コロナウィルスの感染対策に有用な室内環境に関連する研究事例の紹介

篠原直秀*

国立研究開発法人産業技術総合研究所 〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1

Reference researches on indoor environment valuable for infection control of coronavirus

Naohide SHINOHARA*

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan

要 旨

2020年の春時点で、日本を含む世界中で新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の感染が猛威を振るっており、三密を避けることなど、より一層の感染対策が求められている。本稿では、室内環境における感染対策に関する情報を収集・整理した。感染者が呼吸・会話・咳・くしゃみなどをすると、ウィルスを含む飛沫が環境中に飛散する。会話や咳で飛散する大きな粒子は、多くの場合2 m以内に床面に沈着するが、室内の気流によっては5 m程度飛散することもある。また、飛沫核などの小さな粒子は、沈着せずに数時間もしくはそれ以上室内を漂う可能性がある。室内空気中からウィルスが除去される経路としては、床面や壁面への沈着、換気による屋外への排出、ウィルスの不活化があるが、無風の状態では10 μmを超えるサイズの粒子ではほぼ沈着で除去されるが、数μm以下の粒子では換気と不活化の寄与が大きい。室内を漂うエアロゾル上の新型コロナウイルスの不活化の半減期は1.1時間程度であり、換気回数1回/hの場合よりも減衰への寄与は小さい。日本の一般家屋の日常生活時の換気回数は、春夏で1.2-1.7回/h、秋冬で0.6回/h程度であり、病室などで感染対策として取られる換気回数よりはるかに低い。窓開け換気は室内濃度を低減させるのに非常に有効であるが、屋外の風向や風速によっては十分な換気量が得られないケースもある。空気清浄機については、コロナウィルスについての研究はないが、HEPAフィルター(High Efficiency Particulate Air Filter)を用いた場合には、ウィルスについても一定の効果が認められている。

Key words: 室内環境(indoor environment), コロナウィルス(coronavirus), 粒径分布(size distribution), 飛沫(droplet), 換気(ventilation), 沈着(deposition), 不活化(inactivation)

1. 緒言

2020年の春時点で、世界中で新型コロナウイルスの感染が猛威を振っている。日本国内での感染も感染拡大期に入っており、より一層の感染対策が求められている。室内環境についても、三密(換気の悪い密閉空間、近距離での会話や発声、手の届く距離に大人数)を避けることが推奨され、換気の励行も各所で行われている。この状況の中で、室内環境に関連する既存の研究結果が対策に有用なケースも少なからずあると考えられるため、ウィルスの感染経路、飛沫の大きさと室内での飛散、室内空気中の飛沫核の挙動とウィルスの不活化、室内の換気、室内空気の清浄化、室内における沈着と再飛散に関

して情報を収集・整理した。

2. ウィルスの感染経路

現在感染が拡大しているコロナウィルスなどのウィルスは、接触を介した感染とエアロゾルを介した感染により広がるとされている¹⁾。コロナウィルスの感染経路としても、接触感染とエアロゾルを介した感染が起きていると考えられている²⁻⁶⁾。接触感染は、握手やハグなどで生じる直接接触とドアノブや家電や消費者製品などに触れることにより生じる間接接触によるものに分けられる¹⁾。エアロゾルを介した感染は、咳やくしゃみや発声に伴って排出される飛沫(主に>5 μmの液滴)によるもの(いわゆる飛沫感染)

*Corresponding author (責任著者) E-mail: n-shinohara@aist.go.jp, Tel: 029-861-8030

受付: 2020年4月28日 (Received: 28 April 2020)

受理: 2020年5月25日 (Accepted: 25 May 2020)

とそれらの水分が蒸発して残る飛沫核(<5 μm の粒子)によるもの(いわゆる空気感染)に分けられる¹⁾。本稿では、以下に、飛沫及び飛沫核を介した感染対策に有用だと思われる情報を整理する。

