

Particle Tracing による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の基礎的解析

不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究

ANALYSIS OF VISITATION FREQUENCY AND PURGING FLOW RATE THROUGH PARTICLE TRACKING METHOD

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

In this research, in order to evaluate a local ventilation effectiveness, Visitation Frequency (VF; time for contaminant to return back to an objective domain), Tp (average time of contaminant staying in an objective domain) and Purging Flow Rate (PFR; air flow rate for defining domain averaged concentration) are introduced. VF, Tp and PFR of a local domain in the model room are analyzed by particle tracing method based on LES (Large Eddy Simulation). To examine the value of VF, Tp and PFR, 3 kinds of objective domains are set up in the model room (1500(x)×300(y)×1000(z) mm); (1) occupant space (1/2 volume of model room), (2) 1/4 volume of occupant space, (3) 1/9 volume of occupant space (Breathing zone). The relative position of the particle generating point and the objective domain (volume) in the model room are changed and the property of VF, Tp and PFR are analyzed. VF and its standard deviation become largest value in the case where the particle generating point is located at the center of the model room, comparing to other cases. It means that the particles generated at the center of the model room, are transported only by turbulent motion and are not likely to be smoothly exhausted from the room. Tp becomes low in the case where particles are generated near the inlet, the outlet or the floor, since the particle generated from these points are transported by the flow in the same stream lines. For cases where particle are generated at the center of the model room, the value of Tp becomes high, due to the closed re-circulation. In PFR analysis, when the local domain becomes smaller, PFR becomes higher for all cases. When particles are generated near the inlet or the outlet, PFR is always bigger than 1.0 in this study.

Keywords : Visitation Frequency, Local Purging Flow Rate, Particle Tracing

訪問回数、局所排出換気量、粒子追跡

1. 序

一般に室内では、局所的な領域、各ポイントでその気流性状が異なり、新鮮空気の到達、分配や発生汚染質の排出性状は大きく異なる。即ち、室内には汚染質濃度分布、換気効率分布が存在する。本研究では不均一濃度場における室空間の制御単位として居住域及び呼吸域に着目し、居住域及び呼吸域といった局所領域の換気性状の評価を、Visitation Frequency (訪問回数)^{※1)}、局所領域平均滞在時間 Tp、並びに Purging Flow Rate (局所排出換気量)^{※2)}を利用して行っている。

室内の局所領域における換気効率の評価は、合理的な換気設計を行う上で重要であり、空気調和・衛生工学会で提案されている HASS 102 換気規準^{※3)}においても、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。この規準化居住域濃度は対象領域内での汚染質発生率と Purging Flow Rate により定義されるものであり、局所領域の規準化居住域濃度を求めることと Purging Flow Rate を求めることは、ほとんど同じことを意味する。この Purging Flow Rate は、局

所領域内に汚染質が再帰する可能性を示す Visitation Frequency と、局所領域内での汚染質挙動を示す局所領域平均滞在時間 Tp の 2 つの換気効率指標によりその性状が表される。

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^{※4)6)}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。更に、得られた風速データにより精度を検証した標準 k-ε model を用いて流れ場・拡散場の解析を行い、平均拡散場解析結果を基に Visitation Frequency、局所領域平均滞在時間 Tp、Purging Flow Rate の平均的性状を系統的に解析している^{※7)}。換気設計を行う際等の実務レベルにおいては、比較的簡便な標準 k-ε model を用いた解析が有効である。しかし、標準 k-ε model を用いた解析の際には局所領域に対する汚染質の再帰確率 α を一定値、即ち局所領域内の汚染質流入に関する挙動を均一なものとして、平均値としての Visitation Frequency を算出している^{※1)}。しかしながら実際の室内気流において、このような仮定が成立するか否かは必ずしも確認されていない。本報では局所領域に流入する汚染質のばらつきま

* 東京工芸大学 助手・工博

** 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

Research Associate, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

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

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

でを考慮し、厳密な意味での Visitation Frequency、局所領域平均滞在時間 T_p 及び Purging Flow Rate を解析する。そのため、平均的性状のみならず個々の汚染質(Particle)の挙動に着目し、その詳細な統計的性状の解明を目的とする。この解析を行うため、本研究では LES (Large Eddy Simulation) による Particle Tracing ^{文 8)} の手法を用いて個々の汚染質(Particle)の追跡を行い、Particle 発生点及び局所領域の位置・体積が変化した際の Visitation Frequency、局所領域平均滞在時間 T_p 及び Purging Flow Rate の統計的性状を詳細に解析する。

