

報告 ↓ 最新知見に基づく室内の飛沫感染対策

通常の飛沫には「マスク着用」 エアロゾルには「換気」で対応を 「富岳」による高精度・大規模シミュレーションから

編集部

理化学研究所は文部科学省と連携し、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源を、新型コロナウイルス対策に資する5つの研究課題に供出している。「富岳」は、来年の共用開始に向け開発・整備中だが、今般の国難ともいえる状況を踏まえ、いち早く成果を出すことをめざしての取り組みだ。

本稿では、5つの研究課題のうち、「室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策」の最新知見の一部を報告する。職場における対策の一助としてほしい。

感染リスクの定量的評価と 具体的対策を示す

「室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策」は、理化学研究所（理研）のほか、神戸大学、大阪大学、京都工芸繊維大学、豊橋技術科学大学、九州大学、東京工業大学と大王製紙、鹿島建設、ダイキン工業など産学共同のチームで進められている。

理研が開発した超大規模熱流体解析ソフト・CUBEを使用、従来のスーパーコンピュータでは処理に膨大な時間がかかる飛沫、およびごく微小な飛沫（以下、エアロゾル）

布マスクでも飛沫飛散を 抑える効果は十分にある

マスクの効果について坪倉教授らのチームは、飛沫飛散抑制（飛沫の飛散を抑える）効果と気流抑制（飛沫が気流に乗り遠くまで飛散するのを防ぐ）効果が確認されたことを6月に発表している。8月には新たに、マスクの素材による飛沫飛散抑制効果の違いに関するシミュレーション結果を公表した。

比較したのは、市販の不織布マスクと手作り布マスク2種の計3種。布マスク2種は、シーツを素材としたポリエステル相当と、着古したTシャツを素材とした綿相当のもので、前者は手作りとしては最高性能、後者は最低性能のケースとして設定した。ポリエステルと綿は1枚構造で、重ねていない。

マスクのサイズは3種とも同一で、マスクと顔の間に隙間がある状態を設定した。マスクは、顔と密着させて着用するのが理想だが、ほとんどの場合、息苦しさなどから隙間がある状態で着用しているという現実を即したシミュレーションである。

こうした条件で咳をした場合、どのくらいの飛沫が、どのように飛散

するのかを見たのが図1だ。

フィルタを透過する飛沫数（青色）が最少で、フィルタに捕集された結果、マスク・顔に付着する飛沫数（赤色）が最多、つまり、もっとも高い飛沫飛散抑制効果を示したのは、不織布マスクである。

ただ、飛沫の粒径別のマスク透過率を見ると、不織布マスクは50μmより大きな飛沫はほぼ全数捕集するものの、隙間から放出されるエアロゾル（緑色）は多い。不織布は、フィルタの目が密で空気を通しにくいため多くの飛沫を捕集するが、それゆえ、逃げ場を失ったエアロゾルの多くが、隙間から放出されてしまう。

一方、布マスクは目が粗く空気が通りやすいため、フィルタを透過する飛沫は多くなってしまうが、その分、隙間から放出されるエアロゾルは、不織布マスクより少ない。トータルで見ると、特にポリエステル相当の布マスクは、不織布マスクとほぼ同等の飛沫の捕集・飛散抑制効果があることが、図1からわかる。

飛沫の数ではなく体積比で見ても、不織布マスクとポリエステル相当布マスクは、どちらも数十μm以下の比較的小さな飛沫に対しても8割程度を捕集し、やはり同等の性能を示す。

坪倉教授によれば、体積の大きな飛沫ほど含んでいるウイルス量が多い（逆に、エアロゾルに含まれるウイルス量は少ない）ことを考えれば、飛沫数より体積比のほうが、付着・透過・放出されるウイルス量を、より正確に反映しているという。

