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

INVESTIGATION OF COUGHED SPIT'S TRANSMISSION CHARACTERISTICS IN A CALM ENVIRONMENT BY SUBJECT EXPERIMENT AND NUMERICAL ANALYSIS

朱 晟 偉*, 加藤 信 介**, 梁 楨 訓*

Shengwei ZHU, Shinsuke KATO and Jeong-Hoon YANG

In this paper, the transmission characteristics of the spits expelled through coughing are examined in a calm environment. Three subject experiments were performed, and it shows that there are about 6.7mg spits expelled at a high speed up to 22m/s when coughing, and the spits can arrive further than 2m. Then the transmitting processes of the coughed spits of different diameters were analyzed using Lagrangian Equation. The results show that coughed spit's transmission process will be greatly influenced by the indoor airflow, and its transmission characteristics will change with its increase in size. The spits less than 30 μ m will be spread to the whole room by the airflow's movement, the spits between 50 μ m~200 μ m will fall by gravity, and the spits greater than 300 μ m will become difficult to fall because of inertia. Moreover, it indicates that the coughed spits probably cause droplet infection in close contacts of patients of infectious respiratory diseases.

Keywords: Subject Experiment, PIV, Numerical Analysis, Lagrangian Model, Cough, Spit

被験者実験、粒子画像流速測定法、数値解析、ラグランジュモデル、咳、唾液

1. 序

咳は日常の生理現象として、発生のメカニズムに関し生理学の分野で詳細な研究がなされている^{*)}。咳は、また肺炎、SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome)、インフルエンザなど種々の病気の主な症状でもあり、医学、病理学、疫学など様々な分野で、それぞれの病気との相互関係について多くの研究がなされてきた^{*)2,3,4,5)}。しかし、著者らが知る限り、これらの研究において、咳による物質伝搬、すなわち、空気・唾液などがどのように呼出され、その後どのように空中に拡散していくかを詳細に検討した報告はない。SARS、インフルエンザなどの呼吸器感染症感染者の咳で呼出された唾液粒子は、表面にウィルスが附着されているため、これらの病気の飛沫感染の主な媒介になっていると認識されている^{*)6,7)}。室内スケールで呼吸器感染症の感染経路や予防対策を検討する際には、咳による唾液粒子の放出と拡散を無視できないものと考えられる。本研究は、以上の観点から静穏環境において、咳により呼出された唾液粒子の伝搬特性の解明を目的としている。

本研究では、被験者実験と数値解析の手法を用いている。被験者実験に関しては、三つの実験を行っている。初めに、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を測定して咳気流の呼出速度を計測する。次に、

表 1 被験者のプロフィール

被験者	年齢(才)	体重(Kg)	身長(m)	肺活量(L)
YX	28	68	1.75	4.3
JH	29	67	1.74	3.6
SW	30	70	1.68	3.5

表 2 PIV 装置の概要

PROCESSAR	相関係数演算は、DANTEC 社製の PIV2000 専用演算器(実時間 FFT アナライザー)、カメラ及びレーザーのタイミング制御もこれによる。
CCD CAMERA	KODAK 社製 ES1.0CCD カメラ(ピクセル分解能 1024×1024)で 60mm の Nikon Micro レンズ(35mm, f=5.6)を使用。
LASER	NEW WAVE 社製のダブルキャビティのミニ Nd:YAG レーザー(50mJ/puls, 15Hz)。ヘッド先端にライトシート用の光学系を取り付け。

表 3 PIV 測定パラメータ

測定領域	100mm×100mm
測定間隔	70ms
レーザーパルス時間間隔(Δt)	0.05ms
検査領域 (Interrogation area)	32pixel×32pixel
Overlap	25%×25%
ベクトル数	1,722 (41×42)

表 4 咳で呼出された唾液の質量

	YZ	JH	SW	平均値
結果	7.7 mg	6.5 mg	6.1 mg	6.7 mg

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・工修

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., University of Tokyo, M. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

マスクを使用して、被験者の咳で呼出された唾液を採集し、電子天秤によりこの質量を測る。最後に、小麦粉をトレーサーとして、咳で呼出された後の空中における拡散過程を可視化し、その影響範囲を観察する。数値解析においては非定常現象である咳や呼吸により生じる気流を定常気流でモデル化し、PIV 実験で得られた咳気流の最大呼出風速を境界条件として咳呼出気流による室内流れ場性状を解析する。次に、直径がそれぞれ $30\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ の唾液粒子が咳により呼出されてから、各壁面に附着するまでの全過程を再現する。本報は、以上の実験と咳現象をモデル化した数値解析結果に基づき、咳による唾液粒子の静穏環境における伝搬特性を検討するものである。

