

令和4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

4. 空気環境衛生管理に向けたIoTセンサー活用手法の検討

分担研究者	下ノ菌 慧	国立保健医療科学院	研究員
分担研究者	鍵 直樹	東京工業大学	教授
代表研究者	金 勲	国立保健医療科学院	上席主任研究官

研究要旨

建築物衛生法では空気調和機を設けている場合の空気環境の基準が定められており、2か月以内ごとに1回の測定が義務付けられている。浮遊粉じんの量、一酸化炭素の含有率(CO濃度)、二酸化炭素の含有率(CO₂濃度)、温度、相対湿度、気流の6項目の測定が義務付けられているが、CO₂濃度、温度、相対湿度については、連続測定が可能な小型測定機器(IoTセンサー)が普及しており、IoTセンサーによる建築物衛生管理への適用も期待されている。本章の1節では、IoTセンサーの建築物衛生管理への利用可能性について検討することを目的とし、(1)複数のIoTセンサーの測定値比較と(2)IoTセンサーと現場立入測定の測定値比較、(3)温湿度・CO₂濃度の平面分布の測定の3点を実施した。(1)複数のIoTセンサーの測定値比較では、3件の建物(Aビル、Dビル、Eビル)に設置した4種のIoTセンサー(センサーA、B、C、D)の測定値を比較した。本研究で利用したIoTセンサーはCO₂濃度の手動校正・自動校正の有無等の機能が異なるほか、データ容量の有無等のIoTセンサーの特徴がある。温度についてはセンサーDの測定値が他のIoTセンサーの測定値と比較して0.5K以上低くなっており、センサーDを除いた3種のIoTセンサーの差は0.5K以内であった。相対湿度についてはセンサーBの測定値が他のIoTセンサーと比較して10%RH以上高くなる場合があり、測定機器の個体差が見受けられる場合があった。CO₂濃度については初期CO₂濃度に差異がある建物において100ppm以上の差異が見受けられたものの、多くの時間帯で100ppm以下の差であった。(2)IoTセンサーと現場立入測定の測定値比較では、2章に示したすべての建物を対象に現場立入測定を実施した時刻の瞬時値を比較した。温度についてはIoTセンサーと現場立入測定の結果は1K程度の差、相対湿度についてはセンサーBを除くとIoTセンサーと現場立入測定の結果は±5%RH程度の差、CO₂濃度についてはセンサーCを除くとIoTセンサーと現場立入測定の結果は±100ppm程度の差であった。(3)温湿度・CO₂濃度の平面分布の測定では、冬期の温度の平面分布については外皮に近いペリメータゾーンで低くなる傾向が見受けられた。また、相対湿度については多くの建物で平面分布は見られなかったが、測定値は温度に影響されることから温度の平面分布が大きい建物においては相対湿度の測定値にも差が生じる可能性がある。以上の結果より、IoTセンサーは現場立入測定の結果と概ね同等の結果が得られていると考えられるが、測定機器の個体差がある、CO₂濃度の初期値の設定、浮遊粉じんの量・CO濃度・気流の連続測定センサーの開発、適切な測定位置等の課題があることから、引続き調査・測定を行う予定である。

浮遊粉じん濃度について、大気環境の改善や空調性能の向上等により管理基準値より十分に低いことが知られている。また、連続測定が可能な小型センサーもまだ存在しない。一方、粒径2.5μm以下の粒子(PM_{2.5})については健康影響が大きいことから、室内環境測定に利用可能な測定機器の調査を行っている。小型センサーによるPM_{2.5}濃度測定結果からは、センサー個体差、機器間の精度、換算係数、校正の方法等を考慮する必要性が示唆された。

4-1. IoT センサーによる建築物衛生管理への適用可能性検討

A. 研究目的

建築物衛生法では空気調和機を設けている場合の空気環境の基準が定められており、2 か月以内ごとに1回の測定が義務付けられている。浮遊粉じんの量、一酸化炭素の含有率（以降、CO濃度）、二酸化炭素の含有率（以降、CO₂濃度）、温度、相対湿度、気流の6項目の測定が義務付けられているが、CO₂濃度、温度、相対湿度については、連続測定が可能な小型測定機器（以降、IoTセンサー）が普及しており、IoTセンサーによる建築物衛生管理への適用も期待されている。

本章では、市販されている複数のIoTセン

サーの測定値比較ならびにIoTセンサーと建築物衛生法に準じた現場立入測定の測定値比較により、IoTセンサーの建築物衛生管理への利用可能性について検討することを目的とする。

B. 研究方法

表4-1-1にIoTセンサーの概要を示す。本研究で扱うIoTセンサーは4種類であり、いずれもCO₂濃度、温度、相対湿度が測定可能である。CO₂濃度の測定精度はセンサーAとセンサーCが±50ppmであるのに対してセンサーBは±120ppm、センサーDは±70ppm（at 0 - 1000ppm）であった。なお、温度と相対湿度の測定精度は0.4~0.5°C、3~5%RHである。吸引方式はセンサーBがブラシレスファンによる強

表 4-1-1 IoT センサーの概要

機器名称		センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
外観写真					
測定範囲	CO ₂ 濃度	0 - 9 999ppm	360 - 4 000ppm	400 - 2 000ppm	0 - 5 000ppm
	温度	0 - 55°C	-10 - 100°C		-20 - 55°C
	相対湿度	10 - 95%RH	10 - 95%RH		5 - 95%RH
測定精度	CO ₂ 濃度	± 50ppm ± 読み値の 5%	± 120ppm ± 1digit	± 50ppm ± 読み値の 5%	1)0 - 1 000ppm ± 70ppm ± 読み値の 3% 2)1 001 - 5 000ppm ± 100ppm ± 読み値の 3% 3)2 001ppm - ± 180ppm ± 読み値の 3%
	温度	± 0.5°C	± 0.5°C	± 0.4°C	± 0.4°C (0 - 55°C)
	相対湿度	± 5%RH (at 25°C50%RH)	± 4%RH	± 3%RH (0 - 80%RH)	± 4%RH
吸引方式	自然	強制	自然	自然	
CO ₂ 濃度 手動校正	有 →現在 CO ₂ 濃度を 400ppm とする	有 →現在 CO ₂ 濃度を任意値 に変更する。	無	無	
CO ₂ 濃度 自動校正	有 →180 時間ごとに最低値 を 400ppm とする。	無	有 →7 日間ごとに最低値を 400ppm とする。	有 →180 時間ごとに最低値 を 400ppm とする。	
記録容量	8000 データ (5 分間隔の場合約 28 日)	98304 データ (5 分間隔の場合約 341 日)	無 →サーバー上に常時 アップロード	無 →ゲートウェイを介して 常時 PC に記録	
外部電源	要	要	要	不要	

