

解 説

空気中の CO₂ 濃度と感染症リスク

生 田 和 良

[要旨]

新型コロナウイルス感染症の流行は、私たちに「空気」という存在を強く意識させた。それまで空気はそこにあるのが当然で、何も疑うことなく吸い込んでいた。ところが、ある日突然、その空気が不安の対象となった。感染が拡大し始めた当初は、飛沫感染対策としてマスクの着用、接触感染対策として手洗いやアルコール消毒の必要性が強調された。しかし集団感染事例の報告が相次ぐにつれ、問題は「密」にあるとされ、密対策として換気の重要性が指摘されるようになった。さらにその後、多くの人が初めて「空気感染」という言葉を意識するようになった。現在では、新型コロナウイルス感染症に限らず、多くの感染症が空気中を漂う微小粒子、すなわちエアロゾルを介して伝播する可能性が広く認識されるようになった。社会は徐々に日常を取り戻し、マスクを外す人も増え、イベントも再開され、コロナ以前の日常に戻っている。しかし、すべての人が安心して生活しているわけではない。特に、がん治療中の人、臓器移植後の人、自己免疫疾患の治療を受けている人、高齢者、そして妊娠中の女性など、多くの人々が「免疫機能が低下している人、いわゆる免疫弱者」と言われ、現在も外出に慎重である。その家族もまた同じ不安を抱えている。感染を完全にゼロにすることは難しいとしても、CO₂センサーを用いて測定した二酸化炭素(CO₂)の濃度は、空気の滞留度を示す指標となる。見えない空気の状態を数値として確認することで、行動可能な情報に変換することができる。したがって、この方法で「空気を見える化」しながらの行動は、感染者の呼気を吸い込むリスクを極力下げることにも効果的であり、この考え方は世界的にも認められている。そこで、今回 CO₂センサーの示す値を行動判断の基準にして、できるだけ外に出て活動的な日々を送ることを提案したい。

キーワード： 二酸化炭素、CO₂センサー、免疫反応、免疫弱者、感染症

まえがき

新型コロナウイルス感染症の流行は、私たちに「空気」という存在を強く意識させた。現在では、新型コロナウイルス以外にも、インフルエンザウイルスや薬剤耐性(AMR)細菌など、多くの感染症が空気中を漂う微小粒子、すなわちエアロゾルを介して伝播する可能性が広く認識されている^{1),2),3)}。社会は徐々に日常を取り戻し、マスクを外す人も増え、イベントも再開されている。しかし、すべての人が安心して生活しているわけではない。

がん治療中の人、臓器移植後の人、自己免疫疾患の治療を受けている人、高齢者、そして妊娠中の女性など、多くの人々が「免疫が弱い」と言われ、いまも外出に慎重

である。その家族もまた同じ不安を抱えている。

外に出るか、出ないか。人と会うか、会わないか。選択は二択のように見える。しかし本当にそうであろうか。感染を完全にゼロにすることは難しいとしても、条件を整えることはできるのではないだろうか。ワクチン、免疫、そして換気という複数の要素を統合し、合理的に行動するための方法を考えたいのである。

その具体的な道具の一つとして、CO₂センサーが挙げられる。このセンサーが測定するのは二酸化炭素(CO₂)の濃度であり、この値は空気の滞留度を示す指標となる。見えない空気の状態を数値として示すことで、行動可能な情報に変換することができる。

1. 感染はどのように広がるのか

感染症は人から人へ広がる。その経路は大きく三つに分類される。

1. 飛沫感染
2. 接触感染
3. 空気(エアロゾル)感染

飛沫感染は、咳や会話などで発生する比較的大きな飛沫粒子が短距離を飛ぶことで成立する。例えば、マスク表面に付着した飛沫を手で触れ、その手で目や鼻の粘膜に触れることで接触感染が成立する。

一方、空気感染では微細な粒子が空間中に滞留し、それを吸い込むことで感染が成立する。麻疹ウイルスや水痘ウイルスは典型的な空気感染(エアロゾルよりさらに小さい飛沫核による感染)を起こすウイルスであり、空中に長く留まり、感染力が非常に強く、同じ空間にいただけで感染するリスクが高い。

