

〔特集〕新型コロナウイルス感染症の拡大防止に貢献する流体力学

呼吸器から生じる飛沫・飛沫核とその感染経路について

東京都立大学 都市環境学部

尾方 壮行*

Droplets and Droplet Nuclei from the Respiratory Tract and the Modes of Transmission

*Masayuki Ogata, Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

*E-mail : mogata@tmu.ac.jp

1 はじめに

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は、感染性を保った新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) を含む飛沫および飛沫核によって人から人へ伝播する。本稿では、呼吸器から放出される飛沫および飛沫核の特性について述べ、エアロゾル粒子への曝露様式に基づいて感染経路を整理した上で、模擬咳発生装置を用いて測定した飛沫沈着量について報告する。

2 飛沫および飛沫核の特性

飛沫および飛沫核という用語は従来粒径5 μm を閾値として定義されてきた^{1,2)}が、本稿では放出された後、直ちに環境表面へ沈着するものを大きな飛沫、室内空气中に浮遊するものをエアロゾル粒子と呼ぶ。ここでエアロゾル粒子とは、日本エアロゾル学会の定義³⁾に従い、粒径および液相、固相の状態によらず空气中に浮遊する微粒子の総称とした。感染を媒介する飛沫および飛沫核は、咳やくしゃみ、会話、呼吸などの呼吸器活動により、呼吸器から放出される。発生するエアロゾル粒子および大きな飛沫は、1 μm 以下のサブミクロンから、大きいものでは数百 μm の粒径を持ち、広い粒径範囲に分布する。Johnsonらは、咳および会話時に発生するエアロゾル粒子の粒子径分布を測定し、発生個数に占める割合は粒径10 μm 以下の粒子が大半を占めることを示している⁴⁾。Lindsleyらは、咳によって発生するエアロゾル粒子数を測定し、発病時には平均75,400個、罹患後には平均52,200個であったと報告している⁵⁾。Asadiらは、咳やくしゃみほど激しい呼吸器活動ではなく目には見えずとも、会話するだけで声の大きさに応じて1秒あたり約1~50個の粒子が発生することを報告している⁶⁾。また、SARS-CoV-2を含むエアロゾル粒子の粒径特性について、Liuら⁷⁾は集団感染

が起きた中国武漢市の病院で調査を行い、0.25~1.0 μm および1 μm 以上の範囲にピークがあることを報告している。

エアロゾル粒子の室内空气中での滞在時間と終末沈降速度を図1に示す⁸⁾。飛沫の大部分は水分であるため、エアロゾル粒子の密度を1 g/cm^3 と仮定し、式(1)により求めた沈降速度および無風環境下で1.5m鉛直落下する時間を示している。図1から、粒径10 μm 以下のエアロゾル粒子の沈降速度は0.3 cm/s 以下であり、人が居住する室内環境では平均で0.1 m/s 程度の気流があることから、長時間空气中に浮遊し続けることがわかる。

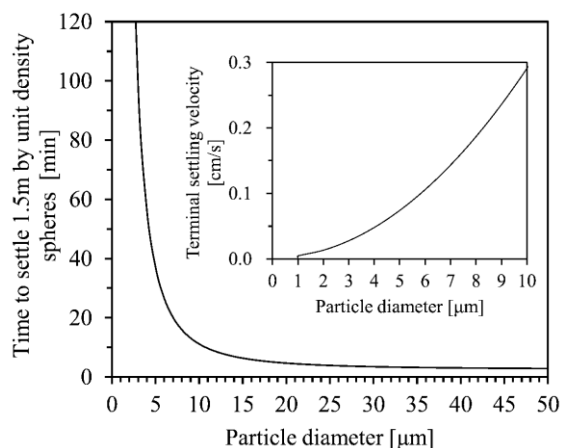


図1 エアロゾル粒子の沈降特性と室内での滞在時間 (Adopted from Hayashi et al., 2020⁸⁾ with permission under Creative Commons Attribution License 4.0)

$$v = \frac{gD_p^2\rho_p}{18\mu} \tag{1}$$

- v : 終末沈降速度 [cm/s]
- g : 重力加速度 [cm/s^2]
- ρ_p : 粒子密度 [g/cm^3]
- D_p : 粒径 [cm]
- μ : 空気の粘度 [$\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$]

