

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8) ブロックモデルによる室内鉛直温度分布の予測及び乱流熱拡散係数の同定
A Study on Semi-Displacement Ventilation using Radial Wall Jet
(Part 8) Prediction of Vertical Temperature Profile by Block Model
and Determination of Turbulent Thermal Diffusivity

学生会員 ○杉田 雄希 (大阪市立大学) 正会員 小林 知広 (大阪市立大学) 正会員 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 a numerical experiment, a parametric study on supply air momentum is first conducted by CFD in this paper. Based on those results, appropriate 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、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³⁻⁶⁾ では実験室実験による基礎的性状の把握、ならびに放射の影響を考慮した非等温 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⁷⁾ 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^{8,9)} 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、吹出口数と給気風量を変更した CFD 解析による数値実験を実施した上でその結果を真値と仮定し、ブロックモデルを用いて適切な室内鉛直温度分布を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とともに、無次元数を用いた関数式を提案する。

2. CFD 解析を用いた数値実験

本章では吹出口数の異なる 4 条件 (1,2,4,6 個) を設定し、一定の投入熱量条件下で給気運動量の変化が温度成層に及ぼす影響を把握するために、CFD 解析を用いて吹出口数と給気風量を変更した数値実験を行う。解析対象は既報⁵⁾ の実験室を模した寸法 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

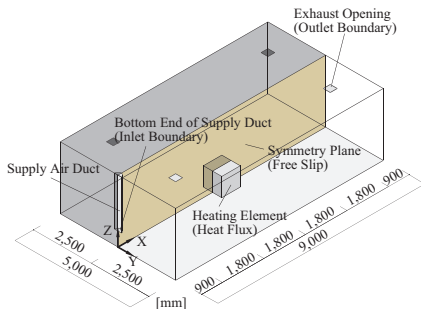


図1 解析空間 (Case 1)

表1 解析条件

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 1-1	Case 2-1	Case 3-1	Case 4-1
	V [m/s]	4.716	2.358	1.179	0.786
	J [%]	10	10	10	10
	L [mm]	21	21	30	21
Outlet	Velocity Magnitude : -0.463m/s				
	Walls (Heat)	Room Walls : External Temperature			
	Walls (Velocity)	Symmetry : Free Slip			
	Other Walls	Linear-Logarithmic Blending Law			
Total Number of Cells		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		2,625,154	2,936,478	3,632,340	3,887,170

表2 給気条件

	Number of Diffusers	Supply Air Volume [m ³ /h]	Supply Air Velocity [m/s]
Case 1-1	1	600	4.716
Case 1-2	1	900	7.074
Case 1-3	1	1,200	9.431
Case 2-1	2	600	2.358
Case 2-2	2	900	3.537
Case 2-3	2	1,200	4.716
Case 3-1	4	600	1.179
Case 3-2	4	900	1.768
Case 3-3	4	1,200	2.358
Case 4-1	6	600	0.786
Case 4-2	6	900	1.179
Case 4-3	6	1,200	1.572

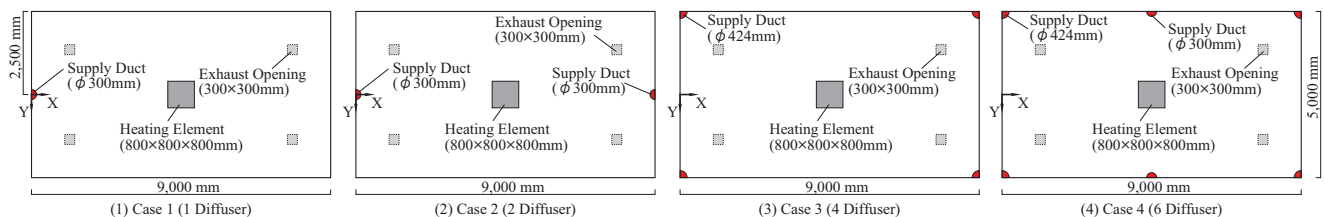


図2 数値実験における解析空間平面図 (Case 1~4)