新型コロナウイルスについても、流行の早い段階からエアロゾルの関与が指摘されていた。欧米の主要機関が公式に注意喚起を始めたのは 2020 年秋頃である。それ以前の段階では、感染経路の理解に混乱があった。WHO や米国 CDC は当初、飛沫感染や接触感染の重要性を強調していた。しかし 2020 年 7 月、多数の研究者がエアロゾルによる感染の証拠を提示し、閉鎖空間での感染リスクについて警鐘を鳴らした。2021 年には、空気中に漂うエアロゾル吸入が主要な感染経路の一つであることが広く認識され、換気の重要性が強調されるようになった^{4),5),6)}。

2. 空気を選ぶという発想

空気の問題が難しい理由は、それが目に見えないことである。見えないために不安は拡大する。

室内の空気は常に循環しているが、閉鎖空間では人が吐き出した呼気が再び吸い込まれることがある。これを「再呼吸」と呼ぶ。

再呼吸の割合が高いほど、他者の呼気を吸い込む割合が増える。その結果、感染成立の確率も上昇すると考えられる。

人は呼吸をすると CO₂ を吐き出す。室内の CO₂ 濃度が上昇するという事は、呼気が空間に滞留していることを意味する。もちろん CO₂ 自体が感染源ではない。しかし CO₂ 濃度が高いということは、呼気の再循環が多い状態を示している。つまり他者の呼気を吸い込む割合が高くなっていると言える。そのため CO₂濃度は、室内換気状態を示す指標として利用することができる。

最近では、小型の CO₂ センサーを使うことで室内の空気状態を簡単に確認できる。CO₂ 濃度を測定することで、換気のタイミングや室内の空気環境を客観的に把握することが可能になる。空気は目に見えないため、私たちは環境の変化に気づきにくいものである。しかし、CO₂ 濃度を測ることで空気の状態を数値で確認することができる。これは感染症対策にも使えることを意味している。

CO₂ 濃度が高い環境では、人の呼気、湿気、においなどが室内に蓄積するが、これは空気の循環が悪い状態を意味している。換気が不十分な環境では、ウイルスを含むエアロゾルも滞留しやすくなる^{7),8),9),10)}。したがって、CO₂ 濃度が高い環境は換気不足のサインと考えて、換気を徹底することを心掛けると、感染の可能性を低下させられると考えることができる³⁾。

一方、学校の教室や一般の会議室では、人数や発言や議論が白熱しているかどうかの程度にもよるが、CO₂ 濃度が 1,500ppm 以上になることも珍しくない。実際、学校の教室では、多くの生徒が長時間同じ空間で過ごすため、CO₂ 濃度が上昇しやすい環境の一つでもある。教室の空気環境を評価するために、CO₂ 濃度は重要な指標となり得る。文部科学省の学校環境衛生基準¹¹⁾で「1,500ppm 以下」が目安とされているが、窓を閉め切った授業では 20 分程度でこれを超える事例が報告されている。CO₂ 高濃度は集中力低下や眠気を招くため、こまめな換気が必要とされている。一般に、換気は対角線の窓を開ける、休み時間に換気、機器を使つての強制換気などを有効活用する必要がある。

3. CO₂ 濃度と感染リスク

CO₂ 自体は通常の濃度では健康に害を与えるもので

はない。しかし、感染症の観点から重要なのは、CO₂ は「換気の指標」であるという点である。人が呼吸する際には二酸化炭素(CO₂)・水蒸気・エアロゾルが同時に排出される。もし部屋の換気が不十分であれば、ウイルスを含む可能性のあるエアロゾルも室内に蓄積していく。そのため、CO₂ 濃度が高い環境は感染が広がりやすい環境であることを意味している。

室内環境の目安として、CO₂ 濃度は次のように考えられる。屋外の空気は 400ppm、換気が良好な室内は 600～800ppm まで。1,000ppm を超えると、眠気や集中力低下が起こり、2,000ppm を超えると頭痛やめまいが起こる。10,000ppm を超えると二酸化炭素(CO₂)中毒の危険性が出てくる。

ここで、換気不足の可能性を考慮して換気する目安は 1,500ppm 以上である。2,000ppm 以上になると、かなり換気が悪い状態と言える。もちろんこれは目安であり、実際の感染リスクは人数・滞在時間・会話量が影響する。

