

〔特集〕新型コロナウイルス感染症の拡大防止に貢献する流体力学

新型コロナウイルス感染症に関連する流体力学研究 およびアウトリーチ活動 —Making the Invisible Visible—

兵庫県立大学大学院 工学研究科

高垣直尚*

Fluid-Dynamic Research/Outreach Related to COVID-19 -Making the Invisible Visible-

*Naohisa Takagaki, Department of Mechanical Engineering, University of Hyogo

*E-mail : takagaki@eng.u-hyogo.ac.jp

1 はじめに

特集前書きでも述べた通り、新型コロナウイルスの感染経路の検証・解明や感染対策は、粒子・流体挙動を専門に扱う流体力学が得意とするテーマです。実際、新型コロナウイルス感染症 COVID-19 のパンデミックが宣言された 2020 年 3 月 11 日以降の、わずか 1 年の間に、多くの流体力学の研究者がウイルス感染に関する研究を新たに始めました。流体力学分野における著名な雑誌の一つである *Physics of Fluids* においても”Flow and the Virus”¹⁾という特集が組まれるほどでした (the Virus は新型コロナウイルス SARS-CoV-2 を指す)。また、流体力学の研究者ばかりでなく、他分野の研究者・医療関係者・企業人・飲食関係者・YouTuber などの分野外の人々も、飛沫の可視化実験に取り組み、市中・医療現場・飲食店での感染リスク検証がなされました。本解説では、流体力学の研究者ばかりでなく非専門家の活動も含みつつ、新型コロナウイルス感染症に関連する、全世界的な流体力学研究活動・アウトリーチ活動 (科学的知見の社会還元活動) の概要を解説します。ただし、著者が見聞きした範囲において纏めたに過ぎず、実際には本解説で取り上げることのできなかった数多くの研究/アウトリーチ活動がなされたであろう点を、初めに断らせていただきます。また、日本国内での研究活動は、本特集の他の解説記事に詳しいので、ここでは主に海外の動向に着目しました。

2 学術誌における活動

パンデミック宣言に前後して、様々な学術誌において、ウイルス感染やウイルス飛沫についての論文

が発表されました。例えば、*The New England Journal of Medicine*²⁾, *The Journal of the American Medical Association*³⁾, *Nature Medicine*⁴⁾, *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*⁵⁾などの、著名な医学系学術誌において発表されました。これらの論文では、例えば、医学・感染症学の観点から、新型コロナウイルス感染では発症前に他者に感染させる問題⁴⁾や、マスクを着用したらアメリカの感染者数が抑えられた⁵⁾、などの報告がなされました。また、流体力学を専門としない衛生研究所や医療現場の医療関係者により、呼気や飛沫の単純な挙動解析^{2,6)}が行われた点は、特筆に値します。一方で、流体力学の研究者は、より詳細な検証結果を流体力学分野の一流誌の一つである *Physics of Fluids* 等にて発表する傾向がありました。これらの流体力学論文は、ニュースなどで取り上げられる頻度も非常に高く、流

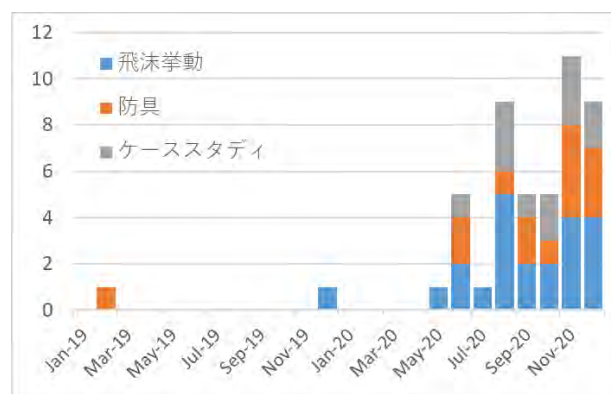


図1 *Physics of Fluids* に掲載された新型コロナウイルスに関連した論文数の月変化 (2019年1月~2020年12月, 2019年はウイルス感染に関する論文数)。

