

室内環境における飛沫・飛沫核の吸入曝露シミュレーション

西原, 択海

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178750>

出版情報：九州大学, 2023, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 5 年 度

修 士 論 文

室内環境における飛沫・飛沫核の吸入曝露シミュレーション

九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻
機械・システム理工学メジャー 建築環境工学研究室

西原 択海

指導教員 伊藤 一秀

提出年月日 令和 6 年 2 月 6 日

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 数値流体解析概要	3
2.1 流体の基礎方程式	3
2.1.1 支配方程式	3
2.1.2 Reynolds 方程式	4
2.2 乱流モデル	5
2.2.1 低 Reynolds 数型 k- ϵ モデル	5
2.2.2 Abe-Kondo-Nagano モデル	6
2.3 輻射モデル	7
第 3 章 数値解析モデル概要	9
3.1 咳飛沫拡散	9
3.1.1 咳及び飛沫	9
3.1.2 解析モデル	10
3.1.3 解析ケース	11
3.2 会話飛沫解析	13
3.2.1 会話及び飛沫	13
3.2.2 解析モデル	13
3.2.3 人体姿勢の再現	14
3.2.4 解析ケース	15
3.3 非定常呼吸サイクル	15
3.4 数値人体モデル(CSP)	16
3.4.1 人体皮膚表面温度制御モデル	16
3.4.2 水蒸気蒸散量モデル	17
3.5 粒子輸送モデル	18
3.6 飛沫粒径変化モデル	19
3.6.1 物質移動	19
3.6.2 飛沫への伝熱	19
第 4 章 結果及び考察	21
4.1 咳飛沫・飛沫核拡散	21
4.1.1 室内初期流れ場	21
4.1.2 口腔形状の影響	21
4.1.3 呼吸タイミングの影響	26
4.1.4 蒸発に伴う粒径変化の影響	27

4.1.5 Physical distance の影響	29
4.1.6 曝露リスク評価	30
4.2 会話飛沫・飛沫核拡散	37
4.2.1 室内初期流れ場	37
4.2.2 Physical distance の影響	38
4.2.3 人体姿勢の影響	40
4.2.4 吐出流量の影響(咳との比較)	41
4.2.5 曝露リスク評価	43
第 5 章 総括	48
参考文献	49
謝辞	52

第1章 序論

グローバル化が進む現代社会において、人々の活動範囲の広がりや密度の高い都市居住の増加により、感染症の拡大が懸念されている。直近でも、2019 年末頃から新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が、広範囲にわたって多くの国や地域へと伝播しており、深刻なパンデミックが現実となった。また、現在においても、インフルエンザや肺炎等の呼吸器感染症の感染者数が増加傾向にあり、これらの感染性汚染物質による感染症問題の対策は、喫緊の課題となっている。特に、これらの感染症の二次感染は、家庭や職場、学校等の室内空間での感染報告が多い。これは、室内空間で 9 割以上の時間を過ごすといわれている現代社会にとって深刻な問題であることから、室内環境の重要性が増している。

室内環境とは壁面で囲まれた空間のことであり、通常は冷暖房や送風機、換気のような空調システムが設置されている。そして、室内空間には家具・家電等のモノや人体といった多くの障害物が室内気流を妨げており、これらの要素が複雑に組み合わさることで、室内環境では不均一な流れ場分布が生じる[1]。特に、人体は代謝によって熱源となるため、人体周辺には発熱による熱上昇流が生じる。そして、鼻や口は給気として機能し、呼吸に伴って瞬時気流を発生させるため、複雑で不均一な非定常気流を形成する[2]。このように、複雑な室内気流や人体からの吐出気流により感染性汚染物質を含む飛沫・飛沫核が輸送されるため、室内における居住者への曝露・感染リスクを評価する際には、(1) 不均一で非定常な流れ場の情報とメカニズムへの正確な理解、(2) 不均一な汚染発生源に関する情報を用いた汚染物質の濃度分布の正確な分析、(3) 経気道及び経皮における曝露リスク評価の 3 つのプロセスが重要である[3]。しかし、このような不均一で不完全混合な流れ場に関する情報を実験的なアプローチから得ることは難しい。そのため、CFD 解析(Computational Fluid Dynamics, 数値流体解析)に基づく数値的アプローチが、実用的な解決策への唯一の方法である。

室内環境中における新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)やインフルエンザウイルス等による呼吸器感染症の感染経路は、WHO(World Health Organization)によって吸水性エアロゾルを介した感染(飛沫感染)と接触を介した感染(接触感染)の 2 種類あると報告されている[4]。ここで、エアロゾルとは粒径及び粒子状態(液相・固相)によらず空気中を浮遊する微粒子の総称のことを指しており、吸水性エアロゾルを介した感染には、飛沫感染と空気感染の 2 種類ある[5]。飛沫感染とは、咳や会話による発声、くしゃみに伴って吐出される粒径が $5\mu\text{m}$ 以上の飛沫を呼吸により体内に吸入することで感染する。空気感染とは、飛沫の水分が蒸発して粒径が $5\mu\text{m}$ 未満になった飛沫・飛沫核を吸入することで感染する。これらの感染経路は、前述のように複雑な室内気流パターンによって形成される不均一な濃度分布の存在を前提としなければならず、室内環境における曝露・感染リスクには強い不均一性が存在する。したがって、曝露・感染リスクを評価するためには、人体周辺の流れ場を再現した室内気流場の予測が不可欠である。そこで、咳や会話による発声、くしゃみ時の飛沫の室内拡散動態を正しく再現する境界条

件を設定する必要がある。

感染者の咳や会話による発声等により、ウイルスを含む飛沫が室内に放出され、非感染者に曝露することから、感染性汚染物質の発生源である咳や会話による吐出気流に関する基礎的な実験・研究が行われている。朱ら[6]の被験者実験では、PIV(Particle Image Velocimetry)風速計を用い、被験者が咳をする瞬間の口元周辺における速度分布と咳気流の呼出速度を計測した。そして、飛沫拡散の再現のためにトレーサーとして小麦粉を使用し、咳により呼出されたトレーサーの空気中での拡散過程を可視化することで影響範囲を観察した。また、Gupta ら[7,8]の被験者実験では、咳や多種多様な発話、呼吸に着目しており、吐出した空気の温度を再現するためにタバコの煙を用いて、流量と吐出方向、口腔開口面積を測定した。流量測定では、被験者の顔にスピロメーター付マスクを装着して計測した。飛沫拡散の再現においては、暗い背景の中で喫煙者が出す煙に光を照射することで吐出方向を可視化した。開口面積の測定では、被験者が吐出したときの唇付近の正面からの写真を撮ることで計測した。Gupta ら[7,8]の実験データに基づく流量プロファイルは、CFD の境界条件設定との整合性から多くの研究で適用されている。

室内環境中の人体への健康影響を評価するために、室内環境解析に用いる詳細な数値人体モデルが村上ら[9]の研究により提案されてきた。人体幾何形状と体温調節モデルを統合し、室内温度場解析と組み合わせることで温熱快適性のための人体皮膚表面温度が予測できることが報告されている[10-15]。また、伊藤ら[16]によって人体だけでなく呼吸器系の形状も再現した人体モデルが開発され、呼吸器に吸入された室内空気汚染の曝露量の測定を可能にした。Yoo ら[17]は、室内環境中でのホルムアルデヒドの吸入曝露評価に人体モデルを適用した。久我ら[3,18]は、電子タバコの喫煙による有害物質の局所組織線量や室内の空気質悪化に及ぼす影響評価のために、CFD 解析を用いて人体モデルを統合した解析結果を報告した。

室内環境中での曝露・感染リスクは、人体の接触距離や接触時間による影響も支配的である。Nan Zhang ら[19]は、オフィスを対象に学生の行動をモニタリングし、その際の人体の姿勢や接触距離に関する解析結果を報告した。人体の接触には立位－立位、座位－座位、立位－座位の 3 種類あり、接触形態によって頭部や口の角度は異なる。多くの会話を想定した研究では、Tiede ら[20]が報告しているように、会話の際の口腔開口面の角度は完全な正面方向と想定しているが、実際は頭部と口の動きは静止していない。そして、会話時の口腔開口面の角度は、咳や会話による飛沫拡散に大きな影響を与える。Alicia ら[21]は口角の変化を考慮した場合の吸入曝露リスクを定量的に評価した。

以上より、本研究は呼吸器感染症の感染性汚染物質を対象として、咳と会話による吐出を想定した。そして、感染者の吐出気流により輸送された飛沫の室内拡散動態から非感染者の呼吸に伴う気道内輸送、気道粘膜や人体皮膚表面への沈着までの各現象をシームレスに数値解析し、曝露・感染リスクを定量評価した。本論文では、室内環境中での非感染者への経気道・経皮曝露リスクの定量的な解析結果を報告する。

第2章 数値流体解析概要

本研究では、単純室内で対面している2体の数値人体モデル(CSP)を解析対象としているため、室内環境中の速度場、温度場の正確な数値予測は重要な課題となる。本章では、流体の基礎方程式、乱流モデル、輻射モデルについて解説する。

2.1 流体の基礎方程式

2.1.1 支配方程式

室内環境中は、低速気流がほとんどであることから非圧縮性流体として扱う。そのため、流体の運動は、以下の支配方程式によって表現できる。

- Navier-Stokes 方程式 (運動量保存則)

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho X_i \quad (2.1)$$

- 連続の式 (質量保存則)

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 u_i は速度ベクトルの x_i 方向成分、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 X_i は x_i 方向に作用する外力を表す。また、チルダ記号は瞬時値を表している。

前述のように、非圧縮性流体であるため密度は一定である($\rho = \rho_0$, ρ_0 は基準密度)。なお、外力は重力を想定しているため、式(2.1)は式(2.3)のように書き換えることができる。

$$\frac{\partial \rho_0 \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_0 \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \rho g \delta_{i3} \quad (2.3)$$

ここで、 g は重力加速度、 δ_{i3} はクロネッカーのデルタを表す。

式(2.3)の外力の項を以下のように変形する。

$$-\rho g \delta_{i3} = -\rho_0 g \delta_{i3} - (\rho - \rho_0) g \delta_{i3} \quad (2.4)$$

式(2.3)に式(2.4)を代入すると式(2.5)のように表すことができる。

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\rho_0 g \delta_{i3}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g \delta_{i3} \quad (2.5)$$

ここで、式(2.5)の各項を整理する。

$$\frac{\partial \tilde{p}_s}{\partial x_1} = \frac{\partial \tilde{p}_s}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{p}_s}{\partial x_3} = -\rho_0 g \quad (2.6)$$

$$\tilde{p} = \tilde{p}_s + \tilde{p}' \quad (2.7)$$

また, Charles's law($\rho T = \rho_0 T_0$)を用いることで, 式(2.5)の最後の項は式(2.8)のように書き換えられる. ここでは, 流体の温度(T)と基準温度(T_0)の偏差を $\tilde{\theta}$ とおく.

$$-\frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} = \frac{T - T_0}{T_0} = \beta(T - T_0) = \beta\tilde{\theta} \quad (2.8)$$

ここで, $\beta(= 1 / T_0)$ は体積膨張率を表す.

式(2.5)に式(2.6)～式(2.8)を用いて整理すると, 式(2.9)のように表すことができる.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + g\beta\tilde{\theta}\delta_{i3} \quad (2.9)$$

非等温の場合, 外力項における浮力は温度差による密度変化によって表される. しかし, 非圧縮性流体では, ブジネスク近似を用いて式(2.9)のように温度差に比例する力として表すことができる.

非等温気流の場合, 室内の温度場はエネルギー方程式によって表現できる(式(2.10)).

・熱エネルギー輸送方程式(エネルギー保存則)

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\theta} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} \right] + S \quad (2.10)$$

ここで, α は温度拡散率($\alpha = \lambda / (C_p \cdot \rho)$), λ は熱伝導率, C_p は比熱, S は熱源を表す.

2.1.2 Reynolds 方程式

2.1.1 で記した支配方程式は, 物理量の瞬時値を対象としている. そのため, この方程式を解くことができれば, 乱れ成分も含めて厳密に室内環境中の流れを表現することができる. しかし, 式(2.9)に記した Navier-Stokes 方程式は, 非線形構造をしているため厳密な解を解くことはできない. そのため, 物理現象を平均化し近似解を得る必要がある. そこで, 本研究ではアンサンブル平均をした RANS(Reynolds-Averaged Numerical Simulation)を用いることで, 室内環境中の流れ場を求める.

以下では, RANS で用いられる Reynolds 方程式の導出を解説する. 2.1.1 の支配方程式中の未知数を平均値と変動成分に分ける(平均値: 大文字, 変動成分: 小文字) [22].

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i \quad (2.11)$$

$$\tilde{\theta} = \Theta + \theta \quad (2.12)$$

アンサンブル平均をオーバーバーで表すと, 変動成分の平均は 0 になる(式(2.13)).

$$\overline{u_i} = 0 \quad (2.13)$$

そのため, 式(2.11)は式(2.14)のように書き換えられる.

$$\tilde{u}_i = U_i \quad (2.14)$$

また, 変動成分の積の平均は 0 ではない(式 2.15).

$$\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} = U_i U_j + \overline{u_i u_j} + \overline{U_i u_j} + \overline{u_i U_j} = U_i U_j + \overline{u_i u_j} \quad (2.15)$$

式(2.2), 式(2.9), 式(2.10)をアンサンブル平均すると, 式(2.16)～式(2.18)となる.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu}{\rho_0} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right\} + g\beta\Theta \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial \Theta U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \overline{\theta u_j} \right] \quad (2.18)$$

上記の平均流の 3 つの方程式のうち, 式(2.17)は Reynolds 方程式という. ここで, 式(2.17)と式(2.18)に着目すると, 平均操作の前後で新たに項が追加される. 式(2.17)中の $-\overline{u_i u_j}$ を Reynolds 応力, 式(2.18)中の $-\overline{\theta u_j}$ を乱流熱フラックスという.

アンサンブル平均をすることで, 上記のように新たな未知数である変動量の相関項が生まれる. 室内環境中の平均流れ場を求めるためには, 変動量の相関項の値の推定が必要である. しかし, これらの相関項の輸送方程式を立てても, 再び新たな未知数が現れてしまうため方程式が閉じない. そのため, 乱流モデルを導入し, 方程式を閉じる必要がある. 以下の 2.2 では, 本解析で用いた乱流モデルについて解説する.

2.2 乱流モデル

2.2.1 低 Reynolds 数型 k-ε モデル

k-ε モデルは, 乱流エネルギー(k , $k \propto v^2$)と粘性散逸率(ε , $\varepsilon \propto v^3 / l$)のモデル方程式を解く. 低 Reynolds 数型 k-ε モデルでは, 渦動粘性係数(ν_t)を算出する際に, 壁座標(y^+ , $y^+ = u_\tau y / \nu$, u_τ は壁面摩擦速度, y は壁面からの距離), 乱流 Reynolds 数 $R_t (= k^2 / \nu \varepsilon)$ 等をパラメータとする減衰関数(f_μ), ε 方程式中の生産項及び消散項に関してモデル関数 f_1 , f_2 を導入する. また, 壁面近傍において十分に細かくメッシュを分割し, 壁面境界条件において No-slip を適用することで, 壁面近傍の乱流挙動, 低 Re 数効果, 乱れが減衰し疑似層流化する流れ場の再現を可能にする.

一般的な低 Reynolds 数型 k-ε モデルの基礎方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right\} + g\beta\Theta \quad (2.19)$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.20)$$

$$\nu_t = C_\mu \cdot f_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = D_k + P_k - (\bar{\varepsilon} + D) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varepsilon} U_j}{\partial x_j} = D_\varepsilon + \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot f_1 \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \cdot f_2 \cdot \bar{\varepsilon}) + E \quad (2.23)$$

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (2.25)$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right) \quad (2.26)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_k} \right)^2 \quad (2.27)$$

ここで, f_μ , f_1 , f_2 はモデル関数, D 及び E は $\bar{\varepsilon}$ を用いる場合の付加項を表す.

非定常流れや乱流に対して正確で数値的に安定した解が得られることから, 本解析では低 Reynolds 数型 k- ε モデルの中でも Abe-Kondo-Nagano モデルを用いた. 以下の 2.2.2 では, Abe-Kondo-Nagano モデルの解説をする.

2.2.2 Abe-Kondo-Nagano モデル

上記(参照 2.1.1)のように多くの低 Reynolds 数型 k- ε モデルでは, 壁座標(y^+)を利用したモデル関数が適用されているが, 壁座標は壁面摩擦速度が 0 となる位置において, $f_\mu = 0$ となるモデルが多い. そのため, 式(2.21)より渦動粘性係数は 0 になってしまうことから物理的に不合理である. そこで, Abe-Kondo-Nagano モデル[23, 24]は壁座標の代わりに速度スケールとして Kolmogorof の速度スケールを用いたパラメータ y^* を利用し, 剥離や再付着を伴う流れ場にも適用可能な低 Reynolds 数型 k- ε モデルとなっている.

Abe-Kondo-Nagano モデルのモデル関数及び数値定数を以下に示す.

$$f_\mu = \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{y^*}{14} \right) \right\}^2 \left[1 + \frac{5}{R_t^{3/4}} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{R_t}{200} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.28)$$

$$f_1 = 1.0 \quad (2.29)$$

$$f_2 = \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{y^*}{3.1} \right) \right\}^2 \left[1 - 0.3 \cdot \exp \left\{ \left(\frac{R_t}{6.5} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.30)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \quad (2.31)$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (2.32)$$

$$y^* = \frac{u_\varepsilon y}{\nu} = \frac{y}{\eta} \quad (2.33)$$

$$\eta = \frac{\nu^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \quad (2.34)$$

$$u_\varepsilon = (\nu \varepsilon)^{1/4} \quad (2.35)$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.4, \sigma_\varepsilon = 1.4, C_{\varepsilon 1} = 1.5, C_{\varepsilon 2} = 1.9, D = E = 0$$

2.3 輻射モデル

本研究では，人体皮膚表面と室内壁面間の放射計算の際に形態係数が必要となるため，商業用 CFD コード ANSYS Fluent に実装されている Surface-to-Surface(S2S)モデルを用いた．以下では，S2S モデルの概要について説明する[22]．

S2S モデルは，室内環境のような密閉空間中での各面(人体皮膚表面や室内壁面)を灰色拡散表面として輻射交換計算を行う．ここでは，空間内での輻射の吸収，放射，散乱を無視できるとし，表面の寸法，表面間距離，面方向によって2面間のエネルギー交換を決定する．これらのパラメータは，各表面間の幾何学的な位置関係によって決まる形態係数(View Factor)により決まる．灰色表面の放射率および吸収率は波長に対して独立しており，放射率(ε)と吸収率(α)は等しい(キルヒホッフの法則)．また，拡散表面における反射率は，反射または入射方向に対して独立しているとする．

灰色拡散モデルは，解析対象の表面間の放射エネルギー交換において，表面を分離する媒体からの影響を受けない．そのため，一定量の放射エネルギー(E)が表面に入射する場合，各割合で反射(ρE)，吸収(αE)，透過(τE)する．ほとんどの場合，解析対象の各表面は熱輻射に対して不透明性を有するので，表面は不透明と見なし，透過率は無視できる．エネルギー保存則より $\alpha + \rho = 1$ ，灰色性から $\varepsilon = \alpha$ (前述)であることから， $\rho = 1 - \varepsilon$ となる．

ある表面から発生するエネルギー流束は，放射エネルギーと反射エネルギーからなる．反射エネルギー流束は，周囲からの入射エネルギー流束に依存するため，他の全表面から発生するエネルギー流束に依存して表される．ここで，表面 k から発生するエネルギー流束($q_{out,k}$)は式(2.36)のように表すことができる．

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \quad (2.36)$$

ここで， ε_k は放射率， σ は Stefan-Boltzmann 定数($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$)， $q_{in,k}$ は周囲から表面に入射するエネルギー流束を表す．

ある表面に対する他の表面からの入射エネルギーは，形態係数(F_{jk})に依存する．形態係数(F_{jk})は，表面 j から発生するエネルギーのうち表面 k に入射するエネルギーの割合を指す．入射エネルギー流束($q_{in,k}$)は，他の全表面から発生するエネルギー流束によって式(2.37)で表現される．

$$A_k q_{in,k} = \sum_{j=1}^N A_j q_{out,j} F_{jk} \quad (2.37)$$

ここで、 A_k は表面 k の面積、 F_{jk} は表面 j から表面 k を見た時の形態係数を表す。

2つの有限な表面 j と表面 k との間の形態係数は式(2.38)より求められる。

$$F_{jk} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_k}{\pi r^2} \delta_{jk} dA_j dA_k \quad (2.38)$$

ここで、 δ_{jk} は dA_j の dA_k に対する可視性によって決まる (dA_j から dA_k を見たとき、可視： $\delta_{jk} = 1$ ，不可視： $\delta_{jk} = 0$)。

N 個の表面について形態係数の相互関係を適用すると式(2.39)のように表すことができる。

$$A_j F_{jk} = A_k F_{kj} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2.39)$$

式(2.39)によって、表面 k への入射エネルギー流束 ($q_{in,k}$) と表面 k からの発生エネルギー流束 ($q_{out,k}$) は、それぞれ式(2.40)、式(2.41)のように書き換えられる。

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^N F_{jk} q_{out,j} \quad (2.40)$$

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{jk} q_{out,j} \quad (2.41)$$

S2S モデルにおいて、形態係数および放射を多数の表面に対して計算することは、計算負荷が非常に大きくなる。そのため、表面クラスタを作成し、計算する表面の数を減らすことによって負荷を軽減させる。表面クラスタとは、1つの面から始めてそれに隣接する複数の面を指定した数までまとめたものである。

第 3 章 数値解析モデル概要

本研究では、感染性汚染物質の発生源である咳と会話に着目した。感染者の咳や会話による発声によって吐出された飛沫・飛沫核の室内環境中での輸送現象の解明や非感染者への吸入曝露評価をするために、境界条件として咳や会話、非定常呼吸サイクルの流量プロファイル、ジオメトリーとして用いた単純部屋モデル、詳細な人体表面幾何形状を再現した男性型裸体の数値人体モデル(CSP, Computer-Simulated Person), 数値気道モデルを用いた。本章では、各モデルの概要を説明する。

3.1 咳飛沫解析

3.1.1 咳及び飛沫

感染者と想定した CSP からの咳による吐出気流を再現するために、Gupta ら[7]が行った被験者実験の吐出流量の測定結果を用いた。実験データを関数で近似し、咳の流量プロファイルをモデル化した(図 3.1.1.(a))。本研究では 1 回の咳を想定しており、咳の時間は約 0.4 秒である。そして、流量を流速に変換し、境界条件として感染者 CSP の口腔開口面または気道端に設定した。実際の咳では飛沫の吐出速度は不均一かつ非定常であるが、本研究では単純化のために、均一かつ瞬時発生・拡散を想定した。咳飛沫の粒径分布は、Duguid ら[25]や Yang[26]らの研究結果を基に $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ を想定し、咳と同時に合計 45000 個の飛沫を瞬時発生させる条件とした(図 3.1.1.(b))。本研究では、飛沫の蒸発による粒径変化も考慮するため、咳による呼気温度は 36.4°C 、呼気の水蒸気質量分率は 99%RH となるように設定した。

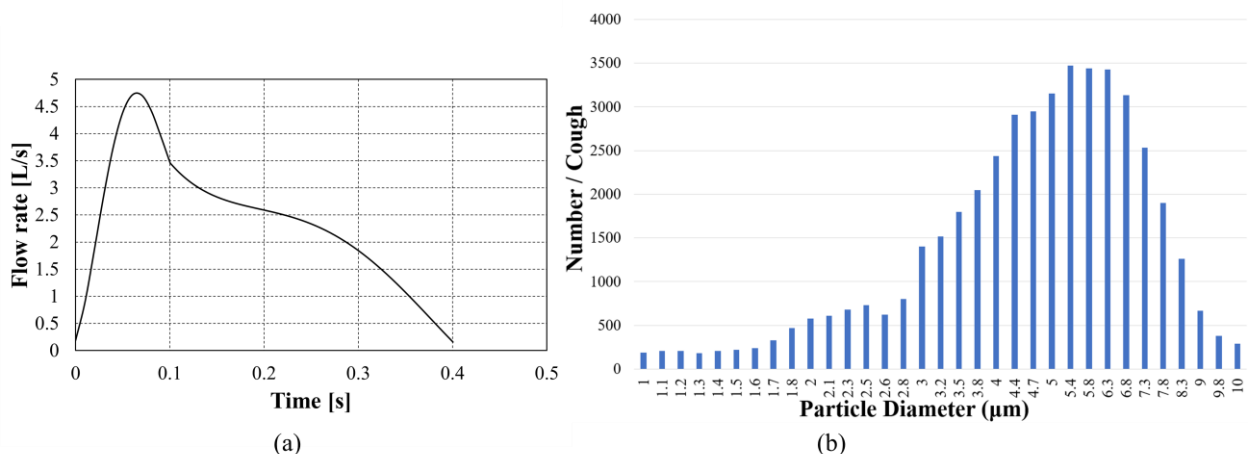


図 3.1.1. 咳飛沫拡散時の境界条件((a)咳プロファイル. (b)咳飛沫粒径分布).

