

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14306

研究課題名（和文）人体呼吸域内の不均一・非正常二酸化炭素濃度場の定量的理解と室内環境設計の高度化

研究課題名（英文）Quantitative investigation of non-uniform and transient CO2 concentration distribution in breathing zone for advanced indoor environmental design

研究代表者

劉 城準（Yoo, Sung-Jun）

九州大学・エネルギー研究教育機構・准教授

研究者番号：30783394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鼻や口から呼出される呼気中の二酸化炭素濃度の時間変化と呼吸器系に実際に流入（吸気）する二酸化炭素濃度の時間変化を定量的に解明し、新たな空調設計指針を確立するために、3の細部課題を設定し、研究を推進した。本研究の成果から、本研究で構築した数値解析モデルを基盤とする空調制御シミュレーションの膨大なパラメトリック解析により、呼吸域内の二酸化炭素の挙動や吸入リスクに関する基礎データが確保でき、在室者の二酸化炭素吸入リスクの低減に主眼を置いた新たな室内環境設計技術の確立に貢献できると判断される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の室内環境設計法が、室全体の均一制御から、パーソナル空調に代表される局所領域と在室者（人）の精緻な制御へと大きなパラダイムシフトを迎えているにも関わらず、直接的な環境制御の対象となる在室者由来の二酸化炭素発生モデルの高精度化が図られていないが故、設計精度向上のボトルネックになっていることが懸念されている。呼吸域内の不均一・非正常二酸化炭素濃度場の定量的解明は、建築環境工学分野の研究者の貢献が求められている重要かつ喫緊の研究課題であるため、本研究の成果は学術的価値に加えて社会的貢献度も高いものと期待している。

研究成果の概要（英文）：In this study, three detailed objectives were set and research was advanced in order to quantitatively elucidate the time-dependent changes in the concentration of carbon dioxide in the breath exhaled from the nose and mouth and the time-dependent changes in the concentration of carbon dioxide that actually flows into the respiratory system (inhalation), and to establish new air conditioning design guidelines. The results of this study indicate that a large amount of parametric analysis of air conditioning control simulations based on the numerical analysis model constructed in this study can provide basic data on the behavior of carbon dioxide in the respiratory zone and the risk of inhalation, and that this can contribute to the establishment of new indoor environmental design techniques that focus on reducing the risk of carbon dioxide inhalation by occupants.

研究分野：建築環境工学

キーワード：二酸化炭素 呼吸空気質 数値人体モデル 数値気道モデル 計算流体力学

1. 研究開始当初の背景

空気中の二酸化炭素は、地球環境の視点では主要な温暖化ガスとして排出量制御の対象とされているが、室内では古くから空気汚染の主要なモニタリング対象物質として位置づけられており、換気設計の直接制御対象となってきた。二酸化炭素は、(外気濃度レベルである)400ppm程度から 5000ppm 程度以下の濃度範囲では、直接的な人体影響の懸念は無いとされてきたが、近年の研究にて、この二酸化炭素濃度範囲においても血液中の二酸化炭素分圧の上昇、心拍変動の変化、抹消血液循環の増加が有意に確認されており、また、1000ppm 以下の低濃度域においても、二酸化炭素の存在が意思決定力 (Decision Making) に影響を与える可能性が示唆されている。室内環境中の二酸化炭素は、人体影響の点で依然として未解明の点が多い重要な研究対象である。

室内汚染レベルの代表的なトレーサである二酸化炭素の発生源とその発生量モデルに関しては、非常に古くからの研究対象であったにも関わらず、現在においても時間平均化された簡易的な発生量予測モデルしか存在しない。室内環境設計が、室全体の均一制御から、パーソナル空調に代表される局所領域と在室者(人)の精緻な制御へと大きなパラダイムシフトを迎えているにも関わらず、直接的な環境制御の対象となる在室者由来の二酸化炭素発生モデルの高精度化が図られていないが故、設計精度向上のボトルネックになっていることを懸念していた。呼吸域内の不均一・非定常二酸化炭素濃度場の定量的解明は、建築環境工学分野の研究者の貢献が求められている重要かつ喫緊の研究課題であるため、本研究の成果は学術的価値に加えて社会的貢献度も高いものと期待しており、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では「人体呼吸域内の不均一・非定常二酸化炭素濃度場の定量的理解と室内環境設計の高度化」と題して、呼気と吸気を繰り返す非定常呼吸に伴い人体呼吸器系に出入りする二酸化炭素に着目し、呼吸域周辺に形成される非定常・不均一な二酸化炭素濃度場を高い精度で定量的に予測・評価可能な数値解析モデルを開発する。その上、在室者が実際に呼吸する、もしくは呼出する二酸化炭素濃度の実態を定量的に検討すると共に、本数値解析モデルを基盤とする空調制御シミュレーションにより呼吸域内の二酸化炭素の挙動や吸入リスクに関する基礎データを構築し、在室者の二酸化炭素吸入リスクの低減に主眼を置いた新たな室内環境設計技術を提案する。

