

# CFD解析による住宅用全館空調の快適性評価に関する研究 (その2) : Momentum法における拡散吹出気流・斜め吹出気流の再現手法

# STUDY ON COMFORT EVALUATION FOR THE CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM IN RESIDENTIAL HOUSE BY CFD SIMULATION (PART 2) : THE SIMULATION METHOD OF DIFFUSED AIRFLOW AND OBLIQUE-BLOWING AIRFLOW BY MOMENTUM METHOD

孫 路寧 — \* 1 胡 沢環 — \* 2  
前 真之 — \* 3 高瀬幸造 — \* 4  
盧 炫佑 — \* 5

Luning SUN — \* 1 Zehuan HU — \* 2  
Masayuki MAE — \* 3 Koza TAKASE — \* 4  
Hyunwoo ROH — \* 5

キーワード :

CFD解析, 全館空調, Momentum法, 吹出口, 気流性状評価方法

Keywords:

CFD simulation, Central air-conditioning system, Momentum method, Air-conditioning outlet, Airflow evaluation method

The central air-conditioning system attract people's attention because the thermal comfort can be improved by arranging the air outlets properly. Moreover, various blow out conditions may be adopted to improve the indoor thermal environment. In this research, simulation studies to improve the accuracy of CFD by Momentum method under various blow out conditions has been conducted. Firstly, the airflow distribution under each blowing condition was measured by isothermal condition. Then, the simulation method by Momentum method is proposed. In addition, airflow evaluation method of diffused airflow and oblique-blowing airflow are proposed. Finally, an efficient acceleration determination method is proposed.

## 1. はじめに

近年、ZEHの実現及び住宅温熱環境改善という背景から、住宅用全館空調システムが注目されている。特にダクト式全館空調システムは、ダクト施工の手間はあるが吹出口を比較的自由に配置できるために快適性を高められる可能性が既往研究でも示されている<sup>1) 2)</sup>。一方、効果的な吹出口配置を計画するためには、CFDによって詳細な室内気流温度分布を検討する必要があり、その解析精度向上は大きな課題である。

従前、なるべく小さい計算負荷で吹出気流性状のCFD解析精度を確保するモデル化として、Momentum法<sup>3)</sup>が提案されている。近年、空気調和・衛生工学会<sup>4)</sup>においてMomentum法で各吹出口のモデリング手法がまとめられており、その中では深田・酒井<sup>5)</sup>をはじめとする検証の結果、Momentum法による残風速の再現が有効であるとされている。しかし、限られた数点の計測位置における残風速だけで評価すると、気流の広がりを再現できないと考えられ、実用的にMomentum法で新しい吹出口の気流性状を再現するためには、実験とCFDの比較において、妥当性のある計測点を検討する必要がある。

前報<sup>6)</sup>では、住宅用全館空調システムに採用実績があるグリル吹出口とライン吹出口を対象とし、実験において水平吹出の気流性状を把握したうえで、CFD解析においてMomentum法で3次元気流の再現性を検討した結果、Momentum法の精度が確認された。また、住宅室

内を現実的なメッシュ数で解くために50mm程度の粗目のメッシュ(全体で数百万セル)で吹出口からの気流性状(特に到達距離)を適切に予測できることも確認された。しかし、実住宅の状況によって、水平吹出だけではなく、様々な吹出条件を採用することがある。例えば、グリル吹出口において、床面積が小さい個室で、拡散吹出の吹出条件を採用すれば、より良好な室内温熱環境が形成できると推測される。また、斜め吹出を採用することで、気流が直接居住者に当たることを避けられると考えられる。さらに、ライン吹出口において、暖房時の上下温度差を改善するため、天井から下向き吹出の条件を採用することがよくあり、CFDにおいてこれらの吹出気流の到達距離・広がりを再現することが必要である。

そこで本報では、各吹出条件において気流性状をMomentum法で効率的に高い精度で再現できることを目的とした研究を行った。まず、実験室実験で実住宅設置を想定した小風量時の拡散吹出気流・斜め吹出気流の特性把握を行った後、拡散吹出気流の再現手法・風速評価方法及び斜め吹出気流の再現手法を検討した。また、Momentum法で吹出口近くに複数方向加速度を与えた際は、互いに気流の性状に影響を与えるため、列挙法で各パラメータの組み合わせを列挙して、試行錯誤をしなければならぬことが前報で示されたが、本報ではこうした手間の削減を目指し、高効率な加速度決定方法も検討した。

\*1 東京大学大学院工学系研究科 学術専門職員・修士(工学)  
(〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

\*2 東京大学大学院工学系研究科 大学院生

\*3 東京大学大学院工学系研究科 准教授・博士(工学)

\*4 東京理科大学理工学部建築学科 講師・博士(工学)

\*5 OMソーラー(株) 取締役・技術部長・博士(工学)

\*1 Project Academic Support Staff, Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, M.Eng.

\*2 Graduate Student, Dept. of Architecture, The Univ. of Tokyo

\*3 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

\*4 Junior Assoc. Prof., Faculty of Science & Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

\*5 Director, OM Solar Inc., Dr.Eng.

