

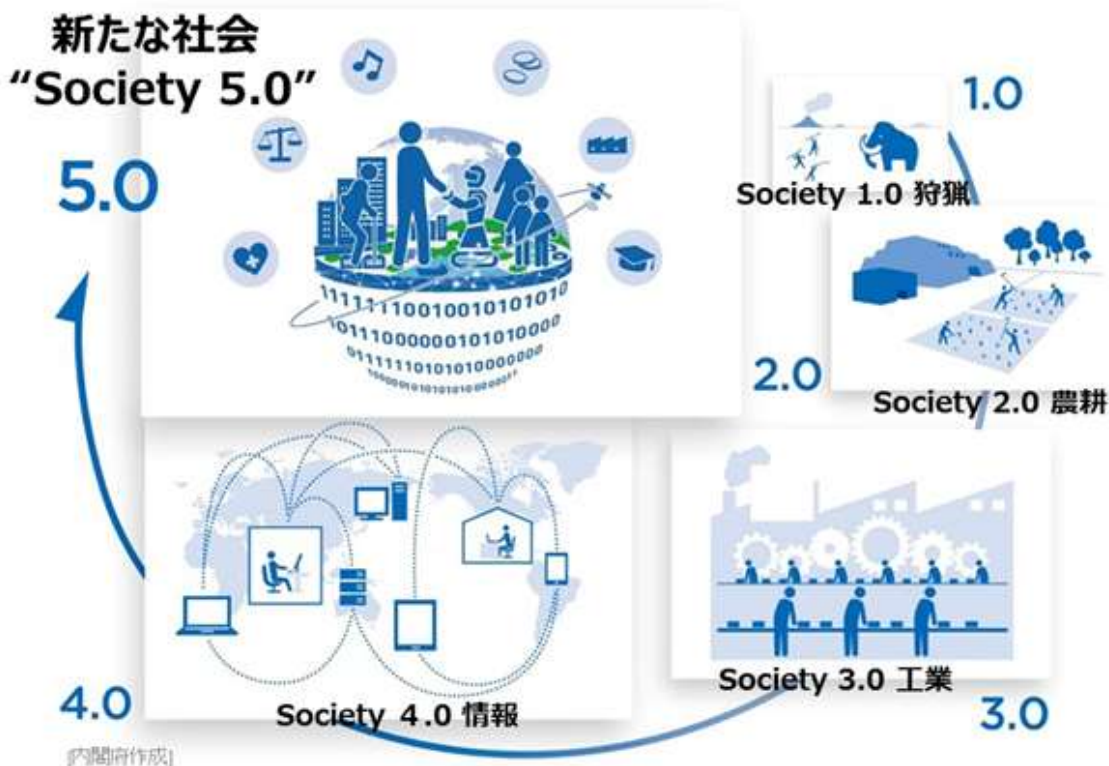
富岳を用いた ウイルス飛沫エアロゾル感染リスク評価の デジタルトランスフォーメーション

神戸大学大学院システム情報学研究科 計算科学専攻 教授
理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー
坪倉 誠

センサイトWEBセミナー

2022年3月10日14:00-14:50

- サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する社会（Society）



サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合

フィジカル（現実）空間からセンサーとIoTを通じてあらゆる情報が集積（ビッグデータ）
人工知能（AI）がビッグデータを解析し、高付加価値を現実空間にフィードバック

これまでの情報社会(4.0)

Society 5.0



Society 5.0時代のものづくり

- サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたものづくり

Physical Space



膨大な形状候補の中から...



最適な形状を提案!

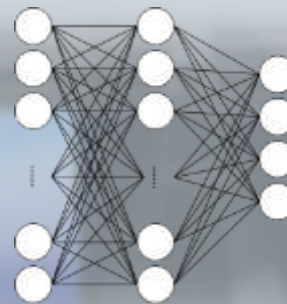
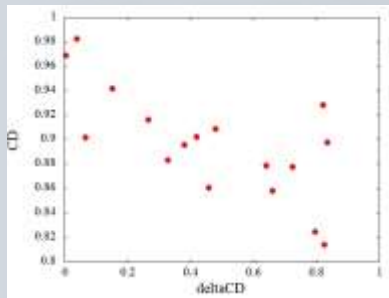
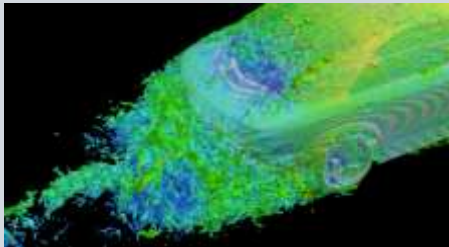


実走行する自動車や
周囲環境の情報を入力すれば...



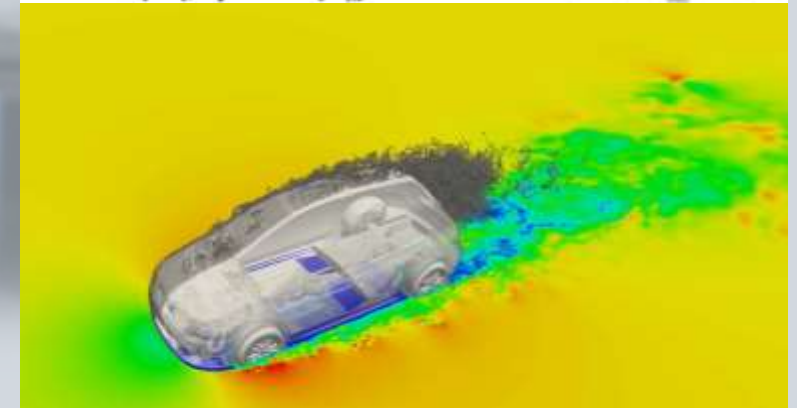
最適な運転条件の提案!
自動運転のトレーニング!

Cyber Space

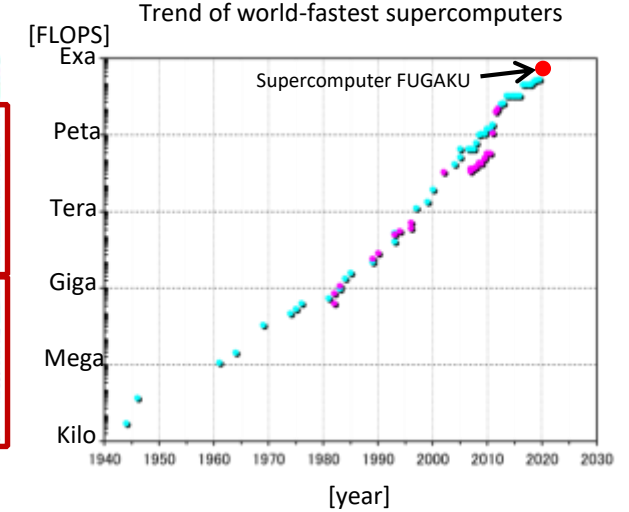
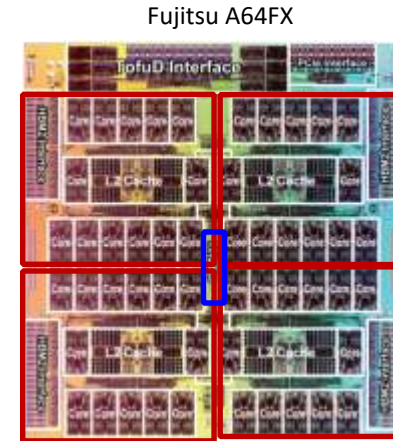


人工知能と高精度シミュレーションの融合

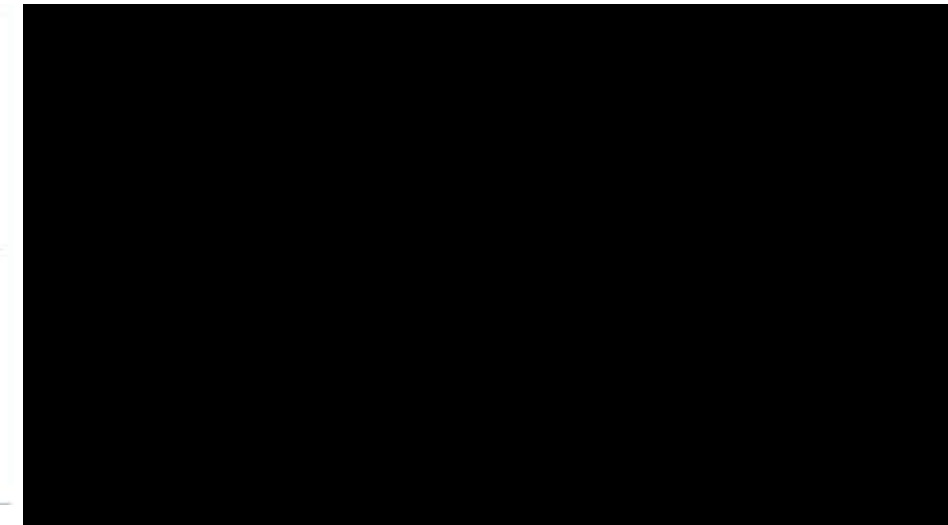
time = 0.5000[s]
x = 14.5995[m], y = -0.0038[m], z = 0.5509[m]
roll = 0.0458[deg], pitch = -0.3455[deg], yaw = 0.0029[deg]
vel = 27.8522[m/s], slip = -0.0031[deg]



- 相理論演算性能：488PFLOPS（倍精度）
- LINPACK実行性能：442.01PFLOPS
（82.3%, 2020秋）
- 総ノード数：158,976個（京の約2倍）
（384ノード×396ラック+192ノード×36ラック）
- ノード単体性能：3.072TF（京の約24倍）
 - 命令セットアーキテクチャ：ARMv8.2-A SVE 512bit
 - 計算コア数：48 cores (+ 2 for OS)（京の6倍）
 - メモリとバンド幅：HBM2 32 GB（京の約2倍），1024 GB/s（京の約16倍）
- インターコネクト：Tofu Interconnect D
- 四冠達成(二期連続)：ISC(2020)とSC(2020)
 - Top500(442.01PFLOSP)
 - 密行列連立一次方程式
 - LU分解
 - HPCG(16.00PFLOSP)
 - 粗行列連立一次方程式
 - 共役勾配法
 - HPL-AI(2.00EFLOPS)
 - AI性能
 - Graph500(102.95TFLOPS)
 - グラフ探索性能（データ処理）



