

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)

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

令和5～令和7年度 総合研究報告書

研究代表者 阪東 美智子

令和8年（2026）年 5月

目 次

I. 総合研究報告

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	----- 1
阪東 美智子	

II. 分担研究報告

1. 建築環境衛生の実態とデジタル技術に関する調査	-----17
開原 典子、林 基哉	
2. 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	-----37
鍵 直樹、柳 宇、尾方 壮行	
3. ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討	-----62
阪東 美智子、谷川 力、芝生 圭吾、木村 悟朗、茂手木 眞司、橋本 知幸	
4. 清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討	-----68
正田 浩三、深見 盛英、川村 典子、江本 達哉、辻本 彩香、杖先 樹里、 栢森 聡、下平 智子、阪東 美智子	
5. 建築物内受水槽及び排水設備の衛生管理に活用可能な技術に関する調査	-----75
三好 太郎、大塚 雅之、阪東 美智子、徳安 真理奈、角野 公亮	

III. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----84
---------------------	---------

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

研究代表者 阪東 美智子 国立保健医療科学院 生活環境研究部 上席主任研究官

研究要旨

本研究は、建築物衛生法におけるデジタル技術の活用に向けて、利用可能な技術、機器、ソフトウェア等を抽出し、従来の手法との比較検証等を実施して、適切な維持管理方法の探索とその際の判断基準や留意点を明確化することを目的とした。

令和 5 年度は、環境衛生管理へのデジタル技術の適用について、空気環境、ねずみ・衛生害虫防除、清掃、水管理の各分野における現状と課題を整理した。空気環境の連続測定以外では、導入コストや適切なデジタル機器が市場にないなど課題が多く普及が進んでいないことを把握した。また、ねずみ・衛生害虫防除と清掃分野における目視点検・調査について、それぞれアイトラッキングシステムを使った試行調査を行い、その有用性を確認した。

令和 6 年度は、空気関連分野について、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、現状までの特性の把握と今後の課題を示した。ねずみ・衛生害虫防除分野については、国際展示会を視察し海外のデジタル機器について情報を収集した。また、センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証試験を実施した。さらにアイトラッカーを用いて目視による厨房の点検内容を検証した。清掃分野については、清掃点検報告システム（アプリ）を用いた実証試験によりシステムの効果を確認した。またデジタル機器の導入によるトイレの清掃の効率化に関する検証試験を実施した。水関連分野については、建築物衛生法の維持管理に関する記述、既往の診断技術、業者ヒアリングなどの調査に加え、受水槽及び排水管の点検、清掃に関連する協会に対するヒアリングを実施した。

令和 7 年度は、空気環境分野について、前年度に引き続き PM_{2.5}測定器や CO₂センサーの精度・校正方法を検討し、換気制御に必要な精度維持条件や表示基準の必要性を示した。また、浮遊微生物迅速測定装置を用いた実測から、実用化に向けた課題を整理した。ねずみ・衛生害虫防除分野では、自動計数機能付きライトトラップの検証を行い、捕虫数との誤差が比較的小さいことを確認したほか、ウェアラブルアイトラッカーを活用して厨房点検の視線行動を可視化し、研修教材化を試みた。清掃分野では、論文検索システムの構築、清掃ロボットの性能整理、ATP 測定による新たな衛生評価法の検証を実施した。水管理分野では、レーダー式レベルセンサーを用いた排水管閉塞状況の自動検知技術について性能評価を行い、有効性を確認した。

以上より、建築物環境衛生管理におけるデジタル技術は、管理の効率化や DX 推進に寄与する可能性を有する一方、測定精度の維持、コスト、人による管理との役割分担などの課題が存在することが明らかとなった。本研究成果は、今後の建築物環境衛生管理基準の見直しやデジタル技術導入指針の基礎資料として活用が期待される。

研究分担者

開原典子 国立保健医療科学院 生活環境研究部
三好太郎 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部
浄水処理研究室
林基哉 北海道大学大学院工学研究院
柳宇 工学院大学 建築学部
鎌直樹 東京科学大学 環境・社会理工学院
尾方壮行 東京都立大学 都市環境学部
大塚雅之 関東学院大学 建築・環境学部

研究協力者

茂手木眞司 日本ペストコントロール協会
谷川力 イカリ消毒株式会社、日本ペストコントロール協会
木村悟朗 イカリ消毒株式会社
下平智子 全国ビルメンテナンス協会
鎌倉良太 日本建築衛生管理教育センター
杉山順一 日本建築衛生管理教育センター
正田浩三 東京美装興業株式会社
芝生圭吾 鵬図商事株式会社
杖先寿里 建築物管理訓練センター
森郁恵 産業技術総合研究所
橋本知幸 日本環境衛生センター
栢森聡 (株)ウィズらぼ
杉田洋 広島工業大学
杉田宗 広島工業大学
平敷勇 三菱電機先端技術総合研究所
藤木広幸 全国管洗浄協会
難波信二 全国管洗浄協会、(株)日本パイプクリーニング
佐藤昭二 全国管洗浄協会、(株)マルシビルサービス
高岡ジョージ 全国管洗浄協会、(株)プログレス
堀井清志 全国建築物飲料水管理協会、(株)関東保全サービス
平隆道 全国建築物飲料水管理協会、(株)日本分析

A. 研究目的

建築物衛生管理へのデジタル技術の活用の可能性については、令和4年度より、「IoT を活用した建築物衛生管理手法の検証のための研究（研究代表者：金勲）」や「中規模建築物所有者等による自主的な維持管理手法の検証のための研究（研究代表者：本間義規）」が進められている。前者は特定建築物を対象に、自動測定が可能なもののデータ精度と維持管理の効果を検証するものであり、後者は中規模建築物を対象に、所有者等の自主的な維持管理手法を検証するものである。両研究によりデジタルを活用した自動化等の可否やエビデンスが蓄積されつつあるものの、建築物衛生管理基準として規定する項目の中で、空気環境や水質検査に関するデジタル活用の検討に比べて、清掃やネズミ等の防除に関する検証は遅れを取っている。

この状況を踏まえ、本研究は、建築物衛生法が求める各種項目のうち、特にネズミ等の防除や清掃等において、デジタル技術の活用でその目的の達成が見込まれる技術、機器、ソフトウェア等を抽出するとともに、手動で行われた結果との比較検証等を実施し、適切な維持管理方法の探索とその際の判断基準や留意点を明確化することによって、政府全体の方針であるデジタル原則の達成と公衆衛生の向上を目指した。また、「建築物環境衛生管理に関する検討会報告書（令和3年7月）」で継続検討とされた維持管理項目である、PM_{2.5}、CO₂ 等について、改正案の提案の根拠となる科学的エビデンスの収集を行った。

令和 5 年度の研究目標は、先行している、「IoT を活用した建築物衛生管理手法の検証のための研究（研究代表者：金勲）」においてカバーされていない維持管理項目について、IoT で対応可能なものを抽出した。活用可能なデジタル技術に関する知見や課題を整理するとともに、デジタル活用の現状やニーズ等を把握した。

令和 6 年度の研究目標は、活用可能なデジタル技術について、建築物における実測調査や実験室における検証実験などを行い、データの精度や導入に伴う課題を整理した。また、法令等改正手続きに伴い見直しが必要となる告示・通達内容を精査し、必要な科学的エビデンスの収集を行った。

令和 7 年度は、前年度に引き続き、活用可能なデジタル技術について建築物における実測調査や実験室における検証実験などを行い活用の可能性や課題を整理した。ねずみ等防除や清掃分野では、定期点検・検査におけるデジタル技術の活用には課題が多いことから、それ以外で建築物環境衛生管理に資する事項（研修教材の開発など）でのデジタル技術の活用についても検討を行った。

B. 研究方法

研究期間は 3 年間で、以下の 7 つの部会に分かれて実施した（図 1）。

- | |
|---|
| 部会① 環境衛生管理の実態と課題の把握
(R5-R6) |
| 部会② デジタル技術のシーズの把握 (R5-R6) |
| 部会③ 空気環境・粉じんの調整に関するデジタル技術の特性および適用課題の検討
(R5-R7) |
| 部会④ ネズミ・衛生害虫の防除に関するデジタル技術の特性および適用課題の検討 |

(R5-R7)

部会⑤ 清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討 (R5-R7)

部会⑥ 飲料水、雑用水・排水等の管理に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討 (R5-R7)

部会⑦ 建築物環境衛生管理基準の改正案の提案 (R6-R7)

B1. 建築環境衛生の実態とデジタル技術に関する調査

部会①「環境衛生管理の実態と課題の把握」及び部会②「デジタル技術のシーズの把握」は、合同で、先行している 2 つの研究（「IoT を活用した建築物衛生管理手法の検証のための研究（研究代表者：金勲）」と「中規模建築物所有者等による自主的な維持管理手法の検証のための研究（研究代表者：本間義規）」）と情報交換を行い、カバーされていない維持管理項目を抽出した。そのうえで、建築物衛生法の環境衛生管理項目に対するデジタル技術の導入例を関連企業等から取得し、デジタル技術導入に関する研究段階の知見を、企業及び研究機関等から収集した。

令和 5 年度は、デジタル技術の導入による効率化の試算方法についてドレンパンの事例を用いて検討した。また、デジタル技術を活用している先駆事例の情報を文献や企業・有識者等へのヒアリング等から収集・整理し、建築物衛生管理への展開の可能性を検討した。さらに、法令等改正手続きに伴い見直しが必要となる告示・通達の内容を整理した。

令和 6 年度は、これらの作業を継続するとともに、自治体のホームページ等から特定建築物の維持管理状況報告書の様式を収集し報告で求めている内容の整理を行った。維持管理項目ごとに、デジタル技術導入の可能性を整理した。

また、感染症対策のためのデジタル技術の利用の試みについて情報を収集し、環境中トレーサーを用いた感染リスク推定について整理した。さらに、デジタル技術を活用する際の課題について、「スマートビルシステムアーキテクチャガイドライン」を参照し整理した。

令和7年度は、環境衛生管理のためのデジタル技術の適応として、主にエアロゾル感染対策を中心にデジタル技術の利用について情報を収集・整理した。パンデミックを契機に普及したCO₂濃度による換気状態の検知と空調換気設備制御に関する課題として注目されている測定器の精度と誤差によって生じる課題を検証し、CO₂濃度の測定器に求められる要件について検討した。また、建築物衛生の監視指導に従事する環境衛生監視員等の実務担当者により共有された監視指導上の課題認識、自治体からの事前課題回答、監視指導実態に関する資料等を用いて、建築物環境衛生監視指導上の課題を整理した。また、建築物環境衛生管理に関連するIoTセンサー、クラウド管理、電子台帳等のデジタル技術について、既存事例および活用状況を収集し、監視指導業務への適用可能性を整理した。さらに、報告徴収および立入検査の実施状況、不適率の推移等について整理し、デジタル技術活用との関係について検討した。

B2. 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

部会③「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」では、建築物環境衛生基準のうち、空気環境の測定項目について、建築物衛生法の政省令を確認し課題を整理した。また、CO₂計測機器、とくに換気制御用に用いられる機器も含めて、仕様を調査し課題を整理した。さらに浮遊微生物測定について、迅速測定法とリアルタイム測定法

のそれぞれの現状と課題を整理した。

令和5年度は、空気調和・換気設備の維持管理状況を検出できる機器の現状把握をし、空気環境計測機器の抽出と測定手法の検討をした。

令和6年度は、主に空調機に装着される二酸化炭素モニタ装置の調査を行った。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、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、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についてヒアリング調査を実施した。さらに、浮遊微生物測定器、粒子計測器、PM_{2.5}測定器を用いて実建物で測定を実施した。オフィスや大学において在室者密集時の連続測定を実施し、機器の特性を検討した。また、新たな監視項目の検討として、空気質に関する項目について、ローコストセンサーを計測手法として既往研究の文献調査を行った。

令和7年度は、ローコストセンサーによる室内環境の計測についてレビュー論文以外の関連論文の調査を行った。また、実建築物においてPM_{2.5}の測定を2025年12月、2026年1月の暖房期に行った。PM_{2.5}濃度の測定については、複数のPM_{2.5}測定機に加えてPM_{2.5}サイクロンインパクターを装着した粉じん計も用いた。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やパーティクルカウンタも使い、広い粒径範囲の粒子の計測を行った。次に、室内環境・ダクト用CO₂センサーに関する調査として、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。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して文献調査を行った。主要アウトカムは、認知機能、眠気・睡眠、症状、生理指標とする。バイオエアロゾル粒子のリアルタイム測定については、

オフィスビルにおいて夏期（2025 年 8 月）および冬期（2026 年 2 月）に実測を行った。各対象室において、BAS を用いた 1 分間隔の連続測定を約 1 時間実施し、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。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. ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

部会④「ネズミ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討」では、令和 5 年度は、ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性と適用課題の検討した。また、日本 PCO 協会会員を対象にアンケート調査を実施した。

令和 6 年度は、2 つの国際展示会（FAOPMA PEST SUMMIT と PEST WORLD）に参加し、海外のデジタル技術の活用・普及状況に関する情報を収集した。また、ねずみ用センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証試験を行った。さらに、実際の特定建築物の厨房において、熟練作業員と未経験者のそれぞれに点検作業を行ってもらい、アイトラッカーでデータを収集した。収集したデータを用いて注視した順番や注視した時間を図面に落として作業内容を比較し、熟練作業員による点検作業の特徴を明らかにした。

令和 7 年度は、国際学会（International Conference on Urban Pests）に参加し、海外のデジタル技術の活用・普及状況に関する情報を集め整理した。また、日本ペストロジー学会

若手談話会の協力の下、現場で求められるデジタル技術について情報を収集した。次に、捕虫器（ライトトラップ）の有効性と課題を明らかにするため、自動計測機能付きトラップを用いて検証試験を行った。検証試験は、条件（部屋の大きさ、照明、供試動物の種類）を変えて実施した。さらに、アイトラッカーによる厨房点検作業の視線データの分析を深めた。また、アイトラッカーの活用方策として、熟練作業員による点検作業の動画教材の作成を試みた。

B4. 清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

部会⑤「清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討」では、令和 5 年度は、デジタル化技術の実施事例の収集や、清掃状況、清掃機材状況の測定機器の抽出と測定方法の検討など、清掃に関するデジタル技術の現状と課題整理をした。

令和 6 年度は、清掃点検報告システムを用いて、複数のビルにおいて清掃点検報告システムの作成を行い、所要時間やシステムの使い勝手等について確認を行い、従来の方法と比較を行った。また、デジタル機器の導入によるトイレの清掃の効率化を検証するために、センサー等を用いた実証実験を実施し、トイレの使用人数、トイレの消耗品、大便器の使用時間、ゴミ箱の堆積状況等を測定した。

令和 7 年度は、東京ビルメンテナンス協会の企業会員に対するアンケート調査を行うデジタル技術の導入状況を把握した。また、昨年度実施した清掃点検報告システムの検証結果及びセンサー等を用いたトイレ清掃の効率化に関する実証実験の結果について分析を深めた。さらに、ATP 測定器 2 種を用いて実験室実験ならびに実証実験を行った。実験室実験では、ベビーフードを用いた模擬汚れを使い、表面仕

上げの異なる 3 種の建材で測定値の相違を検証した。清掃用具であるタオルとモップの測定方法の検討も行った。実証実験では、実建築物において、男女トイレ、清掃倉庫・用具における清掃前後の測定を行った。

B5. 建築物内受水槽及び排水設備の衛生管理に活用可能な技術に関する調査

部会⑥「飲料水、雑用水・排水等の管理に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討」では、令和 5 年度は、建築物衛生法に基づく水の衛生管理のうち、貯水槽の清掃に関連する技術として水中清掃ロボットと、水関連設備点検技術としてセンサーやドローン技術等についてインターネット上で公開されている情報をもとに、現状の製品開発状況や実用化状況を取りまとめた。

令和 6 年度は、現在の適用技術について、建築物衛生法の維持管理に関する記述、既往の診断技術、業者ヒアリングなどを行った。また、公益社団法人全国建築物飲料水管理協会及び一般社団法人全国管洗浄協会の協力の下、受水槽及び排水管の点検、清掃を業務とする専門家合計 6 名に対して現状の業務における技術的な課題並びにそれらの課題の解決に向けたデジタル技術の活用方策に関するヒアリングを実施した。

令和 7 年度は、建築物衛生法の維持管理に関する記述、既往の診断技術、業者ヒアリングなどにより、各工程において現在活用されている技術を調査した。デジタル技術を活用した建築

物衛生管理の効率化に関する選択肢の 1 つとして、レーダー式レベルセンサーを用いた排水管洗浄システムを試作し検証する。測定排水ます 4 箇所にレーダー式レベルセンサーを設置し、管内閉塞を再現して管内水位の経時変化を測定した。

なお、部会⑦「建築物環境衛生管理基準の改正案の提案」については、各部会で活用できるデジタル技術の可能性を検討した結果、導入可能なデジタル技術は限定されているうえ課題が多いことから、建築物環境衛生管理基準の改正案を検討するには時期尚早と判断し、部会を作って検討することは見送ることとした。

（倫理面への配慮）

本研究は、建築物衛生法に基づく特定建築物の衛生管理手法について研究を行うものであり、主たる調査対象は建築物であることから、基本的には研究倫理審査の申請を必要とする調査研究はない。

ただし、「B3. ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討」において、ねずみ用センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証試験については、イカリ消毒株式会社動物実験審議会の承認を得て実施した（承認番号 24-010）。アイトラッカーを用いた厨房における点検作業の試験については、国立保健医療科学院研究倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号 NIPH-IBRA#24037）。

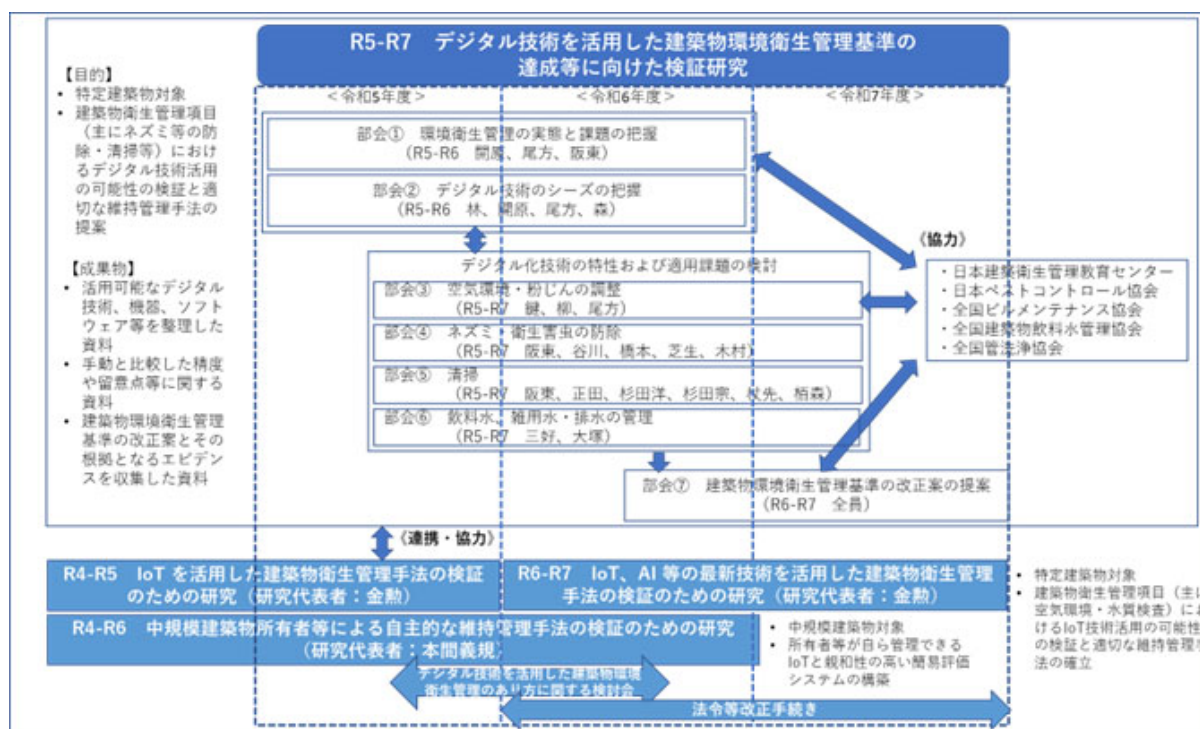


図1 研究の流れ図

C. 研究結果

C1. 建築環境衛生の実態とデジタル技術に関する調査

令和5年度は、環境衛生管理におけるデジタル技術の活用状況を整理し、その導入レベルをモデル化した。その結果、従来は目視確認や定期的な測定・検査によって実施されてきた環境衛生管理項目について、センシング技術等による常時監視が可能となれば、管理の信頼性や効率性の向上につながる可能性を示した。また、研究開発段階にある技術として、エアロゾル感染症対策に関するデジタル技術の動向を調査し、感染性が未知の新興・再興感染症への対応においてデジタル技術が果たし得る役割を整理した。さらに、ドレンパン点検をモデルケースとして導入効果の試算を試みた結果、実際の点検頻度や運用実態に関する情報不足が課題として明らかとなり、現場実務者からの情報収集の必要性を示した。

令和6年度は、引き続き環境衛生管理における

デジタル技術の導入事例や研究開発動向を収集し、その展開可能性と課題を検討した。特に、COVID-19パンデミックを契機として進展した感染症対策分野のデジタル技術に着目し、室内環境情報を用いた感染リスク推定手法を整理した。なかでも、CO₂濃度などの環境中トレーサーを利用した感染リスク評価の考え方を整理し、環境センシング技術の活用可能性を明らかにした。また、建築物衛生法に基づく環境衛生管理項目へのデジタル技術導入事例を企業や研究機関から収集し、センシング機器の信頼性、データ活用時のセキュリティ対策、制度との整合性など、導入に伴う課題を整理した。

令和7年度は、これまでに整理したデジタル技術の活用可能性について、具体的な技術課題と制度運用上の課題の両面から検証を行った。エアロゾル感染対策では、病原体を直接検知する技術は依然として実用化途上にあることから、感染リスクの代替指標として広く用いられているCO₂濃度

計に着目し、測定誤差の実態とその影響をシミュレーションにより検討した。その結果、自動校正機能によるCO₂濃度の過小評価が換気量の抑制を招き、結果として室内CO₂濃度を上昇させる可能性が示された。また、温度条件等による測定誤差や、校正方法の違いによる影響も確認され、感染対策に活用するためにはセンサー性能や校正方法に関する要件整理が重要であることが明らかとなった。

さらに、建築物衛生の監視指導を担う環境衛生監視員等への調査を実施し、監視対象施設数の増加や人員不足、紙媒体中心の記録管理による業務負担の増大など、現場が抱える課題を整理した。その結果、CO₂濃度、温湿度、残留塩素等のデータをIoTにより連続取得することで、異常値の早期把握や監視優先度の設定などに活用できる可能性が示された。一方で、これらのデータは法定測定を代替するものではなく、測定精度、データの信頼性、制度との整合性を確保する必要があることが明らかとなった。

以上より、本研究では、環境衛生管理におけるデジタル技術の活用可能性を体系的に整理するとともに、感染症対策への応用、センシング技術の信頼性評価、監視指導業務への活用可能性を検討した。その結果、デジタル技術は環境衛生管理の効率化・高度化に寄与する可能性を有する一方で、測定精度の確保、データ信頼性の担保、制度との整合性確保が社会実装に向けた重要な課題であることが示された。

C2. 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

令和5年度は、環境衛生管理におけるデジタル技術活用の可能性と課題を整理した。空気環境項目の中には連続測定器による代替が可能なものも存在する一方、現行制度における測定機器の精度要件や評価方法については見直しが必要であることを指摘した。また、空調設備の維持管理は複数

の要素を総合的に評価する必要があるため、完全な自動化には課題が残されていることを示した。CO₂センサーについては、多くの機器で採用されている自動補正アルゴリズムに着目し、24時間利用施設などで室内濃度が十分に低下しない場合には測定誤差が生じる可能性を指摘した。さらに、浮遊微生物については、従来の培養法による測定に代わり、リアルタイム測定技術が将来的に有用な管理手法となる可能性を示した。

令和6年度は、これらの課題を踏まえ、粒子状物質、CO₂、浮遊微生物を対象に実測調査および技術調査を実施した。粉じん測定については、ローコストセンサー(LCS)に関する文献調査と実建築物におけるPM_{2.5}測定を行った結果、測定機器によって絶対値には差がみられるものの、濃度変動の傾向は概ね一致することが確認された。CO₂センサーについては、換気制御用機器の校正方法や運用実態についてメーカー調査を実施し、センサーの信頼性が機器性能だけでなく、設置環境や運用方法にも大きく左右されることを明らかにした。また、浮遊微生物については迅速測定装置を用いた実測を行い、蛍光粒子(FAP)、細菌濃度および在室者数との関係を分析したが、有意な相関関係は確認されなかった。

令和7年度は、これまでの知見を発展させ、各技術の性能評価と実用化可能性についてより詳細な検討を行った。PM_{2.5}測定用LCSについては、文献レビューから、光散乱式センサーが低価格かつ連続測定可能である一方、湿度や温度、粒子特性、経年変化の影響を受けやすく、基準機器との比較校正や補正アルゴリズムが不可欠であることを整理した。実測調査では、機器間で測定値に差がみられたものの、室内PM_{2.5}濃度は環境基準値を下回っていた。また、室内粒子の大部分が超微粒子であることが確認され、光散乱式測定器では0.3μm未満の粒子を十分に検出できないことから、超微粒子が多い環境では濃度を過小評価する可能性が示された。

CO₂センサーについては、電気化学式、光音響式、熱伝導式およびNDIR式の特徴を整理し、現在はNDIR方式が主流であることを確認した。また、令和5年度に指摘した自動補正機能の課題や令和6年度に明らかとなった運用条件の影響を踏まえ、CO₂濃度と健康影響に関する文献を整理した。その結果、一般的な室内濃度域ではCO₂そのものによる明確な健康影響の科学的根拠は限定的である一方、1,000ppmを超える環境では睡眠効率低下や眠気増加などが報告されていた。また、シックビル症候群様症状はCO₂そのものではなく、換気不足に伴うVOCや生体由来汚染物質の蓄積が主因である可能性が高いことが示された。

浮遊微生物については、令和6年度の結果をさらに発展させ、オフィスビルにおけるバイオエアロゾルの実態調査を実施した。その結果、浮遊細菌・真菌濃度には季節変動が認められ、特に真菌は夏季に基準値を超える事例が多かった。また、FAP濃度は冬季に高い傾向を示し、粒径が大きくなるほど総粒子中に占める割合が増加した。さらに、令和6年度には確認できなかったFAPと細菌濃度との関係について、測定対象やサンプル数を拡大した結果、有意な相関関係が認められた。このことから、FAP測定は従来の培養法を補完するリアルタイムの微生物汚染評価手法として活用できる可能性が示された。

以上より、本研究では、PM_{2.5}測定用ローコストセンサー、CO₂センサーおよび浮遊微生物の迅速測定技術について、性能、信頼性および実務への適用可能性を体系的に評価した。その結果、これらの技術は建築物の環境衛生管理の高度化・効率化に資する有望なツールである一方、測定原理に起因する限界や校正方法、設置環境による影響を十分考慮し、標準化や品質保証の仕組みを整備することが今後の実装に向けた重要な課題であることが明らかとなった。

C3. ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化

技術の特性および適用課題の検討

令和5年度は、ねずみ・衛生害虫防除に関連する市販のデジタル機器18機種を対象に、対象害虫、用途、費用、使用場所、利用頻度および将来性を整理した。その結果、対象害虫はねずみが最も多く、次いでハエ類やゴキブリ類であった。ねずみ対策では赤外線センサーや暗視カメラを活用した機器が主流であり、生息確認や初回調査、難防除事例における実態把握には有効である一方、防除計画の立案や効果判定まで含めて活用できる機器は限定的であった。また、PCO事業者を対象としたアンケート調査では、一部の赤外線センサー式暗視カメラを除き利用実績は低く、デジタル技術の普及がまだ限定的であることが明らかとなった。さらに、アイトラッキングシステムを用いた予備的な分析から、熟練者と未経験者では点検箇所や点検時間に大きな違いがあることが確認され、点検技能の可視化の可能性が示された。

令和6年度は、国内で利用されている機器の検討に加え、海外におけるデジタル技術の活用状況を調査した。国際展示会であるFAOPMA PEST SUMMITおよびPEST WORLDでは、工程管理や業務管理に関するIT技術が多く見られた一方、調査・点検や防除技術に直接活用されるデジタル機器は限定的であり、海外においても技術開発は発展途上であることが確認された。また、日本で主流であった赤外線センサーに加え、海外では振動センサーを利用したねずみ検知技術が普及していることが明らかとなった。

さらに、令和5年度に抽出したデジタル機器のうち、ねずみ用センサーについて実験的検証を行った。その結果、センサー設置後には餌の喫食量が減少し、ねずみがセンサーを迂回または忌避する行動を示すことが確認された。これは、センサーがねずみの行動に影響を及ぼし、調査結果に偏りを生じさせる可能性を示唆するものであり、デジタル機器の運用時にはこうした影響を考慮する必要があることが示された。

