

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

研究分担研究者	鍵 直樹	東京科学大学	環境・社会理工学院	教授
研究分担研究者	柳 宇	工学院大学	建築学部	教授
研究分担研究者	尾方壯行	東京都立大学	都市環境学部建築学科	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、空気環境の定期の測定により基準値との比較を行うことだけではなく、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、空気環境の定期の測定により基準値との比較を行うことだけではなく、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発展しているため、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、我が国の大気の環境基準値が、1 年平均値が 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下、かつ、1 日平均値が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均を 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

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平衡測定を行い、それぞれの測定機器の特性について検討した。

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	10 ppm 以下 (6 ppm 以下に改正)
二酸化炭素の含有率	1000 ppm 以下
温度	17°C以上 28°C以下 (18°C以上に改正)
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)

A2. CO₂センサーの不具合事例に関するヒアリング調査とその分析

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、国内主要センサーメーカーへのヒアリング調査を通じて、CO₂センサーの運用実態、トラブル事例、ならびに自動校正機能の影響に関する情報を収集・分析し、信頼性向上のための運用指針策定の基礎資料とすることを目的とした。また、前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。

表2 空調システム用CO₂センサーの仕様一覧

製品名	型式	メーカー	測定方式	測定範囲	測定精度	長
CO ₂ センサモジュール	IMGXCA0006-00BA※	村田製作所	NDIR方式	0~2000 ppm	±(50ppm + 5% of reading) Typ. ± (30ppm + 2.5% of reading)	±
CO ₂ センサモジュール	IMGXCA0006-00BB※	村田製作所	NDIR方式	0~3000 ppm	±(50ppm + 5% of reading) Typ. ± (30ppm + 2.5% of reading)	±
Sunrise		旭化成エレクトロニクス (AKM) グループ会社 Senseair	NDIR方式	400~5000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
Sunlight CO ₂		旭化成エレクトロニクス (AKM) グループ会社 Senseair	NDIR方式	400~5000 ppm	+/- (50ppm + 3% of reading)*	
S8		旭化成エレクトロニクス (AKM) グループ会社 Senseair	NDIR方式	400~50,000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
K30		旭化成エレクトロニクス (AKM) グループ会社 Senseair	NDIR方式	0~5,000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	CY8100C1001	azbil (山武)	NDIR方式	0~2,000 ppm	± 50ppm + 指示値の5%	速 無 速 無 速 無 速 無
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	CY1000C1000	azbil (山武)	NDIR方式	0~2,000 ppm	± 50ppm + 指示値の5%	速 無 速 無 速 無 速 無
ネオセンサ 室内用CO ₂ 濃度・温度センサ	CY7101	azbil (山武)	NDIR方式	0~2,000 ppm	± (50ppm + 計測値の5%)	速 無 速 無 速 無 速 無
シーリングセンサ 天井用CO ₂ 濃度・温度センサ	CY7102	azbil (山武)	NDIR方式	0~2,000 ppm	± (50ppm + 計測値の5%)	速 無 速 無 速 無 速 無
CO ₂ 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%)	± ± ± ± ± ± ± ±
CO ₂ 変換器	GMD110	VAISALA	NDIR方式	~10,000ppm CO ₂ 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 CO ₂ ± 40ppm CO ₂ 3,000~10,000ppm CO ₂ ± 2% (読み値)	0~ 3, 6,
CO ₂ 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 25
XENSIV PAS CO ₂ Sensor	PASC02V01BUMA1	infineon	光音響分光法	0~32,000 ppm	± (30 ppm + 3% of reading) between 400 ppm and 5000 ppm	15 cc

製品名	メンテナンス頻度	センサが使用されている商品	備考
CO ₂ センサモジュール	ビル換気向けに約10年間 (測定環境次第)		
CO ₂ センサモジュール	ビル換気向けに約10年間 (測定環境次第)		
Sunrise		旭化成、Aranet 4	*: 15~35°C, 0~85%RH, After three ABC period
Sunlight CO ₂	Lifetime <15 years		*: 15~35°C, 0~85%RH, After three ABC period ABC periodは調整可能
S8			
K30	おんどり		*: After three ABC period
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	自動校正を行いますが、少なくとも3年に1度CO ₂ 濃度校正を実施してください。		
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	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CO ₂ 濃度・温度センサ	1回/年のゼロガス校正を実施してください。		
シーリングセンサ 天井用CO ₂ 濃度・温度センサ	1回/年のゼロガス校正を実施してください。		
CO ₂ 湿度温度変換器		CO ₂ センサ : CARBOCAP GM10	
CO ₂ 変換器		CO ₂ センサ : CARBOCAP GM10	
CO ₂ 湿度温度変換器		CO ₂ センサ : CARBOCAP GM10	
XENSIV PAS CO ₂ Sensor	Lifetime 10 years		