3. 飛沫の大きさと室内での飛散

ウィルス自体の大きさは、30 nm (rhinovirus⁷⁾), 80-120 nm (influenza⁸⁾), 50-200 nm (SARS-CoV-2⁹⁾)などとされているが、それらはさらに大きい飛沫(液滴)の中に含まれて気中に出てくる。話すときや咳をしたときの呼気中の飛沫の大きさは、数百nm-数mmであり、個数濃度としては2 μm 前後と120-150 μm 辺りにピークを持つサイズ分布である¹⁰⁾。咳をした時の液滴を0.35 μm から10 μm まで測定したところ、小さい粒子ほど個数が多く、インフルエンザ患者で咳一回当たり75000個/咳、治癒後は咳一回当たり52000個/咳の粒子が含まれているという報告もある¹¹⁾。病院の飛沫中のコロナウィルスについては、<1 μm のエアロゾルでは検出されず、1-4 μm で>4 μm より大きいもしくは同程度検出されたという報告¹²⁾、<0.25->2.5 μm で検出されたが粒径間に明らかな傾向はないという報告¹³⁾があるが、これらは今のところ査読前原稿であり、また例数も少なく、今後の知見の集積が待たれる。

60 μm を超える大きな飛沫は、通常の呼吸 (<1 m/s)では感染者から50 cm以内、話す場合 (<5 m/s)には1 m以内、咳をする場合 (<10 m/s)には2 m以内、くしゃみをする場合 (20-50 m/s)には3-6 mで、重力沈降で気中からなくなるもしくは水分が蒸発して飛沫核になる¹⁴⁾。これらの研究を元にして、現在多くの国において2 mや6 feet (約1.8 m)のソーシャルディスタンスを取ることが求められている(2014年のWHOのガイドラインでは最低1 mの距離¹⁾)。ただし、換気などの室内の気流条件によっては、通常の呼吸をしているだけでも100 μm の飛沫でもが感染者から5 m程度まで飛散する可能性もある¹⁵⁾。新型コロナウイルスについても、レストランにおいて感染者のテーブルから空調の気流に沿った直線上のテーブルのみで感染が確認されたという報告があり、気流によって飛沫が拡散した可能性も示唆されている¹⁶⁾。

飛沫の水分が蒸発する時間は、0.5-20 μm の粒子では0.8秒¹⁷⁾、50 μm の粒子で2秒、200 μm の粒子でも24秒¹⁴⁾であり、環境中と水分量が平衡となった飛

沫核となる。飛沫の成分となる粘液(mucus)は、水分以外の大部分が糖タンパク質であり、残りがナトリウム、カリウム、塩素、乳酸塩などが含まれている¹⁸⁾。飛沫核の組成は、89%がタンパク質で、10%がNaCl、1%が肺サーファクタントとする報告もある¹⁹⁾。また、蒸発後の飛沫核の大きさ(直径)は湿度によって異なるとされており、飛沫を模したNaCl(塩化ナトリウム)の液滴を用いた実験と糖タンパク質を含んでいた場合の推定結果(NaCl液滴と糖タンパクを含む液滴の場合の違いは4%程度しかない)から、相対湿度50%以下では元の飛沫の大きさの40%程度、相対湿度90%では元の飛沫の大きさの50%程度になる²⁰⁾。これらの飛沫核については、一定時間の間、室内空气中を漂うことになる。

4. 室内空气中での飛沫核の挙動とウィルスの不活化

室内におけるエアロゾル中のウィルスは、換気・沈着・不活化によって、感染に寄与しなくなる²⁰⁾。沈着とは、重力沈降や気流による慣性や拡散などによって、室内の表面に付着して空气中から除かれることを指す。相対湿度50%の条件下の咳をして10分後には、1 μm 、10 μm 、>25 μm のエアロゾル中のインフルエンザウィルスは、重力沈降によっては0.7%、51.2%、98.8%減少し、換気によっては換気回数1回/h及び10回/hの場合でサイズに拠らず15%及び81%減少し、不活化によってはサイズに拠らず15%減少する(それぞれ独立に計算しているため合計は100%を超えていることに注意)²⁰⁾。つまり、大きい粒子は沈着により空气中から除かれるが、小さい粒子では換気により屋外に排出されるか不活化されるのを待つことになる。ただし、空調・換気のあるオフィスなどでは、一部は換気口を経由して屋外に排出されるが、一部は室内に再循環される。エアロゾル中のインフルエンザは湿度が高いほど不活化しやすく、また沈着しにくい。相対湿度90%と相対湿度10%とを比べると、10分、30分、1時間では、失活速度は、1.4倍、2.7倍、7.3倍に、沈着速度は1.7倍、2.0倍、2.2倍になる²⁰⁾。実験室(温度22-23℃、相対湿度40%)で発生させたエアロゾル中の新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の生存半減期の中央値は1.1時間(95%信頼区間は0.6-2.6時間)とされている²¹⁾。コロナウィルスの湿度依存性はよくわかっていないが、インフルエンザと比べて、不活化するのにより長い時間を要する可能性がある。

