

原著論文

大きな声量を伴う活動を想定したCOVID-19の感染確率に関する研究

—ワンルーム型の保育施設の換気量に着目して—

胡 怡賢¹⁾ 種市 慎也²⁾ 田中 稲子²⁾ 大西 達也¹⁾

1) 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

2) 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

略題

大きな声量を伴う活動を想定したCOVID-19の感染確率に関する研究

和文抄録

COVID-19のクラスター感染は、保育施設においても報告事例がある。また、保育活動中は大きな声での発声機会が多いことや就学前児童のマスク着用が一律に求められていないことを鑑みると、感染に対する脆弱性が高いことが懸念される。そこで、本研究ではワンルーム型の保育施設を対象に、保育者が継続的な発声（大声）を行った際のCOVID-19の拡散性状や感染確率をCFD解析にて明らかにすることを目的とした。その結果、保育エリアの換気設備の位置や家具配置によって、感染性粒子濃度分布や感染確率に差がみられた。また、出席率が50%の場合、一人当たりの換気量は $60\text{m}^3/\text{h}$ であり、建築基準法の基準値（ $20\text{m}^3/\text{h}$ ）と比べて、感染確率は46.7%～59.2%減少することが確認された。さらには、換気量の違いによって、定常解析と非定常解析の感染確率の算出結果に差がみられ、短時間の解析の場合、非定常解析による検証が適切であることが示された。

《和文キーワード》 保育施設、オミクロン株、Wells-Riley式、感染確率、大声

受付：2024年2月1日 採用：2024年8月26日

対応責任著者

氏名：胡 怡賢

所属：横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

住所：〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

電話：080-4159-1996

Eメールアドレス：hu-yixian-fk@ynu.jp

A study on the probability of COVID-19 infection assuming activities involving loud speaking

-Focusing on the ventilation rate in one-room nursery facility-

Yixian HU¹⁾ Shinya TANEICHI²⁾ Ineko TANAKA²⁾ Tatsuya ONISHI¹⁾

1) Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University

2) Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University

英文抄録

Cluster infections of COVID-19 have been reported in nursery facilities. Given the frequent opportunities for speaking loud during nursery activities and the lack of a uniform requirement for preschool children to wear masks, there is concern about their increased vulnerability to infection. This study aims to elucidate the dispersion characteristics and infection probability of COVID-19 when infected nursery teacher engages in continuous loud vocalizations in a one-room nursery facility using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The results indicate that the distribution of infectious particle concentration and infection probability varies depending on the position of ventilation equipment and the arrangement of furniture in the nursery area. Additionally, when the attendance rate was 50%, the ventilation rate per person was 60 m³/h. Compared to the Building Standards Act' s standard value of 20 m³/h, this resulted in the range from 46.7% to 59.2% reduction in infection probability. Furthermore, differences were observed in the calculated infection probabilities between steady-state and unsteady-state analyses depending on the ventilation rate, indicating that unsteady-state analysis is more appropriate for short-term assessments.

《英文キーワード》 Nursery facilities, SARS-CoV-2 Omicron variant, Wells-Riley formula, Probability of infection, Speaking loudly

Corresponding author

: Yixian HU

: 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama City, Kanagawa Prefecture 240-8501, Japan

Tel : 080-4159-1996

E-mail : hu-yixian-fk@ynu.jp

1. 緒言

待機児童問題の解消策として、2001年に保育施設の設置基準¹⁾の緩和が講じられ、保育施設の周辺の公園等が園庭の代替場として認められた。その結果、都市部ではオフィスビルや商業施設、集合住宅の中に開設される保育施設（以下、複合型）が多くみられるようになった。これらの保育施設は、独立して開設される保育施設（以下、独立型）と比べて、セキュリティや外部騒音に対する遮音、室内からの音漏れ、ビル管理の観点から、窓の開閉等による室内環境調整の自由度は低くなることが確認されている²⁾。また、都市部の保育施設を対象とした実測調査によって、機械換気設備のみで運用を行う施設においては、換気不足も指摘されている^{2, 3)}。

現在、新型コロナウイルス感染症（以下、COVID-19）の世界的なパンデミックは終息しつつあるが⁴⁾、再流行のリスクや今後来たる新たな感染症のリスクは絶えることはないと考えられている。日本のCOVID-19の感染者数（2022年）は、10歳未満と10～40代の感染者数において、同様の増減傾向がみられ（図1）、保育施設でのクラスター感染も複数報告されている⁵⁾。また、就学前児童は、呼吸器の負担軽減等の理由からマスク着用は一律に求められていない⁶⁾ため、感染症に対する脆弱性が高い状態であると言える。さらに、多くの保育施設では吸音材の設置等の音環境の保全措置が図られておらず、喧騒感が非常に高い保育活動が行われている⁷⁾。このため、保育者が子どもに対して、発話や歌唱、読み聞かせ等で大き

な声を発する機会が多く、保育施設内の感染リスクはさらに高まることが予想される。したがって、子どもが多く時間を過ごす保育室内の換気性状や感染性粒子状物質の実態、これらが感染確率に及ぼす影響を把握し、子どもの発育を支える環境を整えていくことは極めて重要である。

COVID-19に関する既往研究として、以下が挙げられる。G.Buonannoらはモンテカルロ法によって、口呼吸（休息）、会話（軽作業）、大声（軽作業）、口呼吸（重作業）の4つの活動におけるCOVID-19原始株の感染性粒子生成率を明らかにした⁸⁾。これにより、疫学調査で多く使われるWells-Rileyモデル⁹⁾を用いたCOVID-19の空気感染のリスク評価が報告されるようになった。例えば、倉淵¹⁰⁾は、Wells-Rileyモデルを用いてCOVID-19の感染確率と換気量の関係进行分析し、8時間の事務作業時の必要換気量が、厚生労働省¹¹⁾が推奨している換気量（一人当たり30m³/h）と同程度であり、妥当な推奨値であることを示唆している。しかし、保育室では事務作業よりも活発な活動を行っているため、上記の値よりも多くの換気量が必要であると考えられる。さらに、前述した就学前児童のマスク未着用による脆弱性も踏まえると、保育施設では特に感染症対策を加味した適切な換気設計が求められる。

