、平均年齢 22.0 歳) だったが、CY の Lm, Hm, Ms, Adp 条件で 1 名ずつ欠員があったため CY の 6 条件では 13 名で集計した。

3. 香り強度評価結果

3.1 近似曲線結果比較

得られた連続強度評価データを基に噴霧間隔及び濃度条件間の比較を行う。なお、実験での香りは各条件の噴霧間隔時間で 10 分間にわたり噴霧されたが、実験者側の不備により 10 分時点で噴霧される香りの強度評価を行わせる前に評価終了の指示を行った。そのため、9 分時に噴霧された香りの強度評価を含むと考えられる 550[s] までの評価で考察を進める。嗅覚順応は従来から、指数関数的に減少するとされてきた²⁾。そのため、本研究でも (式 1) に示す指数関数を用い近似することとした。

$$I = a * \exp(-bt) + c \text{ (式 1)}$$

I: 臭気強度 [-] a, b: 係数 [-]

t: 評価時間 [s] c: 定数項 [-]

既往研究²⁾では連続的な香り噴霧であったため、評価が直接的に近似に用いられたが、本研究では香りが噴霧されない間の評価を除く必要があると考えた。そこで時系列データを各条件の香り噴霧間隔時間枠、すなわち間欠噴霧が行われたタイミングで区切り、各時間枠での最大強度評価を抽出した。抽出された評価値に対して指数関数を適用し、最小二乗法によって近似することとした。なお、時間枠での最大強度評価値が 0 の場合は、順応の影響だけでなく、香り噴霧と吸気のタイミングのずれなども考えられることから、今回の近似には含めないこととした。パネルごとの各条件における近似曲線を図 5 に示す。行方向に噴霧間隔が異なる条件、濃度が異なる条件、Adp と Ctr の各臭気における結果を、列方向に各パネルの結果 (P1-P14) を示し、横軸が臭気曝露開始からの時間で縦軸は香り強度尺度を示す。なお、P5 の CY 条件は欠値扱いのため未記載である。まず、濃度条件の結果を見る。濃度が高いほど最初的评价も高いことから、切片の高さも段階的に異なると考えられたが、系統的な傾向は見られず、1 条件ごとに日を改めたこ

Figure 4 Time schedule

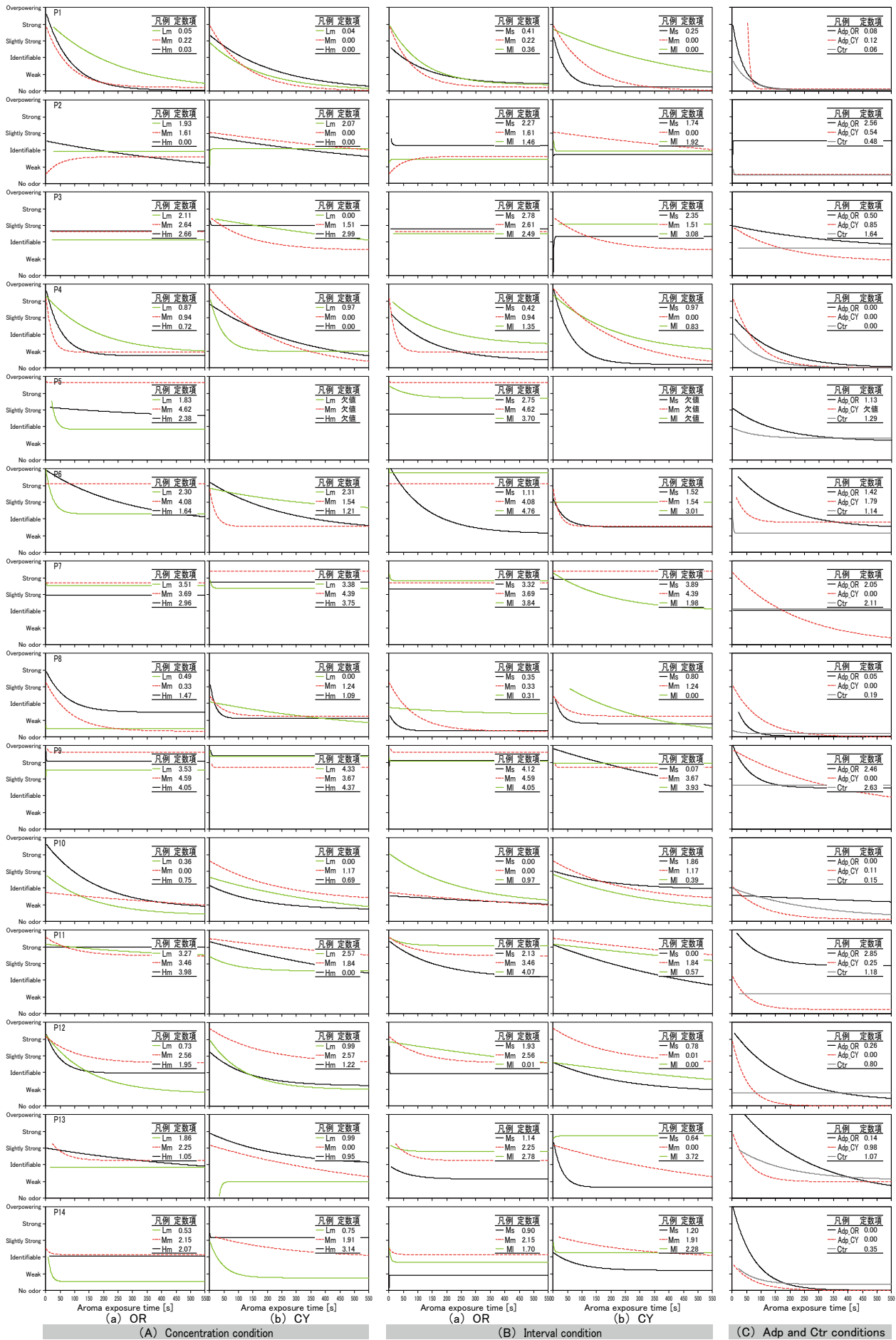


Figure 5 Approximate curve based on intensity evaluation

とから、実験時の体調などが影響したと考えられる。近似曲線では経時的に減衰したパネルが多かったが、P3、P7、P9のようにほぼ横ばいとなったパネルも見られた。しかし、Adpの結果を見ると、P3とP9では減衰したことから、30sの間隔を設けたことで順応が抑制されたと考えられた。また、P7はAdpでもほぼ横ばいだったことから順応しにくいパネルであることが示唆された。さらに、近似曲線が経時的に上昇した条件もあった。これは近似による影響で香り噴霧開始直後の最大評価値として抽出された値が他の最大評価値よりも低く、最小二乗法では残差が最も小さくなるように近似したためと考えられる。また、ORとCYの近似曲線を比較したところ、ORよりCYの方が大きな減衰が見られ、異なる香りでは順応パターンに影響する可能性が示唆された。次に噴霧間隔が異なる条件間を比較する。濃度は間欠曝露の各条件で一定であるが、切片の大きさが異なる実験参加者が多かった。各条件の切片の大きさが最も近いP11のORではMsが最も減衰し、Mm、M1の順に減衰の程度が小さくなった。この結果から順応の回復に要する時間が短いほど減衰が大きくなると考えられるが、他のパネルの結果からは系統的な傾向が見られなかった。また、P3、P7、P9のMsでも順応は見られなかった。なお、Ctrでは他の条件よりも低い評価が多く見られたが、「無臭」の評価ではないパネルが多く、室内の固有臭やパネルらの体臭などの影響が示唆された。また、これらの結果から順応の程度の検討は難しいことから別の指標を用いることとした。

3.2 順応後の強度評価結果比較

順応の指標として松葉佐ら³⁾は連続臭気噴霧による強度評価の時系列データと近似曲線の適合度から「順応のしやすさ」を示されたが、本研究は順応後においても高い香り強度評価を得ることである。そのため、強度評価は(式1)の定数項(c)に収束することから、この定数項を順応後にパネルが評価する香り強度評価値であるとみなした。そこで、Ctrを除いた各条件における全パネルの定数項を基に定数項

の平均値を算出し、濃度条件間及び間隔条件間で比較を行った。図6にその結果を示す。横軸に各条件を、縦軸に香り強度評価を示す。まず、濃度条件間の比較では香り2試料とも間欠噴霧の条件でAdpより高い値を示した。またCYでは若干ではあるが、Lm、Mm、Hmの順に高い値となり、濃度が高いほど評価も高くなる傾向だった。しかし、ORではMmが最も高く、次いでHm、Lmの順だった。しかし、ORとCY間でのMsとM1の値の差を見ると同程度であることから、本来はMmでも同程度の結果となると考えられたため、ばらつきによる影響が一因として挙げられる。また、ORでは「への字」型であることから香りの濃度に対して順応後でも十分臭気を知覚可能な範囲があることが示唆された。次に間隔条件間でも香り試料のどちらも間欠噴霧の条件でAdpより高い値を示した。CYでは噴霧間隔が長いほど、値も高かった。ORでもMm、M1はMsより値は高かったが、MmとM1の値がほぼ同程度を示しており、噴霧時間を設けることで順応後も十分知覚できるが、香りによって一定時間を超えると強度評価が横ばいになる噴霧間隔が存在する可能性が示唆された。

4. おわりに

作業性向上への十分な効果に向け、嗅覚順応の低減が見込める曝露方法として間欠曝露方法に着目し、濃度と噴霧間隔が異なる条件を用いて検討を行った。本報では得られた連続強度評価を基に近似曲線を算出し、順応後の知覚される評価値とみなした近似曲線の定数項を条件間で比較した。その結果、高い濃度で噴霧間隔を長く設けるほど定数項が高い値となることが明らかとなったが、濃度が高すぎる場合には、順応を促進する可能性がある。また、噴霧間隔がでも一定時間を超えると香りを知覚されないことで持続的な快適性を得ることにつながりにくことが示唆された。今後は別の指標を考え、その指標による考察を進めるとともに、別の香りや条件などの検討も進めたい。次報では濃度、間隔条件間の作業成績、心理評価、生理量を比較した結果について述べる。

