

CO₂ センサーと測位システムを用いた感染リスクモニタリングシステムの開発

山本 ミゲイル

(技術研究所)

川村 聡宏

(技術研究所)

長谷部 弥

(技術研究所)

栗原 隆

(技術研究所)

富田 賢吾

(技術研究所)

鈴木 圭一

(技術研究所)

Development of Infection Risk Monitoring System Utilizing CO₂ Sensors and Local Positioning System

Miguel Yamamoto, Akihiro Kawamura, Hisashi Hasebe,
Keichi Suzuki, Takashi Kurihara and Kengo Tomita

本論文は、CO₂ センサーと測位システムを用いて感染確率をリアルタイムにモニタリングするシステムについて述べている。Wells-Riley モデルの理論を基本として、エアロゾルによる感染確率分布と飛沫による感染確率分布を予測する手法を提案し、このシステムで採用した。また、このシステムが導入されたフリーアドレスのオフィスを例として示し、感染経路ごとの傾向を反映して可視化できることを確認した。このシステムを用いることで、建物管理者が換気の目安としたり、フリーアドレスのオフィスであれば在室者が座席選択の参考としたりすることができるものである。

This paper describes a system for real-time monitoring of infection risk using CO₂ sensors and a local positioning system. Based on the theory of the Wells-Riley model, a method to predict the infection probability distribution by airborne transmission and by droplet transmission is proposed and employed in this system. Also, an example was given of a free-address office where this system was installed, and it was confirmed that the system could reproduce and visualize trends for each transmission route. By using this system, building managers can use it as a guideline for ventilation, and if it is a free-address office, occupants can use it as a reference for seat selection.

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の流行により、建物における感染対策の重要性が高まった。新型コロナウイルス感染症の感染経路の内、マイクロ飛沫等と呼ばれる小さなサイズの飛沫(以下、エアロゾル)による感染は、換気によって対策が可能である。しかし、部屋の隅や障害物があるところまで換気が十分に行き届いていなかったり、風下側では高濃度のエアロゾルを含んだ空気が流れていたり、実際の換気の効果は直感的には把握しにくい。大きな飛沫による感染は、人と人の距離を大きくとること(ソーシャルディスタンス)で対策が可能である。したがって、換気の状態や人と人の距離をモニタリングすることができれば、感染リスクを把握することができ、リスクに応じた対策行動を取ることができる。新型コロナウイルス感染症のパンデミックが収束した後も、人口増加等の影響でパンデミックがより高頻度に発生する可能性が示唆されている¹⁾。そ

のため、今後発生すると考えられるパンデミックに備えた建築が求められている。

順天堂大学大学院医学研究科 Pandemic Ready 共同研究講座(担当教授：堀賢氏)において、当社と順天堂大学の共同研究の一環として、感染確率をリアルタイムにモニタリングするシステム(以下、感染リスクモニタリングシステム)を開発した。感染リスクモニタリングシステムの構成を図-1に示す。このシステムでは、空間のCO₂濃度と在室者の位置情報から感染確率分布画像をリアルタイムに表示する。エアロゾル感染確率と飛沫感染確率を、CO₂濃度と人の位置情報で代替して算出するシステムはこれまでに例がない。また、空間の代表値としてではなく、感染確率の面的な分布を表示できるという特徴もある。本論文では、感染リスクモニタリングシステムの理論を示すとともに、その適用例を紹介する。