製品名	自動校正方法	動作温度	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
CO ₂ センサモジュール	二波長方式でCO ₂ 吸収波長と参照波長の両方を計測し、常時補正	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC/DC 24 0.5W / Max. 2.0W		アナログ 0 ~ 5V	
CO ₂ センサモジュール	二波長方式でCO ₂ 吸収波長と参照波長の両方を計測し、常時補正	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC/DC 24 0.5W / Max. 2.0W		アナログ 0 ~ 5V	
Sunrise	Automatic Baseline Correction (ABC) アルゴリズム (一定期間内の最低値を大気中CO ₂ 濃度とみなして自動補正)	0 ~ 50°C	記載なし	3.05~5.5 34 uA			
Sunlight CO ₂	ABCアルゴリズム (一定期間内の最低値を大気中CO ₂ 濃度とみなして自動補正)	0 ~ 50°C	-40 ~ 70°C	3.05~5.5 30uA or lower			
S8	ABCアルゴリズム (一定期間内の最低値を大気中CO ₂ 濃度とみなして自動補正)	0 ~ 50°C	記載なし	4.5~5.25 18~30 mA		PWM / デジタル	
K30	ABCアルゴリズム (一定期間内の最低値を大気中CO ₂ 濃度とみなして自動補正)	0 ~ 50°C	記載なし	4.5~14 V 40 mA		アナログ / デジタル	
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC24V	3VA以下	DC 1~5V リニア特性	3 min以
ダクト用CO ₂ 濃度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC24V	3VA以下	DC 1~5V リニア特性	
ネオセンサ 室内用CO ₂ 濃度・温度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 70°C	AC24V	3VA以下	DC 1~5V リニア特性	3 min以
シーリングセンサ 天井用CO ₂ 濃度・温度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-10 ~ 65°C	AC24V	3VA以下	DC 1~5V リニア特性	3 min以
CO ₂ 湿度温度変換器	単光源二波長方式でCO ₂ 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	-5 ~ 55°C	-30 ~ 60°C	18~35VD < 2W		0~5/10V、2および3チャンネルモデル	
CO ₂ 変換器	単光源二波長方式でCO ₂ 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	-20 ~ 60°	-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
CO ₂ 湿度温度変換器	単光源二波長方式でCO ₂ 吸収波長と基準波長の両方を計測し、常時補正	0 ~ 50°C	-40~+70° C -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:
XENSIV PAS CO ₂ Sensor	ABCアルゴリズム (一週間内の最低値を大気中CO ₂ 濃度 (400ppm) とみなして自動補正)	0 ~ 50°C			3~3.6V/10.8~13.2V		

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

オフィスビル内のバイオエアロゾル粒子対策においては、その挙動をリアルタイムで把握することが重要である。リアルタイム測定法には、細菌細胞、芽胞、毒素、ウイルスなど、ほとんどの生物細胞の蛍光に寄与する分子を認識する外膜レセプターや構造的特徴の利用が含まれる。ほとんどの生体細胞の蛍光に関与する主な分子として、アミノ酸、核酸、いくつかの補酵素（例：還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド（NADH）およびそのリン酸塩、フラビンモノヌクレオチド、フラビンアデニンジヌクレオチド、B6ビタミー）、ビタミン K およびその同族体が挙げられる。発光極大は励起波長に強く依存し、還元型トリプトファンと NADH は波長 300nm 以下の光で励起された場合、それぞれ 340nm と 450nm 付近に発光極大を持つことが知られている^{1), 2), 3)}。

蛍光エアロゾル粒子（Fluorescent Aerosol Particles、FAP）は生物由来の粒子（バイオエアロゾル粒子）の指標として使用されることがある。リアルタイム FAP の測定技術として、これまでに分光強度バイオエアロゾルセンサー（Spectral Intensity Bioaerosol Sensor: SIBS）や広帯域統合バイオエアロゾルセンサー（Wideband Integrated Bioaerosol Sensor: WIBS）が開発され、実用化されている。国内ではバイオエアロゾルセンサー（Bioaerosol Sensor: BAS）が開発され、その実用性の検証が進められている。筆者らが実施した大学研究室での検証において、BAS は蛍光エアロゾル粒子のみに応答することが確認された⁴⁾。本報では、BAS を用いた宮崎市内の 3 棟のオフィスビル（計 4 室）における 2024 年 10 月および 2025 年 1 月の室内蛍光エアロゾル粒子のリアルタイム測定結果について報告する。

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。

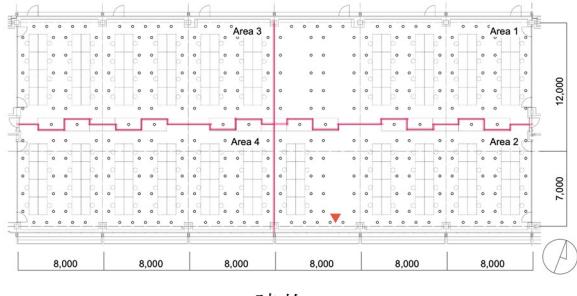
B1.2. 建築物における PM_{2.5} 測定

本報告における室内環境の測定については、表 3 に示す東京都内にある大学の建物 A、B の製図室及び学生交流施設である。それぞれ、平日昼間には多くの学生が利用しており、通常の事務所に近い使い方をしている。測定時期は、設計製図の締め切り前、期末試験前であったことからも、在室者数が多い時期を選択した。

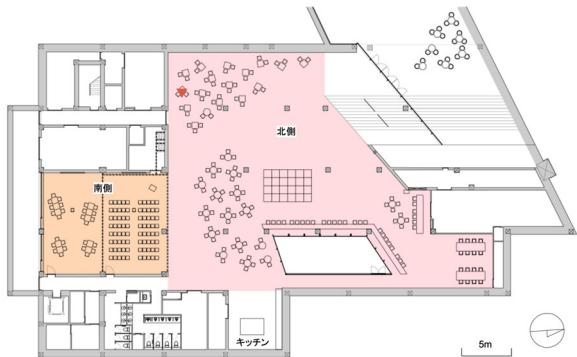
測定ポイントは、図 1 に示す▼の場所であり、製図室は南側の壁沿い、学生交流施設は排気口の近くであった。製図室の空調・換気設備は 4 系統に分かれており、対応する空間を Area1 ~4 と分割されている。空調換気設備は床吹出しであり、各エリアに定格風量 4,200 m³/h のパッケージ空調機が 2 台、定格風量 1,500 m³/h の全熱交換器が 1 台設置されている。一方、学生交流施設においては、北側は利用者の会話・交流が盛んであり、南側は個々人の利用が目立った。空調換気設備は、空調機と換気設備を組み合わせたものである。

