

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

爰川知宏¹

概要：コロナ禍で多くの学校がオンライン授業への移行を余儀なくされた。その後対面授業へ戻す動きは進んでいるものの、対面環境での授業や試験時の安全性の確保に多くの学校が苦慮している。本研究では、CO₂ センサを教室内に定点設置することで、授業利用状況と建物の空調管理との関係性を可視化するとともに、入学試験での環境監視にも適用し、リアルタイムでリスク把握と対応指示への活用を試みた。その経過を紹介する。

キーワード：COVID-19, CO₂, リスク可視化

Trial of Building Resilient Face-to-Face Classroom based on CO₂ measurement and visualization

TOMOHIRO KOKOGAWA^{†1}

Abstract: COVID-19 pandemic forced many schools to shift to online classes. Although there has been a movement back to face-to-face classes since then, many schools are still struggling to ensure safety during classes and examinations in a face-to-face environment. In this study, we attempted to visualize the relationship between class usage and building air-conditioning management by installing CO₂ sensors at fixed points in classrooms, and also applied them to environmental monitoring during entrance examinations to grasp the risks in real time and provide response.

Keywords: COVID-19, CO₂, Risk visualization

1. はじめに

2019 年末に中国・武漢で初めて報告された新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は全世界規模のパンデミックを引き起こし、本稿執筆現在 (2021 年 3 月末) も収束の見通しは立っていない。

教育現場への影響も甚大で、日本においては国内での感染拡大がはじまった 2020 年 2 月下旬に、政府による全国小中高校への臨時休校要請が出された。大学については要請の対象外ではあったものの、卒業式や入学式の中止、新学期の授業開始延期などの対応を行うところが続出した。その後も感染拡大が続いて緊急事態宣言発出に至り、多くの大学がキャンパスを閉鎖してオンライン授業への移行を余儀なくされた。

緊急事態宣言が全国で解除された 5 月下旬以降、徐々に対面授業への復帰の動きが始まったが、ほどなく感染の第 2 波の発生もあって全面的な復旧とはいかず、分散登校や対面・オンラインの混成 (ハイフレックス) 授業の試行錯誤が行われている。

半ば強制的ともいえるオンライン授業への移行は様々な弊害をもたらした半面、国立情報学研究所 (NII) を中心にノウハウを共有する取り組みが進められた[1]こともあ

り、新たな教育手段として定着し、COVID-19 騒動収束後も継続される動きも出ている。一方で対面でしか行えない、特に実習・実技を伴うような授業においては、感染リスクにおびえながら対面授業を続けざるをえず、学生はもとより、学校関係者にとって大きなストレスになっている。

一番の問題は、感染リスクが目に見えづらいことである。政府専門家会議等の尽力により、感染リスクを高める要因を早い時期に把握し、「三密」(密集、密接、密閉) [2]というわかりやすいフレーズで提供されたことは大きな助けになっている。しかし、どの程度の環境を用意すれば安全といえるレベルになるかについては試行錯誤が続いている。

中でも対応が難しいのが「密閉」である。COVID-19 の感染経路は当初、飛沫感染と接触感染が主経路とされていたが、後に直径 5 μm 以下のマイクロ飛沫 (エアロゾル) による感染経路も可能性を指摘されるようになり[3]、厚労省アドバイザリーボードも 2020 年 7 月に注意喚起を行っている[4]。ソーシャルディスタンスを保っていても、マイクロ飛沫が室内を長時間漂うことで感染のリスクが発生するため、換気が重要となる。しかし換気は体感しづらく、高層ビル等の構造的に窓を開けられない建築物では、どの程度の換気が行われているかの把握が特に困難である。

本研究では、高層ビル内にある大学キャンパスを対象に CO₂ 濃度の測定を通じて換気の程度を可視化し、対面授業や試験における感染リスクの可視化や対応への活用を検討

¹ 東京国際工科専門職大学
International Professional University of Technology in Tokyo

した試みについて報告する。

2. 事例と課題

2.1 対面授業に向けた対応事例

著者が所属する東京国際工科専門職大学は、55年ぶりとなる新制度の「専門職大学」として2020年4月に開学したばかりであり、本稿執筆時点（2021年3月末）では学生は一期生のみ230名程度、専任教員40名程度の小規模大学である。キャンパスは東京・新宿の高層ビル（コクーンタワー、地上50階）内にある。専門職大学の従来の大学との大きな違いとして、実務家教員の割合が高い（4割以上）こと、カリキュラムにおいて実習・実技の占める割合が高い（1/3以上）こと、授業ごとの受講者数が40人以下に限定されている、といった点が挙げられる[5]。

