

居室における感染リスク評価手法に関する研究

庄司 研*¹

Keywords : infectious disease control, ventilation planning, CFD analysis, aerosol, infection probability, infection risk assessment
感染症対策, 換気計画, CFD解析, エアロゾル, 感染確率, 感染リスク評価

1. はじめに

新型コロナウイルスの流行を受け、感染拡大防止対策として厚生労働省から3つの密（密閉・密集・密接）を避けることが示された。このうち「密閉」は密閉空間にならないような換気の重要性を示しており、呼吸器系の感染症の感染経路となるエアロゾル感染¹⁾への換気対策を促すものである。また、「密集・密接」は、人との距離を確保して飛沫感染や接触感染を予防する対策であり、建物運用中の取り組みも大切である。

エアロゾル感染では粒径 5 μm 未満の粒子が空気に乗って広く室内に拡散する可能性があり、対策には換気が重要となる。今後、建物を新築、改修の際の空調・換気計画では、鳥インフルエンザ等も含め感染症発生時のリスクに備えた対応が重要となる。

室内における呼吸器系の感染症への感染リスクは Wells-Riley モデル²⁾による感染確率で定量評価されることがある^{注1)}。これは麻疹（はしか）の感染経路を元にしており、感染力が強く新型コロナウイルスとの類似性もあると考え、感染確率の計算に用いた。このモデルは REHVA の感染抑制対策に関するガイダンス³⁾にも整理され、人の活動に対応した quanta 発生量と呼吸量等を用い感染確率の算出が可能である^{注2)}。

しかしこのモデルは室内空気の完全混合を前提としており、実際の居室で空調気流により生じる室内の感染原因物質濃度に空間的な分布は考慮できない。同じ席に長時間滞在するような場合、完全混合の仮定では感染リスクが過小評価される可能性があり、室内の分布を考慮した評価が必要となる。これに対し、CFD 解析や測定による濃度分布と Wells-Riley モデルを組み合わせた感染リスク評価の研究がなされている。越田、小林ら⁴⁾は CFD 解析で飲食店における規準化汚染質濃

度分布と感染確率分布を示し、換気方式の違いによる結果を比較している。また、金、倉渕ら⁵⁾は実際のオフィスで CO₂ ガスを用い、その濃度分布から quanta 発生量と在室時間を変数とした二次感染者数の分布を評価している。いずれも感染確率や二次感染者数は示されているもののクライテリアについては、明確には示されておらず、居室としての感染リスク評価のクライテリアに関しては検討の余地があると考えられる。

そこで本研究では居室の感染症対策としての換気・空調計画段階での感染リスク評価手法と、感染症への対策要否の判定目安となるクライテリアを提案することを目的とした。本報では継続利用する居室を対象とし、「二次感染者数1人未満」を感染リスクのクライテリアと定義して、空調方式の異なる居室の評価例からその有効性を示す。

2. 感染リスクの評価方法

2.1 感染確率の計算

呼吸器系の感染症への感染確率 P_{inf} の計算は式(1)に示す Wells-Riley の感染確率モデルで計算される。

$$P_{inf} = 1 - e^{\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right)} \quad (1)$$

ここで、

- I : 一次感染者数 [人]
- q : quanta 生成量 [quanta/h]
- p : 人の呼吸率 [m^3/h]
- t : 滞在時間 [h]
- Q : 居室の換気量 [m^3/h]

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

感染原因物質の quanta 生成量 [quanta /h]は人の活動状態により発生量が異なるものであり、quanta は感受性者の 63%が感染するのに必要な感染性の浮遊粒子数として定義³⁾されている。また、本研究では感染の初期を想定し、室内の一次感染者数は1人と仮定した。

2.2 CFDによる感染確率分布の計算

室内の感染リスクの空間分布を把握するため、エアロゾル化した感染原因物質が感染者の呼気に含まれており、それが室内気流に応じて移動・拡散していくものと仮定する^{注3)}。CFD解析により感染者の口から一定の呼気として quanta 生成量 q^* (濃度 $1[\text{quanta}/\text{m}^3] \times$ 吐出風量 $0.54[\text{m}^3/\text{h}]$)として拡散物質を設定し、室内の濃度分布を求める。感染確率の分布は式(1)の Q に対して、CFDの定常解析で求めた室内の拡散物質濃度 C の分布を反映させて求める。室内の完全混合濃度 C_e と C の比 C/C_e は、その場における一種の換気効率を表す。よって、 QC_e/C は完全混合の室内における換気量に対して、室内に換気性状に関する空間分布がある場合の、その場の実質的な換気量と解釈することができる。これを Q に乗じて室内の分布を反映した感染確率を求める(式(2))。

$$P_{i,j} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q} \frac{C}{C_e}} \quad (2)$$

$$C_e = \frac{q^*}{Q} \quad (3)$$

- ここで、 $P_{i,j}$: 席 i から席 j への感染確率
- i : 感染者の席 (位置) 番号
- j : 非感染者の席 (位置) 番号
- I : 室内の一次感染者数[人]
- q : quanta 生成量[quanta/h]
- p : 人の呼吸率[m^3/h]
- t : 曝露時間[h]
- Q : 居室の換気量[m^3/h]
- q^* : CFDでの quanta 生成量[quanta/h]
- C : CFD 拡散物質濃度[quanta/ m^3]
- C_e : 室内の完全拡散濃度[quanta/ m^3]

p (呼吸率) および q (quanta 生成量) は対象とする居室の利用状況から活動の比率を想定して設定する。表-1に感染原因物質 quanta 生成量を、表-2に非感染者の呼吸率を示す。quanta 生成量は会話の割合により異なり、会議室(10席)では会話率を10%とし、オフィス(30席)では会話率は5%と仮定した。また、感染確