表 3 実測対象建物の概要

建物	A		B	
用途	製図室		学生交流施設	
測定日	2025/1/28	2025/1/29	2025/1/30	2025/1/31
床面積	912 m ²		750 m ²	
空調	PAC+HEX		AHU+HEX	
居住人数	60	41	80	59



建物 A



建物 B

図 1 測定対象建物の平面と計測ポイント

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)、AQGuard (PALAS) 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センサーに関するヒアリング調査

2024 年 12 月に、国内で CO₂センサーの製造・販売を行っているメーカーの担当者に対し、対面形式およびオンライン会議形式、E メールでヒアリング調査を実施した。調査では、以下の項目について聴取を行った。

- ・自動校正機能の有無およびその運用実態
- ・ゼロガス校正の頻度とドリフト傾向

・不具合事例の実態とその要因

・トラブル発覚時の経緯と対応策

現在販売されている対象のセンサーは、主に非分散型赤外線吸収方式 (NDIR) を採用しており、建物と分離された可搬式の測定機器ではなく、建築設備として BEMS に接続され、室内環境の監視や換気制御に利用されることを前提としている。

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

宮崎市内の 3 棟のオフィスビル (A～C ビル) にある 4 室 (A ビルの 2F・8F, B ビルの 3F, C ビルの 6F) を対象に、2024 年 10 月 22 日・23 日、および 2025 年 1 月 29 日・30 日に測定を実施した。測定対象ビルの測定対象室床面積と空調方式を表 4、測定対象ビルの外観と測定風景を写真 3-1～写真 3-4 に示す。

表 4 測定対象室床面積と空調方式

	Aビル		Bビル	Cビル
	2F	8F	3F	6F
床面積 m ²	537	540	225	173
空調方式	AHU+duct	AHU+duct	AHU+duct	AHU+duct

AHU:エアハンドリングユニット, duct:ダクト



写真 3-1 A ビル



写真 3-2 Bビル



写真 3-3 Cビル



写真 3-4 測定風景

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 時間であった。また、BAS による測定と並行して、バイオエアサンプラーおよび SCD 培地を用いた浮遊細菌の測定を 5 分間隔で実施した。さらに、浮遊細菌の測定時に在室者数をカウントした。

C. 研究結果および考察

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、室内空気質をモニタリングする際に課題となる項目を解決すると思われる論文について調査を行った。

García ほか⁵⁾においては、ローコストセンサーのレビューを行い、ローコストセンサーの長所、短所を整理するとともに、それぞれの測定項目ごとの機器の特性について検討を行った。IAQ の健康への影響に対する意識によりこのようなセンサーを活用することは有意義であること、測定精度については問題がある場合があるが、常時モニタリングすることにより、発生源の特定や警告システムと組みわせることの意義があり、今後のセンサーの開発の発展が期待されていることが述べられている。さらには建物だけではなく、ウェアラブルデバイスとすれば個人暴露への展開も期待されることも述べられている。

Chojer ほか⁶⁾は、学校においてローコストセンサーによる PM_{2.5} 濃度のモニタリングを行ったが、どの測定機器も低濃度では良いデータを得ることができなかった。そこで、機械学習を用いてデータの修正を行ったところ、精度の良い測定器と良い相関を得ることができた。このように、生データを使用するのではなく、データの修正を加えることによって、実環境でも有効なデータにすることが可能であることを示したものである。

Bousiotis ほか⁷⁾は、PM センサーを用いて、

室内濃度を多点において連続測定することにより、室内 PM 濃度の特徴を検討するとともに、濃度の上昇が Positive Matrix Factorisation (PMF) 手法を用いて、それらの発生源について推定することを可能したものである。モニタリングデータを活用することにより、暴露要因まで拡張することを述べたものである。

Pei ほか⁸⁾は、事務所建築物において PM センサーを 6 ヶ月設置して、さらにエアハンドリングユニット内に設置することで、機械換気設備のエアフィルタの有効性について確認している。さらに、CO₂センサーの組み合わせにより、居住者の活動に伴う粒子の排出も容易に検出できることを確認している。よって、複数の要素を組み合わせることにより、空間における発生源の推定を行うことの有効性を述べているものである。

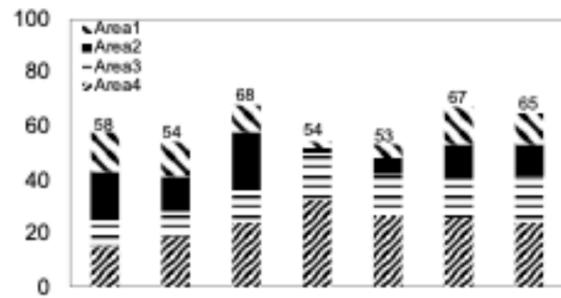
Chojer ほか⁹⁾は、ローコストセンサーのデータ精度とロバスト性は依然として重要な課題であるため、独自の PM_{2.5}、CO₂、CO、O₃、NO₂、温度、相対湿度を含む多汚染物質モニタリング装置を開発した。精密な測定機器のデータと比較検討して、フィールドにおいて使用に耐えうるものとなることを確認している。

以上のように、PM_{2.5}を中心とした近年の技術革新があるため、様々なセンサーが世に出るようになっている。一方でその精度には課題となることが多いが、その課題解決及び複数環境要素の計測により、発生源、制御に活かす取り組みがなされる傾向であった。

