

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03856

研究課題名（和文）新型コロナウイルス飛沫拡散の動的シミュレーションによる社会的距離概念の刷新

研究課題名（英文）Reformulating the concept of social distancing using dynamic simulation of new coronavirus droplet transmitting

研究代表者

山川 勝史（Yamakawa, Masashi）

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：90346114

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：Afterコロナにおける新たな生活様式を、人等の動きまで考慮して実態をより反映した科学的根拠に基づいて提案・社会実装するために、新型コロナ疾患のウイルス飛沫拡散に対する『動的』シミュレーション技術を構築した。特に咳により変形する不織布マスクに対する動的シミュレーションでは、変形しない静的シミュレーションと比較して、咳の流速が抑えられるため、飛沫の拡散範囲が小さくなると予測していた。しかしシミュレーションの結果は全く逆の結論であった。動的マスクでは咳の後の呼吸過程において拡散後の飛沫の吸い込みが減少するのが原因であった。よってより高精度な計算においては動的が必要であることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

飛沫シミュレーションにおいて、従来の静的モデルに対して動的モデルを導入することで、ウイルス飛沫の挙動をより正確に解析できるようになった。特に、マスクの動的変形が飛沫拡散に与える影響を精緻に評価することが可能となり、呼吸過程における飛沫吸い込みの減少など新たな発見をもたらし、エアロゾル科学の分野における理解を深化させた。またこの研究により得られた知見により、飛沫拡散の実態をより正確に把握することで、効果的なマスクの設計や公共空間での適切な行動指針の策定が可能となる。結果として、感染拡大の防止や公衆衛生の向上に寄与し、社会全体の健康と安全を守るための科学的基盤の提供につながる。

研究成果の概要（英文）：In order to propose and socially implement new lifestyles in the With and After coronas based on scientific evidence that better reflects the actual situation, even taking into account the movements of people and other factors, a 'dynamic' simulation technique for viral droplet diffusion in new coronary diseases was developed. In particular, the dynamic simulation for non-woven masks that deform due to coughing predicted that the range of droplet diffusion would be smaller because the velocity of coughing would be suppressed compared to the static simulation in which no deformation occurs. However, the simulation results showed quite the opposite conclusion. This was due to the fact that the inhalation of droplets after diffusion is reduced in the breathing process after coughing with a dynamic mask. Therefore, it was found that dynamic was necessary for more accurate calculations.

研究分野：計算流体力学

キーワード：新型コロナウイルス 飛沫感染 計算流体力学 感染シミュレーション マスク マスク変形 非構造格子 動的シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始したのは2021年4月であり、丁度新型コロナウイルス肺炎のパンデミックが勃発してから1年が経過した時期である。しかしながらその頃でも終焉の兆しは見えなかったことから、マスク着用や3密を避けた新たな日常生活スタイルが定着しつつあった。本疾患は、発病時の症状もさることながら、感染回避のために不自由な生活スタイルが課せられることにより、人々の精神的健康や経済活動にも多大な影響を与えていた。一方、これら疾患対策として医薬分野だけでなくあらゆる学術的知見が集結している中、スパコン富岳プロジェクトを筆頭に国内外で数多くの感染シミュレーションが実施され成果を挙げていた。これらは主に患者から発せられた飛沫の追跡や室内空間における換気量を評価するものであり、マスク着用の促進や3密回避を目的とした各種ガイドラインの策定に利用されていた。しかしながらこれらの計算は、その殆どが動かない乗客や変形しないマスク等を対象とした『静的』シミュレーションであった。一方、満員電車における乗客の乗降動作により誘起される換気量予測や、咳の風圧によるマスクの変形により変化するマスクと顔面の隙間など、『動的』シミュレーションでなければ評価が困難な場合も存在した。例えばマスク着用時のウイルス飛沫の正確な拡散範囲の特定は、Social distancing の新たな定義に繋がり、社会活動に対する必要以上の抑制からの解放も期待できた。また満員電車において乗客の乗降動作の有無は車内換気量の推定に大きな影響を与えていたはずであった。この場合、『動的』による評価結果は『静的』によるものの数十倍もの実行換気を示し、山手線など駅間距離の短い路線では「密閉」ではなくなる可能性もあった。感染者と被感染者の間に介在する気流の緻密な理解と制御によって「新型コロナウイルス感染の抑制」と「人的交流の制約解除」という二律背反の問題への有効な解決策を探るためには、本『動的』シミュレーションの実装が非常に重要であると考えていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、With コロナ・After コロナにおける新たな生活様式を、人等の動きまで考慮して実態をより反映した科学的根拠に基づいて提案・社会実装するために、新型コロナ疾患のウイルス飛沫拡散に対する『動的』シミュレーション技術を構築することである。

