

# 二酸化炭素濃度とフィルタの効果に基づく エアロゾル感染リスクの評価方法

森 本 正 一 新菱冷熱工業（株）

エアロゾル感染リスクを低減するために重要な換気は、外気導入に加えて、フィルタでの捕集など対象となる汚染物質を取り除く効果を反映した相当換気で評価される。二酸化炭素濃度は、そのまま使うと外気導入量のみでの評価となるが、循環風量とフィルタ性能などを使って換算することで、相当換気を評価することができる。また、感染リスクの評価で使われる Wells-Riley 感染確率モデルは、式の中に換気量が入っており、通常は部屋などの単位でのリスク評価となる。この換気量を、二酸化炭素濃度から推定することで、室内の感染確率の分布を評価することができる。

## 1. はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行で、エアロゾル感染という言葉が作られ、従来は病院のような限られた環境だけで起こると考えられていたエアロゾル発生手技の状況が、一般の環境でも起こることが知られるようになった<sup>1)</sup>。エアロゾル感染の定義は定まっていないが、飛沫核感染と飛沫感染の中間にあたる伝播経路と考えられる。その対策のため、厚生労働省から 30 m<sup>3</sup>/h・人の目安が示されるなど<sup>2)</sup>、換気的重要性が認知されるようになっている。

換気には、外気導入による換気のほか、フィルタでの捕集など対象となる汚染物質を取り除く効果を外気で希釈する場合の換気量へ換算した換気がある。外気量と、汚染物質を取り除く効果を合わせた換気を、相当換気と呼ぶ。ASHRAE Standard 241-2023<sup>3)</sup> では、換気量が ECAi（感染リスクを低減するための 1 人当たり相当換気量）で示されており、日本でも相当換気の活用が進む可能性がある。

換気の評価には二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）濃度が使われることが多い。CO<sub>2</sub> 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も適している。一方で、CO<sub>2</sub> はフィルタ等で捕集されずに通過するため、CO<sub>2</sub> 濃度はフィルタで取り除かれる効果を評価できず、導入される外気のみを換気として評価してしまう課題がある。そのため、CO<sub>2</sub> 濃度で換気を評

価すると、必要以上に大きな換気量で換気してしまう可能性がある。この課題を解決できれば、必要な換気をすべて外気の導入で賄うのではなく、空調機や空気清浄機などに内蔵されるフィルタで捕集する効果を有効に活用することができる。そこで、簡便な方法で相当換気を評価するため、CO<sub>2</sub> 濃度を利用しながら、相当換気での換気を行うための方法を紹介する。

## 2. CO<sub>2</sub> 濃度での相当換気の評価<sup>4)</sup>

### 2.1 CO<sub>2</sub> 濃度を使って相当換気を評価する方法

COVID-19 の病原体である SARS-CoV-2 など、ウイルスや細菌などの病原体は大きさのある粒子である。そのため、エアロゾルとして浮遊した場合でも、粒子径に相当するフィルタ効率で捕集することができる。エアロゾルに対するフィルタの捕集効率<sup>3,5)</sup>を表-1に示す。表-1のエアロゾルに対する捕集効率は、0.3~1.0 μm の粒子が 30%、1.0~3.0 μm の粒子が 30%、3.0~10.0 μm の粒子が 40%存在する場合の捕集効率が示されている。

表-1 エアロゾルに対するフィルタの捕集効率

MERV	旧 JIS 比色法	JIS B 9908:2018	エアロゾルに対する捕集効率
<11			0%
11	60%	ePM <sub>10</sub> 55%	60%
13	90%	ePM <sub>1,min</sub> 50%	77%
14	95%	ePM <sub>1,min</sub> 70%	88%

換気の評価に CO<sub>2</sub> 濃度を使うことが増えているが、CO<sub>2</sub> は空調設備で使われるフィルタ等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ことが課題となっている。そのため、CO<sub>2</sub> 濃度をそのまま指標とすると、除去されるはずの汚染物質濃度を評価できず、本来よりも換気が必要であると評価してしまう。そこで、CO<sub>2</sub> 濃度を、CO<sub>2</sub> がフィルタでエアロゾルと同様に捕集されたと仮定した場合の濃度である、換算 CO<sub>2</sub> 濃度へ換算する方法を紹介する。

相当換気と室内の汚染物質濃度の関係は、式 (1) および式 (2) で近似することができる。

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

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

$Q$  : 相当換気量 [m<sup>3</sup>/h]