阿式ら¹²⁾は中国広州のレストランを対象に、定常解析と非定常解析による感染性粒子濃度分布を比較分析し、定常解析よりも非定常解析の方が有効であることを指摘した。これは、一人当たりの換気量3.15m³/hで、換気が不足する環境での解析結果であるため、換気の条件が異なる場合には検討の余地がある。また、Wells-Rileyモデルは室内空気の完全混合を前提としているため、換気性状に影響を及ぼす換気設備や空調設備、家具配置等の影響に着目した研究例はほとんどみられない。都市部に多くみられるワンルーム型の保育施設^{注1)}では、保育エリアを家具でゾーニングするため、局所的に感染性粒子状物質が滞留する可能性も考えられる。

本研究では、ワンルーム型の保育施設を対象に、感染した保育者の大きな声量を伴う継続的な

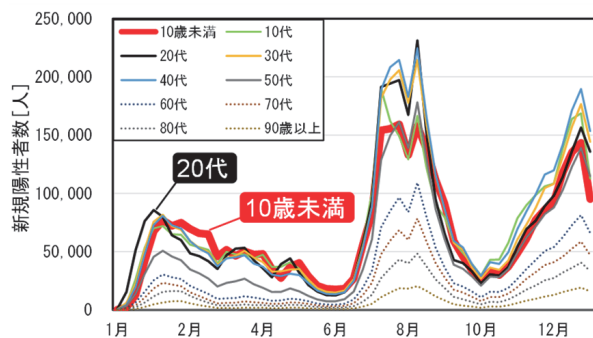


図1 2022年の月別新規陽性者の推移

(厚生労働省のデータ5) により作成)

活動を想定して、COVID-19の拡散性状をCFD解析より把握する。そして、異なる換気条件によるCOVID-19の空気感染の相対的な感染リスクも明らかにすることを目的とする。さらには、定常解析及び非定常解析の双方から分析を行い、両結果の違いについても考察を行うものとする。

2. 研究方法

2.1 対象保育施設の概要

本研究では、これまでに実施した実測調査^{2,13,14)}にて、換気量の課題がみられた複合型の小規模保育施設であるYc施設を解析対象とした(表1)。なお、Yc施設の天井高さは、高層ビルの1階に位置するため、一般的な保育施設よりも高い3.8mを有している。一方で、施設の規模については、過去の調査結果に基づいて作成した確率分布(図2)と比較すると、いずれの保育エリアも比較的小規模であることが窺えるが、国¹⁵⁾や市¹⁶⁾の基準面積を満足している。また、保育

表1 対象施設の概要

施設形態	エリア名	園児数	保育者数	保育面積[m ²]
複合型 ワンルーム型	A	12	7	37.6
	B	12	3	39.8
	C	12	2	29.8
階数	構造	開設年/建築年	天井高さ	
1階/29階	RC	2018/2008	3.8	
備考				
・認可外保育施設		・機械換気(第1種換気)		
・排煙窓の換気利用はなし				

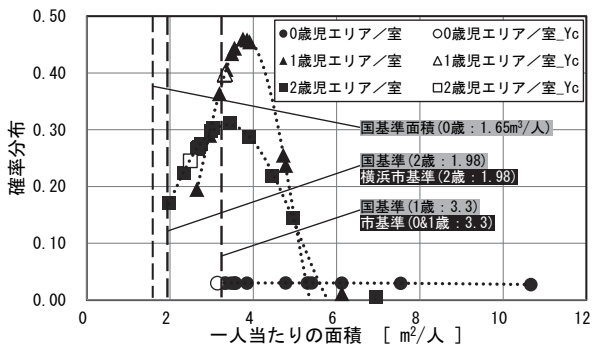


図2 保育施設における一人当たり面積の正規化曲線

室は図3に示すように家具でゾーニングされ、給気口は概ね保育エリアの中心部、排気口は概ね保育エリアの周辺部に設置されている。同図の南西部はドアと高さ2m程度の間仕切壁が設置されており、上部は空気が循環可能な仕様である。また、保育従事者へのヒアリング調査により、自由遊びの際は、大声での発声や歌唱(5分程度)が一般的に行われていることが確認された(表2)。

2.2 解析フロー

本研究では、FlowDesigner2022(Advanced Knowledge Laboratory Inc.)を使用し、解析を実施した。具体的には、2022年8月の実測調査¹⁴⁾で得られた建築図面より、解析モデルを作成し、実測当日の出席人数及び保育スケジュールに基づいたCO₂発生量と実測したCO₂濃度の結果を用いてモデルの精度を事前検証した¹³⁾。次に、オミクロン株の感染者一名(保育者)が声量の大きな発話や歌唱を行った際の感染性粒子生成率⁸⁾を想定し、保育室の感染性粒子濃度分布の解析を行った。さらに、Wells-Riley式⁹⁾によって保育室に設定した3か所(A~Cエリア)の感染確率を算出した。また、建築基準法¹⁷⁾や厚労省が感染症対策¹¹⁾として推奨する換気量に基づき、感染確率と換気量の関係について分析を試みた。

