

令和 7 年度厚生労働科学研究費補助金
(健康安全・危機管理対策総合研究事業)
分担研究報告書

デジタル技術を活用した建築物環境衛生管理基準の達成等に向けた検証研究
空気環境・粉じんの調整に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

分担研究者 鍵 直樹 東京科学大学 教授
分担研究者 柳 宇 工学院大学 教授
分担研究者 尾方壮行 東京都立大学 助教

研究要旨

建築物における空気環境の維持については、空気環境の定期的測定により基準値との比較を行うことだけでなく、空調設備の維持管理を定期に点検することが重要となっており、政省令等でその対応が求められている。

本報告では、粉じんの連続測定に用いられるローコストセンサーの文献調査と PM_{2.5} 測定器を用いた建築物における実測調査を行い、それぞれの測定器の傾向と室内粒子の実態から今後検討すべき項目について検討した。

また、建築物室内に使用される二酸化炭素計測機器、特に換気制御用に用いられる計測機器について、制度管理のための校正の方法などについてメーカーへのヒアリングも含めて調査を行った。

さらに、浮遊微生物測定について、迅速測定装置を用いて実建築物において測定を行い、その実測結果から、現状までの特性の把握と今後の課題について示した。

A. 研究目的

A1. ローコストセンサーによる室内環境調査

建築物衛生法において、特定建築物の維持管理として、環境衛生管理基準値が表 1 のように定められている。温度、相対湿度、二酸化炭素濃度、一酸化炭素濃度、気流、浮遊粉じんの 6 項目について 2 カ月以内ごとに 1 回測定し、基準値との比較を行うことで、適切な維持管理を行うことになっている。ホルムアルデヒドについては、新築または大規模模様替えを行った後、最初に来る 6 月から 9 月の間に 1 回測定することとなっている。

建築物における空気環境の維持については、空気環境の定期的測定により基準値との比較を行うことだけでなく、空調設備の維持管理を定期に点検することが重要となっており、政省令等でその対応が求められている。現在特定建築物においては、これらの項目が基準値に適合していないもの

のとして、二酸化炭素、温度、相対湿度の不適率が高く、浮遊粉じん、一酸化炭素、気流、ホルムアルデヒドの不適率は低く推移している。

一方、これらの環境測定としては、浮遊粉じんについては毎年較正された機器で測定することが義務付けられており、温度・相対湿度、二酸化炭素については、比較的簡便なセンサーが普及しているため、これらを使用することが多い。一酸化炭素もセンサーは存在するものの一般に市販されているものは少なく、気流についても比較的安価なものは少ない。ホルムアルデヒドについては、厚生労働大臣指定の可搬型の測定器があり、現在においても建築物衛生法の測定として使用されている。

浮遊粉じんについては、建築物衛生法で規定している粒径 10 μm 以下の粒子を対象とした粉じん計の他に、大気基準で規定されている粒径 2.5 μm

以下の PM_{2.5}がある。PM_{2.5}については、我が国の大気環境基準値が、1年平均値が 15 µg/m³以下、かつ、1日平均値が 35 µg/m³以下であることが定められている。また、WHO においては、AQG (Air quality guideline) level として、年平均を 5 µg/m³、日平均を 15 µg/m³を提案している。この測定については、大気環境においては標準的な測定方法があるが、その他にも、可搬型の安価な測定機器がある。

今後室内における室内 PM_{2.5}の監視も視野に、空気環境測定の定期測定に関して、連続測定に関する既往研究の調査を行うとともに、複数の PM_{2.5}

測定器を用いて、実建築物空間において並行測定を行い、それぞれの測定機器の特性について検討した。

A2. CO₂センサーおよび CO₂暴露がヒトに与える影響に関する調査

近年、建築物における省エネルギーおよび感染症対策の観点から、室内空気質のモニタリングと換気制御および空調換気設備の適切な維持管理の重要性が高まっている。室内空気中の CO₂濃度は、人の体臭を主な汚染質とした総合的な換気の指標として古くから活用され、建築物衛生法においても建築物環境衛生管理基準の空気環境の基準として CO₂の含有率 1,000 ppm が定められており、そのモニタリング方法のデジタル技術活用による調査・報告業務の省力化は重要な課題である。

本年度は、CO₂センサーの測定メカニズムを整理したうえで、初年度から継続して市販されている空調システム用の CO₂センサーの仕様を調査し、一覧表(表 2)を作成した。また、基準値を検討するための基礎資料として室内における CO₂ガスがヒトに与える影響に関して文献調査を行った。

表 1 空気環境に関する建築物環境衛生管理基準

浮遊粉じんの量	0.15 mg/m ³ 以下
一酸化炭素の含有率	6 ppm 以下
二酸化炭素の含有率	1,000 ppm 以下
温度	18℃以上 28℃以下
相対湿度	40%以上 70%以下
気流	0.5 m/秒以下
ホルムアルデヒドの量	0.1 mg/m ³ 以下 (= 0.08 ppm 以下)

表 2 CO₂センサの測定方式と特徴

項目	NDIR方式	光音響方式	熱伝導方式	化学電池式	半導体式
主な測定範囲	0～10,000 ppm	0～10,000 ppm	0～100 vol%	35～5,000 ppm	400～5,000 ppm
精度(誤差)	◎ 高い (±30ppm～)	◎ 高い (±40ppm～)	○ 高濃度域で高精度	△ 普通 (±10%～)	× 低い (推定値)
ゼロガス校正	◎ 可能 (窒素等を使用)	◎ 可能 (窒素等を使用)	◎ 可能	△ 困難	× 不可
スパンガス校正	◎ 可能 (標準ガス使用)	◎ 可能 (標準ガス使用)	◎ 可能	× 不可	× 不可
自動校正(ABC)	◎ 一般的 (外気想定)	◎ 一般的 (外気想定)	— (不要)	△ 一部存在	○ アルゴリズム依存
手動大気校正	○ 可能	○ 可能	△ 不向き	◎ 推奨 (頻繁に必要)	○ 簡易リセット
自己補正機能	○ (2波長式で対応可)	△ (小型化優先のため稀)	—	—	—
寿命	5～10年	5～10年	10年以上	2～3年	3～5年
主な用途	換気・ビル空調・農業	モバイル・小型機器	医療・工業・燃料電池	簡易警報機	安価な環境モニター

A3. オフィスビル執務室におけるバイオエアロゾル粒子のリアルタイム測定

昨年度は、バイオエアロゾルセンサー（Bioaerosol Sensor : BAS）を用いて、宮崎市内の3棟のオフィスビル（計4室）を対象に、2024年10月および2025年1月における室内蛍光エアロゾル粒子のリアルタイム測定を実施し、その結果を報告した。昨年度の研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

FAP/TPM（蛍光粒子／総粒子）の割合は、夏期と比較して冬期の方が有意に高かった（ $p<0.001$ ）。また、粒径別にみると、 $<2.0\ \mu\text{m}$ では1.5%以下であったのに対し、 $2.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$ では0.6~30.2%、 $5.0\ \mu\text{m}$ 超では77.6~93.9%であった。

今年度は、昨年度の測定対象に加え、千葉県、神奈川県、埼玉県内の3棟の建物（計6室）を対象として、夏期および冬期に測定を実施した。

B. 研究方法

B1. ローコストセンサーによる室内環境調査

B1.1. 空気環境の連続測定機器

室内環境の計測については、建築物衛生法の環境管理項目だけではなく、その他の環境項目を計測する連続測定器、センサーが多く開発されている。海外の研究者においても、計測装置をレビューしている事例が多く存在するためレビュー論文以外の関係する論文の調査を昨年度に引き続き行った。

B1.2. 建築物におけるPM_{2.5}測定

本報告における室内環境の測定については、表3に示す埼玉県、東京都内にある建物C、Dの事務所である。測定は、2025年12月、2026年1月の暖房期に行い、室内では通常通り居住者がいる状態であった。