また、ウェアラブルアイトラッカーを用いた厨房での実証調査では、熟練作業員と未経験者との間で点検ルート、注視時間、点検姿勢、設備や什器に関する知識、トラップ設置提案箇所および害虫発見速度に差がみられた。これにより、目視点検技術の一部を客観的に可視化できる可能性が示された。

令和 7 年度は、デジタル技術の活用可能性をさらに検証するため、国際的な技術動向調査、自動計数機器の性能評価、および熟練者の点検行動分析を実施した。国際学会 ICUP2025 では、オンラインねずみ監視、AI によるねずみ画像識別、AI を用いた昆虫計数などの研究発表がみられたものの、全体に占める割合は少なく、ねずみ・衛生害虫防除分野におけるデジタル技術は国内外ともに発展途上であることが改めて確認された。また、実務者を対象としたワークショップでは、報告書作成支援、害虫同定の自動化、臭気センサーや AI 搭載ドローン、トラップ配置支援ツールなどへの期待が示される一方、AI 判定精度や顧客との合意形成が課題として挙げられた。

機器性能の検証では、自動計数機能付き捕虫器を用いてイエバエおよびクサビノミバエを対象とした実験を行った。その結果、部屋の広さや明暗条件の違いによる捕獲数への影響は認められず、計数精度はイエバエで特に高く、クサビノミバエでも 80%以上の検出率が得られた。これにより、自動計数技術が環境条件の違いに左右されにくく、害虫発生状況の継続的なモニタリングに活用できる可能性が示された。

さらに、厨房における目視点検作業について詳細な視線分析を実施した結果、熟練作業員は什器の脚部や裏側、水回り、熱源周辺、壁の亀裂、冷蔵庫のパッキンや蝶番など、害虫の生息・侵入リスクが高い箇所を重点的に確認していることが明らかとなった。また、アイトラッカー分析から、熟練者はペンライトで照射する前に次の確認箇所へ視線を移動させており、先読みしながら効率的

に点検を進めていることが可視化された。これらの知見は、熟練者の暗黙知をデジタル技術によって形式知化し、点検手法の標準化や人材育成に活用できる可能性を示している。

以上より、本研究では、ねずみ・衛生害虫防除分野におけるデジタル技術の現状と課題を整理するとともに、センサー機器や自動計数装置の性能評価、ならびに熟練者の点検技術の可視化を行った。その結果、デジタル技術は害虫発生状況の把握や業務効率化に寄与する可能性を有する一方で、機器が対象生物の行動に与える影響や AI 判定精度、実務への適用方法など、社会実装に向けて解決すべき課題が残されていることが明らかとなった。また、視線分析による熟練技術の可視化は、今後の点検技術の標準化や技能継承を支援する有効な手法となる可能性が示された。

C4. 清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

令和 5 年度は、清掃分野における研究動向とデジタル技術の現状把握を目的として、既往研究の収集・整理を行い、論文・資料のデータベース構築に着手した。また、清掃分野で活用されているデジタル機器を調査し、比較的導入しやすい技術として清掃点検報告システムに着目した。そこで、従来の紙媒体による点検報告書を基にデジタル様式の記入用紙案を作成し、次年度以降の実証実験に向けた準備を行った。さらに、トイレの維持管理を対象として、利用者数カウンター、マグネットセンサー、ゴミ箱容量検知センサーなどを用いた実証実験の方法を検討した。このほか、アイトラッキングシステムを用いた予備的な分析から、人による目視点検の確認箇所や確認方法を可視化できる可能性が示され、将来的にカメラやセンサーによる自動点検と人による点検との比較評価につながる知見が得られた。

令和 6 年度は、令和 5 年度に構築した研究資料を拡充し、1950 年から 2025 年までに公表された

346 編の清掃関連論文を整理した。その結果、汚れの実態把握や発生要因、汚れ評価に関する研究が全体の約 4 割を占めることが明らかとなり、清掃研究の主要な関心領域を整理することができた。

また、清掃点検報告システム「123 レポーター」を用いた実証実験を 13 施設で実施し、従来の紙媒体による報告方式との比較を行った。その結果、13 施設中 10 施設において作業時間の短縮が認められ、短縮時間は 10～130 分であった。施設規模や作業内容による差はあるものの、全体として報告業務の効率化に寄与する可能性が示された。

さらに、トイレ維持管理におけるセンサー活用の実証実験を実施した。利用者数カウンター、個室利用センサー、トイレトペーパーおよび水石鹸の在庫アラートセンサー、ごみ量センサーを用いてデータを収集した結果、利用者数の推移や利用ピーク時間、個室利用状況、消耗品補充の適切なタイミングなどを把握できることが確認された。特に水石鹸については、本調査条件では 5～7 日間隔での補充が可能であることが示され、実態に応じた維持管理計画の立案に活用できる可能性が示された。

令和 7 年度は、これまでの研究成果を踏まえ、清掃分野におけるデジタル技術の普及状況、導入効果および品質評価への応用について検討を行った。まず、令和 5 年度から収集した論文データを体系化し、検索可能なデータベースウェブサイトを構築した。

次に、2025 年に開催されたビルメンテナンス関連展示会を調査した結果、出展企業の多くが清掃機器、ロボット、センサー関連企業であり、特に床清掃ロボットの普及が進展していることが確認された。また、勤怠管理や報告書作成などの業務支援システムも多数出展されており、人手不足への対応策としてデジタル化が進んでいることが明らかとなった。

さらに、東京ビルメンテナンス協会加盟企業を対象とした調査では、多くの企業が清掃ロボット

を導入しており、清掃品質の向上や作業負担軽減などの効果が認識されていた。一方で、業務効率化システムについては未導入の企業も一定数存在し、さらなるデジタル化の余地があることが確認された。

デジタル技術の効果検証では、令和 6 年度の実証実験結果を詳細に分析した結果、清掃点検報告システムの導入により、13 施設中 10 施設で作業時間が短縮し、平均では約 20%の効率化が認められた。加えて、写真管理機能や音声入力機能により、報告書作成負担の軽減や情報共有の向上といった効果も確認された。また、トイレ利用状況や消耗品残量、ごみ箱充填率のセンサーデータは、利用実態に応じた清掃頻度の調整や資材補充計画の最適化に活用できることが示された。

加えて、清掃品質の客観的評価手法として ATP 測定に関する基礎的検討を行った。その結果、測定値は建材表面の凹凸や使用する測定機器によって大きく変動することが確認された。実建築物での測定では、トイレ設備や清掃用具の一部で高い ATP 値が検出され、清掃対象箇所や作業方法の改善の必要性が示唆された。また、清掃後には平均 56%の汚れ除去が確認されたものの、測定機器間で数値差が大きく、現時点では建築物清掃に適用可能な統一的な基準値は十分に確立されていないことが明らかとなった。このため、今後は利用頻度や部位特性を考慮した評価基準の整備が必要であることが示された。

以上より、本研究では、清掃分野におけるデジタル技術の現状把握から実証実験、導入効果の評価、さらには清掃品質評価への応用までを体系的に検討した。その結果、清掃点検報告システムや各種センサーは業務効率化や維持管理の最適化に有効であり、清掃ロボット等の導入も着実に進展していることが確認された。一方で、品質評価指標の標準化や評価手法の信頼性向上など、デジタル技術を清掃管理へ本格的に実装するための課題も明らかとなった。

C5. 建築物内受水槽及び排水設備の衛生管理に活用可能な技術に関する調査

令和 5 年度は、水の衛生管理に活用可能なデジタル技術の現状把握を目的として、貯水槽や排水設備等に関連する点検・清掃技術の調査を行った。その結果、水中で稼働可能な清掃ロボットや、水関連施設の点検に活用できるロボット、ドローン等の技術が既に実用化されていることを確認した。これらの機器にはカメラに加え、サーマルセンサーや收音装置などを搭載したものも存在し、設備状態の把握や異常検知に利用できる可能性が示された。しかし、多くの機器は点検作業による手動操作を前提としており、建築物衛生法に基づく定期点検や清掃業務を直接代替する段階には至っていないことが明らかとなった。このことから、水の衛生管理分野におけるデジタル技術は個別技術としては実用化が進んでいるものの、自動化や業務全体への統合には依然として課題が残されていることが示された。

令和 6 年度は、点検・清掃業務の実態とデジタル技術導入の可能性について、事業者等へのヒアリング調査を通じて検討を行った。その結果、現場における点検や清掃作業の多くは依然として目視や手作業に依存しており、現段階でのデジタル技術の活用は限定的であることが確認された。一方で、点検結果の記録管理や報告書作成などの周辺業務については、デジタル技術を活用した業務支援ツールの導入が進んでいることが明らかとなった。また、熟練技術者の不足を背景として、AI による画像診断、流量計などの連続測定機器、排水管内のガス組成モニタリングなどを活用し、点検や清掃の実施時期や対象箇所を合理的に判断する支援システムへの期待が高いことが確認された。これにより、現場作業そのものの完全自動化は困難であるものの、データに基づく予防保全や業務支援の方向性が有望であることが示された。

令和 7 年度は、これまでに整理した課題を踏ま

え、水関連設備の診断・清掃技術の体系的な整理と、自動化システムの可能性について検討を行った。まず、建築物衛生法、既往研究および事業者ヒアリングに基づき、排水管の診断技術および清掃技術を整理した。排水管の劣化診断では、放射線透過試験（X 線）、超音波肉厚測定、内視鏡調査などの非破壊検査技術が活用されており、特にイメージングプレート（IP）法を用いた放射線透過試験は高精度な残存肉厚測定が可能で、余寿命評価や保全計画の合理化に有効であることが確認された。一方で、これらの診断技術においても撮影や測定作業は依然として人手に依存しており、自動化には課題が残されていた。

また、排水管清掃では高圧洗浄法やワイヤ式清掃法などの機械的洗浄法に加え、閉塞検知と洗浄を組み合わせた技術も提案されていることを整理した。しかし、診断、清掃および維持管理情報を統合的に管理するシステムは実用化されておらず、個別技術が存在する一方で、それらを連携させた包括的なデジタル管理手法は未成熟であることが明らかとなった。

そこで本研究では、水の衛生管理分野における自動化技術の一例として、レーダー式レベルセンサーを用いた排水管閉塞自動検知・洗浄システムを提案し、その基礎的検証を行った。実験では、排水横管内に擬似閉塞を発生させ、排水ます内の水位変動を測定した。その結果、閉塞の進行に伴う水位上昇を連続的に検知できることが確認され、閉塞除去後には水位が速やかに低下した。これにより、レーダー式レベルセンサーを用いて排水管内の閉塞状態を把握し、自動的に洗浄装置を作動させるシステムの実現可能性が示された。

以上より、本研究では、水の衛生管理分野におけるデジタル技術の現状と課題を整理するとともに、点検・診断・清掃技術の発展状況を体系的に把握した。その結果、ロボット技術や非破壊検査技術などの個別技術は実用段階に達しているものの、多くは人手による操作を前提としており、

現場作業の完全な代替には至っていないことが明らかとなった。一方で、センシング技術や AI を活用した状態監視、自動検知・自動洗浄システムなどの導入により、予防保全型の維持管理や業務効率化を実現できる可能性が示され、今後はこれらの技術を統合した総合的な維持管理システムの構築が重要な課題であることが明らかとなった。

D. 考察

本研究は、先行研究で主として検討されてきた空気環境分野に加え、ねずみ・衛生害虫防除、清掃、水・排水設備管理等を含む建築物衛生管理全般を対象として、デジタル技術の導入可能性と課題を明らかにすることを目的として実施した。研究期間中には、国の「デジタル技術を活用した建築物環境衛生管理のあり方に関する検討会」においても制度的検討が進められ、本研究はその継続的な検討課題を踏まえながら、実測調査や実証実験を通じて実務的な知見を蓄積してきた。本研究全体を通して、以下のように論点を整理した。

(1) デジタル技術による「見えない状態」の可視化

本研究を通じて、デジタル技術の最大の意義は、従来は断続的な測定や経験的判断に依存していた衛生リスクを連続的かつ定量的に把握できる点にあることが明らかとなった。空気環境分野ではCO₂濃度やPM_{2.5}濃度の連続測定、バイオエアロゾルのリアルタイム測定、水分野では排水管内の水位変動監視、清掃分野ではトイレ利用状況や消耗品残量の把握、ねずみ・衛生害虫防除分野では自動計数装置やセンサーによる生息状況把握などが可能となった。

これらの技術は、人の巡回や定期点検だけでは把握しにくい状態変化を継続的に監視し、異常の早期発見や業務の効率化に寄与する可能性を有している。一方で、現時点では多くの技術が特定の

工程や対象に限定された個別技術であり、建築物衛生管理全体を包括的に代替できる段階には至っていない。

(2) 測定精度・信頼性と標準化の課題

各分野に共通して、デジタル技術の活用にあたっては測定精度とデータ信頼性が最も重要な課題として抽出された。

空気環境分野では、PM_{2.5}センサーが超微粒子を十分に検出できない可能性や、測定器ごとの校正係数の違いによる測定値のばらつきが確認された。また、CO₂センサーについては、自動校正機能による過小評価や設置環境による影響が明らかとなり、定期校正や適切な設置管理の重要性が示された。さらに、ATP測定では測定機器や測定対象面の状態によって結果が大きく変動することが確認された。

これらの結果は、デジタル機器の導入だけでは十分ではなく、校正方法、補正手法、評価指標、基準値などの標準化が不可欠であることを示している。特に建築物衛生法に基づく管理への適用を考える場合には、法定測定との整合性やデータの品質保証の方法について制度的な整理が必要である。

(3) 現場作業の代替よりも業務支援への効果

本研究では、当初想定されたような現場作業の完全自動化は容易ではないことが明らかとなった。

ねずみ・衛生害虫防除分野では、対象生物の多様性や現場ごとの状況の違いにより、調査・防除・効果判定までを一体的に自動化することは困難であった。また、ねずみ用センサーについては、ねずみ自身が機器を認識して忌避行動を示す可能性があり、センサー設置が行動に影響を与えるという課題も確認された。

水分野においても、点検ロボットやドローン、非破壊検査技術などは実用化されているものの、多くは人による操作を前提としており、点検・診

断・清掃の全工程を自動化するには至っていない。

一方で、報告書作成、記録管理、データ集約などの周辺業務では、デジタル技術の導入効果が比較的大きいことが確認された。清掃点検報告システムでは報告書作成時間の短縮や情報共有の改善が認められ、環境衛生監視業務においてもデータ管理や監視対象の優先順位付けへの活用可能性が示された。

このことから、現段階のデジタル技術は「人を置き換える技術」ではなく、「人の判断や作業を支援する技術」として位置づけることが適切であると考えられる。

(4) 熟練技能の可視化と継承

建築物衛生管理の多くの業務は、熟練技術者の経験や判断に依存している。本研究で実施したアイトラッカーによる視線分析では、熟練者と未経験者の間で点検箇所、視線移動、注視時間、移動経路などに明確な違いが認められた。

熟練者は設備構造や衛生害虫の生態を理解した上で効率的に点検を行っており、その技能は従来暗黙知として扱われてきた。しかし、アイトラッカー等を用いることで、これらの知識や判断過程を可視化し、教育・訓練や作業標準化へ活用できる可能性が示された。

今後は、AI 画像認識や点検支援システムと組み合わせることで、熟練技能の形式知化と技能継承に活用することが期待される。

(5) 予防保全型管理への転換

従来の建築物衛生管理は、定期点検や異常発見後の対応を中心とする事後対応型管理であった。しかし、本研究で検討した各種センサー技術や連続監視技術は、異常が顕在化する前に変化の兆候を把握することを可能にする。

CO₂濃度の常時監視による換気状態の把握、トイレ利用状況に基づく清掃計画の最適化、排水管閉塞の予兆検知、害虫発生状況の継続監視などは、

その代表的な例である。これらは限られた人的資源を効率的に活用しながら、より効果的な衛生管理を実現する手法として期待される。

したがって、デジタル技術の活用は、建築物衛生管理を「定期点検中心の管理」から「データに基づく予防保全型管理」へ発展させる可能性を有している。

(6) 統合的な衛生管理システムと制度設計の必要性

本研究で対象とした各分野では、有望なデジタル技術が多数確認されたものの、それらの多くは個別機能にとどまっていた。例えば、水分野では診断・清掃・完了確認を一体的に管理するシステムは存在せず、ねずみ・衛生害虫防除や清掃分野においても、調査から対策、評価までを統合する仕組みは十分整備されていない。

今後は、各種センサー、AI 解析、維持管理履歴、点検記録などを統合したデジタルプラットフォームを構築し、建築物衛生管理全体を一元的に支援する仕組みの検討が必要である。

また、現行の建築物衛生法は定期測定・定期点検を前提としているため、IoT による連続監視や AI による判定結果をどのように位置づけるかについて制度的整理が求められる。デジタル技術の導入を促進するためには、測定精度や信頼性に関する基準整備に加え、法定測定との関係や評価方法の見直しを含めた制度設計が重要な課題である。

E. 結論

建築物衛生管理分野におけるデジタル技術は、空気環境、清掃、ねずみ・衛生害虫防除、水・排水設備管理の各分野において、衛生状態の可視化、業務効率化、技能継承、予防保全の推進に大きな可能性を有することが確認された。一方で、測定精度の確保、標準化、人とデジタル技術の役割分担、制度との整合性などの課題も明らかとなった。したがって、現段階では、デジタル技術を活用し

た建築物環境衛生管理基準の策定は時期尚早であると判断する。

しかし、さらなるデジタル技術の進展に伴い将来的にはこれらを建築物環境衛生管理に活用することは時代の流れとして否定できない。今後は、個別技術の導入段階から、各種データを統合したデータ駆動型の建築物衛生管理システムへ発展させるとともに、それを支える評価基準や法制度の整備を進めることが必要となるであろう。個別技術の高度化に加え、各技術を統合した建築物衛生管理プラットフォームの構築と、それを支える制度・運用基準の整備を進めることが、建築物衛生管理のデジタルトランスフォーメーション実現に向けた重要な方向性であると考えられる。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 柳宇：浮遊微生物測定法の現状。空気清浄，第 62 巻，第 2 号，4-11。2024。
- 2) 阪東美智子。ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討。Pest Control Tokyo. 2025.7;Vol.90:15-18。
- 3) 谷川力。PCO における IoT 技術の活用—ねずみ等の遠隔監視の実例と普及の課題—。第 53 回建築物環境衛生管理全国大会（公益社団法人日本建築衛生管理教育センター）。2026.01:42-45。

2. 学会発表

- 1) 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，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，1241-1244。2025。

- 3) 阪東美智子。ペストコントロール分野の IT 活用状況に関するアンケート調査。第 83 回日本公衆衛生学会総会；2024.10.29-31；札幌。同抄録集。P21-16(31AM012).p.607。
- 4) 谷川力，芝生圭吾，木村悟朗，茂手木眞司，小室正二，阪東美智子。アイトラッカーを利用した調査—ベテランと初心者の調査視点の相違について—。日本ペストロロジー学会大会；2024.12.3-4；群馬。同抄録集(40)。p.33。
- 5) 茂手木眞司，谷川力，芝生圭吾，木村悟朗，阪東美智子。ペストコントロール業界におけるデジタル機器活用状況。日本ペストロロジー学会大会；2024.12.3-4；群馬。同抄録集(40)。p.34。
- 6) 杖先壽里，正田浩三，栢森聡，阪東美智子。清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討。第 52 回建築物環境衛生管理全国大会；2025.1.23-24；東京。同抄録集。p.88-89。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 杖先壽里、正田浩三、阪東美智子：清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討（その 2）、第 53 回建築物環境衛生管理全国大会、P56-57、2026 年 1 月
- 10) 渡辺貴之、杖先壽里、正田浩三：清掃管理業務に関する調査論文の収集・データベース化、第 53 回建築物環境衛生管理全国大会、P58-59、2026 年 1 月

- 11) 清掃現場における人手不足に関する調査（作業効率化・機器等の導入）：公益社団法人 東京ビルメンテナンス協会 建築物衛生管理委員会 調査研究小委員会、2026 年 3 月
- 12) Goro Kimura, Behavioral Response of Musca Domestica to Visual Targets, Proceedings of the Eleventh International Conference on Urban Pests 2025, 219-224.
- 13) 阪東美智子. ペストコントロールにおける IT 技術活用の可能性：アイトラッカーによる目視点検の分析. 第 84 回日本公衆衛生学会総会；2025.10.29-31；静岡. 同抄録集. p.660.
- 14) 田中和之, 木村悟朗, 芝生圭吾, 谷川力, 阪東美智子. センサーカメラの設置によるクマネズミの行動変化 . 第 76 回日本衛生動物学会東日本支部大会；2025.11.1；千葉. 同要旨集. p.29.
- 15) 谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 佐々木健, 市川博一, 大山克幸, 野本祥一, 西田雄剛, 大川拓也, 茂手木眞司, 下ノ藺慧, 阪東美智子. 実際の現場でのアイトラッカーを利用した調査一続 熟練作業員と未経験者の調査視点の相違について－. 第 41 回日本ペストロロジー学会大会；2025.11.6-7；新潟. 同抄録集(41). p.40.
- 16) 木村悟朗, 谷川力, 阪東美智子. 空間サイズおよび室内照明がハエ・コバエ類の捕獲効率に及ぼす影響. 第 78 回日本衛生動物学会大会；2026.4.18-19；栃木. 衛生動物大会特集号 (77). p.77.

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

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
建築環境衛生の実態とデジタル技術に関する調査

研究分担者 開原 典子 国立保健医療科学院 建築・施設管理研究部 上席主任研究官
研究分担者 林 基哉 北海道大学 大学院工学研究院 特任教授

研究要旨

デジタル技術を活用した建築物環境衛生管理について、エアロゾル感染対策を含む空気環境管理への適用可能性、および建築物環境衛生監視指導への活用可能性と課題について検討を行った。

環境衛生管理におけるデジタル技術の適用については、CO₂ 濃度による換気状態の検知および空調換気設備制御に着目し、測定器の精度と自動校正によって生じる誤差について検証した。その結果、自動校正によって CO₂ 濃度が過小評価された場合、換気量が抑制され、室内 CO₂ 濃度が上昇する可能性が示された。また、温度条件等によって測定誤差が発生する可能性も認められ、測定精度および精度維持方法の重要性が示唆された。建築物における環境衛生を長期的に維持するためには、IoT 機器の精度維持、定期的な点検・維持管理、測定データの信頼性確保等を含めた総合的な管理が重要であると考えられた。

建築物環境衛生管理に関連するデジタル技術の現状については、IoT、AI、クラウド等を活用したスマートビル技術の普及により、空気環境管理、給排水管理、設備監視、異常検知等への活用可能性が広がっていることが確認された。一方で、データ標準化、空間情報整理、システム複雑化への対応、情報セキュリティ対策、センシング機器の信頼性確保等が課題として認められた。

また、建築物環境衛生監視指導においては、人員不足、監視対象施設数の増加、紙媒体による記録管理、監視業務の属人化等の課題が確認された。IoT センサーやクラウド管理等を活用することにより、異常値把握、監視優先度付け、情報共有等への活用可能性が示された一方、IoT による測定データは法定測定を代替するものではなく、日常管理や異常検知等を補完する技術として活用する必要があることが整理された。

以上より、建築物環境衛生管理および監視指導におけるデジタル技術活用に関して、測定精度、データ信頼性、運用条件等に関する課題が整理され、効率的かつ実効性のある監視体制の構築に資する基礎的知見が得られた。

A. 研究目的

A1. 環境衛生管理のためのデジタル技術の適応

デジタル技術を活用し建築環境衛生の維持向上を効率的に行うために、技術開発の動向を把握して建築物環境衛生管理基準のあり方を検討するための基礎資料とすることを目的とした。建築

環境衛生における課題を整理し、その維持向上に資する要素を明確するとともに、建築環境衛生に関連する既存技術、技術開発動向を収集整理した。

A2. 環境衛生管理におけるデジタル技術の現状

A2.1. デジタル技術の現状と可能性

近年、IoT、AI、クラウド等を活用したスマートビル技術の普及が進み、建築物環境衛生管理においても、空気環境、給排水管理、清掃、防除等へのデジタル技術活用の可能性が広がっている。特に、BEMS 等を活用した空気環境管理や、センシング技術を用いた設備監視・異常検知等については、環境衛生管理業務への応用が期待されている。

一方で、デジタル技術の活用にあたっては、データ標準化、空間情報との関係整理、システム複雑化への対応、セキュリティ対策、センシング機器の信頼性確保等の課題も指摘されている。

本節では、建築物環境衛生管理に関連するデジタル技術の現状および活用可能性について整理するとともに、建築物環境衛生管理への適用にあたって留意すべき課題について検討を行った。

A2.2.建築物環境衛生管理におけるデジタル技術活用の可能性と監視指導上の課題に関する検討

建築物衛生法に基づく環境衛生監視指導については、対象施設数の増加、施設用途の多様化、監視業務の複雑化等により、限られた人的資源の中で効率的かつ効果的な監視体制を構築することが課題となっている。

また、紙媒体を中心とした記録管理や、監視業務の属人化等も課題として指摘されており、監視指導業務の効率化および平準化が求められている。

本節では、自治体における建築物環境衛生監視指導の実態および課題を整理するとともに、IoT等のデジタル技術を活用した監視指導支援の可能性について検討を行い、今後の建築物環境衛生管理基準の運用および監視体制のあり方に関する基礎資料を得ることを目的とした。

B. 研究方法

B1. 環境衛生管理のためのデジタル技術の適応

環境衛生管理のためのデジタル技術の適応として、主にエアロゾル感染対策を中心にデジタル技術の利用について情報を収集・整理する。

COVID-19 パンデミックによって感染症対策のために、デジタル技術の利用の試みが行われている。パンデミックを契機に普及した CO₂ 濃度による換気状態の検知と空調換気設備制御に関する課題として注目されている測定器の精度と誤差によって生じる課題について検証し、今後の CO₂ 濃度の測定器に求められる要件について検討した。

B2. 環境衛生管理におけるデジタル技術の現状

B2.1. デジタル技術の現状と可能性

建築物衛生法の環境衛生管理項目を中心に、今後の環境衛生管理に資するデジタル技術の導入例について、関連する企業等からデジタル技術に関する情報を収集し整理した。

B2.2. 建築物環境衛生管理におけるデジタル技術活用の可能性と監視指導上の課題に関する検討

建築物衛生の監視指導に従事する環境衛生監視員等の実務担当者により共有された監視指導上の課題認識、自治体からの事前課題回答、監視指導実態に関する資料等を用いて、建築物環境衛生監視指導上の課題を整理した。なお、課題認識の整理にあたっては、地方公共団体等において環境衛生監視業務に概ね 2 年以上従事した実務担当者による課題整理および意見交換の内容を参考とする。また、建築物環境衛生管理に関連する IoT センサー、クラウド管理、電子台帳等のデジタル技術について、既存事例および活用状況を収集し、監視指導業務への適用可能性を整理した。さらに、報告徴収および立入検査の実施状況、不適率の推移等について整理し、デジタル技術活用との関係について検討を行った。

C. 研究結果

C1. 環境衛生管理のためのデジタル技術の適応

C.1.1. 室内環境検知による感染リスク推定

室内環境中で健康影響を及ぼす物質には、病原体（ウイルス、細菌、真菌など）、アレルゲン（カビ、ダニ、ゴキブリ等の昆虫、ペットの毛・フケ、花粉など）、化学物質（燃焼ガス、揮発性化学物質、オゾンなど）、病原体・アレルゲン・化学物質を含む粒子（粉塵、ハウスダスト）などがある。空気を介して伝播する病原体には、新型コロナウイルス、インフルエンザウイルス、水痘ウイルス、麻疹ウイルス、風疹ウイルス、ノロウイルス、レジオネラ属菌、結核菌、マイコプラズマ、百日咳菌などがある。

図1に示すように、空気中の物質濃度は、その発生量と換気量によって推定される。空気中の病原体濃度は健康リスクの基礎情報であり、その濃度は病原体発生量と換気量によって推定される。

表1に、室内環境検知と感染リスクに係る項目を示す。検知の対象には、ウイルス濃度などの感染リスクの直接的な要因、在室者の行動、室内空気質、空調換気設備などの感染リスクの間接的な要素が挙げられる。直接的な検知については、ウイルスの検知技術が開発段階にあり、今後の実用化がきたいされている。また、間接的な要素については、複数の要素を検知して感染リスクを推定するための技術が検討され、実用化されている事例がある¹⁾⁻¹²⁾。

C.1.2. 環境中トレーサーを用いた感染リスク推定

換気を定量化するためには、給排気風量を測定する風量法とトレーサー法がある。トレーサー法は、建物隙間を介する通気や他室との相互換気等がある場合でも定量化が可能である。

換気量の測定では、CO₂やSF₆などのガスを用いたトレーサーガス法が用いられている。空間で発生量が想定（例えば、人体のCO₂発生量）できる物質は、トレーサーとして利用できる。

