

室内環境におけるウイルス飛沫感染 の予測とその対策

課題責任者

理化学研究所／神戸大学 坪倉 誠

謝辞

本研究は以下の支援を受けて行っている。ここに謝意を表する。

「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について」（文部科学省/理研）

「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）

おねがい

本資料に含まれる図やアニメーションは、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。ただし利用する際は、媒体名と企画内容について、予め**理研計算科学研究センター広報申請フォーム**にて申請願います。

<https://krs2.riken.jp/m/fugaku-corona-dl-0824>

また、本研究に関する取材については、**理研計算科学研究センター広報**まで連絡をお願いします。

<https://krs2.riken.jp/m/media-form>

坪倉 誠 の所属表記は 下記の例のように理研と神戸大を併記するようお願いします。

(例)

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

研究の概要

- ウイルス飛沫・エアロゾル感染の予測とその対策提案をシミュレーションを用いて行う。
- 公共施設（オフィス，教室，病室等）や公共交通機関（通勤電車，バス，航空機等）等の室内環境を想定する。
- 目に見えない飛沫を可視化し，社会に発信することで，飛沫・エアロゾルに対する正しい理解とリスク認知，感染予防の啓発を行う。

本日の内容

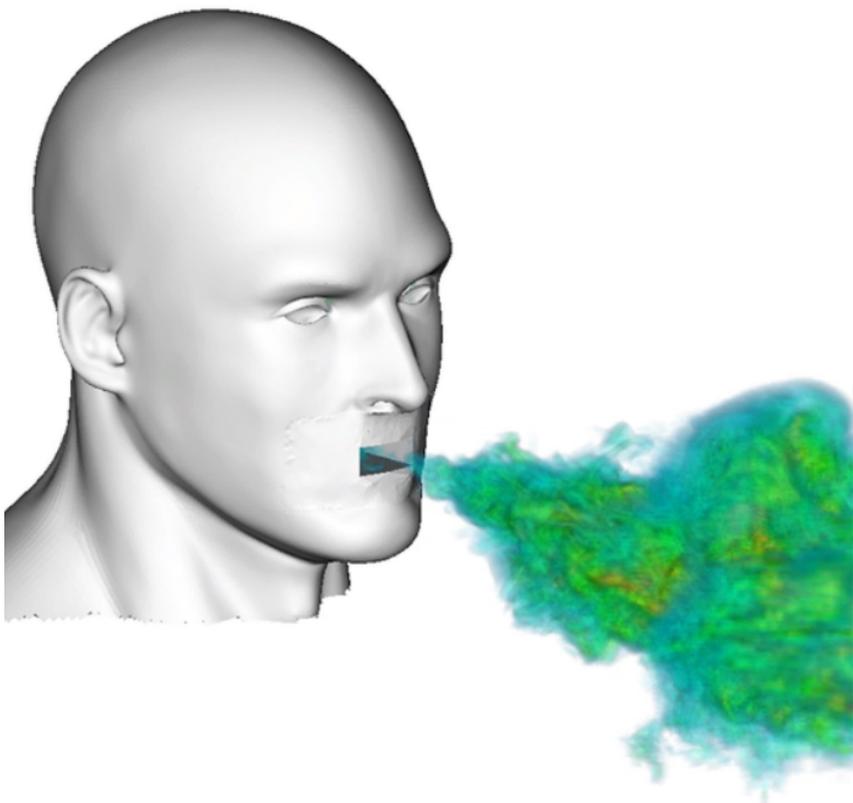
- マスク性能評価
- 病室
- オフィス
- 教室
- 多目的ホール

マスクの効果

実施内容

- 飛沫・エアロゾル感染リスクを低減するためのマスク等の効果に関する評価を行う。マスクの素材による影響の他、フェースガードによる代替効果やマスクの被感染リスク低減効果についても検討を行う。

マスク非着用時の空気の流れ



マスク着用時の空気の流れ



マスクの効果

提供：理研・豊橋技科大・神戸大，協力：京工織大・阪大・大王製紙

不織布マスクと手作り布マスクの比較

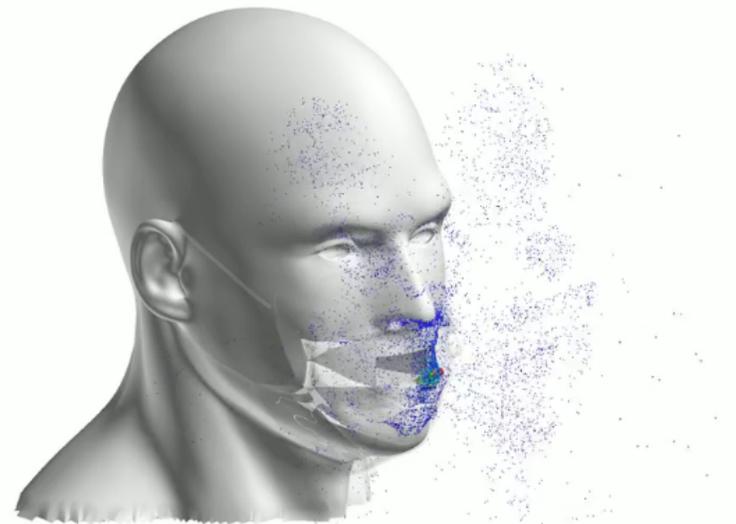
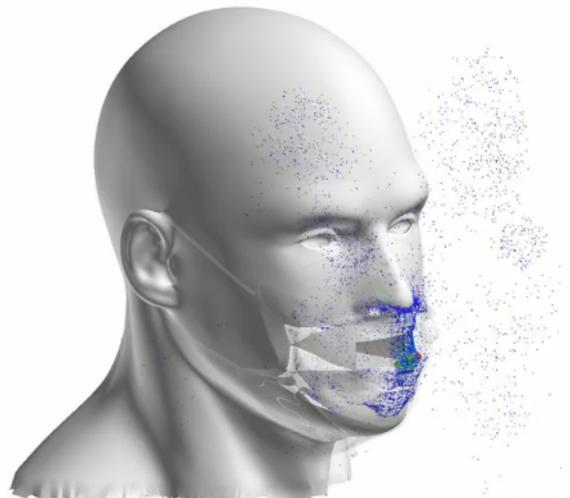
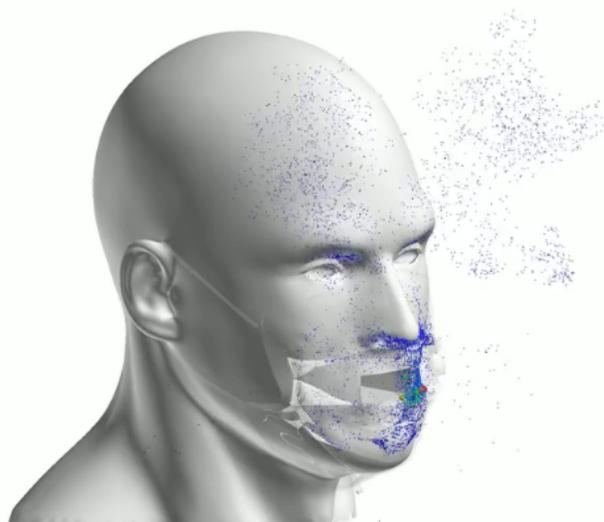
- マスクの素材の違いによる飛沫抑制効果について調べる（鼻まで覆われています）

不織布マスク

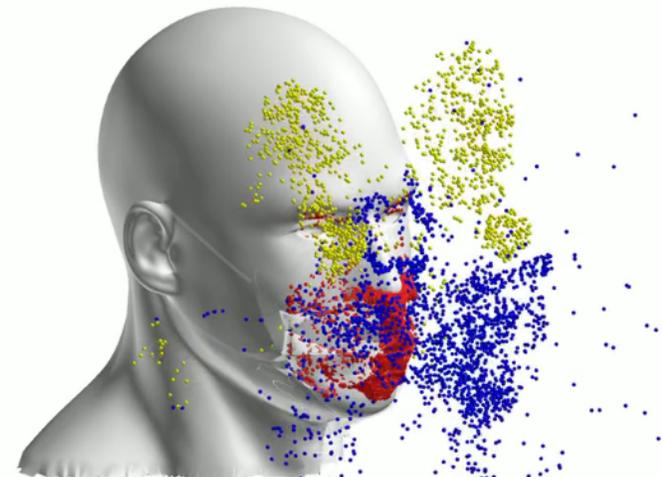
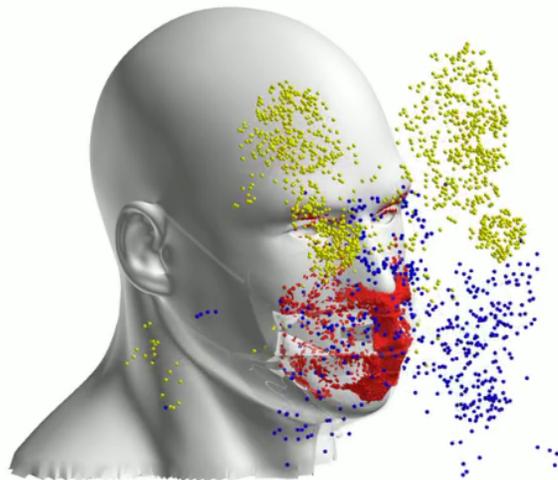
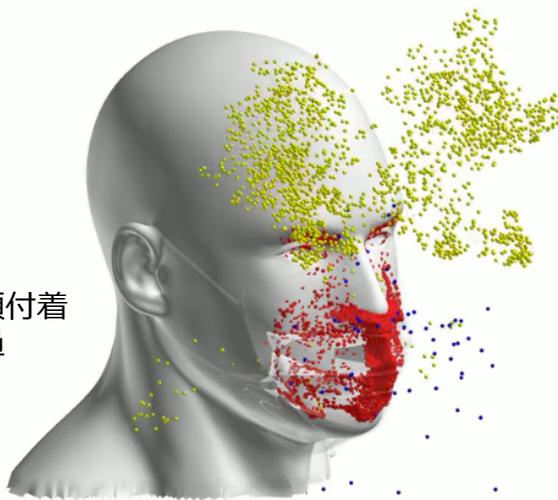
手作り布マスク（ポリエステル相当）

手作り布マスク（綿相当）

色は粒径



黄：隙間放出
赤：マスク・顔付着
青：マスク透過



不織布マスクと手作り布マスクの比較

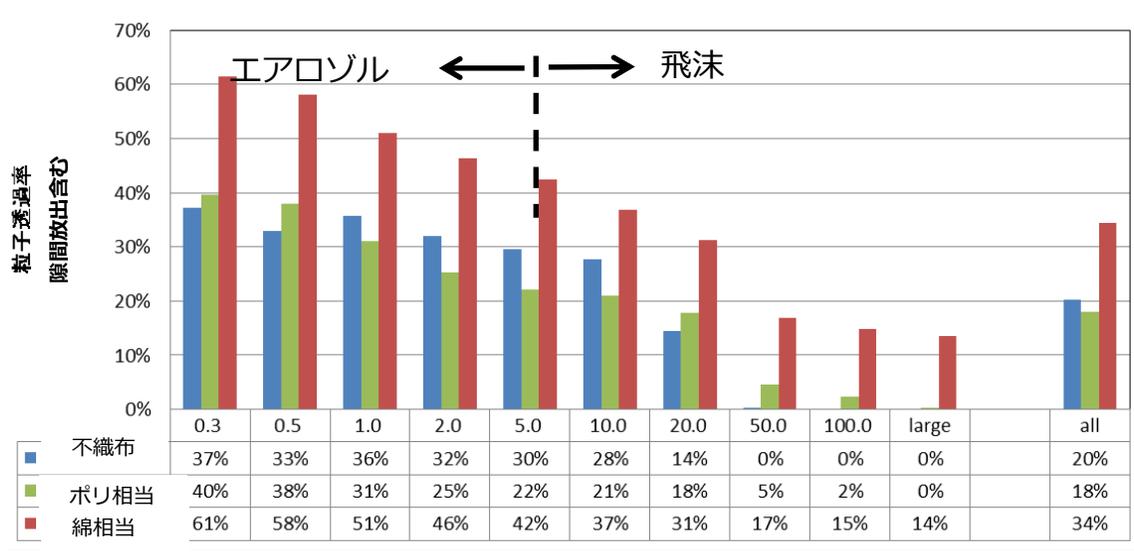
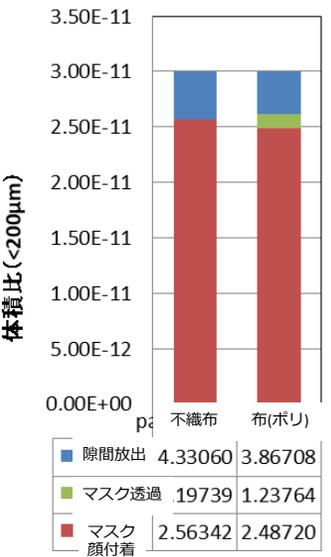
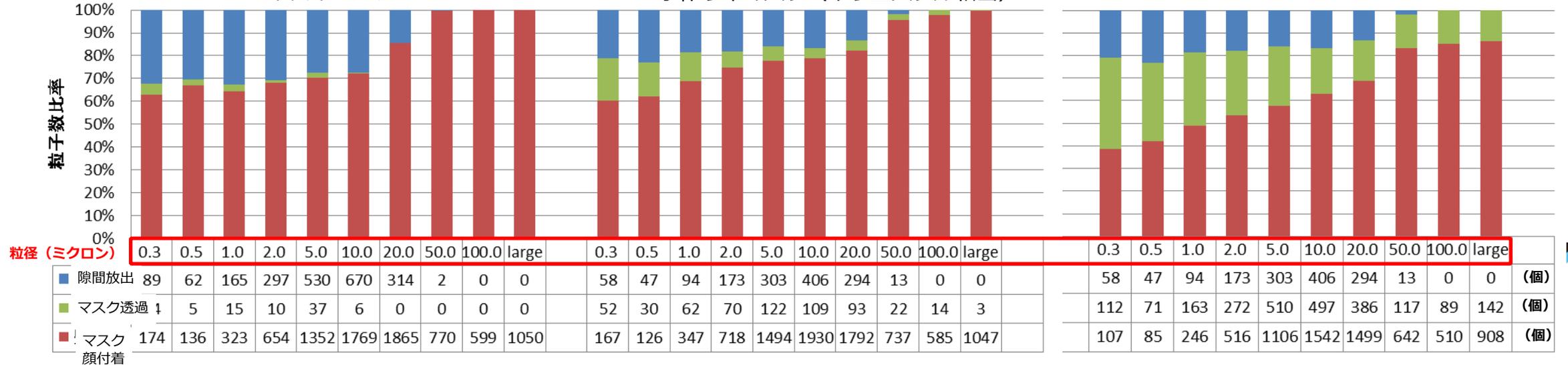
- 粒径ごとのマスク透過率

マスクの効果

不織布マスク

手作り布マスク (ポリエステル相当)

手作り布マスク (綿相当)

