

Impinging Jet Ventilation 方式の室内環境予測に関する研究  
 (第5報) 実大実験による置換換気・IJV の暖房条件下での熱環境及び換気効率評価  
**Prediction of Indoor Environment for Impinging Jet Ventilation System**  
**(Part 5) Experimental Investigation of Thermal Environment and Ventilation Effectiveness**  
**under Heating Operation with DV and IJV**

○山澤 春菜 (大阪大学)      小林 知広 (大阪大学)  
 山中 俊夫 (大阪大学)      崔 ナレ (大阪大学)

Haruna YAMASAWA\*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Narae CHOI\*<sup>1</sup>  
 \*<sup>1</sup> Osaka University

The impinging jet ventilation (IJV) system is considered to be adaptable for both cooling and heating operation, while displacement ventilation (DV) is considered to be only limited to cooling operation. In order to accumulate the fundamental feature of IJV and DV under heating operation, and investigated their applicability for heating, full-scale experiments were conducted in a climate chamber. Different ventilation systems and supply air conditions were investigated along with indoor temperature distribution, and ventilation effectiveness. For DV, the temperature and contaminant distribution differed significantly depending on the supply conditions, while that of IJV remained almost the same.

はじめに

冷房時、低温低速給気により温度・濃度成層を形成して居住域における高い換気効率を実現する置換換気方式 (Displacement Ventilation System : 以下、DV) は、給気運動量の小ささから暖房への適用が難しいとされる。そこで、冷房運転において DV 同様の高い換気効率を有し DV より大運動量で床面に対して給気し、床面衝突後に床に沿って給気する Impinging Jet Ventilation System (以下、IJV) が考案された<sup>1)</sup>。IJV は暖房に適用可能とされるが、研究例は未だ少ない<sup>2)</sup>。既報<sup>3)</sup>の冷房実験では小流量条件で近い温度・濃度性状を呈した IJV と DV について、本報では暖房運転への適用を実大実験により検討する。

1. 実験条件

2020年7月～8月にかけて大阪大学大実験棟内の人工気候室にて実大実験を行なった。人工気候室概要を Fig. 1 に示す。壁面の熱貫流率 (以下、U 値) が 0.3 W/m<sup>2</sup>·K 程度で断熱された人工気候室を、U 値が 4.6 W/m<sup>2</sup>·K 程度の壁 (以下、OC 壁) で仕切り、測定対象室 (内寸 5.00×5.45×2.77 m) と仮想外気室 (以下、OC) に分けた。この OC を冷却し、OC 壁を介して測定対象室の熱を奪い冬期の暖房負荷を模擬した。OC 壁及び OC の対面には下端面が床から 0.6 m の位置となるよう直径 0.15 m の IJV 給気装置が、天井の概ね中央には排気口が設置された。DV 条件の実験を行う際は、既報<sup>3)</sup> 同様 IJV 給気装

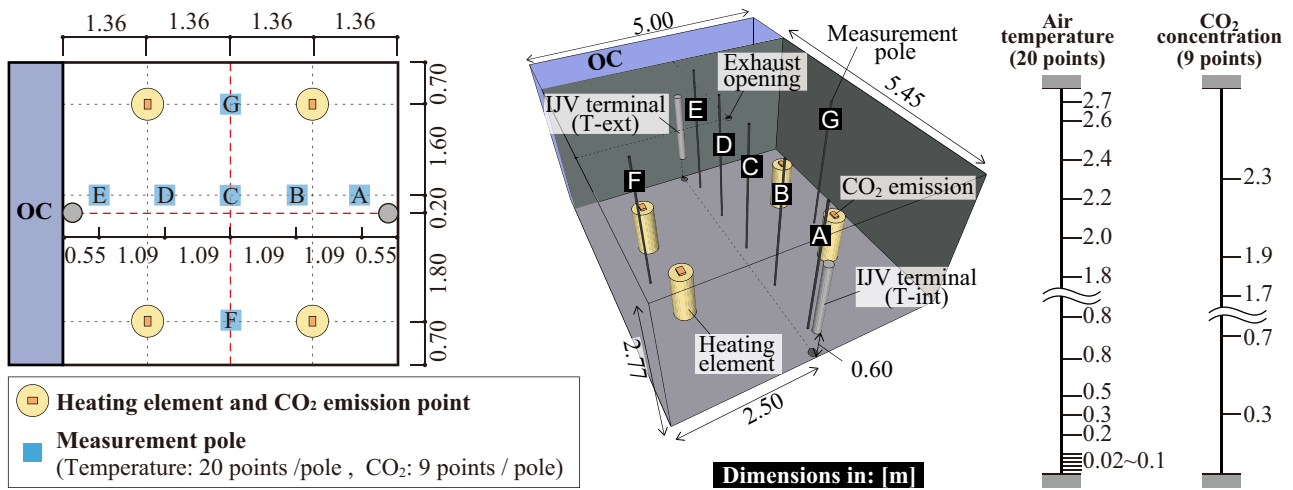


Fig. 1: Plan of climate chamber and measurement point

- 記号 -

$Ar_{room}$ : アルキメデス数 [-]	$C_s$ : 給気濃度 [ppm]	$T_h$ : 高さ $h$ における温度 [°C]	$\beta$ : 体膨張率 [1/K]
$C_e$ : 排気濃度 [ppm]	$g$ : 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	$T_{OC}$ : OC の空気温度 [°C]	$\Delta T_{e-0.1}$ : 室鉛直温度差 [°C]
$C_h$ : 高さ $h$ での濃度 [ppm]	$H_c$ : 部屋の高さ [m]	$T_s$ : 給気温度 [°C]	$\Delta T_{0.2,1.1-e}$ : 座位時の居住域平均温度 [°C]
$C_n$ : 規準化居住域濃度 [-]	$T_e$ : 排気温度 [°C]	$v_s$ : 給気速度 [m/s]	$\Delta T_{1.1,0.1}$ : 座位時居住域鉛直温度差 [°C]

置の下に Fig. 2 に示す DV 給気口を接続した。給気装置の吹出し面積は、IJV で  $0.0177 \text{ m}^2$ 、DV で  $0.467 \text{ m}^2$  である。室内熱負荷として座位人体を模擬した円柱型発熱体 (発熱量  $50 \text{ W}$ 、直径  $0.4 \text{ m}$ 、高さ  $1.0 \text{ m}$ ) を 4 台設置し、人体からの汚染質発生を想定して発熱体上部から各  $30 \text{ L/h}$  で  $\text{CO}_2$  を発生させた。OC 壁以外の壁面を完全断熱とみなし、OC からの暖房負荷は  $600 \text{ W}$ 、室内熱発生は 4 つのシリンダーから計  $200 \text{ W}$ 、換気による熱供給は、完全混合を仮定すると  $400 \text{ W}$  となるよう設定した。

給気装置は、OC 壁側 (Exterior 側) 給気装置 (T-ext) のみを使う場合と他方 (Interior 側) の装置 (T-int) のみを使う場合を設定した。給気位置に加え、Table 1 に示す換気システム、給気流量・温度の組み合わせの 3 項目で合計 12 条件の実験を行なった。このとき、空調装置の能力特性のため、OC 温度を冬季外気温まで低下させることができなかつた。そこで、OC 空気との温度差による温度評価及び気流性状には大きな影響を与えないとして、全体的に温度を高温度側へ平行移動して実験を行なった。そのため、Table 1 に OC 温度基準の給気温度も併記した。

測定点を Fig. 1 に示す。室中央断面における鉛直分布を測定するために合計 7 本のポールを設置し、そのポールに沿って鉛直方向に空気温度は 20 点、 $\text{CO}_2$  濃度は 9 点で測定した。給気装置を含む室内中央断面については、噴流の発達を妨げないよう、中央よりも  $0.2 \text{ m}$  だけ OC 壁に向かって右側にポールを並行移動させた。

## 2. 評価指標の定義

室内温度・濃度環境の評価指標を (Eq. 1) ~ (Eq. 4) に、給気条件を表現する無次元数を (Eq. 5) に定義する。

- 1) 座位時の居住域平均温度 :  $\Delta T_{Oz,1.1-e}$  [°C]

IJV と DV は居住域内に直接給気するため、座位時居住域高さを  $1.1 \text{ m}$ 、基準を排気温度として定義した。

$$\Delta T_{Oz,1.1-e} = \frac{1}{1.1} \int_0^{1.1} T_h dh - T_e \quad (\text{Eq. 1})$$

- 2) 座位時上下温度差 :  $\Delta T_{1.1-0.1}$  [°C]

各種規準<sup>4,5)</sup>において、足元と頭高さにおける上下温度差は、 $3 \text{ °C}$  を越えるべきではないとされているため、座位時の頭と足元の温度差として定義した。

$$\Delta T_{1.1-0.1} = T_{1.1} - T_{0.1} \quad (\text{Eq. 2})$$

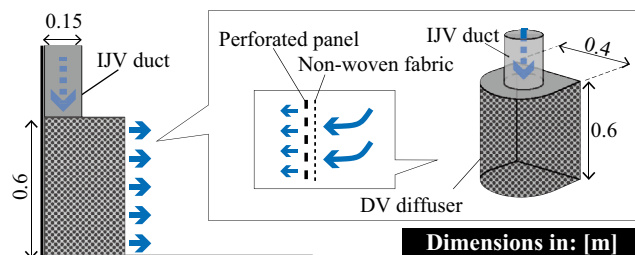


Fig. 2: Supply terminal of DV

- 3) 室鉛直温度差 :  $\Delta T_{e-0.1}$  [°C]

室全体での温度成層の強さを確認するため、 $\Delta T_{e-0.1}$  を定義した。(Eq. 2)において快適性評価のための鉛直温度差が定義されているのに対し、(Eq. 3)は物理現象としての鉛直温度性状を評価するために定義した。

$$\Delta T_{e-0.1} = T_e - T_{0.1} \quad (\text{Eq. 3})$$

- 4) 規準化居住域濃度 :  $C_n$  [-]

居住域における換気効率の指標として、SHASE-S 102<sup>9)</sup>において規準化居住域濃度  $C_n$  が定義されている。

$$C_n = \frac{\frac{1}{1.8} \int_0^{1.8} C_h dh - C_s}{C_e - C_s} \quad (\text{Eq. 4})$$

- 5) 室アルキメデス数 :  $Ar_{room}$  [-]

既報<sup>3)</sup>において、層状換気方式では給気条件が重要なパラメータとなることが示されている。そこで、今回の暖房運転においても給気条件を含む  $Ar_{room}$  を、給気条件の特徴を表すために定義した。

$$Ar_{room} = \frac{g\beta H_c (T_s - T_e)}{v_s} \quad (\text{Eq. 5})$$

## 3. 結果と考察

### 3.1 温度・濃度測定結果

本報で流量が最小・最大の条件について、中心断面における温度・濃度コンターを Fig. 3 ~ 4 に示す。温度は OC 空気温からの差で、濃度は基準化濃度  $C^*$  で示した。

$$C^* = \frac{C - C_s}{C_e - C_s} \quad (\text{Eq. 6})$$

DV 条件において、全ての条件で温度・濃度ともに鉛直方向に分布が生じたが、大流量条件では小流量条件に比べて分布が比較的均一となった。また、T-int を用いた場合で水平方向に温度分布が生じた。これは、冷却壁面と Interior 側壁面との距離が遠く、DV の給気運動量が小さいため、冷却壁面からの下降冷気流を T-int からの給気暖気が処理しきれなかつたためと考えられる。

IJV 条件では全条件で明確な鉛直温度分布は生じず T-int を用いたとき水平に温度分布が生じた。これは DV 同様、冷却壁面と T-int が離れていたためと考えられる。汚染質は全条件で概ね完全混合され、値に注目すると、概ね T-ext で  $C^* \leq 1.0$ 、T-int で  $C^* \geq 1.0$  となった。

Table 1: Experimental conditions

Case	Supply flow rate and temperature ( $T_s, T_s - T_{oc}$ )			Supply velocity [m/s]
	120 m <sup>3</sup> /h 41.0, 20.8 °C	240 m <sup>3</sup> /h 36.0, 15.8 °C	360 m <sup>3</sup> /h 34.3, 14.1 °C	
IJV-120	X			1.96
IJV-240		X		2.36
IJV-360			X	2.95
DV-120	X			0.37
DV-240		X		0.44
DV-360			X	0.55

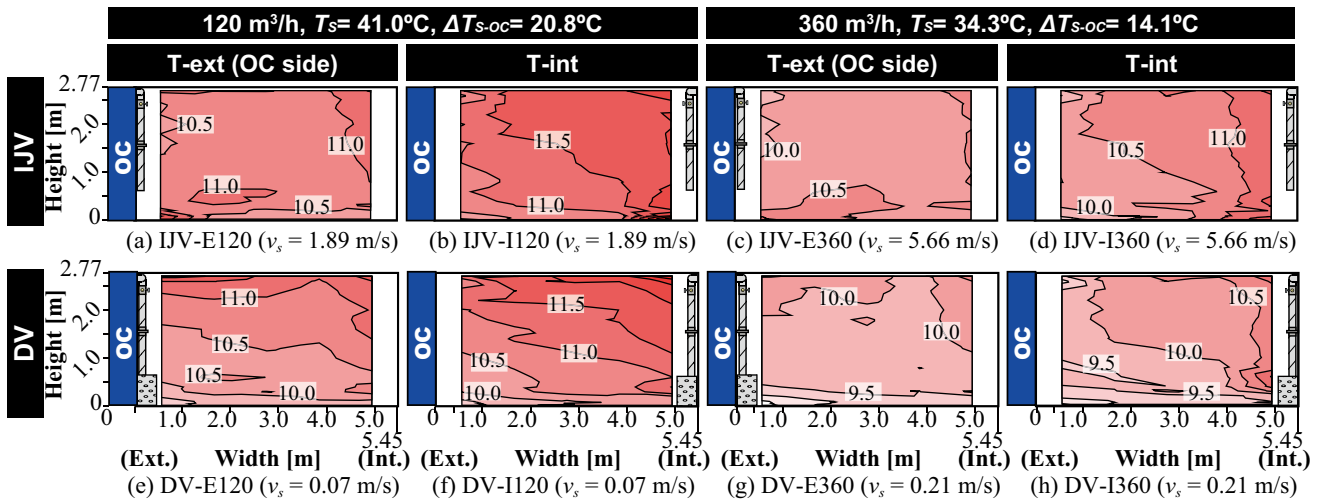


Fig. 3: Distributions of air temperature at North-South cross section

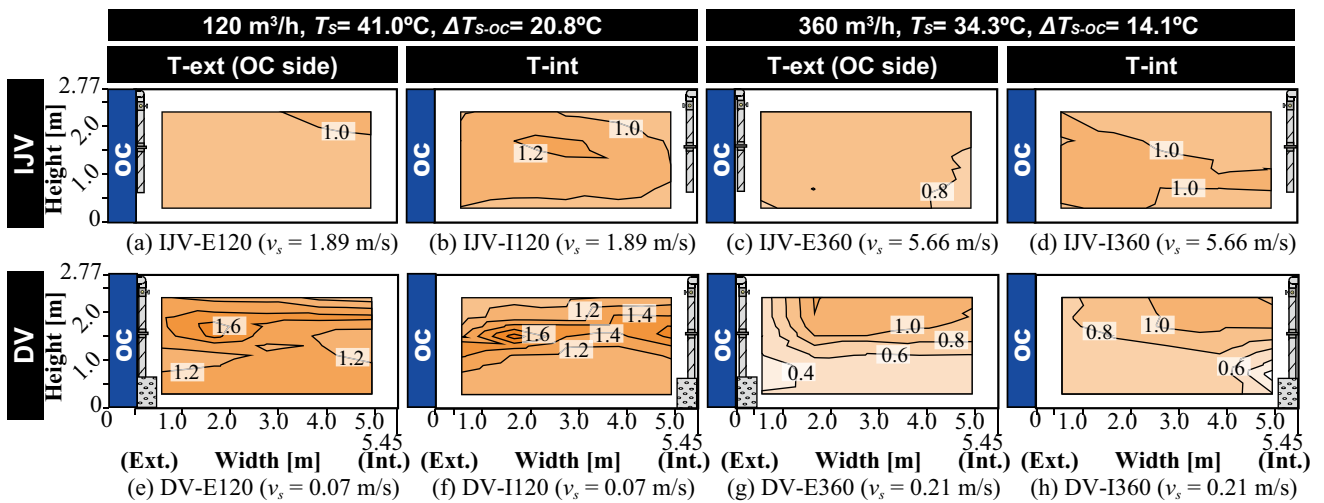


Fig. 4: Distributions of CO<sub>2</sub> concentration at North-South cross section

IJV と DV を比較すると、IJV においてより均一な温度・濃度分布となることが示された。

水平断面で平均した温度・濃度の鉛直分布を Fig. 5-6 に示す。IJV 条件において温度・濃度ともに流量の影響はあまりみられず、T-ext を用いた 240 m<sup>3</sup>/h 条件で足元温度が排気温度程度まで増加することが示された。DV 条件においては流量による変化が顕著であった。小流量条件では温度成層が明確になり、濃度は居住域において 1.0 を超えた。一方、比較的大流量条件においては温度

成層が緩やかに、濃度は居住域で 1.0 以下となり、完全混合よりも良好な濃度分布となることが示された。

### 3.2 アルキメデス数との相関

2 において示した  $Ar_{room}$  を横軸にとり、4 種類の評価指標との相関を Fig. 7 に示す。 $\Delta T_{Oz,1.1-e}$ 、 $\Delta T_{1.1-0.1}$ 、 $\Delta T_{e-0.1}$  について、(i) DV よりも IJV を用いる条件で、(ii) T-int よりも T-ext を用いる条件で、(iii)  $Ar_{room}$  がより大きい条件で、値が 0 に近く、すなわち完全混合状態に近くなった。特

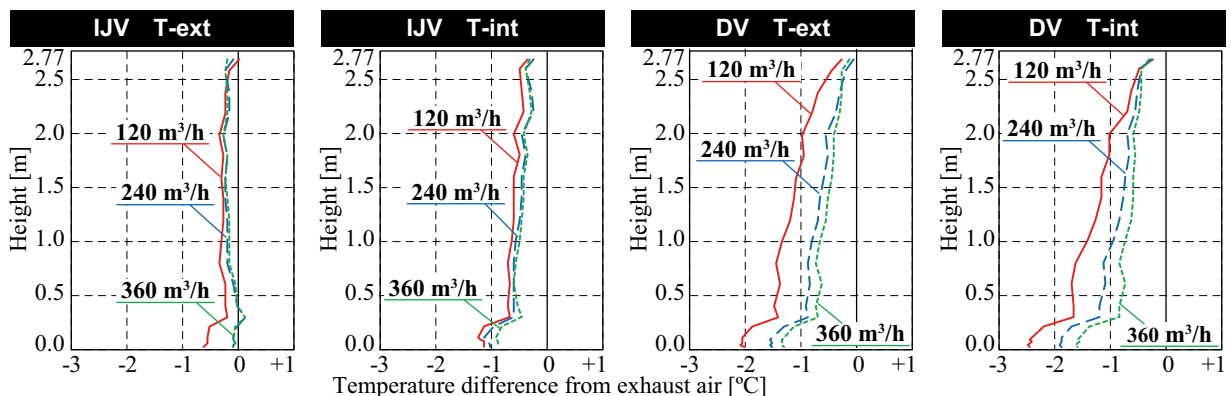


Fig. 5: Vertical distribution of temperature difference from exhaust air ( $T_r - T_e$ )

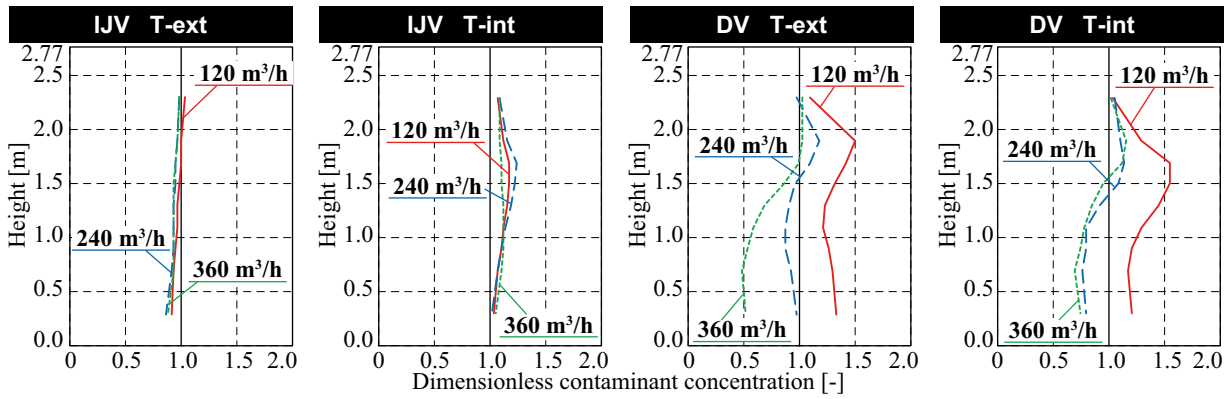


Fig. 5: Vertical distribution of normalized CO<sub>2</sub> concentration

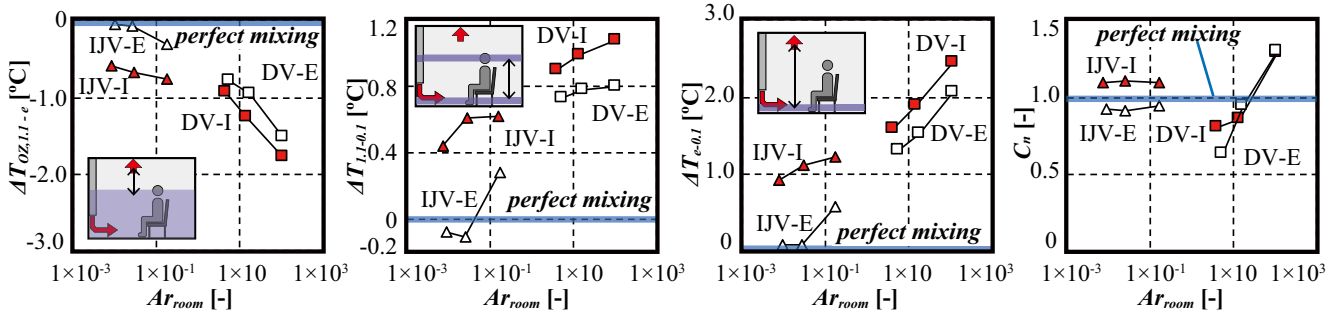


Fig. 7: Correlation between  $Ar_{room}$  and various indices

にIJVについて、T-extを用いて $Ar_{room}$ を0.1以下にすると、 $\Delta T_{Oz,1.1-e}$ と $\Delta T_{e-0.1}$ は概ね完全混合状態と等しくなった。また、全条件において $\Delta T_{L,1.1-0.1}$ は推奨値の3°Cを下回り、IJV、DVそれぞれの平均値は0.6°C、1.1°Cとなった。

$C_n$ について、IJVの条件において結果は1.0程度となり、流量に関わらず概ね完全混合と同じ換気効率を有することが示された。ただし、給気位置については、T-intを用いる場合で $C_n$ が1を上回り、T-extを用いる場合で $C_n$ が1を下回った。一方で、DVの条件においては流量によって $C_n$ が大きく変化し、 $Ar_{room}$ が10以上の条件では給気位置による差異はほとんどみられなかった。また、 $Ar_{room}$ が10以下の条件においてはIJV及び完全混合状態での換気効率を超えた。

参考文献

- 1) T. Karimipناهら: Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *Build. and Env.* Vol. 37 (2002) 1329-1347.
- 2) X. Yeら: Temperature distribution and energy consumption in impinging jet and mixing ventilation heating rooms with intermittent cold outside air invasion, *Energy Build.* 158 (2018) 1510-1522.
- 3) H. Yamasawaraら: Experimental Investigation of Difference in Indoor Environment using Impinging Jet Ventilation and Displacement Ventilation Systems, *Int. J. Vent.* (2021).
- 4) ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2013).
- 5) ISO, ISO-7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, (2005).
- 6) SHASE: SHASE-S 102: 換気基準・同解説. (2011).

