

# EnvBridge: CO<sub>2</sub> センサと Minecraft を組み合わせた 情報提供システム

ウラタ 英寿<sup>1,a)</sup> 岩井 将行<sup>1,b)</sup>

**概要:** 2020 年より世界中へ影響を及ぼしている COVID-19 への対策として、屋内換気を徹底することが強く求められている。換気が充分になされているかどうかの指標として、二酸化炭素濃度を利用できる。実際に、商業施設等では、二酸化炭素濃度の数値をサイネージに表示している例が見られる。しかしながら、この手法では、数値での表示に興味を持たない人々や、幼児や児童などの低年齢層に対しては二酸化炭素濃度や換気の情報が届きづらいと考える。二酸化炭素は通常目に見えたり直接肌で感じられたりするものではないからである。また、室内においては、空気中の二酸化炭素濃度を 1000ppm 以下に抑える必要があるが、筆者が行ったアンケート調査によると、この具体的な数値を知っている者は 51.4 %にとどまった。このことから、より目を引きやすく、より直感的に換気の目安を伝える方法が必要だと筆者は考えた。他方で、現実世界に存在する物や情報を仮想空間上に再現するという「デジタルツイン」の概念が近年では盛り上がりを見せている。そこで本研究では、サンドボックスゲームである Minecraft 内の仮想空間に現実の CO<sub>2</sub> 濃度データを反映するシステム「EnvBridge」を開発し、これを提案する。すでに行われている Minecraft 上で大学のキャンパスを再現するプロジェクトを利用することで、「現実世界で得られた情報を仮想空間へ反映する」ことを実現している。本システムでは、サイネージに数値や文字のみを表示する方法に対して、より直感的に理解しやすいことと、利用者の注意や関心を引きやすいことに着目している。システムに対する評価の結果、上記二点について、一定の効果を得られることが分かった。さらに、低年齢層に対してより高い効果を持つことと、数値や文字で換気の目安を伝える手法と組み合わせることで高い効果を持つことが示唆された。

## EnvBridge: An Information Providing System enabling Combination of IoT CO<sub>2</sub> Sensors and Minecraft

### 1. はじめに

室内に滞在する人員の健康を維持するために、換気励行は極めて重要である。換気が不十分な場合は、頭痛、眠気、集中力低下等の原因となりうる [1] ほか、場合によっては、一酸化炭素中毒 [2][3] などの致命的な中毒を引き起こす恐れもある。また、本論文執筆時点においては、新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の感染拡大が続いている状況である [4][5]。「換気の悪い密閉空間」は、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) における代表的なリスク要因のひとつとされている [6]。感染を避けるための有効な手段の

ひとつとして、換気への関心が高まっている。

換気ができているかどうかの指標として、空気中の二酸化炭素 (以下、CO<sub>2</sub>) 濃度を利用できる。建築物衛生法では、建築物の管理者に対して、空気中の CO<sub>2</sub> の含有率が 1,000 ppm 以下となるように義務または努力義務が課せられている [7]。COVID-19 の影響によって、商業施設等でサイネージに CO<sub>2</sub> 濃度を表示するようなシステムが見られる機会も増えた。あるいは、狭い閉鎖空間に多くの人が集まる傾向にある各種公共交通機関を代表例として、「この場所の空気は数分以内にすべて入れ替わります」といった掲示も多く見られる。サイネージに CO<sub>2</sub> 濃度を表示するシステムが実際に稼働している例を、図 1 に示す。測定された数値のほか、それらの数値が良好であることも併せてわかりやすく示されている。サイネージに CO<sub>2</sub> 濃度の数値を表示するシステムは、CO<sub>2</sub> 濃度に関する知識がある

<sup>1</sup> 東京電機大学  
Senju-asahicho 5, Adachi, Tokyo 120-8551, Japan  
<sup>a)</sup> urata@cps.im.dendai.ac.jp  
<sup>b)</sup> iwai@cps.im.dendai.ac.jp

者が見れば、空気質の悪化状況を瞬時に把握できる。しかしその知識を持たない者から見たとき、換気の必要性の実感わきにくい。前述の通り、屋内においてはCO<sub>2</sub>濃度を1,000 ppm以下に押さえる必要があるとされているが、筆者が主に大学生に対して行ったアンケート調査の結果、この具体的な数値を知っている者の割合は51.4%にとどまった(第4章参照)。また、数値や文字のみでの掲示の場合、人々の関心を寄せにくかったり、低年齢層に対しては意味が伝わらない恐れがある。

