実建物における室内化学物質モニタリングシステムの検証

山口 一¹⁾, 富岡一之¹⁾, 大塚俊裕¹⁾, 中山正樹²⁾, 真継常義²⁾, 竹林芳久³⁾

¹⁾清水建設株式会社技術研究所 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17

²⁾新コスモス電機株式会社 〒532-0036 大阪府大阪市淀川区三津屋中2-5-4

³⁾東北学院大学工学部 〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1

Evaluation of indoor chemical substance monitoring system in office building

Makoto YAMAGUCHI¹⁾, Kazuyuki TOMIOKA¹⁾, Toshihiro OTSUKA¹⁾, Masaki NAKAYAMA²⁾,
Tsuneyoshi MATSUGU²⁾ and Yoshihisa TAKEBAYASHI³⁾

¹⁾Shimizu Corp., 3-4-17, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8530

²⁾New Cosmos Electric Co., Ltd., 2-5-4, Mitsuyanaka, Yodogawa-ku, Osaka, 532-0036

³⁾Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537

要 旨

ホルムアルデヒドやVOC等の室内化学物質によるシックハウス症候群や化学物質過敏症が問題となっている。さらに、最近では省エネルギー対策のため、室内CO₂濃度や在室人数によって外気導入量を制御する手法が注目されている。しかし、外気導入量の減少によって、室内化学物質が増加することを留意する場合は少ない。現在、これらの室内化学物質を測定するには、ガスクロマトグラフや高速液体クロマトグラフ等を用いる必要があり、短時間で簡便に測定結果を得ることは出来ない。また、精度よく室内の化学物質濃度をモニタリングできるシステムも存在しない。我々は、これらの問題点を解消するために、半導体センサを用いた簡易のTVOC測定法を開発し、その成果を既報¹⁻⁴⁾で発表してきた。本報では、2つの実建物に3種類の半導体センサを設置し、各々のセンサの特性を評価し、建物内の化学物質濃度のモニタリングに半導体センサが応用できることを確認し、今後の課題について報告する。

Abstract

Sick house syndrome and multiple chemical sensitivity syndrome caused by indoor chemical substances have become a problem. In addition, energy-saving measures to control the outside air intake rate according to indoor carbon dioxide concentration and the number of occupants have received attention in recent years. However, attention is rarely paid to the increase in indoor chemical concentration due to the decrease in the outside air intake rate. To measure the concentrations of indoor chemical substances, such as formaldehyde and volatile organic compounds (VOC), gas chromatography, high-performance liquid chromatography and other techniques need to be used and it is not easy to obtain measurements in a short time. Further, there are no systems capable of accurately monitoring the concentration of indoor chemical substances. To solve these problems, a simplified method of measuring the concentration of total volatile organic compounds (TVOC) using a semiconductor-based sensor was developed and the development results were presented in the previous report. This paper reports the evaluation results of the characteristics of three types of semiconductor-based sensors installed in two buildings, the results of confirmation that the semiconductor-based sensors could be used for monitoring the concentration of chemical substances in the buildings, and the subjects for future study.

Key words: 半導体センサ (Semiconductor-based sensor), 総揮発性有機化合物 (TVOC; Total volatile organic compounds), 室内空気質 (Indoor air quality), シックハウス症候群 (Sick house syndrome), ニオイセンサ (Odor sensor), 建物モニタリング (Building monitoring)

1. はじめに

室内のホルムアルデヒド (HCHO) や揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds; VOC^{注1)}) による、シックハウス症候群や化学物質過敏症等が問題となっ

ている⁵⁻⁸⁾。これらの問題を解決する場合、ホルムアルデヒドやVOC等の測定やモニタリングを行うことは重要であるが、大別すれば以下の2つの課題が存在すると考えられる。

第1に、室内の化学物質は比較的低濃度であり、ガスクロマトグラフ (GC), ガスクロマトグラフ質

受付: 2010年4月8日 (Received: 8 April 2010)

