

〔特集〕

感染症拡大防止対策としてのマスク

慶應義塾大学 理工学部

奥田 知明*

Wearing Face Masks as a Measure against Spreading Infectious Disease

*Tomoaki Okuda, Faculty of Science and Technology, Keio University

*E-mail : okuda@aplc.keio.ac.jp

1 はじめに

新型コロナウイルス (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, SARS-CoV-2) による感染症 (COVID-19) は、本稿執筆時点の 2021 年 4 月においてなお世界中で流行が続いている。SARS-CoV-2 の主要な感染経路は、contact transmission (接触感染) と droplet transmission (飛沫感染)、および airborne transmission (空気感染・飛沫核感染・エアロゾル感染) であると考えられている¹⁻³⁾。具体的な経路は、接触感染は感染者と直接的に接触する経路の他に、飛沫落下などによりウイルスが付着した食卓やスマートフォンなどの環境表面を介して間接的に接触移行する経路が考えられる。飛沫感染は、感染者の口から放出されたウイルスを含む飛沫を非感染者が直接吸引するか、その飛沫が直接もしくは間接的に目鼻口などの粘膜に付着する経路である。飛沫核感染は、SARS-CoV-2 ウイルスが付着した粒子が空気中を浮遊しながら移動し、それを非感染者が吸引することで感染が成立する経路である。いずれの場合にも、飛沫あるいは飛沫核が感染者の口から放出される過程を経ているため、口元を覆うマスクは感染症対策として有効であることが考えられる。COVID-19 流行前においては感染症拡大防止対策としてのマスクの有用性は必ずしも明らかではなかったが、2020 年以降では特に COVID-19 に関連して、マスクの有用性を示す科学的知見が多く報告されている⁴⁾。米国疾病予防管理センター (CDC) の website⁵⁾ にはマスクの効果に関する数多くの科学的報告がまとめられているため、最新の知見はこれらの文献をご参照いただきたい。ただし CDC の見解については、最新のものは上述の通りであるものの、2020 年 3 月以前にはマスク着用の有用性については必ずしも肯定的ではなかった。一方筆者は、2020 年 3 月上旬より、マスクまたは代替的な素材により口元を覆うことの有用性について YouTube を用いて発信していた⁶⁾。本稿では、感染症拡

大防止に資する筆者の取り組みを紹介する。

2 ウイルスを含み得る粒子としての飛沫の考察

SARS-CoV-2 は、ウイルスそのものの粒子サイズとしては 50~200 nm 程度であることが知られている^{7,8)}。しかしながら、このウイルスが単独で空気中を浮遊していることはあまり考えられない。一般に、人の口から放出されるウイルスは、水分やタンパク質などといった体内組織表層に存在する成分と共に放出されると考えられるためである。人の口から放出される粒子の粒径分布は、個数濃度としては 1~2 μm と 100~200 μm 程度にピークを示し、0.5 μm 以下の粒子は個数濃度としても体積濃度としてもその割合は小さい、という報告がある⁹⁾。この場合、個数濃度を考えた場合は 5 μm 以下の粒子が大半を占めるが、体積濃度を考えた場合は 20 μm 以上の粒子による寄与が支配的である。ここで空気中での粒子の挙動を考えると、それは 5 μm といったある特定の粒径を境に不連続的に変化するものではなく連続的な現象ではあるものの、例えば 20°C、1 気圧で密度 1 g/cm³ の球の重力沈降速度は、粒径 5 μm で約 0.8 mm/s であるが、粒径 20 μm で約 12 mm/s であり、人間の生活環境スケールにおいて両者には明確な違いがある。屋内外の粒子計測を多数実施してきた筆者の経験からも、粒径 1~5 μm 程度の粒子は類似の挙動を示す場合が多いが、粒径 5 μm 以下の粒子と 10 μm 以上の粒子では明確に挙動が異なる場合が大半である。つまり、粒子中のウイルス存在量を考える場合、空気中を長時間浮遊する可能性のある 5 μm 以下の粒子と比較して、発生者の近傍にすぐ落下するような 20 μm 程度やそれ以上の飛沫の方が重要であり、これは飛沫を避ける行為、いわゆるソーシャルディスタンスが有効であることに繋がる。

