

CFD解析に基づく避難所での COVID-19対策に向けた換気システムの検討

下野 明佳里^{1,a)} 川原 圭博^{1,b)}

概要：COVID-19対策として、不特定多数の人が集まる3密空間の利用を控えるよう呼びかけられている。その一方で災害発生時には避難所の開設が不可避であることから、早急な感染対策が求められている。COVID-19への対策として飛沫の飛散防止と換気が重要であるとされており、避難所では、パーティションの設置が増加している。しかしながら、パーティションは前者に基づく対策であり、換気への配慮については現在明確な報告がない。本稿では、避難所をモデル化した空間にパーティションを配置し、CFD解析により換気評価を行った。換気評価には、室内各点での評価が可能である空気齢・空気余命を使用した。その結果、パーティション内部では給気口からの新鮮空気が届きにくく、かつ滞留が発生していることが明らかとなった。また、換気状況の改善に向けて配置の変更が容易な空気清浄機やサーキュレータの設置を考え、それらの導入効果を検討した。

キーワード：COVID-19, 避難所, パーティション, 換気, CFD解析

1. はじめに

2019年末からのCOVID-19の流行は、全世界で甚大な影響を及ぼし続けている。COVID-19の感染拡大における特徴として、3密 [9] が重なる空間でのクラスター発生が挙げられる。3密とは、密閉・密集・密接を指しており、感染が拡大するフェーズでは、オフィスや避難所、レストランなど不特定多数の人が集まる公共空間は3密に該当するとして利用を控えるよう呼びかけられてきた。その一方で避難所は、緊急性が高く、災害発生時には開設が不可避である。COVID-19の流行の長期化に伴い、最近では感染対策を行いながら公共空間の利用再開を試みる動きも始まっているが、前述の観点から避難所ではより早急な感染対策が必要である。

COVID-19への感染の仕方には飛沫感染・接触感染・空気感染の3種類であるとされている [3]。そして、飛沫感染・接触感染ではサイズが $5\mu\text{m}$ 以上である飛沫、空気感染では $5\mu\text{m}$ 未満の飛沫核が原因であるとされている [4]。感染には飛沫が主に関与しているとされている [3] が、換気の悪い空間では飛沫核も感染に寄与する可能性があることが示唆されている [3]。以上の観点からCOVID-19への対策

として、飛沫の飛散防止と換気が重要であるとされており、避難所では、パーティションが設置されるケースが増加している。しかしながら、パーティションは前者に基づく対策であり、換気に対して配慮されているかは不明瞭である。したがって、パーティションを設置した場合に換気状況がどのように変化するか把握する必要があると考えられる。

以上を踏まえ、本稿では、避難所におけるパーティションの設置を想定し、コンピュータ上で流体シミュレーションを行うCFD解析^{*1}を用いて換気評価を行った。評価指標は、COVID-19に関する文書に記載のある換気量・換気回数について必要量を満たすように予め設定した上で、室内各点での評価が可能である空気齢 (SVE3) [12]・空気余命 (SVE6) [10] について解析した。さらに、換気状況の改善に向けて配置の変更が容易な空気清浄機やサーキュレータの設置を考え、それらの導入効果を検討した。

2. 避難所用パーティションの換気評価

2.1 換気評価に用いた指標

本稿で使用した換気指標 (換気量・換気回数・空気齢・空気余命) について以下に述べる。

2.1.1 換気量・換気回数

換気について、COVID-19に関する文書ではその指標として換気量と換気回数を用いられている。ここで、換気量

¹ 東京大学
The University of Tokyo
^{a)} shimono@akg.t.u-tokyo.ac.jp
^{b)} kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

^{*1} Computational Fluid Dynamics Analysis.

は1時間あたりに何立方メートルの空気を取り入れるか、換気回数は1時間にその部屋の容積の何倍の空気を取り入れるかを表す指標である。2020年3月に厚生労働省が発表した文書 [6] によると、機械換気では建築物衛生法におけるCO₂の室内濃度基準1000ppmを満たしている条件、すなわち30m³/(h・人)が確保されていること、窓開け換気では2回/hが確保されていることが、換気の悪い密閉空間に当たらない条件とされている。このように、換気量や換気回数では1時間あたりに取り入れた空気量や空気を入れ替えた回数を知ることができるが、その一方で、COVID-19に求められる換気対策は、上述したように室内全体の空気を入れ替えることである。その観点から考えると、同じ換気量・換気回数であっても場所によっては空気が入れ替わっていない状況が想定される。例えば、室内に流入した新鮮な空気がそのまま排出されてしまう、一部で空気が滞留してしまうといった状況である。したがって、感染症対策の観点から換気を評価するには換気量・換気回数だけでは不十分であると考えられる。

2.1.2 空気齢・空気余命

空気齢・空気余命の概略を図1に示す。空気齢は給気口から室内各点に至るまでの時間を表し、空気がどの程度新鮮であるかを意味する。空気余命は室内各点から排気口に至るまでの時間を表し、汚染された空気がどの程度早く排出されるかを意味する。空気齢・空気余命を用いることにより、室内各所の換気の様子を可視化し、より詳細な換気評価を行うことが可能となる。

