

特集

新型コロナウイルス感染症の現状と その対策(2)

前月号に引き続き、COVID-19に関して、機械換気や自然換気、感染事例及び衛生設備関連についての特集です。

様々なメディアが発達している現代社会において、世間一般の人々が換気や衛生設備に対してこれほど関心を持ったことはなかったのではないのでしょうか。関連情報が錯綜しながら日常的に取り上げられ、それが日々アップデートされていく中、本特集では、最新※かつ的確な分析がなされ、より専門的な知見や情報が整理されています。

(※ 2021年2月原稿受理)

前月号も含めまして、本特集にご対応いただいた執筆者の方々には深くお礼申し上げます。

安田 健一 前学会誌委員会委員長

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？

東京理科大学 倉渕 隆

1. 厚生労働省推奨 $30 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$, 2回/h の根拠
2. Wells-Riley 感染確率モデル
3. 新型コロナウイルスの quanta 生成率の推定
4. 感染率, 感染者数と1人当たり換気量の関係

自然換気と感染リスク評価

大阪大学 山中 俊夫

1. 自然換気の特徴
2. 自然換気量の計算方法
3. 感染症対策のための自然換気ガイドライン
4. 感染リスク評価と必要換気量
5. 自然換気時の換気効率と感染リスク評価
6. ウイルスの寿命と感染リスク評価

集団感染事例から学ぶ

東京都立大学 尾方 壮行

1. SARS-CoV-2 の感染経路と対策
2. 集団感染事例

トイレ空間における COVID-19 の感染リスクと防止に向けた研究動向と課題

関東学院大学 大塚 雅之

1. トイレ空間を中心とした水まわりの感染防止対策の必要性
2. 大便器トイレブースでの課題と感染防止
3. 洗面器周辺の課題と感染防止
4. 小便器周辺の課題と感染防止
5. 排水通気設備における課題と感染防止
6. 衛生設備に関連した COVID-19 対策ガイドライン

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？

倉 潤 隆 東京理科大学 正会員

キーワード：新型コロナウイルス感染症(COVID-19), 換気(Ventilation), 空気感染(Airborne Infection), Wells-Riley モデル(Wells-Riley Model)

我が国では、新型コロナウイルス感染症がまん延し始めた2020年の初期段階から、クラスター発生リスク回避のために“密を避けましょう”ということで換気的重要性が指摘され、厚生労働省では1人当たり $30\text{ m}^3/\text{h}$ の換気量確保を推奨している。その一方で、感染症学の観点から1人当たりの換気量確保の有効性については必ずしも明らかとなっていない。本稿では空気感染症の感染確率理論を踏まえて、感染対策の観点から空気感染リスクを低減するための必要換気量をどうやって決めるべきかについて考察する。

はじめに

2019年12月に中国武漢市で原因不明の肺炎が発生してから、瞬く間に全世界で新型コロナウイルス感染症がまん延し、1年経過後もその収束の道筋は全く見えない状況にある。我が国では感染拡大初期の2020年2月末日までのクラスター追跡調査に基づき¹⁾、専門家会議は集団感染の発生に関する“3つの密”のリスク²⁾を3月9日に提示し、新型コロナウイルス感染症の空気感染の可能性を世界に先駆けて指摘した。当初、WHO(世界保健機関)や米国CDC(疾病予防管理センター)は空気感染の可能性については否定的であったが、その後のクラスター報告事例などを踏まえて見解を変更し、空気感染の可能性について言及している^{3),4)}。我が国ではその後、厚生労働省が具体的な対策として建築物衛生法の二酸化炭素(CO_2)濃度基準である 1000 ppm を満たすために機械換気による場合は1人当たり $30\text{ m}^3/\text{h}$ 、窓の開放による場合は2回/h(30分に1回以上、数分間程度、窓を全開にする)以上の換気の確保を推奨している⁵⁾。その一方で、これは“換気の悪い空間”を回避することが目的であって、感染を確実に予防できることまで明らかとなっていないとし、感染防止に有効な換気量については明確な見解を示していない。本稿においては、厚生労働省の推奨換気量の背景について解説するとともに、空気感染症の感染確率に関する既往研究成果に基づき空気感染リスク抑制のための必要換気量の考え方について検討する。

1. 厚生労働省推奨 $30\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ 、2回/hの根拠

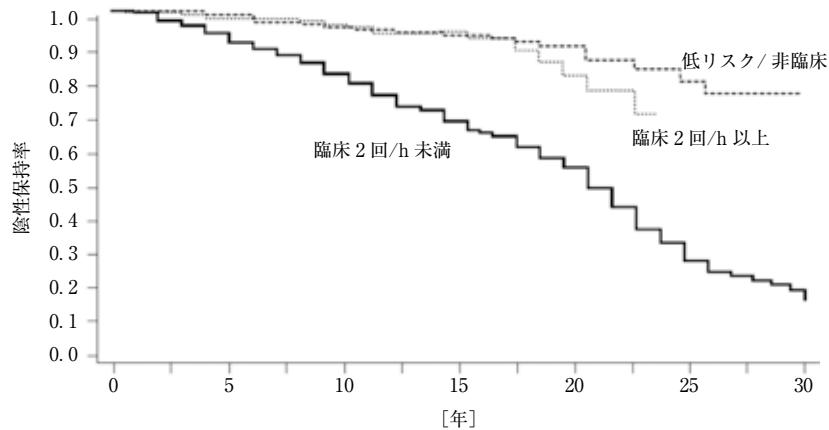
厚生労働省の推奨する換気量の根拠は、Menziesらによ

るカナダの17の救急医療施設に勤務する医療従事者を対象とした結核の院内感染リスクに関する大規模疫学調査結果に基づくものである⁶⁾。カナダでは我が国のような幼少期におけるツベルクリン反応検査と陰性時のBCGの予防接種の推奨義務はないが、医療施設での雇用開始時点で全員がツベルクリン反応検査を行うことになっている。この時点で陰性であったと記録されている1289人について、研究調査時点でツベルクリン反応検査を再度行い、勤続年数、勤務環境とその換気回数との間の関係調査が行われた。換気回数については現場にて CO_2 を用いたトレーサガス減衰法による測定が実施された。検査結果が陽性であれば勤務開始後に結核に院内感染している可能性が高いこととなる。調査結果に明確な傾向が見られたのは、換気回数が2回/h以上である場合とそれ未満であった非隔離病棟を含む一般病棟勤務者であった。図-1に示すように一般病棟で換気回数2回/h未満である場合、勤続20年で5割以上、30年で9割以上が結核に院内感染し、2回/h以上の場合より感染リスクが3.4倍高いことが示されている。これに対し、医療従事者が感染対策装具を着用する呼吸隔離室においては、当時の北米基準であった換気回数が6回/hの条件を満たす場合と満たさない場合で有意な差はなかった。一般病棟では感染対策装具を着用しないが、一定の割合で患者の中に結核感染患者がいるためと考えられる。なお、カナダの一般病棟の1人当たりの気積は $2\times 4\times 3=24\text{ m}^3$ とされているので、換気量にすると $48\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ に相当する。新型コロナウイルス感染症と結核の感染力が同等であることを示す証拠はないが、空気感染する疾病の予防に有効な換気量を確保するという観点から厚生労働省では $48\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ と同じオーダーであるとして $30\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ と2回/hの換気の確保を推奨している。なお、1人当たり換気量の建築物衛生法との差については、現行法を順守すべきとの指導が行政的には実施しやすいことを考慮に入れたものと考えられる。

2. Wells-Riley 感染確率モデル

2.1 モデルの基本形

1人当たり換気量の推奨値は院内感染リスクに関する疫学調査結果によるものであるが、より直接的な呼吸器疾病の空気感染リスクを定量評価する目的で提案されたアプ



ツベルクリン転換までの雇用開始からの経過年数

職員, n	2回/h未満	471	372	217	139	79	22
	2回/h以上	651	518	237	104	42	20
低リスク/非臨床		150	122	74	38	15	3

図-1 医療施設勤務年数と陰性維持率の関係

ローチに Wells-Riley モデルがある⁷⁾。このモデルは、“感染の quanta”の概念に基づいており、感染性粒子である quanta 生成率を使用して、定常状態の十分に混合された室内にいる個人が感染者の発する飛まつ(沫)核に暴露されて感染する確率をモデル化する。

$$P_{inf} = \frac{\text{二次感染者数}}{\text{室内の非感染者数}} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q_{OA}}\right) \quad (1)$$

ここに、

- P_{inf} : 感染確率[-]
- I : 室内にいる一次感染者数[人]
- p : 人の呼吸率[m³/h]
- q : quanta 生成率[1/h]
- t : 暴露時間[h]
- Q_{OA} : 外気による換気量[m³/h]

“感染の quanta”には物理的な単位はない。これは通常、疫学調査から逆算される架空の感染量単位であり、時間内に生成される粒子の量と粒子の感染力の両方を含む概念である。quanta 生成率に関する既存の文献は限られており、病気の種類と疫学的検討ごとに変化する。ライノウイルス、結核、インフルエンザ、麻疹に対する値の提案値を図-2に示すが⁸⁾、麻疹>インフルエンザ>結核>ライノウイルスの順となっている。

2.2 相当外気量効果の導入

空調機のエアフィルタは、外気同様、空気中の感染性粒子の濃度を減らすことに有効であるため、その効果を相当外気量として位置づけることができる。このため、Wells-Riley 方程式は、呼吸器によるろ過、UV 殺菌、粒子堆積、空調エアフィルタなど、外気による換気以外の追加の除去効果を表す項を組み込む式(2)に示す拡張が行われてい

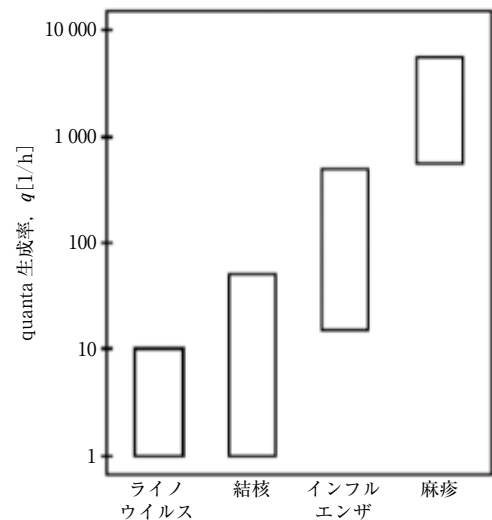


図-2 各種呼吸器系疾病における quanta 生成率

る^{9)~11)}。

$$P_{inf} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{VC}\right) \quad (2)$$

ここに、

- V : 室容積[m³]
- C : 実効換気回数(つまり $\lambda_{vent} + k_{ftr} + k_{de} + k_{inact}$) [1/h]
- λ_{vent} : 外気による換気回数(Q_{OA}/V) [1/h]
- k_{ftr} : エアフィルタによる感染性粒子除去率 [1/h]
- k_{de} : 感染性粒子沈着除去率[1/h]
- k_{inact} : 不活化率[1/h]

沈着除去率(k_{de})は、粒子サイズ、密度、および対気速度や表面積などの部屋の特性に依存する^{12), 13)}。フィルタ除去率(k_{ftr})は、空調フィルタ(Q_{ftr})を通過する気流速度、空調

システムの運転時間比率(f_{HVAC})、およびフィルタまたは空気清浄の除去効率、また設置された粒子サイズに依存する空気清浄機のフィルタ効率(η_{fltr})に依存して変化する。これらは式(3)に示すように、フィルタを通過する空気流量を室容積で割って、運転時間比率を乗じたものを、再循環率(λ_{recirc})と呼ぶ。

$$k_{fltr} = f_{HVAC} \frac{Q_{fltr} \eta_{fltr}}{V} = \lambda_{recirc} \eta_{fltr} \quad (3)$$

ここに、

f_{HVAC} : 空調運転時間比率[-]

Q_{fltr} : フィルタ通過風量[m³/h]

η_{fltr} : フィルタの粒子除去率[-]

λ_{recirc} : 空調フィルタを通過する再循環率[1/h]

式(2)と(3)は、粒子サイズの影響が陽に現れていないが、ろ過と堆積損失に関連する k_{de} と k_{fltr} はどちらも粒子サイズに依存する。したがって、それぞれの粒径別効果の推定が値の決定に必要となる。感染性粒子の除去が目的であるから、ウイルス本体の大きさの粒子が捕集できなければならないということではなく、空気中に浮遊するウイルスを含む飛まつをどの程度有効に捕集できるかによって、 k_{fltr} の値は決まる。一方、沈着の効果の概算には式(4)が用いられる場合がある。

$$k_{de} = \frac{0.108 d_p^2 \left(1 + \frac{0.166}{d_p}\right)}{H} \quad (4)$$

ここに、

d_p : 粒子の空力直径[μm]

H : 室高さ[m]

飛まつまたは飛まつ核内のウイルスまたは細菌の性質によっては、エアロゾルが室内空気にさらされると、ある程度不活化する場合があります。これについては室内温湿度に一部依存する可能性が考えられ、 k_{inact} にその効果が反映されている。ただし、感染性エアロゾルの粒径別不活化率に関するデータは不足していることと、quanta 生成率をこの効果を考慮に入れずに式(1)によって逆算した場合には、不活性化の効果が組み込まれていることから、 k_{inact} の効果は含めるべきではない。

2.3 濃度の非定常性の影響の考慮

Gammaitoni ら¹⁴⁾は、定常状態の Wells-Riley モデルに時間変化する濃度暴露の影響を含めた。彼らは、修正された Wells-Riley モデルを使用して病院の個室での架空の感染発生時の結核感染管理対策評価を試みた。quanta 生成率が一定であり、初期時間 $t=0$ に特定の数の感染者(I)が存在すると仮定すると、室内 quanta 濃度(R)の時間変化は式(5)で表される。

$$R = \frac{Iq}{VC} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (5)$$

ここに、

R : 室内 quanta 濃度[1/m³]

t : 経過時間[h]

これより、時刻 $0 \sim t$ [h] の平均室内濃度は次のように表すことができる。

$$\bar{R} = \frac{Iq}{tV} \left(\frac{Ct + e^{-\alpha t} - 1}{C^2} \right) \quad (6)$$

ここに、

\bar{R} : 時間平均室内 quanta 濃度[1/m³]

これが暴露平均濃度になるので、式(2)の $Iq/(VC)$ を式(6)で置き換えることによって次式が得られる。

$$P_{inf} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqp}{V} \times \frac{Ct + e^{-\alpha t} - 1}{C^2}\right) \quad (7)$$

このモデルの利点は、感染者とそれ以外の個人による占有時間の重要性を調査できることにある。

2.4 CO₂ 濃度に基づく感染リスクの推定

感染性ウイルスの除去として外気による換気を用いる場合に適用が限定されるが、一様混合状態の室内を対象に Rudnick ら¹⁵⁾は、室内の CO₂ 濃度から感染リスクを推定する方法を提案した。室内の CO₂ 濃度の外気からの上昇は呼気中の CO₂ のみによるものとすれば式(8)が成立する。

$$Q_{O_2} \Delta C = C_a p N \quad (8)$$

ここに、

ΔC : 外気からの CO₂ 濃度上昇[-]

C_a : 呼気中の CO₂ 濃度[-]

N : 在室人数[人]

これより、式(1)の p/Q_{O_2} を式(8)を用いて変形すれば式(9)を得る。

$$P_{inf} = 1 - \exp\left(-\frac{Iq \Delta C t}{C_a N}\right) \quad (9)$$

Rudnick らは、式(7)は定常はもとより非定常条件にも適用可能としている。

3. 新型コロナウイルスの quanta 生成率の推定

新型コロナウイルスの quanta 生成率に関する研究報告は限られているが、異なるアプローチで得られた結果を紹介する。

Miller ら¹⁶⁾は米国スカジット郡の音楽隊練習で起こったクラスター事例¹⁷⁾に対して quanta 生成率の推定を行った。61 人が 2.5 時間練習を行った結果、疑いを含めて 53 人の二次感染者を出したが、このケースではそもそも正確な二次感染率や換気回数、呼吸率などが不明であったので、これらの取り得る範囲を想定してモンテカルロ法による解析を実施し、quanta 生成率の範囲を求めた。その結果は平均 970 1/h で 10 パーセントと 90 パーセント

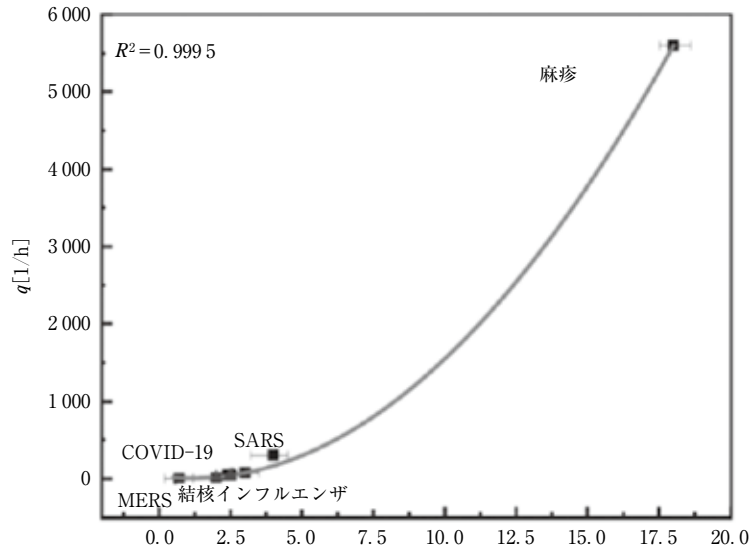


図-3 基本再生産数と quanta 生成率の相関関係

表-1 Buonanno らと REHVA の想定する quanta 生成率

Buonanno ら		休息口呼吸	軽作業会話	軽作業歌唱 (大声出す)	重作業口呼吸
90 パーセンタイル値 記号		3.1 ①	42 ②	270 ③	21 ④
REHVA による quanta 想定値[1/h]					
教室 5.0	事務作業 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
0.95 ①+0.05 ②		0.60 ①+0.40 ②	0.70 ①+0.30 ②	0.80 ①+0.20 ②	④

