

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760476

研究課題名(和文)放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式の換気効率及び室内熱環境に関する研究

研究課題名(英文)Thermal environment and ventilation efficiency of semi-displacement ventilation system using radial impinging jet

研究代表者

小林 知広 (KOBAYASHI, Tomohiro)

大阪市立大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：90580952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は室内で温度成層を形成して居住域のみを重点的に空調しつつ快適性を確保することを意図して、床面への衝突噴流を用いた換気方式(IJV方式)を対象として実験室実験及び気流解析(CFD)を用いてその熱的性能の評価を行った。その結果、従来の置換換気方式(DV方式)と比較して居住域内が適度に混合して快適性を保つことができることが示された。またCFD解析で評価を行うにあたっての乱流モデルや格子配置に関する適切な解法が示された。

研究成果の概要(英文)：In this work, Impinging Jet Ventilation (IJV) system was evaluated as it has a potential to achieve both thermal comfort and energy saving by forming vertical thermal stratification inside a room. This work involves both laboratory measurement and CFD analysis to clarify mechanics in generating thermal stratification. According to laboratory measurement, it was shown that IJV systems could appropriately mix air in the occupied zone to obtain thermal comfort, which was impossible by Displacement Ventilation system. This work also showed analysis methodology in using CFD, i.e. appropriate turbulence model and grid layout in analyzing a room controlled by IJV system.

研究分野：建築環境工学・建築設備学

キーワード：温度成層 衝突噴流 置換換気 CFD

1. 研究開始当初の背景

省エネルギーの達成と快適性の確保を目的として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有効と考えられる。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方式、以降DV方式)があるが、DV方式は低温・低速で給気を行うため、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った問題点がある。また、室下部での急な温度勾配による足下付近の過剰冷却の問題も存在する。一方、DV方式と同様に上下温度分布を形成し、水平方向の温度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し、床近傍で水平方向に広がる衝突噴流により空調を行う方式(Impinging Jet Ventilation方式、以降IJV方式)が提案されている。この方式はDV方式に比べて室下部が適度に混合するため、足下付近の過剰冷却を解消することができ、北欧諸国を中心に近年導入が多く見られ始めている。IJV方式の特性を考えると、比較的高い運動量を有する給気方式であることから、我が国においても冬季の暖房にも適用できる可能性がある。しかし、その詳細な性状は十分に明らかになっていないことから、実建物の設計段階で導入するには課題が残されていると言える。本研究は我が国の空調設計の現状を踏まえた上で、このIJV方式のポテンシャルに着目し、当該空調方式の基礎的性状を明らかにして空調設計の一助とすることを目指して着想に至ったものである。

2. 研究の目的

IJV方式との比較対象として、室内温度成層を形成する空調方式の代表例であるDV方式を想定し、実験室実験によって両者の相違点を明らかにする。その上でIJV方式による室内温度形成の特徴とメカニズムを明らかにすることを本研究の第1の目的とした。主な比較項目は鉛直温度分布であるが、吹出口近傍の気流環境も快適性に影響を及ぼすため検討の対象とした。また、将来的な展望としてIJV方式が形成する熱環境を各種設計条件によって体系的に整備することが期待される。具体的には吹出口数や吹出風量、吹出温度や室内熱負荷等が考えられるが、これらの様々な条件を実験室実験によって変化させて整備することは困難と考えられ、このような場合は数値流体解析(Computational Fluid Dynamics、以降CFD解析)による数値実験が有効となる。しかしCFD解析を行うにあたっては、乱流モデルや境界条件の取り扱い等の解法の選択が重要であり、流れ場に適した手法をとること必要となる。そこで本研究では実験室実験で得られた室温分布と吹出口近傍風速を真値としてCFD解析の精度検証を行うことも目的とする。そのため、

実験室実験では室温のみならず、CFD解析の境界条件となる値(発熱体及び壁面表面温度)を取得することも行い、最終的に衝突噴流を用いた換気システムであるIJV方式に適した数値解法を選定する。

3. 研究の方法

(1) 熱負荷が均等に配置された室の冷房時を対象とした実験室実験

図1に示す実験室を用いて実物大実験を行った。室内には顕熱負荷としてブラックランプ(60W×32台)を設置して室温測定実験を行った。室には1箇所吹出口を設け、この吹出口を置換換気ディフューザーとIJVディフューザー(図2)で入れ替え可能なものとした。実験室内では図3に示すプロット位置に水晶温度計を設置し、鉛直温度分布を測定した。給気量と給気温度は表1に示す条件で変更し、各条件でDV方式とIJV方式の性状の違いを把握する。