表3 実測対象建物の概要

建物	C		D	
地域	埼玉		東京	
用途	事務所		事務所	
測定日	2025/12/16	2025/12/17	2026/1/28	2026/1/29

PM_{2.5}濃度の測定器については、DustTrak II（TIS）、PS-2（柴田科学）、PMT-2500（光明理化学）のほか、PM_{2.5}サイクロンインパクターを装着した粉じん計であるLD-5R（柴田科学）、3444（日本カノマックス）とした。測定は概ね9時半から17時ごろを目安に、連続測定をそれぞれの建物で2日間行った。測定値は1分ごとに記録している。また、室内粒子の粒径別の特徴も検討するため、ポータブル粒度分布測定器（PAMS Model 3310、日本カノマックス）、パーティクルカウンターOPS3330（TSI）でも同様に測定を行い、広い粒径範囲の粒子の計測を行った。

B2. 室内環境・ダクト用CO₂センサに関する調査

B2.1. 各種CO₂測定方式についての調査方法

研究論文およびメーカーがWebページにて公表している資料に基づいて、各種CO₂測定方式について調査し、その内容を整理した。

B2.2. 室内におけるCO₂ガスがヒトに与える影響に関する調査方法

公表された学術研究を中心に、室内CO₂濃度とヒトへの影響に関するエビデンスを整理し、実務および政策判断に資する解釈を提示することを目的として文献調査を行った。対象文献は、査読付き原著論文（介入研究・観察研究）、系統的レビュー・メタ解析、公的機関ガイドラインおよび専門学会声明とした。主要アウトカムは、認知機能、眠気・睡眠、症状、生理指標とした。

B3. オフィスビル執務室におけるバイオエアロゾル粒子のリアルタイム測定

B3.1. 測定対象オフィス

測定対象ビルの概要および空調方式を表4に示す。測定期間は夏期（2025年8月）および冬期（2026年2月）とした。夏期の測定対象はA~Eビルであり、冬期にはFビルを加えた。

表 4 測定対象ビルの概要と空調方式

ID	所在地	竣工年	測定階	空調方式
A	宮崎県 宮崎市	2020	2F, 8F	AHU (VAV)
B		1968	3F	PAC
C		1990	6F	AHU
D	千葉県 印西市	1993	1F	AHU (VAV)
			3F	放射冷温水放射ネル+FCU
E	神奈川県 藤沢市	2006	2F	AHU (VAV)
		1996	3F	AHU (VAV)+FCU
F	埼玉県 入間市	1984	2F, 3F	外気処理PAC

AHU:エアハンドリングユニット

PAC:パッケージ型空調機

VAV:変風量ユニット

B3.2. 測定項目と測定方法

各対象室において、BAS を用いた 1 分間隔の連続測定を実施した。各室の測定時間は約 1 時間とした。また、BAS による測定と並行して、バイオエアサンプラーを用いた浮遊細菌および浮遊真菌の測定を行った。浮遊細菌の測定には SCD 培地、浮遊真菌の測定には DG18 培地を用いた。培養条件は、それぞれ 32℃で 2 日間、および 25℃で 5 日間以上とした。

さらに、室内測定終了後には、屋外においてもバイオエアロゾル粒子および生菌（浮遊細菌・浮遊真菌）の測定を実施した。

B3.3. 統計解析

各ビルにおける室内外の蛍光エアロゾル粒子（Fluorescent Aerosol Particles : FAP）濃度および季節間の差の有意性については、ウィルコクソンの符号付順位検定を用いて評価した。また、粒径区分差の有意性については、マン・ホイットニーの U 検定を用いて検討した。統計解析には IBM SPSS Statistics Ver. 29 を使用し、有意水準は 0.05 とした。

C. 研究結果

C1. ローコストセンサーによる室内環境調査

C1.1. 空気環境の連続測定機器

空気環境については、建築物衛生法において、浮遊粉じん、一酸化炭素、二酸化炭素に関する空気質の項目と温度、相対湿度、気流に関する温熱

環境に関する項目を定期的に測定することとなっている。近年の技術の進展より、空気質を計測する測定機器の中で、センサー技術を利用した測定機器により連続で計測値を記録するものが多く市販されるようになってきた。Low cost sensor として認知されるようになってきたが、計測できる項目、測定精度については十分に理解されていないところがある。

そこで、海外雑誌を対象に、indoor, air, low, cost, sensor, でヒットした近年の論文のうち、室内空気質を特に PM_{2.5} 濃度をモニタリングする際に課題となる項目を解決すると考えられる論文について調査を行った。

Morawska ほかりより、低コストセンサー (LCS) を活用して室内の PM_{2.5} 濃度を監視し、法的な基準への適合性を評価するための枠組みを提案している。ここでは、光散乱を利用する LCS が粒子の特性や湿度による精度の課題を指摘している。その解決策として、建物内に「基準センサー」を設けて外部の公的観測データと連携させるネットワーク構築や、定期的な比較校正、さらには補正係数のデータベース化という具体的な運用指針を示している。

Ahmed ほかに²⁾は、2019 年から 2025 年までの研究成果を統合し、研究者や政策立案者に対して、環境健康を増進させるための次世代モニタリングシステムの設計と運用に関する実用的な指針を提供している。通信プロトコルの評価から、システムの持続可能性を高めるための太陽光発電の統合、さらには人工知能 (AI) による予測精度の向上について提案している。

Silva ほかに³⁾は、環境要因である温度や湿度による誤差、およびセンサーの経年劣化といった技術的限界を分析している。実社会での具体的な応用例を挙げ、これらの測定装置の可能性を提示している。現状の LCS は法的基準や公的規制を完全に満たすには至っていないものの、適切な校正を行うことで信頼性の高いデータを提供できる貴重なツールになり得ると結論付けている。

Kumar ほかに⁴⁾は、室内汚染に対する意識不足や法的な規制の欠如が、LCS を社会に普及させる上

での大きな障壁となっていると指摘している。
LCSは高度な汚染対策を可能とするものの、技術の進歩に追いついていない社会制度や規制との乖離を埋めることが今後の重要な課題としている。

Atfeh ほか⁵⁾は、センサーはPM_{2.5}濃度の時間的変化を正確に捉える能力を持つ一方で、湿度や温度の変動を受けやすく、結果に影響を与える。単なる生データの利用ではなく、データ補正が不可欠であると結論付けている。

Petrić ほか⁶⁾は、室内空気質をリアルタイムで監視し、空気清浄機の配置を最適化するために、センサーから得られる実測データに、質量収支モデルや数値流体力学シミュレーション、さらに機械学習アルゴリズムを組み合わせることで、汚染物質の挙動を高精度で再現している。

Tsameret ほか⁷⁾は、LCSを用いてPM_{2.5}への個人曝露量をより正確に推定する手法を提案している。職業や年齢が異なる4つの行動パターンをモンテカルロ・シミュレーションに組み込むことで、居住環境やライフスタイルが健康リスクに与える影響を分析した。また、湿度などの環境要因を補正する4種類の補正アルゴリズムを比較し、低価格なセンサーであっても適切なデータ処理を行うことで、屋内特有の汚染源や個人曝露実態を可視化できることを示している。

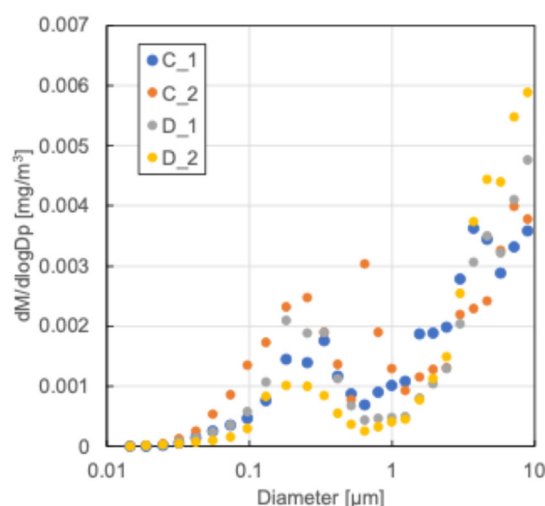
C1.2. 建築物におけるPM_{2.5}測定

表5に、建物C、Dにおける1日目、2日目の平均したPM_{2.5}濃度の結果を示す。いずれの測定場所においても、また測定機器においても、大気環境基準値である1年平均値が15 µg/m³を下回っていた。絶対値については、機器によってばらつきがある。