## 2. 吹出口近傍気流の風向・風速の計測実験

本報では前報と同様に高断熱住宅を念頭に、小風量の吹出口(1箇所あたり 100m<sup>3</sup>/h)を採用することを前提として検討する。対象吹出口は住宅用全館空調システムで採用実績があるグリル吹出口とライン吹出口(図1)である。そこで、各吹出条件の気流性状を把握するため、まず室温と吹出空気温度が等温となる条件での風向・風速計測実験を行った。

### 2.1 実験概要

東京大学工学部一号館地下の人工環境実験室内の暖冷房ブースにて、等温風向・風速計測実験を行った。吹出口の配置を図2に示す。グリル吹出口を壁の中央、ライン吹出口を天井に配置し、等温吹出条件でグリル吹出口の拡散・斜め吹出気流及びライン吹出口の鉛直吹出気流の風速・風向を三次元超音波風速計(ソニック社 WA-590)で計測した。サンプリング間隔は 0.1s、各計測点におけるサンプリング時間は 2 分間とし、最後の 1 分間の平均値を測定値とした。

#### (1) グリル吹出口\_壁付\_拡散吹出(吹出風量 100m<sup>3</sup>/h)

天井と壁の影響をなくすように、吹出口と吸込口を壁の中央に設置した。また、吹出気流を拡散させるため、上下風向調整フラップを水平のまま、左側と右側の 3 枚の水平風向調整フラップをそれぞれ 0°、20°、40°(図3(1))のように調整した。6 台の三次元超音波風速計は上下間隔 0.1m で各点を移動計測し、上から 3 番目の計測点は吹出口中心軸にあたる。また、吹出気流の横方向への拡散を把握するため、吹出口中央から Y 方向に -0.4m から +0.4m までの範囲で計測した。X 方向については壁より 0.15m の位置から 1.55m の位置まで計測した。なお、各軸の計測間隔はすべて 0.1m である。

#### (2) グリル吹出口\_壁付\_上向き吹出(吹出風量 100m<sup>3</sup>/h)

気流の拡散を避けるため、水平風向調整フラップをすべて平行の状態に調整した。そして、吹出気流が上向きに吹出すように、吹出口の上下風向調整フラップを全部中心軸とのなす角 40° に調整した(図3(2))。X 方向に吹出口より 0.15m の位置から 1.15m まで計測した。吹出気流の横方向への拡散を把握するため、吹出口中央から Y 方向に -0.4m から +0.4m までの範囲で計測した。気流が Z+方向に傾いているため、天井から Z-方向に 0.1m 離れた位置から高さ 0.8m の位置までの広い範囲で計測した。

#### (3) グリル吹出口\_壁付\_左向き吹出(吹出風量 100m<sup>3</sup>/h)

吹出気流が左向きに吹出すよう、上下風向調整フラップを水平に固定し、水平風向調整フラップをすべて左向き 40° に調整した(図3(3))。気流が Y-方向に傾いているので、Y 方向に 0.2m から -0.8m までの範囲で計測した。なお、X・Z 方向の計測範囲及び計測点の間隔は(1)と同様である。

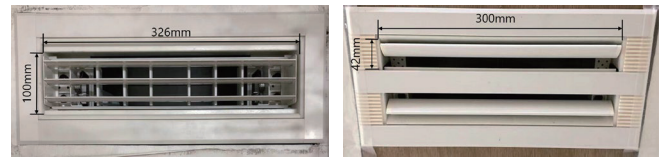
#### (4) ライン吹出口\_天井付\_鉛直吹出(吹出風量片側のみ 50m<sup>3</sup>/h)

吹出口を天井に設置し、冬期条件として、中心軸とのなす角度が 0° で(図3(4))、天井から Z-方向に 0.1m 離れた位置から風速を計測した。また、吹出気流の横方向への拡散もあったため、吹出口中央から X 方向に -0.4m から +0.4m までの範囲で計測した。なお、計測点間隔はグリル吹出口の計測と同じである。

### 2.2 各吹出方法における実験結果

#### (1) グリル吹出口\_壁付\_拡散吹出

水平断面の風速分布を図4左に示す。吹出口から残風速が 0.5m/s になるまでの到達距離は約 1m、気流が横方向(Y 方向)への広がり



グリル吹出口風量 100m<sup>3</sup>/h ライン吹出口\_1 方向風量 50m<sup>3</sup>/h  
図1 本報評価対象のダクト接続用吹出口

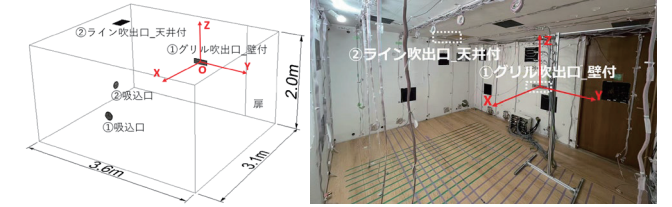
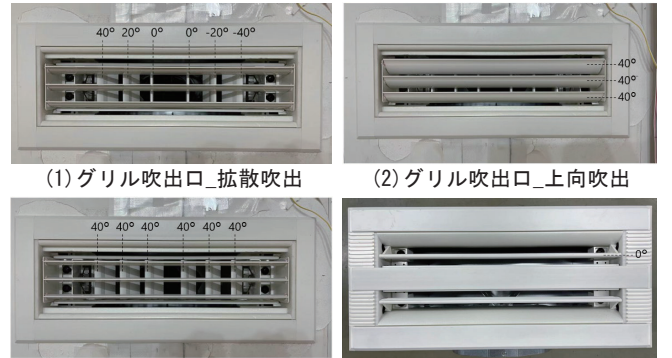