Fig.1 Size and behavior of droplet

Fig.2 Removal mechanism of virus from indoor environment

5. 室内の換気

日本の住宅は、建築基準法で新築時に0.5回/h以上の機械換気設備の設置が義務付けられている。日常生活を送っている間の換気回数は、春、夏、秋、冬で1.2, 1.7, 0.6, 0.6回/hであり、春や夏で換気回数が高くなっているのは窓開け時間が長いためだとされている²²⁾。海外の調査でも窓開け換気をしている住宅としていない住宅では、3.5回/hと0.8回/h(夏季)及び2.5回/hと0.5回/h(年間)と換気に大きな違いがみられ

る²³⁾。室内で単回のPM_{2.5}発生があった場合には、10分以内の窓開け換気で室内のPM_{2.5}濃度は外気レベル以下に落ちるとされている²⁴⁾。窓を開けている場合でも、外気の風速と風向や窓の形状によって換気回数は0.5回/hから数10回/hと大きく変わりうるものがモデル計算によって報告されており、窓開けをしても換気量が大きく上昇しないこともある²⁵⁾。

MERS患者の病室における感染リスクを評価した研究では、看護師や医療従事者や家族など近くで患

者と接する人の感染リスクは換気回数が6回/hから12回/hに増えても数%しか減らない一方で、同室の離れた場所にいる他の患者のリスクは半分近くまで減少すると推定されている²⁶⁾。

一般住宅で日常生活を送っている時の換気回数では、数 μm 以下の粒子に対しては、数十分～数時間曝露され続けることとなる。このことから、定常的もしくは断続的に発生が想定される場合には、常時窓開けをしておくことが望ましい。ただし、季節や部屋の目的によっては常時の窓開けが困難なケースも考えられる。そのような場合には、一定時間ごとの窓開け換気をすることとなるが、曝露を減らす対策としては不十分な可能性もある。

換気によって屋外に排出された空気中にウィルスが含まれている場合も、多くの場合は外気によって非常に高倍率で希釈されるため、屋外での感染には寄与しないと考えられる。ただし、排気口のすぐそばに喫煙所などの人が集まる場所がある場合や、排気口のすぐそばに吸気口がある場合などには、注意が必要なケースもあるかもしれない。

6. 室内空気清浄化

フィルターによる粒径別粒子の捕集効率は、100 nm前後で非常に低く、数 μm 以上や10 nm以下では非常に高い²⁷⁾。ただし、粒子捕集効率はフィルターによって大きく異なっており、40% ASHRAEフィルター、85% ASHRAEフィルター、標準ファーンエスフィルターの粒子捕集効率は、10 nm以下の粒子では、それぞれ40%-100%、40%-100%、100%、数10 nm-数100 nmの粒子で10%以下、20%以下、40%-80%、数 μm 以上の粒子では80%-100%、100%、100%だったという報告もある²⁷⁾。(ASHRAEは、アメリカ暖房冷凍空調学会のことで、空調システムや換気などに関する各種規格の策定もしている組織。40% ASHRAEフィルター及び85% ASHRAEフィルターは、ASHRAEの標準ダストの平均捕集効率が40%及び85%の紙製プリーツフィルターである。標準ファーンエスフィルターは、厚紙フレーム中に紡糸グラスファイバーを組み込んだフィルターである²⁸⁾)。静電フィルターでは、これらのサブミクロン領域の低捕集効率が改善され、0.03-0.6 μm の粒子の捕集効率は、市販のHEPAフィルターでそれ以上ではほぼ100%(0.03 μm のみ97%程度、放電状態では40%-90%)、作成したCMフィルターで85%以上(放電状態では30%-

