くしゃみや呼気による飛沫拡散の数値解析*

Numerical Simulation of Aerosol Scattering by Sneezing and Exhalation

入 江 智 洋**
IRIE Tomohiro

白 川 慶 介**
SHIRAKAWA Keisuke

Abstract Numerical simulations of aerosol motion induced by sneezing and exhalation were carried out by CFD (Computational Fluid Dynamics) with modeled particles. For sneezing analysis, with and without covering by an elbow and wearing a face mask were modeled to clarify the effect of how to prevent scattering. Aerosol scattering from a talking passenger in a ventilated train was also analyzed to show a realistic situation that may cause infections of the virus. Those results have been published on the web through several SNSs to promote understanding the effect of infection prevention manner.

Keywords: Sneeze, Exhalation, Aerosol, Computational fluid dynamics, Large-eddy simulation, Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation

1. 緒 言

2019 年末に原因不明の肺炎として集団発生が報告された新型コロナウイルス (COVID-19) は、その後日を追うごとに全世界へと広がり、近代人類史における未曾有の伝染病 (パンデミック) として認識されるに至った。歴史上、人類が未経験の伝染病によって危機的状況にさらされた事例は初めてではないが、現代のグローバルな人やモノの移動は結果的にウィルスが極めて短期間で大陸間を伝播し、全世界に広がることを可能にした。最新の科学技術を駆使した先進諸国の医療体制をも崩壊せしめた事実、ウィルスの感染力の強さが各国保健当局や専門家の想定をはるかに超えるものだったことを裏付けている。直接、ウィルスの脅威による健康被害を受けた人々のみならず、人やモノの活発な移動を前提として発展してきた経済活動もまた大きな影響を受けており、経済の低迷による社会的なダメージについても配慮が必要な点が各種対策を実施する際の判断を困難にしている。

この新種のウィルスがこれほどまでに広範か

つ短期間で人々の間に伝染する機構は当初から科学的に理解されていたとは言い難く、国際機関や各国のリーダーシップによる感染拡大防止の施策決定に必要な知識や情報が不足していたことが、初期の混乱した判断を招いたことの一因であることは否めない。当初、新型コロナウイルスの感染経路としてはウィルスに直接触れることによる接触感染のほか、咳やくしゃみに含まれる飛沫とともにウィルスを吸い込む飛沫感染が主体であると考えられていた。しかし、咳やくしゃみだけでなく通常の会話や呼吸で発せられる、より微細な飛沫核 (droplet nuclei, aerosols) による感染が広がっている可能性も指摘されており、WHO は 2020 年 7 月に飛沫核による空気感染 (airborne transmission) の可能性を改めて指摘した[1]。厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボードにおいても、2020 年 7 月末に"マイクロ飛沫"による感染について注意を呼び掛けた。密閉された室内空間や乗り物の中で大規模な集団感染 (クラスター) が多数発生していることがこうした飛沫核による感染の可能

* 2021.1.26 受付

** (株)ソフトウェアクレイドル (ヘキサゴングループ) 〒530-0001 大阪市北区梅田 3-4-5 毎日インテシオ
TEL: (06)6343-5641 FAX: (06)6343-5580 E-mail: tomohiro.irie@hexagon.com

性を示唆しているが、残念ながら飛沫よりはるかに長時間浮遊する飛沫核に対する警戒が感染拡大初期の段階で十分に周知されていたとは言い難い。

わが国ではインフルエンザを始めとした一般的なウィルス感染防止策として抵抗なく受け入れられているマスクの着用さえ、当初は欧米諸国の多くで感染防止効果を疑問視され、否定的に受け止められていた。マスクの着用は自身をウィルス感染から守ることよりも、自身が感染者であった場合に他者へ感染を広げることを防止することを目的に着用するという考え方が受け入れられるかどうかの文化的土壌の違いとの指摘もされているが、文化的な背景だけでなくマスク等の感染防止策の効果について科学的・論理的な説明が十分になされていなかったことも要因と考えられる。人類共通の脅威に直面し、公衆衛生や医療・保健の専門家が死力を尽くして分析・研究してきたことに疑いの余地はないが、日常的には感染症の伝染経路説明等に関わっていない分野からも英知を結集して対策に当たることが望まれる。混相流および流体力学を専門とする研究者・技術者の視座からも、貢献できることは少なくないと考ええる。