ル値はそれぞれ 550 1/h と 1510 1/h となった。このように実際のクラスター事例を当てはめて推定する場合、一次感染者がスーパースプレッダーなどの例外的な条件であった場合が多いこと、空気感染以外の感染経路があった場合にも quanta 生成率の計算結果に反映されるなど、過大に評価される可能性は否定できない。

一方、Dai ら¹⁸⁾は quanta 生成率と感染症の基本再生産数との関係を多項式近似した結果に新型コロナウイルス感染症の基本再生産数 2.0~2.5 を当てはめて図-3 に示すように公共の場で低い代謝率の感染者からの quanta 生成率を 14~48 1/h と推定した。

感染事例と直接結びつけることなく、影響要素を積み上げることによって quanta 生成率を推定する方法を Buonanno ら¹⁹⁾が提案し、その計算には式(10)が用いられた。

$$ER_q = c_v \cdot c_i \cdot IR \cdot V_d \quad (10)$$

ここに、

ER_q : quanta 生成率[1/h]

c_v : 感染者の唾液中のウイルス濃度[RNA 量/mL]

c_i : ウイルス量と quanta の換算係数[1/RNA 量]

IR : 呼吸率[m³/h]

V_d : 感染者が吐き出す飛まつ濃度[mL/m³]

これらの中で例えば c_v は平均 10^7 RNA 量/mL としているが、発症時期との関係で $10^3 \sim 10^{11}$ と幅があるため、平均と標準偏差を想定する。同様の想定を他のパラメータについても行い、モンテカルロ法を用いて4段階の活動状態に対応する quanta 生成率の分布を求めた結果のうち 90 パーセンタイル値を表-1 に示す。パラメータの設定には相当の任意性が含まれるため、どの程度の安全率を設定するかは難しい問題であるが、REHVA(欧州の空調・換気設備に関する学協会)ではこの 90 パーセンタイル値に対して作業時間の重みづけ平均を行い quanta 想定値²⁰⁾を示している。これらの結果から明らかなのは、声を出すことのリスクである。教室と事務作業における quanta 生成率が低く抑えられているのは、その 95% を 3.1 1/h の休息(口呼吸)が占めていることを前提としているためである。これは、そもそも発声を伴わない呼吸での飛まつ発生量が極端に少ないことが反映された結果である。

4. 感染率、感染者数と 1 人当たり換気量の関係

以下では REHVA による quanta 生成率を式(1)に示す Wells-Riley モデルに当てはめて、感染症対策として 1 人当たり換気量を設定することの意義について考察を加える

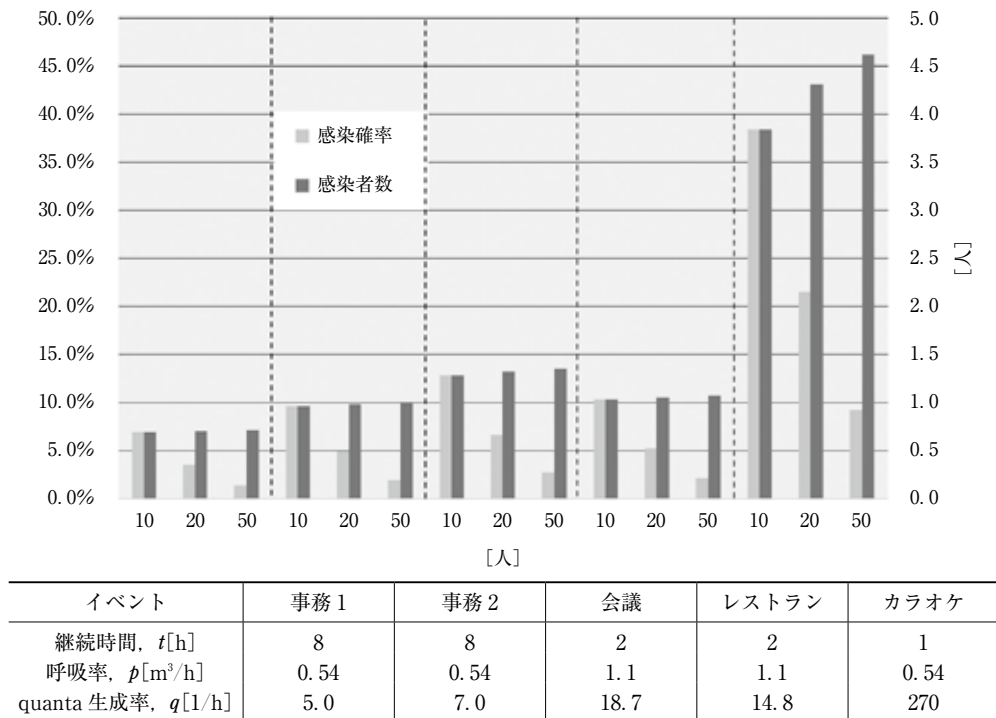


図-4 各種イベントに対する感染確率と予測感染者数

ことにする。表-1に示す標準的な事務作業を事務1とし、会話の比率を10%とした事務2を検討に加え、カラオケとして③を quanta 生成率とした。また、在室者として10, 20, 50人、呼吸率としてREHVAの計算法を参考²⁰⁾に会議とレストランの場合を1.1 m³/h、それ以外の場合を0.54 m³/hと置き、イベントの継続時間を想定した。換気量としては、1人当たり換気量として30 m³/hが確保されていること、1人が感染しているとして quanta 生成率を想定した(厳密に言えば室内の非感染者数=在室者-1とすべきであるが、感染者数と在室者数の関係を分かりやすくするために両者は等しいとした)。計算結果を図-4に示す。

図によれば、感染確率は概ね在室者数に反比例して減少している。これは換気量が在室者数に比例して増加し、式(1)が小さくなるためである。とはいえカラオケの感染者率がずば抜けて高いのは、表-1に示す歌唱に伴う quanta 生成率が非常に大きいためである。また、感染確率に在室者数を乗じて求めた感染者数の期待値が、在室者数にほとんど関係なく一定となっている。これは、感染確率が概ね在室者数に反比例し、これに在室者数を乗じると、両者が相殺して一定となるためである。この原因は次のように説明される。

$x=0$ 付近ではテーラー展開により式(11)が近似的に成立する。

$$x=1-\exp(-x) \quad (11)$$

式(11)は $x=0.05$ で誤差2.5%、 $x=0.1$ で誤差5%程度

であることから、この程度の範囲の値については良い近似式となっている。したがって、感染確率が10%程度までは式(1)を近似的に式(12)で表すことができる。

$$P_{inf} = \frac{Iqpt}{Q_{OA}} \quad (12)$$

一方、イベント終了後の二次感染者数を n [人]、在室者数を N [人]とおけば、感染確率： $P_{inf}=n/N$ となるので、二次感染者数をこの人数以下に抑えるためには、式(13)の条件が満たされる必要がある。

$$\frac{Iqpt}{n} \leq \frac{Q_{OA}}{N} \quad (13)$$

式(13)の右辺は在室者1人当たりの換気量となっており、必要換気量は左辺によって与えられることになる。一般に室内で想定される感染者数は高々1人であることから $I=1$ 、二次感染者数 $n=1$ 人とおけば、必要換気量の計算式として式(14)を得る。

$$qpt \leq \frac{Q_{OA}}{N} \quad (14)$$

quanta 生成率として図-4の表より事務作業： $q=7.0$ 1/h、呼吸率： $p=0.54$ m³/h、継続時間： $t=8$ hを代入すると、30.2 m³/hとなり、厚生労働省推奨値の30 m³/hに近い値が得られる。これより、1人当たり換気量の趣旨は、室内に在室する人数によらず、イベント時に万一感染者がいた場合、イベント終了後に複数の感染者を出さないために必要となる換気量と解釈することができる。なお、この考え方は在室人数が10人未満などの少数の場合に、イベ

ント終了後に1人の感染者を許容することにつながるため合理的ではなく、あくまで数十人以上が同室に継続して滞在する場合には、クラスターを発生させないための換気対策と考えるべきである。

おわりに

本稿では新型コロナウイルス感染症対策として厚生労働省が推奨する1人当たり30 m³/hないし2回/hの換気量の背景にある、カナダにおける結核の院内感染防止対策に関する調査結果の概要と、呼吸器系疾病の空気感染リスク予測モデルあるではWells-Rileyモデルとその拡張モデルの概要、モデルのキーパラメータであるquanta生成率の設定について述べ、感染モデルを背景とした1人当たり換気量の意味について考察した。簡単な計算から明らかのように、空気感染リスクを減らすために優先して取り組むべき対策は万一感染者が同一空間にいた場合のquanta生成率をいかに低減させるかに関わってくる。このための最も簡単で効果的な方法は全員がマスクを着用するユニバーサル・マスクングであるが、局所換気装置を有効に活用して室内に放散された飛まつ空間拡散を抑制することなどの換気効率を応用した対策や、対面ではあるが発声を伴わずに意思疎通を図る手段はないか、など新型コロナウイルス感染症は社会システムの在り方にも一石を投じていると考えられる。

文 献

- H. Nishiura, H. Oshitani et al.: Closed environment facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019(COVID-19) 16 April 2020 <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.02.28.20029272v2.full.pdf>(閲覧日 2021/4/24)
- 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年3月9日 <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000606000.pdf>(閲覧日 2021/4/24)
- World Health Organization: Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?, 9 July 2020 <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>(閲覧日 2021/4/24)
- Centers for Disease Control and Prevention: Scientific Brief: SARS-CoV-2 and Potential Airborne Transmission, 5 October 2020 <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/more/scientific-brief-sars-cov-2.html>(閲覧日 2021/4/24)
- 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年3月30日 <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf>(閲覧日 2021/4/24)
- Dick Menzies, Anne Fanning, Lilian Yuan, J. Mark FitzGerald, and the Canadian Collaborative Group in Nosocomial Transmission of TB: Hospital Ventilation and Risk for Tuberculous Infection in Canadian Health Care Workers, *Annals of Internal Medicine*, **133**-10, 21 November 2000
- Riley, E.C., Murphy, G., Riley, R.L. : Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am. J. Epidemiol.* **107**, 421-432, 1978
- Brent Stephens: HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases, NAFA Foundation Report, 1 March 2012 <http://www.nafahq.org/wp-content/uploads/WellsRileyReport.pdf> (閲覧日 2021/4/24)
- Fennelly, K.P., Nardell, E.A. : The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis. *Infect Control Hosp. Epidemiol.* **19**, 754-759, 1998
- Nazaroff, W.W., Nicas, M., Miller, S.L. : Framework for Evaluating Measures to Control Nosocomial Tuberculosis Transmission. *Indoor Air*, **8**, 205-218, 1998
- Fisk, W.J., Seppanen, O., Faulkner, D., Huang, J. : Economic benefits of an economizer system: energy savings and reduced sick leave. *ASHRAE Transactions*, **111**, 673-679, 2005
- Lai, A.C.K., Nazaroff, W.W. : Modeling Indoor Particle Deposition from Turbulent Flow onto Smooth Surfaces. *Journal of Aerosol Science*, **31**, 463-476, 2000
- Nicas, M., Nazaroff, W.W., Hubbard, A. : Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. *J. Occup. Environ. Hyg.* **2**, 143-154, 2005
- Gammaitoni, L., Nucci, M.C. : Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures. *Emerging Infect. Dis.* **3**, 335-342, 1997
- Rudnick, S.N., Milton, D.K. : Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, **13**, 237-245, 2003
- Miller, S.L. et al. : Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Vally Chorale superspreading event. Submitted to *Indoor Air*, 15 June 2020 <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.15.20132027v2>(閲覧日 2021/4/24)
- Hamner, L. et al. : High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice — Skagit County, Washington, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, **69**-19, 15 May 2020 <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/69/wr/pdfs/mm6919e6-H.pdf>(閲覧日 2021/4/24)
- Dai, H. and Zhao, B. : Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. *Building Simulation*, **13**, 1321-1327, 4 August 2020 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-020-0703-5> (閲覧日 2021/4/24)
- Buonanno, G. et al. : Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospec-

tive and retrospective applications, Environmental International 145, 6 September 2020 <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.01.20118984v1> (閲覧日 2021/4/24)

20) REHVA : REHVA calculator to estimate the effect of ventilation on COVID-19 airborne transmission <https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator> (閲覧日 2021/4/24)

(2021/1/30 原稿受理)

How should we determine the ventilation rate as a measure against COVID-19 ?

Takashi Kurabuchi*

Synopsis In Japan, from the early stage of 2020 when the COVID-19 infection began to spread, the importance of ventilation was pointed out by saying “Avoid the three Cs” to avoid the risk of cluster occurrence, and the Ministry of Health, Labor and Welfare recommended to

secure a ventilation volume of 30 m³/h per person. It is based on epidemiological findings on the risk of nosocomial infections of tuberculosis in Canadian healthcare facilities. On the other hand, the Wells-Riley infection probability model has been proposed for the purpose of evaluating the risk of airborne infection of respiratory diseases. This paper outlines the Wells-Riley model and its variations, and considers the significance of ensuring per capita ventilation based on the Wells-Riely model.

(Received January 30, 2021)

* Tokyo University of Science, Member



倉瀬 隆 くらぶちたかし
昭和34年生まれ/出身地 東京都/最終学歴 東京大学工学系大学院博士課程中退/学位 博士(工学)/その他 SHASE 技術フェロー

SHASE-S (スタンダード) 空気調和・衛生工学会規格

SHASE-S 013-2014

建築設備用配管ねじ接合シール材

適用範囲／用語及び定義／種類／要求事項
試験方法／検査／引用規格

付属書A (参考) 施工の指針
解説

- ・平成27年5月25日発行
- ・A4判 30頁
- ・定価 1,834円 (本体1,667円+税10%)
会員価格 1,650円 (本体1,500円+税10%)

当学会ホームページ(<http://www.shasej.org/>)にて、PDFファイルのダウンロード販売を行っております。詳細は、ホームページ“発行図書案内”をご覧ください。

SHASE-G(ガイドライン)紹介

SHASE-G 0021-2016

BEMSビル管理システムの 計画・設計と運用の知識

本書は、主として企業の若手から中堅の技術者を読者の対象と想定し、BEMSの基本的事項、自動制御の基礎的事項やBEMS設計の基本事項、関連設備に関する基本事項を記載している。

本書の前半は、大学・専門学校などで環境を学ぶ学生を意識し、7章以降の後半は、実際にビルを管理している技術者も活用できる内容となっている。
また、当学会ビル管理システム委員会の各小委員会において行われたBEMSに関する研究の成果が多く引用・参照されている。

主要目次

1. ビル管理システム概念と変遷
 2. BEMSの構成と概念
 3. 自動制御の基礎と代表的な自動制御
 4. BEMSの設計と表記法
 5. BEMSにかかわる関連システム
 6. 性能検証にかかわるBEMSの活用
 7. BEMSの効率的運用
 8. BEMSの更新
 9. 情報の標準表記と通信規格
 10. BEMS計画・設計と運用の事例
- 用語の解説
索引

発行日 平成28年3月25日

体裁 B5判 321頁

定価 5,500円(本体5,000円+税10%) 会員価格 4,840円(本体4,400円+税10%) 送料別途

ご注文は、下記にご記入の上、FAX(03)5206-3603(空気調和・衛生工学会)にてお申し込みください。

配 送 先	会社名		部署名		担当者名		注 文 部 数	冊
	住所	〒	TEL		FAX			

自然換気と感染リスク評価

山中俊夫 大阪大学 正会員

キーワード：自然換気(Natural Ventilation), 感染リスク(Infection Risk), 応答関数(Response Function)

自然換気は簡便に大容量の換気量を得ることができるため、感染防止に優れた換気手段であるが、気候条件に左右されることやその変動性などの欠点もあり、特性を十分に理解した上で利用するべきである。自然換気される病院における必要換気量としては、患者1人当たり160 L/sが提案されており、これは室容積24 m³での換気回数12回/hの2倍に相当する。また、換気効率とウイルス寿命を考慮する場合、ウイルス発生をパルスとみなした濃度応答関数を用いる考え方が有効であり、感染防止のためには、換気量とともに、室容積も重要な要因となる。

はじめに

本稿では、新型コロナウイルスなどによる感染症を防ぐための自然換気の手法とその効果について考えたい。自然換気は、古くて新しい室内環境技術であると言え、近年欧州では温暖化に対するパッシブな環境制御手法として、自然換気が“Ventilative Cooling”として着目されている。温暖多湿な日本では自然換気は伝統的な環境制御手法であり、日本の建築物の構成が軸組の木造であったことから、開口部が多く、必然的に隙間からの漏気による換気量も含めて自然換気量は多く、空気質の維持の観点からも空気清浄度維持のための重要な手法であると言える。本稿では、感染症予防という観点からの自然換気の特性について考えるとともに、自然換気の効果の評価する手法やWHO(世界保健機関)による感染症対策としての必要換気量についてのガイドラインについて紹介するものである。

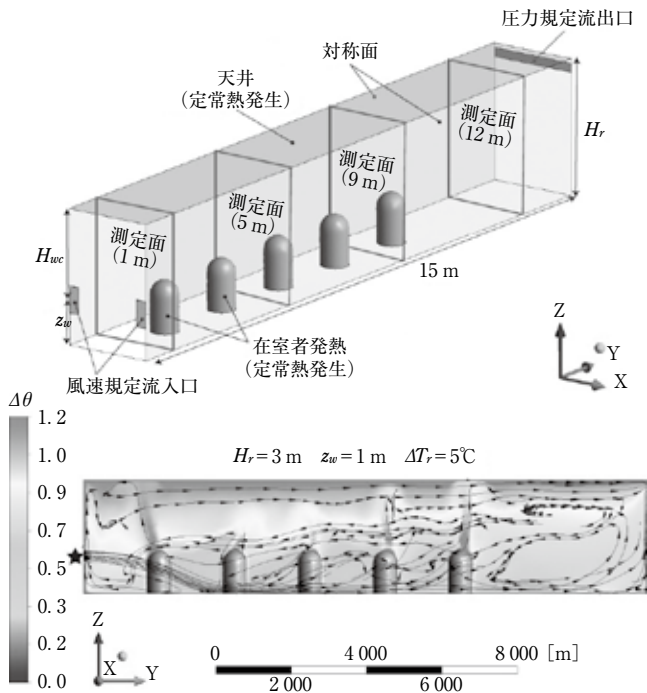
1. 自然換気の特性

端的な例として、病院にとっての自然換気の特徴を機械換気とハイブリッド換気(機械換気と自然換気の併用)を対比させたものが、表-1¹⁾である。この内容は隔離エリア意外については、病院に限らず、いずれの建物においても当てはまる特徴とすることができる。一方で、自然換気では、基本的に外気をそのまま取り入れることから、温湿度や騒音の問題以外にも、外部からの虫や花粉・ほこりの侵入などの問題があると考えられる。しかし、自然換気のメリットは大きく、病院以外においても、感染症予防対策として活用する価値は大きいと言える。