表-1 感染原因物質 quanta 生成量

Table 1 Quanta emission rate

活動	休息・口呼吸	軽作業・会話	quanta q設定値 [quanta/h]
90パーセンタイル値 [quanta/h]	3.1	42	
会話率 0%	3.1(100%)	0(0%)	3.10
会話率 10%	2.79(90%)	4.2(10%)	6.99
会話率 20%	2.48(80%)	8.4(20%)	10.88

表-2 呼吸率

Table 2 Breathing rate

活動	立っている	会話	呼吸率p設定値 [m^3/h]
呼吸率 [m^3/h]	0.54	1.1	
会議室(10席)	0.49(90%)	0.11(10%)	0.60
オフィス(30席)	0.51(95%)	0.06(5%)	0.57



図-1 曝露時間の考え方

Fig.1 Concept of exposure time

表-3 二次感染者数の期待値

Table 3 Expected number of infected people

		感染者の位置 (i)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
非感染者の位置 (j)	1		$R_{2,1}$	$R_{3,1}$	$R_{4,1}$	$R_{5,1}$	$R_{6,1}$	$R_{7,1}$	$R_{8,1}$	$R_{9,1}$	$R_{10,1}$
	2	$R_{1,2}$		$R_{3,2}$	$R_{4,2}$	$R_{5,2}$	$R_{6,2}$	$R_{7,2}$	$R_{8,2}$	$R_{9,2}$	$R_{10,2}$
	3	$R_{1,3}$	$R_{2,3}$		$R_{4,3}$	$R_{5,3}$	$R_{6,3}$	$R_{7,3}$	$R_{8,3}$	$R_{9,3}$	$R_{10,3}$
	4	$R_{1,4}$	$R_{2,4}$	$R_{3,4}$		$R_{5,4}$	$R_{6,4}$	$R_{7,4}$	$R_{8,4}$	$R_{9,4}$	$R_{10,4}$
	5	$R_{1,5}$	$R_{2,5}$	$R_{3,5}$	$R_{4,5}$		$R_{6,5}$	$R_{7,5}$	$R_{8,5}$	$R_{9,5}$	$R_{10,5}$
	6	$R_{1,6}$	$R_{2,6}$	$R_{3,6}$	$R_{4,6}$	$R_{5,6}$		$R_{7,6}$	$R_{8,6}$	$R_{9,6}$	$R_{10,6}$
	7	$R_{1,7}$	$R_{2,7}$	$R_{3,7}$	$R_{4,7}$	$R_{5,7}$	$R_{6,7}$		$R_{8,7}$	$R_{9,7}$	$R_{10,7}$
	8	$R_{1,8}$	$R_{2,8}$	$R_{3,8}$	$R_{4,8}$	$R_{5,8}$	$R_{6,8}$	$R_{7,8}$		$R_{9,8}$	$R_{10,8}$
	9	$R_{1,9}$	$R_{2,9}$	$R_{3,9}$	$R_{4,9}$	$R_{5,9}$	$R_{6,9}$	$R_{7,9}$	$R_{8,9}$		$R_{10,9}$
	10	$R_{1,10}$	$R_{2,10}$	$R_{3,10}$	$R_{4,10}$	$R_{5,10}$	$R_{6,10}$	$R_{7,10}$	$R_{8,10}$	$R_{9,10}$	
R_i [人]	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	
R_{ave} [人]										R_{ave}	

率に影響を及ぼす要因である室内表面への付着や重力沈降、紫外線照射による感染原因物質の不活化の効果などは考慮せず、循環空調のフィルタの効果のみ反映した。

図-1に居室の感染リスク評価における感染原因物質への曝露時間の考え方を示す。曝露時間の対象期間は、濃厚接触者を判断する際の「感染可能期間^{注4)}」である発症日の2日前から、発症日に療養が開始されるまでとし、合計3日間とする。また居室内ではオフィスで1日8時間の勤務時間を仮定し、3日間の累積滞在時間である合計24時間を最大の滞在時間として評価に用いることとする。

2.3 感染リスクのクライテリア

室内において1人の感染者が新たに他の人に感染させる「二次感染者数(再生産数)」が1人未満であるこ

とをクライテリアとすることは、新たな感染が生じない（感染が収束に向かう）条件と考えられる。感染リスクの評価においては、全ての座席に人が着席した状況を想定し、そのうち1つに感染者が着席した場合、他の席の在席者への感染確率を全ての席について求める。各席における感染確率にその席の人員（一般には1人）を乗じたものは、その席に着いた人が感染する人数の期待値を表すものと考えられる。例えば感染確率が0.1であれば、これに1人を乗じた0.1人は、その席に着いた人が感染する人数（二次感染者数）の期待値と考えることができる。表-3に二次感染者数の期待値の計算表のイメージを示す。各欄には室内の各感染者の位置（座席） i から非感染者の位置（座席） j の人への感染確率 P_{ij} に1[人]を乗じて求めた各席での二次感染者数 R_{ij} が入る。これを感染者の位置（ i ）毎に全座席分合計した $\sum R_{ij}$ が、二次感染者数 R_i となる（式(4)）。感染者の位置（ i ）ごとに算出した R_i の平均値 R_{ave} を居室における二次感染者数と定義し、 R_{ave} が1人未満であることをクライテリアとした。（式(5)）

$$\sum_j (R_{i,j}) = R_i \quad (4)$$

$$R_{ave} < 1 \quad (5)$$

ここで、 R_{ave} ：二次感染者数[人]