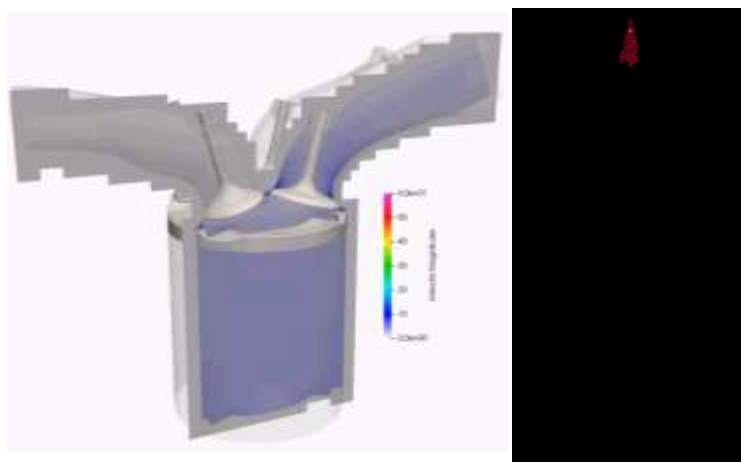
富岳ヴァーチャルツアー



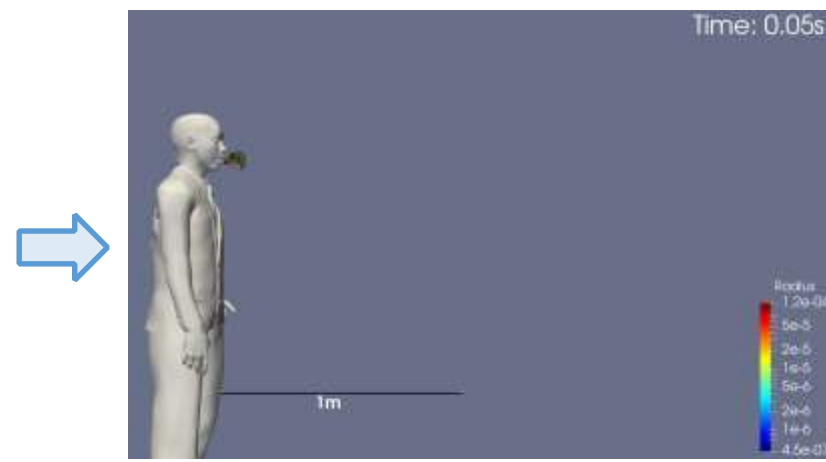
高速かつ大量にシミュレーションモデルを作成し、スパコン性能を最大限に活用できるソフトウェア

- 2012年より理化学研究所で産学連携で開発。
- スパコン「京」を活用して、自動車、燃焼システム、建築防災分野で多くの実績。
- 2020年初頭、Society5.0時代のものづくりへ向けて富岳でチューニング中に、新型コロナパンデミックが発生。

「京」による自動車エンジンシミュレーション
と燃料噴霧噴射の様子



「富岳」による
飛沫飛散シミュレーション



HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム



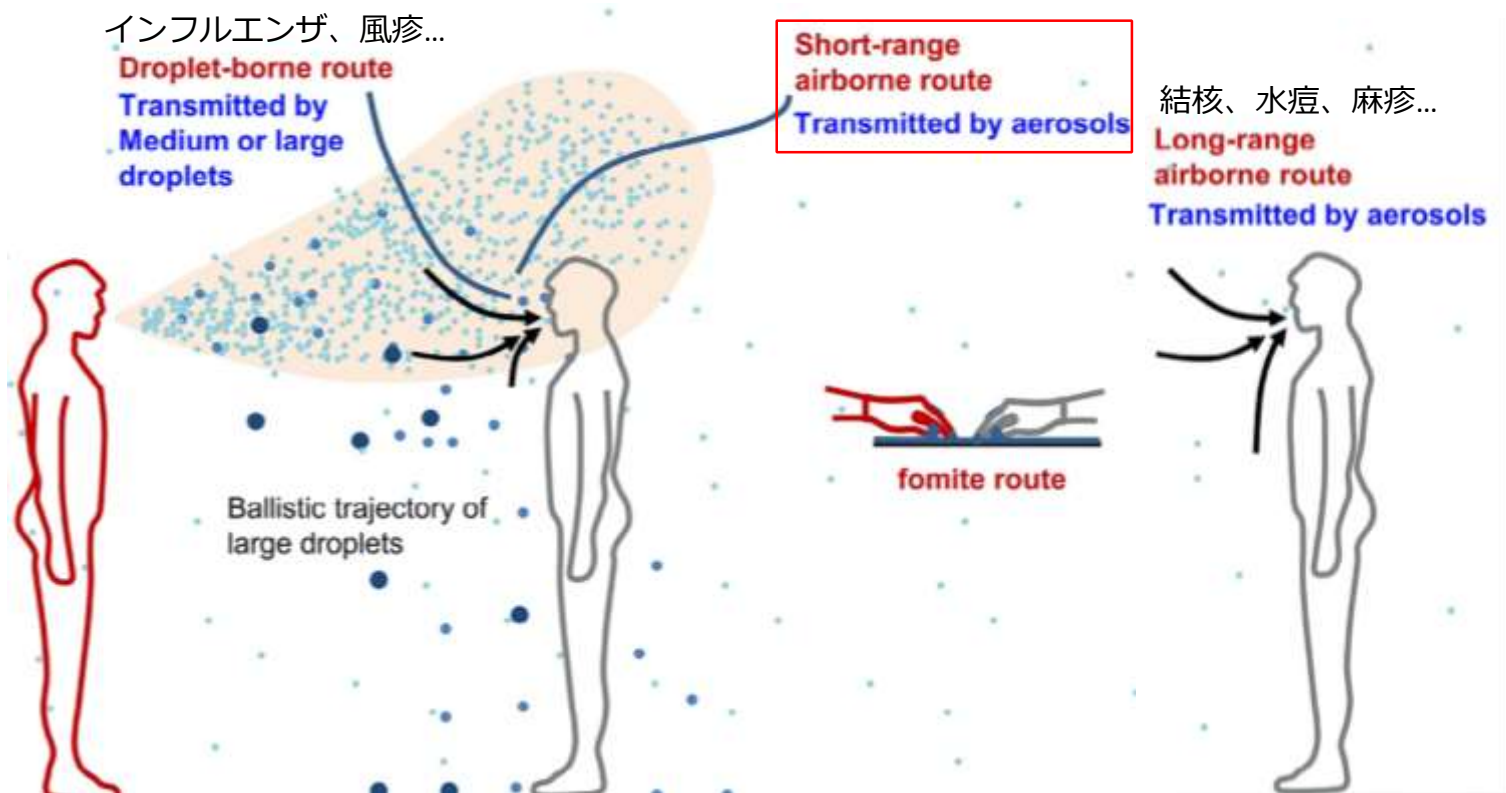
燃焼システム用次世代CAEコンソーシアム



都市・建築CFD コンソーシアム（東京工業大学）

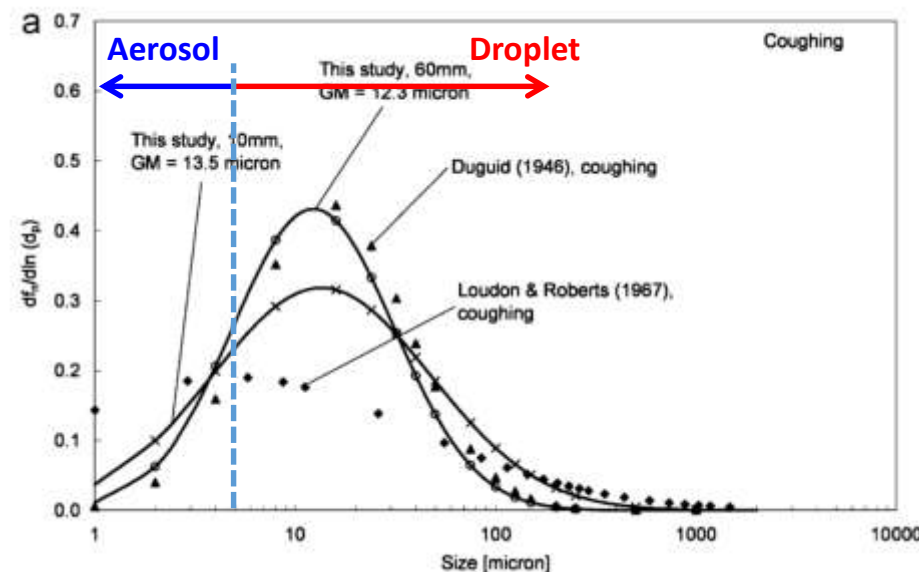


● 飛沫・エアロゾル感染



J. Wei, Y. Li American Journal of Infection Control 44 (2016) S102-S108

咳をした際の飛沫粒径の分布



C.Y.H. Chao et al./Aerosol Science 40(2009)122-133

比較的近距离（数メートル以内）で高濃度のエアロゾルを吸引することによる感染



感染リスクが感染者や被感染者の周りの空気の流れに大きく依存する

「富岳」による飛沫・エアロゾル感染シミュレーション

感染症に対する非科学的な恐れ、
根拠のない過信と侮り

新型コロナに対する圧倒的な
科学的データ不足

圧倒的な計算資源を活用した高精度シミュレーションによる科学的データの提示と飛沫の見える化による現象の理解
(ロックダウンで研究室実験ができない中、この効果は多大)

社会に対する飛沫感染の正しい理解と
その予防の啓発

テレビ・ラジオ：350件，新聞：325件
ウェブ記事：1400件

行政機関や各種業界との連携による
ガイドラインの策定や改定

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）

産学官連携による新型コロナ対策課題の推進

ステアリングメンバー



理化学研究所
計算科学研究センター
RIKEN Center for Computational Science



神戸大学



国立大学法人
豊橋技術科学大学



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology



九州大学



鹿島
KAJIMA CORPORATION



今まで協力いただいたメンバー

(協力者の一部を掲載)



JAPAN AIRLINES



大王製紙株式会社



SUNTORY



TOPPAN



Miraikan



株式会社 東京技研



BOEING



TOYOTA



FUSO



TOYOTA
CUSTOMIZING &
DEVELOPMENT



浜松医療センター
HAMAMATSU MEDICAL CENTER



一般社団法人 日本耳鼻咽喉科学会
The Oto-Rhino-Laryngological Society of Japan



RIT JATA



酪農学園大学



NuFD
Numerical Flow Designing



VINAS
Visual Integration & Numerical Analysis Systems

行政機関



文部科学省



国土交通省
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism



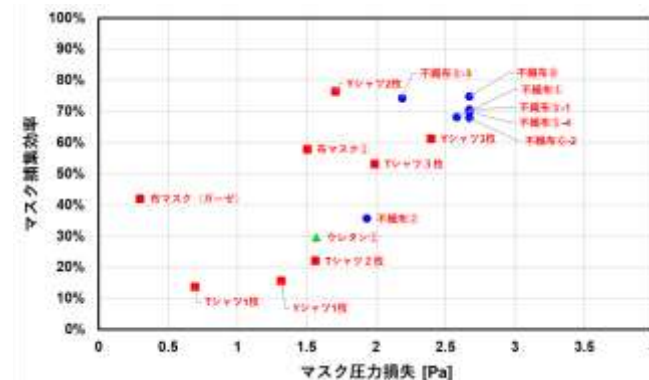
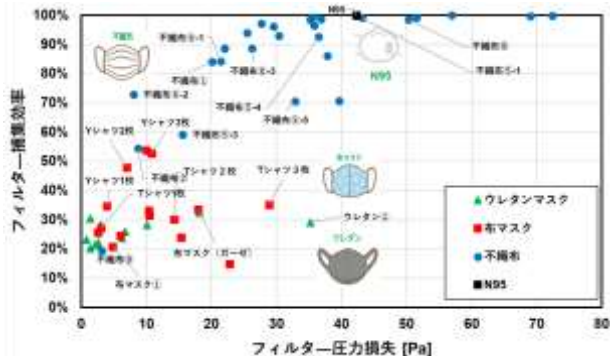
内閣府
Cabinet Office