他方で近年、デジタルツインやメタバースといった、仮想空間に関する概念が盛り上がりを見せている。先述したCOVID-19の影響によって人々が自宅で過ごす時間が増えていることも一因だとされている。筆者は、2020年4月より大学への一時的な入構禁止が発表されたことを受けて、ビデオゲームであるMinecraft上で大学のキャンパスを建てるプロジェクト(TDUCraft<sup>\*1</sup>)を立ち上げている。同プロジェクトでは、複数の学生有志が集まり、現実に存在する東京電機大学東京千住キャンパスやその周辺の建造物等を仮想空間上に再現している。同様の事例は、東京都市大学や筑波大学などをはじめとする国内の大学でもみられるほか、世界中の大学で活発になっていることも報じられている[8]。

そこで本研究では、TDUCraftをデジタルツインとして活用し、現実世界で計測した情報を取り込んで可視化するシステムを開発したので、これを報告する。元々コンピュータゲームであるMinecraftを利用しているため、換気状態を数値や文字のみで伝える従来手法と比較して視覚的インパクトが強く、「換気状況に興味・関心を持ってもらえない」という問題への解決策になりうると考える。また、本システムはMinecraftのマルチプレイヤーを拡張するという形式を取っている。そのため、すでにマルチプレイヤーをするための環境が整っていれば、本システムの導入は容易であることも大きなメリットである。さらに、Minecraftはプレイヤーが自由に建築を行うことができる。したがって、デジタルツインとして活用するためのワールドデータの準備が比較的容易になる。例えば、先述したTDUCraftは元々有志の学生が集まってゲーム内で大学のキャンパスを再現するプロジェクトであるが、そのようなデータは本システムを用いることでデジタルツインとして転用可能になる。

## 2. 関連研究

先述したCOVID-19の影響により、換気に関する研究や取り組みが各所で盛んに行われている。例えば、横川らの研究チーム[9]では、飲食店にCO<sub>2</sub>センサを設置し、そこから得られたデータを地図上に表示する「TOKYO換気



図1 ショッピングモールにおけるシステムの例  
Fig. 1 An example of a system in a shopping mall.

良好マップ」を、アンビエントデータ株式会社と共同で運営<sup>\*2</sup>している。同じく横川らは、電気通信大学の入学式で、会場内のCO<sub>2</sub>濃度をイラストを交えながらリアルタイムでサインエージ上に表示する取り組みを行った[10]。

Minecraftを教育機関において活用する動きもある。Bourdeauら[11]は、Minecraft Education Edition<sup>\*3</sup>を用いたアクティブラーニングに関する報告をしている。学生がMinecraftの仮想空間上で学ぶことで、学習意欲・学習効果・満足感が高まると述べられている。また、教育現場においてデジタルトランスフォーメーション(DX)の気運が高まっているが、技術的に複雑で敷居が高いことが多い。そこで、Minecraftという既存のプラットフォームを転用することで、現場の負担を軽減できるとしている。

鈴木ら[12]は、ゲーミフィケーションを用いて室内の環境改善を誘導する手法を模索した。広く用いられているゲームエンジンであるUnity<sup>\*4</sup>を使って、複数のセンサデータを可視化するシステムを構築している。

本システムは、これらの関連研究が持つ要素を組み合わせたものである。リアルタイムで空気質を計測し、既存のプラットフォームであるMinecraftを利用することで導入のハードルを抑えつつ、直感的に理解しやすい表現ができるシステムを目指して構築した。

## 3. システム構成

本章では、構築したシステムの構成について説明する。大きく分けて、データ収集・保管システムと、データ可視化プラグイン(以下「EnvBridge」)で構成されている。システムの全体的な構成を図2に示す。

### 3.1 プロトタイプデバイスとデータ収集・保管システム 環境センシングを行うために、IoTプロトタイプデバイ

<sup>\*2</sup> <https://ambidata.io/co2/>

<sup>\*3</sup> <https://education.minecraft.net/ja-jp>

<sup>\*4</sup> <https://unity.com/ja>

<sup>\*1</sup> <https://www.tducraft.com/>

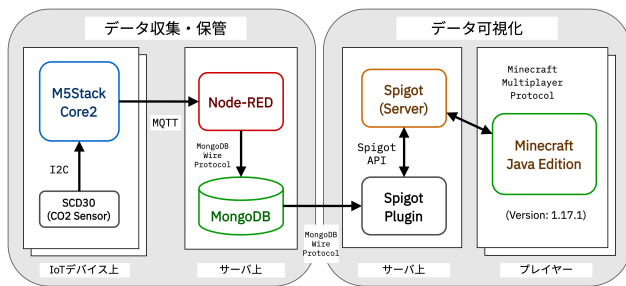


図 2 システム構成図

Fig. 2 A system diagram.