前置きが長くなったが、筆者らは主として製造業や建設業向けに CFD (Computational Fluid Dynamics) を応用したソフトウェアの開発・販売を行う企業に所属し、これまで流体運動に関連した種々の物理現象をシミュレーションし可視化・分析するという業務を日常的に行ってきた。世界的な経済の低迷に直面して当社も少なからず影響を受けてきたが、人類共通の脅威に対して CFD を生業にしている企業だからこそできる貢献もあるのではないかとの思いから、くしゃみや呼気による飛沫拡散の数値解析を実施した。また、その可視化映像を積極的に社会へ発信することで、飛沫拡散というウィルスの感染伝播経路の一つと考えられる現象について理解を深める一助となることを目指した。

2. くしゃみの数値シミュレーション

2.1 くしゃみのモデリング

はじめに広範囲な飛沫の飛散を引き起こす最も一般的なケースとして、くしゃみのモデル化を試みた。この解析に取り組み始めた 2020 年 3 月

の時点では“ソーシャルディスタンス”という言葉が欧米を中心に使われ始め、メディアなどでは“2 m”という具体的な距離が提唱されていたが、筆者個人としては果たして飛沫感染を避ける距離として 2 m が十分な距離なのかという疑問を持っていた。くしゃみは円筒形に広げられた口から発作的に呼気を噴き出す動作である。円筒形状かつインパルスに流れを駆動する機構をもつことから、ここに渦輪状の流れが形成されることが予想される。そして、安定な渦輪は直進する性質を持つことから、特に微細な飛沫は直感的に予期されるスプレー状の噴霧機構よりもはるかに遠方まで運ばれる可能性がある[2]。

そこで、2 名の人物が閉鎖された無風状態の部屋の中で 2 m 離れた位置に向かい合って立っており、片方の人物がくしゃみをした状況を想定した。口の形は直径約 50 mm の円筒形とした。くしゃみは、流速 10 m/s の流れが計算開始から 0.1 秒間だけ持続する時間依存の流入条件とする[3]。くしゃみによって発生する飛沫を模擬するため、おおよそ水の密度 (1000 kg/m^3) をもつ直径 $1 \mu\text{m}$ の粒子を同じく口から 1×10^6 個を 10 回に分けて発生させている。

インフルエンザウイルスでは直径 $1 \mu\text{m}$ の飛沫核も感染性を有するとされており[4]、より大きな飛沫は重力ですぐに落下することが予想されるため、遠方まで飛散する可能性が高い微細な飛沫のみを考慮した。現実のくしゃみを詳細に模擬するためには、飛沫の粒子径分布や蒸発による粒子径変化のほかにも噴出角度などをモデル化する必要があると考えられるが、ここでは微細な飛沫の飛散を防ぐ方法による影響に着目するため、以上のように単純化したモデルを用いた。飛散を防ぐ手法の影響を比較するため、(1)口を塞がないくしゃみ、(2)肘で口を覆った場合、(3)マスクをした場合の 3 ケースについてシミュレーションを行った。

2.2 流れの数値計算手法

流れの数値解析には(株)ソフトウェアクレイドルで開発・販売している熱流体解析ソフトウェア scFLOW V2020 を用いた。流れの計算は非圧縮性 Navier Stokes 方程式を有限体積法 (Finite Volume Method) により解いている。支配方程式の離散化に用いる計算要素の形状には、任意の多面体 (ポリヘドラルメッシュ) が利用できる。圧力補正法には PISO