2. VF、 T_p 及び PFR

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。本論では汚染質は局所領域内で発生するものと仮定し、始めに存在(発生)した回数を 1 回としてカウントする。個々の汚染質(Particle)毎に定義される個別の VF に対して、全発生汚染質の平均 VF を定義することが出来る。本報では平均 VF を $\langle VF \rangle$ として表記し、個々の汚染質挙動を示す個別の VF とは区別する。VF は局所領域に対して慣性のない Particle の流入をカウントすることにより直接計算される。また $\langle VF \rangle$ は全発生汚染質の VF の平均値、もしくは Passive Contaminant を仮定した平均拡散場解析による流入 flux を用いて(1)式のように定義される。

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

$\langle VF \rangle$: 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 内で発生する 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, 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]

局所領域内における個別汚染質(Particle)の挙動は 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。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。VF と同様に個別汚染質の平均滞在時間 T_p に対して、全発生汚染質の平均滞在時間 $\langle T_p \rangle$ を定義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に対する個別汚染質の全(合計)平均滞在時間、即ち平均寿命を示す。

Purging Flow Rate(排出換気量、以降 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 $\langle VF \rangle$ 及び局所領域平均滞在時間 $\langle T_p \rangle$ 、もしくは局所領域内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。

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

PFR : Purging Flow Rate [m^3/s]
 V_p : 対象領域 P の体積 [m^3]
 $\langle VF \rangle$: 汚染質の平均 Visitation Frequency [-]
 $\langle T_p \rangle$: 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^3]

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)

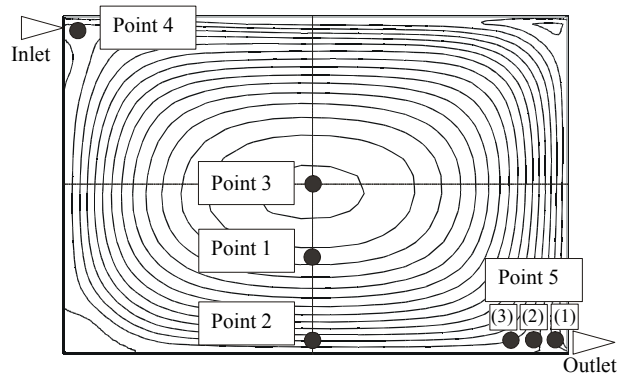


図1 流線図と Particle 発生点

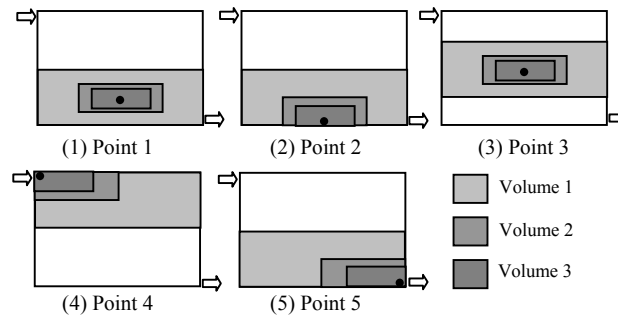


図2 Particle 発生点及び局所領域の設定

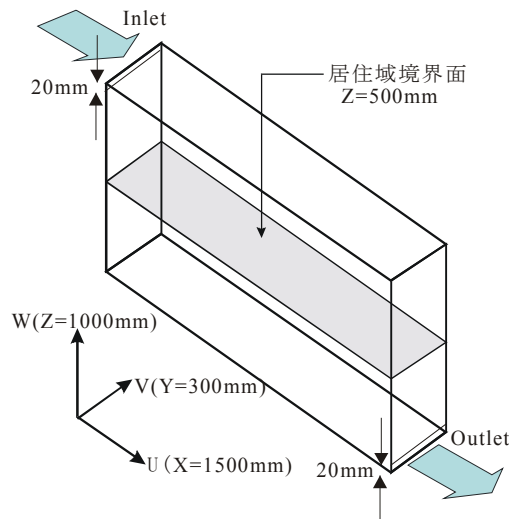


図3 解析対象 cavity (精密模型 working cavity ^{文 4)})

と表記して区別すべきであるが、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。

3. 汚染質発生位置と VF、 T_p

VF、 T_p 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。局所領域内での汚染質発生位置による VF、 T_p 及び PFR の依存性を除去するためには、汚染質を領域内で一様発生させることが望ましい。しかし本報では、局所領域に対する汚染質の平均的な発生性状、及び平均的な再帰性状のみならず、個々の汚染質(Particle)それぞれの挙動を解析対象とする。そのため、個別の汚染質に対して発生位置は同一条件とし、局所領域内でポイント発

生とする^{註2)}。また汚染質発生位置の微妙な相違がVFに与える影響も検討するため、吸込口近傍では汚染質発生位置を変化させた場合も検討する。

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Tp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、Tp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Tp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、Tp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、Tp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ケース設定している。

