

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 東京工業大学 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的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、建築物衛生法の空気環境、空調設備の維持管理、特に定期的実施項目について課題整理を行うとともに、空気環境測定の定期測定に適用することが可能な連続測定装置に関する既往研究の調査を行った。

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も含めて、制度管理のための校正の方法などについて調査を行った。

さらに、浮遊微生物測定について現状の測定方法をまとめるとともに、迅速測定について現状の把握とその課題について示した。

A. 研究目的

A.1 空気環境に関する課題整理

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。なお、2022年から、一酸化炭素の基準値として10 ppm以下であるところが、6 ppm以下であることと、20 ppm以下の特例が削除された。さらに温度については、17℃以上が、18℃以上となった。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的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、建築物衛生法の空気環境、空調設備の維持管理、特に定期的実施項目について課題整理を行うとともに、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	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℃以上 28℃以下 (18℃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)

A.2 CO₂ 濃度の測定方法

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、古くから活用されており、居住者の健康性・快適性と建物で消費されるエネルギーの削減を両立するために使用されている。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。そこで、市販されている空調システム用の CO₂ センサおよび可搬式 CO₂ 計測機器の仕様を調査し、一覧表を作成し、衛生的な室内環境のモニタリングを行う上での課題を整理した。

A.3 微生物の分類と測定法

在来、生物界を動物界 (Kingdom Metazoa)、植物界 (Kingdom Metaphyta) に分類していた。19 世紀の後半に Haeckel (1866) は動物界、植物界から微生物を分離し、原生生物界 (Kingdom Protista) として独立させる 3 界分類を提唱した。また、原生生物界の微生物はその生態によって分類されている。現在の教科書は、建築環境中の微生物を細菌、真菌、ウイルスを分類することもあるが、近年、遺伝子レベルの解析を基にした分子系統分類が確立されている¹⁾。図 1 に生物の進化系統樹²⁾を示す。

細菌は真正細菌、真菌は真核生物に属している。この系統樹の分類は 16S rRNA の塩基配列に基づいているため、ウイルスが含まれていない。ウイルスは共有の祖先ゲノムに含まれている。

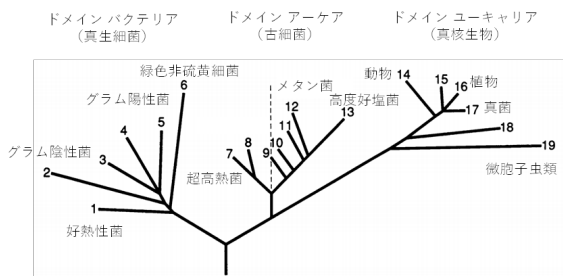


図 1 生物の進化系統樹

浮遊微生物の測定法は、大きく培地を用いた生菌を測定する培養法と培地を用いない方法に大別される。培地を用いない方法には、バイオ

エアロゾルを迅速的に測定する迅速法とバイオエアロゾルをリアルタイムで測定する方法がある (図 2)。

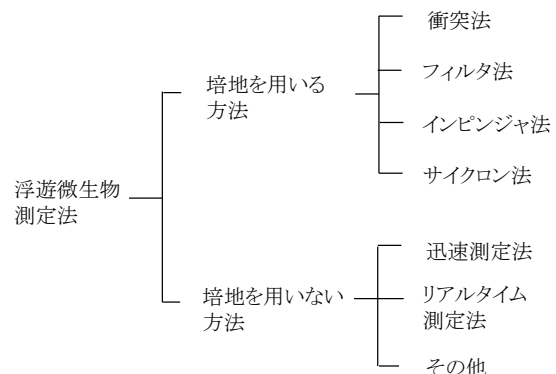


図 2 浮遊微生物測定法の分類

培養法では、浮遊微生物粒子のサンプリングと培養の 2 段階の作業が必要になる。サンプリング方法には、衝突法、フィルタ法、インピンジャ法、サイクロン法などがある^{3,4)}。また、真菌測定は衝突法とフィルタ法は ISO の規格となっている^{5,6)}。これらの方法はターゲット微生物の測定に適しているが、サンプリング後に培養を行う必要があるため、結果が得られるまで数日間がかかる。また、培地法では培養できる生菌を測定できるが、培養不可能な微生物 (Viable but non culturable, VBNC) や、選択した培地で増殖しない生菌が多くあり、全微生物のごく一部しか測定できない。Amann ら⁷⁾は、過去の研究をレビューし、培養できる細菌は、海水で 0.001~0.1%^{8,9,10)}、淡水で 0.25%¹¹⁾、中栄養湖で 0.1~1%¹²⁾、汚染されていない河口水域で 0.1~3%⁸⁾、活性汚泥で 1~15%^{13,14)}、堆積物で 0.25%¹¹⁾、土壌で 0.3%¹⁵⁾であることを明らかにした。

培地、とりわけ選択培地を用いた場合では、ターゲットの生菌の種類を同定することが可能になる反面、サンプリング、培養、計数、同定などの一連の作業に細菌では 2 日間、真菌では 5 日間以上の時間を要するため、測定現場で結果を知ることができない欠点もある。近年、PL (product liability) 法、HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) システムに基づく衛生管理方式の導入のほか、2001 年に

米国で起こった炭疽菌の芽胞に汚染された郵便物の事件は、微生物のリアルタイム測定の必要性を高めた¹⁶⁾。バイオテロ対策などから、空气中浮遊微生物の迅速測定またはリアルタイムでの測定が強く望まれていた。さらに、感染性バイオエアロゾルによって引き起こされる呼吸器感染症においては、バイオエアロゾル粒子濃度の急上昇場所（ホットスポット）をリアルタイムで検知・特定することで、より迅速な緩和措置が可能となる。

培地を用いない方法は微生物を培養して測定するのではなく、その細胞の特性を利用する測定方法であり、長時間の培養が不要なため短時間またはリアルタイムで結果が得られるという特徴がある。

B.研究方法

B1 空気環境に関する課題整理

B1.1. 建築物衛生法の空気環境に関する課題整理

建築物衛生法の施行令、省令、告示、通知について、空気環境に関する測定と空調設備の点検について内容を抽出し、特に定期的に確認する事項についてその課題について整理を行った。

B1.2. 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、関係する論文の調査を行った。

B2 CO₂濃度測定センサの原理

CO₂センサは、CO₂の波長吸収や電気化学反応の特性を利用することで気中濃度を検出する。その主な方式としては、光学式、電気化学式、半導体式がある。

(1) 光学式

CO₂が赤外線の特徴波長を吸収する特性を利用し、特定波長の赤外線を光源から発生させ、光路におけるCO₂の吸収による光の強度の減少を測定することで、濃度を検出する方式である。

非分散赤外線検出（non dispersive infrared:

NDIR)方式は、高精度で広い測定範囲を持ち、他のガスの影響を受けにくい他、メンテナンスの容易さ、小型化と低価格化が可能であるという利点から、一般的な室内環境のCO₂モニタリングに最も広く普及している。経済産業省および産業用ガス検知警報器工業会が策定した新型コロナウイルス感染症防止対策として「換気の悪い密閉空間」を改善することを目的に、換気が十分に行われているかどうかを確認するための方法として二酸化炭素濃度測定器が使用される場合においても、測定器を選定する際に最低限要求される仕様等の基準を定めるガイドラインにおいても検出原理がNDIR方式等の光学式である測定器が推奨されている¹⁷⁾。

(2) その他の測定法

電気化学式は、CO₂が電解質溶液中で電気化学反応を起こす性質を利用している。電極間の電位差や電流値の変化からCO₂濃度を測定する。小型化が可能で、低濃度のCO₂測定に適しているが、他のガスの影響を受けやすく、定期的なキャリブレーションが必要となる。

光音響分光法は、CO₂分子が赤外線を吸収した後、熱に変換される性質を利用している。断続的に赤外線を照射し、発生する音波をマイクロフォンで検出する。音波の強度からCO₂濃度を算出する。高感度で応答速度が速いという利点があるが、装置が複雑で高価になる傾向がある。

(3) 市販されているCO₂センサの仕様

表2に各種空調システム用CO₂センサの仕様一覧、表3に可搬式CO₂計測機器の仕様一覧を示す。

NDIR方式のCO₂センサについては、光路の汚れ等による測定値のドリフトが課題として挙げられる。この課題について、一部メーカーでは、単光源二波長方式でCO₂の吸収波長と基準波長の両方を計測することで常時汚れによるドリフトを補正する方式があるが、ほとんどのセンサでは一定期間内の最小値を大気濃度として自動補正する方法がとられている。

表 2 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)
CO2 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)	± 50ppm/Year@1000ppm
CO2 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)	± 50ppm/Year@1000ppm
Sunrize		旭化成エレクトロニクス	NDIR方式	400~5000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
Sunlight CO2		旭化成エレクトロニクス	NDIR方式	400~5000 ppm	+/- (50ppm + 3% of reading)*	
S8		旭化成エレクトロニクス	NDIR方式	400~50,000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
K30		旭化成エレクトロニクス	NDIR方式	0~5,000 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)*	
ダクト用CO2濃度センサ	CY8100C1001	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
ダクト用CO2濃度センサ	CY1000C1000	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
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
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
CO ₂ 温度湿度変換器	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)
CO2変換器	GMD110	VAISALA	NDIR方式	~10,000ppm CO2 0~2,000ppm, 0~5,000ppm, または10~10,000ppm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
CO ₂ 温度湿度変換器	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
XENSIV PAS CO2 Sensor	PASCO2V01BUMA1	infineon	光音響分光法	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

製品名	自動校正手法	動作温度	保管温度	入力電圧	平均消費電力
CO2 センサモジュール	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	-20 ~ 50°C	AC/DC 24 0.5W / Max. 2.0W	
CO2 センサモジュール	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	-20 ~ 50°C	AC/DC 24 0.5W / Max. 2.0W	
Sunrize	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	記載なし	3.05~5.5	34 uA
Sunlight CO2	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	-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CO2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
K30	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	記載なし	4.5~14 V	40 mA
ダクト用CO2濃度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC24V	3VA以下
ダクト用CO2濃度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 50°C	AC24V	3VA以下
ネオセンサ 室内用CO2濃度・温度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-20 ~ 70°C	AC24V	3VA以下
シーリングセンサ 天井用CO2濃度・温度センサ	記載なし	0 ~ 50°C	-10 ~ 65°C	AC24V	3VA以下
CO ₂ 温度湿度変換器	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	-30 ~ 60°C	18~35VDC	< 2W
CO2変換器	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	-40 ~ 60°C	20~30V DC	
CO ₂ 温度湿度変換器	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	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
XENSIV PAS CO2 Sensor	ABCアルゴリズム (一週間内の最低値を大気中CO2濃度 (400ppm) とみなして自動補正)	0 ~ 50°C		3~3.6V/10.8~13.2V	

製品名	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
CO2 センサモジュール	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	アナログ 0 ~ 5V		ビル換気向けに約10年間 (測定環境次第)		
Sunrize				旭化成、Aranel 4	*: 15-35°C, 0-85%RH, After three ABC period
Sunlight CO2			Lifetime < 15 years		*: 15-35°C, 0-85%RH, After three ABC period ABC periodは調整可能
S8	PWM / デジタル				
K30	アナログ / デジタル			おんどり	*: After three ABC period
ダクト用CO2濃度センサ	DC 1-5V リニア特性	3 min以下	自動校正を行います、少なくとも3年に1度CO2濃度校正を実施してください。		
ダクト用CO2濃度センサ	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	DC 1-5V リニア特性	3 min以内	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CO2濃度・温度センサ	DC 1-5V リニア特性	3 min以内	1回/年のゼロガス校正を実施してください。		
CO ₂ 温度湿度変換器	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	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
CO ₂ 温度湿度変換器	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			Lifetime 10 years		

表3 可搬式 CO₂計測機器の仕様一覧

製品名	型式	メーカー	測定方式	測定範囲	測定精度
CO2・温度・湿度 データロガー	TR-76Ui	T & D	NDIR方式	0~9,999 ppm	± (50ppm + 読み値の5%) at 5,000ppm以下
Aranet 4 Home	TDSPC0H3	aranet	NDIR方式	0~9,999 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)
Aranet 4 Pro	TDSPC0U3	aranet	NDIR方式	0~9,999 ppm	+/- (30ppm + 3% of reading)
3密見える化センサ		旭化成	NDIR方式	400~5,000ppm	± (測定値の3% + 30)ppm
testo 535 - CO2計	0563 0535	testo	NDIR方式	0~10,000 ppm	± (100ppm + 測定値の5%)
IAQモニター	Model 2212	日本カノマックス	NDIR方式	0~5,000 ppm	指示値の±3または±50ppmのいずれか大きい方 (20°Cにおいて)
オートビルセットⅢ	Model 2100	日本カノマックス	NDIR方式	0~5,000 ppm	指示値の±3または±50ppmのいずれか大きい方 (20°Cにおいて)
BiFlow	BMK-504	フローシステム	NDIR方式	300~2,000ppm、0~5,000ppm	± (測定値の3% + 30)ppm
Chicco-iino (ちっこいーの)	CS-1	柴田科学	NDIR方式	360~4,000 ppm	±120 ppm±1 digit
室内環境測定セット	IES-5000R LD-2I	柴田科学	NDIR方式	0~10,000 ppm	0~2000ppm : ±50ppm 2001~5000ppm : ±100ppm

