

空気調和・衛生工学会大会学術講演論文

循環による相当換気を考慮した CO₂ 濃度による感染リスク評価(第 1 報)

○柳澤 淳 (新菱冷熱工業)

森本 正一 (新菱冷熱工業)

穴井 俊博 (新菱冷熱工業)

新型コロナウイルス感染症 (COVID 19) の対策の一つとして、換気が重要視されている。厚生労働省では、室内の CO₂ 濃度が 1,000ppm 以下であれば、1 人当たりの必要換気量 30m³/h は確保されており、「換気が悪い空間」には当てはまらないとの見解を示している。

しかし、換気量では空間全体として換気が足りているかの判断はできるが、空間の中で人が多い場所や換気が行き届かない場所など、局所的な感染リスクは不明である。また、エアコンや空気清浄機のフィルタがウイルスを捕集し、感染リスクを減らす効果があることがこれまでに確認されているが、フィルタを通過しても CO₂ 濃度は変化しないため、室内に空気清浄機を設置しても、CO₂ 濃度でその効果を確認することは不可能である。

そこで本報では、9 人の感染者が局所的に発生したレストランの事例について CFD 解析を行い、CO₂ 濃度分布を感染リスク分布へと換算する検討を行った。その結果、感染者の発生人数から、大気中の CO₂ 濃度 400ppm に加えて、人体活動による CO₂ 濃度の増加分 850ppm につき 1 人の感染リスクがあると仮定することで、CO₂ 濃度を感染リスクに換算するという知見を得た。また、空調機や空気清浄機等のフィルタによってウイルスが除去される、相当換気の効果を加味し、任意のフィルタ効率に応じた感染リスクの評価も可能であることも確認した。

はじめに

新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の感染対策では、密閉・密接・密集の三つの密を避けることが推奨されてきた。空気中のウイルス濃度の低減を図るための換気もその中に含まれ、日本では流行の初期の頃から重要視されてきた。換気基準に関しては、CO₂ 濃度を 1,000ppm 以下とするビル管理法を順守することを念頭に、厚生労働省は 1 人当たり 30 m³/h を確保できれば、「換気が悪い空間」には当てはまらないとしている¹⁾。

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ローチに Wells-Riley モデルがある²⁾。これは定常状態の十分に混合された室内にいる感染者の飛沫による感染をモデル化したものである。このモデル化を利用した事例として中国のレストランの事例について Quanta 生成量を推定した既往研究がある³⁾。

本稿では、簡便な解析を目指し、CO₂ 濃度についての CFD 解析を行った。さらに相対的な評価を目指して、既往研究と比較を行いながら、CO₂ 濃度を感染リスク指標へ換算した。さらに、空気を介した感染を想定した場合には、空気がフィルタを通過する際にウイルスがろ過されて除去されることを考慮することにより、相当換気が見込むことができると考えられる⁴⁾。そこで、本稿では既往研究を参考にフィルタでの粒径別の捕集効率とウイルスの粒径に関する報告を合わせて考慮することにより、相当換気が感染確率の低減に寄与する程度について検証を行った⁵⁾。

1. CO₂ 濃度の感染リスクへの換算方法

CO₂ 濃度を感染リスクへ換算する際の課題は、空調設備に設置されているフィルタでは CO₂ が除去できない点にある。一方で、室内および屋外の CO₂ 濃度と循環風量は測定可能であり、循環フィルタの種類も確認可能である。また、循環フィルタの種類によって、病原体をどの程度除去できるかは、浮遊する病原体の粒径が明らかであれば推定できる。つまり、循環風量と循環フィルタの除去効率の積で表される相当換気を計算することが可能である。

