

二酸化炭素濃度を利用した相当換気量評価の方法

森本 正一

五十嵐 瞳

穴井 俊博

柳澤 淳

小林 徳和

三國 恒文

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行により、換気的重要性が世界的に認知されるようになった。換気の評価は、外気導入による換気と、エアフィルタによる病原体の除去効果を換気量で表す相当換気の、両者について行う必要がある。換気の評価では、二酸化炭素（CO₂）濃度が広く使われているが、CO₂はエアフィルタで捕集されずに通過するため、感染リスクを評価する場合に相当換気の効果を評価できない課題がある。また、感染リスクの評価で使われる Wells-Riley モデルは、病原体濃度分布を評価できない課題がある。そこで、CO₂濃度を利用して病原体濃度分布と感染リスクを評価する手法を考案した。相当換気の評価するため、室内に導入する外気風量、空気清浄機等の循環風量とエアフィルタの病原体捕集効率を用いて CO₂濃度を換算した。検証は数値流体シミュレーション（CFD 解析）で行った。在室者を 8 人、外気風量を 240 m³/h、循環風量を 594 m³/h としたモデルで CO₂を捕集できる仮想のエアフィルタの効果を検証した結果、CFD 解析の結果と考案した方法で換算した結果の差は 0.3~1.5%であった。また、CFD 解析の結果と理論値との差は 3.3~3.7%であり、考案した換算方法は実用上、問題ない精度であることを確認した。

1. はじめに

新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）感染症（COVID-19）の流行で、マイクロ飛沫感染（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。COVID-19 対策では、主な感染経路は飛沫感染とされながら、早くから換気的重要性が指摘されていた¹⁾。換気は主に空気感染に対して有効な対策なので、一見矛盾するように感じられたが、初期に発生したクラスターを解析した結果から、三つの密（密閉、密接、密集）が重なると感染リスクが 18.7 倍になると分析され、原因の一つが換気不足であった²⁾。その後、WHO が室内空気中の感染性ウイルス濃度の低減が重要であることを指摘³⁾するなど、換気的重要性が認知されていった。また、厚労省から換気を目安として 30 m³/h・人という目安が示された⁴⁾。これにより、窓開けなど外気を導入する換気が増やされたが、相当換気を含めた換気にできれば、エネルギー効率の面で有利である。

換気の状態を把握するためには、人体から発生する物質を代替指標とするのが簡便である。代表的なものは二酸化炭素（CO₂）だが、フィルタで除去できないため、CO₂濃度を下げるためには外気によって希釈する必要がある。微生物や粒子、化学物質も人体から発生するが、人体からの発生量が少なく、安定した測定が困難である。

そこで、安定した測定が可能な CO₂濃度を代替指標としながら、循環による相当換気を考慮した換気制御をするための手法を検討した。

2. CO₂濃度を感染リスクへ換算する方法

CO₂濃度を感染リスクへ換算するためにもっとも大きな課題は、空調設備で通常使われるフィルタでは除去できないことである。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、循環フィルタも確認可能である。また、循環フィルタの種類によってどの程度病原体を除去できるかは、浮遊する病原体の粒径がわかれば推定できる⁵⁾。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。

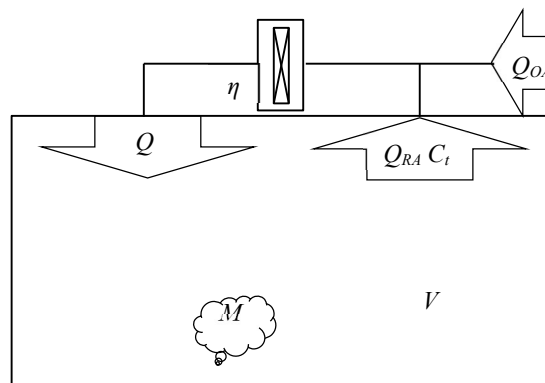


図1 式(1)および式(2)の模式図

ここで、室内に発生源がある場合の CO₂ の室内濃度の推移を式 (1) および式 (2) に、式 (1) および式 (2) の模式図を図 1 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_{OA} : 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]