図 1 PIV システム概念図

図 2 PIV 実験の概要

図 3 咳の呼出速度の分布範囲

2. 被験者実験による咳の伝搬特性の検討

被験者実験により、咳気流の呼出速度、咳で呼出された唾液の量を求め、咳気流の拡散過程を可視化する。

2.1 被験者について

健康な男子大学院生 3 名を被験者とした。被験者の身体データを表 1 に示す。

2.2 PIV 風速計による咳の呼出速度の測定

2.2.1 PIV システムの概要^{文 8,9,10)}

PIV システムは、粒子追跡法と相関法の 2 種が良く用いられる。本研究では実用化が進んでいる 2 時刻の画像の相互相関を取り、移動量に対応する相関係数のピークを検出することにより風速ベクトルを算出するパターン相関法を用いて流れ性状の解析を行う。図 1

図 4 測定領域 A 内における咳の吐出気流の風速分布 [m/s]

図 5 咳の吐出気流の可視化

に示すように、流れ場のある断面を高出力のパルスレーザーにより微小な時間間隔で照射し、そのパルスレーザーに同期させた CCD カメラにより、2 時刻の粒子画像フレームをデジタルデータとして得る。次に、この 2 時刻の画像フレームの相互相関を取り、移動量に対応する相関係数のピークを検出することにより風速ベクトルを算出する。今回使用した PIV 装置の概要を表 2 に示す。

2.2.2 実験室概要

実験は東京大学生産技術研究所の極限実験室内に設置したチャンパーにて行った。チャンパーはスチレンボード製で、 $1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.8\text{m}$ である。トレーサガスとレーザーの人体への障害を防ぎ、更に人体生理発熱による上昇流が咳の呼出気流に与える影響を避けるため^{※1)}、チャンパー内はスチレンボード AB (図 2) により仕切り、被験者と PIV システムはそれぞれスチレンボード AB の両側に位置させる。スチレンボードには、人体口位置に $5\text{cm} \times 3\text{cm}$ の穴をあけ、咳を呼出させる。実験中、PIV による測定側の部分は無風静穏状態に保った。

2.2.3 PIV 測定の概要

表 3 に示すように、測定領域や最大流速に応じて 2 時刻の時間差 (パルス間隔) を 0.05ms に設定する。得られたベクトル図において、明らかに錯誤ベクトルであるものを除去するため、速度範囲、相関ピークに基づく校正 (Velocity-range validation, Peak-height validation) を行った上で、更にフィルタリング (Moving average validation) を行う。

2.2.4 測定結果

PIV システムの制限で、連続的な計測ができないため、 70ms 間隔で被験者口元周辺の流れ場を測定する。測定は多数回行い、咳から 5ms 以内の風速ベクトルと判断されるものを選び、全部で 60 回の有効となる結果を得た。各有効な結果の最大風速を該当の咳の呼出速度とする。図 3 に示すように、咳の呼出速度は $6\sim 22\text{m/s}$ の広い範囲内で変化しているが、 10m/s 程度のものが特に多い。呼出速度の平均値は約 11.2m/s である。図 4 に有効な測定結果の例を示す。これは咳の後、約 2.3ms の時点における口元周辺の風速分布である。図 4(1)に示すように、呼出気塊中心の速度がおおよそ 18.6m/s であったが、この範囲は極めて狭く、気塊中心から周辺に大きな速度勾配が観察される。また、図 4(2)に示されるように、気塊が進行するにつれに前面の空気と衝突し、前面の流れ場が次第に乱れ、その周囲に渦が形成される。周りの空気はこの咳の呼出気流に巻き込まれる。

2.3 咳で呼出された唾液の質量の測定

2.3.1 測定方法

被験者が咳をした際に呼出された唾液を、通気性が良好なマスクを用いて採取し、精度 0.001g の電子天秤 (メトラ・トレド: PR1203) により質量を測定する。実験手順は以下の通り: ①測定の前にマスクの質量を測る。②マスクを被験者の口に密着にかけて、被験者を連続で 10 回の咳をさせる。③もう一度マスクの質量を測る。④2 回の測定値の差の $1/10$ を咳で呼出された唾液の量として求める^{※2)}。実験の精度を向上するため、高応答性の電子天秤を用いる一方、測定までのマスクの移動は蒸発の影響を避けるため迅速に行った。また、実験中、被験者は鼻で呼吸するように求めた。