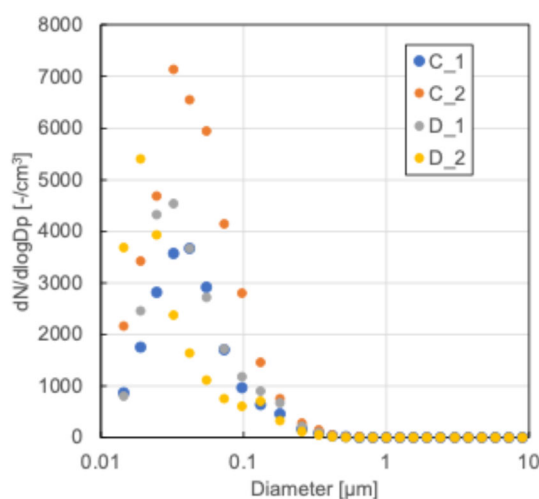
表5 各測定器のPM_{2.5}濃度結果[µg/m³]

	DustTrak II	PS-2	PMT-2500	LD-5R	3444
C_1	8.2	1.9	2.2	3.7	1.3
C_2	5.0	3.0	3.2	4.7	2.0
D_1	2.4	1.3	1.8	1.5	1.1
D_2	3.8	1.4	1.2	1.3	0.5

図1に、各測定日の平均粒径別個数濃度分布と粒径別質量濃度分布を示す。粒径別個数濃度は、粒径0.1 µm以下の超微粒子が大部分であり、粒径1 µm以上の粒子は少ない。一方質量濃度分布では、粒径0.2 µmと10 µmにピークがあり、大気における濃度分布とよく似ており、個数濃度分布と粒径別質量濃度分布から、各測定日の粒径2.5 µm以上の粒子の濃度は変わらないものの、粒径2.5 µm以下の濃度分布に差が現れている。主に粒子の発生源としては、喫煙など室内の強力な発生源はないため、その他の人の行動と外気からの侵入になる。



a) 個数濃度



b) 質量濃度

図1 各測定日における粒径別個数・質量濃度

このピークから $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度を粒子の密度 1 g/cm^3 として計算すると、建物 C の 1 日目、2 日目、建物 D の 1 日目、2 日目は、2.38, 3.83, 3.19, $4.47 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ となり、前述の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度計とは傾向が異なる。 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度計の原理的には、各種センサーが微小粒子を全て検出しているわけではないので、超微粒子濃度が高い空間において、正確には計測できないことも考えられる。よって、近年の建築物における室内粒子の現状を把握することも重要となり、さらにはセンサーの校正係数、校正方法を規定することも必要となると考えられる。

光散乱を利用した $\text{PM}_{2.5}$ 測定器は、 $0.3 \text{ } \mu\text{m}$ 未満の粒子を検出することができないことから、 $\text{PM}_{2.5}$ の質量濃度を正確に検出することは困難である。また、相対湿度の影響、低温の影響を考慮する必要がある。また、粒子の粒径、組成により、散乱強度が異なることから、質量濃度に換算する際には、室内中の粉じんの特性を考慮する必要がある。多くの $\text{PM}_{2.5}$ 測定器は校正係数が必要となるため、典型的な室内環境における係数を設定する必要がある。実際の室内環境において、または大気環境における測定値を用いて、各測定機器を随時校正するようなシステムを構築することで、精度を劇的に向上させることが可能と考えられる。

C2. 室内環境・ダクト用 CO_2 センサに関する調査

C2.1 各種測定方式の概要

CO_2 センサは、 CO_2 の物理的・化学的特性を利用して気中濃度を検出するものであり、主な方式として以下が挙げられる。それぞれの方式には一長一短があり、使用環境に応じた適切な選定が求められる。表 6 に各種 CO_2 センサの測定方式と特徴を示す¹⁻⁸⁾。

(1) 電気化学式

電気化学式は、 CO_2 が電解質溶液中で化学反応を起こす性質を利用し、電極間の電位差や電流値の変化から濃度を測定する方式である。小型化が可能で低濃度測定に適しているが、他ガスの干渉を受けやすく、電解質の劣化により寿命が比較的短い傾向がある。

(2) 光音響分光法 (Photoacoustic Spectroscopy)

光音響分光法は、 CO_2 分子が赤外線を吸収した際に発生する熱膨張による圧力波（音波）をマイクで検出する方式である。NDIR と同様に光を利用するが、検出部がマイクであるため非常に小型化できる利点がある。

(3) 熱伝導方式 (Thermal Conductivity)

熱伝導方式は、気体の熱伝導率の違いを利用して濃度を測定する方式である。 CO_2 の熱伝導率は空気（窒素・酸素）よりも低いため、マイクロヒーターの放熱量を計測することで CO_2 濃度を算出できる。レンズや反射板等の光学系を持たないため、本稿で後述する光路の汚れやホコリによる誤動作が原理的に発生しないという大きな強みを持つ。従来は高濃度測定向けが主流であったが、MEMS 技術の発展により、室内空気質レベルの計測が可能な超小型チップも登場している。

(4) 光学式 (NDIR)

光学式は、 CO_2 が赤外線領域の特定波長を吸収する特性を利用し、ガスセル内の光強度の減少量を測定して濃度を算出する方式である。中でも非分散型赤外線吸収 (Non Dispersive Infrared: NDIR) 方式は、高精度で広い測定範囲を持ち、他ガスの干渉を受けにくいことから、現在の空調制御用センサとして最も広く普及している。

