

令和 4 年 4 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03807

研究課題名(和文)健康影響を可視化するin silico人体モデルの開発と環境設計への展開

研究課題名(英文)Development of in silico human model and its application to indoor environmental design

研究代表者

伊藤 一秀 (Ito, Kazuhide)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：20329220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、汚染空気暴露に伴う健康影響を可視化するin silico人体モデルの開発に取り組んだ。特にガス状ならびにエアロゾル状の各種空気汚染物質を対象として、呼吸に伴う経気道暴露、沈着や接触に伴う経皮暴露による人体影響を定量的に予測・評価する数値モデルを開発した上で、その数値解析用の人体プラットフォームを作成した。具体的に、経気道暴露・経皮暴露経路と人体暴露メカニズムを数理的に記述する生理的薬物動態モデルを人体モデルに統合した新たなin silico人体モデルを作成し、熱流体解析技術(CFD)と統合することで、人体・環境系の総合的な数値解析手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築空間における健康影響評価のための研究手法である被験者実験は、非常に有用なデータ取得が可能である一方、その実施には倫理的制約がある。被験者実験を補完・代替する夕食な手法がコンピュータ上に人体生理を再現したin silico人体モデルによる数値実験法である。本研究では汎用的な室内環境設計に適用される既存の環境解析技術に統合可能で、経気道・経皮曝露を定量的に評価可能な全く新しいコンセプトのin silico人体モデルを開発した。この成果により、不完全混合場を対象とした局所領域環境制御を目的とする自由度の高いパラメトリック解析が可能となる。

研究成果の概要(英文)：We developed an in silico human model to visualize health risk associated with exposure to contaminated indoor air. In particular, we developed numerical models that can predict inhalation exposure in respiratory tract and dermal exposure by deposition of gas-phase contaminant. Specifically, (1)we newly developed physiologically based pharmacokinetic/toxicokinetic models that reproduce inhalation exposure and dermal exposure, and (2)these models were integrated into the in silico human model that precisely reproduced body surface and respiratory tract geometry. (3) We also established a comprehensive analysis method for human-environment systems that integrates in silico human model and computational fluid dynamics (CFD) technique. Finally, (4)we conducted demonstrative analyses for e-cigarette smoking in an indoor environment and showed quantitatively the potential effects of e-cigarette smoking on local tissue dosimetry and the deterioration of indoor air quality.

研究分野：建築環境工学

キーワード：in silico人体モデル 計算流体力学 経気道曝露 経皮曝露 室内環境解析

1. 研究開始当初の背景

ヒトを含む生物を対象とした実験を行う場合、生きた個体もしくは細胞を直接扱う *in vivo* 試験、もしくは試験管の中などの人工的に構成された条件下で実験を行う *in vitro* 試験が用いられる。その一方、人体を対象とした実験を行う際には世界医師会(WMA)ヘルシンキ宣言「人間を対象とする医学研究の倫理的原則」の主旨を尊重し、医の倫理に基づいた適正な実施が求められる。人体を対象とした実験を制約無く自由に実施することは許されず、倫理的な制約の下で必要最小限の実験に限定されるのが実情である。これは建築環境・設備分野で頻繁に実施される被験者実験も例外では無い。

近年、*in vivo* や *in vitro* といった実験手法に加え、*in silico* の可能性に大きな期待が集まっている。「シリコン内で」を意味する *in silico* 手法は、数理モデルを基盤としたコンピュータ上での数値実験であり、倫理的制約の無い非常に大きな自由度、例えば境界条件を変化させた多数のパラメトリックスタディが(倫理的制約無く)実施できることなどが、*in vivo/in vitro* と比較した場合の大きな利点と考えられている。

建築環境・設備分野における *in silico* モデルの例として、例えば体温調節メカニズムの理解や熱的快適性の評価を目的とした人体熱モデルの開発が行われており、既に実務レベルの設計に適用された事例もある。しかしながら、環境中の汚染物質暴露に伴う健康影響の予測に関しては、暴露経路の予測が困難であること、被験者実験の実施が(倫理的に)困難であることから数値解析モデル開発のための基盤データが不足していること等を理由として未だ十分な研究成果が蓄積されていない。経気道・経皮暴露による健康影響評価の問題は、特に、医学と工学の連携が必須となる課題であり、両分野の成果を効率的に整理・統合するためのプラットフォーム整備が必須であるが、特に建築学の視点からこの課題に積極的に取り組んだ先事例は殆ど無い。前述のとおり、建築空間における居住者の快適性や健康影響評価のための有効な研究手法として被験者実験があるが、この手法は非常に有用なデータ取得が可能である一方、一般に(倫理的制約に加えて)被験者の負担が大きく、対応して時間・費用も増大する傾向がある。この被験者実験を補完・代替する手法として、コンピュータ上に人体(生理)を再現した *in silico* 人体モデルによる数値実験法に大きな可能性がある。特に建築環境・設備分野に限定すれば、1990年代の村上・加藤らの研究を端緒とする流体解析用の数値人体モデル開発等の先行研究事例があるが、汚染物質暴露経路と経気道・経皮暴露に伴う健康影響を総合的に予測・評価可能な *in silico* 人体モデルは、現時点では存在しない。