2.3.2 測定結果 (表 4)

被験者が咳で呼出した唾液の質量は個人差により多少違うが、 $6\sim 8\text{mg}$ である。また、3 人の被験者の平均値は約 6.7mg である。

2.4 咳の呼出気流の可視化実験

2.4.1 実験方法

実験は東京大学生産技術研究所の極限実験室内恒温チャンパー ($3.5\text{m} \times 3.0\text{m} \times 2.5\text{m}$) で行った。小麦粉のトレーサーを口に含み、咳で口から呼出された後、その軌跡をデジタルビデオカメラ (ソニー: DSR-PD100) により撮影する^{※2)}。実験中のチャンパー内は無風静穏状態に保った。

2.4.2 実験結果

トレーサーの塊が口から高速に呼出された後、この勢いで約 30cm 以上を飛ぶ。その後、呼出気流の移動に伴う速度減衰により、トレーサーの塊が次第に分解し、小麦粉が空气中に拡散していく。図 5 に示されるように、トレーサーの塊が空气中を進むにつれ、径が大きくなり、トレーサーに影響される範囲が広がる様子が示される。なお、一部のトレーサーは 2m 以上飛行することが観察される。咳の呼出空气中に含まれる唾液粒子に関し、粒子直径が小麦粉より小さいものは、より拡散範囲が大きくなると考えられる。

3. 数値解析による咳気流に伴う唾液粒子の伝搬特性の検討

ここで、一人の在室者が連続的に咳をし続けた場合に室内に形成される流れ場を、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) 解析の手法を用いて求めた後、咳気流に伴って呼出された各サイズの唾液粒子の拡散過程を、それぞれラグランジュ方程式を用いて解析する。これらの数値解析結果に基づき、咳による唾液粒子の室内伝搬特性、空調と在室者の位置関係が唾液粒子の伝搬に与える影響、及び咳が他の在室者に与える影響を検討する。但し、咳や呼吸による気流は本来非定常流れであるが、本研究は、これを定常流としてモデル化し、唾液粒子の室内伝搬特性はこの咳呼出を定常流れでモデ

図 6 各ケースの解析対象のモデル空間

ABCD 断面: Y 方向の中央断面; EFGH 断面: 立位人体の中心を通過する断面 (隣の壁面への距離は 0.33m)

ル化した流れ場でモデル化している。このモデル化は実現象に比べ空気に大きな運動量を与えるものとなり、実現象との対応に関しては注意が必要なることは無論である。また、流れ場の数値解析において、四肢及び胸部、頸部などの局部形状を有する複雑形状の人体モデルを用い、代謝発熱による人体周辺の熱上昇流も再現する。

3.1 解析対象

本研究は、寸法が 3.5m×3.0m×2.5m、普通の壁掛けのルームエアコンディショナーにより空調されている室内領域を対象として、全4ケースの解析を行う。空調は吹出口サイズが 0.035m² (0.05m×0.7m) であり、いずれのケースにおいても、26℃の風を 0.4m/s の速度で水平方向で吹き出す。

Case1,2 (図 6(1)、表 5) は、通常の病院の待ち合わせ室を想定し、部屋の中央に机を設置、二つの座位人体形状を対面させて机の両側に置く。二人の口間の距離は約 1.54m である。Case1 では、空調側の人体が連続的に咳をし続け、空調反対側の人体が連続的に吸気し続けるとモデル化する。Case2 では、空調反対側の人体が連続的に咳をし続け、空調側の人体が連続的に吸気し続けるとモデル化する。Y 方向の空間の対称性により、Case1,2 では半分の領域のみを計算する。

Case3,4 (図 6(2)-(3)、表 5) では、普通の病室を想定してモデル化する。部屋の中央に壁に接してベッドを設置する。ベッドの上で一つの臥位人体を置き、この人体が連続的に咳をし続けるとモデル化する。立位人体はベッドの近傍に立ち、連続的に吸気し続けるとモデル化する。Case3 では、空調をベッドの後の壁に設置し、Case4 では、空調を立位人体に対面する壁に設置する。