図2に示すように、トレーサー法によって、空

間全体（換気量、換気回数）、分布（空気齢、局所換気回数）、多空間（相互換気量、換気回路）に関する換気量が算出される。換気量と病原体発生量から、その濃度が算出され、感染リスク評価の基礎情報となる。なお、新型コロナウイルスの室内濃度から感染リスクを推定した事例がある¹²⁾⁻¹⁶⁾。

表2に換気量の推定方法を示す。環境中トレーサー濃度の情報数によって、空間の平均濃度や分布、変化などの推定レベルが制約される。

C.1.3. エアロゾル感染対策のデジタル技術

令和4年6月にデジタル臨時行政調査会は「デジタル原則に照らした規制の一括見直しプラン」を決定し、人を介する代表的なアナログ規制7項目について見直しを行う事となった。厚生労働省は「デジタル技術を活用した建築物環境衛生管理のあり方に関する検討会」を立ち上げ、令和6年6月に中間報告を取りまとめた。

IoT、AIなどのデジタル技術の活用は様々な分野で行われている。建築物においても、空調・照明・人流データを一元管理するスマートビルの普及、点検データから報告書の自動作成やテナントの要望に対する自動対応などへの生成AIの活用も期待されている。また、各種センサー・カメラ等を用いた室内空気環境、汚れ、ねずみ等の検知など、建築衛生管理を効率的に実施する技術の可能性が示されている。図3に示すように、デジタル技術は、建築物の環境衛生に関する認知、基準適合判断などの認識、空調換気設備の運転、防虫防鼠、清掃など、建築物環境衛生管理の様々な段階で人よりもより高い精度や効率で実施できる可能性を持っている。

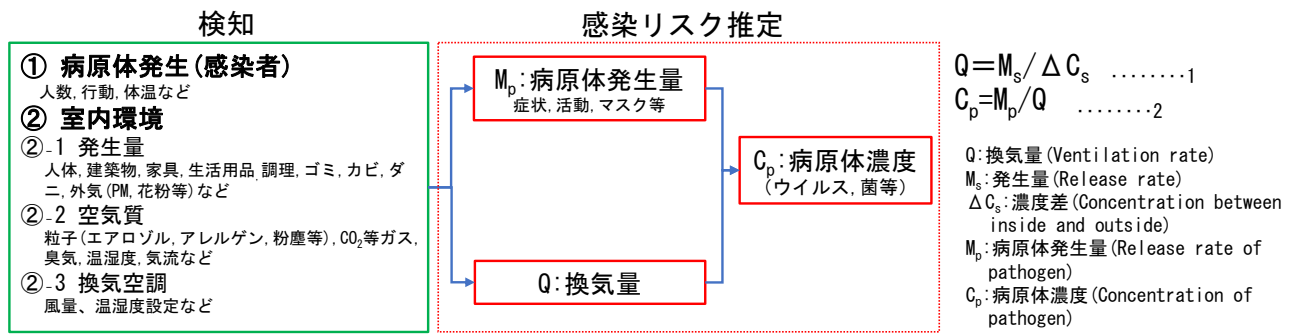


図1 室内環境検知と感染リスク推定の基本枠組

表1 室内環境検知と感染リスクに係る推定

対象	検知	検知に基づく推定	備考
① 病原体発生(感染者)	・ 人感(動態) ・ 放射温度 ・ 熱画像 ・ 感染情報	・ 在室の有無、通過人数 ・ 体温(発熱) ・ 体温(発熱)、在室者数 ・ 感染者の在室確率	・ IoT ・ AI等による分析
② 室内環境			
②-1 発生量	・ 人体: ①と共通 ・ 建築情報(設計図書, 家具情報等) ・ 生活情報(購入履歴, 生活習慣) ・ 室内環境情報(結露やカビ, ダニ) ・ 外気情報(気象, PM2.5, 花粉等)	・ 発生量 ・ 建築物, 家具からの発生量 ・ 生活用品, 調理, ゴミからの発生量 ・ 結露, カビ, ダニ等に伴う発生量 ・ 侵入量	・ BIM (Building Information Modeling) ・ AI等による分析
②-2 空気質	・ 測定器(粒子(エアロゾル, アレルゲン, 粉塵等), CO₂等のガス, 臭気, 温湿度, 気流) ・ 測定値による分析(結露, カビ, ダニ, アレルゲンなど) ・ 室内環境指標(温熱環境, 空気環境)	②-1 発生量と②-2 空気質から換気量を推定	・ BEMS (Building Energy Management System) ・ AI等による分析
②-3 換気空調	・ 外気量, 循環量(OA, EA, SA, RA) ・ 設定温湿度 ・ 設定CO₂濃度	②-3 換気空調から換気量を推定	・ BEMS (Building Energy Management System) ・ AI等による分析
感染リスク	・ ウイルス濃度の測定分析: PCR (Polymerase Chain Reaction), バイオエアロゾルセンサー (UV)、ウイルスセンサー (人工DNAアプタマー) ・ AI等による分析		

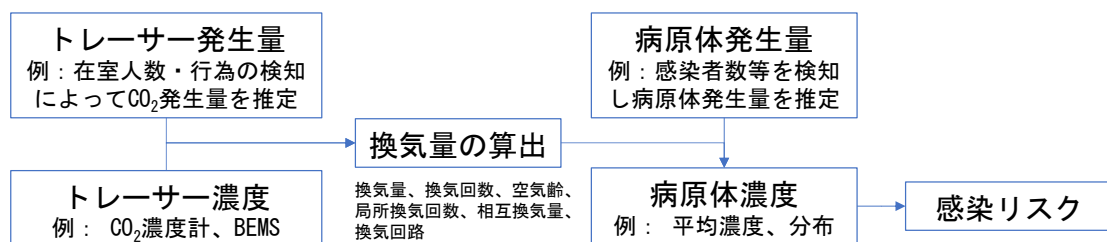


図2 環境中のトレーサーを用いた病原体濃度の推定

表2 トレーサー法による換気量推定

換気の指標	推定方法	基本式及び計算手法の例
換気量・換気回数	トレーサの発生量と濃度から、空間の換気量・換気回数を算出する。 病原体発生量を想定すると、空間の病原体濃度を推定することが出来る。	基本式：トレーサー質量収支式 $V_i \cdot C'_i(t) = Q(t) \cdot (C_o - C_i) + M_i(t)$ V_i :空間容積, C_i :空間濃度, C_o :給気濃度, Q :換気量, M :発生量 換気量・換気回数:濃度変化, 濃度減衰, 濃度上昇から、算出
空気齢、局所換気回数	トレーサの発生量と空間内濃度分布・変化から、空間の各点の空気齢、局所換気回数を算出する。 病原体発生量を想定し、空間の病原体濃度の分布を推定することが出来る。ただし、発生源に分布がある場合は、CFD等による解析が必要となる。	空気齢:点のCO ₂ 濃度減衰から空気齢は式(1)により得られる。 $\tau_p = \int_0^\infty \frac{C_r - C_o}{C_{r0} - C_o} dt \quad \dots (1)$ τ_p :局所空気齢[h], C_o :外気濃度[m ³ /m ³], C_r :時刻tにおける室内濃度[m ³ /m ³], C_{r0} :時刻t ₀ における室内濃度[m ³ /m ³] 局換気回数:N=1/τ _p
相互換気量・換気回路	複数空間のトレーサの発生量と濃度から、相互換気量・換気回数を算出する。 病原体発生量と発生する空間を想定すると、発生する空間から他の空間に移動し、それぞれの空間の病原体濃度を推定することが出来る。	基本式：複数空間のトレーサー質量収支の連立式 $\{V_i \cdot C'_i(t)\} = [Q(t)] \cdot \{C_i\} + \{M(t)\}$ V_i :空間iの容積, C_i :空間iの濃度, $[Q]$:風量マトリックス, $[M]$:発生量マトリックス 計算手法:微分方程式の数値解法(ルンゲ=クッタ法, New mark β法, EXCELソルバー等)

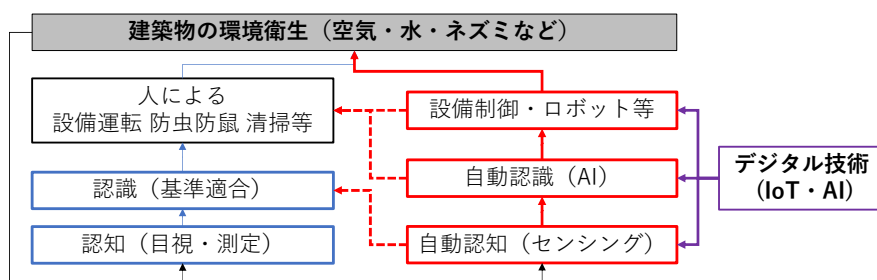


図3 建築物環境衛生におけるデジタル技術の可能性

しかしながら、建築物における省エネルギーのために早くから導入されたデジタル技術であるBEMS（Building Energy management system）は、エネルギーや室内環境に関するデータが十分に活用されず、環境衛生管理には活用されていない。特定建築物の空気環境基準に対する不適率は、温度、相対湿度、CO₂濃度で高くなっており、その要因として省エネルギーが挙げられている。デジタル技術の導入によって、不適率の改善はもとより様々な効果が期待されるが、その効果を実現するには慎重な検討と検証が必要である。

具体的には、以下のような観点が必要である。全国の建築物には、新旧、地域による差がある。

建築物と設備に使われている技術は多様であるため、一律のIoT導入は健康リスクの背景になる。IoTは急速に進化するため、現場から先進技術までの相互理解がないと実質的な効果が得られない。国際的には、デジタル技術（認知、認識）による建築物の環境評価も進んでいる。PCOに先進的なデジタル技術が使われつつある。普及にはコスト、情報管理、人による対処への連携など、課題がある。空気環境の連続測定センサーの実用性が検証され、3項目（温度、湿度、CO₂）、空調設備の汚れの検知の可能性が検討されているが、センサーの精度管理が重要な課題として指摘されている。

建築物の環境衛生を長期的に保持するためには、センサー等の IoT 機器の精度維持をはじめシステムの定期的点検と維持更新が必要である。また、IoT 機器のコストや人による点検・管理のあり方など、管理の在り方を総合的に計画する必要がある。

エアロゾル感染（空気を介する感染）は、病原体を含むエアロゾルが不可視であるため、感染リスクを認知するためのデジタル技術の必要性が非常に高い。現時点では、ウイルスを直接検知することは難しく、今後の技術開発が望まれる。

COVID-19 パンデミックに際しては、人由来の CO₂ の濃度を検知することで、換気の状態を把握する方法が推奨された。CO₂ 濃度は、一人当たりの換気量を大略示すため、エアロゾル感染リスクの目安となる。また、CO₂ 濃度計は比較的安価であるため、実用的な手段である。しかし、CO₂ 濃度計の精度に関して様々な検証が行われ、一定の信頼性が確認されると同時に、機種による差や換気の過剰抑制などの可能性が指摘された。

C.1.2. CO₂ 濃度の測定・制御の要件

CO₂ 濃度の測定器の要件の中に、自動校正の必要性が指摘されている。本研究では、CO₂ 濃度の測定器の誤差に関する調査とその影響に関するシミュレーションを行った。以上に基づいて、CO₂ 濃度の測定器の要件の整理を行った。

比較的精度管理が行われている場合のセンサーの種類：精度には、NDIR：±50ppm、光音響：±100ppm などがあり、自動校正の方法には、400ppm 未満の場合に、基準外気濃度 400ppm に調整、最低値が 400ppm 超の場合に基準外気濃度 400ppm に調整する方法がある。また、調整の時間は、初期校正は使用数日後、定期校正の間隔は一週間など、調整の時間に関する対応が行われている。定期校正では、期間最低値を 400ppm に向けて段階的に修正する方法がある。なお、この定期校正間隔が 1 日の場合もある。

基準外気濃度については、外気の濃度上昇傾向があるため、ほとんどの場所で 400ppm を超えているとともに、都市部ではさらに高濃度となっていることから、実際の外気濃度を反映していないことが指摘されている。また、定期校正の間隔については、一般の事務所では週末に無人となり室内濃度が外気濃度に近くなることを想定して一週間間隔の自動校正が設定されるが、週末の換気の停止や週末の利用等によって、外気濃度に近づかない状況が継続することが指摘されている。このような濃度維持の実態に対する対応方法が自動校正の課題となっており、間隔の延長などが検討されている。

以上の自動校正方法をモデル化した上で、CO₂ 濃度の推移を仮定した場合の誤差についてシミュレーションした結果を以下に示す。

図 4-1 は、定期校正間隔が 7 日(7day)、校正が 1 段階(1step)の場合を示す。Study1-1 は CO₂ 濃度が 1500ppm 一定の場合、Study1-2 は 1500ppm 日較差が 300ppm の場合の結果である。Study1-1 では、7 日後に 1500ppm が 400ppm に変更され 1100ppm の誤差が続くことになる。日較差がある場合でも、日平均値は 700ppm となり、800ppm の誤差が継続する。

図 4-2 は、同様に定期校正間隔が 7 日(7day)、校正が 3 段階(3step)の場合を示す。7 日間の最低濃度と基準外気濃度との差の 1/3 を補正する場合である。Study2-1 は CO₂ 濃度が 1500ppm 一定の場合、Study2-2 は 1500ppm 日較差が 300ppm の場合の結果である。Study2-1 では、7 日後に 1500ppm が約 1100ppm に変更され約 400ppm の誤差になる。35 日後の誤差は約 1000ppm となる。日較差がある場合は、35 日後の誤差は約 700ppm となる。

図 4-3 は、定期校正間隔が 1 日(1day)、校正が 3 段階(3step)の場合を示す。Study3-1 では、14 日後に 400ppm に収束して誤差が約 1100ppm になる。日較差がある場合は、700ppm に収束して誤

差が約 800ppm になる。

以上のように、濃度が低下しない環境では、定期校正の間隔、校正の段階によって、異なる誤差に収束する。室内の CO₂ 濃度は、空間の利用状況や空調換気設備と運転の影響を受ける。従って、自動校正の誤差は室毎に異なると考える必要がある。

	Study 1-1	Study 1-2
Concentration	Steady (1500 ppm)	Sin wave (1500 ± 300 ppm)
Auto-calibration Interval	7 days	7 days
Calibration step	1 step	1 step

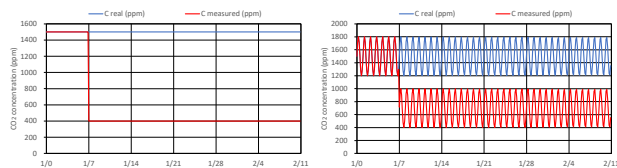


図 4-1 CO₂ 濃度誤差の試算結果 1

	Study 2-1	Study 2-2
Concentration	Steady (1500 ppm)	Sin wave (1500 ± 300 ppm)
Auto-calibration Interval	7 days	7 days
Calibration step	3 steps	3 steps

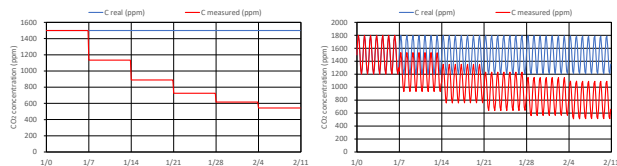


図 4-2 CO₂ 濃度誤差の試算結果 2

	Study 3-1	Study 3-2
Concentration	Steady (1500 ppm)	Sin wave (1500 ± 300 ppm)
Auto-calibration Interval	1 day	1 day
Calibration step	3 steps	3 steps

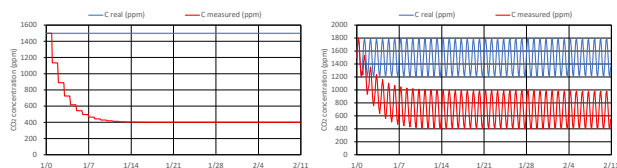


図 4-3 CO₂ 濃度誤差の試算結果 3

図 5 は、自動校正による換気抑制に関する事務所を対象にしたシミュレーションである。シミュレーション条件を以下に示す。

- ① 就業終了時に換気停止
- ② 1 日間隔 1 段階で自動校正

この条件は、COVID-19 のクラスターが発生し

たコールセンターの事例^{17),18)}を再現したものである。図 6 に示すように、この事例では省エネルギーを目的に還気の CO₂ 濃度が 800ppm になるように外気供給量を制御している。夜間の濃度低下が少ない状況で、CO₂ の自動校正が毎日 21 時に行われた。これによって、濃度を過小評価して換気量が抑制された結果、1000ppm を超える状況になった。また、濃度の過小評価の要因には、利用されていない室の空気が還気に混合したことで、濃度測定点の濃度が低くなったことも指摘された。

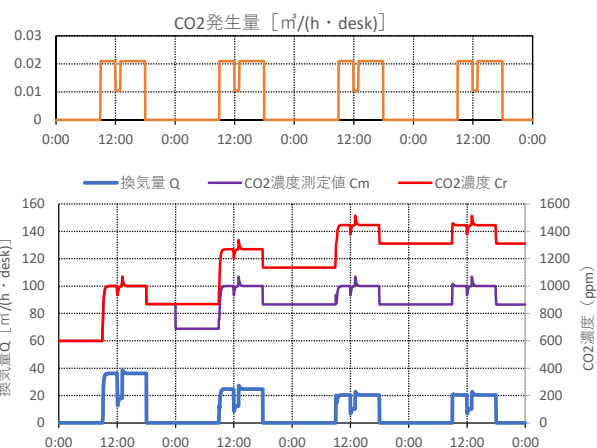


図 5 自動校正が換気量制御に与える影響

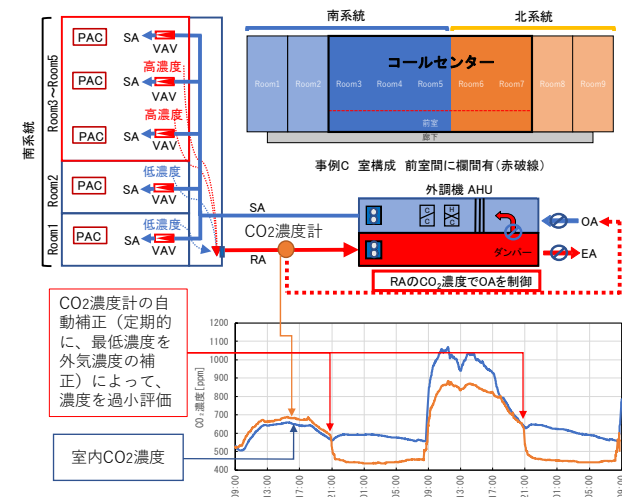


図 6 CO₂ 濃度による換気制御と自動校正の事例

自動校正による換気抑制に関する事務所を対象にしたシミュレーション(図 3)では、自動校正によって CO₂ 濃度が過小評価されると、換気量が抑

制され、実際の室内 CO₂濃度が上昇する結果が示された。また、この現象が繰り返された場合、4日後の誤差は約 400ppm となり、換気量は約半分に抑制される結果となった。さらに、CO₂濃度センサーについては、自動校正による濃度の過小評価に加え、温度条件等によって比較的大きな誤差が発生する可能性が認められた。一方、自動校正を行わない場合には、時間経過に伴い誤差が変化する可能性も認められた。

C2. 環境衛生管理におけるデジタル技術の現状

C2.1. デジタル技術の現状と可能性

C2.1.1. デジタル技術の現状

表 C2.1 に、環境衛生管理に資する項目ごとにその技術概要を示し、実装の技術を紹介する。整理する項目は、建築物環境衛生管理基準の項目（空気環境の調整、給水及び排水の管理、清掃及びねずみ等の防除）を踏まえて、空気環境の調整に資するものを“空気”、給排水及び排水の管理に資するものを“水”、清掃及びねずみ等の防除に資するものをそれぞれ“清掃”・“ねずみ”、様々な技術を統合して管理するものを“総合”、それ以外を“その他”としている。近年、スマートビルディング（スマートビルともいう）の市場規模が大きくなっている。スマートビルは、IoT (Internet of Things)・AI (Artificial Intelligent) などの技術を用いて、既存の設備制御システムでは実現が難しかった高度な省エネ（脱炭素、気候変動対応）や快適性・利便性の向上等だけではなく、データを活用した新たな価値を提供するプラットフォームとして機能しているとされている¹⁹⁾。特に「BEMS (Building Energy Management System)」は、空調等をセンシング・分析するシステムであり、環境衛生管理の空気環境の調整への使用可能性が期待されている。

C2.1.2. デジタル技術の可能性

スマートビルとは、建物内の設備やシステムを

デジタル技術で統合し、効率的な運用、快適な環境、安全性の向上を実現する次世代型の建物を指すとされている。デジタル技術を活用する際の課題について、スマートビルの「スマートビルシステムアーキテクチャガイドライン」¹⁹⁾から抽出し整理する。

1) データの意味／情報の不足

現状では、設備機器のデータに「どのような機器か」「どの場所に設置されているか」といったメタデータが十分に表現されていないため、データの横断的な利活用が難しい。

2) 空間情報の表現の必要性

設備のメタデータとして空間情報を表現することは可能ですが、設備とは独立した「空間」として表現することが適切であり、これが十分に実現されていない。

3) データの標準化の不足

データ名称や構造が標準化されていないため、建築・設備ドメインの専門知識がないとデータの意味を正しく理解することが難しい。

4) ユースケースの多様化への対応

スマートビルのビジョンに基づくユースケースの詳細検討が進んでおらず、新たな概念の抽出や関連付けの詳細化が必要である。

5) システムの複雑化

外部ネットワークへの接続や IoT デバイスの導入により、システムが大規模化・複雑化しており、セキュリティや運用の課題が増加している。

これらの課題を解決するためには、データモデルの標準化、空間と設備の関係性の明確化、セキュリティ対策の強化などが必要とされている。

C2.1.3. デジタル技術活用時のセキュリティ対策

デジタル技術活用時のセキュリティ対策として、スマートビルのガイドライン¹⁷⁾から、その内容を抽出し整理する。

1) 基本方針の策定

ビルシステムにおけるセキュリティ対策の汎用的な基本方針については、経済産業省が策定した「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク（CPSF）」等を参考に定めることが望ましいとされている。

2) 脅威の分類と対策要件の整理

建物内の場所や機器の種類ごとに脅威を分類し、それぞれに対して想定されるインシデントやリスク源を特定し、対策要件をポリシーレベルで整理するのが望ましい。

3) ライフサイクルに応じた対応策

設計、施工、運用管理などのフェーズごとに取り組むべきセキュリティ対応策を明確化するとよい。

4) 外部ネットワークへの接続対策

外部ネットワークへの接続が必要な場合、通信の暗号化や認証・認可の仕組みを導入し、不正アクセスを防止する。

5) IoT デバイスのセキュリティ強化

IoT デバイスの認証機能やデータの暗号化を実施し、デバイス間の通信を安全に保つ。

6) 監視とインシデント対応

不正な通信を検知・遮断する機能をネットワークに実装し、インシデント発生時の迅速な対応体制を整備する。

これらの対策を講じることで、スマートビルのセキュリティを強化し、システムの安定運用を実現できるとされている。

C2.1.4. センシング機器の信頼度確保

デジタル技術を活用するために、センシング機器の信頼度の確保が重要である。機器の信頼度確保について、スマートビルシステムアーキテクチャガイドライン¹⁷⁾から、その対策を抽出し整理する。

1) データの品質管理

センシング機器から取得したデータに対してバリデーションを実施し、所定のデータ形式や構文

チェックを行うことで、信頼性の高いデータのみを受信するとよい。

2) データフィルタリング

センシング機器が提供するデータに対して異常値を判定し、フィルタリングを実施する。これにより、誤ったデータやノイズを排除可能となる。

3) ネットワーク切断時のデータ保存

センシング機器がネットワーク切断時にデータを一時保存し、復旧後に送信する機能を持つことで、データ欠損を防止することが可能となる。

4) デバイス認証

センシング機器を認証し、正規の機器からのデータのみを受信する仕組みを導入する。これにより、不正なデバイスからのデータを排除することが可能となる。

5) 定期的な校正とメンテナンス

センシング機器の精度を維持するために、定期的な校正やメンテナンスを実施するとよい。

6) 通信ログの記録

センシング機器のデータ送信に関する通信ログを記録し、トラブル発生時の原因特定に活用する。

これらの対策を講じることで、センシング機器の信頼度を向上させ、データの正確性と信頼性を確保できると考えられる。

表 C2.1 環境衛生管理におけるデジタル技術の事例

項目						内容（技術等） ^{注）}
空 気	水	清 掃	ね ず み	総 合	そ の 他	
	○			○	○	中小規模ビル（延床面積 3,000m²以下）向けソリューション： ・ スマートフォンを使用してエントランスやエレベーターのセキュリティを解除 ・ カメラと連動してモニター管理＋データはクラウド保存で記録装置不要 ・ 低コストでの導入が可能、セキュリティカードの発行管理業務を低減 ・ 設備異常時にメール配信＋技術者派遣、現地の映像を確認しながらリモートで初期対応可能
				○	○	建物運営管理支援サービス： ・ ビル運営管理情報をクラウドによって「見える化」 ・ いつでもどこでも見られるため、よりスピーディーな対応が可能 ・ 複数ビルの運営管理情報を一元管理でき、運営管理業務を効率化
○				○		ビル全体の省エネルギー推進サポート： ・ テナントがパソコンからエネルギー使用量を確認、空調や照明を制御
○				○	○	BIM とデータベースを連携、全体最適を視野に入れたデータドリブンな設計手法の確立： ・ BIM とデータベース連携による設計の効率化 ・ BIM とデータベースを活用したデータプレチェックによる設計の高品質化 ・ BIM を活用したトータルカーボン算出の試行・実践を通じ、エネルギー効率や環境を最適化するデザインの推進 ・ IoT センシングと建物運用フェーズの BIM モデルを統合。オフィス内のデータ（温湿度などの環境・在室者情報）がリアルタイムに 3D で可視化。従業員は自身のパソコンやデジタルサイネージなどを通じて、オフィス内の環境をいつでも把握。 ←均質でない環境をつくり、コノミヤその日の体調などで環境を選択（ウェルビーイングなオフィス環境の構築）。
○				○	○	ビルディングオートメーションシステム： 統合コントローラが各種設備を統合し、連携制御することで建物全体の省エネルギーや安全性・利便性を向上 確認を要する画面が自動的に表示され、トラブル発生時のスムーズな対応が可能。監視用の PC は汎用 PC を利用可能 多彩なセンサーを使ってアクチュエータを制御し、快適な温熱環境と建物の省エネルギーを実現 チャートや日週月年報、警報・状態変化・操作情報の履歴を活用して管理品質が向上 クラウドサービスを利用して効率的な管理を実現
（次のページに続く）						

項目						内容（技術等） ^{注）}
空 気	水	清 掃	ね ず み	総 合	そ の 他	
○				○	○	ビル向けクラウドサービス： IoT 技術を利用してビルのエネルギー管理や設備管理業務の効率化を図り、管理コストの削減を実現 時間や場所を選ばずに確認でき、関係者間での情報共有を促進 気象データを用いたエネルギー使用量の予測や、電力逼迫状況に応じた受電電力の抑制が可能
○						セル型空調システム： セントラル空調において吹出口単位で変風量を制御
○					○	研究施設向け風量制御システム： 研究施設、感染症対応病床などにおいて、室内空気の状態・湿度・圧力・気流・清浄度を厳密に制御 サッシセンサ、高速 VAV、ヒュームフードモニタ、人検知センサー
○				○	○	CO₂ 濃度制御搭載製品： ・業務用換気機器は、天埋型・天吊型・露出型・屋外設置型等、部屋用途・規模にあわせた商品展開 ・CO ₂ センサーは、NDIR 方式 ・リモコンに二酸化炭素濃度表示/空気の状態やメンテナンス時期を色で知らせる機能有 ・二酸化炭素濃度に応じた換気量自動制御（リニア制御の場合、濃度判定は 30 分。二酸化炭素濃度が 700ppm 以下の場合は弱ノッチ運転となる） ・クラウド型空調コントロールサービスで空調・換気・各設備（照明、センサスイッチ、防犯設備、火災警報、熱源機器、電力系、AHU 等）がつながり、まとめて管理
○						スマート空調システム： ・オフィス向け ・天井内に空調空気を直接供給し、天井面の約 10m 毎に設置した軽量小型のファン付吹出口（以下 FDU※）を用いるダクトレス空調方式 ・FDU の風量設定は PC やタブレット端末などを用いて、在室者が 1 台単位で自由に操作可能 ・FDU の風量制御専用の制御配線は不要 ・FDU に給気ダクトを接続する必要がなく、かつ、シンプルな電力配線のみで構成 ・ダクト工事量の削減、運用後のレイアウト変更が容易
（次のページに続く）						