空間中の湿度はエアロゾル粒子の粒径に影響するが、純粋な水滴ではなく何らかの溶質もしくは懸濁物を質量

比で数%含んでいるような一般的な含水粒子では、湿度が低いからといって $100\ \mu\text{m}$ 以上の粒子が $1\ \mu\text{m}$ よりも小さい粒子になることは起こらないし、逆に、湿度が高いからといって粒径が無限に大きくなっていくこともない。例えば物質の密度を全て $1\ \text{g/cm}^3$ と仮定して理論的に粒子の乾燥を考えた場合に、質量比で 1~5%の溶質を含んだ $100\ \mu\text{m}$ の粒子が完全に乾燥したとしてもその粒径は $22\sim 37\ \mu\text{m}$ にとどまる¹⁰⁾。別の研究では、相対湿度 10~90%の範囲で、水分を含んだ粒子の粒径は放出後に元の粒径の 40%~50%になると計算されている¹¹⁾。

上記より、感染症拡大防止対策としてのマスクの機能を考えるとき、まずは数十 μm 以上といった比較的大きめの飛沫の飛散をまずは防止することが重要である。この観点から、不織布マスクや高性能ないわゆる N95 マスク等でなく綿等の衣服の素材で作成した手作りマスクであっても、 $100\ \mu\text{m}$ 以上の大きな粒子の飛散を抑制する効果が高いことが報告されている¹²⁾。さらには、実際の SARS-CoV-2 ウイルスを用いた実験により、N95 マスク、不織布マスク、布マスクのいずれも、それぞれ程度に差はあるもののウイルスの伝播を抑制する効果が示されている¹³⁾。ここまでで紹介してきた疫学のおよびエアロゾル工学的な知見から、マスクの着用は SARS-CoV-2 の感染拡大を抑制する効果があると考えerことは妥当である。

3 微粒子可視化技術を用いたマスク効果の可視化

リスクコミュニケーションのためには科学的根拠を可能な限り多くの人に伝えるための工夫が重要である。飛沫や飛沫核などの微小な粒子は肉眼でとらえることが困難であるため、その粒子を可視化することによってマスク着用の効果を「見える化」した例を紹介する。

約 $5\ \text{m}^3$ の簡易ブースに空気清浄機を設置し、ISO class 7 相当の清浄度とした空間内において、防護服を着用した人間が異なるマスクを着用し、音声を発した際に飛散する飛沫の様子を高感度カメラにより検出した (Fig. 1)。微粒子可視化システムはカトウ光研 Particle Viewer PV2-L を使用し、光源には LED を用いた。

まずマスクをしない状態で、発する言葉の違いによる飛沫の発生挙動を観察した。「あいうえお」「さしすせそ」「ぱびぷぺぽ」と発声したところ、飛沫の飛散量は、「ぱ行」>「さ行」>「あ行」であった。「あ行」つまり母音のみの場合はほとんど飛沫の発生が見られなかった。次に、同じ発声 (今回は「び」とした) をした際に、マスクの有無およびマスクの種類により飛沫の飛散挙動がどのように異なるのかを観察した。その結果、マスクなしと比較すればどの種類のマスクでも飛沫の飛散を防止する効果が見られたが、特に不織布マスクが最も良い結果となった。