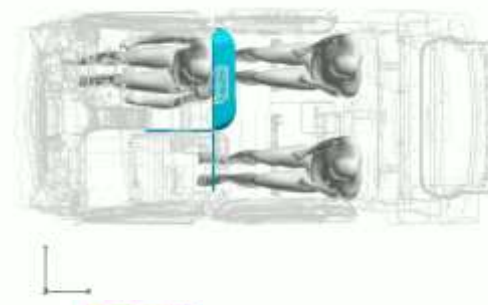
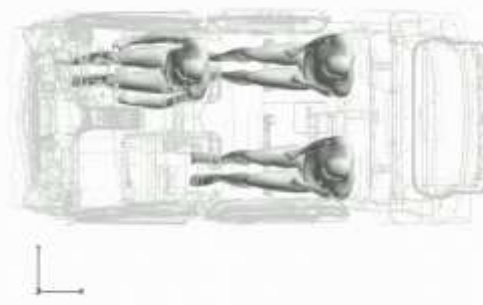
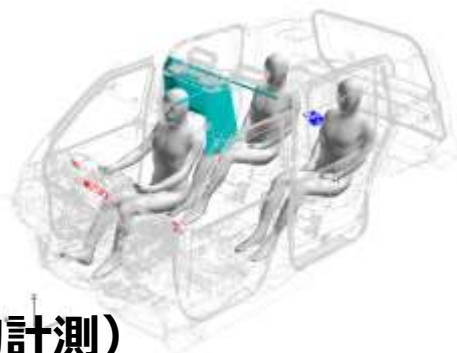
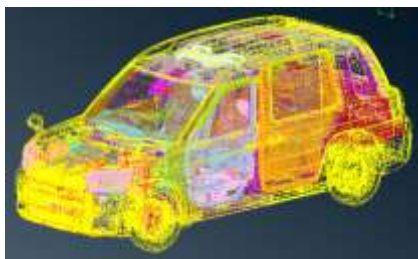
神戸市

感染症リスク評価のデジタルトランスフォーメーション

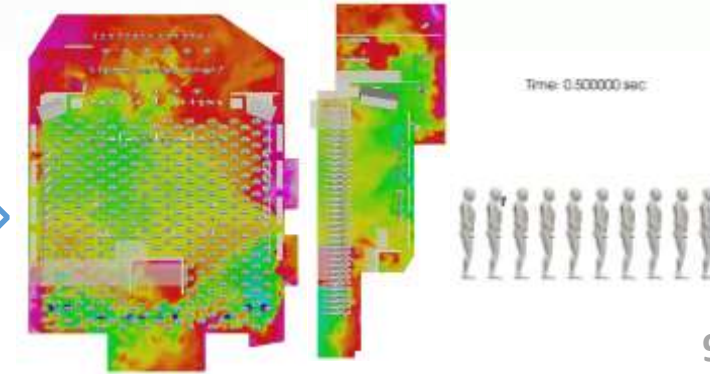
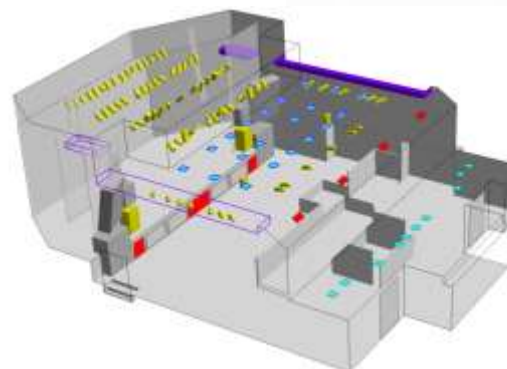
- マスクシミュレーション（シミュレーションによる形状データ自体の作成 + 実験による必要データの計測）

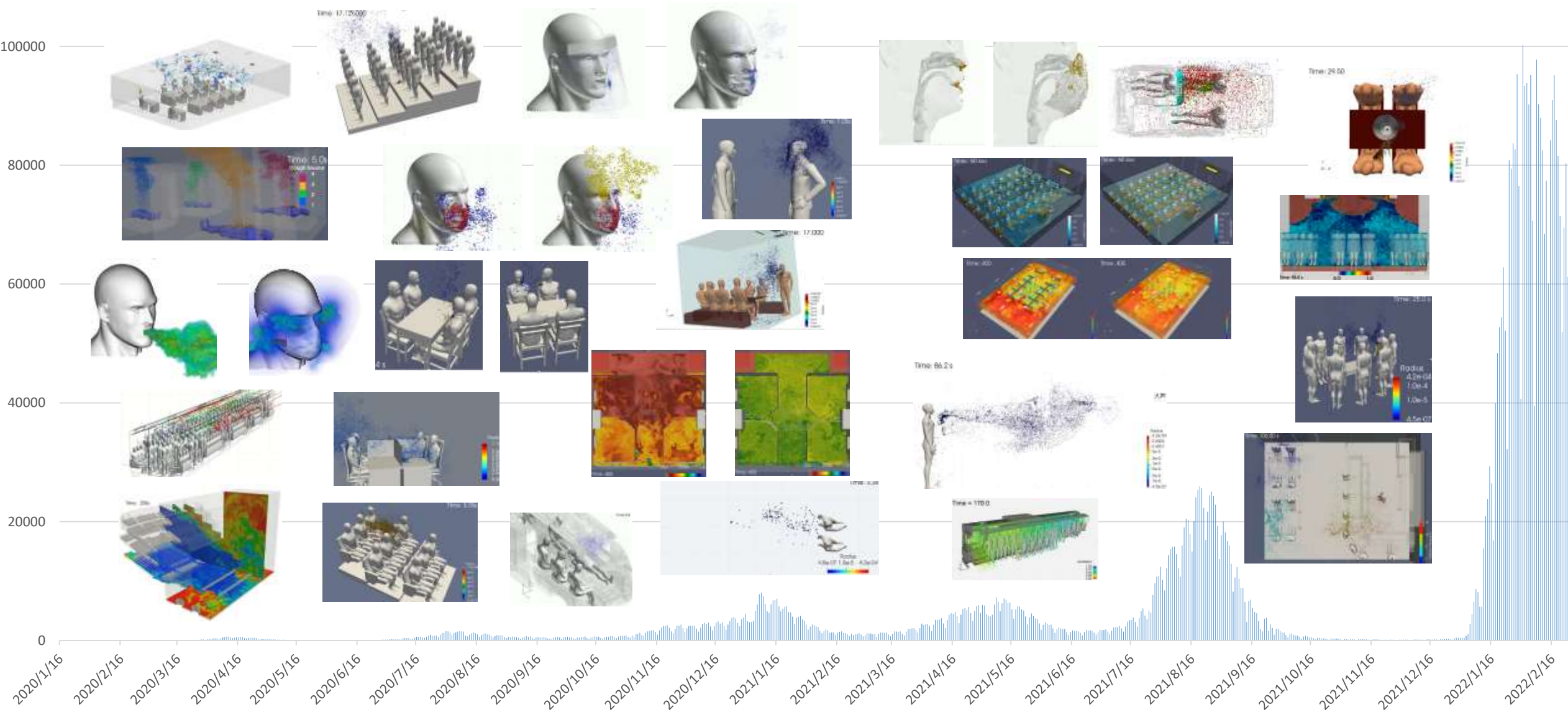


- 公共交通機関での感染リスク評価（CAD形状データの活用）



- 室内での感染リスク評価（実物計測）





- 320以上の新聞、350以上のテレビ、1400以上のウェブ記事



感染確率の計算方法

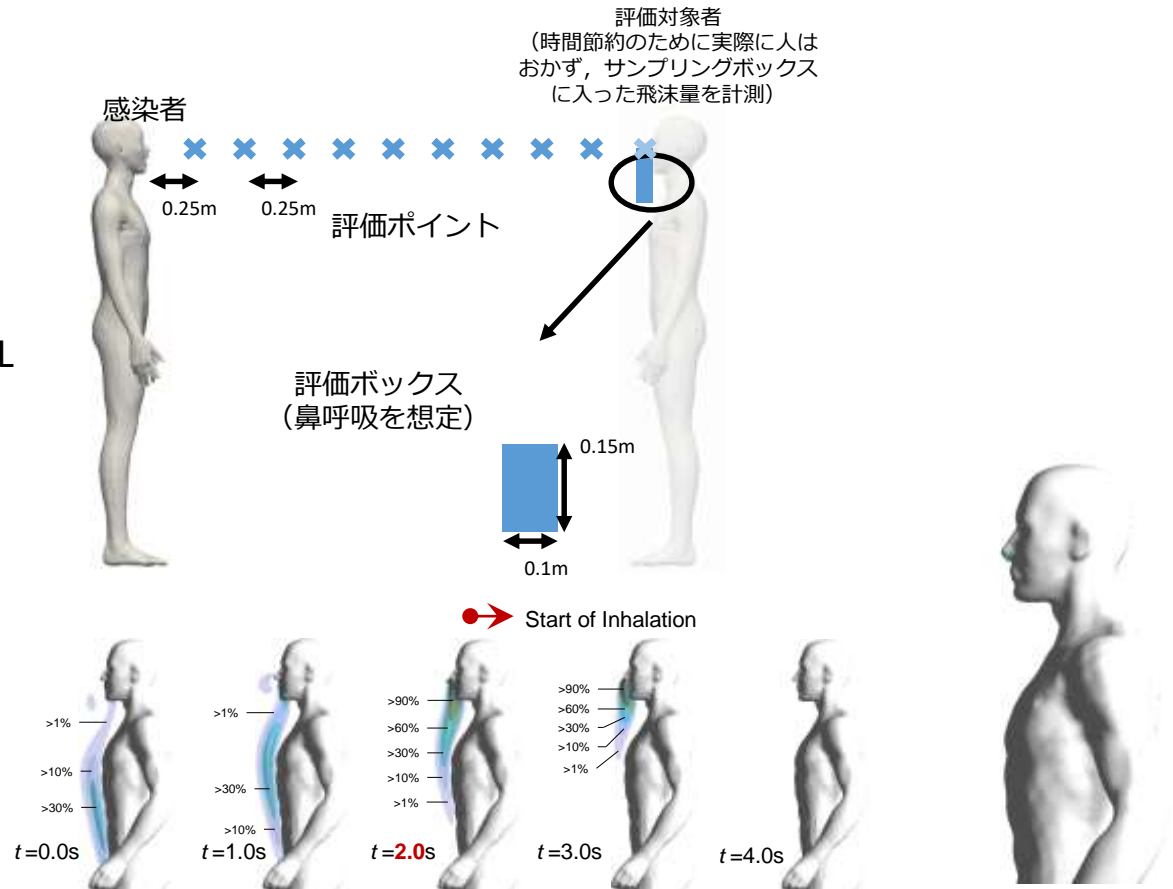
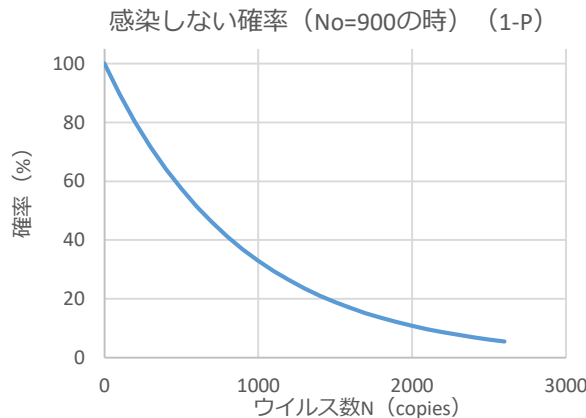
- 通常呼吸を想定して、ある時間に吸引する飛沫の総量 (ml) をシミュレーションにより予測
- 飛沫に含まれるウイルス数を過去の文献より仮定し、呼吸で体内に侵入するウイルス数 (N) を算出
- 感染に至るウイルス数 (N₀) を過去のクラスターイベントより仮定して、以下の式 (ポアソン過程) で感染確率を推定 (文献*より)