表 6 空調システム用 CO₂ センサの仕様一覧

製品名	型式	メーカー	測定方式	測定範囲	測定精度	長期安定性（ドリフト）	自動校正手法	動作温度
CO2センサモジュール	IMGXCA000 6-00BA※	村田製作所	NDIR方式	0-2000 ppm	± (50ppm + 5% of reading) Typ. ± (30ppm+2.5% of reading)	± 50ppm/Year@1000ppm	二波長方式でCO2 吸収波長と参照波長の両方を計測し、常時補正	0 ～ 50°C
CO2センサモジュール	IMGXCA000 6-00BB※	村田製作所	NDIR方式	0-3000 ppm	± (50ppm + 5% of reading) Typ. ± (30ppm+2.5% of reading)	± 50ppm/Year@1000ppm	二波長方式でCO2 吸収波長と参照波長の両方を計測し、常時補正	0 ～ 50°C
Sunrize		Senseair	NDIR方式	400～5000 ppm	± (30ppm + 3% of reading)* Note: ± 75ppm Accuracy at 1500～2500ppm (ANSI/ASHRAE compliance)		Automatic Baseline Correction (ABC) アルゴリズム （一定期間内の最低値を大気中CO2濃度とみなして自動補正）	0 ～ 50°C
Sunlight CO2		Senseair	NDIR方式	400～5000 ppm	+/- (50ppm + 3% of reading)*		ABCアルゴリズム（一定期間内の最低値を大気中CO2濃度とみなして自動補正）	0 ～ 50°C
S8		Senseair	NDIR方式	400～50,000 ppm	± 40 ppm ± 3% of reading Note: ± 75ppm Accuracy at 600, 1000 and 2500ppm @ sea level, 77 ° F (25 ° C) (ANSI/ASHRAE compliance)		ABCアルゴリズム（一定期間内の最低値を大気中CO2濃度とみなして自動補正）	0 ～ 50°C
S88		Senseair	NDIR方式	400～10,000 ppm	± 40 ppm ± 3% of reading Note: ± 75ppm Accuracy at 600, 1000 and 2500ppm @ sea level, 77 ° F (25 ° C) (ANSI/ASHRAE compliance)		ABCアルゴリズム（一定期間内（デフォルトで8日間）の最低値を大気中CO2濃度400ppmとみなして自動補正） 補正幅は 30-50ppm/ABC period	0 ～ 50°C ～ 85%RH
K30		Senseair	NDIR方式	0～5,000 ppm	+/- (30ppm+3% of reading)*		ABCアルゴリズム（一定期間内の最低値を大気中CO2濃度とみなして自動補正）	0 ～ 50°C
eSENSE		Senseair	NDIR方式	0～2,000 ppm				
ダクト用CO2濃度センサ	CY8100C100 1	azbil（山武）	NDIR方式	0～2,000 ppm	± 50ppm + 指示値の5%	連続通電時 ± 150ppm/年@1,000ppm 無通電放置時 ± 50ppm/年@1,000ppm	記載なし	0 ～ 50°C
ダクト用CO2濃度センサ	CY1000C100 0	azbil（山武）	NDIR方式	0～2,000 ppm	± 50ppm + 指示値の5%	連続通電時 ± 150ppm/年@1,000ppm 無通電放置時（参考値） ± 15ppm/48時間 50%RH時	記載なし	0 ～ 50°C
ネオセンサ 室内用CO2濃度・温度センサ	CY7101	azbil（山武）	NDIR方式	0～2,000 ppm	± (50ppm + 計測値の5%)	連続通電時 ± 150ppm/年@1,000ppm 無通電放置時（参考値） ± 15ppm/48時間 50%RH時	記載なし	0 ～ 50°C
シーリングセンサ 天井用CO2濃度・温度センサ	CY7102	azbil（山武）	NDIR方式	0～2,000 ppm	± (50ppm + 計測値の5%)	連続通電時 ± 150ppm/年@1,000ppm 無通電放置時（参考値） ± 15ppm/48時間 50%RH時	記載なし	0 ～ 50°C
CO2湿度温度変換器	GMW90シリーズ	VAISALA	NDIR方式	0～5,000 ppm	+20～+30° C ± (30ppm + 読み値の2%) +10～+20° C、+30～+40° C ± (35ppm + 読み値の2.7%) -5～+10° C、+40～+55° C ± (45ppm + 読み値の3.8%)	± 75ppm/5Year@1000ppm（一般空調設備下）	単光源二波長方式でCO2 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	-5 ～ 55°C
CO2変換器	GMD110	VAISALA	NDIR方式	～10,000ppm CO2 0～2,000ppm、0～5,000ppm、または0～10,000ppmの範囲のアナログ出力で注文可能	0～3,000ppm CO2 ± 40ppm CO2 3,000～10,000ppm CO2 ± 2%（読み値）	0～3,000ppm CO2 ± 60ppm CO2/年 3,000～6,000ppm CO2 ± 150ppm CO2/年 6,000～10,000ppm CO2 ± 300ppm CO2/年	単光源二波長方式でCO2 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	-20 ～ 60°C
CO2湿度温度変換器	GMW80シリーズ	VAISALA	NDIR方式	0～5,000ppm (GMW86PK5/ GMW88K5) （その他のモデル） 0～2,000ppm	+20～+30° C ± (30ppm + 指示値の 3%) +10～+20° C、+30～+40° C ± (35ppm + 指示値の 3.7%) +0～+10° C、+40～+50° C ± (40ppm + 指示値の 4.8%)	代表的な HVAC 用途での安定性 ± (15ppm + 指示値の 2%)/5 年超	単光源二波長方式でCO2 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	0 ～ 50°C
XENSIV PAS CO2 Sensor	PASCO2V01 BUMA1	infineon	光音響NDIR方式	0～32,000 ppm	± (30 ppm + 3%) of reading between 400 ppm and 5000 ppm	1%/year, at 1 meas/ min with ABOC enabled in continuous mode	ABCアルゴリズム（一週間で7日間）の最低値を大気中CO2濃度（400ppm）とみなして自動補正）補正幅は +/-50ppm	0 ～ 50°C
SCD40		Sensirion	光音響NDIR方式		± (50 ppm + 5% 読み取り誤差) @ 400～2,000 ppm			
SCD41		Sensirion	光音響NDIR方式		± (40 ppm + 5% 読み取り誤差) @ 400～5,000 ppm			
SCD42		Sensirion	光音響NDIR方式		± 75 ppm @ 400～1,000 ppm ± (40 ppm + 5% 読み取り誤差) @ 1,001～2,000 ppm			
STCC4		Sensirion	熱伝導センシング	380 ～ 32,000 ppm	± (100ppm + 計測値の10%) @ 400～5,000 ppm			
CO2センサー（外気処理ユニット専用）	PGL-100TGSF	三菱電機		400～2000 ppm	± (70 ppm + 5% 読み取り誤差)		ABCアルゴリズム（一定期間内の最低値を大気中CO2濃度とみなして自動補正）	

製品名	保管温度	入力電圧	平均消費電力	出力インターフェース	時定数	メンテナンス頻度	センサが使用されている商品	備考	URL
CO2センサモジュール	-20 ～ 50°C	AC/DC 24V, DC12V	0.5W / Max. 2.0W	アナログ 0 ～ 5V		ビル換気向けに約10年間（測定環境次第）			
CO2センサモジュール	-20 ～ 50°C	AC/DC 24V, DC12V	0.5W / Max. 2.0W	アナログ 0 ～ 5V		ビル換気向けに約10年間（測定環境次第）			
Sunrize	記載なし	3.05～5.5 V	34 uA				旭化成、Aranet 4	*: 15-35°C, 0-85%RH, After three ABC period	
Sunlight CO2	-40 ～ 70°C	3.05～5.5 V	30uA or lower			Lifetime <15 years		*: 15-35°C, 0-85%RH, After three ABC period ABC periodは調整可能	
S8	記載なし	4.5～5.25 V	18～30 mA	PWM / デジタル					
S88	-40 ～ 70°C	4.5 - 5.25 V	≤18mA	Digital, Modbus protocol, UART		Maintenance free		The default "tuning speed" is limited to about 30-50ppm/ABC period.	
K30 eSENSE	記載なし	4.5～14 V	40 mA	アナログ / デジタル			おんどとり	*: After three ABC period	
ダクト用CO2濃度センサ	-20 ～ 50°C	AC24V	3VA以下	DC 1-5V リニア特性	3 min以下 (0.6m/sの時)	1回/年のゼロガス校正を実施してください。			https://www.azbil.com/jp/product/building/system/sensor/co2-concentration-sensor-duct/index.html
ダクト用CO2濃度センサ	-20 ～ 50°C	AC24V	3VA以下	DC 1-5V リニア特性		1回/年のゼロガス校正を実施してください。			
ネオセンサ 室内用CO2濃度・温度センサ	-20 ～ 70°C	AC24V	3VA以下	DC 1-5V リニア特性	3 min以内（拡散状態、参考値）	1回/年のゼロガス校正を実施してください。			https://www.azbil.com/jp/product/building/system/sensor/sensor-iaq-co2/downloads.html
シーリングセンサ 天井用CO2濃度・温度センサ	-10 ～ 65°C	AC24V	3VA以下	DC 1-5V リニア特性	3 min以内（拡散状態、参考値）	1回/年のゼロガス校正を実施してください。			
CO2湿度温度変換器	-30 ～ 60°C	18～35VDC	< 2W	0～5/10V、2および3チャンネルモデル				CO2センサ：CARBOCAP GM10	
CO2変換器	-40 ～ 60°C	20～30V DC		0/4～20mA（選定可能）、最大負荷 500Ω 0～5/10V（選定可能）、最小負荷 10kΩ Modbus RTU（RS-485）	1分以内（T90）			CO2センサ：CARBOCAP GM10	
CO2湿度温度変換器	ディスプレイ無しモデル： -40～+70° C ディスプレイ付きモデル： -30～+70° C	18～35VDC	GMW83モデル：0.7W GMW86/GMW88モデル：1W GMW84モデル：1.2W	4～20mA および/または 0～10V	60 秒(63%) GMW88モデル：7分			CO2センサ：CARBOCAP GM10	
XENSIV PAS CO2 Sensor		3～3.6V/10.8～13.2V				Lifetime 10 years			
SCD40									
SCD41									
SCD42									
STCC4									
CO2センサー（外気処理ユニット専用）	-10 ～ 40°C, 80%RH以下					製品寿命目安：約10年		外気処理ユニット本体のRA（運氣）風路に設置 ※自動校正機能は、夜間や人の出入りが少なくなる時間帯など、一番低いCO2濃度を基準値（一般の外気のCO2濃度）と認識し校正を実施するため、CO2センサーで検知しているCO2濃度と実際の室内のCO2濃度とは異なることがあります。このため、外気のCO2濃度が常時高いと思われる場所（幹線道路沿いなど）や室内のCO2濃度が常時高い環境で 사용되는場合は実際の濃度と検知濃度のずれが大きくなる場合があります。この場合は、自動校正機能の基準値を変更するか自動校正機能をOFFにして使用してください。	

