

# 平均拡散場解析による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析

不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究

## STUDY OF VISITATION FREQUENCY AND PURGING FLOW RATE BASED ON AVERAGED CONTAMINANT DISTRIBUTION

### Study on Evaluation of Ventilation Effectiveness of Occupied Space in Room

伊藤一秀\*, 加藤信介\*\*, 村上周三\*\*\*

Kazuhide ITO, Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI

Since ventilation efficiency in a room is not always uniformly distributed, an index for measuring ventilation efficiency at a concerned point or in a concerned domain is required. To evaluate a local flow field and contaminant distribution, Visitation Frequency (VF, : the times for contaminant to return back to the objective domain) and Purging Flow Rate (PFR, : the air flow rate for defining the domain averaged concentration) are introduced. In this research, VF, Tp (the average time of contaminant staying in the objective domain) and PFR of occupied zone and breathing region in a 2D model room are analyzed through the CFD (Computational Fluid Dynamics) based on the standard k- $\epsilon$  model, in which the prediction results is validated by the precise model experiment. Then, the property of VF, Tp and PFR are analyzed with the various of boundary conditions① inlet and outlet position, ② partitions in occupied space, ③ temperature difference, ④ inlet velocity. In the cases where the exhaust opening is set directly under the supply opening, PFR of occupied zone exceeds 1. It means that those ventilation systems distribute fresh air efficiently to the occupied zone.

**Keywords :** Visitation Frequency, Local Purging Flow Rate, Averaged Contaminant Distribution  
訪問回数、局所排出換気量、平均拡散場解析

#### 1. 序

換気計画を行う際には、居住域、人間の呼吸域周辺、発熱機器或いは調理機器周辺といった室内の限られた範囲における換気制御が重要となる。空気調和・衛生工学会で提案されている HASS 102 換気規準<sup>\*)</sup>においても、室内のなかで特に居住域の換気効率 (=排気濃度で無次元化された居住域平均濃度、規準化居住域濃度)を加味した換気設計を行うことを推奨している。本研究では、HASS 102 換気効率、即ち局所領域(居住域等)の平均濃度の構造を Visitation Frequency (訪問回数)<sup>\*)</sup>、局所領域平均滞在時間(Tp)、及び Purging Flow Rate (局所排出換気量)<sup>\*)</sup>の指標を用いて詳細に解析することを目的とする。

局所領域の平均濃度は、領域内で発生する汚染質量と局所領域に流入する換気量で決定される。一般に汚染質発生率は既知として与えられるため、局所領域の平均濃度は流入する換気量を増減することで制御されることとなる。本研究で用いる Purging Flow Rate (局所排出換気量)は、局所領域の平均濃度を制御する換気量を直接定義するものである。

この局所領域の換気性状を評価する際には、室全体の換気システムと問題とする局所領域の換気性状の相対的な関係を理解することが重要となる。Purging Flow Rate は室全体の換気システムから供給さ

れる新鮮換気量に対し局所領域内で汚染質を排出するのに有効となった換気量を示すものであるが、この局所領域で発生した汚染質の排出効率を室全体の換気システムとの関係で評価することは、局所領域の平均濃度の構造(換気の構造)を理解する上で有効となる。本研究では室全体の換気システムと、局所領域で発生、もしくは局所領域に流入した汚染質の排出特性との関係を端的に示す指標として Visitation Frequency を用いて局所領域の換気性状を明らかにする。

筆者らは、2次元流を対象とした精密な室内気流模型実験を行い、様々な境界条件において詳細な平均風速及び各種乱流統計量のデータを提供している<sup>\*)</sup>。本報では、精密模型実験で得られた風速データにより精度を検証した標準 k- $\epsilon$  model を用いて、局所領域平均濃度分布形成に大きな影響を与えると考えられる吹出・吸込口位置や室内障害物等の各種境界条件を変化させた様々なケースの流れ場・拡散場の解析を行い、その結果を基に Visitation Frequency 並びに Purging Flow Rate が、これらの要素によりどのような影響を受けるか、という点に関して系統的に解析した結果を報告する。

#### 2. Visitation Frequency 及び Purging Flow Rate

室内において汚染質の完全混合を仮定した場合、室内に汚染質濃

\* 東京大学大学院  
\*\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博  
\*\*\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博

Graduate student, Univ. of Tokyo  
Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.  
Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

度分布は存在せず、室内各点の汚染質濃度は均一となる。即ち室内で汚染質の完全混合を仮定した場合、平均濃度を基にした換気効率の分布は存在せず、室内で換気の良い場所、悪い場所は存在しないこととなる。しかし、一般的な室内においては吹出噴流が指向性を持つこと、室内障害物が存在すること、更には汚染発生源にばらつきが存在すること等の理由で室内に汚染質濃度分布が生じる。空気齢<sup>9)</sup>、及びSVE's<sup>文10)</sup>はこういった汚染質の不均一濃度分布を基にして室内各点の換気効率を評価している。

本研究では、汚染質の不均一濃度分布の高低のみを評価するのではなく、発生した汚染質が室外に排出されるまで、問題とする局所領域にどれくらい再帰し、また滞在するか等、領域内の汚染質濃度を定める汚染質挙動の構造の解析・評価を行う。そのための指標として Visitation Frequency 及び局所領域平均滞在時間  $T_p$  を導入する。