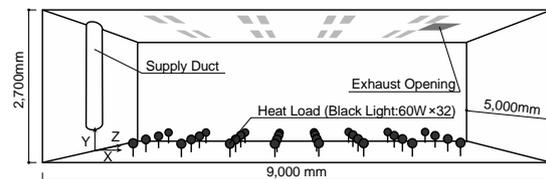


図1 実験室概要(ブラックランプ配置)

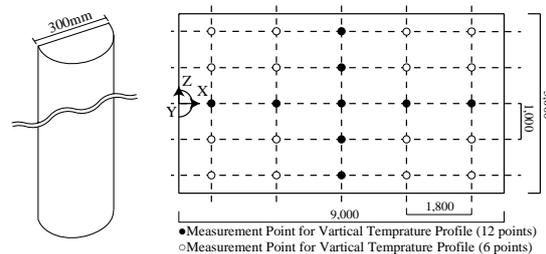


図2 IJV吹出口

図3 温度測定点

表1 吹出風量と吹出温度条件

	300CMH	400CMH	600CMH	900CMH
14deg.C	case1			
17deg.C		case2		
20deg.C			case3	
22deg.C				case4

温度測定に加え、吹出気流の性状を把握するために吹出口周辺の2次元風速をParticle Image Velocimetry (PIV)により測定した。光源にはダブルパルスNd:YAGレーザーを用い、ディフューザー中央の鉛直断面を投影し、側部に設置した高速カメラにより撮影した。撮影は10Hzで10間行い、1回の測定で1,000μsの間隔で2枚の画像を撮影し、1回の測定で100組200枚の画像を撮影した。画像処理には汎用解析コードであるDavis 8.0を使用し、カメラとレーザーの制御もこれによった。また、風速算定には直接相互相関法を用い、再帰的相関法を適用した計算を実施

の本計算を行った。LES の瞬時結果の一例を 図 8 に示す。CFD 解析の概要を表 4 及び表 5 にまとめて示す。なお、CFD 解析の壁面温度境界条件は前述の境界条件測定の実験の壁面温度分布を適用した。

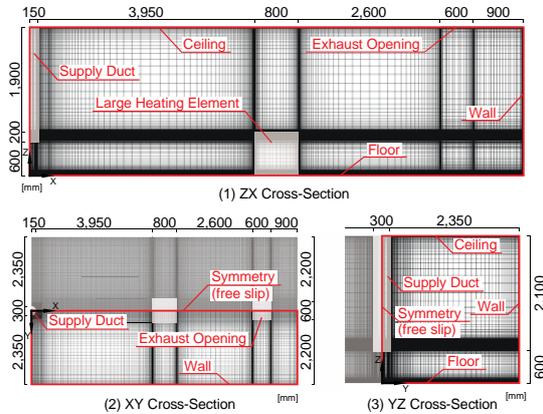


図 7 CFD 解析領域 (RANS モデル)

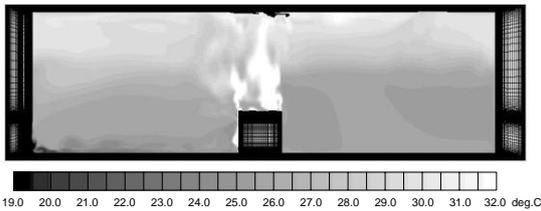


図 8 CFD 解析結果の一例 (LES)

表 4 CFD 解析条件 (RANS モデル)

CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Standard k-ε Model (SKE) RNG k-ε Model (RNG) Shear-Stress Transport k-ω Model (SST)
Algorithm		SIMPLE
Discretization Scheme for Advancement Term		QUICK
Boundary Condition	Inlet	Velocity Magnitude : 4.716m/s Turbulent Intensity : I=10% Turbulent Length Scale : L=21mm
	Outlet	Velocity Magnitude : 0.463m/s
	Walls (Heat)	Wall (X=0) : Adiabatic Boundary Heating Element Surface : Heat Flux Boundary Other Walls : Temperature Boundary
	Walls (Velocity)	Symmetry : Free Slip Other Walls : Standard Wall Function
Total Number of Cells		2,023,362

表 5 CFD 解析条件 (LES)