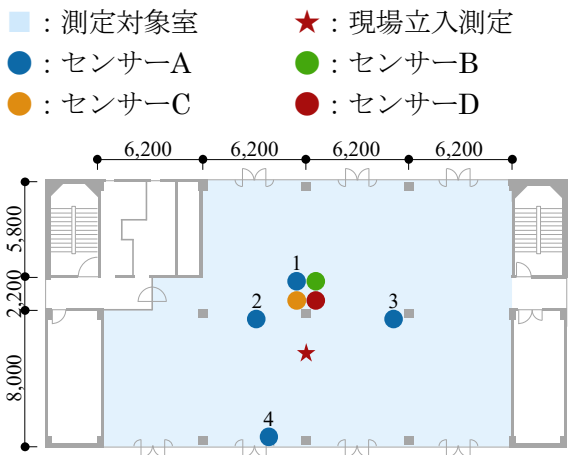


図 4-1-1 Aビル 2階平面概要図

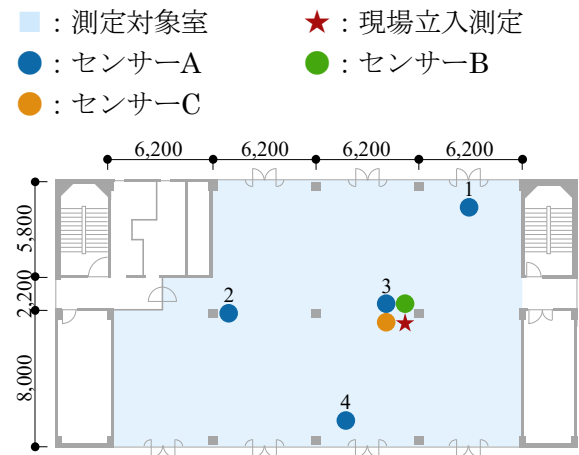


図 4-1-2 Aビル 3階平面概要図

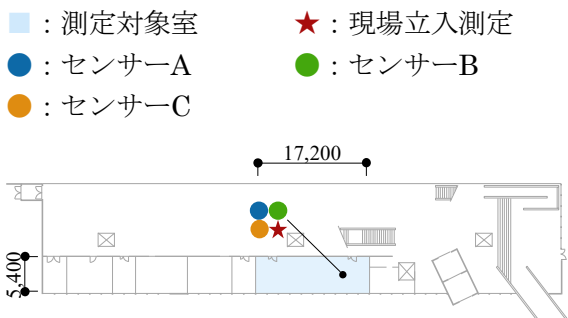


図 4-1-3 Bビル 1階平面概要図

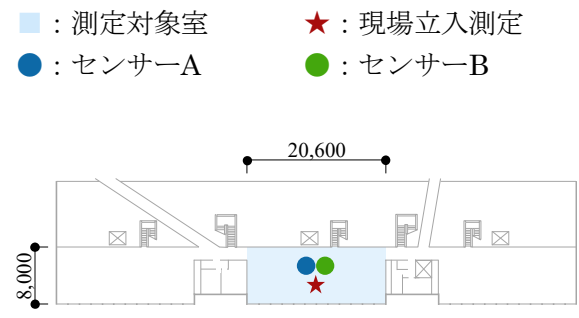


図 4-1-4 Bビル 3階平面概要図

■ : 測定対象室 ● : センサーA ● : センサーB ● : センサーC ★ : 現場立入測定

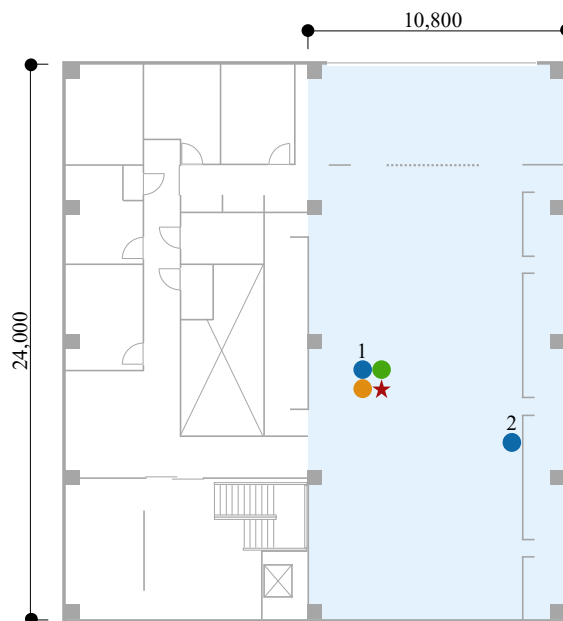


図 4-1-5 Cビル 2階平面概要図

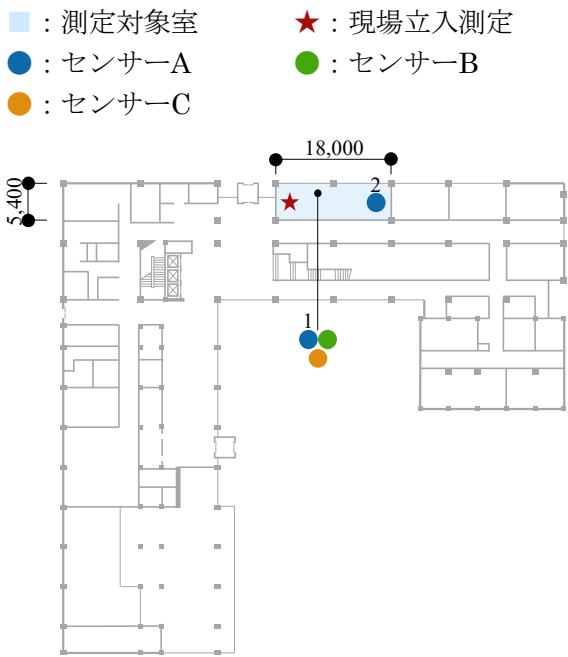


図 4-1-6 D ビル 1 階平面概要図

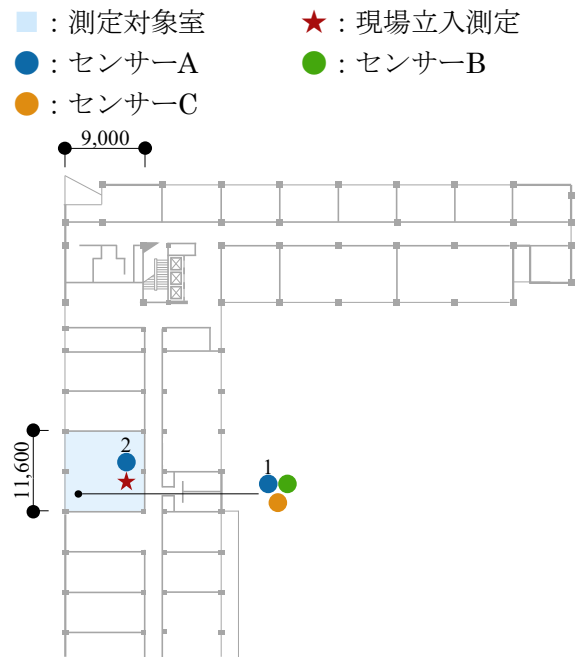


図 4-1-7 D ビル 4 階平面概要図

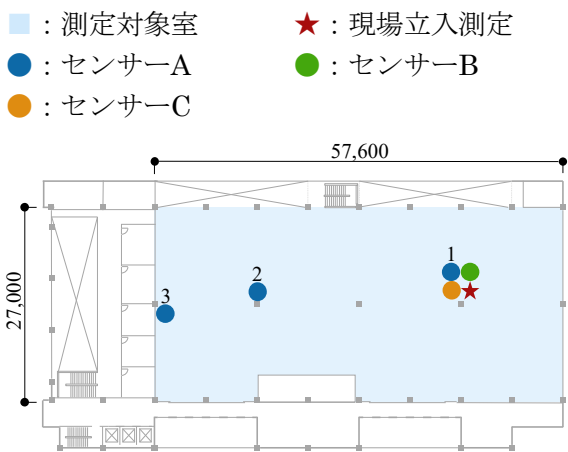


図 4-1-8 E ビル 2 階平面概要図

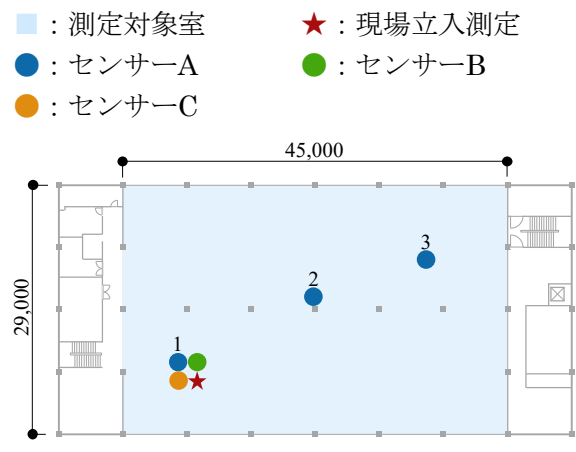


図 4-1-9 F ビル 2 階平面概要図

制吸引であるが、その他の IoT センサーは自然吸引である。また、CO₂濃度の自動校正機能はセンサーBを除いて搭載されており、いずれも約7日間ごとに最低値を400ppmに補正する機能となっている。記録容量はセンサーCとセンサーDには容量は無く、常時測定値がアップロードされるが、センサーAは8000データ、センサーBは98304データであり、5分間隔で測定する場合、それぞれ約28日間、約341日間で容量オーバーとなる。なお、外部電源はセンサーDを除いてACアダプタによる電源を要する。

上記のIoTセンサーを表2-1-1に示した6件の建物に設置した。各建物の平面概要図と測定点を図4-1-1～図4-1-9に示す。水色陰影部が測定対象室を示しており、丸プロットがIoTセンサーの測定点、星プロットが現場立入測定の測定点を示している。いずれの建物でも測定対象室の平面中央付近に設置するよう配慮したが、一部平面中央付近ではない建物も含まれる。また、IoTセンサーと現場立入測定の測定点も可能な限り近接するよう配慮したが、Aビル2階では2m程度、Dビル1階では3m程度、Dビル4階では6m程度離れた位置となっている。なお、センサーAは温湿度・CO₂濃度の平面分布を確認するため、Bビルを除いて複数点設置した。センサーDはAビルの2階のみ設置した。

本章では、以下の2つの事項を実施する。

(1) 複数のIoTセンサーの測定値比較

表4-1-1に示した4種のIoTセンサーの測定値を比較し、IoTセンサーの種類による測定値の差異を明らかにする。対象とする建物はセンサーDを設置したAビル2階、比較的小面積のDビル1階、比較的大面積のEビルとした。IoTセンサーの測定間隔はセンサーCが10分間隔であり、その他は5分間隔とした。また、CO₂濃度の手動校正が搭載されている機器は測定機器を外気に設置し、400ppm程度に校正した。CO₂濃度の自動校正が搭載されている機器はその機能を使用した。

(2) IoTセンサーと現場立入測定の測定値比較

IoTセンサーの測定値と現場立入測定の測定値を比較し、IoTセンサーの建築物衛生管理へ

の利用可能性について検討する。測定方法は2章と同様の方法である。なお、対象とする建物はすべての建物とした。

C. 研究結果

C.1. 複数のIoTセンサーの測定値比較

温度に関するIoTセンサー同士の比較を図4-1-10～図4-1-18・表4-1-2～表4-1-7、相対湿度に関するIoTセンサー同士の比較を図4-1-19～図4-1-27・表4-1-8～表4-1-13、CO₂濃度に関するIoTセンサー同士の比較を図4-1-28～図4-1-36・表4-1-14～表4-1-19に示す。各図は月別・全測定期間のIoTセンサー同士の比較と同測定時刻における各センサーの最高値と最小値の差のヒストグラムを示している。各表は月別・全測定期間の各IoTセンサーの最高値・中央値・最低値を示している。なお、いずれも平日の9～18時の結果を示している。

温度については最大温度差のヒストグラム(図4-1-12・図4-1-15・図4-1-18)によると、Dビル・EビルではIoTセンサーの各時刻の差が0.5K以下である時間率はそれぞれ62.6%・55.7%であり、各IoTセンサーの差異はほとんど無いと考えられる。一方で、AビルではIoTセンサーの各時刻の差が0.5K超1.0K以下となる時間率は84.3%であり、Dビル・Eビルと比較して大きな差異が見られた。この要因としてセンサーDの測定値が他のIoTセンサーと比較して低いことが挙げられる。11/1～3/31のIoTセンサー同士の比較(図4-1-11・表4-1-3)によると、各IoTセンサーの中央値はセンサーAが23.3°C、センサーBが23.6°C、センサーCが23.7°C、センサーDが22.8°Cとなっており、センサーDの温度は他のIoTセンサーと比較して0.5K以上低くなっている。

相対湿度については最大相対湿度差のヒストグラム(図4-1-21・図4-1-24・図4-1-27)によると、Aビルでは4～6%RHの差、Eビルでは2%RH以下の差が最頻値となっているが、Dビルでは16～18%RHの差が最頻値となっている。この要因としてセンサーBの相対湿度が他のIoTセンサーと比較して高いことが挙げられる。12/20～3/31のIoTセンサー同士の比較(図4-1-23・表4-1-11)によると、各IoTセンサー

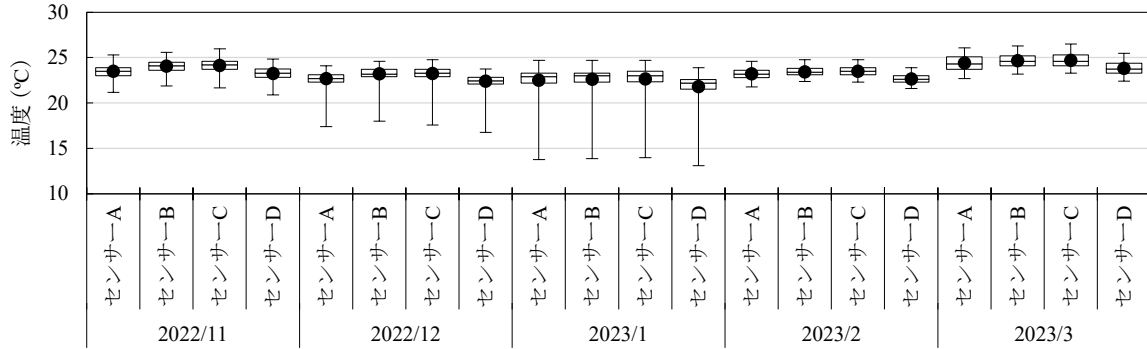


図 4-1-10 IoT センサー同士の月別温度比較 (A ビル 2 階, 平日 9-18 時)

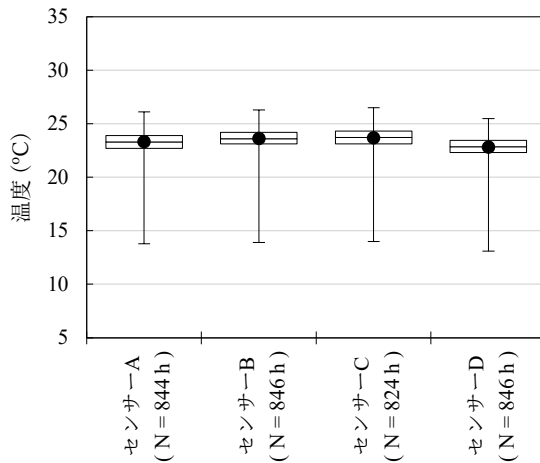


図 4-1-11 IoT センサー同士の温度比較 (A ビル 2 階, 11/1-3/31, 平日 9-18 時)

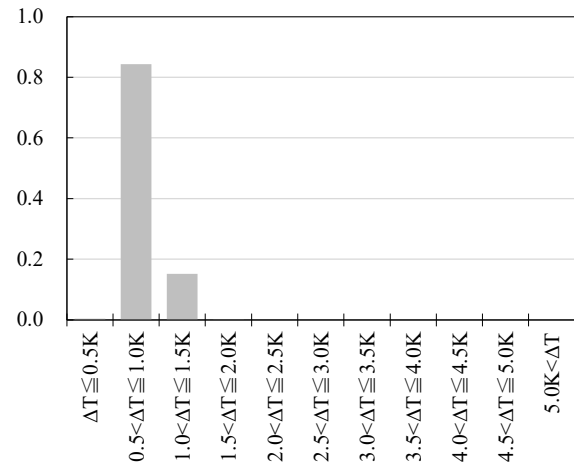


図 4-1-12 IoT センサー同士の最大温度差のヒストグラム (N = 846h) (A ビル 2 階, 11/1-3/31, 平日 9-18 時)

表 4-1-2-1 IoT センサー同士の月別温度比較 (A ビル 2 階) (1)

	2022/11				2022/12				2023/1			
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD
Max.	25.3	25.6	26.0	24.9	24.1	24.6	24.8	23.8	24.7	24.7	24.7	23.9
Med.	23.5	24.1	24.2	23.3	22.7	23.2	23.3	22.5	22.9	23.0	23.0	22.2
Min.	21.2	21.9	21.7	20.9	17.4	18.0	17.6	16.8	13.8	13.9	14.0	13.1

表 4-1-2-2 IoT センサー同士の月別温度比較 (A ビル 2 階) (2)

	2023/2				2023/3			
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD
Max.	24.6	24.8	24.8	23.9	26.1	26.3	26.5	25.5
Med.	23.2	23.4	23.5	22.6	24.3	24.6	24.6	23.7
Min.	21.8	22.4	22.3	21.6	22.7	23.2	23.3	22.4

表 4-1-3 IoT センサー同士の温度比較 (A ビル 2 階, 11/1-3/31, 平日 9-18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
Max.	26.1	26.3	26.5	25.5
Med.	23.3	23.6	23.7	22.8
Min.	13.8	13.9	14.0	13.1

