

Particle Tracing による VF、PFR の基礎的解析

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

前報及び既報^{1,2,3)}までに Visitation Frequency(VF)及び Purging Flow Rate (以降 PFR)の概念を導入し、その構造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。特に既報²⁾において標準 $k-\epsilon$ model 及び LES(Large Eddy Simulation)を用いて同じ流れ場・汚染質発生位置において VF、PFR を解析した結果、LES に比べ標準 $k-\epsilon$ model による解析結果は VF、PFR 共に若干大きく評価することを報告した^{注1)}。本報では LES による Particle Tracing の手法を用いて、Particle 発生点及び局所領域の位置・体積が変化した際の VF、PFR を詳細に解析することを目的とする。本報においても平均 Visitation Frequency を単に VF と表記し、個々の汚染質(Particle)の挙動を示す個別 Visitation Frequency(個別 VF)とは区別する(前報その 11 参照)。

2. 汚染質発生位置と VF、 T_p

VF 及び PFR の値は汚染質発生位置、発生方法及び局所領域の設定方法に大きく依存する。本報では汚染質発生位置の微妙な相違が VF に与える影響を詳細に検討するためにポイント発生の場合を検討する。そのため前報で検討した $k-\epsilon$ model による解析結果(局所領域内で汚染質一様発生)との比較には注意が必要となる。

解析対象とした空間を図 1、図 3 に示す。図 1 は図 3 に示す cavity を対象として LES により解析した平均風速結果を y 方向に平均して描いた流線図上に Particle 発生点をプロットした図である。また図 2 は各 Particle 発生点周りに設定した局所領域を示す。

VF 及び平均滞在時間 T_p は汚染質発生位置及び局所領域の設定方法に大きく依存する。即ち図 1 の Point.2 で発生した汚染質は発生位置が室内大循環流に含まれるため移流により汚染質が運ばれる傾向が強く、Point.2 を含む周辺の局所領域では VF が大きく、 T_p が小さくなることが予想される。また室中央部の Point.3 で発生した汚染質は発生位置が閉じた流線の中に位置するため、拡散により汚染質が輸送される傾向が強く、Point.3 を含む周辺の局所領域では T_p が大きくなることが予想される。本報では流線図を基に VF、 T_p が顕著に影響を受けるであろうと予想される汚染質発生位置を 5 カ所設定し、詳細な VF、 T_p の解析を行う。特に Point.5 においては汚染質発生位置を吸込口位置から微妙に変化させて Point.5(1), (2), (3)の 3 ケース設定した。

3. Particle Tracing による VF、PFR 解析

PFR は汚染質排出に関する平均的性状を示しており、前報で示したように VF、平均滞在時間 T_p 及び対象領域の体積 V_p によって定義される。しかし PFR の性状に関する詳細な解析には VF、 T_p の平均値ばかりでなく統計的性状も含めた正確な評価が必要となる。

