

CO₂の可視化による 感染症予防の取り組み

電気通信大学 特任准教授

石垣 陽 Yo Ishigaki

1. はじめに

新型コロナウイルスの蔓延により、室内の二酸化炭素（CO₂）濃度が注目されている。屋外の新鮮な空気はCO₂濃度が約400 ppmと一定なのに対し、ヒトの吐息には4万 ppmと多量のCO₂が含まれている。そのため室内CO₂濃度を測定すれば、ヒトの吐いた息がどれだけ滞留しているかを把握できる。

新型コロナウイルス厚生労働省対策本部では、「換気の悪い密閉空間」を改善するため、ビル管理法の基準（CO₂濃度換算で1,000 ppm以下）への適合を推奨している。また日本産業衛生学会は、新型コロナウイルス対策のため換気の良否をCO₂濃度によって指針化して

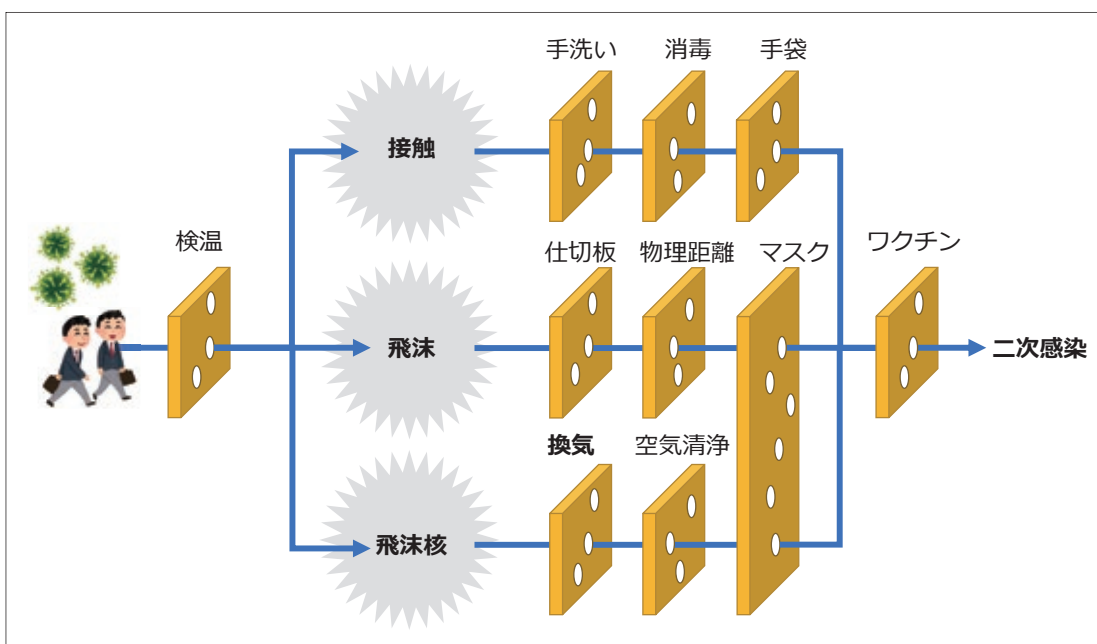
いる。

なお新型コロナウイルスの感染経路には「接触」「飛沫」「飛沫核」の3つがあるとされる。図1に二次感染経路と防護策を示す。CO₂濃度を可視化することで換気状態を適切に管理すれば、このうち「飛沫核」による感染確率を低減できるであろう。もちろん、一つの防護策だけでは穴あきチーズのように必ず「抜け穴」があるため、その他の防護策も併用することで、全体としてリスクの低減を図る必要がある。

2. 室内CO₂濃度の基準値

室内のCO₂濃度にはいくつかの基準値や指

図1 二次感染経路と防護策の分類



標があることをご存じだろうか。以下では、「感染症対策」「法規制」「生体影響」の3つの観点から説明する。

(1) 感染症対策

米国保健工学会（ASHE）は、結核、はしか、水疱瘡、インフルエンザ、天然痘やSARSの空気感染リスクと換気能力の間に相関があるとしている¹⁾。また細菌やウイルスによる空気感染リスクを定量的に評価するモデルとしてWells-Riley式（1）が知られている^{2),3)}。

$$P=1-\exp\left[-\frac{Iqpt}{Q}\left\{1-\frac{V}{Q\theta}\left[1-\exp\left(-\frac{Q\theta}{V}\right)\right]\right\}\right] \quad (1)$$