項目						内容（技術等） ^{注）}
空 気	水	清 掃	ね ず み	総 合	そ の 他	
				○	○	ビル監視向け統合システム： オープンシステムでコストを削減。中央監視システムのほか、電力、空調/ 熱源、照明、防災、セキュリティ/ 防犯/ 入退室/ 駐車場などのサブシステムとしても使用可能
					○	IoT ガス報知器： ・LTE 通信機能付きガス警報器をリース方式（5 年間）で提供 ・アプリと連携して自宅の異常や災害情報をスマートフォンに通知 ・停電時に内蔵バッテリーにより最大 2 日間作動
					○	太陽光発電システム： ・毎日の電気を、可能な限り太陽光発電でまかなう ・余った電気は蓄電池にためる ・給湯の光熱費削減に寄与
					○	家庭用蓄電池の遠隔制御： ・電力需給バランスを維持するために、電力供給量の変動に応じて、電力需要量を抑制・創出する ・家庭用蓄電池を用いた調整力の創出
		○				自立型掃除ロボット： AI と 3D カメラによるマッピング機能による自動清掃、PC でスケジュール設定 割れたガラス、小石・コンクリート、粉塵等に対応
		○	○			IoT 害虫検知システム： ・特定の場所にセンサー（電源不要）を設置し、害虫の存在を検知すると通知・記録
			○			デジタル害虫駆除ソリューション： ・害虫センサー、トラップを設置し、定期的に送信されるレポートにより適切な駆除が実施可能
○				○	○	ワイヤレスセンサーネットワーク： <ビル・商業施設 工場・プラント> ・建物施設の状態監視、AI による駐車車両監視、電気設備等の監視制御、照明・空調コントロール、防災システムのための無線インフラ整備
（次のページに続く）						

項目						内容（技術等） ^{注)}
空 気	水	清 掃	ね ず み	総 合	そ の 他	
注)						
技術等の内容について、引用文献を基に編集した。						
引用文献：						
1) https://www.hbs.co.jp/products/builmirai/						
2) https://www.hbs.co.jp/products/kanri/support/uneikanrishien.html						
3) https://www.hbs.co.jp/products/solution/bivale/service/energy_saving/						
4) https://www.nihonsekkei.co.jp/news/detail_19702/						
5) https://www.azbil.com/jp/product/building/system/building-automation-system/savic-net-G5/index.html						
6) https://www.azbil.com/jp/product/building/building-cloud-service/index.html						
7) https://www.azbil.com/jp/product/building/cell-airflow-control/index.html						
8) https://www.azbil.com/jp/product/building/airflow-control-system/index.html						
9) https://www.ac.daikin.co.jp/va/kinou1						
10) https://www.sanki.co.jp/service/technology/article/detail183.html						
11) https://eee.tokyo-gas.co.jp/lp/joy/watcher/lp/ba/index.html						
12) https://www.tepco.co.jp/ep/notice/pressrelease/2022/1663085_8667.html						
13) https://www.tepco.co.jp/ep/kurashi/denka/index-j.html						
14) 例えば、 https://www.kyocera.co.jp/newsroom/news/2024/002520.html						
15) https://www.plibot.co.jp/products/kemaro_k900/						
16) https://www.astina.co/work/insect-detector/						
17) https://iot.telenor.com/wp-content/uploads/2020/06/Telenor-Connexion-Case-Study-Anticimex-JP.pdf						
18) https://www.kandenko.co.jp/business/service42.html						

C2.2.建築物環境衛生管理におけるデジタル技術活用の可能性と監視指導上の課題に関する検討

自治体における特定建築物の監視指導では、人員不足、異動に伴う知識・経験の継承の困難さ、監視対象施設の増加、紙媒体による記録管理等に伴う事務負担の増大などの課題が確認された。

また、報告徴収は増加傾向にある一方、立入検査件数は減少傾向にあり、限られた人的資源の中で監視指導を実施している実態が確認された。

デジタル技術活用としては、CO₂濃度、温湿度、残留塩素等の測定データを IoT センサーにより連続的に取得し、クラウド上で管理することにより、異常値把握、監視優先度付け、平常時の状況把握等へ活用できる可能性が示された。

また、電子台帳や電子報告の活用により、記録管理や情報共有の効率化につながる可能性が示された。

一方で、IoT による測定データは法定測定とは位置づけが異なり、法定測定を代替するものではなく、日常管理や異常検知等を補完する技術として活用する必要があることが整理された。

さらに、デジタル技術導入に当たっては、センサー精度、データの信頼性、情報セキュリティ、維持管理コスト等への対応が課題として挙げられた。

D. 考察

D1. 環境衛生管理のためのデジタル技術の適応

CO₂濃度センサーの精度（濃度と濃度センサー指示値の差）の自動校正による濃度の過小評価を防止する方法には以下の方法が考えられる。

- ① 自動校正を停止し、適切な間隔で標準ガスによる校正を行う。
- ② 濃度の下方修正を行わない。
- ③ 濃度指示値が高い場合、外気暴露によって指示値を修正して室内濃度を再確認する。ただし、濃度指示値が温度に影響される場合には、室温に近い状況で外気暴露するなど温度の影響に配慮して修正する。

以上のような対応に加えて、以下の要件が検討される必要があると考えられる。

- ① 建築物衛生法、WHO 等の基準を踏まえて、濃度の精度に関する要求レベルを明らかにする。
- ② 空間用途と濃度下限値、濃度下限値の発生頻度、空間温度の範囲を想定した精度維持方法の確立を行う。
- ③ 精度維持に関する基準及び表示項目（精度の持続性、温度等の影響、自動校正）を策定する。

以上より、建築物環境衛生管理におけるデジタル技術の活用にあたっては、単なる測定機器の導入ではなく、測定精度の維持管理および運用条件を含めた総合的な環境衛生管理として整理する必要があると考えられた。

D2. 環境衛生管理におけるデジタル技術の現状

D2.1. デジタル技術の現状と可能性

近年、スマートビルや BEMS 等を中心として、IoT、AI、クラウド等を活用した建築物管理技術が普及しており、環境衛生管理分野においても、空気環境管理、給排水管理、設備監視、異常検知等への活用可能性が広がっていることが確認された。特に、センシング技術やクラウド管理を活用することにより、環境状態の継続的把握や設備異常の早期検知、情報共有の効率化等に活用できる可能性が示された。

一方で、デジタル技術活用に当たっては、データ構造や名称の標準化不足、空間情報と設備情報の関係整理、ユースケースの多様化への対応等、データ利活用に関する課題が認められた。特に、設備データに関するメタデータや空間情報の整理が十分でない場合、異なるシステム間でのデータ活用や比較が困難となる可能性があると考えられた。

また、IoT デバイスやクラウド利用の拡大に伴い、システム構成の複雑化や外部ネットワーク利用によるセキュリティリスクへの対応も重要になると考えられた。さらに、センシング機器につい

ては、異常値除去、データ欠損対策、デバイス認証、定期校正等を含めた信頼性確保が重要であり、測定値の品質管理が環境衛生管理上の基盤となることが示唆された。

これらのことから、建築物環境衛生管理におけるデジタル技術活用に当たっては、単なる機器導入に留まらず、データ標準化、セキュリティ対策、センシング機器の信頼性確保等を含めた総合的な管理の視点が重要であると考えられた。

D2.2.建築物環境衛生管理におけるデジタル技術活用の可能性と監視指導上の課題に関する検討

従来型の全数立入を中心とした監視指導体制については、監視対象施設数の増加や人的制約等を踏まえると、継続的な実施には限界があると考えられた。そのため、報告徴収結果、過去の指導履歴、IoT データ等を活用し、異常兆候の把握や監視優先度付けを行う重点的監視の考え方が、今後重要になる可能性が示唆された。また、本研究で整理した内容は、体系的な自治体調査や定量的アンケート調査に基づくものではないものの、建築物衛生の監視指導に従事する環境衛生監視員等の実務担当者から、人員不足、監視対象施設数の増加、紙媒体による記録管理、監視業務の属人化等に関する課題が共通して指摘されており、現場実務における課題認識の一端を示すものと考えられた。

IoT 技術については、環境状態の連続的把握や異常の早期検知に有用である一方、測定精度やデータ解釈の標準化が十分整理されていない状況も認められた。さらに、紙媒体による記録管理が依然として多く認められたことから、IoT 活用以前に、電子報告や電子台帳等を含む基盤整備を進める必要性が示された。

デジタル技術の活用に当たっては、法定測定との関係性、測定精度、運用方法等に留意する必要があると考えられた。

E. 結論

建築物におけるエアロゾル感染対策の基礎となる環境衛生を長期的に保持するためには、センサー等の IoT 機器の精度維持をはじめシステムの定期的点検と維持更新が必要である。空気環境については、また、IoT 機器のコストや人による点検・管理のあり方など、管理の在り方を総合的に計画する必要がある。CO₂ 濃度による換気状態の検知と空調換気設備制御に関する課題として注目されている測定器の精度と誤差によって生じる課題について検証し、建築物衛生法、WHO 等の基準を踏まえて、濃度の精度に関する要求レベルを明らかにすること、空間用途と濃度下限値、濃度下限値の発生頻度、空間温度の範囲を想定した精度維持方法の確立を行うこと、精度維持に関する基準及び表示項目（精度の持続性、温度等の影響、自動校正）を策定することが必要であることを明らかにした。

建築物環境衛生監視指導においては、人的制約や監視対象の複雑化等への対応が課題となっていた。また、現場実務者からは、紙媒体による記録管理、監視業務の属人化、限られた人員による監視体制等に関する課題が共通して挙げられた。IoT 等のデジタル技術は、法定測定を代替するものではなく、日常管理、異常検知、監視優先度付け等を支援する補完的手法として活用可能性が示された。一方で、デジタル技術の活用に当たっては、測定データの信頼性、法定測定との関係性、運用条件等について留意が必要と考えられた。また、空気環境管理においては、CO₂ 濃度センサー等の IoT 機器について、測定精度、精度維持方法、運用条件等に留意した管理が重要であると考えられた。以上より、建築物環境衛生監視指導におけるデジタル技術活用に関する基礎的知見が得られた。

<参考文献>

- 1) Doe, J., Smith, A., and Johnson, P.;
Indoor Localization and Occupancy

- Estimation Using Bluetooth Low Energy (BLE) Signals. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 69, No. 5, pp. 1234-1245.
- 2) Nguyen, H.T., and Patel, S.; Occupancy Detection Using WiFi Infrastructure: Counting Devices to Estimate Occupancy Levels., IEEE Wireless Communications, Vol. 28, No. 3, pp. 45-51. 2021.
 - 3) 福田雄大, 山本高広, 画像解析モデル YOLO を用いた在室人数測定手法の提案及び空調システム設計への応用に関する研究, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第 22 巻, pp. 51-52, 2022. 5.
 - 4) 富樫英介, 室内温熱環境の廉価な無線計測記録装置の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 28 巻, 第 68 号, pp. 267-274, 2022. 2.
 - 5) 菅原正則, 遠藤千和, 林基哉, CO₂濃度変化に基づいた住宅内滞在人数の推定, 日本建築学会東北支部研究報告集. 計画系, 第 71 巻, pp. 103-106., 2008. 6.
 - 6) モノワイヤレス株式会社: TWELite-DIP (TWE-L-DI-W), <https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-dip/index.html>
 - 7) Seeed Studio; PIR Motion Sensor module, (Device Wiki page), https://wiki.seeedstudio.com/PIR_Motion_Sensor_Large_Lens_version/
 - 8) 杉山幸輝, 山田裕巳, 菊田弘輝, 林基哉, 長谷川麻子, 保育所等及び高齢者福祉施設における COVID-19 感染リスク低減に向けた改善効果の検証 (その 2) 北海道と福岡県の保育施設における換気設備の増設, 日本建築学会学術講演集, pp. 1377-1378, 2024. 7
 - 9) 株式会社構造計画研究所 行動センシング・デザイン室, ピープルカウンター, <https://www.sensing.kke.co.jp/>
 - 10) 株式会社 OPTEX, 在室・在席検知機器, <https://www.optex.co.jp/products/occupancy-sensor/>
 - 11) フジタ技研, 在室者の位置情報に基づく三密回避システムの開発 ～位置情報検知精度と自動換気制御機能による室内空気環境に関する検証～, フジタ技研報告第 58 号 2022 年, https://www.fujita.co.jp/tech_center/img/up/2022/2022_12.pdf
 - 12) 三菱電機, ムーブアイの役割と効果, https://www.mitsubishielectric.co.jp/lbg/ja/air/products/slim/knowledge/item_04.html
 - 13) 本間義規, 開原典子, 林基哉: 興行場における衛生的な環境確保のための研究, 映画館内の換気に関する実態とその評価法に関する検討, 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, 2023
 - 14) Kosuke Minakuchi, Koki Kikuta, Hisashi Hagiwara, Kenji Miyazaki, and Motoya Hayashi, Effective Method to Collect Indoor Floating Aerosols Using Cooling Equipment, Atmosphere, 2023. 11.
 - 15) 「病院の気流制御」最新技術 | 鹿島技術研究所 | 鹿島建設株式会社
 - 16) 新型コロナウイルスを検出するバイオセンサーを開発 | ニュースルーム | ニュース | DENSO - 株式会社デンソー / Crafting the Core /
 - 17) 山本直輝, 菊田弘輝, 林基哉: コールセンターの COVID-19 エアロゾル感染に関する分析, 日本建築学会大会梗概集 2024-07, pp. 1423-1424
 - 18) 山本直輝, 菊田弘輝, 長谷川麻子, 林基哉: 新型コロナウイルス感染症のクラスター感染が発生したコールセンターの空気環境, 日本建築学会大会梗概集 2022-07, pp. 1547-1548
 - 19) 独立行政法人情報処理推進機構 デジタルアーキテクチャ・デザインセンター スマートビ

ルプロジェクト. スマートビルシステムアーキテクチャガイドライン. 2023.5.31 第1版.

E. 研究発表

1. 論文発表

1. Koki Kikuta, Shun Omori, Masakazu Takagaki, Yasuhiko Ishii, Kazuhiro Okubo, Yuta Ohno, Yoshihiro Fujiya, Hitomi Kurosu, Tomoe Shimada, Tomimasa Sunagawa, Takuya Yamagishi and Motoya Hayashi; Verification of Ventilation and Aerosol Diffusion Characteristics on COVID-19 Transmission through the Air Occurred at an Ice Arena in Japan; Buildings 2024, 14(6), 1632, 2024.4.
2. 開原典子, 林基哉, 本間義規; 高齢者の乾燥由来の健康リスク低減に向けた住まいの湿度環境提案, 住総研研究論文集・実践研究報告集, 2024 年 50 巻 p. 257-268 (2024)
3. Motoya Hayashi, Yoshinori Honma, Koki Kikuta, Asako Hasegawa, Sayaka Murata, Hiromi Yamada, Masayuki Ogata, Naoki Kagi, U Yanagi, Toshio Yamanaka, Hoon Kim, Kenichi Kobayashi, Noriko Kaihara, Akira Ito, Fumihiko Shinohara and Shoichi Morimoto; Ventilation measures to control aerosol transmission based on COVID-19 outbreaks in hospitals in Japan, JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW 7(1), 2024.1.
4. 浅岡凌, 海塩渉, 鍵直樹, 林基哉, 澤地孝男, 上野貴広; 新型コロナウイルス感染症蔓延時のオフィスにおける室内環境質の実態 (その2): 2020 年と 2021 年における室内環境と環境満足度の関連, 日本建築学会環境系論文集, Vol.817, pp.135-140, 2025.3.
5. 山田裕巳, 杉山幸輝, 菊田弘輝, 長谷川麻子, 鍵直樹, 本間義規, 林基哉: 保育施設におけるエアロゾル感染対策のための機械換気設備の

改修 (その1) トレーサーガスを用いた換気改修効果の検証, 830 号, 185-194, 2025-04

6. Akihiro Katsuki, Koki Kikuta, Yu Tanaka, Masato Iguchi, and Motoya Hayashi: Relative Evaluation Approach for Cross-Room Exposure in a Detached House Using a Measurement-Informed Multizone Model; Buildings 2026, 16(3), 583, 2026.1.30.
7. Yu Tanaka, Koki Kikuta, Takema Nakazawa, Yuta Sasai, Yuki Ogawa, Yoshiaki Gu, Fujiko Mitsumoto-Kaseida, Katsunori Yanagihara, Kazuhiro Tateda, Motoya Hayashi; Ventilation characteristics and infection risk in Japanese hospital wards: An assessment based on field measurements and CFD, Indoor Environment, 2026.2.26.
8. Yu Tanaka, Koki Kikuta, Takema Nakazawa, Yuta Sasai, Yuki Ogawa, Yoshiaki Gu, Fujiko Mitsumoto-Kaseida, Katsunori Yanagihara, Kazuhiro Tateda, Motoya Hayashi; Influence of Poor Ventilation and Door Operation on the Spread of Infectious Respiratory Particles and Infection Risk in a Hospital Ward, JAR, 2026.4.1.

2. 学会発表

- 1) 林基哉「フィンランド高齢施設の室内環境特性と感染症対策」第 83 回日本公衆衛生学会総会国立保健医療科学院企画シンポジウム「高齢者施設の室内環境と感染症対策を考える」(2024)
- 2) 林基哉「環境衛生管理における不適の実態と課題を考える」第 51 回建築物環境衛生管理全国大会シンポジウム「求められる建築物衛生管理を考える」(2024)
- 3) 林基哉「ポスト COVID-19 における 空調・換気・通風計画」自立循環プロジェクトフェーズ 7 シンポジウム, IBECs (2024)
- 4) 青山恭子, 森太郎, 林基哉, 大沢飛智; 省エネルギー区分別にみた日本における気象データと健

- 康の関係に関する分析, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.569-570, 2024.07.
- 5) 金勲, 東賢一, 林基哉, 篠原 直秀; SVOC のハウスダスト中濃度と居住環境に関する全国調査, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1235-1256, 2024.07.
- 6) 柳宇, 開原典子, 本間義規, 島崎大, 戸次加奈江, 伊庭千恵美, 浅井敦人, 林基哉; 映画館における室内空気質実態に関する調査研究 第 4 報 4D 映画館ミスト噴出口の付着細菌叢, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1281-1282, 2024.07.
- 7) 開原典子, 柳宇, 本間義規, 島崎大, 戸次加奈江, 伊庭千恵美, 浅井敦人, 林基哉; 映画館における室内空気質実態に関する調査研究 第 5 報 観覧場内における 4D 上映中の温湿度及び二酸化炭素濃度の測定, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1283-1284, 2024.07.
- 8) 新谷理一, 菊田弘輝, 金勲, 阪東美智子, 東賢一, 長谷川兼一, 本間義規, 林基哉; 新築戸建住宅における室内化学物質と換気に関する全国実態調査, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1335-1336, 2024.07.
- 9) 田中雄, 菊田弘輝, 勝木皓大, 井口雅登, 林基哉; ダクト式全館空調システム住宅のエアロゾル感染に関する研究 その 1 エアロゾル感染リスクの試算, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1337-1338, 2024.07.
- 10) 勝木皓大, 田中雄, 菊田弘輝, 井口雅登, 林基哉; ダクト式全館空調システム住宅のエアロゾル感染に関する研究 その 2 室内濃度シミュレーションモデルの構築, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, p.1339-1340, 2024.07.
- 11) 柳宇, 開原典子, 本間義規, 島崎大, 戸次加奈江, 伊庭千恵美, 林基哉; 4D と 2D 映画館の付着真菌叢, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, p.37-40, 2024.09
- 12) 水口晃輔, 菊田弘輝, 林基哉; 室内浮遊ウイルスの効果的な捕集方法の検討および病室等における捕集実験, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, p.45-49, 2024.09
- 13) 田中雄, 菊田弘輝, 勝木皓大, 井口雅登, 林基哉; ダクト式全館空調システム住宅のエアロゾル感染対策に関する研究 (第 1 報) エアロゾル感染リスクの試算, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, p.105-109, 2024.09
- 14) 勝木皓大, 菊田弘輝, 田中雄, 井口雅登, 林基哉; ダクト式全館空調システム住宅のエアロゾル感染対策に関する研究 (第 2 報) 室内濃度シミュレーションモデルの構築, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, p.109-112, 2024.09
- 15) 長屋杏美, 菊田弘輝, 林基哉, 佐藤花菜子, 高橋篤志, 竹田恵美, 古橋拓也; 換気回路網計算モデルを用いた戸建て住宅の常時換気設備におけるエアロゾル除去性能の評価, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, p.113-116, 2024.09
- 16) 開原典子, 柳宇, 林基哉, 戸次加奈江; 中規模映画館の観覧場における温度・相対湿度・二酸化炭素濃度の実態調査. 2025 年室内環境学会学術大会講演要旨集. 198-199. 2025.
- 17) 柳宇, 開原典子, 林基哉, 戸次加奈江, 黒須一見; 検疫ホテルにおける客室から廊下へのバイオエアロゾル伝播特性の実証と緩和策の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2026.
- 18) 山田裕巳, 林基哉, 菊田弘輝, 杉山幸輝, 長谷川麻; 換気設備のエアロゾル低減効果に関する研究 粒子濃度のステップ応答を用いた曝露濃度換算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2025.
- 19) 石附健太郎, 近藤寿紀, 菊田弘輝, 林基哉; 新型コロナウイルス感染症における自宅療養時の家庭内感染に関する研究 第 1 報 調査概要と感染予防策の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2025.

- 20) 近藤寿紀, 石附健太郎, 菊田弘輝, 林基哉: 新型コロナウイルス感染症における自宅療養時の家庭内感染に関する研究 第2報 感染予防策及び家庭内感染リスクの分析、日本建築学会大会学術講演梗概集. 2025.
- 21) 佐藤花菜子, 高橋篤志, 古橋拓也, 勝木皓大, 菊田弘輝, 林基哉: 第一種換気システムを用いた戸建て住宅における汚染物質挙動に関する研究 (第1報) CO₂ による実測および換気回路網モデルによる検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 22) 勝木皓大, 菊田弘輝, 佐藤花菜子, 高橋篤志, 古橋拓也, 林基哉: 第一種換気システムを用いた戸建て住宅における汚染物質挙動に関する研究 (第2報) エアロゾル相当換気回数_{推定}の推定、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 23) 杉山幸輝, 山田裕巳, 菊田弘輝, 林基哉, 長谷川麻子: 保育施設におけるエアロゾル感染リスク低減のための換気設備改修効果の検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 24) 菊田弘輝, 田中雄, 中澤武馬, 笹井雄太, 小川夕季, 林基哉: 医療施設における感染対策のための空調換気に関する研究 (第1報) 3病院における空気環境の実態調査、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 25) 田中雄, 菊田弘輝, 中澤武馬, 笹井雄太, 小川夕季, 林基哉: 医療施設における感染対策のための空調換気に関する研究 (第2報) 病棟部における換気特性の実態調査、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 26) 笹井雄太, 小川夕季, 菊田弘輝, 林基哉, 中澤武馬, 田中雄, 田中秀和: 医療施設における空気環境の維持・管理に関する研究 (第3報) 換気条件および病室扉の開閉による感染リスク評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. 2025.
- 27) 長倉竜也, 倉本朗, 金野知哉, 木田秀幸, 太田秀一, 渡邊洋平, 掛水和彦, 目黒順一, 開原典子, 本間義規, 菊田弘輝, 林基哉: 全室個室で発生したCOVID-19集団感染病棟における空調換気性能とエアロゾル拡散に関する検討、第46回札幌市病院学会. 2026.2.7
- 28) 林基哉: “空気を介した感染”と病院設備の備え—ポストCOVID-19時代の設計・運用を考える—ポストCOVID-19の医療施設に求められる空調換気性能、第54回日本医療福祉設備学会. 2025年11月29日
- 29) 林基哉, 石黒信久, 開原典子, 島崎大, 戸次加奈江, 柳宇, 黒須一見: 旅館業法及び興行場法の施設の感染拡大防止対策に関する調査研究 その2 COVID-19を踏まえた宿泊施設の換気対策、第84回日本公衆衛生学会総会. 2025.10
- 30) Ryo Asaoka¹, Wataru Umishio, Naoki Kagi, Motoya Hayashi, Takao Sawachi⁴, and Takahiro Ueno: Relationship of perceived indoor environmental control and worker satisfaction. Findings from field measurements in 22 offices in Japan, Sustainable Built Environment Conference 2025 in Tokyo. 2025.12.
- 31) 林基哉: 医療施設における感染リスクと空調換気 医療施設におけるエアロゾル感染と空調換気対策、第40回日本環境感染学会総会・学術集会. 2025.7.12
- 32) 林基哉: 2025年日本臨床環境医学会学術集会シンポジウム 高齢者施設感染症対策の現状と課題 呼吸器感染症に備える空調換気対策、日本臨床環境医学会学術集会. 2025.6.21
- 33) 林基哉: シンポジウム ポストCOVID-19の医療福祉施設における建築物衛生法の遵守 ポストCOVID-19の医療福祉施設における建

3. 書籍等

- 1) 林基哉, 新建築物の環境衛生管理, 第 1 章 建築物環境衛生管理総論 要点, 1.4.4 建築物環境衛生管理業務の課題, 1.5 建築物環境衛生管理の展望, 第 2 章 建築物衛生行政概論 要点 (2024)
- 2) 林基哉, ポスト COVID-19 の高齢者施設における空気清浄の課題と対策, 空気清浄 62 巻 4 号, PP. 42-49 (2024)
- 3) 林基哉, 海塩渉, 菊田弘毅, 村田さやか, 開原典子, 今後の住宅・建築物の感染症対策 ポスト COVID-19 の空調・換気・通風計画, IBECS No. 251PP2-17 (2024)
- 4) 林基哉 巻頭言 ポスト COVID-19 における空気清浄管理への期待, 空気清浄第 62 巻第 3 号, PP. 1-2 (2024)
- 5) 林基哉 室内環境の健康リスクと居住リテラシー - 健康維持増進のための住環境整備に関する一連の研究 -, 住まいと環境東北フォーラム H&E レター, PP. 1-3 (2024)
- 6) 林基哉 COVID-19 クラスター事例の換気性状と対策 - 換気不良とエアロゾル感染 -, 空気調和・衛生工学 98 (10), PP. 839-846 (2024)

F. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得 なし
2. 実用新案登録 なし
3. その他 なし

令和 5～7 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)
分担研究総合報告書

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はなく、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はなく、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校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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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。

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)

A2. CO_2 センサおよび CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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。

本研究では、 CO_2 センサーの測定メカニズムを整理したうえで、市販されている空調システム用の CO_2 センサーの仕様を調査し、一覧表 (表 2) を作成した。また、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、 CO_2 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 CO_2 ガスがヒトに与える影響に関して文献調査を行った。

表 2 CO_2 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 ($\pm 30\text{ppm}$ ~)	◎ 高い ($\pm 40\text{ppm}$ ~)	○ 高濃度域で高精度	△ 普通 ($\pm 10\%$ ~)	× 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

従来、浮遊微生物の測定は培養法を中心に行われてきた。培養法では、浮遊微生物粒子のサンプリングと培養という二段階の操作が必要であり、結果が得られるまでに数日を要する。また、培養可能な生菌は測定できる一方で、培養不可能な微生物（Viable But Non-Culturable: VBNC）や、使用した培地で増殖しない生菌も多く存在するため、全微生物のごく一部しか評価できないという課題がある。

近年では、バイオエアロゾルのリアルタイム測定が可能となり、各種の計測機器が開発・実用化されている。リアルタイム測定法には、細菌細胞、芽胞、毒素、ウイルスなどの生体粒子に含まれる蛍光性分子や構造的特徴を利用する手法が含まれる。生体細胞の蛍光に関与する主な分子としては、アミノ酸、核酸、各種補酵素（例：還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド（NADH）およびそのリン酸体、フラビンモノヌクレオチド（FMN）、フラビンアデニンジヌクレオチド（FAD）、ビタミン B6 関連化合物）に加え、ビタミン K およびその同族体が挙げられる。これらの発光特性は励起波長に強く依存し、例えばトリプトファンおよび NADH は、波長 300 nm 以下の光で励起された場合、それぞれ約 340 nm および 450 nm 付近に発光極大を示す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⁴⁾。リアルタイム FAP 測定技術としては、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）などが開発され、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。柳らによる大学研究室での検証では、BAS は蛍光エアロゾル粒子に対して選択的に応答すること

が確認されている⁵⁾。

本研究では、BAS を用いて、宮崎市内のオフィスビル 3 棟（計 4 室）における夏期（2024 年 10 月、2025 年 8 月）および冬期（2025 年 1 月、2026 年 2 月）、ならびに千葉県・神奈川県・埼玉県のオフィスビル 3 棟（計 6 室）における夏期（2025 年 8 月）および冬期（2026 年 2 月）を対象に、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

B.1.1 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。

B.1.2 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。

B.1.3 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、埼玉県、東京都内にある建物 C、D の事務所である。建物 A、B ではそれぞれ、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、在室者数が多い時期を選択した。製図室の空調・換気設備は 4 系統に分かれており、空調換気設備は床吹出しである。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、南側は個人での利用が目立った。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。建物 C、D

については、埼玉県、東京都内にある事務所である。事務所ビルの測定は、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	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	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) (建物 A、B のみ) 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. CO₂センサおよび CO₂暴露がヒトに与える影響に関する調査

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 室内環境・ダクト用 CO₂センサに関するヒアリング調査方法

