

<proceedings>

空気を介する感染経路と感染対策を整理する

坂本 史衣

Understanding Air-Mediated Infection Routes and Control Measures

Fumie SAKAMOTO

Itabashi Chuo Medical Center

(2025 年 4 月 16 日受付・2025 年 5 月 2 日受理)

要 旨

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的流行は、空気を介する感染経路への理解や対策の見直しを促す契機となった。本稿では、ヒトが微粒子を産生するメカニズム、微粒子の空気中での挙動、それに伴う吸入リスクについて概説する。あわせて、微粒子を介した感染経路に関する概念の変遷についても整理する。感染対策については、標準予防策を基本としつつ、感染経路に応じたマスクの選択や陰圧隔離の適応に関して、近年の科学的知見に基づく考え方を示す。空気を介する感染に関する考え方や対策についての勧告は、今後、専門機関が発行するガイドラインにおいて、より明確に示されていくことが期待される。医療現場においては、これらの最新情報を随時確認し、状況に応じて適切な対策を講じることが求められる。

Key words : エアロゾル, 感染経路, 空気

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的流行を契機に、空気を介する感染経路に関する考え方や感染対策が見直されている。本稿では、感染源であるヒトから微粒子が産生されるメカニズム、空気中での微粒子の挙動と吸入リスクを踏まえたうえで、空気を介した感染経路の考え方や推奨される感染対策について、2025 年 4 月 15 日現在の情報をもとに解説する。

2. ヒトが産生する微粒子の名称

呼吸、発声、咳やくしゃみの際に産生される微粒子は、エアロゾル (aerosol)、飛沫核 (droplet nuclei)、感染性呼吸器微粒子 (infectious respiratory particles)、呼吸器飛沫 (respiratory droplets) といった様々な名称で呼ばれる¹⁻⁴⁾。このうち、日本国内で広く使われているエアロゾルの工学的な定義は、「気体中に浮遊する微小な液体または個体粒子と周囲の気体の混合体」である⁵⁾。エアロゾルは多様な分野で扱われており、その分類や名称も文脈によって異なる。たとえば、気象学的な分類で

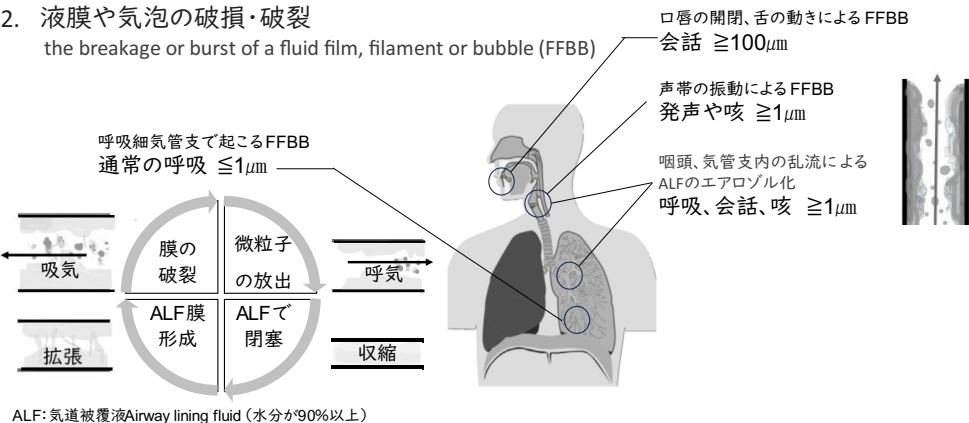
は視程や色調に応じて「霧」「もや」「煙霧」「スモッグ」などと呼ばれ、生成過程に基づく分類では「粉塵」「フューム」「ミスト」「煤塵 (ばいじん)」などの名称が用いられる。エアロゾルの粒径は約 $0.001\ \mu\text{m}$ ($1\ \text{nm}$) から $100\ \mu\text{m}$ 程度までと幅広く、濃度は発生源からの距離や空気質によって変動する。さらに、エアロゾルは粒径や濃度以外にも、化学組成、形状、光学的・電気的特性といった種々の要素によって特徴づけることができる物質である⁵⁾。本稿では、ヒトが産生する微粒子のうち病原体を含むものを「感染性微粒子」と呼び、排出後に重力で落下する水分量の多い微粒子を「飛沫」、空気中を漂う軽い微粒子を「エアロゾル」と呼んで区別する。

