

CFD モデリングによる天井設置型パーソナル吹出口からの 吹出気流の簡易再現手法とその精度検証

SIMPLIFIED CFD MODELING METHOD AND ACCURACY VERIFICATION OF AIRFLOW FROM CEILING-MOUNTED PERSONALIZED AIR SUPPLY TERMINAL

小林知広^{*1}, 西堀啓規^{*2}, 梅宮典子^{*3}, 山中俊夫^{*4},
粕谷敦^{*5}, 小林佑輔^{*5}, 和田一樹^{*5}

*Tomohiro KOBAYASHI, Hiroki NISHIHORI, Noriko UMEMIYA, Toshio YAMANAKA,
Atsushi KASUYA, Yusuke KOBAYASHI, and Kazuki WADA*

The purpose of this study is to establish a CFD modeling method of the airflow from personal air supply terminal. First, the velocity distribution was measured by the hot wire anemometer to obtain boundary conditions and true value of CFD. Second, the accuracy of the CFD is verified. To do this CFD, a large number of grids is required, which leads to large computational load and difficulty in analysing a large space. Therefore, to decrease the number of grids without loosing accuracy, the momentum method and P.V. method are applied, and its analysis accuracy is presented.

Keywords : CFD, Task & Ambient Air Conditioning System, Personal Air Terminal,

Momentum Method, Prescribed Velocity Method,

数値流体力学, タスク＆アンビエント空調, パーソナル吹出口, モーメンタム法, P.V.法

1. はじめに

居住者が長時間滞在することが想定される執務室において、室内の熱環境や空気質は居住者の健康、快適性、生産性に影響を及ぼす重要な要素である。適切な室内環境を確保するための空調設計の考え方としては、室内で一様な温度分布かつ静穏な気流環境の提供が現在最も一般的である。しかし、省エネルギーへの貢献や快適性・生産性向上の観点からは居住者個々の活動状況や好みに合わせた環境を提供することが有効と言える。このため、1990年頃からタスク・アンビエントまたはパーソナル空調の概念が提唱され、実験による評価研究が継続的に見られるようになった¹⁻⁸⁾。このようなシステムは日本のみならず国外でも同時期からパーソナル換気として活発に研究されている⁹⁻¹¹⁾。また、近年では実験室環境のみならず実オフィスでの執務環境下における性能評価研究例¹²⁻¹³⁾も見られており、実務的な設計の観点からも関心が高いと言える。

執務者個人への空調方法としては一般に机上に吹出口を設ける方法や床吹出方式が考えられるが、その他にもオフィスチェアを利用した方式¹⁴⁻¹⁶⁾や天井に個人用の器具を設置する方式¹⁷⁻¹⁹⁾も採用され、執務者個人への吹出気流と天井面からの放射効果の併用を意図した方式¹⁸⁻¹⁹⁾もある。このような組み合わせが可能であるため、パーソナル空調システムとしては多くのバリエーションが考えられる。中間期には主にタスク域の空調を行いながら自然換気も同時に利用す

る方式²⁰⁻²¹⁾も提案されており、省エネルギーの観点からは自然換気との併用は有効と言える。パーソナル空調が個人を対象とする以上、執務者周辺の物理環境は最も重要な検討項目と言え、設計段階で具体的な検討を行うには数値流体力学(CFD)が有効となる。このため、人体周辺の詳細な気流解析を実施することで空気質や換気効率指標を評価した研究も見られる²²⁻²³⁾。

パーソナル空調システムの検討時にはCFD解析が有効と言えるが、例えば前述の自然換気とパーソナル空調を併用する場合などは室全体の気流性状と執務者周辺のパーソナル気流の性状の両者を事前に予測する必要がある。しかし、CFD解析で室内に数多く設置されるパーソナル気流を適切に再現可能な計算格子を設けた上で室全体を解析することは計算負荷を増加させ、実務の設計段階での検討は容易ではない。そこで、本研究では比較的汎用性が高いと思われる天井設置型のパーソナル気流の吹出口¹⁷⁻¹⁸⁾に着目し、CFD解析時に比較的粗い計算格子でパーソナル気流の気流性状を適切に再現可能な吹出気流のモデリング手法の検討を行うこととする。そのため、まずは実験でパーソナル吹出気流単体の2次元風速分布を測定し、後に実施するCFD解析の真値を取得するとともに吹出面での風速分布も測定して境界条件を取得する。その後、CFDで細かな計算格子を配置した詳細解析を実施して実験結果と比較することで解析精度の検証を行い、粗い計算格子を用いた場合の解析精度悪化の程度を把

* 1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士（工学） Associate Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Eng., Osaka University, Dr.Eng.

* 2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 前期博士課程 Grad. Stud., Department of Urban Engineering, Graduate School of Eng., Osaka City University

* 3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授・博士（工学） Prof., Department of Urban Engineering, Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.

* 4 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・博士（工学） Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Eng., Osaka University, Dr.Eng.

* 5 株式会社竹中工務店 TAKENAKA Corporation

握する。その上で、特に設計時に関心の高い項目と言える残風速に着目し、粗い計算格子を用いた場合でも精度が大きく悪化しない簡単なCFDモデルの検討を行うこととし、Momentum法とP.V.法の2種のモデリング手法を用いた解析を行う。

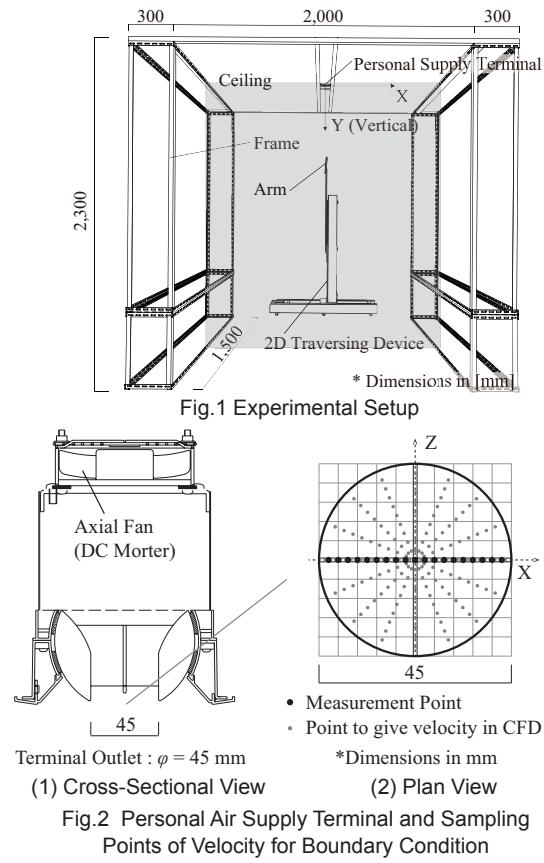
2. パーソナル吹出気流の風速測定実験

2.1 実験の概要

大阪市立大学工学部内部のホール空間においてFig.1に示す装置を作成して等温環境下で実験を行なった。実験装置の寸法は2,600 mm (W) × 1,500 mm (D) × 2,300 mm (H)であり、上部に天井面を設けてその中央部にパーソナル気流の発生装置を設置した。Fig.2 (1)に使用した吹出口ユニットの断面図を示す。天井面には開口を設けており、吹出口の下端が天井面のレベルと一致する高さに設置した。吹出口ユニットはDCモーターの軸流ファンにより天井裏に相当する空間の空気を吹き出すことでパーソナル気流を給気する仕組みであり、断面の球状部を回転させることで吹出風向を調整することができる。実験は風向を鉛直下向きに固定して行い、後述するCFD解析の境界条件の取得と精度検証時の比較対象となる真値の取得を目的として2種の風速測定実験を行った。

2.2 風速測定実験の概要

CFDの流入境界条件取得を目的として、熱線風速計を用いて吹出口面上での風速測定を行った。吹出面上の測定点をFig.2 (2)に示す。吹出口ユニットの軸流ファンはコンバーターでDC24Vに固定して一定風速を吹き出した。吹出口は正円形状であるが、気流の到達距離を延ばすために内部中央には十字状に平板が設置されている。このため気流は完全な軸対称流とは言い難いが、境界条件モデルを簡潔にするため対称性を仮定し、Fig.2 (2)に示す中心線上の19点で風速



