

Ambient Intelligence (環境知能) による フリーアドレススペースのリスク評価

○横川 慎二 (電気通信大学) 石垣 陽 (電気通信大学) 遠藤 駿 (電気通信大学)
高原 廉 (電気通信大学) 川内 雄登 (電気通信大学)

A Risk Assessment of Free-address Space by Ambient Intelligence

* S. Yokogawa (The University of Electro-Communications), Y. Ishigaki (The University of Electro-Communications), S. Endo (The University of Electro-Communications), R. Takahara (The University of Electro-Communications), Y. Kawauchi (The University of Electro-Communications)

Abstract— We discuss risk assessment in free-address space where users are free to change desks and its layout on the floor, as the fields of the workplace and learning space in the "New Normal." This talk presents the space risk assessment, risk prediction, and environmental control using environmental sensing data obtained by the environmental sensor network installed in the University of Electro-Communications Library. In addition, we introduce information visualization for users and their effects..

Index terms— Ambient Intelligence, Sensor network, CO₂

1 はじめに

Internet-of-Things (IoT)技術の進展や、働き方改革を動機として緩やかに変化を続けていた職場や学修の場の姿は、COVID-19によってその変化を急激に加速することを余儀なくされている。

三密を避ける、ソーシャルディスタンスを確保するという策は、感染拡大防止という目的に対して大きな効果を挙げているものと思われる。ただし、人々が集うことによってその成果が生まれる経済活動や文化的活動に対しては、多大な影響が生じている。その損失を抑制するものとして、遠隔会議や遠隔授業などのリモートワークと、それに用いるウェブ会議システムなどの導入が急速に進んだ¹⁾。これを受けて、移動時間の削減や時間の有効活用などの効果があることも広く認識されるようになった。リモートワークを支援する技術が発展したことや、在宅勤務を本格的に導入する企業が現れたことなどにより、今後社会の一部において、その常態化が進むものと考えられる。

その変革の中で改めて、人々が場を共有することによって生まれる価値が認識されている。遠隔授業を中心として教育を再開した大学において、その成果を調査するアンケートの結果などにそれが伺える。理工系大学である電気通信大学では、Information and Communication Technology (ICT)を不得手とする学生・教職員はまれという環境と、実体形態ごとのシステム厳選とウェブ訓練プログラムにより、遠隔授業開始直後から、ほぼ全員が問題なく取り組むことができた²⁾。一方で、その感想を問うアンケートの結果では、遠隔授業にそぐわない科目である、演習・実験科目を中心に、対面での受講に対する要望が大きいという結果となった。演習・実験科目の実施をどのような体制、環境にて実施するかについては、国内外の各大学において議論が続いており、本稿執筆の時点では、決定的かつ統一的な方法は見つかっていない。

このような課題は、人が集う場におけるリスクを定量的に評価し、いかにして人々の安全、安心を確保しつつ、リスクを取るのにふさわしい価値を最大にするかという観点から、新常态 (ニューノーマル) の世

界における重要な課題の一つとなるとも考えられる。COVID-19に限らず、自らが身を置く場の環境を正しく認識し、行動を決める判断の拠り所としての環境情報の重要性と、その取得、分析、可視化、判断の方法論が必要になってくるものと思われる。

本報告では、電気通信大学の附属図書館に設置されたフリーアドレススペースに設置されたセンサーネットワークとそのデータを活用したリスク評価の事例と、Ambient Intelligence (環境知能) を用いた場のリスク評価の方向性について述べる。

2 Ambient Intelligence Agora概要

Ambient Intelligenceは90年代末に提唱された概念であり、次世代の情報社会の研究指針として示されたものである³⁾。ウェアラブルなICTによる新たなアプリケーションや、クラウドコンピューティングを基盤とするセンサー機器用小型オペレーティングおよびデータベースシステム、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)、先端二次電池、アドホックネットワークとそのセキュリティ技術などのデバイス・基盤技術など、次世代ICTの方向性を示すだけでなく、その利活用環境の方向性をも示すビジョンとされている。Ambient Intelligenceが創出する環境とは、環境に埋め込まれた技術により、人や物の行動やニーズを敏感かつ適応的に理解し、非明示的に活動を支援したり、セキュリティ、プライバシー、そして信頼の価値を維持しつつ情報を過不足なくタイムリーに提供するものとされる。この概念に沿って、様々な要素技術開発が進んでおり、今後はその統合によるAmbient Intelligenceの具現は、新常态の一つとなると考えられる。

