

窓開け換気による現場詰所の感染リスク低減効果

住 吉 栄 作 原 嶋 寛

Effectiveness of Ventilation through Open Windows to Reduce the Risk of Infection at Construction Site Rest Areas

Eisaku Sumiyoshi Hiroshi Harashima

Abstract

Ventilation is an effective measure for preventing viral infections, such as COVID-19. It is recommended that workers' rest areas in construction sites be regularly ventilated because of their crowded environments. However, because the expected effect varies depending on various conditions, such as window opening and room layout, a method to quantitatively evaluate the risk of infection is required. In this study, airflow distribution and ventilation efficiency in a room were evaluated to verify the effectiveness of ventilation in reducing the risk of infection through open windows. Additionally, the risk of aerosol infection was estimated using the Wells-Riley model. The results confirmed that a larger window opening was effective in increasing the ventilation air volume and reducing the risk of infection.

概 要

COVID-19をはじめとしたウイルス感染症に対して、感染予防のために講じるべき具体的対策のひとつに換気が挙げられる。建設現場の作業員詰所においても、密閉・密集・密接いわゆる「3つの密」となりやすい環境であることから、定期的な換気が推奨されている。本報では、作業員詰所を対象とした窓開け換気による感染リスク低減効果の検証を目的として、流体解析に基づく室内の気流分布および換気効率の評価を実施した。さらに、Wells-Rileyモデルを用いたエアロゾル感染のリスクの見積りを行った。その結果、窓の開度を大きくすることで換気量を増やし、感染リスクを低減する効果があることを確認した。今後は、得られた評価手法を活かして感染リスク低減を目的とした建築物の計画や運用方法の提案に幅広く適用していきたい。

1. はじめに

昨今のCOVID-19の流行拡大に伴い、建設現場の作業員詰所（以降、現場詰所）においてもその対策が求められている。一般的に細菌やウイルスなどによる感染症は、接触・飛沫・空気感染が主な感染経路とされており、厚生労働省は感染予防のための積極的な換気と呼び掛けている。同省の資料によると、「換気の悪い密閉空間」に当たらないためには、換気量 $30\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ を満足することと記されている¹⁾。これは、建築物衛生法（建築物における衛生的環境の確保に関する法律）における空気環境基準に沿ったものであり、仮設建物である現場詰所において同様の対策を求めることは困難である。そこで、窓開け換気による新鮮外気の取り入れを行い、十分な換気量を確保することが現実的な対策方法となる。しかし、窓の開け具合は気象条件による制約を受けるため、事前に窓の開度と室内の温熱環境について検証する必要がある。本報ではまず、ウイルス感染経路や感染リスク評価手法について整理したうえで、2種類の現場詰所を対象とした数値流体シミュレーションを実施する。窓の開度を変化させたケーススタディを行い、それぞれの換気量および室温を明らかにする。さらに、一次感染者の存在を想定した感染性粒子の拡散性状解析を実施する。あわせて、

感染確率モデルを用いた感染リスク評価を行い、窓開け換気による感染リスク低減効果についても検討する。

2. 室内環境中での感染性粒子の拡がり

2.1 伝播経路

感染性ウイルスを含む粒子は、感染者の鼻や口から放出され、これに曝露されることで感染が拡大する。感染性ウイルスによる感染経路は、接触感染、飛沫感染、空気感染がある。接触感染および飛沫感染については、手指消毒やマスク着用などの対策が一般的である。しかし、空気を介した感染については目に見えないことから、対策は困難となる。麻疹・結核・水痘は空気感染によって拡がるのが知られており、感染力が強く相応の対策が必要となる。SARS-CoV-2（SARSコロナウイルス2）については、流行初期に空気感染の可能性は否定されていたが、日本国内においては厚生労働省の呼びかけにより、「3つの密」を避けて生活するよう注意喚起が促された²⁾。これは室内において換気が悪く密集した特定の環境条件下において、集団感染が発生した事例が国内外で報告されたことを受けたものである。SARS-CoV-2の感染経路については様々な見解が存在しているが、2022年3月に国立感染症研究所が公表した情報では、空気中に浮遊する