自然換気の特徴として、多くの場合、外気の温度と室内の空気温には差異があることから、温度差に応じて室内気流は影響を受け、室内に鉛直方向の温度分布が形成される。図-1は、自然換気時の内外温度差によって生じる室内の温度分布をCFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体解析)によって予測した例²⁾であるが、室内外に5℃の温度差があることから、温度の低い外気が室内に流入後、下降し床面に沿って流れることによって室内には鉛直方向の温度成層が形成されることがわかる。この例では排気側の開口が窓側の反対の壁面の上部に設置されていることから、温度成層が維持される。外気温によっては、居住者の足下の冷えなどの不快感につながることもあるが、20℃程度の外気であれば、室内の温度成層により置換換気と同じメカニズムで居住者から発生した飛まつ(沫)核などの感染の危険性のあるエアロゾルが室上部に運ばれて感染症予防に効果的である可能性があると言える。

表-1 病院における各換気タイプの特徴¹⁾

	機械換気	自然換気	ハイブリッド換気(併用モード)
利点	気候条件に応じた空調設備があればすべての気候・天候条件に適切制御がしやすく快適な環境 在室者がコントロールできる環境の範囲がより狭い	温暖な気候であれば適応-50%の時間はほどよく有効に使える シンプルな自然換気の場合はイニシャル・運用・メンテナンスのコストが安い 大風量が容易に得られる 在室者の環境制御範囲が広い	ほとんどの気候・天候に適応 省エネルギー よりフレキシブル
欠点	イニシャル・メンテナンスのコストが高い 必要な取り入れ外気量が得られていない報告例あり 機器からの騒音を避けられない	屋外の気候条件や居住者の行動に影響される 換気量の予測、解析と設計がより難しい 外気が暑熱、多湿、寒冷の場合に快適性を損ねる 隔離エリアにおいて負圧を実現することができないが、状況によっては適切な設計により達成可能 外部騒音が侵入する可能性がある ハイテク自然換気の場合は機械換気と同じ制限と欠点を有する	高額になりやすい

図-1 自然換気によって生じる室内温度分布²⁾

2. 自然換気量の計算方法

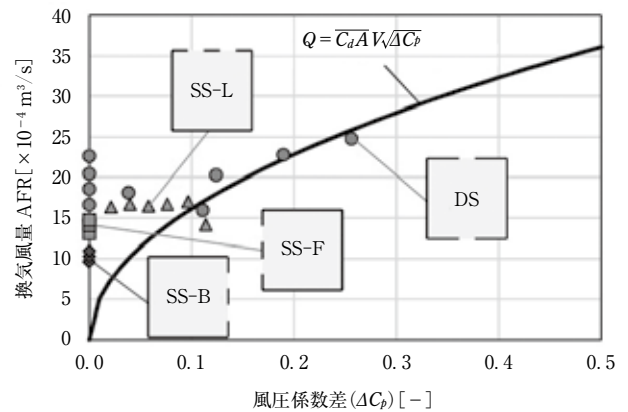
自然換気による換気量の計算方法は、開口のない場合の建物壁面の風圧係数を用いる方法が確立されており(例えば文献3)), 改めて述べるまでもないが、ここでは少し特殊なケースとして、単一開口換気に代表される片側換気による換気量の計算方法について述べておきたい。

表-2は、建物の壁面に一つの開口が存在する場合の風力による換気量を様々な開口条件において定量化した⁴⁾のものであり、開口前の建物壁面に沿う単位気流速度 U_i [m/s] 当たり、開口面積 A [m²] 当たりの基準化換気量が示されたものである。開口内のペーンの有無によって異なるが、単純な開口で、およそ0.02~0.03の換気量が得られることがわかる。同様の開口で、Yamanaka⁵⁾らは0.03~0.06の値の結果を得ており、例えば、建物壁面に沿って2 m/sの気流が存在する場合に、1 m²の開放窓があれば、約0.04~0.12 m³/s(144~432 m³/h)の換気量が得られる計算となる。また、片側に二つの開口部が存在するケースで、風圧係数差と換気量との関係が示されており、風向により風圧係数差がない場合でも、風圧の変動により0.1程度の風圧係数差の場合とほぼ等しい換気が行われることを示している(図-2)。

一方、窓のような長方形の単一開口における温度差による換気量は、開口部下端から中性帯高さまでの距離を h_n [m]、開口幅を W [m]、開口部の流量係数を a 、開口下端高さでの室内圧を p_m [Pa]、室内外の空気の密度をそれぞれ ρ_i [kg/m³]、 ρ_o [kg/m³] として、式(1)で表すことができる。

表-2 単一開口の規準化換気量⁴⁾括弧内はケース1との比

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
平面図				
立面図				
種別	単一開口 (基準形式)	単一開口 (主流方向に長い)	単一開口 +ペーン 45° (縦軸回転窓)	単一開口 +ペーン 90° (縦軸回転窓)
換気量 基準化	0.024 (1.0)	0.030 (1.3)	0.074 (3.1)	0.156 (6.5)

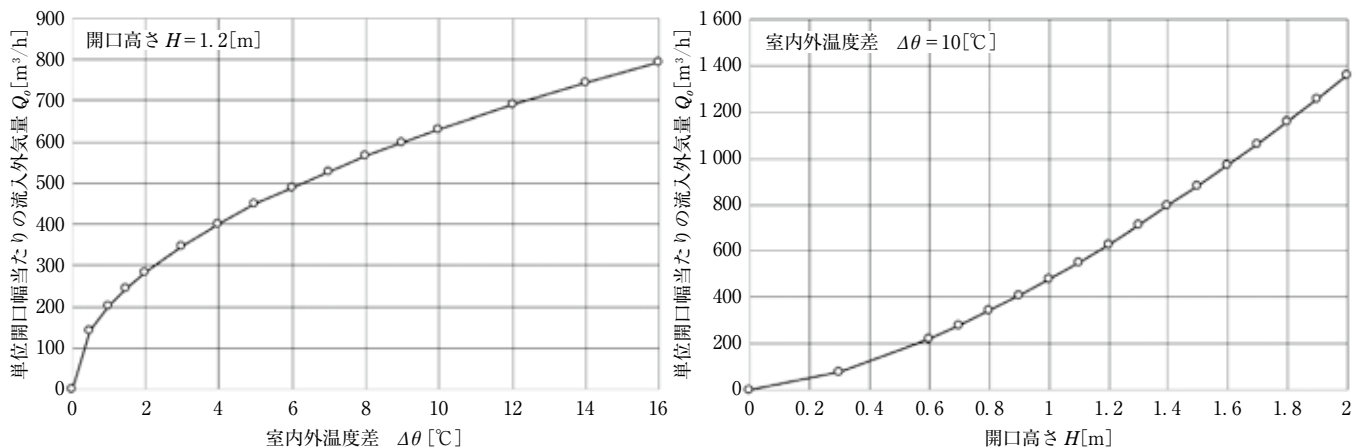
図-2 自然換気によって生じる風圧係数差と換気量⁶⁾

$$Q_o = \frac{1}{\rho_o} \int_0^{h_n} a W [2\rho_o \{(\rho_i - \rho_o) g h - p_m\}]^{\frac{1}{2}} dh \quad (1)$$

式(1)をもとに、室外から流入する質量流量 M_o [kg/s] と室外に流出する質量流量 M_i [kg/s] が等しいとして中性帯の高さを求め、流入する単位開口幅当たりの外気の換気量 Q_o [m³/m²・s] を導くと、式(2)が得られる。

$$Q_o = \frac{1}{3} a W \left(\frac{2H}{\rho_i^{\frac{1}{3}} + \rho_o^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left\{ \frac{\rho_i}{\rho_o} (\rho_o - \rho_i) g \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

いま、冬期を想定し、開口部の高さが1.2 mの場合に、室内の空気温を22℃と仮定し、室内外の温度差 $\Delta\theta$ [℃] と単位開口幅当たりの換気量 Q_o [m³/m²・s] との関係及び、室内外温度差が10℃の場合に、開口高さ H [m] と単位開口幅当たりの換気量 Q_o [m³/m²・s] との関係を図-3に示している。なお、流量係数 a については、信頼できる値が整備されていないことから、ここでは0.7と仮定した。図-3(a)より、例えば、腰窓($H=1.2$ [m])で、室内外温度差が4℃だったとしても、窓幅を1 mに開放すれば、得られる換気量は400 m³/hであり、1人当たりの換気量が



(a) 室内外温度差と単位開口幅当たりの換気量との関係

(b) 開口高さ と単位開口幅当たりの換気量との関係

図-3 単一開口における室内温度差による換気量

30 m^3/h とすると、13 人分の換気量が得られることになる。例えば、開口幅を 7.5 cm にした場合で、 $400 \times 0.075 = 30 [\text{m}^3/\text{h}]$ となり、1 人分として適当な換気量が得られる計算となる。単一開口であったとしても、自然換気がいかに大量の換気量を容易に得られるものであるかがわかる。また、図-3(b)からは、高さ 1 m の開口と 2 m の開口の換気量を比較すると、およそ 2.8 倍の換気量が得られており、腰窓より掃き出し窓の方がより換気効果が高いことがわかる。

3. 感染症対策のための自然換気ガイドライン

さて本稿での本題とも言えるが、感染症対策としての自然換気はどうあるべきかについて、2007 年に WHO が提案している自然換気ガイドライン¹⁾から必要換気量の推奨値について紹介したい。

主な推奨事項

- ① 医療施設における空気感染を防止する手立てのためには、患者がいるすべてのエリアにおいて十分な換気量が供給されることが必要である。

【強い推奨事項】換気量が不十分な場合には、感染のリスクが上昇し、空気感染制御のためには換気が効果的であることについて、ある程度の証拠がある。

- ② 自然換気については、以下の換気量(1 時間平均値)が供給されなければならない。

- ・ 空気感染警戒病室 (airborne precaution rooms) では、160 L/s・患者 (576 m^3/h ・患者、1 時間平均値)。最小換気量は 80 L/s・患者。この値は新築の医療関連施設や大規模改修工事の場合であることに注意されたい。
- ・ 一般の病室と外来部門では 60 L/s・患者 (216 m^3/h ・患者)
- ・ 常に決まった数の患者がいない廊下や他の通路空間

においては 2.5 L/s・患者 (9 m^3/h ・患者) とする。ただし、緊急事態やその他の状況下で廊下で患者のケアが行われる場合には、空気感染警戒病室や一般病室と同じ必要換気量が適用される。

なお、換気計画では、換気量の変動を考慮しなければならない。

また、自然換気だけでは推奨必要換気量が満足されない場合には、ハイブリッド自然換気(併用モード)のような代替換気システムを考慮しなければならない。なお、それでも十分な換気量が得られない場合には、機械換気システムを用いなければならない。

【状況に応じた推奨事項】自然換気の利用は気候条件の良い条件に限られる。

- ③ 医療施設の自然換気の計画を行う場合には、全体的な気流の流れは、感染病原体の存在するエリアから、十分な希釈が期待されるエリア、できれば外気に向けて流出するように計画されるべきである。

【状況に応じた推奨事項】室内の気流の方向が空気感染の拡大に関係しているとのいくつかの証拠はあるが、そのような拡大は非常に低い換気回数(4 回/h 以下)の場合で生じている。もし、隣室空間の換気量が十分に大きければ、感染リスクは極めて小さくなるであろう(例えば、オープンスペースなどの場合)。しかしながら、空気感染警戒病室に隣接する閉鎖空間の場合には、感染拡大の危険性を低くするために必要となる正確な換気量はわからないのが現状である。自然換気の利用は気候条件の良い条件に限られる。

- ④ 病原体伝染の恐れのあるエアロゾル発生(筆者注: 感染患者のせき、くしゃみ、会話など)がある空間に対しては、最低限推奨 2 に従った自然換気による必要換気量が必要である。感染病原体が空気伝染する場合

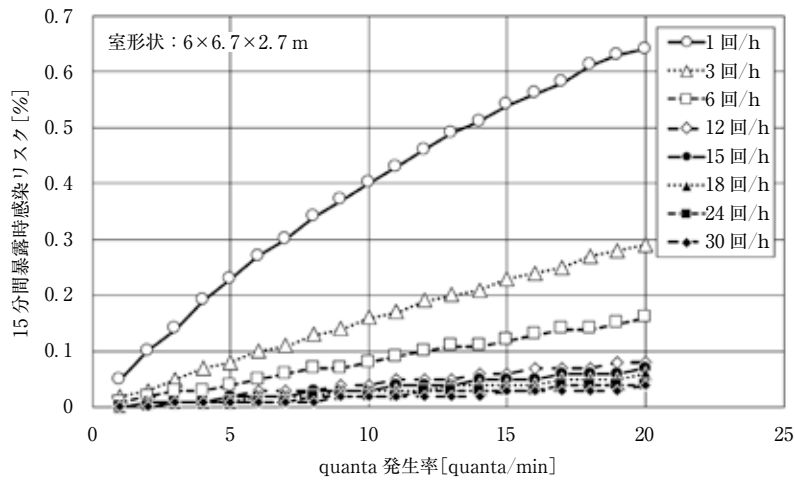


図-4 quanta 発生率と 15 分間暴露時における感染リスク (文献 1) より作成

は、推奨 2 と推奨 3 が守られなければならない。

【状況に応じた推奨事項】エアロゾル発生が感染リスク増加に関係しているという間接的な証拠がある。しかし、エアロゾル発生過程のための必要換気量については、今後の検討が必要である。

また、WHO のガイドラインでは、換気と感染リスクとの関係については、今後の検討が必要ではあるが、米国 CDC (疾病予防管理センター) から機械換気では換気回数 12 回/h 以上という推奨がなされていることを参考にしたと記述されており、同時に、自然換気が変動すること、流れの方向を制御することが難しいことなどを考慮して、現状の機械換気での推奨換気量よりも大きくすべきと述べている。機械換気での換気回数 12 回/h を $4 \times 2 \times 3 \text{ m}^3 (= 24 \text{ m}^3)$ の部屋に適用すると、80 L/s になるが WHO のガイドラインでは、2 倍の 160 L/s を要求しており、これは自然換気の時変動性によると説明されている。

4. 感染リスク評価と必要換気量

ここで、病室での換気回数 12 回/h がどのような理由で決められたかを紹介する。WHO¹⁾によれば、換気回数 12 回/h の場合、室内の完全混合を仮定すると、10 分間で 1/7 に希釈することができること、及び、Wells-Riley 式を用いて $6 \times 6.7 \times 2.7 \text{ m}$ の大きさの室を仮定した場合に、ウイルス発生量と換気量及び感染確率との関係を試算した場合 (図-4)、換気回数が 12 回/h 以上になると明らかに感染確率が低下することから、換気回数 12 回/h が決められたと述べている。図-4 から明らかなように、たしかに換気回数 12 回/h と 6 回/h の間の差異は大きく、換気回数が 12 回/h 以上になると、quanta 発生率に対する感染リスクの上昇がゆるやかになっていることがわかる。なお、quanta とは、確率的に 63.2% の人を感染させるウイルス (あるいは細菌) の単位のことを言う。つまり、図-4 自体

は新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) を対象としたものではないが、新型コロナウイルスに対しても適用することができる。

ここで注意が必要なことは、以下の式 (3) の通り、Wells-Riley 式では、感染確率は換気回数ではなく、換気量に反比例する形となっていることである。これは、室内の時間的な平均濃度が q/Q で表されるからであり、ここでは定常濃度が想定されていると言える。つまり、換気回数が一人歩きしてはならず、想定されている室の室容積 108.54 m^3 を乗じて、換気量 $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ と考えるのが正しい。

$$P = \frac{D}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right) \quad (3)$$

ここで、式中の変数は以下の通りである。

P : 感染源に暴露された場合の感染確率

D : 感染者数

S : 感染源に暴露された人の数

I : 感染者数

p : 人 1 人の呼吸量 [m^3/s]

q : 感染者からの quanta 発生量 [quanta/s]

t : 総暴露時間 [s]

Q : 外気供給量 (換気量) [m^3/s]

換気回数が一人歩きする危険性は、換気量を確保せず、少ない換気量でも室容積を小さくすれば換気回数が大きくなることから、室容積を小さくすることにより換気回数 12 回/h を確保する設計の間違いから容易に理解できよう。ところで、換気量が $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ であったとしても、容積が変わる場合には、WHO¹⁾の言うところの希釈速度としての換気回数、つまり 10 分間で 1/7 に希釈、という条件は満たされない。しかしながら、この希釈速度に基づく考え方は、理論的感染確率評価に基づくものではないことから、筆者は換気量をもとにした必要換気の基準として