$Q_{OA}$  : 外気量 [m<sup>3</sup>/h]

$Q_{RA}$  : 循環風量 [m<sup>3</sup>/h]

$\eta$  : フィルタ効率 [-]

$C_t$  : t 時間後の室内汚染物質濃度 [ppm]

$C_{OA}$  : 外気中の汚染物質濃度 [ppm]

$M$  : 室内の汚染物質発生量 [mL/h]

式 (1) のフィルタ効率  $\eta$  は、中性能フィルタの場合エアロゾルに対して 60~88 %<sup>3)</sup> の効果が想定されるが、CO<sub>2</sub> に対しては 0 となる。また、式 (2) は、時間が経過すると  $Q/M$  に収束する。そのため、汚染物質が CO<sub>2</sub> の場合、室内の CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  は式 (3) に収束する。

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

式 (3) は、室内の汚染物質 (=CO<sub>2</sub>) 発生量  $M$  を外気量  $Q_{OA}$  で除していることから、室内の CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  で換気の評価すると、外気量を換気として評価していることがわかる。そこで、式 (3) の外気量  $Q_{OA}$  を相当換気量  $Q$  に置き換えるため、両辺に  $Q_{OA}/Q$  をかけて式 (1) を代入すると式 (4) が得られる。

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

式 (4) により、室内濃度と関係する  $Q/M$  を、CO<sub>2</sub> 濃度および風量、フィルタ効率で表すことができる。そこで、式 (2) に式 (4) を代入すると式 (5) が得られる。

$$C_t = C_{OA} + (C - C_{OA})\left(\frac{Q_{OA}}{Q_{OA} + Q_{RA}\eta}\right) \quad (5)$$

式 (5) を構成する要素のうち、CO<sub>2</sub> 濃度は測定が可能であり、風量とフィルタ効率は設計条件などから定めることができる。そのため、式 (5) を用いることで、室内の汚染物質濃度  $C_t$  を、室内の CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  を測定することで決めることができる。本稿では、式 (5) で得られる  $C_t$  を換算 CO<sub>2</sub> 濃度と呼ぶことにする。

## 2.2 換算 CO<sub>2</sub> 濃度の活用

CO<sub>2</sub> 濃度の代わりに換算 CO<sub>2</sub> 濃度を使うことで、汚染物質の濃度をより正確に推定することができるため、代替指標としての CO<sub>2</sub> の活用が広がる。

式 (1) のうち、外気量  $Q_{OA}$  と循環風量  $Q_{RA}$  は実測値や設計条件などから定めることができるため、表-1 の捕集効率を使うと、相当換気量  $Q$  が定まる。外気量が 2 回/h、循環風量が 4 回/h、循環フィルタが ePM<sub>10</sub> 55 % の場合、エアロゾルに対する捕集効率は 60 % なので、相当換気量は 4.4 回/h となる。外気量の 2 倍以上となることから、無視できない大きさの効果があることがわかる。

CO<sub>2</sub> 濃度を空調設備の風量制御に使う場合、測定された CO<sub>2</sub> 濃度に合わせて外気風量を増減する。CO<sub>2</sub> 濃度の代わりに換算 CO<sub>2</sub> 濃度を使うことで、外気風量の代わりに循環風量を増やした換気を行うことが可能になる。このとき、循環風量が増えても CO<sub>2</sub> 濃度は変わらないが、換算 CO<sub>2</sub> 濃度は下がることになる。そのため、CO<sub>2</sub> 濃度で制御している場合は外気風量を増やす必要があるが、換算 CO<sub>2</sub> 濃度で制御している場合は、外気風量の代わりに循環風量を増やすことでも、必要な換気量を確保することができる。

また、フィルタ効率は、対象となる粒径が大きくなるほど捕集効率が大きくなる<sup>5)</sup> ことが知られている。新興感染症の流行初期のような、空気感染の可能性が否定できず、エアロゾルよりもさらに小さな粒子が感染に寄与する可能性がある場合であっても、病原体の粒径に基づくフィルタの捕集効率を使用すれば、安全側の評価が可能である。

## 3. CO<sub>2</sub> 濃度を利用してエアロゾル感染リスクを評価する方法<sup>6)</sup>

### 3.1 換気量を CO<sub>2</sub> 濃度から推定する方法

空気を介した感染リスクを評価する方法として、Wells-Riley 感染確率モデル (式 (6)) が利用されている<sup>7)</sup>。

$$P = \frac{N}{n-1} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad (6)$$

$P$  : 感染確率 [-]  
 $N$  : 二次感染者数 [人]  
 $n$  : 在室者数 [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 [m<sup>3</sup>/h]  
 $Q$  : 換気量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $t$  : 曝露時間 [h]

