

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

5. 空気環境管理に向けた BEMS データ活用手法の検討

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

**研究要旨**

通常、空調設備の自動制御に使用される BEMS データの計測項目は、建築物環境衛生管理基準の項目と、温度、相対湿度、CO<sub>2</sub>濃度が重複しているが、当該データは空気環境管理に現状活用されていない。そこで、BEMS を導入している 3 棟のオフィスビルを対象にデータ収集を行い、BEMS データの空気環境管理への応用可能性について検討を行った。対象ビルには、2022 年度の暖房期に温度、湿度、CO<sub>2</sub>濃度の連続測定データロガーを設置し、同時期の BEMS データ収集を依頼した。

空間分布に関するデータ分析の結果、①温度は居住域とインテリア壁面設置センサで近い値を取るため、この 2 箇所は空気環境管理に利用できる可能性が高いが、ペリメータ壁面や還気ダクトへの設置センサはゾーニングや空調方式の影響を受ける可能性があること、②相対湿度はセンサの測定精度等の影響で一貫した結果が得られず、空気環境管理への応用に向けたハードルが高いこと、③CO<sub>2</sub>濃度は空間的に大きく離れた還気ダクトに設置されている場合でも居住域と近い値を取り、空気環境管理へ応用の可能性が高いが、センサの校正の影響を大きく受けることが示唆された。

また時系列分析の結果、①温度は朝の暖房立ち上がり時に低く、特に建物を使用していない連休明けに注意が必要であること、②CO<sub>2</sub>濃度は朝から夕方にかけて上昇していく傾向を示し、夕方に 1000 ppm 以下を達成できるかがポイントとなることが示された。

従来の 2 か月以内に 1 回、午前と午後にスポットで測定する環境衛生管理手法では把握できない時刻変動が見えることで、基準を逸脱している場合の原因特定や対策立案が容易になること、基準を逸脱している時間割合という新たな指標で環境を管理できることは、BEMS による空気環境管理の大きな長所と言える。一方で、通常 BEMS データとして測定している項目が温度、相対湿度、CO<sub>2</sub>濃度の 3 項目しかなく、浮遊粉じんや CO 濃度、気流の 3 項目については別途測定を行う必要があるため、人的コストの削減には繋がりがづらく、まだまだ課題である。

研究協力者

原山 和也 アズビル (株)  
橋本 翔 ダイダマン (株)

**5-1 BEMS データ活用の趣旨**

建築物の空気環境管理への Building Energy Management System (BEMS) データの応用可能性の検討にあたって、表 5-1 に示す通り、BEMS の空調関連データとして通常取得しているデータを整理し、建築物環境衛生管理基

準の項目との比較を行った。その結果、温度、相対湿度、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度の 3 項目が重複しているため、このデータを空気環境管理に利用できる可能性について検討していく。

初めに、コンセプトについて説明する。通常 BEMS データは図 5-1 に示す通り、空調設備の自動制御のために使用されている。具体的には①室内の温度に応じてコイルの冷温水バルブや変風量装置を調節し、冷温水流量や風量を調整する、②室内の相対湿度に応じて加湿バルブを開閉し、加湿量を調整する、③室内の CO<sub>2</sub>濃度

に応じてダンパの開閉やファンのインバータを調整し、外気量を調整する、といった制御内容である。常時設置されている環境センサは連続測定をしているため、2 か月以内に1回、午前と午後にスポットで測定をする従来の環境衛生管理手法に比して、時間的なデータ解像度が高いという長所を有する。一方で、室内の壁面や還気ダクト内に設置されるケースも多々あり、その場合居住空間からセンサの設置位置が乖離するという短所もある。これらの長所や短所を踏まえた上で、BEMS センサによる空気環境管理が、従来手法と遜色ない、もしくは従来手法より優れた手段となり得るかを検討することが本章の趣旨である。

## 5-2 調査対象ビルの概要

関東地方に所在し、BEMS を導入している3棟のオフィスビルを対象にデータ収集を行った。表 5-2 に3棟のビルの基本情報を示す。3棟とも、空気調和機 Air Handling Unit (AHU) を基本とした空調方式であった。加湿方式は全て気化式であり、窓は閉状態であった。A, F ビルは OA フロアを利用した床吹出・天井吸込であり、E ビルのみ天井吹出・天井吸込であった。データを温度、相対湿度、CO<sub>2</sub>濃度の3項目と、居住域、壁面(インテリア)、壁面(ペリメータ)、還気ダクトという4つのセンサ設置箇所で見ると、ビルによって測定項目と設置箇所は異なっていたため、それぞれのビルの特徴を活かしながら、以降の検討を行った。暖房期を対象とし、A ビルは1月、E, F ビルは2月のデータを分析した。また勤務時間を考慮し、平日の9~17時(12~13時の昼休憩除く)を分析対象とした。また、居住域に設置した連続測定小型データロガー(T&D社製おんどり TR-76Ui)のデータも比較対象として分析した。各ビルの平面図は2章を参照されたい。

## 5-3 空間分布に関する検討

### (1) A ビル

A ビルでは、2F と 3F の2フロアを測定対象としたが、BEMS センサが居住域と壁面(ペリメータ)の2か所に設置されている2Fを分析対象とした。なお、A ビルにおいてはCO<sub>2</sub>濃度

の BEMS データの取得はなかった。

図 5-2 に、設置箇所別の BEMS センサの温度、比較対象として居住域に設置した連続測定小型データロガー(T&D社製おんどり)の温度を示す。各センサにおいて、温度が15°C程度の低温域まで広範囲にわたっていた。図 5-3 に居住域に設置したデータロガーの温度を y 軸、BEMS センサの温度を x 軸とした場合の散布図を示す。居住域・壁面(ペリメータ)の BEMS センサとも、 $y=x$  のライン上にプロットが集中しており、データロガーと極めて良好な相関関係が確認された。

図 5-4, 5-5 に相対湿度の箱ひげ図と散布図を示すが、相対湿度も良好な対応が確認された。

### (2) E ビル

E ビルの測定対象エリアは、オフィスの中央、北東、南東エリアで AHU のゾーニングがされていたが、そのうち、BEMS センサを居住域と壁面(インテリア)、還気ダクトの3か所に設置している中央エリアを分析対象とした。

図 5-6 に、設置箇所別の BEMS センサの温度と居住域のデータロガーの温度を示す。場所による明確な差は認められず、平均温度は±0.5°Cの範囲内に収まっていた。図 5-7 に散布図を示すが、プロットは $y=x$  近傍に固まっていた。これは E ビルの空調が天井吹出・天井吸込であり、空気が攪拌されて温度ムラがほとんどなかったことが一因と考えられる。

図 5-8, 5-9 に還気ダクトの BEMS センサとデータロガーの相対湿度の箱ひげ図と相関図を示す。温度は同程度であったが、BEMS センサの相対湿度の方が低く、8%RH の平均値の差であった。

