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 13）鉛直温度分布予測のための乱流熱拡散係数の関数式の検討
A Study on Semi-Displacement Ventilation using Radial Wall Jet
Prediction of Turbulent Thermal Diffusivity for Vertical Temprature Profile

○ 西海　利哉　（大阪市立大学）　　小林　知広　（大阪市立大学）　　梅宮　典子　（大阪市立大学）

Toshiya NISHIUMI [*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. In this system, the air within the occupied zone is moderately mixed if compared with Displacement Ventilation system. The authors aim to establish a simplified prediction method of vertical temperature profile based on the Block Model. This paper analyzes an impinging jet ventilated room of relatively large ceiling heigh, and explores appropriate method to give the turbulent thermal diffusivity which plays an important role in the Block Model to predict vertical temperature profile.

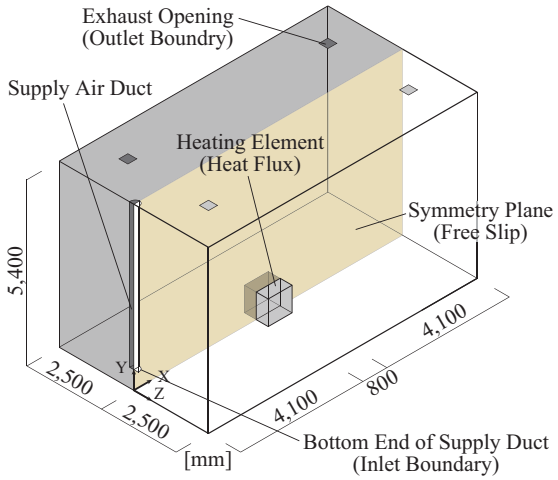
1. はじめに

温度成層を形成する換気方式として、床面付近から鉛直下向きに給気を行う準置換換気方式[1)]（Impinging Jet Ventilation 方式、以降 IJV 方式）がある。この IJV 方式は、従来の置換換気方式に比べ水平方向の温度分布が生じ難い等のメリットがあるが、現状 IJV 方式が形成する室内温度分布は十分に解明されていない。そこで、本研究では IJV 方式が形成する室内鉛直温度分布の簡易予測手法の提案を最終目的とする。既往研究[2),3)]においては、それぞれ天井高 2.7m、5.4m の室を対象として CFD 解析およびブロックモデルを用いた鉛直温度分布予測を行い、各々の天井高条件において最も適切な乱流熱拡散係数を、アルキメデス数を用いて提示した。しかし、このアルキメデス数は各天井高において個別に与えられた式であるため、本報では、既往研究の条件と今回追加した条件を含め、異なる天井高条件にも対応し得る関数式の提案を行う。

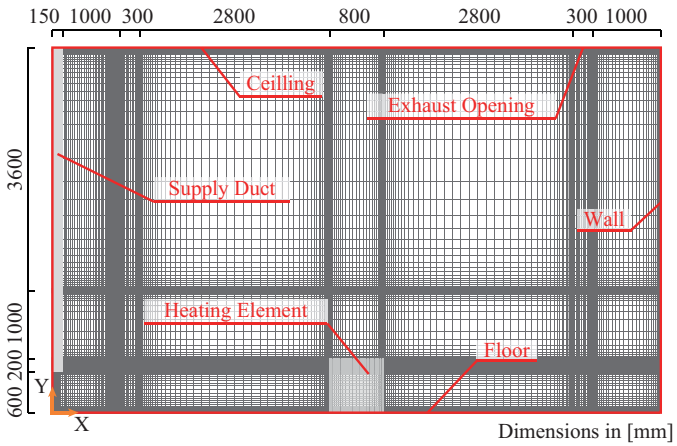
2. CFD を用いた鉛直温度分布解析

既往研究では、天井高 2.7m の室を対象とし、床上 600mm に設置した IJV の吹出口を 1 個（Case 1）、2 個（Case 2）、4 個（Case 3）、6 個（Case 4）の 4 条件に変化させ、給気風量は 400m^3/h、600m^3/h、900m^3/h、1200m^3/h の 4 条件を設定し、全 16 条件において CFD 解析とブロックモデルのアルキメデス数の提案が行われている。また、天井高 5.4m の室においては、同様の吹出口数 4 条件で、600m^3/h、900m^3/h、1200m^3/h の 3 条件、全 12 条件において同様にアルキメデス数の提案を行った。