3. 研究の方法

本研究では、鼻や口から呼出される呼気中の二酸化炭素濃度の時間変化と呼吸器系に実際に流入(吸気)する二酸化炭素濃度の時間変化を定量的に解明し、新たな空調設計指針を確立するために三つの細部課題に分類し、研究を推進する。以下に本研究の細部課題と具体的な達成目標を示す。

1) 被験者実験に基づいた肺胞内ガス交換モデルの開発

- ・時間分解能 1 秒の半導体ガスセンサを用い、成人男女 30 名を対象とした被験者実験を実施する。その際、複数台の二酸化炭素濃度計を同時併用して呼吸域周辺の非定常濃度履歴と不均一濃度分布の高精度計測を実施する。
- ・環境条件 (空気温度と湿度の他、室内二酸化炭素濃度) と被験者の代謝量を変化させた計測データに基づき、肺胞内での二酸化炭素-酸素のガス交換モデルを開発する。

2) 数値人体モデルの開発と非定常呼吸に伴う二酸化炭素発生・輸送の数値解析手法の確立

- ・高精度 3D スキャナを使用し、健康な成人男性の人体幾何形状データを作成する。また、呼吸器系の CT データを基に鼻腔・口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作成し、両者を統合した数値人体モデル(Computer-Simulated Person, CSP)を開発する。
- ・更に、気道内壁面での二酸化炭素の壁面境界条件を正しく設定した上で、人体の熱快適性や人体発熱による微気流の詳細予測を可能とする人体熱モデルを数値人体モデルに統合し、呼吸に伴う気流・熱・二酸化炭素輸送解析を同時に連成する数値解析手法を確立する。

3) 在室者の呼吸空気質を直接考慮した空調制御手法による新たな空調設計指針の提案

- ・統合数値人体モデルによる呼吸域内二酸化炭素濃度場の定量評価データをリアルタイムでフィードバック可能な空調制御アルゴリズムを作成し、在室者の呼吸空気質を直接考慮した空調最適制御法を確立する。
- ・室内空間全体を対象とする従来の空調設計法と比較し、本研究で開発した新たな空調制御法による呼吸空気質の改善効果を検討すると共に、室内二酸化炭素濃度の制御において目標濃度を達成するための新たな空調設計指針を提案する。

4. 研究成果

1) 被験者実験に基づいた肺胞内ガス交換モデルの開発

環境条件が CO₂ 呼出量に及ぼす影響を把握するために、図1のように14名の被験者を対象とした CO₂ 呼出濃度測定実験を実施した。表1に実験条件一覧を示す。CO₂ 呼出量におけるバックグラウンド CO₂ 濃度の影響を評価するために、チャンバー内 CO₂ 濃度を3段階に設定し、CO₂ 発生量の測定実験を実施した。

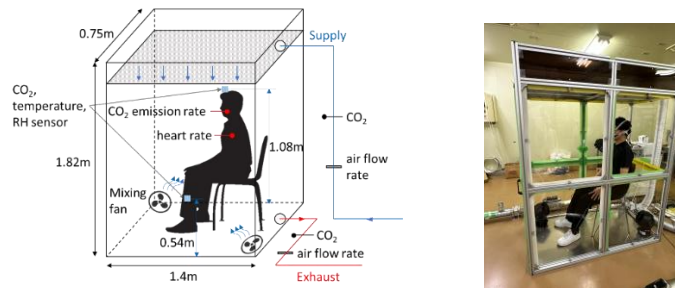


図1 二酸化炭素濃度測定実験の様子

表1 実験条件一覧

	実験条件
室内温度	24°C
バックグラウンド CO ₂ 濃度	800, 1400, 3000 ppm
活動量	軽作業(座位)
CO ₂ 測定方法	間接熱量計, チャンバー法
その他の測定項目	心拍数
着衣量	0.5clo

