

〔特集〕新型コロナウイルス感染症の拡大防止に貢献する流体力学

新型コロナウイルス感染防止のための換気対策

東京理科大学 工学部 倉 洸 隆*

Ventilation Measures to Control COVID-19 Infection

*Takashi Kurabuchi, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

*E-mail : kura@rs.tus.ac.jp

1 はじめに

新型コロナウイルス感染症は、2019年の12月に中国の武漢で原因不明の肺炎患者が出て以来、全世界に急速に蔓延し、2021年に入ってもいまだその猛威は衰えない状況にある。日本では感染が本格化する2020年2月末までの国内感染者110名を対象とした追跡調査¹⁾の結果、クラスター発生リスクの高い条件を踏まえて「3つの密を避けましょう!」という新型コロナウイルス感染症対策専門家会議からの提言²⁾が2020年3月9日に公開された。その結果、「換気が悪い密閉空間」が集団感染リスクの高い条件であり、感染防止対策として換気が重要であることが国民全体に広く浸透している。その一方で、麻疹や水痘などの既往の空気感染症と新型コロナはどこが違うのか、換気が重要といってもどの程度の換気を確保すればよいのか、といった基本的な問題が一般には明らかとなっていない。

本稿では、これまでに得られている国内外の研究報告などに基づき、これらの疑問に対する知見を明らかにしようとするものである。

2 新型コロナウイルス感染症の感染経路

2.1 厚生労働省の見解

専門家会議によれば2020年2月末の段階で、新型コロナウイルス感染症の主要感染経路は咳やくしゃみに伴って感染者が発する飛沫を浴びることによる飛沫感染、触れることによる接触感染であり、空気感染は起こっていないとしていた。しかし、咳やくしゃみがなくても近距離で相対している場合、例外的に感染する可能性は否定できず、無症状や軽症の人であっても感染を広げる可能性があるとの認識を

新型コロナウイルス感染症はこうした経路で広がっています



※いわゆる「空気感染」は、結核菌や麻疹ウイルスで認められており、より小さな飛沫が、例えば空調などを通じて空気中を長時間漂い、長い距離でも感染が起こり得るもの。「マイクロ飛沫感染」とは異なる概念であることに留意が必要。

図1 新型コロナウイルス感染症の感染経路に関する見解を示していた³⁾。

その後、2020年7月末に新型コロナウイルス感染症対策分科会は、図1に示すように今回の疾病の感染経路は飛沫感染、接触感染に加えてマイクロ飛沫感染であるとし、マイクロ飛沫感染は5µm未満の飛沫核によるものであり、飛沫感染が生じる1~2mよりも少し離れた距離まで感染が広がる可能性があるとしている。その一方で、麻疹や結核は空気感染し、空調などを通じて運ばれ、長距離でも感染がみられるが、これとマイクロ飛沫感染は異なる概念であるとの認識を示している⁴⁾。

ここで、1980年代にアメリカで発生した麻疹のクラスター事例について空気感染の発生状況を見ていくことにしよう⁵⁾。図2に示す1フロアをDr. A, Bの2人の小児科医がシェアする小児科クリニックにある日、麻疹に罹患した子供がDr. Aのクリニックを訪れて帰っていった。その結果、図に示すようにフ



図2 クリニックにおける麻疹のクラスターの事例⁵⁾

ロアの隅々まで7人の二次感染者が発生し、特にその中の1人は感染者がクリニックを出た1時間後にクリニックを訪れて感染している。二次感染者がフロア全体に渡って発生した原因は、クリニックが循環空調を行っており、空調がウイルスを含む空気を運んだこと、感染源が不在でも、感染者が発したウイルスが活性を保った状態で残存していれば感染してしまうことを表している。このように麻疹における空気感染は、「空間から空間へ」空気が運ばれることによって、また、感染者が不在でも、感染者が発した飛沫由来の飛沫核(飛沫が乾燥によって $5\mu\text{m}$ 以下の大きさとなったエアロゾル粒子)が感染性を有した状態で空間に存在すれば感染が成立することが特徴となっている。