測定を行なった^{注1)}。全ての測定点においてX型とI型の熱線プローブ（日本カノマックス、0252R-T5 及び 0251R-T5）を用いて1回ずつ風速測定を行うこととし、前者は2次元の平均風速、後者は乱流統計量の k と ε の取得に用いた^{注2)}。Fig.1に示すXおよびY方向に移動可能な2次元電動トラバーサに取り付けられたアームの先に治具でサポートを固定し、その先端に熱線プローブを設置することで実験を行った。X型プローブは風速のX成分とY成分が測定可能な向きに、I型プローブはX成分とY成分の合成風速を測定する向きに設置し、測定は全て 1.0 kHz で 60 秒間行った。前述の通り、CFD の真値取得を目的として中心断面上 ($Z=0$ mm) でも風速を測定した。Fig.3 に示す 203 点の測定点全てについて各 1 回ずつ、境界条件取得と同様に X型および I型の 2 種の熱線プローブを用いて 1.0 kHz で 60 秒間風速測定を行った。

2.3 風速測定結果

X型プローブによる吹出面中心線上の平均風速ベクトルをFig.4 (1)に示すとともに、Table 1に測定結果を示す。全体的に風向が傾いているが、ここではアームに取り付けたX型プローブが若干傾いていた可能性が大きいと判断し^{注3)}、吹出口直下の風向が鉛直下向きになるよう全点の結果を同じ角度で回転して補正した (Fig.4 (2))。中心断面でZ成分の平均風速は0で、流れ場全体としては軸対称流と仮定し、CFDでは測定結果を 22.5° ずつY軸を中心に座標回転してFig.2 (2)に示す全145点で3次元の平均風速と k 及び ε を境界条件として与えることとし、これをパーソナル気流のCFD境界条件とする。

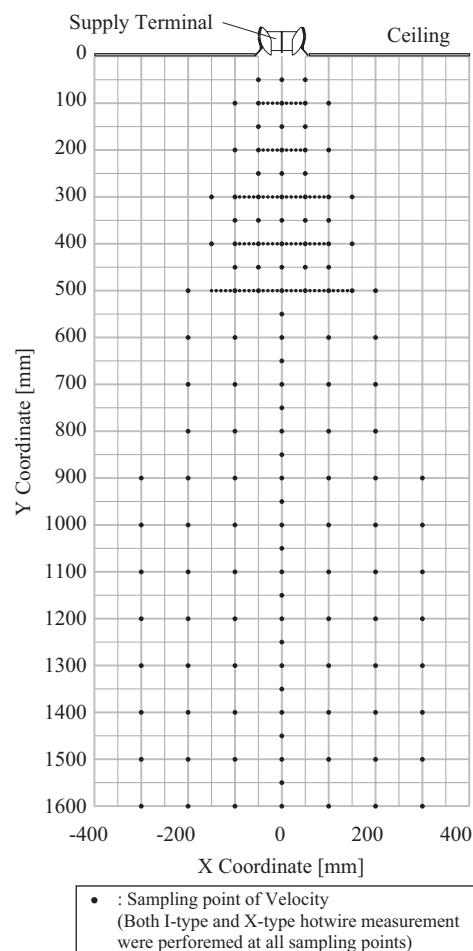


Fig.3 Sampling Points on the Central Cross-Section

Fig.5 に精度検証用風速測定で X型プローブにより得られた全域の風速センターと Y=500 mmまでの風速ベクトルを示す。気流の広がりは±100 mm程度で指向性の強さが確認でき、風向もほぼ鉛直下向きに噴出されていることが確認できる。吹出面から概ね 1,000 mm程度の位置で残風速が 1.0 m/s となった。この測定結果をパーソナル気流の真値とし、次章では CFD 解析結果と比較して精度検証を行う。

Table 1 Recorded Mean Velocity and Estimated Turbulent Statistics to be Applied for Inlet Boundary Condition of CFD

| ID | X [mm] | Vx [m/s] | Vy [m/s] | k [m^2/s^2] | ε [m^2/s^3] |
|----|--------|----------|----------|---------------------------------|---|
| 1 | -20.25 | 0.290 | 4.42 | 0.692 | 14.8 |
| 2 | -18.00 | 0.386 | 4.80 | 0.784 | 20.3 |
| 3 | -15.75 | 0.532 | 5.06 | 0.813 | 23.4 |
| 4 | -13.50 | 0.612 | 5.18 | 0.866 | 24.3 |
| 5 | -11.25 | 0.666 | 5.25 | 0.918 | 24.3 |
| 6 | -9.00 | 0.680 | 5.28 | 0.957 | 25.8 |
| 7 | -6.75 | 0.693 | 5.27 | 0.913 | 25.8 |
| 8 | -4.50 | 0.696 | 5.05 | 0.873 | 24.0 |
| 9 | -2.25 | 0.608 | 4.37 | 0.893 | 25.1 |
| 10 | 0.00 | 0.340 | 3.75 | 0.676 | 21.0 |
| 11 | 2.25 | 0.301 | 4.36 | 0.911 | 27.3 |
| 12 | 4.50 | 0.254 | 4.76 | 0.875 | 23.3 |
| 13 | 6.75 | 0.199 | 4.83 | 0.881 | 25.0 |
| 14 | 9.00 | 0.155 | 4.94 | 0.952 | 26.4 |
| 15 | 11.25 | 0.135 | 5.03 | 1.020 | 28.7 |
| 16 | 13.50 | 0.200 | 5.24 | 1.037 | 28.4 |
| 17 | 15.75 | 0.333 | 5.30 | 1.030 | 27.3 |
| 18 | 18.00 | 0.555 | 5.28 | 1.036 | 24.8 |
| 19 | 20.25 | 0.781 | 5.07 | 0.976 | 23.7 |

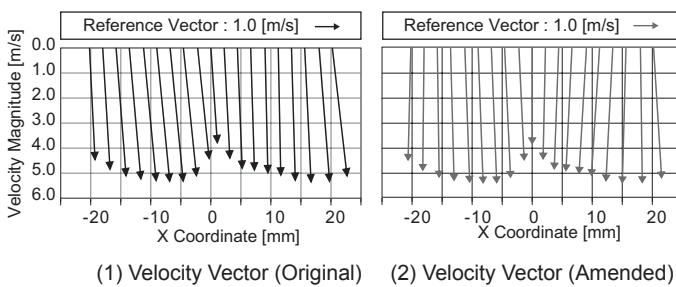


Fig.4 Velocity Vector Plots along the Central Line at Outlet Surface obtained by X-type Hotwire Probe

3. CFD 解析を用いたパーソナル吹出気流の再現

3.1 解析概要

実験装置と同様の領域を再現して CFD による等温定常解析を行う。Fig.6 に解析領域と計算格子分割を示す。実験時に装置に壁面は設けていないが、吹出気流の拡散幅に対して十分長い領域であることからその影響は小さいと考えられ、計算の安定性向上を意図して領域の側面は壁面境界として下部 100 mmのみを流出境界とした。流入境界条件には前章で作成した風速および乱流統計量の分布を与えた。Fig.6 (2) に示す流入境界面の計算格子は Fig.2 (2) の境界条件の規定点とは無関係に配置されているが、距離が最も近い規定点の測定値

Table 2 CFD Analysis Condition

| Calculation Domain | 2,600 (X) 2,300 (Y) 1,500 (Z) mm | | | | | | |
|--|---|--------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|------|------------------------------|
| CFD code | ANSYS Fluent 17.0 | | | | | | |
| Algorithm | SIMPLE | | | | | | |
| Discretization Scheme for Advection Term | QUICK | | | | | | |
| Boundary Condition | <table border="1"> <tr> <td>Inlet</td> <td>Each component of velocity, k and ε (obtained from hotwire measurement)</td> </tr> <tr> <td>Outlet</td> <td>Gauge pressure : 0 Pa</td> </tr> <tr> <td>Wall</td> <td>Based on Generalized Log Law</td> </tr> </table> | Inlet | Each component of velocity, k and ε (obtained from hotwire measurement) | Outlet | Gauge pressure : 0 Pa | Wall | Based on Generalized Log Law |
| Inlet | Each component of velocity, k and ε (obtained from hotwire measurement) | | | | | | |
| Outlet | Gauge pressure : 0 Pa | | | | | | |
| Wall | Based on Generalized Log Law | | | | | | |
| Turbulence Model | <table border="1"> <tr> <td>Standard $k-\varepsilon$ Model</td> </tr> <tr> <td>SST $k-\omega$ Model</td> </tr> <tr> <td>Reynolds Stress Model</td> </tr> </table> | Standard $k-\varepsilon$ Model | SST $k-\omega$ Model | Reynolds Stress Model | | | |
| Standard $k-\varepsilon$ Model | | | | | | | |
| SST $k-\omega$ Model | | | | | | | |
| Reynolds Stress Model | | | | | | | |
| Total Number of Cells | 1,121,868 | | | | | | |