3 SARS-CoV-2 の感染経路

COVID-19 は呼吸器感染症であり、ヒトの咳やくしゃみ、発声、呼吸などの呼吸器活動によって発生する飛沫や飛沫核に含まれる感染性を保った SARS-CoV-2 によって感染する。この病原体を含む飛沫や飛沫核などの担体がヒトの体に侵入するまでの経路を感染経路もしくは伝播様式 (Modes of Transmission) と呼ぶ。図 2 に SARS-CoV-2 の主な感染経路を示す。

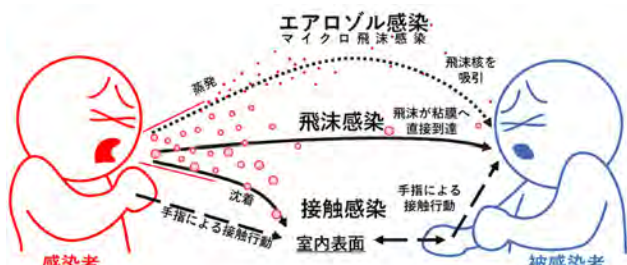


図 2 SARS-CoV-2 の主な感染経路

SARS-CoV-2 の主たる感染経路は発生源から約 2 m 以内の近距離で短時間のうちに飛沫や飛沫核が目や鼻、口の粘膜面に沈着したり、鼻や口の中に吸い込まれたりすることで起こる飛沫感染であると考えられている^{9,10}。換気が不十分な閉鎖された環境では、一般的に飛沫感染が起こる濃厚接触として考えられる約 2 m の距離を超えて病原体を含む感染性エアロゾル粒子を介した感染が起こる可能性が指摘されている。この感染経路はエアロゾル感染やマイクロ飛沫感染¹¹と呼ばれており、従来の空気感染のような空間の長距離において感染する結核や麻疹、水痘とは異なり、特定の条件下においてエアロゾル粒子を介した感染を引き起こす広義の空気感染ともいえる。本稿では、この感染経路をエアロゾル感染と呼ぶ。現在では、汚染された表面や物品に触れた手指で目や鼻、口を触ることで新型コロナウイルスの接触感染が起こることは少ないと考えられている⁹。

4 エアロゾル粒子への曝露様式と対策

図 3 に感染性エアロゾル粒子への曝露様式と対策のあり方を示す。直接的な曝露により伝播する飛沫感染は、通常の換気などの環境制御では防ぐことが難しく、人と人の物理的な距離を確保したりマスクを着用したりするような行動変容を促し、その遵守率を高く保つことが対策として重要となる。間接的な曝露により伝播する空気感染への対策としては、換気や有効なフィルター、UVGI (Ultra Violet Germicidal Irradiation) システムなどによる空気清浄によって空気中の感染性エアロゾル粒子を除去また

は失活化することで、感染リスクを低減できる。空気感染経路のリスク評価手法として、Wells が提唱した quanta の概念に基づき Riley が開発した室内空気の完全混合・定常状態を仮定する Wells-Riley モデルがよく知られている¹²。以上の比較的一般化しやすい曝露様式に対して、今般のエアロゾル感染は、発生源から近距離で短時間のうちに曝露を受けなくとも、エアロゾル粒子を高濃度を含む空気への曝露を受けやすい環境で生じると考えられる。

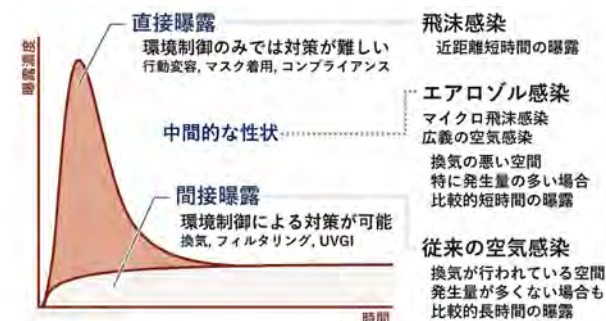


図 3 エアロゾル粒子への曝露様式と対策

5 模擬咳発生装置による飛沫・飛沫核の測定

飛沫および飛沫核の伝播に関して、筆者が開発した模擬咳発生装置を用いて水平面・鉛直面沈着量分布、エアロゾル粒子濃度を測定した研究を紹介する。

5.1 模擬咳発生装置の概要

被験者実験では再現性のある咳を発生させることが難しく、異なる環境における咳飛沫の挙動を比較するためには多数の測定が必要となり、実験協力者の健康が損なわれる恐れがあるため、模擬咳発生装置を開発した。図 4 に模擬咳発生装置を示す。

