

〔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

## 「富岳」が支える Society 5.0 時代の社会貢献 ～コロナ禍での飛沫シミュレーションを例に～

神戸大学大学院システム情報学研究科/理化学研究所計算科学研究センター

坪倉 誠\*

富岳新型コロナ対策プロジェクト飛沫感染チーム

### Social Contributions Supported by Supercomputer “Fugaku” in the Era of Super-Smart Society (Society 5.0): Droplet Simulation for the COVID-19 as an Example

\*Makoto Tsubokura, Faculty of System Informatics, Kobe University/RIKEN Center for Computational Science  
Viral Droplets Infection Control Team, Fugaku COVID-19 Project

\*E-mail : tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp

#### 1 はじめに

2020年に世界中で急速に感染拡大した新型コロナウイルスにより、我々の社会経済活動は大きな打撃を受けている。未知のウイルスに対する科学的データが不足する中、時々刻々と変化する感染状況に対応するために、最前線の医療現場のみならず政府・行政機関もその対応に苦慮している。このように突然襲ってくる自然災害や感染症に対して、我々はどうのようにレジリエントな、即ち社会経済活動を大きく停滞させずに短期間で復興できる社会を構築することができるであろうか？

2016年に総合科学技術・イノベーション会議により策定された第5期科学技術基本計画には、我が国が目指すべき未来社会の姿として、経済発展と社会課題の解決を両立する人間中心の超スマート社会「Society 5.0」が提唱されている。実社会が抱える様々な課題に対して、過去の事例や様々な選択肢をビッグデータとして取り扱い、仮想世界で構築されたデジタルツインを用いて、与えられた状況の中から最適な解を高速に求め、実社会に実装する、いわば「サイバー空間」と「フィジカル空間」を高度に融合させたシステムは、まさに Society 5.0 の基幹技術と言える。ここでは、我々が実施したスーパーコンピュータ「富岳」を用いた新型コロナ飛沫シミュレーションを例に、Society 5.0 の実現にむけた高性能コンピューティング（HPC, high-performance

computing）の役割と課題について議論する。なお、シミュレーション手法の詳細については、文献<sup>1,2)</sup>を参照されたい。

#### 2 スパコン「富岳」と新型コロナ対応

スパコン「富岳」は、2020年春の新型コロナウイルスの感染拡大の最中、2021年度からの共用利用開始に向けて、感染に対する細心の注意をはらって理化学研究所計算科学研究センターへの設置が進められていた（5月13日に全ての筐体の搬入が完了）。

「富岳」は、従来のシミュレーションを中心とした計算科学の研究基盤としての役割に加えて、我が国が目指す Society 5.0 を実現するための HPC インフラとしての役割も担っている。このような背景から、2020年4月6日、理研と文科省が連携し、まだ試運転中の「富岳」に対して、新型コロナウイルス対策を目的とした優先的な試行的利用について、プレスリリースがなされた。プロジェクト開始当初には、治療薬候補の同定、ウイルス表面のたんぱく質動的構造予測、パンデミック現象および対策、及びウイルス関連たんぱく質に対するフラグメント分子軌道計算の4つのプロジェクトが採択された。我々の「室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策」テーマは、それに続く5つ目のプロジェクトとして4月24日に採択された。その後、重症化に関するヒト遺伝子解析が採択された。