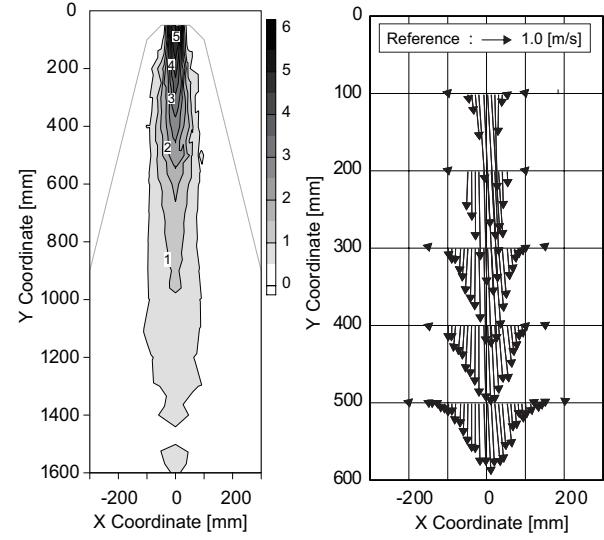


Fig.5 Contour of Velocity Magnitude and 2-D Velocity Vector Plots obtained from X-type Hotwire Measurement

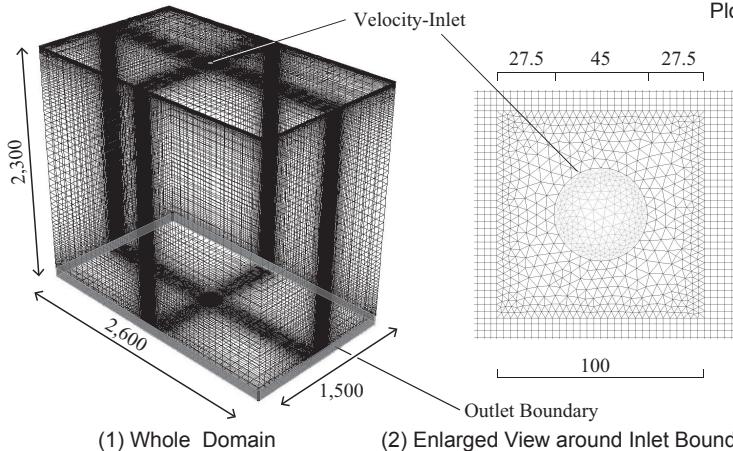
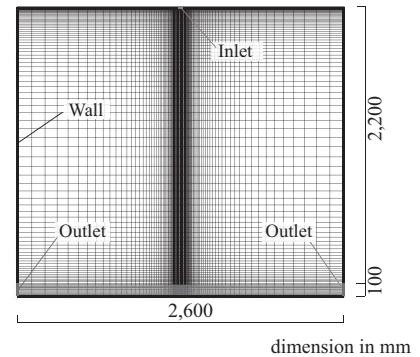


Fig.6 Calculation Domain and Mesh Layout for CFD Analysis



dimension in mm

を流入境界条件として与えた。乱流モデルは標準 k - ϵ モデル (SKE)、SST k - ω モデル (SST)、応力方程式モデル (RSM)^{注4)} の 3 種を用い、解析精度を検証する。壁面境界条件には一般化対数則に基づく壁関数を適用した^{注5)}。解析条件を Table 2 にまとめて示す。なお、RSM でのレイノルズ応力の流入境界条件はノルマルストレスは実験で得られた乱流エネルギー k の 2/3 倍、シアストレスは 0 とした。

3.2 CFD 解析の結果と精度検証

Fig.7 に全測定点での風速測定結果と CFD 解析結果を比較して示す。ここでは実験値・解析値ともに X, Y 成分の平均風速の 2 乗和の平方根を比較している。SKE と SST では概ね実験と解析が近い値となっている。一方 RSM では特に高風速の領域で CFD が風速を過小評価しており、平均二乗誤差も相対的に大きくなっている。

Fig.8 及び Fig.9 に CFD の風速コンターと風速ベクトル分布を示す。ここでは実験と比較するために、CFD 解析結果は実験の測定点に該当する位置の結果のみを抽出してセンター図を作成している。なお、風速ベクトルは実験結果とも重ねて示す。SKE と SST では残風速が 1.0 m/s となるのは吹出口から概ね 1,000 mm の位置となり実験と同様の傾向となつたが、RSM では 800 mm 程度と噴流の到達距離が適切に再現されていない。また、風速ベクトルを見ても SKE と SST では実験と CFD 解析が比較的良く一致するのに対して RSM では明らかに鉛直方向の運動量の拡散が大きく計算される結果となつたが、この原因としてレイノルズ応力の流入境界条件が適切に与えられていないことが可能性として考えられる。次節では流入境界条件をより簡易的なものにするために流入境界面で一様な値を与えた解析を行い解析精度に及ぼす影響を検討する。

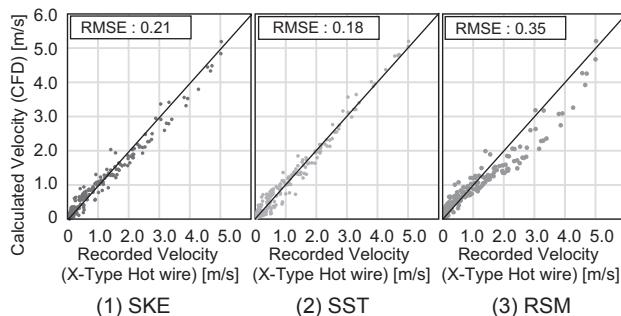


Fig.7 Correlation between Experimental and CFD Results

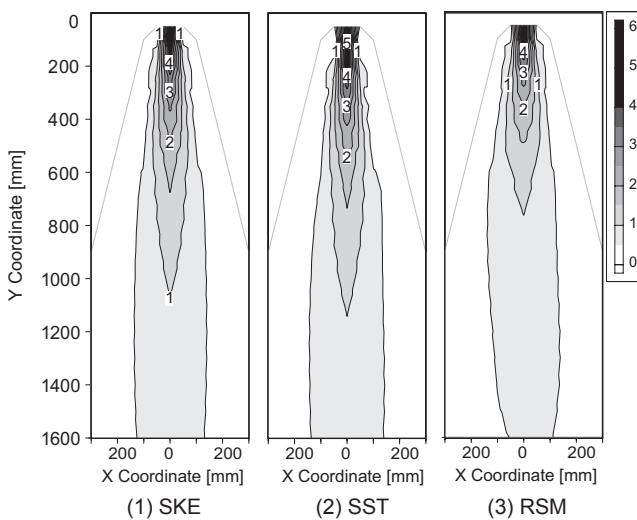


Fig.8 Contour of Velocity Magnitude obtained from CFD

3.3 流入境界条件の分布による影響と簡易化の検討

前節で取得した吹出面の境界条件には分布に大きなばらつきが見られなかった。このため、本節では流入境界条件を簡易化した際の影響を把握することを目的に、前節と同じ計算格子で流入面に一様な境界条件を与えた解析を実施し、前節の解析結果と比較して検証を行う (Fig.10)。ここでは吹出面上 19 点で取得したスカラー風速の算術平均値を鉛直下向きに与え、水平成分の風速は 0 とした。乱流統計量も同様に実験値を算術平均して与えた。Table 3 に与えた流入境界条件の値を示す。乱流モデルは前節で再現精度が概ね良好であった標準 k - ϵ モデルを用い、その他の解析条件は前節と同様とした。Fig.11 に風速センターと風速ベクトル図を示す。なお、ここでは CFD 解析結果の比較を容易にするために、中心断面上の全ての計算格子点の CFD 解析結果に基づいて作成した風速センター図を示しており、風速ベクトルは重ねて表示している。風速センター図の残風速 1.0 m/s と 0.5 m/s の到達距離を比較すると、Y=100 ~ 500 mm までの風速ベクトル分布はほぼ一致し、高風速域では再現精度にほとんど影響は見られない。風速センター図からは流入境界条件を一様に与えた条件で残風速を若干過大評価しているが、分布は概ね一致している。これらの結果から、流入境界に一様な値を与えた場合であっても解析精度には大きな影響はないと考えられる。

4. パーソナル吹出気流の CFD モデリング

前章では幅 2.6 m、奥行き 1.5 m、高さ 2.3 m を解析領域とし、詳細なメッシュ分割を行うことで高い精度でパーソナル吹出気流を再現可能であることを確認した。しかし、執務室全体で解析を行うことを考慮すると、詳細解析の格子分割をそのまま適用することは計算負荷の観点から現実的ではないため、計算負荷を抑えるためにパーソナル吹出口を単純化し格子数を減らしつつ、解析精度の悪化を防ぐためにパーソナル吹出口へモデル化を適用した解析を行う。