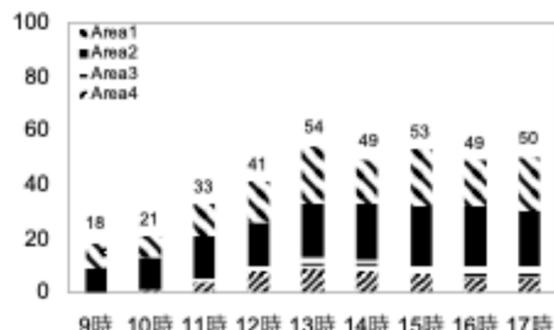
C1.2. 建築物における PM_{2.5} 測定

図 2 にそれぞれの測定日における在室者数を示す。建物 A の 1 日目については、60 名前後が、その 2 日目、建物 B においては、昼にかけて人数が増えている状況となった。

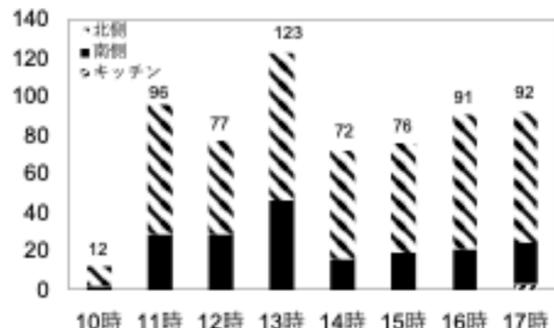
表 5 に、建物 A、B における 1 日目、2 日目の平均した PM_{2.5} 濃度の結果を示す。いずれの測定場所においても、また測定機器においても、大気の環境基準値である 1 年平均値が 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回っていた。絶対値については、機器によってばらつきがあり、建物 B の 1 日目は AQGuard を除いて、総じて高い値となっていた。



A_1



A_2



B_1

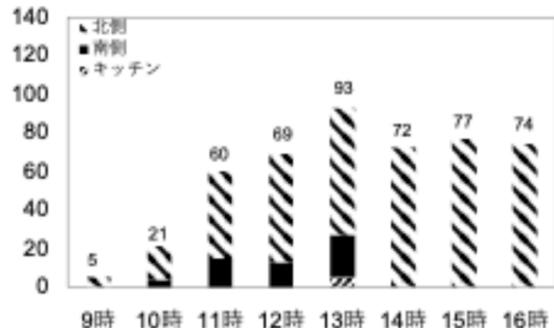


図 2 各測定日における在室者数

表 5 各測定器の PM_{2.5} 濃度結果 [μg/m³]

	DustTrak II	PS-2	PMT-2500	AQGuard	LD-5R	3444
A_1	2.7	1.5	1.6	6.8	1.3	1.0
A_2	3.6	2.3	1.7	3.6	3.3	0.1
B_1	10.5	3.1	3.1	1.9	3.6	3.0
B_2	3.3	1.6	1.6	1.7	1.4	1.4

図 3 に各測定日の PM_{2.5} 濃度の経時変化を示す。建物 A の 1 日目、建物 B の 2 日目においては、それぞれの測定器が同様の濃度の上昇、減少を示しており、絶対値は異なるものの、経時変化は同じ傾向を表している。一方、低濃度の測定日においては、いずれの測定器も値の変化が少ない状況であった。

図 4 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、個数濃度分布とは傾向が異なる。よって、PM_{2.5} 質量濃度を評価するには、粒径 2.5 μm より大きい粒子はカットして計測することになっていることから、粒径 0.2 μm のピークを考慮に入れることが重要である。

PM_{2.5} の測定方法については、大気環境に関するものが参考となる¹⁰⁾。これによれば、環境大気中に浮遊する粒子状物質のうち空気動力学的特性が粒径 2.5 μm で 50% のカット特性をもつ分粒装置により分粒された粒子状物質について、ロウボリウムエアサンプラーを用いてフィルタ上に採取し、精密天秤によって質量を測定するものである。フィルタ上に捕集された粒子へのガス状物質の吸着や再揮発など様々な妨害要因や不確定要素を含んでおり、厳密な測定の困難さが指摘されている。また、秤量を行わない相対濃度計として、1 時間ごとの測定が可能な β 線吸収法、光散乱法、圧電天秤法が環境基準を評価する方法として存在する。