空気齢は、室内一様に汚染質が発生する際の各点の濃度を瞬時一様拡散濃度^{*2}で正規化することによって求められる [12]。空気余命についても、解析領域内での流れ場を時間逆転させることにより、空気齢と同様の手順で求められる [10]。値は、空気齢では給気口付近で0、排気口付近で1となり、空気余命では給気口付近で1、排気口付近で0となる。すなわち、空気齢・空気余命ともに、1を大幅に上回る領域では空気質が特に悪化していることを指し示しており、その領域において改善が必要であることが分かる。

なお、空気齢・空気余命については、換気評価に関する書籍 [5] に記述がある他、会議室内での感染者の呼気について、他の出席者への感染寄与度と換気効果との相関関係を示した研究 [1] においても評価指標として用いられている。

2.2 評価手法

避難所における換気評価手法として、実大実験が考えられる。しかし、実大実験を行うためには模擬避難者を多数集める必要があり、現在の状況も考慮すると実施は困難である。

また、空気齢・空気余命は一般的に給気口にトレーサー

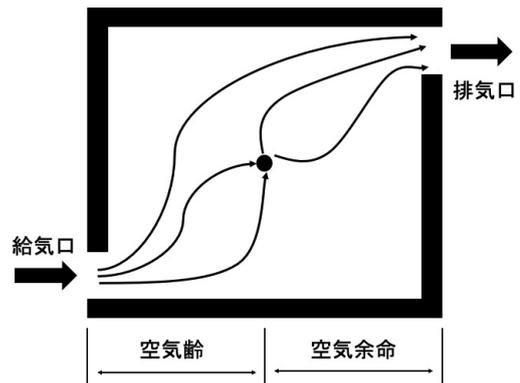


図1: 空気齢と空気余命

表1: CFD解析条件表

設定項目	設定条件
計算コード	FlowDesigner 2020
乱流モデル	標準 k - ε モデル
解析種類	定常解析
解析領域	X : 9.0 m, Y : 7.0 m, Z : 3.0 m
メッシュ分割	約 5.0 × 10 ⁵ メッシュ
給気口モデル	角型 (幅: 0.50 m, 高さ: 0.50 m) 流量: 40 m ³ /(min・台) 台数: 4台 吹出温度: 25 °C
排気口モデル	角型 (幅: 1.0 m, 高さ: 1.0 m) 流量: 160 m ³ /(min・台) 台数: 1台
人体発熱	一人当たりの発熱量: 100W 居住者人数: 4人

ガスを注入し、観測地点でのトレーサーガス濃度の時間変化を測定することで求められる [13]。しかし、室内全域での空間分布を調べるには上述の作業を室内各点で繰り返す必要がある。

本稿で使用した CFD 解析では、実測では測定が困難な空気齢・空気余命分布を容易に求めることができ、結果を可視化することで改善が必要な箇所を特定することができる。また、風量や温度、人体発熱など様々な条件を設定することができ、模擬避難者や発生装置等を用意することなく現実に近い解析を行うことができる。

2.3 解析条件

解析モデルを図2に、表1に CFD 解析において設定した条件を示す。なお、今回は周辺環境や気候条件に左右されにくく、計画的な換気を行いやすい機械換気を想定して解析を行った。

2.3.1 躯体仕様

今回の解析では、避難所として利用されることがある学校教室を模した空間を対象とした。なお、寸法は学校教室に関する規定 [7] [16] に従い、幅 9.0 m、奥行 7.0 m、高さ 3.0 m の直方体形状とした。

^{*2} 対象領域内で発生した物質が瞬時一様に拡散したと仮定した場合の平均濃度 [11].

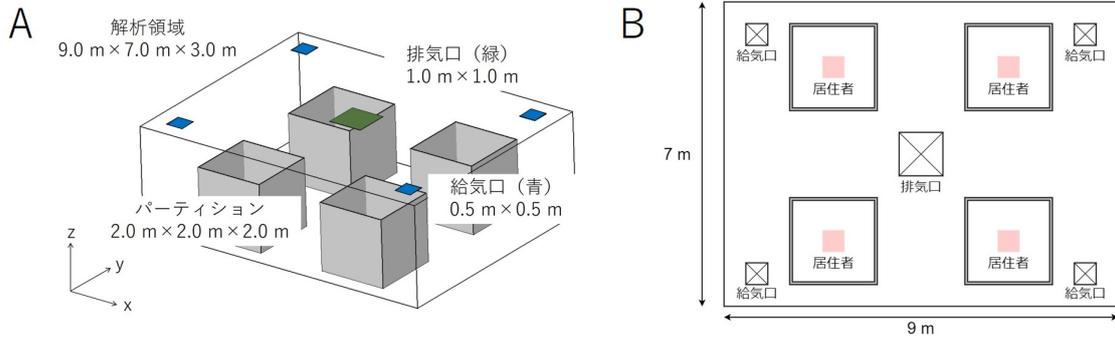


図 2: 解析モデル (A: 立体図 B: 平面図)



図 3: 避難所用間仕切りシステム [8]

