

---

**総 説**

---

# 室内環境中での経気道感染を予測する *in silico* モデルと可視化

伊藤 一秀

九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

## Development of *in silico* human model for airborne transmission analysis in indoor environment

Kazuhide Ito

Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

---

### 要旨

室内環境中には一般に非定常性・不均一性の強い汚染物質濃度場が形成される。咳や会話による飛沫・飛沫核の室内拡散と感染伝播の問題は、この室内環境場の非定常性と不均一性を前提として議論することが重要である。本稿では、計算流体力学 CFD を基盤とした室内流れ場・濃度場解析技術に統合可能な数値人体モデル (*in silico* モデル) の概要と経気道感染予測への適用事例に関して紹介する。

(臨床環境 31 : 22 - 32, 2022)

---

《キーワード》 室内環境、飛沫・飛沫核、経気道感染、計算流体力学、*in silico* 人体モデル、SIR モデル、TIV モデル

---

### Abstract

To address the problem of airborne transmission caused by droplets/droplet nuclei containing viruses, it is important to accurately understand virus dynamics in the indoor environment from the generation/emission from infected subject to exposure of targeted subject via indoor air. Conducting research on airborne infectious viruses requires rigorous prior ethical review, and experimental studies on the human body, e.g., *in vivo* and *in vitro* experiments, are severely limited. Therefore, *in silico* model-based research methods i.e., numerical modeling and numerical analysis approaches, are expected in terms of

---

受付：2022年6月9日 採用：2022年7月12日

責任著者：伊藤一秀

九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

its flexibility for case and sensitivity analysis. In this study, assuming airborne transmission by SARS-CoV-2 in an indoor environment, we develop and perform a seamless and continuous numerical analysis of the virus-laden droplets dispersion exhaled by coughing from an infected subject, subsequent inhalation exposure of a target subject to respiratory tract through transient breathing, and resultant virus deposition and replication on mucosal epithelial tissues. This may be a promising method to determine the infection risk by comparing the time variation of viral RNA copies by numerical analysis with the detection limit of PCR. Here this report introduces the demonstrative results of a discussion of changes in the infection risk when the physical distance between infected and target subjects is changed, in terms of changes in viral replication in the respiratory tract.

(Jpn J Clin Ecol 31 : 22 – 32, 2022)

---

《Key words》 Indoor Environment, Droplet/droplet nuclei, Respiratory infection, Computational Fluid Dynamics, *in silico* human model, SIR model, TIV model

---

## 1. 序

人々の活動範囲がグローバル化すると共に、密度の高い都市居住が加速することで、様々な感染症が都市の中で急速に拡大する事態、パンデミックの発生が懸念されてきたが、2019年末に中国武漢で発生したとされる新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) による感染症は瞬く間に全世界に伝播し、深刻化した。この新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 問題に対し、建築環境工学・建築設備分野の研究者には感染リスクを低減するための室内環境調整法、特に換気設計やその運用に関する情報発信が求められてきた。しかし、2年以上経過し既に感染のピークは越えたとされる現時点 (本原稿執筆時は2022年6月) においても、建築基準法や関連法規で定められた一人あたり換気量 ( $20\text{m}^3/\text{h}$  もしくは  $30\text{m}^3/\text{h}$ ) が担保された空間は「換気の悪い空間には該当しない」と述べるのが精一杯で、一般環境を対象とした場合の「気道感染の制御に効果のある換気設計」を具体的に提示するには至っていない。そもそも気流場が非線形現象であり室内幾何形状や換気システムによって解が多様に変化する上に、居住者の移動に伴うウイルス発生の境界条件を適切に与えることが難しい、と云った多くの不確定要素の存在に加え、ウイルス感染という細胞スケールの現象と飛沫・飛沫核拡散による感染伝播という室内スケールの現象をシームレスに、且つ、定量的に記述することの難しさがある。更には、こ

れらの基礎研究的な予測評価モデルや一連の数値解析手法を換気設計や運用の実務へ実装出来るレベルまで昇華させることの困難さ、といった問題もある。

一般に、室内には不均一性の強い流れ場が形成されており、飛沫もしくは飛沫核として呼出されたウイルス含有エアロゾルは非定常かつ不均一な濃度場を形成する。居住者個々人の感染リスクを正しく議論するためには、この非定常・不均一濃度場の形成を正しく理解し、発生源から室内空気を介して人体呼吸器粘膜上皮に至る輸送動態、即ち経気道曝露に伴う感染経路を精緻に再現する一連の数値解析モデルが必須となる。更に、気道内粘液・粘膜に沈着したウイルスの増殖を数値的に再現した上で、粘液中のウイルス濃度 (例えば RNA copies/mL など) の時間変化を予測し、PCR (ポリメラーゼ連鎖反応 Polymerase Chain Reaction) の検出限界値との比較から感染の有無 (陽性/陰性判定) を評価する一連の数値解析モデルの開発が必要となる。COVID-19の他、季節性インフルエンザや結核などの感染伝播を含めて、多くの研究者が室内環境中での感染メカニズム解明に取り組んでいるものの、現時点では室内環境中の非定常・不均一濃度分布と人体の関係を、曝露・感染リスクの点で接続する研究成果が圧倒的に不足している。