図 5-10 に還気ダクトの BEMS センサとデータロガーの CO<sub>2</sub>濃度の箱ひげ図を示す。平均値に約 50 ppm の差が認められた。図 5-11 の相関図を見ると、CO<sub>2</sub>濃度が高い領域において、 $y=x$  から乖離していくプロット群と  $y=x$  上に乗っているプロット群の大きく2つに分かれていた。これは、データロガーの CO<sub>2</sub>濃度自動校正機能が測定期間の途中で働いたことが原因であり、CO<sub>2</sub>センサの校正は空気環境管理の精度に影響する重要な要素であることが示唆された。

### (3) F ビル

F ビルの測定対象エリアは、AHU のゾーニングが北と南エリアに二分されており、ペリメータの負荷処理用にファンコイルユニット Fan Coil Unit (FCU) が別途設置され、ペリメータ壁面に FCU 制御用のセンサが設置されていた。

図 5-12 に、設置箇所別の BEMS センサとデータロガーの温度の箱ひげ図を示す。北・南エリアとも、居住域の BEMS センサとデータロガーは近い値を取った。北エリアの居住域の BEMS センサの温度は平均 23.5°C、データロガーの温度は平均 23.4°C であり、南エリアの BEMS センサは平均 24.4°C、データロガーは 24.2°C であった。一方で、北・南エリアともにその他の設置箇所では温度が大きく異なり、居住域、壁面 (ペリメータ)、還気ダクトの順に平均温度が低くなっていった。居住域と壁面 (ペリメータ) に設置された BEMS センサの平均温度の差は、冬の寒冷な屋外の影響を受けたものと考えられる。A ビルでも壁面 (ペリメータ) に BEMS センサが設置されていながら、同様の差が認められなかったのは、F ビルでは FCU によってペリメータ負荷処理を行っており空調ゾーンが分かっていたものの、A ビルでは AHU のみで空調ゾーンが形成されていたことが一因と推察される。居住域より還気ダクトに設置された BEMS センサの平均温度が 2°C 低かったのは、F ビルは天井チャンバを介して還気が AHU に戻る構成となっており、暖房している室内と暖房していない天井裏の空気が混合したためと考えられる。E ビルも天井チャンバ方式であったものの同様の温度差がなかったのは、F ビルよりも築年数が浅く断熱性能が高かったため、天井裏の温度が比較的高く保たれていたものと推測される。

図 5-13 に居住域に設置したデータロガーと BEMS センサの温度の散布図を示す。居住域の BEMS センサとデータロガーは  $y=x$  の線上にプロットが位置し、良好な対応を示しているが、壁面 (ペリメータ) や還気ダクトのプロットは、傾きは 1 に近いが、 $y=x$  から平行移動しているような分布であった。事前測定等で切片の補正係数を把握しておくことで居住域の温度を推定できる可能性はあるが、上記 2 箇所の測定値をそのまま活用することは難しいことが示された。

図 5-14 に居住域の BEMS センサとデータロガーの相対湿度の箱ひげ図、図 5-15 に散布図を示す。温度は 2 つのセンサでほぼ同等であったにもかかわらず、相対湿度には 5~6% の差異が認められ、データのバラツキが大きい結果であった。BEMS センサとデータロガーは、空間的には近い場所 (どちらも居住域) に設置したため、センサ種別や個体による差が表れたものと考えられる。今回の 3 ビルの測定では、相対湿度について一貫した結果は得られなかった。

図 5-16, 5-17 に、還気ダクトの BEMS センサと居住域のデータロガーの CO<sub>2</sub> 濃度の箱ひげ図と散布図を示す。空間的には大きな距離があったものの、データのバラツキ含めて非常に良い対応関係が見られた。これは CO<sub>2</sub> の拡散のしやすさ等によるものと考えられる。

## 5-4 時刻変動に関する検討

### (1) A ビル

図 5-18, 5-19 に、居住域の BEMS センサによって取得した、1 月の平日の日ごとの温度と相対湿度の時刻変動を示す (9~17 時の勤務時間中)。温度は 18°C を下回る時間帯があり、これは 1/10 (火、3 連休の翌日)、1/16 (月)、1/23 (月) という連休明けの空調立ち上がり時間帯であった。このような結果は、午前と午後にスポットで測定をする従来の環境衛生管理手法では明らかにすることが難しいものであり、BEMS センサ活用の長所と言える。相対湿度は 40% を下回る時間も見られ、逸脱時間割合 (= 基準を逸脱している時間 / 総測定時間) は、81.4% と高い割合であった。このような逸脱時間割合といった指標に基づいて建築物の空気環境管理ができる点も BEMS センサ活用の別の長所である。

### (2) E ビル

図 5-20, 5-21, 5-22 に、BEMS センサによって取得した温度、相対湿度、CO<sub>2</sub> 濃度の時刻変動を示す。温度と相対湿度は一日を通して安定していたが、後者は基準範囲下限である 40% を下回る時間も見られた。逸脱時間割合は、36.4% であった。E ビルは還気ダクトに BEMS 湿度センサが設置されており、図 5-8 で居住域のデータロガーの相対湿度は基準範囲に収まってい

ることを踏まえると、基準の逸脱はセンサ種別や個体差に加え、設置箇所の影響を受けたものと考えられる。CO<sub>2</sub>濃度は夕方にかけて徐々に上昇する挙動を示したが、環境基準は逸脱しなかった。

### (3) F ビル

図 5-23 に、BEMS センサによって取得した温度の時刻変動を示す。朝の空調立ち上がり時に温度が上昇する挙動が確認されたものの、空気環境の基準である 18~28℃を逸脱する時間はなかった。図 5-24 には相対湿度の時刻変動を示すが、相対湿度についても 40~70%の基準範囲を逸脱しなかった。図 5-25 に CO<sub>2</sub>濃度の時刻変動を示す。朝から夕方にかけて緩やかに上昇をするものの、E ビルと同様に 1000 ppm 以下の基準範囲を逸脱することはなかった。

## 5-5 BEMS データ活用の可能性

本章では暖房期の実物件データ分析を通じ、建築物の空気環境管理に対する BEMS データ（温度・相対湿度・CO<sub>2</sub>濃度）の応用可能性を検討した。その結果、以下の成果が得られた。

1) 温度は居住域とインテリア壁面設置センサでは近い値を取るため、空気環境管理に利用できる可能性が高い。ただし窓際の FCU など、ペリメータの熱負荷処理用に居住域と空調ゾーニングが別となっている場合のペリメータ壁面センサや、天井チャンバ方式で天井内の空気と居住域の空気が混合する場合の還気ダクトセンサは、居住域と温度が乖離する可能性があるため注意が必要である。