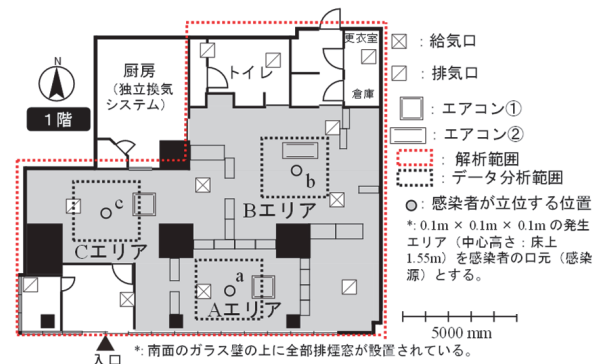


図3 対象施設の平面図および解析条件

表2 対象施設の一日スケジュール



2.3 解析モデル

2.3.1 COVID-19原始株の感染性粒子生成率

前章の通り、G.Buonanno⁸⁾は、モンテカルロ法によって感染性粒子生成率 (ER_q) を算出し (式1)、休息・口呼吸、軽作業・会話、軽作業・大声、重作業・口呼吸等の活動による成人のCOVID-19原始株における感染性粒子生成率の確率分布をまとめている。表3に抜粋した感染性粒子生成率を示す^{注2)}。

$$ER_q = c_v \times c_i \times IR \times V_d \quad (1)$$

ER_q : 感染性粒子生成率 [quanta/h]

c_v : 唾液中のRNA濃度 [RNA copies/mL]

c_i : 感染性粒子とRNA量換算係数 [quanta/RNA copies]

IR : 呼吸率 [m^3/h]

V_d : 呼気中の飛沫濃度 [mL/m^3]

また、図4に示したライノウイルス、結核、麻疹等の既存感染症における感染性粒子生成率¹⁸⁾と比較すると、COVID-19の原始株生成率はこれらと同程度であることが確認できた。REHVA(欧州の空調・換気設備に関する協会)は、表3の66パーセンタイル値を利用し、換気がCOVID-19の

表3 活動による各確率密度の感染性粒子生成率

確率密度分布	単位:[quanta/h]			
	休息 口呼吸	軽作業 会話	軽作業 大声	重作業 口呼吸
66パーセンタイル値	0.72	9.7	62	4.9

※文献⁹⁾より抜粋

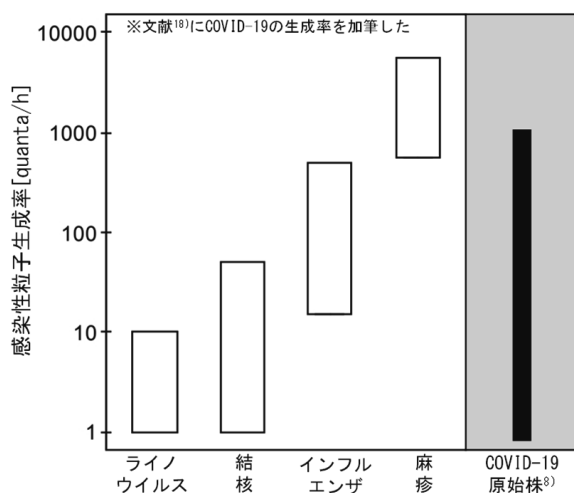


図4 既存感染症における感染性粒子生成率

空気感染に及ぼす影響を推定できるカリキュレーターを開発している^{19,20)}。そのため、本研究ではREHVAの推奨値に倣い、軽作業・大声時の66パーセンタイル値62quanta/hを利用した。

2.3.2 変異株の感染性粒子生成率の設定

2022年以来、新型コロナウイルスの変異株(オミクロン株)は、症状や重症化・入院の割合、感染力等、従来のコロナウイルスとの違いが報告されている²¹⁾。そのため、REHVAは式1を利用し、変異株による生成率の設定への影響を表4のCOVID-19係数としてまとめ、式2を立案している²⁰⁾。本研究の感染者は、各保育エリアの中央1地点に滞在していることを仮定している(図3)。感染性粒子生成率は、「大声(軽作業)」時の155 quanta/hを利用し、感染者が移動せず、立位の状態(口の高さ:床上1.55m)で継続的に発声する条件で解析を行った^{注3)}。

$$ER_q = c_v \times c_i \times IR \times V_d \times C_{19} \quad (2)$$

C_{19} : COVID-19係数 [-]

2.3.3 感染性粒子の感染確率

後述する表5の与条件で、まず感染性粒子濃度分布 (quanta/ m^3) をCFD解析にて算出した。ここでは感染確率の分布を得るために、算出した感染性粒子濃度分布の1メッシュを単位体積^{注4)}とみなし、これに対応する容積を乗じて算出した感染性粒子量をWells-Riley式^{8,9)}に代入することで、感染確率の分布を得ている(式3、式4)。また、3.3節以降の分析で用いる感染確率は、各保育エリアにおける分析対象範囲の平均値^{注5)}を用いて分析を進める。

$$D_q = n \times V \quad (3)$$

D_q : 感染性粒子量 [quanta]

n : 感染性粒子濃度 [quanta/ m^3]

V : 1メッシュの体積 [m^3]

表4 変異株によるCOVID-19係数²⁰⁾

原始株	アルファ株	デルタ株	オミクロン株
1	1.4	2	2.5

$$P_I = 1 - \exp(-D_q) \quad (4)$$

P_I : 感染確率 [%]

D_q : 感染性粒子量 [quanta]

2.3.4 解析条件

解析条件を表5に示す。流入・流出条件となる標準の換気量は、設計換気量を設定している。これは、保育室のCO₂濃度の実測値¹⁴⁾と解析値¹³⁾を比較した結果、保育室の換気量は設計換気量(1,510m³/h)に相当することが確認されたためである^{注6)}。また、3.3節以降の分析では、この換気量を変更した際の感染確率の変化を検討している(表6)。図3のA、Cエリアに設置されたエアコン①の設定風量は22.5m³/min、Bエリアのエアコン②設定風量は13.5m³/minであり、弱運転での稼働を想定している。乱流モデルについては、高レイノルズ数型標準k-εモデルを利用し、保育施設の換気量による室内感染性粒子濃度分布を解析する。なお、本研究では温度、湿度、感染性粒子の重力沈降^{注7)}は考慮していない。

本研究の解析は、定常解析と非定常解析の両者を用いた。非定常解析では、表2の歌唱及び大声

の発声頻度が高い自由遊びの時間帯を模して、60分間の解析を行った。定常解析では、換気量を変えた与条件(表6)において、非定常解析の結果をどの程度反映できているかを検討するために併せて実施した。なお、解析時間中は常に感染者との接触を想定しており、感染については、成人と子どもが同等の感受性を持つものと仮定して解析を行った。

