

## 局所発生汚染物質の再帰確率と Net Escape Probability

NET ESCAPE PROBABILITY OF CONTAMINANT FROM A LOCAL DOMAIN  
TO EXHAUST OUTLET

イム ウンス\*, 伊藤 一秀\*\*

*Eunsu LIM and Kazuhide ITO*

Ventilation is essential to control contaminant concentration in a room and hence the evaluation of ventilation effectiveness is crucial to achieve the clean, healthy and energy saving indoor environment. In general, contaminant transport efficiency is defined by total flux, i.e. convective and diffusive fluxes of contaminant in a local domain, and the fluxes are divided into two components; (i) contaminant directly exhausted through exhaust outlet in the room (and no-return to target local domain), and (ii) contaminant returned to the target local domain by recirculating flow in the room. In this study, we propose the calculation procedure of net escape probability (hereafter NEP) of contaminant in which the contaminant constantly generates in the target local domain.

**Keywords:** Ventilation Effectiveness, Net Escape Velocity, Net Escape Probability, Returning Probability

換気効率, 直接排出速度, 直接排出確率, 再帰確率

## 1. 序

換気とは室内の汚染空気と清浄空気(一般には外気)の交換を示す。仕様規定の立場では「室の換気回数0.5回/h以上」といった空気導入量そのものを要求するが、性能規定の立場では室内汚染物質濃度を閾値以下に制御するために必要となる清浄空気量の担保を要求する。一般環境を対象とすれば、換気による清浄空気供給の目的は衛生環境の維持・居住者の健康維持が主となるため、居住者の生活空間である居住域、呼吸域といった局所領域の空気環境制御が重要となる。省エネルギーの観点から考えると、外気導入に伴う換気負荷とは即ち空調負荷そのものであるため、局所領域空気環境制御は、居住空間から大きく離れた領域、例えば天井近傍領域に清浄空気を供給するといったエネルギー面で無駄を避けることにもなる。この視点は、換気効率研究として既に多くの研究成果が蓄積されており、実務への適用事例も多い<sup>1-3)</sup>。

本稿では、この室内換気効率に関して、室内に想定した局所領域の極限值に関して議論を深める。

前述のとおり、性能規定の立場から換気効率を考えれば、換気の本質の一つは「局所領域の汚染物質平均濃度の制御」となる。この局所領域平均濃度は室内での汚染物質発生量(とその位置)と清浄空気量で決定されるが、室内流れ場がNavier-Stokes式で記述される強非線形場であるため、完全混合や瞬時一様拡散といった単純かつ理想的な流れ場環境を仮定しなければ、容易に「局所領域の汚染物質(体積)平均濃度」を求めることは出来ない。室内に形成される不

均一混合場を前提として「局所領域の汚染物質平均濃度」を定義する実質的な換気量は、対象とする局所領域に流入する移流風量(境界面での平均風速と流入断面積の積)とは異なる値となり、この局所領域平均濃度を決定する実質的な換気風量はLocal Purging Flow Rate (*L-PFR*)と呼ばれる<sup>4,7)</sup>。

さて、この局所領域の汚染物質平均濃度と*L-PFR*は想定する局所領域のサイズに依存する。体積を有する局所領域の極限をとれば、室内の局所的な「点」となり、この場合に*L-PFR*は風量の次元 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] を持つことが許されず、速度スケール [ $\text{m}/\text{s}$ ] となる。この局所点の平均濃度を決定する速度スケールはM. SandbergによってNet Escape Velocity (*NEV*)と呼ばれており、筆者らの研究によって汚染物質移流フラックスと拡散フラックスの和から算出可能であることを報告している<sup>8,9)</sup>。

本稿では、この*NEV*によって定義される室内の「点」の平均濃度を構成する汚染物質の挙動に着目し、対象とする「点」から直接室の排気口に向かう成分と、再循環して対象とした「点」に再帰する成分に分離することで、室内の「点」の局所平均濃度の形成メカニズムに関して議論を深化させることを試みる。本稿では、「点」から直接室の排気口に向かう確率をNet Escape Probability (*NEP*) [-]と呼ぶこととし、以下、その定義と*NEV*との関係を議論する。

## 2. Net Escape Probability (NEP)

議論を単純化するため、Fig.1に示すような給気口と排気口が各1

\* 東洋大学理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

\*\* 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Faculty of Science and Engineering, Toyo University, Dr.Eng.  
Prof. IGSES, Kyushu University, Dr.Eng.

の単純な二次元室モデルを想定する。またNavier-Stokes式に支配される非線形場である室内流れ場の把握には計算流体力学CFDによる解析を前提とし、CFD解析の最小解像スケールであるControl Volume (CV)を、議論の対象とする局所領域と想定する。CVは厳密には体積を有するが、例えば、有限体積法による離散化を前提とした場合、CV内を体積積分することによりボリューム境界面における不均一性は無視されることになり、このCVの体積平均値を点と見なすことには一定の合理性がある。即ちCFD解析のCVを局所領域と想定することで、室内の「点」を想定した議論が成立する。

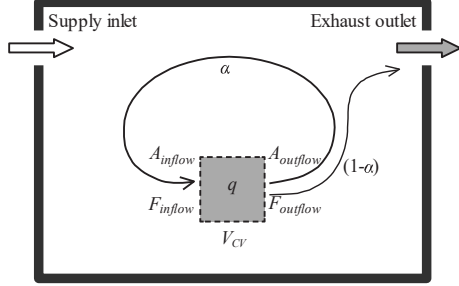


Fig.1 Conceptual Diagram of Net Escape Probability and Returning Probability

この室モデル内の一つのCVに着目し、このCV内で一定の汚染物質発生 $q$  [kg/m<sup>3</sup>/s]を仮定する。CV内で発生した汚染物質 $q$ の一部は室内を再循環し、最終的には室の排気口から必ず排出されることから、CV内で発生した汚染物質 $q$ がCV外に輸送後、再度CVに循環して戻ってくる確率を $\alpha$ [-]とすれば、CVに対する流入フラックス(CV界面における移流フラックスと拡散フラックスの和)が汚染物質再帰確率の等比級数の和とバランスし、次式が成立する。

$$qV_{CV} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n = qV_{CV} \frac{\alpha}{1-\alpha} = F_{inflow} \cdot A_{inflow} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ はCVから流出した汚染物質が再度同じCVに戻る確率[-]、 $q$ はCV内での汚染物質発生量 [kg/m<sup>3</sup>/s]、 $V_{CV}$ はCVの体積 [m<sup>3</sup>]、 $A_{inflow}$ はCVの界面で流入フラックスとなる面積 [m<sup>2</sup>]、 $F_{inflow}$ は流入フラックス(CV界面における移流フラックスと拡散フラックスの和) [kg/m<sup>3</sup>/s]を示す。当然のことではあるが、CVに対して流入フラックスが存在すると云うことは、一端CV外に輸送された汚染物質の再循環が存在することを示しているのである。