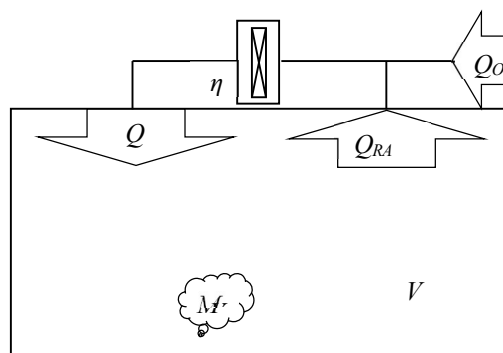


図1 式 (1) および式 (2) の模式図

ここで、室内で CO₂ 発生源がある場合の模式図を図 1 に示す。また、その濃度推移を式 (1) および式 (2) に示す。

$$Q = Q_{OA} + Q_{RA}\eta \quad (1)$$

$$C_t - C_{OA} = (C_0 - C_{OA})\exp\left[-\frac{Q}{V}t\right] + \frac{M}{Q}\left(1 - \exp\left[-\frac{Q}{V}t\right]\right) \quad (2)$$

Q : 相当換気量 [m³/h]

Q_{OH} : 外気量 [m³/h]

Q_{RA} : 循環風量 [m³/h]

η : フィルタ効率 [-]

C_t : t 時間後の室内CO₂濃度 [ppm/m³]

C_0 : 初期の室内CO₂濃度 [ppm/m³]

C_{OA} : 外気中のCO₂濃度 [ppm/m³]

V : 室容積 [m³]

t : 経過時間 [h]

M : 室内のCO₂発生量 [ppm/h]

式(2)において、経過時間 t が大きくなると初期濃度 C_0 に起因する濃度は低減するが、発生量 M に起因する濃度が増加し、 M/Q に収束する。そこで、式(1)および(2)について、 η が 0 で M/Q に収束した場合について計算すると式(3)が得られる。

$$C_t - C_{OA} = \frac{M}{Q_{OA}} \quad (3)$$

式(3)の Q_{OH} を Q へ換算するため両辺に式(1)を変形した $Q_{OH}/(Q_{OH} + Q_{RA}\eta)$ をかけると式(4)が得られる。

$$(C_t - C_{OA})\left(\frac{Q_{OA}}{Q_{OA} + Q_{RA}\eta}\right) = \frac{M}{Q} \quad (4)$$

CO₂濃度を、新型コロナウイルスなどの代替指標として使う場合、計測器で得られる数値は式(3)の M/Q_{OH} であるが、式(4)を使うことで循環系に使われているフィルタの効率を加味した相当換気を考慮した濃度 M/Q へ換算することができる。

2. CFD解析条件

新型コロナウイルスの流行初期にクラスターが発生し、多くの解析事例のある中国のレストランをモデルとしてCFD解析を行った。解析ソフトにはSTREAM V2021 (MSCソフトウェア(株))を用いた。解析モデルを図2に、CFDの解析条件を表1に、風量条件を表2にそれぞれ示す。換気については、外気がドア開口より流入し、トイレのファンにより排気される。循環風量の条件はエアコン(AC1~AC5)による。フィルタ効率59%は、外気風量に循環風量のうちフィルタによる除去分を加味することで相当換気量が30 m³/h・人となる条件である。なお、解析ソフトの仕様上、在室者の配置については近似を行ったが、既存の文献³⁾と同様の気流が形成されることを確認した。次に、CO₂濃度の感染リスクへの換算を行った。換算は外気のCO₂濃度400 ppmからの濃度の上昇分によって行う。図2の黒枠の領域について、実際の二次感染者数が9人だったことから、850 ppm上昇した場合に1人の二次感染者が発生すると想定した。

表1 CFD解析の条件

外気中CO ₂ 濃度	400 ppm
呼気中CO ₂ 濃度	40,000 ppm
呼気風量	0.6 m ³ /h
在室人数	89人
室内容積	422 m ³
天井高さ	3.14 m
外気風量	280 m ³ /h
循環風量	4,080 m ³ /h
フィルタ効率	0, 1, 10, 25, 50, 59, 75, 100%