汚染物質暴露に伴う健康影響予測は、人体・環境系の相互作用の基盤となる流体现象、物質輸送現象や体内薬物動態が、一般に強非線形性の数理モデルで記述されるため、いわゆる複雑系の様相を示す。人間・環境系システム内での汚染物質輸送が非常に複雑な現象であるが故、全体理解のために個別要素の解明を蓄積していく、いわゆる要素還元型のアプローチにて研究開発が進められている。例えば、経気道暴露に関しては、解像スケールの違いから、鼻腔から気管支までの上気道を対象とした数値解析モデルと、気管支から肺胞に至る下気道を対象とした数値解析モデルが個別に議論されており、呼吸器系全体を再現する合理的なモデル化に大きな課題がある。また、医学・生理学分野を中心に気道粘膜上皮から粘膜下組織へ向かう汚染物質移動と体内動態は各種の生理的薬物動態(PBPK)モデルとして提案があり、化学物質別にモデル定数が提案されている。その一方、生体流体工学分野では気道内腔の流体解析と汚染物質輸送、界面沈着までの詳細解析モデルが議論されている。また建築環境・設備分野の研究者は主に室内空間と呼吸空気質までを守備範囲としており、これら別々の分野で研究開発が進められてきた知見・成果を包括的に集約するための統合プラットフォームや各境界条件の議論が本質的に欠落している。また、空気汚染問題に対して、公衆衛生学の研究手法である疫学調査は一定量の母集団を確保することでマクロな健康リスク評価を目的としており、実際の個々人の呼吸濃度や暴露濃度の評価といった人体周辺の不均一微気象を含めたミクロな解析を考慮に入れた環境側の評価まで踏み込むことは希である。近年、個々人の特性を反映した、所謂、テーラーメイド医療実現に向けた取り組みが活発になっており、個人を対象とした暴露濃度予測とその健康影響評価の重要性が高まっている。特に、個別の人体スケールを対象とした経気道暴露や経皮暴露に伴う健康影響予測の高精度化のためには、人体周辺に形成される不均一濃度分布の正確な予測から、上皮界面を介した汚染物質暴露と体内薬物(汚染物質)動態までを統合して扱うことの出来る統合プラットフォームが必要である。

本研究は、このような背景のもと、汚染空気暴露に伴う健康影響を可視化する *in silico* 人体モデルの開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、ガス状ならびにエアロゾル状の各種空気汚染物質を対象として、呼吸に伴う経気道暴露、沈着や接触に伴う経皮暴露による人体影響を定量的に予測・評価する数理モデルと、その数値解析用の人体プラットフォームを開発に取り組んだ。具体的に、(1) 各種空気汚染物質を対象とした経気道暴露・経皮暴露の経路と人体暴露メカニズムを数理的に記述する生理的薬物動

態(PBPK)モデルを作成し、(2) 皮膚表面幾何形状や呼吸器系幾何形状を精緻に再現した *in silico* 人体モデル開発の基礎となる数値解析用の人体プラットフォームを作成する。これらを統合した上で (3) 経気道暴露・経皮暴露による健康影響・リスクを部位別に定量評価可能な *in silico* 人体モデルと可視化技術を開発する。最終的に (4) *in silico* 人体モデルと熱流体解析技術(CFD)を統合した人体・環境系の総合解析手法を確立し、境界条件整備を進めることで、高精度で汎用的な空気環境設計ツールの開発を目指す。

生命倫理や動物愛護の観点で生体を対象とした実験の制限は、今後、益々厳格化する傾向を踏まえれば、*in silico* 人体モデルの可能性追求は今まさに取り組むべき喫緊の課題である。また、建築環境中で生活するヒトの健康に関連した課題に取り組むためには、建築環境・設備を中心とした工学分野の技術(例えば流体力学)と医学・生理学分野の成果(例えば薬物動態)を相互補完的かつ効率的に統合していく必要がある。また、この *in silico* 人体モデルは基礎研究から応用研究まで多様な分野での貢献が期待出来るが、本研究では特に、建築空気環境設計の高精度への貢献に目標を定めた。この場合、既存の空気環境設計技術や解析ツールと *in silico* 人体モデルの親和性を確保した上で、設計者に的確な情報提供を行うための可視化が必要となる。そのため、*in silico* 人体モデルと環境解析手法を高度に統合し、健康影響の可視化手法を確立することで、*in silico* 人体モデルを中心とした環境設計法の有効性も検討した。