ここで、 P は被感染者が感染する確率、 I は閉鎖空間における感染者数、 p は1人の呼吸量（ m^3/h ）、 q は感染性飛沫の発生率（ $1/\text{h}$ ）、 t は被感染者の滞在時間（ h ）、 θ は感染者の滞在時間（ h ）、 V は室内容積（ m^3 ）、 Q は換気量（ m^3/h ）である。なお、COVID-19感染における q は100以上になることが報告されている⁴⁾。Wells-Riley式は、感染者が排出した感染性飛沫を被感染者が呼吸して取り込むことによる曝露確率をリスク量としてモデル化している。感染性飛沫は高濃度の CO_2 を伴っており、どちらも気流拡散する性質があることから、 CO_2 濃度を空気感染リスクの指標とすることは有用といえる。

結核の有効繁殖率（新規二次感染者と感染源との比率）を1以下にするための換気率の

閾値は、 CO_2 濃度1,000 ppmに相当することがモデル化により示唆されており、実際にDuらは、結核の集団感染（結核患者27人、接触者1665人）が発生した換気が不十分な大学の建物の換気設備を改善し、最大 CO_2 濃度を 3204 ± 50 ppmから $591\text{--}603$ ppmに低下させることで、新規接触者の二次感染率をゼロに抑えることができ（平均追跡期間：5.9年）、 CO_2 濃度を1,000 ppm未満に管理すれば、接触者における結核発症率を97%減少させられる（95%CI：50%～99.9%）と報告している⁵⁾。

日本産業衛生学会 産業衛生技術部会では CO_2 濃度に関する法規制や生体影響等（後述）を総合的に勘案した上で、 CO_2 濃度に応じた換気の良否を見積る区分を表1のように設定し、各区分に応じた対策を推奨している⁶⁾。

(2) 法規制

建築基準法（2003年改正・施行）では、先進諸外国と同様、シックハウス対策のため全居室に24時間換気装置の設置を義務付けており、住宅等の居室では0.5回/h以上の換気能力が求められる。0.5回/hの換気能力では、例えば 70m^2 の空間に標準的な活動量の人が入居するとき、 CO_2 濃度は2名在室時に800 ppm、3名在室時に1,000 ppm、4名在室時には1,200 ppm程度となる。

建築基準法が換気回数を定めるのに対して、「建築物における衛生的環境の確保に関

表1 換気の良否見積り区分

CO ₂ 濃度 [ppm]	区分	説明
1,000以下	良好	良好でありこの状態を保つ
1,000-1,500以下	やや良い	受け入れられる限度。時々一部の窓を開けることもよい（1時間に数分間程度）
1,500-2,500以下	悪い	30分に数分間程度窓を開ける（全開）またその部屋の使用は控える
2,500-3,500以下	非常に悪い	常時窓を開ける（全開）またその部屋の使用は控える
3,500超	極めて悪い	その部屋の使用は控える

（文献⁶⁾を元に色付け）

する法律」(ビル管理法、1970年施行)ではCO₂濃度の管理基準を定めている。具体的には、興行場、百貨店、店舗、事務所、学校等の用に供される建築物で、特定用途に利用される部分の面積が3,000 m²以上(学校の場合は8,000 m²以上)の建築物(特定建築物)において、CO₂濃度は1,000 ppm以下と規定される。

この他、学校保健安全法に基づく学校環境衛生基準(2021年改正・施行)では、学校内のCO₂濃度は1,500 ppm以下が「望ましい」としている。また、労働安全衛生法では、事務所衛生基準規則により、労働者が執務する事務所でのCO₂濃度を5,000 ppm以下、中央管理式空気調和設備等を設ける場合は1,000 ppm以下と定めている。日本産業衛生学会では、作業所において1日8h、週40h労働を想定した場合、CO₂の許容濃度を5,000 ppmとしている。