3.1.2 解析モデル

室内環境を再現するための単純室内モデルのジオメトリーは、床面積 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 、高さ 3m とした。室内には、感染者・非感染者と想定した 2 体の直立した CSP を Physical distance($1\text{m} / 2\text{m}$)で対面させた。室内の換気に関しては、非感染者から見て前壁下部の給気口($3\text{m} \times 0.3\text{m}$)から 0.05m/s で外気(25°C , $50\%\text{RH}$)が流入し、後壁上部の排気口($3\text{m} \times 0.3\text{m}$)から自由流出する置換換気を想定した(図 3.1.2).

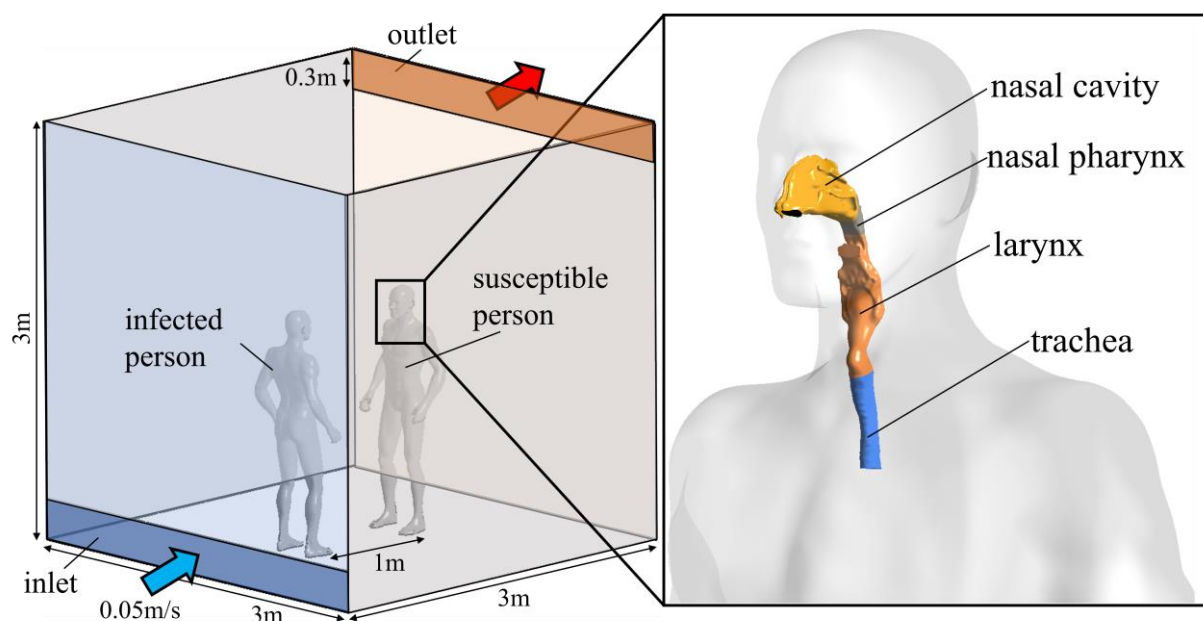


図 3.1.2. 解析モデル概要(咳)

感染者 CSP からの咳の吐出気流の再現及び数値シミュレーションの質を維持するため, CSP の数値気道モデルと呼吸域近傍のメッシュを細分化した(図 3.1.3 の赤枠). 計算コストとシミュレーションの精度のバランスをとるため, ハイブリッドメッシュを使用した.

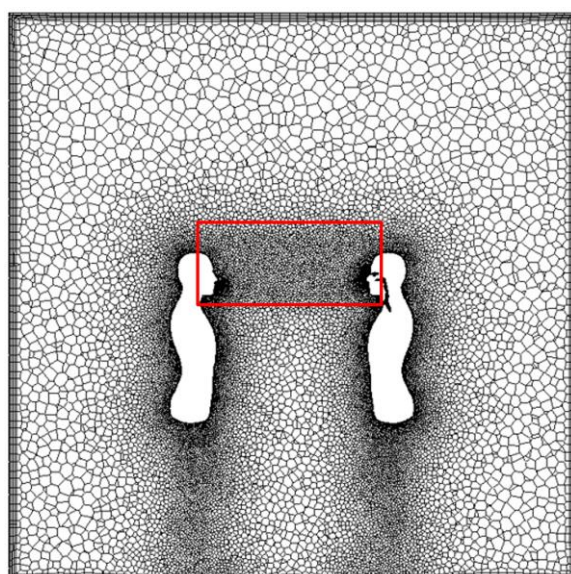


図 3.1.3. 解析領域のメッシュデザイン(Physical distance : 1m)

3.1.3 解析ケース

口腔形状の影響による飛沫・飛沫核の室内拡散動態を調べるため, 3 つのケースを比較した. 以下に各ケースの具体的な内容を記した(図 3.1.4).

- Case A は, 感染者 CSP に数値気道モデルは統合せず, 境界条件として咳プロファイルは口腔開口面に設定した. また, 飛沫の発生場所も口腔開口面で瞬時発生とした.
- Case B は, 感染者 CSP に数値気道モデルは統合し, 境界条件として咳プロファイルは気道端(気管支位置)に設定した. また, 飛沫の発生場所は口腔開口面で瞬時発生とした.
- Case C は, 感染者 CSP に数値気道モデルは統合し, 境界条件として咳プロファイルは気道端(気管支位置)に設定した. また, 飛沫の発生場所も気道端(気管支位置)で瞬時発生とした.

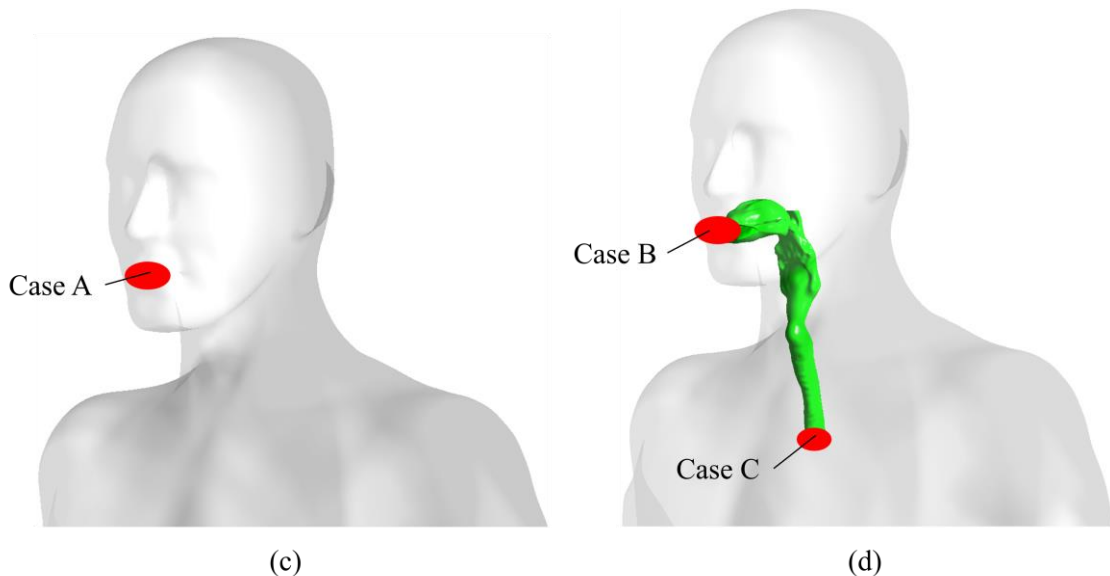


図 3.1.4. 感染者 CSP の口腔形状 ((c)口腔形状なし, (d)口腔形状あり)

本解析で使用した CSP は, 詳細な幾何形状を再現しており[27], 数値気道モデルは, 健康な男性の CT データを基にしている[28, 29]. 口腔形状を再現した感染者 CSP には, 鼻腔を除く口腔から気道端までを再現した数値気道モデルを CSP にシームレスに統合した. また, 全 3 ケースにおいて, Physical distance を 1m とし, 非感染者 CSP の呼吸プロファイルは吸入-呼出サイクルとした. また, 対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない.

次に、呼吸タイミング、水分の蒸発に伴う飛沫の粒径変化、Physical distance 等の複数の要因が吸入曝露に与える影響を調べるため、6つのケースを検討した。これらは、呼吸プロファイル、飛沫の粒径変化の有無、Physical distance(1m または 2m)が異なる。以下に各ケースの具体的な内容を記した。

- Case1-1 は、Physical distance を 1m とし、非感染者 CSP の呼吸プロファイルは吸入－呼出サイクルとした。また、対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない。
- Case1-2 は、Physical distance を 1m とした。呼吸タイミングが吸入曝露に及ぼす影響を調べるために、非感染者 CSP の呼吸プロファイルは呼出－吸入サイクルとした。また、対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない。
- Case1-3 は、Physical distance を 1m とし、非感染者 CSP の呼吸プロファイルは吸入－呼出サイクルとした。また、蒸発による飛沫の粒径変化が室内拡散動態や吸入曝露に及ぼす影響を調べるために、対象飛沫の蒸発による粒径変化を考慮した。
- Case1-4 は、飛沫・飛沫核の吸入曝露に対する Physical distance の影響を調べるため、Physical distance を 2m とし、非感染者 CSP の呼吸プロファイルは吸入－呼出サイクルとした。また、対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない。
- Case1-5 は、Physical distance を 1m とし、非感染者 CSP は定常吸入(Flow rate : 0.467 L/s)を想定した。また、対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない。
- Case1-6 は、Physical distance を 2m とし、非感染者 CSP は定常吸入(Flow rate : 0.467 L/s)を想定した。また、対象飛沫の蒸発による粒径変化は考慮していない。

ここで、Case1-5 と Case1-6 は、Physical distance 以外の境界条件を完全に一致させており、Physical distance の影響のみを評価するために数値解析を行った。

本解析では、感染者 CSP と非感染者 CSP の接触時間として、Physical distance が 1m の場合では 75 秒間、Physical distance が 2m の場合では 120 秒間を想定した。

3.2 会話飛沫解析

3.2.1 会話及び飛沫

感染者 CSP からの会話による吐出気流を再現するために, Gupta ら[8]が行った被験者実験の吐出流量の測定結果を基に Alicia ら[21]が適用した会話の流量プロファイルを用いた. 会話流量を $\sin$ 関数で近似し, 会話プロファイルをモデル化した(図 3.2.1.(e)). 会話の 1 サイクルは, 8.94 秒であり, 流量を流速に変換し, 境界条件として感染者 CSP の口腔開口面に設定した. 咳の場合と同様で, 実際の会話では飛沫の吐出速度は不均一かつ非定常であるが, 本研究では単純化のために, 均一かつ瞬時発生・拡散を想定した. 会話により発生した飛沫の粒径分布は, Duguid ら[25]の研究結果を基に粒径は $0.9\mu\text{m}$ ~ $850\mu\text{m}$ を想定し, 各吐出のピーク流量で 213 個/回を瞬時発生させる境界条件設定をした (図 3.2.1.(f)). 本研究では, 飛沫の蒸発による粒径変化を想定し, 会話の呼気温度は 36.4°C , 呼気の水蒸気質量分率は $99\%\text{RH}$ となるように設定した.

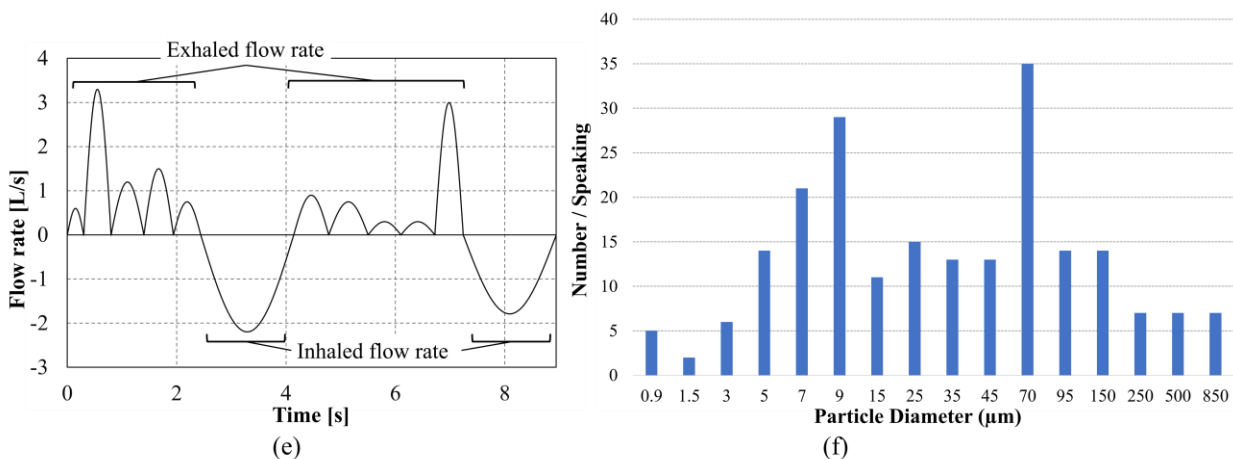


図 3.2.1. 会話飛沫拡散時の境界条件((e)会話プロファイル. (f)会話による飛沫粒径分布)

3.2.2 解析モデル

咳のケースと同様に会話のケースでは, 室内環境を再現するための単純室内モデルのジオメトリーは, 床面積 $3\text{m} \times 3\text{m}$, 高さ 3m とした. 室内には, 感染者・非感染者と想定した 2 体の CSP を Physical distance($0.3\text{m} \sim 1.1\text{m}$)で対面させた. 室内モデルの換気に関しては, 換気流が粒子輸送に与える影響を減らし, 室内流れ場の左右対称性を保つために, 感染者・非感染者からみて左右両側の室内下部にある 2 つの給気口($3\text{m} \times 0.15\text{m}$) から 0.05m/s で外気(25°C , $50\%\text{RH}$)が流入し, 室内上部中央の排気口($3\text{m} \times 0.3\text{m}$) から自由流出する置換換気システムを想定した(図 3.2.2).

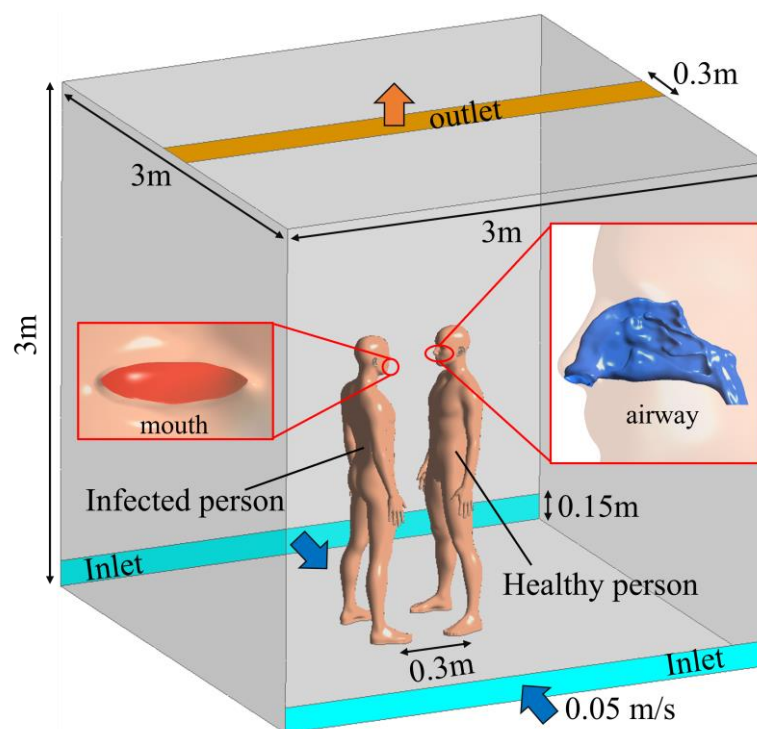


図 3.2.2. 解析モデル概要(会話)

3.2.3 人体姿勢の再現

飛沫拡散解析において、近距離接触時の人体姿勢を詳細に再現するため、本研究では Nan Zhang ら[19]のモニタリング実験による接触形態の結果を基に、立位と座位の CSP を作製した(立位の体高：175cm，座位の体高：135cm)。そして、(g)立位－立位，(h)座位－座位，(i)立位－座位の 3 種類を再現しモデル化した(図 3.2.3)。

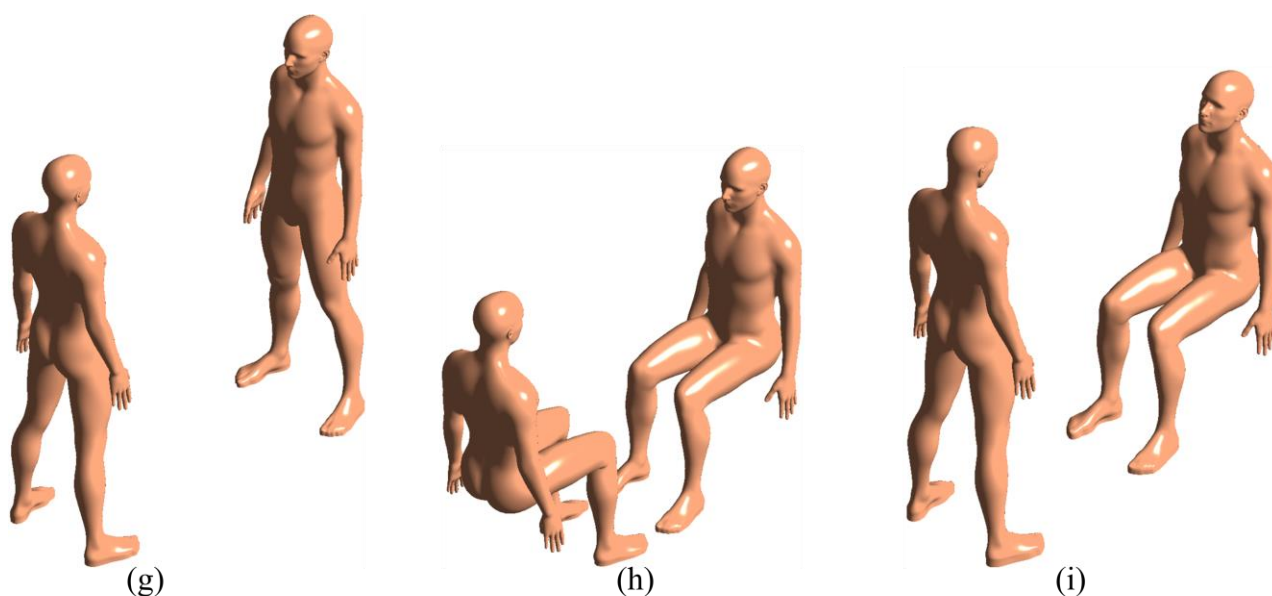


図 3.2.3. 人体の接触パターン((g)：立位－立位，(h)：座位－座位，(i)：立位－座位)

3.2.4 解析ケース

- Case2-1～Case2-5 は、2 体の立位姿勢の CSP を用いた(モデル(g)). Nan Zhang らの近距離接触時の接触距離に関する実験データを基に Physical distance を 0.3m(Case2-1), 0.5m(Case2-2), 0.7m(Case2-3), 0.9m(Case2-4), 1.1m(Case2-5)の 5 ケースを想定した.
- Case2-6 と Case2-7 は、2 体の座位姿勢の CSP を用いた(モデル(h)). Physical distance は 0.7m(Case2-6)と 1.1m(Case2-7)の場合を想定した.
- Case2-8 と Case2-9 は、立位姿勢と座位姿勢のそれぞれ 1 体ずつ CSP を用いた(モデル(i)). Physical distance は 0.7m(Case2-8)と 1.1m(Case2-9)の場合を想定した. 非感染者への飛沫・飛沫核の曝露リスク評価において、リスクが高いケースを再現するため、立位姿勢の CSP を感染者、座位姿勢の CSP を非感染者と想定した. 本モデルは、実際のコミュニケーション時での近距離接触を再現しており、立位と座位によって生じる体高差を考慮して、CSP の頭部の角度を調整した.
- Case2-10 と Case2-11 は、会話と咳の吐出流量が曝露リスクに与える影響を比較するために、2 体の立位姿勢の CSP を用いて(モデル(g)), Physical distance を 0.7m(Case2-10), 1.1m(Case2-11)の 2 ケースを想定し、咳の解析を行った.

本解析では、Nan Zhang ら[19]のモニタリング実験の結果から、感染者 CSP と非感染者 CSP の接触時間の中央値が 17 秒となったことを基に、17.88 秒(会話 2 サイクル分)を接触時間として想定した.

3.3 非定常呼吸サイクル

感染者 CSP の咳や会話によって室内拡散した飛沫・飛沫核の非感染者への曝露リスクを評価するため、非感染者 CSP の連続呼吸による吸入曝露をモデル化した. 非感染者 CSP の呼吸プロファイル(図 3.3)は、Gupta ら[8]に基づいて作成し、数値気道モデルの流入・流出境界(気道端部)に適用した(咳のケース：気管支位置、会話のケース：咽頭端位置). さらに、気道壁面温度は 36.4℃と仮定し、呼気の水蒸気質量分率は 99%RH になるように境界条件を設定した.