チャンバー法では、センサで測定した室内外の CO₂ 濃度を用い、被験者がチャンバーから退室後の減衰過程から換気量を算出し、定常状態の室内 CO₂ 濃度から CO₂ 発生率を算出する。実験では換気量を調整するために流量計を使用した。チャンバーが置かれた人工気候室を完全密閉にすることができないため、上記の計算方法を採用した。間接熱量測定は、体内の CO₂ 発生量と酸素消費量を測定して熱生成量を計算する方法で、高精度でかつ被験者への影響が少ない。

図2に CO₂ 発生量の測定結果を示す。間接熱量計による測定結果として、低い換気率と純粋な CO₂ ガスによって CO₂ 発生率が減少し、CO₂ 発生率はバックグラウンド CO₂ 濃度によって約 0.04% 変化し、CO₂ 発生率が約 0.4L/h 減少した。チャンバー法の測定では、CO₂ 発生量は低

換気量によってのみ減少し、大幅に減少したことが示されている。2つの測定値を比較すると、換気量が減少するにつれて2つの方法の差が減少するが、換気量の計算誤差によりCO₂発生量の測定精度が低下する可能性があり、間接熱量測定法を採用することでより高い精度が確保できると判断される。

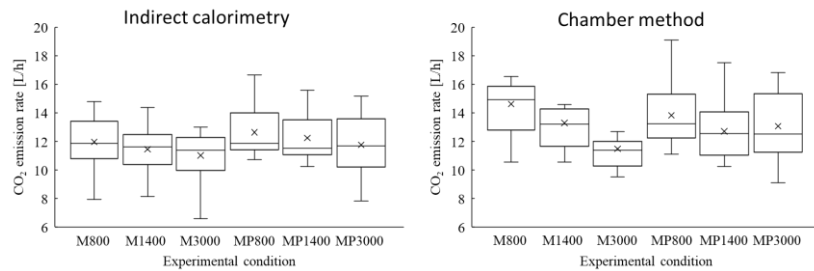


図2 CO₂発生量測定結果

今後、上記の実測結果に加え、様々な条件下で追加の測定実験を実施し、バックグラウンドCO₂濃度、環境温度、代謝量を考慮した人体からのCO₂発生率モデルを作成する予定である。

2) 数値人体モデルの開発と非正常呼吸に伴う二酸化炭素発生・輸送の数値解析手法の確立

日本人の平均的な幾何形状を再現した代表モデルだけでなく、個人の実人体の幾何形状を詳細に再現可能な3Dスキャン手法を活用し、人体周辺微気候の詳細予測が可能な数値人体モデルを作成した。数値人体モデル(立位状態)および解析格子作成結果を図4に示す。数値気道モデルは、鼻腔・口腔から咽頭、気管を経由して気管支第4分岐までの幾何形状を再現したもので、健康な成人男性(身長170cm程度、体重70kg程度の中肉中背、40歳程度の年齢)の上半身を対象としたCTデータを元に作成している。本研究で使用する数値気道モデルの概要と表面メッシュ分割の様子を図5に示す。

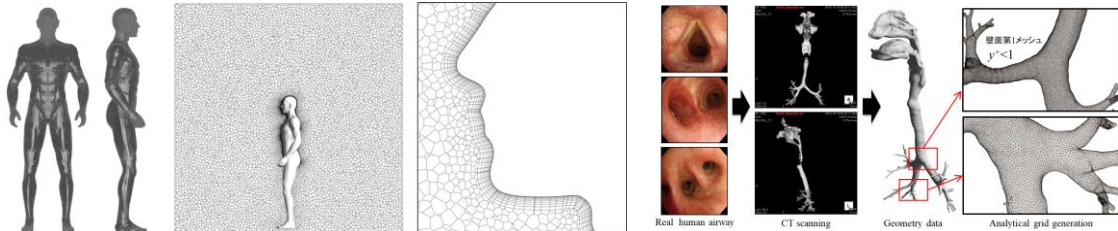


図4 数値人体モデルおよび解析格子の概要 図5 数値気道モデル作成および解析格子の概要

最終的に、数値人体モデルと数値気道モデルを完全に一体化し、CFD解析を実施する際には気道内部空間から鼻腔・口腔を介して室内空間まで一連の解析空間として扱う統合数値人体モデル(Computer Simulated Person)を作成した。この完全統合型数値人体モデルの概要と鼻孔近傍のメッシュ分割の様子を図6に示す。このモデル化では鼻孔面を介して数値人体モデルと数値気道モデルが連続したメッシュで生成されており、CFD解析そのものの解析精度を担保することで、流量保存、エネルギー保存等が自動的に満足される。