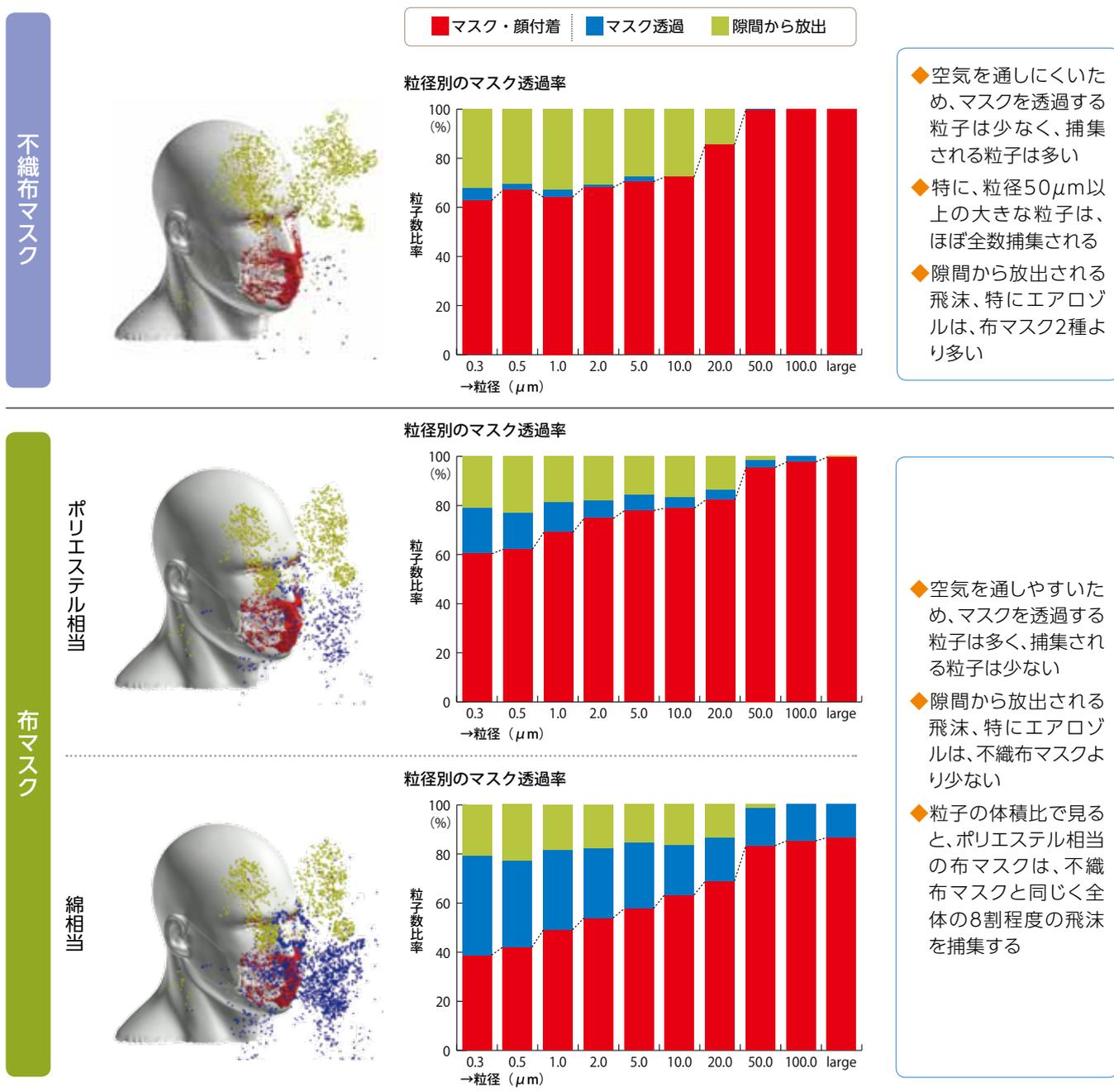
気候や体調に応じたマスクの使い分けを

これらを総合すると、全体的に飛沫飛散抑制効果が高いのは不織布マスクだが、ポリエステル相当の布マスクにも、十分な飛散抑制効果がある。綿相当の布マスクも、大きな飛沫に限れば、かなりの割合を捕集しており、飛散抑制効果は決して低くはない。

この結果を踏まえ坪倉教授は、「気候や体調などに応じ、性能優先で不織布マスクにするか、呼吸のしやすさを優先させてポリエステルや綿の布マスクにするか、使い分けると良い」とする。

そして、「最悪の選択は、マスクを着用しなかったり、外してしまったりすること」と述べ、できるだけマスクを着用することで、感染（させる）リスクの低減に努めてほしいと訴えた。

図1 マスクの素材による飛沫飛散抑制効果の違い



提供：理研・豊橋技科大・神戸大、協力：京都工繊大・大王製紙

飛沫侵入を防ぐ効果も 確認された不織布マスク

次に紹介するのは、マスクの「被感染防御効果」、つまり人から飛沫を受けない、自分を守る効果についてのシミュレーションである。図2は、人の上気道モデルを用いて、さまざまな大きさの飛沫を顔の周囲に均等に配置、深呼吸6秒後に付着した飛沫の分布を見たものだ。