Visitation Frequency (訪問回数、以降 VF)とは解析対象として局所的に設定された領域内、即ち局所領域内で発生した汚染質が一度局所領域から排出された後、再び領域内に移流されてくる平均回数で定義する。即ち、局所領域内で発生した、もしくは局所領域に流入してきた汚染質の排出のスムーズさを示す重要なパラメータとなる。全発生汚染質の平均 Visitation Frequency に対し、個々の汚染質挙動を示す個別汚染質 Visitation Frequency(個別 VF)を定義することが出来る。本報では平均 Visitation Frequency を VF として表記し個々の汚染質挙動を示す個別 VF とは区別する。以降平均 VF は単に VF と表記する。

VF は慣性のない Particle の挙動、もしくは Passive Contaminant を仮定した平均拡散場解析による流入 flux<sup>注1)</sup>を用いて(1)式のように定義される。

$$VF = 1 + (J_p / M_p) = 1 + (\Delta q_p / q_p) \quad (1)$$

- VF : 平均 Visitation Frequency [-]
- $J_p$  : 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する Particle 数 [個/s]
- $M_p$  : 単位時間当たり対象領域 P に初めて入る、もしくは発生する Particle 数 [個/s]
- $\Delta q_p$  : 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する汚染質量 [流入 flux, kg/s] 但し汚染質は P 内で発生
- $q_p$  : 単位時間当たり対象領域 P 内で発生する汚染質量 [kg/s]

(1)式で表現される VF の定義は、本論文で新たに誘導したものである。局所領域の VF は室内の換気設計上、汚染質の排出のスムーズさを示す重要なパラメータとなる。VF が高い場合、局所領域から排出された汚染質が室内から円滑に排出されず、再度還流する頻度の高いことを示す。逆に VF が低い場合、汚染質の再帰の少ない好ましい設計であることを示す。

局所領域内の汚染質の平均的挙動は VF と共に、一度の訪問時に平均して滞在する時間( $T_p$ )により記述される。局所領域平均滞在時間  $T_p$  を、一度局所領域に流入した汚染質が局所領域から流出するまでの平均的時間として定義する。平均滞在時間  $T_p$  に VF を乗じたものは局所領域での全(合計)平均滞在時間、即ち平均寿命を示す。

局所領域の汚染質平均濃度が同一の値、即ち局所領域の平均寿命が同一となる場合においても、循環流を含む領域では汚染質の再帰が大きくなり(VF 大)、滞在時間が短くなる( $T_p$  小)。また流れが滞留する領域においては汚染質の再帰は少ないが(VF 小)、滞在時間は長くなる( $T_p$  大)。このように VF、 $T_p$  を同時に評価することで、局所領

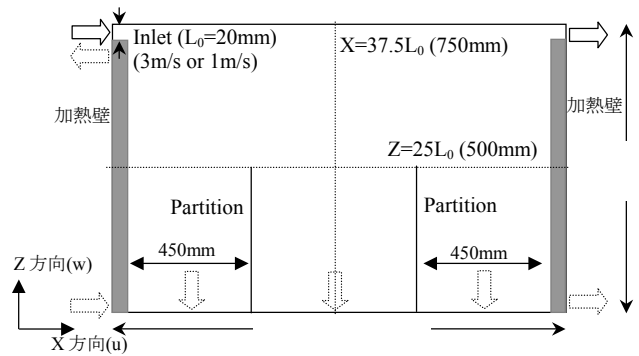


図1 解析対象

表1 k-ε model 計算・解析条件

解析ケース	Case1~10	Case11~16
メッシュ分割	60(x) × 1(y) × 60(z)	
差分スキーム	移流項: Hybrid	
流入境界	$U_{in}=3\text{m/s}$ $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.012)^2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ $l_{in}=1/7 \cdot L_0$ 吹出気流の乱れは実験結果と一致。	$U_{in}=1\text{m/s}$ $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.012)^2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ $l_{in}=1/7 \cdot L_0$ 吹出気流の乱れは実験結果と一致。
流出境界	$U_{out}$ (質量保存による)、 $k_{out}$ , $\epsilon_{out}$ =free slip	
壁面境界	速度は一般化対数側	
その他	流れ場を解析した後、局所領域内で汚染質(passive contaminant)を一様発生させ、平均拡散場の解析を行う。	

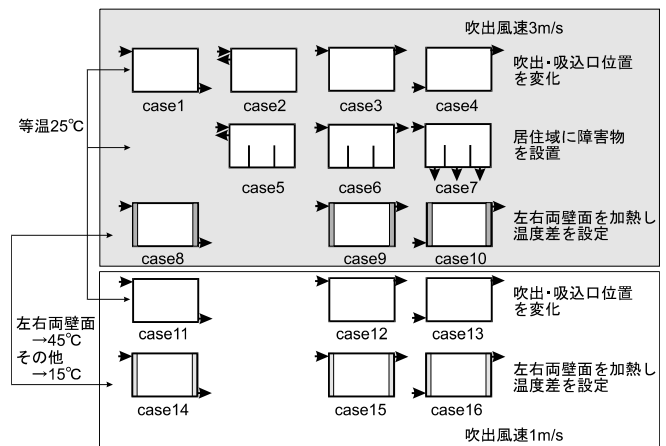
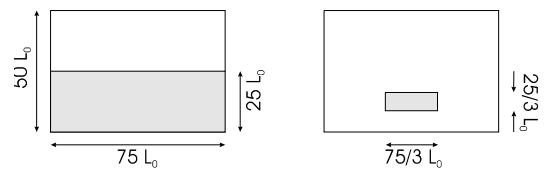