ウイルスを含むエアロゾル（飛沫核）による感染があり得るとしている³⁾。これは、換気の悪い密閉空間のような特定の条件下では、5 μm 以下のエアロゾル粒子がしばらくの間、空气中を漂うような広義の空気感染と呼べる状況を示唆したものである。ただし、この現象は従来の空調などを通じて空气中を長時間漂い、長い距離でも感染が起こる空気感染とは異なる概念である。いずれにおいても、エアロゾルも感染経路の一つとして認識し、エアロゾル感染を前提とした対策が必要であると考えられる。

2.2 飛沫およびエアロゾルの特性

咳やくしゃみ、会話や呼吸によって人間から発生する粒子は様々な大きさや性状を有する。空間中に放出された粒子は、その大きさや水分量によって振る舞いが異なる。飛沫のような液体を含んだ大きな粒子はすぐに落下するが、飛沫核のような小さく乾燥した粒子は、室内中に長時間にわたって浮遊する。WHOでは直径が5 μm より大きいものを飛沫、咳やくしゃみによって発生した飛沫が空气中で蒸発して5 μm 以下となったものを飛沫核と定義している⁴⁾。ウイルスを含むエアロゾル粒子の空气中での滞留時間は、他の力が働かない場合、粘性抗力と重力のバランスから求められる。粒子の終末沈降速度 $u_p(\text{cm/s})$ は、Stokesの法則から次式で表現される。

$$u_p = \frac{gd_p^2 \rho_p}{18\eta} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度(cm/s^2)、 d_p はエアロゾル粒子の直径(cm)、 ρ_p はエアロゾル粒子の密度(g/cm^3)、 η は空気粘度($\text{g/cm}\cdot\text{s}$)である。静穏環境下におけるある大きさのエアロゾル粒子が1.5mの高さから地表に到達するまでの沈降時間をFig. 1に示す。飛沫の大部分は水分であることから、エアロゾル粒子の密度は1 g/cm^3 を仮定した。静止した空气中では、5 μm のエアロゾル粒子が33分で地表面に沈降するのに対し、1 μm のエアロゾルでは14時間以上浮遊し続けることが分かった。実際の室内環境中では、周囲の気流影響を受けることになるが、換気の悪い空間においては室内空气中を長時間エアロゾル粒子が滞留する可能性がある。

3. 感染リスクの評価手法

エアロゾル感染のように空気を介した感染を防ぐためには、換気によって室内のウイルス濃度を低下させることが重要となる。建築物の換気設計では、建築物衛生法に基づき一人あたりの換気量を30 m^3/h とすることが多い。しかし、これはあくまで二酸化炭素濃度基準での換気量であり、感染リスクを踏まえたものではない。既存の換気基準をもとにした感染対策では、少ない在室者の中に一次感染者が存在する場合、相対的にウイルス濃度が高くなることも想定される。この考え方はあくまで室内の空気が完全混合であることを前提としているが、感染対

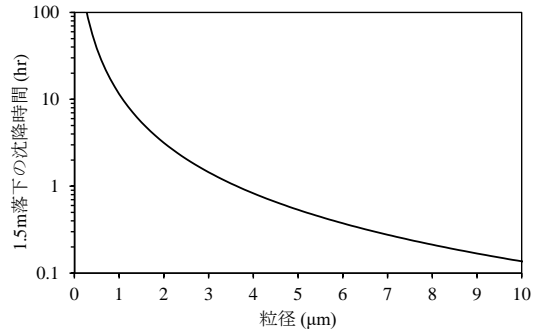


Fig. 1 粒径と沈降時間の関係
Relationship between Aerosol Diameter and Residence Time in Still Air