2024 年 12 月に、国内で CO₂センサの製造・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

B2.3 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。

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:パッケージ型空気調和機

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、ウイ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 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関係する建築物衛生法の施行令、省令、告示、通知の中で、本研究に関係する項目について、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。ロにおいて同じ。)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をすること。	「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"> <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 十八度以上二十度以下 二 居室における温度</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> </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 十八度以上二十度以下 二 居室における温度	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 十八度以上二十度以下 二 居室における温度														
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することができる設備をいう。)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。	「空気の浄化」を外気導入によるガス状物質の浄化か、エア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><tr><td>一 浮遊粉じんの量</td><td>グ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</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、三―ヒドラジノ―五―メ別に指定する測定器</td></tr></table>	一 浮遊粉じんの量	グ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	七 ホルムアルデヒドの量	二・四―ジニトロフェニル、三―ヒドラジノ―五―メ別に指定する測定器	・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。	月以内ごとに一回、定期に、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。 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、定期に、行うこと。	
一 浮遊粉じんの量	グ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																
七 ホルムアルデヒドの量	二・四―ジニトロフェニル、三―ヒドラジノ―五―メ別に指定する測定器																
		告示（平成 15 年 117,119 号）															
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。 送風機及び排風機について、定期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。 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に点検すること。 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に点検すること。	・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。														
（空気調和設備に関する衛生上必要な措置） 第三条の十八 令第二条第一号ニに規定する措置は、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た後、一月以内ごとに一回、定期に、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。 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		・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 ・汚れを検知するシステムの検索															
		通知（平成 20 年 0125001 号）															
		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バ内部の汚染状況、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、必要に応じ、整備、補修その他の措置を講じること。 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 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	・総合的にチェックするため、困難か ・総合的にチェックするため、困難か ・測定データにより障害を検出できるか。														

こと。また、適切な外気導入量を確保するため、定期的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	
--	--

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。

Juliana ほか⁶⁾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 (LCS) 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⁷⁾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⁸⁾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⁹⁾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。

García ほか¹⁰⁾においては、LCS のレビューを行い、LCS 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合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曝露への展開も期待されることも述べられている。

Chojer ほか¹¹⁾は、学校において LCS 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¹²⁾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にしたものである。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¹³⁾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¹⁴⁾は、LCS 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。

Morawska ほか¹⁵⁾より、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¹⁶⁾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¹⁷⁾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¹⁸⁾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¹⁹⁾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。

Petrici ほか²⁰⁾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²¹⁾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。

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²²⁾。これによれば、標準測定法として、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、ロウボイウムエアサンプラ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。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。光散乱法は、質量濃度を直接測定する方法ではないため、標準測定法、による測定値と比較して「質量濃度への換算係数 (F 値)」を求め、補正 (事実上の校正) を行う必要がある。

建築物衛生法における浮遊粉じんの光散乱などを用いた相対濃度計については、1 年以内ごとに 1 回の校正・点検が求められており、質量濃度に変換するために、質量濃度変換係数 (K 値) を用いている。PM_{2.5} の相対濃度計も同様に、室内 PM_{2.5} に適した校正、係数が必要であり、従来の浮遊粉じんよりも低濃度を対象とする PM_{2.5} については、特別な検討が必要になってくるものと考えられる。

上述の既往の研究によれば、現在市販されている LCS についても光散乱法が用いられており、適切な校正と係数が必要となってくる。さらに、湿度や温度の変化が測定値に与える影響、低濃度域における感度不足の課題があり、基準値との比較については課題が多いのが現状である。一方、大気環境の基準器との比較することにより精度を確認し、連続測定によりデータの補正などを行うこと、またその他の汚染物質の濃度変動と組み合わせた評価を行うことにより、室内空気質の評価への発展が期待できるため、今後も LCS の活用に向けた検討が必要と考えられる。

C1.3 建築物における PM_{2.5} 測定

表 6 に、各建物における 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回っていた。絶対値については、機器によ

表 6 各測定器の PM_{2.5} 濃度結果 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

	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

	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、DustTrak を横軸に、各測定器の 1 日の平均濃度の相関図を示す。今回対象とした測定点については、概ね濃度が 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度以下と低濃度であったため、測定器によっては低濃度域の感度が十分ではなく、数値を小さく表示するものもあるが、いずれも正の相関とはなっている。前述したように、低濃度域におけるローコストセンサーの感度については、今回対象にした機器においても課題は残る結果となっている。

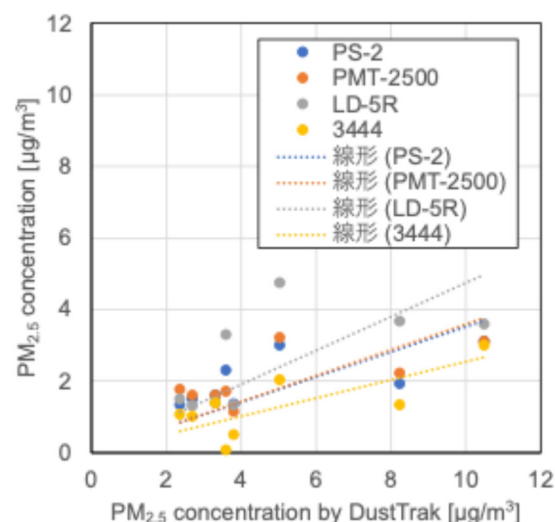
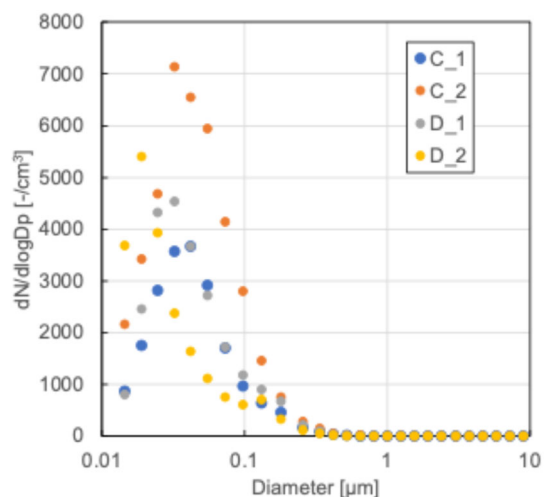
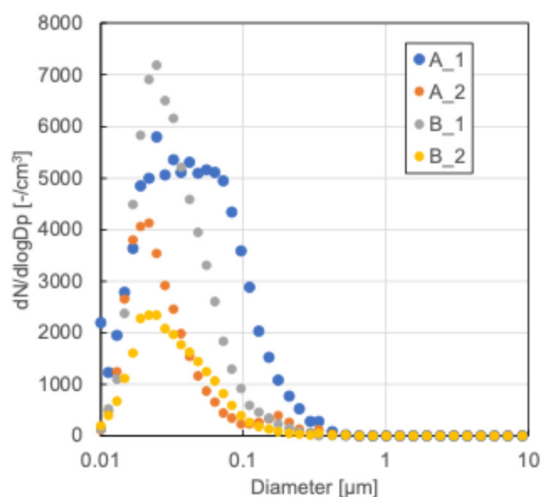


図 1 各測定機器同士の 1 日平均濃度の相関

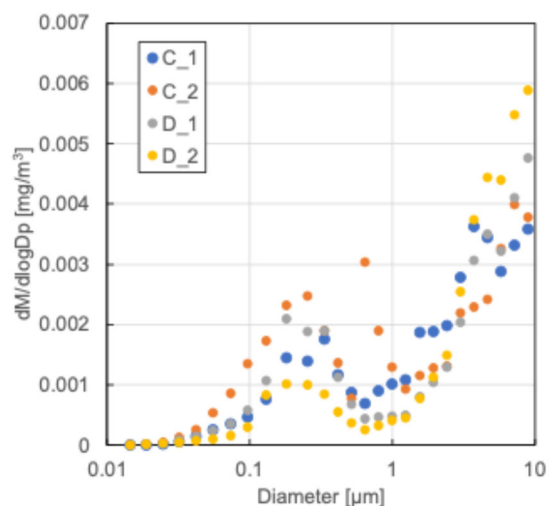
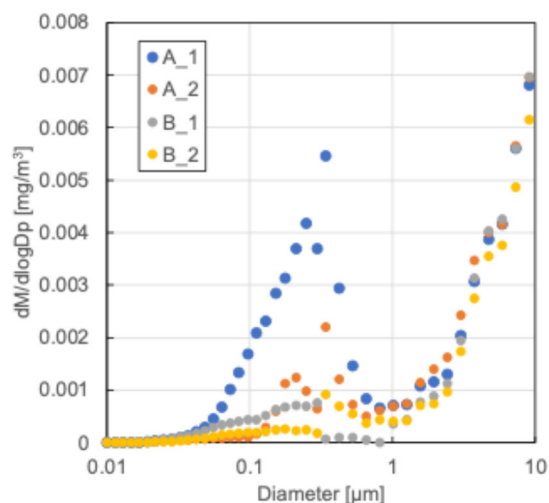
図 2 に、各測定日の平均粒径別個数濃度分布と粒径別質量濃度分布を示す。粒径別個数濃度は、粒径 0.1 μm 以下の超微粒子が大部分であり、粒径 1 μm 以上の粒子は少ない。一方質量濃度分布では、粒径 0.2 μm と 10 μm にピークがあり、大気における濃度分布とよく似ており、個数濃度分布とは傾向が異なる。よって、PM_{2.5} 質量濃度を評価するには、粒径 2.5 μm より大

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 $0.2\ \mu\text{m}$ のピークを考慮に入れることが重要である。

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 $1\ \text{g/cm}^3$ 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、 $4.0, 1.5, 0.9, 0.8\ \mu\text{g/m}^3$ 、建物 C の 1 日目、2 日目、建物 D の 1 日目、2 日目は、 $2.38, 3.83, 3.19, 4.47\ \mu\text{g/m}^3$ 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。



a) 個数濃度



b) 質量濃度

図 2 各測定日における粒径別個数・質量濃度

光散乱を利用した PM_{2.5} 測定器は、0.3 μm 未満の粒子を検出することができないことから、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 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. CO₂ センサおよび CO₂ 暴露がヒトに与える影響に関する調査

C2.1 各種測定方式の概要

CO₂ センサは、CO₂ 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 7 に各種 CO₂ センサの測定方式と特徴を示す²³⁻³⁰⁾。

(1) 電気化学式

電気化学式は、CO₂ 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、CO₂ 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。CO₂ 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 CO₂ 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、CO₂ 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7 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（一週間内（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	出カインターフェース	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（還気）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使用される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 実態調査に基づく不具合事例とその要因

センサメーカーへのヒアリング調査を通じ、CO₂センサの運用実態とトラブル事例を収集・分析した。過去の事例から、センサの不具合は1. 物理的環境要因による故障と2. 運用・論理的な誤補正に大別できることが明らかとなった。

C2.2.1 物理的環境要因による不具合

設置環境に由来する物理的な劣化や汚染が、測定値異常や故障を引き起こす事例である。

- 基板腐食（駐車場系統）：自動車の排気ガスに含まれる腐食性成分により、設置から1年程度で基板が腐食し故障に至った事例がある。このような環境では、基板コーティング等の対策が必須となる。
- 結露による機能停止（還気ダクト）：還気ダクト内に設置されたセンサが、外気導入の影響等で結露し、短期間で機能停止した事例が報告されている。ダクト内設置においては、断熱処理や設置位置の慎重な選定が求められる。
- 受光部の汚染による高濃度表示（オフィス）：臨海部のオフィスにおいて、設置後1年以内に多数のセンサが実測値に対して約900ppm 高い異常値を表示した事例がある。これは空気中の粒子や化学物質がNDIRの光学系を汚染したことが原因と推定され、ゼロガス校正により復旧した。

C2.2.2 自動校正機能による低濃度側の誤補正

NDIR センサにおいて特に注意が必要なのが、前述した自動校正機能が不適切な環境で作動することによる過補正の問題である。

- 24時間使用環境での誤補正：24時間連続で使用される居室や、気密性が高く換気量が絞られている空間では、一定期間を通して室内のCO₂濃度が大気濃度（400ppm程度）まで下がらない場合がある。このような環境で自動校正が作動すると、その期間の最低値（例えば600ppm）を400ppmと誤認して補正してしまうため、以降の表示値が実際よりも一律に低く表示される現象（マイナスドリフト）が発生する。

- 事例（映画館・駐車場）：実際に、人が不在でもCO₂濃度が600ppmを下回らない映画館において、センサが常に高濃度環境にあると誤認して自動補正を行い、実際の濃度より200ppm以上低く表示されていた事例がある。また、室内環境ではないが、給排気ファンが停止された駐車場で、最低濃度が400ppmに達しないまま補正が行われ、約300ppm低い値が表示されたケースも確認されている。

なお、聞き取り調査対象のセンサは、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。

C2.3 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室内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」³¹⁾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。

C2.3.1 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³²⁾。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³³⁾。

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^{34,35)}。

C2.3.2 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³⁶⁾。また、実際の寝室環境を対象としたフィールドドラゴ研究においても、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³⁷⁾。

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³⁸⁾。

C2.3.3 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^{39,40)}。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^{39,41)}。

C2.3.4 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^{40,42)}。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³¹⁾。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^{40,42)}、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。

C2.3.5 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⁴³⁾。

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

C3.1.1 A・B・C ビルにおける年度別比較

図 3 に、A ビル、B ビルおよび C ビルにおける 2024 年度および 2025 年度の夏期・冬期の FAP 濃度を示す。図中の記号は、先頭のアルファベットが測定対象ビルを、続く英数字が測定場所および測定年月を表す。例えば、「A2F_2410」は、表 4 に示す 2024 年 10 月に測定した A ビル 2 階を意味する。

いずれの測定対象においても、同一年度内では夏期と比較して冬期の FAP 濃度が有意に高かった（ $p<0.001$ ）。また、夏期および冬期それぞれについて年度間の比較を行ったところ、A ビル 8 階（A8F）の冬期においては比較的大きな差が認められたものに、その他の対象室では夏期・冬期間ともに顕著な差は認められなかった。

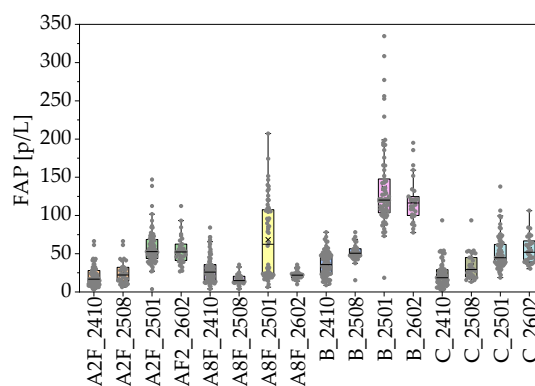


図 3 夏期における各測定対象室の FAP 濃度

C3.1.2 2025 年度各対象室の測定結果

図 4 および図 5 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。

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 2F および B ビルにおいて、室内の FAP 濃度が屋外より有意に高かった。

一方、冬期においては、すべての測定対象室で室内外の FAP 濃度に有意差が認められた。宮崎県内の 3 ビル 4 室では、いずれも室内の FAP 濃度が屋外より有意に高かったのに対し、それ以外の対象室では、室内の FAP 濃度は屋外より有意に低かった。

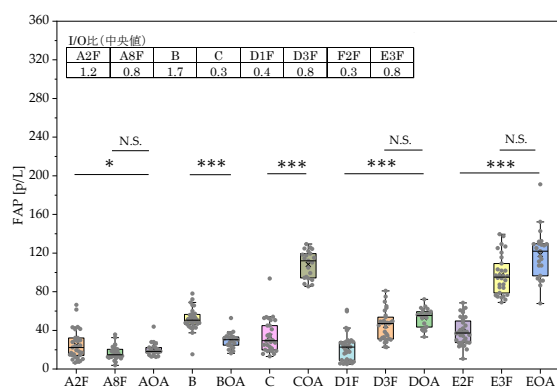


図 4 夏期における各測定対象室の FAP 濃度 (*: $p<0.05$, ***: $p<0.001$)

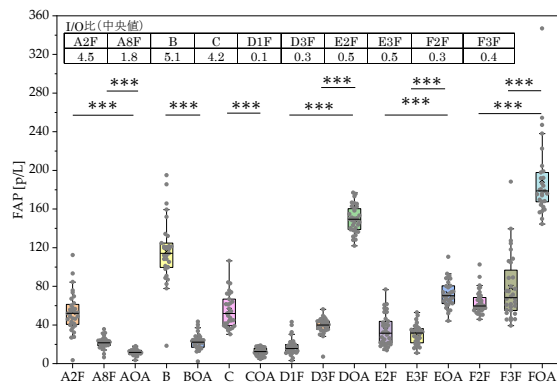


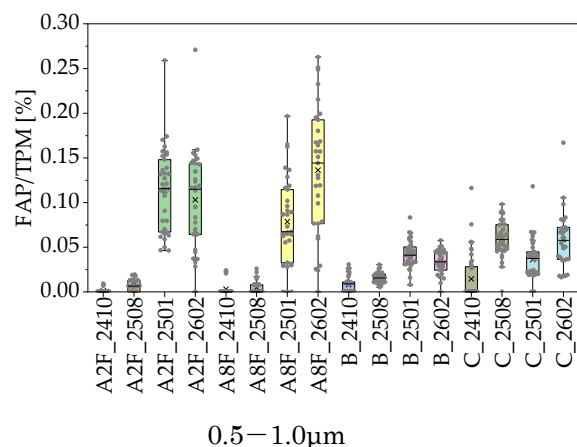
図 5 冬期における各測定対象室の FAP 濃度 (*: $p<0.05$, ***: $p<0.001$)

C3.2 総粒子状物質に占める蛍光粒子の割合

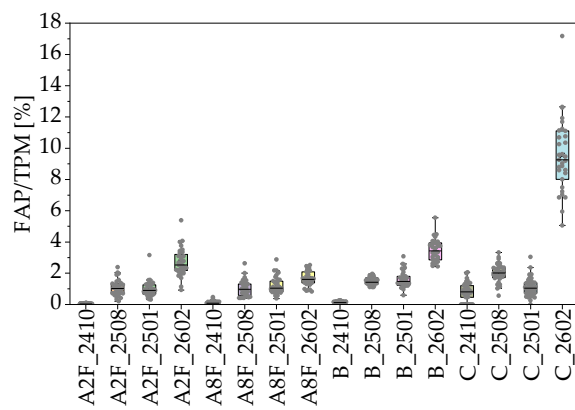
C3.2.1 A・B・C ビルにおける年度別比較

図 6 に、A ビル、B ビルおよび C ビルにおける夏期および冬期の粒径別 TPM に対する FAP の割合 (FAP/TPM) を示す。粒径が大きくなるにつれて、FAP/TPM 値は増加する傾向が認められた。

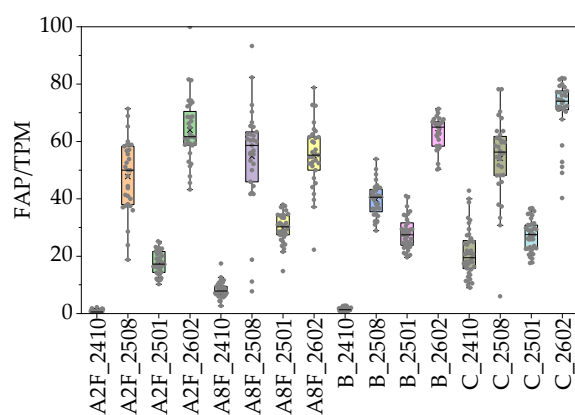
粒径別にみると、 $2.0\mu\text{m}$ 以下の粒子区分では、C ビルを除くすべての対象室において、夏期と比較して冬期の FAP/TPM 値が顕著に高かった。一方、 $2.0\sim 5.0\mu\text{m}$ の粒子区分では、冬期の FAP/TPM 値が高い傾向を示す対象室が多くみられた。さらに、 $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子区分では、季節にかかわらず FAP/TPM 値は総じて高く、中央値は夏期で 77.6~93.2%、冬期で 89.9~93.3%であった。



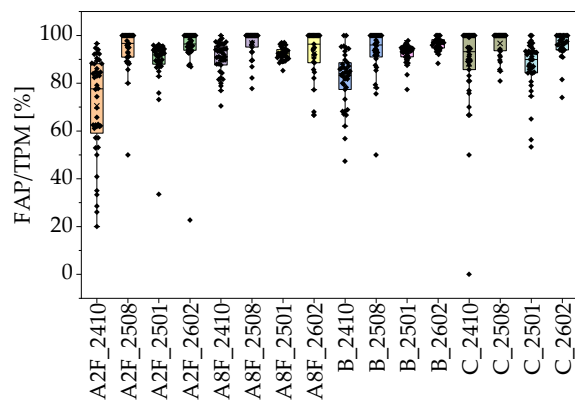
$0.5\sim 1.0\mu\text{m}$



1.0-2.0 μ m



2.0-5.0 μ m

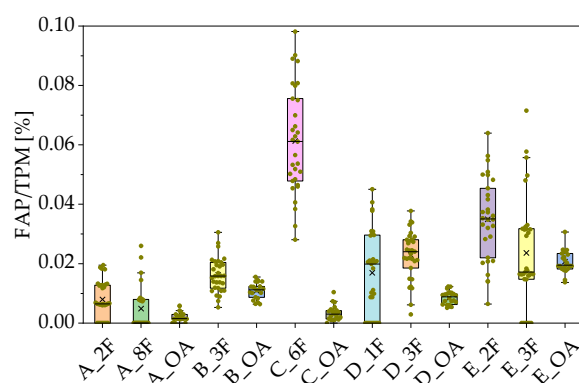


>5.0 μ m

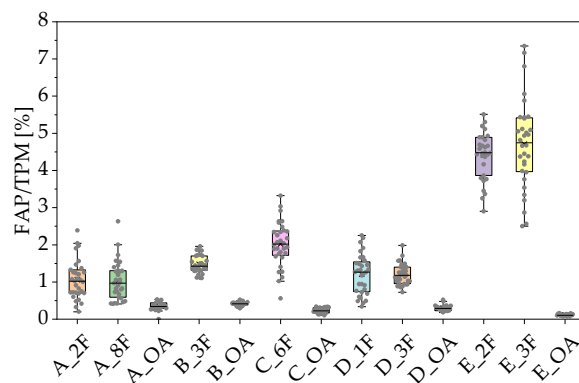
図6 TPMに占めるFAPの割合-A・B・Cビル

示す。夏期・冬期を問わず、粒径が大きくなるに伴い、FAP/TPMは有意に増加する傾向が認められた。各粒径区分における中央値は、表8に示すとおりである。

室内外のFAP/TPMを比較すると、1.0 μ 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 μ m以下の粒径区分およびCビルにおける5 μ 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: $p<0.001$)。



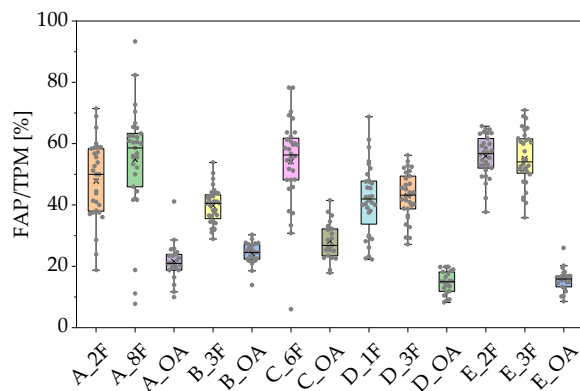
0.5-1.0 μ m



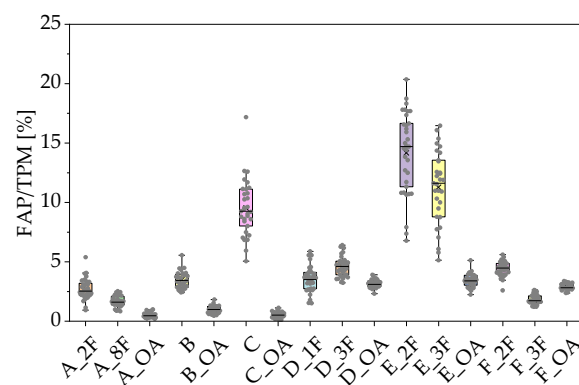
1.0-2.0 μ m

C3.2.2 2025年度各対象室の測定結果

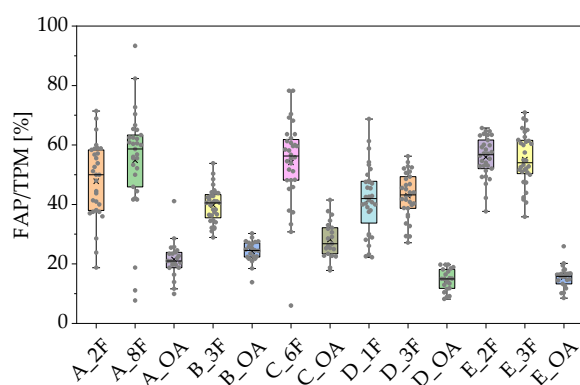
図7および図8に、それぞれ2025年度の夏期および冬期の測定結果から算出した総粒子状物質濃度(Total Particulate Matter: TPM)に対するFAP濃度の割合(FAP/TPM)の分布を



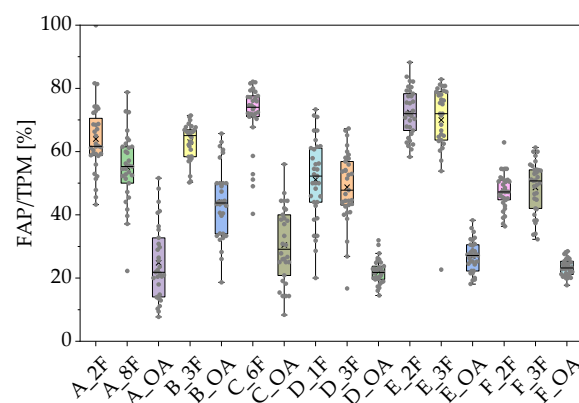
2.0-5.0μm



1.0-2.0μm

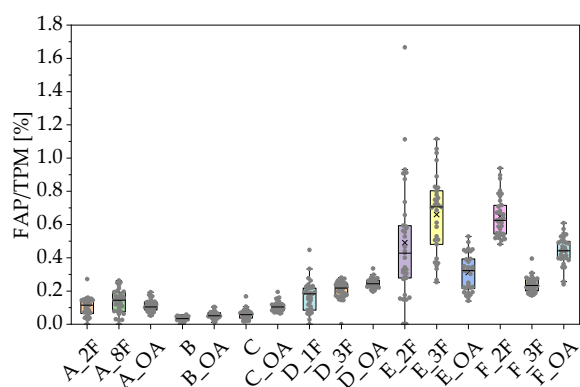


>5.0μm

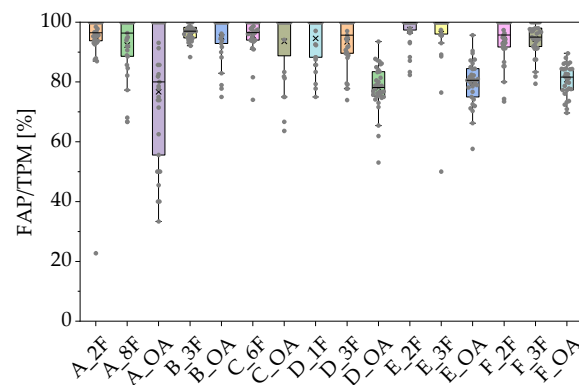


2.0-5.0μm

図7 TPMに占めるFAPの割合ー夏期



0.5-1.0μm



>5.0μm

図8 TPMに占めるFAPの割合ー冬期

表8 粒径別・季節別 FAP/TPM 中央値 (%)

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

C3.3 FAP と生菌（細菌）の関係

図9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。

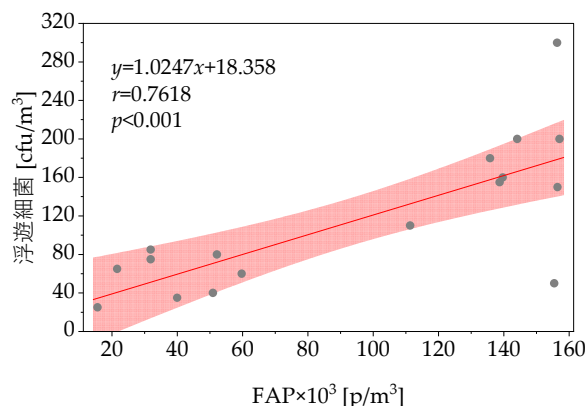


図9 FAP濃度と浮遊細菌濃度との相関

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

空気環境に関する測定と空調設備の点検に関係する建築物衛生法の施行令、省令、告示、通知の中で、本研究に関係する項目について、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。

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、各測定機器においては正の相関はあり、昨

年度の結果から経時変化は同様の傾向になった。しかし、低濃度域においては、感度の課題がある。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。実際に、基準値と比較する際には、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。

D2. CO₂センサおよびCO₂暴露がヒトに与える影響に関する調査

D2.1 CO₂センサの精度管理と運用上の課題

センサが実際より高い値を示す場合や、断線等で故障した場合は、警報や異常値として管理者が気づきやすい。しかし、自動校正の誤作動により実際より低い値が表示されている場合、システム上では空気環境は良好であると判断されるため、発見が極めて困難である。この状態が続くと、CO₂濃度が基準値を超えているにもかかわらず必要換気量が供給されない事態となり、居住環境の悪化や法基準の不適合を招くリスクがある。

