

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 7) CFD 数値実験に基づいたブロックモデルによる室内鉛直温度分布の予測

A Study on Semi-Displacement Ventilation using Radial Wall Jet
 (Part 7) Prediction of Vertical Temperature Distribution using Block Model
 based on Numerical Experiment by CFD

○杉田 雄希 (大阪市立大学) 小林 知広 (大阪市立大学)
 梅宮 典子 (大阪市立大学)

Kazuki SUGITA *¹ Tomohiro KOBAYASHI *¹ Noriko UMEMIYA *¹
 *¹ Osaka City University

The Impinging Jet Ventilation (IJV) system is an air-conditioning method to form thermal stratification. This system mixes air more moderately within the occupied zone than the Displacement Ventilation. The final objective of this work is to establish a simplified prediction method of vertical temperature distribution based on the Block Model. As numerical experiments, a parametric study on supply air momentum is first conducted by CFD in this paper. Based on those results, appropriate value of turbulent thermal diffusivity in the Block Model corresponding to the supply air condition is determined, because it is of great importance on vertical temperature distribution.

1. はじめに

本研究では置換換気方式に比べて室下部の居住域空気が適度に混合する方式で床面付近から鉛直下向きに給気する Impinging Jet Ventilation 方式^{1,2)} (以降 IJV 方式) を対象とし、十分に明らかにされていない鉛直温度分布の性状解明とその簡易予測を目的とする。既往の研究^{3,4,5)} では実験室実験による気流分布および温度分布の基礎的性状の把握、ならびに数値実験の前段階としての非等温 CFD 解析の精度検証を行った。上下に温度成層が形成される大空間の予測モデルとして戸河里ら⁶⁾ のブロックモデルがあり、置換換気室を対象として熱プルームの影響を組み込んだブロックモデルに関する研究^{7,8)} も見られる。しかし、これらの予測モデルで温度成層の形成に大きな影響を及ぼす重要なパラメーターである上下ブロック間の乱流熱拡散係数について検討した研究は少ない。そこで本報ではブロックモデルの利用を前提とし、室への給気風量を固定して吹出口数と給気風速を変更した CFD 解析による数値実験を実施し、それに基づき鉛直温度分布を適切に再現し得る乱流熱拡散係数の同定を行った結果を報告する。

2. 放射連成 CFD 解析による数値実験

2.1. 放射連成解析

既報⁵⁾ では、壁面の境界条件に実験室実験から得られた表面温度を与えることで室内気流性状を再現可能な CFD 解析手法を検討したが、給気条件等を変更すると表面温度も影響を受ける。そのため、数値実験でのパラメトリックスタディでは室外の温度条件を境界条件とし、室内壁面間の相互放射を考慮した解析が必要と言える。本節では、既報⁵⁾ 同様の CFD 解析格子を用いた放射連成解析を行い、同等の精度が得られることを確認する。解析対象は寸法 9.0×5.0×2.7m の室で、IJV 吹出面が床上 600mm になるように設置され、夏期冷房時を想定した熱負荷として室中央に発熱体 (2.0kW) を有する (Fig.1)。既往研究と同様、吹出風量 600m³/h、吹出温度 20℃ とし、乱流モデルには SST k- ω モデルを用いた。放射計算は透過や空間内の吸収・散乱を無視した表面メッシュ間のみ放射解析 (Surface-to-surface モデル) とし、メッシュ間の形態係数はレイトレーシング法にて算出した。境界条件として外部温度および壁面の物性値を与えた。解析条件を Table 1 に示す。

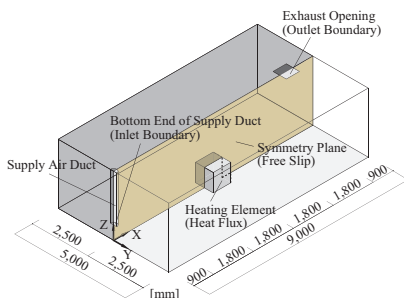


Fig.1 Calculation Domain (Validation Model)

