

二酸化炭素濃度から相当換気量とエアロゾル感染リスクを 評価する方法

森 本 正 一（新菱冷熱工業）
柳 澤 淳（新菱冷熱工業）
穴 井 俊 博（新菱冷熱工業）

小 林 徳 和（新菱冷熱工業）
五十嵐 瞳（新菱冷熱工業）

CO₂ 濃度で相当換気の評価する手法と、感染粒子濃度に相当する quanta 濃度分布を CFD 解析で予測した結果を利用して、エアロゾル感染リスクを評価する方法を検討した。相当換気の評価では、CO₂ 濃度を換気量に換算する方法と、CO₂ 発生量と quanta 生成率から算出する方法を比較し、両者が同等であることを確認した。quanta 濃度分布を CFD 解析した結果、パーティション型の空気清浄機を 1 台設置した場合空気清浄機の運転により、空気清浄機の近くのエアロゾル濃度が低減するなど、濃度分布を評価できた。このことから、空気清浄機の運転の有無による quanta 濃度比を考慮して CO₂ 濃度を補正することにより、感染リスクの濃度分布を評価できると考えた。また、空気清浄機の代わりに、天井カセット型エアコンを 3 台設置した条件で CFD 解析を行った結果、同じ相当換気であれば同程度の感染リスクと評価されるが、風量が低いほど感染リスクの分布の偏りが大きくなることが示唆された。相当換気の評価に加えて quanta 濃度分布の CFD 解析結果を利用することで、感染リスクの評価が可能であると考えられた。

はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行で、厚生労働省から換気の目安 30 m³/h・人が示されるなど¹⁾、換気の重要性が認知されるようになっている。COVID-19 の伝播経路は、飛沫核感染と飛沫感染の中間にあたる、エアロゾル感染が提唱されている²⁾。エアロゾル感染の主要な対策が換気と考えられているため、感染リスクを下げるために換気の効果の評価することが求められている。換気の効果としては、外気導入による換気と、フィルタでの除去効果を換気量で表す相当換気の、両者の評価を行う必要がある。換気の目安として多く使われる二酸化炭素（CO₂）濃度は、人体から発生し、リアルタイムに計測できるため、感染症のリスクを評価する代替指標として用いられることが多い。一方で、CO₂ はフィルタで捕集されずに通過するため、相当換気の効果の評価できない課題がある。そこで、筆者らは室内に導入する外気風量、空気清浄機等の循環風量とフィルタによる病原体の捕集効率を用い、CO₂ 濃度に相当換気の効果を考えて評価する手法を考案し、CFD 解析により精度を確認した³⁾。本報では、考案した手法を用いて、エアロゾル

感染リスクを評価する方法について報告する。

1. CO₂ 濃度から相当換気を推定する方法

相当換気を考慮した CO₂ 濃度を評価するため、考案した式 (1) を使って換算 CO₂ 濃度を求める。CO₂ 濃度に対する換気の効果は外気による希釈だけのため、CO₂ の室内濃度の推移の式に、相当換気の換気量を加える換算をすることで、式 (1) を導き出した³⁾。

$$(C_t - C_{OA}) \left(\frac{Q_{OA}}{Q_{OA} + Q_{RA}\eta} \right) = \frac{M}{Q} \quad \dots\dots (1)$$

C_t : t 時間後の室内換算 CO₂ 濃度 [ppm]

C_{OA} : 外気中の CO₂ 濃度 [ppm]

Q_{OA} : 外気量 [m³/h]

Q_{RA} : 循環風量 [m³/h]

η : フィルタ効率 [-]

M : 室内の CO₂ 発生量 [mL/h]

Q : 相当換気量 [m³/h]

2. CO₂ 濃度を利用した感染リスク評価

2.1 CO₂ 濃度を換気量に換算して感染リスク分布を評価する方法

空気を介した感染リスクを評価する方法として、Wells-Riley モデル (式 (2)) が利用されている^{3,4,5)}。

$$P = \frac{N}{n} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad \dots\dots (2)$$