C_0 : 初期の室内 CO₂ 濃度 [ppm]

C_{OA} : 外気中の CO₂ 濃度 [ppm]

V : 室容積 [m³]

t : 経過時間 [h]

M : 室内の CO₂ 発生量 [mL/h]

式 (2) では、 t が大きくなると C_0 に起因する濃度は低減するが、 M に起因する濃度が増加し、 M/Q に収束する。事務所ビルなどでは一定の人数が在室することが多いと考えられるため、室内濃度を測定した場合は M/Q に近い値が得られると考えられる。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_{OA} を Q へ換算するため両辺に式 (1) を変形した $Q_{OA}/(Q_{OA} + Q_{RA}\eta)$ 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 (SARS-CoV-2) 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_{OA} 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 M/Q へ換算することができる。

3. CFD 解析による検証

3.1. 方法

CFD 解析は 13.0m × 5.8 m × 2.85 m の実験室をモデルとした。解析ソフトには STREAM V2021 ((株) ソフトウェアクレイドル) を用いた。モデルを図 2 に、CFD 解析の条件を表 1 に示す。吹出し口としてアネモを 4 箇所、吸込み口は 2 箇所配置した。在室者は 8 人とし、外気の CO₂ 濃度を 400 ppm、人体から発生する CO₂ 濃度を

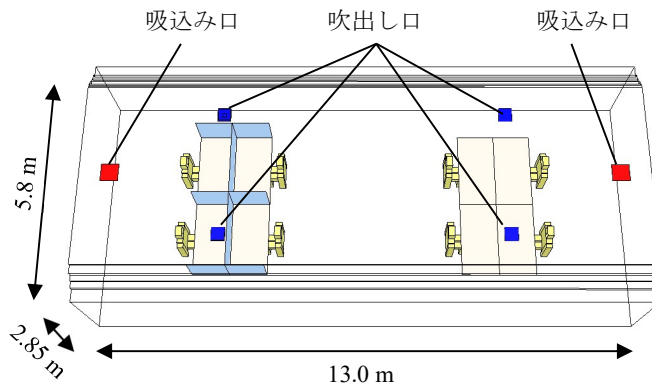


図 2 CFD 解析のモデル

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	8 人
外気風量	240 m ³ /h
循環風量	594 m ³ /h
フィルタ効率	0, 25, 50, 75, 100 %

40,000 ppm とした。外気の導入量は、換気を目安とされる 30 m³/h・人⁴⁾から 240 m³/h とした。気流が拡散しやすい状況と拡散しにくい状況を混在させるため、8 人のうち 4 人はパーティションに囲まれた座席、残りの 4 人はパーティションのない座席に着席させた。フィルタ効率 0% のモデルでは、吸込み口に到達した CO₂ 量を 4 等分して吹出し口の濃度に上乘せした。フィルタ効率 25~100% のモデルでは、CO₂ 量に除去率を乗じた値を 4 等分して吹出し口の濃度に上乘せした。解析は、CO₂ に対するフィルタ効率が 0, 25, 50, 75, 100% の 5 条件とした。次に、CO₂ に対するフィルタ効率は通常 0% と考えられるため、0% 時の室内平均 CO₂ 濃度の結果を利用して式 (4) で換算した結果と比較した。

3.2. 結果および考察

CFD 解析による室内平均 CO₂ 濃度と換算結果、理論値の比較を表 2 に、CFD 解析の結果の平面図および断面図を図 3 に示す。まず、フィルタ効率と室内濃度の関係では、フィルタ効率が向上するほど、つまり相当換気量が増えるほど CO₂ 濃度が下がることが確認できた。また、室内平均 CO₂ 濃度と式 (4) による換算の結果を比較すると、換算した 4 条件の差は 0.3~1.5% であり、精度よく換算できていると考えられる。

