

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：32663  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2012～2014  
 課題番号：24560717  
 研究課題名(和文) 汚染物質の局所排出速度を示す新たな換気効率指標に基づく室内空気環境設計法の開発  
  
 研究課題名(英文) Development of indoor air environment design method based on a new ventilation index that presents the net velocity scale of contaminant transport  
  
 研究代表者  
 Lim Eunsu (Lim, Eunsu)  
  
 東洋大学・理工学部・准教授  
  
 研究者番号：50614624  
  
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：清浄な空気環境創出を目的とし、汚染物質の実質的な局所排出速度を定量的に評価する新たな換気効率指標Net Escape Velocity(NEV)を開発し、NEVにより室内不均一濃度場の形成メカニズムを深く理解し、構造的に解明すると共に、効率的な室内局所領域の空気環境制御法を提案した。それに加え、ガス状汚染物質濃度をパッシブ制御する技術として光酸化分解反応に着目し、TiO<sub>2</sub>担持建材の性能評価法を確立するため、CFDによる室内濃度予測に組み込み可能な光酸化分解反応モデルを提案した上で、独自開発した20Lチャンバーを用いてトルエン濃度低減性能試験とモデルパラメータ同定を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a design method to create a high level of IAQ. We proposed a concept of Net Escape Velocity (NEV), as a new index for ventilation effectiveness in an indoor environment and to establish a design method of indoor environment based on NEV. NEV represents the effective velocity at which the contaminant is transported/diluted from a target point. The possibility of NEV as an index for evaluating the structure of a non-uniform concentration field of a contaminant was revealed. In addition, a purpose of this research is to establish of numerical prediction of concentration reduction performance of VOCs in Indoors by photocatalytic oxidation (PCO). The kinetic studies were carried out for PCO of toluene as a VOCs in the gas phase over TiO<sub>2</sub>-bound building materials using a 20 L test chamber developed by us and CFD simulations were performed using the same boundary conditions as the experiments to identify model parameters of the PCO process.

研究分野：建築環境工学

キーワード：建築環境設備 換気効率 Net Escape Velocity 計算流体力学 汚染物質濃度低減 光触媒 光酸化分解 小形チャンバー

## 1. 研究開始当初の背景

九割以上の時間を室内空間で過ごす現代において、室内空間の空気環境が居住者の健康に直接的な影響を与えることは明白である。それ故、必要換気量を満足させることは当然のこととして、各種の汚染物質による健康影響リスクを最小化する清浄度の高い室内空気環境の創出と空気質の適正管理が強く求められている。

室内に形成される不均一汚染物質濃度場制御の観点では、各種の換気効率指標が開発されており、一部は既に換気設計の実務に応用されている。しかしながら、実施設計では換気効率を考慮した場合においても、居住域と完全混合濃度の比を用いて外気導入量を調整する方法が通常であり、室内での汚染物質の不均一性を積極的に利用して空間全体での濃度低減を図るための換気効率指標ならびに空気環境設計法は十分に整備されているとは言いがたく、省エネルギー性能と良好な空気質を両立させた高度な環境設計を達成するためには、室内に形成される不均一濃度場に対する更なる理解と評価方法の確立が必要である。

清浄度が高く感染リスクの低い室内空気環境を作出するためには、環境中に存在する対象汚染物質が建築空間で効率的に希釈・除去されるかを定量的に評価する指標が必要である。換言すれば、対象汚染物質を吸着・分解する建材の性能と室内空気流動を総合的に考慮した最適な組み合わせを実現する必要があり、統一したフレームで汚染物質の高精度濃度予測と定量評価を可能とする空気環境予測モデルの開発と健康影響リスク最小化を目指した空気質制御アルゴリズムの開発が必需となるが、海外でも研究例は少ない。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、汚染物質の局所排出速度に着目した新たな換気効率指標を開発すると共に、各種汚染物質を対象とし、光触媒を担持した建材と換気装置による空気流動を最適に組み合わせることで、清浄度の高い室内空気環境設計法の構築を行うことを目的とする。