3. 研究の方法

本研究は、汚染空気暴露に伴う健康影響を数値的に予測・可視化する *in silico* 人体モデルの開発を4年計画で実施した。生体流体力学分野で世界をリードする J Tu 教授ならびに K Inthavong 博士の研究グループ(豪州 RMIT 大学)とも連携して研究を推進した。

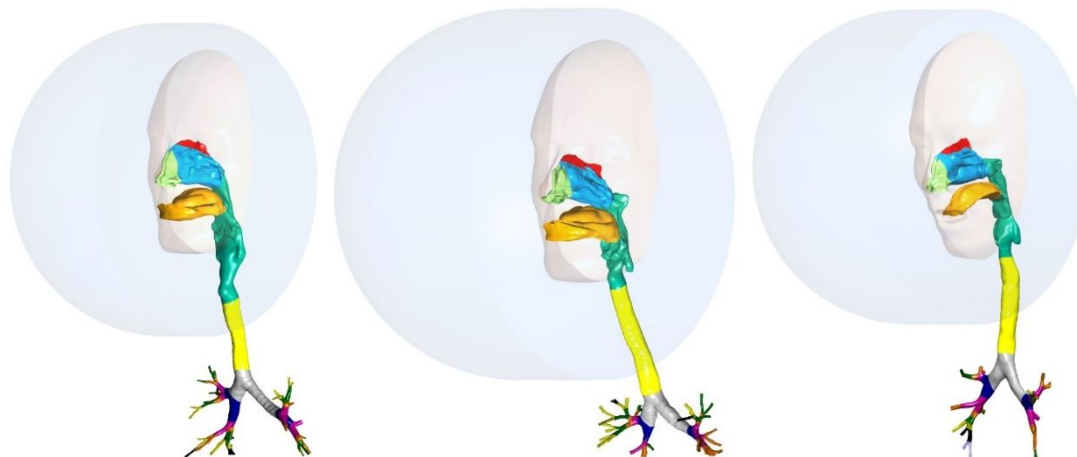
これまでに人体詳細幾何形状を再現した CFD 解析用の数値人体モデルの開発を進めると共に、鼻腔から気管支第四分岐までを再現した数値気道モデルの開発を行ってきた実績があり、これらを基に、人体皮膚表面幾何形状と呼吸器系幾何形状を精緻に再現した *in silico* 人体モデルのプロトタイプモデルの開発に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究での成果を項目別に以下に示す。

(1) *In silico* 人体モデル開発のための人体プラットフォーム作成

これまで開発に取り組んで来た鼻腔から気管支第四分岐までを再現した数値気道モデルを基に、計算負荷と解析精度の両者に配慮した新しいグリッドデザインの数値気道モデルを3体作成した。その結果を図1に示す。これらの数値気道モデルはボランティア男性の上半身 CT (コンピュータ断層撮影) データを基に、流体解析と化学物質・粒子輸送解析に適用可能な必要十分な精度で呼吸器系の幾何形状を再現した。



(1) Model A

(2) Model B

(3) Model C

図1 ボランティア CT 画像より作成した3種類の数値気道モデル(上気道モデル)

幾何形状抽出後に計算流体力学 CFD による解析に適用するためのメッシュ分割(壁面近傍のプリズム層 10 層とポリヘドラルメッシュのハイブリッドメッシュ)を行い、最終的な数値気道モデルを作成した。これらの数値気道モデル内に形成される流れ場の特徴を定量的に把握するため、気道内でスカラを定常一様発生させた場合の濃度分布解析、すなわち換気効率解析を実施した。本解析では、鼻孔から流入した空気の気道内各部位への無次元到達時間を評価する SVE3 (Scale for Ventilation Efficiency 3)として換気効率解析結果を整理した。結果を図2に示す。3種類の気道モデルには、上気道の新鮮外気分配と到達時間には有意な差が確認できる。特に鼻腔内には新鮮外気の到達が非常に遅れる滞留域が存在するが、その場所には明確に個体差があることが確認出来る。

