

【研究ノート】

CO2 モニタリングに基づく 感染リスク認識支援システムの 構築と運用

爰川知宏・武本充治

Building and Operation of Risk Awareness Support System based on CO2 Monitoring

Tomohiro Kokogawa and Michiharu Takemoto

Abstract : As part of efforts to realize a "Resilient Campus" where the professional university can flexibly respond to various threats, a system for situation awareness of COVID-19 infection risk has been established. CO2 sensors have been installed in major classrooms at the university to create a centralized monitoring environment for the entire university, and the system is now in operation. This paper reports on the series of activities.

Keywords : resilience, situation awareness, risk awareness, co2

1. はじめに

COVID-19 の蔓延は長期化し、社会活動に様々な影響を与えている。学校教育においては、オンライン教育、ハイブリッド教育に関する知見・ノウハウの蓄積により、多様な学習形態への適応という効果も生み出されたものの、対面授業においては相変わらず感染リスクとの隣り合わせで制約の多い状況が続いている。

本学が属する専門職大学を対象とし、専門職大学自身が様々な脅威に対してもしなやかに対応できる環境（ICT システムおよびマネジメント）を構築し、それに基づく授業スケジュールリングや緊急時対応を行うことで、サステイナブルかつ効果的な人材教育をめざした概念を Resilient Campus と名付け、全体の状況認識を行える ICT プラットフォーム（Resilient Campus Platform）を構築する試みを進めてきた [1]。その取り組みの一つとして、COVID-19 感染リスクの状況認識を目指して主要な教室、会議室に二酸化炭素（CO2）センサを取り付け、全学的に集中モニタリングできる環境を構築し、運用を進めている。本稿ではその一連の活動について報告する。

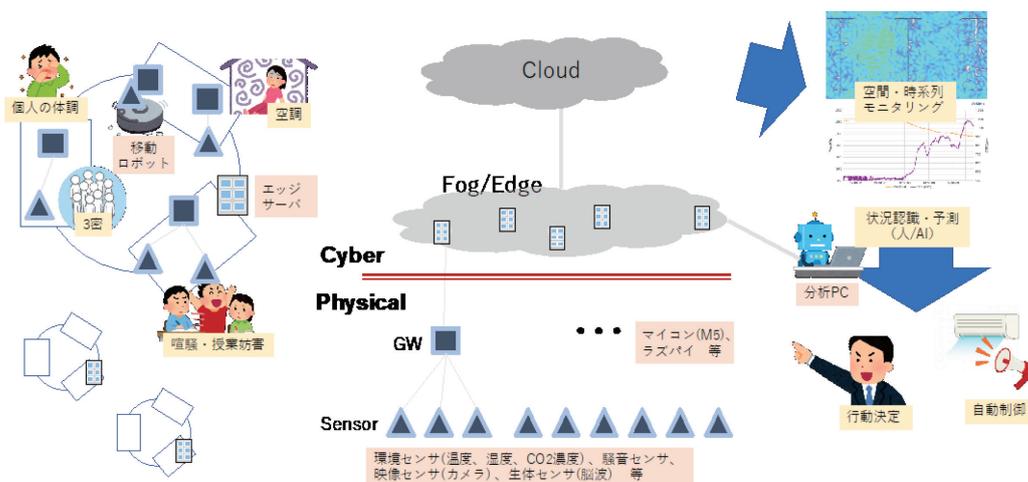


図1 Resilience Campus Platform の構想概要 ([1]より引用)

2. 課題設定

これまでではCO₂濃度と換気の関係性を明らかにするとともに、CO₂測定ノードの試作およびイベント(試験等)での活用、簡易な可視化方法について検討してきた[1]。その上で、実際のイベント(入学試験、定期試験)にCO₂測定ノードを持ち込んで感染リスクの可視化効果を確認した[2][3]。こうした仕組みを全学的に展開し、常設のサービスとして運用することを検討する上での課題として以下が挙げられる。