受理: 2010年6月29日 (Accepted: 29 June 2010)

量分析装置(GC/MS)及び高速液体クロマトグラフ(HPLC)等の精密法によって測定されてきた。これらの方法は精度が高い反面、専門知識や技術が必要であり、専用装置による複雑な分析操作を必要とした。そのため、測定結果を即座に得ること、多量の測定を一度に処理すること、連続して測定すること等が困難であった。

第2に、建築基準法では、ホルムアルデヒド等の室内化学物質対策のため、住宅等では換気回数0.5回/h以上(外気導入量)の機械換気設備の設置を義務付けている。また、オフィスビル等の建物(特定建築物)の必要取入外気(OA)導入量の設計は、建築物衛生法(旧ビル管理法)や建築基準法に則り^{9,10)}、室内CO₂濃度を1,000ppm以下に維持するため、通常は外気導入量を25から30m³/h・人に設定される。しかし最近では、省エネルギーの観点から、室内に設置した人感センサ、画像解析、Radio Frequency Identification(RFID)タグあるいは無線端末等より在室人数を推定したり、CO₂濃度センサにより室内CO₂濃度を直接にモニタリングし¹²⁾、各部屋(各エリア)の冷暖房や照明ばかりでなく外気導入量を制御する手法が広がっている¹¹⁻¹⁴⁾。この手法は、無駄なエネルギーを節約し、たとえば照明で約7%、外気導入量の制限で約13%のCO₂排出量の削減を実現した例もある¹⁴⁾。この中で、外気導入量の制御は、上述したようにCO₂の主な発生源である居住者(執務者)による室内CO₂濃度を基準としており、建材・備品・什器等から放散する種々の化学物質を考慮していない。したがって、CO₂濃度のみを基準に外気導入量を制御すると、室内の化学物質濃度の上昇を引き起こす可能性がある。

我々は、これらの課題を解決するため、VOCを簡便で迅速かつ多量に測定・評価でき、さらに建物内の化学物質濃度をモニタリングできる手法を確立するため、半導体センサによる総揮発性有機化合物(Total VOC; TVOC)の簡易測定法を検討してきた。既に、半導体センサによる化学物質発生源の検出法(原位置測定)、トルエン、キシレン、エチルベンゼン、スチレン(芳香族VOC)

の簡易測定装置及びセンサによるTVOC測定の特性について報告した¹⁴⁾。本報では、2件の実建物での半導体センサによる室内化学物質のモニタリング結果と半導体センサによる室内TVOC濃度モニタリングの可能性について報告する。

2. 実施方法

2-1 実建物の概要

試験対象の2件の建物について、その概観と概要を写真1および表1に示す。建物Aは、平成15年11月に竣工した地上6F、延床面積が約9,600m²の事務所ビルであり、内装も通常の事務所仕様である。建物Bは平成18年7月に竣工した地上3F、延床面積が約300m²で、主用途は倉庫であるが、種々の設備の性

Photo 1 Appearance of the building

Table 1 Outline of the buildings

Building	A	B
Location	Etchujima 3-chome, Koto-ku, Tokyo	
Major uses	Research laboratory (office)	Research laboratory (warehouse)
Year of completion	Nov. 2003	Jul. 2005
Number of stories	6F	3F
Structure	S, partly RC	S
Building area	1,828m ²	136m ²
Total floor area	9,634m ²	298.5m ²
Roof	Deck plate for structural use, thermal insulation, sheet-applied membrane waterproofing	Deck plate for structural use, thermal insulation, asphalt membrane waterproofing
Exterior finishes	Gasket curtain wall, Alstar steel sheet	Galvalume steel sheet
Interior finishes	Floor: GRC free access floor (partly ordinal free access floor) Wall: steel wall, glass, partly gypsum board (with EP finish) Ceiling: flat deck, partly rock wool acoustic board	(2F) Floor: dustproof paint finish Wall: PB Ceiling: deck plate (3F) Floor: P tile Wall: painted calcium silicate board Ceiling: calcium silicate board