シミュレーションモデルのメッシュ分割数は、X 軸方向に 125 分割、Y 軸方向に 97 分割、Z 軸方向に 41 分割である。上記の解析領域から、シミュレーション中における単位格子は約 7.2×10 mm の立方体である。

2.3.2 居住仕様

(1) パーティション仕様及び配置

パーティションは、図 3 に示す建築家の坂茂氏が考案し、避難所での設置が増加している避難所用間仕切りシステム (Paper Partition System 4: PPS4) [8] を設置することを想定した。PPS4 の寸法を参考に、幅 2.0m、奥行 2.0m、高さ 2.0m のパーティションを 4 個設置することを想定した。パーティションの配置は、2020 年 5 月に政府が発表した避難所運営に関する文書 [15] に基づき、2.0m ずつ離して配置した。

(2) 居住人数

避難所の居住スペースは、1 人あたり最低 3.5 m^2 必要であるとされている [2]。そのため、本稿では、1 個のパーティション (床面積 4.0 m^2) の中に避難者 1 人が居住する条件を想定し、居住者人数は 4 人とした。また、居住者 1 人あたりの人体発熱を 100 W とした。

(3) 換気口

角型の給気口 (幅 0.50m、高さ 0.50m)・排気口 (幅 1.0m、高さ 1.0m) をそれぞれ 4 台、1 台設置した。給気口の流量を $40 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{台})$ 、排気口の流量を $160 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{台})$ とした。このとき、一人当たりの

表 2: 空気齢・空気余命平均

設定条件	空気齢	空気余命
パーティション設置：なし	1.02	0.918
パーティション設置：あり	1.82	1.75

換気量は $2400 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ 、換気回数は 50.8 回/h となり、COVID-19 に関する文書内で規定された必要量が十分に確保される。

2.4 解析結果

パーティションを設置しない状態での空気齢・空気余命分布を図 4 に、パーティションを設置した状態での空気齢・空気余命分布を図 5 に示す。なお、いずれの結果も $Z=1.5 \text{ m}$ における断面を表している。また、パーティションを設置しない場合とパーティションを設置した場合における空気齢・空気余命の平均値を表 2 に示す。なお、前者では解析領域全体、後者ではパーティション内部 (幅 2.0m、奥行 2.0m、高さ 2.0m) における値を示す。

図 5 より、パーティションを配置した場合、図 4 では見られなかった赤色の領域がパーティション内部に表れていることが分かる。このことは、パーティション内部において空気齢・空気余命の値が高いことを意味する。実際、表 2 より、パーティション内部における空気齢・空気余命の平均値はともにパーティションを設置しない場合と比較して高い値となった。以上のことから、パーティション内部には給気口からの新鮮な空気が届きにくいこと、そして滞留により空気が排出されにくくなっていることが示唆され、パーティション内部の空気質は避難者が居住するのに適したものではないと推察される。

3. 空気清浄機・サーキュレータの導入効果検討

2.4 節において、パーティション内部では空気質が悪化しており、改善が必要であることが明らかとなった。シミュレーションを用いた検討手法の一つとして、空調設備の配置を変更することが考えられる。しかし、実際の空調設備は建設時に備え付けられるものがほとんどであり、それ

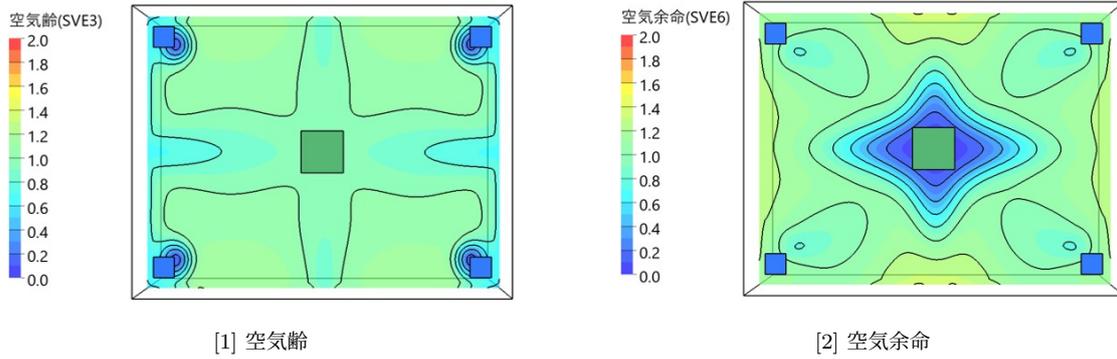


図 4: 空気齢・空気余命分布 (パーティション：なし)