P : 感染確率 [-] N : 二次感染者数 [人]

n : 被曝露者数 [人] I : 一次感染者数 [人]

q : クアンタ生成率 [q/h] p : 人の呼吸率 [m³/h]

Q : 換気量 [m³/h] t : 曝露時間 [h]

式 (2) には部屋全体の換気量 Q が使われているが、瞬時一様拡散を前提としているため、病原体の濃度分布を反映することができない。そこで、式 (2) を利用しながら、病原体の濃度分布を考慮した感染リスクを評価する方法を検討した。

式 (2) を含めて、事務所など感染者の場所が不明な室内では、感染リスクを評価する場合にすべての在室者を一定の確率の感染者とみなして室内の感染リスクを評価する。ここで、CO₂ は人体から発生するため、燃焼機器や喫煙など人以外の CO₂ の発生源がない室内では、CO₂ 濃度の分布を在室者から発生した感染性粒子の代替指標として利用することができると考えられる。

次に、CO₂ 濃度を換気量へ換算する方法として、厚生労働省から換気の目安として示されている 1 人あたり 30 m³/h の換気と、建築物衛生法の空気環境の基準である CO₂ 濃度 1,000 ppm の関係に注目した。室内濃度を 1,000 ppm 以下に維持する必要換気量は、人体からの発生を 1 人あたり 30,000 ppm×0.6 m³/h、外気濃度を 400 ppm とした場合、1 人あたり 30 m³/h となる。室内の CO₂ 濃度が 1,000 ppm の場合に 1 人あたりの換気量が 30 m³/h となる関係を利用して、式 (3) で室内の CO₂ 濃度 C から換気量 Q を計算することができる。

$$Q = 30 \times n \times \frac{1000 - C_{OA}}{C - C_{OA}} \quad \dots\dots (3)$$

式 (2) に式 (3) を代入すると、測定場所における CO₂ 濃度 C から感染リスクを評価する式 (4) を得られる。

$$P = \frac{N}{n} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{30 \times n \times \frac{1000 - C_{OA}}{C - C_{OA}}}\right) \quad \dots\dots (4)$$

CO₂ は人体から発生するため、エアロゾル濃度と近い挙動を示すと考えられる。式 (4) を使うことで、Wells-Riley モデルでは考慮できない、室内の濃度分布を考慮した感染リスクの評価が可能である。

2.2 CO₂ 発生量とクアンタ生成率から感染リスク分布を評価する方法

式 (4) は、前提として使用した数値が事務作業の場合の CO₂ 発生量である。そのため、より詳細に解析するためには想定する作業状態における CO₂ 発生量とクアンタ生成率から換算する必要がある。作業状態とクアンタ生成率の関係⁴⁾を表-1に示す。

表-1 作業状態とクアンタ生成率の関係

作業状態	クアンタ生成率 q/h		呼吸率 m ³ /h
	SARS-CoV-2 (初期)	オミクロン変異体	
教室	1.6	4.0	0.60
事務作業	2.5	6.3	0.65
会議	4.3	10.8	0.76
レストラン	3.4	8.5	0.71
買い物	4.2	10.5	1.32
スポーツ	4.9	12.3	3.30

まず、1 人当たりの CO₂ 発生量 p_{CO2} と換気量 Q 、CO₂ 濃度の関係は式 (5) が成り立つ。

$$\frac{n \times p_{CO2}}{Q} = C - C_{OA} \quad \dots\dots (5)$$

式 (2) に式 (5) を代入することで、測定場所における CO₂ 濃度 C から感染リスクを評価する式 (6) を得られる。

$$P = \frac{N}{n} = 1 - \exp\left\{-\frac{(C - C_{OA})Iqpt}{n \times p_{CO2}}\right\} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、式 (4) と式 (6) を比較すると、式 (7) が得られる。

$$30 \times (1000 - C_{OA}) = p_{CO2} \quad \dots\dots (7)$$

式 (7) から、外気の CO₂ 濃度 C_{OA} が 400 ppm の場合、1 人当たりの CO₂ 発生量 p_{CO2} が 0.018 m³/h だと式 (4) と式 (6) が同等となる。つまり、式 (4) は事務作業程度の活動量であれば成り立つが、呼気の CO₂ 濃度と呼吸率が上昇するスポーツ等の場合は式 (6) の方がより良い近似になると考えられる。