マスク無しでは、吸引する飛沫のうち50μm以上の大きな飛沫（赤色、緑色）のほとんどは顔の表面や鼻腔、口腔に付着するが、エアロゾルは気道に入り、20μm以下の飛沫（青色）は、上気道奥まで到達する。

不織布マスクを隙間がある状態で着用すると、上気道まで浸入する飛沫数はマスク無しの3分の1となり、大きな飛沫の侵入をブロックする効果は高い。ただ、隙間から侵入する20μm以下のエアロゾルは、マスク無しと同様、上気道奥にまで達する。エアロゾルはその小ささゆえ、さらに下気道、そして肺にまで達してしまう。

一方、不織布マスクを密着させて着用した場合は、エアロゾルは隙間からも侵入せず、大きな飛沫と合わ

せ、ほぼブロックする。マスクの主な効果は飛沫飛散抑制効果であり、被感染防御効果は医療用のN95マスクを除き、ほとんど期待できないという、これまでの通説を覆す結果といえる。

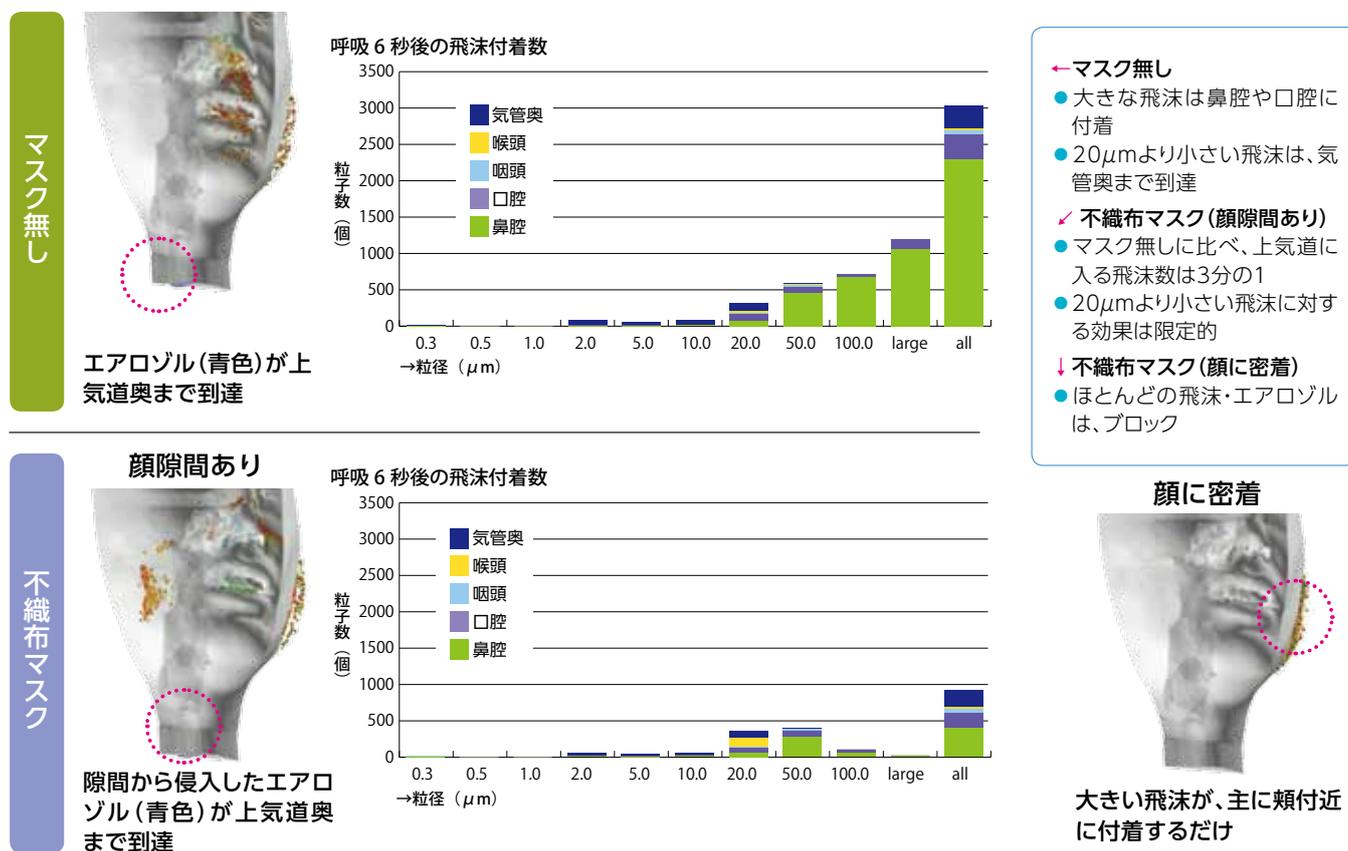
エアロゾル対策 キーワードは「換気」

ただ、マスクに隙間がある状態ではエアロゾルの侵入を防ぐことは難しい。では、エアロゾルにはどう対応すれば良いのか。そのキーワードとして坪倉教授が挙げるのが「換気」だ。