CO₂ 濃度が注目されるようになったのは、新型コロナウイルス感染症の流行以降であり、今では室内の空気環境を評価する指標になっている。CO₂ そのものは通常の濃度では健康に直接害を与えるものではないが、感染症対策の観点から見ると、CO₂ 濃度は重要な意味を持っている。CO₂ の濃度は、換気がまだ必要なのか、必要なのかのタイミングの指標になる。もし新型コロナウイルスに感染した人が室内に存在している場合に、その人の呼気中に含まれるエアロゾルにはウイルスが含まれた状態で吐き出されていることになる。もし部屋の換気が不十分であれば、これらが時間と共に室内に蓄積していくことになる。CO₂ 濃度が高くなっているということは、人(この中に感染者も混じっている)の呼気が室内に溜まっていることを意味している。したがって、呼気の中に含まれる感染者由来のウイルスを含むエアロゾルを吸い込むことになる。そのため CO₂ 濃度が高い環境は、感染が広がりやすい環境である可能性が高くなる。

日本の建築物環境衛生管理基準¹²⁾では、室内の CO₂ 濃度は 1,000ppm 以下が望ましいとされている。この基準は本来、快適性や作業効率の観点から設定されたもので

あるが、換気状態を示す目安として感染対策にも応用することができる。厚生労働省でも、この 1,000ppm に従った、感染症に対する対応が推奨されている¹³⁾

1,500ppm は直ちに危険という値ではないが、換気不足のサインと考えることができる。重要なのは、数値が大きくなる上昇してから行動するのではなく、早い段階で対応することである。

では、なぜ 1,000ppm が基準になるのか？日本では、建築物衛生法などの室内環境基準で CO₂ 濃度 1,000ppm 以下が推奨されている¹²⁾。これは換気が十分に行われている状態、すなわち人の呼気が過剰に溜まっていない状態を示す目安と考えてよい。

室内の空気環境を評価する際には、一般的には 1,000ppm が換気の目安とされているが、実際の室内では 1,500ppm 程度になることもあるのは事実である。では、CO₂ 濃度 1,500ppm は危険なのだろうか？

CO₂ 濃度 1,500ppm は、換気が十分ではない可能性を示す目安である。ただし、この濃度自体が健康に直接害を与えるレベルではない。CO₂ が健康に影響を与えるのは数万 ppm といった非常に高い濃度で起こるとされている。そのため、1,500ppm は空気がよどんでいる、換気が不足しているというサインと考える方が適切である。ただ、感染症の観点から考えると、この数値は、換気が不十分で、エアロゾルが室内に溜まりやすくなっている状況ととらえることができるので、感染が広がりやすい状況であると考えられる。

圧倒的に換気が不十分な部屋では、CO₂ 濃度が 2,000ppm 以上になることもあるが、このような環境はどのように考えればよいのだろうか？CO₂ 濃度 2,000ppm は、かなり換気が不足している可能性を示しており、眠気、集中力低下、空気のよどみを感じることもある室内環境と考えられる。直ちに窓を開ける、空気を入れ替えるなどの換気が重要な状況ととらえる必要がある。

マスクを長時間つけていると、「マスクの中の CO₂ の濃度が増えて危険なのではないか」と心配する声を聞くことがある。実際にマスクの内部では呼気が一部滞留するため、CO₂ 濃度は外気より高くなると考えられる。しかし、こ

のことが健康に重大な影響を与えるかどうかについては、科学的な理解が必要である。

人は呼吸によって、酸素を取り込み、二酸化炭素(CO₂)を排出している。呼気中の CO₂ 濃度は約 4% (約 40,000ppm) と高いため、マスクの内部ではこの呼気が一時的に滞留し、CO₂濃度が外気より高くなることがある。実際、いくつかの測定では、マスク内部の CO₂ 濃度は数千 ppm 程度になることがある。呼吸は常に外気と混ざりながら行われるため、マスク内部の CO₂ がそのまま体内に取り込まれるわけではない。実際、健康な人の場合、通常のマスク着用で血液中の CO₂ と酸素濃度に大きな変化は起こらないとされている。しかし、長時間のマスク着用時に息苦しさをを感じる人は多いと思われる。これは、CO₂ の影響というよりも、呼吸抵抗の増加、温度や湿度、心理的要因によることが多いと考えられている。マスク着用による弊害として、集中力の低下、喉の乾燥や咳といった症状が調査で挙げられているが、これらは口呼吸によるものと考えられている。