本報では、5.4m の室の吹出口数 1 個、2 個、4 個、6 個の 4 条件を対象とし、給気風量 400m^3/h での CFD 解析およびブロックモデルを用いた鉛直温度分布予測を新たに行った。なお、給気温度は全条件において 20℃としている。CFD の解析条件については既報[3)]を参照されたい。**Fig.1** に解析対象空間およびメッシュレイアウト、**Fig.2** に Case 1 ~ 4 の平面図を示す。



(1) Calculation Domain



(2) Mesh Layout

Fig.1 Calculation Domein and Mesh Layout（Case 1）

3. ブロックモデル概要

本研究では、戸河里らの提案したブロックモデル[4)]を基にして、鉛直温度分布の予測を行う。今回対象とした天井高 5.4m の室においては、1 ブロック高さを 270mm とし、鉛直方向に 20 分割して計算を行う。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し、各ブロック間の移流・乱流熱拡散及び壁面での熱伝達による風量・熱量収支を解くことで、室ブロック温度を求める。計算の詳細については既報[2)]を参照されたい。**Fig.3** にブロックモデルの概要を示す。

4. 乱流熱拡散係数の同定

戸河里らのブロックモデルは、一般的な大空間における上下温度分布を予測するものであるが、IJV 方式においては従来の換気方式に比べ室空気が混合しやすく、乱流拡散による熱移動が鉛直温度分布に比較的強く影響を及ぼす。この乱流拡散による熱移動は、熱移動係数 C_b [W/(m^2・K)] を用いて評価しているが、この値は乱流熱拡散係数 a_t [m^2/s] と容積比熱 $C_p\rho$ [J/(m^3・K)] 及びブロック高さ H_b [m] から算出[注1)]する。よって、IJV 方式に適応するブロックモデルにおいては、この a_t を適切に与える必要がある。そこで、CFD 解析による鉛直温度分布の結果を真値とし、ブロックモデルにより予測した鉛直温度分布が CFD 結果と最もよく一致する時の a_t を、最小二乗法を用いて同定を行う。本報では、既報[3)]に基づいて室上部 15 ブロックを a_{t_upper}、室下部 5 ブロックを a_{t_lower} とし、同様の手法を用い、前述した 400m^3/h の 4 条件において a_t の同定を新たに行った。

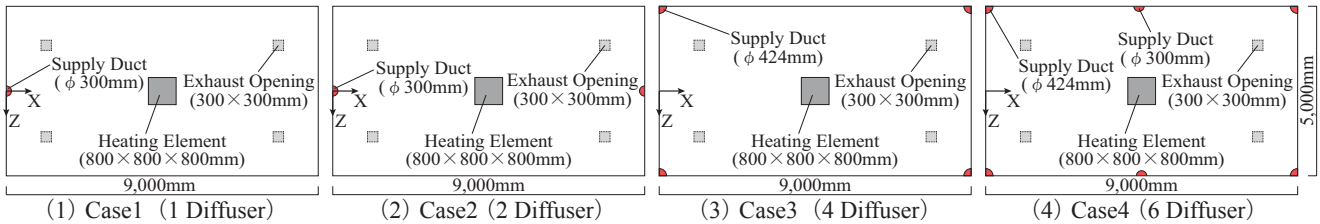
5. 乱流熱拡散係数の関数化

既往研究で同定した天井高 2.7m の室における 16 条件及び天井高 5.4m における 12 条件に、本報で同定した 4 条件を加えた全 32 条件の a_t から、ブロックモデルに用いる乱流熱拡散係数の関数化を行う。ここで、既往研究同様に室の気流性状を表すパラメータとなるアルキメデス数を、室上部と室下部で 2 種類定義する。室上部においては、天井高の異なる室に対応するため天井高を代表長さとし、給気と最上部ブロックの温度差に基づくアルキメデス数 Ar_{room} を定義した。室下部においては吹出気流の影響を考慮し、吹出口面積の平方根を代表長さとし、給気と最下部ブロックの温度差に基づくルキメデス数 Ar_{sa} を定義した[注2)]。

$$Ar_{room} = \frac{g \cdot \beta \cdot H_r \cdot (T_1 - T_{SA})}{U_{SA}^{\ 2}} \quad ...(1)$$

$$Ar_{SA} = \frac{g \cdot \beta \cdot \sqrt{A_{in}} \cdot (T_n - T_{SA})}{U_{SA}^{\ 2}} \quad ...(2)$$