$$P(N) = 1 - e^{-\frac{N}{N_0}I}$$

N₀: 感染に至るウイルス量, ここでは300~2000 viral copies
(5つのイベント: 中国観光バス×2, 韓国エアロビ, 韓国コールセンター, 米聖歌隊)

感染者の飛沫に含まれるウイルス数 (ピーク時), 10⁷ copies/mL
(患者により大きく異なる!)

I (強度): 変異株やワクチンの効果、オミクロン株はデルタ株の1.5倍の感染力として概算



伊藤一秀先生 (九大) の計算

飛沫飛散の様子

- 英語でone～tenを9秒（途中で一度吸気）これを繰り返す
 - 1分間で、大声の場合2万5千個程度の飛沫が発生
 - マスクを装着することで漏れ出る飛沫量を1/3程度に抑えると共に、飛散距離を減らすことができる

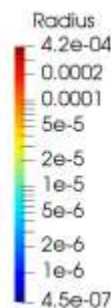
Time: 0.2 s

マスク無し時



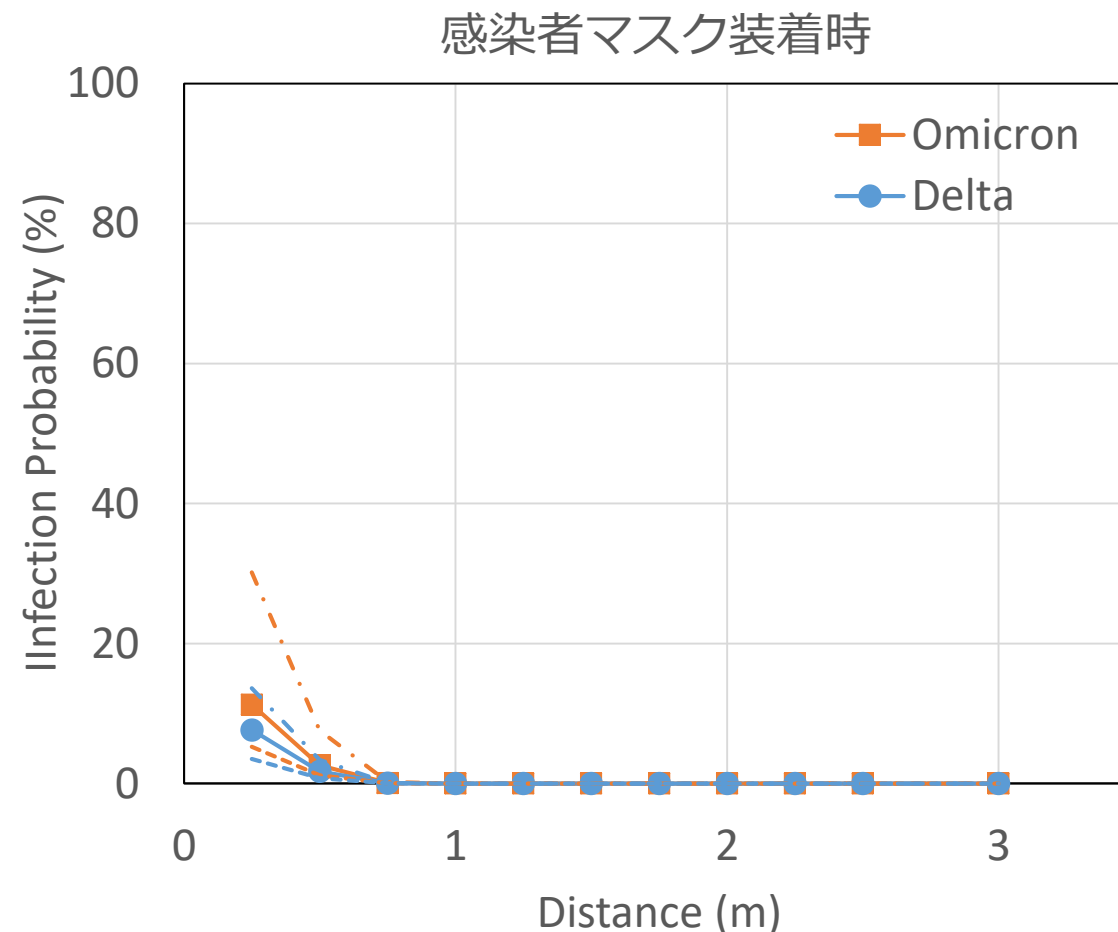
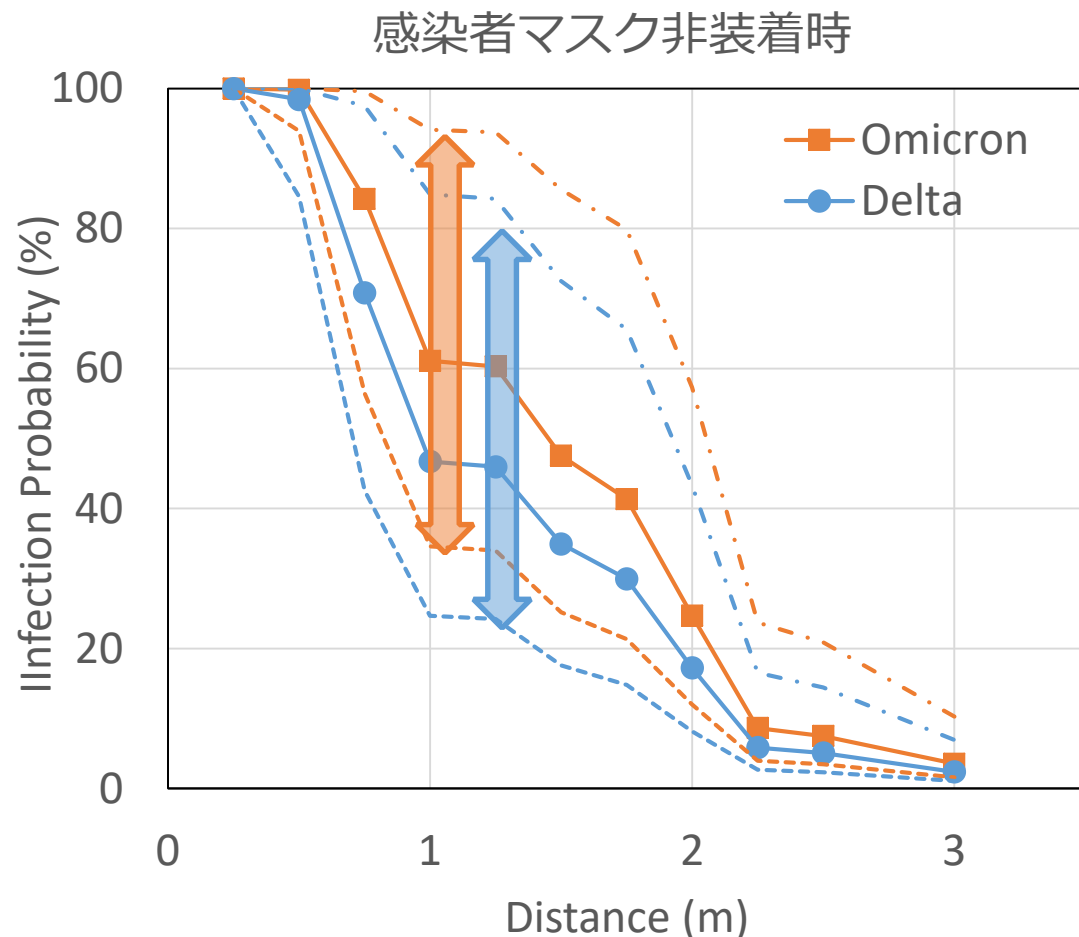
マスク装着時