最近、感染症対策としてマスク着用は重要であるが、状況に応じて使い分けることも大切である点を取り上げられるようになってきている。厚生労働省・文部科学省や専門家は、屋外で周囲の人と 2 メートル以上の十分な距離が確保できる場所や、距離が確保できなくても会話をほとんど行わない場面では、感染リスクは低いとしてマスクを外して呼吸を楽にすることを推奨している。

4. 屋外施設で測定した結果

室内の空気環境を評価する指標として CO₂ 濃度が注目されているが、カフェやレストランでは CO₂ 濃度はどれくらいになるのだろうか？ 著者は 2020 年に比較的小型の CO₂ センサーを購入して、通勤時の電車内の状況を調べていた。私鉄と JR を比べた際は、JR は空調設備が整っているようで、それほど高値には達しなかったが、私鉄は空調管理よりも、窓を拭くなど、抗菌のための処理をしているとのチラシが目についていた印象で、確かに、乗車時間の経過と共に徐々に CO₂濃度は上昇し、1,500ppm 以上に達することもあった。

最近、携帯しやすい小型の CO₂ センサーで、スマホで CO₂ 濃度を見ることができるタイプを購入し、周辺の調査を再開している。

CO₂濃度は、店舗の広さ、人数、換気設備などによって大きく変わる。通常、空いている時間帯では 600～800ppm 程度のことが多く、混雑時には 1,000ppm 以上、客の声が大きく感じるような状況では 1,500ppm を超えている場合もある。一般的な印象であるが、2020 年当時と比べると、現在は多くの店舗でかなり空調管理が整備されてきているようである。最近では、入店時 700～800ppm で、その後に人数が増えていくにしたがって徐々に増えていくが、1,200ppm 前後にとどまり、1,500ppm を超える店舗は少ない。週末の人気喫茶店のモーニング時間帯はさすがに満席で、入店待ちが数名で入店した時などは、いきなり 1,500ppm 近かったが、それ以上にはならず、徐々に帰る客が出始めると、目に見えて下がり始めた。同じく、週末でも、市立図書館はにぎわっていたが、空調管理が完璧で、1,000ppm あたりで留まっていた。また、市民劇場での演劇鑑賞では、当日満席であったが、1,200ppm 程度で、それ以上にはならなかった。

2021～2022 年、多くの飲食店で CO₂ センサーを入り口の近くに設置していた。確かにそこは 600～800ppm 程度になっているが、多くの客が座っているところほどの程度の CO₂ 濃度なのか、分からなかった。おそらく、かなり高くなっていたと思われる。ただ、入り口の数字に安心していた人が多かったと思われるのが心配である。

5. CO₂ センサーを使いながらの屋外探索

新型コロナウイルス感染症の発生以来、室内の空気環境を知るために CO₂ センサーが使われるようになった。その多くは、比較的大型で重いものが多い設置型である。CO₂ センサーを使うことで、換気のタイミングや空気の状態を数値で知ることができる。すなわち、CO₂ 濃度を測ることで空気環境の評価や換気の判断が可能になる。

ここで提案であるが、先ほどの飲食店での場合を紹介したように、CO₂ センサーが測定している場所よりも、自分がいる場所の CO₂ 濃度がどの程度かを気にする時代

に入っていると考えられる。最近では、小型化が進んで持ち歩くことも可能になっている。しかし、カバンの中に入れて状態でCO₂濃度を調べている人も多いようである。

このように、持ち歩いて自分が現在いる空間のCO₂濃度を調べて、1,000ppm 近い数値になって、まもなくその値を超えようとしている状況であると判断される場合は、その空間から移動するなど、次の行動を決めるためのサインと捉えることが重要である。

6. 免疫機能が低下している状態

がん治療中の人、臓器移植後の人や自己免疫疾患患者で免疫抑制剤を使っている人など、免疫機能が低下している人は感染症に注意が必要である。また、一部の高齢者も免疫機能の低下を心配している人も多いと思われる。そのため、多くの人々が「外出すると感染してしまうのではないかと不安を感じている。しかし、感染を恐れるあまり外出を控えすぎると、生活の質が低下し、心身の健康にも悪影響が出る可能性がある。では、免疫が弱い人はどのように外出を考えればよいのだろうか？