CVからの流出フラックス $F_{outflow}$ に着目すれば、質量保存より(2)式が成立し、(1)式と(2)式より(3)式が導かれる。

$$F_{inflow}A_{inflow} + qV_{CV} = F_{outflow}A_{outflow} \quad (2)$$

$$qV_{CV} \frac{1}{1-\alpha} = F_{outflow} \cdot A_{outflow} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ をReturning Probability (RP, [-])と呼ぶことにすれば、(1)式ならびに(3)式からRPは次式で算出される。

$$RP = \alpha = \frac{F_{inflow}A_{inflow}}{F_{inflow}A_{inflow} + qV_{CV}} = \frac{F_{inflow}A_{inflow}}{F_{outflow}A_{outflow}} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ 以外の成分、すなわち $(1-\alpha)$ はCVから流出した汚染物質の中で再度CVに再帰することなく、(室内空間をあちこちと漂うか

もしれないが)直接排気口から排出される成分を示し、これを汚染物質の正味排出確率 Net Escape Probability (NEP, [-])と定義する。

$$NEP = 1 - \alpha = \frac{qV_{CV}}{F_{outflow}A_{outflow}} = \frac{F_{outflow}A_{outflow} - F_{inflow}A_{inflow}}{F_{outflow}A_{outflow}} \quad (5)$$

上記の議論では、CVから流出した汚染物質の再帰確率 Returning Probability  $\alpha$ を一定と想定した。この仮定は、定常流れ場を前提とした議論に限定し、局所領域としたCVがCFDの最小解像スケールであることを鑑みれば、一定の合理性がある。また、この仮定を導入することで、NEPをRANSモデルによるCFD解析で算出することが可能となる。

本節で示したNEPは、筆者らが既報で提案している Visitation Frequency (VF)の概念をCVに適用し、確率(Probability)として再整理した概念に相当する<sup>7)</sup>。

次節ではNEPと局所「点」の平均風速を定義する速度スケールであるNet Escape Velocityとの関係を整理する。

### 3. NEP と Net Escape Velocity (NEV)の関係性

筆者らはCVを対象とした汚染物質の平均濃度を決定する速度スケールとしてベクトル量であるNet Escape Velocity (NEV)を(6)式もしくは(7)式のように2種類定義した。ここでは一次元モデル(x方向のみ)で構造格子系のCVを想定して定義している<sup>8)</sup>。

Definition [1]

$$NEV_x = \frac{1}{\phi_{CV}} \left\{ \left( u_x \phi \Big|_{out} - D_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{out} \right) - \left( u_x \phi \Big|_{in} - D_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{in} \right) \right\} = \frac{F_{outflow,x} - F_{inflow,x}}{\phi_{CV}} \quad (6)$$

Definition [2]

$$NEV_x^* = \frac{1}{\phi_{CV}} \left( u_x \phi \Big|_{out} - D_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{out} \right) = \frac{F_{outflow,x}}{\phi_{CV}} \quad (7)$$

ここで、 $\phi_{CV}$ は対象とするCVでの汚染物質濃度(体積平均濃度) [kg/m<sup>3</sup>]を示す。RANSモデルによる解析では、式(3)に示すとおり汚染物質濃度 $\phi_{CV}$ はアンサンブル平均量 $\overline{\phi_{CV}}$ を用いることになる。また $D_{eff} = (D + \nu_t / \sigma_t)$ であり、 $\sigma_t$ は乱流シュミット数を示す。

Definition[1]は、汚染物質が発生した場所で希釈・除去される実質的な排出速度で示すものであり、汚染物質の局所領域(体積)平均濃度を定義する実質的な換気量を示すPurging Flow Rate[m<sup>3</sup>/s]を「点」で定義した場合のNet Escape Velocityに相当する。

Definition[2]は、汚染物質が対象CVを離れるとき、即ちCVからの排出効率のみに着目した場合の汚染物質の輸送速度を表す。

Definition[1]ではCVに対する汚染物質の再循環分を差し引くことで、CV内で発生した成分のみに着目した排出効率を評価するのに対し、Definition[2]ではCVに対する再循環分も含めた全成分の排出効率を示すことになり、両者の定義は換気設計時の必要に応じて使い分けることが重要となる。

さて、本来は(6)式の $NEV_x$ ならびに(7)式の $NEV_x^*$ はベクトル量であるが、CVに対する汚染物質の流出のみに着目したスカラー量として

$NEV_x^*$ を再定義し、単純にCVに対する流入(Inflow flux)と流出(Outflow flux)の方向のみで正負を決定することとすれば、 $NEV$ と $NEV^*$ はスカラ量(ここでは3次元で定義)として(8)式ならびに(9)式と表現することができ、(5)式との関係より(10)が導出される<sup>注1)</sup>。

$$|NEV| = \sum_{i=1}^3 |NEV_i| = \frac{F_{outflow} - F_{inflow}}{\phi_{CV}} \quad (8)$$

$$|NEV^*| = \sum_{i=1}^3 |NEV_i^*| = \frac{F_{outflow}}{\phi_{CV}} \quad (9)$$

$$NEP \cdot |NEV^*| = \frac{qV_{CV}}{A_{outflow}\phi_{CV}} = |NEV| \quad (10)$$

本報では、この $NEP$ の物理的な意味を理解するため、単純な室モデルを対象として数値解析を実施する。

#### 4. 数値解析の概要

本報で対象とする単純室内モデル(二次元モデル)をFig.2に示す。無次元スケールで $10L_0 \times 10L_0$  ( $L_0$ は給気口幅)の閉空間であり、床面に沿った給気口の他、排気口位置を変化させて、3ケース設定(Case 1, 2, 3)した上で、給気口対向壁に汚染物質の吸着面を想定したケースを1ケース設定(Case 4)した。排気口の位置条件では、給気口対向壁面の床近傍(Case 1)、給気口対向壁面の天井近傍(Case 2)、給気口の位置する壁面の天井近傍(Case 3)の3条件とし、吸着面を有する室条件(Case 4)ではCase 3の給気口対向壁面に吸着面を想定した。