Time: 0.0 s



感染者と対面した時の感染リスク

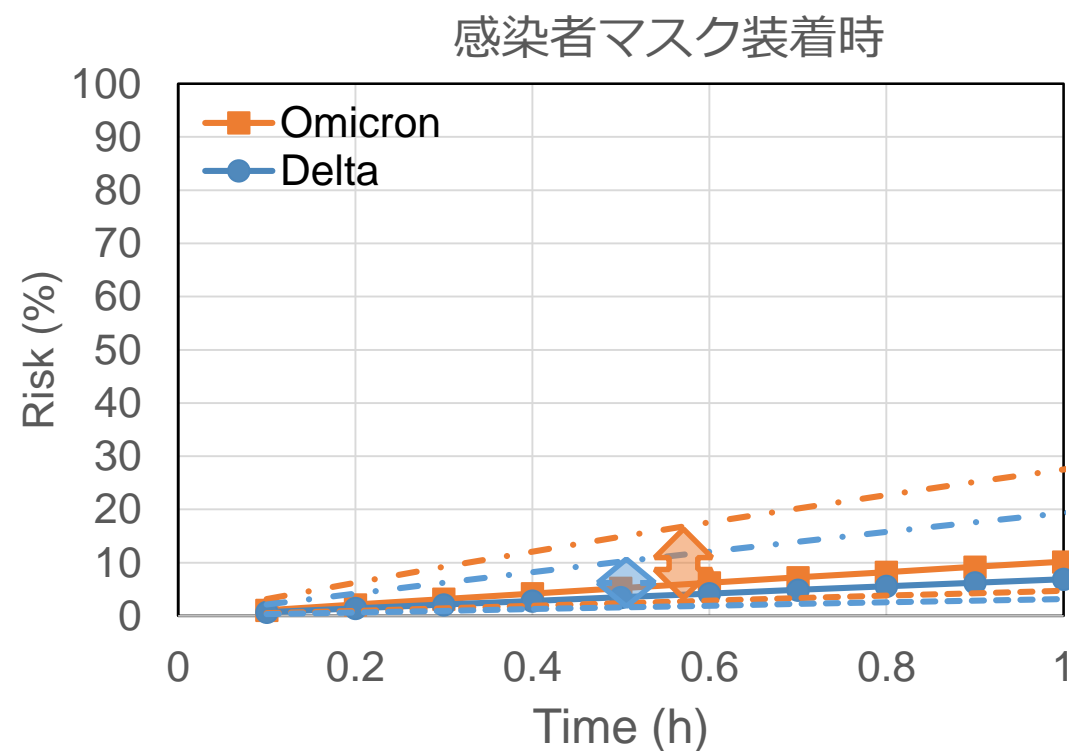
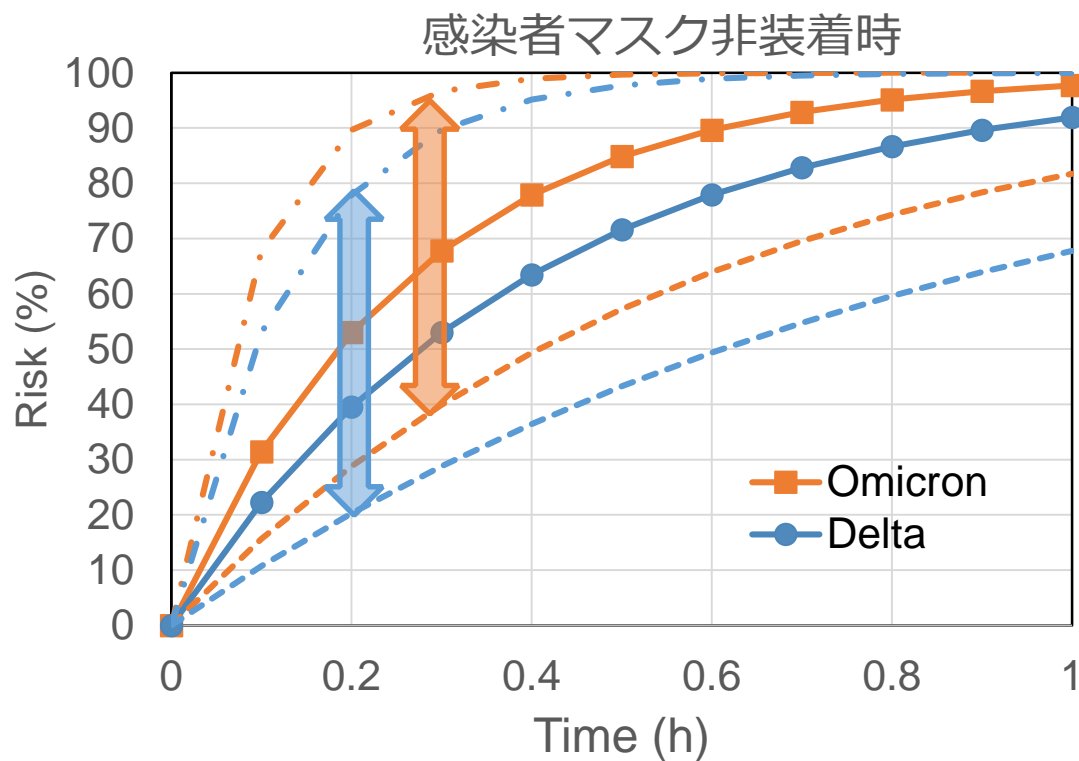
- **15分間**対峙した場合の距離と感染確率（％）の関係と、感染者がマスク（不織布）をした時の効果



- 感染者がマスクをしていても50cm以内に近づくと感染リスクは高まる

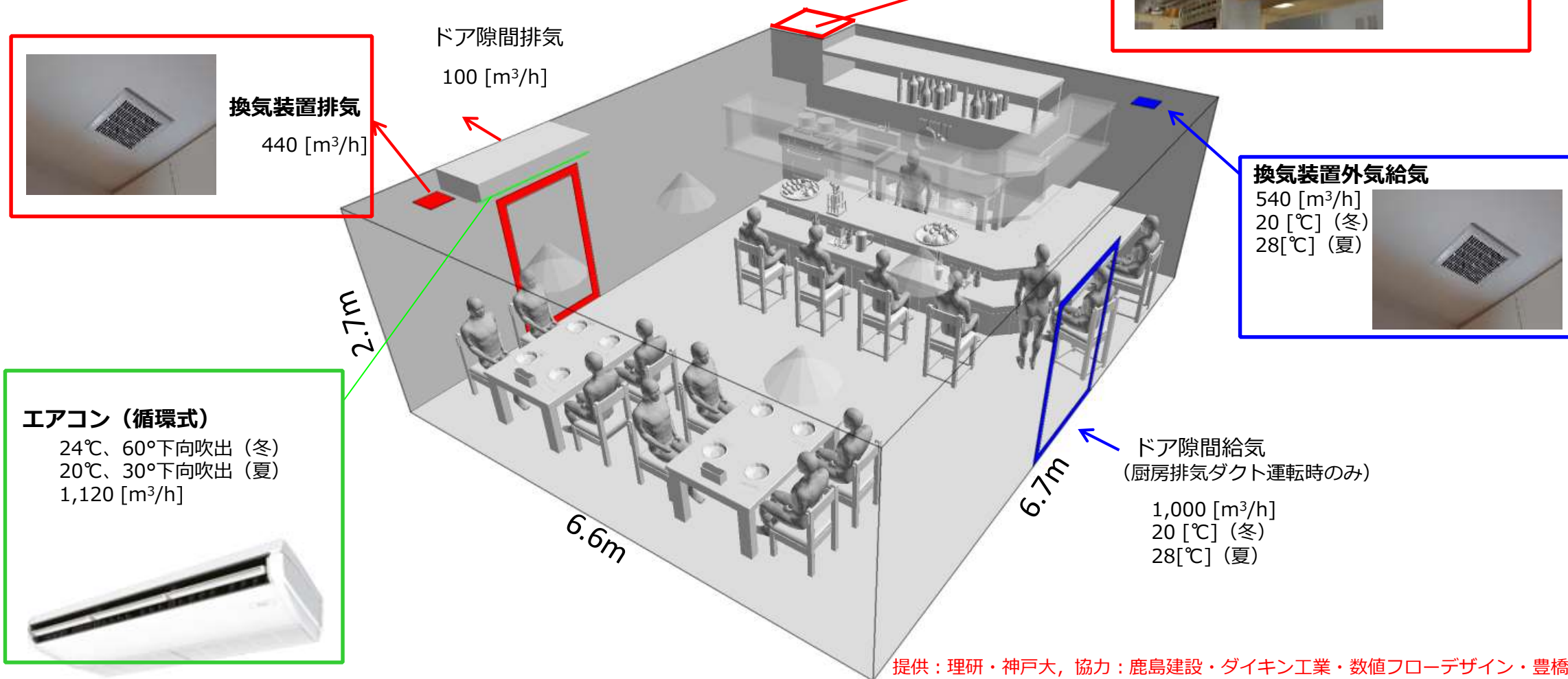
感染者と対面した時の感染リスク

- 1m（マスク非装着）及び0.5m（マスク装着）の距離での感染確率と時間の関係



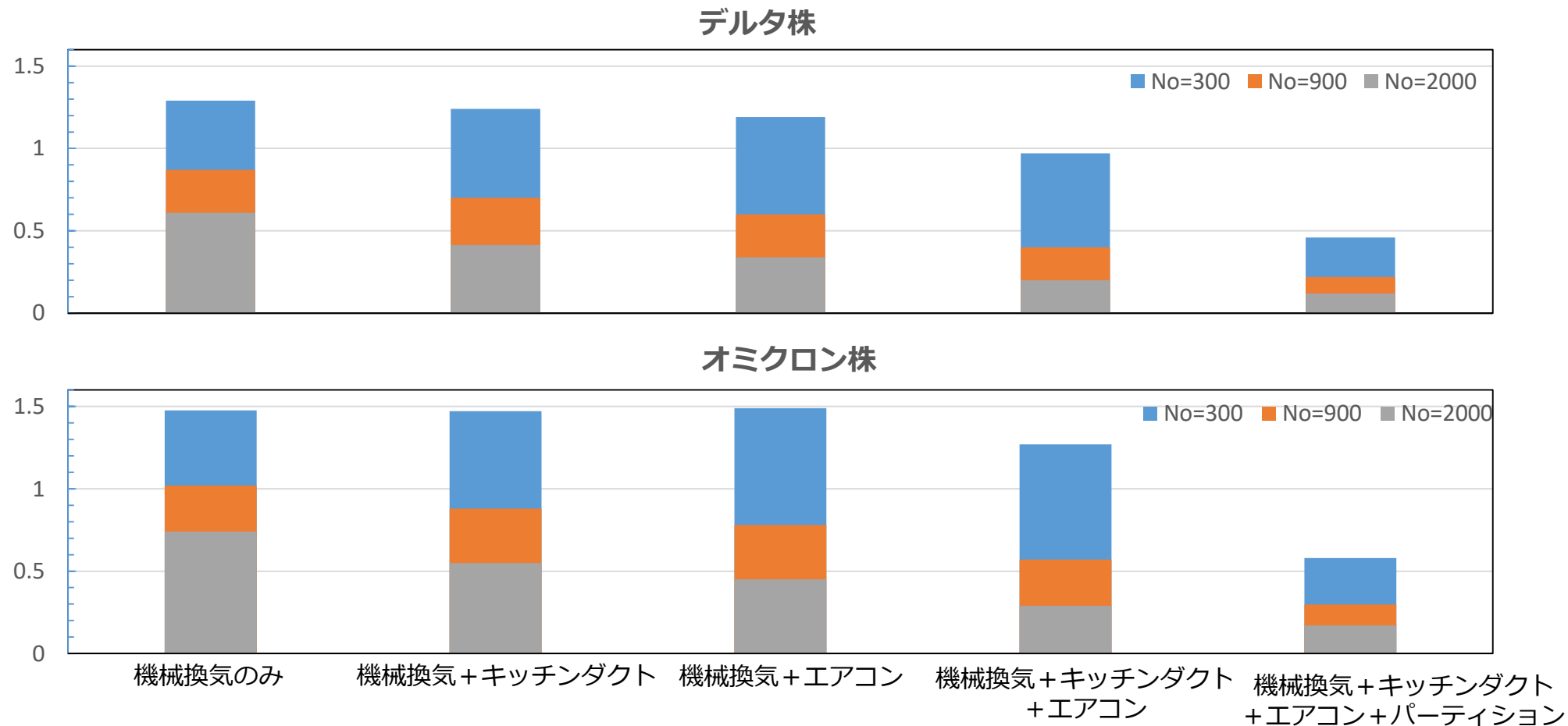
16人程度が入る小型の店舗を想定

- ・ 室内に**1名の感染者**が滞在するとして**在室者1名の感染確率**を求める
- ・ 滞在時間は**1時間**で感染者は**30分間大声**で話していることを想定
- ・ 全員マスクは装着していない



