

新型コロナウイルス感染症流行下の寒冷地の学校教室における 室内環境と換気代替手法の評価

EVALUATION ON INDOOR ENVIRONMENT AND ALTERNATIVE VENTILATION METHODS IN A SCHOOL CLASSROOM IN A COLD REGION UNDER COVID-19 PANDEMIC

赤松大成^{*1}, 森 太郎^{*2}, 林 基哉^{*3}, 羽山広文^{*4}

*Taisei AKAMATSU, Taro MORI, Motoya HAYASHI
and Hirofumi HAYAMA*

COVID-19 caused a global pandemic. The possibility of aerosol transmission has been pointed out as a possible route of infection, and there are reports that conventional infection control measures are insufficient to counteract aerosol transmission. Therefore, this report presents the results of an actual survey at a high school, including measurement of CO₂ concentration and a questionnaire survey, and the results of an experiment to evaluate the attenuation of particle concentration by an air cleaner based on this survey.

Keywords: *Winter, COVID-19, Aerosol transmission, Air cleaner, Alternative ventilation methods*

冬季, 新型コロナウイルス感染症, エアロゾル感染, 空気清浄機, 換気代替手法

1. はじめに

2019年に発生した新型コロナウイルス感染症(以下、COVID-19とする)は世界中で歴史的な大流行となり、日本国内における累計陽性者数は2021年12月21日現在で173万人以上にのぼる¹⁾。COVID-19の感染対策として、厚生労働省は咳エチケットや手洗い、マスク着用などの実施の呼びかけを行った²⁾。一方、エアロゾル感染対策を想定した場合それらは不十分であるという指摘もある。世界保健機関は感染経路として空気感染の可能性は否定できないとし、屋内空間で感染力のあるエアロゾルが長時間空气中を浮遊することで感染を引き起こされると報告している³⁾。屋内環境における集団感染に関する研究は発生直後から行われており、Qianら⁴⁾は中国国内で2020年1月4日~2月11日に発生した集団感染の発生場所を抽出したところ、全て屋内であったことを報告した。また、Lipinskiら⁵⁾は10 μ m以下の飛沫核が何時間も空气中に滞留して密閉空間の空気感染を引き起こす可能性を指摘し、現在の換気手法は適切でないと指摘した。北海道内の問題に焦点を当てると、冬季の学校教室においてCOVID-19の集団感染の発生リスクが高くなることが挙げられる。吉野ら⁶⁾によると、北海道内の公立小学校の換気設備の設置率は33%であり、そのうち全熱交換型の割合は1割程度である。このことから、北海道の学校教室の換気は自然換気に頼らざるを得ないため、厳寒の冬季には室内温度維持を優先して換気量が減少す

る状況が生じやすい。一方、換気量の減少によって厚生労働省の定める「換気の悪い密閉空間」⁷⁾が発生しやすくなるため、エアロゾル感染のリスクも上昇すると考えられる。換気の補助的手法として、既往の研究では空気清浄機の使用が提案されているが^{8,9)}、性能や限界を把握した上で使用することが望ましい¹⁰⁾。そこで、本研究では北海道の学校教室において換気代替手法として空気清浄機を用いる場合の性能の評価を目的として以下の調査と実験を行った。

- 1) 学校教室における運用時の実態調査
- 2) 空気清浄機のパーティクル除去性能を評価する実験

なお、本研究では直径5 μ m以下の飛沫核を介した感染をエアロゾル感染と表現した³⁾。一方、実験で用いた粒子状物質は直径5 μ m以下とは限らないため、パーティクルと表現した。

2. 学校教室における運用時の実態調査

2.1 調査概要

北海道内の高等学校の教室において、実運用時の二酸化炭素濃度の計測、アンケート調査、電力消費量の調査を行った。エアロゾル感染のリスクが上昇しやすい学校教室の実態を把握し、室内温度や電力消費量への影響の小さい換気代替手法の必要性を検討することが目的である。Table. 1に教室の概要を示す。二酸化炭素濃度の計測とアンケート調査の対象は、高等学校Aの普通教室と特別教室の

^{*1} 北海道大学大学院工学院修士課程

^{*2} 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)

^{*3} 北海道大学大学院工学研究院 教授・工博

^{*4} 北海道大学大学院工学研究院 名誉教授・博士(工学)

Grad. Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

Emer. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

2 教室である。二酸化炭素濃度の計測は普通教室(4F)と特別教室において 2020 年 6 月~12 月に行った。Fig. 1 に計測機器を示す。計測機器はマイクロコンピュータ M5 Stack と濃度センサ Sensirion 社製 SCD30 を組み合わせて作成しており、各教室の前方に設置した。アンケート調査は生徒 78 名(1 年生 40 名、2 年生 38 名)を対象に 2020 年 9 月と 2021 年 2 月の 2 回実施した。設問は普通教室の換気状況や温冷感に関するものであり、回答形式は選択式とした。電力消費量の調査は、札幌市より入手した市有施設のエネルギー消費量データ¹¹⁾のうち、高等学校 A の電力消費量と外気温との比較を行い、COVID-19 流行拡大前後の変化を分析した。

Table. 1 Outline of the classroom

	General classroom	Special classroom
Room volume		195m ³
Level of floors	3F / 4F	3F
Location on plane		Central
Window-side	South	North