室内は給気口幅 $L_0$ と同一間隔で $10 \times 10$ メッシュの等間隔に分割しており、給気口ならびに排気口サイズは各1メッシュに相当することになる。また吹出風速は無次元風速1を与え、乱れ強さを30%と仮定した。Reynolds数( $Re = U_0 L_0 / \nu$ ,  $U_0$ は流入風速)は70,000として計算した。この解析対象は既報<sup>9)</sup>でNet Escape Velocity ( $NEV$ )の解析を実施したモデル空間であり、極力単純なモデル空間にて $NEV$ や本報で提案するNet Escape Probability ( $NEP$ )の物理的意味を議論し、解析手順を明示することを優先した。そのため、メッシュ分割が単純化されており、流れ場や濃度場の予測精度という観点では限界があることを認識した上での解析条件設定としている。

$10 \times 10$ メッシュの等間隔に分割した2次元室内モデル内の流れ場は、乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて解析を行う。壁関数(一般化対数則)を用いた解析とするが、本解析では壁面第一メッシュのサイズには配慮していない。定常流れ場の解析の後、Passive Scalarを仮定した汚染物質の拡散場解析を実施する。汚染物質はCVそれぞれで発生させ、個別に濃度場を計算する。即ち、本解析では $10 \times 10 = 100$ メッシュの各々で汚染物質を発生させて濃度場解析を実施することになり、計100回の濃度場解析を個別に実施した。ここで、汚染物質発生率 $q_{CV}$ は全条件において排気口における完全混合濃度が1となるように与えた。

汚染物質の濃度場解析の際、給気口と排気口の相対的な位置関係を変化させたCase1からCase3のケースでは、壁面に濃度勾配ゼロの境界条件を与えており、給気口対向壁に汚染物質の吸着面を想定したCase 4では、吸着面表面には濃度ゼロ(Perfect sink)固定の境界条件を、吸着面以外の壁面には濃度勾配ゼロの境界条件を与えた。

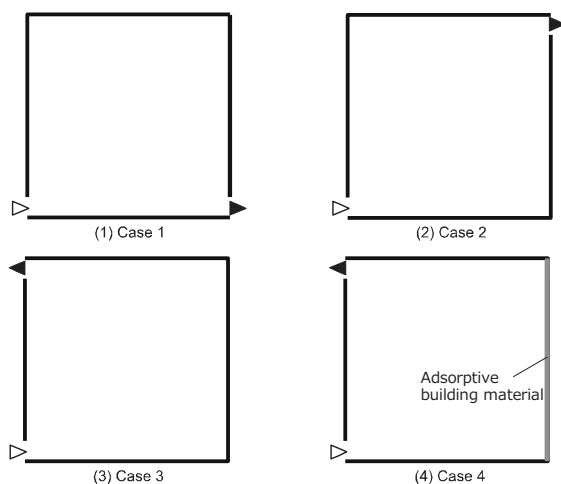


Fig.2 Cases Analyzed

Table 1 Numerical and Boundary Conditions

|                  |   |
|------------------|---|
| Mesh design      | 10 (X)×10 (Y)   |
| Turbulent model  | Standard $k-\epsilon$ model   |
| Algorithm        | SIMPLE  |
| Inflow boundary  | $U_{in}=1.0 [-]$ , $k_{in}=3/2(0.3U_{in})^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \cdot k^{3/2} / l_{in}$             |
| Outflow boundary | $U_{out}$ , $k_{out}$ , $\epsilon_{out} =$ Gradient zero  |
| Wall treatment   | Velocity: Generalized log law<br>Contaminant: Gradient zero (General wall)<br>$C_s=0$ (Adsorption wall surface) |
| Contaminant      | Passive scalar  |

#### 5. 数値解析結果

##### 5.1 平均風速分布

平均スカラ風速分布をFig.3に示す。平均風速のベクトル分布は $NEV^*$ の解析結果とあわせてFig.6 (移流風速:  $\rightarrow$ ,  $NEV^*$ :  $\rightarrow$ )に示している。スカラ風速分布に着目すれば、全体的に左側壁面下部に位置する給気口からの流入空気は、床面に沿って室内奥まで流入し、給気口対向壁面に衝突、その後は壁面に沿って流れることで室内に大循環流を形成する。全ての解析ケースにおいて壁面近傍で平均風速が相対的に大きくなっており、室中央では風速が小さく滞留域となった。平均風速のベクトル図(Fig.6 $\rightarrow$ )に着目すれば、排気口の相対的な位置関係によって風速に差異は見られるものの、全条件において反時計回りの大きな循環流が観察できる。Case 1では、給気口から排気口までの流入気流の移動距離が最も短く、流入気流は直接排気口へ向かい排気されるため、室内の循環風速は他の条件に比べて小さいことが確認できる。

##### 5.2 汚染物質の濃度分布

汚染物質を室全体で均一発生させたときの汚染物質の濃度をFig. 4に示す。図中の値は無次元濃度[-]で示しているが、Case 1~Case 3ではそれぞれの排気口での濃度(即ち完全混合濃度)を用いて基準化している。Case 4は吸着面による濃度低減効果が存在するため、換気量と汚染物質発生量から算出される完全混合濃度にて無次元化した(この完全混合濃度は全条件Case 1- 4で同一である)。