(1) キャンパスが高層複合ビル内にあること

本学キャンパスは50階建ての高層ビル内にあり、かつ同じビル内に複数の教育機関(専門学校、大学)が混在している。ビル内の監視や空調管理は防災センターが一元的に行っており、状態確認や設定変更は入居する各教育機関が個別に調整する必要がある。そのため、個々の授業においては、担当教員がその場で状況を確認できることはもちろんのこと、防災センターとの調整は、教員がバラバラに連絡を入れるのではなく、機関(大学)として総合的に行える必要があり、そのためには他の教室も含めた全体状況を容易に把握できる必要がある。

(2) 小規模な教室が数多くあること

専門職大学の特性として、1クラス40人以下での授業が基本となっている。そのため、人数規模に対して多くの教室を使用する必要性が生じている。本学は1学年あたりの学生数が200名程度の小規模な大学ではあるが、40人単位の授業が基本となっていることもあり、主たる教室だけでも大小合わせて20箇所以上にわたる。さらにはそれらが複数のフロアに分散している。監視対象が多くなることで、センサノード等の設置コストや、それらを常設運用する際の運用・メンテナンスに関する稼働・コストの増大が懸念される。

上記課題を踏まえて、本検討においては以下を目指してシステム構築と運用を行うこととした。

(1) 使用する教室のほぼ全てにセンサノードを安価かつ低メンテナンスコストで設置する

(2) 個々の教室での状況確認と全体俯瞰を両立させる

3. センサノード

制御用ノードは M5StickC Plus を用いた。これはマイコンチップに ESP32 を用いた安価な開発用ボードであり、小型の液晶画面（LCD）と Wi-Fi 通信機能を持つ。LCD を介して教室にいる教員や学生がその場で現在状況を確認できるとともに、Wi-Fi を介して外部のサーバにデータを送信することができる。また、複数のボタンが備えられており、簡易なセルフメンテナンスの機能を持たせることができる。

センサデバイスは比較的容易に入手でき、開発ライブラリが充実したものを比較検討した結果、SCD30 を採用した。同じ NDIR（非分散型赤外線）方式を採用し、より安価な MH-Z19C も候補であったが、校正機能が使いづらいことと、電源条件が厳しく動作が不安定になりがちであったため、採用を見送った。

なお、運用開始後に SCD30 よりも安価な SCD40 が流通し始めた。SCD40 は NDIR ではなく、光音響センシング方式を採用しているが、教室内の測定レベルでは精度的には問題はなく、運用性も SCD30 と同等であることが確認できたため、今後のノード追加に際しては SCD40 に順次切り替える予定である。

表 1 CO2 センサデバイスの比較

	SCD30	SCD40	MH-Z19C
製造元	Sensirion	Sensirion	Winsen
実売価格	9,000 円程度	7,000 円程度	2,500 円程度
方式	NDIR	光音響センシング	NDIR
測定範囲	400 - 10,000ppm	400 - 2,000ppm	400 - 5,000ppm
測定対象	CO2/ 温度 / 湿度	CO2/ 温度 / 湿度	CO2/ 内部温度
通信方式	I2C	I2C	UART
動作電圧	2.4-5.5V	2.4-5.5V	5V ± 0.1V
手動校正	任意設定可	任意設定可	400ppm のみ

センサの設置場所については、視認性が高く、電源確保が容易な場所として、教室入口のドア付近を基本とした（図 2 左）。高層ビル内の教室であり、廊下も含めて閉鎖的な空間であることから、ドアの開閉による CO2 濃度の増減はあまり大きくないと考えられる。

データの測定は 5 秒おきに行い、その結果を M5StickC の LCD に数値で表示することとした。SCD30（および SCD40）は温度、湿度も同時に測定できることから、その値も合わせて表示している。また、値に応じて文字色を変えることで視認性を上げている。