本稿では、この課題に対して筆者らの研究グループが開発に取り組んでいる計算流体力学

CFDによる室内環境解析技術への統合を目指した *in silico* 人体モデルの開発概要と、この *in silico* 人体モデルを室内環境中での感染伝播予測へ適用した事例、さらに気道内でのウイルス沈着・増殖現象の可視化事例を紹介する<sup>1-14)</sup>。

## 2. 完全混合系の室内換気設計と換気量

室内環境中には多様な汚染物質が存在することから、特にオフィス空間や一般住宅の居室などは、人体由来の主要な Bio-effluent である二酸化炭素濃度をトレーサーとして室内空気質の制御、すなわち換気設計を行う。この場合、汚染物質発生量は既知で空間一様に定常発生し、流れ場は完全混合状態にある、と云った大胆な仮定を前提とすることが一般的である。設計換気量は、室の完全混合系を対象としたマスバランス式を基に、想定される汚染物質発生量を設計段階で参照可能な濃度閾値やガイドライン濃度値で（単純に）除することで決定される。例えば、人体由来の汚染物質の制御を意図する場合には、呼吸器系でのガス交換に伴う二酸化炭素発生量（フラックス）を既知として固定し、室内濃度1000ppmを維持するための換気量として主に $20\text{m}^3/\text{h}/\text{人}$ （ $\text{CO}_2$ 発生量を着席安静時の $0.013\text{m}^3/\text{h}$ と想定）もしくは $30\text{m}^3/\text{h}/\text{人}$ （ $\text{CO}_2$ 発生量を軽作業時の $0.020\text{m}^3/\text{h}$ と想定）といった値が用いられる。新型コロナウイルス SARS-CoV-2による経気道感染問題（COVID-19）に対する対策の一つとして、換気（外気導入）による室内空気質制御が着目されたが、そもそもオフィスや住宅などを対象とした換気量設計は、前述のとおり人体由来の二酸化炭素濃度の適切な維持を設計対象としており、感染リスクの制御を意図したものでは全く無い。

オフィスや住宅といった一般環境中での感染症もしくは感染制御を対象とした換気基準は、少なくとも筆者の知る限りでは存在しない。換気設計の前提条件となる室内でのウイルス発生量や感染に寄与する空気中のウイルス濃度（どの程度のウイルスに曝露したら感染するのか）といった基本情報がウイルス種によって大きく異なり、また研究蓄積も不十分であることから、具体的な閾値設

定が困難である。そのため、空気感染性汚染物質（ウイルス）によるパンデミックが発生した場合に、即座に対応可能な換気設備やそのための設定値に関する基準は無い。それにも関わらず（他に出来ることが限定されるので）換気制御へ過大な期待が寄せられたこと、これが、今回の COVID-19の混乱の一因であろう。

感染制御を意図した換気量設計値としての一つの目安は、感染症患者の治療を対象とした病院での環境基準となろう。我が国の病院設計では、一般病棟を対象とした換気設計では換気回数6回/h（名目換気時間 $\tau=10$ 分）、感染症隔離病棟では換気回数12回/h（ $\tau=5$ 分）が基準とされている。一般住宅の換気回数0.5回/h（ $\tau=2$ 時間）と比較すれば、12倍から24倍の次元の異なる大量の換気量確保が求められている。また、感染症隔離病棟では、病棟外への感染性汚染物質（ウイルス）拡散を抑制するために圧力管理が求められており、隔離病室と室外との圧力差 $2.5\text{Pa}$ 以上を確保し、感染隔離室側を負圧（陰圧）とすることが求められている。

2003年に顕在化した SARS によるパンデミックの事例では、香港のアモイガーデン（集合住宅）にて大規模な感染拡大が発生したが、WHOの報告書によれば、SARS 感染者のウイルスを含む汚物が排水管（集合住宅を上下に貫通する縦汚水排水管）に放出された際、一部の一般住居の浴室床面に設置されていた排水口の封水トラップ（U型トラップ）が乾燥した状態にあり、汚染された下水の一部がエアロゾル化し、下水システムから浴室側に流入したことで感染が集合住宅全体に拡大した。これは、浴室が第三種機械換気の下流側ゾーンとなっており、負圧になっていることも一因と指摘されている。室内に感染性汚染物質の発生限があれば、陰圧制御することで（室外への）拡散が抑制できるが、室外に発生限があれば、室内への流入が促進される可能性があることを意味する。

建物の圧力管理は、目的を明確に定めた上で慎重に設計する必要がある。また、室内外の圧力管理を行うためには漏気や隙間を高度に制御する建

物を設計する必要があり、設計施工コストが増大する。一般住宅の設計では(省エネの観点で気密性確保は意図されているが)、感染抑制のための圧力制御を意図した設計は全く考慮の対象外であり、(パンデミックが発生したからといって急に既存の一般住宅に)病室と同様の精度を求めるのは無理がある。