参考文献

- 1) 七塚輝, 竹村明久, 脇山雄多, 杉本泰世, 南田高希, 間欠曝露される香りの評価と作業効率に及ぼす影響 (その2) 作業効率と心理生理量に関する検討, 第49回近畿支部学術研究発表会論文集, (pdf), 2020
- 2) 大迫政浩, 西田耕之助, 松井三郎嗅覚順応モデルの提案と香り空間設計への適用方法に関する一考察, 空気調和・衛生工学論文集 No. 46, pp. 11-19, 1991
- 3) 松葉佐智子, 後藤なおみ, 五味保城, 小早川達, 持続提示臭気に対する順応しやすさの定量化, におい・かおり環境学会誌 45 巻 1 号, pp. 38-45, 2017

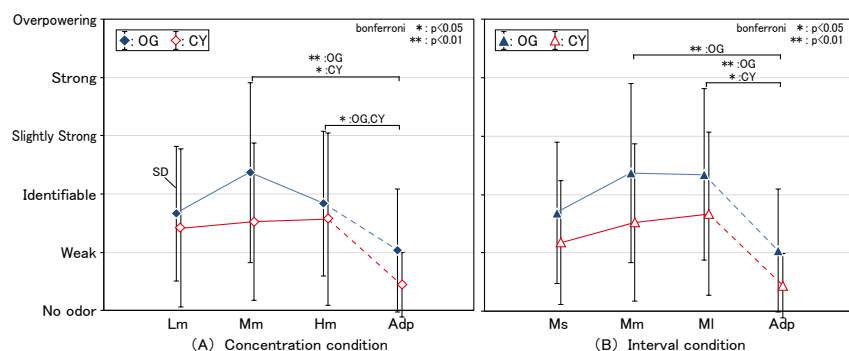


Figure 6 Comparison of constant terms

間欠噴霧される香りの評価と作業効率に及ぼす影響
(その 2) 作業効率と心理生理量に関する検討

Evaluation of Adaptation
and Effect of Intermittently Sprayed Aroma on Mental Work Performance
(Part2) Investigation of d2 Test, Mood Evaluation, Flicker Value and Salivary Amylase

○ 七塚 輝 (摂南大学) 竹村 明久 (摂南大学) 脇山 雄多 (パナソニックエコシステムズ)
杉本 泰世 (パナソニックエコシステムズ) 南田 高希 (摂南大学)

Hikaru NANATSUKA^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*1} Yuta WAKIYAMA^{*2}
Yasuyo SUGIMOTO^{*2} Koki MINAMIDA^{*1}
^{*1} Setsunan University ^{*2} Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.

It must be meaningful for improving the workplace environment to make the occupants keep feeling the good fragrance. Therefore, we looked at the effect of the interval exposure on the olfactory adaptation. In this report, indexes of mental work performance, moods, mental exhaustion and stress were compared among conditions those had three different intervals and three different concentrations. It was revealed that percentage of achievement might be effected by aromas and their sprayed interval. Flicker value was also better effected by interval exposure. There was almost no difference about evaluation of moods and salivary amylase value.

1. はじめに

前報¹⁾では、実験概要及び異なる臭気噴霧間隔および濃度条件間の連続臭気強度評価の比較に基づく順応状態の評価指標の提案とそれを用いた評価について述べた。本報では、異なる臭気噴霧間隔条件と異なる濃度条件間の作業成績、心理評価、生理量を比較した結果について述べる。

2. 実験概要

前報¹⁾と同じである。実験は 10.5 m³ (2m × 2.5m × 2.1Hm) の PET 製フィルムで覆われた室内で送風機 (風速約 0.2 ~ 0.3m/s: パナソニック F-BP25T) から 1m 離れた位置に実験参加者を着座させて実施した。香り条件にオレンジスイート (以下 OR) と吉野ひのき精油 (以下 CY、共にインセント社) の 2 種を設定して、条件は表 1 の通りとした。送風機内に間欠的に 0.4s の香り発生ができる機器を設置して、香りの希釈倍数を 5% (記号 L), 20% (M), 40% (H) の 3 条件と、香り送風機から香りを噴霧する間隔を 10s (記号 s), 30s (m), 60s (l) の 3 条件としてそれらを組合せた計 5 条件を設定した。また、Mm 条件と同程度の香りの強度となるようアロマディフューザーを用いて室内に香りを充満させて、実験参加者への連続曝露を意図した Adp 条件と香り発生を全く行わない Ctr 条件を設けた。表中の Lm から Adp の 6 条件は

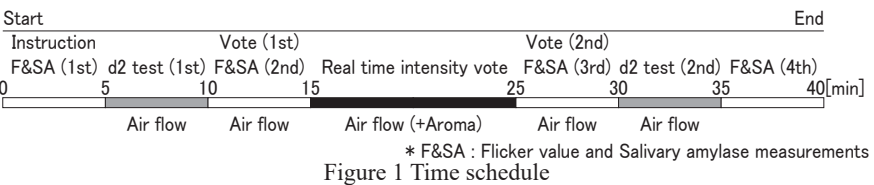


Table 1 Conditions

Symbol	Condition	
	Concentration [%]	Interval [s]
Lm	5	30
Ms	20	10
Mm	20	30
Ml	20	60
Hm	40	30
Adp	*	—
Ctr	—	—

*: Aroma filled the room to the same intensity as Mm

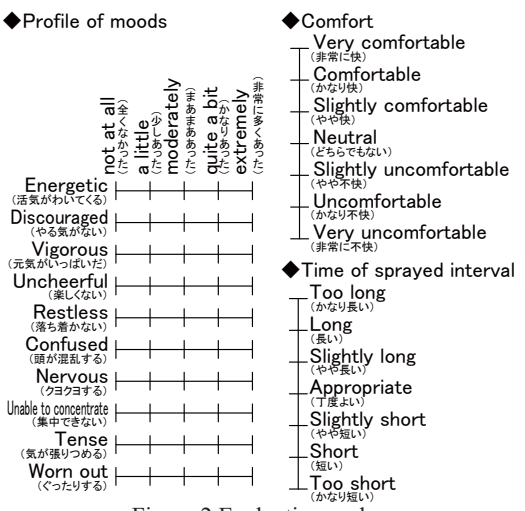


Figure 2 Evaluation scales

2 種の精油について実施したため、実験参加者は異なる日に計 13 条件の実験に参加した。

実験におけるタイムスケジュールを図 1 に示す。本報で扱う作業には d2 テスト²⁾を採用し、事前に 10 回のテストを実施後に、実験内で臭気強度連続評価前後に 2 回ずつの計 36 回実施した。作業前後に精神疲労測定を目的としたフリッカー値 (竹井機器工業 T. K. K. 501c) を連続で 5 回測定し、ストレス量把握のための唾液アミラーゼ値 (ニプロ唾液アミラーゼ

Figure 5 Deviations of P_a and P_e from regression values

回目評価は気流と香り曝露前のため、偏差は当日の実験参加者の体調などの影響により生じたとみなした。条件内の1,2回目の差異を見ると、Ctr条件では有意差はないものの、2回目の方が達成率がわずかに高くミス率がわずかに低かった。Adp条件は、ORでは2回目の方が達成率が高くミス率が低く、いずれも有意差が検出された。CYでは1,2回目の達成率もミス率もほぼ一致した。これに対してLm,Mm,Hmの濃度間比較ではORのMm条件で達成率に有意差がみられたものの、Hm条件は差異がなかったことから効果のある濃度範囲が存在する可能性が示唆された。Ms,Mm,Mlの間隔条件間はORでMm,Ml条件で有意差が見られたがMsには差異が見られず、Adpで有意差が見られたことと合わせて考えると、間欠曝露であれば30s以

上の間隔をあけた方が達成率が高いと言えそうだが、連続曝露でも高いこととの整合性に追加検討の余地がある。CYでは傾向が真逆で、Ms条件のみ有意差が見られたことから、香りの種類の影響も小さくないことが推測される。

3.2 気分評価

図6にOR、図7にCYのPOMS評価を示す。上段が濃度条件間比較、下段が間隔条件間比較で、横軸は条件と臭気強度連続評価前後を示し、縦軸はPOMS評価尺度で示した。まずORの図6では、1回目と2回目の評価の差異としては「気が張りつめる」と「落ち着かない」は全条件で2回目が低い傾向だった。その他、条件によっては1,2回目間に差異が見られた条件もあったが系統的な傾向ではなかった。CYの図7でも

