

床面衝突噴流換気方式の鉛直温度分布および鉛直濃度分布の簡易予測手法

SIMPLIFIED PREDICTION METHOD OF VERTICAL TEMPERATURE AND CONCENTRATION PROFILE FOR IMPINGING JET VENTILATION SYSTEM

建築環境工学分野 西海 利哉

Division of Architectural Environmental Engineering Toshiya NISHIUMI

本研究では、床面衝突噴流換気方式を対象とした鉛直温度分布および鉛直濃度分布の簡易予測手法の提案を最終目的とする。CFD解析を用いて室条件・給気条件を変更した数値実験を行い、その結果を真値と仮定してブロックモデルを用いた鉛直温度分布および鉛直濃度分布の予測精度の検証を行った。また、鉛直分布性状の予測結果に大きな影響を及ぼす乱流熱拡散ならびに物質拡散について、予測モデルに用いる拡散係数を適切に与える手法を示した。

The Impinging Jet Ventilation (IJV) System is an air-conditioning method to form thermal and concentration stratification. The final objective of this work is to establish a simplified prediction method of vertical temperature and concentration profile for Impinging Jet Ventilation System. As a numerical experiment, a parametric study on room conditions and supply air conditions is conducted. Assuming those results to be true values, prediction accuracy of vertical temperature and concentration profile using Block Model is verified. In addition, an appropriate method of inputting diffusivity for turbulent thermal diffusion and mass diffusion which greatly influences the vertical profiles predicted is shown.

1. はじめに

室内の居住域のみを対象とした空調方式は、非居住域の空調負荷を削減できるため、省エネルギーの観点から有効であると考えられる。そのような空調方式として置換換気方式が提案されているが、床面付近から低温低速で給気を行う置換換気方式では、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う問題点を有する。一方で、置換換気方式と同様に温度成層を形成し、水平方向の温度分布が生じ難い方式として、床面付近から鉛直下向きに給気し床面に衝突、拡散する気流により空調を行う床面衝突噴流換気方式¹⁾ (Impinging Jet Ventilation System, 以降 IJV 方式)がある。しかし、現状 IJV 方式が形成する室内温度分布および汚染物濃度分布は十分に解明されていない。そこで、本研究ではこの IJV 方式を対象とした室内鉛直温度分布および鉛直濃度分布の簡易予測手法の提案を最終目的としている。既往研究²⁾では、CFD解析により給気条件を変更した温度解析を行い、戸河里らのブロックモデル³⁾に基づき IJV 方式に適した乱流熱拡散係数 a_t [m²/s] を与える予測モデルを提案し、室を上部と下部の2領域に分けてそれぞれの a_t を設計条件から予測する手法の検討を行ったが、対象条件数が少なく、濃度解析については行われていない。そのため、本研究では IJV 方式が特に有効と考えられるより高い天井高の室条件も追加し、CFDを用いた温度・濃度解析、予測モデルによる鉛直温度分布の簡易予測、濃度予測モデルの構築を行う。

また、ブロックモデルによる鉛直分布性状の予測結果に大きな影響を及ぼす乱流熱拡散係数ならびに乱流物質拡散係数について、適切に与える手法およびそれを与える際の領域分割の手法について検討を行う。

2. CFD 解析

2.1 解析概要

既往研究²⁾と同様に IJV 吹出面を床上 600mm、高熱工場を想定した熱負荷として室中央に発熱量 2.0kW で一辺 800mm の発熱体を設置した平面寸法 9.0m×5.0m、天井高 2.7m と 5.4m の2室を対象とする。図 1 に解析対象空間を示す。解析パラメータとして吹出口数を 1 個 (Case 1)、2 個 (Case 2)、4 個 (Case 3)、6 個 (Case 4) の 4 条件、総給気風量を 400m³/h、600m³/h、900m³/h、1200m³/h の 4 条件設定し、天井高 2 条件の全 32 条件で解析を行う。なお、給気温度は 20°C とした。図 2 に Case 1~4 の平面図、表 1 に CFD 解析の条件を示す。流入境界面の位置は吹出口下端とし、境界条件には各条件ごとの総給気風量を吹出口面積の合計で除した風速を与え、全吹出口から均等に給気する条件とした。流出境界は強制排気とした。なお、各ディフューザーの吹出口面積、排気口面積は全条件で統一した。

2.2 汚染物発生条件

濃度解析においては、温度解析時に得られた気流場を固定して解析を行う。発熱体直上 200mm の位置に 800mm×800mm×100mm の発生源を設定し、発生量を 60L/h、発生汚染物を CO₂ とした。

2.3 解析結果

CFD 解析による鉛直温度分布を図 3 に、鉛直濃度分布を図 4 に示す。濃度は排気濃度で基準化した値を示す。なお、結果は全て天井高 2.7m の条件のみ掲載する。温度分布については、吹出口数が多い、つまり給気運動量が小さい条件ほど室下部温度が低下し、居住域内の温度差も増加する傾向が見られ、置換換気方式に近い温度分布を示した。一方で、給気運動量が大きい条