### 3. 室内の非定常・不均一濃度分布と換気効率

流体现象の支配方程式であるナビエ・ストークス式が強非線形であることは良く知られている。室内環境中に形成される流れ場(空気流動)は、例えば、換気空調吹出口の近傍では数 m/s 程度の比較的高風速となり、また、室の床面付近の隅角部などは滞留域であり相対的に低風速となり、層流から乱流、衝突や旋回などを含む非常に不均一性の強い流れ場が形成される。汚染物質発生位置も偏在することから、濃度分布も不均一となる。一般に、完全混合濃度に対するこの不均一場の濃度(例えば室の体積平均濃度や居住域や呼吸領域の局所領域濃度)の比が換気効率として定義される。特に経気道感染の観点では、室内に存在している居住者が実際に呼吸する空気中のウイルス濃度、すなわち呼吸域濃度の把握が重要となるが、この呼吸域濃度は、室の完全混合濃度とは異なる値となることが一般的であり、換気方式や境界条件によって大きく変化する。

完全混合の仮定とは、室内濃度分布が存在しないとの想定である。完全混合系では汚染物質発生量が定常一定であれば、換気量を2倍にすると濃度は1/2となる線形関係がある。換気量の多寡は空調負荷に直結することから省エネルギーの観点で単純な換気量の増加には制約が多い。そのため、“実質的に”換気量を増加させたことと等価の意味を持つ換気効率を上手に向上させる換気設計が推奨されている。これは室内環境中に形成される不均一濃度分布を積極的に利用し、呼吸域濃度を完全混合濃度よりも低く維持する換気方式や条件を見いだすことを意味する。我々の経験では、全外気運転の置換換気方式(床面に近い位置

に給気口、天井面に近い位置に排気口を設置して室下部から上部に向かう一様流を作出する換気方式)を採用した場合には、最適設計を行うことで呼吸域濃度を完全混合濃度の1/2程度まで抑えることが可能であり、これは換気量を実質的に2倍に増加したことと同じ効果となる。

室内には換気効率の分布が存在する。即ち不均一濃度分布が存在するという事実は、室内環境中では場所によって呼吸する汚染物質濃度が異なり、一定の換気量が担保された室空間においても居住者位置によって感染リスクが異なることを意味する。室内に形成される不完全混合場の評価は容易ではなく、実務レベルの換気設計においても、計算流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)や*in silico*人体モデルなどの数値解析技術の適用が必要となる。

### 4. 計算流体力学 CFD への統合を目指した *in silico* 気道モデルと *in silico* 人体モデル

経気道曝露のリスクを議論する際の参照濃度は、鼻孔から鼻腔内に至る(室内と人体の)外部境界を通過して輸送される空気中の汚染物質濃度と定義されることが多いことから、完全混合系の室の平均濃度ではなく、人体頭部周辺の呼吸域濃度、もしくはもう少し直接的に鼻孔位置の濃度を求めることが出来れば、より精緻な曝露リスクの議論が展開できる。このような局所領域の濃度測定を、実人体(被験者)を対象として行うことは倫理的な制約に加えて技術的な困難もあり、実施は容易ではない。特に設計段階での適用までを考慮した場合には、人体を数値的な仮想空間に再現した*in silico*モデルを用いた検討がほぼ唯一の実施可能な方法となろう。医学系の臨床環境医学会誌上では説明は必要無いようにも思われるが、*in silico*は「シリコン内で」という意味で、コンピュータ上での数値実験を示す用語として(*in vivo*や*in vitro*などの)ラテン語に似せて作られた造語である。

図1には筆者らの研究グループで開発に取り組んでいる成人男性の体型を再現した数値人体モデ

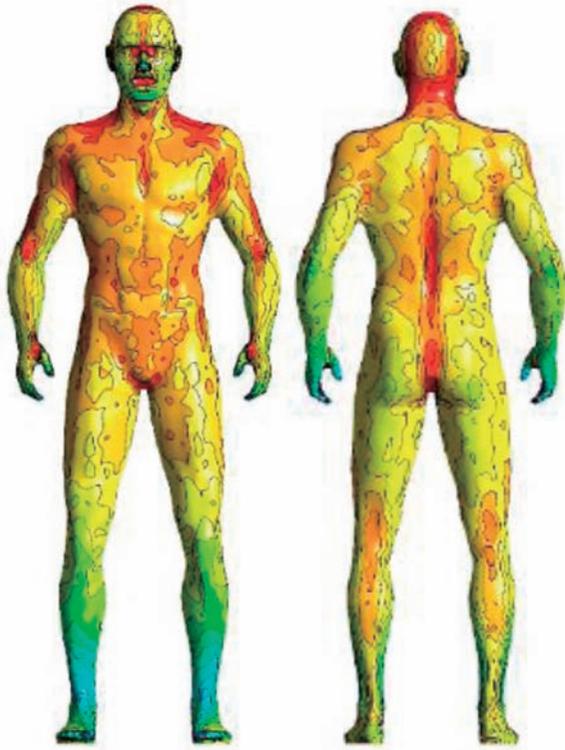


図1 室内環境解析への統合を意図した数値人体モデル (*in silico* 人体モデル) の例

ル (*in silico* 人体モデル) の例を示す。ここでは、人体と周辺環境との熱交換の結果として生じる体温調節メカニズムを再現する人体熱モデル (Fanger モデル) を統合することで、皮膚表面温度分布を解析した結果も併せて示している。