C2.2 室内における CO₂ガスがヒトに与える影響に関する文献調査

室内の CO₂濃度は、長らく換気量および在室密度の代理指標として用いられてきた。一方で、2010 年代以降、比較的低い濃度域（概ね 1,000–3,000 ppm）においても、CO₂そのものが眠気、睡眠、特定の高次認知機能に寄与し得る可能性が再検討されている。2020 年までの状況については、空気調和・衛生工学会提言「必要換気量算定のための 室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方」⁹⁾に詳しい。

本研究では、近年の文献を中心に調査し、純 CO₂を独立に操作した実験研究と、換気量を操作した実環境・準実験研究を区別して整理した。その結果、以下の結論が得られた。

C2.2.1 認知機能

純 CO₂曝露を独立に操作した研究では、600–2,100 ppm の短時間曝露で認知低下は明確でなかった¹⁰⁾。一方、換気操作を含む終日曝露を行った研究では、CO₂上昇と認知スコア低下が報告されているが、これらの実環境研究では、CO₂の上昇が換気不足による他の汚染物質（VOCs や在室者由来の臭気物質）の蓄積と同時に発生するため、CO₂単独の効果を特定することは困難である¹¹⁾。

系統的レビューおよびメタ解析は、複雑な課題で影響が出やすい可能性を示す一方、研究間の異質性が大きいと結論づけている^{12,13)}。

C2.2.2 眠気・睡眠

室内二酸化炭素（CO₂）濃度と睡眠および翌日の眠気に関する研究では、比較的低濃度域においても負の影響を示唆する結果が一貫して報告されている。

寝室を模した模擬チャンバー研究においては、CO₂濃度を 800 ppm から 1,900 ppm、さらには 3,000 ppm へと段階的に上昇させる実験が行われ、濃度上昇に伴い睡眠潜時の延長および深睡眠の減少が確認されている¹⁴⁾。また、実際の寝室環境を対象としたフィールドラボ研究においても、平均濃度が 1,000 ppm を超えると睡眠効率の低下や主観的な睡眠の質の悪化が報告されている¹⁵⁾。

日中の眠気に関しても、高濃度の CO₂曝露が客観的な指標に影響を与えることが示されている。5,000 ppm 級の曝露条件下で実施された反復睡眠潜時検査（MSLT）では、曝露中に有意な日中眠気の増加が認められた¹⁶⁾。

C2.2.3 シックビル症候群様症状

純粋な CO₂のみを曝露させた実験研究では、これらの症状が必ずしも再現されないことが指摘されている^{17,18)}。実環境において症状が誘発される主な要因は、CO₂そのものではなく、換気低下に伴って蓄積する生体発散物質（bioeffluents）や揮発性有機化合物（VOCs）などの混合曝露の影響が大きいと考えられている^{17,19)}。

C2.2.4 生理指標

室内 CO₂濃度が呼吸、循環、自律神経系などの各種生理指標に及ぼす影響について、3,000 ppm 程度の条件では呼気終末二酸化炭素分圧（ETCO₂）や血圧反応の変化が示される報告がある^{18,20)}。建築物衛生法の 1,000 ppm 基準についても、制定当時には 0.1%（1,000 ppm）付近で呼吸、循環器系、脳の電気活動に変化がみられたとする知見が参照されたとされる⁹⁾。一方で、近年の一般的な室内環境を想定した 1,000–1,500 ppm 程度の曝露研究では、明確な生理的差異が乏しいとする研究も多く^{18,20)}、1,000 ppm を CO₂単独の明確な健康閾値として解釈することには限界がある。

C2.2.5 長期健康影響

概ね 3,000 ppm 以下の一般的な室内濃度域における CO₂曝露がもたらす長期的な健康アウトカムについて、因果関係を直接的に評価した前向き研究等は著しく不足している²¹⁾。

C3. オフィスビル執務室におけるバイオエアロゾル粒子のリアルタイム測定

C.3.1 夏期と冬期における FAP 濃度

図 2 および図 3 に、夏期および冬期における室内外の FAP 濃度および中央値の I/O 比（室内屋外濃度比）を示す。図中の記号は、先頭のアルファベ

ットが測定対象ビル、続く英数字が測定場所を表す。例えば、A2F は表 4 に示す A ビルの 2F を意味する。

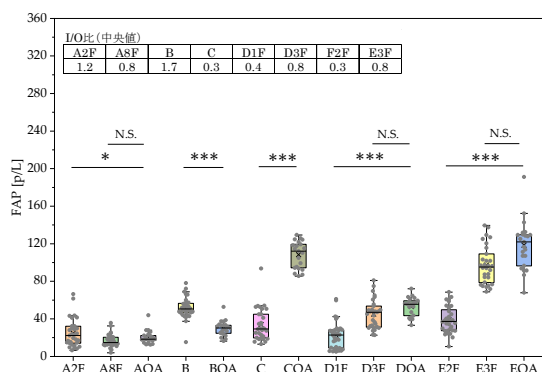


図 2 夏期における各測定対象室の FAP 濃度
(*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$)

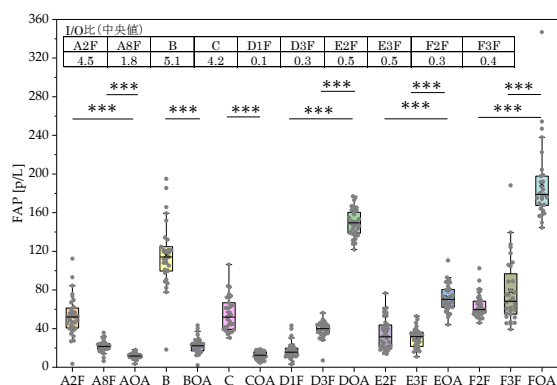


図 3 冬期における各測定対象室の FAP 濃度
(*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$)

室内 FAP 濃度について夏期と冬期の差の有意性を検定した結果、D ビルの 1F ($p=0.142$) および 3F ($p=0.268$)、E ビルの 2F ($p=0.256$) を除き、すべての測定対象室で有意差が認められた (B ビル: $p < 0.05$, その他: $p < 0.001$)。有意差が認められた A ビルの 2F と 8F、B ビル、C ビル、E ビルの 3F のすべてにおいて、冬期の FAP 濃度は夏期より有意に高かった。

室内外の FAP 濃度の比較では、夏期の A ビル 8F ($p=0.261$) および D ビル 3F ($p=0.067$) を除き、すべての測定対象室で有意差が認められた (A ビル 2F: $p < 0.05$, その他: $p < 0.001$)。有意差が認められた測定対象室のうち、夏期では A ビルの 2F と B ビルの中央値において、室内の FAP 濃度が

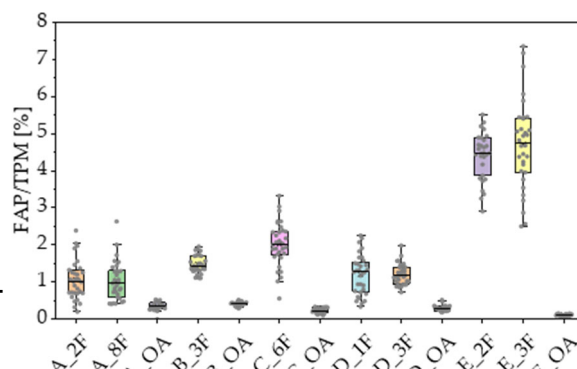
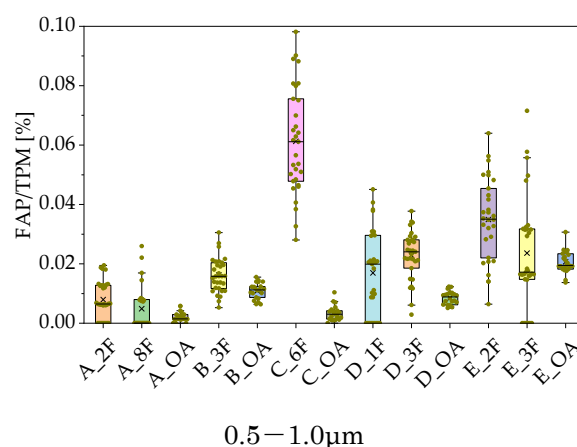
屋外より有意に高かった。一方、冬期では宮崎県内にある 3 ビル 4 室すべてにおいて、室内 FAP 濃度が屋外より有意に高かった。

