

床面衝突噴流を用いた準置換換気空調方式に関する研究 (その 1) 実験室実験による温度分布性状の把握と等温気流の CFD 解析精度検証

正会員 ○小林 知広¹ 同 近本 智行²

4. 環境工学 -13. 空気流動応用

衝突噴流 置換換気 CFD

1. はじめに

室内の居住域のみを対象とする空調方式は非居住域の空調制御条件の緩和ができるため、省エネルギーの観点から有効と考えられる。夏期の冷房時を考えると、そのような効率的な空調方式の 1 つとして置換換気方式 (Displacement Ventilation、以降 DV 方式) の導入が考えられるが、DV 方式は床面付近の高さから低温低速で給気を行うため、室内に大きな熱負荷がある場合にはその周辺で気流が上昇して水平方向に温度分布が生じるという問題点も存在する。

一方、DV 方式と同様に上下温度分布を形成し、水平方向の分布が生じにくい方式として、床面付近に設置したダクトから鉛直下向きに給気する方式 (Impinging Jet Ventilation 方式、以降 IJV 方式) が近年提案されており^{1,2)}、置換換気方式が積極的に導入されてきた北欧諸国等では導入事例も少なくない。また、IJV 方式は冬期の暖房にも適用できる可能性を有することも利点の一つと考えられるが、DV 方式に関する研究³⁾はこれまでも多く見られるのに対して、IJV 方式を用いた際の室内熱環境に関する検討事例は多くない。そこで本研究では、IJV 方式の基礎的な温度分布性状を明らかにするとともに、DV 方式との差異を把握することを目的として実験室実験を行う。また、将来的に CFD を用いてケーススタディを行うための初歩的な段階として等温場での計算を行い、実験結果と速度分布を比較することにより解析手法の基礎検討を行った結果を報告する。

2. 実験室実験

2.1. 実験及び実験室概要

実験は 2013 年 1 月 7 日～1 月 24 日に行った。図 1 に示す実験室に直径 300 mm の円筒型ダクトを半割して作成した IJV 吹出口を下端が床上 600 mm の

高さになるよう設置し、実験室外の空調機に接続した。ここでは DV と IJV 方式の気流性状の違いを確認するための可視化実験、室内温度分布性状の差異を把握するための温度測定、CFD 解析を実施する際の吹出面における流入境界条件及び比較対象となる実験値取得のための風速測定の 3 種の実験を行った。

温度測定実験においては冷房時を想定して熱負荷を設置し、天井に設置された照明 (90W×8) に加え、人体からの発熱を想定したブラックライト (60W×32) を設置した。ここでは人体を想定したシリンダーの代替としてブラックランプを用いたため、プルーム性状がシリンダーと概ね同等になるように床上 500 mm 高さにブラックライトを設置した⁴⁾。

2.2. 可視化実験

DV 方式と IJV 方式の吹出気流性状の違いを定性的に確認するため、熱負荷を設置せずに等温場を対象に気流の可視化を行った。実験室外に設置した煙発生機と空調機をビニルチューブで接続することでトレーサを注入し、給気ダクトを介して実験室内に供給した。また、実験室内部においては中央断面 (Z=0 mm) に CW:YAG レーザー (日本カノマックス社製、CW532-3WR) を照射して吹出口周辺の可視化を行った。図 2 の実験結果とスケッチから、大きな運動量を保持したまま床面に沿って空気が流れる IJV 方式では DV 方式と比較して主流方向により遠くまで気流が到達することが確認された。

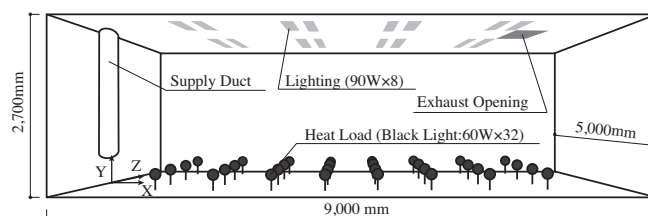
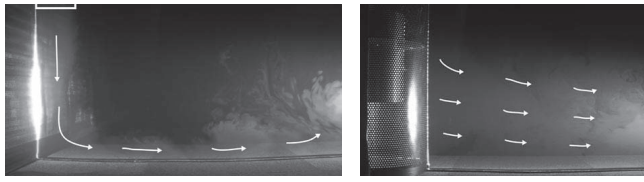


