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 12）異なる熱負荷配置条件における乱流熱拡散係数の同定
A Study on Semi-Displacement Ventilation using Radial Wall Jet
(Part 12) Turbulent Thermal Diffusivity under Different Conditions of Heat Load Distribution

正会員 ○杉田 雄希（東畑建築事務所） 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 [*2] Noriko UMEMIYA [*2]
[*1] Tohata Architects & Engineers, inc. [*2] 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 profile based on the Block Model. A parametric study on interior heat load is conducted by CFD, and the appropriate turbulent thermal diffusivity for the Block Model is determined. Because it is of great importance on vertical temperature profile, a function to predict appropriate diffusivity based on design parameter is proposed.

1. はじめに

本研究では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手法の提案を目的とする。温度成層を形成する空間を対象とした温度予測モデルにブロックモデル[3,4]があるが、当該モデル中で温度分布に大きな影響を及ぼすパラメータである乱流熱拡散係数に関する検討事例は少ない。筆者らの既往研究[5]及び前報[6]ではブロックモデルによる鉛直温度分布の簡易予測ならびに上下ブロック間の乱流熱拡散係数の同定を行うとともに、2 種のアルキメデス数を用いた関数化を行ったが、対象は大きな熱負荷が集中して配置された条件に限定していた。そこで、本報では CFD 解析を用いて室内熱負荷の配置条件を変更した数値実験を実施し、各条件でブロックモデルにより適切な温度分布を再現し得る乱流熱拡散係数（a_t）の同定を行った上で、設計パラメータから算出可能なアルキメデス数を用いて配置条件毎に乱流熱拡散係数の関数化を試みた結果を報告する。

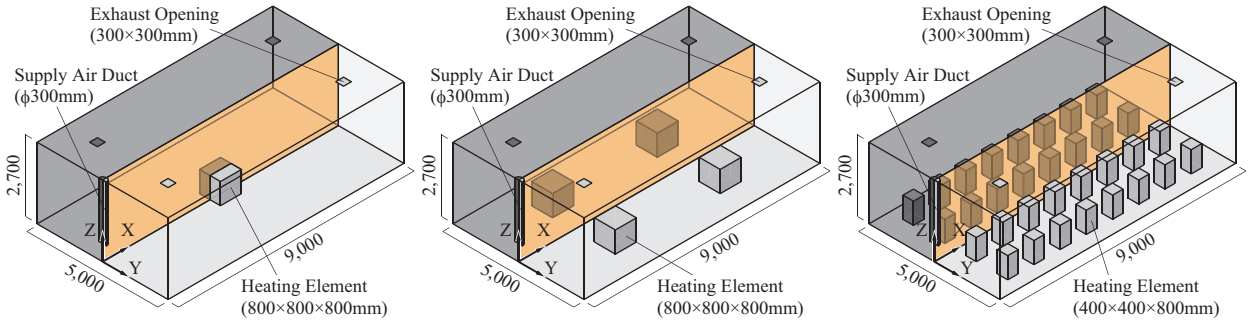
2.CFD 解析による数値実験

対象空間は 9.0×5.0×2.7m の室とし、発熱体の配置条件を以下の 3 条件とした（I~III、**図 1**）。

（Ⅰ）発熱体（800×800×800mm）1 個を室中央に配置
（Ⅱ）発熱体（800×800×800mm）4 個を均等配置
（Ⅲ）発熱体（400×400×800mm）32 個を均等配置

室内総発熱量は 2.0kW、発熱体数で除した発熱量 2.0kW, 500W, 62.5W を各発熱体に与えた。発熱体の境界条件は発熱量を床面を除く 5 面の面積で除した熱流束で与えた。各配置条件において、吹出口数を 1, 2, 4, 6 個の 4 条件（A~D、**図 2**）とし、吹出面が床上 600mm になるように設置する。発熱体条件 I~III と吹出口条件 A~D を組み合わせた 12 条件において、給気風量を 400, 600, 900, 1,200m^3/h の 4 段階に変更して計 48 条件で解析した。流入境界には総給気量を吹出面積合計で除した風速と給気温度 20℃を与えた。乱流モデルは SST *k-ω* モデルを使用し、Surface-to-Surface モデルを用いた放射連成解析とした。