- (1) 汚染物質の局所実質排出速度を評価する換気効率指標 Net Escape Velocity の開発  
局所領域の平均濃度を定義し、局所領域からの実質的な汚染物質排出換気量を示す Purging Flow Rate (PFR) の概念を拡張し、CFD でのコントロールボリューム(CV)で定義可能な、局所領域からの実質的な汚染物質排出速度を示す新たな換気効率指標 Net Escape Velocity (NEV) を開発する。
- (2) 可視光応答型光触媒を担持した建材の汚染物質分解速度の実験的解明と性能評価法の確立  
開発した SUS 製小形チャンバーを用いて一定濃度供給法にて可視光応答型光触

媒を担持した建築材料の汚染物質濃度減衰性能を評価すると共に、光酸化分解反応の Langmuir- Hinshelwood 型数理モデル化を提案し、結果より反応速度定数を求める。測定により得られた反応速度定数を用いた沈着分解フラックス式を整理することで、CFD を基礎とする濃度場解析での境界条件整備を行う。

- (3) 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた高効率空気清浄空間創出設計法の開発  
室内空気環境の良否評価ならびにその制御パラメータとして汚染物質の局所実質排出速度を評価する指標 NEV を用い、効率的な濃度場制御を可能とする空気環境設計法を整理する。

## 3. 研究の方法

新たな換気効率指標 Net Escape Velocity (NEV) を開発し、局所汚染物質排出速度 NEV により空間最小解像単位の質点における換気効率評価に基づく換気設計法を提案する。実験による光触媒建材表面での反応速度定数を用いた沈着分解フラックスモデルを開発し、CFD 解析の境界条件として組み込むことで、高精度の汚染物質の不均一濃度分布予測手法を開発する。

- (1) 汚染物質の局所実質排出速度を評価する換気効率指標 Net Escape Velocity の開発  
局所領域の平均濃度を定義する局所排出換気量 NEV の理論的背景を整理し、既往の換気効率指標と比較することで、その有効性を明確にする。  
CFD による濃度場解析結果を基に、コントロールボリューム(CV)での汚染物質の移流フラックスと拡散フラックス、平均濃度値を用いて NEV を算出するアルゴリズムを開発する。
- (2) 各種の局所換気装置を対象とした空気質制御問題への NEV の適用  
IEA Annex 20 のベンチマークテストケース(図 1)を解析空間として、流れ場と汚染物質発生領域の異なる 3 次元空間条件を対象とした流れ場・汚染物質拡散場の予測結果と、NEV ならびに PFR の解析結果を示すことで、NEV を利用した換気設計のための基礎データを整理する。  
産業換気分野にて特徴的な換気システム、特に厨房換気における局所排気装置(図 2)と Push-Pull 型換気装置に着目し、現実的な空間を対象とした制御対象局所領域の換気性状を NEV にて評価する。
- (3) 可視光応答型光触媒を担持した建材の汚染物質反応速度定数の測定  
ISO 16000-9 に準拠して独自制作した 20L 小形チャンバーを用いて、一定濃度供給法によるトルエン濃度低減試験を実施し、光触媒建材による対象汚染物質の実験チャンバー内滞在(通過)時間と濃度低下量より沈着分解速度定数(反応速度定数)を算出する。20L 小形チャンバーを含む実

験系の模式図とチャンバーの写真を図 3 に示す。

(4) CFD への組み込み可能な吸着分解フラックスモデルの開発

上記(3)で得られた実験結果を踏まえ光触媒を担持した建材表面での濃度変化を CFD 解析での壁面境界条件として組み込み可能な沈着分解フラックスモデルを開発する。粘性底層内( $y^+ < 1$ )での成立を前提とするフラックスモデルとし、参照濃度と反応速度定数によるシグモイド型の Langmuir-Hinshelwood 型吸着分解フラックスモデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 汚染物質の局所実質排出速度を評価する換気効率指標 Net Escape Velocity の開発

局所領域の平均濃度を定義する局所排出換気量 NEV の理論的背景を整理し、既往の換気効率指標と比較することで、その有効性を明確にした。

局所領域換気効率として良く知られている Purging Flow Rate (PFR)は、局所領域の汚染物質平均濃度を決定する実質換気量を表しているが、NEV は室内のある点の代表濃度を決定する速度スケールを持つ換気の基本性質であり、特定空間の換気性能を決定する最小スケールの物性値とも云える。Sandberg によって NEV の基本的概念のみ提案されたのを、本研究課題により NEV の数学的定義を確立した。

