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

P.V. METHOD AS CFD MODELING OF SYSTEM CEILING AIR DIFFUSER AND ITS APPLICATION

近藤 靖史*, 趙 凡**, 太田 恭兵***, 長澤 康弘****

*Yasushi KONDO, Fan ZHAO, Kyohei OTA
and Yasuhiro NAGASAWA*

The previous studies show that the prescribed velocity method (hereafter, P. V. method) is effective to simulate complicated airflow from an air diffuser in CFD. However P.V. method is not applied to system ceiling air diffusers which are popular in office buildings. In this paper, the unstructured fine mesh CFD is conducted to obtain the airflow data of four types of system ceiling diffuser. Then the airflow data is applied in the structured coarse mesh CFD and the short circuit rate and the normalized concentration of occupied zone are examined as ventilation effectiveness. The relationship between shape of diffuser and ventilation effectiveness is discussed on the basis of CFD results.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Prescribed Velocity Method, System Ceiling Air Diffuser,

Short Circuit, Normalized Concentration of Occupied Zone

CFD 解析, P.V.法, システム天井用吹出口, ショートサーキット, 規準化居住域濃度

1. はじめに

室内の気流場を特徴づける最も重要な要因の一つとして、吹出気流性状が挙げられる。特に、省エネルギーと快適性・健康性の維持の観点から、換気・空調用の吹出口からの気流により、効率よく居住域に新鮮外気を供給し、居住域の温熱環境を快適範囲に維持することが重要である。一方、近年のオフィス空間ではデザイン性やコストなどの観点からシステム天井が採用されることが多い。システム天井に用いられる吹出口(以降、システム天井用吹出口と記す)には多くの種類があるにもかかわらず、これらの吹出気流性状についての研究はほとんどなされていない。これに対し、既往の研究^{1)~3)}ではオフィスビル等で用いられる複雑な形状の空調用吹出口を対象に、数値流体解析(Computational Fluid Dynamics、以降 CFD 解析と記す)における吹出口のモデリング手法として P.V. 法(Prescribed Velocity Method)が有効であることが示されている。

本研究では、4 種類のシステム天井用吹出口形状を詳細に非構造格子系 CFD 解析により再現し、吹出気流データを作成する。また、実験を行い、非構造格子系 CFD 解析結果の妥当性を確認する。さらに吹出気流データを P.V.法に適用し、構造格子系 CFD 解析を行う。その際、風速規定面での乱流統計量(k と ε)の規定の必要性を検討した。次に、P.V.法の適用例として空調気流のショートサーキットを検討する。吹出口、照明とスリット型吸込口がひとつのパネルに組み込まれたグリッド型システム天井を対象にして、解析結果

からショートサーキット率^{4),5)}や規準化居住域濃度⁶⁾等を検討する。

2. 非構造格子系 CFD 解析による吹出気流データの作成

2.1 解析概要

解析対象空間を図 1 に示す。解析対象空間は吹出口用チャンバの一部を含めた空間である。解析条件を表 1^{註1)}に示す。天井の中央に 1 つの吹出口を設置した状態を想定し、空間の対称性から空間全体の 1/4 領域(2.8m(X)×2.8m(Y)×2.86m(Z)、吹出口用チャンバを含む)について解析する。既往の研究^{1)~3)}から吹出口チャンバへのダクト接続の位置が吹出気流の分布に影響を与えたと考え、特に吹出気流の非対称性を無くすために、本研究では吹出口用チャンバの側面に一様な風速(吹出風量は 35m³/h)を与えた。乱流モデルは低 Re 数型 k- ε model (Abe-Nagano-Kondo)⁷⁾を用いる。壁面の壁座標 y^+ は概ね 1 以下となるように要素を分割した。また、温度分布が吹出気流に影響のない等温場として解析を行う。