式 (6) のうち、クアンタ生成率  $q$ 、人の呼吸率  $p$  は、在室者が従事している作業状態によって定まる。また、クアンタ生成率  $q$  は病原体の種類によって定まる。作業状態とクアンタ生成率の関係<sup>7)</sup> を表-2 に示す。

表-2 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 <sup>3</sup> /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

また、式 (6) には換気量  $Q$  が使われている。換気量  $Q$  は部屋単位などで定められるため、病原体の濃度分布を反映することができないことが課題である。そこで、式 (6) 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紹介する。

式 (6) 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、CO<sub>2</sub> は人体から発生するため、燃焼機器や喫煙など人以外の CO<sub>2</sub> の発生源がない室内では、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 濃度を換気量へ換算する方法が必要になる。そこで、建築物衛生法の空気環境の基準である CO<sub>2</sub> 濃度 1,000 ppm と 1 人あたり 30 m<sup>3</sup>/h の換気の関係を利用する方法を紹介する。室内の CO<sub>2</sub> 発生が人体だけの場合で、1 人あたり 30 m<sup>3</sup>/h の換気がある場合の CO<sub>2</sub> 濃度が 1,000 ppm であると仮定した場合、室内の CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  と相当換気量  $Q$  の関係は、式 (7) で表すことができる。

$$Q = 30 \times n \times \frac{1,000 - C_{OA}}{C - C_{OA}} \quad (7)$$

式 (6) に式 (7) を代入すると、測定場所における CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  から感染リスクを評価する式 (8) を得られる。

$$P = \frac{N}{n-1} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{30 \times n \times \frac{1,000 - C_{OA}}{C - C_{OA}}}\right) \quad (8)$$

式 (8) は、センサーにより計測可能な室内 CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  と、その他実測や文献などから数値を決めることができる要素で構成されている。CO<sub>2</sub> 濃度はエアロゾル濃度と近い挙動を示すと考えられるため、式(9)を使うことで、Wells-Riley モデルの課題であった室内のエアロゾル濃度分布に基づいた感染リスクの評価が可能である。

### 3.2 換気量を CO<sub>2</sub> 発生量から推定する方法

式 (8) で利用した 1 人あたり 30 m<sup>3</sup>/h の換気がある場合の CO<sub>2</sub> 濃度が 1,000 ppm であるという仮定は、事務作業を想定した CO<sub>2</sub> 発生量を根拠としている。そのため、運動時など事務作業と大きく異なる作業状態では、適用することができない。そこで、想定する作業状態における CO<sub>2</sub> 発生量から換気量を推定し、感染リスクを評価する方法を紹介する。

室内の CO<sub>2</sub> 発生が人体だけと仮定した場合、1 人当たりの CO<sub>2</sub> 発生量  $p_{CO_2}$  と換気量  $Q$ 、CO<sub>2</sub> 濃度  $C$  の関係は式 (9) が成り立つ。

$$\frac{n \times p_{CO_2}}{Q} = \frac{C - C_{OA}}{1,000,000} \quad (9)$$

式 (9) を変形し、式 (6) の換気量  $Q$  へ代入することで、式 (10) が得られる。

$$P = \frac{N}{n-1} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{\frac{n \times p_{CO_2}}{C - C_{OA}} \times 1,000,000}\right) \quad (10)$$

ここで、式 (8) と式 (10) を比較すると、式 (11) が得られる。

$$30 \times (1,000 - C_{OA}) = p_{CO_2} \times 1,000,000 \quad (11)$$

式 (11) から、外気の CO<sub>2</sub> 濃度  $C_{OA}$  が 400 ppm の場合、1 人当たりの CO<sub>2</sub> 発生量  $p_{CO_2}$  が 0.018 m<sup>3</sup>/h (30,000 ppm × 0.6 m<sup>3</sup>/h に相当) の場合に式 (8) と式 (10) が同等となる。