次に、呼気の風量、呼気および外気の CO₂ 濃度、在室

人数から計算される室内濃度の理論値との比較では、CFD 解析の濃度との差は 3.3~3.7 %であった。また、図 3 では、いずれの条件でも発生源である口元以外は室内の濃度分布に偏りがみられなかった。そのため、パーティションの設置程度の什器等の設置であれば、CO₂ 濃度分布への影響は小さく、濃度換算への影響も小さいと考

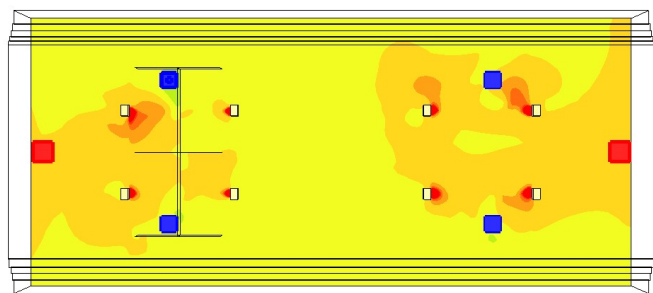
えられる。

これらの結果から、式 (4) を利用して、室内の CO₂ 濃度に $Q_{OA} / (Q_{OA} + Q_{RA}\eta)$ をかけて換算することで、フィルタ効率を考慮した濃度への換算が可能であると考えられる。

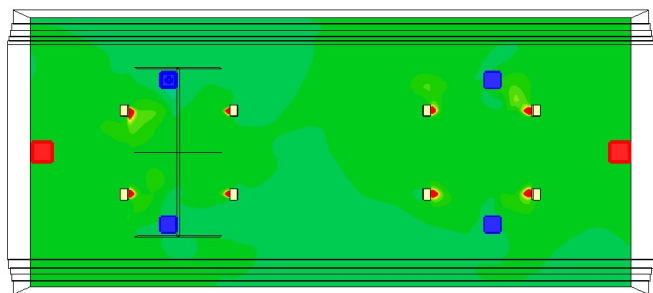
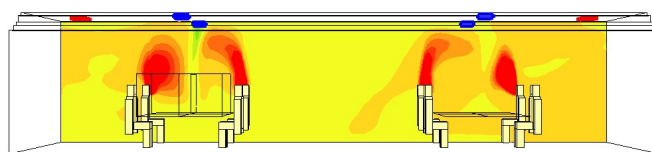
表 2 CFD 解析による室内平均 CO₂ 濃度と換算結果、理論値の比較

フィルタ効率	CFD 解析による室内平均 CO ₂ 濃度	式 (4) による換算	理論値
0 %	1,150 ppm	—	1,192 ppm (103.7 %)
25 %	861 ppm	863 ppm (100.3 %)	889 ppm (103.3 %)
50 %	729 ppm	735 ppm (100.8 %)	754 ppm (103.4 %)
75 %	660 ppm	662 ppm (101.2 %)	677 ppm (103.4 %)
100 %	612 ppm	616 ppm (101.5 %)	628 ppm (103.5 %)

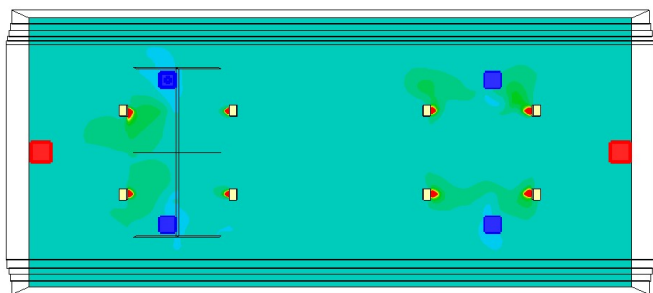
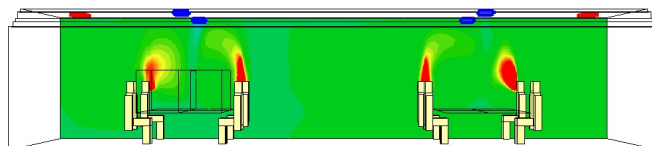
※カッコ内の数値は CFD 解析の結果を分母とした濃度比



