

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

正会員 ○伊藤一秀¹ 正会員 加藤信介²
 同 村上周三³ 同 大川 泉⁴

1. 序

前報^{1,2,3)}までに局所領域の流れ・濃度分布を評価するための指標として Visitation Frequency(VF)を、更に局所領域の換気性状を評価するための指標として Purging Flow Rate (以降 PFR)を導入し、それらの基礎的性質を精密模型実験及び数値解析の手法を用いて検討してきた。本報では前報までに示した実験ケースを対象として、標準 k-ε model による平均拡散場解析結果を基に、VF 及び PFR を系統的に解析した結果を報告する。

2. VF 及び PFR

Visitation Frequency (平均訪問回数)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され、局所領域内で発生した、もしくは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^{注1)}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]
- Δq_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, m³/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 [m³/s]

局所領域内の汚染質の平均的挙動は VF と一度の訪問時に平均して滞在する時間 T_p により記述することが可能である。平均滞在時間 T_p に VF を乗じたものは局所領域での合計平均滞在時間、即ち平均寿命を示す。

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流入量、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。

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

- PFR: Purging Flow Rate [m³/s]
- V_p : 対象領域 P の体積 [m³]

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・拡散項共に Hybrid	
流入境界	$U_{in}=3\text{m/s}$ $K_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.012)^2$ $\varepsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ $l_{in}=1/7 \cdot L_0$ 吹出気流の乱れは実験結果と一致。	$U_{in}=1\text{m/s}$ $K_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.012)^2$ $\varepsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ $l_{in}=1/7 \cdot L_0$ 吹出気流の乱れは実験結果と一致。
流出境界	$U_{out}=(\text{質量保存による}), k_{out}, \varepsilon_{out}=\text{free slip}$	
壁面境界	速度は一般化対数則	
その他	流れ場を解析した後、局所領域内で汚染質 (passive contaminant)を一樣発生させ、平均拡散場の解析を行う。	

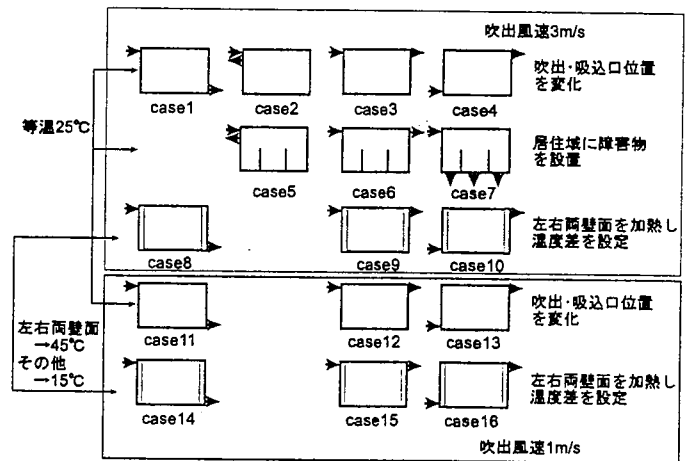
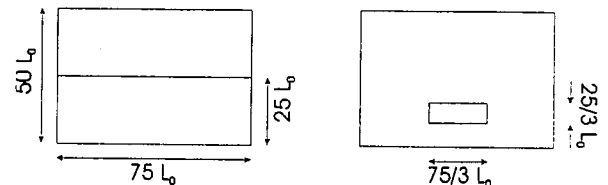


図 1 解析ケース



(1) Volume1 (居住域) (2) Volume2 (呼吸域)

$L_0=0.02\text{m}$ (吹出スロット幅)、 $\text{Volume2}=\text{Volume1} \times 1/9$

図 2 局所領域

- 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 [m³/s]
- C_p : 対象領域 P の平均濃度 [-]

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、汚染質を局所領域内で一様発生させることにより局所領域内における汚染質発生位置に対する依存性を取り除くことが可能となる。また、個別 VF、Tp、PFR の統計的性状をも詳細に解析するためには Point 発生による Particle Tracing も有効となる。

3. 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 RANS モデル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。本報では精密模型実験結果により精度を検証した標準 $k-\epsilon$ model を用いて解析を行っている。

3-1. 計算概要 計算は既報²⁾で示した精密模型 working cavity (吹出スロット幅を $L_0=0.02\text{m}$ とすると $75 L_0(x) \times 15 L_0(y) \times 50 L_0(z)$) を対象とする。模型実験では十分な 2 次元性が得られているため、計算も 2 次元で行う。計算及び解析条件は表 1 参照。