法[5]を用いており、時間項には2次精度陰解法を用いている。移流項の離散化には1次精度風上差分と2次精度中心差分をブレンドするガンマスキーム[6]、拡散項には歪んだ形状の計算要素に対しても計算が不安定になりにくい α ダンピングスキーム[7]を用いている。時間進行のタイムステップは 1×10^{-3} 秒とし、実時間でおよそ5秒間(5000ステップ)の計算を実施した。噴流状の流れの特性をできるだけ詳細に捉えるため、乱流の取り扱いには計算格子サイズ以下の渦による寄与をサブグリッドスケール(SGS)モデルと呼ばれる統計的なモデルに置き換えるLES(Large Eddy Simulation)を選択した。SGSモデルにはWALE[8]モデルを使用した。粒子に対する空気抵抗、および重力の影響は考慮しているが、蒸発による粒子径変化や粒子の分裂・結合は考慮しない。また、温度分布による流れへの影響も考慮していない。

もっとも小さな計算要素の大きさは6.25 mmであり、計算に用いた計算要素数は約130万~250万要素で(Fig. 1~4)、計算時間はIntel Xeon E5-2695v2 2.40 GHzを144コア用いたMPIによる並列計算で1ケース当たり約1~2時間である。

2.3 口を塞がないくしゃみ

口を全く塞がないままくしゃみをした場合の計算結果をFig. 5に示す。粒子を輸送する渦の構造を可視化するため、渦運動の可視化によく用いられる速度勾配テンソルの第2不変量(Q値)の等値面を粒子と共に半透明で描画している。噴出された直後の流れは、先頭の大きな渦輪の後に周期的な渦輪列が連続して発生している(0.1 s)。これらの渦輪は徐々に崩壊しながら合体し、より大規模な渦輪を形成していく(0.5 s)。詳細な渦運動を解析するにはやや解像度が不足しているものの、典型的な円形噴流による渦輪の生成・成長過程[9]が捉えられているものと思われる。

噴出された粒子は、渦輪構造が保たれている間は直進する渦輪とともに輸送されていく。しかし、大規模な渦輪構造は対面する人物に到達する前に崩壊し、多数の渦管が絡み合った複雑な流れ場に変化していく(1.0 s)。大規模な渦輪構造が崩壊していく過程では、一部の渦輪がちぎれてヘアピン状の渦を形成し、直進方向とは大きく異なる方向へも粒子が輸送されていく様子が観察される(2.0 s)。大規模な渦輪構造が崩壊すると、粒子の直進速度は落ちていくが、周囲に拡散しなが

ら直進する粒子群の先頭は、約2.5秒後には2 m離れて対面する人物に到達する結果が得られた。

Fig. 1 Computational mesh for the uncovered sneeze case.

Fig. 2 Computational mesh for the case of covered by an elbow.

Fig. 3 Computational mesh for the case of wearing a face mask.

Fig. 4 Computational mesh around a face mask.

0.1 s

0.5 s

1.0 s

2.0 s

Fig.5 Particles and vortices motion of uncovered sneeze.

2.4 肘で口を覆った場合

くしゃみをする際に掌で口を覆うと、その後にウィルスが付いた手で他の場所を触って感染を広げる可能性があることから、厚生労働省は「咳エチケット」として咳やくしゃみをする際には掌よりも上着の内側や袖で覆うことを推奨している。そこで、肘で口元を覆ってくしゃみをした場合には、全く覆わない場合と比べてどの程度飛沫の飛散を抑えられるかを数値計算により比較した。実際には衣類の袖による摩擦や吸着効果があると考えられるが、ここでは衣類の影響は考慮せず、腕の表面は滑らかな壁としている。顔と腕の間には上下に隙間があり、Fig. 6 に示すように口から噴出した流れはこの隙間を通して前方へ向かう。口を覆わない場合と比較すると、直進する大規模な渦輪構造は形成されず、絡み合った渦管の状態で減速する。粒子は対面する人物には到達せず、周囲に拡散しながら漂う結果となった。飛沫の到達距離は約 1 m となり、口を塞がないケースに比べると大幅に短くなっている。この結果から、肘で口を覆うだけの簡易な方法でも、口を覆わない場合に比べると微細な飛沫の直接到達距離を半減させる効果があることが確認できた。