謝辞

本研究の遂行にご協力いただきました Mathias Cehlin 氏 (University of Gavle)、Arman Ameen 氏 (同) に深く感謝いたします。本研究は JSPS 科研費 JP20J10608 の助成 (研究代表者: 山澤春菜) を受けたものです。

4. 結論

暖房時のIJV・DVによる室内温度性状と換気効率を検討するため、換気方式、給気流量・温度の組み合わせ、給気位置をパラメータに実大実験を行なった。対象室の壁面のひとつを冷却し、冬季暖房負荷を模擬した。また、給気条件を表現したアルキメデス数 ( $Ar_{room}$ ) を定義して室内環境との相関をみた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 温度分布: DVでは鉛直温度成層が形成されたが、IJVでは鉛直方向の明確な分布は見られなかった。ただし、冷却壁面から離れた位置で給気するとき、IJV・DVともに水平方向に分布が生じた。
- 2) 濃度分布: IJVでは流量に関わらず概ね完全混合と同様となった。DVでは流量により分布が変化し流量が大きい条件では居住域で基準化濃度が1を下回った。
- 3) 温度性状の評価指標: (i) DVよりもIJVを用いる条件で、(ii) 冷却壁面に近い給気口を用いる条件で、(iii)  $Ar_{room}$ がより大きい条件で、完全混合状態に近い温度性状となった。ただし、全条件において頭と足元高さの温度差は3°C以内となった。
- 4) 換気効率: IJVでは $Ar_{room}$ によらず概ね完全混合と同様となり、DVでは $Ar_{room}$ が小さいとき向上した。
- 5) まとめ: IJVでは冷却壁面側から給気し $Ar_{room} < 0.1$ のとき温度性状は概ね完全混合と同様となり、DVでは $Ar_{room} > 10$ のとき換気効率が完全混合よりも向上した。

今後は、IJVにおける風速分布の把握及び更なる温度・流量・室形状などにおける検討を行う。

業務用厨房における局所排気フードの捕集原理に関する研究  
(その23) 4方向付加噴流噴流による竜巻状吸引気流の形成と汚染物捕集性能の向上効果  
**Capture and Containment Mechanism of Local Exhaust Hood in Commercial Kitchen**  
**(Part 23) Formation of Tornado-like Suction Flow and Improvement of Capture Performance**  
**for Pollutants using Four Directional Jets**

○寺本 大智 (大阪大学)                      山中 俊夫 (大阪大学)  
小林 知広 (大阪大学)

Daichi TERAMOTO\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup>  
\*<sup>1</sup> Osaka University

In this study, capture performance of local exhaust hood using tornado-like suction flow in commercial kitchen is evaluated. An exhaust hood and a cooking appliance which generates updraft flow and four fans which generate angular momentum are used on experimental device. As a result of measurement for capture efficiency, it is found that capture performance decreases when the updraft flow from the cooking appliance is prevented by the jet from the fan. On the other hand, it is found that capture performance improves by using tornado-like suction flow under air disturbance.

はじめに

前報<sup>1)</sup>では、付加噴流を用いた高効率排気フードの提案として、2方向付加噴流装置を用いた排気フードについて報告した。本報では、排気フードの捕集性能を向上させる新たな方法として竜巻状気流を用いた。竜巻は積乱雲に伴って発生する上昇気流が地上付近の渦を巻きこむことで形成されるが、詳細な形成要因は未だ解明されていない。そこで本研究では、竜巻状気流の形成要因及び竜巻状気流を用いた排気フードの捕集性能について評価を行った。

動量 (angular momentum) が挙げられている。本実験装置には、排気フードと調理機器及び4つのファン(以下、竜巻発生ファン)があり、前者の2つは上昇気流の役割を担い、後者は角運動量の役割を担っている。使用した竜巻発生ファンを Fig. 2 に示す。吹き出し風速の下限値を下げるため、吹き出し口に抵抗として市販の医療用ガーゼを取りつけた。また実験空間の平面図及び断面図を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。実験空間の壁面には床からの高さ 2150mm の位置に PAC 型空調機が設置されている。

1. 実験概要

1.1 実験装置周辺

本研究で使用した装置の写真を Fig. 1 に示す。既往研究<sup>2)</sup>では、竜巻の形成要因として上昇気流 (updraft flow) と角運

1.2 厨房機器

本研究では厨房機器として業務用の IH 調理器及びガス調理器の2種類を使用した。使用した厨房機器を Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。各調理機器の出力はそれぞれ 2.5kW、9.3kW であり、共に出力 100% で実験を行った。

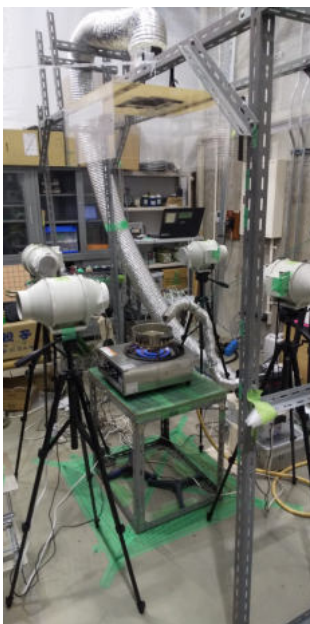


Fig.1 Experimental Device



Fig.2 Fan



Fig.5 IH Range Cooker



Fig.6 Gas Cooking Stove

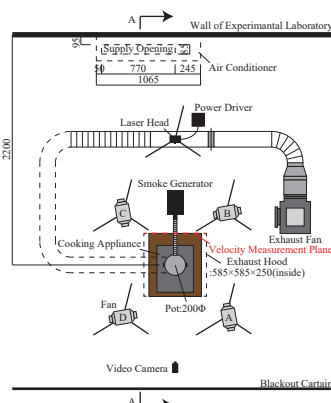


Fig.3 Plan of Experimental Set-up

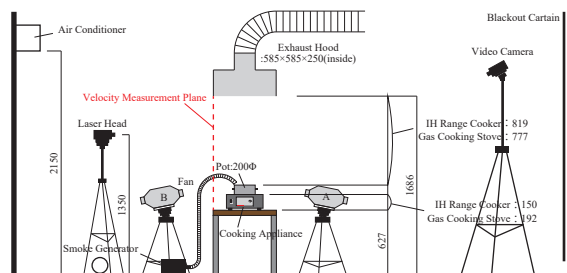


Fig.4 Cross-Section along the Line A-A

2. 評価手法

2.1 捕集率

捕集率を算出するにあたり、本研究ではトレーサーガスに CO<sub>2</sub> を用いた。IH 調理器使用時は、鍋上に設置した供給リングから CO<sub>2</sub> を発生させ調理生成物質を模擬した。ガス調理器使用時は、供給リングを設置せず機器からの燃焼排ガスを対象とした。実験機器の接続経路を Fig. 7 に示す。調理生成物質を想定したときの CO<sub>2</sub> 発生量はマスフローコントローラーで制御し、燃焼排ガス発生量は、不燃性の板を用いてフード下端から調理機器周辺までを囲い、燃焼排ガスを完全に捕集できる状態で測定を行い、そのときのダクト内汚染物通過量とした。捕集率及びダクト内汚染物通過量の算出式を Eq. 1 及び Eq. 2 に示す。

$$\eta = \frac{q}{M} \tag{1}$$

$$q = (C_d - C_r) \times Q \times \frac{273.15}{273.15 + t} \tag{2}$$

$\eta$  : 捕集率 [-]  
 $q$  : ダクト内汚染物通過量 [Nm<sup>3</sup>/h]、 $M$  : 発生量 [Nm<sup>3</sup>/h]  
 $C_d$  : ダクト内 CO<sub>2</sub> 濃度 [-]、 $C_r$  : 室内 CO<sub>2</sub> 濃度 [-]  
 $Q$  : 実流量 [m<sup>3</sup>/h]、 $t$  : 測定点温度 [°C]

排気量の測定手順を説明する。Fig. 7 において、三方弁により経路 C を閉じ、ガスボンベから発生する CO<sub>2</sub> を完全に捕集できる状態で、測定点の濃度  $C_d$  及び温度  $t$  を得る。続いてボンベからのガス発生を停止し、室内空気の誘引により室内 CO<sub>2</sub> 濃度  $C_r$  を得る。このとき Eq. 2 におけるダクト内汚染物通過量  $q$  はマスフローコントローラーで制御した発生量  $M$  と等しくなるため、実流量  $Q$  を求めることができる。なおガス調理器使用時の排気量を求める測定中は調理機器は稼働させていない。ゆえにガス調理器使用時の

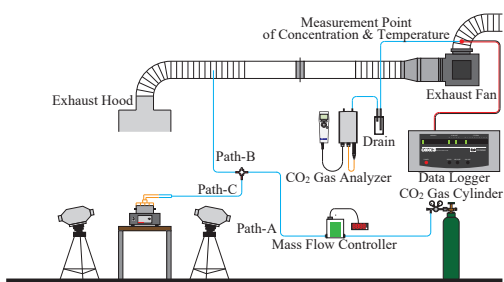
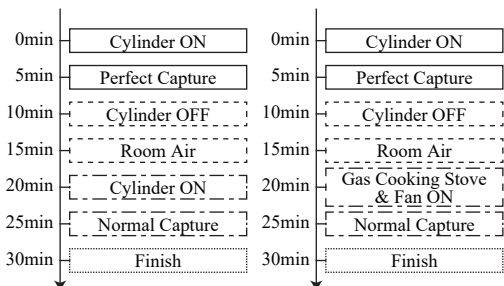
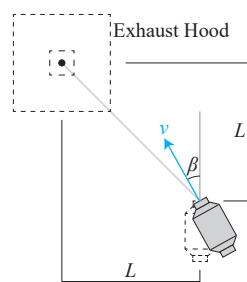


Fig.7 Connection Paths of Measurement Device



a) IH Range Cooker      b) Gas Cooking Stove  
Fig.8 Measurement Schedule



a) Plane Surface  
b) Elevation Surface  
Fig.9 Parameter of Fan

排気量は非燃焼時のものを使用することになるが、予備実験により、温度差が約 30°C のときの燃焼時と比燃焼時の実流量の誤差が 3% 程度であることを確認している。

2.2 測定手順

IH 調理器及びガス調理器使用時それぞれの測定手順を Fig. 8 に示す。捕集率の算出には各測定の最後の 5 分間のデータを使用した。測定開始から最初の 20 分間は前述の排気量を求める操作である。

2.3 竜巻状気流の挙動

レーザー及び煙発生器を用いて煙の可視化を行った。レーザーは床から 1350mm の高さで照射した。また、気流の挙動を把握するために 5cm 間隔で格子状に線を引いた板を用意した。これを実験空間に設置しビデオカメラで撮影し画像処理ソフトで編集したものと、別に撮影した各条件の動画を画像処理ソフトに 10 フレームごとに読み込み、読み込んだ画像を 10 枚ずつ合成したものを重ね合わせることで気流の挙動を評価した。

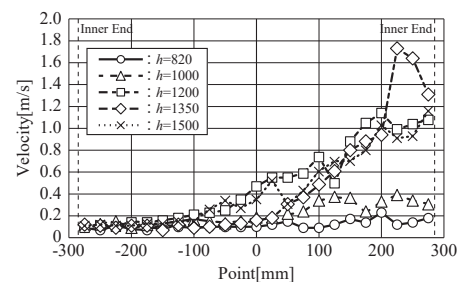
3. 実験条件

3.1 フード排気量

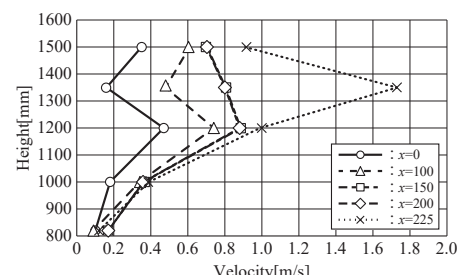
排気量はフード下端面風速をもとに、IH 調理器使用時は 0.3m/s(369.6m<sup>3</sup>/h)、ガス調理器使用時は 0.45m/s(554.4m<sup>3</sup>/h) に設定した。

3.2 竜巻発生ファン

竜巻発生ファンの諸条件を Fig. 9 に示す。本研究では、竜巻発生ファンの実験条件を絞り込むための予備の可視化実験を行っている。本報ではフード中心と竜巻発生ファンの吹き出し口までの距離  $L$  を 40cm とし、吹き出し高さ  $h$  を IH 調理器使用時は 80cm、ガス調理器使用時は 120cm に設定した条件の結果のみ示す。



a) Plane Surface



b) Elevation Surface

Fig.10 Air Velocity near Cooking Appliance due to Air Conditioner

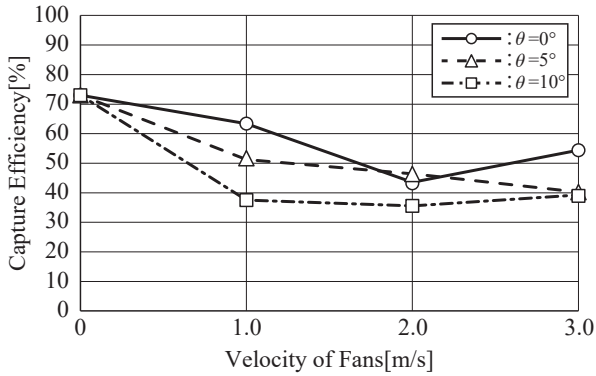


Fig.11 Capture Efficiency on IH Range Cooker

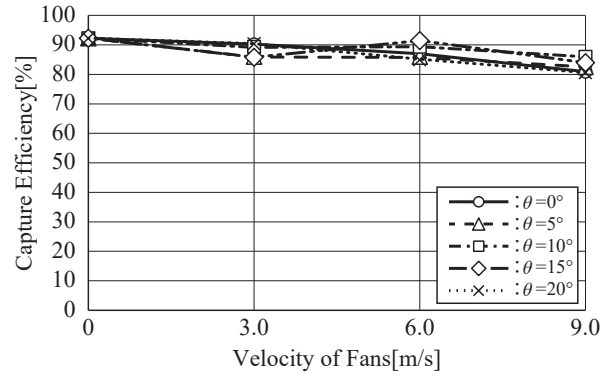


Fig.12 Capture Efficiency on Gas Cooking Stove without Air Conditioner Flow

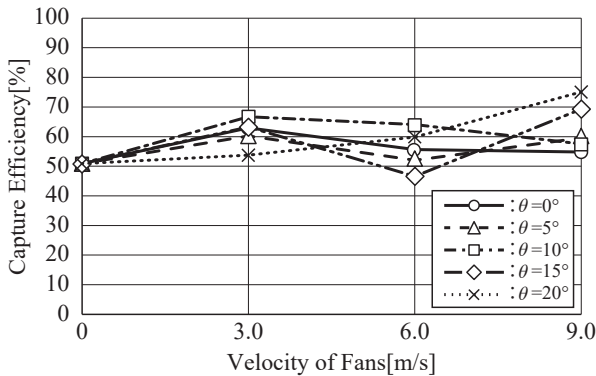


Fig.13 Capture Efficiency on Gas Cooking Stove with Air Conditioner Flow

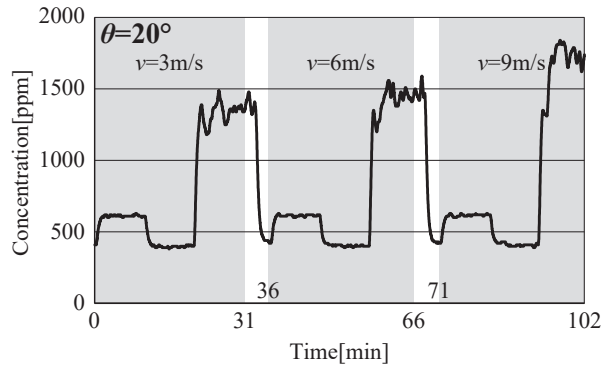


Fig.14 Variation of CO<sub>2</sub> Concentration with Air Conditioner Flow

3.3 空調擾乱

Fig. 3 及び Fig. 4 に示す範囲で各高さごとの風速を測定した。水平及び任意の鉛直断面における結果を Fig. 10 に示す。結果には 1 分間の測定の平均値を使用している。水平面の結果の横軸はフード面の中心を原点とし、竜巻発生ファン B 側を負、C 側を正としている。なお、空調機はガス調理器使用時のみ運転させた。

4. 結果

4.1 捕集率

IH 調理器使用時の捕集率結果を Fig. 11 に示す。このときの竜巻発生ファンの水平角度  $\beta$  は  $0^\circ$  に設定した。また、 $\beta=5^\circ$  に設定し、調理機器をガス調理器に変更したときの結果を Fig. 12 に、同条件で空調を稼働させたときの結果を Fig. 13 に示す。ガス調理器への変更に伴う上昇気流の増大を想定し、IH 調理器使用時よりも竜巻発生ファンの風速を大きくした。なお、ガス調理器使用時のファン風速 0m/s の結果は 5 回の測定の平均値で、IH 調理器使用時の結果を含むその他の結果は 1 回のみでの測定結果である。さらに空調擾乱条件下で竜巻発生ファンの鉛直角度  $\theta$  を  $20^\circ$  に設定したときの濃度の時系列変化を Fig. 14 に示す。

4.2 竜巻状気流の挙動

本実験はガス調理器使用時のみ行った。空調擾乱のない条件の結果を Fig. 15 に、空調擾乱のある結果を Fig. 16 に示す。各図の () で示された番号の間隔は 3 秒に相当する。

5. 考察

Fig. 11 より、IH 調理器を使用した条件において竜巻状気流を使用した場合、捕集率の著しい低下が見られた。これは竜巻発生ファンの設置位置が原因であると考えられる。実際の厨房での利用を想定し、調理者の作業を妨げないために可能な限りファンが調理機器に近くなるように設置したが、それにより鍋からの上昇気流が乱れ捕集率が低下したと考えられる。

上昇気流をより安定したものにするために調理機器及び排気量を変更し、さらに竜巻発生ファンの吹き出し高さ  $h$  を変え捕集率を測定した結果、Fig. 12 に示すように排気フード単体の捕集性能が向上した。フード単体での捕集率が高いため竜巻状気流による捕集率の大きな向上は見られず、逆に擾乱となり捕集率が低下する条件も見られた。一方で Fig. 13 に示す結果より、擾乱条件下で竜巻状気流を発生させた場合、ほとんどの条件で捕集率の上昇が見られ、中には最大で 75% まで上昇したのものもあり、竜巻状気流の有効性を示すことができた。ただし、Fig. 14 に示すように空調擾乱と竜巻状気流が同時に存在する場合、ダクト内に設けた測定点における濃度の振動が大きいという結果も得られた。この傾向は空調擾乱条件下で行った全ての条件で見られ、測定点の濃度が安定していないことから、今後は再現性について検討する必要がある。

Fig. 15 に示す竜巻状気流の挙動を見ると、 $\theta=0^\circ$  のときは渦の形状が安定せず大きく広がっているのが確認できる。

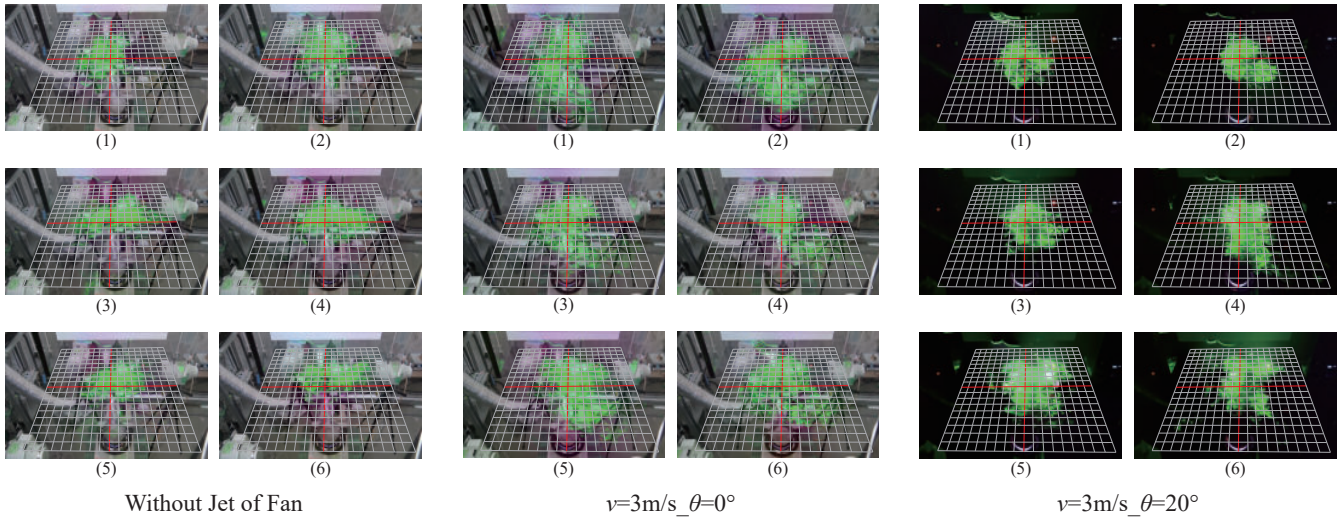


Fig.15 Transformation of Tornado-like Flow without Air Conditioner Flow

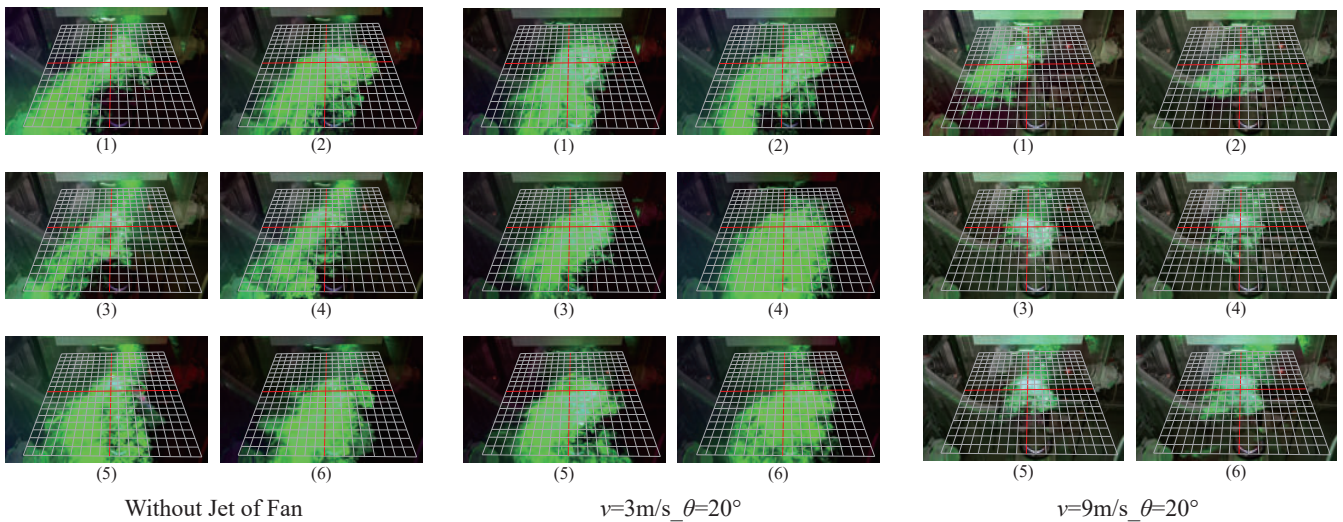


Fig.16 Transformation of Tornado-like Flow with Air Conditioner Flow

一方、 $\theta$ を $20^\circ$ と大きくすると、 $0^\circ$ のときと比較して渦の形状が小さく安定することも確認できた。同様の知見が既往研究<sup>2)</sup>にも示されており、本研究でも安定した竜巻状気流の形成には鉛直角度 $\theta$ が重要であることが示された。また撮影した動画を確認すると、捕集率の高い条件での気流は挙動が小さく、中心に穴の開いたドーナツ型の形状をしているものが多かった。Fig. 16より、擾乱に対して竜巻発生ファンの吹き出し風速をある程度大きくすれば安定した渦が形成されることが確認できた。さらに捕集率の大幅な改善が見られた条件では、渦が瞬時的に擾乱に流されても元の位置に戻る傾向が見られた。

### おわりに

本研究では、付加噴流を用いた高効率排気フードの提案を目的として、竜巻状気流を用いた排気フードの捕集性能について報告した。その結果、角運動量の成分を担う竜巻発生ファンの位置によっては吹き出したジェットが擾乱となり捕集率が低下する可能性が示唆された。一方で、擾乱条件下において竜巻状気流を用いることで排気フードの捕

集性能を改善できる可能性があり、竜巻状気流の有効性を示すことができた。

今後は人体擾乱を含む擾乱条件下での捕集率改善の再現性について検討し、竜巻状気流の有効性をより確固たるものにする必要がある。次に実験及びCFD解析により、上昇気流や竜巻発生ファンの吹き出し口形状などの条件を加え、より安定した竜巻状気流を形成できる条件を探っていく。そして、実際の厨房空間での利用を想定した機器配置について考慮した提案を行っていく必要があると考える。

### 謝辞

本研究は大阪ガス(株)との共同研究によるものであり、種々の便宜を図っていただいた関係者各位に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 千田紗恵、山中俊夫、小林知広、袁繼輝、寺本大智：業務用厨房における局所排気フードの捕集原理に関する研究(その22)人体擾乱下における2方向付加噴流を用いた排気フードの捕集性能向上手法、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、D-4、2020.09
- 2) Zhixiang Cao, Yi Wang, Mengjie Duan, Huaxin Zhu : Study of vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system, Energy and Buildings 142, pp.39-48, 2017

## 業務施設時刻別電力需要データを利用した電力需要成分分解とエネルギー管理への応用

**Disaggregation of time series electricity demand for commercial buildings and application of energy management.**

○榎原 史哉 (大阪大学)

山口 容平 (大阪大学)

岩井 良真 (関西電力)

上林 由果 (関西電力)

下田 吉之 (大阪大学)

Fumiya ENOKIHARA\*1 Yohei YAMAGUCHI\*1 Yoshimasa IWAI\*2 Yuka KAMBAYASHI\*2 Yoshiyuki SHIMODA\*1

\*1 Osaka University \*2 The Kansai Electric Power Co., Inc.