4. 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、(2)式で示したように<VF>、平均滞在時間<Tp>及び対象領域の体積Vpによって定義される。前述したが、標準k-εmodel等の平均拡散場解析結果を基に<VF>を算出する場合、発生汚染質の局所領域に対する再帰確率α^{註1)}を一定と仮定している。しかしながらこの仮定が成立しない状況も多くあると考えられる。対象とする局所領域が大きくなり領域内での一様性が保証できない場合等には、再帰確率α一定の仮定は必ずしも成立しない。その様な場合には、<VF>、<Tp>といった平均値ばかりでなく、個々の汚染質(Particle)の挙動を解析し、その統計的性状も含めた正確な評価を行うことが重要となる。

発生汚染質の移動をLagrange的に追跡することにより直接VFやTpの統計的性状を詳細に評価することができる。しかしながらこれを実験的に行うことは困難である。解析を行うには、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等が有力な候補となる^{註3)}。

4-1. 計算概要 流れ場はLESにより解析する。計算は図3に示す1500mm(x)×300mm(y)×1000mm(z)の大きさを持つcavity(吹出スロット幅をL₀=0.02mとすると75L₀(x)×15L₀(y)×50L₀(z))を対象とする。吹出・吸込口はcavity Y方向と同幅で、天井に沿って吹出口、吹出口対向壁床面に沿って吸込口が設置されている。吹出を含む模型内は等温(25℃一定)である。本解析対象は精密模型実験 case1^{文4)}に対応している。

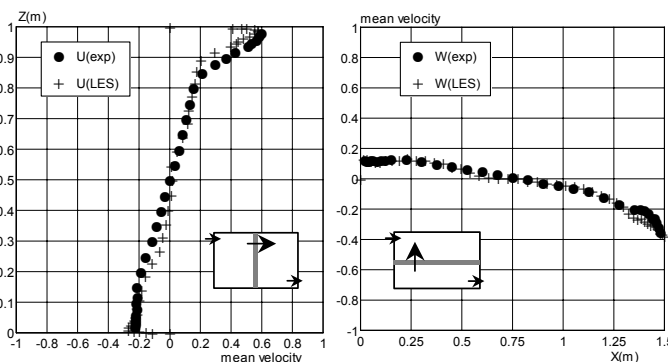
Subgrid Scale ModelにはDynamic Smagorinsky Model^{文9)}を用いた。気流解析の後、図1で示した汚染質発生位置の各々よりParticleを6.67×10⁴秒間隔に1個の割合で50秒間、全75,000個発生させ、Particle Tracingを行う。計算概要は表1参照。

4-2. Particle Tracing 本報ではParticleはResolvable Scaleの移流によって輸送されると仮定しSubgrid Scaleの影響は無視して解析を行う^{註4)}。

4-3. Particle発生位置・局所領域の設定(図1、2) Point.1は居住域中心

表1 LES計算及び解析条件

SGS model	Dynamic Smagorinsky Model ^{文9)}
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 ^{文4)} 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 ^{文10)}



(1) U (x=750mm位置) (2) W (z=500mm位置)
図4 平均風速分布(値は吹出風速で基準化)

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発生位置を内包する形で図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)×0.3_m(y)×1.0_m(z))。

5. 解析結果及び考察

LESによる流れ場の解析精度を検証するため、精密模型実験^{文4)}結果と比較した後、各発生点よりParticleを発生させ、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)Particle Tracingを行った。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。

5-1. 平均風速分布 図4にcavity中央断面におけるX=750mm(Z=0~1000mm)及びZ=500mm(X=0~1500mm)ラインにおけるU、Wの平均風速分布を示す。精密模型実験^{文4)}、LESの両者の結果は良く一致するが、壁面近傍で若干の差異が見られる。特に天井・床面ではLESの結果が若干非拡散的である^{註5)}。

5-2. 個別Visitation Frequencyの分布 図5に各Volumeにおける個別VFの分布を示す。紙面の都合で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)。また比較のため、図5(1)及び(3)には標準k-εmodelによる<VF>の解析結果^{文7)}も併せて示す。

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(図 5(1)(4)(7))。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(mode)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 数が減衰していく(図 5(10)(13))。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(図 5(3)(6)(9)(12)(15))。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。

Volume2 は Volume3 とほぼ同様の傾向である。

表 2、3、4 に各ケースの<VF>を示す。また図 7(1)(2)(3)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 7(1))。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

表 2 Volume1 を対象とした場合の<VF>、<Tp>、PFR、Cp の解析結果

	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 を対象とした場合の<VF>、<Tp>、PFR、Cp の解析結果

	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 を対象とした場合の<VF>、<Tp>、PFR、Cp の解析結果

	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]

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>の値が小さくなる。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 7(2)(3))。