開学直前からコロナ禍の影響を受けたため、認可申請時に計画していた学内行事や授業カリキュラムを一度も行わないうちに様々な緊急対応を余儀なくされた。開学からこれまでの主な対応状況は以下の通りである。

- 2020年3月上旬：一般入試終了（当初通り）
- 2020年3月中旬：入学式の中止（オンライン実施への変更）および授業開始の2週間延期を決定
- 4月上旬：開学。オンライン入学式。学生オリエンテーションは全てオンライン実施
- 4月中旬：一部科目の特別編成によりオンライン授業開始
- 5月中旬：当初時間割で全科目オンライン授業開始
- 6月中旬：学生初登校。分散登校（週2日）、オンライン・対面混在（ハイフレックス）授業に移行
- 10月：後期授業開始。対面授業日を週1日増加
- 2021年1月：緊急事態宣言を受け、対面授業日を週1日減少
- 4月：2期生入学。ハイフレックス授業を継続

開学直後で一期生しかいない状況であり、一度も登校しないまま休校が続くことによる学生の不安増大が強く懸念されたため、早急な授業開始を目指して、Slack^aを用いて全学生・教員をつなぐコミュニケーション手段を構築し、できることからオンライン授業をスタートさせた。5月連休明けまでには全ての科目について授業実施の目途を立て、本来の時間割に基づく全科目オンライン授業へ移行することができた。

一方で、専門職大学としての特徴である実習・実技系授業はオンライン授業だけでは支障を来すこともあり、緊急事態宣言解除後を見据えて対面授業への早急な復帰も並行して検討した。また、オンラインのみで授業が続くことや、自粛続きで友人にも会えない生活が続くことによる学生の

ストレス増大も早い段階から懸念され[6]、その後も裏付けとなる調査結果も出ており[7]、学生の心身面での健康維持の点からも対面授業機会の確保は重要と考えた。

対面授業の再開に際しては、以下の対策を実施した。

- 分散登校によりキャンパス内滞在者を削減
- 教室収容定員を半減
- 校舎入り口での体温測定
- 各フロアに消毒液を設置
- 3人以上集まったの昼食禁止など生活ルール整備
- 授業の冒頭や Slack 等での事務連絡を通じた、学生への頻繁な注意喚起

以上の対策の結果、幸いなことに教職員・学生ともクラスターの発生はなく最初の1年を無事に乗り切ることができた。

加えて、入学試験や在校生の期末試験については、オンラインでは準備稼働もさることながら、公平・公正性を担保する上でも課題が多くあり、オンライン実施を断念し、全て対面で実施した。特に入学試験に関しては、いつも同じメンバ（在校生）で実施する授業や期末試験とは異なり、全国から不特定多数の受験生が初めてキャンパスを訪れるため、ウイルスの持ち込みに備えて上記の感染対策をより厳重に行う必要があった。一方で受験する側も（感染多発地帯である）東京・新宿に出向くことに不安を持っており、安心して受験できる環境が求められた。

2.2 換気の課題

一方で、キャンパス全体が高層ビル内にある、という点が対策を難しくしている面もある。構造上窓を開けることはできず、自発的な換気を行うことができない。教室の扉を開けてもフロア全体がある種の密閉空間なので効果は期待できない。空調管理はビル全体で一元的に行われており、かつ、複数の他学校（専門学校、大学）が同じビルに入居しているため、特定の学校・部屋単位の事情による制御が難しい。また、冷暖房と比べて換気は体感しづらく、換気システムの稼働状況を把握するのは困難である。

換気の見える化の手段として、二酸化炭素（CO₂）濃度の測定が注目されている。部屋に人がいる状況では、人の呼吸により CO₂ がどんどん発生し、換気が不十分であれば室内の CO₂ 濃度が上昇する。これを計測することで、換気がどの程度できているかを把握する一つの目安となる。