This study developed an energy saving tool for various commercial buildings. The tool is consisted of the disaggregation model and the anomaly detection model. In the disaggregation model, 4 ingredients are estimated from time series electricity demand and time series temperature data. In the anomaly detection model, by analyzing the difference between actual electricity demand and the sum of 4 ingredients from the disaggregation model, we detected the time when consumers used too much electricity. In this detected time, unnecessary electricity demand may arise, so detecting this time helps saving energy and reduction of CO2 emission of the commercial department.

**はじめに**

近年業務施設ではスマートメータやBEMSで計測された時系列電力需要データが利用可能となり、エネルギー管理への活用が期待されている。木村ら<sup>1)</sup>による調査では、時系列電力需要データを用いた省エネルギー関連サービスは大きく、需要予測、フォルト検知、ディスアグリゲーション、ベンチマーキング、クラスタリングに分類されている。それらにより省エネルギーやエネルギーコストの削減を実現することが可能と考えられるが、その実施には専門知識が必要となることが多く、時系列の電力需要データは十分に活用されていない。また、大島ら<sup>2)</sup>によるディスアグリゲーション、フォルト検知の事例では対象がオフィスのような電力消費特性をもつ建物に限定されているなど、既存の手法では対象が限定的であることが多く、多種多様な業務施設に対して汎用的に活用しうる手法は確立されていない。そこで本研究では、業務施設で計測された時系列電力需要データに基づき、汎用的に適用可能なエネルギー管理ツールの開発を目的とする。

以下では1章に本論文で利用したデータを示し、2章に開発ツールの概要、3章に適用例を示す。4章に本論文で得られた知見をまとめる。

**1. 分析対象データの概要**

開発ツールでは30分間隔の電力需要と、気象庁が公開している1時間間隔の外気温データ<sup>3)</sup>を用いる。本論文では大阪府豊中市の全電化オフィスにおいて2016年1月

1日から2016年12月31日の期間に計測された施設総電力需要及びその用途別内訳データを用いる。用途別内訳は電灯・コンセント、通信機器系、通信系空調、空調設備、熱源設備、給湯、厨房、その他の8用途であり、開発ツールの評価に用いる。なお、以下の分析では対象施設の電力需要を年間のピーク値で除すことで、電力需要を0から1に基準化して示す。

**2. 開発ツールの概要**

開発ツールはスマートメータやBEMSで計測された時系列電力需要データの成分分解、過大電力検知の二つの機能を持つ。成分分解により電力需要の量的特性、時刻・週・期間に関する時間特性を定量的に把握する。過大電力検知では、電力需要が通常よりも大きくなった場合それを検知する。これらを組み合わせることによって、短期的な視点から施設運用の変更に起因する過大な電力需要の是正と、長期的な視点からエネルギー性能の良し悪しの評価や性能低下等に伴う電力需要増加傾向の有無の評価などを可能とし、エネルギー管理を効果的に実施するための材料を提供する。

**2.1 電力需要の成分分解**

電力需要は個々の機器の消費電力の合計値であり、それぞれの機器は、施設の用途や営業形態に応じた特有の稼働スケジュールと電力消費特性を持つ。本研究は、稼働スケジュールと電力消費の季節依存性から電力消費機器を次の4つの区分に分類した。まず稼働スケジュールについて、常時稼働する常時稼働機器と、施設の稼働スケジ

ジュールに基づいて稼働するスケジュール稼働機器の 2 つに分類した。常時稼働機器はトイレの換気扇など常時稼働する機器や、サーバなどの常時サービスへの要求に対して応答することが求められる機器を含む。スケジュール稼働機器は廊下の照明、換気などの固定されたスケジュールの機器・設備や、個人使用の PC などの人の利用で稼働が決まる機器を含む。本来個人使用機器はある程度確率的な挙動を示すと考えられるが、本ツールが施設全体の挙動を対象として扱うことから、個人使用機器の電力消費の合計値は平準化され、スケジュール稼働として模擬することが可能であると考えた。次に季節依存性については、稼働時消費電力の季節変動の有無により稼働時消費電力の特性を区分し、非季節依存機器、季節依存機器とした。成分分解では、この 4 つの区分に基づき、表 1 に示す 5 成分に電力需要を分解する。

表 1 成分分解による 5 成分

成分名	定義
ベース固定成分 $X_{BF}$	常時稼働機器による電力需要のうち、季節変動のない成分
ベース季節変動成分 $X_{BS}$	上記の需要のうち、季節変動を持つ成分
活動起因スケジュール稼働成分 $X_{ASc}$	スケジュール稼働機器による電力需要のうち、季節変動を含まない成分
活動起因季節変動成分 $X_{ASs}$	上記の需要のうち、季節変動を持つ成分
残渣成分 $X_R$	上記の 4 成分の総和と実測値の差

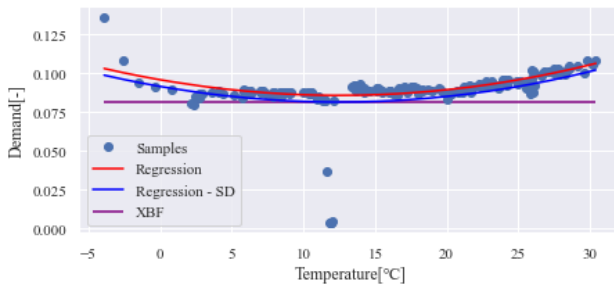


図 1 ベース成分の推計

2.1.1 ベース成分と活動起因成分の分離

成分分解ではまず、施設における人間活動に依存せず発生する電力需要であるベース成分を推計し、ベース成分をベース固定成分  $X_{BF}$ 、ベース季節変動成分  $X_{BS}$  に分離する。ここで、0 時から 7 時に観測された外気温の最小値から最大値までを 30 等分し、これを外気温帯とする。各外気温帯において電力需要が小さいものから頻度 1% 分を  $Y_i$  [-] とする。本研究では  $Y_i$  が常時稼働機器のみにより構成されていると考える。常時稼働機器の電力消費における季節変動性を考慮するため、 $Y_i$  について外気温  $T_i$  [°C] の二次回帰式  $Y_i = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 T_i^2 + \varepsilon_i$  を作成する。 $\varepsilon_i$  [-] はランダム項である。図 1 のプロットは対象施設の  $Y_i$  を表し、図中の赤線は回帰式を示す。次に、回帰式の標準偏差  $SD$  (残渣  $\varepsilon_i$  の標準偏差) を算出し、 $Y' = \beta_0 -$

$SD + \beta_1 T + \beta_2 T^2$  により施設のベース成分を模擬する (図中の青線)。 $Y'$  の最小値を  $X_{BF}$ 、 $Y'$  から  $X_{BF}$  を引いた電力需要を  $X_{BS}$  とする。また、時刻別の総電力需要から  $X_{BF}$  と  $X_{BS}$  を差し引いた結果を活動起因成分として定量化する。

2.1.2 活動起因成分の分離

活動起因成分は、施設における人間活動によって生じる電力需要であり、季節、曜日、時刻によって変化する。その影響を次に説明する方法で別々に考慮する。

季節については、ひと月を前後半の 2 つの期間に分割し、24 の期間を複数の季節に分割する。まず、各期間における平均電力需要を昇順にソートし、そのうち、電力需要が小さい 4 期間を最小需要期間とする。次に、最小需要期間において観測された電力需要の出現頻度分布と、各期間の出現頻度分布の統計的な差異を評価し、有意差が認められなかった期間を最小需要期間に統合する。分布間の差異の評価では、平均電力需要が小さい期間から順に  $\chi^2$  検定を実施し、有意差が認められた場合は検定処理を終了し、そこまでに求めた最小需要期間を最小需要期間として確定する。また、 $\chi^2$  検定では、全期間の電力需要の出現頻度から全階級が等頻度を持つように電力需要について 15 の階級を定め、階級別の出現頻度の統計的有意差を評価する。最後に、最小需要期間を 1 つの季節とし、最小需要期間によって区切られたひとまとまりの期間をそれぞれ活動起因成分の季節依存特性が異なる期間 (季節と呼ぶ) として分離する。ただし、分離された季節が 1 つの期間のみで構成される場合、例外処理として当該期間を最小需要期間に組み込む。また、最小需要期間における時刻別の平均外気温を取得し、それを基準外気温とし、のちのプロセスで用いる。

上述の処理を分析対象施設に適用して得られた期間別の平均電力需要と、季節判定結果を期間に色を付けて図 2 に示す。横軸に示す 2016 年 1 月から 2016 年 12 月までの計 24 期間では、黄色で示す中間期に電力需要が小さくなり、最小需要期間として選択された。また、最小需要期間および分析の開始日、終了日によって区切られたオレンジ、青、緑の 3 つの期間がそれぞれ一つの季節として判定された。

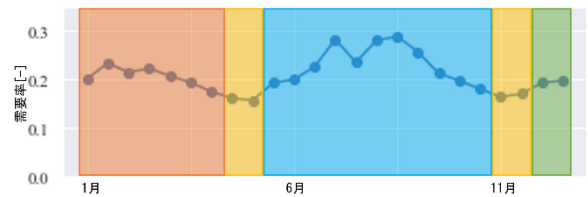


図 2 期間別平均電力需要と季節判定

次に、曜日と時刻の組み合わせを考慮し、活動起因成分を、季節変動性を持つ活動起因季節変動成分  $X_{ASs}$  と持た

ない活動起因スケジュール稼働成分  $X_{4Sc}$  に分離する。まず、判定した季節別、時刻別に、活動起因成分を対象として外気温の二次回帰式を作成する。この結果、各季節に 48 の回帰式が作成される。回帰式では各曜日のダミー変数と外気温及び外気温の二乗値、それらの交互作用項を説明変数とする。次に、上記のプロセスで定量化した基準外気温を用いる。基準外気温を得られた回帰式に代入すると、その時刻・曜日の組み合わせに対応する最小の電力需要を得ることができる。そのため、基準外気温を回帰式に代入し、回帰結果との差を暫定的に  $X_{4Se}$  とする。活動起因成分から  $X_{4Se}$  を差し引いた結果は季節変動を除かれた活動起因の需要と考えられることから、これを曜日別時刻別に平均し、 $X_{4Sc}$  として定量化する。さらに、活動起因成分から  $X_{4Sc}$  を差し引いて、得られた結果を対象に、上述と同様に季節別時刻別回帰式を作成し、 $X_{4Se}$  として定量化する。最後に、ここまでで得られた 4 成分の総和と時刻別電力需要の実測値との差を残渣成分  $X_R$  として定量化する。

上記の処理では祝日について例外処理を行っている。祝日においては、多くの商業施設のように当該曜日と同様に稼働する施設と、多くの事務所ビルのように日曜日と同様に稼働する施設がある。上記のプロセスで曜日を用いるため、各祝日における電力需要が当該曜日と日曜日のいずれに近い挙動をとるか判定する。ここでは、各祝日前後 10 日ずつの日曜日の時刻別平均電力需要、前後 10 日ずつの同曜日の時刻別平均電力需要を算出し、当該祝日の電力需要との平均二乗誤差が小さい曜日（日曜あるいは当該曜日）を選択する。

## 2.2 過大電力需要検知

2.1 節に示した電力需要の成分分解により、業務施設の電力需要は表 1 に示した 5 成分に分解される。 $X_R$  を除いた 4 成分は、季節、曜日、時刻、気温に応じて生じる標準的な電力需要を表し、 $X_R$  は実測値と標準的な電力需要の差分を示す。そのため、 $X_R$  が大きな数値を示した場合、通常とは異なる挙動が生じたと考えられることができる。過大電力需要検知では残渣成分  $X_R$  に基づいて異常を検知する。

まず、残渣成分  $X_R$  の自己回帰モデルを作成する。自己回帰の次数は過去 24 時間分の 48 とする。次に、 $X_R$  と自己回帰モデルによる予測値の差分を自己回帰残渣とし、正であらかじめ定めた閾値より大きい自己回帰残渣が観測されたとき、異常が発生したと判定する。閾値は自己回帰残渣の頻度分布に基づいて決定し、閾値によって異常の出現頻度を調整することが可能である。0.2%（年間では約 35 回）を出現頻度として定めた閾値を用いた場合、対象施設では 2016 年 1 月 25 日に異常が検知された。図 3 に 1 月 25 日を含む 1 週間の  $X_R$  と自己回帰モデルによ

る予測値の挙動を示す。図からわかるように  $X_R$  は自己相関性を持つ挙動を示した。図中のプロットは異常が判定されたタイムステップを表しており、そのタイムステップでは大きな自己回帰残渣が観測されている。

$X_R$  を使用した異常判定では、時間の経過とともに  $X_R$  が徐々に増加するような挙動をとった場合、自己回帰残渣は自己回帰の特性から大きく変化せず、異常が検知されない。そこで、 $X_R$  の日平均値について閾値を設定し、閾値を超えた日を異常日と判定する。異常検知に用いる閾値は前述のとおり出現頻度を考慮して調整する。



図 3 残渣成分と自己回帰モデルによる予測

## 3. 結果

### 3.1 成分分解結果の評価

1 節に説明したように、対象オフィスビルでは用途別の電力需要が利用可能である。このデータを用いて、成分分解の精度を確認した。ここでは、総電力需要を成分分解した結果と、各用途について、それぞれ成分分解した結果の成分別合計値を比較する。両者の差異が小さければ総電力需要の成分分解結果により各用途の季節、時刻、曜日に関する時間的挙動、季節依存性を把握可能であることを意味する。

図 4 から図 7 に面グラフとして用途別の成分分解結果を積み上げグラフとして示す。折れ線グラフは総電力需要を成分分解した結果を示す。図 4 は  $X_{BF}$  を示す。総電力需要の  $X_{BF}$  は各用途の  $X_{BF}$  の合計よりも 0.01[-]程度大きい。 $X_{BF}$  は季節依存性がなく、施設の稼働状況に依存しない電力需要であるが、各用途でスケジュール稼働している複数の需要が組み合わせられた場合、合計の最小値が  $X_{BF}$  に組み込まれる。過大推計はこの重ね合わせ効果に起因するものである。図 5 はベース成分の季節変動性を示す  $X_{BS}$  について、左から、暖房期、中間期、冷房期の順に一日の挙動を示す。内訳をみると、電灯・コンセントの用途が大きく、通信系空調、給湯などの季節変動性を持つ用途が含まれている。図 6 は、季節変動性を持たない活動起因スケジュール稼働成分  $X_{4Sc}$  について月曜日から日曜日までの一週間の挙動を示す。内訳をみると、始業時から、電灯・コンセント、空調の用途の電力需要が大きな割合を占め、全体の挙動と一致している。図 7 は季節変動性を持つ活動起因季節変動成分  $X_{4Se}$  について左から暖房期、中間期、冷房期の順に、各期間の平日と土曜日の一日にお

ける挙動を示す。 $X_{Asc}$ が大きくなるのは暖房期及び冷房期の平日であり、ともに熱源設備の電力需要が大半を占めている。暖房期には給湯の需要も大きい。

このように、施設の総電力需要の成分分解の結果と用途別の成分分解結果の積算値はおおむね一致しており、各成分は用途別の電力需要特性をよく反映している。この結果より、施設の総電力需要の成分分解結果は、2節冒頭に述べた4つの区分別のエネルギー消費機器・設備により形成される電力需要の特性をある程度反映していると考えられる。この結果は、成分分解結果に基づいて、エネルギー管理として有効な手段を特定することが可能であることを示唆する。例えば、図4に示す $X_{BF}$ では電灯・コンセントが占める割合が高く、常時稼働している機器の電力需要を削減することが電力需要削減に効果的であると考えられる。このように内訳が利用可能ではないとしても、 $X_{BF}$ を形成している機器設備に関するエネルギー管理が有効であることを判定することができる。

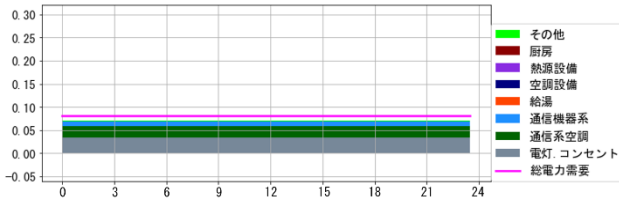


図4 ベース固定成分  $X_{BF}$  の精度検証

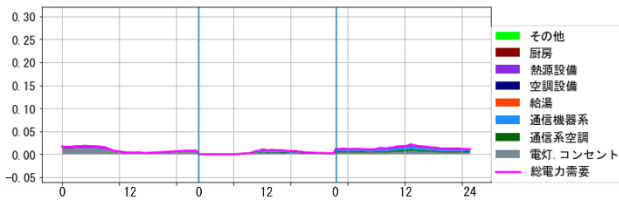


図5 ベース季節変動成分  $X_{BS}$  の精度検証

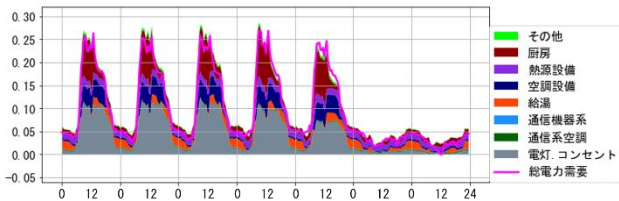


図6 活動起因スケジュール稼働成分  $X_{Asc}$  の精度検証

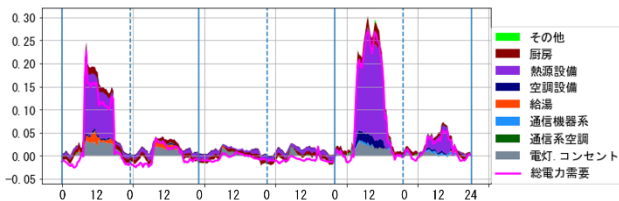


図7 活動起因季節変動成分  $X_{Asc}$  の精度検証

### 3.2 異常検知の評価

図8に、分析対象とした全電化オフィス施設について、異常判定された2016年8月5日の成分分解結果を示す。 $X_R$ の挙動を見ると、正午付近の総電力需要がピークを迎える時刻に大きく、これが異常として判定された。図9に同日における最終用途別の電力需要用途別内訳を示す。

用途別の内訳から、異常発生時刻における電力需要の増加は空調熱源設備に起因するものであることがわかっているが、成分分解から得られた $X_R$ を分析することで、過剰な電力需要が発生した可能性のある挙動を特定可能であることが確認できた。

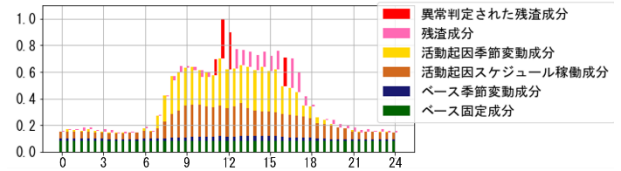


図8 異常判定された日の成分別積み上げグラフ

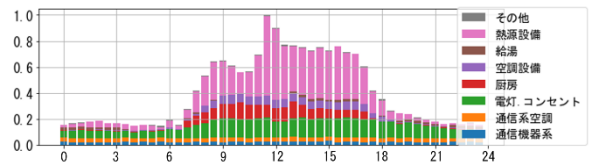


図9 最終用途別の積み上げグラフ

### 4. まとめ

本論文では、業務施設の時刻別電力需要を、その発生要因や稼働時の特性に基づいた5つの成分に分解するとともに、過剰な電力需要が発生したと考えられる日時を特定するツールを開発した。本ツールでは、入手が容易なデータのみを入力データとして利用し、様々な業務施設に共通する特性を考慮しているため、多様な業務施設に対して汎用的に適用可能である。本ツールを全電化オフィスに適用した結果、長期的な視点からエネルギー管理に有用な知見が得られること、空調熱源に起因する短期的な電力需要の増加を検知することが可能であることを確認した。このように、成分分解結果に基づく電力需要特性の明確化、過大電力の検知により、様々な需要家のエネルギー管理の余地を特定できると考えられる。さらなる研究として、過大な電力需要の発生を特定した日時に、どのような原因で過大電力需要が発生したかを特定することができれば、本研究で作成したツールと組み合わせ、自動的に省エネルギー提案を行うツールとすることができると考えられる。

### 参考文献

- 1) 木村宰, 小松秀徳: スマメデータ・EMSデータの分析手法と省エネサービスへの活用: スマメデータ・EMSデータ分析に基づく省エネサービスの海外動向: エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 第37回 (2018), pp.88-93
- 2) 大島弘暉, 下田吉之, 山口弘雅, 岸本卓也, 山口麻有, 中村和弘: [時刻別総電力量を用いた建物エネルギー使用実態評価手法開発](#), 空調調和・衛生工学会論文集, 264号(2019-3), pp.13-21
- 3) 気象庁: 過去の気象データ検索: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture00> (2021年2月18日)

## 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その2) 単室モデルを対象とした LES の解析精度検証

### Unsteady Analysis of Cross-Ventilation Flow using Domain Decomposition Technique with LES (Part 2) Validation of LES for a Generic Isolated Building Model

○田中 佑亮 (大阪大学)      小林 知広 (大阪大学)  
 山中 俊夫 (大阪大学)      丹原 千里 (大林組)  
 小林 典彰 (大阪大学)      崔 ナレ (大阪大学)  
 佐野 香之 (大阪大学)

Yusuke TANAKA<sup>\*1</sup> Tomohiro KOBAYASHI<sup>\*1</sup> Toshio YAMANAKA<sup>\*1</sup> Chisato TAMBARA<sup>\*2</sup>  
 Noriaki KOBAYASHI<sup>\*1</sup> Narae CHOI<sup>\*1</sup> Kayuki SANNO<sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup> Osaka University      <sup>\*2</sup> Obayashi Corporation

Large Eddy Simulation (LES) will be widely used in cross ventilation. However, it takes an enormous amount of time to predict the indoor airflow of a complex-shaped building by cross ventilation if high accuracy is required. Therefore, a method is required for reducing the calculation load while maintaining the accuracy. This study presents CFD analysis using domain decomposition technique by LES and clarifies the issues. Following the previous paper, this paper validates CFD analysis in Sealed Model and Whole Domain by comparing them with Experiments<sup>3)</sup>.