CFD 解析上のコントロール・ボリューム (CV)に対する汚染物質の流入・流出フラックスによる NEV の定義を式(1)に示す。

$$\overline{NEV}_j = \frac{1}{\phi_p} \left\{ \left( \overline{u_{out} \phi_{out}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right)_{out} - \left( \overline{u_{in} \phi_{in}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right)_{in} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $D_{eff} = (D + v_t / \sigma_t)$  あり、本解析では  $D = v$  (動粘性係数,  $1.5e-05 \text{ m}^2/\text{s}$ )とした。 $\sigma_t$  は乱流シュミット数を示し 1.0 と仮定する。

フラックスを CV に対する汚染物質の発生と見なした場合の NEV\*の定義を式(2)に示す。

$$\overline{NEV}_i^* = \frac{1}{\phi_p} \cdot \left( \overline{u_{out} \phi_{out}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right)_{out} \quad (2)$$

式(1)の  $NEV_i$  はベクトル量の一成分であり、3次元計算の場合の NEV のスカラー量は式(3)で求める。

$$\overline{NEV} = \sqrt{\overline{NEV}_x^2 + \overline{NEV}_y^2 + \overline{NEV}_z^2} \quad (3)$$

単純な 2次元流れ場を対象として RANS モデルによる平均拡散場解析を実施した上で、CFD による濃度場解析結果を基に、コントロールボリューム(CV)での汚染物質の移流フラックスと拡散フラックス、平均濃度値を用いて NEV を算出するアルゴリズムを開発した。

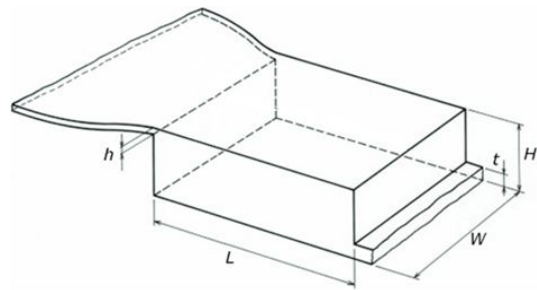


図 1 IEA Annex 20 テストケース

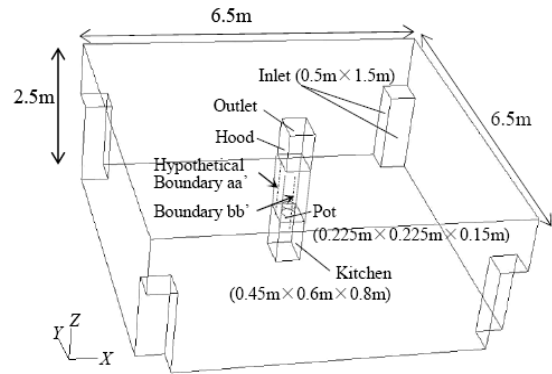
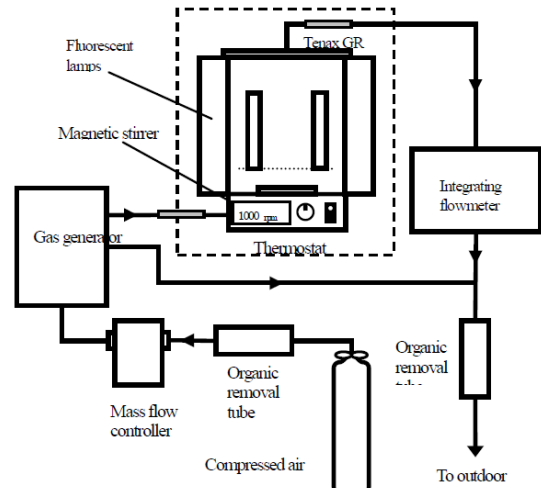