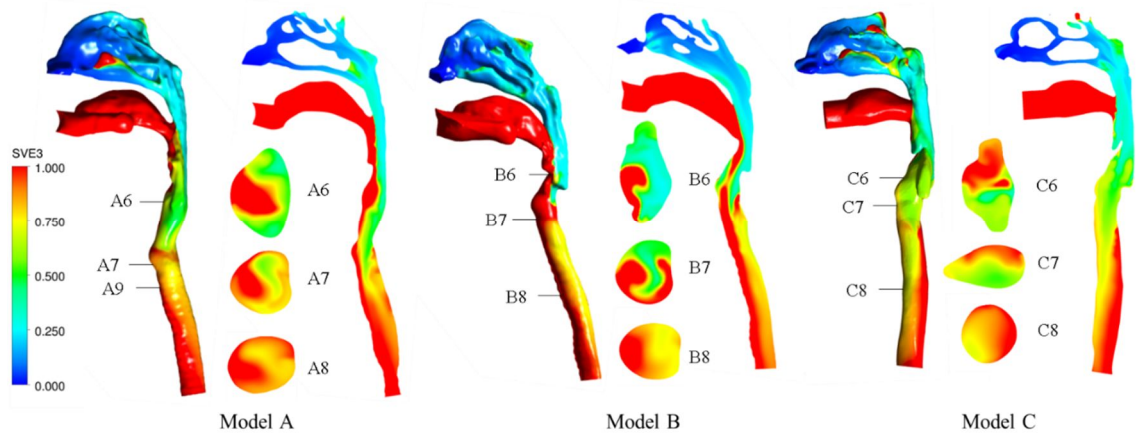


図2 気道内換気効率 SVE3 解析結果

上記の Model A の気道モデルを対象として、人体皮膚表面幾何形状再現した数値人体モデルと統合することで、経気道曝露・経皮曝露評価の基盤となる *in silico* Human のプロトタイプモデルを作製した。これは CFD 解析用の人体幾何形状メッシュであると共に、以下で開発する部位別の生理的薬物動態モデルや体温調節モデルを統合するためのプラットフォームとなる。

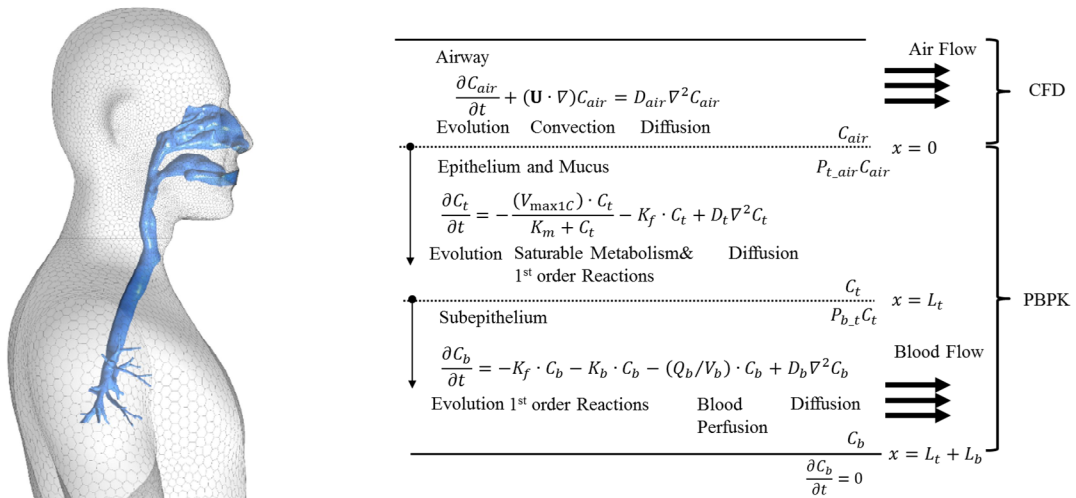
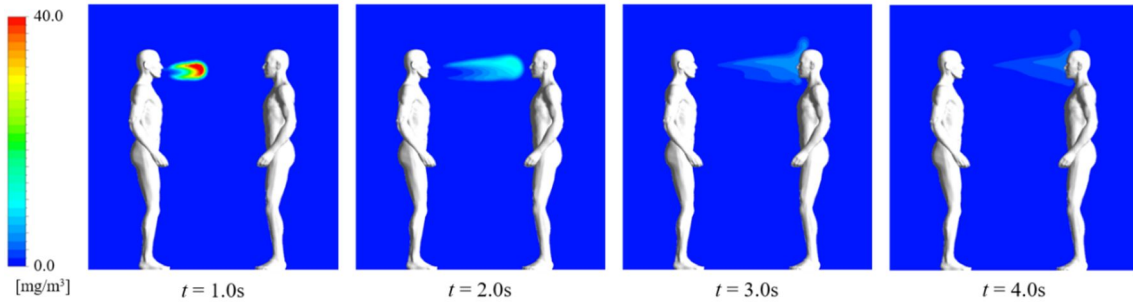


図3 人体幾何形状と気道を統合した *in silico* Human モデルのグリッドデザイン(左図)と経気道曝露評価用 PBPK モデルの概要(右図)