図2 吹出口の配置



(1)グリル吹出口\_拡散吹出 (2)グリル吹出口\_上向吹出  
(3)グリル吹出口\_左向吹出 (4)ライン吹出口\_鉛直吹出  
※図の中に表示した角度は中心軸とのなす角である(時計回りが正)  
図3 実験の吹出条件

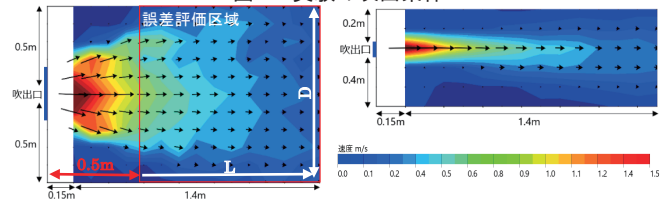


図4 (1) グリル吹出口\_拡散吹出\_実験結果

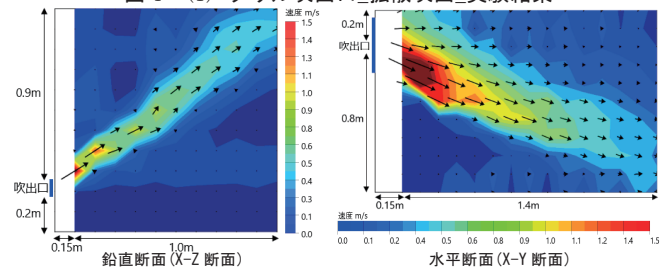


図5 (2) グリル吹出口\_上向き吹出\_実験結果

図6 (3) グリル吹出口\_左向き吹出\_実験結果

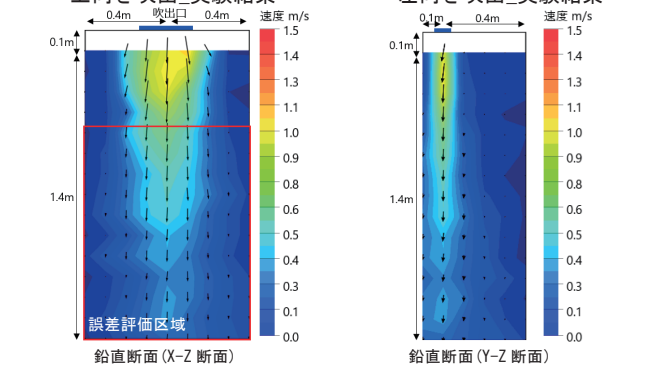


図7 (4) ライン吹出口\_鉛直吹出\_実験結果

大きい。鉛直断面の実験結果(図4右)より、気流の鉛直方向への拡散はごく小さい。なお、図に示した誤差評価区域は3章1節で気流再現精度を評価する際に使っている。Lは主流方向において吹出口より0.5mの位置からの長さ、Dは吹出口の中心軸から横方向においてある距離離れた位置までの幅である。

(2) グリル吹出口\_壁付\_上向き吹出

実験結果の鉛直断面を示した図5によると、吹出した気流は約40°の仰角で上向きに吹出しており、X-Z断面上の鉛直方向への拡散は極わずかであった。

(3) グリル吹出口\_壁付\_左向き吹出

実験結果の水平断面を示した図6によると、吹出した気流が約40°で吹出していた。そして、気流の横方向への拡散がほとんどなく、到達距離が拡散吹出(1)より遠くなったことを確認した。

(4) ライン吹出口\_天井付\_鉛直吹出

実験結果の鉛直断面を示した図7によると、X-Z断面の結果を見ると、気流が横方向への拡散が少しあるが、(1)より広がりには小さかった。気流の到達距離は約1mであった。そして、Y-Z断面の結果から、気流が鉛直に吹出していることを確認した。

3. Momentum法による拡散吹出気流の再現

前報において、水平吹出気流のMomentum法による再現手法を検討した。主流方向加速度と横方向加速度の両方を設定することで、中心軸の残風速が0.5m/sになる位置と垂直2方向に吹出口外縁から1mesh分の位置、合計3点の風速が合えば、気流の到達距離と拡散の両方を再現できることがわかった。しかし、気流の拡散程度によっては、この3点だけで評価すると妥当性が低いと考えられるので、信頼性の高い断面風速評価方法を詳しく検討する必要がある。さらに、主流方向と横方向の加速度は互いに到達距離に影響を与えるので、何回もCFD解析を行う列挙法で試行錯誤をする必要があり、計算時間がかかる。こうした手間の削減を目指し、ここではまず高効率な加速度決定方法を検討した。