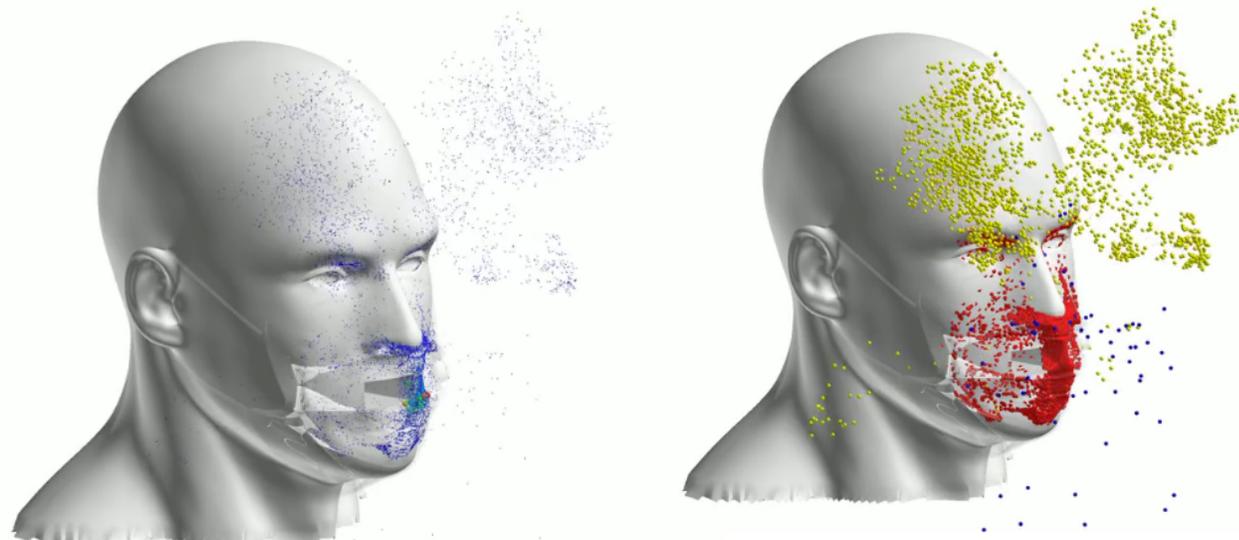


- 不織布の方が手作りマスクより、飛沫の粒子数でみた場合の全般的な性能 (赤) は高い。ただし飛沫の体積で見るとどちらも8割の飛沫が捕集されており、布マスクでもリスク低減効果は期待できる。
- 布マスクは不織布マスクより空気抵抗が少なく、その分マスクのフィルタ部分に入る (緑・赤) する粒子も多い。一方、不織布マスクはフィルタの空気抵抗が大きいいため、隙間からの漏れが多い。
- 両者ともエアロゾル粒子は全体の約40~50%程度が漏れる。

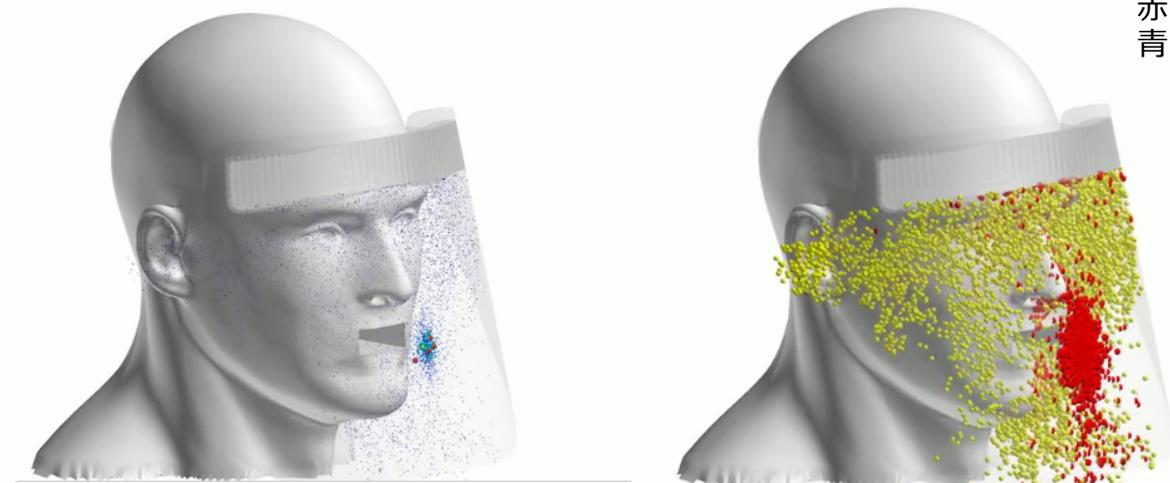
フェースシールドの飛沫飛散防御効果

- マスクに対して、フェースシールドによる飛沫飛散抑制の代替効果について調べる（鼻まで覆われています）

不織布マスク

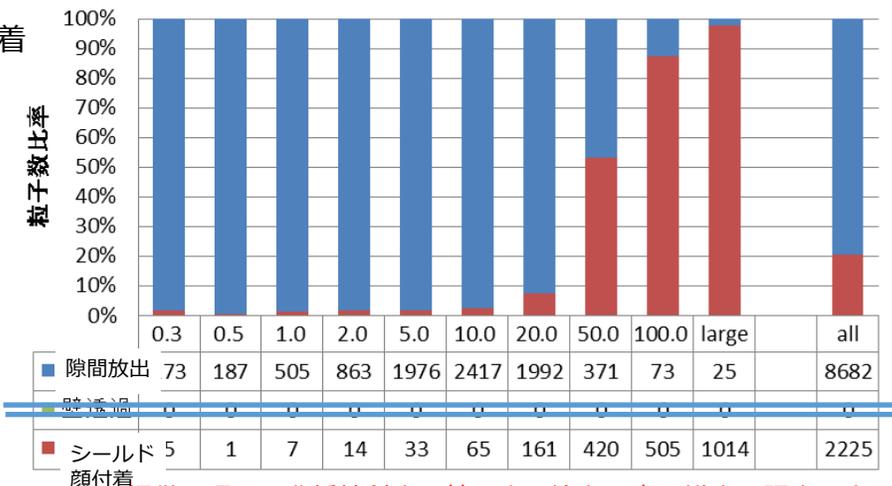
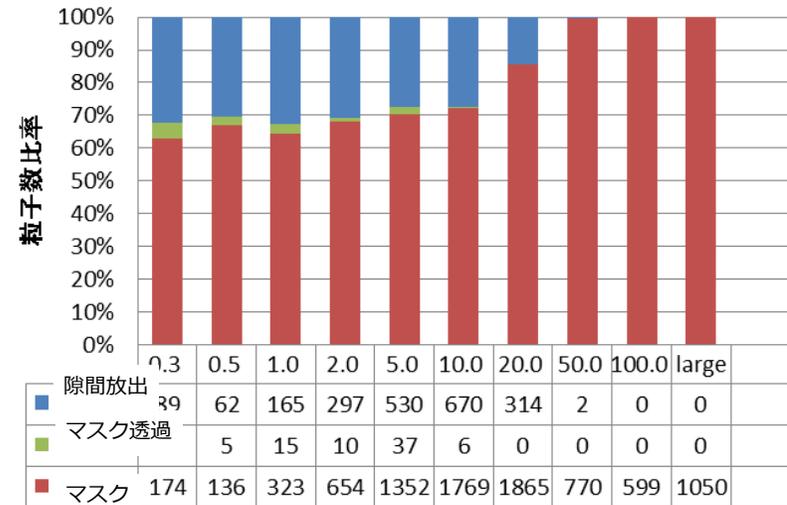


フェースシールド



黄：隙間放出
赤：マスク・顔付着
青：マスク透過

- 50ミクロン以上の大きな飛沫については捕集効果は見込めるが効果は限定的である。エアロゾルについてはほぼ漏れている。

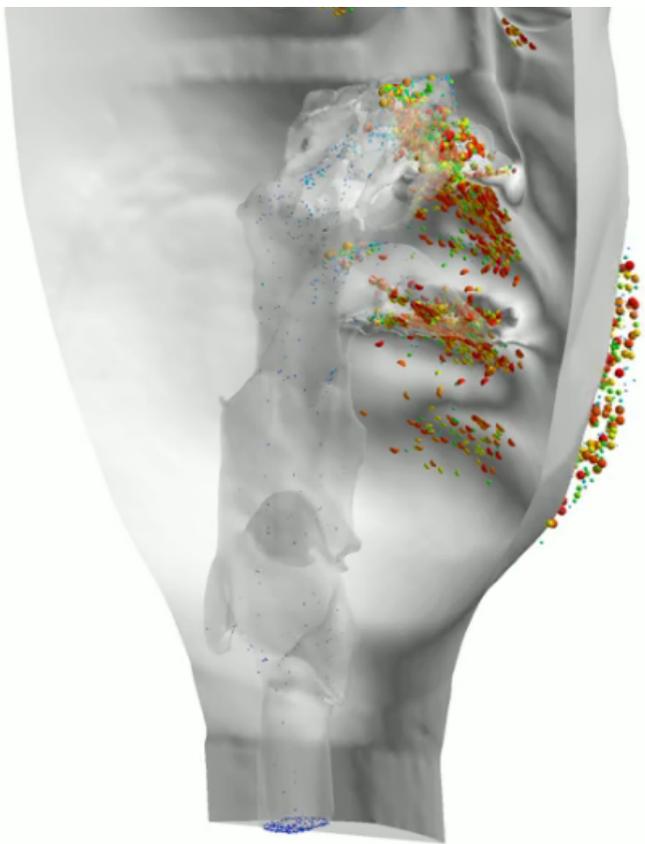


マスクの効果

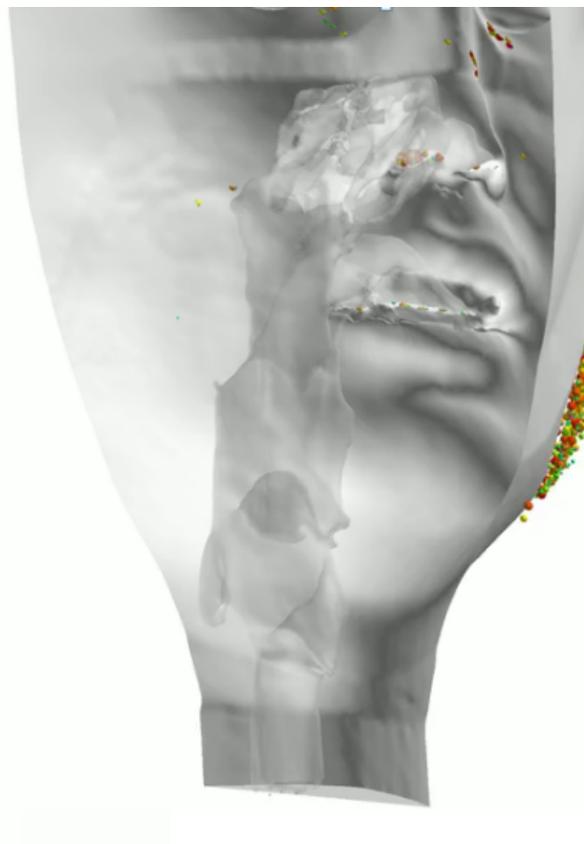
マスクによる被感染防御効果について

- 人の上気道をモデル化，深呼吸時にどの程度の飛沫が上気道に取り込まれるかを評価する。
- 鼻と口で同時呼吸を想定。

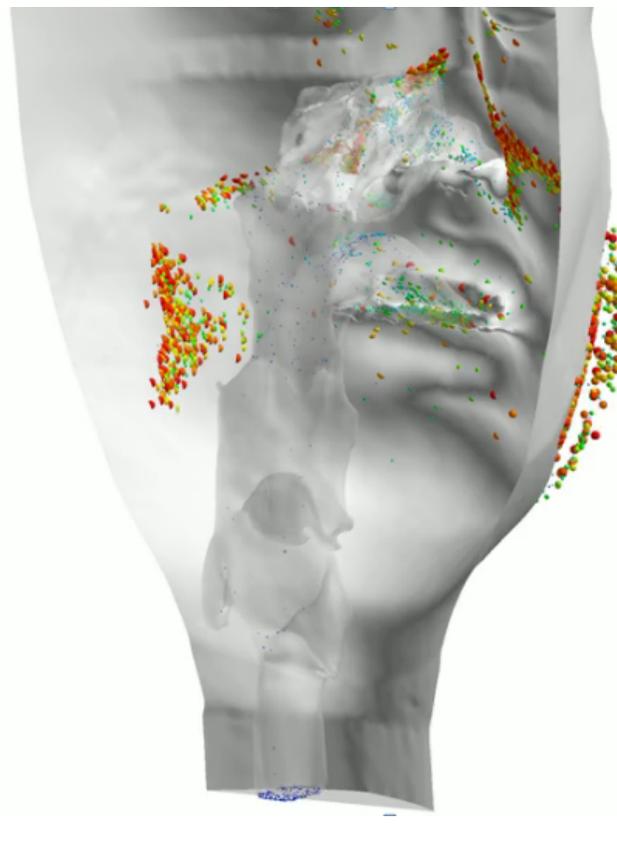
マスク無し



不織布マスク（密着）



不織布マスク（顔隙間あり）

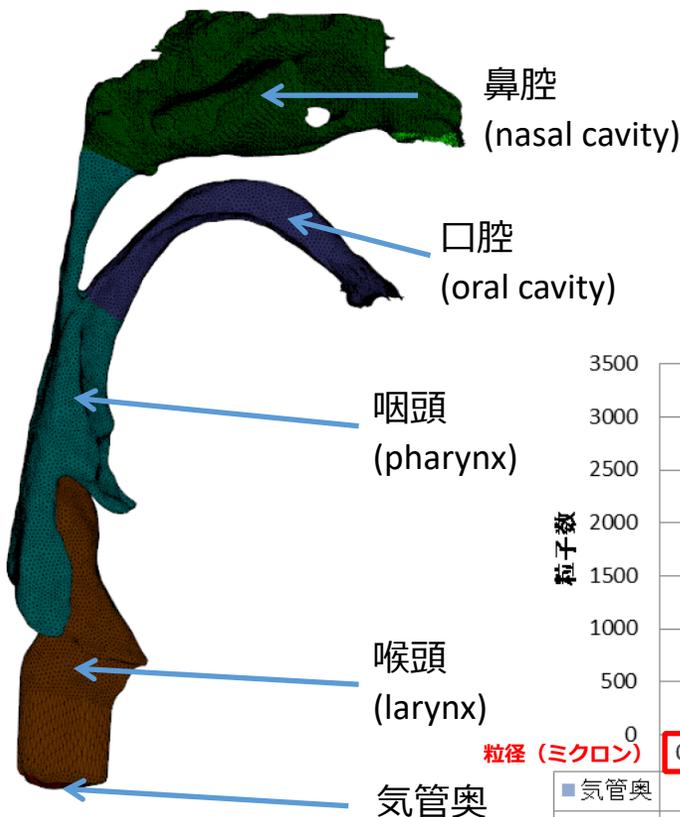


マスクの効果

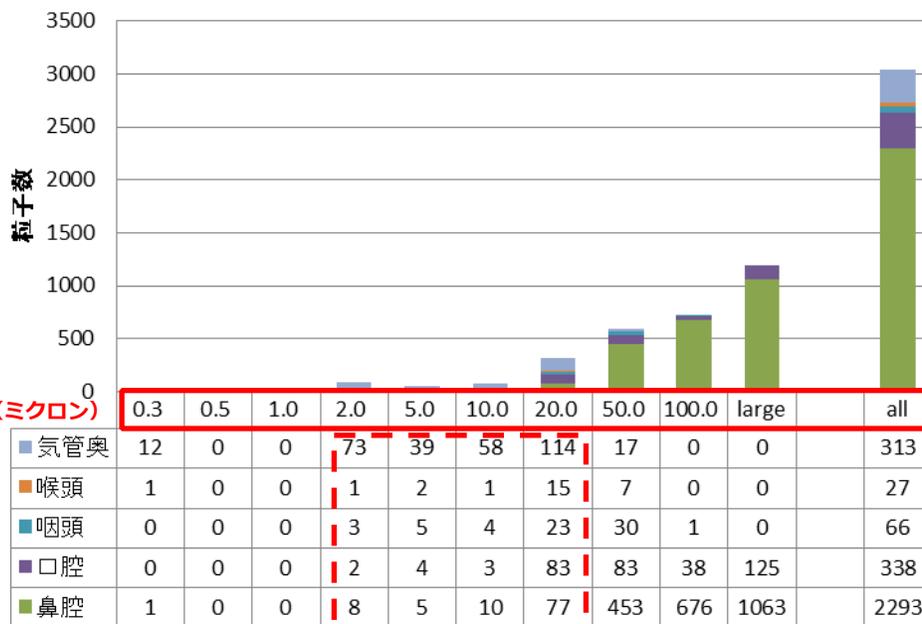
マスクによる被感染防御効果

呼吸6秒後の飛沫付着個数（顔の周りに200ミクロン以下の飛沫を一様に同じ粒径分布で配置）

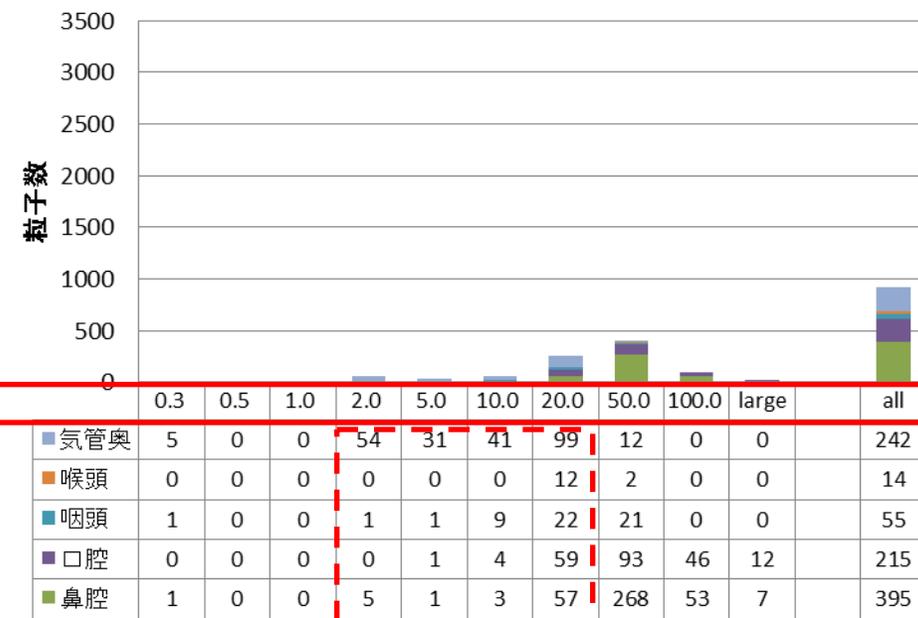
- マスクなし：大きな飛沫は鼻腔や口腔にほぼ付着するが、20ミクロンより小さな飛沫は気管奥にまで到達する。
- マスクを顔に隙間なく着用した場合：吸引する飛沫・エアロゾルはほぼブロックすることができる（図無し）
- マスクと顔に隙間がある場合：マスクを着用することで上気道に入る飛沫数を三分の一にすることができる。特に大きな飛沫については侵入をブロックする効果は高い。ただし20ミクロン以下の小さな飛沫に対する効果は限定的であり、隙間からの侵入を阻止することはできない。