連続的に呼出し続ける咳のモデル化に関し、上述の PIV 実験で測定した最大呼出速度 22m/s を計算条件とした。定常吸気モデル化に関し、吸気量は人体の鼻位置で、定常的に 0.0004m³/s とした^{注3)}。また、咳をする座位人体、臥位人体の口の開口面積は約 3.5cm² とし、定常吸気をする座位人体、立位人体の鼻の開口面積は約 3.3cm² とした^{注12)}。

3.2 計算概要

3.2.1 CFD 計算概要

表 6 に示すように、流れ場解析は標準 k-ε モデル (三次元) による。アルゴリズムは SIMPLE 法、解析スキームは速度項に対して MARS スキーム^{注13)}、温度項に対して一次風上スキームと陰解法を用いる。Case1,2 では、空間メッシュ数は約 447,801、座位人体の表面総メッシュ数は 4,620 である。Case3,4 の空間メッシュ数はそれぞれ 572,146、572,331、立位人体の表面総メッシュ数は 13,520、臥位人体は実人体形状に布団を加えて作成したもので、布団外に露出した部位の表面総メッシュ数は 2,860 である。

全ての壁面では、風速に対して一般化対数則を適用する。温度の境界条件に関しては、人体表面において対流熱伝達量を与える^{注4)}。また、人体の咳気流の呼出温度は 32℃ とした。他詳細な境界条件を表 7 に示す。

3.2.2 粒子計算概要

直径 30μm、50μm、100μm、200μm、300μm、500μm の唾液粒子は、CFD 解析で得られた定常状態の各流れ場において、その拡散過程をラグランジュ方程式に基づき求めた。唾液粒子に関して、ストークスの抗力と重力及び圧力変動による影響のみを考慮して運動方程式を次式とした^{注6)}。

表 5 解析ケース

ケース	空間モデル	人体の姿勢	空調の設置場所
Case1	待合合わせ室	座位+座位	咳をする人体側の壁
Case2			咳をする人体対面の壁
Case3	病室	臥位+立位	ベッドの後方の壁
Case4			立位人体対面の壁

表 6 解析概要

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
CFD 計算モデル	標準 k-ε モデル (三次元)			
アルゴリズム	SIMPLE			
差分スキーム	速度項: MARS、他: 一次風上			
粒子計算モデル	ラグランジュモデル			
メッシュ分割	空間メッシュは 447,801、座位人体表面メッシュは 4,620。また、Y 方向の空間の対称性により、半分の領域のみを計算する。		空間メッシュは 572,146	空間メッシュは 572,331
			臥位人体の露出部位の表面メッシュは 2,860、立位人体の表面メッシュは 13,520。	

表 7 境界条件

空調の吹出口	速度: 0.4m/s、温度: 26℃、風向: 図 6 に参照 乱れの強さ: 10%、長さスケール: 0.05m 寸法: 0.05m×0.7m
空調の吸込口	速度: free slip、温度: free-slip 寸法: 0.05m×0.7m
壁面 (ベッド、机を含む)	速度: 一般化対数則 温度: 一般化対数則、断熱壁
人体表面	速度: 一般化対数則 温度: 一般化対数則、表面に対流熱伝達量を与える (座位人体: 均一 23.0W/m ² 、立位人体: 均一 23.1W/m ² 、臥位人体: 全対流熱伝達量 33.8W を分布を考慮して与える ^{注5)})。
咳をする人体の口	速度: 22m/s、温度: 32℃ 乱れの強さ: 10%、長さスケール: 0.01m また、粒子も 22m/s でランダムに呼出される。
定常吸気人体の鼻	速度: 0.0004m ³ /s (代謝量は 1.3Met) 方向: 鼻から垂直より 15° の角度 乱れの強さ: 10%、長さスケール: 0.01m

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_p + \vec{F}_d \quad (1)$$

$\vec{F}_g$ は重力項、 $\vec{F}_p$ は圧力項、 $\vec{F}_d$ は抗力であり、それぞれ(2)、(3)、

(4)式により与える。

$$\vec{F}_g = V_d(\rho_p - \rho_f)\vec{g} \quad (\vec{g} = (0, 0, -9.8)\text{m/s}^2) \quad (2)$$

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p \quad (3)$$

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_p |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (4)$$

抗力係数 C_d の値は(5)式に示す。

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) / \text{Re}_p, & \text{Re}_p \leq 10^3 \\ 0.44, & \text{Re}_p > 10^3 \end{cases} \quad (5)$$

粒子のレイノルズ数は(6)式により算出する。

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f |\vec{u} - \vec{u}_p| d_p}{\mu} \quad (6)$$