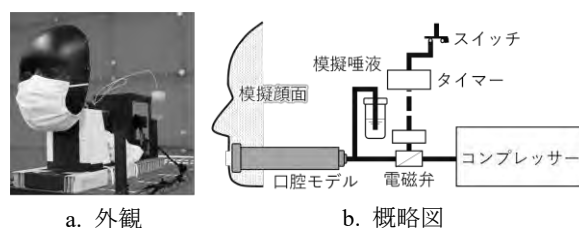


図 4 模擬咳発生装置

本装置はコンプレッサーもしくはガスシリンダーによる圧縮気体の気体圧力および電磁弁の開閉時間を調節し、口腔モデルから噴射することで咳気流を模擬する。また、二流体ノズルを用いて、気体の吸引効果により液体を送り、混合することで飛沫を生成する。混合された気液は口腔モデルを経て開口部から模擬咳として噴出される。本装置による模擬咳については、咳風量、速度、飛沫量、粒径分布を既往研究、被験者実験の結果と比較し、飛沫を含む咳を一定程度模擬できることを確認している¹³。

5.2 水平面・鉛直面への飛沫沈着量分

咳により飛散する飛沫の沈着量分布を把握するため、模擬咳発生装置により咳を噴射し、測定対象面に設置した感水紙により飛沫痕を記録し、画像解析により飛沫沈着数を定量化した。空気温度は 23°C、相対湿度は 50%を基準とし、低湿度の 30%を加えた 2 条件を設定した。

図 5 に水平面への飛沫沈着量分布を、図 6 に飛沫沈着体積分布を示す。発生源から 30 cm, 60 cm 下方の各測定面において、模擬咳噴出口から前方 50 cm, 60 cm で最も飛沫沈着数が多くなり、前方 150 cm に沈着した飛沫は少なかった。相対湿度 50%条件より 30%条件の方が少なくなり、各相対湿度条件における全測定点の合計で 24%少なくなった。また、咳噴射口から 90 cm 下の水平面では 30 cm 下の水平面よりも相対湿度による沈着数の差が小さかった。原因として、相対湿度の低下や飛沫の浮遊時間が長くなることで飛沫の蒸発が促進され、表面に沈着する前に乾燥し、飛沫核となる飛沫が増加することが挙げられる。また、ほぼ全ての条件で、全測定点で測定された飛沫沈着数の 90%以上が前方 90 cm までに沈着した。これは、CDC ガイドライン¹⁾において明確なリスクがあると定められてきた 3 feet という距離と一致する。

飛沫沈着体積について、全粒径範囲を対象とした結果を見ると、飛沫沈着数のグラフと比較し各条件で傾向が異なったが、図 6b の粒径 200 μm 以下の結果では、どの条件でも同様の傾向を示した。飛沫沈着体積への相対湿度および測定面高さの影響は小さかった。これは、環境条件によらず表面に沈着する粒径の大きな飛沫は、数として全体に占める割合に小さいが、体積としては大きく、飛沫沈着体積の結果に与える影響が大きいためである。

図 7 に顔粘膜面を想定した鉛直面における飛沫沈着数および体積を示す。図 7b には、粒径 200 μm 以下の飛沫の結果を示している。前方 60 cm では、位置の高い目よりも口で沈着数が多く、相対湿度による差が見られた。前方 90, 120 cm では沈着数は非常に少なかった。90 cm 以上離れると咳飛沫は顔粘膜位置にはほとんど沈着しないことが分かった。相対湿度 30%と 50%を比較すると、30%の方が沈着数は少なかった。沈着体積についても沈着数と同様の傾向があったが、相対湿度による影響は小さかった。