マスク無し



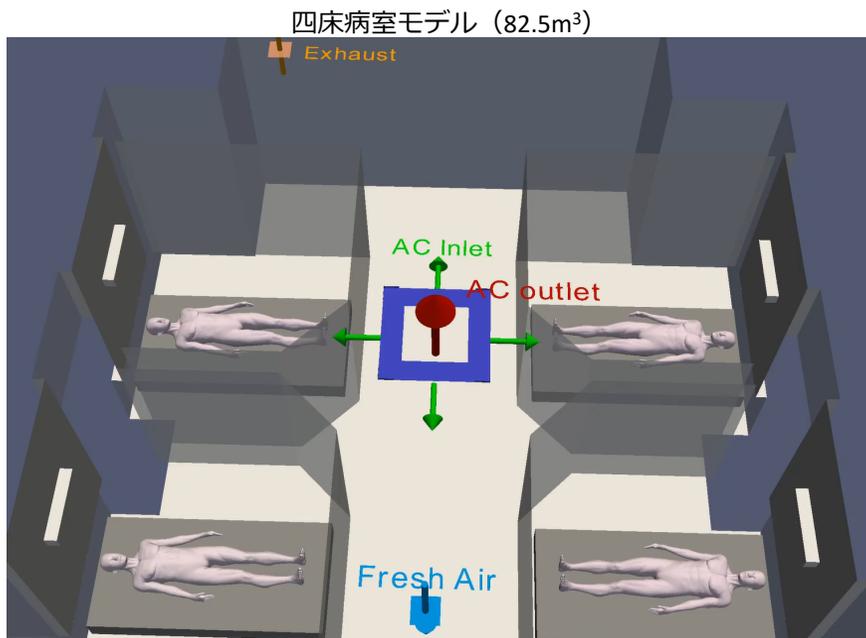
不織布マスク（顔隙間あり）



実施内容

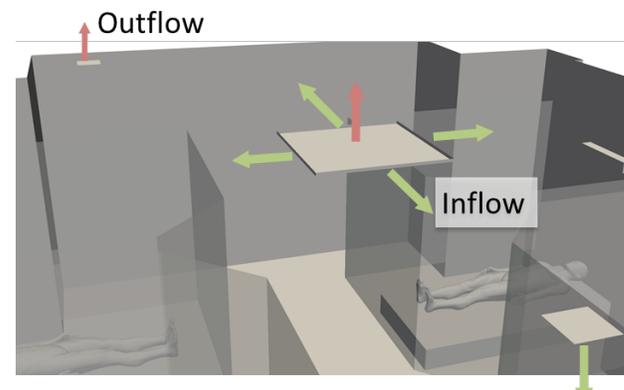
一般病室（四床）内での、飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行っている。一般の病室では、各種法令等により一定基準を満たした外部空気との換気（ここでは4人在室時に一人当たり50m³/h、8人在室時に25m³/h）がなされている。しかし室内の流れは一様ではなく換気効率の「むら」も発生する。エアコン運転と窓の開閉による換気がリスク低減に与える影響を検討することで、その低減対策について提案を行う。特に即効性のある対策としてサーキュレーターや扇風機等の活用による、リスク低減に効果的な空気の流れを誘起する方法を提案すると共に、長期的には病室設備のより効果的な配置や換気装置の設置についても検討を行う。

提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設・阪大



体温：34℃，室温：24℃，湿度：60%

空調運転条件

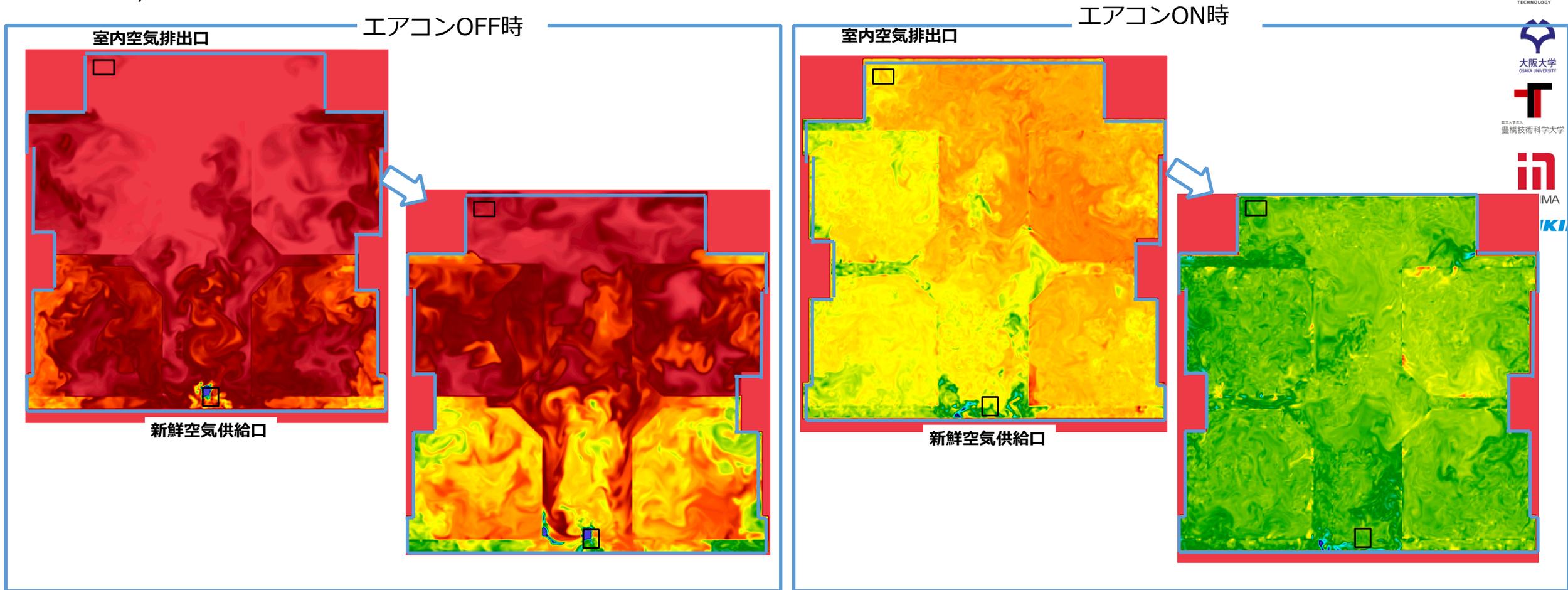


		吹出角度	ユニット数	ユニット流量	総流量	外部換気
中央カセット	In	-30°	4	202.5m ³ /h	810m ³ /h	0m ³ /h
	Out	+90°	1	-810m ³ /h	-810m ³ /h	
新鮮空気換気口	In	-90°	1	200m ³ /h	200m ³ /h	200m ³ /h
	Out	+90°	1	-200m ³ /h	200m ³ /h	

エアコンは外部換気無し。換気口により外部換気

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（赤）で部屋を満たした後に換気を行った場合の、230秒後の比較（青が清浄空気）。床から160cmの高さを、上から見た可視化。



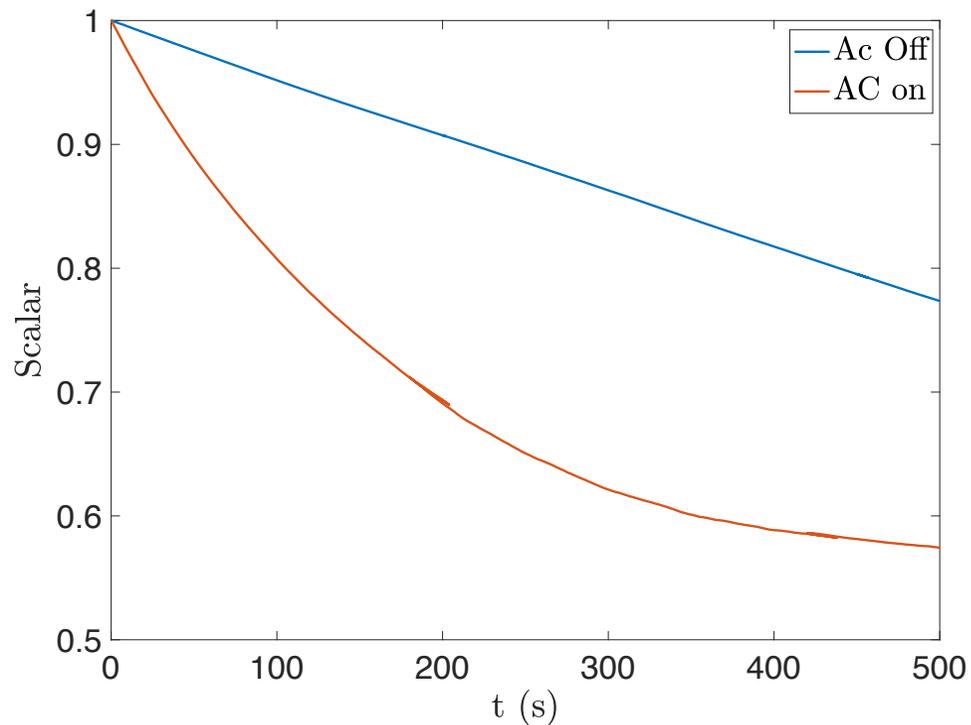
提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設・阪大

- 同じ新鮮空気の流入量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。
- 仕切りカーテンの影響で換気むらができるので、こういった場所は扇風機等で空気を循環させるのがよい。

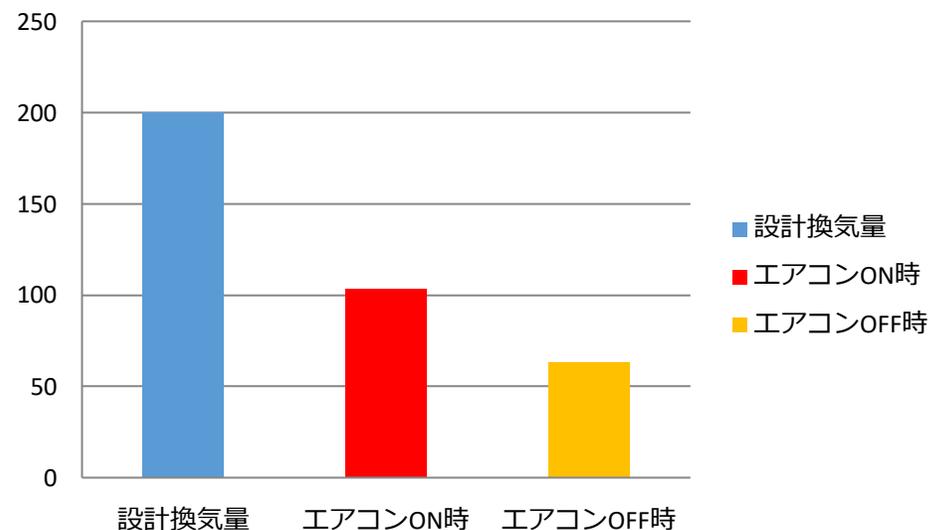
エアコンON時とOFF時の実換気量の比較

- 供給される新鮮空気の量は同じ (200m³/h) でも, エアコン (換気能力無し) のON/OFFで実際の換気量は異なる. エアコンをつけて空気を循環させた方が, 部屋全体の实換気量は良くなる.

汚染空気を満たした状態から換気を行った場合の汚染空気の時間変化
(1が汚染された状態, 0が清浄化された状態)



設計換気量と実換気量の比較 (m³/時)

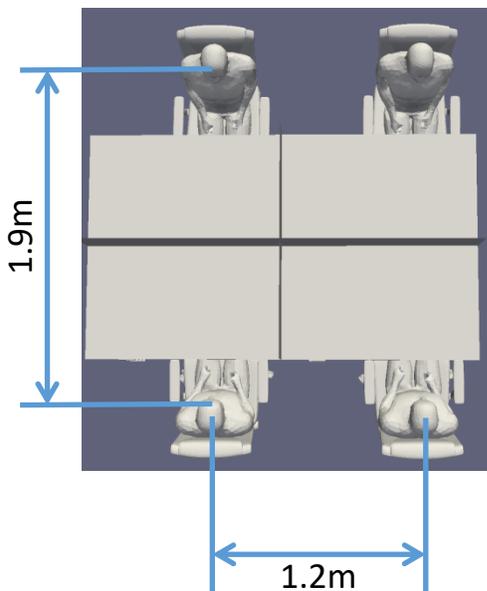


提供: 理研・神戸大, 協力: 鹿島建設・阪大

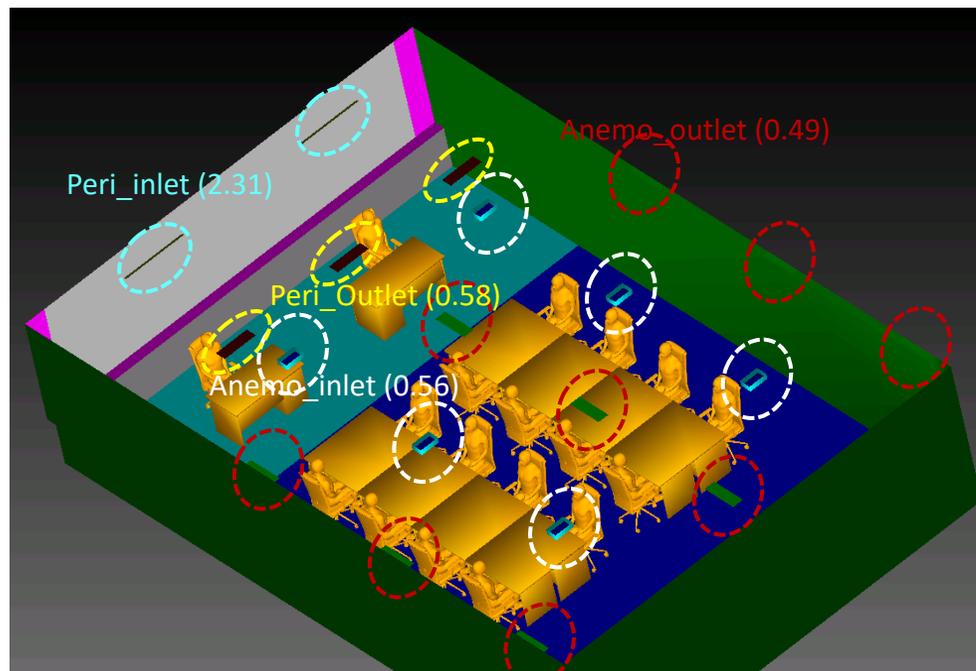
実施内容

オフィス（18人，269m³）を対象に，飛沫、及びエアロゾル感染のリスク評価を行う。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（20～30m³/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，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%

