

小学校における環境モニタリングシステムの導入による 換気行動変容に関する研究

四国電力(株)	土木建築部	天野 雄一郎
四国電力(株)	土木建築部	松田 健太郎
(株)四国総合研究所	土木技術部	藤井 良平
(株)四電技術コンサルタント	建築部	堀岡 建吾
(株)四電技術コンサルタント	建築部	井上 貴之

キーワード : モニタリング
二酸化炭素濃度
行動変容
換気
メンテナンス

Key Words : Monitoring
Carbon dioxide concentration
Behavior change
Ventilation
Maintenance

Ventilation behavior changes by employing environmental monitoring system for elementary schools

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Department

Yuichiro Amano and Kentaro Matsuda

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Ryohei Fujii

Yonden Consultants, Inc., Architectural Department

Kengo Horioka and Takayuki Inoue

Abstract

Experiments and questionnaires were conducted at an elementary school to determine the effect of environment monitoring system on ventilation behavior. The LED lamp display according to the carbon dioxide concentration served as a criterion for decision-making on ventilation behavior, and the percentage of carbon dioxide concentrations exceeding the standard (1,000 ppm) decreased for many classrooms. Alternatively, in some classrooms, excessive ventilation was fixed, and the thermal environment was also improved. Moreover, the children's involvement in opening windows for ventilation increased. In addition to, we report on measurement results of indoor environment obtained in classrooms employing air to air total heat exchanger at an elementary school. The indoor air environment in the classrooms is sufficiently also utilising cross ventilation with opening windows. Moreover, measurement of the ventilation systems' air flow rate of before and after cleaning including at other schools are operated.

1. はじめに

新型コロナウイルスの流行下において、密閉・密集・密接の「3密」に代表される基本的な感染対策が重要視されてきた。しかし、ワクチンの接種率の向上や罹患による免疫の取得などで集団免疫を獲得し、以前のような大流行を回避し現在は小康状態を保っている状況である。2023年5月には、感染症法上の新型コロナウイルスの扱いが2類から季節性インフルエンザと同等の5類へと移行した。しかし、感染拡大防止の観点からは手洗いや換気などの励行は必要とされている。

小学校教室の空調・換気設備に着目すると、近年冷暖房設備の普及が急速に進んでいるが、2003年の改正建築基準法施行前に建てられた小学校教室の多くは機械換気設備を有していない。冷暖房中であっても換気は窓や戸の開放によって行われるため、外気の侵入による室内温熱環境の悪化や、窓や戸を閉め切ることによる換気量不足が懸念される。昨冬、オミクロン株による学校施設でのクラスターが全国的に発生していたこともあり、学校などの人員密度の高い教室においては適正な換気量を確保し「密閉」を防ぐことが重要とされている。

本研究では新型コロナウイルス流行下における小学校教室の換気を感染症対策・温熱環境・エネルギー消費量の面から適正化する手法としてモニタリングによる行動変容に着目し、その有用性の検証を進めている。本報では、窓開けによる小学校を対象としたモニタリングシステムによる教室内環境の計測概要・室内環境の推移や行動変容について、LEDランプ導入前後における室内CO₂濃度や室内温度の変化をより詳細に分析し、その相関性について有意差検定を実施した結果および換気環境と感染リスクについて算出した結果について報告する。また、近年建て替えが実施された校舎では、全熱交換型を含む機械換気設備が採用されているが、窓開けによる換気も併用している学校が多いため、機械換気設備を有する教室の空気環境の実情を把握するため同様な手法でモニタリング計測を行った結果についても報告する。

2. 対象施設

2.1 窓開け換気のための教室(A小学校)

窓開け換気のための教室として香川県高松市に所

在するA小学校を対象施設とした。校舎は南北2棟あり、1,2年生の教室が位置する南校舎は昭和30年代に竣工したRC造3階建、3年生以上の教室が位置する北校舎は昭和50年代に竣工したRC造4階建の建物である。全ての教室は片廊下型に配置されており、北側に廊下が位置する(図1)。調査期間においては各学年3学級の編成となっており、1学級あたり30~35人程度の児童が在籍している。教室の大きさは7.0m(幅)×9.0m(奥行)×3.15m:南校舎, 3.0m:北校舎(高さ)である(図2, 3)。

壁付換気扇を有する職員室を除き、全教室に機械換気設備は設置されておらず、換気は専ら窓や戸の開放により行われる。各教室の南側には外気と直接通じる窓が上下3か所、廊下に面する北側には2か所の引き違い戸、その間には開閉可能な腰窓とそれらの上部には常時開放されている回転窓が存在する。廊下と階段は窓や昇降口等の開口部より常に外気に対して開放されている。新型コロナウイルスへの対策として授業中、休み時間の教室の窓開け換気が励行されているが、実施の詳細は教員の判断によるため学級毎に窓や戸の開放状況が異なる。

教室の空調設備はガスヒートポンプパッケージ空調機であり、各教室に冷房7.1kW(暖房8.0kW)の室内機が2台存在する。新型コロナウイルス流行下においては窓の開放が積極的に行われ外気導入量が多いこともあり、教員への聞き取りを行ったところほとんどの学級で室内機の設定温度を冷房時には下限、暖房時には上限にしており、風量は常に最大とのことであった。実際に各教室の暖房時の設定温度を調査したところ、ほとんどの室内機は25~28℃設定であることを確認した。

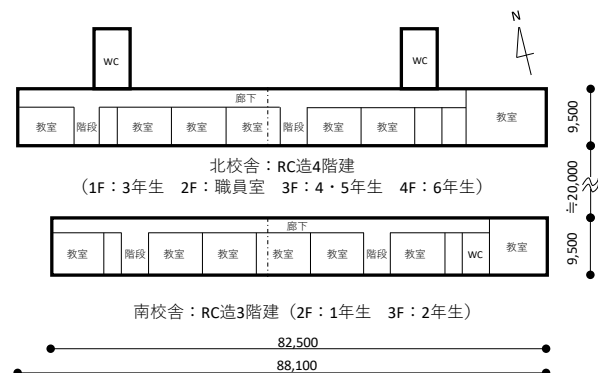


図1 教室配置図(A小学校)