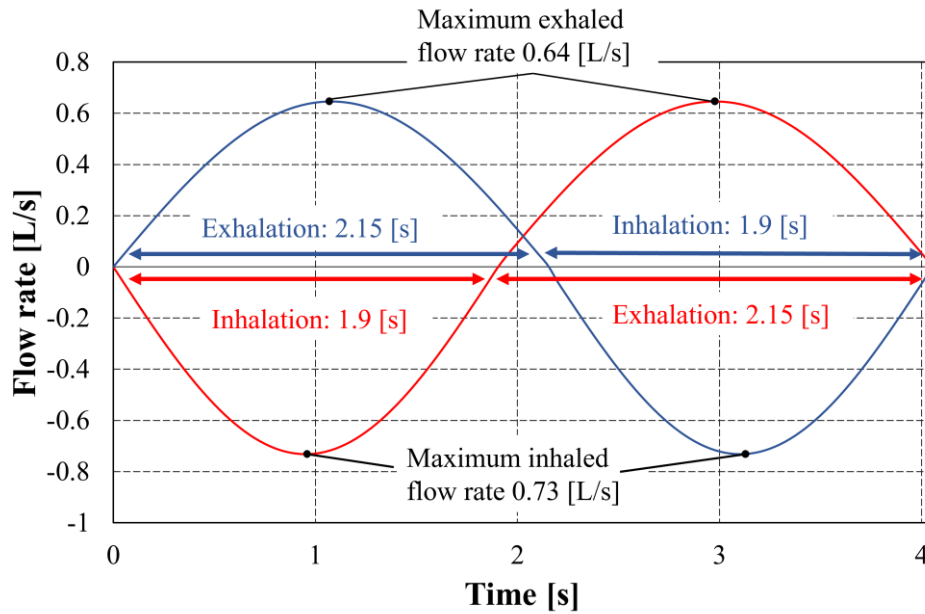


図 3.3. 異なる呼吸パターンによる非定常呼吸サイクルプロファイル（赤線：吸入－呼出，青線：呼出－吸入）

本研究では，咳のケースにおいて，非感染者 CSP の吸入のタイミングに着目した．飛沫・飛沫核が到達した際の非感染者 CSP の呼吸タイミングによる吸入曝露リスクの差異を評価するために，図 3.3 の吸入－呼出を交互に繰り返す非定常呼吸サイクル(赤線)と呼出－吸入を交互に繰り返す非定常呼吸サイクル(青線)の 2 つのプロファイルを境界条件として設定した．

3.4 数値人体モデル(CSP)

3.4.1 人体皮膚表面温度制御モデル

室内環境を構成する重要な要素の一つである人体発熱を再現するために，CSP には，人体と周辺の温熱環境との熱交換に基づいて皮膚表面温度を制御する Fanger の 1-node モデルを適用した．以下では，Fanger の 1-node モデルを解説する．

定常状態において，人体の総熱放散量(Q_m)と代謝による熱の生産量(M)は，ほぼ等しい(式(3.1)).

$$Q_m = M \quad (3.1)$$

人体の総熱放散量は皮膚表面からの熱放散(Q_{sk})と呼吸による熱放散(Q_{res})に分けられ(式(3.2))，皮膚表面からの熱放散は，顕熱(Q_t)と潜熱(E_{sk})に分けられる(式(3.3)).

$$M = Q_{sk} + Q_{res} \quad (3.2)$$

$$Q_{sk} = Q_t + E_{sk} \quad (3.3)$$

Fanger ら[30]によって，人体皮膚表面からの潜熱(E_{sk})及び呼吸による熱放散は(Q_{res})は，それぞれ次の式(3.4)，式(3.5)で表された．

$$E_{sk} = 3.05 \times 10^{-3}(5733 - 6.99M - P_a) + 0.42(M - 58.15) \quad (3.4)$$

$$Q_{res} = 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) + 0.0014M(34 - T_a) \quad (3.5)$$

ここで、室内空気温度 T_a は、総熱放散への影響が比較的小さいと考えられているため、 $T_a = 26^\circ\text{C}$ とする。室内空気の水蒸気圧は、気温 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $40 \sim 60\%$ の場合を想定し $P_a = 1500\text{Pa}$ を用いる。以上を考慮して、式(3.1)～(3.5)を整理すると式(3.6)となる。

$$Q_m = M = 1.93Q_t - 25 \quad (3.6)$$

人体が熱的中立状態にある場合、代謝量と熱平衡状態での平均皮膚表面温度に関する実験結果の報告より式(3.7)が成立する。

$$T_{sk} = 35.7 - 0.028Q_m \quad (3.7)$$

式(3.6)と式(3.7)より、式(3.8)が導くことができる。

$$T_{sk} = 36.4 - 0.054Q_t \quad (3.8)$$

ここで式(3.8)を Q_t に関して整理すると式(3.9)のように書き換えられる。

$$Q_t = 18.52(36.4 - T_{sk}) \quad (3.9)$$

式(3.9)では、人体のコア温度(36.4°C)と人体皮膚表面温度との差により熱量が生じる熱伝導の式と同様の形態をとっている。図 3.4 に Fanger の 1-node モデルのイメージを示す。

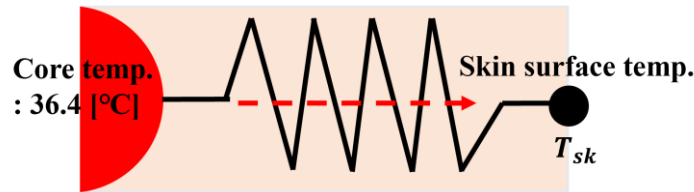


図 3.4. Fanger の 1-node モデルのイメージ図

3.4.2 水蒸気蒸散量モデル

飛沫の粒径変化を考慮するためには、室内環境中の水蒸気の質量分率が必要となる(参照 3.6)。そのため、人体皮膚表面からの水蒸気蒸散量モデルを適用した。本解析では、CSP を熱的中立状態だと仮定しているため、潜熱(E_{sk})は式(3.4)を整理すると人体の総熱放散量(Q_m)から算出できる(式(3.10))。ここで、人体の総熱放散量(Q_m)は、式(3.6)と式(3.9)から得られる(参照 3.4.1)。

$$E_{sk} = -(6.94 + 3.05 \times 10^{-3} \times P_a) + 0.339 \times Q_m \quad (3.10)$$

これを蒸散に伴う潜熱係数(h_{fg})で割り、皮膚表面からの水蒸気の質量分率(m_{sk})を得る。

$$m_{sk} = \frac{E_{sk}}{h_{fg}} \quad (3.11)$$

3.5 粒子輸送モデル

室内や気道内での飛沫・飛沫核の輸送現象を把握するために、咳や会話によって吐出される飛沫・飛沫核には、粒子(分散相)の計算モデルとして one-way coupled Lagrangian DPM (Discrete Phase Model) アプローチを適用した。このアプローチは、はじめに気流場を時間ステップごとに計算し、次に一つ一つの粒子に対して粒子の運動方程式を積分することによって飛跡を決定する。

粒子の運動方程式では、飛跡に大きな影響を与える抗力と重力を考慮した(式(3.12)).

$$\frac{du_i^d}{dt} = f_D + \frac{g(\rho_d - \rho)}{\rho_d} \quad (3.12)$$

ここで、上付き文字と下付き文字の d は飛沫(droplet)を表す。

f_D は単位粒子質量あたりの抗力であり、Stokes's drag law に基づき式(3.13)のようになる。

$$f_D = \frac{(u_i^g - u_i^d)}{\tau} = \frac{18\mu}{\rho_d d_d^2} \cdot \frac{C_D Re_d}{24} (u_i^g - u_i^d) \quad (3.13)$$

ここで、 μ は空気粘度、 u_i^g は気流速度、 u_i^d は粒子速度、飛沫の粒径は d_d 、飛沫の密度は ρ_d 、 C_D は抗力係数、 Re_d は飛沫の相対レイノルズ数である。

飛沫の相対 Reynolds 数(Re_d)は、式(3.14)のように表される。

$$Re_d = \frac{\rho_d d_d |u_i^d - u_i^g|}{\mu} \quad (3.14)$$

抗力係数(C_D)は、Morsi and Alexander [31]の方法にて、球形・滑面を仮定した粒子を対象として定義される(式(3.15)).

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_d} + \frac{a_3}{Re_d^2} \quad (3.15)$$

ここで、定数 a_1 , a_2 , a_3 は飛沫の Reynolds 数によって決まる。

粒子に作用する乱流分散は、確率的変動であるランダムウォークモデル(DRWM (Discrete Random Walk Model))を適用し、式(3.16)～式(3.18)で与える。変動速度成分は、標準偏差 σ のガウス分布確率密度関数からランダムに割り当てる。

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (3.17)$$

$$G(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u'^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.18)$$

本研究において、解析対象の室内空間に供給される粒子体積は、連続相(空気相)と比較して十分に希薄であり、粒子間の相互作用と粒子が空気相に及ぼす影響は無視可能であると仮定

した．そして，飛沫の対象粒径(図 3.1.1.(b)，図 3.2.1.(f))から，サフマン揚力や熱泳動力などの他の力が飛沫拡散に及ぼす影響は比較的小さいと仮定し，無視できるものとした[32, 33]．また，飛沫の密度(ρ_d)は 1000 kg/m^3 と仮定した．これは，唾液の組成[34]から飛沫は 98.2%の水と 1.8%の不揮発性固体化合物から構成されるためであり，ウイルスの有無にかかわらず密度は同じであると仮定した．

3.6 飛沫粒径変化モデル

3.6.1 物質移動

飛沫は水分を多く含んでいるため，蒸発によって初期粒径よりも小さくなることで空気中に長い時間浮遊する．そのため，飛沫拡散解析を行う上で蒸発による粒径変化の影響を考慮することは重要である．以下では，飛沫粒径変化モデルについて解説する[22]．

飛沫周辺にある大気中の水蒸気と飛沫中の水(液体)との間の蒸発は，各飛沫の質量バランスとエネルギーバランスを考慮する必要がある．Miller[35]と Sazhin[36]の研究によって，蒸発速度は式(3.19)のように表すことができる．

$$\frac{dm_d}{dt} = k_m A_d \rho \ln(1 + B_m) \quad (3.19)$$

ここで， m_d は飛沫の質量， k_m は物質移動係数， A_d は飛沫の表面積， ρ は気体の密度である． B_m は Spalding の質量輸送数であり，式(3.20)のように表すことができる．

$$B_m = \frac{Y_s - Y_\infty}{1 - Y_s} \quad (3.20)$$

ここで， Y_s は飛沫表面における水蒸気の質量分率， Y_∞ は飛沫から遠く離れた気体中の水蒸気の質量分率である．

3.6.2 飛沫への伝熱

飛沫の顕熱変化と飛沫と連続相との間の対流伝熱及び潜熱輸送との関係を表した熱収支式(式(3.21))によって，飛沫の温度(T_d)が得られる[22]．

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = k_h A_d (T_g - T_d) - L \frac{dm_d}{dt} \quad (3.21)$$

ここで， c_d は飛沫の比熱， T_d は飛沫の温度， k_h は対流熱伝達率， L は潜熱である．

液体と気体間の物質と熱の移動係数は，類似の経験的な相関関係で説明される．

・物質移動係数(k_m)

$$k_m = \frac{Sh D_v}{d_d} = \frac{D_v}{d_d} \left(2 + 0.6 Re_d^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \right) \quad (3.22)$$

ここで、 Sh はシャーウッド数であり、式(3.22)のように経験式で表される。 D_v は空気中の水蒸気拡散係数、 Sc は ν/D_v (動粘度： $\nu = \mu/\rho$) で与えられるシュミット数である。

・ 対流熱伝達率(k_h)

$$k_h = \frac{Nuk}{d_d} = \frac{k}{d_d} \left(2 + 0.6Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (3.23)$$

ここで、 Nu はヌセルト数であり、式(3.23)のように経験式で表される[36]。 k は気体の熱伝導率、 Pr は ν/α (熱拡散率： $\alpha = k/\rho c_p$) で与えられるプラントル数である。

第 4 章 結果及び考察

本研究では，第 3 章で解説した解析モデル及び境界条件を用いて CFD 解析を行った．本章では，咳と会話による非感染者への曝露リスク評価に関する結果及び考察について報告する．

4.1 咳飛沫・飛沫核拡散

4.1.1 室内初期流れ場

本解析では，室内に人体がある初期状態(代謝発熱あり，呼吸なし)を再現するために，定常解析を行った．図 4.1.1 では，室内環境中及び CSP 周りの速度場，温度場，水蒸気質量分率の分布を示した．

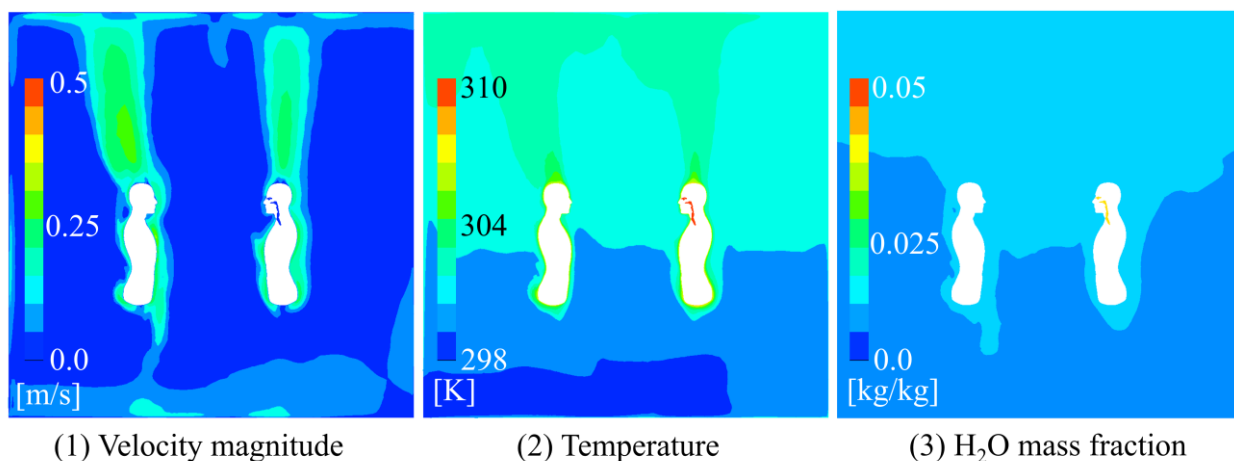


図 4.1.1. 室内初期流れ場分布

CSP からの発熱により，室内環境中に熱上昇流と温度成層が形成されることが確認できた．これは，部屋の換気方式が置換換気であるため，室内気流が室内下部から給気し室内上部から排気されるからである．室内環境中のこれらの流れ場(速度，温度，水蒸気質量分率)分布は，感染者 CSP の咳による吐出気流によって発生した飛沫の輸送，室内分布，非感染者 CSP への吸入曝露に必要な初期条件として設定した．

4.1.2 口腔形状の影響

本解析では，感染者 CSP の口腔形状の再現が飛沫・飛沫核の室内拡散動態に与える影響について着目し，数値気道モデルの有る CSP と無い CSP の咳による飛沫の輸送現象を比較した．図 4.1.2 には，顔面付近および口腔開口面における咳気流の速度分布を示した．これにより，口腔形状の影響による咳の吐出気流パターンを比較した．

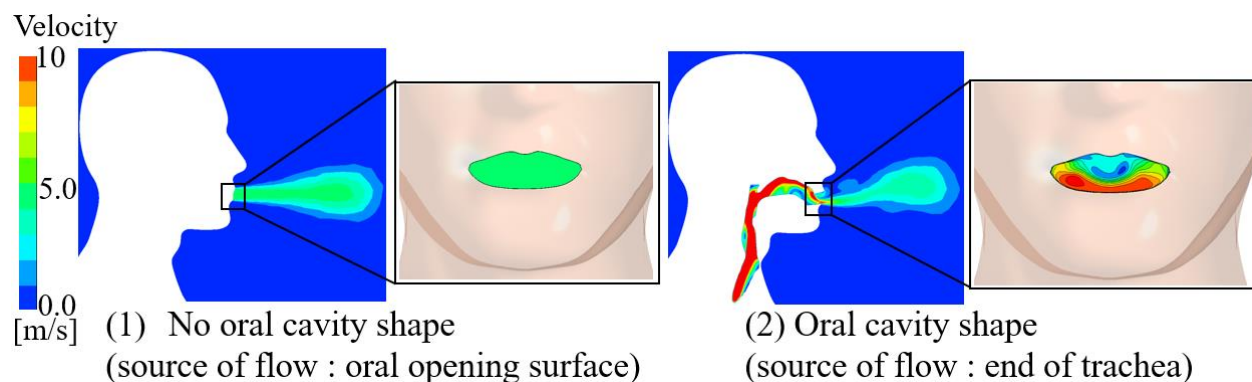
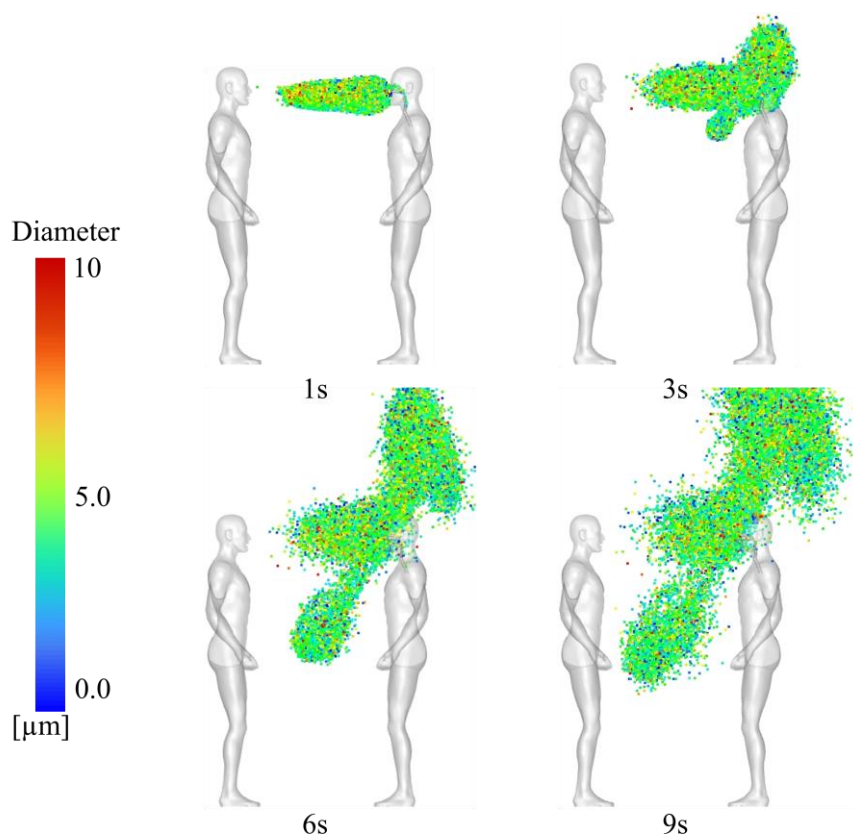


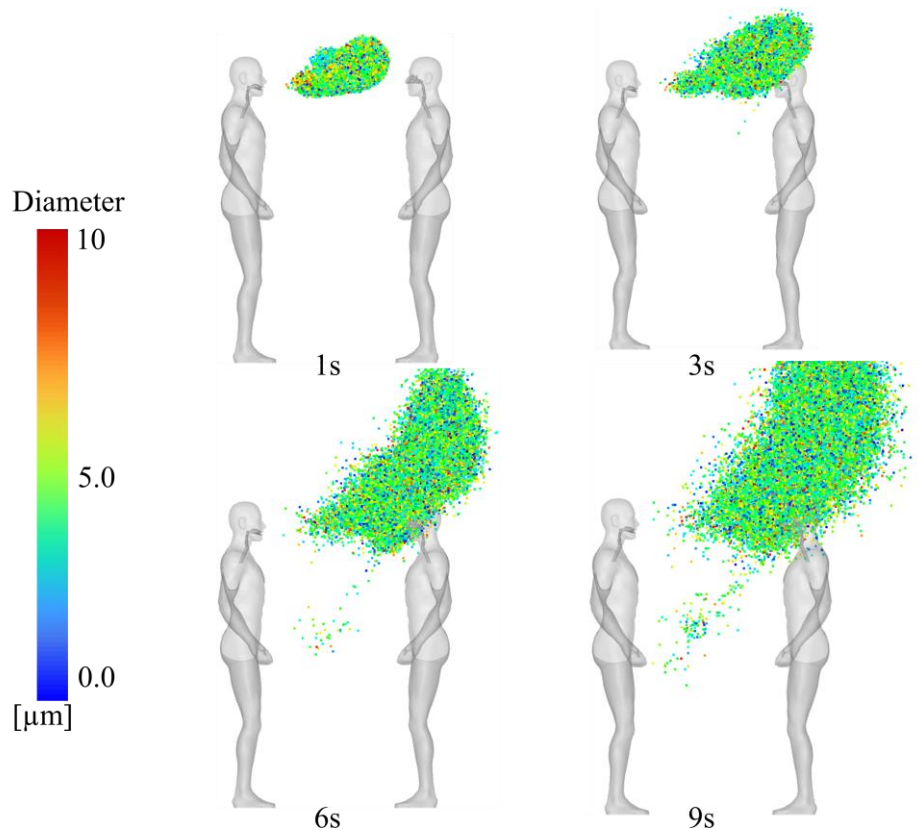
図 4.1.2. 気道内・口腔開口面上での速度分布

気道の有無によって、感染者 CSP の口腔開口面上での速度分布に明確な差があった。気道の無いケース(図 4.1.2.(1))では、境界条件として **cough profile** を口腔開口面上に設定しているため、口腔開口面上での速度分布は一様になった。一方で、気道の有るケース(図 4.1.2.(2))では、境界条件として **cough profile** を気道端(気管支位置)に設定しているため、咳気流が気管や口腔の形状による影響を受けて流れ場が複雑になり、口腔開口面上での速度分布は下部の速度が高く、上部では低くなった。

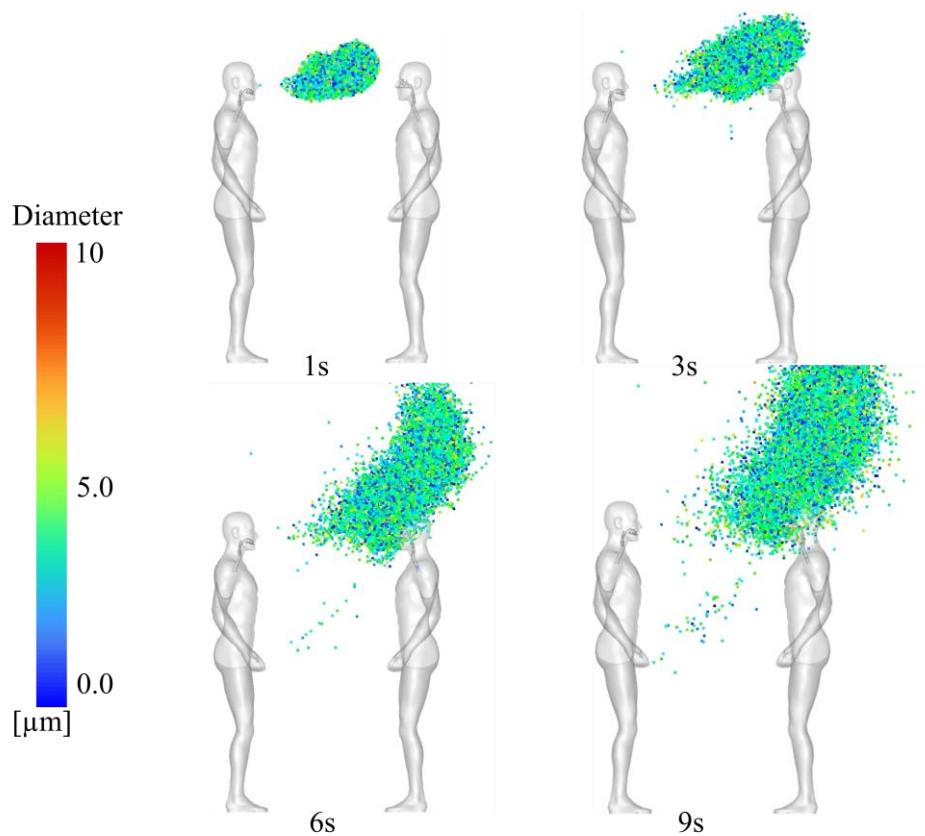
次に、気道の有無による飛沫の室内拡散動態、非感染者への吸入・沈着割合の違いを比較した。図 4.1.3 に 3 ケースの咳飛沫の室内拡散分布を示した。