80%)、市販のMERV13フィルターで60%以上(放電状態では数%-25%)と向上している²⁹⁾。ちなみに、HEPAフィルターは、JIS(日本工業規格)で粒径0.3 μm の粒子の捕集効率が99.97%以上とされるフィルターである。CMフィルターはこの研究において作成された市販でない複合素材でのフィルターである。MERVは、米国のフィルターの規格(ASHRAE 52.2 (2007))で、MERV 1からMERV 16まであり、MERV 13は0.3-1 μm の粒子の捕集効率が75%以下とされている。MERV16は、0.3-1 μm の粒子の捕集効率が95%以上である。市販の空気清浄機は、数 $\text{m}^3/\text{分}$ から10 $\text{m}^3/\text{分}$ のため、HEPAフィルターが搭載されているものであれば、12畳の部屋で3-15回/h程度の換気に相当する可能性がある。HVACシステムでフィルターを通して空気清浄化を行った場合(循環回数0.8-0.9回/h)、咳を模した装置から発生するウイルス(バクテリオファージ T4)の気中濃度は、0.5 m離れた位置では3種類のどのフィルターでも20%程度しか減少せず、3 m離れた位置では20%-80%、5 m離れた位置では70%-98%、12%-92%とフィルターごとに大きく異なる効率で減少したと報告されている³⁰⁾(HVACシステムは、暖房・換気・エアコンの機能を一体化したシステム)。HEPAフィルターを搭載した大型の空気清浄化システムを使用した場合(51回/h)、ウイルス(バクテリオファージ MS2)を含むエアロゾル発生器から発生させたウイルスはバクテリアやカビよりは除去効率が低いものの、95%が除去されたとする報告もある³¹⁾。ただし、HEPAフィルターも製品によって性能に違いがあり、ウィルスの種類によって効果が小さい場合もありうる。これらのことから、空気清浄機を使用する場合にも、換気との併用が望ましい。また、フィルターの取り換え時の曝露が懸念されるため、フィルターの交換は手袋やマスクをした上で、屋外において行うべきだと思われる。

7. 室内における沈着と再飛散

大きな粒子では重力沈降により床面に沈着したり移流により壁面に沈着したりすることが多く、小さな粒子では拡散により床面だけでなく天井や壁面や家具などの表面に沈着することが多い。100 μm 、10 μm 、0.1 μm の粒子の床面に沈着する割合は43%-79%、0.6%-18%、2.5%-18%、壁面に沈着する割合は8.7%-47%、51%-86%、51%-89%とする研究もある¹⁵⁾。

ウィルス(バクテリオファージ T4)の床面への沈着は、大きな大腸菌のケースと違い、咳をした近く(0.5 m)では少なく、3 m離れた位置で高く、5 m離れた地点でも0.5 mの地点より高いという報告がある³⁰⁾。大きい飛沫は重力沈降により数秒から15秒程度で床面に沈着する¹⁴⁾。ちなみに、温度21-23℃相対湿度40%の実験室で行った実験では、銅、段ボール紙、ステンレス鋼、プラスチックの表面における新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の生存半減期の中央値は、0.77時間、3.5時間、5.6時間、6.8時間である²¹⁾。他にも、温度22℃相対湿度65%の実験室において、新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)を含む液を表面に滴下したところ、印刷用紙とティッシュペーパーでは3時間後まで、木材や布は2日後まで、ガラスや紙幣は4日後まで、ステンレス鋼やプラスチックは7日後まで活性を有していた(初期値の~0.1%)とする報告もある³²⁾。ただし、これらは実験室内でコントロールされた条件下の試験であり、実環境中では温度・湿度・紫外線の影響をウィルスが受けることや、ウィルスの活性を調べているがヒトへ感染するかどうかを調べている試験ではない。新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の患者の病室において、ドアノブやベッドレールなどの手の触れるところだけでなく、床や窓や排気ファンなど沈着したと考えられる箇所からもウィルスが検出されている^{5,12)}。室内の床面や各種表面に沈着したウィルスからの接触感染の可能性もあるため、床面やテーブル等の表面について殺菌を定期的に行うことが必要と考えられる。