粒子を輸送する気流速度 $\vec{u}$ は平均の速度成分に変動速度成分を加えたものとして、以下の式に与える。

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (7)$$

変動速度成分は以下の標準偏差 σ のガウス分布確率密度関数からランダムに選択する。

$$\sigma = \sqrt{2k/3} \quad (8)$$

$$G(\vec{u}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

計算中、唾液粒子は22m/sの速度で口位置からランダムに呼出され、壁面にぶつかる場合は、附着するように設定する²⁷⁾。また、Case3,4では、各サイズの唾液粒子数がそれぞれ10000個に設定するが、Case1,2では、半分の領域のみだけを計算するため、各サイズの唾液粒子数がそれぞれ5000個に設定する。

3.3 解析結果

3.3.1 風速分布

いずれのケースにおいても、咳気流は22m/sの速度で定常的に呼出されている。呼出された後、風速は口元を中心に大きな勾配で下がる。8m/sの高風速域は口元周辺の極めて狭い範囲内に限られ、室内全体として0.2m/s以下の静穏環境となる。

図7,8に示すように、Case1,2では、咳気流の速度が非常に速いため、周辺の空気が引っ張られて、咳気流に巻き込まれる。咳気流は約1.2m/sの速度で対面の人の顔と衝突する。また、二人の人体とも表面での自然対流による熱上昇流が咳気流により遮断されるため、頭上に顕著な熱上昇流は観察されない。

Case3,4での風速分布をそれぞれ図9,10に示す。EFGH断面における風速分布をみると、立位人体は咳気流に直接に当たっていないが、自然対流による熱上昇流が咳気流と混合し、頭上には顕著な熱上昇流が生じないで、周辺は殆ど0.2m/s以下の風速分布となっている。Case3では、空調の吹出気流が咳気流と衝突し、この影響で咳気流が室内側に寄り、EFGH断面中央における最大風速がCase4より2倍以上大きくなる。Case3では人体表面の熱上昇流の影響で咳気流が立位人体の反対側に寄っているが、Case4では空調吹出気流の影響が大きく、咳気流が立位人体側に寄る。

3.3.2 唾液粒子の伝搬

いずれのケースにおいても、唾液粒子は22m/sの速度で呼出された後、粒子の大きさに関わらず初めに団塊として空中に飛び、後に流れ場の減衰に伴い、団塊が崩壊し、唾液粒子が空中に拡散して、最後に各壁面に附着する。

図11,12にそれぞれCase1,2の解析結果を示す。直径が30 μ mの唾液粒子は概ね咳気流に乗って移動する。粒子は呼出された後すぐ室内の流れ場に左右され、気流に乗って室内全体に拡散する(図11(1)、12(1))。このような粒子は室内滞在時間が長く、最終的附着場所は確定できない。直径が50 μ mの粒子は一部が対面する人体の顔や首に衝突し、一部が人体を越えた後、前方の壁面に衝突する前に床面に落ちる(図11(2)、12(2))。直径が100 μ mの唾液粒子は、80%以上が対面する人体の首の下部周辺に衝突し、残りの部分が人体を越えた直後に床面に落ちる(図11(3)、12(3))。直径が200 μ mの唾液粒子は対面する人体に到達する前に落下し、殆ど100%が人体の胸部に衝突する(図11(4)、12(4))。唾液粒子は直径が300 μ m以上になると、殆ど100%が対面する人体の首に衝突する(図11(5)、12(5))。直径が500 μ mの唾液粒子は殆ど対面する人体の顔に衝突し、落下

の影響は全く観察されない(図11(6)、12(6))。

図13,14にそれぞれCase3,4の解析結果を示す。Case1,2と同じく、直径が30 μ mの唾液粒子は室内気流により室内空間に拡散し、ランダムに各壁面に附着する(図13(1)、14(1))。直径が50 μ m以上になると、この拡散範囲が狭くなり、直径が300 μ mの唾液粒子の拡散範囲は枕周辺の上部空間に限られる(図13(2)–(5)、14(2)–(5))。直径が500 μ mになると、唾液粒子が口から呼出された後の速度も殆ど減らず、直ちに天井に衝突する(図13(6)、14(6))。また、直径が50 μ m–300 μ mの唾液粒子は、Case3の場合では立位人体表面で自然対流による熱上昇流の影響でやや立位人体反対側寄りに落ちるが、Case4の場合では空調吹出気流の影響を受けて立位人体側寄りに落ちる。