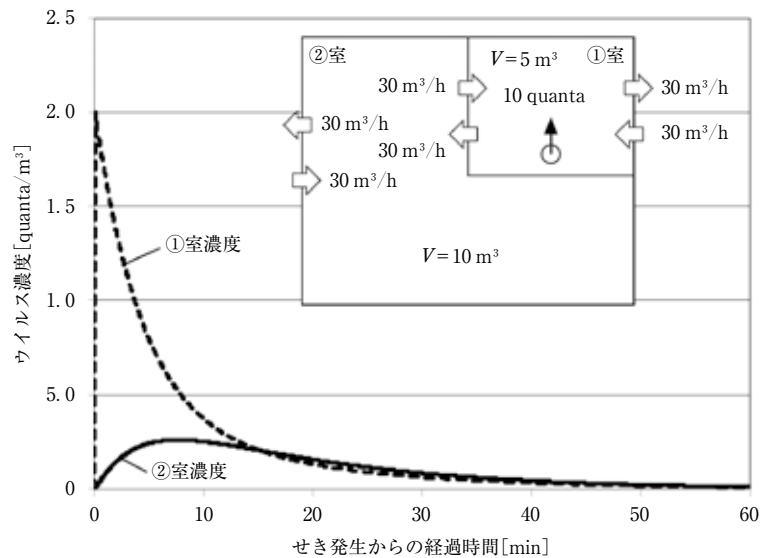


図-5 2室換気時でのせき発生時(1 000 quanta)の各室濃度変化

は、3. で述べた換気回数を基準にした換気量 160 L/s (576 m³/h)ではなく、換気量 1 300 m³/hが本来は望ましいものとする。

しかし仮に、換気量 1 300 m³/hを単一開口の自然換気により得ようとする、風力換気で窓前の風速が 2 m/sの場合に、基準化換気量を 0.02 とすると、9 m²の窓が必要となり、かなり大きな室でない現実的な開口面積ではないが、室内外の温度差 10℃での温度差換気による換気量を計算すると、図-3からは、高さ 1.3 m、幅 1 mの窓が二つあればよいことになり、風力換気よりは実現性が高い。ただしこのときの外気による暖房負荷は 4.6 kWとなり、かなりの暖房エネルギーが必要であることに注意したい。

なお、3. で述べた自然換気のガイドラインは、2007年に公表されたものであり、現在問題となっている COVID-19を対象としたものではない。しかし、ウイルス数を quantaで表していることから、当然新型コロナウイルスに対しても、適用できるものである。

5. 自然換気時の換気効率と感染リスク評価

前章にて、感染リスク評価に換気回数を用いることは正しくない理由を述べたが、本章では、換気効率を考慮した自然換気時の感染評価法について考える。

式(3)の Wells-Riley 式では、換気に関する変数としては、換気量だけが示されている。ここでは、ウイルスやウイルスを含む飛まつ核の室内での瞬時一様拡散を前提としており、室内の換気効率は 1、つまり完全混合の状態を前提としていると考えられる。しかし、図-1に示す通り、室内の混合状態は通常分布を有しており、室内での感染確率の評価のためには、室内の換気効率を考慮した感染モデ

ルが必要と言え。

換気効率には様々な定義のものがあるが、いずれの換気効率であっても、対象とする領域の汚染物濃度と換気量との関係は、一般形として、換気効率を η で表現した場合、次式の通りに書くことができる。

$$C = \frac{E}{\eta Q} \quad (4)$$

ここで、式中の変数は以下の通りである。

C : 対象領域でのウイルス濃度 [quanta/m³]

E : quanta 発生量 [quanta/s]

η : 換気効率 [-]

Q : 外気供給量(換気量) [m³/s]

なお、 ηQ [m³/s]は、ウイルス濃度低下に貢献する実質的な換気量、即ち“実効換気量”と呼ぶべき変数と言え、ウイルス濃度の評価を行う場合、最も重要な変数である。

自然換気を考える場合、建物内での換気経路が存在し、単に外気導入量(換気量)だけで、ウイルス濃度の評価はできないことは言うまでもない。例えば、複数の室が隣接する場合、片方の室でせきによるウイルス発生が生じる場合、各室では完全混合が成り立つとしても、室内では図-5に示すような濃度変化が生じる。

各室の濃度変化を時間積分することで、Wells-Riley 式の式(3)の qt/Q に相当するウイルス暴露量を求めることができる。ただし、各室内が完全混合でない場合には、濃度変化の計算は簡単ではなく、室内気流とウイルス発生位置と評価点を定めた上で、実験や CFD、あるいはゾーンモデルなどに基づく予測が必要となる。

6. ウイルスの寿命と感染リスク評価

空気中のウイルス濃度の変化に影響を与える要因は、換

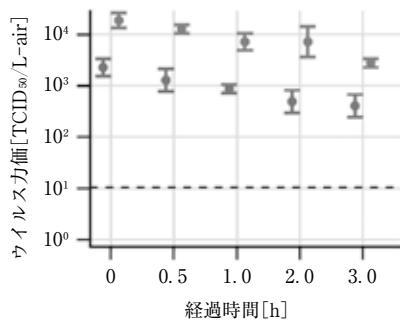


図-6 エアロゾル中の生存ウイルスの時間減衰⁸⁾

気だけではない。REHVA(欧州の空調・換気設備に関する学協会)のガイダンス⁷⁾によると、単室の室内濃度の変化を表現する微分方程式として、次式が示されている。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{E}{V} - \lambda C \quad (5)$$

ここで、変数は以下の通りである。

C : 室内ウイルス濃度[quanta/m³]

V : 室容積[m³]

λ : 一次減衰係数[quanta/h]

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_{dep} + k + k_f \quad (6)$$

λ_v : 換気回数[1/h]

λ_{dep} : 室内壁面沈着率(=0.3)[1/h]

k : ウイルス減衰率(=0.32)[1/h]

k_f : フィルタ式空気清浄機のウイルス除去効果(相当換気量)[1/h]

式(6)に示される通り、ウイルス濃度の一次減衰係数 λ は換気と壁面への沈着、ウイルス自体の減衰、空気清浄機などによる除去率の合計で表現されており、数値としては、換気による効果が最も大きいことは明らかである。しかし、新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の場合、空気中のエアロゾルとして浮遊している場合の活性度については、いくつかの研究データがあり、REHVA ガイダンス⁷⁾では例として $k=0.32[1/h]$ が示されているが、空気中の温湿度などにも依存すると考えられることから、その正確な予測は簡単ではないと考えられる。ウイルス濃度の一次減衰係数は換気と壁面への沈着、ウイルス自体の減衰、空気清浄機などによる除去の合計で示されている。この考え方では、ウイルスの活性度が指数関数的に減衰すると仮定されているが、それは図-6に示されるエアロゾル中の活性新型コロナウイルスの減衰過程を示す図において、その減衰が指数的であることから仮定されたものと考えられる。

式(5)は単室に対してのウイルス濃度の微分方程式であるが、図-5に示すような複数の室の相互換気を考える場合に拡張をすることは可能である。しかし、各室での換気効率を考える場合には、室内の濃度分布を考慮することに

表-3 2室換気時のウイルス暴露量LCD

	①室のLCD	②室のLCD	LCD ①/LCD ②
ウイルス減衰なし ($k=0$)	0.222	0.111	2.00
ウイルス減衰考慮 ($k=0.32$)	0.211	0.100	2.11

なることから、式(5)を用いることは不便である。なぜなら、例えば、最も換気効率が高いピストン流の場合には、式(5)は成り立たない。そこで、様々な換気効率を有する室における濃度変化を予測する方法として、最も汎用性に優れていると考えられるのが、感染者から発生する単位量(1 quanta)のウイルス発生に対する評価点でのウイルス濃度の時間変化を応答関数として用意し、感染者のせきやくしゃみ、会話などの条件に応じて、評価点での濃度応答を計算し、ウイルスの暴露量LCD(Local Cumulative Dose)[quanta·h/m³]を求める方法を提案したい。

いま、室内のある点Pにおいて、特定の場所にいる感染者による単位量のquanta発生に対するウイルス濃度の応答係数を $R_p(t)$ とすると、 q_i [quanta]の発生があった場合のLCDは、次式で求められる。

$$LCD = \int_0^{\infty} q_i R_p(t) dt \quad (7)$$

いま、活性化ウイルスの減衰曲線を $L_v(t)$ と表すとき、式(7)は次のように書ける。

$$LCD = \int_0^{\infty} q_i R_p(t) L_v(t) dt \quad (8)$$

式(8)を用いれば、任意の $R_p(t)$ と $L_v(t)$ に対して室内P点でのLCDを求めることができ、非常に汎用性が高い。例えば、ウイルスの寿命関数が減衰係数を用いた指数関数で表されるとすると、次式のように書ける。

$$L_v(t) = \exp(-kt) \quad (9)$$

いま、図-5に示したそれぞれの室内が完全混合の隣接2室での濃度変化がある場合には、ウイルスの減衰係数 $k=0.32[1/h]$ としてLCDを計算(24時間で積分)すると、表-3に示す通りとなる。表-3より、ウイルスの減衰を考慮する場合としない場合で、ウイルスの暴露量に差異が生じることがわかる。

上記の通り、複数室における自然換気下での感染リスク評価においても、換気量によってはウイルスの減衰効果を考慮することで、より正確な評価が可能になると言える。

最後に、単室を対象として、ウイルスの寿命を考慮し、瞬間的に $q_i=10$ [quanta]のウイルスが発生したとし、ウイルス減衰率を $k=0.32[1/h]$ と仮定し、室容積 V とLCDとの関係を換気量 Q 別に示したものが図-7である。この図の意味することは重要であり、同じ換気量であっても、

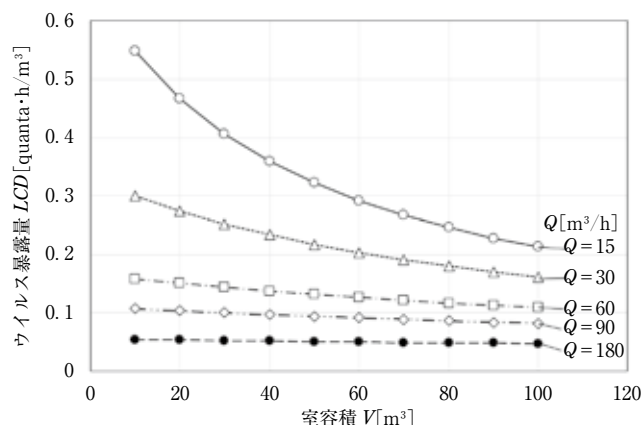


図-7 室容積とウイルス暴露量 LCD との関係

室容積が小さいと、ウイルス暴露量が大きくなり、感染リスクが高まることになる。換気量を確保するとともに、室容積も重要な要因とすることができる。

おわりに

本稿では、自然換気の特徴と必要換気量、感染リスク評価の考え方など、多岐にわたって私見を含めて解説を行った。いくつかの重要なポイントを以下にまとめる。

- ・自然換気の特徴をよく理解することが重要
- ・病室の必要自然換気量は患者1人当たり160 L/sと提案
- ・換気効率と寿命の考慮には応答関数の考え方が有効
- ・換気量の確保とともに室容積が大きいことが重要

文 献

- 1) WHO Publication/Guidelines : Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings, World Health Organization, 2009
- 2) Maria Alejandra, Menchaca Brandan : Study of Airflow and Thermal Stratification in Naturally Ventilated Rooms, Doctoral Thesis, 2012, Massachusetts Institute of Technology
- 3) 日本建築学会編：実務者のための自然換気ハンドブック，2013年，技報堂
- 4) 河野良坪，加藤信介，大岡龍三，高橋岳生：横風時における単一開口換気の実験的研究：片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究(その1)，日本建築学会環境系論文集，72-611(2007)，29-35
- 5) Toshio Yamanaka, Hisashi Kotani, Kiyotaka Iwamoto and Masahiro Kato : Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, International

Journal of Ventilation, 5-1(2006), 179-188

- 6) Tomohiro Kobayashi, Mats Sandberg, Takuya Fujita, Eunsu Lim, Noriko Umemiya : SIMPLIFIED ESTIMATION OF WIND-INDUCED NATURAL VENTILATION RATE CAUSED BY TURBULENCE FOR A ROOM WITH MINUTE WIND PRESSURE DIFFERENCE, 616 PROCEEDINGS of Roomvent & Ventilation, 2018
- 7) REHVA : COVID-19 GUIDANCE Version 4.0 “How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces”, REHVA(November 17, 2020)
- 8) Doremalen et al. : Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, N. Engl. J. Med., 382(2020), 1564-1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973 (2021/3/10 原稿受理)

Natural Ventilation and Prediction of Infection Risk

Toshio Yamanaka*

Synopsis Natural ventilation is quite an effective method to ventilate rooms, but the merit and defect should be well understood before using or planning this ventilation system. The natural ventilation requirement for health-care facilities is 160 L/s (576 m³/h) for one infected patient, and this corresponds to double of ACH of 12 l/h with a room volume of 24 m³. In order to take into account for ventilation efficiency and lifetime of virous, the evaluation method based on the impulse response is valid, and it can be said that the room air volume is also important in addition to ventilation rate in the case of accounting for the lifetime of virous.

(Received March 10, 2021)

* Osaka University, Member



山中俊夫 やまなかとしお
昭和34年生まれ/出身地 大阪府/最終学歴 大阪大学大学院/学位 工学(博士)/専門 建築環境工学/資格 一級建築士/その他 SHASE技術フェロー

SHASE-S(スタンダード)紹介

SHASE-S 010-2013

空気調和・衛生設備工事標準仕様書

改定の要点 地球を守り、人を守り、安全・安心な活動を継続するため、各種の規制が行われ、また新しい設備技術・手法が開発されている。これらの中からキーワードを抽出し、さらに空調・衛生設備が果たすべき事項、設備工事標準仕様書に反映すべき事項を選び出し改定項目の一部とした。編の構成は、時代の潮流に合わせ再編し中規模な改訂とした。第3編を“中央監視設備工事”とし第2編から独立させた。“BEMS”の項を追加した。第7編では“浄化槽設備工事”を“排水処理及び排水再利用設備工事”とし“ちゅう房除害設備工事”“排水再利用設備工事”“雨水利用設備工事”を追加した。第10編“医療ガス設備工事”を追加した。

主要目次

1. 共通工事
 2. 空気調和設備工事
熱源機器設備工事／空気調和機器設備工事／ダクト設備工事／配管設備工事／自動制御設備工事
 3. 中央監視設備工事
 4. 給排水設備工事
給水設備工事／給湯設備工事／排水通気設備工事／衛生器具設備工事
 5. 消火設備工事
水系消火設備／ガス系消火設備／フード・ダクト内自動消火装置工事
 6. ガス設備工事
共通工事／都市ガス設備工事／液化石油ガス設備工事
 7. 排水処理及び排水再利用設備工事
浄化槽設備工事／ちゅう房除害設備工事／排水再利用設備工事／雨水利用設備工事／ディスポーザ排水処理システム
 8. さく井設備工事
 9. ちゅう房機器設備工事
 10. 医療ガス設備工事
- 特記仕様書作成要領

発行日 平成 25 年 10 月 31 日

体裁 A4 判 頁数 308 頁

定価 3,300 円 (本体3,000円 + 税10%) 会員価格 2,970 円 (本体2,700円 + 税10%) 送料別途

ご注文は、下記にご記入の上、FAX(03)5206-3603(空気調和・衛生工学会)にてお申し込みください。

配 送 先	会社名		部署名		担当者名		注 文 部 数	冊
	住所	〒	TEL		FAX			

集団感染事例から学ぶ

尾方 壮行 東京都立大学 正会員

キーワード：新型コロナウイルス感染症(COVID-19)、集団感染(Cluster)、感染経路(Mode of Transmission)

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)に対してワクチン接種が始まっているが、今後さらなる流行波が生じる可能性は十分残っており、流行が収束するまでは引き続き感染対策を実施する必要がある。対象とする環境下で病原体がどのように伝播するかを把握し、それを防ぐ効果的な方法を検討する必要があるが、定量的な分析に基づいてその方法を定めるための詳細な調査事例は極めて少ない。そのため、感染事例に共通する条件を把握し、感染を促進する要因を極力少なくすることが重要である。本稿では、主にSARS-CoV-2の感染経路と対策を整理した上で、COVID-19の集団感染事例について解説する。

はじめに

感染対策を行うためには、対象とする環境で病原体がどのように伝播するかを把握し、それを防ぐ効果的な方法を検討する必要がある。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染拡大について、二次感染者数に大きなばらつきがあること、多くの二次感染者が発生するクラスター感染事例の多くは室内で発生し、共通する要因として、換気が悪く、人が密集する環境で、近距離での会話などが行われることがクラスター対策班および専門家会議の分析によって指摘された^{1,2)}。2003年から2004年にかけて流行した重症急性呼吸器症候群(Severe Acute Respiratory Syndrome: SARS)についても、多くの人へ感染を拡大させる少数のスーパープレッダーが存在し、二次感染再生産数に大きな分散があることが確認されている³⁾。スーパープレッダーと聞くと、多くの二次感染を引き起こす源となる宿主(宿主)のみが問題の焦点として考えられやすいが、実際には環境による影響も大きく、環境と人の関わり合いの中でスーパープレッディングなイベントが生じると考えられる。

日本では先述の集団感染事例に共通する要因の分析に基づいて2020年3月2日、9日に公表された専門家会議による見解で集団感染が発生しやすい場所や場面を避けるよう注意喚起がなされ、首相官邸・厚生労働省により新型コロナウイルスの集団感染を防止するために喚起の悪い密閉空間、多数が集まる密集場所、間近で会話や発生をする密接場面の“3つの密”を避けることを啓発するポスター⁴⁾が3

月19日に公表された。これにより、3密回避の必要性が広く早期に認識され、換気の励行などの対策が取られた。世界的にもMorawska, Miltonらを中心として感染性を保ったウイルスを含むエアロゾル粒子による空気を介した感染への対策の必要性を訴える働きかけ^{5,6)}があり、2020年7月9日に世界保健機関(WHO)も空気感染の可能性は排除できないと認めた⁷⁾。7月11日には3密回避を推奨するポスター⁸⁾を公表し、2021年3月1日に室内換気の改善および確保のための手引き⁹⁾を公表している。

室内環境制御による適切な感染対策を実施するためには、許容可能なリスクを定め、病原体を含む飛沫や飛沫核の発生量を呼吸量や発声の大きさ、マスク着用の有無に基づいて確率的に考慮し、その伝播を効果的に防ぐ環境制御の方法を検討することが望ましい。この分析を行うためには感染が起きた空間の換気量や室内環境に関する調査が必要であるが、多くの場合実施が難しく、調査報告例は極めて少ない。そのため、集団感染例に共通する条件を把握し、感染リスクを増大させる要因を極力減らすことが重要である。

本稿では、新型コロナウイルスの感染経路を整理した上で、主に集団感染事例についての報告を紹介し、感染拡大を促進する要因となりうる室内環境の条件に関する知見をまとめる。