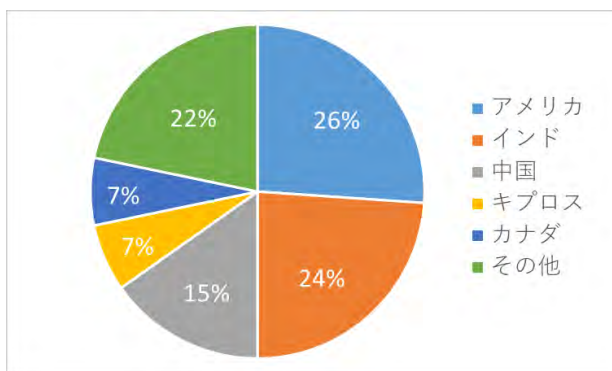


図2 *Physics of Fluids* に2020年に掲載された新型コロナウイルスに関連した論文の著者の国別比率.

力学が社会と人々の生活にリンクした学問であることを如実に現わしていました.

ここでは、新型コロナウイルスに関連した流体力学研究がどのようになされたのかを説明するために、*Physics of Fluids* にて発表された学術論文に注目しました（理由は不明ですが、他の流体力学誌よりも *Physics of Fluids* に関連論文が集中する傾向がありました）。図1に、*Physics of Fluids* に掲載された関連論文数の月変化の様子を示します。調査対象期間は2019年1月から2020年12月で、2019年は一般的なウイルス感染に関する論文数をまとめています（付録1参照）。図より、2020年5月頃から関連論文が発表され始め、2020年中には *Physics of Fluids* のみで約50本もの関連論文が発表されました。これは、*Physics of Fluids* に掲載された総論文数（1200本）の約4%に相当します。特に、2020年11月には126本の論文のうち実に11本（約9%）が新型コロナウイルスの関連論文でした。論文内容は、大まかに三つに分類できました（飛沫挙動に関する論文⁷⁻⁹⁾、防具開発に関する論文^{10,11)}、ケーススタディ¹²⁻¹⁶⁾。飛沫挙動に関する論文では、その多くで、口腔から飛び出た後の呼吸器由来の飛沫（respiratory aerosol）の拡散挙動に関する論文⁷⁾が多く執筆されました。また、

プラスチックなどの固体壁面に付着した後の飛沫の生存時間（蒸発し消滅するまでの時間）⁸⁾や口腔内部での飛沫の発生⁹⁾に関する論文も見られました。防具開発の論文では、飛沫の顔への付着や吸い込みを防ぐために、どのようなマスク¹⁰⁾やフェイスシールド¹¹⁾が良いか、について論じられました。ケーススタディでは、トイレを介したウイルス感染^{12,13)}、歯医者での感染¹⁴⁾、室内エアコンによる感染¹⁵⁾、米国・大統領候補討論会における感染¹⁶⁾などに関して検討されました。論文の著者は、主にはアメリカ・インド・中国の研究者でしたが、各国の研究者が活発に発表を行いました（図2）。インドの研究者は、固体壁面における飛沫の蒸発挙動や、呼吸器系における飛沫挙動を扱った研究が特徴的でした。中国の研究では、トイレや室内での感染といったケーススタディに目を向けた論文が多く見受けられました。その他に明瞭な傾向はなく、どの国でもマスク着用の効果やくしゃみによる飛沫の飛散過程が主たる関心であることが分かります。日本の研究者としては、福岡大学の工学部および医学部の研究グループによる論文が発表されています。以下では、主ないくつかの論文について紹介します。

2.1 “Visualizing the effectiveness of face masks in obstructing respiratory jets”¹⁰⁾

本論文は、新型コロナウイルス関連の論文があまり発表されていない2020年6月に、米国・フロリダアトランティック大学 海洋機械工学科の研究グループにより発表されました。その実験手法は、人工霧発生装置とマネキンをホースで接続し、ホースの途中に接続した手押しポンプで人の呼吸を模倣するという簡便なものでした。著者らは、作成された人工呼吸にレーザーシートを照射して、口腔からの呼吸がどのように広がっていくか、また、マスク着用により呼吸がどの程度遮蔽されるかを可視化しまし