5-3. 標準 k-ε model の解析結果との比較 Volume1 において発生点が Point.1 の場合(図 5(1))、標準 k-ε model による<VF>の解析結果は、汚染質の局所領域に対する再帰確率 α を一定としているため、<VF>が大きくなるにつれ指数関数的な減少を示す。LES による Particle Tracing を行った結果は VF=2 にピークを持ち、その後徐々に減衰する分布を示す。平均の VF(<VF>)の値は、標準 k-ε model による解析結果は 6.88、LES による Particle Tracing を行った結果は 5.70 と 20% 程度の差を示す²⁾。即ち、局所領域内での一様性の仮定には十分な配慮が必要である。

Volume3 において発生点が Point.1 の場合(図 5(3))、Volume1 での場

< >
 < >

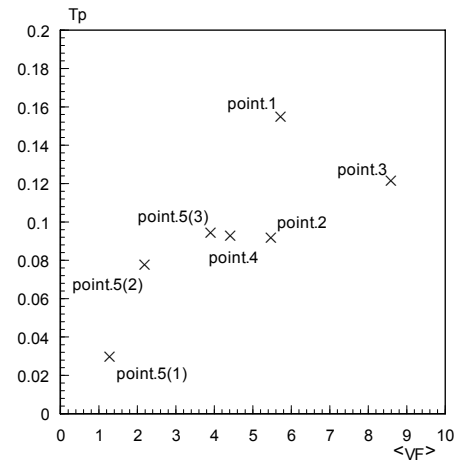
合と同様に、標準 $k-\epsilon$ model による $\langle VF \rangle$ の解析結果は、汚染質の局所領域に対する再帰確率 α を一定としているため、 $\langle VF \rangle$ が大きくなるにつれ指数関数的な減少を示す。LES による Particle Tracing を行った結果も傾向は同様であるが、 $VF=1$ のピークが大きく、その後の減衰が大きい。平均の $VF(\langle VF \rangle)$ の値は、標準 $k-\epsilon$ model による解析結果は 3.51、LES による Particle Tracing を行った結果は 2.11 と大きな差がある^{注 2)}。対象領域が小さくなった場合においても、流れ場が明確な指向性を持つ場合等には局所領域内での一様性の仮定には十分な配慮が必要である。

5.4. 個別 T_p の分布 図 6 に各 Volume における個別 T_p の分布を示す。紙面の都合で Point.5(2)、Point.5(3)の個別 T_p 分布は割愛する(図中 Particle 数は全発生数で基準化、 $\langle T_p \rangle$ は平均値、また各 Particle はそれぞれ個別の T_p を持つ。本解析では T_p のばらつきに興味があるため、無次元時間 0.02 間隔で T_p を分類し、各 Particle の T_p 分布を表現した。図 6(5),(6),(11),(12),(13),(14),(15) に関しては無次元時間 0.002 間隔で分類を行っている。) 各 Particle 発生点における Volume1 に着目すると、比較的室中央に位置する Point.1 及び Point.3 で T_p が大きく、またばらつきも大きい(図 6(1)(7))。この傾向は VF 分布と同様である。また、Point.2 及び Point.4 における T_p 分布が同様の傾向を示しており、この原因も壁面に沿って室内大循環流が生じており、壁面近傍に Particle 発生点を設定した場合には 1 本と同じ流線上に位置するためである。各 Particle 発生点における Volume2、及び Volume3 においては、Volume1 の場合と同様に Point.1 及び Point.3 で T_p が大きく、またばらつきも大きい(図 6(2)(8)及び(3)(9))。

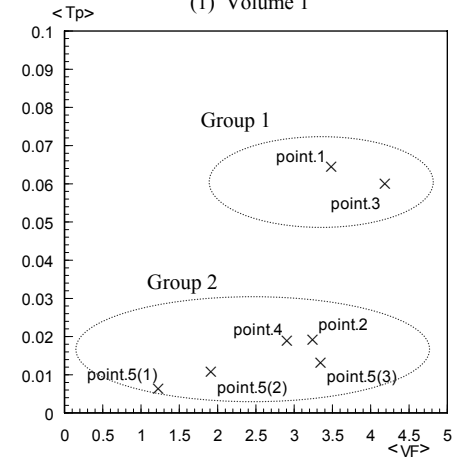
表 2,3,4 に各ケースの $\langle T_p \rangle$ (平均 T_p) を示す。また図 7(1)(2)(3) に縦軸に $\langle T_p \rangle$ 、横軸に $\langle VF \rangle$ をとったグラフ上に各ケースをプロットした図を示す。Volume1 に着目すると、室中央部で流線の閉じた位置に設定した Point.3 での平均滞在時間 $\langle T_p \rangle$ が最も大きくなると予想されたが、今回の解析では Point.1 での $\langle T_p \rangle$ が 0.16 と最も大きく評価された(表 2)。また壁面近傍に設定した Point.2、Point.4、Point.5(3) における $\langle T_p \rangle$ 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 $\langle T_p \rangle$ 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 $\langle T_p \rangle$ は 0.02 前後の同一の値を示している。Volume3 では、 $\langle T_p \rangle$ 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。