この具現の一形態として、電気通信大学では附属図書館内に「Ambient Intelligence Agora (AIA)」を設置している⁴⁾。このAIAはアンビエント情報環境を取り入れたアクティブ・ラーニング空間であり、数人でのブレインストーミングや個人での学習、さらには大人数のセミナーまで実施可能な約1,000 m²のフリーアドレススペースである (Fig. 1)。温度・湿度・照度・CO₂濃度などの環境センサー、コンセント単位の消費電力を



Fig. 1: Bird's eye view of AIA.

測定するスマートプラグ、CCDカメラ、指向性マイクなどのセンシングデバイスが多数設置され、個人情報への十分な配慮の下でアクティビティがデータ化されている。このデータを人工知能 (Artificial Intelligence, AI) と連携させ、イノベーションの創出や業務効率の向上への空間の寄与を解明することが目的の一つである。このAIAの空間は、教室における講義とは異なる形で、学生や教職員が集ってアクティブ・ラーニングを進める場として活用されており、近年注目されているフリーアドレスオフィスと同じ用途と活動の場となっている。すなわち、この空間におけるAmbient Intelligenceの活用とその体系は、新常态の一つの形を示すものと考えている。

AIAは8つの用途エリアに分かれ、各々のエリアごとにセンサーが設置されている。温度・湿度・照度、および人感センサーはそれぞれ45台、CO₂センサーは10台、スマートプラグは187台設置され、それぞれ有線もしくは無線のネットワークによって時系列データが取得されている。今回の分析に用いたデータは、2018年4月1日から2020年3月31日までの2年間に取得されたものである。ただし、消費電力に関する測定については、2019年2月1日から開始されている。また、通常は閉館日でも測定が行われているが、工事などの都合により、数日間欠損となった期間が含まれている。

それぞれのセンサーからのデータは、取得され次第データベースへ収集されるため、時系列順(周期性)が揃わないこと、データの補完が必要になるなどの課題があった。そこで、OSIsoft社製 PI System™を用いてデータの整然化や補完を行った。ここで整然データとは次の条件を満たすものを指す⁹⁾。

- ①個々の値が1つのセルをなす
- ②個々の変数が1つの列をなす
- ③個々の観測が1つの行をなす
- ④個々の観測ユニットの類型が1つの表をなす

本報告では、10分毎に整理されたデータを分析に用いている。

3 CO₂ トレーサーによるリスク評価

感染症による場のリスクを軽減する方法として、室内換気を行うことが有効とされている⁶⁻¹⁸⁾。一方で、室内の空気質としてウイルスそのものをセンシングする技術は研究開発の途上にある。そのため、同じ人間の呼気の中に含まれるCO₂をトレーサーガスとして用い、空気質の評価や感染リスク予測に利用する方法が数多く研究されている。人の呼気に含まれるCO₂の濃度は約40,000 ppmであるため、簡易なセンサーで測定することが十分可能であることから、空気質モニターの手

法として注目され、さかんに研究が行われている。

3.1 CO₂の測定方法

CO₂を測定する方法には、質量分析器を用いる方法、赤外線吸収光を用いる方法、等価揮発性有機化学物質相当値を用いる方法などがある。

質量分析器 (Mass Spectrometer) を用いる方法は、高精度であるが、高価で大掛かりな機器を必要とする。さらに、測定には高度のテクニックが必要となるため、専門家による実施が必要となる。

赤外線吸収光を用いる方法としては、非分散型赤外線吸収法 (Non Dispersive Infrared; NDIR) が代表的なものである。赤外光源から放射された赤外光が、ガス分子により吸収される現象を利用したものである。CO₂は43 μmの波長をピークとする赤外線をよく吸収するため、CO₂を採取したチェンバーに吸収される赤外線光量を測定することによってCO₂の濃度を求める方法である。センサーの構成が簡単で小型化に適しているという特徴がある。