飲食店における感染リスク評価と対策

- 1時間滞在で新規に発生する感染者数の期待値（人）（デルタ株とオミクロン株の比較）

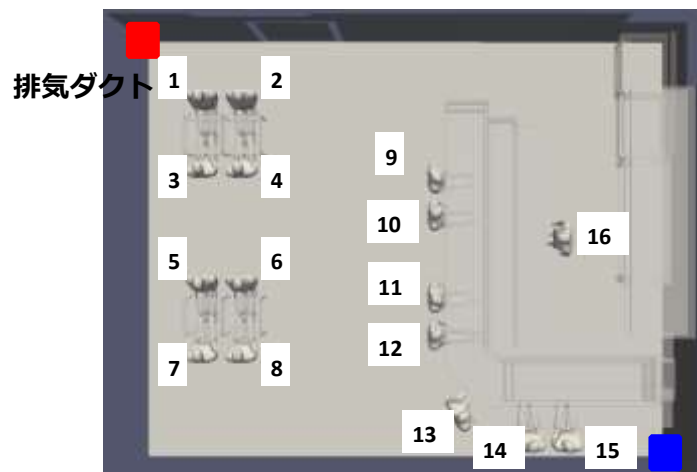


- 換気能力のないエアコンであっても作動させて空気をかくはんさせることでリスクを2～3割程度下げることができる
- 法令による機械換気の状態から、キッチンダクト（換気扇）やエアコン、さらにはパーティションを作動させることで、感染リスクは三分の一程度まで下げることができる

● 感染リスクマップの見方

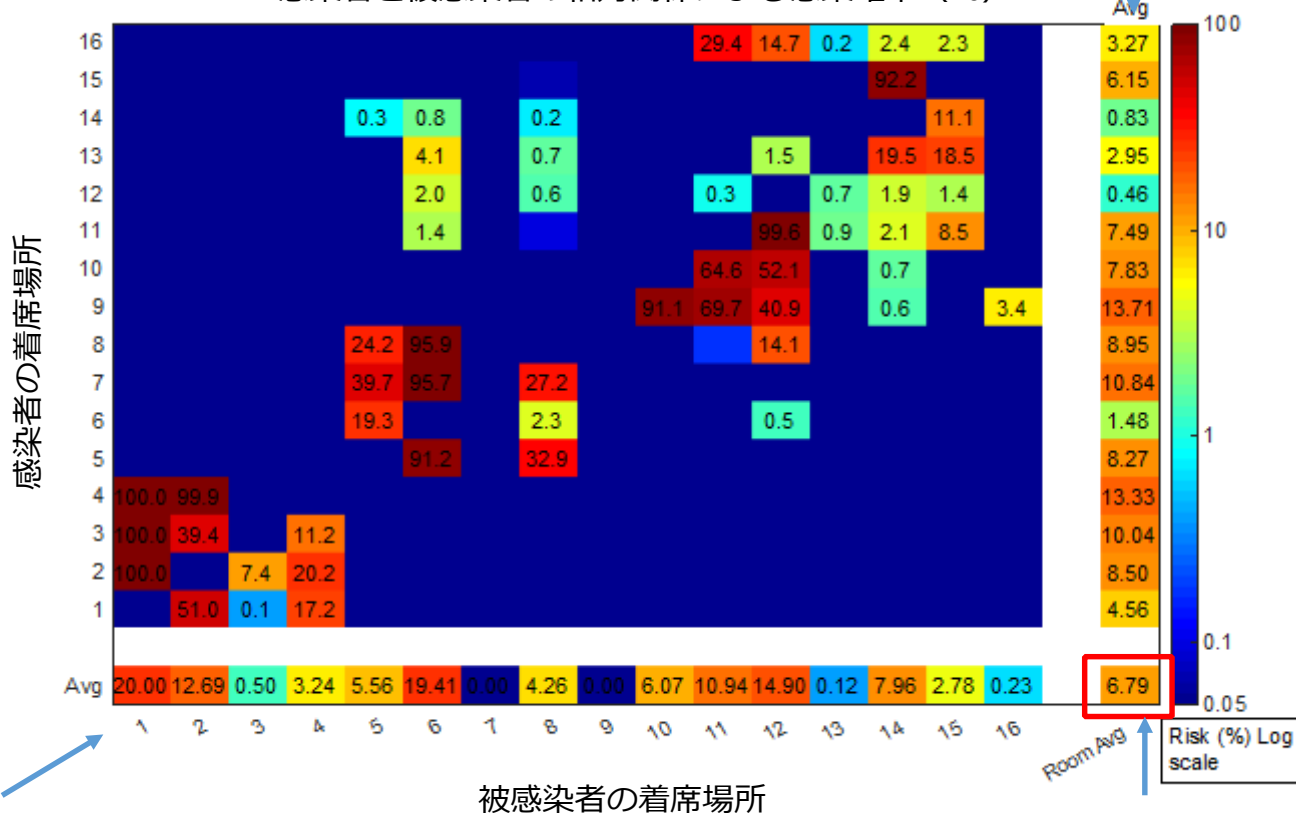


着席場所の番号



給気ダクト

感染者と被感染者の相対関係による感染確率 (%)



縦軸を感染者を除く15人で平均した値
健康者がそこに座った場合の感染確率を表す

被感染者の着席場所

縦軸もしくは横軸を16人で平均した値
部屋全体の感染リスクを表す。
これに16をかければ、1名の感染者が1~16の全ての場所で同じ確率で着席した場合の、新規感染者の数を表す。

横軸を感染者を除く15人で平均した値
感染者がそこに座った場合の感染確率を表す

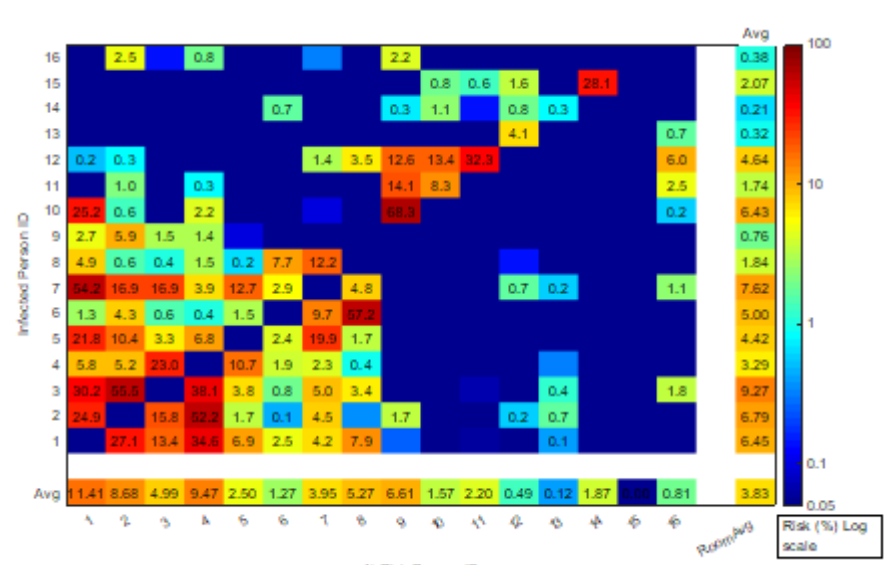
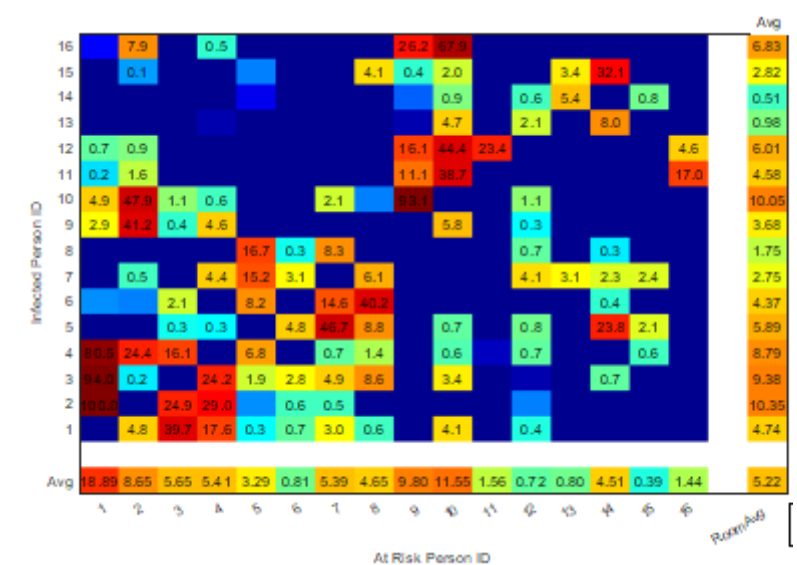
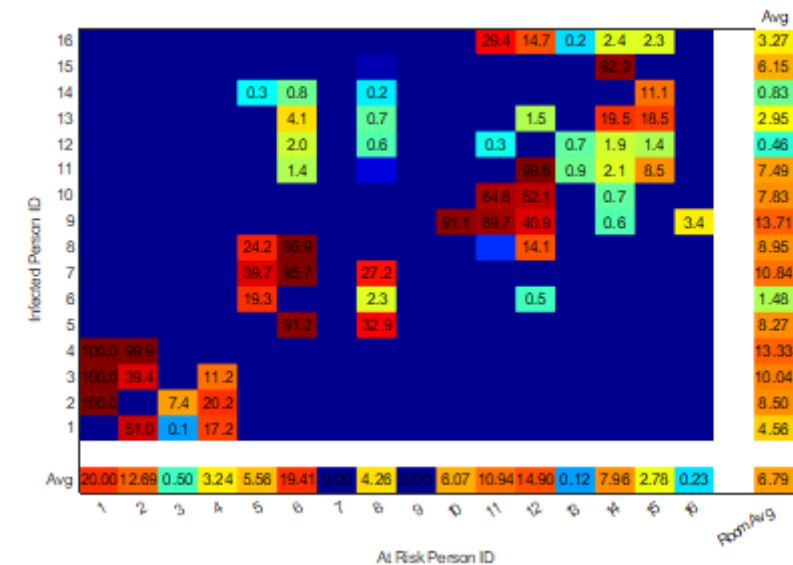
飲食店における感染リスク評価と対策