表 1 IoT デバイスのハードウェア構成

Table 1 Hardware configuration of IoT devices.

名称	用途
M5Stack Core2	センサ制御および通信
M5Stack Pa.HUB Unit	M5Stack Core2 の I <sup>2</sup> C ポート拡張
M5Stack ENV.III Unit	温湿度および気圧計測
Grove SCD30 Sensor	CO <sub>2</sub> 濃度および温湿度計測

スを作製した。デバイスのハードウェア構成を表 1 に示す。また、デバイスの外観を図 3 に示す。

空気中の CO<sub>2</sub> 濃度を計測するためのセンサとして, Sensiron 社製の SCD30 が搭載された Grove SCD30 Sensor を使用した。SCD30 は, 光分散型赤外線 (NDIR) CO<sub>2</sub> センサ [13] である。CO<sub>2</sub> 分子が 4.26 $\mu$ m の光 (赤外領域) を吸収するという特性を利用して, 気体中の CO<sub>2</sub> 濃度を計測する仕組みになっている。SCD30 単体の外観を, 図 4 に示す。橙色に写っている部分から赤外線照射部で, その右側に 2 つ空けられている穴の部分が読取り部である。また, 温湿度・気圧センサとして, SHT30 と QMP6988 を搭載した M5Stack ENV.III Unit を使用している。

以上を用いて組み上げた IoT デバイスの外観を, 図 3 に示す。図の右側, M5Stack Core2 の画面には, センサから取得された温度・湿度・気圧・CO<sub>2</sub> 濃度の値と, ネットワーク上の DHCP サーバからリースされた IP アドレスが表示されている。

計測した値は Wi-Fi (2.4 GHz 帯) 経由でサーバ上の Node-RED で動作する MQTT ブローカを経由して MQTT サブスクライバで受信・処理され, MongoDB に送られる。このように, IoT デバイスの機能はデータの計測と送信のみに絞られ, データを処理する部分は Node-RED 上で実装することで, 後からの機能追加が容易な設計としている。

### 3.2 EnvBridge による可視化

提案システムでは, データの可視化をサーバを用意した上で Minecraft のマルチプレイ機能内で実現している。サーバソフトウェアは, Minecraft の開発元である Mojang より配布されているが, それをもとにして有志が開発・配布するものが多数存在している。本研究では, それらのう



図 3 使用した IoT デバイスの外観

Fig. 3 Appearance of the IoT device used.

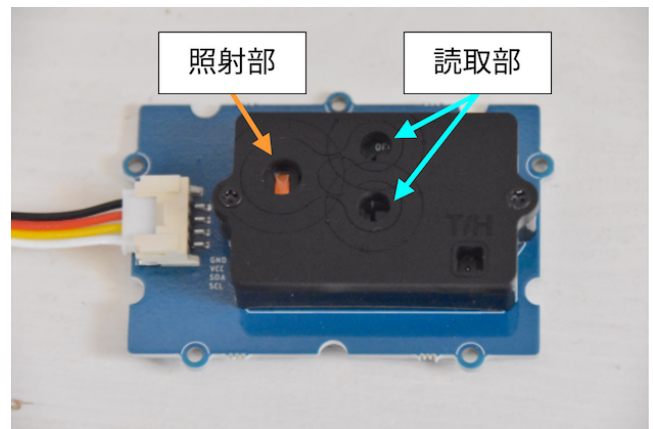


図 4 SCD30 の外観

Fig. 4 Appearance of the SCD30.

