

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6) 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

4. 環境工学 - 13. 空気流動応用

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^{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^{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 (図 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 (表 1)。放射計算は透過や空間内の吸収・散乱が無い表面メッシュ間のみの放射解析 (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。

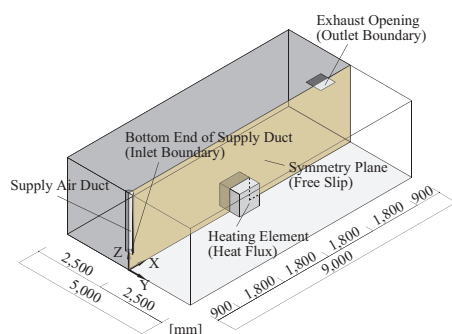


図 1 解析空間 (Validation Model)

表 1 CFD 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 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 Room Walls : External Temperature Heating Element Surface : Heat Flux
	Walls Symmetry : Free Slip
	Other Walls : Linear-Logarithmic Blending Law
Total Number of Cells 2,023,362	

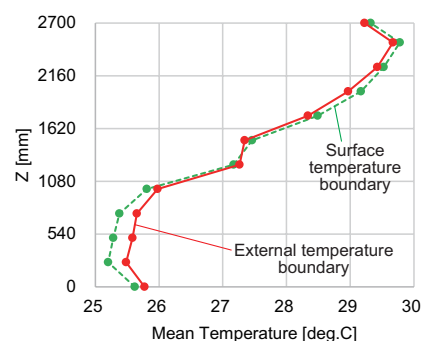


図 2 室内鉛直温度分布

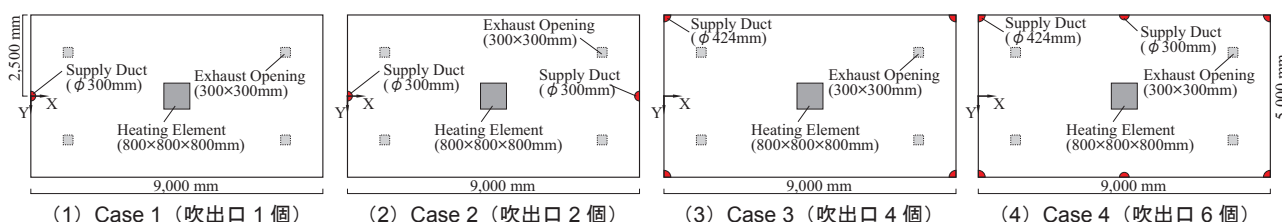


図 3 パラメトリックスタディにおける解析空間平面図 (Case 1~4)

A Study on Semi-Displacement Ventilation System using Impinging Jet Flow

Part 6. Prediction of Vertical Temperature Distribution using Block Model based on Numerical Experiment by CFD

SUGITA Kazuki, KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko

表面温度を与えた解析⁵⁾および放射連成解析における水平面平均温度の鉛直分布を図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。図3に示すように、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)}(表2)。解析空間(Case 1)を図4に示す。4条件の水平面平均温度の鉛直分布を図5に示す。室上部の温度にも若干の差異は見られるが、居住域下部では吹出口数の増加とともに温度が大きく低下し、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。

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

ブロックモデルでは室内空間を鉛直方向に複数のブ

ロックに分割し、室・壁面近傍・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。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図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から行う。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。なお、壁面の境界条件には放射連成CFD解析における床面・天井面・壁面温度をそれぞれ与えた。本モデルでは鉛直温度分布を予測するために「室ブロック」に加え、壁面に沿う下降流(あるいは上昇流)を表現する「壁面ブロック」、熱プルームの影響を考慮する「プルームブロック」の3領域に分けて風量・熱量の収支計算を行う。

3.2. 計算過程

図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

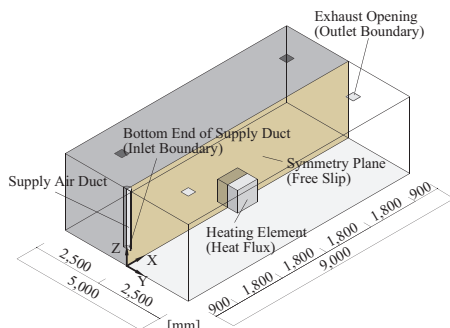


図4 解析空間 (Case 1)

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

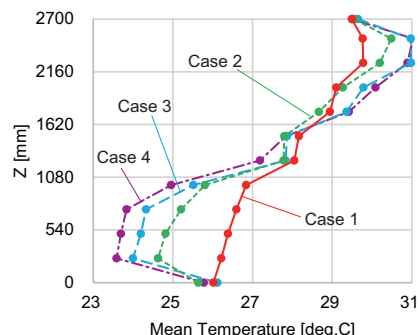


図5 室内鉛直温度分布 (Case 1~4)