3. 微粒子産生のメカニズム

微粒子が産生されるメカニズムは、乱流による気道被膜液のエアロゾル化と、液膜や気泡の破損・破裂に大別される。前者では、呼吸・会話・咳の際に、咽頭や気管支内で生じる乱流で気道被覆液がエアロゾル化し、粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以上の微粒子が排出される。後者では、会話における口唇の開閉や舌の動きで生じる粒径 $100\ \mu\text{m}$ 以上の微粒子、発声や咳をしたときの声帯の振動で生じる粒径

1. 乱流によるエアロゾル化
turbulent aerosolization

2. 液膜や気泡の破損・破裂
the breakage or burst of a fluid film, filament or bubble (FFBB)



ALF: 気道被覆液Airway lining fluid (水分が90%以上)

引用文献 6)7)をもとに筆者作成

図1 微粒子産生のメカニズム

表1 微粒子の到達可能部位

粒径	到達可能部位
≤2.5～5μm	細気管支～肺胞
≤10～15μm	気管～終末気管支
≤100μm	鼻腔、咽頭、口頭

引用文献 10)をもとに筆者作成

1 μm 以上の微粒子、また、通常の呼吸により呼吸細気管支で生じる粒径 1 μm 以下の微粒子が産生される^{6,7)} (図 1)。

4. 空気中での微粒子の挙動

ヒトが産生する微粒子のうち、水分量が多く、重量があるもの（飛沫）の多くは、水分が蒸発する前に放物線に近い軌道を描いて落下する。飛沫の到達距離は排出速度に左右されるが、咳やくしゃみの際の最大排出速度は 10～30 m/秒に達し、様々な粒径の微粒子を含むガス雲が 7～8 m 先まで到達する⁸⁾。水分量が少ない微粒子（エアロゾル）は、体外に放出された後、水分が蒸発するため、より長い距離を移動することが可能である。エアロゾル産生量は声量が多いほど多く、通常の呼吸で最も少ない。濃度は発生源の近くが最も高く、離れるにつれて減少し、室内の温度差により生じる自然対流や、人や電子機器から生じる熱で天井付近まで上昇する。特に粒径が 5 μm を下回るエアロゾルは、換気により希釈されるか、気流によって除去されない限り、ほとんどの屋内環境で無限に滞留することができる^{7,9)}。こうしたことから、声量が多い場合、発生源からの距離が近い場合、

また、換気不良の空間に滞在する場合は、空気中のエアロゾルを吸入するリスクが高まると考えられる。

5. 吸入した微粒子の到達可能部位

吸入した微粒子が到達できる部位は、粒径に依存する¹⁰⁾。粒径が ≤2.5～5 μm の微粒子は肺胞に到達可能だが、100 μm に近いものは上気道にとどまる（表 1）。肺胞に到達し得る大きさの微粒子を介した感染を防ぎたい場合は、N95 と同等のフィルター性能を有するフィット性の高いマスクを着用する必要がある。一方、上気道にとどまる大きさの微粒子への曝露を防ぐには、サージカルマスクで通常は十分である。

空気中から検出されたことが報告されている病原体は、インフルエンザウイルス、アデノウイルス、ライノウイルス、EB ウイルス、RS ウイルス、水痘ウイルス、麻疹ウイルス、*Mycobacterium tuberculosis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* など多岐に渡るが、核酸増幅法を使用した調査が多く、感染性については不明である¹¹⁾。空気中の感染性エアロゾルの吸入を確実に防ぐ必要性は、問題となっている病原体の病原性・毒性・伝播性・空気中での感染性の維持可能性などの特徴、感染予防策・治療法・曝露後予防の有無や有効性、さらに、病原体の標的細胞が存在する部位にも左右される（表 2）。