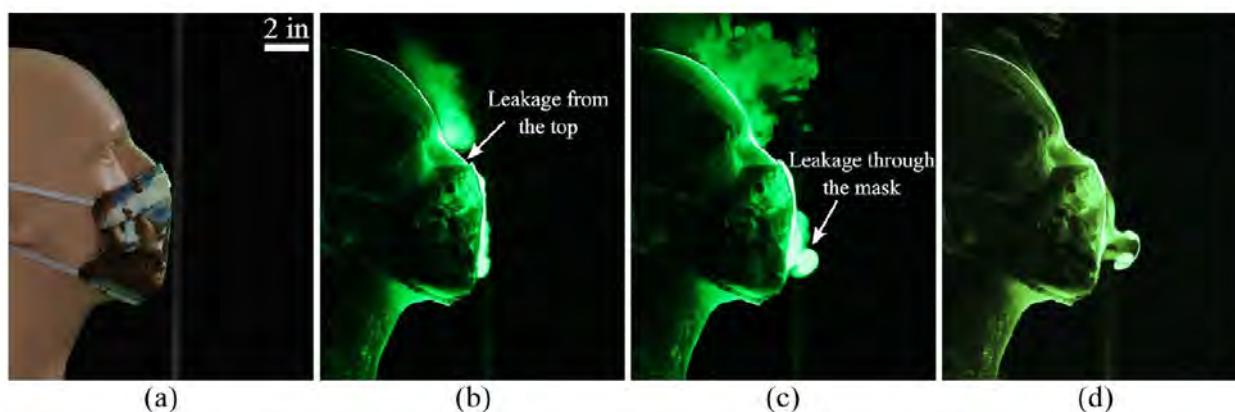


図3 (a)手作り布マスク，人工的な咳の(b)0.2秒，(c)0.47秒，(d)1.68秒後における画像¹⁰⁾(Reprinted from Verma, S. et al., *Physics of Fluids*, 32, 061708, (2020) with the permission of AIP Publishing.)

た。ハンカチ、手作り布マスク (図 3)、不織布マスク等が使用され、マスク未着用時との違いについて検証されました。その結果、ほぼすべてのマスクにおいて、マスク表面を通過する呼気の流れや、顔面とマスクとの隙間から漏れ出る呼気の流れが観察されるものの、その勢いはマスク未着用の場合に比べると非常に小さい事が観察されました。本知見は、流体力学に携わる者であれば、観察するまでもなく理解している点です。しかし、この単純な流体现象の可視化やマスク着用の有効性に関するエビデンスこそが、2020年6月当時に、国際社会が真に知りたいと望んだ科学的事実であったのでしょうか。

2.2 “Virus transmission from urinals”¹²⁾, “Can a toilet promote virus transmission?”¹³⁾

これらの2報はいずれも中国・東南大学の工学系研究グループによるトイレを対象としたケーススタディ論文です。論文では、男性用小便器もしくは大便器 (図 4) の使用後に水を流した時に、便器中の水面から発生する飛沫が、どの程度トイレの室内に拡散するかを、VOF法 (Volume of Fluid 法、水面形状を追跡する方法) や離散粒子法 (一つ一つの粒子を追跡する方法) による数値流体計算手法を用いて検討しました。例えば、大便器中で発生した飛沫のうち40~60%は、トイレシートの部分よりも上方まで拡散するとのことでした。著者らは、トイレを介してのウイルス飛沫感染の危険性を指摘しました。

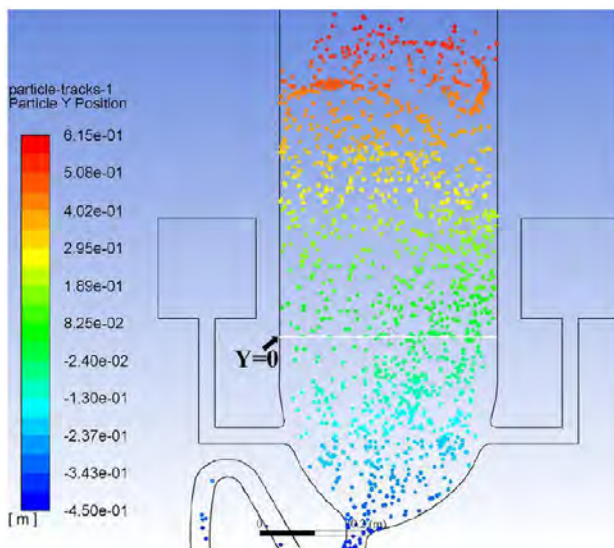


図 4 大便器にて水を流し終えた 70 秒後における発生飛沫の分布¹³⁾。Y=0 はトイレシートの位置、Y=0 下部は大便器、左右の 2 つのボックスは水溜を表す (Reprinted from Li, Y-Y. et al., *Physics of Fluids*, 32, 065107, (2020), with the permission of AIP Publishing.)