件では室空気の混合が促進され、混合換気方式に近い分布を示した。また、総給気風量の増加に伴い室下部温度が低下し、温度成層高さが高くなる傾向が見られた。濃度分布についても温度分布と同様の傾向が見られたが、濃度成層は温度成層に比べより明確に見られた。これより、IJV 方式において居住域を十分に空調・換気するためには、総給気風量だけでなく給気運動量についても適切に設計を行う必要があると言える。

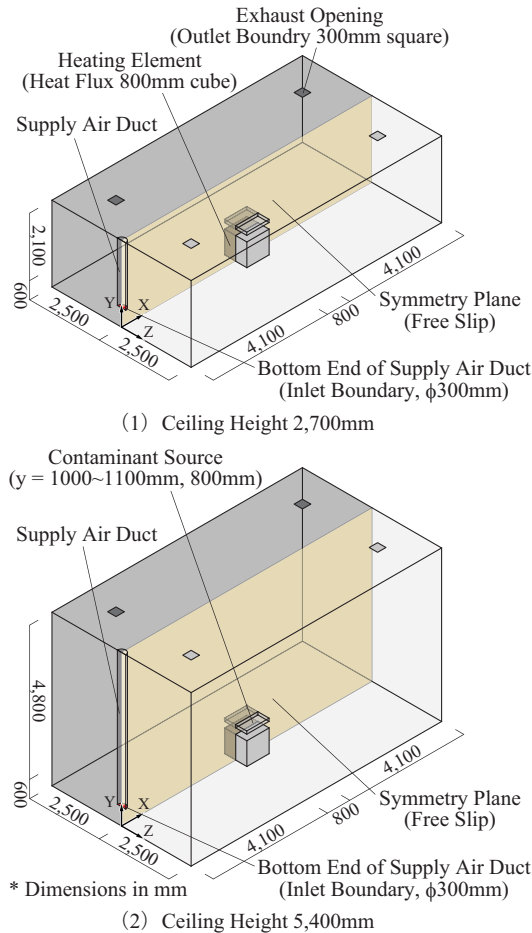


図 1 CFD 解析対象空間 (Case 1)

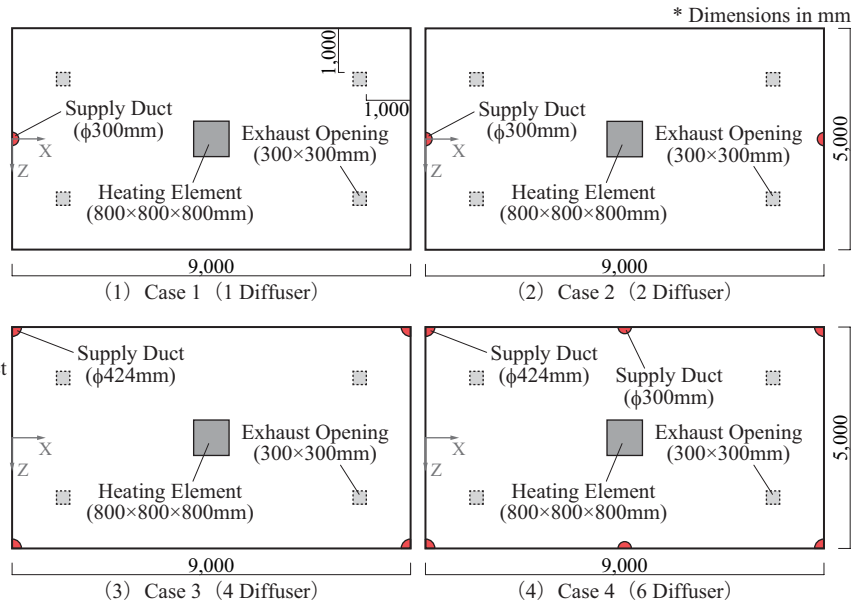


図 2 CFD 解析対象室平面図 (吹出口配置図)

表 1 CFD 解析条件

CFD code	Ansyes Fluent 17.0	
Turbulence Model	SST $k-\omega$ Model	
Radiation Model	Surface-to-Surface Model	
Algorithm	SIMPLE	
Discretization Scheme for Advection Term	QUICK	
Boundary Condition	Walls (Heat)	Room Walls : External Temperature
		Heating Element Surface : Heat Flux
	Walls (Velocity)	Symmetry : Free Slip
		Other Walls : Linear-Logarithmic Blending Law