Fig. 1 M5 Stack and Sensirion SCD30

2.2 調査結果

Fig. 2 に各教室の二酸化炭素濃度の累積度数分布を示す。生徒の登校日の始業から終業まで(8 時~15 時)のデータを抽出し、凡例に示す日付を含む以降 2 週間の期間内の累積度数分布図を作成した。また、Table. 2 に測定期間内の平均外気温を示す¹²⁾。6-25 と比較して 9-1 は両空間とも低濃度の時間が増加し、換気状況が改善したと考えられる一方で、9-1 以降は 11-1 まで高濃度の時間が増加する傾向がみられ、11-1 には普通教室で 80%以上、特別教室で 50%以上が黒線で図中に示す設計基準濃度の 1,000 ppm を超えた。Fig. 3 に窓の開放状況および温冷感に関するアンケート調査の結果を示す。6 月から 8 月にかけては窓は常時全開放(Always half open)の割合が増加し、温冷感は昨年と比較して、暑かった(Hotter than LY)と少し暑かった(Slightly Hotter than LY)の割合が増加した。また、9 月以降は外気温の低下に伴い、窓は常時全開放(Always half open)の割合が著しく減少し、休み時間等に開放(Open only during break time)の割合が増加した。温冷感は昨年と比較して、少し寒かった(Slightly Colder than LY)と寒かった(Colder than LY)の割合が増加した。これらを踏まえて、外気温の低下によって窓を開放する頻度が減少し、高濃度の時間が増加した可能性が考えられる。

そこで、11 月 15 日に高等学校 A を訪問した際に北海道立総合研究機構のパンフレット^{13, 注 1)}に基づいて換気的重要性を説明し、授業時間の途中に 1 回、休み時間に 1 回窓を開放し、換気の頻度を増加させるよう要請した。結果、11-15 の換気状況は改善傾向となった。その後は外気温の低下に伴って高濃度の時間が増加したが、要請前よりは改善していた。また、度数分布は複数の教員が使用する

普通教室よりも教員 1 名が使用する特別教室のほうが均一に近く、教員によって換気の頻度が異なっていた可能性が考えられる。

Fig. 4 に電力消費量と外気温の関係を示す。流行拡大前を BC(2015 年 4 月~2020 年 3 月)、流行拡大後を AC(2020 年 4 月~2021 年 2 月)とすると、外気温が 15 °C を下回る場合、同じ外気温における消費電力は BC よりも AC のほうが高い傾向があった。高等学校 A の暖房器具は全て電力が動力源であることを考慮すると、換気の頻度の増加によって室温が低下し、暖房器具の使用量が増大した可能性が考えられる。