排気口の位置によって、濃度分布にやや差異は見られるものの、Fig.3に示した風速分布で風速の小さい室中央では濃度が高く、滞留域が形成されている。室内の体積平均濃度はCase 1, Case 2, Case 3,

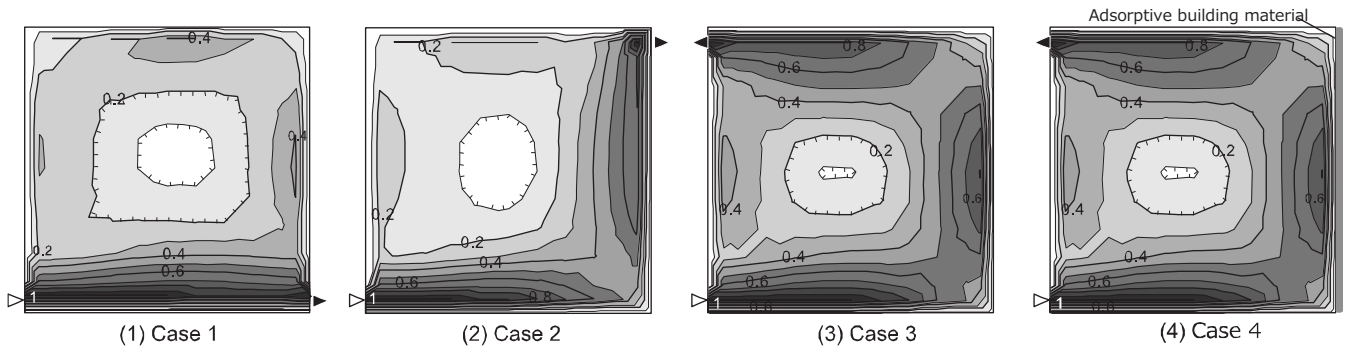


Fig.3 Distributions of Velocity Magnitude [ $U_{in}=1.0$ ]

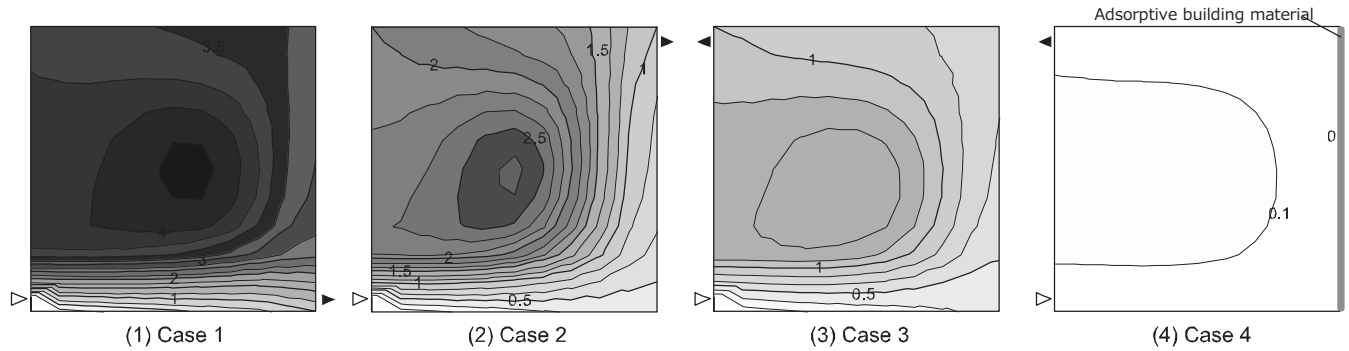


Fig.4 Distributions of Contaminant Concentration under Uniform Contaminant Generation in the Space [-]

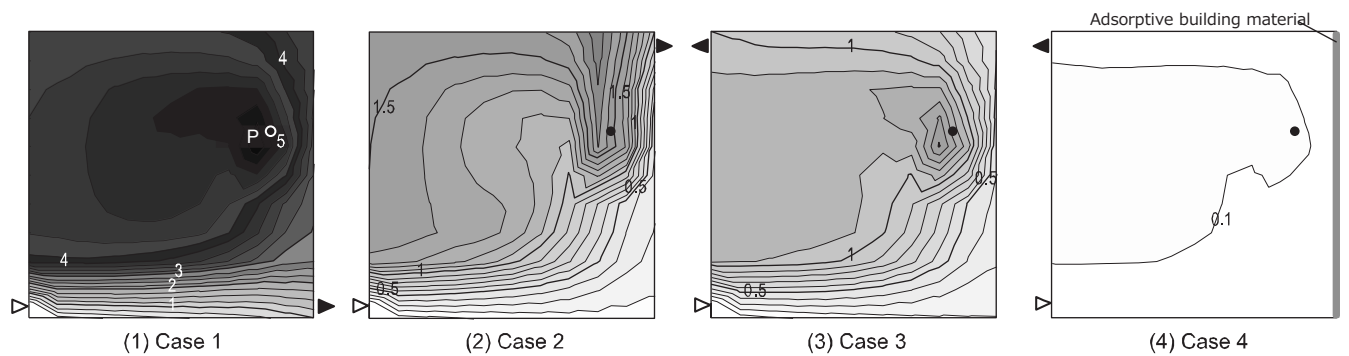


Fig.5 Distributions of Contaminant Concentration under Contaminant Generation at Point P in the Space [-]

Case 4の順で小さい値を示しており、床面と壁面に沿って流れる循環気流によって汚染物質が有効に輸送されること、そのために特にCase 4では吸着面に効率的に汚染物質が輸送され、その結果として効率的に汚染物質除去されている。Case 4では吸着面として表面濃度ゼロ、すなわち汚染物質のPerfect Sinkを仮定しているため、Case 3では室内汚染物質濃度の最大値が1.2程度であるのに対し、Case 4では0.1程度と非常に低い濃度となった。

室内の点P位置のCVで汚染物質を発生させた条件の室平均濃度分布をFig.5に示す。図中の値はFig.4と同様に無次元濃度で示している。汚染物質発生点である点P付近で濃度が高くなっており、特に循環流の下流域(室の左側領域)の濃度が高くなっている。

