

Visitation Frequency、Purging Flow Rate による局所領域換気効率の評価

学生会員 ○伊藤一秀 (東京大学 大学院)
 正会員 村上周三 (東京大学生産技術研究所)
 正会員 加藤信介 (東京大学生産技術研究所)

1. 序

換気計画を行う際、人間の呼吸域周辺、発熱機器、あるいは調理機器周辺といったような局所的な換気制御が重要となることが多い。前報^{1,2)}までに局所領域の流れ・濃度分布の構造を評価するための指標として Visitation Frequency を導入し、更にその局所領域換気性状を評価する指標として Purging Flow Rate を導入してきた。本報では Visitation Frequency、Purging Flow Rate³⁻⁵⁾の概念、有用性及び解析手法の概要について解説する。

2. Visitation Frequency

2-1. 局所領域 Visitation frequency

Visitation frequency (訪問回数、以降 V.F.)とは、解析対象として局所的に設定された領域内(以降、局所領域)で発生した汚染質が、一度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る。V.F.=1 とは 1 回だけその領域に滞在し、そのまま排出され、再び帰還する事が無いことを意味する。同じく V.F.=2 は一度滞在して領域外に出た後、再び帰還し、その後排出されることを意味する。

2-2. 平均 V.F.

局所領域の平均 V.F.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。平均 V.F.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意味し、局所領域の下流側の換気設計に問題があることを示す。逆に平均 V.F.が低い場合、汚染質の再循環の少ない好ましい設計であることを示す。

2-3. 局所領域 平均滞在時間

局所領域の平均滞在時間 (Tp)は一度、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を示す。局所領域に対する汚染質の挙動は、局所領域内での平均滞在時間と局所領域と室全体との関係を示す平均 V.F.により記述される。平均滞在時間(Tp)に平均 V.F.を乗じたものが対象領域での汚染質の合

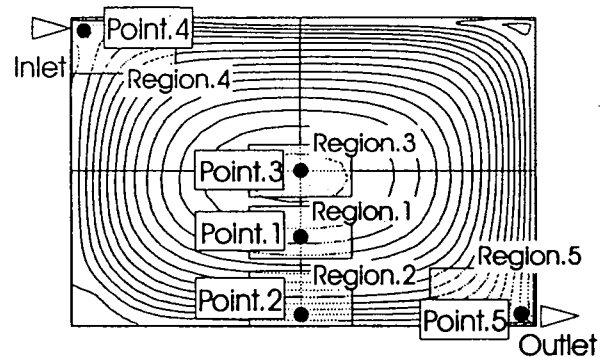


図1 汚染質発生位置と V.F.
 (汚染質発生点近傍を V.F.の対象領域と仮定)

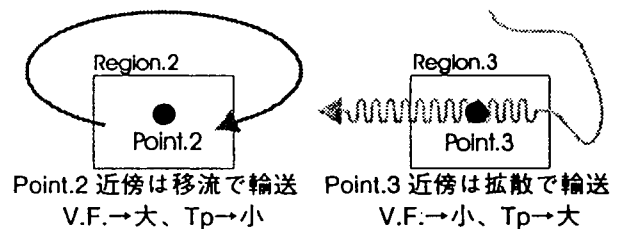


図2 汚染質発生点近傍の汚染質挙動

計平均滞在時間、即ち平均寿命(Tp_{total})となる。局所領域を拡大し、室全体とすると、一度室外に排出された汚染質の漏入が無い場合には V.F. = 1 の為、室内の汚染質平均滞在時間は即ち汚染質平均寿命となる。

2-4. 汚染質発生位置と V.F.、Tp

図1の流線図上に汚染質発生位置と汚染質発生点を示し、局所領域(Region)における、V.F.、Tp の関係を示す。床面近傍の 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ているため、移流により汚染質が輸送される傾向が強く、Point.2 を含む Region.2 においては V.F.は大きく、Tp は小さくなる (図2)。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心に位置するため、拡散により汚染質が輸送される傾向が強く、Region.3 において Tp は大きくなる。また室内大循環流から外れた位置であるため V.F.は小さくなる (図2)。Point.1 を含む Region.1