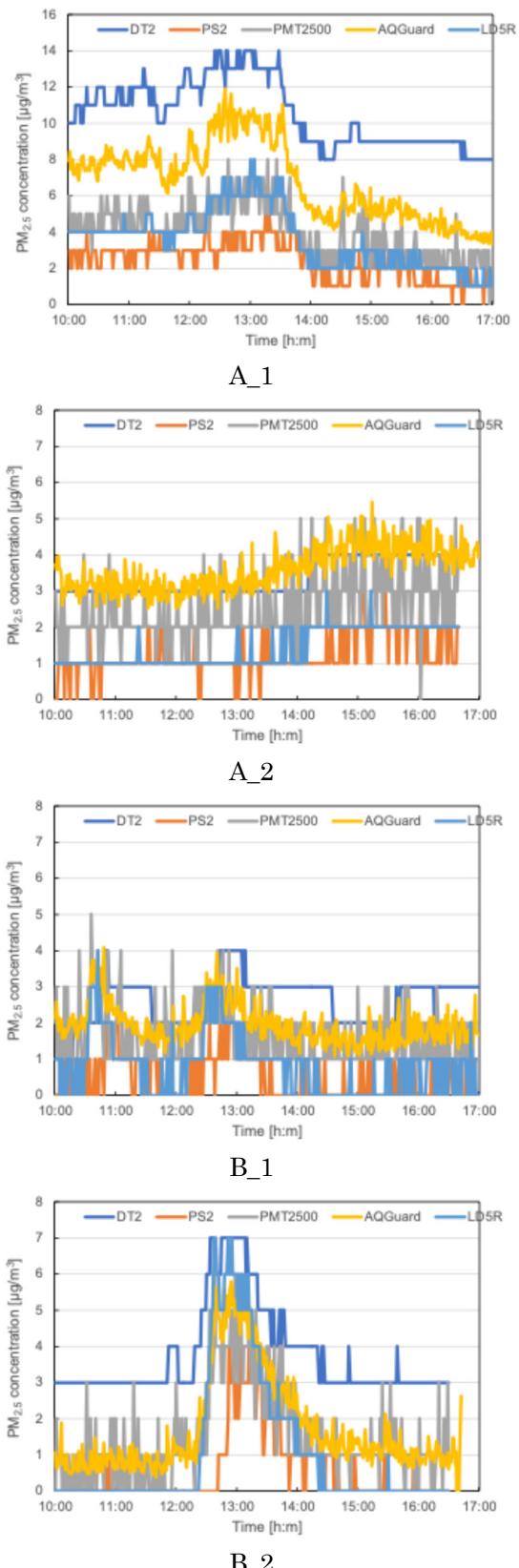
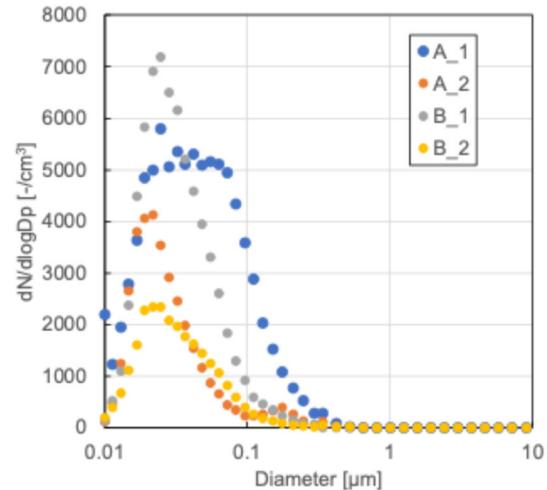


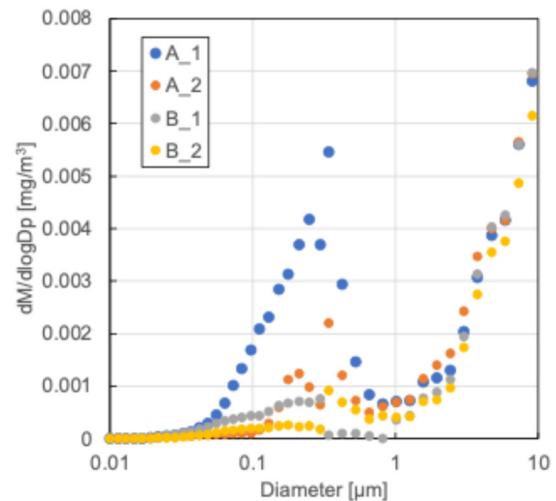
図 3 各測定日の PM_{2.5} 濃度の経時変化

今回使用した室内でも使用可能な測定器としては、光散乱方式であり、測定器によっては、粒径 $2.5 \mu\text{m}$ の粒子をカットするインパクタを備えて、 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子のみを計測しているもの、全ての粒子を検出しているものがある。また、光散乱方式は、レーザーの波長により散乱強度を得られる粒径が限られており、 $0.1 \mu\text{m}$ から $0.3 \mu\text{m}$ 以上の粒子のみを検出するのが一般的であり、それ以下の粒子は検出できていない。よって機器によっては、校正係数値を設定することで、これらの要因を補正することを行う機器もある。これらの測定機器については、粒径 $0.2 \mu\text{m}$ のピークの粒子の粒径の大きい側のみを計測しているに過ぎない。

図 4 の粒径別質量濃度分布から、各測定日の粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子の濃度は変わらないものの、粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 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。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 A の 1 日目、2 日目、建物 B の 1 日目、2 日目は、 4.0 、 1.5 、 0.9 、 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、前述の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度計とは傾向が異なることになった。 $\text{PM}_{2.5}$ 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。



a) 個数濃度



b) 質量濃度

図 4 各測定日における粒径別個数・質量濃度

C2. CO₂センサーの不具合事例に関するヒアリング調査とその分析

C2.1. センサー仕様と運用状況

対象メーカーでは、現在販売しているセンサーに自動校正機能は搭載されておらず、年1回のゼロガス校正を推奨している。かつては自動校正機能付きセンサーを販売していたが、以下の理由により現在は廃止されている。

- ・実環境において CO₂濃度が大気濃度まで下がらないことが多く、自動校正が誤った補正を行う
- ・使用者が校正アルゴリズムの特性を理解しておらず、不適切な使用例が多い
- ドリフト幅は、連続運転下でおよそ ±150ppm/年程度とされるが、詳細な経年劣化データは蓄積されていない。

C2.2. 不具合事例の分類と詳細

過去 20 年間で蓄積された不具合事例から、典型的なパターンを以下の 3 種類に分類できる：

- ・物理的故障（基板腐食・結露など）
- ・表示値が実際より高くなるケース
- ・表示値が実際より低くなるケース（自動校正の誤補正）

以下に代表的な事例を示す。

駐車場での基板腐食

排気ガスに含まれる腐食性成分により基板が腐食し、センサーが 1 年程度で故障。調査の結果、腐食対策として基板のコーティングが推奨された。

屋外ダクトでの結露

還気ダクト内に設置されたセンサーが、外気由来の結露により短期間で機能停止。点検時にセンサー内部の結露が確認され、断熱処理や屋外設置回避の重要性が再認識された。

臨海部オフィスでの表示値過大

設置から 1 年以内で、98 台中 71 台において、実測値（660ppm）に対して 1,530ppm と極端に高い表示値が記録された。環境空気中の粒子や化学物質による受光部の汚染が原因と推定された。ゼロガス校正により修正された。