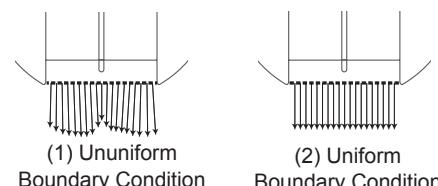


Table 3 Uniform Inlet Boundary Condition

| u [m/s] | 0 |
|--|------|
| v [m/s] | 4.93 |
| w [m/s] | 0 |
| k [m^2/s^2] | 0.90 |
| ϵ [m^2/s^3] | 24.4 |

Fig.10 Simplification of Inlet Boundary Condition

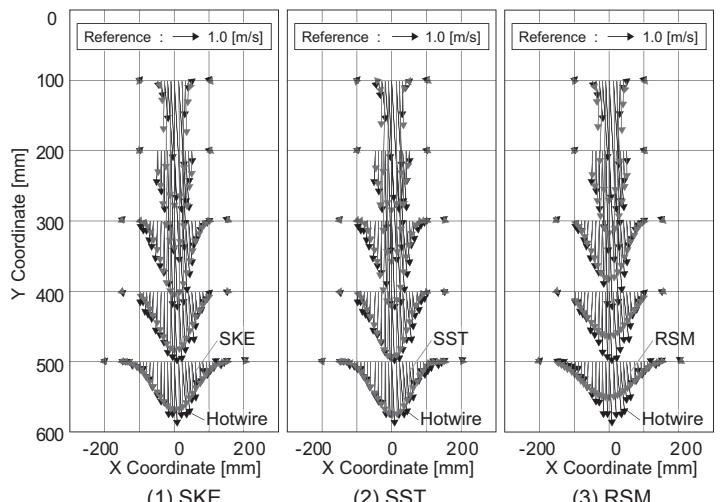
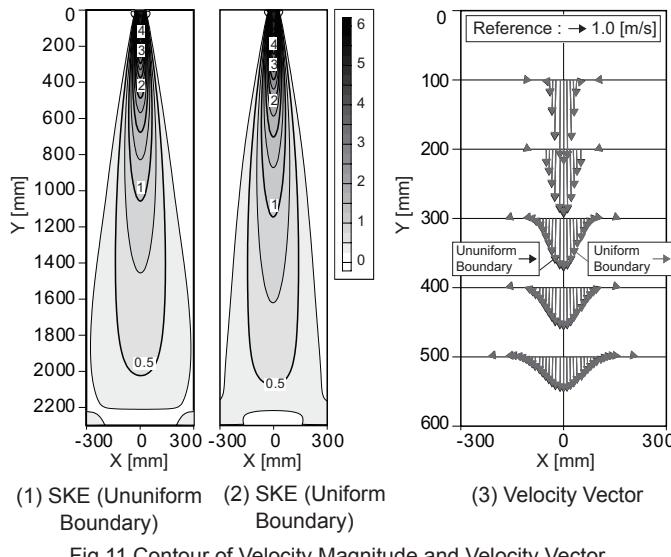


Fig.9 Velocity Vector Plots obtained from CFD



4.1 Momentum 法の適用

本研究では大規模な執務室空間にパーソナル吹出口が多数点在するような解析への適用を可能にするため、パーソナル吹出口を比較的粗い1メッシュで再現するCFDモデリング手法の検討を行う。流入境界面積が実際の吹出面積より大きく設定された場合、吹出風量を本来の値とするためには流入面での風速を実際の値より小さく設定する必要があり、運動量が不足する問題が生じる。Momentum法²⁴⁾は流入境界近傍の計算格子中にソース項で付与することで運動量を担保する方法であり、例えばSrebricら²⁵⁾は一般的によく使用される吹出口についてMomentum法を適用しBox法と比較することで精度検証を行っており、アネモ型やグリル型などに対しては良好な結果を示すと結論付けている。また、近年では深田ら²⁶⁾による角形アネモスタットを対象とした検討も見られ、実用的な精度で解析可能であることが示されている。ここでは詳細解析と同サイズの解析領域を対象に、水平方向の格子サイズを50 mm・100 mmの2条件として解析を行う。なお、高さ方向は50 mm分割で統一した。吹出風向については前章で精度検証を行なった鉛直下向き条件に加え、斜め下向き（吹出風向26°）を加えた2種の条件を対象に解析を行う。斜め吹出条件の流入境界条件については、前章で流入境界を一様に与えた場合においても解析精度の差が見られなかったことから一様に与えることとした。また、Fig.12 (1)に示す通り、ユニットの球状部の傾いた吹出面を流入境界として解析領域を再現することが好ましいが、計算の簡便性と汎用性の観点からFig.12 (2)のように鉛直下向き条件と同じ計算格子と流入境界位置とした。このため、斜め吹出し条件は詳細な実験との比較検証には基づかないが、本研究のモデリング手法を粗い計算格子に適用した際の効果を把握する上で一定の有用性があるとの認識で、鉛直下向き条件と同様の検討を実施した。なお、境界条件は鉛直方向には鉛直下向き吹出の風速と同じ値を、水平方向には風向が26°となるような水平風速を規定した。実際に与えた境界条件の値をTable 4にまとめて示す。Momentum法で与える運動量は鉛直下向き吹出では運動量をY成分のみに対して与え、斜め吹出条件ではX成分も与えている。ここでは単位時間あたりの運動量 $\rho v^2 A$ [N]の不足分を、吹出口直下の第一計算格子にソース項として運動量保存式に付与した。その概要をFig.13に記す。図

中の黒矢印が規定した流入境界条件を示し、網掛け部に付与した運動量の値も併記している。本解析では28 CMHの吹出風量を解析対象としているため詳細解析と吹出風量を一致させることで吹出風速は小さくなり、流入境界の下向き風速は50 mmメッシュ条件で3.14 m/s、100 mmメッシュ条件で0.78 m/sとなる。50 mm、100 mmメッシュ条件を対象としてMomentum法適用の有無、風向条件（鉛直下向き吹出・斜め吹出）の計8条件で解析を行う。乱流モデルには標準k-εモデルを用い、SIMPLE法で定常解析を行った。ここでは前章の詳細な計算格子を用いた解析の結果が概ね真値を再現していると仮定して正解値とみなし、詳細解析結果を用いてMomentum法を適用した場合の解析精度悪化の低減効果を確認する。

4.2 P.V. 法の適用

P.V.法は流入境界条件には流入風量に合わせた風速を与え、解析領域内の特定の格子に風速を規定してその位置で本来持つべき風速を与える方法である。Nielsen²⁷⁾は単純化した吹出口による解析を行な際にP.V.法を用いることで、3次元壁面噴流の速度減衰の予測精度を改善する結果を示しており、近年では近藤ら²⁸⁻²⁹⁾によるシステム天井用の吹出口モデリングや丹原ら³⁰⁾によるライン型ディフューザーのモデリングが報告されている。本研究では前述のMomentum法と

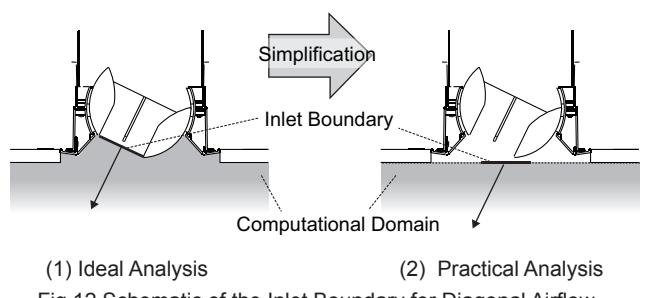


Table 4 CFD Analysis Condition

| Supply Direction | Vertical / Diagonal | | | |
|--|----------------------------------|------------------------------|--------|--------|
| Computational Domain | 2,600 (X) 2,300 (Y) 1,500 (Z) mm | | | |
| CFD code | ANSYS Fluent 17.0 | | | |
| Turbulence Model | Standard k-ε Model | | | |
| Algorithm | SIMPLE | | | |
| Vertical | | | | |
| Inlet | | Detailed | 100 mm | 50mm |
| | u | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | v | 4.93 | 0.78 | 3.14 |
| | w | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | k | 0.90 | 0.90 | 0.90 |
| Boundary Condition | ε | 24.4 | 24.4 | 24.4 |
| | Diagonal | | | |
| | | Detailed | 100 mm | 50mm |
| | u | -2.41 | -0.38 | -1.53 |
| | v | 4.93 | 0.78 | 3.14 |
| outlet | w | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | k | 0.90 | 0.90 | 0.90 |
| | ε | 24.4 | 24.4 | 24.4 |
| | Gauge pressure : 0 Pa | | | |
| | Wall | Based on Generalized Log Law | | |
| Total Number of Cells | | 1,121,868 | 18,630 | 77,221 |
| Discretization Scheme for Advection Term | QUICK | | | |

