

補助事業番号 2021M-223

補助事業名 2021年度 新型コロナに対するマスク変形を考慮した人体気道内における  
飛沫発生と漂着シミュレーション 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、感染者の肺気道から発生した新型コロナウイルスを含む飛沫が、室内気流により運ばれ、被感染者の肺気道へ漂着するまでの一連のシミュレーション手法を構築した。感染者と被感染者の距離やマスクの有無による飛沫発生と漂着の様子について、パラメトリックスタディを実施した。さらに被感染者については第8世代までの肺気道におけるウイルス飛沫の漂着について調査を行った。さらに変形するマスクを、モーションキャプチャーシステムを用いて測定し、その取得した変形量から移動格子法を用いてマスク変形を含む飛沫拡散シミュレーション手法も併せて構築した。これらの成果は新型コロナウイルス疾患感染の検証だけでなく、次期新型コロナウイルスによる飛沫感染についても利用が期待できるものとなった。

## 2 研究の目的と背景

2020年初頭に国内において感染爆発を起こした新型コロナウイルスによる疾患COVID19について、マスク着用や換気の促進といったワクチン以外の感染防止策を推進するため、流体シミュレーションによる飛沫の可視化が実施されていた。その当時国内外でも最も大きなプロジェクトとして、本補助事業者も参画している「スパコン富岳プロジェクト」があり、日常の様々なケースについて飛沫拡散のシミュレーションを実施していた。本プロジェクトでは非常に短期間で多くの計算例を要求されており、ウイルス飛沫感染による本質まで目指すことが出来ていなかった。そこで本JKA事業では、感染者の肺気道から発生したウイルス飛沫が室内を浮遊し、被感染者の肺気道へ漂着するまでの一連のシミュレーションについて2年間という比較的長いスパンでの研究を進めることとなった。またその際、従来では考慮されていなかった咳の気流により変形するマスク、つまりマスクと顔との隙間が非定常的に変化するような実状に近い条件での計算を組み込むことを考えた。これはウイルス感染の本質にせまり、より実際に近い環境下での高精度シミュレーション技術の構築を目指したものである。

## 3 研究内容

### (1) マスクの変形を考慮した飛沫拡散シミュレーション技術の構築 (<http://www.etril.kit.ac.jp/>)

飛沫の拡散による感染リスクを評価するため、本課題は咳の風圧によるマスクの変形量を考慮したより高精度な解析のためのマスクモデルを作成することにある。モーションキャプチャーシステムを新たに導入し、3次元的なマスク変形の測定を行った。システムは Acuity社 OptiTrackモーションキャプチャーシステムであり、モーション解析には同社のソフトウェア Motiveを採用した。31箇所にマーカーを貼り付けた不織布マスクを装着した学生を図1に示す。学生の頭部はヘッドセツ

トにより固定されているものの微小な変位も修正するため、頭部(赤丸印)にもマーカーを貼り付けることで、咳による頭部の揺れの補正を行った。咳によるマスクの変形量は6台の赤外線カメラを用いて測定した。図9には分かりやすいよう5点に絞った変位の履歴を示しているおり、これらの変位履歴を用いて変形するマスクモデルを作成し、シミュレーションを行った。



図1 測定対象

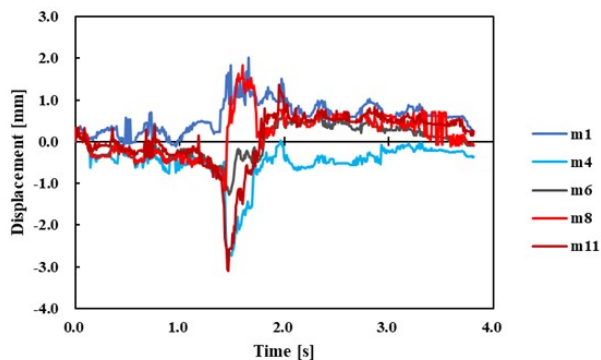


図2 マスク上の変位履歴

まず咳をした際の非定常流速を口に与え気流計算を実施し、その流速結果を用いて飛沫計算を行った。マスク変形の効果を確認するため、マスク変形の有無についてそれぞれ気流計算および飛沫計算を行った。このマスク変形を考慮した気流計算は、移動境界問題として取り扱われるため、本問題に対して非常に高い計算精度を誇る「非構造移動格子有限体積法」を採用した。図3には $t = 200$ におけるマスク変形の有無の違いによる飛沫拡散の差を示している。赤い飛沫はマスク変形無、青い飛沫はマスク変形有の結果である。マスク変形を考慮することで飛沫拡散の抑制が確認でき、拡散距離は約14%縮まっている。実現象として咳によるマスク変形は生じるものであり、本結果はより現実に即した状況を再現していると考えられる。

