

【レビュー】

空調における新型コロナウイルス対策

五味弘

Countermeasures Against COVID-19 with Respect to the Air Conditioning System

Hiroshi Gomi

新型コロナウイルス感染症 COVID-19 が世界に拡散してから約 2 年間が経過し、まだ不明な点が多いながら多くの知見も得られている。その知見を空気調和設備もしくはシステムに関わる視点で整理し、空調におけるコロナ対策として記述する。

1. はじめに

2019 年 12 月に中国湖北省武漢市で原因不明の肺炎患者が確認され、翌 2020 年 1 月 7 日には新種のコロナウイルスと特定され、同月 WHO (World Health Organization: 世界保健機関) が「国際的に懸念される公衆衛生上の緊急事態」と警告してから、このウイルスによる感染症 COVID-19 は瞬く間に全世界に拡散した。それから約 2 年間、波状の感染拡大を繰り返したが、ワクチン接種の効果もあってか 2021 年 12 月現在、国内では小康状態を保っている。一方で海外ではワクチン接種率の高い国でも再び感染拡大の兆候を示すなどコロナ禍収束のための要件は明確ではない。さらに新たな変異株のオミクロン株の出現など、予断を許さない状況にある。このように COVID-19 は未曾有の災禍で現時点でも不明なことも多いが、この 2 年間で多くの知見も得られている。その知見を空気調和設備もしくはシステム(以後、単に空調と記す)に関わる視点で整理することは重要である。本報では、これまでに発表された COVID-19 に関する文献等を空調の観点でレビューし、空調における新型コロナウイルス対策として記述する。

2. 感染経路と空調

感染経路には主に、A.飛沫感染、B.エアロゾル感染、C.接触感染がある。当初 COVID-19 の感染は従来のインフルエンザ等の感染と同様に飛沫感染と接触感染が主体と考えられたが、それでは説明のつかないエアロゾルによると思われるクラスター感染も発生した。感染経路に関しては疫学的調査を含めて各種の検証が継続的になされ、2020 年 3 月からの世界的な流行から約半年が経過した 2020 年 10 月には、CDC(Centers for Disease Control and Prevention:米国疾病予防管理センター)は、COVID-19 の感染経路についてホームページに以下のようなコメントを掲載している¹⁾。

- 1) 人と人の密接な接触の際に最も一般的に広がる(A.飛沫感染)。
- 2) ときに空気を伝播して感染することがある(B.エアロゾル感染もしくは飛沫核感染)。
- 3) 汚染された表面との接触を通してはあまり広がらない (spreads less commonly)(C.接触感染)。

A.飛沫感染が主感染ルートであることは明らかである。飛沫感染対策は、人と人の離隔距離の確保、マスクやフェイスシールドの着用、アクリル板等の設置、大声を出さないなどであり、特殊な一方向流の清浄気流形成装置などを除いて基本的に空調(換気)によって対策できるものではない。

B.エアロゾル感染は、 $5\mu\text{m}$ 程度以下のウイルスを含む粒子が重力沈降等せずに気中に浮遊するものを呼吸時に吸込み、感染するものである。この対策は、空調(換気)が主となる。この感染の代表的な事例に、中国広州のレストランの事例があり、ファンコイルユニットの循環気流によってウイルスの高濃度領域が局所的に形成され、感染者から離れたテーブルで二次感染が

発生している²⁾。詳細な調査の結果、換気回数として0.56~0.77回/h(一人あたりの換気量2.70~3.74m³/h)と外気がほとんど導入されておらず、新鮮外気による希釈がなされていなかったことが集団感染発生の原因と考えられている³⁾。国内では2020年3月9日に厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策専門家会議が示した「新型コロナウイルス感染症対策の見解」⁵⁾で集団感染リスクの高い3つの「密」を避ける呼びかけをしており、その一つに世界に先駆けてエアロゾル感染を意識した「換気の悪い密閉空間」を挙げている。さらに2020年3月30日には、「一人あたりの必要換気量を満たすだけで感染を確実に予防できるということまで明らかになっているわけではないが」と前置きしながらも、『ビル管理法における空気環境の調整に関する基準に適合していれば必要換気量(一人あたり毎時30m³)を満たすことになり、「換気が悪い空間」には当てはまらないと考えられる。』との見解⁹⁾を示した。

C.接触感染に関しては、表面接触による感染の事例はほとんど報告されないこと、感染者が滞在した部屋の表面でウイルスのRNA(存在の痕跡)は検出されるが感染力を持つウイルスはめったに検出されないことから、主感染経路ではないと考えられている⁷⁾。また、2020年3月に発表されたNeeltjeらによる新型コロナウイルスの生存期間に関わる著名な論文⁸⁾では、ステンレス表面で2日、プラスチック表面で3日間もウイルス感染力を維持するとし、接触感染の可能性のあることの裏付けとされてきたが、試験濃度が非現実的に高濃度であることが指摘されている⁷⁾。確かにその他のウイルスの生存期間に関わる報文⁹⁾でも、濃度10の5~6乗オーダーのウイルスを各種材料表面に塗布し、滅菌レベルに近い10の1~2乗になる時間を生存期間として最長で7日間とするなど、生存期間だけが独り歩きしているところもある。これらの測定方法の妥当性、特に実際の表面でのウイルスの状況を再現しているのかに関しては疑問視されている¹⁰⁾。ただし、接触感染のリスクが小さいからといって、直ぐに手洗いや手指の消毒、感染者が滞在した部屋等の除菌作業を止める状況にはない。まだまだCOVID-19においては不明なところが多いので、リスク低減の努力は続けられるべきと言えよう。