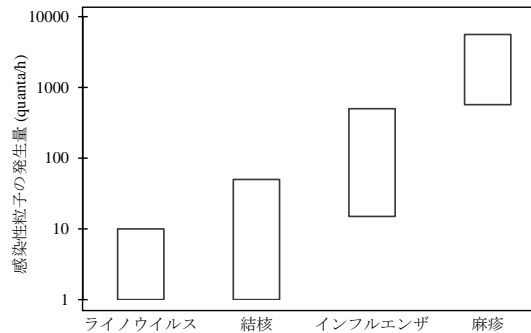


Fig. 2 既往感染症におけるquanta発生量⁶⁾
Ranges of Quanta Generation Rates for Pre-existing Infections

策としてこれを適用する場合には注意が必要となる。加えて、前述の必要換気量の考え方には、滞在時間やマスクの着用の有無など感染リスクの評価に大きく影響する項を考慮できない。

このような留意点はあるが、空気感染経路のリスク評価として、室内空気の完全混合および定常状態を仮定したWells-Rileyモデル⁵⁾がよく知られている。これは、室内にいる個人が感染性ウイルスに曝露されて感染する確率をモデル化したものである。Wells-Rileyのモデルは次式で表される。

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad (2)$$

ここで、 P は感染確率(-)、 I は一次感染者数の人数(人)、 q は感染性粒子の発生量(quanta/h)、 p は呼吸量(m^3/h)、 t は滞在時間(h)、 Q は換気量(m^3/h)である。

本モデルにおける感染性粒子の発生量はquantaという仮定の感染量単位で与えられ、その数値は疫学調査から求められる。quantaの発生量はウイルスの種類や感染力、人間の活動状態によって異なる。一例として、Fig. 2に4つの既往感染症におけるquanta発生量の範囲を示す⁶⁾。quantaの発生量は、感染者から排出される感染性粒子の数や大きさ、呼吸器系への沈着と感染力などを暗に含んだ表現となっている。quanta発生量は、マスクの着用や発声を抑えることで減少するが、ウイルスの遺伝情報の変

Table 1 解析ケースと解析条件
Analysis Cases and Numerical Conditions

解析ケース	詰所A						詰所B					
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
窓開度	5%	50%	100%	5%	50%	100%	5%	50%	100%	5%	50%	100%
外部風	なし			あり			なし			あり		
空調機設定	風量 (m ³ /min)	21	21	27	27	27	27	18	18	18	18	18
	吹出上限温度 (°C)	24	25	29	27	*	*	27	27	28	29	*
解析領域 (mm)	30,550×9,722×2,343			120,000×135,000×48,352			16,450×7,200×2,343			82,000×97,000×30,532		
メッシュ数	1,324,400			4,403,312			461,094			1,745,228		
空間離散化	有限体積法											
乱流モデル	標準k-εモデル											
移流項精度	3次精度(QUICK)											
放射計算	VF法：放射率0.9(一律)											
温度差による浮力	ブジネスク近似(基準温度：22°C)											
壁面境界条件	速度	上空面・側面：Free-slip条件，地表面：壁面粗度指定(粗度長=0.005m)， その他静止壁：一般化対数則										
	温度	屋外：総合熱伝達率 23W/m ² ・°C， 詰所外壁面および室内：温度対数則，解析境界面および隣室：断熱										

*) 各空調機の最大能力で運転

化すなわち変異によって値が変化するため実態に則した考慮が必要となる。

4. 詰所を対象としたシミュレーション

4.1 解析対象

Fig.3に解析対象とした現場詰所のモデルを示す。建設現場において、現場詰所は作業員が休憩や事務作業を行うための仮設建物である。本報では大きさとレイアウトが異なる2つの解析モデルを作成した。現場詰所Aは3階建ての中間階に位置する居室を対象として、形状はおおよそ30m×10m×高さ2.3m、収容人数は224人とした。現場詰所Bは2階建ての1階に位置する居室を対象としており、形状はおおよそ16m×7m×高さ2.3m、収容人数は64人とした。詰所には二方向に窓開口が設けられており、詰所Bは詰所Aと比べて座席間隔が大きくとられている。