3. 感染リスクの評価事例

3.1 評価対象室の設定

図-2に評価対象とする会議室のモデルを示す。在室10人で、対面者正面に飛沫防止用パーティションを設定した。7.9m×5m×高さ2.7mで室容積は106.65m³で、居室の長辺側に吹出口（SA）、短辺側に吸込口（RA）を配置した場合を基本ケースとした。吹出口SA1と吸込口RA1、また、SA2とRA2はそれぞれ対応しており、RA1の吸込み空気は一人当たり30m³/hを排気し、残りをSA1に循環させている（図-3）。この時フィルタの効果を考慮した。また、床吹出方式では、人体の後方の床面に片側6カ所の床吹出口を設け、吸込口を人体上部に設定し、換気効率の向上に配慮した（図-4）。さらに広い居室で座席数が増えた場合の傾向を確認するため、会議室のモデルを3倍の広さに拡大したオフィスを評価対象とした。なお、机上の飛沫防止用パーティションを隣接座席間にも追加した（図-5）。

これらの感染確率の計算に用いるCFD解析の結果である拡散物質濃度は、人体発熱による上昇流を考慮し

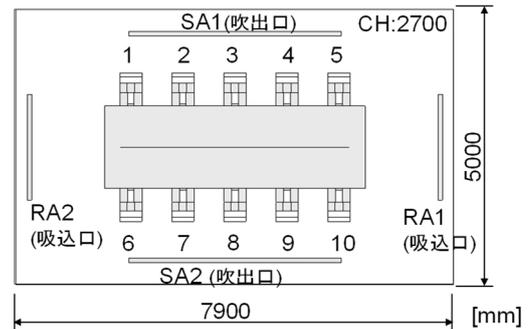
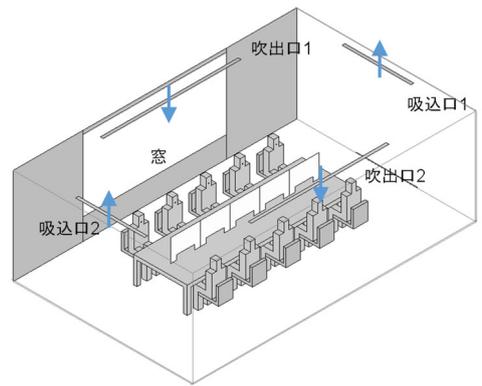


図-2 会議室平面図（天井吹出）
Fig.2 Conference room floor plan (ceiling diffuser)

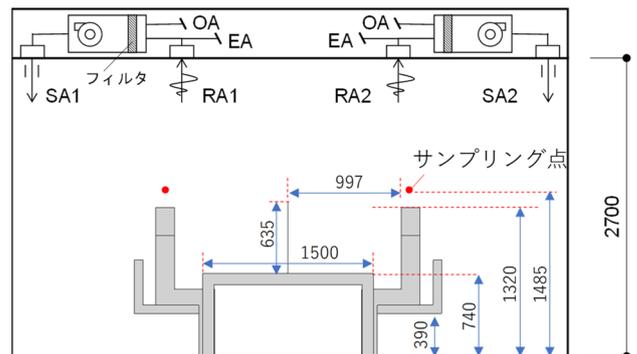


図-3 CFD結果のサンプリング点（会議室断面）
Fig.3 Sampling points of CFD results (cross-sectional view)

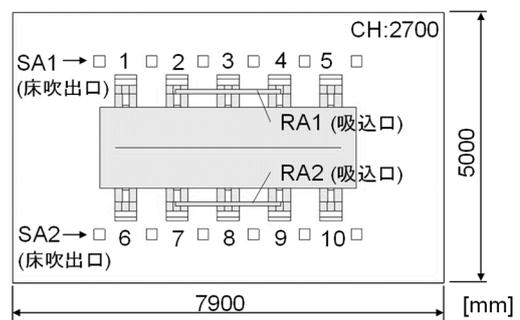


図-4 会議室平面図（床吹出）
Fig.4 Conference room floor plan (floor diffuser)

口の周辺の濃度と頭上の点での濃度差は大きくないと考え、非感染者の頭上中心を代表点としてサンプリングした。図-3に断面位置を示す。

3.2 ケーススタディの設定条件

表-4 にケーススタディの設定を示す。空調方式は、天井吹出と床吹出の2通りを代表例とした。床吹出空調では下から上への気流で拡散を抑制する意図で座席の上部付近に吸込口を設けた。吹出口は12個を座席後方の人と人の間に配置し、吹出口の1か所(0.04m²)の風量は45.5[m³/h]で風向は鉛直上向きとした。

フィルタはMERV13相当の捕集効率50%⁵⁾と、さらに高性能フィルタとして捕集率90%を仮定した。フィルタの効果はRA吸込口を通過する拡散物質濃度にフィルタの除去効率を乗じた上でSA吹出口からの発生濃度として設定することで模擬した。

冷房時と暖房時で室内の気流分布は異なると考えられるため、冷房、暖房のどちらでも吹出口、吸込口の配置が感染リスクの観点で適正となっていることを確認する必要がある。そこでCase7~Case12では暖房時を想定した評価を実施した。暖房時は居室の一面を外壁と考え、窓、壁からの冷熱の流入を設定した。窓は複層ガラス(4m×高さ2m、熱貫流率3.4W/m²K)、その他は壁(13.3m²、熱貫流率0.38W/m²K)とし、外気温度を0℃、室内を設定温度とした時の貫流熱量を与え、空調吹出温度は26℃、室温設定は22℃とした。(図-6)