図2 解析ケース<sup>注3)</sup>



(1) Volume1 (居住域) (2) Volume2 (呼吸域)  
 $L_0=0.02\text{m}$  (吹出スロット幅)、Volume2=Volume1 × 1/9

図3 局所領域

域内の平均濃度生成の構造を評価することが可能となる。

Purging Flow Rate(PFR)は局所領域で実質的に汚染質を希釈、排除するのに有効な換気空気の入流量、即ち汚染質の排出効率を示すものであり、局所領域の濃度分布形成特性、汚染質の排出特性を示す VF

と密接な関係を持つ。

PFRは汚染質(Particle)のVF及び局所領域平均滞在時間 $T_p$ 、もしくは局所領域内での汚染質発生量と平均濃度を用いて(2)式のように定義される<sup>註2)</sup>。

$$PFR = V_p / (VF \times T_p) = q_p / C_p \quad (2)$$

- PFR : Purging Flow Rate [m<sup>3</sup>/s]
- $V_p$  : 対象領域Pの体積 [m<sup>3</sup>]
- VF : 汚染質の平均 Visitation Frequency [-]
- $T_p$  : 対象領域Pの平均滞在時間 [sec/1回の滞在]
- $q_p$  : 単位時間当たり対象領域P内で発生する汚染質量[kg/s]
- $C_p$  : 対象領域Pの平均濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

本来、室全体を対象とする場合にPFRと表記し、局所領域を対象とする場合には、局所を意味する"Local"を付けて Local PFR (L-PFR)と表記して区別するべきであるが、本報では局所領域のみを対象とするため、"Local"を省略して全てPFRと表記する。

局所領域の汚染質濃度を定める実質的な換気量を示すPFRは、局所領域空気質の代表的制御変数となる。PFRは局所領域の設定方法及び汚染質発生位置に大きく依存するが、ここでは汚染質が局所領域内で一様発生する場合を主に考察し、汚染質発生位置の違いによるPFR変化の性状に関しては検討を行わない。なお、個別VF、 $T_p$ 、PFRの統計的性状をも詳細に解析するためには汚染質の Point 発生による Particle Tracing も有効となる。これに関しては別報にて検討を行う。

### 3. 規準化居住域濃度 (HASS102 換気効率)と PFR

居住域等の局所領域の平均濃度は室内の空気質制御で重要な指標となる。空気調和・衛生工学会の HASS102 換気規準<sup>文1)</sup>では室内の換気効率(規準化居住域濃度  $C_n$ )を平均排気濃度(瞬時一様拡散濃度)で無次元化された居住域平均濃度として定義している。(2)式に示されるように、吹出口換気量Qで無次元化された居住域PFRの逆数はHASS102換気基準で定義された換気効率と一致する。

$$C_n = C_p / C_e = (C_p \times Q) / q_p = Q / PFR \quad (3)$$

- $C_p$  : 対象領域Pの平均濃度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_e$  : 排気口での平均濃度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_n$  : 規準化居住域濃度 [-]
- Q : 吹出口換気量 [m<sup>3</sup>/s]

(3)式に示されるように、居住域PFRは、HASS102換気基準で定義される換気効率、即ち規準化居住域濃度を実質的に表すパラメータとなっている。

### 4. 平均拡散場解析による VF、PFR 解析

詳細な Visitation Frequency 解析は局所領域を出入りする Particle の Lagrange 追跡が基本となるが、その平均的挙動に主たる興味がある場合は流れ場の平均的性状のみからこれを算出する方法が簡易で便利となる。換気システム等の境界条件を変化させた場合のVF、PFRの系統的解析にはアンサンブル平均に基づいた乱流モデルであるRANSモデル(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)による平均流れ場に基づく平均拡散場解析結果を用いた解析が有効となる<sup>文11)</sup>。本報では精密模型実験結果により精度を検証した標準 k-ε model<sup>文12)</sup>を用いて解析を行った結果を示す。

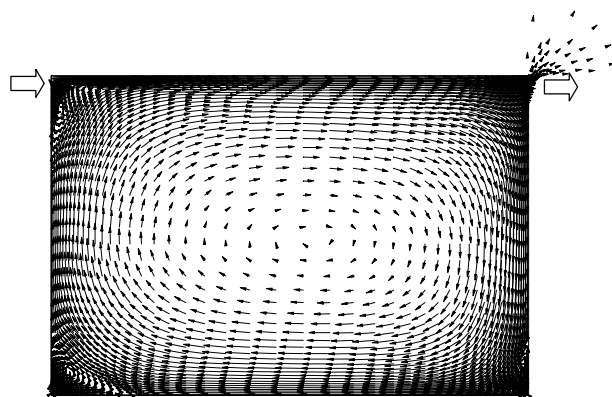
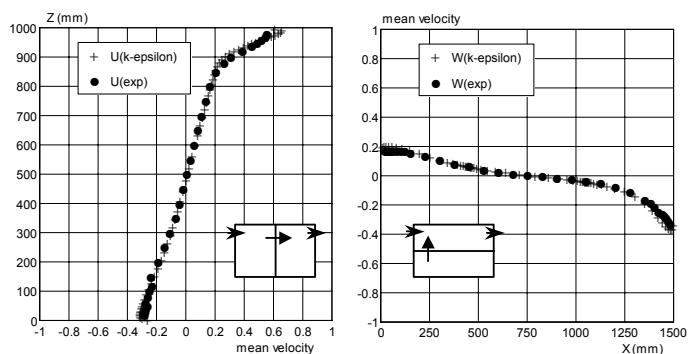
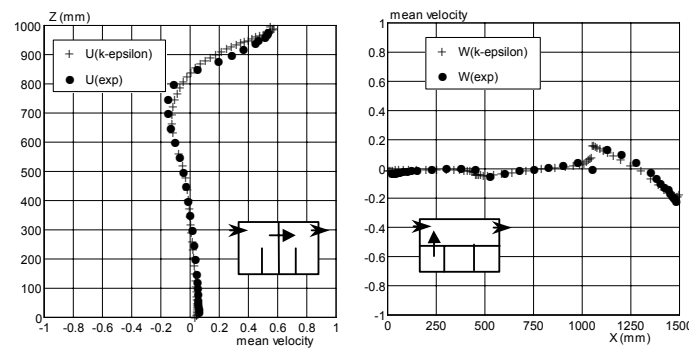


