

令和元年6月12日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04466

研究課題名(和文) 産業用局所排気装置のスカラー排出速度を定義する新たな指標の提案と環境設計への展開

研究課題名(英文) The proposition of a new index to define the scalar discharge velocity of the industrial local ventilation system and development to an environment design

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：室内汚染物質の不均一濃度分布を利用し、室内環境設計の高度化による清浄な空気質環境創出を目的とし、以下の研究課題を推進した。

[1]局所汚染物質(スカラー量)の排出効率を示す新たな換気効率評価指標Net Escape Probability (NEP)の概念を提案し、[2]数学的定義、物理的意味と数値解析手法を整理した。[3]NEPとNet Escape Velocity (汚染物質の排出速度、NEV)の概念により様々な環境下の不均一濃度場形成構造を解明し、換気・環境設計への適用可能性と有用性を検証した上、[4]室内不均一濃度場分布に基づいた高精度・高効率換気設計法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室内環境設計の高度化を達成するためには、制御対象とする局所領域の精緻化と、究極の局所領域となる質点(ポイント)での環境評価が必須となる。本研究では、室内空間における汚染物質の濃度を決定する汚染物質の直接排出確率Net Escape Probabilityと再帰確率Returning Probabilityを提案し、その数学的定義、物理的意味、数値解析手法も整理しており、学術的意義が非常に高いと云える。先行研究で開発した汚染物質の排出速度Net Escape Velocityと一緒に評価することで、室内環境設計の高度化を可能とする換気設計法を示したことは社会的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to create clean indoor environments by indoor air quality design based on heterogeneous concentration distribution of indoor contaminants. [1] We proposed the concept of new ventilation efficiency, Net Escape Probability (NEP), which indicates the discharge efficiency of pollutants (scalar quantities) in local areas, and [2] organized the mathematical definition, the physical meaning and the numerical analysis method of NEP. [3] Confirmed the applicability and the usefulness of the NEP and Net Escape Velocity, which is a velocity scale determining the pollutant concentration at a point, to ventilation design and indoor air quality design in various indoor environments. [4] Finally, proposed a high accuracy and high efficiency ventilation design method based on the heterogeneous concentration field distribution.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：換気効率 Net Escape Velocity Net Escape Probability Purging Flow Rate 不均一汚染物質分布
室内空気環境

1. 研究開始当初の背景

空気調和工学の分野では、建物の省エネルギー性能の追求と衛生性・快適性や労働生産性を向上させる室内環境の創造という相反する課題に対する解の提示が求められている。この課題に対する環境設計の一般的な解は、対象空間に流入する負荷と室内で発生する負荷を最小化した上で、建築空間に形成される不均一分布を利用し、必要となる局所領域のみを効率的に制御する手法を極限まで追求することになる。その一つの方法として、局所排気装置を用いた環境制御が使われている。これは、室内に形成される汚染物質の不均一濃度分布を積極的に活用し、制御対象領域を局所化することで汚染物質濃度制御性の向上を図ることとなるが、究極の局所領域環境制御を達成するためには、環境設計に利用可能な評価指標が必要となる。しかし、実務では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難い。

2. 研究の目的

室内環境設計の高度化を達成するためには、制御対象とする局所領域の精緻化と、究極の局所領域となる質点(ポイント)での環境評価が必須となる。本研究は、室内空間における各種汚染物質の局所排出効率を定義する新たな換気効率指標 NEP を提案した上で、数値解析手法を整備することで、工場等の産業分野ならびに室内環境設計の高度化への貢献を目指すものである。

本研究グループは、室内の局所領域の極小値である質点(ポイント)における汚染物質の実質的な排出速度を定量的に評価する換気効率指標 Net Escape Velocity (NEV) を提案し、換気設計への利用に関する基礎的な研究開発に取り組んできた。本研究では、この NEV の概念を汚染物質(スカラー量)の輸送現象評価にも拡張し、建築空間の局所領域に形成される室内環境のマイクロレベルでの構造理解と、環境評価指標を提案した上、NEV と新たに提案する指標を用いた高精度環境制御を可能とする設計法を示すことを目的とし、具体的な目標を以下に示す。

[1]局所汚染物質(スカラー量)の排出効率を示す新たな換気効率評価指標 NEP の開発、[2]産業局所排気装置を有する空間を対象とし、数値解析により新たな換気効率評価指標 NEP の環境評価への有用性の検証、[3] NEV と NEP の概念を用いた様々な環境下の不均一濃度場形成構造の解明に適用し、換気・環境設計への適用可能性を確認する。これらの結果より[4]室内不均一濃度場分布を積極的に利用した高精度・高効率換気設計法を開発する。