#### はじめに

近年、屋外風環境分野では LES 利用の現実性が高まっており<sup>1)</sup>、換気・通風分野でも Large Eddy Simulation (LES) の利用拡大が予想される。しかし、室内外を同時に解析する必要のある自然換気・通風解析では複雑形状建物への適用は計算負荷の観点から容易ではない。河内・倉渕ら<sup>2)</sup>は RANS で計算負荷を低減する手法として室内のみを解析する「領域分割法」を提案しているが、本研究ではその手法を LES で適用し、計算負荷を抑制しつつ非定常で室内気流を予測する手法の検討を行う。本報では前報<sup>3)</sup>の風洞実験を再現した CFD 解析を行い、室内外を同時に解析する全域計算の換気量と、開口を有さないモデル(以下、シールドモデル)における風圧係数・建物周辺風速を対象として、CFD 解析の精度検証を行う。

#### 1. 全域計算による CFD 解析

##### 1.1 解析概要

風洞での縮小模型実験を再現した CFD 解析を行った。解析領域は幅、高さ、長さがそれぞれ、1,400 mm、1,000 mm、3,200 mm の流路とし、外寸 1 辺 200 mm、壁厚 2

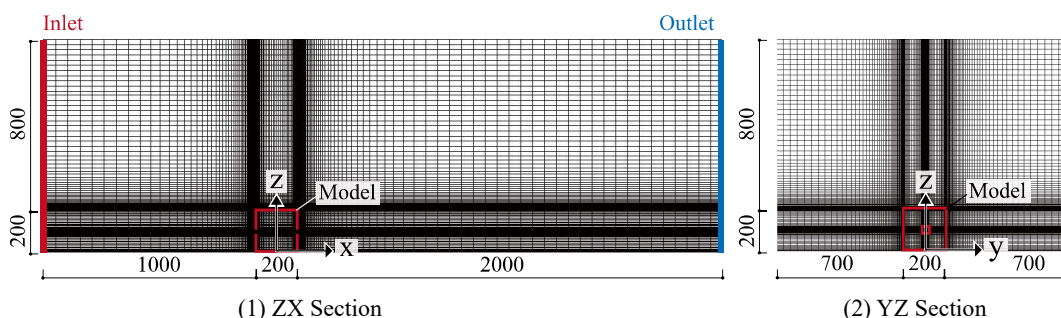
mm、上流及び下流の建物壁面中央部に 1 辺 20 mm の開口を有する建物を配置し室内床面中央を原点とした。**Fig. 1** に解析領域及びメッシュレイアウトの一例を示す。

##### 1.2 解析条件

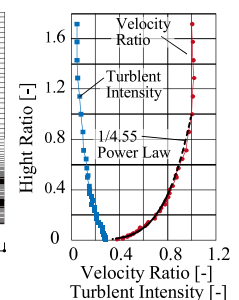
LES による CFD 解析を行う。標準  $k-\varepsilon$  のモデルの結果を初期条件とし、計算時間間隔は 1/2,000 s、計算開始後の 2,000 タイムステップ (=1.0 s) を LES への移行期間として計算結果を破棄し、その後の 5.0 s を本計算とみなして統計データを取得した。なお LES の流入境界には **Fig. 2** に示す前報の 1/4.55 べき乗則の境界層流に Smimov ら<sup>4)</sup>の手法を適用して作成した変動風を与えた。**Table 1** に CFD 解析条件について一覧で示す。

##### 1.3 Purging Flow Rate (PFR) を用いた換気量評価方法

トレーサー粒子を発生させ換気量の評価を行う。**Fig. 3** に粒子発生の概要を示す。風洞実験<sup>3)</sup>でのトレーサー供給部と同一地点から 1/2,000 s 毎に粒子を発生させ、建物内 ( $-98 < x < 98, -98 < y < 98, 0 < z < 198$ ) の粒子個数の推移から粒子個数濃度  $C_i$  [個/m<sup>3</sup>] を算出する。また、5.0 s では



**Fig. 1** Computational Domain and Computational grid on ZX and YZ section (Whole Domain)



**Fig. 2** Approaching flow

$C_r$  が定常状態に達しないと考えられるため、Eq. (1) の非定常濃度予測式を用いて LES 解析結果との濃度の誤差の二乗和が最小となる換気回数  $n$  [1/s] を求めて PFR ( $= nV$ ) を算出した。ここで、 $m$  は発生量 [個/s] である。

$$C_r(t) = \frac{m}{nV}(1 - e^{-nt}) \quad (1)$$

#### 1.4 PFR を用いた換気量評価による精度検証

Fig. 4 に LES における粒子個数濃度の時系列変化のグラフを示す。解析を終了した 5.0 s 時点においても濃度は上昇傾向にあり、定常に達していないため、Eq. (1) に基づき換気回数  $n$  を同定した。Fig. 5 に前報の風洞実験<sup>3)</sup> と LES で算出された換気量を示す。ここで、実験では室中央に設置した配管の 3 つの高さ位置から計 12 点で吸引して濃度を測定している。このため、室平均濃度の測定を意図したものであるが、実際は完全混合状態でないことから平面中央位置の濃度の影響が大きく、室平均濃度を算出した CFD と厳密に比較が可能なものではないが、換気量のオーダーは概ね一致したと言える。

Table 1 Calculation Condition (Whole Domain)

CFD Code	Fluent 19.2	
Turbulence Model	Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model : $C_s=0.12$ )	
Algorithm	PISO	
Discretization Scheme for Advection Term	Central Differencing	
Time Step	0.0005 sec. (2 kHz)	
Pre-conditioning Term	2,000 time steps (1 sec.)	
Mian Calculation Term	10,000 time steps (5 sec.)	
Boundary Condition	Inlet	Smirnov's Method based on Experimental Value
	Outlet	Gauge Pressure : 0 [Pa]
	Walls	Werner and Wengel Wall Function
	Symmetry	Free slip
Total Number of Cells	3,264,244	

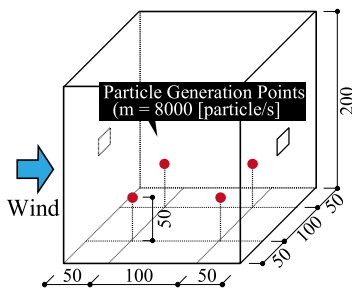


Fig. 3 Particle generation points

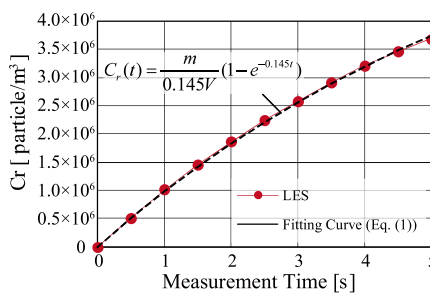


Fig. 4 Particle concentration  $C_r$

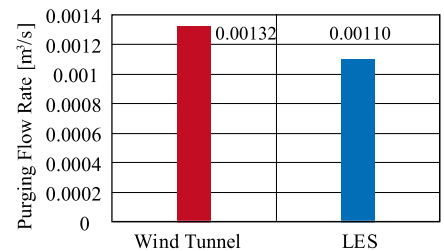


Fig. 5 Purging flow rate (PFR) obtained from Wind Tunnel Test and LES

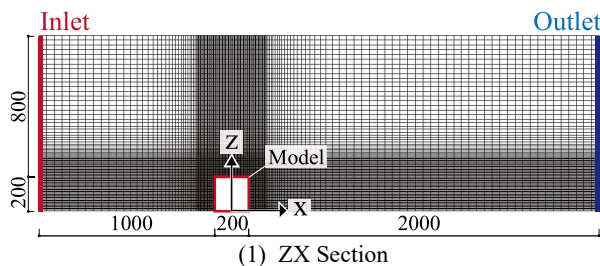


Fig. 6 Computational Domain and Computational grid on ZX and YZ section (Sealed Model)

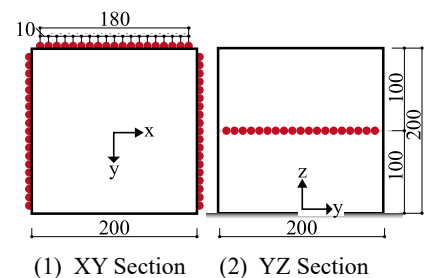


Fig. 7 Monitoring point of  $C_p$  Value

## 2. シールドモデルによる CFD 解析

### 2.1 解析概要および解析条件

シールドモデルを用いて風圧係数を測定した風洞実験を再現した CFD 解析を行った。解析領域は全域計算と同様で、流路内に外寸 1 辺 200 mm の開口を持たない建物を配置した。Fig. 6 に解析領域及びメッシュレイアウトを示す。ここで、総計算格子数は 2,284,272 である。CFD 解析の手法は Table 1 に示した全域計算時と同様であるが、総計算時間は 12 s (24,000 タイムステップ) として、うち最初の 1 s を助走計算とした。

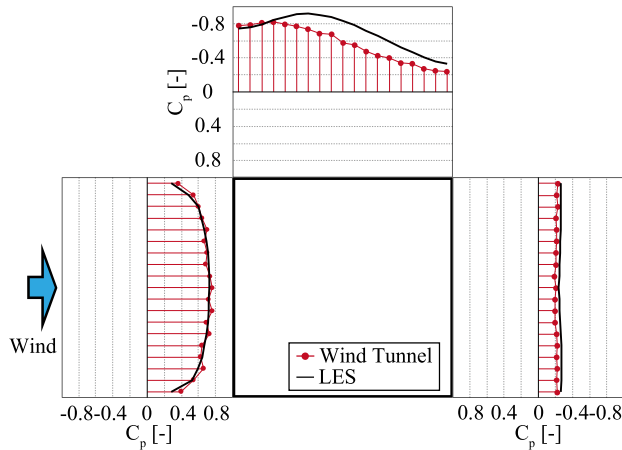
### 2.2 風圧係数評価方法

建物の壁面静圧である風圧を、建物の影響を受けない上流アプローチフローの建物高さでの動圧で除した風圧係数を用いて LES と風洞実験<sup>3)</sup> の結果を比較し、LES の解析精度を評価する。ここでは風洞実験で得られた時間平均の風圧係数を比較することとし、建物の対称性を考慮して Fig. 7 に示す 57 点において全計算タイムステップで壁面静圧を記録した。CFD においても風洞内基準静圧を全タイムステップで記録し、そのモニター点を  $(x, y, z) = (-600, 400, 945)$  に設置した。各タイムステップで得た瞬時の壁面静圧から瞬時の基準静圧を減じることで瞬時風圧求めた。また、瞬時の基準動圧は点  $(x, y, z) = (-1100, 0, 200)$  で取得し、瞬時風圧をこれで除して得られる瞬時の風圧係数を助走計算を除く全タイムステップで時間平均することで平均風圧係数を算出した。

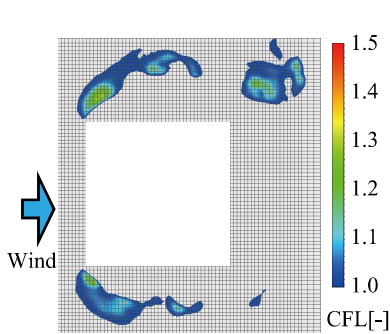
### 2.3 風圧係数分布評価による精度検証

Fig. 8 に LES 解析による本計算開始後 11 s 間の測定点における時間平均風圧係数と風洞実験<sup>3)</sup> で取得した時間平均風圧係数を示す。図より建物風上面と風下面において LES と実験値は非常に良く一致したと言える。一方、

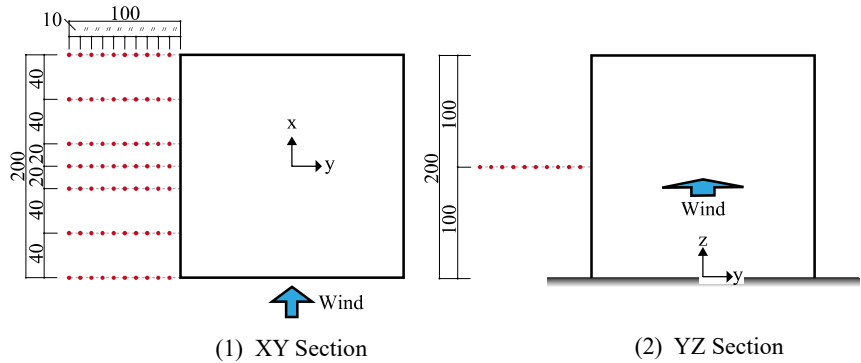
側面においては若干の差異が見られるが実験値と同様の分布傾向を示しており、比較的解析精度の良い結果が得られたと考えられる。なお、ここで見られた若干の差異の原因の一つとして、クーラン数 (CFL) が考えられる。**Fig. 9** に本計算開始後 11 s 時点の CFL が 1 を超える範囲をコンターで示す。本解析では建物近傍のメッシュを比較的細かく施したが、主に剥離による縮流域で瞬時的に CFL が 1 を超えてしまう領域が出現しており、計算タイムステップをさらに細かく設定することで一層の精度向上を図ることができる可能性もある。



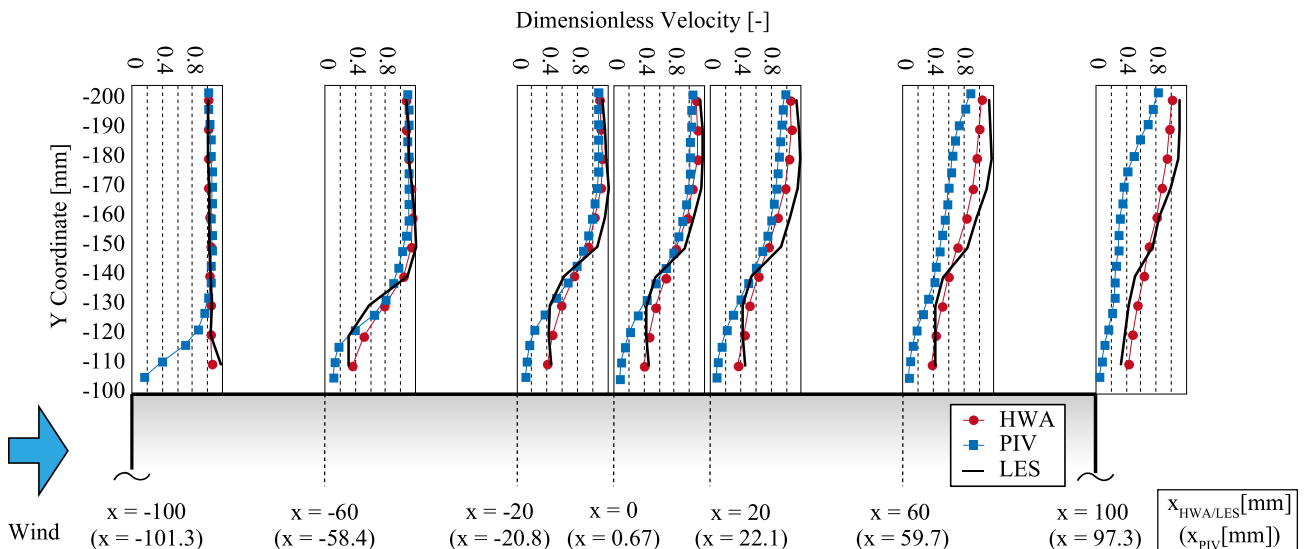
**Fig. 8** Cp Value obtained from LES and experiment



**Fig. 9** Countour of CFL



**Fig. 10** Position of monitoring velocity



**Fig. 11** Velocity in LES and experiment

## 2.4 建物周辺風速の評価方法

本節では LES における建物周辺風速の解析精度検証を行う。ここでは対称性を考慮し、建物側面の片側でのみ平均風速の比較を行う。**Fig. 10** に示す 70 点に瞬時風速のモニター点を設置した。得られた瞬時風速の水平成分を合成することで算出される各点での 2 次元スカラー風速を本計算中の全タイムステップで時間平均し、これを点  $(x, y, z) = (-100, -200, 100)$  における時間平均スカラー風速で無次元化して評価を行う。なお、前報<sup>3)</sup>の熱線風速計の測定結果は水平方向 2 成分の合成風速であると仮定している。

## 2.5 建物周辺風速評価による精度検証

**Fig. 11** に風洞実験<sup>3)</sup>での熱線風速計 (HWA) 及び粒子画像測定法 (PIV) による風速測定で得た結果と、本報の LES で得た建物周辺風速の結果を示す。この結果から、HWA の測定結果と LES の解析結果が非常によく一致したと言える。一方 PIV と LES の結果を比較すると、上流側の壁面から離れた位置ではよく一致しているが、壁面近傍と下流側ではあまり一致していない。これは PIV による測定の際、該当箇所煙粒子が十分に存在しない時間帯があったために、PIV が過小評価をしていた可能性が考えられる。ここでは誤差要因が少ないと思われる

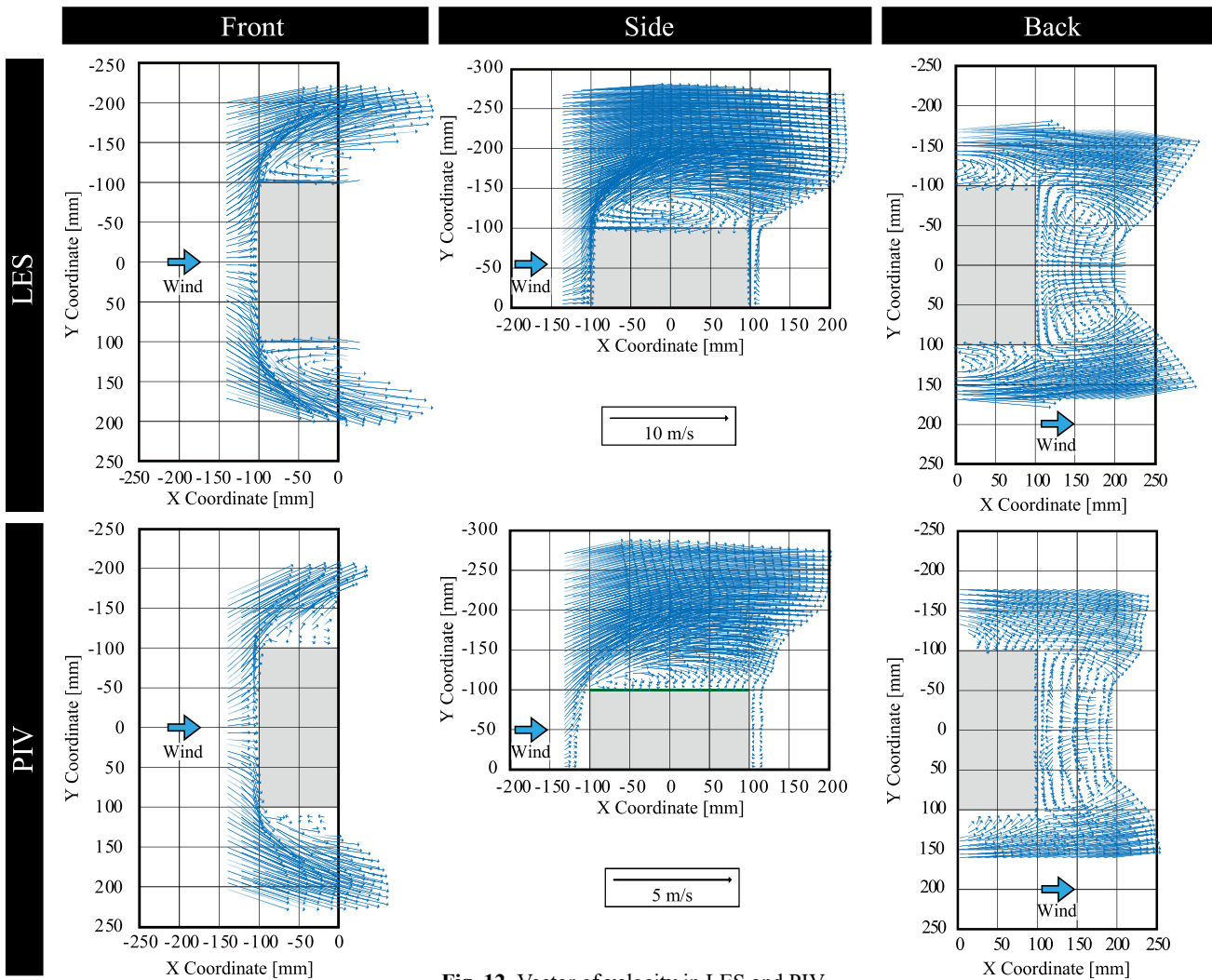


Fig. 12 Vector of velocity in LES and PIV

HWA での測定結果の信頼性が高いものと考え、この結果から建物周辺風速についても LES の解析精度は概ね良好と判断した。

## 2.6 建物周辺風速ベクトル場による評価

本節では建物周辺の気流場の精度を確認することを目的として、PIV と LES の比較を行う。Fig. 12 に建物周辺における平均風速ベクトル分布をそれぞれ示す。なお、PIV ではアプローチフロー風速を 5.0 m/s と半減させて測定されたため、基準ベクトルの長さを変更して表示している。上流部分・下流部分ではベクトル方向が非常に良く一致している事が分かる。また、側面部分では壁面近傍位置では概ね一致、壁面から離れた位置ではよく一致している。近傍位置での差異は、前報<sup>3)</sup>で示した通り PIV で壁面近傍位置に十分にトレーサーが入り込んでいなかったことなどにより測定精度が高くない可能性がある。しかしながら、剥離流や縮流、循環流といった気流パターンは全体的によく一致しており、本研究で実施した LES が概ね精度良く解析できていると考える。今後はシールドモデルで得られた瞬時風圧と瞬時風速のモニター結果を用いて LES で領域分割法の検討を行う。

## 3. まとめ

本研究では LES による領域分割法の提案を目的とし、本報ではその前段階として LES の全域計算とシールドモデルの計算結果を風洞実験結果と比較して精度検証を行った。その結果概ね精度良く解析できていることを確認した。今後は本報の解析結果を用いて LES による領域分割法を適用した解析を行う所存である。

### 【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費 ( 基盤研究 (B) JP20H02311, 研究代表者: 小林知広 ) の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会編: 都市の風環境予測のための CFD ガイドブック, 日本建築学会, 2020.1
- 2) 河内悠磨, 倉渕隆, 大場正昭, 遠藤智行, 塚本健二, 野中俊宏, 鶴田久美子: 領域分割法を用いた数値シミュレーションによる通風室内気流予測に関する研究 (第 1 報) 領域分割法の精度検証, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, D-21, pp.1043-1046, 2009.9
- 3) 佐野香之, 小林知広, 山中俊夫, 丹原千里, 小林典彰, 崔ナレ, 田中佑亮: 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非常数解析法に関する基礎的研究, (その 1) 単室モデルを対象とした風洞実験, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 掲載予定
- 4) A.Smironov, S.Shi, I.Celik : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue 2, pp359-371, 2001.6

## 冷房使用と通風利用の選択における外気温に応じた室温の調節範囲 Adjusted range of indoor temperatures depending on outdoor temperatures during cooling and window opening selection

○渡部 麗杏 (大阪市立大学)

梅宮 典子 (大阪市立大学)

Reia WATABE\*1 Noriko UMEMIYA\*1

\*1 Osaka City University

During summer and autumn, we particularly measured indoor environments, cooling, window opening and closing. Based on the data, we considered the adjusted range of indoor temperature according to outdoor temperatures during cooling (AC) and according to window opening (WO) selection. Results revealed the following. During WO selection, indoor temperatures increase about 0.43°C at night, and about 0.55°C during daytime, per degree rise in outdoor temperature. When outdoor temperatures are higher than 22.1°C, the WO indoor temperature is higher than the AC indoor temperature during night. When outdoor temperatures are higher than 26.3°C, the WO indoor temperature is higher than the AC indoor temperature.