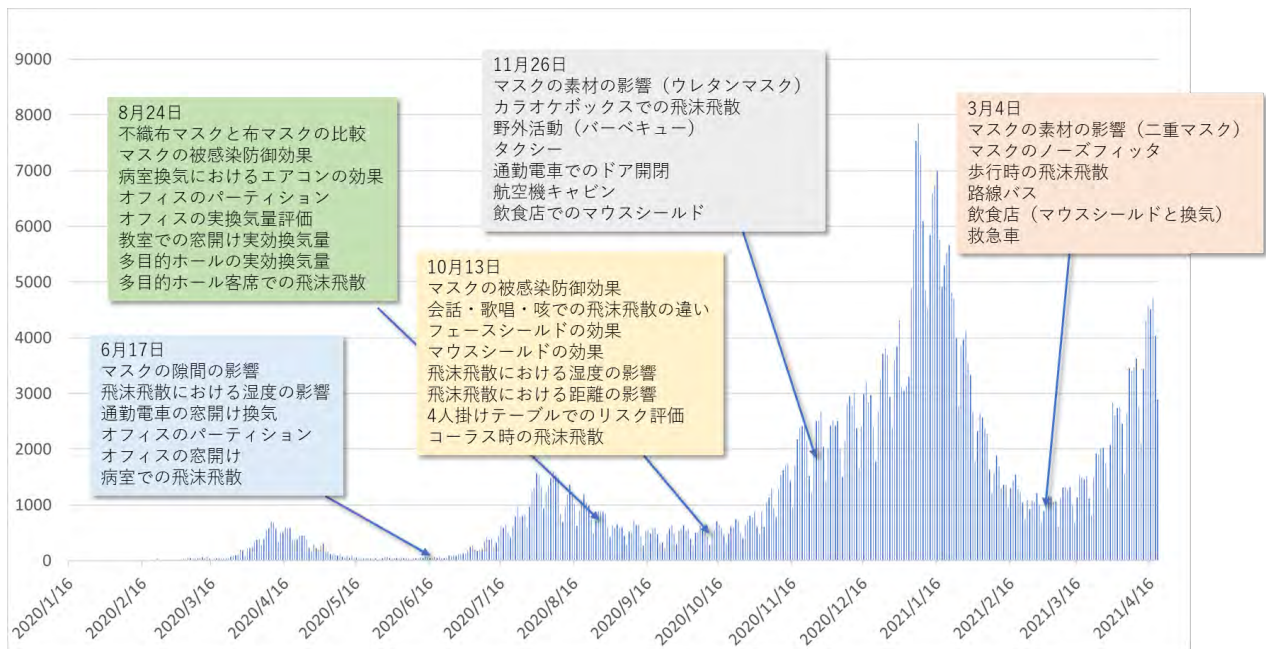


図1 新規陽性者数の推移と飛沫感染チームの活動概要

### 3 飛沫感染チームの活動概要

「富岳」新型コロナ対策プロジェクトのニュースが発表された際、理研・神戸大の現研究メンバーは全て在宅勤務を余儀なくされていた。このニュースを聞いたメンバーの一人が、「この富岳の資源を使って我々も何かできないか？」と研究グループのSlackに投げかけたのが、活動のきっかけである。我々の研究グループは、「京」や「富岳」といったハイエンドスパコンの能力を有効活用して、熱・流体運動・構造変形に関する複雑・複合現象を対象に、高精度かつ高速にシミュレーションする技術の研究とその産業展開を進めてきた。幸い、「富岳」に対するプログラムチューニングもある程度できている。これを使って何ができるか？早速Slack上で議論が進み、直ぐに飛沫の飛散シミュレーションが思いついた。自動車エンジンのために開発したモジュールの中に、液滴の輸送モデルが入っている。これがそのまま飛沫の飛散、蒸発、付着の予測に使える。化学種の計算サブルーチンは、呼気中の水蒸気や二酸化炭素の輸送方程式として使える。既に富岳・コロナウイルス対策としては治療薬候補同定やたんぱく質動的構造予測といった多くの人々の生命を直接的に救う最重要課題が採択されていた。そのような研究と比較すると、飛沫の飛散予測の研究はなんととも地味に思え、提案しても採択されるのか？採択されたとして貴重な富岳の資源を用いて結果を公表した際、批判をされないか？様々な不安が胸をよぎった。しかしマスクの性能に関する知見さえ十分でなく、感染に対する盲目的な恐れや根拠のない自信・悔りが社会に蔓延するのを見たとき、目に見えない飛沫