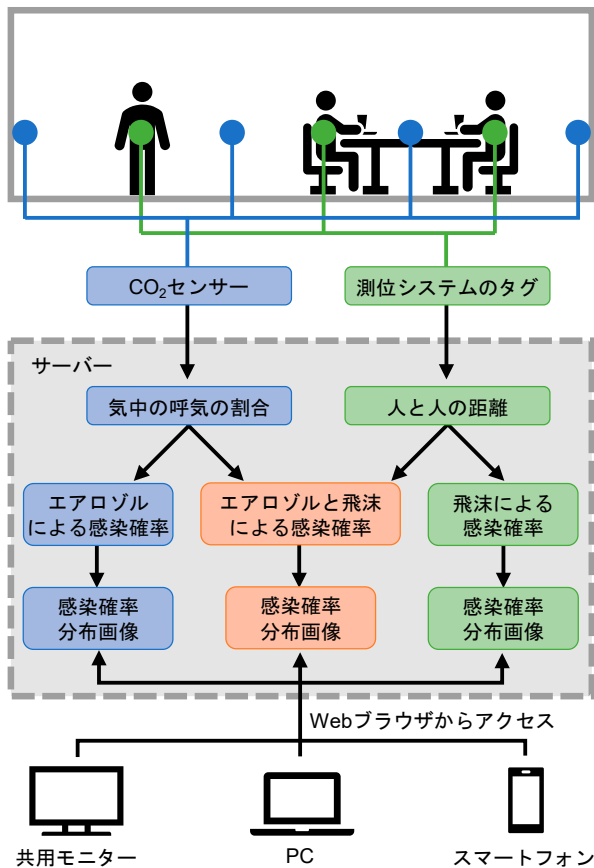


図-1 感染リスクモニタリングシステムの構成

2. 感染リスクモニタリングシステムの理論

2.1 感染確率の予測式

2.1.1 概要

感染確率の予測には、Wells-Riley モデル^{2),3)}と呼ばれる量-反応関係モデルの理論が広く用いられている。Wells-Riley モデルでは、感染確率は式(1)によって予測される。

$$P = 1 - \exp(-\mu) \quad (1)$$

ここで、 P は感染確率、 μ は感染性エアロゾルの積算曝露量(quantas)である。なお、曝露量の単位として用いられている quantas は、ウイルスの量とウイルスの感染力の両方を加味した量であり、感染確率が 63%となる時の曝露量が 1 quantas であると定義されている。

これまでに、Wells-Riley モデルに基づいてエアロゾル感染確率を評価した事例は多くあるが、これらのほとんどは、完全混合の状態を想定しており、感染性エアロゾルが均一に拡散していることを前提としている。しかし実際は、制気口の配置によって室内の換気は不均一であり、また、発生

源の場所も特定できないため、場所によって感染リスクが異なると考えられる。

さらに、飛沫による感染を考えると、大きな飛沫は長時間空中を漂うエアロゾルと異なり、重力の影響が大きいため短時間で床に落下する。したがって、エアロゾルによる感染確率を予測する式を、飛沫による感染確率の予測にそのまま用いることはできない。

以上を踏まえて、我々は Wells-Riley モデルの理論を基本として、エアロゾルによる感染確率分布と飛沫による感染確率分布を予測する手法⁴⁾(以下、本手法)を提案し、感染リスクモニタリングシステムで採用している。本章では、本手法について説明する。

2.1.2 エアロゾルによる感染確率

通常、CO₂ は気中のウイルスと同様に人の呼吸からのみ発生するため、CO₂ をウイルスのマーカーとして利用できる。空間の CO₂ 濃度からマイクロ飛沫による感染確率を求める手法としては、Wells-Riley の式を基にした Rudnick と Milton⁵⁾の手法が存在する。Rudnick と Milton の手法は完全混合状態の室内を対象としているが、本手法では対象空間を水平方向に離散化し、各 Control Volume (C.V.)の CO₂ 濃度に基づいてエアロゾル感染確率(P_{air})を予測する手法として式(2)・式(5)を提案する。

$$P_{air}(i,j) = 1 - \exp(-\mu_{air}(i,j)) \quad (2)$$

$$\mu_{air}(i,j) = f(i,j)Bq_{air}t \quad (3)$$

$$f(i,j) = (C(i,j) - C_o)/C_a \quad (4)$$

$$B = I/n \quad (5)$$

ここで、 $P_{air}(i,j)$ は i,j 番目の地点におけるエアロゾルによる感染確率、 $\mu_{air}(i,j)$ は i,j 番目の地点における感染性エアロゾルへの曝露量(quantas)、 $f(i,j)$ は i,j 番目の地点の空气中に占める呼気の割合、 B は現在の感染者の割合、 q_{air} は感染性エアロゾル発生率(quantas/時)、 t は滞在時間(時)、 $C(i,j)$ は i,j 番目の地点の CO₂ 濃度(ppm)、 C_o は外気の CO₂ 濃度(ppm)、 C_a は呼気によって増加する CO₂ 濃度(ppm)、 I は現在の感染者の人数(人)、 n は在室者数(人)である。