### 1. 研究背景

冷房は熱中症予防のために適切に使用することが必要である一方で、建物内外の寒暖差を生じさせ、「冷房病」などの健康被害をもたらす。窓開放による通風の利用は、自然エネルギーを利用した採涼行為であり、外気環境を室内環境に取り込むことが可能である。さらに、窓開放行為は、温熱環境を調節する在室者による適応行動のひとつであると捉えられている。

de Dear と Brager (1998)<sup>1)</sup>は、温冷感申告と申告に対応する温熱環境測定値、着衣量、活動量を記録した約 20,000 個の観測値からなるデータベースをメタ分析した。その結果、自然通風下の快適温度は月平均外気温度に応じて変化することを示した Adaptive Model を提案した。ASHRAE 基準に導入され実際の設計にも使われている。

本報は、夏季から中間期にかけて、冷房発・停、窓開・閉、室内温熱環境を 20 秒間隔で連続測定したデータに基づいて、冷房及び通風の選択時における内外気温の関係を明らかにし、外気温に応じた室温の調節範囲を検討す

ることを目的とする。具体的には、1)各季節における内外気温の関係はどのようになっているのか、2)室温が外気温に応じてどの程度変化するのか、また、3)内外気温の関係を線形回帰し、Adaptive Model と比較し、4)外気温に応じた冷房選択時と通風選択時の室温を比較したので報告する。

### 2. 方法

実測は、大阪市内の 11 階建て集合住宅 1 棟で、冷房、通風、温熱環境の関係が読み取りやすいようにエアコンが 1 台で間取りが単純 (Fig. 1)、居住者 1~2 人の 9 住戸を対象に 8 月下旬から 12 月中旬まで、室内温熱環境、エアコン吹き出し温度、マグネットスイッチによる全開口部の開・閉を記録した。複数ある開口部のうち、1 つでも開の場合を「開放」、すべて閉の場合を「閉鎖」と定義した。冷房発・停の判定は、冷房吹き出し温度と室温から、居住者の在・不在は玄関の開閉スイッチと照度の記録、居住者へのヒアリングから判定した。屋外環境は、実測対象住棟から西に約 1km 離れた大学建物屋上の気象

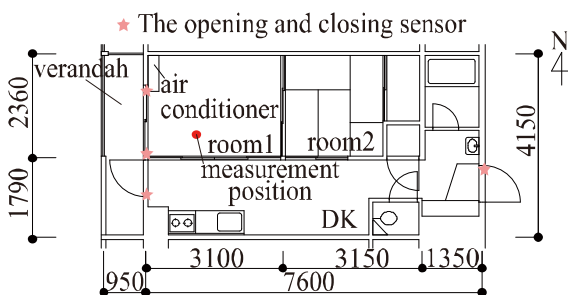


Fig.1 Floor Plan

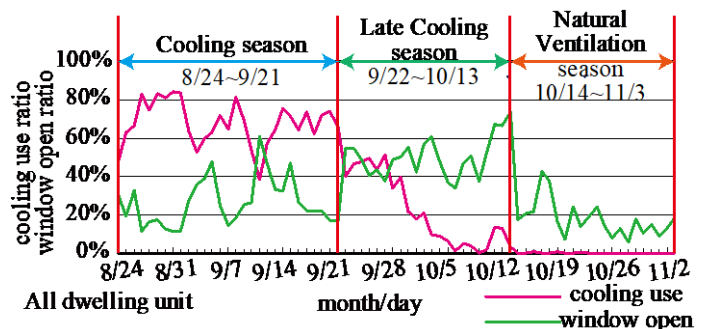


Fig.2 Daily mean ratio of air conditioner use and window opening

観測システムの観測値を用いた。

分析期間は、Fig.2 に示す冷房使用時間率の季節推移をもとに、冷房期、冷房終了期、中間期の3季節とする。温熱環境調節行為は、冷房使用・不使用と窓開閉の組み合わせから、「冷房使用のみ選択」のAC、「冷房使用と窓開放両方選択」のAW、「窓開放のみ選択」のWO、「どちらも選択しない」のFRの4つに分類する。

本報では、各住戸の在宅率の日内変動をもとに推定した過渡状態を除いて分析する。また、生活行為の影響が最も少ないと考えられる夜間 2-5 時と日中 14-17 時の2つの時間帯<sup>2)</sup>を対象とする。

3. 外気温の出現分布

WO 選択時における外気温の出現状況を調べた。

Fig. 3 に冷房期における 1℃刻みにした外気温の出現分布を示す。正規性の検定に Kolmogorov-Smirnov 検定を適用すると  $p < .01$  で、データは正規分布に従っているとはいえない。平均値は夜間 24.1℃、日中 29.7℃である。最頻値は夜間 25℃、日中 31℃である。日中は 28~33℃に分布が集中している一方で、23℃にもピークがある。これは、実測期間のうち、1 日だけ外気温が他の日と比べて低い日があり、そのデータが影響していると考えられる。よって、外れ値とみなし、冷房期の日中の外気温は 25℃未満を除くこととした。

Fig. 4 に冷房終了期における 1℃刻みにした外気温の出現分布を示す。正規性の検定に Kolmogorov-Smirnov 検定を適用すると、 $p < .01$  で、データは正規分布に従っているとはいえない。平均値は、夜間 21.0℃、日中 25.3℃

である。夜間は 23℃、同程度に 20℃が多く、日中の最頻値は 22℃である。

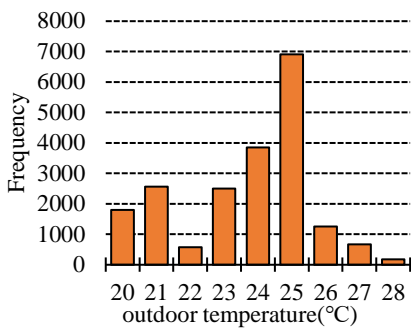
Fig. 5 に中間期における 1℃刻みにした外気温の出現分布を示す。正規性の検定に Kolmogorov-Smirnov 検定を適用すると、 $p < .01$  で、データは正規分布に従っているとはいえない。平均値は、夜間 15.0℃、日中 20.8℃である。最頻値は、夜間 15℃、日中 22℃である。

4. 調節行為別内外温熱環境の関係

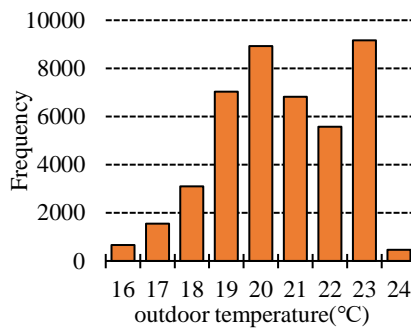
外気温に対する室温の関係について、季節別、調節行為別に述べる。室温も外気温も 95%レンジを分析した。調節行為の違いによって、同じ外気温に対して室温はどう異なるのか、季節による違いにも着目する。Table. 1 に回帰式、決定係数、データ数 N を季節別、調節行為別にまとめて示す。

Fig. 6 に冷房期における外気温と室温の関係を示す。夜間では、決定係数は、Table. 1 に示した通り、WO 選択時のみ 0.1 以上である。外気温が 1℃上昇すると室温は約 0.4℃上昇する。同じ外気温に対して室温は、26.5℃以下において、FR、WO、AC の順に高い。日中では、決定係数は、WO 選択時のみ 0.35 であてはまりがよく、外気温 1℃あたり室温は約 0.3℃上昇する。同じ外気温に対して室温は WO、FR、AC の順に高く、FR と AC はほとんど平行している。

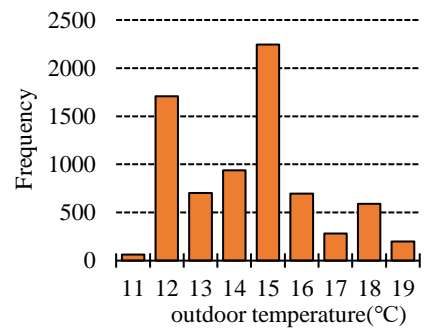
Fig. 7 に冷房終了期における外気温と室温の関係を示す。夜間では、決定係数は WO 選択時で 0.34 とあてはまりがよく、FR 選択時で 0.16 とやや当てはまりがよい。AC 選択時は、外気温と無関係に室温が決まっているのに



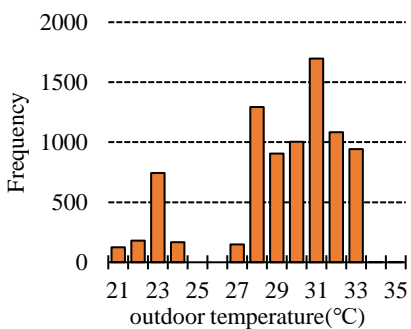
(1) night



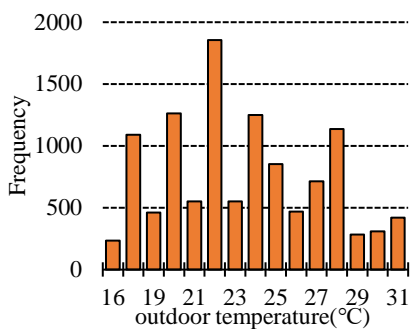
(1) night



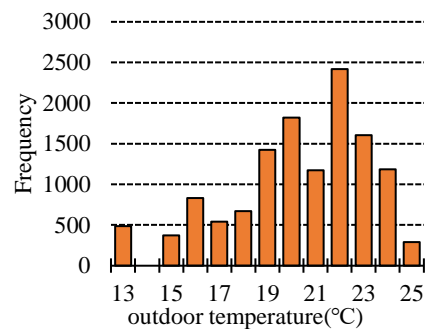
(1) night



(2) daytime



(2) daytime



(2) daytime

Fig.3 Frequency of distribution about outdoor temperature (Cooling season)

Fig4. Frequency of distribution about outdoor temperature (Late Cooling season)

Fig5. Frequency of distribution about outdoor temperature (Natural Ventilation season)

対して、WO 及び FR 選択時は外気温が高いと室温が高い傾向がある。外気温 1℃あたり、室温は、WO 選択時で約 0.4℃、FR 選択時で約 0.3℃上昇する。夜間の外気温の最頻値 23℃における室温は、FR、WO、AC の順に高い。日中では、決定係数は、WO 選択時が 0.56、FR 選択時で 0.26 とあてはまりがよい。WO と FR は外気温 28.3℃に交点をもつ。外気温 1℃あたり、室温は WO 選択時で約 0.4℃、FR 選択時で約 0.2℃上昇する。

Fig. 8 に中間期における外気温と室温の関係を示す。中間期では、AC は選択されない。夜間では、WO も FR も決定係数が 0.1 以下で回帰式のあてはまりは悪い。同じ外気温に対して室温は、FR 選択時の方が WO 選択時より高い傾向がある。日中では、WO 選択時の決定係数が 0.50 とあてはまりがよい。外気温 1℃あたり室温は約 0.4℃上昇する。同じ外気温に対して室温は、FR 選択時の方が WO 選択時より高い傾向がある。

5. Adaptive Model との対応

WO 選択時における内外気温の関係を de Dear ら (1998)<sup>1)</sup> が提案した Adaptive Model の回帰式  $y=0.31x+17.8$  の勾配と比較する。縦軸は快適とは限らないが、在室者の調節による定常状態の室温である。

Fig. 9 に WO 選択時における各季節の外気温と室温の関係を示す。夜間における回帰式の勾配は、冷房期が 0.40、冷房終了期が 0.41、中間期が 0.16 である。冷房期と冷房終了期の勾配は、Adaptive Model の勾配 0.31 より大きい。日中における回帰式の勾配は、冷房期が 0.33、冷房終了期が 0.42、中間期が 0.40 である。すべての季節

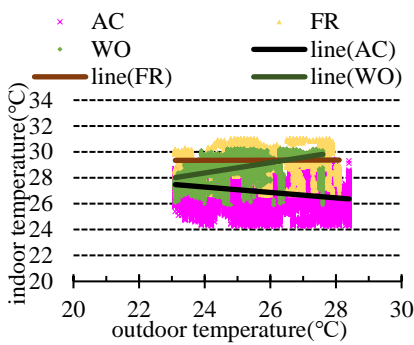
で勾配は Adaptive Model の勾配 0.31 より大きく、冷房期では同程度である。

Fig. 10 に、冷房期から中間期までの合計の WO 選択時における外気温と室温の関係を示す。夜間の回帰式の決定係数は 0.67 とあてはまりがよい。勾配は 0.43 で Adaptive Model の勾配 0.31 より大きい。日中の回帰式の決定係数は 0.81 とあてはまりがよい。勾配は 0.55 で Adaptive Model の勾配 0.31 より大きい。

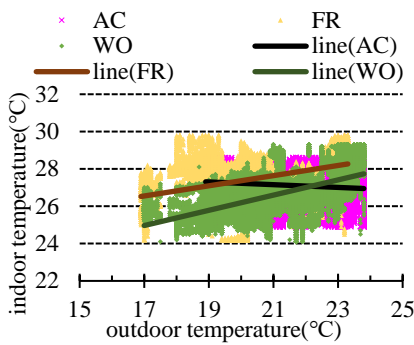
以上により、WO 選択時において、各瞬間の外気温と室温との関係の勾配は、各季節において、中間期の夜間以外は Adaptive Model より大きい。3 季節合計の場合、勾配は Adaptive Model より大きく、外気温 1℃当たり室温は、夜間では 0.43℃、日中は 0.55℃上昇する。Adaptive Model は、長期的な関係を示しているが、瞬時値でみて

Table.1 Seasonal refression formula

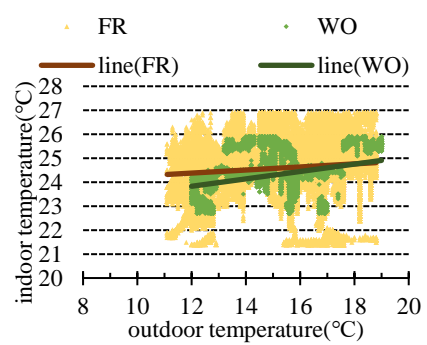
		refression formula	R <sup>2</sup>	N
Cooling season	night	AC $y=-0.21x+32.3$	0.07	58,580
		WO $y=0.40x+18.8$	0.16	14,386
		FR $y=0.004x+29.3$	0.00003	17,388
	daytime	AC $y=-0.08x+30.0$	0.02	20,766
		WO $y=0.33x+20.5$	0.35	6,865
		FR $y=-0.03x+30.5$	0.002	2,612
Late Cooling season	night	AC $y=-0.073x+28.7$	0.01	21,238
		WO $y=0.41x+18.1$	0.34	40,317
		FR $y=0.27x+21.9$	0.16	29,054
	daytime	AC $y=-0.04x+28.9$	0.02	7,707
		WO $y=0.42x+17.0$	0.56	16,795
		FR $y=0.18x+23.8$	0.26	9,391
Natural Ventilation season	night	WO $y=0.16x+22.0$	0.10	7,012
		FR $y=0.06x+23.6$	0.02	77,739
	daytime	WO $y=0.40x+16.0$	0.50	11,517
		FR $y=0.17x+22.1$	0.07	14,565



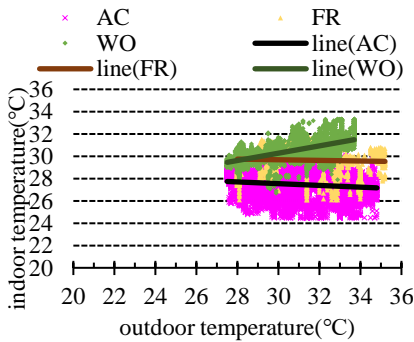
(1) night



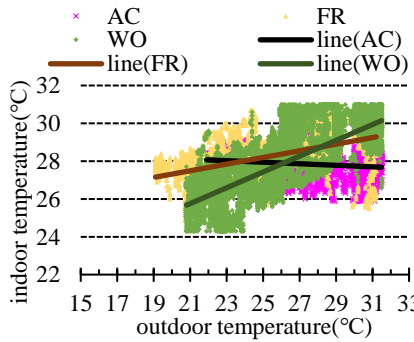
(1) night



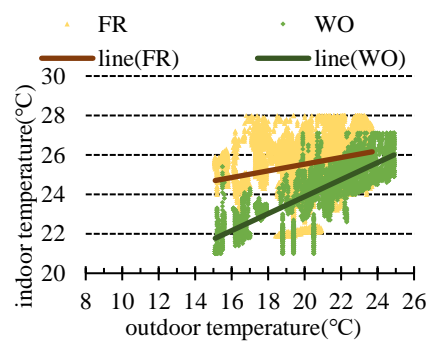
(1) night



(2) daytime



(2) daytime



(2) daytime

Fig.6 Relation of indoor and outdoor temperature (Cooling season)

Fig.7 Relation of indoor and outdoor temperature (Late Cooling season)

Fig.8 Relation of indoor and outdoor temperature (Natural Ventilation season)

も室温は外気温に応じて決まっており、外気温が室温を決定する傾向は瞬時値の方がより強いことが示された。

6. 外気温に応じた室温の調節範囲

Fig. 11 に3季節合計のW0選択時とAC選択時の外気温に対する室温との関係を示す。夜間のW0選択時の回帰式は、 $y=0.43x+17.7$ 、決定係数は0.67であてはまりがよい。AC選択時は決定係数が0.04であてはまりが悪い。AC及びW0の回帰直線の交点は、外気温22.1℃、室温27.2℃である。同じ外気温に対して、外気温22.1℃以上は、W0選択時の方が室温は高く、外気温22.1℃以下では、W0選択時の方が室温は低い。

日中のW0選択時の回帰式は、 $y=0.55x+13.4$ 、決定係数は0.81であてはまりがよい。AC選択時は決定係数が0.05であてはまりが悪い。AC及びW0の回帰直線の交点は、外気温26.3℃、室温27.9℃である。同じ外気温に対して外気温26.3℃以上では、W0選択時の方がAC選択時に比べ室温は高く、26.3℃以下ではW0選択時の方が室温は低

い。

7. 結論

20秒間隔で測定した冷房発・停、窓開・閉、室内温熱環境のデータに基づいて、内外気温の関係を Adaptive Model と比較した。通風選択時の外気温と室温の関係は、1)中間期夜間を除き直線回帰でき、外気温が1℃上昇すると室温は約0.3~0.4℃上昇、2)中間期夜間を除き、線形回帰の勾配は Adaptive Model の0.31より大きく、冷房期の日中は0.33でほぼ同じ、3)3季節合計の室温の瞬時値は外気温の瞬時値に応じて変化し、外気温が1℃上昇すると、室温は夜間約0.43℃、日中約0.55℃上昇する。瞬時の室温は Adaptive Model より敏感に外気温に反応、4)3季節合計の通風選択時の室温は同じ外気温に対し、夜間では外気温22.1℃以上のとき冷房選択時より高く、日中では外気温26.3℃以上のとき冷房選択時より高い。

【参考文献】 1)de Dear ら, ASHRAE transactions, 145-167, 1998  
 2)NHK 国民生活時間調査2015年, <https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/>, 2021年2月16日閲覧

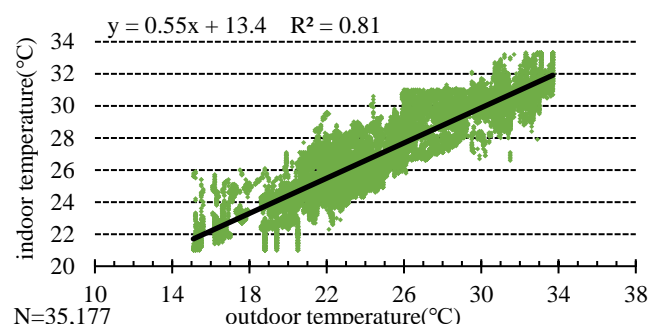
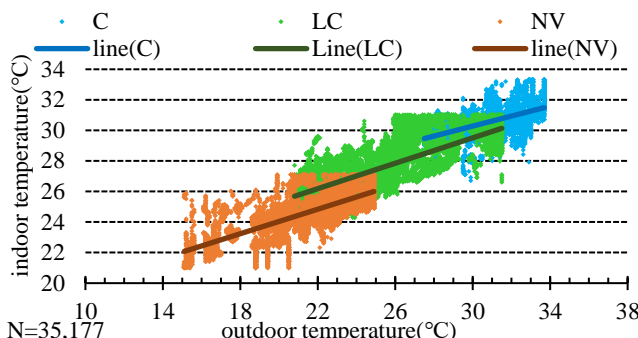
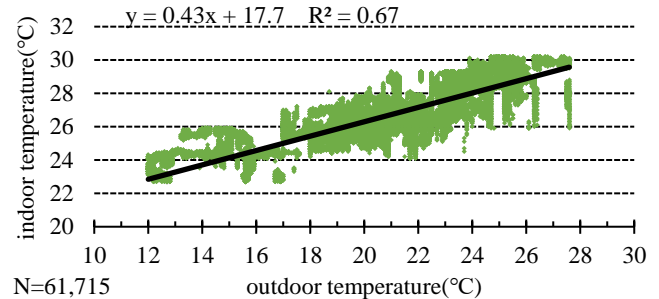
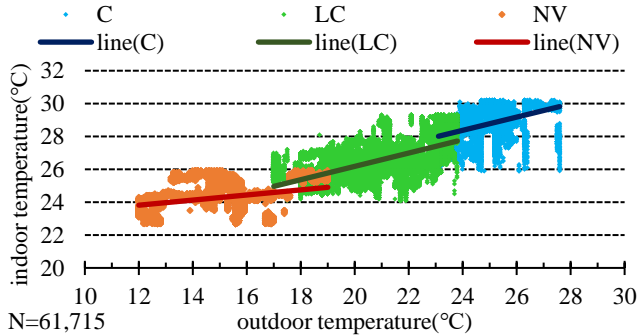


Fig.9 Seasonal Relation of indoor and outdoor temperature (W0)

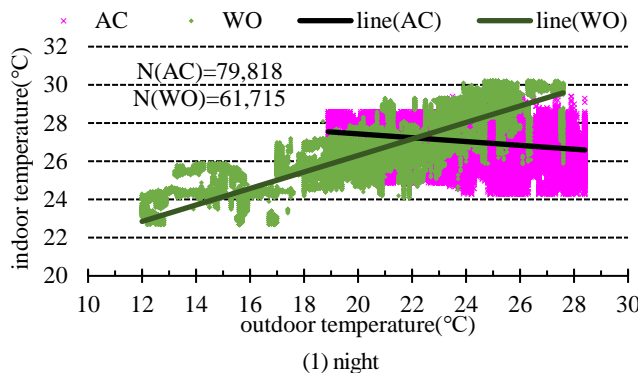


Fig.10 All season Relation of indoor and outdoor temperature (W0)

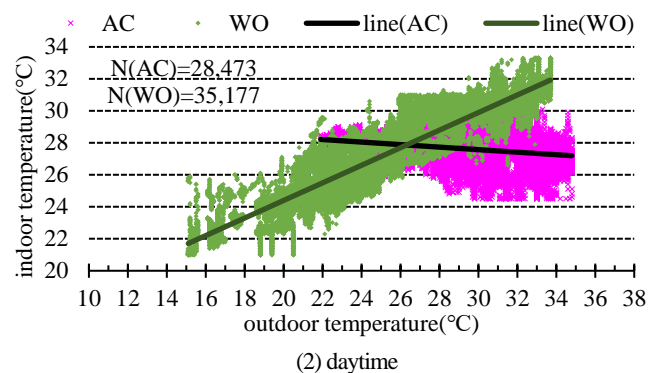


Fig.11 All season Relation of indoor and outdoor temperature (AC and W0)

香り環境下における学習効率に関する研究  
(その6) 間欠的香り噴霧時における主観評価に関する検討  
**Learning Performance in Odor Environment with Aroma Oils**  
**(Part6) Study of Subjective Evaluation of Odor under Intermittent Spraying**

○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)

Masato HIRANO<sup>\*1</sup> Toshio YAMANAKA<sup>\*1</sup> Narae CHOI<sup>\*1</sup>

Akihisa TAKEMURA<sup>\*2</sup> Tomohiro KOBAYASHI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>Osaka University <sup>\*2</sup>Setsunan University

It is known that odor has a psychological effect, and it is often used to change one's mood, such as aromatherapy. Many studies have also reported that odor affects cognitive functions, indicating that the odor environment could improve learning performance in the learning space. In our previous research, it was revealed that the aroma of lemon might have a positive impact on learning performance and subjective evaluation. However, odor adaptation was observed because the participants were exposed to the odor continuously. In this study, the odor intensity and preference under intermittent aroma spraying with different intervals and concentrations were examined.