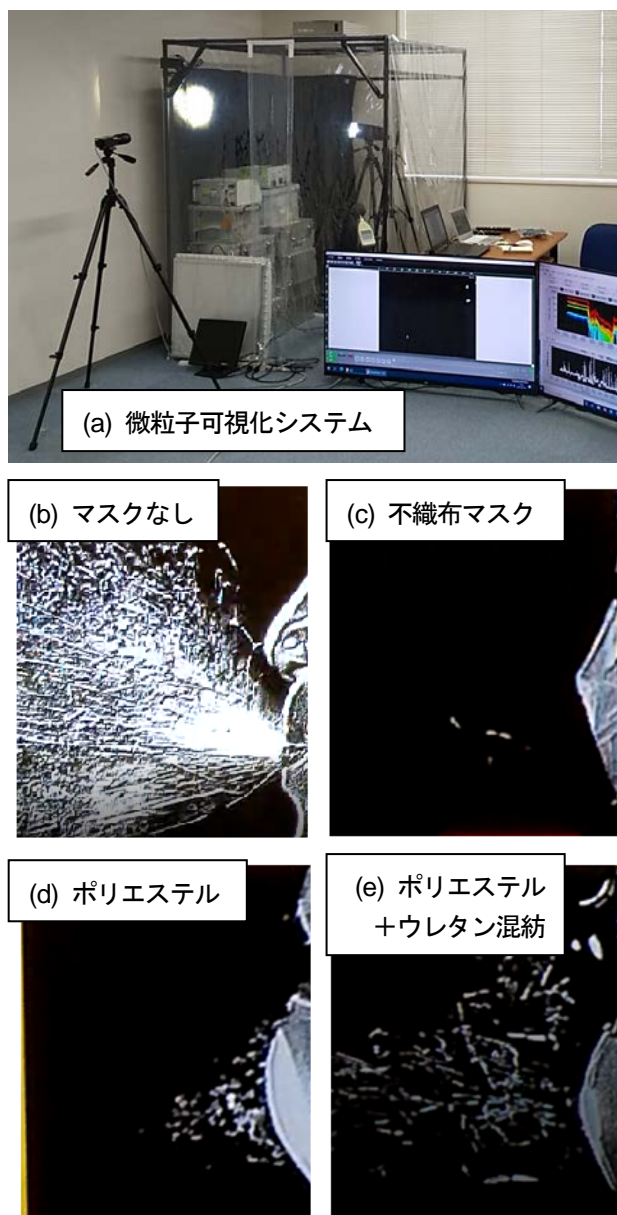


Fig. 1 微粒子可視化システムによるマスク効果の可視化事例. (b)~(e)は同じ音声を発している

また別の事例として、オペラ歌手の歌唱による飛沫の飛散挙動の可視化も行った¹⁴⁾。この場合は、発声する言語や歌い方によっても飛沫の発生挙動は異なり、先ほどと同様に母音のみの場合は飛沫はほとんど観察されず、例えばイタリア語で破裂音が多い曲では多くの飛沫の放出が見られた (Fig. 2)。この時は、並行して 10 種類の管楽器 (測定順に、オーボエ、トランペット、ホルン、チューバ、トロンボーン、フルート、ピッコロ、ファゴット、クラリネット、バスクラリネット) から放出される粒子を観察した。観察領域を楽器や口元に極めて接近させた際にわずかに粒子が見られ、またマウスピースのみを吹いた場合には計測可能な数の粒子が発生したが、男性歌手よりも粒子を発生する楽器は一つもなかった。

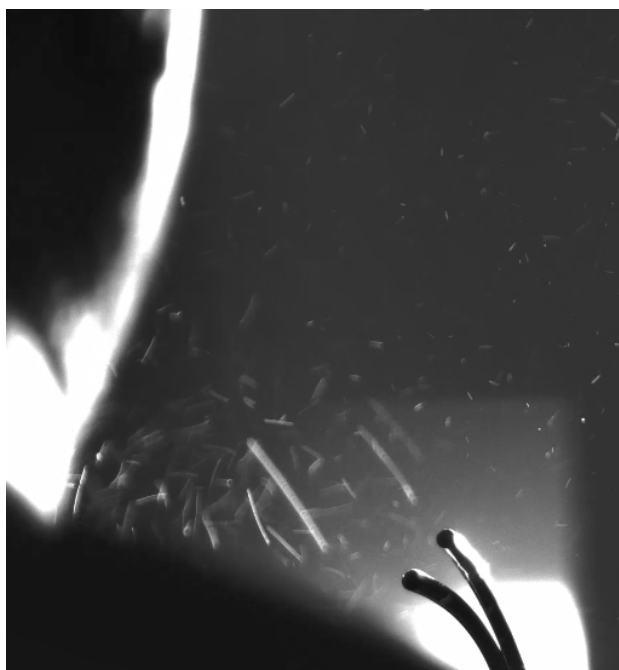


Fig. 2 オペラ歌手の歌唱時の飛沫可視化事例。口元直下にすぐ落ちる飛沫と、顔の前に浮遊する飛沫核が見える

4 マスク代替素材としてのペーパータオルの活用

本稿執筆時点においてはマスクは市場に広く流通しているが、1年前の2020年2~3月頃にはマスクの入手が非常に困難であったことは記憶に新しい。本稿ではマスクの代替素材としてペーパータオル（キッチンペーパー）を重ねて使用した際の粒子の捕集効率と通気抵抗すなわち息の吸いやすさについての実験結果を紹介する。