2.1.3 飛沫による感染確率

短時間で落下する飛沫による感染確率を求める手法としては、Wells-Riley の式を基にした Sun と Zhai⁶⁾の手法が存在する。Sun と Zhai の手法では換気量が大きいほど飛沫による感染確率が小さくなるという想定に基づいている。しかし実際は、飛沫は短時間で落下するため換気量は飛沫による感染確率に影響しないと考えられる。また、Sun と Zhai の手法ではストークスの式から求めた沈降速度を用いて距離と飛沫の到達率の関係を求め、これを感染確率の予測に用いている。しかし、咳や発話によって飛沫が発生することを考慮すると、粒子速度の水平成分を 5 m/s で一定としている点は実際の飛沫の挙動と異なると考えられる。

以上を踏まえて本手法では、次の想定に基づいて、人と人の距離から飛沫による感染確率(P_{dro})を求める手法として式(6)・式(9)を提案する。

1. 換気量は飛沫の到達率に影響しない。
2. 部屋全体の平均値ではなく、分布を求める。
3. 最も近い人だけではなく、周辺の全ての人からの飛沫の到達を考慮する。
4. 実験結果に基づいて飛沫の到達率を求める。

$$P_{dro}(i, j) = 1 - \exp(-w_{dro}\mu_{dro}(i, j)) \quad (6)$$

$$\mu_{dro}(i, j) = \alpha(i, j)Bq_{dro}t \quad (7)$$

$$\alpha(i, j) = \sum_{k=1}^n P_d(i, j, k) \quad (8)$$

$$P_d(i, j, k) = 1/(1 + \exp((d(i, j, k) - e_1)e_2)) \quad (9)$$

ここで、 $P_{dro}(i, j)$ は*i, j*番目の地点における飛沫による感染確率、 w_{dro} はエアロゾル感染に対する飛沫感染の重み、 $\mu_{dro}(i, j)$ は*i, j*番目の地点における飛沫への曝露量(quanta)、 $\alpha(i, j)$ は*i, j*番目の地点における飛沫の到達率の総和、 q_{dro} は飛沫の発生率(quanta/時)、 $P_d(i, j, k)$ は*k*番目の人から発生した飛沫の*i, j*番目の地点における到達率、 $d(i, j, k)$ は*i, j*番目の地点と*k*番目の在室者の距離(m)である。ただし、在室者が位置する場所での感染確率を予測する場合は、自身から発生する飛沫の影響を除外するため、 $P_d(i, j, k) = 0$ とした。 e_1 と e_2 は尾方ら⁷⁾による模擬咳派生装置を用いた実験から求めたパラメータであり、 $e_1 = 0.571$ m、 $e_2 = 10.185$ /mである。

2.1.4 エアロゾルと飛沫による感染確率

エアロゾルと飛沫による感染確率($P_{air+dro}$)は、エアロゾル感染または飛沫感染のいずれかの事象が発生する確率であることから、式(10)で表される。

$$P_{air+dro}(i, j) = 1 - (1 - P_{air}(i, j))(1 - P_{dro}(i, j)) \quad (10)$$

ここで、 $P_{air+dro}(i, j)$ は*i, j*番目の地点におけるエアロゾルと飛沫による感染確率である。式(2)と式(6)を式(10)に代入すると、式(11)が得られ、これを整理して式(12)が得られる。

$$P_{air+dro}(i, j) = 1 - \frac{(1 - (1 - \exp(-\mu_{air}(i, j))))}{(1 - (1 - \exp(-w_{dro}\mu_{dro}(i, j))))} \quad (11)$$

$$P_{air+dro}(i, j) = 1 - \exp(-(\mu_{air}(i, j) + w_{dro}\mu_{dro}(i, j))) \quad (12)$$

2.1.5 二次感染者数の予測

二次感染者数は、現在未感染の在室者数と感染確率を乗じることと求められる。本手法では感染確率は単一の値ではなく分布として求められることから、各在室者の位置での感染確率の平均を用いて、二次感染者数は式(13)・式(16)で与えられる。

$$D_{air} = (S/n) \sum_{k=1}^n P_{air}(l) \quad (13)$$

$$D_{dro} = (S/n) \sum_{k=1}^n P_{dro}(l) \quad (14)$$

$$D_{air+dro} = (S/n) \sum_{k=1}^n P_{air+dro}(l) \quad (15)$$

$$S = n - I \quad (16)$$

ここで、 D_{air} はエアロゾルによる二次感染者数の予測(人)、 $P_{air}(l)$ は*l*番目の在室者が位置する地点におけるエアロゾルによる感染確率、 D_{dro} は飛沫による二次感染者数の予測(人)、 $P_{dro}(l)$ は*l*番目の在室者が位置する地点における飛沫による感染確率、 $D_{air+dro}$ はエアロゾルと飛沫による二次感染者数の予測(人)、 $P_{air+dro}(l)$ は*l*番目の在室者が位置する地点におけるエアロゾルと飛沫による感染確率、 S は現在未感染の在室者数(人)である。