### 5.3 平均風速と $NEV^*$ のベクトル分布

平均風速分布(移流速度のベクトル図)と $NEV^*$ 解析結果をあわせてFig.6に示す。図中の $NEV^*$ (7)式にて定義されたDefinition[2])は定常流れ場条件のもと、各CVで順次汚染物質を定常発生させて得られた平均濃度場解析結果を用いて求めたものであり、移流の他、汚染物質濃度勾配に起因する拡散効果を統合した汚染物質の輸送速度

スケールを示す。今回の解析条件では、全てのケースにおいて移流風速ベクトルと $NEV^*$ のベクトルに大きな差異は見られないものの、詳細に比較すれば、両ベクトルには大きさや向きに一定の差異が観察できる。全体的に移流風速に比べて $NEV^*$ がやや大きく評価されており、濃度勾配による(乱流)拡散効果が一定程度存在することが確認できる。この結果は、移流の向きと濃度勾配の向き(拡散の向き)が同方向であることを示している(移流と拡散の向きが異なれば、 $NEV^*$ は移流風速スケールよりも小さく評価される)。Case 3とCase 4(給気口の対向壁を吸着面と想定)を比較すると、両者の $NEV^*$ 分布に有意な差異は確認できないが、給気口対向壁面から第1のCVでの $NEV^*$ は、吸着面への拡散成分の影響でCase 4の方がCase 3より $NEV^*$ 成分が2~3%程度大きく評価されている。本解析条件では、 $NEV^*$ 算出の際に計算対象となるCVのみで汚染物質を発生させるため、等方拡散により対象CVからの拡散フラックスはほぼ外向きになる。吸着面に接するCVでは、吸着面に対する吸着フラックスは一定量存在するものの、その逆方向(室空間側)にも一定の拡散フラックスが存在し、 $NEV^*$ 算出の際に両者が打ち消し合うために、吸着面に平行



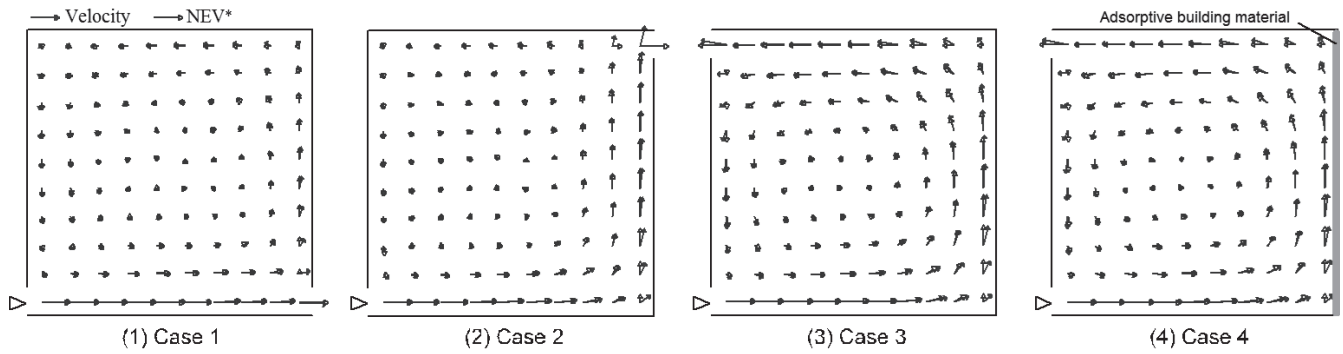


Fig.6 Vector Distributions of Airflow (advection) and NEV\* [ $U_{in}=1.0$ ]

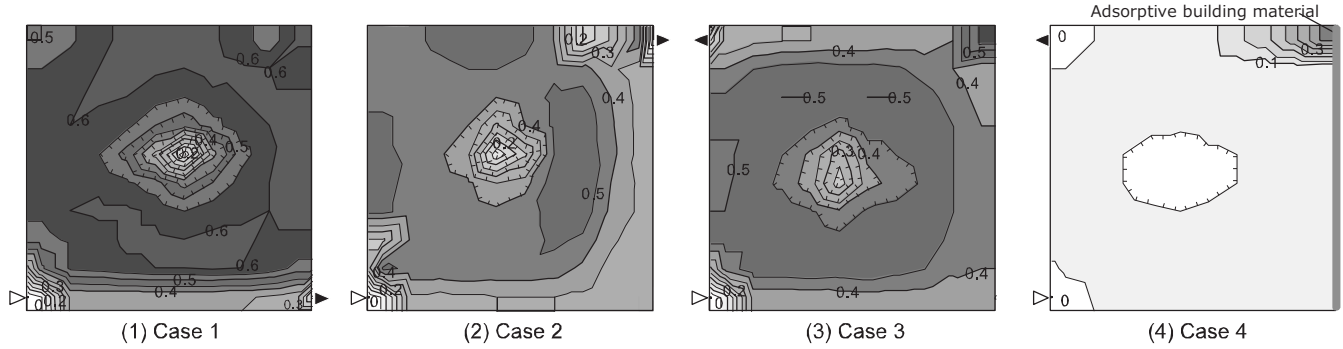


Fig.7 Distributions of Returning Probability [-]

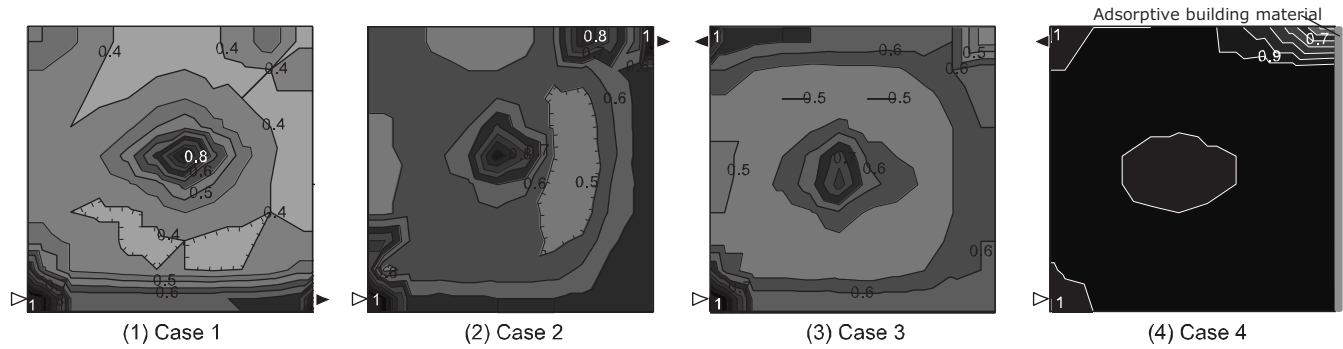


Fig.8 Distributions of Net Escape Probability [-]