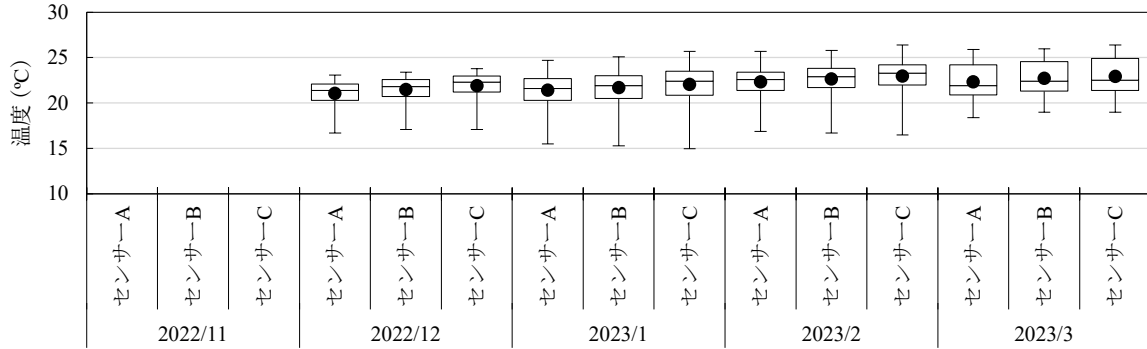


図 4-1-13 IoT センサー同士の月別温度比較 (D ビル 1 階, 平日 9 – 18 時)

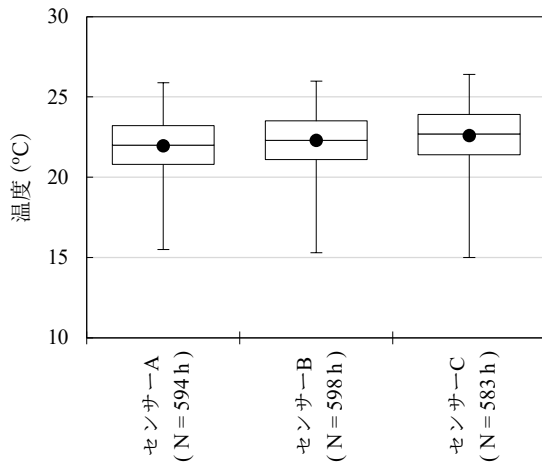


図 4-1-14 IoT センサー同士の温度比較
(D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

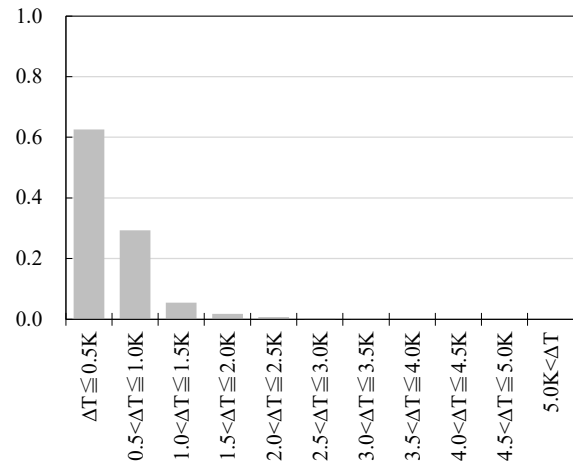


図 4-1-15 IoT センサー同士の最大温度差の
ヒストグラム (N = 596h)
(D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

表 4-1-4 IoT センサー同士の月別温度比較 (D ビル 1 階)

	2022/12			2023/1			2023/2			2023/3		
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC
Max.	23.1	23.4	23.8	24.7	25.1	25.7	25.7	25.8	26.4	25.9	26.0	26.4
Med.	21.4	21.8	22.3	21.6	21.9	22.4	22.6	22.9	23.3	21.9	22.4	22.5
Min.	16.7	17.1	17.1	15.5	15.3	15.0	16.9	16.7	16.5	18.4	19.0	19.0

表 4-1-5 IoT センサー同士の温度比較
(D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	25.9	26.0	26.4
Med.	22.0	22.3	22.7
Min.	15.5	15.3	15.0

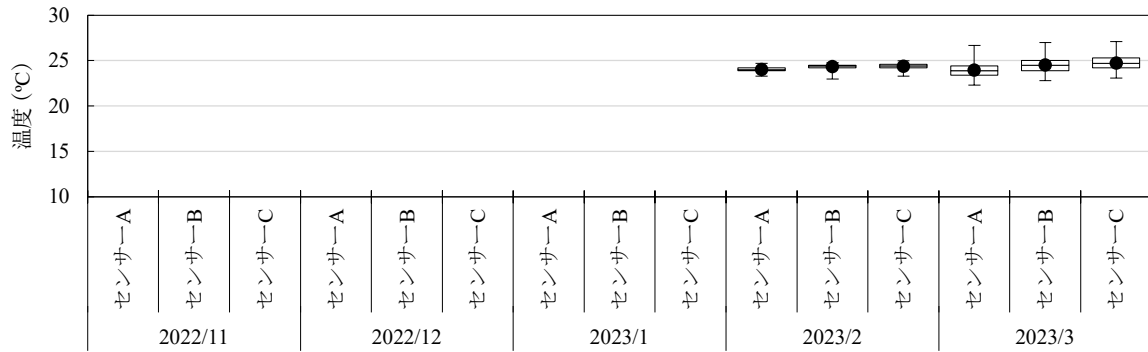


図 4-1-16 IoT センサー同士の月別温度比較 (E ビル 2 階, 平日 9 – 18 時)

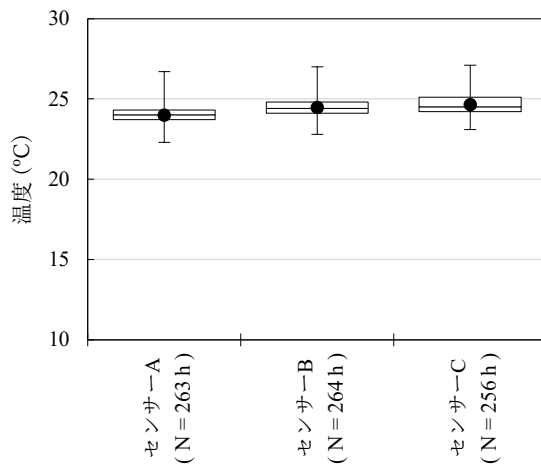


図 4-1-17 IoT センサー同士の温度比較 (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

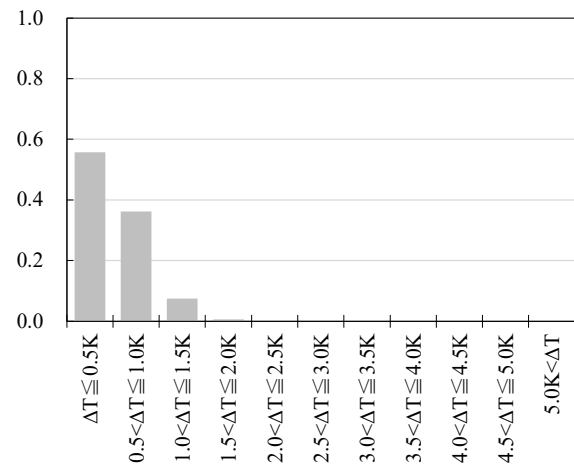


図 4-1-18 IoT センサー同士の最大温度差のヒストグラム (N = 194h) (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

表 4-1-6 IoT センサー同士の月別温度比較 (E ビル 2 階)

	2023/2			2023/3		
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC
Max.	24.7	24.8	25.0	26.7	27.0	27.1
Med.	24.0	24.4	24.4	23.9	24.5	24.7
Min.	23.3	23.0	23.3	22.3	22.8	23.1

表 4-1-7 IoT センサー同士の温度比較 (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	26.7	27.0	27.1
Med.	24.0	24.4	24.5
Min.	22.3	22.8	23.1

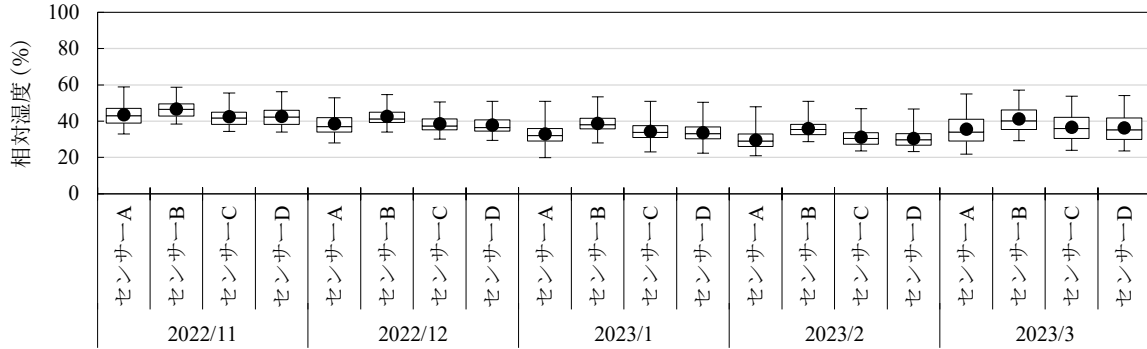


図 4-1-19 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Aビル2階, 平日9-18時)

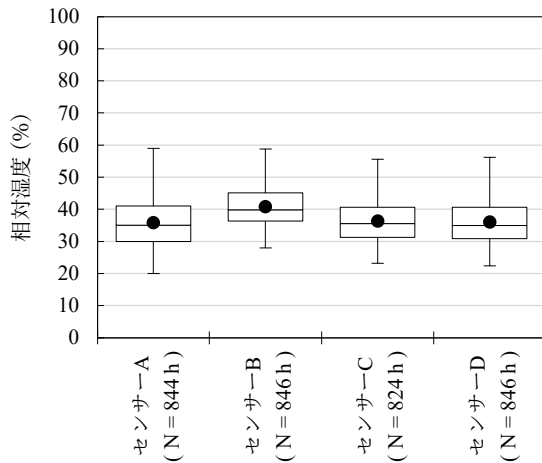


図 4-1-20 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Aビル2階, 11/1-3/31, 平日9-18時)

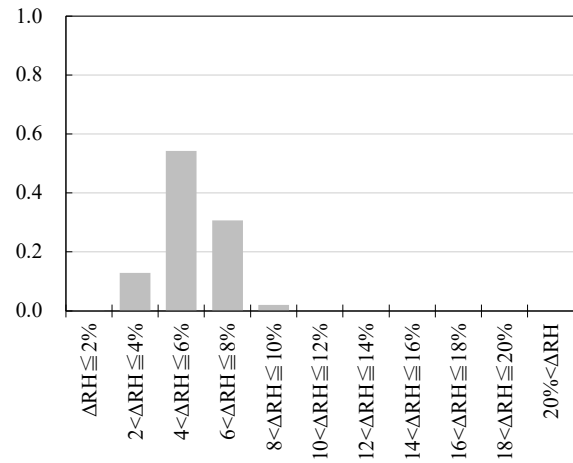


図 4-1-21 IoTセンサー同士の最大相対湿度差のヒストグラム (N=846h) (Aビル2階, 11/1-3/31, 平日9-18時)

表 4-1-8-1 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Aビル2階) (1)

	2022/11				2022/12				2023/1			
	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
Max.	59	59	56	56	53	55	51	51	51	54	51	50
Med.	43	47	42	42	37	41	37	36	32	38	34	33
Min.	33	39	34	34	28	34	30	30	20	28	23	22

表 4-1-8-2 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Aビル2階) (2)

	2023/2				2023/3			
	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
Max.	48	51	47	47	55	57	54	54
Med.	29	35	31	30	34	40	36	35
Min.	21	29	24	23	22	29	24	24

表 4-1-9 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Aビル2階, 11/1-3/31, 平日9-18時)

	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
Max.	59	59	56	56
Med.	35	40	36	35
Min.	20	28	23	22