を可視化して社会に発信するだけでも、感染拡大の防止に向けた啓発につながるのではないかと思直した。シミュレーション技術を産業界に展開し、新しいものづくりを産学連携で模索する、我々が今まで進んできた道と合致していると感じた。研究を進めるにあたって、飛沫感染の知識や必要な実験データを計測できる研究者、室内環境に関するデータを提供できる企業に連携の声をかけたところ、皆、快諾してくださった。Slackで最初に議論してから数日後にはテレビ会議が開催され、産学連携の研究チームが発足し、プロジェクト提案は幸いにして採択された。

プロジェクト提案にあたって、まず、どのような対象の飛沫飛散の解析をするのかが議論となった。その際、闇雲に恐れを煽るようなことはせず、できるだけ感染リスクを下げるための情報とセットで発信しようとメンバーの意識を合わせた。やみくもに「危険性」をうたうのではなく、我々の社会経済活動が少しでも早く回復できることを目標に、リスク低減のための対策を発信するよう心掛けた。「危険性」をうたうのは易しいが、「安全性」をうたうのは想像以上に難しく、大きな責任が伴うことを後になって痛感することになる。

対象と共に、どのような規模のシミュレーションをするのかというのも大きな議論になった。折角の富岳資源である。富岳全体を使うような誰もやったことのない超大規模なシミュレーションをやったことと言わせたいという研究者としての思いはあった。マスクを繊維の一つ一つまで再現し、繊維を通る際の飛沫の分裂等も全て再現するようないわゆるケ

一パビリティシミュレーションをやるか？我々のシミュレーションフレームワークを活用すればそのようなシミュレーションを実施することは可能である。しかし飛沫の飛び方は状況に応じて千差万別であり、求められるケース数も膨大である。そのような大規模シミュレーションは、一つの結果を得るまでに数か月はかかるであろう。これでは社会が要求するケース数や速度にはとても追いつかない。この考えは即座に却下された。それよりも富岳の資源を使って、可能な限り様々な対象と条件のシミュレーションを行い、感染拡大の状況に応じて必要な情報を提供しようとした。様々な異なる状況で飛沫の飛散を観察すればそこに共通点のようなものが見えてきて、過去のクラスターとの関係を調べればこのウイルスの感染経路が見えてくるのではないかと考えた。

図 1 に、新規陽性者の推移と共に発表した我々のシミュレーションの内容を示す。最初のプレス発表となった 6 月 17 日には、第 1 回目の緊急事態宣言の解除に伴い、社会生活に戻る人々に対して、オフィスにおけるパーティションや空調・窓開けによる換気の効果、通勤電車における窓開けの効果、病室における飛沫の飛散等のシミュレーションを発表した。第 2 波が収まり学校活動が再開される 8 月 24 日には、教室での窓開け換気他、マスクの素材による飛沫抑制効果の違い等について発表した。年末に向けて各種芸術イベント活動の再開が議論されていた 10 月 13 日には、合唱時における感染リスクと対策やフェースシールド、マウスシールドの効果他、乾燥期に入ることから飛沫飛散における湿度の影響について発表した。若者への感染増加が懸念された 11 月 26 日には、ウレタンマスクの効果やカラオケボックスでの感染リスクの他、Go To トラベルによる人の移動が活発になってきたため、航空機やタクシーといった公共交通機関でのリスクと対策について発表した。第 3 波が収まりつつあった 3 月 4 日には、米国疾病予防管理センター (CDC) の発表を受けて二重マスクの効果や、歩行時のウイルス飛散の様子について発表を行った。