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 2) で一様発生させ平均拡散場解析を行っている。

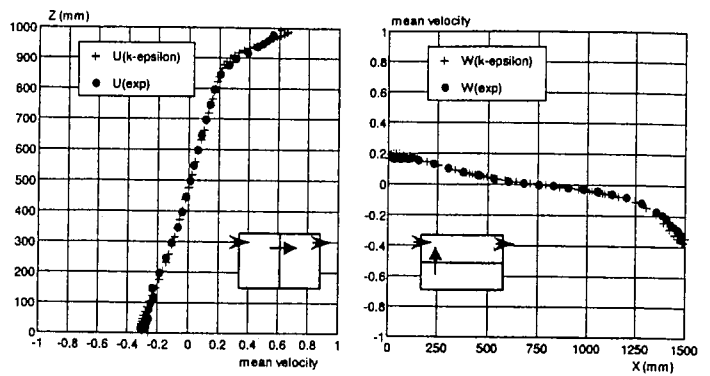
3-2. 解析ケース 解析は図 1 に示すように①吹出口、吸込口位置、②室内障害物、③温度差、④吹出風速、の各パラメータを変化させて全 16 ケース設定している。これらのケースは既報²⁾までに示した精密模型実験で行ったケースに対応している。

3-3. 局所領域の設定 局所領域は図 2 に示すように居住域に対応する Volume1 (室下半分の領域) と呼吸域に対応する Volume2 (居住域体積の 1/9 領域) の 2 種設定した。

4. 解析結果及び考察

4-1. 平均風速分布 図 3 に case3, 6, 9 の精密模型実験及び 2 次元標準 $k-\epsilon$ model 解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 $k-\epsilon$ model が十分な解析精度を持つことが示された。また紙面の都合で他のケースの紹介は割愛するが、実験・計算は十分な精度で一致する事を確認している。

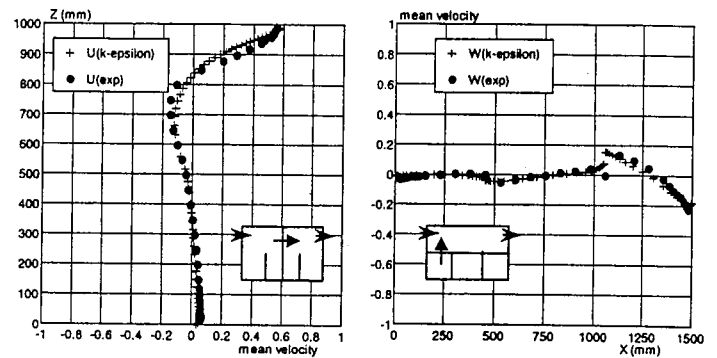
4-2. 平均拡散場解析結果 表 2, 3 に各ケースにおいて Passive Contaminant を仮定した汚染質を対象領域内 (Volume1 もしくは Volume2、図 2) で一様発生させた場合の平均拡散場解析結果を基に、各対象領域の平均濃度及び対象領域に対する汚染質の流入 flux を解析し、VF、PFR を解析した結果を示す。また図 4 に縦軸に平均滞在時間 Tp、横軸に VF をとったグラフ上に各ケースの値をプロットした図



(1) U (x=750mm 位置)

(2) W (z=500mm 位置)

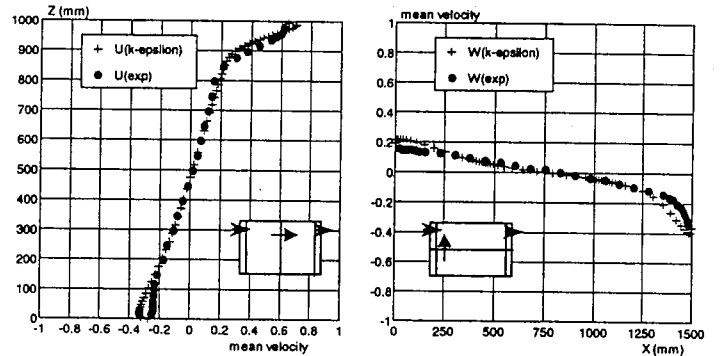
図 3-1 case3



(1) U (x=750mm 位置)

(2) W (z=500mm 位置)

図 3-2 case6



(1) U (x=750mm 位置)

(2) W (z=500mm 位置)

図 3-3 case9

図 3 平均風速分布 (値は吹出風速で基準化)

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~case19 では名目換気時間及び吹出口換気量が異なる。

4-2-1. Tp の分布 表 2 及び図 4-1 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

他のケースでは $T_p=0.2$ 前後とほぼ同様の値となっている。図5に縦軸に平均滞在時間 T_p 、横軸にVolume内のスカラ平均風速^{注3)}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 T_p 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4-2に示されるように、Volume2(呼吸域)では T_p のオーダーがVolume1に比べ1/10となっている。これは体積の変化分(=1/9)に相当しており、且つ対象領域に流入する流量にほぼ比例している(図6、対象領域をVolume1からVolume2に変化させた場合、流入流量は約1/2に減少し、 T_p は1/10に小さくなっている)。