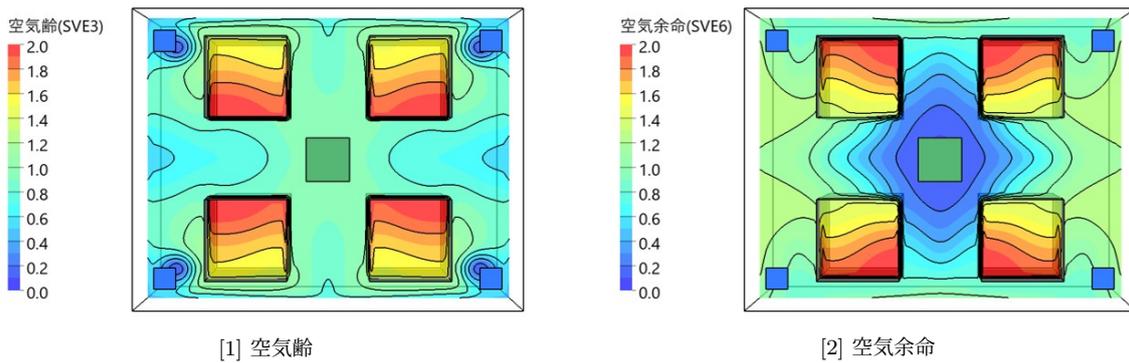


図 5: 空気齢・空気余命分布 (パーティション：あり)

らの配置を変更することは困難である。そこで本稿では、空調設備と比較して配置の変更が容易である空気清浄機・サーキュレータの導入を想定し、それらの導入効果を検討した。

3.1 空気清浄機の導入効果検討

まず、空気清浄機の導入がパーティション内の換気状況にもたらす効果を検討した。

3.1.1 空気清浄機仕様及び比較ケース

本稿で使用した空気清浄機の計算条件を表 3 に示す。空気清浄機の寸法は、幅 0.40 m、奥行 0.20 m、高さ 0.64 m であり、図 6 A に示すように前面吸気・上面排気型を想定した。また、空気清浄機の吸気面には、多くの空気清浄機において採用されている HEPA フィルタ^{*3}が搭載されているものとした。HEPA フィルタは、粒形 0.3 μ m の粒子に対して 99.97 % 以上の粒子捕集率を持つため [14]、解析上では空気清浄機の捕集効率を 99.97 % と設定した。

比較ケースは、図 6B に示す Case 1 - Case 4 の 4 ケースを設定した。本稿では、初期検討として各パーティション内の四方の壁に 1 台ずつ、計 4 台設置することを想定した。図 6B 左上のパーティションを基準として、居住者の上側に設置する場合を Case 1、下側に設置する場合を Case 2、左側に配置する場合を Case 3、右側に配置する

表 3: 空気清浄機仕様

設定項目	設定条件
寸法	幅 0.40 m, 奥行 0.20 m, 高さ 0.64 m
吸気	吸気形式：前面吸気 流量：4.0 m ³ /min 捕集効率：99.97%
排気	排気形式：上面排気 流量：4.0 m ³ /min

場合を Case 4 と呼称する。解析領域の床面は約 40 畳であり、その領域に対し 4 台空気清浄機を設置することから、流量は 10 畳程度用に対応する 4.0 m³/min とした。

3.1.2 解析結果

各ケースにおける空気齢・空気余命分布を図 7 - 図 10 に示す。また、パーティション内部の空気齢・空気余命の平均値及び改善率^{*4}を表 4 に示す。

空気齢について、各ケースとも空気清浄機を設置しない場合 (図 5 [1]) と比較して、値が高いことを示す赤色の領域が消え、改善が見られた。パーティション内の平均値も Case 1, Case 3, Case 4 において 1.23 となり、約 73.8 % 改善された。図 11 は Case 4 におけるパーティション中央付近 (図 2A : Y = 1.5 m) における気流分布を表している。空気齢分布が改善した要因は、空気清浄機から排気さ

^{*3} High Efficiency Particulate Air Filter.

^{*4} 表 2 に示したパーティションを設置しない場合での空気齢・空気余命値を改善率 100 % とした。

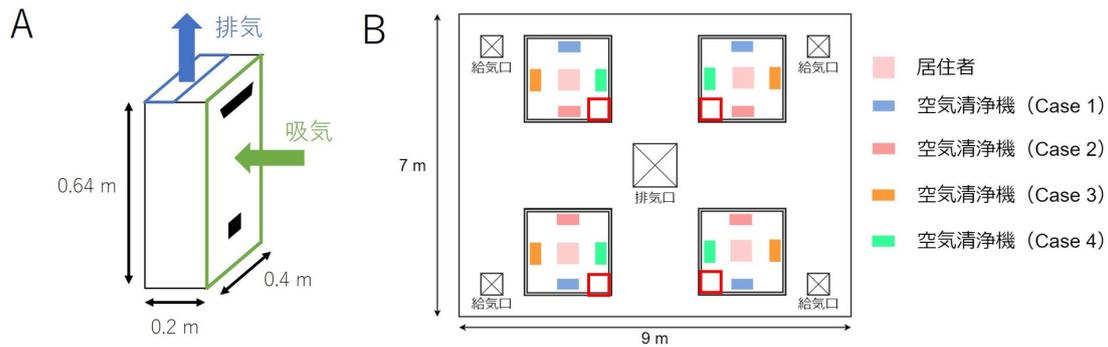


図 6: A: 空気清浄機モデル, B: 比較ケース

表 4: 空気齢・空気余命平均と改善率

	空気齢		空気余命	
	平均値	改善率 (%)	平均値	改善率 (%)
Case 1	1.23	73.8	1.05	84.1
Case 2	1.31	63.8	1.05	84.1
Case 3	1.23	73.8	1.07	81.7
Case 4	1.23	73.8	1.04	85.3