感染症のリスクは、外出するかしないかではなく、どのような場所に行くかによって大きく変わってくる。リスクが高い環境としては、人が密集している場所、換気が悪い場所、それらの場所での長時間の滞在などが挙げられる。

一方で、屋外、人が少ない場所、換気の良い空間などでは感染リスクは低くなる。

適度な外出には、運動になる、気分転換になる、また社会とのつながりができる、すなわち活動的な時間を過ごせるといった重要な意味があるのも事実である。長期間の外出制限は、筋力や体力の低下、気分の落ち込みなどにつながることもある。そのため、感染対策を行いながら外出することは、健康維持の観点からも重要であると考えられる。

あとがき

免疫機能が弱い人にとって、感染症への注意は大切である。外出する際には、混雑した場所を避ける、換気の良い場所を選ぶ、滞在時間を短くする、手洗いなど基本

的な感染対策を行う必要がある。しかし、外出そのものを過度に避ける必要はないと考える。もちろん、担当医の意見に従う必要はあるが、重要なのは場所・時間・空気環境を意識すること、そして空気環境を意識しながら行動することは、心身の健康・生活の質を保つうえでも重要と考える。欧米の介護施設や高齢者施設では、新型コロナウイルス感染症のパンデミックを機に、エアロゾル感染を防ぐための環境モニタリング手法として、CO₂濃度センサーを活用した換気管理が標準的な対策として取り入れられている¹³⁾。

最後に、本記事をまとめて編集者に送ろうとしていた時に、本格的なエアロゾルに関する総説が、「エアロゾルウイルス学ノススメ」と題したウイルス学会誌が送られてきた¹⁴⁾。まだ、十分に読み切れていないが、本格的に「エアロゾル学」を知りたい方はこちらが大変有用と思われる。

参考資料

- 1) Morawska L, Milton DK. It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clin Infect Dis.* 2020; 71:2311-2313.
- 2) Greenhalgh T, Jimenez JL, Prather K, Tufekci Z, Fismane D, Robert Schooley R. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *Lancet.* 2021; 397:1603-1605.
- 3) Prather KA, Wang CC, Schooley RT. Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science.* 2020; 368:1422-1424.
- 4) Rudnick SN, Milton DK. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air.* 2003; 13: 237-245.
- 5) Peng Z, Jimenez JL. Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments. *Environmental Science & Technology Letters* 2021.
- 6) Allen JG, Ibrahim AM. Indoor air changes and potential implications for SARS-CoV-2 transmission. *JAMA.* 2021; 325: 2112-2113.
- 7) Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Cha CYH, Lin JZ.

et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*. 2007; 17: 2–18.

8) Monroe R. It's not just SARS-CoV-2: most respiratory viruses spread by aerosols. *Scripps Institution of Oceanography*. 2021/08/26.

<https://scripps.ucsd.edu/news/its-not-just-sars-cov-2-most-respiratory-viruses-spread-aerosols#:~:text=SARS%2DCoV%2C%20MERS%2DCoV,27>

9) Nazima Habibi N, Uddin S, Behbehani M, Mustafa AS, Al-Fouzan W, Al-Saraw HA, et al. Aerosol-mediated spread of antibiotic resistance genes: biomonitoring indoor and outdoor environments. *Int J Environ Res Public Health*. 2024; 21:983.

10) Nikitin N, Petrova E, Trifonova E, Karpova O. Influenza virus aerosols in the air and their infectiousness.

Adv Virol. 2014; 859090.

11) 学校環境衛生管理マニュアル. 文部科学省. 平成30年5月.

https://www.mext.go.jp/content/20230817-mext_kenshoku-100000613_2.pdf#:~:text=

12) 建築物環境衛生管理基準について. 厚生労働省.

<https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>

13) Khaliq KA, Mohamad S, Edwards AJ, Noakes C, Kemp AH, Thompson C, et al. Environmental data monitoring and infection risks in UK care-homes in the context of COVID-19. *Building and Environment*. 2024; 250:111174.

14) 西村秀一. エアロゾルウイルス学ノススメ II. *ウイルス* 2025; 75: 121–134.

(大阪大学 名誉教授)

Airborne CO₂ concentration and infectious disease risk

Kazuyoshi Ikuta

Professor Emeritus, Osaka University

Keywords: Carbon dioxide, CO₂ sensor, immune response, immunocompromised individuals, infectious diseases