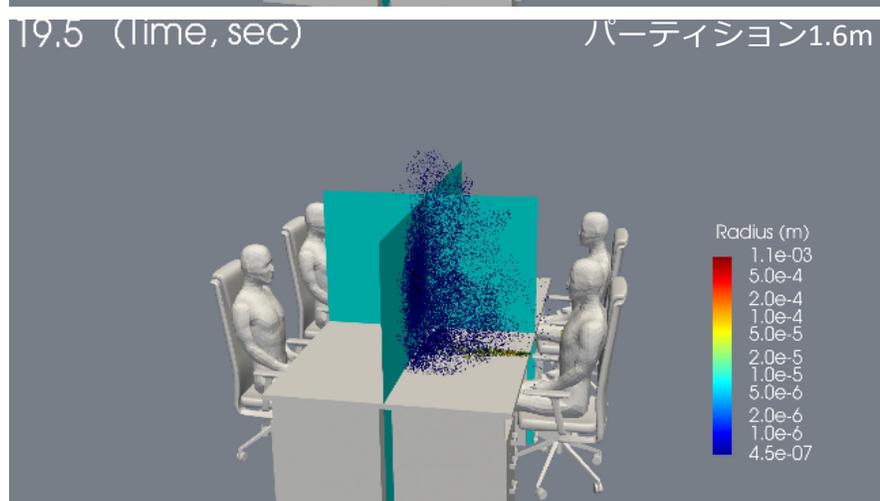
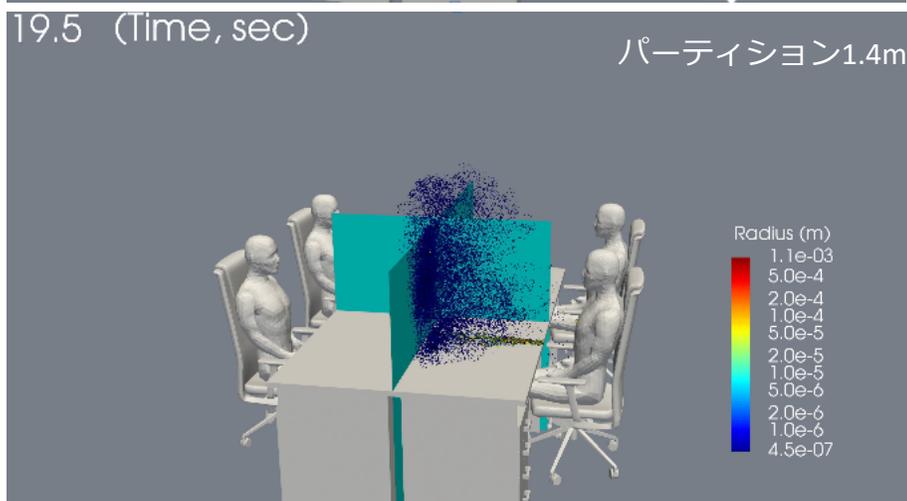
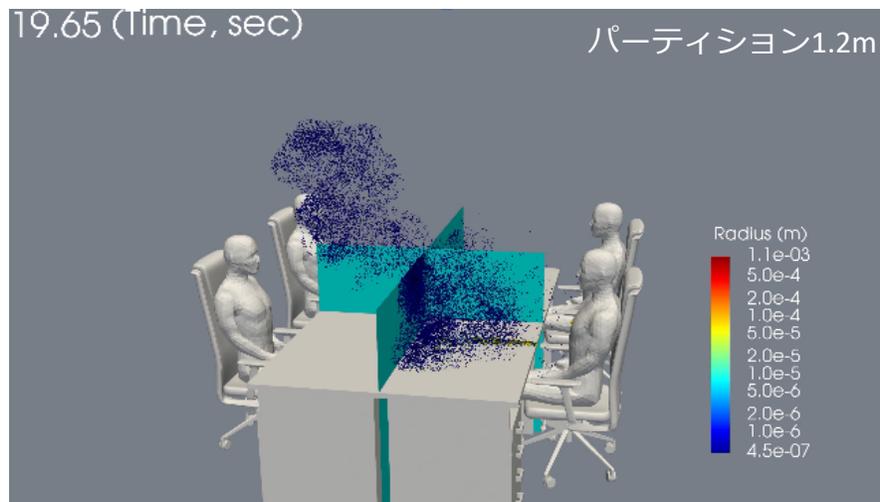
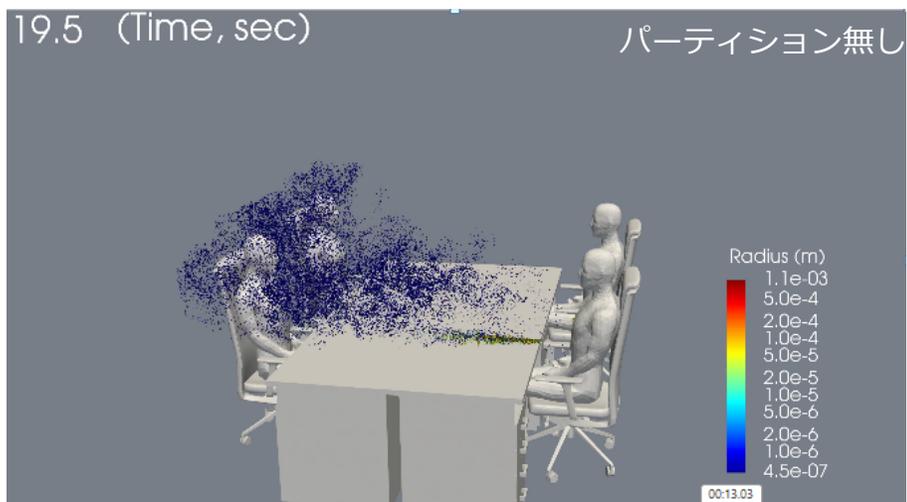


		吹出角度	ユニット数	ユニット流量	総流量	外部換気	吹出風速
アネモ空調	In	0°	6	225m ³ /h	1350m ³ /h	540m ³ /h	0.56m/s
	Out	+90°	9		-1350m ³ /h		
ペリ空調	In	-90°	2	400m ³ /h	800m ³ /h	0m ³ /h	2.31m/s
	Out	+90°	3		-800m ³ /h		

パーティション高さの影響

パーティションの高さが飛沫・エアロゾル飛散に与える影響を調べる。1.2mでは不十分であり、1.4m程度の高さは必要であるが、1.4mと1.6mではほとんど効果は変わらない。

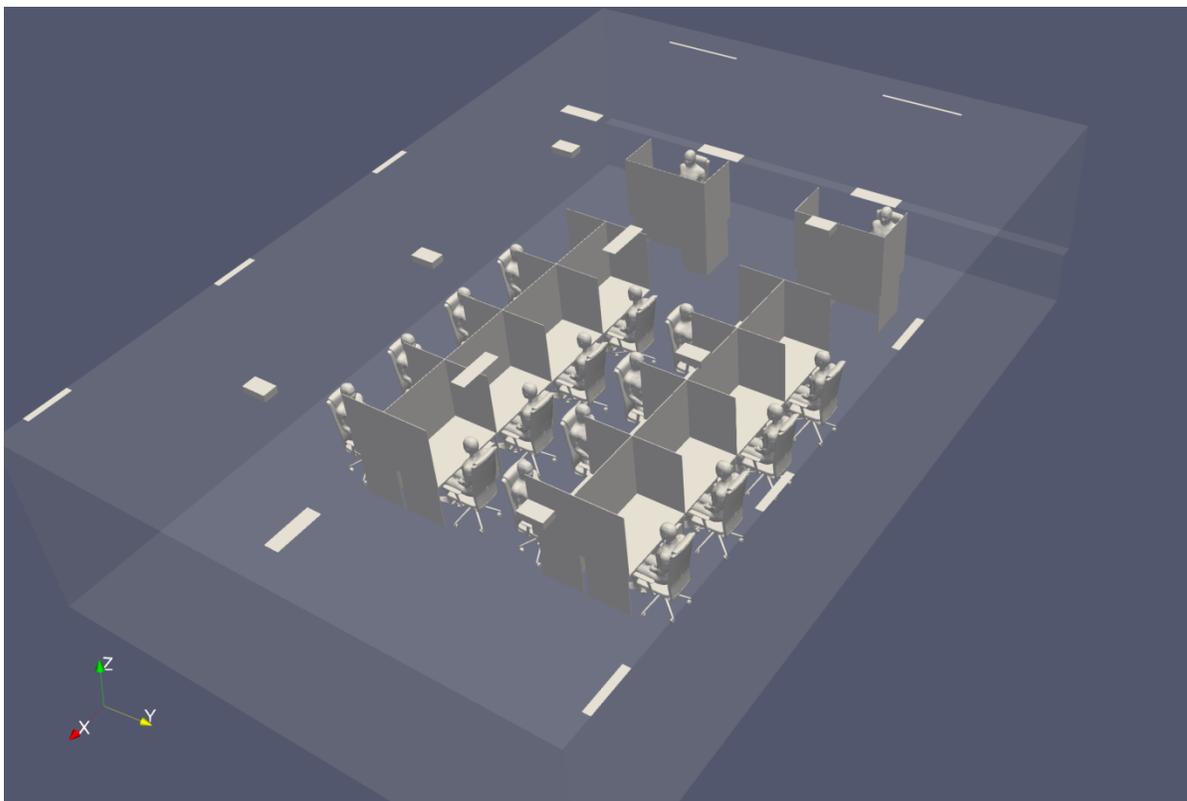
提供：理研・豊橋技科大，協力：京工織大，阪大



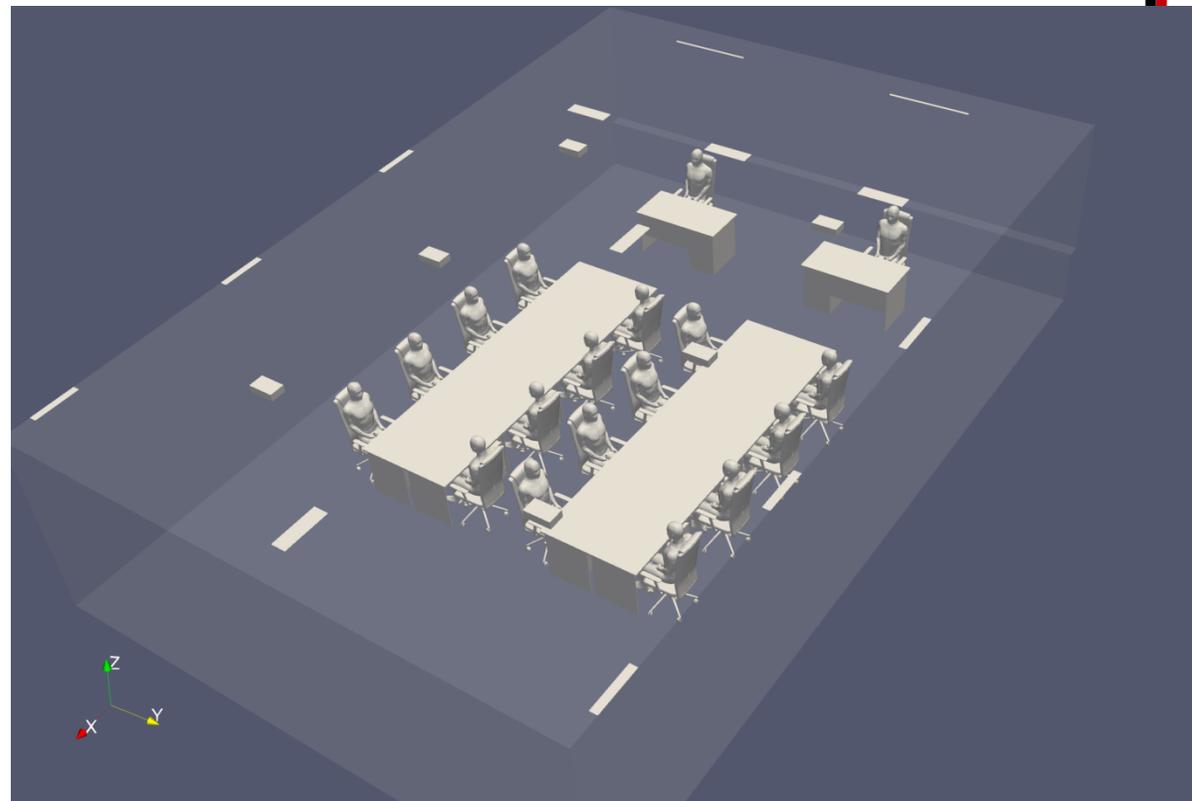
室内の局所換気効率

室内の空気がどの程度換気されているかの指標である空気齢モデルを用いて、室内の局所的な換気効率を評価する。ここでは室内におかれた備品（パーティション160cm）が局所換気に与える影響を検討する。