図 2 厨房換気装置を有する解析空間



(1) 一定濃度供給法による試験模式図



(2) チャンバー外観 (3) チャンバー内観

図 3 20L 小形チャンバーを含む実験系の概要

(2) 各種の局所換気装置を対象とした空気質制御問題への NEV の適用

IEA Annex 20 のベンチマークテストケースを対象として、異なる気流性状を持つ 3 次元空間を対象とした流れ場・汚染物質拡散場の予測結果と、NEV ならびに PFR の解析結果を示すことで、NEV を利用した換気設計のための基礎データを整理した。計算結果の一例を図 4 に示す。図 4 - (3) に示す各 CV における平均風速で基準化した NEV の分布は、移流風速成分と NEV の差異を示している。無次元 NEV が 1 の場合は拡散による汚染物質輸送は無視可能で移流のみ存在する場を示す。無次元 NEV が 1 と異なる値を有する場合には、その 1 からの差異が拡散フラックスによる汚染物質の輸送効果を示すことになり、場所によっては無次元 NEV が最大 1.51 と拡散効果が約 50% であることが示された。

産業換気分野の厨房環境における局所排気装置や Push-Pull 換気装置を有する空間において、汚染物質制御領域と室内との仮想境界面における NEV のベクトル分布ならびに、各 CV の移流風速で無次元化した NEV 分布を用いて、汚染物質の輸送構造を解明すると共に、NEV による空気質制御への適用可能性を確認した。

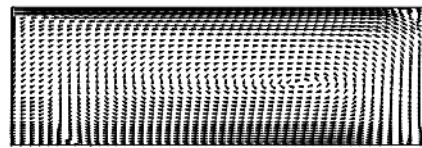
厨房換気排気風量を検討パラメータとし、排気フードの風量を 100m<sup>3</sup>/h(Case K1)、300m<sup>3</sup>/h(Case K2)の 2 条件の汚染物質拡散場の解析結果を図 5、仮想境界における NEV 分布を図 6、各 CV の移流風速で無次元化した NEV 分布を図 7 に示す。フード領域内で発生した汚染物質は、濃度の低いフード領域の外側に向かって拡散するため、移流フラックスと拡散フラックスの向きが異なる。ベクトル表示した NEV(▶)は単純な移流速度(ベクトル、▷)より、フード領域の外側に傾く傾向が観察出来る。図 7 中の無次元 NEV の値 1.0 は移流速度 = NEV を、1.0 < NEV は移流と拡散の向きが異なることを意味し、両条件共に、NEV の値が 1.0 より小さくなっており、拡散による室内空気質が低下することが理解できる。移流速度は拡散速度により CaseK1 で最大 17%、CaseK2 で最大 51%低下することとなった。

(3) 可視光応答型光触媒を担持した建材の汚染物質反応速度定数の測定

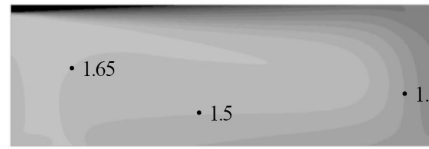
ISO 16000-9 に準拠して独自制作した 20L 小形チャンバーを用いて、一定濃度供給法によるトルエン濃度低減試験を実施した。実験の前に、チャンバー内 SUS 壁面への物理吸着が無視可能なレベルであることを確認した上で、光触媒建材によるトルエン濃度の低減率を式(4)で評価した。

$$\eta = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \quad (4)$$

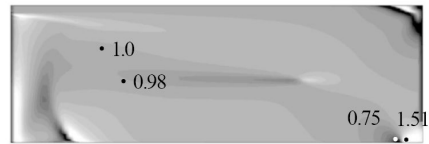
$C_{in}$  ならびに  $C_{out}$  はトルエンの供給濃度と



(1) 平均風速ベクトル分布(z=H/2)

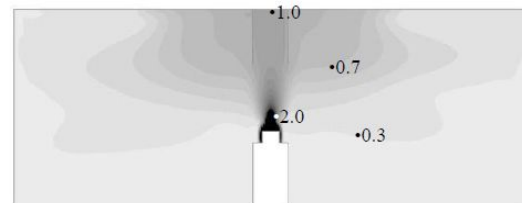


(2) 平均濃度分布(z=H/2)