2.2 解析ケース

解析ケースと解析モデルを表 2 に示す。本研究では、角型多層コーン型吹出口(K 社製。以降、アネモ型吹出口と記す)、吹出気流が斜め 4 方向となる吹出口 2 種類(K 社製。以降、4 方向吹出口・350 と 4 方向吹出口・240 と記す)と吹出気流が 2 方向となる吹出口(K 社製。以降、2 方向吹出口と記す)の計 4 種類の吹出口を再現し、解析を行う。表 2 中の矢印に示すように吹出気流が形成されると想定される。

* 東京都市大学工学部 教授・博士(工学)

** 高砂熱学 修士(工学)

(研究当時 東京都市大学大学院 博士前期課程)

*** 東京都市大学大学院 博士後期課程・修士(工学)

**** 鹿児島大学大学院理工学研究科 助教・博士(工学)

Prof., Faculty of Engineering, Tokyo City University, Dr. Eng.

Takasago Thermal Engineering Co., Ltd., M. Eng.

(Former Graduate Student, Tokyo City University)

Graduate Student of Doctor Course, Tokyo City University, M. Eng.

Assistant Prof., Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Dr. Eng.

図1 解析モデル(非構造格子系CFD解析) 単位[mm]

表1 解析条件(非構造格子系CFD解析)

解析領域	5.6m(X)×5.6m(Y)×2.86m(Z)(吹出口用チャンバを含む)、天井高さは2.6m、対称性から全体の1/4領域。
要素分割数	約300万要素
温度条件	なし(等温度場を想定)
移流項スキーム	MUSCL(2次精度)
乱流モデル	低 Reynolds 数型 k-ε model (Abe-Nagano-Kondo)
壁面条件	天井・床: no-slip 条件、壁面(対称面): free-slip 条件
流入条件(1/4領域)	$Q_m=35\text{m}^3/\text{h}$ (吹出口1個の風量の1/4) 吹出口用チャンバの側面に一様に風速を与える。 $k_m=0.12\text{m}^2/\text{s}^2$ 、 $\varepsilon_m=0.08\text{m}^2/\text{s}^3$ 注1)
流出条件(1/4領域)	表面圧力規定(吸込口において0Pa) 天井スリット部分: 0.05m×0.6m(1ヶ所)

表2 解析ケースと解析モデル(非構造格子系CFD解析)

ケース名	(a) アネモ型吹出口	(b) 4方向吹出口-350	(c) 4方向吹出口-240	(d) 2方向吹出口
写真				
CFD解析モデル				
サイズ	350mm(X)×210mm(Y)	350mm(X)×240mm(Y)	240mm(X)×240mm(Y)	240mm(X)×240mm(Y)

表3 吹出口のペーンの角度(天井面に対する角度)と吹出気流の水平方向の幅

	吹出口のペーンの角度(天井面に対する角度)				吹出気流の水平方向の幅
	1枚目(内側)	2枚目	3枚目	4枚目(外側)	
(a) アネモ型吹出口	37°	40°	—	—	≒吹出口の長辺+短辺
(b) 4方向吹出口-350	22°	15°	15°	17°	≒吹出口の長辺÷2
(c) 4方向吹出口-240	34°	34°	27°	27°	吹出気流は隅角部に集中し、幅は狭い。
(d) 2方向吹出口	22°	19°	27°	—	≒吹出口の1辺

2.3 解析結果

非構造格子系CFD解析の結果を図2に示す。ケース(a)、(b)と(d)は天井に沿った水平方向の天井付着噴流が形成されている。アネモ型吹出口では、短辺(Y)より長辺(X)のほうが風速は大きく、吹出風量が多い。4方向吹出口-350では、吹出気流がほぼX=Yラインに沿って形成されている。一方、4方向吹出口-240では、天井付着噴流が形成されておらず、斜め下方に向かう吹出気流が形成されている。2方向吹出口では、吹出口形状からわかるように長辺方向(X)に吹出気流が形成されている。なお、このような気流の形成は可視化実験により確認している。