2.2 WHO(世界保健機関),CDC(米国疾病予防センター)の見解

一方、WHOやCDCは当初、新型コロナウイルスは空気感染しないと明確に述べており、従って感染防止対策としての換気的重要性についての注意喚起はなされていなかった。しかし、いくつかのクラスター発生事例を踏まえて2020年7月9日にWHOは次のように見解を変更している⁶⁾。

「屋内の混雑した空間に関連するいくつかの発生報告は、例えば合唱練習中、レストラン、またはフィットネスクラスでのエアロゾル感染と飛沫感染の可能性を示唆しています。これらのイベントでは、特に感染者が長期間にわたって混雑し、換気が不十分な場所など、特定の屋内場所での短距離エアロゾル感染を排除することはできません。」

ここでは、空気感染をエアロゾル感染と言い換えている。一方、CDCは2020年10月5日になって次のような見解を示している⁷⁾。

「主に密接な接触を介して伝染する病原体(すなわち、接触感染と飛沫感染)は、特別な状況下で空気感染を介して広がることもあります。SARS-CoV-2が長距離または長距離にわたって伝播されたように見える十分に文書化された例がいくつかあります。これらの感染イベントはまれに見え、通常、閉鎖空間で長時間(>30分から数時間)呼吸器飛沫を生成する感染者の存在を伴います。6フィート以上離れた場所にいる人、または感染者が去った直後にその空間を通過した人に感染を引き起こすのに十分なウイルスが空間に存在していました。」

このように、新型コロナウイルスの主要な感染経路は飛沫感染と接触感染によって「人から人へ」と広がるので、感染介入策としては社会的距離の確保、パーティション、殺菌清掃などの対策が一義的に重要であるが、換気の悪い混雑した密閉空間などの条件が揃うと、飛沫感染リスクの高い1~2mを超えて感染が広がる可能性があるとの見解を示している。

3 クラスター事例

3.1 広州レストランの事例

2020年の1月24日に武漢から帰って広州入りした家族がレストランで食事をしたところ、うち一人がその日の夜に発症した。家族が食事したテーブル(図3のTA)と隣接する2つの合計3テーブルの客の中から9人の二次感染者が出た。最初の感染者と二次感染者の同席時間は最短で46分間であり、店内カメラの記録から、接触感染の可能性は低いとされた。この事象を最初に取り上げた報告⁸⁾では、感染の原因は3テーブルの上部に取り付けられた空調ユニットからの暖房気流がテーブル間に循環気流を形成、その気流に感染者からの飛沫が乗って、通常の飛沫の飛散距離よりも遠距離運ばれたことが原因と推察した。

次の報告⁹⁾では、当時の状況を現地で再現した上で換気量の計測と室内気流のシミュレーション解析が実施された。その結果、クラスター発生当時、店内の換気扇はすべて停止状態にあり、入り口付近のトイレのみ換気扇が運転されていたことから、店内の換気回数は0.56~0.77回/h、89名の客が同席していたが換気量は $2.7\sim 3.7\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ と極端に少なかったことを明らかにした。その結果、クラスター発生の原因を空調ユニットによって形成された循環気流と過小な換気量によるウイルスの希釈能力の少なさによるものと結論付けた。この事例は、無換気状態で循環空調のみを運転すること、あるいは換気を連続的ではなく間欠的に行うことによるリスクを示唆する

