

# 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6) 非等温場における CFD 解析の精度検証

### A Study on Semi-Displacement Ventilation using Radial Wall Jet

#### (Part 5) Accuracy of CFD Analysis under Non-Isothermal Condition

正会員 ○杉田 雄希 (大阪市立大学)

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)

正会員 岸本 孝志 (きんでん)

Mats Sandberg (イエブレ大学)

Kazuki SUGITA \*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI \*<sup>1</sup> Noriko UMEMIYA \*<sup>1</sup> Takashi KISHIMOTO \*<sup>2</sup> Mats SANDBERG \*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka City University \*<sup>2</sup> Kinden Corporation \*<sup>3</sup> University of Gävle

The Impinging Jet Ventilation (IJV) System is an air-conditioning method to form thermal stratification within a room as well as Displacement Ventilation (DV) System. The strength of the IJV system seems that it is less likely to generate horizontal temperature distribution even when large heat load exists in the room because of higher momentum than DV system. The final objective of this work is to establish a simplified prediction method of vertical temperature distribution which can be used in the design phase.

#### 1. はじめに

室内の居住域のみを対象とする空調方式は非居住域の空調制御条件の緩和ができるため、省エネルギーの観点から有効と考えられる。そのような効率的な空調方式の一つとして置換換気方式<sup>1,2)</sup>(Displacement Ventilation 方式、以降 DV 方式)があるが、DV 方式は低温・低速で給気を行うため、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がある。また、室下部での急な温度勾配による足下付近の過剰冷却の問題も存在する。一方、DV 方式と同様に上下温度分布を形成し、水平方向の温度分布が生じにくい方式として、床面付近に設置したダクトから鉛直下向きに給気し、床近傍で水平方向に広がる衝突噴流により空調を行う方式<sup>3,4)</sup>(Impinging Jet Ventilation 方式、以降 IJV 方式)が提案されている。この方式は DV 方式に比べて室下部が適度に混合するため、足下付近の過剰冷却を解消し、冬期の暖房にも適用できる可能性を有するが、その詳細な性状は十分には明らかにされていない。

既往の研究<sup>5,6)</sup>では DV 方式と IJV 方式における気流分布および鉛直温度分布の基礎的性状の比較を行い、初期段階として等温場における CFD 解析の精度検証を行った。本研究では、非等温場における CFD 解析のケーススタディを行い、最終的には数値実験に基づく鉛直温度分布の簡易予測モデルの提案を行うことを目的とする。そのためには非等温場での CFD 解析の精度検証が必要であるため、本報では実験室実験と CFD 解析の結果を比較して精度検証を行う。

#### 2. 実験室実験

##### 2.1. 実験概要

実験は 2014 年 7 月 19 日～7 月 20 日に行った。Fig.1 に示す実験室(幅 9,000mm×奥行き 5,000mm×高さ 2,700mm)において、直径 300mm の半円筒型の IJV 吹出口(Fig.2)を下端が床上 600mm の高さになるように設置し、実験室外の空調機に接続した。ここでは、冷房時を想定した熱負荷として室中央に発熱体(2kW)を設置し、IJV 方式における風速測定および温度測定の実験を行った。

##### 2.2. 測定概要

CFD 解析の精度検証時の真値の取得のため、吹出風量 600m<sup>3</sup>/h、吹出温度 20℃の実験条件で、空調開始後概ね定常状態となったところで、吹出口付近における風速・温度測定および空間温度測定を行った。風速測定は、I 型熱線流速計(日本カノマック

