

室内CO₂濃度とTVOC濃度制御による省エネルギー対策の検証

川上 梨沙 山口 一 田中 勲 大塚 俊裕 富岡 一之 後藤 昌秀
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Verification of the energy conservation by air-conditioning control

-Field survey about indoor CO₂ and TVOC concentration-

by Risa Kawakami, Makoto Yamaguchi, Isao Tanaka, Toshihiro Otsuka,
Kazuyuki Tomioka and Masahide Goto

Abstract

In the office building, we have to maintain indoor air quality (IAQ, for example, carbon dioxide and total volatile organic compounds) good for occupants' health, although reduce the amount of fresh air on air-conditioning for saving power and energy and reducing carbon dioxide emission. This paper reports the trend of IAQ with changing the amount of fresh air or supply air in the office by actual measurement, in order to clarify the method of keeping up both IAQ and saving energy.

概要

事務所ビルにおける省エネルギー対策および二酸化炭素(CO₂)排出量削減の一つとして、室内CO₂濃度を指標として外気導入量を制御し、冷暖房負荷の削減を図る手法がある。しかしCO₂濃度を指標とするだけでは、CO₂とは異なる発生源を持ち、異なる濃度変化をする物質による室内空気質の低下を招く懸念がある。本報では、室内CO₂濃度と共に人体への健康影響を考慮した室内空気質の指標として用いられるVOC(揮発性有機化合物)の総量(TVOC濃度)と、外気導入量・給気風量に対する関係について明らかにするため、既存の事務所ビルでの模擬実験や、実際の執務中における長期測定を行った。また今回の結果から、室内CO₂濃度とTVOC濃度の両方を計測・管理する空調制御方法を提案した。

§1.はじめに

現在、室内空気質の保全是、建築物衛生法(旧ビル管法)で定められた室内CO₂濃度1,000[ppm]¹⁾を基準として図られている。近年、建物のZEB(Zero Energy Building)化を目標とした省エネ化、すなわち未利用エネルギーの活用、外気負荷の削減、高効率熱源・照明・空調の利用などが進められている。これらのうち具体的な外気負荷削減対策の一つとして、室内CO₂濃度を総合指標とした外気導入量の制御が行われることが多い。

しかし、室内CO₂濃度による空調制御だけでは、CO₂とは異なる濃度変化を示す別の汚染物質、例えばTVOCの発生によって室内空気質の悪化を招く可能性がある。通常の事務所ビル内でのCO₂の発生源は人間の呼気、揮発性有機化合物類(TVOC)の発生源は、主に建材や施工材、備品や什器、執務者が使用する日用品などである。これらの発

生源強度と外気導入量によって室内のCO₂やTVOCの濃度は決まる。つまり、外気導入量とCO₂濃度だけでなく、少なくともTVOC濃度の実態調査を通じて省エネと空気質を両立させるための空調制御を求めることは、地球環境と室内環境を良好に維持するために必要であろう。

本研究では、室内CO₂濃度およびTVOC濃度を考慮した空調制御を検討するため、吹出(給気)風量と外気導入量を変化させ、室内CO₂濃度と室内TVOC濃度を計測する「オフィス空間における再現実験」と、通常の勤務状態の中で実際の人員密度と空調制御による室内CO₂濃度やTVOC濃度の変化を継続的にモニタリングする「実オフィス環境におけるケーススタディー」を行った。

§2.オフィス空間における再現実験

2.1 実験概要

実験は既存事務所内にて2011年9月17日(土)に行った。図-1に実験対象室の平面図を示す。床面積は約75[m²]、天井高は2,420[mm]である。給気口としてアネモ丸型多層コーンが2箇所あり、照明ボックス裏のスリットより天井排気を行っている。

表-1に測定項目の概要を示す。測定は、空気温度、相対湿度、風速、CO₂濃度、TVOC濃度^(注1)の5項目とし、室内では床から天井までポールを立て(写真-1)、床上50、1,000、1,900[mm]の高さに測定機器(表-1、写真-2)を設置して観測データの上下分布を把握した。また、水平分布の把握のため、ペリメータ(A点)とインテリア(B点)にポールを1本ずつ設置した。さらに、機械室のOAダクト内空気を外気の代替とし、また、給気口付近の空気をRAを含むSAとして其々空気温湿度、風速、CO₂濃度を測定し、空調状態の確認を行った。なお、TVOCセンサの出力値の単位は電圧[V]だが、以後の図表では濃度[μg/m³]に換算^(注2)して示す。