(1)、(2) 式による Ar 数と a_t の関係式を **Fig.4** に示す。室下部、室上部ともに比較的明確な関係が見られた。この関数式を用いた場合のブロックモデルによる鉛直温度分布の予測結果と、同定した a_t を用いた場合の予測結果を、CFD 解析による鉛直温度分布とともに天井高 2.7m の 16 条件を **Fig.5** に、天井高 5.4m の 16 条件を **Fig.6** に示す。関数式を用いたブロックモデルにより、どの条件においても概ね温度分布を再現することが出来た。よって、ここで定義した 2 種のアルキメデス数により適切な a_t を与えることで、天井高の異なる室においてもブロックモデルを用いて鉛直温度分布の予測が可能であると言える。



(1) Case1 (1 Diffuser)　(2) Case2 (2 Diffuser)　(3) Case3 (4 Diffuser)　(4) Case4 (6 Diffuser)

Fig.2 Floor Plan of Diffuser Condition

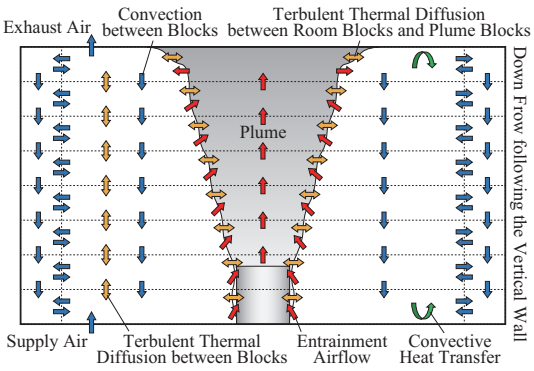
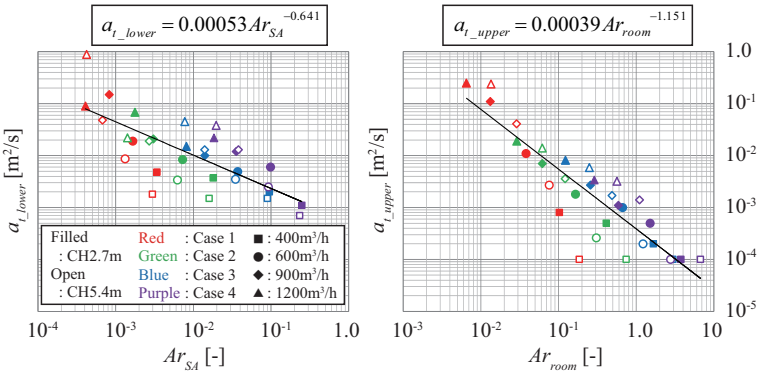


Fig.3 Block Model Overview



(1) Bottom of Room (a_{t_lower})　(2) Top of Room (a_{t_upper})

Fig.4 Function of Archimedes Number to Determine a_t

6. まとめ

本報では天井高 5.4m、給気風量 400m^3/h における吹出口数を変更した 4 条件での CFD 解析及び乱流熱拡散係数の同定を行い、既往研究を含めた全 32 条件から、異なる天井高に対応し得る乱流熱拡散係数の予測式の提案を行った。今後は、IJV 方式において形成される汚染物濃度分布の性状把握と、その簡易予測手法の検討を行う。

［注釈］

注 1) 熱移動係数 C_b [W/(m^{2}K)] は乱流拡散による上下室ブロック間の熱移動量算定のための係数で、$C_b = a_t \times C_p \rho / H_b$ で与えた。