パーティションあり（160cm）



パーティションなし

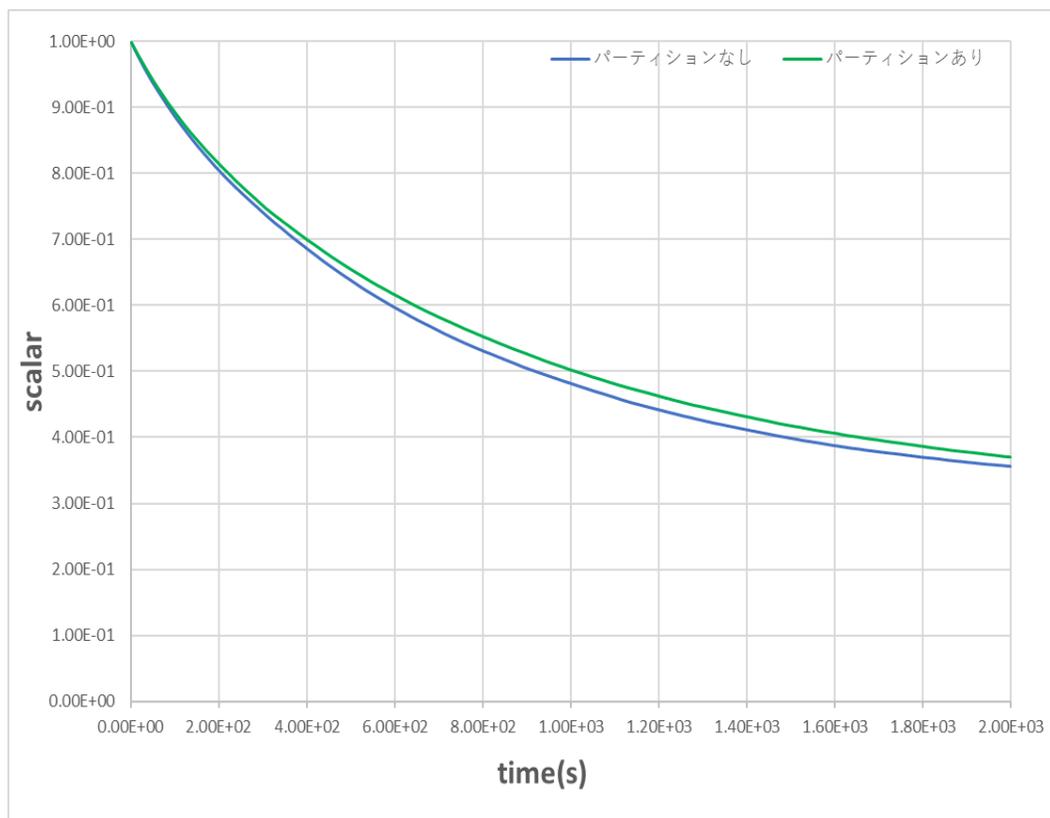


換気量の比較

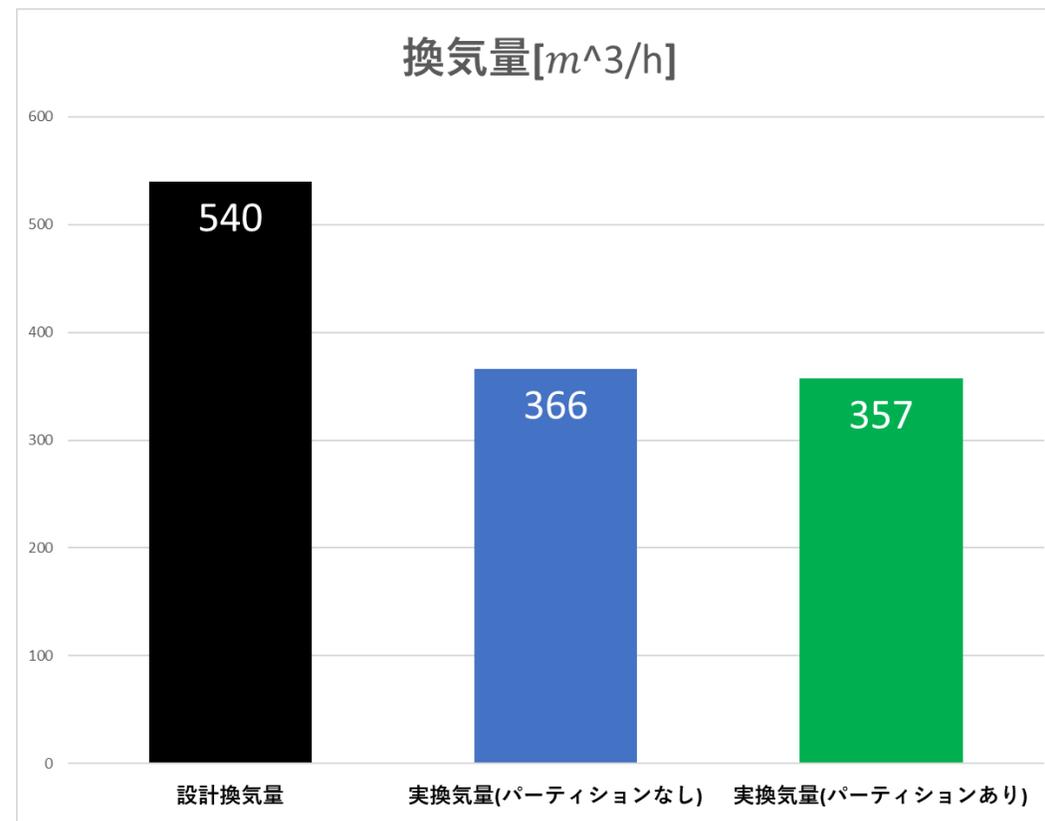
- 空調設備の換気性能（外部空気の取り入れ量，設計換気量）と実際の換気量との違い。
- 実換気量は室内に空気の流れの淀みを作ることによって悪化する（空気入れ替えにより長い時間がかかる）。
- 全体としての換気量はパーティションの有無にはあまり影響しない（パーティション有りの方が若干悪くはなる）。

提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業

汚染空気を満たした状態から機械換気を行った場合の汚染空気の時間変化
(1が汚染された状態，0が清浄化された状態)



機械の換気性能（設計換気量）と実際の換気量との違い



室内の汚染空気が清浄化されていく様子

- 室内の空気が一様に汚れた状態 (Time:0秒) で換気を開始。青くなるほど清浄。
- 室内では局所的に換気の悪い場所ができ、特にパーティションを入れた場合は場所の差が大きい。
- こういった換気むらをできるだけ少なくすることが、エアロゾル感染リスク低減において重要。

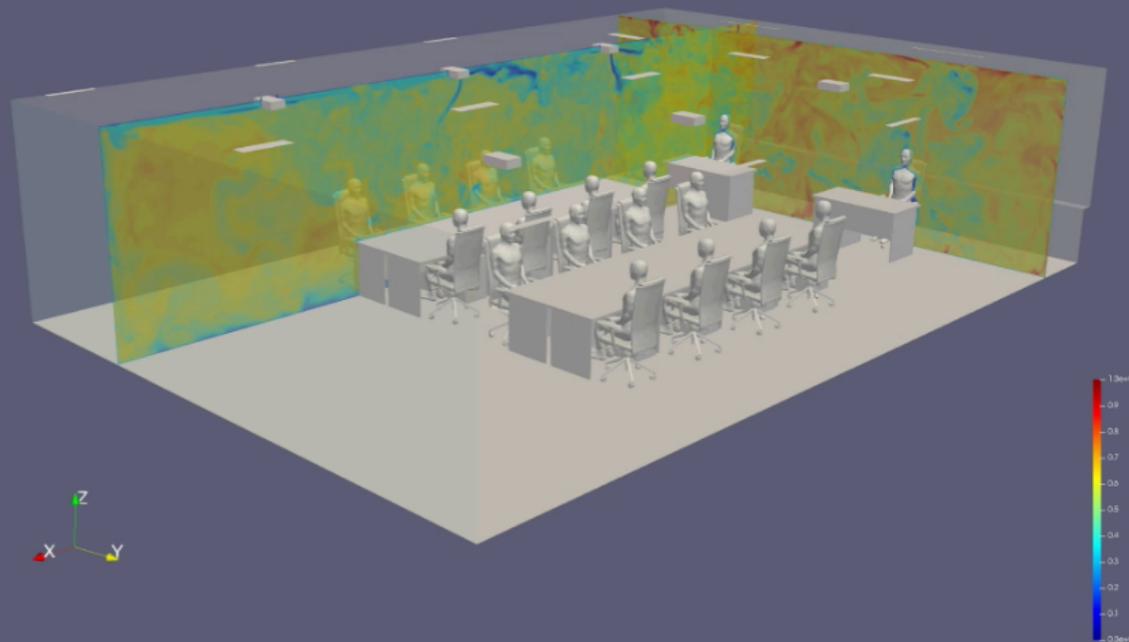
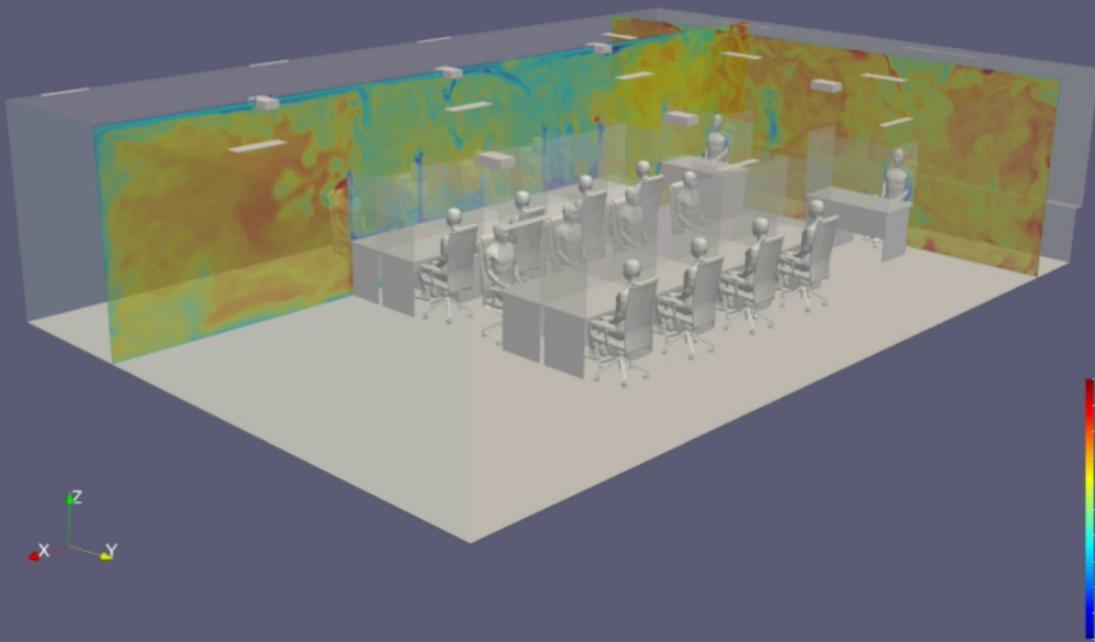
提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業

パーティションあり (160cm)

パーティションなし

Time: 710

Time: 710



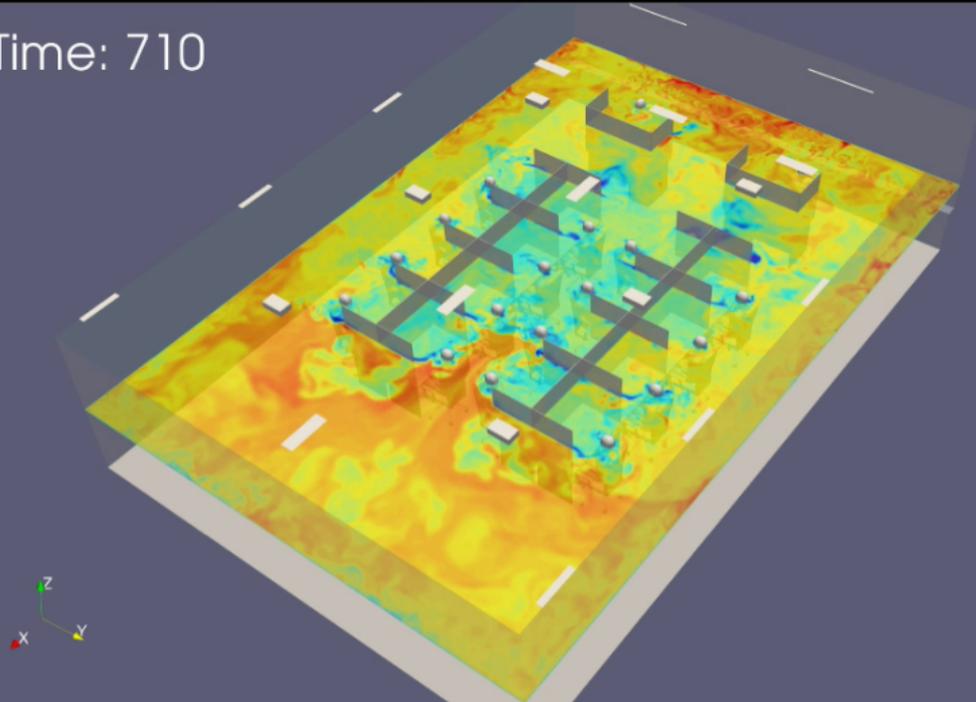
室内の汚染空気が清浄化されていく様子

- 室内の空気が一様に汚れた状態 (Time:0秒) で換気を開始。青くなるほど清浄。
- 室内では局所的に換気の悪い場所ができ、特にパーティションを入れた場合は場所の差が大きい。
- こういった換気むらをできるだけ少なくすることが、エアロゾル感染リスク低減において重要。

提供：神戸大・理研，協力：鹿島建設・ダイキン工業

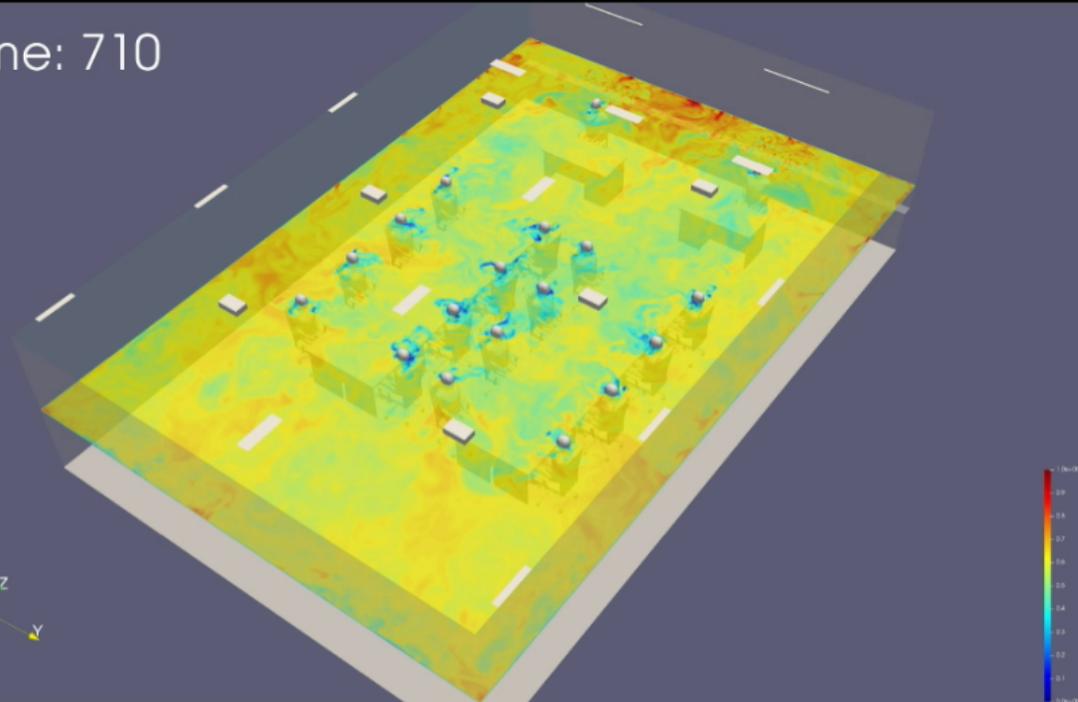
パーティションあり (160cm)

Time: 710



パーティションなし

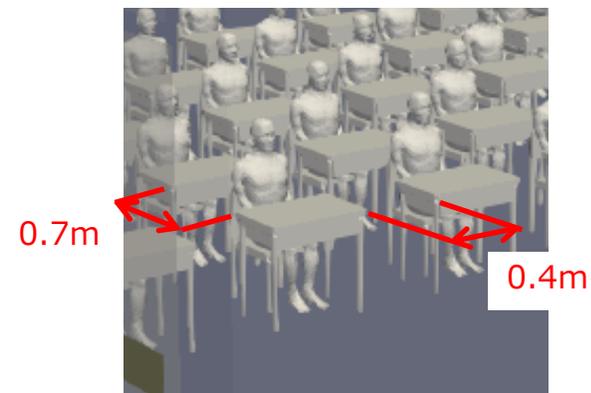
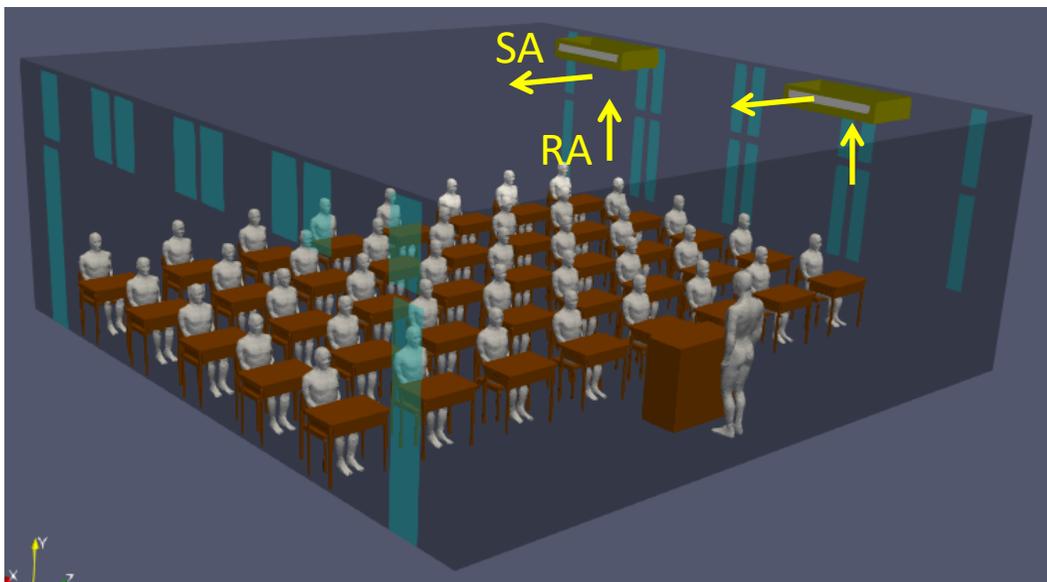
Time: 710