能検証を行えるように、2Fの一部に機械室を、3Fに試験用の執務室を設置した。また、室内TVOCも種々の濃度に調整できるように、試験の条件により外気導入量を変化させた。

2-2 半導体センサ

本報で使用するセンサは、ニオイセンサ、空気汚染センサ、VOCセンサの3種類であり、金属酸化物半導体表面でのガスの吸着と反応による電気伝導度変化を、センサ両端の抵抗値変化として測定する半導体センサである。半導体センサは高感度であるが、特定のガスに対する選択性を持たすことが困難である。酸化物半導体材料の選択や触媒添加による表面処理により、これらの欠点を改良した。

ニオイセンサは、酸化スズ表面に塩基性酸化物を添加し、酸化スズが持つ固有の酸化活性の抑制を行い、水素や一酸化炭素等無臭の還元性ガスの感度を抑制し、有臭ガスに高い選択性を持たせ、ニオイに対する高感度を実現させている¹⁵⁾。空気汚染センサは、特定のガスに対する選択性を持たさず、水素及び多種類の有機溶剤に対して高感度である。VOCセンサは、半導体材料に酸化インジウムを用い、ベース出力の湿度依存性を抑制している。さらに、触媒添加により半導体表面の活性制御を行い水素感度を抑制させ、トルエン等のVOCに対する感度を向上させている¹⁶⁾。

VOCのような還元性ガスによるセンサ電気抵抗の変化は、その濃度と指数関数の関係を持ち、一定の濃度範囲において、次式で表すことが可能である。

$$R = KC^n \quad \dots\dots\dots(1)$$

R ：センサ抵抗値、 K 、 n ：定数、 C ：ガス濃度

半導体式センサの反応性は(1)式のように、センサ部の抵抗値で評価するが、センサ部をブリッジ回路等の電気回路に組み込んで使用する場合、抵抗値変化を電気回路の偏差電位として取り出し、電気的出力(V)で評価する。ガス感度 ΔV は清浄空気中での電気的出力を V_0 、ガスがある時の出力値を V_t とすれば式(2)と定義される。

$$\Delta V = V_t - V_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ΔV とガス濃度 C の関係式は、(1)式と同様に次式となる。

$$\Delta V = K' C^{n'} \quad \dots\dots\dots(3)$$

K' 、 n' ：定数

また、(3)式は、半導体センサの値と化学物質濃度の関係を表す次式に変換できる。

$$S = A \times \log_{10} C + B \quad \dots\dots\dots(4)$$

S ：半導体センサの値、 A 、 B ：定数

いま、室内の n 種類の化学物質濃度を C_1 、 C_2 、 $\dots$ 、 C_n とし、各々の物質の単独の半導体センサ値を S_1 、 S_2 、 $\dots$ 、 S_n とする。各々の化学物質濃度(たとえば C_i)をトルエン換算した化学物質濃度(C_{tvoc})に換算し、室内での半導体センサ値(S_{tvoc})とトルエン換算した全濃度には、(4)式から(5)式が成り立つことは既に報告している³⁾。

$$\begin{aligned} S_{tvoc} &= A_t \times \log_{10} C_{tvoc} + B_t \\ &= A_t \times \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\{(A_i \times \log_{10} C_i + B_i - B_t) / A_t\}} + B_t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

A_t 、 B_t ：トルエンの定数

2-3 センサモニタリングユニット

上記の3種類のセンサを、専用ユニットに組込んだ(写真2)。このユニットを建物Aは3Fと4F執務室、4Fリフレッシュコーナー及び6F応接室に、建物Bは2Fと3Fに、各々1個ずつ設置した。図1に4F執務室での2ヵ所のモニタリング位置(測定点)を示し、写真3に建物Aの各所へ設置したセンサユニットを示す。

Photo 2 Sensor and sensor unit

3F,6F also have sensors installed.