3.1 断面風速評価方法に関する検討

ここでは気流の拡散が大きいグリル吹出口\_拡散吹出(図3(1))と拡散がやや大きいライン吹出口\_鉛直吹出(図3(4))を対象とし、気流の拡散がどの程度でも使える断面風速誤差の評価方法を検討した。

3.1.1 断面風速誤差の検討

汎用CFDソフトウェアFlowDesigner2022を用い、吹出口前セルに図8のように加速度を設定して、CFD解析を行った。CFDの解析条件は表1に示した通り。差分スキームについて前報はQUICKを採用したが、与えた加速度が大きい場合、到達距離が逆に短くなり、非常に大きい数値拡散を引き起こした。一方、1次精度風上差分を採用すれば、与えた加速度がどの程度でも気流の到達距離を再現するため、本報では1次精度風上差分を採用した。メッシュの分割方法は前報と同様に壁前セルを50mmのメッシュで細かく分割し、他の領域を等比率1.1で分割する。なお、QUICKと1次精度風上差分の違いによる結果の差はほとんど生じないことを今回確認している。

実験結果により、鉛直断面(X-Z)に気流の拡散があまりないので、水平断面(X-Y)だけ評価しても問題ないとする。CFDにおいて吹出口付近の風速誤差は吹出口の寸法・構造などの影響で避けられないので、吹出口より0.5mまでの計測点を抜いて、列挙法で試行錯誤を

行い、(1)式により誤差評価区域内(図4左)全計測点の平均二乗差(以下RMSE\_t)を比較した。

$$RMSE_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U}_i)^2} \quad (1)$$

N: 誤差評価区域全計測点数  $U_i$ : CFD風速  $\bar{U}_i$ : 実験風速

列挙法の結果により、 $a_x$ が31m/s<sup>2</sup>、 $a_y$ が29 m/s<sup>2</sup>の場合、誤差評価区域内において、すべての計測点を合わせたRMSE\_tが最小値の0.0728になった。

3.1.2 実用上最適な風速評価対象範囲に関する検討

吹出口種類や吹出条件によって、吹出気流性状が異なるため、適切な風速計測範囲を提案する必要がある。ここでは、誤差評価区域を狭め、(2)式により該当区域(風速評価対象範囲)計測点の平均二乗

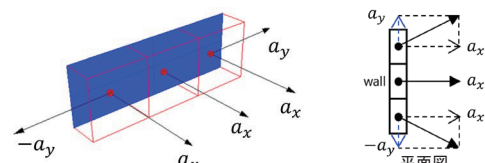


図8 拡散吹出\_加速度設定方法  
表1 CFD解析条件

解析コード	FlowDesigner2022	解析対象	風速
流入乱流条件	$k=(U/10)^2$ $\varepsilon=0.09^{3/4} \times k^{3/2}/D$	Uネック風速 D吹出口幅	グリル吹出口:風量100m <sup>3</sup> /h ライン吹出口:風量50m <sup>3</sup> /h
乱流モデル	標準k-εモデル	解析手法	SIMPLEC
差分スキーム	1次精度風上差分	流出条件	グリル吹出口:風量100m <sup>3</sup> /h ライン吹出口:風量50m <sup>3</sup> /h
解析領域	X,Y,Z=3.1m,3.6m,2m		

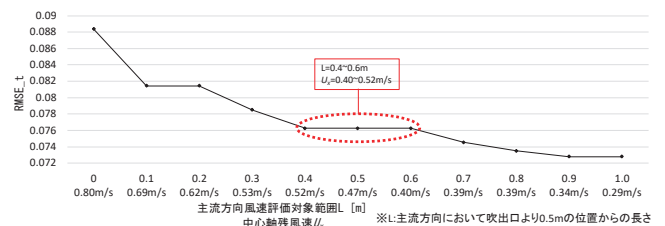
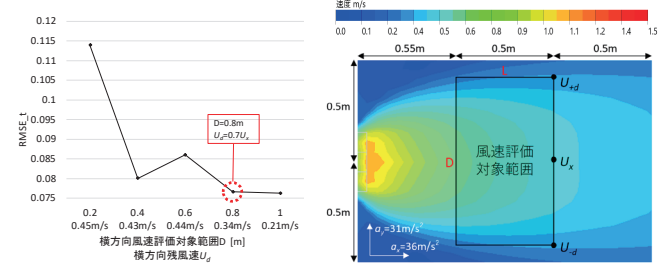


図9 主流方向風速評価対象範囲検討



※D:吹出口の中心軸から横方向においてある距離離れた位置までの幅

図10 横方向風速評価対象範囲検討

図11 (1) グリル吹出口\_拡散吹出 CFD風速分布

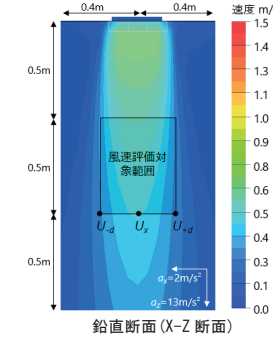


図12 (4) ライン吹出口\_鉛直吹出 CFD風速分布

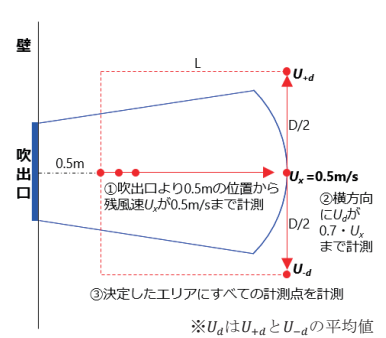


図13 風速計測エリア提案



偏差 (RMSE\_p) が最小値になる場合の加速度を用いて、RMSE\_t を比較することで、実用上最適な風速評価対象範囲の L と D を検討した (L は主流方向において吹出口より 0.5m の位置からの長さ、D は吹出口の中心軸から横方向においてある距離離れた位置までの幅である)。