4.2 解析条件

本報では、詰所Aと詰所Bについて、窓の開度を5%、50%、100%とした計6ケースの検討を行う。窓の開度5%は、窓が閉まっている状態すなわち窓サッシからの隙間風を想定したものである。さらに、外部風を考慮した6ケースを加えた合計12ケースについて流体解析を実施する。Table 1に解析ケースと解析条件の一覧を示す。特に冬場の窓開け換気は室温の低下が懸念されることから、冬季を前提とした解析を行う。外気温は0°C、風速3メートル/秒(観測点高さ6.5m)、風向はY軸方向に設定した。内部発熱については、着座位置に一人あたり70Wを与えた。空調機の風量および吹出上限温度は、室内温度22°Cを目標としてケース別に設定した。空調機の吹出し角度は水平方向に対して下向き30°とした。流体解析では、風速と温度分布性状の把握に加えて、窓開け換気の効果把握するために、換気効率指標である空気齢(新鮮外気

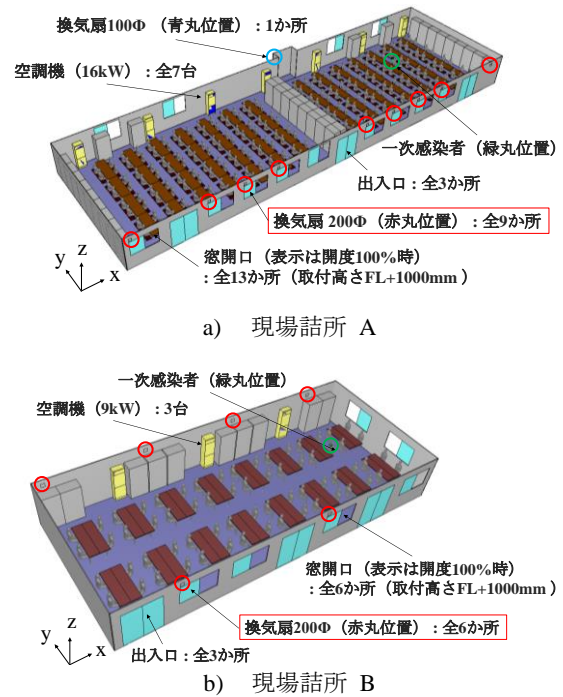


Fig. 3 解析対象モデル
Model for Computational Fluid Dynamics Simulation

が流入口からの室内のある点まで到達するのに要する時間)による評価を実施する。また、感染リスク評価のために、一次感染者が室内に1人存在する場合を想定して、感染性粒子100 quanta/hをFig. 3に示す一次感染者の口元から発生させた濃度解析を行う。感染性粒子quantaの拡散について、重力沈降や不活化による影響は無視する。

4.3 解析結果

本節では、はじめに空気齢を用いた窓開け換気の評価、次に室レイアウトとquanta濃度分布の関係、最後に外部風が室内の温度分布に与える影響について述べる。

4.3.1 窓開け換気の効果 窓開け換気による効果を確認するために、無風条件で窓開度を5%、50%、100%と変化させたケースA-1、A-2、A-3、B-1、B-2、B-3について流体解析から得られた総換気量をTable 2に示す。換気扇風量はファンの風量と静圧特性に従って決まるものである。窓開度が5%の場合、総換気量と換気扇風量が一致していることから、窓の隙間から流入した外気は換気扇から排出されていることが分かった。窓開度を100%とすることで、詰所Aについては最大で約2.5倍、詰所Bについては最大で約1.7倍、換気量が増加することが分かった。これにより、一人あたり30m³/hを確保するための換気量(詰所A:6,720m³/h、詰所B:1,920m³/h)を概ね満足する結果となった。換気量の増加は室内の感染性粒子の濃度を低下させ、感染リスクの低減にも寄与することとなる。Fig. 4にケースA-1(窓開度5%)とA-3(窓開度100%)について床上1.2mにおける水平面の空気齢分布を示す。空気齢の値が大きい箇所は換気の状態が望ましくない、すなわち空気が汚染されている可能性が大きいことを意味する。ケースA-1に比べてA-3では室全体として空気齢が小さい値となっており、換気性能は向上していると考えられる。さらに、ケースA-3では一様な空気齢分布となっており、ケースA-1の室中央部に存在する局所的に空気齢の値が大きい領域が見られない。これは、換気量の増加によってよどみ領域が解消し、部屋全体として効率のよい換気であることを示している。また、室中央に置かれた什器によって空間が二分され、窓開口がひとつ多い左側の空間が右側よりも空気齢が小さい値となっている。一次感染者の位置が決められない場合などは空気齢による評価も有効となる。