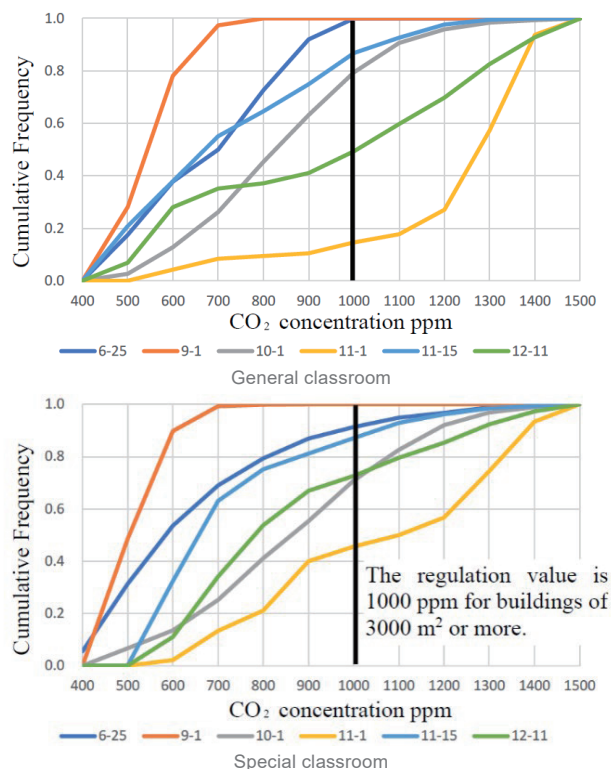


Fig. 2 Cumulative Frequency Distribution of CO₂ Concentration

Table. 2 Outdoor temperatures during the measurement period

	6-25	9-1	10-1	11-1	11-15	12-11
Temp. (°C)	19.4	22.3	15.1	7.7	5.6	-2.1

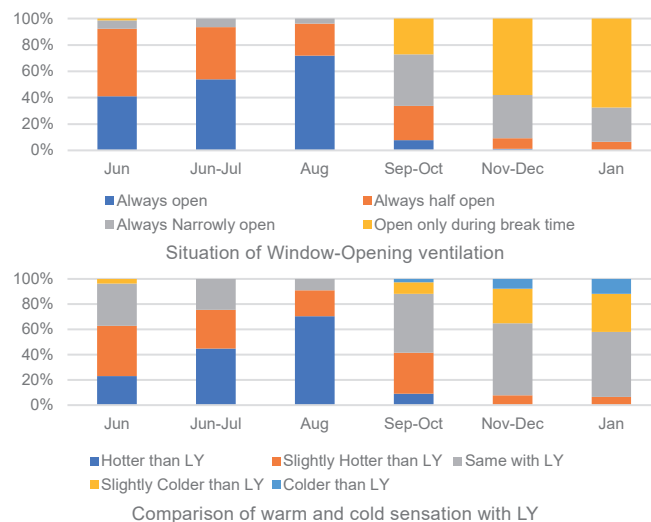


Fig. 3 Survey Results

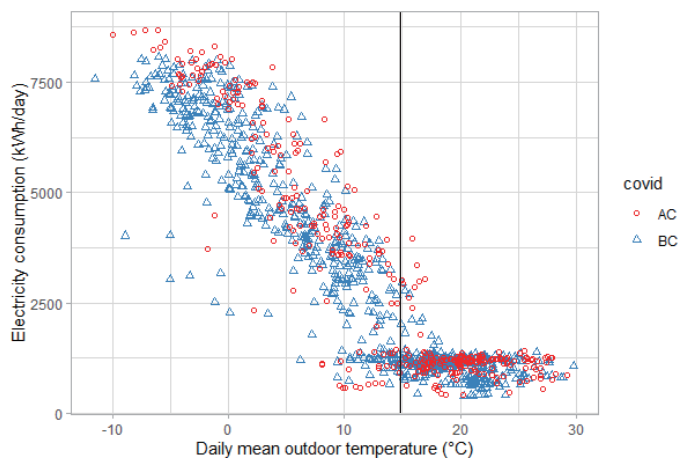


Fig. 4 Comparison of Electricity Consumption between BC and AC in High School A

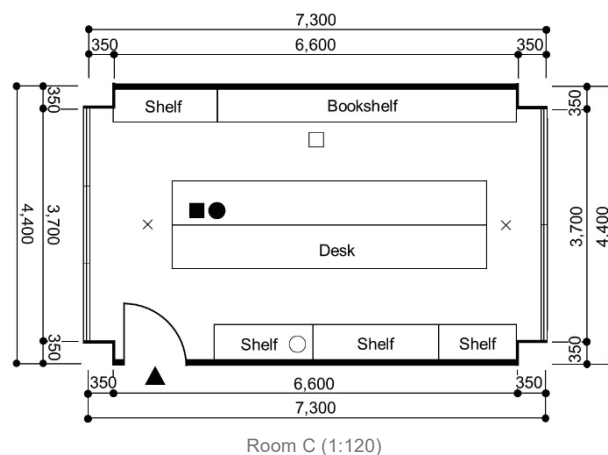
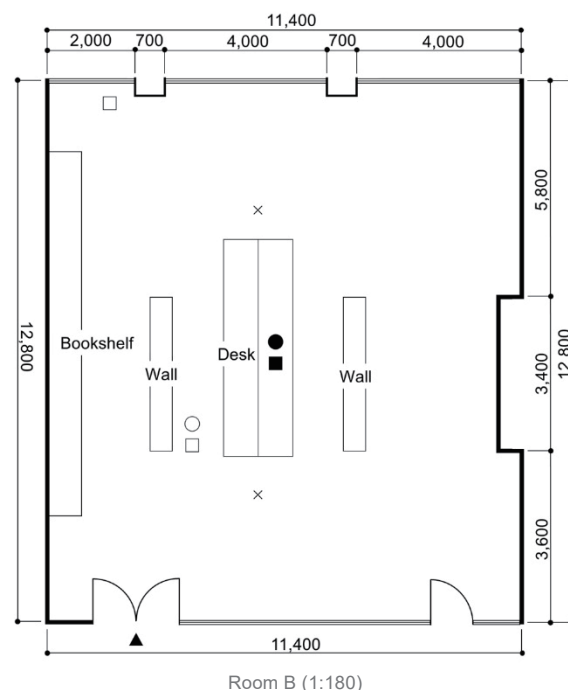
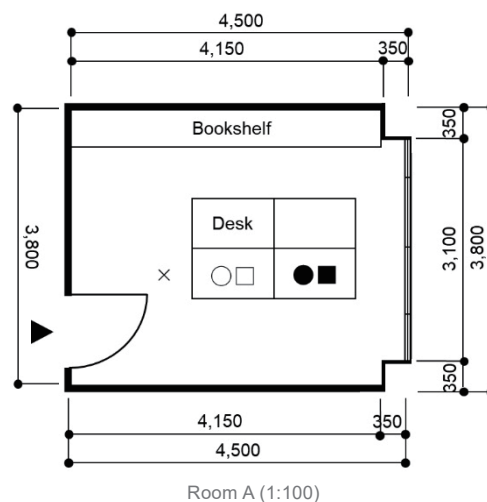
3. 空気清浄機のパーティクル除去性能を評価する実験

3.1 実験概要

実態調査の結果を踏まえると、換気代替手法としての空気清浄機の性能を評価する必要があると考えられる。既往の研究としては林ら⁸⁾、倉渕ら⁹⁾、Blockenら¹⁴⁾の研究が挙げられる。林らは、日本の夏季のCOVID-19の感染症対策を検討している。集団感染が発生した事例の調査から、空調などの環境要因が感染を拡大した可能性を指摘し、冷房設備を使用中の空間における換気手法を提案した。換気装置を備えた空間における補助的な手法として空気清浄機の使用が提案されており、フィルターの回収率、風量、室容積によって求められる等価換気量を確保できた場合はウイルス濃度の低下が期待できると述べた。倉渕らは、空気清浄機について日本製の空気清浄機にはHEPAフィルターが採用されていることが多く、必要な等価換気量が確保できればウイルス濃度の減衰効果が大きくなると述べている。また、HEPAフィルターを搭載した空気清浄機に関しては、フィルターの性能と限界に関する知識を念頭に置いて使用するべきとの見解もある¹⁰⁾。Blockenらは、ジムにおける空気清浄機の等価換気回数を数理モデルの作成によって評価している。機械換気設備と空気清浄機によるパーティクル濃度の減衰を測定したところ、2.2 ac/hの機械換気のみの場合と1.39 ac/hの空気清浄機のみの場合で同様の効果が得られ、機械換気設備の効果が低かったことを明らかにした。本研究では、寒冷地の学校教室を想定した空間において二酸化炭素とパーティクルを発生させ、換気および空気清浄機の使用を行った際の濃度減衰から換気回数と等価換気回数を計測する実験を行った。空気清浄機の性能を評価し、換気代替手法として使用する際の必要風量や必要台数を定量的に把握できるようにすることが目的である。なお、本研究ではパーティクル濃度の減衰から計算した、換気回数と等価な値を等価換気回数と表現した。