Case A(気道：無，飛沫の発生場所：口腔開口面)



Case B(気道：有，飛沫の発生場所：口腔開口面)



Case C(気道：有，飛沫の発生場所：気道端(気管支位置))

図 4.1.3. 気道の有無による飛沫の室内拡散分布比較

気道の有無の影響による口腔開口面上での速度場分布の違いが、飛沫の室内拡散に大きな影響を与えた。気道の有る感染者 CSP と気道の無い感染者 CSP の飛沫拡散の室内分布を比較すると、気道の有る感染者 CSP の咳によって吐出された飛沫は、気道の無い感染者 CSP の咳によって吐出された飛沫よりも室内上方に輸送されていることが分かった。(Case A vs Case B and C). これは、口腔形状(主に舌部分)の影響により口腔開口面で速度分布差が生じることで、飛沫拡散の方向が上方になるからである。

Case C において、気道の有る感染者 CSP の気道端(気管支位置)から吐出された飛沫は、図 4.1.4 のように気道内輸送され、気道壁面に沈着した。

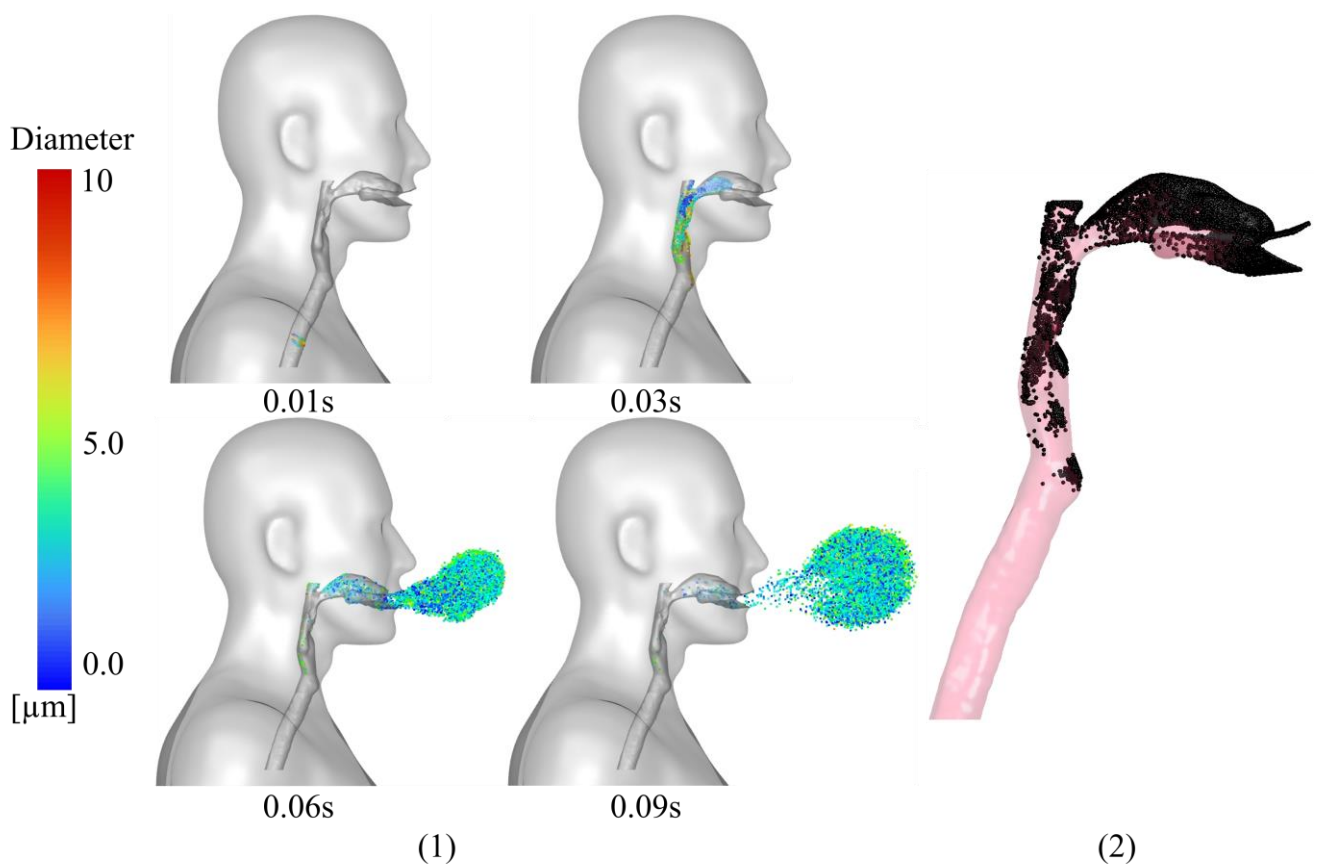


図 4.1.4. 気道の有る感染者 CSP の飛沫拡散((1)飛沫の気道内輸送。(2)感染者 CSP の気道壁面への沈着分布).

Case C の口腔開口面から吐出される飛沫の個数や粒径分布は、気道の無い CSP よりも数少なく、比較的小さい粒径($< 5\mu\text{m}$)となり、室内環境中に輸送された(図 4.1.3. Case A and B vs Case C). その理由として、咳による吐出気流の速度が大きく、気道が複雑な幾何形状をしているため、粒径が大きい飛沫($> 5\mu\text{m}$)が慣性衝突により沈着してしまうからである。

このように、気道の有無により飛沫の拡散に違いがあることから、非感染者 CSP への飛沫・

飛沫核の吸入・沈着割合(表 1)に有意な差が生じた。また、図 4.1.5 では非感染者の顔面及び気道壁面における沈着分布を示した。

表 1. 気道の有無による非感染者への曝露リスク評価(75 秒間)

	Case A	Case B	Case C
吸入割合	5.39%	0.13%	0.038%
気道への沈着割合	2.64%	0.042%	0.011%
皮膚表面への沈着割合	2.89%	0.0067%	0.0044%
感染者の気道への沈着割合	—	—	58.9%

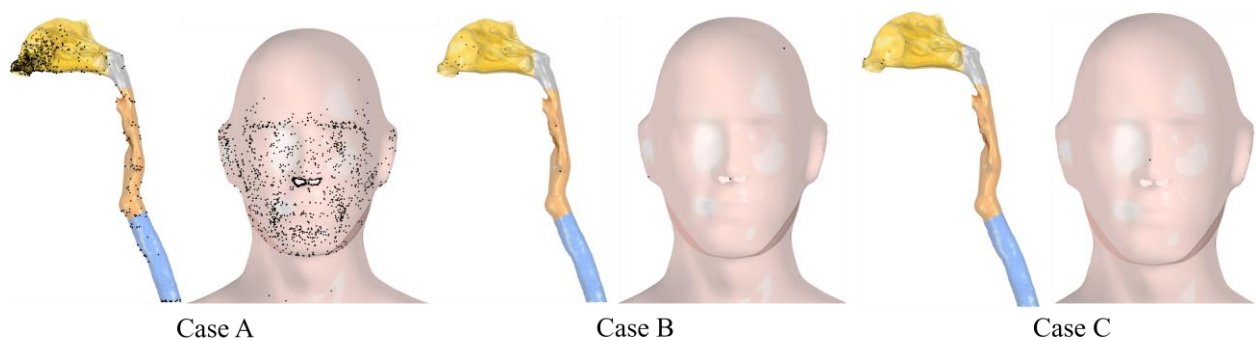


図 4.1.5. 口腔形状の有無による非感染者への沈着分布比較

Case A と Case B を比較すると(Case A vs Case B), Case B では吸入・沈着割合は劇的に減少した。この 2 ケースは、飛沫の発生場所がどちらも口腔開口面上であるため、気道モデルの有無による口腔開口面での速度分布の差が飛沫の輸送に大きく影響を与えた。Case B の飛沫は、口腔形状の影響を受けて室内上方に拡散したため、非感染者 CSP の呼吸域に入る飛沫数が減少した。

Case B と Case C を比較すると(Case B vs Case C), どちらも吸入・沈着割合が低い値となった。この 2 ケースは、飛沫の発生場所が異なる(Case B:口腔開口面, Case C:気道端(気管支位置))ため、口腔開口面から室内に向けて吐出される飛沫の粒径分布の差が飛沫の輸送に大きく影響を与えた。Case C の飛沫は粒径が小さく、室内気流の影響を受けて上方に拡散したため、非感染者 CSP の呼吸域に入る飛沫数は減少した。

以上のように、気道モデルの有無による微粒子拡散及び非感染者への曝露リスクの影響を評価した。感染者 CSP が気道モデルを有する場合では、非感染者への曝露リスクが劇的に低くなることが分かった。

本研究では、数値計算の単純化や感染リスクが最も高くなるケースを想定していることから、気道モデルの無い感染者 CSP を用いて、その他の解析を行った。

4.1.3 呼吸タイミングの影響

本解析では、非感染者 CSP の吸入のタイミングが曝露リスクに与える影響をについて着目し、呼吸パターンを変更した際の非感染者 CSP への曝露リスクを比較した。図 4.1.6 では、飛沫・飛沫核の室内分布を示した(Case1-1 vs Case1-2)。

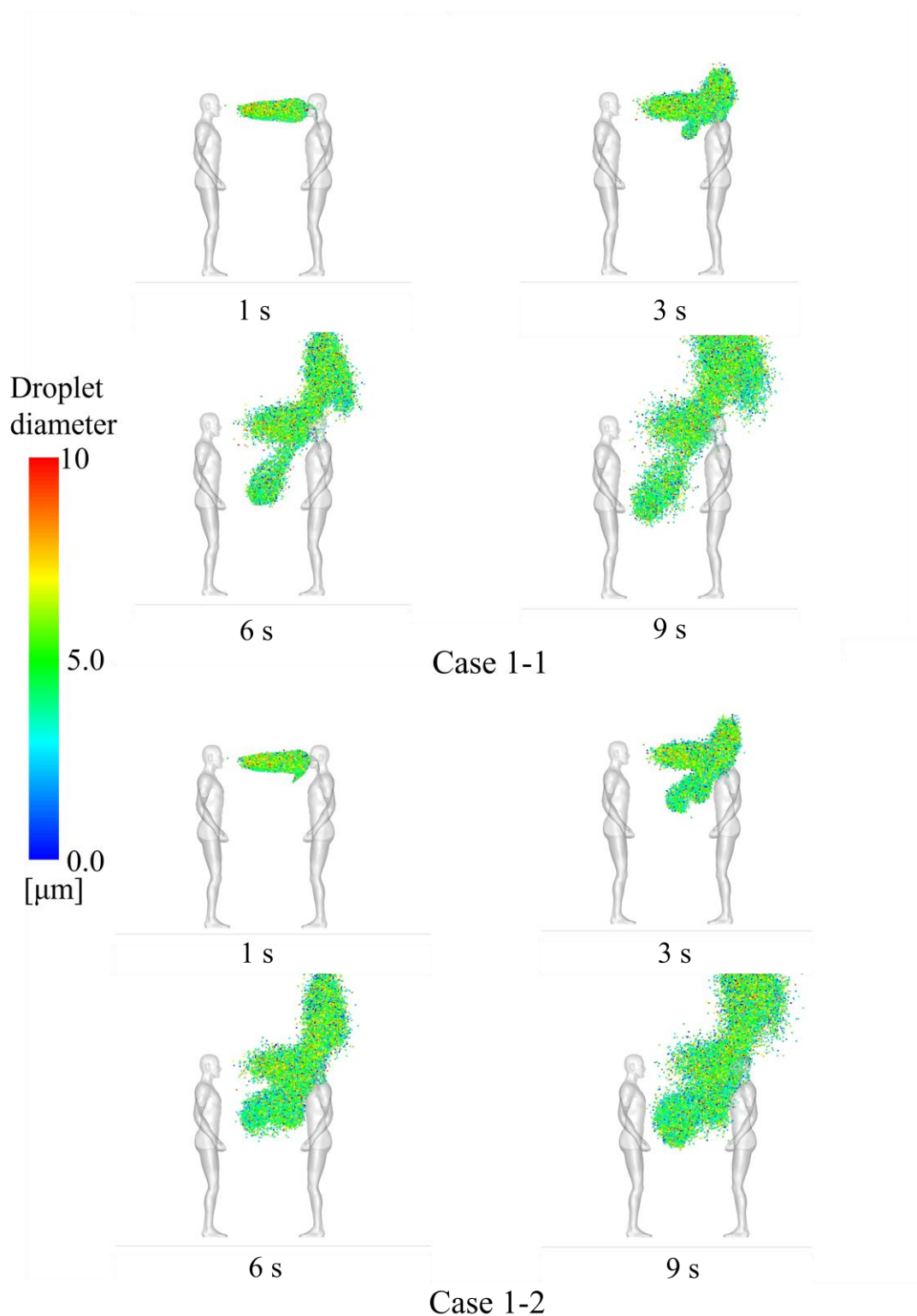


図 4.1.6. 非感染者 CSP の 2 種類の呼吸パターン(Case1-1:吸入－呼出, Case1-2:呼出－吸入)

表 2 では 4 ケースの各呼吸サイクル(1 サイクル:4.05 秒)における非感染者 CSP の吸入割合を示した。

表 2. 各呼吸サイクルにおける吸入割合

	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	4th cycle	5th cycle	Total
Case1-1	4.55%	0.53%	0.13%	0.06%	0.03%	5.31%
Case1-2	2.99%	0.31%	0.16%	0.07%	0.03%	3.55%
Case1-3	1.71%	0.50%	0.06%	0.01%	0.00%	2.28%
Case1-4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%

表 2 より, Case1-4 では Physical distance が 2m であり, 非感染者への飛沫到達時間が 10 秒以上かかった。そのため, 1st cycle から 4th cycle までの間は非感染者 CSP に到達しなかった。

Case1-1 から Case1-3 の呼吸サイクルごとの吸入割合は, サイクル回数が増すにつれて減少した。そして 3rd cycle 以降では, ほとんど同じ吸入割合となった。そのため, 2 つの呼吸パターンにおける最初の 2 サイクルの結果を比較した(Case1-1 vs Case1-2)。いずれの呼吸サイクルにおいても, Case1-1 は Case1-2 の 1.5 倍以上あった。これは, Physical distance が 1m であり, 飛沫到達時間が約 0.9 秒と短いため, 到達した際の非感染者 CSP の呼吸状態(吸入または呼出)に依存すると考えられる。図 4.1.6 より, 人間の呼吸パターンが飛沫拡散や吸入曝露に及ぼす影響は非常に複雑であり, 今後の検討が必要である。

非感染者 CSP によって吸入される感染性飛沫の量が多いほど, 感染する確率は高くなる。そこで, 本研究では, 吸入－呼気のサイクルからなる呼吸パターンを前提に, 飛沫拡散に対する他の要因の影響を検討した。

4.1.4 蒸発に伴う粒径変化の影響

本解析では, 飛沫の蒸発に伴う粒径変化が曝露リスクに与える影響をについて着目し, 粒径変化を考慮した際の非感染者 CSP への曝露リスクを比較した(Case1-1 vs Case1-3)。図 4.1.7 は, 室内環境中で感染者 CSP が咳をした場合の対象粒径 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ の飛沫拡散を 75 秒間観察したスナップショット画像である。蒸発を伴わない場合(Case1-1)と蒸発を伴う場合(Case1-3)では, 感染者 CSP と非感染者 CSP の Physical distance は 1m である。Case1-3 において, 50%RH の室内環境中に咳によって放出された飛沫は瞬時の蒸発し直径 $1\mu\text{m}$ 以下の飛沫に変化した。

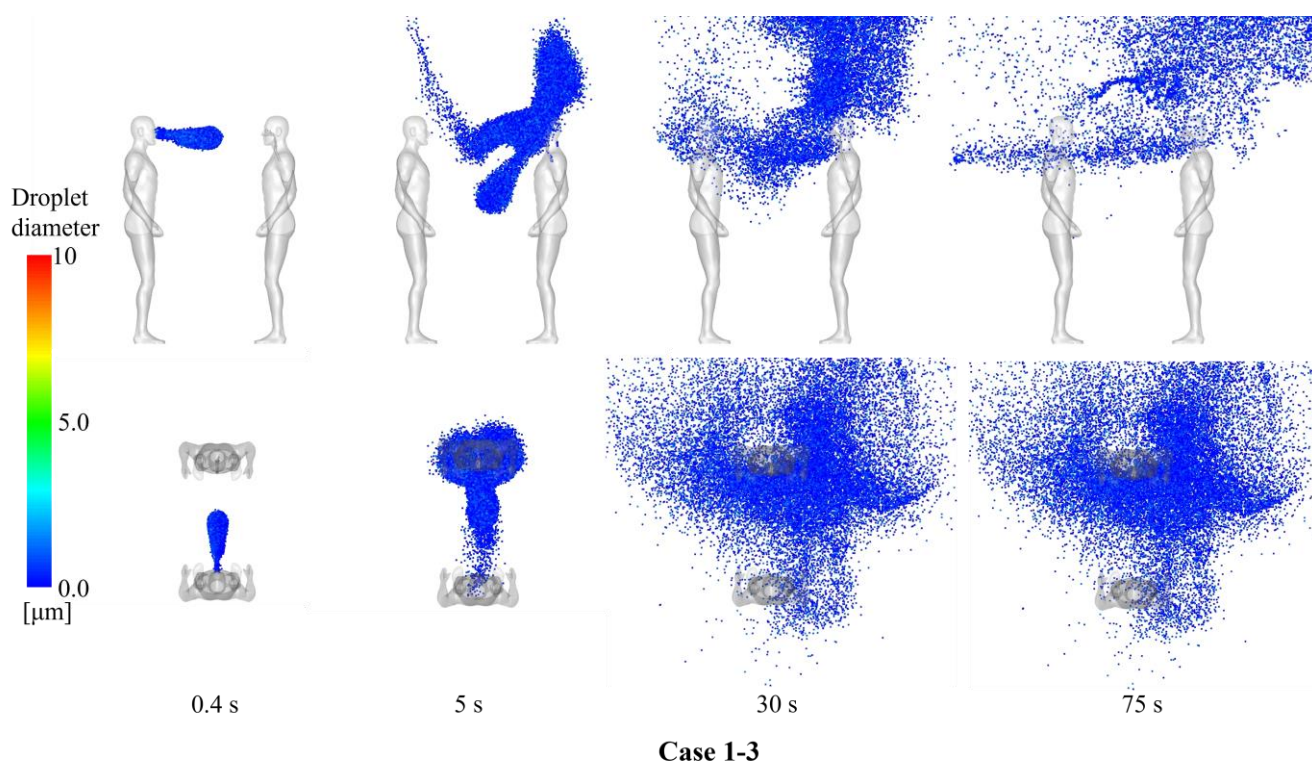
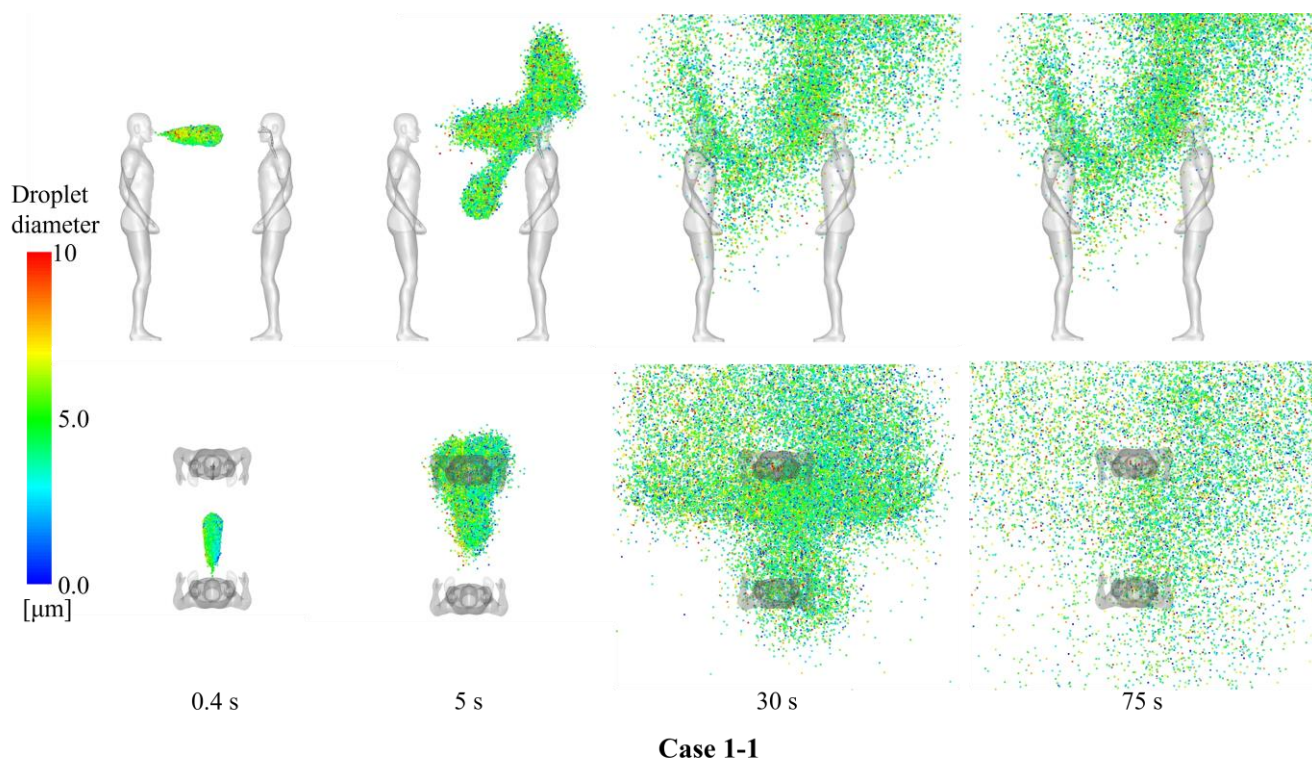


図4.1.7. 室内環境における感染者CSPの咳飛沫拡散(側面図及び上面図). (Physical distance:1m, Case1-1:蒸発なし, Case1-3:蒸発あり)

図 4.1.7 の Case1-3 の 5 秒時点では、蒸発により飛沫の粒径が小さくなったため、一部の飛沫は、感染者 CSP の人体周辺の熱上昇流によって天井方向に拡散した。また、両ケースにおいて、非感染者 CSP に到達した飛沫は、熱上昇流によって天井方向に拡散した。この現象に関しては、Amjadimanesh ら[37]も飛沫拡散に対する熱上昇流の影響を報告している。一般的に、人体に向かう風がない場合(無風状態)において、人体周辺の熱上昇流は強く、咳により吐出された小さい粒径の飛沫拡散に影響する。

飛沫の蒸発に伴う粒径変化を考慮すると、人体周辺の熱上昇流や室内換気に伴う流れ場の影響を受け、非感染者に到達する飛沫の量は減少する。そこで本研究では、前述のとおりワーストケースを想定していることから、飛沫が粒径変化を考慮しないことを前提に、Physical distance の影響を検討した。