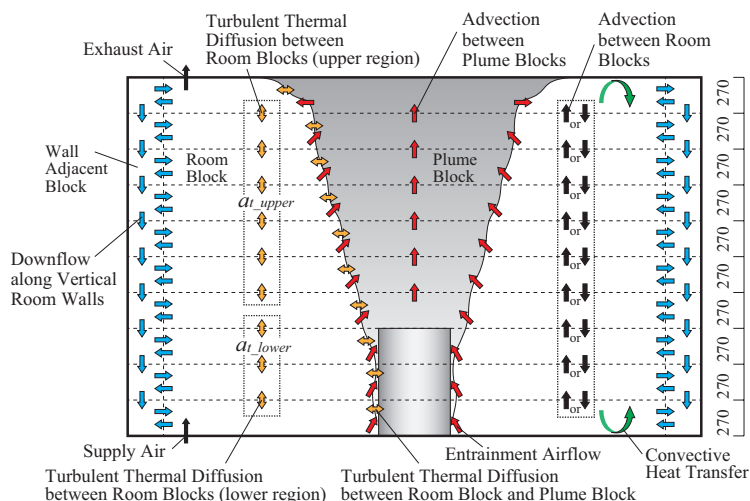


図6 ブロックモデル概要図

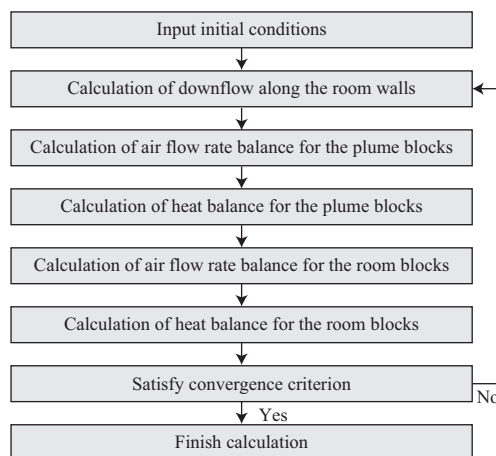


図7 計算過程

に発熱体 (L) からのプルーム流量の算出を行う。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、それに基づき室ブロックからの誘引風量を算出する。また、室ブロックおよびプルームブロックの温度から熱量収支を計算する。この後、壁面流およびプルームによる誘引風量から各室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、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2)}。なお、室ブロックおよびプルームブロックの熱量収支では室ブロックとプルームブロック間の乱流熱拡散も考慮して、熱移動係数 $C_{bp}=1.0$ [W/(m²・K)] として計算し、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。