3. CFD 解析での検証

3.1 方法

CFD 解析の条件は、在室者 55 人の事務所で、CO₂ 発生量は 0.02 m³/h・人とした。また、クアンタ生成率は事務作業でのオミクロン変異体の 6.3 q/h とした。外気は 30 m³/h・人となる 1,650 m³/h 導入し、温度は 26℃等温とした。その他の解析条件は、島貫ら⁵⁾の手法を参考に、高さ 0.4 m の椅子上の、0.5 m×0.5 m×0.8 m の人体からクアンタを発生させた。

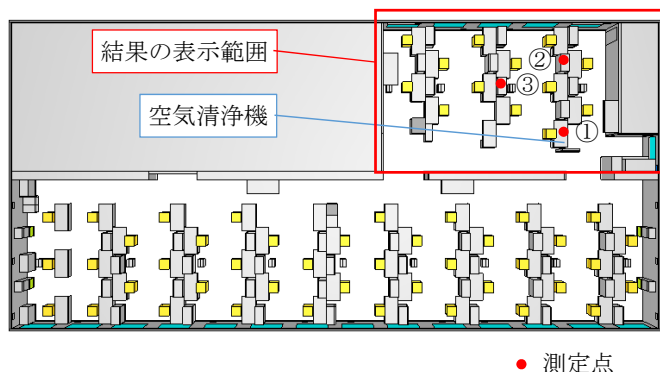


図-1 解析モデル（空気清浄機）

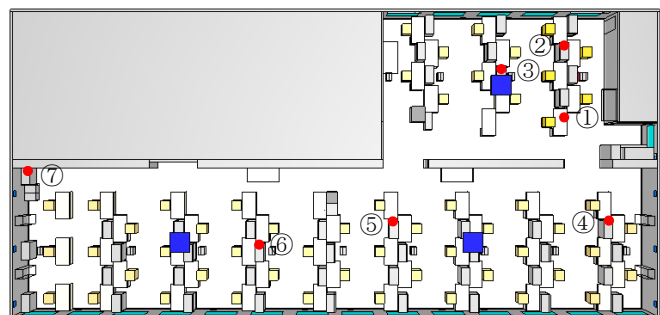


図-2 解析モデル（天井カセット型エアコン）

はじめに、CO₂ 濃度から空気清浄機を設置したときの相当換気进行评估するため、室内にパーティション型の空気清浄機を1台設置した（図-1）。空気清浄機の風量は0～750 m³/h とし、CO₂ に対するフィルタ効率を0%、エアロゾルに対するフィルタ効率を100%とした。次に、相当換気量の濃度分布への影響を確認するため、空気清浄機の代わりに、天井カセット型エアコンを3台設置した（図-2）。1台あたりの風量は1,050 m³/h とし、エアロゾルに対するフィルタ効率を70%とした。さらに、フィルタ効率と風量をそれぞれ0まで11段階変動させて、相当換気の変化による影響を確認した。

3.2 結果および考察

空気清浄機の風量を0～750 m³/h に変化させた結果のうち、図-1 の赤枠内の結果を図-3 に示す。図中の数値は、測定点①～③の停止時との濃度比である。空気清浄機の吹出し空気の影響を強く受ける測定点①の濃度比は、風量180 m³/h で0.40、風量390 m³/h で0.09であった。空気清浄機から離れた測定点②と③は同程度の濃度比となっており、風量180 m³/h で0.90～0.91、風量390 m³/h で0.81～0.82であった。これらの結果から、相当換気の効果が大い場所では、CO₂ 濃度で感染リスクを評価すると、過大に判定する可能性があることが明らかになった。このとき、CO₂ 濃度をCFD で求めた濃度比を用いて補正することで、感染リスクの濃度分布を評価できると考えられる。