Table 1 CFD Analysis Condition

CFD code	Ansys Fluent 14.5	
Turbulence Model	SST k- ω Model	
Radiation Model	Surface-to-surface Model	
Algorithm	SIMPLE	
Discretization Scheme for Advection Term	QUICK	
Boundary Conditions	Inlet	Velocity Magnitude : $V=4.716\text{m/s}$ Turbulent Intensity : $I=10\%$ Turbulent Length Scale : $L=21\text{mm}$
	Outlet	Velocity Magnitude : -0.463m/s
	Walls (Heat)	Room Walls : External Temperature Heating Element Surface : Heat Flux
	Walls (Velocity)	Symmetry : Free Slip Other Walls : Linear-Logarithmic Blending Law
	Total Number of Cells	2,023,362

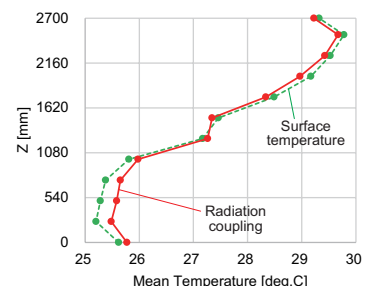


Fig.2 Vertical Distribution of Horizontal Average Temperature

表面温度を与えた解析⁵⁾および放射連成解析における室内鉛直温度分布を Fig.2 に示す。放射連成解析でも同等の精度が得られることが示されたため、次節では放射連成解析を用いて数値実験を行う。

2.2. 数値実験概要

本節では吹出口数量を変更した数値実験を行い、鉛直温度分布の性状を把握する。吹出口数の異なる4条件(1,2,4,6個)を設定し、風量の合計が等しくなるように吹出風速を設定した解析を行う。つまり投入熱量を固定し、給気運動量のみの変化が温度成層に及ぼす影響の把握を意図した。その他の解析条件は原則として前節と同様とした^{注1)}(Table 2)。解析空間(Case 1)と各条件の平面図を Fig.3, 4 に示す。4条件の水平面平均温度の鉛直分布を Fig.5 に示す。室上部の温度に大きな差異は見られないが、居住域下部では吹出口数量の増加と共に温度が低下し、上下温度差が増加する傾向が見られる。よって吹出口と吹出風速を適切に設計することで省エネかつ快適な居住域環境を実現できる可能性があると言える。

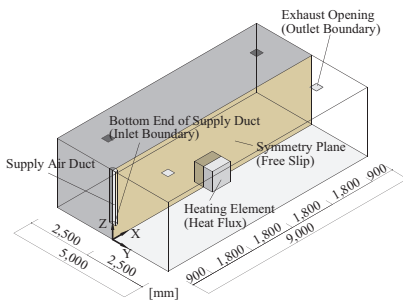


Fig.3 Calculation Domain (Case 1)

Table 2 Analysis Condition for Parametric Study

CFD code		Ansys Fluent 14.5			
Turbulence Model		SST k- ω Model			
Radiation Model		Surface-to-surface Model			
Algorithm		SIMPLE			
Discretization Scheme for Advection Term		QUICK			
Boundary Conditions	Inlet	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
	Outlet	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Walls (Heat)		Room Walls : External Temperature			
Walls (Velocity)		Symmetry : Free Slip			
Total Number of Cells		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4

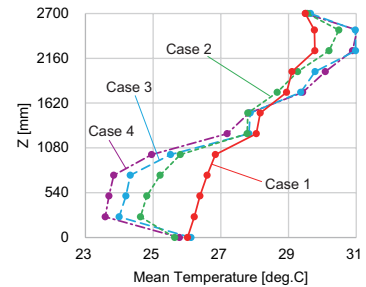
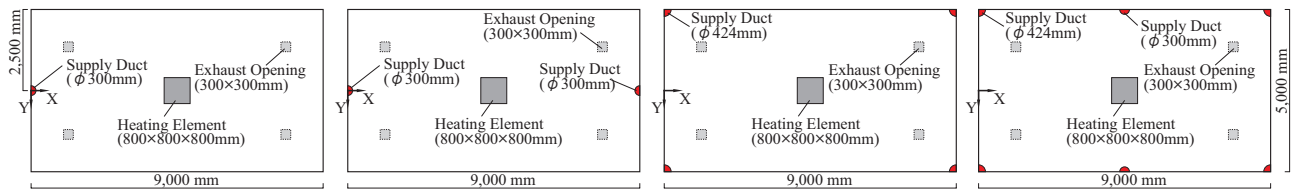