3.2 実験手法

換気設備を停止し、開口部を閉じた密閉状態の実験空間において、二酸化炭素濃度は2,000 ppm、パーティクル濃度は100 μg/m³を目安に上昇させ、換気および空気清浄機の使用を行って一定の値となるまで濃度を減衰させた。濃度減衰から換気回数および等価換気回数を導出し、その結果から感染確率の計算、数理モデルによる評価を行った。



Legend	
○	Nebulizer
□	Gas cylinders
●	Particle counter
■	CO ₂ concentration measuring instrument
X	Air cleaner

Fig. 5 Floor plan of each room

Fig. 5 に実験対象とした空間 A~C (Room A~C) の平面図を、Table. 3 に寸法および室容積を示す。実験機器の配置は Fig. 5 の凡例を用いて図中に示した。ネブライザーとは、Fig. 6 に示す機器であり、これを用いてパーティクル(0.9 %塩化ナトリウム水溶液)を放出した。二酸化炭素はガスシリンダーを用いて放出した。二酸化炭素濃度およびパーティクル濃度の測定は、それぞれティアンドデイ社製 TR-76Ui、アイデック社製 P-sensor を用いた。Table. 4 に実験ケースを示す。各対象空間において換気および換気代替手法である、窓開放による自然換気(Window)、換気設備による機械換気(Ventilation)、空気清浄機の設置(Air cleaner)の条件を変更した。自然換気は空間 A においては 150 mm、空間 B, C においては 100 mm ずつ窓を開放した。全空間とも換気設備は第 1 種換気方式であり、空気の再循環は行われない。空気清浄機はアイリスオーヤマ社製 PMAC-100-S(風量 2.5m³/min) と PMAC-100(風量 2.4m³/min) を使用した。空気清浄機の風量は風速計を用いた実測値であり、設定は「標準」であった。また、両者とも HEPA フィルターを用いるろ過式である。1 台のケースは PMAC-100-S、2 台のケースは PMAC-100 を使用した。

換気回数および等価換気回数の換算は、濃度減衰法を用いて行った¹⁵⁾。また、感染確率の計算には式(1)に示す修正 Wells-Riley 式¹⁶⁾を用いた。この式は、求められたデータが麻疹や結核の空気感染の観測データとよく一致するため、感染確率の推定に用いられている Wells-Riley 式¹⁷⁾を、非定常状態において用いられるように修正した式である。

$$Nc = 1 - \exp\left\{-\frac{iqpt}{q} \times \left[1 - \frac{v}{qt} \left(1 - \exp\left(-\frac{qt}{v}\right)\right)\right]\right\} \quad (1)$$

Nc は感染確率、 i は感染者数、 q は感染粒子発生量(h^{-1})、 p は呼吸量(m^3/h)、 t は総曝露時間(h)、 Q は換気量もしくは等価換気量(m^3/h)、 V は室容積(m^3)である。本実験では、 $i = 1$ 、 $q = 5$ (Classroom)、 $p = 0.54$ 、とし¹⁸⁾、授業時間を考慮して $t = 6$ とした。数理モデルは、換気回数と等価換気回数の関係式であり、空気清浄機のパーティクル除去性能に相当する換気回数の評価を行うために作成した。

Table. 3 Dimensions and volumes of the experimental room

	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Volume (m ³)
A	4,500	3,800	2,700	46
B	11,400	12,800	2,800	409
C	7,300	4,400	2,700	87



Fig. 6 Nebulizer

Table. 4 Experimental cases

Room A	Room B	Room C	Ventilation	Air cleaner	Window
1, 13	1	1	Off	0	Closed
2, 14	2	2	On	0	Closed
3, 15	3	3	Off	0	Open
4, 16	4	4	On	0	Open
5, 17	5	5	Off	1	Closed
6, 18	6	6	On	1	Closed
7, 19	7	7	Off	1	Open
8, 20	8	8	On	1	Open
9	9	9	Off	2	Closed
10	10	10	On	2	Closed
11	11	11	Off	2	Open
12	12	12	On	2	Open

3.3 実験結果

Table. 5~7 に、換気回数(ACR)・等価換気回数(Equivalent ACR)と感染確率の計算結果を示す。Fig. 7 に換気回数と等価換気回数の関係を示す。等価換気回数のほうが高い値を示す傾向があった。Fig. 8 に感染確率の関係を示す。感染確率は空間の空気交換量が増大するほど減少する指標であるため、換気回数から計算した値のほうが大きくなった。これらの結果を踏まえて、同じケースにおいて等価換気回数のほうが高い要因の分析と、数理モデルによる空気清浄機の等価換気回数の評価を行った。