次に、フィルタ効率を変動させた結果を図-4 に、風量を変動させた結果を図-5 に示す。フィルタ効率を変化させた場合、部屋全体の濃度比の平均値は、基準としたフィルタ効率70%から半減させたフィルタ効率35%の場合に1.35、1/10となるフィルタ効率7%の場合に1.91であった。このとき、測定点①～⑦の濃度比は、フィルタ効率35%の場合に1.22～1.40、フィルタ効率7%の場合に1.58～2.06であった。一方、風量を変化させた場合、部屋全体の平均値は、基準とした1台当たりの風量1,050 m³/h から半減させた風量525 m³/h の場合に1.37、1/10となる風量105 m³/h の場合に1.96であった。このとき、測定点①～⑦の濃度比は、風量525 m³/h の場合に0.71～1.58、風量105 m³/h の場合に1.00～1.98であった。部屋全体の平均値はフィルタ効率を変化させた場合も、風量を変化させた場合も、同等の値であった。これらの結果から、同じ相当換気であれば部屋全体の平均としては同程度の感染リスクと評価されるものの、風量が低いほど感染リスクの分布の偏りが大きくなることが示唆された。

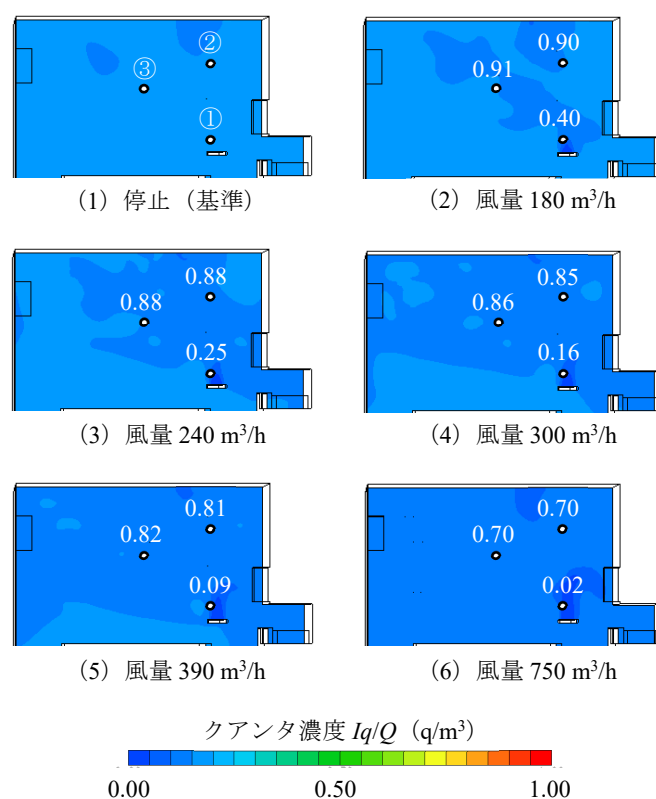


図-3 空気清浄機の風量の影響

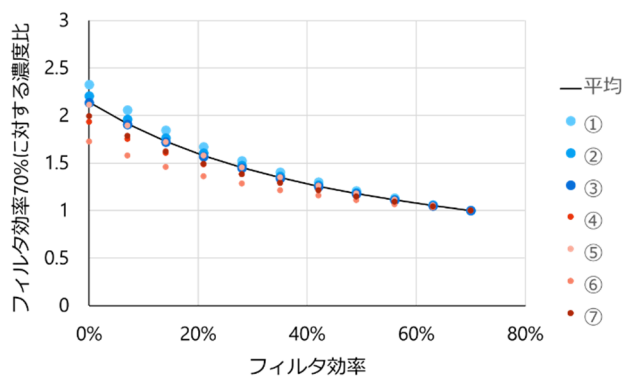


図-4 フィルタ効率の影響

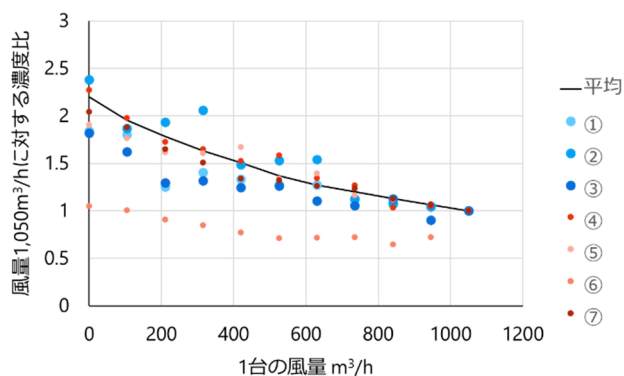


図-5 風量の影響

4. CO₂ 濃度測定から感染リスク評価までの流れ

図-1 のモデルを利用し、空気清浄機の風量が 390 m³/h、測定点①～③の CO₂ 濃度が 1,200 ppm、外気 CO₂ 濃度が 400 ppm とした場合の感染リスクの評価の流れに沿った、CO₂ 濃度、クアンタ濃度、感染確率を図-6 に示す。感染者数は、事務作業中の 55 人の在室者のうちの 1 人と想定した。クアンタ生成率は、オミクロン変異体に相当する 6.3 q/h とした。得られたクアンタ濃度から、感染確率を算出した。次に、測定点①～③の CO₂ 濃度を図-3 (3) の濃度比で換算した場合の感染リスクの評価の流れに沿った、CO₂ 濃度、クアンタ濃度、感染確率を図-7 に示す。図-6 と同様の換算に加えて、クアンタ濃度算出の段階で図-3 (5) の濃度比を乗じた。これにより、同じ CO₂ 測定の結果であっても、相当換気に合わせて感染確率の分布の偏りを示せることを確認した。