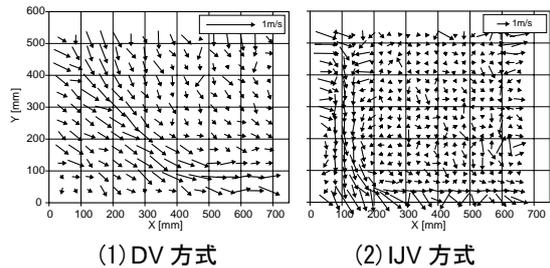
CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)
Algorithm		Implicit Method (SIMPLE)
Discretization Scheme for Advancement Term		Bounded Central Differencing
Time Step		0.01s (100Hz)
Total Calculation Term	Preconditioning	3,000 time step (30s)
	Main Calculation	72,900 time step (729s)
Boundary Condition	Inlet	Velocity Magnitude : 4.716m/s (Constant)
	Outlet	Velocity Magnitude : 0.463m/s (Constant)
	Walls	Warner & Wengle's linear-power law
Smagorinsky Coefficient		0.1
Total Number of Cells		2,423,104

4. 研究成果

(1) 熱負荷が均等に配置された室の冷房時を対象とした実験室実験

図 9 に吹出口近傍で実施した PIV 測定の結果を示す。400CMH の場合、床面近傍風速は DV 方式では概ね 0.3 m/s であるのに対して IJV 方式では 1.5 m/s 程度となっていることが確認される。本研究では主として温度分布

に焦点を当てているが、この結果から IJV では足元付近の気流感の検討が実用化に向けての重要な検討課題であることが示される。



(1) DV 方式 (2) IJV 方式

図 9 PIV 測定結果

図 10 にブラックランプ配置時の室内鉛直温度分布の測定結果を示す。給気風量が小さい条件では DV、IJV 方式ともに大きな差異は見られずどちらも明確な温度成層を形成している。一方給気風量が多い条件では IJV では温度成層が形成され難い状況となる。

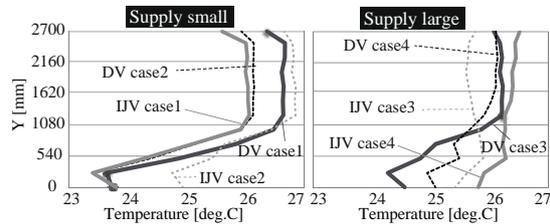


図 10 ブラックランプ配置時の鉛直温度分布

これは IJV 方式が DV 方式と比較して大きな運動量で給気するためと言える。

(2) 大きな熱負荷が配置された室の冷房時を対象とした実験室実験

図 11 に大型発熱体 (発熱量 2.0 kW) を室中央に設置した際の鉛直温度分布測定結果を示す。ブラックランプ配置時と同様に小さな風量では DV 方式と IJV 方式に大きな差は見られないが、給気風量が多い場合には IJV 方式は室内で温度分布を形成するものの、室下部の居住域内で温度勾配が緩やかになっている。このことから、比較的強い熱上昇が集中的に発生する場合、IJV 方式は室下部でその運動量により適度の混合する傾向があると見え、DV の同風量条件と比較すると足元の過剰冷却を解消しつつ給気温度を上昇させることもでき、省エネルギー性と快適性の両方を確保することができる空調方式となり得ることが示された。

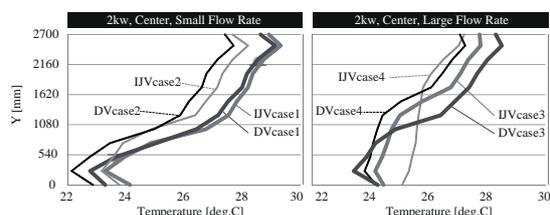
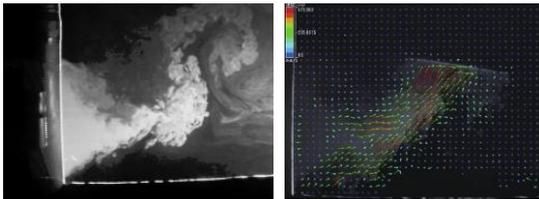


図 11 大型発熱体設置時の鉛直温度分布

(3) 暖房時を想定した実験室実験

図 12 に DV 方式で暖房時の吹出条件 Case1 における PIV 測定結果を示す。室温が概ね 25°C 程度の状況で室下部より 35°C で吹出し、低運動量で大きな温度差の吹出であることから給気直後から気流の上昇が見られた。一方、IJV 吹出の条件では運動量が大きいことから定性的には給気直後の上昇は見られなかった。冷房時に温度成層を形成する空調方式においては、暖房時には室内が完全混合となる状況が最善と考えられるが、この状況からも IJV 方式は DV 方式と比較して一定の有効性があることが定性的ではあるが示されたと言える。



(1) 可視画像 (2) 風速ベクトル
図 12 暖房時の吹出口近傍の PIV 測定

両方式で暖房を行った際の室内の鉛直温度分布を図 13 に示す。温度差が小さく・給気量が大きい条件では DV 方式と IJV 方式で差異はなくなるが、低風量条件では IJV 方式で鉛直温度分布がより均一になる。このことから IJV 方式は暖房時に DV 方式と比較して一定の有効性があることが示されたと言えるが、DV 方式と IJV 方式での差異はあまり大きくはない。このような暖房時の温度分布は排気口位置の影響も受けると考えられ、本研究では比較的給気口から遠い位置に排気を設けたが、ショートサーキットをし易い位置に排気口が存在する場合にはこの差がより顕著になる可能性がある。

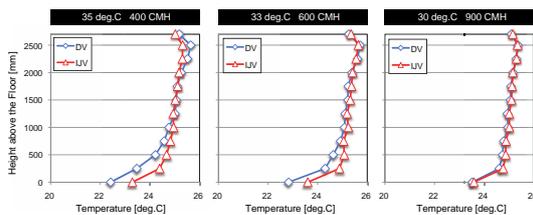


図 13 暖房時の吹出口近傍の PIV 測定

(4) CFD 解析の真値及び境界条件取得を目的とした実験室実験

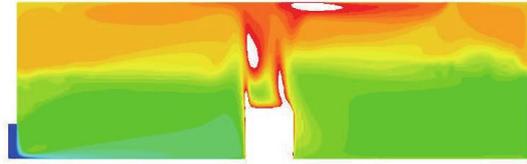
本項は CFD 解析の入力条件と正解値としての実験データ取得に相当するため、その研究成果は次項に示す CFD 解析と合せて示す。

(5) IJV 方式を対象とした CFD 解析の精度検証

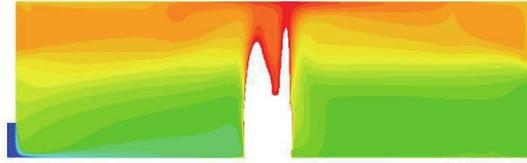
図 13 に 4 種の CFD 解析から得られた室内中央断面での温度分布を示す。この結果からはどの手法においても定性的に明確な差異は見られないと言える。



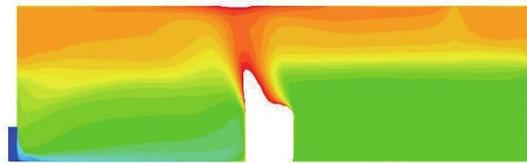
(1) Standard k-epsilon Model (SKE)



(2) RNG k-epsilon Model (RNG)



(3) SST k-omega Model (SST)



(4) Large Eddy Simulation (LES)

図 14 CFD により得られた温度分布

より定量的な比較を目的として、図 15 に吹出口近傍の風速を実験と CFD で比較する。この結果から、どの乱流モデルにおいても比較的壁から近い位置では風速分布を概ね良く再現することができている。しかし、壁面からの距離が 800mm 程度の位置以降は床面衝突噴流のピーク風速を過小に評価してしまっている結果となったが、SKE では全体的な傾向が実験と異なる結果が得られた。

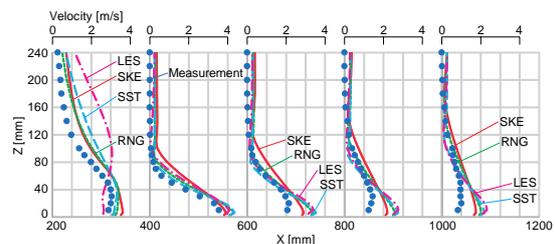


図 15 吹出口近傍における風速の比較

図 16 に吹出口近傍の温度分布を示す。この比較からは RNG と SST が実験と比較的に近い傾向を示す結果となった。このように局所的には若干実験値からの差異が見られたが、本研究では室温の設計時に関心の高い鉛直温度分布に焦点を当てるため、この解析精度が最も重要となる。図 17 に室内鉛直温度分布の比較を示す。SKE を除くと概ねどの条件でも実験と良く傾向が一致するが、特に発熱体上部の解析精度に着目した場合には SST が最も良く実験の温度分布を再現することができている。以上より、設計段階等で IJV