ケース(a)、(b)、(d)で天井付着噴流が形成され、ケース(c)で形成

されない理由を以下に考察する。吹出気流が天井に付着するかどうかは下記の2点が関わると考えられる。

(1)吹出口のペーンの角度

(2)吹出気流の水平方向の幅

表3に各ケースでの吹出口のペーンの角度と吹出気流の水平方向の幅を示す。アネモ型吹出口では吹出気流の水平方向の幅が広く、ペーンの角度も40°以下であり、天井付着噴流が形成されたと考えられる。2方向吹出口では吹出気流の幅は比較的狭いが、ペーンの角度が小さく、天井付着噴流が形成された。一方、4方向吹出口-240では吹出気流は隅角部に集中し、水平方向の幅が狭く、ペーンの角度も大きめであったため、天井付着噴流は形成されなかったと

図2 非構造格子系CFD解析の結果

図3 実験室概要

図4 測定点(平面図)

表4 測定機器

測定機器	備考
3次元超音波風速計 DT-700	ソニック社製
トラバース装置 MT-3000 TYPE 3S	日東紡音響社製
T型熱電対	江藤電気

考えられる。これに対し、4方向吹出口-350では吹出気流の幅は吹出口長辺の2分の1程度であり、ペーンの角度も最も小さいため、天井付着噴流が形成されたと考えられる。

3. 実験による非構造格子系CFD解析結果の確認

3.1 実験概要

実験室を図3に示す。等温場に設定した実験室を対象として吹出口周辺の気流分布を測定する。代表としてアネモ型吹出口(表2(a))を用いて実験を行う。実験により得られた吹出口周辺の吹出気流データを非構造格子系CFD解析から得られた吹出気流データと比較し、非構造格子系CFD解析結果の妥当性を確認する。

3.2 実験条件

一つのアネモ型吹出口を天井に設置した環境実験室(4.0m×4.0m×2.5m)において、吹出口周辺を測定対象として測定する。測定領域および測定点を図4に示す。天井面下のX-Y断面(図4(a))では、X方向に吹出口中央から400mmまで50mm間隔で計9点と400mmから1000mmまで200mm間隔で計3点を測定する。Y方向も同様である。高さ方向は天井面から下10mmから40mmまでの領域において風速測定を行う。吹出風量は300m³/hに調整する。

3.3 測定機器

測定機器を表4に示す。3次元超音波風速計を使用し、吹出口周辺の気流分布を詳細に測定する。3次元風速計は50Hzで10秒間の計測を行う。本実験ではトラバース装置を用いて測定を行う。また、等温場であることをT型熱電対により吹出温度および室内空気温度数点の測定結果から確認した。

図 5 実験結果と非構造格子系 CFD 解析結果の比較

表 5 解析条件(構造格子系 CFD 解析、等温)

解析領域	5.6m (X)×5.6m (Y)×2.8m (Z) 対称性から全体の 1/4 領域			
要素分割数	70(X)×70(Y)×84(Z)=411600			
温度条件	なし(等温度場を想定)			
乱流モデル	標準 k-ε model			
移流項	QUICK			
吹出モデル	各吹出口を想定し P.V.法に適用			
壁面条件	天井・床：一般化対数則、鉛直面(対称面)：free-slip 条件			
流入条件 (1/4 領域)	(a) アネモ型吹出口	(b) 4 方向吹出口-350	(c) 4 方向吹出口-240	(d) 2 方向吹出口
	$U_{in}=0.61\text{m/s}(Q_{in}=35\text{m}^3/\text{h})$	$U_{in}=0.53\text{m/s}(Q_{in}=35\text{m}^3/\text{h})$	$U_{in}=0.67\text{m/s}(Q_{in}=35\text{m}^3/\text{h})$	$U_{in}=0.67\text{m/s}(Q_{in}=35\text{m}^3/\text{h})$
	$k_{in}=3.8\times10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^2$	$k_{in}=2.8\times10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^2$	$k_{in}=4.5\times10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^2$	$k_{in}=4.5\times10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^2$
	$\varepsilon_{in}=7.6\times10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^3$	$\varepsilon_{in}=4.9\times10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^3$	$\varepsilon_{in}=9.8\times10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^3$	$\varepsilon_{in}=9.8\times10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^3$
流出条件	$U_{out}=0.54\text{m/s}(Q_{out}=35\text{m}^3/\text{h})$			