発生汚染質の移動を Lagrange 的に追跡することにより直接

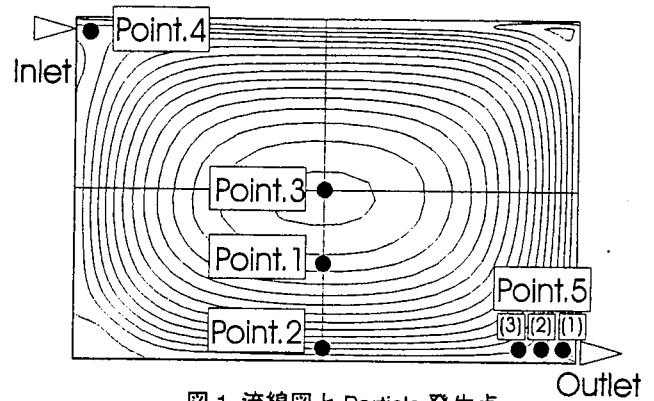


図 1 流線図と Particle 発生点

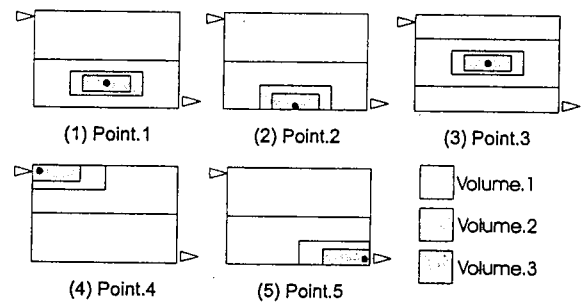


図 2 Particle 発生点及び局所領域の設定

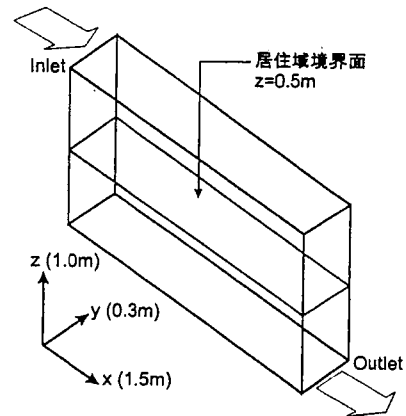


図 3 解析対象 cavity (精密模型 working cavity^{注1)})

表 1 LES 計算及び解析条件

SGS model	Dynamic Smagorinsky Model ^{注4)}
メッシュ分割	48(X)×23(Y)×46(Z)
差分スキーム	空間：2次精度中心差分 時間：3次精度 Runge-Kutta 法
流入境界	吹出口速度分布は実験 ^{注1)} に対応する平均速度分布を与えた。流入の乱れ強さは無視。
壁面境界	Linear - Power Law

VF や T_p の統計的性状を詳細に評価することができる。この解析は瞬時瞬時の流れの変動が再現され、発生 Particle の移動を Lagrange 的に追跡することが可能な LES が有力な候補となる^{注2)}。

3-1. 計算概要 計算は前報と同様に精密模型 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(図 3)。吹出・吸込口は cavity Y 方向と同幅である。解析ケースは天井に沿って吹出口、吹出口対向壁床面に沿って吸込口を設置した精密模型実験 case1^{注1)}で吹出を含む模型内は等温(25°C 一定)である。Subgrid Scale Model には Dynamic Smagorinsky Model^{注4)}を用いる。気流解析の後、図 1 で示した汚染質発生位置の各々より Particle を 6.67×10^{-4} 秒間隔に 1 個の割合で 50 秒間、全 75,000 個発生させ、Particle Tracing を行う。計算概要は表 1 参照。

3-2. Particle Tracing 本報では Particle は Resolvable Scale の移流により輸送されると仮定し、Subgrid Scale の影響は無視して解析を行う^{注3)}。

3-3. Particle 発生位置・局所領域の設定(図 1、2) Point.1 は居住域中心位置で($0.75_m(x), 0.15_m(y), 0.25_m(z)$)、Point.2 は床面上で($0.75_m(x), 0.15_m(y), 0.01_m(z)$)、Point.3 は空間の中心位置で($0.75_m(x), 0.15_m(y), 0.5_m(z)$)である。Point.4 は吹出口位置で($0.0_m(x), 0.15_m(y), 0.99_m(z)$)。また吸込口位置に Point.5(1)を設定($1.5_m(x), 0.15_m(y), 0.01_m(z)$)し、吸込口から離れる方向(x 方向)に向かって 0.015m 間隔で Point.5(2)、Point.5(3)を設定した。

VF 及び PFR の解析対象領域として、各 Particle 発生位置を中心とし図 2 に示す Volume1, 2, 3 の 3 種の局所領域を設定した。室下半分の居住域を Volume1 とした場合、各局所領域の体積は(cavity 全体) : Volume1 : Volume2 : Volume3 = 1 : $1/2$: $1/8$: $1/18$ である(cavity は $1.5_m(x) \times 0.3_m(y) \times 1.0_m(z)$)。