5.5. VF 及び T_p の相関 図 7(1)(2)(3) に縦軸に $\langle T_p \rangle$ 、横軸に $\langle VF \rangle$ をとったグラフ上に各ケースをプロットした図を示す。居住域を想定した Volume 1(図 7(1)) では明確な group 化は困難であるが、Volume 2 及び Volume 3(図 7(2)(3)) では、 $\langle T_p \rangle$ のオーダーに着目し group 1 及び group 2 の 2 種に大別が可能である。Group 2 に着目すると、例えば汚染質発生点 point. 5(1) に対して point. 5(3) は $\langle T_p \rangle$ のオーダーは同一であるが $\langle VF \rangle$ は約 2.5 倍程度異なる。point. 5(3) で汚染質が発生した場合には汚染質の再訪問が多い、即ち VF が大きいために局所領域平均濃度 C_p の値が高くなるのが理解できる。汚染質が point. 5(3) で発生した場合の C_p 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、stream line を変化させ、循環流の生じない室内流れ場を作出することが効果的であると読みとることが可能である。

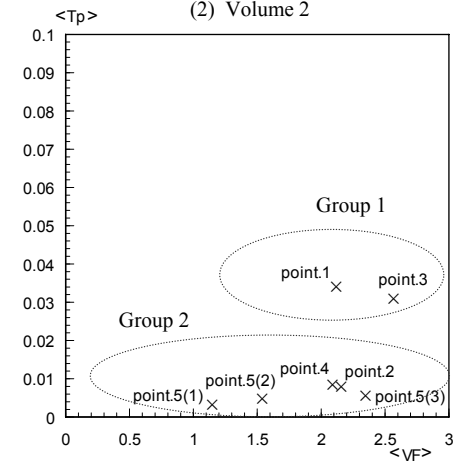
5.6. PFR の分布 図 8 に PFR 分布を示す。Volume1 では、吸込口に最も近い Point5(1) での PFR が 13 を越え、発生 Particle が拡散する前に効



(1) Volume 1



(2) Volume 2



(3) Volume 3

図 7 $VF-T_p$ 分布

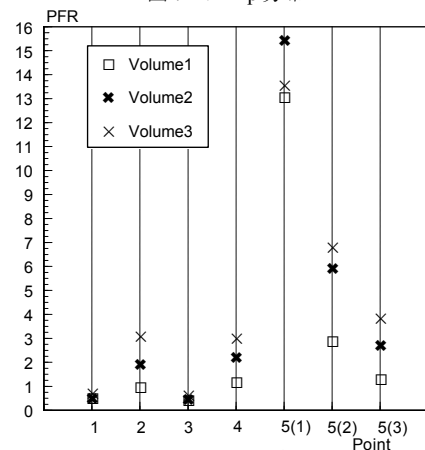


図 8 PFR 分布

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、 $\langle VF \rangle \times \langle Tp \rangle$ の減少分がより大きい事を示している。

6. 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 $\langle VF \rangle$ 、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) 局所領域平均滞在時間 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 $\langle Tp \rangle$ 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 $\langle Tp \rangle$ が大きく評価された。

(3) $\langle VF \rangle$ 及び $\langle Tp \rangle$ の相関図を示すことにより、局所領域平均濃度 C_p の構造評価を試みた結果、 $\langle VF \rangle$ 及び $\langle Tp \rangle$ の各要素を同時に評価することで C_p の生成原因を適切に評価可能であることを示した。

(4) 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] Visitation Frequency は個々の汚染質塊を追跡する事により算出が可能であるが、対象領域内での一様性を仮定すれば、RANS モデルによる平均拡散場の解析でも算出が可能である。対象領域 V 内で汚染質が $q[\text{kg/s}]$ だけ定常発生し、領域 V 内では瞬時一様拡散している状態を考える。流れ場が定常状態になっている時、領域 V に定常的に $\Delta q[\text{kg/s}]$ の流入汚染質があると仮定する。

汚染質発生量 q の内、領域外に排出された後常に α ($\alpha < 1$) の確率で領域 V に戻ってくるものがあるとすると、以下の等式が成り立つ。ここで汚染質の再帰確率 α は領域内で一定である。

$$q\alpha + q\alpha^2 + q\alpha^3 + \dots + q\alpha^n = \Delta q \quad (3)$$

$$q\alpha(1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-1}) = \Delta q \quad (4)$$