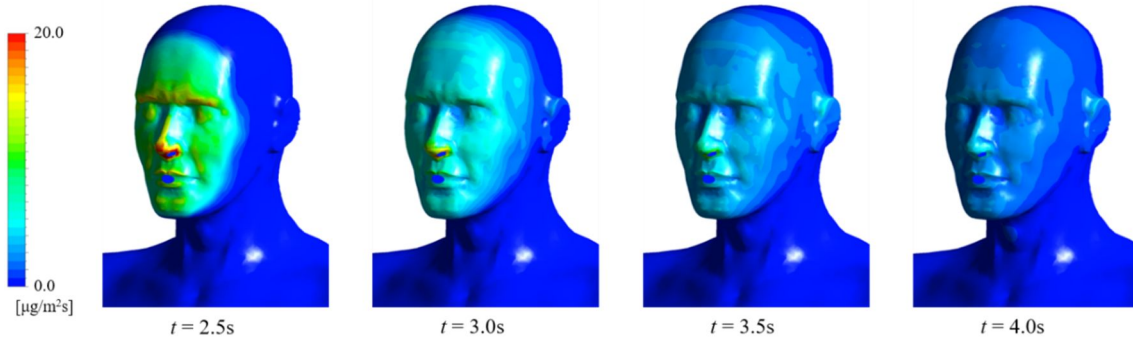
(2) 経気道曝露用の生理的薬物動態(PBPK)モデルの作成

本研究では RA Corley らのアルデヒド類を対象とした経気道曝露の PBPK-CFD モデルを基に、気道(Airway)、粘膜上皮 (Epithelium+Mucus)、上皮組織 (Subepithelium) の 3 層(正確には CFD 解析で 1 層、PBPK モデルとして 2 層)からなる PBPK-CFD モデルを作成し、図 1 に示した数値気道モデルに統合した。本研究で開発した経気道曝露用 PBPK モデルの概要を図 3 右図に示す。同様のコンセプトにて経皮曝露用 PBPK モデルも作成した。特に、短期曝露を想定して表皮脂質(SSL)と角質層(SC)を再現した 2 層モデルを作成し、図 3 に示す数値人体モデルの皮膚境界条件として統合した。

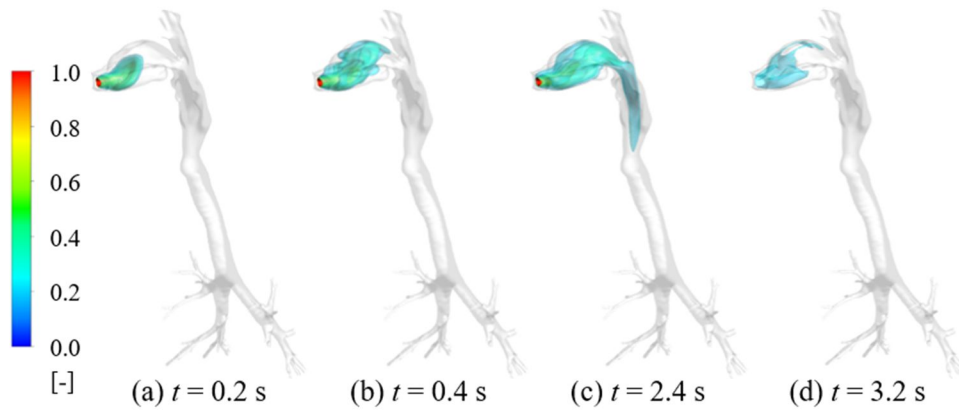
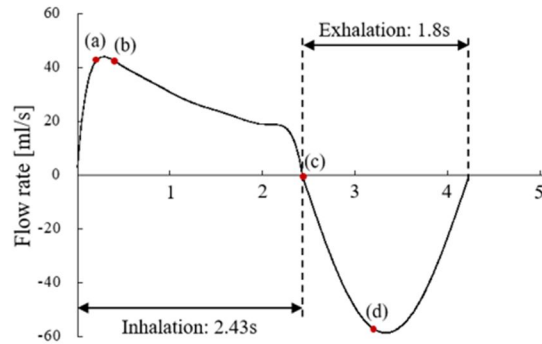
(3) *in silico* 人体モデルと熱流体解析技術(CFD)を統合した人体 - 環境系の統合解析手法の確立
 本研究で開発した経気道曝露ならびに経皮曝露評価モデルを統合した数値人体モデル *in silico* 人体モデルを汎用の熱流体解析ソフトである ANSYS/Fluent に統合し、室内の流れ場・温度場・汚染物質濃度場の解析と連成解析を可能とする一連の数値解析手法を確立した。この数値解析手法を、室内での電子煙草による喫煙を再現した一次曝露、二次曝露の問題に適用した。喫煙者と非喫煙者を再現した一連の解析結果を図 4 に示す。喫煙に伴う気道内化学物質輸送と気道内粘膜組織への曝露濃度(曝露フラックス)を定量的に予測することで喫煙者の一次曝露を解析した上で、連続して呼出した化学物質の室内移流拡散と非喫煙者の経気道曝露・経皮曝露を連続して解析することで、喫煙に伴う非喫煙者の二次曝露成分の同定、換気による除去効果を定量的に議論することが可能となることを確認した。