4. 解析結果及び考察

LES の流れ場の再現性に関しては既報^{注3)}参照。精密模型実験結果と LES 解析結果は非常に良く一致した。Particle Tracing は Particle 発生後無次元時間で 14,250 (実時間で 95 秒間、対象領域の名目換気時間 25 秒)行い、全てのケースにおいて 75,000 個中 88%以上の Particle が排出された。

4-1. 個別 Visitation Frequency の分布(図 4) 各 Volume における個別 VF の分布を示す。紙面の都合で各 Particle 発生点における Volume2 及び Point.5(2)、Point.5(3)の個別 VF 分布は割愛する。(図中 Particle 数は全発生数で基準化、VF は平均値、variance は分散、deviation は標準偏差、mode は最頻値、median は中央値を示す。)

各 Particle 発生点における Volume1 に着目すると、Point.1 ~ Point.3 では個別 VF = 2 に mode が存在し、その後、徐々に Particle 数が減衰していく。今回対象とした流れ場では居住域における流れの方向が吸込口とは逆向きで、且つ Volume1 の X 方向の幅が cavity 幅と同一である。個別 VF = 1 に比べ個別 VF = 2 における排出 Particle 数が多くなっているのは、領域内で発生した Particle が最初、室内の大循環流により吸込口とは逆方向に移流されることに起因する。室中央部に位置する Point.3 では全体的に Particle 数のピークが低く、また分布曲線のテールが長くなっている、即ち個別 VF の大きい Particle が多く存在している事を示している。吹出口近傍の Point.4 及び吸込口に最も近い Point.5(1)では個別 VF = 1 に mode が存在し、その後指数関数的に Particle