等価揮発性有機化学物質相当値 (equivalent Total Volatile Organic Compounds; eTVOC) を用いる方法は、MEMSなどのMetal Oxide表面に吸着した酸素が還元性ガスにより吸着量に変化し、その電気伝導度の変化により還元性ガスの総量を検出するものである。ここで求められたeTVOCからCO₂量が推定されるものであるため、直接測定ではない。MEMSを用いるため小型に適している。

本報告では、NDIRによる測定結果を用いる。長期データについては、1日1回の自動補正と設置高度補正により、±75ppmもしくは±10%の測定精度が確保されている。

3.2 CO₂濃度に着目した感染症リスク評価

CO₂濃度に着目した感染症リスク評価の方法については、空気感染の抑制に関して研究が進んでいる⁶⁻¹⁸⁾。

空気感染と飛沫感染は、前者は直径5 μmより小さい飛沫核によるもの、後者は飛沫核が水分につつまれて直径5 μm以上となった飛沫によるものとして区別されている。後者は1m以内程度の半径で床面に落下するため社会的距離をとる効果が高い。一方で、前者は長時間空气中を浮遊するため、換気によるリスク低減が重要となる。なお、本稿執筆時現在では、COVID-19の感染経路が空気感染、飛沫感染によるものかの結論は定かになっていない。

換気の感染抑制の効果は、様々なウイルス等に対して検証されており、十分な換気によりはしか、水疱瘡、インフルエンザ、SARSなどの伝染・拡散を抑制できる事が広く知られている。例として、中学校での結核集団感染において十分とは言えない換気が高い感染率につながった可能性が指摘されている⁹⁾。また、空間が狭くなるほど、結核の感染リスクが高まることも示されている¹¹⁾。いかえれば、密閉・密集の環境が空気感染のリスクを高めると考えられる。これに対して、様々な研究の結果により、時間あたりの空気交換率 (Air Change per Hour; ACH) が2以下の場合、集団感染や高確率の感染が発生することが数多く報告されている^{6,9,10,12)}。

換気効果の評価には、前述のように測定が容易な

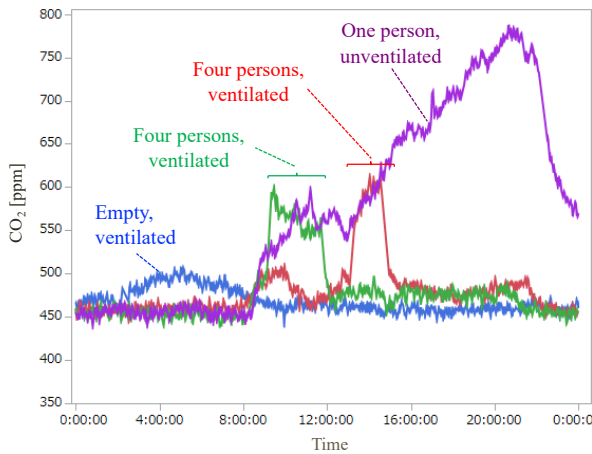


Fig. 2: Change in CO₂ concentration with or without air ventilation.

CO₂ ガスをトレーサーとする方法が取られる。例えば、窓開放によって時間あたりの ACH が 0.5 から 12 に改善することが報告されている¹³⁾。また、換気装置を適切に使用することによって、CO₂ ガス濃度の増加が抑制される。Fig. 2 に、約 48 m² の居室で CO₂ 濃度の変化を 4 日間モニタリングした結果を示す。換気装置を動作させた状態で、無人状態では 450 ppm 前後の濃度が観測されている。この状態で 4 人が部屋を利用すると 550~600 ppm 程度まで CO₂ 濃度が上昇する。さらに、換気装置を停止させて 1 人が終日部屋を利用した場合、800 ppm 近傍まで CO₂ 濃度が増加する様子が見られる。改正建築基準法では、2003 年 7 月以降に施行されたマンション等では、24 時間換気システムの設置が義務化されており、そのシステムを有効に活用することが必要である。