初期の研究 [1] でも示した通り、換気の可視化という観点では、CO2 濃度の現在値よりも増減の方が重要な情報である。そのため、CO2 濃度の増減をグラフとして表示することとした。具体的には、LCD ライブラリのスプライト機能を活用し、測定した CO2 濃度

をグラフの縦軸に変換して右端にプロットし、次の更新周期に1ドット左に画面をシフトさせることでグラフ描画を実現している。M5StickC PlusのLCDは135×240ドットであり、横向きにして半分の幅(120ドット分)をグラフ用スプライトとして確保することで、更新周期を30秒で計1時間分の増減をLCD上にグラフ表示できる。

また、センサノードの個体識別のために、制御ノードのチップ(ESP32)が内蔵するWi-FiモジュールのMACアドレスから下位2バイト(16進数4桁)を取り出して個体識別番号とし、画面上部に常時表示することとした。この表示はWi-Fiの接続状況の確認も兼ねており、Wi-Fi接続時は白文字、Wi-Fiが切れている時は赤文字で表示している。全体の表示画面を図2右に示す。



図2 センサノードの外観

4. データ収集

無料もしくは安価なデータ収集環境を目指し、IoTクラウドサービスである Ambient[4]を利用する。このサービスはAPIが充実しており、センサからのデータを送信するだけで簡単に時系列グラフ化などができる特徴があるが、1契約あたりのチャンネル数(8個)、1チャンネルあたりのデータ項目(8個)、1日当たりの送信数(3,000回)、送信インターバル(5秒以上)と制約が大きく、スケーラブルな運用は困難である。一方で学内LAN環境にオンプレミスに収集サーバを構築するとこれらの制約はなくなるものの、セキュリティ的な制約から、(学外やスマホ等からの)インターネットを介した状況確認はできなくなる。学内収集サーバはまだ実験段階で運用の中断や仕様変更の可能性が大きい一方で、継続的な運用による学内モニタリングを行う観点から、現段階においては一方に集約することはせず、センサノードから Ambient と学内収集サーバの双方へ独立にデータを送信する仕様とした。

4.1 学内収集サーバへの送信

学内に構築した収集サーバに対して、MQTT で測定データの全てを 30 秒間隔で送信する仕様とした。最低限の要件は、CO2 データが送信できることと、送信元センサノードの個体識別ができることであるが、送信データの種類の柔軟性を持たせるために JSON 形式でデータを送信することとした。データ形式の例を以下に示す。

```
{'sensor': 'ABCD', 'temperature': 20.5, 'humidity': 35.4, 'co2': 567, 'loudness': 1230, 'move': false }
```

上記において、sensor はセンサノードの個体識別番号を示している。temperature、humidity、co2 はそれぞれ CO2 センサ (SCD30) から取得した温度、湿度、CO2 濃度を示している。loudness、move は制御ノード (M5StickC Plus) の内蔵センサから取得したデータであり、loudness は内蔵マイクで拾った音量、move は加速度センサが検知した動きの有無を、CO2 センサからのデータと合わせて送信している。このように CO2 濃度以外の情報も送信データに任意に追加することができるため、センサノード毎に異なる種類のデータを送信させたり、収集サーバ側でも必要な種類のデータを取捨選択して処理を行ったり、といった柔軟な機能追加や運用が可能となる。

4.2 Ambient への送信

クラウドサービス (Ambient) の制約条件の下で多ノードの運用を行うため、以下の方針で対応した。

- (1) CO2 濃度の処理に特化し、他のデータ (温度、湿度など) の収集は行わない
- (2) 1つのチャンネルにできるだけ多くのセンサノードを収容する
- (3) 増減把握の観点から、送信間隔をなるべく短くする

1チャンネルあたりのデータ項目数が8個なので、最大で8台のセンサノードを収容可能である。一方で送信データ数が1日あたり3,000回という制約がある。授業や業務を行っていない夜間は測定の必要性が低いことから、夜間のデータ送信を停止してその分を昼間のデータ送信に回すことで送信間隔を短くした。運用上のバランスから最終的には

