

## 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策

理化学研究所/神戸大学 坪倉 誠

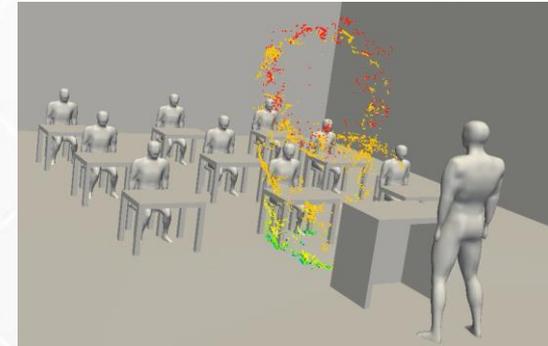
### 実施内容:

ウイルス感染の内、くしゃみ、せき、発話等で発生する飛沫による感染は、飛沫の飛散経路が感染者と非感染者の間の空気の流れや湿度、温度等に大きく依存する。また新型コロナウイルスについては、通常の飛沫感染に加えて飛沫が空気中で微小化したエアロゾルでの感染の可能性も示唆されている。微小飛沫であるエアロゾルはより長時間空気中を漂うことから、飛沫感染リスクの評価と感染予防対策の提言のためには、飛沫の飛散経路を正しく予測し、周囲流れの影響が感染にどのような影響を与えるのかを正しく推定する必要がある。本課題では、通勤列車内、オフィス、教室、病室といった室内環境において、新型コロナウイルスの特性を考慮した飛沫の飛散シミュレーションを行い、様々な条件下での感染リスク評価を行った上で、空調、換気、パーティション等を活用した感染リスク低減対策の提案を行う。

本課題は、理研、京都工芸繊維大、神戸大、大阪大、豊橋技科大、鹿島建設が連携する。理研が開発し富岳に実装を進めている超大規模熱流体解析ソフトCUBEを主に用いて、既存の飛沫計算では難しかった、高精度かつ大規模な系でのシミュレーションを行う。

### 期待される成果:

室内環境における感染リスクの定量的評価を行うと共に、窓の開閉や空調の効果的運転条件、さらにはパーティションの配置等による感染リスク低減策を具体的・定量的に示すことで、ウイルス飛沫感染に対してより安全・安心な生活環境を実現する。また、シミュレーション結果を動画とすることで、具体的に飛沫や飛沫核がどの程度の速度でどこまで飛散するのかを視覚的に理解することができ、感染防止に向けた認識や理解を広く普及させることができる。これをもって、我が国の社会経済活動の早期復活に寄与できると期待される。



教室における飛沫飛散シミュレーションの例  
(京都工芸繊維大学 山川提供)



通勤列車モデル

## 研究のポイント:

- 社会経済活動の早期回復を第一目標に、感染リスクの評価と感染リスク低減策を提案する。
- 「富岳」の計算資源は、過去のウイルス飛沫シミュレーションの典型的な計算資源の数百倍～一千倍。精度（解像度、物理モデル、計算モデル形状）、ケース数、解析領域のいずれかで過去のウイルス飛沫シミュレーションを凌駕する。

## 各機関の役割

- 理研：超並列計算、計算モデル作成支援、富岳利用支援
- 京都工芸繊維大：多ケース解析、ウイルス飛沫モデルの開発
- 神戸大：超並列計算
- 大阪大：ウイルス飛沫モデルの検討、病理学的・生理学的検討
- 豊橋技術科学大：マスク効果実験とマスクモデル構築
- 鹿島建設：計算モデルの作成、室内環境シミュレーションノウハウ、感染リスク評価

## 成果公表のタイミング:

- 第1弾：飛沫感染のリスク評価（5月～6月）
- 第2弾：即応性のある対策提案（6月～7月）
- 第3弾：建物設備改善を含む長期的提案（7月以降）

# マスクの効果について (実験検証)

## 実施内容:

マスクによる飛沫飛散抑制効果の検討

### 不織布 (ふしょくふ) マスクの役割とそのモデル化

吹き出し速度の低減効果: 飛沫, エアロゾルが周囲に噴き出すときの勢いを抑制  
 フィルター効果: 飛沫やエアロゾルの排出・吸引を抑制

・マスクそのものをシミュレーションするのは計算資源上不可能→実験数値モデル

発話, 咳, くしゃみで口から出る飛沫サイズ:  $1\mu\text{m}$ ~数百 $\mu\text{m}$  (図2)

不織布の孔径は $0.5\text{-}15\mu\text{m}$  (図3) → 飛沫 ( $5\mu\text{m}$ 以上) はほぼ捕集可能

→ **エアロゾル ( $0.3\text{-}5\mu\text{m}$ ) 顔との隙間からの漏れ 50%**  
 (フィルター部からの漏れ量は 10%以下)



図1 マスク周りの流れ

### エアロゾル: 一部捕獲不可

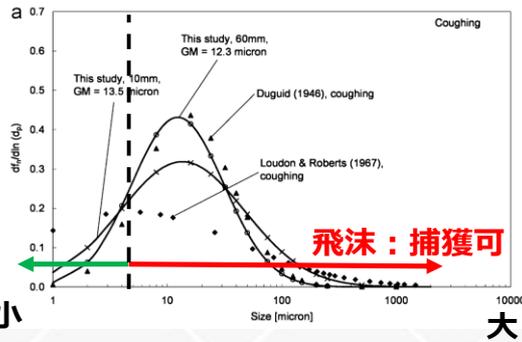


図2 人から排出される飛沫の大きさと割合 (10 $\mu\text{m}$ 程度の大きな飛沫が多い)

(Chao et al., Aerosol Science 40(2009)122-133)

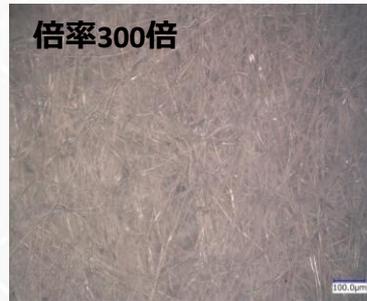


図3 不織布マスクのフィルタ部の繊維構造

繊維間  $0.5\sim 15\mu\text{m}$ ,  
 繊維太さ: 約 $5\mu\text{m}$

資料提供: 大王製紙株式会社



図4 人工口腔モデルを用いた流れ場・粒子計測実験

圧損・速度分布・粒子透過数をもとに解析モデルを構築解析及検証データとして使用  
 実験協力: カノマックス

マスクなし 吹き出し速度 3m/s  
 不織布マスク  
 フィルター面: 0.5m/s以下  
 目・鼻の隙間: 0.5 m/s以下  
 頬: 1.2 m/s  
 圧力損失: 40 Pa  
 フィルター透過率: 5%

不織布マスクのフィルター効果

フィルター単体試験

漏れ量 5%程度

マスクとして利用時

漏れ量 40-50%程度

参考: N95マスク

フィルター単体試験

漏れ量 1%以下

マスクとして利用時

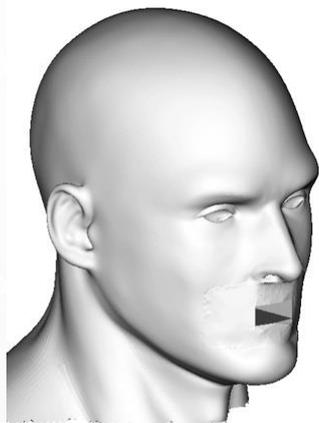
漏れ量 5%程度

## マスクの効果について

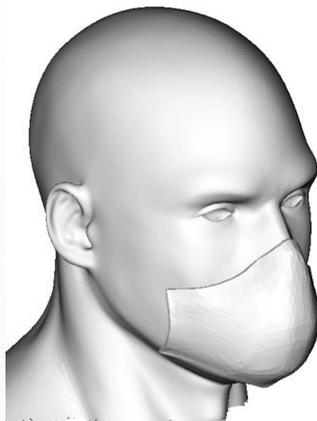
### 咳（上）と発話（下）時の空気の流れの比較

提供：理研・豊橋技科大，協力：京工織大，阪大

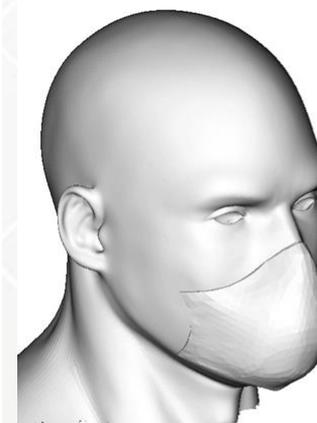
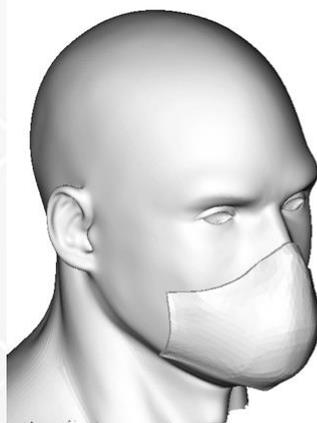
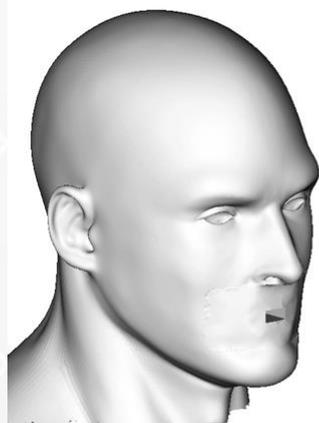
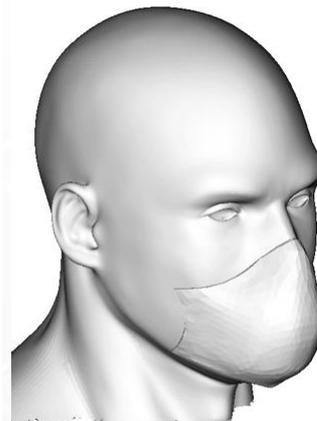
マスク無し



不織布マスク  
隙間あり



不織布マスク  
隙間なし



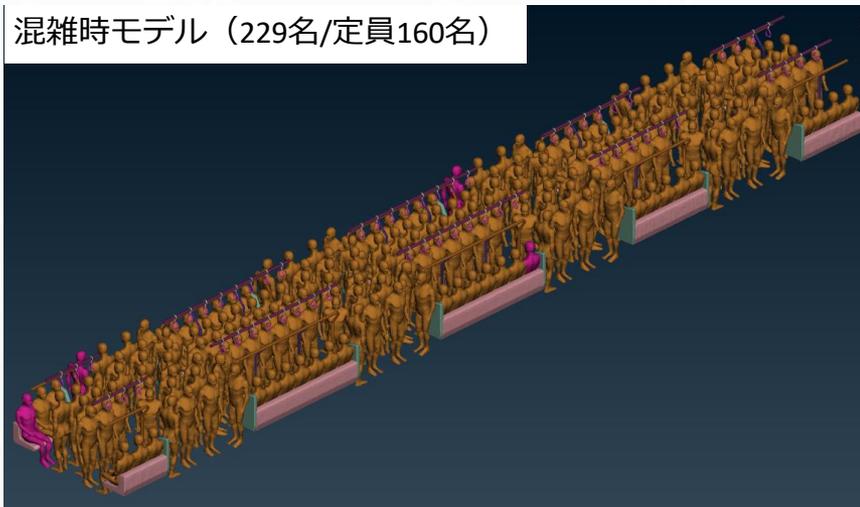
マスクの装着方法は咳のみならず発話においても重要。隙間があると咳と同程度の空気の漏れは確認され、エアロゾルに対しては性能は半減する。

# 列車内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

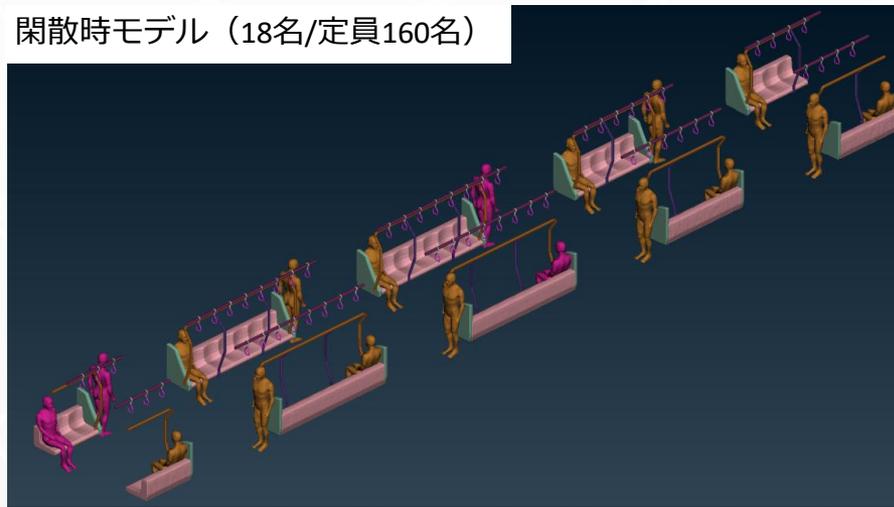
## 実施内容:

山手線等の通勤列車を想定し、飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行っている。特に乗車率の変化や、窓の開閉による換気がリスク低減に与える影響を検討し、その低減対策について提案を行う。

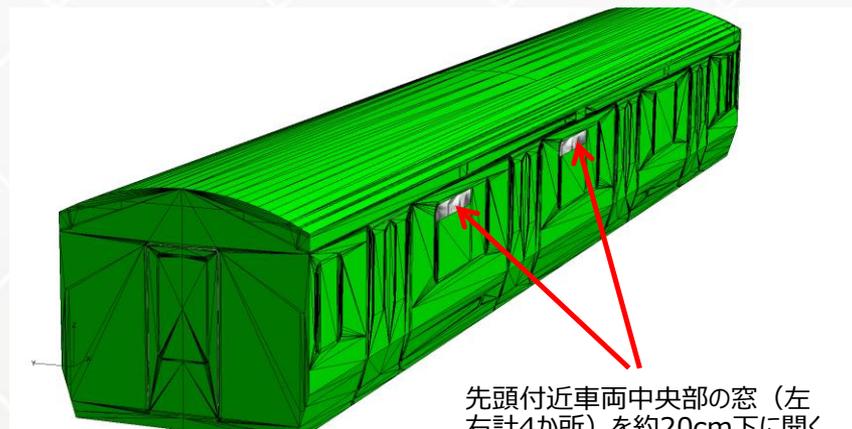
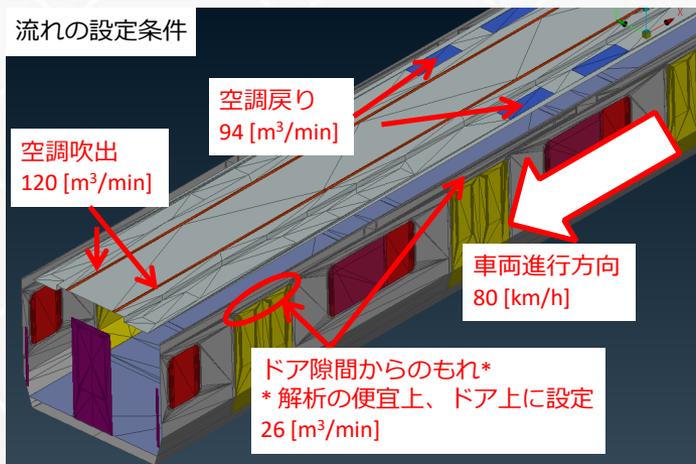
混雑時モデル (229名/定員160名)



閑散時モデル (18名/定員160名)



流れの設定条件



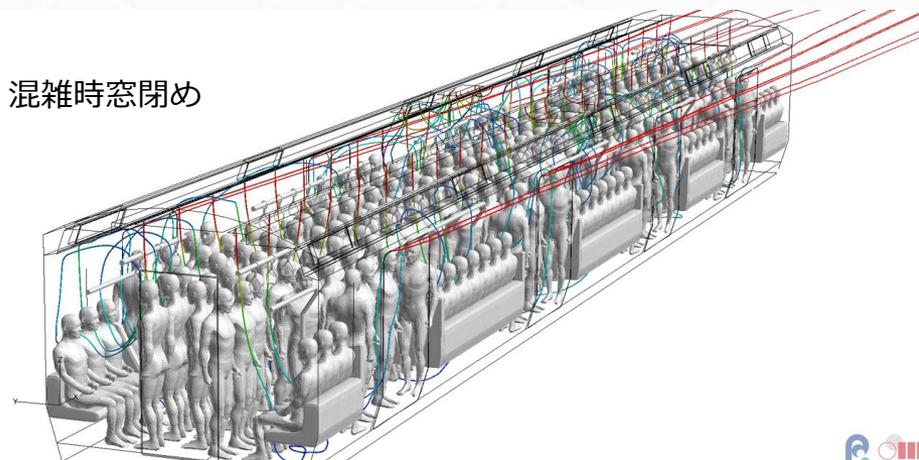
(参考) 古賀, 東日本旅客鉄道(株)向けE235系車両用空調装置の特長とメンテナンス性向上, 三菱電機技報, Vol.92(7), pp.410-413, 2018.

## 列車内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

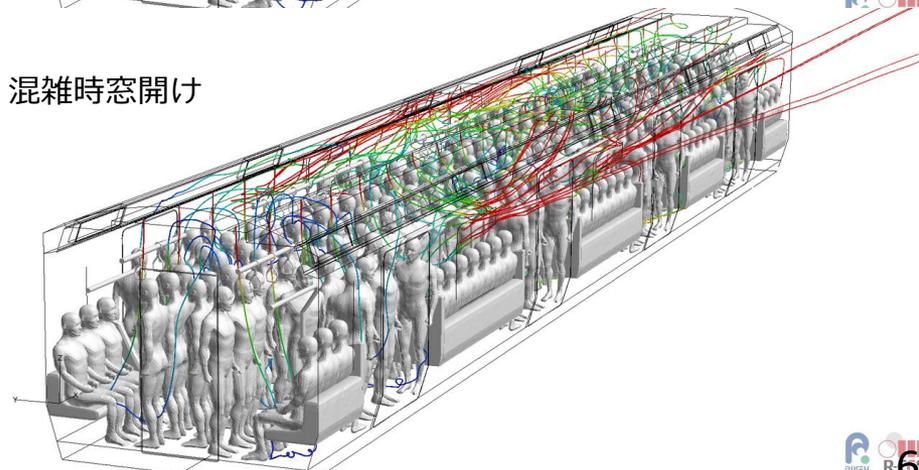
### 車内の気流の様子（色は流速）：

閑散時には車内のあらゆる位置に流れが行き届いている（全体的に緑から赤が多い）。一方混雑時には立っている乗客の身体から下等、流れが不均一、かつよどんでいる場所がある（青の所）。窓をあけることである程度はましになり、特に立っている人の頭から上で流れが速くなるが、身体から下では十分流れが行き届いていない。

混雑時窓閉め

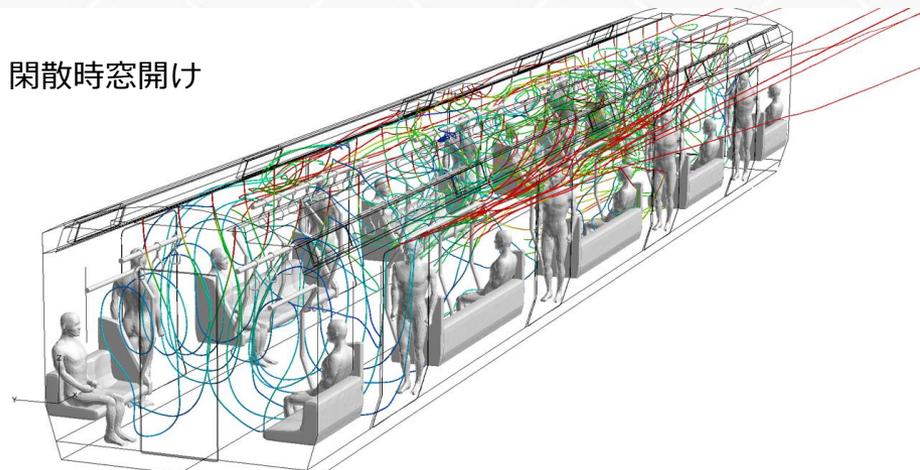


混雑時窓開け



提供：理研，協力：豊橋技科大，鹿島建設

閑散時窓開け

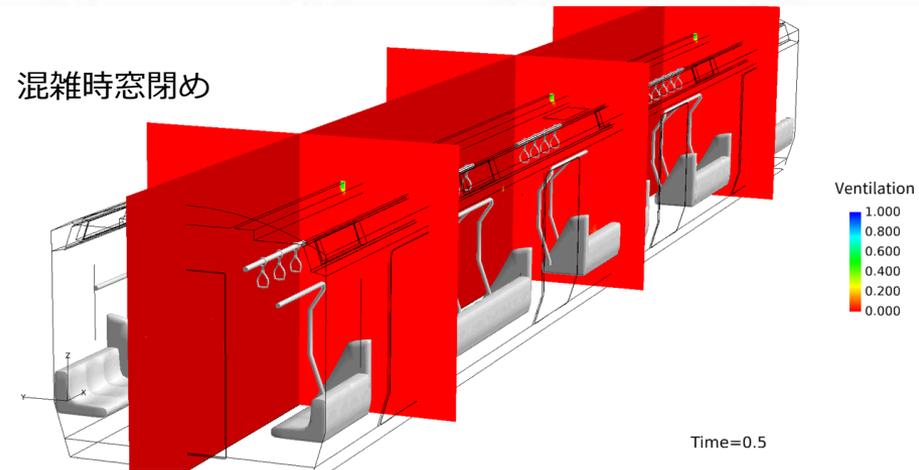


## 列車内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

### 車内の換気の様子（色は換気率）：

車内の空気に新鮮空気（外気）が含まれる割合。混雑時，窓を開けることで車内の換気が促進される。換気は車内上面の中央から後方にかけて進んでいく一方，前方空気はややよどみ気味。なお，閑散時は車内の空気が混雑時より多いため，換気にはより時間がかかる。

混雑時窓閉め

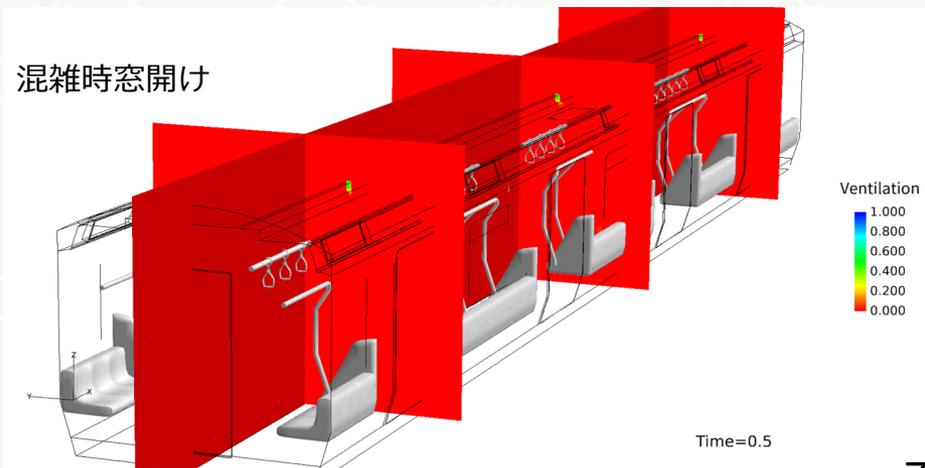


提供：理研，協力：豊橋技科大，鹿島建設

閑散時窓開け



混雑時窓開け

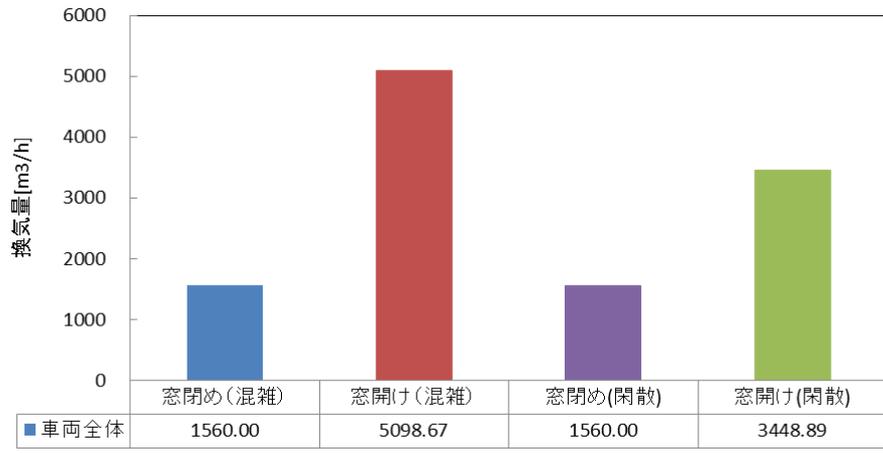


## 列車内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

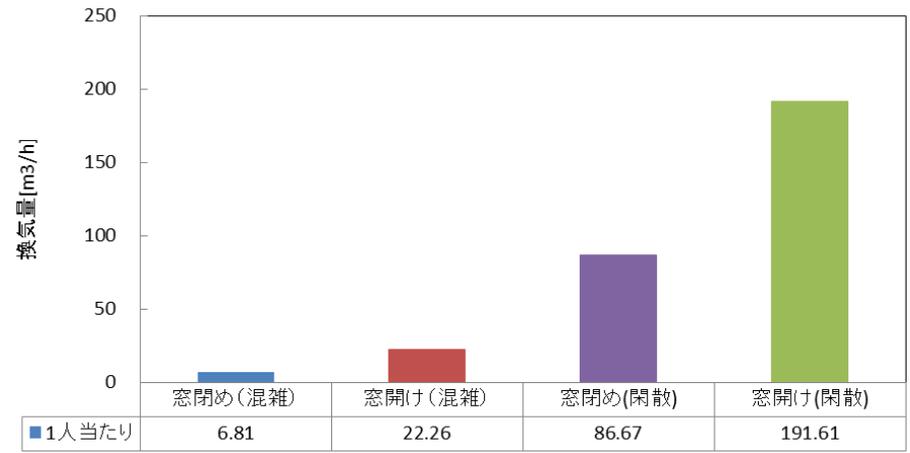
### 実換気量（1時間当たりどの程度空気が新鮮空気と入れ替わっているか）の比較:

窓閉め状態では（エアコン性能できまる）設計換気量（1560m<sup>3</sup>/h）に対して、窓を開けることでその換気量を2～3倍にすることができる。乗客一人当たり換算すると、閑散時の換気量は窓閉め時でも、空調換気が管理されている一般オフィス（20～30m<sup>3</sup>/h）の3倍程度（87m<sup>3</sup>/h）であり、十分な換気がなされていると言える。これに対して混雑時の一人当たりの換気量は乗車率に応じて1/10以下（7m<sup>3</sup>/h）となる。このような過密状態でも、窓開けにより一般オフィス程度（22m<sup>3</sup>/h）まで改善することが可能である。ただし混雑した車内では換気にむらができ、十分な換気がなされない箇所も発生するので、まずは過密状態を避けて乗客間に十分な「隙間」ができることが重要である。

車両全体の推定換気量



乗客1人当たりの推定換気量

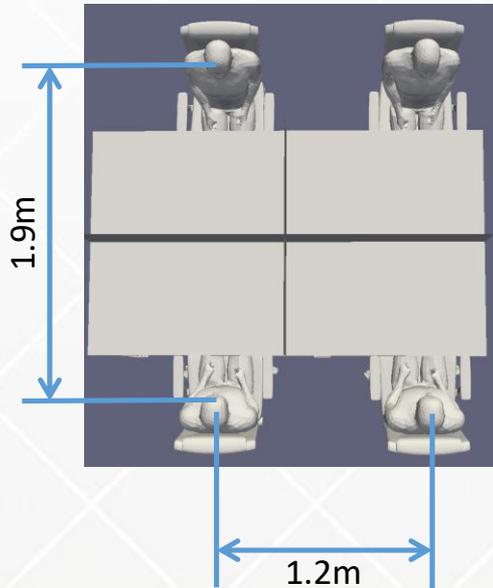


# 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

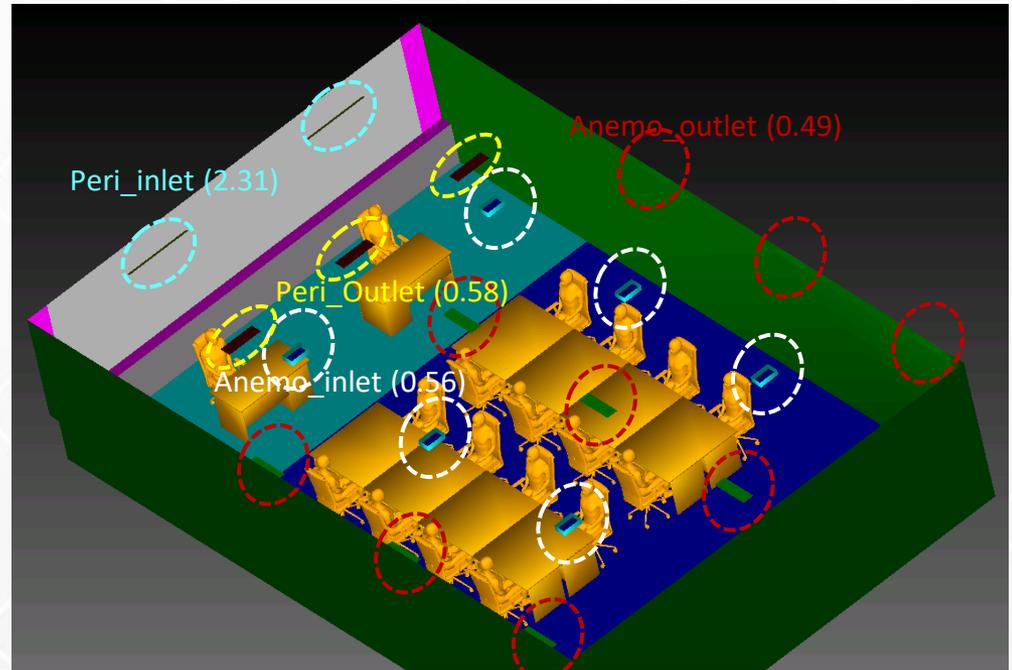
## 実施内容:

小規模オフィス（18人/室）を対象に、飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行っている。一般のオフィスでは、各種法令により一定基準を満たした外部空気との換気がなされている（20~30m<sup>3</sup>/h/人）。しかし不適切な設備運転や整備不良の他、室内の流れは一様ではなく換気効率の「むら」も発生する。従ってここでは、窓換気の外、着席の工夫（千鳥配置）やパーティション、サーキュレーター等の付加物による感染リスク低減法を提案する

体温：33℃，室温：25℃，外気温：30℃



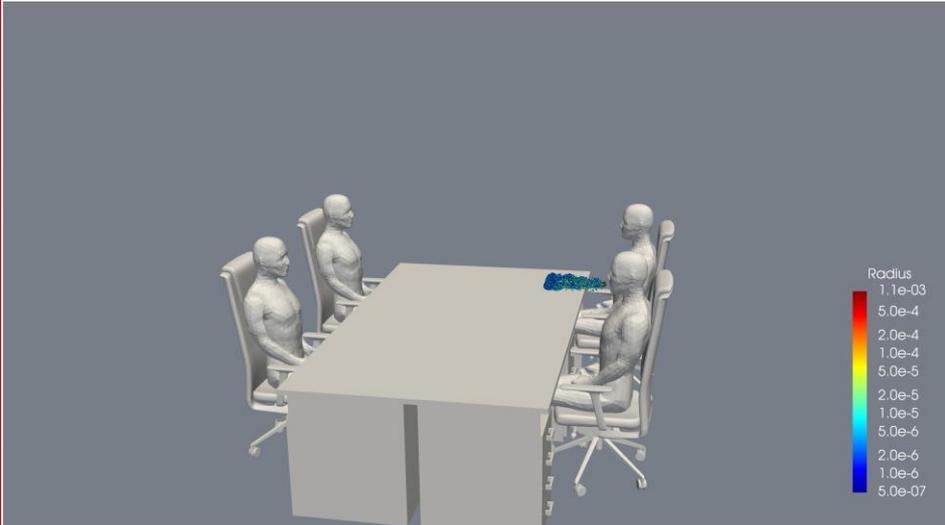
体温：34℃，室温：24℃，湿度：60%



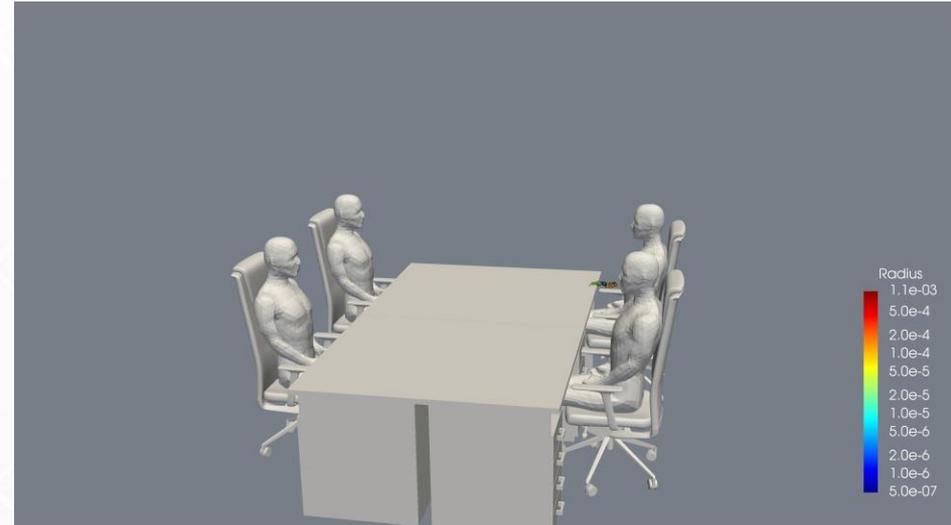
		吹出角度	ユニット数	ユニット流量	総流量	外部換気	吹出風速
アネモ空調	In	0°	6	225m <sup>3</sup> /h	1350m <sup>3</sup> /h	540m <sup>3</sup> /h	0.56m/s
	Out	+90°	9		-1350m <sup>3</sup> /h		
ペリ空調	In	-90°	2	400m <sup>3</sup> /h	800m <sup>3</sup> /h	0m <sup>3</sup> /h	2.31m/s
	Out	+90°	3		-800m <sup>3</sup> /h		

## 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

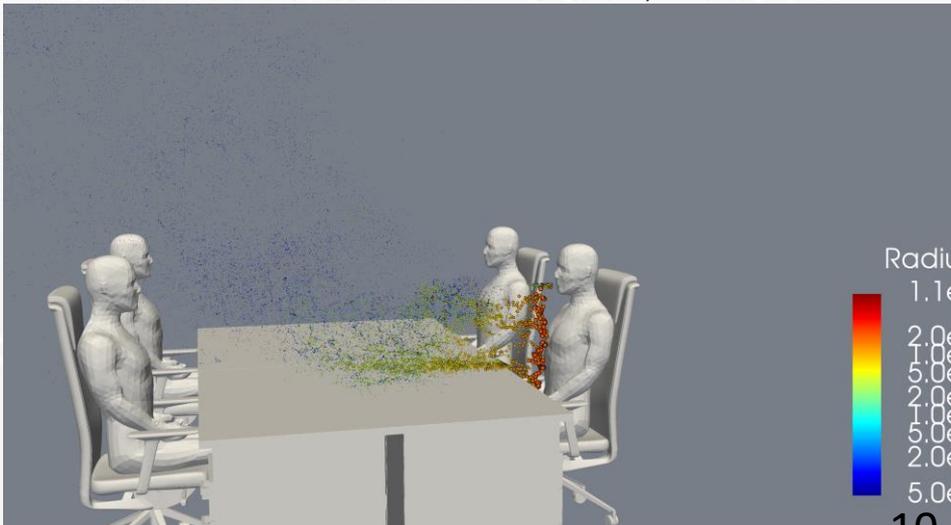
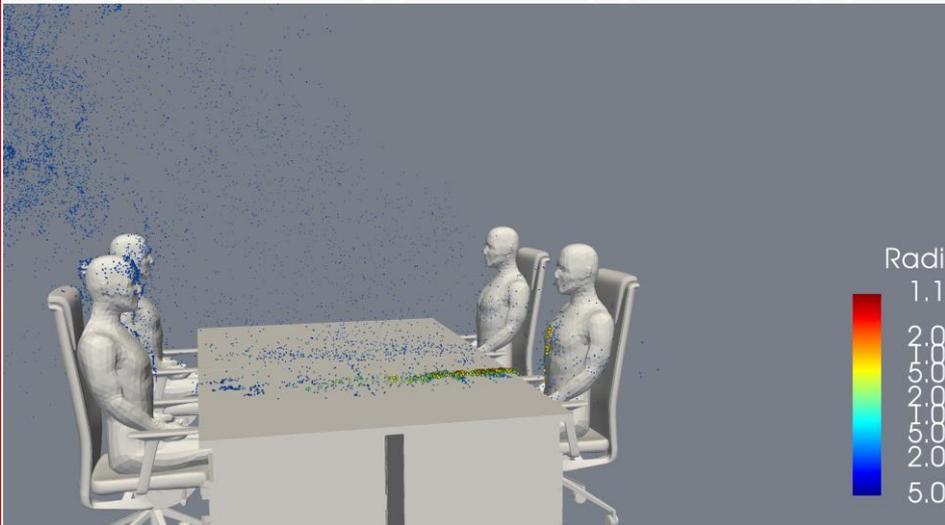
**近距離飛沫感染リスク（咳と発話）**：咳のみならず発話においても飛沫は2m程度飛ぶ。ただし、リスクのほとんどは正面であり、横へのリスクはかなり低い（千鳥配置の有効性を示唆）  
提供：理研・豊橋技科大，協力：京工繊大，阪大