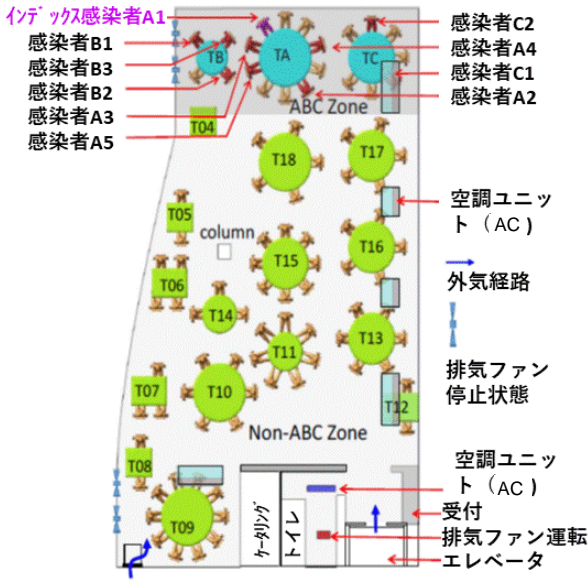


図 3 広州レストランにおけるクラスター発生状況^{7,8)}

結果として重要である。

このクラスター事例の不可解な点は、レストラン内は全般的に換気が不十分で室内に 89 人の滞在者が居たにもかかわらず、一次感染者が食事した TA を含めて隣接する 3 テーブルのみから二次感染者が発生した点にある。この原因に対する流体力学的な考察を行うため、クラスター発生時の室内気流の CFD による再現の追試を行い、SVE3、SVE4 の算出を試みた¹⁰⁾。SVE3 とは排気口を基準とした相対空気齢分布を示し、室内空間に汚染が一樣発生する場合の濃度分布に対応することから、新鮮外気の到達状況、気流の滞留状況を示す換気効率指標である。SVE4 とは、対象となる吹き出し口からは濃度 1 が、その他の吹き出し口からは濃度 0 が吹き出される条件での空間濃度分布から、吹き出し気流の勢力範囲を表す換気効率指標である。計算結果を図 4 に示す。

図 4 によれば、SVE3 について外気導入が行われる入り口側から奥に進むに従って SVE3 は大きな値をとり、気流の滞留によってテーブル A,B,C 領域の換気の状態が非常に悪かったことは明らかである。次に、各吹き出しの SVE4 の分布をみると、空調ユニットごとに給排気量がバランスし、空調ユニットの吹き出し領域から外れた領域には、吹き出し気流の影響がほとんど及んでいないことが明らかである。このため、各空調ユニットは個別の循環領域を形成するため、入り口からの外気流入による希釈の影響が及びにくいことは SVE3 の結果からも明らかである。このように広州におけるレストランで発生したクラスター事例は換気効率の観点からも説明可能と考えられる。

