

補助事業番号 2024M-564

補助事業名 2024年度 分岐肺気道内におけるウイルス飛沫シミュレーションによる感染メカニズムの解明とその応用 補助事業

補助事業者名 京都工芸繊維大学 山川勝史

## 1 研究の概要

本研究は、CT画像から抽出した分岐肺気道形状と室内空間モデルを組み合わせ、感染者の咳などで放出された飛沫が室内を移動し、被感染者の鼻腔から気道内へ吸入され、肺の各分岐へ到達・沈着する過程を高精度に数値シミュレーションしたものである。計算には気流解析と飛沫追跡を組み合わせ、大規模計算環境としてスパコン富岳やワークステーションを活用している。特に、首の横方向の角度の違いが気道内流れと飛沫輸送経路を変化させ、肺内への到達量や沈着部位に大きな影響を与えることを明らかにした。さらに、最終分岐まで含む完全肺気道解析に向けて、機械学習手法やFANモデルを用いた数理モデルの導入も進めており、感染リスク評価だけでなく、吸入薬の効率的送達や肺炎進展予測への応用も期待されるものとなっている。

## 2 研究の目的と背景

本研究の背景には、新型コロナウイルス感染症をはじめとする呼吸器感染症において、飛沫やエアロゾルがどのように人体へ取り込まれ、気道内を移動し、肺のどこに到達するのかという詳細な機序が十分に解明されていないという課題がある。従来は室内空間中での拡散や上気道近傍での評価が中心であり、室内空間から鼻腔、さらに分岐した肺気道の奥までを連続的に扱う解析は容易では無く、特に、人体姿勢や首の向きといった日常的な条件の違いが、吸い込まれた飛沫の輸送経路や沈着位置にどのような影響を与えるかは、ほとんど検討されていないのが現状である。そこで本研究では、CT画像に基づく分岐肺気道モデルを構築し、室内空間内の飛沫挙動と被感染者の気道内輸送を一体的にシミュレーションすることで、感染メカニズムを流体力学的に解明することを目的としている。加えて、首の角度の違いによる肺内着床特性の変化を明らかにし、感染リスク低減策や吸入薬送達設計への応用可能性を探るとともに、最終分岐まで含む完全肺気道解析への発展も目指している。

## 3 研究内容

(1) 感染者の口腔から室内空間を経て被感染者への分岐後の肺気道着床までの飛沫シミュレーションに関する研究 (<http://www.etr1.kit.ac.jp/>)

本研究では、感染者が放出した飛沫が室内空間を移動し、被感染者の鼻腔から取り込まれた後、分岐肺気道内を輸送されて肺内に到達・着床するまでの一連の過程を、数値流体解析により評価するための基盤構築を行った。まず、室内気流解析に用いる人モデルと、CT画像データから抽出した分岐肺気道モデルを作成した。CTデータから気道領域を抽出し、計算に適した形状へ修正することで、流体解析に利用可能な気管支モデルを構築した。ここでは、CTデータ、抽出した概