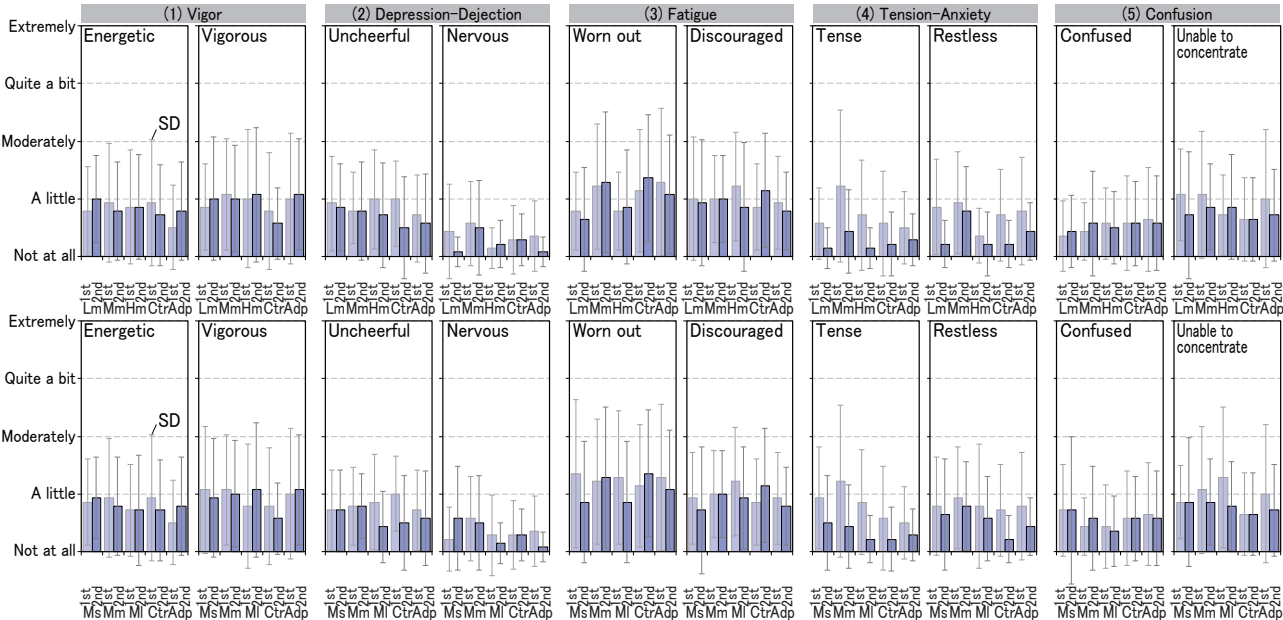


Figure 6 Moods evaluation about OR condition

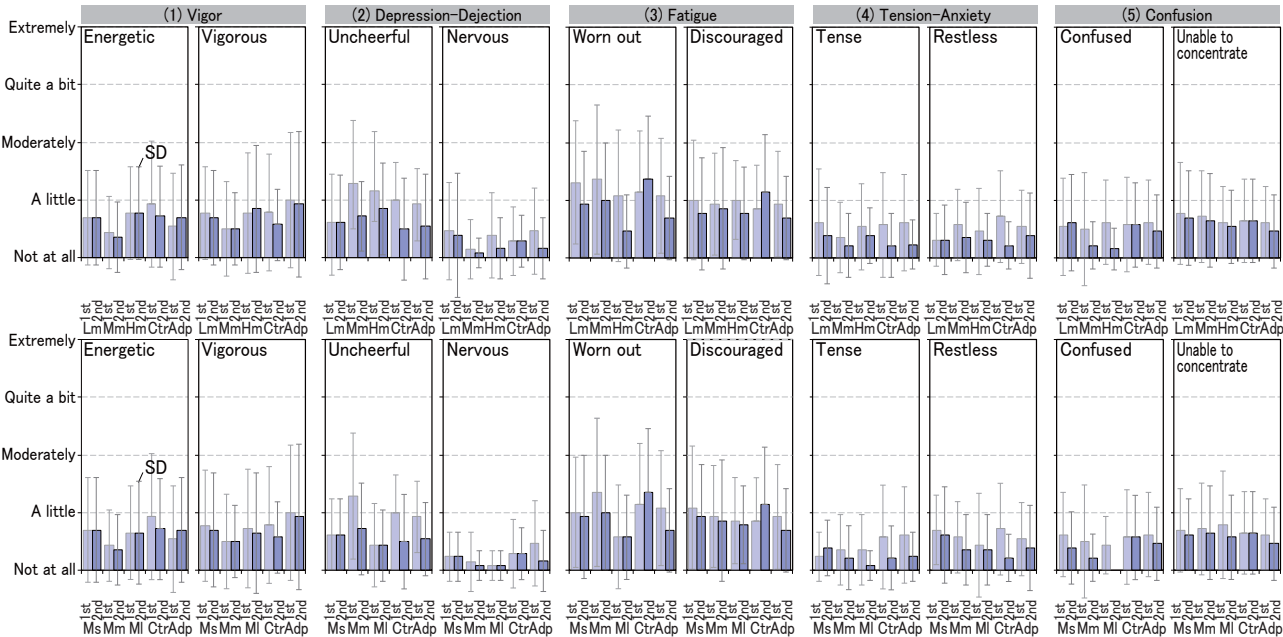


Figure 7 Moods evaluation about CY condition

OR と同様の傾向だった。全体的に平均評価は「少しあった」程度で低めの評価だった。

図8に間延び感評価と総合的快・不快評価を示す。横軸方向に比較する香り濃度や間隔条件を並べ、縦軸が各評価尺度である。間延び感ではMs, Mm, M1の濃度条件についてはORもCYもほぼ条件間に差異は見られなかった。Hm, Mm, Lmの間隔条件については、ORではHmでやや低く短い側で認識されたが、MmとLmは

同程度の評価だった。CYでは右上がりの傾向であり、M1の60秒間隔は長い側の評価だった。

総合的快・不快評価の傾向は間延び感と概ね類似した。間延び感が総合的快・不快評価に大きな相関を持つ可能性と、両者が連続した設問だったことで回答が類似した可能性との二点が理由として考えられた。

3.3 フリッカー値

フリッカー値は、5回分の測定値を上下カットした

3データの平均値を測定値とした。図9にd2テスト後のフリッカー値をテスト前の値で除した比の対数値を示す。横軸は1, 2回目のd2テスト時点を示す。Ctr条件は2回目の方が高く有意差も検出され、精神疲労が低かったと推定される。Adp条件は有意差の見られたORでは反対の傾向、CYではほぼ横ばいだった。Lm~HmとMs~M1条件間比較では、CYのMm条件で有意差はないが2回目の方が低いほかは、横ばいより右上がりの傾向であり、d2作業直前の香り曝露は間欠であること

でAdpよりは状況が改善しやすい可能性が示唆された。

3.4 唾液アミラーゼ値

図10に4回測定した唾液アミラーゼ値を示す。横軸は時系列を、縦軸はd2テスト後をテスト前の唾液アミラーゼ値で除した比の対数値を示す。縦線分は標準偏差である。d2テスト前後では平均値の変動は非常に小さく、有意差はいずれの条件でも見られなかった。OR, CYのAdp条件では、気流と香り曝露後に唾液アミラーゼ値のわずかな上昇が見られ、香りの曝露がストレス上昇に影響した可能性は示唆された。間欠曝露の各条件では、わずかでもd2テスト後の方が高かったのはCYのLm, Hmの2条件のみだった。

4. おわりに

本報では、香りの間欠曝露では、作業成績には香りの種類や曝露間隔が影響する可能性、香りの噴霧濃度や間隔によってはフリッカー値に好影響がある可能性を示した。今後は香りの種類や実験参加者を拡張して検討を進めたい。

参考文献

- 1) 南田高希, 竹村明久, 脇山雄多, 杉本泰世, 七塚輝: 間欠噴霧される香りの評価と作業効率に及ぼす影響(その1) 香りの強さの順応状態評価に関する検討, 第49回近畿支部学術研究発表会論文集, (pdf), 2020
- 2) R. Brickenkamp and E. Zillmer: The d2 Test of Attention, Hogrefe & Huber Publishers, 1998
- 3) 横山和仁, 荒記俊一: 日本版 POMS 手引, 金子書房, 1994