製品名	長期安定性 (ドリフト)	自動校正手法	動作温度
CO2・温度・湿度 データロガー	記載なし	ABCアルゴリズム (180時間内の最低値を大気中CO2濃度 (400ppm) とみなして自	0 ~ 45°C
Aranet 4 Home	記載なし	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
Aranet 4 Pro	記載なし	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
3密見える化センサ	記載なし	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)	0~80°C
testo 535 - CO2計	記載なし	記載なし	0 ~ 50°C
IAQモニター	記載なし	記載なし	5~40°C
オートビルセットⅢ	記載なし	記載なし	記載なし
BiFlow	記載なし	記載なし	0 ~ 40°C
Chicco-iino (ちっこいーの)	記載なし	記載なし	0 ~ 45°C
室内環境測定セット	記載なし	記載なし	5 ~ 45°C

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	使用されているセンサ	備考
CO2・温度・湿度 データロガー	記載なし							
Aranet 4 Home					100 sec (63%)		Sunrize	
Aranet 4 Pro					100 sec (63%)		Sunrize	
3密見える化センサ	0-35°C						Sunrize	サービス終了
testo 535 - CO2計	0 ~ 50°C							
IAQモニター	-20~60°C				約4.5秒 (90%応答, 校正キャップ使用時)			
オートビルセットⅢ	記載なし							
BiFlow								
Chicco-iino (ちっこいーの)	-20~65°C			USB形式 (micro B)	90 sec (90%)			
室内環境測定セット								

表 4 測定対象施設の概要

名称	測定対象	原理・特徴	測定装置の例
1) 直接測定法			
固相サイトメトリー	菌体	フィルターなどの担体に捕捉した細菌が発するシグナルを直接的に検出する。染色剤を選択することにより、生理活性等にかかわるシグナルを得ることもできるほか、自家蛍光を利用することもある。また特定の細菌を選択的に検出するため、遺伝子プローブや抗体、また蛍光標識したファージなどを用いることがある。検出・測定装置として、蛍光顕微鏡やレーザー顕微鏡などを含む、種々の光学検出・測定装置を用いる。	蛍光顕微鏡 レーザーキャニング サイトメーター等
フローサイトメトリー	菌体	流路系を通過する細菌が発するシグナルを直接的に検出する。染色剤を選択することにより、生理活性等にかかわるシグナルを得ることもできるほか、自家蛍光を利用することもある。また特定の細菌を選択的に検出するため、遺伝子プローブや抗体、また蛍光標識したファージなどを用いることがある。検出・測定装置として、種々の光学検出・測定装置を用いる。	フローサイトメーター等
2) 間接測定法			
免疫学的方法	抗原	細菌がもつ抗原に特異的な抗体を反応させ、発色や蛍光を目視やマイクロプレートリーダーなどで測定する。簡便なものには免疫クロマトグラフィーがある。	免疫クロマトグラフィー マイクロプレートリーダー
核酸増幅法	核酸	微生物がもつ核酸を、対象とする微生物に特異的なプライマーを用いて増幅し、検出する。定量的 PCR 法を用いることにより、定量も可能である。	電気泳動装置 定量的 PCR 装置
生物発光法・蛍光法	ATP 等	菌体内の ATP 等を酵素反応による発光現象・蛍光現象をもとに測定する。	発光測定器 蛍光測定器
マイクロコロニー法	増殖能 (マイクロコロニー)	コロニー形成初期のマイクロコロニーを検出・計数する。平板培養法と同じ培養条件(培地組成、温度等)を使用できる。	蛍光顕微鏡等
インピーダンス法	増殖能 (電気特性)	細菌が増殖の際に培地成分を利用し産生する代謝産物の増加により生じる電気特性の変化を利用する。	電気計測器
ガス測定法	増殖能 (ガス産生等)	細菌の増殖に伴う二酸化炭素の産生や酸素の消費等のガス量の変化を利用する。	ガス測定器 培地の呈色反応
脂肪酸分析法	菌体脂肪酸	細菌の種類によって菌体脂肪酸組成が異なることを利用する。	ガスクロマトグラフィー
赤外吸収スペクトル測定法	菌体成分	菌体に赤外線を照射し、その赤外吸収スペクトルパターンを利用する。	フーリエ変換赤外分光 光度計
質量分析法	菌体成分	菌体成分を質量分析計により測定し、データベースと照合して解析する。	質量分析計
フィンガープリント法	DNA	試料から抽出した DNA を制限酵素で切断し、DNA 断片の泳動パターンを利用する。データベースと照合することにより同定が可能である。また T-RFLP 法では群集構造解析が可能である。	電気泳動装置
ハイスループット・シーケンシング	核酸	試料中に存在する多種多様な細菌から抽出した核酸の配列を決定し、その情報をもとに群集構造を解析する。	シーケンサー等

注) PCR: ポリメラーゼ連鎖反応 T-RFLP: 末端標識制限断片長多型分析

B.3 迅速測定法¹⁸⁾

迅速測定法は一度サンプリングをしてから分析するため、現状では数分～数十分程度の時間を要し、リアルタイム法とは異なる。迅速測定法には直接測定法と間接測定法がある(表 4)¹⁹⁾。直接測定法の測定対象は菌体であり、固相サイトメトリー法とフローサイトメトリー法がある。間接測定法の対象は表 4 に示す通り、抗原、核酸、ATP、増殖能、菌体脂肪酸、菌体成分、DNA 法がある。ここでは、現在使用されている迅速測定法の例について述べる。

B3.1. ATP 法

ATP (Adenosine Triphosphate、アデノシン 3 リン酸) 法は、菌中の ATP のルシフェリン・ルシフェラーゼ酵素反応時の光量を測定する方法である。ATP は生物の共通エネルギー物質で

あり、微生物 1 菌体当たりの ATP 量はほぼ同じであることから、ATP 量を測定することによって、微生物数を推定できるとされている²⁰⁾。ATP 法を応用した測定は、発光量を測定するのに一定量の菌量 ($10^3 \sim 10^4$ 個/mL) が必要であり、そのために、数分～数十分程度の時間要する。近年、ATP 法による空中微生物の測定ができるようになった

B3.2. 酵素活性の測定法

1970 年代以後、酵素活性を持つ細菌の迅速測定法が実用化されるようになった。また、細菌用自動機器法があり、振とう培養法が採用され、光学的に菌増殖に伴う濁度上昇を精密にモニタするものが多い。しかし、この方法では、数時間かかる²¹⁾。

近年では、有効な蛍光染色剤を使用すること

によって、測定時間を数分程度まで大幅に短縮できた。さらに、UV 励起と青色励起を使い分けによって、生菌と死菌の区別まで可能となる。

B3.3. そのほかの方法

前述した方法は主として原核微生物（染色体が核膜で覆われておらず、細胞質に DNA が直接露出している）である細菌を対象としている。一方、これらの方法では核膜に覆われた核を持つ真核生物である真菌の測定は難しい。そのため、真菌を加熱分解してからその蛍光物質を測定する方法があり、1 回の測定に 20 分程度の時間を要する。