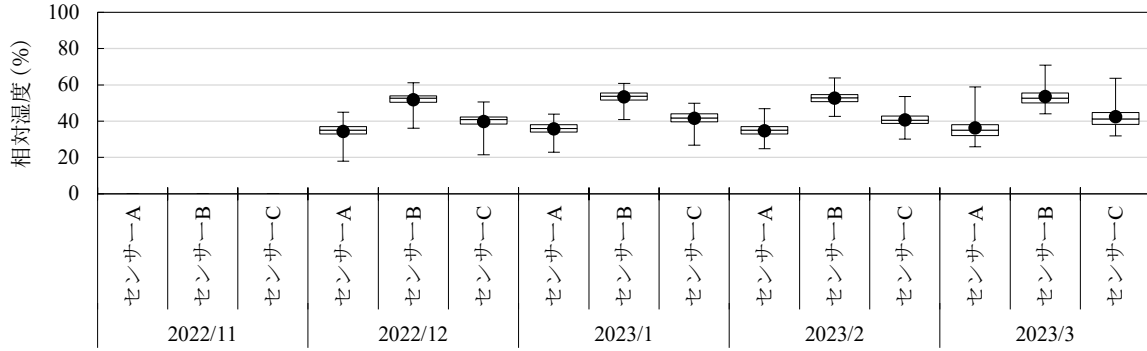


図 4-1-22 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Dビル1階, 平日9-18時)

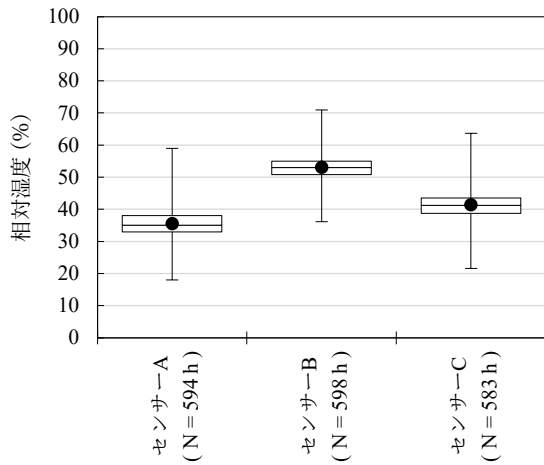


図 4-1-23 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Dビル1階, 12/20-3/31, 平日9-18時)

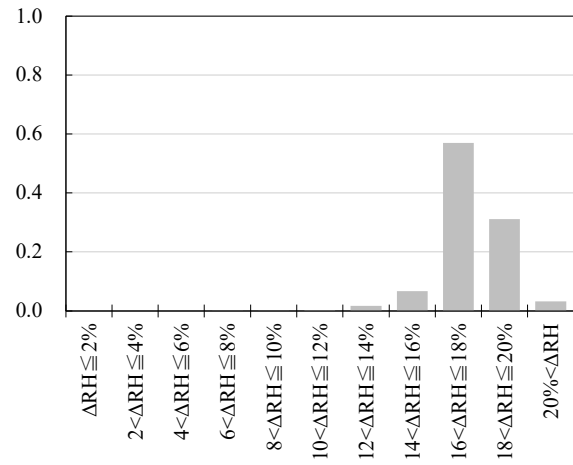


図 4-1-24 IoTセンサー同士の最大相対湿度差のヒストグラム (N=596h) (Dビル1階, 12/20-3/31, 平日9-18時)

表 4-1-10 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Dビル1階)

	2022/12			2023/1			2023/2			2023/3		
	センサーA	センサーB	センサーC	センサーA	センサーB	センサーC	センサーA	センサーB	センサーC	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	45	61	51	44	61	50	47	64	54	59	71	64
Med.	35	53	41	36	54	42	35	53	41	35	53	41
Min.	18	36	22	23	41	27	25	43	30	26	44	32

表 4-1-11 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Dビル1階, 12/20-3/31, 平日9-18時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	59	71	64
Med.	35	53	41
Min.	18	36	22

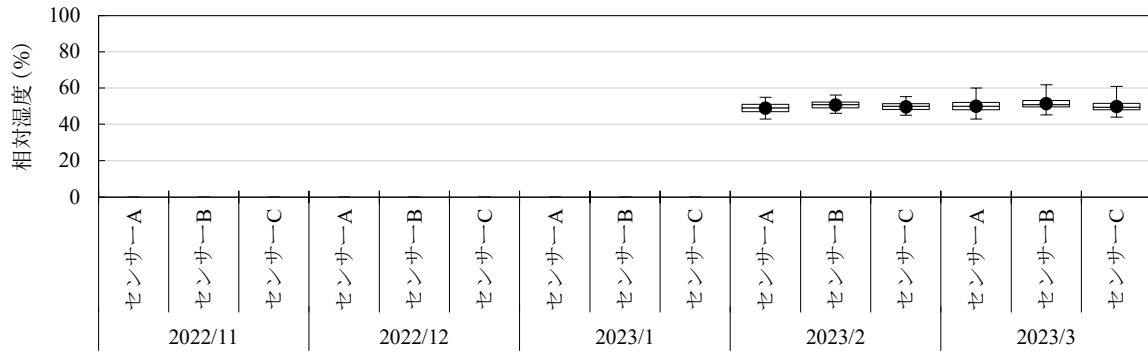


図 4-1-25 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Eビル2階, 平日9-18時)

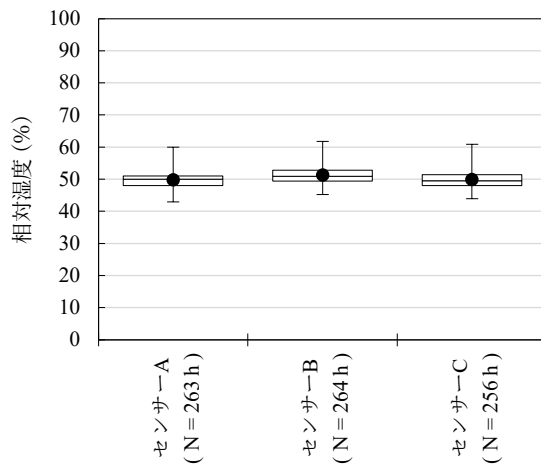


図 4-1-26 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Eビル2階, 2/16-3/31, 平日9-18時)

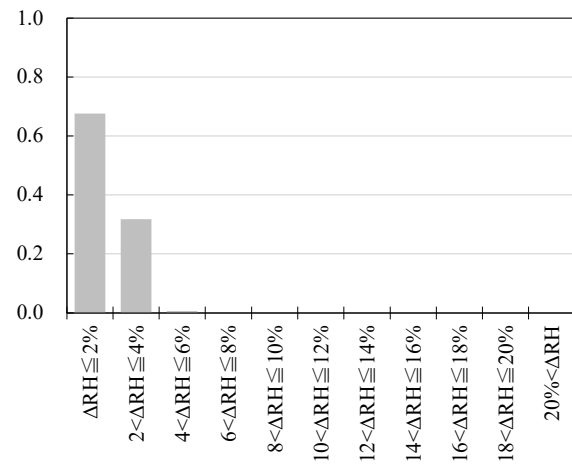


図 4-1-27 IoTセンサー同士の最大相対湿度差のヒストグラム (N=194h) (Eビル2階, 2/16-3/31, 平日9-18時)

表 4-1-12 IoTセンサー同士の月別相対湿度比較 (Eビル2階)

	2023/2			2023/3		
	センサーA	センサーB	センサーC	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	55	56	55	60	62	61
Med.	49	51	50	50	51	49
Min.	43	46	45	43	45	44

表 4-1-13 IoTセンサー同士の相対湿度比較 (Eビル2階, 2/16-3/31, 平日9-18時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	60	62	61
Med.	50	51	50
Min.	43	45	44

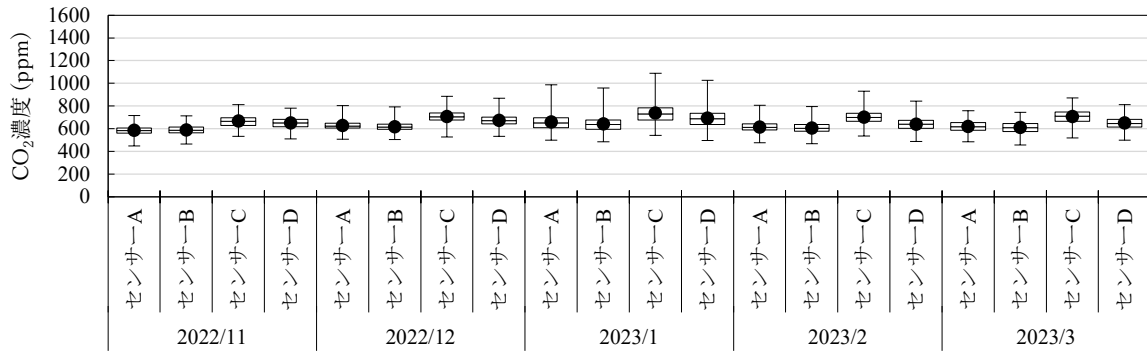


図 4-1-28 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (A ビル 2 階, 平日 9 - 18 時)

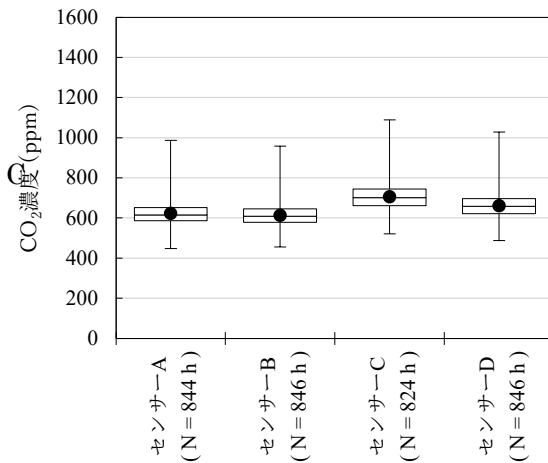


図 4-1-29 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (A ビル 2 階, 11/1 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

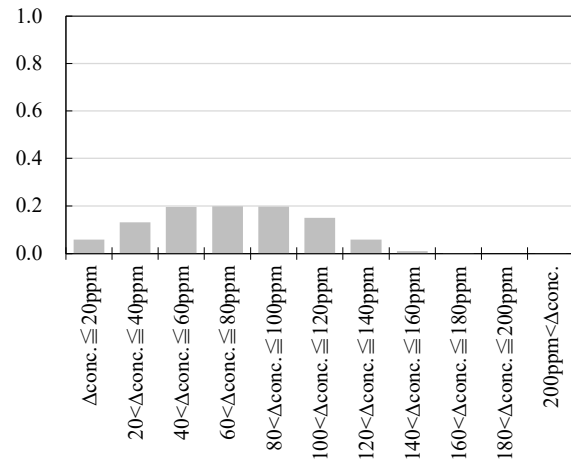


図 4-1-30 IoT センサー同士の最大 CO₂濃度差のヒストグラム (N = 846h) (A ビル 2 階, 11/1 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

表 4-1-14-1 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (A ビル 2 階) (1)

	2022/11				2022/12				2023/1			
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD
Max.	718	715	812	781	805	793	888	870	988	959	1 089	1 029
Med.	583	587	665	650	623	614	705	672	650	638	730	688
Min.	448	467	535	511	509	505	529	534	501	485	542	498

表 4-1-14-2 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (A ビル 2 階) (2)

	2023/2				2023/3			
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーD
Max.	809	797	933	843	761	745	873	812
Med.	613	604	700	641	616	608	710	646
Min.	477	469	538	488	485	457	521	501

表 4-1-15 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (A ビル 2 階, 11/1 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC	センサーD
Max.	988	959	1 089	1 029
Med.	615	609	701	658
Min.	448	457	521	488

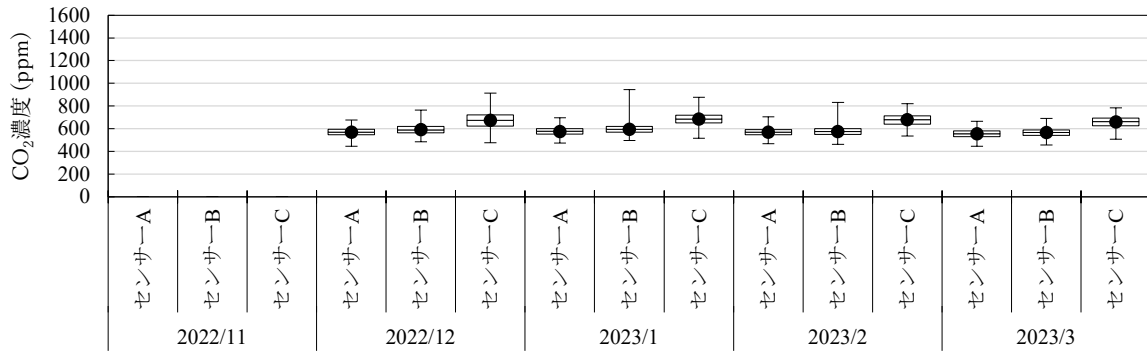


図 4-1-31 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (D ビル 1 階, 平日 9 – 18 時)