(3) 生体影響

低濃度CO₂曝露の生体影響は研究例が少ないが、Satishら⁷⁾は、2,500 ppmを超えると意思決定能力に影響を及ぼすと報告している(2.5h曝露, N=25)。アメリカ航空宇宙局(NASA)による宇宙飛行士への聞き取り調査⁸⁾では、頭痛を起こす人の出た最低濃度は2,700 ppm程度であり、無気力、気分不調、疲労感が出る閾値が5,300 ppm程度、9割の確率で二酸化炭素関連障害が起こる閾値が6,500 ppm程度だったとしている。

3. CO₂の可視化と行動変容

以下では最新の小型・軽量・安価なCO₂センサを紹介した上で、そのデジタルデータを活用した可視化や行動変容に向けた取り組み事例を紹介する。

(1) センサ

CO₂センサの測定原理は主に、eCO₂(equivalent CO₂)、NDIR(Non Dispersive Infrared、非分散赤外線吸収法)及び光音響方式の3つに分類できる。eCO₂は、微細なヒーターで加熱された金属との酸化還元反応によって推定される等価CO₂濃度であるが、CO₂以外の様々な物質にも反応するため選択性・精度が低い。NDIRは、CO₂分子の吸収波長(4.26 μm)における吸収度を測定する方式であり、精度が高いため広く産業用途に利用されている。光音響方式は、光でCO₂分子を励起させ、再び基底状態に戻るときに出る音波を測定しており、小型・低消費電力・低コスト化が可能であるため、次世代のCO₂センサとして期待されている。

著者はNDIRセンサを具備した手のひらサイズのスマホ連動型測定器「ポケットCO₂センサ」を開発し、産学連携により社会実装した(図2)。以下ではこの測定器を使った社会実証例を紹介する。

(2) 市民による自主測定と行動変容

図3はポケットCO₂センサの利用者から寄せられた、電車通勤時のCO₂濃度の推移であり、混雑する電車内ではCO₂濃度が1,500 ppmを超えることがわかる。自動車内の最大濃度はタクシー・バスで4,000 ppmを超え、乗

図2 ポケットCO₂センサー



用車では5,000 ppm を超えることが報告されており⁹⁾、電車と同様に密閉・密集が起きやすい。このような場所では定期的な窓開けが奨励されるが、乗客が窓開けに躊躇する事を考慮して、例えば CO₂濃度を車両内のモニターで可視化することや、濃度が閾値を超えた場合に窓開けをアナウンスで促すことも考えられるだろう。

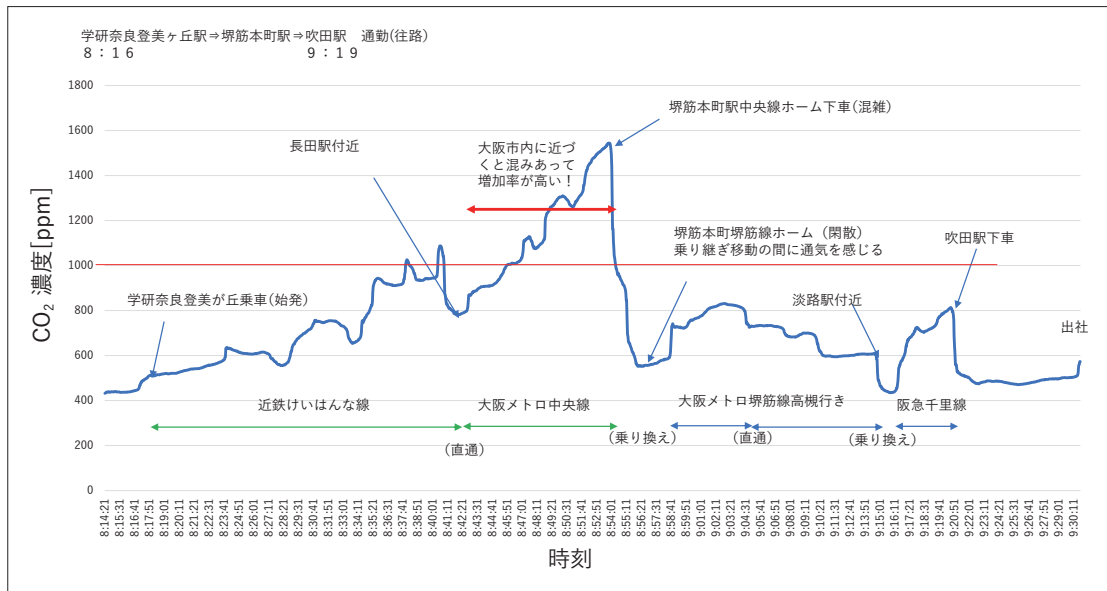
図4は音楽会場(ライブハウス)のオーナーの協力により CO₂濃度を測定した結果である。日々の開演で CO₂濃度が増加しているこ