表-1 新型コロナウイルス感染症の集団感染事例^{6), 8)}

事例名	用途	滞在時間 (時間)	人と人の 距離 (m)	一人当たり 外気量 (m ³ /時/人)	在室者数 (人)	二次 感染者数 (人)	実際の 感染率 (%)
バス A	係数推定	2	1.05	23.91	46	8	17.8
バス B	係数推定	1	1.3	28	12	3	27.3
バス C	係数推定	4	0.7	20	68	25	37.3
レストラン	精度検証	1.4	—注 1)	13.7	21	9	45.0

表-2 推定された係数と予測誤差

係数決定に用いた事例の 組み合わせ		感染性エアロゾ ル発生率(q_{air}) (quanta/時)	飛沫の発生率× 重み($q_{dro}w_{dro}$) (quanta/時)	予測された 感染確率 (%)	実際の感染率 との差 (ポイント)
バス A	バス B	226	1.18	41.0	4.0
バス B	バス C	226	3.31	43.0	2.0
バス C	バス A	223	3.40	42.8	2.2

2.2 係数の決定

本手法で必要な係数である、感染性エアロゾル発生率(q_{air})、飛沫の発生率(q_{dro})、エアロゾル感染に対する飛沫感染の重み(w_{dro})について、これらの係数は、感染症の種類によって異なる値を取る。また、同じ感染症であっても、感染症を引き起こしているウイルスの株ごとに異なる値を取る。本論文では、新型コロナウイルス感染症を引き起こす SARS-CoV-2 の従来株を想定して、2020 年 1 月に発生した実際の新型コロナウイルス感染症の集団感染事例を用いて係数を決定した。集団感染事例として使用した条件を表-1 に示す。

係数決定用の感染事例から 2 つの事例を選択し、本手法で予測される感染確率と、実際の感染率の誤差^{注 2)}が最小となる係数を求めた。求めた係数を用いて、精度検証用の感染事例の感染確率を予測し、実際の感染率との差を求めた。なお、事例の選択は 3 パターン試行した。この係数推定方法では、飛沫の発生率(q_{dro})とエアロゾル感染に対する飛沫感染の重み(w_{dro})を分離できず、これを掛け合わせた係数($q_{dro}w_{dro}$)を推定した点に留意された。

推定された係数と、その予測誤差を表-2 に示す。SARS-CoV-2 の従来株の感染性エアロゾル発生率(q_{air})を推定した研究はいくつか報告されている^{9)・11)}。その値は活動状態によって大きく異なり、10.5-1030 quanta/時である。本論文で推定さ

れた 223-226 quanta/時はこの範囲内であることから、概ね妥当と考えられる。各組合せで推定された係数を用いて予測された感染確率と、実際の感染率の差は最大で 4 ポイントであり、本手法の予測精度が十分に高いことが確認された。

3. 感染リスクモニタリングシステムの実装

3.1 概要

前章で述べた理論を用いて、感染リスクモニタリングシステムを開発した。本システムでは、対象空間に設置された CO₂ センサーによって CO₂ 濃度分布を、測位システムによって在室者の位置情報を測定する。測定データはリアルタイムにサーバーに送信される。サーバーでは、測定データを基に感染確率の計算が Web アプリによって行われる。計算された感染確率の分布は平面図にプロットされ、出力された画像を各種端末で Web ブラウザを用いて閲覧することができる。例えば個人の PC やスマートフォンで閲覧したり、共用部のモニターに表示したりすることが可能である。

また、感染リスクモニタリングシステムは当社が提供する建物 OS である DX-Core¹²⁾と連携させることが可能である。したがって、建物利用者は DX-Core で行う会議室予約等と同じインターフェース(以下、「DX-Core 画面」と記載する)から、現在や過去の感染確率分布を確認することが