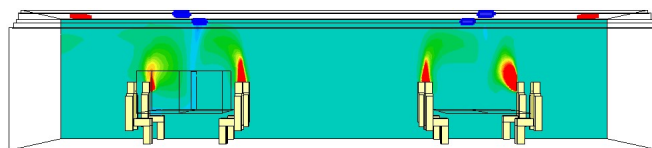
(a) フィルタ効率 0 % (左 : Z = 1.2 m、右 : Y = 3.8 m)

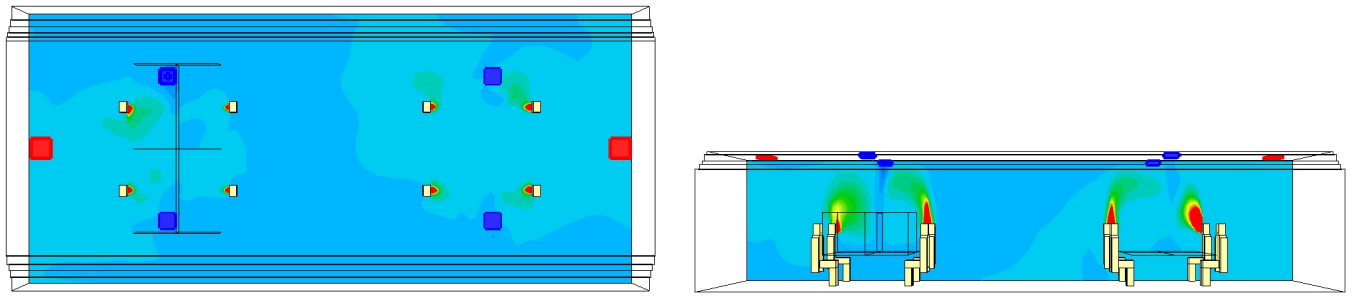


(b) フィルタ効率 25 % (左 : Z = 1.2 m、右 : Y = 3.8 m)

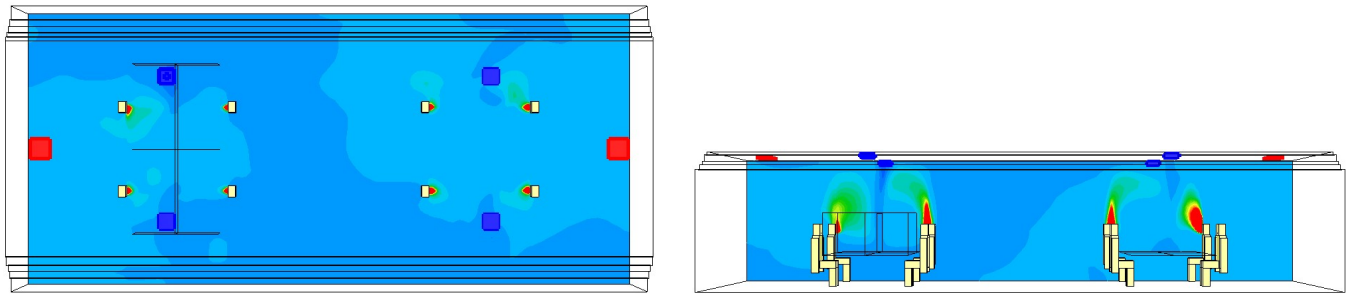


(c) フィルタ効率 50 % (左 : Z = 1.2 m、右 : Y = 3.8 m)





(d) フィルタ効率 75 % (左 : Z = 1.2 m、右 : Y = 3.8 m)



(e) フィルタ効率 100 % (左 : Z = 1.2 m、右 : Y = 3.8 m)