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - \hat{U}_i)^2} \quad (2)$$

$n$ : 風速評価対象範囲計測点数  $U_i$ : CFD 風速  $\hat{U}_i$ : 実験風速

まずは主流方向長さ L の検討結果 (図 9) を見ると、L の短縮に従って、RMSE\_t が上昇したが、吹出口より 0.5m の位置から L が 0.4m ~ 0.6m (残風速  $U_x$  が約 0.5m/s) となる範囲までの風速が合うようであれば、RMSE\_t が相対的に低く、実用上問題ない精度であると判断した。その後、主流方向の点数を固定し (吹出口より 0.5m の位置から、残風速  $U_x$  が 0.5m/s まで)、横方向の風速評価対象範囲の幅 D を検討した。

横方向幅 D の検討結果 (図 10) を見ると、実験で横方向残風速  $U_d$  ( $U_x$  が 0.5m/s になる位置から水平断面垂直 2 方向において、D/2 離れた位置の風速の平均値) が  $0.7 \cdot U_x$  以下となった領域において CFD 解析結果の風速が一致していれば、RMSE\_t が相対的に低い値に抑えられることがわかった。そして CFD 結果の風速分布を図 11 に示す。実験結果と比較の上、主流方向に吹出口より 0.5m の位置から中心軸残風速  $U_x$  が 0.5m/s になる位置まで、横方向に  $U_d$  が  $0.7 \cdot U_x$  になる位置まで決定した風速評価対象範囲において、すべての計測点が合えば、気流の性状を高精度で再現できると判断した。

そして、拡散がやや大きい吹出口において、上記検討した結論の適用性を検証するために、ライン吹出口\_鉛直吹出の実験結果を用い、検証を行った。CFD 結果 (図 12) を見ると、気流の到達距離・拡散を再現できることがわかった。以上より、吹出口の拡散の程度によらず、図 13 のように主流方向に吹出口より 0.5m の位置から中心軸残風速  $U_x$  が 0.5m/s になる位置まで計測し、その後横方向に  $U_d$  が  $0.7 \cdot U_x$  となる位置まで計測した。その結果、決定したエリア内において、すべての計測点において、気流性状を精度高く再現できることを確認した。

### 3.2 最急降下法を用いる加速度決定方法

主流方向と横方向の加速度は互いに風速結果に影響を与えるので、CFD を実施し、列挙法で試行錯誤をしながら、最適な加速度を探す必要がある。しかし、試行錯誤をするのは計算時間がかかるので、ここではこうした手間の削減を目指し、最急降下法<sup>7)</sup>を用いて、高効率な加速度決定方法を検討した。

#### 3.2.1 実現方法

無駄な計算量を抑えるため、更新の方向を決めるのが重要である。(3)式により、RMSE\_p が最小値まで 2 方向加速度の更新を進める。

$$a_x = a'_x - \alpha \times \frac{\partial f(a_x, a_y)}{\partial a_x} \quad a_y = a'_y - \alpha \times \frac{\partial f(a_x, a_y)}{\partial a_y} \quad (3)$$

ここで、 $a'_i$  は前回の値である。 $\alpha$  は更新速度率であり、ハイパーパラメータである。誤差 RMSE\_p を  $a_x$  と  $a_y$  に関する関数に見なし、 $\frac{\partial f(a_x, a_y)}{\partial a_i}$

は RMSE\_p の  $a_x$  と  $a_y$  に関する偏導関数であり、計算できないので、解析を実施して、(4)式によりハイパーパラメータ  $\epsilon$  を用いて前進差

分で計算しなければならない。

$$\frac{\partial f(a_x, a_y)}{\partial a_x} = \frac{f(a'_x + \epsilon, a'_y) - f(a'_x, a'_y)}{\epsilon} \quad \frac{\partial f(a_x, a_y)}{\partial a_y} = \frac{f(a'_x, a'_y + \epsilon) - f(a'_x, a'_y)}{\epsilon} \quad (4)$$

適用のフロー図を図 14 に示す。極端な加速度の初期値を与えた場合、RMSE\_p が局部最小値が低下しづらくなるため、ここではすべて 0 から更新する。初期条件をすべて設定した後、外部連携で CFD を繰り返し回して、RMSE\_p が最小値になるまで加速度を更新する。

#### 3.2.2 計算結果と考察

グリル吹出口\_拡散吹出の計算過程 (図 15) を見ると、適切な更新速度率  $\alpha$  により、RMSE\_p が最小値まで収束する CFD 実施回数を抑えられることが確認された。最急降下法の高効率・適用性を確認した。