5.3 咳によるエアロゾル粒子濃度

模擬咳発生装置の口腔モデル先端に模擬顔面を設けてマスクを着用した状態を実験的に再現し、物理的距離およびマスクの有無が咳の飛沫・飛沫核への

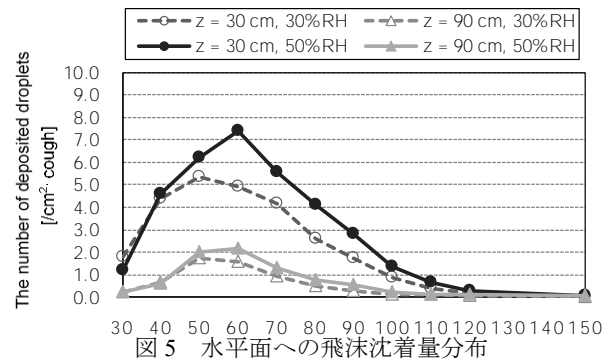


図 5 水平面への飛沫沈着量分布

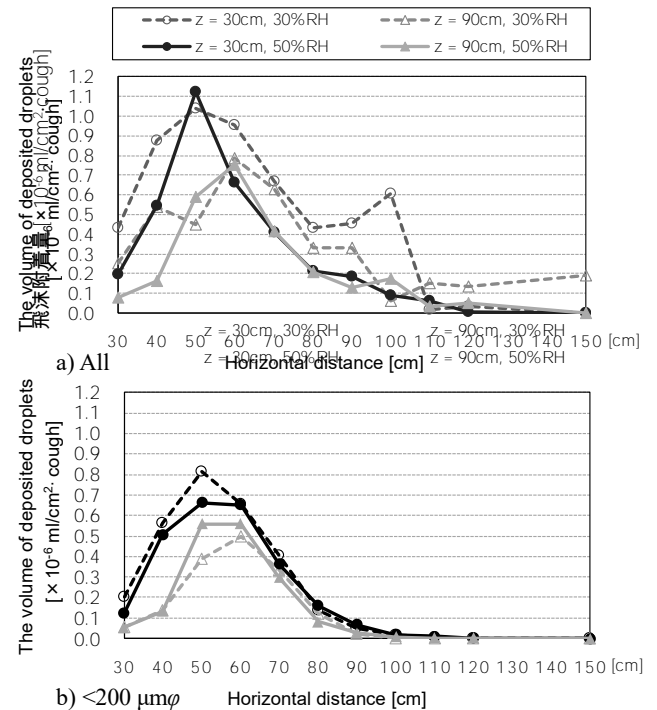


図 6 水平面への飛沫沈着体積分布

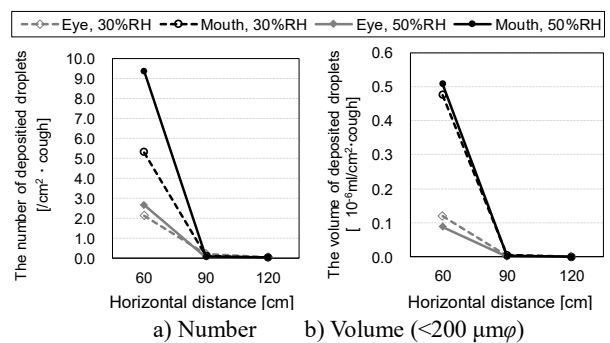


図 7 鉛直面への飛沫沈着量分布

曝露に与える影響を評価した。

模擬咳を噴射してから 180 秒後までに各条件で測定された平均濃度のエアロゾル粒子への曝露を受けた場合の曝露量を算出した。曝露を受ける者の吸気量は毎分 9 L と仮定した。粒径クラスごとの曝露量を図 8 に、各条件の曝露量を図 9 に示す。

結果から、マスクを着用していない時には 2.0 m の距離を取ることでより粒径 1.0 μm 以上の咳飛沫・飛沫核への曝露量が大幅に低下することがわかる。

また、マスクを着用することで粒径 $1.0 \mu\text{m}$ 以上の粒子への曝露量が有効に抑制された。しかしながら、マスク着用時にも、特に粒径 $1.0 \mu\text{m}$ 未満の粒子はマスクと顔面の空隙から吹き出される空気とともに室内空気中へ漏洩する。物理的な距離の確保やマスク着用を行っても $1.0 \mu\text{m}$ 以下の粒子を高濃度に含む雰囲気曝露される恐れがあるため、エアロゾル粒子が多く発生するような場合には発生源から風下とならない方向に 2m 以上の物理的な距離をとりながら換気量を増大するように努めるほか、発生源が予め予測できるならば、発生源となる者その他の者の過ごす空間を分けて発生源近くに排気口を設けるなどの工夫によって、他の者を感染性エアロゾル粒子に曝露させずに直ちに除去する工夫を行うことが対策として考えられる。