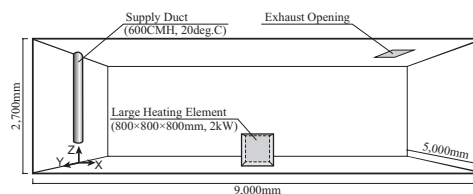


Fig.1 Experimental Setup

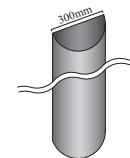


Fig.2 IJV Inlet

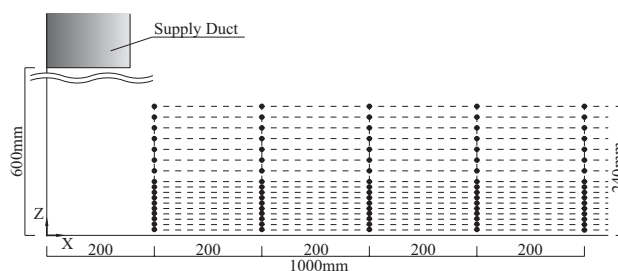


Fig.3 Measurement Point of Velocity around Diffuser

ス、0251R-T5 型  $\phi 5\mu\text{m}$  タングステン) を用いて行った。測定点は全て中心断面 ( $Y=0\text{mm}$ ) 上とし、サンプリング周波数 1,000Hz、平均化時間 30 秒とした。吹出口付近における測定点は、 $X=200\text{mm}$  から水平方向に 200mm 間隔で高さ  $Z=240\text{mm}$  までの風速の鉛直分布 85 点 (17 点 $\times$ 5) とした (Fig.3)。温度測定は、T 型熱電対 (旭産業, T-0.32-PVC-VKF) を用いて、Fig.4 に示す位置の温度分布を測定した。測定点は  $X=250\text{mm}$  から水平方向に 100mm 間隔かつ鉛直方向に 100mm 間隔で高さ  $Z=600\text{mm}$  までの 78 点 (6 点 $\times$ 13) とした。また、吹出口近傍以外の空間温度測定も実施し、水晶温度計 (九州計測器, TempLAN) を用いて Fig.5 のプロットで示す位置の鉛直温度分布を測定した。図中の黒プロットで表す中央断面 ( $Y=0\text{mm}$  および  $X=4500\text{mm}$ ) 上においては鉛直方向に 250mm 間隔で 12 点 (ただし最上部のみ 200mm 間隔)、白プロットの点は 500mm 間隔を基本として  $Z=250\text{mm}$  も追加して 6 点とした。CFD の温度境界条件の取得を目的として、Fig.5 の灰色プロット位置で内壁面表面温度の鉛直温度分布を T 型熱電対により測定した。

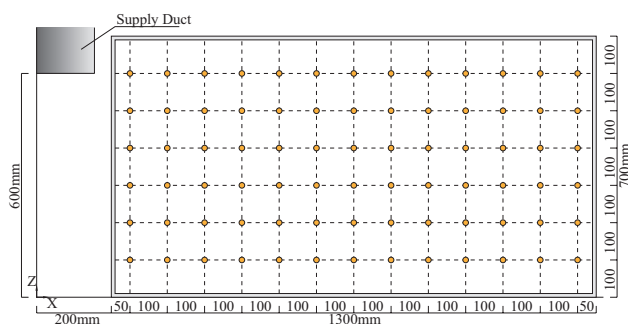


Fig.4 Measurement Point of Temperature around Diffuser

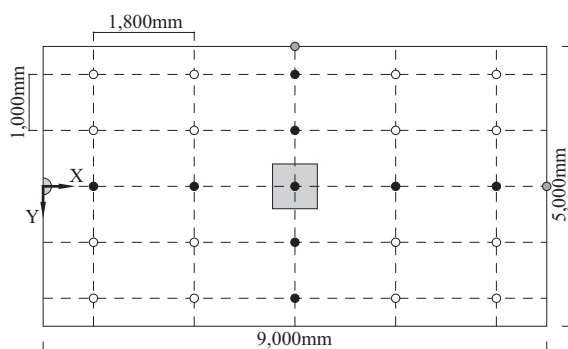
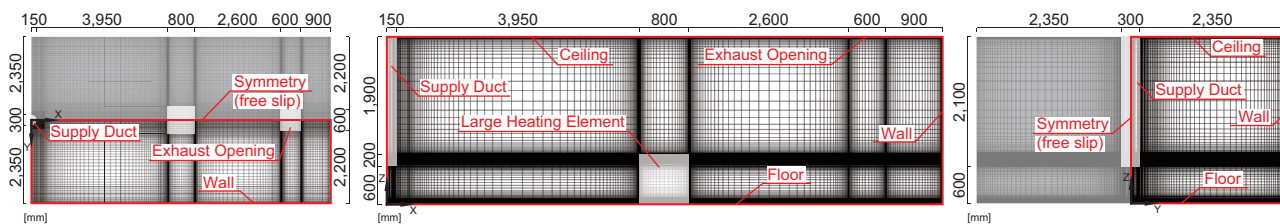