3. 結果

3.1 設計換気量時における気流速度分布

3.2節に示す感染確率分布は、室内の気流速度分布の影響を受けると考えられる。そのため、図5に設計換気量時の気流速度分布を示す。なお、気流速度は基本的に安定した状態であるため、定常解析で算出した。その結果、床上0.5m、1.5mの地点では、各エリアは概ね0.05~0.20m/sであった。具体的には、Aエリアで、概ね0.05~0.15m/sであり、床上0.5mの方の風速が高くなった。Bエリアで、0.10~0.25m/sであり、床上1.5mの方が高い結果となった。Cエリアで、床上0.5m、1.5mともに0.15m/s程度であり、鉛直方向の顕著な速度差はみられなかった。また、断面図A—A'をみると保育者と子どもの生活空間(0.5~1.5m)で、気流がほぼ0.20m/s以下となり、Yc施設の天井の高さ(3.8m)による影響がみられた。断面図B—B'では、B、Cエリアの気流が概ね0.10m/s以下であった。このようにAエリアの風速は、他のエリアより低くなった。これは、Aエリアが家具に囲まれていることにより、空気の循環が阻害されている可能性が一因として考えられた。特にA、Cエリアでは、給排気口やエアコンの型番が同等であることから、家具が気流を阻害した影響が窺えた。給排気口が多く設置されたBエリアでは、気

表5 解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル(高レイノルズ数型)
アルゴリズム	SIMPLEC
移流項差分スキーム	1st-order
解析領域	16m×13m×3.8m
メッシュ数	1,000,000
流入・流出境界条件	1510m ³ /h ^{※1} (第1種換気)
定常解析	収束判定: -3 解析時間: 定常状態に到達するまで
非定常解析	刻み時間: 5s 解析時間: 60min
ソフトウェア	FlowDesigner2022

※1: 実測調査¹⁴⁾と解析結果¹³⁾に基づき、当園で設計換気量が確保されているのを事前検証している

表6 各解析条件の総換気量

保育エリアの総換気量[m ³ /h]	255	505	755	1000	1250	1510	1755	2000	2250	2500
出席人数[人]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
一人あたりの換気量[m ³ /h・人]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
定員人数[人]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
一人あたりの換気量[m ³ /h・人]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

流の一部がドアの隙間を經由してトイレ・倉庫等の排気口で排気されており、気流分布のムラがみられた。給排気口の位置が室内の気流分布に与える影響についてはさらなる議論が必要と考えられ、今後の課題とする。

3.2 設計換気量時における感染確率分布

本節では、いずれかの年齢児の保育エリア中央に感染者1名がいた際の感染確率の分布を、定常解析にて算出する。感染源a、b、cごとに、床上0.5m、1.5mのそれぞれの結果を図6に示す。

感染者が点aにいる場合(図6(1)(2))、感染確率はAエリアの床上1.5mで33%程度となり、床上0.5mで18%になっていた。B、Cエリアでは8%、10%となり、上下差はみられなかった。解析結果の時間経過アニメーションから、Aエリアの感染性粒子のほとんどが近くの排気口に排出される様子がみられたが、一部の感染性粒子は家具に遮られAエリアに滞留することが確認できた。

感染者がbにいる場合(図6(3)、(4))、感染確率はBエリアの床上1.5mで34%程度となり、床上0.5mで13%になっていた。A、Cエリアでは6%となり、上下差はみられない。Bエリアの感染性粒子は、前節で指摘したようにトイレ等の排気口からも排出されたため、感染者が点aにいる場合よりも、感染性粒子の滞留空間は縮小したと考えられる。

感染者がcにいる場合(図6(5)、(6))、感染確率はCエリアの床上1.5mで37%程度となり、床上0.5mは12%になっていた。A、Bエリアでは8%、11%となり、上下差はみられなかった。Cエリアにおける感染性粒子は、ほとんど近くの排気口から排出されており、感染者がbにいる場合と比べ、感染者のいないエリアでの感染確率が高くなった。この施設では、排気口よりも給気口の個数が少なく、1つの給気口の換気量が大きいいため、空気が他のエリアに移動し、排出されたと考えられる。