3. 研究の方法

まず、感染シミュレーションにおいて『動的』流体計算を導入するにあたり、時空統一検査体積に有限体積法を適用する非構造移動格子有限体積法をベースに技術構築を行うことにより、極めて高い計算精度を維持できるという特徴を持つ。これは物体適合座標系における格子移動の保存則（幾何保存・物理保存）を完全に保証するものであり、一般的な仮想境界法等による移動表現とは根本的に異なる。これによりマスクの繊細な変形や、乗客のダイナミックな乗降動作などに高い再現性が期待できる。さらに、他に例を見ない『ウイルス学+流体力学』による高精度な飛沫計算を行うという特徴も持つ。これは従来法のように“飛沫=空気の流れ(流跡)”と見なしたのではなく、蒸発、タンパク質含有量、飛沫の結合、半減期等あらゆるパラメータを導入し、数万の飛沫の動きを個別に全点計算するというものである。本手法はインフルエンザを対象に申請者が世界で初めて実施した計算であり、富岳プロジェクトの飛沫計算においても導入している。これはウイルス飛沫飛翔経路予測の精度を上げるだけでなく、今後も出現するであろう新たなウイルスに対しても計算が可能となるものでもある。

研究目的を達成するために、本研究では研究成果の恩恵を受ける人が最も多くなるマスクシミュレーションに注力することとした。具体的にはより近い Social distancing の提案に向けマスク動的シミュレーションの実施である。咳の風圧によるマスクの変形、およびその変形により生じるマスクと顔の隙間の変化は、飛散するウイルス飛沫の範囲を大きく変化させる。つまり動的シミュレーションの実施により、従来の静的シミュレーションにより導き出された Social distancing とは全く異なった結果が得られる可能性が高い。これにより、より近い社会的距離の安全性を示し、人の交流の不安軽減に資することが期待される。

4. 研究成果

本研究で測定に使用したマスクは市販品 17 cm x 9 cm の不織布マスクである。計測のために図1に示すように縦5行、横5列、合計25個の赤外線マーカーを張り付け、また被験者の顔には基準マーカーを3つ設置した。基準マーカーとマスク上マーカーの相対変位を測定することにより、咳による顔の移動量を補正可能としている。マスクの移動量を3次元的に測定するために Acuity 製モーションキャプチャーシステムを用いた。システムの概要図を図2に示す。マスクを着用した被験者から約2mの位置に、6台のカメラを設置し、それぞれのカメラですべてのマーカーを撮影できるようにしている。なお、今回の実験における測定誤差は約0.015mmである。計測結果より、約0.1secでマスクはz軸方向(人体前方向)に5.5mmの最大変位に到達することがわかった。しかし咳終了後、マスク変形やマスク位置のずれにより、y,z軸方向の変位は0に戻っておらず、計算のための補正が必要となる。まず被験者による非対称性を排除するために、左右でも変位を平均化したものを本マスクの最大変位量としてモデル化し、各マーカー間の変位は、x軸方向はラグランジュ補完、y軸方向は線形補完で計算し、モデル化されたz軸