Fig.5 Measurement Point of Indoor Temperature



(1) X-Y Section

(2) X-Z Section

(3) Y-Z Section

Fig.6 CFD Calculation Domain and Mesh Layout (RANS Model)

### 3.CFD 解析の精度検証

#### 3.1.CFD 解析概要

Table1,2 に CFD 解析条件を示し、Fig.6 に解析に用いた実験室の解析領域およびメッシュレイアウトを示す。メッシュの分割幅は最小 3mm とし、吹出口・発熱体等の流れが複雑になると考えられる領域から離れる方向に分割領域が大きくなるように設定した。乱流モデルには標準 k- $\epsilon$  モデル (SKE)、RNGk- $\epsilon$  モデル (RNG)、せん断応力輸送 k- $\omega$  モデル (SST)、Large Eddy Simulation (LES) の 4 種を用いた。RANS モデルの解析空間は計算負荷を軽減するために Free Slip 境界を用いて実験室の半分のみを再現した。流入境界面の位置は吹出口下端とし、吹出風量  $600\text{m}^3/\text{h}$  を吹出口面積で除した風速および実験から得られた給気温度を境界条件に与えた。発熱体表面の熱的境界条件は熱流束で与え、発熱量  $2\text{kW}$  を表面積で除した  $625\text{W}/\text{m}^2$  とした。室の壁面については実験により得られた鉛直温度分布を与えたが、給気口が設置された壁のみ断熱境界とした。解析は非等温場とし、浮力ブシネスク近似を用い、瞬時値の非定常計算であるため、対称面を設けず、解析空間は実験室全体とした。SKE の解析結果を初期条件とし、計算時間

Table1 CFD Analysis Condition (RANS Model)

CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Standard k- $\epsilon$ Model (SKE)
		RNG k- $\epsilon$ Model (RNG)
		Shear-Stress Transport k- $\omega$ Model (SST)
Algorithm		SIMPLE
Discretization Scheme for Advanction Term		QUICK
Boundary Condition	Inlet	Velocity Magnitude : 4.716m/s Turbulent Intensity : I=10% Turbulent Length Scale : L=21mm
	Outlet	Velocity Magnitude : 0.463m/s
	Walls (Heat)	Wall (X=0) : Adiabatic Boundary Heating Element Surface : Heat Flux Boundary Other Walls : Temperature Boundary
	Walls (Velocity)	Symmetry : Free Slip Other Walls : Standard Wall Function
Total Number of Cells		2,023,362

Table2 CFD Analysis Condition (Large Eddy Simulation)

CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)
Algorithm		Implicit Method (SIMPLE)
Discretization Scheme for Advanction Term		Bounded Central Differencing
Time Step		0.01s (100Hz)
Total Calculation Term	Preconditioning	3,000 time step (30s)
	Main Calculation	72,900 time step (729s)
Boundary Condition	Inlet	Velocity Magnitude : 4.716m/s (Constant)
	Outlet	Velocity Magnitude : 0.463m/s (Constant)
	Walls	Warner & Wengle's linear-power law
Smagorinsky Coefficient		0.1
Total Number of Cells		2,423,104

間隔は0.01秒(100Hz)として3,000ステップ(30秒)までを助走計算として結果を破棄し、その後の72,900ステップ(729秒=名目換気時間)の結果を用いて時間平均値の算出を行った。