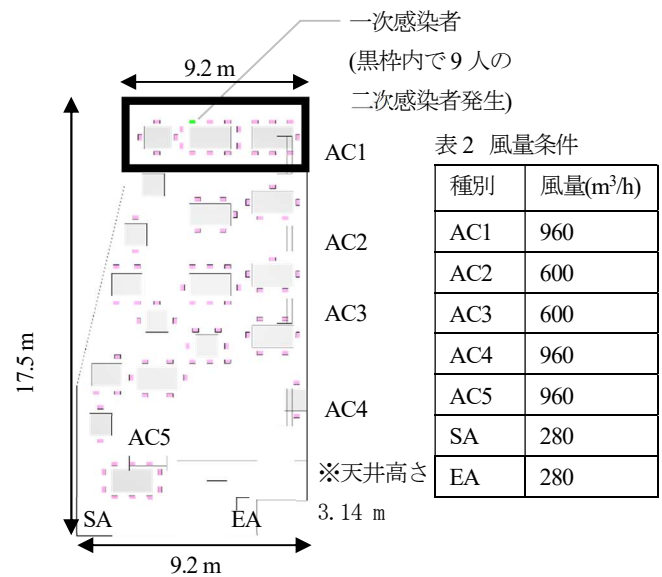


図2 レストランのモデル

表2 風量条件

種別	風量(m ³ /h)
AC1	960
AC2	600
AC3	600
AC4	960
AC5	960
SA	280
EA	280

3 結果

3.1 理論値との比較

室内平均CO₂濃度について、(4)式により得られる理論値とCFD解析による結果を比べた結果を図3に示す。フィルタ効率0付近の理論値からのずれは換気に用いられる風量が極端に少ないためだと考えられる。0付近以外ではCFD解析結果は理論値と良く合致した。

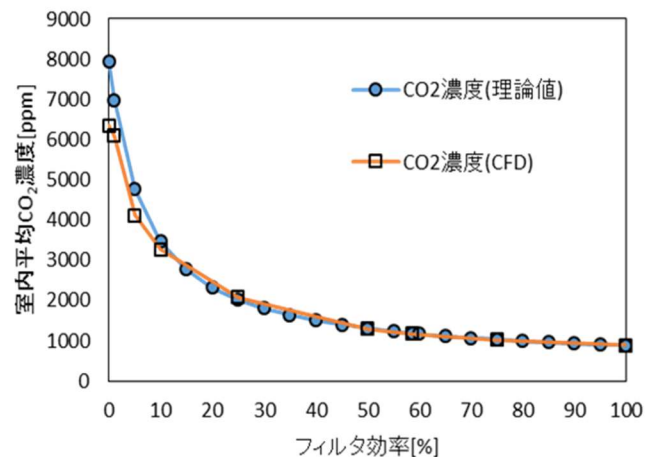


図3 室内平均CO₂濃度の比較

フィルタ効率 0 %の室内平均 CO₂濃度を図 4 に示す。フィルタ効率 0 %の結果から、感染当時の室内平均 CO₂濃度は許容限度 5,000 ppm を超え、換気が極端に悪い環境であることがわかった。このレストランの換気量は 1 人当たり 3.15 m³/h・人であり、30 m³/h・人の基準と比べてはるかに少ない。このように換気量が不十分であることに加えて、レストランの中でも、感染者が発生した図 2 黒枠内の環境がとくに換気の悪い空間(=よどみ)であることが CFD 解析により分かった。この原因は、室内気流も影響するものの、他の席に比べて黒枠内の席同士がやや密集していることも原因に考えられる。この点において、密集を避けることが感染リスクを下げるために重要と考えられる。