B3.4. 迅速測定法の課題

前述したとおり、数十年前に比べ現在では多くの微生物迅速測定法が提案され実用化されている。ターゲット菌が分かれば適正な試薬を用いることで、生菌を測定することができる利点がある。一方、迅速測定法、とりわけ間接的な測定法は結果を得るまでの時間を短くできるが、生菌か死菌かの区別がつかない場合がある。すなわち、時間と感度の両立が難しいのは現状である。今後、迅速法においては検出時間の短縮化と感度の向上かが課題となっている。

C. 研究結果および考察

C1. 空気環境に関する課題整理

C1.1. 建築物衛生法の空気環境に関する課題整理

空気環境に関する測定と空調設備の点検に係る建築物衛生法の施行令、省令、告示、通知の中で、本研究に係る項目について、表 5 のように課題の整理を行った。

施行令の第二条においては、「湿度の調整」については夏期の除湿と冬期の加湿の両方ができる設備であることを明記することが必要と考える。加湿器の設置がない設備を空気調和設備と混同しないことが重要である。また、機械換気設備において「空気の浄化」について、外気導入を想定したガス状物質の浄化を意味するのか、エアフィルタにより浮遊粉じんも除去することを意味するのかを明確に定義することが重要である。建築物空気環境測定項目の中で、浮遊粉じんの定義について、粒径 10 μm より小さいものであることを測定の定義と同様となるように

明記することが必要である。

省令第三条の二において、測定項目について定義されているが、検知管など測定機器の種類ではなく、精度による規定の記載が好ましい。

また、「空気調和設備に関する衛生上必要な措置」として、汚れを確認すること、公示においてろ材、送風機、冷凍機などの検知するシステムについては、技術的に容易に可能な面もあるが、総合的に判断する項目が多く存在することから、全て自動で実施することは困難であるとも考えられる。しかし、検知するだけの項目については、技術の進展とともに適用可能となるものと考えられる。

表 5 空気環境に関する建築物環境衛生管理基準の定期測定に関する課題整理

内容	課題														
施行令 (建築物環境衛生管理基準) 第二条 イ 空気調和設備(空気を浄化し、その温度、湿度及び流量を調節して供給(排出を含む。以下この号において同じ。))をすることができる設備をいう。ニにおいて同じ。)を設けている場合は、厚生労働省令で定めるところにより、居室における次の表の各号の上 欄に掲げる事項がおおむね当該各号の下欄に掲げる基準に適合するように空気を浄化し、その温度、湿度又は流量を調節して供給すること。	「湿度の調整」について、冷却除湿だけではなく、「加湿」も含めて湿度調整とする。「加湿器」を設置基準にすることが明確になる。														
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>一 浮遊粉じんの量</td> <td>空気一立方メートル</td> </tr> <tr> <td>二 一酸化炭素の含有率</td> <td>百万分の六以下</td> </tr> <tr> <td>三 二酸化炭素の含有率</td> <td>百万分の千以下</td> </tr> <tr> <td>四 温度</td> <td>一 十八度以上二十 二 居室における温</td> </tr> <tr> <td>五 相対湿度</td> <td>四十パーセント以上</td> </tr> <tr> <td>六 気流</td> <td>〇・五メートル毎秒</td> </tr> <tr> <td>七 ホルムアルデヒドの量</td> <td>空気一立方メートル</td> </tr> </tbody> </table>	一 浮遊粉じんの量	空気一立方メートル	二 一酸化炭素の含有率	百万分の六以下	三 二酸化炭素の含有率	百万分の千以下	四 温度	一 十八度以上二十 二 居室における温	五 相対湿度	四十パーセント以上	六 気流	〇・五メートル毎秒	七 ホルムアルデヒドの量	空気一立方メートル	浮遊粉じんの定義を粒径 10μm をカットした粒子を対象とすることを明記するか。 今後の PM _{2.5} も見据えて。
一 浮遊粉じんの量	空気一立方メートル														
二 一酸化炭素の含有率	百万分の六以下														
三 二酸化炭素の含有率	百万分の千以下														
四 温度	一 十八度以上二十 二 居室における温														
五 相対湿度	四十パーセント以上														
六 気流	〇・五メートル毎秒														
七 ホルムアルデヒドの量	空気一立方メートル														
ロ 機械換気設備(空気を浄化し、その流量を調節して供給をいう。)を設けている	「空気の浄化」を外気導入によるガス状物質の浄化か、エア														

場合は、厚生労働省令で定めるところにより、居室におけるイの表の第一号から第三号まで、第六号及び第七号の上欄に掲げる事項がおおむね当該各号の下欄に掲げる基準に適合するように空気を浄化し、その流量を調節して供給をすること。	フィルタなどによる粉じん除去を意味するのか。エアフィルタを設置基準にすることが明確になる。今後のPM _{2.5} も見据えて。														
省令															
(空気環境の測定方法) 第三条の二															
<table border="1"> <tr> <td>一 浮遊粉じんの量</td> <td>ガラスファイバーろ紙(〇能を有するものに限る。)法により測定する機器又は</td> </tr> <tr> <td>二 一酸化炭素の含有率</td> <td>検知管方式による一酸化炭素</td> </tr> <tr> <td>三 二酸化炭素の含有率</td> <td>検知管方式による二酸化炭素</td> </tr> <tr> <td>四 温度</td> <td>〇・五度目盛の温度計</td> </tr> <tr> <td>五 相対湿度</td> <td>〇・五度目盛の乾湿球湿度計</td> </tr> <tr> <td>六 気流</td> <td>〇・二メートル毎秒以上の気流</td> </tr> <tr> <td>七 ホルムアルデヒドの量</td> <td>二・四—ジニトロフェニルメチル—三—ヒドロジノー—五—メチル—アミン—別指定する測定器</td> </tr> </table>	一 浮遊粉じんの量	ガラスファイバーろ紙(〇能を有するものに限る。)法により測定する機器又は	二 一酸化炭素の含有率	検知管方式による一酸化炭素	三 二酸化炭素の含有率	検知管方式による二酸化炭素	四 温度	〇・五度目盛の温度計	五 相対湿度	〇・五度目盛の乾湿球湿度計	六 気流	〇・二メートル毎秒以上の気流	七 ホルムアルデヒドの量	二・四—ジニトロフェニルメチル—三—ヒドロジノー—五—メチル—アミン—別指定する測定器	<ul style="list-style-type: none"> ・検知管方式(CO、CO₂)の精度記載。その他の測定器のための校正の記載追加(粉じん計と同様に) ・温度、相対湿度について、精度、校正について明記。
一 浮遊粉じんの量	ガラスファイバーろ紙(〇能を有するものに限る。)法により測定する機器又は														
二 一酸化炭素の含有率	検知管方式による一酸化炭素														
三 二酸化炭素の含有率	検知管方式による二酸化炭素														
四 温度	〇・五度目盛の温度計														
五 相対湿度	〇・五度目盛の乾湿球湿度計														
六 気流	〇・二メートル毎秒以上の気流														
七 ホルムアルデヒドの量	二・四—ジニトロフェニルメチル—三—ヒドロジノー—五—メチル—アミン—別指定する測定器														
三 次に掲げる区分に従い、それぞれ次に定める事項について、二月以内ごとに一回、定期的に、測定すること。	更に高い環境衛生を目指し、連続測定結果の活用。														
(空調設備に関する衛生上必要な措置) 第三条の十八 令第二条第一号二に規定する措置は、次の各号に掲げるものとする。 一 冷却塔及び加湿装置に供給する水を水道法(昭和三十二年法律第七十七号)第四条に規定する水質基準に適合させるため必要な措置 二 冷却塔及び冷却水について、当該冷却塔の使用開始時及び使用を開始した後、一月以内ごとに一回、定期的に、その汚れの状況を点検し、必要に応じ、その清掃及び換水等を行うこと。ただし、一月を超える期間使用しない冷却塔に係る当該使用しない期間においては、この限りでない。 三 加湿装置について、当該加湿装置の使用開始時及び使用を開始し	<ul style="list-style-type: none"> ・汚れを検知するシステムの検索 ・汚れを検知するシステムの検索 														