3. 空調における対策

空調におけるウイルス対策技術には、大別すると①新鮮外気(外気中にはウイルスは通常存在しない)の希釈効果によるウイルス濃度低下、②循環系でのエアフィルタや紫外線照射によるウイルス除去および殺菌がある。なお、温湿度による感染防止に関しては、COVID-19に関しては十分な知見が得られていない¹¹⁾¹²⁾。厚生労働省の『冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法』¹³⁾においても、呼吸器系疾患等への影響を考慮に入れて18°C以上、RH40%以上を推奨しており、特にCOVID-19に関するデータに基づくものではない。ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers:アメリカ暖房冷凍空調学会)、空気調和・衛生工学会(SHASE:The Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan)でも、呼吸器系疾患および従来のウイルスにおけるデータを考慮して、温度18~28°C、相対湿度40~60%を推奨しており¹⁴⁾、ビル空調において特に厳しい温湿度範囲ではない。したがって、空調における対策としては、上記①②が基本であり、併せて居室の換気効率の向上を図ることが換気によるウイルス汚染制御技術として有効である。

換気の効果을把握するために換気量と感染リスクの基本的関係を理解することは重要である。ここでは、感染確率モデルを紹介して、換気によるウイルス汚染制御について説明する。

3.1 感染確率モデル

室内にウイルスの発生源(一次感染者)が存在する場合に、換気量と感染リスクの関係を表すものにWells-Riley感染確率モデル¹⁴⁾があり、(1)式で表される。

$$\frac{n}{N} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \approx \frac{Iqpt}{Q} \quad (1)$$

- ここで、n [-]: イベント後の二次感染者数
- N [-]: 感受性の高い在室者数
- I [-]: 在室する一次感染者数
- q [1/h]: 時間当たりの quanta 生成率
- p [m³/h]: 時間あたりの呼吸量
- t [h]: 滞在時間
- Q [m³/h]: 実効換気量

すなわち、感染確率 n/N は、一次感染者数、quanta 生成率(後述)、呼吸量(活動の強度に依存)、滞在時間に正比例し、換気量に反比例する。

3.2 quanta 生成率について

quanta 生成率(以後、quanta 値)とは、単なるウイルスの発生量ではなくて、(2)式に示す感染確率 P_i に関わる指標で、1 quanta は「密閉空間において在室者の $1-e^{-q}$ 、すなわち 63%が感染する感染性ウイルスの発生量」と定義される¹⁵⁾。

$$P_i = 1 - e^{-q} \quad (2)$$

Buonanno らは、発生者の呼吸(安静、静座)、会話、歌唱等の各種動作や受動者の呼吸量(安静、静座、軽い運動、激しい運動)の条件を変えて、モンテカルロ法によって quanta 値を求めた¹⁵⁾。それを中国広州のレストランや米国スカジットバレーでの合唱団⁹⁾等の集団感染事例に適用して妥当性を検証している。REHVA(Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations:欧州空調換気設備協会)は、Buonanno らの①～④の各種動作等での quanta 値を重みづけ平均して、事務作業、会議、レストランでの会食などの日常的行動に対する感染リスク評価のために想定すべき quanta 値を提案している。表1に Buonanno と REHVA の quanta 値を示す¹⁶⁾。REHVA の quanta 想定値は、会議や会食などの会話が伴う行動では大きく、授業や事務などの会話の少ない行動では小さくなっている。この考えを応用すれば種々の行動状況に応じた quanta 値や感染リスクが想定可能である。例えば、映画館などでは視聴中はほとんど会話も無いので quanta 値は 5.0 以下で、また滞在時間も 3 時間程度なので感染リスクは比較的小さい。

表 1 Buonanno と REHVA の想定する quanta 値¹⁶⁾

Buonanno らの quanta 値					
各種動作等	① 休息 口呼吸	② 軽作業 会話	③ 軽作業 歌唱	④ 重作業 口呼吸	
90 パーセントイル値	3.1	42	270	21	
REHVA による quanta 想定値(h ⁻¹)					
教室 5.0	事務所 5.0	会議 18.7	レストラン 14.8	ショッピング 10.9	スポーツ 21.0
0.95①	0.95①	0.60①	0.70①	0.80①	
+	+	+	+	+	④
0.05②	0.05②	0.40②	0.30②	0.20②	