強い咳を2回した場合（50,000個の飛沫）



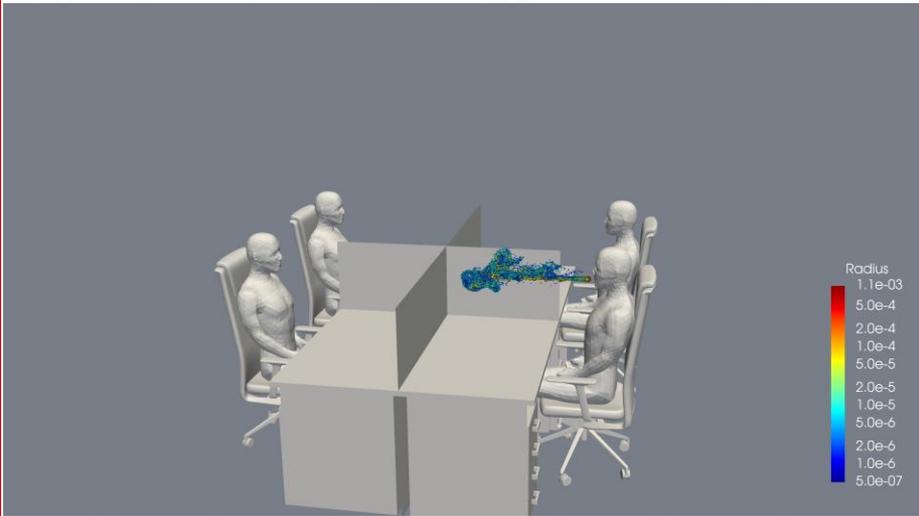
強い口調で1分程度発話した場合（35,000個の飛沫）



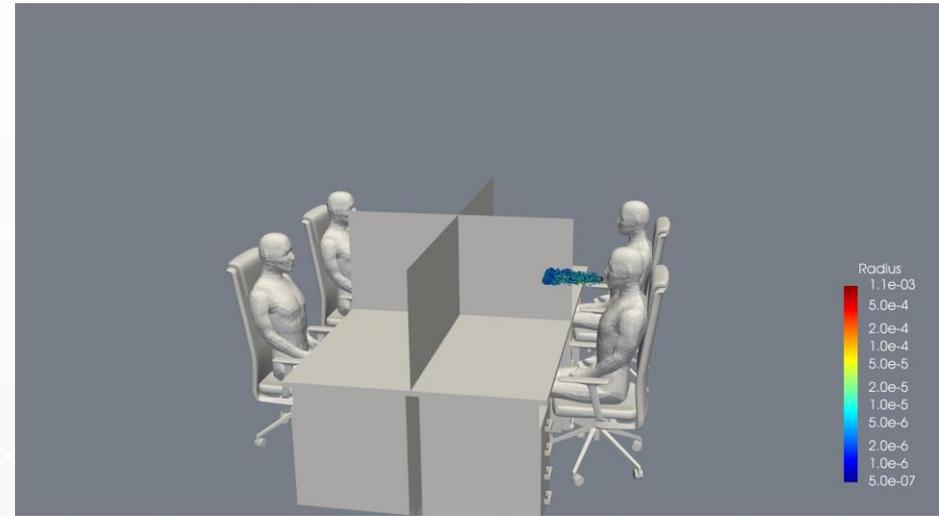
## 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

**近距離飛沫感染リスク（パーティション）**：口より少し高い120cmでは正面へのリスク低減効果は限定的であり，頭の高さ140cmが効果的である．これにより飛沫到達量を1/10以下に低減することができる．ただし空中に飛散するマイクロ飛沫に対しては別の対策が必要．

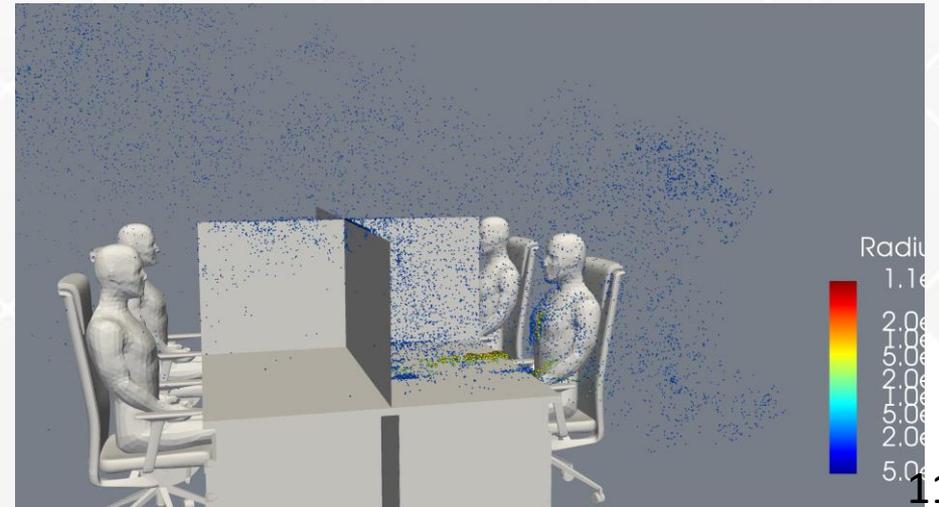
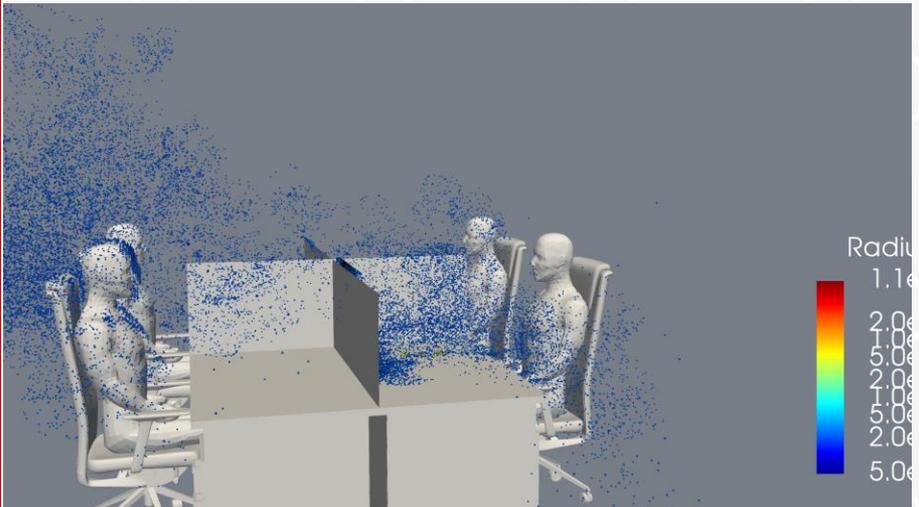
提供：理研・豊橋技科大，協力：京工織大，阪大



咳時パーティション120cm



咳時パーティション140cm



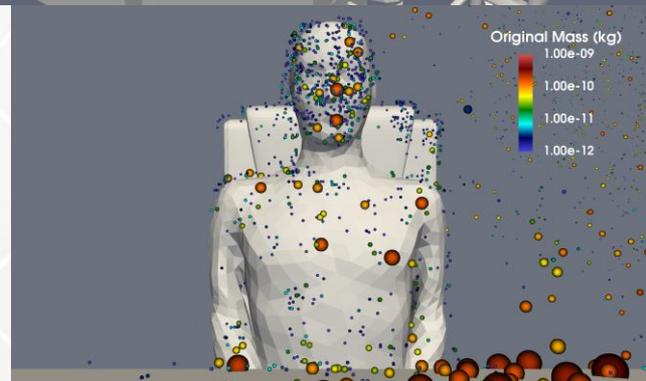
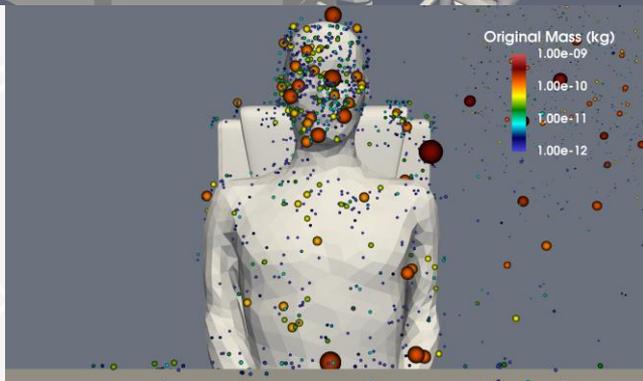
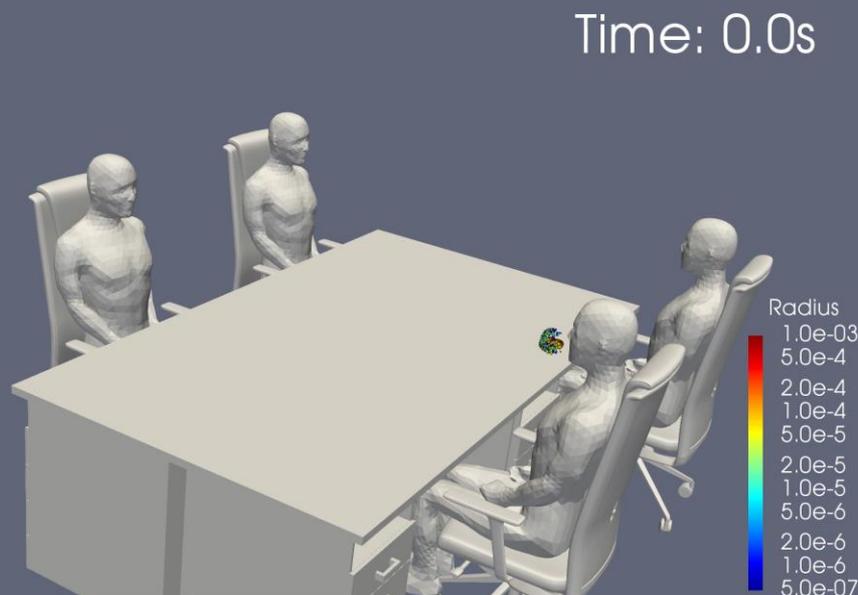
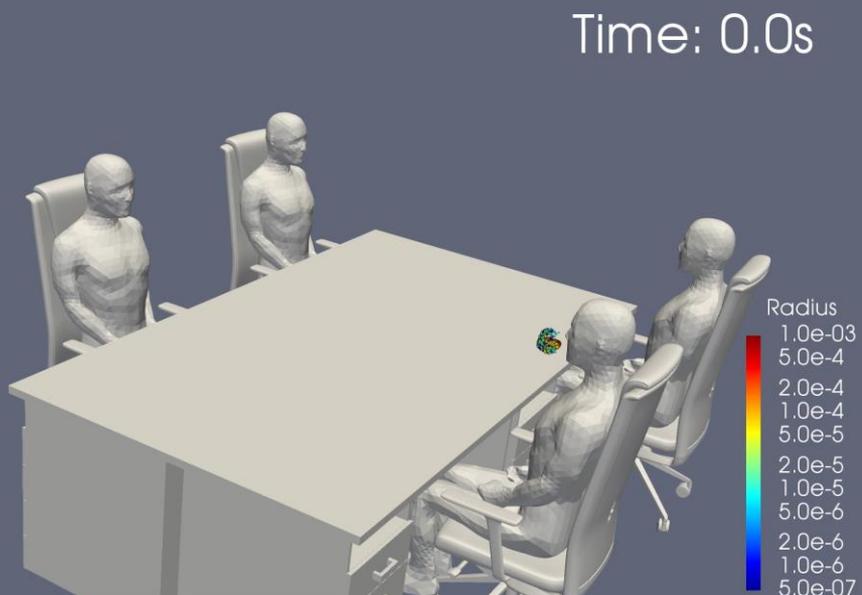
## 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

**近距離飛沫感染リスク（湿度の影響）**：湿度は飛沫の蒸発に大きな影響を与える。高速に蒸発が進む30%では飛沫の机への落下が緩慢になり感染リスクが増加するとともに、より多くのエアロゾルが飛散するため、エアロゾル感染リスクも高くなる。一方、机に付着する飛沫量は90%で増加するため、机を介しての接触感染リスクが高まると考えられる。