方向の最大変位量を図3に示す。またこの最大変位をマスクに与えた際のマスクの断面図を図4に示す。青色の線が元のマスクの位置、赤色の線が最大変位を与えた際のマスクの位置である。

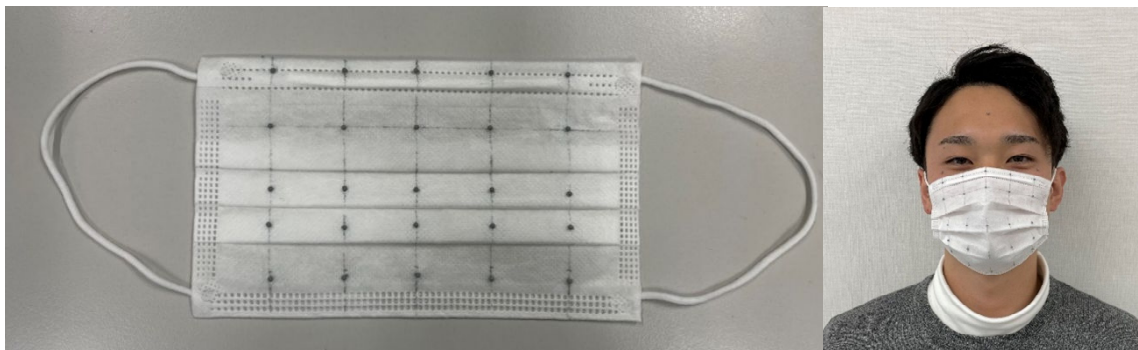


図1 マーカー付きの不織布マスクとマスク装着時の被験者

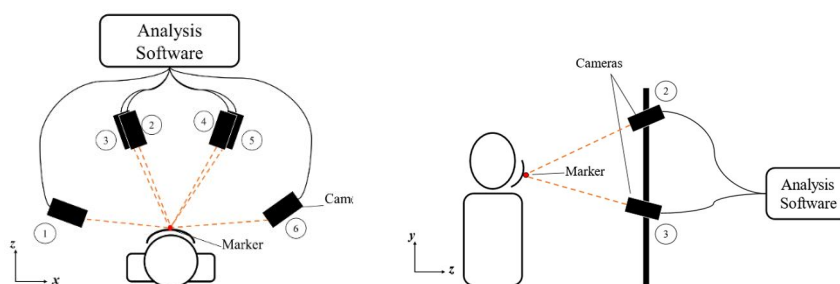


図2 モーションキャプチャーシステムの概要

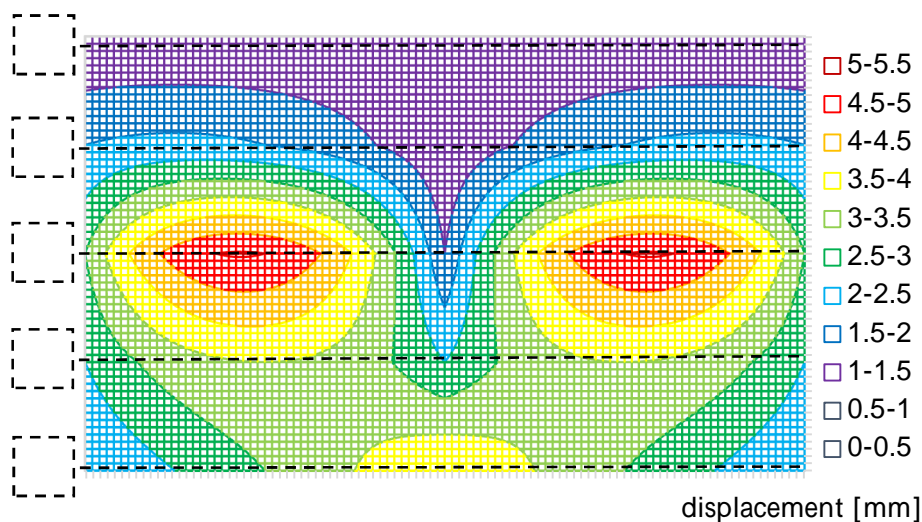


図3 モデル化されたマスク最大変位量の分布



図4 マスクの静止位置（青）と最大変位（赤）（左：側面，右：上面）

マスクを着用した人体モデルを用いて、マスクを静止させて行う計算と、前述のモデル化された変位量をマスクに与えて行う動的マスク計算の2つの条件で計算を行った。マスクの厚み方

向に最低でも3つ以上の計算格子を作成するために、マスクの厚みは一様に2.5mmとし、マスクと鼻の間隙の初期幅は3.5mmとした。座標系は人体モデルを基準として、マスクの変位量の計測実験と同様に定義した。代表長さとして、人体モデルの口の相当直径である0.02m、代表速度は口前方での咳の最大流速である12.0m/sとした。