表 6 P.V. 法の規定面(1/4 領域)

ケース名	(a) アネモ型吹出口	(b) 4 方向吹出口-350	(c) 4 方向吹出口-240	(d) 2 方向吹出口
流入境界面サイズ	105mm(X)×175mm(Y)	120mm(X)×175mm(Y)	120mm(X)×120mm(Y)	120mm(X)×120mm(Y)
仮想ボックスサイズ	130mm(X)×200mm(Y)	145mm(X)×200mm(Y)	150mm(X)×150mm(Y) ^{注3)}	155mm(X)×155mm(Y)

3.4 非構造格子系 CFD 解析

実験では吹出風量は 300m³/h であるため、風量を実験と合わせた条件で非構造格子系 CFD 解析を行い、これと比較した。風量以外の条件は表 1 の解析条件と同じである。また、3 次元超音波風速計で測定した実験結果と比較する非構造格子系 CFD 解析結果は、天井面下 10mm から 40mm の平均した風速である^{注2)}。

3.5 実験結果

実験結果と非構造格子系 CFD 解析結果を図 5 に示す。実験結果と非構造格子系 CFD 解析結果は概ね対応していることが確認できる。しかし、吹出口中心付近では、非構造格子系 CFD 解析結果より実験結果の風速が大きい。この差異の原因として、吹出口上部のチャンパへのダクト接続位置が実験(図 3)と非構造格子系 CFD 解析(図 1)で異なることが挙げられる。また、実験では吹出口の近くに照明があり、これが短辺(Y)方向の天井付着噴流の妨げとなっている可能性がある。

4. 構造格子系 CFD 解析における P.V.法の適用(等温)

4.1 解析概要

P.V.法とは吹出口を囲むように設定した仮想ボックス面に吹出気流を規定して、複雑な吹出気流性状を再現する方法である。P.V.法

図 6 P.V. 法における風速規定面の概要

では、仮想ボックス面のうち吹出気流の風速が大きい領域に卓越する風速成分を与える。図 6 に示すように主流方向風速成分、誘引流成分を規定する。境界面には流入境界条件として、流入風速を一樣に規定する。

4.2 P.V.法における吹出気流の規定方法

P.V.法の規定方法⁹⁾を表 6 と図 7 に示す。なお、吹出気流を規定する位置は吹出気流にかかる浮力よりも吹出気流の慣性力が卓越する位置とすることにより、非等温場における吹出気流データの汎用性が高まる。本研究ではこれを考慮して、表 6 に示すような仮想ボックスのサイズを設定した。各ケースに非構造格子系 CFD 解析から得られた主流方向風速成分を主流方向規定面に規定し、接線方向風速成分を接線方向規定面に規定する。各ケースに非構造格子系

CFD 解析から得られた主流方向風速成分を主流方向規定面に規定し、接線方向風速成分を接線方向規定面に規定する。また、ケース(c)では、吹出気流を再現するために、Z 方向吹出成分を Z 方向規定面に規定する^{注4)}。流入条件は吹出口に規定し、非構造格子系 CFD 解析で得られた誘引流風速成分を誘引流規定面に規定する。ケース(a)、(b)と(d)は天井面から 50mm 下部までの領域に吹出気流を規定し、ケース(c)は天井面から 100mm 下部までの領域に規定した。

4.3 解析結果

解析結果を図 8 に示す。非構造格子系 CFD 解析結果(図 2)と P.V. 法に適用した構造格子系 CFD 解析結果(図 8)は概ね対応していることが確認できる。