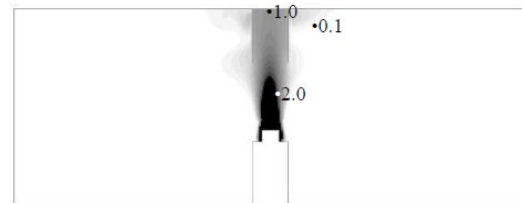


(3) 各セルにおける平均風速で無次元化した平均 NEV の分布(z=H/2)

図 4 IEA Annex 20 テストケースを対象とした 3 次元空間での解析結果の一例

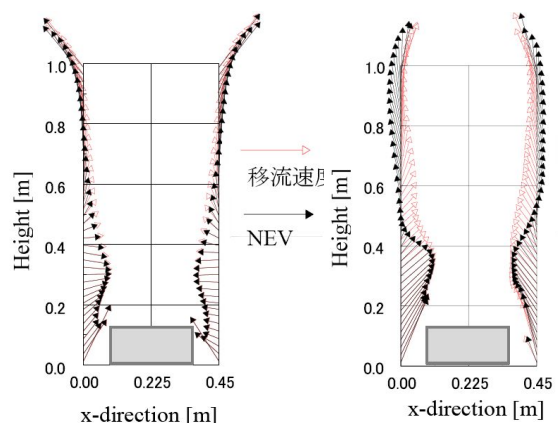


(1) 換気量 100 m<sup>3</sup>/h



(2) 換気量 300 m<sup>3</sup>/h

図 5 厨房の汚染物質濃度分布



(1) 換気量 100 m<sup>3</sup>/h (2) 換気量 300 m<sup>3</sup>/h

図 6 厨房換気モデルの仮想境界面における NEV 分布[m/s]

排出濃度(単位は $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ ),  $\eta$  [-]は Conversion (濃度低減率)を示す.

実験対象の光触媒担持建材による汚染物質トルエン濃度低減率の結果一部を図8に示す. 供給濃度約  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 800 \mu\text{g}/\text{m}^3$  の範囲内で, 約  $0.51 \sim 0.88$  の濃度低減率 $\eta$  [-]となった. 光酸化分解反応によるトルエン濃度の低減率は供給濃度が高くなるにつれ低下し, 供給濃度の約 10 倍増加に対して濃度低減率は約 42%低下し, 供給濃度による濃度依存性を確認した.

触媒層表面における光触媒反応の数理モデルを表1にまとめて示す. 光酸化反応のモデル化では, シグモイド型の Langmuir-Hinshelwood 型のモデルを採用し, 小形チャンパー内の流れ場, 濃度場等の不均一性を無視した上でチャンパー内を質点系と想定して実験結果からモデルパラメータを同定した.

表1 触媒層表面における光触媒反応の数理モデル

[1] Langmuir-Hinshelwood 型の吸着モデルを考慮した反応速度式

$$r = k \frac{KC_{VOC}}{1 + KC_{VOC}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kK} \frac{1}{C_{VOC}} + \frac{1}{k} \quad (6)$$

[2] 実験値からの  $r$  の算出式

$$r = \frac{Q}{A} (C_{in} - C_{ext}) \quad (7)$$

$r$ : 反応速度 $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$   
 $C_{VOC}$ : トルエン濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$   
 $k$ : 反応速度定数 $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$   
 $K$ : 吸着平衡定数 $[\text{m}^3/\text{kg}]$   
 $C_{in}, C_{ext}$ : 給排気濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$   
 $Q$ : 換気量 $[\text{m}^3/\text{s}]$   
 $A$ : 建材反応面積  $[\text{m}^2]$

反応速度  $1/r$  と供給濃度  $1/C_{in}$  の関係を図9に示す. 実験結果には強い線形関係が確認された ( $R^2 = 0.9874$ ). チャンパーの給気濃度  $C_{in}$  と反応速度  $r$  によるモデル定数の同定では, 反応速度係数  $k = 4.85 \times 10^{-11} [\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$ , 吸着平衡係数  $K = 1.16 \times 10^6 [\text{m}^3/\text{kg}]$  となった.

(4) CFD への組み込み可能な吸着分解フラックスモデルの開発と高精度モデル定数予測法の提案

数値流体力学 CFD による室内流れ場解析に連成させて解析可能な光酸化分解反応モデルを開発した.