各条件における水平面平均温度の鉛直分布を**図 3** に示す。全条件で給気風速の減少とともに室下部の



（1）発熱体配置条件：Ⅰ（2.0kW × 1） （2）発熱体配置条件：Ⅱ（500W × 4） （3）発熱体配置条件：Ⅲ（62.5W × 32）

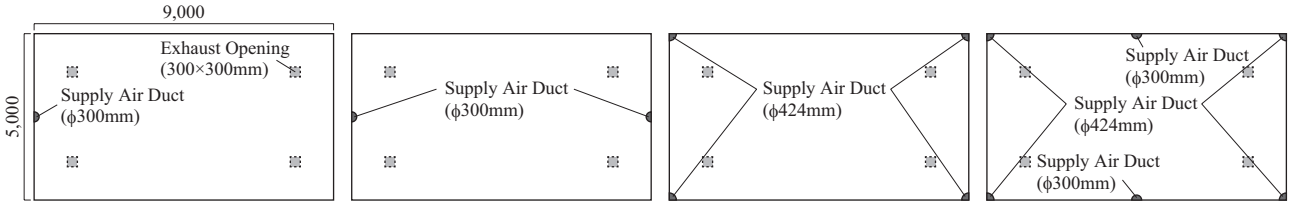
図 1 各発熱体配置条件での解析領域

温度が低下し、上下温度差が増加する傾向が見られる。また、配置条件により成層高さに差異が生じている。次章では、CFD 解析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乱流熱拡散係数の同定

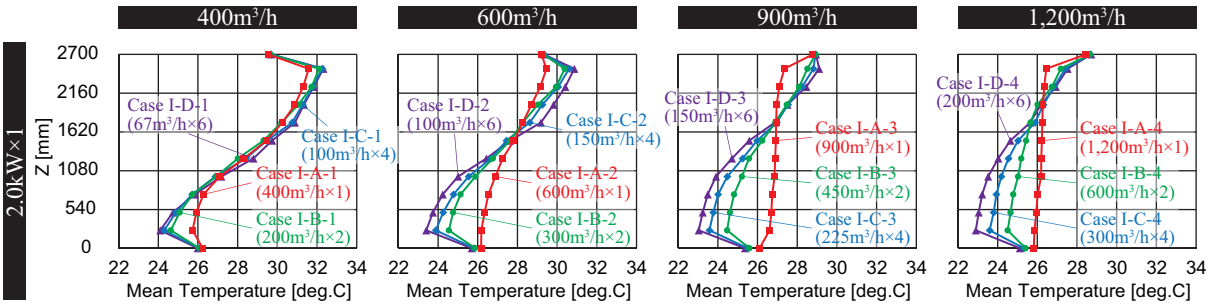
既報[5]と同様に、対象空間を鉛直方向に均等に 10 分割し、室上部から順にブロック番号を 1~10 とし、給気は最下部の室ブロック 10、排気は室ブロック 1 から行い、発熱量はプルームブロック 10 に与えた。ブロックモデルの計算方法は既報[5]及び前報[6]を参照されたい。本報では、前章の結果を真値として適切な温度分布を予測する乱流熱拡散係数 a_t [m^2/s] を室の上部と下部の 2 領域に分けて最小二乗法により有効数字 2 桁で同定する。上部 7 ブロック内のブロック境界面の a_t を a_{t_upper} とし、下部 4 ブロック内の境界面の a_t を a_{t_lower} とする。これはプルームによる浮力が支配的な室上部と吹出気流が支配的な室下部を区別することを意図した。

次に、同定された 2 領域の a_t を設計条件等から予測可能とするため、流れ場を特徴付ける 2 種の Ar 数を用いて関数化を行う。室上部ではプルームの浮力の影響が大きいと仮定してプルーム風速[注 1)]とプルーム内外温度差に基づく Ar_{plume} を (1) 式で定義した。既