<p>た後、一月以内ごとに一回、定期的に、その汚れの状況を点検し、必要に応じ、その清掃等を行うこと。ただし、一月を超える期間使用しない加湿装置に係る当該使用しない期間においては、この限りでない。</p> <p>四 空気調和設備内に設けられた排水受けについて、当該排水受けの使用開始時及び使用を開始した後、一月以内ごとに一回、定期的に、その汚れ及び閉塞の状況を点検し、必要に応じ、その清掃等を行うこと。ただし、一月を超える期間使用しない排水受けに係る当該使用しない期間においては、この限りでない。</p> <p>五 冷却塔、冷却水の水管及び加湿装置の清掃を、それぞれ一年以内ごとに一回、定期的に、行うこと。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・汚れを検知するシステムの検索
告示(平成15年117、119号)	
<p>空気清浄装置について、ろ材又は集じん部の汚れの状況及びろ材の前後の気圧差等を定期的に点検し、必要に応じ、ろ材又は集じん部の性能検査、ろ材の取替え等を行うこと。</p> <p>送風機及び排風機について、定期的に送風量又は排風量の測定及び作動状況を点検すること。</p> <p>冷却塔について、集水槽、散水装置、充てん材、エリミネータ等の汚れ、損傷等並びにボールタップ及び送風機の作動状況を定期的に点検すること。</p> <p>自動制御装置について、隔測温湿度計の検出部の障害の有無を定期的に点検すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・差圧計によるデータ回収は可能 ・BEMSを用いたモニタリング ・総合的にチェックするため、困難か ・計測データより障害を検出できるか。
通知(平成20年0125001号)	
<p>エアフィルターや静電式空気清浄装置(分煙用を含む。)等の空気清浄装置については、ろ材やフィルターチャンパ内部の汚染状況、イオン化部及び集じんユニット部の汚染状況、ろ材の変形、空気漏れ等について定期的に点検を行い、必要に応</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・総合的にチェックするため、困難か

<p>じ、整備、補修その他の措置を講じること。</p> <p>全熱交換器については、定期的にフィルターやエレメントの汚れを点検し、必要に応じ、清掃、交換その他必要な措置を講じること</p> <p>自動制御装置については、経年変化に対する調整及び設定温(湿)度と室内の温(湿)度との差の点検も行うこと。また、適切な外気導入量を確保するため、定期に風量の点検を行うこと。なお、実測値との差が認められた場合には、センサー等の調整を実施すること</p>	<p>・総合的にチェックするため、困難か</p> <p>・測定データにより障害を検出できるか。</p>
--	---

C1.2. 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、review でヒットした論文のうち、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。

Juliana ほか²²⁾においては、室内環境で室内空気質をモニターして得られたデータより機器の比較を行った研究論文をレビューし、それぞれの機器の精度の比較などを確認した。PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0}、CO₂、CO、TVOC、O₃、NO₂が取り上げられ、その中でもPM_{2.5}を対象とした研究が多く存在していた。低コストセンサーと基準機器との室内環境および実験室内での測定値の関係についても調査されており、十分な信頼性はあるものが存在するものの、定期的な校正の必要性が述べられている。

Zhang ほか²³⁾は、既存の空気質ガイドライン

を示すとともに、室内基準とともに、既存の典型的な検出範囲、測定許容誤差または再現性などの仕様を調査した。ここでも、粒子状物質とガス状物質を対象にしているが、校正アルゴリズムなど機器によって異なり、またガスセンサーの方が粒子センサーに比べて不確実性が大きい状況にあることを述べている。

Mobaraki ほか²⁴⁾は、建物モニタリングへの低コストセンサの応用に関する体系的な文献レビューを行った。2006年から2020年までの99件の論文を選択すると、多く(58.3%)が公共建築物のモニタリングに焦点を当てて研究していることがわかった。また、室内空気質の計測に関する論文を調査したところ、41.7%が、教育、歴史、住宅、実験室など、様々なタイプの建物のモニタリングへの装置の導入に焦点を当てていた。今後の研究では、O₂、VOC、HCHO、CO₂、真菌、細菌の検出のための低コストのモニタリングシステムの開発に焦点を当てるべきとしている。

Chojer ほか²⁵⁾は、メンテナンス、連続測定が可能な低コストセンサーの利点を挙げつつ、データの信頼性などに起因するような室内空気質モニタリング装置の開発に関連する最近の研究を批判的にレビューした。その中で、センサーの校正/検証を実施したプロジェクトが少なく、基準器を用いてこれらのテストを実施した研究はさらに少なかった。従って、校正、信頼できる検証、センサーの性能と評価の標準化に関するより多くの研究の必要性が、今後の研究に推奨されるとしている。

以上については、わが国では容易に手に入らない測定器が挙げられており、わが国で手に入りやすい機器についても、同様の手法で確認することが必要である。

C2. 自動校正方法の課題

多くのCO₂センサに、一定期間内の最小値を大気中CO₂濃度とみなして自動補正を行うアルゴリズムが使用されている。この手法は光学式センサの欠点である光路の汚れによる測定値のドリフトを取り除くために効果的である。しかしながら、24時間使用される居室や、3日間等の一定期間を通してCO₂センサが設置され

ている箇所の CO₂ 濃度が大気濃度相当まで下がらないような状況で自動補正がされてしまうと、実際の濃度よりも測定値が低くなり、CO₂ 濃度 1、000 ppm 以下を制御目標として運転が行われる場合に必要換気量を満たさないという問題が生じる。そのため、最低値を大気濃度として自動補正を行う CO₂ センサを使用する場合には、設置空間の CO₂ 濃度が一定期間内に大気濃度相当となることが必要条件であることに注意を払わなければならない。