図 1 実験室概要



(1) IJV 方式 (2) DV 方式

図2 可視化画像及び気流のスケッチ

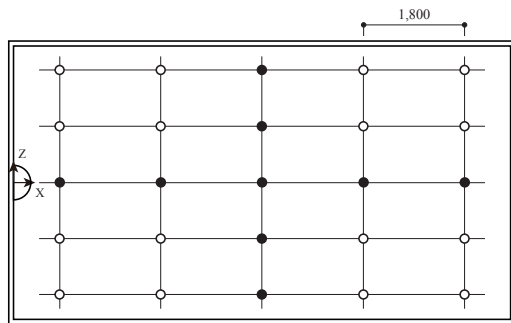
2.3. 室内温度測定概要

DV方式とIJV方式の室内温度分布性状の違いを把握することを目的として室内温度測定を行った。実験条件としては吹出温度及び吹出風量を変化させた表1に示す計7条件とし、空調開始後概ね定常状態となったところで図3のプロットで示す位置の鉛直温度分布を測定した。図中の黒プロットで表す中央断面上においては鉛直方向に250mm間隔で12点、白プロットの点は500mm間隔を基本としてY=250mmも追加して6点とした。また、ディフューザーを交換し、DV方式においても表1

表1 温度測定実験条件

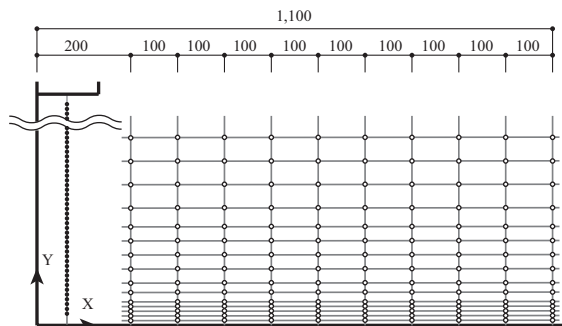
	300 CMH	400 CMH	600 CMH
18 deg.C	Case 1	Case 6	
20 deg.C	Case 4	Case 2	Case 5
22 deg.C		Case 7	Case 3

式に示す7条件で温度測定を行った。



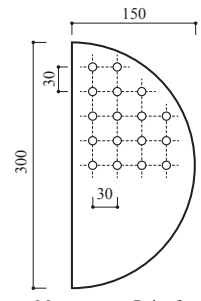
- Measurement Point for Vertical Temperature Profile (12 points at every 250 mm from the floor)
- Measurement Point for Vertical Temperature Profile (6 points at every 500 mm from the floor)

図3 温度測定点



- Measurement Point for Vertical Velocity Distribution (57 points)
- Measurement Point for Vertical Velocity Distribution (150 points)

図4 吹出口近傍の風速測定点



- Measurement Point for Velocity (17 points)

図5 吹出面における風速測定点

2.4. 吹出口周辺の風速測定概要

CFD解析の精度検証時における真値を取得するため、I型熱線流速計（日本カノマックス、0251R-T5型φ5μm タングステン）を用いて、等温場・風量400 CMHで吹出口周辺の風速を測定した。測定点はZ=0の中心断面上とし、吹出口直下の風速の鉛直分布57点、X=200mmから100mm毎に高さ400mmまでの風速の鉛直分布150点（15点×10）とした（図4）。また、CFD解析の境界条件取得のため、図5に示す吹出面においても測定を行った。なお、サンプリング周波数は1,000 Hzで平均化時間は30秒とし、本測定結果から乱流エネルギーの算出も行った。

3. 結果と考察

図6にIJV、DV方式で得られたCase 1、Case 2、Case 3における室内温度分布を示す。Case 1ではIJV方式とDV方式ともに室内で明確な温度成層が形成され、大きな差異はないことがわかる。Case 2ではDVが明確な温度成層が形成しているのに対して、IJVでは上下方向の温度勾配が小さくなり温度成層が不明瞭になっている。Case 3では給気量が大きいため、IJV方式では鉛直方向の温度分布があまり見られなくなり、室内が概ね混合されていること