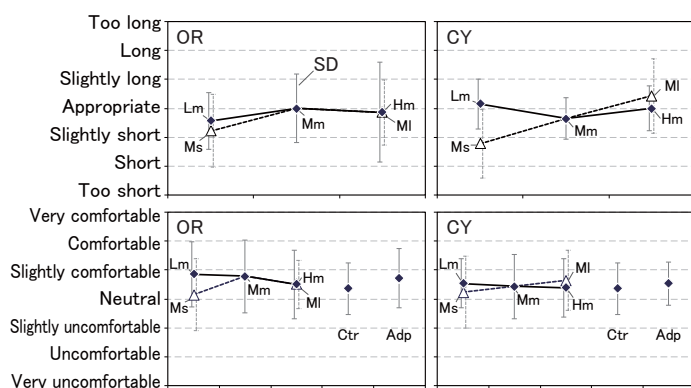


Figure 8 Time of interval and comfort evaluations

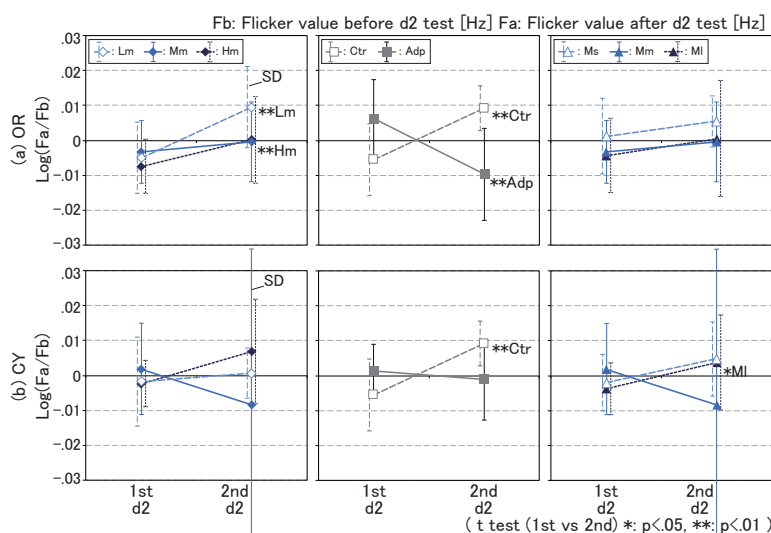


Figure 9 Flicker value before and after d2 tests

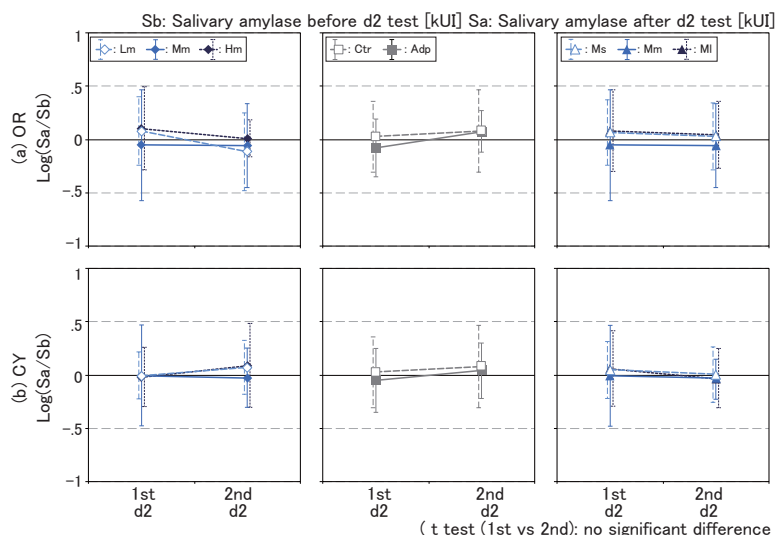


Figure 10 Salivary amylase before and after d2 tests

香り環境下における学習効率に関する研究
（その3）香りの種類が香りの印象評価及び室内環境評価に及ぼす影響

Learning Performance in Odor Environment with Aroma Oils
(Part3) Influence of Aroma Oils on Evaluation of Impression and Indoor Environment

○衛藤 文（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） 平野 雅人（大阪大学）

Aya ETO^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Narae CHOI^{*1}
Akihisa TAKEMURA^{*2} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Masato HIRANO^{*1}

^{*1}Osaka University ^{*2}Setsunan University

Recently, the psychological and the physiological effects of the essential oils have been widely researched in various fields. The purpose of this research is to examine that if odor environment given by essential oils has positive effects on learning performance. In this paper, the influence of rosemary, lemon and peppermint essential oils is investigated using the subjective evaluation. As a result, panels tended to like the odor environment of essential oils, but they feel unacceptable to utilize in lecture room.

1. はじめに

少子高齢化に伴う労働人口の減少により、作業効率のさらなる効率化が求められている。近年では、室内環境を制御しこれらを向上させようという研究が盛んである。本研究では、香りに着目し、学習空間に導入することで学習効率の向上を図る。本報ではパネル実験のうち、主観評価結果について報告する。

2. 実験概要

実験は2019年11月6日～12月20日にかけて本学内の自習室にて実施した。嗅覚テストに合格した18～25歳の本学学生91名（男子21名、女子70名）をパネルとして採用した。パネルは全員非喫煙者であり、前日ににの強い食事は避けるなどの指示をした。

香り条件は香り噴霧を行わず水を噴霧した群（以下、噴霧なし）および既報¹⁾で採用した、記憶力に効果があるとされる²⁾ローズマリー・シネオールに加え、レモン、ペパーミントの計4条件とした。香りの噴霧には圧縮微粒子式アロマディフューザー（生活の木社製、アロマア）を用い、予備検討にて臭気強度

が同程度となるよう運転モード及び使用台数をそれぞれ設定した。実験条件および各条件に参加した人数表をTable 1に示す。

実験に用いた室平面図をFig.1に示す。室内に香りを十分拡散させるため、部屋の各隅にサーキュレーターを配置し、香り噴霧に用いたディフューザーはサーキュレーターの上部に設置した。また、実験中は実験室内に小型CO₂濃度計（T&D社製、TR-76Ui）を水平方向に3台、鉛直方向に3台の計5台設置し、空気が十分攪拌されていることを確認した。室内の換気は強モード（実測値：308m³/h）で行い、空調機（パッケージ型エアコン）の温度を設定することで室内温度の調整を行った。温熱環境による影響がないことを確認するため、室内の側壁中央にアメニティメーター（京都電子工業株式会社製、AM-101）を設置し、各実験時のPMVを測定した。

Table 1 Experimental Condition

		※diffuser mode			
		Strong ... 20s Atomizing + 40s Pause			
		Weak ... 10s Atomizing + 40s Pause			
Condition		Control	Rosemary	Lemon	Peppermint
diffuser mode		Strong×1	Strong×1	Strong×1	Strong×1+Weak×1
Panel Number	female	17	18	18	17
	male	5	6	5	5
	total	22	24	23	22

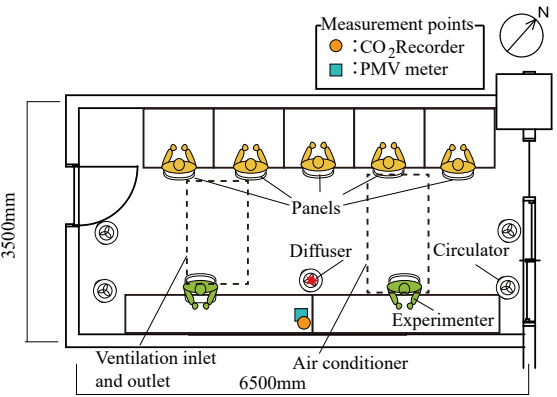


Fig. 1 Plan

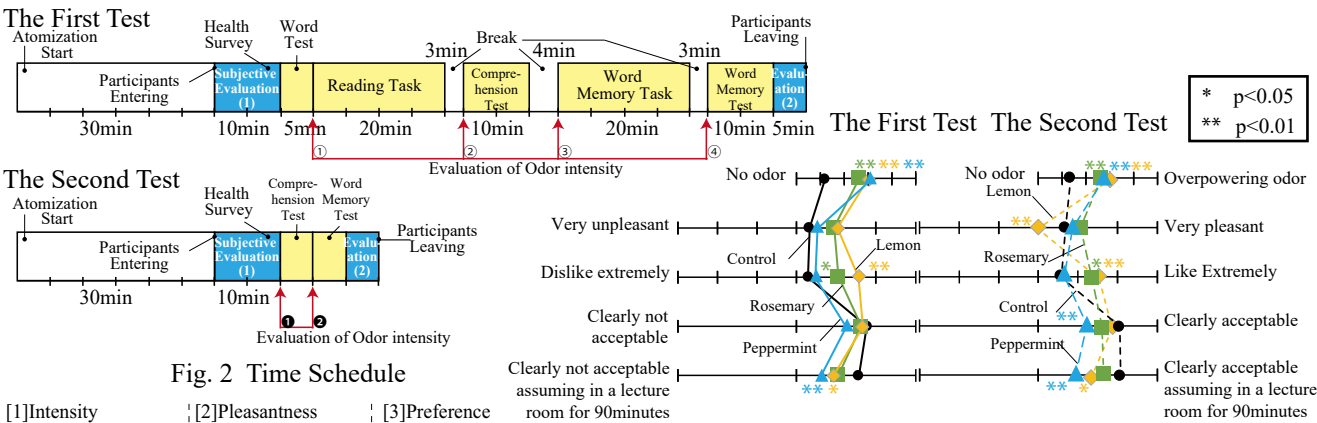


Fig. 2 Time Schedule

Fig. 4 Intensity, Pleasantness, Preference, Acceptability

実験タイムスケジュールを Fig.2 に示す。入室前に予め実験室内に香りの噴霧を開始し、実験に対する注意事項などのインストラクションは入室前に実験室の外部で行った。入室後、室内の香りや印象に関する主観評価及びパネルの体調などに関する調査を行った。主観評価の後、2つの作業及びテストを行ったが、これらの概要及び結果に関しては次報にて報告する。全ての作業終了後、再度主観評価を行い、退室させた。

香りの主観評価項目として、においの強さ、快・不快度、嗜好度、受容度、印象、におい環境の評価、空間に対する印象評価、室内環境の総合評価としての快・不快度、学習意欲を採用した。においの強さについては、2回の主観評価に加えて、各作業およびテスト前に評価させた。受容度については、におい環境自体における受容度と学習空間にあると想定した場合の受容度が異なると予想されたため、これら両方における受容度を尋ねる項目をそれぞれ設けた。におい環境の評価はリフレッシュ・リラックス・集中しやすさの度合いを尋ねた。また、学習意欲に関しては既往研究³⁾を参考にし、最もやる気がある場合を100、ない場合を0としてテスト後でのみ評価させた。各評価項目を Fig.3 に示す。

3. 結果と考察

3.1 においの強さ、快・不快度、嗜好度、受容度評価

初回テストおよび再テストにおける入室直後に行った主観評価における結果を Fig.4 に示す。

各項目について、噴霧なし条件と各香り噴霧条件の平均値を用いて t 検定を行った。香り噴霧を行った3条件において、においの強さは同程度となった。初回テスト、再テストのどちらにおいてもレモン条件では有意に好き側であった。また、ペパーミント、レモン条件は学習空間を想定した際に受け入れられない側の評価となった。