形データ、さらに解析用に整形した気管支モデルを順に示すと、本研究で用いた形状生成過程が理解しやすい。

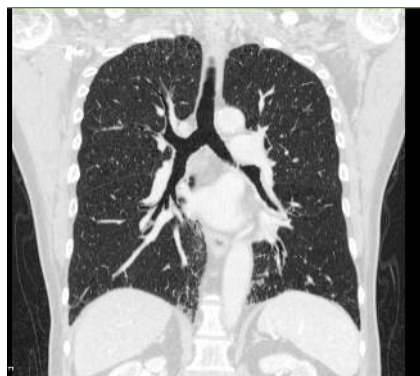


図1 CTデータ

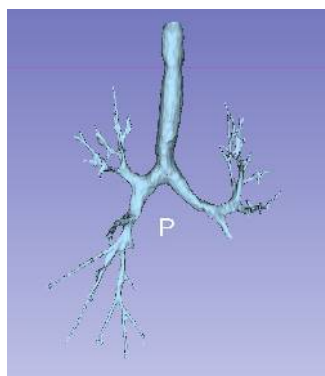


図2 概形データ

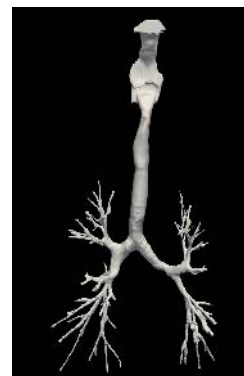


図3 計算用気管支モデル

さらに、室内空間から肺気道着床までを対象とした飛沫シミュレーション手法を構築した。計算領域としては、被感染者の口鼻周辺だけでなく、1.5m×3m×3mの室内全体を含め、壁面には換気口を設けて室内および気道内流量を調整した。計算領域の全体像を示すことで、室内空間と人体周辺、さらに気道解析とが一体的に扱われていることを明示できる。また、呼吸条件は肺末端部に与える流量変化として表現しており、その時間変化を示すことで吸気・呼気の設定条件が明確となる。加えて、吸い込まれる飛沫については、人の咳により放出される粒径分布を与えており、その設定条件は図示することで理解しやすい。飛沫計算では、あらかじめ求めた気流場を用い、飛沫一粒ずつの運動を追跡した。飛沫は極めて微小であり、流れ場そのものへの影響は小さいとみなしてOne-Wayモデルを採用したが、一回の計算で扱う飛沫数は10万個に及び、十分に大規模な解析となっている。以上により、室内空間内での飛沫輸送と被感染者気道内での輸送・付着・肺方向への到達を一体的に解析するための基盤技術を整備した。本項目で構築した解析手法は、次項に示す首の角度依存性評価の基礎となっている。

## (2) 被感染者の鼻腔から取り込んだウイルスの首の角度の違いによる分岐後の肺気道着床までのシミュレーションに関する研究 (<http://www.etr.kit.ac.jp/>)

本研究では、被感染者が飛沫を吸入した際、首の横方向の角度の違いが気道内流れおよび肺内への飛沫到達に与える影響を明らかにするための解析を実施した。首の向きは日常生活で頻繁に変化するにもかかわらず、その違いが肺内飛沫輸送に与える影響を詳細に調べた研究はほとんどない。そこで本研究では、首姿勢の違いに着目し、気流と飛沫沈着の両面から評価した。まず、解析精度の妥当性を確認するため、単純化した第1世代気道モデルを用いて格子依存性の検証を行った。使用したモデルの概要を示すことで、検証条件が把握しやすくなる。さらに、格子数の異なる複数条件における末端気管支流量の比較結果を示すことで、中間解像度メッシュで十分な格子独立性が得られたことを明確に示すことができる。この結果を踏まえ、本解析では計算コストと精度の両立が可能な中間解像度メッシュを採用した。その上で、首の角度を水平方向に

±30° の範囲で10° 刻みに変化させた複数の気道形状モデルを作成し、それぞれについて気流計算と飛沫追跡計算を実施した。首角度の定義については、頭部上方から見た模式図を示すと読者に理解されやすい。