2.3 “Likelihood of survival of coronavirus in a respiratory droplet deposited on a solid surface”⁹⁾

本論文は、インド工科大学ボンベイ校の機械工学の研究者グループにより執筆されました。著者らは、様々な温度・湿度の雰囲気大気中において様々な固体壁面に付着した、様々な粒径のウイルス飛沫群の平均的な蒸発時間を推定しました。固体壁としては、水滴との表面湿潤性 (接触角で評価される) が異なるガラス・木・ステンレス等が検討されました。図 5 上図は、推定された蒸発時間を表しています。図より、低温・高湿度の大気中で、高接触角の固体壁面上に付着した飛沫は、その蒸発時間が長いことが分かります。さらに、世界の各都市での気温・湿度から推定される飛沫の蒸発時間と、都市での 1 日当たりの新規感染者数を比較し、温度・湿度が感染拡大に影響している点を指摘しました (図 5 下図)。

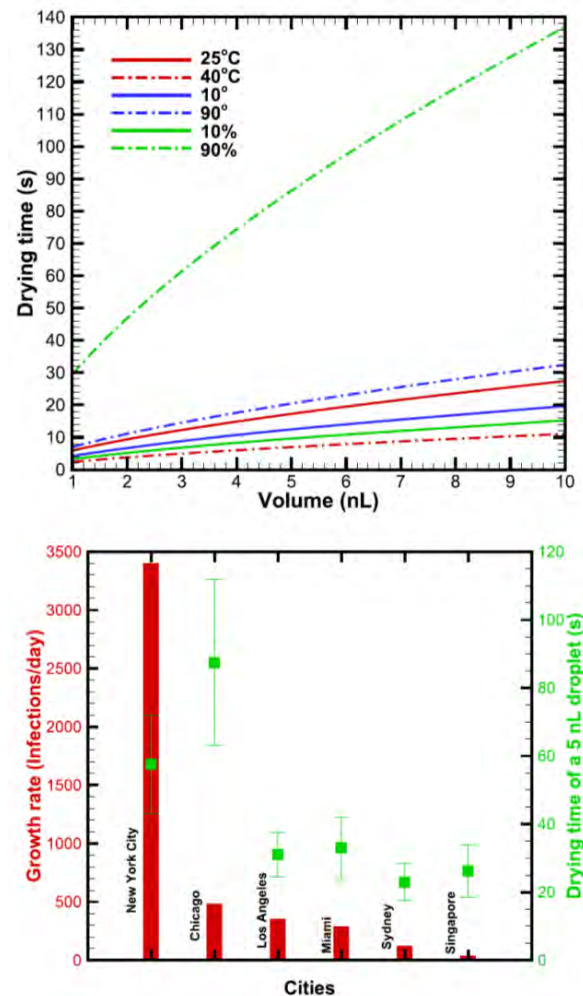


図 5 (上図) 各雰囲気温度および湿度下におけるウイルス飛沫の蒸発時間⁹⁾。(下図) 各都市の気候条件において予測されるウイルス飛沫の蒸発時間と 1 日当たり感染者数 (Reprinted from Bhardwaj, R. and Agrawal, A., *Physics of Fluids*, 32, 061704, (2020) with the permission of AIP Publishing.)