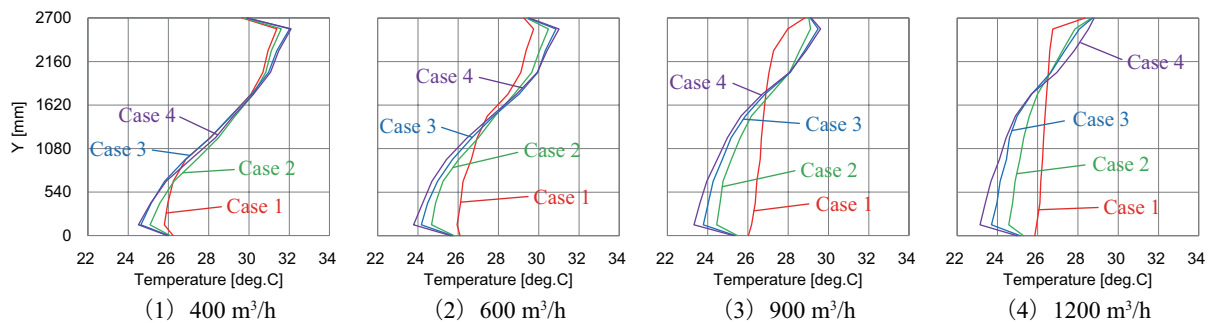


図 3 鉛直温度分布 (CFD 解析)

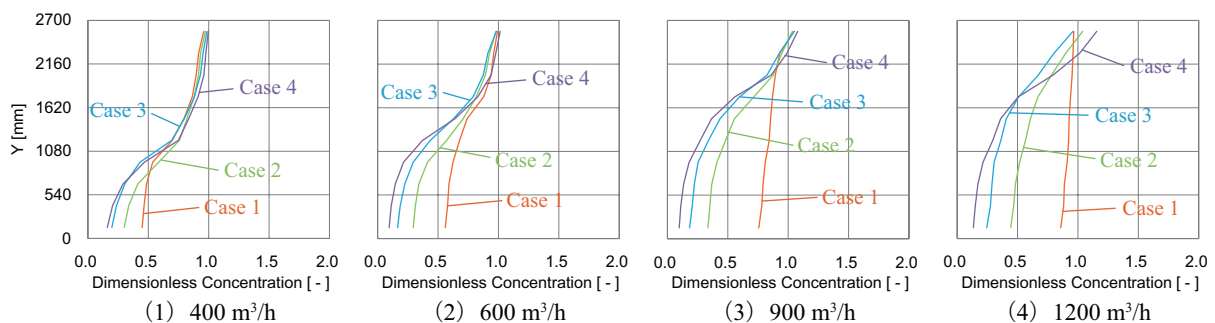


図 4 鉛直濃度分布 (CFD 解析)

3. ブロックモデル概要

3.1 温度予測モデル

本研究の予測モデルでは、対象空間を複数のブロックに分割する。1ブロックの高さを270mmとして、天井高2.7mでは鉛直方向に10ブロック、天井高5.4mでは20ブロックとし、水平方向には室ブロック・壁面近傍ブロック・プルームブロックに分割する。各ブロック間において、風量収支と移流・乱流熱拡散ならびに対流熱伝達による熱量収支を反復計算することで、最終的に室ブロック温度を求める。壁面近傍ブロックにおける壁面流の計算には戸河里ら³⁾の手法を用い、プルームブロックにおける風量収支にはプルーム流量予測式⁴⁾を用いた。給気は最下部ブロック、排気は最上部ブロックから行い、発熱量は最下部プルームブロックに全て与えた。概要図を図5に、計算式を図6に示す。

室条件および給気・熱負荷条件等を入力し、室ブロック初期温度は全ブロック25°C、壁面温度にはCFD解析により取得した各ブロック壁面における平均表面温度を与えた。風量収支・熱量収支を計算した後に室ブロック温度を更新し、再度計算を行う。収束判定は10000回を計算回数の上限とし、旧室ブロック温度と算出された室ブロック温度の残差が 10^{-15} 以下とした。

3.2 濃度予測モデル

濃度予測モデルでは、前述した温度予測モデルの計算が収束した後、各ブロック間の移流量に基づく物質移動および乱流物質拡散による物質質量収支計算を行い、同様に収束させる。濃度予測モデルの計算式を図7に示す。各ブロックの初期濃度は0とし、汚染物発生はCFD解析時と同等の高さとなるよう下から4番目のプルームブロック(高さ810mm~1080mm)に与えた。

