

# 半導体センサーによる室内化学物質のモニタリングと換気制御への適用の可能性

Case study of semiconductor-based sensor

Possibility of indoor chemical substance monitoring system and control of ventilation

清水建設株式会社 技術研究所

Shimizu Corporation, Institute of Technology

山口 一

Makoto YAMAGUCHI

キーワード：半導体センサー (Semiconductor-based sensor)、総揮発性有機化合物 (TVOC) 臭気 (Odor)、建物モニタリング (Building monitoring)、換気制御 (Ventilation control)

## 1. はじめに

室内の揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds ; VOC) 等によるシックハウス症候群や化学物質過敏症、あるいは種々の臭気物質による悪臭の問題が話題となっている<sup>1-4)</sup>。これらの問題を解決する場合、VOC やその他の化学物質等の測定やモニタリングを行うことは重要である。しかし、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。

更に、建築基準法では、室内化学物質対策のため、住宅等では換気回数 (外気導入量) 0.5 回/h 以上の機械換気設備の設置を義務付けている。また、事務所ビル等の建物 (特定建築物) の必要取入外気導入量の設計は、建築物衛生法 (旧ビル管理法) や建築基準法に則り<sup>5-6)</sup>、室内 CO<sub>2</sub> 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 30m<sup>3</sup>/人・h 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ー、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、CO<sub>2</sub> 濃度センサーにより室内 CO<sub>2</sub> 濃度を直接にモニタリングし、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<sup>7-11)</sup>。このような外気導入量の制御は、CO<sub>2</sub> の主な発生源である居住者 (執務者) による室内 CO<sub>2</sub> 濃度を基準としており、建材・備品・

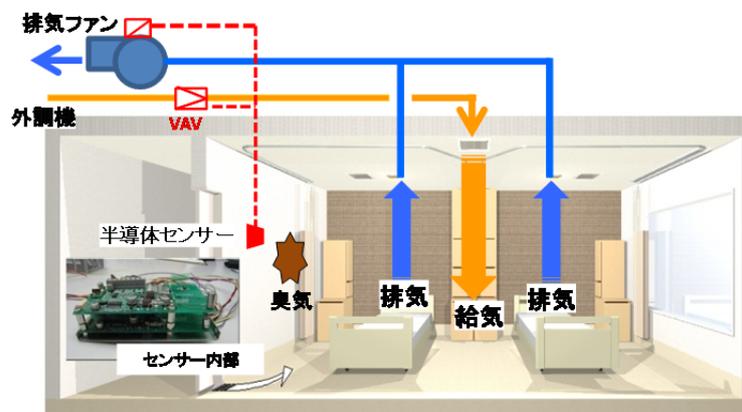


図1 半導体センサーを用いた換気制御の概念図

什器等から放散する種々な化学物質を考慮していない。したがって、CO<sub>2</sub>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、室内の化学物質をモニタリングできる手法を確立し、半導体センサーによる簡易測定法を検討してきた<sup>12-14)</sup>。

一方病院では、空気清浄度や温湿度条件の基準として、日本医療福祉設備協会規格 HEAS-02-2013 があり<sup>15)</sup>、病室の空調による最小換気回数（外気導入量）は2回/hと定められており、通常は換気回数（外気導入量）を増減させることはなく、事務所ビル等の建物のように外気導入量を制御することで省エネルギーに寄与させたり、食事やオムツ替え等で臭気が発生した場合に外気導入量を上げて臭気対策を実施する例は殆どなかった。

本報では、実際の建物への半導体センサーの導入を目指し、実用化に必要であるセンサーの課題の検証と病室でのセンサーによる外気導入制御についての基礎的検討を実施した（図1）。これらの知見は、事務所ビル等、他の建物への応用も期待できる。

## 2. 半導体センサー

### 2.1 半導体センサーの選択

本報で使用するセンサーは、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、センサー両端の抵抗値変化として測定する半導体センサーである。半導体センサーは高感度であるが、特定のガスに対する選択性を持たすことが困難であった。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、総揮発性有機化合物（TVOC; Total VOC）や臭気物質に高感度に反応する<sup>16-18)</sup>。また、半導体センサーは、専用ユニットに組み込んで使用した（写真1）。