して室中央に発熱体 (2.0kW) を有する (図 1)。4 条件の平面図を図 2 に示す。既報^{5,6)}と同様に乱流モデルには SST k- ω モデルを使用し、透過や空間内の吸収・散乱の無い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より算出した。解析条件を表 1 に示すとともに、給気条件を表 2 に示す。給気温度は 20°C とし、給気風量は 600, 900, 1,200m³/h の 3 段階とした。水平面平均温度の鉛直分布を図 3 に示す。給気風量が等しい場合、居住域下部では給気風速の低下とともに温度が低下し、居住域の上下温度差が増加する傾向が示された。また、給気風量が大きくなるにつれて空気の混合が促進されるため、温度成層が不明瞭になると言える。次章ではこの結果を真値と仮定してブロックモデルによる鉛直温度分布の簡易予測を行う。

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

本研究では室内空間を鉛直方向に 10 分割し、室・壁面近傍・熱プルームの 3 領域間あるいは隣接する上下ブロック間の移流・拡散ならびに床面及び天井

面での対流熱伝達による熱移動を評価し、鉛直温度分布の簡易予測を行う (図 4)。前章と同様の室を想定し、強い熱プルームを生じる発熱体を想定して発熱量を 2.0kW とした。室上部から順にブロック番号 I を 1~10 とし、IJV 方式における給気は最下部の Block 10 から行い、排気は Block 1 から行う。

図 5 に計算過程を示す。本モデルは給排気風量等の初期条件ならびに室ブロックに仮定した初期温度を与え、戸河里らの手法⁷⁾により各壁面ブロック (K) で生じる下降流 (または上昇流) の風量を算出する。次にプルーム流量の予測式¹⁰⁾を用いて発熱体 (L) から生じるプルーム流量を算出し、流入風量をもとに熱量収支を計算する。その後、壁面流ならびにプルームへの誘引風量をもとに室ブロックの風量収支及び熱量収支を計算する。熱量収支においては上下ブロック間の乱流熱拡散を考慮するため、熱拡散係数 a_t [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1,2)}。なお、対流伝達率はユルゲスの式を用いて算出した^{注3)}。