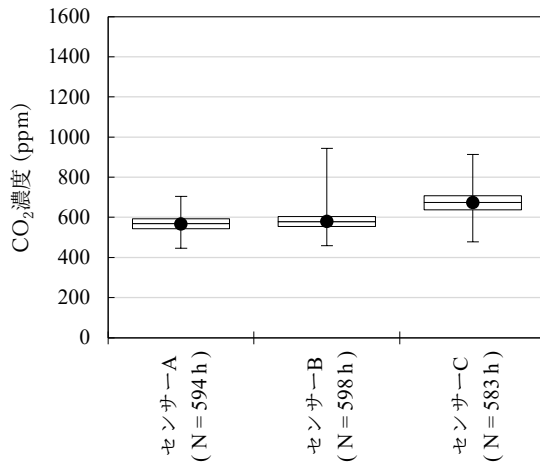


図 4-1-32 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

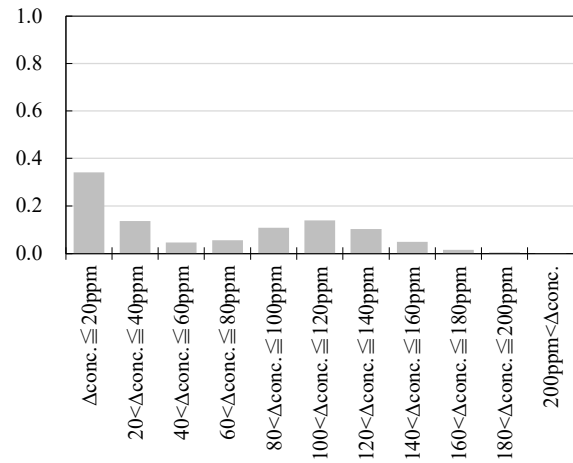


図 4-1-33 IoT センサー同士の最大 CO₂濃度差のヒストグラム (N = 596h) (D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

表 4-1-16 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (D ビル 1 階)

	2022/12			2023/1			2023/2			2023/3		
	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC	セン サーA	セン サーB	セン サーC
Max.	679	764	914	699	945	879	705	834	823	666	692	785
Med.	570	589	673	578	594	685	571	575	678	556	567	663
Min.	447	486	478	475	496	516	470	464	537	447	459	509

表 4-1-17 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (D ビル 1 階, 12/20 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	705	945	914
Med.	568	579	674
Min.	447	459	478

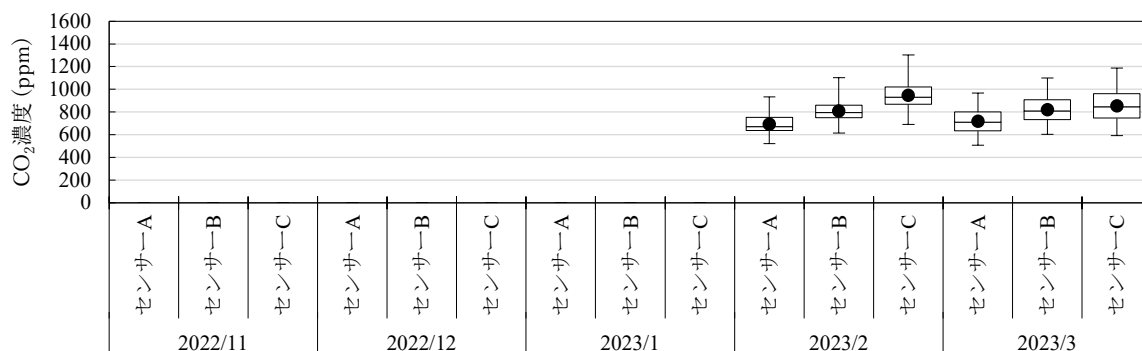


図 4-1-34 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (E ビル 2 階, 平日 9 – 18 時)

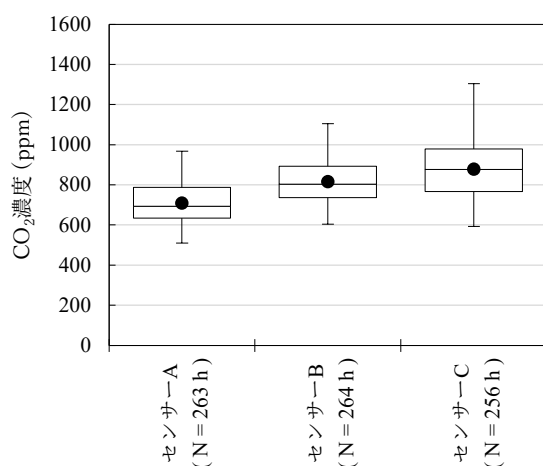


図 4-1-35 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

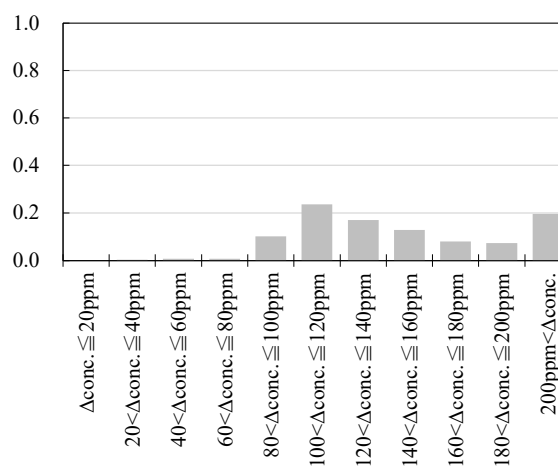


図 4-1-36 IoT センサー同士の最大 CO₂濃度差のヒストグラム (N = 194h) (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

表 4-1-18 IoT センサー同士の月別 CO₂濃度比較 (E ビル 2 階)

	2023/2			2023/3		
	センサーA	センサーB	センサーC	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	934	1 105	1 305	968	1 101	1 188
Med.	670	795	930	712	808	846
Min.	522	615	692	510	605	593

表 4-1-19 IoT センサー同士の CO₂濃度比較 (E ビル 2 階, 2/16 – 3/31, 平日 9 – 18 時)

	センサーA	センサーB	センサーC
Max.	968	1 105	1 305
Med.	693	804	877
Min.	510	605	593

の中央値はセンサーA が 35%、センサーB が 53%、センサーC が 41%となっており、センサーB の相対湿度は他の IoT センサーと比較して 10%RH 以上低くなっている。なお、A ビルにおいても 11/1~3/31 の IoT センサー同士の比較 (図 4-1-20・表 4-1-9) によると、各 IoT センサーの中央値はセンサーA が 35%、センサーB が 40%、センサーC が 36%、センサーD が 35%となっており、E ビルにおいても 2/16~3/31 の IoT センサー同士の比較 (図 4-1-26・表 4-1-13) によると、各 IoT センサーの中央値はセンサーA が 50%、センサーB が 51%、センサーC が 50%となっており、いずれもセンサーB が高くなっている。

CO₂ 濃度については最大 CO₂ 濃度差のヒストグラム (図 4-1-30・図 4-1-33・図 4-1-36) によると、A ビルでは 40~100ppm の差、D ビルでは 20ppm 以下の差が最頻値となっているが、E ビルでは約 90%の時間帯で 100ppm 以上の差となっている。2/16~3/31 の IoT センサー同士の比較 (図 4-1-35・表 4-1-19) によると、各 IoT センサーの中央値はセンサーA が 693ppm、センサーB が 804ppm、センサーC が 877ppm となっており、センサーA とセンサーC の差が 184ppm であった。なお、A ビルにおいても 11/1~3/31 の IoT センサー同士の比較 (図 4-1-29・表 4-1-15) によると、各 IoT センサーの中央値はセンサーA が 615ppm、センサーB が 609ppm、センサーC が 701ppm、センサーD が 658ppm となっており、D ビルにおいても 12/20~3/31 の IoT センサー同士の比較 (図 4-1-32・表 4-1-17) によると、各 IoT センサーの中央値はセンサーA が 568ppm、センサーB が 579ppm、センサーC が 674ppm となっており、いずれもセンサーC が高くなっている。また、E ビルの月別 CO₂ 濃度比較 (図 4-1-34・表 4-1-18) によると、2023 年 2 月の中央値はセンサーA が 670ppm、センサーB が 795ppm、センサーC が 930ppm となっているが 2023 年 3 月の中央値はセンサーA が 712ppm、センサーB が 808ppm、センサーC が 846ppm となっており、IoT センサー同士の差が小さくなっている。センサーB の中央値は 2 月と 3 月でほとんど差は無いが、センサーA は 3 月の方が高く、センサーC は 3

月の方が低くなっていることからセンサーA とセンサーC が有する自動校正機能によって IoT センサー同士の差が小さくなったと考えられる。即ち、E ビルに設置した初期 CO₂ 濃度には差異があったと考えられる。

C.2. IoT センサーと現場立入測定の測定値比較

各建物における IoT センサーと現場立入測定を比較した結果を図 4-1-37~図 4-1-45 に示す。本図は現場立入測定を実施した時刻の瞬時値で示している。

温度については F ビルにおいてセンサーC が現場立入測定結果と比較して 1.8K 低くなっており、本研究で対象とした建物において最大の差となった。その他の建物では IoT センサーと現場立入測定の結果が 1K 程度の差が多い。

相対湿度についてはセンサーB を除いてほとんどすべての建物で IoT センサーの相対湿度は現場立入測定結果の±5%RH 以内となっていた。センサーB は A ビル・E ビル・F ビルでは他の IoT センサーと同等程度の測定値となっている一方で B ビル・D ビルでは他の IoT センサーと比較して 10~20%RH 程度高い測定値となっている。

CO₂ 濃度についてはセンサーC が高い測定値になっているのは前述のとおりであり、多くの建物でセンサーC の測定値が最高値となっている。IES-5000 と Model 2100 に差異がある建物もあるが、センサーC を除くと IoT センサーの CO₂ 濃度は現場立入測定結果の±100ppm 以内となる建物が多い。

C.3. 温湿度・CO₂ 濃度の平面分布の測定

B ビルを除いた 5 件における温湿度・CO₂ 濃度の平面分布を確認するため、各室複数点に設置したセンサーA の測定結果を図 4-1-46~図 4-1-52 に示す。本図はいずれも測定期間中の平日の 9~18 時の結果を示している。

A ビルの 2 階においては No. 1~3 の温度の中央値は 22.9~23.3°C と差はないが、No. 4 は第一四分位点と第三四分位点の差が他の位置よりも大きくなっている。これは、No. 4 を南面の外皮近傍に設置したことが要因と考えられ、日射の影響による温度上昇や低外気温度による温度低下が挙げられる。一方、No. 1~4 の相対湿度の中央値は 31~35%、CO₂ 濃度の中央値は

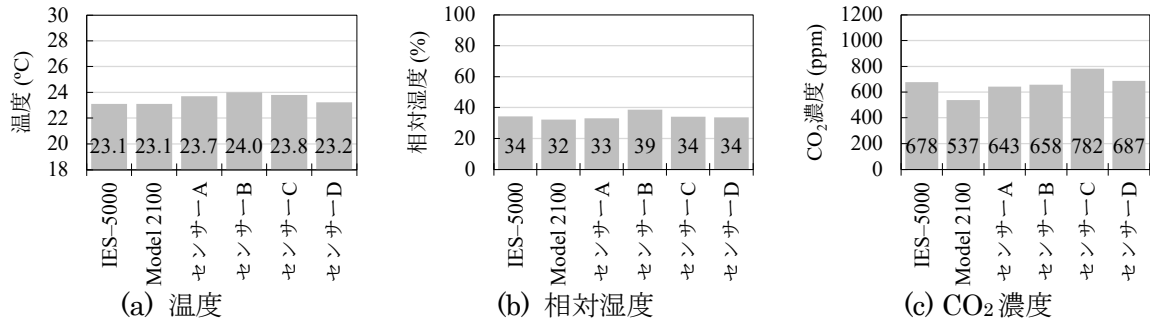


図 4-1-37 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Aビル2階, 2023/2/17 10:10)