とがわかり、最大濃度は8,000 ppm を超える日が多かった。このオーナーは後日、換気扇やダクトを使用した換気能力の改善を自ら行うと共に、現在は換気設備の大規模な更新も検討している。このように管理者が自主的に CO₂濃度を測定することで、事業所・店舗の換気対策を講じるきっかけを作る効果も期待できる。

(3) 一般公衆への可視化

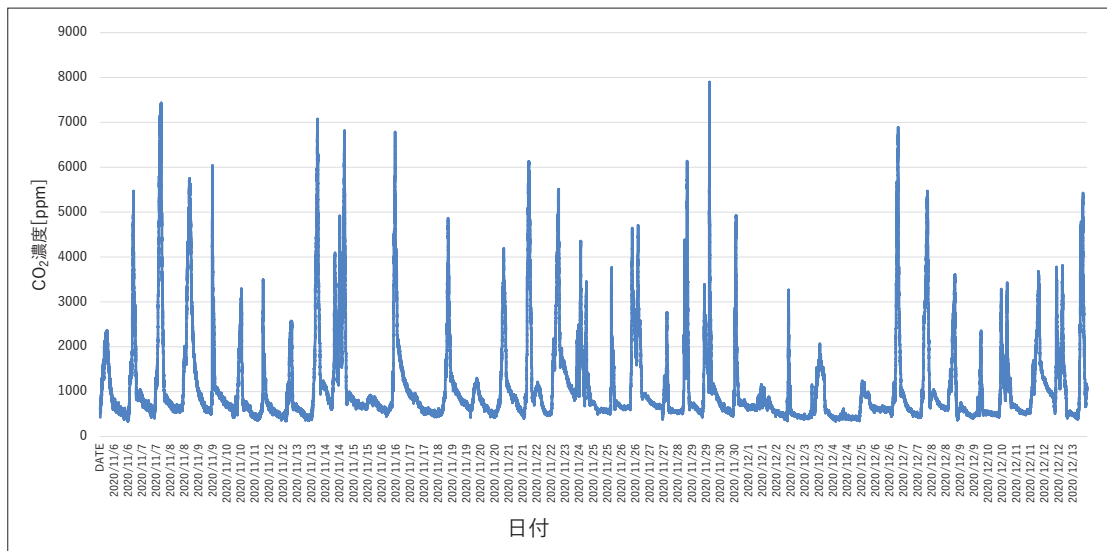
その場の CO₂濃度を共有する試みとして、

図3 通勤電車内の CO₂ 濃度トレンド (利用者提供)



2020年11月30日(月) 通勤時の CO₂測定

図4 音楽会場での CO₂ 濃度トレンド



アイドルのライブイベント中にリアルタイムでCO₂濃度を表示した(図5)。CO₂濃度が1,000 ppmを超えたらライブを中断して換気するというルールで合計4回のイベントを行った結果、このライブ会場では幸いにも1,000 ppmを超える事は無かった。