2.2 機械換気設備を有する教室(B 小学校)

機械換気設備を有する教室として香川県高松市に所在する B 小学校を対象施設とした。B 小学校は 2010 年竣工(経年 12 年), RC 造 4 階建である。計測教室は, 各学年の代表 1 学級の計 6 教室とした。なお, 1 学級あたり 30 名程度の児童が在籍しており, 教室の大きさは 9m(幅) × 8m(奥行) × 2.9m(高さ)である(図 4, 5)。

各教室の空調設備は, 天井カセット型ガスヒートポンプパッケージ空調室内機: 冷房 9.0kW(暖房 10.0kW) が 2 台設置されている。また天井埋め込み型式の全熱交換型第 1 種換気設備(以下, 全熱交換器)が 1 台設置されており, ダクトにより給気用と排気用の吹出口が教室内に各 2 つ設置されている。仕様書上の風量は, 強運転時 1,000m³/h, 弱運転時 790m³/h(設計風量: 860m³/h)であり, 通常は全熱交換モードの強運転で運転している。

教室の南側は外気と直接通じる窓が 3 か所とベランダ出入口, 北側は廊下に面した全面引き戸となっており, 計測期間においては全熱交換器を運転しながら, 適宜窓開けを行っている状況であった。廊下はホールとなっており, 外部に直接通じる連窓が設置されている。窓の開閉方法については, 学校全体で廊下側の扉は常時全開にしておき, また, ベランダ側の窓については教員が中心に実施している状況であった。

3. 環境モニタリングシステム

四国電力グループが開発した無線式環境モニタリングシステム「Energy Minder」(以下, E/M)を用いて, 対象施設内の計測を行った。E/M はデータ収集装置(Network Computer, 以下, NC)と, 各種センサが接続可能なセンサユニット(Networked Intelligent Cell, 以下 NICE)から構成されており, NICE の計測値が NC に送信される。NC-NICE 間の通信方式は回折性に優れ, 干渉物が多い建物内でも安定した通信が可能である 920MHz 帯の無線通信を採用しており, マルチホップ通信方式により自動的に通信網を構築する。

NC で収集されたデータはインターネットを經由して遠隔から確認することができる他, 計測項目ごとに閾値を設定し電子メールで警報を発信することもできる(図 6)。今回は温度, 湿度, CO₂濃度を計測できるセンサ(SENSIRION 社 SCD30)を接

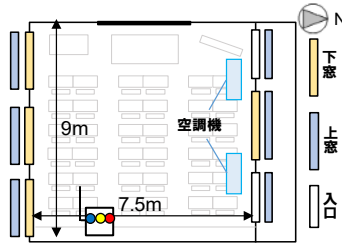


図 2 平面図(A 小学校)

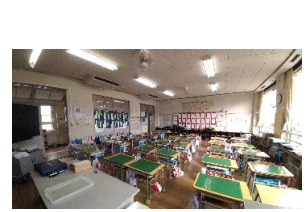


図 3 教室内観(A 小学校)

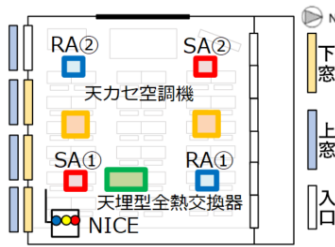


図 4 平面図(B 小学校)

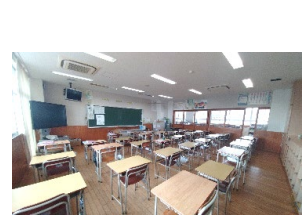


図 5 教室内観(B 小学校)

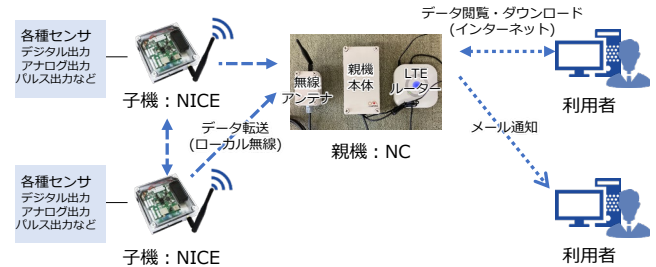


図 6 Energy Minder 概要

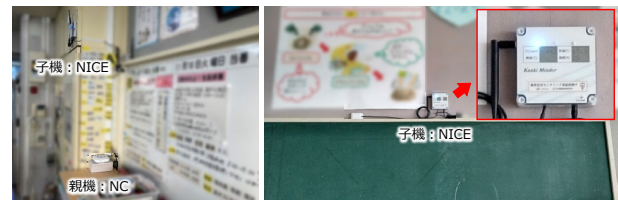


図 7 Energy Minder 設置状況(左:職員室 右:教室)

続し, 教室内のデータ収集を行うと同時に, CO₂濃度の計測値により NICE 表面の LED ランプを異なる色に点灯させ, 換気に関する行動変容を促すこととした。

4. A 小学校での換気行動変容に関する実証実験

4.1 実験概要

教室および職員室の計 19 室を対象として 1 分間隔で各室の温湿度, CO₂濃度の計測を行った。予備計測としてある教室の前方 2 か所, 後方 3 か所の CO₂濃度を同時計測したところ, 場所による差がほとんど見られなかったことから, 可能な限り同時に測定できる教室を増やす目的から, 各教室で後方中央の 1 か所に NICE を設置することとし