2) 相対湿度は 3 ビルの BEMS データから一貫した結果が得られず、センサ個体に依存している可能性が示された。現在、空気環境の管理に使用されている測定セットの湿度センサの精度は±2.0% (2~80%RH) のものもあるが、例えば C ビルに設置されていた BEMS センサの測定精度は±5% (20~80%RH、15~35℃) と誤差範囲が広いため、値がずれる要因と考えられる。

3) CO<sub>2</sub>濃度は、空間的に大きく離れた還気ダクトに設置されている場合でも、居住域と近い値を取った。これは CO<sub>2</sub>等のガス状物質の拡散のしやすさによるものと考えられ、BEMS センサ

を空気環境管理へ活用できる可能性があると言える。ただし、CO<sub>2</sub>濃度センサに搭載されている自動校正機能（一定期間中に計測された CO<sub>2</sub>濃度の最も低い値を大気中の CO<sub>2</sub>濃度であるとみなして、段階的に補正する機能）によっては値が大きくなる可能性があるため、予め校正の方法を明確にしておく必要がある。

4) 時系列分析の結果、温度は朝の空調立ち上がり時に低くなっており、特に建物を使用していない連休明けに注意が必要である。相対湿度は一日を通して安定しており、今回の測定で時刻別の特徴は認められなかった。温度は朝に注意が必要であった一方で、CO<sub>2</sub>濃度は夕方にかけて上昇していくトレンドを示し、夕方に 1000 ppm 以下を達成できるかがポイントと考えられる。

以上のような BEMS データの分析を通して、①従来の午前午後のスポット測定では把握できなかった時刻変動が見え、基準を逸脱している場合の原因特定や対策立案が容易になること、②逸脱時間割合という新たな指標で環境を管理できることは、BEMS センサによる空気環境管理の大きな長所と言える。一方で、①通常の BEMS データとして測定している項目が温度、相対湿度、CO<sub>2</sub>濃度の 3 項目しかなく、浮遊粉じんや一酸化炭素 (CO)、気流の 3 項目については別途測定を行う必要があり、人的コストの削減には繋がらないこと、②ペリメータ壁面や還気ダクトにセンサを設置する場合は、ゾーニングや空調方式等、様々な制約を受けること、③湿度センサの個体差や測定精度の幅が大きいこと、④CO<sub>2</sub>濃度はセンサの校正方法の影響を大きく受けることなど、まだまだ課題も多いことが示唆された。来年度は別のオフィスビルや暖房期以外のデータを拡充し、データ活用の可能性について検討を深める予定である。

## 参考文献

1) 千葉 孝男、空調システムの自動制御、オーム社、2004.11、pp.153-174.

## 研究発表

無し

知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

予定なし

表 5-1 BEMS の空調関連の一般的な監視・制御項目 1)

対象設備		監視・制御項目
ボイラ系	ボイラ	運転・停止・故障、バーナ燃焼状態、温水温度、蒸気圧力、蒸気流量、煙濃度、地震感知器
	燃料	油ポンプ、油タンク油面、油用緊急遮断弁、ガス圧、燃料消費量
	ポンプ	温水ポンプ、給水ポンプ、真空給水ポンプ
	給水	補給水量
冷凍機系	遠心冷凍機	運転・停止・故障、冷水温度（入口/出口）、冷水量、冷却水量、電力等
	吸収冷凍機	運転・停止・故障、吸収剤結晶、冷水温度（入口/出口）、冷水量、冷却水量、蒸気圧力、流量、温水温度（入口/出口）、温水量
	直焚き 冷温水発生機	運転・停止・故障、吸収剤結晶、異常燃焼、冷温水温度（入口/出口）、冷水量、冷却水量、ガス圧力・流量、燃料油量、油ポンプ、油タンク油面、油用緊急遮断弁
	冷水ポンプ	運転・停止・故障、電力量、冷却水温度（入口/出口）
冷却塔	冷却塔	送風機運転・停止・故障、電力量、冷却水温調節弁開度、水質調整装置
	冷却水ポンプ	運転・停止・故障、電力量、冷却水温度（入口/出口）
蓄熱槽	水蓄熱槽	水温、水位
	氷蓄熱槽	冷凍機の運転・停止・故障、電力量、運転時間、水温、氷量
空気調和機系	主送風機	運転・停止・故障
	エアフィルタ	差圧、巻き取り、故障
	外気取入れ 送風機	運転・停止・故障
	還気送風機	運転・停止・故障
	排気送風機	運転・停止・故障
	全熱交換器	運転・停止・故障
ファンコイル ユニット	運転・停止・故障、電源	
ビルマルチ	運転・停止・故障、電源、電力量	
パッケージ エアコン	運転・停止・故障、電源、電力量	
換気用 送風機	便所排気	運転・停止・故障、電源、電力量
	厨房給排気	運転・停止・故障、電源、電力量
	機械室給排気	運転・停止・故障、電源、電力量
	ボイラ室給排気	運転・停止・故障、電源、電力量
	電気室給排気	運転・停止・故障、電源、電力量
	発電機室給排気	運転・停止・故障、電源、電力量
環境計測	外気	乾球温度、湿球温度、相対湿度、比エンタルピー
	室内空気	乾球温度、湿球温度、相対湿度、比エンタルピー、二酸化炭素濃度
	空調用給気	乾球温度、露点温度、比エンタルピー

表 5-2 データ収集したオフィスビルの基本情報

ID	所在地	空調方式	加湿方式	吹出	吸込	窓	データ収集期間
A	埼玉県三芳町	AHU+水冷 PAC	気化式	床	天井	閉	2022/11~2023/1
E	神奈川県藤沢市	AHU	気化式	天井	天井	閉	2023/2 中旬~
F	神奈川県藤沢市	AHU+窓際 FCU	気化式	床	天井	閉	2023/2 中旬~

※ AHU (Air Handling Unit) : 空気調和機、FCU (Fan Coil Unit) : ファンコイルユニット  
 PAC (Package Air Conditioner) : パッケージエアコン

表 5-3 各ビルで収集した BEMS データ項目とセンサの設置箇所

ID	温度				相対湿度				CO <sub>2</sub> 濃度			
	居住域	壁面		還気ダクト	居住域	壁面		還気ダクト	居住域	壁面		還気ダクト
		I	P			I	P			I	P	
A	○	—	○	—	○	—	○	—	—	—	—	—
E	○	○	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○
F	○	—	○	○	○	—	—	—	—	—	—	○