この時のレイノルズ数は $Re=16000$ である。人体中心での断面図をFig. 5に示す。計算格子はマスクと人体モデルの間隙や、マスク内部で細くなっており、総格子数は約200万である。口の大きさは縦が10mm、横が40mmの長方形とし、最小格子幅は約0.5mmである

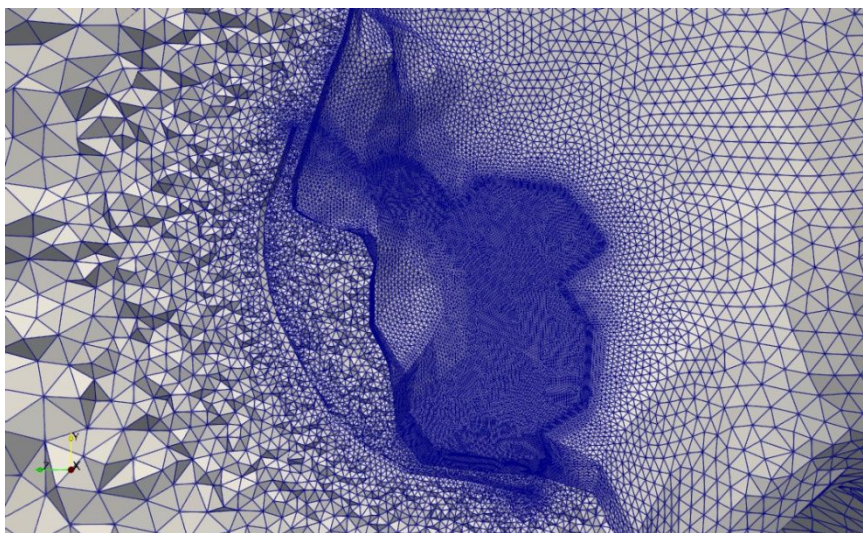


図5 マスク周りの計算格子

本研究では時刻 $t=0$ sec から咳を開始し、咳が終了した後は吸気から通常呼吸を行うものとする。時刻 $t=0.3$ sec における人体中心の断面における速度分布を図6に示す。左側が静止マスクの計算結果、右側が動的マスクの結果である。咳開始後0.1sec後ではマスクが前方に移動してマスクと人体との隙間の流路が広がったことにより、鼻とマスクの間の流速が動的マスクで小さくなった。また0.2~0.4 secにおいて動的マスクでは流れが後方へ、静止マスクでは人体上方向へ広がる結果となった。これにより平均流速は、最大流速の時刻において、動的マスクの方が静止マスクと比べて約7%小さくなった。これはマスクの移動により、マスクと人体モデルの間隙の流路が広がったためである。静止マスク場合、マスクは平均で人体モデルから約3mm離れており、動的マスクでは最大でマスクと人体の間隙面積が約6%増加する結果となった。