調査を行った一部のメーカーでは、実環境においてCO₂濃度が大気レベルまで下がらないケースが多く、誤った補正によるトラブルが多発したことを受け、現在販売しているモデルでは自動校正機能を廃止している。代わりに、年1回程度の定期的なゼロガス校正を推奨する運用へとシフトしているが、使用者がその特性を十分に理解していないケースも散見される。

D2.2 信頼性確保のための設計・運用

以上の調査結果を踏まえ、空調制御にCO₂センサを用いる際の精度管理について、以下のような対策が考えられる。

センサを選定・設置する段階で、対象空間のCO₂濃度推移を予測することが重要である。24時間使用される居室や、夜間も濃度が下がりにくい高气密空間においては、自動校正期間中にセンサ周辺のCO₂濃度を確実に大気レベルまで低下させる時間を設ける運用ができない限り、

通常の自動校正機能付きセンサの採用は避けるべきである。そうした環境では、単光源二波長方式（測定用波長と参照用波長を比較して補正する方式）のセンサを採用するか、自動校正機能を無効化できる機種を選定することが望ましいと考えられる。

自動校正機能の有無にかかわらず、センサの経年変化は避けられない。したがって、定期的な精度検証および校正を行う以下のような運用管理が考えられる。

1. 実測値との比較確認：定期的に標準的な可搬式計測器を用いて実測を行い、設備用センサの表示値との乖離を確認する。
2. 定期校正の実施：メーカー推奨の頻度（例：年1回）で、ゼロガスやスパンガスを用いた校正を実施する。
3. 環境改善運転の導入：自動校正機能付きセンサを使用する場合は、自動校正期間中にセンサ周辺のCO₂濃度を確実に大気レベルまで低下していることを確認する。CO₂濃度が下がりきらず、誤補正の恐れがある場合には、週1回に十分なプリまたはポスト運転を行う等して、自動校正期間中にセンサ周辺のCO₂濃度を確実に大気レベルまで低下させる時間を設ける運用を検討する。

また、NDIR方式のセンサであっても光源や受光素子には寿命がある。一般的にドリフト幅は±150ppm/年程度とされるが、現状では実運用時の詳細な劣化データは不足している。故障してから交換するのではなく、あらかじめ定められた更新周期での計画的な機器更新が必要である。

D2.3 CO₂ガス曝露の人体影響

実環境におけるCO₂濃度の上昇は、多くの場合換気が不足する状況においてVOCsや生体発散物質と同時に発生する。純CO₂の曝露実験では認知機能や健康症状への明確な影響が出にくいことから、実環境で観察される悪影響の主因は、CO₂そのものではなく混合曝露である可能性が高いと考えられる。

認知機能への影響については結果が不一致であり、明確な閾値を見出すのは困難である。

一方で、睡眠の質や日中の眠気に対しては、1,000 ppm程度の比較的低濃度から一貫して負の影響が報告されている。

長期的な健康影響に関するエビデンスが不足している現状では、単一の安全閾値を定める根拠は乏しいといえる。そのため、一律の基準で管理するのではなく、空間の用途や滞在時間に応じた柔軟な基準設定が求められる。

D2.4. 結論

本研究では、CO₂センサの測定原理と運用実態、ならびに室内CO₂濃度がヒトに与える影響に関する文献的知見を統合的に整理した。その結果、CO₂濃度の測定および管理に関して、技術・運用・健康影響の各側面にまたがる重要な知見が得られた。

CO₂センサは換気制御および室内環境評価において有用な指標を提供する一方で、その測定値は常に正確であるとは限らない。特にNDIR方式における自動校正機能は、設置環境との不適合により系統的な誤差を生じうる。室内CO₂濃度が大気レベルまで低下しない環境では、自動校正により実際よりも低い濃度が表示される過補正が発生し、換気不足を見逃すリスクがある。このような誤差は、発見されやすい高濃度異常値とは異なり、管理上検知されにくい点で重大である。

室内CO₂濃度とヒトへの影響については、CO₂単独の曝露による明確な健康影響は限定的である一方、実環境において観察される認知機能低下や不快症状については、CO₂単独の影響だけでなく、換気不足に伴うVOCsや生体発散物質との複合曝露が関与している可能性が高い。一方で、睡眠の質や日中の眠気に関しては、1,000 ppm程度の比較的低濃度域から負の影響を示す報告が一定の一貫性をもって存在している。

これらの知見を踏まえると、室内CO₂濃度は人体影響の直接的な指標というよりも、従来通り換気状態および複合曝露リスクを反映する代理指標として位置づけることが適切である。また、現行の1,000 ppm基準は制定当時までの健康影響に関する知見に基づいて設定された管理基準であるが、単一の健康閾値として解釈する

ことには限界がある。そのため、1,000 ppm を下回ることのみをもって良好な室内環境が保証されるわけではなく、センサ精度、換気量、在室状況、用途を含めた総合的な判断が必要である。

実務上は、設置環境に応じたセンサ方式および校正機能の選定、自動校正機能の適切な運用、定期的な校正および実測値との比較による精度検証が不可欠である。これらを怠った場合、見かけ上良好な環境が維持されていると誤認し、結果として換気不足を長期間放置する恐れがある。

さらに、1,000 ppm 前後の濃度域におけるCO₂単独影響と混合曝露影響の切り分け、ならびに実環境におけるセンサ精度の経年変化に関するデータは依然として不足している。今後は実測データの蓄積とともに、センサの信頼性評価および室内環境基準の再検討に資する研究が求められる。

以上より、CO₂センサは省エネルギーと室内環境の質の両立を支える重要な技術であるが、その有効性は適切な理解と運用に大きく依存する。本研究で得られた知見は、建築設備設計者および維持管理者に対し、CO₂濃度の解釈および管理手法を再考するための基盤を提供するものである。

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

D3.1 考察

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⁴⁴⁾に加え、繊維状粒子や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⁴⁵⁾。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。

季節別の 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。この傾向は、2 年度連続で測定した宮崎県内の 3 ビル 4 室においても同様であった。さらに、D ビル 1F および 3F、E ビル 2F を除くすべての測定対象室において、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。

また、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示唆される。

FAP/TPM の割合については、Patra ら⁴⁶⁾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。さらに粒径別にみると、2.0 μm 未満では最大でも約 15%にとどまる一方、2.0–5.0 μm では 40–74%、5.0 μm 超では 95%以上となり（表 8、粒径が大きくなるに伴って FAP の寄与が顕著に高まる傾向が示された。これらの結果から、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、柳らが過去に 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⁵⁾。本研究においても同様の傾向が確認され（図 9）、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。

一方で、本研究にはいくつかの限界が存在する。まず、FAP は蛍光特性に基づいて検出されるため、必ずしも生物由来粒子のみを対象としているわけではなく、蛍光増白剤や有機粒子などの非生物由来粒子も含まれる可能性がある。そのため、FAP 濃度はバイオエアロゾルの指標として有用である一方で、浮遊細菌濃度を直接

的に表すものではない点に留意が必要である。

また、浮遊細菌との比較においては、培養法による測定が培養可能な生菌のみに限定されること、ならびに FAP 測定との時間分解能やサンプリング体積の違いにより、両者の定量的比較には不確実性が含まれる。さらに、室内外環境条件や在室者の活動状況などの影響を十分に分離できていない点も、本研究の制約である。したがって、今後は FAP に含まれる粒子の由来を詳細に把握するとともに、FAP を用いたバイオエアロゾルの定量評価の精度向上について検討する必要がある。

D3.2 まとめ

本研究では、BAS を用いて宮崎市内のオフィスビル 3 棟（計 4 室）における夏期（2024 年 10 月、2025 年 8 月）および冬期（2025 年 1 月、2026 年 2 月）、ならびに千葉県・神奈川県・埼玉県のオフィスビル 3 棟（計 6 室）における夏期（2025 年 8 月）および冬期（2026 年 2 月）を対象に、室内蛍光エアロゾル粒子のリアルタイム測定を実施し、以下の知見を得た。

- ① FAP 濃度は季節要因に強く依存し、夏期より冬期の方が有意に高い対象室が多かった。
- ② 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。

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) 土屋将大、柳 宇、金 勲、下ノ蘭慧、鍵 直樹：オフィスビルにおける蛍光エアロゾル粒子を用いた室内環境評価。日本建築学会大会学術講演梗概集、2026。
- 2) 柳 宇、金 勲、下ノ蘭慧、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。
- 3) 土屋将大、柳 宇、金 勲、下ノ蘭慧、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。

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

予定なし

<参考文献>

- 1)柳 宇：浮遊微生物測定法の現状。空気清浄、第 62 巻、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/bp00007a.004>.
- 4)Fennelly, M.J. et al. Review: The Use of Real-Time Fluorescence Instrumentation to Monitor Ambient Primary Biological Aerosol Particles (PBAP). Atmosphere. 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos9010001>
- 5)Yanagi, U, et al. 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>.
- 6) 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.
- 7) He Zhang, Ravi Srinivasan: A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management, *Sustainability*, 12, 9045, 2020
- 8) Behnam Mobaraki et al.: Application of Low-Cost Sensors for Building Monitoring: A Systematic Literature Review, *Buildings*, 11, 336, 2021
- 9) H. Chojer et al.: Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements, *Science of the Total Environment*, 727138385, 2020
- 10) 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 Orłowski, 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Gonçalo 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.
- 18) 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.
- 19) 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.

20) 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.

21) Shahar Tsameret, Daniel Furuta, Provat Saha, Nohhyeon Kwak, Aliaksei Hauryliuk, 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.

22) 環境省：微小粒子状物質曝露影響調査報告書、2007

23) Senseair AB: "Automatic Baseline Correction (ABC) functionality", Senseair Technical Whitepaper. <https://senseair.com/knowledge/> (閲覧日: 2026 年 4 月 30 日)

24) 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)

25) 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)

26) 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)

27) 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)

28) 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)

29) 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)

30) 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)

31) 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

32) 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>

33) 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>

34) 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>

35) 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>
- 36) 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>
- 37) 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>
- 38) 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>
- 39) 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>
- 40) 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>
- 41) 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>
- 42) 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>
- 43) 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>
- 44) 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>.
- 45) 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>.
- 46) 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>

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
ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

研究代表者	阪東 美智子	国立保健医療科学院 生活環境研究部
研究協力者	谷川 力	イカリ消毒株式会社、日本ペストコントロール協会
研究協力者	芝生 圭吾	鵬図商事株式会社
研究協力者	木村 悟朗	イカリ消毒株式会社
研究協力者	茂手木 眞司	日本ペストコントロール協会
研究協力者	橋本 知幸	日本環境衛生センター

研究要旨

本研究は、建築物衛生管理におけるねずみ・衛生害虫防除分野を対象として、デジタル技術活用の可能性を検証することを目的とした。

まず、ねずみ・衛生害虫の防除に関する現在の調査方法と報告書の例を収集し、課題を整理した。デジタル技術を活用した調査方法の事例を収集し、一覧表に整理して、デジタル技術の適用の可能性を検討した。さらに、日本 PCO 協会会員を対象にアンケート調査を実施し、デジタル機器の普及状況を把握した。ごく一部の商品が半数程度の事業所で使用されていたほかは、ほとんど普及しておらず、その要因として通信費を含む導入コストや費用対効果の評価の難しさがあることが示唆された。

国際展示会や国内外の学会等に参加し、デジタル技術の活用・普及状況やニーズを調べた結果、IT 関連の報告・展示は数題から数割程度で、工程管理系のものが多く調査・点検等で使用できるものは少数であった。AI による害虫同定やオンライン監視などの技術は一部実用化されているものの、普及は限定的であり、コストや精度への懸念が課題として挙げられた。一方、現場からは報告書作成の効率化や臭気センサー、AI 相談アプリ等への期待が示された。

また、ねずみ用センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証試験と、自動計数機能付き捕虫器を用いた検証試験を実施した。前者は試験室においてねずみ用センサーの設置前後の餌の喫食量の推移や天井カメラの動画分析によるねずみの行動観察を行うもので、実験結果からねずみはセンサーを新奇物として認識し警戒しており、センサー設置直後の行動が変化する可能性が高いと推察された。後者はイエバエおよびクサビノミバエを対象に、部屋の広さや照明条件が捕獲効率に大きく影響しないことを確認した。カウント精度は概ね 80%以上であり、昆虫類の生息状況把握への有効性が示された。

さらに、アイトラッキングシステムを用い、目視による点検・検査の内容・方法を可視化することを試みた。具体的には、実際の厨房において、熟練作業員と未経験者による点検ルートや点検箇所の違い、トラップの設置提案場所の違い、あらかじめ隠しておいたゴキブリおもちゃの発見時間の違いを調べた。調査結果から、点検ルートや各所の点検時間（注視時間）、点検の姿勢、設備・什器の知識等に見られた。熟練作業員の視線移動や点検技術を可視化でき、什器の隙間や熱源周辺など重点点検箇所が明らかとなった。これらの成果を基に、熟練作業員の点検技術を学習できる教材動画を作成した。

以上より、本分野におけるデジタル技術は限定的ながらも、効率化や人材育成への活用可能性を有することが示唆された。

A. 研究目的

建築物衛生管理のうち、ねずみ衛生害虫防除分野におけるデジタル技術の活用の可能性を検証することを目的とした。建築物衛生法が求める各種項目において、デジタル技術の活用でその目的の達成が見込まれる技術、機器、ソフトウェア等を抽出するとともに、従来の手法との比較検証等を実施し、適切な維持管理方法の探索とその際の判断基準や留意点を明確化した。

B. 研究方法

B1. ねずみ・衛生害虫の防除に関する調査内容の整理とデジタル技術導入の可能性の検討

ねずみ・衛生害虫の防除に関する報告書例を収集し現在の調査方法や点検結果の報告内容について整理を行った。また、市販されているデジタル機器を中心に、ねずみ・衛生害虫の防除に活用可能な機器を収集して一覧表を作成した。これらの資料から、ネズミ・衛生害虫防除におけるデジタル技術の適用可能性を検討した。

B2. デジタル技術の活用状況に関する調査

(公社)日本ペストコントロール協会の協力の下、ペストコントロール分野のIT活用状況に関するアンケート調査を実施した。アンケートの対象は特定建築物件数や地域性を考慮し、2022年度の特定建築物の物件数が概ね2000件以上ある北海道・東京都・神奈川県・愛知県・大阪府・福岡県の6地区のペストコントロール協会所属会員企業とし、ウェブによるアンケート調査を行った。調査期間は令和6年2-3月。

B3. ねずみ・衛生害虫の防除分野におけるデジタル技術に関する情報収集

2つの国際展示会(FAOPMA Pest SummitとPest World)及び国際学会(第11回International Conference on Urban Pests)に参加し、海外のデジタル技術の活用・普及状況に関する情報を集め整理した。

また、日本ペストロジー学会若手談話会の協力の下、現場で求められるデジタル技術について参加者から意見を募った。

B4. ねずみ用センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証

ねずみ用センサーのうち、比較的に普及度の高い2つのセンサー(トロフィーカムXLT32MP・ノーグロウDC4K及びRYODEN Pescleカメラタイプ)を用い、センサーに対するねずみの認知や回避行動の有無を明らかにするため、センサーを用いた検証試験を行いねずみの行動をカメラで記録した。

B5. 自動計数機能付き捕虫器に関する検証

捕虫器(ライトトラップ)の有効性と課題を明らかにするため、自動計測機能付きトラップを用いて検証試験を行った。検証試験は、条件(部屋の大きさ、照明、供試動物の種類)を変えて実施した。

B6. 目視による点検作業の視線分析

ねずみ・衛生害虫の防除に関し、現在の目視による点検作業の詳細を確認するため、アイトラッキングシステムを使用し「見える化」を行った。施行試験として、イカリ技術研究所の実験室(工場等の再現室)において、熟練作業者と未経験者のそれぞれに点検作業を行い、有用性や分析方法を確認した。その後、特定建築物の実際の厨房において、5名の熟練作業員(東京都ペストコントロール協会の技術委員等)と3名の未経験者にそれぞれ点検作業を行ってもらい、ウェアラブルアイトラッカー(Tobii Pro3 Glasses 3)でデータを収集した。収集したデータを用いて注視した順番や注視した時間の程度、あらかじめ隠しておいたゴキブリおもちゃの発見数や発見までの時間、トラップの設置提案箇所などの指標を用いて作業内容を比較し、熟練作業員による点検作業の特徴を明らかにした。

また、ウェアラブルアイトラッカー（Tobii Pro3 Glasses 3）の活用方策として、熟練作業員による点検作業の動画教材の作成を試みた。

（倫理面への配慮）

ねずみ用センサーの検証試験については、イカリ消毒株式会社動物実験審議会の承認を得て実施した（承認番号 24-010）。アイトラッカーを用いた厨房における点検作業の分析については、国立保健医療科学院研究倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号 NIPH-IBRA#24037）。

C. 研究結果

C1. ねずみ・衛生害虫の防除に関する調査内容の整理とデジタル技術導入の可能性の検討

ねずみ・衛生害虫の防除に関する報告書例や特定建築物における対象害虫の被害発生度合い等の統計資料を整理し、対象とする衛生害虫の種類や、施工の流れ及び作業内容を確認した。特定建築物で発生頻度が高いのは、主にねずみとゴキブリであった。施工の標準的な流れは、調査→計画→対策→効果判定であった。調査の具体的方法は、目視調査、トラップ調査、聞き取り調査があった。対策については、物理的防除（捕獲、侵入防止）、環境的防除（清掃、整理整頓）、化学的防除（殺虫剤・殺鼠剤）に整理できた。

現在市場に出回っている製品を中心に、ねずみ・衛生害虫の防除に関して活用可能な商品について、ジャンル、対象害虫、どのような調査に活用できるか、商品の概要、費用、主な使用場所、使用頻度、将来的な発展性を整理した。情報収集した 18 品目は、赤外線センサー式暗視カメラや熱感知式カメラ、振動センサー、捕虫器、殺虫器などで、うち 7 品目が特定 PCO 専用商品（特定 PCO が自社の顧客だけに施工もしくは販売している商品）であった。対象害虫は、ねずみが 10、ゴキブリが 4、ハエが 7、蚊が 1 であった。生息調査に使用可能なものが多く、現場から離れた場所でも監視できるものもあった。報告書作成や物理的または化学的防除等に使用

できるものもあった。対象害虫別のデジタル化の現状を示す。対象害虫では、主にねずみ、ゴキブリ、ハエが中心であり、作業内容としては、調査と報告書作成、防除対策の一部に利用できる可能性があった。一方、ねずみ、ゴキブリ、ハエ以外の衛生害虫を対象とした商品や、聞き取り調査や計画立案、防除方法組み合わせ、環境的防除などの作業に利用できる商品はほとんどなかった。

C2. デジタル技術の活用状況に関する調査

ペストコントロール分野の IT 活用状況に関するアンケート調査は、対象会員（事業所単位）410 社のうち 112 件（企業単位の回答を含む）の回答を得た。デジタル機器 18 品目について使用の有無を尋ねたところ、「トロフィーカム／赤外線センサー式暗視カメラ」（60 件、54%）は半数程度の事業所で使用されていたが、特定建築物での使用は 15 件（13%）であった。他のデジタル機器はほとんど使われておらず、いずれの機器も使用していないのは 41 件（37%）であった。

ねずみ・衛生害虫防除におけるデジタル機器について問題点を感じているという回答は 17 件（15%）あり、通信に係る契約や費用などの導入コストや、費用対効果の評価の難しさなどが挙げられた。ねずみ・衛生害虫防除におけるデジタル技術について求めるものがあるという回答は 13 件（12%）であり、報告書の作成をサポートする技術などが挙げられた。「デジタル技術導入のためにはまずは業界における規格の統一化が必要」との意見もあった。

C3. ねずみ・衛生害虫の防除分野におけるデジタル技術に関する情報収集

「FAOPMA Pest Summit」（2024 年 8 月 7 日～10 日、インド・ムンバイ）には、約 30 カ国 700 人以上が集まり、日本からは約 30 名が参加した。害虫の生態・防除方法からチームマネジメント方法など多岐にわたるジャンルで 20 題の講演があり、最も多い対象害虫は蚊とシロアリであった。「Pest World」（2024 年 10 月 22 日～

25 日、アメリカ・デンバー）には、世界各国から 4000 名以上の登録があった。64 題の講演と 242 社が出展していた。出展企業の商品ジャンル別に分類したところ、IT 関連が 51 社（21.1%）と最も多く、次いで資材 43 社（17.8%）、薬剤 37 社（15.3%）、機材 37 社（15.3%）と続いた。ねずみを対象とするものが多く振動センサーを使用した商品が多かった。また、センサー感知式暗視カメラや超音波タイプの駆除器などが見られた。デジタル技術を用いた商品については、業務効率化や集客を目的とした工程管理系のものが多く、調査・点検等で使用できるものはほとんどなかった。「ICUP（第 11 回 International Conference on Urban Pests）」（2025 年 6 月 29 日～7 月 2 日、スウェーデン）では、28 か国約 230 名が参加し、52 題の口頭発表および 28 題のポスター発表が行われた。うち、デジタル技術に関する報告は 3 題（ネズミ 2、飛翔性昆虫 1）であった。海外も目下開発中であることがわかると同時に、真新しい技術発表はなかった。

次に、日本ペストロジー学会若手談話会において、ワークショップ形式で参加者（22 名）の意見を募った。報告書作成の効率化や臭気センサー、AI 相談アプリ等への期待が示された。

C4. ねずみ用センサーに対するねずみの認知・行動に関する検証

試験に利用するデジタル機器として、「Pescle（カメラタイプ）／赤外線センサー式暗視カメラ」と「トロフィーカム／赤外線センサー式暗視カメラ」を選定した。実験の結果、全ての供試動物で試験品設置日の消灯後に初めて試験品を認識した際に、いったん動きが止まる、後ずさりをする等の試験品を警戒している様子が認められた。また、エサの喫食量について、試験品設置側が前日比で 30%以上減少した。

C5. 自動計数機能付き捕虫器に関する検証

部屋サイズおよび明暗条件ではイエバエおよびクサビノミバエの捕獲数に影響しなかった。カウ

ント精度についてみると、本試験条件ではイエバエはクサビノミバエよりもカウント精度が高かった。捕獲時間については、明暗条件は捕獲時間に影響した。しかし、部屋の大きさについては、イエバエとクサビノミバエのいずれも、狭い部屋のほうが広い部屋よりも捕獲時間が必ず短くなることはなかった。

C6. 目視による点検作業の視線分析

熟練作業員と未経験者の点検内容を比較すると、点検ルート、点検時の姿勢、什器や設備等に関する知識において相違が見られた。

点検ルートは、熟練作業員は動きに無駄がなく、同じところを行ったり来たりしなかった。作業をしながらも視線は次の点検箇所に移動していた。点検時の姿勢は、熟練作業員は、什器と什器の間や、什器の上、什器と床の間などをとくに細かく点検していた。低い箇所を調査するには膝をたてて姿勢を極力低くし、什器等の下まで覗き込み隅々までライトで照らして点検していた。また、熟練作業員は、什器・設備等の構造や形態に詳しく、開閉できる場所はすべて開閉して点検していた。グリース・トラップ、コールドテーブルカバーや電気系統のカバーは外して中まで点検し、メタルラックや落ちているゴミ袋、調理器具類などの動かせるものは極力動かして調査していた。

さらにインタビュー調査により、熟練作業員には、什器の隙間や熱源周辺など共通の重点点検箇所があること等が明らかになった。

D. 考察

建築物衛生法に基づくねずみ・衛生害虫等の調査業務において、デジタル技術は生息状況の把握やモニタリングの効率化には有効であるものの、調査から防除、効果判定までの一連の業務を代替する段階には至っておらず、特に熟練作業員の知識・経験に依存する目視点検や防除計画の立案は依然として人の判断が不可欠であることが明らかとなった。

調査技術については、赤外線カメラや各種センサー、AI 画像解析などにより遠隔監視や自動計数・同定が可能となりつつあり、昆虫類においても生息状況把握への有効性が確認された。しかし、対象種ごとに適用できる機器が限定されることや、ねずみがセンサーを忌避する可能性が示されたことから、機器の性能だけでなく対象生物の生態や行動特性を踏まえた運用が重要である。また、国内外ともに防除工程のデジタル化は限定的であり、徘徊性昆虫への対応技術も十分に普及していない。

さらに、企業調査、若手技術者への聞き取り、国際学会の動向からは、導入コストや費用対効果への懸念が共通して指摘されており、高度な技術が開発されても必ずしも普及につながらない実態が確認された。そのため、今後は単なる技術開発ではなく、現場ニーズに即して「何をデジタル化すべきか」を選択し、業務改善効果を明確に示すことが求められる。

一方で、ウェアラブルアイトラッカーによる分析では、熟練作業員の視線、点検ルート、判断根拠などの暗黙知を可視化できることが示された。目視点検そのものを完全にデジタル化することは困難であるが、デジタル技術を活用して熟練技能を記録・継承し、人材育成や作業標準化に活用することは十分可能である。したがって、今後の建築環境衛生分野におけるデジタル化は、人を置き換える自動化を目指すだけでなく、人の判断や技能を支援・継承する「人間中心型のデジタル化」として進めることが重要である。

E. 結論

ねずみ・衛生害虫防除分野におけるデジタル技術の導入は国内外ともに限定的であり、導入コストや費用対効果の不明確さ、さらには現行技術では業務全体を代替できないことが普及の大きな障壁となっていることが明らかとなった。一方で、現場ではデジタル技術の活用に対する期待やニーズも存在しており、特にモニタリングや生息状況把握の効率化において有効性が確

認された。例えば、ねずみ用センサーや自動計数機能付き捕虫器によって対象生物の行動や生息状況を把握できることが示されたが、ねずみがセンサーを新奇物として警戒するなど、生物の生態・行動特性が調査結果に影響を及ぼす可能性も明らかとなり、技術導入時には慎重な運用が求められることが分かった。

また、ウェアラブルアイトラッカーを用いた調査では、熟練作業員の点検ルート、注視箇所、点検姿勢、設備や害虫生態に関する知識など、従来は暗黙知とされてきた目視点検技術の可視化が可能であることが確認された。その成果は教育ツールや教材動画の作成に活用することが可能である。デジタル技術は単に人の作業を代替するだけでなく、熟練技能の継承や人材育成を支援する手段として大きな可能性を有していることが示された。

本分野におけるデジタル化は、完全な自動化を目指すのではなく、人の判断や技能を補完・支援する形で発展していくことが現実的かつ有効な方向性であると考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 阪東美智子. ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討. *Pest Control Tokyo*. 2025.7;Vol.90:15-18.
- 2) 谷川力. PCO における IoT 技術の活用—ねずみ等の遠隔監視の実例と普及の課題—. 第 53 回建築物環境衛生管理全国大会（公益社団法人日本建築衛生管理教育センター）. 2026. 01:42-45.

2. 学会発表

- 1) 阪東美智子. ペストコントロール分野の IT 活用状況に関するアンケート調査. 第 83 回日本公衆衛生学会総会；2024.10.29-31；札幌. 同抄録集. P21-16(31AM012).p.607.
- 2) 谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 茂手木眞司, 小室正二, 阪東美智子. アイトラッカーを利用し

た調査—ベテランと初心者の調査視点の相違について—，日本ペストロロジー学会大会；2024.12.3-4；群馬．同抄録集(40)．p.33.

- 3) 茂手木眞司, 谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 阪東美智子. ペストコントロール業界におけるデジタル機器活用状況. 日本ペストロロジー学会大会; 2024.12.3-4; 群馬. 同抄録集(40). p.34.
- 4) Goro Kimura, Behavioral Response of Musca Domestica to Visual Targets, Proceedings of the Eleventh International Conference on Urban Pests 2025, 219-224.
- 5) 阪東美智子. ペストコントロールにおける IT 技術活用の可能性：アイトラッカーによる目視点検の分析. 第 84 回日本公衆衛生学会総会；2025.10.29-31；静岡．同抄録集．p.660.
- 6) 田中和之, 木村悟朗, 芝生圭吾, 谷川力, 阪東美智子. センサーカメラの設置によるクマネズミの行動変化．第 76 回日本衛生動物学会東日本支部大会；2025.11.1；千葉．同要旨集．p.29.
- 7) 谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 佐々木健, 市川博一, 大山克幸, 野本祥一, 西田雄剛, 大川拓也, 茂手木眞司, 下ノ蘭慧, 阪東美智子. 実

際の現場でのアイトラッカーを利用した調査—続 熟練作業員と未経験者の調査視点の相違について—，第 41 回日本ペストロロジー学会大会；2025.11.6-7；新潟．同抄録集(41)．p.40.

- 8) 木村悟朗, 谷川力, 阪東美智子. 空間サイズおよび室内照明がハエ・コバエ類の捕獲効率に及ぼす影響. 第 78 回日本衛生動物学会大会；2026.4.18-19；栃木．衛生動物大会特集号(77)．p.77.