※ I : インテリア、P : ペリメータ

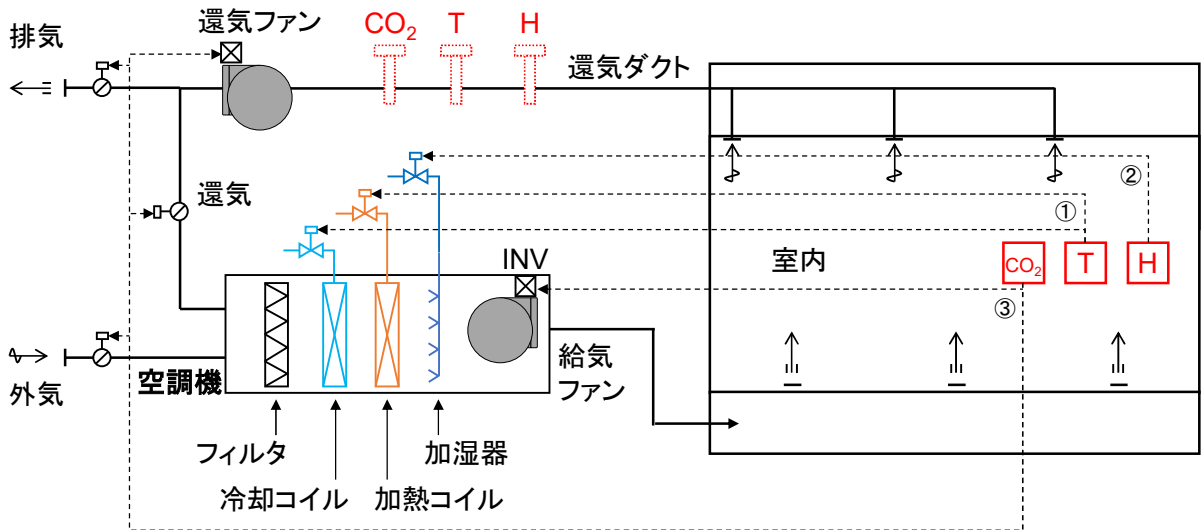


図 5-1 通常の BEMS データの使用状況 (T: 温度センサ、H: 湿度センサ)