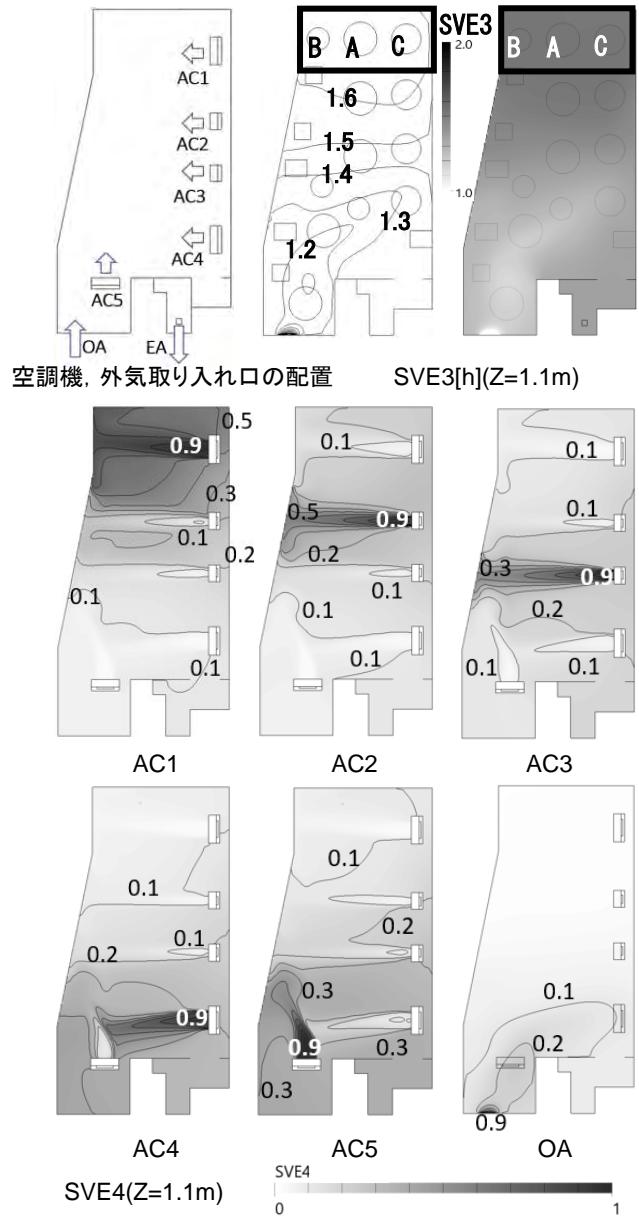


図 4 広州レストランにおける換気効率解析

3.2 その他のクラスター事例

次に、アメリカで発生した声楽隊の練習によって生じたクラスターを紹介する¹¹⁾。2020年3月10日、61人の2.5時間の練習後、1人の感染者によって、確定症例33人、感染の疑われるもの20人の合計53人の二次感染症例が確認された。メンバー間距離の近さ、椅子の片づけ協力の他、そもそも歌う行為そのものが多量の飛沫発生を招き、これが感染拡大の原因となった可能性がある。ライブハウスやカラオケにおけるリスクに通じる事象である。

韓国ソウルのコールセンターで2020年3月に起こったクラスターは事務所ビルの感染防止対策を考える上で重要である¹²⁾。事務所・住居兼用ビルの11階コールセンターにおいて勤務者216名中94名の大規模クラスターが発生した。原因の調査結果によ

れば、一人当たりの専有面積が $3\text{m}^2/\text{人}$ と小さいこと、机が共用でパーティションが低いこと、職員が家族的で昼食を会議室などで談笑しながら取っていたこと、勤務管理に指紋認証を用いていたこと、パッケージユニット型空調機+全熱交換器の組み合わせであったものの、全熱交換器は停止していたなど、感染防止対策が不十分であったことが原因と考えられる。

4 感染防止に有効な換気量

4.1 厚労省の推奨換気量

厚生労働省は2020年3月30日に、専門家会議が提唱したクラスター発生リスクとなる条件である「換気の悪い密閉空間」を避けるために推奨される具体的な対策を示した¹³⁾。建築物衛生法の二酸化炭素濃度基準である 1000ppm を満たすために、機械換気による場合は一人当たり $30\text{m}^3/\text{h}$ 、窓の開放による場合は2回/h以上の換気が確保できていれば「換気の悪い空間」には当てはまらないが、感染を確実に予防できることまでは明らかとなっていないとしている。

厚生労働省の推奨する換気量の根拠は、Menziesらによるカナダの救急医療施設に勤務する医療従事者に関する結核の院内感染リスクに関する疫学調査結果に基づくものである¹⁴⁾。一般病棟勤務者について院内感染確率は換気回数が2回/h未満である場合、それ以上の場合に比べて3.4倍高く、一般病棟の一人当たりの気積が 24m^3 であることから一人当たりの換気量に換算した $48\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ が $30\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ と概ね同等であることに基づくものである。

4.2 Wells-Riely 感染確率モデル

厚生労働省の推奨換気量は、結核の院内感染リスクに関する知見を参考に既存の換気基準の順守を推奨するものであるが、新型コロナウイルス感染症の感染リスクを踏まえたものではないため、以下では感染症学の観点からの考察を試みる。呼吸器疾病の空気感染リスクを定量評価する古典的なアプローチとしてWells-Rileyモデルがある¹⁵⁾。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 の生成率を使用して、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沫核に暴露されて感染する確率をモデル化する。

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

ここに

P_{inf} : 感染確率(-)

I : 室内にいる一次感染者数

p : 人の呼吸率(m^3/h)

q : quanta生成率(h^{-1})

t : 曝露時間(h)

Q_{OA} : 外気による換気量(m^3/h)