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

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
清掃に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討

研究協力者	正田 浩三	東京美装興業株式会社
研究協力者	深見 盛英	東京美装興業株式会社
研究協力者	川村 典子	東京美装興業株式会社
研究協力者	江本 達哉	東京美装興業株式会社
研究協力者	辻本 彩香	東京美装興業株式会社
研究協力者	杖先 樹里	一般財団法人 建築物管理訓練センター
研究協力者	栢森 聡	株式会社ウィズらぼ
研究協力者	下平 智子	全国ビルメンテナンス協会
研究代表者	阪東 美智子	国立保健医療科学院

研究要旨

本研究では、清掃業務におけるデジタル技術について、①既存研究の整理と情報収集・企業への導入状況の把握、②清掃点検報告システム、③トイレ利用・消耗品計測システム、④アイトラッキングシステムを用いた目視点検の分析、⑤2 機種 of ATP 測定器（キッコーマン製、ニッタ製）の検証を行った。

既存研究については論文・資料のデータベースを作成し収集した論文の検索システムを構築した。また、展示会において清掃ロボットの情報を収集し性能を比較検討した。清掃企業でのデジタル技術の導入については、アンケート調査から、清掃ロボットの導入企業が 8 割程度あった。また、業務の効率化システムとして勤怠管理システムの導入企業が 4 割程度ある一方、「特にない」と答えた企業が 4 分の 1 あった。

また、清掃分野におけるデジタル機器のうち清掃点検報告システムを取り上げ、その有用性を検証した。使用したのは 123 レポーター（クリーンシステム株式会社）で、写真の貼り付け、コメントの音声入力、写真撮影を同時に行うことができる。13 施設に約 8 か月導入した結果、10 施設で作業時間が短縮し、平均 32 分（約 20%）の効率化が確認された。特に、写真添付や情報共有、報告書作成業務の効率化に効果がみられた。多数建築物、大規模建築物等においては、作業が多忙となるため、改良が必要となる面があった。

さらに、デジタル機器の導入によるトイレの清掃の効率化を検証するために、TERAS（テラモト）のセンサー（トイレ利用者数カウンター、トイレ個室利用者数カウンター、トイレトーパー在庫減アラートセンサー、水石鹸在庫減アラートセンサー、ゴミ量アラートセンサー）を用いた実証実験を実施した。データから、1 日のトイレ利用者数、1 か所あたりのトイレ個室利用者数、個室平均滞在時間、トイレ個室利用ピーク時間や水石鹸の補充のタイミング（本調査では 5～7 日間隔で対応が可能と判明）が明らかになった。感覚で捉えていた利用ピーク等が数字で明らかにな

ったことにより、今後の対応に活かせる情報が得られた。一方で、導入コストが課題として挙げられた。

アイトラッキングシステムを使った目視点検のデータ分析からは、どの場所をどのように確認しているのかを「見える化」することで、カメラ等による点検と人による目視との点検内容の違いを具体的に検証できる可能性が示唆された。

ATP 測定では、疑似汚れとしてベビーフード 10 倍希釈液を用い、建材表面、タオル、モップ等の測定条件を検討した。表面が平滑な建材ほど高い ATP 値を示し、凹凸面では低値となった。また、測定者差や繰返し測定誤差が認められ、特に凹凸面でばらつきが大きかった。液用ペンは表面ペンより高値かつ安定した測定結果を示し、タオル・モップ管理への応用可能性が示唆された。さらに、都内複合建築物で ATP 測定を実施した結果、トイレや高頻度接触部位で高値を示した。2 機種間では測定値に大きな差があり、機種間比較は困難であったが、同一機種を継続使用することで汚染傾向の把握に有効であると考えられた。

以上より、デジタル技術は、建築物清掃管理の効率化と衛生管理の高度化に有用であることが示された。

A. 研究目的

建築物衛生管理のうち、清掃分野におけるデジタル技術の活用の可能性を検証することを目的とした。建築物衛生法が求める各種項目において、デジタル技術の活用でその目的の達成が見込まれる技術、機器、ソフトウェア等を抽出するとともに、従来の手法との比較検証等を実施し、適切な維持管理方法の探索とその際の判断基準や留意点を明確化した。

B. 研究方法

B1. 清掃分野における既存研究の整理とデジタル技術の収集及び清掃企業への導入状況調査

清掃関連に関する技術の現状と課題を整理するために、清掃に関する学会論文及び関係機関の成果物を収集しリストを作成した。作成リストに基づき、収集した論文を検索できるシステムを構築した。

また、全国ビルメンテナンス協会主催の 2023～2024 年度ビルメンヒューマンフェアに参加し、展示品資料やデジタル化技術の実施例を収集した。清掃ロボットについては、小型清掃ロボット、中型清掃ロボット、大型清掃ロボットについて機械性能を比較した。

さらに、2025 年 9 月に東京ビルメンテナンス協会の企業会員を対象にデジタル技術の導入の現状についてアンケート調査を行った。

B2. デジタル技術を活用した清掃点検報告書の作成に係る検証

清掃点検報告システムである 123 レポート（クリーンシステム株式会社製）を選定し使用した。清掃会社の実際に使用している清掃点検・報告シートをカスタマイズし、携帯端末にインストールした。既存の 13 建築物の清掃点検（約 8 月間）を行い、前年度の清掃点検・報告書作成に要した時間等と比較した。

使用期間は、2024 年 4 月から 12 月であり、2 名の専任清掃点検者が実施した。点検項目はエントランスやトイレなど共用部を対象に 48 項目とし、13 施設で点検を実施し、導入前後の報告書作成時間を比較した。

B3. デジタル技術を活用したトイレ清掃の効率化に係る検証

2024 年 10 月～12 月に都内にある O 複合建築物で、3 階共用部にある男女トイレの使用人数、トイレ消耗品、個室使用回数・時間、1 階ゴミ箱の回収保管率を測定する。男女トイレに 3 ヶ月に

わたりテラモト製のセンサー（通行量カウンター、マグネットセンサー）を設置し、トイレ清掃の効率化につながる利用者数、個室の利用回数や滞在時間を収集した。またトイレトペーパーホルダー、水石鹸容器、共用部のゴミ箱にもセンサーを設置し、在庫管理や巡回清掃頻度の見直し等への有用性を確かめた。

B4. 熟練作業者の目視による点検作業の分析

現在の目視による点検作業の詳細を確認するため、アイトラッキングシステムを使用し「見える化」を行った。建築物管理訓練センター・全国ビルメンテナンス協会が入居する事務所ビル（全国ビルメンテナンス協会が主催する建築物清掃管理評価資格者講習会の会場で、点検作業の実習の場所としても使われている）において、建築物清掃管理評価資格者（インスペクター）に点検作業を行ってもらい、アイトラッキングシステムでデータを収集した。収集したデータを用いて注視した順番を表現した Scan Path と注視した時間の程度を表現した Heat Map を作成し、作業内容を比較する。また、点検作業中の発語を録音し、視線データと照合することにより、作業内容の補足を行った。

B5. 建築物内清掃作業の ATP 測定器導入の基礎的研究

清掃作業の点検機械として ATP 測定器 2 機種（キッコーマン社ルミテスターA3 とニッタ社ハンドヘルドルミノメーター33S）を用いて、基礎的資料を作成する。測定ペンは、表面測定用と水中測定用の 2 種類を用いる。

まず、実験室において建材や清掃用具の測定を行う。汚れとしてベビーフードの 10 倍希釈液を選定し、建材として表面仕上げの異なる 3 種類の亚克力板を用いる。また、清掃用具としてタオルとモップの汚れを測定する方法を検討し実測を行う。測定は 2026 年 2 月に実施した。

さらに、都内の特定建築物において、清掃前後の測定を行う。測定場所は男女トイレと清掃倉庫・用具とし、測定は 2026 年 1 月に実施した。

C. 研究結果

C1. 清掃分野における既存研究の整理とデジタル技術の収集及び清掃企業への導入状況調査

C1.1. 清掃分野に関する既往研究の整理

清掃に関する調査・研究論文は、1950 年から 2025 年までの 346 編となる。収集論文の関係学会は、日本建築衛生管理教育センター、日本建築学会、日本環境管理学会が主であり、その他収集できた発表・報告論文をリスト化した。対象となる建築物の内訳は、建築物室内関連 79%、建築物外装関連 15%、住宅関連 6%であった。内容により分類すると、汚れ関連 39%、安全・健康 16%、清掃用具の発塵・発生量・拡散 15%、清掃品質評価 11%、清掃方法・汚れ除去 7%であった。これらを（一財）建築物管理訓練センターの HP に専用サイトを WEB 公開した。

(<https://bmtc.libra.lw-cloud.jp/#/home>)

C1.2 清掃分野におけるデジタル技術の収集整理

J-STGE、J-dreamⅢ、メディカルオンラインや、ネット記事から、「デジタル・AI・ロボット・オート・自動・IoT・センサー」と「清掃」をキーワードとして検索した結果、計 184 本の記事を収集した。主要な記事は、清掃ロボットに関するものが多かった。

2023 年度ビルメンヒューマンフェアにおいて収集したデジタル機器・ツールは、作業管理ツールと清掃状況管理報告作成ツール、報告書作成ツールの 3 種に分類できた。

2025 年度のビルメンヒューマンフェアではロボット・センサーが多く出展されていた。出展された、清掃ロボットは、小型タイプ 8 台、中型タイプ 15 台（吸塵タイプ 9 台、洗浄タイプ 6 台）、大型タイプ 18 台（吸塵タイプ 7 台、洗浄タイプ 11 台）、外壁清掃タイプ 3 台、トイレ大便器清掃タイプ 2 台であった。

C1.3 清掃分野におけるデジタル技術の収集整理

全国ビルメンテナンス協会が実施した 2023 年度建築物清掃管理評価資格者講習の受講者アンケート結果（回答者数 450 人）では、インスペクシ

ョンに使用している機器として、「光度計」35 (24.3%)、「ブラックライト」25 (17.4%)、「ATP測定器・ルミテスター」24 (16.7%) が上位を占めた。「作業管理アプリ・自社開発アプリ」を使用しているとの回答が5件 (3.5%) あった。

東京ビルメンテナンス協会の建物清掃調査委員会のメンバーに2025年9月に清掃委員会の企業を対象としたアンケート調査(34社)では、清掃ロボットを導入している企業は、80%であり、その内、10台以内が78%、20台以上は、14%であった。導入建築物は、事務所建築物が50%で最も多く、次に、商業施設25%、病院16%の結果であった。業務の効率化システムとしては、勤怠管理システムが43%と最も多く、報告作成システム12%、作業スケジュール管理システム11の順であった。しかし、特にないと答えた企業も25%あった。

C2. デジタル技術を活用した清掃点検報告書の作成に係る検証

全国ビルメンテナンス協会の清掃点検資格者による事務所建築物約750件の点検報告書の内容から建築物の特徴を調べた。建物の延床面積は10,000㎡未満が65%であり、うち清掃作業面積は6,000㎡以下が大部分であった。大規模ビルは1社単独で清掃作業を受託することは少なく、複数のビル管理会社で分担して作業を実施することが影響している可能性がある。点検評価シートに記載された得点について、全国ビルメンテナンス協会のインスペクター制度の評価を参照すると、標準以上のビルが16%、標準が68%、標準未満が16%であった。総合点に影響を及ぼす場所ごとの得点は、トイレ、事務室、湯沸室、階段の順に相関が高かった。

「123 レポーター」による検証結果は以下のとおりであった。このデジタルツールは写真取込みやデータ転送ができる仕組みになっており、点検項目はカスタマイズを行った。2名で使用したが人による使用感に大きな違いはなかった。従来の方法よりも時間が短縮した施設は13施設中10施設、短縮時間は10分から130分で、平均32

分であった。3施設は変化がなかった。現場による時間短縮はほぼ同じであったが、会社での事務処理の効率化が大きかった。平均すると20%の時間短縮につながった。現場で音声録音しているので、再確認が容易であり間違いが少なくなった。また、関係者との情報共有、前回清掃点検結果との比較が簡単にできるようになった。

C3. デジタル技術を活用したトイレ清掃の効率化に係る検証

10月の1日あたりの時間ごとの平均使用人数は、朝8時から夕方18時までが多く、女性の利用人数より男性の利用人数が多かった。男性の場合は、手前個室が奥の個室より利用者が多かった。女性の場合は、奥が最も多く、その次に、真ん中、手前の順であった。曜日別1日当たりの利用者数をみると、土日の利用者が少なかった。土日は、事務所フロアの会社が休みであり、レストラン、ショッピング等の共用部の利用者に限られていた。

次に、3か月間のトイレ個室利用回数と利用時間の関係を見ると、女子トイレの平均滞在時間は、2分12秒であり、男子トイレは、5分40秒であった。また、30分を超える個室利用者は、女性トイレ5人/月、男子トイレ22人/月であり、男性が多かった。

トイレ消耗品のトイレトペーパーの補充回数をみると、女子トイレでは奥の個室(46ロール)が最も多く、次に手前(45ロール)、中(36ロール)の順であった。男子トイレでは、奥の個室(33ロール)が多く、次に手前の個室(20ロール)であった。石鹸の補充では、4Lの容器に、1回の補充で2Lを補充するが、女子トイレは14回の補充で、男子トイレは32回の補充であった。

ゴミ保管率については、もえるゴミでは、保管率の平均が70%、かん・びん・ペットボトルの保管率は平均が18%であった。もえるゴミは、袋、紙ゴミ等のかさばるゴミであり高い値が継続していた。かん・びん・ペットボトルゴミは、重量があり下に貯まるため低い保管率を示した。

C4. 熟練作業者の目視による点検作業の分析

アイトラッカーによる視線データ及び点検中の発語記録から、点検は全国ビルメンテナンス協会が実施している建築物清掃管理評価資格者講習で使用される「作業品質シート」の内容に準じて行われており、各場所においてポイントとなる箇所を重点的にくまなく点検していることが明らかになった。

点検作業中のアイトラッカーによる撮影動画は、教材として活用できるように字幕を入れて編集した。

C5. 建築物内清掃作業の ATP 測定器導入の基礎的研究

C5.1. 表面仕上げが異なる 3 種類のアクリル板の ATP 値

表面仕上げが異なる 3 種類のアクリル板に同一の汚れを塗付して測定を行った。つるつるの建材が最も値が大きく、小さな凹凸のある建材、大きな凹凸のある建材はあまり差が出なかった。キッコーマンでの建材の凹凸の違いでは、1・2 回の平均でつるつる建材を 100%とした時、小さな凹凸 54%、大きな凹凸 53%であった。ニッタでは、つるつる建材を 100%としたとき、小さな凹凸 30%、大きな凹凸 40%であり、凹凸の大きさによる違いは明確ではなかった。

キッコーマンとニッタの比較では、キッコーマンの値をニッタの値で除した時、つるつる建材 23.6 倍、小さな凹凸 43 倍、大きな凹凸 31.8 倍となり、23 倍～43 倍の結果となった。

同じ場所の 1 回目と二回目の測定の差は、キッコーマンで、つるつる建材 2%の減少、小さな凹凸建材 20%の減少、大きな凹凸 55%の減少であり、ニッタでは、つるつる建材 19%の減少であるが、小さな凹凸、大きな凹凸では、逆に増加した。

C5.2 タオルの ATP 測定結果

10cm×10cm に切断したタオルの測定では、キッコーマンとニッタの数値の違いは 1.9 倍で キッコーマンの値が大きい結果となった。

同様の手順により 1 枚タオルの ATP 値を測定すると、キッコーマンでは、10 倍希釈液(7842RLU)をタオルに加えた後の液ペン値(4182RLU: 10 倍

液の 53%)、表面ペン値(1772RLU: 液ペン値の 42%)であった。ニッタでは、10 倍希釈液(683RLU)をタオルに加えた後の液晶ペン値(1319RLU: 液晶値の 193%)、表面ペン値(113RLU: 液晶ペンの 9%)であり、異なった傾向を示した。

C5.3. モップ房の ATP 測定結果

モップ房表面を表面ペンで測定した結果は、キッコーマンでは、10 倍希釈液(73913RLU)をモップ房に加えた後の液ペン値(14100RLU: 10 倍液の 19%)、表面ペン値(4440RLU: 液ペン値の 31%)であった。ニッタでは、10 倍希釈液(5528RLU)をモップ房に加えた後の液晶ペン値(2022RLU: 10 倍液の 37%)、表面ペン値(814RLU: 液晶ペンの 40%)であった。

C5.4. O 建築物における ATP 測定報告

キッコーマンとニッタの 2 機種で測定値に大きな差があった。同じ機種でも測定場所により差が出た。キッコーマン測定器の結果で 5000RLU 以上を示した箇所の内うち、最も多かったのはトイレ内ジェットタオル横壁(67083RLU)、トイレ内ゴミ箱蓋(51924RLU)、トイレ内ジェットタオル上面(44860RLU)、トイレ内ジェットタオル前面床(28099RLU)であった。資機材倉庫では、資機材倉庫床が最も高く 2000RLU 以上を示し、コレクター押し手(8861RLU)、アップライトバキューム持ち(7717RLU)、ポット型バキューム持ち手(5667RLU)で測定値が高かった。

タオル、モップの測定結果からは、清掃前はきれいであり、清掃後が汚れていることが確認できた。

キッコーマン測定器とニッタ測定器の関係は、ばらばらであった。

清掃前と清掃後の比較では、清掃すると全体平均で 56%の汚れが除去されていた。キッコーマン測定器とニッタ測定値の数値は、平均でキッコーマン値が 132 倍高くなった。

D. 考察

建築物衛生法及び関連通知では、定期的な清掃、点検、機械器具の維持管理等が求められているものの、点検作業の具体的な方法や評価手法は十分

に標準化されていない。現状では、全国ビルメンテナンス協会の建築物清掃管理評価資格者制度が存在するものの、点検様式や評価方法は企業や顧客ごとに異なり、評価の客観性や統一性に課題がある。本研究では、アイトラッキング技術を活用して熟練者の点検行動を可視化し、点検工程や着眼点の分析を試みた。その結果、点検作業の詳細な検証や標準化に向けた基礎的知見が得られた。

また、清掃業務におけるデジタル技術の導入状況を調査した結果、清掃ロボットの普及は進みつつある一方で、点検業務や品質管理に関するデジタル化は限定的であることが明らかとなった。アンケート調査では約 8 割の企業が清掃ロボットを導入していたが、その他の業務効率化システムについては導入率が低く、約 4 分の 1 の企業がデジタル技術を特に導入していなかった。清掃ロボットについては、大型機種ほど清掃効率が高く、導入効果が期待される一方、建築物の特性に応じた運用方法や実績の蓄積が今後の課題であることが示された。

清掃点検報告書作成システムについては、実際の清掃現場で導入実験を行った。13 施設中 10 施設で作業時間が短縮し、平均 32 分の削減効果が確認された。特に事務処理の効率化や情報共有の容易さが大きな利点であり、多様な報告様式への対応や大規模施設向けのシステム開発が今後の課題として挙げられた。

トイレ管理においては、利用者数や個室利用状況、消耗品使用量を計測するセンサーシステムを導入した。利用ピーク時間や利用頻度の高い個室を定量的に把握でき、従来経験的に認識されていた利用傾向を客観的なデータとして示すことができた。さらに、利用者数や滞在時間等の情報を活用することで、清掃頻度や人員配置の最適化に資する可能性が示された。一方で、導入コストが高く、継続運用における費用負担が課題であることから、短期間の測定による傾向把握が実務的であると考えられた。

さらに、清掃品質の客観的評価手法として ATP 測定の有効性について検討した。異なる測定器や測定方法、建材表面の性状、清掃用具を対象とし

た基礎実験および実建築物での測定を実施した結果、清掃前後の汚れの変化を定量的に把握できることが確認された。一方で、測定器メーカー間では測定原理や基準が異なるため数値の直接比較は困難であり、同一機種を継続的に用いて傾向を把握することが重要であることが明らかとなった。また、測定者や測定面の凹凸によるばらつきも確認され、運用に際しては測定手順の標準化や教育訓練が必要であることが示された。

E. 結論

3 か年にわたり段階的に検証を進めてきた。

令和 5 年度は、清掃に関する既往研究やデジタル機器の動向を調査し、導入が比較的容易な清掃点検報告システムに着目して、デジタル化された点検報告書様式を試作した。また、トイレ清掃の維持管理状況を把握するための各種センサーの活用方法について実証実験の計画を検討した。さらに、アイトラッキングシステムを用いた目視点検の分析から、作業者がどこをどのように確認しているかを可視化できる可能性が示され、人による点検とカメラ等による自動点検との違いを検証する基盤が整えられた。

令和 6 年度は、清掃点検報告システムを実際の建築物の清掃点検業務に導入し、従来の紙媒体による報告方法との比較検証を行った。その結果、報告書作成時間の短縮、業務効率の向上、入力ミスの減少などの効果が確認された。一方で、現場や顧客の要望に応じたシステムのカスタマイズや管理機能の充実が課題として明らかになった。また、トイレ利用状況や消耗品の使用状況を把握する各種センサーについては、従来作業員の経験や感覚に依存していた情報を定量化できることが確認され、効率的な清掃計画への活用可能性が示された。

令和 7 年度は、これまでの成果を踏まえ、清掃ロボットや清掃点検報告システムなどのデジタル技術が清掃業務の効率化に有効であることが確認された。特に清掃点検報告システムは、現場作業だけでなく事務処理の効率化や情報共有の促進にも寄与することが明らかとなった。また、トイレ

利用状況や消耗品管理システムは需要に応じた清掃計画の高度化に有効である一方、導入コストが普及に向けた課題として残された。さらに、ATP測定を用いた清掃品質評価について検討した結果、客観的な品質管理手法として有用であるものの、測定機器や測定条件による影響が大きく、異なる機種間での直接比較は困難であることが判明した。そのため、同一機種による継続的な測定と基準設定を行い、建築物ごとの汚れの傾向把握や品質管理に活用する必要性が示された。

以上より、清掃分野におけるデジタル化は業務効率化や情報共有、清掃品質管理の高度化に大きく寄与することが確認された。一方で、導入コストやシステムの柔軟性、評価手法の標準化といった課題も明らかとなった。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

- 1) 杖先壽里、正田浩三、栢森聡、阪東美智子：清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討。第 52 回建築物環境衛生管理全国大会；2025.1.23-24；東京。同抄録集。p.88-89。
- 2) 杖先壽里、正田浩三、阪東美智子：清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討（その 2）、第 53 回建築物環境衛生管理全国大会、P56-57、2026 年 1 月
- 3) 渡辺貴之、杖先壽里、正田浩三：清掃管理業務に関する調査論文の収集・データベース化、第 53 回建築物環境衛生管理全国大会、P58-59、2026 年 1 月
- 4) 清掃現場における人手不足に関する調査（作業効率化・機器等の導入）：公益社団法人東京ビルメンテナンス協会 建築物衛生管理委員会 調査研究小委員会、2026 年 3 月

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) 入力支援アプリ／ツール「1,2,3Reporter」：クリーンシステム(株)、<https://123reporter.bc-ol.com>
- 2) ゴミ箱可視化（ゴミ体積状況、アラート機能）、トイレ空き状況、トイレトッパーパー残量、トイレ行列人数計測：テラモト(株)、<http:t-teras.jp/service>
- 3) 杖先樹里、正田浩三、阪東美智子：清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討、第 52 回建築物環境衛生管理全国大会、P86-87、公益財団法人 日本建築衛生管理教育センター、2025.1
- 4) 杖先樹里、正田浩三、阪東美智子：清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討（その 2）、第 53 回建築物環境衛生管理全国大会、P56-57、公益財団法人 日本建築衛生管理教育センター、2026.1
- 5) ATP 検査について（環境基準値の設定）、ニッタ株式会社ホームページ、<https://nitta-monitoring.com/sanitary/atp/standard-value/>
- 6) 高頻度接触面の衛生管理/ATP 拭取り検査、キッコーマンバイオケミファ、https://biochemifa.kikkoman.co.jp/kit/atp/article/article_detail_23/

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
貯水槽、排水管等建築物内水関連の衛生管理に資するデジタル技術に関する調査及び検討

研究分担者	三好 太郎	国土技術政策総合研究所	上下水道研究部	主任研究官
研究分担者	大塚 雅之	関東学院大学	建築・環境学部	教授
研究代表者	阪東 美智子	国立保健医療科学院	建築・施設管理研究部	上席主任研究官
研究協力者	徳安 真理奈	国土技術政策総合研究所	上下水道研究部	
研究協力者	角野 公亮	関東学院大学	工学研究科	修士課程

研究要旨

デジタル技術を活用した建築物内の水の衛生管理の効率化に向けて、受水槽清掃及び排水管清掃に関連する協会へのヒアリングを通じたニーズ調査並びに当該領域に適用が可能と考えられる技術に関する調査を実施した。ニーズ調査においては、事業継続に向けた熟練技術者の確保は困難となっているものの、デジタル技術の活用に関しては、十分に進展していない状況が明らかとなった。一方で、清掃状況の確認や技術継承、並びに排水管内閉塞状況検知技術など、複数の技術分野でデジタル技術の活用に期待が寄せられるなど、適用可能な技術の開発が求められていることも明らかとなった。技術調査に関しては、受水槽清掃分野では、ドローンや水中清掃ロボットといった点検・清掃支援ツールが、排水管閉塞状況検知技術に関しては、複数の非接触水位・流量測定技術が他領域において開発されていることが明らかとなったものの、いずれも建築物内の水の衛生管理を目的とした開発には至っておらず、適用方法が確立されているとは言い難い状況であった。排水管内閉塞検知技術に関しては、レーダー式レベルセンサを用いた排水管内水位の連続測定により、管内閉塞状況の評価ができる可能性を、実験的検討を通じて示すことができた。今後は、建築物内の水の衛生管理へ活用可能なデジタル技術について、ニーズを広く発信していくことを通じて、技術開発の加速を促すことが望ましいものと考えられる。

A. 研究目的

特定建築物内における飲料水及び雑用水の安全性を確保するためには、受水槽をはじめとする給水装置の衛生管理が必須である。また、建築物内で使用された水は、速やかに生活空間から排除される必要があるが、この時、排水管をはじめとする排水設備が所期の性能を発揮できない状態となっていた場合、使用された水が生活空間にとどまり、衛生環境を悪化させてしまう可能性が懸念される。建築物内における水の衛生管理においては、

受水槽や排水管等、水の供給及び排除にかかる設備を健全に保っておくことが必須であるといえる。

建築物衛生法においては、受水槽に関しては、定期的な目視による点検を実施するとともに、1年に一度の洗浄を実施することが定められている。これらの点検及び清掃は、定期的に行う必要がある業務ではあるが、自動化が困難な作業であり、専ら点検員あるいは清掃員による目視・手動による作業が実施されているのが現状である。排水に関する設備の清掃を6カ月以内ごとに1回の頻度で行うことが定められている。このよ

うな作業が適切に実施されなかった場合、排水管の詰まりによる排水の逆流、汚損、臭気の発生、トラップの破封による悪臭の発生やねずみ等の室内への侵入が懸念される。また、排水を一旦貯留する排水槽では硫化水素の発生、厨房系統に接される阻集器の不適切な維持管理による悪臭などの障害の発生がある。いずれの作業も、実施する際には作業技術の習熟が不可欠であり、そのような熟練作業者が減少していることも鑑みると、デジタル技術をはじめとする、近年開発が進められている技術を可能な限り活用し、作業精度を低下させることなく、作業負荷を低減する試みが特に重要となってきたといえる。

本調査では、上述の目的に向けて、受水槽清掃及び排水管洗浄の関連協会に対してヒアリングを行い、各業務における技術的課題並びに想定されるデジタル技術活用方策に関する情報収集を行うと同時に、ドローンや水位・流速検知技術をはじめとする点検支援ツールに関する技術調査を実施した。また、排水管内の水位検知技術を活用した排水管閉塞状況自動検知技術に関し、実験的検討も実施した。

B. 研究方法

B1. 貯水槽清掃、水関連設備点検に活用できるロボットに関する技術調査

特定建築物における貯水槽の清掃並びに貯水槽、マンホール等の水関連設備の点検に活用できる可能性のある自動化技術として、水中で稼働できる清掃ロボット並びにドローン等を活用した施設・設備点検支援技術について調査を行った。関連すると思われる技術について、インターネット上で公開されている情報に基づき、現状の製品開発状況、実用化状況を取り纏めた。

本調査における調査対象は、特定建築物に限定していない。水中清掃ロボットに関しては、水道用の配水池や浄水処理設備内、さらには水道以外で利活用される貯水設備を想定した技術も調査対象とした。点検支援技術については、建築物の劣化状況を点検するための技術に加え、道路、橋梁といった土木構造物や各種工場のような製造設備での適用が想定されている技術についても取り纏

めの対象とした。特定建築物の衛生管理において想定される状況で活用するためには技術的な対応が必要な余地が残っていたとしても、適切な調整、設計変更を通じて適用できる可能性のある要素技術を取り纏めることを本調査における主眼とした。