室内の床面上のダストは、歩行やドアの開閉や掃除などの人の活動によって再飛散(巻き上げられること)が起こる³³⁾。ダストのサイズ・性状や床面の材質や環境条件によって、再飛散率は大きく異なるが、金属粒子などのダストの再飛散率は0.000001%-0.1%、カビやバクテリアなどの再飛散率は0.0001%-0.1%とされている³³⁾。ウィルス(バクテリオファージ T4)を用いた試験では、ウィルスが検出された床上を歩いた時の気中のウィルス濃度は検出下限以下だったとされている³⁰⁾。

8. 結言

感染者が呼吸・会話・咳・くしゃみなどをすると、ウィルスを含む飛沫が環境中に飛散する。会話や咳で飛散する大きな粒子は、多くの場合2 m以内に床

面に沈着するが、室内の気流によっては5 m程度飛散することもある。また、飛沫核などの小さな粒子は、沈着せずに数時間もしくはそれ以上室内を漂う可能性がある。室内空気中からウィルスが除去される経路としては、床面や壁面への沈着、換気による屋外への排出、ウィルスの不活化があるが、10 μmを超えるサイズの粒子ではほぼ沈着で除去されるが、数μm以下の粒子では換気と不活化の寄与が大きい。室内を漂うエアロゾル上の新型コロナウイルスの不活化の半減期は1.1時間程度であり、換気回数1回/hで減らせるエアロゾル量よりも小さい。日本の一般家屋の日常生活時の換気回数は、春夏で1.2-1.7回/h、秋冬で0.6回/h程度であり、病室などで感染対策として取られる換気回数よりはるかに低い。窓開け換気は室内濃度を低減させるのに非常に有効であるが、屋外の風向や風速によっては十分な換気量が得られないケースもある。空気清浄機については、コロナウィルスについての研究はないが、ウィルスについても一定の効果が認められているため、有用である可能性はあるが、換気との併用が推奨される。マスクについては、別の機会に整理したいが、感染者からの感染リスクの低減効果は大きい。

※ WHOにおける用語の定義¹⁾

- 接触感染(contact transmission)
直接接触(direct contact)と間接接触(indirect contact)による感染(transmission)
- 飛沫感染(droplet transmission)
主に<1 mの距離で生じる飛沫(droplet)による感染
- 空気感染(airborne transmission)
飛沫核(droplet nuclei)の飛散・吸入による感染
- 飛沫(droplet)
5 μmより大きい吸入性エアロゾル
- 飛沫核(droplet nuclei)
5 μmより小さい吸入性エアロゾルで飛沫が乾燥した吸入性エアロゾル残渣(residue of dried respiratory aerosols)
- 感染性吸入性エアロゾル(infectious respiratory aerosols)
吸入可能なサイズの感染性の飛沫と飛沫核

謝辞

本稿は、室内環境学会ホームページにおいて公開

した情報を改変したものである。公開に先駆けては、室内環境学会学術委員会や理事会からのコメントに従って修正した。学術委員会の川上裕司先生(株式会社エフシー総合研究所)、清水一男先生(静岡大学)、池田四郎先生(株式会社ガステック)、野崎淳夫先生(東北文化学園大学大学院)、中島大介先生(国立研究開発法人国立環境研究所)、北條祥子先生(東北大学大学院歯学研究科)、水越厚史先生(近畿大学医学部)、徳村雅弘先生(静岡県立大学)、高木麻衣先生(国立研究開発法人国立環境研究所)、理事会の関根嘉香先生(東海大学)、山口一先生(大同大学)、鍵直樹先生(東京工業大学)、三宅祐一先生(静岡県立大学)に深く感謝する。