Case13, Case14 では、天井吹出・吸込の位置により室内の気流場が大きく変わることから、吹出(SA)と

吸込(RA)の場所を入れ替えたケースを設定した。元の設定では吸込口は短辺側に配置され、在室者からはやや遠い位置であったが、入れ替えると吸込口が近くなり、排気の効果が高くなる可能性がある。

Case15~Case17では30席のオフィスを想定しフィルタの設定を変更して傾向を確認した。

3.3 CFD解析条件

表-5 にCFD解析の解析条件を示す。乱流モデルは標準k-εモデルとし、内部発熱は人体発熱として冷房時55[W/人]、暖房時71[W/人]を与え、室内温度は24℃と

表-4 ケーススタディの設定
Table 4 Settings for case study

1. 会議室(10席)

	空調方式	フィルタ	室温設定 [°C]	呼吸率 [m ³ /h]	空調風量 [m ³ /h]	外気量 [m ³ /h]
Case1	天井吹出	なし	冷房 設定: 24 吹出: 21	0.6	546	300
Case2		50%捕集				
Case3		90%捕集				
Case4	床吹出	なし				
Case5		50%捕集				
Case6		90%捕集				
Case7	天井吹出	なし	暖房 設定: 22 吹出: 26			
Case8		50%捕集				
Case9		90%捕集				
Case10	床吹出	なし				
Case11		50%捕集				
Case12		90%捕集				
Case13	天井吹出 SAとRAの 配置交換	なし	冷房			
Case14		なし	暖房			

2. オフィス(30席)

	空調方式	フィルタ	室温設定 [°C]	呼吸率 [m ³ /h]	空調風量 [m ³ /h]	外気量 [m ³ /h]
Case15	天井吹出	なし	冷房 設定: 24 吹出: 21	0.57	1638	900
Case16		50%捕集				
Case17		90%捕集				

表-5 CFD解析条件

Table 5 CFD analysis conditions

乱流モデル	標準k-εモデル	呼吸量	0.54[m ³ /h]
モデルサイズ	7.9[m]×5.0[m]×2.7[m]	口面積	3.6[cm ²]
壁面	気流: 対数則, 熱: 断熱	吐出風速	0.4[m/s]
人体発熱[W/人]	冷房時: 55, 暖房時: 71	呼吸温度	32[°C] ⁶⁾

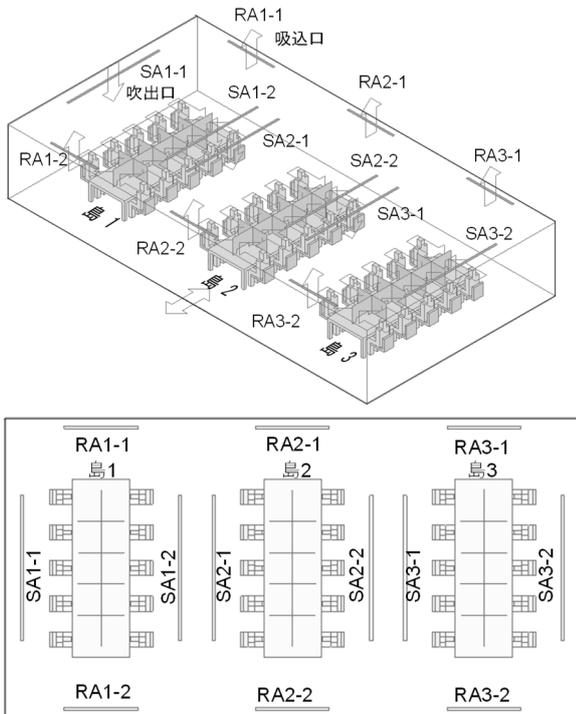


図-5 オフィスアイソメ図, 平面図(天井吹出)
Fig.5 Office room isometric view, floor plan (ceiling diffuser)

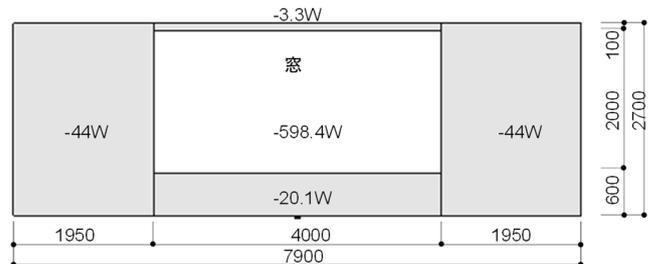


図-6 暖房時の壁面, 窓の設定
Fig.6 Settings for wall and window (heating)

設定した。呼吸量は、REHVA³⁾の試算に合わせて約0.54[m³/h]とし、吐出風速は0.4[m/s]、呼気温度は32℃⁶⁾とした。空調吹出し温度は内部発熱を除去できる熱量で冷房として設定した。

3.4 CFD 解析結果

3.4.1 天井吹出の室内気流分布と感染確率分布

図-7、図-8に Case1 (天井吹出) の風速ベクトルと、感染者が座席 1 にいる場合の口高さ (FL+1167mm) の感染確率の平面分布と断面分布を示す。気流は人体発熱による上昇流と両側天井付近からの吹出し気流が壁に沿って下降するような室内の循環流を形成している。