表 5: サーキュレータ仕様

設定項目	設定条件
寸法	幅 0.40 m, 奥行 0.10 m, 高さ 0.50 m
ファン領域	幅 0.40 m, 高さ 0.40 m
流量	23 m ³ /min

れて天井に達した気流が給気口側 (図 11 左側) へと近づくにつれ、給気口から吹き出された下向きの気流によって、徐々に下向きへと変化したことであると考察される。一方で、Case 2 では排気口側の領域において値が高い分布が残存しており、パーティション内部の平均値も 1.31 と他ケースに比べ高い値となった。図 12 は Case 2 における天井付近 (図 2A: Z = 2.95 m) での気流分布を表している。空気清浄機上面から排気された空気が天井付近に達した後、一部が排気口へと向かっていることが分かる。このように、Case 2 では狭い範囲で空気が循環してしまうショートサーキットが発生しており、このことが空気齢値の改善率が低かった要因であると考えられる。

空気余命についても、各ケースとも図 5 [2] と比較して赤色の領域が消え、改善が見られた。また、表 4 より、全てのケースにおいて改善率は 85 % 程度であった。図 13 は、Case 4 における床面付近 (図 2A: Z = 0.5 m) でのパーティション内での気流分布を表しているが、空気清浄機がパーティション内に設置されたことで、空気清浄機の吸気口へと向かう気流が発生し、汚染された空気が排出されやすくなったと示唆される。

3.2 サーキュレータの導入効果検討

3.1.2 節から、空気清浄機を導入することでパーティション内の空気質が改善されることが示唆された。しかしながら、空気清浄機の横側では値の高い領域が残存する傾向が見られた。これは空気清浄機の排気が上向きであることに起因すると考えられる。実際、Case 4 において、図 6B の赤枠 (幅 0.50 m, 奥行 0.50 m, 高さ 2.0 m) で囲われた領域 (area 1 とする) では空気齢の平均値が 1.43 となり、さ

らなる改善が必要であると考えられる。そこで本稿では、空気清浄機に加えてサーキュレータを配置することを想定し、その導入効果を検討した。

3.2.1 サーキュレータ仕様

使用したサーキュレータの計算条件を表 5 に示す。本稿では計算コストを削減するため、サーキュレータのファン領域を正方形パネルに近似して計算を行った。

また、サーキュレータの配置を図 14 に示す。サーキュレータについても、空気清浄機と同様に初期検討としてパーティション内に 1 台ずつ、計 4 台設置した。また、空気清浄機対面の隅に配置し、風向は area 1 に向けて設定した。空気齢の値が高いということは、その領域で気流が発生していない、あるいは微弱であることを意味する。そのような領域に向けてサーキュレータを配置することで、空気を届けやすくする、もしくは空気を排出させやすくする (空気が届く時間が長くなるほどその空気の汚染度が高まると考えられるため) ことを想定した。

3.2.2 解析結果

空気齢・空気余命分布を図 15 に示す。また、パーティション内部の空気齢・空気余命の平均値及び改善率を表 6 に示す。図 15 [1] より、図 10 [1] の area 1 に対応する領域で見られた値の高い分布が改善されていることが分かる。area 1 における平均値は 0.963 となり、空気清浄機の場合と比較すると、約 113.9 % 改善した。また、パーティション内部全体についても、表 6 より、空気齢が 103.3 %、空気余命が 92.9 % と大幅な改善が見られた。パーティション中央付近 (図 2A: Y = 1.5 m) の気流分布を図 16 に示す。図 11 と比較すると、サーキュレータを設置することで床面に向かう下向きの気流が増していることが分かる。空気齢・空気余命両者における改善は、このことが主要な要因で

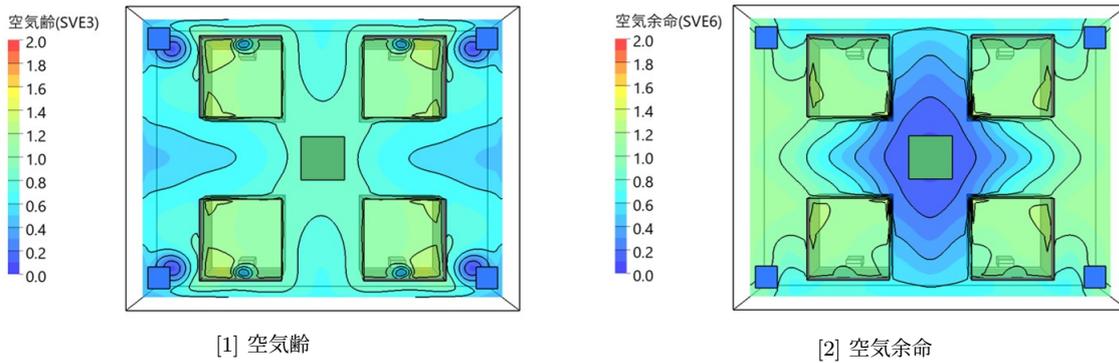


図 7: Case 1 (図 6B 左上のパーティションにおいて空気清浄機を居住者上側に配置)