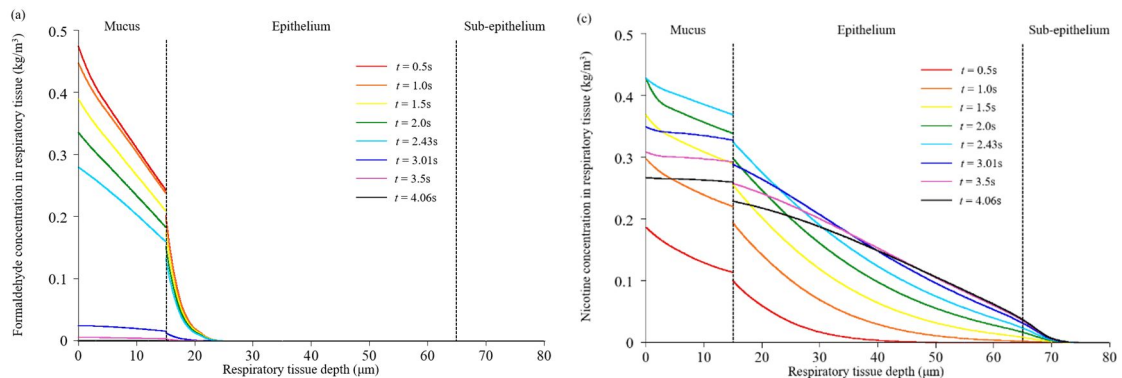
(1) 喫煙に伴う吐出と吹出噴流の時間変化



(2) 非喫煙者頭部のニコチン沈着分布の時間変化



(3) 喫煙者の経気道暴露解析結果



(4) 気道内粘液 - 粘膜上皮 - 上皮組織内の暴露化学物質濃度変化

図 4 電子煙草使用を想定した一次暴露と二次暴露を想定した数値解析の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Lim Eunsu, Sandberg Mats, Ito Kazuhide	4. 巻 31
2. 論文標題 Returning characteristics of pollutants for a local domain in the presence of returning and recirculating airflow in indoor environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Indoor Air	6. 最初と最後の頁 12803 ~ 12803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ina.12803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Xu Chang, Khoa Nguyen Dang, Yoo Sung-Jun, Zheng Xin, Shen Shifei, Ito Kazuhide	4. 巻 285
2. 論文標題 Inhalation airflow and ventilation efficiency in subject-specific human upper airways	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Respiratory Physiology & Neurobiology	6. 最初と最後の頁 103587 ~ 103587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resp.2020.103587	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Dong Jingliang, Ma Jiawei, Tian Lin, Inthavong Kiao, Ito Kazuhide, Tu Jiyuan	4. 巻 37
2. 論文標題 Numerical analysis of nanoparticle transport and deposition in a cynomolgus monkey nasal passage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 3414 ~ 3414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cnm.3414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Yiwen, Murga Alicia, Long Zhengwei, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 2
2. 論文標題 Experimental study of oil mist characteristics generated from minimum quantity lubrication and flood cooling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy and Built Environment	6. 最初と最後の頁 45 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbenv.2020.05.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dang Khoa Nguyen, Phuong Nguyen Lu, Ito Kazuhide	4. 巻 32
2. 論文標題 Numerical modeling of nanoparticle deposition in realistic monkey airway and human airway models: a comparative study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inhalation Toxicology	6. 最初と最後の頁 311 ~ 325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08958378.2020.1800148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Chong, Yoo Sung-Jun, Tanabe Shin-ichi, Ito Kazuhide	4. 巻 1
2. 論文標題 Investigation of transient and heterogeneous micro-climate around a human body in an enclosed personalized work environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy and Built Environment	6. 最初と最後の頁 423 ~ 431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbenv.2020.04.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murga Alicia, Long Zhengwei, Yoo Sung-Jun, Sumiyoshi Eisaku, Ito Kazuhide	4. 巻 1
2. 論文標題 Decreasing inhaled contaminant dose of a factory worker through a hybrid Emergency Ventilation System: Performance evaluation in worst-case scenario	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy and Built Environment	6. 最初と最後の頁 319 ~ 326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbenv.2020.04.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoo Sungjun, Ito Kazuhide	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-stage optimization of local environmental quality by comprehensive computer simulated person as a sensor for HVAC control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Building Energy Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17512549.2019.1588167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Chong, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 -
2. 論文標題 Does detailed hygrothermal transport analysis in respiratory tract affect skin surface temperature distributions by thermoregulation model?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Building Energy Research	6. 最初と最後の頁 1~21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17512549.2019.1607776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Phuong Nguyen Lu, Khoa Nguyen Dang, Ito Kazuhide	4. 巻 -
2. 論文標題 Comparative numerical simulation of inhaled particle dispersion in upper human airway to analyse intersubject differences	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Indoor and Built Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1420326X19894128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yihuan Yan, Xiangdong Li, Kazuhide Ito	4. 巻 2 (1)
2. 論文標題 Numerical investigation of indoor particulate contaminant transport using the Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian two-phase flow models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experimental and Computational Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42757-019-0016-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tao Yao, Yang Wei, Ito Kazuhide, Inthavong Kiao	4. 巻 1
2. 論文標題 Computational fluid dynamics investigation of particle intake for nasal breathing by a moving body	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental and Computational Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 212~218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42757-019-0014-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murga Alicia, Kuga Kazuki, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 252
2. 論文標題 Can the inhalation exposure of a specific worker in a cross-ventilated factory be evaluated by time- and spatial-averaged contaminant concentration?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Pollution	6. 最初と最後の頁 1388 ~ 1398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envpol.2019.06.056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kang Yujin, Yoo Sung-Jun, Takenouchi Kazuki, Yoshida Hitomi, Tanabe Shin-ichi, Ito Kazuhide	4. 巻 218
2. 論文標題 Distribution of transient formaldehyde concentration in confined small glass desiccators and its impact on emission rate measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 116979 ~ 116979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosenv.2019.116979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Phuong Nguyen Lu, Quang Tran Van, Khoa Nguyen Dang, Kim Ji-Woong, Ito Kazuhide	4. 巻 271