一方、30 m³/h・人換気相当のフィルタ効率 59 %では室内平均 CO₂濃度は 1,172 ppm となった。理論値との比較で、30 m³/h・人の換気とした場合でも室内平均 CO₂濃度が 1,000 ppm を超えたのは、呼気中に含まれる CO₂濃度を 40,000 ppm とし、軽作業で想定される 30,000 ppm よりも高く設定したことが原因だと考えられる。呼気の濃度を 30,000 ppm とした場合、室内平均 CO₂濃度の理論値は 984 ppm となり、ビル管理法の基準値である 1,000 ppm に近い値を得られた。

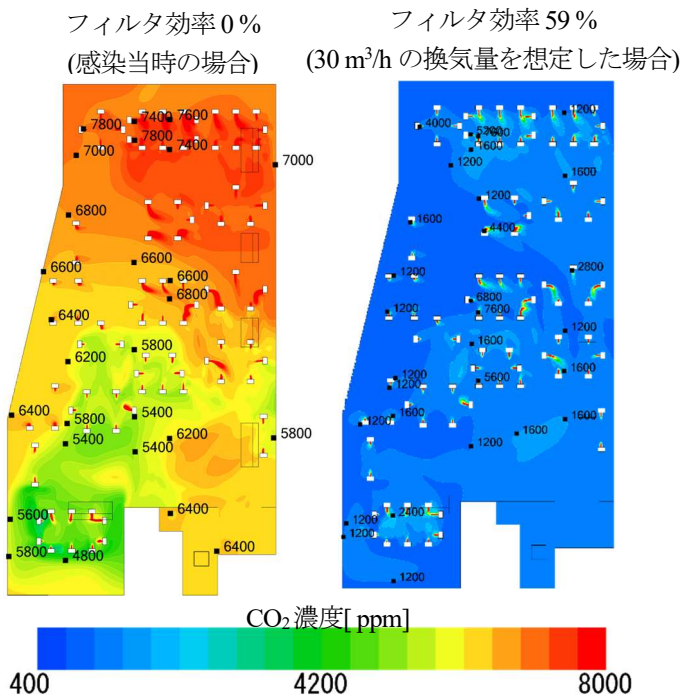


図 4 CO₂濃度の解析結果

3.2 感染リスクへの換算結果

図 2 の黒枠の領域において 9 人の二次感染者が発生したことから、CO₂濃度の感染リスクへの換算を行った。その結果を図 5 に示す。まず、CO₂濃度が 1,000 ppm(=外気中の CO₂濃度+600 ppm 上昇)のときに感染者が 1 人と換算すると、黒枠内の値が約 12 人となった。次に、1,250 ppm を基準としたところ、同程度の 9 人の感染者数とな

った。よってこれ以降の検討では外気中の CO₂濃度 400 ppm から人体の呼吸によって 850 ppm 増加した濃度である 1,250 ppm を基準とした。