なNEV\*成分が強調される結果となった。

#### 5.4 RP と NEP の分布

汚染物質再帰確率 Returning Probability (RP : (4)式)分布の解析結果をFig.7に、対象CVから流出した汚染物質が再度CVに再帰することなく直接排気口から排出される確率、即ち汚染物質の正味排出確率Net Escape Probability (NEP : (5)式)分布の解析結果をFig.8に示す。ここで、各CVのRPとNEPはFig.6に示したNEV\*と同様に、定常流れ場情報をもとに、各CVで順次汚染物質を発生させて得られた平均濃度場情報を用いて求めた値である(Fig.8のNEP分布を得るために、メッシュ数に対応する10×10回の濃度場計算を実施した)。

全ケースにおいて、給気口と排気口に接するCVでは、両位置ともに汚染物質再帰確率RPは0に近い値となり、NEPは1に近い値となる。これは、給気口と排気口近傍のCVで発生した汚染物質は、CVから排出された後、室内の様々な経路を辿る可能性はあるものの、過半が再帰せず、直接排気口から室外へ排出されることを意味する。滞留域の室中央と給気口と排気口のない隅角部においても、RPは相対的に小さい値となり、NEPは相対的に大きい値となる。滞留域ではCV内で発生した汚染物質の輸送は拡散による輸送が支配的であり、

CVから排出された汚染物質が移流により再帰する確率が低いことを定量的に示す結果となっている。Fig.8に示したNEPの分布は、図中の各ポイントで発生した汚染物質が(各ポイントに一度も戻ることなく)排気口に輸送される確率を示しており、汚染物質排出経路(もしくは換気による希釈経路)を定量的に示す指標となっているが、排出までの時間スケールを含むものではないことに注意が必要である。

#### 5.5 NEV の分布

我々は、汚染物質の局所点濃度を規定する輸送速度スケールを、NEV((6)式)ならびにNEV\*((7)式)として2種類定義した。両者は、(10)式で示したとおり、汚染物質の正味の直接排出確率であるNEPを用いることで統合される。Fig.9には(7)式で定義された $|NEV^*|$ の分布を、Fig.10にはNEP・ $|NEV^*|$ の分布、即ち、(6)式で定義された $|NEV|$ の分布を示す。両者をFig.3に示した平均スカラ風速(移流風速)分布と比較すると、汚染物質が局所点(CV)を離れる際の汚染物質輸送速度 $|NEV^*|$ は移流風速より大きい値となっており、移流速度と $|NEV^*|$ の差は汚染物質が拡散により局所点外に輸送される成分を示す。また、汚染物質が局所点(CV)を離れた後、その点に再帰する