4.3.2 室レイアウトによる影響 本項では室レイアウトの違いが感染性粒子の拡がりに与える影響について検討する。詰所Aは室中央にロッカーが置かれており、長手方向の両側に窓開口が設けられている。一方で、詰所Bは空間を遮る什器がなく、窓開口も片側(長手方向と短手方向)に集中しているという特徴がある。Fig. 5にケースA-2とB-2について、Y軸鉛直断面(室中央位置)と床上1.2mにおける水平面のquanta濃度分布を示す。どちらのケースも窓開度は50%であり、窓開口からの空気の流入出が存在する。ケースA-2では、一次感染者から発生した感染性粒子quantaが空調機の吹出し気流に沿って室内に拡散する様子が確認された。しかし、詰所Aは長手方向の両側に窓開口が設けられていることから、Y軸方向の空気の流れが支配的であり、室全体に粒子が拡がっている様子は確認できなかった。さらに、室中央に設置された什器によって空間が分割され、粒子の拡散が抑えられたことも影響していると考えられる。一方で、ケースB-2では、一次感染者から発生した感染性粒子が空調機の吹出し気流によって対面の壁にぶつかり、室全体へと拡散する様子が確認された。詰所Bは窓開口が片側に寄っていることから、開口から離れたエリアでは空気が滞留してしまい、quanta濃度が減少しにくい結果となった。

Table 2 無風時の換気量一覧

List of Ventilation Volume under no-wind condition

解析ケース	窓開度 (%)	総換気量 (m ³ /h)	換気扇風量 (m ³ /h)
A-1	5	2,178	2,178
A-2	50	3,085	2,216
A-3	100	5,497	2,217
B-1	5	1,489	1,489
B-2	50	1,669	1,496
B-3	100	2,528	1,496

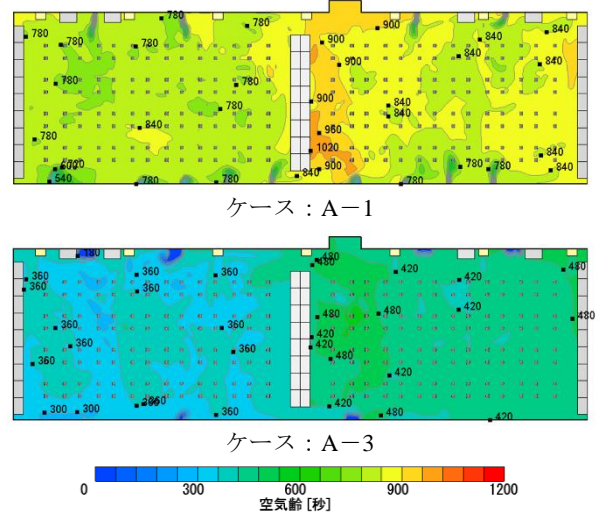


Fig. 4 空気齢分布 (床上1.2m位置)
Distribution of Age of Air (at 1.2m above floor level)