た(図7)。なお、NICEは中継器としても機能するため、マルチホップで通信網を構築することが可能であるが、職員室に設置したNCに対して各教室のNICEはシングルホップでの直接的な通信が可能であった。

2021年11月より計測を開始し、2022年11月現在も継続中であるが、本研究では最も寒い期間の換気状況の評価するため2021年12月2日から2022年2月17日を解析対象期間とした。

計測開始から一定期間はCO₂濃度に応じたLEDランプの点灯を行わずに現状把握を行い、途中からLEDランプを点灯させることで、点灯の有無による空気環境の変化および行動変容の評価を試みる計画とした。この時、各教員に対してランプの点灯パターンの閾値を説明したうえで、黄色・赤色ランプ点灯時には窓開け換気を行うことを推奨した。また、2022年1月21日から高松市に「まん延防止等重点措置」が適用されたため、これが換気行動に影響を及ぼす可能性を考慮し、期間を表1の通りに区分し、評価・考察を行った。

4.2 実測結果(CO₂濃度)

表1に計測期間とLED表示の有無を示す。同計測期間における実測結果について、授業が行われる平日8:00~15:00の時間帯を対象とした、各期間、各教室における室内CO₂濃度および1,000ppmを超過した割合を図8~10に示す。なお、本報では各教室を1-A(1は学年、Aはクラス分類)という形で記す。全期間で全ての教室のCO₂濃度の中央値は1,000ppmを下回っているものの、多くの教室で1,000ppmを超過することがあった。特に5,6年生でCO₂濃度が高い傾向が見られるが、これは体格差による呼出量の差が要因と考えられる。次に、期間①と②におけるLEDランプ点灯の有無に伴う影響を評価するため、Wilcoxonの符号付順位和検定³⁾により有意水準0.05での有意差を検定の上、CO₂濃度変化の傾向ごとに計測結果を評価した。

(1) CO₂濃度が有意な上昇傾向を示した教室

該当した計10教室の計測結果を図11に示す。多くの教室において期間①のCO₂濃度の中央値が600~700ppm程度であり、また期間②③では全ての教室でLEDランプの点灯状況に応じて窓開けを行うよう行動が変化した。5-C, 6-Aを除く8教室では期間①では常時あるいは定期的に窓開けを

表1 計測期間とLED表示の有無

期間	期間	LED表示	備考
期間①	2021年12月2日~ 2021年12月27日	無	冬休み期間(12月25日~1月10日)は評価対象外
期間②	2021年12月28日~ 2022年1月21日	有	
期間③	2022年1月22日~ 2022年2月17日	有	まん延防止等重点措置適用期間

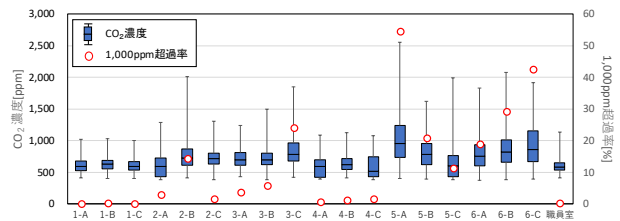


図8 実験結果(期間①)

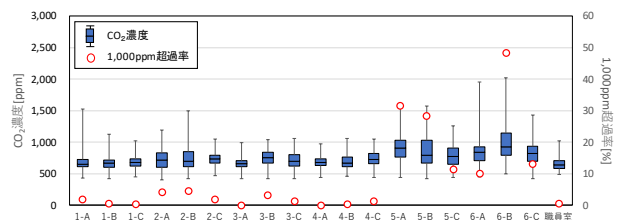


図9 実験結果(期間②)

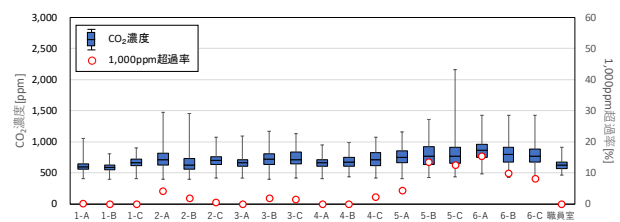


図10 実験結果(期間③)

行う習慣があったが、期間②以降はLEDランプの点灯状況を判断指標として随時の換気を行うようになり、過度な換気が抑制された結果、CO₂濃度の上昇に繋がったと考えられる。

(2) CO₂濃度が有意な低下傾向を示した教室

該当した計4教室の計測結果を図12に示す。各教室に共通して、期間①のCO₂濃度の中央値が700~900ppm程度と比較的高く、期間②③ではLEDランプの点灯状況に応じて窓開けを行うよう行動が変化している。1,000ppm超過率が低下していることから、期間②以降はLEDランプの点灯に応じて換気行動が取られたものと推測される。

(3) CO₂濃度に有意差が生じていない教室

該当した計4教室の計測結果を図13に示す。いずれの教室も期間②③ではLEDランプを換気行動の判断基準としていたとのアンケート回答であっ

た。1,000ppm 超過率を見ると、2-B では期間①から期間②③にかけて大幅に低下していることから、LED ランプの点灯に応じて換気行動がとられたものと推測される。一方、5-B では1,500ppm を超過することはほぼ無いものの、1,000ppm 超過率は期間①よりも期間②の方が高く、LED ランプの具体的な活用状況が異なることが示唆される。

4.3 実測結果(室内温度)

授業が行われる平日 8:00~15:00 の時間帯を対象として室温の分析を行った。実測期間中の外気温については対象施設に最も近い高松地方気象台の日平均外気温データを参照しており、期間①よりも期間②③の方が低いことが確認された(図 14)。なお、空調機の使用は各教室の教員の判断に委ねられる運用だが、基本的には12月から空調機が使用されており、本実測期間においても授業中に空調機が稼働していたと推測される。