4.1.5 Physical distance の影響

本解析では、Physical distance が曝露リスクに与える影響について着目し、Physical distance が 1m(Case1-1)と 2m(Case1-4)の場合における非感染者 CSP への曝露リスクを比較した(Case1-1 vs Case1-4)。図 4.1.8 は、Case1-4 室内環境中で感染者 CSP が咳をした場合の対象粒径 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ の飛沫拡散を 120 秒間観察したスナップショット画像である。Case1-4 では、Case1-1 と同様、蒸発による飛沫の粒径変化は考慮していない。

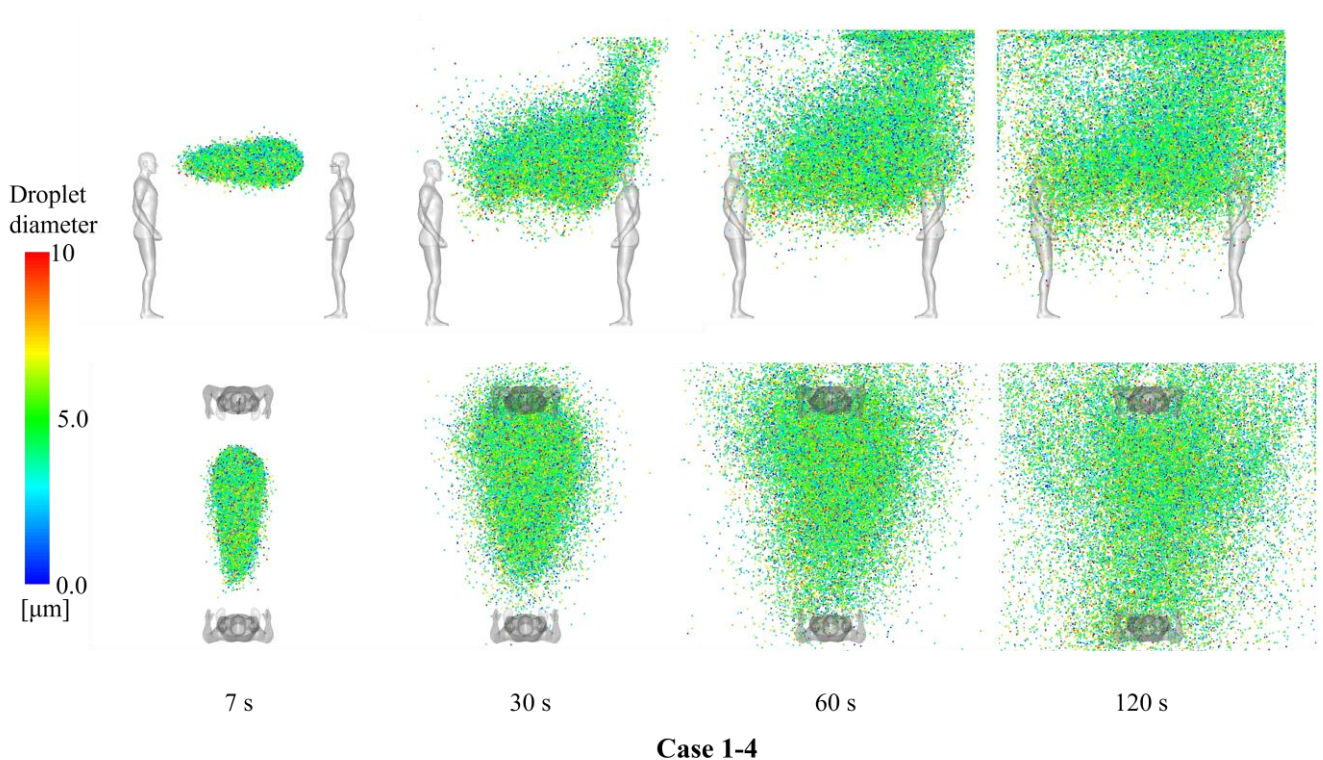


図4.1.8. 室内環境における感染者CSPの咳飛沫拡散(側面図及び上面図). (Physical distance:2m, Case1-4:蒸発なし)

Physical distance が 1m の場合(Case1-1), 感染者 CSP の咳によって吐出された飛沫は約 0.9 秒で非感染者 CSP の顔面に到達する。本解析において, 非感染者 CSP の呼吸は, 感染者 CSP の咳と同時に吸入を開始すると想定した。そのため, 非感染者 CSP の吸入流量がピークに達したときに, 咳飛沫は非感染者 CSP の呼吸域に到達した。非感染者 CSP は呼吸域に到達した飛沫を 1.9 秒まで吸入し, 気道内や呼吸域に浮遊している飛沫・飛沫核は, 図 4.1.7 の 5 秒時点のように呼気によって鼻から斜め下方向に拡散された。

Physical distance が 2m の場合(Case1-4), 咳飛沫は非感染者 CSP の顔面に到達するまでに約 12 秒かかった。咳飛沫が非感染者 CSP に到達するまでの間に, 飛沫濃度は乱流拡散によって希釈されたため, 非感染者 CSP の呼吸域における飛沫濃度は 1m の場合(Case1-1)に比べて低くなり, 吸入割合も低下した(表 3)。そのため, 呼気による呼吸域での飛沫・飛沫核の有意な拡散は見られなかった。

両ケース(Case1-1 and 1-4)において, 飛沫・飛沫核は非感染者 CSP に到達するまでの間に, 粒径の大きい飛沫は重力沈降による室内下方に拡散し, 粒径の小さな飛沫・飛沫核は置換換気の床から吹き上げる気流により上方に拡散した。また, 到達後は人体周辺の熱上昇流の影響を受けて天井方向に拡散した。

4.1.6 曝露リスク評価

感染者 CSP の咳による曝露リスクを評価するためには, 非感染者 CSP の飛沫の吸入量と沈着量を用いた。各解析ケースの吸入割合と人体皮膚表面への沈着割合の結果を表 3 にまとめた。

表 3. 各数値条件下での咳飛沫の吸入・沈着割合(飛沫数)

	Aspiration efficiency	Exhalation rate	Deposition efficiency on airway	Penetration efficiency to lung region	Deposition efficiency on skin surface
Case1-1	5.4%	0.7%	2.6%	2.0%	2.9%
Case1-2	3.6%	0.2%	1.5%	1.9%	2.3%
Case1-3	2.3%	0.7%	0.6%	1.1%	1.8%
Case1-4	0.2%	< 0.1%	< 0.1%	0.1%	< 0.1%
Case1-5	8.5%	—	2.9%	5.6%	3.0%
Case1-6	1.8%	—	0.2%	1.6%	< 0.1%

ここで、咳による各曝露リスクの定量評価は以下のように計算した。

吸入割合(Aspiration efficiency)を AE_{cough} と表記すると、式(4.1)のように定義した。

$$AE_{cough} = \frac{\text{Number of droplets inhaled by susceptible CSP}}{\text{Number of droplets coughed by infected CSP}} \quad (4.1)$$

沈着割合(Deposition efficiency)を DE_{cough} と表記すると、式(4.2)のように定義した。

$$DE_{cough} = \frac{\text{Number of droplets deposited on the skin surface of susceptible CSP}}{\text{Number of droplets coughed by infected CSP}} \quad (4.2)$$

Physical distance が 1m において、飛沫の蒸発に伴う粒径変化の有無による吸入・沈着割合を比較すると(Case1-1 vs Case1-3), Case1-1 の吸入・沈着割合は両方とも Case1-3 よりも高くなった。Zhu ら[38]は、飛沫の粒径に依存する輸送特性について報告しており、一般的に、粒径の小さい飛沫は慣性力の影響をあまり受けることなく口腔開口面から室内環境中へと拡散し、粒径の大きい飛沫は慣性力の影響をより強く受ける。そして、Case1-1 の飛沫の粒径は、蒸発による粒径変化を考慮していないため、Case1-3 よりも対象飛沫の粒径が大きい。そのため、Case1-1 の吸入・沈着割合が高いのは、Case1-1 の飛沫は大きい慣性力を有し人体周辺の熱上昇流の影響をあまり受けず、非感染者 CSP に輸送されやすくなることに起因した。

蒸発を考慮しない場合において、Physical distance が 1m と 2m のときの吸入・沈着割合を比較すると(Case1-1 vs Case1-4), Physical distance が長くなるにつれて、吸入・沈着割合は減少した。Physical distance が 2m の場合では、吸入割合は 0.15%, 人体皮膚表面への沈着割合は 0.004% であり、これは Physical distance が 1m の場合の吸入割合の 30%以下となった。これは、吸入流量 0.467L/s の定常吸入条件下でも同様で、Physical distance が 1m と 2m を比較すると(Case1-5 and Case1-6), 吸入・沈着割合は Physical distance の影響を大きく受けた。一般に、吸入割合は非感染者 CSP の吸入タイミングと呼吸域の飛沫濃度に依存することが考えられる。しかし、定常吸入条件の結果から、吸入タイミングの影響に比べ Physical distance が呼吸域の飛沫濃度に及ぼす影響が大きい。このように、Physical distance が 1m と 2m での吸入・沈着割合の差は、Physical distance が長くなるにつれて、飛沫・飛沫核が非感染者 CSP に到達するよりも前に室内全体に広く拡散し、非感染者 CSP の呼吸域及び皮膚表面に到達する飛沫数が減少することに起因した。

肺領域への通過率に着目すると、非定常呼吸(Case1-1, 1-3, and 1-4)では、吸入した飛沫の約 40%~70%が気道壁面に沈着することなく肺領域に侵入した。また、定常吸入(Case1-5 and 1-6)では、吸入した飛沫の約 70%~90%が肺領域に侵入した。このような呼吸の仕方による通過率の差は、気道内の気流の違いによって生じる。非定常呼吸は、吸気と呼気からなる呼吸サイクルにより、定常吸入よりも複雑な気流を気道に発生させる。そのため、非定常吸入の場合よりも定常吸入の場合に吸入された飛沫が肺に輸送されやすくなった。加えて、曝露リスク評価では、非感染者 CSP が吸入する飛沫体積量にも着目した。吸入された飛沫体積の割合(η_{EAV}),

気道に沈着した飛沫体積の割合(η_{EDV}), および肺領域へと通過した飛沫体積の割合(η_{EVP})の各曝露割合は, 次のように計算され, 計算結果を表 4 にまとめた.

$$\eta_{EAV} = \frac{\text{Volume of droplets inhaled by susceptible CSP}}{\text{Volume of droplets coughed by infected CSP}} \quad (4.3)$$

$$\eta_{EDV} = \frac{\text{Volume of droplets deposited on the skin surface of susceptible CSP}}{\text{Volume of droplets coughed by infected CSP}} \quad (4.4)$$

$$\eta_{EVP} = \frac{\text{Volume of droplets penetrated into the lung of susceptible CSP}}{\text{Volume of droplets coughed by infected CSP}} \quad (4.5)$$

表 4. 各数値条件下での咳飛沫の吸入・沈着割合(飛沫体積)

	η_{EAV}	η_{EDV}	η_{EVP}
Case1-1	5.5%	3.4%	1.5%
Case1-2	3.5%	1.8%	1.5%
Case1-3	2.4% (< 0.1%)	0.7% (< 0.1%)	1.0% (< 0.1%)
Case1-4	0.2%	< 0.1%	< 0.1%
Case1-5	8.7%	3.9%	4.8%
Case1-6	2.1%	0.5%	1.6%

飛沫体積の吸入・沈着割合(表 4)は, 飛沫数の吸入・沈着割合(表 3)と同じ傾向であった. 表 4 より, Physical distance は非感染者 CSP によって吸入または沈着する飛沫体積に大きく影響した(Case1-1 vs Case1-4 and Case1-5 vs Case1-6). 特に, 定常吸入流量 0.467 L/s の同じ境界条件では(Case1-5 and 1-6), Physical distance が 1m での飛沫体積の吸入割合は 8.69%であり, 2m の場合の約 4 倍になった. この差は, 非感染者 CSP の呼吸域に到達する飛沫の粒径と個数によって生じる. Physical distance が 2m の場合, 粒径の大きい飛沫は重力沈降によって室内下方に拡散されるため, 非感染者 CSP に到達した飛沫の粒径と個数は 1m の場合よりも小さくなる. 図 4.1.9 からも Physical distance が 1m の場合(Case1-1, 1-2, 1-3 and 1-5)の曝露リスクは, 2m の場合よりも高いことがわかる. 特に, 図 3.1.1.(b)の咳飛沫の粒径分布より, 粒径約 5 μ m の飛沫が多く発生するため, Physical distance が 1m の場合は気道壁面や皮膚表面にこれらの飛沫が多く沈着した.

蒸発による飛沫の粒径変化の影響を比較すると(Case1-1 vs Case1-3), Case1-3 では非感染者 CSP の呼吸域に到達するまでの間に蒸発により飛沫の粒径が小さくなり, それに伴って飛跡が変化するため, 吸入・沈着する飛沫体積は Case1-1 よりも小さくなった. そのため, 蒸発後の吸入された飛沫体積の割合は 0.04%, 蒸発後に沈着した飛沫体積の割合は 0.01%であった.

蒸発前後で飛沫の粒径が変化するため, 表 4 には蒸発前の元の粒径の吸入・沈着した飛沫体積示している.

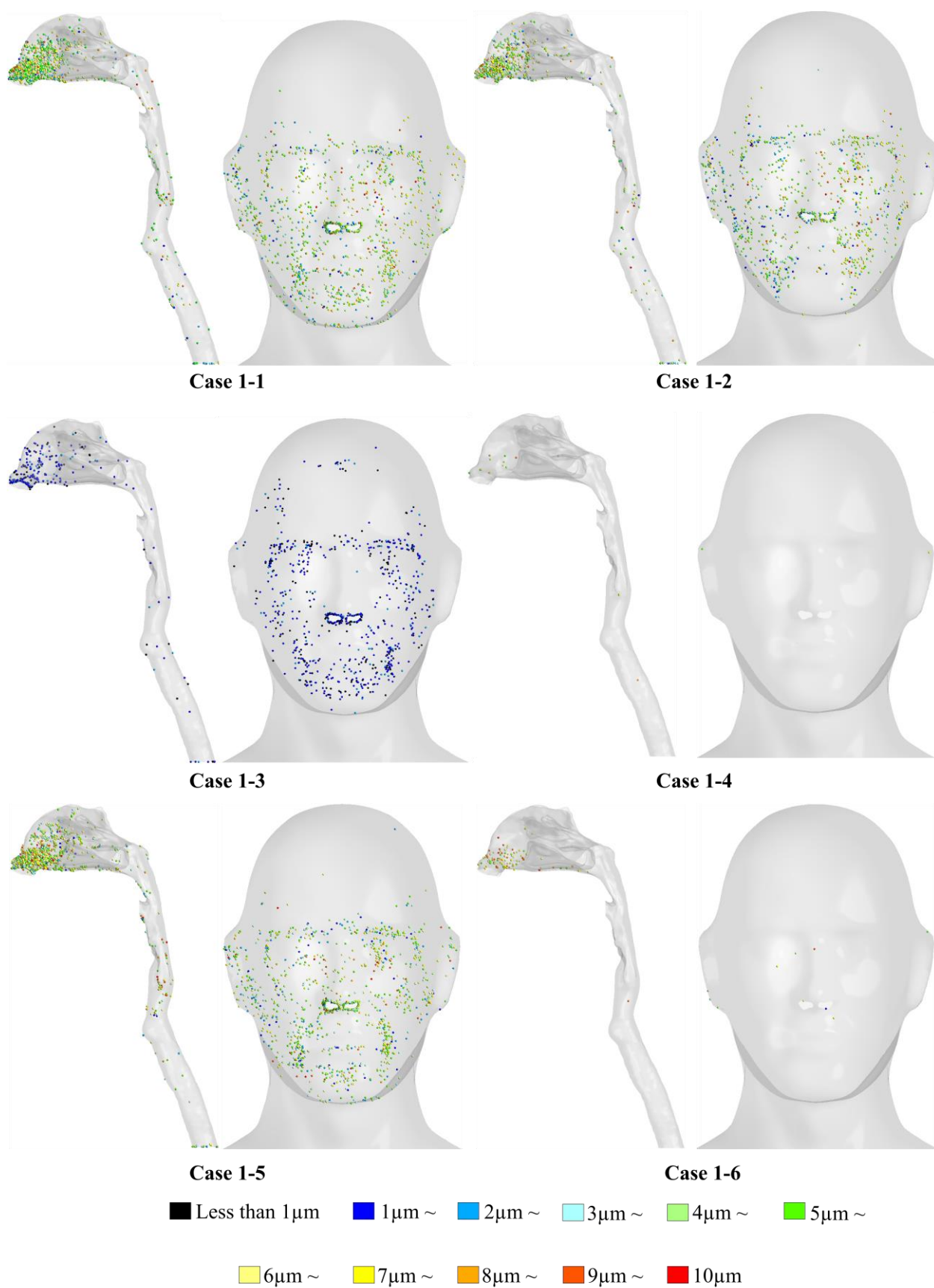


図 4.1.9. 非感染者 CSP の気道壁面と人体皮膚表面への飛沫・飛沫核の沈着分布

次に、非感染者 CSP が吸入・沈着した飛沫の粒径に着目し、各粒径ごとの飛沫の吸入沈着割合を評価した。図 4.1.10 では、Physical distance が 1m の場合における、飛沫粒径(D_d)に応じた吸入割合(η_{AE})、気道の各部位での沈着割合(η_{DE})、肺領域への通過率(η_{PL})を示している。

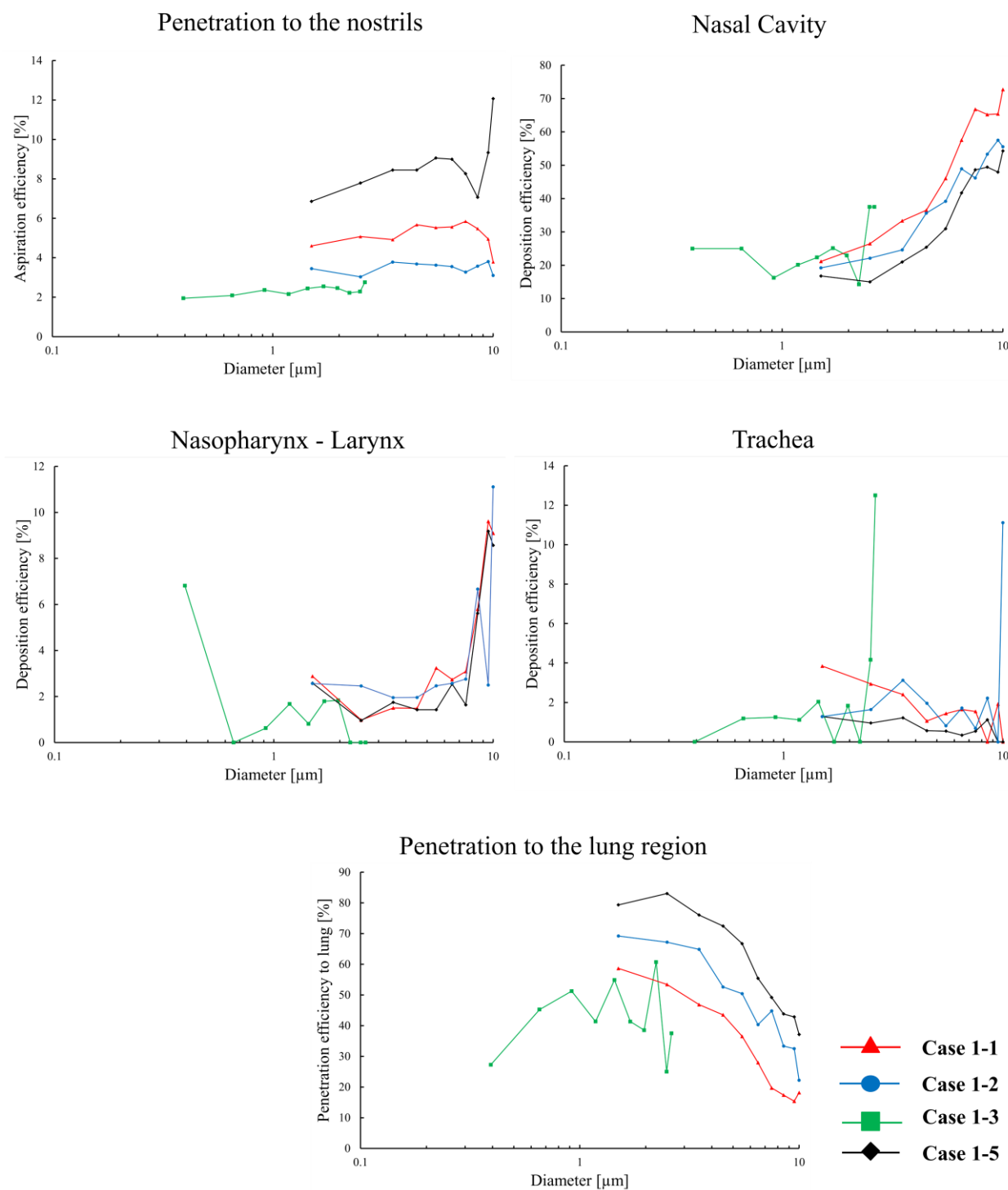


図 4.1.10. 気道の各部位における飛沫粒径ごとの吸入・沈着割合

ここで、各割合は次のように計算される．

$$\eta_{AE} = \frac{N_{total\ inhaled}}{N_{total\ generated}} \times 100 \quad (4.6)$$

$$\eta_{EDP} = \frac{N_{deposited}}{N_{total\ inhaled}} \times 100 \quad (4.7)$$

$$\eta_{pl} = \frac{N_{penetration}}{N_{total\ inhaled}} \times 100 \quad (4.8)$$

$N_{total\ inhaled}$ は非感染者 CSP が吸入した各粒径の全飛沫数， $N_{total\ generated}$ は感染者 CSP が咳によって吐出した各粒径の全飛沫数である． $N_{deposited}$ は気道の特定領域に沈着した各粒径の飛沫数， $N_{penetration}$ は肺領域に侵入した各粒径の飛沫数である．

吸入割合を比較すると(Case1-1 vs Case1-2 vs Case1-3 vs Case1-5)，Case1-5 の吸入割合が最も高く，Case1-3 の吸入割合が最も低かった．Case1-5 の呼吸プロファイルの境界条件は，定常吸入であり呼気が無いため吸入割合は高く，常に7%以上を超えていた．また，Case1-1 と Case1-5 では，呼気の影響により粒径が $8\mu\text{m}$ 以上の飛沫の吸入割合の差が大きくなる．これは，飛沫の粒径が大きいと抗力が大きく，飛沫の非感染者 CSP への到達時間が粒径の小さい飛沫と比べると長くなるからである．これにより，粒径の大きい飛沫が非感染者 CSP の呼吸域に到達するときには，呼気により吸入されることなく室内に拡散される．Case1-2 の吸入割合は，飛沫が呼吸域に到達したときに非感染者 CSP は呼出をしているため，全ての粒径で常に Case1-1 の吸入割合よりも低くなった．Case1-3 の吸入割合は，常に 2.5%未満であった．これは，Case1-3 の飛沫粒径が蒸発によって他のケース(Case1-1 and Case1-5)よりも小さくなるからである．粒径の小さい飛沫は，換気や発熱等による室内気流の影響を受けやすいため，非感染者 CSP の呼吸域に到達する飛沫数は，粒径が大きい飛沫よりも少なくなる．