Fig.1 Ground plan in 4th FL of Building A

Photo 3 Setting situation of the sensor unit in Building A

2-4 室内化学物質濃度のモニタリング

建物Aの室内の化学物質(TVOC)濃度に応じた各センサの出力(1-5V)を、WEB対応のSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)ソフトを採用したビル管理システムを通じて、中央管理室ばかりでなく、社内ネットワーク上のどのパーソナルコンピュータ(PC)でも、WEBブラウザより本管理システムにアクセスでき、室内の状況がモニタリングできるようにした(図2)。建物Bも同様に社内ネットワークからモニタリングデータを収集した。

Fig.2 Equipment monitoring system route diagram

2-5 室内化学物質濃度の測定

VOCの測定は、Tenax GRに試料空気を通常10 L 捕集し、加熱脱着後、GC(FID〔水素炎イオン化検出器〕、島津製作所GC-17A；キャピラリーカラム：J & W社製ワイドボアカラム125-1035)にて分析・定量した。TVOC濃度は、このGCを使用し、概ねn-ヘキサンからn-ヘキサデカンまでの範囲で検出されたVOCの総量をJIS A1901¹⁷⁾に準拠しトルエン換算した。また、VOC成分の同定は、VOC濃度測定と同様に試料空気を捕集したTenax GRを、GC/MS(島津製作所QP-5000；キャピラリーカラム)にて分析・同定した。

ホルムアルデヒド及びその他カルボニル濃度の測定には、DNPH(2,4-ジニトロフェニルヒドラジン)サンプラ(Waters製)を用いて、22.5 Lの試料空気を捕集し、アセトニトリルで溶媒抽出後、高速液体クロマトグラフ(Hewlett Packard；HP1100)にて分析・定量した。温湿度の測定には、温湿度センサ(おんどとり、TR-72S、ティアンドディ)を用い、連続的にデータを収集した。

2-6 室内化学物質の捕集条件

建物Aでは、機械換気運転前(午前7:00～8:00)に、比較的高濃度の化学物質の空気試料を捕集した。建物Bでは午後13:00～14:00の時間帯で、竣工年の平成18年では機械換気量を調節して種々の化学物質濃度の空気試料を捕集し、平成19年以降は室内化学物質濃度が自然減衰するため機械換気を停止した条件

で捕集した。また、試料空気の捕集位置は床から1.2mで、厚生労働省の方法¹⁸⁾に準じたが、対象建物では捕集前の窓開け換気を実施せず、通常の建物使用条件下での室内空気の捕集とした。

3. 結果

3-1 対象建物の化学物質濃度

建物Aと建物Bは竣工時から年に6回以上、定期的に建物内の室内化学物質濃度を測定してきた。3種類のセンサを設置した建物Aの3F、4Fと6Fの測定結果を図3に、建物Bの2Fと3Fの測定結果を図4に示す。建物Aは、竣工後直ぐに内装の改修等を行ったため、3F執務室は平成16年1月から、6F応接室は平成16年3月からのデータを記載した。竣工時点で、全ての測定箇所のホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、及びVOCの濃度は厚生労働省の指針値¹⁸⁾未満であったが(表2)、夏季には、化学物質濃度が上昇することを確認した。これは、測定が空調稼働前であり、外気(以下OA)の導入がなく室内温度も高いこと、建材ばかりでなく什器・備品からの化学物質の放散が主要な原因と考えられる¹⁹⁾。空調(機械換気)稼働時には、常に室内TVOC濃度は暫定目標値の400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であることを確認している。

建物Bの主用途は倉庫であり、3Fには試験用の執務室はあるが、通常は執務者はいない。また、室内TVOCも種々の濃度に調整できるように、内装材・下地材は通常の製品で施工し、竣工時の平成18年は外気導入量を0回/h、2.6回/h、5.3回/hと変化させ、

Fig.3 TVOC concentration, temperature and relative humidity in Building A (before running air conditioning)
Numerical values in boxes in the drawings are TVOC concentrations of reception room (March 2004).