実験条件は以下の通りとした。光散乱式粒子計数器（OPC, RION KC-01E, 流量 0.5 L/min, 粒径 0.3~10 μm, 20 sec count), 流量制御用ミニポンプ（日東工器 VP0125, 到達真空度 -33.3 kPa, 吐出空気量 7 L/min), マスフローコントローラー（KOFLOC 8500MC, 流量 0.5 L/min at 20°C 1 atm), マスフローメーター: Bronkhost Mass-Stream (流量 20 L/min), 差圧計（山本電機製作所 Manostar WO81FN50DH, 最大差圧 50 Pa), 温湿度計（T&D TR-72wb), フィルターホルダー（東京ダイレック MCI ホルダー, フィルター径 47 mm, 有効径 40.5 mm), 自作 1 cm×1 cm ガイド（シリコンシート 2 mm）を Fig. 3 に示す通りセッティングした。導入粒子は実験室内空気中粒子を用いた。通気線速度は、低速時 0.65 cm/s, 高速時（自作ガイド使用時）8.33 cm/s であった。ペーパータオルはエリエール超吸収キッチンタオル（50 カット 4 ロール, パルプ 100%）を用いた。

結果を Fig. 4 に示す。横軸は単位線速度あたりの通気抵抗を示し、この値が小さいほどフィルター素材を通し

て息が吸いやすいことを意味する。また縦軸は粒子捕集効率を示す。つまり、この図においてプロットが左上にくるほど、呼吸がしやすかつ粒子捕集効率も高い、つまりマスクとしての性能が高いことを意味する。ペーパータオルを重ねるにつれて、粒子捕集効率は上がるが、同時に通気抵抗も上がってゆくことが明確に示された。

ここで複数の市販の不織布マスクを同じ実験系で評価すると、そのほとんどにおいて粒子捕集効率は90%以上かつ通気抵抗が 10 Pa・s/cm 以下であった。これは Fig. 4 のグラフ平面における最も左上の領域となる。すなわち、ペーパータオルを重ねて行くと不織布マスクと同程度の粒子捕集効率を得ることは可能であるものの、通気抵抗が著しく高くなってしまふ。ただし、息苦しさを許容できるのであれば、ペーパータオルを複数枚重ねてマスクの代替とすることはある程度現実的である。また、ポリエステル100%やウレタン100%のマスクを同じ実験系で評価したところ、通気抵抗は小さかったものの粒子捕集効率は 0~40%程度となったため、それらの素材よりはペーパータオルの方が粒子捕集効率は高いようである。