### 3.2. 乱流モデルに関する検討

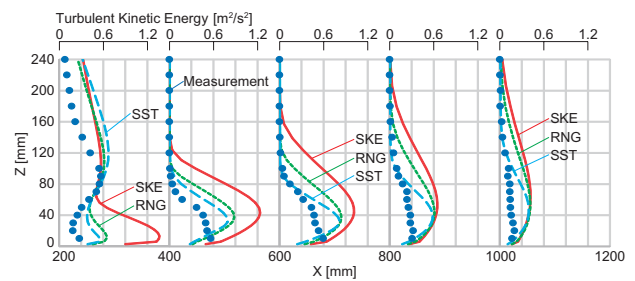
4種の乱流モデルSKE、RNG、SST、LESの解析結果および実験結果の比較を行う。Fig.7に吹出口付近の風速・乱流エネルギー $k$ ・エネルギー消散率 $\varepsilon$ の分布を示す(LESは風速のみ)。風速分布において $X=200\text{mm}$ ではLESで差が生じており、給気直後に下向きの運動量の拡散を過大評価している。また、 $X=400\text{mm}$ ではSKEを除く乱流モデルでは全体的に実験結果に概ね一致しており、それ以降では床面付近で差が生じる傾向が見られる。SKEでは概して差が大きいことが示され、全体的にはSSTが実験結果と概ね一致する傾向を示す。また、吹出口付近における鉛直温度分布の比較結果をFig.8に示し、中心断面( $Y=0\text{mm}$ )上における空間温度分布の結果をFig.9に示す。温度分布においてはSST、LESが実験結果に比較的良く一致し、SSTでは発熱体上部の熱ブルームの影響が適切に再現されている。吹出口のごく近傍ではLESが温度の低い給気気流との混合を過大評価しているため、温度が低い結果となっている。

本検討では、吹出口近傍あるいは床面のごく近傍の風速・乱流統計量の過大評価が見られた。実験における風速の過小評価もあり得るが、この領域の解析精度向上の可能性を探るため、次節では床面の速度の壁面境界条件の取り扱いに関する検討を行う。

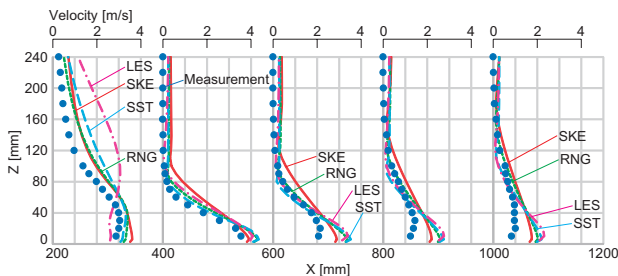
### 3.3. 床面粗度の検討

CFD解析では比較的粗度の小さな床面を想定した境界条件を設定したのに対し、実験では床面にタイルカーペットが敷設されており、床近傍で摩擦が働き、風速が低減された可能性が考えられるため、床面の粗度の影響を考慮した検討を行う。本研究では、次式のように標準壁関数を $\Delta B$ を用いて補正することで壁面粗さを考慮する<sup>7)</sup>。

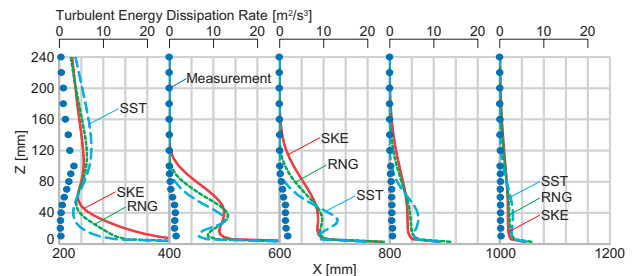
$$\frac{u_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{E y_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\nu} \right) - \Delta B$$



(2) Turbulent Kinetic Energy (RANS)



(1) Velocity Resultant of X and Z Components



(3) Turbulent Energy Dissipation Rate (RANS)

Fig.7 Velocity, Turbulent Kinetic Energy and Turbulent Energy Dissipation Rate Distribution on the Central Cross-Section