最後に収束条件を確認して条件を満たしていれば計算を終了する。風量収支及び熱量収支の概要図を図 6 に示し、計算方法詳細を表 3 に示す。

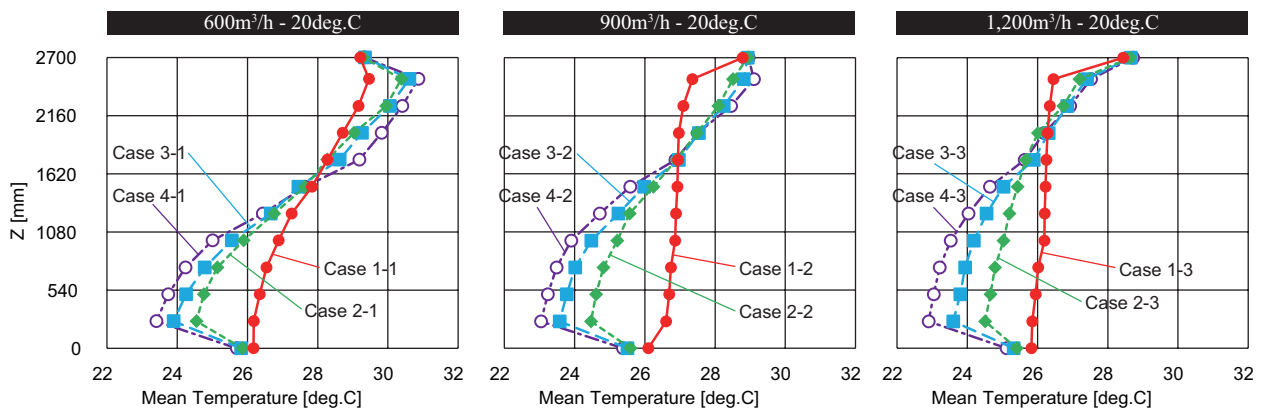


図 3 水平面平均温度の鉛直分布

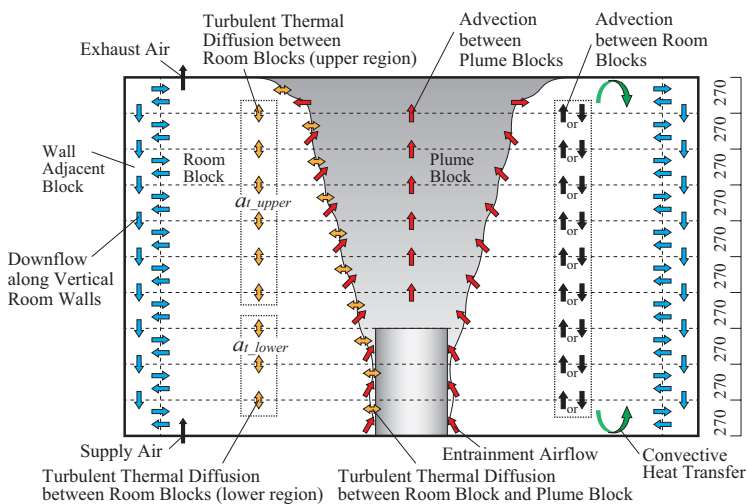


図 4 ブロックモデル概要図

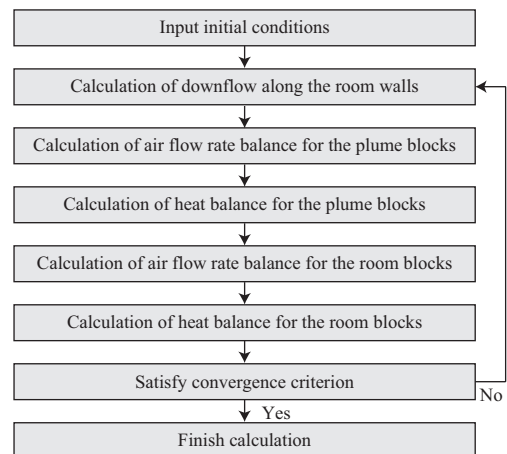


図 5 計算過程

3.2. 乱流熱拡散係数の同定

本節では、前章のCFD解析結果を真値と仮定してブロックモデルによる予測結果を比較し、上下ブロック間の乱流熱拡散係数 a_t を最小二乗法により有効数字2桁で同定する。本研究では a_t を室の上部と下部で a_{t_upper} と a_{t_lower} の2つに分け、それぞれ 10^{-5} ~ 10^{-1} の範囲で同定する。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。表2に示す条件において同定された両領域の乱流熱拡散係数を表4に示すとともに、室内鉛直温度分布を図7に示す。全条件においてブロックモデルとCFD解析の結果が良く一致したと言え、乱流熱拡散係数を2種に分ける手法の妥当性が示された。温度予測モデルの確立には2種の a_t を設計条件等から予測可能とする必要があり、 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 数を定義し、それぞれその関数として整備する。