図3は、82・5m²の病室に4つのベッドを配置。換気能力がないエアコンを設置し、新鮮空気供給口及び室内空気排出口が設置されているという設定のシミュレーションである。坪倉教授によると、病室に限定せず、「小さな部屋」ととらえても差し支えないという。

この部屋を仮想的に汚染空気（エアロゾル）で満たした後、エアコンをONにすると、エアコンOFF時に比べ、より早く部屋全体の空気が清浄化されることを、図3は示している。供給口から入る新鮮空気の量はエアコンON/OFF時で変わり

図2 マスクの被感染防御効果 *モデル図の中の、赤・緑は大きな飛沫、青は小さな飛沫（エアロゾル）を表す

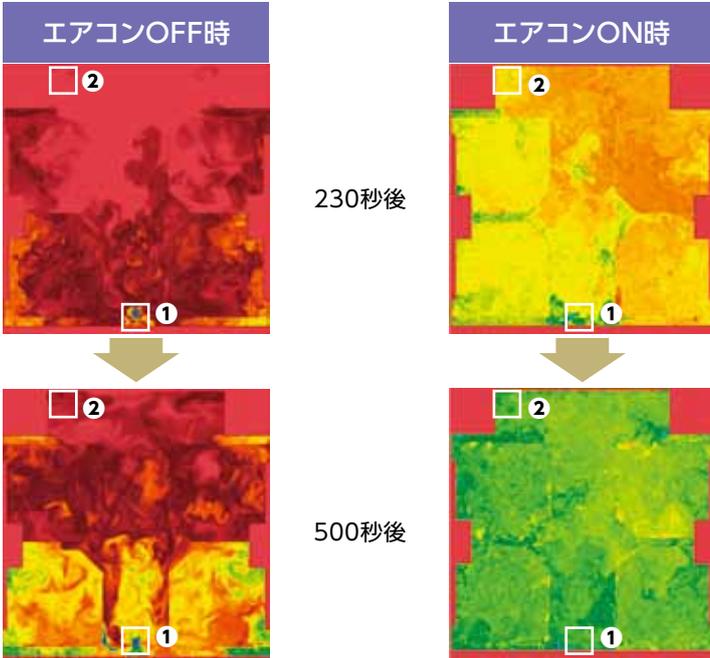


提供：理研・豊橋技科大・神戸大、協力：京都工繊大・大王製紙

図3 エアコンON時とOFF時の換気効果の比較

仮想的に汚染空気で部屋を満たした後に換気を行った場合の比較。床から160cmの高さを上から見たもの。

赤:汚染空気/緑→青の順に清浄 ①新鮮空気供給口 ②室内空気排出口



新鮮空気の流入量が同じであっても、エアコンをつけて空気を循環させることで、室内の換気は進む

提供：理研・神戸大、協力：鹿島建設・阪大

はないが、エアコンにより空気を循環させるだけで、エアロゾルの排出が促されるのだ。
 エアロゾルは非常に軽いため、通常の飛沫よりも長い時間、空気中を漂い、より広く拡散してしまう。それを防ぐためには、換気能力がないエアコンでも運転させること、また可能であれば（空気供給・排出口がない部屋では必ず）、定期的に窓を開けて換気することが、エアロゾルによる感染リスクを下げることにつながる。