3. 研究の方法

室内汚染物質濃度の高精度制御を目指して、室内の最小局所領域である質点(CFD 解析上の Control volume, CV)で発生した汚染物質の局所排気確率 Net Escape Probability (NEP, [-])と汚染物質の発生場所に再帰する確率 Returning Probability (RP, [-])を開発する。第一段階として数学的定義と物理的意味、既存換気効率評価指標との関係を整理する。その後、単純2次元空間と産業局所排気装置 Push-Pull 装置を有する3次元空間を対象とし、汚染物質の排出速度 NEV の概念と併せて、濃度場形成構造の解明に適用し、換気設計への適用可能性と有用性を検証する。

オゾン(O₃)や過酸化水素(H₂O₂)、二酸化窒素(NO₂)といった空気中での除染を意図した薬剤散布により、室内汚染物質を除去する場合、即ち化学反応効果を考慮した場合の室内汚染物質の濃度場への展開として、反応項を組み込んだ汚染物質(Scalar)の移流拡散方程式と NEV の概念を再整理し、付加される項に乱流拡散効果と化学反応効果として表現される乱流シュミット数 (The Turbulent Schmidt Number), ならびに第一ダムケラー数 (The First Damköhler Number)の設定値が換気効率の予測値に与える影響を定量的に検討し整理する。

4. 研究成果

本研究での具体的な成果を以下に示す。

[1] 局所発生汚染物質の直接排出確率 Net Escape Probability と再帰確率 Returning Probability の定義

本研究では、CFD解析の最小解像スケールであるControl Volume (CV)を、局所領域の最小スケール「点」と想定する。先行研究で、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2種類定義しており、これらを(2)式と(3)式に示す。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おり、(1)式はアンサンブル平均されたスカラー量の輸送方程式である。

$$\frac{\partial \bar{\phi}_p}{\partial t} + \frac{\partial U_j \bar{\phi}_p}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{\phi}_p}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

$$NEV_j = \frac{1}{\bar{\phi}_p} \left\{ \left(\overline{U_{out} \phi_{out}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \Bigg|_{out} - \left(\overline{U_{in} \phi_{in}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \Bigg|_{in} \right\} \quad (2)$$

$$NEV_j^* = \frac{1}{\bar{\phi}_p} \left(\overline{U_{out} \phi_{out}} - D_{eff} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \Bigg|_{out} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\phi}_p$ は対象とする CV での汚染物質平均濃度 [kg/m³]を、 $D_{eff} = (D + v_t / \sigma_t)$ であり、 D は

分子拡散係数を, σ_t は乱流シュミット数を示す.

本研究では, 「点(数値解析上の CV)」から発生した汚染物質が発生場所から排出された後, 直接排気口に向かう確率を直接排気確率 Net Escape Probability (NEP) とし, 発生場所に再帰する確率を Returning Probability (RP) と定義する.

ここで, ある CV 内で一定の汚染物質発生 q [kg/m³/s] を仮定すると, この 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 α [-] とすれば, CV に対する流入フラックス F_{inflow} (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/m²/s]) が汚染物質再帰確率の等比級数の和とバランスし, (4) 式が成立する.

$$qV_{CV} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n = qV_{CV} \frac{\alpha}{1-\alpha} = F_{inflow} \cdot A_{inflow} \quad (4)$$

ここで, α は CV から流出した汚染物質が再度同じ CV に戻る確率 [-], V_{CV} は CV の体積 [m³], A_{inflow} は CV の界面で流入フラックスとなる面積 [m²] を示す.

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 (5) 式が成立し, (4) 式と (5) 式より (6) 式が導かれる.

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

ここで, α を Returning Probability (RP, [-]) と呼ぶことにすれば, (4) 式ならびに (5) 式から RP は次式で算出される.

$$RP = \alpha = \frac{F_{inflow} A_{inflow}}{F_{inflow} A_{inflow} + qV_{CV}} = \frac{F_{outflow} A_{outflow} - qV_{CV}}{F_{outflow} A_{outflow}} \quad (6)$$

(1- α) 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, 直接排気口から排出される成分を示し, これを Net Escape Probability (NEP, [-]) と定義する.