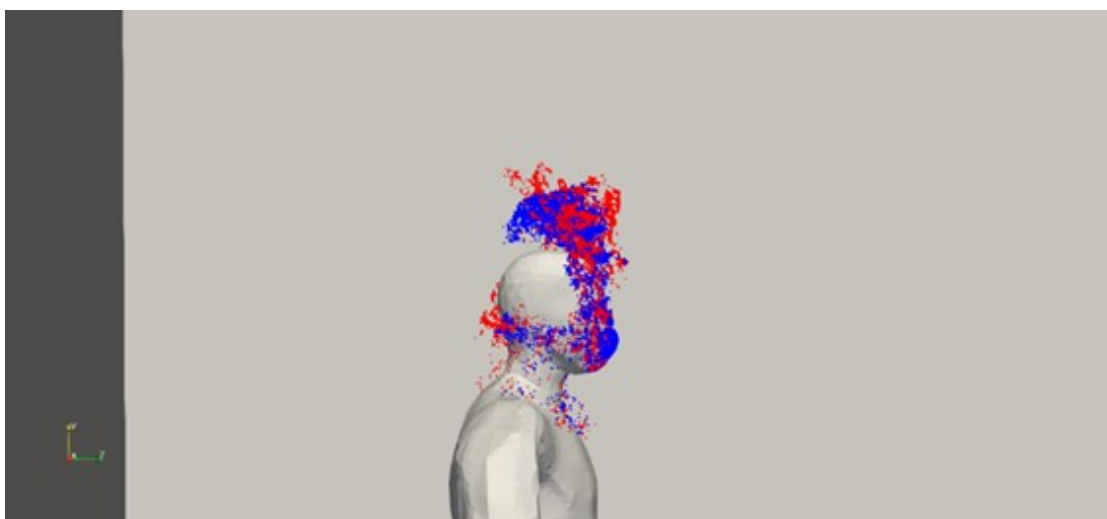


図3 マスク変形の有無による飛沫拡散の状況(赤:変形無、青:変形有)

(2) 感染者の肺から非感染者の肺までの飛沫シミュレーション(<http://www.etr.kit.ac.jp/>)

本課題では被感染者が吸い込んだウイルス飛沫が上気道のどの部位に漂着し、それによる感染や症状への影響を評価するのが最終目的である。今回の報告においては気管支末端部に到達するウイルス飛沫に注目した。つまり患者の肺から発生し室内を浮遊したウイルス飛沫が被感染者の肺に到達するまでのルートの特定でもある。これは新型コロナのオリジナル株、アルファ株、デルタ株など毒性の強いウイルスの感染リスク評価について重要な内容であり、また鳥インフルエンザなど肺での感染が報告されている他のウイルス疾患についても応用が期待できる。

対面に座した患者および被感染者について、その距離を0.5m、1.00m、1.25mと変化させ、また患者と被感染者にマスク着用の有無の全組み合わせ(4通り)を実施した。結果、患者がマスクを着用した2(被感染者のマスク有無)×3(距離の違い)=6ケースについては被感染者のウイルス飛沫の吸い込みが確認できなかったのを除外している。その他のケースについては、最もウイルス飛沫の吸引個数が少なかった距離最大(1.25m)且つ被感染者がマスク着用条件は想定通りであったものの、最も吸引個数が多かったケースが距離中程度(1.00m)且つ被感染者がマスク着用と全く想定していなかった結果であった。その理由等について検討を行ったので以下に示す。まず図4にはマスク着用の被感染者におけるマスク近傍から気管支末端までの気流状況を示している。これらは鳥観図と断面図であり、マスク内部への流入は主にマスク上部および下部より行われていることが確認できる。にもかかわらず吸引される空気はマスク上部や下部に続く頭部や首部からではなく、マスク前方、つまりマスクを着用していない場合と同様の領域からであることがわかる。次に図5に患者から被感染者への飛沫経路の一例を示す。これは距離0.75mの間隔で  $t = 0.2$  における状況である。飛沫は主に被感染者の胸元方向へ飛翔している。この結果を踏まえて、 $t = 60$  におけるウイルス飛沫の浮遊および付着状況を図6(近距離0.75m)および図7(長距離1.25m)に示す。赤い点は浮遊飛沫を、また緑の点は付着飛沫を示している。図6では大量の飛沫が被感染者に付着していることを確認できる。これは患者から発せられた飛沫速度が速く、被感染者の到達した飛沫は勢いよく胴体に付着すると共に、付着できなかった飛沫はその速さゆえ被感染者乗り越えて後部方向へと浮遊している。次に図7では十分時間が経過しているにも関わらず、被感染者への付着がほとんど見られなかった。これは被感染者に到達する前に体温による上昇気流に乗った飛沫が上昇したためだと考えられる。浮遊飛沫が被感染者の前方且つ上部に存在していることから類推できる。これらの結果から中距離においての吸い込み飛沫が多くなった原因は、被感染者を通り越さず、また手前で上昇せず、吸い込みされやすい領域に集まったからであると考えられる。図8には被感染者がマスクを着けた状態での距離ごとの気管支末端部に到達したウイルス飛沫数を示したものであり、両者の肺から肺への飛沫飛翔の割合を今回初めて確認することができた。これは肺におけるウイルスの発生量および被感染者のウイルス暴露量が実験的手法やクラスターイベントなどから判明すれば、滞在時間(会話時間)から感染確率を直接算出できることになり、また新たな変異型コロナウイルスや次世代新型ウイルスについても本算出法が転用できる可能性を示している。