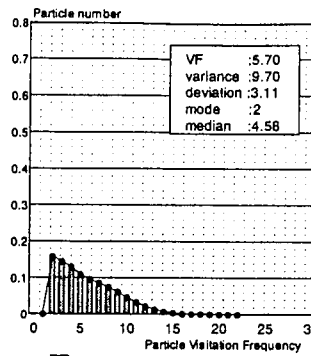


図 4-1 Point.1 - Volume1

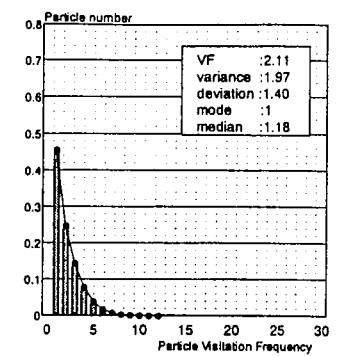


図 4-2 Point.1 - Volume3

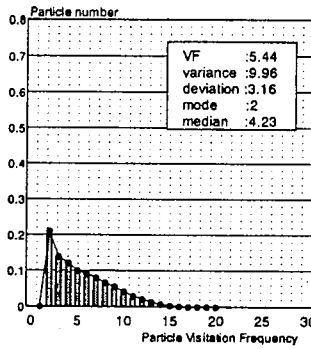


図 4-3 Point.2 - Volume1

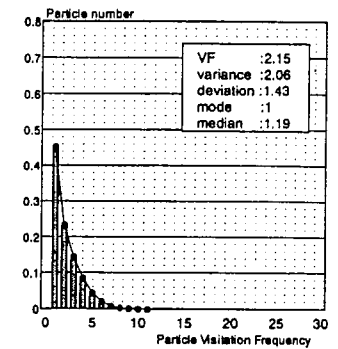


図 4-4 Point.2 - Volume3

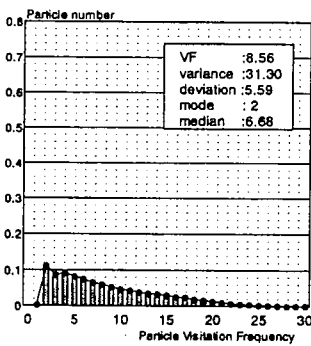


図 4-5 Point.3 - Volume1

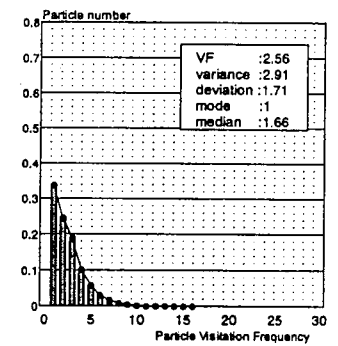


図 4-6 Point.3 - Volume3

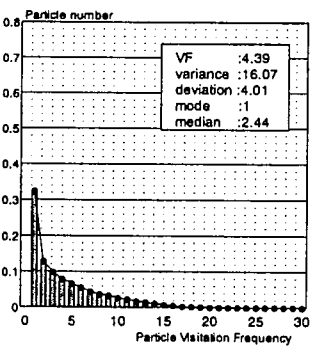


図 4-7 Point.4 - Volume1

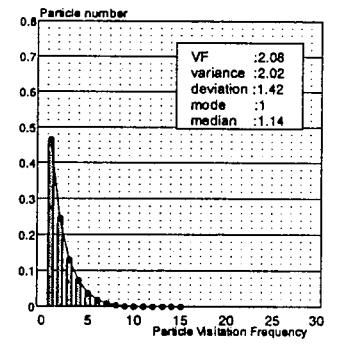


図 4-8 Point.4 - Volume3

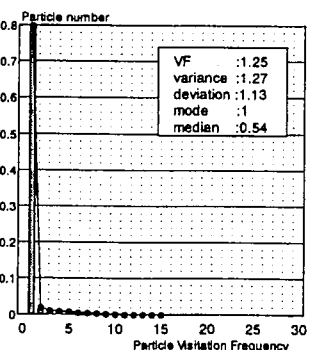


図 4-9 Point.5(1) - Volume1

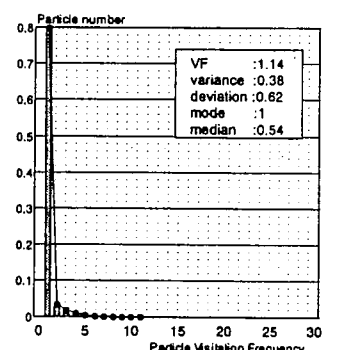


図 4-10 Point.5(1) - Volume3

図 4 個別 Visitation Frequency 分布

数が減衰していく。吸込口に最も近い Point.5(1)では Particle 発生位置が吸込口に向かって閉じた流線上に位置するため、発生後直ちに排出される Particle が全体の 86%以上存在する。また標準偏差に着目すると Point.3 で 5.59 と最も高い値となっており、また median が 6.68 と全ケース中で最も高い値となっていることから個別 VF が広範囲に分布していることが示される。Point.4 では Point.1~3 と比べピーク値(mode の絶対値)が大きくなっているが、標準偏差は 4.01 と Point.1~3 での値に比べ大きく、個別 VF 分布にばらつきがあることを示している。Point.4 で発生した Particle のうち、吹出口から吸込口に向かって閉じた流線上に沿って移流された Particle(全体の 34%)が個別 VF =1 の mode として現れ、その流線からはずれた Particle は Point.5(3)で発生した Particle と同様の挙動を示している。

各 Particle 発生点における Volume3 に着目すると、全てのケースで個別 VF =1 に mode が存在し、その後の減衰も指数関数的である。局所領域を室体積の 1/18 程度(Volume3)まで小さくした場合、個別 VF の分布は吸込口付近で Particle が発生した場合を除き、同じ分布である。これはどのケースにおいても Volume3 内から吸込口に至る流れの道筋が同じである事を示す。また標準偏差に着目すると Volume1 での値と比べ全体的に小さい値となっており、個々の Particle の挙動にばらつきが小さいことを示している。

表 2、3、4 に各ケースの VF(平均 VF)を示す。また図 5-2,3,4 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をプロットした図を示す。Tp は名目換気時間、PFR は吹出口換気量、Cp は瞬時一様拡散濃度で基準化した値を示す。