同様に吹出口が多数設置された大空間への適用を想定した検討のため、簡易なモデルが好ましいとの意図で1格子のみに風速を規定する。規定する風速の値は詳細解析における当該格子中心高さ位置の水平面平均風速とした。解析条件は Momentum 法と同様に 50 mm、100 mm メッシュ、風向 2 条件としたが、それに加えて風速規定高さも 3

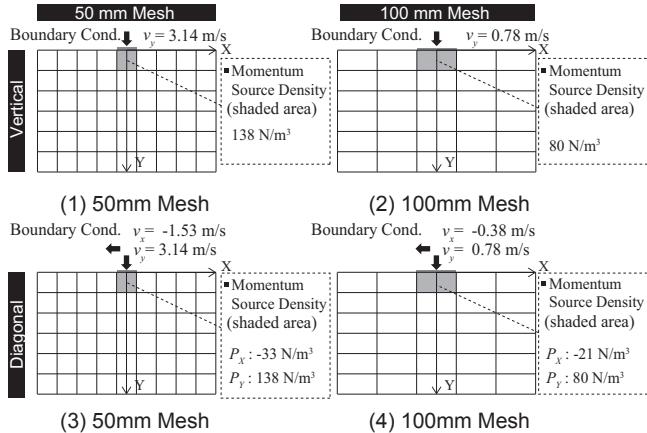


Fig.13 Schematic of Momentum Method

条件 ($Y=125, 225, 325 \text{ mm}$) 設定して計 12 条件で解析を行う。本研究で実施した P.V. 法の概要を Fig.14 に記す。図中の黒矢印が与えた流入境界条件を示しており、網掛け部に規定した風速も併記する。なお、ここでは風速に加えて乱流統計量 k, ε も規定しており、風速同様詳細解析から規定面高さの値を抽出し、その面積加重平均値を与えた。

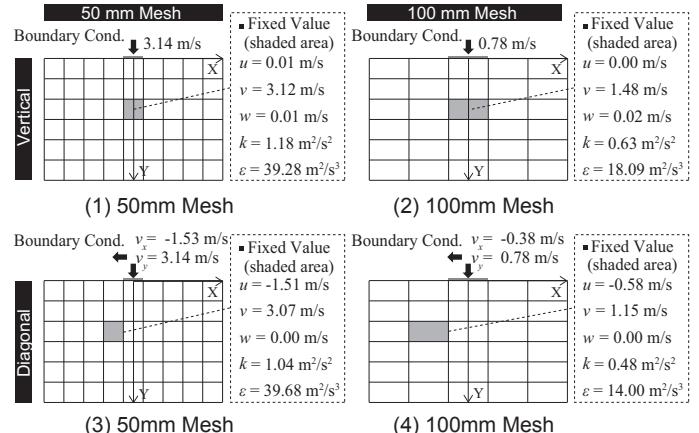


Fig.14 Schematic of P.V. Method

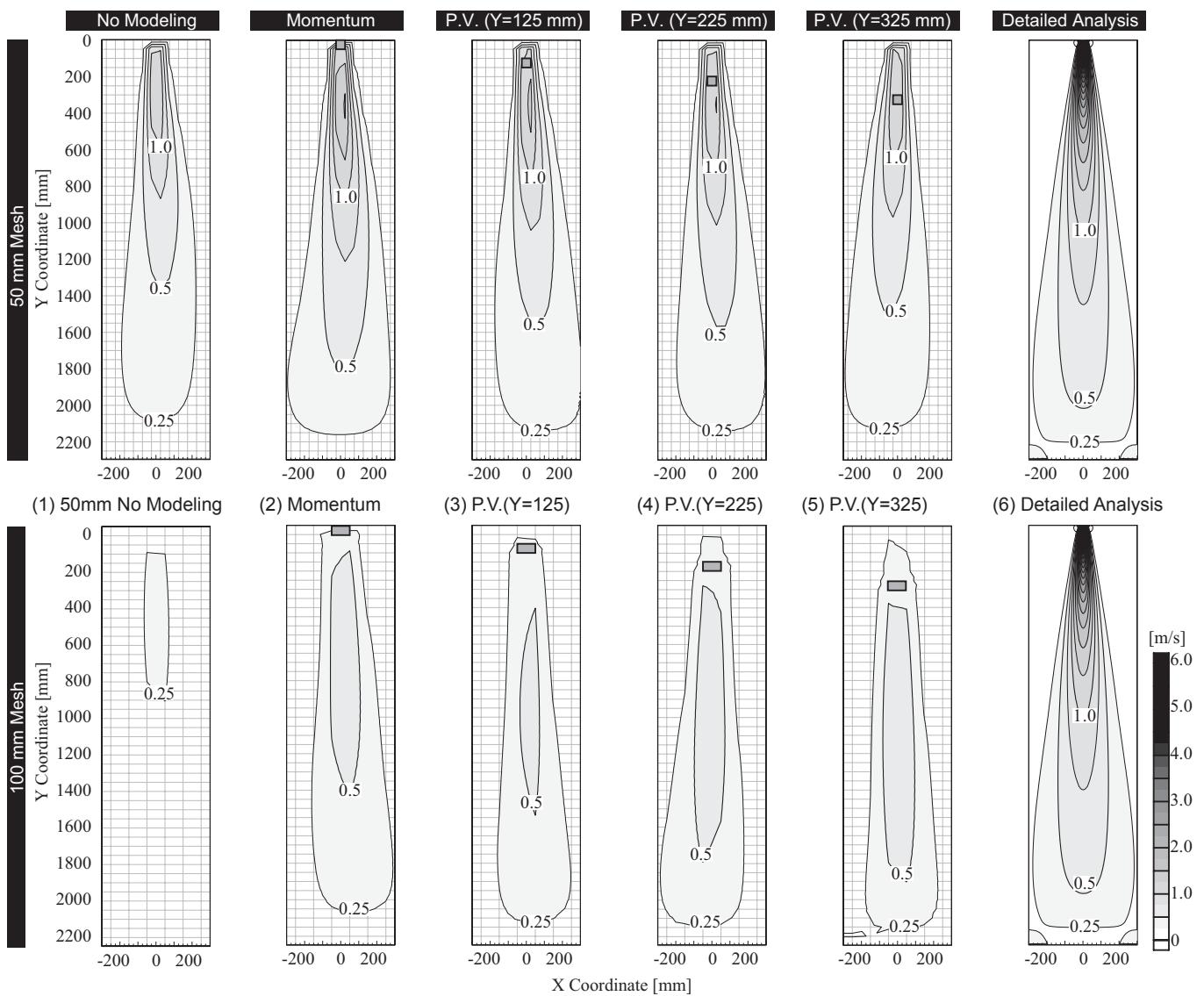


Fig.15 Contour of Velocity Magnitude in the Case of Vertical Supply (Top : 50 mm Mesh, Bottom : 100 mm Mesh)

5. 解析結果

5.1 鉛直下向き吹出条件

鉛直下向き吹出条件を対象として、50 mm、100 mm メッシュでモデリングなし、Momentum 法適用、P.V. 法適用の場合の風速分布を Fig.15 に示す。また、比較対象として第3章の詳細解析 (SKE) の結果を合わせて示す^{注6)}。50 mm メッシュではどの条件においても吹出口近傍において、詳細解析の最大風速を再現することはできないが残風速 0.25 m/s の到達距離は概ね一致している。また、50 mm メッシュではモデリングなしの条件であっても分布傾向には大きな差はない。これは直径 45 mm の円形吹出口を一辺 50 mm の正方形とした際の運動量の差が小さく微修正であったためと考えられる。P.V. 法では風速の規定高さに関わらず残風速 0.5 m/s の位置までの到達距離が短く Momentum 法の方が精度が高い結果となった。