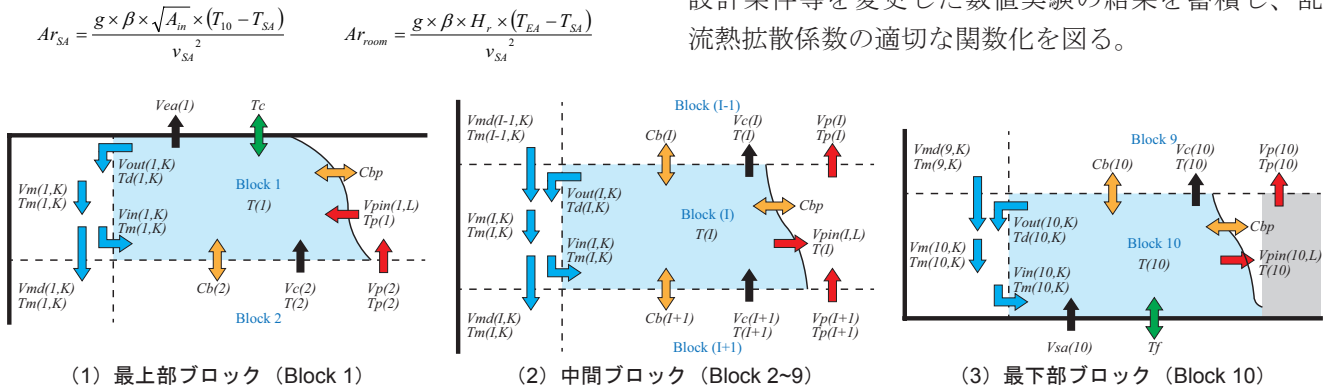


図6 ブロックモデルにおける風量収支・熱量収支概要図

表3 ブロックモデルにおける計算方法

<p>Air flow rate of plume</p> $V_p = 0.005 \times W^{\frac{1}{3}} \times (h - h_0)^{\frac{5}{3}}$ <p>Air flow rate balance of wall down flow</p> $V_{out}(I, K) - V_{in}(I, K) + V_{md}(I-1, K) - V_{md}(I, K) = 0$ <p>Air flow rate and heat balance of plume block</p> $V_p(I+1, L) - V_p(I, L) + V_{pin}(I, L) = 0$ <p>【Top block】</p> $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$ <p>【Medium block】</p> $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$ <p>【Bottom block】</p> $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + W + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	<p>Air flow rate and heat balance of room block</p> $\sum_{K=1}^m \{V_{in}(I, K) - V_{out}(I, K) + V_{sa}(I) - V_{ca}(I) - \sum_{L=1}^n V_{pin}(I, L) + V_c(I+1) - V_c(I)\} = 0$ <p>【Top block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \alpha_c A_c \{T_c - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>【Medium block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>【Bottom block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + \alpha_c A_c \{T_j - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>※The term with underbar is 0 if V_c indicates the outflow from the block.</p>																								
<p>Nomenclature</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tbody> <tr> <td>V_p : Air flow rate of plume [m³/s]</td> <td>V_{sa} : Supply air flow rate [m³/s]</td> <td>T_{sa} : Supply air temperature [°C]</td> <td>A_b : Area of boundary surface of block [m²]</td> </tr> <tr> <td>V_{pin} : Entrainment air flow from block [m³/s]</td> <td>V_{ca} : Exhaust air flow rate [m³/s]</td> <td>W : Heat generation rate of heating element [W]</td> <td>H_b : Height of one block [m]</td> </tr> <tr> <td>V_{in} : Inlet air flow from wall down flow [m³/s]</td> <td>V_c : Vertical flow rate between room blocks [m³/s]</td> <td>h : Height above the floor [m]</td> <td>B_p : Circumferential length of plume [m]</td> </tr> <tr> <td>V_{out} : Outlet air flow to wall down flow [m³/s]</td> <td>T : Room block temperature [°C]</td> <td>h_0 : Distance to virtual point heat source from floor [m]</td> <td>C_b : Heat transfer coefficient between blocks [W/(m²·K)]</td> </tr> <tr> <td>V_m : Mixed wall down flow [m³/s]</td> <td>T_p : Plume temperature [°C]</td> <td>B : Circumferential length of heating element [m]</td> <td>C_{bp} : Heat transfer coefficient around plume [W/(m²·K)]</td> </tr> <tr> <td>V_{md} : Vertical flow rate of mixed flow [m³/s]</td> <td>T_m : Temperature of wall down flow [°C]</td> <td>$C_p \rho$: Volumetric specific heat of air [J/(m³·K)]</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		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)]	
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)]																							