Volume1 では Point.3 の VF が 8.56 と最も大きくなっている(図 5-2)。これはどの発生点においても Volume1 の体積は同じであるが、Point.3 周りの Volume1 のみ空間の中心に位置し、Particle の出入りをチェックする面が上下 2 面あることに起因する。今回の解析では Point.1 及び Point.2 を比較した場合、移流の効果がより強いと思われた Point.2 で VF が小さくなる結果となった。これは Point.2 が室内を大循環して吸込口に至る(吸込口から排出される)閉じた流線上に位置している為である。また吸込口近傍で Particle 発生位置を微妙に変化させた場合、最も吸込口に近い Point.5(1)で VF はほぼ 1 となり、発生直後にほとんどの Particle が排出されている。しかし、Point.5(2)、Point.5(3)と徐々に吸込口より距離を置くと、VF の値は吹出口近傍の Point.4、及び床面上の Point.2 で Particle を発生させた場合に近づいていく。これは、今回対象とした流れ場が、吹出風速が大きく、噴流が直接対向壁に到達し壁面に沿って室内大循環流を形成しているために、壁面近くに Particle 発生点を設定した場合は 1 本の同じ流線上に位置する為である。

Particle 発生点ごとに VF を考察すると、point.3、point.1、point.2、point.4 の順で VF の値が小さくなっていく。この傾向は Volume2、Volume3 と対象領域の体積を順次小さくした場合もほぼ同様である(図 5-3,5-4)。

4-2. Tp の分布 Volume1 に着目すると、室中央部で流線の閉じた位置に設定した Point.3 での平均滞在時間 Tp が最も

表 2 Volume1

	Point.1	Point.2	Point.3	Point.4
VF	5.70	5.44	8.56	4.39
Tp	0.16	0.09	0.12	0.09
PFR	0.56	0.99	0.48	1.21
Cp	1.79	1.01	2.08	0.83

	Point.5(1)	Point.5(2)	Point.5(3)
VF	1.25	2.16	3.88
Tp	0.03	0.08	0.10
PFR	13.10	2.94	1.35
Cp	0.08	0.34	0.74

表 3 Volume2

	Point.1	Point.2	Point.3	Point.4
VF	3.47	3.23	4.17	2.89
Tp	0.06	0.02	0.06	0.02
PFR	0.54	1.96	0.50	2.24
Cp	1.85	0.51	2.00	0.45

	Point.5(1)	Point.5(2)	Point.5(3)
VF	1.21	1.90	3.33
Tp	0.01	0.01	0.01
PFR	15.5	5.96	2.74
Cp	0.06	0.17	0.36

表 4 Volume3

	Point.1	Point.2	Point.3	Point.4
VF	2.11	2.15	2.56	2.08
Tp	0.03	0.01	0.03	0.01
PFR	0.75	3.12	0.69	3.03
Cp	1.33	0.32	1.45	0.33

	Point.5(1)	Point.5(2)	Point.5(3)
VF	1.14	1.53	2.34
Tp	0.003	0.01	0.01
PFR	13.59	6.84	3.90
Cp	0.07	0.15	0.26

VF : 平均 Visitation Frequency [-]
 Tp : 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]
 Cp : 平均濃度 [瞬時一様拡散濃度で基準化]