自動校正による過補正（駐車場系統）

給排気ファンが停止された環境で、1 日の最低 CO₂濃度が 400ppm に達しないまま自動校正が行われ、実際より約 300ppm 低い値が表示された。

映画館での誤補正

人が不在の状態でも CO₂濃度が常時 600ppm 以上であったため、センサーが常に高濃度と誤認し、自動補正が誤作動。実際の濃度より 200ppm 以上低く表示された。

C2.3. 考察

本調査から、CO₂センサーの信頼性には設置環境と運用方法が大きく影響することが明らかとなった。特に、以下の 3 点が重要である。

1) センサー異常の検出可能性

高表示やセンサー故障は比較的発見しやすいが、過補正による低表示は発見が困難であり、換気制御が不十分なまま運用されるリスクがある。

2) 設置環境の把握

排ガス、結露、粉塵、空気汚染などの要因は NDIR センサーの性能に影響を与えやすいため、適切な保護措置および設置位置の選定が重要である。

3) 自動校正機能のリスク

自動校正機能は便利である一方、濃度変化が少ない環境では誤補正が生じやすく、制御精度を損なう可能性がある。特に人が常時在室している空間や換気停止状態では注意が必要である。

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

C3.1. 蛍光エアロゾル粒子濃度

一例として、図5に2025年1月に測定を行ったCビルの結果を示す。この図では、粒径別($<2.0\mu\text{m}$ 、 $2.0\text{--}5.0\mu\text{m}$ 、 $>5.0\mu\text{m}$)の総粒子状物質濃度(Total Particulate Matter、TPM)および蛍光エアロゾル粒子濃度(Fluorescent Aerosol Particles、FAP)の経時変化を示している。結果として、粒径が大きくなるにつれてTPMは低下する一方で、FAPの濃度は上昇する傾向が見られた。また、 $>5.0\mu\text{m}$ のTPMのほとんどがFAPであることが確認された。この傾向は、筆者らが以前に報告した病院手術室での測定結果とほぼ一致している¹¹⁾。

C3.2. 全粒子を占める蛍光粒子の割合

図6に、測定対象の3ビル4室における2024年10月および2025年1月の測定結果から算出した、TPMに占めるFAPの割合を示す。季節間の差の有意性を検討するため、統計ソフトIBM SPSS Statistics Ver. 29を用いてマン・ホイットニーU検定を実施した。

FAP/TPMの割合に関して、Aビル8Fの $>5.0\mu\text{m}$ およびCビルの $2.0\text{--}5.0\mu\text{m}$ では有意な差は認められなかつたが、その他の粒径範囲では1月のほうが10月よりも有意に高かつた($p<0.001$)。 $2.0\text{--}5.0\mu\text{m}$ の中央値を見ると、10月は20%以下(Aビル2F:1%、Aビル8F:8%、Bビル:1%、Cビル:19%)であったのに対し、1月は30%(Aビル2F:17%、Aビル8F:31%、Bビル:27%、Cビル:28%)であった。また、 $>5.0\mu\text{m}$ のFAP/TPMの割合は、10月が81~93%であったのに対し、1月は90~94%とやや増加する傾向が見られた。一方で、FAP/TPM割合は季節を問わず0.5~1.0%は0.2%以下、1.0~2.0%は3%以下であった。