- ・データ送信時間を朝7時から夜23時まで(16時間)に限定する
- ・1チャンネルあたりの収容数を6ノードとする

ことで、各ノード2分間隔でデータ送信できるようにした。本稿執筆時点ではチャンネルを3個使用し、計18ノードを運用している。

各センサノードからのデータは独立に Ambient に送信されるが、同じチャンネル内でのデータ送信間隔は5秒以上空ける必要がある。同じチャンネルに収容されたノード同士でデータ送信時刻の近接を避けるために、送信タイミングを意図的にずらすこととした。具体的には、制御ノード (M5StickC Plus) に内蔵された RTC (リアルタイムクロック) を活用して全てのノードを NTP により時刻同期を行った上で、RTC 上の指定された時刻 (例えば偶数分の毎0秒) ごとにデータを送信するようにした。6ノードが各2分間隔でデータ送信することから、ノード間の送信指定時刻を20秒ずつずらして指定した。

4.3 学内収集サーバ

4.1 の通り、センサノードからは独立に MQTT でデータが送信されるので、学内収集サーバには MQTT ブローカおよびデータを格納するデータベースが必要となる。

MQTT ブローカには Mosquitto を使い、センサノードから MQTT 送信されたデータを受け付ける。データを格納するデータベースとしては、断続的に送付されてくるデータを時系列で高速に蓄積・処理する必要性から、通常のリレーショナルデータベースではなく、時系列データベースとして代表的な InfluxDB を用いることとした。Mosquitto で受信したデータを InfluxDB に格納する処理は Telegraf をプラグインとして用いた。さらには、InfluxDB に格納されたデータの可視化プログラムとして Grafana を導入することとした。以上の環境を docker 上に構築し、Ubuntu Linux をインストールした小型 PC 上に構築した。学内収集サーバのアーキテクチャを図 3 に示す。

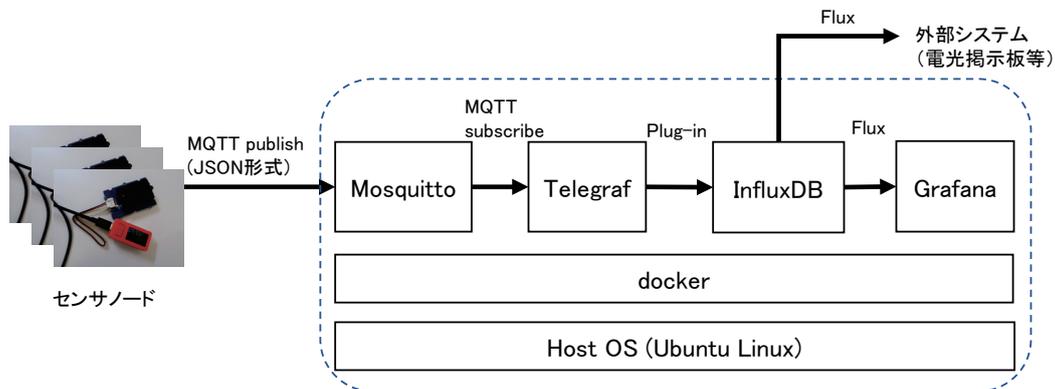


図3 学内収集サーバのアーキテクチャ

5. 可視化環境

5.1 Ambient による可視化

グラフ表示は折れ線グラフではなく棒グラフとした。Ambient のグラフ機能では縦軸のスケールを動的に変更することができないため、CO₂ 濃度がグラフの上限を超えた場合には折れ線グラフでは表示が切れてしまい、濃度が高いのかデータ受信に失敗したのかが判別しづらくなる。表示を棒グラフにすることで、その時刻でのデータの有無が一目で視認できるとともに、実際の CO₂ 濃度がわからないまでも、グラフの最大値を超える高い濃度、すなわち何らかのアクションが必要な状態であることは即座に把握できる (図 4)。