$$NEP = 1 - \alpha \quad (7)$$

[2] 乱流拡散効果と第一ダムケラー数を組み込んだ輸送方程式と NEV 概念の再整理

化学反応による汚染物質の濃度低減効果を単純な一次反応速度 (k_b') で表現すれば, 反応項 S_p は (8) 式で記述できる. 結果として, 化学反応項を考慮した NEV の定義は (9) 式となる.

$$S_p = -k_b' \bar{\phi}_p \quad (8)$$

$$NEV_j = \frac{1}{\bar{\phi}_p} \left\{ \left(\overline{U_{out} \phi_{out}} - D_{eff} \left. \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right|_{out} \right) - S_p - \left(\overline{U_{in} \phi_{in}} - D_{eff} \left. \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right|_{in} \right) \right\} \quad (9)$$

(9) 式に生成項として (8) 式の化学反応項を組み込んだ上で, 代表速度 u_0 , 代表長さ d_0 , 代表濃度 ϕ_0 を用いて無次元化すると (10) 式が導出される.

$$\frac{\partial \bar{\phi}_m}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U_j \phi_m}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{Re Sc_m} \frac{\partial \bar{\phi}_m}{\partial x_j} + \frac{1}{u_0 d_0} \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{\phi}_m}{\partial x_j} \right) + D_a \bar{\phi}_m \quad (10)$$

ここで, m は対象化学物質の種類を, Re はレイノルズ数を示す. また, Sc_m は対象汚染物質の種類に対応したシュミット数を, D_a は第一ダムケラー数を示す.

[3] NEV と NEP による 2 次元濃度場形成構造の理解

無次元スケールで $10L_0 \times 10L_0$ (L_0 : 給気口幅) の気流パターンの異なる単純 2 次元閉空間を解析対象とし, 気流解析結果と各 CV で汚染物質を発生させた各汚染物質濃度場の結果を用いて, 個別の CV の NEV* ならびに NEP の解析を実施し, 合成することで各評価指標の分布を求めた. 平均風速と NEV* のベクトル分布を図 1 に示す. 図中の NEV* ((3) 式) 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. 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た. 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.

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 NEP 分布を図 2 に示す. 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.

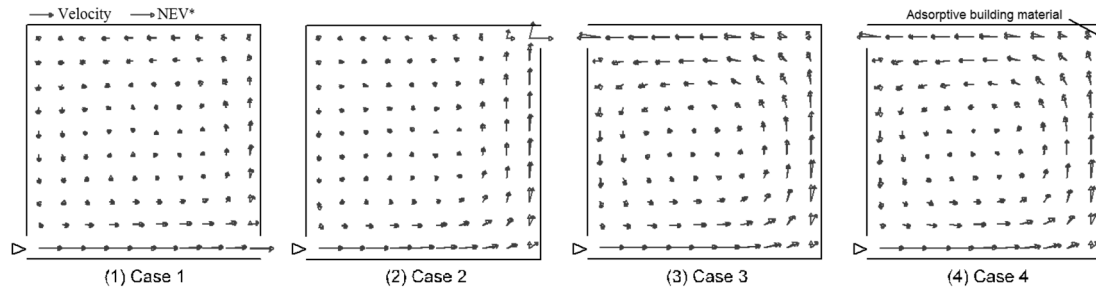


図1 平均風速とNEV*のベクトル分布

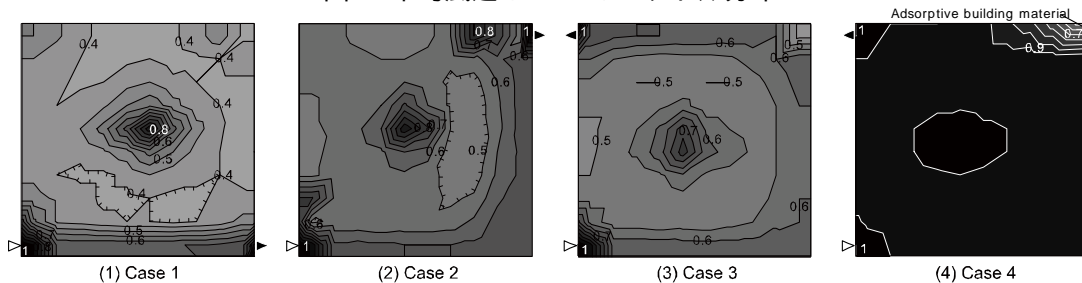


図2 NEP分布

[4] NEVとNEPによる産業用局所排気換気装置 Push-Pull 装置の汚染物質除去性能の評価

産業換気分野での適用例が多い Push-Pull 型の局所換気装置を対象として、その制御対象となる局所領域の換気性能を NEV ならびに NEP を用いて評価した。解析空間を図 3 に示す。一般には Push-Pull 型の局所換気装置の制御対象領域内で汚染物質発生を想定し、発生汚染物質の室内拡散や作業曝露を最小化することを目的とすることが多い。Push-pull 換気装置内の汚染物質制御空間と室内空間の仮想境界面(図 3 右図の P-1 と P-2)における移流風速分布を図 4、NEV*分布を図 5、NEP の分布を図 6 に示す。

