A101 実験と数値解析による咳の吐出空気の拡散の可視化

朱 晟偉[○] (東京大学大学院), 加藤 信介 (東京大学生産技術研究所)

Visualization of Coughed Air's Dispersion with
Experiment and Numerical Methods
Shengwei ZHU and Shinsuke KATO

ABSTRACT

In this paper, the dispersion process of coughed air in a stagnant indoor environment is visualized by the experiment using flour as tracer, and the transient CFD analysis coupled with concentration simulation. Moreover, the instant flow field in breathing zone immediately after coughing is visualized and measured by PIV. It shows that coughed air will be diffused into a considerable area even in a stagnant environment. The analytical results also indicate that the dispersion process and influence to another occupant of coughed air will be greatly affected by indoor ventilation situations.

Keywords: Visualization, Coughed Air's Dispersion, CFD, PIV

1. 緒 論

日常生理現象の咳は肺炎、SARS などの種々の病気の主な症状でもあり、生理学、医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[文 1,2]。しかし、著者らが知る限り、咳による物質拡散、即ち空気・エアロゾル・唾液などが咳で吐出された後に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がない。呼吸器感染症の感染者の咳で吐出されたエアロゾルは、表面にウィルスが附着されているため、これらの病気の空気感染媒介になりかねないことがよく認識されている[文 3]。故に、室内スケールで呼吸器感染症の空気感染を検討する際には、咳によるエアロゾルの放出と拡散が無視できないものと考えられる。また、直径が $30\mu\text{m}$ より小さなエアロゾルには重力の影響が殆どない、その拡散が流れ場によって左右されるため[文 4]、エアロゾルが咳の吐出空気に均等に分布し、咳の吐出空気につれ拡散されると仮定できる。そのため、本研究は咳に伴うエアロゾルの伝搬特性の解明を目的として、静穏環境において咳の吐出気流を可視化して咳で吐出された空気の拡散過程を考察する。

本報では、被験者実験と数値解析の両方で検討を行う。実験では、初めに PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) 風速計を用い、人が咳をする瞬間の口元周辺における流れ場を可視化して測定し、咳気流の吐出速度を計測する。次に、小麦粉をトレーサとして咳気流の拡散過程を可視化してその影響範囲を観測する。CFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学) 解析では、実現象の咳と呼吸の非定常モデルを用いて咳気流の瞬時変化をシミュレートし、更にトレーサーガスの濃度解析により咳の吐出空気の拡散を再現する。

2. 被験者実験により咳気流の可視化

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 Table 1 に示す。

2.2 PIV 風速計を用いた可視化実験 [文 4]

2.2.1 実験室の概要 (Fig. 1)

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スチレンボード製のチャンバー ($1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.8\text{m}$) に行った。トレーサー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、チャンバー内はスチレンボードにより仕切り、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 による測定側は無風状態に保った。

2.2.2 PIV 測定の概要

本研究で用いた PIV システムは、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

Table 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

Table 2 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)

て流れ性状の解析を行う。Table 2 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を行った上で、更にフィルタリングを行う。また、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 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。

2.2.3 測定結果

咳の吐出速度は $6\sim 22\text{m/s}$ の広い範囲内で変化し、平均値は約 11.2m/s である。Fig. 2 に一例を示す。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。Fig. 2(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、Fig. 2(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 小麦粉を用いた可視化実験

2.3.1 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（3.5m×3.0m×2.5m）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^{注1)}。実験中、チャンパー内は無風状態に保った。

2.3.2 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 以上を飛ばす。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。Fig. 3 に示すように、トレーサーの塊が空气中を進むにつれ、径が大きくなり、トレーサーの影響範囲が広がる様子が示される。

3. CFD 解析による咳気流の可視化

3.1 解析对象

Fig. 4 に示すように、普通の病室の様子を想定して両

た、咳気流や呼気の温度を 32°C とした。他詳細な境界条件は Table 3 を参考する。

各ケースで、先ず予備計算を行い、咳と呼吸ともしない場合で対象空間に流れ場と温度場を形成する。この定常計算の結果に踏まえ、非定常解析を行う。

3.4 解析結果

3.4.1 流れ場 (Fig. 6, 7)

Case1 において (Fig. 6)、いずれの時点でも、室内全体として 0.2m/s 以下の静穏環境となる。ABCD 断面では、咳が始まってから、咳気流の影響により、ベッドの上部空間の流れ場が次第に乱れていく。咳の進行に伴い、流れ場が加速され、 0.2 秒後に ABCD 断面で最大風速 1.17m/s に達する。その後、咳の終了に伴って、流れ場がどんどん弱くなる。また、立位人体周辺に生理発熱による熱上昇流が生じているため、咳気流はこの影響を受けて立位人体の反対側に寄って斜めに上昇する。

Case2 の場合 (Fig. 7)、ABCD 断面で 0.2s の時点で 1.33m/s の最大風速を得られる。又、空調が立位人体反対側の壁にあるため、吹出気流に当たる咳気流が立位人体側に寄って拡散する。

3.4.2 濃度場 (Fig. 8, 9)

数値解析では、咳の吐出気流にトレーサを一様に混入し、この濃度を 100% とする。即ち、Fig. 8, 9 では、各濃度値は該当場所の空気における咳により吐出された空気が占める割合と看做してよい。

Case1 の場合 (Fig. 8)、ABCD 断面では、立位人体の生理発熱による熱上昇流の影響を受けて、吐出空気は立位人体反対側の壁に寄って拡散する。30s 後に、室内は全体的に 0.02% 以下の低濃度分布となっているが、立位人体反対側の壁の近傍に濃度が比較的に大きい。