4.4 風速規定面での k と ε の規定の必要性

既往研究では、P.V.法を用いる構造格子系 CFD 解析における天井付着噴流の減衰は非構造格子系 CFD 解析より小さく、拡散距離が大きい(図 2 (a)と図 8 (a)を参照)との報告がある⁹⁾。この原因のひとつとして、流入境界から吹き出された気流は規定面の近くで方向や風速が大きく変化し、このため、乱流エネルギー k や渦動粘性係数 ν_t が大きくなることが挙げられる。これを検討するため、非構造格子系 CFD 解析で得られた k と ε を構造格子系 CFD 解析の風速規定面に与えた場合と与えなかった場合を比較する。スカラー風速の解析結果を図 9 に示す。結果からわかるように、風速規定面で k と ε を規定することによる影響はほとんど見られない。図 10 に k と ε の解析結果を比較する。吹出口付近では、 k と ε を与えなかったケースより非構造格子系 CFD のほうが乱流エネルギーや渦動粘性係数が小さい。また、 k と ε を与えたケースは k と ε を与えなかった

ケースを比較すると、風速規定面($X=130\text{mm}$)から 20mm 程度までは、 k と ε を与えたケースの方が非構造格子系 CFD の解析結果に近いが、風速規定面から 20mm 程度以上離れるとほぼ同じ結果となっている^{注5)}。このように、P.V.法を適用する際には、 k と ε を特に規

図 7 P.V. 法における吹出気流規定方法(1/4 領域)

図 8 構造格子系 CFD 解析結果

定しなくても結果には大きな差異が見られず、これらを規定する必要はないと考えられる。

5. 非等温 CFD 解析によるショートサーキットの検討

5.1 ショートサーキット率の概要

ASHRAE STANDARD 62-1989¹⁰⁾において、吹出気流のショートサーキットを『居住域^{注6)}へ到達することなく、吸込口へ吸込まれる気流』と考え、『室内に供給する総給気風量とショートサーキットした風量の割合』をショートサーキット率^{注7)}と呼んでいる。本解析では、このショートサーキット率を用いて評価する。しかし、CFD 解析においてショートサーキットした風量を直接算出することはできない。そこで粒子追跡法^{11),注8)}により、ショートサーキットした粒子を算出し、それによりショートサーキット率を算出した。

5.2 解析概要

解析対象空間はグリッド型システム天井に各吹出口を設置したオフィス空間を想定する(図 11)。ここでは、ショートサーキットによる空調・換気効率の影響に着目しており、机等の仕器がない単純なモデルとした。解析条件を表 7 に示す。図 11 の天井面の一部に照明発熱を規定し、床面に OA 機器や人体からの発熱を一樣に規定し、対流・放射連成解析を行う。解析結果からショートサーキット率を算定する。また、規準化居住域濃度を算出し、ショートサーキット率との関係などについて検討する。

5.3 解析結果

解析結果を図 12 と表 8 に示す。アネモ型吹出口や 4 方向吹出口・350 から流れる天井付着噴流の一部がショートサーキットしている様子が確認できる。表 8 に示すようにショートサーキット率は、アネモ型吹出口では 46.6%、4 方向吹出口・350 では 39.1%、4 方向吹出口・240 では 8.3%、2 方向吹出口では 0.0%である。また、規準化居住域濃度はショートサーキット率が高いほど、高くなる。これは吹出気流がショートサーキットを形成する傾向が強い場合、居住域に清浄な吹出気流が到達する割合が小さくなり、また、居住域で発生した汚染質が効率的に除去されにくくなり、汚染質の居住域濃度が高くなるためである。

6 まとめ

本研究では、システム天井用吹出口のモデリングとしての P.V.法の有効性を検討し、さらに吹出方向と空調気流のショートサーキットの関係について CFD 解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 4 種類のシステム天井用吹出口の形状を詳細に非構造格子系 CFD 解析で再現し、吹出気流データを得た。
- (2) 非構造格子系 CFD 解析結果と実験結果と比較し、非構造格子系 CFD 解析結果の妥当性を確認した。
- (3) 各吹出口を対象に、構造格子系 CFD 解析において P.V.法を適用し、P.V.法の有効性を確認した。
- (4) P.V.法を適用する際には、風速規定面における k と ϵ の規定の有無は結果に大きな影響を与えない。
- (5) グリッド型システム天井に各吹出口を設置したオフィス空間を想定し、ショートサーキット率や規準化居住域濃度を算定した。
- (6) システム天井に用いられる吹出口は、その種類や形状によっては、ショートサーキットが生じ、室内汚染質濃度が上昇する。