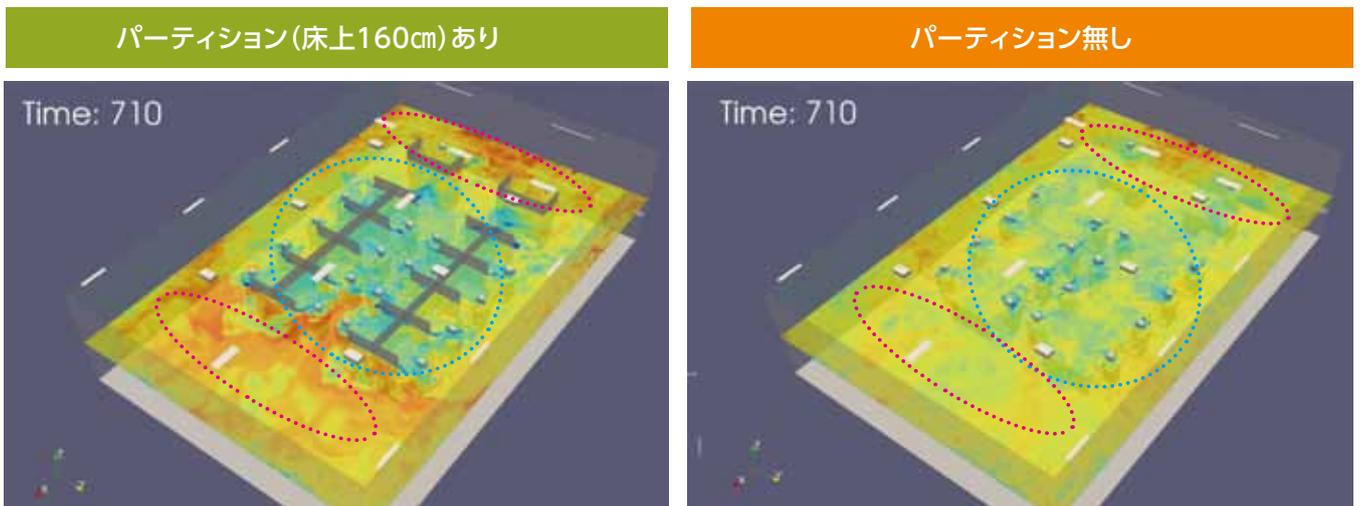
続いて紹介するのは、デスク間のパーティションが、空気の汚染度に及ぼす影響を見たシミュレーションである。換気能力があるエアコン等や空気供給・排出口も設置されているオフィスという設定だ(図4)。
 このオフィス内の空気が一様に汚れた状態から換気を始めると、全体的な汚染量は、パーティションの有無で大きく変わることはない。

パーティションが起こす「換気ムラ」に注意

図4 パーティションの有無による換気ムラ(オフィス)

オフィス(18人、269m)を対象にした、飛沫及びエアロゾル感染のリスクを評価
 各種法令により、一定基準(20~30m³/h/人)を満たした外部空気との換気がなされているオフィスを想定

- 室内の空気が一様に汚れた状態で換気を開始し、710秒後の様子。赤→緑→青の順で空気が清浄
- 室内では局所的に換気の悪い場所ができ、パーティションありの場合は、空気が清浄な場所との差が大きい
- こういった換気ムラをできるだけ少なくすることが、エアロゾル感染リスクの低減において重要