Table. 5 Results in room A

Case	ACR (h ⁻¹)	Equivalent ACR (h ⁻¹)	ACR Probability of infection	Equivalent ACR Probability of infection
1	2.0 × 10 ⁻¹	2.6 × 10 ⁻¹	5.2 × 10 ⁻¹	4.9 × 10 ⁻¹
2	1.2	1.5	2.2 × 10 ⁻¹	1.9 × 10 ⁻¹
3	4.1	3.6	8.0 × 10 ⁻²	9.0 × 10 ⁻²
4	3.3	2.8	1.0 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ⁻¹
5	2.5 × 10 ⁻¹	2.9	4.9 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ⁻¹
6	1.6	3.2	1.8 × 10 ⁻¹	1.0 × 10 ⁻¹
7	3.0	4.3	1.0 × 10 ⁻¹	7.5 × 10 ⁻²
8	4.9	6.0	6.7 × 10 ⁻¹	5.5 × 10 ⁻²
9	2.1 × 10 ⁻¹	5.3	5.2 × 10 ⁻¹	6.3 × 10 ⁻²
10	7.7 × 10 ⁻¹	6.0	3.0 × 10 ⁻¹	5.6 × 10 ⁻²
11	4.6	1.0 × 10	7.1 × 10 ⁻¹	3.3 × 10 ⁻²
12	3.9	7.3	8.2 × 10 ⁻¹	4.6 × 10 ⁻²
13	2.0 × 10 ⁻¹	2.9 × 10 ⁻¹	5.2 × 10 ⁻¹	4.7 × 10 ⁻¹
14	1.3	1.3	2.1 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
15	2.0	1.6	1.5 × 10 ⁻¹	1.8 × 10 ⁻¹
16	3.0	2.8	1.1 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ⁻¹
17	3.3 × 10 ⁻¹	2.6	4.6 × 10 ⁻¹	1.2 × 10 ⁻¹
18	1.5	4.0	1.9 × 10 ⁻¹	8.1 × 10 ⁻²
19	2.1	3.9	1.4 × 10 ⁻¹	8.3 × 10 ⁻²
20	2.5	4.5	1.2 × 10 ⁻¹	7.3 × 10 ⁻²

Table. 6 Results in room B

Case	ACR (h ⁻¹)	Equivalent ACR (h ⁻¹)	ACR Probability of infection	Equivalent ACR Probability of infection
1	1.1×10 ⁻¹	1.8×10 ⁻¹	9.3×10 ⁻²	8.1×10 ⁻²
2	1.2	2.3	2.8×10 ⁻²	1.6×10 ⁻²
3	1.0	1.5	3.4×10 ⁻²	2.4×10 ⁻²
4	2.1	3.6	1.7×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²
5	1.0×10 ⁻¹	5.7×10 ⁻¹	9.4×10 ⁻²	4.9×10 ⁻²
6	1.2	2.2	2.9×10 ⁻²	1.7×10 ⁻²
7	6.4×10 ⁻¹	1.2	4.5×10 ⁻²	2.8×10 ⁻²
8	2.0	4.1	1.8×10 ⁻²	9.2×10 ⁻³
9	1.0×10 ⁻¹	9.2×10 ⁻¹	9.4×10 ⁻²	3.5×10 ⁻²
10	1.0	3.1	3.3×10 ⁻²	1.2×10 ⁻²
11	9.1×10 ⁻¹	1.6	3.5×10 ⁻²	2.2×10 ⁻²
12	1.7	3.3	2.0×10 ⁻²	1.1×10 ⁻²

Table. 7 Results in room C

Case	ACR (h ⁻¹)	Equivalent ACR (h ⁻¹)	ACR Probability of infection	Equivalent ACR Probability of infection
1	1.8×10 ⁻¹	3.5×10 ⁻¹	3.3×10 ⁻¹	2.7×10 ⁻¹
2	4.0×10 ⁻¹	6.2×10 ⁻¹	2.5×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻¹
3	2.9	6.2×10 ⁻¹	5.9×10 ⁻²	2.0×10 ⁻¹
4	2.4	2.4	6.9×10 ⁻²	7.0×10 ⁻²
5	1.7×10 ⁻¹	1.9	3.3×10 ⁻¹	8.5×10 ⁻²
6	1.1	3.1	1.3×10 ⁻¹	5.5×10 ⁻²
7	3.2	4.5	5.3×10 ⁻²	3.9×10 ⁻²
8	2.8	4.9	6.1×10 ⁻²	3.6×10 ⁻²
9	1.7×10 ⁻¹	3.7	3.4×10 ⁻¹	4.7×10 ⁻²
10	1.0	4.7	1.4×10 ⁻¹	3.7×10 ⁻²
11	3.4	3.5	5.1×10 ⁻²	4.9×10 ⁻²
12	2.4	4.8	6.8×10 ⁻²	3.7×10 ⁻²