提供：理研・豊橋技科大，協力：京工繊大，阪大

湿度30%

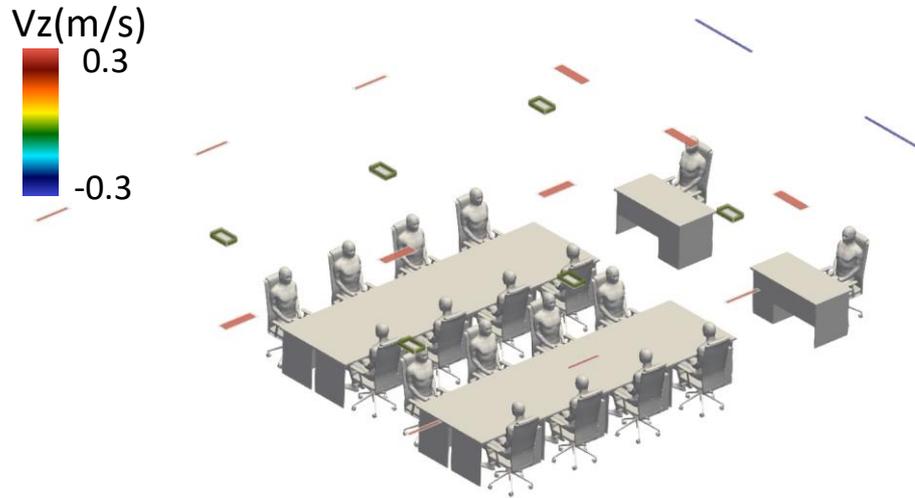
湿度90%



# 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

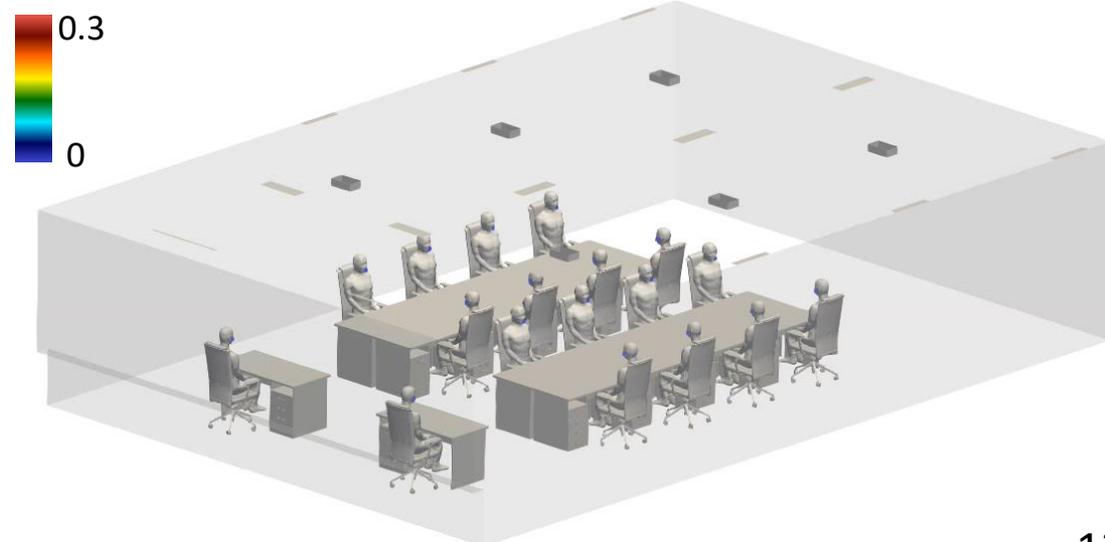
エアロゾル感染リスク評価：窓閉め時のエアロゾル拡散予測（75秒程度）

提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業



室内の気流の様子。床に垂直方向の流速を色で表す。エアコンの他、人体からの発熱が気流の駆動力となっている

仮想粒子を用いたエアロゾル拡散の様子（色はエアロゾルの周囲流速）  
 全ての人の顔付近から仮想的に粒子を飛散させ（マスク時の発話を想定）、室内への飛散を可視化したもの。エアロゾルは広く室内に拡散されると共に、発生個所によって滞留にむらが発生する。



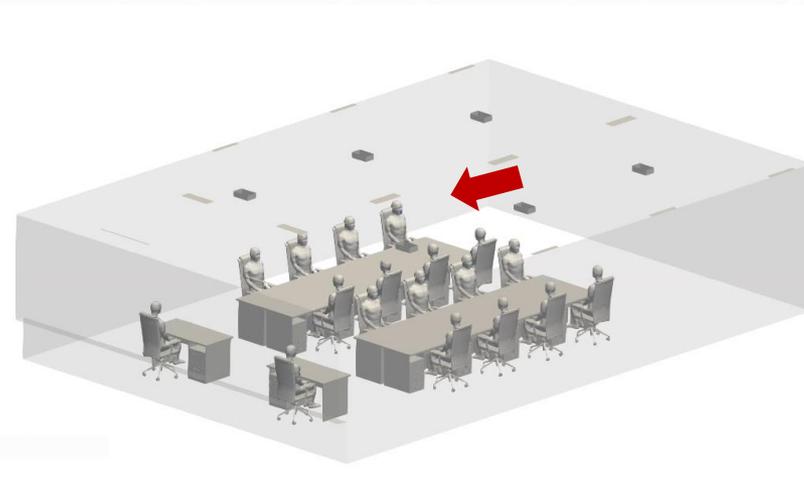
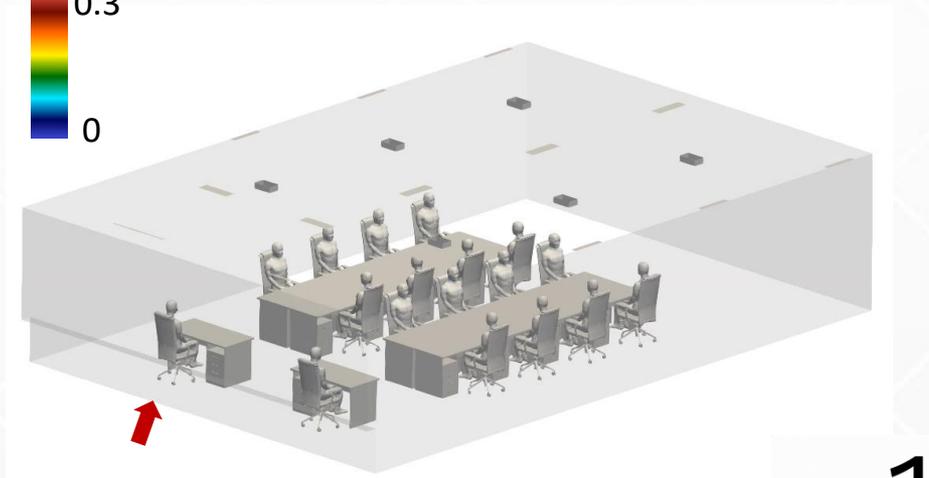
# 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

## エアロゾル感染リスク評価：窓閉め時のエアロゾル拡散予測（75秒程度）

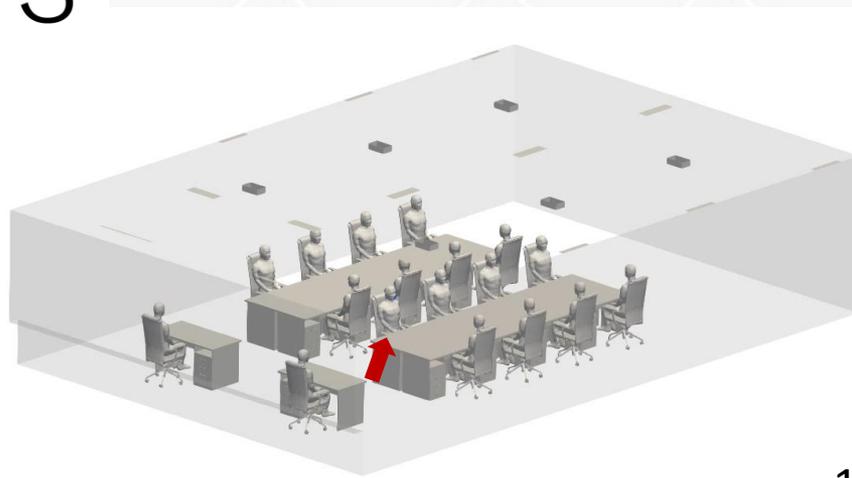
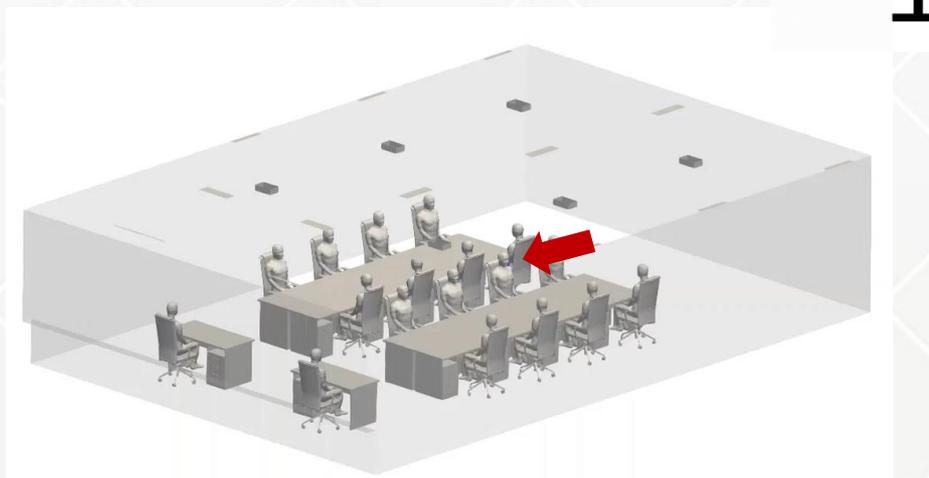
座る場所によるエアロゾル拡散の違い。

提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業

Vmag(m/s)



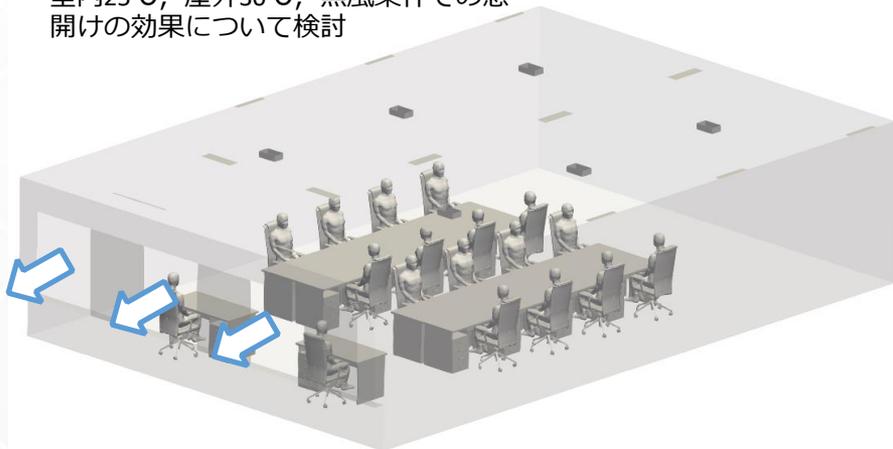
1s



# 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

## エアロゾル感染リスク低減策：窓を開けた際のウイルスエアロゾルの換気の可視化

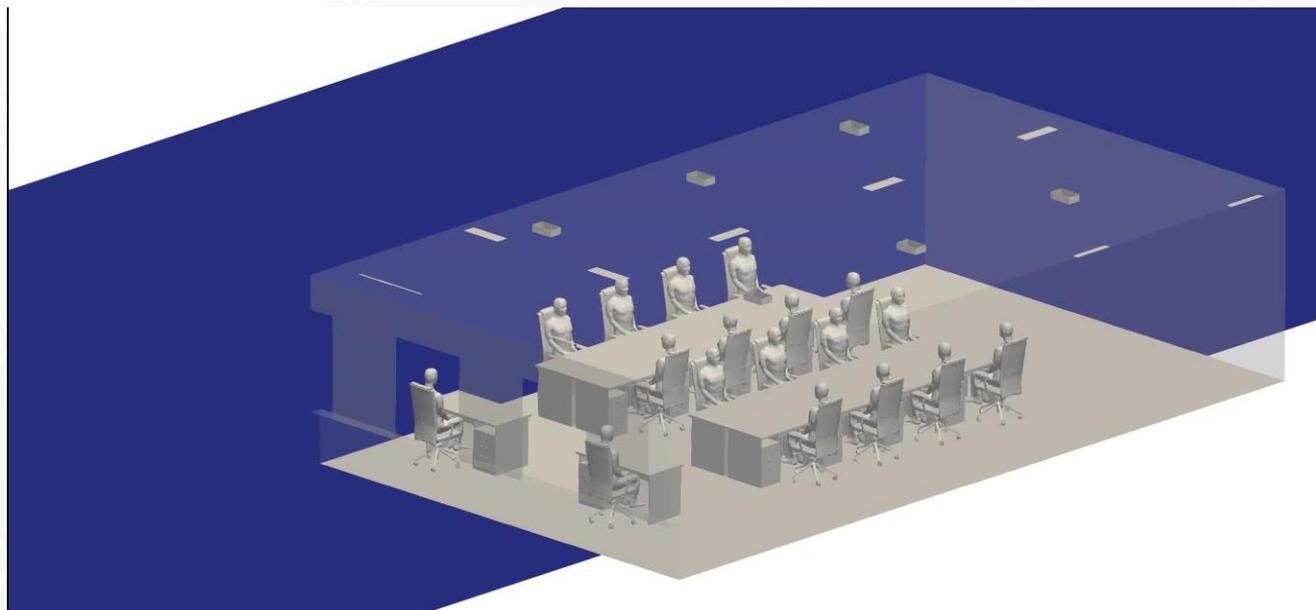
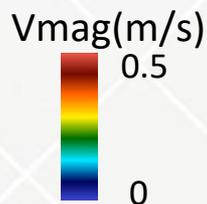
室内25°C，屋外30°C，無風条件での窓開けの効果について検討