注 2) g : 重力加速度 [m/s^2]、β : 体膨張率 [1/K]、H_r : 天井高 [m]、T_l: 最上部ブロック温度 [℃]、T_{sa} : 給気温度 [℃]、U_{sa} : 給気風速 [m^2/s]、A_{in} : 吹出口面積 [m^2]、T_n : 最下部ブロック温度 [℃]

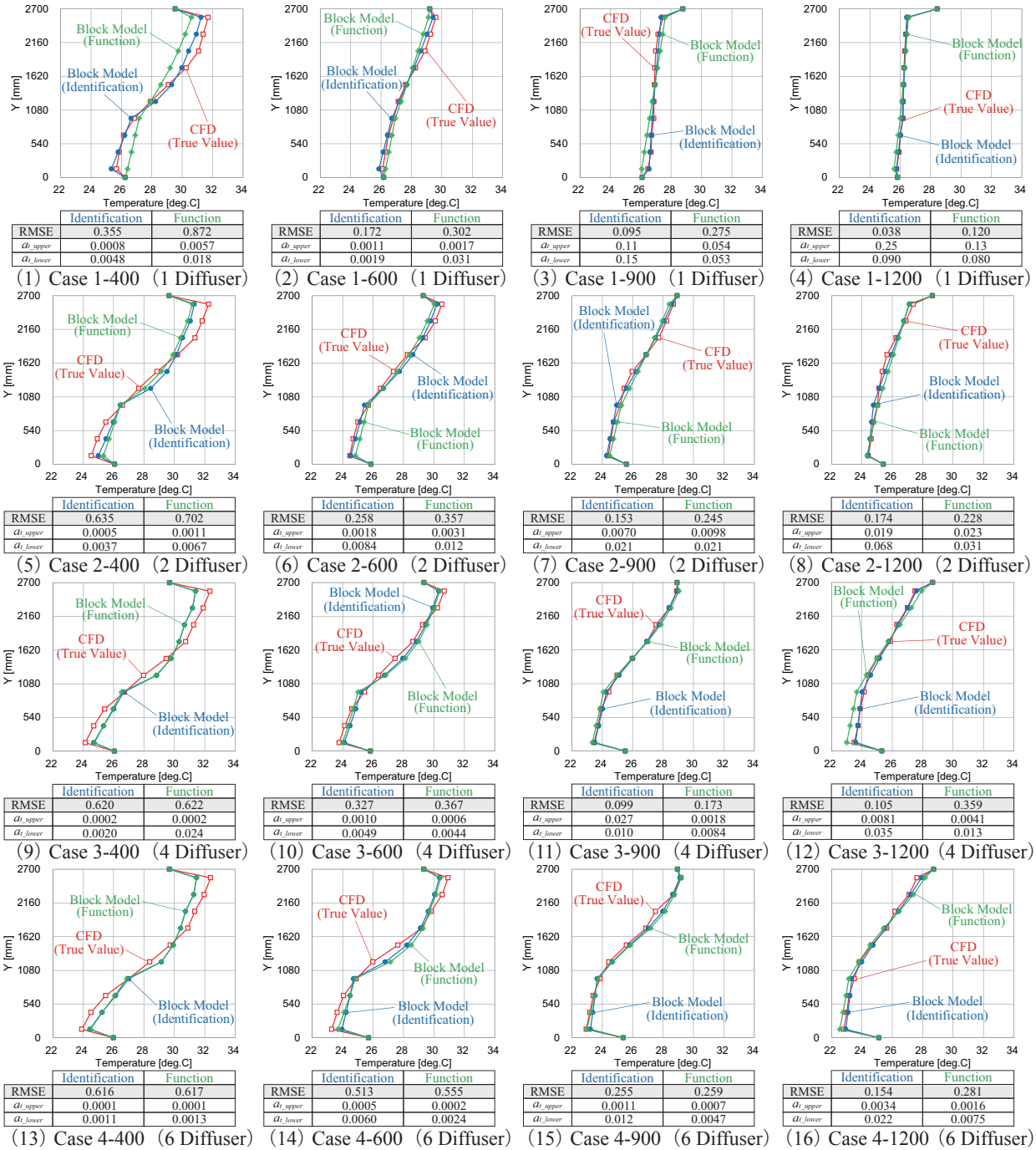
［参考文献］

1) T. Karamipanah, 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) 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－