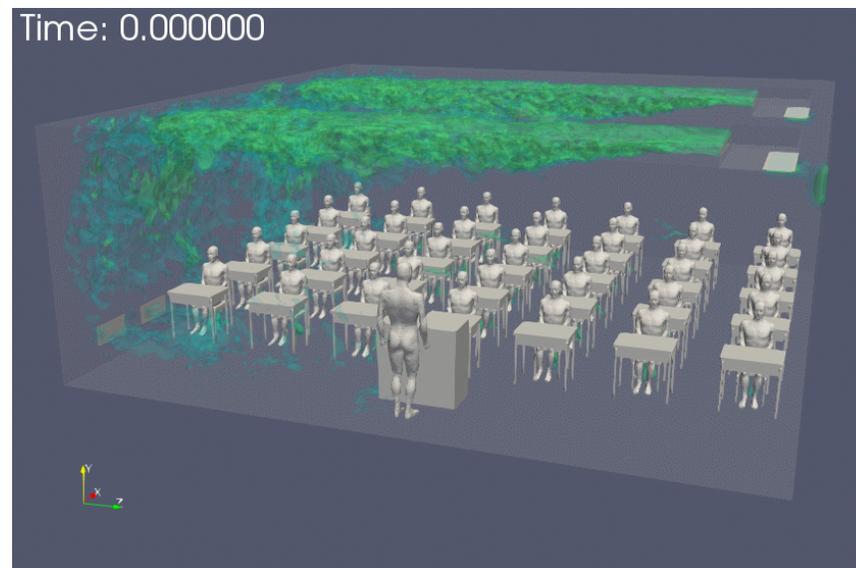
実施内容

公立学校モデル（生徒40人， $8\text{m} \times 8\text{m} \times 3\text{m} = 192\text{m}^3$ ）を対象に，エアロゾル感染のリスク評価を行う。ここでは機械式換気が十分ではない場合を想定し，エアコンの併用や窓開けによる換気促進によるリスク低減効果を評価する。

対象とする教室モデル



エアコンオン時の気流の様子

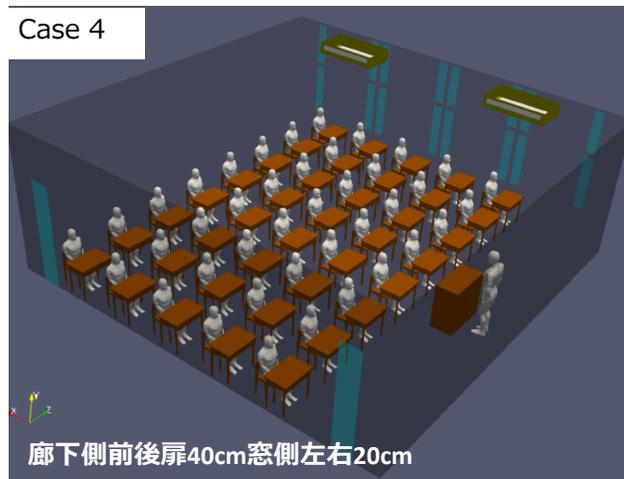
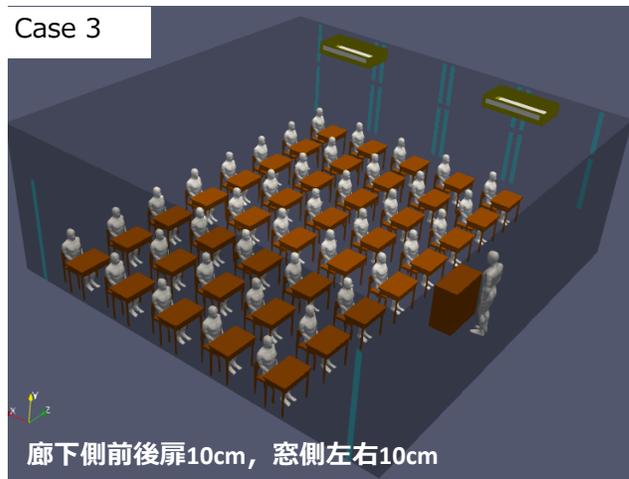


	吹出/吸込個数	吹出/吸込風速 (m/s)	合計風量(m ³ /h)
SA	2	2.61	2160
RA	2	-0.87	-2160

外付けエアコン2機 (SA, RA) 稼働

窓開け換気効果の評価

- 窓から流速1m/sで一様に外気が流入する条件

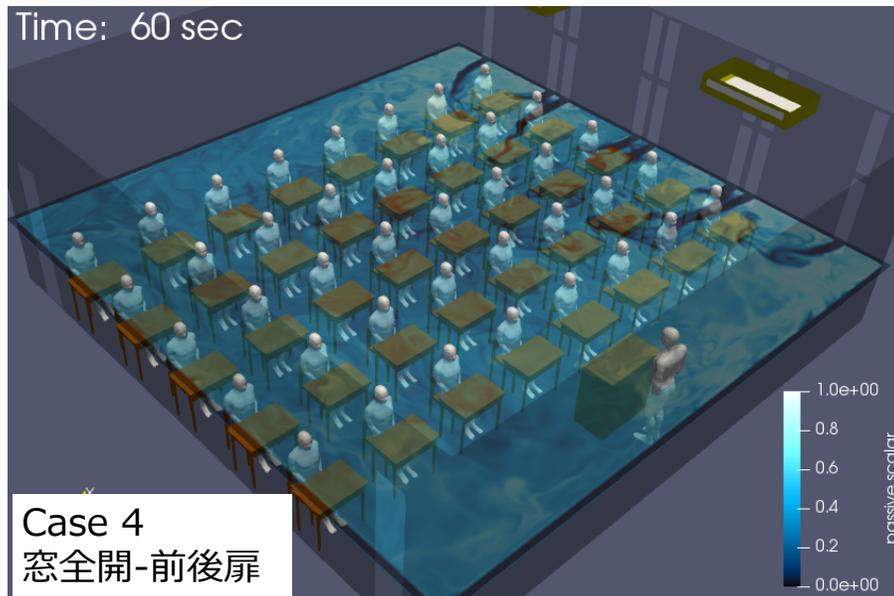
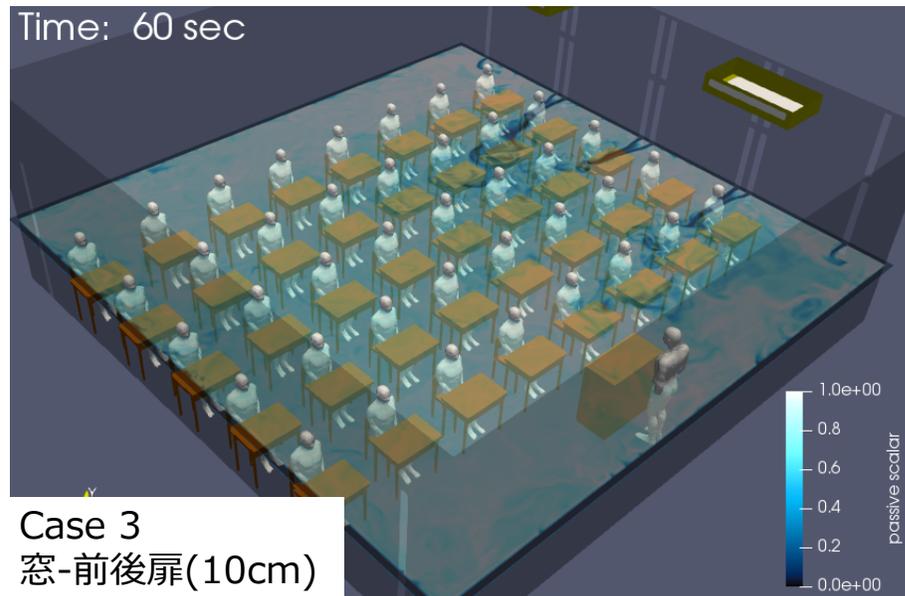
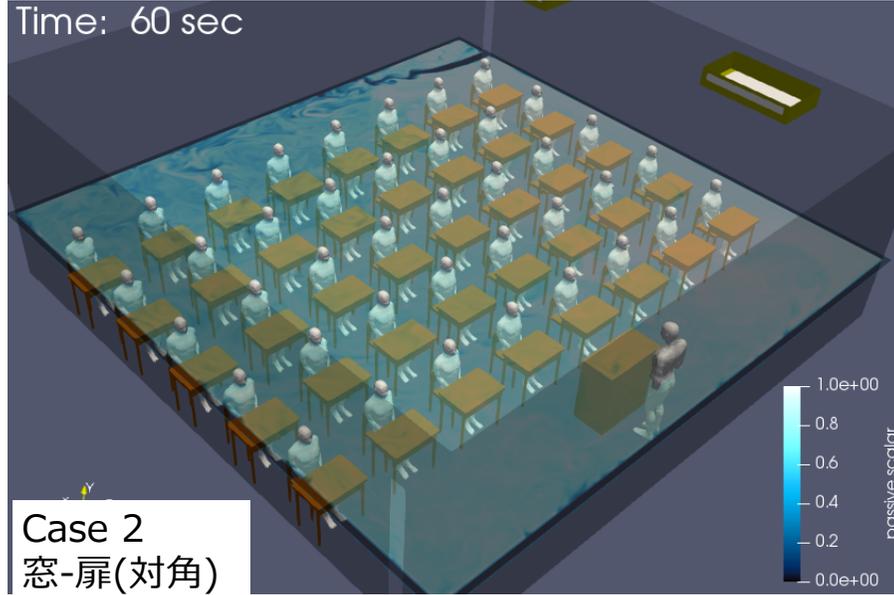
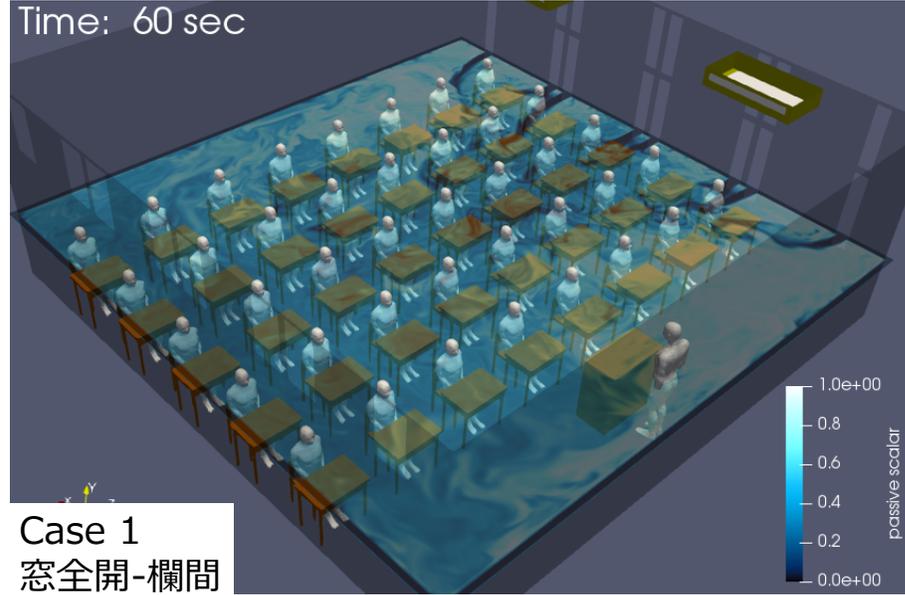