Case1 では、感染者からの呼気は上昇流に乗って天井付近に到達し、一部は再び空調吹出気流と混合して循環し、一部は排気されていると考えられる。

図-9、図-10 に Case7 (天井吹出、暖房時) の分布を示す。左側の壁に窓があり、窓表面で冷却された空気

が空調吹出し気流と同じ方向に流れることで、気流の流れが大きくなり、居室全体に拡散物質が広がり希釈される結果となった。冷房時と暖房時で流れ場が変わることが確認され、冷房と暖房の両方で二次感染者数 R_{ave} を評価することが必要と考えられる。

3.4.2 床吹出の室内気流分布と感染確率分布

図-11、図-12に Case4 (床吹出) とした時の風速ベクトルと、感染者が座席 1 にいる場合の口高さの感染確率の平面分布と断面分布を示す。感染者からの呼気が上昇した後に下方の流れの影響で感染者側の上部に拡散する結果となった。図-13、図-14 に Case10 (床吹出、暖房時) の風速ベクトルと感染確率分布を同様に示す。暖房時、窓面からのコールドドラフトの影響により床面に向かって下降気流が生じて流れ場が大きく変化し、呼気の吸込口への到達が妨げられたものと考えられる。

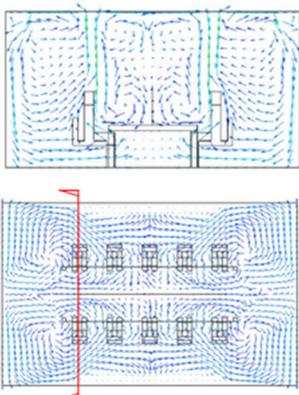


図-7 天井吹出空調の風速ベクトル
Fig.7 Air velocity vector of ceiling diffuser

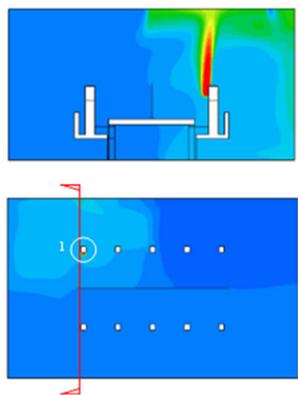


図-8 Case1 の感染確率分布 (席 1 に感染者)
Fig.8 Case1: Infection probability (an infected person at seat 1)

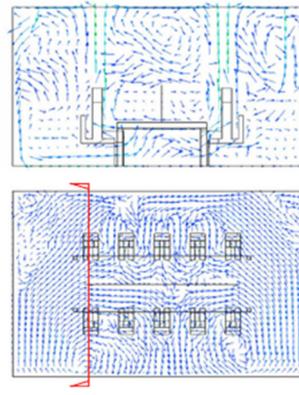


図-9 暖房時の天井吹出空調の風速ベクトル
Fig.9 Air velocity vector of ceiling diffuser (heating)

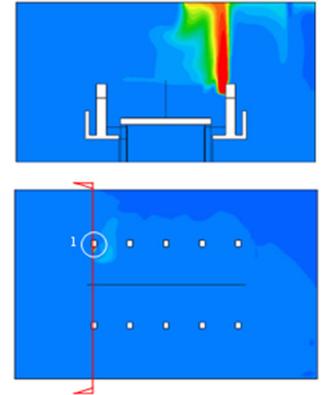


図-10 Case7 の感染確率分布 (席 1 に感染者)
Fig.10 Case7: Infection probability (an infected person at seat 1)

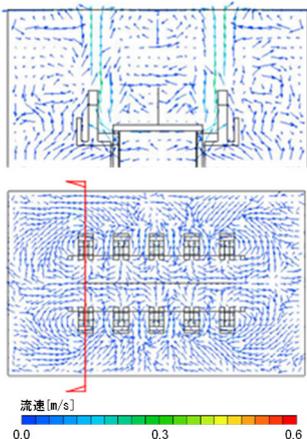


図-11 床吹出空調の風速ベクトル
Fig.11 Air velocity vector of floor diffuser

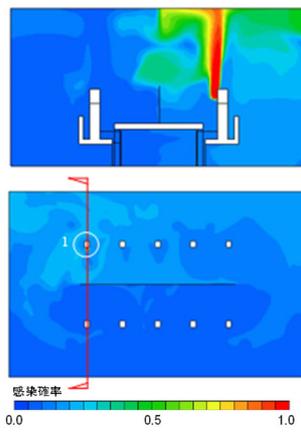


図-12 Case4 の感染確率分布 (席 1 に感染者)
Fig.12 Case4: Infection probability (an infected person at seat 1)

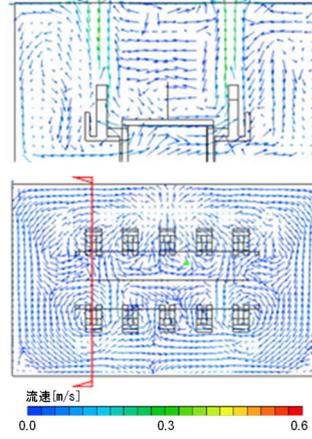


図-13 暖房時の床吹出空調の風速ベクトル
Fig.13 Air velocity vector of floor diffuser (heating)

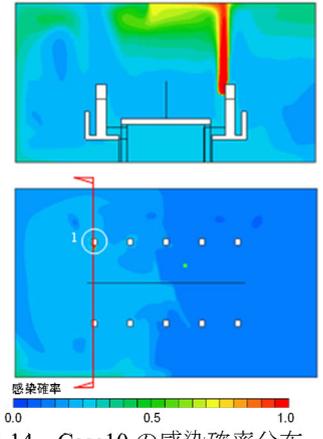


図-14 Case10 の感染確率分布 (席 1 に感染者)
Fig.14 Case10: Infection probability (an infected person at seat 1)