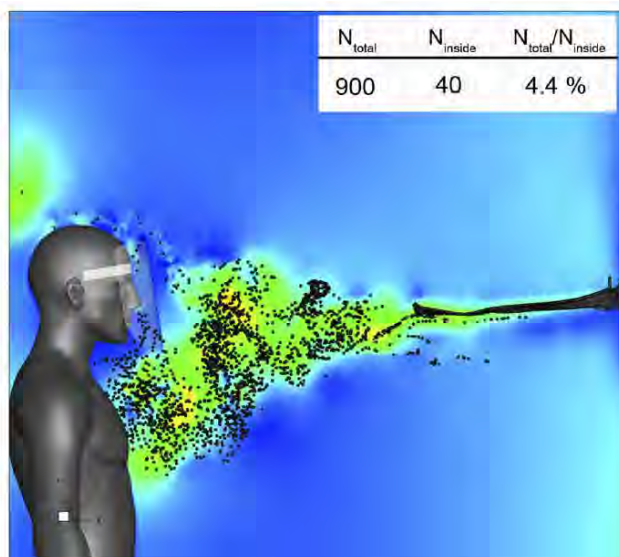


図6 フェイスシールドを着用した人の顔に向けてくしゃみがされた時の飛沫分布¹¹⁾(Reprinted from Akagi, F. et al., *Physics of Fluids*, 32, 127105, (2020) with the permission of AIP Publishing.)

2.4 “Effect of sneezing on the flow around a face shield”¹¹⁾

本論文は、日本・福岡大学の工学部と医学部の研究グループにより執筆されました。商用ソフトを使用した数値流体計算により、フェイスシールド着用時の周囲空気の流れと飛沫分布を観察しています。論文では、フェイスシールドを着用した医療従事者の目の前で、感染患者がくしゃみをした時の、医療従事者の感染リスクの評価を行うことを目的としています(図6)。計算の結果、吐出された飛沫の4.4%がフェイスシールドと顔の間に侵入することを確認しました。このことは、患者のくしゃみとほぼ同じタイミングで医療従事者が息を吸った場合には、医療従事者はこれらのウイルス飛沫を吸引してしまう可能性があるかと結論付けています。

3 ニュース・記事・動画配信等における活動

『はじめに』でも触れたとおり、コロナ禍において、飛沫の挙動や空気流れを扱うニュースや記事¹⁷⁻²¹⁾が巷にあふれました。このような基礎的な粒子・流体挙動が頻繁にニュースに登場する様は、流体力学を扱う研究者にとっても目新しさがありました。また、医学・医療関係の専門家²²⁻²⁴⁾からの情報発信が多くなされましたが、発信される内容には流体関連のエビデンスも散見されました。さらに、飲食²⁵⁻²⁷⁾や音楽^{28, 29)}業界からは、パンデミック初期から飛沫挙動検証や感染対策防具開発に関する活発なニュース発信がなされました。教育現場³⁰⁾からは、冬に室温を保ちながら換気を行う方法も提案されました。



図7 YouTubeにおいて公開された動画の一例³⁵⁾。

交通業界では、飛沫挙動の観察のために、二酸化炭素濃度を代用指標として利用する実証実験³¹⁾も行われました。飛沫や空気挙動は、文字よりも動画の方が分かりやすいため、YouTube³²⁻³⁵⁾などのSNS上において、自ら行った飛沫や空気挙動の実験・計算結果を発信するような、情報発信活動も散見されました(例えば、著者自身が兵庫県立大学にて実施したマスク周りの呼吸可視化実験³⁵⁾, 図7)。その多くは、日ごろ複雑な流体挙動の解明に心血を注いでいる流体研究者からすると、非常に単純なものです。コロナ禍の混乱した社会情勢においては、普段は敷居の高い『流体力学』を有用な学問として身近に感じていただける活動となったと思われます。

4 おわりに

今回、コロナ禍の2020年を振り返りながら、流体力学と新型コロナウイルス感染症との関わりについて概説しました。一年を通して、流体力学的な情報発信も加わり、パンデミック時には社会全体で共有されていなかった、(1)飛沫挙動、(2)マスクの効果、などの科学的エビデンスは概ね共有されました。また、『三密』に代表されるような、(3)感染リスクの高くなる状況が明らかにされました。一方で、ワクチン接種が開始されたにもかかわらず、未だに新型コロナウイルス感染リスクは高く、社会全体での対策が十分ではありません。特に、(4)ファクターX³⁶⁾の検証、(5)見えない感染源³⁷⁾の特定(Making the Invisible Visible)、(6)飲食時の感染対策法の確立、(7)安価かつ高性能なマスク開発には、高度な流体工学知識・技術を保有する研究者の参画が重要だと思います。新型コロナウイルス感染リスクに怯える社会では、専門家からの確かな学術的情報発信が切望されておりますので、高度な科学知識・技術を有する専門家が、アウトリーチ活動を行うことが使命であるともいえましょう。