においの強さの主観評価の経時変化を Fig.5 に示す。入室直後から評価を行う毎ににおいの強さが減少し

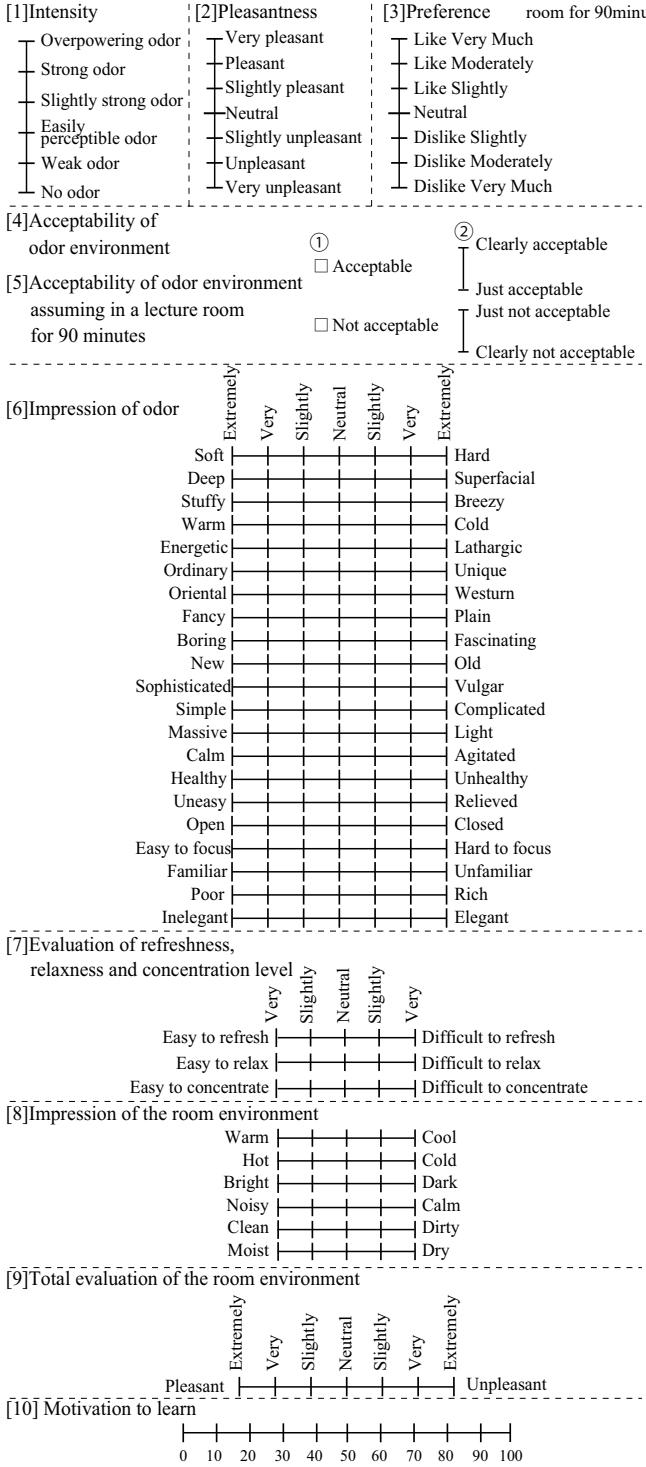


Fig. 3 Subjective Evaluation

ていくことから、順応が確認できる。また、初回テストではテスト後に上昇する傾向がみられたが、再テストではその傾向は見られなかった。初回テストでは作業およびテストの負荷により周囲環境のにおいを感じにくくなったためであると考えられる。一方再テストでは実験に対する慣れにより影響を受けなかった可能性が考えられる。

各香り噴霧3条件における、受容度の結果から算出した非容認率を Fig.6 に示す。いずれの香りに対しても、香りそのものに対する非容認率よりも学習空間を想定した際の非容認率の方が高くなった。また、レモン条件は再テストの入室直後で上昇した。

3.2 においの印象評価

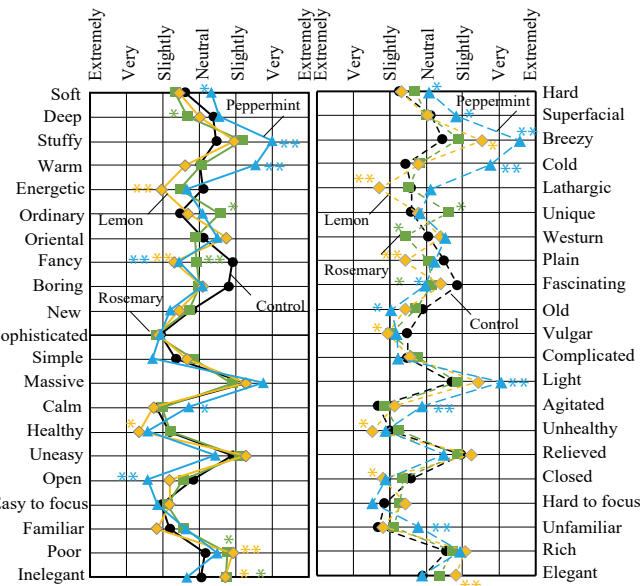
初回テストと再テストでの入室直後におけるおいの印象評価の結果を Fig.7 に示す。各条件において、初回テスト及び再テストでの評価で概ね同様の傾向がみられた。噴霧なしと比較して3条件共にt検定で有意差がみられた項目は「派手な」であり、それ以外については香りによって異なった。他の香り2条件と比較して、ローズマリー条件では「個性的な」、ペパーミント条件ではより「堅い」「さわやかな」「冷たい」「開放的な」側の評価であり、レモン条件では「生き生きした」側の評価でそれぞれ有意差がみられ、これらが香りの特徴を表すと考えられる。

3.3 におい環境の評価

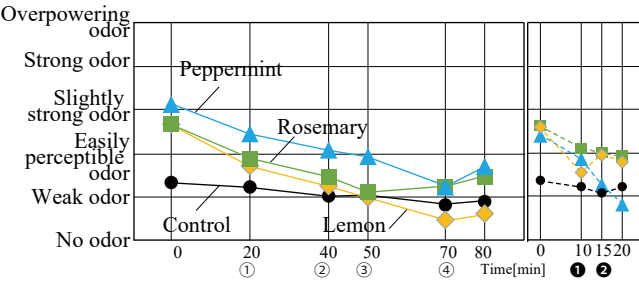
リフレッシュ・リラックス・集中しやすさについての評価結果を Fig.8 に示す。噴霧なしと比較して、リフレッシュしやすさについてはレモン及びペパーミントが有意に高い評価となった。一方でリラックス

しやすさではペパーミントがしにくい側の評価となった。集中しやすさは3条件ともに噴霧なしと比較して同程度の値となった。

また、香り3条件に対して、初回テストの入室直後の主観評価結果を男女別および嗜好性別にプロットしたものを Fig.9,10 に示す。それぞれ2群間でt検定を行った。男女別で評価に違いがみられたものの有意差はなく、嗜好性別では項目により有意差がみられた。これより、性別の違いよりも香りに対する嗜好性の差が評価に与える影響は大きいことがわかる。また Fig.10 よりペパーミント条件では嗜好性に関わらずリフレッシュしやすい側の評価であった。



The First Test The Second Test
Fig. 7 Impression of odor



The First Test The Second Test
Fig. 5 Time variation of odor intensity

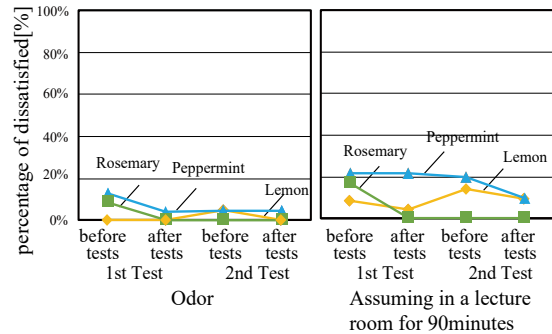
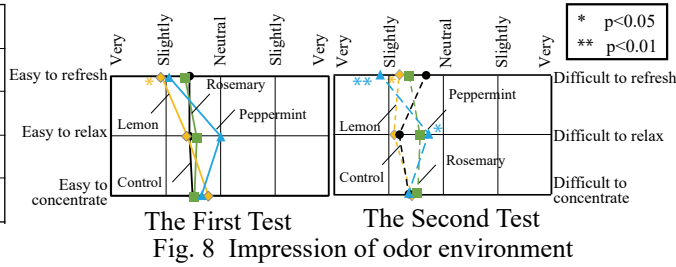


Fig. 6 Percentage of dissatisfied



The First Test The Second Test
Fig. 8 Impression of odor environment

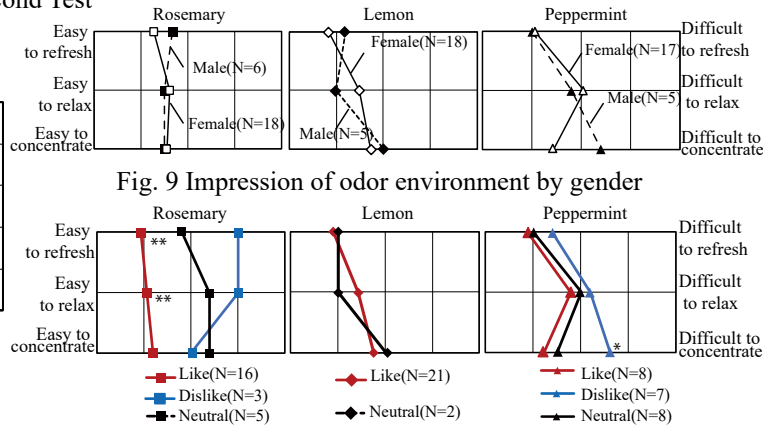


Fig. 9 Impression of odor environment by gender

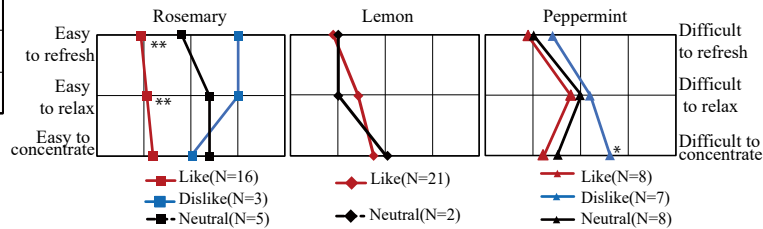
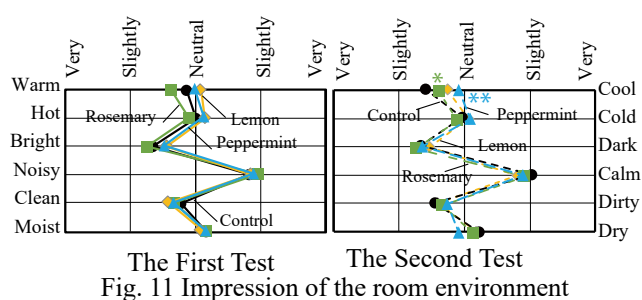