3.5 感染リスクの評価結果

3.5.1 天井吹出の室内気流分布と感染確率分布

感染リスクの計算は、CFD による座席位置のサンプリング点の拡散物質濃度を用いて行う。変数として quanta 生成量 [quanta/h] は表-1 の会話率の想定により 3 通り (0%, 10%, 20%) で計算した。表-6 に各ケースの二次感染者数の算出結果を示す。会話率 0% の時、どのケースでも感染リスクは小さく、最も大きい Case1 で、 $R_{ave}=0.87$ であった。会話率 10% の時、フィルタがなくても $R_{ave}<1$ だったのは SA と RA の配置交換をした Case13 と Case14 であり、冷暖房の差も小さく、最も感染リスクの小さい吹出口・吸込口配置であった。これは、吸込口が在室者に近くなることで上昇した拡散物質が除去されやすくなったことが要因であると考えられる。また、冷房よりも暖房の時にややリスクが小さくなる傾向がみられた。図-15 に会話率 10% での天井吹出の場合の二次感染者数を示す。フィルタなしでは冷房の結果が約 0.3 小さいものの、フィルタがあると差は小さい。すべてのケースで $R_{ave}>1$ であったが、90% 捕集フィルタの設置で $R_{ave}=1$ に近い値に改善した。

3.5.2 床吹出の冷房・暖房の比較

床吹出は冷房時より暖房時の方が、二次感染者数が多く、これは暖房時に窓がある部位からの気流が床面付近に流れて流れ場が大きく変化し、拡散物質の吸込口への到達が妨げられたためと考えられる。

図-16 に会話率 10% での床吹出の場合の二次感染者数を示す。フィルタ 90% 捕集により $R_{ave}<1$ をクリアする

結果となった。50% 捕集の Case5 では、冷房だけが $R_{ave}<1$ をクリアしており、暖房時の改善ができればリスク低減が可能と言える。表-7 にフィルタなしの床吹出空調における冷房 (Case4)、表-8 に暖房 (Case10) の感染リスク評価結果 (感染確率表) を示す。暖房時

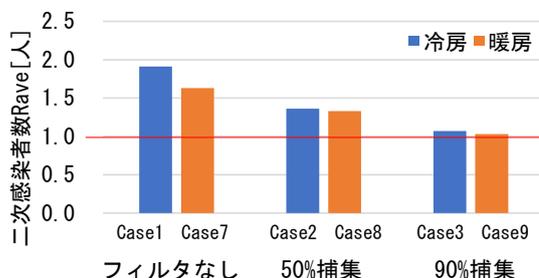


図-15 天井吹出の二次感染者数 (会話率 10%)
Fig.15 Number of secondary infections (ceiling diffuser)

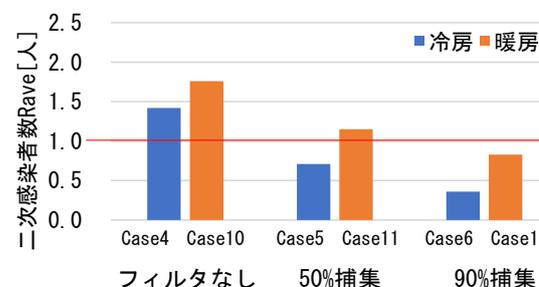


図-16 床吹出の二次感染者数 (会話率 10%)
Fig.16 Number of secondary infections (floor diffuser)

表-7 Case4 (床吹出, 冷房) の感染リスク評価結果
Table 7 Infection risk assessment results for Case 4

		感染者の位置 (i)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
非感染者の位置 (j)	1		0.10	0.09	0.09	0.10	0.22	0.11	0.11	0.11	0.12	
	2	0.11		0.09	0.09	0.10	0.15	0.17	0.11	0.11	0.12	
	3	0.11	0.09		0.10	0.12	0.12	0.10	0.18	0.14	0.14	
	4	0.11	0.10	0.11		0.15	0.11	0.08	0.11	0.19	0.20	
	5	0.12	0.11	0.12	0.14		0.12	0.09	0.11	0.15	0.22	
	6	0.24	0.17	0.16	0.16	0.17		0.15	0.16	0.17	0.18	
	7	0.23	0.22	0.17	0.18	0.19	0.19		0.17	0.18	0.18	
	8	0.21	0.20	0.22	0.19	0.20	0.19	0.16		0.18	0.19	
	9	0.20	0.19	0.20	0.26	0.26	0.19	0.16	0.18		0.20	
	10	0.19	0.18	0.19	0.23	0.33	0.18	0.15	0.18	0.18		
Ri[人]		1.51	1.38	1.35	1.45	1.61	1.47	1.18	1.31	1.40	1.54	
Rave[人]												1.42

表-8 Case10 (床吹出, 暖房) の感染リスク評価結果
Table 8 Infection risk assessment results for Case 10