Fig.4 TVOC concentration, temperature and relative humidity in Building B (before running air conditioning)
Numerical values in boxes in the drawings are TVOC concentrations of 3F (October 2006).

Table 2 Indoor chemical substance concentration in 4th floor of Building A

		[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]							
Measured substance	Measurement Time	2003/11	2004/1	2004/8	2005/2	2005/6	2006/4	2006/8	2007/4
TVOC		322	300	516	79	499	273	238	84
Toluene		27	79	22	16	54	54	11	14
Ethyl benzene		8	6	12	3	8	8	7	3
Xylene		11	12	38	6	20	17	16	4
p-Dichlorobenzene		22	9	—	13	83	36	62	25
Styrene		2	1	6	—	3	2	4	—
Tetradecane		3	2	8	—	2	—	2	—
Formaldehyde		12	8	35	4	26	14	26	14
Acetaldehyde		10	9	1	5	18	2	12	8

—; Not detected

Table 3 Indoor chemical substance concentration in 3rd floor of Building B

		[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]						
Measurement Material	Measurement Time	2006/8	2007/3	2007/8	2008/1	2008/7	2009/1	2009/7
TVOC		9,979	137	1,119	92	1,132	205	661
Toluene		386	19	140	12	154	29	136
Ethyl benzene		99	5	12	2	10	4	7
Xylene		366	8	32	3	28	13	20
p-Dichlorobenzene		381	4	75	—	73	—	53
Styrene		—	—	—	—	—	—	—
Tetradecane		—	—	—	—	—	—	—
Formaldehyde		58	13	145	8	121	5	132
Acetaldehyde		65	8	38	6	45	9	35

—; Not detected

TVOC濃度を最高9,979 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から最低53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ までの濃度範囲に設定した。室内化学物質濃度は年々低減し、平成19年以降は全ての測定箇所のホルムアルデ

ヒド、アセトアルデヒド、及びVOCの濃度は厚生労働省の指針値未満であった(表3)。しかし、夏季にはTVOC濃度は暫定目標値以上となっていたが、

平成19年以降の測定は換気なしの条件であり、建物Bは通常は使用しておらず、換気による低減効果がなかったためと推察できる。

3-2 半導体センサによる室内TVOC濃度のモニタリング

図5に、建物A内に設置した3種類のセンサ値の平成19年4月8日から15日までの変化を示す。通常、平日の8:00から18:00までは就業時間であり、事業用PHS(Personal handyphone system)を用い在館人数の制御を行い、1人当たり25m³/hの外気導入を実施し、室内CO₂濃度を700ppm以下に維持した。外気が導入されTVOC濃度が低下する間は、各センサ値が低下し、空調停止後に上昇することが確認できた。特に4Fと5Fの執務室は、4月10日、12日及び13日の10:00から18:00は外気冷房(1フロア約70m³/分)を実施したためセンサ値は急激に低下したが、6Fの応接室は外気冷房を実施しなかったためセンサ値の急激な低下はなかった。また、4月8日に一過性のセンサのピークが確認できるが、このピークは当日の内

Fig.5 Monitoring of the sensor in Building A
Fresh air cooling applied areas are shown as bars (■).

Fig.6 Monitoring of the sensor in Building A

装の補修工事が原因と考えられる。6Fの応接室では使用時間帯でのみで空調が稼動し、図6でも平成21年3月23日に1度のピークの上昇が確認できた。これは、6Fの応接室で午後に飲食した場合の臭気等をセンサが感知したと考えられる。

このように、今回設置した3種類の半導体センサは、室内の化学物質濃度、換気(OA導入)やオフィス内のイベント等で、各々のセンサの反応性は異なるがよく感知し、室内の化学物質濃度をモニタリングするツールとして応用できることが確認できた。

3-3 外気導入時における半導体センサ値と室内TVOC濃度

年間を通じて、外気導入時における半導体センサ値と室内TVOC濃度を検討した。図7に、建物Aにおける夏季のニオイセンサ値と外気導入量の関係の一例を示す。前述したように、通常は建物Aの執務室では平日は8:00から18:00まで空調が稼動し、外気が導入されTVOC濃度が低下する間はニオイセンサ値は低下し、空調停止後に上昇することが確認できた。図8に、冬季における結果を示す。冬季では、空調稼動前ではTVOC濃度は54μg/m³以下であり、

Fig.7 Relationship of the odor sensor output and ventilation open air volume in Building A (summer time)
The air conditioning operated from 8:30 to 18:00.