Fig.5 Vertical Distribution of Horizontal Average Temperature for Case 1 to 4



(1) Case 1 (1 Diffuser) (2) Case 2 (2 Diffusers) (3) Case 3 (4 Diffusers) (4) Case 4 (6 Diffusers)

Fig.4 Floor Plans of Calculation Domains for a Parametric Study on Momentum in the Supply Air (Case 1 to Case 4)

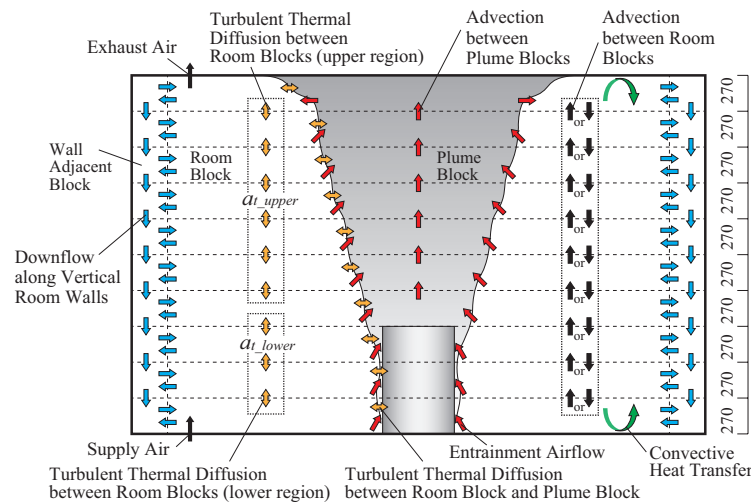


Fig.6 Schematic Diagram of Block Model

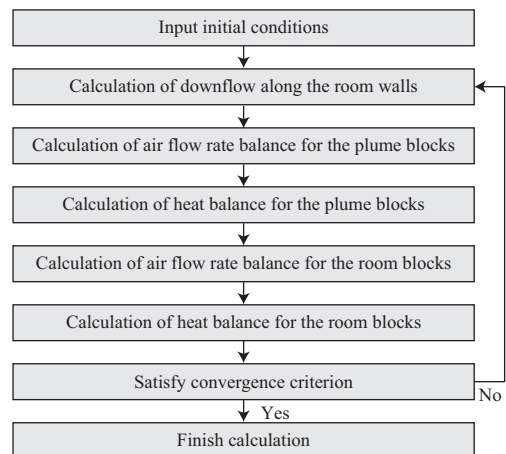


Fig.7 Flowchart of Iterative Calculation

3. ブロックモデルによる室内鉛直温度分布の予測

3.1. モデル概要

ブロックモデルは室内空間を鉛直方向に複数のブロックに分割し、室・壁面・熱プルームのブロック間の移流・拡散ならびに壁面での熱伝達による熱移動を評価し、鉛直温度分布を簡易に予測する方法である。本研究では、実験室実験および数値実験と同様の室を想定して室寸法を 9.0×5.0×2.7m とし、室内を鉛直方向に等間隔に 10 分割した。ブロックモデルの概要図を Fig.6 に示す。室上部から順にブロック番号 I を 1 ~ 10 とし、IJV による給気は最下部のブロック 10 から行い、排気は最上部のブロック 1 から行い。また、強い熱プルームを生じる発熱体を想定した発熱量は実験および CFD と同様に 2.0kW とした。本モデルでは鉛直温度分布を予測するために、壁面に沿う下降流(あるいは上昇流)を表現する「壁面流モデル」、熱プルームの影響を考慮する「熱プルームモデル」、上下の温度差による熱移動を評価する「熱移動モデル」の 3 つに分けて考える。