Ambient のグラフは公開設定にすることで、URL を知るすべての教員・学生が、学内・学外環境問わずインターネット接続できる環境にいれば閲覧できる。但し、1つの画面に表示可能なデータ数の制約のため、運用中の全てのノード (18 ノード) を把握するには3つの画面 (URL) を開く必要がある。

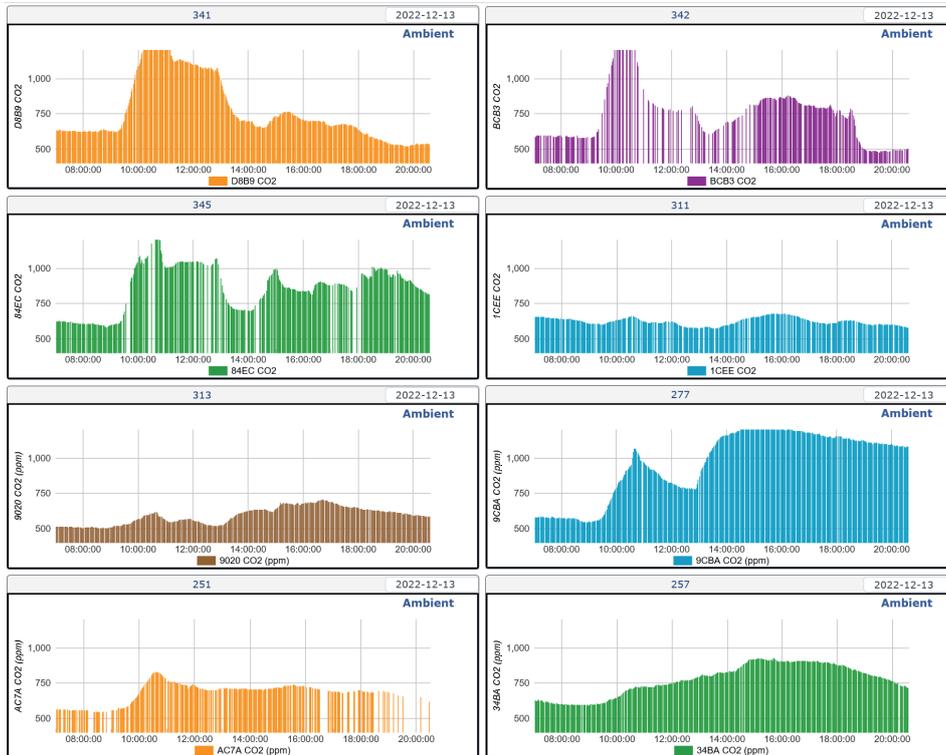


図4 Ambient による可視化

5.2 Grafana による可視化

校内収集サーバに関しては Grafana の機能を使うことで、Ambient よりも柔軟な画面表示が可能である。例えば縦軸のスケールを測定値に応じて動的に変更することもできる。視認性を高めるために、フロア範囲ごとに束ねた形で全てのノードのデータを1つの画面に収まるように設定した。さらに CO2 濃度の範囲ごとに背景色を変更することで、各グラフの縦軸のスケールが異なった場合でも相互に状況比較が行いやすくなる (図5)。