ここで、 $n \rightarrow \infty$ のとき

$(1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-1}) = 1/(1 - \alpha)$ となり、発生汚染質が対象領域内で一様拡散する場合の平均 Visitation Frequency となる。

$$VF = 1/(1 - \alpha) \quad (5)$$

(4)(5)式より

$$\alpha = \Delta q / (q + \Delta q) \quad (6)$$

(5)(6)式より

$$VF = (q + \Delta q) / q \quad (7)$$

対象領域 V での一様性を仮定すれば RANS モデル等によるシミュレーションでも Δq を評価することが可能なため、(7)式により平均 VF が求められる。実際の拡散場では汚染質が対象領域 V に再帰した場所により、再び V に戻ってくる確率 α は異なることが予想されるため、Visitation を(3)式のように簡単に仮定することは出来ず、発生汚染質を Lagrange 的に追跡できる LES シミュレーションが唯一、詳細な解析を可能とする。

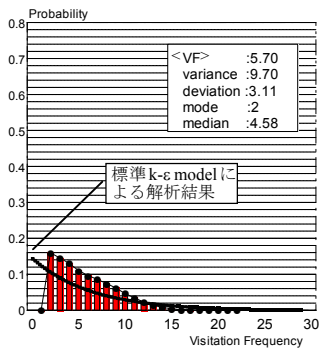
[2] 既報²⁷⁾で検討している $k-\epsilon$ model による解析結果(局所領域内で汚染質一様発生)との比較には注意が必要である。LES では汚染質(particle)を point 発生、 $k-\epsilon$ model では passive contaminant を領域内で一様発生させ

ている。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。

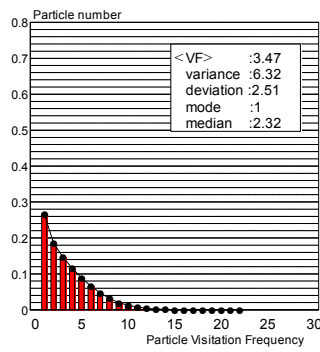
- [3] 最も正確に VF の評価を行うためには DNS (Direct Numerical Simulation) を用いた Particle の Lagrange 追跡が必要となる。しかし DNS は計算負荷が過大であるため、本報では LES を用いている。LES では Subgrid Scale 成分をモデル化して Resolvable Scale 成分に結びつけているため、Particle の SGS 拡散変動による影響を何らかの形で考慮する必要があるが、本報ではこれを無視して解析を行っている。
- [4] 本解析では発生汚染質を慣性が無く空気と一緒に移動する Particle と仮定。なお、直径 $20 \mu\text{m}$ 、密度 1g/cm^3 、緩和時間 $5 \times 10^{-5}\text{sec}$ 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²¹⁾。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。
- [5] 原因として本解析で使用した DS モデルが若干モデル係数 C (Smagorinsky 定数 C_s の 2 乗に対応)を過大評価していることが考えられる。C が大きいと ν_{sgs} が大きい、すなわち Smagorinsky モデルでは ϵ (散逸)が大きいことを意味する。 ϵ が大きくなれば乱流エネルギーは小さくなり流れは非拡散的となる。

参考文献

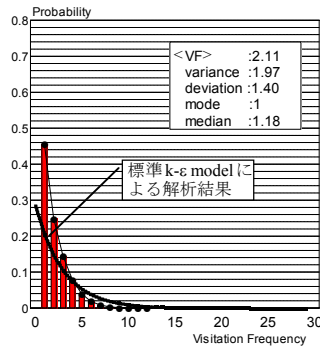
- [1] Csanady, G. T. : Dispersal by randomly varying currents, J. Fluid Mech. Vol. 132, pp.375-394, 1983
- [2] Sandberg, M., : Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review. International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo, 1992
- [3] HASS102-1997 換気規準・同解説, 空気調和衛生工学 vol. 71, no. 5, pp.418-433, 1997
- [4] 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 : 空気調和衛生工学会講演論文集 1996.9, pp.45-48
- [5] 鈴木信夫、伊藤一秀、加藤信介、小林光、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 5) 精密模型を用いた室内気流測定一居住域に障害物がある場合の検討一 : 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3, pp.1-4
- [6] 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一居住域に温度差がある場合の検討一 : 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3, pp.5-8
- [7] 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,
- [8] 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 12) Particle Tracing による VF、PFR の基礎的解析 : 日本建築学会関東支部研究報告集 1998.3,
- [9] Gemmano et al. A Dynamic sub grid - scale eddy viscosity model, Phys. Fluid, 1991
- [10] H.Werner, H.et al. Large - Eddy simulation of Turbulent Flow over and around A Cube in A Plane Channel 8th Symposium on Turbulent Shear Flows 1991
- [11] Squires, K.D et al. Particle Deposition in Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow int. J. of Multiphase Flow 1995