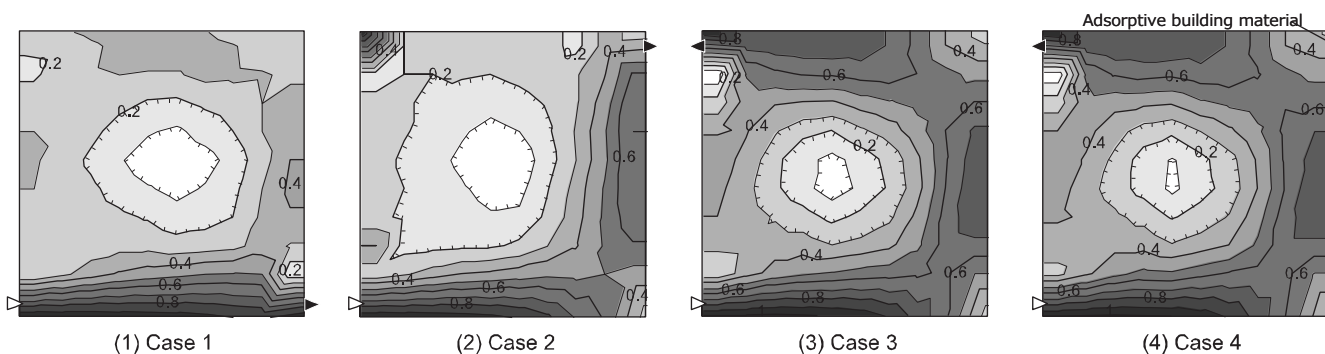


Fig.9 Distributions of Net Escape Velocity Star  $|NEV^*| [U_{in}=1.0]$

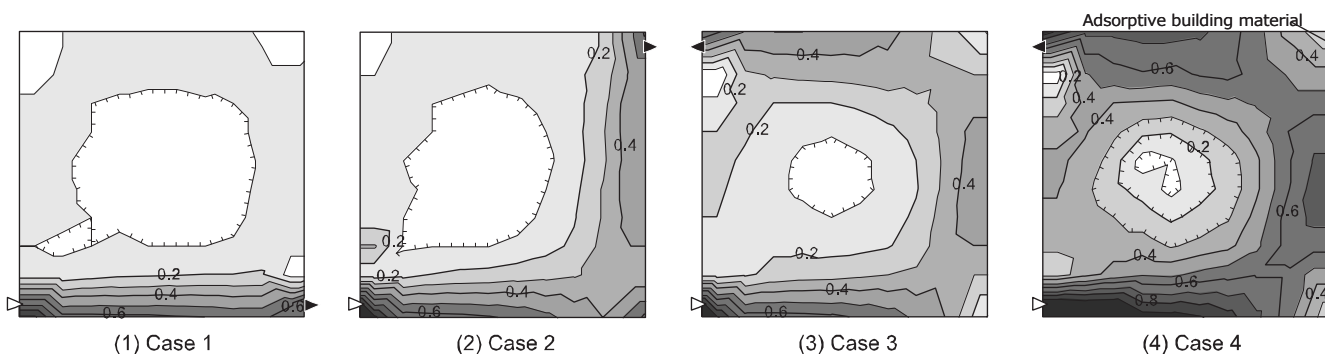


Fig.10 Distributions of Net Escape Velocity  $|NEV| [U_{in}=1.0]$

ことなく直接排気口に向かう汚染物質排出経路の排出速度スケール成分 $|NEV|$ は移流風速より小さい値となっている。

## 6. 考察と今後の課題

本稿では室内の局所領域換気効率の一つの極限(極値)に関する議論として、CFD解析のコントロールボリューム(CV)を実質的な質点と見なし、この局所点で発生した汚染物質の再帰確率Returning Probabilityと汚染物質の排出確率Net Escape ProbabilityをRANSモデルによる平均拡散場解析結果を用いて算出する手順を示し、単純な2次元室モデルを対象として数値解析を実施した結果を報告した。

局所点での換気効率を考える場合、第一にその点での汚染物質平均濃度(もしくは完全混合濃度で無次元化した濃度)が本質的な情報を与える。続いて、この局所点の平均濃度を設計目標値もしくは(各種の環境基準で定められた)閾値以下に制御することになるが、この濃度制御を効率的に行うためには、局所点の平均濃度を形成するメカニズムの理解が必要となる。例えば、汚染物質の輸送速度を表す $NEV^*$ が大きく $NEP$ も大きい場合、移流と乱流拡散の効果によって汚染物質(再帰汚染物質と発生した汚染物質の両方)が注目する点から素早く離れると共に、再循環無く排気口を通過して除去される確率が大きいことを示しており、結果として((10)式で定義される)点で定義される $NEV$ も大きくなる。換気設計上はこの $NEV^*$ と同点での平均風速(移流速度) $U$ を比較することで乱流拡散による濃度希釈効果の程度が把握でき、 $NEP$ の値より給気口から排気口に至る仮想的な室内換気経路上の同点の相対位置が把握できる。これが前述した「局所点の平均濃度形成のメカニズム理解」の意図である。しかしながら、換気設計上の現実的な制御パラメータは給気口のレイアウトや風

量であり、流れ場が強非線形場であることを鑑みれば、これらのパラメータを調整した結果、 $NEV^*$ や $NEP$ に与える影響は、新たな境界条件の下で解析を実施しなければ定量的に把握することは不可能である。 $NEV^*$ や $NEP$ の値から適切な給気口のレイアウトや風量を決定する問題は、所謂、逆問題解析と呼ばれる分野の課題となり、(3次元同化や4次元同化手法など)非常に活発な研究が進められている。 $NEV^*$ や $NEP$ の解析を単なる局所点の平均濃度形成のメカニズムを理解する指標から、実用的な換気設計ツールに昇華させるためには、逆問題解析技術を含めた更なる研究開発が必要である。

本報で議論した汚染物質の排出確率Net Escape Probability ( $NEP$ )ならびに汚染物質の実質排出速度Net Escape Velocity (本稿では、 $NEV$ )は「新鮮空気の供給場所である給気口から排気口に至る一連の換気空気のフローの中で、その途中にある注目する局所点から排気口までの汚染物質輸送に関する効率」を定量的に議論する指標である。 $NEP$ は注目点で発生した汚染物質がどれくらいの割合で(直接)排気されるかを示す指標であり、その点を通る気流(もしくは汚染物質塊)が対象とする局所点を通過した後の領域(局所点より後流域)で(対象点を再度経由することなく)直接排気口に向かう経路と、少なくとも一度は対象とする局所点に再帰する経路、の二つに分岐すると仮定した場合、前者の経路に沿った汚染物質輸送量の割合が $NEP$ 、後者が $RP$ となる<sup>注2)</sup>。 $NEV^*$ はその局所点の後流側の全ての輸送経路に沿った汚染物質の輸送速度を、 $NEV$ は局所点の後流側の複数の輸送経路の中で直接排気口に向かう経路のみに着目した汚染物質の輸送速度(これらは空気の移流速度とは異なる値)を示している。

局所点での濃度値が一定である場合を想定し、その点で $NEV^*$ が大きいが、同時に $NEP$ が小さい場合は、発生汚染物質が高速で移動す

るが、繰り返しその点に戻ってくることを意味する。 $NEV^*$ が小さく且つ $NEP$ が大きい場合は、発生汚染物質はゆっくりと移動するが、そのまま(注目する局所点には再帰せず)排気口に向かうことを意味する。これらを端的に示すのが $NEV^*$ と $NEP$ を統合した $NEV$ となる。この $NEV$ 、 $NEV^*$ と $NEP$ を用いた換気効率解析は、汚染物質濃度が単純に移流風速(換気量)のみで決定されない場合、特に、局所的に汚染物質の吸着材が設置されており、その吸着フラックスが濃度場に大きな影響を与えるケースや空間中で化学反応等が生じて濃度減衰するケースなどの評価指標として有効となる。

また、本報で議論した局所“点”での議論はそのまま有限の体積を有する局所領域に拡張が可能であり、呼吸域や居住域といった局所領域換気効率制御にも展開可能である。それ故、本稿にて局所領域の極限としての「点」での平均濃度形成メカニズムに関する議論を展開したことには一定の意義がある。

## 謝辞

本報で提案したNet Escape Probabilityの定義や物理的意味、換気効率指標としての妥当性に関してM. Sandberg先生 (KTH, Sweden) と多くの貴重なディスカッションを踏まえた上での成果である。Sandberg先生からのご助言に深甚なる謝意を示します。本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号16H04466)の助成を受けたものであり、記して深甚なる謝意を示します。