図 9 風速規定面での k と ϵ の規定の影響
スカラー風速[m/s] (天井から 10mm 下の水平断面、1/4 領域)

○ 非構造格子系 CFD 解析 □ P.V. 法 (k と ϵ を規定) △ P.V. 法 (k と ϵ を規定しない)
図 10 風速規定面近傍での k と ϵ の分布

表 7 解析条件(構造格子系 CFD 解析、非等温)

解析領域	4.8m(X)×6.0m(Y)×2.7m(Z) 対称性から全体の 1/4 領域
メッシュ数	70(X)×73(Y)×84(Z)=429,240
壁面条件	天井・床：一般化対数則 鉛直面(対称面)：free-slip 条件 温度：各表面の熱収支式より算出 放射率：0.9(天井面、床面) 0.0(鉛直面) ^{注9)}
発熱条件 (1/4 領域)	人体：60W/人×1.44 人=86.4W(人員密度 0.2 人/m ²) PC：100W/台×1.44 台=144W(1 人 1 台) 照明：20W/m ² ×7.2m ² =144W
流入・ 流出条件	表 5 参照
その他	吹出風量は、給気温度 18.0℃、発熱量、設定温度 26.0℃(排気温度)とした場合の熱収支式から算出
規準化居住域 濃度 C_n	居住域で汚染質を一樣発生させて次の式より算出 $C_n = C_{room}/C_e$ (C_{room} ：居住域平均濃度、 C_e ：排気濃度)

図 11 解析モデル

表 8 解析結果(非等温 CFD 解析)

	ショートサーキット率[%]	標準化居住域濃度[-]	居住域平均温度[℃]
(a) アネモ型吹出口	46.6	1.67	29.7
(b) 4 方向吹出口-350	39.1	1.45	27.7
(c) 4 方向吹出口-240	8.3	0.98	24.9
(d) 2 方向吹出口	0.0	0.85	24.8

図 12 吹出気流の流跡線
(非等温 CFD 解析、1/4 領域、室内から室中央を見た状態)

参考文献

- 1) 近藤, 長澤, 張本, 守屋: 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 等温実大実験と数値シミュレーション(その 1) 日本建築学会計画系論文集 No.557, pp.65~72, 2002.7
- 2) 長澤, 近藤, 張本: 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 等温実大実験と数値シミュレーション(その 2) 日本建築学会計画系論文集 No.565, pp.47~54, 2003.3
- 3) 長澤, 近藤: 非構造格子系 CFD による簡易 CFD 用吹出気流モデルリング作成とその適用 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 3) 日本建築学会環境系論文集 No.579, pp.15~20, 2004.5
- 4) 近藤, 小笠原, 太田, 神村, 徐, 吉田: 空調制気口の配置に起因するショートサーキットとミキシングロスに関する CFD 解析 空気調和・衛生工学会論文集 No.126, pp.27~30, 2007.9
- 5) 太田, 近藤, 阿部, 長澤: 空調気流のショートサーキットと室内温熱・空気環境 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.691~692, 2008.9

- 6) 空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S102-2003
- 7) K. Abe, T. Kondo, Y. Nagano: A New Turbulent Model for Predicting Fluid Flow and heat Transfer in Separating and Reattaching Flows-1, Flow Fields Calculations, Int. J. Heat Mass Transfer Vol.37, No.1, pp.1467~1481, 1994
- 8) 趙, 太田, 長澤, 近藤: 空調用吹出口の CFD モデリング手法としての P.V.法の汎用化に関する研究 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.707~708, 2009.8
- 9) 趙, 太田, 長澤, 近藤: 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 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.2507~2510, 2010.9
- 10) 吉野, 内海: ASHRAE 規格 62-1989 “室内空気質を正しく維持するための換気に関する規格”(その 2), 空気調和・衛生工学, 1993.5
- 11) 太田, 近藤: 粒子追跡法による局所換気装置の直接捕集率(DCE)の算定 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1111~1114, 2009.9