夏場や冬場といった外気と室内との温度差がある条件では，片面しか窓が開かなかつたり，外部が無風条件という劣悪な条件でも，室内換気が進む。

室内と屋外の温度差で流れが誘起され換気が進む様子（流れの速さを色で表示，90秒）

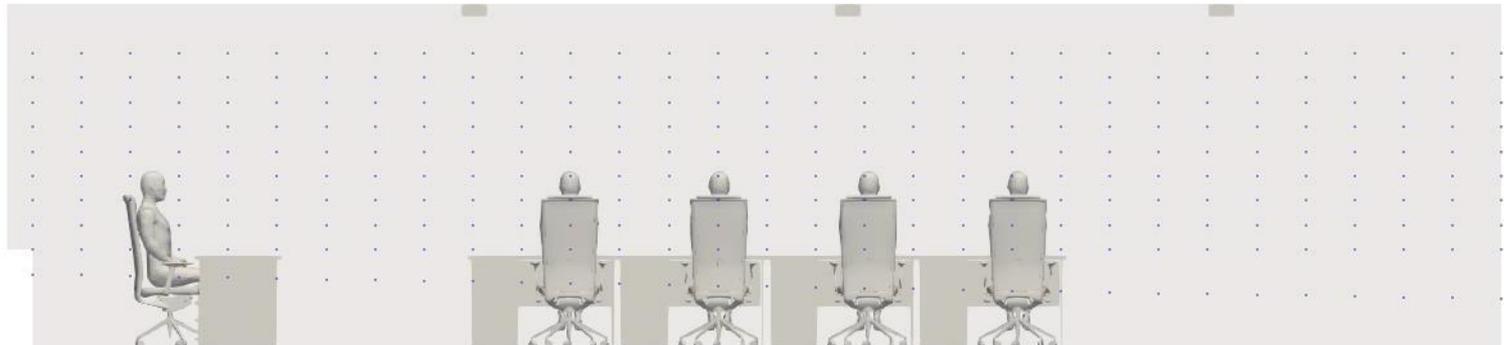
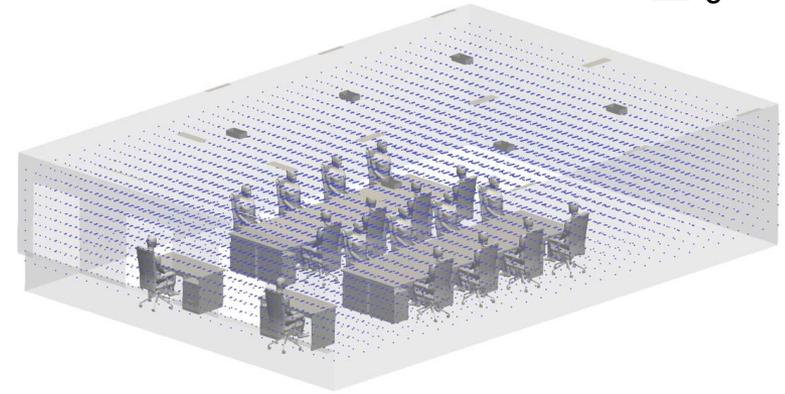
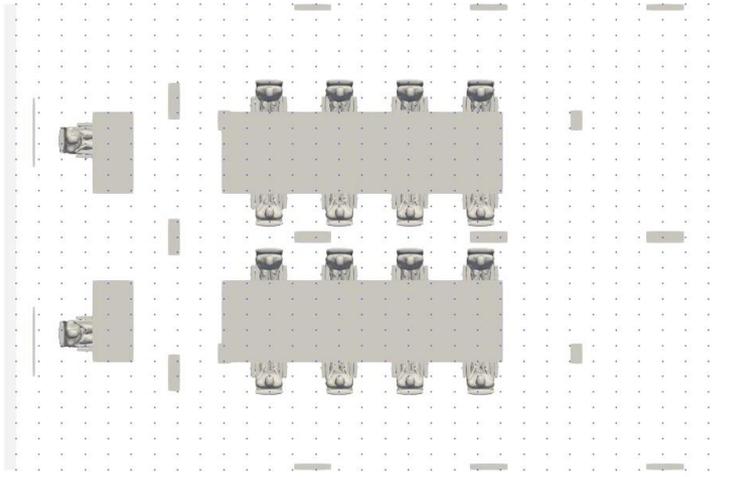
提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業



## 小規模オフィス内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

エアロゾル感染リスク低減策：窓を開けた際のウイルスエアロゾルの換気の可視化（90秒）  
空間に仮想的なエアロゾル粒子を配置し，その挙動を可視化

Vmag(m/s)  
0.5  
0



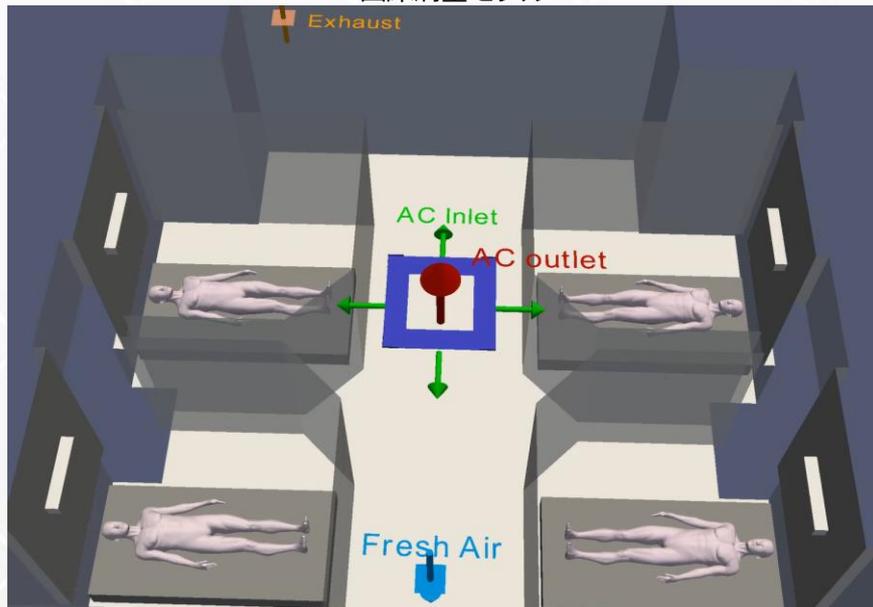
## 病室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

### 実施内容:

一般病室内での、飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行っている。一般の病室では、各種法令により一定基準を満たした外部空気との換気がなされている。しかし室内の流れは一様ではなく換気効率の「むら」も発生する。エアコン運転と窓の開閉による換気がリスク低減に与える影響を検討することで、その低減対策について提案を行う。特に即効性のある対策としてサーキュレーターや扇風機等の活用による、リスク低減に効果的な空気の流れを誘起する方法を提案すると共に、長期的には病室設備のより効果的な配置や換気装置の設置についても検討を行う。

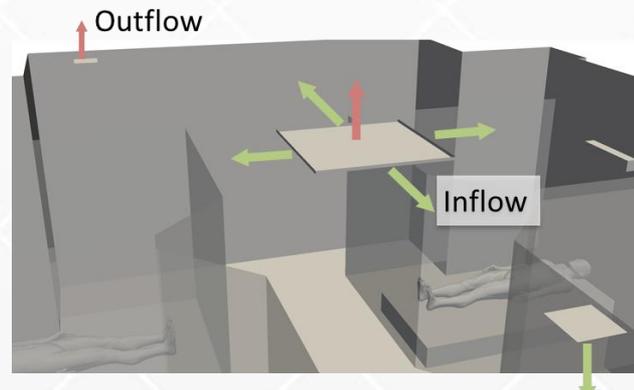
提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設，阪大

四床病室モデル



体温：34℃，室温：24℃，湿度：60%

空調運転条件



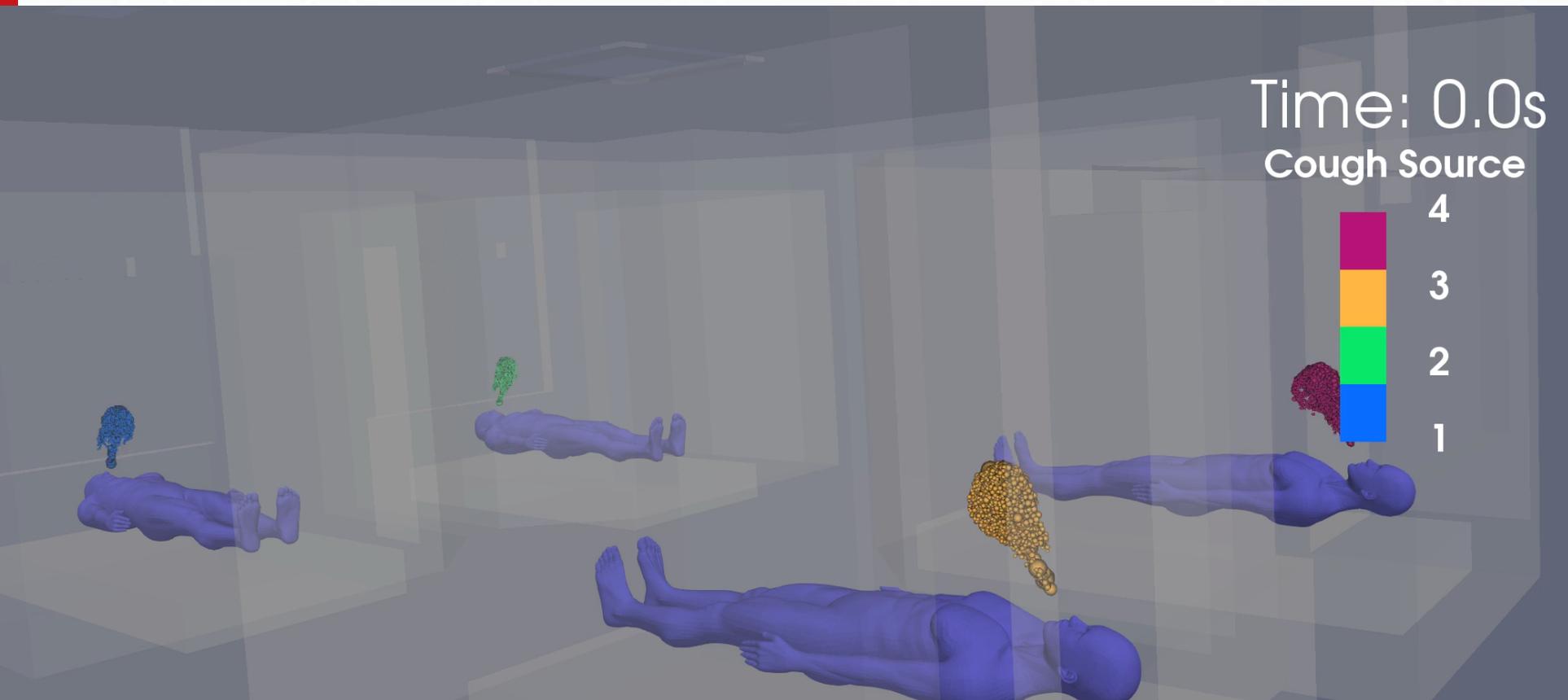
		吹出角度	ユニット数	ユニット流量	総流量	外部換気
中央力セット	In	-30°	4	202.5m <sup>3</sup> /h	810m <sup>3</sup> /h	0m <sup>3</sup> /h
	Out	+90°	1	-810m <sup>3</sup> /h	-810m <sup>3</sup> /h	
換気口	In	-90°	1	200m <sup>3</sup> /h	200m <sup>3</sup> /h	200m <sup>3</sup> /h
	Out	+90°	1	-200m <sup>3</sup> /h	200m <sup>3</sup> /h	

エアコンは外部換気無し。換気口により外部換気

## 病室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

**エアコンオフ時の飛沫の飛散**：エアコンをオフにした状態で，仮想的に四名の患者が同時に咳をした場合を想定．飛沫のサイズは1ミクロン～数百ミクロンで大きさで表示．色は各患者．数十ミクロン以上の大きな飛沫は仕切りカーテンの中に落下・付着する．一方小さな飛沫は天井に到達し，隙間を経て室内に拡散する．

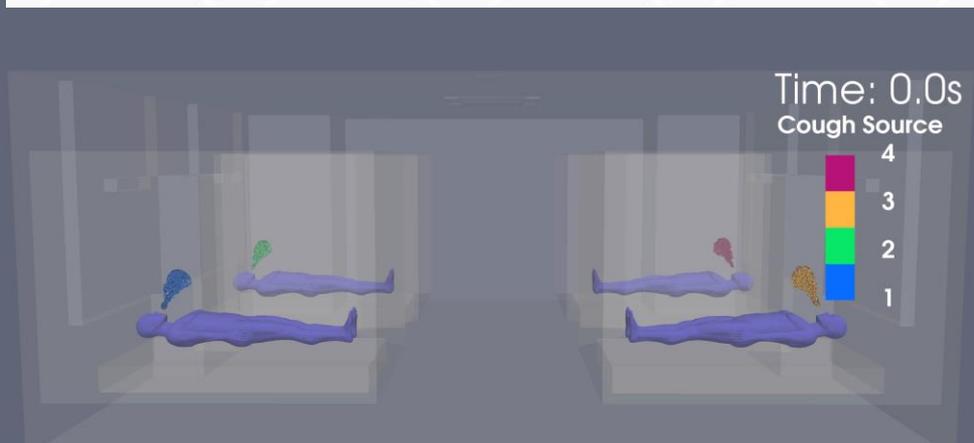
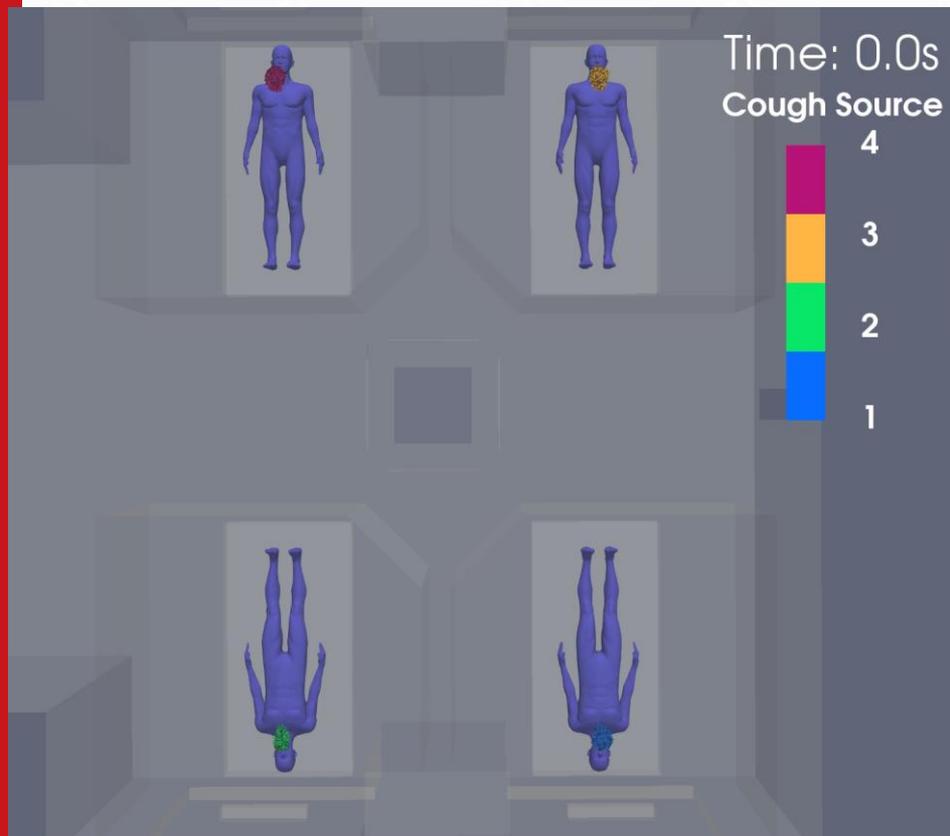
提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設，阪大