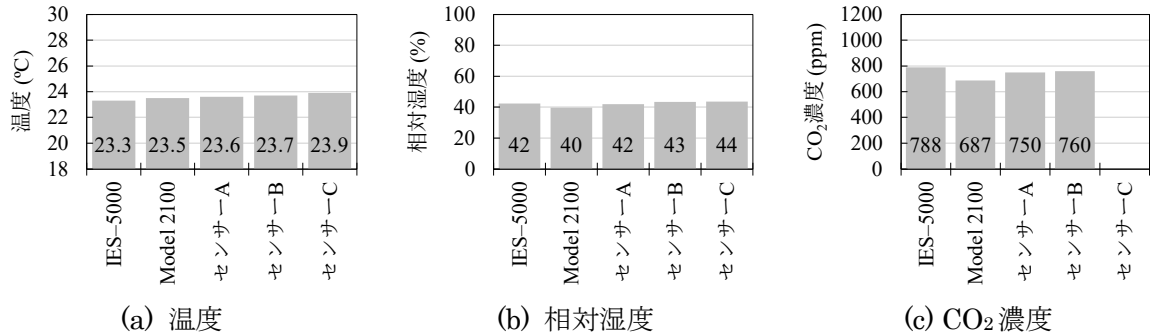


図 4-1-38 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Aビル3階, 2023/2/17 10:30)

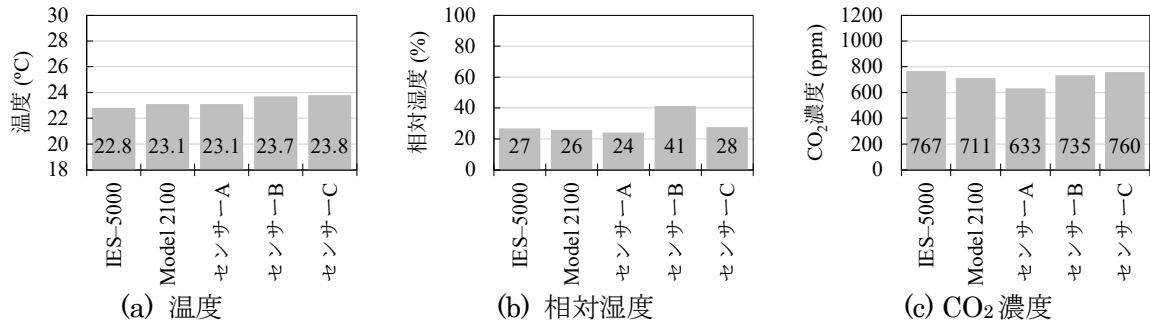


図 4-1-39 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Bビル1階, 2022/12/8 15:10)

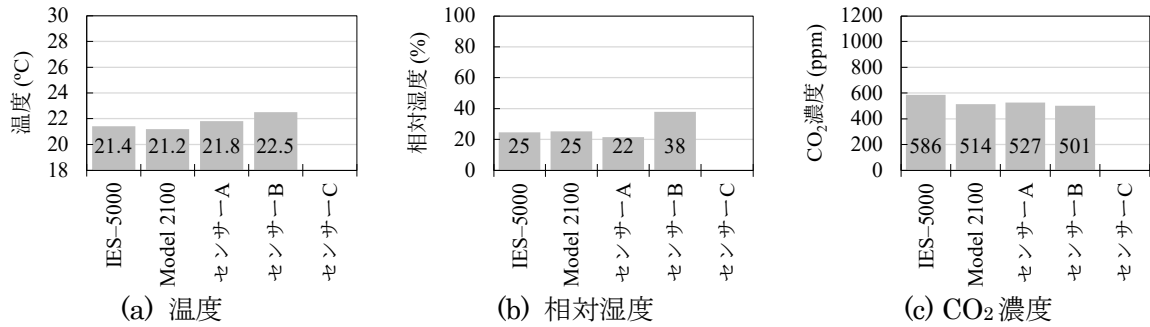


図 4-1-40 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Bビル3階, 2022/12/8 15:50)

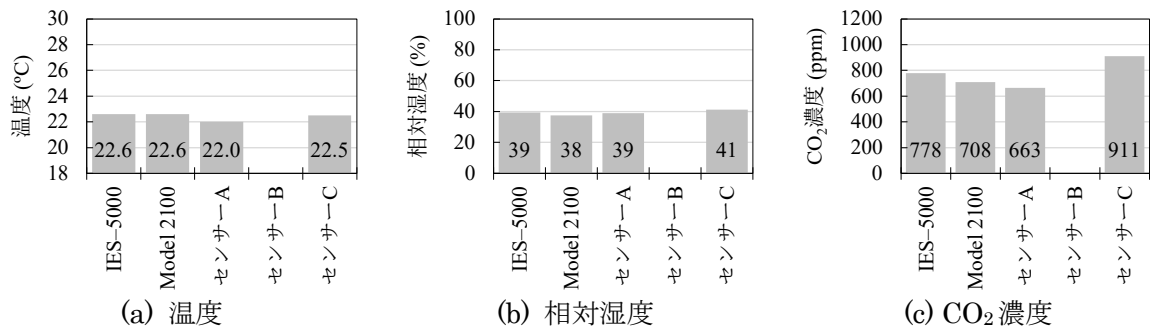


図 4-1-41 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Cビル2階, 2022/12/9 10:30)

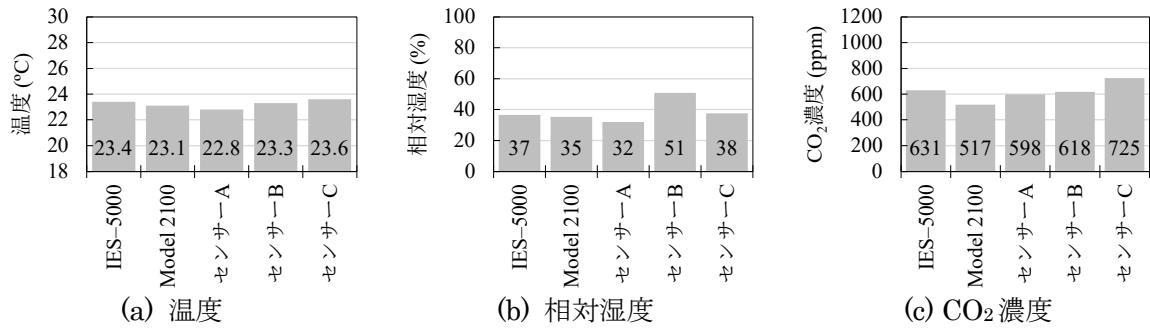


図 4-1-42 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Dビル1階, 2023/2/22 15:20)

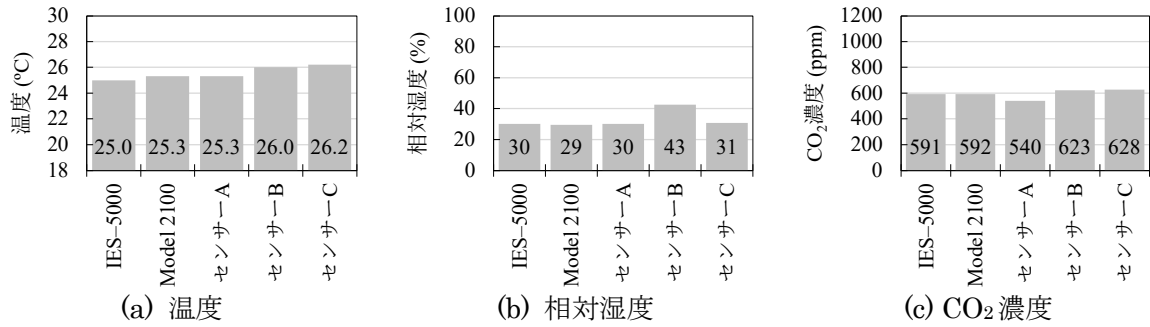


図 4-1-43 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Dビル4階, 2023/2/22 16:30)

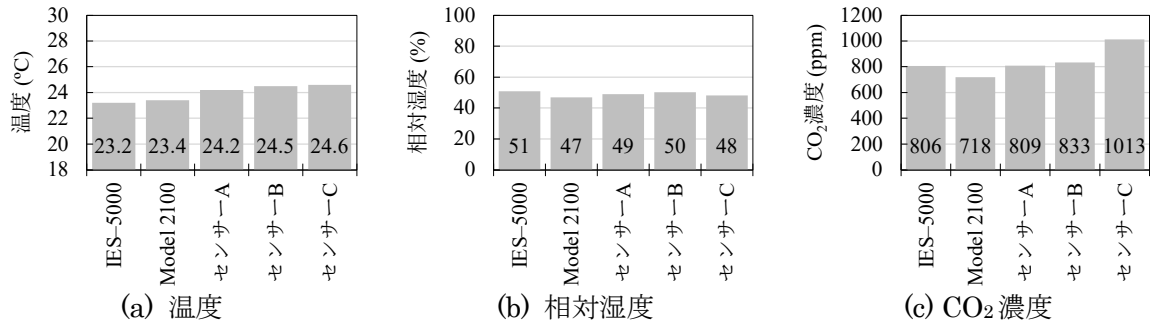


図 4-1-44 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Eビル2階, 2023/2/16 15:30)

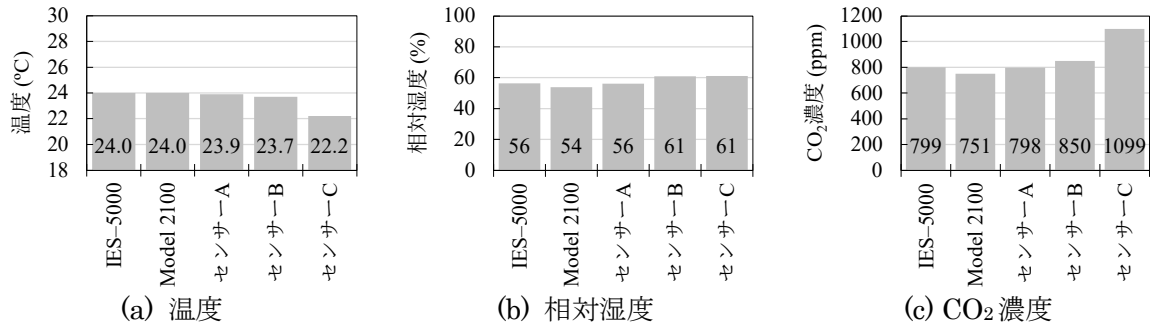


図 4-1-45 IoTセンサーと現場立入測定の比較 (Fビル2階, 2023/2/16 16:20)

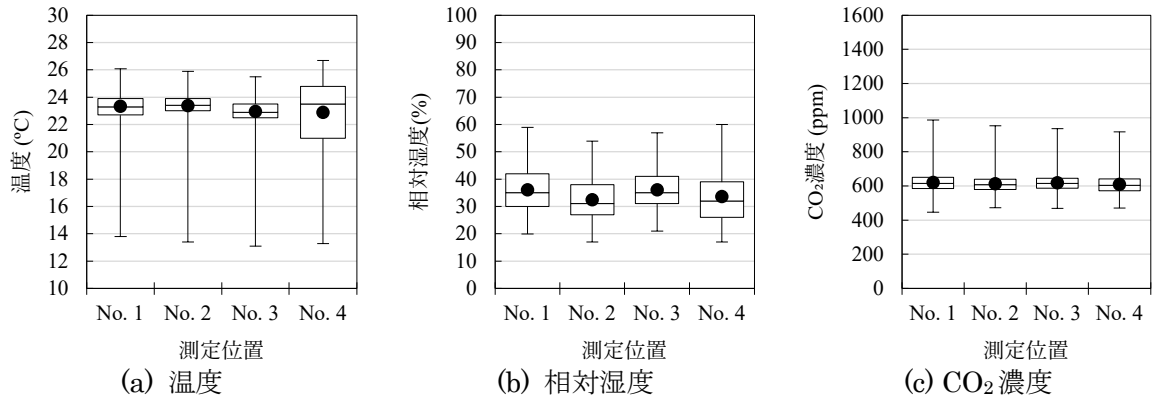


図 4-1-46 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (A ビル 2 階, 11/1 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