2.2 CO₂発生方法と空調設定

実験は執務者のいない休日に行い、人の呼吸より

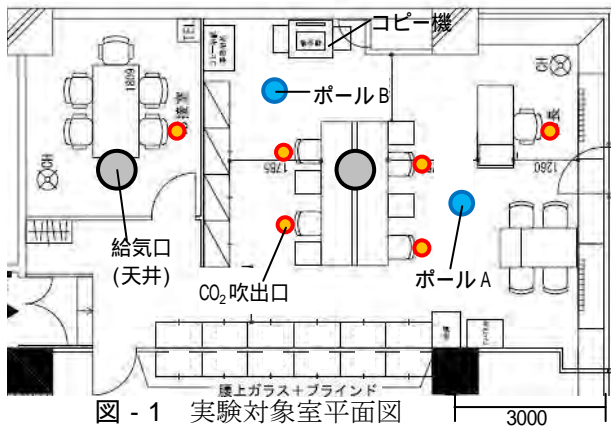


図-1 実験対象室平面図

表-1 測定項目概要

実験対象室			
場所	測定項目	床上高さ [mm]	測定機器 (メーカー)
ポールA ポールB	温度	50	T型熱電対
		1000 1900	
	湿度	1000	Thermo Recorder TR72-U(T&D)
	CO ₂	1000 1900	M5001-00(CHINO)
	TVOC	1000 1900	TVOCセンサ
給気口	風速	1000	多点風速計 (KANOMAX)
		1900	
		2400	T型熱電対
		2400	CO ₂ レコーダTR-76Ui (T&D)
OA'外 (外気)	風速	2400	CO ₂ レコーダTR-76Ui (T&D)
		2400	多点風速計 (KANOMAX)
		-	T型熱電対
		-	Thermo Recorder TR72-U(T&D)
機械室	CO ₂	-	M5001-00(CHINO)
		-	TVOCセンサ
		-	T型熱電対
		-	Thermo Recorder TR72-U(T&D)
OA'外 (外気)	TVOC	-	TVOCセンサ
		-	Thermo Recorder TR72-U(T&D)
		-	M5001-00(CHINO)
		-	T型熱電対

備考: データロガー: CADAC21(江藤電機) メインユニット9201A×1台 スタンユニット9221A×2台
多点風速計: (KANOMAX) SYSTEM6242×1台 プローブ 0965-03×8本 出力モジュール1510×2枚
測定インターバル: 1分 注)湿度のみ10分

発生するCO₂をCO₂ガスのドーズー(INOVA社製)を用いて模擬発生させた。CO₂発生量は、人員密度0.152[人/m²]、呼気中CO₂量20[l/(hr・人)](事務作業時)とした^(注2)。図-1にCO₂の模擬発生位置(①~⑥)を示す。試験室内の6箇所CO₂吹出口(チューブ端)を設置し、床上高さは座位時の人の呼吸域と同等の1,150[mm]とした(写真-3)。なお、ガスボンベから供給するCO₂は低温であるため、吹き出したCO₂が室温に影響を与える可能性、または室内上下CO₂濃度差が大きくなる懸念があった。しかし、チューブ長さを十分に取ることにより、26[°C]から28[°C]であった室温に対し、吹き出すCO₂温度が表-2のように室温と同等の28[°C]以上になることを確認した。表-3に各試験の空調制御パターンを示す。空調設定である吹出風量と外気導入量はそれぞれ100[%](通常)、50[%]、25[%]、0[%](停止)の4段