4) 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



	Identification	Function
RMSE	0.355	0.872
α_{t_upper}	0.0008	0.0057
α_{t_lower}	0.0048	0.018

（1）Case 1-400（1 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.172	0.302
α_{t_upper}	0.0011	0.0017
α_{t_lower}	0.0019	0.031

（2）Case 1-600（1 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.095	0.275
α_{t_upper}	0.11	0.054
α_{t_lower}	0.15	0.053

（3）Case 1-900（1 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.038	0.120
α_{t_upper}	0.25	0.13
α_{t_lower}	0.090	0.080

（4）Case 1-1200（1 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.635	0.702
α_{t_upper}	0.0005	0.0011
α_{t_lower}	0.0037	0.0067

（5）Case 2-400（2 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.258	0.357
α_{t_upper}	0.0018	0.0031
α_{t_lower}	0.0084	0.012

（6）Case 2-600（2 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.153	0.245
α_{t_upper}	0.0070	0.0098
α_{t_lower}	0.021	0.021

（7）Case 2-900（2 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.174	0.228
α_{t_upper}	0.019	0.023
α_{t_lower}	0.068	0.031

（8）Case 2-1200（2 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.620	0.622
α_{t_upper}	0.0002	0.0002
α_{t_lower}	0.0020	0.024

（9）Case 3-400（4 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.327	0.367
α_{t_upper}	0.0010	0.0006
α_{t_lower}	0.0049	0.0044

（10）Case 3-600（4 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.099	0.173
α_{t_upper}	0.027	0.0018
α_{t_lower}	0.010	0.0084

（11）Case 3-900（4 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.105	0.359
α_{t_upper}	0.0081	0.0041
α_{t_lower}	0.035	0.013

（12）Case 3-1200（4 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.616	0.617
α_{t_upper}	0.0001	0.0001
α_{t_lower}	0.0011	0.0013

（13）Case 4-400（6 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.513	0.555
α_{t_upper}	0.0005	0.0002
α_{t_lower}	0.0060	0.0024

（14）Case 4-600（6 Diffuser）

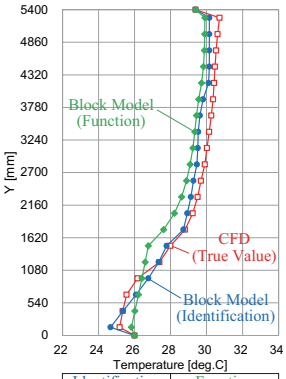
	Identification	Function
RMSE	0.255	0.259
α_{t_upper}	0.0011	0.0007
α_{t_lower}	0.012	0.0047

（15）Case 4-900（6 Diffuser）

	Identification	Function
RMSE	0.154	0.281
α_{t_upper}	0.0034	0.0016
α_{t_lower}	0.022	0.0075

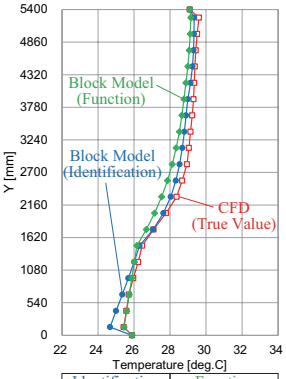
（16）Case 4-1200（6 Diffuser）

Fig.5 Vertival Profiles of Temperature and Turbulent Thermal Diffusivity Identified and Function（Ceiling Height 2.7m）



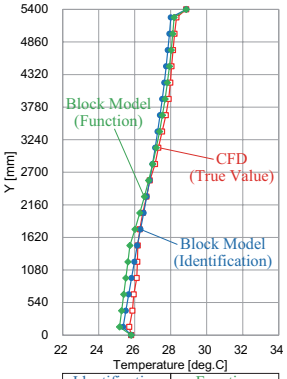
	Identification	Function
RMSE	0.434	0.810
α_{t_upper}	0.0001	0.0028
α_{t_lower}	0.0018	0.019