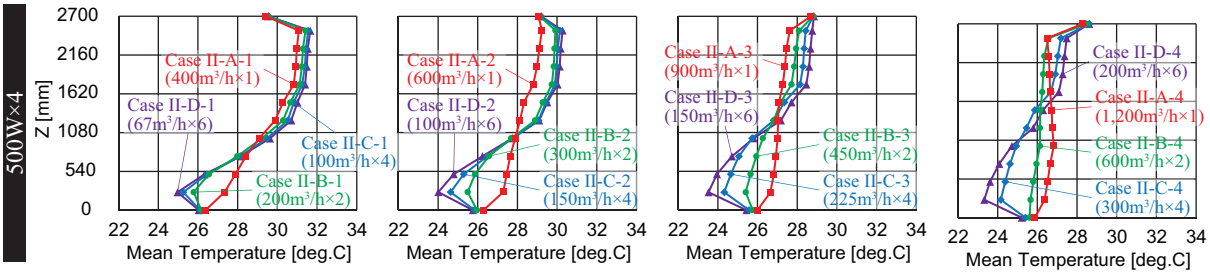
（1）吹出口条件：A（吹出口 1 箇所）　（2）吹出口条件：B（吹出口 2 箇所）　（3）吹出口条件：C（吹出口 4 箇所）　（4）吹出口条件：D（吹出口 6 箇所）

図 2　各吹出口条件における平面図



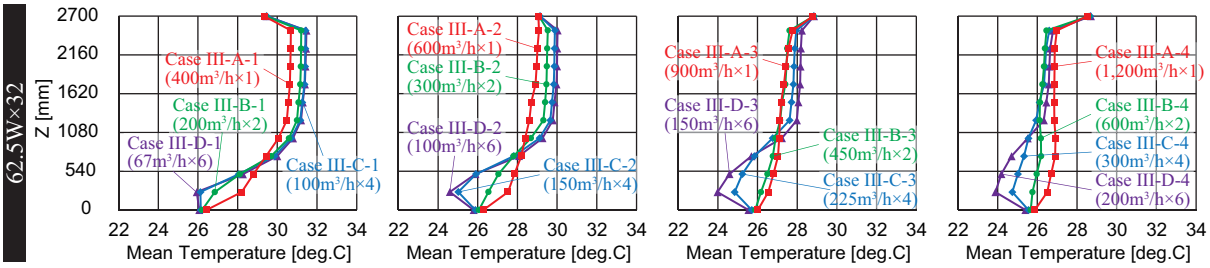
(a) 400m³/h - 20deg.C　(b) 600m³/h - 20deg.C　(c) 900m³/h - 20deg.C　(d) 1,200m³/h - 20deg.C

（1）熱負荷配置条件：Ⅰ（2.0kW × 1）



(a) 400m³/h - 20deg.C　(b) 600m³/h - 20deg.C　(c) 900m³/h - 20deg.C　(d) 1,200m³/h - 20deg.C

（2）熱負荷配置条件：Ⅱ（500W × 4）



(a) 400m³/h - 20deg.C　(b) 600m³/h - 20deg.C　(c) 900m³/h - 20deg.C　(d) 1,200m³/h - 20deg.C

（3）熱負荷配置条件：Ⅲ（62.5W × 32）

図 3　CFD 解析により得られた水平面平均温度の鉛直分布

報[5] 及び前報[6] では代表風速に給気風速、温度差に室の上下温度差を採用した Ar_{room} を評価したが、本報では発熱体一個あたりの発熱量に起因するプルームの強さの差異を考慮するために発熱量を式中に組み込むことを意図した。室下部は吹出気流が支配的と仮定して給気風速に基づく Ar_{sa} を定義する[注1)]。

$$Ar_{plume} = \frac{g \cdot \beta \cdot \sqrt{A_h} \cdot (T_p - T_{middle})}{U_p^{\ 2}} \tag{1}$$

$$Ar_{sa} = \frac{g \cdot \beta \cdot \sqrt{A_{in}} \cdot (T_{bottom} - T_{sa})}{U_{sa}^{\ 2}} \tag{2}$$

各配置条件における Ar 数と a_t の関係式を**図 4** にまとめる。室上部領域では発熱体条件 III においてばらつきが生じ、a_{t_upper} を過大あるいは過小に評価する可能性があるものの、その他の条件では a_{t_upper} と Ar_{plume} に明確な関係が見られる。一方、室下部領域では全条件で a_{t_lower} と Ar_{sa} に明確な関係が見られ、3 条件の近似曲線が類似することが示された。このため、室下部の a_{t_lower} は熱負荷配置によらず (2) 式の Ar_{sa} のみで概ね決定されると言える。最後にこの関数式をブロックモデルに適用して鉛直温度分布の簡易予測を行う。同定結果とともに関数式を用いた予測結果を**図 5** に示す。関数式を用いて予測した場合でも概して同定値を用いた場合と同程度の精度で温度分布予測が可能であることが示された。しかし、本報の手法では発熱量によって a_{t_upper} と Ar_{plume} の関係が大きく異なり使い分けが必要となるため、モデルの簡便性の観点から (1) 式に代わるより適切な Ar 数による a_{t_upper} の関数化に関する検討が引き続き必要と考える。