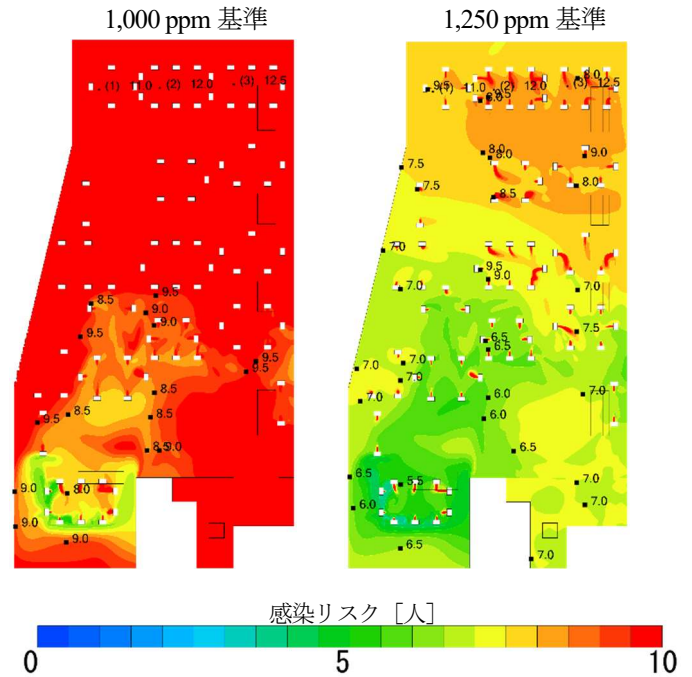


図 5 換算基準による違い

4. 考察

4.1 適切な換気量を確保した場合の感染リスクについて

1,250 ppm を換算基準とした感染リスクをもとに、日本で推奨されている換気基準である 30 m³/h・人のときのリスクを評価する。CO₂濃度の測定では直接的な影響を除くため、開口部から離れた場所で、人から 0.5m 程度離れた場所で測定するとされている⁶⁾。そのため、局所的な影響を除いて評価することが必要だと考えられる。よって、口元中心の高さ 1.155 m より鉛直方向に 0.5 m 間隔で床-天井間の断面の平均濃度および感染リスクによって評価を行った。その結果を表 3 に示す。

表 3 各高さ方向での感染リスクの検討

高さ	床	口元					天井	部屋全体
		-1.0	-0.5	±0	+0.5	+1.0		
濃度[ppm]	1040	1048	1052	1384	1353	1195	1107	1172
換算リスク[人]	0.75	0.76	0.77	1.16	1.12	0.94	0.83	0.72

口元および+0.5mの高さまでは1を超えている一方で、それ以外の高さでは1を下回っている。そのため、空気を介した感染について想定した場合、30 m³/h・人の換気量を確保した際には感染リスクは低いと考えられる。

さらに、感染者が 9 人発生した領域の断面について、感染当時の状況と 30 m³/h・人の換気量のとときの比較を図 6 に示す。両者ともに口元付近の領域においては感染リスクが高くなる傾向はあるが、通常はこのような場所には別の人が近づかないため、感染リスクは低いと考えられる。さらに、それ以外の領域については、30 m³/h・人の換気量を確保した場合には低くなっており、1 を下回っている。そのため、厚労省が示している換気の目安で

ある $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ の換気を行うことで、感染リスクが十分に下がり、クラスターは発生しにくいと考えられる。ただし、今回の検討で想定しているのは空気を介した感染経路であるため、基本的な感染対策により、飛沫感染などその他の感染除去経路が遮断されている場合の評価である。