図4 case3 平均風速ベクトル



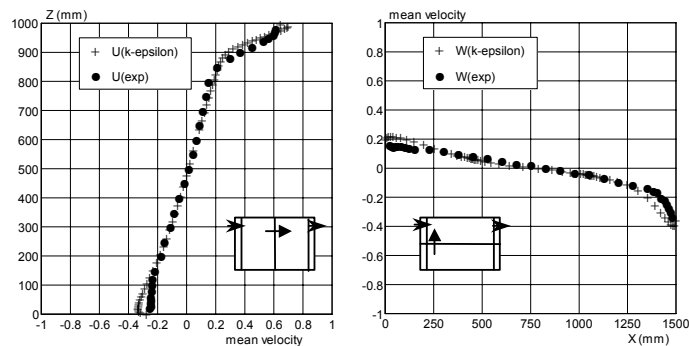
(1) U (x=37.5 L<sub>0</sub>(750mm)位置) (2) W (z=25 L<sub>0</sub>(500mm)位置)

(1) case3



(1) U (x=37.5 L<sub>0</sub>(750mm)位置) (2) W (z=25 L<sub>0</sub>(500mm)位置)

(2) case6



(1) U (x=37.5 L<sub>0</sub>(750mm)位置) (2) W (z=25 L<sub>0</sub>(500mm)位置)

(3) case9

図5 平均風速分布 (値は吹出風速  $U_{in}$  で基準化)

表 2 Volume1 (居住域)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
VF	6.88	5.93	7.95	6.53	1.95
Tp	0.15	0.12	0.17	0.16	0.60
PFR	0.71	1.02	0.56	0.73	0.64
Cp	1.40	0.98	1.80	1.37	1.56

	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
VF	3.10	2.43	7.68	8.70	6.69
Tp	0.76	0.31	0.15	0.16	0.15
PFR	0.32	1.01	0.67	0.54	0.73
Cp	3.09	0.99	1.50	1.85	1.38

	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15
VF	7.33	7.94	6.48	8.16	8.08
Tp	0.16	0.18	0.16	0.13	0.17
PFR	0.63	0.53	0.71	0.72	0.55
Cp	1.58	1.88	1.40	1.39	1.80

	Case16	VF
VF	2.01	: 平均 Visitation Frequency [ - ]
Tp	0.40	: 平均滞在時間 [名目換気時間で基準化]
PFR	0.93	: Purging Flow Rate [吹出口換気量で基準化]
Cp	1.08	: 平均濃度 [瞬時一様拡散濃度で基準化]

表 3 Volume2 (呼吸域)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
VF	3.51	3.39	3.99	3.71	3.42
Tp	0.04	0.04	0.05	0.05	0.09
PFR	0.55	0.68	0.45	0.50	0.27
Cp	1.83	1.46	2.25	1.99	3.76

	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
VF	3.81	3.21	3.94	4.33	3.86
Tp	0.10	0.06	0.04	0.05	0.04
PFR	0.20	0.41	0.50	0.43	0.49
Cp	5.13	2.44	2.00	2.31	2.04

	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15
VF	4.20	4.71	3.93	5.06	6.08
Tp	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03
PFR	0.46	0.42	0.46	0.50	0.47
Cp	2.18	2.40	2.16	2.01	2.15

	Case16	VF
VF	2.75	: 平均 Visitation Frequency [ - ]
Tp	0.05	: 平均滞在時間 [名目換気時間で基準化]
PFR	0.66	: Purging Flow Rate [吹出口換気量で基準化]
Cp	1.52	: 平均濃度 [瞬時一様拡散濃度で基準化]

4-1. 計算概要 解析対象の概略を図 1 に示す。本解析対象は既報<sup>5-8)</sup>で示した精密模型 working cavity (吹出スロット幅を  $L_0=0.02m$  とすると  $75 L_0(x) \times 15 L_0(y) \times 50 L_0(z)$ ) に対応している。精密模型実験では y 方向に関して十分な 2 次元性が得られているため、本解析も 2 次元で行う。計算及び解析条件は表 1 に示す。

流れ場を解析した後、Passive Contaminant を仮定した汚染質を局所領域内 (Volume1 もしくは Volume2、図 3) で一様発生させ平均拡散場解析を行っている。局所領域に対する流入 flux を算出することで VF が求まる。また局所領域平均濃度を算出することで PFR が求まる。