筆者注)REHVA 下段は各種動作による重みづけの内訳

3.3 外気量 30m³/(h・人)の持つ意味

厚生労働省指針の外気量 30m³/(h・人)⁹⁾は、建築物衛生法(いわゆるビル管法)を踏襲したものであるが、Menzies らのカナダの医療従事者に対する病院の換気と結核の院内感染リスクに関する報文¹⁷⁾において、換気回数 2 回/h 以下で感染リスクが高く、それ以上で感染リスクは低いことなどを根拠としている。倉淵は、事務所を想定し、(1)式に一次感染者数 $I=1$ 、quanta 値 $q=7$ 、呼吸量 $p=0.53$ 、滞在時間 $t=8$ を代入し、二次感染者を 1 人以内にするための一人当たりの外気量 Q を計算し、約 30m³/(h・人)であることを示した¹⁸⁾。これより、一人当たりこの外気量を確保すれば在室者 N が何人でも二次感染者 n は 1 を超えない、すなわち、エアロゾル感染でクラスターを発生させない換気量と考えることができるとしている。ただし、可能な限り実効換気量を多くして安全率を高めることが望まれるとも述べている¹⁹⁾。ここで、Buonanno らの quanta 値は、感染拡大当初に武漢株に対して求められたものであるため、最近のデルタ株の感染力上昇の影響は盛り込まれておらず、またマスクは装着していない条件のものである。武漢株に対するデルタ株の感染力は 2 倍以上²⁰⁾とのことではあるが、不織布マスクの感染抑制効果は発生側と受動側双方がマスクを装着すれば約 75%の低減効果²¹⁾があるので、マスク着用が徹底している日本では両者の影響は相殺される可能性を倉淵は示唆している¹⁹⁾。ちなみに、マスクの効果に着目して(1)式を考えた場合、quanta 値が 75%削減されるとすると換気で同じ効果を出すには 4 倍の実効換気量 Q が必要で、後述する対策でこの実効換気量を得るのはかなり困難を伴う。マスクの効果は絶大であることがこのことから分かる。

3.4 実効換気量について

感染リスクを低減するための実効換気量 Q は、外気量 Q_{OA} だけではなく(3)式の要素が含まれる¹⁹⁾。

$$Q = Q_{OA} + \eta Q_r + Q_{de} + Q_{inact} \quad (3)$$

ここで

- Q :実効換気量(m³/h) Q_{OA} :外気量(m³/h)
- Q_r :還気量(m³/h) η :還気系統の除去装置のウイルス除去効率 (-)
- Q_{de} :壁面沈着によるウイルス濃度低減を換気量換算したもの (m³/h)
- Q_{inact} :自己の不活化によるウイルス濃度低減を換気量換算したもの (m³/h)

各換気量の大きさを Q_{OA} と比べて表2に示す。なお、 Q_{de} と Q_{inact} は文献19を参考にして求めた。 Q_{de} と Q_{inact} はウイルス濃度の自然減衰に関わる相当換気量であるが、不明確な点もあり、かつ空調において制御できる Q_{OA} や ηQ_r に比べて小さいので、安全側としてここでは考慮しないこととする。なお、小型の空気清浄機等の性能試験において濃度減衰カーブから除去効率を求める場合などは、循環風量が小さく、相対的にこれらの影響が大きいと言えるので自然減衰項も考慮する必要がある。

セントラル空調方式の場合、一般的には循環空気量(還気量) Q_r は、外気量 Q_{OA} の2~3倍程度ある。そのため適切なウイルス除去効率 η を持つ除去装置を還気系統に用いれば、外気量と同等以上の実効換気量を得ることが出来る。この除去装置に該当するものがエアフィルタと紫外線殺菌装置(UVGI: Ultraviolet Germicidal Irradiation)である。ただし、これらの除去装置はCO₂ や VOC(揮発性有機物)等は除去できないので、外気導入との併用に限られる。なお、空気清浄機に多用される光触媒技術は、光触媒機能を持つエアフィルタ等にウイルスを付着させ、光を照射して活性酸素やOHラジカルによって表面のウイルスを不活化するものであるため、粒子性のウイルス除去に関してはエアフィルタ技術の範疇と言える。

表2 セントラル空調方式を想定した外気量 Q_{OA} と Q_r , Q_{de} , Q_{inact} の比率

項目	換気量(m ³ /h)	Q_{OA} 比率	還気系への中高性能フィルタ設置時	
			比色法 65%	比色法 90%
Q_{OA}	600	1	1	1
ηQ_r	1,200 η	2 η	1	1.6
Q_{de}	36	0.06	-	-
Q_{inact}	170	0.28	-	-

想定条件: 用途:事務所ビル、サイズ:10m×10m×天井高さ2.7m、在室人数:20人(専有面積5m²/人)

2× Q_{OA} = Q_r 、中高性能フィルタの捕集効率 η は0.5 μ m以上に対する実測定データを使用

4. 除去装置

4.1 エアフィルタ

当初 REHVA が空気循環系の還気を停止することを推奨していた²²⁾のに対して、ASHRAE は、適切な外気量が導入された空調システムにおいて還気が感染に繋がったというエビデンスは無く、循環系にエアフィルタを設置して積極的に還気を活用することを推奨している²³⁾。SHASE も ASHRAE と同様な考えである²⁴⁾。還気をせずに外気のみ供給する場合、30m³/(h・人)では風量が少なすぎて輻射方式でもない限り適切な温湿度調節が難しいこと、外気量を増やすと外気処理に要するランニングコストの増加が生じること、また、日本で採用されることが多いビル用マルチエアコンを用いた個別分散空調では基本的に還気を停止することは不可能なことから、SHASE や ASHRAE の指針が現実的と考える。