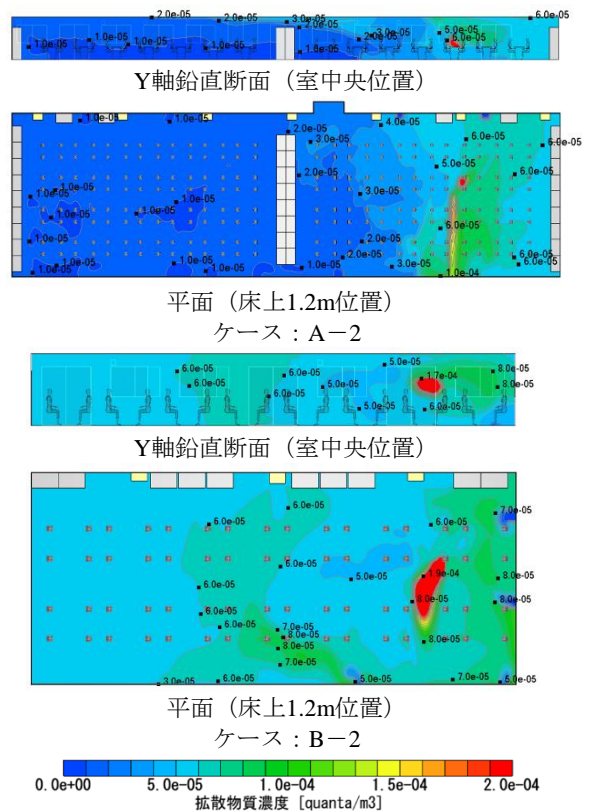


Fig. 5 quanta濃度分布
Quanta Concentration Distribution

4.3.3 外部風による室内環境への影響 外部風による窓開け換気の効果を確認するために、有風条件で窓開度を5%、50%、100%と変化させたケースA-4、A-5、A-6、B-4、B-5、B-6について流体解析から得られた総換気量をTable 3に示す。窓開度が5%の場合、総換気量は無風条件時と同様の値となったが、窓開度が50%と100%については大幅に換気量が増加する傾向が確認できる。外部風の影響については、風向や風速条件によって異なるため一概には言えないが、今回の解析条件では風力換気が有効であったと言える。一方で、ケースA-5、A-6、B-5、B-6については、換気量が大きく増大したことから、Table 1に示すとおり空調機が最大能力で運転するため、十分な室温を保てない可能性が示された。Fig. 6にケースA-5（窓開度50%）について、Y軸鉛直断面（室中央位置）と床上1.2mにおける水平面の温度分布を示す。空調機によって暖められた空気は天井付近に留まっており、着座位置では冷たい外気が流入している様子が分かる。特に、座席スペース（床上1.2m以下）では室温が22℃を下回る領域が多くみられ、過大な換気量は温熱環境の悪化を招くことが分かった。

4.4 感染リスク評価

4.4.1 評価方法 3章にて記載したWells-Rileyモデルを用いて、飛沫核すなわちエアロゾル感染に対する感染リスクを評価する。解析条件については4.2節に記載のとおりである。本解析では、一次感染者が室内に1人存在する場合を想定して、二次感染者数を算出する。人の呼吸量は0.3m³/hとし、曝露時間は昼休みの休憩時間を想定して1時間とする。

4.4.2 評価結果 流体解析から得られた換気量を用いて、Wells-Rileyモデルにて試算した各ケースの感染リスクをFig. 7に示す。本モデルは、室内の完全混合状態、すなわち平均的なリスク評価を目標としており、ケースごとの相対的なリスクの大小を比較可能である。発生する感染性粒子quantaの量を同じとした場合、詰所Aと詰所Bでは換気量の小さい詰所Bのほうが相対的に感染リスクは高い結果となった。詰所Aと詰所Bともに窓開度を5%から100%にすることで、最大9割程度感染リスクを低減できる可能性が示された。また、窓開け換気を行うことで、詰所Aにおける二次感染者数の期待値（リスク×人数）は最小0.2人、詰所Bでは0.15人と厚生労働省がクラスターの目安とする5人程度を大きく下回る結果となった。これらの結果から、一人あたりの換気量が大きいほど感染リスクを低減できる傾向にあると読み取れるが、その他にも滞在時間や代謝量（呼吸量）の削減により、感染リスクを抑えることが一定程度可能であろう。ただし、これらの検討はWells-Rileyモデルにおけるquanta値の大小に依存することから、対象とする感染性粒子の感染力によって見直しが必要となる。