図 5 に示した NEV*は図 4 (a)と(b)に示した移流風速よりやや大きな値となっていることが確認出来る。例えば、図 4 より示しているポイント d, e, f 位置の移流速度に比べ NEV*の値は、移流に加えて乱流拡散による汚染物質の輸送速度が加味され、P-1 ではそれぞれ約 30%, 37%, 35%程度、P-2 ではそれぞれ約 43%, 26%, 31%程度大きくなっている。

仮想境界面の吹出側における NEP の値は P-1 と P-2 それぞれ約 0.71, 0.77 であり、中心部で最大値を示しており、排気側に近づくほど減衰している。これは、仮想境界面の排気側下部付近に汚染物質が発生した場合、排気側に向いている汚染物質排出速度は速いものの、発生した汚染物質すべてが排気口まで直接排出せず、約 34~37%は解析対象空間 (Push-Pull 領域外の室内側)に放出されることを示唆している。

[5] 乱流拡散効果と化学反応効果が室内換気効率の予測に与える影響の定量的評価

本課題では、乱流拡散効果と付加的な化学反応効果を考慮した場合の局所濃度場形成に着目し、その設定値が換気効率に与える影響を定量的に検討した。(10)式中の乱流シュミット数 (The Turbulent Schmidt Number, σ_t)、ならびに第一ダムケラー数 (The First Damköhler Number, D_a)に着目し、単純 2 次元空間と 3 次元流れ場として IEA Annex20 のベンチマークテストケース(図 7, 3D)を対象として、これらのモデルパラメータを順次変化させた感度解析を実施する。加えて、その濃度場解析結果を対象として換気効率指標 NEV、その他の関連換気効率指標を解析することで、不完全混合場形成メカニズムに関して定量的な議論を行った。化学反応を考慮せず、乱流拡散のみを考慮する条件(σ_t case, $D_a=0$)では、 σ_t を 0.5 から 1.0 の範囲で段階的に変化させて解析を実施した。化学反応を考慮する条件(D_a case, $\sigma_t=1.0$)では、第一ダムケラー数 D_a を 1×10^{-5} から 1×10^{-2} の範囲($\times 10^{-1}$ 間隔)で段階的に設定した。ここでは、3 次元計算結果のみを示す。流れ場解析結果を図 8 に、移流風速で無次元化した NEV* (NEV*/U)分布を図 9 に、NEP の分布を図 10 に示す。2 次元空間と 3 次元空間の結果を纏めて、本課題の結果で得られた知見を以下に示す。

本課題では、第一ダムケラー数 D_a を 1×10^{-5} から 1×10^{-2} の範囲で変化させたが、この設定範囲はオゾン(O₃)や過酸化水素 (H₂O₂)、二酸化窒素 (NO₂)といった空気中の除染を意図した薬剤散布の際に推定される反応速度スケールにほぼ対応する。この D_a の設定範囲では室内空気中の汚染物質濃度に有意な濃度低下は確認されず、結果として NEV や NEP 等の換気効率指標にも差は現れないことが確認された。

乱流シュミット数 σ_t の設定値が濃度場形成に与える影響は非常に大きく、対象とする汚染物質種類と流れ場に合った適切な σ_t の設定が重要であることが確認された。

室内の局所領域(もしくは点)に着目した場合、平均濃度の値が同じ場合であっても各セルでの移流風速値で無次元化した NEV の値(NEV*/U)を用いることで、乱流拡散の寄与を明示化することが可能となり、濃度場形成の差異を議論することが可能となる。