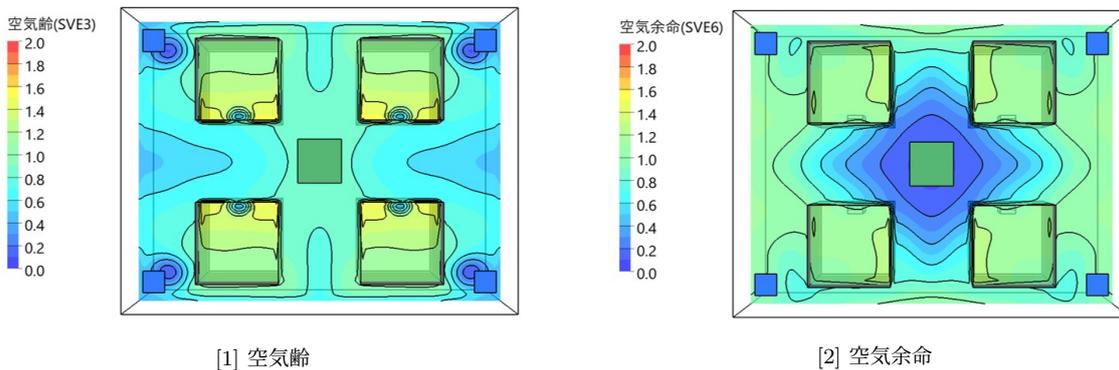


図 8: Case 2 (図 6B 左上のパーティションにおいて空気清浄機を居住者下側に配置)

表 6: 空気齢・空気余命平均と改善率

空気齢		空気余命	
平均値	改善率 (%)	平均値	改善率 (%)
0.994	103.3	0.977	92.9

あると考えられる。COVID-19 への対策として、くしゃみや咳により飛散する飛沫・飛沫核のパーティション外部への拡散を防ぐことも重要である。内部に居住する避難者が飛沫を発生させたとしても、サーキュレータによって強められた下向きの気流が飛沫を床面へと落下させやすくし、パーティション外部への拡散を抑えることができる。また、図 13 より床面に近い領域では、空気清浄機の吸入口へと向かう気流が発生しており、サーキュレータによってその気流の強さが増すと考えられる。これにより、落下した飛沫の再浮遊をより効果的に防ぐことができ、パーティション内の空気質がさらに改善されると推察される。

4. おわりに

本稿では、COVID-19 を始めとした感染症への対策として避難所での使用が増加しているパーティションに着目し、換気設備を有する学校教室を模した空間にパーティションを配置して CFD 解析による換気評価を行った。解析では COVID-19 に関する文書に記載のある換気量・換気回数 of 必要量を満たすように予め風量を設定したが、評価指標と

して用いた空気齢・空気余命はともにパーティション内部において高い値となった。このことから、パーティション内部では空気の滞留が発生しており、避難者が居住するのに適した空気質となっていないことが示唆された。

また、配置の変更が容易な空気清浄機・サーキュレータを用いてパーティション内部の換気状況の改善に向けた検討を行った。空気清浄機については、本稿では配置を 4 ケース設定して比較を行った。空気余命については 4 ケースとも同程度の改善が見られ、床面付近の気流分布から、空気清浄機の吸気口へと向かう気流が形成されたことが改善の要因であると示唆された。一方で空気齢については、空気清浄機の横側において空気齢の高い分布が残存しており、新鮮な空気が届きにくいことが分かった。その改善策として、本稿ではサーキュレータの設置を試みた。空気清浄機の対面から、空気齢の値が高かった空気清浄機横側に向けてサーキュレータを配置することで、空気齢・空気余命の値が大きく改善されることが分かった。また、サーキュレータによる吸い込みにより、空気清浄機上面から天井に達した空気をパーティション内部へと引き込む気流が増すことも明らかとなった。

さらなる改善に向けては、パーティションデザインの改良が考えられる。空気清浄機の多くは上面から排気を行っている。パーティション内部に空気清浄機を設置する場合、現状のパーティション形状では上面全体が開口部となって

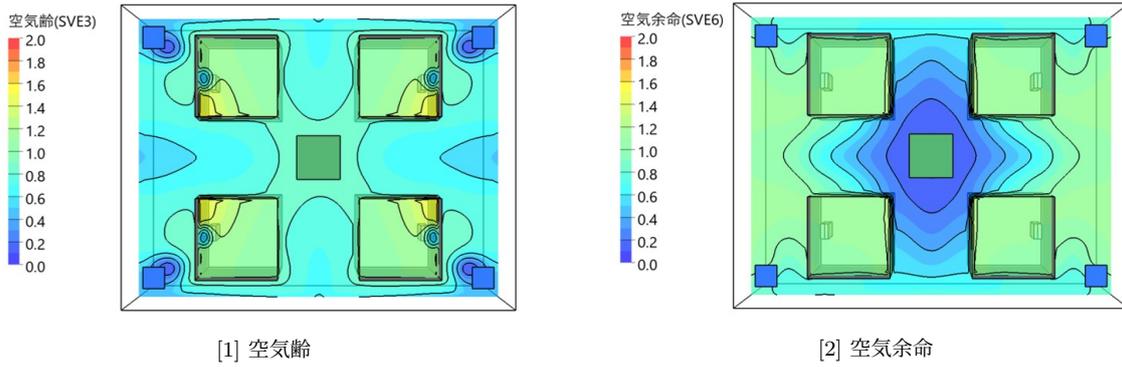


図 9: Case 3 (図 6B 左上のパーティションにおいて空気清浄機を居住者左側に配置)