## 注

注1) (6)式ならびに(7)式で定義した $NEV$ ならびに $NEV^*$ は仮想的な局所点に相当する $CV$ を想定した上でのマスバランスを基に導出されたものである。従って、1次元モデルにて考察する場合、この仮想的な $CV$ では流入面と流出面の面積が等価であることが前提となっている。この定式化を3次元に拡張した場合、3次元 $CV$ での流入面と流出面の面積が等価となる想定は厳密には成立しない。そのため、(8)式ならびに(9)式から、(10)式を導出する際には、3次元 $CV$ における流入面面積 $A_{inflow}$ と流出面面積 $A_{outflow}$ の面積比( $A_{inflow}/A_{outflow}$ )を用いて流入フラックス $F_{inflow}$ を補正し、流入面と流出面が等価である場合の換算流入フラックス $F'_{inflow}$ を用いる必要がある。

CFD解析における $CV$ が最小の解像スケールであり、 $CV$ 内での均一性が担保されているとの前提に立てば、流入面と流出面の面積が等価であると仮定した流入・流出フラックスを用いた $NEV$ 、 $NEP$ の定式化にも一

定の合理性がある。

注2) 例えば、局所点での $NEP$ が0.7、 $RP$ が0.3であれば、その点を経由する汚染物質輸送量のうち7割は(その点に戻る事無く)排気口へ向かう経路に沿って除去されるが、3割は様々な経路で室内を辿って少なくとも一度は対象とする局所点に再帰することを意味する。概念図を図A-1に示す。

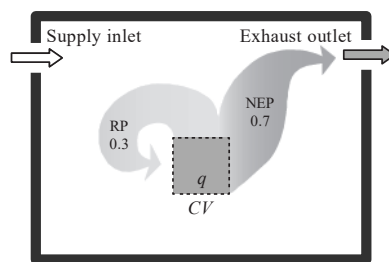


図 A-1 局所点での $NEP$ と $RP$ の概念図

## 参考文献

- 1) Mats Sandberg : What is ventilation efficiency?, *Building and Environment*, 16 (2), pp123-135, 1981
- 2) Shinsuke Kato and Shuzo Murakami : New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation, *ASHRAE Transactions*, 94(2), pp309-330, 1988
- 3) Thad Godish, John D. Spengler : Relationships Between Ventilation and Indoor Air Quality-A Review, *Indoor Air*, 6(2), pp135-145, 1996
- 4) Mats Sandberg : Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review, International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, *The University of Tokyo*, 1992
- 5) Lars Davidson, Erik Olsson : Calculation of age and local purging flow rate in rooms, *Building and Environment*, 22(2), pp11-127, 1987
- 6) Shia-Hui Peng, Lars Davidson : Towards the determination of regional purging flow rate, *Building and Environment*, 32(6), pp513-525, 1997
- 7) Shinsuke Kato, Kazuhide Ito and Shuzo Murakami : Analysis of Visitation Frequency through Particle Tracking Method based on LES and Model Experiment : *Indoor Air*, 13 (2), pp182-193, 2003
- 8) Eunsu Lim, Kazuhide Ito and Mats Sandberg : New Ventilation Index for evaluating imperfect mixing condition- Analysis of Net Escape Velocity based on RANS Approach : *Building and Environment*, 61, pp45-56, 2013
- 9) Eunsu Lim, Kazuhide Ito and Mats Sandberg : Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index Net Escape Velocity : *Building and Environment*, 79, pp78-89, 2014

# NET ESCAPE PROBABILITY OF CONTAMINANT FROM A LOCAL DOMAIN TO EXHAUST OUTLET

*Eunsu LIM\* and Kazuhide ITO\*\**

\* Assoc. Prof., Faculty of Science and Engineering, Toyo University, Dr.Eng.  
\*\* Prof., IGSES, Kyushu University, Dr.Eng.

The amount of contaminant re-circulated in a local domain implies the potential of the ventilation efficiency in a room. The returning probability (hereafter RP) of contaminant generated in a local domain and the net escape probability (NEP) of that will become useful information for understanding the mechanism of contaminant concentration distribution formed in a target room and for controlling Indoor Air Quality. Here we proposed the fundamental definitions of RP and NEP, and then discussed the potential relation with net escape velocity ((hereafter NEV, 2013 Lim et al.) concept. Further, the calculation results of RP, NEP and NEV distributions in simple 2D model room were demonstrated.

We have already reported the definition and calculation procedure of NEV. NEV is defined for control volume of CFD (C.V.) and is calculated based on the net flux, difference between transport out of and into the C.V. NEP is defined as the probability that is exhausted directly through exhaust outlet and does not re-circulate to the target local domain (here, C.V.) again. If the RP, to target local domain is assumed to be constant, is calculated by the summation of geometric series of returning frequency to the target local domain. The sum of NEP and RP equals '1.0' and the NEP must be (1- $\alpha$ ).

In this study, the NEV and NEP distributions were analyzed in 2D simple model room. The size of indoor model is  $10L_0 \times 10L_0$  ( $L_0$ : size of inlet) with a dimensionless scale. We set up the dimensionless wind velocity  $U_{in} 1.0 [-]$  at inlet. For calculating the NEP and NEV in a C.V., contaminant was assumed to be generated in C.V. and this meant that the same numbers of CFD calculations with the number of C.V. within the target room were required.

As a result, the supplied jet from the inlet opening flowed into the room along the floor and reached the sidewall opposite the supply inlet. Flow bifurcation was observed in front of the exhaust outlet and a large circulating flow and one-pass flow from the supply opening to the exhaust outlet were formed. A stagnant region was formed at the center of the room. The slight differences between air velocity vector and NEV that were calculated by net flux removed/diluted contaminant from the target C.V. was confirmed.

NEP became '1.0' at the vicinity of exhaust outlet because the contaminant in the target C.V. was directly exhausted through exhaust outlet and would not be returned. It means that RP denotes '0'. NEP at the vicinity of inlet was '0.94' because most of contaminant in the target C.V. was transported from inlet to exhaust outlet with little re-circulation. NEP became high at the center, stagnant region, in the room. In this region, the contaminant concentration was high and the driving force of contaminant transportation depended on diffusion than convection. And then diffused contaminant from stagnant region in room did not return to the original C.V.

(2016年7月1日原稿受理, 2016年11月22日採用決定)