ASHRAE では、新型コロナウイルス対策として、ANSI/ASHRAE Standard 52.2 のエアフィルタ性能規格において、MERV13 以上のエアフィルタを推奨している²⁵⁾。日本の中高性能エアフィルタの規格には JIS B 9908 があり、2011年及び2019年に同規格は改定されてはいるが慣例として2001年制定の旧 JIS の比色法捕集効率で中高性能エアフィルタの性能を呼ぶことが多い。ASHRAE と JIS 規格では規定する粒子径等が違うので完全に一致はしないが、おおよそ MERV13 に相当するものは比色法捕集効率 90%の中高性能エアフィルタである²⁶⁾。

さて、制御すべき粒径として、何 μ m 以上をターゲットにするのかという問題があるが、結論から先に述べると現状では一定のコンセンサスは得られていない¹⁹⁾。G.R. Jonson らは人の呼吸、会話、咳等で生じるエアロゾルの粒径を測定し、口腔内での粒径分布として1 μ m 程度と200 μ m 程度にピークがあることを示した(図1-1)²⁷⁾。空調においては直径5 μ m 程度以下のエ

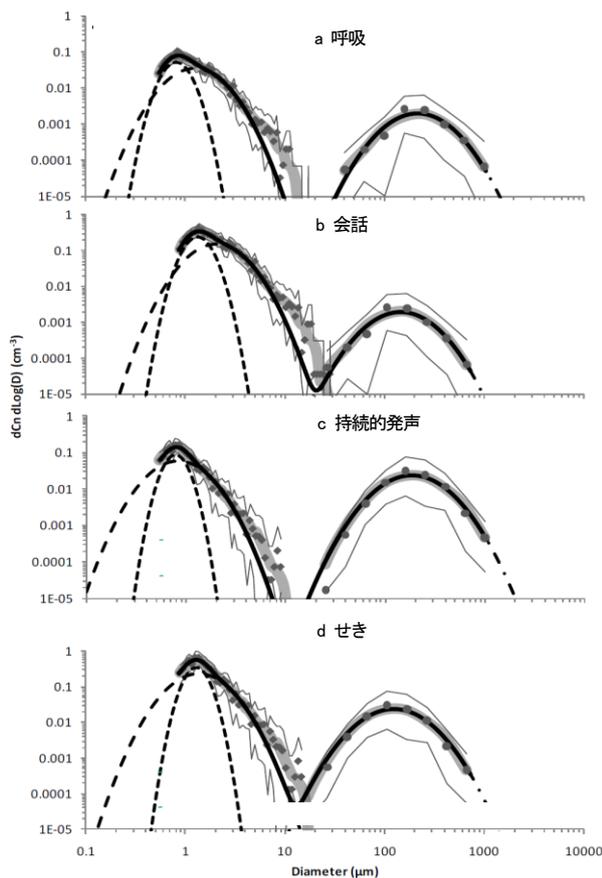


図 1-1 口腔内でのエアロゾル粒径分布(補正後)

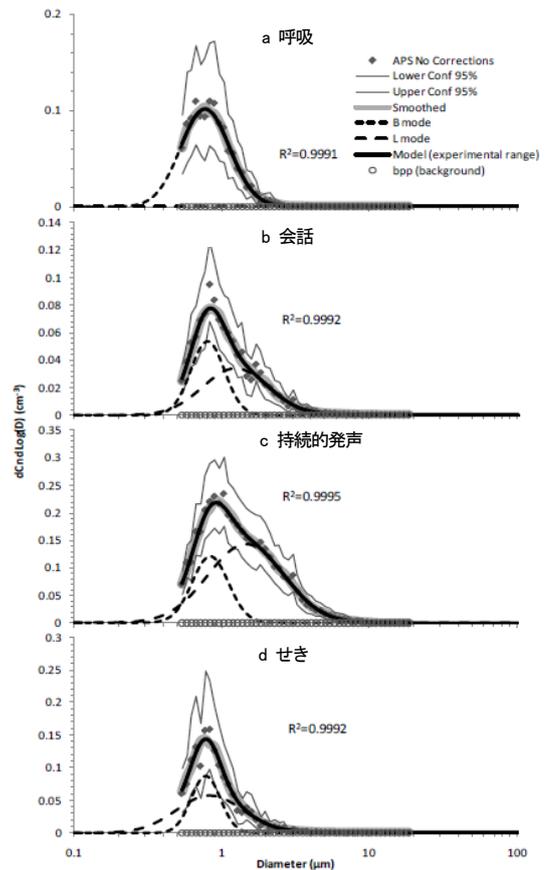


図 1-2 放出後のエアロゾル粒径分布測定値

図 1 呼吸、会話、持続的発声、せきで発生したエアロゾルの粒径分布²⁷⁾

エアロゾルが重力沈降せずに長時間室内に浮遊するので制御対象となるが、その中でどの粒径区分に新型コロナウイルスが多く存在するかに関しては、多くの調査事例²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾が報告されているが、これまでのところ一定の傾向は見いだせていない。この理由としては、微量のウイルスを粒径別に捕集し、ウイルス感染力価を測定するという技術的な難しさやP3レベルの封じ込め施設を持つ特定の研究機関でしか実証できないことが考えられる。