引用文献

- 1) World Health Organization: Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care, Geneva: World Health Organization (2014). https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_eng.pdf?sequence=1
- 2) Chan J. F. W., Yuan S. F., Kok K. H., To K. K. W., Chu H., Yang J., Xing F. F., Liu J. L., Yip C. C. Y., Poon R. W. S., Tsoi H. W., Lo S. K. F., Chan K. H., Poon V. K. M., Chan W. M., Ip J. D., Cheng V. C. C., Chen H. L., Hui C. K. M., Yuen K. Y.: A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster, *Lancet*, 395, 514-523 (2020).
- 3) Li Q., Guan X. H., Wu P., Wang X. Y., Zhou L., Tong Y. Q., Ren R. Q., Leung K. S. M., Lau E. H. Y., Wong J. Y., Xing X. S., Xiang N. J., Wu Y., Li C., Chen Q., Li D., Liu T., Zhao J., Liu M., Tu W. X., Chen C. D., Jin L. M., Yang R., Wang Q., Zhou S. H., Wang R., Liu H., Luo Y. B., Liu Y., Shao G., Li H., Tao Z. F., Yang Y., Deng Z. Q., Liu B. X., Ma Z. T., Zhang Y. P., Shi G. Q., Lam T. T. Y., Wu J. T., Gao G. F., Cowling B. J., Yang B., Leung G. M., Feng Z. J.: Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia, *The New England Journal of Medicine*, 382, 1199-1207 (2020).
- 4) Huang C. L., Wang Y. M., Li X. W., Ren L. L., Zhao J. P., Hu Y., Zhang L., Fan G. H., Xu J. Y., Gu X. Y., Cheng Z. S., Yu T., Xia J. A., Wei Y., Wu W. J., Xie X. L., Yin W., Li H., Liu M., Xiao Y., Gao H., Guo L., Xie J. G., Wang G. F., Jiang R. M., Gao Z. C., Jin Q., Wang J. W., Cao B.: Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China, *Lancet*, 395, 497-506 (2020).
- 5) Ong S. W. X., Tan Y. K., Chia P. Y., Lee T. H., Ng O. T., Wong M. S. Y., Marimuthu K.: Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient, *JAMA*, E1-E3 (2020).
- 6) World Health Organization: Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) 16-24 February 2020 (2020). <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid-19-final-report.pdf>
- 7) Bella J., Rossmann M. G.: Review: Rhinoviruses and their ICAM receptors, *Journal of Structural Biology*, 128, 69-74 (1999).
- 8) Noda T.: Native morphology of influenza virions. *Frontiers in Microbiology*, 3, 269 (2012).
- 9) Chen N. S., Zhou M., Dong X., Qu J. M., Gong F. Y., Han Y., Qiu Y., Wang J. L., Liu Y., Wei Y., Xia J. A., Yu T., Zhang X. X., Zhang L.: Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study, *Lancet*, 395: 507-513 (2020).
- 10) Johnson G. R., Morawska L., Ristovski Z. D., Hargreaves M., Mengersen K., Chao C. Y. H., Wan M. P., Li Y., Xie X., Katoshevski D., Corbett S.: Modality of human expired aerosol size distributions, *Journal of Aerosol Science*, 42, 839-851 (2011).
- 11) Lindsley W. G., Pearce T. A., Hudnall J. B., Davis K. A., Davis S. M., Fisher M. A., Khakoo R., Palmer J. E., Clark K. E., Celik I., Coffey C. C., Blachere F. M., Beezhold D. H.: Quantity and Size Distribution of Cough-Generated Aerosol Particles Produced by Influenza Patients During and After Illness, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9, 443-449 (2012).