100 mm メッシュのモデリング無しの結果は詳細解析と比較して明らかに解析精度が悪化して実用的ではないと言える。しかし Momentum 法を適用することで残風速 0.25 m/s の到達距離は概ね一致し、運動量を付与することで気流性状が詳細解析に近づくことが示された。この結果から吹出口のメッシュ分割が粗いほどモデリング無し条件と比較して解析精度の悪化が低減され、相対的に Momentum 法の有効性が高まることが確認された。しかし残風速 0.5 m/s の到達距離を見ると 50 mm メッシュ条件と同様に少し短くなっているが再現精度は十分とは言い難い。一方、P.V. 法の結果を見ると Momentum 法と比較して残風速 0.5 m/s の到達距離が伸びており、特に Y=325

mm の条件では風速分布も詳細解析と同様の傾向を示す結果となり再現精度が向上した。

5.2 斜め方向吹出条件

前節同様、斜め方向吹出条件の解析結果を Fig.16 にまとめて示す。50 mm メッシュ条件で Momentum 法または P.V. 法を適用した場合、概して詳細解析と近い風速分布が得られている。100 mm メッシュでは鉛直下向き条件同様モデリング無しではパーソナル気流が全く再現されていない。このメッシュで Momentum 法を適用することで気流の到達距離が伸びる結果となったが、残風速 0.5 m/s の位置の再現精度については低いと言える。P.V. 法については Y=125 mm 条件で同様に精度が悪いが、225 mm の結果を見ると詳細解析の結果とも比較的精度よく一致していることが分かる。P.V. 法の Y=325 mm 条件では、125 mm 条件ほどではないが残風速 0.5 m/s の到達距離が短くなっている。これらの結果から、計算格子幅を 100 mm として斜め方向吹出条件で P.V. 法を適用する場合には鉛直下向き条件と比較して風速を規定する面の位置が重要となり、本研究で対象とした吹出気流については天井から 225 mm の位置の計算格子に規定することで最も詳細解析と近くなっている。

6. まとめ

本研究ではパーソナル空調方式を対象としてパーソナル吹出気流の風速を測定し、その実験結果に基づいて CFD の吹出境界条件モデルを作成して詳細な解析を行い精度検証を行った。また計算負荷

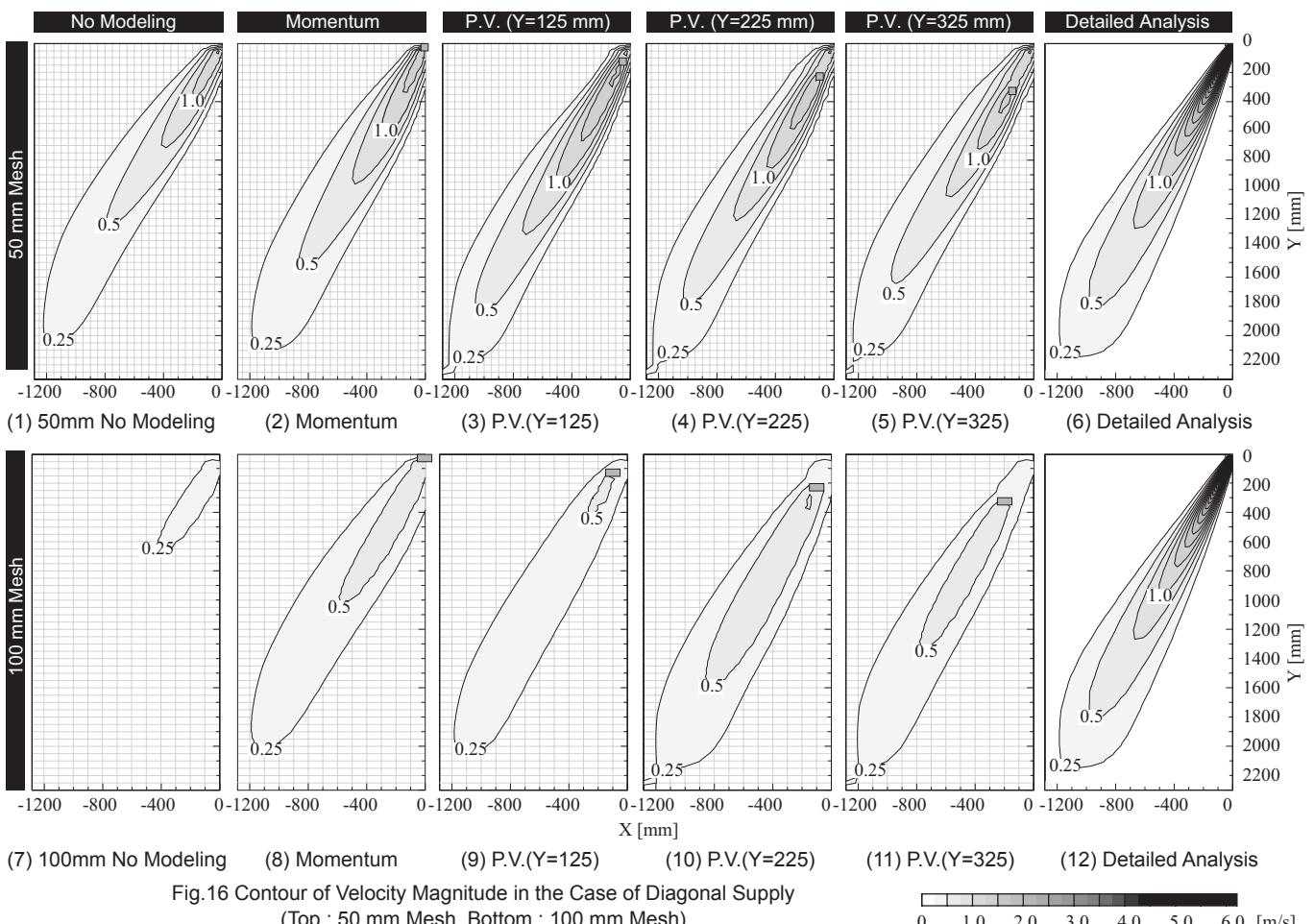
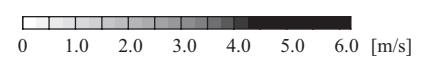


Fig.16 Contour of Velocity Magnitude in the Case of Diagonal Supply
(Top : 50 mm Mesh, Bottom : 100 mm Mesh)



軽減を目的とし、吹出口を単純化することで計算格子数を低減し Momentum 法・P.V. 法を適用した解析を行い、詳細解析と比較することで吹出口のモデル化による効果を確認した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 風速測定実験を再現する CFD 解析において、流入境界条件に実験値を与え、乱流モデルを変更して解析精度の比較を行ったところ、標準 $k-\epsilon$ モデルと SST $k-\omega$ モデルでは風速分布の傾向は変わらず、比較的精度良く実験と一致することを確認した。一方で RSM を用いた解析では運動量の拡散が大きく、気流の到達距離が実験値と比較して過小評価する傾向が確認されたが、乱流モデルそのものではなくレイノルズ応力の境界条件が適切でないことが原因の可能性も考えられる。
- (2) Momentum 法を用いて計算負荷を低減した風速分布の予測において、詳細解析と比較して再現精度は十分とは言い難いが、詳細解析の風速分布に近づく傾向は得られ、特に粗い計算格子の場合の有効性を確認した。
- (3) P.V. 法は Momentum 法と比較して粗い計算格子条件でもパーソナル気流の風速分布の再現精度が高く、特に斜め吹出条件において残風速 0.5m/s の到達距離が詳細解析の再現精度と概ね一致を示すことを確認した。

今後の展望としてはパーソナル吹出口が多数設置されたオフィスを想定し、大空間における解析を行いそれぞれの気流の影響や、アンビエント空調に与える影響などについての検討への適用が考えられる。また本論文では風速のみに着目した結果の比較を行ったが、パーソナル気流によって形成される温熱環境についての評価を行うために温度分布の予測に関する検討も必要と考える。