新型コロナウイルス単体のサイズは0.05~0.2 μm 程度である³¹⁾が、一般に微生物粒子は単体では存在せず、微生物同士の集合体や大気中に多量に存在する非生物粒子に付着したりして、粒径が単体より大きくなっている³²⁾。新型コロナウイルスも人の粘液と混合したエアロゾルとして気中に放出される。これらのエアロゾルの粒径は、放出された直後に乾燥によって水分を失い発生時の直径から40~50%になる³³⁾とのことである。図1-2は、人から放出された直後に粒径測定器で得られた1 μm 前後のエアロゾル粒径分布の実測値である。図1-1はその値を用いて乾燥等の影響を加味して、口腔内の状態として補正したものである。フィルタの選定に関しては、図1-2の分布の方を考慮する必要がある。エアロゾル数の多い粒径がウイルス数も多いと平易に仮定すれば、0.1 μm の粒子を制御対象とする必要はなく、0.5~1.0 μm 程度が制御対象になると筆者は考える。

0.5 μm 以上のエアロゾルを捕集すると仮定すると、中高性能エアフィルタの粒子捕集効率の実力値は、比色法65%フィルタで50%以上、比色法90%フィルタで80%以上ある³⁴⁾ので、表2の η にこの捕集効率を代入すれば、セントラル空調方式では外気のみの場合と比べて実効換気量比は、比色法65%フィルタを設置した場合で2倍、同90%フィルタを設置した場合で2.6倍となる。したがって、(1)式の感染リスクはフィルタ無しに比べて、それぞれ50%、38%となる。また、HEPAフィルタ付きの空気清浄機やファン・フィルタ・ユニットも有効である。HEPAフィルタの捕集効率はほぼ100%(粒径0.3 μm 以上で99.97%以上)なので、フィルタと送風機間のリークが無い限り、実効換気量にこれらの機器の送風量を加えることができる。ただし、これらの機器は局所的に設置することになるので、使用にあたっては換気効率等の分布を考慮する必要がある。

フィルタの特性として、エレクトレット(静電気利用)では無い機械的な捕集機構(慣性、さえぎり、拡散等)を利用した一

般のエアフィルタは、経時的に粉塵負荷の増加とともに捕集効率は良くなる。一方で、粉塵負荷の増加に伴って圧力損失は増加し、システムの送風量が低下するので、エアフィルタの運用においては圧力損失の確認や定期交換等が必要になる。

4.2 UVGI

空調における微生物汚染対策としての紫外線殺菌技術(以後、UVGI)は、WHO、CDC、REHVA、ASHRAE などから認知され、その技術も確立されており ASHRAE のハンドブック³⁵⁾にも掲載されている。さて、微生物汚染源としては真菌、細菌、ウイルスがあるが、真菌の発生源/由来は主に外気であり、細菌のそれは人間である³⁶⁾。これらは空調機内で増殖したりもするので UVGI はドレンパンや温調コイル等の表面殺菌に主に用いられて来た。新型コロナウイルスも発生源は人間であるが、細菌との違いは生細胞内以外では増殖できないところにある。したがって、空調における新型コロナウイルス対策においては、空調機器およびダクト等の部材表面の殺菌はあまり重要ではないと考える。前記新型コロナウイルスの生存期間に関わる文献⁸および⁹によれば、高濃度の実験ながらウイルス感染力価が2桁減衰するのに要する時間はほとんどの場合で24時間程度かそれ以内であり、またエアロゾルとしてのウイルス感染力価の半減期は1.1時間と短い。さらに論文としては未発表ながら、岩附はエアロゾル中の新型コロナウイルスの感染力価を測定し、発生から1時間後に1/100、2時間後に1/1000に減少した(ただし、3時間後でも2時間後とほぼ同じレベル)と報告³⁷⁾している。還気中のエアロゾルがフィルタや温調コイルに付着した場合を想定すれば、エアロゾルとしてのウイルスの感染力価の減衰率は大きく、部材表面で活性をもつウイルスは高濃度に蓄積されず、かつ増殖しないので再飛散の恐れもほとんど無いと言える。なお、一部にウイルスが付着したフィルタの交換時に感染することを懸念する考えがあるが、これに対しては空調のフィルタは不特定多数の人が扱うものではないので、作業標準等の運用における対策で対応可能であり、ウイルスの表面殺菌の目的だけでUVGIを設置することは少し過剰であると考えられる。

以上の理由により、空調でのウイルス対策におけるUVGIの使命は、空気中のウイルスを殺菌することにあると言える。UVGIにとって都合なことに、ウイルスは真菌や細菌に比べて紫外線に弱い傾向がある³⁵⁾³⁸⁾。UVGIの殺菌力の波長特性は一般に波長265nm程度にピークを持つ山形の特性を持つ³⁵⁾が、深紫外線UV-C(波長100~280nm)の内でもそのピーク近辺の波長253.7nmに中心を持つ光源が利用できる。UVGIの殺菌効果は(4)式で表され、殺菌力は積算光量(mJ/cm²)=紫外線強度(mW/cm²)×照射時間(s)、すなわちIとtの積に相関する。

$$\eta_u = 1 - e^{-kIt} \quad (4)$$

ここで、 η_u :殺菌効率(-) k :殺菌係数[cm²/(mW・s)]
I:紫外線強度(mW/cm²) t:照射時間(s)