期間①から期間②にかけて CO₂ 濃度が上昇傾向を示した教室における室温の計測結果を図 15 に示す。なお、図中には当時の学校環境衛生基準⁴⁾で望ましいとされる室温の下限値である 17℃を下回ったデータ数の割合を付記している。外気温が低いにも関わらず期間②③の室温が期間①と比較し上昇する傾向を示した教室が半数ほど存在しているが、これは当該教室の CO₂ 濃度が上昇していることから、低温の外気導入量が減少したことにより温熱環境が改善したものと考えられる。期間①から期間②にかけて CO₂ 濃度が低下傾向を示した教室における室温の計測結果を図 16 に示す。4 教室で共通の傾向は見られないが、期間①の CO₂ 濃度中央値が全教室で最も高かった 5-A、それに次ぐ 6-C に注目すると、室温がやや低下傾向にあることが確認できる。

全学年教室の全期間のデータ(n=18 教室×3 期間=54)を対象を広げ、室温・CO₂ 濃度の中央値を散布図上にプロットし、95%確率楕円を付記したものを図 17 に示す。近似直線の傾きが正となり CO₂ 濃度が高いほど室温が高いという妥当な傾向が確認され、換気量の確保を前提の上、過度な換気を抑制することで温熱環境の維持を図ることが可能である。また、寒冷な外気導入の抑制は空調機処理熱量の低下にも繋がることから、空調エネルギー消費量の削減にも寄与すると考えらえる。

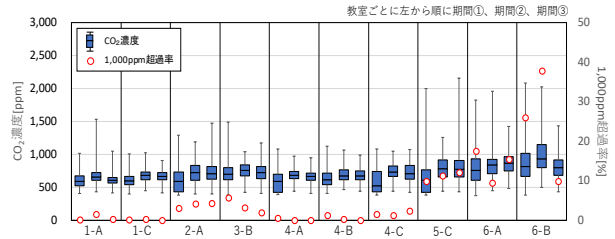


図 11 CO₂ 濃度が有意な上昇傾向を示した教室

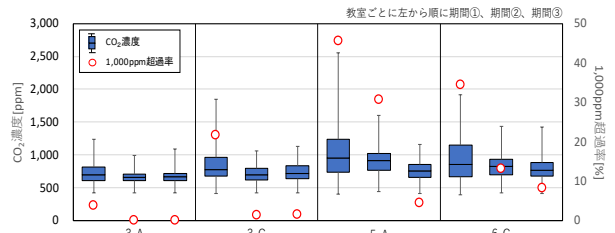


図 12 CO₂ 濃度が有意な低下傾向を示した教室

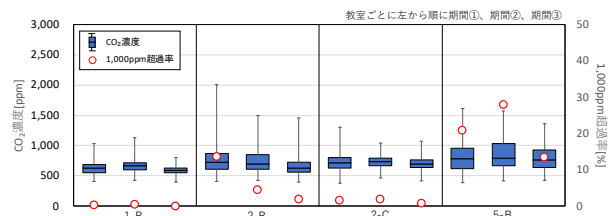


図 13 CO₂ 濃度に有意差が生じていない教室

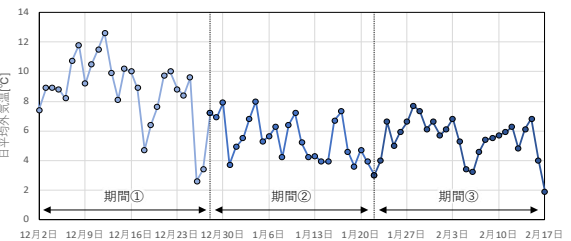


図 14 日平均外気温の推移(気象台データ)

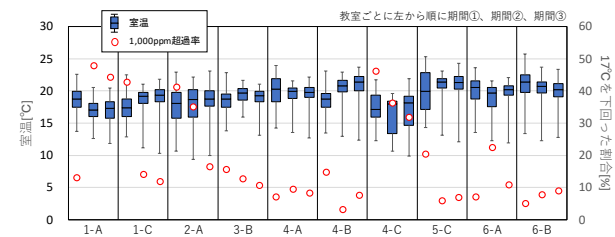


図 15 CO₂ 濃度が有意な上昇傾向を示した

教室における室温の計測結果

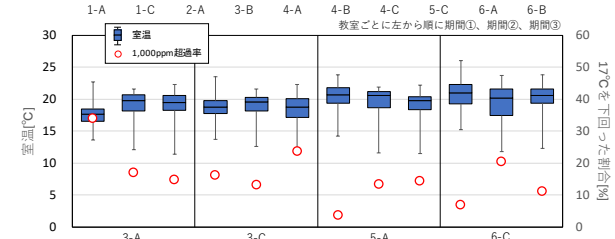


図 16 CO₂ 濃度が有意な低下傾向を示した教室における室温の計測結果

5. 感染リスク評価

各教室のクラス人員や室内 CO₂ 濃度データ等を用いて、授業中の換気量および感染リスクについて分析した。対象教室の授業中の換気量 Q は SHASE の連続発生(供給)法⁵⁾を用いて単室条件として算出し、在室者の CO₂ 呼出量は田島ら⁶⁾の CO₂ 呼出量推定式である式 3-1 および式 3-2 を用いた。体重と身長は文献⁶⁾データを参照し、小学校 1 年生から 6 年生を 7 才から 12 才、教員を 30 才台として身長と体重を設定した。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_p \times Met \times C_a \times C_g) \quad 3-1$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad 3-2$$

ただし、 P_{CO_2} :CO₂呼出量[m³/h], A_p :体表面積[m²], W :体重[kg], H :身長[cm], Met :エネルギー代謝率, C_a :年齢係数(18~29 歳基礎代謝量⁷⁾に対する比), C_g :性別係数(男性 1.00 女性 0.73)