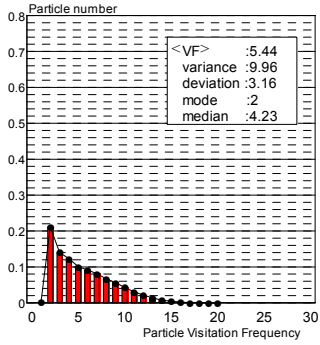
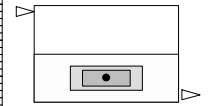
(1) Point.1 - Volume1



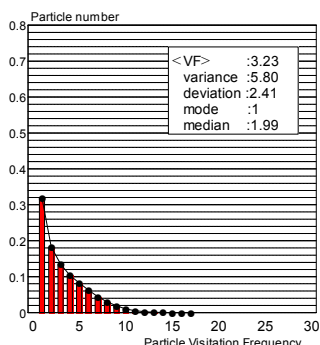
(2) Point.1 - Volume2



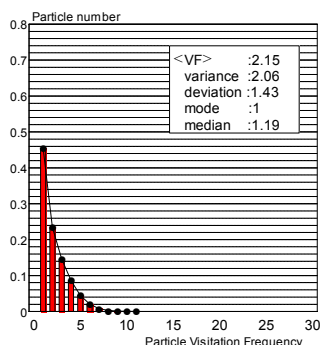
(3) Point.1 - Volume3



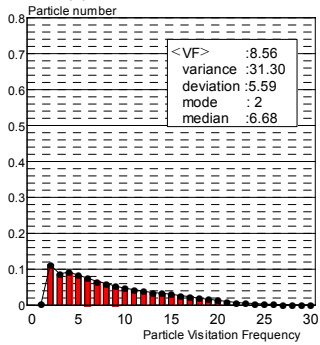
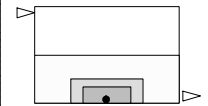
(4) Point.2 - Volume1



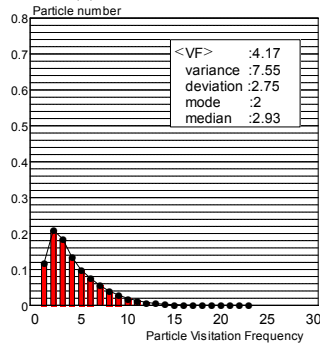
(5) Point.2 - Volume2



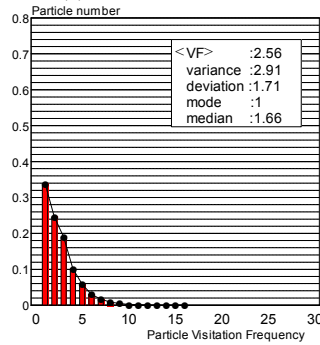
(6) Point.2 - Volume3



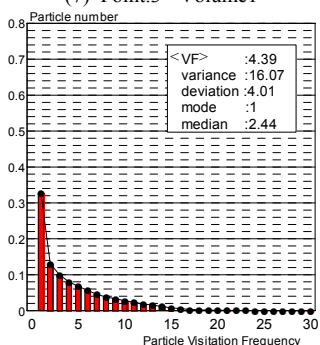
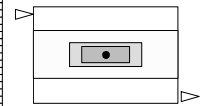
(7) Point.3 - Volume1



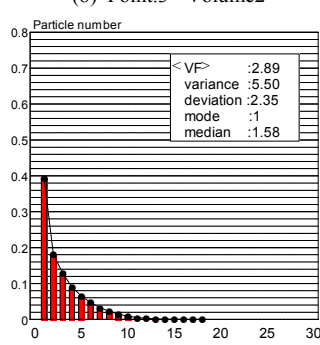
(8) Point.3 - Volume2



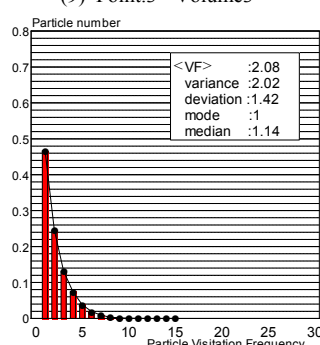
(9) Point.3 - Volume3



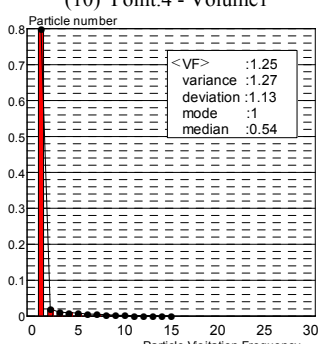
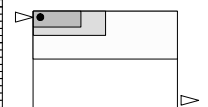
(10) Point.4 - Volume1