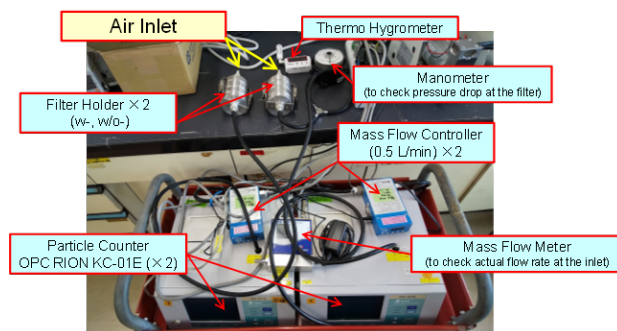


Fig. 3 ペーパータオルの粒子捕集効率測定の実験系

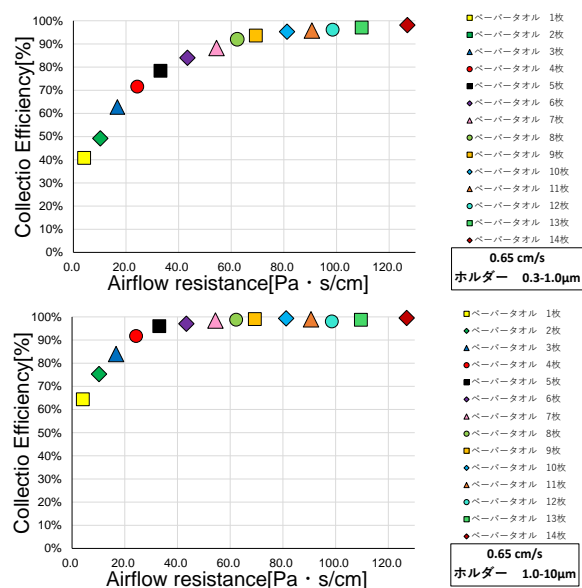


Fig. 4 ペーパータオルの粒子捕集効率測定結果

5 おわりに

本稿に記した内容は、必ずしも筆者が専門とする調査研究内容ではなく、むしろ素人が自己流で実施したものであり、その妥当性や正確性は必ずしも担保できない面が多々ある。しかしながら、COVID-19 はそれ自体が新規の事象であり、その「専門家」がどこかに元々いたわけではない。一般の人々が把握しづらい飛沫の挙動等に対して可能な限り実験的・定量的なアプローチを行って現状を把握し、個々の状況に合わせて合理的な対応を行っていくという姿勢を研究者として示すことが極めて重要であると考えます。

謝辞：今回の計測の一部は、慶應義塾大学新川崎先端研究教育連携スクエア・超実践型人間環境化学社会実装プロジェクト、および慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート・KGRI 新型コロナウイルス危機研究：実践的メドテックデザインプロジェクト～緊急対応からの学びとポストコロナ時代の活動の一環として実施された。また、有志研究チーム MARCO (Mass gathering Risk Control and Communication) からは多くのご示唆を得た。ご支援とご協力をいただいた全ての関係者の方々に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) WHO (2020) Transmission of SARS-CoV-2: Implications for infection prevention precautions, *Scientific Brief*, 9 July, 2020.
- 2) 横畑綾治, 石田悠記, 西尾正也, 山本哲司, 森卓也, 鈴木不律, 蓮見基充, 岡野哲也, 森本拓也, 藤井健吉 (2020) 接触感染経路のリスク制御に向けた新型コロナウイルス除染機序の科学的基盤—コロナウイルス, インフルエンザウイルスを不活性化する化学物質群のシステムティックレビュー—, *リスク学研究*, **30** (1): 5-28.
- 3) Morawska, L., Milton, D.K. (2020) It is time to address airborne transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19), *Clinical Infectious Disease* **71**, 2311-2313.
- 4) Brooks, J.T., Butler, J.C. (2021) Effectiveness of Mask Wearing to Control Community Spread of SARS-CoV-2, *Journal of American Medical Association*, **325** (10), 998-

- 999.
- 5) CDC (Centers for Disease Control and Prevention) website, *Guidance for Wearing Masks*.
- 6) 奥田知明, YouTube チャンネル.
- 7) Ke, Z., Oton, J., Qu, K. et al. (2020) Structures and distributions of SARS-CoV-2 spike proteins on intact virions. *Nature*.
- 8) Chen, N., Zhou, M., Dong, X. et al. (2020) Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *Lancet* **395**: 507-13.
- 9) Johnson, G.R., Morawska, L., Ristovski, Z.D. et al. (2011) Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, **42**, 839-851.
- 10) 向阪保雄, 野村俊之, 内藤牧男 (2020) 新型コロナウイルス COVID-19 のエアロゾル感染の可能性—微粒子工学の立場からの考察—. *粉体工学会誌*, **57**, 526-529.
- 11) Yang, W., Marr, L.C. (2011) Dynamics of airborne Influenza A viruses indoors and dependence on humidity. *PLoS One* **6** (6): e21481.
- 12) Fischer, E.P., Fischer, M.C., Grass, D. et al. (2020) Low-cost measurement of facemask efficacy for filtering expelled droplets during speech, *Science Advances*.
- 13) Ueki, H., Furusawa, Y., Iwatsuki-Horimoto, K. et al. (2020) Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2. *mSphere* **5**:e00637-20.
- 14) 東京都交響楽団 (2020) 演奏会再開への行程表と指針 (第2版) .

(原稿中リンクは2021年5月22日確認)

(2021年11月3日, 編集委員記)

本記事におきまして、下記の通り記載内容に誤りがございました。

- p.211 右段上から20行目
(誤) 20 μm で約 120mm/s (=12cm/s) であり,
(正) 20 μm で約 12 mm/s であり,