できる。さらに今後は、予測された感染リスクに応じて外気量を変更するなど、DX-Coreを通して空調制御との連動を可能にする開発を検討している。

本章では、あるフリーアドレスのオフィスに感染リスクモニタリングシステムを導入した例を示す。

3.2 測定機器

感染リスクモニタリングシステムでは、CO₂センサーと測位システムが必要である。ただし、予測する感染リスクの要素を限定することで、いずれかの測定機器のみことも可能である。例えばエアロゾル感染リスクのみを対象とし、飛沫感染リスクには対応しないとする場合は、測位システムの導入は不要であり、CO₂センサーの設置のみで良い。

CO₂センサーには様々な機種が存在するが、本章で示すオフィスでは Haltian 社 Thingsee AIR を使用した。センサーの設置状況を写真-1に示す。CO₂センサーはCO₂濃度以外に温湿度等も測定可能な機種が多く、その場合は感染リスク以外にもそれらの要素の分布画像を感染リスクモニタリングシステムで閲覧することが可能となり、感染対策以外にも活用の幅を広げることができる。

測位システムにも様々なシステムが存在するが、本章で示すオフィスでは Quuppa 社 Quuppa Intelligent Locating System™ を用いた。LPS(Local Positioning System)の一種であり、数十 cm 単位の高精度測位が可能な仕様である。在室者は写真-2に示すタグを携帯する必要がある。タグは直径 4 cm 程度の円盤状であり、社員証に取り付けて携帯できる大きさである。このタグの位置を、天井に設置したロケータによって測定することで、在室者の位置情報を測定する。

3.3 感染確率の計算に用いた設定

SARS-CoV-2 の従来株が流行している状態を想定して、感染確率予測計算の設定を決定した。設定値を表-3に示す。また、感染リスクモニタリングシステムでは、感染確率が閾値を超えた場所は赤く表示される。閾値は 0.5% に設定した。なおこれらの設定値は、想定する感染症の種類や流行状況に応じて変更することができる。

3.4 感染リスク等の表示例

ある日時の結果を例として示す。初めに、CO₂濃度分布を図-2に示す。在室者の周辺で CO₂濃



写真-1 CO₂センサー

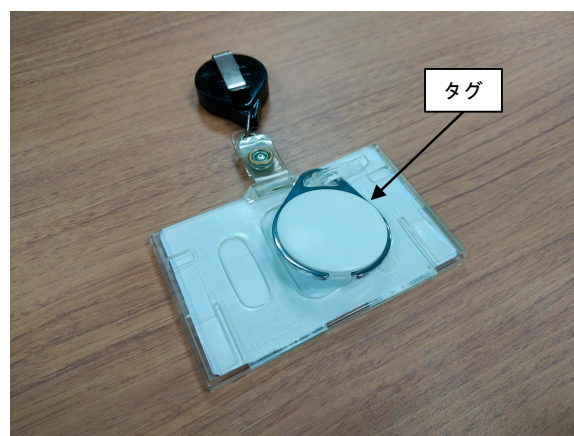


写真-2 測位システムで用いるタグ

表-3 感染確率の予測のための設定値

項目	設定値	備考
現在の感染者の割合(B)	0.1%	抗体保有調査の結果 ¹³⁾ を参照
呼吸によって増加する CO ₂ 濃度(C_a)	38,000 ppm	事務作業を想定 ⁵⁾
感染性エアロゾル発生率(q_{air})	226 quanta/時	2.2 節で推定した係数の中央値
飛沫の発生率×重み($q_{dro}w_{dro}$)	3.31 quanta/時	2.2 節で推定した係数の中央値
滞在時間(t)	1 時間	

度が高い傾向や、図面の左側よりも右側の方がCO₂濃度が相対的に高い傾向が見られた。これは、図面の右側よりも左側の方が換気の状態が相対的に良いことを示していると考えられる。

エアロゾルによる感染確率分布を図-3に示す。エアロゾルによる感染確率の予測にはCO₂濃度を用いているため、CO₂濃度分布と似た傾向を示した。飛沫による感染確率を図-4に示す。飛沫による感染確率の予測には在室者の位置情報を使用しているため、在室者の近傍で感染確率が相対的に大きく、在室者から離れた位置では0となった。エアロゾルと飛沫による感染確率分布を図-5に示す。エアロゾル感染確率分布と飛沫感染確率分布を足し合わせたような分布を示した。感染確率が閾値を超える範囲(図の黒線で囲まれた赤い領域)は、在室者の周辺だけであり、自身から発生する飛沫の影響を除外して予測した感染確率(図の