6. 空気を介した感染経路の考え方

1) COVID-19 流行前までの考え方

COVID-19 の流行以前までは、主要な感染対策ガイドラインにおいて、ヒト・ヒト感染する病原体の感染経路

表2 空気中の微粒子を介した感染リスクに影響を与える要因

項目	要因
病原体	構造, 感染部位, 感染価, 伝播性, 空気中における感染性の維持
微粒子	粒径, 産生量, 排出速度, 濃度, 水分量, 微生物量
環境	重力, 紫外線, 換気, 気流 (方向・速度), 温度, 湿度, 占有人数
感染源	感染巣, 微生物量, 排出様式 (声の大きさ, 咳・くしゃみ)
接触状況	感染源からの距離, 曝露時間
事前確立	流行状況
宿主	個人防護具の有無・種類・使用方法, 免疫能, 感染歴, 予防接種歴, 年齢, 性別, 基礎疾患, 1 回換気量・呼吸回数

引用文献 1), 6) -8) をもとに筆者作成

は、接触感染、飛沫感染、空気感染の3つに分類されていた¹²⁾。このうち、飛沫感染と空気感染は、いずれも空気を介した感染経路であるが、それぞれが明確に区別されていた。すなわち、飛沫感染は、空気中に放出される飛沫による粘膜汚染であり、発生源から概ね3 m以内の距離で起こりやすいと定義されていた。また、飛沫感染で広がる感染症には、インフルエンザやマイコプラズマ肺炎に代表される呼吸器感染症の多くが含まれていた。一方、空気感染は空気中を浮遊する粒径5 μm 以下の微粒子の吸入によって成立する感染経路と定義され、空気感染する感染症は、結核、麻疹、水痘にほぼ限定されていた。実際には、感染性微粒子の粒径や発生源からの到達距離には連続性があり、飛沫感染を主要な感染経路とする感染症のなかには、空気を介した感染を起こし得ることが指摘されているものが含まれていた。このため、粒径5 μm や距離3 mといった画一的な基準値に基づいて飛沫感染と空気感染を厳密に区別することは、感染性微粒子による感染のリスクを制御するうえで不適切ではないかという指摘は以前から存在していた¹³⁾。

2) COVID-19 流行開始以降の考え方

2020年にCOVID-19パンデミックが発生すると、換気の不十分な空間において、感染源から離れた場所にいた人が感染する事例が国内外より多数報告されるようになった。例えば、パンデミック初期には、換気の行われていないレストランにおいて、初発例から離れたテーブルにいた複数の利用客が感染した事例が報告されている¹⁴⁾。初発例の頭上を通るエアコンの気流に沿って感染例が発生したことから、気流で拡散した感染性エアロゾルの吸入による集団感染が起きたと考えられた。同様の事例は、コーラス練習会場、ジム、カフェなどでも発生している^{15~17)}。一方で、麻疹や結核のように、感染性を保ったエアロゾルが空気中に長時間・長距離にわたって浮遊し、広範囲に感染のリスクが生じる従来の空気感染は、COVID-19では起こりにくいとされている。たとえば麻疹や結核では、感染者が退出した後の待合室や教室に入室した人が感染する事例があるが、COVID-19では