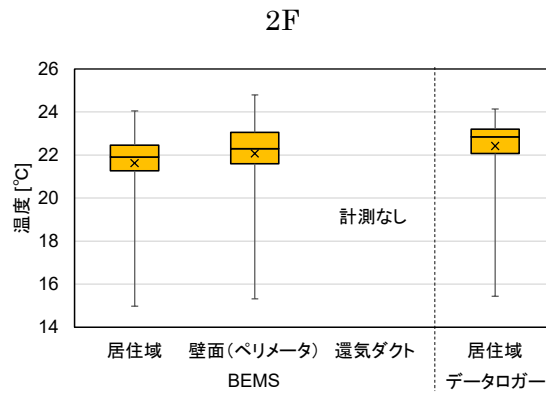


図 5-2 A ビルの BEMS センサ (設置箇所別) とデータロガーの温度比較

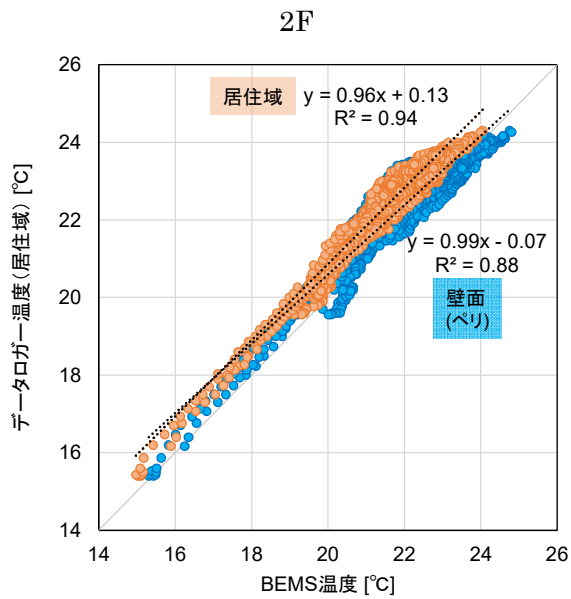


図 5-3 A ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の温度散布図

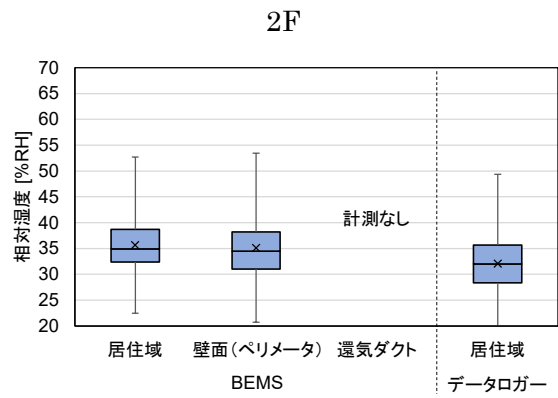


図 5-4 A ビルの BEMS センサ（設置箇所別）とデータロガーの相対湿度比較

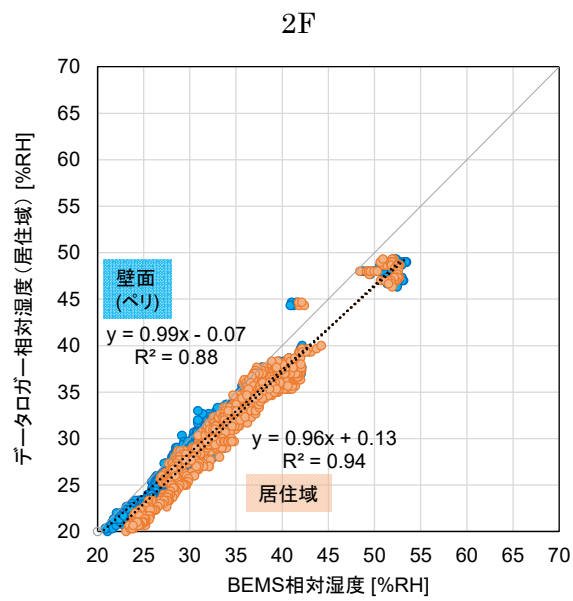


図 5-5 A ビルの BEMS センサ（横軸）とデータロガー（縦軸）の相対湿度散布図



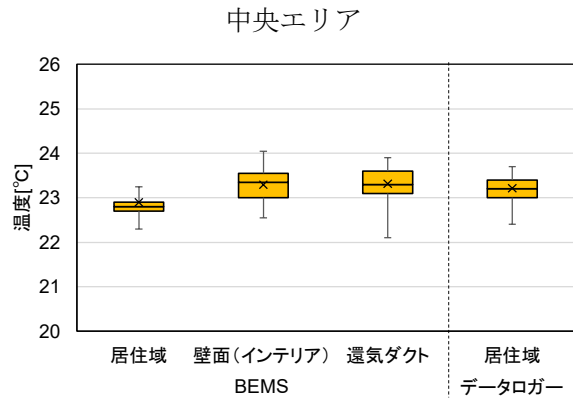


図 5-6 E ビルの BEMS センサ (設置箇所別) とデータロガーの温度比較

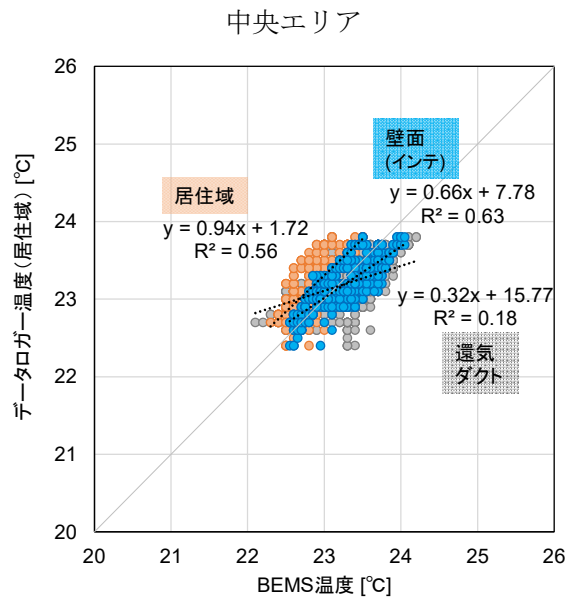


図 5-7 E ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の温度散布図

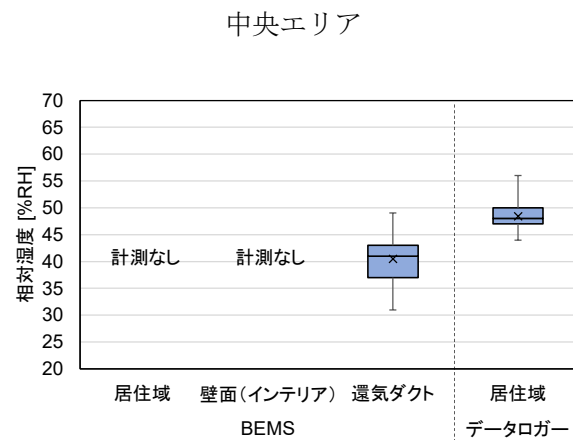


図 5-8 E ビルの BEMS センサ (設置箇所別) とデータロガーの相対湿度比較

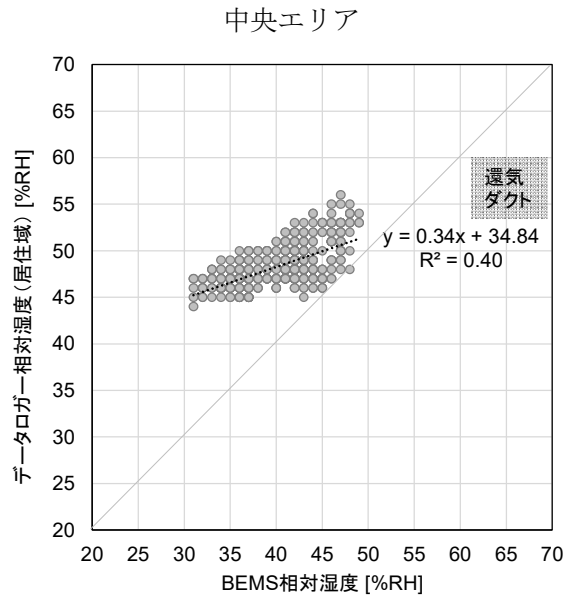


図 5-9 E ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の相対湿度散布図  
中央エリア

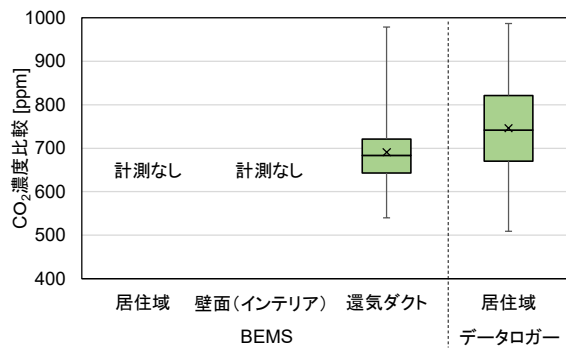


図 5-10 E ビルの BEMS センサ (設置箇所別) とデータロガーの CO<sub>2</sub> 濃度比較

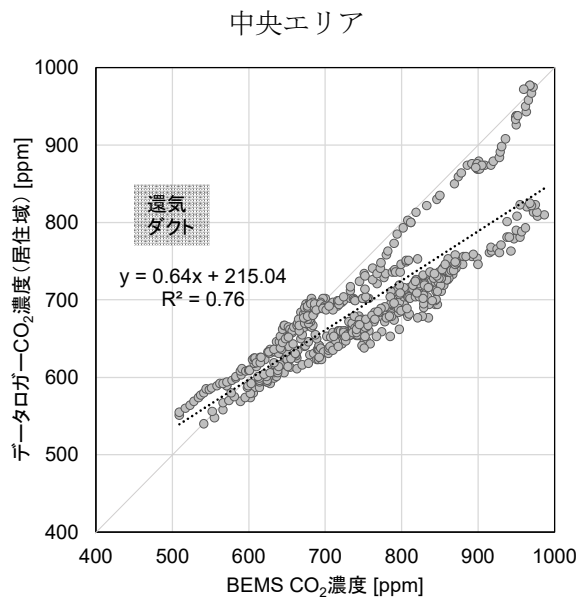


図 5-11 E ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の CO<sub>2</sub> 濃度散布図