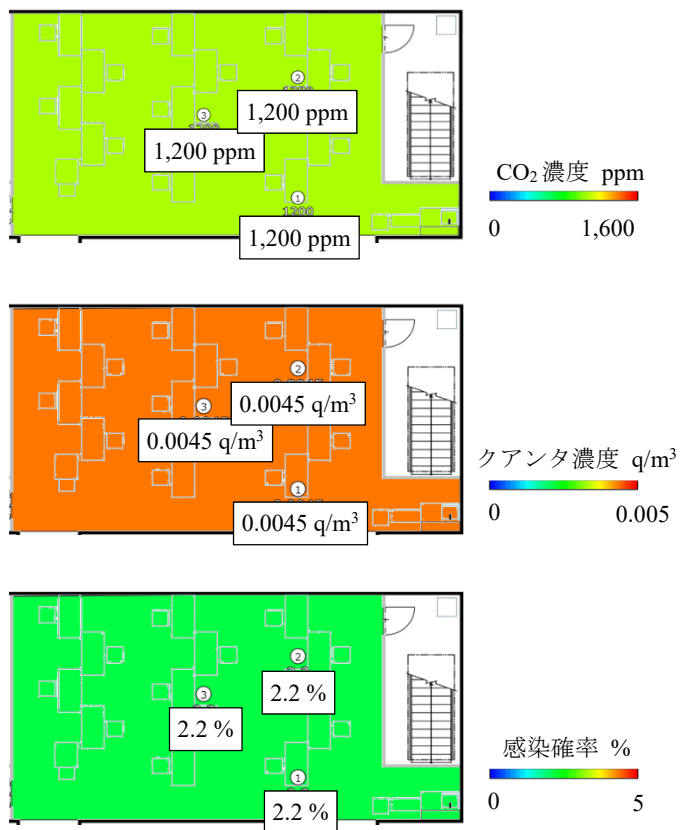


図-6 CO₂ 濃度から感染確率の評価例

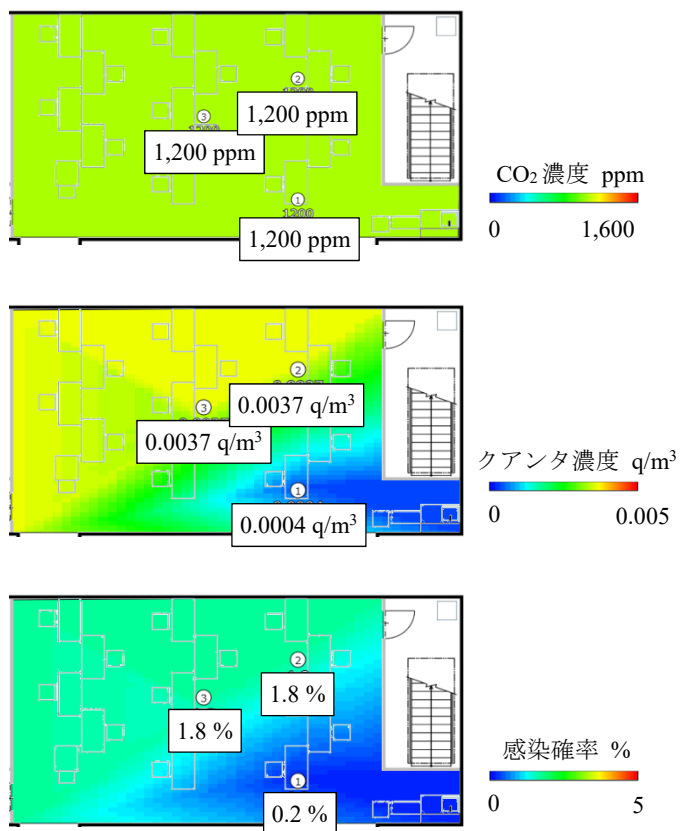


図-7 CO₂ 濃度から相当換気を考慮した感染確率の評価例

5. まとめ

CO₂ 濃度で相当換気を評価する手法を利用して、エアロゾル感染リスクを評価する方法について検討し、以下の知見を得た。

- 1) CO₂ 濃度を利用した感染リスク評価について、CO₂ 濃度を換気量に換算する方法と、CO₂ 発生量とクアンタ生成率から算出する方法を示した。外気の CO₂ 濃度が 400 ppm、1 人当たりの CO₂ 発生量が 0.018 m³/h の場合に両者は同等となった。
- 2) 空気清浄機の吹出し口近くなど、エアロゾルに対する相当換気の大きい場所では、感染リスクを Wells-Riley モデルを用いて CO₂ 濃度から評価すると、過大になる可能性があることが明らかになった。
- 3) 部屋全体の感染リスクは、Wells-Riley モデルとフィルタ効率を考慮した手法で同等となった。加えて、フィルタ効率を考慮した CFD の結果では、風量が低いときに感染確率の分布の偏りが大きくなるなど、Wells-Riley モデルでは評価できない感染リスクの分布を評価することが可能であり、対策を検討する上

で有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf>
- 2) 日本医療福祉設備協会：空調設備設計ガイドライン（空調設備編）HEAS-02-2022, 2022 年
- 3) 森本正一, 柳澤淳, 五十嵐瞳, 小林徳和, 穴井俊博, 三國恒文：二酸化炭素濃度を利用した相当換気量評価の方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）, 2022 年
- 4) RHEVA : RHEVA calculator to estimate the effect of ventilation on COVID-19 airborne transmission V2.1
<https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator>
- 5) 島貫友貴, 浅輪泰久, 工藤安未, 倉渕隆, 金政一, 鳥海吉弘, 李時桓：新型コロナウイルス感染症を対象としたレストランの飛沫核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（東海）, 2021 年