注

注1) 乱流統計量の流入境界条件(k_{in} と ϵ_{in})は下記から求めた。

$$k_{in} = U_{in}^2 \div 100$$

$$\epsilon_{in} = 0.09^{3/4} \times k_{in}^{3/2} \div (0.07 \times D)$$

D : 流入境界面の短辺[m]

注2) 3 次元超音波風速計の測定範囲は直径 30mm の球状であるため、これと比較する非構造格子系 CFD 解析結果は以下のようにした。すなわち、天井面下 10mm~40mm の 1mm 間隔の 30 個の解析結果(U, V, W)を平均したものを用いて図 5 を作成した。

注3) 150mm(X)×150mm(Y)は主流方向規定面の仮想ボックスサイズを示す。Z 方向規定面の外側の仮想ボックスサイズは 165mm(X)×165mm(Y)である。

注4) 4 方向吹出口-240 以外のケースについても Z 方向成分の風速を規定した計算を行ったが、結果にはほとんど差異は見られなかった。風速の規定方法はできるだけ簡易であるのが望ましいと考え、4 方向吹出口-240 以外のケースについては Z 方向成分の風速を規定していない結果を本研究では示した。

注5) 非構造格子系 CFD 解析から得られた k と ϵ を与えて P.V.法を適用した結果と非構造格子系 CFD 解析の結果を比較すると差異が見られる。これは主に乱流モデルと境界条件の影響であると考えられる。すなわち、非構造格子系 CFD 解析では低 Re 数型 $k-\epsilon$ model を用い、壁面での気流の境界条件は no-slip としているのに対し、P.V.法では標準 $k-\epsilon$ model を用い、壁面での気流の境界条件は対数則としている。

注6) 本研究では居住域の範囲は床から上 1.8m までとした。

注7) ショートサーキット率の算定方法を補図 1(次頁)に示す。

注8) 粒子追跡法の概要を下記に示す。粒子の速度 u_p は(2)式の粒子の運動方程式から得られる。粒子の運動方程式では流体から受ける力は抗力のみとし、流体は粒子から反作用の力を受けないものとする。また、Stokes 数が十分小さくなるように粒径 D_p を極めて小さく設定し($D_p = 1.0E-20$ m)、粒子は流体の移流にパッシブに挙動するものとした。空気速度 u_f は、CFD 解析で求めた空気速度の平均成分 U_f に変動速度成分 u'_f を加えた速度として(1)式で表される。変動速度成分 u'_f は、平均値が 0 であり、標準偏差 σ が(3)式となるような正規乱数を発生させることにより与えることができる。文献 11 と同様に粒子の発生個数を検討した結果、10,000 個で充分であったため、本研究では発生個数を 10,000 個とした。

$$u_f = U_f + u'_f \quad (1)$$

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi D_p^2 |u_f - u_p| (u_f - u_p) \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (3)$$

注9) 解析モデルでは鉛直面が対称面であり、この面における気流の境界条件は **free-slip** とし、温度の境界条件は断熱(**free-slip**)としている。また、放射熱伝達については完全鏡面反射とし、放射率は 0.0 を与えた。

記号表	
U_{in}	: 流入速度 [m/s]
k_{in}	: 乱流エネルギー k の流入条件 [m ² /s ²]
ε_{in}	: 乱流エネルギーの散逸率 ε の流入条件 [m ² /s ³]
Q_{in}	: 流入風量 [m ³ /h]
C_n	: 規準化居住域濃度 [-]
u_p	: 粒子の速度 [m/s]
u_f	: 空気の流れ速度 [m/s]
U_f	: 空気の流れ速度の平均成分 [m/s]
u'_f	: 空気の流れ速度の変動成分 [m/s]
m_p	: 粒子の質量 [kg]
C_D	: 抵抗係数 [-] ($C_D=1.0$)
D_p	: 粒径 [m]

補図 1 ショートサーキット率の算定方法

(2011年2月9日原稿受理, 2011年6月1日採用決定)