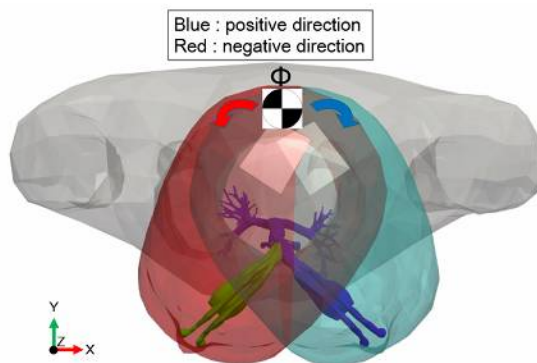


図4: 頭部から見た首の角度の定義

本研究で用いた8世代肺気道モデルは53の末端枝を有しており、これらを左上、左下、右上、右中、右下の5肺領域グループに分類して評価した。この分類を図示することで、後述する肺領域ごとの結果との対応関係が明瞭となる。また、首角度の違いによる気道内流れの変化については、代表条件における流線図を示すことで、下部気道の流れ場が姿勢によって変化する様子を直感的に示すことができる。解析の結果、首の角度の違いは、肺各領域へ到達する飛沫数および飛沫体積に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。各肺領域グループに到達した飛沫量と飛沫数をまとめた結果を示すと、角度条件によって優勢となる到達部位が変化し、左右対称ではない挙動が現れることが分かる。特に、首を左側へ傾けた条件では肺末端に到達する飛沫量が増加し、反対に右向き姿勢では相対的に到達量が抑えられる傾向が見られた。これは、首姿勢の違いが気道形状を介して流れ場を変化させ、飛沫の輸送経路を変えていることを示している。

さらに、気道壁面への付着の様子を可視化した結果では、飛沫の多くが鼻腔、咽頭、気管壁などの上気道に付着し、一部のみが肺入口まで到達することが分かった。この様子は、異なる首角度における飛沫付着分布を示すことでわかりやすい。条件ごとに肺入口に到達した飛沫数、到達割合、および飛沫体積を整理すると、初期飛沫10万個に対して肺に到達したのは約5~13%であり、残る大部分は上気道で付着することが確認された。以上より、首姿勢は肺内飛沫沈着を左右する重要な因子であり、感染リスク評価や吸入薬送達設計においても考慮すべき条件であることを示した。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究の成果は、まず感染症対策への応用が期待される。室内で放出された飛沫が、被感染者の姿勢や首の向きによって肺内への到達量や沈着部位を変えることが示されたため、マスクや換気に加え、身体の向きや姿勢を考慮した新たな感染リスク低減策の提案につながる。また、気道内での粒子輸送を高精度に予測できることから、吸入薬を狙った部位へ効率よく届けるドラッグ

デリバリー設計にも展開可能である。さらに、最終分岐まで含む完全肺気道解析が進めば、肺炎の広がり方や病変形成の予測、個人差を踏まえた医療支援への発展も期待される。加えて、本研究で培われた大規模数値解析、機械学習、数理モデル化の技術は、呼吸器分野にとどまらず、幅広い流体・医療工学分野への応用も見込まれる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

今回の研究は、これまで進めてきた流体力学・数値シミュレーション研究の延長線上に位置づけられると同時に、その応用領域を医工連携・感染メカニズム解明へ大きく広げるものである。従来取り組んできたCFD、高精度気流解析、複雑形状内部流れの数値計算技術を基盤として、室内空間から分岐肺気道内に至る飛沫輸送を一体的に扱う新しい研究対象へ発展させた。また、スパコン利用、気道モデル構築、粒子追跡、さらには機械学習や数理モデルの導入にも踏み込み、計算力学研究をより学際的かつ社会実装志向の高い段階へ進めた点に意義がある。教歴・研究歴の流れの中では、基盤的な数値流体解析の専門性を保持しつつ、医療・感染対策・創薬応用へと展開する転換点となる研究と位置づけられる。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

Nonoka Ikenaga, Takahiro Ikeda, Masashi Yamakawa, Ayato Takii, Yusei Kobayashi, Shinichi Asao, Seiichi Takeuchi, Minsuok Kim, Effect of horizontal neck twist on the position of droplets reaching the lungs, Journal of Aerosol Science, Vol.194 (2026),106788

#### 7 補助事業に係る成果物

該当なし

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 京都工芸繊維大学(キョウトコウゲイセンイダイガク)

住 所： 〒606-8585

京都市左京区松ヶ崎御所海道町

担 当 者： 教授 山川勝史(ヤマカワマサシ)

担 当 部 署： 機械工学系(キカイコウガクケイ)

E - m a i l: yamakawa@kit.ac.jp

U R L: <http://www.etrl.kit.ac.jp/>