

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18763

研究課題名（和文）飛沫・飛沫核拡散の動的物理モデルの構築

研究課題名（英文）Construction of a physical model of airflow, droplets, and droplet nuclei ejected by human respiratory activity

研究代表者

大岡 龍三（Ooka, RYOZO）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人の呼吸活動により噴出される飛沫・飛沫核が室内環境へ飛散および拡散する物理的な現象を計測により明確に把握し、数値解析手法(CFD)で再現することを目的とする。気流と飛沫・飛沫核の粒径分布を正しく計測するためには、粒子画像流速計測法(PIV)および干渉画像法技術(IMI)技術が必要である。本研究では、非定常の気流条件下で、PIVおよびIMI技術を用いて、様々な呼吸活動における気流計測、粒子計測を行った。またそれらの結果は、CFDの境界条件、検証データとして利用された。加えて飛沫の蒸発現象に関するモデル化を行った。構築したCFDモデルは、人の呼吸活動の可視化実験により交差検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室内環境では、換気システムを効率的に運用することで、空気中に広がって浮遊する飛沫・飛沫核の濃度を減らし空気感染のリスクを抑えることができる。換気システムにおける感染リスクの評価や感染経路の予測には、CFD解析が有効である。今回の研究では、室内環境における飛沫・飛沫核の動態を予測するCFD解析手法を開発することができた。本研究の成果は、今後、室内環境における感染拡大予防の対策に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clearly grasp the physical phenomenon that droplets and droplet nuclei ejected by human respiratory activities (coughing, sneezing, talking) scatter and diffuse into the indoor environment by measurement, and develop numerical analysis method (CFD). intended to reproduce. Human respiratory activity generates a mixed flow of airflow and droplets/droplet nuclei. Particle image velocimetry (PIV) and interferometric imaging (IMI) techniques need to be realized to accurately measure the particle size distribution of airflow and droplets/droplet nuclei. In this study, we performed airflow and particle measurements in various respiratory activities using PIV and IMI techniques under unsteady airflow conditions. These results were used as boundary conditions and validation data for CFD. In addition, we modeled the droplet evaporation phenomenon. The constructed CFD model was cross-validated by a visualization experiment of human respiratory activity.

研究分野：建築環境工学

キーワード：飛沫 飛沫核 CFD PIV IMI

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

新型コロナウイルスの感染拡大は、社会・経済的に甚大な影響を及ぼしている。マスクの着用や手洗いなどの行動で感染の予防ができると知られているが、感染者との直接的な接触がない集団居住施設や航空機内での感染事例が報告され、空気中の伝播が疑われている^{2),3)}。従って、室内環境における感染リスクを軽減させる方法として、換気システムの評価や換気対策の模索が早急に必要である。

室内環境では、換気システムを効率的に運用することで、空気中に広がって浮遊する飛沫・飛沫核の濃度を減らし空気感染のリスクを抑えることができる。換気システムにおける感染リスクの評価や感染経路の予測には、CFD解析が有効である。申請者らは、CFDを用いて室内環境における気流分布の解析、換気システムの性能評価に関する研究を進めてきた。加えて、換気システムにおける飛沫粒子除去の効果に関する研究を行ってきた。しかし、CFD解析には、感染源から発生した気流と飛沫・飛沫核の発生量、速度、粒径分布などの物理的特性の時系列データが必要となるが、従来の研究では想定した物理量を使用している。

2. 研究の目的

本研究は、人の呼吸活動(咳、くしゃみ、会話)により噴出される飛沫・飛沫核が室内環境へ飛散および拡散する物理的な現象を計測により明確に把握し、数値解析手法(CFD)で再現することを目的とする(図1)。飛沫・飛沫核の飛散特性を正しく計測することができる技術を検討し、その計測値から構築した物理モデルをCFDで統合することで、飛沫・飛沫核の拡散を再現することを最終的な到達点に据え、<課題1>粒子画像流速計測法(PIV)を用いた人の呼吸活動による気流特性の把握、<課題2>干渉画像法技術(IMI)を用いた飛沫・飛沫核の粒径分布計測、<課題3>呼吸活動の可視化実測によるCFDの再現性検証、以上の3項目について研究を行う。

3. 研究の方法

呼吸活動は、気流(気体)と飛沫・飛沫核(液体)が混在する流れを生成する。従って、呼吸器感染症の主な感染原因となる飛沫・飛沫核の飛散特性を正しく計測し、その計測値を活用するCFD再現モデルを構築する本研究の目標を達成するためには、各相の特性を把握して統合する以下の詳細な課題を果たす必要がある(図2)。