4.4.3 感染確率分布 前項にて算出した感染リスクは室全体でのquanta濃度の一様分布を仮定したものであ

Table 3 有風時の換気量一覧
List of Ventilation Volume at wind velocity of 3.0m/s

解析ケース	窓開度 (%)	総換気量 (m ³ /h)	換気扇風量 (m ³ /h)
A-4	5	2,578	1,719
A-5	50	16,544	1,928
A-6	100	30,441	1,929
B-4	5	1,458	1,458
B-5	50	6,848	1,484
B-6	100	12,683	1,486

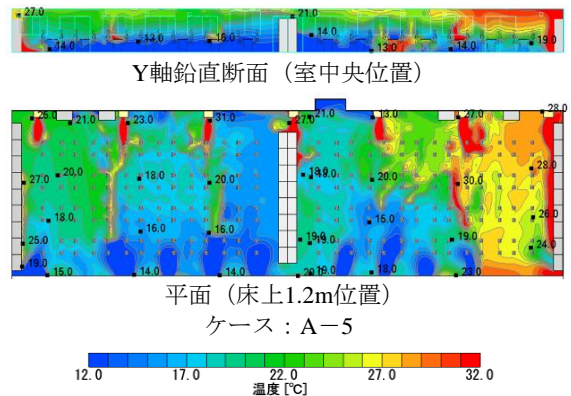


Fig. 6 温度分布
Temperature Distribution

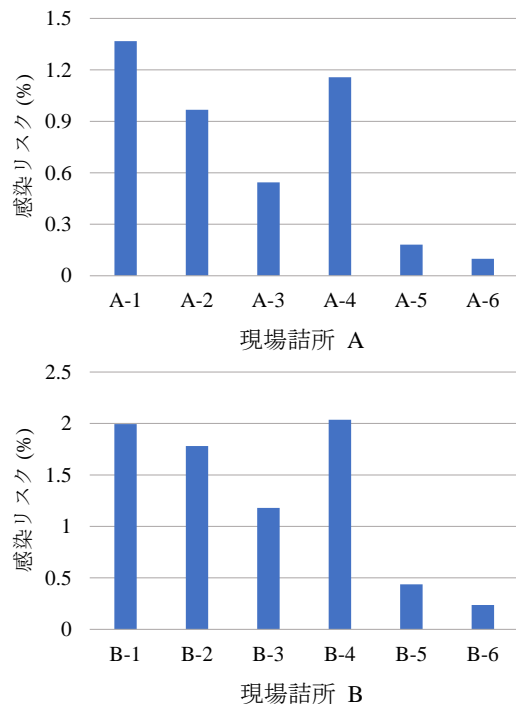


Fig. 7 感染リスクの比較
Comparison of Infection Risk

るが、Fig. 5で示したとおり空間中のquanta濃度分布には偏りが生じる。そこで、流体解析から得られたquanta濃度分布を用いて感染確率の分布を計算する。Table 4にケース別の座席位置における感染確率の最大値と最小値を示す。感染確率は、椅座位の顔の高さに相当する床上1.1mにて算出した。詰所Aは詰所Bと比較して在室密度が高い

Table 4 感染確率の最大値と最小値
Maximum and Minimum Infection Risk

解析ケース		詰所A						詰所B					
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
感染確率 (%)	最小値	0.03	0.27	0.07	0.03	≈0	≈0	1.53	1.38	0.49	0.67	≈0	≈0
	最大値	19.4	4.98	2.68	19.4	2.30	6.77	6.86	2.52	2.12	4.49	0.60	0.29