また完全混合条件で室内の感染確率を求めるために式 3-3 の Wells-Riley モデル⁷⁾を用いた。現時点で新型コロナウイルスの感染に関する児童についてのデータは充実していないと考え、算出時には REHVA によるデルタ株に関する呼吸量と量子発生値⁸⁾を用いた。再生産数は式 3-4 により求めた。なお、各種算出は学年ごとの平均の値を算出している。

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right) \quad 3-3$$

$$R = P \times (x - 1) \quad 3-4$$

ただし、 P :感染確率, I :感染者数[人], p :呼吸量[m³/s], q :量子発生量[quanta/s], t :暴露時間[s], Q :外気供給率[m³/s], R :再生産数[-], x :在籍者数[人]

図 18~20 に各期間における学年ごとの CO₂ 濃度を、図 21 に各期間、各学年の再生産数の平均値を、表 2 に各期間における感染確率および再生産数を示す。図 18~20 より、期間①から②にかけて全体的な CO₂ 濃度が 1,000ppm に漸近する傾向が確認される。これは LED ランプの導入により窓開け換気の判断材料となる指標ができたことから、ランプ点灯の閾値である 1,000ppm を基準に換気が行われていたためと考えられる。図 21 および表 2 より、全ての期間で再生産数が 1 を大きく下回っていることから、感染対策上の換気は十分に行われていると考えられる。したがって、再生産数を指標の一つとして換気量を適正化することで、室内

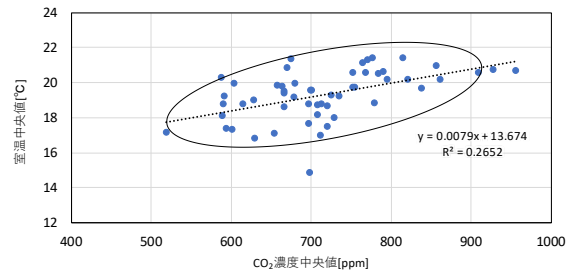


図 17 室温中央値と CO₂ 濃度中央値の相関

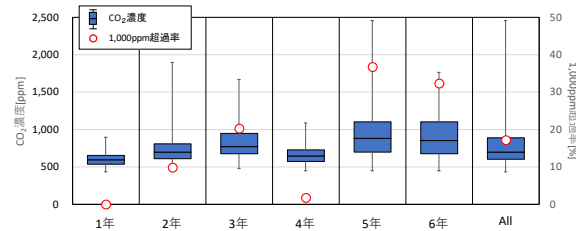


図 18 期間①における学年ごとの CO₂ 濃度

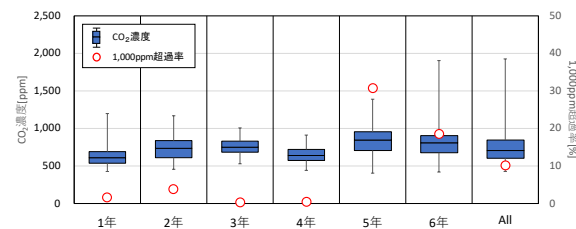


図 19 期間②における学年ごとの CO₂ 濃度

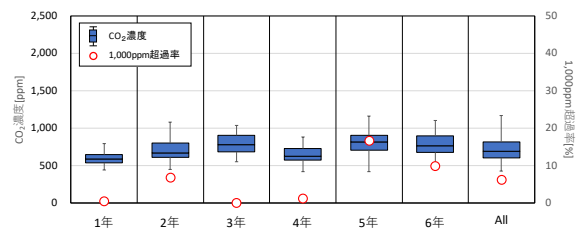


図 20 期間③における学年ごとの CO₂ 濃度

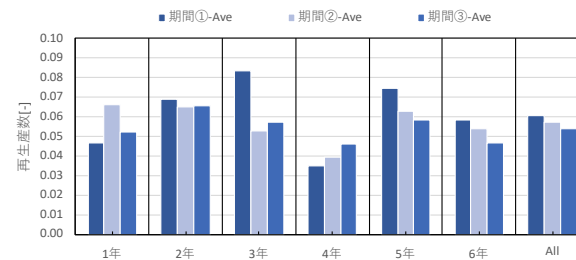


図 21 授業時間の再生産数(平均)

環境と空調のエネルギー消費量の更なる適正化に寄与すると考えられる。なお、本研究では LED ランプ点灯の閾値を 1,000ppm および 1,500ppm としていたことから、CO₂ 濃度が 1,000ppm を境に窓開け換気が行われていたと考えられるが、例えば 1,300ppm を最初の閾値とすることで窓開けに関する行動変容を促すことが比較的容易に可能であるとされる。