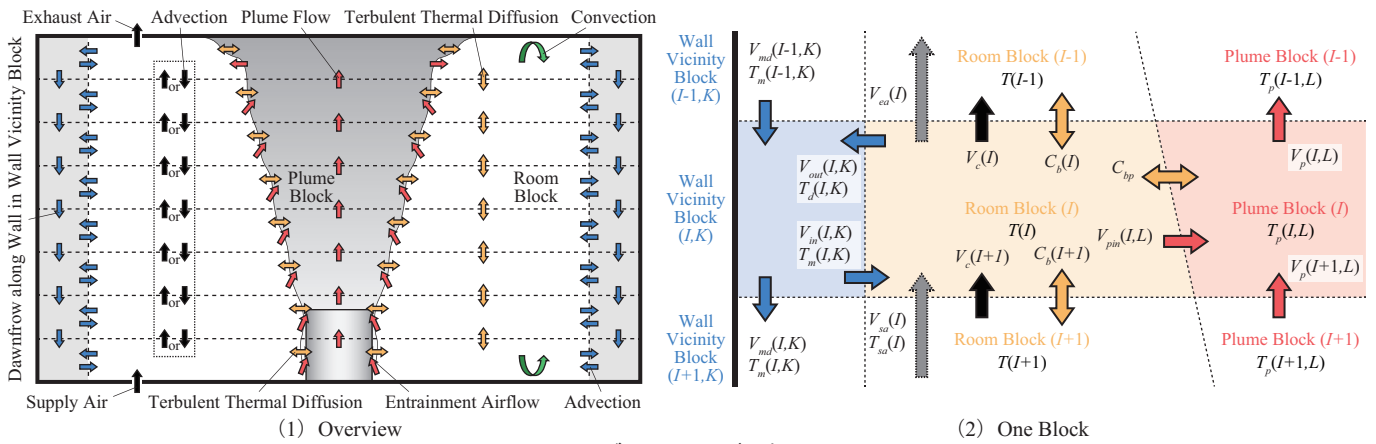


図5 ブロックモデル概要図

<p>Airflow Rate Balance of Plume Block</p> $V_p = 0.0005 \times W^{\frac{1}{3}} \times (h - h_0)^{\frac{5}{3}}$ $V_p(I+1, L) - V_p(I, L) + V_{pin}(I, L) = 0$	<p>Heat Balance of Room Block</p> <p>【Top block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} + C_p \rho V_c(I+1) \{T(I+1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \alpha_c A_b \{T_c - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>【Medium block】</p> $\sum_{K=1}^m \{V_{in}(I, K) - V_{out}(I, K)\} + V_{sa}(I) - V_{ca}(I) - \sum_{L=1}^n V_{pin}(I, L) + V_c(I+1) - V_c(I) = 0$ $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I+1) A_b \{T(I+1) - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>【Bottom block】</p> $\sum_{K=1}^m C_p \rho V_{in}(I, K) \{T_m(I, K) - T(I)\} + C_p \rho V_{sa}(I) \{T_{sa}(I) - T(I)\} - C_p \rho V_c(I) \{T(I-1) - T(I)\} + C_b(I) A_b \{T(I-1) - T(I)\} + \alpha_c A_b \{T_f - T(I)\} + \sum_{L=1}^n C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T_p(I, L) - T(I)\} = 0$ <p>*The term with underbar is 0 if Vc indicates the outflow from the block.</p>
<p>Airflow Rate Balance of Wall Vicinity Block</p> $V_{out}(I, K) - V_{in}(I, K) + V_{md}(I-1, K) - V_{md}(I, K) = 0$	<p>Heat Transfer Coefficient by Turbulent Diffusion</p> $C_b = a_t \times C_p \rho / H_b$
<p>Airflow Rate 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>Heat Balance of Plume Block</p> <p>【Top block】</p> $C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$ <p>【Medium block】</p> $C_p \rho V_p(I+1, L) \{T_p(I+1, L) - T_p(I, L)\} + C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$ <p>【Bottom block】</p> $C_p \rho V_{pin}(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} + W + C_{bp} H_b B_p(I, L) \{T(I) - T_p(I, L)\} = 0$	

Nomenclature

V_p : Air Flow Rate of Plume [m ³ /s]	V_c : Vertical Flow between Room Blocks [m ³ /s]	C_b : Heat Transfer Coefficient between Room Blocks [W/(m ² ·K)]
V_{pin} : Entrainment Air Flow from Room Block [m ³ /s]	W : Heat Generation Rate of Heating Element [W]	C_{bp} : Heat Transfer Coefficient around Plume [W/(m ² ·K)]
V_{in} : Inlet Air Flow from Wall Down Flow [m ³ /s]	h : Height above Floor [m]	a_t : Turbulent Thermal Diffusivity between Room Blocks [m ² /s]
V_{out} : Outlet Air Flow to Wall Down Flow [m ³ /s]	h_0 : Distance between Virtual Heat Point and Floor [m]	T : Room Block Temperature [°C]
V_{md} : Vertical Flow Rate of Mixed Flow [m ³ /s]	A_b : Boundary Surface Area between Room Blocks [m ²]	T_p : Plume Block Temperature [°C]
V_{sa} : Supply Air Flow Rate [m ³ /s]	H_b : Height of One Block [m]	T_m : Temperature of Downflow along Wall [°C]
V_{ca} : Exhaust Air Flow Rate [m ³ /s]	B_p : Circumferential Length of Plume [m]	T_{sa} : Supply Air Temperature [°C]