方式のケーススタディを実施する場合の乱流モデルは SST が最も適していると言え、本研究ではそれに適した最小メッシュ幅等の格子レイアウトの提案も行うことができた。

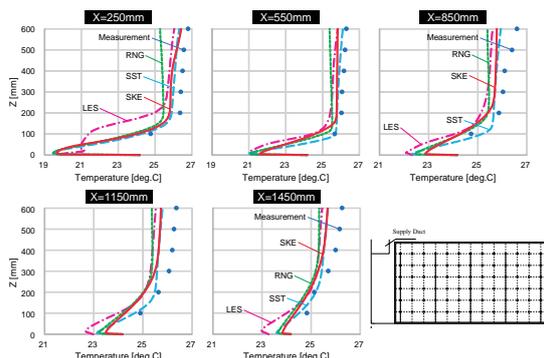


図 16 吹出口近傍の温度分布比較

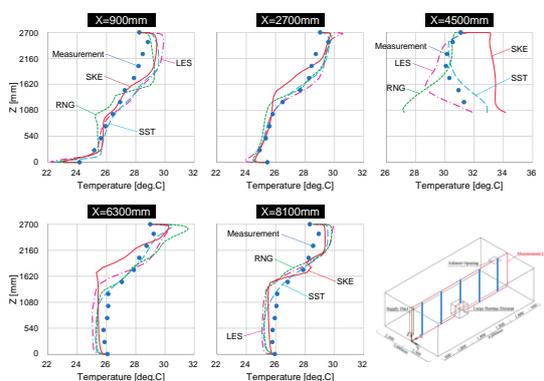


図 17 CFD と実験の室内温度分布比較

(5) 総括

本研究では省エネルギーを目的として室内で温度成層を形成しつつ居住域内の快適性を保つことを意図した居住域空調としての IJV 方式に着目して実験室実験と CFD 解析を実施し、不明な点が多かった IJV 方式の温度形成メカニズムを明らかにするとともに、IJV 方式では小さな給気量でない場合には適度に室下部の居住域が混合して省エネルギーと快適性を両立できる可能性を示すことができた。また、当該方式を CFD により再現する際の適切な解法の提案を行った。

今後の展望として、これらの知見に加えて設計段階で実務者がより使用し易い温度分布予測式を確立することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 宇佐美亮太, 小林知広, 近本智行: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 277-230, 2013. 3.
- ② 小林知広, 近本智行: 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, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号, 環境系, pp.157-160, 2013. 6.

- ③ 小林知広, 近本智行: 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 2) 実験による室内温度分布性状の把握と等温気流の CFD 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概, D2, pp. 699-700, 2013. 8.
- ④ 小林知広, 近本智行: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究 (その 2) 実験室実験による吹出気流分布と室内温度分布の基礎的性状, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 3 巻, pp. 437-440, 2013. 9.
- ⑤ 富田篤, 小林知広, 梅宮典子, 岸本孝志: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究 (その 3) 実験室実験による大型発熱体を有する室内の温度分布性状, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 413-416, 2014. 3.
- ⑥ 小林知広, 梅宮典子, 岸本孝志: 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 3) 大型発熱体を有する室における温度分布性状, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 54 号, 環境系, pp. 117-120, 2014. 6.
- ⑦ 小林知広, 梅宮典子, 岸本孝志: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究 (その 4) 実験室実験による大型発熱体を有する室内の温度測定, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 3 巻, pp. 205-208, 2014. 9
- ⑧ 杉田雄希, 小林知広, 梅宮典子, 岸本孝志, Mats Sandberg: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究 (その 5) 非等温場における CFD 解析の精度検証, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 236-239, 2015. 3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 知広 (KOBAYASHI, Tomohiro)
 大阪市立大学・大学院工学研究科・講師
 研究者番号: 90580952

(4) 研究協力者

マッツ サンドバーグ (SANDBERG, Mats)
 イェブレ大学居住環境センター
 岸本孝志 (KISHIMOTO, Takashi)
 きんでん
 宇佐美亮太 (USAMI, Ryota)
 立命館大学学部生 (2012 年度のみ参画)
 富田篤 (TOMITA, Atsushi)
 大阪市立大学学部生 (2013 年度のみ参画)
 杉田雄希 (SUGITA, Kazuki)
 大阪市立大学学部生 (2014 年度のみ参画)