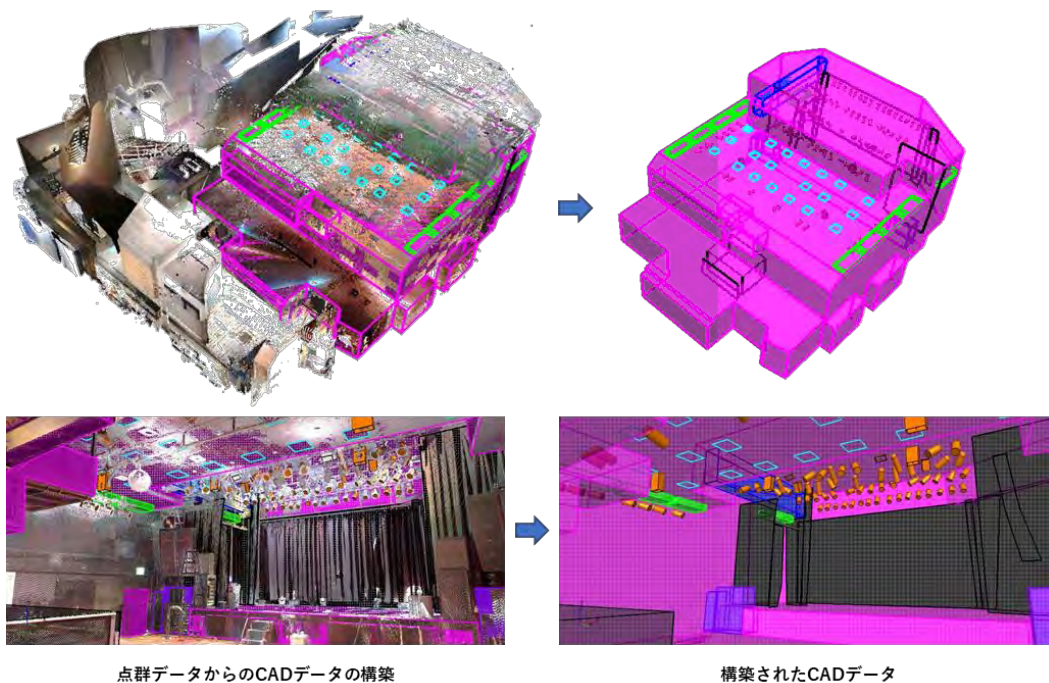
研究テーマの選定と進捗報告は、週に一度の定例会議で行われる。プロジェクトメンバーは、理研、神戸大、豊橋技科大、京都工芸繊維大、東京工業大、九州大、大阪大、鹿島建設、ダイキン工業、シンガポール国立大をステアリングメンバーとし、解析対象に応じて、トヨタ自動車、日本航空、大王製紙、全音楽譜出版社、サントリー酒類、凸版印刷、三菱ふそう、ユニクロ、ボーイング、University College London、耳鼻咽喉科学会等の企業・大学が協力メンバーとして適宜参画した。研究の進め方や解析ター

ゲットの選定、解析結果の展開先として、行政機関との連携も活発であり、今までに文科省の他、国交省、内閣府、神戸市と連携した。また、厚生省クラスター対策班に所属する感染症専門の医師等からも、適宜助言を頂いている。定例会議には常時、40 名程度のメンバーが出席し、感染状況の確認と次回プレスリリースに向けたターゲットの選定の他、解析結果の妥当性の検討が行われる。

#### 4 イベントホール内での飛沫・エアロゾル飛散予測

飛沫やエアロゾルによる感染リスクは、感染に至るウイルスの量と、被感染者が体内に取り込んだウイルス量がわかれば、古典的な確率論モデルを用いて定量的に評価をすることができる。従って、感染者から発生した飛沫やエアロゾルに対して、周囲の空気の流れと連成させてシミュレーションすることで、被感染者への到達量を精度よく予測することが重要である。その飛散状況は周囲の気流に大きく依存するため、到達量の予測と気流制御による感染リスク低減対策の提案のためには、対象となる室内の形状と熱・気流条件を精密に再現する必要がある。しかしながら対象となる室内空間の中には、形状のデジタルデータが存在しない、もしくは二次元データしか存在しない場合が多く、迅速な対応が要求される本プロジェクトにおいて大きな難関であった。Society 5.0 の実現に向けては、シミュレーションや AI 技術のみならず、フィジカル空間の対象をデジタル化してヴァーチャル空間に再現する技術も大変重要である。ここでは実在するイベントホールを対象として、我々が実施した飛沫・エアロゾルシミュレーションについて、そのフレームワークを紹介する。