このような事象はほとんど観察されていない^{18,19)}。

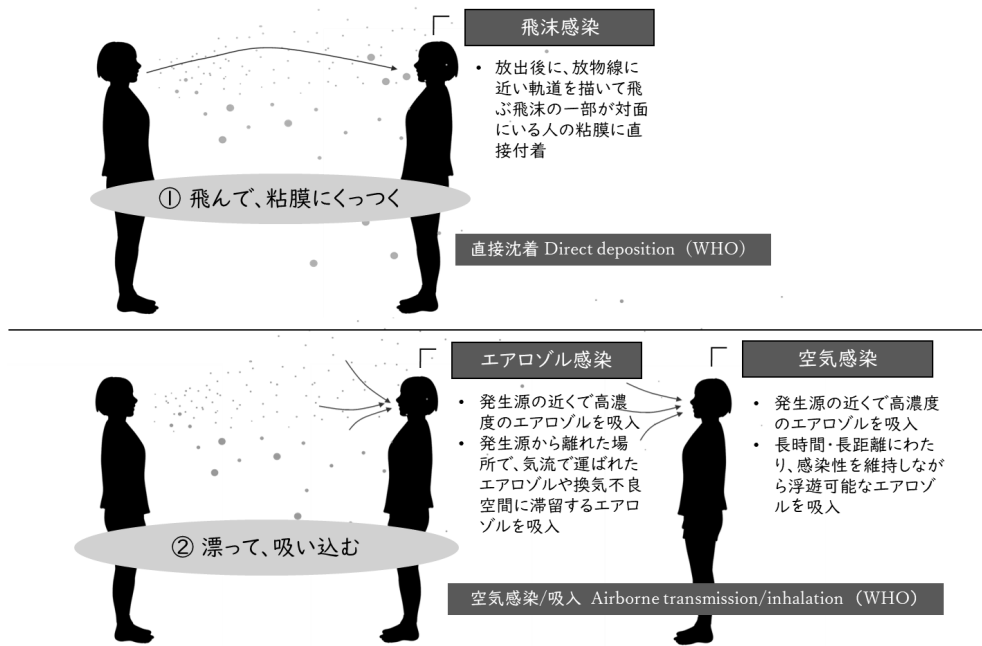
こうした背景から、日本国内では、COVID-19においてみられるエアロゾルを介した感染経路を「エアロゾル感染」と呼び、麻疹や結核でみられる「空気感染」とは区別する考え方が、次第に定着しつつある³⁾。「飛沫感染」については、従来通りの名称および概念が踏襲されている。一方、世界保健機関 (World Health Organization, WHO) は、飛沫やエアロゾルを介する感染経路を一括して「空気感染/吸入 (Airborne transmission/inhalation)」と定義し、従来の「飛沫感染」は「直接沈着 (Direct deposition)」と呼ぶことを提案している。さらに、これらを包括する概念として、「空気を介した感染 (Through the air transmission)」という用語を推奨している¹⁾ (図2)。

7. 空気を介した感染予防の考え方

空気を介した感染対策の基本となるのは、以下を含む標準予防策である¹²⁾。

- ・医療従事者が飛沫を浴びる可能性がある場合には、事前にサージカルマスクおよび目の防護具を着用すること
 - ・咳やくしゃみをする際には咳エチケットを実施すること
 - ・呼吸器感染症の流行期にはユニバーサル・マス킹を行うこと
 - ・推奨されるタイミングと手順で手指衛生を行うこと
- これらの対策は、感染の疑いや診断の有無にかかわらず、日常的に実践することが勧められる。また、普段から良好な換気を維持することも重要である。

空気を介して伝播する感染が疑われる患者には、感染経路に応じて、飛沫感染予防策、エアロゾル感染予防策、空気感染予防策のいずれかを標準予防策に追加して実施する。飛沫感染を主要な感染経路とする呼吸器感染症には、インフルエンザのようにエアロゾル感染を起こす可能性があるものが含まれる。こうした感染症には、COVID-19と同様に、標準予防策に飛沫感染予防策およ



引用文献 6) をもとに筆者作成
図 2 空気中の微粒子を介した感染経路の考え方

表 3 エアロゾル産生手技

エアロゾル産生手技に含めるのが適当と考えられる手技	除外しても差し支えないと考えられる手技	結論が出ていない手技
・気管切開術・チューブ交換 ・気管支鏡検査（覚醒下※） ・上部消化管内視鏡検査（覚醒下※） ・気道/副鼻腔の手術・解剖 ・耳鼻咽喉科的気道処置（気道吸引含む）※ ・喀痰誘発 ・開放式気管吸引 ・胸骨圧迫 ・歯科処置（高速器械使用）	・気管挿管・抜管（鎮静下） ・非侵襲的換気療法（NIV） ・高流量式鼻カニュラ酸素療法（HFNO） ・声門上エアウェイ（SGA）の挿入・抜去 ・胸腔穿刺・ドレナージ ・スパイロメトリー ・用手換気	・高頻度振動換気療法（HFOV） ・ネブライザー療法

引用文献 21) をもとに筆者作成
※意識下鎮静法（conscious sedation）を含む
NIV：Non-invasive ventilation HFNO：High flow nasal oxygen SGA：supraglottic airway
HFOV：High frequency oscillatory ventilation