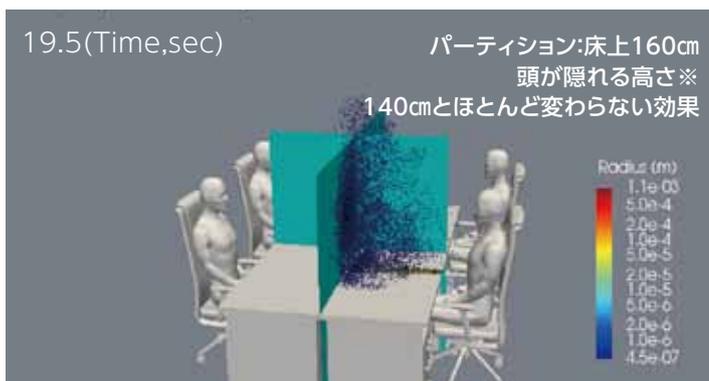
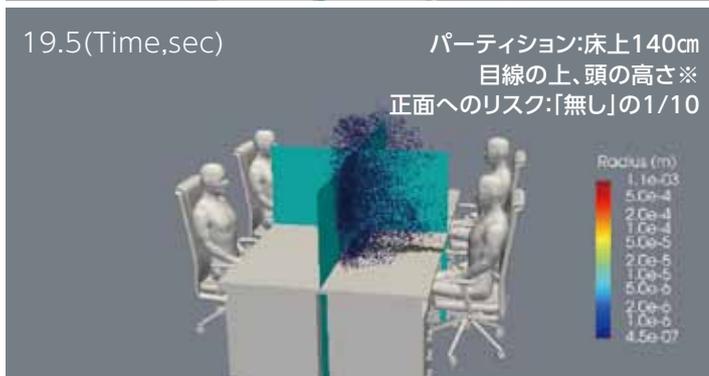
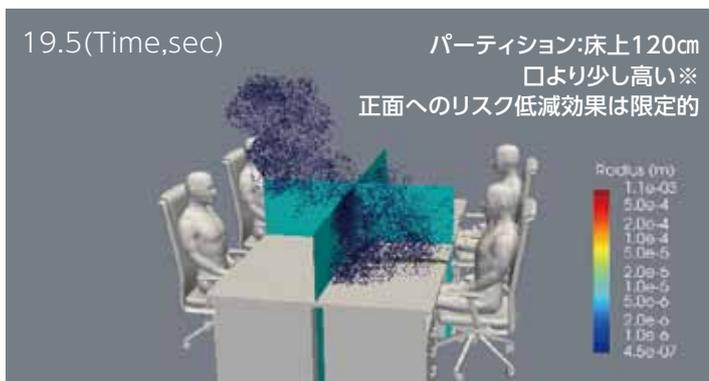
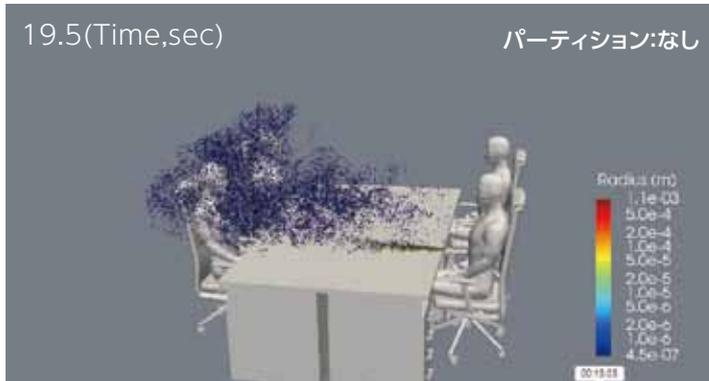
デスク周辺は、「パーティションあり」のほうが、「無し」よりも、空気が清浄になっている。

右上と左下は、「パーティションあり」のほうが、汚れた空気がたまっている。

提供：理研・神戸大、協力：鹿島建設・阪大

図5 パーティションの高さによる飛沫飛散への影響

- パーティションの高さは、床上120cmでは不十分であり、140cm程度の高さは必要
- 140cmと160cmでは、ほとんど効果は変わらない
- 空中に飛散するエアロゾルについては、別の対策が必要となる(本文参照)



※ 身長170cmの人を想定

提供: 理研・神戸大, 協力: 鹿島建設・阪大

ただ、パーティション無しでは均一に空気がきれいになるのに対し、パーティションありでは、デスク周辺の空気は清浄化される半面、左下のコピー機などが置かれるようなエリア、右上の上司が着席するようなエリアに汚染が目立つ。これらのエリアでは、マスクを着用してもエアロゾルによる感染が懸念される。なぜ、こうした換気ムラが起るのか? 坪倉教授は「パーティションは、部屋全体に行き渡ろうとする空気の流れを妨げてしまうため」と

説明。そのうえで「汚染空気がたまるエリアには扇風機等を設置し、空気が激まないような対策」を勧める。パーティションは**床上140cmが適切**。換気ムラには、パーティションの高さも影響する。

図5のシミュレーションからは、パーティションは床上140cm以上でない正面へのリスク低減効果は限定的である一方、160cm以上にしても、効果はほとんど変わらないという結果を得ている。図4のシミュレーションは160cmのパーティションだが、これを140cmに下げただけでも、換気ムラによる局所的な空気の汚染を抑えることができるという。

坪倉教授は、「パーティションを高くするほど、特に正面への飛沫飛散抑制効果は高まるが、エアロゾルによる感染リスクが高いエリアもできてしまう」とし、そのバランスをとるうえで、パーティションの高さ140cmを勧める。

最後に、坪倉教授が本誌読者に寄せてくれたメッセージを紹介したい。「記者勉強会の資料と動画は、理研計算科学センターのサイト(※)でも公開されており、(本稿で触れられなかった)教室や多目的ホールでのシミュレーションもご覧になれます。これらは、地域の病院や介護施設、学校、音楽ホール等での飛沫感染対策に必ず役立つものと思います。併せて、民間の事業者や地域住民の方々にも、この知見を広く周知していただければ幸いです」。

※ <https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/corona/projects/tsubokura.html>