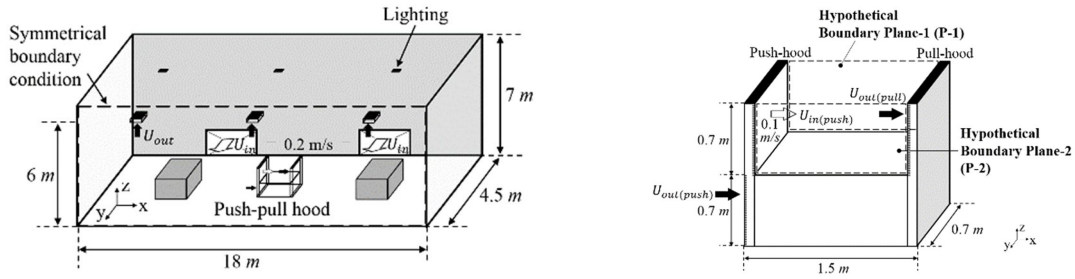


図3 産業用 Push-pull 換気装置(左図：解析空間，右図：Push-pull 換気装置)

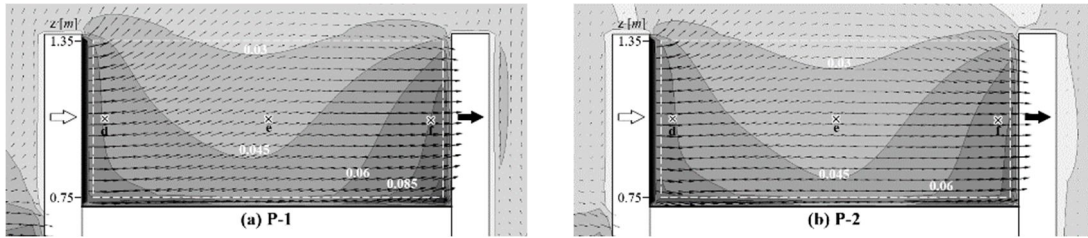


図4 平均風速のスカラ分布とベクトル分布(z-x 断面)

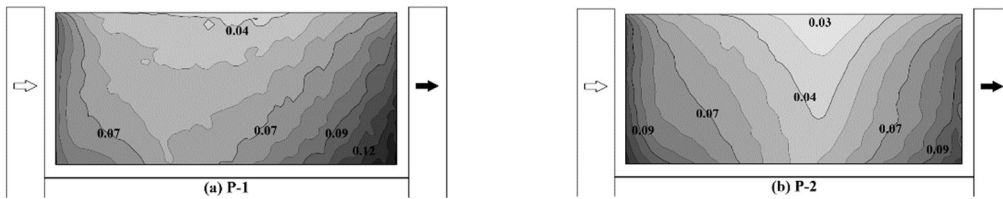


図5 NEV*[m/s]分布(z-x 断面)

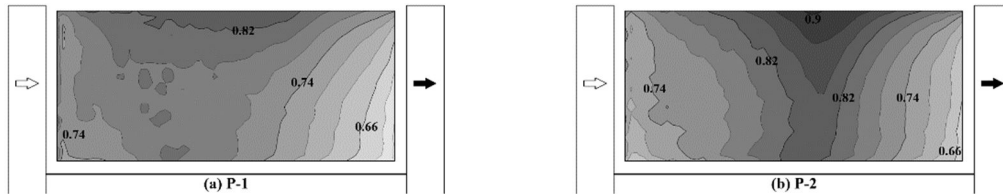


図6 NEP[-]分布(z-x 断面)

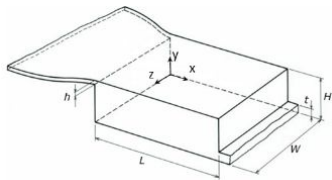


図7 IEA Annex20 Benchmark test case (3D)

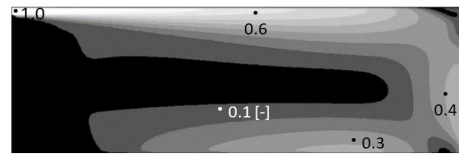


図8 平均風速分布(z=0.5W, x-y 断面)

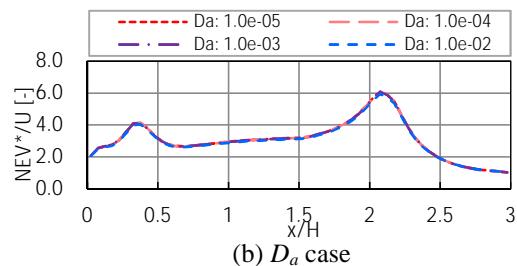
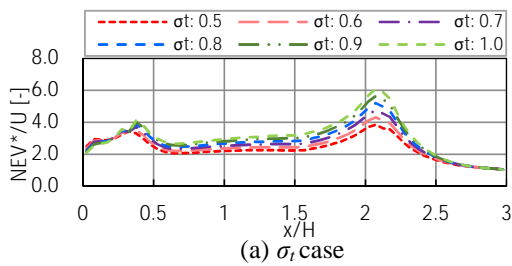