図6 温度予測モデル風量収支・熱量収支式

3.3 拡散係数

前述した予測モデルは、乱流拡散による熱移動および物質移動を考慮するため、計算に乱流熱拡散係数 a_t [m²/s] および乱流物質拡散係数 D_t [m²/s] の値が必要となる。既往研究²⁾においては、気流性状を示す無次元数であるアルキメデス数を用いた関数式により乱流熱拡散係数を与えたが、整備された条件が限られているため、本研究では追加した条件も含めて関数式を整備する。詳細には、CFD 解析結果を真値として適切な拡散係数の同定を行った後、同定値を基に関数化を行う。なお、拡散係数は本来局所的な統計量であるが、モデルの煩雑さの軽減を目的とし、既往研究²⁾ 同様に室を上部領域と下部領域に大きく分け、上部領域においては $a_{t, upper}$, $D_{t, upper}$ を、下部領域においては $a_{t, lower}$, $D_{t, lower}$ を与えるものとした。領域分割の位置については次節に示す衝突モデルを用いて決定する。

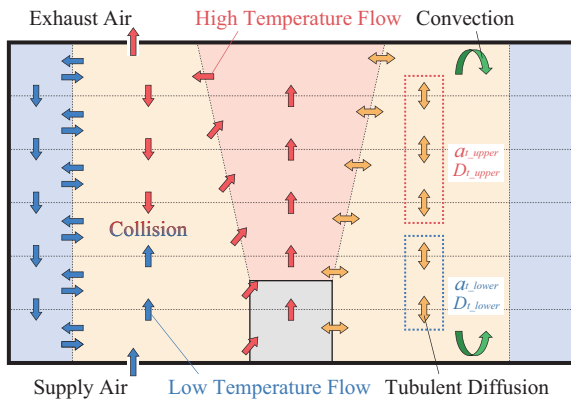


図8 衝突モデル概要図

3.4 衝突モデル

既往研究²⁾における領域分割では、計算前に予め上部領域および下部領域のブロック数を決めており、明確な根拠に基づく手法ではない上に、鉛直ブロック数を変更した際に対応できないという問題点を有する。そこで、予測モデルの風量収支結果に基づき領域分割位置を決定する手法の提案を行う。本研究ではこれを「衝突モデル」と呼ぶ。予測モデルにおける移流は基本的には図8に示すような流れを示すため、室ブロックにおいて高温の下降流と低温の上昇流が衝突する位置で成層が形成されるという考えに基づき、当該ブロックを領域分割の境界面とした。図9に上部領域および下部領域における各条件のアルキメデス数と同定された乱流熱拡散係数の関係を示す。両領域ともに明確な関係が見られた。なお、本報においては乱流物質拡散係数は簡易的に乱流熱拡散係数の値と同じ値を与えた。