2.5 マスクをした場合

マスクは厚さ 1 mm の不織布を想定し、流速に依存して圧力損失(抵抗)が発生する条件を設定した。粒子に対しては特に影響を与える条件は設定しておらず、マスク自体が粒子を捕捉する作用は考慮していない。特殊な医療用マスクではなく通常の市販マスクを想定し、マスクの周囲では顔との間に 10 mm 以下程度の隙間がある。このような条件を用いた結果、Fig. 7 に示すように粒子の大部分は鼻とあごの周りの隙間から上下方向に吹き出すが、前方に向かって運ばれる粒子は少なく、ほとんどがくしゃみをした人物の周囲に漂う結果となった。

以上の結果から、マスクの着用でくしゃみによる飛沫が直接到達する距離は大幅に低減できることが確認できた。しかしながら、空間に放出された飛沫がどのように浮遊し、移動または付着するかを分析することが感染対策の検討には重要と考えられる。その為には、空調による気流や飛沫の粒径分布を考慮したより広範囲かつ長時間の流体解析を実施する必要がある。

0.1 s

0.01 s

0.5 s

0.05 s

1.0 s

0.1 s

2.0 s

0.2 s

Fig.6 Particles and vortices motion of sneeze with covered by an elbow.

Fig.7 Particles motion of sneeze with wearing a face mask.

3. 乗り物の中での呼気による飛沫拡散

3.1 解析の概要

前項までは微細飛沫の挙動に着目し、無風条件下の室内において、マスクによる防護効果並びにソーシャルディスタンスの効果を観察してきた。この解析がソーシャルメディアに紹介されてほどなく、欧州でロックダウンが段階的に解除される見通しとなり、公共の場での飛沫拡散とマスクによる防護効果が着目されるようになってきた。とりわけ公共の場であってソーシャルディスタンスを確保するのが難しく、不特定多数の人間が利用する鉄道車両内で飛沫拡散の様子、およびマスクによる防護効果を可視化することは、感染のリスクを抑制しながら日常生活へと戻っていく上で有益な情報をもたらさうと考えられる。そこで以降では鉄道車両内に複数の客が乗り合わせた状態で、感染者一名が発した飛沫拡散の様子を解析によりみていくことにする。

この解析では、Fig. 8 に示すように長手方向に約 12.8 m、短手方向に約 2.8 m、高さ方向に約 2.35 m の車両を模擬した空間を用意した。乗客同士が互いに近接した状況を想定して 1 m 弱程度の間隔で 27 名の乗客を考慮し、車両中央部で赤く着色した感染者が 3 分間発話した状況を想定してこの感染者が発する飛沫の挙動を解析した。鉄道車両内は約 4 分で一回換気される状況を想定し、天井部中央で赤く着色したスリット状の流入口から固定流量 $19 \text{ m}^3/\text{min}$ で流入させ、天井部四隅に設けた青色の排気口では圧力値を固定し自然に排出される状況を想定している。

Fig. 8 Overview of analysis domain and flow field.