1. SARS-CoV-2の感染経路と対策

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り発生する飛沫や飛沫核中に含まれる感染性を保ったSARS-CoV-2ウイルスによって感染する。この病原体を含む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と呼ぶ。図-1に主な感染経路を、図-2に感染性エアロゾル粒子への曝露様式と対策を示す。

SARS-CoV-2の主たる感染経路は、飛沫や飛沫核が鼻や口の中などの粘膜面に吸い込まれたり沈着したりすることで生じる飛沫感染であると考えられている。また、換気が不十分な閉鎖された空間では、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2mの距離を超えてエアロゾル粒子を介した感染が生じる可能性が指摘されている。この感染経路についてはエアロゾル感染やマイクロ飛

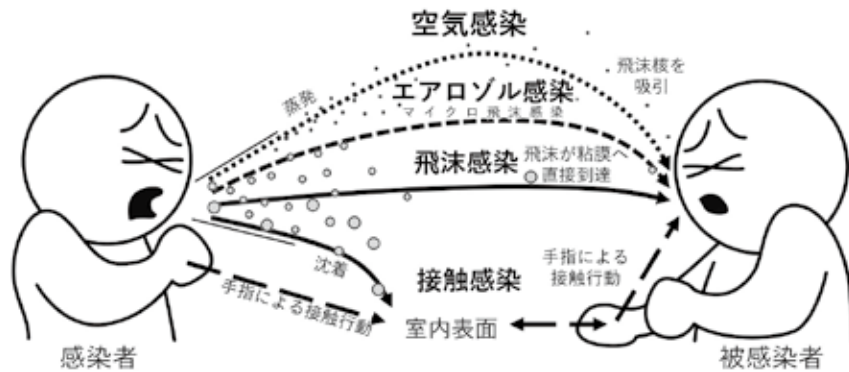


図-1 主な感染経路

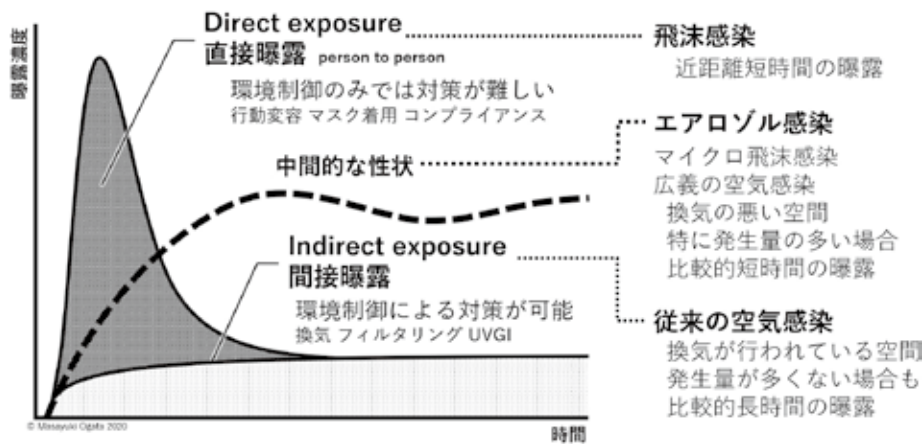


図-2 感染性エアロゾル粒子への曝露様式と対策

沫感染などと呼ばれ、従来空気感染すると言われてきた長距離を介して感染する結核や麻疹、水痘とは異なり、特定の条件下で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言える。現在では、ウイルスが付着した表面や物品に触れた後に自身の目や鼻、口に触れることで起こる接触感染は少ないと考えられている¹⁰⁾。

2. 集団感染事例

2.1 中国・広州レストラン

2020年1月24日に中国・広州のレストランで食事をした客からCOVID-19が発生し、3家族計10人の感染が確認された。感染者は9人の友人と約1時間から1時間半レストランに滞在し食事をとった。感染者と同じテーブルについた者の50%(10人中5人)が、7日間以内に感染が発覚した。隣接する風下のテーブルでは75%(4人中3人)が感染した。また、風上のテーブルでは7人のうち2人が感染した。エアコンによる循環流から外れた位置での感染はみられなかった。この疫学調査結果を報告したLuらは、エアコンの気流によって飛沫感染が促されたと結論し、人と人の間の距離を確保し、換気を改善することを推奨している¹¹⁾。この事例について、香港大学のLiらは換気量の測定および数値熱流体解析による室内環境の詳細な調査を

行った。結果として、換気装置としてはトイレの換気扇のみが運転され、レストラン客席の壁に設けられた換気扇は封じられ運転されておらず、換気量は431m³の室容積に対して換気回数で0.56~0.77回/h、1人当たり換気量で2.70~3.74m³/hと少なかったことを指摘し、換気不良が感染拡大の第一義的な原因であったと指摘している¹²⁾。

2.2 ダイヤモンド・プリンセス号

2020年2月に3711人の乗員乗客を乗せたダイヤモンド・プリンセス号内でCOVID-19の集団感染が発生し、合計712人の感染者が確認された。

ダイヤモンド・プリンセス号における感染伝播について推測するため、国立感染症研究所が船内の環境調査を実施した。船内の共有部分97カ所と乗員乗客の49部屋490カ所について、スワブ法でサンプルを採取し、国立感染症研究所でReverse-transcription polymerase chain reaction (RT-PCR)にてSARS-CoV-2 RNAを検出した。また、空気サンプルを7部屋14カ所から採取した。退室からRNA検出サンプル採取までの日数は最長17日であった。結果として、感染者周囲の環境は症状の有無にかかわらず汚染されており、トイレ周辺、机、電話機、TVリモコンなどから高い割合でSARS-CoV-2 RNAが検出されたことを報告している。感染者以外の部屋からはSARS-

CoV-2 RNA は検出されなかった。また、空気検体からは検出を認めなかった。空気伝播を示唆する証拠は得られなかったが、廊下天井排気口から SARS-CoV-2 RNA が検出されており、特殊な環境でウイルスが遠方まで浮遊する可能性について更なる検討が必要であるとしている¹³⁾。

このダイヤモンド・プリンセス号での集団感染について、循環空調が客室間の感染拡大に寄与した可能性を指摘する報道がある¹⁴⁾。ダイヤモンド・プリンセス号の客室区画は通常運用時には一般の中央式空調システムと同様、外気 30%、還気 70% の循環空調システムとなっている¹⁵⁾。横浜港にて 2 月 5 日に検疫隔離が開始された時点で循環ファンの停止、還気ダクト内ダンパの閉鎖、居室と廊下をつなぐドアルーバの閉鎖が行われ、循環空調の運転は停止され、客室には外気のみを取り入れる処置が取られている。そのため、以降の空調による客室における空気感染の可能性はない。Li らは症例に関する情報に基づき感染動態を分析し、船内での感染のほとんどは検疫が開始される前の通常のサービスが行われていた期間である 2 月 5 日までとなり、2 月 6 日以降の乗客の感染は感染者と同室の乗客に限られることを指摘している¹⁶⁾。ダイヤモンド・プリンセス号での感染拡大に循環空調が与えた影響を明らかにするためには通常のサービスが提供されていた 2 月 5 日以前に感染が成立したケースについて、飛沫感染や接触感染の可能性も含めて検討する必要がある。再循環された空気中に含まれた感染性を有するウイルスが、発生した部屋から別の部屋へと拡散される可能性はあるが、適切な換気が行われていれば、その濃度は低く保たれるため、空調システムを介して室間の感染拡大が生じるリスクは低いと推測される。主要な感染経路は近距離での飛沫感染であり、中央空調システムを介した長距離の空気感染は起きていないと考えられる。

2.3 韓国・ソウルコールセンター

216 人の従業員が働いていたコールセンターの 1 フロアで、94 人がウイルスの陽性反応を示した。感染は 2 月 21 日からの 16 日間に発生したと考えられている。感染した 94 人のうち 92 人が発症、2 人が無症状であった。オフィスの片側に感染が集中しているのに対し、反対側では感染者が非常に少なかったことから、コールセンターのような密集した執務環境では SARS-CoV-2 が伝播しやすいと考えられる。エレベータやロビーにおいて異なるフロアの従業員とも多くの接触があったであろうにもかかわらず、ほとんどの感染が 1 フロアで起こっていたことから、接触時間が SARS-CoV-2 の伝播を促進する主な要因である可能性が指摘されている¹⁷⁾。また、空調システムは 30 分から 1 時間の間隔で運転されていたことが報告されており¹⁸⁾、換気量が不十分であった可能性がある。

2.4 アメリカ・ワシントン州スカジット郡聖歌隊の練習

2020 年 3 月 10 日の聖歌隊の練習に参加した 61 人のうち、確定症例 33 人、可能性のある症例 20 人を含む 53 人の症例が確認された。確定症例の二次感染率は 53.3%、全症例の二次感染率は 86.7% であった。発症した 53 人のうち 3 人 (5.7%) が入院、2 人 (3.7%) が死亡した。2 時間半の歌唱練習では、メンバー同士が近くに座り、練習の終わりには椅子を重ねる作業をするなど、飛沫感染や接触感染の機会があった。発声が大きいとエアロゾル粒子の放出量が多くなるため、歌唱によって多量のエアロゾル粒子が放出され、感染に寄与した可能性がある^{19), 20)}。

2.5 ドイツ・食肉加工工場

ドイツ最大の食肉加工施設で SARS-CoV-2 の感染拡大が発生し、最初の発生から 1 カ月後に行われた検査で 1400 人以上の感染が確認された。2020 年 5 月の感染拡大について、原因調査が行われ、最初に確認された感染者は 3 日間の連続する勤務の間に、半径 8 m 以上の範囲にいた同僚にウイルスを感染させたことが示唆された。食肉加工工場の低温な環境、外気導入量の少なさ、ホール内空調システムによる空気循環が、激しい呼吸を伴う労働者の高負荷な肉体労働と相まって、ウイルスを含むエアロゾル粒子による 8 m 以上の距離を介した感染を可能にした要因であると指摘されている。このような状況下では人と人の間に 1.5~3 m の距離を取るだけでは感染を防ぐのには不十分であり、感染リスクを低減させるためにはマスクの着用や換気・気流の改善、空気清浄装置の設置が必要であると述べている²¹⁾。この他にも食肉加工施設における集団感染事例は各国で報告されている²²⁾。

2.6 航空機内

2020 年 3 月 20 日の神戸空港から沖縄空港までの 2 時間の航空機内で 148 人の搭乗者のうち、14 人の感染者が確認された。指標患者は 3 月 23 日に帰宅後 26 日に発熱、28 日に陽性反応が出た。指標患者は機内でマスクを着用せずに激しく咳をしていた。指標患者の左右 2 列 3 人のうち 2 人、前 3 列、後ろ 1 列、左右 2 列 10 人のうち 3 人、左右および後ろ 3 列 9 人のうち 2 人に陽性が確認された。前後左右 2 列を超える位置の座席からも確定例が認められた。利用した航空機の空調や換気の状態、指標患者の機内での行動範囲、搭乗前後の乗客同士の接触歴は把握されていないが、確定例の座席の分布から、飛沫感染およびマイクロ飛沫感染の可能性が疑われている²³⁾。

航空機内の感染拡大は感染者から同心円状に広がり、また 2 列を超える座席からも感染が確認されている。このことから、直接的な飛沫・飛沫核への曝露だけではなく、ウイルスを含むエアロゾル粒子の濃度が高い範囲で曝露を受

けることで感染が生じていると推察される。

2.7 地下鉄運転士

地下鉄大江戸線清澄乗務区で2020年12月15日から2021年1月3日にかけて、運転士39人にCOVID-19への感染が判明した。感染者は大江戸線に乗務する運転士の約2割にあたり、濃厚接触者となった運転士4人も出勤ができなくなったことにより、大江戸線は2020年12月27日から2021年1月11日にかけて運転本数を平常時の約7割に減らす運行が行われた。運転士は始発電車の乗務などに備えて庁舎に宿直し、飲食スペースや洗面所、浴室を共用していた。感染経路としては、食事や休憩中のマスクを外した状態での会話による飛沫感染の他、共用スペースの人が触れる表面や物品を介した伝播の可能性が考えられる。

この感染事例について、歯磨きの際の唾液が付着した手で共用洗面所の蛇口に触れたことにより、感染が広まった可能性が高いと保健所が指摘したという報道があった²⁴⁾。報道された内容について日本口腔衛生学会理事長山本喜久氏が該当保健所に問い合わせた結果、保健所は聞き取り調査を行っただけで、感染源についての具体的検査などは行っていなかったことが判明したことを1月15日に学会員向けの挨拶で報告している²⁵⁾。蛇口はありうる感染経路のうちの一つであり、その他にも脱衣所や飲食時、入浴中などマスクを外す際の会話を控えることが指摘されていたが、報道では蛇口のみが取り上げられ他の情報が欠落していたことで、感染経路および必要な対策について偏った印象が与えられた。報道でも断片的な情報が断定的に伝えられ、ミスリードが生じる恐れがあることに注意が必要である。より適切な判断を行うためには、情報源を確認するとともに複数の資料にあたりながら妥当性を検証することが重要である。

おわりに

集団感染事例からは、密閉され、人が多く集まり、換気が不十分な中で、会話や大きな発声、激しい呼吸が行われるような感染を促進する要因が重なった環境では、少し離れた距離でも空気を介してSARS-CoV-2が伝播し、多くの感染者が生じる可能性が示唆されている。在室者数・室容積に応じた換気量の確保や室内空気への飛沫・飛沫核呼出量を低減するためのマスク着用などの対策を取れば、室内環境における感染拡大のリスクは十分に小さくできると考えられる。ただし、換気や空気清浄による対策のみでは、感染者から近距離・短時間での曝露や環境表面を介した感染を防ぐことはできないため、併せて人と人の間の物理的な距離の確保およびマスク着用、適切なタイミングでの手指衛生などによる飛沫・接触感染対策を講じなければ

ならない。今後、感染対策のために必要となる換気や空気清浄の条件を定量的に明らかにするため、環境要因が感染拡大を促進したと考えられる集団感染が発生した建築物の環境について、発生当時の室内環境や換気量、換気・空調設備の運転状況を調査する必要がある。

文 献

- 1) Nishiura H, Oshitani H, Kobayashi T, Saito T, Sunagawa T, Matsui T, Wakita T, MHLW COVID-19 Response Team, Motoi Suzuki : Closed environments facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19), medRxiv preprint, Feb 28, 2020. 0029272 <https://doi.org/10.1101/2020.02.28.20029272> (閲覧日 2020/3/22)
- 2) 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年3月9日 https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000121431_00093.html (閲覧日 2020/7/26)
- 3) Centers for Disease Control and Prevention : MMWR Morb Mortal Wkly Rep, 52(18); May 9, 2003, 405-411 <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5218a1.htm>
- 4) 首相官邸ホームページ <https://www.kantei.go.jp/jp/headline/kansensho/coronavirus.html> (閲覧日 2020/7/26)
- 5) Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, et al. : How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? Environment International. 142(2020), 105832 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>
- 6) Morawska L, Milton DK : It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19, Clinical Infectious Diseases, ciae 939 <https://doi.org/10.1093/cid/ciae939>
- 7) World Health Organization : Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. 9 July 2020 <https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>
- 8) WHO ホームページ <https://www.who.int/brunei/news/infographics--english> (閲覧日 2020/7/28)
- 9) World Health Organization : Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. 1 March 2021 <https://apps.who.int/iris/handle/10665/339857> (閲覧日 2021/3/2)
- 10) Center for Disease Control and Prevention : How COVID-19 Spreads. 28 Oct. 2020 <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html#print> (閲覧日 2020/10/29)
- 11) Lu J, Gu J, Li K, Xu C, Su W, Lai Z, et al. : COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, Emerg Infect Dis. 2020 Jul. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200764>
- 12) Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Hong L, Liang P, Li J, Xiao S, Wei J, Liu L, Kang M : Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant, medRxiv preprint, April 22, 2020 <https://doi.org/>

- 10.1101/2020.04.16.20067728
- 13) 国立感染症研究所：ダイヤモンドプリンセス号環境検査に関する報告(要旨)，2020年5月3日公表，5月20日修正
<https://www.niid.go.jp/niid/ja/diseases/ka/corona-virus/2019-ncov/2484-idsc/9597-covid19-19.html>(閲覧日 2020/7/26)
- 14) 朝日新聞：循環空調 感染にリスク，2020年7月27日
- 15) 小佐古ら：大型客船の空調システム設計についての紹介，Princess Cruises 三菱グランドシリーズ実施例(〈特集〉海を越えて“ひと”を運ぶ)，日本船舶海洋工学会誌，17(2008)，24-26 https://doi.org/10.14856/kanrin.17.0_24
- 16) Xu P, Hua Qian, Miao T, Yen H-L, Tan H, Cowling BJ, Li Y : Transmission routes of Covid-19 virus in the Diamond Princess Cruise ship, medRxiv preprint, Apr. 9, 2020. 20059113 <https://doi.org/10.1101/2020.04.09.20059113>
- 17) Park SY, Kim YM, Yi S, Lee S, Na BJ, Kim CB, et al. : Coronavirus disease outbreak in call center, South Korea. Emerg Infect Dis. 2020 Aug. <https://doi.org/10.3201/eid2608.201274>
- 18) Regular briefing of the Central Defense Countermeasure Headquarters, March 11, 2020 <https://www.korea.kr/news/policyBriefingView.do?newsId=156379672>
- 19) Hamner L, Dubbel P, Capron I, et al. : High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice — Skagit County, Washington, March 2020. MMWR Morb Mortal Wkly Rep., 69(2020), 606-610 <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6919e6>
- 20) Asadi S, Wexler AS, Cappa CD et al. : Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. Sci. Rep., 9(2019), 2348 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
- 21) Guenther T et al. : Investigation of a superspreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany, SSRN. July 2020 <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3654517>
- 22) Steinberg J et al. : COVID-19 Outbreak Among Employees at a Meat Processing Facility — South Dakota, March-April 2020, CDC, MMWR, 69-31 (August 7, 2020)
- 23) 国立感染症研究所：航空機内での感染が疑われた新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のクラスター事例，IASR，41(2020-10)，187-188
- 24) 共同通信社：運転士感染源，洗面所の蛇口か 都営大江戸

線の集団コロナ，2021年1月14日

- 25) 日本口腔衛生学会：理事長からの学会外部の皆様へのお知らせ，2021年2月4日 http://www.kokuhoken.or.jp/jsdh/general/file/notice_20210204.pdf(閲覧日 2021/2/10)

(2021/3/10 原稿受理)

Learning from Outbreaks of COVID-19 Infection

Masayuki Ogata*

Synopsis Vaccinations have begun against the COVID-19 pandemic, but the possibility of further epidemic in the future remains high. It is necessary to carry out the infection countermeasure continuously until the epidemic is settled. In order to implement the countermeasures, it is necessary to understand how pathogens are transmitted in the target environment and to consider effective methods to prevent them. It is desirable to determine the method based on quantitative analysis, but there are very few detailed investigations. Therefore, the next approach is to understand the conditions common to cases of infection and minimize the factors that promote infection. This article describes the infection routes and countermeasures for SARS-CoV-2 and explains cases of mass infection in COVID-19.