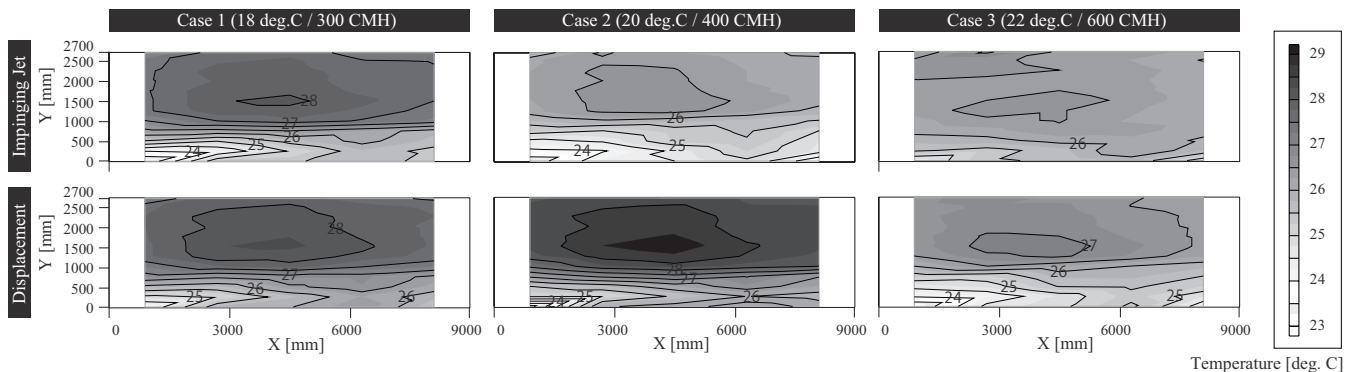


図6 IJV方式とDV方式における温度分布の比較 (Case 1, Case 2, Case 3)

がわかる。一方、DV方式においても温度成層は若干不明瞭になるが、IJV方式と比較すると温度勾配はやや大きい。また、図7に吹出温度を固定して風量のみを変化させたCase 4、Case 2、Case 5における両方式の温度分布を示す。Case 4はCase 1と同風量で吹出温度が2℃高いため両方式においてCase 1と近い分布性状となり、全体的に室内温度が高くなっていた。Case 5ではCase 3と同様にDV方式では室下部で温度成層が形成されているのに対して、IJV方式では温度成層が不明瞭となり、一様拡散状態に近づく。このようにIJV方式は給気量が大きい場合にはDV方式と比較して温度成層が形成され難い傾向が見られたが、これは衝突噴流が床面に沿って流れる際に周囲の気流を巻き込んで発達することが乱流拡散の影響を大きくするためと考えられる。一方、給気量が小さい場合にはDV方式と大きな差異なく温度成層が形成されることが分かった。なお、風速及び乱流エネルギーの測定結果についてはCFD解析の結果とともに後述する。

4. 等温IJV気流を対象としたCFD解析の精度

CFD解析を用いて種々の検討を行う場合、流れ場に応じた適切な解法を用いる必要があるため測定結果との比較によるバリデーションが必要となる。しかし比較的複雑な流れ場の精度検証では誤差要因を

特定することが難しいため、研究の初期段階として等温場を対象に乱流モデルの検討を行う。表2に解析概要を示す。ここでは流れ場の対称性を考慮し、free slip境界を用いて領域の半分のみ解析を行う。図8に解析領域及びメッシュレイアウトを示す。流入境界は吹出口下端とし、熱線風速計により得られた風速の鉛直成分の分布を境界条件に与えた。吹出風量は400 CMH、移流項の差分はQUICK、乱流モデルはまずは広く用いられる標準k-εモデル(SKE)を用いたが、速度勾配が大きい箇所では乱流エネルギーkを過大に評価し、衝突噴流域を正しく再現できないと予想されたため、Kato-Launder型修正k-εモデル(KL-KE)と応力方程式モデル(RSM)も使用して解析を行った。図9に実験とCFDで得られた

表2 CFD解析概要

CFD Code	Ansys Fluent 14.0	
Turbulence Model	Standard k-ε Model (SKE) Kato-Launder k-ε Model (KL-KE) Reynolds Stress Model (RSM)	
Algorithm	SIMPLE	
Discretization Scheme for Advection Term	QUICK	
Boundary Condition	Inlet	Velocity : Based on Measurement Turbulent Intensity : Based on Measurement Turbulent Length Scale : $\Lambda = 21$ mm
	Outlet	Velocity : -0.310 m/s
	Walls	Walls : Generalized Log Low Symmetry : free slip
Total number of Grids	899,660	