提供：理研・神戸大，協力：鹿島
建設・ダイキン工業・数値フロー
デザイン・豊橋技科大

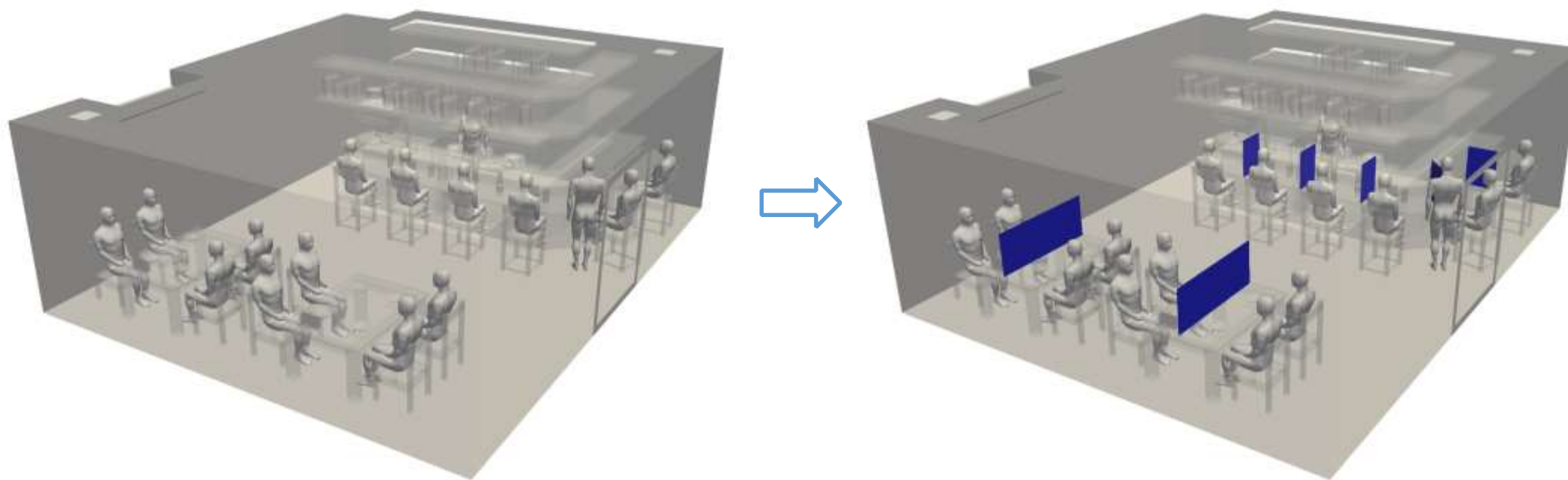
機械換気のみ

機械換気+エアコン

機械換気+キッチンダクト+エアコン



- 対策案：パーティション



テーブルのサイズ：160x108cm

テーブル高さ：77cm

カウンター高さ：89cm

パーティション高さ：60cm

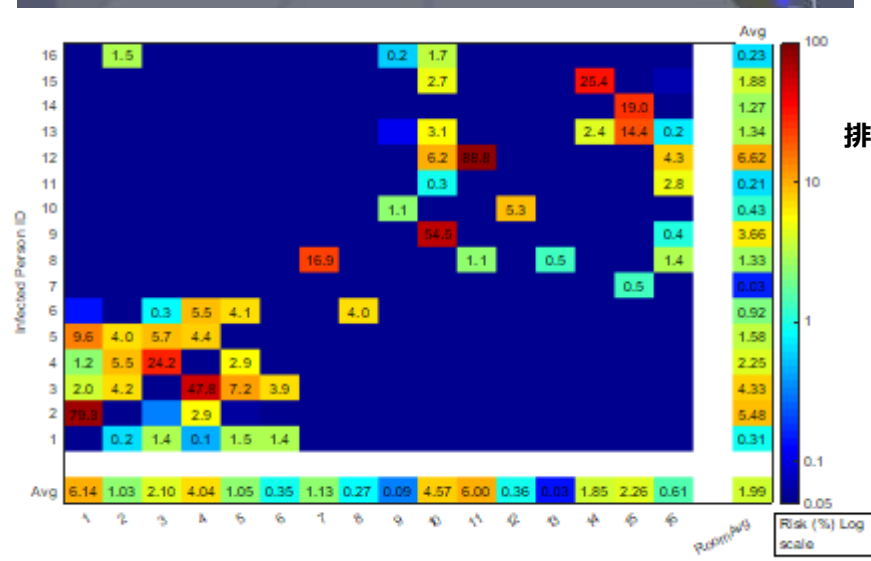
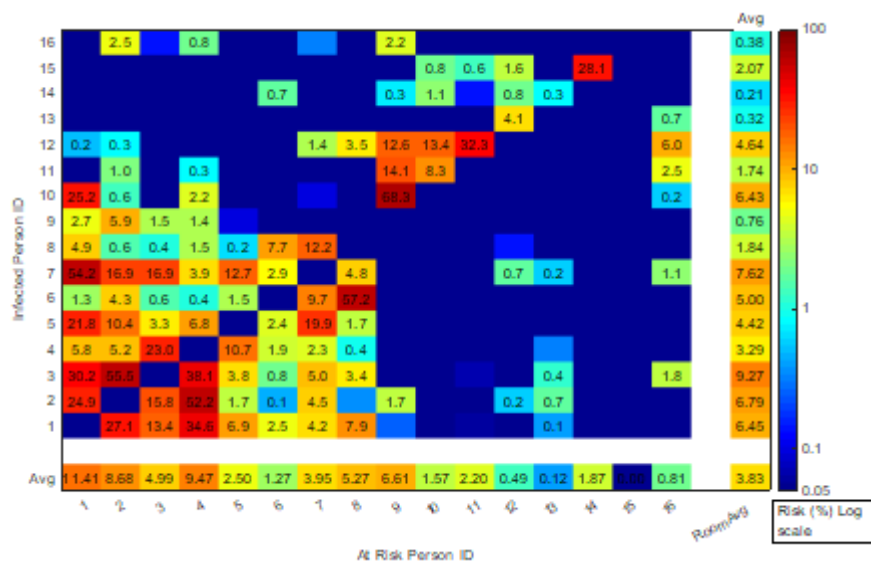
飲食店における感染リスク評価と対策

提供：理研・神戸大，協力：鹿島
建設・ダイキン工業・数値フロー
デザイン・豊橋技科大

機械換気+キッチンダクト+エアコン



機械換気+キッチンダクト+エアコン
+パーティション



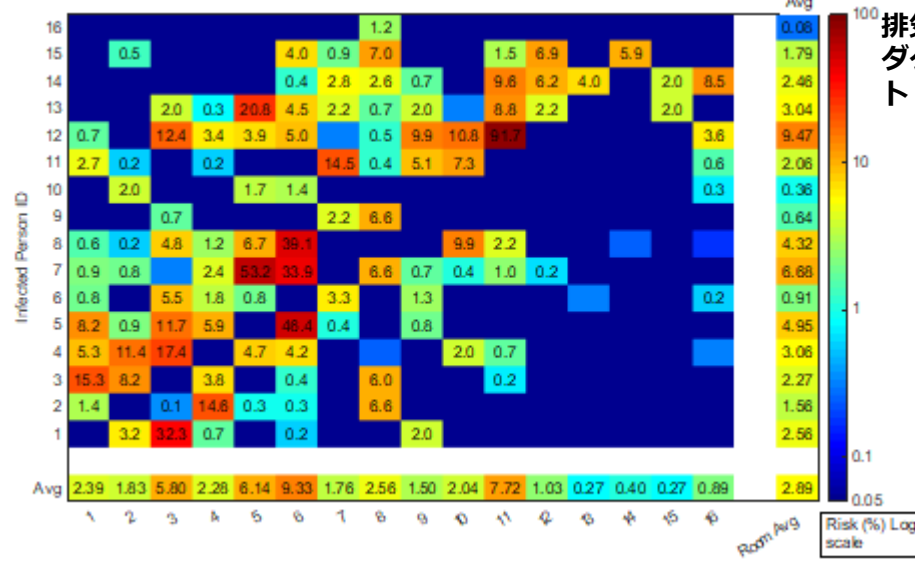
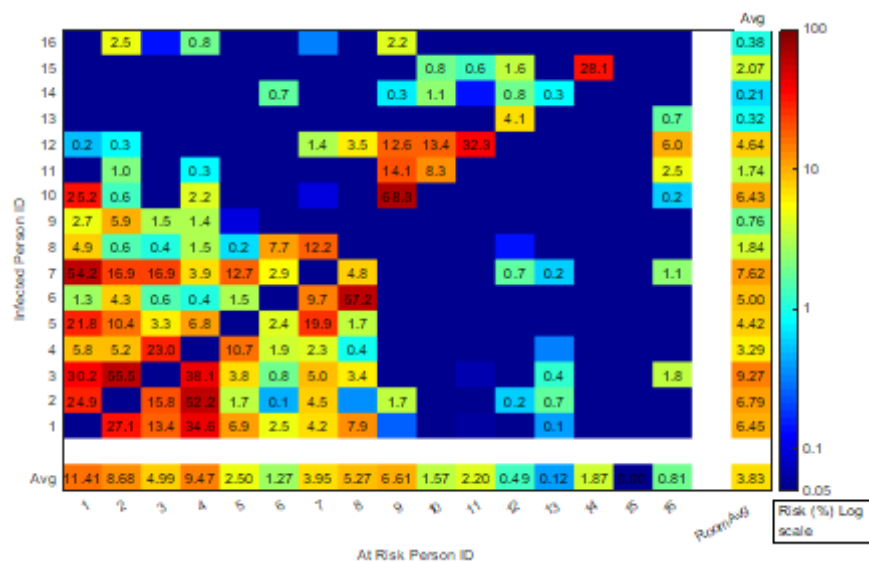
着席場所の番号



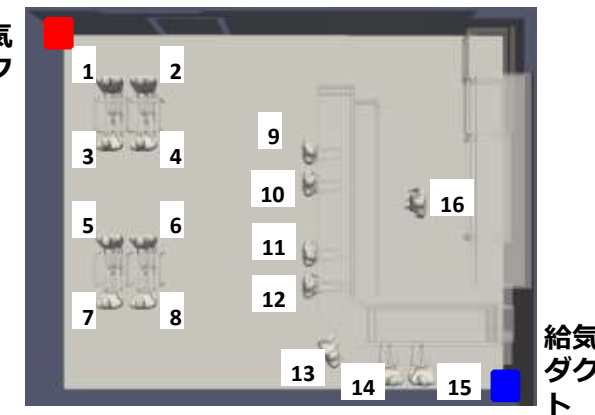
● 夏（左）と冬（右）の違い（機械換気＋エアコン＋キッチンダクト）



エアコン吹き出し方向の違い（夏は天井に対して30°、冬は60°）により、空気がより「かくはん」され、リスクがやや低くなっている。



着席場所の番号



提供：理研・神戸大，協力：鹿島建設・ダイキン工業・数値フローデザイン・豊橋技科大

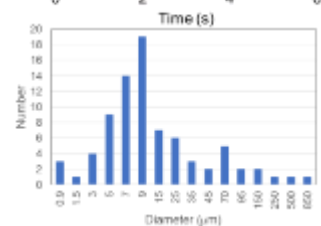
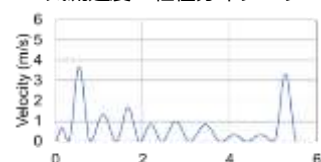
統合的飛沫感染リスク評価システム

飛沫発生モデル

感染者の飛沫発生条件
(呼吸, 発話, 咳....)