3.2 流れの数値計算手法

数値解析には前項と同じく熱流体解析ソフトウェア scFLOW V2020 を用いた。前項と異なり、より長時間かつ広範囲の現象を追跡するため、本

解析では乱流モデルとしてレイノルズ平均型モデルである SST $k-\omega$ モデルを使用した。タイムステップは $5 \times 10^{-3} \text{ s}$ とし、実時間で 3 分間 (36000 ステップ) の計算を行っている。前項と同じく温度分布による流れ場への影響は無視している。また、粒子に対する空気抵抗、および重力の影響は考慮しているが、蒸発による粒子径変化や粒子の分裂・結合は考慮しない。加えて乗客表面や座席面など、壁面に到達した粒子は反発せずに壁面に付着するものと仮定し、感染のリスクを特に高めると考えられる乗客の顔面部と手指部において、ここに到達した粒子の数を計測している。粒子運動の非定常解析に当たっては、これに先立って車内空調の定常解析を行い、この結果を初期値として解析を実施した。本解析では感染者の口元から扇形状に水と同じ物性を持つ粒子を、飛沫を模擬して発生させている。粒径については文献[10]を参考に Fig. 9 に示すような $20 \mu\text{m}$ 付近にピークを持つ分布を scFLOW に実装されている抜山-棚沢式を利用して与えている。感染者は 5 秒を周期として 3.5 秒間の発話 (呼気) と 1.5 秒間の吸気を、解析を通じて繰り返す設定としている。発話時の呼気速度は文献[11]を参考に 0.51 m/s とし、1 周期の呼気と吸気で正味の流量が 0 となるよう吸気速度を与えている。一回の呼気あたりに放出される粒子数は文献[12]に紹介される個数密度より 1000 個とした。計算に用いた要素数は約 240 万で 288 コアを使用して 3.5 - 4.0 時間程度の計算時間であった。

Fig. 9 Exhaled particle size distribution.

3.3 マスクのモデル化

前項同様にマスクは 1 mm 厚の不織布を仮定しているが、前項と異なりマスクによる粒子の捕捉効果を考慮している。粒子の捕捉に関しては、粒

径に応じた捕捉効率が測定されており[13]、本解析でもこれを参考に Fig. 10 のように粒子の捕集効率を設定した。粒子の捕捉については粒子発生を行う口元とマスクが近接しているため、各粒子の発生時に一度だけ 0-1 の乱数を粒子に与え、生成粒子の粒径に対する捕集効率を乱数値が下回った場合、粒子は捕捉されたとみなして消滅させた。マスク通過判定をされた粒子は以後捕捉を仮定することなく解析される。本解析においては、平均的には約 85 % の粒子がマスクにより捕捉されることとなった。

Fig. 10 Particle trapping efficiency by mask.

3.4 マスクなしの場合

感染者がマスクを着用しない場合、Fig. 11 に黄色で示すように放出された粒子は、呼吸に乗って前方に直進するような運動をする。くしゃみの場合と比較すると、発話による呼吸流速はくしゃみの場合と比べて遅いため、発生した飛沫は相対的に車内空調の影響を受けやすい。車内中央部に位置する感染者周囲では中央部スリット状の流入口から吹き降ろす空調気流に乗って、飛沫粒子が前方部下方に輸送される。この時呼吸中で多数を占める 10 μm オーダーの粒子は流体抵抗に対して重力が無視できないため、前方に向かって吹き流されつつ、落下するような運動をする。結果的に感染者がマスクをしていない場合、Fig. 12 に示すように 20 -50 μm の粒子を中心に感染者正面に座った乗客に大量の粒子が付着することが確認できる。特に感染のリスクを高めると考えられる顔面部、および手指部分では 3 分経過時点で 138 個、509 個の粒子が付着する結果となった。粒径が小さい粒子に関しては、重力よりも流体抵抗の影響が大きく、前方の乗客に付着せずに周囲に拡散していくものが多数認められる。

Fig. 11 Exhaled droplets without mask.

Fig. 12 Particles landed on the passenger in the calculation without mask.

3.5 マスクありの場合

感染者がマスクを着用している場合、マスクによって粒子が捕捉されるが、このマスクのモデルでは、とりわけ粒径が大きく重い粒子が選択的に捕捉される。また、マスクそのものが流体に対して抵抗力を与えるため、感染者の発話による呼吸流速はマスク通過後に大きく減速される。マスクを通過した約 15 % の粒子も、減速された呼吸からさらに抵抗を受けることになる。これによって Fig. 13 に示すように、マスクで捕捉されなかった粒子も大多数が感染者胸部に付着していることがわかる。Fig. 14 では前方に座った乗客に付着した粒子の様子を示している。3.4 節と比較すると、3 分経過時点で前方に座っている乗客の顔面部と手指部に付着した粒子はそれぞれ 2 個、11 個とマスクなしの場合に比べて大幅に抑えられる結果となった。