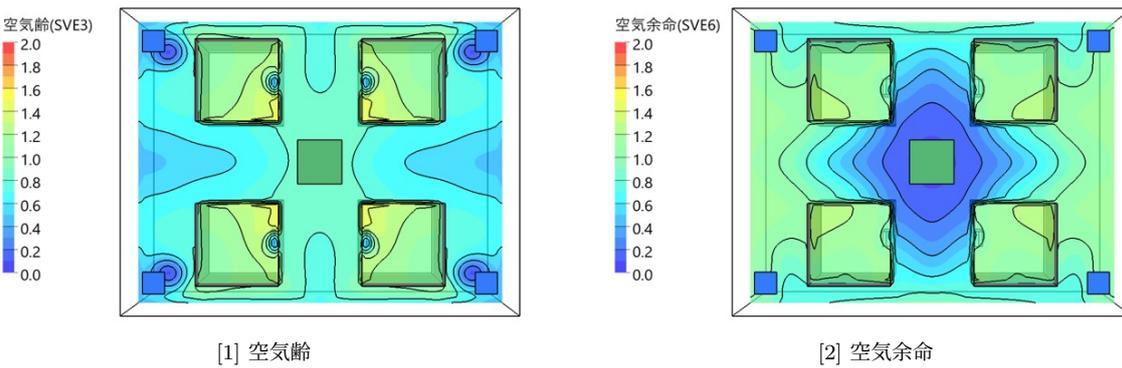


図 10: Case 4 (図 6B 左上のパーティションにおいて空気清浄機を居住者右側に配置)

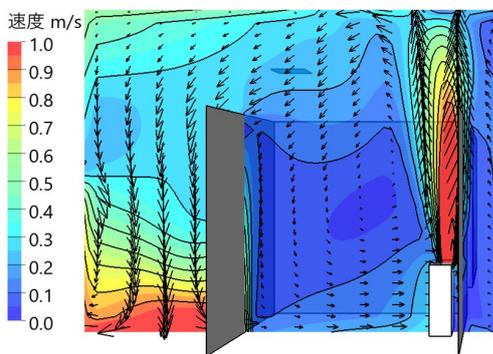


図 11: パーティション中央付近の気流分布 (Case 4, 図 2A : Y = 1.5 m における断面)

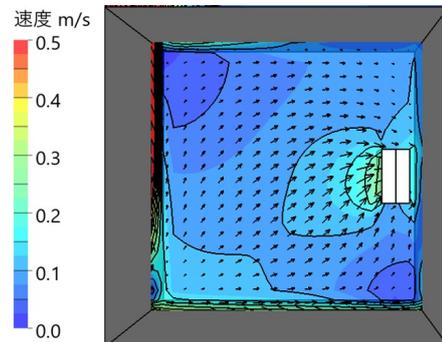


図 13: 床面付近における気流分布 (Case 4, 図 2A : Z = 0.5 m における断面)

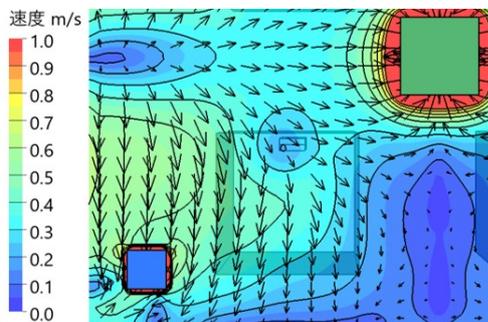
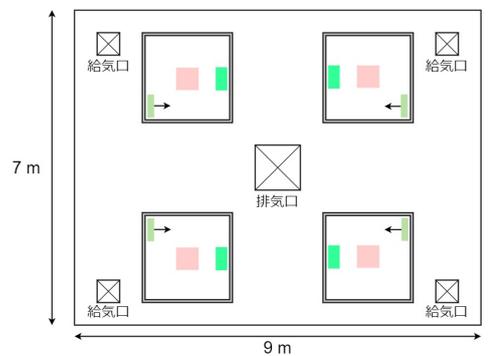
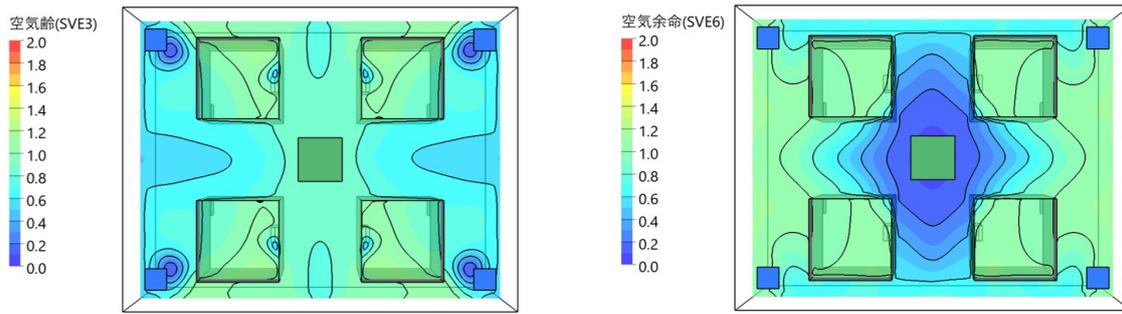