ちで最も広く用いられている Spigot を選択した。Spigot およびその元となった Bukkit から派生するソフトウェア群は, Mojang より配布されているサーバソフトウェアの機能に加えて, サーバ管理者がプラグインを導入できるという特徴を持つ。Spigot API (Bukkit API) を実装しており, プラグインは Spigot API を通じてゲーム内の様々な要素にアクセスすることが可能となっている。

可視化については, 換気が不十分な場合, すなわち CO<sub>2</sub> 濃度が上がっている場合に, その濃度に応じて, ゲーム内の指定した空間内にパーティクル (視覚エフェクト) を表示する。

システムを動作させるにあたって, CO<sub>2</sub> 濃度に対するパーティクルの密度を決定する必要がある。本研究では, 日本産業衛生学会産業衛生技術部会により公開されている目安 [14] にならって, 表 2 のように濃度別で 5 段階にレベル分けした。レベルが大きいほど, ゲーム内で表示されるパーティクルの種類や多さが段階的に変わる仕様になっている。ゲーム中におけるそれぞれの場合のスクリーンショットを, 図 5~9 に示す。なお, レベル 0 の場合は, そ

表 2 CO<sub>2</sub> 濃度のレベル  
Table 2 Levels of CO<sub>2</sub> concentration.

レベル	CO <sub>2</sub> 濃度 $x$ (ppm)	目安
0	$x \leq 1,000$	良好；これを維持する
1	$1,000 < x \leq 1,500$	やや良い；受け入れられる限度
2	$1,500 < x \leq 2,500$	悪い；30分に一度換気が必要
3	$2,500 < x \leq 3,500$	非常に悪い；常時換気が必要
4	$3,500 < x$	極めて悪い；部屋の使用を控える



図 5 レベル 0 の場合のパーティクル  
Fig. 5 Particles at level 0



図 6 レベル 1 の場合のパーティクル  
Fig. 6 Particles at level 1



図 7 レベル 2 の場合のパーティクル  
Fig. 7 Particles at level 2

の場の換気状態が良好であることを示すために、緑色に光るようなパーティクルを表示させている。

#### 4. 評価

本章では、換気に関する意識調査と本システムに対する評価を目的として実施したアンケート調査について述べる。40件の回答を得られ、その内訳は、東京電機大学の学



図 8 レベル 3 の場合のパーティクル  
Fig. 8 Particles at level 3



図 9 レベル 4 の場合  
Fig. 9 Particles at level 4

生 36 人・その他 4 人であった。

#### 4.1 アンケート項目と回答

質問項目とそれらに対する回答は、次の通りである。

- (1) あなたは換気が重要だと思いますか？  
(はい 91.9 % / どちらでもない 8.1 % / いいえ 0 %)
- (2) 空気中の CO<sub>2</sub> 濃度を 1,000 ppm 以下に抑えるべきということを知っていましたか？  
(はい 27.0 % / 数値は知らなかった 51.4 % / いいえ 21.6 %)
- (3) (図 5~9 を示して) 視覚的効果の量は、目安 (表 2) と比較して適切だと思いますか？  
(多すぎる 7.5 % / 適切 80.0 % / 少なすぎる 12.5 %)
- (4) これ単体のみを見せられたとき、これが何を意味するか分かりますか？  
(はい 25.0 % / いいえ 75.0 %)
- (5) 換気の目安を伝えるために、具体的な CO<sub>2</sub> 濃度の数値を併記すべきだと思いますか？  
(はい 95.0 % / いいえ 5.0 %)
- (6) 換気の目安を伝えるために、言葉による目安を併記すべきだと思いますか？  
(はい 92.5 % / いいえ 7.5 %)

次の質問に関しては、「1: 全くそう思わない」から「5: とてもそう思う」までの 5 段階で回答を求め (リッカート尺度)、その加重平均を計算した。この 2 つの質問に対す

表 3 質問 7, 8 に対する回答の加重平均

Table 3 Weighted averages of responses to questions 7 and 8.