		感染者の位置 (i)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
非感染者の位置 (j)	1		0.18	0.13	0.14	0.16	0.74	0.16	0.13	0.15	0.17	
	2	0.31		0.13	0.14	0.16	0.36	0.24	0.13	0.14	0.16	
	3	0.19	0.15		0.17	0.29	0.20	0.13	0.27	0.19	0.33	
	4	0.15	0.14	0.13		0.32	0.15	0.12	0.13	0.29	0.37	
	5	0.15	0.14	0.13	0.18		0.16	0.12	0.13	0.20	0.87	
	6	0.35	0.18	0.13	0.14	0.16		0.17	0.13	0.15	0.17	
	7	0.29	0.25	0.13	0.15	0.17	0.34		0.13	0.15	0.18	
	8	0.22	0.16	0.17	0.17	0.24	0.24	0.17		0.19	0.27	
	9	0.16	0.14	0.13	0.26	0.30	0.17	0.13	0.13		0.36	
	10	0.15	0.14	0.07	0.10	0.21	0.09	0.07	0.07	0.12		
Ri[人]		1.96	1.47	1.18	1.45	2.01	2.46	1.32	1.27	1.58	2.88	
Rave[人]												1.76

表-6 各ケースの二次感染者数の結果

Table 6 Results of the number of secondary infections

1. 会議室 (10席)

	空調方式	フィルタ	室温設定 [°C]	呼吸率 [m³/h]	二次感染者数[人]		
					会話0%	会話10%	会話20%
					Case1	天井吹出	なし
Case2	天井吹出	50%捕集	0.61	1.36	1.99		
Case3	天井吹出	90%捕集	0.48	1.07	1.93		
Case4	床吹出	なし	0.63	1.42	2.1		
Case5	床吹出	50%捕集	0.31	0.71	1.07		
Case6	床吹出	90%捕集	0.15	0.36	0.55		
Case7	天井吹出	なし	0.8	1.63	2.47		
Case8	天井吹出	50%捕集	0.65	1.33	2.04		
Case9	天井吹出	90%捕集	0.5	1.03	1.58		
Case10	床吹出	なし	0.89	1.76	2.6		
Case11	床吹出	50%捕集	0.58	1.15	1.7		
Case12	床吹出	90%捕集	0.24	0.83	1.22		
Case13	天井吹出 SAとRAの 配置交換	なし	冷房	0.41	0.91	1.35	
Case14	天井吹出 SAとRAの 配置交換	なし	暖房	0.23	0.88	1.35	

2. オフィス (30席)

	空調方式	フィルタ	室温設定 [°C]	呼吸率 [m³/h]	二次感染者数[人]		
					会話0%	会話10%	会話20%
					Case15	天井吹出	なし
Case16	天井吹出	50%捕集	設定: 24	0.67	1.47	2.24	
Case17	天井吹出	90%捕集	吹出: 21	0.61	1.35	2.05	

には感染者が座席 6 に着席時に感染確率が 0.74, 座席 10 の時に 0.87 と 2 か所だけが特に高く, 局所的な感染確率の値が二次感染者評価値に影響していた。机の両端でいずれも座席の正面の非感染者への感染確率が高い結果となった。暖房時のペリメータ空調はなく, 窓面でコールドドラフトが生じ, 床からの吹出し気流が影響を受けたことが結果の差の原因と考えられる。

3.5.3 30 席のオフィスの場合の感染リスク評価

表-6 の評価結果より, 会話率 0% の時に, 二次感染者数 $R_{ave} < 1$ をクリアしていたが, それ以外はクライテリアの 1 を超えていた。表-9 に島単位での二次感染者数の評価結果 (感染者が位置する島にいる場合の他の島での二次感染者数) を示す (レイアウトは図-4 参照)。3 つの島のうち, 両側の島 1 と島 3 は同じ島に感染者がいた場合に中央よりも二次感染者数が多くなる傾向がみられた。島 1 と島 3 は壁に近いことから, 島 2 に比べ空気が滞留しやすい場所があったと考えられる。また, 感染者のいる島から隣接する島への影響は約 0.5[人]であり, 感染リスクの評価範囲の検討時には留意が必要である。

3.5.4 マスク着用の効果の検討

在室者がマスク着用時の感染リスクへの影響を検討した。マスク着用の効果は既往の実験により, 感染者がマスクをする場合, 対面者がマスクをする場合, およびその両方で 4 種のマスクについて, 相手に到達する割合が示されている^{7)注5)}。対面距離が 50cm で外科用マスクの場合, 感染者着用で 42%, 対面者の着用で 50% に低減することから, 両者の着用で 21% のウイルス低減率となる。マスクの効果はこの低減率を quanta 生成量に乗じることで反映でき, 運用による感染リスクの低減効果として評価に加えることができる。

一例として, Case1 の会話率 10% の場合, マスクによる低減を 21% とすると, 二次感染者数 $R_{ave} = 0.45$ となりクライテリアまでの余裕が生まれる。ここで感染力が 2 ~ 5 倍まで増加 (感染原因物質が増加) した場合の二次感染者数, およびマスクなしの場合との比較を図-17 に示す。全員がマスクありの場合, 感染力が 2.3 倍 (16.2[quanta/h]) までは, 二次感染者数は 1 人未満となる。感染力の異なる感染症が発生した場合に安全に利用できる可能性を高めることが可能となる。

4. 結論

新型コロナウイルスの感染リスクの低い空間を構築するため, 室内の感染確率の分布を考慮したリスク評

表-9 オフィスの感染リスク評価結果
Table9 Infection risk assessment results (office room)

		感染者の位置(i)		
		島1	島2	島3
非感染者の位置(j)	島1	0.94	0.53	0.13
	島2	0.50	0.64	0.48
	島3	0.12	0.50	0.96
Ri[人]		1.56	1.68	1.56
Rave[人]		1.60		