### 1. はじめに

近年ウェルネス建築への関心が高まり、室内環境の快適性や知的生産性の向上が注目されており、その一つの方法として、オフィスの執務室や休憩室に香りを取り入れる事例がある。一方で、学習空間に香りを取り入れた実用例はほとんどなく、学習時の香り環境が学生に及ぼす影響については未解明である。

本研究では、学習空間における香り環境の有効性の検証と、最適な噴霧方法の提案を目的とし、パネル実験により検討を行う。本報では、香りの噴霧間隔と濃度変化が与える影響に着目し、間欠噴霧時の香りへの順応特性と主観評価を調べた結果を報告する。

### 2. 実験概要

本実験は2020年12月～2021年1月にかけて、本学学内の実験室にて実施した。パネルは全員非喫煙者で、嗅覚テストに合格した18歳～28歳の本学学生21名(男性12名、女性9名)を採用した。また、パネルには時間に応じて適切な報酬を支払った。

実験は実験室内に設置した、PET製フィルムで覆われたステンレス製のチャンバー(7.65m<sup>3</sup>)で行った。実験チャンバーの平面図及び断面図をFig.1に示す。室内の換気は、実験室内の空気をポンプで活性炭に通し、無臭の空気を約90m<sup>3</sup>/hで給気した。サーキュレーターを2台設置し、室内に香りを攪拌させた。室内の温熱環境による影響がないことを確認するために、室中央部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、PMVを測定した。

### 2.1 実験条件

使用した香りについては、既往研究<sup>2)</sup>において嗜好度の高かったオレンジスイートの精油を採用した。香りの噴霧には、1秒単位でディフューザーの噴霧時間を調整することのできる、業務用アロマディフューザー(アットアロマ社製、all-in-one-type)を用いた。

実験のタイムスケジュールをFig.2に示す。インストラクションの音声をヘッドホンから流し、実験を進めた。1回90分間の実験で、1人あたり2回行った。香りに対する主観評価を1条件につき32分間行い、1回あたりに2条件実施した。噴霧条件の順番をパネルごとに変えることで条件間の順序効果を考慮した。

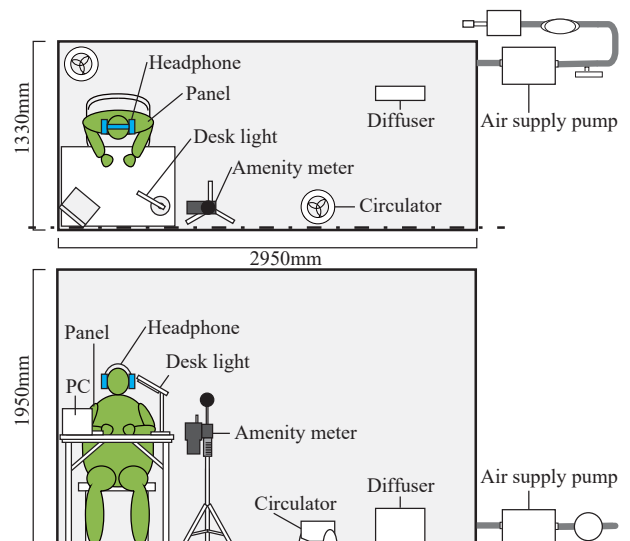


Fig.1 Plan of Experimental Chamber

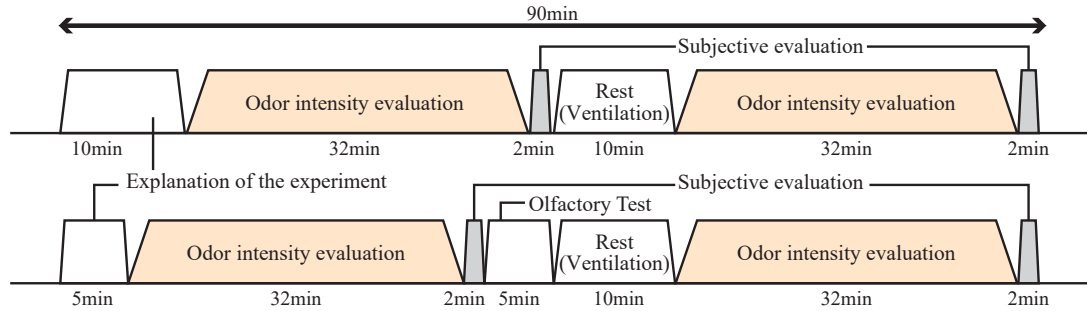


Fig.2 Time Schedule of Experiments

Table 1 Experimental Conditions

	Spray Rate[mg/sec]	Spray Interval[sec]	Time of Spraying[sec]	Average Concentration of indoor air[mg/m <sup>3</sup> ]	Peak Concentration of indoor air[mg/m <sup>3</sup> ]
Basic Conditions (5min,5sec)	0.932	300	5	0.622	0.968
Conditions(1) (10min,7sec)	0.932	600	7	0.434	0.978
Conditions(2) (10min,10sec)	0.932	600	10	0.624	1.366
Conditions(3) (53sec,3sec)	0.415	53	3	0.923	1.002

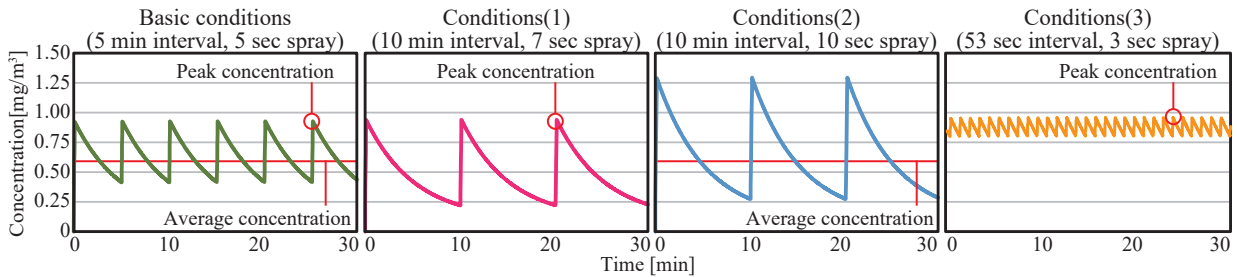


Fig.3 Changes in Odor Concentration of Indoor Air in the Experimental chamber

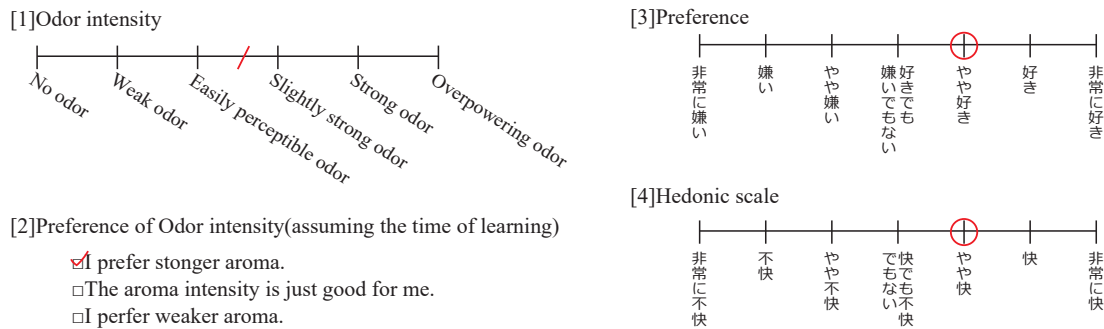


Fig.4 Subjective Evaluation Scale

2.2 噴霧条件

香りの噴霧条件を Table 1 に示す。ここで、間欠噴霧の香りの噴霧間隔については、5 秒間の香り噴霧に対し、換気量を 90m<sup>3</sup>/h としたとき、嗅覚閾値まで香りが減衰する時間を予備実験より検討し、5 分の噴霧間隔を基本条件とした。

また、5 分間の基本条件とピークの臭気濃度が等しい 10 分間隔 7 秒間の香り噴霧を比較条件 (1)、平均濃度 (総噴霧量) が等しい 10 分間隔 10 秒間の香り噴霧を比較条件 (2) とした。連続的な曝露を模擬した条件と比較するために、ピークの臭気濃度を基本条件に合わせた 53 秒周期 3 秒間の香り噴霧を比較条件 (3) とした。噴霧間隔を短くし濃度変化を小さくするために運転モードを変えて噴霧量を減らした。噴霧された香りが瞬時一様拡散されることを仮定し、式 1 により香りの濃度変化について検討したものを Fig.3 に示す。

$$Cr = Cro \times e^{-nt} + \frac{M}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad \dots(1)$$

Cr: 臭気濃度  
 n: 換気回数  
 Cro: t=0 の臭気濃度  
 M: 噴霧量 [mg/sec]

2.3 主観評価項目

主観評価項目を Fig.4 に示す。臭気強度の変化を調べるために、30 秒に 1 回の頻度で臭気強度の評価を 32 分間行った。時間の経過による香りの感じ方の変化も調査するために、上記に加えて嗜好度や快・不快度の評価をさせた。ここで、香りの強さに対する嗜好度 (評価項目 [2]) を「欲求度」と定義する。

また、上記の 32 分間の主観評価終了直後に、実際の学習行為を想定した場合の「香り環境」に対する受容度を調査するために、①教室で講義を受けると想定したとき、②自習室で自習をすると想定したとき、③自宅で勉強をすると想定したときについて評価させた。

3 結果・考察

3.1 香り環境に対する受容度の結果

学習時を想定した香り環境に対する受容度の結果を Fig.5 に示す。平均値を比較すると、全ての項目で比較条件 (2) の受容度が最も高い結果となった。また最低値についても比較条件 (2) がどの条件よりも高いことから、多くのパネルにとって比較条件 (2) が学習時に最も受け入れられやすい噴霧条件だと考えられる。

3.2 基本条件における臭気強度、欲求度の結果

全パネルにおける基本条件の臭気強度及び欲求度の結果を Fig.6 に示す。左側縦軸が臭気強度、右側縦軸が欲求度を表す。全体的に時間の経過とともに臭気強度が下がる傾向はあまり見られず、香りが間欠的に噴霧されていたことにより、嗅覚順応が軽減していたと考えられる。

パネル 7、10、13、14、15 に着目すると、香りの濃度変化に対応した臭気強度の変化をしており、臭気強度が上昇するときに欲求度が低下する傾向がみられた。パネル 3、8、12 に着目すると、香りが減衰したときも香りを感じ、欲求度にはほとんど変化が見られなかったため、間欠噴霧の濃度変化の影響を

受けにくい傾向があると示唆される。

一方で、パネル 1、5 に着目すると、香りの濃度変化の影響を受けず、臭気強度が大きく変動し、欲求度については臭気強度の影響を受ける傾向がみられた。

斉藤ら<sup>3)</sup>は連続曝露における臭気強度の経時変化に対して 5 種類に分類した結果を報告したが、間欠的な曝露における知見は不十分である。そこで本実験では、前述した臭気強度結果の特徴より、パネル 15 のように香りの濃度変化に敏感な「敏感型」とパネル 8 のように臭気強度の変動が小さい「不変型」、パネル 5 のように香りの濃度変化の影響を受けず臭気強度の変動が大きい「変動型」の 3 種類に分類し、検討を行う。

3.3 分類ごとの主観評価結果の比較

上記で分類した 3 つのパターンの一例として、パネル 5、8、15 の 3 名の臭気強度と欲求度の結果を Fig.7 に、臭気強度と快・不快度の結果を Fig.8 に示す。横軸が経過時間、左側縦軸が臭気強度であり、右側縦軸がそれぞれ欲求度と快・不快度を表す。

比較条件 (3) では緩やかに臭気強度が低下していることからわずかに順応を確認できた。全体的に快・不快度は高く、香りの噴霧を知覚して臭気強度が急上昇したときに欲求度と同様に低下する傾向が見られた。

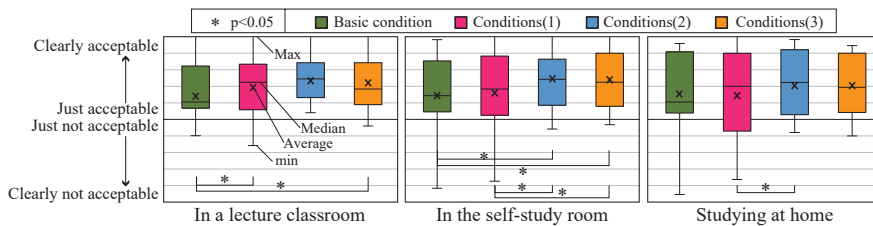


Fig.5 Acceptability of Odor Environment

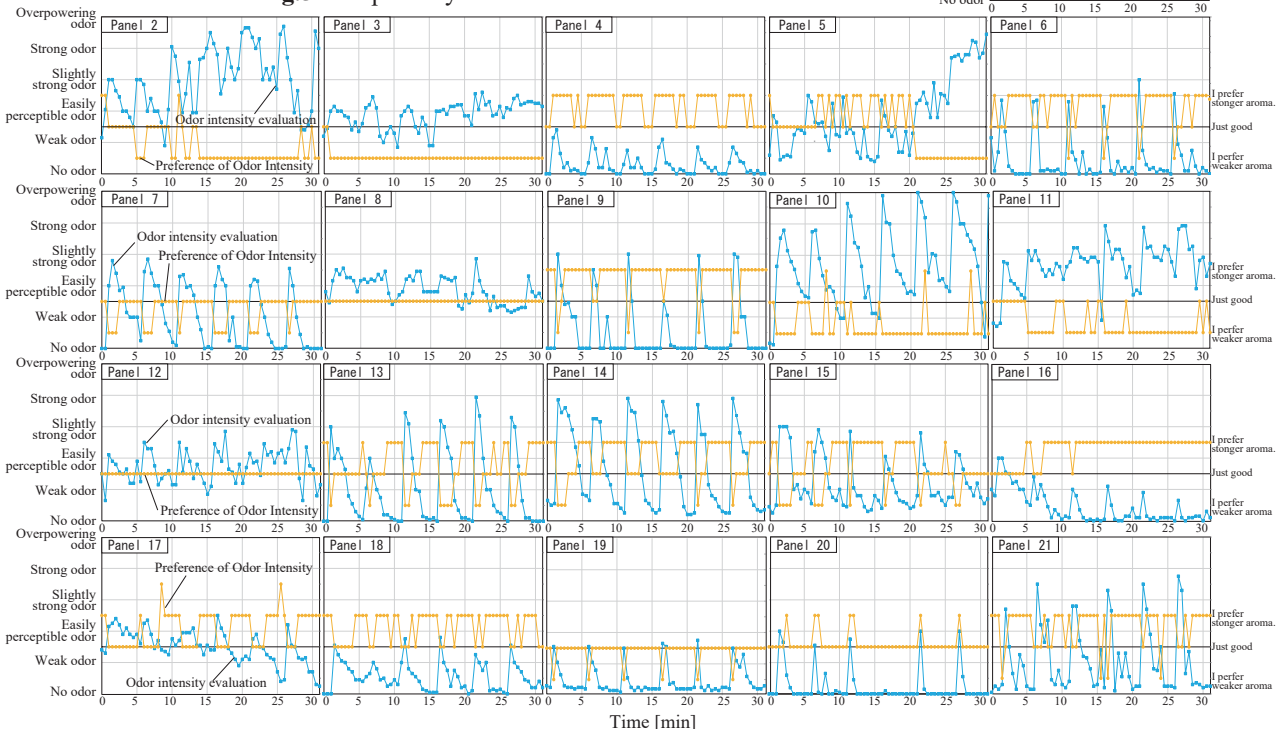


Fig.6 Odor Intensity and Preference of Odor Intensity of Basic Condition

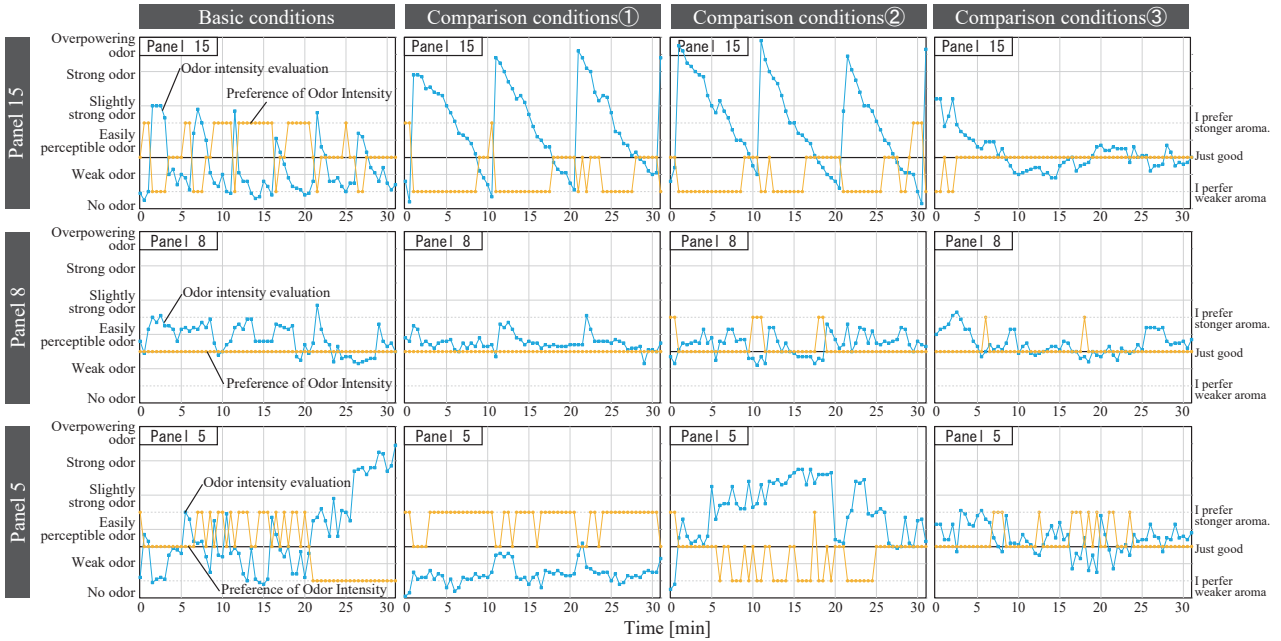


Fig.7 Odor Intensity and Preference of Odor Intensity of all Conditions

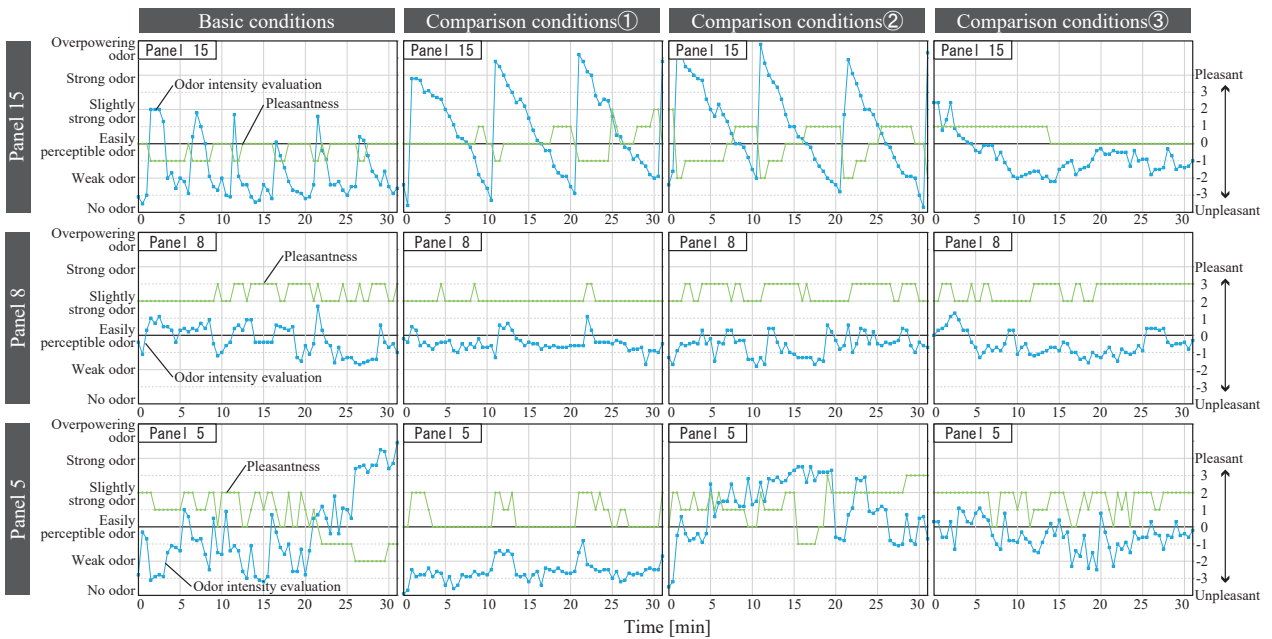


Fig.8 Odor Intensity and Pleasantness of all Conditions

4. おわりに

本報では、香りを間欠的に噴霧した環境下における主観評価の変化について、パネル実験により検討を行った。臭気強度結果から、「敏感型」、「不変型」、「変動型」の3つのパターンに分類して考察した。欲求度や快・不快度については、全体的に臭気強度が急上昇した際に低下する傾向がみられた。また、学習時を想定した受容度の結果では、10分周期10秒噴霧の比較条件(2)で最も評価が高く、多くの学生にとって受け入れられやすい香り環境を形成できている可能性が考えられる。今後は、実際に学習行為をさせ、間欠噴霧時の香り環境が知的生産性や学習時の心理評価に与える影響について検討を行う所存である。

なお、本研究は大阪大学工学研究科倫理委員会の承認を得ている。

【謝辞】

本研究は、ダイキン工業(株)との共同研究であり、関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 平野、山中、崔、竹村、小林、衛藤：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、令和元年度空調調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2020.3
- 2) 崔、衛藤、山中、竹村、小林：気中噴霧アロマ精油による香りが学習効率と印象評価に及ぼす影響、室内環境学会学術大会講演要旨集、pp.96-97、2019.12
- 3) 斉藤、飯尾、小早川、後藤：持続提示する臭気に対する感覚的強度の多様な時間依存性、におい・かおり環境学会誌、No.35、Vol.1、pp.17-21、2004

# エネルギー多消費型施設のリニューアル ZEB 化に関する取り組み

## Renewal Plan for ZEB Development for the Next-Generation

### Research Facility of Energy Consumption

○信藤 邦太 (大成建設)                      岩村 卓嗣 (大成建設)

Kunita SHINDO\*1    Takuji IWAMURA\*1

\*1 TAISEI CORPORATION

#### はじめに

本取り組みは、既存材料実験棟の ZEB 化を伴う増改修工事である。従前の施設は、新たな研究・開発のニーズに対し、フレキシブルな実験環境の創出やイノベーションを促すための機能・空間を十分に提供できない状態であった。そこで本計画では、施設の高機能化を図るとともに、様々な省エネルギー技術の導入により、民間研究関連施設では国内初となる「Nearly ZEB (75%以上の省エネルギー効果がある施設)」を目指した。

#### 1. 建物概要及び導入技術

Table.1 に建物概要を示す。また、Fig.1 に導入技術を示す。空調、照明、実験エネルギー等の削減を汎用技術と開発技術の組み合わせによって、大幅なエネルギー消費量を削減するとともに、屋上の太陽光発電設備を利用した創エネにより、設計段階で Nearly ZEB を実現している。

#### 2. 次世代実験環境制御システム

本施設は、環境 (Environment)、健康・衛生 (Health)、安全 (Safety) の3つのカテゴリー (EHS) をコンセプトとし、エネルギー多消費型施設の省エネルギー化と、研究者の健康と衛生面を考慮した実験環境の快適性、及び安全性を確保することを目指した。その代表的な技術が、今回開発・導入した次世代実験環境制御システム (Fig.2) である。本システムは、実験に使用するドラフトチャンバーに導入する外気を機器近傍に直接吹き出すことにより、大幅な空調エネルギー削減を図っている。また、実験に使用する試薬の種類、特性に応じて室内の排気位置を上方・下方と選択でき、排気風量の強弱、緊急といった形で切り替えることができることから、無駄のない実験室の運用を実現でき、省エネに寄与している。

#### 3. 運用実績値と ZEB 評価

計画値と、建物の運用開始後1年目 (2019年6月～2020年5月) の実績値を ZEB チャートに示したものを Fig.3 に示す。運用実績としては計画値をはるかに上回る省エネルギー化を図ることができ、結果として基準値から100%以上エネルギー消費量を削減の『ZEB』を達成した。