図2にはボランティア成人男性の上半身CT (コンピュータ断層撮影 Computer Tomography) データより上気道幾何形状を抽出することで作成した数値気道モデル (*in silico* 気道モデル) の例を示す。図1に示した数値人体モデルに統合することで、室内環境から鼻孔を経由して気道内部への連続した物質輸送解析が可能となる。

気道モデル内部の壁面条件として例えば粘液層を流体解析用の領域として設定すれば、気道内の空気流動とガス状・粒子状汚染物質の移流拡散解析に加え、粘液に沈着もしくは吸収された汚染物質の (線毛運動に伴う) 粘液輸送も同時に解析が可能となる。粘膜上皮層の境界条件として PBPK モデル (生理的薬物動態 Physiologically-Based



図2 数値気道モデル (*in silico* 気道モデル) の例

Pharmacokinetics) を適用すれば、細胞組織内での代謝反応や毛細管へ輸送、血中濃度まで統合して解析することも可能となる。

## 5. SIR 型疫学モデルとウイルス感染を定量的に予測する TIV (Host Cell Dynamics) モデル

感染リスクに配慮した換気設計や室内環境設計を行うためにはリスクの定量化が必須となり、また不均一分布を前提した予測を行う場合には *in silico* 人体モデルもしくは *in silico* 気道モデルに適用可能な感染症の数理モデルの適用が必要となる。

人体経気道曝露の点で外部境界となる鼻孔 (もしくは口) 位置での汚染物質濃度 (経気道感染の場合は空気中のウイルス・細菌濃度) を計算流体力学 CFD と数値人体モデルを基盤とした濃度分布解析でそれなりに予測出来るとすれば、(とりあえずは気道内での感染の詳細は無視することに

して) この鼻孔位置での濃度 (もしくは完全混合などを仮定した室の代表濃度) を入力とした感染症数理モデルが使いやすい。この代表が Wells-Riley モデルであろう。

$$P_I = \frac{C}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad (1)$$

オリジナルの Wells-Riley モデルは、感染確率  $P_I$  [-] を室換気量  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、quanta 発生量  $q$  [quanta/s]、肺換気量  $p$  [ $\text{m}^3/\text{person}/\text{s}$ ]、曝露時間  $t$  [s] で記述する単純モデルである。室の代表濃度  $q/Q$  に一人あたり呼吸量である肺換気量を乗じることで個人曝露量を算出する形となっているため、CFD による濃度分布解析結果より、簡易に感染確率  $P_I$  を算出できる。ここでは quanta と呼ばれるウイルス濃度と用量反応関係を総合的に考慮した仮想的な感染性汚染物質単位が用いられており、ウイルス毎に同定する必要がある。

感染伝播や感染リスクを再現する数理モデルとして Kermack and McKendrick による古典的な SIR モデルが有名である。このモデルは一定の母集団を対象とした感染リスクの伝播を再現するモデルであり、*Susceptible* (感染可能性を有する人口もしくは密度)、*Infective* (感染者数もしくはその密度)、*Recovered* (回復者数もしくはその密度) の頭文字を取ることによって SIR モデルと称される。これら 3 変数の時間変化を示す常微分方程式により一般には次式で記述される。

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI, \quad \frac{dI}{dt} = -\gamma I + \beta SI, \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (2)$$

式中の  $\beta$  は感染者と非感染者の接触による感染伝播確率を示す伝達係数 [ $1/\text{person}/\text{s}$ ]、 $\gamma$  は回復率 [ $1/\text{s}$ ] を示すが、この  $\beta$  と  $\gamma$  より基本再生産数  $R_0$  が定義され、感染強を示す指標として広く使用されている ( $R_0 > 1$  で感染拡大、 $R_0 < 1$  で感染が収束)。感染初期に着目し、 $S$  のサイズと比較して  $I$  が十分に小さい、即ち初期値としての  $I$  を一定と仮定すれば  $S$  の常微分方程式は容易に解け、Wells-Riley 式が導かれる。Wells-Riley モデルは感染初期の拡大期の様相を再現するモデルと云える。

さて、Wells-Riley モデルでは、quanta 発生量を定常発生と見なし、感染リスクに閾値無し線形関係を仮定している。即ち、定常的な呼吸に伴い経気道曝露量が時間経過と共に増加し、対応して感染リスクが幾何級数的に増加する。ウイルス増殖の初期定足数問題 (quorum) や免疫応答を考慮すれば、曝露濃度と感染リスクに単純な閾値無し線形関係を仮定することは多少無理がある。感染の有無は PCR 検査の検出限界値、すなわちウイルスの RNA コピー数で決定するとするならば、呼吸器系に沈着したウイルス含有エアロゾル粒子量とその濃度分布と、その後のウイルス増殖を予測することで感染の有無とリスクを評価する手順が実現現象に近い。