3.2. 計算過程

Fig.7 にブロックモデルの計算過程を示す。本モデルは、壁体情報、発熱体条件、対流熱伝達率、給排気風量等を入力し、各ブロックに仮定した初期温度を与える。まず戸河里らの手法⁶⁾により各壁面(K)ブロックで生じる下降流(または上昇流)の風量を算出する。次に発熱体(L)からのプルーム流量の算出を行う。本研究では大きな熱負荷を有する発熱体を設置するため、発熱体から生じる熱プルームが室内鉛直温度分布に大きな影響を及ぼす。そこで、プルーム流量の予測式⁹⁾を用いて、ブロック境界高さにおける風量を算出し、それに基づき各ブロックからの誘引風量を算出する。また、流入風量をもとに、ブロック温度およびプルーム温度から熱量収支を計算する。この後、壁面流および熱プルームによる誘引風量から各ブロックの上下ブロック間の風量収支および熱量収支を計算する。熱量収支の計算においては隣接するブロック間の乱流熱拡散を考慮するため、熱拡散係数 a_l [m²/s]を用いて熱移動係数 C_b [W/(m²·K)]を算出して計算を行う^{注2)}。

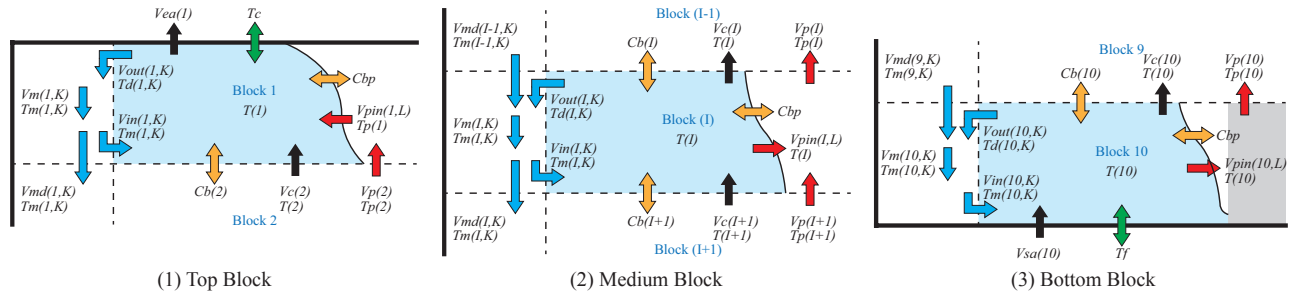


Fig.8 Air Flow Rate and Heat Balance of Block Model

最後に収束状況を確認し、条件を満たしていれば計算を終了する。風量収支・熱量収支の概要図をFig.8に示し、計算方法をTable 3に示す。

3.3. 予測結果と解析結果の比較

本節では、放射連成CFD解析の結果を真値と仮定してブロックモデルによる予測結果と比較する。上下ブロック間の乱流熱拡散係数 a_l は、室の上部と下部でそれぞれ a_{l_upper} と a_{l_lower} の2つに区別し、温度分布の計算結果が真値と最もよく一致する組み合わせを最小二乗法により有効数字2桁で同定する。 a_{l_upper} はブロック1~7のブロック境界、 a_{l_lower} はブロック7~10のブロック境界として、それぞれ 10^{-5} ~ 10^{-1} の範囲で同定した。これは吹出気流の影響を受ける領域を室上部と区別することを意図したためである。室ブロックとプルームブロック間の乱流熱拡散は熱移動係数 C_{bp} を用いて計算し、 $C_{bp}=1.0$ [W/(m²·K)]として、プルーム周長^{注3)}にブロック高さを乗じた境界面積を適用した。なお、本報のブロックモデルの境界条件には放射連成CFD解析における給気温度、床面・天井面・壁面温度を与えた。

Table 3 Calculated Method of Block Model

Air flow rate of plume	Air flow rate and heat balance of room block
$V_p = 0.005 \times W^{\frac{1}{3}} \times (h - h_0)^{\frac{5}{3}}$	$\sum_{k=1}^m \{V_{in}(I, K) - V_{out}(I, K)\} + V_{sa}(I) - V_{ca}(I) - \sum_{l=1}^m V_{pin}(I, L) + V_c(I+1) - V_c(I) = 0$
Air flow rate balance of wall down flow	【Top block】
$V_{out}(I, K) - V_{in}(I, K) + V_{md}(I-1, K) - V_{md}(I, K) = 0$	$\sum_{k=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + \sum_{l=1}^m C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\}$
Air flow rate and heat balance of plume block	$+ C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\}$
$V_p(I+1, L) - V_p(I, L) + V_{pin}(I, L) = 0$	$+ C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \alpha_c A_b \{T_c - T(I)\} + \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$
【Top block】	【Medium block】
$\sum_{l=1}^m C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	$\sum_{k=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{ca}(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\}$
【Medium block】	$+ C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$
$\sum_{l=1}^m C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{l=1}^m C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\}$	【Bottom block】
$+ \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	$\sum_{k=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T(I) - T(I)\}$
【Bottom block】	$+ C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\}$
$\sum_{l=1}^m C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + W + \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	$+ C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + \alpha_c A_b \{T_c - T(I)\} + \sum_{l=1}^m C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$