図 12: 天井から見た気流分布 (Case 2, 図 2A : Z = 2.95 m における断面)



居住者 空気清浄機 サークキュレータ

図 14: サークキュレータの配置



[1] 空気齢 [2] 空気余命
図 15: 空気齢・空気余命分布 (空気清浄機 + サークキュレータ)

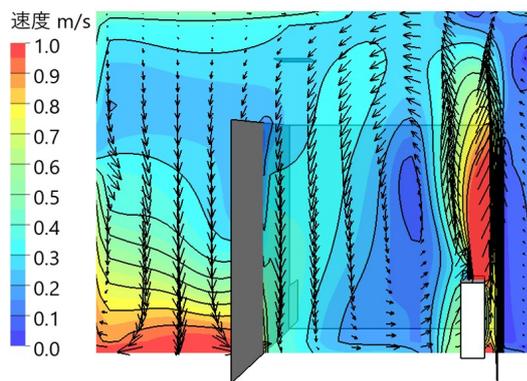


図 16: パーティション中央付近の気流分布 (空気清浄機 + サークキュレータ, 図 2A : Y = 1.5 m における断面)

いるため、空気清浄機の上面から吹き出された空気はパーティション外部へと拡散しやすく、内部には行き届きにくい。これに対し、パーティション上面の開口領域を狭める、空気が循環しやすいように半球の形とする、などの対策を行うことにより、パーティション内部の空気質がさらに改善されると推察される。

参考文献

[1] Brockmann, G. and Kriegel, M.: Airborne infection prevention: a comparison of mixing ventilation and displacement ventilation in a meeting room (2020). Preprint Technische Universität Berlin.

[2] The Sphere Project: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response, <https://www.ifrc.org/PageFiles/95530/The-Sphere-Project-Handbook-20111.pdf> (2011), Accessed: September 25, 2020.

[3] WHO: How COVID-19 Spreads, <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html> (2020), Accessed: October 22, 2020.

[4] WHO: Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions, <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> (2020), Accessed: September 24, 2020.

[5] 宇田川光弘, 近藤靖史, 秋元孝之, 長井達夫, 横山計三:

建築環境工学 (改訂版) -熱環境と空気環境-, 朝倉書店 (2009).

[6] 厚生労働省: 商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について, <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf> (2020), Accessed: September 9, 2020.

[7] 国立国会図書館: 学校の教室の面積について定めている基準はあるのか, https://crd.ndl.go.jp/reference/detail?page=ref_view&id=1000207423 (2016), Accessed: September 25, 2020.

[8] 坂茂建築設計: 2020 新型コロナウイルス / 飛沫感染予防用・紙の間仕切りシステム, http://www.shigerubanarchitects.com/SBA_NEWS/2020_corona/index.html (2020), Accessed: October 22, 2020.

[9] 首相官邸: 新型コロナウイルス感染症に備えて一人ひとりができる対策を知っておこう-, <https://www.kantei.go.jp/jp/headline/kansensho/coronavirus.html> (2020), Accessed: September 24, 2020.

[10] 小林光, 加藤信介, 村上周三: 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究: 第1報-CFDに基づく局所領域の換気効率評価指標の開発, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 23, No. 68, pp. 29-36 (1998).

[11] 諏訪好秀, 土井暁, 坂本滋: 換気性能評価方法及びシステム, <https://astamuse.com/ja/published/JP/No/2003043058> (2003), Accessed: November 6, 2020.

[12] 村上周三, 加藤信介: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法: 換気効率の評価モデルに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 11, No. 32, pp. 91-102 (1986).

[13] 池村尚也, 倉淵隆, 鳥海吉弘, 吉野一, 竹内仁哉, 佐藤要: 応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 Part 2. 空気齢分布測定, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, Vol. 2019.4, pp. 149-152 (2019).

[14] 中川翔太郎, 橋本明憲, 高橋俊樹: 窓と換気扇を有する室内の空気清浄機花粉捕集に関するシミュレーション研究, 室内環境, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10 (2016).

[15] 内閣府, 消防庁, 厚生労働省: 避難所における新型コロナウイルス感染症への対応の参考資料について, <http://www.bousai.go.jp/pdf/colonasanko.pdf> (2020), Accessed: September 22, 2020.

[16] 文部科学省: 教室の天井高さの在り方について, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shisetu/001/toushin/05092001/003.htm Accessed: October 22, 2020.