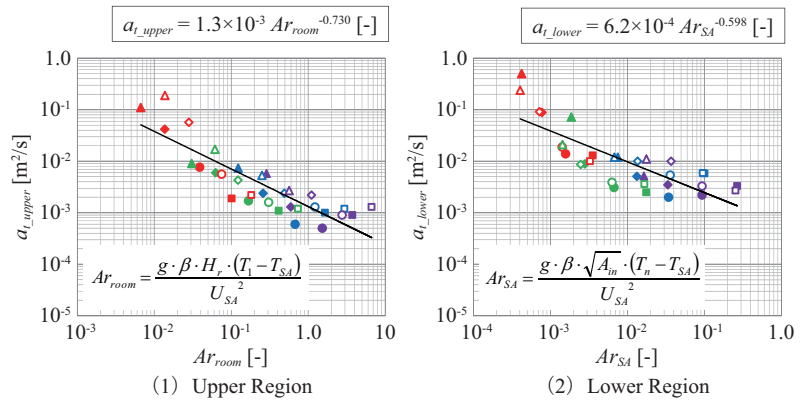


図9 乱流熱拡散係数とアルキメデス数の関係

<p>Mass Balance of Plume Block</p> <p>【Top block】</p> $V_p(I+1, L)\{Cr_p(I+1, L) - Cr_p(I, L)\} + k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr(I) - Cr_p(I, L)\} + M_p(I, L) = 0$ <p>【Medium block】</p> $V_p(I+1, L)\{Cr_p(I+1, L) - Cr_p(I, L)\} + V_{pin}(I, L)\{Cr(I) - Cr_p(I, L)\} + k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr(I) - Cr_p(I, L)\} + M_p(I, L) = 0$ <p>【Bottom block】</p> $V_{pin}(I, L)\{Cr(I) - Cr_p(I, L)\} + k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr(I) - Cr_p(I, L)\} + M_p(I, L) = 0$	<p>Mass Balance of Room Block</p> <p>【Top block】</p> $\sum_{K=1}^m V_{in}(I, K)\{Cr_w(I, K) - Cr(I)\} + V_{sa}(I)\{Cr_{sa}(I) - Cr(I)\} + \sum_{L=1}^n V_{pin}(I, L)\{Cr_p(I, L) - Cr(I)\} + V_c(I+1)\{Cr(I+1) - Cr(I)\} + k_c(I+1)A_b\{Cr(I+1) - Cr(I)\} + \sum_{L=1}^n k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr_p(I, L) - Cr(I)\} + M_r(I) = 0$ <p>【Medium block】</p> $\sum_{K=1}^m V_{in}(I, K)\{Cr_w(I, K) - Cr(I)\} + V_{sa}(I)\{Cr_{sa}(I) - Cr(I)\} + V_c(I+1)\{Cr(I+1) - Cr(I)\} - V_c(I)\{Cr(I-1) - Cr(I)\} + k_c(I)A_b\{Cr(I-1) - Cr(I)\} + k_c(I+1)A_b\{Cr(I+1) - Cr(I)\} + \sum_{L=1}^n k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr_p(I, L) - Cr(I)\} + M_r(I) = 0$ <p>【Bottom block】</p> $\sum_{K=1}^m V_{in}(I, K)\{Cr_w(I, K) - Cr(I)\} + V_{sa}(I)\{Cr_{sa}(I) - Cr(I)\} - V_c(I)\{Cr(I-1) - Cr(I)\} + k_c(I)A_b\{Cr(I-1) - Cr(I)\} + \sum_{L=1}^n k_{cp} H_b B_p(I, L)\{Cr_p(I, L) - Cr(I)\} + M_r(I) = 0$ <p>* The term with underline is 0 if Vc indicates the outflow from the block.</p>
<p>Mass Balance of Wall Vicinity Block</p> <p>【Top block】</p> $V_{out}(I, K)\{Cr(I) - Cr_w(I, K)\} + M_w(I, K) = 0$ <p>【Medium block】</p> <p>【Bottom block】</p> $V_{mid}(I-1, K)\{Cr_w(I-1, K) - Cr_w(I, K)\} + V_{out}(I, K)\{Cr(I) - Cr_w(I, K)\} + M_w(I, K) = 0$	<p>Mass Transfer Coefficient by Turbulent Diffusion</p> $k_c = D_t / H_b$

Nomenclature

V_p : Air Flow Rate of Plume [m ³ /s]	V_c : Vertical Flow between Room Blocks [m ³ /s]	M_r : Contaminants Emission Rate in Room Block [kg/s]
V_{pin} : Entrainment Air Flow from Room Block [m ³ /s]	A_b : Boundary Surface Area between Room Blocks [m ²]	M_p : Contaminants Emission Rate in Plume Block [kg/s]
V_{in} : Inlet Air Flow from Wall Down Flow [m ³ /s]	H_b : Height of One Block [m]	M_w : Contaminants Emission Rate in Wall Block [kg/s]
V_{out} : Outlet Air Flow to Wall Down Flow [m ³ /s]	B_p : Circumferential Length of Plume [m]	Cr : Contaminants Concentration of Room Block [kg/m ³]
V_{mid} : Vertical Flow Rate of Mixed Flow [m ³ /s]	k_c : Mass Transfer Coefficient between Room Blocks [m/s]	Cr_p : Contaminants Concentration of Plume Block [kg/m ³]
V_{sa} : Supply Air Flow Rate [m ³ /s]	k_{cp} : Mass Transfer Coefficient around Plume [m/s]	Cr_w : Contaminants Concentration of Wall Block [kg/m ³]
V_{ex} : Exhaust Air Flow Rate [m ³ /s]	D_t : Turbulent Mass Diffusivity between Room Blocks [m ² /s]	Cr_{sa} : Contaminants Concentration of Supply Air [kg/m ³]

図7 濃度予測モデル物質収支式

4. ブロックモデル予測結果

4.1 鉛直温度分布

予め領域分割位置を決めた場合 (Predefined) と衝突モデルを用いた場合 (Collision) の鉛直温度分布の予測結果を、CFD 解析結果とともに図 10 に示す。なお、関数式は Predefined 条件と Collision 条件それぞれの同定値を基に整備している。室ブロックとプルームブロック間における熱移動係数は $C_{bp} = 1.0[W/(m^2 \cdot K)]$ とした。Case 1-400 では僅かに低い精度を示したが、全条件で概ね温度分布を再現できた。衝突モデルによる領域分割位置は、CFD 解析時の温度成層高さとほぼ一致し、予め領域分割位置を決めた場合と同等の精度が得られた。また、領域分割位置が温度成層高さに対して適切でなかった条件においては、僅かだが精度の向上も見られた。衝突モデルによる領域分割位置は、ほぼ総給

気風量に依存して決まる傾向が得られたが、CFD 解析においても成層高さは総給気風量に依存する傾向が見られており、衝突モデルの有効性が示されたと言える。

4.2 鉛直濃度分布

次に、鉛直濃度分布の予測結果を図 11 に示す。こちらも CFD 解析、予め領域分割位置を決めた場合、衝突モデルを用いた場合で比較を行った。室-プルームブロック間における物質移動係数は、 $C_{bp} = 1.0[W/(m^2 \cdot K)]$ を空気の容積比熱で除した値を目安とし $k_{cp} = 0.0010[m/s]$ とした。鉛直濃度分布についてもある程度の精度が得られたが、室下部濃度を高く予測する傾向が見られた。衝突モデルによる領域分割位置は、濃度分布においても CFD 解析結果の成層高さと概ね一致する結果となったが、鉛直濃度分布予測における乱流物質拡散係数の与え方については、更なる検討が必要である。