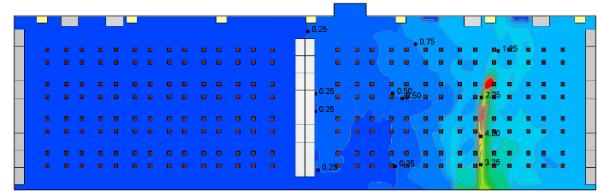
ことから、感染確率の最大値も大きいことが分かる。また、Fig. 8にケースA-3とB-3について、床上1.1mにおける水平面の感染確率分布を示す。ケースB-3の場合、感染確率が最も低い座席は0.49%、最も高い座席は2.12%であり、座る位置によって感染リスクが最大4.3倍高いことが示された。感染確率分布はquanta濃度分布と同じ傾向を示すが、加えて滞在時間やマスク着用の有無といった感染対策の効果を検証することができる。さらに、現場詰所内の座席位置ごとに感染リスクを算出することで、室内によどみ領域が存在する場合や一次感染者の風下側に座席が存在するなど、完全混合の仮定では把握できない感染リスクを明らかにすることが可能である。これらの手法を用いた評価により、室のレイアウトや空気清浄設備の運用、パーティションの設置など各種感染症の対策や検討に有用である。

5. まとめ

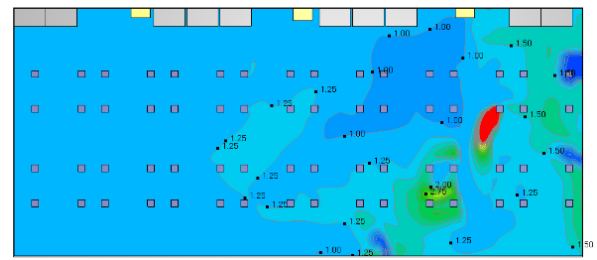
現場詰所を対象として、窓開け換気による感染リスクの低減効果を検証するため、流体解析にて室内の流れ場、温度場、濃度場の解析を実施した。さらに、Wells-Rileyモデルを用いてエアロゾルを介した空気感染を対象にリスク評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 現場詰所において窓開けによる換気は、換気量を増やすために有効である。
- 2) 建物の形状や開口位置、室レイアウトによって室内の気流分布は影響を受けるため、空気齢などの換気性能指標をもとにした換気効率の評価および改善が重要となる。
- 3) 屋外で風が吹く場合、気象条件によっては詰所の換気量増加に有利にはたらくことが分かった。ただし、冬場に換気を行う際は、窓の開度や窓開けの間隔を工夫することで、換気量と室温のバランスを考慮することが重要である。
- 4) 窓開け換気を行うことで、一次感染者から発生する感染性粒子によって感染する確率を最大9割低減できる可能性がWells-Rileyモデルによって明らかとなった。また、感染性粒子の拡散を考慮することで、室内のエリアごとに感染リスクを評価できる。

本報で得られた知見は、ウイルス感染症に対して理論的根拠に基づいた対策の提案につながることから、さらなるパンデミックの脅威に備えるための効果的な感染対策の整備などに活かしていく。



ケース：A-3



ケース：B-3

平面 (床上1.2m位置)

0.00 感染リスク [%] 5.00

Fig. 8 感染確率分布
Infection Risk Distribution

参考文献

- 1) 厚生労働省, “「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法”, 2020-04-03, <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000618969.pdf>, (閲覧日 2022-05-20)
- 2) 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議, “「密をさけて外出しましょう！」”, 2020-03-09, <https://www.kantei.go.jp/jp/content/000061234.pdf>, (閲覧日 2022-05-20)
- 3) 国立感染症研究所, “新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の感染経路について”, 2022-03-28, <https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2484-idsc/11053-covid19-78.html>, (閲覧日 2022-05-20)
- 4) World Health Organization, “Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care”, 2014, https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/112656/9789241507134_eng.pdf?sequence=1, (閲覧日 2022-05-20)
- 5) E. C. Riley, G. Murphy, and R. L. Riley: Airborne spread of measles in a suburban elementary school, American Journal of Epidemiology, Vol. 107, Issue 5, 1978
- 6) Stephens Brent: HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases, The National Air Filtration Association Foundation, 2012