C3. 微生物の測定に関する現状と課題

C3.1. 測定方法と代表的な計測器

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の大部分を担う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の大部分を担う分子は、アミノ酸、核酸、およびいくつかの補酵素（例えば、還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド (NADH) とそのリン酸塩 (NADPH)、フラビン (フラビンモノヌクレオチド (FMN) とフラビンアデニンジヌクレオチド (FAD))、および B6 ビタミン、ならびにビタミン K およびその同族体である。発光極大は励起波長に強く依存するため、還元型トリプトファンと NADH は、波長 300 nm 以下の光で励起された場合、340 nm と 450 nm 付近に発光極大を持つ^{26,27)}。レーザー誘起蛍光 (ultraviolet laser/light-induced fluorescence、LIF) を用いたリアルタイム測定については、多くの研究成果が発表されている。Li らは、多重励起蛍光測定システムを用いた真菌 (パン酵母) の測定結果を報告している²⁷⁾。Dalterio らは、Staphylococcus epidermidis、Enterobacter cloacae、Escherichia coli などの細菌を用いた実験結果を報告している²⁸⁾。Mason らは、プロトタイプの蛍光検出器と組み合わせて使用する微生物捕捉チップは、病原体について環境を統計的にサンプリングすることができる²⁹⁾。これらの報告は、ターゲットとなる細菌や真菌に関する実験的研究に関するものである。

近年、V-LIF 装置に関しては多くの示唆を富む論文が発表されている。広帯域統合型バイオ

エアロゾルセンサー (wideband integrated bioaerosol sensors、WIBSs) に関して、Savage らは装置の平均バックグラウンド (強制トリガー、forced trigger; FT) に測定値の標準偏差 3 倍を加えたものとして定義される一般的に使用される蛍光閾値を含む、いくつかの粒子分析戦略について議論した³⁰⁾。Könemann らは、分光強度バイオエアロゾルセンサー (spectral intensity bioaerosol sensor、SIBS) を用いたリアルタイムでの単一粒子の測定に関する詳細な実験研究を行った。SIBS は、単一粒子の 2 つの励起波長 ($\lambda_{ex} = 285$ と 370 nm) のそれぞれから、分解された蛍光スペクトル ($\lambda_{mean} = 302\text{--}721$ nm) を与える装置である。この論文では、リアルタイムのバイオエアロゾル定量化と分類への関心の高まりに関して、SIBS の長所と限界を批判的に評価している³¹⁾。

Crawford らは、単一粒子の UV-LIF シグネチャを分類するための機械学習の有用性を評価する研究の結果を得ている。このシグネチャは、多機能ビルにおける空気中の一次生物学的エアロゾル粒子 (primary biological aerosol particle; PBAP) 濃度を調査するために使用された。彼らは、高分解能のマルチパラメーター UV-LIF スペクトロメーターと組み合わせて、室内バイオエアロゾル組成に特化した特殊な訓練データを使用することで、分類能力を大幅に向上させ、PBAP 放出メカニズムを調査し、空機質と曝露への影響を評価し、最終的には放出と拡散の緩和戦略を導くために使用できる、優れた高時間分解能データセットを提供することができる³²⁾。

Huffman らは、特に環境科学、アレルギー・モニタリング、農業、公衆衛生、および国家安全保障に関して、PBAP 研究に適用されてきた主要なリアルタイム測定器クラスの批判的レビューを発表した。リアルタイム技術の 8 つの主要クラス (蛍光分光法、弾性散乱法、顕微鏡法、ホログラフィー法、ラマン分光法、質量分析法、分解分光法、リモートセンシング法、マイクロ流体技術、ペア水性技術) それぞれについて、技術的限界、誤解、落とし穴を提示し、操作、分析、報告の最善方法もまとめた³³⁾。

Lieberherr らは、市販されている 3 つのバイ

オエアロゾル検出器 (Droplet Measurement Technologies WIBS-NEO、Plair Rapid-E、Swisens Poleno) の基準校正を発表した。その結果、各機器が検出できる粒子径の予想範囲が示された。例えば、粒径 0.9 μm の粒子を 90% 検出できた。Plair Rapid-E はより大きな粒子に有効で、10 μm の粒子を 58% 検出できた。Swisens Poleno も大きな粒子用に作られたが、2 μm 以上の粒子でうまく機能した³⁴⁾。

実環境では、Patra らが、浮遊蛍光粒子を測定するために、パルスキセノン紫外線 (UV) 光源を備えた広帯域統合型バイオエアロゾルセンサー (WIBS) を使用して、生活実験室で研究を行った。その結果、ヒトがスーパーミクロン蛍光エアロゾル粒子 (FAP) の主要な発生源であることが示された³⁵⁾。しかし、この研究では同時に生菌を測定していないため、FAPs と生菌の関係は不明である。

C3.2. 実環境中の測定例

図 3 に Patra らが WIBS を用いた居住環境と換気条件が変化する実の研究室における蛍光エアロゾル粒子のリアルタイム測定の結果を示す。この研究の結果は、実環境中の蛍光粒子が全粒子に占める割合がかなり高いこと示している³⁵⁾。室内環境中に様々な蛍光粒子の発生源があり、図 3 の結果では WIBS の測定値と生菌の関係は分からない。

図 4 に柳らが病院待合室における IMD (Instantaneous Microbial Detection System) と同時に行った浮遊細菌濃度 (SCD 培地と MG サンプラを使用) の結果を示す³⁶⁾。総じて両計測器から得られた経時変化のパターンは同様であった。即ち、IMD の結果は MG サンプラの

濃度と同じように、経時的に上下することから、IMD が一般環境でモニタとして使用可能であることが分かる。また、IMD のカウント値と生菌数の間に 100 倍の関係にあることが興味深い。

前述した WIBS、SIBS、IMD はリアルタイムの測定に適しているが、高価かつ可搬性が劣るため、現場での測定に向いていない。2023 年に現場測定に向いている安価かつ軽量の BAS (Bioaerosol Sensor) が開発されている。図 5 に浮遊粒子濃度、図 6 にバイオエアロゾル粒子濃度の経時変化を示す³⁷⁾。14:00 にネブライザで市販の OS-1 を 1 分間の発生させた場合、パーティクルカウンタでは浮遊粒子濃度の上昇がみられたが、BAS での濃度上昇が認められなかった。一方、14:20 に OS-1 に蛍光粒子を混ぜて発生した場合、BAS での能動少々が確認された。また、BAS で測定したバイオエアロゾル粒子濃度と MG (Mattson-Garvin) サンプラで測定した細菌 (生菌) 濃度の間に有意な相関関係が認められた (図 7)。