Fig.8 Relationship of the odor sensor output and ventilation open air volume in Building A (winter time)
The air conditioning operated from 8:30 to 18:00.

空調稼動後に若干濃度が上昇していた。この現象は、建物Aが幹線道路の近傍に位置しており外気のTVOC濃度が室内より高濃度であること、あるいは本建物が研究所の事務棟で通常より多くのオフィス機器があり、執務時のこれら機器の稼動が主因であると考えられた。センサ値の変化が殆どないのは、TVOCの低濃度域の変化のためと推論できる。図9に、中間期の結果を示す。空調稼動前ではTVOC濃度は $273\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、空調稼動後に $119\mu\text{g}/\text{m}^3$ に低下していた。センサ値は、空調稼動時に若干低下していることが確認できた。

図10に、建物Bの計測例として室内TVOC濃度が高い夏季(平成18年8月29日)のニオイセンサの結果を示す。午前10時から午後7時30分まで空調を稼動した。外気導入の有無によってセンサ値は変動している。空調制御のため室内相対湿度はハンチングし、この湿度変化にセンサが応答しているが、モニタリングに支障はないと判断できる。また、他の2種類のセンサもニオイセンサと同様な反応を示した。

Fig.9 Relationship of the odor sensor output and ventilation open air volume in Building A (spring time)
The air conditioning operated from 8:30 to 18:00.

3-4 室内化学物質濃度とセンサ値との関係

室内の化学物質(TVOC)のモニタリングセンサとして可能性のある半導体センサについて、実際の室内TVOC濃度と3種類のセンサ値の関係を求めた。建物Bにおける竣工時から平成19年5月までの関係を図11から図13に示す。センサの決定係数(R^2)は、ニオイセンサで約0.83, 空気汚れセンサで約0.80, VOCセンサで約0.83となり、室内TVOC濃度のモニ

Fig.11 Relationship of the odor sensor output and TVOC concentration in 2nd and 3rd FL of Building B

Fig.12 Relationship of the air pollution sensor output and TVOC concentration in 2nd and 3rd FL of Building B

Fig.10 Monitoring of the odor sensor in Building B

Fig.13 Relationship of the VOC sensor output and TVOC concentration in 2nd and 3rd FL of Building B

Fig.14 Relationship of the odor sensor output and TVOC concentration in 3rd FL of Building A

タリングとして使用できることが確認できた。今回、センサ値は安定しており経年変化は確認できなかった。但し、3種類のセンサの常用対数の相関式の各定数は異なっており、各センサの感度が異なることを示している。建物Aの竣工時から平成19年までのニオイセンサ値と室内TVOC濃度の関係を図14に示す。決定係数は約0.81であり、建物Bと同様な常用対数の相関式となったが、定数が異なっていた。また、建物Aでもセンサ値は安定しており、経年変化は確認できなかった。

4. 考察

我々は既報において1種類の半導体センサに関し、トルエンや酢酸エチル等の単一の化学物質に対し上述の常用対数の相関式(4)が成立するが、単一の物質毎に(4)式の定数 A 、 B が異なること、すなわち感度が異なることを示した。このような物質毎に感度が異なる特性は、半導体センサだけでなく、GC、GC/MSやHPLC等全ての測定装置も同じであり、標

準物質によって検量線を作成し定量する必要がある。さらに、チャンバー試験や新築建物内の複合の化学物質(TVOC)濃度とも(5)式が成り立つことを確認し、各ケースで化学物質(TVOC)の各物質の組成・濃度が異なるので、(5)式の定数 A_t と B_t が異なることを示した³⁾。