「感染の quanta」には物理的な単位はなく感染者から放出されるウイルス量と感染力の両方を含む概念である。Wells-Rileyモデルは、UV殺菌、重力沈降、空調エアフィルタ、不活化など、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拡張が試みられている¹⁶⁾。

4.3 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、Millerら¹⁷⁾は声楽隊練習で起こった米国のクラスター事例¹¹⁾に対して quanta 生成率の推定値として 970h^{-1} を得た。Daiら¹⁸⁾は quanta 生成率と感染症の基本再生産数との相関関係から $14\sim 48\text{h}^{-1}$ と推定した。一方、感染事例と結びつけることなく、要素を積み上げることによって推定する方法をBuonannoら¹⁹⁾が提案し、その計算には式(2)が用いられた。

$$q = c_v \cdot c_i \cdot IR \cdot V_d \quad (2)$$

ここに

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(m^3/h)

V_d : 感染者が吐き出す飛沫濃度(mL/m^3)

各パラメータについて平均値と標準偏差を想定し、モンテカルロ法を用いて四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。REHVA(ヨーロッパ暖房・換気・空調連合協会)ではこの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(マスクの着用は想定していない)。

4.4 感染率、感染者数と一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、感染症対策として一人当たり換気量を設定することの意義について検討する。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 名, 呼吸率として会議とレストランの場合を 1.1m³/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, 一人当たり換気量として 30m³/h が確保されていること, 在室者の一人が感染しているとして quanta の生成を想定した。計算結果を図 2 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。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(3)が近似的に成立する。

$$x = 1 - \exp(-x) \tag{3}$$

式(3)は, 感染確率が10%程度まではよい近似となっているため式(1)は近似的に式(4)で表される。

$$P_{inf} = \frac{Iqpt}{Q_{OA}} \tag{4}$$

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(5)が満たされる必要がある。

$$\frac{Iqpt}{n} \leq \frac{Q_{OA}}{N} \tag{5}$$

式(5)の右辺は在室者一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(6)を得る。

$$qpt \leq \frac{Q_{OA}}{N} \tag{6}$$

quanta生成率として図5より事務作業: $q=7.0 \text{ h}^{-1}$, 呼吸率: $0.54\text{m}^3/\text{h}$, 継続時間: $t=8\text{h}$ を代入すると, $30.2\text{m}^3/\text{h}$ となり, 厚生労働省推奨値の $30\text{m}^3/\text{h}$ に近い値が得られる。これより, 一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名未満などの少数の場合に, イベント終了後に1名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, あくまで数十名以上が同室に継続して滞在する場合に, 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。

5 おわりに

新型コロナウイルス感染症は, これまでのクラスター事例によれば, 「換気の悪い密閉空間」において, 麻疹等で生じる空気感染とは異なるマイクロ飛沫感染による集団感染のリスクがある。これを回避するためには感染確率を踏まえた換気量の確保が有効であると同時に, 室内の換気効率に対して適切な配慮を行うことが必要と考えられる。

表 1 Buonanno と REHVA の想定する quanta 生成率

Buonanno		休息	軽作業	軽作業	重作業
		口呼吸	会話	歌唱	口呼吸
90パーセンタイル値		3.1	42	270	21
記号		①	②	③	④

REHVA による quanta 想定値(h ⁻¹)					
教室	事務作業	会議	レストラン	ショッピング	スポーツ
5.0	5.0	18.7	14.8	10.9	21.0
0.95①	0.95①	0.60①	0.70①	0.80①	④
+	+	+	+	+	
0.05②	0.05②	0.40②	0.30②	0.20②	