(1) Case 1-400 (1 Diffuser)



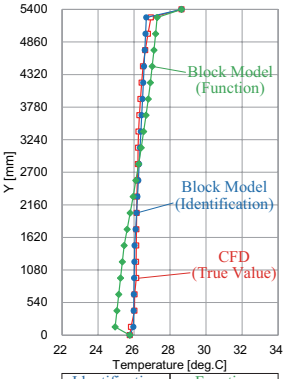
	Identification	Function
RMSE	0.334	0.504
α_{t_upper}	0.0027	0.0078
α_{t_lower}	0.0087	0.034

(2) Case 1-600 (1 Diffuser)



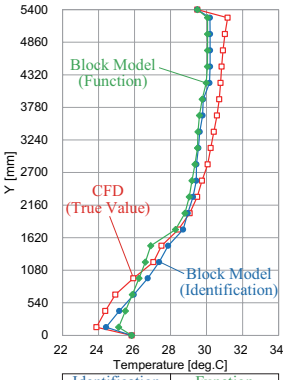
	Identification	Function
RMSE	0.251	0.328
α_{t_upper}	0.041	0.022
α_{t_lower}	0.048	0.059

(3) Case 1-900 (1 Diffuser)



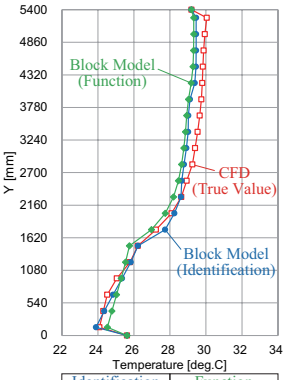
	Identification	Function
RMSE	0.104	0.558
α_{t_upper}	0.24	0.050
α_{t_lower}	0.89	0.087

(4) Case 1-1200 (1 Diffuser)



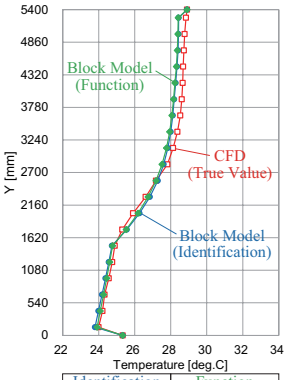
	Identification	Function
RMSE	0.667	0.800
α_{t_upper}	0.0001	0.0006
α_{t_lower}	0.015	0.0069

(5) Case 2-400 (2 Diffuser)



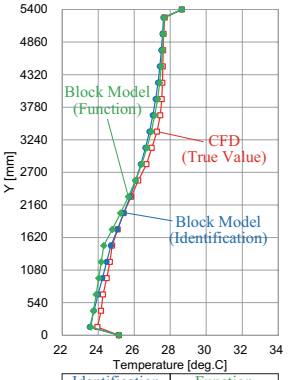
	Identification	Function
RMSE	0.400	0.537
α_{t_upper}	0.0003	0.0015
α_{t_lower}	0.0034	0.012

(6) Case 2-600 (2 Diffuser)



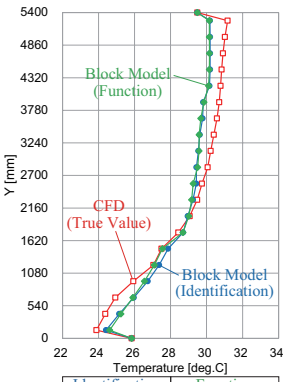
	Identification	Function
RMSE	0.295	0.304
α_{t_upper}	0.0036	0.0044
α_{t_lower}	0.019	0.023

(7) Case 2-900 (2 Diffuser)



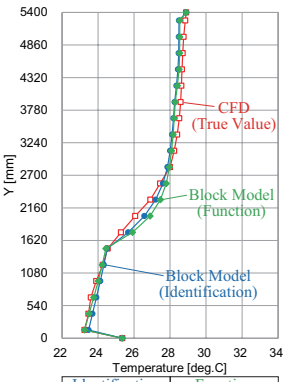
	Identification	Function
RMSE	0.257	0.293
α_{t_upper}	0.014	0.0095
α_{t_lower}	0.022	0.035