Fig. 10 Impression of odor environment by Preference



The First Test The Second Test
Fig. 11 Impression of the room environment

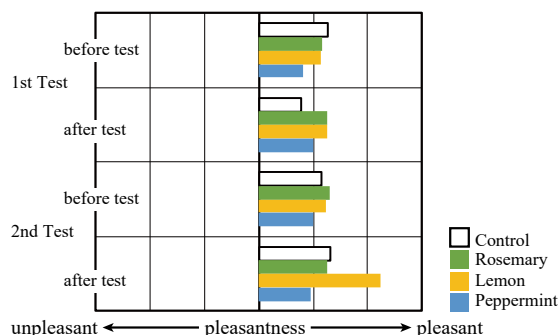


Fig. 12 Total evaluation of the room environment

3. 4 室内環境の評価

評価結果を Fig.10 に示す。各香り条件において、噴霧なし条件と概ね同様の評価であった。再テストにおける、「暖かい - 涼しい」の項目でのみ香りがある条件で差がみられたものの、全体としては香りが室内環境の印象に与える影響は小さかった。

3. 5 室内環境の総合評価

室内環境を総合的に快・不快7段階で評価した平均値を Fig.12 に示す。全体的に快側の評価であり、全体の傾向としてはペパーミントが他3条件と比較して低い傾向であった。また、同じ評価指標を用いているのにおいに対する快・不快度の評価値との関連を見ると (Fig.13)、いずれも正の相関がみられたが、ペパーミントの R^2 値は他と比較すると小さくなった。

3. 6 学習意欲

初回テスト及び再テストでの、各テスト後における学習意欲の平均値を Fig.14 に示す。香り噴霧を行った3条件に関してはパネルを嗜好性別に分けた結果も併記した。なお、レモン条件については嫌いと回答したパネルがいなかった。全体の平均値については、香りの有無で大きな差は見られず、70ポイント前後であった。ローズマリー及びペパーミントについて、嗜好性別で比較をすると、嗜好性の違いで3~10ポイントの差がみられ、嫌い群の方が高い値を示した項目があるが、いずれも有意差は見られず、香りによる影響は見られなかった。

4. おわりに

本報では、パネル実験を行い、香り噴霧が学習効率に及ぼす影響および、学生の学習空間における香りへの受容性について検討を行った。今回用いたローズマリー、レモン、ペパーミントに関しては、いず

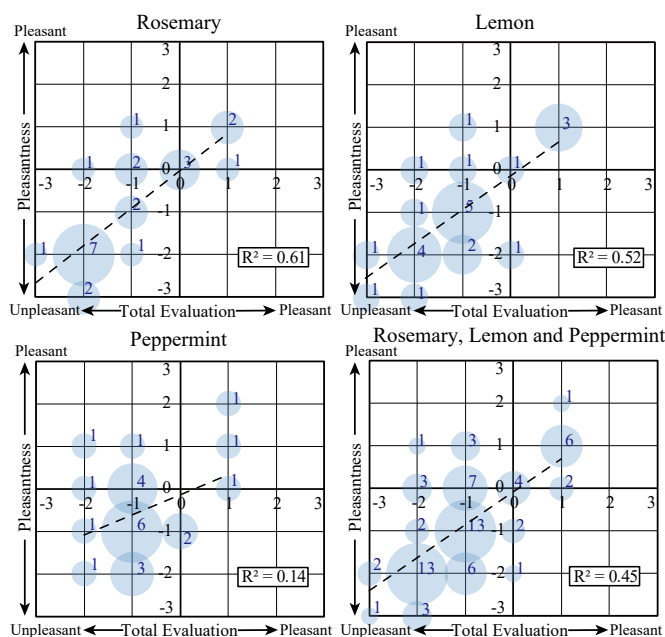


Fig. 13 the Relationship between
Total Evaluation and pleasantness

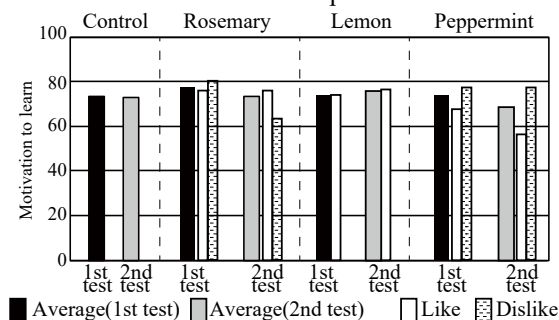


Fig. 14 Motivation to learn

れも好き・快側の評価であるが、受容度に関しては噴霧なし条件より低い結果となった。香りに対する評価においては、男女差の影響よりも香りに対する嗜好性の方が影響が大きいと考えられる。また、香りは室内環境に対する評価及び学習意欲の主観評価へ及ぼす影響は小さいことが分かった。

なお、本実験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】

本研究を遂行するにあたり、数々の便宜をお図りいただいた本学外国語学部の関係者の皆様に深謝いたします。また、本研究はダイキン工業(株)との共同研究であり、関係者各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 衛藤, 山中, 崔, 竹村, 小林: 香り環境下における学習効率に関する研究 (その2) ローズマリーの印象評価と学習効率に及ぼす影響, 令和元年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 第7巻, pp.13-17, 2019.9
- 2) Moss, Cook, Wesnes, Duckett: AROMAS OF ROSEMARY AND LAVENDER ESSENTIAL OILS DIFFERENTIALLY AFFECT COGNITION AND MOOD IN HEALTHY ADULTS, International Journal of Neuroscience Vol.113, pp. 15-38, 2003.1
- 3) 亀田, 村上, 伊藤: 室内環境質が学習意欲ならびに学習効率に与える影響 学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究 (その3), 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.642, pp.943-949, 2009.8

香り環境下における学習効率に関する研究
(その4) 香りの種類が学習効率に及ぼす影響
Learning Performance in Odor Environment with Aroma Oils
(Part4) Influence of Aroma Oils on Learning Performance

○平野 雅人 (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) 衛藤 文 (大阪大学)

Masato HIRANO*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Narae CHOI*¹
Akihisa TAKEMURA*² Tomohiro KOBAYASHI*¹ Aya ETO*¹

*¹Osaka University *²Setsunan University

The purpose of this research is to examine if the odor environment of essential oils has a positive influence on learning performance. Experiments were carried out with ninety-one participants using three kinds of essential oils with different preference: rosemary, lemon and peppermint. In order to assess the learning performance, the reading task and word memory task were utilized. The score of each task was then analyzed considering the difference in individual ability. Additionally, the relationship between the subjective evaluation and learning performance was also investigated.

1. はじめに

近年では空気質の向上や省エネルギー性に加えて、室内の快適性や知的生産性の向上を目的とした研究が盛んに行われている。本研究では、記憶力や学習効率に影響を及ぼすとされている「香り」を空調に導入した学習空間の可能性についての検討を行う。前報¹⁾ではパネル実験により、香りが主観評価に及ぼす影響について示した。本報では、学習効率テストの結果より香りが学習効率に及ぼす影響について考察を行う。また、主観評価との関係性についても検討する。

2. 実験概要

実験手法については前報¹⁾に示す通りである。学習課題における個人の能力差の影響を少なくするためにパネルは全員本学外国語学部生とした。また、実験への意欲的な参加を促すために、実験開始時に成績上位1割である9名には賞品がある旨を伝えた。

初めに行ったテスト(以下、初回テスト)では短期記憶を測ることを目的としたが、香り環境における暗記効率と記憶定着に関する影響を調べるために、約3週間後に同じ香り条件で再テストを行った。また、再テストを行った後、初回テスト成績の基準化を図るために全パネルに対して香りの噴霧を行わない状態で初回テストに似た課題及びテスト(以下、基準テスト)を行った。実験条件及び人数表をTable1に示す。基準テストでは、噴霧したにおいの影響を防ぐために、実験の途中で小教室から会議室へ移動させた。使用した小教室及び会議室の平面図をFig.1,2に示す。2回の実験のタイムスケジュールをFig.3に示す。

Table 1 Number of Panels and Intervals of Two Experiments

	First Experiment			Second Experiment			Elapsed Days	
	Male	Female	Total	Male	Female	Total	Average	Min/Max
Control Group	17	5	22	14	5	19	21.9	21/30
Rosemary Group	18	6	24	17	6	23	22.9	21/35
Lemon Group	18	5	23	17	4	21	21.0	20/22
Peppermint Group	17	5	22	14	5	19	21.7	21/28