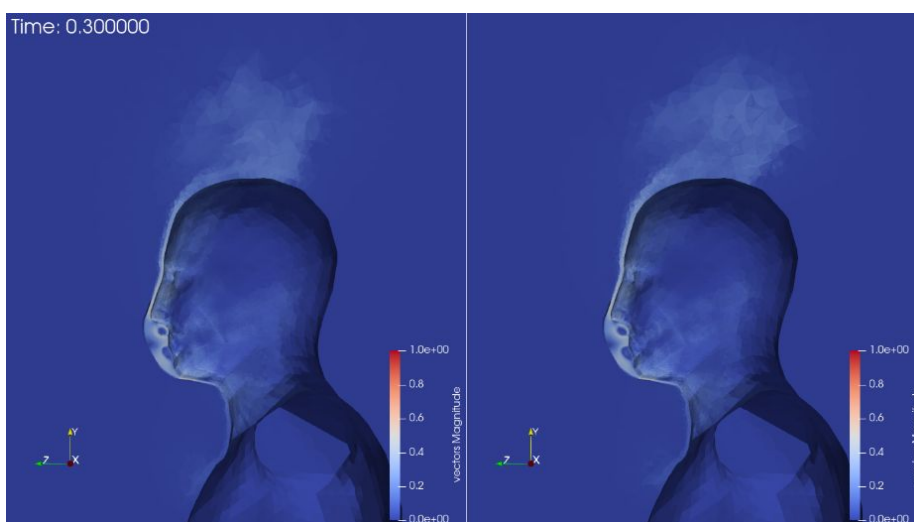


図6 咳開始から0.3秒後における気流の様子(左:静的,右:動的)

本研究では温度25℃、湿度60%として飛沫計算を行った。飛沫の初期位置は人体モデルの口前方に等間隔に10,000個配置した。飛沫は各境界を通過すると付着したと判定される。計算済みの咳と呼吸の流速データは1/600 sec毎に更新され、その流速データを用いて飛沫の運動を計算している。図7に時刻 $t=4.0$ sec における飛沫の様子を示す。青色の飛沫は静止マスクの気流データを用いた結果、赤色の飛沫は動的マスクの気流データを用いた飛沫計算の結果である。咳をしてから0.4 secまではマスクの変位により流速低減が起きた影響により、静止マスクの

データを用いた結果の方が、飛沫がより遠くへ速い速度で運動していたが、時間が経過すると動的マスクの方がより後方へと飛沫が飛散する結果となった。また、マスクの移動・変形を考慮したことにより、飛沫の付着位置や浮遊して留まる位置が変化していることが分かった。

時間が経過するにつれて、動的マスクの気流データを用いた条件の方がより遠くへ飛沫が飛散した要因として、吸気の流速低減が考えられる。マスクの時間的な変位傾向を再現するために、本研究では咳開始 0.4 秒後以降に最大変位の 30% の変位がマスクに残存する。また、人体モデルの口に境界条件として与えている流速は、咳終了後直ぐに吸気を行う。その結果、図 8 に示すように動的マスクにおいて吸気に関して流速の低減が生じる結果となった。これにより、気流による飛沫にブレーキをかける働きが動的マスクでは弱くなり、飛沫がより後方へ飛散したと考えられる。これは研究前の予測と全くの逆であった。