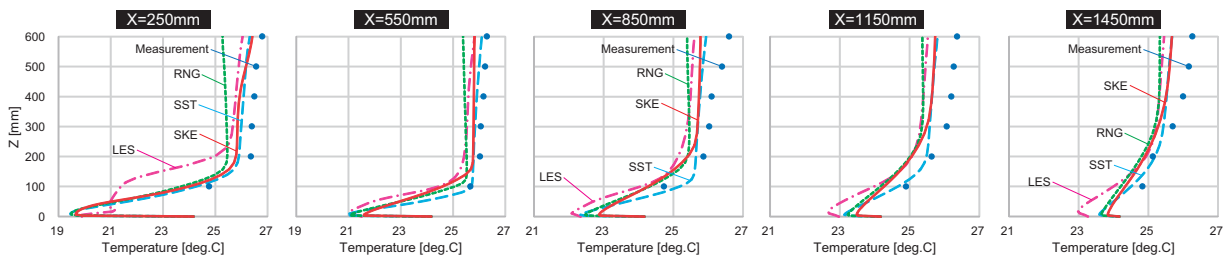


Fig.8 Vertical Temperature Distribution on the Central Cross-Section around Diffuser

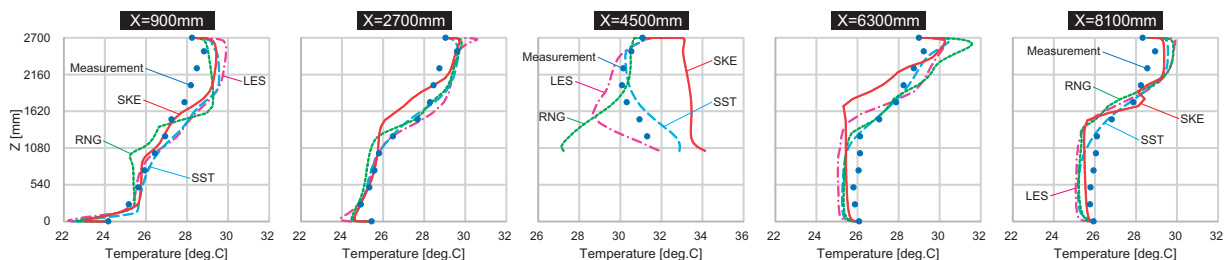


Fig.9 Vertical Temperature Distribution on the Central Cross-Section

なお、 $\Delta B$  は粗度 Re 数  $K_s^+$  の関数であり、粗さの程度により挙動が異なり、次のように  $K_s^+$  に応じて算出される。

・滑らかな領域  $K_s^+ < 2.25 : \Delta B = 0$

・遷移域  $2.25 < K_s^+ < 90 :$

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right) \sin[0.4258 \{ \ln(K_s^+) - 0.811 \}]$$

・粗い領域  $K_s^+ > 90 : \Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s K_s^+)$

ここで、 $C_s$  は粗度定数であり、 $0.5 \sim 1$  の値を取り、不均一な粗さを持つ壁面ほど大きい値を与える必要がある。また、粗度 Re 数  $K_s^+$  は絶対粗度  $K_s$  を与えることにより次式を用いて算出される。

$$K_s^+ = \frac{K_s C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{v}$$

$K_s$  は第一メッシュの寸法より小さい値を与える必要があるため、Table3 のように床面の境界条件を与えた。乱流モデルには SST を用いた。吹出口付近における風速分布の比較結果を Fig.10 に示し、空間温度分布の結果を Fig.11 に示す。床面のごく近傍の風速が低減される傾向を示すが、吹出口近傍の風速の過大評価の大幅な改善は見られない。温度分布は多少実験結果から遠ざかる傾向が見られたが、Case 毎に大きな差異は見られない。

#### 4. まとめ

本研究では非等温場における IJV 方式を対象とした CFD 解析の精度検証を目的として、実験室実験および CFD 解析を行った。ケーススタディに最も精度

Table3 Roughness Height and Constant of the floor

	Roughness Height $K_s$	Roughness Constant $C_s$
Case1 (Default)	0 [mm]	0.5
Case5	2 [mm]	0.5
Case6	2 [mm]	1