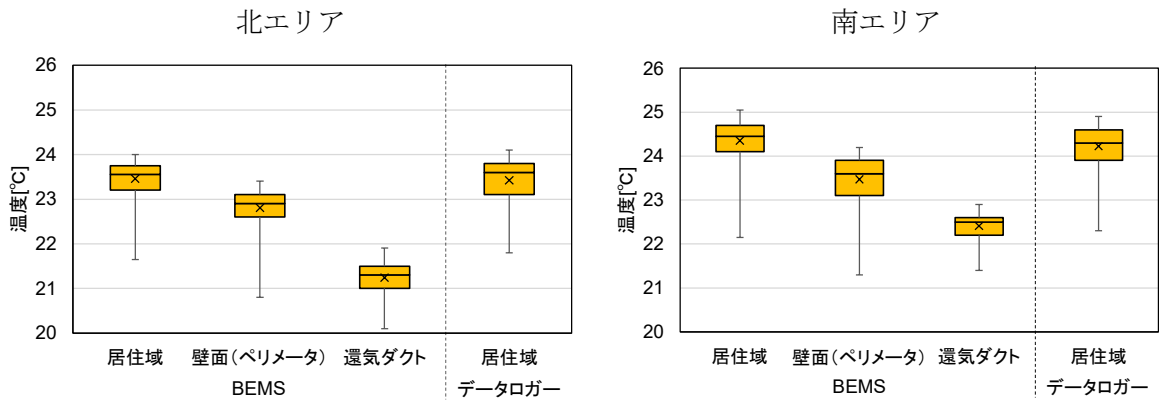


図 5-12 F ビルの BEMS センサ（設置箇所別）とデータロガーの温度比較

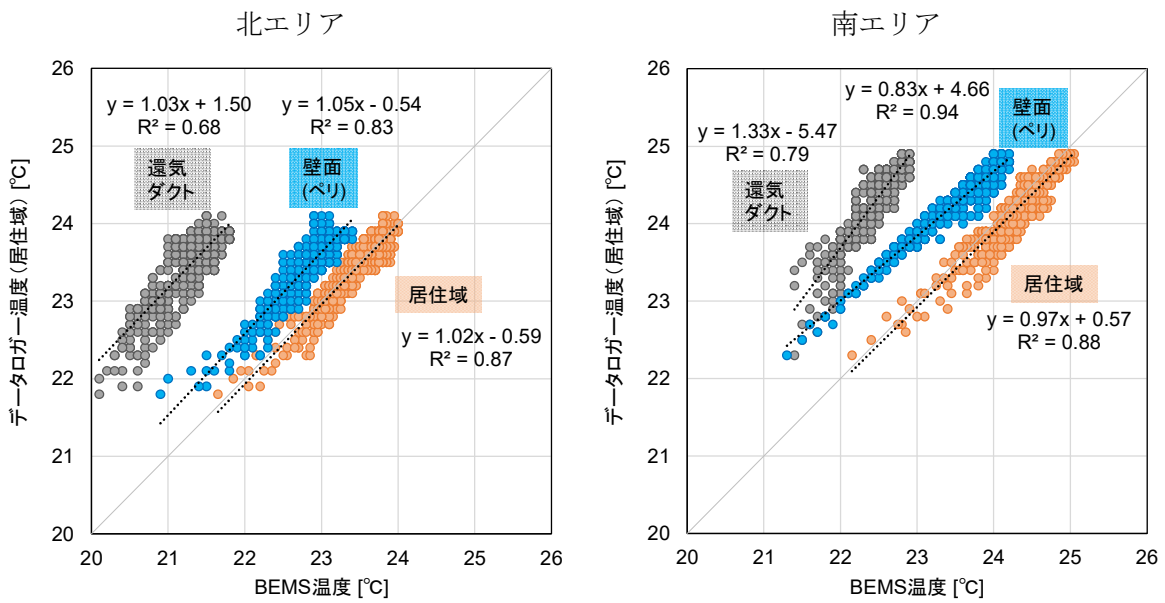


図 5-13 F ビルの BEMS センサ（横軸）とデータロガー（縦軸）の温度散布図

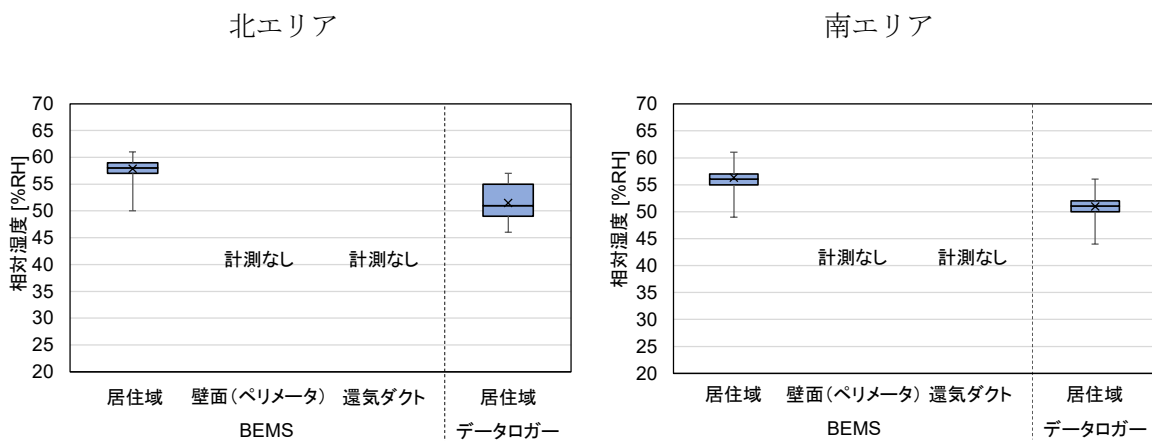


図 5-14 F ビルの BEMS センサ（設置箇所別）とデータロガーの相対湿度比較

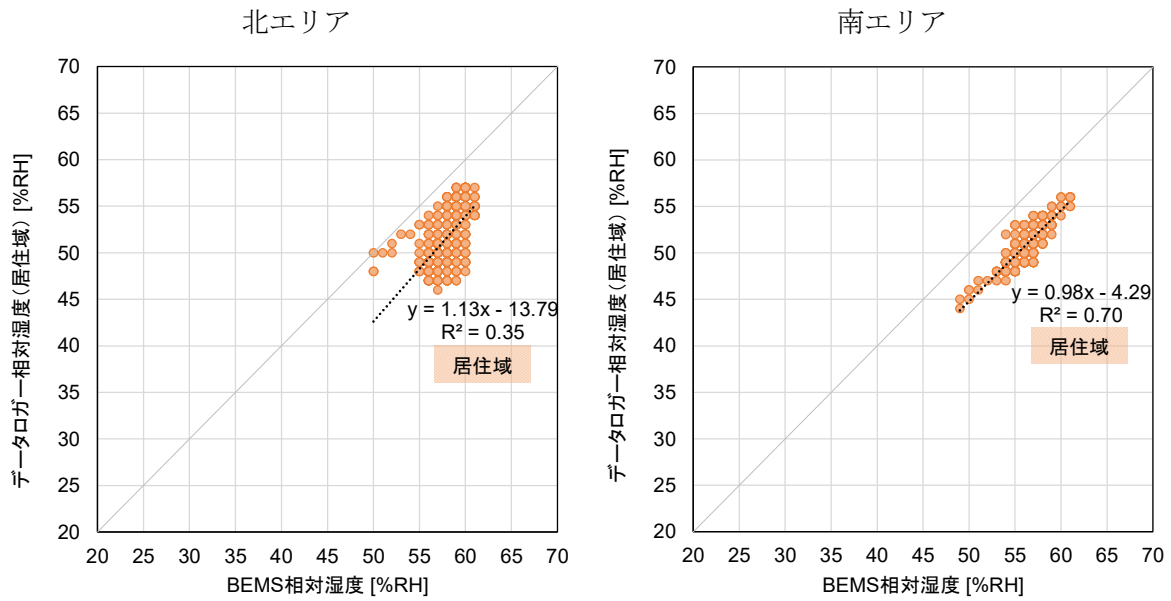


図 5-15 F ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の相対湿度散布図

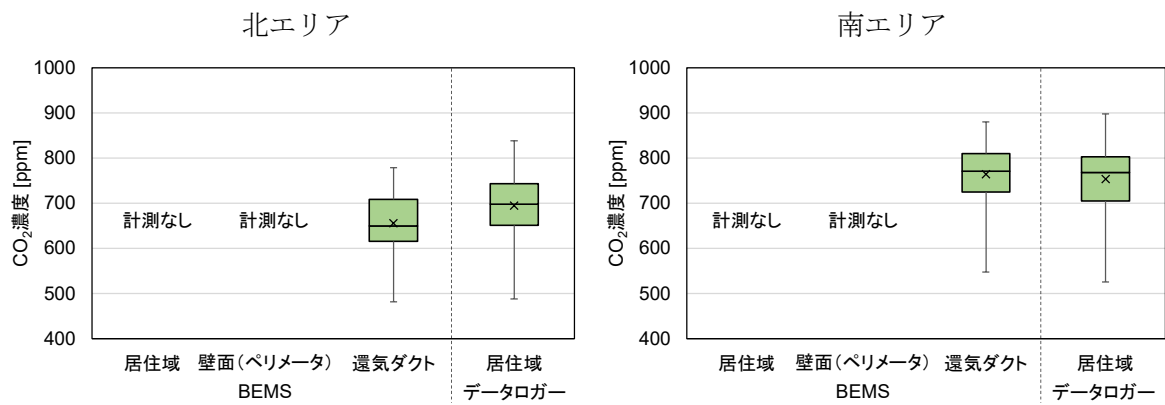


図 5-16 F ビルの BEMS センサ (設置箇所別) とデータロガーの CO<sub>2</sub> 濃度比較

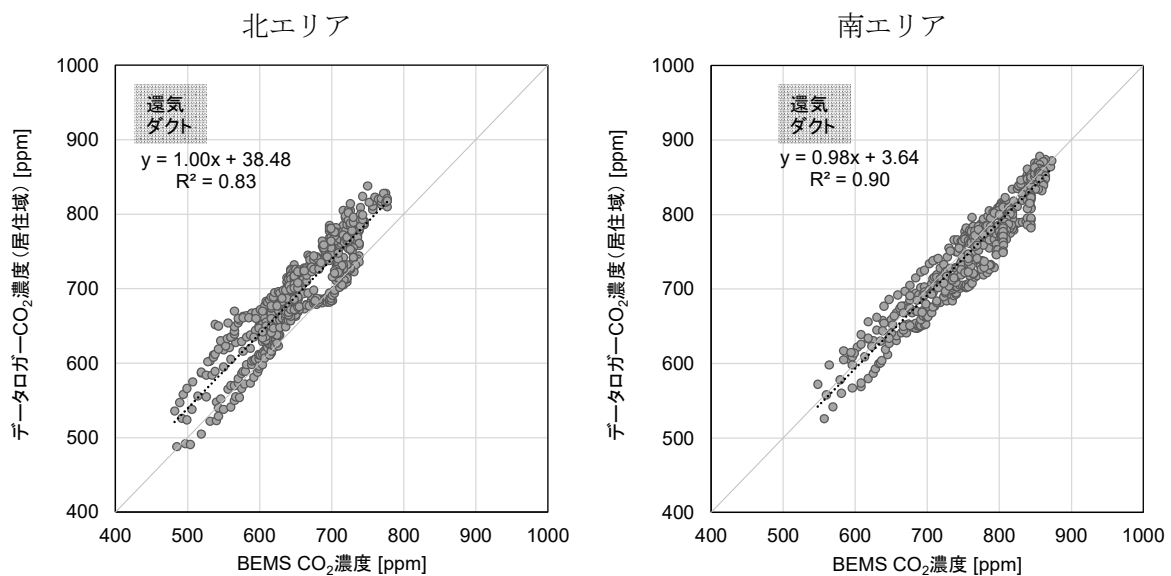