Nomenclature

V_p : Air flow rate of plume [m ³ /s]	V_{sa} : Supply air flow rate [m ³ /s]	T_{sa} : Supply air temperature [°C]	A_b : Area of boundary surface of block [m ²]
V_{pin} : Entrainment air flow from block [m ³ /s]	V_{ca} : Exhaust air flow rate [m ³ /s]	W : Heat generation rate of heating element [W]	H_b : Height of one block [m]
V_{in} : Inlet air flow from wall down flow [m ³ /s]	V_c : Vertical flow rate between room blocks [m ³ /s]	h : Height above the floor [m]	B_p : Circumferential length of plume [m]
V_{out} : Outlet air flow to wall down flow [m ³ /s]	T : Room block temperature [°C]	h_0 : Distance to virtual point heat source from floor [m]	C_b : Heat transfer coefficient between blocks [W/(m ² ·K)]
V_m : Mixed wall down flow [m ³ /s]	T_p : Plume temperature [°C]	B : Circumferential length of heating element [m]	C_{bp} : Heat transfer coefficient around plume [W/(m ² ·K)]
V_{md} : Vertical flow rate of mixed flow [m ³ /s]	T_m : Temperature of wall down flow [°C]	$C_p \rho$: Volumetric specific heat of air [J/(m ³ ·K)]	

Table 4 に同定された $a_{t,upper}$ と $a_{t,lower}$ を示すと共に、各条件の水平面平均温度の鉛直分布を Fig.9 に示す。全条件において CFD 解析とブロックモデルの結果が概ね一致しており、IJV を対象とした場合に乱流熱拡散係数を室の上部と下部の 2 領域に分割することの妥当性が示されたと言える。温度予測モデルの確立にはこの 2 種の乱流熱拡散係数を設計条件等から予測可能とする必要があり、それぞれの領域について特徴的な無次元数の関数として整備されると有用と言える。ここではその初期検討として、 $a_{t,lower}$ は給気と室下部の温度差、 $a_{t,upper}$ は室の上下温度差が支配的と仮定して以下の 2 種の Ar 数を定義する。

$$Ar_{SA} = \frac{g \times \beta \times \sqrt{A_m} \times (T_{10} - T_{SA})}{v_{SA}^2} \quad (1)$$

$$Ar_{room} = \frac{g \times \beta \times H_r \times (T_{EA} - T_{SA})}{v_{SA}^2} \quad (2)$$

ここで、 g : 重力加速度 [m/s²], β : 体積膨張率 [1/K], A_m : 吹出面積 [m²], v_{SA} : 吹出風速 [m/s], T_{10} : 最下部ブロック温度 [°C], T_{SA} : 給気温度 [°C], T_{EA} : 排気温度 [°C], H_r : 天井高 [m] である。Fig.10 にそれぞれの領域の Ar 数と a_t の関係を示す。室上部においては低風速で Ar_{room} が大きくなるほど $a_{t,upper}$ が低下する傾向が示された。吹出後の衝突噴流の影響を受ける領域の Ar_{SA} と $a_{t,lower}$ でもその傾向は見られるものの、室上部と比較すると $a_{t,lower}$ の値は大きく、給気風速を抑えても一定の値を下回らない可能性がある。これは衝突噴流により室下部では空気の混合が促進されることが影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では放射連成 CFD 解析の精度を確認した上でそれを用いた数値実験を行った。その後 CFD 解析結果を真値としてブロックモデルによる室内鉛直温度分布の簡易予測に必要な乱流熱拡散係数を 2

Table 4 Turbulent Thermal Diffusivity obtained by Least Squares Method

Case	1	2	3	4
$a_{t,upper}$ [m ² /s]	0.011	0.0021	0.0013	0.00064
$a_{t,lower}$ [m ² /s]	0.021	0.010	0.0062	0.0072