3.4 数値解析結果に関する検討

3.4.1 連続咳の仮定の妥当性の検討

前節では、非定常現象である咳が定常的に生じている仮定により解析を行った。定常計算の結果では、1.8m/s以上の高速な領域は口元を中心とする極めて狭い範囲内に限られており、この周辺の風速は急激に減衰し、室全体としては0.2m/s以下の静穏環境となっている。PIV実験と可視化実験で観測された実現象の咳気流と比較すると、CFD解析結果による流れ場は実際の唾液粒子の伝搬過程の風速を定量的にはある程度過大に評価するが、定性的には対応しているものと考えられる。定常の咳気流による流れ場における唾液粒子の伝搬の解析結果は、流れ場に対応し、定量的にはその移動速度を実現象に比べ多少過大に評価するものと考えられるが、本研究は各サイズの唾液粒子の伝搬特性の把握を主要な目的としており、流れ場のある程度の定量的な差異が無視できるものと考えている。

図7 Case1の流れ場解析結果

図8 Case2の流れ場解析結果

(1) 部位Aの拡大図

(2) ABCD断面におけるスカラー風速分布

(3) EFGH断面におけるスカラー風速分布

図9 Case3の流れ場解析結果

(1) 部位Aの拡大図

(2) ABCD断面におけるスカラー風速分布

(3) EFGH断面におけるスカラー風速分布

図10 Case4の流れ場解析結果

(1) 粒子直径=30μm

(2) 粒子直径=50μm

(3) 粒子直径=100μm

(4) 粒子直径=200μm

(5) 粒子直径=300μm

(6) 粒子直径=500μm

図11 Case1の粒子計算結果

(1) 粒子直径=30μm

(2) 粒子直径=50μm

(3) 粒子直径=100μm

(4) 粒子直径=200μm

(5) 粒子直径=300μm

(6) 粒子直径=500μm

図12 Case2の粒子計算結果

3.4.2 咳による唾液粒子の伝搬特性の検討

唾液粒子のサイズの増大に伴い、唾液粒子の室内伝搬特性も次第に変化する。Case1,2の解析では、 $30\mu\text{m}$ 以下の唾液粒子は口から呼出された後すぐ室内の流れ場に従って室内全体に拡散し、重力や慣性力の大きな影響は観られない。また、唾液粒子の附着場所も室内すべての場所に達しており、ランダムである。直径が $50\mu\text{m}$ 以上になると、唾液粒子に働く重力の影響が顕著になり、唾液粒子は咳気流の影響が小さくなるに従い重力で落下する。直径 $200\mu\text{m}$ までは、唾液粒子は直径の増大に伴い重力の影響が大きくなり、より早く落下する。すなわち、直径が $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ の唾液粒子に対しては、重力の影響が大きく観られる。唾液粒子は直径が $300\mu\text{m}$ 以上になると、この飛行距離では重力より慣性力の影響が大きく、慣性力により遠くまで飛ぶ。唾液粒子は直径が $500\mu\text{m}$ になると、 22m/s の初速で飛び出した後すぐ対面の壁面にぶつかる。唾液粒子の附着場所に関しては、 $50\mu\text{m}$ の粒子は主に床面に落下、一部(約18%)は対面する人体に衝突する。 $100\mu\text{m}$ 以上の粒子は殆ど対面の人体表面にぶつかる。近距離では、咳で呼出された唾液による飛沫感染の危険性が相当に高いことが示される。

Case3,4も唾液粒子の直径の増大に伴う伝搬特性の変化をCase1,2と同様に観察される。唾液粒子の直径が大きくなる程、流れ場の影響が小さく、重力と慣性力の作用が大きく働き、唾液粒子の到達範囲は臥位人体の頭部周辺の狭い空間内に限られる。また、Case4では、空調が立位人体対面の壁にあるため、空調の吹出気流の影響で、咳気流が立位人体に寄って上昇し、直径が $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ の唾液粒子も明確に立位人体寄りに落ちる傾向を示す。Case3,4において、臥位人体から呼出された各直径の唾液粒子に対し、その中に立位人体の表面や空調の吸込口に附着する割合を表8にまとめる。表8に示すように、Case4では、立位人体表面に附着する $30\sim 200\mu\text{m}$ の唾液粒子の数量が明らかにCase3より多い。Case3は、空調が臥位人体後の壁上部にあるため、吸込口から排出した $50\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ の唾液粒子の数量はCase4より多く、特に $300\mu\text{m}$ の唾液粒子が50%以上を空調の吸込口から排出される。これらの結果は、空調と室内人体の位置関係が唾液粒子の伝搬に大きな影響を与えることを示唆している。