びエアロゾル感染予防策を追加することが望ましい。
エアロゾル感染予防策において、医療従事者による N95 マスクの着用は必須ではなく、多くの場面ではサージカルマスクで十分とされる。ただし、エアロゾル産生手技を行う場合や、呼吸器症状のある患者の近くで長時間作業する場合のように、エアロゾル曝露量が多いと予想される状況では、N95 マスクの使用を検討する²⁰⁾ (表 3)。患者については、個室管理またはコホーティングを行う。陰圧空調は必須ではないが、エアロゾル産生量が多いと判断する場合は、空気清浄機や簡易陰圧装置を用いて、空間中のエアロゾル濃度を下げることが検討する。

一方で、結核、麻疹、水痘のように空気感染で広がる感染症については、医療従事者は N95 マスクを着用し、患者は陰圧空調を有する病室に隔離する (図 3)。

8. おわりに
本稿で取り上げた空気を介した感染に関する用語やその定義は、いずれも暫定的なものであり、各専門機関において、引き続き整理と検討が進められている段階にある。中でも、感染経路の分類、それぞれに該当する感染症、ならびに具体的な感染予防策の在り方については、現在改訂作業が進められている米国疾病対策センター (Centers for Disease Control and Prevention, CDC) の

エアロゾル感染予防策 ポイント: エアロゾルの拡散・滞留・吸入を防ぐ 対策: 1. 職員はサージカルマスク (エアロゾル産生量が多い場合はN95マスクを検討) 2. 患者は個室またはコホーティング 3. 陰圧室は必須ではない (エアロゾル産生量が多い場合は空気清浄機や簡易陰圧装置の設置を検討)			
疑い例・確定例に追加する対策	飛沫感染予防策 ポイント: 飛沫の放出と粘膜曝露を防ぐ 対策: 1. 職員はサージカルマスク 2. 患者は個室またはコホーティング	飛沫感染予防策 ポイント: 飛沫の放出と粘膜曝露を防ぐ 対策: 1. 職員はサージカルマスク 2. 患者は個室またはコホーティング	空気感染予防策 ポイント: エアロゾルの拡散・滞留・吸入を防ぐ 対策: 1. 職員はN95マスク 2. 患者は陰圧隔離
	流行期のユニバーサルマスクング	流行期のユニバーサルマスクング	流行期のユニバーサルマスクング
	標準予防策 (咳エチケット含む)	標準予防策 (咳エチケット含む)	標準予防策 (咳エチケット含む)
平時の対策	換気の評価と改善	換気の評価と改善	換気の評価と改善
感染経路と疾患例	飛沫感染 例: インフルエンザ、COVID-19	エアロゾル感染 例: COVID-19、インフルエンザ	空気感染 例: 麻疹、水痘、肺結核

筆者作成

図3 空気中の微粒子を介した感染予防策

隔離予防策ガイドラインにおいて、今後明確に示されることが期待される²⁾。空気を介した感染予防策に関する知見や推奨は日々更新されており、医療現場における患者対応にあたっては、常に最新のガイドラインや指針を確認のうえ、適切に対応することが求められる。