図9 無次元化 NEV*分布 (NEV*/U) in 3D cal. (y=0.5H, z=0.5W, x-y 断面)

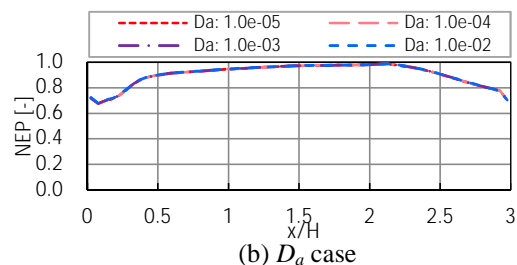
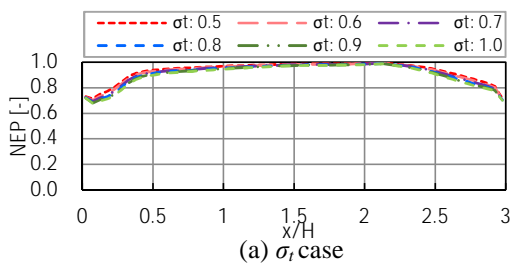


図10 NEP 分布 in 3D cal. (y=0.5H, z=0.5W, x-y 断面)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Eunsu Lim, 鄭朱娟, 伊藤一秀: 化学反応と乱流拡散を考慮した汚染物質濃度場形成の Net Escape Velocity 概念を用いた構造理解, 日本建築学会環境系論文集, 84(761), 2019.7, pp661-669 [査読有]

Eunsu Lim, 伊藤一秀, 風除染装置としての可搬型噴流ノズルの適用可能性に関する基礎実験, 空気調和衛生工学会論文集, No. 259, 2018.10, pp55-62 [査読有]

Eunsu Lim, 伊藤一秀, 局所発生汚染物質の再帰確率と Net Escape Probability, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No. 733, 2017.03, pp249-256 [査読有]

〔学会発表〕(計 8 件)

Eunsu Lim, 鄭朱娟, 伊藤一秀: Net Escape Velocity 概念による化学反応及び乱流拡散を伴う汚染物質濃度場形成の構造理解, (その1) 単純2次元濃度場における Net Escape Velocity のメッシュ依存性の検討, 日本建築学会大会, 2019

Eunsu Lim, 鄭朱娟, 伊藤一秀: Net Escape Velocity 概念による化学反応及び乱流拡散を伴う汚染物質濃度場形成の構造理解, (その2) IEA Annex20 の三次元流れ場を対象とした解析, 空気調和・衛生工学会大会, 2019

Eunsu Lim, Juyeon Chung, 伊藤一秀, 換気効率指標 Net Escape Velocity と Net Escape Probability による Push-Pull 換気装置の汚染物質排出効率評価, 日本建築学会大会, 2017

Juyeon Chung, Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Evaluation of Ventilation Efficiency in Push-Pull Type Ventilation System by Ventilation Indices NEV and NEP, Healthy Buildings 2017 Asia, 2017

Juyeon Chung, Eunsu Lim, 伊藤一秀, 換気効率指標 Net Escape Velocity と Net Escape Probability を用いた局所換気装置の汚染物質排出効率評価, 日本建築学会九州支部研究発表会・研究報告, 2017

Eunsu Lim, 伊藤一秀, エアガンを用いた可搬型風除染装置の性能評価に関する基礎実験, 空気調和衛生工学会大会, 2016

Eunsu Lim, 伊藤一秀, 局所発生汚染物質の直接排出確率 Net Escape Probability と直接排出速度 Net Escape Velocity, 日本建築学会大会, 2016

Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Evaluating net escape probability distribution of contaminant from local point to exhaust outlet in indoor environment, Indoor Air 2016, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 伊藤 一秀

ローマ字氏名: Ito, Kazuhide

所属研究機関名: 九州大学

部局名: 総合理工学研究院

職名: 教授

研究者番号(8桁): 20329220

研究分担者氏名: 金 勲

ローマ字氏名: Kim, Hoon

所属研究機関名: 国立保健医療科学院

部局名: 生活環境研究部

職名: 主任研究官

研究者番号(8桁): 00454033

研究分担者氏名: 小林 知広

ローマ字氏名: Kobayashi, Tomohiro

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 90580952