4. まとめ

- ①被験者実験と数値解析の手法を用いて、静穏環境において咳による唾液粒子の伝搬特性を詳細に検討した。数値解析には、四肢及び胸部、顎部などの局部形状を有する複雑形状の人体モデルを用いた。
- ②被験者実験により、毎回の咳で総量約 6.7mg の唾液粒子団は最大 22m/s の速度で呼出され、この影響範囲は 2m 以上遠くにも及んだ。
- ③数値解析により、静穏環境において咳で呼出される各サイズの唾液粒子の伝搬特性を検討した。直径が $30\mu\text{m}$ 以下の唾液粒子は質量が極めて小さいため、唾液粒子に働く重力と慣性力が小さく、粒子の

図 13 Case3 の粒子計算結果

図 14 Case4 の粒子計算結果

伝搬は室内流れ場に左右される。直径が $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ の唾液粒子は、重力の影響が顕著となるため、唾液粒子が流れ場の減衰に従って落ちる。しかし、唾液粒子の直径が $300\mu\text{m}$ 以上になると、慣性力の影響が支配的となり、 $500\mu\text{m}$ の唾液粒子はこの到達距離で直線的に初速の目標に達する。

- ④待合せ室を想定したCase1,2の解析結果により、近距離内において、咳で呼出された唾液粒子による呼吸器感染症の飛沫感染の危険性は相当に高いものと考えられる。
- ⑤病室を想定したCase3,4の解析結果により、空調と室内人体の位置関係は唾液粒子の伝搬に大きな影響を与えることが示唆された。
- ⑥今後、現実の咳現象をモデル化して非定常解析を行い、咳による物質伝搬の特性をより一層明確に解明したい。

表 8 Case3,4 において立位人表面及び空調の吸込口に附着する唾液粒子の数量

ケース	Case3	Case4	Case3	Case4
附着場所	立位人体		空調の吸込口	
30 μ m	52	104	666	938
50 μ m	67	233	161	24
100 μ m	108	1058	53	0
200 μ m	0	82	411	0
300 μ m	0	0	5048	0
500 μ m	0	0	0	0

謝辞

本研究は、厚生科学特別研究事業「SARSに関する緊急研究」：分担研究課題「建築物衛生の観点からの SARS 予防に関する研究」（分担研究者：吉澤晋 愛知淑徳大学非常勤講師）の一環として実施したものと文部科学省・科学研究費（萌芽）（研究代表者：加藤信介）の助成を得て行ったものを整理している。関係各位に深甚なる謝意を表する。

記号

A_p	唾液粒子の断面積(m^2)
C_d	抗力係数
d_p	唾液粒子の直径 (m)
$\bar{F}_{dr}$	抗力 (N)
$\bar{F}_p$	圧力勾配による力 (N)
$\bar{F}_g$	重力 (N)
k	乱流エネルギー (m^2/s^2)
m_p	唾液粒子の質量 (kg)
P	圧力 (Pa)
Re_p	唾液粒子のレイノルズ数
t	時間 (s)
u	空気の瞬時速度 (m/s)
u_p	唾液粒子の瞬時速度 (m/s)
V_d	唾液粒子の体積 (m^3)
σ	標準偏差
μ	分子粘性係数 (kg/m/s)
ρ_f	空気密度 (kg/m^3)
ρ_p	唾液粒子の密度 (kg/m^3)

注

注 1) 既往の研究では、人体が呼吸・咳・くしゃみなどによって呼出するエアロゾルの約 95% は $1\mu m$ より小さい、この量は約 $10^5 \sim 10^7$ 個^{14,15)}。また、人体の一回の咳で呼出できる最大空気量が肺活量より少ないと考えて普通の成人男性の肺活量 (4l) を用い、エアロゾルの密度を $1000kg/m^3$ とすると、成人の咳で唾液として飛散する $1\mu m$ 以下の粒子は $0.2mg$ 以下であると考えられる。すなわち、マスクを通過した唾液粒子の量は $0.2mg$ 以下である。

注 2) 実験中、唾液による小麦粉の凝集に気がつけた。

注 3) ここで、人体の代謝量を $1.3Met$ と想定し、呼吸量を $10l/min$ にする¹⁶⁾。図 15 の様に、 $10l/min$ (呼吸回数は 10 回/min。すなわち $1l/回$) の呼吸現象の吸気部分が均一に定常的に続く想定している。