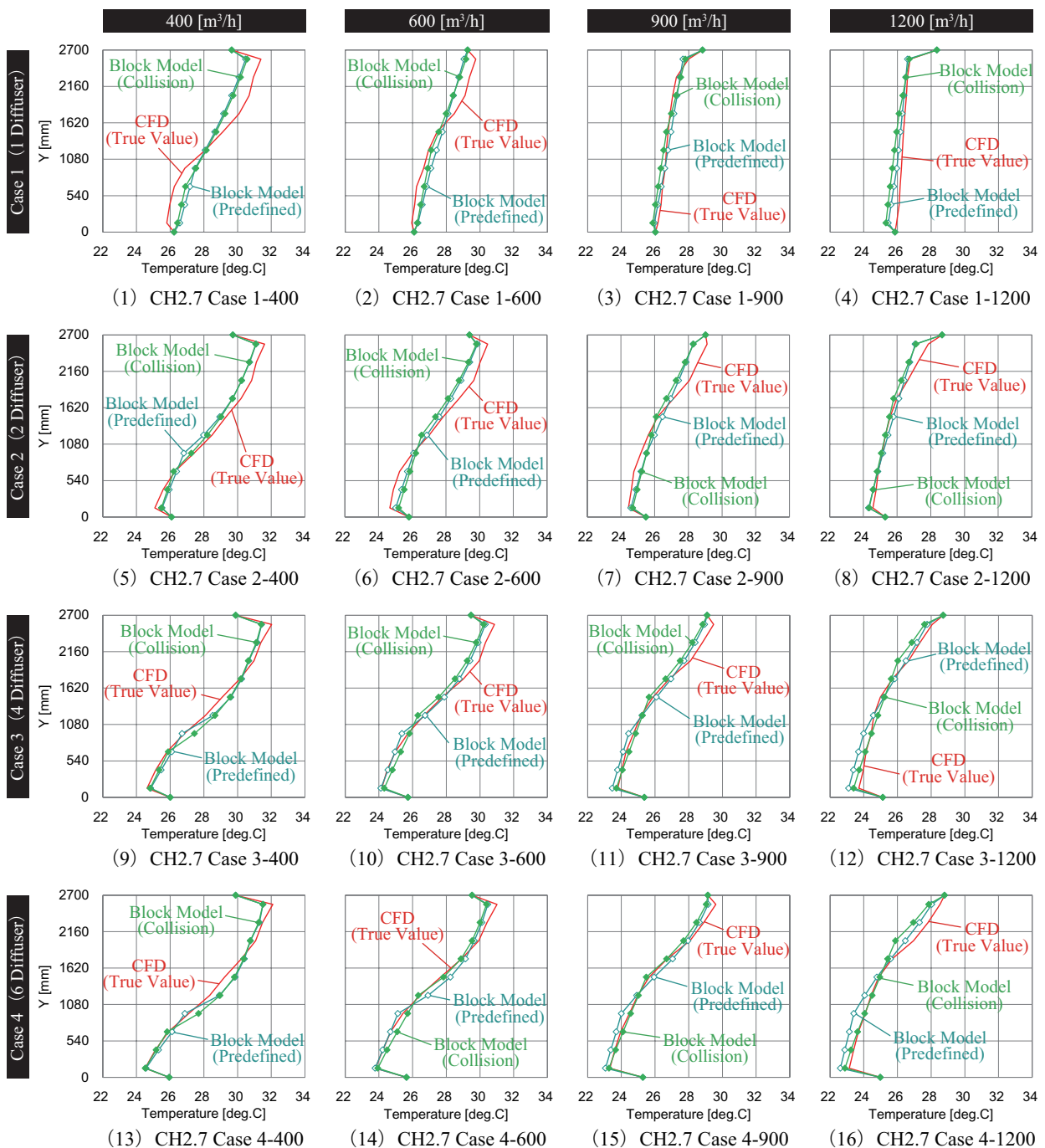


図 10 鉛直温度分布予測結果

5. まとめ

本研究では、IJV方式を対象とした、設計段階における鉛直温度分布および鉛直濃度分布の簡易予測手法の提案を最終目的とし、ブロックモデル³⁾に基づく予測モデルを用いて精度検証を行った。また、予測モデルに必要な拡散係数の関数式²⁾の改良およびその際の領域分割手法の提案を行った。その結果、比較的高い予測精度が得られ、衝突モデルを用いた領域分割位置は、概ね成層高さに対して適切な位置となった。加えて、衝突モデルを用いた場合、予め上部領域および下部領域のブロック数を決める必要がなくなり、鉛直ブロック数を変更した場合においても対応可能であるため、モデルの煩雑さの軽減にも繋がったと言える。しかし、鉛直濃度分布予測では精度が低い条件もあり、乱流物質拡散係数の与え方に関する検討が必要である。

