

新型コロナウイルス感染症予防を目的とした 換気と空調の効率を両立させる方法を探る

～博物館展示室における温湿度・CO₂濃度モニタリングの実施事例～

兵庫県立人と自然の博物館 主任研究員 橋本佳延

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症（以下、コロナと略す）の感染様式は接触感染、飛沫感染である。大きな飛沫による感染は排出距離も長くなく、排出後に速やかに地面へと落下するため、フィジカルディスタンスを確保することで回避できる。しかし、微少な飛沫（マイクロ飛沫）についてはそれとは異なり、排出後も比較的長時間にわたり空気中を漂うため、浮遊するマイクロ飛沫を吸い込むことによって空気感染のようなメカニズムで感染する可能性が高いことが指摘されている。マイクロ飛沫による感染を回避するためには、密閉環境とならないよう適正な換気を行うことが有効であるが、夏季の猛暑時や冬季の厳寒時においては換気の励行により空調効率の悪化し、適正な室温の維持が難しくなることや、館の経営資源の損失につながるなどが懸念されている。

このような懸念事項を解消しつつ効果的な感染防止効果が得られるような換気を行うには、換気効率を数値化してリアルタイムに把握し、合理的な方法を試行錯誤して見つける必要がある。換気効率の数値化に有効な指標は二酸化炭素（以下、CO₂と略す）濃度であり、近年では比較的安価にCO₂センサーを入手できるようになってきている。そこで、本館では展示室やセミナー室などの複数箇所に温湿度CO₂センサーを設置し、室温、湿度、CO₂濃度をリアルタイムに把握して、合理的な換気方法を探る取組を行っているので報告する。

2. 換気とCO₂濃度の関係

CO₂は炭素を含む物質の燃焼や生物の呼吸によって発生する、人の呼気にも含まれる気体である。近年の日本において、大気中の平均的なCO₂濃度は約410ppmであり、物を燃やしたり生物を飼育したりしていない室内のCO₂濃度は外気と同程度となる。そのため、人が活動する室内においてCO₂濃度がこの値よりも高い場合、それは呼気に由来するものと判断できる。呼気にはCO₂の他にマイクロ飛沫なども含んでいることから、CO₂濃度が上昇すれば室内の空気質に含まれる人の呼気量が増え、結果としてマイクロ飛沫の量も増えるため、感染リスクが

高まることとなる。室内の空気に含まれる他人の呼気の割合は、800ppm 程度になると 1%、4400ppm となると 10%に相当するとされている¹。ただし、CO₂ 濃度とマイクロ飛沫・ウイルスの濃度との間の相関関係については環境条件やシチュエーションにより異なるため、数理的なモデルが成立するかどうかは明らかとなっていない。

換気は人の呼気を含んだ室内の空気を排出し外気を取り入れる行為であり、有効な換気が行われれば室内の CO₂ 濃度は外気と同程度の数値まで低下する。そのため、CO₂ 濃度の値は効果的な換気が行われているかを図る指標となる。

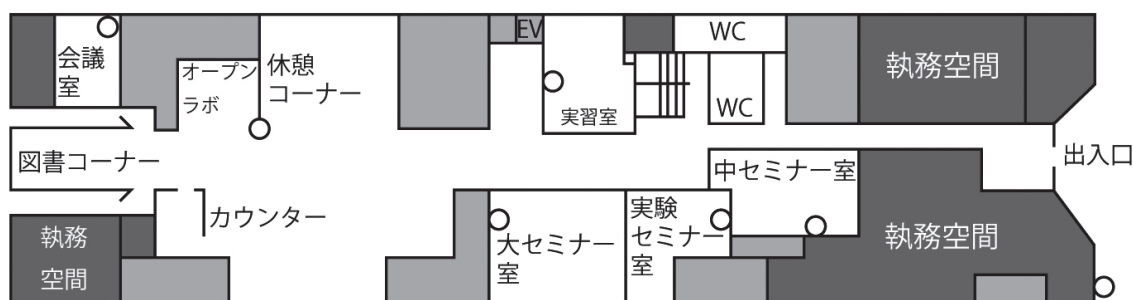
室内における CO₂ 濃度の維持管理基準値として、わが国法令では建築物衛生法および労働安全衛生法が 1000ppm 以下に保つことを定めており、学校保健安全法では 1500ppm 以下に保つことを推奨している。厚生労働省もコロナ対策として換気の悪い密閉空間を改善するための換気の方法として、CO₂ 濃度を建築物衛生法の定めに従うことを推奨している²。