波長253.7nmに中心を持つUVGIが、多くのウイルス種に対して99.9%死滅させることが出来る積算光量³⁷⁾は数mJ/cm²で、新型コロナウイルスに関しては3mJ/cm²(文献39)、3.7mJ/cm²(文献40)、約4.3mJ/cm²(文献41)などの報告がある。空調で空中のウイルスを殺菌する場合は、気流速度が空調機内で2~3m/s、ダクト内で5~10m/s程度と速いため、照射時間を長く確保することが難しく、積算光量を確保して殺菌効率を良くすることは比較的難しい⁴²⁾のであるが、一方で空調では滅菌レベル(10の-6乗)の殺菌効率が求められるわけではない。空調機内で紫外線ランプの本数や設置場所の最適化を図り、エアフィルタ無しのワンパスで80%程度の殺菌効率が期待できる使い方が提案されている⁴³⁾⁴⁴⁾。

空調の技術領域に入るかは微妙であるが、ASHRAE HANDBOOK Chapter62には、Upper-Air UVCというユニークなUVGI技術が示されている。ルーバーを利用して居住域の人には直接照射されないようにして、部屋の天井付近の空間に水平方向に紫外線を照射するものである(図2)。上記ハンドブックには2回程度以上の換気回数に相当するとの記載があるが、筆者がメーカーカタログ⁴⁵⁾の浮遊菌減少曲線から相当換気回数を求めたところでは、1.1回/h程度(浮遊菌の種類は不明)であった。成らは、4床病室においてUpper-Air UVCの設置位置、排気口の個数を変えて気流シミュレーションを行い、室内平均で0.24~0.48mJ/cm²の紫外線積算光量を受けることを示した⁴⁶⁾。前述の3.7mJ/cm²で99.9%の新型コロナウイルスの殺菌効率の値を使って(4)式で殺菌係数kを求め、成らのシミュレーションによって得られた積算光量を使って同じく(4)式から殺菌効率を計算すると36~59%となり、この程度の殺菌効果はあるものと考えられる。

この技術は室内空気中にウイルスが滞留するほど照射時間が増加し、積算光量は大きくなるので殺菌効率は良くなるが、なるべく換気回数及び換気効率を向上して滞留を短くするという換気設計の考えとは基本的に相反するところがあると言える(CDCのガイドライン⁴⁷⁾では換気回数6回までは影響を受けないとの記述があるが)。かつ、室内の気流形状とUpper-Air UVC

の配置によって効果が変わる⁴⁶⁾ので殺菌効率の予測が難しいという点が挙げられる。空調システム的设计・施工者の立場からは、例えば、在室人数が設定される居室は外気導入とエアフィルタや空調機内 UVGI 設置による実効換気量で主に対策し、居室の換気経路ではない廊下や附室は Upper-Air UVC を用いるなど使い分けるのが良いと考える。

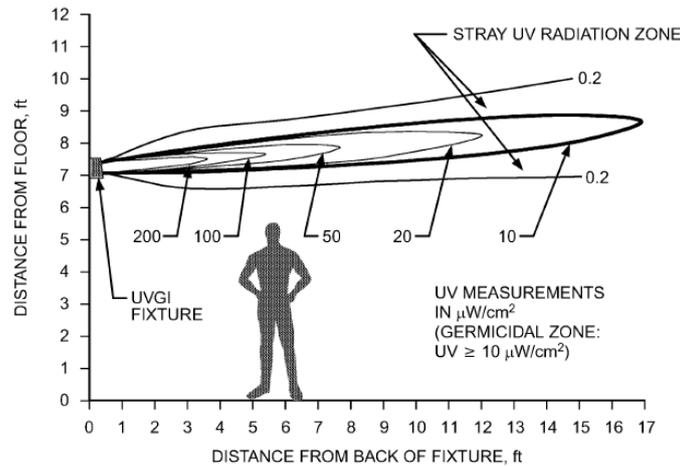


図2 Upper-Air UVC の典型的な立面³⁵⁾

5. 空調システムにおける対策の動向

5.1 換気状況の見える化

(1)式の Wells-Riely 感染確率モデルは汚染粒子(値としては quanta)が瞬時一様拡散するとした場合の感染確率を表しているが、実際においては換気効率が一樣ではなく、ウイルス発生場所が局在することにより、局所的換気量と quanta 値には分布があり、感染確率も一樣ではない。最近の空気調和・衛生工学会や建築学会の大会においては、より実際に近い状態で部屋の換気状況を見える化する取り組みが発表されている。吉澤らは個別分散空調機に中高性能フィルタを追加設置した効果について空気齢を指標として実効換気量の分布を評価している³⁴⁾。金ら⁴⁸⁾、山本ら⁴⁹⁾はそれぞれ CO₂ も感染性粒子も人が発生するものであるから両者の濃度に相関性があると仮定して、多点の CO₂ 濃度計の値を用いて quanta 値を予測し、感染確率の分布を予測する手法を提案している。