表 2 期間ごとの各学年の感染確率および再生産率（左：期間①，中央：期間②，右：期間③）

学年	1	2	3	4	5	6	ALL	学年	1	2	3	4	5	6	ALL	学年	1	2	3	4	5	6	ALL
Q [m ³ /h] Ave	1,707	1,776	1,198	2,967	1,933	2,174	1,958	Q [m ³ /h] Ave	1,231	1,446	1,704	1,950	1,598	2,039	1,654	Q [m ³ /h] Ave	1,437	1,213	1,748	1,510	1,387	1,713	1,487
Q [m ³ /h] Max	29,987	66,266	7,412	73,225	49,780	14,263	73,225	Q [m ³ /h] Max	4,047	11,747	7,718	6,340	13,128	16,288	16,288	Q [m ³ /h] Max	5,760	4,670	10,084	4,362	8,514	7,482	10,084
Q [m ³ /h] Min	400	121	161	597	179	358	121	Q [m ³ /h] Min	74	453	588	648	335	338	74	Q [m ³ /h] Min	494	476	613	687	560	786	476
P [%] Ave	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.2	P [%] Ave	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	P [%] Ave	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
P [%] Max	0.5	1.7	1.3	0.3	1.1	0.6	1.7	P [%] Max	2.7	0.4	0.3	0.3	0.6	0.6	2.7	P [%] Max	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4
P [%] Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	P [%] Min	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	P [%] Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
R [-] Ave	0.05	0.07	0.08	0.03	0.07	0.06	0.06	R [-] Ave	0.07	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05	0.06	R [-] Ave	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
R [-] Max	0.13	0.53	0.40	0.10	0.34	0.19	0.53	R [-] Max	0.70	0.13	0.11	0.09	0.17	0.20	0.70	R [-] Max	0.11	0.13	0.11	0.09	0.10	0.09	0.13
R [-] Min	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	R [-] Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	R [-] Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
n	249	238	179	189	224	262	1,341	n	131	143	93	114	140	142	763	n	59	63	41	63	63	63	352

6. B 小学校での換気行動変容に関する実証実験

6.1 実験概要

計測期間は夏期の 2022 年 9 月 1 日～10 月 14 日とし、9 月 14 日の午後に LED ランプを設置した。LED 表示の有無による窓開け換気の状態と行動変容の差異を評価するため、①冷房有・LED 表示無(2022 年 9 月 1 日～9 月 14 日)、②冷房有・LED 表示有(2022 年 9 月 15 日～10 月 2 日)、③冷房無・LED 表示有(2022 年 10 月 3 日～10 月 14 日)とし、各学年における①～③の期間内の代表 1 週間の測定結果を図 22～24 に示す。計測期間中、学校環境衛生基準である 1,500ppm を超えることは殆ど無かった。冷房有の期間①と②を比較したが、CO₂ 濃度に大きな差は無く LED による換気行動変容は確認できなかった。冷房の有無の差のあった②と③を比較すると平均 CO₂ 濃度は③の方が 200ppm 以上低くなった。③は中間期となり冷房を停止し窓開け等で積極的に外気を導入した結果と推測される。冷房有の①と②の期間において全熱交換器を稼働させていたことが確認されているが、1,000ppm 以上になる時間帯も多かったため、在室者の換気行動の状況を調査した。

また、各クラスの担任の教員に対して実施したアンケートでは、廊下側の扉は常に全開にするという学校の指示もあり、教室と廊下側のホール部分は常時空気が流動し、ホールを間接的に通じて外気と接するような状況であることがわかった。ベランダ側の外気と直接接する窓においては、低学年(1, 2 年生)と中学年(3, 4 年生)は先生が中心となり、常時一定の窓を開ける運用となっているのに対し、高学年(5, 6 年生)では、LED の状況により児童が窓開けを実施しているという回答であった。これらの結果により、LED 表示が行動変容の一助となっていることが示唆された。

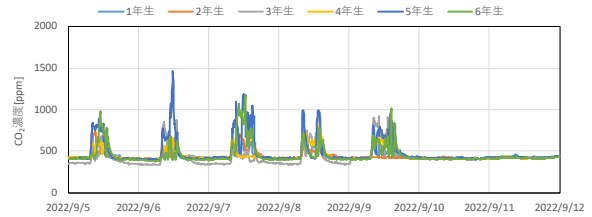


図 22 CO₂ 濃度推移 (冷房有・LED 無 : 9/5-12)

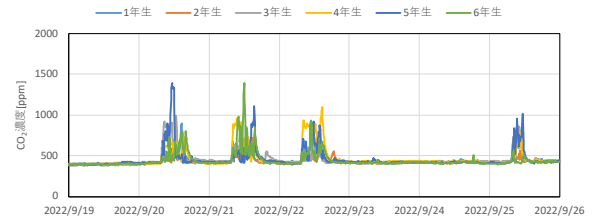


図 23 CO₂ 濃度推移 (冷房有・LED 有 : 9/19-25)

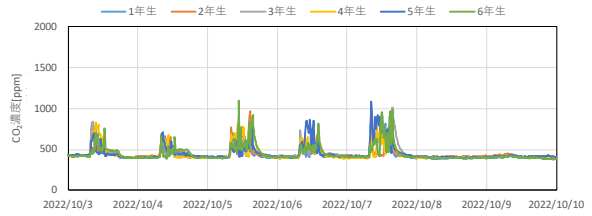


図 24 CO₂ 濃度推移 (冷房無・LED 有 : 10/3-9)

6.2 換気設備の状況調査

換気設備の状況調査および清掃は 2, 4, 6 年生の 3 教室を対象とした。なお、使用開始後 10 年以上の間、フィルター・エレメントの清掃や交換は行っていない。風量はキャプチャーフード風量計(日本カノマックス社製)で吹出口(SA), 吸込口(RA)毎に計測し、評価した。また、外部の給気口、排気口についても状況を確認した(図 25)。天井埋込型の全熱交換器のフィルターと全熱交換エレメントを確認したところ、フィルターはチョークの粉や衣類の繊維、ホコリなどでほぼ閉塞した状態であった。全熱交換エレメントはフィルターが閉塞したため、端部より直接空気が流入することでホコリなどが付着している状況であった(図 26)。

清掃は、天井内の全熱交換器の側面から、給気フィルターと排気フィルターを取外し、掃除機で埃等を吸引後に水洗いを行い、乾燥させて再度装着した。エレメントはフィルターと同様に側面から取外し後、ブラシで表面のごみを落とししながら、掃除機で吸引し、清掃後再度装着した(図 27, 28)。清掃前後の風量を表 3 にまとめる。清掃前の風量は、設計風量：860m³/h に対し、給気風量、排気風量ともに約 40～80%減と全体的に低い傾向であることがわかる。