質問	回答の加重平均
質問 7	3.55
質問 8	3.95

る答えは表 3 に、リッカート尺度を図示したものを図 10 に示す。

(7) 提案手法は、従来手法と比べて、文字のみでの表示に興味を持たない人々に対して、換気の程度を伝える手段として有効だと思いますか？

(8) 提案手法は、従来手法と比べて、低年齢層（小学生や幼児など）に対して、換気の程度を伝える手段として有効だと思いますか？

## 4.2 考察

回答者のうち、91.9%が「換気が重要だと思う」と回答している。COVID-19の影響も大いに考えられるが、換気の重要性が広く共有されていると言える。しかしながら、室内でのCO<sub>2</sub>濃度を1,000 ppmに抑えるべきであるという具体的な数値を知っている者は、約半数であった。このことから、換気の目安を人々に伝える手段が必要であることは明白である。

センサで測定したCO<sub>2</sub>濃度の値に応じてゲーム内で表示する視覚エフェクトは、ほぼ適切であるという評価を得た。換気状態が悪化するにつれゲーム内の視界が悪化することでユーザに状態を伝えるという目的は、おおむね達成できたものと考えられる。しかしながら、これ単体のみを見せられたとき何を意味するか理解できないという評価と同時に、具体的なCO<sub>2</sub>濃度の値および言葉による目安を併記した方が良いという評価を得た。すなわち、本システムは既存手法を完全に置き換えるものではなく、既存手法を組み合わせることで効果を得られものであることがわかる。

また、質問 7, 8 より、EnvBridge による可視化は、低年齢層に対してより強い効果を持つことが示唆された。低年齢層からもゲームとして広く認識されている Minecraft を基盤としたシステムであるためだと考えられる。既存システムに対する懸念点として挙げた「意味が伝わらない恐れがある」という点に対して、この「ゲームであることから注意を引きやすい」と「視覚エフェクトによって伝えることができる」という点で対応できると考える。このシステムを公共の場で運用する際には、可視化対象であるCO<sub>2</sub>濃度についての説明を併記することで、教育的側面も生まれるであろう。ただし、アンケートの自由記述欄では、「使用している視覚エフェクトを空気中のチリやホコリと混同してしまう恐れがあるため、低年齢層へ見せるものとしては不適切だ」といった意見があり、今後検証が必要な懸念事項だといえる。

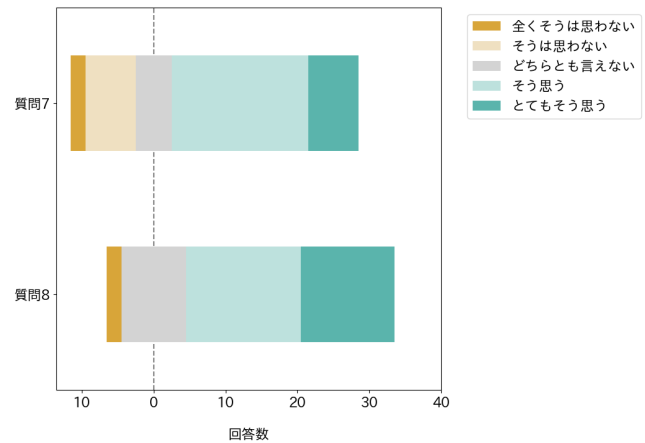


図 10 質問 7, 8 に対する回答のリッカート尺度の図示

Fig. 10 An illustration of the Likert scale for responses to questions 7 and 8.

## 5. 今後の展望

開発したシステムにおいて、現在可視化しているのはその場のCO<sub>2</sub>濃度のみである。今後は、AIカメラ等を用いた人数推定システムと組み合わせて、現実世界の人数、すなわち混雑度と同期してゲーム内キャラクタを出現させるような機能を追加したい。また、本システムのセンサで得られた値に合わせてそれらのキャラクタが反応を示したりする機能も考えられる。例えば、温度と湿度が高ければ汗を出すなどといったものである。室内の混雑を避けることは、換気の励行と併せて、感染症の予防方法として有効であるため、COVID-19への対策を助けるツールとしてより有用にできる。

また、本文中で述べた TDU Craft は外部に公開されているマルチプレイサーバであるが、本研究においてはそのデータをコピーした非公開のサーバで動作させていた。今後、先に述べた改善点を反映するほか、機能追加等を行って、外部に公開されているサーバに組み込んだ実運用ができるように取り組んでいきたい。例えば、実際に外部へ公開しているサーバで EnvBridge を動作させる際には、可視化機能のオン・オフを切り替えられる機能が必要であろう。

さらに、Minecraft は低年齢層を初めとして広い層への知名度が高いほか、すでに Minecraft を教育目的で利用する例が多数見られることから、本システムの教育目的への転用可能性もある。例えば、本システムにおける IoT プロトタイプデバイスの部分を自作してもらって EnvBridge と接続するといった使い方で、電子工作の入門教材として利用するといった例が考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、M5Stack Core2 に接続した CO<sub>2</sub> センサで濃度を測定し、そのデータを Minecraft 上で可視化するシ