ここで、 g : 重力加速度 [m/s²], β : 体積膨張率 [1/K], v_{SA} : 給気風速 [m/s], T_{SA} : 給気温度 [°C], A_{in} : 吹出面積 [m²], T_{10} : 最下部ブロック温度 [°C], H_r : 天井高 [m], T_{EA} : 排気温度 [°C]である。図8に Ar 数と a_t の関係を示すとともに、それぞれの近似式の一例を図中に示す。室上部においては低風速で Ar_{room} が大きくなるとともに 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室下部でもその傾向は見られるものの、衝突噴流により空気の混合が促進されるため、室上部と比較すると a_{t_lower} の値は大きくなる結果となった。

4. まとめ

本研究では、CFD解析による数値実験の結果を真値として、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領域に分けて同定するとともに、その妥当性を示した。今後は設計条件等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]

- 注 1) 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 2) 室ブロックとブルームブロックの境界における乱流熱拡散を考慮し、熱移動係数を $C_{bp}=1$ [W/(m²·K)] として、ブルーム周長にブロック高さに乗じた境界面積を適用した。なお、ブルームが鉛直方向から軸対称に 12.5 度の拡がり角度を有する¹⁰⁾と仮定してブルーム周長を計算した。
- 注 3) 対流熱伝達率は以下のユルグスの式から算出した。v には給気風量を床面積で除した風速を適用した。
- $$\alpha_c = 5.6 + 3.9v \quad (v \leq 4.9 \text{ m/s})$$
- $$\alpha_c = 7.2v^{0.78} \quad (v > 4.9 \text{ m/s})$$

表 4 最小二乗法により同定した乱流熱拡散係数

	$a_{t, upper}$ [m ² /s]	$a_{t, lower}$ [m ² /s]		$a_{t, upper}$ [m ² /s]	$a_{t, lower}$ [m ² /s]
Case 1-1	0.011	0.019	Case 3-1	0.0010	0.0059
Case 1-2	0.11	0.15	Case 3-2	0.0025	0.011
Case 1-3	0.23	0.096	Case 3-3	0.0075	0.036
Case 2-1	0.0018	0.0094	Case 4-1	0.00052	0.0079
Case 2-2	0.0067	0.022	Case 4-2	0.0010	0.017
Case 2-3	0.019	0.069	Case 4-3	0.0030	0.025