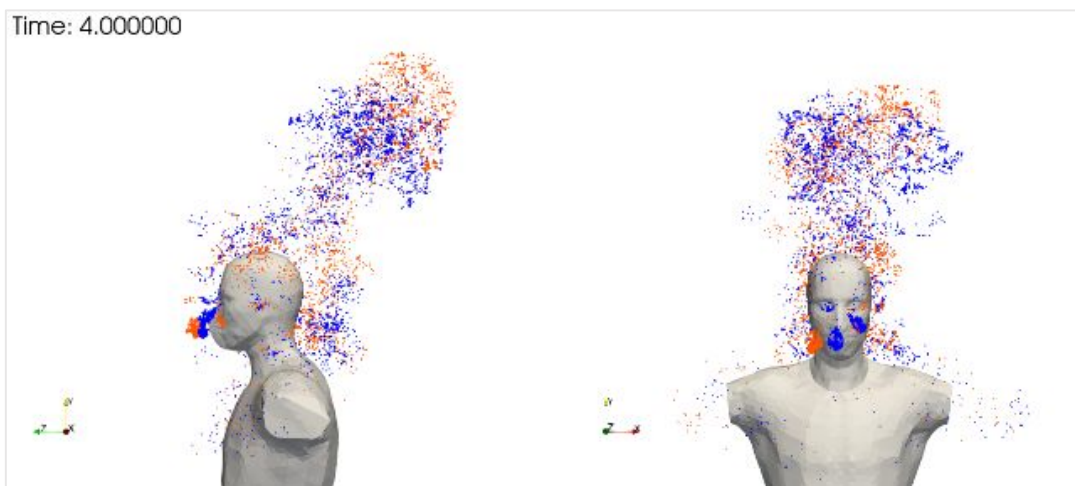


図 7 咳から 4 秒後の飛散飛沫の様子（青：静的，赤：動的）

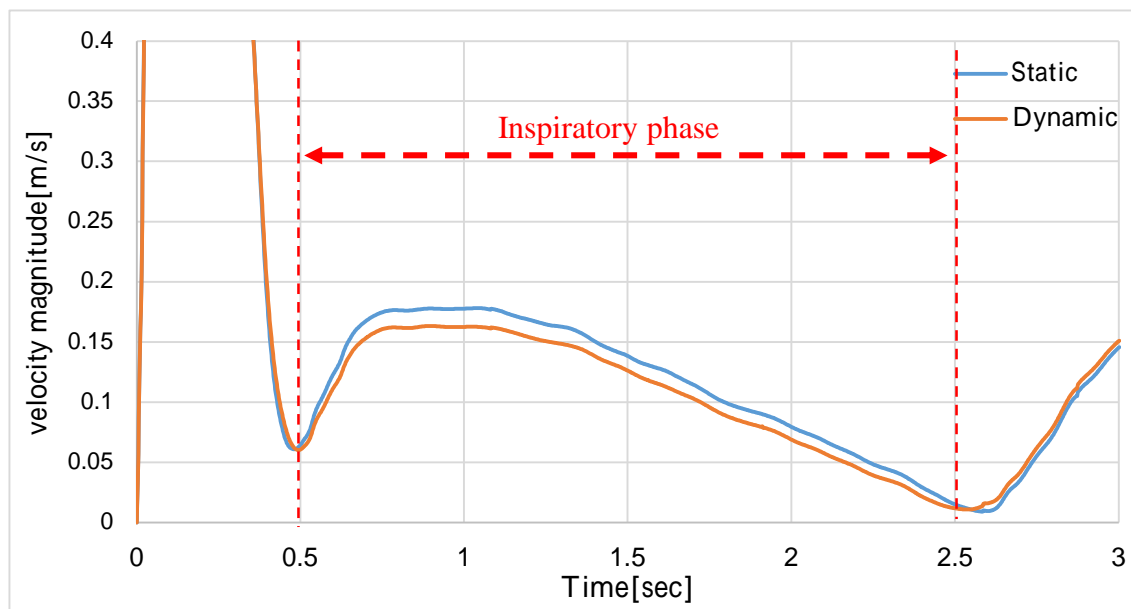


図 8 咳後の顔とマスクの隙間における時間経過に対する平均流速の大きさ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Momoha Nishimura and Masashi Yamakawa	4. 巻 vol. 13353
2. 論文標題 Simulation of Nearly Missing Helicopters Through the Computational Fluid Dynamics Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 329-342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-08760-8_28	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 Masashi Yamakawa, Yuto Yoshimi, Shinichi Asao, Seiichi Takeuchi	4. 巻 vol. 13353
2. 論文標題 Blood Flow Simulation of Left Ventricle with Twisted Motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 343-355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-08760-8_29	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 Takahiro Ikeda, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao and Seiichi Takeuchi	4. 巻 vol. 13353
2. 論文標題 Numerical Simulation of an Infinite Array of Airfoils with a Finite Span	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 323-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-08760-8_27	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 Shohei Kishi, Yuta Ida, Masashi Yamakawa, Momoha Nishimura	4. 巻 vol. 13353
2. 論文標題 Simulation of Virus-Laden Droplets Transmitted from Lung to Lung	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 356-369,
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-08760-8_30	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 Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Atsuhide Kitagawa, Tomoaki Watamura, Yongmann M. Chung, Minsuok Kim	4. 巻 Vol.32, 11, e13131
2. 論文標題 Numerical model for cough-generated droplet dispersion on moving escalator with multiple passengers	5. 発行年 2022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.13131	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 該当する

1. 著者名 Ritsuka Gomi, Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao, Seiichi Takeuchi and Momoha Nishimura	4. 巻 5
2. 論文標題 Flight simulation from takeoff to yawing of eVTOL airplane with coaxial propellers by fluid-rigid body interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Aerodynamics	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) 10.1186/s42774-022-00133-x	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 Masashi Yamakawa, Kohei Yoshioka, Shinichi Asao, Seiichi Takeuchi, Atsuhide Kitagawa, and Kyohei Tajiri	4. 巻 LNCS 12747