4-2-2. VFの分布 表2及び図4-1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5)。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4-2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6)。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言える。

4-2-3. PFRの分布 表2, 3及び図4-3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等量の新鮮空気が供給されている。これは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に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。

5. 結論

(1) 精密模型実験結果と標準k- ϵ modelの解析結果を比較した結果、今回対象とした流れ場では平均風速分布に関して

表2 Volume1 (居住域)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
VF	6.88	5.93	7.95	6.53	1.95
T_p	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
T_p	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
T_p	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	2.01
T_p	0.40
PFR	0.93
Cp	1.08

VF : 平均 Visitation Frequency [-]
 T_p : 平均滞在時間
 [名目換気時間で基準化]
 PFR : Purging Flow Rate
 [吹出口換気量で基準化]

表3 Volume2 (呼吸域)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
VF	3.51	3.39	3.99	3.71	3.42
T_p	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
T_p	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
T_p	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	2.75
T_p	0.05
PFR	0.66
Cp	1.52

VF : 平均 Visitation Frequency [-]
 T_p : 平均滞在時間
 [名目換気時間で基準化]
 PFR : Purging Flow Rate
 [吹出口換気量で基準化]

標準k- ϵ modelが十分な解析精度で流れ場を再現することを確認した。

(2) Passive Contaminantを仮定した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、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て平均VF、PFRを系統的に解析した結果、吹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供給する換

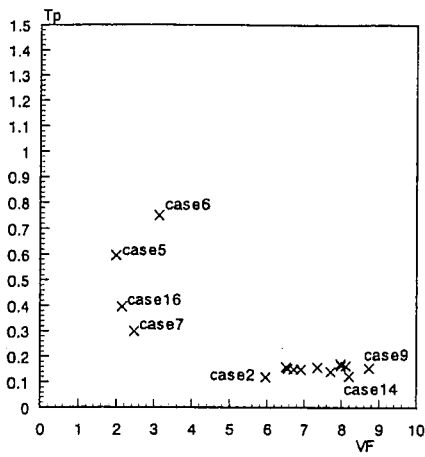


図 4-1 Volume1 (居住域)

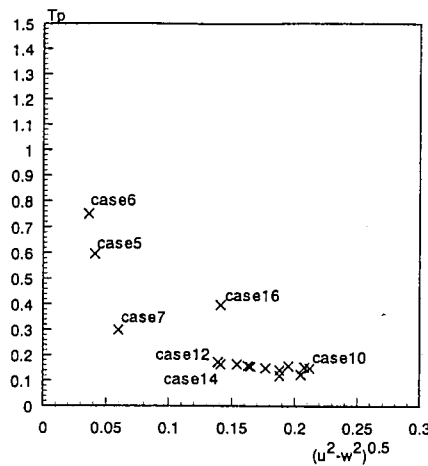


図 5-1 Volume1 (居住域)

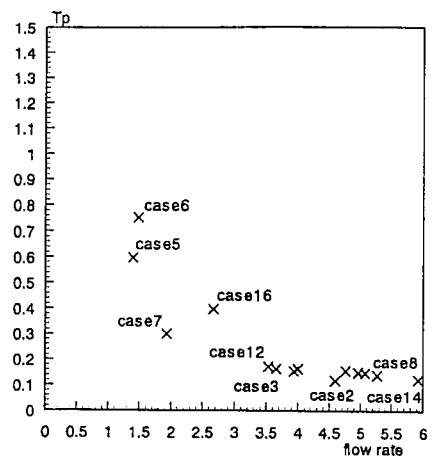


図 6-1 Volume1 (居住域)

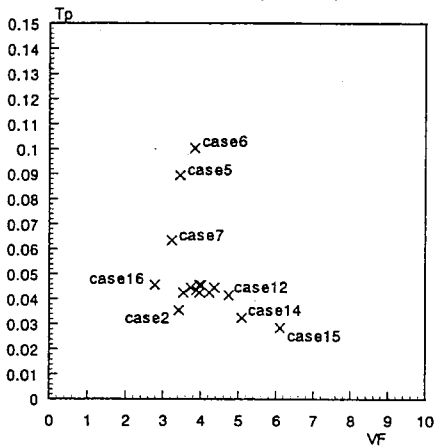


図 4-2 Volume2 (呼吸域)