鼻腔，咽頭－喉頭，気管への沈着割合と肺領域への通過率を比較すると，Case1-1 と Case1-5 の結果は同様の結果を示している．鼻腔から喉頭までの領域は，複雑な幾何形状により飛沫が慣性衝突するため，粒径の大きい飛沫がこの領域に沈着した．対して，粒径の小さな飛沫は，慣性力や重力沈降による影響が小さいため，気管への沈着または気管を通過し肺領域に侵入する．Biglarian ら[39]は，粒子の沈着場所は粒径に依存すると報告している．既往研究によると，中程度の粒径($D_p \geq 10\mu\text{m}$)のほとんど全ての粒子が，前庭および鼻咽頭曲線に沈着した．一方，微粒子($2\mu\text{m} \leq D_p \leq 5\mu\text{m}$)は鼻腔及び鼻咽頭の領域を通過し喉頭と気管に沈着した．

Case1-2 と Case1-3 の沈着割合に着目すると，Case1-2 の粒径 $10\mu\text{m}$ の飛沫の咽頭－喉頭及び気管への沈着割合と，Case1-3 の粒径 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ の飛沫の気管への沈着割合と粒径 $0.4\mu\text{m}$ の飛

沫の咽頭－喉頭への沈着割合が比較的大きかった。Case1-2において、沈着割合の増加は、呼吸タイミングにより非感染者 CSP によって吸入される粒径の大きい飛沫の数が増えるからである。Case1-3 の沈着割合の増加は、蒸発に伴う飛沫の粒径変化によって飛跡が増えるからである。しかしながら、吸入された飛沫の総数は、沈着割合を計算するためのパラメータとして使用される。そのため、十分な数の飛沫が吸入されない限り、沈着する飛沫数の微量の変化でも沈着割合に大きな差を生じさせる可能性がある。そこで、Case1-2 及び Case1-3 では、各粒径での沈着割合の違いについては言及しない。

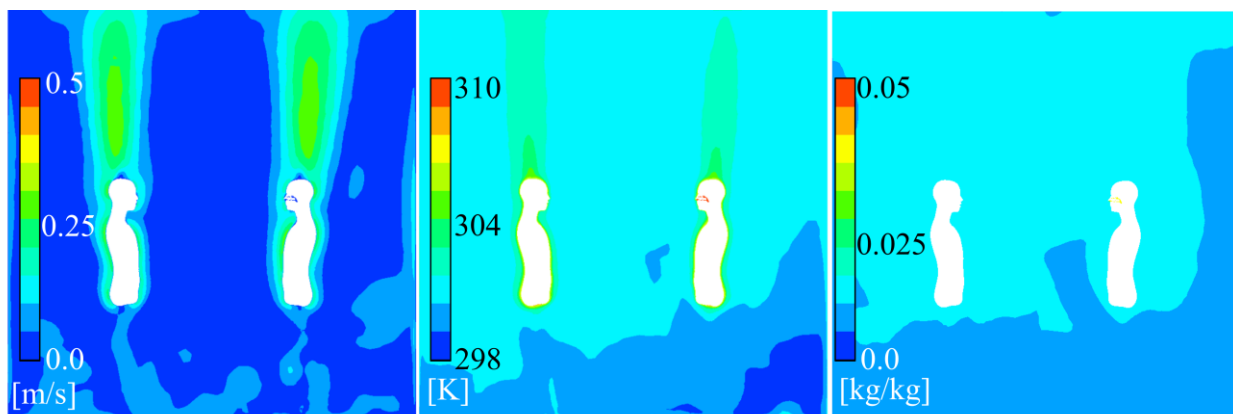
非定常呼吸と定常吸入の流量プロファイルを比較すると、定常吸入(Case1-5)は非定常呼吸(Case1-1)より高い吸入割合と肺への通過率を示すのに対し、非定常呼吸(Case1-1)は定常吸入(Case1-5)より高い沈着割合を示した。これは、非定常呼吸(Case1-1)では吸入と呼出のサイクルがあるため、非感染者 CSP の気道内の速度ベクトルとその大きさがより複雑になるためである。そのため、Case1-5 に比べて Case1-1 では、気道内の気流による慣性衝突のため多くの飛沫が気道壁面に沈着した。Kuga ら[40]は、定常吸入よりも非定常呼吸のピーク流量が高いため、粒子沈着に対する慣性衝突及び乱流拡散の影響は、定常吸入よりも非定常呼吸のほうが大きいと報告している。非定常呼吸と定常吸入のピーク流量を比較すると(Case1-1 vs Case1-5)、非定常呼吸のピーク流量(吸入：0.73 L/s、呼出：0.64 L/s)が定常吸入のピーク流量(吸入：0.467 L/s)よりも高かった。そのため、Case1-1 では非定常呼吸時の高いピーク流量が乱流拡散を引き起こし、多くの飛沫が沈着した。

以上の解析は、既に出版された自身の研究成果を基に作成した[41]。

4.2 会話飛沫・飛沫核拡散

4.2.1 室内初期流れ場

本解析では、室内に人体がある初期状態(代謝発熱あり，呼吸なし)を再現するために，定常解析を行った．図 4.2.1 では，速度場，温度場，水蒸気質量分率の分布を示した．

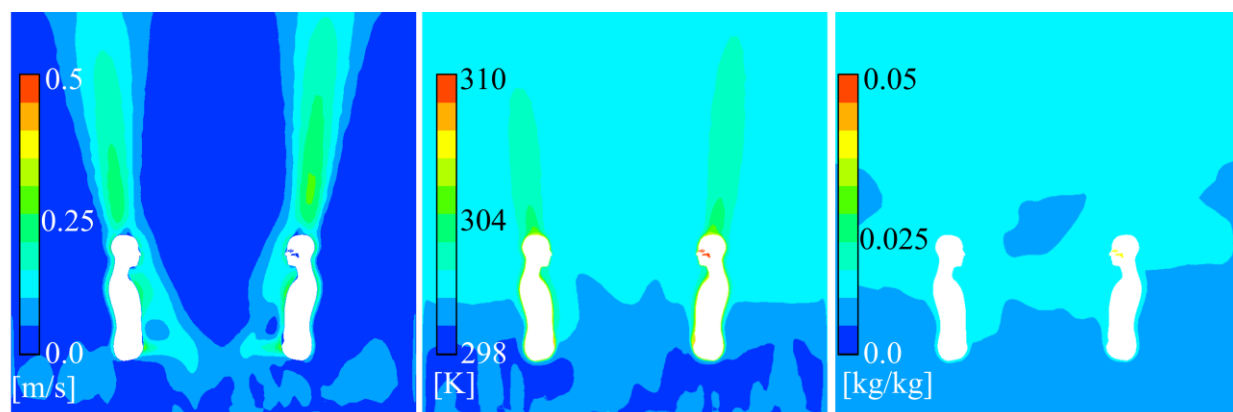


(1) Velocity magnitude

(2) Temperature

(3) H₂O mass fraction

(a) Case2-5 (立位－立位)

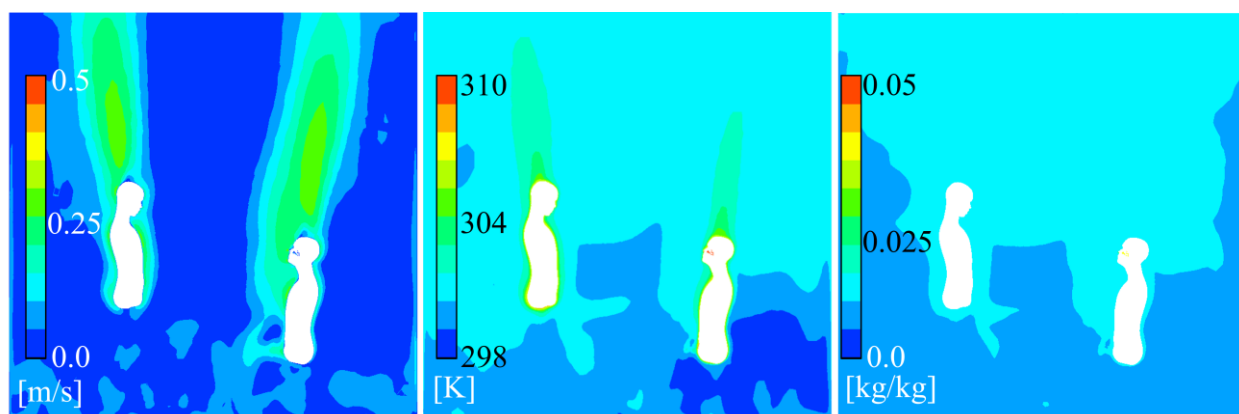


(1) Velocity magnitude

(2) Temperature

(3) H₂O mass fraction

(b) Case2-7 (座位－座位)



(1) Velocity magnitude

(2) Temperature

(3) H₂O mass fraction

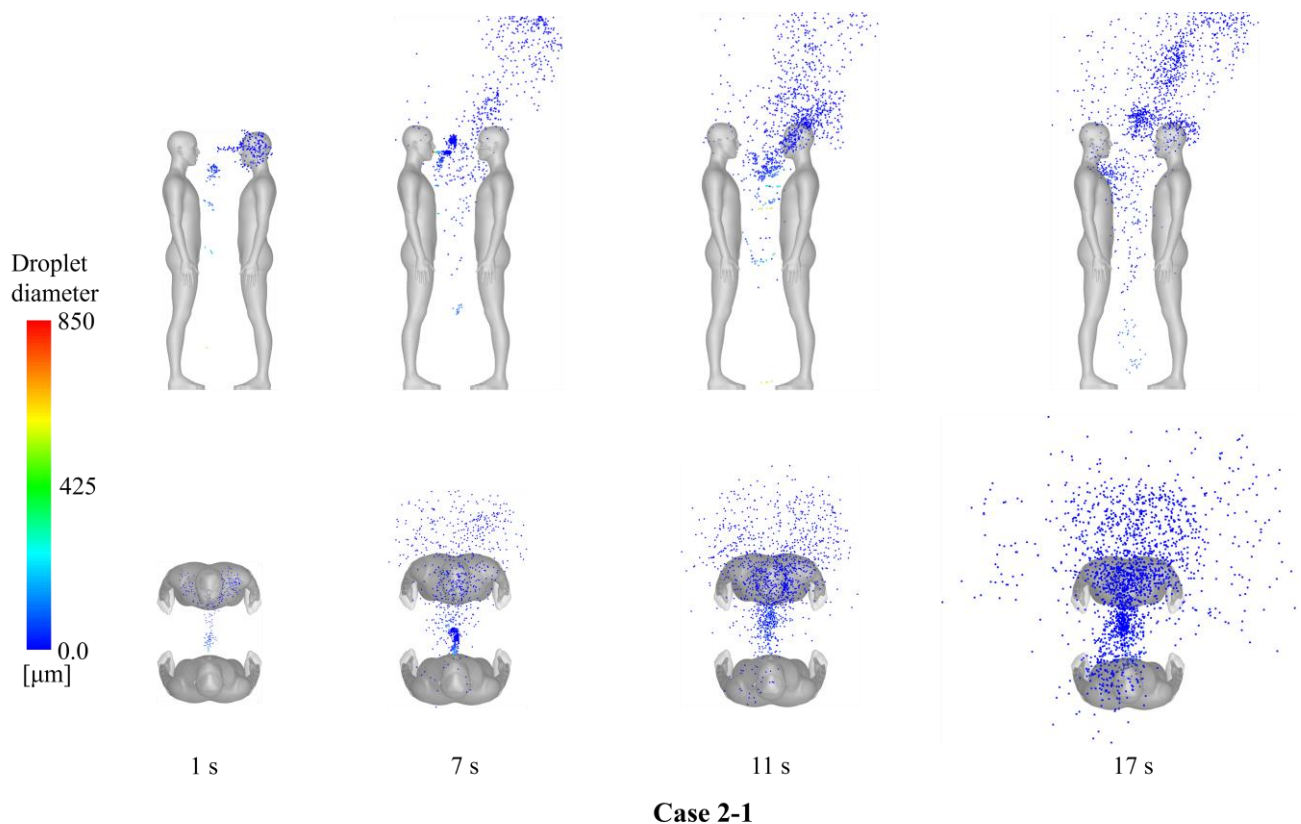
(c) Case2-9 (立位－座位)

図 4.2.1. 室内初期流れ場(会話)(Physical distance:1.1m)

CSP からの発熱により、室内環境中に熱上昇流と温度成層が形成されることが確認できた。これは、部屋の換気方式が置換換気であるため、室内気流が室内下部から給気し室内上部から排気されるからである。本解析では、境界条件を左右対称に設定するため、図 3.2.2 のように CSP の左右両側の室内下部から給気し、室内上部で排気させた。室内環境中の流れ場(速度、温度、水蒸気質量分率)分布は、感染者 CSP の会話による吐出気流によって発生した飛沫の輸送、室内分布、非感染者 CSP への吸入曝露に必要な初期条件として設定した。

4.2.2 Physical distance の影響

本解析では、2 体の CSP のコミュニケーション時の近距離接触(close contact)に着目し、Physical distance が曝露リスクに与える影響を評価した。図 4.2.2 は、室内環境中で感染者 CSP と非感染者 CSP が会話をした場合の対象粒径 $0.9\mu\text{m} \sim 850\mu\text{m}$ の飛沫拡散を 17.88 秒間観察したスナップショット画像である。ここでは、Physical distance が 0.3m (Case2-1), 0.7m (Case2-3), 1.1m (Case2-5)の飛沫の室内拡散分布を比較した。全てのケースにおいて、50%RH の室内環境中に会話によって放出された飛沫の蒸発による粒径変化を考慮した。



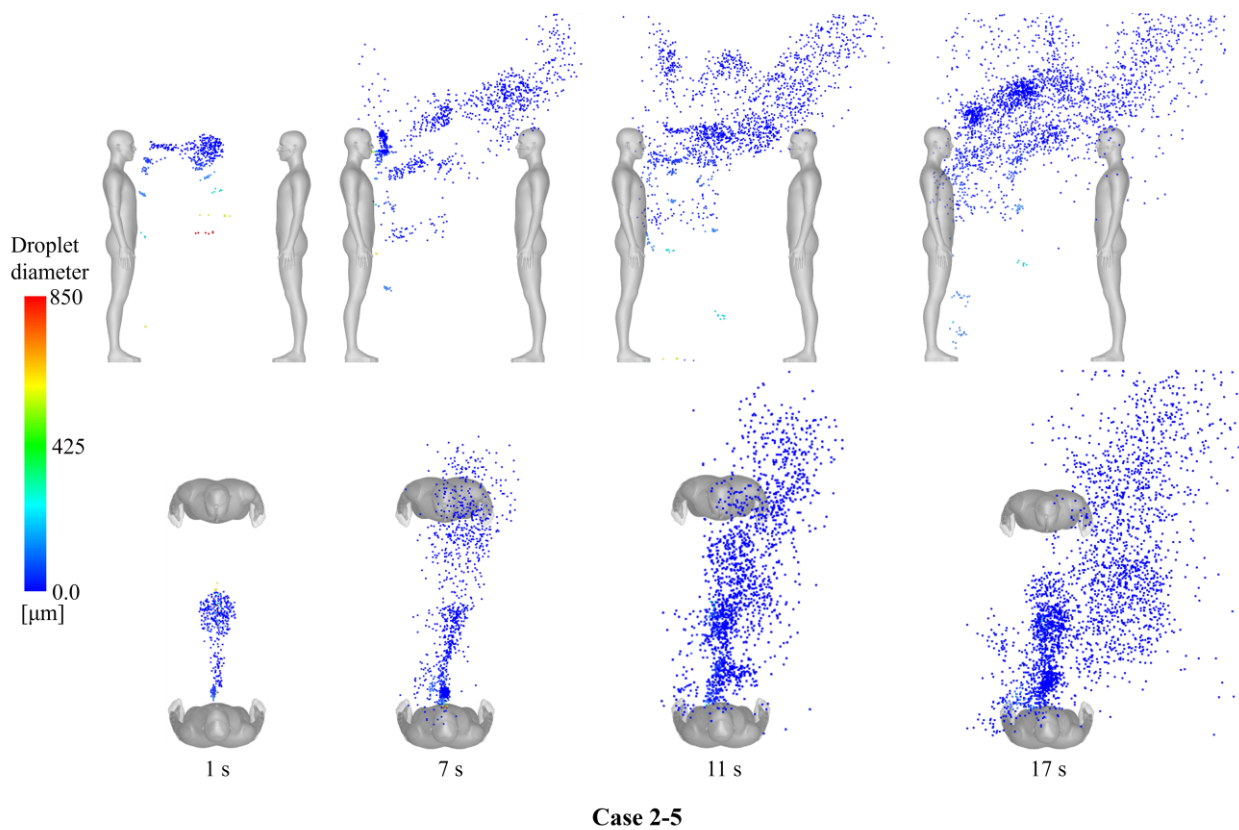
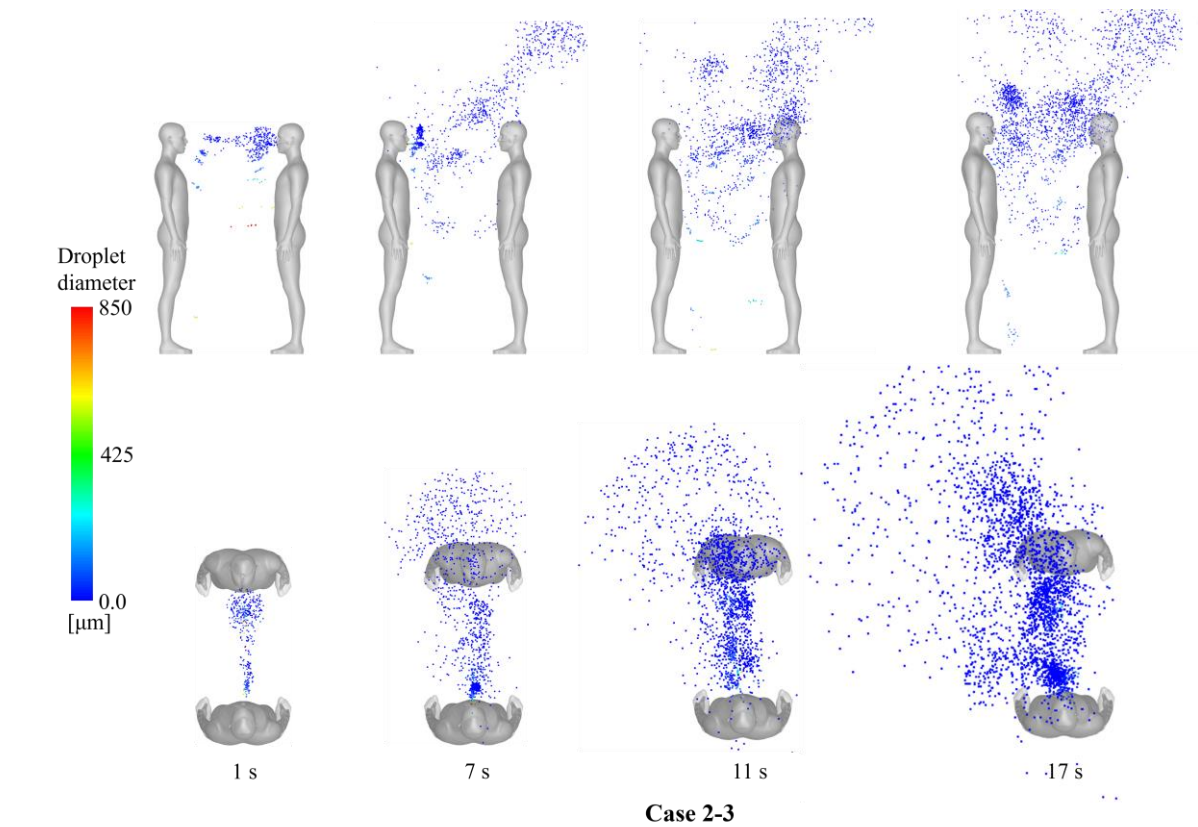


図 4.2.2. 室内環境における感染者 CSP の会話飛沫拡散(側面図及び上面図). (Physical distance: 0.3m(Case2-1), 0.7m(Case2-3), 1.1m(Case2-5))

Physical distance が 0.3m の場合(Case2-1), 感染者 CSP の会話によって吐出された飛沫は, 吐出後約 0.1 秒で非感染者 CSP の顔面に到達し吸入された. Case2-1 は, 全てのケースの中で Physical distance が最短のため, 非感染者 CSP の呼吸域の飛沫濃度は高かった.

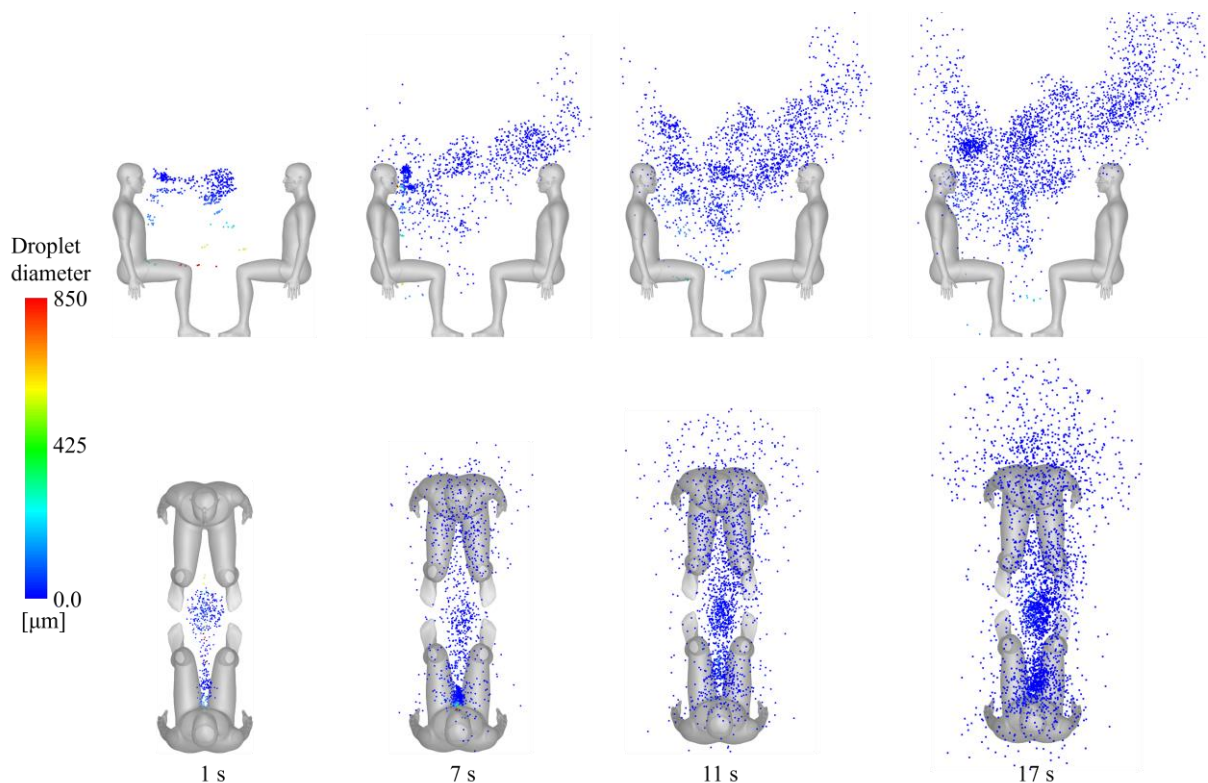
Physical distance が 0.7m の場合(Case2-3), 会話飛沫は非感染者 CSP の顔面に到達するまでに吐出後約 0.5 秒かかった. 会話飛沫が非感染者 CSP に到達するまでの間に, 飛沫濃度は乱流拡散によって希釈されたため, 非感染者 CSP の呼吸域における飛沫濃度は Case2-1 に比べて低くなり, 吸入割合も低下した(表 5).