## 4. Momentum 法による斜め吹出気流の再現

本章では斜め吹出気流の再現方法について、3 章 2 節で提案した最急降下法の適用性を検討した。そして、前報の検討により、グリル吹出口鉛直方向に数値拡散が大きいという問題点があることがわかっているため、本章では数値拡散を抑制するため鉛直方向・水平方向の最小メッシュ寸法も検討した。

### 4.1 斜め(上向き)吹出気流の再現

実験結果により、気流の横方向への拡散があまりないので、ここでは図 16 に示された通り、水平方向・鉛直方向の 2 方向加速度を設定した。そして、吹出角度によらず、CFD において流入条件の気流方向を適当に設定したら、2 方向加速度を調整できるので、ここでは CFD 吹出気流角度も設定した。そこで吹出口中心軸より 0.5m の位置から残風速 0.5m/s になる位置までの平面においての RMSE\_p が最小値になるまで最急降下法を用い、2 方向加速度と吹出角度の 3 つパラメータを同じ初期値から更新する。パラメータが多いため、最適解を超えるのを避ける必要があり、更新過程に従って RMSE\_p が上昇したら、更新速度率  $\alpha$  を 0.5 倍に調整し、 $\alpha$  が 40 以下になったら、RMSE\_p が収束したと判断する。そして、RMSE\_p が局部最小値で立ち往生しないため、ここでは各パラメータの初期値を 0, 25, 50 の 3 段階から更新し、RMSE\_p の最小値を比較した。