CO₂ 濃度が高いと頭痛・めまい・吐き気等人体への悪影響が生じることが知られており、また、授業中の居眠りなど集中力の低下との相関も指摘されている[8]。文部科学省による学校環境衛生基準では、教室内の CO₂ 濃度は 1,500ppm 以下が望ましいとされており[9]、厚生労働省による建築物環境衛生管理基準では 1,000ppm 以下と定められている[10]。そのため、ある程度の規模の建物においては CO₂ 濃度の監視が行われており、それに基づいた換気制御

a <http://slack.com/>

も行われていると考えられる。しかし、この判断基準は換気の有無ではなく CO2 濃度の大小であり、高濃度の CO2 による健康被害を防ぐためのものである。一方で換気に着目した場合、濃度の大小よりも増減が重要であり、その観点で換気制御が行われる形態にはなっていない。また、CO2 の増減は人の出入りなどにも依存し、換気は温度、湿度にも影響を与えるため、一律的な制御が難しい。

そこで本研究では教室に CO2 測定器を配置して、日々の増減パターンを把握することから取り組むこととした。その上で現状の換気システムの課題・リスクを洗い出し、より効果的な対面環境の換気実現をめざす。また、イベントを対象とした短期的な監視を行い、個別対応にどのように生かせるかを合わせて検討する。

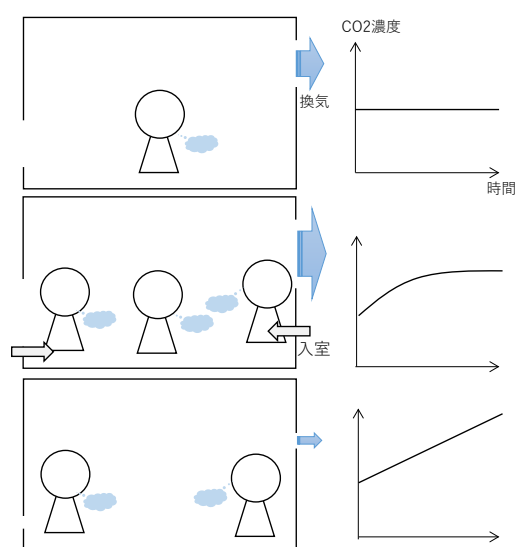


図 1 CO2 濃度と換気の関係

Figure 1 Relationship between CO2 and ventilation.

図 1 は換気と CO2 濃度の関係を模式的に示したものである。部屋に人がいる状態では、人が呼吸で排出する CO2 が時間とともに増加するが、換気がある程度なされるとある濃度で平衡する(上段)。人数が増えると CO2 排出量が増えるとともに濃度も上昇するが、十分に換気がなされていれば、ほどなく上段同様に平衡あるいは減少に転じる(中段)。一方、人数が少なくても換気が不十分であれば人が排出した CO2 が室外に排出されず濃度が上がり続ける(下段)。下段の場合が最も問題であり、少人数であっても呼気に含まれるマイクロ飛沫が長時間室内にとどまり続けるため、感染者がいた場合の感染リスクが高くなると考えられる。しか従来のビル空調制御では環境衛生管理基準(1,000ppm)に達するまで問題に気付かず、換気が行われない可能性が高い。かといって、全ての部屋の換気を強制的に行うことも現実的ではない。外気が大量に取り込むことで室内の温度や湿度にも影響を与え、冷暖房や加湿も含め、空調設備の電力使用量が大幅に増える可能性がある。

以上の通り、感染対策(換気)とビル内の環境維持(温度・湿度)、経済性(電力量の削減)を両立させる空調制御は簡単ではなく、解決には実際の室内利用状況と空調の状況を観測してパターン化していく必要があると思われる。

3. 測定システム

CO2 の検出方法は非分散型赤外線(NDIR)方式が代表的であるが、測定器は比較的高価(市販品で数万円程度)である。一方、安価な測定器では、揮発性有機化合物(VOC)の濃度(特に水素濃度)から等価二酸化炭素(equivalent CO2)を推定して算出しているタイプのものもあり、精度に問題がある。また、市販の測定器の多くはログ機能を持たず、その時点の測定値を表示するのみであり、増減の傾向把握が難しい。そのため、NDIR方式のCO2センサデバイスを用いて測定器を試作することとした。

制御用マイコンは M5StickC シリーズを用いた[b]。M5StickC はマイコンチップに ESP32 を用いた開発用ボードであり、小型の液晶画面と Wi-Fi 通信機能を持つ。CO2 センサデバイスで測定した値を液晶画面に表示するとともに、IoT クラウドサービスである Ambient[c]に定期的にデータを送信し、グラフ表示するようにした。センサデバイスとして、MH-Z19B[d]、SCD30[e]の二種類を入手した。当初は MH-Z19B しか入手できなかったため、最初の実験(定点測定)は前者で行った。その後 SCD30 を複数台入手できたため、以降の実験(イベント利用)では後者を使用した。また、CO2 に加えて温度、湿度も同時に測定を行った。システム構成を図 2 に、使用機材の構成を表 1 に、測定器の外観を図 3 に示す。