対象空間のデジタル化には、3D レーザースキャナを活用した。イベントホール全体を計測するために、レーザー計測器 1 台を用いて合計 10 か所からデータ計測を行う。計測に必要な時間は 1 か所当たり 7 分程度であり、イベントホール全体のデータ取得にかかる時間は 1 時間強である。データは、建物表面の 3 次元座標と色情報をもった点群として表される。図 2 左はこの方法により 10 セットのデータを統合して再現されたイベントホールの外観と内部の構造である。データは、撮影の際にリファレンスとなるボールを設置することで、ソフトウェア上で自動的に統合される。一見して写真のように見えるのは、点群データが色情報を持っているからである。得られた点群データはそのままではシミュレーションデータとして活用することはできず、サーフェスデータとして CAD 化する必要がある。具体的には、内壁等をサーフェス CAD として再構築する他、形状の



点群データからのCADデータの構築

構築されたCADデータ

図2 3D スキャンによるイベントホールのデジタル化

複雑なカーテンやオーディオ機器等も簡略化を行う。その他、空気の給排気口や照明機器、オーディオ機器等の気流や熱の境界条件を設定する場所に対しては、個別のモデル化作業が必要となる。今回のプロジェクトではこの部分の自動化は不可能であったため、手作業により最も工数のかかった部分（数日程度）である。図2右に作成されたCADデータを示す。このCADデータに対して、各種境界条件を設定する。詳細は割愛するが、図2右の青部分は天井に設置された外気給気口であり17450 m<sup>3</sup>/hの新鮮空気が供給されている。客席両側には空気清浄効果の無い循環式のエアコン（緑色）が設置されている。この他、ステージ上の照明や人体にも発熱条件を与える。シミュレーションは、実験データと比較検討するために人のいないケースと、実際のライブ時を想定して360名の観客及びステージ上の人を考慮したケースの二つを実施した。この程度の計算であれば、シミュレーションに用いたメッシュ数は1億～2億セル程度であり、1ケースの結果を得るのに富岳500～1000ノードを用いて40時間程度で結果を得ることができる（1ノード換算では2万～4万時間必要）。

シミュレーションにあたっては、まず、イベントホール内の気流と換気状況を詳細に把握するための解析を行った。こういった建物では、利用者の健康や快適性を目的とした保健換気により新鮮空気が一定量供給されている。新鮮空気の供給は特にエアロゾル感染リスクの低減効果という観点からも重要であり、良好な換気状態が維持されているか、特に局所

的に換気の悪い空間ができていないか確認し、必要に応じて局所換気効率の改善策を提案するためである。また、感染者との近距離での飛沫感染リスクを評価するためにも、こういった解析は必要である。局所的な実効換気量をシミュレーションで評価する際には、一般的には定常乱流解析による空気齢という概念を用いることが有効である。しかしここでは、実地計測データとの直接比較という観点と、得られた結果を可視化して一般に公開し、感染予防の啓発に使う目的のため、実験で用いられる濃度減衰法をあえて採用して、ラージエディシミュレーションに基づく非定常乱流シミュレーションで評価を行った。即ち、エアコン等の空調設備を作動させた状態で流れを十分発達させた後、仮想的な汚染物質をスカラーとして室内に充満させ、その減衰を追う。

図3はこの方法で得られた、充満後100秒と200秒のスカラー分布の様子である。ここでは汚染物質の初期状態を1、新鮮空気を0として表している。無観客状態では、イベントホール内の空気の浄化は客席側（図下側）からステージ側（図上側）に進み、二つの領域には実局所換気量に大きな差異がみられる。これに対して実験計測が難しい360名の観客を入れた状態では、人の発熱に伴う上昇気流により、屋根から客席への新鮮空気の供給がやや疎外され、客席側の換気が無観客時と比較してやや遅くなっているのがわかる。一方、客席天井からの新鮮空気がステージ側に流れ込むことにより、ステージの換気がより進んでいるのがわかる。これに対して、さら