<課題1: PIVを用いた人の呼吸活動による気流特性の把握>

人の呼吸活動は0.5秒以内の短い時間刻みで行われるため^{1),2)}、一般的な風速計では呼吸を伴う人体周りの気流特性を把握することができない。粒子画像流速計測法(PIV)では、レーザー光を利用して空気中の煙による反射光を高速カメラ(約3000 Hz)で撮影するため、粒子の動きによる気流の運動特性を取ることができる。しかし、時間変動が大きい非定常流条件での計測については適切なテクニックの検討が必要となる。また、人の呼吸活動による気流変化は、個人差が生じるため生理特性を考慮した一般化モデルを構築する必要がある。

<課題2: IMI技術を用いた飛沫・飛沫核の粒径分布計測>

干渉画像法(IMI)は、エンジンの噴射ノズルによる燃料の直径分布の計測に活用される技術である^{3),4)}。粒子を通過したレーザー光は屈折や反射によって干渉縞を発生させる。各粒子内部の干渉縞数は粒径との相関関係を持つ。従って、IMI技術を用いると、呼吸活動により噴出された飛沫・飛沫核の時系列粒径分布を数値化できると考えられる。しかし、非定常流条件での計測や収集した干渉画像データの処理には、干渉撮影技術、自動画像認識、高速フーリエ変換(FFT)などの高度なテクニックが要求される。

<課題3: 呼吸活動の可視化実測によるCFDの再現性検証>

PIVとIMI技術を用いて収集した呼吸活動による人体周辺の気液二相流の特性を反映したCFDモデルを構築する。これにより、飛沫・飛沫核の飛散と拡散特性を再現する数値計算が可能になる。しかし、飛沫・飛沫核は環境条件に応じて蒸発および凝縮するため、その直径が変動することで運動特性が変わる⁵⁾。従って、飛沫・飛沫核の可視化実験を通してCFDモデルを交差検証し、モデルの妥当性を検討する。

4. 研究成果

初年度は、レーザー光を利用するPIVを用いて人の呼吸活動(咳、くしゃみ、会話)による流の特性を計測した。また、PIV実から得た噴出流の計測結果から特性を解析することで、流分布に相するCFDの境界条件を討した。加えて、その境界条件に基づいて人呼吸活動(咳、くしゃみ、会話)により発生する流の流れが再現できるCFDモデルを構築した。2.人の呼吸活動により発生する飛沫・飛沫核の粒分布の把握に関する研究人の口から噴出された飛沫および飛沫核の粒子は、時間の過とともに蒸発することで粒が化し、その粒子の浮遊時間は口からの距離に概ね比例する。人の息の流が妨げられないようにチャンバー部を空け、逆流の発生を防ぐために一定の方向の流を形成するような設備を設計した。また、呼吸咳会話などの行動により呼吸器から発生するエアロゾルの粒分布をパーティクルカウンターを用いて計測し、噴

出した粒子の空間濃度分布を把握して各呼吸行動によるエアロゾル粒子の散傾向を比較した。1 μm 以下の粒子は深呼吸条件が、6–10 μm の粒子は咳の条件が最も多かった。また、咳の場合、エアロゾルの濃度が0.6 m、口腔呼吸は0.3 mまで現れ、会話は呼吸や咳より粒子が左右に広がる傾向が見られた。



図 パーティクルカウンターによるエアロゾル計測装置

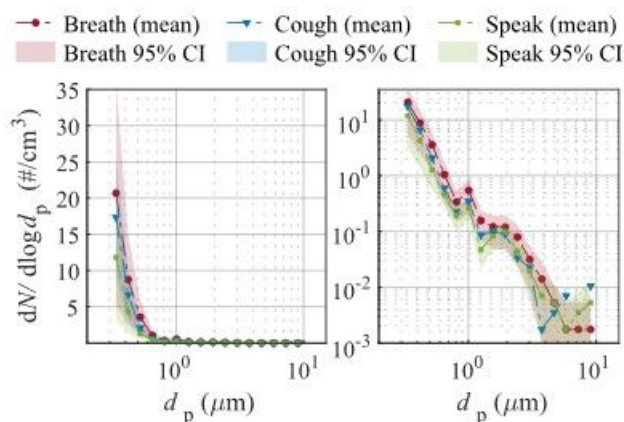


図 口近傍で計測したエアロゾルの粒径分布

次年度は、IMI 技術を用いて 10 μm 以上の粒径分布を把握し、PIV と IMI 技術、パーティクルカウンターを併用して活用することで人の活動による人体周辺の気液二相流の計測データを収集した。加えて、その計測データの特徴を反映して CFD モデルを構築した。また、構築した呼吸活動による気流と飛沫・飛沫核の CFD モデルを用いて様々な環境における感染リスクを評価して呼吸器感染症の拡大防止策を検討した