4-2. 解析ケース 解析は図 2 に示すように①吹出口、吸込口位置、②室内障害物、③温度差、④吹出風速、の各パラメータを変化させて全 16 ケース設定している。これら全てのケースは精密模型<sup>5-8)</sup>を用いて気流(温度)測定を行っており、CFD 結果に対し流れ場、温度場の測定値による精度の検討を行っている。

4-3. 局所領域の設定 局所領域は図 3 に示すように居住域を想定した Volume1 (室下半分の領域) と呼吸域を想定した Volume2 (居住域体積の 1/9 領域) の 2 種設定している。

## 5. 解析結果及び考察

5-1. 平均風速分布 図 4 に代表的ケースとして case3 の平均風速ベクトル図を示す。右回りの大きな循環が観察され、cavity 隅角部では大きな循環とは逆向きの 2 次渦が観察される。図は割愛するが、天井面に沿って吹出口を設置した case1, 2 及び case8, 9 では case3 と同様の傾向となる。左右両壁面を加熱し、温度差を設定したケースは、同様の吹出・吸込口位置で等温の場合と比較し、流れ場に大きな差は現れない。床面に沿って吹出口を設置した case4 及び case10 では右回りの大きな循環が観察され、cavity 隅角部では大きな循環とは逆向きの 2 次渦が観察される。また居住域に Partition を設置した case5, 6, 7 では、Partition で囲まれた各領域内が滞留域となる。

図 5 に case3, 6, 9 の精密模型実験<sup>5-8)</sup>及び 2 次元標準 k-ε model 解

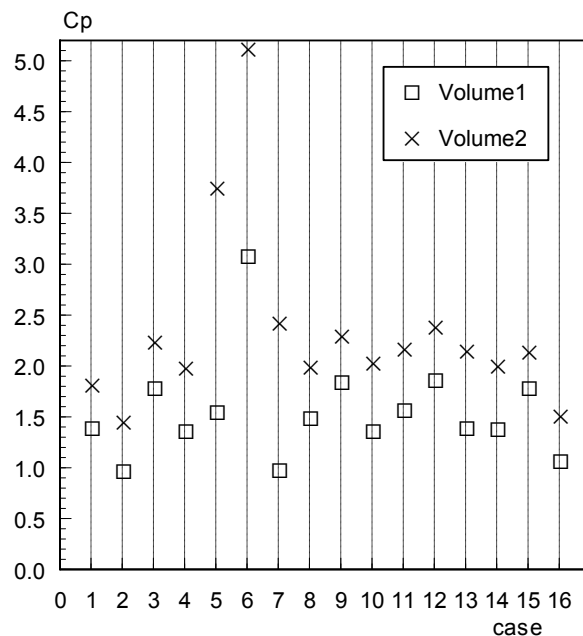


図 6 Cp (局所領域平均濃度) 分布

析結果の平均風速分布の比較を示す。

実験(図中 exp で表示)及び計算(k-epsilon で表示)共に、平均風速分布はどのケースも壁面近傍、室内中央部の全ての領域でかなり良く一致している。特に今回の解析対象においては、天井付近の吹出噴流の再現性も良く、標準 k-ε model が十分な解析精度を持つことが示された。また他のケースの紹介は割愛するが、実験結果と計算結果は十分な精度で一致する事を確認している。

5-2. 平均拡散場解析結果 表 2, 3 に各ケースにおいて Passive Contaminant を仮定した汚染質を対象領域内 (Volume1 もしくは Volume2、図 3) で一様発生させた場合の平均拡散場解析結果を基に、各対象領域の平均濃度及び対象領域に対する汚染質の流入 flux を解析し、VF、PFR を解析した結果を示す。図 6 に Cp (局所領域平均濃度)

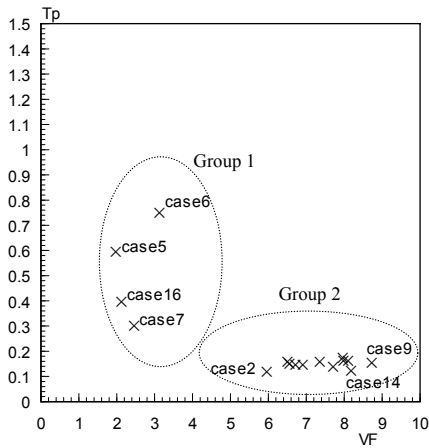


図 7 (1) Volume1 (居住域)

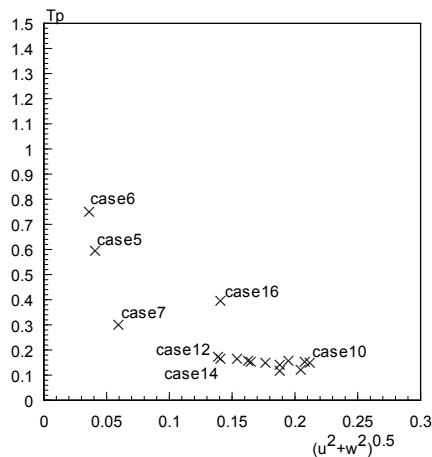


図 8 (1) Volume1 (居住域)

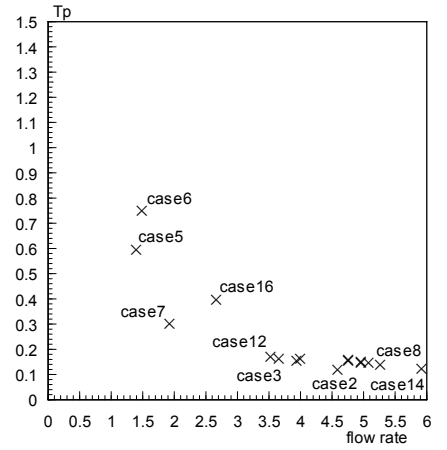


図 9 (1) Volume1 (居住域)