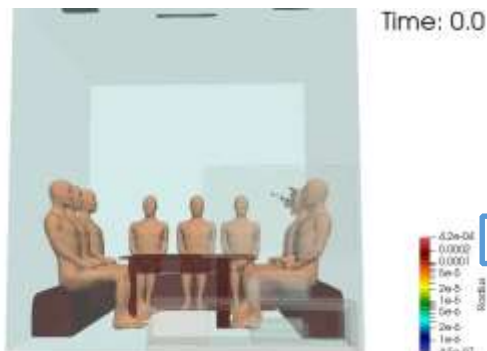


気流速度・粒径分布データ

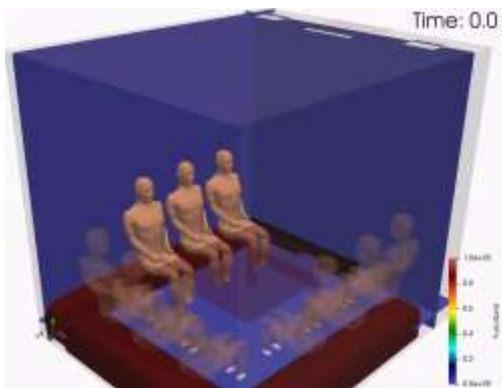


室内飛沫・エアロゾル飛散モデル

室内環境情報+人の配置状況



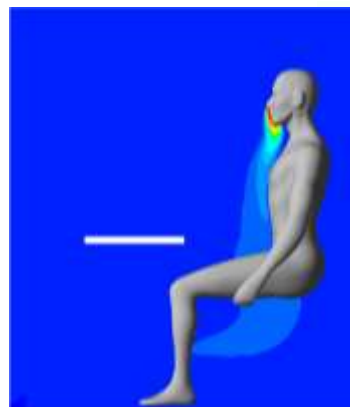
高精度気流・飛沫連成解析



高精度乱流シミュレーションに基づく室内空気質評価

数値人体モデル

被感染者の生体情報データ



人体吸気の精密な再現



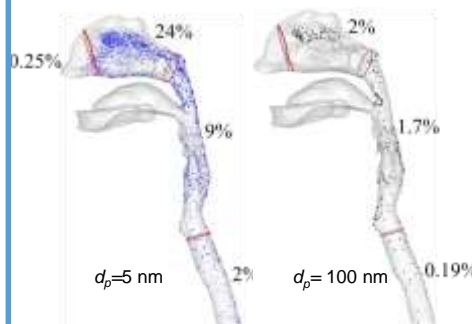
人体表面の精密な再現

数値気道モデル

被感染者の生体情報・吸気状態



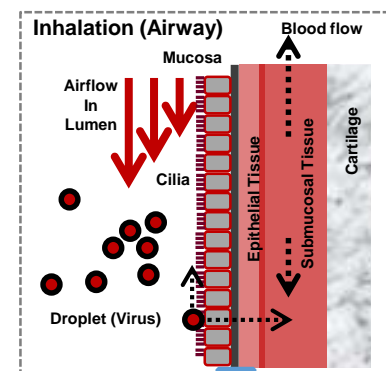
鼻腔・口腔から気管支まで再現



飛沫粒径に応じた気道内沈着分布の高精度予測

感染リスク推定モデル

被感染者の生体情報・対象ウイルスデータ



Bioregulation
(Host cells, Pathogen, Adaptive Immune System)

$$\frac{dT_T}{dt} = -\beta_T T_T V - \phi F T_T + \xi R \frac{dR}{dt} \quad (\text{Target Cells})$$

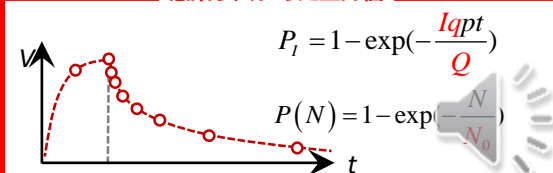
$$\frac{dI}{dt} = \beta_T T_T V - \kappa_F I F - \kappa_E I T_C - \delta_X I \quad (\text{Infected Cells})$$

$$\frac{dV}{dt} = \beta_E I - \delta_V V - \kappa_V V A \quad (\text{Virus})$$

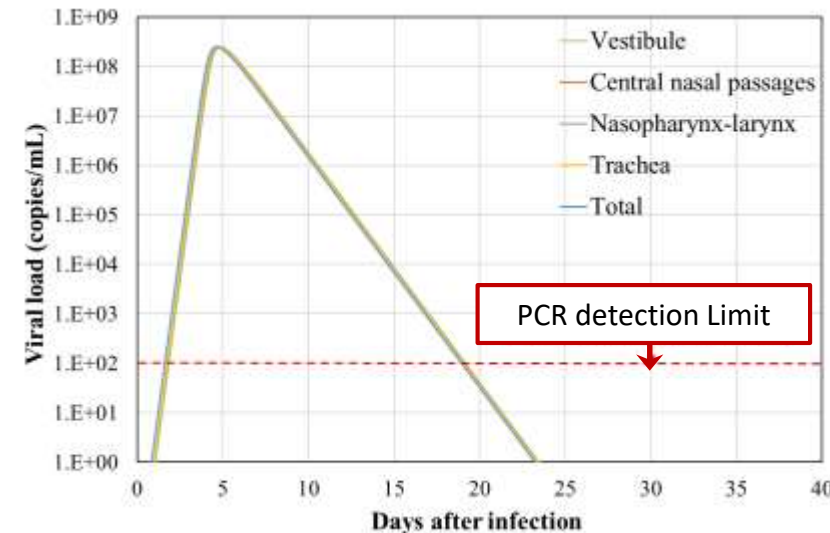
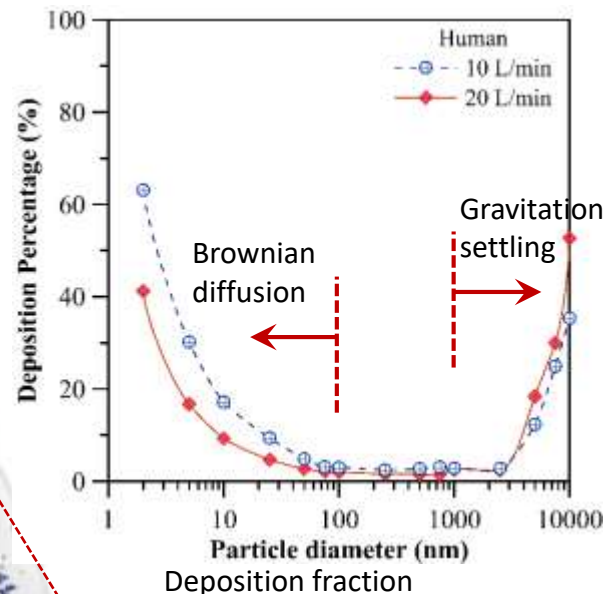
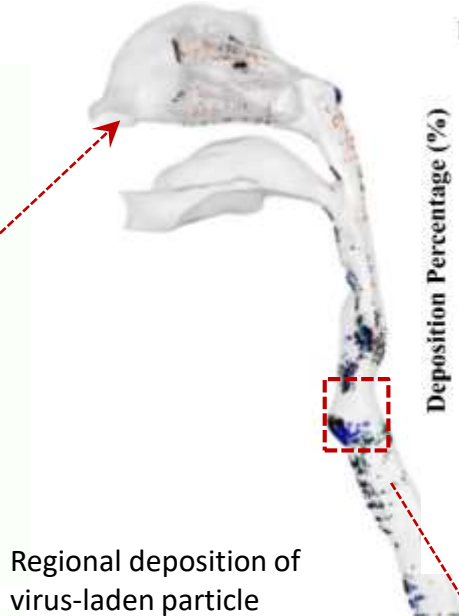
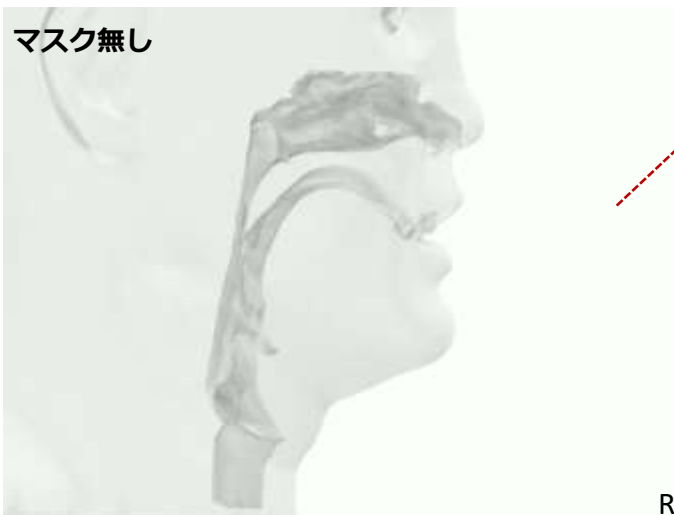
$$\frac{dF}{dt} = \beta_F I - \kappa_A F \quad (\text{Interferon})$$

$$\frac{dT_H}{dt} = \left[\frac{\pi_{H2} D_M}{\pi_{H2} + D_M} \right] (1 - T_H / K_H) - \left[\frac{\delta_{H2} D_M}{\delta_{H2} + D_M} \right] T_H \quad (\text{Helper T Cells})$$

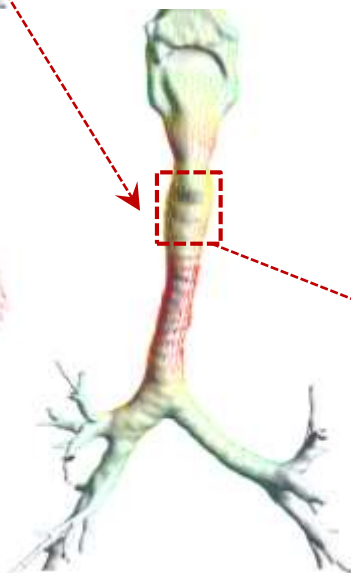
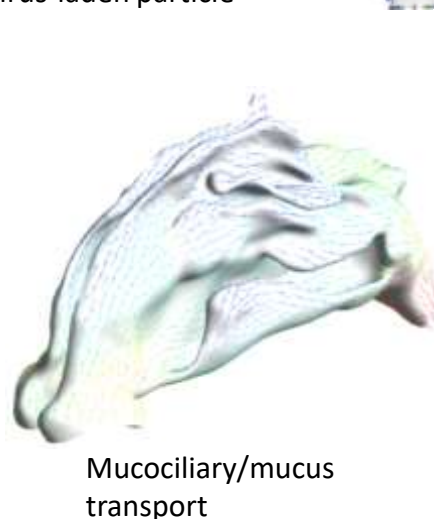
感染リスクの定量評価



- 飛沫の吸引、気道表面への沈着、宿主細胞の感染ダイナミクス



Resultant viral replication



Bioregulation – Host Cell Dynamics
(Host cells, Pathogen, Adaptive Immune System)

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = -\beta T(t)V(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta T(t)V(t) - \delta I(t) \\ \frac{dV(t)}{dt} = pI(t) - cV(t) \end{cases}$$