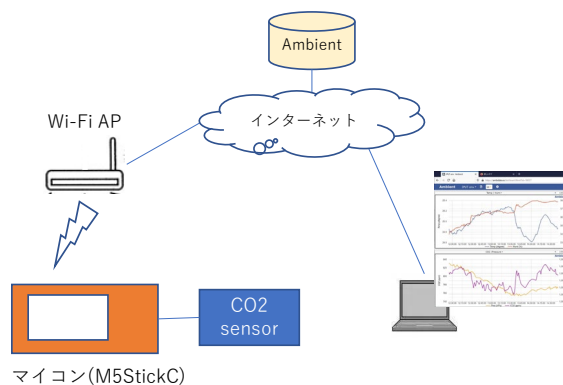


図 2 システム構成

Figure 2 System configuration.

b <https://docs.m5stack.com/#/en/core/m5stickc>

c <https://ambidata.io/>

d https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf

e <https://www.sensirion.com/jp/environmental-sensors/carbon-dioxide-sensors/carbon-dioxide-sensors-scd30/>

表 1 試作測定器の部品構成

Table 1 Prototype system equipment.

	実験 1(常設)	実験 2(イベント)
マイコン	M5StickC	M5StickC Plus
CO2 センサ	MH-Z19B	SCD30
温度センサ	SHT30	
湿度センサ		

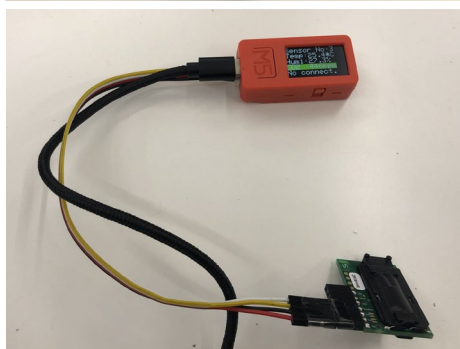


図 3 試作測定器の外観

Figure 3 Prototype system Overview.

4. 実験

4.1 実験 1: 定点測定

試作した CO2 測定器を教室の一つに設置し、冬休み明けから後期授業終了までの 6 週間にわたり測定を行った。教室後方の物陰に試作測定器を設置し(図 4)、測定間隔は 1 分とした。該当の教室を使用するのは同一学科の 4 つのクラス (A~D) であり、実施される授業は 2 科目 (K, E)、各授業は 1 限あたり 90 分である。K, E いずれの授業も電子回路系の実習を伴うもので、2 限連続で行われている。1 限目の授業は 9:50 に開始され、1-2 限間、3-4 限間は 15 分、2-3 限間は 50 分 (昼休み)、4-5 限間は 10 分の休憩時間が設けられている。表 2 はこの教室を使用する科目-クラスの対応を示したものである。A~C クラスはそれぞれ学生 35 名程度、D クラスは 20 名程度となっている。また、表中で「自」となっている時間帯は、自習室として明示的に割り当てが行われているもので、オンライン授業を学内で受講する場合や、授業の合間の自習用として学生が自由に利用できる旨が全学生に通知されている。但し、それ以外

の授業等で使用されていない時間帯に学生や教員が使用している場合もある。

また、緊急事態宣言の発令を受けて、対面授業日 (週 2 日) 以外の登校を原則禁止とし、キャンパス内の滞在期限を 20 時までと定めていた。木曜日は本教室以外も含め対面授業がなく、全てオンライン授業となっている。

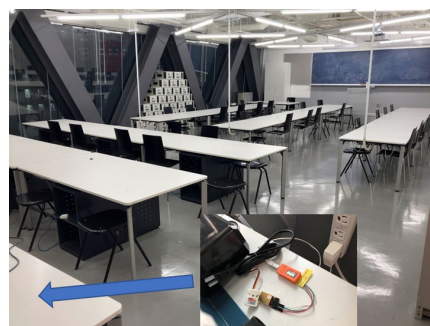


図 4 教室の外観と設置した試作測定器

Figure 4 Classroom Overview.