本報では、使用する半導体センサを3種類に増やし、2件の建物で竣工時から長期間のセンサのモニタリング試験を行った。今回の試験でも3種類のセンサは、各々に(5)式が成り立っていたが定数が異なり、さらに同じセンサであってもモニタリングする建物によって定数が異なることを示した。このように同じセンサ値であっても、モニタリング対象が異なれば室内TVOC濃度は異なる可能性があり、より正確な測定値を得るためには、必要時に室内化学物質濃度を精密法で測定し、この測定値と使用するセンサ値での相関を取る必要がある。

また、本論文では、センサを設置後毎年6回以上、定期的に室内TVOC濃度(各VOC濃度)を精密法で測定し、各センサ値の経年変化を確認した(図3, 4)。今回の測定条件では、センサ値は安定しており経年変化は確認できなかった(図11, 12, 13, 14)。実用化に向けては、センサの劣化を留意する必要がある。本論文で実施したように定期的に室内の化学物質濃度を測定するか、一定濃度の標準ガスを用いてセンサ値を確認し、センサの経年変化が認められた場合は、センサの交換や校正が必要となる。但し、今回の測定結果から、通常のオフィスビルでは5年以上安定して測定可能であると考えられる。

センサに電流が流れると、検知素子である金属酸化物の半導体が高温となり、空気中の酸素分子がこの部分に吸着し抵抗が上昇する。この半導体に、空気中のVOCばかりでなく臭気物質等の還元物質が接触すると、半導体上の酸素を奪い抵抗値が減少するので、還元物質濃度を測定することができる²⁰⁾。補修工事でのVOCや飲食等の臭気の発生は短時間であり、センサ出力値のピークは一過性(図5, 6)である。しかし、建材等からのVOCは長期間発生し、センサの出力値は一過性でなく建物の換気条件にも影響された独特のピークパターンを示す(図5)。したがって、両者は容易に区別でき、センサ特性や反応(ピーク)パターンを十分に理解すれば、建物内のVOC対策ばかりでなく、臭気対策等にも活用が可能である。

オフィスビル等の建物における室内の化学物質濃度の増加は、竣工時における内装材や什器・備品からの発生ばかりでなく、執務者が持ち込んだ日用品やオフィス機器、省エネによる外気導入量の制御や、休日や夜間の執務時間以外での空調停止等が原因である。今回は、建物内でのTVOC濃度のモニタリング結果のみを示しが、室内モニタリングを応用し、室内TVOC濃度が高い場合は、外気導入量を増やしたり、空調稼動開始時間を早めたり稼働時間を延ばす等の制御によって、室内TVOC濃度の低下が可能となろう。

実際の建物で長期間使用する場合は、半導体センサの特性を十分に把握する必要がある。高温時の補正、ブランク値上昇への対応、低濃度時のセンサの反応性の確認(標準物質での校正、センサ取換等)や対象によってセンサの感度が異なる等の半導体センサの欠点^{15,16)}を解消する必要がある。センサによる測定が安定して継続できれば、本報で使用したセンサの信頼性はより高くなり、室内化学物質モニタリングツールばかりでなく、室内空気質を良好に維持するための制御系への展開活用も期待できる。

5. まとめ

- ・室内の比較的低濃度の化学物質(TVOC)濃度をモニタリングできる半導体センサの特性を、3種類のセンサを用いた2件の建物で、竣工時から長期間試験した。今回の測定条件では、3種類のセンサ値は安定しており、経年変化は確認できなかった。

- ・センサ別、建物別に感度は異なるが、センサ値と室内TVOC濃度はよい相関を示すことを確認でき、半導体センサによるモニタリングの有用性を示した。

- ・但し、同じセンサにおいてセンサ値が同じでも、対象の物質組成や比率が異なれば、室内TVOC濃度は同一ではない可能性は高い。

- ・この点を解消するためには、未知の対象物を半導体センサでモニタリングする場合は、GC、GC/MS、HPLC等の精密法での測定値によってセンサ値を補正する必要がある。