C3.2 総粒子状物質に占める蛍光粒子の割合

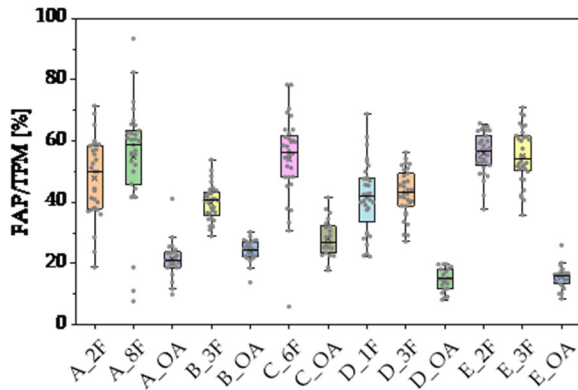
図 4 および図 5 に、それぞれ夏期および冬期の測定結果から算出した総粒子状物質濃度 (Total Particulate Matter : TPM) に対する FAP 濃度の割合 (FAP/TPM) の分布を示す。

夏期・冬期を問わず、粒径が大きくなるに伴い FAP/TPM が有意に高かった。各粒径区分における中央値は表 7 に示す通りである。

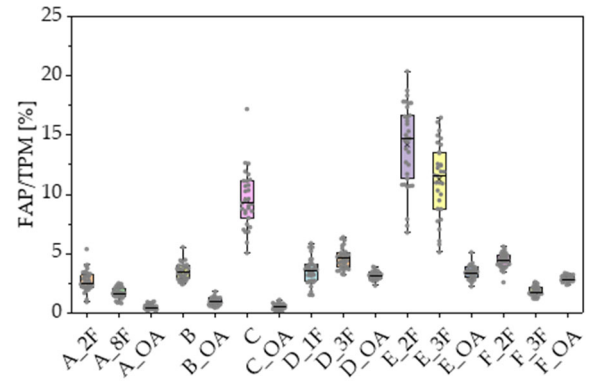
室内外の FAP/TPM を比較すると、 $1.0 \mu\text{m}$ 以上では屋外に比べて室内の方が高い値を示した。両者の差について統計的検定を行った結果、D ビル 3 階における $2 \mu\text{m}$ 以下の粒径区分および C ビルにおける $5 \mu\text{m}$ 以上の粒径区分を除き、有意差が認められた (A ビル 8F: $p < 0.01$, その他: $p < 0.001$)。



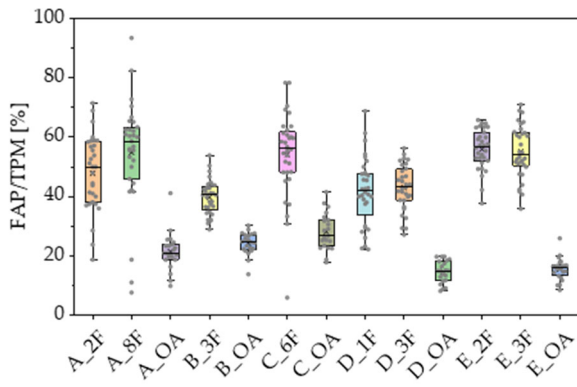
1.0–2.0μm



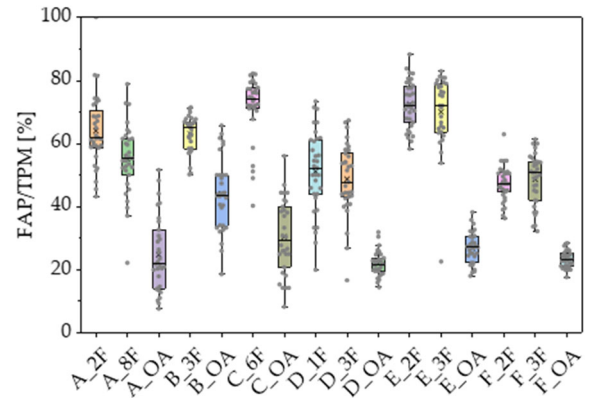
0.5–1.0μm



2.0–5.0μm



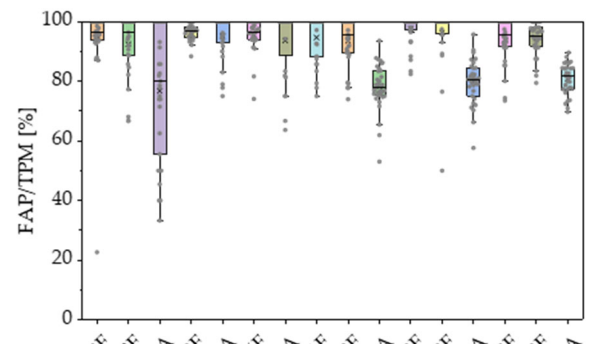
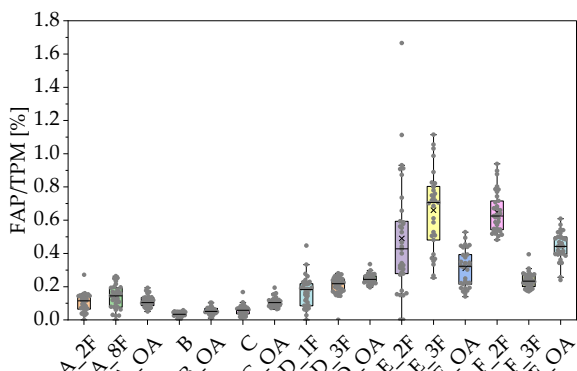
1.0–2.0μm



>5.0μm

図 4 TPM に占める FAP の割合ー夏期

2.0–5.0μm



>5.0 μm

図5 TPMに占めるFAPの割合ー冬期

表7 粒径別・季節別 FAP/TPM 中央値(%)

	夏期		冬期	
	室内	屋外	室内	屋外
0.5~1.0 μm	0~0.060	0.002~0.019	0.03~0.71	0.104~0.442
1.0~2.0 μm	1.02~4.68	0.102~0.414	1.61~14.7	0.45~3.39
2.0~5.0 μm	40.5~58.6	15.0~26.8	47.2~74.0	21.8~43.8
>5.0 μm	95.3~100	54.2~80.4	95.0~100	78.1~100

C3.3. 浮遊細菌と浮遊真菌濃度

図6に浮遊細菌および浮遊真菌濃度の測定結果を示す。図中のSおよびWは、それぞれ夏期および冬期を表す。細菌および真菌のいずれにおいても、冬期と比較して夏期の濃度は有意に高かった。また、浮遊細菌濃度はすべて、日本建築学会の規準値である500 cfu/m³を下回っていた。一方、浮遊真菌濃度については、冬期は同規準値(50 cfu/m³)を下回っていたが、夏期では半数以上の測定値が規準値を上回った。