(Received March 10, 2021)

* Tokyo Metropolitan University, Member



尾方壮行 おがたまさゆき
 平成2年生まれ/出身地 千葉県出身/最終学歴 早稲田大学大学院創造理工学研究科博士後期課程満期退学/学位 博士(工学)

SHASE-M(マニュアル)紹介

SHASE-M 0001-1-2015

都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用

本書は建築設備業務に携わる方々が、コージェネレーションの計画・設計を行うにあたり実務的かつ段階的に知見が得られるように構成を行った。

また、可能な限り平易に解説しており、実務者のみならず学生の方々にも活用していただけるものと期待している。

主要目次

- 第1章 コージェネレーションの基礎
- 第2章 コージェネレーションの導入計画
- 第3章 コージェネレーションの実施設計
- 第4章 コージェネレーションの運用管理
- 第5章 コージェネレーションの構成機器
- 第6章 コージェネレーションと各種政策
- 第7章 コージェネレーションの設置事例
- 付 録

発行日 平成27年 3 月25日

体 裁 B5判 289頁

価 格 4,950 円(本体4,500円+税10%) 会員価格 4,455 円(本体4,050円+税10%) 送料別途

ご注文は、下記にご記入の上、FAX(03)5206-3603(空気調和・衛生工学会)にてお申し込みください。

配 送 先	会社名		部署名		担当者名		注 文 部 数	冊
	住 所	〒		TEL		FAX		

トイレ空間における COVID-19 の感染リスクと防止に向けた研究動向と課題

大塚 雅之 関東学院大学 正会員

キーワード：新型コロナウイルス感染症(COVID-19)、重症呼吸器症候群(SARS)、トイレ空間(Toilet Space)、給排水衛生設備(Plumbing System)、衛生器具(Plumbing Fixtures)、排水通気設備(Drainage, Waste and Vent System)

香港の高層集合住宅アモイガーデンでの SARS やダイヤモンド・プリンセス号での COVID-19 のウイルス感染事例にみられるように、生活の水まわりの空間、とりわけ、トイレ空間は排便・排尿、衛生器具使用後の手洗いなどの行為により、感染症の感染源及び感染ルートとなるリスクが非常に高い。本稿では、一般の建物のトイレ空間に設置される大便器、小便器、洗面器といった衛生器具、それらの衛生器具に接続される排水通気設備に注目し、国内外の研究動向を調査し、筆者の実験結果や知見も含め、感染症に対するリスクとその防止策について報告する。

1. トイレ空間を中心とした水まわりの感染防止対策の必要性

国立感染症研究所の調査報告では、2020年2月に起きたダイヤモンド・プリンセス号の船内での新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の集団発生において、患者の入っていた船室33室から検体を採取した結果、COVID-19をもたらし新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)のRNAの各部位からの検出頻度は、浴室内のトイレ床13室(39%)、枕11室(34%)、電話機8室(24%)及び机8室(24%)、TVリモコン室(21%)と浴室・トイレ空間での検出頻度が高かった¹⁾。

また、遡れば2003年に香港の高層集合住宅アモイガーデンで起きたSARSの集団感染事例では、SARSウイルス(SARS-CoV)が排水管から浴室内の破封した床排水トラップ(Uトラップ)を経由して室内に侵入し、換気扇を介してライトコートへ排出され、各住戸へまん延していったことが要因とされている^{2),3)}(図-1)。

今回、COVID-19の感染者のふん尿からもウイルスが検出されており便器からのふん口感染のリスクも指摘されたほか⁴⁾、感染者の増加とともに排水処理施設へ流入する未処理の下水中からもウイルスが検出されたことから下水道からの感染リスクも報じられている^{5),6)}(図-2)。特にトイレ・浴室空間は、衛生器具及びその使用者も感染源となること、また、衛生器具は排水設備を介し下水道ともつながっているため感染ルートとなるリスクが高く、感染防止

に向けた対策を講ずる必要がある。

2. 大便器トイレブースでの課題と感染防止

2.1 洗浄時の飛まつ(沫)の拡散現象とその抑制

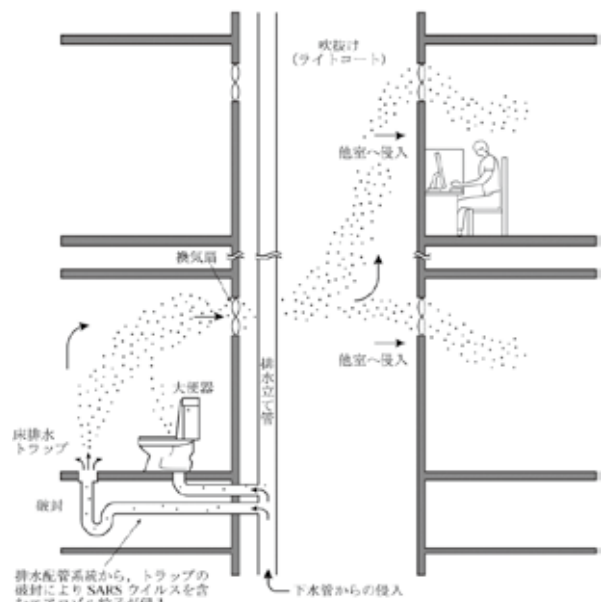
大便器の洗浄時に生ずる飛まつからの感染リスクは、諸外国では、今回もいち早く報じられており、洗浄時に飛ま



(a) 外観



(b) ライトコートと排水立て管



(c) ウイルスの拡散³⁾

図-1 アモイガーデンの外観(大塚)と SARS の拡散²⁾

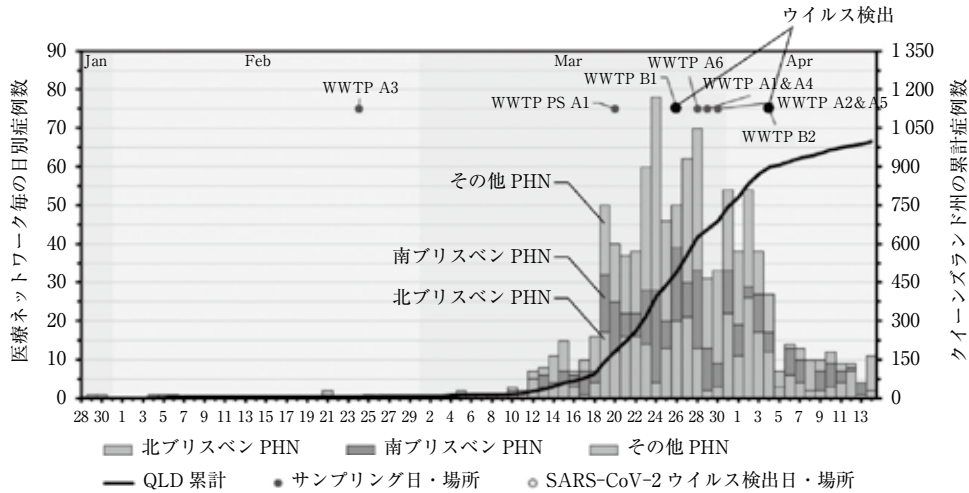


図-2 クイーンズランド州の COVID-19 日別症例数⁵⁾

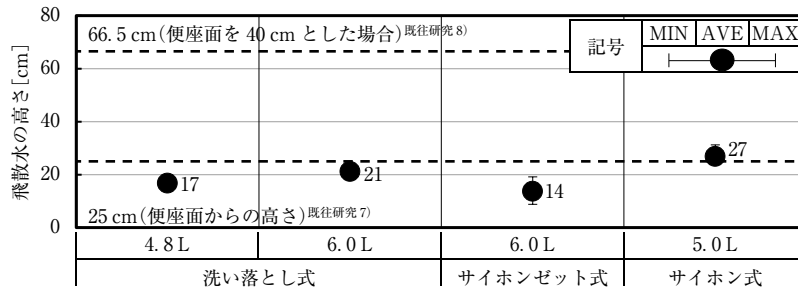


図-3 大便器測定時の高さ(測定5回の平均値)(大塚)⁹⁾
注 既往文献⁷⁾⁸⁾のラインも記入

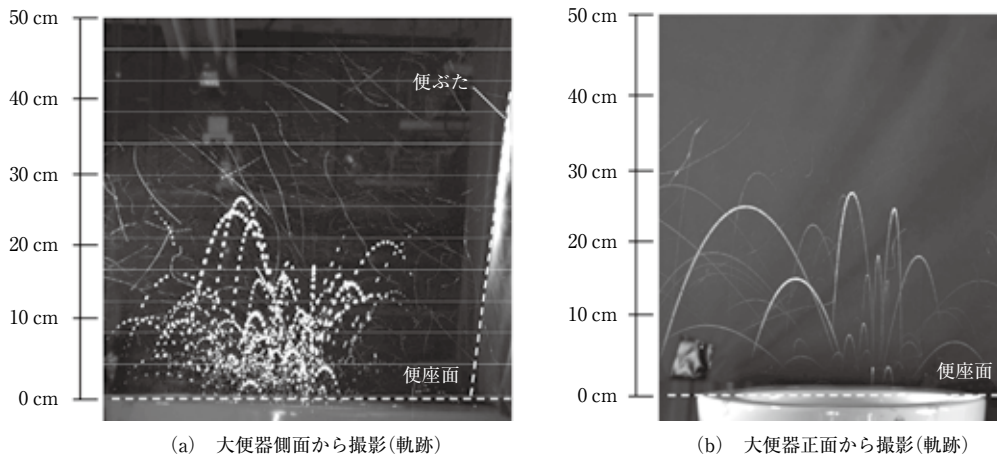


写真-1 大便器からの飛まつ測定の一例(大塚)

つの達する高さが E. L. Best らの実験では大便器の便座面から 25 cm⁷⁾, Yun-yun Li らの数値シミュレーションでは床面から 106.5 cm(便座面から 66.5 cm と推定)⁸⁾に及ぶことが報告されている。筆者の予備実験結果では、洗い落とし式、サイホン式、サイホンゼット式の大便器では、清水のみの洗浄水量 4.8 L と 6.0 L の差異を勘案しても飛まつの高さは、便座面から平均値で 20~30 cm 程度であることを確認している⁹⁾(図-3, 写真-1)。

そのため、後述する各国のガイドラインには、対策として便ぶたを閉めて洗浄することが記述されているが、使用後に洗浄を繰り返すことで飛まつが便ぶたの裏面へ付着する量も増加するため、使用前後の除菌、そして、頻繁に便ぶたの裏面、便座の表面を消毒・洗浄することなどが必要となる(図-4, 写真-2)。今回は一例を示したが、洗浄方法や洗浄水量の違いによっても状態は異なると思われるので、継続してその確認が必要である。

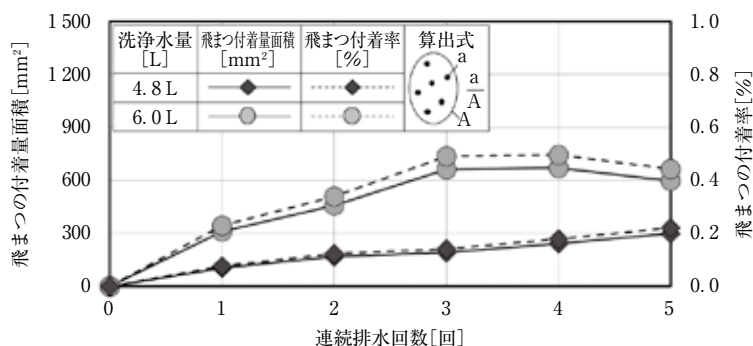
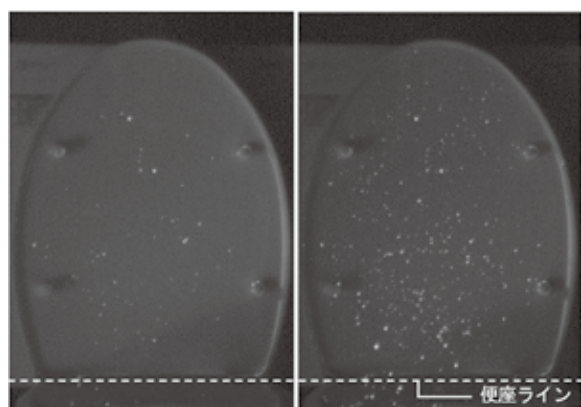


図-4 連続使用時の便ぶた裏面への水滴の付着の推移(大塚)

表-1 便ぶたへの飛まつ(直径 2 mm 以上)の付着評価(大塚)

洗浄水量	6.0 L	5.0 L	6.0 L
洗浄方式	洗い落とし	サイホン	サイホン
留水面			
洗浄回数			
1 回	37	2	3
2 回	74	6	1
3 回	103	9	2
4 回	101	14	4
5 回	98	19	6
判定	不合	合	合



(a) 排水 1 回目 (b) 排水 5 回目

写真-2 便ぶたへの飛まつ付着状況(大塚)^注

注 排水前, 排水 2 回目, 3 回目, 4 回目を除く結果のみ記載。

注 BL 試験法では, 要求性能(直径 2 mm 以上(3.2 mm²))が 25 個以下とする。

また, 我が国には飛散水の評価法としてベターリビング優良住宅部品性能試験方法書(便器)に“便器洗浄時の飛散試験法”¹⁰⁾があるが, 飛散する水滴数の測定方法の記述や測定精度に不明点もある。よって, 筆者は便ぶたにレーザーを当て飛散した水滴量の合計面積を画像処理して求め, 同試験法に規定する一つの水滴面積(直径 2 mm (3.2 mm²))で除した値を飛散水滴の個数とみなし計量した。その結果, 洗い落とし式大便器では, BL 試験法の許容数値(25 個以内)を超える結果が得られており, 洗浄方法の種類によっては, その改善及び試験法の見直しも併せて必要と考える(表-1)。飛まつ核のような細かい粒子をいかに捉え, 健康影響がどの程度あるのかを明らかにすることが課題である。

2.2 和式から洋式への更新と留水面の縮小化

トイレ空間の衛生性確保の観点から, 排泄物からの汚臭の拡散については, 田仲, 山中らの実験から設置される便器と周辺の開口条件, 使用者の姿勢や人体ブルームの状況にもよるが, 鼻周辺の汚染濃度は洋式便器に比べ, 和式の方が使用時の姿勢が低いこともあり高くなることが指摘で

きる¹¹⁾。

また, 2016 年に実施された文部科学省の調査報告では, 公立小中学校施設に設置された約 140 万個の便器のうち, 和式便器の設置個数は約 79 万個(56.7%), 洋式便器の個数は約 61 万個(43.3%)と前者が過半数を超え, 今後のトイレの改修では洋式便器への移行を望む声が多く, 衛生面からも更新が期待されている¹²⁾。

しかし, 表-1 のように最近の洋式大便器では節水化の促進により留水面が従来に比べ小さくなっており, 便器に要求されてきた衛生性確保の基本原則とは逆行することについては, 議論の余地があると考え¹³⁾。

2.3 在室時間の短縮と除菌・殺菌対策

大便器ブースがプライバシーの確保や防犯上の対策として密閉化される傾向にあるが, その反面, ブースがリフレッシュ(スマホ使用時間など)空間としても使用される傾向にある。筆者の調査では, 既往研究での占有時間, 器具平均排水間隔に比べ, 約 30% の男女使用者がそれらの時間より長くなる傾向にあることを指摘した¹⁴⁾(図-5)。

前述のとおり汚染度の高い空間であるため早く退室させ

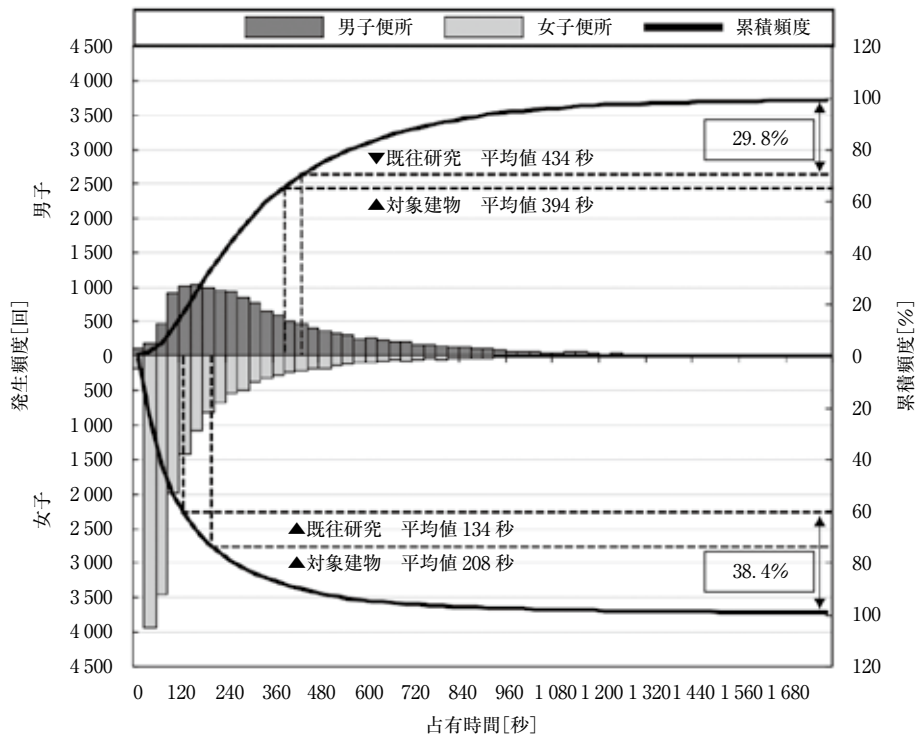
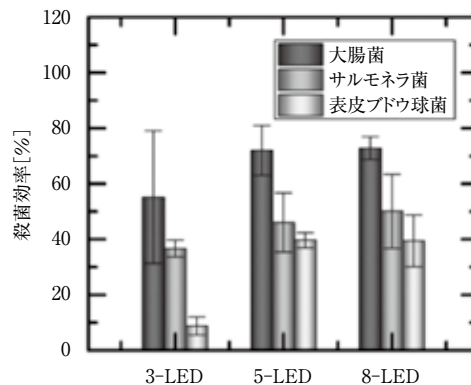