最後に収束状況を確認して条件を満たしていれば計算を終了する。本研究における風量収支・熱量収支の概要図を図8に示し、計算方法詳細を表3に示す。

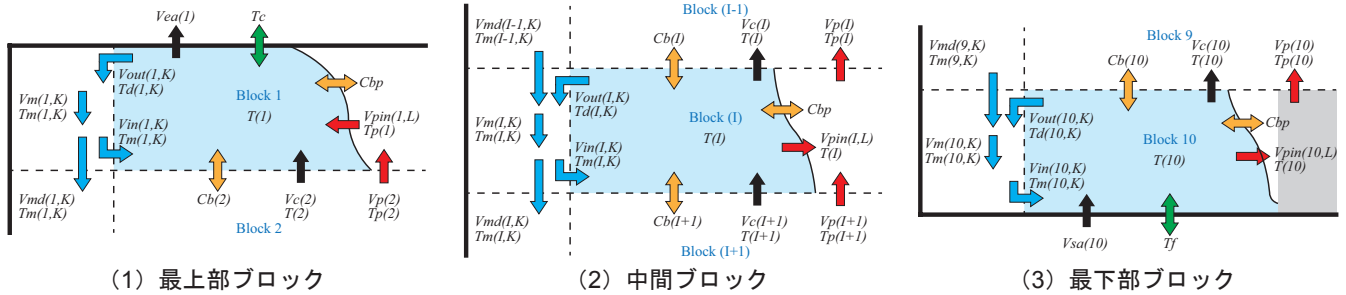


図8 ブロックモデルにおける風量収支・熱量収支概要図

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 and heat balance of room block</p> $\sum_{K=1}^m \{V_{in}(I, K) - V_{out}(I, K)\} + V_{sa}(I) - V_{ea}(I) - \sum_{L=1}^n V_{pin}(I, L) + V_c(I+1) - V_c(I) = 0$ <p>【Top block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I) \{T(I+1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \alpha_c A_c \{T_c - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <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> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + \alpha_c A_c \{T_f - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>※The terms with underline is 0 if V_c indicates the outflow from the block.</p>
<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>Nomenclature</p> <p>V_p : Air flow rate of plume [m³/s] V_{pin} : Entrainment air flow from block [m³/s] V_{in} : Inlet air flow from wall down flow [m³/s] V_{out} : Outlet air flow to wall down flow [m³/s] V_m : Mixed wall down flow [m³/s] V_{md} : Vertical flow rate of mixed flow [m³/s]</p>	<p>V_{sa} : Supply air flow rate [m³/s] V_{ea} : Exhaust air flow rate [m³/s] V_c : Vertical flow rate between room blocks [m³/s] T : Room block temperature [°C] T_p : Plume temperature [°C] T_m : Temperature of wall down flow [°C]</p> <p>T_{sa} : Supply air temperature [°C] W : Heat generation rate of heating element [W] h : Height above the floor [m] h_0 : Distance to virtual point heat source from floor [m] B : Circumferential length of heating element [m] $C_p \rho$: Volumetric specific heat of air [J/(m³・K)]</p> <p>A_b : Area of boundary surface of block [m²] H_b : Height of one block [m] B_p : Circumferential length of plume [m] C_b : Heat transfer coefficient between blocks [W/(m²・K)] C_{bp} : Heat transfer coefficient around plume [W/(m²・K)]</p>

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_t は、室の上部と下部でそれぞれ a_{t_upper} と a_{t_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_{t_upper} はブロック1～7のブロック境界、 a_{t_lower} はブロック7～10のブロック境界として、それぞれ $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 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。

表4に同定された a_{t_upper} と a_{t_lower} を示すとともに、各条件の水平面平均温度の鉛直分布を図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。

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

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

ここで、 g ：重力加速度 [m/s²]、 β ：体積膨張率 [1/K]、 A_{in} ：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。図 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气の混合が促進されることが影響していると考えられる。

表 4 最小二乗法により同定した乱流熱拡散係数

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

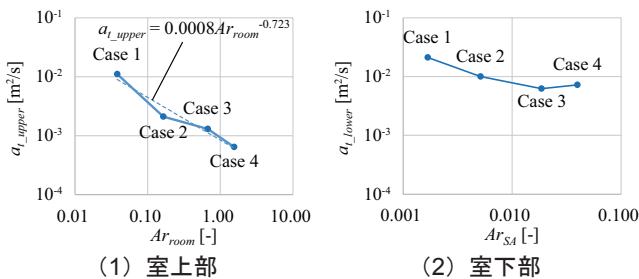


図 10 乱流熱拡散係数とアルキメデス数の関係

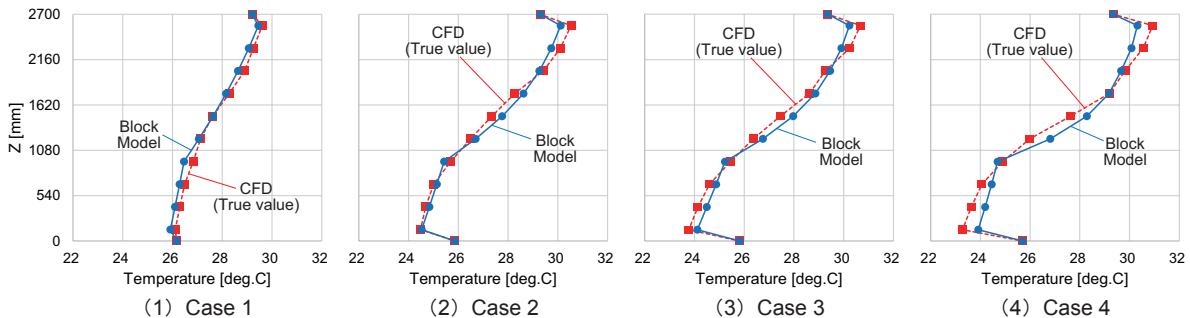


図 9 CFD 解析およびブロックモデルにおける室内鉛直温度分布

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領域に分けて同定するとともに、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⁾を参考にプルーフ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プルーフ周長を計算した。

[参考文献]

- 1) T.Karimipannah, H.B.Awbi : Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *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 : 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), 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
- 4) 小林知広, 梅宮典子ら : 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), 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
- 5) 杉田雄希, 小林知広ら : 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 4), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 55 号・環境系, pp.125-128, 2015.6
- 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・汚染物質濃度分布—熱プルーフ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換気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
- 9) H.Skistad : DISPLACEMENT VENTILATION, Research Studies Press Ltd., 1994

* 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.