における V.F.、Tp の性状は Region.2、Region.3 の中間の様相を示すと考えられる。

吹出口近傍の Point.4 で発生した汚染質は室内全体に拡散する。Point.4 を含む Region.4 は吹出ジェット、及び室内の大循環流を含むため V.F.は大きく、Tp は小さくなると考えられる。吸込口近傍の Point.5 で発生した汚染質は室内に拡散する前に排出される。そのため V.F.、Tp は最も小さくなる。

2-5. Particle Tracing による V.F.解析

発生汚染質が Passive Contaminant で空気と全く一緒に移動すると仮定した場合、汚染質を慣性のない Particle に置き換え、その Particle を Lagrange 的に追跡することにより直接、V.F.を評価することができる。この解析には瞬時瞬時の流れの変動を再現し、発生 Particle の挙動を Lagrange 的に追跡できる LES(Large Eddy Simulation)が有力な手法となるものと考えられる。

2-6. 平均拡散場解析による V.F.解析

詳細な V.F.解析は LES が基本となるが、RANS 等の Passive Contaminant による平均拡散場解析結果を用いて平均 V.F.解析が可能である。(表 1 参照)

2-7. 模型実験による解析

模型実験による V.F.解析は、上記の RANS 等による平均拡散場解析と同様に、表 1(5)式より求める必要がある。即ち、模型内の汚染質平均濃度分布を詳細に測定し、対象領域に対する汚染質の流入 flux を算出する必要がある。そのため、実験的な V.F.解析は大変困難と考えられる。

3. Purging Flow Rate

V.F.は局所領域の濃度分布、汚染質の排出特性(即ち Purging Flow Rate (以降 PFR))と密接に結びついている。PFR は、局所領域に対する実質的な換気空気の流入量(又は排出量)を示すもので、局所領域に対する Particle の平均 V.F.と平均滞在時間により次のように定義される。

$$PFR = \frac{V}{(\text{平均V.F.}) \times T_p} \quad (6)$$

- PFR : 局所領域の Purging Flow Rate[m³/s]
- V : 局所領域の容積[m³]
- 平均 V.F. : Particle の平均 Visitation Frequency [-]
- T_p : 局所領域内での Particle の 1 回の訪問当りの平均滞在時間 [s]

また(6)式は、局所領域内での汚染質発生率と平均濃度により次式のようにも定義される。

表 1 Passive Contaminant 解析結果による V.F.解析

対象領域 P 内で汚染質が q [m³/s] だけ定常発生している状態を考える。流れ場が定常状態であるとき対象領域 P に定常的に Δq [m³/s] の流入汚染質があるとする。

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すると以下の等式が成立する。

$$q\alpha + q\alpha^2 + q\alpha^3 + \dots + q\alpha^n + \dots = \Delta q \quad (1)$$

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

ここで定常状態より n → ∞ より次式が成立する。

$$1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^n = (1 - \alpha^n) / (1 - \alpha) = 1 / (1 - \alpha) \quad (3)$$

(3)式が対象領域 P における平均 V.F.となる。

(2),(3)式より

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

(3),(4)式より

$$(\text{平均V.F.}) = (q + \Delta q) / q \quad (5)$$

汚染質の再帰確率 α (< 1) の対象領域 P 内での一様性を仮定すれば RANS モデル等の平均流れ場・汚染質拡散場解析結果でも Δq を評価する事が可能なため、(5)式により平均 V.F.を求めることが可能である。

しかし、実際の拡散場では汚染質が対象領域 P に再帰した場所により、再び P に戻ってくる確率 α が異なることが予想される。その場合には Visitation を(1)式のように簡単に仮定することはできない。なお、対象領域 P を十分に小さく設定する等の配慮により解析精度を向上させることは可能である。