図-5 大便器ブースでの在室時間の例¹⁴⁾



(a) 便座に設置した UVC-LED 装置(5-LED)



(b) 表面殺菌の構成別の有効性¹⁵⁾

図-6 UVC-LED 装置と殺菌効果¹⁵⁾

注 横軸は(a)のように設置をした LED の数を表している。

ること、適正な換気量を確保すること、除菌・清掃された空間とすることが必要である。また、諸外国では、殺菌効果の高い C 波長の紫外線 LED (UVC-LED) 装置を大便器の便座に装着させ、大腸菌、サルモネラ菌、表皮ブドウ球菌などの殺菌効果を検討しており、今後はウイルスの殺菌・除菌装置を有する大便器の開発も期待される¹⁵⁾ (図-6)。

3. 洗面器周辺の課題と感染防止

3.1 手指洗い時間の基礎的根拠

接触感染防止対策となる手指の手洗いと消毒殺菌の励行について、WHO では、“石けんと清水またはアルコール

ベースの手指さっ(擦)式で手を洗う必要がある”¹⁶⁾と述べ、手が目に見えて汚れていない場合で手洗い時間を 20~30 秒と推奨しており、各国のガイドラインにも同様に記述されている。例えば、ISHARE(インド暖房冷凍空調学会)では、いち早く公開した COVID-19 ガイドラインの中で、“石けんを使用して、少なくとも 20 秒間の頻繁な手洗いを行うこと、常にアルコールベースの消毒を携帯し、手指洗いが不可能な場合には常に使用すること”を述べている¹⁷⁾。一方、我が国の給排水設備分野の研究では、紀谷らが、細菌の除菌を対象とし手洗い効果と細菌学的な検討を行い、衛生効果を得るための最低必要水量(ミニマム水量)について被験者実験による研究を実施している。その結果より、

表-2 手洗いと除菌率、水量など(紀谷ら)¹⁸⁾

アイテム	手洗い前の菌数 (before)	手洗い後の菌数 (after)	除菌率 [%]	すすぎ時間 [s]	水量 [mL]	流量 [L/min]
もみ洗い	5秒	36.0	93.1	12.2	939.9	4.622
	10秒	88.0	85.2	14.2	1088.6	4.600
	15秒	65.5	6.5	90.1	1331.2	4.617
	20秒	63.0	2.0	96.8	1385.6	4.568
	25秒	38.0	3.0	92.1	1449.4	4.752
	30秒	99.5	1.5	98.5	1486.0	4.926

注 除菌率=(前菌数-後菌数)/前菌数×100[%]

石けんを手につけての手洗いで洗浄流量が4.5~5.0 L/min程度、総水量で1.4~1.5 L/回とし、約20秒間の洗浄で細菌の除去率は92~98.5%となることが読みとれる¹⁸⁾(表-2)。ISHAREの推奨する洗浄時間(20秒)とも概ね一致した見解となる。

一方、細菌類より小さな粒子となるウイルスを対象とした実験では、流水のみの15秒手洗いで約1%、ハンドソープで10秒または30秒のもみ洗い後、流水での15秒すすぎで約0.01%、さらにハンドソープで10秒もみ洗い後、流水で15秒すすぎを2回繰り返すことで約0.0001%の除菌効果のあることが確認されている¹⁹⁾。この結果は、厚生労働省などの手洗いの効果に関する指針の根拠となっているものと推察する²⁰⁾(図-7)。

3.2 自動水栓の普及とハンドドライヤの使用

学校トイレ研究会が2020年8月25日に発表した2019年度全国自治体のアンケート調査の結果(総数204の教育委員会より回答)によれば、トイレの未改修の学校においてトイレについている水栓の実態は、ハンド水栓が78%、自動水栓が17%にとどまり、74%の自治体が今後の新築・改築の学校では自動水栓を導入したいとの回答結果を報告している²¹⁾。接触感染リスクを回避するために、公共施設、住宅などでも自動水栓の採用が推進され、施設の入口付近にも水場を設置し、除菌した後に入館、入室するような水まわり計画の検討も必要であると考えられる。

一方、ハンドドライヤについては使用を禁止している施設が多く、厚生労働省でもハンドドライヤの中止と共通のタオルの使用を禁止している²²⁾。諸外国の研究では拡散する飛まつ数は、ジェットドライヤ、温風ドライヤ、ペーパータオルの順に多く、ペーパータオルに比べ、温風ドライヤで約6.8倍、ジェットドライヤで約27.2倍の飛まつ量となることが報告されている²³⁾(図-8)。現在もハンドドライヤの使用の是非については、様々な議論がなされている²⁴⁾。

しかし、手指洗いによるウイルスの除菌が十分に行われていない状態で、ハンドドライヤを使用することは、ウイルスの拡散につながる。まずは、前記の根拠に基づく十分な手指洗いを励行した上で、建物管理が十分なされている

手洗い時間・回数による効果²⁰⁾

手洗いの方法	残存ウイルス(残存率)*
① 手洗いなし	約1000000個
② 流水で15秒手洗い	約10000個(約1%)
③ ハンドソープで10秒または30秒もみ洗い後、流水で15秒すすぎ	数百個(約0.01%)
④ ハンドソープで60秒もみ洗い後、流水で15秒すすぎ	数十個(約0.001%)
⑤ ハンドソープで10秒もみ洗い後、流水で15秒すすぎを2回繰り返す	約数個(0.0001%)

* 手洗いなしと比較した場合

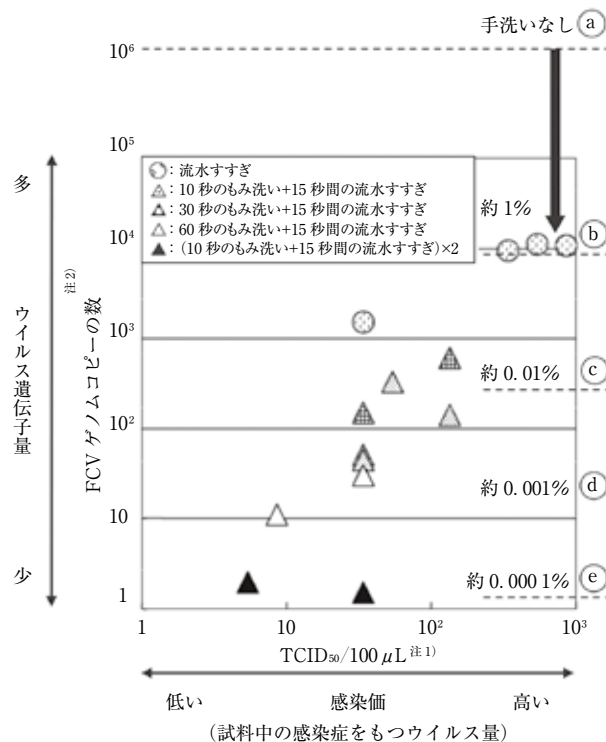
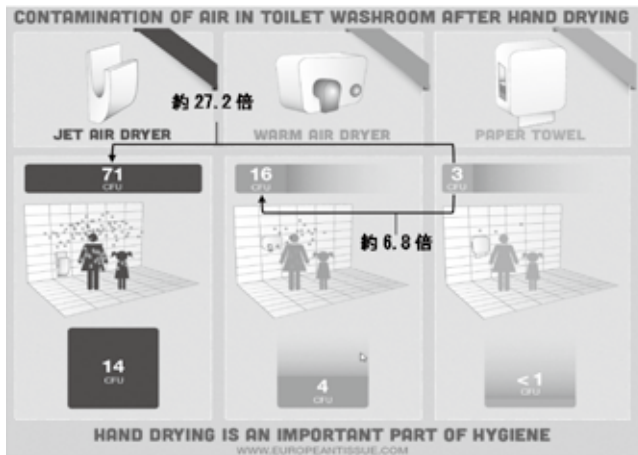
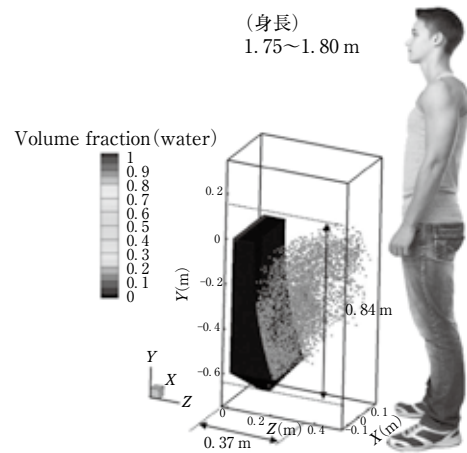


図-7 手洗いの除菌効果(文献19)に筆者追記)

注1) TCID₅₀とは、組織培養細胞における50%感染量のこと、本文中には感染価として表されている。10倍段階希釈したウイルス液(FCV)100 μLを、CRF K細胞(ネコ腎細胞)に投与して培養した結果、50%の細胞が感染した量がTCID₅₀/100 μLで表されている。

注2) 手洗い後のウイルス回収液100 μLを試料として、この試料液中のRNA抽出後、逆転写してcDNAとしてRT-PCRで測定し、ウイルスの遺伝子量(FCV遺伝子量)を求めている。

図-8 ハンドドライヤ使用時の飛まつ拡散²³⁾図-9 排尿時の飛まつ拡散²⁶⁾

トイレで使用していくことが大切であろう。また、ハンドドライヤの手挿入部、ドレンタンク、排水路、フィルタなどの清掃を徹底することが必要であると考え。今後の研究動向が注目される^(注)。

4. 小便器周辺の課題と感染防止

感染者の尿サンプルからもウイルスは検出されており²⁵⁾、小便器のボール面、トラップ部分を衛生的に保つために、尿石の付着抑制対策をも考慮し、使用後にすぐに洗浄すること、既存建物ではマニュアル式のボタン洗浄式も残っており、洗浄は非接触の自動洗浄式へ更新することが望ましい。また、既往文献による排尿時の飛まつ拡散についてシミュレーション結果では、計算上は小便器背面(壁面)から水平に約0.37m、垂直高さで床面から0.84m程度の範囲に尿の飛まつが拡散することの報告もあり、感染防止のためにマスクの着用を言及している²⁶⁾(図-9)。無水式小便器についてもボール面へのウイルスの付着などが懸念され、維持管理には留意する。

5. 排水通気設備における課題と感染防止

冒頭で述べたとおり、2003年のアモイガーデンでのSARSの感染事故は排水通気設備の不具合が要因となった(図-10(a))。今回のCOVID-19においても、2020年9月に中国の広州の高層集合住宅で同様に排水通気系統が要因とみられる感染事例が報告されている²⁷⁾(図-10(b))。中国における排水通気方式は、排水立て管(汚水、雑排水分流)と併設する通気立て管とを結合通気管を介して接続する方式が多く見られる(写真-3(a))。

中国の広州の事例(図-10(b))では、排水立て管・通気立て管内の温度差による上昇気流や排水負荷による圧力変



(a) 排水立て管・通気立て管 (b) トイレの床排水トラップ

(c) 浴室床排水トラップ施工

写真-3 中国の排水通気設備の例(大塚)

動が生じ、上階へウイルスが浮上し、乾燥し封水がなくなっていた雑排水系統でトラップを経由して侵入したことが報告されている。特にアジア諸国では、浴室に大便器が設置されていること、設置されている大便器や床排水トラップ(Uトラップ)の封水強度の弱いこと、長期にわたり使用しないために封水が蒸発してしまっていることなどの要因から、浴室・トイレがウイルスの感染経路となるリスクが指摘される(写真-3(b), (c))。

最近では、下水道も感染経路となるので下水中のウイルス濃度などを定量的に評価し、感染症がまん延する前に流行の兆候を把握しようとする“下水疫学”の研究²⁸⁾も進められており、建物側の給排水衛生設備研究との連携が必要な研究分野である。

(注) 一般社団法人日本経済団体連合会、新型コロナウイルス感染症予防対策ガイドラインの再訂について(2021年4月13日)ハンドドライヤの利用停止の削除(最終閲覧日 2021/5/13)

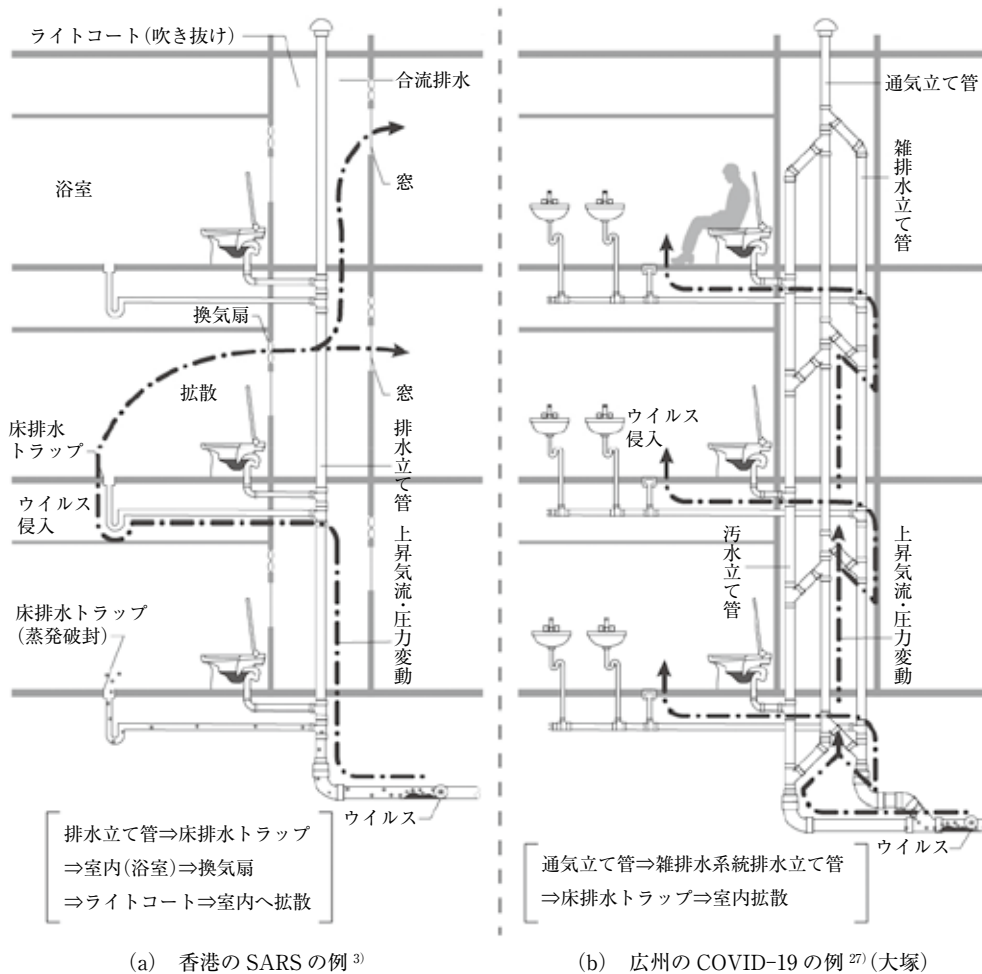


図-10 集合住宅の排水通気設備での事故事例(中国の例)



(a) 左床 排水トラップ (b) 床排水トラップの封水の蒸発と劣化

写真-4 我が国の湿式仕上げのトイレ(大塚)

我が国でも既存建物の中にはトイレの床面が、中国の場合と同様に湿式仕上げの場合も多く、その場合、床面に床排水用のわんトラップが設置されているが封水の蒸発、ごみの詰まりや劣化により封水が保持されていない場合も散見される(写真-4, 5)。封水の補充に留意するとともに、維持管理と衛生性の向上の観点から乾式仕上げへと更新



(a) ブース内と掃除口 (b) ふた付の掃除口

写真-5 乾式仕上げの最近のトイレ(大塚)

し、気密性の高いふた付の掃除口を設置すべきである。

6. 衛生設備に関連した COVID-19 対策ガイドライン

国内外の学協会が情報開示している COVID-19 対策に関する指針・ガイドラインの中より、給排水衛生設備に関連する記述を整理しておく(表-3)。いち早く詳細を記載したガイドラインを発表した ISHRAE では、接触感染対策

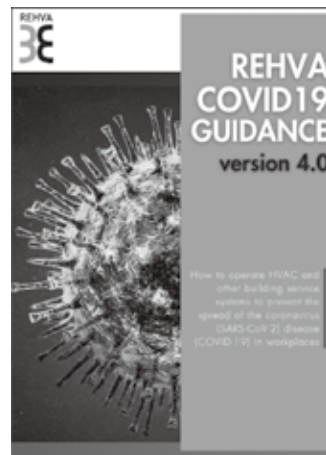
表-3 各国の COVID-19 対策ガイドライン(給排水衛生設備に関連した部分を整理)(大塚)