図 29 に冬期の風量測定の際のフィルター他の清掃前後の給気・排気風量と清掃前の風量に対して清掃を行うことによる風量の改善量(増加量)を示す。給気風量・排気風量共に清掃前の風量が小さいほど清掃による効果大きい傾向にある。給気風量に関して、清掃前風量が 200 m³/h を下回る場合、フィルター他の清掃により 50 m³/h 以上の風量の増加があるケースもあった。排気風量に関して、清掃前風量が約 200 m³/h の場合 250～450 m³/h の風量増加が認められるケースもあった。

しかしながら、清掃前風量が小さいものでも清掃後の増加が小さいケースも存在した。また、2年生教室は給気風量が多く、逆に 4, 6年生教室では排気風量の方が多いという違った傾向を示しており、施工の状況の確認や機器内部の詳細なメカニズムの検討が望まれる。更に、フィルター他の目詰まりだけでなく、外気からの取入口なども防虫網などにホコリなどが付着して開口率が極端に下がっており、試験的に簡易な清掃を実施した結果、風量を 50%程度増加させることができたため、これも風量が低下している一要因として示唆された。調査後に、全教室のフィルター・エレメント清掃が行われたため、本報で報告した以外の教室においても、今後風量調査を実施する。

6.3 他の学校施設における換気設備の状況調査

近年、建て替えられた学校施設では、全熱交換型換気設備の採用が多くみられる。全熱交換器は、比較的換気量の多い教室や外気温度が暑い、寒いなどの厳しい条件下において省エネルギーや温熱環境の向上に寄与することがわかっている。しかし、設計時点でこのような利点を考慮し採用した場合でも、清掃等のメンテナンスができていない場合には前節で報告したように、風量減少による



図 25 風量測定・外部給気口確認状況
全熱交換エレメント

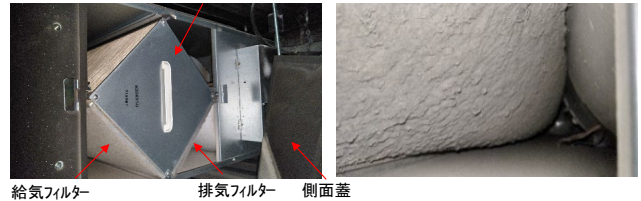


図 26 全熱交換器フィルター等の状況



図 27 清掃状況



図 28 清掃前後のフィルター・エレメントの状況
(左：清掃前，右：清掃後)

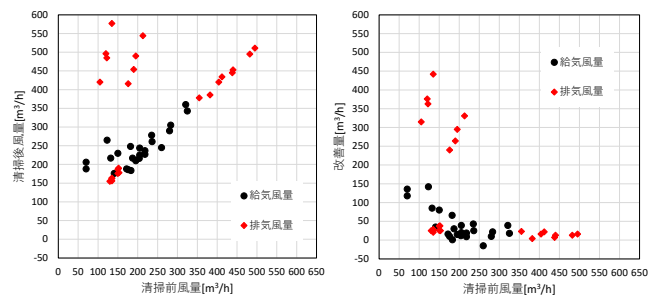


図 29 清掃前後の変化量 (左：風量，右：改善量)

空気環境の悪化や窓開け併用によるエネルギー消費量の増加を招く懸念がある。このため、他の学校施設における全熱交換器の状況調査を行った。

対象としたC中学校は、築8年のRC造の校舎であり、天井カセット型の全熱交換器（設計風量：410m³/h×2台、定格風量：強運転時500m³/h・台、弱運転300m³/h・台）を採用している。この学校も空調設備のフィルター清掃は毎年実施しているが、換気設備のメンテナンス作業は竣工以来実施していない。フィルターとエレメントの状況を図30に示す。この教室も黒板を採用していることから、特に排気（RA）側のフィルターでは、チョーク他のホコリによるフィルターの閉塞が確認された。また、エレメントについてもフィルター同様の閉塞が確認された。給気（SA）側のフィルターについてもホコリや虫などによる閉塞が確認された。このため、各学年が使用する教室から、A～Fの6教室をランダムに抜き出し風量調査を行ったところ、強運転・弱運転、全熱交換・普通運転の組み合わせにおいて、給気側で最大20%程度、排気側で最大70%程度の減少が確認された（表4）。

調査後、B小学校同様に清掃業者による清掃を全教室で実施しフィルター・エレメントの閉塞は解消されていることから、今後、風量調査を実施し換気量の評価を行う予定である（図31）。

表3 清掃前後での風量変化

運転方法	設定強度	風向	風量[m ³ /h]						
			2年生		4年生		6年生		
			清掃前	清掃後	清掃前	清掃後	清掃前	清掃後	
全熱交換	風量(弱)	給気風量	SA①	280	290	183	184	187	217
			SA②	205	244	150	230	70	188
			合計	485	534	333	414	257	405
		排気風量	RA①	135	163	176	416	105	420
			RA②	135	163	190	454	122	485
			合計	270	326	366	870	227	905
	風量(強)	給気風量	SA①	325	343	132	217	182	248
			SA②	235	278	123	265	70	206
			合計	560	621	255	482	252	454
		排気風量	RA①	150	187	195	490	120	496
			RA②	152	190	213	544	135	577
			合計	302	377	408	1034	255	1073
普通換気	風量(弱)	給気風量	SA①	283	305	176	186	218	227
			SA②	205	225	195	210	141	176
			合計	488	530	371	396	359	403
		排気風量	RA①	130	155	382	386	355	378
			RA②	135	156	404	420	412	434
			合計	265	311	786	806	767	812
	風量(強)	給気風量	SA①	321	360	204	216	260	245
			SA②	236	261	218	237	172	188
			合計	557	621	422	453	432	433
		排気風量	RA①	150	176	440	453	438	445
			RA②	153	178	482	495	495	511
			合計	303	354	922	948	933	956