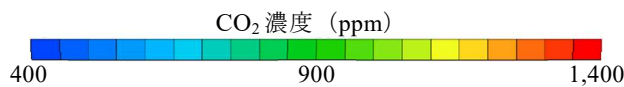


図 3 CFD 解析の結果

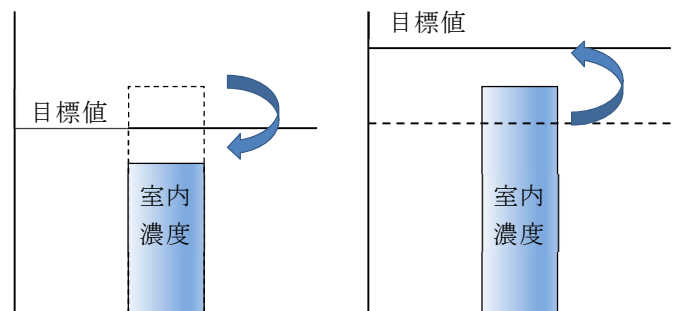
4. CO₂ 濃度の換算の活用

CO₂ をフィルタで除去した場合の濃度へ換算することで、代替指標としての CO₂ 濃度測定の実用範囲が広がる。つまり、通常のフィルタでは CO₂ を除去できないため、外気による換気量で CO₂ 濃度は決まるが、本来濃度を知りたい物質について、フィルタで除去される量を考慮した濃度を推定することが可能になる。

たとえば、中性能フィルタでもある程度除去できると考えられる SARS-CoV-2 など、病原体濃度をより正確に予測することが可能になる。これにより、測定器で得られる濃度が変わらなくても、病原体が除去された量を考慮した濃度へ換算することができる。つまり、計測される CO₂ 濃度は変わらないが、制御する目標値を、循環風量の増減に合わせて計算し、変えることができる。図 4 に目標値を超えた場合の制御イメージを示す。CO₂ 濃度が目標値を超えた場合、通常は (a) のように外気の導入量を増やして CO₂ 濃度を下げる制御を行う。一方、本報で提案した方法で制御する場合、(b) のように循環風量の増加分だけ目標値を上げる制御を行うことで、測定器の値は変化しなくても、目標値を超えている状態から、目標値以下の状態へ、変化させることができる。このとき、目標値は式 (4) を利用して循環風量などから自動的に算出されるため、根拠のある目標値を提示し続ける

ことが可能である。

また、換算で使用しているフィルタ効率は、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⁹⁾ことから、新興感染症の流行初期のような、感染に寄与するエアロゾルの粒径が不明な場合であっても、病原体の粒径を使用すれば安全側の評価が行える。また、SARS-CoV-



(a) 外気を増やし、室内濃度を下げる制御

(b) 相当換気を増やし、目標値を上げる制御

図 4 目標値を超えた場合の制御イメージ
2 が流行した際に SARS-CoV が流行した際の知見が応用されたように、似ている病原体のデータから推測することも可能である。

5. まとめ

CO₂ 濃度を感染リスクへ換算する方法について検討し、以下の知見を得た。これらの知見から、CO₂ をフィルタで除去した場合の濃度へ換算することで、病原体濃度などをより正確に予測することができる。

- ・ 外気風量、循環風量、循環フィルタの捕集効率を利用して、相当換気を考慮した濃度へ CO₂ 濃度を換算できる。
- ・ CFD 解析で検証した結果、室内平均濃度と換算した濃度の誤差は 0.3～1.5 %であった。
- ・ 換算した CO₂ 濃度を制御に使う場合、目標値を循環風量の増減に合わせて自動的に算出することで、根拠のある目標値を提示し続けることが可能である。

参考文献

- 1) 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（令和2年3月1日版）
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000602323.pdf>
- 2) Nishiura, H., et al. Closed environments facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19).
<https://doi.org/10.1101/2020.02.28.20029272>
- 3) WHO. Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care. Geneva: World Health Organization; 2014.
https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_eng.pdf
- 4) 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>
- 5) 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
- 6) 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

*1 新菱冷熱工業（株）経営統括本部イノベーションハブ・博士（医学）

*2 新菱冷熱工業（株）経営統括本部イノベーションハブ

*1 Shinryo Corporation Corporate Management Division Innovation Hub, Ph.D.

*2 Shinryo Corporation Corporate Management Division Innovation Hub