

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

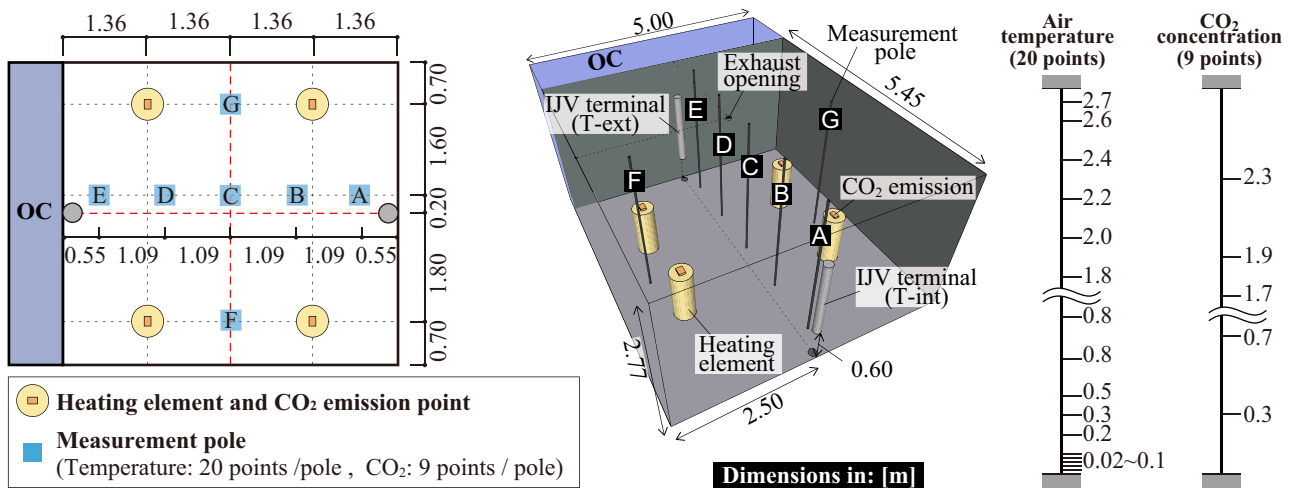


Fig. 1: Plan of climate chamber and measurement point

- 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。

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

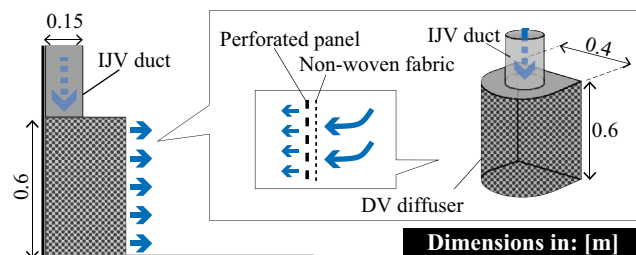


Fig. 2: Supply terminal of DV

- 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

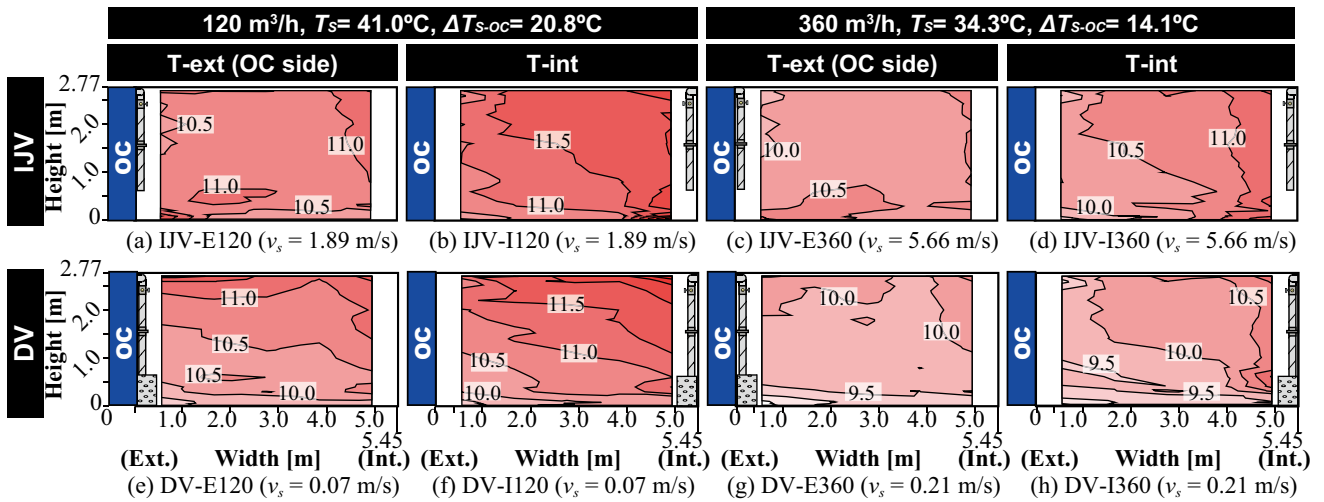


Fig. 3: Distributions of air temperature at North-South cross section

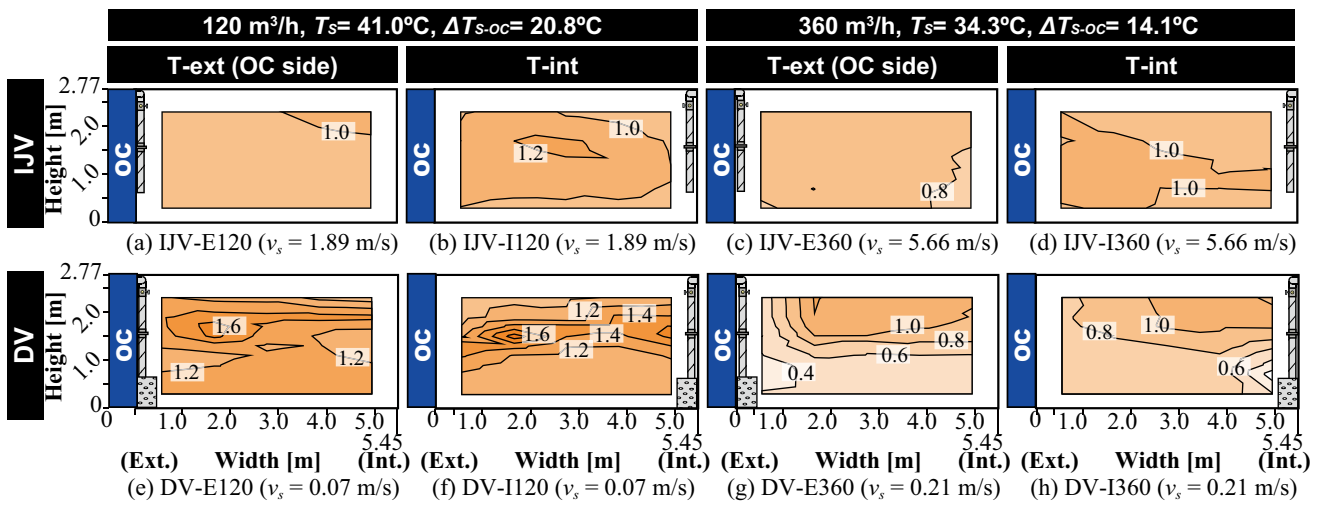


Fig. 4: Distributions of CO<sub>2</sub> concentration at North-South cross section

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

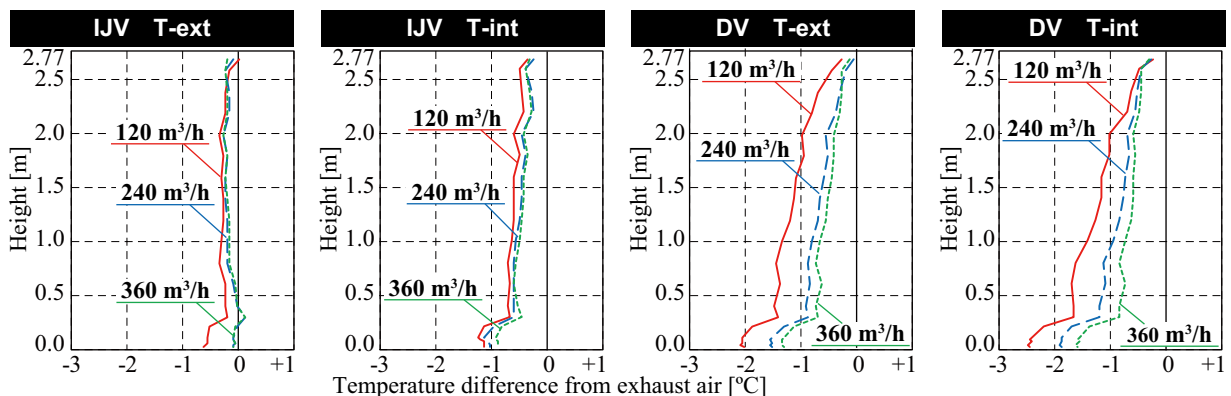


Fig. 5: Vertical distribution of temperature difference from exhaust air ( $T_r - T_e$ )

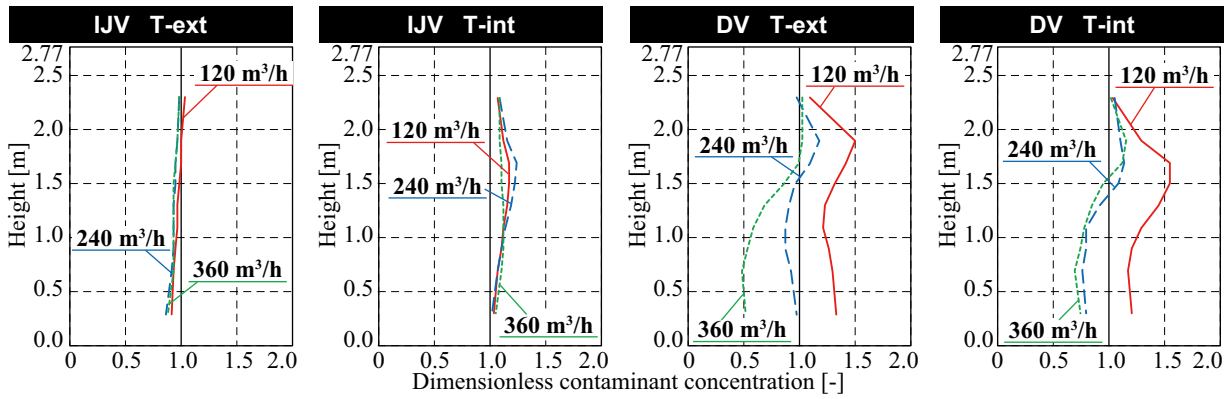


Fig. 5: Vertical distribution of normalized CO<sub>2</sub> concentration

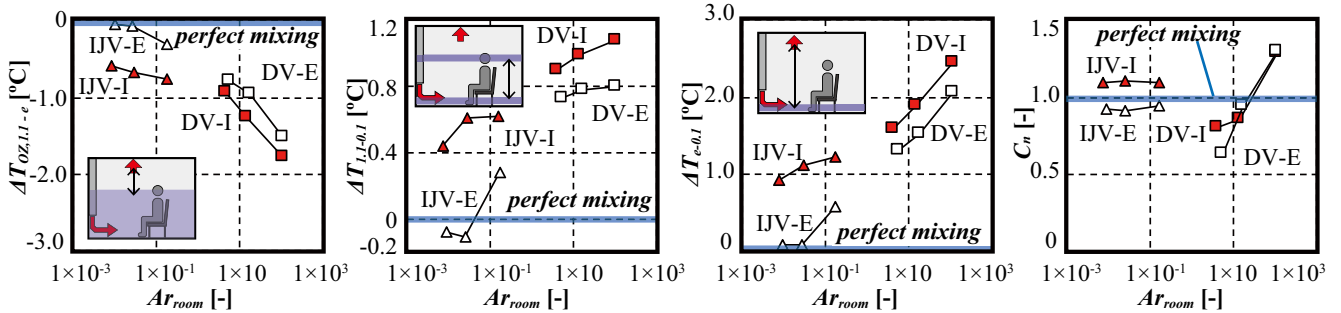


Fig. 7: Correlation between  $Ar_{room}$  and various indices

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 $\Delta T_{L,1-0.1}$ 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。