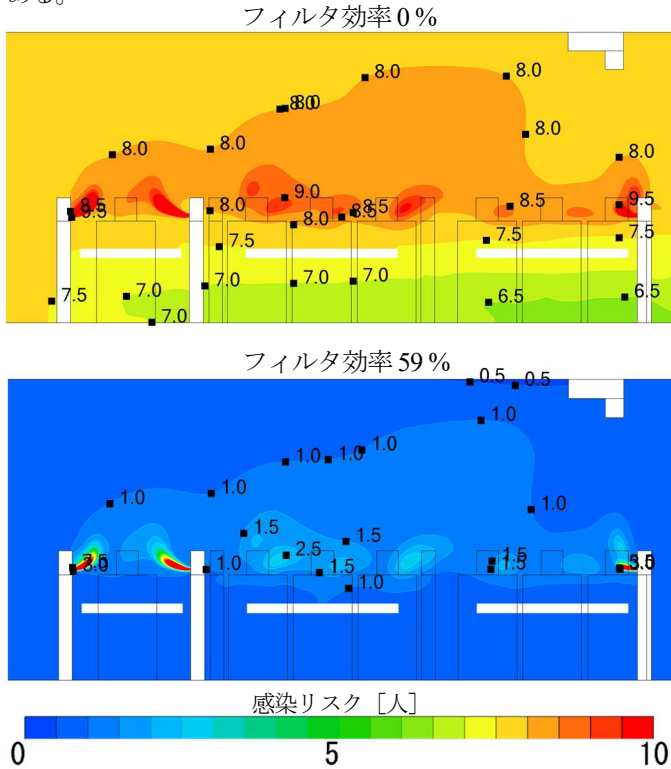


図6 感染者発生領域での感染リスク分布

4.2 呼気条件のモデル化について

人体呼気の解析条件は、一般的な値として1回の呼吸量を 0.5 L 、1分当たりの呼吸回数を20回として算出される呼気条件である $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ を用いた。呼気中に含まれる CO_2 濃度については $40,000 \text{ ppm}$ を用いた。これより、 CO_2 の発生量は 24 L/h と求めることができる。 CO_2 の発生量については、空気調和衛生工学会の資料によれば表3のように示される⁷⁾。なお、文科省による資料によれば幼稚園・小学生(低学年)は 11 L/h 、小学生(高学年)は 16 L/h 、高校生・大人は 22 L/h とされており、年齢によっても呼気量は異なる⁸⁾。

表4 各作業程度に応じた CO_2 呼気量の違い

作業程度	CO_2 呼気量[L/h]
安静時	13.2
極軽作業	13.2~24.2
軽作業	24.2~35.2
中等作業	35.2~57.2
重作業	57.2~90.2

上記のように、呼気中の CO_2 濃度に用いた値は呼気条件のモデル化においてやや高い値を採用したことによる。そ

の一方で、対象とする空間の利用目的や在室者の年齢・作業量に応じた適切な CO_2 呼気量を選択することによって、よりその環境に近い感染リスクの評価が可能になると考えられる。

4.3 ウイルスの粒子径とフィルタ効率について

ウイルスの浮遊する粒径については $0.25 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 以上にピークがあるとの報告がある⁹⁾。他方、フィルタによる粒径別の捕集効率については、アメリカ暖房冷凍空調学会および日本空気清浄協会の資料より、旧 JIS 比色法 65 % の中性能フィルタにおいては、 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ であれば 20 %、 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ であれば 65 %、 $3.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ であれば 85 % が捕集できると推察される^{10), 11)}。よってウイルスの除去の程度については議論の余地はあるものの、20 % 程度は除去が可能だと推察される。仮に循環風量の $4,080 \text{ m}^3/\text{h}$ が中性能フィルタを有する空調設備により行われると仮定すると、元の $3.15 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ から $12.3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ の相当換気が得られることになる。したがって 4.1 での考察も踏まえると、空気感染を想定した場合には既存の換気量に加えて相当換気が得られることになるため、 $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ の換気量を確保していれば、さらに過剰となる換気量を導入しなくても感染リスクは低いと考えられる。

参考文献

- 厚生労働省: 新型コロナウイルスの集団感染を防ぐために <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000602323.pdf>
- 倉淵隆: 新型コロナ対策として換気量はどのように決めるべきか? 空気調和・衛生工学, 第95巻6号, 2021年
- 阿式信英: 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 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021年
- 日本空気清浄協会: 各国の一般換気用エアフィルタの規格における捕集率の比較に関する指針(JACA No. 53), 2018年
- 森本正一: COVID-19 対策で求められる換気とフィルタの考察 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2021年
- 英国非常時科学諮問委員会: Role of Ventilation in Controlling SARS-CoV-2 Transmission, 2020年
- 空気調和・衛生工学会: 空気調和衛生工学 第46巻第12号, p.1073, 1972年
- 文科省: 学校施設の換気設備に関する調査研究報告書 第2章 換気設備計画の立案(1)1) https://www.mext.go.jp/a_menu/shisetu/shuppan/04062201/011.htm
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y. et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. Nature, 2020
- アメリカ暖房冷凍空調学会: ASHRAE Standard 52, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, 2017年
- 日本空気清浄協会: 各国の一般換気用エアフィルタの規格による捕集率の比較に関する指針(JACA No. 53), 2018