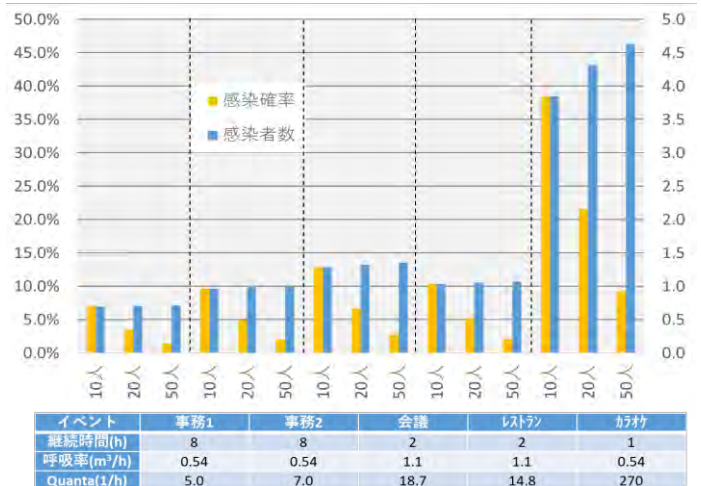


図 5 各種イベントに対する感染確率と予測感染者数

引用文献

- 1) Nishiura, H., Oshitani H. et al.: Closed environment facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19) April 16((2020)
(<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.02.28.20029272v2>)
- 2) 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議：「密をさけて外出しましょう！」チラシ March 9(2020)
(<https://www.kantei.go.jp/jp/content/000061234.pdf>)
- 3) 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基本方針の具体化に向けた見解 February 24(2020)
(https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/newpage_00006.html)
- 4) 新型コロナウイルス感染症対策分科会：新型コロナウイルス感染症はこうした経路で広がっています July 31(2020)
(<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000657104.pdf>)
- 5) Bloch, A. B. et al.: Measles Outbreak in a Pediatric Practice: Airborne Transmission in an Office Setting, *PEDIATRICS* vol.75 No.4 April(1985)
- 6) WHO : Transmission of SARS-CoV-2:implications for infection prevention precautions, Scientific Brief July 9(2020)
(<https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>)
- 7) CDC: Science Brief: SARS-CoV-2 and Potential Airborne Transmission October 5 (2020)
(https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/scientific-brief-sars-cov-2.html?CDC_AA_refVal=https%3A%2F%2Fwww.cdc.gov%2Fcoronavirus%2F2019-ncov%2Fmore%2Fscientific-brief-sars-cov-2.html)
- 8) Lu, J. et al.: COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020, *Emerging Infectious Diseases*, Vol/26, No. 7 Research Letter July (2020)
- 9) Li, Y. et al.: Probable Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in a Poorly Ventilated Restaurant, *Building and Environment* 196 107788(2021)
- 10) 阿式, 倉渕, 金 : 中国広州レストランでの新型コロナウイルス感染症クラスターを対象とした各種換気効率評価と感染確率分布に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, vol.91 (2021) 25-28.
- 11) Hamner, L. et al.: High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice — Skagit County, Washington, March 2020, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, vol.69, No.19 May 15(2020)
(<https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/69/wr/pdfs/mm6919e6-H.pdf>)
- 12) Park, S. Y. et al.: Coronavirus Disease Outbreak in Call Center, South Korea, *Emerging Infectious Diseases*, Vol.26, No.8 August (2020)
- 13) 厚生労働省：～商業施設等の管理権限者の皆様へ～「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法
(<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000618969.pdf>)
- 14) Menzies, D. et al.: Hospital Ventilation and Risk for Tuberculous Infection in Canadian Health Care Workers, *Annals of Internal Medicine*, Vol.133, No.10, 21 November (2000)
- 15) Riley, E. C. et al.: Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am. J. Epidemiol.* 107 (1978) 421–432.
- 16) Stephens, B.: 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>)
- 17) Miller, S. L. et al.: Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. Submitted to *Indoor Air*, 15 June (2020)
- 18) Dai, H. et al.: Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. *Building Simulation*,13,1321-1327 August 4(2020)
- 19) Buonanno, G. et al.: Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications, *Environmental International* 145, September 6(2020)
- 20) RHEVA: RHEVA calculator to estimate the effect of ventilation on COVID-19 airborne transmission
(<https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator>)
(最終アクセス日：2021年5月26日)