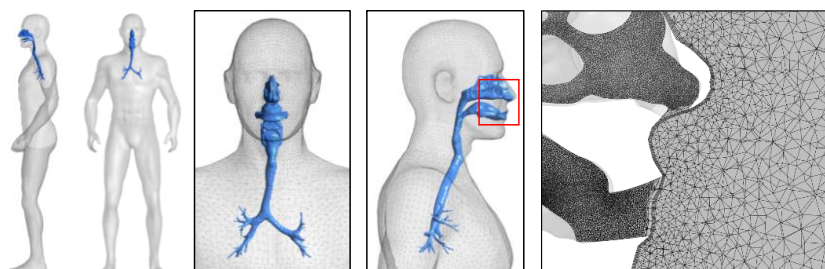


図6 統合数値人体モデル(Computer Simulated Person)の概要

図7は仮想空間及び呼吸域を対象とした流れ場解析結果を示している。解析対象空間の環境

条件として、置換換気(Displacement ventilation)を想定した上、人体熱生理モデル(2-Node モデル)と数値人体モデルの連成解析を行っているため、その結果として人体発熱により人体周辺、特に頭頂部に熱上昇流が確認される。また、呼吸器内の詳細幾何形状による気流の複雑分布が再現され、二酸化炭素の吸入・呼出により形成される濃度分布を詳細かつ高精度な予測が可能であると判断される。

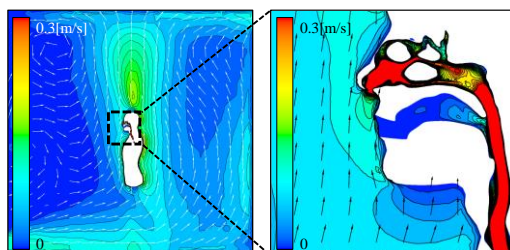


図7 数値人体モデルを使用した室内・呼吸域内気流解析結果

3. 在室者の呼吸空気質を直接考慮した空調制御手法による新たな空調設計指針の提案

数値人体モデルの解析により得られた健康リスクおよび快適性の情報を直接空調・換気制御に取り入れることで、室内環境要素の不均一性に対応し、健康・快適性だけでなく、空調・換気に使用されるエネルギーの最適化まで実現することが可能となる。本研究では、最も基礎的な制御法で幅広く使用されている二点制御法に基づき、数値人体モデルの二酸化炭素吸入濃度ならびに皮膚表面温度の予測データを反映する空調・換気制御アルゴリズムを作成した。

図8は解析対象空間の概要及び各制御方法による空調・換気制御結果ならびに健康・快適性の最適化結果を示している。空調・換気制御において、制御無し(初期条件を維持, Initial condition)および完全混合を想定した理論値を空調・換気条件に導入したケース(Case 1)をそれぞれ黒線、緑線で示している。また、従来の制御方式(空調機に付着したセンサによる制御, Case 2)およびCSPを用いた制御方式(Case 3)をそれぞれ青線、赤線で示している。全てのケースにおいて、合理的な健康・快適範囲を設定し、空調・換気制御アルゴリズムのセットポイントに設定している。この結果より、呼吸空気質ならびに人体熱快適性の観点から見ると、CSPをセンサとして使用した空調・換気制御が最も効果的な制御になっていることが確認できる。