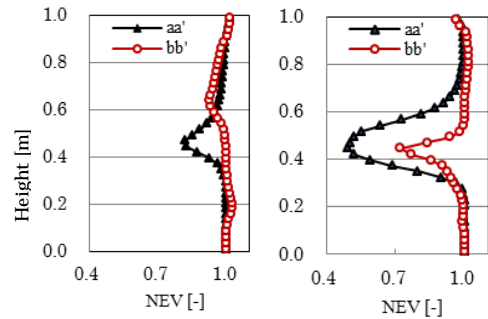
建材表面に接する第一セル(ここでは  $y+<1$  を満たす粘性底層内)のみに Source Term  $S_{PCO}$  を Sink Term として与えることで光酸化分解反応をモデル化した.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial U_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( D + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + S_{PCO} \quad (8)$$

ここで, オーバーバー(  $\bar{\quad}$  )はアンサンブル平均値を,  $D$  はトルエンの分子拡散係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$ ,  $U_j$  は風速 $[\text{m}/\text{s}]$ を,  $v_t$  は渦動粘性係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$ ,  $\sigma_t$  は乱流シュミット数[-]を示す.

Source term  $S_{PCO}$  に採用したシグモイド型 Langmuir-Hinshelwood 型の反応モデルを

式(9)に示す.



(1) 換気量  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  (2) 換気量  $300 \text{ m}^3/\text{h}$

図7 厨房換気モデルの仮想境界面における無次元 NEV 分布[-]

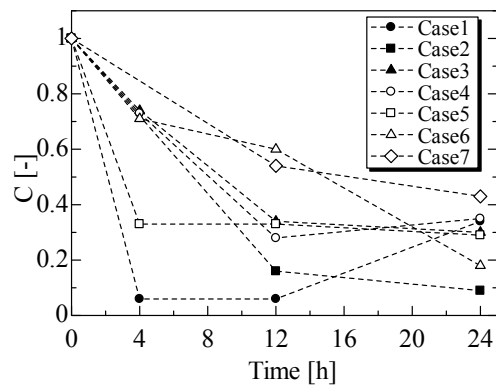


図8 トルエン濃度低減効果の経時変化

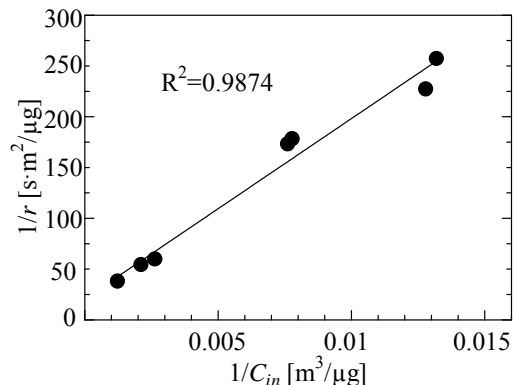
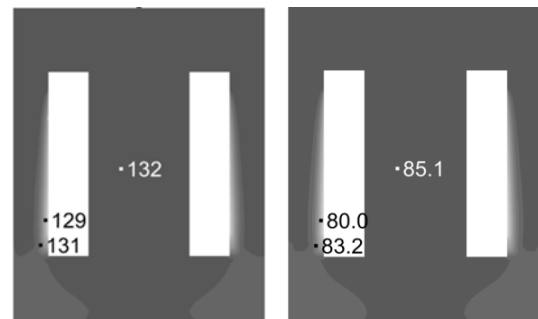


図9 給気濃度と光酸化反応量の関係



(1) 実験結果  $k = 4.85 \times 10^{-11}$  (2) 不均一性を考慮した同定結果  $k = 4.85 \times 10^{-11}$

図10 チャンパー内濃度分布

$$S_{PCO} = - \frac{k' K \bar{C}}{1 + K \bar{C}} \Big|_{y=\Delta y_1} \quad (9)$$