表 2 教室利用状況

Table 2 Classroom usage.

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月		K-B	K-B	K-C	K-C
火		E-C	E-C	自	自
水	K-A	K-A	K-D	K-D	
木					
金	自	E-D	E-D	自	自

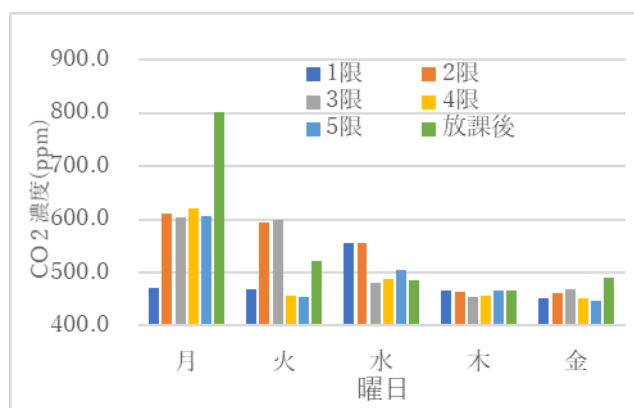


図 5 時間帯毎の平均 CO2 濃度

Figure 5 CO2 measurement result.

図 5 は休日・休講日を除く曜日、時限毎の CO2 濃度の平均値を示したものである。放課後は 5 限終了後から退出期限である 20 時までとしている。A~C クラスの授業の行われている時間帯に CO2 濃度が有意に上昇していることがわかる。D クラスの授業については他のクラスより人数

が少ないこともあり、平時と比べての濃度上昇はわずかである。他方、放課後のCO₂濃度が高くなる傾向がみられた。

図6は期間中のある月曜日の測定結果を示したものである。授業は2限からであるが、1限の開始時点からCO₂濃度の上昇が始まっている。2限の開始直後にピークを迎えたのちは5限終了までほぼ横ばい（昼休みは若干減少）となっている。このことから、授業時間を通してほぼ換気は問題なく行われていたものと推察される。一方で5限の授業が終わった後にCO₂濃度が急上昇を始め、ピークでは1,000ppmを超えるに至った。この間の教室の状況を確認したところ、10名程度の学生が居残って、前の授業で出された宿題に取り組んでいた。同時に測定している温度・湿度の状況からも、授業終了をもって空調処理の変更（エアコン、換気の停止）がなされたことが推察される。このことから居残った学生の人数が少なくても、空調が停止することでCO₂濃度が容易に大きく上昇することが明らかとなった。この傾向はこの日だけでなく他の月曜日も共通しており、月曜日ほど顕著ではないものの、火曜日、金曜日についても同様の傾向がみられた。

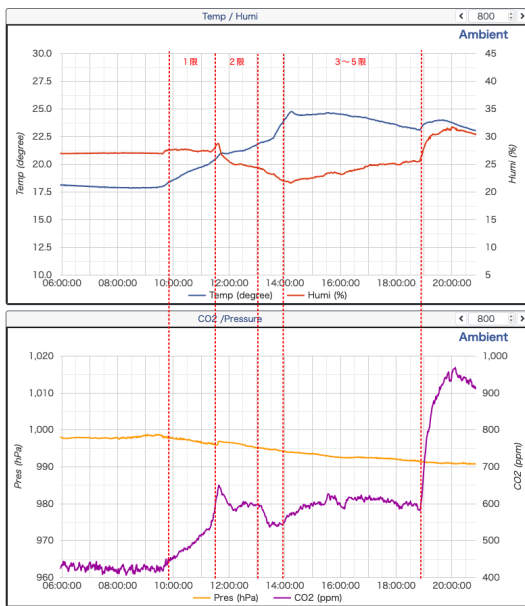


図6 CO₂濃度の観測例

Figure 6 Example of CO₂ measurement at classroom.