丸の中の色で示した)は、いずれの在室者も閾値以下となっていた。したがって、本章の設定では、この時刻の在室者はソーシャルディスタンスを確保していれば感染確率が閾値を超えず、自由に座席を選択できることが分かる。更に感染確率を低減させたい在室者は、感染確率が最も低い、図面の左下のエリアに移動することが考えられる。

以上の通り、感染リスクモニタリングシステムによって予測される感染確率の分布の傾向はエアロゾルによる感染確率と飛沫による感染確率で異なり、感染経路ごとの傾向を反映して可視化できることが確認された。DX-Core画面から感染確率分布画像を閲覧した場合の例を図-6に示す。このように在室者が感染確率分布を確認することで、在室者は座席選択の参考にすることができる。

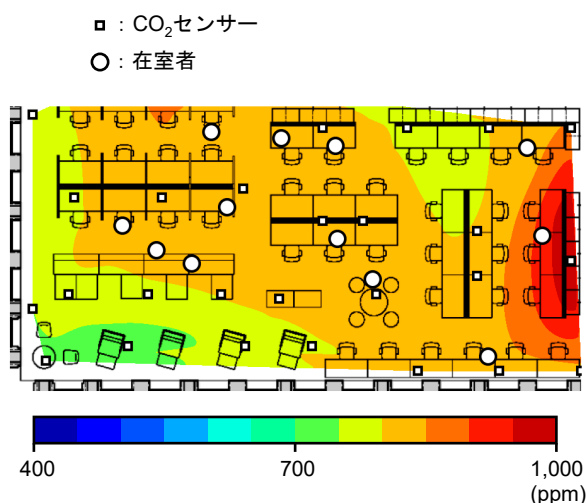


図-2 CO₂濃度分布

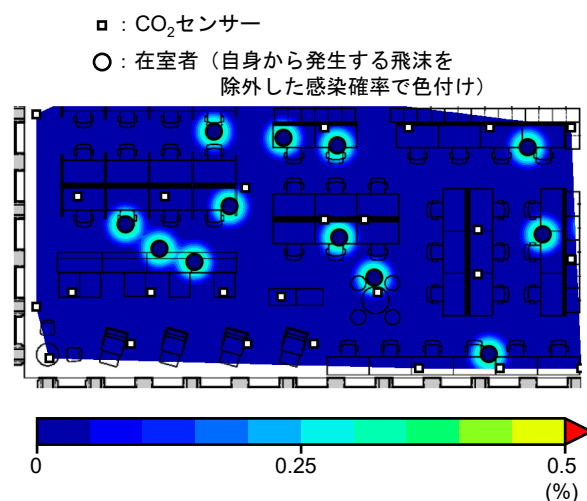


図-4 飛沫による感染確率分布

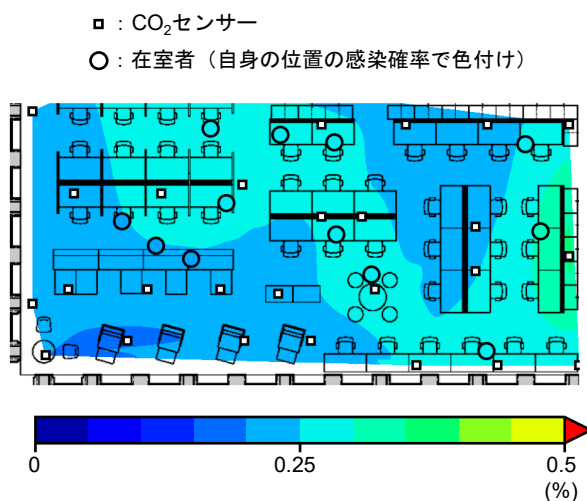


図-3 エアロゾルによる感染確率分布

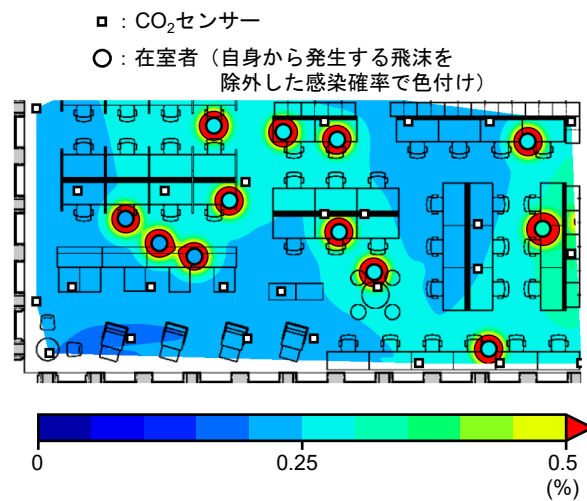


図-5 エアロゾルと飛沫による感染確率分布



図-6 DX-Core 画面からの感染確率画像の閲覧
(センサーはフロアの一部にのみ設置)