## 病室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

**エアコンオフ時の飛沫の飛散**：エアコンをオフにした状態で、仮想的に四名の患者が同時に咳をした場合を想定。飛沫のサイズは1ミクロン～数百ミクロンで大きさで表示。色は各患者。数十ミクロン以上の大きな飛沫は仕切りカーテンの中に落下・付着する。一方小さな飛沫は天井に到達し、隙間を経て室内に拡散する。天井近くに飛散し、仕切りカーテンの外に漏れ出たエアロゾルについてはエアコンによる循環により拡散させると共に、換気口や窓開けを通しての換気が重要であることが示唆される。  
(天井とカーテンの隙間は50cm)

提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設，阪大



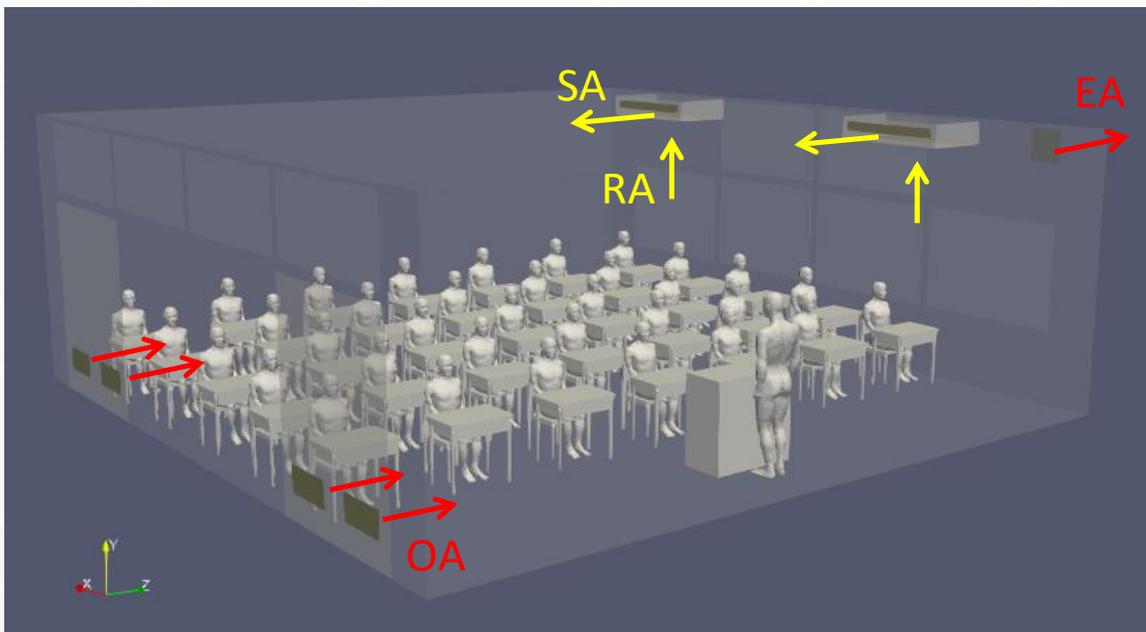
# 教室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

## 実施内容:

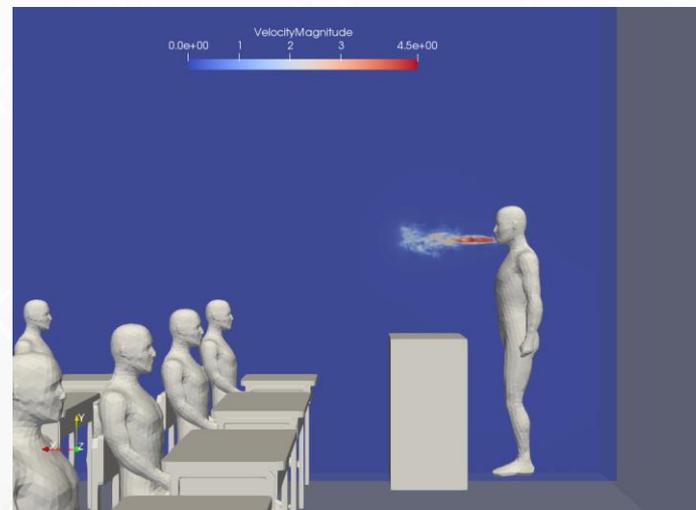
教室を対象に飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行っている。まずは通常エアコン運転/停止時における授業中（先生がマスク有/無での発話）の感染リスク評価を行う。その後、換気扇や窓開放による換気効率の定量評価を行い、改善策を提案する。

提供：京工繊大，協力：神戸大，鹿島建設，理研

公立学校モデル（生徒35人）

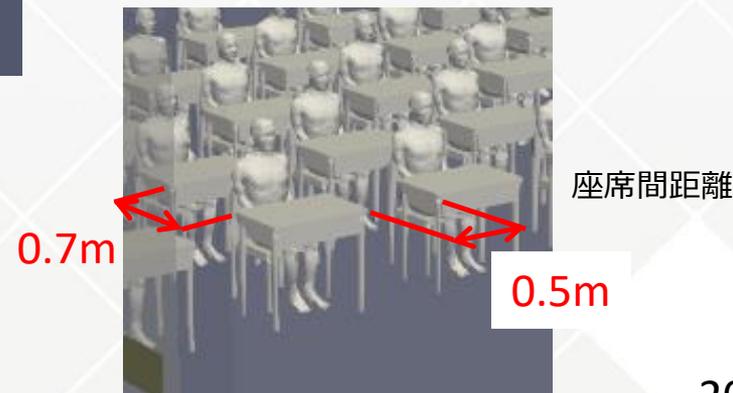


発話による飛沫モデル（マスク有/無）



外付けエアコン2機（SA, RA）+換気扇（EA）+換気口（OA）

	吹出/吸込個数	吹出/吸込風速 (m/s)	合計風量 (m <sup>3</sup> /h)
SA	2	2.61	2160
OA	4	0.40	800
RA	2	-0.87	-2160
EA	1	-1.81	800



## 教室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

### 計画:

教室用計算モデルの作成と、計算環境の構築が完了し、現在、富岳を用いた室内流れ計算を実施中。同時に先生の授業（発話）による飛沫の飛散経路予測も進めている。  
今後、窓開け換気による効果について検討を行っていく。

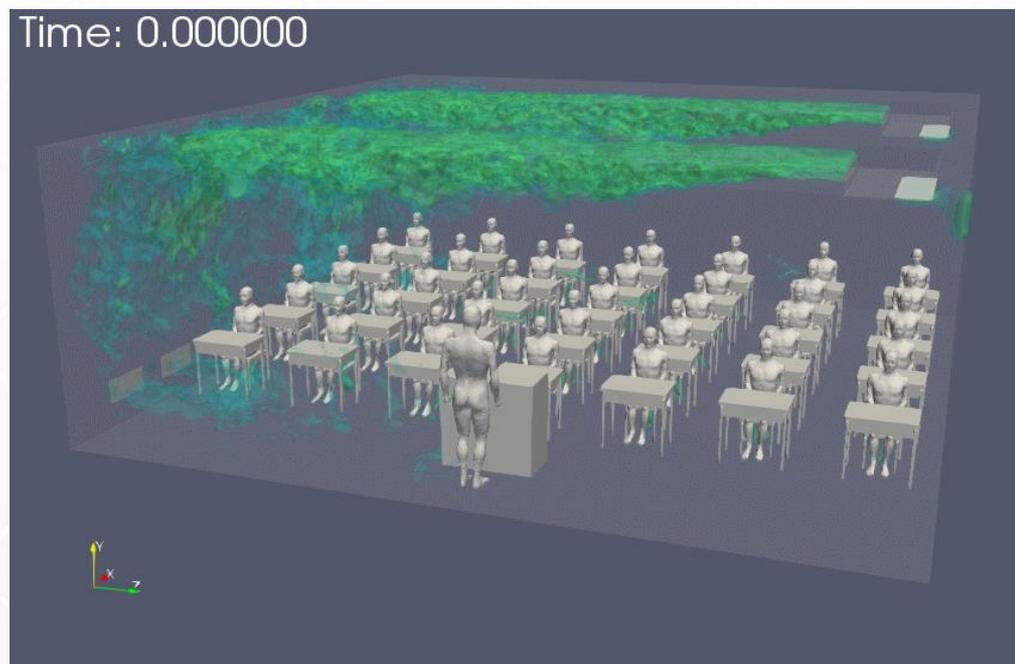
### 感染リスク評価

- (1) 窓閉エアコン運転／停止時の飛沫飛散状況
- (2) 窓・扉開放による換気効率評価と飛沫削減
- (3) 教室内のウイルス飛沫の淀み箇所の把握

### 設備改善を含めた対策提案

- (1) 窓開放とエアコンの組み合わせによる効果的換気法の提案
- (2) 窓開放と簡易追加設備（サーキュレータ等）の組み合わせによる換気法の提案
- (3) 密室時エアコン運転による効果的なウイルス飛沫捕集（冬場想定）