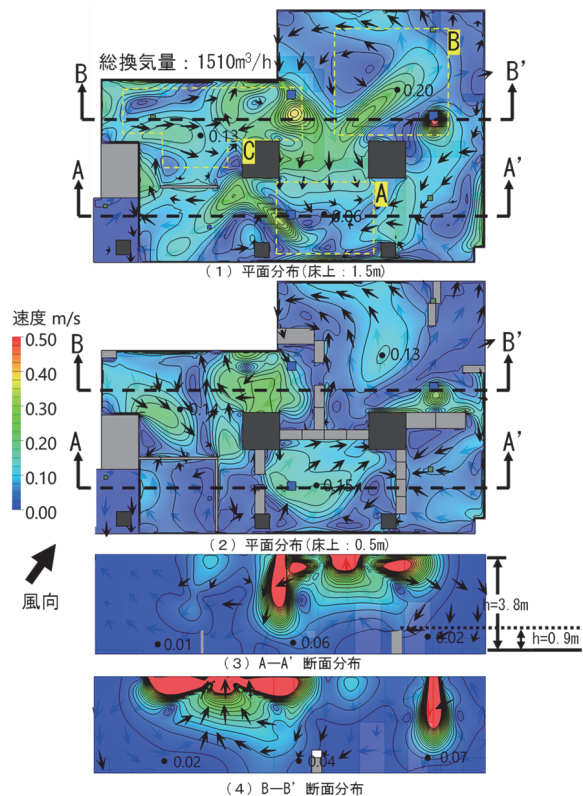


図5 設計換気量時における定常解析の気流分布

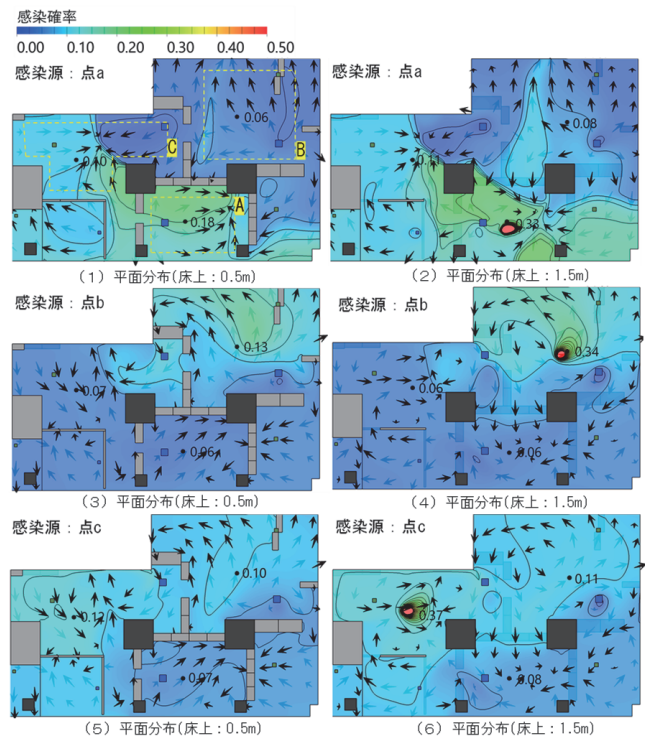


図6 感染源ごとの感染確率分布

3.3 定常解析による換気量と感染確率の関係

前節では、定常解析で保育エリアごとの感染性粒子の拡散性状を把握した。本節では、保育室の総換気量を変更した際の感染確率の変化を分析する(表6)。なお、換気量の変化による相対的な影響を確認するために、その傾向が顕著に生じると予想される感染者が滞在する空間に焦点を当て、考察を行う。各保育エリアの換気量ごとの感染確率を図7に示す。感染確率の平均値は、換気量が大きくなると相対的に減少がみられた。換気量が $1,250\text{m}^3/\text{h}$ 以下の場合、Bエリアの感染確率が最も高くなっていた。一方で、換気量が $1,250\text{m}^3/\text{h}$ よりも大きい場合は、Aエリアの感染確率が最も高くなった。そのため、換気量の大小によって保育エリアの感染確率が異なる傾向が確認された。その一因として、3.1節で指摘した換気設備や家具配置による室内気流の影響が考えられた。

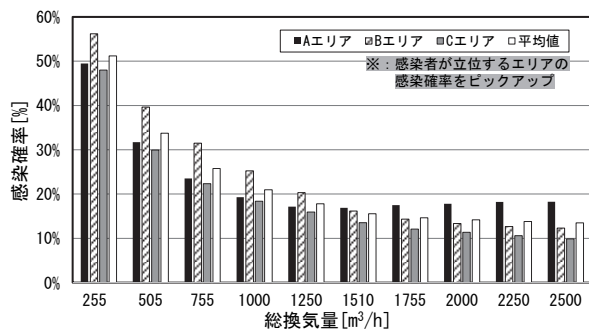


図7 換気量ごとの感染確率

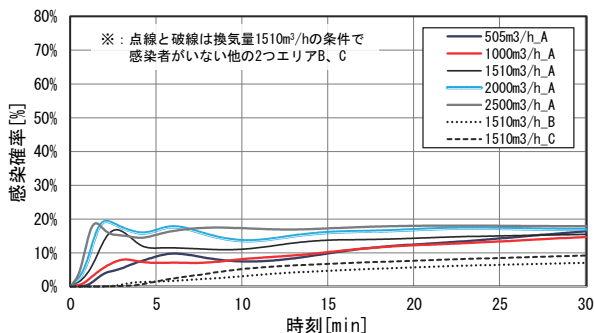


図8 Aエリアにおける換気量ごとの感染確率の推移(感染源:点a)

3.4 非定常解析による換気量と感染確率の関係

本節では、非定常解析によって各保育エリアの換気量別の感染確率を分析する。感染確率の経時変化を、感染源の位置別で図8~図10に示す(注7,8)。同図の破線は、設計換気量($1,510\text{m}^3/\text{h}$)時における感染源の隣の保育エリア(感染者がいない場所)の感染確率を示している。

感染者が点aにいる場合、Aエリアの感染確率は全ての時刻において20%以下になっていた(図8)。また、発声開始から10分後のAエリアは、B、Cエリアよりも感染確率がそれぞれ3.6、2.1倍程度高い。そのため、感染者が滞在している保育エリアが最も感染リスクが高いことが定量的に確認された。さらに、換気量が大きくなるにつれて、感染者がいるAエリアでは感染確率が高くなる傾向が窺えた。これは、断面気流分布(図5)でも指摘したように、給気口の位置が高く、対象エリアまで気流の影響が及んでいないことに加えて、家具で囲まれて空気が循環しにくいことが影響していると考えられた。

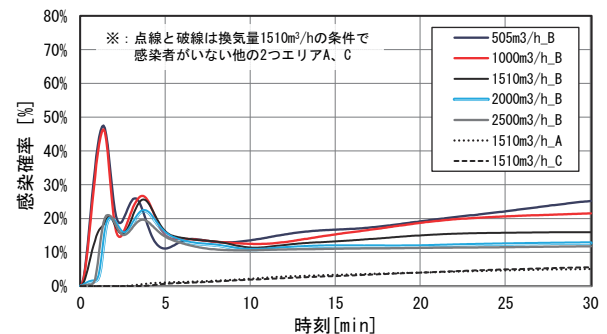


図9 Bエリアにおける換気量ごとの感染確率の推移(感染源:点b)