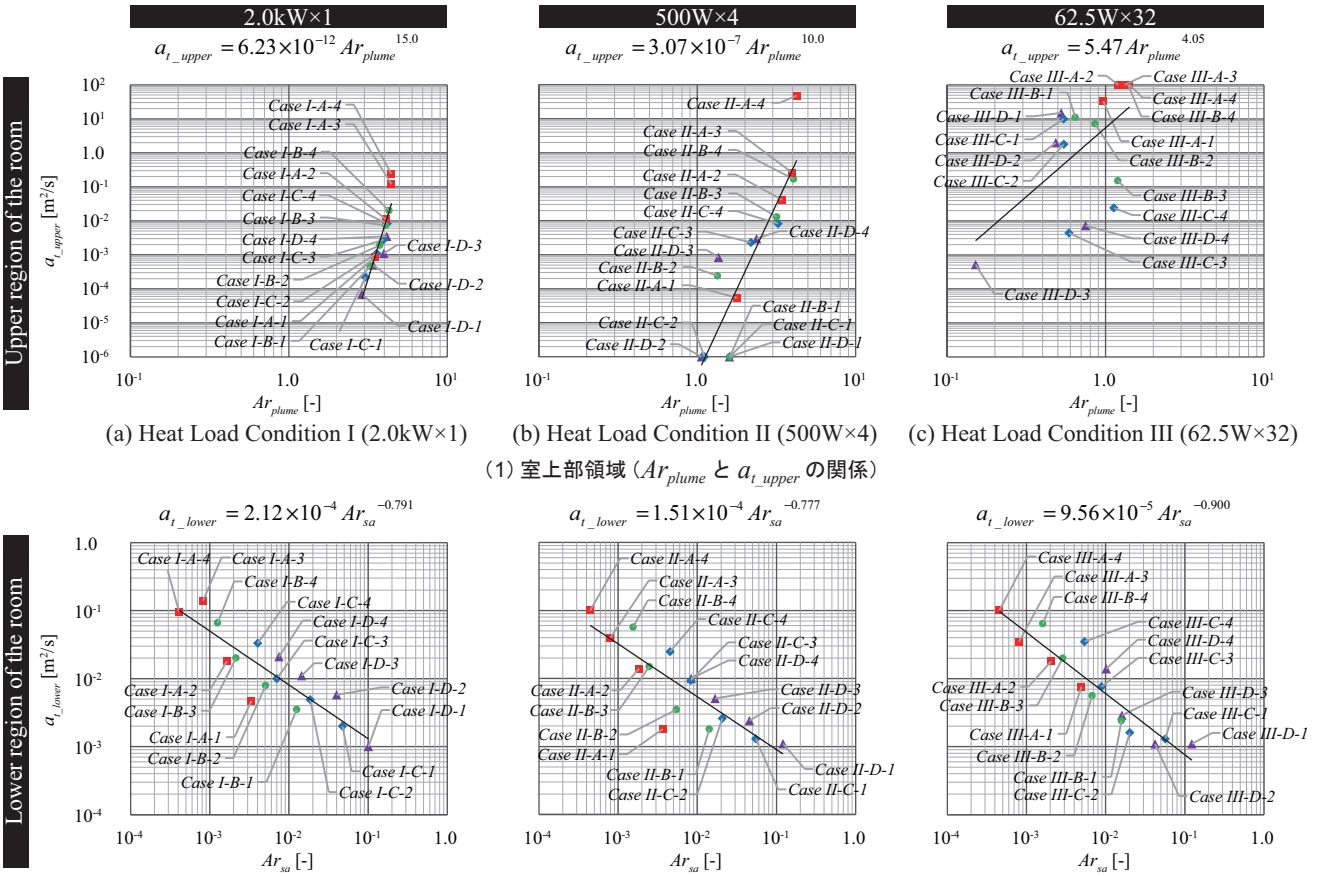
4. まとめ

本報では熱負荷配置と給気の条件を変更した数値実験を行い、適切な乱流熱拡散係数を同定するとともに、2 種の Ar 数を用いた関数式を示した。今後はより適切な乱流熱拡散係数の関数化が課題と言える。