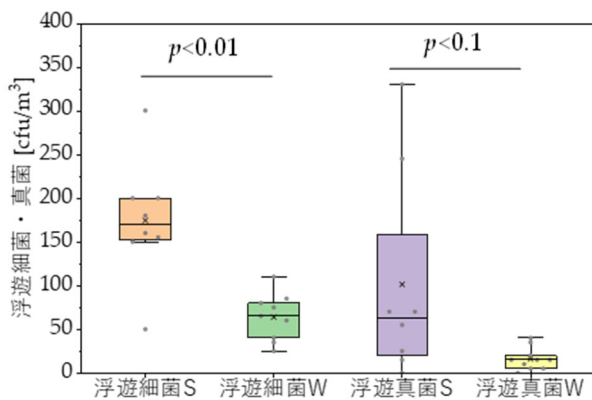


図6 浮遊細菌濃度と浮遊真菌濃度

C3.4. FAP と生菌（細菌）の関係

図7に、夏期および冬期に測定した浮遊細菌濃度と、BASにより測定したFAP濃度との相関関係を示す。また、図中には95%信頼区間を併せて

示す。両者の間には有意な相関関係が認められた($p<0.001$)。さらに、浮遊細菌濃度はFAP濃度の約1/1000であることが明らかとなった。

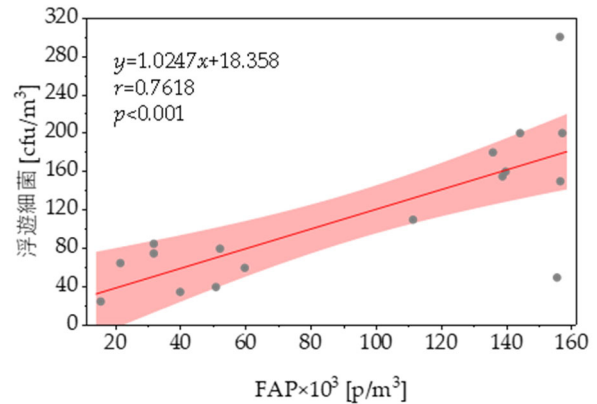


図7 FAP濃度と浮遊細菌濃度との相関

D. 考察・まとめ

D1. ローコストセンサーによる室内環境調査

空気環境項目の連続自動測定について、低コストセンサーの海外論文の調査を行った。PM_{2.5}の精度には課題となることが多いが、その特性を把握しつつ、校正、補正手法を構築することで、濃度の予測や制御に活かす取り組みがなされる傾向であった。

室内環境の測定については、複数のPM_{2.5}濃度計を用いた結果、濃度の絶対値は異なるものの、経時変化は同様の傾向になった。また、室内粒子の粒径分布の解析により、粒径2.5 μm 以下の粒子の質量濃度の粒径分布が異なるため、近年の建築物における室内粒子の現状を把握することが必要と考えられた。さらにセンサーの校正係数、校正方法を規定することも必要となると考えられる。

D2. 室内環境・ダクト用CO₂センサに関する調査

本研究では、CO₂センサの測定原理として電気化学式、光音響分光法、熱伝導方式、NDIR方式の特徴を整理し、それぞれの測定特性および適用上の留意点を明らかにした。これらの方式は、感度、選択性、長期安定性、環境影響(温湿度や汚れ等)において差異を有しており、測定環境や用途に応じた適切な選定が不可欠である。特に、現在

広く用いられている NDIR 方式は他ガス干渉に強く高精度である一方、光学系の汚染や校正の影響を受け得るなど、運用面での管理が測定精度に直結する点が重要である。

実環境における CO₂濃度の上昇は、一般に換気量の低下と同時に生じ、その結果として揮発性有機化合物や生体発散物質等の室内汚染物質の濃度上昇を伴う。このため、CO₂濃度は従来どおり換気状態の代理指標として有用であるが、実環境で観察される認知機能低下や不快症状は、CO₂単独の影響ではなく、これら汚染物質との混合曝露の影響を反映している可能性が高い。実際に、純 CO₂濃度のみを独立に操作した実験研究では、短時間曝露条件において認知機能や症状への影響は限定的であることが示されている。

認知機能への影響については、純 CO₂曝露実験と実環境研究との間で結果の整合性が十分ではなく、研究間の異質性も大きいことから、明確な濃度閾値を導出することは困難である。一方で、複雑な課題において影響が現れる可能性は示唆されており、今後は曝露条件および評価手法の標準化が求められる。これに対し、睡眠および日中の眠気に関しては、概ね 1,000 ppm 程度の比較的低い濃度域から負の影響を示唆する知見が複数の研究で一貫して報告されている。生理指標については 3,000 ppm 程度で一定の変化が報告されているものの、一般的な室内環境レベル（1,000～1,500 ppm）では顕著な影響は限定的である。また、長期的な健康影響については前向き研究が不足しており、因果関係の評価には大きな不確実性が残されている。

以上より、CO₂濃度に基づく単一の安全閾値を設定する科学的根拠は限定的である。一方で、CO₂センサを用いたモニタリングは、適切な方式選定および維持管理を前提とすれば、室内空気質および換気状態を把握するための有効な手段である。したがって、実務においては、センサ特性に起因する測定の不確かさを踏まえつつ、空間の用途や滞在時間、利用者特性に応じた柔軟な管理基準を設定することが重要である。

D3. オフィスビル執務室におけるバイオエアロゾル粒子のリアルタイム測定

前述のとおり、FAP は生物由来粒子（バイオエアロゾル粒子）の指標として用いられることがある。FAP の主成分には、細菌、ウイルス、花粉、カビ、皮膚片、フケ、植物由来有機物¹⁾に加え、類繊維、蛍光成分を含む化粧品、蛍光増白剤を含む布用柔軟剤や洗剤の残留物など、多様な粒子が含まれる²⁾。また、FAP の放出量は、在室者数やその活動、外気の影響、室内の温湿度条件などにより変動することが知られている。

季節別 FAP 濃度の差については、前述の結果より、室内 FAP 濃度には明確な季節差が認められ、特に多くの測定対象室において冬期に濃度が上昇する傾向が確認された。D ビルの 1F および 3F、E ビルの 2F を除き、すべての測定対象室で夏期と冬期の間に有意差が認められたことから、FAP 濃度は季節要因に強く依存している可能性が示唆される。一方、浮遊細菌の測定結果では、冬期と比較して夏期に有意に高い値を示した。このことは、FAP が SCD 培地で培養可能な細菌のみを反映する指標ではなく、培養不可能な細菌やその他の蛍光性粒子を含むことを示唆している。

さらに、浮遊細菌と FAP の関係に着目すると、両者の間には有意な相関が認められるものの、浮遊細菌濃度は FAP 濃度の約 1/1000 にとどまっていた。この結果から、FAP は浮遊細菌の存在と一定の関連性を有する一方で、その大部分は細菌以外の蛍光性粒子によって構成されていることが考えられる。

FAP/TPM の割合について、Patra ら³⁾は、大学研究室を対象として Wideband Integrated Bioaerosol Sensor (WIBS) を用いたリアルタイム測定を行い、居住環境および換気条件の変化に伴う FAP の動態を報告している。その結果、実環境において FAP が TPM に占める割合は最大で約 90%に達する場合があることが示されている。本研究においても、個数濃度に基づく FAP 割合の中央値は、夏期と比較して冬期に高い値を示す傾向が確認された（表 4、図 2、図 3）。また、粒径別みると、2.0 μm 未満では最大でも約 15%にとど

まる一方で、2.0–5.0 μm では 40–74%、5.0 μm 超では 95%以上となり（表 7）、粒径の増加に伴い FAP の寄与が顕著に高まる傾向が示された。このことから、オフィス環境においても、特に粗大粒子領域における FAP の寄与が大きいことが明らかとなった。さらに、著者らが過去に BAS を用いて大学研究室で実施した調査では、FAP 濃度と浮遊細菌濃度との間に有意な相関関係が報告されている⁴⁾。本研究においても同様の傾向が確認され（図 4）、FAP 濃度を指標として浮遊細菌濃度を一定程度推定できる可能性が示唆された。

本研究では、BAS を用いて宮崎県、千葉県、神奈川県、埼玉県に所在する 6 棟のオフィスビル（計 10 室）を対象に、2025 年 8 月および 2026 年 2 月に室内 FAP のリアルタイム測定を実施し、以下の知見を得た。

- ① 多くの測定対象室において、夏期と比較して冬期の FAP 濃度が有意に高いことが確認された。
- ② 2024 年 10 月および 2025 年 1 月の測定結果と同様に、TPM に占める FAP の割合は、夏期よりも冬期に高い傾向が示された。
- ③ 粒径別の FAP/TPM 割合は、2.0 μm 未満では 15%以下である一方、2.0–5.0 μm では 40–74%、5.0 μm 超では 95%以上となり、オフィス環境においては、特に粗大粒子領域における FAP の寄与が大きいことが明らかとなった。
- ④ FAP 濃度の中央値と浮遊細菌濃度との間には有意な相関関係が認められ、FAP 濃度を指標として浮遊細菌濃度を推定できる可能性が示唆された。
- ⑤ 浮遊細菌濃度は、FAP 濃度のおおよそ 1/1000 のオーダーであることが示された。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

- 1) 柳 宇、金 勲、下ノ菌慧、鍵直樹：オフィスビルにおける蛍光エアロゾル粒子のリアルタイム測定. 第 42 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、224–226. 2025.
- 2) 土屋将大、柳 宇、金 勲、下ノ菌慧、鍵 直樹：オフィスビルにおける蛍光エアロゾル粒子と生菌数の関連性. 2025 年室内環境学会学術大会講演要旨集. 300–301. 2025.