利益相反自己申告：申告すべきものなし。

文 献

- World Health Organization: Global technical consultation report on proposed terminology for pathogens that transmit through the air, Geneva 2024: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/emergencies/global-technical-consultation-report-on-proposed-terminology-for-pathogens-that-transmit-through-the-air.pdf>. accessed April 15, 2025.
- Centers for Disease Control and Prevention: Draft 2024 guideline to prevent transmission of pathogens in health-care settings: <https://www.cdc.gov/hicpac/media/pdfs/DRAFT-2024-Guideline-to-Prevent-Transmission-of-Pathogens-2023-10-23-508.pdf>. accessed April 15, 2025.
- 日本環境感染学会：医療機関における新型コロナウイルス感染症への対応ガイド（第5版）2023年1月17日：http://www.kankyokansen.org/uploads/uploads/files/jsipc/COVID-19_taioguide5.pdf：2025年4月15日現在。
- European Centre for Disease Prevention and Control: Factsheet for health professionals on COVID-19: <https://www.ecdc.europa.eu/en/infectious-disease-topics/z-disease-list/covid-19/factsheet-covid-19#transmission-of-covid-19>. accessed April 15, 2025.
- 日本エアロゾル学会：エアロゾルとは：https://www.jaast.jp/new/about_aerosol.html：2025年4月15日現在。
- Wei J, Li Y: Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *Am J Infect Control* 2016; 44: S102-8.
- Morawska L, Buonanno G, Mikszewski A, Stabile L: The physics of respiratory particle generation, fate in the air, and inhalation. *Nat Rev Phys* 2022; 4: 723-34.
- Bourouiba L: Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA* 2020; 323: 1837-8.
- Fennelly KP: Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med* 2020; 8: 914-24.
- Milton DK: A Rosetta Stone for Understanding Infectious Drops and Aerosols. *J Pediatric Infect Dis Soc* 2020; 9: 413-5.
- Lindsley WG, Blachere FM, Thewlis RE, Vishnu A, Davis KA, Cao G, *et al.*: Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs. *PLoS One* 2010; 5: e15100.
- Centers for Disease Control and Prevention: Guideline for isolation precautions: preventing transmission of infectious agents in healthcare settings (2007): <https://www.cdc.gov/infection-control/hcp/isolation-precautions/index.html>. accessed April 15, 2025.
- Wang CC, Prather KA, Sznitman J, Jimenez JL, Lakdawala SS, Tufekci Z, *et al.*: Airborne transmission of respiratory viruses. *Science* 2021; 373: .
- Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Cheng P, Ling H, *et al.*: Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Build Environ* 2021; 196: 107788.
- Groves LM, Usagawa L, Elm J, Low E, Manuzak A, Quint J, *et al.*: Community transmission of SARS-CoV-2 at three fitness facilities — Hawaii, June-July 2020. *Morb Mortal Wkly Rep* 2021; 70: 316-20.
- Hamner L, Dubbel P, Capron I, Ross A, Jordan A, Lee J, *et al.*: High SARS-CoV-2 attack rate following exposure at a choir practice — Skagit County, Washington, March 2020. *Morb Mortal Wkly Rep* 2020; 69: 606-10.
- KDI School of Public Policy and Management: The up-

- dates on COVID-19 in Korea as of August 26 from KCDC: https://www.kdischool.ac.kr/board.es?mid=a10604000000&bid=0041&act=view&list_no=7509&tag=&nPage=87. accessed April 15, 2025.
- 18) Bloch AB, Orenstein WA, Ewing WM, Spain WH, Mallison GF, Herrmann KL, *et al.*: Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics* 1985; 75: 676-83.
- 19) 豊田 誠: 中学校結核集団感染の環境要因に関する検討. 結核 2003; 78(12): 733-8.
- 20) National Health Service: A rapid review of aerosol generating procedures (AGPs) 9 June 2022: https://www.england.nhs.uk/wp-content/uploads/2022/04/C1632_rapid-review-of-aerosol-generating-procedures.pdf. accessed April 15, 2025.
- 〔連絡先: 〒174-0051 東京都板橋区小豆沢 2-12-7
板橋中央総合病院 坂本史衣
E-mail: sakamotofumiehaiprevention@gmail.com〕

Understanding Air-Mediated Infection Routes and Control Measures

Fumie SAKAMOTO

Itabashi Chuo Medical Center

Abstract

The COVID-19 pandemic has highlighted the importance of air-mediated transmission pathways and corresponding infection control measures. This article reviews the mechanisms of aerosol particle generation from the human body, their behavior in the atmosphere, and associated inhalation risks. It also explores the evolving understanding of airborne transmission routes based on recent scientific findings. In terms of infection control, the article emphasizes the importance of standard precautions while discussing the appropriate selection of mask types and the use of negative-pressure isolation, depending on the transmission mode. As scientific knowledge continues to advance, future expert guidelines are anticipated to provide more definite recommendations for understanding and preventing airborne transmission risks. In clinical settings, staying informed and implementing appropriate protective measures remain essential for effective infection prevention.

Key words: aerosol, mode of transmission, air