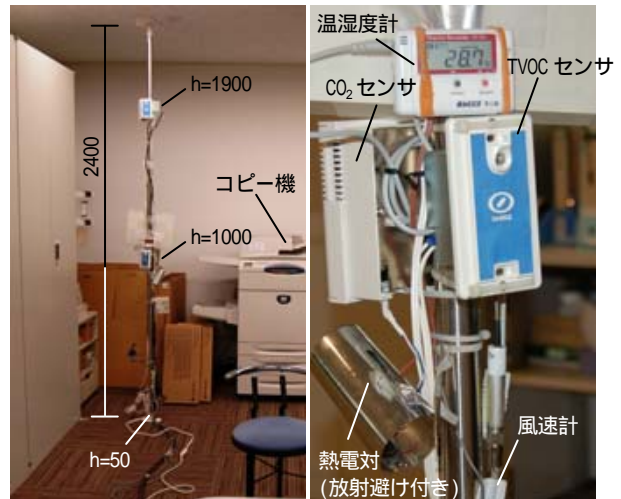


写真-1 測定ポールB

写真-2 測定機器類

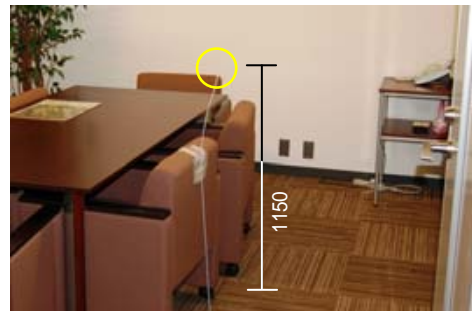


写真-3 CO₂発生位置(応接室)

表-2 CO₂発生量および吹出口温度

発生位置	温度[°C]	発生量[l/hr]
	28.4	8.9
	28.8	27.3
	28.6	25.2
	28.8	27.3
	28.6	23.6
	28.6	112.6
合計	-	225.0

表 - 3 空調制御パターン

試験	吹出風量 ¹⁾	外気導入量 ¹⁾	CO ₂ 発生	試験時間
Ext.1	100%	100%	無し	10:35-11:10
Ext.2	100%	100%	有り	11:53-13:20
Ext.3	100%	50%	有り	13:20-14:37
Ext.4	100%	25%	有り	14:37-16:23
Ext.5	50%	25%	有り	16:23-17:30
Ext.6	25%	25%	有り	17:30-18:37
Ext.7	0%	0%	有り	18:37-19:00

1)吹出風量 100%は 112.5[CMH/人]、外気導入量 100%は 31.57[CMH/人]である。

階を組み合わせExt.1からExt.7の7パターンとした。各パターンの試験時間は20[分]から100[分]とした。

2.3 実験結果

2.3.1 CO₂濃度変化

図 - 2に室内CO₂濃度の理論値^{注3)}と、実測値の変動を示す。吹出風量および外気導入量を表 - 3の空調制御パターンに沿って変化させた結果、外気導入量の低下に伴い室内CO₂濃度は上昇した。なお、ポールA(h=1,000[mm])では、他の測定点と比べ単位時間における変動が大きい。これは、ポールA(h=1,000[mm])はCO₂吹出口であるチューブ3本(図 - 1の③⑤⑥)から距離が近く、更にチューブ高さ(h=1,150[mm])より測定点が低いため、チューブから吹き出したCO₂の影響を強く受けたことによるものと考えられる。

Ext.2やExt.3では、CO₂濃度の実測値と理論値は近い値となった。一方、Ext.5以降では実測値と理論値の差が生じた。これは、吹出風量が大きく、外気導入量も100[%]、50[%]と大きいExt.2やExt.3では短時間で室内CO₂濃度が定常状態に至る一方、吹出風量を絞ると定常状態に至るまでの時間が大きくなり、CO₂が一樣拡散し難くなったためと考えられる。また、同じく室内一樣拡散が困難になったため、Ext.6ではポールA、B間およびポールAの上下間で水平面・鉛直面でのCO₂濃度分布が生じたと考えられる。