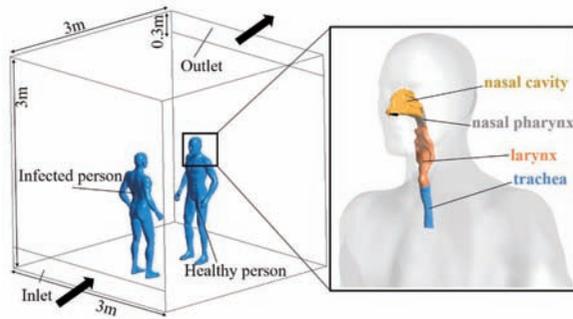
気道粘液・粘膜上皮細胞上でのウイルス増殖を記述する数理モデルとして、各種の Host-Cell Dynamics (HCD) モデルが提案されている。実のところ HCD の基本モデルは前述の SIR モデルと全く同一であり、その基本形は以下の常微分方程式群で記述される。

$$\begin{aligned} \frac{dT(t)}{dt} &= -\beta T(t)V(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \beta T(t)V(t) - \delta I(t), \\ \frac{dV(t)}{dt} &= \frac{p'}{V_{mucus}} I(t) - cV(t) \end{aligned} \quad (3)$$

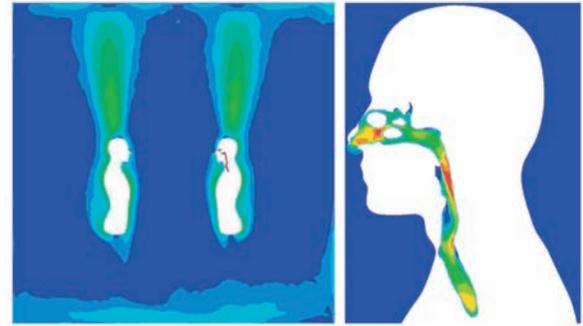
ここで、 $T$ 、 $I$ 、 $V$  は健康な宿主細胞、感染細胞、ウイルス負荷 (RNA コピー数) を示す。 $\beta$  は宿主細胞とウイルスの接触による感染伝播確率を示す伝達係数である。(3)式は、次節で紹介する気道粘膜層との連成解析を行うための補正項を含んでいる。この HCD モデルは変数の頭文字を取って TIV モデルとも呼ばれる。この TIV モデルを適切な境界条件のもとで解けば、宿主細胞上でのウイルス増殖の予測が可能となる。

## 6. 統合解析事例と可視化

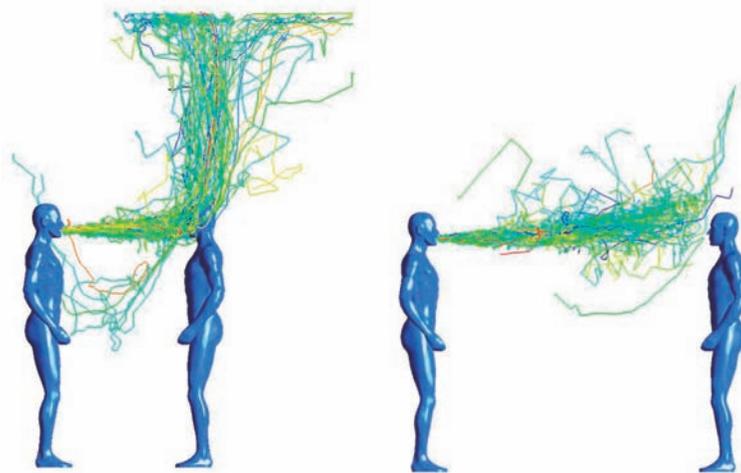
本節では、感染者の咳による飛沫・飛沫核発生と室内環境中での移流拡散、被感染者の呼吸に伴う飛沫・飛沫核の吸入と経気道曝露、その後の気道粘膜上皮上でのウイルス増殖を、一連の数値解



(1) 室概要



(2) 定常流れ場解析結果（左図は室中央断面風速分布、右図は被感染者の気道内風速分布）



(3) 飛沫・飛沫核の拡散場解析結果（左図が対人距離 1 m 条件、右図が 2 m 条件）

### 図3 解析対象空間と流れ場・粒子拡散場解析結果の概要

析として実施した統合解析事例を紹介する。

図3(1)は解析対象とした単純化した室内モデルを示しており、置換換気方式が採用されている。感染者と被感染者を再現する2体の *in silico* 人体モデルが設置されており、対人距離が1 mの場合と2 mの場合の2条件設定した。感染者は一度の咳 (Cough) により  $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  の粒径範囲を有する飛沫・飛沫核を全45,000個室内側に吐出する。図3(2)には飛沫解析を実施するための初期条件として事前に計算した室内に形成される定常流れ場の解析結果を示す。人体の生理発熱により人体周辺には熱上昇流が形成されていること、気道内には複雑な風速分布が形成されていること、などが確認できる。また、図3(3)には咳によ