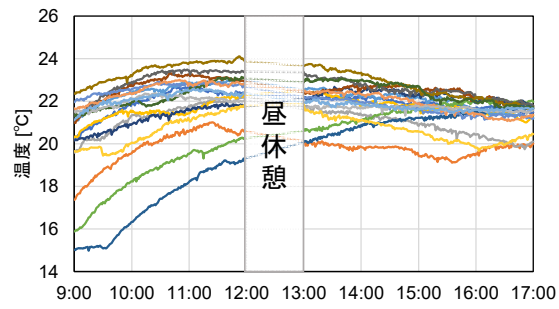


図 5-17 F ビルの BEMS センサ (横軸) とデータロガー (縦軸) の CO<sub>2</sub> 濃度散布図

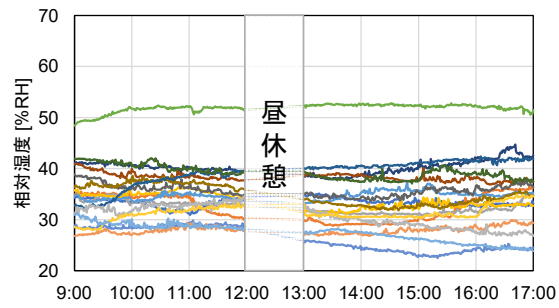
2F



— 1月6日 — 1月10日 — 1月11日 — 1月12日 — 1月13日 — 1月16日 — 1月17日 — 1月18日 — 1月19日  
— 1月20日 — 1月23日 — 1月24日 — 1月25日 — 1月26日 — 1月27日 — 1月30日 — 1月31日

図 5-18 A ビルの BEMS センサ (居住域) の温度時刻変動

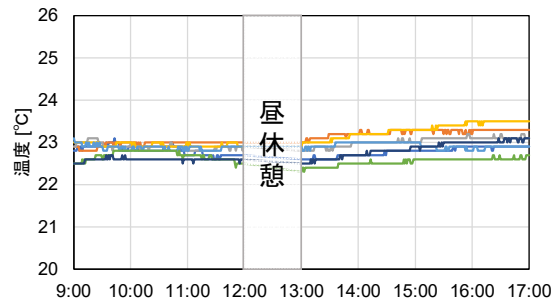
2F



— 1月6日 — 1月10日 — 1月11日 — 1月12日 — 1月13日 — 1月16日 — 1月17日 — 1月18日 — 1月19日  
— 1月20日 — 1月23日 — 1月24日 — 1月25日 — 1月26日 — 1月27日 — 1月30日 — 1月31日