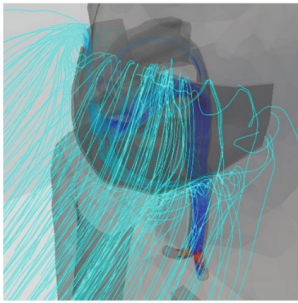


図4 被感染者の吸い込み気流

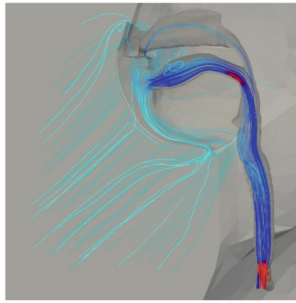


図5 患者から被感染者への飛沫経路

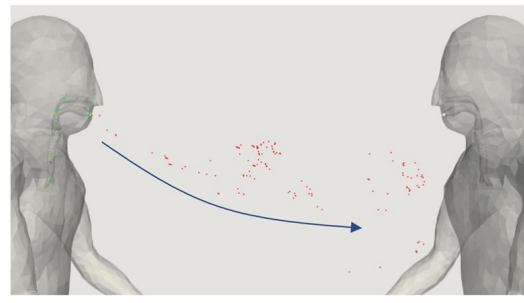


図6 飛沫分布（近距離）

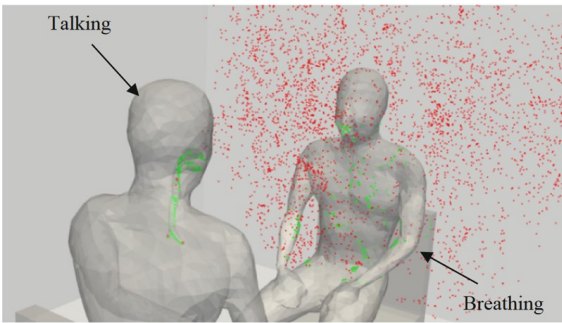


図7 飛沫分布（長距離）

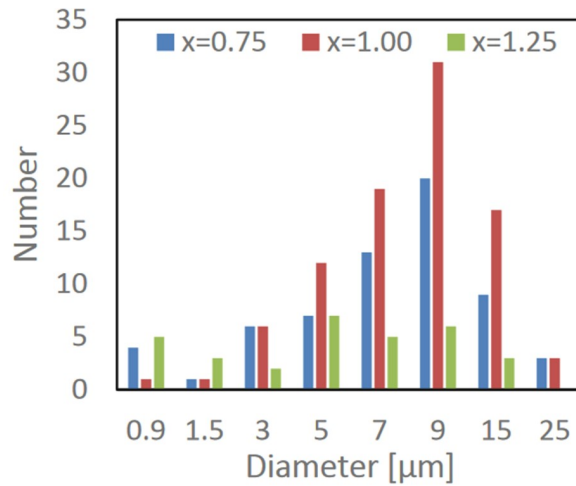


図8 マスク着用時の距離別吸い込み飛沫個数分布

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究の動機は申請段階では先が見えないパンデミックの最中でもあり、新型コロナに対する精度の高い感染ルート の 解明や感染防止策の発案であった。2年間を経て本事業が終了となった昨今では新型コロナ疾患はほぼ終焉を迎えているのは確かである。しかしながらこのようなウイルスパンデミックは長い歴史においてほぼ20年間隔で発生しており、今後もウイルスの飛沫によるパンデミックは必ず起こる。その際、ワクチンが完成するまでの1年間において対抗できるのはこのような流体を用いた対処療法でしかなく、この手法を明示できるのがシミュレーション技術であると言える。今回の事業では従来に比べて格段に高精度化し、次回のパンデミックまでには

完全に実装できると考えられる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は2001年より大学教員として、計算流体力学を専門としており、主に移動物体(航空機、自動車、アスリートなど)周りの高精度な流れ解析を実施してきた。また2010年頃より新型インフルエンザに対する飛沫拡散シミュレーションの研究を開始し、新型コロナのパンデミックが勃発した2020年においては国内外で第一線の飛沫シミュレーションに関する研究者として、様々なプロジェクトに参画と立ち上げを行った。今回の研究は新型コロナに対する飛沫シミュレーションの高精度化を狙ったものである。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

① Shohei Kishi, Yuta Ida, Masashi Yamakawa, Momoha Nishimura, Simulation of Virus-Laden Droplets Transmitted from Lung to Lung, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 13353, pp. 356-369, (2022), DOI: 10.1007/978-3-031-08760-8\_30. DOI:10.1007/978-3-030-22750-0\_39.

② Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Atsuhide Kitagawa, Tomoaki Watamura, Yongmann M. Chung, Minsuok Kim, Numerical model for cough-generated droplet dispersion on moving escalator with multiple passengers, Indoor Air, Vol.32, 11, e13131, 13pages, (2022), DOI: 10.1111/ina.13131.

#### 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.etr1.kit.ac.jp/>