<p>(a) ISHRAE (The Indian Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers : インド暖房冷凍空調学会)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石けんを使用して少なくとも 20 秒間は頻繁に手指を洗うこと。常にアルコールベースの消毒剤を携帯し、手指洗いが不可能な場合は使用すること。
<p>(b) REHVA (The Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations : 欧州の空調・換気設備に関する学協会)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. トイレの排水溝と U トラップの封水は、少なくとも 3 週間以内ごとにチェックし補充すること。 2. 大便器を洗浄するときには、飛まつを抑えるため便ふたを閉めて排水すること。 3. 長期にわたり閉鎖していた施設が、再開したときの給湯・空調(冷却水)システムのレジオネラ属菌対策に留意すること。
<p>(c) IAPMO (The International Association of Plumbing and Mechanical Officials : 米国配管・機器認証協会)^{注)}</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 閉鎖されていた施設の再開に伴う給排水設備配管のフラッシング(配管洗浄)を推奨している。 2. 配管洗浄を実施する専門業者に対して、フラッシングのプロセス(手順)を提示。 3. 長期間使用していない浴室の清掃などでは、床排水トラップの封水が空になっていると下水ガスの充満によるガス爆発の危険性、ウイルス侵入の危険性があるので封水が乾燥してなくなってしまうドライトラップがないこと。 4. 封水に補充され復旧されていることを確認すること。 5. 排水管内で固形物が堆積し、フラッシング時に管内閉塞などがないことを室内に在室し確認すること。 6. 大便器を洗浄するときには必ず便ふたを閉めて、エアロゾルの発生を防ぐ。小便器の洗浄時に何回も洗浄する場合にはビニルシートで小便器を覆いエアロゾルの発生を防止すること。
<p>(d) SHASE (The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan : 空気調和・衛生工学会)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 大便器のふたは閉めて洗浄し、ふたの裏面は入念に除菌・清掃すること。 2. トイレの床面に清掃用に床排水トラップが設置されている場合は定期的に排水を流し封水を補充すること。 3. 蒸発のおそれのあるトラップには自動補給装置を設置すること、シール性の高いドライトラップ(非水封式トラップ)を設置することなどに留意する。 4. 洗面器のソープディスペンサーから石けんを手につけ、泡立てながら 10 秒以上丁寧にもみ洗いして、15 秒程度すすいでウイルスを流し、ペーパータオルなどでしっかりと乾かす。 5. 液体石けんなどが設置されていない場合でも流水で 15 秒以上、流し洗いをすること。

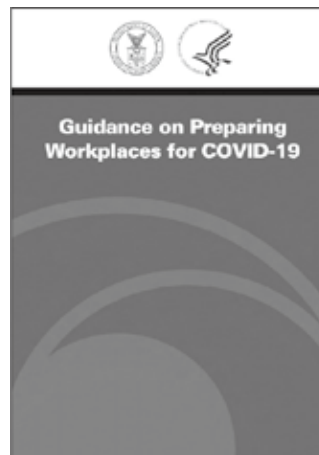
注 (c)は、主に配管の清掃・維持管理に従事する技術者への作業指針(Tips and Recommendations for the Safe and Efficient Flushing of Plumbing Systems in Buildings)を中心にまとめた。



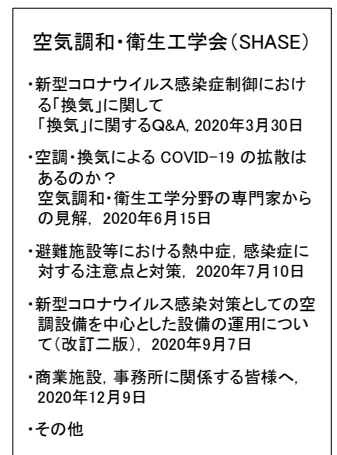
(a) 2020年4月策定



(b) 2020年3月策定後、4月、8月、11月、2021年4月の4回更新



(c) 一般的な内容の指針と配管・機器のメンテナンス技術者への指針



(d) 速報性を重視し、9項目の指針を提示(2021年5月17日現在)

として石けんを使用しての 20 秒間の頻繁な手洗いの励行などを指摘している。

REHVA(欧州の空調・換気設備に関する学協会)では 2020 年 3 月にガイドラインを策定した後、4 回にわたり更新しており、大便器の洗浄時の飛まつ感染防止のふたを閉めての洗浄、トイレブースの床排水トラップ(U トラップ)

を少なくとも 3 週間以内にチェックし封水補充すること、長期にわたり閉鎖していた施設設備の再開における給湯・空調(冷却水)システムでのレジオネラ属菌対策に留意することを記載している。一方、最近 CIBW 062 国際シンポジウムにも関係者が積極的に参加している IAPMO(米国配管・機器認証協会)では、一般的な指針と給排水設備機

設備	(1)大便器(排便・排尿)	(2)洗面器(手指洗い・乾燥)	(3)小便器(排尿)	(4)建物内外・敷地内外の排水管など
課題	・洗浄時飛まつ拡散(洗浄方式) ・臭気・衛生性(和式・洋式) ・長時間在室・気密化(休息空間化・占有時間の長期化)	・手指洗い衛生性(洗浄時間, 手洗い回数, ミニмум水量) ・乾燥時飛まつ(ハンドドライヤ内, 衛生性)	・排尿の洗浄と衛生性(尿石付着と成長・逆流の影響) ・乾燥面の増加(無水小便器・節水化) ・排尿時の飛まつ	・清掃作業の安全確保(下水道でのウイルス検出) ・清掃作業の健康影響(作業者の安全確保) ・親水空間・修景施設での水質の安全(建築物衛生法・雑用水基準)
対策	・飛まつを抑えた洗浄方法を有する節水形大便器の開発 ・便ふたの自動洗浄と除菌・殺菌 ・便座・床面の清掃方法 ・洋式便器への更新	・自動水栓の普及(再開する小中学校など) ・飛び散りの少ない洗面器ユニット ・ハンドドライヤ使用のルール化(十分な手指洗い後使用, 内部の清掃徹底, UVGI装置)	・無水小便器の不使用 ・衛生的な洗浄方法と洗浄制御方法 ・排尿時の飛まつ排出処理方法の検討	・清掃・維持管理マニュアルへの注意事項記載 ・トラップ封水強度などの確認・蒸発防止 ・設備の休止から再開時の設備の検査 ・レジオネラ属菌対策 ・フラッシングの実施
トイレ空間での給排水衛生設備と換気設備の総合的な対策の提案				排水通気設備と下水道(下水疫学など)との連携と総合的な対策

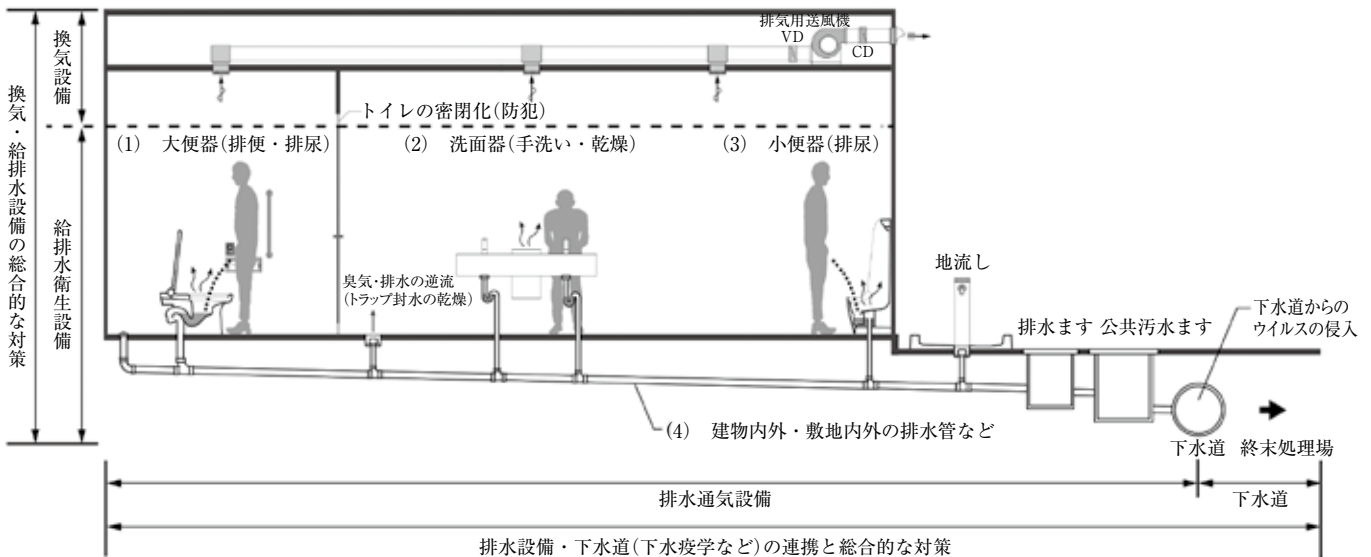


図-11 給排水衛生設備分野での感染症の要因と対策(大塚)

器・配管の清掃・維持管理に従事する技術者への作業指針を提示している(特に表-3(c)では、後者を記述)。その中では REHVA と同様に再開後の施設における事故防止として、機器配管の洗浄(フラッシング)の手順を示し、併せて下水臭気やウイルスの排水設備からの侵入防止のための蒸発破封したトラップのないことを確認することなどを指摘している。本学会においては、速報性を重視し、“換気空調設備の COVID-19 制御と専門家からの見解”の一環として、国内外のガイドラインも視野に入れ、主にトイレ空間における大便器のふたを閉めての洗浄、トラップ封水の確保、洗面器における衛生的な手洗い方法などを記述している。

おわりに

既往研究や各国のガイドラインから一般的な建物におけ

る COVID-19 などのウイルス感染防止に向けて、トイレ空間を中心とした水まわりと給排水衛生設備の課題と対策を整理する(図-11)。

- ① トイレ空間を給排水衛生設備とともに、ブース内は閉室空間であり、在室時間も長いいため換気設備をも含めて、水の安全、空気の安全を総合的に検討し対策を講ずる。
- ② 諸外国では大便器及び小便器での飛まつ感染の可能性について検討されているが、我が国の機器の飛まつ拡散の程度、有効な洗浄方法などを検討し、安全性の高い機器開発を行う。その一環として、大便器を和式から洋式へ更新の促進、抗菌・殺菌技術の装備、飛まつ拡散の少ない洗浄方法の開発などが必要である。
- ③ 洗面器に設置される水栓、また、公共空間に設置する水飲み器などは感染対策を講ずる。水栓類は非接触

型への更新, 手指洗浄後の乾燥方法(飛まつが少ない)の提案なども今後の課題となる。

- ④ 排水通気設備については, 床排水トラップなどの防水強度の確認, 蒸発破封の防止などに留意し, 日常の維持管理を徹底する。既築の湿式の床面のブースは乾式への変更が必要である。今後は, 建物内の排水設備と下水道との連携を図り, 下水疫学的な視点も加え, 総合的にウイルス感染ルートを断つ必要がある。
- ⑤ 機器・配管が運転停止で給水・給湯及び排水が行われていなかった際に, 運転再開時の清掃・フラッシングなどの実施とその強化を既存の維持管理マニュアルなどでも記載を強化しておく必要がある。

文 献

- 1) 国立感染症研究所: ダイヤモンドプリンセス号環境検査に関する報告(要旨), 2020年5月 <https://www.niid.go.jp/niid/ja/diseases/ka/corona-virus/2019-ncov/2484-idsc/9597-covid19-19.html>(最終閲覧日 2021/2/1)
- 2) 柳 宇: 新たな健康阻害要因—生物汚染, 保健医療科学, 63-4(2014-8), 342-349
- 3) 空気調和・衛生工学会換気設備委員会: 新型コロナウイルス感染対策としての空調設備を中心とした設備の運用について, 2020年4月
- 4) Yongjian Wu, et al.: Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples, *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 5(5) (2020-5), 434-435
- 5) Ahmed W, et al.: First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: A proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. *Sci. Total. Environ.*, 728(2020), 138764. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138764 2020.4
- 6) 国立感染症研究所: 環境水調査による新型コロナウイルスの下水からの検出, 2020年7月 <https://www.niid.go.jp/niid/ja/diseases/ka/corona-virus/2019-ncov/2488-idsc/iasr-news/9714-485p02.html>(最終閲覧日 2021/2/1)
- 7) E.L. Best, et al.: Potential for aerosolization of *Clostridium difficile* after flushing toilets: the role of toilet lids in reducing environmental contamination risk <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195670111003392#!>(最終閲覧日 2020/7/16)
- 8) Yun-yun Li, et al.: Can a toilet promote virus transmission? From a fluid dynamics perspective, *Phys. Fluids*, 32(2020), 065107, Published Online: 2020.6, Accepted: 2020.5 <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0013318> (最終閲覧日 2020/7/16)
- 9) 木村彩芳, 大塚雅之ら: トイレ空間における大便器の飛沫拡散とその評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会(福島)学術講演論文集(2021-9)投稿中
- 10) 一般財団法人ベターリビング: 優良住宅部品性能試験方法書 便器, BLT WC: 2013, 2013年4月
- 11) 田仲亮介ら: 臭気源物質の拡散防止を目的とする便所の換気設計に関する研究(その2) 自然体流場での人体ブルーム及び臭気源物質の拡散性状(洋式便所の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), D-2(2000-9), 611-612
- 12) 文部科学省: 公立小中学校施設のトイレの状況調査の結果について, 2016年11月 http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/28/11/_icsFiles/afieldfile/2016/11/10/1379078_1_1.pdf
- 13) 遠藤智行, 大塚雅之ら: 環境・設備から考える建築デザイン, 大便器の洗浄法, 2014年, pp.119-120, 鹿島出版会
- 14) 佐藤奨悟, 大塚雅之ら: オフィスビルのトイレ利用実態の把握と排水負荷算定データの検討に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会(札幌)学術講演論文集(2019-9), 189-192
- 15) Alvin CK Lai, et al.: A New UVC LED System for Disinfection of Pathogens Generated by Toilet Flushing, *Indoor Air*, 2020.9
- 16) World Health Organization: Water, sanitation, hygiene, and waste management for the COVID-19 virus, Interim guidance, 2020.4 https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331846/WHO-2019-nCoV-IPC_WASH-2020.3-eng.pdf?ua=1(最終閲覧日 2021/2/5)
- 17) ISHRAE COVID-19 Guidance Document for Air Conditioning and Ventilation https://ishrae.in/mailler/ISHRAE_COVID-19_Guidelines.pdf(最終閲覧日 2021/4/24)
- 18) 紀谷文樹ら: 手洗い効果の細菌学的検討, 空気調和・衛生工学会論文集(1990-2), 29-36
- 19) 厚生労働省: 手洗い時間・回数による効果 <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11130500-Shokuhinanzendu/0000105095.pdf>(最終閲覧日 2021/4/24)
- 20) 森功次, 林志直ら: Norovirusの代替指標として Feline Calicivirus を用いた手洗いによるウイルス除去効果の検討, 感染症誌, 80(2006-8), 496-500
- 21) 学校のトイレ研究会: 研究誌 23号“学校トイレの挑戦! 2020”, p.17
- 22) 厚生労働省労働基準局長: 職場における新型コロナウイルス感染症への感染予防, 健康管理の強化について 別添4, p.2, 2020年5月 <https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/000630690.pdf>(最終閲覧日 2021/4/24)
- 23) EUROPEAN TISSUE SYMPOSIUM Kunstlaan 44 Avenue des Arts B-1040 Brussels Belgium <https://europeantissue.com/hygiene/studies/potentialcontaminationenvironment2014/>(最終閲覧日 2020/9/9)
- 24) AIRDRI: Hand dryers unlikely to spread Covid-19, Microbiologist report confirms, 2020.4 <https://airdri.com/wp-content/uploads/2020/04/PR22003-Microbiologist-report-findings-FINAL.pdf>(最終閲覧日 2021/4/24)
- 25) Shufa Zheng, Jian Fan, et al.: Viral load dynamics and disease severity in patients infected with SARS-CoV-2 in Zhejiang province, China, January-March 2020: retrospective cohort study, *BMJ*, 369(2020):m1443, doi: 10.1136/bmj.m1443 Accepted: 2020.4 <https://www.bmj.com/content/bmj/369/bmj.m1443.full.pdf>(最終閲覧日 2021/4/24)
- 26) Ji-Xiang Wang, Yun-Yun Li, et al.: Virus transmission

from urinals, Cite as: Phys. Fluids, 32(2020), 081703 ; doi: 10.1063/5.0021450, Accepted: 2020. 7, Published Online: 2020. 8

27) Min Kang, et al. : Probable Evidence of Fecal Aerosol Transmission of SARS-CoV-2 in a High-Rise Building.

For author, article, and disclosure information, see end of text. This article was published at Annals. org on 1, 2020. 9

<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M20-0928> (最終閲覧日 2021/1/16)

28) 北島正章, 原本英司: 下水中の新型コロナウイルスの分析, ぶんせき (2020-11), 411-416

(2021/2/5 原稿受理)

sanitary spaces, especially toilet spaces, where activities such as defecation, urination and hand washing afterwards occur, are most likely places for infectious diseases to break out and be transmitted. This report provides knowledge regarding infection risks and prevention, including research trends and experiment results both in Japan and overseas, with a focus on plumbing fixtures, such as toilets, washbasins, urinals, which are installed in toilet spaces of ordinary buildings and drainage systems which are connected to those plumbing fixtures.

(Received February 5, 2021)

Research trends and challenges regarding COVID-19 infection risks from water supply and drainage systems and their prevention

Masayuki Otsuka*

Synopsis As seen in the case of SARS at the high-rise apartment, Amoy Gardens in Hong Kong and the case of COVID-19 on the Diamond Princess cruise ship,

* Kanto Gakuin University, Member



大塚雅之 おおつかまさゆき
昭和34年生まれ/出身地 静岡県/最終学歴 東京理科大学大学院理工学研究科博士後期課程修了/学位 博士工学/その他 SHASE 技術フェロー, 空気調和・衛生工学会論文賞, 技術賞など受賞

SHASE-S (スタンダード) 空気調和・衛生工学会規格

SHASE-S 115-2017

室内換気効率(規準化居住域濃度)の現場測定法

適用範囲および関連規格との関係 / 用語及び定義 / 規準化居住域濃度 / 対象空間と測定法の適応 / 測定機器及び周辺装置 / 定常濃度に基づく規準化居住域濃度の測定法 / 空気齢に基づく規準化居住域濃度の算出法 / 報告書の作成

付属書 解説

- ・平成29年改定
- ・A4判 33頁
- ・定価 1,987円(本体1,806円+税10%) 会員価格 1,788円(本体1,625円+税10%)

当学会ホームページ (<http://www.shasej.org/>) にて、PDFファイルのダウンロード販売を行っております。詳細は、ホームページ“発行図書”をご覧ください。