4.2 実験2: イベント(試験)での測定

定常利用している教室に対しての空調制御は、建物全体での電力効率などの経済性との両立を考えながら最適解を模索する必要があるため、個別事例による対応は簡単にはできないが、単発のイベントにおいてはその期間に特化した対応を行いやすい。そこで、大学における大きなイベントである入学試験および期末試験を対象として、イベント実施中のCO₂監視と対応のトライアルを実施した。

図7は全体の試験実施体制を示す。3台の試作測定器を

試験会場（筆記試験会場、面接試験、控室）に設置するとともに、測定結果を試験本部で一元的にモニタ表示できるようにした(図8)。設置は測定値を安定させるために試験当日朝に行った。また測定間隔は30秒とした。

試験本部と会場のスタッフ（試験監督、面接官、誘導係等）との連絡はSlackを用いて行い、試験の進捗状況やCO₂濃度の変化を本部・スタッフ間で共有しつつ、問題があれば即座に本部で判断して適切なアクション（空調管理センターへの連絡など）をとれる体制を作った。

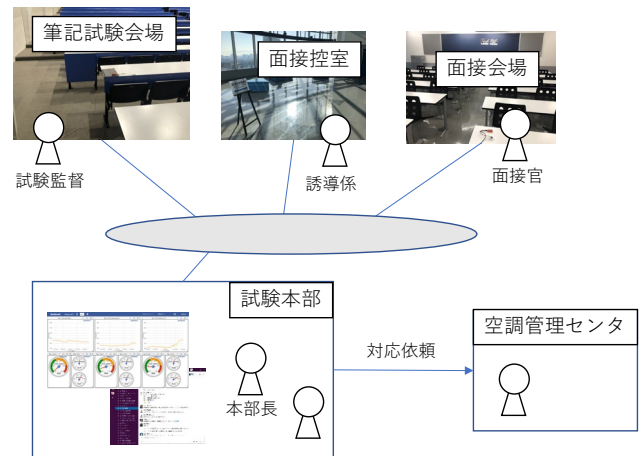


図7 試験実施体制

Figure 7 Response structure for exam.

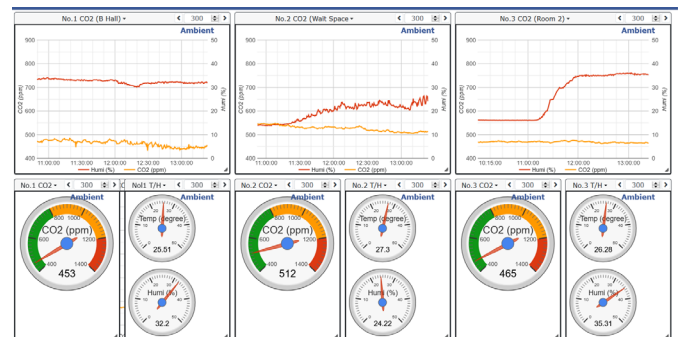


図8 試験本部での表示例

Figure 8 Example of CO₂ view at headquarter office.

実験対象は1月以降に実施された入学試験（総合型選抜1回、一般選抜4回）および期末試験である。試験実施中のSlackへの書き込み状況と、その中でのCO₂濃度に関する話題の書込数を表3に示す。スレッドに分かれた書き込みもそのコメント毎にカウントしている。対応数の欄は、空調管理センターへの対応依頼回数を示している。

入学試験については、Slackを全体管理用と面接室用のチャンネルに分けて運用していたが、後者は面接の進行管理に特化していたため、全体管理用チャンネルのデータのみをカウントしている。期末試験でも全体管理用と試験会場用でチャンネルを分けていたが、こちらは筆記試験のみで

あったこともあり、試験会場用のチャンネルが全体管理も兼ねる形で書き込みが行われたため、試験会場用チャンネルのデータのみをカウントしている。CO2 関連の書き込みが入学試験用で 27.6%、期末試験用で 21.8%占めており、試験の運営への寄与は大きかったと考えられる。

表 3 Slack への書込状況

Table 3 Number of comments on Slack.

種別	実施日	総書込数	CO2 関連	対応数
総合型	1/30	39	13	3
一般 1	2/6	31	8	1
一般 2	2/20	49	13	1
一般 3	3/6	24	4	0
一般 4	3/16	20	7	1
期末 1	2/22	113	27	1
期末 2	2/24	74	13	1
期末 3	2/25	5	2	0

1/30 の入試では、筆記試験会場の CO2 濃度が試験開始前からやや高かったため、換気強化を管理センタに依頼した。その結果 CO2 濃度は改善されたものの、急激に教室内が乾燥しはじめ、試験中に湿度が 10%を下回る事態となった。そのため、加湿器の運転を急遽空調管理センタに依頼することになり、試験終了間際に 20%以上回復させることができた。換気だけを監視していればよいわけではない貴重な教訓となった。以降の試験では湿度とのバランスが保たれ、筆記試験会場での個別対応の必要性はほぼ解消した。