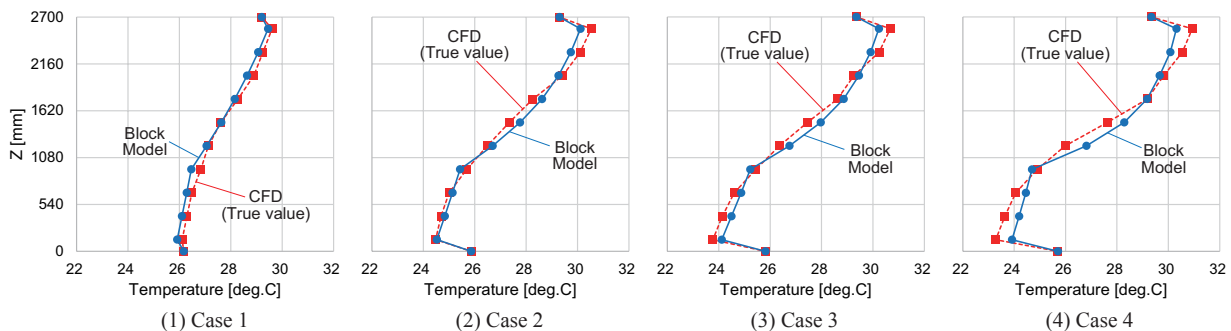


Fig.9 Vertical Distribution of Horizontal Average Temperature obtained from CFD and Block Model

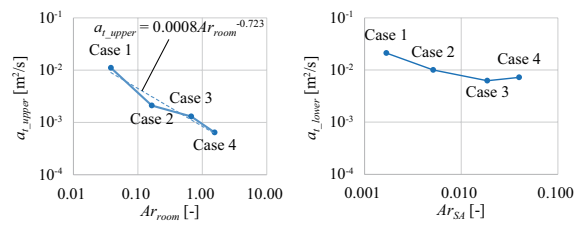
領域に分けて同定すると共に、温度分布予測精度を示した。今後は設計条件を変更した数値実験の結果を蓄積し、乱流熱拡散係数の適切な関数化を図る。

[注釈]

- 注 1) 精度検証時は放射の影響を抑えて壁面にアルミ仕上げの断熱材を設置した実験室実験を再現して放射率を 0.1 としたが、数値実験ではより現実的な壁面を意図して 0.85 とした。また、排気口を 1 箇所から均等な 4 箇所配置に変更した。
- 注 2) 熱移動係数は乱流拡散によるブロック間熱移動の影響を考慮する係数であり、 $C_b = a_t \times C_p \rho / H_b$ で与える。
- 注 3) 文献⁹⁾を参考にブルームが鉛直方向から軸対称に 12.5 度の広がり角度を有すると仮定してブルーム周長を計算した。

[参考文献]

- 1) T.Karimipannah, 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, B.Moshfegh : Investigation on the flow and thermal behavior of impinging jet ventilation systems in an office with different heat loads, *Building and Environment*, Vol.59, pp.127-144, 2013
- 3) 宇佐美亮太, 小林知広ら: 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 1), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.277-280, 2013.3
- 4) 富田篤, 小林知広ら: 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), 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
- 5) 杉田雄希, 小林知広ら: 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 6), 空気調和衛生工学会大会学術講演論文集, 第 6 巻, pp.177-180, 2015.9
- 6) 戸河里敏, 荒井良延ら: 大空間における上下温度分布の予測モデルその 1, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 427 号, pp.9-19, 1991.9
- 7) 東本文明, 山中俊夫ら: 冷却面を有する置換換気室内の温度・汚染物濃度分布—熱ブルームを組み込んだブロックモデルの適用—, 日本建築学会環境系論文集, 第 571 号, pp.47-53, 2003.9
- 8) 石黒亮, 近本智行ら: 緩衝ブロックを用いた置換空調の室内上下温度分布予測モデルに関する研究, 空気衛生調和工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.151-154, 2012.3
- 9) Håkon Skistad : DISPLACEMENT VENTILATION, Research Studies Press Ltd., 1994



(1) Upper Region of Room (2) Lower Region of Room
Fig.10 Correlation between Archimedes Number and Turbulent Thermal Diffusivity for Upper and Lower Region in the Room