6 まとめ

SARS-CoV-2 の室内環境における伝播を担う感染性ウイルスを含む飛沫および飛沫核は、咳やくしゃみだけでなく、会話や呼吸によっても発生する。その多くは $10 \mu\text{m}$ 以下のエアロゾル粒子である。SARS-CoV-2 は、ウイルスを含むエアロゾル粒子によって無症状を含む感染者から伝播する。大きな飛沫のほとんどは 1m 以内に沈着するが、エアロゾル粒子は 2m を超えて長い間室内空気中を漂う。病原体を含むエアロゾル粒子への間接的な曝露による感染は、換気を主とした環境制御によって効果的に抑制できる。発生源から近距離での直接的な曝露は空調設備を中心とした環境制御技術のみでは防ぐことができないため、ユニバーサル・マスクングや物理的な距離の確保などの行動変容が必要である。

引用文献

- 1) Siegel, J. D., Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee et al.: 2007 Guideline for Isolation Precautions: Preventing Transmission of Infectious Agents in Healthcare Settings.
- 2) Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C.L., Jensen, P., Li, Y. and Seto W.-H.: Natural ventilation for infection control in health-care settings. WHO guidelines 2009.
- 3) 日本エアロゾル学会. エアロゾルとは. https://www.jaast.jp/new/about_aerosol.html (2021年2月10日閲覧)
- 4) Johnson, G.R., Morawska, L. et al.: Modality of human expired aerosol size distributions, *Journal of Aerosol Science*. 42-12 (2011) 839-851.
- 5) Lindsley, W.G. et al.: Quantity and Size Distribution of Cough-Generated Aerosol Particles Produced by Influenza

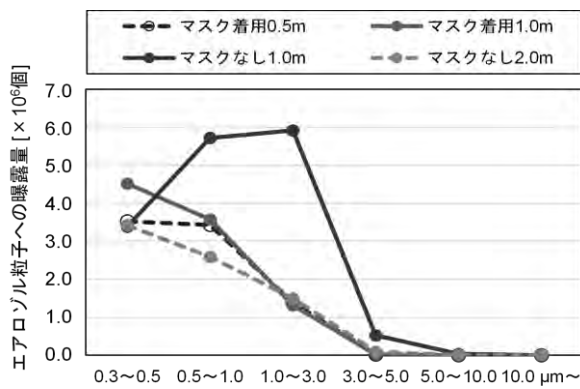


図8 粒子径クラスごとのエアロゾル粒子への曝露量

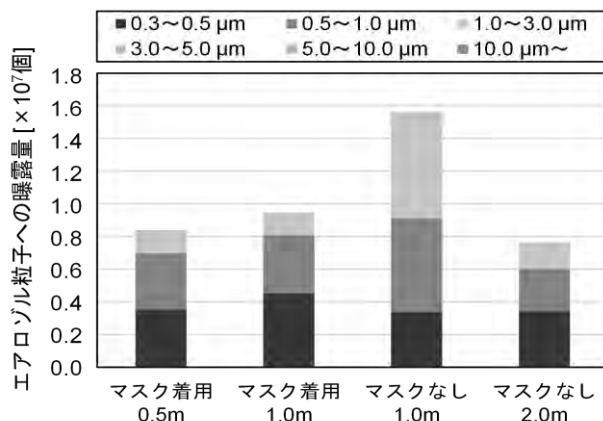


図9 各条件でのエアロゾル粒子への曝露量

Patients During and After Illness. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9-7 (2009) 443-449.

- 6) Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D. et al. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep* 9 (2019) 2348.
- 7) Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y. et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature* 582 (2020) 557-560.
- 8) Hayashi, M. et al.: Measures against COVID - 19 concerning Summer Indoor Environment in Japan. *Japan Architectural Review*. 3-4 (2020) 423-434.
- 9) Centers for Disease Control and Prevention. How COVID-19 Spreads. 2020年10月28日.
- 10) World Health Organization. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. 2020年7月9日.
- 11) 第4回新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード. (啓発資料)「新型コロナウイルス感染症はこうした経路で広がっています」. 2020年7月30日.
- 12) Riley, E.C., Murphy O., Riley, R.L.: Airborne spread of measles in a suburban elementary school, *American Journal of Epidemiology*, 107(1978) 421-432.
- 13) 尾方壮行ら: 模擬咳発生装置による飛沫沈着量分布の測定, 日本建築学会環境系論文集, 83-743 (2018) 57-64.