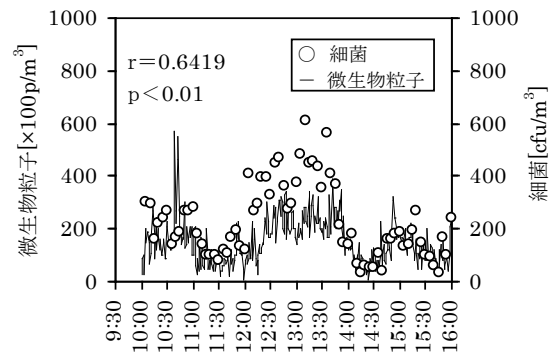


図 4 オフィス内浮遊微生物粒子濃度

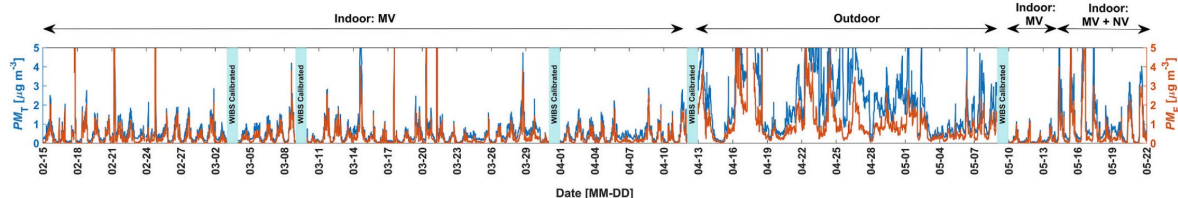


図 3 測定キャンペーン中に WIBS によって測定された、室内空気 (MV および MV+NV モード) および外気中の全粒径粒子 PMT および FAP 質量濃度 PMF の経時変化 (MV: mechanical ventilation ; MV+NV : mechanical ventilation and natural ventilation ; FAP: fluorescent aerosol particles)

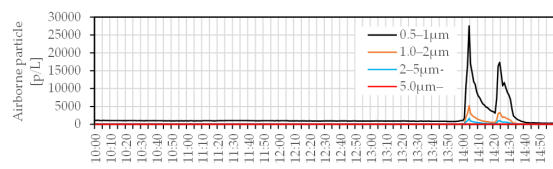


図 5 浮遊粒子濃度の経時変化

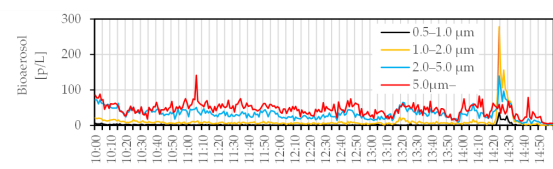


図 6 バイオエアロゾル粒子濃度の経時変換

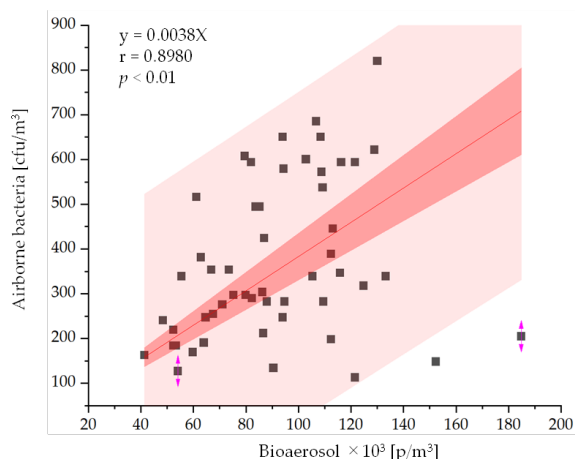


図 7 浮遊細菌濃度とバイオエアロゾル濃度の相関性

D. まとめ

D1. 空気環境に関する課題整理

空気環境に関する測定と空調設備の点検に関する建築物衛生法の施行令、省令、告示、通知の中で、本研究に関する項目について、課題の整理を行った。空気環境項目など、連続測定器により置き換えが可能なものもあるが、例えば省令の機器の精度の表現などについては、見直しが必要になるものと考えられる。また、空調設備の維持管理については、総合的に評価するところもあり、自動化などにおいてはまだ課題があるものと考えられる。

また、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。センサーの精度管理、校正方法などについては、まだ課題があり、わが国においても比較的簡単に手に入る機器を対象に、同様に調査を行う必要性があるものと考えられる。

D2. 二酸化炭素濃度の測定方法調査

24 時間使用される等の理由で一定期間中に CO₂ 濃度が大気濃度相当まで下がらないような居室においては、単光源二波長方式で CO₂ の吸収波長と基準波長の両方を計測することで常時汚れによるドリフトを補正するようなセンサを用いるか、CO₂ センサ設置箇所において一定期間内に CO₂ 濃度が大気濃度相当となるような空調運転を行うことが望ましいと考えられる。

D3. 浮遊微生物の測定法

現在、微生物の測定に培養法を用いる場合が多いが、デジタル化の社会に向けて、今後微生物のリアルタイムの測定が有用なツールになると考えられる。

<参考文献>

- 1) シンプル微生物学 (改訂第 3 版) ,p.1,南江堂,2002
- 2) WOESE CR, et al. Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. Proc. Nati. Acad. Sci. USA, Vol.87, 4576-4579, June 1990
- 3) Verreault, D.; Moineau, S.; Duchaine, C. Methods for Sampling of Airborne Viruses. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2008, 72, 413-444. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00002-08>.
- 4) Haig, C.W.; Mackay, W.G.; Walker, J.T.; Williams, C. Bioaerosol sampling: Sampling mechanisms, bioefficiency and field studies. J. Hosp. Infect. 2016, 93, 242-255. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2016.03.017>.
- 5) ISO 16000-16; Indoor Air-Part 16: Detection and Enumeration of Moulds-Sampling by Filtration. ISO copyright office publisher: Switzerland, 2008.