3.3 曜日と時間帯による CO₂ 濃度の変化

AIA のようなフリーアドレススペースは、利用者が確定していないことに加え、様々なイベントを契機として利用人数が増減する傾向がある。そこで、AIA に設置された CO₂ センサーの観測値の傾向を調査した。

大学の附属図書館という施設の性質により、CO₂ 濃度の変化については曜日による特徴が見られる。Fig. 3 に、AIA 全エリアについて、曜日毎の CO₂ 濃度に関する箱ひげ図を示す。観測値の中央値を示す箱内の線の変化はさほど大きくないことがわかる。一方で、第 1 四分位点と第 3 四分位点を示す箱の大きさや、第 3 四分位点 + 1.5 × (四分位範囲) を示す上側ひげ線は、月曜から木曜にかけて増加し、金曜に低下している。さらに、外れ値とみなされる上側ひげ線を超えた点にも、同様の傾向が見られる。厚生労働省の建築物環境衛生管理基準¹⁹⁾では、空気調和設備や機械換気設備を設けている場合の空気環境における CO₂ の含有率の基準として 1,000 ppm が示されており、この基準値を超える観測値の発生は、月曜から木曜にかけて大きくなり、金曜には減少している。また、1,000 ppm を示す図中の赤点線より、基準超えはほぼ箱ひげ図の外れ値に対応することがわかる。すなわち、週の半ばにおいて基準超えが発生する可能性が高くなると考えられるが、

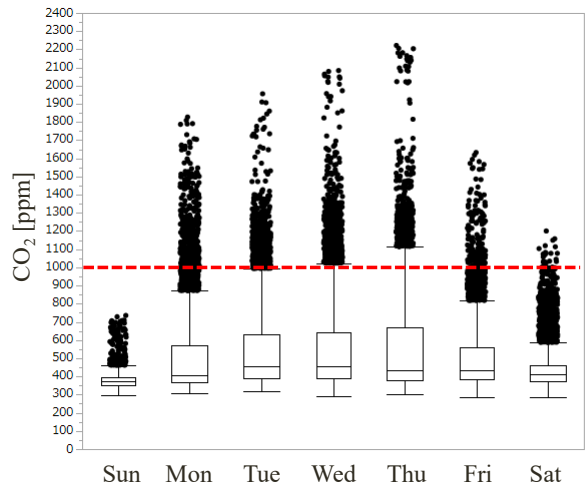


Fig. 3: Change in CO₂ concentration in a day of the week.

定常的な傾向ではなく何らかの契機によって CO₂ 濃度の基準超えが発生しているものと考えられる。

また、同日内においても時間帯によって CO₂ 濃度の増減が発生する。Fig. 4 に、AIA 全エリアの 1 日の中の CO₂ 濃度の推移を示す。第 1 四分位点と第 3 四分位点を示す箱の大きさより、早朝にはほぼ外気と同じレベルまで低下した CO₂ 濃度が、会館時間である 9 時以降は増加して、17 時頃をピークとしてその後低下に転じることがわかる。すなわち、日中の CO₂ 濃度の変動は定常的なものと考えられる。ただし、日内変動の傾向は、出入口付近の人感センサーの反応数の傾向とも一致しているものの、人感センサーの反応数、CO₂ 濃度は共に利用者数と一対一対応するものではないため、100 ppm という基準超えの発生が利用者数の急増によるものか否かは不明である。

以上の結果より、週半ばである条件が重なった際の 17 時前後に、1,000 ppm を超えるような事態が発生する可能性が高くなることがわかった。学事との対比より、基準超えが発生するのは前期、後期の中間試験、期末試験の期間であることが推測される。それらの期