表 2 局所制御における Purging Flow Rate の意義

	室内全体	局所領域
空気質制御変量	吹出口換気量(Q)	Purging Flow Rate
汚染質の寿命 (発生から排出までの挙動)	室内滞在時間 → SVE1 又は SVE6 ^{注1)} で評価	局所領域滞在時間 → V.F. × T _p により評価
→ 汚染質の排出効率の評価	一度排出された汚染質は室内に環流しない(V.F.=1)とすると、汚染質の挙動は室内滞在時間により把握。	局所領域には(新鮮空気+汚染質)が供給される。汚染質の挙動は、局所領域内での挙動を代表する T _p と、局所領域と室全体との相互関係を示す V.F.で把握。
換気指標 (例)	換気回数 n = Q / Vol	局所換気回数 n _p = PFR / Vol

$$PFR = q/C \quad (7)$$

q : 局所領域内の汚染質発生率 [m³/s]
 C : 局所領域内の汚染質の平均濃度 [-]

換気設計では一般に汚染質発生は最小限に抑えられていることが前提であり、換気量・換気効率を制御する事により必要部位の空気質を制御している。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、まさにこの制御変数に対応するものとなる。

PFR は局所領域の大きさ・位置及び汚染質発生位置によりその値が変化する。局所領域の汚染質平均濃度は、その領域で発生した汚染質の平均滞在時間に比例する。局所領域の PFR が与えられれば汚染質の局所領域平均濃度はその発生量から直ちに算出される。

表2に局所制御における PFR の意義を室全体の換気と対比させて示す。局所領域における PFR は、室内全体における吹出口からの換気量に相当する。また、汚染質の寿命、即ち汚染質の室内滞在時間は、SVE1 もしくは SVE6^(注1,文6)により評価されるが、局所領域では、V.F.とTpの積により評価される。

4. V.F.、PFR 解析例

4-1. LES 計算概要

図3に示すようなモデル室内気流場(2次元)を対象とする。吹出スロット幅を L₀=0.02m とすると、計算対象領域は 75L₀ (X)×15L₀ (Y)×50L₀ (Z)。等温吹出(吹出風速 3m/s)。計算及び解析条件は注2参照。

4-2. LES による Particle Tracing の概要

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。流れ場が定常に達した後、居住域(室の下半分、Z<0.5m)中心(X=0.75m, Y=0.15m, Z=0.25m)より、Particle を Short Burst^(注3)により 59,319 個(1.17/1cell)発生させ Particle Tracing を行う。V.F.及び PFR の解析対象領域は居住域とする。

4-3. k-ε 計算概要

計算対象は LES と同様。計算及び解析条件は注1参照。気流解析を行った後、居住域中心より汚染質を発生させ濃度場解析を行う。

4-4. 解析結果及び考察

LES における Particle Tracing は Particle 発生後、74.27 秒間(計算対象領域の名目換気時間 τ_n=25 秒)行い、

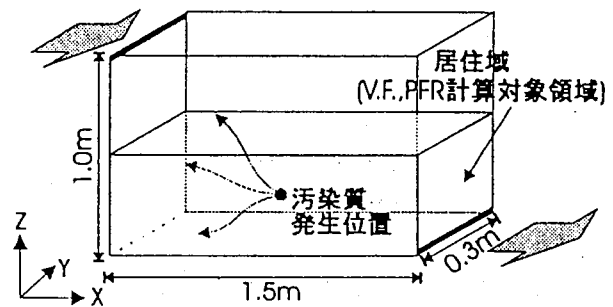
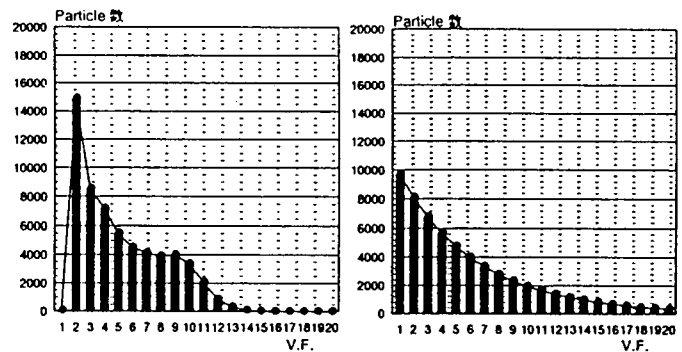