(8) Case 2-1200 (2 Diffuser)



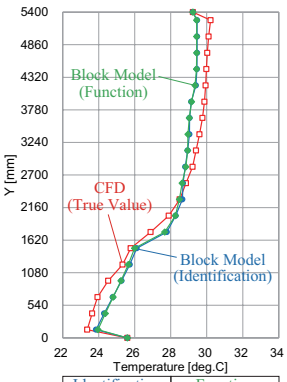
	Identification	Function
RMSE	0.667	0.678
α_{t_upper}	0.0001	0.0001
α_{t_lower}	0.015	0.0024

(9) Case 3-400 (4 Diffuser)



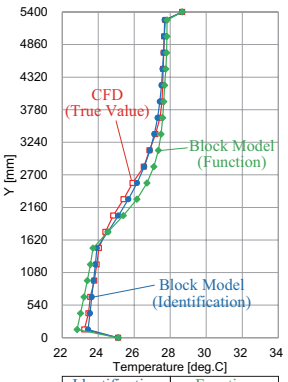
	Identification	Function
RMSE	0.275	0.321
α_{t_upper}	0.0017	0.0009
α_{t_lower}	0.013	0.0085

(10) Case 3-600 (4 Diffuser)



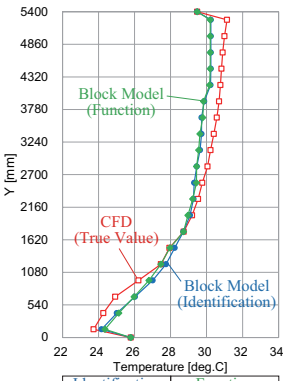
	Identification	Function
RMSE	0.585	0.590
α_{t_upper}	0.0002	0.0003
α_{t_lower}	0.0035	0.0045

(11) Case 3-900 (4 Diffuser)



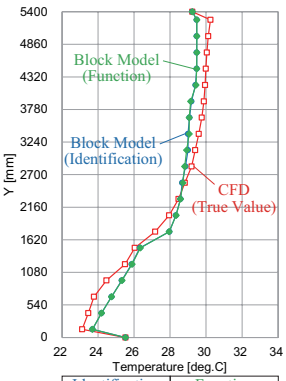
	Identification	Function
RMSE	0.135	0.397
α_{t_upper}	0.0059	0.0019
α_{t_lower}	0.045	0.014

(12) Case 3-1200 (4 Diffuser)



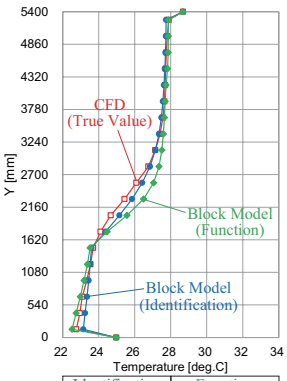
	Identification	Function
RMSE	0.635	0.644
α_{t_upper}	0.0001	0.0001
α_{t_lower}	0.0007	0.0013

(13) Case 4-400 (6 Diffuser)



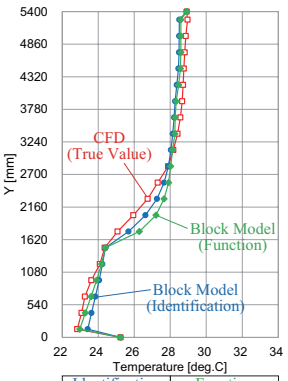
	Identification	Function
RMSE	0.591	0.595
α_{t_upper}	0.0001	0.0001
α_{t_lower}	0.0025	0.0024

(14) Case 4-600 (6 Diffuser)



	Identification	Function
RMSE	0.221	0.431
α_{t_upper}	0.0032	0.0007
α_{t_lower}	0.038	0.0076

(15) Case 4-900 (6 Diffuser)



	Identification	Function
RMSE	0.414	0.505
α_{t_upper}	0.0014	0.0003
α_{t_lower}	0.013	0.0047

(16) Case 4-1200 (6 Diffuser)

Fig.6 Vertival Profiles of Temperature and Turbulent Thermal Diffusivity Identified and Function (Ceiling Height 5.4m)