5.2 換気効率を高める空調システム

置換換気空調方式は、室内の発熱源が発塵源でもある場合に、発熱で生じる上昇流に塵埃を乗せて速やかに部屋上部に移動させることができ、温度成層の上層に塵埃の高濃度領域が形成され、逆に居住域は低濃度領域になるので、居住域は混合空調方式に比べて同じ換気量ではより清浄になる⁵⁰⁾⁵¹⁾。これと同じことが人からの感染性粒子の発生に関しても言える。居室において居住者の周りには、いわゆるブルーム(体温による上昇流)が生じている。会話などによって発生する感染性粒子はそのブルームに乗って上方向に拡散する傾向がある。特にマスクをしている場合にはマスク無しに比べて、感染性粒子は水平方向の速度ベクトルが小さくなっているため、その傾向は顕著である。天井吹き出しの場合は、上昇した感染性粒子が吹き出し気流によって再度押し下げられ居住域に戻る。したがって、置換換気空調方式の方が天井吹き出し方式よりも感染性粒子の排出特性は良い。山中らは病室において置換換気空調の有効性を実験により確認している⁵²⁾。人から発生して上方向に拡散するウイルスを天井からの吹き出し気流によって室内で極力再循環させないためには、気流はアップフローで部屋の上部に吸込み口がある方が好ましく、その点では床吹き出し空調あるいは床からのいわゆる「染み出し」空調も同様な効果がある⁵³⁾と言える。

6. おわりに

with コロナ、after コロナにおいては、空調においても安全・安心と脱炭素の両立を図る必要がある。単純に外気の導入量を増加することは中間期以外では外気処理に多くのエネルギーを要する。そのため今後の空調では、適正な外気量を導入しつつ、

循環系にエアフィルタやUVGIの除去装置を導入することによって空気の処理コストを下げ、実効換気量を増加する方向に進むものと思われる。さらに、換気効率を向上させることによって、感染確率を低下させる工夫も求められる。そして、これらの取り組みがウイルス対策だけではなく、快適性あるいはウェルネスを向上する空調にも繋がることを期待する。

最後に、COVID-19は現在進行形であり、まだ多くのことが明確になっていない中で、2021年12月現在入手できる情報を基に本稿を執筆したが、オーソライズされていない情報も含まれていることをご容赦頂きたい。また、レビューと言いつつ、かなり個人的見解まで言及してしまったことも併せてご容赦頂ければ幸いである。

文 献

- 1) CDC: How COVID-19 Spreads, (Updated Oct. 28, 2020),
<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>.
- 2) Lu J et al.: COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerg Infect Dis*, 26(7), pp.1628-1631(2020), <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200764>.
- 3) Li Y et al.: Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant, medRxiv preprint, 20067728(2020.04.16), doi, <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>.
- 4) 尾方壮行:空調調和・衛生工学会ワークショップ,「新型コロナウイルス対策としての空調・衛生設備の運用」国外の集団感染事例, p.87(2021.09.15 Web).
- 5) 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策専門家会議:新型コロナウイルス感染症対策の見解, (2020.3.9 公表),
<http://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000606000.pdf>.
- 6) 厚生労働省:商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について, (2020.3.30),
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf>.
- 7) Dyani Lewis: COVID-19 rarely spreads through surfaces. So why are we still deep cleaning?, *Nature*, (January 29,2021),
<https://www.nature.com>.
- 8) Neeltje van Doremalen et al.: Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, *The New England Journal of Medicine*, (April 16, 2020).
- 9) Y. Liu et al.: Stability of SARS-CoV-2 on environmental surfaces and in human excreta, *PMC Labes*, Nov 01,2020,
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7603996/>.
- 10) E. Goldman: Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites, *THE LANCET*, (July 03,2020),
[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2).
- 11) 空調調和・衛生工学会新型コロナウイルス対策特別委員会:新型コロナウイルス感染対策としての空調・衛生設備の運用について, (2021.4.1), <http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2021.05.07%20kaite3.pdf>.
- 12) 厚生労働省:冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について(参考資料), (2020.11.27),
<https://www.mhlw.go.jp/content/10906000/000698849.pdf>.
- 13) 厚生労働省,冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法, (2020.11),
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html.
- 14) EC Riley, G Murphy, RL Riley: Airborne spread of measles in a suburban elementary school, *Am. J. Epidemiol*, 107(5), pp.421-432(May 1978).
- 15) G. Buonanno et al.: Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection:Prospective and retrospective applications, *Environment International*, 145 (September 6 ,2020).
- 16) 倉渕隆:空調調和・衛生工学会令和 2 年度セミナー,「新型コロナウイルスによる建築設備の変化とは」新型コロナウイルス感染対策としての空調・換気設備の運用について, p.25(2021.02.19 Web).
- 17) D. Menzies et al.: Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers.,*Annals of Internal Medicine*, 133(10):pp.779-789(2000).
- 18) 倉渕隆:新型コロナウイルス感染症の現状とその対策(2) 新型コロナ対策として換気量はどうやって決めるべきか?,*空調調和・衛生工学* 第95巻6号, pp.3-9(2021.6)
- 19) 倉渕隆:感染症対策を考慮した空調・換気設備のあり方について,*建築設備士* 10, pp.10-15(2021).