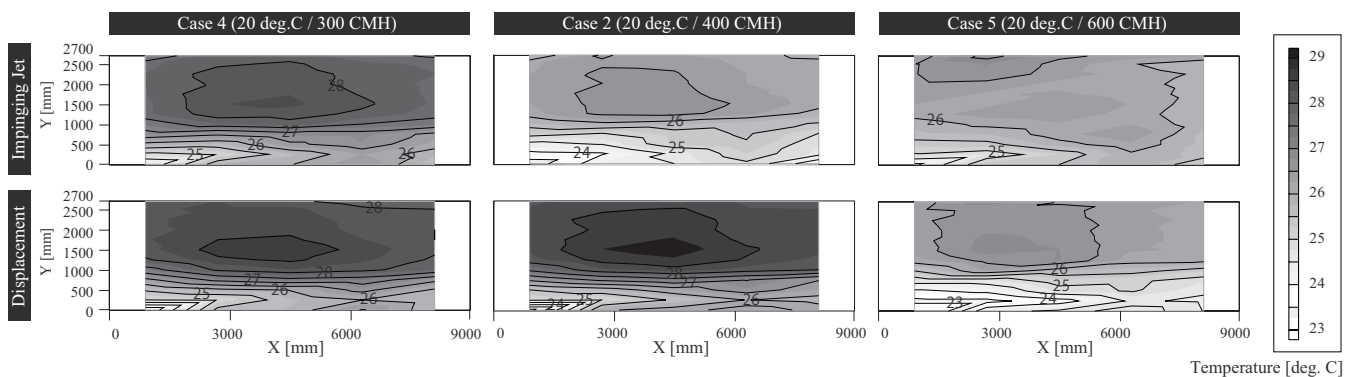


図7 IJV方式とDV方式における温度分布の比較 (Case 4, Case 2, Case 5)

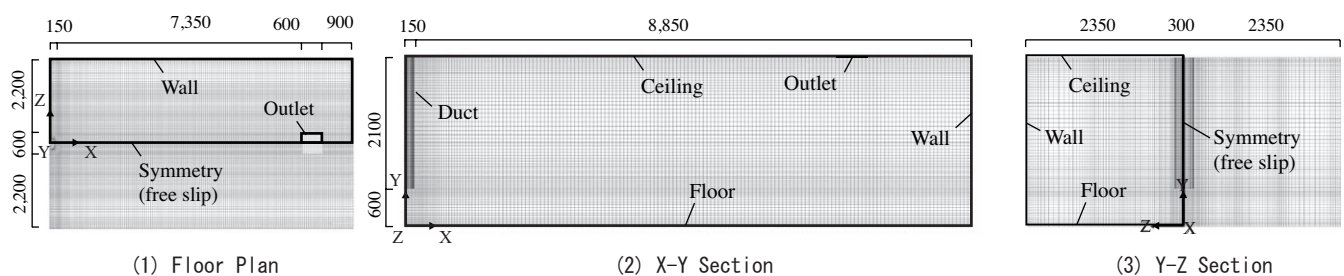


図8 解析領域及びメッシュレイアウト

吹出口直下における風速と乱流エネルギー (k) の鉛直分布をそれぞれ示す。風速の鉛直分布においては概ね一致し、 k についても RSM は比較的良く一致した。図 10 及び図 11 に示す $X=200 \sim 1,100$ mm における風速と乱流エネルギーの鉛直分布については、全体的に傾向は一致しているものの、吹出口に近い $X=200$ mm においては CFD と差異が見られる。これらの結果から、解析を行った 3 種の乱流モデルの中では RSM が最も実験結果に近かったがその精度はまだ不十分であり、今後さらに精度向上のための検討を加えた上で非等温場を対象としたケーススタディを行う。