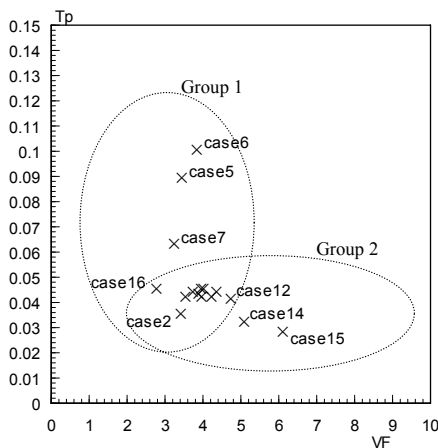


図 7 (2) Volume2 (呼吸域)

図 7 VF-Tp 分布

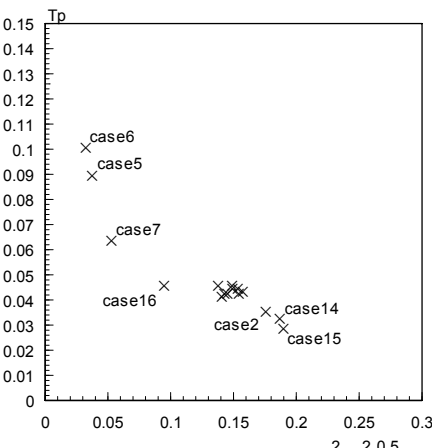


図 8 (2) Volume2 (呼吸域)

図 8 スカラ平均風速<sup>注5)</sup>-Tp 分布

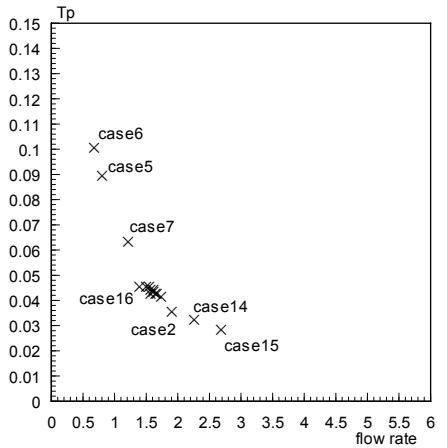


図 9 (2) Volume2 (呼吸域)

図 9 Qp<sup>注4)</sup>-Tp 分布

の分布を示す。また図 7 に、縦軸に平均滞在時間 Tp、横軸に VF をとったグラフ上に各ケースの値をプロットした図を示す。図 7 は局所領域平均濃度の構造を VF 及び Tp の 2 つのパラメータに分離し、その両者の関係を示したものである。図 9 には PFR の分布を示す。Tp は名目換気時間、PFR は吹出口換気量、対象領域平均濃度 Cp は瞬時一様拡散濃度で基準化した値を示す。本解析では吹出風速も変化させているため、case1~10 と case11~case16 では名目換気時間<sup>注4)</sup>及び吹出口換気量が異なる。

**5-2-1. Cp の分布** 図 6 に示されるように、Volume1 (居住域)では居住域に Partition を設置した case6 において Cp が 3.0 を越え、高濃度となっている。case2, 7, 16 は Cp の値がほぼ 1.0 であり、完全混合濃度に近い。その他のケースは Cp が 1.0 から 2.0 の範囲内に分布している。Volume 2 (呼吸域)においても全体的な傾向は Volume1 (居住域)と同様であるが、Cp の値は全体的に高くなっている。Case6 を除き、Cp は 1.5 から 2.5 の範囲内に分布している。

**5-2-2. VF 及び Tp の相関** 図 7(1)に示されるように、Volume1(居住域)では、Tp の値がほぼ同様のグループ(図中 group 1)と VF の値がほぼ同様のグループ(図中 group 2)に分類が可能である。Group 1 に着目すると、例えば case7 に対して case6 の Cp の値が高い原因は、対象領域に流入した汚染質の滞在時間が長い、即ち case7 に対して case6 の Tp が大きいことに起因する。Case6 の Cp を低下させるためには、室全

体の流れ場の傾向はそのまま局所領域内での移流を強くする、即ち吹出風速(換気量)の増大が有効であることが読みとられる。Group 2 に着目すると、例えば case2 に対して case9 の Cp の値が高い原因は、汚染質の再訪問が多い、即ち VF が大きいことに起因する。Case9 の Cp を低下させるためには、吹出風速(換気量)を増加させるよりも吹出・吸込口位置等を変化させて、循環流の生じない室内流れ場を作ることが効果的であると読みとられる。

図 7(2)に示されるように、Volume 2 (呼吸域)においても、Volume1 (居住域)ほど明確では無いが、VF 及び Tp の分布、相関に関しては同様の傾向である。

このように Cp の構造を VF 及び Tp の両者を用いて評価することは、換気設計時、並びに換気性状の改善策を計画する際に大変有効となる。

**5-2-3. Tp の分布** 表 2 及び図 7(1)に示されるように、平均滞在時間 Tp は、Volume1 (居住域)では居住域に Partition を設置した case6 で Tp=0.76 と最も大きい値を示す。吸込口の位置を変え、Partition で囲まれた個々の空間に吸込口を設置した case7 は Tp=0.31 であり、吸込口の位置を変化させることで汚染質の滞在時間は 1/2 以下に改善されている。その他のケースでは Tp=0.2 前後とほぼ同様の値となっている。図 8 に縦軸に平均滞在時間 Tp、横軸に Volume 内のスカラ平均風速<sup>注4)</sup>をとったグラフ上に各ケースの値をプロットした図を示す。