図 4 VF-Tp

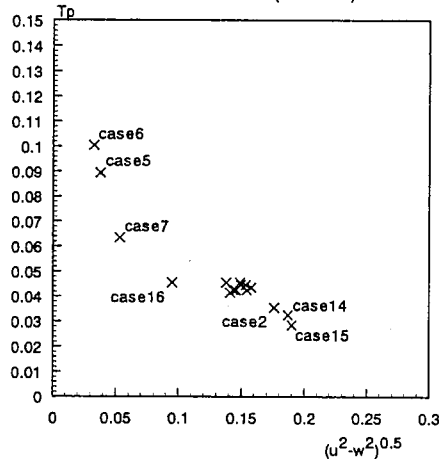


図 5-2 Volume2 (呼吸域)

図 5 平均風速^{注3)}-Tp

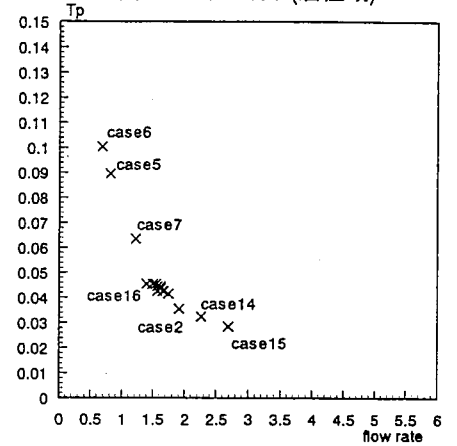


図 6-2 Volume2 (呼吸域)

図 6 Qp^{注3)}-Tp

気システムであることが示された。

(3) また Displacement Ventilation 型の換気システムは室内床付近に、室内空気温より低い温度で吹き出す場合に有効となることが明らかになった。

[注] (1) 定常状態において対象領域 P 内における汚染質発生率 q [m^3/s] 及び流入汚染質 Δq [m^3/s] を考え、更に汚染質発生量 q のうち、対象領域 P 外に排出された後、常に一定確率 α (< 1) で対象領域 P に戻ってくるものと仮定した場合、再帰確率 α 及び VF は(3)、(4)式で示される。詳細は既報文³⁾参照。

$$\alpha = \Delta q / (q + \Delta q) \quad (3)$$

$$VF = (q + \Delta q) / q \quad (4)$$

流入 flux = 移流 flux ($\sum U_3 \cdot C \cdot A$) + 拡散 flux ($\sum -v_i \cdot \partial C / \partial x_i \cdot A$)、値は換気流量で基準化 ($C: \text{kg}/\text{m}^3, U_3: \text{m}/\text{s}, A: \text{m}^2$)

(2) また PFR は吹出口換気量 Q と吸込口濃度 C_{ex} を用いて(5)式の様になる。

$$PFR = q_p / C_p = (C_{ex} / C_p) \times Q \quad (5)$$

即ち室全体で汚染質が瞬時一様拡散している場合、 $C_{ex} = C_p$ となり $PFR = Q$ となる。またピストンフローの場合、同様に室全体で汚染質が瞬時一様拡散している場合 $PFR = 2Q$ である。また PFR を Q で基準化した場合、PFR の値は C_{ex}, C_p のみで表現され、局所領域の換気効率そのものとなる。

(3) 平均風速は平均風速 $\sqrt{u^2 + w^2}$ の体積平均で定義。値は吹出口の平均風速で基準化。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。

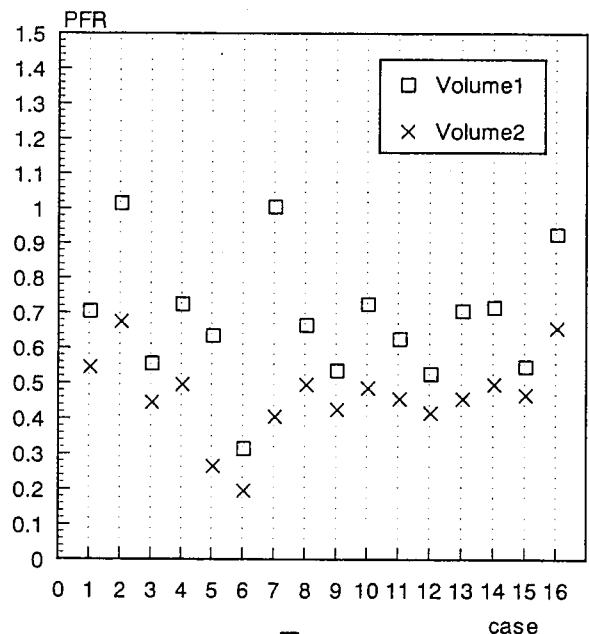


図 7 PFR

[参考文献] (1) 鈴木、伊藤、加藤、小林、村上：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 5)：日本建築学会関東支部研究報告集、1997.3 (2) 伊藤、村上、加藤、小林、富永：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 8)：日本建築学会年次大会、1997.9 (3) 伊藤、村上、加藤：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 9)：空気調和衛生工学会講演論文集、1997.9