Physical distance が 1.1m の場合(Case2-5), 全てのケースの中で, Physical distance が最長のため, 上記と同じ理由から, 非感染者 CSP の呼吸域の飛沫濃度は Case2-3 に比べて低くなり, 吸入割合も低下した(表 4). そのため, 呼気による呼吸域での飛沫の有意な拡散は見られなかった.

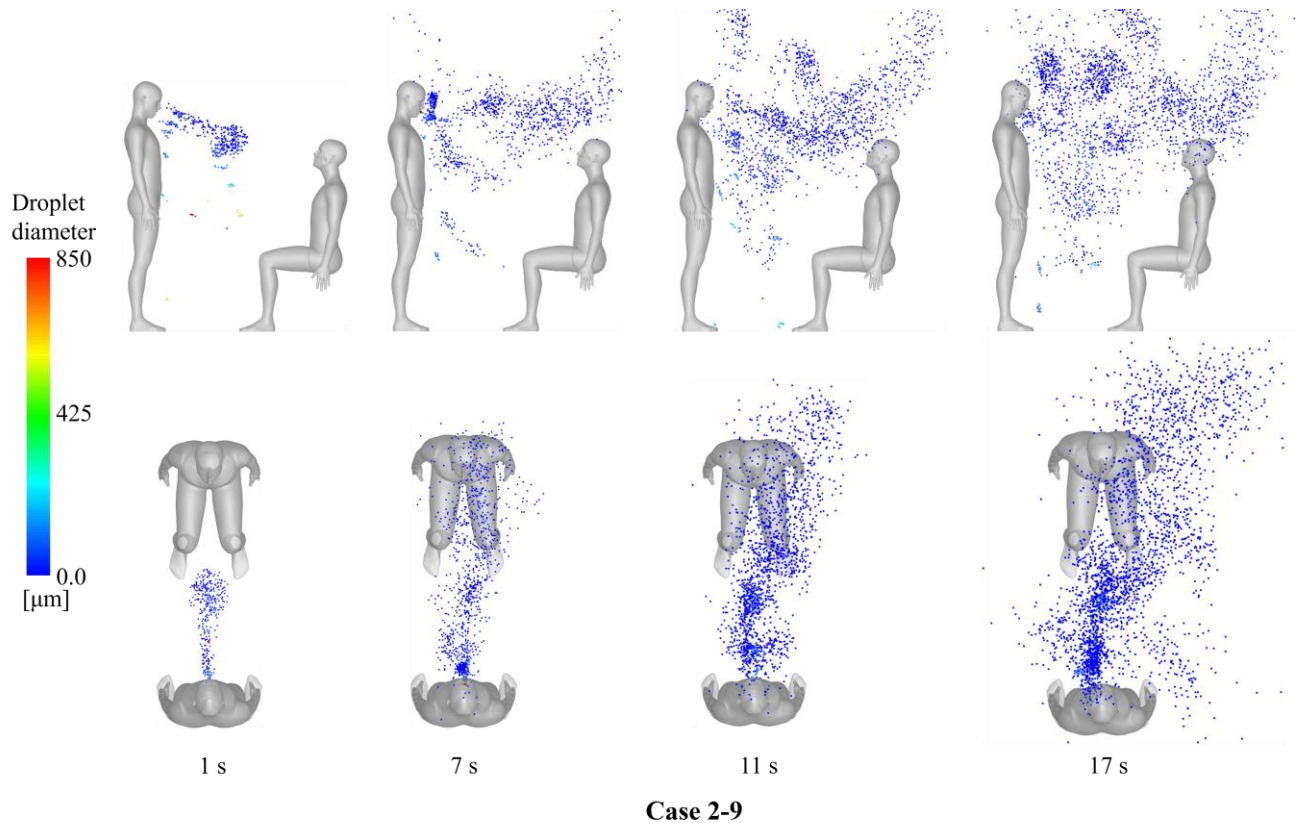
全ケースにおいて, 飛沫が非感染者 CSP に到達するまでに, 粒径の大きい飛沫は重力沈降による室内下方に拡散し, 粒径の小さな飛沫・飛沫核は室内気流により上方に拡散した. そして, 非感染者 CSP 到達後は熱上昇流の影響をうけて天井方向に拡散した.

4.2.3 人体姿勢の影響

会話時の人体姿勢に着目し, 接触形態が曝露リスクに与える影響について評価した. Physical distance が 1.1m の場合の各接触形態における飛沫拡散分布を示す.



Case 2-7



Case 2-9

図 4.2.3. 室内環境における感染者 CSP の会話飛沫拡散(側面図及び上面図)(接触形式：座位－座位(Case2-7), 立位－座位(Case2-9), Physical distance: 1.1m)

図 4.2.3 の人体接触が座位(感染者 CSP)－座位(非感染者 CSP)の場合(Case2-7), 1 秒時点では感染者 CSP の会話により吐出された一部の粒径が大きい飛沫は、重力沈降により非感染者 CSP の呼吸域に到達する前に床面に沈着した。

人体接触が立位(感染者 CSP)－座位(非感染者 CSP)の場合(Case2-9), 1 秒時点では立位姿勢の感染者 CSP の会話による吐出が座位姿勢の非感染者 CSP 方向であるため、床方向への吐出や重力沈降により、粒径の大きい飛沫は床方向に拡散し沈着した。

両ケース(Case2-7 and 2-9)において、7 秒以降では蒸発により飛沫の粒径が小さくなったため、非感染者 CSP 方向に拡散した飛沫は、非感染者 CSP の人体周辺の熱上昇流によって天井方向に拡散した。また、会話の吐出流量が少ないときは、飛沫の慣性力は小さくなるため、吐出後感染者 CSP の熱上昇流の影響を受けて天井方向に拡散した。

4.2.4 吐出流量の影響(咳との比較)

感染者 CSP の会話と咳の吐出流量の差に着目し、発生源が曝露リスクに与える影響について評価した。図 4.2.4 では、感染者の咳によって吐出された飛沫拡散分布を示す。ここで、咳飛沫は吐出気流のピーク流量時に 45000 個を 1 回のみ瞬時発生する条件とした。

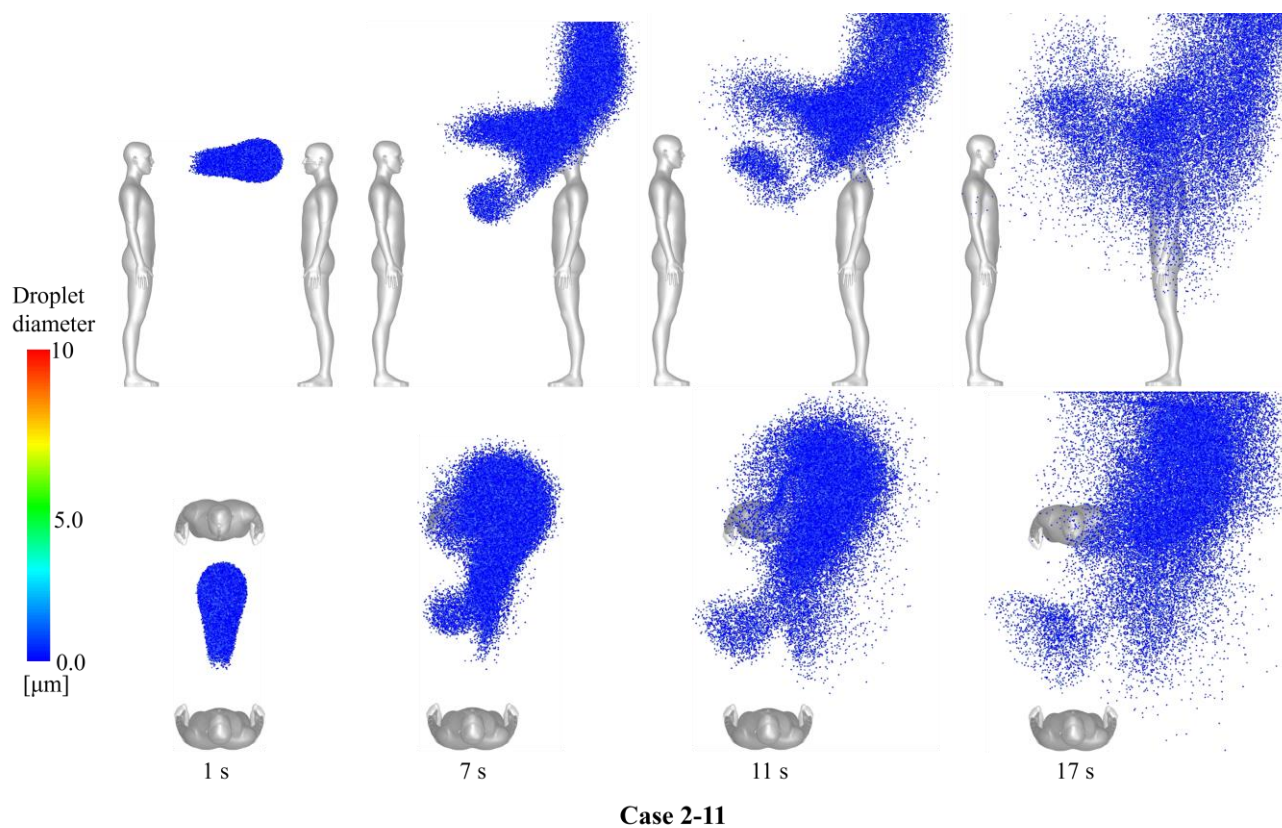
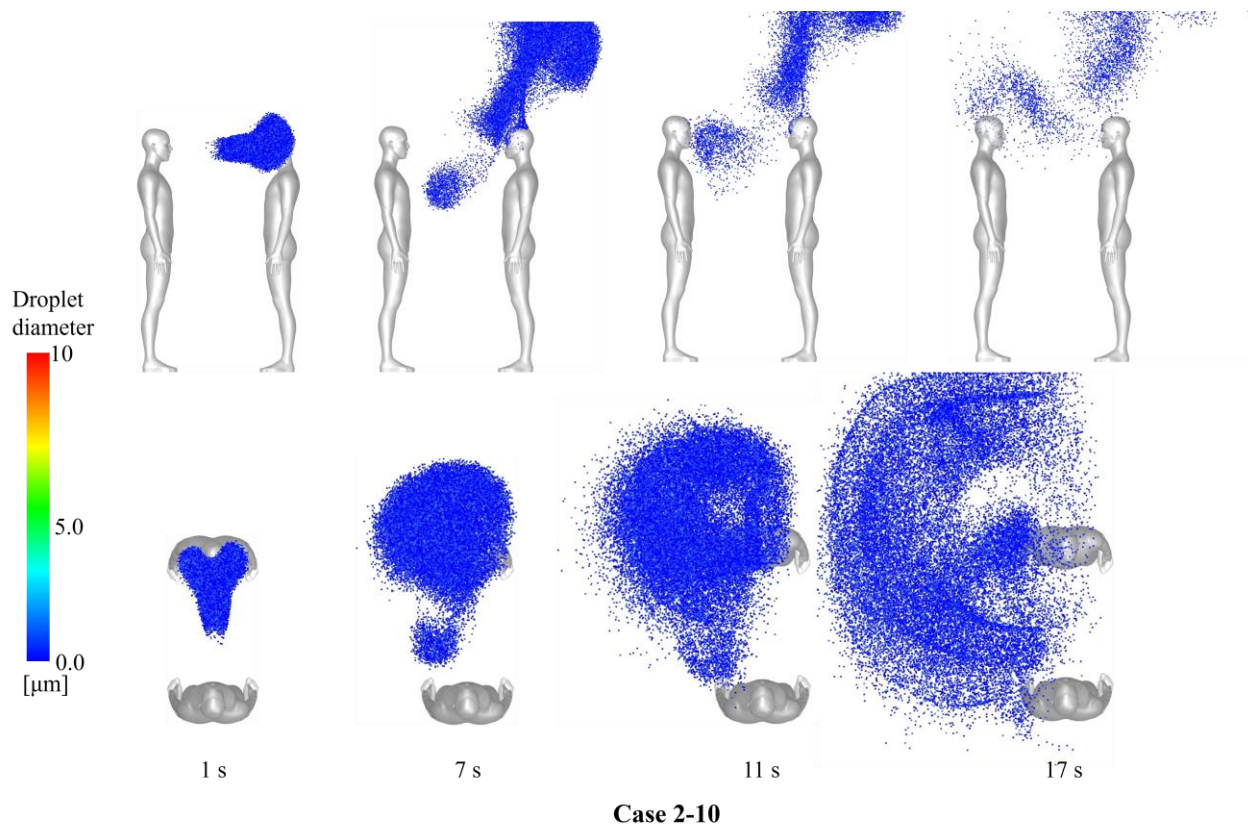


図 4.2.4. 室内環境における感染者 CSP の咳飛沫拡散(側面図及び上面図). (Physical distance: 0.7m(Case2-10), 1.1m(Case2-11))

Physical distance が 0.7m の場合(Case2-10), 感染者 CSP の咳によって吐出された飛沫は, 吐出後約 0.35 秒後に非感染者 CSP の顔面に到達した. 同距離の会話では約 0.5 秒後に到達することから, 吐出流量の大小で到達時間は大きく異なった. 本解析において, 非感染者 CSP の呼吸は, 感染者 CSP の咳と同時に吸入を開始すると想定した. そのため, 非感染者 CSP の吸入流量がピーク付近に達したときに, 咳飛沫は非感染者 CSP の呼吸域に到達した.

Physical distance が 1.1m の場合(Case2-11), 感染者 CSP からの咳飛沫は, 吐出後約 1.6 秒後に非感染者 CSP の顔面に到達した. 会話では到達しなかったことから, 吐出流量によって非感染者 CSP の呼吸域の到達する飛沫数は変化した. しかし, Physical distance が 1.1m と十分に離れていることから, 吸入割合は低くなった.

両ケース(Case2-10 and 2-11)において, 咳の方が会話よりも吐出流量が大きく, 短時間で非感染者 CSP に到達するため, 短時間の接触でも曝露リスクが高くなった. また, 会話と咳では上記の吐出流量に加えて, 飛沫数や粒径も大きく異なるため(第 3 章 図 3.1.1 vs 図 3.2.1), 咳により発生する飛沫数が多いことや咳飛沫の粒径が小さく室内環境中に長時間浮遊しやすいことから, 非感染者 CSP の吸入割合は高くなる. 非感染者 CSP は呼吸域に到達した飛沫を 1.9 秒まで吸入し, 気道内や呼吸域に浮遊している飛沫は, 図 4.2.4 の 7 秒時点のように呼気によって鼻から斜め下方向に拡散された. その他の飛沫は, 非感染者 CSP へ到達後に人体周辺の熱上昇流により天井方向に拡散した.

4.2.5 曝露リスク評価

感染者 CSP の会話による曝露リスクを評価するためには, 非感染者 CSP の吸入量と, 非感染者 CSP の皮膚表面への沈着量を用いた. 各解析ケースの吸入・沈着割合の結果を表 5 にまとめた.

表 5. 各数値条件下での吸入・沈着割合(飛沫数)

	Aspiration efficiency	Exhalation rate	Deposition efficiency on airway	Penetration efficiency to larynx	Deposition efficiency on skin surface
Case2-1	2.9%	0.3%	1.4%	1.2%	14.8%
Case2-2	0.6%	0.1%	0.2%	0.3%	5.6%
Case2-3	0.6%	< 0.1%	0.1%	0.5%	0.7%
Case2-4	0.1%	< 0.1%	< 0.1%	0.1%	0.1%
Case2-5	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%
Case2-6	0.3%	< 0.1%	0.1%	0.2%	3.1%
Case2-7	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%
Case2-8	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	2.0%
Case2-9	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%
Case2-10	4.6%	0.2%	< 0.1%	4.4%	0.4%
Case2-11	0.2%	< 0.1%	< 0.1%	0.1%	< 0.1%

ここで、会話による各曝露リスクの定量評価は以下のように計算した。

吸入割合(Aspiration efficiency)を AE_{speak} と表記すると、式(4.9)のように定義した。

$$AE_{speak} = \frac{\text{Number of droplets inhaled by susceptible CSP}}{\text{Number of droplets exhaled by speaking of infected CSP}} \quad (4.9)$$

沈着割合(Deposition efficiency)を DE_{speak} と表記すると、式(4.10)のように定義した。

$$DE_{speak} = \frac{\text{Number of droplets deposited on the skin surface of susceptible CSP}}{\text{Number of droplets exhaled by speaking of infected CSP}} \quad (4.10)$$

感染者 CSP・非感染者 CSP とともに立位姿勢の接触(立位－立位)で会話をする場合(Case2-1, 2-2, 2-3, 2-4, and 2-5), 非感染者 CSP の吸入割合は、表 5 のように Physical distance が長くなるにつれて減少した。Case2-1 では 2.89%あるのに対し、Case2-2 では 0.63%と 1%未満になった。そして、Case2-5 では 0.0%と飛沫の吸入は無くなった。また、非感染者 CSP の皮膚表面への沈着割合も吸入割合と同様に、Physical distance が長くなるにつれて減少した。Case-2-1 では 14.8%あるのに対し、Case2-3 では 0.7%と 1%未満になった。そして、Case2-5 では 0.047%と 0.1%未満になり飛沫の沈着はほとんど無くなった。Physical distance が長くなるにつれて吸入・沈着割合が低いのは、小さい粒径の飛沫が人体周辺の熱上昇流や換気による室内気流の影響により天井や左右方向に拡散し、大きい粒径の飛沫は重力沈降により床へ落下したことに起因する。

感染者 CSP・非感染者 CSP とともに座位姿勢の接触(座位－座位)で会話をする場合(Case2-6 and 2-7), 非感染者 CSP の吸入割合は Case2-6 の場合、0.31%であるのに対し、Case2-7 では 0.023%であった。座位－座位の接触形態においても Case2-1～Case2-5 の立位－立位の接触形式のときと同様に、Physical distance が長くなるにつれて減少した。また、非感染者 CSP の皮膚表面への沈着割合は、Case2-6 では 3.12%となった。これは、Physical distance の定義を感染者 CSP の口腔開口面から非感染者 CSP の口腔開口面までの距離としたため、図 4.2.5 に示すように飛沫は感染者 CSP から 0.7m 以内にある非感染者 CSP の右側半分の皮膚に主に沈着し、立位－立位の接触時よりも高くなった。Case2-7 の沈着割合も吸入割合と同じ傾向がみられ、Physical distance が長くなるにつれて減少した。

感染者 CSP が立位姿勢、非感染者 CSP が座位姿勢の接触(立位－座位)で会話をする場合(Case2-8 and 2-9), 吸入割合は、立位－立位や座位－座位の接触形式と比較すると低くなった。これは、感染者 CSP の会話による吐出方向と非感染者 CSP の呼吸域付近の流れ場に起因する(図 4.2.1)。感染者 CSP は飛沫を体高の低い非感染者へと吹き降ろすため、粒径の大きい飛沫が床面や非感染者 CSP の下半身に多く沈着した。それに加えて、熱上昇流により非感染者の呼吸域付近の速度が大きいため、到達した粒径の小さい飛沫は天井方向に上昇した。

感染者 CSP・非感染者 CSP とともに立位姿勢の接触(立位－立位)で咳をする場合(Case2-10 and 2-11), Physical distance が 0.7m における非感染者 CSP の吸入割合は、4.61%と会話時と比較し

て約 7.9 倍高くなった。これは、飛沫の粒径分布と吐出流量に起因する。粒径分布に関しては、今回の解析で境界条件として用いた対象飛沫の粒径が、 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ となるのに対し、会話の場合は $0.9\mu\text{m}\sim 850\mu\text{m}$ としたため、咳と会話での対象粒径が異なる。そのため、会話の方が粒径の大きい飛沫が相対的に多く、重力沈降により床面へと拡散するため吸入割合が低くなった。吐出流量に関しては、会話のピーク流量が 3.3L/s であるのに対し、咳は 5.75L/s であるため吐出流量が大きく異なった。吐出流量が大きいと飛沫の初期速度が大きく、室内気流の影響を受ける時間が短くなるため、非感染者 CSP の呼吸域に短時間で到達しやすくなる。そのため、吐出流量の大きい咳による飛沫の吸入割合が高くなった。

咽頭端の通過率に着目すると、会話の場合は Case2-1 の 1.17% であるのに対し、Case2-2 では 0.33% と Physical distance が大きくなると通過率は減少した。Case2-2 と Case2-3 を比較すると、咽頭端の通過率と吸入割合が逆転した。これは、非感染者 CSP の呼吸のタイミングに起因する。咳の場合は、Case2-10 では 4.44% と会話の場合と比べると高くなった。これは、吸入われた飛沫の粒径に起因する。非感染者 CSP によって吸入された飛沫の粒径は、蒸発により小さくなるため慣性衝突によって沈着せず、咽頭端を通過した。

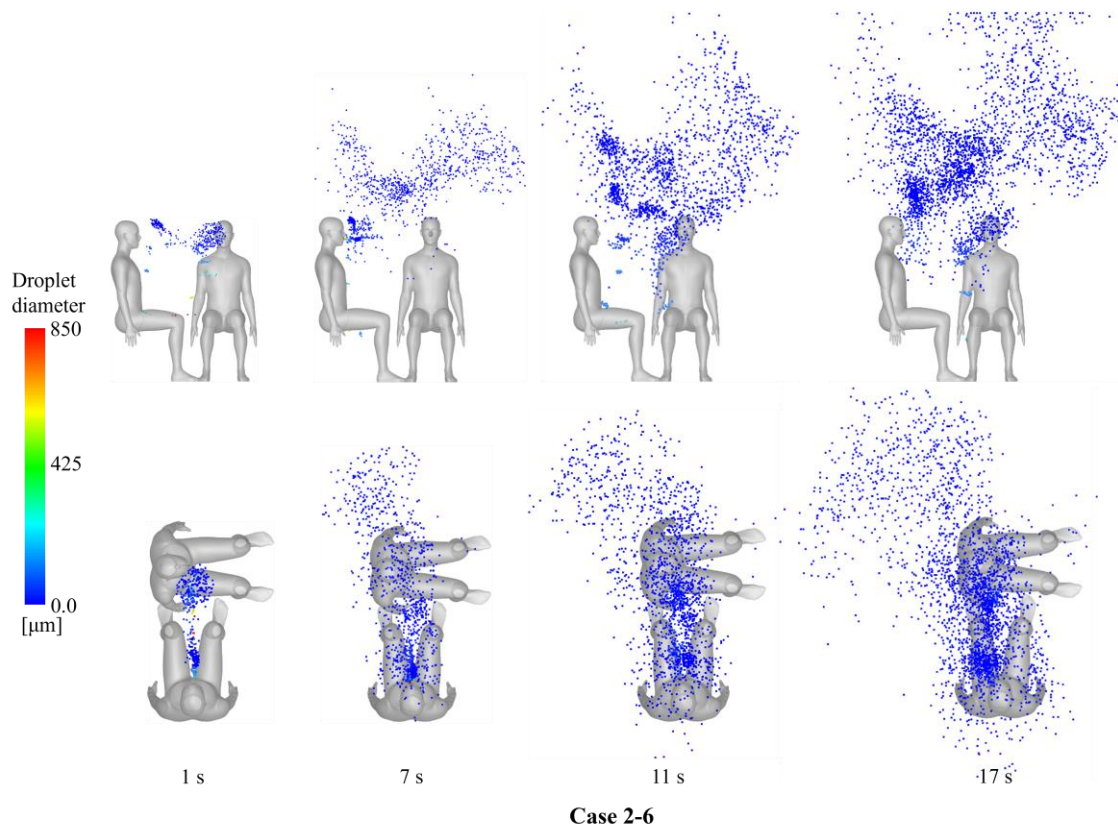


図 4.2.5. 室内環境における感染者 CSP の会話飛沫拡散(側面図及び上面図)(接触形式：座位一座位(Case2-6), Physical distance: 0.7m)

