

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8) 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

正会員 ○杉田雄希*¹ 同 小林知広*² 同 梅宮典子*³

衝突噴流 置換換気 温度成層 数値実験 ブロックモデル

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 (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。上下に温度成層が形成される大空間の鉛直温度分布の予測モデルとして戸河里らのブロックモデル¹⁾があり、置換換気室を対象に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^{2,3)}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、前報で行った 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予測を行うとともに、適切な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。

2. ブロックモデルによる室内鉛直温度分布の予測

2.1. モデル概要

本研究では室内空間を鉛直方向に等間隔に 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 1)。前報の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前報と同様に 2.0kW とした。

図 2 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仮定した室ブロックの初期温度を与え、戸

河里らの手法¹⁾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⁴⁾を用いて発熱体 (*L*) からの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^{註1,2)}。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。収支計算の詳細を図 3 ならびに表 1 に示す。

2.2. 乱流熱拡散係数の同定

本節では、前報の CFD 解析結果を真値と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 つに区分し、それぞれ 10⁻⁵~10⁻¹ の範囲で同定する。前報の数値実験と同様の 4 条件において同定された a_t を表 2 に示すとともに、室内鉛直温度分布を図 4 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る。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、 Ar 数の関数として整備する。

$$Ar_{Sd} = \frac{g \times \beta \times \sqrt{A_m} \times (T_{10} - T_{Sd})}{v_{Sd}^2} \quad Ar_{room} = \frac{g \times \beta \times H_r \times (T_{EA} - T_{Sd})}{v_{Sd}^2}$$

g : 重力加速度 [m/s²] v_{Sd} : 吹出風速 [m/s] A_m : 吹出面積 [m²] H_r : 天井高 [m]
 β : 体積膨張率 [1/K] T_{Sd} : 給気温度 [°C] T_{10} : 最下部ブロック温度 [°C] T_{EA} : 排気温度 [°C]

図 5 に Ar 数と a_t の関係を示す。 Ar 数が大きくなるとともに a_t が低下する傾向が示されたが、 $a_{t,lower}$ の値は大きく、衝突噴流により空気の混合が促進されるため、給気風速を

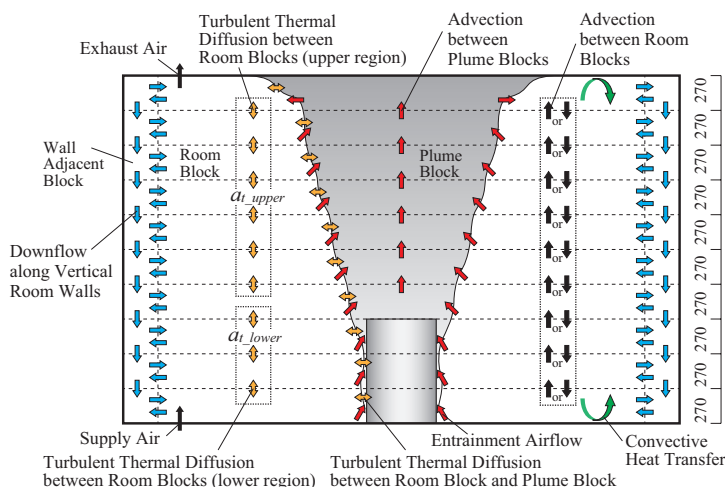


図 1 ブロックモデル概要図

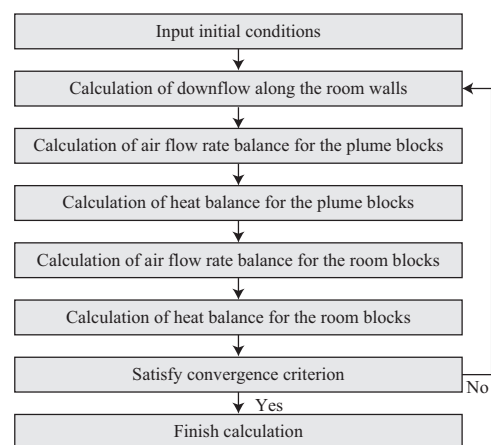


図 2 計算過程

抑えても一定の値を下回らない可能性がある。

が鉛直方向から軸対称に 12.5 度の拡がり角度を有する⁴⁾と仮定してブルーム周長を算出した。

3. まとめ

本研究では、前報の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 領域に分けて同定し、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。