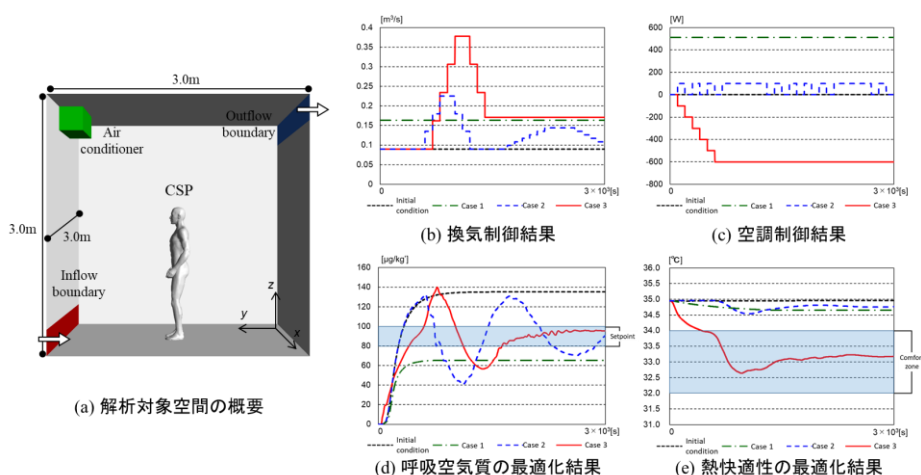


図8 CSPを空調換気制御センサとして使用した室内環境最適化結果

以上の本研究の成果から、本研究で構築した数値解析モデルを基盤とする空調制御シミュレーションの膨大なパラメトリック解析により、呼吸域内の二酸化炭素の挙動や吸入リスクに関する基礎データが確保でき、在室者の二酸化炭素吸入リスクの低減に主眼を置いた新たな室内環境設計技術の確立に貢献できると判断される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Abouelhamd Islam.M.S., Kuga Kazuki, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 103
2. 論文標題 Effect of crowd density, wind direction, and air temperature on the formation of individual human breathing zones in a semi-outdoor environment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sustainable Cities and Society	6. 最初と最後の頁 105274 ~ 105274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scs.2024.105274	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 Park Hyungyu, Yoo Sung-Jun, Seo Janghoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kuga Kazuki, Ito Kazuhide	4. 巻 248
2. 論文標題 Integration of computer-simulated persons with multi-node thermoregulation model that considers the effect of clothing for skin surface temperature distribution analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 111105 ~ 111105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.111105	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 Abouelhamd Islam, Kuga Kazuki, Yoo Sung-Jun, Ito Kazuhide	4. 巻 243
2. 論文標題 Identification of probabilistic size of breathing zone during single inhalation phase in semi-outdoor environmental scenarios	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110672 ~ 110672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.110672	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 Yoo Sung-Jun, Yamauchi Shori, Park Hyungyu, Ito Kazuhide	4. 巻 8
2. 論文標題 Computational Fluid and Particle Dynamics Analyses for Prediction of Airborne Infection/Spread Risks in Highway Buses: A Parametric Study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 253 ~ 253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fluids8090253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoo SJ, Kurokawa A, Matsunaga K, Ito K.	4. 巻 0
2. 論文標題 Spatial distributions of airborne transmission risk on commuter buses: Numerical case study using computational fluid and particle dynamics with computer-simulated persons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental and Computational Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42757-022-0146-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoo SJ, Ito K.	4. 巻 5
2. 論文標題 Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japan Architectural Review	6. 最初と最後の頁 714-727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kazuhide Ito
2. 発表標題 Investigation of the impact of the detailed clothing modelling on the human thermal comfort based on multi-node thermoregulatory analyses using computer-simulated person
3. 学会等名 Healthy Building 2023 Asia Pacific (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Park Hyun-Gyu, Yoo Sung-Jun, Sumiyoshi Eisaku, Harashima Hiroshi, Ito Kazuhide
2. 発表標題 Numerical Thermal Comfort Analysis Using Combined Computer-Simulated Person with Clothing and Multi Node Thermoregulation Model
3. 学会等名 IAQVEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Islam Abouelhamd, Sung-jun Yoo, Kazuki Kuga, and Kazuhide ito
2. 発表標題 Numerical prediction of particle breathing zone in a semi-outdoor environment
3. 学会等名 ICNAA 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sena Hyodo, Kei Murota, Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Development of three-dimensional clothing model for computer simulated person integrated with thermoregulation model
3. 学会等名 Roomvent 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Indoor Thermal Comfort Assessment Using CFD-CSP Hybrid Analysis
3. 学会等名 ACFD 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sena Hyodo, Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito
2. 発表標題 Three-Dimensional Modeling and Computational Fluid Dynamics Analysis for Ventilation in Clothing
3. 学会等名 ACFD 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------