謝辞：本解説執筆にあたり、兵庫県立大学 機械工学専攻にて、呼気ジェットの可視化実験³⁵⁾を共同で進めてきました河南 治教授、および本田逸郎教授から、コロナ禍における流体力学研究的動向に関するアドバイスをいただいたことに感謝いたします。また、本編集委員会の、鹿島建設 上席研究員 伊藤嘉晃博士、京都大学 情報学研究科 辻 徹郎准教授から、助言いただいたことに感謝いたします。

付録1：図1および2に関する論文調査法

新型コロナウイルスの関連論文は、*Physics of Fluids* の Web サイトにおいて、COVID-19, aerosol, virus, pathogen (病原体) などの単語をタイトルもしくはキーワードとして含む論文として、抽出されました。2019年の論文に関しては、当時はCOVID-19という言葉は存在しませんので、aerosol, virus, pathogen のみをキーワードとして検索を行い、その後、呼吸器系でのウイルス移動に関連した論文のみを選択しました。なお、同様の調査を、*Journal of Fluid Mechanics* および *Fluid Dynamics Research* についても実施しましたが、対象論文はわずか数報でした。

付録2：感染対策関連研究を検討の学生の皆さんへ

新型コロナウイルス感染対策は、喫緊の社会的課題です。そのため、新たに学生実験・理科実験のテーマとして選択検討する高校生・大学生の皆さんの一助となることを考え、以下の通り、身近でかつ安価で始められる研究のコツを記載します。実験を始めやすい様に、機材例を一部掲載(表1, PDFではハイパーリンク付き)していますので、ご参考ください。なお、実際の実験や解析を行う場合には、学校の先生や専門家の下で、安全に十分注意してください。特に、レーザーは大変危険ですので、必ず先生の指示の下で使用してください。

まず、呼吸流れを観察する場合ですが、ネブライザーで口元に水滴飛沫を発生させ、その人口飛沫の動きを観察するといいでしょう。線香の煙を用いると、浮力の影響のため、呼吸流れのみを観察することができません。スマートフォンのビデオ機能でも、鮮明な動画撮影が可能です。簡単な暗室を作成し、レーザー光を煙に照射するとより鮮明な動画撮影ができます³⁵⁾。レーザーは、クラス2程度の1mWレーザーポインタならば点光源として使用し、50mW程度のレーザーが使用でき環境ならば、シリンダリカルレンズを介してシート光として可視化実験を実施することが可能です。撮影された動画から、実際の空気の流れを測定するためには、粒子画像速度測定法(PIV: Particle Imaging Velocimetry)が利用可能です³⁵⁾。他にも、オープンソースも利用可能ですが、使用するためにはより多くの基礎知識を要します。

表1 使用する製品の一例。

製品 (商品名, 会社, 型番, 有償/無償, 等)
✓ ネブライザー (コンパクトネブ, Rossmax, NB80)
✓ 暗幕 (ケニス, 33470721)
✓ レーザーポインタ (エレコム, ELP-GL09BK)
✓ シリンダリカルレンズ (パールレーペ, 池田レンズ工業, 805-1967)
✓ PIV ソフト (Dynamic Studio, Dantec Dynamics ; 榊原潤教授の公開コード, 無償 ; OpenPIV, 無償 ; JPIV, 無償)
✓ 空気清浄機 (ピュアスペース, PS01-AD)
✓ パーティクルカウンタ (ハンドヘルドパーティクルカウンタ, KANOMAX, Model 3888)
✓ 感水試験紙 (Spraying Systems Co., 20301-1N)
✓ 二酸化炭素濃度計 (CO2 Engine, SenseAir, K30)
✓ 流体計算コード (OpenFOAM; ANSYS/FLUENT; SOLIDWORKS; STAR-CCM+; レンタルは例えばサイバネットシステム)