図3 計算対象領域



(1) LES による V.F.分布

(2) k-ε による V.F.分布

図4 Visitation Frequency 分布

表3 平均 V.F.、PFR 解析結果

	LES	k-ε
平均 V.F. [-]	5.2	6.1
Tp [sec]	4.9	3.1
PFR [-]	0.5	0.7
居住域平均濃度 [-]	2.0	1.5

PFR の値は吹出口換気流量、濃度は完全拡散濃度で基準化

59,319 個中 52505 個の Particle が排出(89%)された。k-ε による解析では濃度場解析を行った後、V.F.解析対象領域(居住域)の境界面における汚染質の流入 flux を算出し、(5)式より V.F.を算出した^(注4)。

(1) V.F.解析結果 図4(1)に LES を用いた Particle Tracing 解析による V.F.分布を示す。V.F.=2 にピークが存在し、一度居住域を出た後に更にもう一度流入してから排出される Particle が全体の 25%を占めている。今回の設定した局所領域には Particle 発生点及び吸込口が含まれるため、V.F.=1 という Particle は、発生後一度も局所領域を出ることなく直接吸込口に移流されるものを指す。今回の解析では、V.F.=2 に比べ V.F.=1 が極端に小さい値となっているが、これは発生 Particle が最初、直接吸込口に向かわず、室内の大循環流により吸込口と逆側に移流されることに起因する。V.F.=9 に変曲点が見られ、Particle が居住域に再帰した場所により、再び居住域に戻ってくる確率 α が

異なることがわかる。V.F.=17 までに発生 Particle の 89%が排出されている。

図 4 (2)に k-ε モデルを用いた平均拡散場解析による V.F.分布を示す。平均拡散場解析結果による V.F.解析では、居住域への再帰確率αを一定と仮定(今回の解析結果ではα=0.84)しているため、Particle 数 N は $N = a \times e^{-b \cdot V.F.}$ (a,b は定数)の関係に従い、V.F.が大きくなると Particle 数は指数関数的に減少する。

(2) 平均 V.F.、PFR 解析結果 表 3 に平均 V.F.、PFR 解析結果を示す。LES 解析によれば、平均 V.F.は 5.2 回、1 回の滞在時間は平均的に 4.9 秒である。また PFR は 0.5 であり、居住域に流入する汚染質の希釈に有効な換気流量は、吹出換気流量の 1/2 程度であることが示される。居住域平均濃度は(7)式より即座に算出される。

k-ε モデルによる解析結果は、LES 解析結果に比べ平均 V.F.、PFR ともに若干大きく評価された。これは、LES と k-ε モデルの流れ場の解析精度の差、並びに LES では再帰確率αが一定でないのに対し、k-ε モデルでは一定値と仮定していること等が原因と考えられる。

5. 結論

(1) 局所領域の気流・濃度分布性状を評価する新たなパラメータとして Visitation Frequency を、局所換気性状を評価する指標として Purging Flow Rate を導入した。

(2) 局所領域の汚染質濃度分布・排出特性の構造を評価するという観点より、局所領域における汚染質排出のスムーズさを示す平均 V.F.が重要なパラメータとなることを示した。

(3) 直接的な制御手段である換気性状を評価するという観点より、局所領域に対する実質的な換気流量を示す PFR が局所領域の換気性状を示す有用な指標となることを示した。