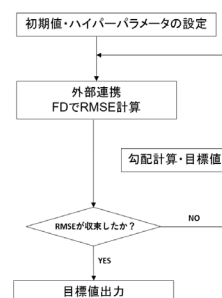


図 14 最急降下法の適用するフロー

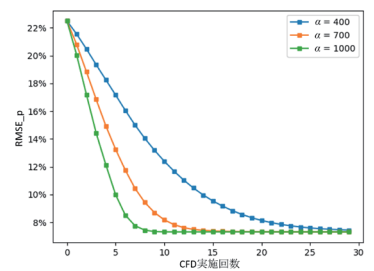


図 15 最急降下法の計算過程\_グリル吹出口\_拡散吹出

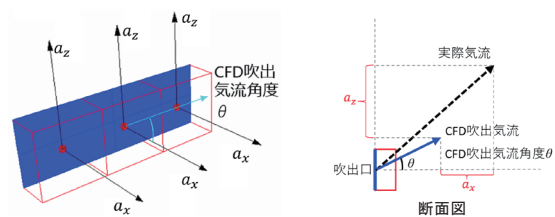


図 16 斜め吹出加速度設定方法

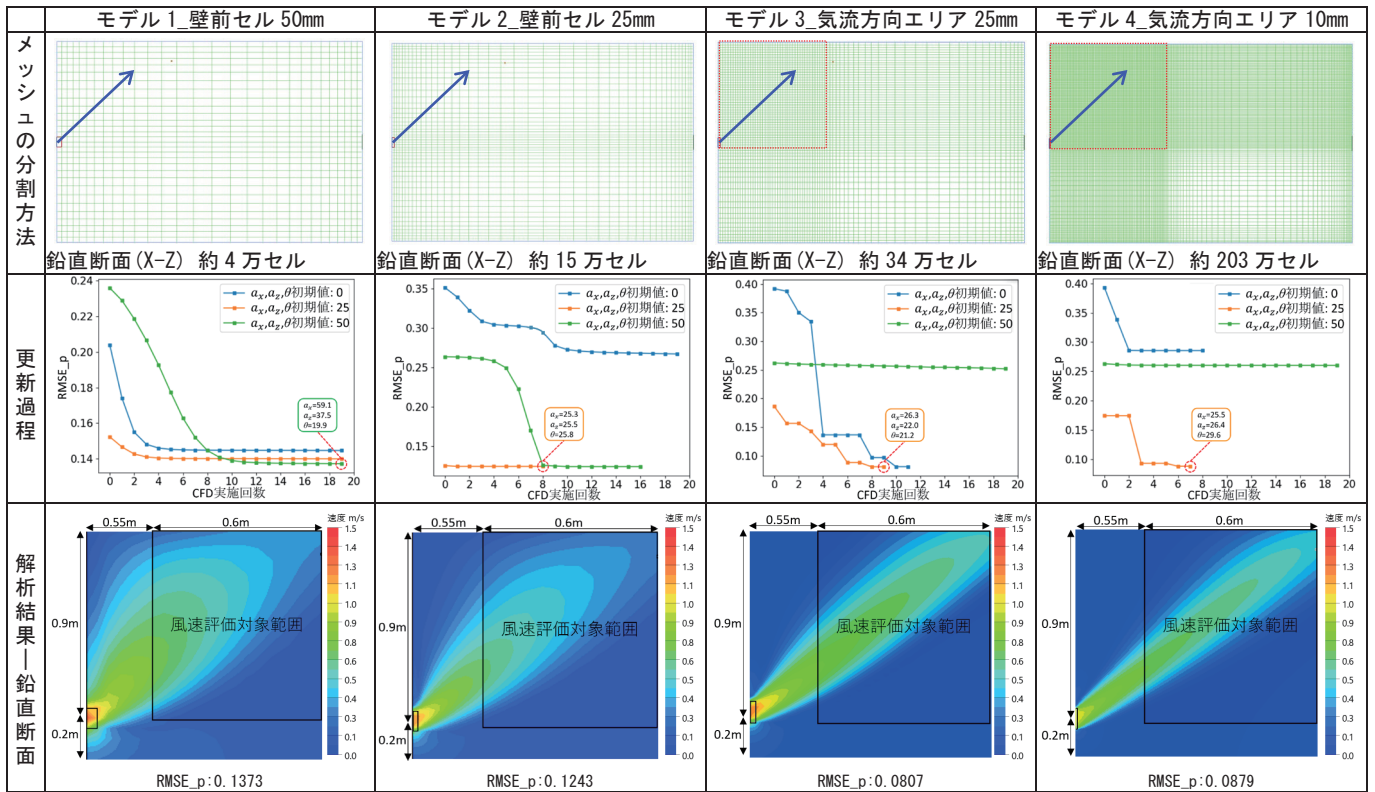


図 17 メッシュの分割方法に関する検討\_斜め(上向き) 気流

#### 4.1.1 メッシュの大きさに関する検討

メッシュの大きさを検討するため、ここでは壁前セルに 50mm のメッシュで固定して、他のところを 1.1 の等比率で粗く分割するモデル 1、壁前セルに 25mm のメッシュで固定して、他のところを 1.1 の等比率で粗く分割するモデル 2、気流方向のエリアに 25mm で均等分割し、他のところを 1.1 の等比率で粗く分割するモデル 3 と気流方向のエリアに 10mm で均等分割し、他のところを 1.1 の等比率で粗く分割するモデル 4 の 4 つについて、メッシュ分割方法の解析結果への影響を比較した(図 17 上)。

#### 4.1.2 解析結果と考察

解析結果を図 17 に示す。まずは更新過程を見ると、初期値は収束のスピード及びパラメータの最適値に影響を与えることがわかった。様々な初期値から更新し、RMSE が最小になる際のパラメータを採用することで、RMSE を全局の相対的な最小値とすることができた。次は各モデルを最適なパラメータを用い、CFD 解析を行った。モデル 1 の解析結果により、気流の鉛直方向への拡散が非常に大きいので、RMSE が最小値になっても気流の性状をよく再現できないことがわかった。モデル 2・3・4 において、メッシュをより細かく分割すれば数値拡散を抑制し、RMSE\_p を低いレベルに抑えることができた。そして、モデル 2 とモデル 3 の比較によって、モデル 3 の方は気流方向のエリアにメッシュが相対的に細かいため、RMSE\_p が低いことがわかった。モデル 3 とモデル 4 を比較すると、風速の誤差はほとんど同じという点から、モデル 3 の方がメッシュ数が少なく、効率的な分割方法だと判断する。

### 4.2 斜め(左向き)吹出気流の再現

#### 4.2.1 解析概要

吹出口のモデリング方法は上記の検討と同様に、水平 2 方向の加

速度と吹出角度を設定した。吹出口より 0.5m の位置から残風速 0.5m/s になる位置までの区域においての RMSE\_p が最小値になるよう、最急降下法で妥当な初期値からパラメータを更新する。4.1 と同様に 4 つのメッシュ分割モデルを用い、メッシュ分割による影響を検討した。

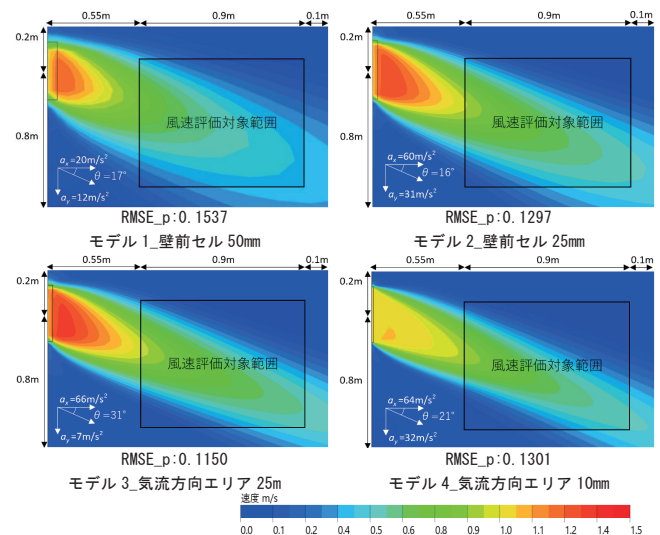


図 18 斜め(左向き)気流の解析結果\_水平断面

#### 4.2.2 解析結果と考察

各モデルの CFD 解析結果を図 18 に示す。上向き吹出気流の検討結果と同じく、モデル 1 の場合はメッシュが粗いため、数値拡散が非常に大きくて、気流の拡散性状を過大に評価することがわかった。メッシュを細かく分割することで(25 mm)、数値拡散を抑制する効果