3. 著書

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

<参考文献>

- 1) Lidia Morawska, Christof Asbach, Hamesh Patel: Application of PM_{2.5} low-cost sensors for indoor air quality compliance monitoring, *Aerosol Science and Technology*, 59, 10, 1210–1220, 2025.
- 2) Shamima Ahmed, Anila Pasha, Tusher Kumer, Md Akhtaruzzaman, Moktar Hossain: *Advancements in Air Quality Monitoring Systems: A Comprehensive Review of Emerging Technologies for Enhancing Environmental Health*, Indoor Air, 3080684, 2026.
- 3) Gonalo Silva, Joana Duarte, João Santos Baptista, João Cavaleiro Rufo: Low-cost sensors for indoor air quality monitoring: A systematic review of accuracy, applications, and limitations, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2026.

- 4) Prashant Kumar, Andreas N. Skouloudis, Margaret Bell, Mar Viana, M. Cristina Carotta, George Biskos, Lidia Morawska: Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings, *Science of the Total Environment*, 560-561, 150-159, 2016.
- 5) Bushra Atfeh, Zoltán Barcza, Veronika Groma, Ágoston Vilmos Tordai, Róbert Mészáros: Performance Assessment of Low- and Medium-Cost PM_{2.5} Sensors in Real-World Conditions in Central Europe, *Atmosphere*, 16, 7, 796, 2025.
- 6) Valentino Petrić, Dejan Strbad, Nikolina Račić, Tareq Hussein, Simonas Kecorius, Francesco Mureddu, Mario Lovrić: Hybrid Digital Twin Framework for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring and Filtration Optimization, *Atmosphere*, 17, 2, 2026.
- 7) Shahar Tsameret, Daniel Furuta, Provat Saha, Nohhyeon Kwak, Aliaksei Haurlyiuk, Xiang Li, Albert A. Presto, Jiayu Li: Low-Cost Indoor Sensor Deployment for Predicting PM_{2.5} Exposure, *ACS EST Air*, 1, 8, 767-779, 2024.
- 8) Senseair AB: "Automatic Baseline Correction (ABC) functionality", Senseair Technical Whitepaper. <https://senseair.com/knowledge/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 9) Sensirion AG: "Datasheet SCD30 - Sensor Module for HVAC and Indoor Air Quality Applications", Sensirion Technical Documentation. <https://sensirion.com/products/catalog/SCD30/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 10) Sensirion AG: "Sensirion's Photoacoustic NDIR Sensor Technology", Sensirion Whitepaper. <https://sensirion.com/technology/environmental-sensing/photoacoustic-ndir> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 11) Infineon Technologies AG: "XENSIV™ PAS CO2 Sensor Datasheet", Infineon Technical Documentation. <https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/co2-sensors/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 12) 理研計器株式会社: "ガス検知器の原理 - 熱伝導式", 理研計器 技術サポート情報. https://www.rikenkeiki.co.jp/support/knowledge/gas_sensor (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 13) フィガロ技研株式会社: "二酸化炭素センサ TGS4161 製品データシート", フィガロ技研 製品情報. <https://www.figaro.co.jp/product/sensor/co2/tgs4161.html> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 14) Bosch Sensortec GmbH: "BME688 - Gas sensor with Artificial Intelligence Datasheet", Bosch Sensortec Technical Reference. <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme688/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 15) Bosch Sensortec GmbH: "BSEC Integration Guidelines (eCO2 calculation)", Bosch Sensortec Software Documentation. <https://www.bosch-sensortec.com/software-tools/software/bsec/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)
- 16) 公益社団法人空気調和・衛生工学会、学会提言 必要換気量算定のための室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方、令和 3 年 5 月 31 日
- 17) Chen, D., Hadi, A. A., Shaliza, A., et al. (2023). Effects of short-term exposure to moderate pure carbon dioxide levels on cognitive performance, health symptoms and perceived indoor environment quality. *Building and Environment*, 245, 110967. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110967>
- 18) Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and

- volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- 19) Du, B., Tandoc, M. C., Mack, M. L., & Siegel, J. A. (2020). Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air*, 30(6), 1067–1082. <https://doi.org/10.1111/ina.12706>
- 20) Fan, Y., Cao, X., Zhang, J., Lai, D., & Pang, L. (2023). Short-term exposure to indoor carbon dioxide and cognitive task performance: A systematic review and meta-analysis. *Building and Environment*, 237, 110331. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110331>
- 21) Xu, X., et al. (2021). Experimental study on sleep quality affected by carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 31(2), 440–453. <https://doi.org/10.1111/ina.12748>
- 22) Kang, M., et al. (2024). Ventilation causing an average CO₂ concentration of 1000 ppm negatively affects sleep: A field-lab study on healthy young people. *Building and Environment*, 247, 111459. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111459>
- 23) Jin, R. N., Inada, H., Momma, H., Ma, D., Yuan, K., & Nagatomi, R. (2024). Impact of carbon dioxide exposures on sleep latency among healthy volunteers: A randomized order, paired crossover study, evidence from the multiple sleep latency test. *Environmental Research*, 262(Part 1), 119785. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119785>
- 24) Zhang, X., Wargocki, P., et al. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor Air*, 27(1), 47–64. <https://doi.org/10.1111/ina.12284>
- 25) Zhang, X., Wargocki, P., & Lian, Z. (2017). Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor Air*, 27(1), 65–77. <https://doi.org/10.1111/ina.12286>
- 26) Maula, H., Hongisto, V., Naatula, V., Haapakangas, A., & Koskela, H. (2017). The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms. *Indoor Air*, 27(6), 1141–1153. <https://doi.org/10.1111/ina.12387>
- 27) Mishra, A. K., Schiavon, S., Wargocki, P., & Tham, K. W. (2021). Respiratory performance of humans exposed to moderate levels of carbon dioxide. *Indoor Air*, 31(5), 1540–1552. <https://doi.org/10.1111/ina.12823>
- 28) Mendell, M. J., Chen, W., Ranasinghe, D. R., Castorina, R., & Kumagai, K. (2024). Carbon dioxide guidelines for indoor air quality: a review. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34(4). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00694-7>
- 29) A.J. Prussin, L.C. Marr, Sources of airborne microorganisms in the built environment, *Microbiome* 3 (2015) 78.
- 30) S. Yang; G. Bekö; P. Wargocki; J. Williams; D. Licina. Human emissions of size-resolved fluorescent aerosol particles: influence of personal and environmental factors, *Environ. Sci. Technol.* 55 (2021) 509–518.
- 31) Patra, S.S.; Wu, Tianren.; Wnger, D.N.; Jiang, J.; Boor, B.E. Real-time measurements of fluorescent aerosol particles in a living laboratory office under variable human occupancy and ventilation conditions. *Build Environ.* 2021, 205:108249.
- 32) Yanagi, U; Fukushima, N.; Nagai, H.; Ye, H.; Kano, M. Bioaerosol Sensor for In Situ Measurement: Real-Time Measurement of Bioaerosol Particles in a Real Environment and

Demonstration of the Effectiveness of Air
Purifiers to Reduce Bioaerosol Particle
Concentrations at Hot Spots. Atmosphere.
2023. 14,1656.