#### 4. まとめ

オフィス等ですでに普及している汎用的な技術と、次世代実験環境制御システムのような研究施設ならではの

Table.1 Building outline

	建物名称 技術センター 材料と環境のラボ 所在地 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 建築用途 研究所 建築主 大成建設株式会社 設計監理 大成建設株式会社一級建築士事務所 建築面積 1,818㎡ 延床面積 15,190㎡ 階数 地下2階、地上3階 構造 鉄筋コンクリート造 施工 大成建設株式会社横浜支店 工期 2017年3月～2018年9月 建物性能 ZEBプランナー・リーディングオーナー Nearly ZEB (BESTプログラム)登録
--	---

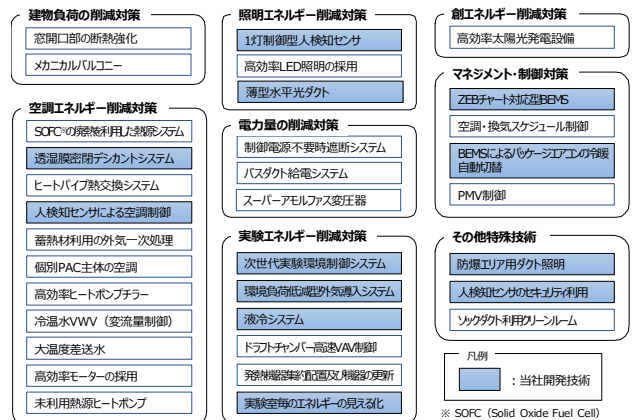


Fig.1 Introduction technology

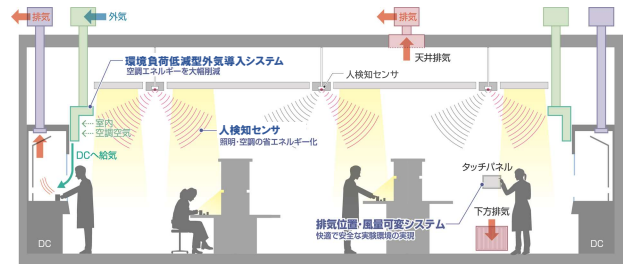


Fig.2 The next generation environment control system

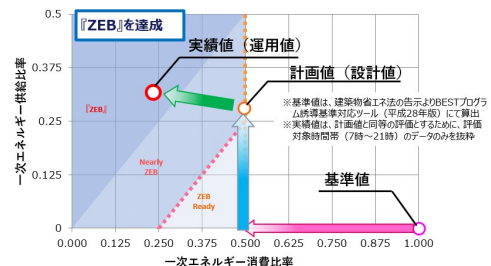


Fig.3 ZEB Evaluation in Operation

技術によって、エネルギー多消費型施設においても、運用実績値で『ZEB』を達成することができた。今後も継続して分析を行っていく。

市立吹田市民病院におけるレジリエンス強化と環境性能向上の両立  
Both strengthening resilience and improving environmental performance at Suita Municipal Hospital

大成建設株式会社設計本部  
Taisei Corporation Design Division  
矢後 佐和子  
Sawako Yago

キーワード：ISS 階 (Interstitial Space System)、クールヒートトレンチ(Cool and Heat Trench)、BCP 対応統合型 BEMS  
(Integrated Type BEMS of BCP Visualization & BCP Control)

## 1. はじめに

市立吹田市民病院は、JR 岸辺駅北側の吹田操車場跡地エリアで、吹田市と摂津市が「健都(北大阪健康医療都市)」という「健康・医療」をコンセプトとした国際級医療クラスターを目指す街づくりを行っている地域に建設され 2018 年 7 月に竣工した。市民病院の基本理念である『市民とともに心ある医療を』を実現するために、①防災拠点としての安全性・耐震性の確保、②環境負荷を抑えた施設、③変化に対応する柔軟性をもった施設、④快適で利用しやすい環境づくり、⑤ライフサイクルコストの適正化、の 5 つのコンセプトを整備方針として建物を計画した。

特に地域や地球環境への配慮(環境負荷の低減)に重きを置いており、CASBEE の第三機関の認証による設計段階の評価で、最高位の『S』ランク(BEE 値=3.0)を取得している。病院では全国 7 番目の『S』ランク取得となった。地球環境の配慮への取り組みとして、太陽光・地中熱等の自然エネルギーの有効利用と、地下水の外気予冷予熱・雑用水利用、積極的な緑化、メンテナンス性・清潔環境の維持実現など様々な技術の導入や工夫を行っている。

## 2. 計画概要

### 2-1. 建築概要

本建物は JR 岸辺駅にペDESTリアンデッキで直結している。計画地周辺では市民病院の他に、隣接して複合商業施設が設けられている。岸辺駅や副業商業施設とデッキで繋がる 2 階に主要外来機能を集約し、3 階には手術エリア、ICU、救急病棟、4～8 階は病棟エリアとなっており、病 431 床を有している。図-1 に断面構成図を示す。

### 2-2. 変化に対応する柔軟性

JR 岸辺駅から続くデッキの床レベルを病院の 2 階レベルとすることで生じた、6.8m となる 1 階の階高を有効利用し、1 階と 2 階の間に ISS 階(設備専用中間階)を設け、低層外来部門の外調機を集中設置している。図-2 に外調機の設置状況写真を示す。ISS 階に集約設置することで、病院諸室に入ることなくメンテナンス・更新が可能となるようにしている。ISS 階は 1 階への騒音伝達や漏水の懸念を考慮し、外調機設置エリアにはスラブを設け、ダクトや配管展開部は必要に応じて点検用キャットウォークを設けた。



図-1 断面構成図

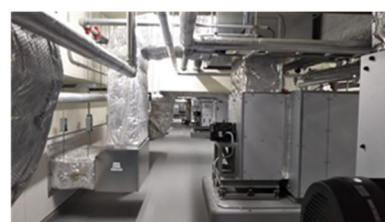


図-2 ISS 階空調機械室内部写真

設備配管、電気配線、ダクトスペースの一部は外部シャフト化し、メンテナンス時の病院運営へ影響を軽減するとともに、諸室のレイアウトの自由度を高め、将来の改修の制約も軽減できるようにした。外部シャフトは外観のアクセントにもなっており、夜にはライトアップを行っている。図-3 に外部設備シャフトの外観写真、図-4 に ISS 階と合わせた断面概念図を示す。



図-3 外部設備シャフト外観写真

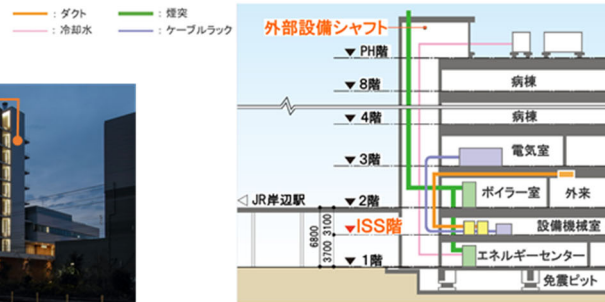


図-4 ISS 階・外部設備シャフト断面概念図

### 3. レジリエンス強化と環境性能向上のための取り組み

本病院施設は地域の中核を担う病院として、レジリエンス強化と環境性能向上の両立を図った。図-5 にその取り組みを示す。

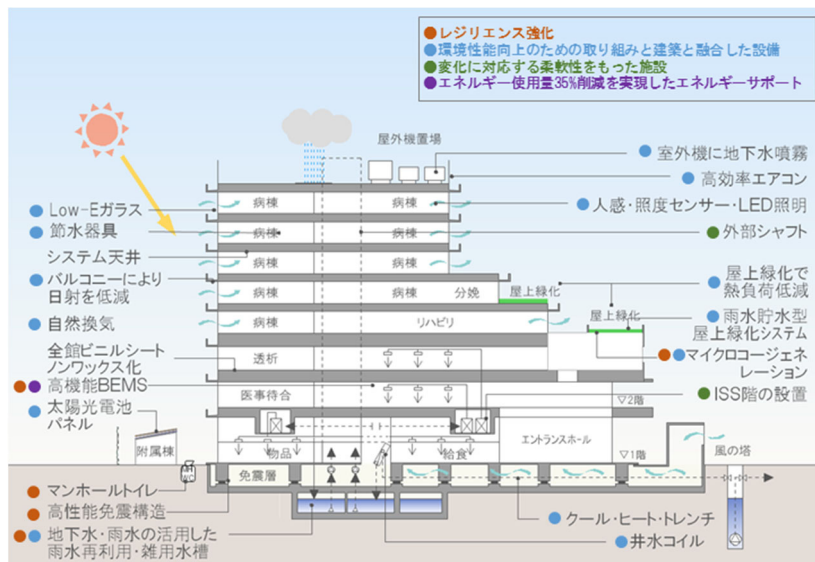


図-5 レジリエンス強化と環境性能向上のための取り組み

#### 3-1. 信頼性の高い熱源システム

熱源システムは信頼性・経済性・環境性・メンテナンス性に考慮し計画した。図-6 に熱源システムフローを示す。

空調熱源は負荷用途に応じたエネルギーを使用し、年間で安定した室内負荷の対応を電気熱源、変動する外気負荷の対応をガス熱源とした。室内負荷のなかでも運転時間が短い外来エリアは GHP を主体とし、病室等連続運転となるエリアは EHP を採用した。また、蒸気の利用は医療用・厨房用の必要最小限に抑え、給湯用には貫流ボイラーに比べ効率の良い真空式給湯ボイラーを採用した。

災害時に対してはヒエラルキーをつけた計画として

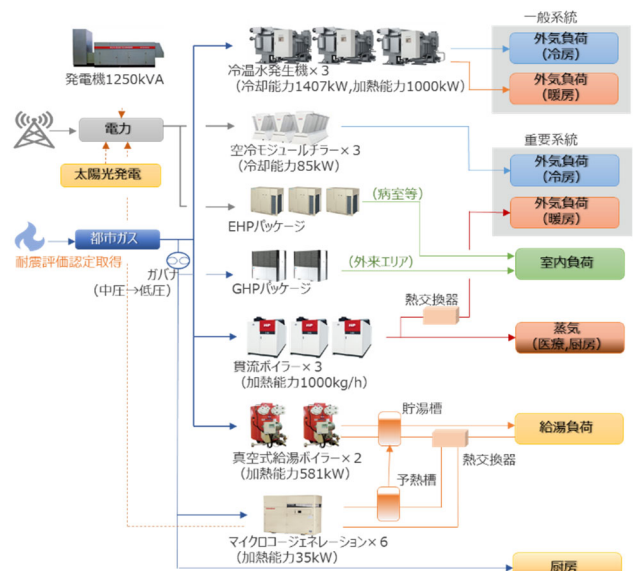


図-6 熱源システムフロー

おり、①発電機バックアップを受けた空冷モジュールチラーを手術室やICU等の重要系統の外気処理に利用、②信頼性を向上した中圧ガスを熱源としたマイクロコージェネレーションにより電力供給、GHPによりトリージ待機スペースとなる外来エリアを空調できる計画とした。また、厨房についても中圧ガスにより継続利用可能としている。

### 3-2. 災害に強く信頼性の高いインフラ

防災拠点としてインフラ途絶時においても、72時間以上の事業継続を確保できるよう、電力、給水、排水、ガス、医療ガスについて対策を行っている。インフラのレジリエンス強化対策を図-7に示す。

雑用水槽は通常使用量の3日分の貯水を行い、さらに地下水を水源としており、井戸ポンプが稼働する限り使用することができる。

電力についてはBCP対応統合型BEMSにより

災害時の機能維持時間を調整することが可能となっている。(詳細は4章に示す。)

### 3-3. 災害時でも衛生的環境が確保できるインフラ途絶対策

災害時の下水道途絶に備え地下二重ピットに緊急排水槽を設置した。容量は平常時使用量の3日分(453m<sup>3</sup>)とした。

また、病院棟の排水はすべて地下二重ピットの汚水槽へ放流後、ポンプアップとする方式を採用することで、災害時に使用できる水回りを限定せず、院内の災害時の対応の幅を持たせた計画としている。図-8に排水システムフローを示す。

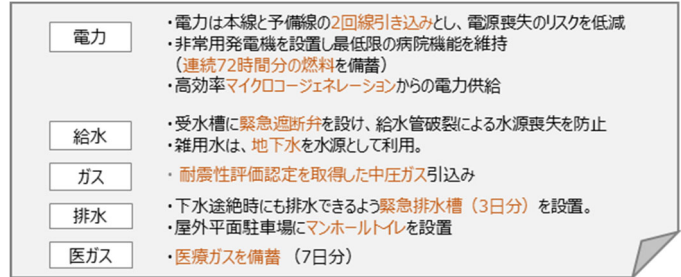


図-7 インフラのレジリエンス強化対策

### 3-4. 中圧ガスの耐震評価認定取得

耐震評価認定は、通常ガス専焼発電設備を導入する際以外には取得できないが、本計画では災害拠点病院としての重要性から特別に敷地境界線までの耐震評価認定を取得することができた。

中圧ガスは、冷温水発生機・貫流ボイラー・真空式給湯ボイラーに供給し、専用ガバナを介した低圧ガスをGHPパッケージ・マイクロコージェネレーション・厨房に供給している。

### 3-5. クールヒートトレンチによる地中熱利用

免震層を利用したクールヒートトレンチにより外気の子冷予熱を行っている。外気の取り入れ口は『風の塔』と名付けて、エントランス脇に『環境配慮型病院の象徴』として配置している。図-9に断面イメージを示す。

風の塔は風の流れをモチーフとした壁面緑化が施されており、夜には風の流れのモチーフをLEDで表現し、エントランス空間を演出している。図-10に風の塔の外観写真を示す。

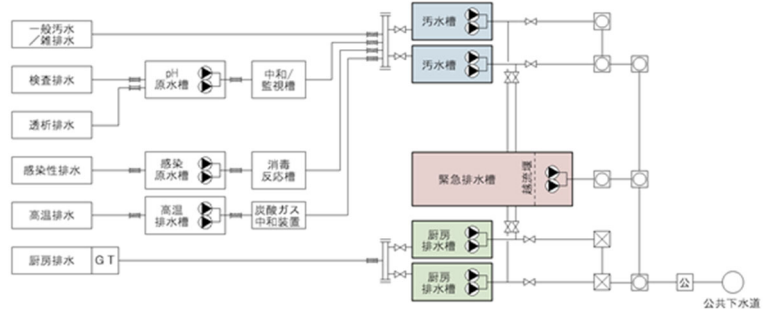


図-8 排水システムフロー

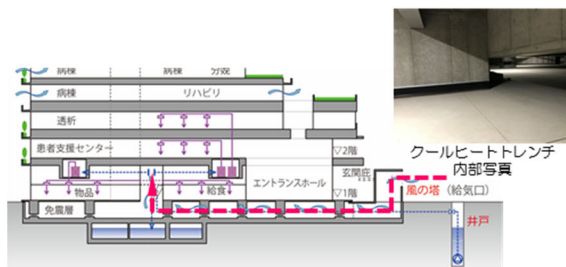


図-9 クールヒートトレンチ断面イメージ図

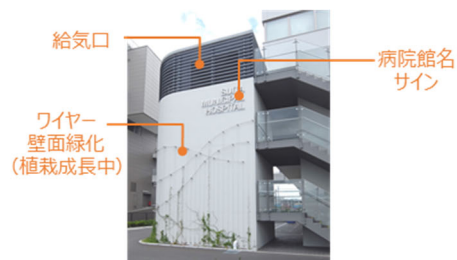


図-10 環境配慮型病院の象徴 風の塔

### 3-6. 地下水の外気予冷予熱・雑用水利用

『風の塔』から取り入れ、クールヒートトレンチで予冷予熱された外気は、更に井水コイルによって予冷予熱され、ISS 階に設置の外調機へ供給される。図-11 に断面イメージ図を示す。

予冷予熱で用いた井水は雑用水として多段階活用している。クールヒートトレンチ、井水コイルを通過する外気は病院棟全体外気量のおよそ 70%に相当する約 200,000m<sup>3</sup>/h で外来エリアを主とした病院棟低層部の外気取入れに利用している。

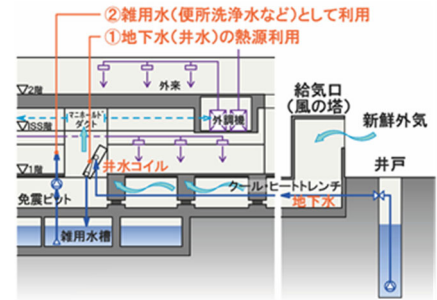


図-11 井水の多段階活用断面イメージ図

### 3-7. 電力平準化のための高効率マイクロコージェネレーション

排熱利用効率から求められる最大容量 (35kW×6 台) の高効率マイクロコージェネレーション設備を設置した。

排熱は給湯熱源に使用している。予熱槽を設置することにより刻々と変化する給湯負荷に対応している。また、配管の放熱ロスの加温にも排熱を利用することで、給湯量が少ない時間帯の排熱利用率を向上させている。

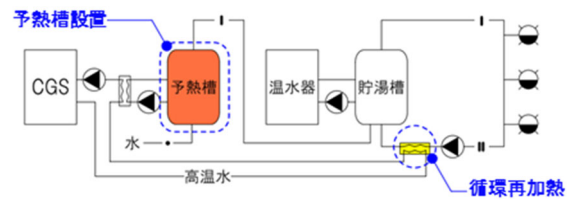


図-12 MCGS 廃熱利用イメージ

図-12 にシステムフローを示す。

## 4. レジリエンス性能を飛躍的に向上させる BCP 対応統合型 BEMS (T-BC Controller) の開発と導入効果

### 4-1. BCP 対応統合型 BEMS の開発

東日本大震災後、災害時の運用の難しさを様々な調査結果、書籍や映像、当事者へのヒアリング等から感じ、建築設備を、もっと簡単に誰でも使いこなせるようにするため“車のナビ”のようなものを作りたいと考えてきた。災害発生時に建築設備に精通した人が現地に居るとは限らない。BCP を実行に移すには、状況を理解しやすく、見やすい情報パネルが非常に有効であると考えた。そこで、混乱した状況下において、インフラ設備の被害状況と予想される必要使用量を早く正確に情報提供する見える化機能を開発・導入した。

加えて、予め計画された災害時機能維持時間に合わせて、建築設備を自動的にコントロールするシステムを実現した。

さらに災害状況によっては、例えば災害拠点病院の施設基準で求められる 72 時間以上、機能維持が必要な場合に備え、あらかじめその状況をシミュレーションし、短期、中期、長期と 3 段階に設定変更が可能で、より柔軟な対応が可能な機能とした (図-20,写真-12 参照)。

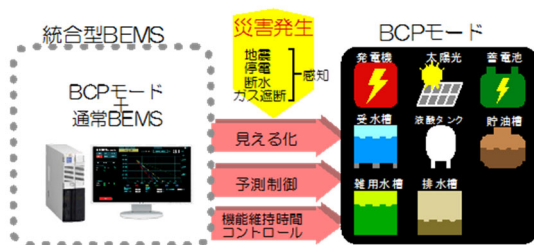


表-1 レベル別機能維持時間

短期 (レベル1)	機能維持 72時間 (3日間)
中期 (レベル2)	機能維持 120時間 (5日間)
長期 (レベル3)	機能維持 168時間 (7日間)

図-13 BCP 対応統合型 BEMS (T-BC Controller) の概要

### 4-2. システム構成と特徴

本システムは、BEMS と連動した BCP モードに対応した統合型 BEMS である。災害時には、エネルギー使用量から機能維持可能時間を予測し、建物設備をコントロールする機能を備えている。BEMS システムのアプリケーションソフトウェアとして提供することにより、比較的安価で汎用性のある BCP 対応のシステムとして運用することを目指した。また、通常時はエネルギー管理のために用いられている BEMS に統合すること

により、被災時のみにしか使用しない遊休設備となることなく運用することができる。

#### 4-3. BCP モード移行トリガー

災害情報、停電、断水、ガス供給遮断などを感知すると、それらをトリガーとし、ポップアップで立ち上がり、ユーザーに災害発生を知らせるとともにインフラ設備の維持可能時間の予測を開始する。供給インフラの状況（電力、市水、ガス）を素早く把握、備蓄インフラ（発電機燃料、飲用水、雑用水）の供給可能時間や排水貯留槽への放流可能時間を実際の使用量から予測し、機能維持時間の見える化を行い、適切な災害時活動方針の決定を支援する。さらに、あらかじめ策定した機能維持時間となるように負荷を選択し、使用量をコントロールする制御機能を備えている。また、災害規模により外部の支援が期待できない場合には、機能維持時間を3段階のレベルに設定変更が可能である。

BCP モード立ち上がり時は、短期（レベル1）にて予測制御を開始するようにした。病院機能の維持時間は、災害拠点病院の施設基準（厚生労働省）で求められている72時間（3日間）とした。大規模都市圏の広域災害時を想定し、救助や燃料の補給に時間がかかる場合も予想されるため、中期（レベル2）、長期（レベル3）は表-1に示す時間とした。

#### 4-4. BCPモード画面は情報把握しやすいUIを実現

各設備の使用状況などの情報を一元管理できるような画面を用意し、ユーザーによる煩雑な操作を不要とし情報把握しやすいUI（ユーザーインターフェース）とした。各設備アイコンをクリックすると、系統図を用いたグラフィック画面で詳細な状況を表示するようにした。被災時のパニック状態でも混乱しないように、可能な限り感覚的に操作しやすい使用勝手を目指した。図-14,15に画面事例を示す。



図-14 各設備のBCP画面例

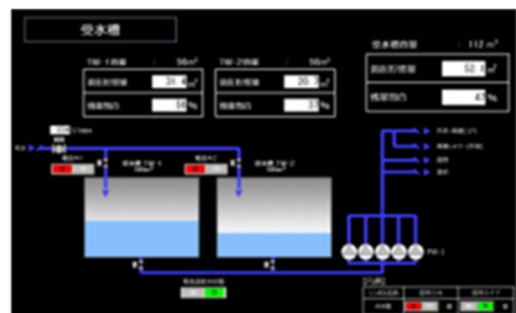


図-15 給水システムのグラフィック

#### 4-5. 機能維持時間の予想の見える化

災害発生からインフラ容量がどのように変化し、現状の運用を続けると、あと何時間で枯渇するのか、直近の使用量から演算を行う。図-16に非常用発電機オイルタンクの運転可能時間予測画面を示す。点線で予想グラフを表示し、機能維持時間の把握を可能とした。

災害が発生した時、油や水の備蓄が規定容量を満足しているとは限らない。例えば油は経年劣化による廃棄量を少なくするために定期的な試運転により消費され、減っている可能性もある。又、水の備蓄は引込設計水量や給水装置のON/OFFレベル設定によっては、夕方頃は受水槽容量の50~70%程度の容量となっている場合も考えられる。災害発生時には正確に現状を把握する事が重要である。全ての備蓄容量や主要な機器の稼働状況の「見える化」を行なった。

#### 4-6. 機能維持時間のコントロール

インフラ設備の維持可能時間を予測しても、条件によっては目標とする維持時間の確保ができない場合が想定される。本システムでは予測した維持可能時間を確保するため、目標とする日時から大きく予測値が乖離した場合に、中央監視システムに対して制御レベル信号をBACnet通信で出力することで、インフラの使用を抑

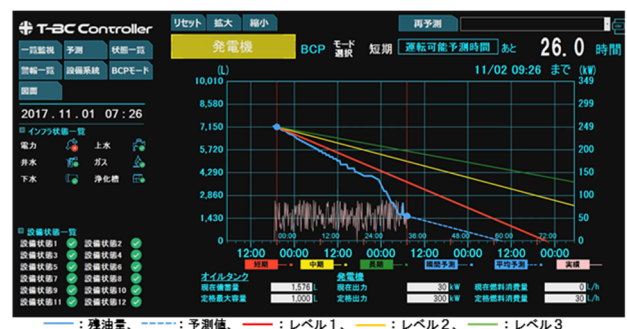


図-16 BCP対応統合型BEMSの運用画面例

制し、目標とする設備の維持可能時間の確保を行う。

設備機器の制御は、利用者の混乱を防ぐために、段階ごとに設備・機器の制御を行う。この制御では、制御当初は最小レベルの信号を出力し、その後改善されない場合に徐々にレベル信号を上げて出力を行うことで段階的な制御を実現した。