があることを確認した。そして、水平2方向加速度と吹出角度を設定したことで気流性状を再現できることも確認された。しかし、モデル4の場合、RMSE\_pが局部最小値になりやすいため、勾配降下法で最適なパラメータを探すのが難しいと考える。以上より、モデル3が、斜め(左向き)吹出においてもより効率的な分割方法だといえる。

#### 4.3 斜め吹出気流再現のまとめ

解析用メッシュは構造メッシュなので、流れが格子に対して斜行しているときには、流れに垂直な方向に拡散が生じ、大きな誤差を引き起こす。精度の高い解を得るためには、気流方向エリアにおいて、細かい格子分割(25mm以下)が必要だと考える。

#### 5. 総括

本研究は等温状態で各吹出条件の風向・風速を把握した上で、Momentum法において拡散気流の風速評価方法と高効率な加速度決定方法を提案した。また、斜め吹出気流の再現手法も検討した。主な結論を以下に示す。

拡散吹出気流の再現について、吹出口前セルを3分割し、主流方向加速度と横方向加速度を設定したことで、拡散気流の性状を再現できた。また、吹出口の拡散の程度によらず、主流方向に吹出口より0.5mの位置から中心軸残風速 $U_x$ が0.5m/sになる位置まで、横方向に実験で $U_d$ が $0.7 \cdot U_x$ 以下となった領域においてCFD解析結果の風速が一致していれば、気流性状を再現できることがわかった。さらに、最急降下法を用い、加速度を高効率に決定できることがわかった。

斜め吹出気流の再現について、2軸加速度と吹出角度を設定した上で、気流の方向・到達距離を再現できた。そして、最急降下法の適用性も確認された。ただ、メッシュの分割について、流れに垂直な方向に拡散が生じ、大きな誤差を引き起こす点には留意すべきである。今回、精度の高い解を得るためには気流方向エリアにおいて、細かい格子分割(25mm以下)が必要であった。

今回採用したFlowDesigner2022では外部連携機能によって今回の研究内容をPythonで実装したプログラムと逐次データをやり取りすることで、各パラメータを変更しながらCFD解析を行った。他の市販CFD解析ソフトでも外部プログラムと連携してパラメータを変更しながら解析する機能を有するソフトはあるので、最急降下法は応用できる。

今後は異なる風量において、加速度決定の効率的な方法を検討する予定である。また、実際の暖冷房時を模擬し、吹出気流が室温と差がある場合についても実験を行って、気流の風速・温度分布を把握し、CFDで再現するためのモデル化の妥当性検証を進める予定である。

#### 謝辞

本研究は、令和2年度の国土交通省サステナブル建築物等先導事業(省CO2先導型)に採択された、エネルギー自立住宅の実現に向けて～太陽光と太陽熱を活用した自立率向上と災害対応～の技術の検証の一環として行った。

#### 参考文献

- 1)CUI J., et al.: EXPERIMENTAL VERIFICATION OF 24-HOURS CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM OF A DETACHED HOUSE IN WARM REGION BASED ON LONG-TERM MEASUREMENT, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.22, No.51, pp.631-636, 2016.6  
崔, 市川: 長期実測に基づいた温暖地域における戸建住宅の24時間全館空調システムの実験検証, 日本建築学会技術報告集, 第22巻 第51号, pp.631-636, 2016.6
- 2)KISHI T., et al.: STUDY ON THERMAL ENVIRONMENT BY ADJUSTING AIR FLOW RATE FOR BLOWER FAN ON CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM FOR RESIDENTIAL BUILDING, Journal of Environmental Engineering, AIJ, Vol.85 No.767, pp.37-44, 2020.1  
岸, 李, 浅野: 冬期における全館空調が導入された戸建住宅における送風ファンの可変風量制御が温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第85巻 第767号, pp.37-44, 2020.1
- 3)SREBRIC J., Chen Q.: A Method of Test to Obtain Diffuser Data for CFD Modeling of Room Airflow, ASHRAE Transactions, Vol.107, Part2, pp.108-116,2001
- 4)空気調和・衛生工学会 換気設備委員会 BIM・CFD パーツ開発応用小委員会, 委員会成果報告書 次世代型CFD パーツの開発およびBIMによる空調設備設計統合手法, 2018.10
- 5)深田, 酒井: 角型のアネモスタット型吹出し口を対象としたCFD パーツのモデリング手法に関する研究 第1報 水平吹出し時におけるMomentum法の適用と検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.254, pp.43-50, 2018.5
- 6)SUN L., et al. : STUDY ON COMFORT EVALUATION FOR THE CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM IN RESIDENTIAL HOUSE BY CFD SIMULATION (PART 1) : COMPARISON OF EXPERIMENT AND CFD OF WIND VELOCITY DISTRIBUTION NEAR OUTLET UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.28, No.68, pp.296-301, 2022.2  
孫, 胡, 前, 高瀬, 盧: CFD解析による住宅用全館空調の快適性評価に関する研究(その1): 等温状態における吹出口近傍風速分布の実験とCFDの比較, 日本建築学会技術報告集, 第28巻 第68号, pp.296-301, 2022.2
- 7)茨木. 最適化の数学. 共立出版. 2011. 240p. ISBN 9784320015654

[2022年2月1日原稿受理 2022年4月14日採用決定]