り吐出された飛沫・飛沫核が室内環境中を移流拡散し、被感染者周辺に到達するまでの解析結果 (Particle Path Line) を示す。咳は高速成分を含む非定常噴流であることから、咳中に含まれる微粒子は噴流の慣性力によって被感染者顔面に到達する。対人距離 (物理的な距離) が被感染者に対する微粒子輸送に大きな影響を与えていることが分かる。

図4には、非定常で呼吸する被感染者が吸引した飛沫・飛沫核の気道内沈着分布と顔面 (皮膚) に対する沈着分布の解析結果を示す。図4左図は対人距離1 mの条件であり、咳による飛沫総発生量に対する、被感染者の吸入割合は5.6%、上気道内沈着割合は2.6%、人体皮膚表面沈着は2.9%

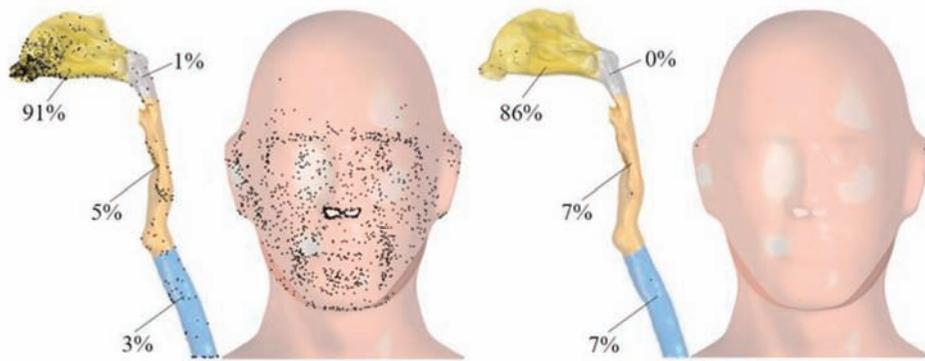


図4 被感染者に対する飛沫・飛沫核の経気道曝露と経皮曝露の解析結果（左図が対人距離1m条件、右図が2m条件）

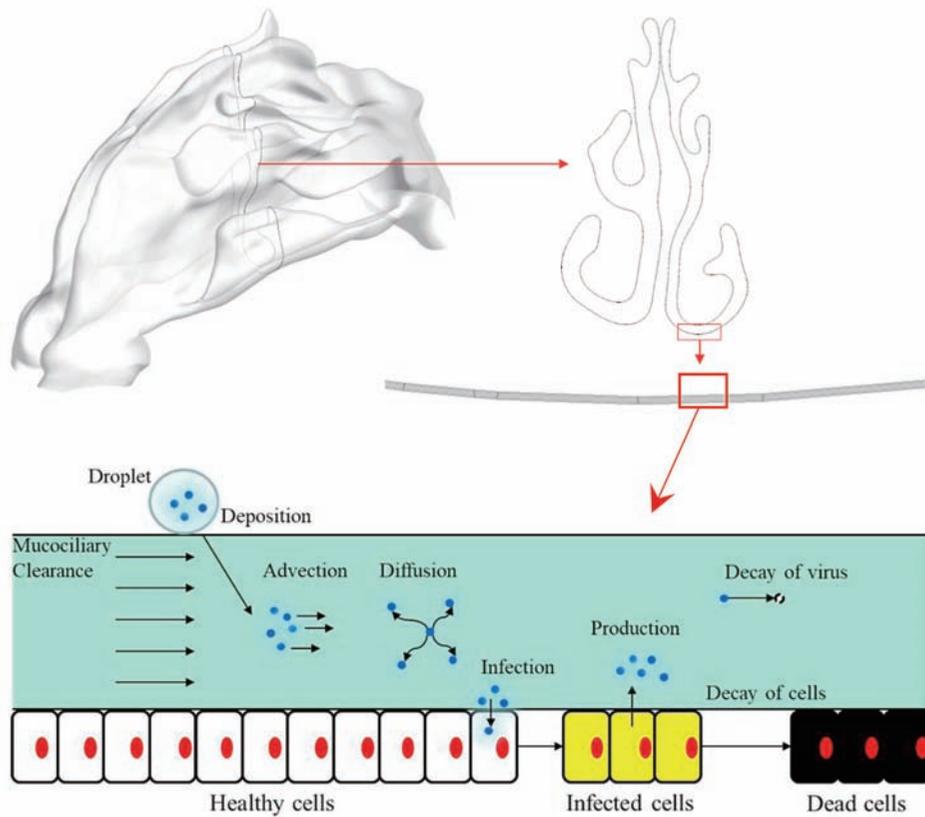


図5 上気道の粘液輸送解析とTIVモデルの模式図（文献1のFig.4ならびにFig.5の一部を著者が修正して再作成）

となった。一方、対人距離2mの条件では、吸入0.1%、上気道内沈着0.03%、人体皮膚表面沈着0.004%となり、物理的な距離を確保することは、飛沫・飛沫核の経気道曝露の低減に非常に有効となる。これは、「今回の室内環境条件の下で」という限定された条件での結果であり、換気システ