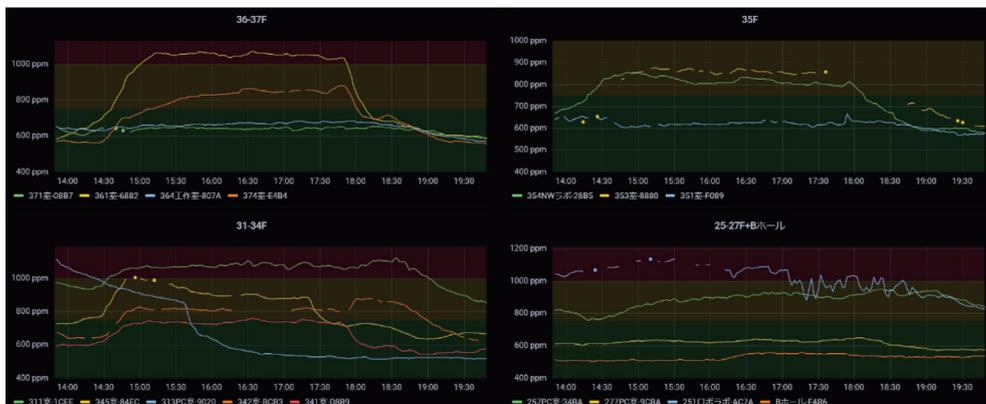


図5 Grafana による可視化

Grafana で作成したグラフについても、匿名での閲覧を許可する設定にしておくことで、公開設定の Ambient 同様に URL を知る教員・学生は閲覧することができる。但しアクセスできるのは同一 LAN 内に端末を接続している時に限られる。

5.3 電光掲示板による可視化

より能動的な情報発信のため、測定データを表示するための電光掲示板を設置した。表示部は汎用品の LED MATRIX パネル（1枚あたり 32 × 64 ドット）を、制御部は Raspberry Pi4 を用いて構築し、処理は以下の通りとした。

- ① 収集サーバ上の InfluxDB から直近 30 秒以内のデータを取得
- ② センサの個体識別番号を設置先の教室名に置き換え
- ③ 教室名と CO2 濃度測定結果をペアにした表示用画像データを生成
- ④ 上記画像データを教室数分横につなげ、ファイルとして保存
- ⑤ 保存した画像ファイルを読み込み、LED MATRIX 上で横スクロール表示
- ⑥ 2分おきに表示を停止し、①に戻る

制御ノード同様に、CO2 濃度に応じて表示文字色を変更するとともに、前回（2分前に）取得したデータと比較して一定量以上の増減があった場合は、CO2 濃度の後ろに上下矢印も追加表示することで、換気の状態を把握しやすくしている（図 6）。



図 6 LED MATRIX 電光掲示板による表示

6. 運用を通じて見えてきた課題

以上の環境を構築し、9ヶ月程度に渡って学内運用を行ってきた。その過程で運用上の課題やノウハウが幾つか見えてきたので、その内容を示す。

6.1 CO2 センサの校正

単一の部屋での CO2 濃度の増減をみるだけであればそれほど重要ではないが、複数の

部屋の状況を俯瞰的に把握するためには、校正（キャリブレーション）によりある程度値を揃えておく必要がある。購入直後の CO2 センサは状態にばらつきがあるため、最初に校正を行う必要がある。屋外の新鮮な空気環境に長時間設置し、その時の値を基準値（通常は 400ppm）として設定するのが一般的な方法であるが、都市部（新宿駅前）にある高層ビル内のキャンパスにおいて、そうした環境を用意すること自体困難である。

また、CO2 センサの多くは、1 日の間で最も濃度が低くなった時の値を基準値に校正する自動校正機能を有する。しかしこの機能は、夜間など人がいない時間帯に十分に換気されて CO2 濃度が外気レベルまで下がる環境を前提としており、複数の組織が雑居する高層複合ビル内ではそうした運用は保証されない。

加えて、電源の ON/OFF やノイズに起因して校正状態が保持できない場合があり、電源を入れ直ただけで測定値が 100ppm 以上ずれるケースも生じた。そのため、導入前のみならず、必要なタイミングで強制的に校正を行える仕組みが必要になる。