以上の結果から、閉鎖空間内では微細な飛沫が空調による気流に乗って広い範囲に輸送されることが確認されたため、換気で浮遊する飛沫を空間外に排出することで感染リスクを下げる効果があると期待される。また、これと併せて放出さ

れる飛沫の絶対数を減らし、かつ呼気の直達を防ぐことができるマスクの着用が感染拡大防止に有効であることが示唆される。

Fig. 13 Overview of particles with mask.

Fig. 14 Particles landed on the passenger in the calculation with mask.

4. 結 言

本稿ではくしゃみや呼気による飛沫拡散の数値解析について紹介した。くしゃみによる飛沫の飛散については、無風状態の室内を想定し、口を全く塞がない場合の飛散状況ならびに肘で口を覆う場合やマスクを着用することによる飛散防止効果について確認した。呼気による飛沫については、換気がされている鉄道車両の車室内を想定し、乗客の発話による飛沫の飛散状況をマスク着用の有無で比較することでマスクによる飛沫飛散の防止効果を確認した。なお、これらの解析結果の動画はインターネット上に公開されている。詳しい解析条件については下記を参照されたい。
<https://www.mscsoftware.com/work-from-home/stay-safe>

参考文献

- [1] WHO Scientific Brief, Transmission of SARS-CoV-2: Implications for Infection Prevention Precautions, (<https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>, July 9, 2020).
- [2] Okura, N., Naitoh, T. and Okude, M., Characteristics of Mass Transport by a Vortex Ring, Nagare: Journal of Japan Society of Fluid Mechanics, Vol. 31, 187-194 (2012).
- [3] Bahl, P., De Silva, C. M., Chughtai, A. A., Macintyre, C. R. and Doolan, C., An Experimental Framework to Capture the Flow Dynamics of Droplets Expelled by a Sneeze, Experiments in Fluids, Vol. 61, 176 (2020).
- [4] Robert, B. C. and Julius A. A., Immunity to Influenza in Man, Ann. Rev. Microbiol. Vol. 37, 529-49 (1983).
- [5] Issa, R. I., Solution of the Implicit Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, Mechanical Engineering Report, FS/82/15, Imperial College, London (1982).
- [6] Jasak, H., Weller, H. G. and Gosman, A. D., High Resolution NVD Differencing Scheme for Arbitrarily Unstructured Meshes, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 31, 431-449 (1999).
- [7] Nishikawa, H., Two Ways to Extend Diffusion Schemes to Navier-Stokes Schemes: Gradient Formula or Upwind Flux, Proc. 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA Paper 2011-3044, 27-30 (2011).
- [8] Nicoud, F. and Ducros F., Subgrid-Scale Stress Modeling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor, Flow Turbulence and Combustion, Vol. 62, 183-200 (1999).
- [9] Toyoda, K., Vortices in Jets, Nagare: Journal of Japan Society of Fluid Mechanics, Vol. 24, 151-160 (2005).
- [10] Xie, X., Li, Y., Sun, H. and Liu, L., "Exhaled droplets due to talking and coughing." Journal of the Royal Society, Interface Vol. 6 Suppl 6 (2009).
- [11] Gupta, J. K., Lin, C. H. and Chen, Q., Characterizing Exhaled Airflow from Breathing and Talking, Indoor Air, Vol. 20(1), 31-39 (2010).
- [12] Zhang, H., Li, D., Xie, L. and Xiao, Y., Documentary Research of Human Respiratory Droplet Characteristics, Documentary Research of Human Respiratory Droplet Characteristics, Procedia Engineering, Vol.121, 1365-1374 (2015).
- [13] Sanchez, E. University of South Florida; Tampa, Florida, USA: Filtration Efficiency of Surgical Masks (2010).