## 4. CO<sub>2</sub> 濃度測定から感染リスク評価までの流れ

エアロゾル濃度を低減するための対策には、空調設備の循環フィルタでの捕集などが考えられるが、後から設

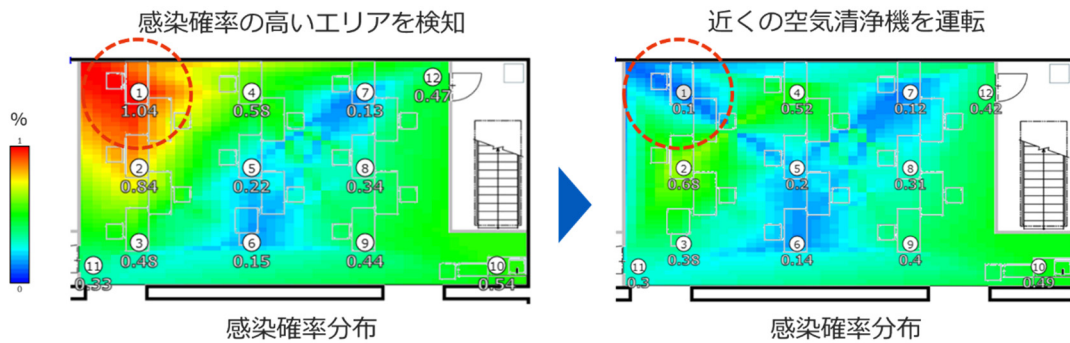


図-2 空気清浄機の運転による感染確率の低減例

置することが容易な、空気清浄機を使う場合を例に説明する。

はじめに、空気清浄機の効果を事前に CFD 解析で確認する。空気清浄機が OFF の場合に対する ON の場合の各測定場所の濃度比率を算出することで、CO<sub>2</sub> 濃度をエアロゾル濃度へ換算する係数が得られる (図-1)。このとき、空調設備のフィルタでもエアロゾルが捕集される場合は、空気清浄機が OFF の場合はフィルタでの捕集効率

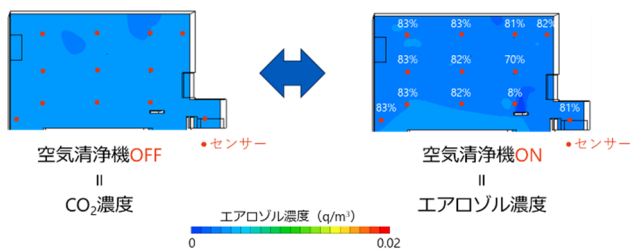


図-1 CO<sub>2</sub> 濃度とエアロゾル濃度の関係

を 0、ON の場合は表-1 のエアロゾルに対する捕集効率で捕集されることとすることで、CO<sub>2</sub> 濃度をエアロゾル濃度へ換算する係数が得られる

次に、式 (8) または式 (10) を使って感染リスクを評価するために、室内の CO<sub>2</sub> 濃度を測定する必要がある。CO<sub>2</sub> 濃度は 1 点の測定でもよいが、測定点を多くすることで、換気効率の分布を評価することができる。ここで、得られた CO<sub>2</sub> 濃度を使って感染リスクを評価することで、感染リスクの高い場所、低い場所の分布を知ることができる。ここで得られた CO<sub>2</sub> 濃度は、事前に実施した CFD 解析の結果を利用して、換算 CO<sub>2</sub> 濃度へ変換することができる。これにより、換算 CO<sub>2</sub> 濃度と、式 (8) または式 (10) を使って感染リスクを評価することができる。

最後に、感染リスクの高い場所を検知した場合に空気清浄機を運転する (図-2)。感染リスクが下がった場合は空気清浄機を停止することで、感染リスクを一定以下へ維持することができる。

## 5. おわりに

COVID-19 は、2023 年 5 月に感染症法上の位置付けが 5 類感染症へ指定された。それに伴い、社会活動も COVID-19 流行以前の状態に近づきつつある。しかしながら、換気だけを流行初期の状態で維持し続けるのは、バランスが悪いと言えるだろう。換気も、他の生活習慣と同様に、過不足のない適切なものが求められていくと考えられる。また、交通の発達した現代では、これまでよりも短い周期でパンデミックが到来する可能性がある。新たなパンデミックに備えるためにも、今から適切な換気へ切り替えていくことが重要である。換気は、私たちがより快適で健康的な生活を送るために、欠かせない要素である。本稿を通じて、適切な換気的重要性についての理解が深まり、その実践に一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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>
- 3) ASHRAE：ASHRAE Standard 241-2023 Control of Infectious Aerosols, 2023
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 森本正一, 小林徳和, 柳澤淳, 五十嵐瞳, 穴井俊博：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。空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2023
- 7) RHEVA：RHEVA calculator to estimate the effect of ventilation on COVID-19 airborne transmission V2.1  
<https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator>