鹿児島市内の小学校における室内空気環境実測

(その2 小学校高学年教室における二酸化炭素濃度と開口部開閉状況)

FIELD STUDY ON THE INDOOR AIR QUALITY IN ELEMENTARY SCHOOLS
IN KAGOSHIMA CITY(Part 2 CO₂ concentrations and window opening in the sixth graders' classroom)

合原 妙美*, 岩下 剛**

Taemi GOHARA and Go IWASHITA

Field survey on indoor air quality was conducted in summer, autumn and winter season, in three elementary schools in Kagoshima city. In every classroom, in summer and autumn, the open degree of a opening was high, and CO₂ concentrations under pupils staying in the classroom were kept below 1000 ppm. In winter, since changing into the state where the opening was closed by the fall of temperature is expected, it is presumed in this case at the time of the lesson end for 45 minutes that indoor CO₂ concentration reaches at about 2260 ppm.

The CO₂ emission rate from one sixth grader child was calculated as 0.014m³/h. In the state where the opening was closed, by operating two sets of ventilation fans, the air change rate of 3 h⁻¹ or more is secured, and it is thought that indoor CO₂ concentration is also set to below 1500 ppm at the time of the lesson end.

Keywords: Elementary Schools, CO₂ concentration, Air Change Rate, CO₂ Emission Rate, Ventilation Fan, Air Temperature

小学校、二酸化炭素濃度、換気回数、二酸化炭素発生量、換気扇、気温

1. はじめに

鹿児島市内の小学校で空気環境の実測を行い、本報その1¹⁾で揮発性有機化合物などの濃度レベルを報告した。在室者がシックハウス症候群の症状を訴える問題は深刻さを増しているが、このほど、「学校環境衛生の基準」が改定され²⁾、室内化学物質濃度に関する基準も示された。今後、児童・生徒の健康を維持する上で、適切な管理が行われることが期待される。日常的には、室内空気中の化学物質濃度を低下させる観点からみても、年間を通じて換気を適切に行う必要性はより高くなると考えられる。

上述した基準によると、CO₂濃度や換気回数の定期検査を年2回行い、空気環境を管理することとしている。換気回数の検査方法としては在室者の呼気によるCO₂濃度の上昇から算定を行う方法が「学校環境衛生の基準」解説³⁾に示されている。この場合、児童のCO₂呼出量は既知であることを必要とするが、同解説書には、小学生(幼稚園生を含む)のCO₂呼出量として大人の1/2の呼出量を用いると示されている。

小学生は学年の幅があり体格の差も大きい。よって、最上級生の6年生の呼出量を確認することは有用であると思われる。また、窓開閉などの行為は気候に応じて行うことから、あらかじめ季節毎の居住実態を把握しておくことは定期検査を行う上で有用性が高い。

全国の各市教育委員会を対象とした石井・塩月らの調査結果によると、小学校普通教室に換気設備(換気扇あるいは換気口)を設置

している市は48都市中11都市で、その内の10都市は暖房器具も設置している⁴⁾。このことから、普通教室の場合、暖房設備を設置しない教室に換気設備を設置することは少ないと考えられる。

鹿児島市の公立小学校では、普通教室に冷暖房設備の設置はされていない。しかし、昭和40年代後半から桜島の噴火活動が活発化し降灰が深刻な問題であったことから、昭和53年から普通教室には換気扇が設置されていった。これは、活動火山対策特別措置法に基づいて、降灰防除に関する整備として設置されたものであるため、特殊な例といえる。

換気扇設置の目的は上述した経緯によるものであるが、現在は、降灰の量・頻度共にかなり少ないことから、普通教室において、降灰対処のため換気扇を稼動するという状況は少ない。一方、通常時における換気扇の活用状況は把握されていないが、実測に先駆けて行った聞き取り調査によると、換気扇を稼動することはほとんどない、とのことであった。

教室の在室者が実際に行う開口部開閉及び換気扇使用の実態調査、及びその状態におけるCO₂濃度、換気回数、気温の測定を同時に行っている例は少ない。そこで、季節毎にこれらの同時調査を行い、実態の把握を試みた。また、6年生教室においてトレーサーガスによる換気回数の測定を行うことにより、6年生児童のCO₂呼出量の算出を試みた。これらを基に鹿児島市内の小学校における冬季教室の換気方法の検討を行ったので、その結果を報告する。

* 鹿児島県立短期大学生活科学科 非常勤講師・家修

** 鹿児島大学工学部建築学科 助教授・工博

Lecturer, Dept. of Life and Environmental Science, Kagoshima Prefectural College, M. Home Eco.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kagoshima University, Dr. Eng.

表1 各小学校の実測対象教室の概要及び実測日程

		夏季実測	秋季実測	冬季実測	築年数	改修工事
F小学校	6年A組	6/23 (44*)	11/9 (39)	2/1 (41)	41年	未
T小学校	6年A組	7/3 (36)	11/20 (37)	1/30 (35)	33年	済(2000年3月)
	5年A組	(40)	(37)	(39)		未
Y小学校	6年A組	7/11 (33)	11/15 (38)	2/14 (35)	33年	済(1998年3月)

夏季、秋季実測は2000年、冬季実測は2001年

* ()内の数字は測定普通教室の在室児童数を示す。

図1 F小学校6年A組教室の南南西側窓立面図-教室内から外気側

図2 F小学校6年A組教室の廊下側窓立面図-教室内から廊下側

図3 F小学校6年A組の廊下外(北北東)側窓立面図-廊下から外気側

2. 実測概要

測定を行った教室と日程を表1に示す。

開口部開閉状況及び換気扇使用実態: F小学校の冬季実測の一部時間帯を除いて、児童や教員に通常通りに行ってもらい、開口部開閉状況及び換気扇使用状況について一日を通して観察し記録を行った。

CO₂濃度: F小学校6年A組教室内外気において、夏季・秋季・冬季の各季節の実測日に、児童の登校前から下校時まで連続測定を行った。CO₂濃度測定には光音響法マルチガスモニター (INNOVA 社、1312) を用いた。

換気回数: トレーサーガス濃度減衰法を用い、トレーサーガスに SF₆ を使用し、上記のマルチガスモニターで濃度の連続測定を行った。

気温及び相対湿度: 教室と外気において、連続測定を行った。

風向及び風速: F小学校の1km南に位置する鹿児島地方気象台(風向風速計測の高さ44.8m)におけるデータを参考として用いた。

図4 F小学校6年A組夏季の開口部開閉状況及び換気扇使用状況

図5 F小学校6年A組夏季のCO₂濃度経時変化及び換気回数

表2 鹿児島地方気象台によるF小学校夏季実測日(6/23)の風向・風速

時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
風向	W	SW	WSW	WSW	SW	WSW	SW	SSW	SW
風速(m/s)	2.4	1.7	3.6	5.2	4.4	3.8	4.7	6.2	6.2

3. 実測結果

3-1. F小学校6年A組における各季節の換気法とCO₂濃度、換気回数

3-1-1. 6年A組教室の窓及び換気扇概要

図1～図3にF小学校6年A組教室の窓の立面図を示す。外気(南南西)側の上段窓には、換気扇が設置されているが、年間を通して使用されることはなかった。また、F小学校教室にベランダはなく、窓1～4には転落防止用の手すりがついてつけられている。尚、外気に面した上段窓1、2の開放は年間を通し行われなかった。

3-1-2. 夏季の開口部開閉状況とCO₂濃度、換気回数

F小学校6年A組では、夏季の間は暑さ対策等の理由で窓5、6は取り外され全面が開放されていた。また、換気口5、6の戸も取り外され全面が開放されていた。図4に夏季実測日における開口部開閉状況を示す。児童登校時から下校までの間、窓1～8、戸1、2及び換気口2、4、5、6は全て開放された状態であった。

図5に6年A組教室のCO₂濃度及び換気回数を示す。換気回数を示すバーの長さはトレーサーガス濃度減衰法による換気回数測定を

図6 F小学校6年A組秋季の開口部開閉状況及び換気扇使用状況

図7 F小学校6年A組秋季のCO₂濃度経時変化及び換気回数

表3 鹿児島地方気象台によるF小学校秋季実測日(11/9)の風向・風速

時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
風向	NNE	NE	NE	NNE	NNE	NNE	NE	NE	NE
風速(m/s)	4.3	3.5	2.3	3.8	5.3	3.3	5.1	5.9	5.7

行った時間帯を表している。尚、授業中の測定に関しては、トレーサーガスの攪拌を行っていなかったため、通風輪道が生じていた可能性も考えられるが、トレーサーガス濃度測定値から最小自乗法で換気回数を求めた際の相関係数は全て 0.95 を上回っていた。表2に鹿児島地方気象台における実測日各時刻の風向及び風速を示す。

児童在室時の主風向はWSW～SSWであった。外気のCO₂濃度は一日を通して450 ppmを下回っていた。室内CO₂濃度は児童在室時間帯には概ね500～700 ppmで変動した。8～9時にCO₂濃度がやや高い600～870 ppmであるのは、気象台の1時間間隔の風速値から考察すると、風速が他の時間帯に比べて相対的に小さいためであると思われる。一日を通して開口部を終始全面的に開放している夏季においては、CO₂濃度は900 ppmを越えることはなかった。

3-1-3. 秋季の開口部開閉状況とCO₂濃度、換気回数

夏季の間に取り外されていた窓5、6が秋季には取り付けられていた。図6に秋季実測日における開口部開閉状況を示す。夏季と異なり、窓5、6及び戸1、2の開閉を頻繁に行っている。これは、集中力を必要とする授業時間帯に児童が自ら、教室と廊下の間の開口部を閉鎖

図8 F小学校6年A組冬季の開口部開閉状況及び換気扇使用状況

図9 F小学校6年A組冬季のCO₂濃度経時変化及び換気回数

図10 F小学校6年A組冬季の教室気温と外気温

表4 鹿児島地方気象台によるF小学校冬季実測日(2/1:曇り)の風向・風速及び全天日射量

時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
風向	NNW	NW	N	NW	NW	NW	NW	NNW	N
風速(m/s)	2.2	3.4	4.8	4.2	4.6	6.6	5.6	7.2	5.0
全天日射量(MJ/m ²)	0.04	0.07	0.61	0.69	1.23	1.83	1.83	1.10	0.61

するためである。秋季実測日の気温は9時から15時の平均値で22.8℃(標準偏差0.5℃)と、夏季実測日の30.3℃(標準偏差0.4℃)と比較し、7～8℃低い。

図7に秋季におけるCO₂濃度及び換気回数を、表3に鹿児島地方気象台における実測日各時刻の風向及び風速を示す。主風向はNNE～NEであった。午前10時から30分程度、児童が教室の廊下に面し

た窓と戸を全て閉鎖した。そのため、その時間帯においては CO_2 濃度がやや高い濃度を示し、1160 ppm まで上昇した。しかし、窓の上下にある換気口は開放されていることから、その後、 CO_2 濃度は 1000 ppm 以下に保たれた。秋季は、屋外風の条件が夏季とほぼ同程度であったと考えられるので、開口部開放度が等しい時間帯においては、 CO_2 濃度は概ね夏季と同様であった。

3-1-4. 冬季の開口部開閉状況と CO_2 濃度、換気回数及び教室気温

図 8 に冬季実測日における開口部開閉状況を示す。図 9 に CO_2 濃度及び換気回数²を、図 10 に教室気温と外気温の経時変化を示す。図 8～10 中のグレー部分は、筆者らが開口部開閉などの制御を行った時間帯であるので、後の項で考察を行う。表 4 に鹿児島地方気象台における実測日各時刻の風向・風速及び全天日射量を示す。

児童の登校時間帯に窓 1～6 と戸 1、2 が開放され、引き続き「朝の会」の間は開放的な状態であった。その間、外気温は 11～12℃、教室内気温は外気温より 3℃程度高い 14～15℃、 CO_2 濃度は 800～1000 ppm であった。1、2 校時は教室の窓や戸を開放した状態で特別教室へ移動した。そのため教室気温は外気温より約 1℃高い程度で、 CO_2 濃度は外気濃度 (420～450 ppm) よりやや高い 500 ppm であった。

10 時 20 分から筆者らが開口部を全て閉鎖したが、午前中の授業が終了した 12 時 20 分に開口部開閉を元の状態に戻し、児童には再び普段通りの開口部開閉を行ってもらった。12 時 20 分に換気口上 2 に加え戸 1、2 が開放された。その後、戸は閉鎖されたが、外気に面した窓 4 が開放されたことから、 CO_2 濃度は 1000ppm まで低下した。

掃除時間帯には教室の窓 1～6 と戸 1、2 が一斉に開放された。掃除時間の換気回数は 22.4 回/時と多く、在室児童は掃除に携わっている数人であることから、 CO_2 濃度はさらに低下した。外気に面した窓 1～3 も開放した間、教室気温は約 16℃で外気温より 3℃高い温度を保っていた。

冬季においては、廊下の外気に面した窓 7、8 の開放を一日を通して行っていない。そのため、夏季・秋季と異なり、 CO_2 濃度は外気濃度レベルまで下がることはなかった。

3-2. T 小学校と Y 小学校各教室における各季節の換気方法

3-2-1. 実測対象教室の窓及び換気扇概要

図 11～13 に T 小学校 6 年 A 組教室の窓立面図を示す。表 1 に示したように 6 年 A 組は改修工事が行われ、窓・換気扇共に取り替えられている。5 年 A 組は窓のタイプはほぼ同様であるが、改修は施されていない。また、F 小学校と同様に、T 小学校の教室にベランダはなく窓 1～4 には転落防止用の手すり取り付けられている。

Y 小学校 6 年 A 組教室の窓は、図 11～13 と若干細部は異なるがほぼ同様のタイプであり、改修が施され換気扇も取り替えられている。尚、窓面方位は南南東であり、ベランダが設置されている。

上述の三教室全てにおいて、外気に面した上部窓 1、2 の開放は年間を通して行われなかった。

3-2-2. T 小学校・Y 小学校各教室の夏季及び秋季の換気方法

児童の手が届かない上段の窓 (T 小学校の一部時間帯で上窓 5、6

図 11 T 小学校 6 年 A 組教室の西側窓立面図-教室から外気側

図 12 T 小学校 6 年 A 組教室の廊下側窓立面図-教室から廊下側

図 13 T 小学校 6 年 A 組の廊下外(東)側窓立面図-廊下から外気側

なども開放)を除き、開口部は全て開放されていた。換気扇は三つの教室全てで使用されなかった。

3-2-3. T 小学校の各教室における冬季の換気方法与教室気温

図 14 に 6 年 A 組、図 15 に 5 年 A 組の、冬季実測日における開口部開閉状況及び換気扇使用状況を示す。図 16 に二つの教室の教室気温と外気温の経時変化、表 5 に鹿児島地方気象台における実測日各時刻の全天日射量を示す。

教室窓の開放度は、登校中である 8 時頃から「朝の会」を行っている 9 時にかけて、二教室共にほぼ同様であり、西側外気に面した窓も開放されている。その時点の外気温は 5～7℃と低いため、教室気温は二教室共に 9～10℃である。

6 年 A 組は 1 校時と 3 校時に不在、5 年 A 組は 2 校時と 3 校時に不在の状態であった。5 年 A 組では 1 校時在室時、6 年 A 組では 2 校時在室時に共に、外気に面した窓 1、2 の開放がなされた状態であったが、室温は共に 3～4℃上昇し、授業終了時に外気温より 4.5～6℃高い 13℃となった。不在時には、6 年 A 組は換気扇を稼働し、窓 5、6、戸 1、2 を開放していた。一方、5 年 A 組は不在時に外気に面した全ての窓も開放を行っていたので、教室気温の低下度は 6 年 A 組より 1.5℃程度大きく、教室気温も低くなっている。しかし、外気温より 2℃程度高い状態を保っている。

4 校時以降においても、5 年 A 組の窓の開放度は非常に高い一方、6 年 A 組では、休憩時間や掃除時間帯においても外気に面した窓の

図 14 T 小学校 6 年 A 組 冬季の開閉状況及び換気扇使用状況

図 15 T 小学校 5 年 A 組 冬季の開閉状況及び換気扇使用状況

図 16 冬季のT小学校6年A組及び5年A組の教室気温と外気温

表5 鹿児島地方気象台によるT小学校冬季実測日(1/30:晴れ一時雨)の全天日射量

時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
全天日射量 (MJ/m ²)	0.07	0.64	1.04	1.83	1.62	1.51	1.83	1.19	0.51

図 17 Y 小学校 6 年 A 組 冬季の開閉状況及び換気扇使用状況

図 18 冬季のY小学校6年A組の教室気温と外気温

表6 鹿児島地方気象台によるY小学校冬季実測日(2/14:晴れ)の全天日射量

時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
全天日射量 (MJ/m ²)	0.22	0.97	1.70	2.23	2.55	2.70	2.62	1.63	1.54

開放度が低い。外気温が最高で 10℃程度で、非暖房状態の教室気温は、換気方法により差がみられた。児童在室時の教室気温は、換気扇を使用せず外気に面した開口部の開放も全面的に行っていた 5 年 A 組で 10～14℃、換気扇を稼動し外気に面した開口部の開放を行っていない時間帯の 6 年 A 組で 13～17℃であった。

3-2-4. Y 小学校 6 年 A 組教室における冬季の換気方法与教室気温

図 17 に 6 年 A 組の冬季実測日における開口部開閉状況及び換気扇使用状況を、図 18 に教室気温と外気温の経時変化を示す。表 6 に鹿児島地方気象台における実測日各時刻の全天日射量を示す。

6 年 A 組教室では始業時から換気扇が稼動していた。2 校時目の途中である 10 時 10 分に体育館に移動した際に換気扇が停止され、教室に在室した 3 校時から給食終了時まで再び稼動した。これは、換気扇のスイッチが教室照明のスイッチと同じ出入り口位置に配置されていることから、照明と同様、教室不在時に換気扇を OFF にし、在室時に ON にしたためである。

表7 二酸化炭素濃度及び換気回数に関する学校環境衛生の基準²⁾

二酸化炭素濃度	換気の基準として、室内は1500ppm(0.15%)以下であることが望ましい。
換気	換気回数は、40人在室、容積180m ³ の場合、幼稚園・小学校においては、2.2回/時以上、中学校においては、3.2回/時以上、高等学校においては、4.4回/時以上を基準とする。

しかし、開口部の開放を積極的に行う様子はみられなかった。

午前中の授業時の教室内気温は14℃から上昇を続け、4校時終了時には18℃と、外気温より8～9℃程度高く、外気温が同程度であった三教室の中で室温が最も高い。その理由として以下のことが考えられる。一つには、午前中に教室を不在とした時間が他の教室と比べて短く、不在時には開口部も全て閉鎖していたことから、教室気温が低下していない。また、授業間の休憩時間においても、教室の出入り以外は開口部の開放がほとんど行われず、10分休憩時の気温の低下も1℃弱に留まっている。さらに、Y小学校実測日は晴天で、冬季の三実測日の中で全天日射量が最も多かったことから、教室の温熱環境に放射の影響があったことも考えられる。

3-3. 開口部を全て閉鎖した場合のCO₂濃度、気温及び絶対湿度

図9の10時20分からの開口部を全て閉鎖した時間帯にトレーサーガス濃度減衰法により求めた換気回数は1.52回/時であり、CO₂濃度は500ppmから経時上昇し100分後の12時には2500ppmに達している。非暖房状態での教室のCO₂濃度を測定している他の研究報告^{4) 5)}と同様にCO₂濃度は高かった。冬季に開口部を閉鎖した状態の教室内では、CO₂濃度を「学校環境衛生の基準」で望ましいとされている1500ppm以下(表7)に保つことは難しい。通常の授業時間を45分間とすると、60%の時間において室内CO₂濃度が1500ppmを越えていたことになる。

また、図10をみると、開口部を閉鎖している間、教室気温は上昇し続け、12時20分には約19℃となり、外気温より5～6℃高い。同時に、教室内絶対湿度は7g/kgから9g/kgに上昇している。

3-4. 換気扇及び換気口の使用状況の相違による換気回数

F小学校冬季実測日の14時18分以降は、筆者らが開口部開閉及び換気扇稼働状態を制御し換気回数を測定した。表8、図8、図9の丸で囲んだ数字は換気扇の稼働状況と開口部開閉のパターンを表し、表8には、そのパターンに応じた換気回数の実測値を示す。

開口部を全て閉鎖し換気扇を稼働させたパターン②では換気回数が3.1回/時であった。上部換気口を開放して換気扇を稼働させたパターン①での換気回数は、パターン②の約2倍の5.4～6.3回/時であった。児童の下校時間帯であったパターン④では、パターン①に加え、さらに窓5、6、戸1、2が開放されたため、換気回数はより多くなっていた。開口部を全て閉鎖し換気扇を停止したパターン③は0.8回/時であった。石川ら⁶⁾によると、換気回数は、開口部を全て閉じた状態で1.0回/時で、廊下側高窓を1ヶ所開けると2.3回/時と、換気量が2.3倍となったことが報告されている。本実測の結果から、2台の換気扇による換気効果は、より大きいことが確認された。

表8 開口部開閉状態及び換気扇使用状態の相違による換気回数

パターン	換気扇	開口した開口部	換気回数測定結果
①及び①'	稼働	換気口1、2、4	5.4回/時、6.3回/時
②	稼働	全閉鎖	3.1回/時
③	停止	全閉鎖	0.8回/時
④	稼働	換気口1、2、4、窓5、6、戸1、2	6.9回/時

4. 考察

4-1. 児童からのCO₂呼出量の算定

図9の10時20分からのCO₂濃度は、児童が41人在室し、開口部を全て閉鎖した状態での上昇を表している。尚、この時間帯は自習時間であり、教師の常時の在室は無かった。ここで、CO₂相対濃度の経時変化、及びこの時間帯に測定したトレーサーガス濃度減衰法の結果により、室内のCO₂発生量を算定した。時間tにおける室内CO₂相対濃度C(t)は以下のザイデルの式で求められる。

$$C(t) = \frac{M}{Q} (1 - e^{-Nqt}) \quad (1)$$

ここで、

C(t): 室内のCO₂相対濃度 [-]

M: 室内のCO₂発生量 [m³/h] Q: 換気量 [m³/h]

N: 換気回数 [h⁻¹]

t: 開口部閉鎖からの経過時間 [h]

式(1)において、換気回数Nに、トレーサーガス濃度減衰法で求めた値を代入し、換気量Qに換気回数に教室容積を掛けた値を代入して、経過時間tと相対濃度C(t)の実測値から最小自乗近似法を用いて、室内CO₂発生量Mを求めた。最小自乗近似法で求めたCO₂発生量Mの値は0.59m³/hとなり(相関係数r=0.98)、小学6年生児童一人当たり0.014m³/h(14L/h)のCO₂を呼出していることになる。

4-2. CO₂呼出量既存値との比較

JIS⁷⁾では、成年男子の呼出するCO₂呼出量は着座事務作業において0.0129～0.0230m³/hとされ、備考に、女子はその値の90%、児童はその値の50%程度にとると示されている。「『学校環境衛生の基準』解説」³⁾には、JISでは大人の場合しか示されていないと述べられ、高校生は大人と同じ0.022m³/hとし、小学生(幼稚園生を含む)は大人の1/2で0.011m³/h程度、中学生は大人の3/4として0.016m³/hの呼出量とする、と説明されている。また、建築学体系⁸⁾によると、成人男子一人当たりのCO₂呼出量は極軽作業時に0.0129～0.0230m³/hで計算採用呼出量を0.022m³/hとし、児童は成人の40～70%であり平均50%としてよい、と記述されている。

CO₂呼出量はHoughton *et al.*⁹⁾に従えば、体軀の体表面積に比例するとされている。そこで、児童・生徒の各学年の体表面積と4-1節で求めた小学6年生のCO₂呼出量の値を用いて、成人と小学1年生のCO₂呼出量を試算することにする。各学年の体表面積は文部科学省学校保健統計調査の資料¹⁰⁾を基にDuBoisの式¹¹⁾によって算定した。さらに高校3年生男子の体表面積を成人男子のものとし、各学年の体表面積の成人男子に対する比率を試算した。その結果を表9に示す。小学6年生体表面積の成人男子に対する比率は時代とともに大きくなっており、平成13年に約73.5%となっている。この比率と本

表9 各年齢児童・生徒の体表面積が17歳生徒の体表面積に占める比率及び各年齢児童・生徒の男女比

	各年齢の体表面積が17歳の体表面積に占める比率								体表面積男女比(女/男)			
	5歳/17歳		6歳/17歳*		11歳/17歳		13歳/17歳		6歳	11歳	13歳	17歳
	男子	女子	男子	女子	男子	女子	男子	女子	小学1年生	小学6年生	中学2年生	高校3年生
S23年	0.46	0.45	0.48	0.48	0.66	0.67	0.76	0.78	0.98	1.00	1.02	0.94
S40年	0.45	0.44	0.48	0.47	0.68	0.70	0.82	0.82	0.98	1.03	1.01	0.90
S60年	0.45	0.44	0.48	0.48	0.71	0.73	0.85	0.83	0.99	1.03	0.98	0.89
H13年	0.44	0.43	0.48	0.48	0.73	0.74	0.87	0.83	0.99	1.02	0.96	0.88

* 6歳の児童の体表面積と17歳男子の体表面積の比を表す。

図19 換気回数の実測値から算出した、開口部開閉状態及び換気扇使用状態に応じたCO₂の推定濃度

実測より求めた小学6年生のCO₂呼出量0.014 m³/hを用いて成人のCO₂呼出量を逆算すると0.019 m³/hとなった。小学1年生と成人の比率は表より48%であるので、成人の発生量を0.019 m³/hと考えると小学1年生の呼出量は0.009 m³/hとなる。

「学校環境衛生の基準」解説」が示す小学生の0.011 m³/hというCO₂呼出量は幼稚園生を含む小学生の平均的な値と考えられる。この呼出量を用いて小学校教室の換気回数をCO₂濃度測定値から算定する場合、高学年教室では、実際よりも少なめの呼出量を仮定しているため、換気回数がやや少なく見積もられることになる。

4-3. 換気方法の相違による換気回数と推定CO₂濃度

実測値から算出した6年生児童のCO₂呼出量:0.014 m³/hと、表8に示した換気扇使用及び開口部開閉のパターン別の換気回数実測値を元に、計算したCO₂濃度の上昇を図19に示す。

外気のCO₂濃度は冬季実測値平均値である435 ppmとし、児童数は40人とした。その場合、パターン③(換気扇停止、開口部全閉鎖)の換気回数をあてはめると、CO₂濃度は23分後に1500 ppm、45分後に約2260 ppmに達することが推定される。10分の休憩時間の間に十分な換気が行われない場合、図9に示した実測結果にもみられるように、CO₂濃度はさらに上昇することになる。一方、換気扇のみ稼働させたパターン②では15分後に1000 ppm、45分後に1300 ppmに達しているが、1500 ppmは下回っている。換気扇を稼働し、上部換気口を3箇所開放したパターン①では、30分後に1000 ppmに達しているがその後の上昇は小さい。

F小学校冬季の実測結果から、廊下の外気に面した窓の開放を行っていない状態の冬季室内CO₂濃度の最低値は500ppmであった。このことを考慮し、初期濃度と外気濃度を共に500ppmとした場合の

パターン②のCO₂濃度推定結果も図19に示す。この場合も授業終了時の45分後に1500 ppmを下回る結果となった。

いずれも、低学年教室あるいは児童数が少ない程、CO₂濃度はより低い値に保たれる。しかし、児童が40人在室している6年生教室で、CO₂濃度を、45分後に1500ppm以下に抑えるためには約3回/時、1000ppm以下に抑えるためには5.5回/時の換気回数が必要となる。

4-4. 空気環境・温熱環境の両側面から検討した普通教室の冬季授業時における換気方法 一温暖地域の鹿児島市の場合

南方に位置し比較的温暖である鹿児島市においても、冬季には外気温が一日を通して低い日がある。T小学校5年A組の場合には、外気温が10℃程度の実測日において、外気に面した開口部の開放も積極的に行っていたため、児童着席時の教室内気温は10～14℃であった。その際、外出用防寒着を着て着衣による調節を行った児童も見受けられた。着席して代謝量の低い状態である児童にとって、寒さを感じさせない程度の温熱環境を保つことは重要である。

児童が教室に在室し、換気扇を稼働した状態の教室内気温(Y小学校6年A組)は、教室と廊下の間の窓3を開放している場合においても17～18℃程度となっており、外気温(9℃)よりもかなり高い値であった。よって、換気扇稼働による室温低下は大きくないと考えられる。換気扇の稼働に加え、教室と廊下の間の開口部開放度が大きい状態では(T小学校6年A組)、換気による熱損失が相対的にやや大きく、児童在室時の教室内気温は17℃を最高として、それより低い気温であった(外気温10℃)。

以上の結果から、冬季授業時には、開口部を閉鎖した状態で換気扇を用いた換気を行うことによって、CO₂濃度を1500ppm以下に保つことができると同時に、外気温が10℃程度の日においても18℃程度の室温は得られると考えられる。

4-5. 普通教室における冬季の空気環境管理 一鹿児島市の場合

比較的温暖であったF小学校の実測日でも廊下の外気に面した窓の開放は行われていない。T小学校やY小学校では、換気扇を稼働することにより、窓の開放を行わない傾向がみられ、特に外気に面した窓に関してはその傾向が顕著であった。しかし、冬季に教室へ流入する空気は、屋外の新鮮な空気だけではない。本報その1の結果では、トイレ内の防臭剤から発生したパラジクロロベンゼンが教室へ流入し、冬季の教室のパラジクロロベンゼン濃度は他の季節より高い傾向もみられた。このように廊下から流入する空気には屋内で汚染された空気も含まれていることから、発生源の除去をできる限り行うと共に、屋外から新鮮外気の導入を行う換気は必要である。

冬季に教室の窓開け換気を行った際、屋外風の条件によっても異なったが、8回/時あるいは22回/時の換気回数が得られた(図9)。教室気温は一時的に低下することになるが、掃除時間、休み時間、及び特別教室等への移動時間を利用した窓開け換気を行うことが望ましい。あるいは、換気扇の稼働と共に、教室と廊下の間の上部窓、及び廊下の外気に面した窓を開放し屋外から空気の導入をはかり、換気を行うことも効果的である。

鹿児島市内における、外気温の低い日の教室の換気法として、授業時には開口部を閉鎖した状態で換気扇による換気を行い、掃除時間や教室不在時を中心とした時間帯には、外気を導入する換気を行うことが有効である。また、空気環境に関する日常的な管理法としては、換気扇の稼動などの実施状況を点検することで、容易に空気質の維持・管理を行えると考えられる。

4-6. 換気扇使用調査からみた換気扇整備の際の児童への配慮

冬季に換気扇を用いて換気を行っていた教室は教室の全面改修工事が施され、換気扇も取り替えられている教室であった。Y小学校6年A組の調査結果では、その教室の換気扇が稼動し易いものであることがわかった。一方、換気扇が使用されていない教室の換気扇は、ひもを引っ張ることで作動及び停止を行うタイプのものである。換気扇が使用されない理由としては、大人の手さえも届かない上方にひもがあること、換気扇及びひもが老朽化していること、が考えられる。

ベランダのない窓面は児童にとって特に危険性が大きい。転落を回避するために転落防止用の手すりを取り付けたり、上部窓の開閉を行わないようにしたりしている。外気側窓面上方のひもを用いてON/OFFを行う換気扇は降灰対策のため昭和53年～54年に付けられたものであり、児童に換気扇を作動させることを想定していなかったと思われる。高学年児童は空気環境を良好に保つ必要性を理解し、自ら換気を行うことも可能である。換気扇の整備と共に児童が換気扇を容易に稼動できる、スイッチの位置に関する配慮も必要である。

5. まとめ

冷暖房設備をもたない鹿児島市内の小学校普通教室において、開口部開閉状況と換気扇使用状況を調査すると共に、CO₂濃度、換気回数及び室温の測定を行い、実態の把握を行った。その結果をふまえ、既存設備である換気扇の有効活用を提案した。以下に結果をまとめた。

- 1) 児童らは、夏季においては開口部開放を優先しているが、気温の低下する秋季においては教室と廊下側の開口部の開閉を状況に応じて頻繁に行っている。夏季及び秋季には、四教室全ての開口部の開放度は非常に高く、CO₂濃度は概ね1000ppm以下に保たれていた。秋季には換気口が有効な役割を果たしている。
- 2) 冬季のF小学校6年A組においては、開口部を全て閉鎖した状態で、換気回数は1.52回/時程度となり、児童数41人で、45分間の授業終了時に室内CO₂濃度は約2000ppmを越えていた。10分休憩の間に窓開放による十分な換気が行われない場合、さらに上昇した。
- 3) 開口部を全て閉鎖した状態においても、2台の換気扇を稼動することにより、3回/時以上の換気回数が得られた。しかし、換気扇を用いて換気を行う場合、外部に面した窓の窓開け換気を積極的に行わない傾向がみられた。
- 4) 外気温が9～10℃程度で、大部分の開口部を閉鎖し換気扇による換気を行った場合、換気扇稼動による室温低下は小さくなく、児童在室状態における定常の教室気温は概ね16～18℃であった。一方、外気に面した開口部の開放も行っていた場合の児童在室時教室気温

は外気温より3℃高い程度であった。

- 5) 6年生児童一人当たりのCO₂呼出量をトレーサガスによる換気回数の測定から算定したところ、0.014 m³/hとなった。この呼出量を基に算定した小学6年生教室の必要換気回数は、CO₂濃度の基準を1500ppmとすると約3回/時、1000ppmとすると5.5回/時となった。

- 6) 冬季の実測教室において、開口部閉鎖状態で2台の換気扇を用いて換気を行うことにより、「学校環境衛生の基準」による教室のCO₂濃度の基準を満たす換気量が確保されると同時に、授業時の温熱環境を改善できることが確認された。

謝辞

本研究を行うに当たりまして、実測調査に快くご協力いただきました小学校関係者及び児童の方々に心より謝意を申し上げます。尚、本研究は平成12年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号12750533、研究代表者：岩下 剛)の研究の一部である。本実測の実施は、当時鹿児島大学学生であった上野公紀氏、地福亜希子氏、鹿児島大学大学院生の尾山秀平氏の労によるところが大きい。

注：夏季・秋季においては、廊下の外気に面した窓は全て開放されていた。よって、廊下の空気質は外気と等しいと考えられたため、測定された換気回数は新鮮外気による換気効果をもつと考えられる。一方、冬季においては廊下の外気に面した窓は閉じられているため、廊下の空気質を一概に外気と等しいと仮定はできない。今回のトレーサガス減衰法では流入空気における新鮮外気と廊下空気との比率が明確でないため、廊下の空気質が劣悪であると、測定された換気回数に相当する希釈効果が得られない可能性がある。しかし、その差はCO₂濃度という観点からみると大きくないと考え、一部廊下の空気を含んだ外気で室内空気を希釈する効果は、外気で室内空気を希釈する場合とほぼ等しいと仮定した。しかし、廊下空気に高濃度の汚染物質が含まれる場合、トレーサガス囲い込み法等の換気測定法を用いて、実質の新鮮外気導入量を算定することが重要である。

参考文献

- 1) 合原妙美、岩下剛、鹿児島市内の小学校における室内空気環境実測、その1 小学校教室における揮発性有機化合物の濃度、日本建築学会計画系論文集NO.553, pp. 63-70, 2002.3
- 2) 「学校環境衛生の基準」の改定について、
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/14/02/020202.htm
- 3) 日本学校薬剤師会編、「学校環境衛生の基準」解説、薬事日報社、1995
- 4) 齊藤基之、石井昭夫、塩月義隆、北山広樹、教室環境の実態に関する調査研究、その4 教室の二酸化炭素濃度と換気について、日本建築学会九州支部研究報告第40号、pp. 149-152, 2001
- 5) 梅干野晃、朝倉由香里、小学校教室における非暖房時の熱環境(川崎市立k小学校における実測及びアンケート調査)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 905-906, 1990
- 6) 石川善美、長友宗重、伊藤直明、吉野博、山本頼房、小・中学校における教室の気密性能と換気量に関する実測、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 601-602, 1989
- 7) JIS A 1406、屋内換気量測定方法(炭酸ガス法)、1974
- 8) 建築学大系編集委員会、建築学大系22 室内環境計画、彰国社、1976
- 9) F.C.Houghten, H.H.Trimble, Carl Gutberlet and Merle F. Lichtenfels, Classroom odors with reduced outside air supply, Heating-Piping and Air Conditioning, pp. 247-252, 1935. 5
- 10) 文部科学省学校保健統計調査資料、
http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/index.htm
- 11) 中山昭雄編、温熱生理学、理工学社、1981

(2002年1月9日原稿受理、2002年6月13日採用決定)