	流入部面積 (m ²)
Case 1	3.28
Case 2	0.41
Case 3	1.64
Case 4	3.28

窓開け換気の様子



エアロゾルに対する窓開け換気効果の評価

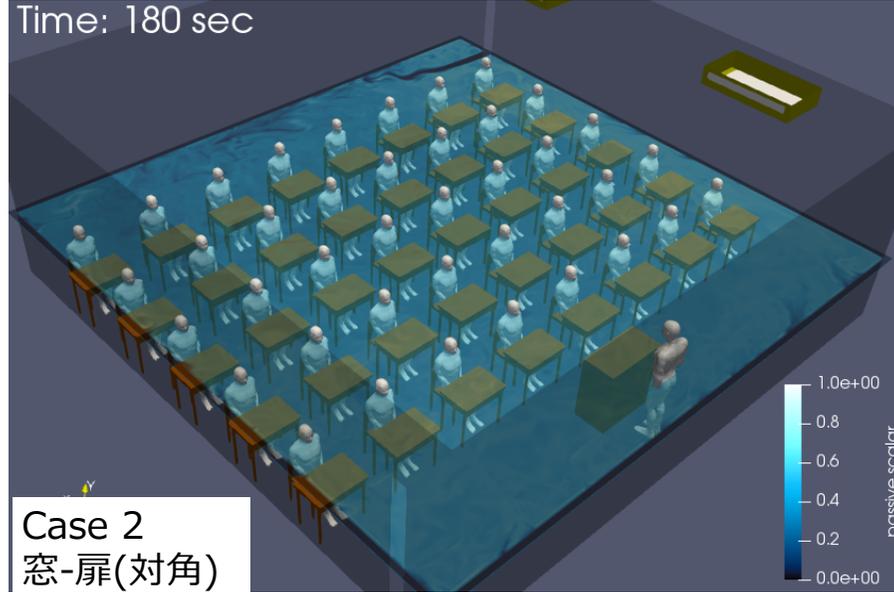


エアロゾルに対する窓開け換気効果の評価

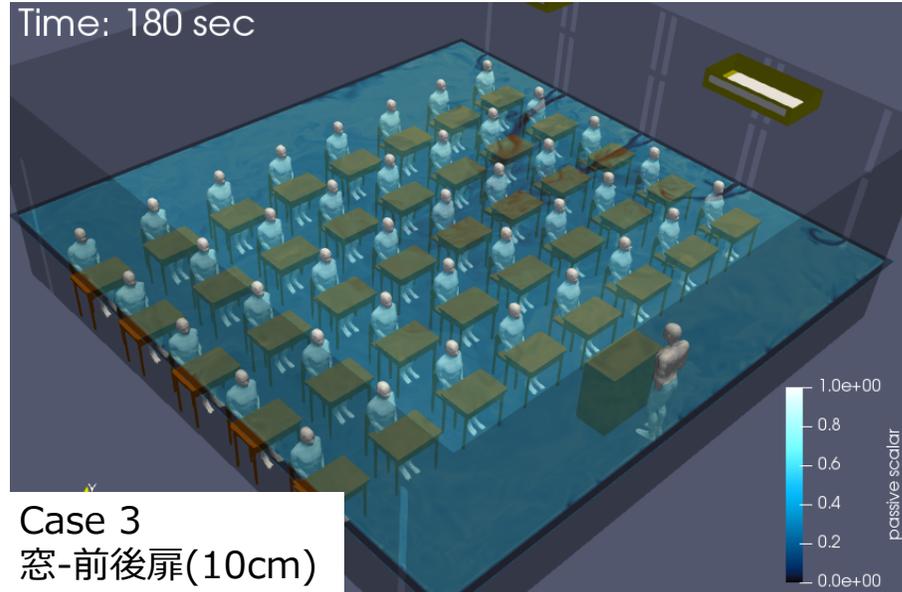
Time: 180 sec



Time: 180 sec



Time: 180 sec



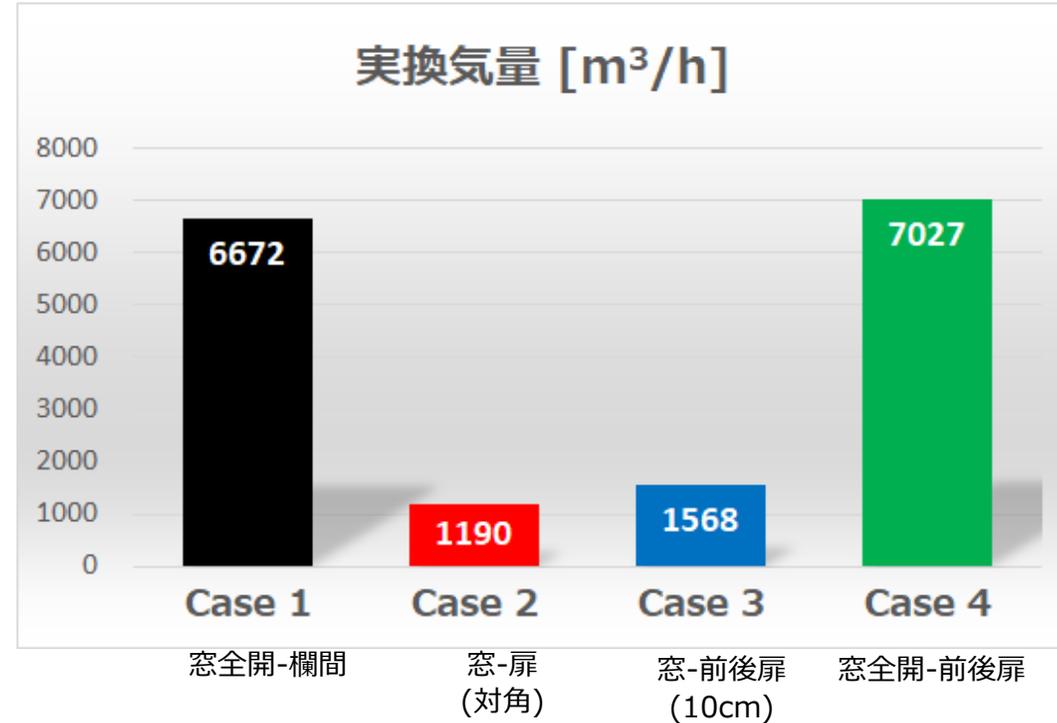
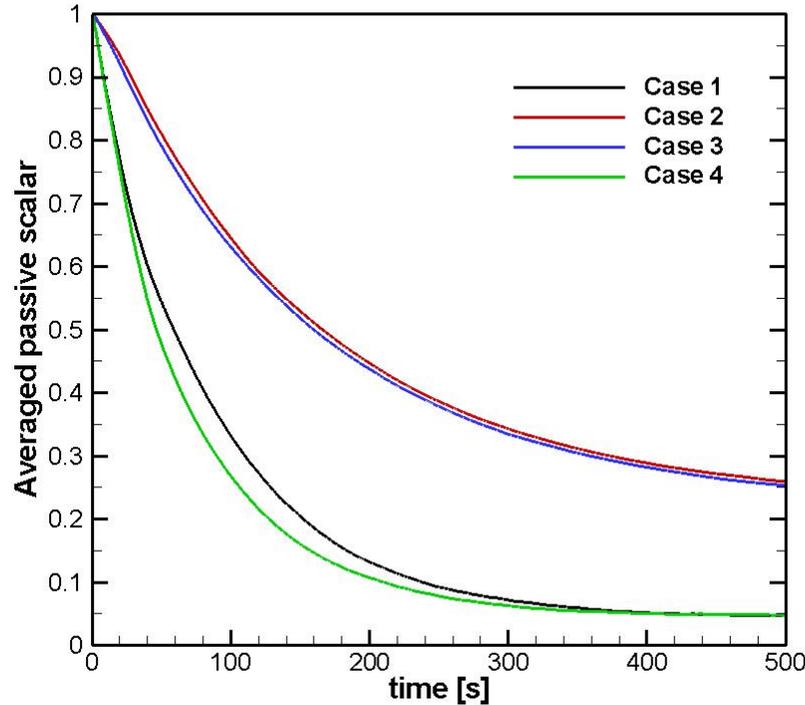
Time: 180 sec



提供：京工繊大，協力：神戸大，鹿島建設，理研

エアロゾルに対する窓開け換気効果の評価

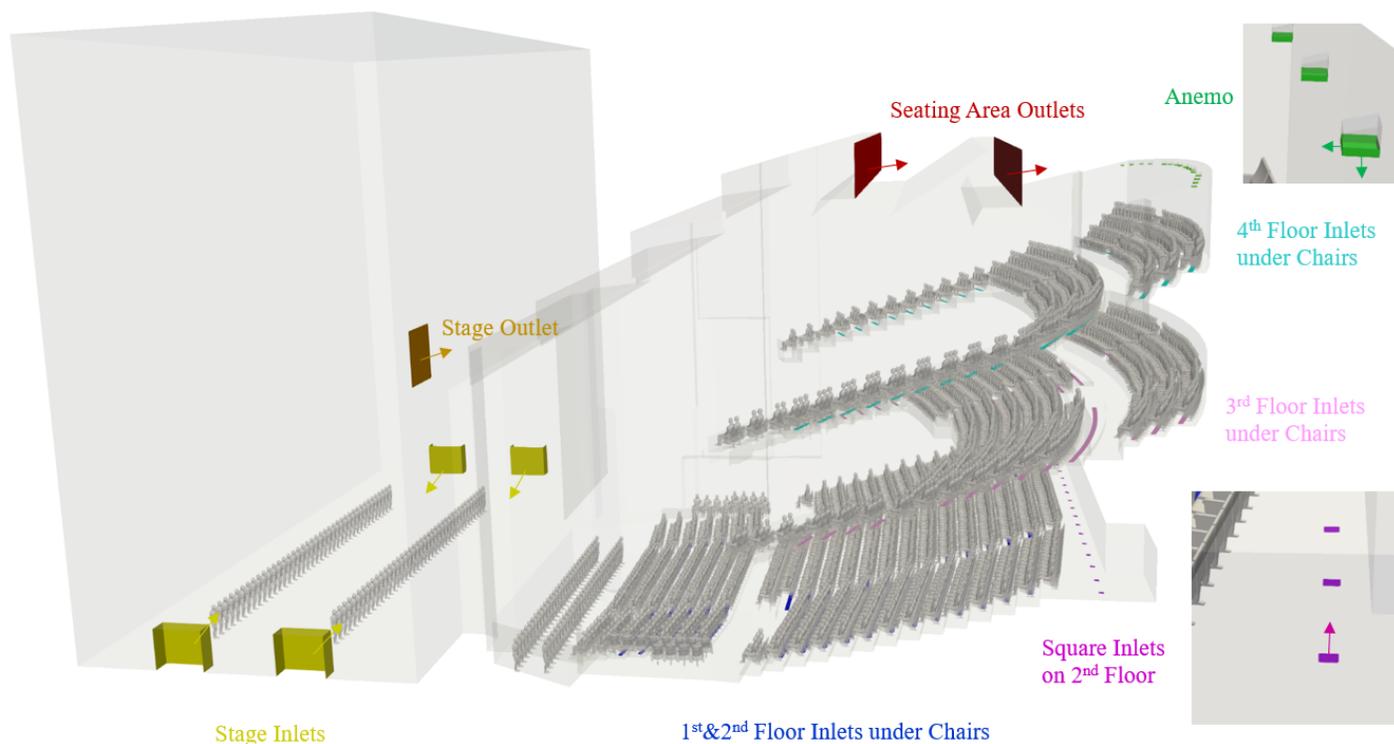
汚染空気を満たした状態から窓開けを行った場合の汚染空気の時間変化
(1が汚染された状態，0が清浄化された状態)



- Case1とCase4（窓側を20cm開放）では100秒程度で，Case2とCase3（窓側窓開けを限定）では500秒程度で室内空気の入れ替えが可能である。
- Case2はCase3に対して，廊下側の開放面積が同じ，窓開放面積が1/4であるにもかかわらず，同程度の実換気がされており，対角換気の有効性が示唆されている。冷暖房効率を考えるとCase2を推奨。
- Case2で連続換気した場合（1190m³/h），一時間で一人当たり約30m³は確保されており，法令等で定められた一般的なオフィスの換気条件と同じレベルにすることができる。

ホール内気流・換気解析

- 実在の多目的ホール（約14000m³）を対象に，2000人程度の観客が着席した状態で，空調設備による換気性能の評価を行い，ホールにおけるエアロゾル感染に対するリスク評価を行う。



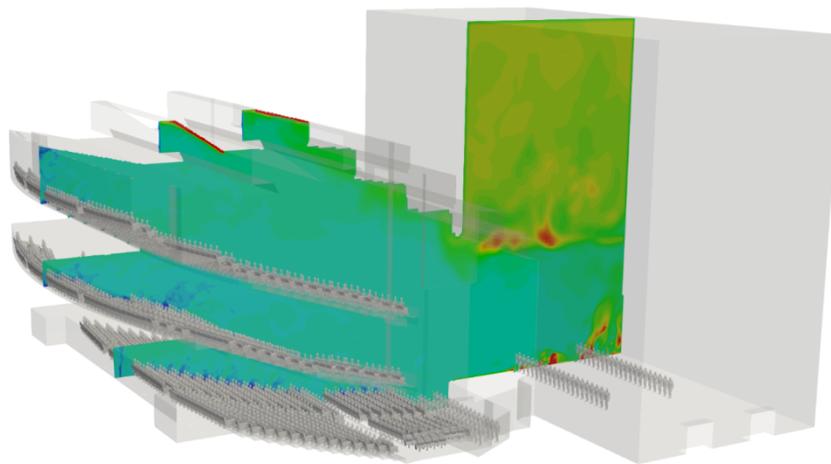
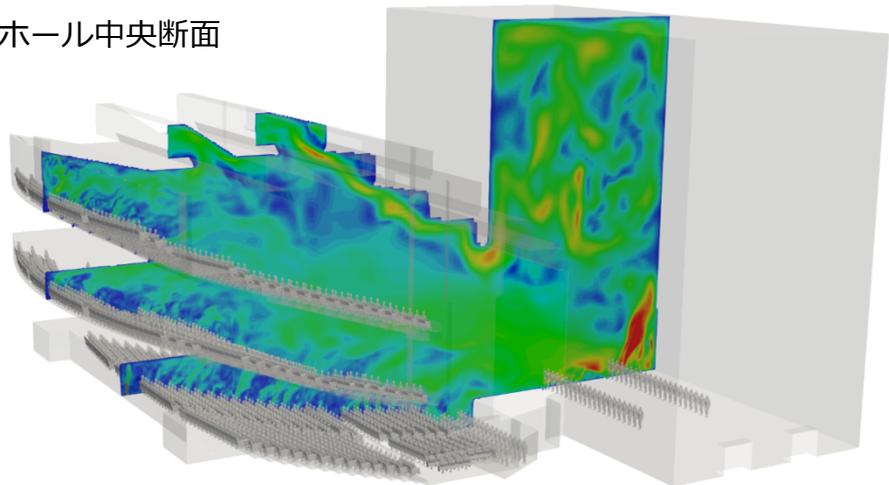
Inlets	Velocity (m/s)
Stage inlets	0.261
Inlets on 1 st &2 nd Floor under Chairs	0.136
Square Inlets on 2 nd Floor	1.25
Inlets on 3 rd Floor under Chairs	0.192
Inlets on 4 th Floor under Chairs	0.151
Anemo	1.111/0.278

Outlets	Velocity (m/s)
Stage Outlet	-1.404
Seating Area Outlets	-0.212

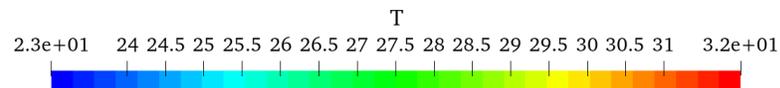
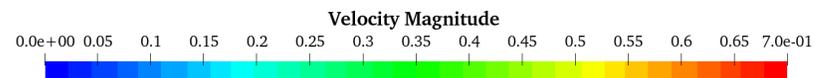
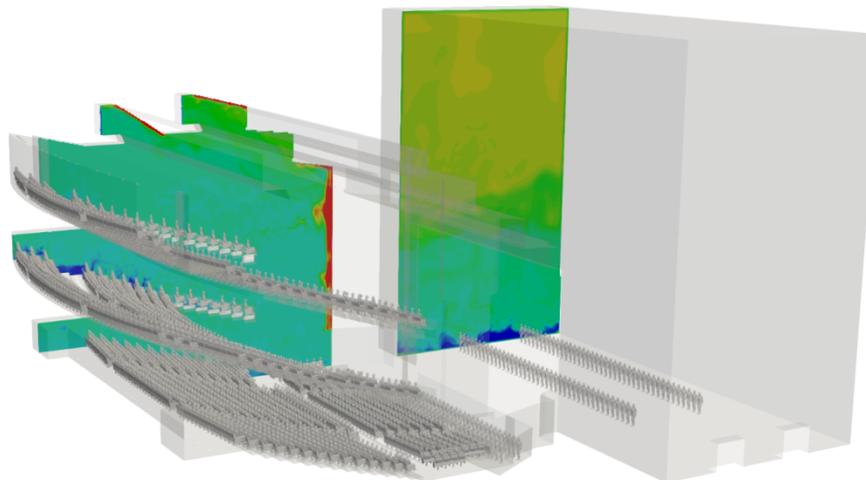
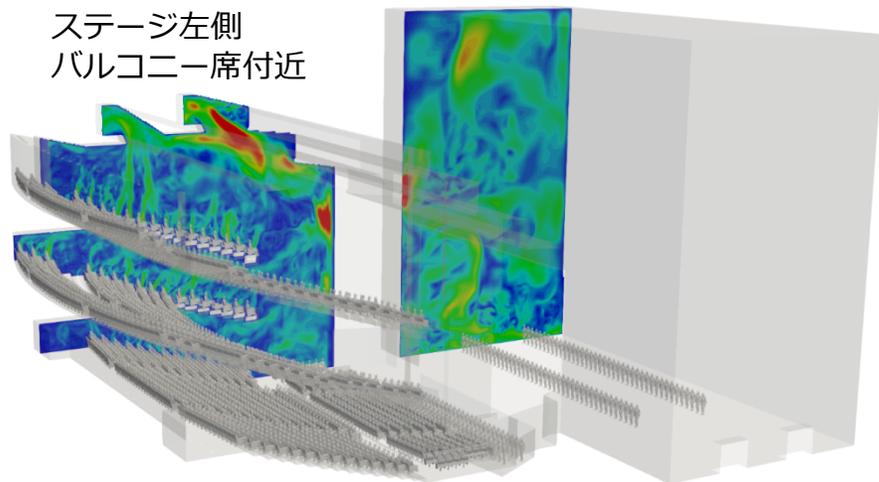
ホール内気流・換気解析

- 速度分布と温度分布

ホール中央断面



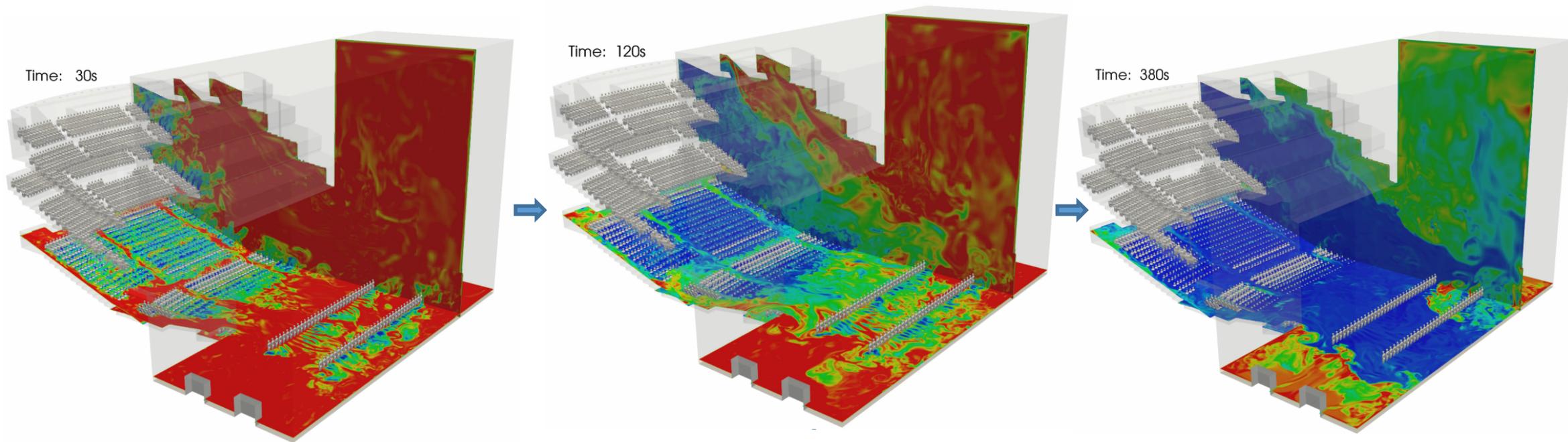
ステージ左側
バルコニー席付近



- 観客の頭上には、客席下からのエアコン吹き出しと観客体温により、0.4m/s程度の弱い上昇気流が発生する。
- 流れは客席からステージ側に向かい、その後、ホール上部の排気口より回収される。