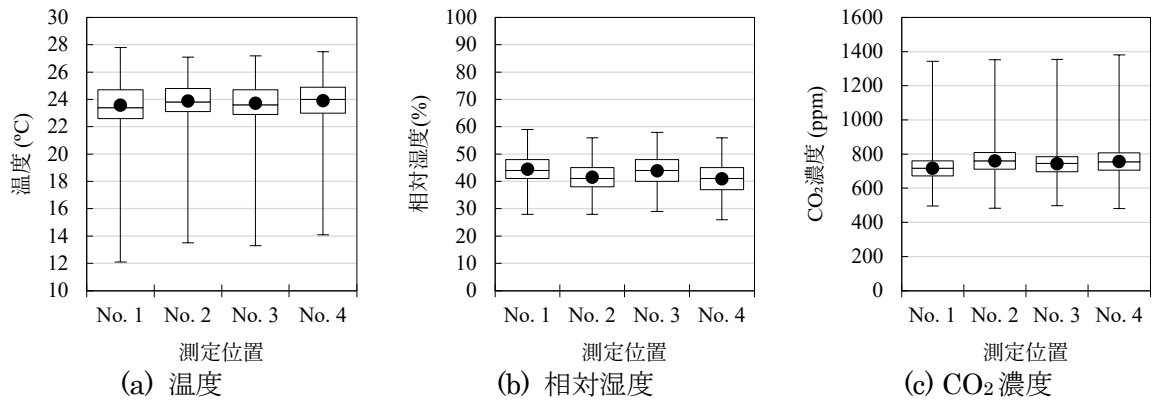


図 4-1-47 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (A ビル 3 階, 11/1 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

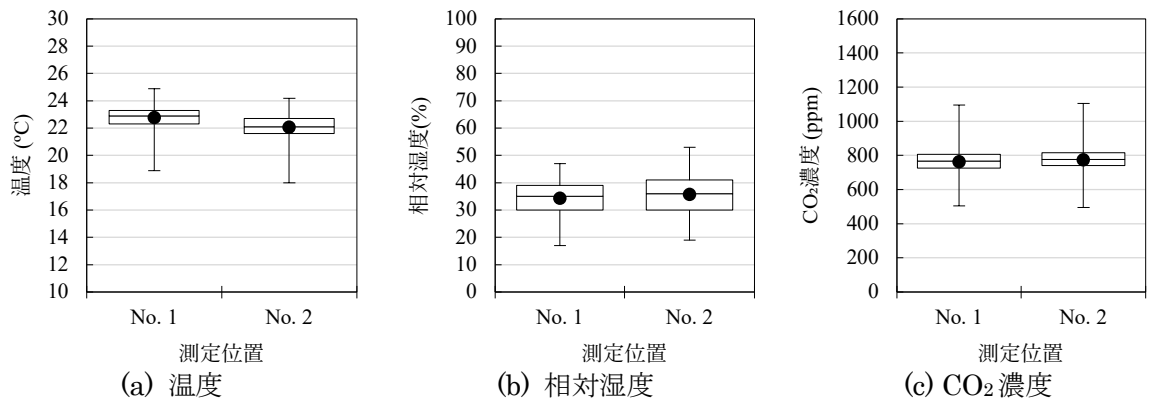


図 4-1-48 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (C ビル 2 階, 12/9 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

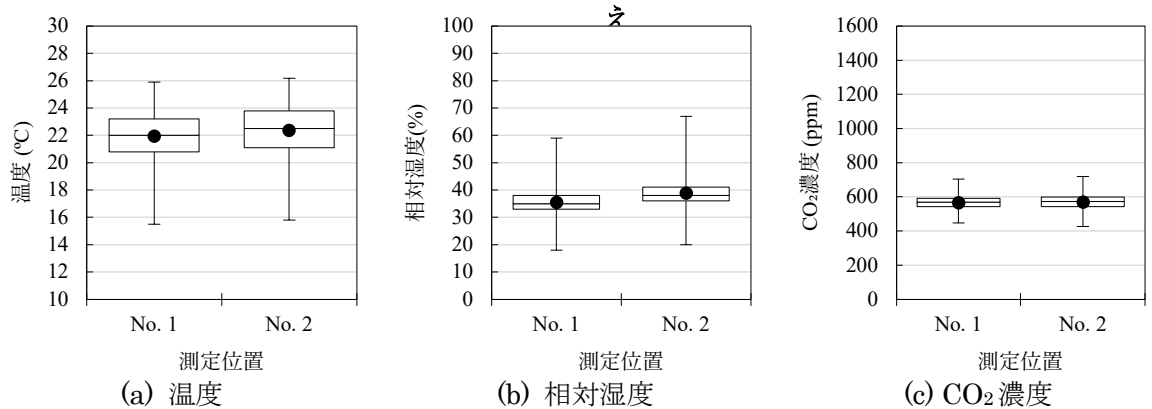


図 4-1-49 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (D ビル 1 階, 12/21 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

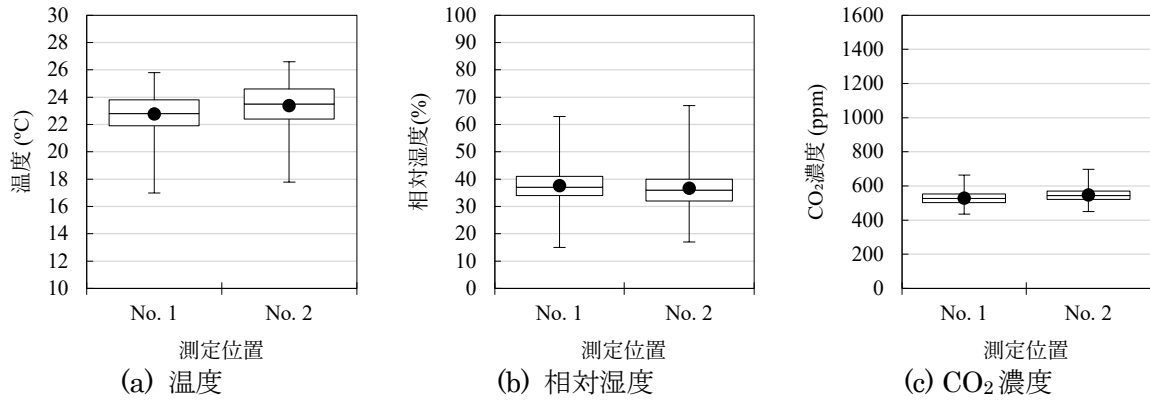


図 4-1-50 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (D ビル 4 階, 12/21 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

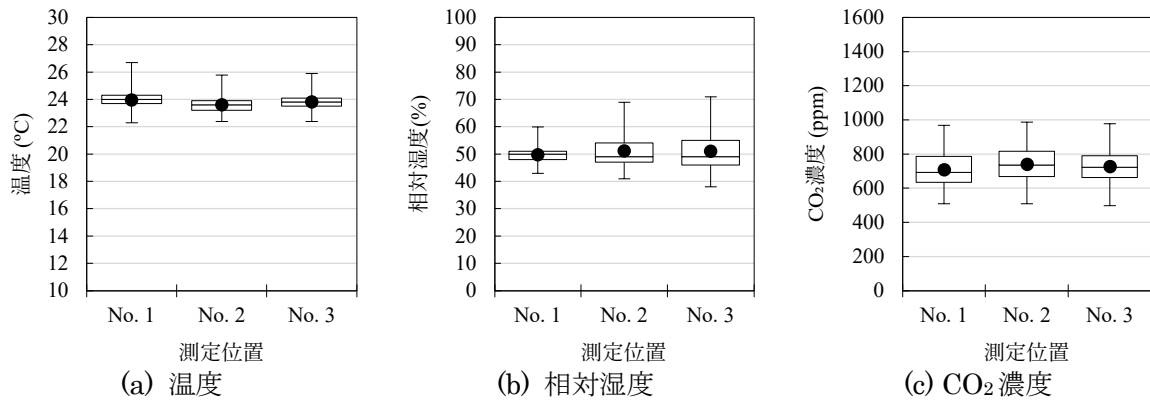


図 4-1-51 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (E ビル 2 階, 2/16 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

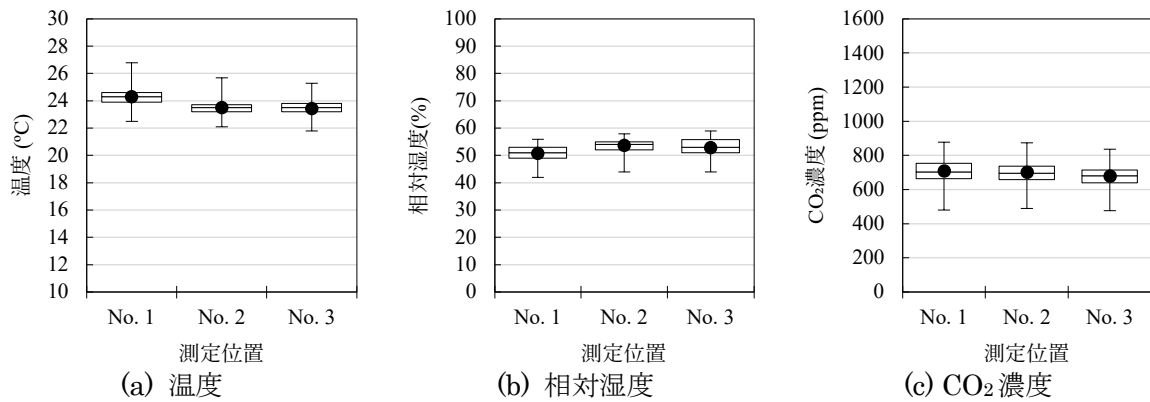


図 4-1-52 温度・相対湿度・CO₂濃度の平面分布 (F ビル 2 階, 2/16 - 3/31, 平日 9 - 18 時)

603～615ppm と差は見られなかった。

A ビルの 3 階においては No. 1 が北側ペリメータゾーン、No. 2～3 がインテリアゾーン、No. 4 が南側ペリメータゾーンに設置されているが、いずれも大きな差は見られなかった。

C ビルの 2 階においては CO₂ 濃度の中央値は 767ppm と 776ppm と差は見られないが、温度の中央値は No. 1 が 22.9°C、No. 2 が 22.1°C と 0.8K の差が見られ、最高値も 0.7K、最低値も 0.9K の差が見られた。これは比較的外皮に近い No. 2 の温度が低下したことが要因と考えられる。また、相対湿度も温度差が発生したことから差が生じており、相対湿度の最高値は No. 1 が 47%、No. 2 が 53%であった。

D ビルの 1 階においては CO₂ 濃度の中央値は 568ppm と 573ppm と差は見られないが、温度の中央値は No. 1 が 22.0°C、No. 2 が 22.5°C と 0.5K の差が見られた。これは比較的外皮に近い No. 1 の温度が低下したことが要因と考えられる。この傾向は同建物の 4 階においても観測されている。

E ビルの 2 階においては、温度の中央値の差は 0.4K 以内、相対湿度の中央値の差は 1%RH 以内、CO₂ 濃度の中央値の差は 43ppm 以内であり、測定位置による差は見られなかったが、温度の最高値には最大 0.8K、相対湿度の最高値には最大 11%RH の差が生じていた。No. 1 の温度の最高値は 26.7°C であり、3 点の測定位置の内では最高であった。一方、No. 1 の相対湿度の最高値は 60%であり、3 点の測定位置の内では最低であった。これらのことから空調吹出し空気が測定機器に当たる時間帯があり、温度上昇に伴う相対湿度の低下が一要因として考えられる。

F ビルの 2 階においては、温度の中央値は南側に設置した No. 1 が最も高く 24.3°C であり、No. 2 と No. 3 と比較して 0.8K 高い結果であった。一方で、相対湿度の中央値と CO₂ 濃度の中央値には大きな差は見られなかった。

D. まとめ

本章では IoT センサーの建築物衛生管理への利用可能性について検討することを目的とし、(1)複数の IoT センサーの測定値比較、(2)IoT セン

サーと現場立入測定の測定値比較、(3)温湿度・CO₂濃度の平面分布の測定の 3 点を実施した。

(1)複数の IoT センサーの測定値比較では、3 件の建物 (A ビル、D ビル、E ビル) に設置した 4 種の IoT センサー (センサーA、センサーB、センサーC、センサーD) の測定値を比較した。温度については A ビルにおける 11/1～3/31 のセンサーD の温度の中央値が他の IoT センサーと比較して 0.5K 以上低くなっていたものの 4 種のセンサーは多くの時間で 0.5～1.0K の差に留まっており、センサーD を除いた 3 種のセンサーは約 0.5K 以下の差であった。相対湿度については同種のセンサーでも差の大小が見受けられた。具体的にはセンサーB の測定値は他の IoT センサーと比較して A ビルでは約 5%RH、E ビルでは 2%RH 高い結果であった一方で、D ビルでは 10%RH 以上高い結果であった。なお、センサーB を除いた 3 種のセンサーは約 5%RH 以内の範囲の測定値であった。CO₂ 濃度についてはセンサーC の測定値が他の IoT センサーと比較して高い傾向にあった。また、初期 CO₂ 濃度に差異があったと考えられる E ビルにおいて 100ppm 以上の差が見受けられたが、A ビルでは 40～100ppm、D ビルでは 20ppm 以下の差であった。なお、E ビルに設置した 3 種の IoT センサーの差異は 2023 年 2 月よりも 2023 年 3 月の方が小さくなっており、測定機器の自動校正機能によるものと考えられる。