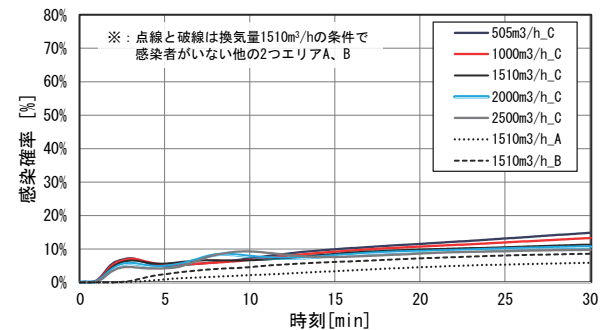


図10 Cエリアにおける換気量ごとの感染確率の推移(感染源:点c)

次に感染者が点bにいる場合、Bエリアの10分後の感染確率は、感染者がいないA、Cエリアと比べて、それぞれ5.2、6.0倍程度高くなることが窺える(図9)。また、総換気量が505m³/h、1,000m³/hの場合は、発声後2分程度で感染確率が40%を超えるピークがみられるが、換気量が1,510m³/h以上ではこのピークが下がることが確認された。さらに、10分経過後は、図8と異なり、換気量が大きくなるにつれて、感染確率が下がっていた。Bエリアでは、3.1節で指摘したように、トイレの排気口も隣接しているため、感染者が放出した感染性粒子が循環しやすく、希釈されやすいものと考えられる。

最後に感染者が点cにいる場合、Cエリアの10分後の感染確率は、A、Bエリアと比べて、それぞれ3.0、1.4倍程度高くなることが確認された。Cエリアの換気量ごとの感染確率は、全時間を通して15%程度とA、Bエリアと比べて最も感染確率が低い傾向を有している。Yc施設は、第1種機械換気で給気口が4個、排気口が7個と、給気口1つ当たりの流量は排気口よりも大きい(図3)。そのため、Cエリア付近では、新鮮空気の給気量が比較的大きい(図5)ことから、感染確率が低くなったものと推察される。以上より、給気口や家具の配置の条件によって、保育エリアの感染確率が異なることが示された。

4. 考察

4.1 換気基準との比較

前節では、Yc施設の総換気量と感染確率の関

係について結果を示した。本節では、総換気量(表6)を定員人数(表1)で除することで、一人当たりの換気量を算出し、現行の換気基準との比較を行った。なお、建築基準法¹⁷⁾では、一人当たり20m³/h(建築物の最低限の基準)、建築物衛生法に基づいたSHASE-S 102²²⁾では一人当たり30m³/hが求められている。Yc施設の総換気量505m³/h、1,000m³/h、1,510m³/h時の一人当たりの換気量は、それぞれ10m³/h、20m³/h、30m³/hであった。そのため、本研究においては、建築基準法の基準値は1,000m³/h、SHASE-S 102は1,510m³/hの条件であるとみなせる。また、Yc施設の定員人数に対して出席率が50%の時には、一人当たりの換気量60m³/hとみなせる。その際には、建築基準法の20m³/hの時と比べて、感染確率は46.7%~59.2%減少することが確認された(図7)。したがって、COVID-19のようなパンデミック時には、少人数で保育施設を利用することで感染リスクを低減させる方法も効果的であると言える。一方で、保育室の換気設備や家具等の条件によっても感染確率は異なる(3.4節)ため、その他の保育施設での検討事例も含めた網羅的な分析が今後は望まれる。

4.2 定常解析と非定常解析の差

本節では、前章で示した定常解析及び非定常解析の結果を用いて、その差について考察を行う。そこで、図8~図10の感染確率の経時変化を5分間隔で平均化し、換気量別に定常解析・非定常解析の結果を図11に示す^{注7)}。その結果、設計換気

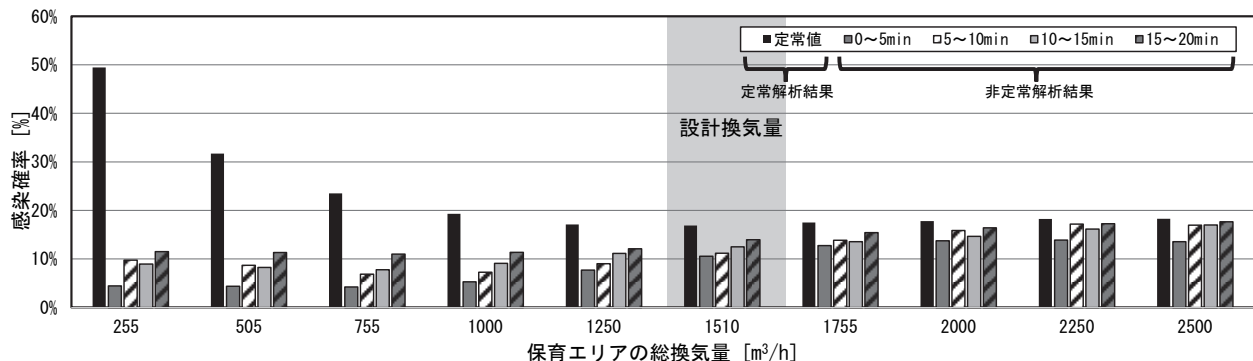


図11 Aエリアにおける換気量ごとの非定常解析と定常解析の比較(感染源:点a)

量（一人当たり30m³/h）を下回る条件では、定常解析と非定常解析の感染確率の差は5.0～45.0%であった。そのため、本研究のような短時間（60分）の解析の場合、定常解析では感染リスクを過大評価する可能性が高いため、非定常解析の方が適切であると言える。一方で、設計換気量よりも大きい場合については、解析結果の差はほとんどみられない（0.6～4.8%）。そのため、解析時間を考慮すれば、定常解析を用いる方が実用であると言える。以上より、換気量の違いによって、定常・非定常解析の値に差がみられたものの、一人当たり30m³/hを超える換気設計は少ないものと予想されるため、既報¹²⁾と同様に非定常解析による感染リスクの評価が適切であると考えられる。