図 5-19 A ビルの BEMS センサ (居住域) の相対湿度時刻変動

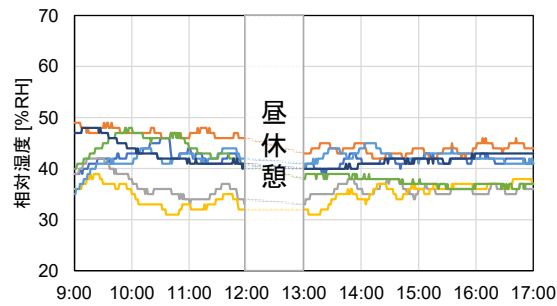
中央エリア



— 2月17日 — 2月20日 — 2月21日 — 2月22日 — 2月24日 — 2月27日 — 2月28日

図 5-20 E ビルの BEMS センサ (居住域) の温度時刻変動

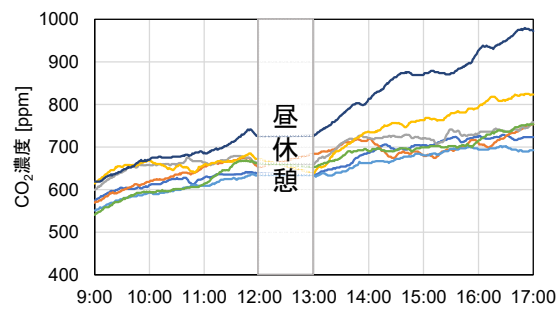
中央エリア



— 2月17日 — 2月20日 — 2月21日 — 2月22日 — 2月24日 — 2月27日 — 2月28日

図 5-21 E ビルの BEMS センサ (還気ダクト) の相対湿度時刻変動

中央エリア



— 2月17日 — 2月20日 — 2月21日 — 2月22日 — 2月24日 — 2月27日 — 2月28日

図 5-22 E ビルの BEMS センサ (還気ダクト) の CO<sub>2</sub> 濃度時刻変動

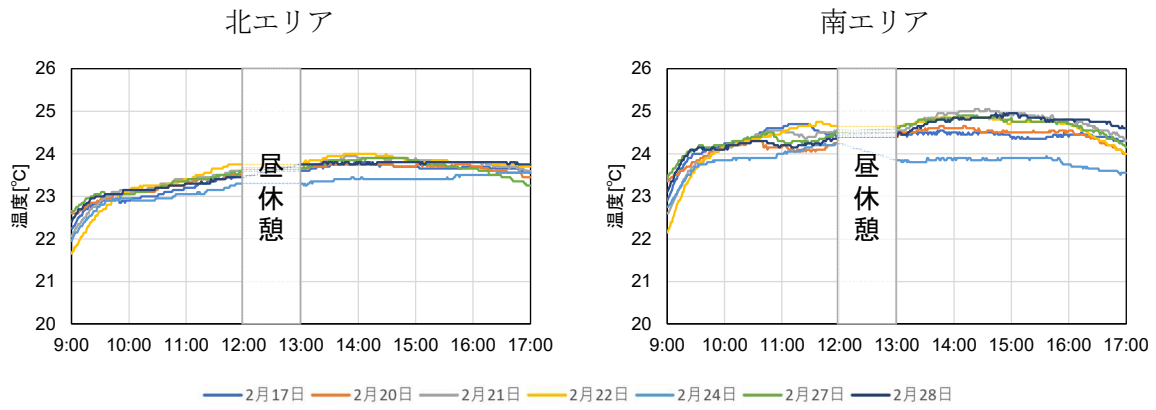


図 5-23 F ビルの BEMS センサ (居住域) の温度時刻変動

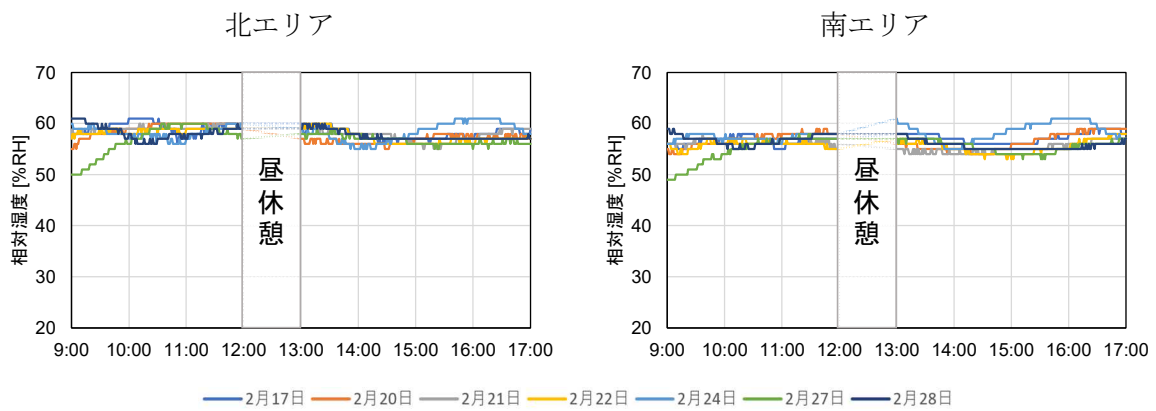


図 5-24 F ビルの BEMS センサ (居住域) の相対湿度時刻変動

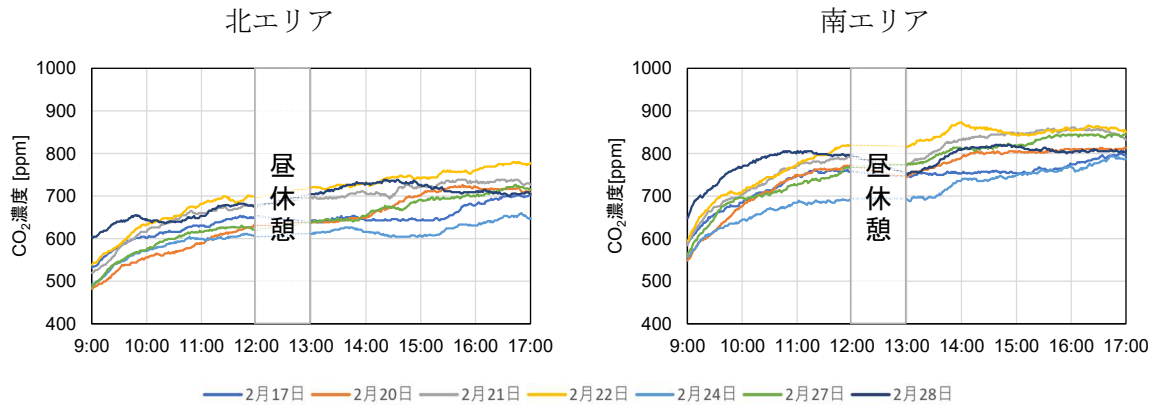


図 5-25 F ビルの BEMS センサ (還気ダクト) の CO<sub>2</sub> 濃度時刻変動