Volume1 及び Volume2 の両者において対象領域内の平均風速と Tp

は反比例の関係にあり、平均風速が弱くなると  $T_p$  が大きくなる傾向がある。居住域に障害物があるケースを除けば領域内での移流(平均風速)の強さは吹出風速に比例し、その移流により汚染質が輸送されている。表3及び図7(2)に示されるように、Volume2(呼吸域)では  $T_p$  の値は Volume1 に比べ 1/5 から 1/10 のオーダーとなっている。これは体積の変化分(=1/9)と対象領域に流入する流量の積にほぼ比例している(図9、対象領域を Volume1 から Volume2 に変化させた場合、各 Volume に対する流入流量  $Q_p$  (注4)は約 1/2 に減少している)。

**5-2-4. VF の分布** 表2及び図7(1)に示されるように、VF は Volume1 (居住域)では  $T_p$  の大きい case5, 6, 7 で小さくなっている。これらのケースは汚染質の再帰は少ないが、対象領域内の流れはゆったりと淀んでいることが原因と考えられる。これは case5, 6, 7 の対象領域内平均風速が小さいことから明らかである(図8)。また天井に沿って吹出口、天井に沿って吸込口を設置した case3, 9, 15 の VF が大きく、この換気システムは温度差、吹出風速に依存せず、比較的汚染質の再帰が多くなっている。表3及び図7(2)に示されるように、Volume2(呼吸域)ではケース間の VF のばらつきは Volume1 に比べ小さくなる傾向があるが、VF のオーダーは変わらない。今回設定した対象領域では、VF は対象領域の体積及び流入流量の変化にほとんど影響を受けていない(図7, 9)。即ち室全体の換気システムにおける吹出口から吸込口に至る一連のフローの中で、Volume1, 2 共に相対的に同じ位置にあると考えられる。

**5-2-5. PFR の分布** 表2, 3及び図10の PFR 分布に示されるように、Volume1 (居住域)では case2, 7, 16 で PFR=1 となっており、Volume1 には吹出口換気量と同量の新鮮空気が供給されている。これは局所領域内での流れ性状を無視し、局所領域平均濃度のみから判断した場合、Volume1 内が完全混合に近い状態であることを示している。case16 は Displacement Ventilation 型の換気システムで床面に沿って吹出口を設置し、かつ左右両壁面を加熱したケースであるが、同様の吹出口位置のケース(case4, 10, 13)と比較し、case16 のみ PFR が大きい値となっている。これは室内床付近に空気温度より低い温度の空気を供給する Displacement Ventilation 型の換気システムが有効に機能することを示している。

また障害物のある case6 の PFR が 0.32 と最も小さな値となっているが、case5 では PFR=0.64 と吸込口位置を変えることにより汚染質排出効率は2倍に改善されており、更に障害物に囲まれた空間の各々に吸込口を設置した case7 では PFR=1.01 と case6 の3倍以上に改善されている。Volume2 では全てのケースで Volume1 の PFR の値を下回った。

## 6. 結論

(1) 局所領域の流れ・濃度分布の構造を評価する指標として Visitation Frequency、Purging Flow Rate を導入し、両者の性状を数値解析による平均拡散場解析を基に解析した。

(2) 精密模型実験結果と標準  $k-\epsilon$  model の解析結果の比較より、標準  $k-\epsilon$  model が充分な解析精度で流れ場を再現することを確認した。

(3) 汚染質を各解析対象領域内(Volume1 もしくは Volume2)で一様発生させた場合に関し、吹出・吸込口位置、障害物、温度差、吹出風速の各条件を変化させ、対応する VF、 $T_p$  及び PFR の変化を検討した。その結果、VF 及び  $T_p$  を同時に評価することで、局所領域平均濃度の構造を容易に評価可能であることを示した。また PFR の解析結果より吹

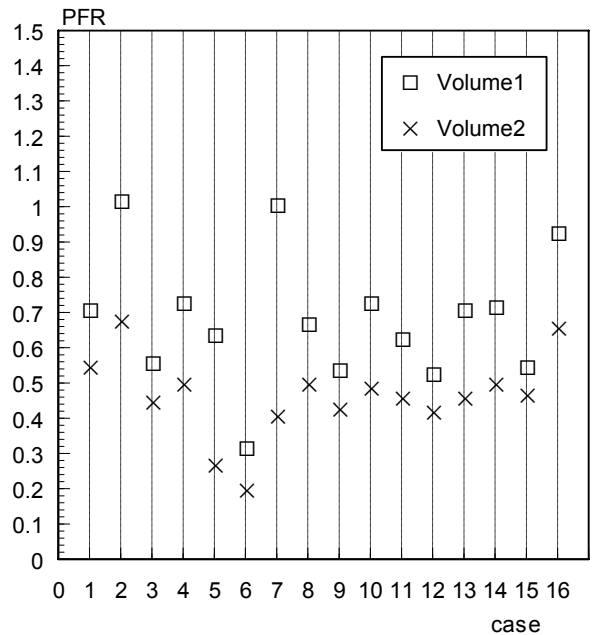


図10 PFR 分布

出口直下に吸込口を設置した case2、及び局所換気を行った case7 で居住域の PFR が 1 を越え、効率的に新鮮空気を室内に分配する換気システムであることが示された。