[注釈]

注 1) g：重力加速度 [m/s^2]、β：体積膨張率 [1/K]、U_p：プルーム風速 [m/s]、A_h：発熱体面積 [m^2]、T_p：プルームブロック 6 の温度 [℃]、T_{middle}：室ブロック 6 の温度 [℃]、U_{sa}：給気風速 [m/s]、A_{in}：吹出面積 [m^2]、T_{sa}：給気温度 [℃]、T_{bottom}：室ブロック 10 の温度 [℃] とする。なお、給気風速 U_{sa} には給気風量を総吹出面積で除した風速を適用した。また、プルーム風速 U_p には次式のように文献[7] のプルーム流量予測式を用いてブロック 6 のプルーム流量を算出し、発熱体の水平投影面積 A_h [m^2] で除した風速を適用した。式中の W は発熱量 [W]、h_o は仮想点熱源から床面までの距離 [m] を表す。

$$U_p = \left\{ 0.005 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot (0.945 + h_o)^{\frac{5}{3}} \right\} \Big/ A_h$$



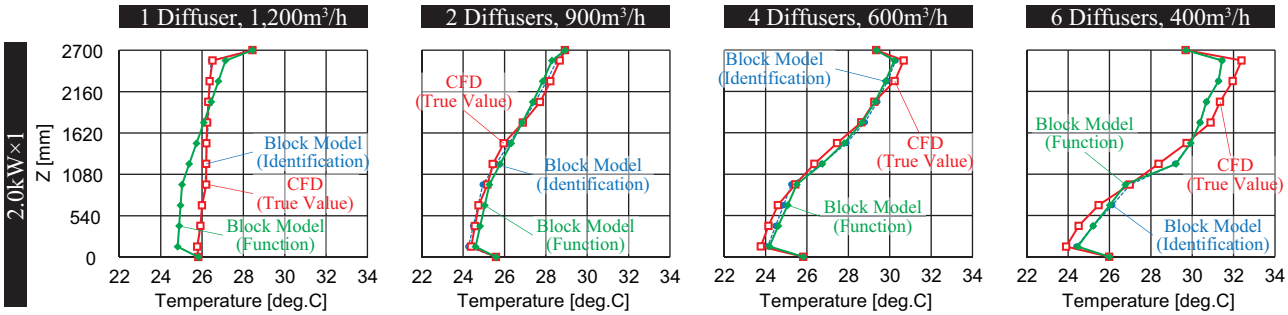
(a) Heat Load Condition I (2.0kW×1)　(b) Heat Load Condition II (500W×4)　(c) Heat Load Condition III (62.5W×32)

（1）室上部領域（Ar_{plume} と a_{t_upper} の関係）

(a) Heat Load Condition I (2.0kW×1)　(b) Heat Load Condition II (500W×4)　(c) Heat Load Condition III (62.5W×32)

（2）室下部領域（Ar_{sa} と a_{t_lower} の関係）

図 4　ブロックモデルの室上部 / 下部における乱流熱拡散係数と各アルキメデス数の関係



	Identification	Function
RMSE	0.0375	0.770
a_{t_upper}	0.24	0.022
a_{t_lower}	0.096	0.12

(a) Case I-A-4
(1 Diffuser, 1200m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.165	0.294
a_{t_upper}	0.0073	0.011
a_{t_lower}	0.020	0.026

(b) Case I-B-3
(2 Diffusers, 900m³/h)

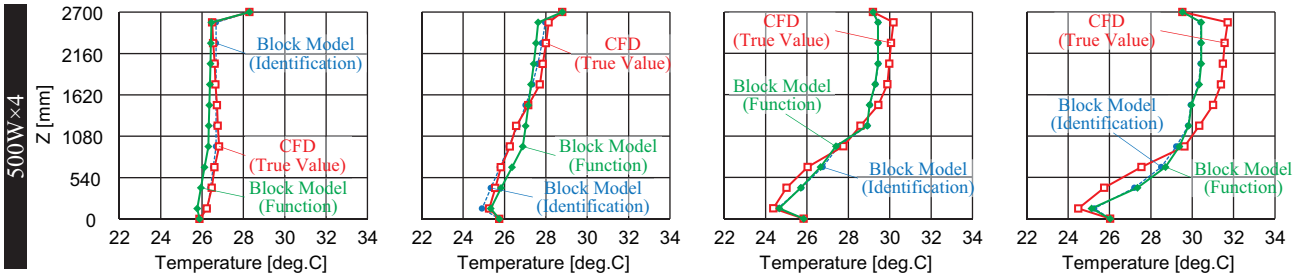
	Identification	Function
RMSE	0.317	0.360
a_{t_upper}	0.0011	0.0017
a_{t_lower}	0.0049	0.0049