今後の課題としては、前述したように乱流物質拡散係数の与え方に関する検討が必要であることに加え、現状は検討を行った条件数が少ないため、さらに室条件、給気条件や熱負荷、発熱体配置等の条件を変更した場合における検討が必要である。

[参考文献]

- 1) T. Karamipناه, 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) 小林知広, 杉田雄希, 梅宮典子 : 床面衝突噴流を用いた準置換換気方式に関する研究 - CFDを用いた数値実験に基づくブロックモデルによる室内鉛直温度分布の予測 -, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第730号, pp.1117-1125, 2016.12
- 3) 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
- 4) H. Skisted : DISPLACEMENT VENTILATION, Reserch Studies Press Ltd., 1994

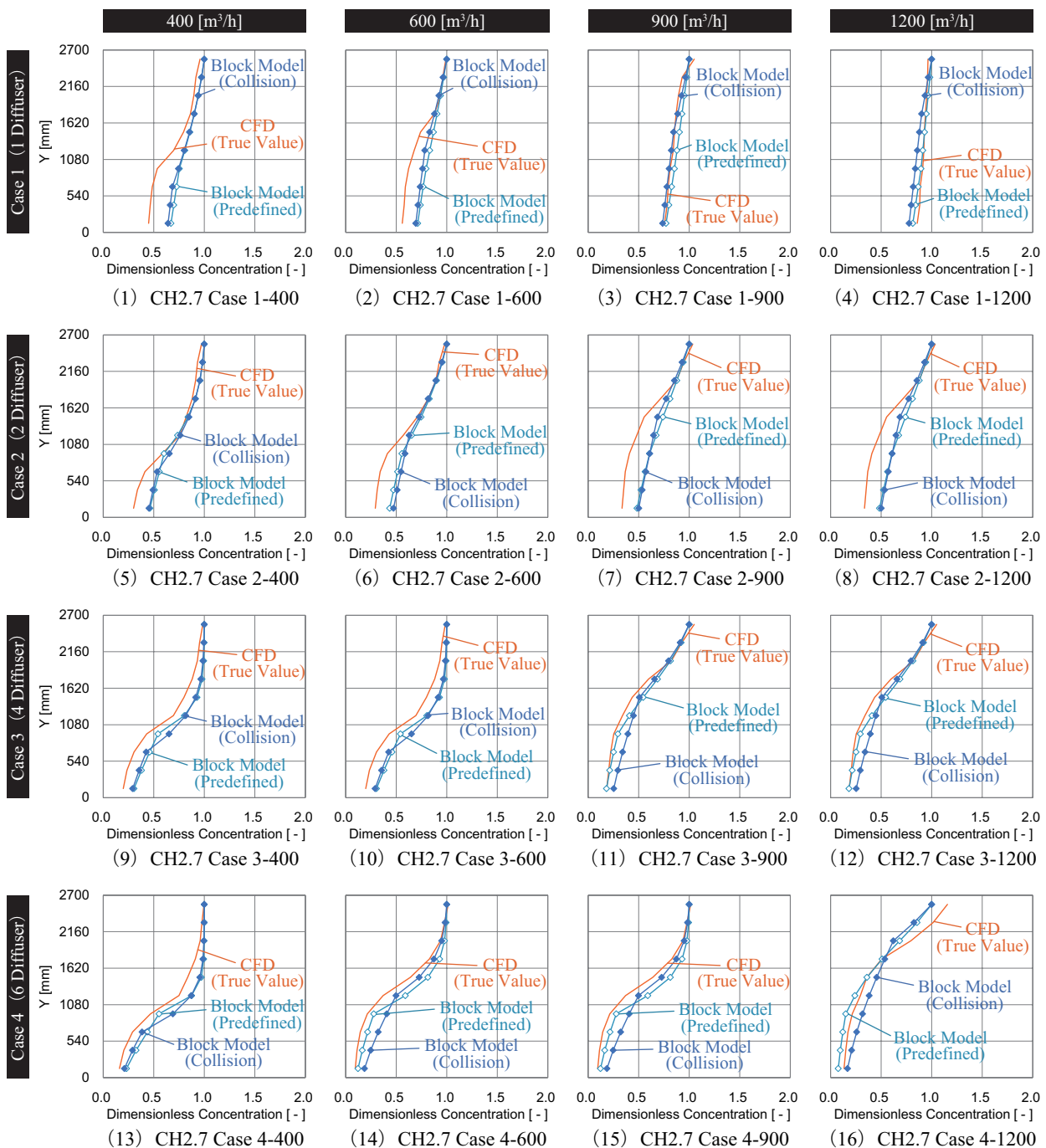


図 11 鉛直濃度分布予測結果