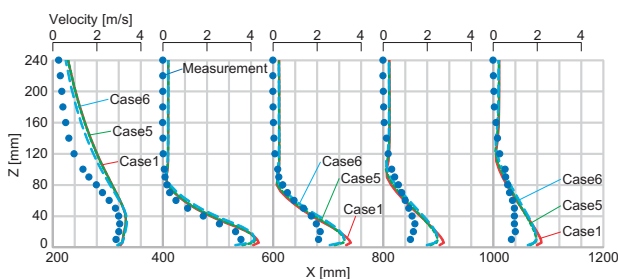


Fig.10 Vertical Velocity Distribution on the Central Cross-Section

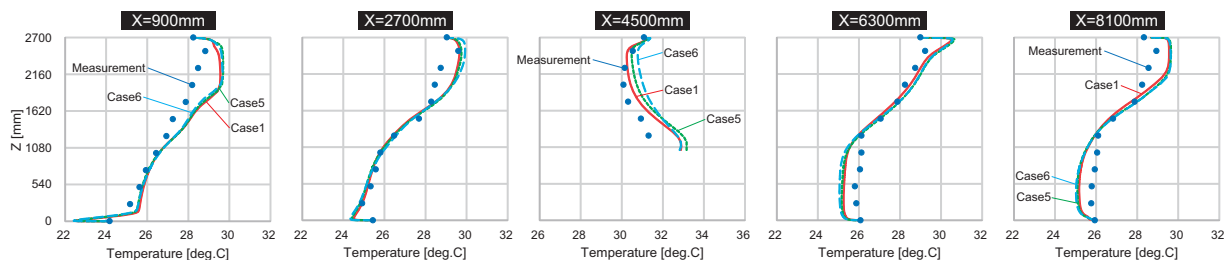


Fig.11 Vertical Temperature Distribution on the Central Cross-Section

が重要な温度分布に関して SST, LES とともに実験結果と比較的良く一致していたと言える。このため、計算負荷と精度の観点から、IJV 方式のケーススタディに最も適した乱流モデルは SST であると言える。今後の課題として、IJV 方式の冬期における暖房での風速分布・空間温度分布の基礎的性状の把握を行うとともに、室内負荷の条件や空調吹出条件を変更した CFD 解析を行う必要がある。将来的には、ケーススタディに基づく鉛直温度分布および濃度分布の簡易予測モデルの提案を行う所存である。

[記号表]

- $u_p$ : 壁面第 1 セルの壁面接線方向速度 [m/s]
- $k_p$ : 壁面第 1 セルの乱流エネルギー  $k$  の値 [ $m^2/s^2$ ]
- $y_p$ : 壁面第 1 セルの中心までの距離 [m]
- $\tau_w$ : 壁面せん断応力 [ $kg/m \cdot s^2$ ]
- $\rho$ : 流体密度 [ $kg/m^3$ ]
- $C_\mu$ : モデル定数 [-] (=0.09)
- $\nu$ : 動粘性係数 [ $m^2/s$ ]
- $E$ : 経験定数 [-] (=9.0)
- $\kappa$ : カルマン定数 [-] (=0.4)
- $K_s^+$ : 粗度 Re 数 [-]
- $K_s$ : 絶対粗度 [m]
- $C_s$ : 粗度定数 [-]

[謝辞]

実験器具をお貸し頂いた大阪大学建築環境・設備 Gr に深謝申し上げます。なお、本研究の一部は科学研究補助金（若手研究 B、課題番号 24760476（研究代表：小林知広））の助成を受けた。

[参考文献]

- 1) P.V.Nielsen : DISPLACEMENT VENTILATION-theory and design, Aalborg University, 1993
- 2) Daid Etheridge, Mats Sandberg : BUILDING VENTILATION Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996
- 3) T.Karimippanah, H.B.Awbi : Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *Building and Environment*, Vol.37, Issue 12, pp.1329-1342, 2002
- 4) H.Chen and B.Moshfegh : Comparing k- $\epsilon$  Models on Predictions of an Impinging Jet for Ventilation of an Office Room, *Proceedings of Roomvent 2011*, In Digital Media, 2011.6
- 5) 宇佐美亮太, 小林知広ら : 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 1), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.277-280, 2013.3
- 6) 富田篤, 小林知広ら : 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 3), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.413-416, 2014.3
- 7) T.Cebeci and P.Bradshaw : "Momentum Transfer in Boundary Layers", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1977