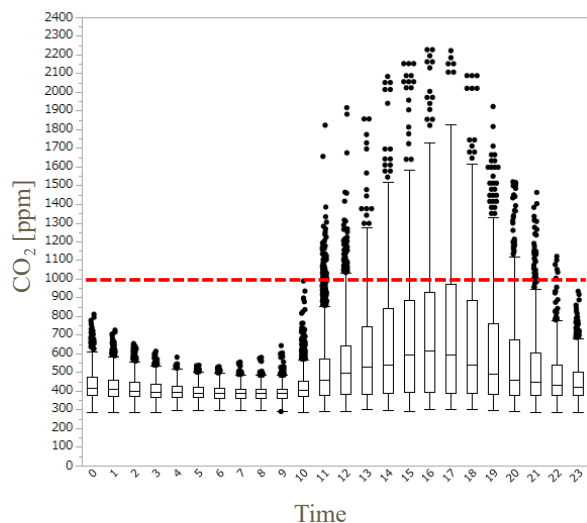


Fig. 4: Change in CO₂ concentration in a day.

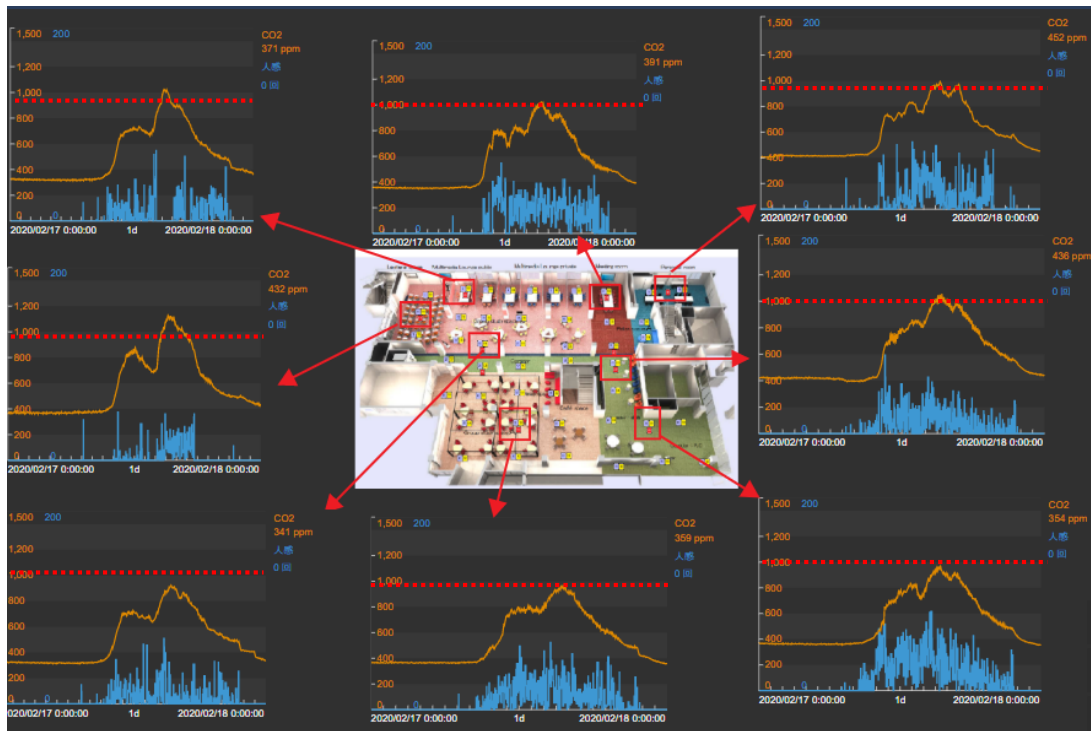


Fig. 5: Time series relation between local CO₂ concentration and local human detecting.

間は、AIAの目的・用途を鑑みると使用希望者が増加する時期であり、その時期に利用を制限することは本末転倒となる。そのため、如何にリスクを正しく理解して、安全安心にAIAを利用できるようにすることが求められる。

3.4 センサーデータの組み合わせによる局所評価

床面積が1,008m²あるAIAは、収容人数が270人以上、電源コンセントが204口、学内者向けWiFi環境が整備されており、短時間から長時間の学習等の用途に用いられる。エリアは用途によって8つに区分されており、利用者は自分の利用スタイルに合わせて居場所を選ぶ。8つのエリアはそれぞれ、(1)セミナーや集合研修を行うLecture space, (2)フリーアドレスデスクとチェアを中心としたGroup study space, (3)会議スペースとして用いるMeeting room, (4)机上プロジェクタ等が整備されたMultimedia Lounge, (5)1人用学習スペースであるPersonal room, (6)休憩やリラックスした状態でのブレインストーミング等に用いられるRelax space, (7)簡単な打ち合わせ等に向けたPlanning space, (8)入り口付近から各エリアへのコンコースとなるCorridorである。