以上を踏まえて、校正は以下の方針で対応することとした。

- ・ 自動校正機能は OFF にする。
- ・ 連休等でビル内の CO2 濃度が最も低くなった際の値を基準値と考える。但し 400ppm ではなく、450ppm に設定する。この値は新宿区の路上での平均 CO2 濃度に相当する。
- ・ 校正が上方にずれた場合は、本体のボタン操作により、即時校正コマンドが実行されるようにする。実際には操作者の呼吸等が影響することを考慮し、ボタン操作後 30 分経過してから実行されるようにしている。夜間帰宅前の操作を想定している。
- ・ 上記強制的な校正操作により校正が下方にずれた場合は、基準値（450ppm）以下の測定値が一定期間（実際の設定は 30 分）継続すれば校正コマンドを自動実施する。これにより、ある程度の期間の運用によりビル内の CO2 濃度が最低レベルに下がる機会に遭遇することで、本来の基準値に近い状態に自然と収斂していく。

6.2 Ambient 送信時の時刻合わせ

Ambient の制約（5 秒以上の送信間隔をあける必要）を回避するために、NTP と RTC を用いた送信タイミングの制御を行っているが、RTC の精度があまり高くないのと、ノイズ等に起因して時刻が突然大きくずれることもあり、思った通りのタイミングでデータが送信されないケースが度々発生した。

当初は Wi-Fi 接続時のみに NTP で時刻合わせをしていたが、NTP での時刻合わせの 1 日 1 回に増やし、さらにボタン操作による手動時刻合わせの機能も追加した。

6.3 Wi-Fi 混雑による通信途絶

一部のフロアでは授業が集中する時間帯に通信が度々途絶し、2 時間以上もデータが届かないケースも発生した。Wi-Fi を使用する学生が多く通信が混雑したためと考えられる。再接続処理の頻度を上げる対策を行っているが、再接続処理中はセンサデータの取得が中断するため処理時間をあまり割けないことと、PC に比べてアンテナサイズ的にも電波感度が弱い問題もあって、あまり効果は出ていないのが現状である。

6.4 InfluxDB の処理負荷

学内収集サーバの運用においては、InfluxDB の負荷が非常に大きいことがわかった。最初はサーバを Raspberry Pi4 を用いて構築したが、処理負荷が耐えられなくなったため、ミニ PC (CPU : Celeron J4125、RAM : 12GB、SSD : 240GB) で構築し直した。9 ヶ月程度運用した状況で、SSD に保存されたデータサイズが 1GB 程度、RAM 使用量が 6GB 程度、CPU 負荷も 20-50% 程度で推移している。SSD のストレージサイズ的には大きな問題はないものの、オンメモリでの処理負荷が非常に大きいことから、一定期間経った古いデータを退避 (あるいはエクスポート) ・削除するような運用が必要と思われる。

7. おわりに

本稿では、不確実な脅威に対して持続可能な教育環境の提供する ICT プラットフォーム「Resilience Campus Platform」の実現形態の一つとして、CO2 濃度のモニタリングに基づいた COVID-19 感染リスクに関する状況認識支援システムを学内に構築し、運用を行ってきた。その結果、センサデバイスや制御ノード等の技術情報だけでは見えない運用上の課題がいくつか明らかになった。今後システムをさらに拡張するうえでこうした課題、ノウハウを整理していくとともに、測定したデータのより効果的な活用方法についても検討していく。

参考文献

- [1] 爰川知宏ほか、持続可能な教育環境の構築に向けて～ Resilient Campus Platform ～、東京国際工科専門職大学紀要、Vol. 1、2022.
- [2] 爰川知宏、CO2 濃度の可視化に基づく安心・安全な対面学習／試験環境提供の試み、情報処理学会研究報告、Vol. 2021-GN-114、No.6、May、2021.
- [3] T. Kokogawa, Trial of Building a Resilient Face-to-Face Classroom based on CO2-based Risk Awareness, The 6th IFIP WG5.15 Conference ITDRR 2021, Morioka, Iwate, Japan, October, 2021. IFIP AIST, vol 638. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04170-9_7
- [4] <https://ambidata.io/>

爰川知宏 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授
武本充治 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授