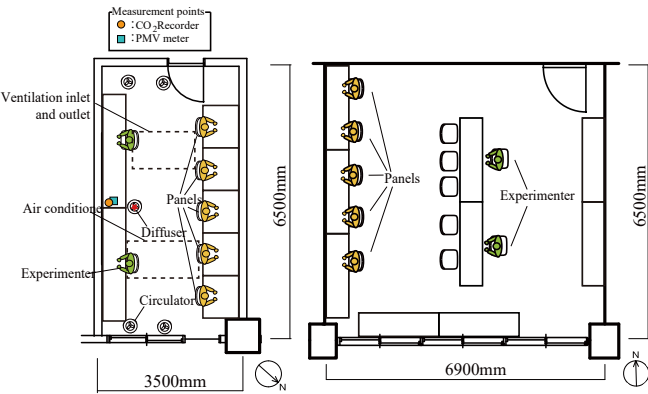


Fig.1 Plan of Classroom Fig.2 Plan of Conference room

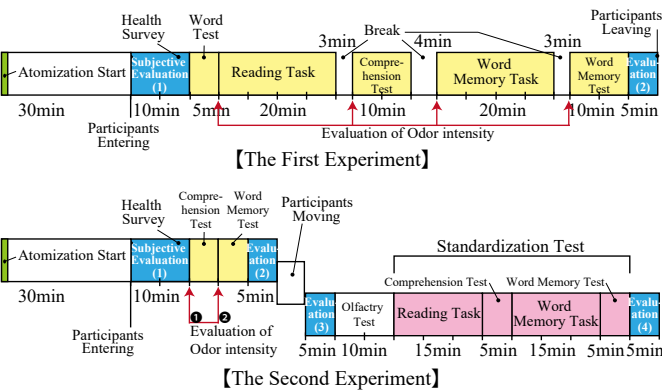


Fig.3 Time Schedule of Two Experiments

学習効率の評価として、既往研究²⁾を参考に読書課題と単語暗記課題の2種類の課題を用いた。

2.1 初回テスト

読書課題については、書籍(「独楽の科学 回転する物体はなぜ倒れないのか」山崎詩郎著、講談社ブルーバックス)の一部で、制限時間内の読み切れない量の文章を配布し20分間読ませた後、読んだ内容に関する理解度テスト(計14問)を行った。偶然による正解を防ぐために、5つの選択肢のうち2つ回答させ、完答時のみを正解とした。なお、読書速度には個人差があるため、作業終了時までの読了位置を記録させて文字数をカウントした。未読の部分の問う設問に対しては、回答していても採点対象外とした。

単語暗記課題については、既報³⁾より、全員が判読できるアルファベットで表記され、学習経験のほとんどないと予想されるエスペラント語を採用した。知識の個人差による影響を考慮するために、作業前に同様の単語テストを行い、作業前から正解した単語は暗記対象単語数から除いた。暗記する単語とともに会話文及び日本語訳を提示し、20分間で暗記を行った後、和訳の書き取りテスト(69単語)を行った。なお、実験時には提示した言語が何であるかは知らせず、実験後には課題を用いた言語が何であるかをアンケートで尋ねた。エスペラント語を知っていたパネルは、成績が高いことと各香り条件で学習経験者の人数が異なり結果に影響があると考えられたため除外した。

2.2 再テスト

初回テストと同様の問題を用いて再テストを行った。再テストの実施について事前に周知は行っていない。テスト正答率と暗記保持率により成績の評価を行う。暗記保持率は、初回テストの正答率に対する再テストの正答率の割合として算出する。

2.3 基準テスト

基準テストでは、初回テストと同様の手法で読書課題及び単語暗記課題を行った。

読書課題については、初回テストで使用了書籍の新たな部分を提示して、15分間読書をさせた後、内容に対する理解度テスト(計10問)を行った。テスト正答率の算出については初回テストと同様である。

単語暗記テストに関しても15分間で暗記した後、和訳の書き取りテストを行った。初回テストでは満点に近いパネルが多かったため、暗記する時間を短くした一方で暗記する単語量を増やした。全77単語に対する正答数の割合を正答率とした。

3 成績の補正

本実験では「個人の能力による影響」を考慮すべく、基準テストを実施し、以下の手法により成績の補正を行った。

3.1 平均値の補正

基準テストでは、全パネルが同じにおい条件で同じ作業を行っている。しかし、Fig.3に示す基準テストの結果から、各香り条件の基準テストの平均値には差がみられ、テスト成績は個人の能力による影響を受けていると推測できる。この影響を除くために、式1により補正を行った。

$$\bar{y}_a' = \bar{y}_a \times \frac{\bar{x}}{\bar{x}_a} \quad \dots(1)$$

\bar{y}_a' : 補正後の a 群の平均値

\bar{y}_a : a 群の初回テストの平均値

\bar{x}_a : a 群の基準テストの平均値

\bar{x} : 全パネルの基準テストの平均値

3.2 ばらつきの補正

初回テストと基準テストでは、Fig.4の内容理解度テストにおけるヒストグラムの通り、成績の分布の違いがみられた。これは、初回テストと基準テストのテストの難易度の違いによる影響だと考えられる。個人の成績を基準化の際、初回テストと基準テストの難易度の違いによるばらつきの差を考慮するために、補正後のそれぞれのパネルの成績を y_{ai}' とし、式2により補正を行った。

$$y_{ai}' = (y_{ai} - \bar{y}_a) \times \frac{\sigma_m}{\sigma_{ya}} + \bar{y}_a' \quad \dots(2)$$

y_{ai}' : 補正後の a 群のパネル i の成績

y_{ai} : a 群のパネル i の初回テストの成績

σ_m : a 群の基準テストの標準偏差

σ_{ya} : a 群の初回テストの標準偏差

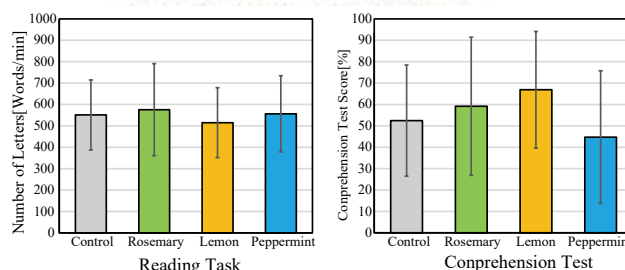


Fig.3 Standardization Test Score

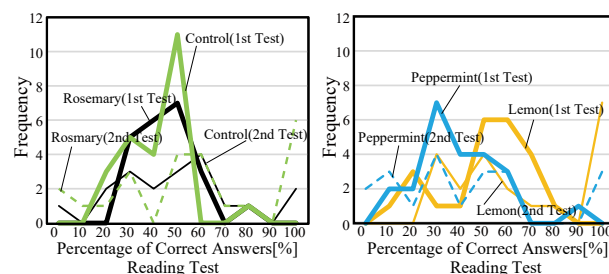


Fig.4 Frequency Distribution of Reading Test

4 結果・考察

4.1 初回テスト結果

補正を行う上で、基準テストに参加していないパネルについては成績の基準化を行うことができなかったため、3週間後の実験に参加していないパネルは除いて成績の分析を行った。

読書課題における各条件の読了文字数の平均と、内容理解度テストの正答率の平均を Fig.5,6 に示す。読了文字数については、ローズマリーとペパーミントの条件では補正前の平均に比べ補正後の平均が低く、レモンの条件では補正後が高くなっており、補正前の成績は個人能力の差の影響を受けていたことが考えられる。各条件の補正後読了文字数の平均はペパーミントの条件がわずかに高かったが、香り噴霧なし条件と各香り条件においてt検定を行った結果、有意差は見られなかった。内容理解度テストでは、噴霧無し条件とペパーミントが同程度の成績だったことから、ペパーミントでは香りの噴霧がない場合と比べて、同程度の理解度で多く読めたという結果が得られた。

単語暗記課題について、各条件の正答率の平均を Fig.7 に示す。補正の前後で成績はあまり変わらず、ばらつきは小さくなった。全体的に香りあり条件の方噴霧無し条件より平均正答率が高く、レモン条件の平均が最も高かった。しかし、単語テストでも、噴霧無し条件と香りを噴霧した3条件においてt検定を行ったが、どの条件でも有意差は見られなかった。

4.2 再テスト結果

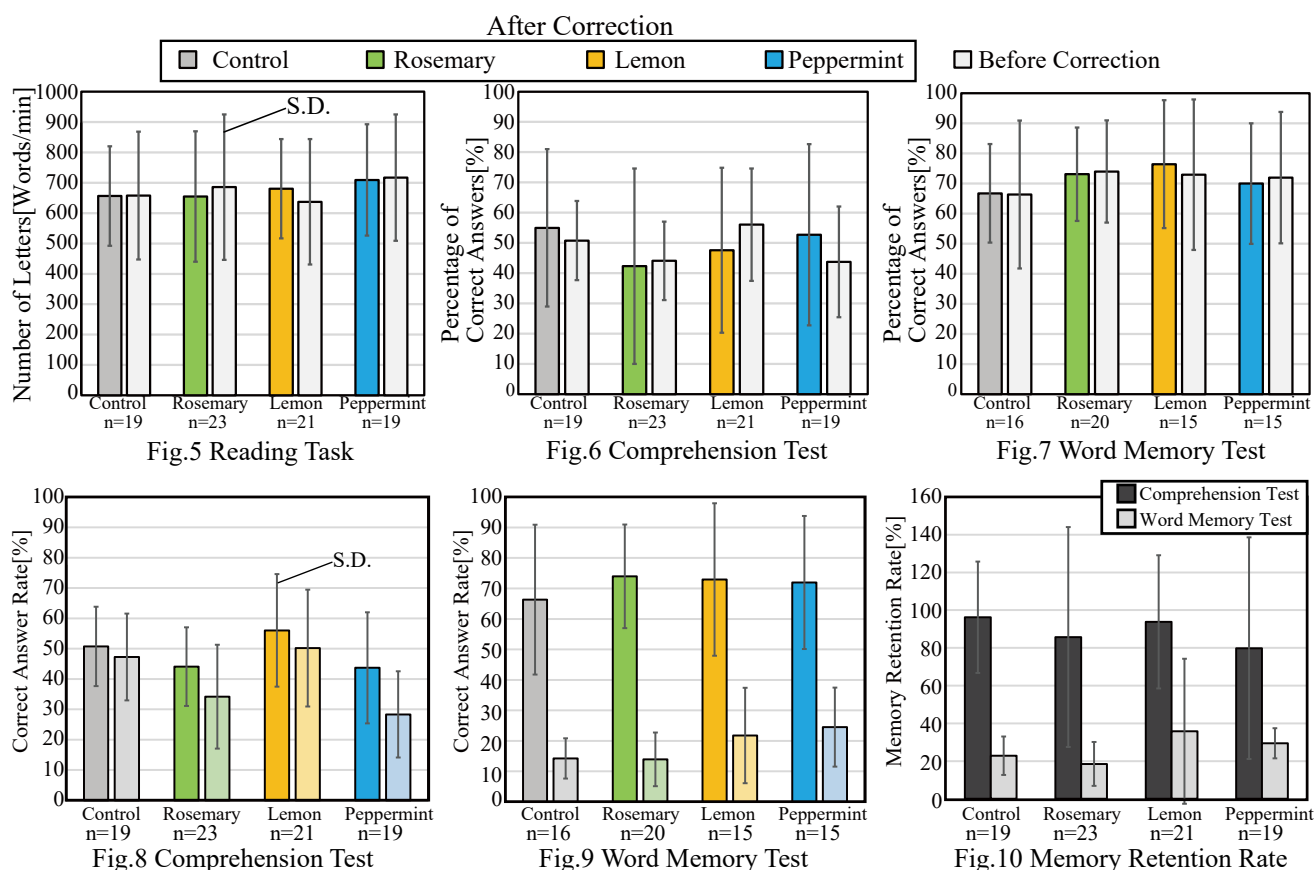
再テストの内容理解度テスト及び単語暗記テストの正答率、および比較のために初回テストの結果の成績を Fig.8,9 に示す。また、再テストは長期記憶のテストであり、基準テストにより補正することができないため、初回テストの結果についても補正前の結