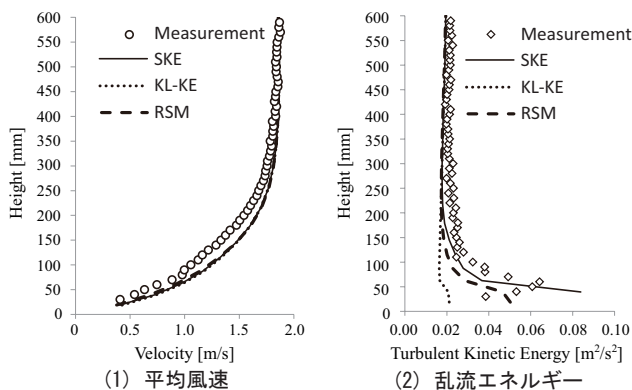


図 9 壁面噴流発達領域における乱流エネルギーの分布

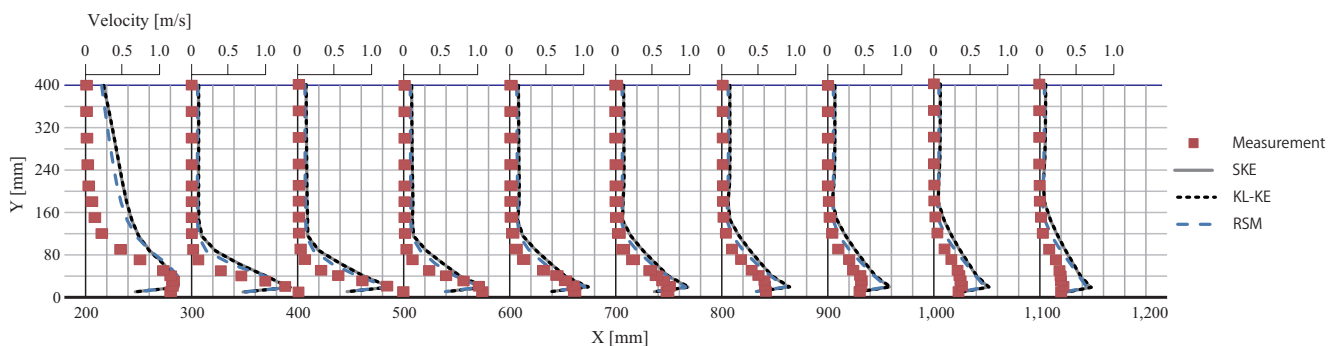


図 10 壁面噴流発達領域における平均風速の分布

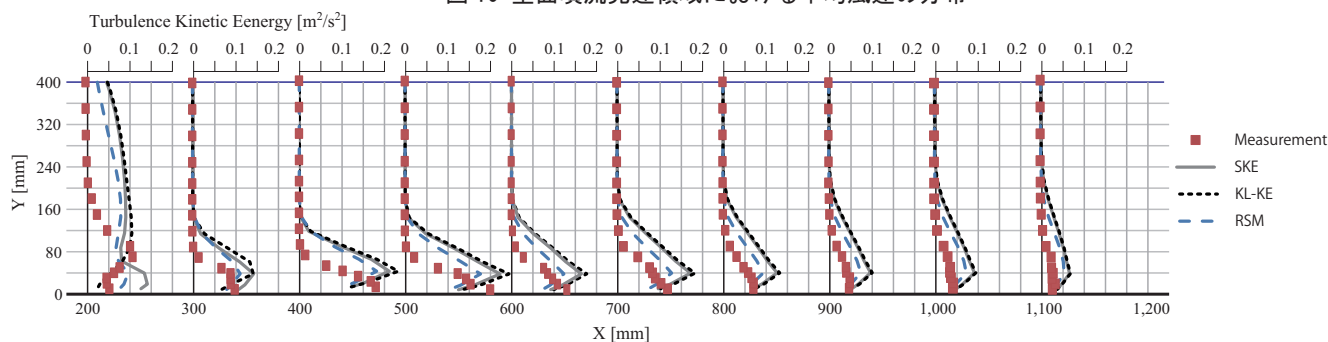


図 11 壁面噴流発達領域における乱流エネルギーの分布

5. まとめ

本報では実験室実験により IJV 方式と DV 方式における室内温度分布の測定を行い、IJV 方式では風量が大きい場合に DV 方式より室内の空気が混合される傾向が確認された。また、等温場の IJV 気流を対象とした CFD 解析を行い、RSM で実験と近い傾向が得られたものの、衝突域近傍の精度は不十分であるため今後も解析精度の向上を図る所存である。

謝辞

本実験を行うにあたりきんでん(株)の岸本孝志氏ならびに水野慶蔵氏に多大なるご協力をいただきました。記してここに謝意を示します。また、実験器具をお貸し頂いた大阪大学建築環境・設備 Gr に深謝申し上げます。本研究の一部は科学研究補助金(若手研究 B、課題番号 24760476(研究代表:小林知広))の助成を受けた。

参考文献

- 1) T. Karimipناه, H. B. Awbi : Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ven-tilation, *Building and Environment*, Vol.37, Issue 12, pp.1329-1342, 2002
- 2) H. Chen and B. Moshfegh : Comparing k-ε Models on Predictions of an Impinging Jet for Ventilation of an Office Room, *Proceedings of Room-vent 2011*, In Digital Media, 2011.6.
- 3) P. V. Nielsen : DISPLACEMENT VENTILATION –theory and design, Aalborg University, 1993
- 4) H. Skistad : Displacement ventilation, Research Studies Press Ltd, 1994.

* 1 立命館大学理工学部 講師 博士 (工学)

* 2 立命館大学理工学部 教授 博士 (工学)

Lecturer, Faculty of Science and Eng., Ritsumeikan University, Dr. Eng.

Professor, Faculty of Science and Eng., Ritsumeikan University, Dr. Eng.