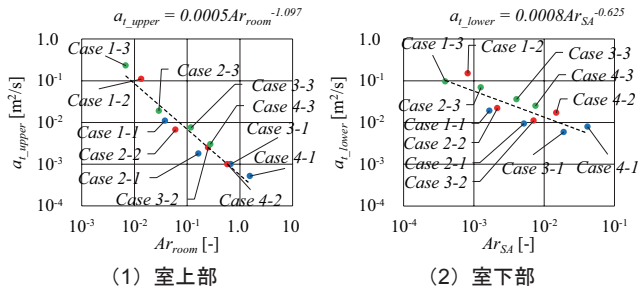


図 8 乱流熱拡散係数とアルキメデス数の関係

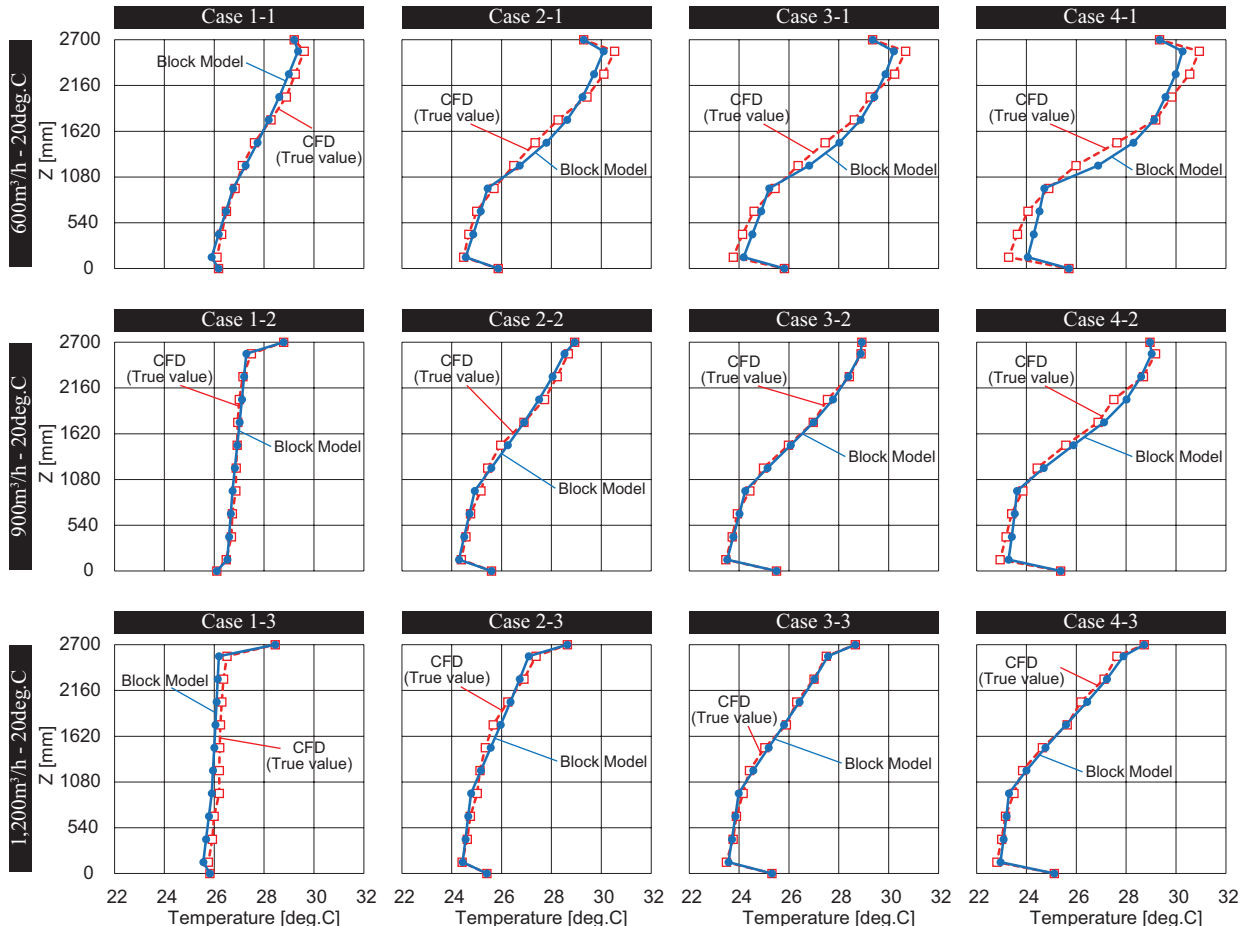


図 7 CFD 解析及びブロックモデルにおける室内鉛直温度分布

[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, 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) 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), 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
- 4) 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), 空気調和衛生工学会大会学術講演論文集, 第 3 巻, pp.205-208, 2014.9
- 5) 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 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) 杉田雄希, 小林知広, 梅宮典子: 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), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. -, 2016.3
- 7) 戸河里敏, 荒井良延, 三浦克弘: 大空間における上下温度分布の予測モデル 大空間の空調・熱環境計画手法の研究 (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
- 8) 東本文明, 山中俊夫, 甲谷寿史, 花野弘行: 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
- 9) 石黒亮, 近本智行, 小林知広: 緩衝ブロックを用いた置換換気方式の室内上下温度分布予測モデルに関する研究, 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.151-154, 2012.3
- 10) H.Skistad : DISPLACEMENT VENTILATION, Research Studies Press LTD., 1994