- 12) Chia P. Y., Coleman K. K., Tan Y. K., Wei S., Ong X., Gum M., Lau S. K., Sutjipto S., Lee P. H., Son T. T., Young B. E., Milton D. K., Gray G. C., Schuster S., Barkham T., De P. P., Vasoo S., Chan M., Ang B. S. P., Tan B. H., Leo Y.-S., Ng O.-T., Wong M. S. Y., Marimuthu K.: Detection of Air and Surface Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in Hospital Rooms of Infected Patients, (Preprint from BioRxiv) (2020). <https://doi.org/10.1101/2020.03.29.20046557doi>
- 13) Liu Y., Ning Z., Chen Y., Guo M., Liu Y., Gali N. K., Sun L., Duan Y., Cai J., Westerdahl D., Liu X., Ho K.-F., Kan H., Fu Q., Lan K.: Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak, (Preprint from BioRxiv) (2020). <https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637>
- 14) Xie X., Li Y., Chwan A. T. Y., Ho P. L., Seto W. H.: How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve, *Indoor air*, 17, 211-225 (2007).
- 15) Chen C. and Zhao B.: Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room: answers from numerical investigation, *Indoor Air*, 20, 95-111 (2010).
- 16) Lu J., Gu J., Li K., Xu C., Su W., Lai Z., Zhou D., Yu C., Xu B., Yang Z.: COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020, *Emerging Infectious Diseases*, 26, in print (2020). <https://doi.org/10.3201/eid2607.200764>
- 17) Morawska L., Johnson G. R., Ristovski Z. D., Hargreaves M., Mengersen K., Corbett S., Chao C. Y. H., Li Y., Katoshevski D.: Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities, *Journal of Aerosol Science*, 40, 256-269 (2009).
- 18) Nicas M., Nazaroff W. W., Hubbard A.: Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2, 143-154 (2005).
- 19) Shaughnessy R.: Transmission of Viruses in Droplets and Aerosols, ISIAQ Webinar, April 14, 2020.
- 20) Yang W., Marr L. C.: Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoors and Dependence on Humidity. *PlosOne*, 6, e21481 (2011).
- 21) van Doremalen N, Bushmaker T, Morris D. H., Holbrook M. G., Gamble A., Williamson B. N., Tamin A., Harcourt J. L., Thornburg N. J., Gerber S. I., Lloyd-Smith J. O., de Wit E., Munster V. J.: Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, *The New England Journal of Medicine*, 382, 1564-1567 (2020). <https://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMc2004973>
- 22) Shinohara N., Kataoka T., Takamine K., Gamo M.: Distribution and variability of the 24-h average air exchange rates and interzonal flow rates in 26 Japanese residences over 5 seasons, *Atmospheric Environment*, 45, 3548-3552 (2011).
- 23) Hou J., Zhang Y. F., Sun Y. X., Wang P., Zhang Q. N., Kong X. R., Sundell J.: Air change rates at night in northeast Chinese homes, *Building and Environment*, 132, 273-281 (2018).
- 24) Xiao Y., Wang L. N., Yu M. Z., Liu H., Liu J.: Effects of source emission and window opening on winter indoor particle concentrations in the severe cold region of China, *Building and Environment*, 144, 23-33 (2018).
- 25) Wang J. H., Zhang T. F., Wang S. G., Battaglia F.: Numerical investigation of single-sided natural ventilation driven by buoyancy and wind through variable window configurations, *Energy and Buildings*, 168, 147-164 (2018).
- 26) Adhikari U., Chabrelie A., Weir M., Boehnke K., McKenzie E., Ikner L., Wang M., Wang Q., Young K., Haas C. N., Rose J., Mitchell J.: A Case Study Evaluating the Risk of Infection from Middle Eastern Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) in a Hospital Setting Through Bioaerosols, *Risk Analysis*, 39, 2608-2624 (2019).
- 27) Riley W. J., McKone T. E., Lai A. C. K., Nazaroff W. W.: Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms, *Environmental Science & Technology*, 36, 200-207 (2002).

- 28) Hanley J. T., Ensor D. S., Smith D. D., Sparks L. E.: Fractional Aerosol Filtration Efficiency of In-Duct Ventilation Air Cleaners, *Indoor Air*, 4, 169-178 (1991).
- 29) Li S. H., Chen D. R., Zhou F. B., Chen S. C.: Effects of relative humidity and particle hygroscopicity on the initial efficiency and aging characteristics of electret HVAC filter media, *Building and Environment*, 171, 106669 (2020).
- 30) Kunkel S. A., Azimi P., Zhao H., Stark B. C., Stephens B.: Quantifying the size-resolved dynamics of indoor bioaerosol transport and control, *Indoor Air*, 27, 977-987 (2017).
- 31) Foarde K. K., Hanley J. T., Ensor D. S., Roessler P.: Development of a method for measuring single-pass bioaerosol removal efficiencies of a room air cleaner, *Aerosol Science and Technology*, 30, 223-234 (1999).
- 32) Chin A. W. H., Chu J. T. S., Perera M. R. A., Hui K. P. Y., Yen H.-L., Chan M. C. W., Peiris M., Poon L. L. M.: Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *Lancet microbe*, 1, e10 (2020). [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30003-3](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30003-3)
- 33) Qian J., Peccia J., Ferro A. R.: Walking-induced particle resuspension in indoor environments, *Atmospheric environment*, 89, 464-481 (2014).