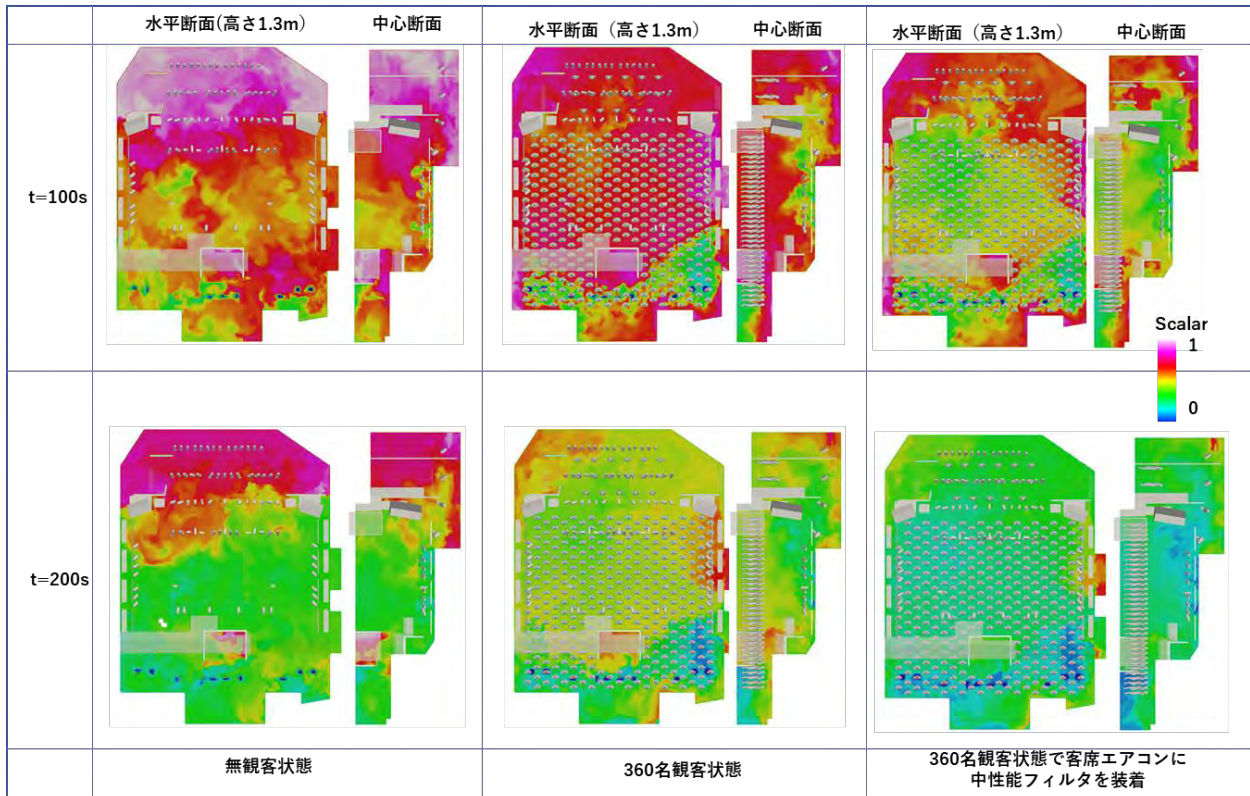


図3 イベントホール内に汚染空気を想定したスカラーを充満させて100秒後及び200秒後の汚染空気の様子(1は汚染空気の初期状態, 0は外部新鮮空気). 左から無観客の場合, 360名の観客状態, 360名の観客で客席の循環式エアコンに中性性能フィルタを装着した場合.

に換気性能を向上させる方法として, 仮想的に客室の循環式エアコンに, 一回のろ過で飛沫・エアロゾル(数百 $\mu\text{m}$ ~0.3 $\mu\text{m}$ )を50%程度ろ過できる一般的な中性性能フィルタを装着した場合を示す. 中性性能フィルタによる飛沫・エアロゾルの除去効果は明らかである. シミュレーション結果から, 無観客状態に対して, 観客を入れた状態ではイベントホール内の実効換気量が17%程度向上することが, さらに中性性能フィルタをエアコンに装着することで, 飛沫・エアロゾルの除去効果は75%程度向上することが明らかになった. ウイルスに効果のあるフィルタとしてはHEPAフィルタが有名であるが, 導入・メンテナンスがかさむうえ, 圧力損失が大きく, 一般的なエアコンに装着することは機器のスペック上不可能な場合が多い. その代替としてエアコンの風量が十分ある場合には, このような中性性能フィルタの導入は有効な感染リスク低減手段となりうる.