- ・更に半導体センサにより、VOCばかりでなく臭気等の還元ガスもモニタリングでき、オフィスビル等の建物の外気導入量や導入時間を効率よく制御することで、室内TVOC濃度を適正に維持できる可能性を示した。

引用文献

- 1) 山口 一, 富岡一之: 室内空気質の簡易測定法の開発(第5報), ニオイセンサによる化学物質放散部位の特定法の評価, 空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 1387-1390(2004).
- 2) 久世 恭, 山口 一: ポータブル型VOC分析計を用いた新たな測定法, 日本建築学会学術講演梗概集, 905-906(2004).
- 3) 山口 一, 富岡一之: 半導体センサによるTVOCの簡易測定法の開発, 日本建築学会環境系論文集, 599, 79-87(2006).
- 4) 山口 一, 富岡一之, 大塚俊裕, 栗原隆, 中山正樹, 真継常義: 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論文集, 469-472(2007).
- 5) 日本建築学会: 特集健康建築, 化学物質室内空気汚染, 建築雑誌, 113(1421)(1998).
- 6) 日本建築学会: 特集健康建築, その2高気密・高断熱, 建築雑誌, 114(1438)(1999).
- 7) 日本建築学会: 特集, シックハウスから健康住宅へ, 建築雑誌, 117(1491)(2002).
- 8) 日本建築学会: 特集, シックハウス問題は解決したか, 建築雑誌, 119(1521)(2004).
- 9) 国土交通省住宅局編集: 改正建築基準法に関する講習会テキスト「改正建築基準法に対応した建築物のシックハウス対策マニュアル」, 工学図書株式会社(2003).
- 10) ビル管理法令研究会: 建築物衛生法, ぎょうせい(2003).
- 11) Cristian Floerkemeier, Roland Schneider, Marc Langheinrich, Scanning with a Purpose – Supporting the Fair Information Principles in RFID Protocols. Ubiquitous Computing System 2004 (UCS2004), ISSN:0302-9743, 3598, 214-231 (2004).
- 12) 藤森敬悟, 藤野友也, 川端理華, 石井 篤: 人感センサデータによる動線の推定, Data Engineering Workshop 2008(DEWS2008), D10-3(2008).
- 13) 帷子京市郎, 中村克行, 超卉菁, 柴崎克介: レーザセンサを用いた歩行者通過人数数の自動計測手法, Forum on Information Technology 2005(FIT2005), 145-148(2005).

- 14) 川島 実, 郷 正明, 小林勝広, 中村卓司: 次世代技術を盛り込んだ環境配慮型建築(第10報) 2004年度の運用実績, 空気調和衛生工学会学術講演会論文集, 1785-1788(2005).
- 15) 福井 清: 酸化錫半導体ガスセンサを用いたニオイの計量, 臭気の研究, 20(4), 1-7(1989).
- 16) 福井 清, 石川 博: 室内環境モニタリング用センサ, *Electrochemistry*, 4, 280-284(2001).
- 17) 村上周三監修: シックハウス対策に役立つ小形チャンバー法(JIS A1901), 日本規格協会(2003).
- 18) 厚生労働省ホームページ: <http://www.mhlw.go.jp/>
- 19) 朱清宇, 加藤信介, 安宅勇二, 徐長厚: 家具などからの揮発性有機化合物の放散量を測定する大形テストチャンバー法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 593, 41-48(2005).
- 20) 福井 清: 半導体によるニオイセンサーの実際と課題, 公害と対策, 26(4), 29-36(1990).

注1): 正式にはVOCsであるが, 本報では一般に使用されているVOCとした。

注2): 通常のオフィスビルでは, センサからの情報(出力信号)は Building Energy Management System(BEMS)等のビル管理システムに渡され, 空調, 照明や外気導入量を最適に制御されている。