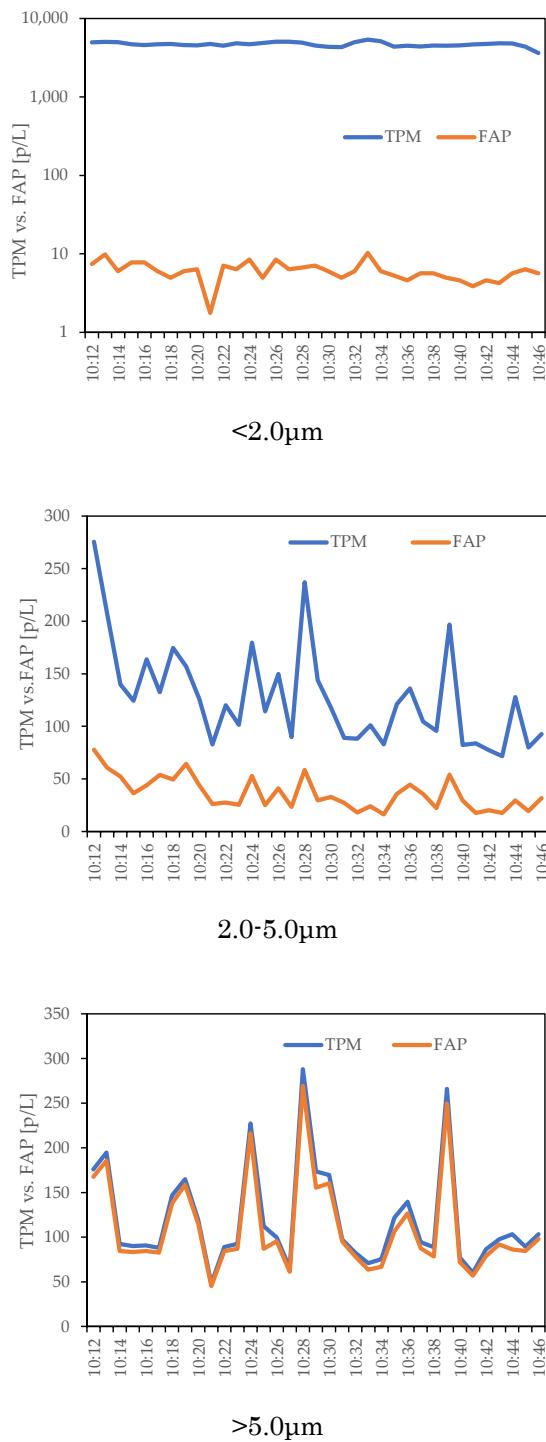


図5 粒径別蛍光エアロゾル粒子(FAP)と質(TPM)濃度の経時変化

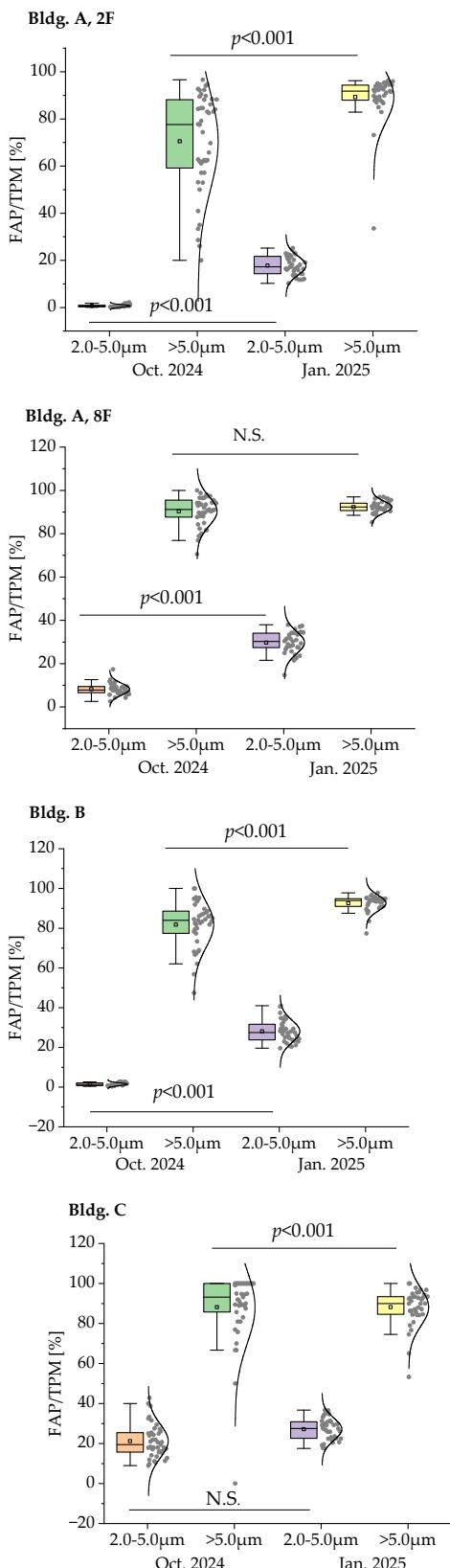


図 6 TPM に占める FAP の割合

C3.3. 荧光エアロゾル粒子と生菌（細菌）の関係

10月と1月において、粒径別FAP濃度と細菌濃度の相関、粒径別FAP濃度と在室者数の相関、細菌濃度と在室者数の相関を分析したが、いずれの組み合わせにおいても有意な相関は認められなかった。

C3.4. 室内と屋外のFAP濃度の比較

別途で行った室内と屋外の浮遊FAP濃度の測定結果を図7に示す。図7に示す通り、屋外では粒径が小さいほどFAP濃度が高い傾向がみられた。一方、室内では粒径が大きくなるにつれてFAP濃度が高くなる傾向がある。<2μmおよび2-5μmの範囲では、屋外のFAP濃度が室内よりも有意に高かった。一方で、>5μmの範囲では、室内のFAP濃度が屋外よりも有意に高かった。

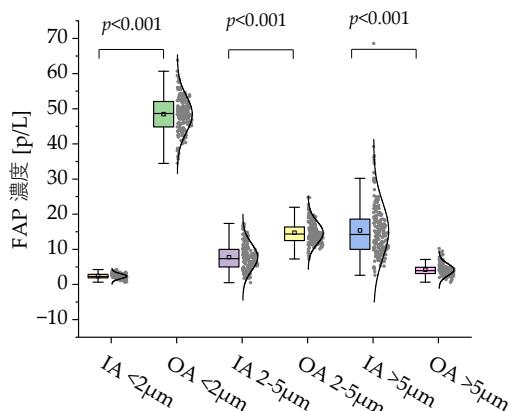


図7 室内と屋外のFAP濃度比較

C3.5. 考察

前述した通り、FAPは生物由来の粒子（バイオエアロゾル粒子）の指標として使用されることがある。FAPの主成分には、細菌、ウイルス、花粉、カビ、皮膚片、フケ、植物由来の有機物¹²⁾に加え、衣類の纖維、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残留物など、多岐にわたる¹³⁾。また、FAPの放出量は、在室者数やその活動、外気の影響、室内の温湿度環境などによって変動する。

Patraら¹⁴⁾は、大学の研究室を対象にWIBSを用いたリアルタイム測定を行い、居住環境や

換気条件の変化に伴う FAP の動態を調査した。その結果、実環境において FAP が TPM に占める割合が最大で約 90% に達する場合があった。本研究では、個数濃度に基づく FAP の割合の中央値は、2.0-5.0 μm で 20-30%、>5.0 μm で 81-94% であり、オフィス内においても FAP の存在割合が高いことが示された。