(c) Case I-C-2
(4 Diffusers, 600m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.622	0.628
a_{t_upper}	0.000070	0.000039
a_{t_lower}	0.0010	0.0013

(d) Case I-D-1
(6 Diffusers, 400m³/h)

（1）熱負荷配置条件：Ⅰ（2.0kW × 1）



	Identification	Function
RMSE	0.100	0.380
a_{t_upper}	48	0.44
a_{t_lower}	0.10	0.065

(a) Case II-A-4
(1 Diffuser, 1200m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.210	0.426
a_{t_upper}	0.013	0.055
a_{t_lower}	0.015	0.015

(b) Case II-B-3
(2 Diffusers, 900m³/h)

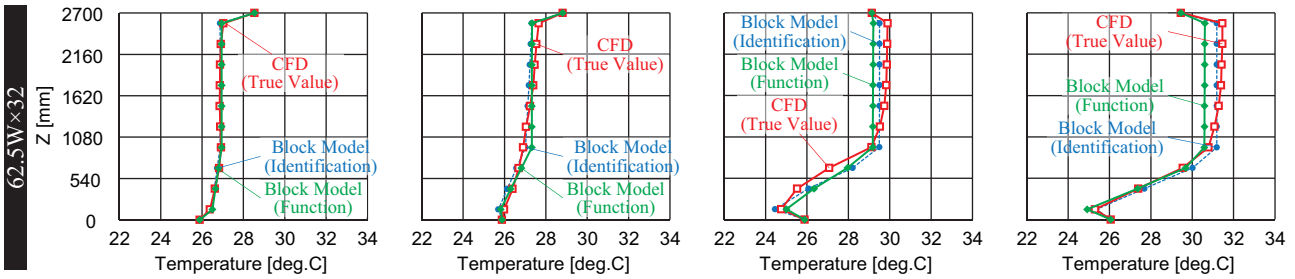
	Identification	Function
RMSE	0.544	0.548
a_{t_upper}	0.000001	7.1×10^{-7}
a_{t_lower}	0.0026	0.0030

(c) Case II-C-2
(4 Diffusers, 600m³/h)

	Identification	Function
RMSE	1.03	1.05
a_{t_upper}	0.000001	0.000043
a_{t_lower}	0.0011	0.00080

(d) Case II-D-1
(6 Diffusers, 400m³/h)

（2）熱負荷配置条件：Ⅱ（500W × 4）



	Identification	Function
RMSE	0.0648	0.0726
a_{t_upper}	100	22
a_{t_lower}	0.10	0.10

(a) Case III-A-4
(1 Diffuser, 1200m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.216	0.222
a_{t_upper}	0.15	11
a_{t_lower}	0.020	0.018

(b) Case III-B-3
(2 Diffusers, 900m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.491	0.610
a_{t_upper}	1.8	1.1
a_{t_lower}	0.0016	0.0029

(c) Case III-C-2
(4 Diffusers, 600m³/h)

	Identification	Function
RMSE	0.272	0.604
a_{t_upper}	15	0.78
a_{t_lower}	0.0011	0.00068

(d) Case III-D-1
(6 Diffusers, 400m³/h)

（3）熱負荷配置条件：Ⅲ（62.5W × 32）

図 5　CFD 解析とブロックモデルにより得られた水平面平均温度の鉛直分布

［参考文献］

1) T. Karimipanah, 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 behavier of impinging jet ventilation systems in an office with different heat loads, *Building and Environment*, Vol.59, pp.127-144, 2013

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.9-19，1991.9

4) 東本丈明，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－熱プ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

5) 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空調方式に関する研究－ 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

6) 西海利哉，小林知広，梅宮典子，杉田雄希：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 11）天井の高い空間における乱流熱拡散係数の同定，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2017.9，投稿中

7) H. Skistad : DISPLACEMENT VENTILATION, Research Studies Press LTD., 1994