この結果を初期条件として観客席での飛沫飛散の様子を直接解析することも可能であるが, 感染者から発せられた飛沫解析には上記の仮想スカラー計算に対してさらに細かい解像度が必要となる. そこでここでは, 前述の気流解析でえられた観客席での気流性状を参考に, 観客席での観客配置のみを抜き出して飛沫解析を別に行った結果を紹介する.

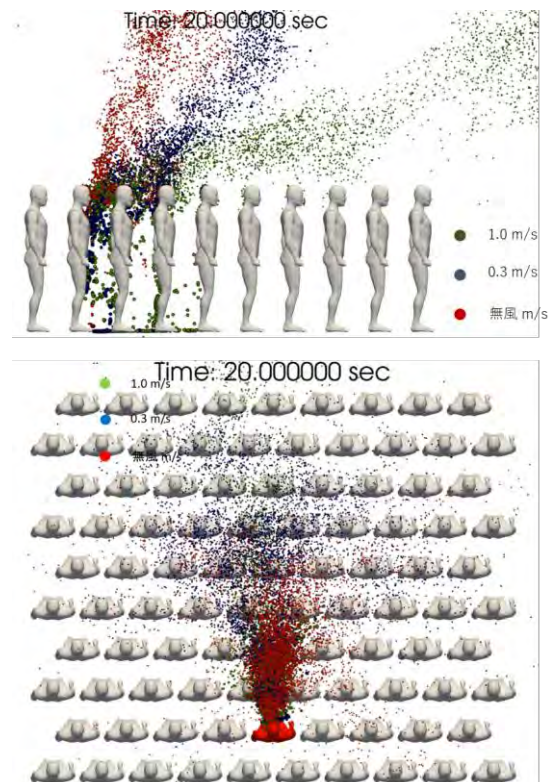


図4 1名の感染者が歌唱している場合の客席での飛沫飛散の様子(無風状態, 後方から0.3 m/s及び1.0 m/sの室内気流が吹いている状態を比較).