(2) IoT センサーと現場立入測定の測定値比較では、現場立入測定を実施した時刻の瞬時値を比較した。温度については IoT センサーと現場立入測定の結果は 1K 程度の差、相対湿度についてはセンサーB を除くと IoT センサーと現場立入測定の結果は±5%RH 程度の差、CO₂ 濃度についてはセンサーC を除くと IoT センサーと現場立入測定の結果は±100ppm 程度の差であった。

(3)温湿度・CO₂濃度の平面分布の測定では、冬期の温度の平面分布については外皮に近いペリメータゾーンで低くなる傾向が見受けられた。また、相対湿度については多くの建物で平面分布は見られなかったが、測定値は温度に影響さ

れることから温度の平面分布が大きい建物においては相対湿度の測定値にも差が生じる可能性がある。一方で、CO₂濃度については、本研究で測定した5件では平面分布は見られなかった。

以上の結果より、IoTセンサーは現場立入測定の結果と概ね同等の結果が得られていると考えられる。しかし、センサーDの温度が低い、センサーBの相対湿度が高い、センサーCのCO₂濃度が高いといったIoTセンサーによって一部の数値が高く若しくは低く測定されることには留意する必要がある。また、センサーBの相対湿度は他のIoTセンサーと比較して同等となる場合や高く測定される場合があるといった測定機器の個体差があることにも留意する必要がある。さらに、Eビルにおいて観測された初期CO₂濃度の差異といった事項にも留意する必要がある。

また、冬期の温度の平面分布については外皮に近いペリメータゾーンで低くなる傾向が見受けられた。一方、CO₂濃度については本研究で測定した5件では平面分布は見られなかったが、在室人数の平面分布がある建物ではCO₂濃度も平面分布が生じる可能性がある。現行の建築物衛生法に準じた現場立入測定は代表点で測定することとなっており、平面分布を考慮した測定法ではないことから、簡易に設置可能なIoTセンサーは平面分布も測定できるという点で大きな利点となり得る。

なお、本研究では温度、相対湿度、CO₂濃度に着目し、IoTセンサーの建築物衛生管理への利用可能性について検討したが、建築物衛生法で定められる環境衛生管理基準項目には浮遊粉じんの量、CO濃度、気流もあり、これらの連続測定が可能な測定機器の開発も望まれる。今後は国外の事例等も含めて測定機器の調査を行うとともに、6つの建物に設置したIoTセンサーを継続的に設置し、IoTセンサーの建築物衛生管理への利用可能な条件等を明らかにする予定である。特に、Eビルでは初期CO₂濃度の差異があったことから自動校正機能による差の低減にも注視して考察を進める予定である。

E. 参考文献

なし

F. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
なし
3. 著書
なし

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

予定なし

4-2. 小型 PM_{2.5} センサーの特徴調査

A. 研究目的

建築物衛生法においては、建築物衛生管理基準として、粒径 10 μm 以下の浮遊粉じんについて基準値を設けている。現在の特定建築物における浮遊粉じん濃度は、室内における禁煙・分煙、大気汚染の低減化、空調機エアフィルタの性能向上などにより、基準値に比べても十分に低く、不適率についても問題がない状況である。一方大気においては、粒径 2.5 μm 以下の粒子を対象とした微小粒子状物質 (PM_{2.5}) について、粒径の小さな粒子の方が人への健康影響について深刻なことから環境基準を設けている。また、WHO においても、PM_{2.5} 濃度の強化が行われたところであるが、室内における基準及びその他各学会の規準などはないのが現状である。さらに、建築物衛生管理に関する検討会における報告書においても、国際機関における基準値等に関する調査において、PM_{2.5} について今後の検討の必要性について言及している。

そこで、建築物室内 PM_{2.5} 濃度の基準策定を念頭に、室内環境で適用できる測定機器の調査を行った。

B. 研究方法

ディーゼル排ガスなどの微小粒子が健康影響で問題となり、PM_{2.5} については、濃度と健康影響との関係が粗大粒子よりも大きいとの報告から注目された¹⁾。そこで、我が国でも一般大気環境において、その科学的知見を蓄積することを目的に、「微小粒子状物質曝露影響調査研究」が行われた²⁾。これに基づき、1年平均値が 15 μg/m³ であり、かつ、1日平均値が 35 μg/m³ 以下であることとなる、我が国における大気環境の PM_{2.5} の基準値が設定された。

微小粒子の特徴として、呼吸器系の深部まで到達しやすく、粒子表面に様々な有害成分が吸収・吸着されていること等から、この健康影響が懸念されている。表 4-2-1 は、WHO が公表した PM_{2.5}、二酸化硫黄、オゾンなどの大気汚染物質による短期及び長期曝露による健康影響をまとめたものである³⁾。短期曝露による健康影響指標として取り上げられるものとしては、死亡、医療機関への入院・受診、循環器系への

悪影響、呼吸器症状変化などである。長期影響については、心血管系・呼吸器疾患による死亡、喘息、肺がんなどの健康影響が示されている。日死亡と粒子状物質濃度についての知見が多くあり、EPA による北米の調査においては、総死亡の増加率は+0.29~1.21%、心血管疾患死亡は+0.30~1.03%、呼吸器疾患死亡は+1.01~2.2%と推計されている。よって、大気汚染濃度の異なる地域での長期調査の結果により、PM_{2.5} 濃度と全死亡および心肺死亡の相対リスクとの間に有意な正の関連性が認められている⁴⁾。

室内における基準値の制定については、以上のような検討結果と同様に行われることが考えられる。しかし、大気基準のように、1年平均値および1日平均値が建築物衛生に馴染むものではないため、測定のタイミングとともに、測定結果と比較する基準値については、検討する必要がある。

表 4-2-1 PM_{2.5}、二酸化硫黄、オゾンなどの大気汚染物質の健康影響³⁾

短期健康影響
・日死亡(PM と日死亡には正の相関がある)
・呼吸器系、心血管系疾患による入院、救急受診、プライマリケア受診
・呼吸器系、心血管系薬の使用
・活動制限が必要な日数
・会社欠勤、学校欠席
・急性症状(喘鳴、咳嗽、喀痰、呼吸器感染症)
・生理機能変化(呼吸機能など)
長期健康影響
・心血管系、呼吸器疾患による死亡
・慢性呼吸器疾患の発症および罹患(喘息、慢性閉塞性肺疾患等)
・慢性的な生理機能変化
・肺がん
・慢性心血管疾患
・子宮内発育の制限(低体重児出産、子宮内発育遅延等)

C. 調査結果および考察

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²⁾。これによれば、環境大気中に浮遊する粒子状物質のうち空気動力学

表 4-2-2 可搬型 PM_{2.5} 測定機器

	TSI DustTrak Model 8530等	柴田科学 PM2.5デジタル 粉じん計 LD-5R	TSI BlueSky Model 8143	ECOMESURE ECOMZEN	柴田科学 簡易PM2.5モニ ター “Chicco- iino” PS-2型	光明理化学工業 PM2.5テスター
センサー	90° 散乱光	光散乱方式	光散乱シングル 粒子カウント		光散乱方式	レーザー光散乱
カットオフ	2.5 μm	2.5 μm	-	-	-	-
粒径範囲	0.1-10 μm				0.3 μm以上	
粒子濃度範囲	0.001-400 mg/m ³	0.01-100 mg/m ³	0-1000 μg/m ³	0~1,000 μg/m ³	10~600 μg/m ³	0 ~ 1000 μg/m ³
精度		±10%	±10 % @100~1,000 μ g/m ³ ±10 μg/m ³ @0~100 μg/m ³			±15 μg/m ³ (0 ~ 100 μg/m ³), ± 15%(100 ~ 1000 μg/m ³)
分解能	±0.1%	0.01 mg/m ³	1 μg/m ³	1 μg/m ³		
ゼロ安定性	±0.002 mg/m ³		±10μg/m ³			
流量	3.0 L/min	1.7 L/min	0.3 L/min.	-	-	-
寸法	135 x 216 x 224	184 x 68 x 109.5	152 x 140 x 113	200 x 210 x 90	80 x 45 x 88	81 x 40 x 141
重量	2.0 kg	1.1 kg	160 g	1.2 kg	130 g	345 g
通信	USB	USB	Wi-Fi	イーサネット, Wi-Fi	Bluetooth通信	USB

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。フィルタ上に捕集された粒子へのガス状物質の吸着や再揮発など様々な妨害要因や不確定要素を含んでおり、厳密な測定の困難さが指摘されている。また、秤量を行わない相対濃度計として、1 時間ごとの測定が可能なβ線吸収法、光散乱法、圧電天秤法が環境基準を評価する方法として存在する。

室内で測定を行う際には、上述のような大気環境を測定する装置を用いることは、装置の大きさ、騒音、吸引流量の多さなどの理由から、現実的ではない。また、昨今の室内粉じんの低濃度化により、秤量を行うのに可能となるサンプル流量、サンプル時間が多大となり、測定及び評価が困難となる場合がある。

室内において PM_{2.5} を測定する場合には、可搬型の PM_{2.5} 計として、表 4-2-2 に示すような装置を用いることが多い。例えば、TSI

DustTrak については、室内で用いている粉じん計と同様に、光散乱法を用いており、1 分毎の濃度を記録するものである。ただし、粒子の性状によりこの機器が表示する濃度と実際の質量濃度は異なることが知られており、換算係数を乗じて濃度とするのが一般的である。これも、粉じん計と同様の考え方である。

我が国の製品についても、例えば柴田科学社製のデジタル粉じん計 LD-5R の標準採気口に PM_{2.5} 用サイクロン式分粒装置を取り付けることにより、PM_{2.5} 濃度を簡便に計測することはできる。こちらも、換算係数が重要となるので、標準的な方法となる秤量する方法との関係を検討しておかなければならない。

さらに小型の測定機器では、サンプリングにファンを持たないもので、インパクトターなどを用いて粒径 2.5 μm 以上の粒子を取り除かない測定機器が多くあり、同様に光散乱の原理を利用した相対濃度計である。その空間の粒子の性状（粒径分布や組成など）が同様であれば、ある程度の精度を有するものである。なお、いず

れも光散乱を用いているが、光源についても違いがある可能性がある。よって、それぞれの計測機器の検出の特性が異なることが考えられるため、校正が重要になる。また、WHO においては、AQG (Air quality guideline) level⁹⁾として、年平均を $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均を $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を提案しており、この濃度レベルになると可搬型測定器において、精度と校正が課題となるものと考えられる。

D. まとめ

建築物室内 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の基準策定を念頭に、室内環境で適用できる測定機器の把握を行った。測定機器については、測定精度とともに、粉じん計と同様に換算係数の設定が重要であること、 $2.5 \mu\text{m}$ カットを行わない測定機器の扱い、校正の方法などが課題となると考えられる。なお、測定結果はリアルタイムに結果を表示、記録を行うものが多いため、連続測定をしながら、監視を行える利点もあるため、今後検討に値すると思われる。

E. 参考文献

- 1) W.E. Wilson: The U.S. Environmental Protection Agency promulgates new standards for fine particles, 大気汚染学会誌, 33, A67-A76, 1998.
- 2) 環境省 :微小粒子状物質曝露影響調査報告書, 2007
- 3) WHO: Air Quality Guideline Global Update 2005, WHO, Geneva, 2006.
- 4) 武林亨, 朝倉敬子, 山田睦子 : $\text{PM}_{2.5}$ の疫学と健康影響 : 日本人のリスク評価の視点から, 大気環境学会誌, 46(2), 70-76, 2011
- 5) WHO: WHO global air quality guidelines, Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021.11

F. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
なし

3. 著書
なし

- G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定含む)
予定なし