4.3 感染源高さが感染確率に与える影響

ここまでの分析では、感染者が立位であることを想定して解析を行ってきた。しかし、保育現場の実態としては、保育者が座位の状態が発話する場面も多くみられる。3.2節で指摘した家具配置によって、感染性粒子が滞留する傾向もみられたため、子どもや保育者の滞在する高さ空間では特に感染リスクが高まるものと推察される。そこで、感染源の高さが立位（1.55m）と座位（0.85m）の状態を想定して、設計換気量時の感染確率を定常解析にて算出した（図12）。なお、定常解析の方が非定常解析よりも過大評価する特徴（4.2節）を用いて、相対的な差を検討した。その結果、感染者がいないB、Cエリアでは、立位と座位による感染確率の差はほとんど生じないことが明

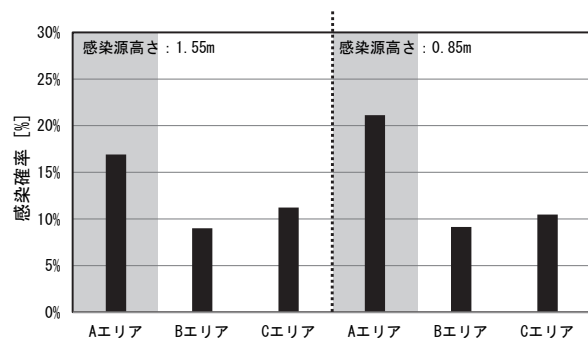


図12 設計換気量における感染源高さによる感染確率に与える影響（感染源：点a）

らかとなった（0.1～0.7%）。一方で、感染者がいるAエリアの感染確率は4.2%増加した。そのため、感染源の高さ方向の影響は、感染者の滞在するエリアについては加味することが望ましい結果であると言える。

4.4 本研究の限界

本研究の知見は、ワンルーム型の保育施設で感染した保育者1名が大声で発声した場合、人同士の感染リスクがどの程度生じるのかを相対的に検討した研究結果である。本研究では、感染に際して成人と子どもが同等の感受性を有するものという仮定で解析を行ったものの、実際には異なることが考えられる。その他にも、実際の保育現場では、保育者と子ども、子どもと子ども間で接触行為が多いことは自明である。そのため、本来の感染確率を検討する上では、空気感染以外にも接触感染や飛沫感染の影響、さらには発症までの潜伏期間等が考慮されるべきである。しかし、本研究においては、それらについては加味しておらず、あくまで空気感染に限定した建築環境の影響に焦点を当てて、検討を実施したものであることに留意されたい。その他にも、今回はYc施設のケーススタディのみであったため、引き続きその他事例についても調査を重ねていく必要がある。

5. 結論

本研究では、ワンルーム型の保育施設であるYc施設を対象に、感染した保育者1名が継続的な発声（大声）を行った際のCOVID-19の拡散性状や感染確率をCFD解析にて明らかにした。さらには、定常解析と非定常解析による感染確率の差についても考察を行い、得られた知見を以下に示す。

- (1) 感染者が滞在する保育エリアの換気設備（給排気口）の位置や家具配置によって、感染性粒子濃度分布や感染確率に差がみられた。換気量が1,510m³/h（一人当たり30m³/h）の場合、感染者が発声してから10分後、感染者がいないエリアと比べ、感染者がいるエリアの感染確率は1.4～6倍

程度高くなった。

- (2) Yc施設の出席率が50%の時、一人当たりの換気量は $60\text{m}^3/\text{h}$ であり、建築基準法の基準値 ($20\text{m}^3/\text{h}$) と比べて、感染確率は46.7%~59.2%減少することが確認された。そのため、パンデミック時には、少人数で施設を利用することも感染リスクを低減させる一つの方法である。
- (3) 換気量の違いによって、定常解析と非定常解析の感染確率の算出結果に差がみられた。本研究のような短時間 (60分) の解析の場合、既報¹²⁾ と同様に非定常解析の方が適切であることが確認された。一方で、一人当たりの換気量が $30\text{m}^3/\text{h}$ を超える場合は、定常解析による検討も可能であることが示された。
- (4) 感染源の高さが感染確率に及ぼす影響を検討した結果、感染者がいるエリアでのみ差が生じた。感染者の立位と座位による感染確率の差は4.2%であり、座位の状態の方が高かった。

謝辞

本研究の解析モデルの作成にあたり、Yc施設の関係者の皆様に多大なるご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

注

注1) 各年齢児の保育空間が間仕切壁等で仕切られ、別空間となっている場合を「個室型」、同一空間となっている場合を「ワンルーム型」としている。

注2) 感染性粒子の生存時間に関する研究^{23,24)} では、実験室 (温度: $22^\circ\text{C}\sim 23^\circ\text{C}$ 、相対湿度40%) で発生させたエアロゾル中におけるSAR-CoV-2の生存半減期の中央期は1.1時間 (95%信頼区間は0.6~2.6時間) と確認されている。COVID-19の感染性粒子については、G.Buonannoらがウイルスの生存率を考慮して生成率をまとめている (表3)。そのため、本研究の非定常解析の解析時間では、ウイルスの不活性化に至らない可能性が高く、感染確率の算出結果は過小評価する可能性があることを留意されたい。

注3) ここでは発生源からの瞬時一様拡散を仮定し、助走期間を設けていない。仮に助走期間として感染

者が5分間呼吸した後に発声する条件で解析を行った結果、発声10分後の感染確率の差は、2%程度に留まることを事前に確認している。

注4) 本解析モデルの1メッシュあたりの体積は約 790cm^3 である。これは、成人が一度の呼吸で肺に取り込む空気量と概ね同等である²⁵⁾ ため、「1メッシュの体積 $V [\text{m}^3] = \text{呼吸率IR} [\text{m}^3/\text{h}] \times \text{滞在時間}t [\text{h}]$ 」と想定している。

注5) 本研究では、各保育エリアを中心とする地点(a~c)において、 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$ (4m^3) の空間データを分析範囲とした。 4m^3 とした理由は、 1m^3 の空間データの場合、感染者自身の影響が支配的であることが事前検証より確認されたためである。そして、 4m^3 の場合は、保育エリアの全容積を用いて算出した結果とも傾向が顕著に変わらないことも確認している。以上より、本研究では、保育者と子どもの滞在空間を評価するには、 4m^3 の分析範囲が適切であると判断した。