- 20) CDC: Delta Variant, What We Know About the Science, (Updated Aug. 26, 2021),
<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/variants/delta-variant.html>.
- 21) Hiroshi Ueki et al.: Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2, *Clinical Science and Epidemiology*, vol.5 Issue 5, (Sep/Oct 2020).
- 22) REHVA: COVID-19 guidance document, (April 3, 2020),
https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_ver2_20200403_1.pdf.
- 23) ASHRAE: Can HVAC Systems Spread COVID-19?, (May 31, 2020),
<https://www.achrnews.com/articles/143255-can-hvac-systems-spread-the-covid-19-virus>.
- 24) 空気調和・衛生工学会新型コロナウイルス対策特別委員会: 空調・換気による COVID-19 の拡散はあるのか,
(2020.6.15), <http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2020.06.15%20covid19v2.pdf>.
- 25) ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, (April 14, 2020),
https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf.
- 26) 大垣豊:各国の一般換気用エアフィルタの捕集率の比較に関する指針(JACA No.53),*空気清浄*第 56 巻 1 号,
pp.36-40(2018.5.31).
- 27) G.R. Johnson et al: Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42, pp.839-851(2011).
- 28) J.L. Santarpi et al.: The Infectious Nature of Patient-Generated SARS-CoV-2 Aerosol, medRxiv preprint doi:
<https://doi.org/10.1101/2020.07.13.20041632>.
- 29) W.G. Lindsley: Distribution of airborne influenza virus and respiratory syncytial virus in an urgent care medical clinic,
Clinical Infectious Diseases, (Mar 1,2020).
- 30) Yuan Liu et al.: Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals, *Nature* Vol.582, pp.557-561(June 25, 2020).
- 31) Chen N et al.: Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan,
China: a descriptive study. *Lancet*, 395,pp.507-513 (2020).
- 32) 柳宇:「バイオクリーン環境の知識」*環境科学フォーラム*編, p.9,日本工業出版, (2021.9.30).
- 33) Yang W, Marr LC: Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoors and Dependence on Humidity, *PLoS ONE* 6(6)
e21481 , (2011), doi:10.1371/journal.pone.0021481.
- 34) 吉澤 他:活動に伴う飛沫発生量とその捕集効率に関する研究, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*,G-1
pp.5-8(2021.9).
- 35) ASHRAE Handbook 2019-HVAC Applications, CHAPTER 62, ULTRAVIOLET AIR AND SURFACE TREATMENT.
- 36) 柳 他:オフィスビルにおける浮遊微生物の挙動に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.893-894(2006.9).
- 37) 岩附研子:インフルエンザウイルスは空気感染するのか?,*JACA* 第 354 回クリーンテクノロジー研究会資料,(2021.12.9).
- 38) 柳宇:「バイオクリーン環境の知識」*環境科学フォーラム*編,日本工業出版(株), p.22(2021.9).
- 39) 岩崎電気ホームページ, <https://www.iwasaki.co.jp/optics/sterilization/CoV-2.html>.
- 40) M. Biasin et al.: UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 Replication, *nature Scientific Reports*11:6260(2021), <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>.
- 41) N. Storm et al.: Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation, *nature Scientific Reports*
10:22421(2020), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79600-8>.
- 42) 瓜生 他: 紫外線ランプによる空調機内部の殺菌効果の検討(第 1 報),(第 2 報), *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*,(2019.9 および 2020.9).
- 43) 新晃工業:健康空調カタログ, <https://www.sinko.co.jp/product/download/>.
- 44) 井田 他: UVGI を組み込んだ空調システムの感染対策例, *臨床環境医学*第 27 巻第 1 号, pp.28-34(2018).
- 45) AND SHIELD 社ホームページ,
https://andshield.jp/product/aero/?gclid=Cj0KCQiA2NaNBhDvARIsAEw55hg3EtyjKfzxfHOuwv_cnARPS2TPeMsvgFPk-2OC5DE6AhJa4BBgzaw0aAsY5EALw_wcB.
- 46) 成 他: UR-UVGI の殺菌性能評価方法 第1報)室内気流と紫外線強度の連成解析による紫外線照射量の評価方法に
関して,日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 639 号, pp.621-627(2009.5).

- 47) P.A. Jensen et al.: Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings (CDC), (2005), <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm>.
- 48) 金 他: オフィス空間における執務者の位置情報および CO2 濃度に基づく感染リスク予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, G-6 pp.25-28(2021.9).
- 49) 山本 他: CO2 濃度センサーと測位システムを用いた感染確率分布と外気負荷の予測, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, G-9 pp.37-40(2021.9).
- 50) 遠藤 他: 高効率換気システムの導入による喫煙室内空気室環境の改善に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.775-776(2009.8).
- 51) 守屋 他: 誘引型置換換気空調システムを用いた非一方向流型クリーンルームに関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-18 pp.389-392(2012.9).
- 52) Toshio Yamanaka et al.: BEHAVIOR OF DROPLETS AND DROPLET NUCLEI FROM COUGHING SIMULATOR IN SICKROOM WITH DISPLACEMENT VENTILATION, ROOMVENT 2021, (2021.2).
- 53) 田辺 他: 新しいワークスタイルにおける安全安心な“かけ流し空調”の考察, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, C-15 pp.61-64(2021.9).

ABSTRACT

In December 2019, a case of pneumonia of unknown cause was reported in Wuhan City, China. On January 7, 2020, a new type of coronavirus—severe acute respiratory syndrome coronavirus 2—was identified; it caused coronavirus disease (COVID-19) that spread worldwide rapidly. In the 2 years since its onset, despite several unclear aspects, research has progressed in this front. It is important to understand the role of air conditioning equipment or systems in the transmission of this viral disease. Therefore, in this report, we will review the literature on COVID-19 published so far from the viewpoint of air conditioning and describe “Countermeasures against COVID-19 with Respect to the Air Conditioning System”.