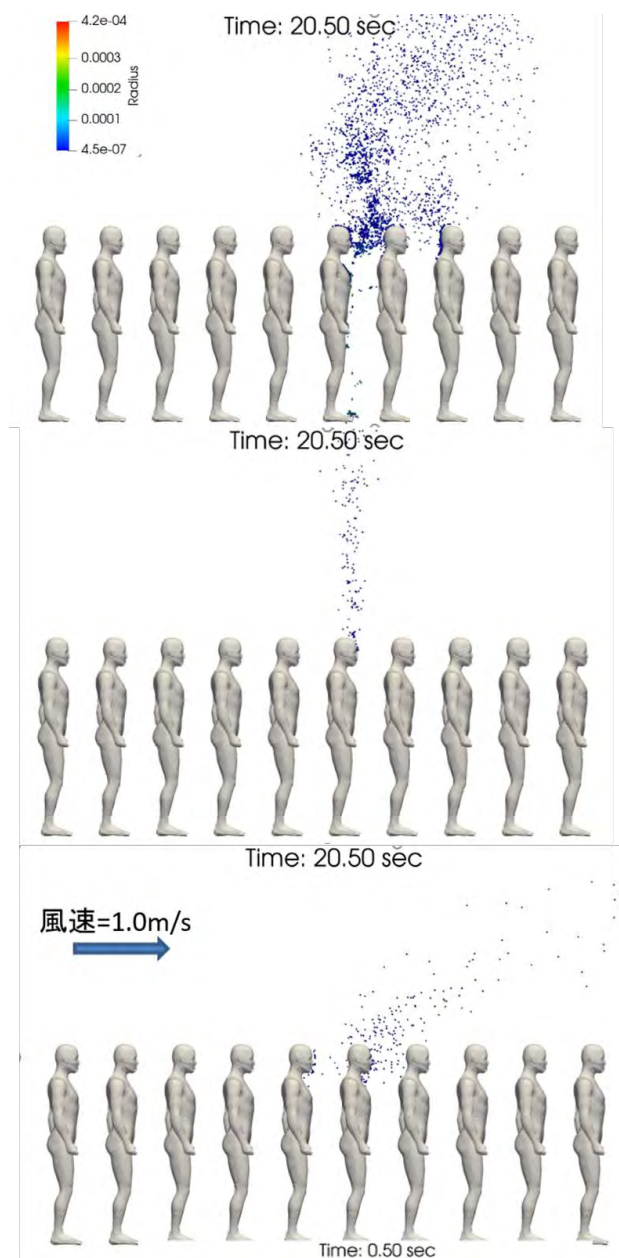


図 5 イベントホール内におけるマスク装着の効果（上から無風状態でマスク無し，無風状態でマスク装着，後方から 1.0 m/s の風が吹いている状態でマスクをした場合）。色は飛沫粒径 (m)。

図 4 は 1 名の感染者（赤色）を想定して全員が歌唱をしている場合の，感染者の飛沫飛散の様子を示す。ここではマスク装着を想定せず，客席後方からのエアコン風の影響を考慮した解析を行っている。一般的には風は局所的な換気量を上げることから感染リスクに対しては安全側に働くと考えられているが，1 m/s 程度までの微風であれば，風の拡散効果はほとんど期待できず，感染者周辺では無風状態と比較してむしろリスクが上昇していることがわかる。これに対して図 5 に，感染者がマスクを装着した場

合の飛沫飛散の様子を，飛沫サイズを色で示す。マスク装着の効果は明らかであり，発生する飛沫総数を 1/3 程度に減らすと共に，歌唱時の感染者の呼気流速を著しく低下させることで，無風時には周囲の観客に飛沫が及んでいないことが確認される。これに対して後方から 1.0 m/s の風が吹いた場合は，前方 2 列程度まで粒径 1 ミクロン以下のエアロゾルが到達しており，マスクを装着した場合でも，ある程度の距離をとることの重要性が示されている。

## 5 おわりに

「富岳」を活用した新型コロナウイルスの飛沫・エアロゾルシミュレーションを事例として，Society 5.0 時代の HPC 技術を基盤とした社会貢献の可能性について議論した。感染状況が時々刻々と変化する感染症に対しては，実験では到底対応が不可能な数多くの事例と条件に対して迅速に結果を得，その中から最適化を求めることが要求されるため，多重ケース処理型のキャパシティコンピューティングが有効である。その際，シミュレーション速度のみならず，解析対象に対して迅速なデジタル化と，シミュレーションのためのモデル化が重要な課題となる。また，得られた膨大な解をビッグデータとして，その中から最適解を求めるための，効果的なポストデータ処理技術が求められる。

謝辞：本プロジェクトは、「新型コロナウイルス対策を目的としたスーパーコンピュータ「富岳」の優先的な試行的利用」(文科省及び理研計算科学研究センター)，「新型コロナウイルス感染症対応 HPCI 臨時公募 (hp200154)」(東大 Oakbridge-CX)，「スマートライフ実現のための AI 等を活用したシミュレーション調査研究」(内閣官房)，CREST「異分野融合による新型コロナウイルスをはじめとした感染症との共生に資する技術基盤の創生」(科学技術振興機構)の支援を受けている。また，室内の 3D レーザー計測と CAD 化に際しては，(株)富士テクニカルリサーチの支援を受けた。ここに謝意を表す。

## 引用文献

- 1) 坪倉誠：「富岳」による飛沫・エアロゾル飛散シミュレーションと感染リスク低減対策の提案，日本流体力学会誌「ながれ」，第 40 巻 (2 号) (2021)。
- 2) 坪倉誠：「富岳」による室内環境の飛沫・エアロゾル感染リスク評価とリスク低減対策，ターボ機械協会誌「ターボ機械」，2021 年 7 月号 (2021)。