B2. 排水管洗浄に活用できる技術に関する調査

建築物衛生法の維持管理に関する記述、既往の診断技術、業者ヒアリングなどの調査結果より、配水管洗浄に対する現在の適用技術を明らかにした。

B3. 受水槽及び排水管清掃にかかる専門家へのヒアリング

公益社団法人全国建築物飲料水管理協会(全水協)及び一般社団法人全国管洗浄協会(管洗浄協会)の協力の下、受水槽及び排水管の点検、清掃を業務とする専門家合計 6 名に対して現状の業務における技術的な課題並びにそれらの課題の解決に向けたデジタル技術の活用方策に関するヒアリングを実施した。ヒアリングは、オンライン会議システムを通じた対話形式で実施し、現況で利用可能な技術に限定せず、今後の技術開発の方向性も含めた意見集約を行った。

B4. レーダー式レベルセンサを活用した排水管閉塞状況自動検知技術に関する実験的検討

本実験では、図 1 に示す供試排水横管システムを用いて、レーダー式レベルセンサを用いた排水管内水位変動の自動検知に関する検討を実施した。同図に示した通り、大便器の排水口芯から末端までの全長を約 17 m とし、末端には LT 継手(100 A×100 A)を接続した。排水横主管は透明塩化ビニル管、呼び口径は 100 A(実内径 103 mm)、こう配は 1/100 とした。

図 2 中に示した測定排水ます①～④にレーダー式レベルセンサを設置し、管内水位の経時変化を測定した。本研究では、管内閉塞発生時における排水管内推移変動を再現するため、図 3 に示す疑似停滞物(ニトリルゴム製抵抗体と油粘土を用いて作成)を排水管内に設置した条件での試験も実施した。上流に設置した大便器より連続で排水を行うことで、管内閉塞発生時の水位上昇を確認したのち、疑似抵抗体を撤去し、水位の変動(水位

低下)の状況を確認した。推移変動は、目視による確認を実施したうえで、当該推移変動がレーダー式レベルセンサの測定結果にも反映されているか否か、評価を行った。

C. 研究結果

C1. 点検・清掃ロボットに関する技術調査

表 1 に国内で販売されている水中用清掃ロボットの一例を示す。水道用配水池、養殖水槽、排水処理施設などで適用できる技術がすでに複数の製造者より市販されていることがわかる。調査対象とした機器の範囲では、給電方式はすべての製品において有線ケーブルによるものとなっていた。水中で、稼働不能となった場合に機器を回収するために陸上施設とワイヤー等で接続することが望ましいことも考慮すると、水中ロボットに関しては、電源供給や操作信号にバッテリーや無線通信を活用して稼働可能範囲を拡大するという要求は大きくないものと推察される。なお、調査対象とした製品のうち、1 番及び 2 番の製品については、一般社団法人日本水中ロボット調査清掃協会が定める「水中調査清掃ロボットの認定に関する規定」に基づく型式認定を受けており、審査過程において日本水道協会が定める浸出試験方法(JWWA Z108: 2016)の水質基準 51 項目の判定を受けている¹⁾。これらの製品は水道施設で使用しても水質へ影響しないロボットとして販売されている。配水池の清掃に関しては、資格を持った作業員が清掃、点検作業を行うことと定められている機器が複数確認された。これは、清掃、点検作業の良否が水道水の安全性に直結することから、作業員の操作技術を一定の水準に保つことが必要であると判断されているためであると考えられる。

貯水槽やマンホールといった水関連の設備の点検に活用できる可能性のある技術についても調査を行った。結果を表 2 に示す。設備点検技術に関しては、建築物関連でも床下や煙突などの狭小空間での点検を支援することを目的に開発された製品がすでに複数市販されて

いる。また、可燃性ガスが充満する可能性があるなど、点検作業に危険が伴うことが考えられる場合に適用されることを想定した製品も販売されている。貯水槽の壁面など、陸地走行ロボットでは点検が不可能な箇所の点検には、ドローンの活用も想定される。調査の結果、壁面を走行し、タイル等の劣化を検知できる製品が販売されていることも明らかとなった。これらの製品は、作業員との距離が離れた状態で運用されることを想定しているものが多く、無線通信による遠隔操作が可能なものが多い。また、事前に設定された巡回スケジュールに従う、自動巡回点検が可能となっている製品も存在している。

C2. 排水管洗浄技術に関する調査

建築物衛生法の維持管理に関する記述、既往の診断技術、業者ヒアリングなどの調査結果より、現在の適用技術を明らかにした。排水管の点検・診断技術としては、内視鏡、超音波肉厚計等を用いて、排水管内の劣化や詰まりなどを目視で診断している。その後、スネークワイヤ法、高圧洗浄法、ロッド法、薬品による洗浄、圧縮空気の衝撃による方法等による技術を用いて清掃作業が実施されている。その一連の診断～清掃～完了までのデータをデジタル化して収集し、その作業工程のフローを自動化した機器システムは現在のところ実用化されていない。業者ヒアリングにおいて、排水管洗浄作業の促進に向けて、排水管内の配水の流速を測定し、閉塞の度合いを判定する塗油音波流量計、透過放射線量から排水管内のスケール形成状況や閉塞状況を推定することができる放射線照射非破壊検査機器、並びに排水管途中に設けた分岐部に設置することで、管底を原点とする水位を計測することが可能なレーダー式水位センサーが有望視される。いずれの機器においても、閉塞状況を評価する際に活用できる指標の連続測定が可能であり、連続測定結果に基づき、排水管の閉塞が予測される場合には、早期に清掃作業を検討することが可能となるものと期待される。

C3. 全水協及び管洗浄協会へのヒアリング

全水協担当者に対して実施したヒアリングでは、当該領域においては、手動による作業が主流であることから、デジタル化が十分に進展していないこと、事業継続に必要な熟練技術者の確保が困難となっていること、ロボット技術等を活用し、現場作業を支援できる技術の開発は期待されるものの、現段階では技術的課題が多く残っていることが明らかとなった。一方で、清掃作業の結果報告等の書類作成に向けた業務支援ツールについては、既存クラウドシステムやタブレット端末等を活用した技術の活用が始まっている。現段階においては、全水協が建築物維持管理要領に基づいて作成している点検項目フォーマットを基盤として、各社が独自の報告書作成等支援ツールの開発を実施している。

デジタル技術の活用法として、現在、主流となっている繊維強化プラスチック(FRP)製やステンレス製の貯水槽における清掃状態の評価技術についても、期待が持てる。ATP測定装置を活用することで、生物活動に起因する有機物汚染を迅速に評価することができるようになっており、このような技術を活用することで清掃状況の正確な評価を通じて、水の安全性、衛生性の確保に資する清掃工程を構築することができる可能性が考えられる。

若手職員への技術継承に向けては、AIを活用した現場作業支援ツールの活用が期待される。作業状況の良否判断を、熟練技術者の判断基準を学習したAIによる画像解析で実施できるようになると、業務水準の均質化や業務効率の改善に資することとなると期待される。AIの学習に必要な画像データを集積する点などは課題であると考えられるが、近年では、作業者が装着できるようなカメラも販売されるなど、画像撮影のコストは以前と比較すると大幅に低減していると考えられるため、今後の発展が期待される領域であるといえる。

管洗浄協会の担当者に対して実施したヒアリングで得られた知見は以下のとおりである。

定期的な排水管の洗浄が実施されていない建築物においては、排水管内における油脂類・堆積物の状況が把握できておらず、排水管が閉塞し、排水が困難となった段階で、清掃が検討される事例も多い。このような場合に、排水管内の油脂類・堆積物の状況を連続的に監視することが可能な技術を導入することができれば、閉塞に起因する障害の発生を未然に防ぐことができる可能性が高くなる。流量計や水位計を設置し、排水管内の流量や水位の変化を常時計測することで、排水管内の油脂類・堆積物の状況を連続監視が可能となるものと考えられる。適用する技術については、流量測定においては超音波流量計、水位測定においては電波式水位計や超音波水位計といった非接触で流量、もしくは水位を測定できる技術であれば、既設配管に対しても追加設備として導入しやすいことから、適しているものと考えられる。

排水施設の定期点検に関しては、現状では、目視による検査が主流である。近年、技術開発が進んでいるカメラを活用した常時監視技術や、排水管内に充満するガス組成を測定することで、油脂類・堆積物の蓄積状況や、それに伴う腐食の進行を予測することのできる技術が開発されれば、排水管の腐食管理に資すること大であると考えられる。

現在、活用されているデジタル技術に関しては、貯水槽清掃の事例と同様、顧客に対する報告資料作成を支援するための清掃管理支援ツールが活用され始めており、報告書関連業務のデジタル化が進みつつある。これらのツールは、現状では各社が独立して開発しているものであり、従業員の作業負担を低減することを主たる目的としている。排水管の内部状況の監視には、内視鏡が多く使用されているが、内視鏡での検査の内容もクラウド等を通じて集約する試みも始まっている。

C4. レーダー式レベルセンサを活用した排水管内水位変化の検知に関する検討

図2に各測定排水ますの水位変動波形及び最高管内水位を示す。同図(1)には上流側の

測定排水ます①及び②を、同図（2）には下流側の測定排水ます③及び④の結果を示す。

同図（1）より、測定排水ます①での最高管内水位は 173.8 s 時に 219 mm であった。また、その前後においても水位が急上昇する波形が複数確認された。これは、大便器から排出された排水が連続的に測定排水ます①の側面に衝突したことにより、一時的に水位が急上昇したためだと考える。一方、測定排水ます②では、331.6 s 時に 24 mm であった。最高水位計測時前後の波形を確認すると、前では水位の上昇は瞬時的であるのに対し、後は継続的な水位上昇が確認された。これは、管内閉塞によって生じた水位上昇に加え、さらに大便器からの連続排水が重なったためであると考えられる。

同図（2）より、測定排水ます③における最高管内水位は、384.2 s 時に 70 mm、測定排水ます④では、319.0 s 時に 85 mm であった。両測定排水ますにおいて、時間が経過するとともに水位が上昇する傾向が確認できた。これは、管内閉塞により排水が排水管内に滞留し、さらに上流から繰り返される連続排水により水位が上昇したものであると考えられる。

その後 385.0 s 時に排水横管内の満水状態を目視確認したため、擬似停滞物を除去した。その結果、両図において管内水位は減少した。

以上の結果から、本実験に用いたレーダー式レベルセンサは排水横管内における管内閉塞に起因する水位変動を検知可能であることが示唆された。

D. 考察

事業者に対するヒアリングを実施したところ、貯水槽並びに排水管の清掃・点検に関しては、業務の多くが手動による作業を必要とすることから、デジタル技術を活用した自動化等の効率化・省力化に関しては、現段階においては十分に進展していないことが明らかとなった。一方で、ATP 測定器を活用した清掃状況評価、画像解析技術を活用した技術継承支援ツール、排水管内水位・流量の自動測定を通じた排水管内閉塞状況評価技

術等に期待が示されるなど、デジタル技術を適切に活用することにより、建築物内の水に関連する衛生管理の改善・効率化に資する技術を構築できる可能性は十分に高いものと考えられる。

既存の技術に関する調査を行った結果、現在、すでに確立あるいは実用化されている製品では、建築物内における水の衛生管理の自動化・省力化を念頭に開発されている商品はほとんど存在せず、既存製品を直ちに利用可能な状態となっているとは言い難いことも明らかとなった。この点に関しては、建築物内の水の衛生管理に活用できるデジタル技術に関するニーズの発信が不十分となっていることに起因する可能性が考えられる。

ATP 測定、画像解析、水位・流量検知技術など、本検討の中で、適用に期待を寄せられた技術の中には、建築物内の水の衛生管理以外の技術領域にて、すでに要素技術の開発、適用が進みつつあるものが存在する。それらの一つであるレーダー式レベルセンサを活用した排水管内閉塞状況検知技術について、実験的な検討を実施したところ、実用可能性を十分に感じさせる実験結果を得ることができた。国内には、衛生管理技術の適用先となる特定建築物が多数存在し、一定の市場規模を有しているものと考えられることから、上述したニーズ発信を適切に行い、適用が期待されるデジタル技術の方向性を提示することができれば、要素技術を有する民間事業者において、技術開発が加速し、実施設において利用可能な技術がより早期に実用化される可能性もあるものと考えられる。

建築物内の水の衛生管理においては、点検方法として「目視」によることと指定されている業務も多い。このような業務に関しては、現行の規制のままで、デジタル技術を活用した代替技術を活用することが困難であると考えられることから、デジタル化の検討範囲の拡大に向けては、定められている点検方法など、規制面の制約要因についても、考慮することが必要であるといえる。

性能評価に際しては、十分な性能を有していることを示すエビデンス収集が重要となる。期待される性能を有することを示すための基準を設け

たうえて、関係各社が積極的にデータ収集を行っていくような枠組みの構築が望まれる。

E. 結論

本調査では、受水槽清掃並びに排水管洗浄に関連する協会に対するヒアリングを通じ、事業者のニーズを収集するとともに、活用可能な技術に関する調査及び活用方法に関する実験的検討を実施した。ヒアリングの結果、事業継続に向けた熟練技術者の確保は困難となっているものの、デジタル技術の活用は十分に進展していないことが明らかとなった。ATP 測定技術、AI 画像解析技術、排水管内閉塞状況自動検知技術等への期待が示されており、適用可能な技術の開発、適用方法の確立については、必要性が高いものと考えられる。技術調査に関しては、受水槽清掃関連では、ドローンや水中清掃ロボット等、受水槽清掃にも応用が可能と考えられる技術は、他領域にて開発、実用化が進んでいる状況が見受けられた。また、

排水管内閉塞検知技術に関しても、非接触で管内の水位、流速を評価可能な技術が複数存在しており、応用可能な要素技術の開発に関しては、他領域において進展していることが明らかであるといえる。一方で、これらの技術に関しては、建築物の水の衛生管理への適用を想定された開発はほとんど進められておらず、適用方法の確立という観点では、課題が多く残されているものと考えられる。今後は、建築物の水の衛生管理に関するニーズの発信を通じ、当該領域における技術開発を促進していくことが重要となるものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 一般社団法人日本水中ロボット調査清掃協会 ホーム ページ、URL: https://jwrca.or.jp/events/20190604_robot_nintei.html、令和 8 年 5 月 18 日閲覧

表 1 水中清掃ロボットの例

No.	名称	メーカー	自動/手動	適用先	給電方式	備考
1	水中底面掃除ロボット CUV-40	広和株式会社	手動(有線遠隔操作)	配水池など	有線ケーブル (AC 100 V)	有資格者が操作
2	クリア A-1 型	株式会社アークエンジニアリング	手動(有線遠隔操作)	配水池など	有線ケーブル (AC 100 V)	有資格者が操作
3	"ドルフィン バイオスター (バキューム式対応型)、ドルフィン ジャイロ DX(低水深プール対応型)、ドルフィン マクロ LED(壁面清掃特化型)	株式会社ジェイ・シー・イー・オーバースーズ	自動/手動(無線遠隔操作)	流水地、養殖水槽、排水処理施設の貯水槽など	有線ケーブル (AC 100 V)	自動起動制御装置搭載 壁面清掃も可能
4	水中調査清掃ロボット 水中エニー	トピー工業株式会社	手動(有線遠隔操作)	配水池など	有線ケーブル (AC 100 V)	有資格者が操作
5	水中清掃ロボット The Bull、Mini Bull	千代田商事株式会社	手動(無線遠隔操作)	土砂が堆積した水中部分、暗渠水路内、水中構造物内	記載なし	
6	水中ドローン アクアブル H01	中里建設株式会社	手動(無線遠隔操作)	配水池、浄水池をはじめ、開口 60cm 以上あるほとんどの施設	有線ケーブル	点検用の機材(清掃機能なし) 複数のセンサー、カメラ等を搭載
7	貯水槽清掃ロボット	株式会社興和	手動(無線遠隔操作)	配水池など	有線ケーブル	発電機でも起動可

表 2 設備点検技術の例

No.	名称	メーカー	手動/自動	適用先	備考
1	床下・設備点検ロボット エニーライト	トビー工業株式会社	手動遠隔操作(有線/無線)	瓦礫などの不整地、床下や設備内部など	
2	プラント自動巡回点検防 爆ロボット EX ROVR "ASCENT"	三菱重工	自動(巡回スケジュールに 従う)	主に可燃性ガスがある危険場 (Zone1)、石油プラント	可視カメラ、熱画像カメラ、ガス検知器、マイク等を搭載
3	超狭小空間点検ドローン IBIS2	株式会社 Liberaware (リ ベラウェア)	手動遠隔操作(無線)	下水道、煙突内部、ボイラー、 蒸留塔内部など	狭小空間への進入が可能 電波が届かない場所への対応技術あり 最大飛行時間は 11 分
4	点検・測量ドローン ELIOS 3	ブルーイノベ ション株式会社	手動遠隔操作(無線)	プラント施設、 インフラ施設、 工場、船舶のドックなど	4K カメラ、サーマルカメラ、距離センサーを搭載、 暗闇の中でも人による目視点検と同等の検知が可能
5	アミューズワンセルフ社製 「GLOW.H (グロウ.エイチ)」、 「GLOW.L (グロウ.エル)」	ソフトバンク株式会社	手動遠隔操作(無線)	マンションや商業ビル、高所ビル、 森林(現況点検)、鉄塔や煙突、 架橋など	導入前のサポートからドローン機器の手配、飛行の申請、 取得したデータの AI 自動分析や レポート管理を受託
6	プラント点検用ドローン Rangle 5	ドローンスポ ーツ株式会社	手動遠隔操作(無線)	プラント、工場など	点検に必要な機能を厳選して 搭載(低コスト化) 熟練技術者による現場点検、 現場管理、報告書作成の受託も可能
7	壁面走行ロボットによる 外壁点検システム	高松建設株式会社、 青木あすなろ建設株式会社、 非破壊検査株式会社	有線で運用	ビルなどの建築物	壁面を走行し、タイルの劣化、 損傷を検知 カメラユニットと打診システムを 搭載
8	インフラ用狭小空間点検 ロボット moogle evo (モーグルエヴォ)	大和ハウス工業株式会社	手動遠隔操作(無線)	住宅等の狭小空間、橋梁、 共同溝など	クラック幅自動判定機能搭載

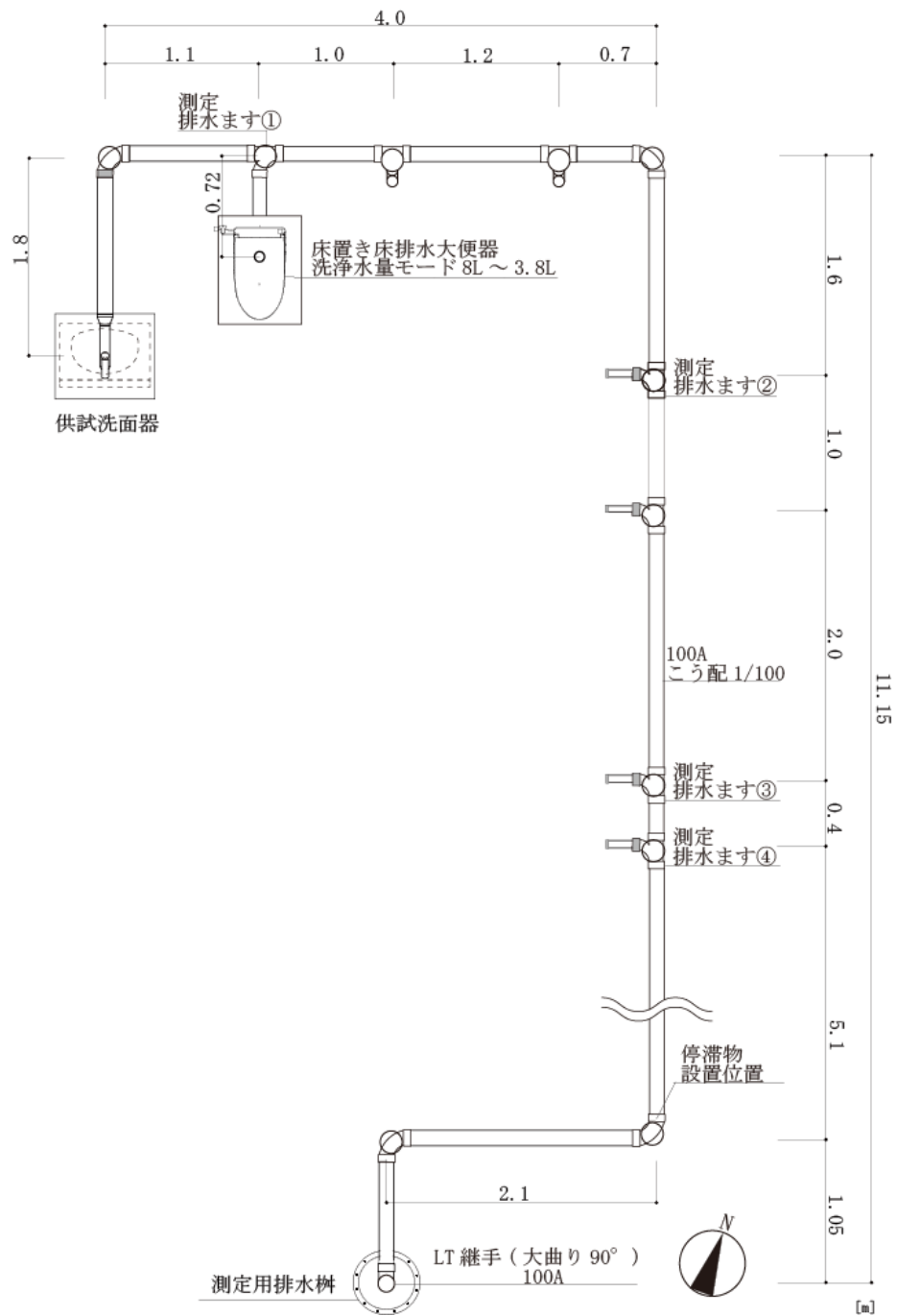
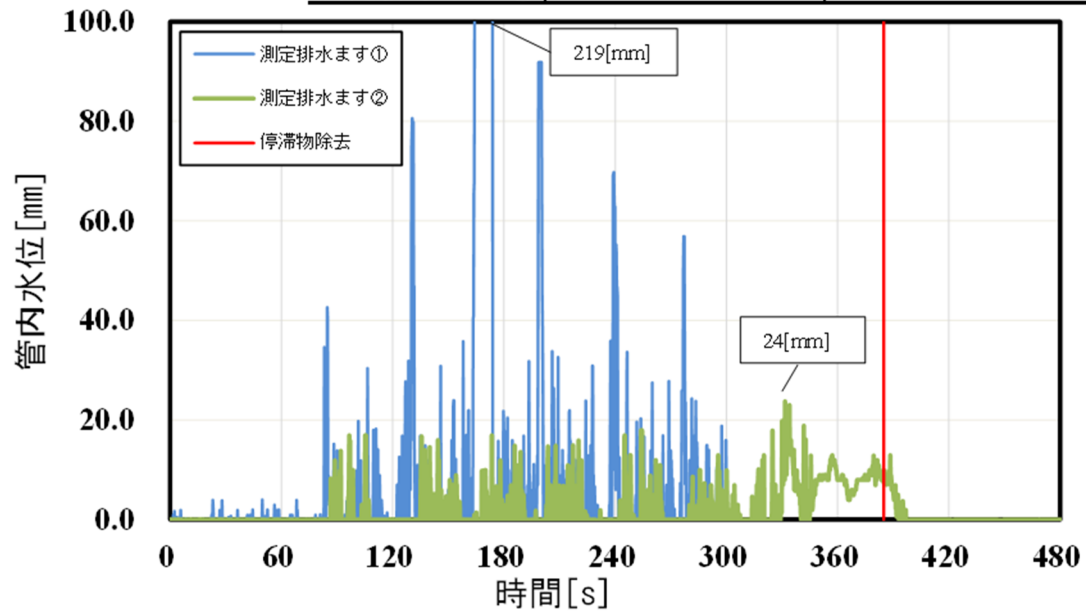


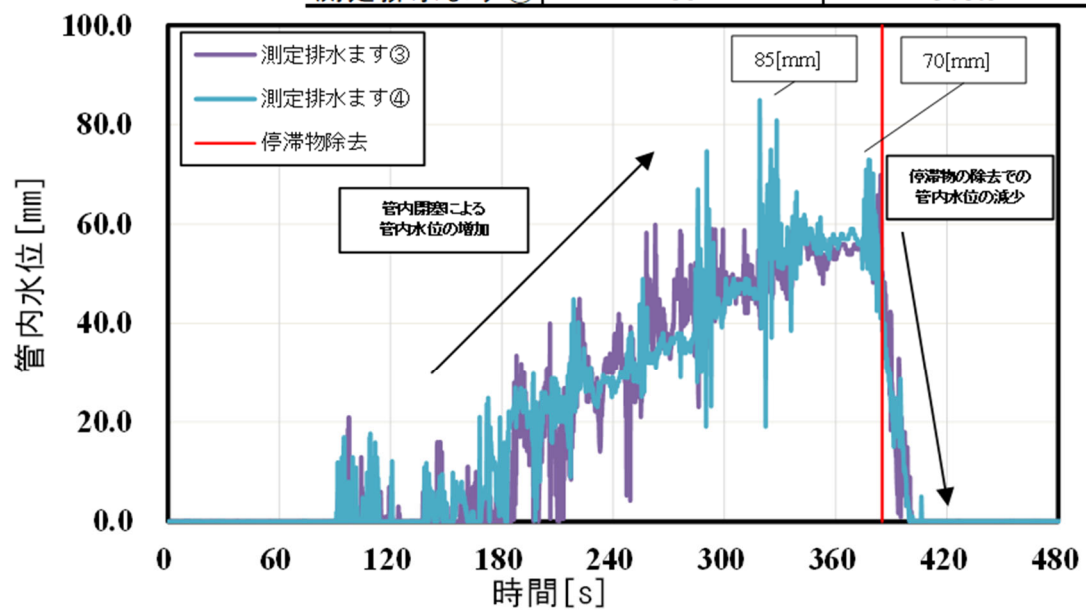
図 1 供試排水横管システムの概略図

測定箇所	最高管内水位 [mm]	経過時間[s]
測定排水ます①	219	173.8
測定排水ます②	24	331.6



(1) 測定排水ます①及び②

測定箇所	最高管内水位 [mm]	経過時間[s]
測定排水ます③	70	384.2
測定排水ます④	85	319.0



(2) 測定排水ます③及び④

図2 各測定排水ますの水位変動

研究成果の刊行に関する一覧表レイアウト（参考）

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
なし							

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
柳 宇	浮遊微生物測定法の現状	空気清浄	62巻2号	4-11	2024
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
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		1241-1244	2025
阪東美智子	ペストコントロール分野のIT活用状況に関するアンケート調査	第83回日本公衆衛生学会総会		607	2024
谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 茂手木眞司, 小室正二, 阪東美智子	アイトラッカーを利用した調査—ベテランと初心者の調査視点の相違について—	日本ペストロギー学会大会	40	33	2024

茂手木眞司, 谷川力, 芝生圭吾, 木村悟朗, 阪東美智子	ペストコントロール業界におけるデジタル機器活用状況	日本ペストロジ学会大会	40	34	2024
杖先壽里, 正田浩三, 栢森聡, 阪東美智子	清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討	第52回建築物環境衛生管理全国大会		88-89	2025
Goro Kimura	Behavioral Response of Musca Domestica to Visual Targets	Proceedings of the Eleventh International Conference on Urban Pests		219-224	2025
阪東美智子	ねずみ・衛生害虫の防除に関するデジタル化技術の特性および適用課題の検討	Pest Control Tokyo	90	15-18	2025
谷川力	PCOにおけるIoT技術の活用—ねずみ等の遠隔監視の実例と普及の課題—	第53回建築物環境衛生管理全国大会		42-45	2026
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
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

杖先壽里、正田浩三、阪東美智子	清掃に関するデジタル化技術の適用課題の検討（その2）	第53回建築物環境衛生管理全国大会		56-57	2026
渡辺貴之、杖先壽里、正田浩三	清掃管理業務に関する調査論文の収集・データベース化	第53回建築物環境衛生管理全国大会	40	58-59	2026
公益社団法人 東京ビルメンテナンス協会 建築物衛生管理委員会 調査研究小委員会	清掃現場における人手不足に関する調査（作業効率化・機器等の導入）				2026
阪東美智子	ペストコントロールにおけるIT技術活用の可能性：アイトラッカーによる目視点検の分析	第84回日本公衆衛生学会総会抄録集		660	2025
田中和之、木村悟朗、芝生圭吾、谷川力、阪東美智子	センサーカメラの設置によるクマネズミの行動変化	第76回日本衛生動物学会東日本支部大会要旨集		29	2025
谷川力、芝生圭吾、木村悟朗、佐々木健、市川博一、大山克幸、野本祥一、西田雄剛、大川拓也、茂手木眞司、下ノ藺慧、阪東美智子	実際の現場でのアイトラッカーを利用した調査一統 熟練作業員と未経験者の調査視点の相違について一	第41回日本ペストロジー学会大会抄録集	41	40	2025
木村悟朗、谷川力、阪東美智子	空間サイズおよび室内照明がハエ・コバエ類の捕獲効率に及ぼす影響	第78回日本衛生動物学会大会 衛生動物大会特集号	77	77	2026