2. 論文標題 CFD analysis of the flow structure in a monkey upper airway validated by PIV experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Respiratory Physiology & Neurobiology	6. 最初と最後の頁 103304 ~ 103304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resp.2019.103304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lim Eunsu, Chung Juyeon, Sandberg Mats, Ito Kazuhide	4. 巻 168
2. 論文標題 Influence of chemical reactions and turbulent diffusion on the formation of local pollutant concentration distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 106487 ~ 106487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2019.106487	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sotokawa Hajime, Chung Juyeon, Yoo Sung-Jung, Ito Kazuhide	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical sensitivity analyses for identifying rate-limiting factors influencing total energy exchange efficiency in energy recovery ventilator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Indoor and Built Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1420326X19890376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kang Yujin, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 30
2. 論文標題 Correlation between formaldehyde emission characteristics in enclosed desiccators with five different geometries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Indoor and Built Environment	6. 最初と最後の頁 565 ~ 577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1420326X20908918	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuga Kazuki, Ito Kazuhide, Chen Wenhao, Wang Ping, Kumagai Kazukiyo	4. 巻 -
2. 論文標題 A numerical investigation of the potential effects of e cigarette smoking on local tissue dosimetry and the deterioration of indoor air quality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Indoor Air	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ina.12666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 久我一喜, 劉城準, 伊藤一秀	4. 巻 83 (754)
2. 論文標題 呼吸器系統合型数値人体モデルを用いた電子煙草(e-Cigarette)使用に伴う1次・2次暴露リスクの定量評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 1005-1013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Ji-Woong, Phuong Nguyen Lu, Aramaki Shin-ichiro, Ito Kazuhide	4. 巻 251
2. 論文標題 Flow visualization through particle image velocimetry in realistic model of rhesus monkey 's upper airway	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Respiratory Physiology & Neurobiology	6. 最初と最後の頁 16 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resp.2018.02.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 40
2. 論文標題 Assessment of transient inhalation exposure using in silico human model integrated with PBPK-CFD hybrid analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainable Cities and Society	6. 最初と最後の頁 317 ~ 325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scs.2018.04.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chen Wenhao, Wang Ping, Ito Kazuhide, Fowles Jeff, Shusterman Dennis, Jaques Peter A., Kumagai Kazukiyo	4. 巻 13(e0195925)
2. 論文標題 Measurement of heating coil temperature for e-cigarettes with a "top-coil" clearomizer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0195925	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lu Phuong Nguyen, Dang Khoa Nguyen, Inthavong Kiao, Ito Kazuhide	4. 巻 30
2. 論文標題 Particle and inhalation exposure in human and monkey computational airway models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Inhalation Toxicology	6. 最初と最後の頁 416 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08958378.2018.1545810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Muttakin Mahbulul, Mitra Sourav, Thu Kyaw, Ito Kazuhide, Saha Bidyut Baran	4. 巻 122
2. 論文標題 Theoretical framework to evaluate minimum desorption temperature for IUPAC classified adsorption isotherms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 795 ~ 805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Akira Kurokawa, Hideaki Koyama, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Numerical infectious risk assessment of airborne particle dispersion in commuter bus interior environment
3. 学会等名 Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Muta, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Inhalation exposure risk assessment associated with inappropriate use of fume hood
3. 学会等名 Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yujin Kang, Murota Kei, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuki Takenouchi, Shin-ichi Tanabe and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Three Dimensional Clothing Model integrated with Computer Simulate Person for Computational Fluid Dynamics Simulation
3. 学会等名 Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	Murota Kei, Yujin Kang, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuki Takenouchi, Shin-ichi Tanabe and Kazuhide Ito
2. 発表標題	Flow and Hygrothermal Transfer Analysis in Three Dimensional Clothing Model integrated with Computer Simulate Person
3. 学会等名	Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Sung-Jun Yoo, Chong Wang, Shin-ichi Tanabe, Kazuhide Ito
2. 発表標題	Transient micro-climate formation around computer simulated person in Personalized Work Environment
3. 学会等名	Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito
2. 発表標題	Heterogeneity of Ultrafine Particle deposition patterns in Two Realistic Human Upper Airway Models
3. 学会等名	Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima and Kazuhide Ito
2. 発表標題	Inhalation Exposure Risk Assessment of High Concentration and Short-Term Exposure: Numerical Prediction of Transient Emission Characteristics from Mixed Solution leaked in Indoors
3. 学会等名	Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4. 発表年	2020年