各エリアにおける個別の状況を調査するため、エリア毎のCO₂センサーの時系列変化と、人感センサーの反応値を比較した。結果の例をFig.5に示す。なお、図中の8箇所は着目したセンサーの位置から選択しており、上記の(1)~(8)に対応しているものではない。分析の結果、①センサー付近で人が動くことに反応する人感センサーの数値は、Corridor付近で大きくなる。これは出入りする人の数に対応しているものと思われる。②一方で、CO₂濃度が高くなるエリアは、入口から離れたLecture spaceやPersonal room付近であり、人感センサーの反応値の大小には関係しない。③フリーアド

レスの中心であるGroup study spaceは利用者のactivityも活発であるため、CO₂濃度と人感センサーの反応値の両者が高くなるが、利用者数が多いとは限らない、などのことがわかった。

期間内の全ての環境センサーデータは52560×180の数値行列による時系列多次元データとなる。また、コンセント単位の電力消費を含むデータは52704×367の時系列多次元データである。これらの次元の変数における特徴を、個別の分析から抽出することは難しいため、位相的データ解析(Topological Data Analysis; TDA)²⁰⁾の手法を用いて分析を行った結果、特定エリアのCO₂濃度の上昇に対して、他の隣接エリアの人感センサーの反応値や消費電力などの特性が影響するようにみえることがわかった²¹⁾。例えば、リスク高エリアに隣接するエリアにおいて人感センサーの反応値が高くなった2~3時間後には、該当エリアのCO₂濃度が高くなる傾向がある。

これらの特徴的な状況が検知された場合に、事前に換気を行うような制御を行うことによって、エリアの局所リスクが高くなることを未然防止することが可能になると考えられる。

3.5 空気の流れの可視化と制御

前述のように、CO₂濃度が高くなる傾向には局所性があることがわかった。この要因の明確化と、緩和、制御のためには、空気の流れそのものを可視化することが必要となる。

一般に、風速を測定する風速計には、熱式風速型、ベーン式風速計、風杯型風速計、風高風速計、超音波風速型、ピトー管式流速型、レーザードップラー流速型などがある。一般に室内の風は空調や換気によるものであり、0~1 m/sec程度の非常に小さいものである。

そのため、調査には低い風量で感度の高い方法を用いる必要がある。

今回は、熱式風速計を用いて AIA の各エリアを 2m ずつのメッシュ状に風量測定を行った。結果の一部を Fig.6 に示す。観測した全ての結果を、式(1)に示すゼロ強調型ワイブル分布を用いて分析した。

$$F(x) = p + (1 - p) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right] \right\} \quad (1)$$

ここで、 x は風量 (m/sec)、 $F(x)$ は累積確率、 p はゼロ比率 (無風と考えられるポイントの比率)、 β は有風分布の形状パラメータ、 η は有風分布の尺度パラメータである。図中に示すパラメータの最尤推定値より、測定時点で無風ポイントが全体の約35%存在することが示唆される。

この測定は、ある時点での状況に限ったものであり、実際には空気の流れは時々変わってゆくものと考えられ、換気によるリスクの低減効果を直接表現するものではない。一方で、換気のパフォーマンスを定量的に把握することは、場の有効利用や空調による無駄なエネルギー消費の低減において重要と考えられる。リスク制御の点からも、安価かつ詳細な微風量分布の可視化は、今後重要な技術になると考えられる。