注 4) 今回の数値解析には、人体放熱に関し対流熱伝達のみを計算している。すなわち人体放熱に関し放射を連成させていないため、壁面での放射受熱、対流放熱がなく、対流伝熱による室内一様化への駆動力がやや弱くなるため、上下温度分布は実際よりも僅かに大きく、浮力による垂直方向への拡散が抑制される可能性がある¹⁷⁾。

注 5) この分布は、実際に実験用サーマルマネキンに布団に寝かせて就寝状態(代謝量は $0.7Met$)の顕熱状態の顕熱放熱量を与えて実験を行い、サーモビューアにより計測した布団上の温度分布を参考に与えた¹⁸⁾。

注 6) 本研究は各サイズの唾液粒子の伝搬特性の検討を目的としているため、唾液粒子の拡散過程で発生する衝突、分裂、水分の蒸発など様々の複雑な実現象を考

図 15 定常吸気状態のモデル概念図

慮しない。

注 7) 唾液粒子が主に水による液体粒子であるため、壁面に衝突する際に、弾性で跳ね返ることがあり得ないと考えられるため、ここで唾液粒子が壁面にぶつかる場合は、附着するように設定した。また、本研究は唾液粒子の空中移動に着目しているため、唾液粒子が壁面に附着する時点で発生しかねない種々の物理現象を考慮しない。

参考文献

- 1) D.E. Leith, et al.: Cough, IN: The Handbook of Physiology, The Respiratory System, Physiological Society, Sec (3), Chapter 20, pp.315-336
- 2) R.S. Irwin, F.J. Curley, and C.L. French: Chronic cough. The spectrum and frequency of causes, key components of the diagnostic evaluation, and outcome of specific therapy, Am Rev Respir Dis, 141, pp.640-647, 1990
- 3) L. Tibbling, F.M. Gibellino, and K.-E. Johansson: Is mis-swallowing or smoking a cause of respiratory symptoms in patients with gastro-oesophageal reflux disease? Dysphagia, 10, pp.113-116, 1995
- 4) W.E. Johnson, J.A. Hagen, et al: Outcome of respiratory symptoms after antireflux surgery on patients with gastro-oesophageal reflux disease, Arch Surg, 131, pp.489-492, 1996
- 5) T. Ekstrom, K.-E. Johansson: Effects of anti-reflux surgery on chronic cough and asthma in patients with gastro-oesophageal reflux disease, Respiratory Medicine, 94, pp.1166-1170, 2000
- 6) SARS: What have we learned? Nature, 424, pp.121-126, 2003
- 7) Jonathan Knight: Researchers get to grips with cause of pneumonia epidemic, Nature, 422, pp.547-548, 2003
- 8) 実践集中講義, PIV の要点, 可視化情報学会編, 1998
- 9) 山下: リアルタイム PIV システムによる測定最適化, 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演論文集, pp.107-208, 1998.4
- 10) PIV の基礎と応用—粒子画像流速測定法, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000
- 11) 林, 加藤, 村上: 静穏室内における人体の吸気領域に関する CFD 解析, 日本建築学会環境系論文集, Vol.547, pp.61-66, 2001.9
- 12) 朱, 林, 加藤, 村上: 可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れ性状の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.583, 2004.9
- 13) van Leer, B: Towards the Ultimate Conservation Difference Scheme, V: A Second-order Sequel to Godunov's Method, Journal of Computational Physics, 32, pp. 101-136, 1979
- 14) Y. Jiang, X.F. Li, B. Zhao, et al: SARS and Ventilation, Proceedings of the 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, K04, Vol.1, pp.27-36, 2003
- 15) Z.L. Xu: The theory of air cleaning technology, Tonji University Press, Shanghai, pp.51-60, 1998
- 16) 快適な温熱環境のメカニズム—豊かな生活空間をめざして, 社団法人 空気調和・衛生工学会編, 1997
- 17) 曾, 村上, 加藤: 数値シミュレーションに関する研究(その 8)対流・放射連成シミュレーションによる人体表面の顕熱伝達特性の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.659-660, 1997.9
- 18) 梁, 加藤, 村上, 笠原, 林: 隙間換気のある室内における人体による吸引空気性状の解析, 第 15 回数値流体力学シンポジウム, E02-3, 2001

(2004年 7 月 9 日原稿受理, 2004年 8 月 26 日採用決定)