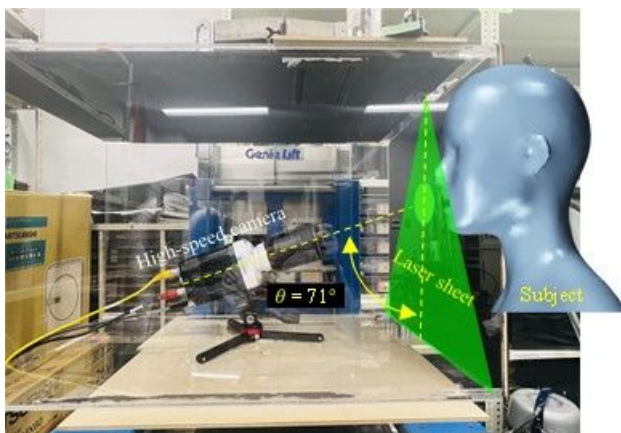


図 IMI によるエアロゾル計測装置

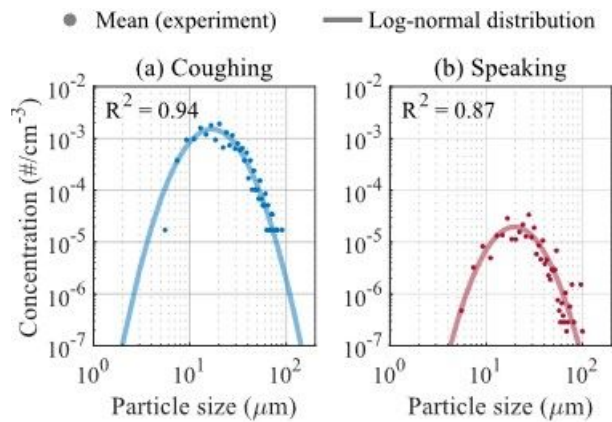


図 IMI によるエアロゾル粒径分布の計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mengtao Han, Ryoza Ooka, Hideki, Kikumoto, Wonseok Oh, Yunchen Bu, Shuyuan Hu	4. 巻 205
2. 論文標題 Experimental measurements of airflow features and velocity distribution exhaled from sneeze and speech using particle image velocimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108293 ~ 108293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2021.108293	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 Mengtao Han, Ryoza Ooka, Hideki, Kikumoto, Wonseok Oh, Yunchen Bu, Shuyuan Hu	4. 巻 202
2. 論文標題 Measurements of exhaled airflow velocity through human coughs using particle image velocimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108020 ~ 108020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2021.108020	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 Wonseok Oh, Ryoza Ooka, Hideki Kikumoto, Mengtao Han	4. 巻 207
2. 論文標題 Numerical modeling of cough airflow: Establishment of spatial-temporal experimental dataset and CFD simulation method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108531 ~ 108531
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2021.108531	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 韓夢濤、大岡龍三、菊本英紀、呉元錫、卜韻謙、胡書媛
2. 発表標題 人の咳により噴出する気流及び飛沫・飛沫核の運動特性の把握（その1） PIVを用いた咳気流の速度分布の測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 人の咳により噴出する気流及び飛沫・飛沫核の運動特性の把握(その2) 数値解析を用いた咳による気流モデルの構築
2. 発表標題 呉元錫、大岡龍三、菊本英紀、韓夢濤
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mengtao Han, Ryoza Ooka, Hideki, Kikumoto, Wonseok Oh, Yunchen Bu, Shuyuan Hu
2. 発表標題 Measurements of Exhaled Airflow Velocity Via Human Coughs Using Particle Image Velocimetry (PIV)
3. 学会等名 IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wonseok Oh, Ryoza Ooka, Hideki Kikumoto, Mengtao Han
2. 発表標題 Numerical analysis of airflow dynamics generated by human coughing based on PIV experimental results
3. 学会等名 IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yunchen Bu, Ryoza Ooka, Hideki Kikumoto, Wonseok Oh
2. 発表標題 Numerical analysis on the applicability of air purifier for removal of indoor viral contaminants
3. 学会等名 IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches (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
研究 分担者	菊本 英紀 (Kikumoto Hideki) (80708082)	東京大学・生産技術研究所・准教授 (12601)	
研究 分担者	呉 元錫 (Oh Wonseok) (10889009)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	

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