口から放出される微小飛沫を観察する場合²⁾には、暗室内をHEPA フィルタ付きの空気清浄機を用いて、事前に空気を浄化しておく必要があります。これは、普段あまり意識されませんが通常の空気は多くの微粒子で汚染されているためです。また、微小飛沫の拡散・反射光を観察するために、強力なレーザーシート光(レーザー出力は1W程度必要)を使用する必要があります。飛沫数をカウントする場合には、一般にはパーティクルカウンタが使用されますが、これはやや高価です。感水紙を用いると、やや大きな微小飛沫のみですが、観察することができます²⁰⁾。微小飛沫の挙動を推測するためには、なにも飛沫そのものを観察しなくともよいケースもあります。微小飛沫はあまりに小さいため、空気中の二酸化炭素^{21,31)}や湿気と同じような挙動をすることもあるからです。このような場合には、二酸化炭素濃度計や湿度計を利用するのがいいでしょう。

手元に高性能のパソコンがあるならば、空気や飛沫の挙動を計算で求める事もできます。計算手法は、実験手法では観察が難しいような、広い空間における飛沫挙動を観察するのに適しています。最近では、フリーの流体計算コードを利用したり、商用ソフトのレンタルを利用したりする方法もあります。計算ソフトを使用すれば、図4や図6のようなカラフルで分かりやすい結果が得られますが、本当に現実的な流れが計算できているのかを確認するためには、実測・実験データを用いた検証や流体力学の知識と経験に基づく妥当性の判断が必要とされます。

引用文献

- 1) Special Topics in *Physics of Fluids* “Flow and the Virus”.
<https://publishing.aip.org/publications/journals/special-topics/phf/flow-and-the-virus/>
- 2) Anfinrud, P., Stadnytskyi, V., Bax, C. E., Bax, A.: Visualizing Speech-Generated Oral Fluid Droplets with Laser Light Scattering, *The New England Journal of Medicine*, 382(21), (2020), 2061-2063.
- 3) Cheng, H.-Y., et al.: Contact Tracing Assessment of COVID-19 Transmission Dynamics in Taiwan and Risk at Different Exposure Periods Before and After Symptom Onset, *JAMA Internal Medicine*, 180(9), (2020), 1156-1163.
- 4) He, X. et al.: Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19, *Nature Medicine*, 26, (2020), 672-675.
- 5) Zhang, R., et al.: Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19, *PNAS*, 117(41), (2020), 25942-25943.
- 6) Simpson, J. P., et al.: Measurement of airborne particle exposure during simulated tracheal intubation using various proposed aerosol containment devices during the COVID-19, *Anaesthesia*, 75, (2020), 1587-1595.
- 7) Dbouk, T., Drikakis, D.: On respiratory droplets and face masks, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 063303.
- 8) Bhardwaj, R., Agrawal, A.: Likelihood of survival of coronavirus in a respiratory droplet deposited on a solid surface, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 061704.
- 9) Fontes, D., Reyes, J., Ahmed, K., Kinzel, M.: A study of fluid dynamics and human physiology factors driving droplet dispersion from a human sneeze, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 111904.
- 10) Verma, S., Dhanak, M., Frankenfield, J.: Visualizing the effectiveness of face masks in obstructing respiratory jets, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 061708.
- 11) Akagi, F., et al.: Effect of sneezing on the flow around a face shield, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 127105.
- 12) Wang, J-X., et al.: Virus transmission from urinals, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 081703.
- 13) Li, Y-Y., Wang, J-X., Chen, X.: Can a toilet promote virus transmission? From a fluid dynamics perspective, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 065107.
- 14) Plog, J., et al.: Reopening dentistry after COVID-19: Complete suppression of aerosolization in dental procedures by viscoelastic Medusa Gorgo, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 083111.
- 15) Xu, A., Tao, S., Shi, L., Xi, H-D.: Transport and deposition of dilute microparticles in turbulent thermal convection, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 083301.
- 16) Shao, X., Li, X.: COVID-19 transmission in the first presidential debate in 2020, *Physics of Fluids*, 32, (2020), 115125.
- 17) 東洋経済オンライン, コロナに「マスクは無意味じゃない」明確な根拠, 2020年4月2日.
<https://toyokeizai.net/articles/-/341569>
- 18) 神戸新聞, コロナ飛沫経路をスパコン「富岳」で予測, 2020年5月1日. <https://www.kobe-np.co.jp/news/sougou/202005/0013310646.shtml>
- 19) 神戸新聞, 呼吸によるウイルス拡散を可視化 マスク着用効果証明, 2020年7月29日.
<https://www.kobe-np.co.jp/news/himeji/202007/0013551564.shtml>
- 20) 朝日新聞, 飲食中に大声で歌唱→飛沫14倍「カラオケでは対策を」, 2020年10月15日.
<https://www.asahi.com/articles/ASNBH5TT3NBHOBJB009.html>
- 21) 大岡龍三, 山中俊夫, 新型コロナウイルス感染症制御における「換気」に関して, 2020年3月30日.
http://www.shasej.org/recommendation/shase_COVID_ventilizationQ&A.pdf
- 22) 山中伸弥, 山中伸弥による新型コロナウイルス情報発信, 2020年3月. <https://www.covid19-yamanaka.com/index.html>
- 23) 忽那賢志, 新型コロナ マスク着用による感染予防の最新エビデンス, 2020年7月23日.
<https://news.yahoo.co.jp/byline/kutsunasatoshi/20200723-00189530/>
- 24) 坂本史衣, 新型コロナ対策フェイスシールド・マウスシールドってどうなの, 2020年10月12日.
<https://news.yahoo.co.jp/byline/sakamotofumie/20201012-00202626/>
- 25) 朝日新聞, 着けたまま飲食可 接客向けのフェイスベール製作, 2020年6月5日.
<https://www.asahi.com/articles/ASN626W0NN62UZHB008.html>
- 26) ねとらぼ, 「千と千尋」気分で感染防止 雅楽「蘇利古(そりこ)」の雑面フェイスガードが無料配布, 2020年6月15日.
<https://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/2006/15/news122.html>
- 27) ねとらぼ, サイゼリヤの食事用マスク「しゃべれるくん」インパクトがすごい, 2020年8月7日.
<https://nlab.itmedia.co.jp/research/articles/41235/>
- 28) New York Times, When Will It Be Safe to Sing Together Again?, June/9/2020.