ムや他の室内環境条件を変更した場合にも常に成立する普遍的な解析結果では無いことに注意が必要である。

この数値気道モデル (*in silico* 気道モデル) の内壁面条件として、粘液輸送モデルと(3)式に示したTIVモデルを適用する場合の模式図を図5に

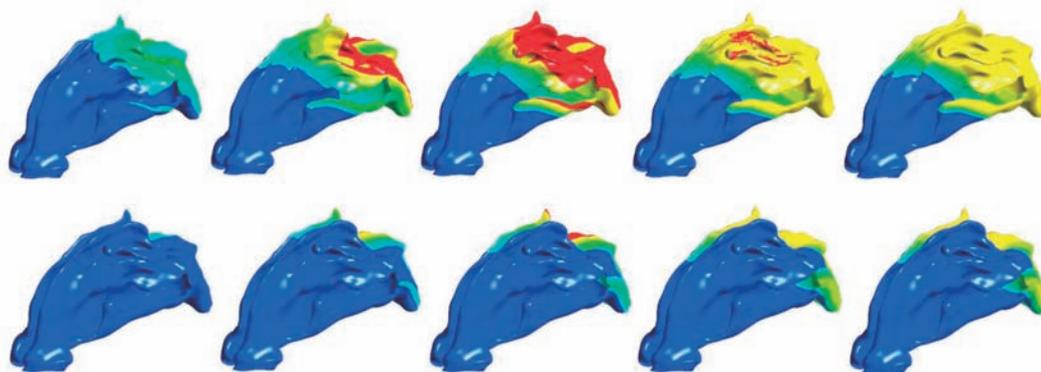


図6 上気道（鼻腔）でのウイルス濃度の時間変化（左から飛沫沈着後24h、3日、6日、9日、12日経過時点での鼻腔内 RNA Copies/mL の分布を示す。上図列は対人距離 1 m、下図列は対人距離 2 m の結果）

示す。図4で示した気道内の飛沫沈着位置に飛沫体積に比例するウイルス濃度を初期値として与え、TIVモデルを気道粘液・粘膜上皮表面に沿って時間発展で解析することでウイルス増殖現象を定量的に解析することが可能となる。ここでは、ウイルスとしてSARS-CoV-2を想定した場合のモデルパラメータを与えた場合の解析結果を図6に示す。

対人距離 1 m の条件では（図6上側）、飛沫の鼻腔内沈着後24時間経過後には鼻腔内に明確なウイルス増殖とその拡散が確認でき、その数日後にはウイルス濃度がピークを迎える。本解析条件ではピーク濃度は $10^7$  [RNA copies/mL] を超える結果となっており、一般的なPCRの検出限界である $10^2$  [RNA copies/mL] を大きく超えている。一方で、対人距離 2 m の条件では（図6下側）、1 m の条件と比較して明らかにウイルス増殖が抑制されており、ピーク濃度ならびに拡散共に限定的である。また、左右の鼻腔で呼吸による空気流量が異なるため、飛沫沈着量分布に差異が生じる。その結果として、左右の鼻腔でウイルス増殖の様子に明確な差異が生じている。

前述したWells-Riley式に代表される室の代表濃度を入力条件とする感染リスクモデルでは、室内の感染リスク分布を議論することは困難であり、図6で示したような対人距離の変化が感染リスクに与える影響を詳細に議論することは出来な

い。この点において、*in silico* 人体モデルとCFD解析を統合した感染リスク評価には一定の可能性があると確信している。また、実人体を対象としてこのような生体内の感染情報を時間経過と共に測定することは、倫理面の制約に加えて技術的にも容易ではなく、また個体差も非常に大きい。これは、*in silico* 人体モデルの予測精度の検証に必要となる *in vivo*、*in vitro* 実験結果が非常に限定的であることも意味する。本稿では、感染リスク評価に対する *in silico* 人体モデルの適用事例を鼻腔内でのウイルス増殖の可視化結果と共に示したが、その精度検証（と精度改善）は今後の大きな課題である。

## 7. 結語

本稿では完全混合系での換気設計の限界に言及した上で、特に室内環境中に形成される非定常・不均一濃度場を前提として、飛沫・飛沫核による経気道感染リスクを定量的に予測するための数値解析技術、特に計算流体力学CFDとの連成を目指した *in silico* 人体モデルの開発動向を紹介した。吸入する飛沫・飛沫核の個数濃度が多少変化することで感染リスクに大きな差が生じる可能性があれば、本稿で紹介したような *in silico* 人体モデルと詳細な流れ場・飛沫拡散場の統合解析に興味があろう。しかしこのような詳細な解析モデルは境界条件に対する依存性が強く、時間平均的な

感染リスク評価への適用には限界があることから、完全混合を仮定したマクロモデルや Wells-Riley 式による感染リスク評価を併用することが実用的なアプローチとなろう。