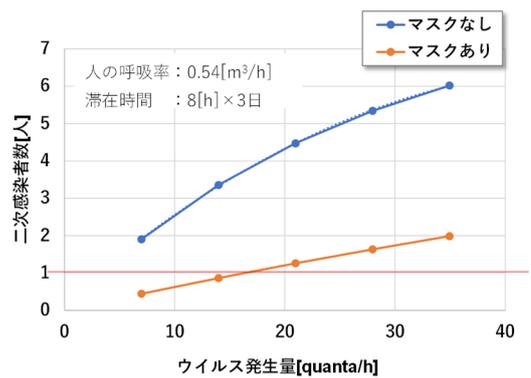


図-17 Case1 のマスク着用時の二次感染者数
Fig.17 The number of secondary infections in Case 1

価に関して, 感染確率モデルと CFD 解析により感染確率の空間分布を求め, 二次感染者数が 1 人未満であることをクライテリアとする感染リスク評価手法を構築した。その結果以下の知見を得た。

(1) 冷房時と暖房時とでは室内温度や吹出温度で気流場が異なり, 濃度分布に変化が生じ, 感染リスクには相違が見られた。冷暖房両方の評価を実施することが必要と考えられる。

(2) 10 席の会議室で評価した結果, 二次感染者数を 1 未満にするためには, 吹出口と吸入口の配置の影響が最も大きく, また, 床吹出空調では捕集率 50% 以上のフィルタ設置で $R_{ave} < 1$ をクリアすることを確認した。

(3) 30 席のオフィス (10 席 x 3 つの島) では, 感染者の呼気が広く拡散し, 隣接する島でも二次感染者数が約 0.5[人]であった。

今後, 本手法により感染リスクの評価事例から知見を蓄積することにより, 感染リスクの低い空調・換気計画に活用していく。

謝辞

本解析の実施に関しては東京大学加藤信介名誉教授のご助言を頂きました。記して感謝申し上げます。

注

参考文献

- 注1) 感染リスクの評価には他に用量反応モデルがあるが、評価に必要な感染原因物質の人の摂取量と感染に関する情報を得る必要がある⁸⁾。本研究では室内空間中の感染原因物質の移動に着目しており、感染力を *quanta* 値で設定する Wells-Riley モデルを用いた。*quanta* 値は文献3)に基づいており、新型コロナウイルスの初期の感染力を反映したものである。感染症に応じた感染力の検討が必要となる。
- 注2) 人の免疫機能の強弱は様々であり、感染原因物質に対する感受性もさまざまである。*quanta* の利用に関しては、このような人の感染原因物質に対する発病の感受性のバラツキを考慮するものではない。例えて言えば、感染原因物質に対する標準的な反応を持つ人を仮定しており、その標準的な反応を持つ人に対する感染確率を検討するものとなっている。
- 注3) 粒径が $0.5\mu\text{m}$ 未満のエアロゾルを想定しており、粒子の重力沈降などが生じないと考え、パッシブスカラーとして拡散物質を設定した。
- 注4) 「感染可能期間」とは、国立感染症研究所「積極的疫学調査実施要領」⁹⁾の「濃厚接触者」の定義において、以下に示す発症または検体採取の「2日前から」とされており、本報では発症日または検体採取日を含む3日間とした。4日目以降は療養のため不在と仮定する。
 ・感染症を疑う症状を呈した2日前から退院又は宿泊療養・自宅療養の解除の基準を満たすまでの期間。
 ・無症状の人は検体採取日の2日前から退院又は宿泊療養・自宅療養の解除の基準を満たすまでの期間。
- 注5) 実験はマスクの材質、対面距離による違いを比較する内容である。ドラフトチャンバー内で至近距離での対面を模擬しており、実際の居室に比べてウイルス濃度が実際の室内での暴露よりも高くなっている可能性がある。本研究では文献7)に記載された性能になると仮定した。

- 1) 国際感染症研究所, 新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の感染経路について, 2022.3
- 2) E. C. Riley, G. Murphy, R. L. Riley: Airborne spread of measles in a suburban elementary school, *American Journal of Epidemiology*, Vol.107, No.5, pp.421-432, 1978
- 3) REHVA: REHVA COVID19 GUIDANCE version 4.1, 2021
- 4) 越田萌恵, 小林知広, 山中俊夫, 崔ナレ, 山澤春菜: Impinging Jet Ventilation 方式を用いた飲食店における室内熱環境及び換気効率・感染リスクの評価, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2022 神戸) 第4巻*, pp.153-156, 2022.9
- 5) 金政一, 倉渕隆, 阿式信英, 田中宏治, 千葉友樹, 和田一樹, 村下和紀: オフィス空間における CO₂ 濃度分布に基づく感染リスク予測に関する研究, *日本建築学会学術講演梗概集*, pp.25-28, 2021.9
- 6) 林立也, 加藤信介, 村上周三, 曾潔: CFD を用いた人体周辺微気象解析による受動喫煙の研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第533号, pp.17-21, 2000.7
- 7) H. Ueki, Y. Furusawa, K. Iwatsuki-Horimoto, M. Imai, H. Kabata, H. Nishimura, Y. Kawaoka: Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2, *American Society for Microbiology, Clinical Science and Epidemiology*, Vol15, Issue5, 2020
- 8) G. N. Sze To, C. Y. H. Chao: Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases, *Indoor Air* 2010: pp.2-16
- 9) 新型コロナウイルス感染症患者に対する積極的疫学調査実施要領, 国立感染症研究所感染症疫学センター, 2021.1