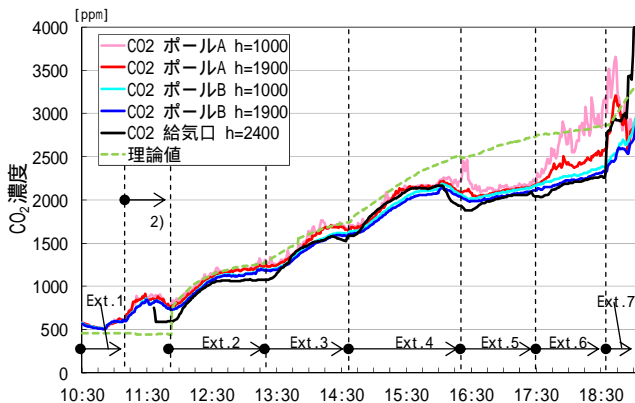


図 - 2 CO₂濃度変動

2) ドーザの暖機運転時間。Ext.2以降のCO₂濃度理論値には暖機中のCO₂発生量を加算して示す。

2.3.2 TVOC濃度変化

図 - 3に室内TVOC濃度の変動を示す。本実験では、在室者がいないため、TVOCの発生源は、建材および什器のみである。Ext.1からExt.6までの各試験時間内でのTVOC濃度は、厚生労働省の暫定目標値400[μg/m³]以下³⁾である100[μg/m³]から200[μg/m³]程度であった。在室者がいないため、人間の動作や所持品によるTVOC濃度の変動が無く、図 - 2に示す室内CO₂濃度と比較すると、空調稼働中の室内TVOC濃度はほぼ一定であると言える。なお、ポールB(h=1,000[mm])のTVOC濃度が他3点よりも50[μg/m³]程度高い原因として、ポールBの近くにあるコピー機(図 - 1、写真 - 1)からのTVOC発生の影響を受けた可能性が考えられる。

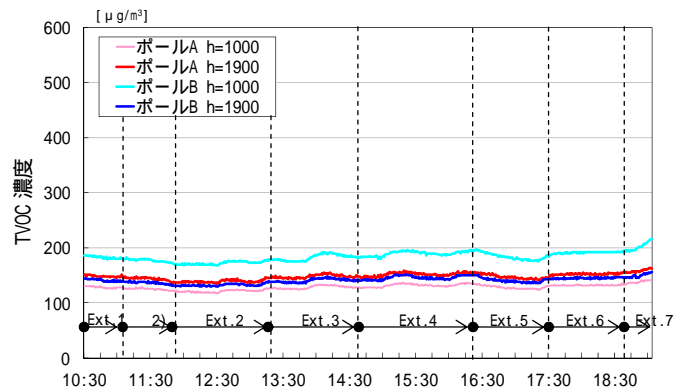


図 - 3 TVOC濃度変動

§3.実オフィス環境におけるケーススタディー

3.1 実オフィスとモニタリングの概要

図 - 4にモニタリング対象とした実オフィスの平面図、写真 - 4に測定機器設置状況を示す。床面積は約600[m²]、天井高2,420[mm]、給排気口は前述した再現実験の実験対象室と同じアネモ丸型多層コーンと天井排気スリットの組み合わせである。モニタリングは2011年9月13日から2011年12月15日

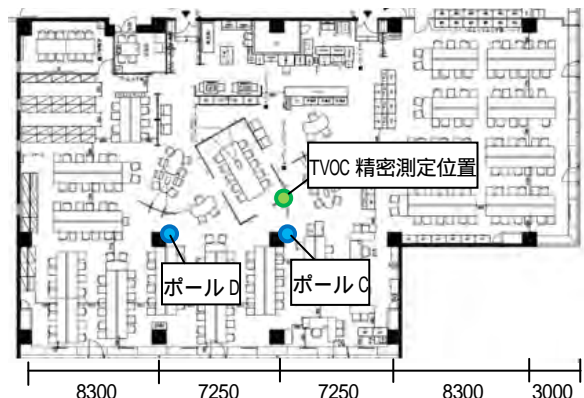


図 - 4 モニタリング対象室平面図

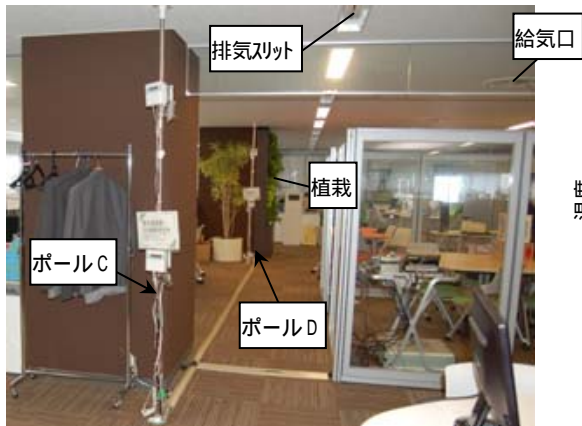


写真 - 4 測定機器設置状況

までの約3カ月間行った。図 - 5にモニタリング期間の平均外気温湿度および室内温湿度を示す。平均外気温が測定期間内に約30[°C]から5[°C]まで変化し、夏期、中間期および冬期にかけての実験データを得ることが出来た。

測定項目は前述した再現実験と同じく5つとし、ポールは2箇所(C、D)に設置した。また、機械室のOAダクト内空気を外気の代替とし、RAを含むSAとして給気口付近で、温湿度と風速を測定した。さらに図 - 4に示す位置にて、室内TVOC濃度の精密測定(GC/TENAX法)を2011年9月27日、10月19日の2回行った。

3.2 空調設定

表 - 4に空調運転スケジュールを示す。モニタリング対象としたオフィスでは、節電対策として勤務時間中の全熱交換機の稼働時間を短く、間欠運転としていた。なお、全熱交換機は停止時も給気経路ダクトのダンパーが「開」の状態となっているため、多少の外気の流入^{注4)}がある。

3.3 モニタリング結果

3.3.1 室内CO₂濃度

図 - 6に、2011年9月13日から12月15日における勤務時間中(平日の9:00から18:00まで)の日平均CO₂濃度を示す。OAダクト内の平均CO₂濃度は500[ppm]から800[ppm]、執務域(h=1,000[mm])における平均CO₂濃度は800[ppm]から1,000[ppm]前後であった。

図 - 7に2011年10月14日の1日のCO₂濃度変化を示す。9:00の始業時刻に、室内CO₂濃度は600[ppm]から800[ppm]まで上昇した。そして、日中の勤務時間における全熱交換機稼働中は、外気の導入があるため室内CO₂濃度は低下し、全熱交換機停止中(12:45~16:15)の室内CO₂濃度は1,000[ppm]前後まで上昇した。18:00以降は空調機を停止したため、在

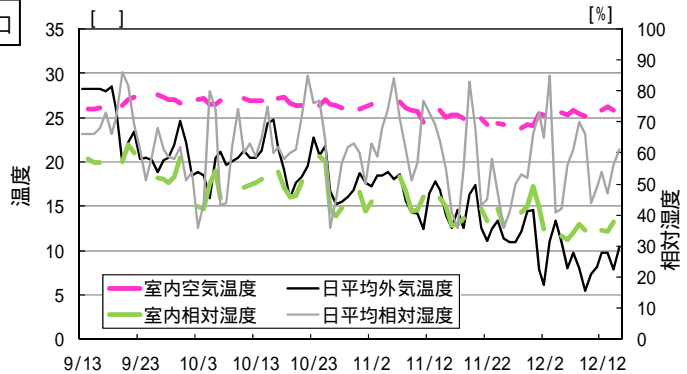


図 - 5 外気・室内空気^{※3)}の平均温湿度

3)室内空気については平日の勤務時間(9時~18時)における平均値を示す。

表 - 4 空調運転スケジュール

	平日	休日
空調機	7:25 - 18:00	停止
全熱交換機	7:00 ~ 8:25、10:15 ~ 11:00 12:00 ~ 12:45、16:15 ~ 18:00	停止
熱交ローター	全熱交換機稼働中、外気が10~15 になった場合 55分停止、5分運転	停止