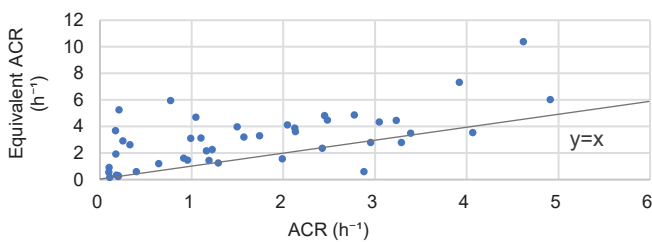


Fig. 7 Comparison of equivalent ACR and ACR

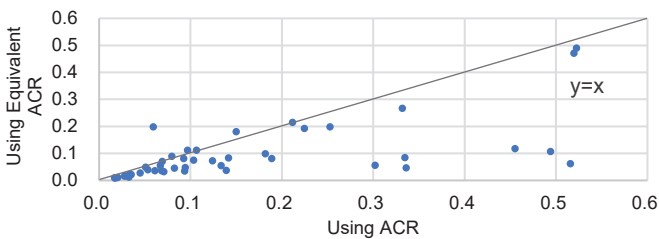


Fig. 8 Comparison of Probability of infection

3.4 数理モデルによる評価

換気回数よりも等価換気回数の値のほうが高くなった原因は、以下の影響から二酸化炭素よりもパーティクルの濃度のほうが短時間で減衰したと考えられる。

- (1) 空気清浄機の HEPA フィルターによるパーティクルの除去
- (2) パーティクルに含まれる水分の蒸発

Fig. 9 に空気清浄機の処理能力と換気回数、等価換気回数の差分との関係を示す。空気清浄機の処理能力は、先述の風量を実験空間の室容積で除した値であり、単位は h⁻¹ である。換気回数と等価換気回数の差分は、等価換気回数から換気回数の値を差し引いた値である。それぞれのデータの相関分析を行った結果、図中に示すように相関係数が 0.8 となり、両者の間には正の相関があった。よって、HEPA フィルターによってパーティクルが除去される影響が確認された。Fig. 10 にパーティクルの粒径別の個数の推移を示す。別途行った調査の結果であり、無換気の空間 A においてパーティクルを放出し、計測機器 BECKMAN COULTER 社製 HHPC 3+ を用いて粒径別の個数の推移を計測した。なお、計測機器の種類以外は実験と同様の方法で行った。結果、時間の経過とともに直径 1.0 μm のパーティクル数が減少するのに対して、直径 0.3 μm のパーティクル数が増加した。パーティクル中の水分が蒸発して収縮したため、小さい粒径の数が増加したと考えられる。よって、水分の蒸発の影響が確認された。

上記の影響を考慮して数理モデルを作成し、空気清浄機の等価換気回数の評価を行った。 $q r_a P_{Particle}$ を HEPA フィルターによる除去の減衰分、 $r_b P_{Particle}$ を水分の蒸発の減衰分として、(2)式に示す微分方程式を作成し、これを解いて整理すると(3)式のようにになった。

$$V \frac{dP_{Particle}}{dt} = Q (P_o - P_{CO_2}) - q r_a P_{Particle} - r_b P_{Particle} \quad (2)$$

$$P_{Particle} = P_{(0)} e^{-\frac{(r_b + q r_a + Q)t}{V}} \quad (3)$$

V は室容積(m³)、 $P_{Particle}$ はパーティクル濃度(μg/m³)、 P_{CO_2} は二酸化炭素濃度(ppm)、 P_o は外気における二酸化炭素濃度(ppm)、 $P_{(0)}$ はパーティクル濃度の初期値(μg/m³)、 Q は換気量(m³/h)、 q は空気清浄機の風量(m³/h)、 r_a はフィルターの除去率である。 Q と q は実験結果から既知であるため、 r_a と r_b を未知数として Microsoft Excel のソルバーの GRG 非線形によるフィッティングを行った。換気回数の予測値である $(r_b + q r_a + Q)/V$ と、実測値である Q/V の平均二乗誤差が最小となる未知数の値を求めたところ、 $r_a=0.8$ 、 $r_b=0.4$ となった。Fig. 11 は、作成した数理モデル上における予測値と実測値の関係である。それぞれのデータの相関分析を行った結果、相関係数は 0.9 となり、高い精度が確認された。したがって、本モデルを用いることで空気清浄機の風量から等価換気回数を行うことが可能であるため、自然換気を代替するための空気清浄機の台数の試算を行うことができる。例えば、一般的な学校教室(180 m³、40 人在籍、必要換気量 1,200 m³)において、必要換気量の半分(600 m³)空気清浄機 PMAC-100(風量 2.35 m³/min)の等価換気量で代替する場合、6 台が必要と推定できた。

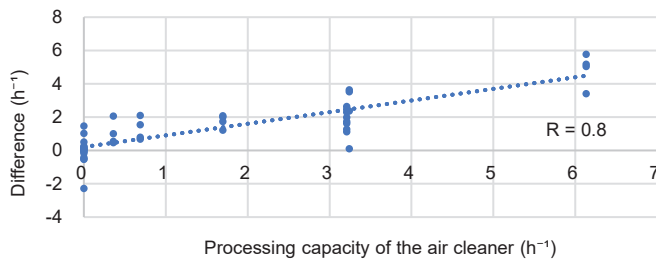


Fig.9 The processing capacity of the air cleaner and the difference between the equivalent ACR and the ACR