参考文献

- 1) Li K., Ito H., Nakahara N. : Experimental Analysis in Indoor Thermal Environment in Task and AMBIENT Air-Conditioning System using Stand-Alone Personal Heat Pump Unit, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No. 463, pp.29-37, 1994.9 (In Japanese)
李克欣, 伊藤尚寛, 中原信生:床設置型個別冷暖房ユニットを用いたタスク・アンビエント空調システムの室内温熱環境の実験解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 463 号, pp.29-37, 1994.9
- 2) Zhu J., Tanaka M., Li K., Ito H., Nakahara N. : Studies on the task and ambient air-conditioning system using the fluctuating airflow Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No. 480, pp.47-53, 1996.2 (In Japanese)
祝家燕, 田中雅之, 李克欣, 伊藤尚寛, 中原信生:変動風を用いたタスク・アンビエント空調システムに関する研究 その 1, 日本建築学会計画系論文集, 第 480 号, pp.47-53, 1996.2
- 3) Akimoto T., Bauman F. S., Benton C. C., Arens E. A. : Field Study of A Desktop-Based Task Conditioning System, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No. 490, pp.35-46, 1996.12
- 4) Lee S., Tanabe S., Nobe T. : Thermal Comfort of Task Air Conditioning with Isothermal Air Flow Unit, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.575, pp.75-82, 2004.1 (In Japanese)
李晟在, 田辺新一, 野部達夫:等温気流型ユニットを用いたタスク空調の熱的快適性, 日本建築学会環境系論文集, 第 575 号, pp.75 – 82, 2004.1
- 5) Nakamura Y., Fujikawa A., Ueno O. Mizuno M. : Evaluation of Thermal Comfort of Inhomogeneous Thermal Environment Created by Task-Ambient Air Conditioning System Using Floor Air Outlet, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.92, pp.39-48, 2004.1 (In Japanese)
中村安弘, 藤川あかり, 上野修, 水野稔:床吹出しを利用したタスク・アンビエント空調における不均一温熱環境場の快適性評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.92, pp.39-48, 2004.1
- 6) Akimoto T., Matsuda J., Nishihara N., Tanabe S. : Impacts of Non-Isothermal Task conditioning System with Individual Control on Thermal Comfort and Productivity, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.582, pp.75-82, 2004.8 (In Japanese)
秋元孝之, 松田順平, 西原直枝, 田辺新一:個人制御による非等温タスク空調が熱的快適性・知的生産性に与える影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 582 号, pp.75-82, 2004.8
- 7) Sudo M., Murakami S., Kato S., Song D., Chikamoto T. : Study on the Personal Air-conditioning System Considering Human Thermal Adaptation, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.95, pp.53-61, 2004.10 (In Japanese)
須藤美音, 村上周三, 加藤信介, 宋斗三, 近本智行:人間の熱的適応性を考慮したパーソナル空調システムに関する研究 第 1 報, 空気調和・衛生工学会論文集, No.95, pp.53-61, 2004.10
- 8) T. Akimoto, Lee S., Tanabe S. : Benefits of Non-Isothermal Task Conditioning System in Office, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.596, pp.67-74, 2005.10 (In Japanese)
秋元孝之, 李晟在, 田辺新一:オフィス空間における非等温気流タスク空調方式の有効性, 日本建築学会環境系論文集, 第 596 号, pp.67-74, 2005.10
- 9) Melikov A. K., Cermak R., Major M. : Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices, *Energy and Buildings*, Vol.34, Issue 8, pp.829-836, 2002
- 10) Melikov A. K. : Personalized Ventilation, *Indoor Air*, Vol.14, Issue s7, pp.157-167, 2004
- 11) Li R., Sekhar S.C., Melikov A. K. : Thermal comfort and IAQ assessment of under-floor air distribution system integrated with personalized ventilation in hot and humid climate, *Building and Environment*, Vol.45, pp.1906-1913, 2010
- 12) Yanai T., Akimoto T. : Field Study on Task Air Conditioning System Performance in Office Building, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.699, pp.419-428, 2014.5 (In Japanese)
柳井崇, 秋元孝之:実オフィスにおけるタスク空調システムの性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 699 号, pp.419-428, 2014.5
- 13) Yanai T., Akimoto T. : Investigation of Design COncept and Basic Performance of Task Air Conditioning System for Wide Use, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.700, pp.525-534, 2014.6 (In Japanese)
柳井崇, 秋元孝之:汎用性に配慮したタスク空調システムの設計概要と基本性能の検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 700 号, pp.525-534, 2014.6
- 14) Ukai M., Muramatsu K., Nobe T. : Cooling Effect by Chair-Mounted Isothermal Airflow Generator, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.223, pp.37-44, 2015.10 (In Japanese)
鵜飼真成, 村松一貴, 野部達夫:等温気流発生装置を具備した事務椅子の冷却効果, 空気調和・衛生工学会論文集, No.223, pp.37-44, 2015.10
- 15) Koyama J., Doi Y., Ukai M., Nobe T. : Study on Cool Chair equipped with warming function, *E3S Web of Conferences*, Vol.111 (CLIMA 2019 Congress), 02033, 2019.8
- 16) Melikov A., Ivanova T., Stefanova G. : Seat headrest-incorporated personalized ventilation : Thermal comfort and inhaled air quality, *Building and Environment*, Vol.47, pp.100-108, 2012
- 17) Akimoto T., Odagiri N., Nakashima Y., Miyazaki S., Yanai T., Matsumoto T., Yamashita D., Araki N. : Development of HVAC Diffuser Unit for Task and Ambient Air Conditioning Allowing User to Control Built-in Fan - Evaluation of Air Supply Mode by Subjective Experiment and Field Measurement in Office, *E3S Web of Conferences*, Vol.111 (CLIMA 2019 Congress), 01025, 2019.8
- 18) Kasuya A., Wada K., Nishibata K., Abe Y., Miyazaki S., Nakashima Y. : Performance Evaluation of Personal Air-Conditioning System with Ceiling Radiation, *Proceedings of Annual Meeting of SHASE*, I-47, 2016.9
柏谷敦, 和田一樹, 西端康介, 阿部裕司, 宮崎清二, 中島洋一:放射併用パーソナル空調システムの性能評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, I-47, 2016.9
- 19) Kohata Y., Hayama H., Sekiguchi K. : Study on All Air Radiation Air-Conditioning System of Task Ambient, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.710, pp.351-358, 2015.4 (In Japanese)
木幡悠士, 羽山広文, 関口圭輔:タスク・アンビエント対応の全空気式放射空調方式に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 710 号, pp.351-358, 2015.4
- 20) Chang H., Kato S., Murakami S., Chikamoto T., Kim T. : Study on Hybrid Air-Conditioning based on Natural and Mechanical Ventilation in Office Building Part 1, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.83, pp.81-90, 2001.10 (In Japanese)