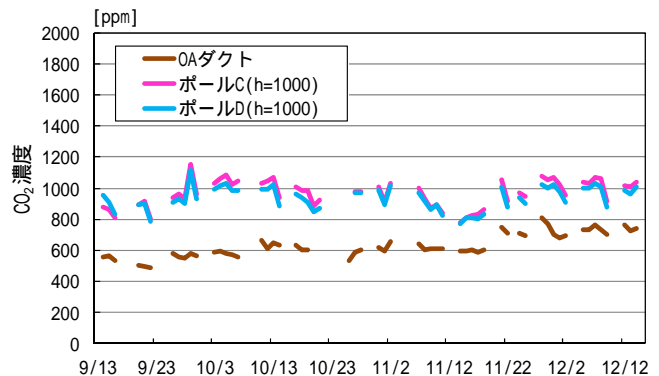


図 - 6 勤務時間中の日平均CO₂濃度

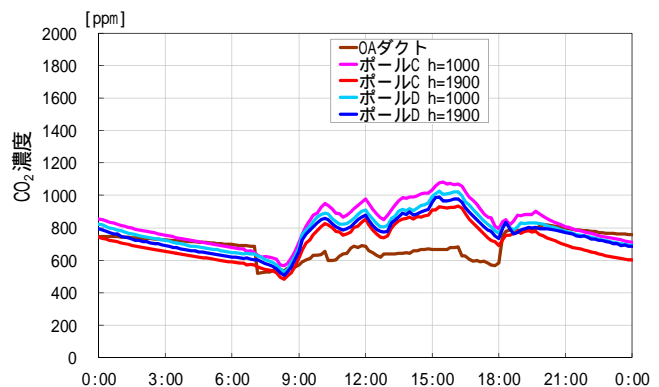


図 - 7 1日のCO₂濃度変動(2011年10月14日)

室者数がいたと推測される時間帯(18:00~19:40)では室内CO₂濃度は上昇したが、その後在室者がいなくなると室内CO₂濃度は徐々に低下し、翌日朝に空調が稼働する前には400[ppm]から600[ppm]程度となった。

3.3.2 室内TVOC濃度

表 - 5に、TVOC濃度の精密測定法の結果と、同時刻におけるTVOCセンサの濃度換算値²⁾を示す。精密測定では室内空気を30分間吸引するため、TVOCセンサ換算値とはその30分間における平均値を示す。精密測定法によるTVOC濃度と、TVOCセンサの示す濃度に大きな差はなく、TVOCセンサが室内のTVOC濃度を概ね正確に捉えていることを確認した。

図 - 8に勤務時間中の日平均TVOC濃度を示す。勤務時間中の執務域(h=1,000[mm])における平均TVOC濃度は、150[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]から400[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]、OAダクト内の平均TVOC濃度は50[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]から200[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]程度となった。

図 - 9に2011年10月14日の1日のTVOC濃度変化を示す。7:00の全熱交換機の稼働開始と共に一旦TVOC濃度は低下するが、9:00の始業時刻前から徐々に在室者が増え、室内TVOC濃度が約250[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]から約350[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]程度まで上昇した。その後、日中の勤務時間における空調機稼働中(7:25~18:00)の室内TVOC濃度は300[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]前後でほぼ一定であった。また、全熱交換機稼働中のTVOC濃度はやや低下したが、図 - 7の室内CO₂濃度と比較すると変化は非常に小さい。なお、夜間において室内TVOC濃度は400[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]を超える場合があった。これは、空調機の停止により主に室内から発生したTVOCが滞留しているためと考えられる。また、空調機の停止によりOAダクト内空気のTVOC濃度が上昇する原因として、室内空気がOAダクト内に逆流した可能性が推測される。

§4.まとめ

オフィス空間における再現実験では、吹出風量や外気導入量を変化させ、室内CO₂濃度やTVOC濃度を測定した。外気導入量が小さくなると室内CO₂濃度は上昇した。また、室内CO₂濃度の実験値は、特に吹出風量が多い場合は定常状態になりやすく、理論値に近い結果となることを確認した。吹出風量が小さくなると、室内空気が一様拡散するまでの時間が長くなり、水平・鉛直面のCO₂濃度差が生じた。

一方、室内TVOC濃度は空調稼働中において100[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]から200[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]程度であり、ほぼ一定であった。

実オフィス環境におけるケーススタディーでは、実際の空調制御と人員密度による室内CO₂濃度やTVOC濃度などの変化を約3カ月間にわたり、継続測定した。本測定期間中の空調運転スケジュールは、

表 - 5 精密測定法濃度とセンサ濃度換算値の比較

	精密測定濃度	TVOCセンサ濃度換算値			
		ボールC		ボールD	
		h=1000	h=1900	h=1000	h=1900
2011/9/27	294	243	287	278	275
2011/10/19	249	253	311	219	282