[注釈]

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、 $C_b = a_i \times C_p \rho / H_b$ 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も考慮し、熱移動係数を $C_{bp}=1.0$ [W/(m²·K)] として、ブルーム周長にブロック高さを乗じた境界面積を適用した。なお、ブルーム

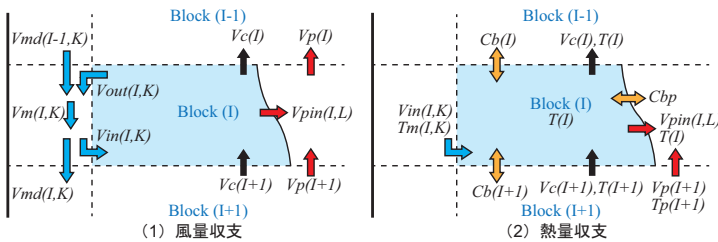


図 3 ブロックモデルにおける風量収支・熱量収支

[参考文献]

- 1) 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
- 2) 東本大明, 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
- 3) 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
- 4) H.Skistad: DISPLACEMENT VENTILATION, Research Studies Press LTD., 1994

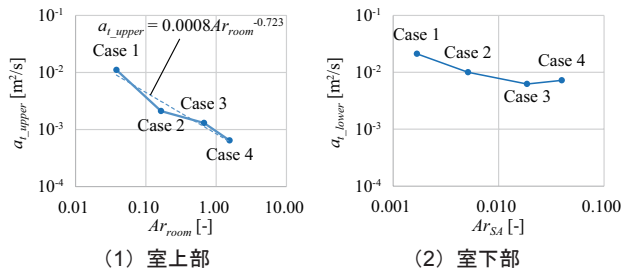


図 5 乱流熱拡散係数とアルキメデス数の関係

表 2 最小二乗法による乱流熱拡散係数の同定結果

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

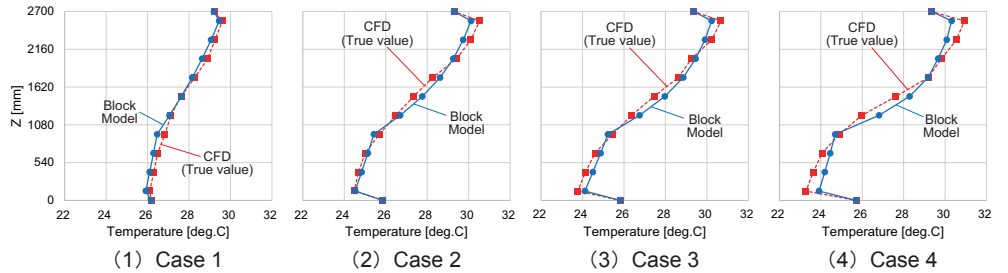


図 4 ブロックモデル及び CFD 解析における室内鉛直温度分布

表 1 ブロックモデルにおける計算方法

Air flow rate of plume $V_p = 0.005 \times W^{1/3} \times (h - h_0)^{5/3}$	Air flow rate and heat balance of room block $\sum_{K=1}^m \{V_{in}(I, K) - V_{out}(I, K)\} + V_{sa}(I) - V_{ca}(I) - \sum_{L=1}^n V_{pin}(I, L) + V_c(I+1) - V_c(I) = 0$		
Air flow rate balance of wall down flow $V_{out}(I, K) - V_{in}(I, K) + V_{md}(I-1, K) - V_{md}(I, K) = 0$	【Top block】 $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \alpha_s A_s \{T_r - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$		
Air flow rate and heat balance of plume block $V_p(I+1, L) - V_p(I, L) + V_{pin}(I, L) = 0$	【Medium block】 $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$		
【Top block】 $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	【Bottom block】 $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + \alpha_s A_s \{T_r - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$		
【Medium block】 $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	※The term with underbar is 0 if V_c indicates the outflow from the block.		
【Bottom block】 $\sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + W + \sum_{L=1}^n C_{hp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$			
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_{hp} : 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)]	

* 1 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 前期博士課程
* 2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師 博士 (工学)
* 3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授 博士 (工学)

Graduate Student, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University
Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.
Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.