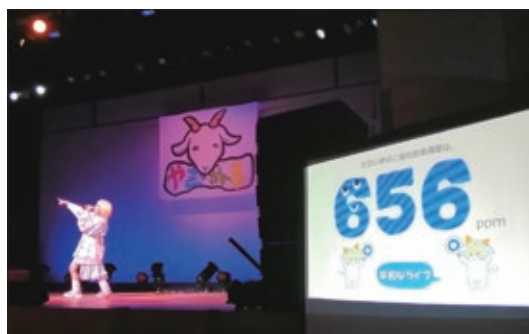
新型コロナウイルス感染症対策分科会の尾身茂会長は、室内のCO₂濃度をモニタリングし、一定の基準を超えた場合に換気を行うことを提案している他、感染予防策の情報を若年層や飲み会の参加者を中心に「興味を持ってもらえる方法」で伝えるよう提案している。そこで本アイドルイベントでは来場者に興味をもってもらえるよう、アイドル自ら描いたイラストを使った可視化を行い、ライブ中に壇上から解説してもらうなどの工夫をした。その結果、来場者へのアンケートではCO₂濃度の可視化について、98%が「とても安心できる」「安心できる」と回答し、95%が今後も「是非やってほしい」「やってほしい」と回答した(N=61)。このことから公共空間におけるCO₂可視化は、興味を持ってもらえる工夫をすることで、一般公衆の安全安心に寄与できるといえる。

4. おわりに

都市の中には、未だ顕在化していない「換気の悪い空間」が多くあるだろう。小型のCO₂センサによる可視化は、空気感染のリスクを一般公衆に知らせるための強力な道具となる。特に特殊建築物以外の建物・空間や、そもそも建築物ではない車両内では、所有者側に改善義務が無い。だからこそ、その場に居合わせた利用者側が積極的に換気(窓・ドア開け)を行い、自ら環境を改善する事も必要である。CO₂濃度情報はその意識づけのためにも重要となる。

新しい生活様式においては、一般公衆の側

図5 CO₂可視化アイドルライブ



も、「安全な空気は自らつくるもの」という意識を持ち、空気感染のリスクが高い場所を「避ける」「利用しない」という行動変容が求められる。今後は、店舗・事業所の換気状態を利用者が共有するため、IoTやソーシャルメディアを利用した、新しい空調管理の時代がやってくるだろう。

参考文献

- 1) F. Memarzadeh : Room Ventilation and Airborne Disease Transmission, American Hospital Association, 2013.
- 2) Wells, WF. : Airborne contagion and air hygiene, Harvard University Press., 1955.
- 3) Riley EC., et al. : Airborne spread of measles in a suburban elementary school, American Journal of Epidemiology, 107, 421-432, 1978.
- 4) G. Buonanno, et al. : Estimation of airborne viral emission : Quanta emission rate of SARS CoV-2 for infection risk assessment, Environment International, 141, 1-8, 2020.
- 5) Chun-Ru Du, et al. : Effect of ventilation improvement during a tuberculosis outbreak in underventilated university buildings, Indoor Air, 30, Issue 3, 422-432, 2019.
- 6) 日本産業衛生学会産業衛生技術部会 : 「換気シミュレーター」<新型コロナウイルス対策-換気の良否が簡単に見積れるツール>, 2020. http://jsoh-ohe.umin.jp/covid_simulator/ventilation_simulator_manual_ver1.0.pdf
- 7) Usha Satish et al. : Is CO₂ an Indoor Pollutant ? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance, Environment Health Perspectives, 120 (12), 2012. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- 8) J. Law, et al. : In-Flight Carbon Dioxide Exposures and Related Symptoms : Association, Susceptibility, and Operational Implications, NASA/TP-2010-216126, 2010.
- 9) 石垣 陽ほか : IoT型CO₂センサの試作とフィールド調査, 日本労働衛生工学会平成28年度第56回学会要旨, BK-19, 132-133, 2016.

いしがき ● よう

博士(工学、電気通信大学)、修士(芸術、多摩美術大学)。セコム(株)IS研究所を経て現職。手のひらサイズの測定器で放射線、PM2.5、三密(CO₂)など多様なリスク情報を可視化し、市民の行動変容を促す社会実装を得意とする。オープンソースのマスク開発、眼科用医療機器の途上国への普及や、アートプロジェクトへ技術協力も行う異色の研究者。人類のためのデザイン研究室(www.design4humanity.com)を主宰。