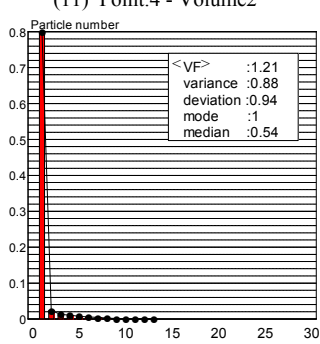
(11) Point.4 - Volume2



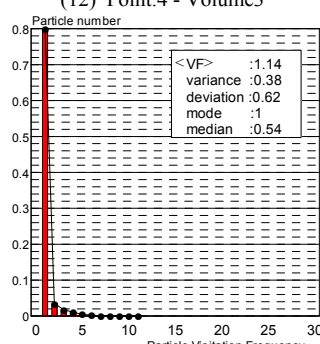
(12) Point.4 - Volume3



(13) Point.5(1) - Volume1



(14) Point.5(1) - Volume2



(15) Point.5(1) - Volume3



図5 個別 Visitation Frequency 分布

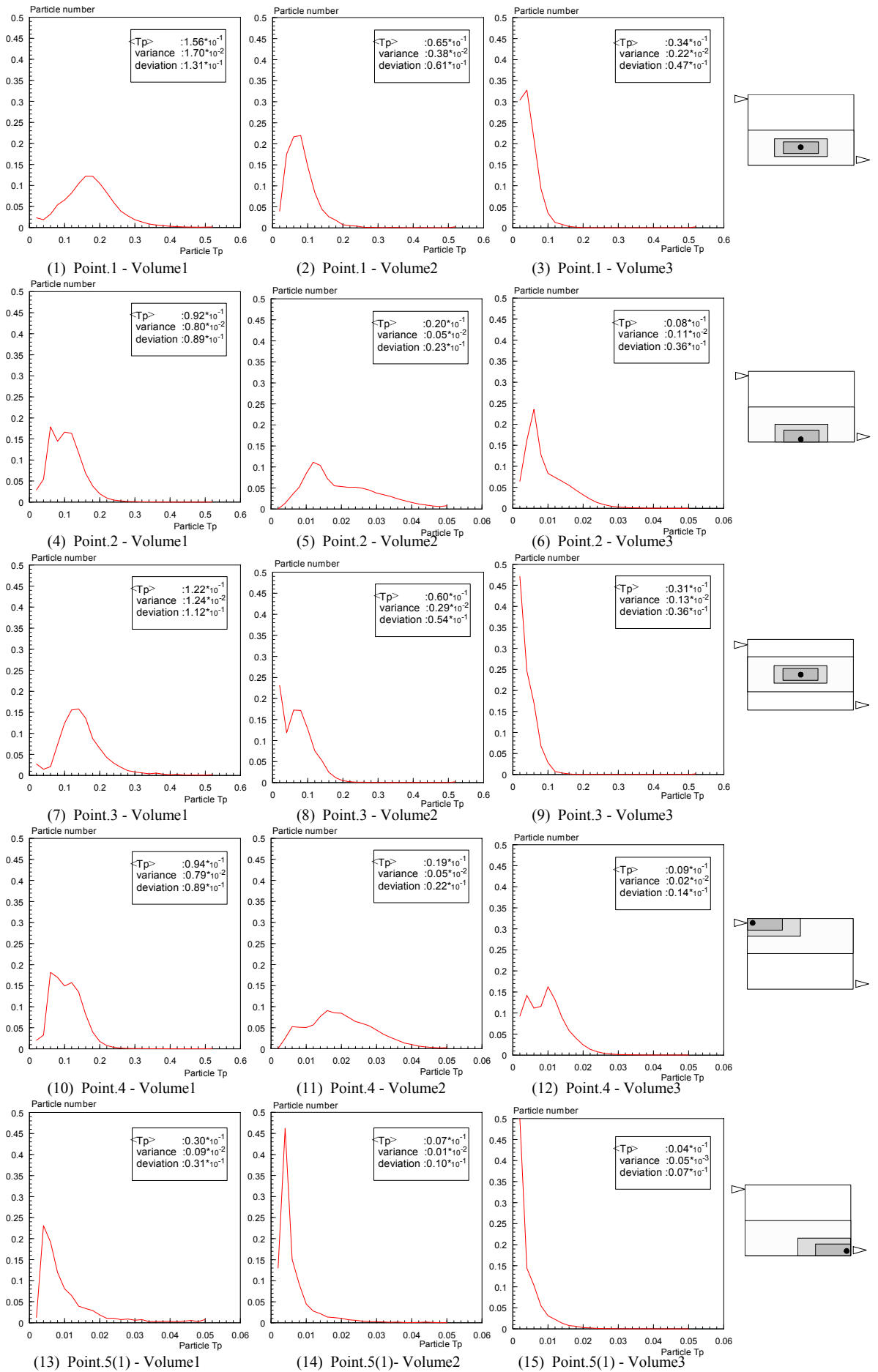


图6 个别 Tp 分布