システムを開発した。実施したアンケート調査の結果により、文字や数値のみでの表示と比較して、より多くの人々の注意を引き、直感的に情報を伝えられる可能性が示された。特に、Minecraft を利用しているという性質上、低年齢層への効果が高いと考えられる。また、既存の数値と文字により目安を表示する手法と組み合わせることで、それぞれの長所を生かしたシステムにできることが示唆された。単に現在の状況を伝える手段としてのみならず、換気について興味を持っていない層に対しても、換気について考えてもらえるようなシステムとなりうる。

一方で、可視化する際の表現方法についての改善点も見えてきた。「空気中のホコリやチリと混同する恐れがある」、「霧のようなエフェクトの方がわかりやすい」、「もっと色による区別が欲しい」などといった意見がその背景にある。これらの点に関しては、今後の機能追加と併せて検討・対応していく。

## 参考文献

- [1] 羽田正沖, 西原直枝, 田辺新一: 温熱環境と換気量が知的生産性に与える影響に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 638, pp. 507-515 (オンライン), DOI: 10.3130/aije.74.507 (2009).
- [2] O'Malley, G. F.: Carbon Monoxide Poisoning, MSD (online), available from (<https://www.msmanuals.com/en-jp/professional/injuries-poisoning/poisoning/carbon-monoxide-poisoning>) (accessed 2022-1-18).
- [3] 東京消防庁: 月別発生状況, 東京消防庁 (オンライン), 入手先 (<https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/lfe/topics/nichijou/co.html>) (参照 2022-1-22).
- [4] 厚生労働省: 国内の発生状況など, 厚生労働省 (オンライン), 入手先 (<https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kokunainohasseijoukyou.html>) (参照 2022-1-17).
- [5] 東京都: 都内の最新感染動向, 東京都 (オンライン), 入手先 (<https://stopcovid19.metro.tokyo.lg.jp/>) (参照 2022-1-17).
- [6] 厚生労働省: 冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について, 厚生労働省 (オンライン), 入手先 (<https://www.mhlw.go.jp/content/10906000/000698849.pdf>) (参照 2022-1-17).
- [7] 厚生労働省: 建築物環境衛生管理基準について, 厚生労働省 (オンライン), 入手先 (<https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>) (参照 2022-1-17).
- [8] Chung, M. and Partridge, W.: Campus is closed, so college students are rebuilding their schools in Minecraft, THE VERGE (online), available from (<https://www.theverge.com/2020/3/31/21200972/college-students-graduation-minecraft-coronavirus-school-closures>) (accessed 2022-1-20).
- [9] 電気通信大学, 東京大学生産技術研究所: 電通大と東大の研究チームが東京都との共同事業を開始～IoT/SNS と建築学の融合による「換気向上プロジェクト」～, 電気通信大学 (オンライン), 入手先 ([https://www.uec.ac.jp/about/publicity/news\\_release/2021/pdf/20210430\\_1.pdf](https://www.uec.ac.jp/about/publicity/news_release/2021/pdf/20210430_1.pdf)) (参照 2021-1-20).
- [10] 電気通信大学: コロナ禍における新たな入学式のスタイル～CO2 濃度の分布をリアルタイムで可視化～, 電気通信大学 (オンライン), 入手先 ([https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210329\\_3248.html](https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210329_3248.html)) (参照 2022-1-20).
- [11] Bourdeau, S., Coulon, T. and Petit, M.-C.: Simulation-Based Training via a “Readymade” Virtual World Platform: Teaching and Learning With Minecraft Education, *IT Professional*, Vol. 23, No. 2, pp. 33-39 (オンライン), DOI: 10.1109/MITP.2021.3062935 (2021).
- [12] 鈴木陽太, 岩井将行: ゲームフィケーション活用による室内環境改善誘導システム (2020).
- [13] Sensirion: SCD30, , available from (<https://sensirion.com/products/catalog/SCD30/>)
- [14] 産業衛生技術部会: COVID-19 対策用換気シミュレーター, 日本産業衛生学会 (オンライン), 入手先 ([http://jsoh-ohe.umin.jp/covid\\_simulator/covid\\_simulator.html](http://jsoh-ohe.umin.jp/covid_simulator/covid_simulator.html)) (参照 2022-1-20).