3. 方法

1) CO₂ センサーの設置

CO₂ 濃度の測定には、壁面設置型のセンサー（ミオコーポレーション社製 SC-302、NDIR 式、測定範囲 400～10000ppm、精度：±（30ppm＋3%））を用いた。なお、CO₂ 濃度の他に温度、湿度についても本センサーで測定した。測定頻度は 1 分ごととし、測定値の記録と即時的な館内での共有にはクラウドサービス（Cynapus 社製 換気アラートシステム hazaview）を用いた。

センサーの設置場所は、休憩コーナーを含む 4F 展示空間（1 か所）、各階展示室（計 3 か所）、各種セミナー室（計 5 か所）、ホール（1 か所）、屋外（1 か所）の計 11 か所に設置した（図 1）。



丸印はセンサー設置場所を示す。4F以外に、展示室（1, 2, 3F）に各1台、ホールに1台設置

図 1 CO₂ センサー設置箇所（4F）

センサーの設置は、2020 年 10 月 30 日から 11 月 10 日にかけて来館者が最も滞留しやすい休憩コーナーを含む展示空間に試行的に 1 台設置し、本格的な設置・計測は同年 12 月 20 日に行った。

2) セミナー室の換気能力の推定

セミナー室は、展示室よりも密閉状態が生じやすいことや、一部のセミナー室では空調とは別系統で換気扇が設置されていることから、展示室の換気能力とは異なる。そこで、日本産業衛生学会産業衛生技術部会が公開する「換気シミュレーター」³を用いて、部屋の大きさ（体積）、室内での活動状況、換気装置の条件を元に、適正なCO₂濃度を保つための滞在人数と換気頻度を推定した。なお、本シミュレーターでは、隙間のほとんどない気密性の高い空間として推計値を算出する。しかし、実際の部屋では扉の通風口や壁面の展示室との通気口が存在し、CO₂濃度の実測値は推測値より低くなる傾向が予想されるため、滞在可能な人数も多くなる可能性がある。

3) 換気方法

CO₂濃度測定期間における展示室での換気方法については表1に示すとおりである。セミナー室や会議室の換気については、使用状況と使用人数に応じて、窓の開口（外気の直接取り込み）、展示室に面した扉の開口（外気の間接的取り込み）、換気扇の稼働を使い分けて実施した。

表1 CO₂濃度測定期間における換気方法

期間	換気方法	換気時間帯	開口幅	空調の稼働
2020/10/30-11/9	常時開口 (2方向換気)	8:00-17:00	10~20cm	なし
2020/11/10	定時・適宜開口 (2方向換気)	13:00-13:15 17:00-17:30 および混雑時に 適宜	10~20cm	なし
2020/12/20-	定時・適宜開口	13:00-13:15 17:00-17:30 および混雑時に 適宜	10~20cm	暖房運転 2F, 3Fについては状況に応じて外気導入運転の実施

4) 換気効果の分析

計測したCO₂濃度、室温の経時的変化を示した折れ線グラフ上に、来館団体の滞在時間帯、換気実施時間帯を重ねるとともに、来館者数や来館団体数、館内行事への参加者数を比較し、CO₂濃度の上昇・降下の原因や換気の効果进行分析した。また、換気の実施による室温の低下の程度についても分析した。

4. 結果および考察

本主旨では10月30日から11月10日の測定結果を紹介し、12月20日以降の結果については大会発表時に補足することとした。

1) 4FにおけるCO₂濃度の変化と換気実施との関係

図2に休館日における4FのCO₂濃度と室温の変化を示した。休館日であるため、人の活動はほとんどなくCO₂濃度は410ppm前後で安定し、換気も行われていないため、室温も20℃前後で安定していた。

窓の常時開口による換気実施期間中で、入館者数が最多(850人)だった11月3日(祝)におけるCO₂濃度と室温の変化を図3に示した。イベントが実施された時間帯には来館者が密集したため、CO₂濃度は30分間で300ppm超の幅で急上昇し、イベント終了後に来館者が散開すると45分間で250ppmの幅でCO₂濃度が低下した。このことから、来館者が多数参集することが予想されるイベントでは、窓開口による常時換気の実施は必須であるといえ、換気を実施していても参集する人数が増えれば、その能力が不足する恐れがあることが考えられた。

窓の常時開口による換気実施期間中で、イベント参加者の延べ人数が最多(1293人)だった11月1日(日)におけるCO₂濃度と室温の変化を図4に示した。この日は11時台と15時台にデジタル紙芝居を、13時台から14時台にかけてはクラフトづくりが実施された。クラフトづくりにより4Fで