エアコン運転時の教室内流れ（速度の等値面0.3m/s）



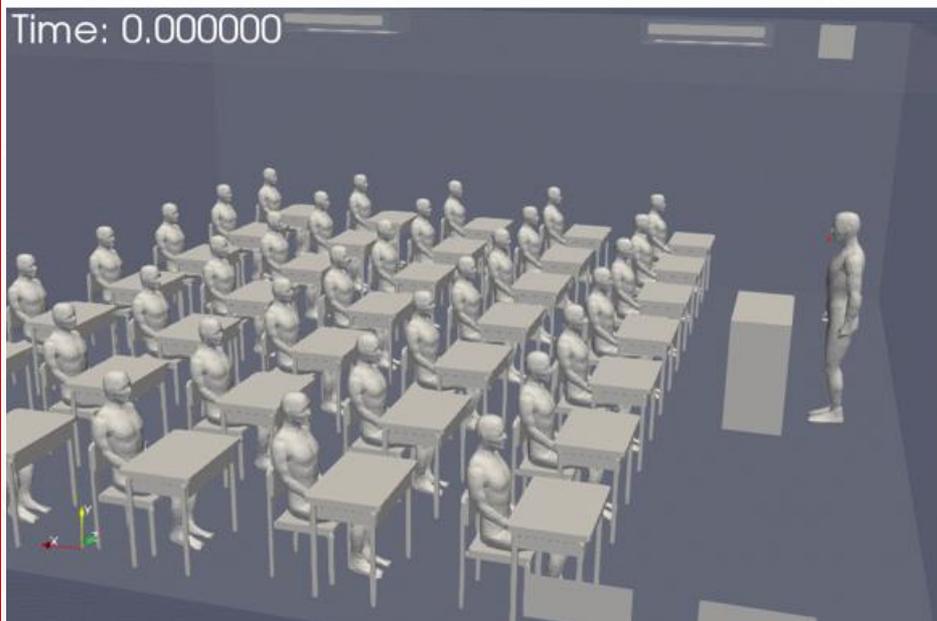
提供：京工織大，協力：神戸大，鹿島建設，理研

## 教室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

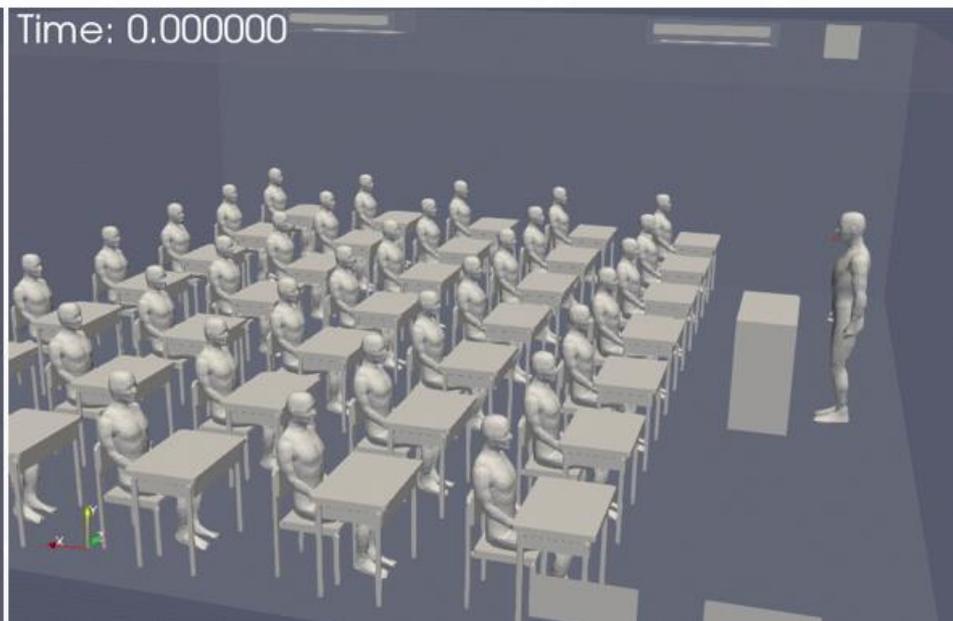
### 1. 授業中（教師の発話）における感染リスクの評価（エアコン無し）

マスクの有無によるウイルス飛沫の状況を比較し、マスクの効果について教室レベルでの評価を行う

提供：京工織大，協力：神戸大，鹿島建設，理研



マスク無で授業



マスク有で授業

- 飛沫については質量無し簡易モデルを使用のため、実際より飛距離は長くなっています。
- 飛沫量はマスク有無で同数を飛ばしています。

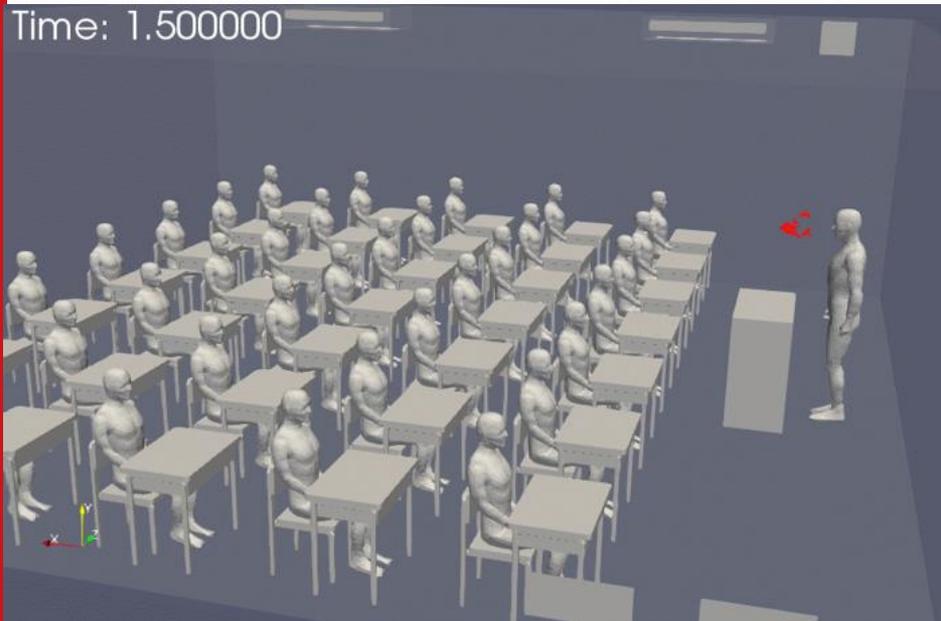
**【本シミュレーション動画については、より正確な結果が出たのち、改めてご提供いたします】**

## 教室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

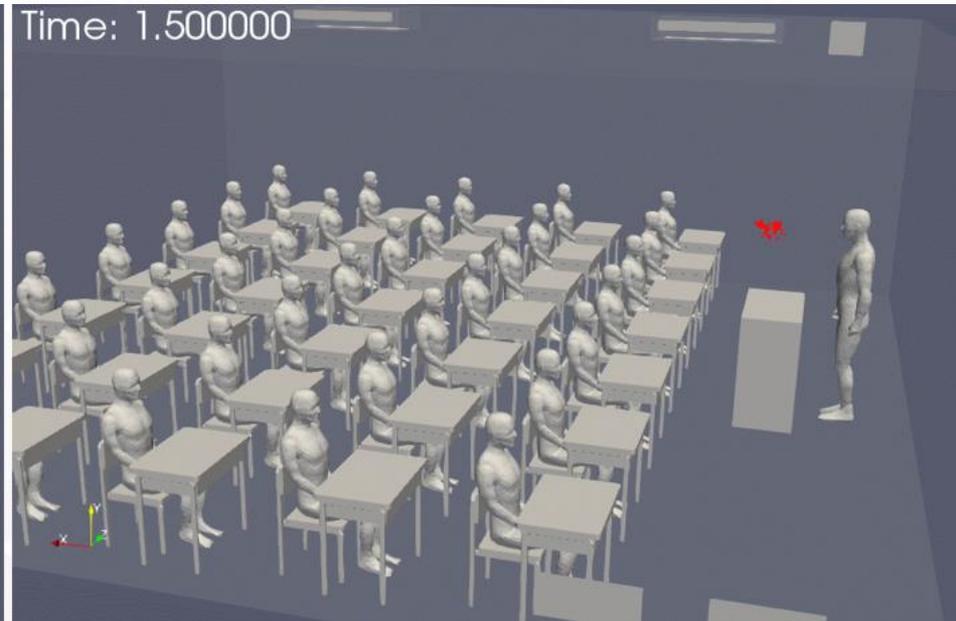
### 2. エアコンの運転/停止による飛沫飛散状況の評価 (マスク有)

エアコンの運転・停止のよりマスクを着用した教師が授業を行った場合の飛沫状況の違いを調査する

提供：京工織大，協力：神戸大，鹿島建設，理研



エアコン運転 (50%の出力)



エアコン停止

- 飛沫については質量無し簡易モデルを使用のため、実際より飛距離は長くなっています。  
【本シミュレーション動画については、より正確な結果が出たのち、改めてご提供いたします】

## 教室内の飛沫・エアロゾル感染リスク評価と対策

### 今後:

#### 感染リスク評価

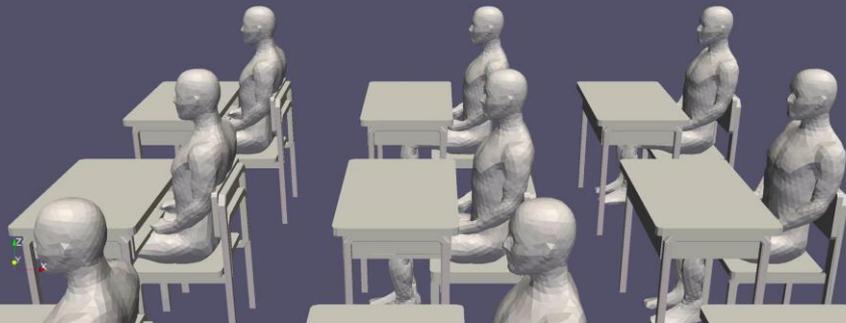
- (1) 窓閉エアコン運転／停止時の飛沫飛散状況
- (2) 窓・扉開放による換気効率評価と飛沫削減
- (3) 教室内のウイルス飛沫の淀み箇所の把握

#### 設備改善を含めた対策提案

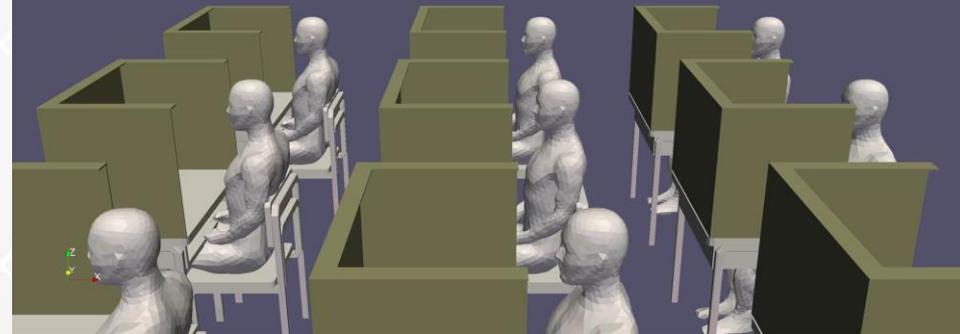
- (1) 窓開放とエアコンの組み合わせによる効果的換気法の提案
- (2) 窓開放と簡易追加設備（サーキュレータ等）の組み合わせによる換気法の提案
- (3) 密室時エアコン運転による効果的なウイルス飛沫捕集（冬場想定）
- (4) 仕切り板による近距離飛沫感染リスクの低減策

提供：理研，協力：京工遷大・豊橋技科大

座高80cm程度高学年モデル



卓上高さ49cm仕切り板



## 配布資料の利用に関するお願い

本資料に含まれる図やアニメーションについては、研究の主旨に沿った報道であれば自由に用いて頂いてかまいません。ただし媒体名と企画内容などについて、予め理研計算科学研究センター広報申請フォーム (<https://krs2.riken.jp/m/fugaku-corona-dl>) にて申請願います。

その他、取材については理研計算科学研究センター広報 ([r-ccs-koho@ml.riken.jp](mailto:r-ccs-koho@ml.riken.jp)) までお願いいたします。

理研計算科学研究センター チームリーダー  
神戸大学システム情報学研究科 教授  
坪倉 誠

坪倉 誠 の所属表記は 下記のように併記をお願いします。

- ・理研計算科学研究センター チームリーダー／神戸大学システム情報学研究科 教授
- ・理研チームリーダー／神戸大学教授
- ・理化学研究所チームリーダー／神戸大学教授

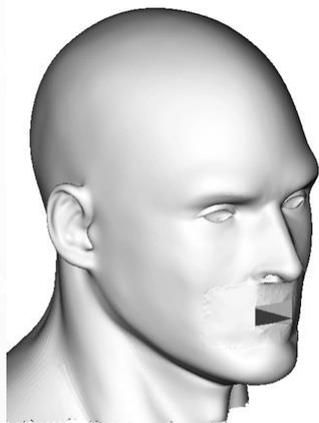
# 付録

## マスクの効果について

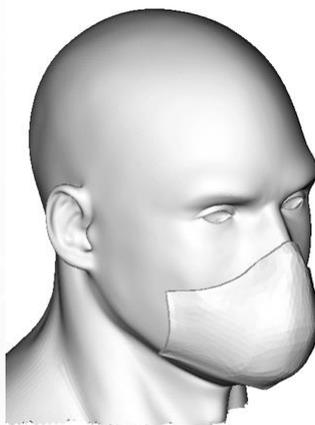
### 咳混んだときの空気の流りの様子

提供：理研・豊橋技科大，協力：京工織大，阪大

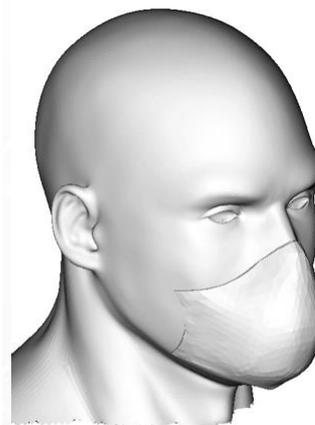
マスク無し



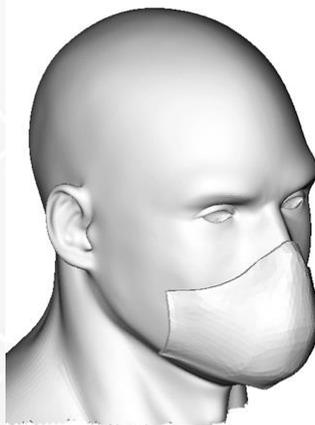
不織布マスク  
隙間あり



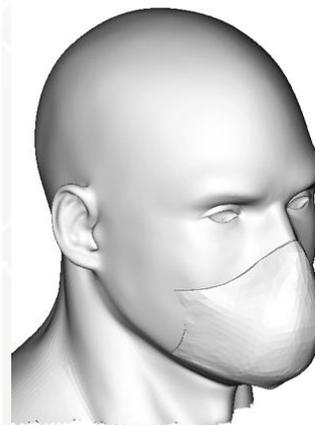
不織布マスク  
隙間なし



布マスク  
隙間あり



布マスク  
隙間なし



マスクには飛沫吸着効果のみならず，気流抑制による飛沫飛散抑制効果も高い。ただし顔とマスクとの隙間によりかなりの空気の漏れがあり，エアロゾル感染リスク低減の観点からはしっかりした装着が重要。