- <https://www.nytimes.com/2020/06/09/arts/music/choirs-singing-coronavirus-safe.html>
- 29) クラシック音楽公演運営推進協議会, クラシック音楽演奏・鑑賞にともなう飛沫感染リスク検証実験 報告書, 2020年8月17日. <http://www.jas-wind.net/pdf/20200817kekkaCOVID-19musiccultureproject.pdf>
- 30) 産経新聞, 真冬の感染防止 「換気と室温」知恵絞る学校, 2020年11月29日. <https://www.sankei.com/life/news/201129/lif201129034-n1.html>
- 31) 丹波新聞, 換気状態を可視化 バス会社がCO2測定実験, 2020年11月12日.
- 32) 奥田知明, ウイルスのような小さい粒子は本当にマスクで取れないのか, 2020年3月9日. <https://www.youtube.com/watch?v=T4fhfCUWFL4&t=1s>
- 33) カトウ光研株式会社, オフィスにおける呼気の挙動の可視化検証, 2020年4月2日. <https://www.youtube.com/watch?v=ErCAXefrDiU>
- 34) GENKI LABO, 布マスクを2000倍に拡大してウイルスが通るか実験してみた, 2020年4月6日. <https://www.youtube.com/watch?v=ZJhf4R3nvWs>
- 35) 兵庫県立大学 流体工学研究室, マスク周り流れ動画 (マスクなし VS あり), 2020年5月4日. <https://www.youtube.com/watch?v=XciFTIVRJFM>
- 36) ハフポスト, ファクターXとは? 山中伸弥教授がサイトで仮説立て話題に, 2020年5月29日. https://www.huffingtonpost.jp/entry/story_jp_5ed0aaacc5b648e0a1b7ff1b
- 37) 朝日新聞, 首都圏下げ止まり「見えない感染源があるのでは」尾身氏, 2021年3月15日. <https://www.asahi.com/articles/ASP3H4ST7P3HUTFK010.html>
- (原稿中リンクは2021年5月22日確認)