表-2 制御レベルの出力範囲

モード	制御レベル
平常時	0
短期	1～5
中期	6～11
長期	11～15

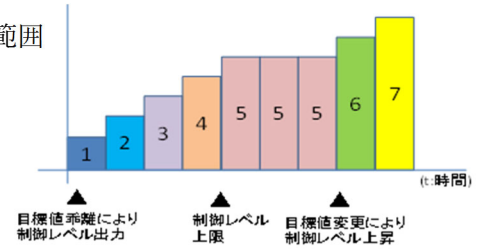


図-17 各レベルの制御範囲例

例えば、目標とする維持可能時間の確保が困難な場合、重要負荷を含めた設備の制御を行うレベルを変更することにより維持可能時間の確保を行う。また、短期／中期／長期のレベルに応じて制御する範囲を限定することで、医療用設備など人命にかかわる重要設備に関わる制御に対するフェイルセーフを設けている。

吹田市民病院では、重要負荷を医療継続のための手術室やICUの電源・空調、透析機械、給排水ポンプ類、サーバー用電源と設定し、制御レベルの高位に設定した。トリアージ待機スペースやスタッフステーションの空調等は保安負荷とし中位に設定し、状況に応じて切断していくこととした。

## 5. クールヒートトレンチと地下水利用による外気負荷低減

### 5-1. 病院における外気負荷低減対策

病院の空調換気設備においては、院内感染防止のため、ロビーなど一部の室を除いて、還気を設けることなく、全外気空調システムとして設計するのが一般的である。また、他の用途に比べて、外気処理量が多いのが特徴である。本施設においても、外調機 32 台すべてが全外気システムであり、外気負荷をいかに低減するかが省エネルギーのポイントであった。

そこで、複数の空調機に調和された外気を導入することで、各空調機の外気負荷を低減させることとした。その実現のために以下の2つの計画を行った。

① 施設の中心部に ISS 階を設け、外調機を集中設置させ、調和空気を導入させやすくした。

ISS 階の中央部にはマニホールダクトを設置し、各外調機へ処理外気を導入させている。また、マニホールダクトを建物の両側まで延長させ、外壁にガラリ接続させることで、緊急時の外気取り入れを可能としている。

② 外気処理のためのエネルギーを施設の特性や自然エネルギーを利用して最小化した。

本施設の場合、免震構造を取っているため、免震層をクールヒートトレンチとして利用する計画とした。免震層は地中壁に面しており、年間を通じて安定した地中熱を有効に利用することができる。

さらに、クールヒートトレンチから ISS 階に外気を導く途中に年間を通じて安定した地下水熱を有効利用することで更なる省エネルギーを図った。予冷予熱後の地下水は雑用水槽に貯留し、便所洗浄水などに多段階に有効活用している。図-18 にこれらの外気の流れを示す。

### 5-2. クールヒートトレンチ利用計画

免震層内に外気を流入させ、外気を処理するにあたって、①クールヒートトレンチとして最大限にエネルギー利用すること、②免震層内に汚染物質を発生させることなく外気を空調機に導き入れること、の2点に配慮した。

これらを解決するため、いくつかのパターンについて CFD シミュレーションを実施し、トレンチ内の温度状況、温度ムラを確認し、最終案を決定した。検討パターンを表-3 に示す。最終案ではトレンチ内風速は 5m/s に抑え最大限の効果を得るとともに、カビ等を防止するため空気が滞留しないようトレンチ内の入隅部を設けないようにしている。

クールヒートトレンチの設置範囲は上階排水管の有無により規制があったが、可能な範囲で拡張し、約

2,115 m<sup>2</sup>とした。また、取り入れ外気がより長くトレンチ床面と温度交換できるように間仕切り壁を2箇所設置し、空気の通過経路が長くなるように調整した。これによりトレンチ長さは128mとなった。

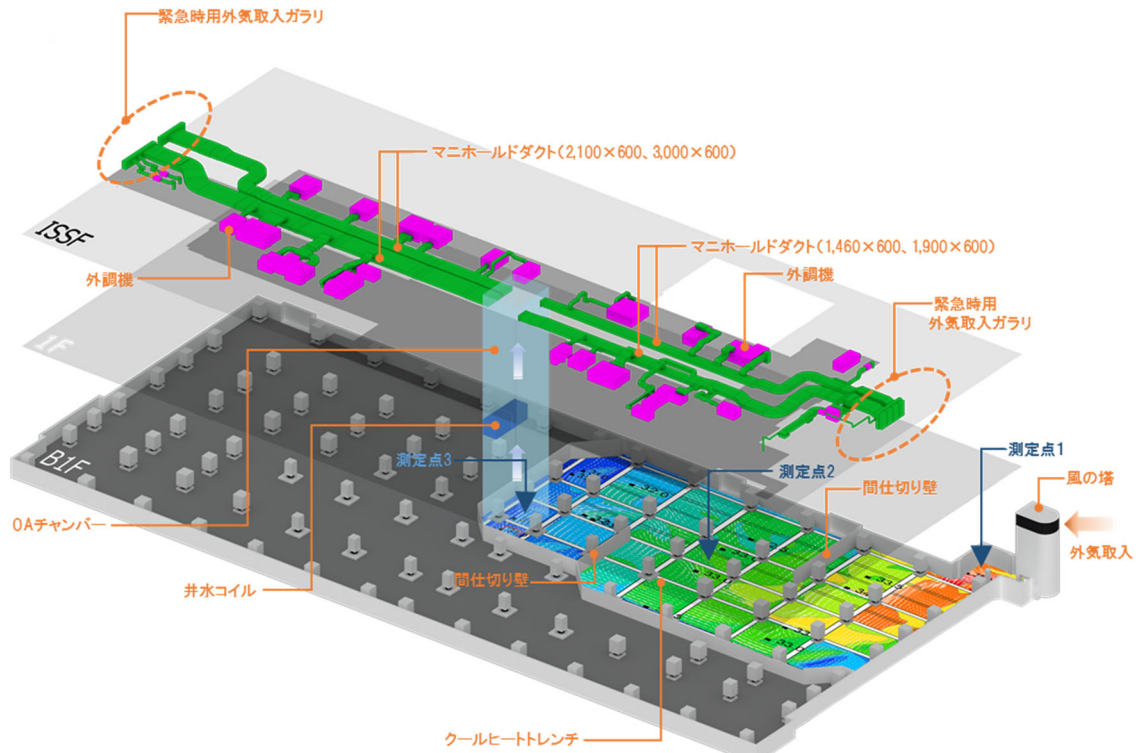


図-18 クールヒートトレンチ・井水コイル・ISS階マニホールドダクトまでの外気の流れ

表-3 検討パターン

		内部壁	ビット 表面温度	入口温度 [°C]		出口温度 [°C]		温度差 [°C]		風量 [m <sup>3</sup> /h]	熱量 [MJ/h]	
				夏期	冬期	夏期	冬期	夏期	冬期		夏期	冬期
①	熱交換面積増加案	無し	変動	35.4	0.3	34.6	1.3	-0.8	1.0	200,000	-176.1	220.2
②	①+内部壁設置案	有り	変動	35.4	0.3	34.5	1.3	-0.9	1.0	200,000	-198.1	220.2
③	②+風量半減案	有り	変動	35.4	0.3	33.9	2.2	-1.5	1.9	100,000	-165.1	209.2
決定	②+ビット表面温度固定	有り	固定	35.0	0.8	31.0	4.8	-4.0	4.0	200,000	-880.7	880.7

最終決定案のシミュレーションによる温度分布を図-33に示す。実施設計段階のシミュレーションによる予冷予熱効果は夏期、冬期ともに4°C程度となった。

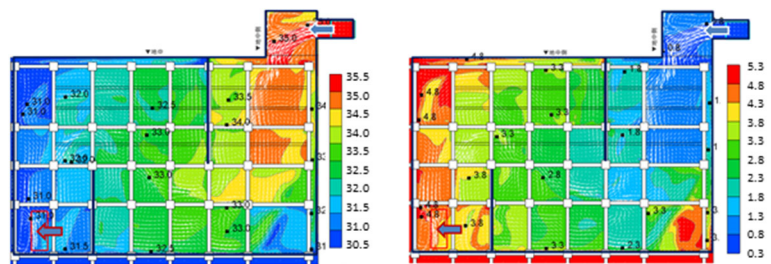


図-19 最終決定案温度分布予測図 (左:夏期 右:冬期)

### 5-3. 実測によるクールヒートトレンチの検証

竣工後、クールヒートトレンチの効果検証のため実測を行った。

クールヒートトレンチの冬期、中間期、夏期の効果検証のため2020年2月7日(金)~2020年7月1日(水)の期間、クールヒートトレンチ内3カ所に表面温度、温度・湿度センサーを設置し、自動計測を行った。測定間隔は10分間とした。また、外気温湿度についてはBEMSのデータを利用した。図-18に測定位置、表-4に測定項目を示す。

クールヒートトレンチの空気温度実測値を図-20に示す。予熱・予冷効果は概ね4°C程度、最大で5°Cを超える場合があり、シミュレーションによる予測値と合致した。一日のうちで朝の外調機立上げ時間帯に最も大きな予熱効果を得られており、立上げに伴うエネ

表-4 測定項目

No.	測定点	測定項目	測定機器
1	入口	床表面温度	熱電対+データロガー
		空気温度	温湿度計(おんどとり)
		空気温・湿度	温湿度計(おんどとり)
2	中間地点	床表面温度	熱電対+データロガー
		空気温度	温湿度計(おんどとり)
		空気温・湿度	温湿度計(おんどとり)
		空気湿度	湿度センサー
3	出口	床表面温度	熱電対+データロガー
		空気温度	温湿度計(おんどとり)
		空気温・湿度	温湿度計(おんどとり)

と合致した。一日のうちで朝の外調機立上げ時間帯に最も大きな予熱効果を得られており、立上げに伴うエネ

ルギー削減に貢献している。また、空調機入口における床表面温度と露点温度の比較を図-21 に示す。常に床表面温度が露点温度より高いことがわかる。また、外気入口ならびに中間地点でも常に床表面温度が露点温度より高く、ピット内で結露が発生していないことが示されている。

クールヒートトレンチ内温度と外気温度の相関図(図-22)を見ると、外気温度が低いほど予熱効果は高く最大値は 7.4°Cで、設計風量 200,000 m<sup>3</sup>/h からエネルギー削減効果は約 500kW と算出される。

トレンチ入口地点の空気温度は外気温度とほぼ正比例となっている。中間地点の空気温度は入口地点に比べて緩やかな勾配となっており、出口地点はさらに緩やかになっている。外気温度 14~16°C付近で入口地点空気温度と出口地点空気温度はほぼ同等となり、以降外気温度が高くなると入口地点よりも出口地点の空気温度が低くなる結果となった。外気温度が 14~16°Cを超えてもピット床表面温度は 10~12°C程度にとどまっていることによるものと考えられる。

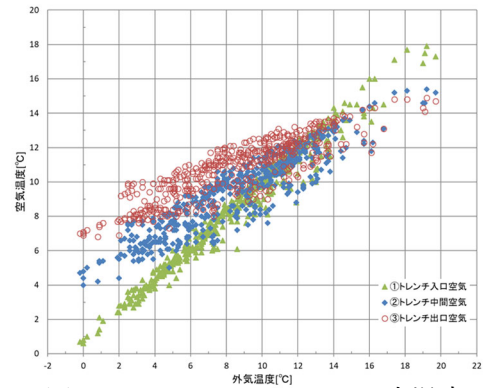


図-22 クールヒートトレンチ内温度と外気温 (2020年2月)

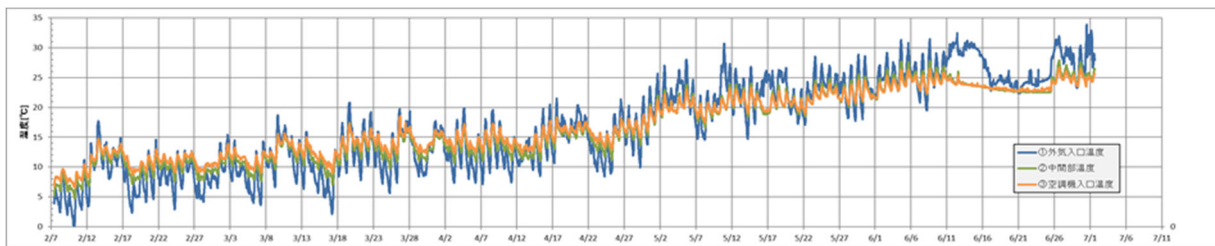


図-20 クールヒートトレンチ空気温度実測値 (2020年2月~7月)

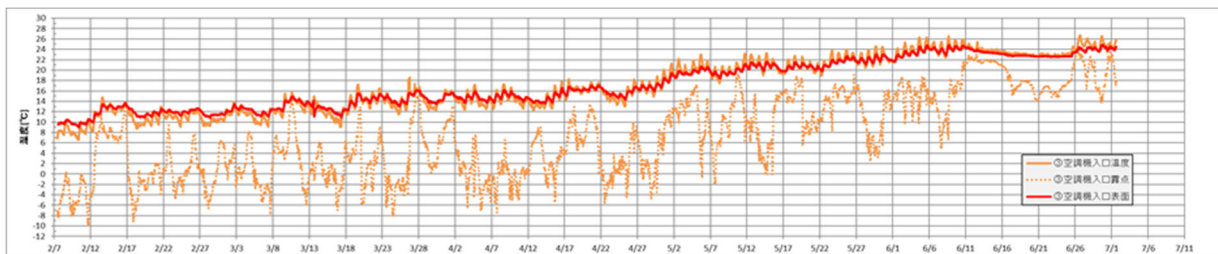


図-21 空調機入口における床表面温度と空気温度、露点温度 (2020年2月~7月)

#### 5-4. BEMS データによる省エネルギー検証

図-23 に示す負荷のデュレーションカーブに示されるように、病院の場合は他の用途に比べて暖房負荷も年間を通じて割合が高く、年間を通じて安定的に利用できる地中熱や井水熱の利用は空調負荷全体の省エネルギーに大きく寄与することが期待される。

ISS 階設置の外調機は全 26 台あり、それぞれについてクールヒートトレンチ通過後の外調機取り入れ外気温度、外調機冷温水コイル通過後の給気温度が計測されている。

それぞれの外調機について、2019年4月から2020年3月までのデータを使って、冷温水コイル熱量からクールヒートトレンチと井水利用による省エネルギー効果量を算出した。省エネルギー効果量は年間で冷房 320.3GJ、暖房で 90.2GJ であり、この系統における全空調負荷の 30~50%の省エネルギーが図れていることが確認できた。

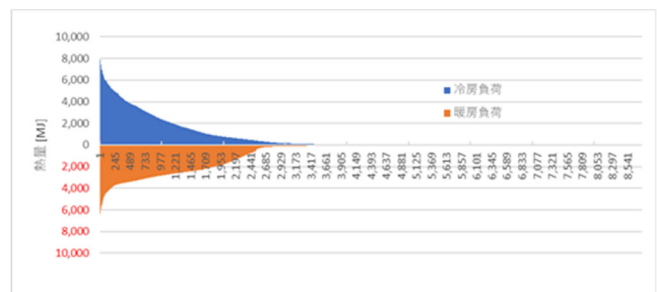


図-23 空調負荷デュレーション (2019年4月~2020年3月)

また、井水コイル熱量も BEMS で収集されているので、全体の省エネルギー量から差し引くことで、クールヒートトレンチの効果が算出される。その結果、この系統において、クールトレンチとして 20%前後、ヒートトレンチとして 30%前後の省エネルギー効果があることが示された。このように算出した省エネルギー効果を空調負荷全体で評価したグラフが、図-24 である。

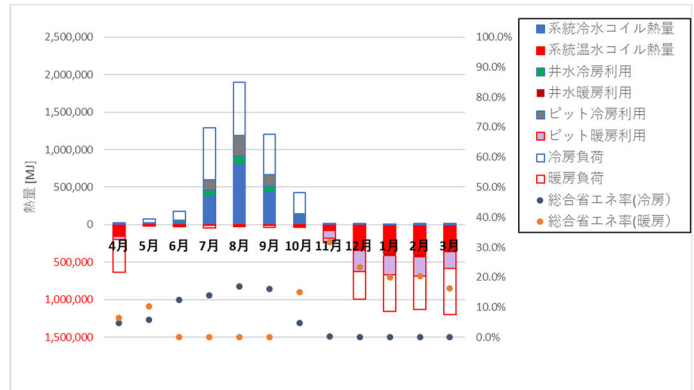


図-24 クールヒートトレンチ + 井水利用省エネルギー効果

年間空調負荷全体においては冷房負荷削減効果として 14.5%、暖房負荷削減効果として 18.6%の効果があつたことになる。

この未利用エネルギーの有効活用により年間エネルギー消費量を大幅に削減することができた。

## 6. エネルギー使用量 35%削減を実現したエネルギーサポート

### 6-1. エネルギーサポート体制

高機能 BEMS を活用したエネルギー管理により PDCA サイクルを確実に実行し、省エネルギー改善を図っている。病院に代わり大成建設のエネルギー管理士が建物のエネルギー運用状況を管理、1 回/月提出するエネルギーレポートで運用改善のアドバイスを実施している。2018 年 12 月の開院より、設備運用について改善提案を行っている。

### 6-2. 建物エネルギー消費量 ～ベンチマークとの比較

図-25 に、2019 年度の月別一次エネルギー消費量を示す。一次エネルギー消費量の季節変動を見ると約 41%の開きがあるが、電力消費量だけでは約 28%となっており、設計通り負荷変動をガスにより担っている結果となった。



図-25 月別一次エネルギー消費量

2019 年度の一次エネルギー消費量原単位は環境配慮に対する様々な取り組みにより 2,087MJ/m<sup>2</sup>・年に抑えることができた。東京都省エネカルテによる用途別のエネルギー消費原単位上位 25%値の基準年度 (表-5) では医療用途のエネルギー消費量は 3,219MJ/m<sup>2</sup>・年となっており、約 35%の削減となっている。

表-5 建物用途別のエネルギー消費原単位上位 25%値 (東京都省エネカルテ)

用途	基準年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
医療	3,219	2,502	2,529	2,534	2,511

(MJ/m<sup>2</sup>・年)

約35%削減

2019年度実績  
2,087MJ/m<sup>2</sup>・年

また、地域別・面積区分別・建物用途別の単位延床面積当たりの年間一次エネルギー消費量平均値 (DECC データ) (表-6) と比較すると、震災前データとの比較では約 32%の削減となっている。震災後は全体的に省エネ化が進んできているが、そのデータ (2015~2017 年度) と比較しても約 19%の削減となっており、大きな削減効果を得られていることがわかる。

表-6 地域別・面積区分別・建物用途別の単位延床面積当たりの年間一次エネルギー消費量平均値 (DECC データ)

※地域区分：6、建物用途：病院、延床面積 30,000 m<sup>2</sup>以上

データ年度	年間一次エネルギー消費量 (MJ/m <sup>2</sup> ・年)	調査件数
2006~2010年度 (震災前)	3,065	211
2011~2012年度 (震災後)	3,012	31
2015~2017年度 (震災5年経過後)	2,581	6

約19~32%削減

2019年度実績  
2,087MJ/m<sup>2</sup>・年

### 6-3. 用途別エネルギー消費量

用途別エネルギー消費量の内訳を図-26 示す。その他用途が 33%と大きな割合を占めているが、テナント系統、コンセント、大型医療機器電源、検査室のガス使用量が含まれており、これらは病院運営に欠かせないエネルギーであり固定された使用量である。

その他用途を除いたエネルギー消費量は、1,399MJ/m<sup>2</sup>・年となっている。

#### 6-4. コージェネレーション運転による電力平準化

図-27 に、コージェネレーション運転を開始する前後の日別時刻別電力消費量を示す。時刻別電力消費量のピーク値が1,040kW から 820kW へ約 21%削減され、ピーク電力削減効果が確認できた。

マイクロコージェネレーションは平日9時から17時の8時間運転としている。2019年4月の稼働は21日間で、平均ガス消費量は478m<sup>3</sup>/日、月間発電量は36,090kWh/月、平均発電効率は約32% (LHV) となっている。

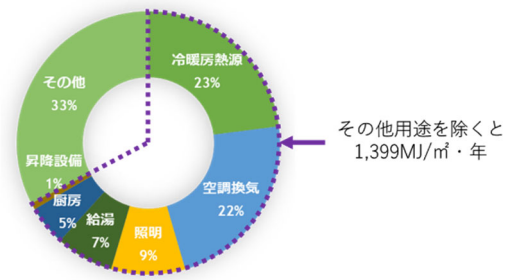


図-26 エネルギー消費量内訳  
(2019年4月～2020年3月)

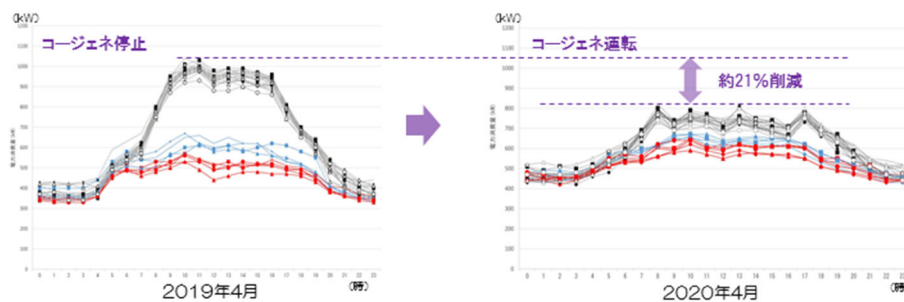


図-27 時刻別電力消費量

#### 6-5. クールヒートトレンチと井水コイルによるガス使用量平準化

図-47 に、日別用途別ガス消費量を示す。クールヒートトレンチと井水コイルの熱利用量が多い夏期(2019年8月)において、外調機の冷熱源である冷温水発生機のガス使用量を比較すると、クールヒートトレンチと井水コイルの使用を停止していた14日のガス使用量(約1,600m<sup>3</sup>/日)に対し、熱利用量が最大であった6日のガス使用量(約1,300m<sup>3</sup>/日)は、約19%削減され、ピーク時のガス使用量の平準化に寄与していることが確認できた。

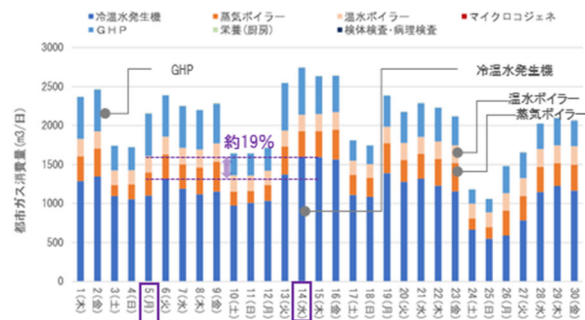


図-28 日別用途別ガス消費量  
(2019年8月)

### 7. おわりに

本稿ではレジリエンス強化と環境性能向上の両立について、BCP対応型BEMSの開発と採用、クールヒートトレンチと井水コイルによる外気負荷低減、エネルギーマネジメントにフォーカスし報告した。

エネルギーサポート体制は竣工後3年間継続予定であり、今後も更なる省エネルギー改善のため運用改善提案を行っていきたい。また、各種の取り組みについても効果の検証を継続していく予定である。

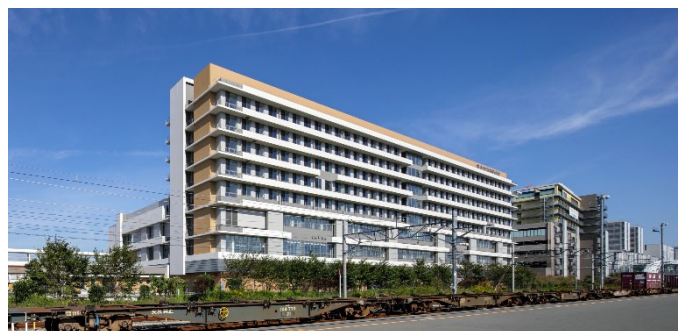


図-29 建物外観