1 . 発表者名 Hiroshi Harashima, Eisaku Sumiyoshi1, Kazuhide Ito
2 . 発表標題 Small Test Chamber Experiment and Numerical Modeling for Sorption and Re-emission of Leaked Liquid-phase Chemicals on Three Types of Mortar Samples
3 . 学会等名 Indoor Air 2020, South Korea (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Hajime Sotokawa, Keiji Kameishi, Juyeon Chung, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2 . 発表標題 Development of Numerical Heat and Mass Transfer Model for Predicting Total Heat Exchange Performance in Energy Recovery Ventilator
3 . 学会等名 IAQVEC 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kazuki Kuga, Hideaki Koyama, Kazuhide Ito
2 . 発表標題 Comparative inhalation exposure/toxicology analysis of e-cigarette vapors with different puffing behaviors using PBPK-CSP-CFD approach
3 . 学会等名 IAQVEC 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Alicia Murga and Kazuhide Ito
2 . 発表標題 Short-term and Long-term personal inhalation risk assessment based on hybrid analysis using Network Modeling and CFD with computer simulated person
3 . 学会等名 IAQVEC 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Yujin Kang, Sung-jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Factors Controlling the Formaldehyde Emission Rate from Building Materials in Small, Airtight, Glass Desiccators
3. 学会等名 IAQVEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chong Wang, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Improvement of human thermoregulation model for in silico human by detail respiratory heat loss analysis
3. 学会等名 ISHVAC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhide Ito
2. 発表標題 CFD simulations of airflow in and around the human body
3. 学会等名 ISHVAC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisaku Sumiyoshi, Kentaro Sakai, Hiroshi Harashima, Alicia Murga, and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Numerical Model for Estimating Transient Air Emissions from Mixed Solution with multiple Chemical Components - Development of Numerical Tools for Health Risk Assessment of High Concentration and Short-Term Exposure
3. 学会等名 IMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Sotokawa and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Discussions regarding performance improvement possibility of energy exchange efficiency in energy recovery ventilators by sensitivity numerical analyses
3. 学会等名 IMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Alicia Murga, Eisaku Sumiyoshi and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Emergency Ventilation System: Displacement versus hybrid push-pull ventilation performance in a factory
3. 学会等名 IMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito, Wenhao Chen, Ping Wang, Jeff Fowles, Dennis Shusterman, Kazukiyo Kumagai
2. 発表標題 Assessment of E-cigarette smoking using in silico human respiratory tract model integrated with coupled PBPK-CFD analysis
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp283-288 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nguyen Lu Phuong, N.D. Khoa, and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Comparative numerical simulation of airflow and inhaled particles transportation in upper airway for inter-subjects of human
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp295-300 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Alicia Murga and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Estimation of diurnally-averaged inhalation exposure risk in a naturally cross-ventilated factory by NWP-CFD integrated analysis
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp301-306 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chong Wang, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Impact of Hygrothermal Transfer Analysis in Numerical Respiratory Tract on Skin Surface Temperature Evaluation by Stolwijk Model
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp307-312 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Koyama, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Integrated PBPK-CFD-CSP Analysis for Dermal Exposure Assessment in Indoor Environment
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp289-294 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koki Nakahara, Shigeto Yamasaki, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Mathematical modeling of photocatalytic oxidation process of toluene for building material with locally doped titanium dioxide
3. 学会等名 Roomvent/Ventilation 2018, Helsinki, pp1031-1036 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Multi-stage optimization of local environmental quality by comprehensive computer simulated person as sensor for air conditioning control
3. 学会等名 The 8th International Conference on Energy and Environment of Residential Buildings, 19-21 November 2018 in Wellington, New Zealand (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学総合理工学研究院 伊藤研究室 www.phe-kyudai.jp

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------