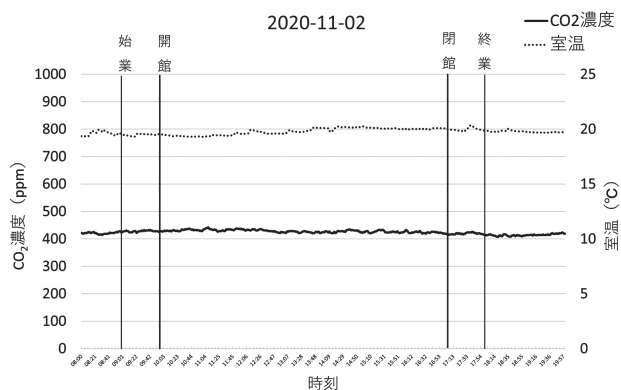


図2 休館日における4F展示室のCO₂濃度と室温の時間変化(8:00-20:00)

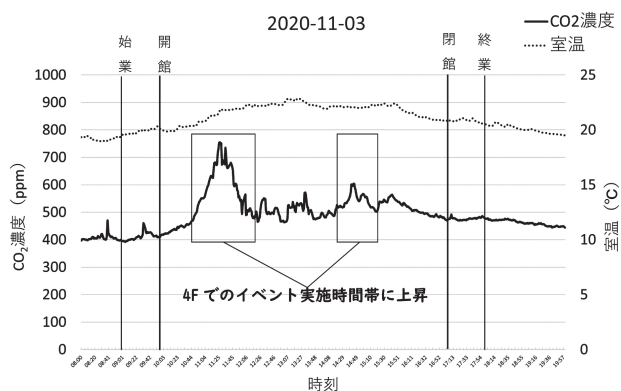


図3 計測期間中で入館者数が最多日における4F展示室のCO₂濃度と室温の時間変化(8:00-20:00)。常時換気を実施。

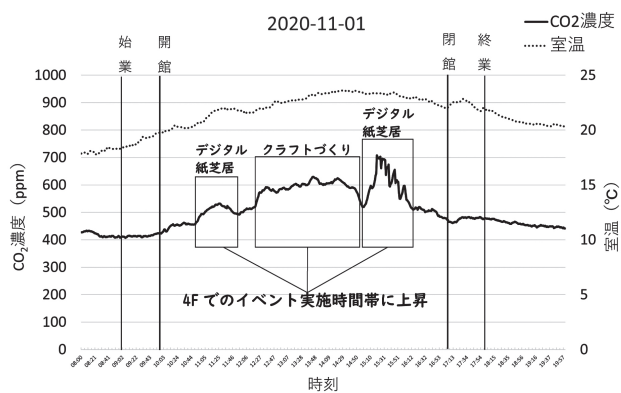


図4 計測期間中でイベント参加者の延べ人数が最多だった日における4F展示室のCO₂濃度と室温の時間変化(8:00-20:00)。常時換気を実施。

の滞留人数・時間が長くなることで、CO₂濃度は600ppm前後の値に高止まりし、さらに15時台のデジタル紙芝居の開催で来館者が集まり700ppmまで上昇していた。15時台のイベント終了後は来館者が散開したことで換気が進み、40分程度で約200ppmの幅でCO₂濃度が低下、閉館・終業により来館者や職員が退館したことで外気に近い濃度にまで下降した。

このことから、入館者数だけでなく、同一フロアでのイベントの参加者人数や滞留時間も考慮して換気を行う必要があると考えられた。

図5に定時換気・適宜換気を実施した11月10日におけるCO₂濃度と室温の変化を示した。図内の矢印番号の動向に影響を与えた事象を順に説明する。①職員出勤で濃度が上昇しはじめ、②午前団体来館で500ppm超まで上昇したため、③適宜換気(窓の開口)を実施したことにより濃度上昇が抑制され、④午前団体の移動と換気の継続により濃度が降下した。定時換気後に閉窓したのちに、⑤複数団体の来館で濃度が800ppmまで急上昇、⑥4Fの混雑状況から判断し臨時的開口換気を実施したことと団体来館者が移動したことで濃度が500ppmまで減少した。十分に換気ができたと判断し閉窓したのち、⑦来館者の滞在により再度濃度が微増したが、⑧閉館による来館者の退館、⑨職員の退勤により濃度が外気のレベルにまで降下した。この日の来館者数は334人で、来館者数最多日(常時換気実施)の850人の半分以下と少なかったがCO₂濃度は来館者数最多日(常時換気実施)における最高値よりも高かった。このことから、換気の強度を下げると、来館者総数が少なくても団体の来館でCO₂濃度は急上昇する恐れがあり、適宜換気を実施しなければ基準値である1000ppmも越える可能性があることが明らかとなった。

このほか、団体来館のない週末で、かつ、来館者が少ない日では、窓の常時開口による換気を行っていただければCO₂濃度の上昇幅が100ppm程度に抑えられることなども確認された。