一方で、面接試験会場では別の問題が発生した。定員 40 名程度の教室に面接官 2 名、総合型選抜では受験者 1 名、一般選抜では 5 名単位と少人数構成であり、試験開始前は温度・湿度・CO2 濃度いずれも問題ないレベルであったが、面接官が試験会場に入ると CO2 濃度が上昇を始め、面接中も継続して上がり続けることが度々発生した。結果的に 1 組目の面接中に CO2 濃度上昇に気付いて換気強化を依頼し、2 組目以降でようやく CO2 濃度が横這いあるいは減少に転じることとなった (図 9 左)。濃度を十分に低いことで安心して換気を強化しなかった可能性が高く、むしろ試験開始直前から換気を意識的に始めるといった運用の見直しが必要と考えられる。

期末試験については、在校生のみのイベントであるため、特別対応はとらず測定メインで開始したところ、入学試験と比較して CO2 濃度の上昇が顕著となり、急遽管理センタへも対応を依頼する必要が生じた (図 9 右)。Slack 上の書き込みでも濃度の上昇報告に加えて、空気の淀み感や学生の集中度合いについても言及がみられた。

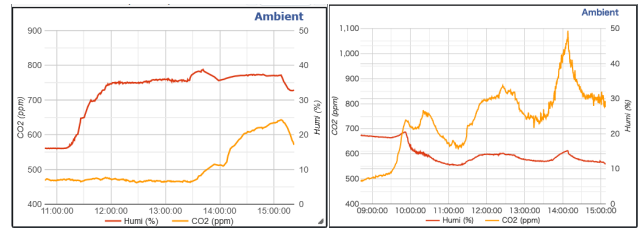


図 9 試験での測定例 (左：入試面接, 右：期末試験)

Figure 9 Example of CO2 measurement at exams.

5. おわりに

高層ビルに入居する大学キャンパスにおいて、授業および試験時の CO2 濃度を測定することで、換気の観点からの COVID-19 感染リスクの把握と、対応への積極的な活用を試みた。測定を通じて CO2 濃度の増減パターンがそれほど単純ではないことが明らかになるとともに、可視化により換気制御への積極的な対応へ活用できることを示した。

今後センサをより広範囲に設置することで、面的および時間軸の両面からリスクの状況把握を行える環境を構築し、対面授業や試験を安心・安全に受けられる環境の実現に向けて検討を進めていく。

参考文献

- [1] 国立情報学研究所. “大学等におけるオンライン教育とデジタル変革に関するサイバーシンポジウム「教育機関 DX シンポ」”. <https://www.nii.ac.jp/event/other/decs/>, (参照 2021-03-26).
- [2] 厚生労働省. “新型コロナウイルス感染予防のために”. https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kenkou-iryousoudan.html#h2_1, (参照 2021-03-26).
- [3] 篠原直秀. “新型コロナウイルスの感染対策に有用な室内環境に関連する研究事例の紹介 (第一版)”. <http://www.siej.org/sub/sarscov2v1.html>, (参照 2021-03-26).
- [4] 第 4 回新型コロナウイルス感染症対策アドバイザーボード. “新型コロナウイルス感染症はこうした経路で広がっています”. <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000657104.pdf>, (参照 2021-03-26).
- [5] 文部科学省. “専門職大学・専門職短期大学・専門職学科”. https://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/senmon/index_pc.htm, (参照 2021-03-26).
- [6] 久保千春. “心身のケアの重要性,” 第 4 回 4 月からの大学等遠隔授業に関する取組状況共有サイバーシンポジウム, April, 2020. https://www.nii.ac.jp/news/upload/20200417-2_Kubo.pdf, (参照 2021-03-26).
- [7] 日本財団. “18 歳意識調査「第 35 回 -コロナ禍とストレス-」”. <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2021/20210325-55393.html>, (参照 2021-03-26).
- [8] 藤原巧未, 長尾和彦. “IoT デバイスの活用による教室環境と授業集中度の評価に関する研究,” FIT2019, 第 4 分冊, pp. 331-332, 2019.
- [9] 文部科学省. “学校環境衛生基準 令和 2 年文部科学省告示第 138 号”. https://www.mext.go.jp/a_menu/kenko/hoken/1353625.htm, (参照 2021-03-26).
- [10] 厚生労働省. “建築物環境衛生管理基準について”. <https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>, (参照 2021-03-26).