2. 論文標題 Numerical Simulation of Free Surface Affected by A Submarine Moving Underwater with A Rotating Screw	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 268-281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-77980-1_21	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 Asao, Masashi Yamakawa, Kento Sawanoi, Seiichi Takeuchi	4. 巻 2141017
2. 論文標題 Flight Simulation of Water Rocket, Shinichi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods	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) 10.1142/s0219876221410176	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 Seiichi TAKEUCHI, Shinichi ASAO, Masashi YAMAKAWA	4. 巻 Vol. 16 No. 2, JTST0030
2. 論文標題 Influence of turbulence-radiation interaction on radiative heat transfer to furnace wall and temperature distribution in large-scale industrial furnaces enveloping hydrocarbon flame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	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) 10.1299/jtst.2021jtst0030	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 Nishimura Momoha, Yamakawa Masashi, Asao Shinichi, Takeuchi Seiichi, Ghomizad Mehdi Badri	4. 巻 4, Article number: 5
2. 論文標題 Moving computational multi-domain method for modelling the flow interaction of multiple moving objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Aerodynamics	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) 10.1186/s42774-021-00099-2	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 Kishi Shohei, Yamakawa Masashi, Takii Ayato, Watamura Tomoaki, Asao Shinichi, Takeuchi Seiichi, Kim Minsuok	4. 巻 14077
2. 論文標題 Numerical Simulation of Virus-Laden Droplets Transport from Lung to Lung by Using Eighth-Generation Airway Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 257 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-36030-5_21	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 Kishi Shohei, Yamakawa Masashi, Takii Ayato, Asao Shinichi, Takeuchi Seiichi, Kim Minsuok	4. 巻 75
2. 論文標題 Impact of neck angle variation on particle and virus-laden droplet transport from lung to lung using eighth-generation airway model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Computational Science	6. 最初と最後の頁 102202 ~ 102202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jocs.2023.102202	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山川勝史
2. 発表標題 コロナ感染にかかわる飛沫の拡散と換気による感染予防
3. 学会等名 第31回日本産業衛生学会全国協議会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masashi Yamakawa
2. 発表標題 Computational Modeling of Virus Droplet Transport
3. 学会等名 Institute of Advanced Studies（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023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
---------	---------