(4) Displacement Ventilation 型の換気システムは室内床付近に、室内空気温度より低い温度で吹き出す場合の PFR は 1 を越え、効率的な換気が行われることが明らかになった。

## 注

[1] 流入 flux = 移流 flux ( $\sum w \cdot C \cdot A$ ) + 拡散 flux ( $\sum -v_t \cdot \partial C / \partial z \cdot A$ )、値は換気流量で基準化 ( $C$ : 汚染質濃度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $w$ :  $z$  方向風速 [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $A$ : 界面の面積 [ $\text{m}^2$ ],  $v_t$ : 渦動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ])

[2] 局所領域内での汚染質発生率  $q_p$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] 及び局所領域平均濃度  $C_p$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] で定義される PFR を Particle の数[個]で記述すると次式(2.1)となる。

$$\text{PFR} = M_p / C_p \quad (2.1)$$

$M_p$ : 単位時間当たり対象領域 P に始めて入る、又は発生する Particle 数 [個/s]

$C_p$ : 対象領域 P における体積当たりの Particle 数 [個/ $\text{m}^3$ ]

ここで  $C_p$  は次式(2.2)で定義される。

$$C_p = N_p / V_p \quad (2.2)$$

$N_p$ : 対象領域 P 内の全 Particle 数 [個]

$V_p$ : 対象領域 P の容積 [ $\text{m}^3$ ]

更に  $N_p$  を次式(2.3)のように変形する。

$$N_p = (M_p + J_p) \times T_p \quad (2.3)$$

$J_p$ : 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する Particle 数 [個/s]

$T_p$ : Particle の平均滞在時間 [sec]

(2.2)及び(2.3)式より(2.1)式は次式(2.4)の様に書き換えることができる。

$$\text{PFR} = M_p \cdot V_p / (M_p + J_p) \cdot T_p \quad (2.4)$$

ここで Visitation Frequency は次式(2.5)として定義される。

$$\text{VF} = (M_p + J_p) / M_p = 1 + (J_p / M_p) \quad (2.5)$$

VF: Visitation Frequency [-]

以上より

$$\text{PFR} = V_p / (\text{VF} \times T_p) \quad (2.6)$$

- [3] 今回解析対象とした精密模型(1.5m(x)×1.0m(z)、吹出風速 3.0m/s、等温)は、Reynolds 数の一致を条件とした場合に、4.5m(x)×3.0m(z)で吹出風速が 1.0m/s (吹出スロット幅は 0.06m)の空間に対応する。
- [4] 名目換気時間  $\tau_n$ (sec)は排気口における吹出空気の平均寿命であり、室容積  $V(m^3)$ と吹出口換気量  $Q(m^3/s)$ を用いて  $\tau_n=V/Q$ としても定義される。case1～10 における名目換気時間は  $\tau_n=25$ sec、case11～case16 では  $\tau_n=75$ sec。
- [5] スカラ平均風速はスカラ風速  $\sqrt{u^2+w^2}$  の体積平均で定義。値は吹出口のスカラ風速で基準化。また  $Q_p$  は各 Volume に対する流入流量で、各 cell の風速を Volume 境界面に沿って積分して求めた。値は吹出口換気量で基準化。(u : x 方向風速[m/s], w : z 方向風速)
- 合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 5) 精密模型を用いた室内気流測定 —居住域に障害物がある場合の検討— : 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3、pp1-4
- [7] 伊藤一秀、加藤信介、小林 光、鈴木信夫、村上周三 : 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 6) 精密模型を用いた室内気流測定 —居住域に温度差がある場合の検討— : 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3、pp5-8
- [8] 大川 泉、伊藤一秀、加藤信介、村上周三 : 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 14) 精密模型を用いた室内気流測定—居住域に発熱体を設置した場合の検討 : 日本建築学会年次大会、1998.9、D-2、pp 595- 596

#### 参考文献

- [1] HASS102-1997 換気規準・同解説, 空気調和衛生工学 vol. 71, no. 5, pp418- 433, 1997
- [2] Csanady, G. T. : Dispersal by randomly varying currents, J. Fluid Mech. Vol. 132, pp.375- 394, 1983
- [3] Sandberg, M., : Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review. International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo, 1992
- [4] M. Sandberg : Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate IS-RACVE ASHRAE pp-17,1992.7
- [5] 鈴木信夫、伊藤一秀、加藤信介、村上周三、小林 光 : 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 3) Purging Flow Rate 検討用精密模型を用いた室内気流測定 : 空気調和衛生工学学会講演論文集 1996.9、I pp45-48
- [6] 鈴木信夫、伊藤一秀、加藤信介、小林 光、村上周三 : 不完全混
- [9] M. Sandberg and Sjoberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment,18, pp. 181-197, 1983
- [10] Kato, S.,and S. Murakami. : New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94(2): 309- 330, 1988
- [11] Davidson, L. and Olsson, E., : Calculation of age and local purging flow rate in rooms. Building and Environment, 1998, 22, 111-127
- [12] Launder, and Spoldong, : The numerical computation of turbulent flows. Comp. Mech. Eng., 3:269-289, 1974
- [13] 伊藤一秀、加藤信介、村上周三、大川 泉 : 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 11) 平均拡散場解析による VF、PFR の系統的解析 : 日本建築学会関東支部研究報告集 1998.3、