3.6 個人用 CO₂ モニターによるリスク観測

AIA のようなフリーアドレススペースにおいて、中央集権的に空気質の管理や制御を行うことには限界があると考えられる。

レイアウトや滞在位置の自由度が高いことを前提とするフリーアドレススペースにおいては、換気や空調の制御の前提となる人流の不確実性が高い。また、CO₂ 分布などによってリスクを可視化することは、利用者の行動変容を促すことになり、それによってリスク分布が変化することが予想される。さらには、同じ情報を得た利用者の集団的行動の相互関与によって、創発的な事象が発生する可能性も否めない。このような状況では、管理者による管理のみに状況を委ねるのではなく、個々の利用者への適切な情報提供を行い、その

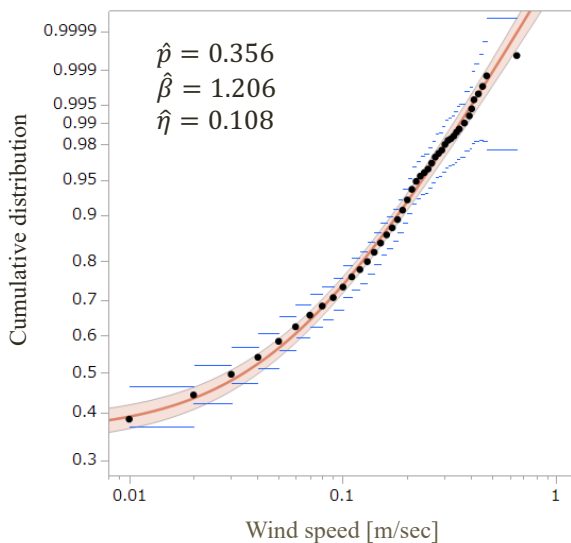


Fig. 6: Weibull plot for wind speed observations. Fitted line indicates Zero-inflated Weibull distribution.



Fig. 7: An example of CO₂ concentration change in the meeting room at AIA.

行動変容を前提とした環境・リスク管理を設計することが必要と考えられる。

例として、Fig.7に NDIR 方式の小型センサーと小型マイコンを使った手元測定の結果を示す。AIA の会議スペースである Meeting room にて、9名の参加による2時間 (14時~16時) の会議を行った際の CO₂ 濃度の変化を測定した結果を示す。通常は CO₂ 濃度が上昇する傾向にある場所と時間であるため、サーキュレーターを用いて空気の流れを作って会議を行った結果である。図に示されるように、外気レベルである 400 ppm 前後より高い濃度が確認されるが、会議を行なっている2時間の間、500 ppm 前後の CO₂ 濃度に抑制されていることがわかる。

CO₂ 濃度がウィルスの存在と一対一対応しているものではないため、これらの数値が感染リスクをそのまま表現している訳ではないと考えられる。そのため、これらの情報をもとにしたリスクの定量的予測の方法が必要になる。また、前述した空気の流れの可視化と組み合わせることにより、場のリスクの制御を行うと同時に、利用者に適切な形で安全安心を伝えることが重要になろう。

フリーアドレススペース以外に、著者らの1人は医療機関スペースでの CO₂ 濃度のモニタリングを実施し、安全性の評価と対策の提案について報告している²²⁾。医療機関室内のレイアウトや換気設備の状況に応じて有効な換気を提案するには、リアルタイムかつ多地点の CO₂ 濃度の可視化が有効である。新常態においても社会に欠かせないこれらの施設において、利用者の安心と安全を確保する取り組みは、今後さらに必要なものである。

4 今後の課題

新常態における場のリスク解析においては、いくつかの課題がある。

前述したように、CO₂ に着目したリスク解析は、ウイルスそのものをセンシングした結果ではない。最近では、MEMS センサーによる方法なども提案されており、その成果が実用化されることが期待される。また、対象となるエリアの状況を検知して、換気と空調のトレードオフを考慮して電力消費を最適化する方法も必要になる。これらの環境情報を統合して、タイムリー

に制御を行うためには、無線通信網技術や人工知能技術の統合も、必要になると考えられる。

さらに、目には見えないウイルスなどのリスクをもとに人々に適切な行動変容を促すには、その可視化や言語による伝達の方法について、リスク工学の視点からの研究が必要であろう。

5 まとめ

本報告では、Ambient Intelligence に関連するセンサーやデータ解析の技術を用いて、フリーアドレススペースのリスク解析と感染の未然防止を行う取り組みについて紹介した。