- 張賢在, 加藤信介, 村上周三, 近本智行, 金泰延: オフィスにおける自然換気併用ハイブリッド空調に関する研究 第1報, 空気調和・衛生工学会論文集, No.83, pp. 81-90, 2001.10
- 21) Lim E., Sagara K., Yamanaka T., Kotani H., Kuise M., Yamagiwa M., Horikawa S. : Mechanism of Structure of Indoor Air flow and Thermal Environment in Ornce Room with Task-Ambient Air-Conditioning and Natural Ventilation, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.141, pp.19-28, 2008.12 (In Japanese)
- Lim Eunsu, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 杭瀬真知子, 山際将司, 堀川晋: 自然換気併用空調を有するオフィス室内における温熱・空気環境形成メカニズム, 空気調和・衛生工学会論文集, No.141, pp.19-28, 2008.12
- 22) Yang J. H., Kato S. : CFD Analysis on Inhaled Air Quality with Large Size Supply Opening Personal Air-Conditioning System, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.106, pp.21-30, 2006.1 (In Japanese)
- 梁禎訓, 加藤信介: CFD 解析による大開口吹出のパーソナル空調における呼吸空気質の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.106, pp.21-30, 2006.1
- 23) Matsuda M., Kato S., Yang J. H. : CFD Analysis of Examination of Inhaled Air Quality with Wide-Covering Personal Air-conditioning, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.106, pp.31-40, 2006.1 (In Japanese)
- 松田美由紀, 加藤信介, 梁禎訓: CFD 解析によるワイドカバー型パーソナル空調使用時における呼吸空気質に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.106, pp.31-40, 2006.1
- 24) Srebric J., Chen Q. : A Method of Test to Obtain Diffuser Data for CFD Modeling of Room Airflow, *ASHRAE Transactions*, Vol.107, Part 2, pp.108-116, 2001
- 25) Srebric J., Chen Q. : Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers, *HVAC&R Research*, Vol.8, No.3, pp.277-294., 2002
- 26) Fukada K., Sakai K. : Research in Modeling Method for Modularizing CFD Element of Square Ceiling Diffuser Part 1 - Application and Validation of the Momentum Method for Horizontal Cold Jet, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.254, pp.43-50, 2018.5 (In Japanese)
- 深田賢, 酒井孝司: 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
- 27) Neilsen P.V. : Description of Supply Openings in Numerical Models for Air Distribution, *ASHRAE Transactions*, Vol.98, Part1, pp.963-971, 1992
- 28) Kondo Y., Nagasawa Y., Harimoto K., Moriya K. : Modeling of Air Diffuser Installed at Ceiling for CFD Simulation (Part 1) Experiments and Numerical Simulation on Complex Air Diffuser at Isothermal Condition, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AJ)*, No. 557, pp.65-72, 2002.7 (In Japanese)
- 近藤靖史, 長澤康弘, 張本和芳, 守屋賢志: 数値流体解析における空調用天井吹出口のモデリング手法(その1)等温実大実験と数値シミュレーション, 日本建築学会計画系論文集, 第 557 号, pp.65-72, 2002.7
- 29) Kondo Y., Zhao F., Ota K., Nagasawa Y. : P.V. Method as CFD Modeling of System Ceiling Air Diffuser and its Application, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AJ)*, No.667, pp.785-792, 2011.9 (In Japanese)
- 近藤靖史, 趙凡, 太田恭兵, 長澤康弘: システム天井用吹出口の CFD モデリング手法としての P.V. 法とその応用, 日本建築学会環境系論文集, 第 667 卷, pp.785-792, 2011.9
- 30) Tambara C., Kotani H., Yamanaka T., Momoi Y., Sagara K. : CFD Analysis on Airflow in a Room with a Linear Slot Diffuser -Applying the P.V. Method to a Single Linear Slot Diffuser-, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.230, pp.37-42, 2016.5 (In Japanese)
- 丹原千里, 甲谷寿史, 山中俊夫, 桃井良尚, 相良和伸: ライン型ディフューザーを用いる室の CFD 解析手法に関する研究- シングルラインディフューザーにおける PV 法の適用-, 空気調和・衛生工学会論文集, No.230, pp.37-42, 2016.5
- 31) Launder B.E. : Second-moment closure: present... and future?, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.10, Issue 4, pp.282-300, 1989.12
- 32) Daly B. J. and Harlow, F. H. Transport Equation in Turbulence, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No.11, pp.2634-2649, 1970.11
- 33) Lien F. S. and Leschziner M. A. : Assessment of Turbulence-Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure for Flow over a Backward-Facing Step, *Computers & Fluids*, Vol.23, Issue 8, pp.983-1004, 1994.11
- 34) Launder B. E. and Spalding D. B. : The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, Issue 2, pp.269-289, 1974.3
- 注
- 注 1) 本研究では十字状の羽板の影響を確認するために Fig.2 (2) に示す測定点から 45° 傾けた中心線上でも測定を行い、その測定結果を境界条件に用いた CFD 解析も実施したが結果に大きな差異は見られなかつたため、この影響は小さいと判断した。
- 注 2) X 型熱線風速計は Y 軸を X 方向に ± 45° 傾けた向きに 2 本のタングステンワイヤを設置することで X 成分と Y 成分の瞬時流速を計測するが、乱流統計量算出にあたっては Z 成分の瞬時流速が誤差要因になると見え、Z 軸に平行に設置されて同成分の瞬時流速を計測しない I 型熱線風速計を用い、等方性の仮定から以下の式により算出した。
- $$k = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2} \overline{u_{\text{Recorded}}^2} \right) \quad \dots(1)$$
- $$\epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\Lambda} \quad \dots(2)$$
- $$\Lambda = \overline{u_{\text{Recorded}}} \times \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau \quad \dots(3)$$
- ここで、 k は乱流エネルギー [m^2/s^2]、 u_{Recorded} は I 型熱線風速計が output する瞬時風速 [m/s] である。ここでは I 型熱線プローブの瞬時出力が X 成分と Y 成分の合成風速を測定しているとし、それを 3/2 倍することでノルマルストレス 3 成分の和になると仮定した。 ϵ はエネルギー散逸率 [m^2/s^3]、 C_{μ} はモデル定数で 0.09 [-]、 Λ は積分長さスケール [m] である。 $\rho(\tau)$ は熱線風速計による風速の自己相関であり、これを積分することで特徴時間を算出するが、本研究では自己相関が最初に負の値を示す τ の値までを積分範囲とした。
- 注 3) Fig.4 (1) の吹出面風速は鉛直下向き方向から若干傾いてはいたが、Fig.5 に示す中心断面上の風速分布では概ね吹出口中心位置の直下で最大風速が見られたため吹出気流自体は鉛直下向きに吹き出されており、吹出面風速測定時のプローブが傾いていたものと判断した。
- 注 4) 本研究で用いた応力方程式モデルは基本的には Launder³¹⁾ が Basic Model と称したモデリング手法の組み合わせを用いているが、計算の安定性の観点からレイノルズ応力の輸送方程式中の乱流拡散項のみ Daly and Harlow³²⁾ による GGDH (Generalized Gradient Diffusion Hypothesis) ではなく、それを簡易化して等方的な拡散係数を用いる渦粘性モデル³³⁾ を採用している。
- 注 5) 本研究で用いた壁関数は基本的に Launder and Spalding³⁴⁾ の用いた一般化対数則に基づいているが、以下の通り y^* の値が小さい場合には直線速度分布に切り替える手法を適用している。
- $$\frac{U_p \left(C_{\mu}^{1/2} k_p \right)^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad \text{For } y^* = \frac{\left(C_{\mu}^{1/2} k_p \right)^{1/2} y_p}{\nu} > 11.225 \quad (4)$$
- $$\frac{U_p \left(C_{\mu}^{1/2} k_p \right)^{1/2}}{\tau_w / \rho} = y^* \quad \text{For } y^* = \frac{\left(C_{\mu}^{1/2} k_p \right)^{1/2} y_p}{\nu} \leq 11.225 \quad (5)$$
- ここに、 U_p , k , τ_w , ρ , y はそれぞれ流速 [m/s], 乱流エネルギー [m^2/s^2], 壁面剪断応力 [Pa], 流体密度 [kg/m^3], 壁からの距離 [m] を表し、添字 P は壁からの第 1 格子点中心である。また、カルマン定数 κ は 0.4187、モデル定数 E は 9.793 を用いている。
- 注 6) Fig.15 (6), (12), Fig.16 (6), (12) に示す「Detailed Analysis」は第 3 章で精度検証を行った計算格子で標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析結果であり、鉛直下向き条件では流入境界に分布を与えた解析の結果を示している。第 3 章の Fig.8 では実験値との比較のために CFD 解析における実験の測定点に対応する位置の値を抽出し風速センター図を作成し、第 4 章以降では CFD 解析結果の比較のために中心断面上の全ての計算格子点の解析結果に基づいて風速センター図を作成しているが、Fig.8 (1), Fig.11 (1), Fig.15 (6), (12) は全て同じ計算結果に基づいている。

SIMPLIFIED CFD MODELING METHOD AND ACCURACY VERIFICATION OF AIRFLOW FROM CEILING-MOUNTED PERSONALIZED AIR SUPPLY TERMINAL

*Tomohiro KOBAYASHI *1, Hiroki NISHIHORI *2, Noriko UMEMIYA *3
Toshio YAMANAKA *4, Atsushi KASUYA *5, Yusuke KOBAYASHI *5, and Kazuki WADA *5*

*1 Associate Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Eng., Osaka University, Dr.Eng.

*2 Graduate Student, Department of Urban Engineering, Graduate School of Eng., Osaka City University

*3 Professor, Department of Urban Engineering, Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.

*4 Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Eng., Osaka University, Dr.Eng.

*5 TAKENAKA Corporation

Personal air conditioning system is an air distribution method to provide a satisfactory thermal environment. The purpose of this study is to propose a CFD modeling method of the airflow from personal air supply terminal. As the first step, a full-scale experiment was conducted under the isothermal condition, where a personal air supply terminal was installed on the ceiling. The supply airflow rate was regulated at 28 m³/h. In the experiment, 2-D velocity was measured using a X-type hot-wire probe, and turbulent statistics were measured using an I-type hot-wire probe. The experiment was conducted to obtain boundary conditions for CFD and to obtain true value for accuracy verification. Second, CFD analyses using Standard $k-\varepsilon$ Model (SKE), SST $k-\omega$ Model (SST) and Reynolds Stress Model (RSM) were performed, and SKE and SST showed good agreement with experimental result as shown in Fig.9. To perform this Detailed CFD analysis, a large number of grids is required, which leads to large computational load and difficulty in analysing a large space. Therefore, to decrease the number of grids without loosing accuracy, two CFD modeling methods were applied in this paper, i.e., momentum method and P.V. method. The analysis using these two methods was performed, and the accuracy was verified by comparing the result with that of above-mentioned detailed analysis. As the result, in the case of 50mm-mesh, the decrease of the accuracy was not significant because the number of grids is relatively large. On the other hand, in the case of 100mm-mesh, the accuracy was greatly decreased if no modeling method was applied. However, the accuracy was obviously improved by using the momentum method and P.V. method as shown in Fig.12 and 13.

The conclusions obtained in this paper are summarized as follows.

- (1) In the accuracy verification where the experiment was compared with CFD, both SKE and SST showed good agreement with the experimental result regarding average 2-D velocity distribution on the central section. However, RSM overestimated the diffusion of momentum, and consequently showed the tendency to underestimate the reach of air flow compared to the experimental value.
- (2) In the CFD analysis using the Momentum method, the accuracy is not sufficient if compared to the detailed analysis. However, the tendency of the velocity distribution was quite similar to that of the detailed analysis. In the case of a 100-mm mesh, the improvement of accuracy by CFD modeling becomes large if compared to the case of 50-mm mesh.
- (3) It was confirmed that the P.V. method had better accuracy of velocity distribution if compared to the momentum method, and that the reaching distance of 0.5 m/s was well agreed with the detailed analysis in the case of diagonal supply.

As a future prospect, CFD analysis for a large office space where a large number of personal air terminals are installed is to be conducted to study the influence of each air flow of personal airflow and the influence on ambient air flow.