測定高さ単位[mm]、濃度単位[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

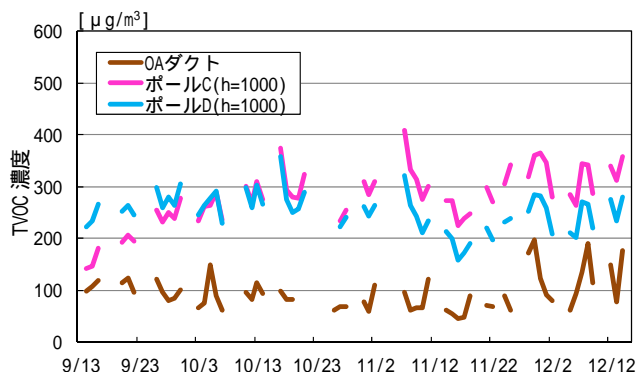


図 - 8 勤務時間中の日平均TVOC濃度

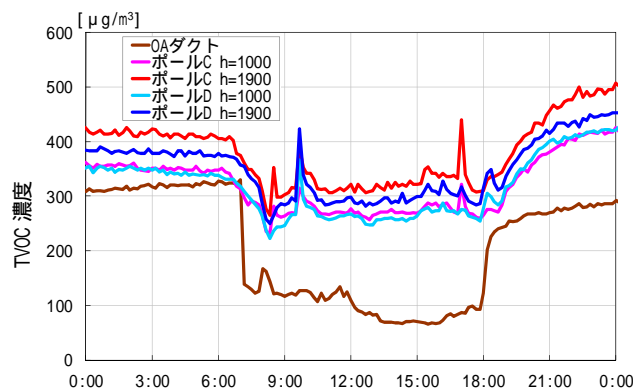


図 - 9 1日のTVOC濃度変動(2011年10月14日)

空調機の稼働が7:25から18:00までの約11時間であるのに対し、節電対策として外気導入のある全熱交換器の稼働は1日4回(合計約4.7時間)の間欠運転とした。そのため、全熱交換器停止時において室内CO₂濃度は建築物衛生法基準濃度1,000[ppm]を超える場合があった。しかし、学校環境衛生基準濃度の1,500[ppm]には達しなかった。一方TVOC濃度は、空調機が停止している夜間や休日に厚生労働省の暫定目標値400[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]を超える場合があったが、平日の勤務時間内においては、空調機の稼働と共にTVOC濃度は低下し、300[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]前後で一定であった。そして全熱交換器の停止時においてTVOC濃度の若干の低下があったものの、CO₂濃度に比べその変化は非常に小さいものであった。

以上のように、本調査における空調制御では室内CO₂濃度とTVOC濃度の変動に相関性は見られなかった。したがって、総合指標である建築物衛生法の基準CO₂濃度による管理だけではなく、例えば当社で開発したTVOCセンサを用いた室内TVOC濃度の管理

を加えることによって、より精度の高い換気制御による室内環境の維持が可能であると考えられる。

注 1) TVOC 濃度の測定装置は清水建設㈱オリジナルの開発品²⁾である。

注 2) CO₂ の模擬発生を実験対象室(図 - 1)および実験対象室と空調系統を共にする隣室(図 - 4 モニタリング対象室)で行った。隣室における CO₂ 発生にはドライアイスを用い、発生量は実験対象室と同じ人員密度 0.152[人/m²]、呼気中 CO₂ 量 20[l/(hr・人)]として計算した。

注 3) CO₂ 濃度理論値の算出において外気の CO₂ 濃度は、OA ダクトでの CO₂ 濃度の実測値を用い、ドーザーからの CO₂ 吹出量を考慮した。

注 4) 本調査では、空調機稼働かつ全熱交換機稼働中に、外気を設計通り導入した。

謝辞

本研究を行うに際しては、東京大学柳沢幸雄名誉教授、成蹊大学野口美由貴氏ならびに東京都立産業技術研究センター水越厚史氏にご指導・ご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令,第二条一イ,建築物環境衛生管理基準.
- 2) 山口一, 富岡一之, 大塚俊裕, 栗原隆, 中山正樹, 眞継常義: “室内空気質の簡易測定法の開発(第 11 報)実建物における室内化学物質モニタリングシステム結果の比較”, 空気調和・衛生工学会学術講演会梗概集 pp.469~472,2007
- 3) 厚生労働省,シックハウス(室内空気汚染)問題に関する検討会, “室内空気汚染に係るガイドライン”