Case2 の場合 (Fig. 9)、ABCD 断面では空調が立位人体対面の壁に設置されているため、立位人体向きの空調吹出気流の影響で、吐出空気は立位人体に寄って拡散し、2s 後、即ち咳直後の吸気期間で、立位人体鼻周辺の濃度が約 0.2% である。30s 後に、室内は全体的に 0.02% 以下の濃度分布となっているが、立位人体の後方及び下方に濃度が比較的に大きい。

3.4.3 立位人体が吸入した咳による空気 (Table 4)

Case1, 2 において、咳で吐出された空気の総量に対し、立位人体に吸入された分の割合は、咳直後の吸気期間でそれぞれ 0.0% 、 0.007% となり、次の吸気期間で何れの場合でも殆どゼロである。

3.5 考察

流れ場の解析結果により、静穏環境において、室内流れ場は主に①空調による送風、②人体の生理発熱による熱上昇流、③咳・呼吸などによる吐出気流の影響で形成され、特に人体周辺には②と③による影響がより顕著と

(1) Case1 (2) Case2
ABCD 断面：立位人体の中心を通過（隣の壁面への距離は 0.33m ）
Fig. 4 各ケースの解析対象のモデル空間

(1) 臥位人体の場合 (2) 立位人体の場合
Fig. 5 咳と呼吸現象のモデリング

Table 3 境界条件

空調の 吹出口	寸法： $0.05\text{m} \times 0.7\text{m}$ 、 速度： 0.4m/s 、温度： 26°C 乱れの強さ： 10% 、長さスケール： 0.05m
	速度： free slip 、温度： free-slip 寸法： $0.05\text{m} \times 0.7\text{m}$
空調の 吸込口	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（立位人体：均一 $23.1\text{W}/\text{m}^2$ 、臥位人体：全対流熱伝達量 33.8W を分布を考慮して与える[文 8]）
	口 速度： 22m/s 、温度： 32°C 乱れの強さ： 10% 、長さスケール： 0.01m
	鼻 速度：Fig. 6 に参照 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

なる。また、静穏環境において咳気流は極めて速い速度で減衰し、遅くても咳をしてから約 2 秒後にこの様子がもう消えてしまう。

Case1 での濃度解析結果により、静穏環境で、空調の吹出気流に直接に当たらない人体が、自らの生理発熱による熱上昇流により、他人の咳気流による被害から保護されることが確認された。また、両ケースの解析結果の比較により、空調と人体の相対位置は咳による空気やエアロゾルの拡散過程に大きい影響を与えられる。

4. 結 論

- (1) 被験者実験と数値解析の両手法を用いて、静穏環境で咳気流を可視化して咳の吐出空気の流れ過程を考察した。
- (2) 被験者実験により、空気やエアロゾルは最大 22m/s の速度で吐出され、この影響範囲は相当に大きい。
- (3) 小麦粉を用いた被験者実験と非定常解析により、空気やエアロゾルは咳で吐出された直後に咳気流により拡散されるが、咳気流の影響が直ぐ消えてしまい、その後室内流れ場により拡散される。
- (4) 数値解析の結果により、空調送風が弱い静穏環境においても、空調送風と人体の位置関係は、咳による空気やエアロゾルの拡散過程に与える影響が大きい。

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。

注

- 1) 実験中、唾液による小麦粉の凝集に気がつけた。
- 2) 同様な被験者を用いた実験で、テドラーバッグを用いて咳の吐出空気をサンプリングして、Wet-Gas-Meter によりこの容積を測定した。この平均値は約 1.4 %。

参 考 文 献

- 1) Leith, D.E., et al.: Cough, IN: The Handbook of Physiology, The Respiratory System, Physiological Society, Sec(3), Chapter 20 (1986) pp.315-336.
- 2) Irwin, R.S., Curley, F.J., French, C.L.: Chronic Cough. The Spectrum and Frequency of Causes, Key Components of the Diagnostic Evaluation, and Outcome of Specific Therapy, Am Rev Respir Dis, Vol. 141 (1990) pp. 640-647.
- 3) Yu, Ignatius, T.S., Li, Y.G, et al: Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome

Fig. 6 Case1 の ABCD 断面における流れ場の時刻歴 [m/s]

Fig. 7 Case2 の ABCD 断面における流れ場の時刻歴 [m/s]

Fig. 8 Case1 の ABCD 断面における濃度場の時刻歴 [%]

Fig. 9 Case2 の ABCD 断面における濃度場の時刻歴 [%]

Table 4 立位人体が吸入した咳による空気

Case No.	1 st Cycle	2 nd Cycle	総量
1	0	0	0
2	0.007 %	0.001 %	0.008%

Virus, The New England Journal of Medicine, Vol.350 (2002) pp.1731-1739.

- 4) 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, No.586 (2004) pp.25-32.
- 5) 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) pp.27-31.
- 6) Van Leer, B.: Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme, II: Monotonicity and Conservation Combined in a Second Order Scheme, Journal of Computational Physics, Vol.32 (1979) pp.101-136.
- 7) 村上周三, 加藤信介, 曾潔: 数値シミュレーションに関する研究 (その 8) 対流・放射連成解析による立位人体表面の顕熱伝達特性の検討, 日本建築学会計画系論文集, No.515 (1999) pp.69-74.
- 8) 梁禎訓, 加藤信介, 村上周三, 笠原啓史, 林立也: 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).