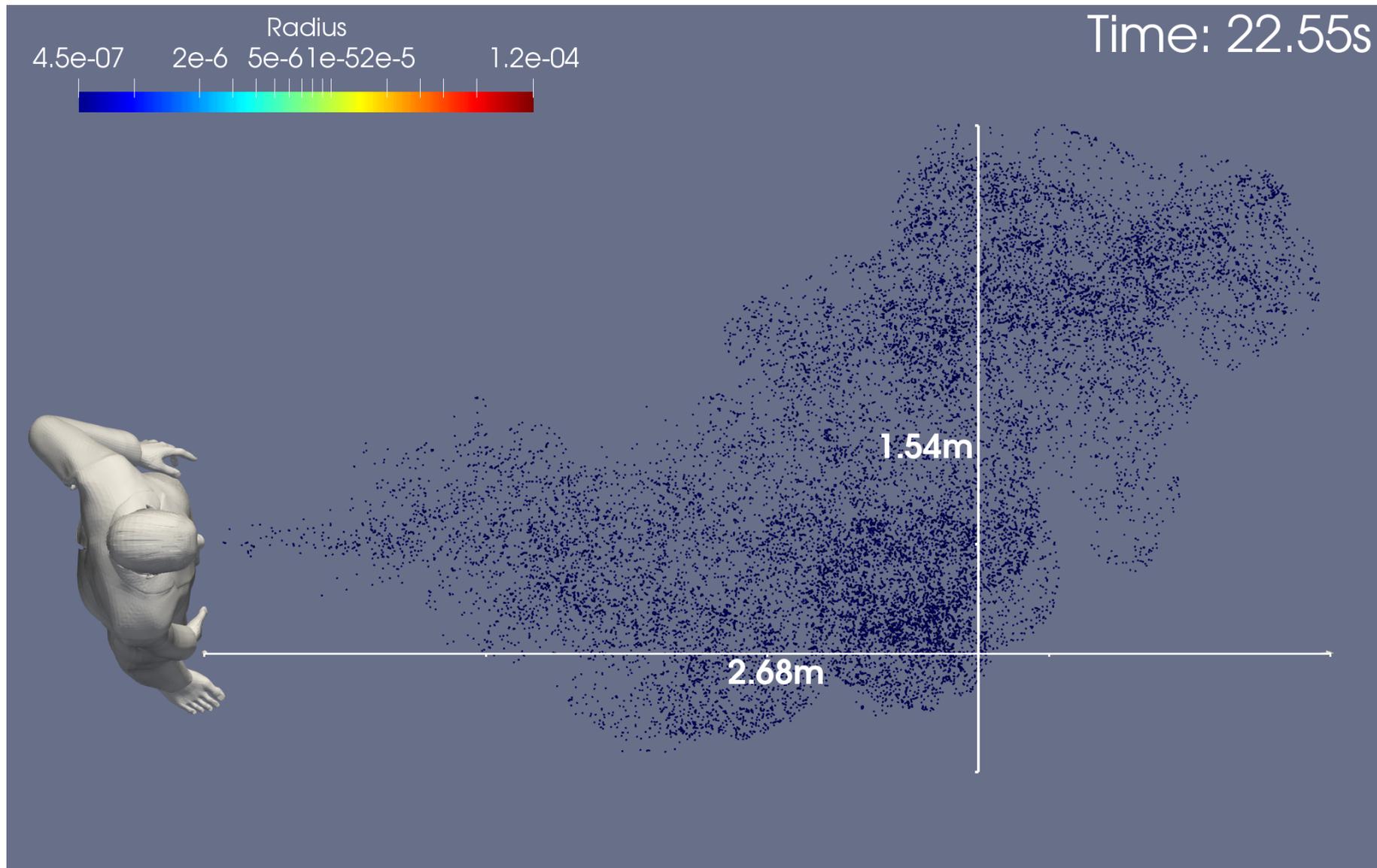
ホール内の汚染空気が清浄化されていく様子

- 仮想的にホール内の空気が汚染された状態 (Time:0sec)で機械換気を開始。青くなるほど清浄。
- 客席下のエアコンから清浄な空気を送り込むことで客席から換気が進む。
- 数分で客席は清浄化。
- 舞台の端や上方で一部、換気の遅い部分があるが、人の少ない部分であるので問題ないレベル。
- 10分程度でほぼ清浄化。



ステージ上での飛沫・エアロゾル拡散の様子

- ステージ上で立った状態で強い咳を連続して2回した場合（歌唱時のワーストケースと想定）



- 大きな飛沫（10ミクロン以上）についてはほぼ人の身長範囲に落下
- 小さな飛沫（5ミクロン以下）については2メートル以上飛散し，拡散する

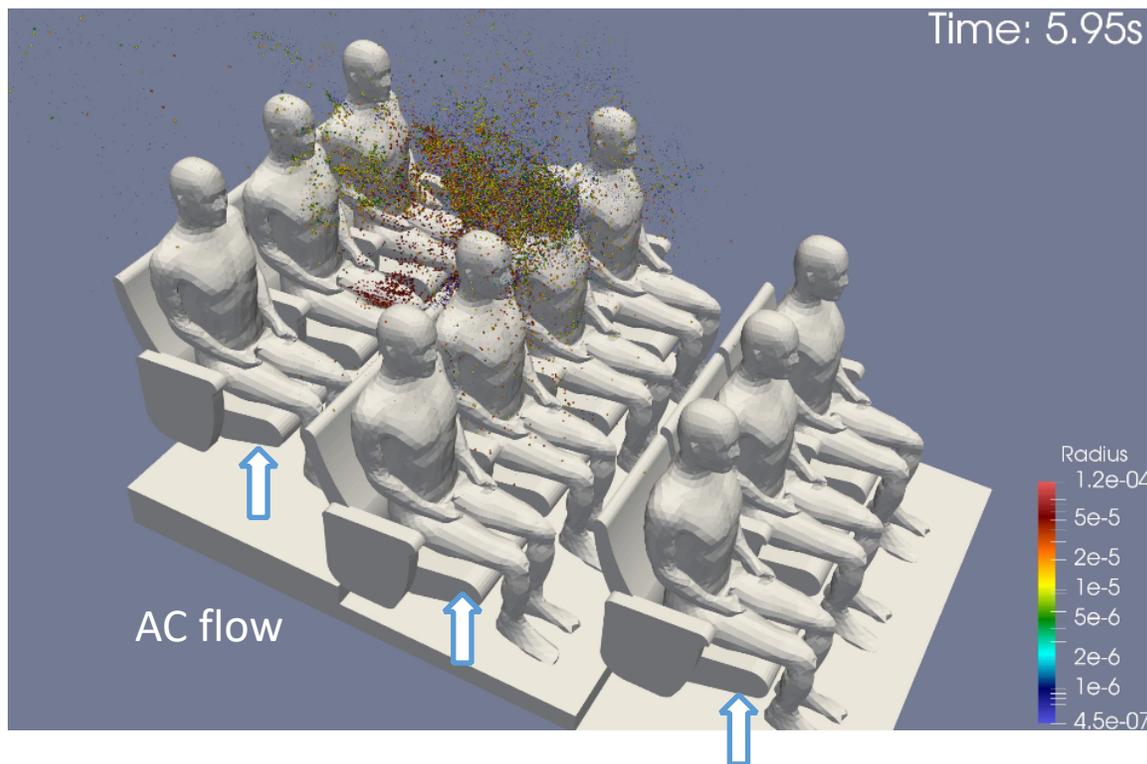
客席での飛沫・エアロゾル拡散の様子

提供：理研・神戸大，協力：豊橋技科大・京工織大・鹿島建設

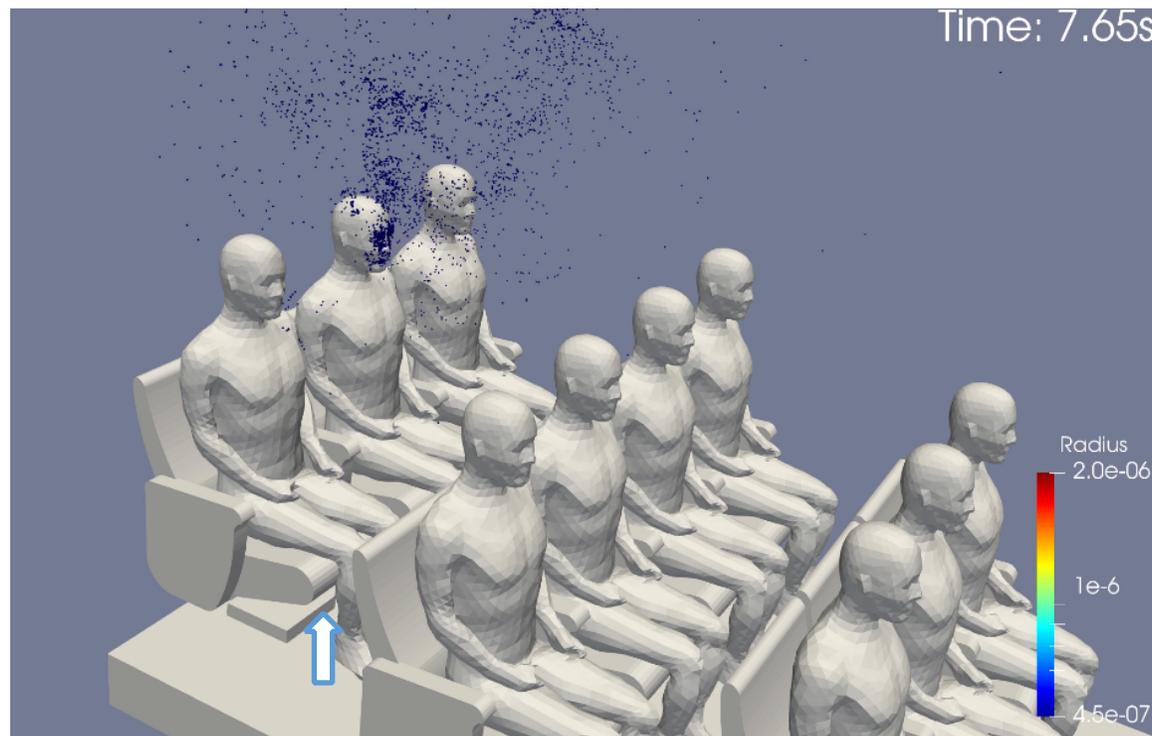
- 強い咳を連続して2回，これを2秒ごとに8回繰り返した場合

1階席（エアコン風が弱いケース）

マスク無の場合



マスク有の場合



- マスク無の場合は，大きな飛沫が前列まで到達する．前列左右の観客のリスクが大きい
- マスク有の場合は，小さな飛沫のみ感染者の周りを漂うが，体温とエアコン気流により上昇拡散していく

客席での飛沫・エアロゾル拡散の様子

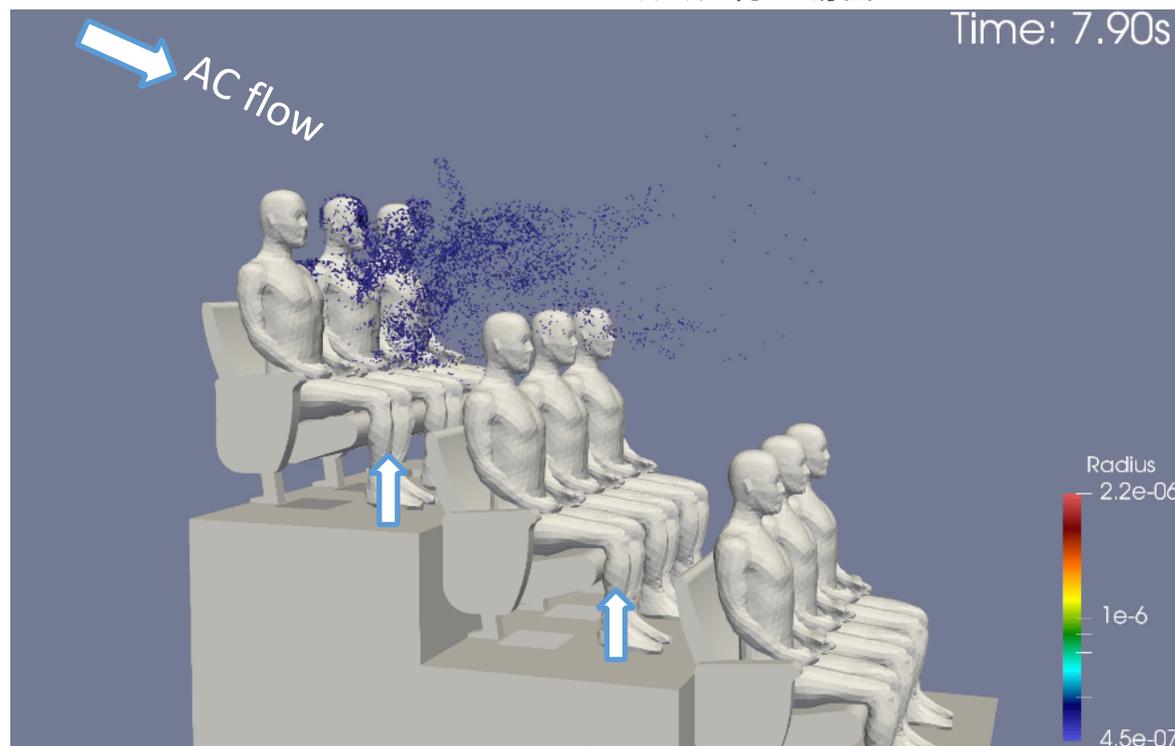
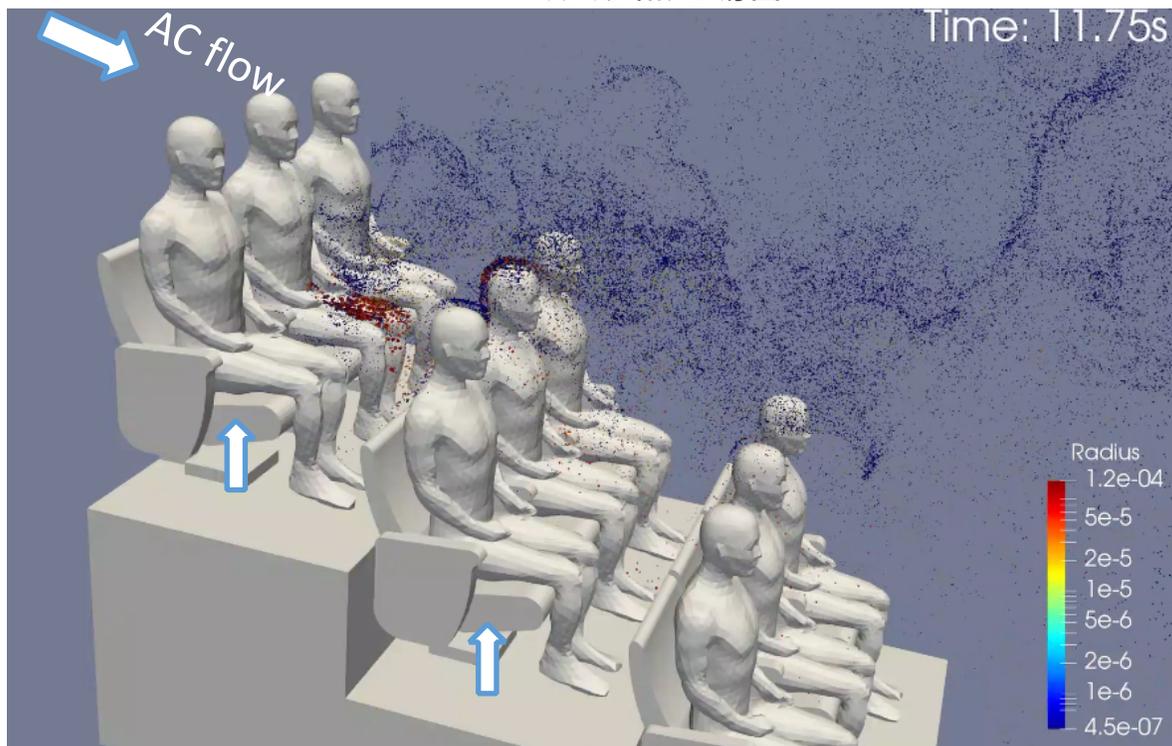
提供：理研・神戸大，協力：豊橋技科大・京工織大・鹿島建設

- 強い咳を連続して2回，これを2秒ごとに8回繰り返した場合

4階席（ステージに向けてエアコン風があるケース0.3m/s）

マスク無の場合

マスク有の場合



- マスク無の場合は，大きな飛沫が前列まで到達，前列左右の観客のリスクが大きい
- マスク有の場合は，小さな飛沫のみ感染者の周りを漂う．エアコン風によってある程度前方に運ばれる

配布資料はここまで