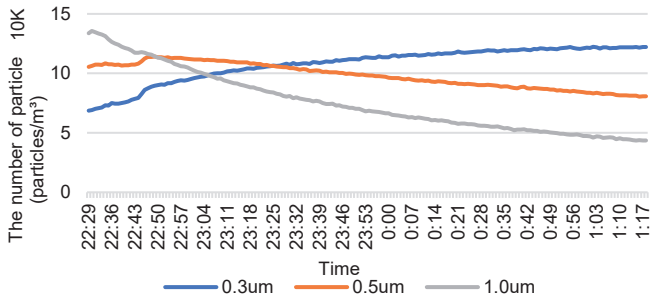


Fig. 10 Number of particles in an enclosed space

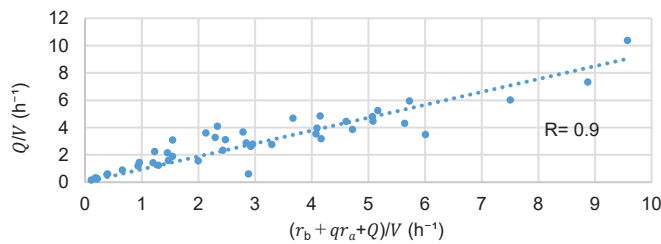


Fig. 11 Predicted and Measured Values

3.5 等価換気回数の粒径間の比較

本実験で用いた P-sensor の計測粒径は 0.3 μm 以上であり、0.3 μm 以上の全てのパーティクルの濃度から等価換気回数の計算を行った。異なる粒径のパーティクル間の等価換気回数の差が無視できることを実験によって確認する必要がある。Table. 8 に追加で行った実験のケースを示す。実験は空間 C において行われ、他の実験と同様の方法でパーティクルを放出し、粒径ごとの濃度を計測できる KANOMAX 社製 Model 3889 と、P-sensor を用いて濃度を計測した。なお、Model 3889 は個数濃度、P-sensor は質量濃度を計測するため(4)式に示す関係式^{19,20)}を用いて換算を行った。

$$c_m = 10^{-6} \cdot C_N \cdot \frac{\rho}{6} \cdot d_m^3 \quad (4)$$

c_m はパーティクルの質量濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 ρ は粒子の密度(g/cm^3)、 C_N は個数濃度($\text{個}/\text{m}^3$)、 d_m^3 は中央粒径(μm)である。Table. 9 に粒径区間ごとの等価換気回数を示す。各 Case において粒径間の等価換気回数の比較を行ったところ、粒径に伴って若干大きくなる傾向がみられたものの、大きな差は見られなかった。また、計測機器間においても大きな差は見られなかった。したがって、異なる粒径のパーティクル間の等価換気回数の差は無視できると考えられる。

Table. 8 The Case for Additional Experiments

case	Ventilation	Air cleaner	Window
1	On	2	Closed
2	On	1	Closed
3	On	0	Closed

Table. 9 Equivalent ACR per grain size interval

Case	KANOMAX	Model 3889	P-sensor	
	0.5-1.0μm	1.0-3.0μm	3.0-5.0μm	0.3μm-
1	3.4	3.8	4.0	3.8
2	2.0	2.5	2.6	2.0
3	5.1×10^{-1}	7.7×10^{-1}	1.1	6.0×10^{-1}

4. まとめ

本研究では、学校教室における運用時の実態調査と空気清浄機のパーティクル除去性能を評価する実験を行い、結果を分析した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 2020年9月以降、高等学校Aの2教室において高濃度の時間が増加する傾向がみられ、外気温の低下によって窓を開放する頻度が減少した影響から、換気状況が悪化したと考えられる。
- (2) 2020年11月15日に高等学校Aを訪問し、換気の頻度を増加するよう要請したところ、以降2週間は高濃度の時間が減少し、換気状況が改善したと考えられる。
- (3) 高等学校Aの電力消費量は外気温が15℃を下回る場合、感染症流行拡大後に増大した傾向があったため、暖房器具の使用量が増加した可能性が考えられる。
- (4) 同じ実験ケースにおいて、等価換気回数のほうが換気回数よりも大きな値を示し、その結果から計算した感染確率の値は小さくなる傾向があった。
- (5) 等価換気回数のほうが高くなった原因として、空気清浄機のHEPAフィルターによるパーティクルの除去、パーティクルに含まれる水分の蒸発の影響が確認された。
- (6) 実験結果から数理モデルを作成することで空気清浄機の等価換気回数の評価が可能となった。例えば、一般的な学校教室の必要換気量の半分(600 m^3)を代替する手法として空気清浄機を用いる場合には、6台が必要と推計された。

5. 限界

本研究における限界を以下に示す。

- (1) 学校教室における実態調査は1校のみを対象に行ったため、結果は限定的なものである可能性がある。
- (2) パーティクル濃度減衰の評価に用いた3空間の室容積はそれぞれ 46 m^3 、 409 m^3 、 87 m^3 であり、一般的な学校教室の設定条件²¹⁾である 180 m^3 とは差があった。
- (3) パーティクルの蒸発の影響は無人の空間において行った実験結果から計算しているため、在室者のいる空間とは結果が異なる可能性がある。
- (4) 数理モデルによる空気清浄機の等価換気回数の評価は、実験に用いた機種に限定された値である可能性がある。

注

注1) 北海道立総合研究機構が、寒さを緩和しつつ換気量を確保する方法について提案を取りまとめたもの。寒さを緩和しつつ教室の換気を常時行うための方法、各教室の換気設備の有無に対応した方法、教室内人数などに応じた必要換気量と窓の開閉幅目安が記載されている。