CO₂をトレーサーガスとする空気質の評価や、安価かつ小型のCO₂センサーなどの技術は既に数多く研究、報告がなされ、実用化も進んでいる。これらの方法を統合し、リスク評価の方法を確立することによって、職場や学修の場の安全・安心を確保し、人々の協業による発想と創造を支える空間を形成することが、これからの新常态をより望ましい姿で具現するために、必要な活動と考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP 20K20314, JP 20H02387 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 文部科学省, 新型コロナウイルス感染症の状況を踏まえた大学等の授業の実施状況, https://www.mext.go.jp/content/20200717-mxt_kouhou01-000004520_2.pdf (2020.8.23 閲覧).
- 2) <https://newswitch.jp/p/22491> (2020.8.23 閲覧).
- 3) Weber, W., J. Rabaey, and E.H.L. Aarts, *Ambient Intelligence*, Springer (2005).
- 4) <https://aia.lib.uec.ac.jp/> (2020.8.23 閲覧).
- 5) Wickam, H., Tidy data, *Journal of Statistical Software*, Vol. 59, No. 10 (2014) doi:10.18637/jss.v059.i10.
- 6) 古谷博行, 室内 CO₂ 濃度測定による結核感染リスクの推定に関する総説, *結核*, Vol. 93, No. 8, pp. 479-483 (2018).
- 7) Bloch A.B. *et al.*, Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting, *Pediatrics*, Vol. 75, No. 4, pp. 676-683 (1985).
- 8) Li, Y., *et al.*, Role of Ventilation in Airborne Transmission of Infectious Agents in the Built Environment: A Multidisciplinary Systematic Review, *Indoor Air*, Vol. 17, No. 1, pp. 2-18 (2007).
- 9) Menzies D, *et al.*, Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers, *Annals of Internal Medicine*, Vol. 133, No.10, pp. 779-789 (2000).
- 10) 豊田誠, 中学校結核集団感染の環境要因に関する検討, *結核*, Vol. 78, pp. 733-738, 2003.
- 11) 渡瀬 博俊, 学習塾の結核集団感染に関連して換気が感染リスクに与える影響, *結核*, Vol. 85, No. 7, pp.591-593 (2010).
- 12) 松本健二, 辰巳朋美, 有馬和代, 他, 環境要因が影響した結核集団感染の 1 例, *結核*, Vol. 86, pp. 487-491 (2011).
- 13) Emmerich S.J. and Persily A.K., *State of the Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application*, DIANE Publishing, PA, USA, 2001.
- 14) Escombe A.R., Oeser C.C., Gilman R.H., Navincopa M., Ticona E., et al., Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion, *PLoS Medicine*, Vol. 4, No. 2, e68 (2007). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0040068>.
- 15) Wells W.F., *Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections*, Harvard University Press, Cambridge, 1955.
- 16) Rudnick S.N. and D.K. Milton, Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration, *Indoor Air*, Vol. 13, pp. 237-45, 2003.
- 17) Hella J, C. Morrow, F. Mhimbira, *et al.*, Tuberculosis transmission in public locations in Tanzania: A novel approach to studying airborne disease transmission, *J. Infect.*, Vol. 75, pp. 191-197 (2017).
- 18) Buonanno, G., L. Stabile, and L. Morawska, Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment, *Environment International*, Vol. 141, pp. 105794-1-8 (2020).
- 19) <https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsueisei10/> (2020.8.23 閲覧).
- 20) Edelsbrunner, H., D. Letscher and A. Zomorodian, Topological persistence and simplification, *Discrete and Computational Geometry*, Vol.28, No.4, pp.511-533 (2002).
- 21) 遠藤駿, 横川慎二, 位相的データ解析を用いた室内環境に関する時系列多次元データの分析, 投稿中.
- 22) 盛武敬, 石垣陽, 棚橋善克, モバイル CO₂ センサによる病院での密集・密閉可視化と“断密”の試み, 第 30 回日本産業衛生学会全国協議会, 演題登録番号 1051 (2020).