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 と細菌、FAP と在室者数、細菌と在室者数の間に有意な相関関係が認められた⁴⁾。また、Patra ら¹⁴⁾の研究では、3 μm 以上の FAP の質量濃度および粒径分布が、オフィス内の在室状況とともに変動することが確認されている。しかし、本研究では FAP、細菌、在室者数のいずれの間にも有意な相関関係が認められなかった。この結果から、実オフィス環境における FAP と細菌の関係を定量的に解明するには限界があることが示唆された。

E. 結論

E1. 空気環境に関する課題整理

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}を中心とした近年の技術革新があるため、様々なセンサーが世に出るようになっている。一方でその精度には課題となることが多いが、その課題解決及び複数環境要素の計測により、発生源、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。

E2. CO₂センサーを換気制御に用いる際の対策

CO₂センサーを換気制御に用いる際には、以下の対策が求められる。

- 定期校正の実施(ゼロガス、スパンガス校正)

- センサー表示値と独立した実測値との定期的な比較
- 異常な表示値が生じる環境の把握と対策(例:常時高濃度環境の回避)
- 経年による性能劣化を踏まえた定期的な機器更新の実施

これらの知見は、今後の CO₂センサー導入指針や、建築設備における換気制御ガイドラインの策定に資するものである。

E3. オフィスビルにおけるバイオエアロゾル粒子の測定

本研究では、BAS を用いて宮崎市内の 3 つのオフィスビル(計 4 室)において、2024 年 10 月および 2025 年 1 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。

- FAP/TPM の割合について、A ビル 8F の >5.0 μm および C ビルの 2.0-5.0 μm を除いた全ての対象室において、2.0-5.0 μm および >5.0 μm の割合は 1 月の方が有意に高かった ($p < 0.001$)。
- FAP/TPM の割合は、0.5-1.0 μm で 0.2% 以下、1.0-2.0 μm で 3% 以下、2.0-5.0 μm で 20-30%、>5.0 μm で 81-94% であった。
- 本研究では、FAP、細菌、在室者数の間に有意な相関関係は認められず、実オフィス環境の実測によってこれらの関係を定量的に解明するには限界があった。

注: 本研究成果の一部は、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にて発表した(参考文献 15)。

F. 研究発表

1. 論文発表

柳 宇: 浮遊微生物測定法の現状. 空気清浄, 第 62 卷, 第 2 号, 4-11. 2024.

2. 学会発表

- 柳 宇, 福嶋信彦, 永井秀康, 加野 稔: 内視鏡手術中におけるバイオエアロゾルの発生特性, 2024 年室内環境学会学術大会講演要旨集, 281-282. 2024.

- 2) 柳 宇, 金 熱, 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, 240–242, 2025.
- 3) 柳 宇, 永野秀明, 鍵直樹: バイオエアロゾルセンサーと人位置計測システムを用いたホット・スポットのリアルタイム検知, 2025 年日本建築学会大会学術講演梗概集, 2025. (印刷中)

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) 柳 宇: 浮遊微生物測定法の現状. 空気清浄, 第 62 卷, 第 2 号, 4-11. 2024.
- 2) Pan, Y.L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 150: 12-35, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>.
- 3) Li, J.K.; Asali, E.C.; Humphrey, A.E. Monitoring Cell Concentration and Activity by Multiple Excitation Fluorometry. *Biotechnol. Prog.*, 7: 21-27, 1991, <https://doi.org/10.1021/bp00007a004>.
- 4) 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.
- 5) Milagros Ródenas García, Andrea Spinazzé, Pedro T.B.S. Branco, Francesca Borghi, Guillermo Villena, Andrea Cattaneo, Alessia Di Gilio, Victor G. Mihucz, Elena Gómez Álvarez, Sérgio Ivan Lopes, Benjamin Bergmans, Cezary Orlowski, Kostas Karatzas, Gonçalo Marques, John Saffell, Sofia I.V. Sousa: Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications, *Applied Spectroscopy Reviews*, VOL. 57, NOS. 9–10, 747–779, 2022.
- 6) H. Chojer, T.B.S. Branco, F.G. Martins, M.C.M. Alvim-Ferraz, S.I.V. Sousa: Can data reliability of low-cost sensor devices for indoor air particulate matter monitoring be improved? – An approach using machine learning, *Atmospheric Environment*, Volume 286, 119251, 2022.
- 7) Dimitrios Bousiotis, Leah-Nani S. Alconcel, David C.S. Beddows, Roy M. Harrison, Francis D. Pope: Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors, *Environmental International*, 174, 107907, 2023.
- 8) Gen Pei, James D. Freihaut, Donghyun Rim: Long-term application of low-cost sensors for monitoring indoor air quality and particle dynamics in a commercial building, 79, 107774, 2023.
- 9) H. Chojer, P.T.B.S. Branco, F.G. Martins, S.I.V. Sousa: A novel low-cost sensors system for real-time multipollutant indoor air quality monitoring – Development and performance, *Building and Environment*, 266, 112055, 2024.
- 10) 環境省: 微小粒子状物質曝露影響調査報告書, 2007
- 11) 柳 宇, 福嶋信彦, 永井秀康, 加野 稔: 内視鏡手術中におけるバイオエアロゾルの発生特性, 2024 年室内環境学会学術大会講演要旨集, 281-282. 2024.
- 12) A.J. Prussin, L.C. Marr, Sources of airborne microorganisms in the built environment, *Microbiome* 3 (2015) 78, <https://doi.org/10.1186/s40168-015-0144-z>.

13) 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, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06304>.

14) 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.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108249>

15) 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, 240–242, 2025.