2) セミナー室の換気能力の推定結果と実際

表2に、各セミナー室の換気能力から推定される滞在可能人数を示した。シミュレーションの推定値はセミナー室に隙間がなく空調も使用していないと想定した上で算出されるため、実際よりも厳しい値で推定されている。常に窓全開の換気を行ってもコロナ禍以前の定員数を満たせないとされたのは会議室、大セミナー室、中セミナー室、実習室で、定員に対する割合はそれぞれ36.4%、31.5%、38.9%、31.0%であった。実験セミナー室については、換気扇を稼働した場合は定員数の滞在でも十分換気能力があると推定され、実習室では換気扇のみの換気では定員の23.8%の滞在までが限界と推定された。

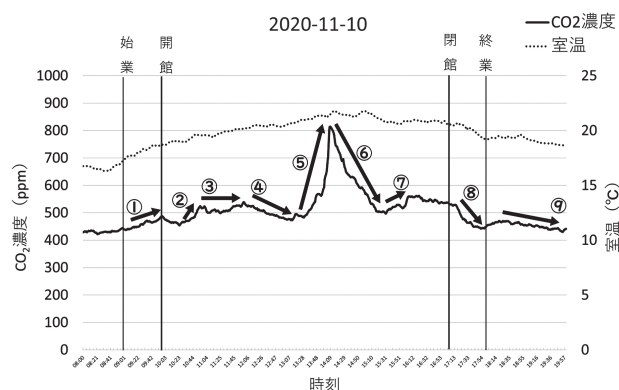


図5 定時換気・適宜換気の実施日における4F展示室のCO₂濃度と室温の時間変化(8:00-20:00)。

表2 各セミナー室の換気能力のシミュレーション結果

1時間あたりに必要な換気の頻度・方法 () 内は1時間あたりのCO ₂ 濃度上昇量	換気なしで良好な状態が保てる (~1000ppm)	1時間に数分の換気 (1000~1500ppm)	30分に数分の窓全開の換気 (1500~2500ppm)	常時全開の窓開放 (2500~3500ppm)	これ以上の人数での使用は控える (3500ppm超)	部屋の大きさ		コロナ禍以前の定員数	換気装置の能力
						面積 (㎡)	体積 (㎡)		
会議室	2	4	8	12	13人以上	54.9	146.7	33	
大セミナー室	6	12	23	34	35人以上	137.4	403.1	108	
中セミナー室	5	10	19	28	29人以上	102.6	326.3	72	
実験セミナー室	3	7	13	20	21人以上	77.8	235.7	30	
実験セミナー室 (換気扇稼働時)	45					77.8	235.7	30	換気扇2台 (強: 670 m ³ /h 弱: 520 m ³ /h)
実習室	5	9	18	26	27人以上	103.7	310.3	84	
実習室 (換気扇稼働時)	20					103.7	310.3	84	換気扇1台 (600 m ³ /h)

シミュレーション条件 (1: 実験セミナー室・実習室以外は換気施設がないと見なした。 2: 活動状態は一般的な事務作業レベルとした。 3: 建物の条件はコンクリート建築とし、扉の通風口や壁の通気口がないものと見なした。)

表3に会議室、大セミナー室、中セミナー室における利用状況と実際のCO₂濃度(利用時の最大値)を示した。会議室では廊下側のドアを開放して空調を稼働させることで、大セミナー室では廊下側ドアと窓開け換気を行うことで、中セミナー室では空調稼働しながら廊下側ドアを開放することでCO₂濃度の上昇幅を小さく抑えることができ、シミュレーション結果よりも多い人数が滞在できる可能性があることが分かった。今後はモニタリングを継続してデータを蓄積し、適正な換気を実施した場合の各部屋の利用可能人数を明らかにする予定である。

表3 会議室、大セミナー室、中セミナー室の利用状況とCO₂濃度(滞在時の最大値)

場所	計測日	使用時間 (h)	人数	換気状況	利用時のCO ₂ 濃度最大値 (ppm)
会議室	12月22日	2	6	空調稼働し、廊下側ドア開放	618
	12月25日	1.5	5	空調稼働し、無開放	562
大セミナー室	12月20日	2	17	空調稼働し、廊下側ドア開放。窓開け換気	545
	12月25日	1.5	15	空調稼働し、廊下側ドア1箇所開放	717
中セミナー室	12月22日	2	24	空調稼働し、廊下側ドア開放	556
	12月25日	1.5	10	空調稼働し、廊下側ドア開放	495

- 1 FAQs on Protecting Yourself from COVID-19 Aerosol Transmission.
<https://tinyurl.com/FAQ-aerosols>
- 2 厚生労働省(2020)「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法.
- 3 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」.
http://jsoh-ohe.umin.jp/covid_simulator/covid_simulator.html