- 6) ISO 16000-18; Indoor Air-Part 18: Detection and Enumeration of Moulds-Sampling by Impaction. ISO copyright office publisher: Switzerland, 2011.
- 7) Amann, R.L.; Ludwig, W.; Schleifer, K.H. Phylogenetic Identification and In Situ Detection of Individual Microbial Cells without Cultivation. *Microbiol. Rev.* 1995, 59, 143-169.
[https://doi.org/ 10.1128/mr.59.1.143-169.1995](https://doi.org/10.1128/mr.59.1.143-169.1995).
- 8) Ferguson, R.; Buckley, E.N.; Palumbo, A. Response of marine bacterioplankton to differential filtration and confinement. *Appl. Environ. Microbiol.* 1984, 47, 49-55.
<https://doi.org/10.1128/aem.47.1.49-55.1984>.
- 9) Kogure, K.; Simidu, U.; Taga, N. A tentative direct microscopic method for counting living marine bacteria. *Can. J. Microbiol.* 1979, 25, 415-420.
<https://doi.org/10.1139/m79-063>.
- 10) Kogure, K.; Simidu, U.; Taga, N. Distribution of viable marine bacteria in neritic seawater around Japan. *Can. J. Microbiol.* 1980, 26, 318-323.
- 11) Jones, J.G. The effect of environmental factors on estimated viable and total populations of planktonic bacteria in lakes and experimental enclosures. *Freshwater Biol.* 1977, 7, 67-91.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1977.tb01659.x>.
- 12) Staley, J.T.; Konopka, A. Measurement of in situ activities of nonphotosynthetic microorganisms in aquatic and terrestrial habitats. *Annu. Rev. Microbiol.* 1985, 39, 321-346.
<https://doi.org/10.1146/annurev.micro.39.1.321>.
- 13) Wagner, M.; Amann, R.; Lemmer, H.; Schleifer, K.H. Probing activated sludge with proteobacteria-specific oligonucleotides: Inadequacy of culture-dependent methods for describing microbial community structure. *Appl. Environ. Microbiol.* 1993, 59, 1520-1525. [https://doi.org/ 10.1128/aem.59.5.1520-1525.1993](https://doi.org/10.1128/aem.59.5.1520-1525.1993).
- 14) Wagner, M.; Erhart, R.; Manz, W.; Amann, R.; Lemmer, H.; Wedi, D.; Schleifer, K.H. Development of an rRNA-targeted oligonucleotide probe specific for the genus *Acinetobacter* and its application for in situ monitoring in activated sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 1994, 60, 792-800.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC201394/pdf/aem00020-0038.pdf> (accessed on 1 August 2023).
- 15) Torsvik, V.; Goksoyr, J.; Daae, F.L. High diversity of DNA of soil bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 1990, 56, 782-787.
<https://doi.org/10.1128/aem.56.3.782-787.1990>.
- 16) Kim, H.Y.; Estes, C.R.; Duncan, A.G.; Wade, B.D.; Cleary, F.C.; Lloyd, C.R.; Ellis, W., Jr.; Powers, L.S. Real-Time Detection of Microbial Contamination. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 2004, 23, 122-129.
<https://doi.org/10.1109/MEMB.2004.1297183>.
- 17) 経済産業省・産業用ガス検知警報器工業会, 二酸化炭素濃度測定器の選定等に関するガイドライン, 2021年11月1日
<https://www.meti.go.jp/covid-19/guideline.pdf>
- 18) 柳 宇: 迅速微生物測定法の現状, 空気清浄, 第56巻, 第1号, 4-7, 2018
- 19) 第十七改正日本薬局方-参考資料: 平成28年3月7日厚生労働省告示第64号, 2016
- 20) 山崎省二編: 環境微生物の測定と評価, オーム社, 2001
- 21) 狩山英之: 細菌の酵素活性力を指標にする, 新しい迅速薬剤感受性試験測定法 第一報 新規の反応液と呈色系の構築, CHEMOTHERAPY, Vol.40, No.6, 1992
- 22) Juliana P. Sá et al.: Application of the low-cost sensing technology for indoor air quality monitoring: A review, *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102551, 2022.
- 23) He Zhang, Ravi Srinivasan: A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management, *Sustainability*, 12,

9045, 2020

24) Behnam Mobaraki et al.: Application of Low-Cost Sensors for Building Monitoring: A Systematic Literature Review, *Buildings*, 11, 336, 2021

25) H. Chojer et al.: Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements, *Science of the Total Environment*, 727138385, 2020

26) Pan, Y.L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2015, 150, 12–35.

<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>.

27) Li, J.K.; Asali, E.C.; Humphrey, A.E. Monitoring Cell Concentration and Activity by Multiple Excitation Fluorometry. *Biotechnol. Prog.* 1991, 7, 21–27.

<https://doi.org/10.1021/bp00007a004>.

28) Dalterio, R.A.; Nelson, W.H.; Britt, D.; Sperry, J.F.; Tanguay, J.F.; Suib, S.L. The Steady-State and Decay Characteristics of Primary Fluorescence from Live Bacteria. *Appl. Spectrosc.* 1987, 41, 234–241.

<https://opg.optica.org/as/abstract.cfm?URI=as-41-2-234> (accessed on 1 August 2023).

29) Mason, H.Y.; Lloyd, C.; Dice, M.; Sinclair, R.; Ellis, W., Jr.; Powers, L. Taxonomic identification of microorganisms by capture and intrinsic fluorescence detection. *Biosens. Bioelectron.* 2003, 18, 521–527.

[https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(03\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(03)00010-1).

30) Savage, N.J.; Krentz, C.E.; Könnemann, T.; Han, T.T.; Mainelis, G.; Pöhlker, C.; Huffman, J.A. Systematic characterization and fluorescence threshold strategies for the wideband integrated bioaerosol sensor (WIBS) using size-resolved biological and interfering particles. *Atmos. Meas. Tech.* 2017, 10, 4279–4302.

<https://doi.org/10.5194/amt-10-4279-2017>.

31) Könnemann, T.; Savage, N.; Klimach, T.;

Walter, D.; Fröhlich-Nowoisky, F.; Su, H.; Pöschl, U.; Huffman, J.A.; Pöhlker, C. Spectral Intensity Bioaerosol Sensor (SIBS): An instrument for spectrally resolved fluorescence detection of single particles in real time. *Atmos. Meas. Tech.* 2019, 12, 1337–1363. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1337-2019>.

32) Crawford, I.; Topping, D.; Gallagher, M.; Forde, E.; Lloyd, J.R.; Foot, V.; Stopford, C.; Kaye, P. Detection of Airborne Biological Particles in Indoor Air Using a Real-Time Advanced Morphological Parameter UV-LIF Spectrometer and Gradient Boosting Ensemble Decision Tree Classifiers. *Atmosphere*. 2020, 11, 1039.

<https://doi.org/10.3390/atmos11101039>.

33) Huffman, J.A.; Perring, A.E.; Savage, N.J.; Clot, B.; Crouzy, B.; Tummon, F.; Shoshanim, O.; Damit, B.; Schneider, J.; Sivaprakasam, V.; et al. Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives. *Aerosol. Sci. Technol.* 2020, 54, 465–495. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1664724>.

34) Lieberherr, G.; Auderset, K.; Calpini, B.; Clot, B.; Crouzy, B.; Gysel-Beer, M.; Konzelmann, T.; Manzano, J.; Mihajlovi, A.; Moallemi, A.; et al. Assessment of real-time bioaerosol particle counters using reference chamber experiments. *Atmos. Meas. Tech.* 2021, 14, 7693–7706.

<https://doi.org/10.5194/amt-14-7693-2021>.

35) Patra, S.S.; Wu, T.; 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>.

36) 柳 宇, 鍵直樹, 池田耕一: 室内環境における浮遊細菌濃度リアルタイム測定の可能性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.666,

673-677,2011.

<https://doi.org/10.3130/aije.76.673>

37) 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.

<https://doi.org/10.3390/atmos14111656>.

E. 研究発表

1. 論文発表

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.

<https://doi.org/10.3390/atmos14111656>.

2. 学会発表

なし

3. 著書

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

予定なし