果を示す。Fig.8 より、ペパーミントでは他の条件よりテスト正答率の平均が低かった。各条件で初回テストの正答率に合わせて下がっていることがわかる。また、暗記保持率を示した Fig.10 より、噴霧無し条件が最も良かった。

単語暗記テストでは、レモンとペパーミント条件で正答率が噴霧無し条件とローズマリー条件に比べわずかに高い結果となった。Fig.10 より、レモン条件の暗記保持率が高い結果が高く、ローズマリー条件では内容理解度テストと単語暗記テストの両方とも暗記保持率が低い結果となった。しかし、再テストの結果については、個人能力差の影響が考慮できていないため、今後検討が必要である。

4.3 主観評価が学習効率に及ぼす影響

噴霧した香りにおける主観評価が学習効率に影響を及ぼす可能性があると考えられたため、前報で報告した入室直後のにおい環境に対する快・不快度とテスト成績の関係を調べた。においに対する快・不快度は嗜好度とも相関があることが知られている。Fig.11 より、全体的に快側の評価になるほど成績も上昇する傾向が見られた。一方で、ペパーミントの読了文字数に関しては、快側の評価が上がるほど読了文字数が減少した。この傾向は嗜好度とテスト成績の相関をとった場合でも見られた。また、前報よりペパーミントではリラックス度が他の条件に比べて低かった。従って、ペパーミント条件では集中が保たれやすかつ



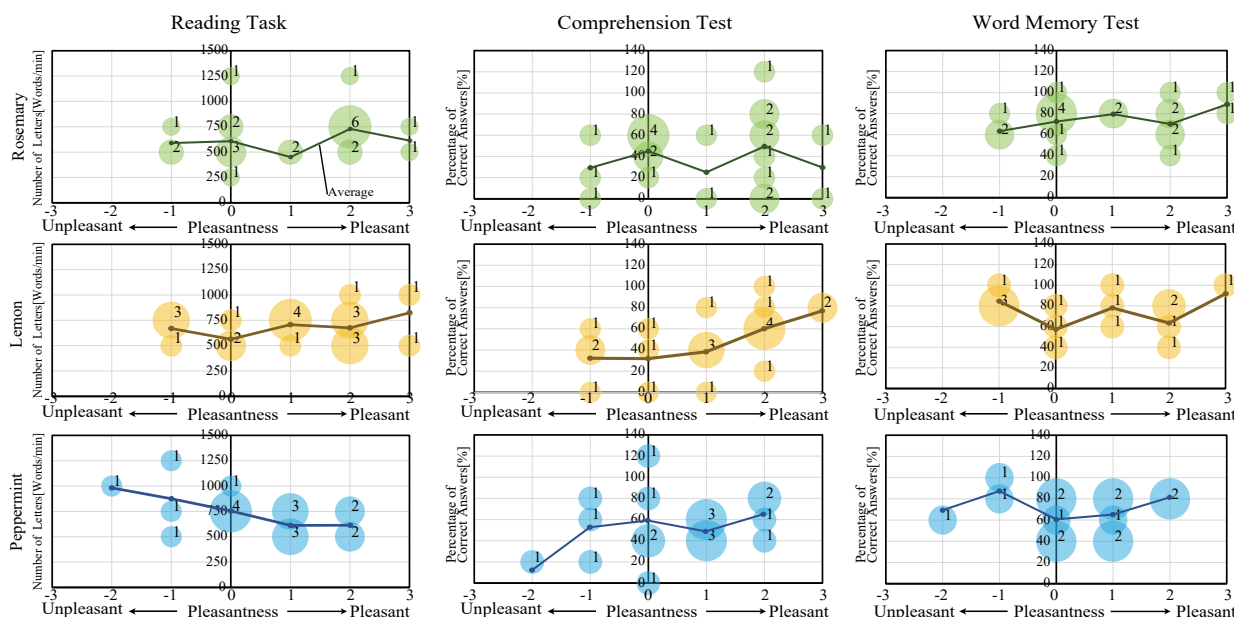


Fig.11 The Relationship between Pleasantness and Learning Performance

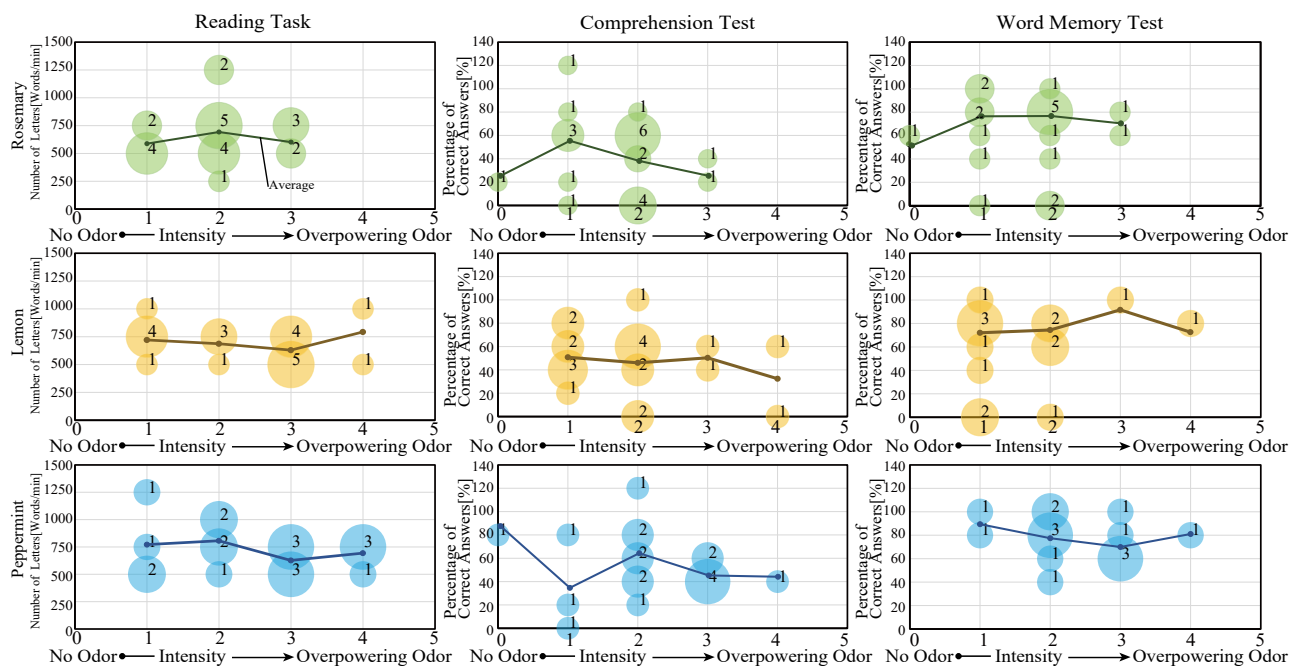


Fig.12 The Relationship between Odor Intensity and Learning Performance

た可能性が考えられる。また、作業およびテストの前に評価させた臭気強度とテスト成績の相関を Fig.12 に示す。臭気強度とテスト成績に相関が見られなかったため、臭気強度の違いが成績に及ぼす影響は小さいということが考えられる。

5. おわりに

本報では、パネル実験を行い、噴霧した嗜好度の異なる香りが学習効率に及ぼす影響について検討を行った。香りの違いによって学習効率に差はあったものの、有意差はみられず個人差による影響が大きいことがわかった。

なお、本実験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】

本研究を遂行するにあたり、数々の便宜をお図りいただいた本学外国語学部の関係者の皆様に深謝いたします。本研究は、ダイキン工業(株)との共同研究であり、関係者各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 衛藤、山中、崔、竹村、小林：香り環境下における学習効率に関する研究(その3) 香りの種類が香りの印象評価及び室内環境評価に及ぼす影響、令和元年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2020.3 掲載予定
- 2) 青木、小久保、辻村、山田：騒音下における作業の違いによる妨害間に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.833-834, 2005.9
- 3) 衛藤、山中、崔、竹村、小林：香り環境下における学習効率に関する研究(その2) ローズマリーの印象評価と学習パフォーマンスへの影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、S-05、2019.9. 第7巻 pp.13-17