4. おわりに

本論文では、感染リスクモニタリングシステムの理論を示すとともに、その適用例を紹介した。感染リスクモニタリングシステムを導入することで、感染確率が高い座席やエリアを早期に発見し、改善策を講じることができる。すなわち、建物管理者が換気の目安としたり、フリーアドレスのオフィスであれば在室者が座席選択の参考としたりすることができる。したがって、感染リスクモニタリングシステムを導入することによって、実際の状況に応じた感染対策を行うことができる。

また、CO₂ センサーの設置や測位システムの導入は、感染対策以外にも活用することが可能である。例えば CO₂ センサーは多くの場合、温度も同時に測定することができるため、温度分布を可視化し、温度ムラが生じていないか等を確認することができる。また、測位システムを導入することで、例えば、打合せスペース等の使用頻度を分析して適切な什器レイアウトの検討に用いたり、フリーアドレスのオフィスでも誰がどこにいるかを簡単に確認できるようにしたりなどの活用が可能である。したがって、通常時は感染対策以外に活用し、パンデミック時には感染対策として活用するという、パンデミックに備えた建築としてのシステムとなっている。

謝辞

順天堂大学大学院 教授 堀賢氏、早稲田大学 教授 田辺新一氏には本手法の開発において指導を受けた。ここに記して謝意を表する。

<注釈>

注1) このケースでは人と人の距離が一樣ではないため、実際の座席配置から飛沫の到達率(P_d)を計算した。

注2) 誤差としては二乗平均平方根誤差(RMSE)を用いた。

<参考文献>

- 1) Marani M., Katul G.G., Pan W.K., Parolari A.J., : "Intensity and frequency of extreme novel epidemics", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.118, No.35, 2021
- 2) Wells W. F. : "Airborne contagion and air hygiene: an ecological study of droplet infections", Harvard University Press (for The Commonwealth Fund), 1955
- 3) Riley E. C., Murphy G., Riley R. L. : "Airborne spread of measles in a suburban elementary school", American Journal of Epidemiology, Vol.107, No.5, pp.421-432, 1978
- 4) Yamamoto M., Kawamura A., Tanabe S., Hori S. : "Predicting the infection probability distribution of airborne and droplet transmissions", Indoor and Built Environment, Epub ahead of print, 2022
- 5) Rudnick S. N., Milton D. K. : "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration", Indoor Air, Vol.13, No.3, pp.237-245, 2003
- 6) Sun C., Zhai Z. : "The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission", Sustainable Cities and Society, Vol.62, p.102390, 2020
- 7) 尾方壮行, 市川真帆, 堤仁美, 有賀隆男, 堀賢, 田辺新一 : "模擬咳発生装置による飛沫沈着量分布の測定", 日本建築学会環境系論文集, Vol.83, No.743, pp.57-64, 2018
- 8) Li Y., Qian H., Hang J., Chen X., Cheng P., Ling H., Wang S., Liang P., Li J., Xiao S., Wei J., Liu L., Cowling B. J., Kang M. : "Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant", Building and Environment, Vol.196, p.107788, 2021
- 9) Buonanno G., Stabile L., Morawska L. : "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment", Environment International, Vol.141, p.105794, 2020
- 10) Dai H., Zhao B. : "Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces", Building Simulation, Vol.13, No.6, pp.1321-1327, 2020
- 11) Miller S., L. Nazaroff W. W., Jimenez J. L., Boerstra A., Buonanno G., Dancer S. J., Kurnitski J., Marr L. C., Morawska L., Noakes C. : "Transmission of SARS - CoV - 2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event", Indoor Air, Vol.31, No.2, pp.314-323, 2020
- 12) 山崎元明, 廣瀬啓一, 白石理人 : "建物デジタルプラットフォーム「DX-Core(建物 OS)」の開発", 清水建設研究報告, Vol.99, 2021
- 13) 厚生労働省 : "抗体保有調査の結果について", 2020