注6) 平面図 (図2) によると、室内の一部の排気口は施設の東北部のトイレや倉庫・更衣室にも位置されていた。今回の解析では、保育者・子どもの生活空間を主な解析対象とするため、モデル作成する際には、上記の排気口を有するトイレや倉庫・更衣室の換気量をBエリアと接するドアで排気するものとしてモデルを再現した。

注7) 感染性粒子は本来、感染者の口・鼻から排出された飛沫に付着したものである。日本人が歌唱する際に、放出された飛沫は概ね $1\mu\text{m}$ 以下になり²⁶⁾、さらに、Zhuら²⁷⁾の研究によると、 $30\mu\text{m}$ 以下の液滴については、そのサイズが比較的小さいため重力や慣性の影響は無視できると報告している。したがって、この感染性粒子の輸送は、ほとんど室内の流れ場に影響を受けるといったものであった。このため、今回は感染性粒子の沈降は考慮していない。

注8) 図5~7の視認性を配慮し、総換気量 $505\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1,000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1,510\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2,000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2,500\text{m}^3/\text{h}$ での結果のみを掲載する。

参考文献

- 1) 厚生労働省：待機児童解消に向けた児童福祉施設最低基準に係る留意事項等について。 https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00tb5653&dataType=1&pageNo=1 (2023.5.14.)
- 2) 種市慎也, 田中稲子, 他. 中間期の換気行為に着目した都市部の保育施設における換気に関する研究. 日本建築学会環境系論文集 88: 288-299, 2023. doi:10.3130/aije.88.288
- 3) 藤井里咲, 定行まり子. 保育所における1歳児の生活行為からみた空間・環境に関する研究. 日本建築学

- 会計系論文集 81 : 2383-2391, 2016. doi: 10.3130/aija.81.2383
- 4) WHO : Coronavirus (COVID-19) Dashboard.
<https://covid19.who.int/> (2023.5.14.)
 - 5) 厚生労働省 : データからわかる - 新型コロナウイルス感染症情報 - .
<https://covid19.mhlw.go.jp/> (2023.5.14.)
 - 6) 厚生労働省 : 新型コロナウイルスに関するQ&A (一般の方向け) .
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/dengue_fever_qa_00001.html#Q6-10 (2023.11.15.)
 - 7) 上野佳奈子, 宮塚 健, 他. 音環境に着目した保育施設の実態調査. 日本建築学会環境系論文集 82 : 87-95, 2017. doi: 10.3130/aije.82.87
 - 8) Buonanno G, Morawska L, et al. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection : Prospective and retrospective applications. *Environ Int* 145 : 106112, [Epub: Sep. 6, 2020].doi:10.1016/j.envint.2020.106112
 - 9) Riley E, Murphy G, et al. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am J Epidemiol* 107 : 421-432, 1978
 - 10) 倉淵隆. 新型コロナウイルス対策として換気量はどうか? 空気調和・衛生工学 95 : 453-459, 2021
 - 11) 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.
<https://hourei.net/law/325AC0000000201> (2023.5.14.)
 - 12) 阿式信英, 金政一, 他. 中国広州レストランでの新型コロナウイルス感染症クラスターを対象とした各種換気効率評価と感染確率分布に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集 : 1295-1298, 2021
 - 13) 胡怡賢, 種市慎也, 他. ワンルーム型保育施設の気流解析によるCOVID-19の感染確率に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集 : 1465-1466, 2023
 - 14) 種市慎也, 胡怡賢, 他. 横浜市の保育施設における夏季の室内空気環境と幼児・保育者の生理反応に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集 : 629-630, 2023
 - 15) 厚生労働省 : 児童福祉施設最低基準 (省令) .
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/kodomo/pdf/tuuchi-04.pdf> (2023.5.14.)
 - 16) 横浜市こども青少年局 : 保育所整備の手引き.
https://www.city.yokohama.lg.jp/business/bunyabetsu/kosodate/seibi/seibinotebiki.files/00_tebiki.pdf (2023.5.14.)
 - 17) 建築基準法.
<https://hourei.net/law/325AC0000000201> (2023.5.14.)
 - 18) HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases. NAFA Foundation Report, 2013
 - 19) REHVA : COVID-19 GUIDANCE.
<https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance> (2023.5.14.)
 - 20) REHVA : CALCULATOR to estimate the effect of ventilation on COVID-19 airborne transmission.
<https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator> (2023.5.14.)
 - 21) 国立感染症研究所 : SARS-CoV-2 の変異株B.1.1.529系統 (オミクロン株) について (第9報) .
<https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2551-cepr/11029-cepr-b11529-9.html> (2023.5.14.)
 - 22) 空気調和・衛生工学会 : SHASE-S 102-2011 換気規準・同解説, 2011
 - 23) Van D, Bushmaker T, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med* 382 : 1564-1567, [Epub: Apr. 16, 2020] , doi:10.1056/NEJMc2004973
 - 24) Smither S, Eastaugh L, et al. Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity. *Emerg Microbes Infect* 9 : 1415-1417, [Epub: Dec. 2020] , doi:10.1080/22221751.2020.1777906
 - 25) 小室透, 間瀬教史, 他. 運動時における健常者の呼吸パターン (呼吸数と一回換気量の関係) および呼吸運動の変化. *理学療法学* 21 : 549-552, 1994. doi: 10.15063/rigaku.KJ00001306886
 - 26) Kato H, Okamoto R, et al. Expansion of droplets during speaking and singing in Japanese. *PLoS One* 17 : e0272122, [Epub: Aug. 25, 2022] , doi:10.1371/journal.pone.0272122
 - 27) Zhu S, Kato S, et al. Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Build Environ* 41 : 1691-1702, [Epub: Dec. 2006] , doi: 10.1016/j.buildenv.2005.06.024