非感染者 CSP の気道壁面と皮膚表面(顔面)での飛沫の沈着分布を図 4.2.6~図 4.2.9 に示す。

立位－立位の接触では、咳と会話の両方において Physical distance が長くなるにつれて沈着量は減少した(図 4.2.6)。Case2-1 や Case2-2 では、Physical distance が比較的短いため、鼻孔付近での飛沫の沈着が多くみられた。一方で、Case2-3～Case2-5 のように Physical distance が長い場合、非感染者 CSP によって吐出された飛沫は、沈着までの間に室内気流や熱上昇流によって拡散されるため、沈着量は減少した。

座位－座位の接触では、立位－立位と同じ傾向がみられ、Physical distance が長くなるにつれて沈着量は減少した。比較的 Physical distance の短い Case2-6 では、図 4.2.5 に示すように接触しているため、沈着分布も人体の左半分集中した。

立位－座位の接触では、人体皮膚表面への沈着量は、Physical distance が長くなると減少した。粒径の大きい飛沫は、重力沈降により座位姿勢の非感染者 CSP の下半身に沈着した。

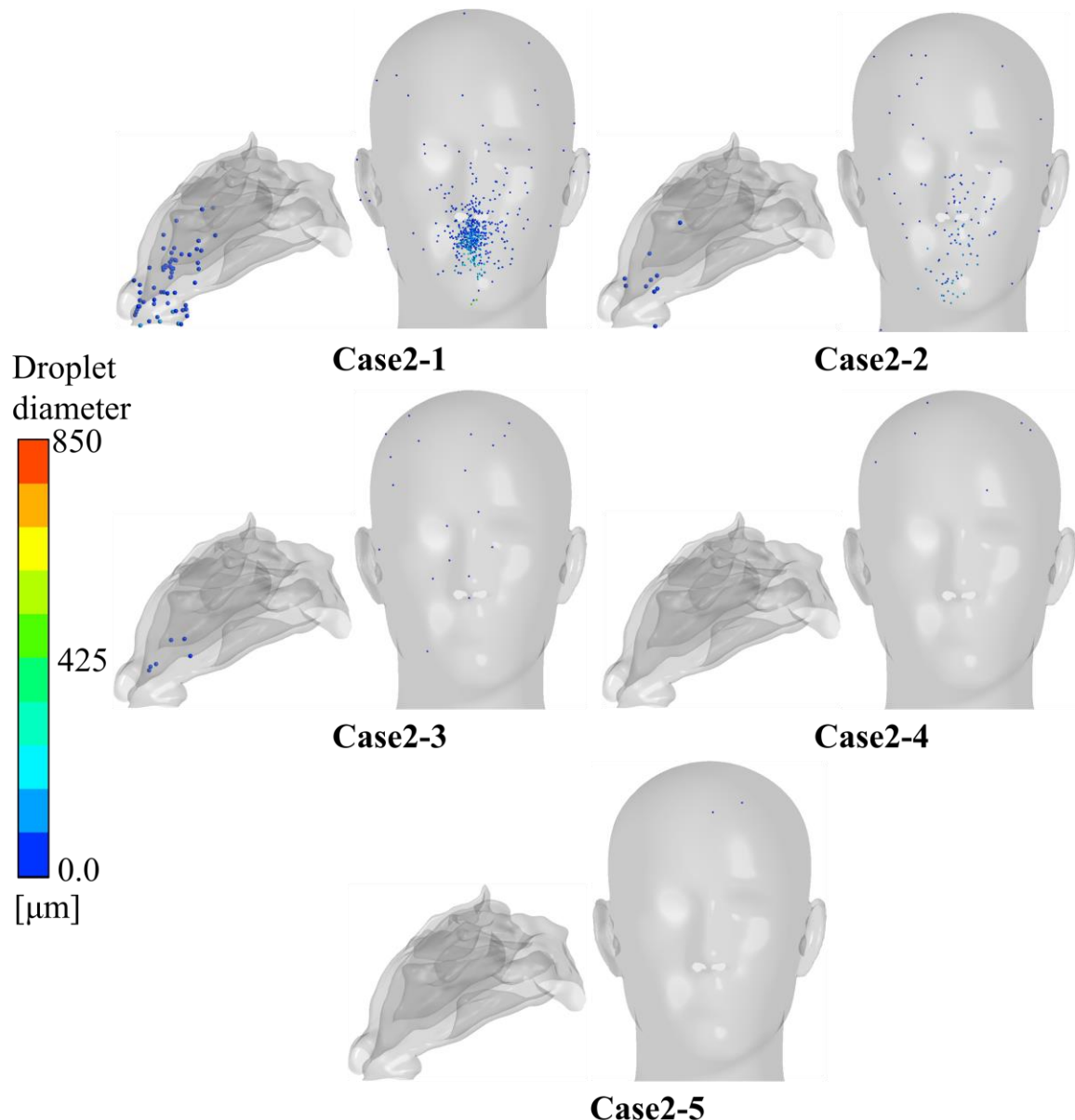


図 4.2.6. 立位－立位接触時の非感染者 CSP への会話飛沫の沈着分布(Case2-1~Case2-5)

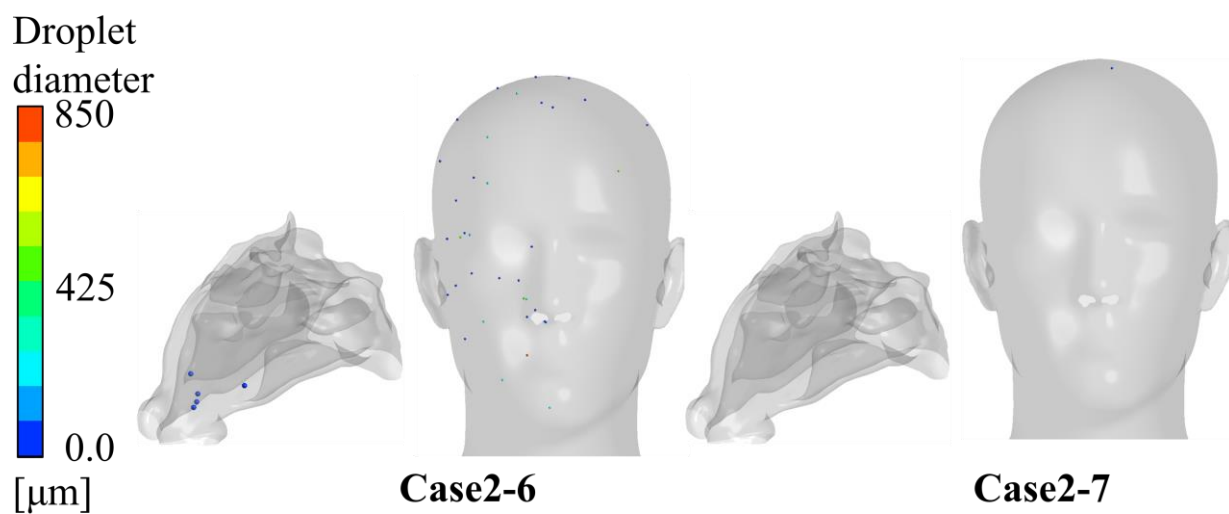


図 4.2.7. 座位－座位接触時の非感染者 CSP への会話飛沫の沈着分布(Case2-6 and Case2-7)

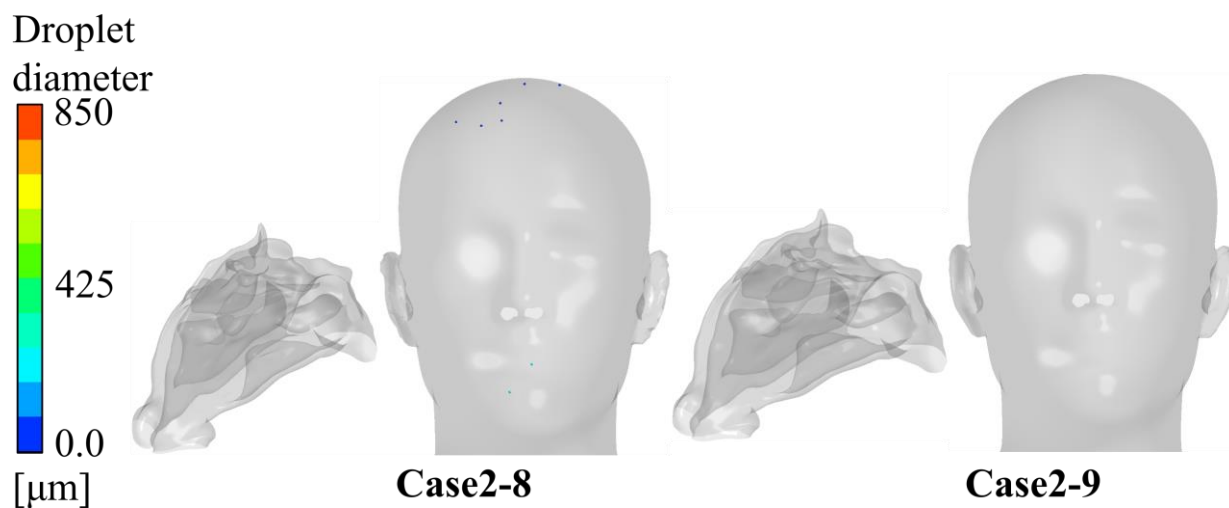


図 4.2.8. 立位－座位接触時の非感染者 CSP への会話飛沫の沈着分布(Case2-8 and Case2-9)

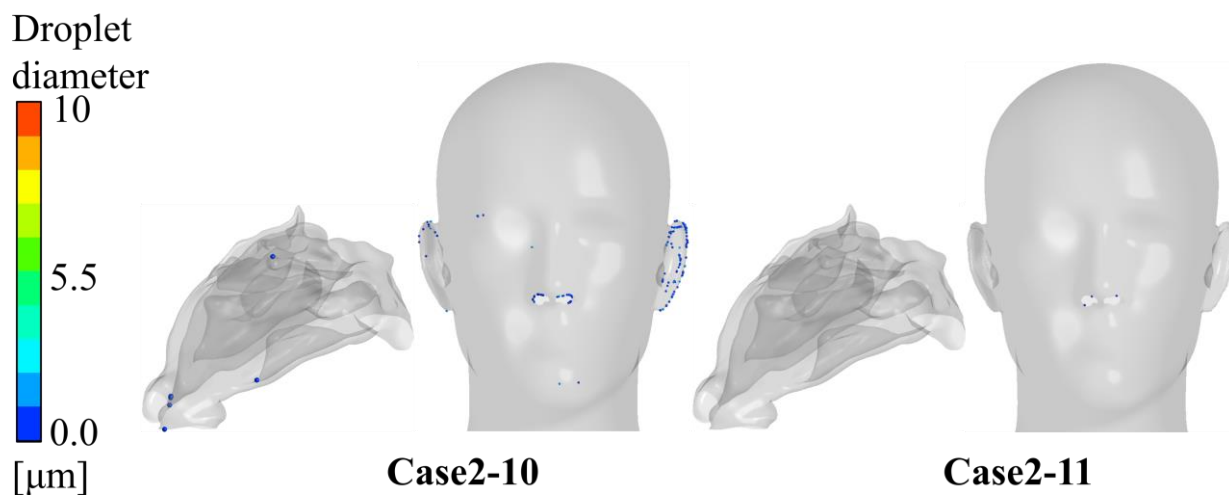


図 4.2.9. 立位－立位接触時の非感染者 CSP への咳飛沫の沈着分布(Case2-10 and Case2-11)

第5章 総括

本研究では、感染性汚染物質の発生源として感染者の咳(第4章4.1)と会話(第4章4.2)による吐出を想定し、飛沫・飛沫核の室内拡散動態から近距離で対面する非感染者の人体皮膚表面や気道粘膜への沈着までをシームレスに解析し、曝露・感染リスクを評価した。非感染者への曝露リスク評価の指標は、飛沫・飛沫核の吸入・沈着割合を用いることで定量的に算出した。吸入・沈着割合に関しては、口腔形状の有無や呼吸タイミング、蒸発に伴う粒径変化の有無、Physical distance などの複数の局所的な数値条件や境界条件の設定が予測結果に影響を与えることが分かった。

口腔形状の有無は、口腔開口面での速度分布に大きな差を生じさせることを確認した。そして、口腔開口面からの速度ベクトルの違いにより、飛沫の輸送経路に大きな影響を与えることを飛沫拡散分布から確認した。それに伴い、非感染者 CSP の呼吸域に侵入する飛沫数も変わるため、曝露リスクにも違いが生じることを確認した。

呼吸タイミングは、吸入割合に大きな影響を与えることを定量的に確認した。飛沫が非感染者 CSP の呼吸域に到達するときに、吸入のタイミングが曝露リスクにセンシティブに影響するため、リスクの幅があることを確認した。

蒸発に伴う粒径変化の有無は、飛沫の粒径によって室内拡散挙動に影響を与えることを確認した。飛沫の蒸発を考慮した場合は、飛沫の粒径が小さくなり、置換換気により顕著になった人体周辺の熱上昇流の影響を受けやすいことを確認した。一方で、蒸発を考慮しない場合は、粒径が大きいため慣性力も大きくなり、非感染者 CSP の呼吸域に到達しやすいことが確認できた。

Physical distance は、感染性汚染物質の発生源の種類に依らず、曝露リスクに最も大きな影響を与えることを定量的に確認した。Physical distance が大きい場合の飛沫輸送過程において、小さい粒径の飛沫は人体周辺の熱上昇流により天井へ上昇し、大きい粒径の飛沫は重力沈降により床へ落下するため、非感染者 CSP の呼吸域内の飛沫濃度は希釈されることを飛沫拡散分布から確認した。

一方で、ある一定の Physical distance 離れた人体の接触形態は、吸入割合にあまり影響を与えないことを確認した。会話の際の人体の接触距離、接触形態を考慮した曝露リスクを確認した。

本研究を通して、感染リスク抑制のための安全評価の観点から、上記の複数要素の影響を考慮して数値解析を行った。これらは、曝露・感染リスク評価の結果に影響を与えてしまうことから考慮すべき要素である。このような具体的な影響についてケーススタディ等を行うことで確認することができた。

参考文献

- [1] Y. Li, G.M. Leung, J.W. Tang, X. Yang, C.Y. Chao, J.Z. Lin, P.L. Yuen, Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment-a multidisciplinary systematic review, *Indoor Air* 17 (2007) 2–18.
- [2] S. Sun, J. Li, J. Han, How human thermal plume influences near-human transport of respiratory droplets and airborne particles: a review, *Environ. Chem. Lett.* 19 (2021) 1971–1982.
- [3] K. Kuga, K. Ito, W. Chen, P. Wang, K. 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* 30 (2020) 1018–1038.
- [4] WHO (World Health Organization), Infection prevention and control of epidemic -and pandemic-prone acute respiratory infections in health care, (2014) (2024/2/3 閲覧).
https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_eng.pdf?sequence=1
- [5] 日本エアロゾル学会, エアロゾルとは, (2024/2/3 閲覧).
https://www.jaast.jp/new/about_aerosol.html.
- [6] 朱晟偉, 加藤信介, 梁禎訓, 被験者実験と数値解析による咳気流に伴う唾液の静穏室内における伝搬特性の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 586 号(2004) 25-32.
- [7] J.K. Gupta, C.H. Lin, Q. Chen, Flow dynamics and characterization of a cough, *Indoor Air* 19 (2009) 517–525.
- [8] J.K. Gupta, C.H. Lin, Q. Chen, Characterizing exhaled airflow from breathing and talking, *Indoor Air* 20 (2010) 31–39.
- [9] S. Murakami, S. Kato, J. Zeng, Flow and temperature fields around human body with various room air distribution, Part 1-CFD study on computational thermal manikin, *Build. Eng.* 103 (1997) 3-15.
- [10] S. Murakami, S. Kato, J. Zeng, Numerical simulation of contaminant distribution around a modeled human body: CFD study on computational thermal manikin-Part II, *Build. Eng.* 104 (1998) 226–233.
- [11] S. Murakami, S. Kato, J. Zeng, Combined simulation of airflow, radiation and moisture transport for heat release from a human body, *Build. Environ.* 35 (2000) 489–500.
- [12] S.I. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, M. Konishi, Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy Build.* 34 (2002) 637–646.
- [13] N. Gao, J. Niu, H. Zhang, Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation, *HVAC R Res.* 12 (2006) 497–518.
- [14] S. Zhu, S. Kato, R. Ooka, T. Sakoi, Development of a computational thermal manikin applicable in a nonuniform thermal environment—Part 1: coupled simulation of convection, radiation, and

Smith's human thermal physiological model for sensible heat transfer from a seated human body in radiant environment, HVAC R Res. 13 (2007) 661–679.

- [15] C. Wang, S.J. Yoo, K. Ito, Does detailed hygrothermal transport analysis in respiratory tract affect skin surface temperature distributions by thermoregulation model? Adv. Build. Energy Res. 14 (2020) 450–470.
- [16] K. Ito, Toward the development of an in silico human model for indoor environmental design, Proc. Jpn. Acad. Ser. B 92 (2016) 185–203.
- [17] S.J. Yoo, K. Ito, Assessment of transient inhalation exposure using in silico human model integrated with PBPK-CFD hybrid analysis, Sustain. Cities Soc. 40 (2018) 317–325.
- [18] K. Kuga, K. Ito, W. Chen, P. Wang, J. Fowles, K. Kumagai, Secondary indoor air pollution and passive smoking associated with cannabis smoking using electric cigarette device—demonstrative in silico study, PLoS Comput. Biol. 17 (2021), e1009004.
- [19] N. Zhang, B. Su, P-T. Chan, T. Miao, P. Wang, Y. Li, Infection Spread and High-Resolution Detection of Close Contact Behaviors, Int. J. Environ. Res. Public Health 2020, 17(4), 1445.
- [20] M. Tiede, C. Mooshammer, L. Goldstein, Noggin Nodding: Head Movement Correlates With Increased Effort in Accelerating Speech Production Tasks, Frontiers in Psychology (2019).
- [21] A. Murga, R. Bale, C-G. Li, K. Ito, M. Tsubokura, Large eddy simulation of droplet transport and deposition in the human respiratory tract to evaluate inhalation risk, PLOS Computational Biology 19(3) (2023), e1010972.
- [22] ANSYS, Inc, ANSYS Fluent 理論ガイド, (2018), pp.35-54, 125-157, 362-369.
- [23] K. Abe, T. Kondoh, Y. Nagano, A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows—I. Flow field calculations, Int. J. Heat Mass Tran. 37 (1994) 139–151.
- [24] K. Abe, T. Kondoh, Y. Nagano, A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows—II. Thermal field calculations, Int. J. Heat Mass Tran. 38 (1995) 1467–1481.
- [25] J. P. Duguid, The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. Epidemiology and Infection, 44(6) (1946), 471-479.
- [26] Yang S, et al. The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. J Aerosol Med, 20(4) (2007), 484-494.
- [27] S.J. Yoo, K. Ito, Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract, Jpn. Archit. Rev. 5 (2022) 714–727.
- [28] N.L. Phuong, K. Ito, Investigation of flow pattern in upper human airway including oral and nasal inhalation by PIV and CFD, Build. Environ. 94 (2015) 504–515.

- [29] N.L. Phuong, M. Yamashita, S.J. Yoo, K. Ito, Prediction of convective heat transfer coefficient of human upper and lower airway surfaces in steady and unsteady breathing conditions, *Build. Environ.* 100 (2016) 172–185.
- [30] P.O. Fanger, *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, 1970.
- [31] S.A.J. Morsi, A.J. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *J. Fluid Mech.* 55 (1972) 193–208.
- [32] N.D. Khoa, N.L. Phuong, K. Takahashi, K. Ito, Transport and deposition of inhaled man-made vitreous and asbestos fibers in realistic human respiratory tract models: an *in silico* study, *Jpn. Architec. Rev.* 5 (2022) 592–608.
- [33] N.D. Khoa, N.L. Phuong, K. Tani, K. Inthavong, K. Ito, In-silico decongested trial effects on the impaired breathing function of a bulldog suffering from severe brachycephalic obstructive airway syndrome, *Comput. Methods Progr. Biomed.* 228 (2023), 107243.
- [34] M. Nicas, W. W. Nazaroff, A. Hubbard, Toward Understanding the Risk of Secondary Airborne Infection : Emission of Respirable Pathogens, *J. Occup. Environ. Hyg.* 2 (2005), 143-154.
- [35] R. S. Miller, K. Harstad, J. Bellan, Evaluation of Equilibrium and Non- Equilibrium Evaporation Models for Many Droplet Gas-Liquid Flow Simulations, *International Journal of Multiphase Flow*, 24, 6 (1998), 1025-1055.
- [36] S. S. Sazhin, *Advanced Models of Fuel Droplet Heating and Evaporation*, Progress in Energy and Combustion Science, Elsevier Science, 32 (2006), 162-214.
- [37] H. Amjadimanesh, M. Norouzi, M.S. Johnson, S. Sadrizadeh, O. Abouali, The effect of body position while coughing on the airborne transmission of pathogens, *Phys. Fluids* 34 (2022), 041902.
- [38] S. Zhu, S. Kato, J.H. Yang, Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment, *Build. Environ.* 41 (2006) 1691–1702.
- [39] M. Biglarian, M. MomeniLarimi, B. Firoozabadi, K. Inthavong, A. Farnoud, Targeted drug delivery with polydisperse particle transport and deposition in patient-specific upper airway during inhalation and exhalation, *Respir. Physiol. Neurobiol.* 308 (2023), 103986.
- [40] K. Kuga, R. Kizuka, N.D. Khoa, K. Ito, Effect of transient breathing cycle on the deposition of micro and nanoparticles on respiratory walls, *Comput. Methods Progr. Biomed.* (2023), 107501.
- [41] T. Nishihara, H. Li, K. Kuga, K. Ito, Seamless numerical analysis of transient infectious droplet dispersion and inhalation exposure – *In silico* study, *Building and Environment*, 244 (2023), 110748.

謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方々にお世話になりました．

九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻 機械・システム理工学メジャー 建築環境工学研究室の伊藤一秀教授，久我一喜助教には，学部生の頃から 3 年間，研究全般にわたって多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました．研究室秘書である山崎延美子さんには，日々の研究室生活や研究活動を支えていただきました．また，九州大学・Sung-Jun Yoo 准教授，都城高専・牟田諒太さん，大阪大学・山澤春菜さんには，研究活動で多くの助言や励ましを賜りました．心より深く感謝いたします．

研究室 OB・OG の皆様には，研究活動のみならず学生生活の様々な場面で多くの助言や励まし，ご指導していただきました．

修士課程の 2 年間をともに過ごした糸数立君，王琦君，祝嘉怡さんには，研究活動を行う中で出てくる疑問をともに考え，互いに励ましあいながら切磋琢磨することができ，充実した学生生活にさせていただきました．

研究室で共に過ごした学生の皆様には，研究活動のみならず学生生活の様々な場面で力を貸していただきました．

最後に，学生生活を支えてくれた家族のおかげで本論文に至る一連の研究を遂行できたことを銘記し，謝辞といたします．

令和 6 年 2 月

西原 択海