ここで、 $k'$ は反応速度定数[kg/m<sup>3</sup>/s]、 $K$ は吸着平衡定数[m<sup>3</sup>/kg]を示す。

実験結果とCFD解析を併用することで、チャンバー内の濃度場の不均一性を考慮したモデルパラメータ同定法を提案した。CFD解析にLangmuir-Hinshelwood型のモデルを建材表面から粘性低層内にある第1セルに組み込み、小形チャンバー内の流れ場・濃度場の不均一性を考慮した上で、反応速度定数 $k$  [kg/s]を再同定( $k'$ )した。その結果、供給濃度260 [μg/m<sup>3</sup>]の条件で反応速度定数 $k'=1.48 \times 10^{-10}$  [kg/m<sup>2</sup>/s]が得られた。

チャンバー内を質点として実験結果により同定したモデル定数とCFDにより流れ場・濃度場の不均一性を考慮して再同定したモデル定数を用いたチャンバー内濃度場の解析結果を図10に示す。チャンバー内分布を考慮することで汚染物質濃度場の高精度予測が可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)(全て査読有り)

Eunsu Lim, Kazuhide Ito, 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, Vol. 79, pp78-89, 2014.9, (DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.4)

Eunsu Lim, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた不均一濃度場の形成構造に関する研究(第3報)各種の局所換気装置を対象とした空気質制御問題へのNEV適用, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 204, pp25-32, 2014. 3

Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Mats Sandberg: New Ventilation Index for evaluating imperfect mixing condition- Analysis of Net Escape Velocity based on RANS Approach, Building and Environment, Vol.61, pp 45-56, 2013.3

(DOI:10.1016/j.buildenv.2012.11.022)

Eunsu Lim, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた不均一濃度場の形成構造に関する研究(第2報)3次元流れ場・汚染物質拡散場へのNEVの適用, 空気調和・衛生工学会論文集, No.187, pp31-37, 2012. 10(査読有り)

Eunsu Lim, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた不均一濃度場の形成構造に関する研究(第1報) Net Escape Velocity の定義及びRANSモデルによる解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.181, pp33-40, 2012. 4(査読有り)

〔学会発表〕(計 20 件)(国際会議

Proceedings 5 件含む)

Kazuhide Ito, Eunsu Lim, Kiyoshi Yamamoto: Small Test Chamber Experiment and Modeling of Photocatalytic Oxidation of VOCs under Indoor Environmental Conditions, Indoor Air 2014, Hong Kong, 7pp, 2014.7.7-7.12

Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Mats Sandberg: Evaluation of the Photocatalytic Decomposition Effect on the Improvement of IAQ by New Ventilation Index - Net Escape Velocity, Proceedings of CLIMA 2013, Praha, 10pp, 2013. 6.16-6.19

Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Mats Sandberg: Fundamental CFD Analysis for New Ventilation Index - Purging Flow Rate and Net Escape Velocity, Proceedings of the 10th Healthy Buildings 2012, 2pp, Brisbane, 2012.7.7-7.12

住吉栄作, 山口貴大, 山本清司, Eunsu Lim, 伊藤一秀: Langmuir-Hinshelwood型光酸化分解反応モデルとパラメータ同定, 第1報 20L小型チャンバーによる基礎実験, 日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 熊本, 2015.3.1, pp227-280

Eunsu Lim, 山本清司, 伊藤一秀: 光酸化分解反応の数値モデル化と室内濃度低減性能の数値予測(その4) 20Lチャンバーによる可視光応答型光触媒担保建材のトルエン濃度減衰性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 兵庫, 2014.9.12-9.14, D-2, pp955-956

Eunsu Lim, 伊藤一秀: 換気効率指標 Net Escape Velocity による厨房排気フードの汚染物質制御効率評価, 室内環境学会, 長崎県, 1pp, 2013.12

Eunsu Lim, 伊藤一秀: 新たな換気効率指標 Net Escape Velocity による室内換気性能評価に関する研究(第2報)ベンチマークテストケースを対象としたNEV・PFRの解析, 空気調和衛生工学会講演論文集, 北海道, pp.3029-3032, 2012.9.5 - 9.7

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

イム ウンス ( Lim, Eunsu )  
東洋大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 50614624

### (2) 研究分担者

伊藤一秀: ( Ito, Kazuhide )  
九州大学・総合理工学研究院・准教授  
研究者番号: 20329220

林 徹夫 ( Hayashi, Tetsuo )  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号: 40150502