表4 清掃前の風量

運転方法	設定強度	風向	風量[m ³ /h]						
			A	B	C	D	E	F	
全熱交換	風量(弱)	給気風量	SA①	280	280	275	250	330	260
			SA②	260	330	280	245	315	280
			合計	540	610	555	495	645	540
		排気風量	RA①	100	240	105	95	245	95
			RA②	110	50	75	95	235	85
			合計	210	290	180	190	480	180
	風量(強)	給気風量	SA①	425	450	440	390	535	410
			SA②	430	515	445	385	530	430
			合計	855	965	885	775	1065	840
		排気風量	RA①	155	375	200	150	395	150
			RA②	160	85	135	150	380	125
			合計	315	460	335	300	775	275
普通換気	風量(弱)	給気風量	SA①	270	300	285	255	350	260
			SA②	270	340	280	235	340	270
			合計	540	640	565	490	690	530
		排気風量	RA①	95	280	150	110	265	115
			RA②	105	70	105	90	245	85
			合計	200	350	255	200	510	200
	風量(強)	給気風量	SA①	440	460	420	385	540	410
			SA②	420	520	440	380	525	420
			合計	860	980	860	765	1065	830
		排気風量	RA①	160	435	245	165	430	180
			RA②	165	120	185	160	390	140
			合計	325	555	430	325	820	320



図30 清掃前の状況
(左:フィルター, 右:エレメント)



図31 清掃後の状況
(左:フィルター, 右:エレメント)

7. おわりに

機械換気設備を有していないA小学校の教室に環境モニタリングシステムを導入し、新型コロナウイルス流行下における冬期の換気状況の実態調査を行うとともにCO₂濃度に応じたLEDランプの点灯が換気行動に及ぼす影響を検証した。また、機械換気設備を有するB小学校の教室の空気環境の状況も把握するため同様の手法でモニタリング計測を行い、更に必要に応じてフィルター等の状況調査と簡易清掃を実施した。同様の状況調査をC中学校においても実施した。

得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 換気設備を有しない A 小学校においては、CO₂濃度に応じた LED ランプの点灯を行う前は教室ごとに窓開けの習慣（常時開放、定期的に開放など）が異なり、教室によっては CO₂濃度が 1,000ppm を超過するデータが多く存在した。
- 2) LED ランプにより CO₂濃度の可視化を行ったところ、全教室において換気行動の判断基準として用いられるようになった。1,000ppm, 1,500ppm を閾値としてランプの色を変化させると、多くの教室で CO₂濃度が 1,000ppm を超過する割合が減少した。
- 3) CO₂濃度の中央値が 600~700ppm 程度と低い教室で、LED ランプの点灯を行うようになってから CO₂濃度が上昇する傾向が見られた。CO₂濃度と室温には相関性が確認され、適度な換気を行うことで CO₂濃度を基準内に収めつつ、室温の維持を両立できる可能性が示唆された。
- 4) LED ランプの点灯後は窓開けに対して児童が関与する教室が増加した。LED ランプの点灯というわかりやすい判断基準が設けられたことにより児童の換気行動が促されたものと考えられる。
- 5) 計測期間中における新型コロナウイルスの再生産数が十分に低いことを計算で確認し、これをもとに LED ランプの閾値変更等を通じて更なる換気量の適正化が可能であると考えられる。
- 6) 換気設備を有する B 小学校において、計測期間を通して窓開け換気を併用していたことから教室の空気環境は概ね問題なかったものの、フィルター・エレメントのメンテナンス不足に起因する全熱交換器の風量低下が散見された。
- 7) C 中学校においても、B 小学校同様にメンテナンス不足が原因による風量低下が確認されたため、各施設で清掃が行われた。これらの事象は空気環境の悪化に加え、エネルギー消費量の増加にもつながる可能性があるため、適正なメンテナンス方法について検討する必要がある。

以上のように、本報では小学校における実証を通じて環境モニタリングが換気行動変容に及ぼす効果を定量的に評価し、その有用性を示した。換気方式は学校によって異なるため、それぞれの換気方式に応じたモニタリング手法とその適用性を検討することが、今後必要であろうと考える。

【謝辞】

実証実験、アンケート調査にご協力頂いた対象施設の先生方はじめ関係者の皆様、調査、分析をご指導いただいた豊橋技術科学大学 田島昌樹教授、無線式環境モニタリングシステム Energy Minder の開発者であり、計測にご協力頂いた四国総合研究所 中西美一氏に深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 天野雄一朗他：小学校を対象とした環境モニタリングシステムによる換気行動変容に関する研究 その1 実測とアンケートによる行動変容の分析，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第8巻，p.321-324，2022
- 2) 藤井良平他：小学校における環境モニタリングシステムの導入による換気行動変容に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第88巻，第808号，p.521-528,2023.6
- 3) 丹後俊郎，古川俊之：統計ライブラリー 医学への統計学【第3版】，p.64-78，149，朝倉書店，2013
- 4) 文部科学省：学校環境衛生管理マニュアル「学校環境衛生基準」の理論と実践[平成30年度改訂版]，文部科学省 HP(参照 2022.08.19)
- 5) 空気調和・衛生工学会：トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法，p.18，2003
- 6) 田島昌樹他：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定，日本建築学会，日本建築学会環境計論文集，第81巻，第728号，p.885-892，2016.10
- 7) 田畑泉 田中茂穂 引原有輝：改訂版「身体活動のメッツ(METs)表」，2008.2
- 8) Riley, E. C., Murphy, G., Riley, R. L.: Airborne spread of measles in a suburban elementary school. American Journal of Epidemiology, Volume 107, Issue 5, p.421-432, 1978.5
- 9) REHVA: COVID 19 GUIDANCE version 4.1, 2021.4