(4) LES に基づいた Particle Tracing を行い、居室モデルの下部領域(居住域)における V.F.および PFR の詳細な解析例を示した。

(5) k-ε モデルを用いた平均拡散場解析結果を用いて簡易に平均 V.F.を算出する方法を示した。更に LES 解析例と同じ居室モデルにおいて、k-ε モデルによる平均 V.F.および PFR の解析例を示した。

(6) 今後、LES により詳細に V.F.、PFR を解析した後、k-ε モデルを用いて汚染質発生位置、換気システム等を変化させた場合の V.F.、PFR の変化をパラメトリックに解析する予定である。

[注] (1) SVE1 は、閉鎖空間内のある点の空気が排出されるまでに要する時間、即ちその点で発生した汚染質の室内滞在時間を評価する。その定義は、閉鎖空間内のある点で汚染質が q (kg/m³)の勢いで定常発生している状態を想定し、そのときの濃度分布の零時モーメント(室内の汚染質総量 kg)を、換気性状が瞬時一様拡散である場合の零時モーメント(瞬時一様拡散濃度と室容積の積)で基準化するものである。

SVE6 は室内各所を通過した空気が、そこを通過した後排出されるまでの平均時間を示す。その定義は、時間進行を逆転した仮想的な流れ場(吸込口から室内に流入する流れ場)のもとで、汚染質の室内一様な発生を仮定して求めた濃度分布を瞬時一様拡散濃度で基準化するものである⁸⁾。

(2) LES 及び k-ε model の計算・解析条件

	LES(Dynamic model) ⁷⁾	標準 k-ε ⁸⁾
メッシュ分割	48(x) × 23(y) × 46(z)	41(x) × 15(y) × 38(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	移流・拡散項共に 風上差分
流入境界	吹出口速度分布は実験に対応する平均風速分布を与えた。	$k=3/2 \cdot (U_m \times 0.0115)^2$ $\epsilon = C \mu \cdot k^{3/2} / l_m$ 流入の乱れ強さは実験値、 $l_m = L_0 / 7$
壁面境界	Linear-Power Law ⁹⁾	一般化対数則

(3) Particle は一度だけ、瞬時に発生させる。

(4) 流入 flux = 移流 flux + 拡散 flux = 5.1388、値は換気流量で基準化

$$(\text{移流 flux} = \sum U_3 \cdot C \cdot A, \text{ 拡散 flux} = \sum -v_i \frac{\partial C}{\partial x_3} \cdot A)$$

$$C: \text{kg/m}^3, U_3: \text{m/s}, A: \text{m}^2$$

[参考文献] (1)鈴木、伊藤、加藤、村上、小林、林：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)、空気調和衛生工学会講演論文集、1996,9 (2)伊藤、村上、加藤、小林：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4)、空気調和衛生工学会講演論文集、1996,9 (3)Standard Method of Measuring Air Change Efficiency: ASHRAE SPC129P Second Public Review, 1995.2 (4)Sandberg and Sjoberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18, pp. 181-197, 1983 (5)M.Sandberg "Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate ISRAEVE ASHRAE pp-17, 1992.7 (6) 村上周三、加藤信介：新たな換気効率指標と 3 次元乱流数値シミュレーションによる算出法 換気効率の評価モデルに関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No32、1986.10 (7) Germano et al. A Dynamic sub grid - scale eddy viscosity model, Phys. Fluid, 1991 (8) Launder, and, Spalding, The numerical computation of turbulent flows. Comp. Mech. Eng., 3:269-289 1974 (9) H.Werner, H.et al. Large - Eddy imulation of Turbulent Flow over and around A Cube in A Plane Channel 8th Symposium on Turbulent Shear Flows 1991 (10) Squires, K.D et al. Particle Deposition in Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow int. J. of Multiphase Flow 1995