参考文献

- 1) Ministry of Health: Outbreaks in Japan, etc., 2021, URL: <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kokunainohasseijoukyou.html> (accessed 2021.12.21) (in Japanese)
厚生労働省: 国内の発生状況など
- 2) Ministry of Health: Information on health and medical advice, 2021, URL: <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kenkou-iryousoudan.html> (accessed 2021.12.21) (in Japanese)
厚生労働省: 健康や医療相談の情報
- 3) World Health Organization: Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions Scientific Brief, 2020(accessed 2021.12.21), URL: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>
- 4) Hua Qian, Te Miao, Li Liu, Xiaohong Zheng, Danting Luo, Yuguo Li: Indoor transmission of SARS-CoV-2, Indoor Air Vol. 31, Issue 3 pp. 639-645, 2020.10 (DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12766>)
- 5) Tom Lipinski, Darem Ahmad, Nicolas Serey, Hussam Jouhara: Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings, International Journal of Thermofluids, Vol. 7-8, 2020.11(DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100045>)
- 6) Hiroshi Yoshino, Yukari Iino, Norie Takizawa, Go Iwashita, Kazukiyo Kumagai, Takashi Kurabuchi, Satoru Nagasawa, Akihiro Nagata, Asako Hasegawa and Satoru Muramatsu: Regional installing and operating conditions of hvac systems in public elementary schools, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No.639, pp.643-650, 2009.5(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.74.643>) (in Japanese)
吉野 博, 飯野 由香利, 瀧澤 のりえ, 岩下 剛, 熊谷 一清, 倉淵 隆, 長澤 悟, 永田 明寛, 長谷川 麻子, 村松 学: 公立小学校における暖冷房・換気設備の地域別整備状況及び使用実態, 日本建築学会環境系論文集 第74巻 第639号, pp.643-650, 2009.5
- 7) Ministry of Health: Ventilation methods to improve "poorly ventilated enclosed spaces" in winter, 2020, URL: https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html (accessed 2021.12.21) (in Japanese)
厚生労働省: 冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法, 2020
- 8) Motoya Hayashi, U Yanagi, Kenichi Azuma, Naoki Kagi, Masayuki Ogata, Shoichi Morimoto, Hirofumi Hayama, Taro Mori, Koki Kikuta, Shin-ichi Tanabe, Takashi Kurabuchi, Hiromi Yamada, Kenichi Kobayashi, Hoon Kim, Noriko Kaihara: Measures against COVID-19 concerning Summer Indoor Environment in Japan, Japan Architectural Review, pp.423-434, 2020.8(DOI: <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12183>)
- 9) Takashi Kurabuchi, U. Yanagi, Masayuki Ogata, Masayuki Otsuka, Naoki Kagi, Yoshihide Yamamoto, Motoya Hayashi, Shinichi Tanabe: Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control, Japan Architectural Review, Vol.4, Issue.4, pp.608-620, 2021.6(DOI: <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12238>)
- 10) David A. Christopherson, William C. Yao, Mingming Lu, R. Vijayakumar, Ahmad R. Sedaghat: High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy, Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2020.7(DOI: <https://doi.org/10.1177/0194599820941838>)
- 11) Sapporo City: Data on Energy Consumption of City-owned Facilities in Sapporo, 2021(in Japanese)
札幌市: 札幌市市有施設に係るエネルギー消費量等データ, 2021
- 12) Japan Meteorological Agency: Meteorological observation data, URL: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn> (accessed: 2022.5.27)(in Japanese)
気象庁: 気象観測データ
- 13) Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization: How to Ventilate Schools for the Cold Winter Months in Hokkaido, 2020 (in Japanese)
地方独立行政法人北海道立総合研究機構建築研究本部 北方総合研究所: 北海道の冬季の寒さに配慮した学校の換気方法, 2020
- 14) B.Blocken, T.van Druenen, A.Ricci, L.Kang, T.van Hooff, P.Qin, L.Xia, C. Alanis Ruiz, J.H.Arts, J.F.L.Diepens, G.A.Maas, S.G.Gillmeier, S.B.Vos, A.C.Brombacher: Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic, Building and Environment, Vol.193, 2021.2(DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107659>)
- 15) Syunroku Tanaka, Hitoshi Takeda, Takao Tsuchiya, Takashi Akimoto, Toshie Iwata, Michihito Terao: Newest architectural and environmental engineering, p.43, 2014 (in Japanese)
田中 俊六, 武田 仁, 岩田 利枝, 土屋 喬雄, 寺尾 道仁, 秋元 孝之: 最新建築環境工学, 井上書院, 2014
- 16) S. N. Rudnick, D. K. Milton: Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration, INDOOR AIR, Vol. 13, Issue3, pp.237-245, 2003.9(DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>)
- 17) E. C. Riley, G.Murphy, R. L. Riley: Airborne spread of measles in a suburban elementary school. Am. J. Epidemiol. 107, pp. 421-432, 1978 (DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112560>)
- 18) REHVA : REHVA calculator to estimate the effect of ventilation on COVID - 19 airborne transmission ,URL: <https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator> (accessed 2021.12.10)
- 19) William C. Hinds: Aerosol Technology, 1985(in Japanese)
ウィリアム・C・ハインズ: エアロゾルテクノロジー, 井上書院, 1985
- 20) Remy Franken, Thomas Maggos, Asimina Stamatelopoulou, Miranda Loh, Eelco Kuijpers, John Bartzis, Suzanne Steinle, John W. Cherrie, Anjoeka Pronk: Comparison of methods for converting Dylos particle number concentrations to PM2.5 mass concentrations, Indoor Air, Vol. 29, Issue 3 pp. 450-459, 2019.2(DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12546>)
- 21) Ministry of education, culture, sports, science, and technology- Japan: Research Report on Ventilation Equipment for School Facilities [Chapter 4] Planning Examples of Mechanical Ventilation Equipment , URL: https://www.mext.go.jp/a_menu/shisetu/shuppan/04062201/024.htm (accessed 2021.12.21) (in Japanese)
文部科学省: 学校施設の換気設備に関する調査研究報告書 [第4章] 機械換気設備の計画事例

(2021年12月22日原稿受理, 2022年8月8日採用決定)