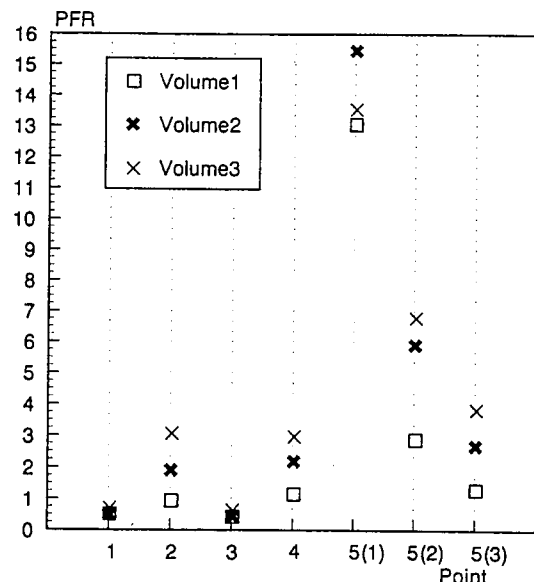


図 5-1 PFR

大きくなると予想されたが、今回の解析では Point.1 での T_p が 0.16 と最も大きく評価された(表 2)。また壁面近傍に設定した Point.2、Point.4、Point.5(3)における T_p は 0.10 前後の値となり、室内大循環流の移流の影響を強く受けていること示す。Volume2 では、Point.1 及び Point.3 の T_p が 0.06 前後と比較的大きくなっているが、その他の Particle 発生点では T_p は 0.02 前後の同一の値を示している。Volume3 では、 T_p の絶対値は小さくなっているが、分布の傾向は Volume2 と同様である。

また、 T_p に関しても VF と同様に平均 T_p のみならず個別 T_p の統計的性状を詳細に解析する必要があるが、本報では紙面の都合で割愛する。

4-3. PFR の分布(図 5-1) Volume1 では、吸込口に最も近い Point5(1)での PFR が 13 を越え、発生 Particle が拡散する前に効率的に排出されている。また吸込口近くに設定した Point5(2)、Point5(3)、及び Point.4 で PFR が 1 を越えている。即ちこれらの位置で発生した Particle は吹出口換気量と同等、もしくはそれ以上の新鮮空気量で希釈され、吸込口から排出されることを示す。室の中心部に近い Point.1 及び Point.3 ではどちらも PFR は 0.5 前後の値となった。

Volume2、Volume3 と対象領域の体積を順次小さくしていくと全てのケースで PFR が高くなる傾向が見られる。これは今回の解析対象では体積の減少分に対し、 $(VF \times T_p)$ の減少分がより大きい事を示している。

5. 結論

(1) Particle Tracing の手法を用い、様々な Particle 発生点、局所領域で直接 Visitation Frequency を解析した結果、全ての Volume(1~3)において室中央部の Point.3 で発生した Particle の平均再帰率 VF、及びその標準偏差が共に最も大きな値となり、Particle の挙動にばらつきが大きいことが示された。

(2) T_p に着目した場合、室内大循環流に含まれる吹出口・壁面近傍の Point.2、Point.4、Point.5(1)~(3)で Particle が発生した場合に T_p が小さく、また流線の閉じた室中央部の Point.1、Point.3 で発生した場合に T_p が大きく評価された。

(3) 局所領域の体積を順次小さくした場合、PFR の値は順次大きくなる傾向が現れ、また吹出口・吸込口及び壁面近傍で Particle が発生した場合に PFR が 1 を大きく越える領域が存在した。

[注] (1) LES では汚染質(particle)を瞬時に一度だけ発生、k- ϵ model では passive contaminant を定常発生させている(発生位置は両者とも居住域中心位置でポイント発生)。そのため、VF、PFR 解析結果には、流れ場の解析精度の他、汚染質発生方法の違いによる誤差が含まれる。(2) 最も正確に VF の評価を行うためには DNS (Direct Numerical Simulation)を用いた Particle の Lagrange 追跡が必要となる。しかし DNS は計算負荷が過大であるため、本報では LES を用いている。LES では Subgrid Scale 成分をモデル化して Resolvable Scale 成分に結びつけているため、Particle の SGS 拡散変動による影響を何らかの形で考慮する必要があるが、本報ではこれを無視して解析を行っている。(3) 本解析では発生汚染質を慣性が無く空気と一緒に移動する Particle と仮定。なお、直径 $20\mu\text{m}$ 、密度 1g/cm^3 、緩和時間 $5 \times 10^{-6}\text{sec}$ 程度の Particle の拡散は重力沈降、及び SGS 変動の影響をあまり受けないことが知られている^{2,3}。Particle 間の相互作用及び壁面の反射等は無視、壁面に衝突した Particle は全て吸着するとして解析。[参考文献] (1)伊藤、加藤、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：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