本稿では紙面の都合で数理モデルの詳細や数値解析条件の詳細を割愛した。興味ある読者のために筆者らの最近の研究論文を参考文献にリストアップした。参考になれば幸いである。

## 謝辞

本稿で紹介した解析事例は、Nguyen Dang Khoa 氏、Ngyen Li Hanyu 氏 (共に九州大学総合理工学府博士課程) ならびに久我一喜博士 (九州大学総合理工学研究院助教) が中心となり実施したものである。また、本稿で示した研究の一部は JSPS 科 研 費 (JP 20KK0099 ならびに JP 22H00237)、JST CREST (JP 20356547)、厚生労働行政推進調査事業費補助金 (JP 21KD2002)、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム (JP-MXP1020210316) の助成を受けたものある。

## 参考文献

- Hanyu Li, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. SARS-CoV-2 Dynamics in the Mucus Layer of the Human Upper Respiratory Tract Based on Host-Cell Dynamics, *Sustainability*, 2022, 14 (7), 3896 (doi.org/10.3390/su14073896)
- Hana Salati, Mehrdad Khamooshi, Jingliang Dong, Kazuhide Ito, David Fletcher, Sara Vahaji, Kiao Inthavong. Exhaled Aerosol and Jet Flow Characterization During Nasal Sneezing, *Aerosol and Air Quality Research*, 22 (4), 2022, 210338 (doi.org/10.4209/aaqr.210338)
- Kazuki Kuga, Pawel Wargocki, Kazuhide Ito. Breathing zone and exhaled air re-inhalation rate under transient conditions assessed with a computer-simulated person, *Indoor Air*, 2022, 32, e13003 (doi.org/10.1111/ina.13003)
- Chang Xu, Nguyen Dang Khoa, Sung-Jun Yoo, Xin Zheng, Shifei Shen, and Kazuhide Ito. Inhalation Airflow and Ventilation Efficiency in Subject-Specific Human Upper Airways, *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 285, 2021, 103587 (doi.org/10.1016/j.resp.2020.103587)
- Kazuki Kuga, Kazuhide Ito, Wenhao Chen, Ping Wang, Kazukiyo Kumagai. A numerical investigation of the potential effects of e-cigarette smoking on local tissue dosimetry and the deterioration of indoor air quality, *Indoor Air*, 2020; 30: 1018-1038 (doi.org/10.1111/ina.12666)
- Alicia Murga, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito. Can the inhalation exposure of a specific worker in a cross-ventilated factory be evaluated by time- and spatial-averaged contaminant concentration? *Environmental Pollution*, 252 (2019) 1388-1398 (doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.056)
- Yao Tao, Weo Yang, Kazuhide Ito, Kiao Inthavong. Computational fluid dynamics investigation of particle intake for nasal breathing by a moving body, *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2019, Volume 1, Issue 3, pp 212-218 (doi.org/10.1007/s42757-019-0014-1)
- Yihuan Yan, Xiangdong Li, Kazuhide Ito. Numerical investigation of indoor particulate contaminant transport using the Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian two-phase flow models, *Experimental and Computational Multiphase Flow*, Vol. 2, No. 1, 2020, 31-40
- Nguyen Lu Phuong, Nguyen Dang Khoa, Kazuhide Ito. Comparative numerical simulation of inhaled particles dispersion in upper human airway for inter-subject differences, *Indoor and Built Environment*, 29 (6), 2020, 793-809 (doi.org/10.1177/1420326X19894128)
- Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito. Assessment of Transient Inhalation Exposure using in silico Human Model integrated with PBPK - CFD Hybrid Analysis, *Sustainable Cities and Society*, 40 (2018) pp 317-325 (doi:10.1016/j.scs.2018.04.023)
- Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito. Numerical Prediction of Tissue Dosimetry in Respiratory Tract using Computer Simulated Person integrated with physiologically based pharmacokinetic (PBPK)-computational fluid dynamics (CFD) Hybrid Analysis, *Indoor and Built Environment*, 2018, Vol. 27(7) 877-889 (doi: 10.1177/1420326X17694475)
- Kazuhide Ito. Editorial, *In silico* human model for fluid-initiated indoor environmental design, *Indoor and Built Environment*, 2017; 26 (3) pp 295-297 (doi:10.1177/1420326X17697290)

- 13) Kazuhide Ito. Toward the development of an in silico human model for indoor environmental design, *Proceedings of the Japan Academy- Series B*, Vol.92, No.7, 2016, pp 185-203  
(doi: 10.2183/pjab.92.185)
- 14) Nguyen Lu Phuong, Masato Yamashita, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito. Prediction of convective heat transfer coefficient of human upper and lower airway surfaces in steady and unsteady breathing conditions, *Building and Environment*, 100, 2016, pp 172-185  
(doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.020)
- 15) Nguyen Lu Phuong and Kazuhide Ito. Investigation of flow pattern in upper human airway including oral and nasal inhalation by PIV and CFD: *Building and Environment*, 94, 2015, pp 504-515  
(doi:10.1016/j.buildenv.2015.10.002)