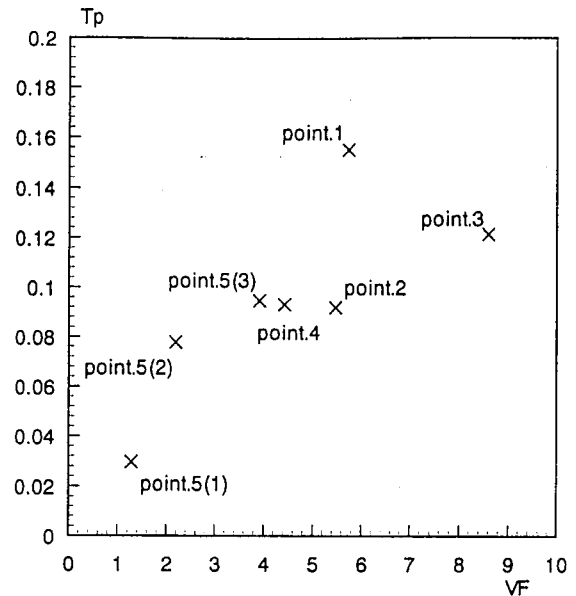


図 5-2 Volume1

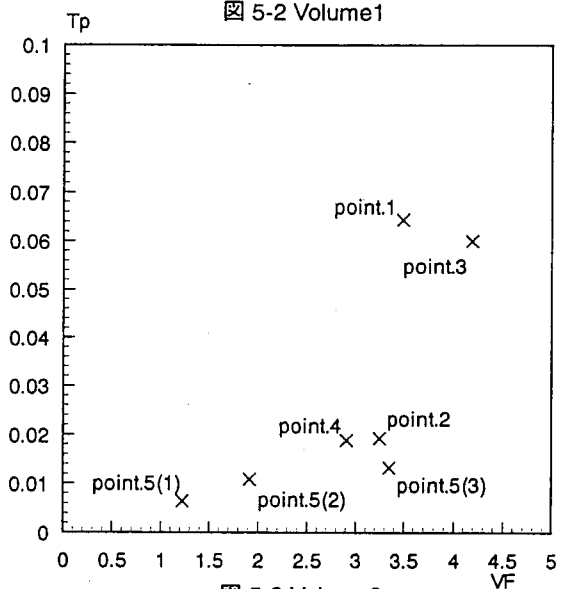


図 5-3 Volume2

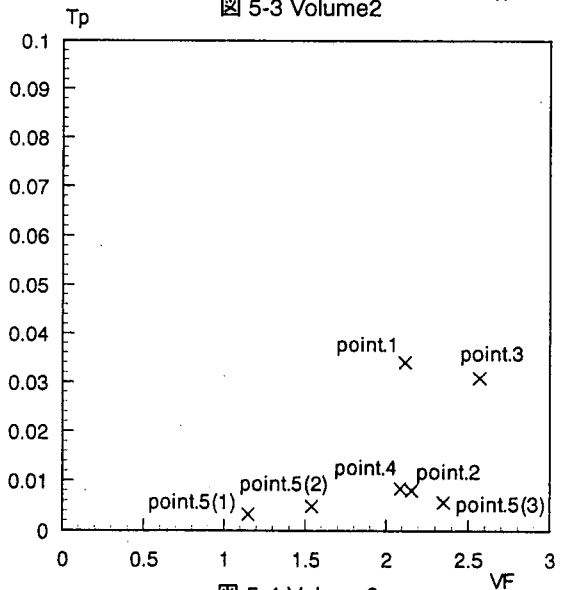


図 5-4 Volume3

集、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 8)：日本建築学会年次大会、1997.9 (4) Germano et al. A Dynamic sub grid - scale eddy viscosity model, Phys. Fluid, 1991 (5) Squires, K.D et al. Particle Deposition in Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow int. J. of Multiphase Flow 1995