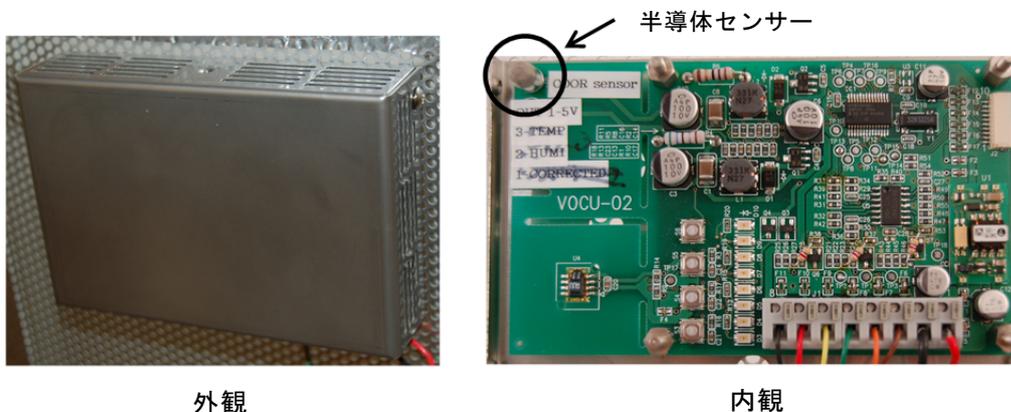


写真1 半導体センサーユニット

### 2.2 半導体センサーの特性

VOCのような還元性ガスによるセンサー電気抵抗の変化は、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: センサー抵抗値、K、n: 定数、C: ガス濃度

半導体式センサーの反応性は（1）式のように、センサー部の抵抗値で評価するが、センサー

部がブリッジ回路などの電気回路に組み込まれて使用する場合、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  $\Delta V$  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。

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

$\Delta V$  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、半導体センサー出力値（以下半導体センサー値とする）と化学物質濃度の関係を表す次式に変換できる。ヒトの嗅覚と同様に、Weber-Fechner の法則に従う<sup>13)</sup>。

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

$S$ : 半導体センサー値、 $A$ 、 $B$ : 定数

### 3. 実験材料ならびに実験方法

#### 3.1 対象施設

##### 3.1.1. 急性期総合病院

1982年に竣工した病院の5床病室内の床頭台に、半導体センサー（写真1）と温湿度計を各々2箇所を設置した（表1、図2）。病室の容積は約94m<sup>3</sup>であり、9月中旬に測定した。室内は、26℃設定の冷房運転で、湿度は成行であった。

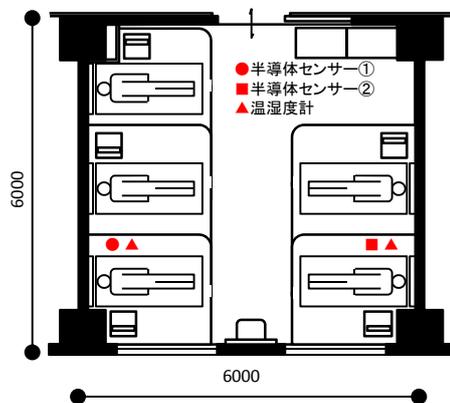


図2 5床病室の測定点

表1 急性期総合病院概要

種別	総合病院
竣工年	1982年
病床数	480床
場所	大阪府堺市
実測期間	9月中旬
対象病床室	5床室
空調運転	有：冷房
室内設定温湿度	26℃/成行
換気方式	第3種機械換気

##### 3.1.2. 4床病室ハーフカットモデル

本報で試験に用いた4床病室ハーフカットモデル（6m×3.7m、約60m<sup>3</sup>）の概要を図3に示す。窓側と廊下側にベッドを1台ずつ納めた。モデル病室内壁面は外乱の影響を受けにくいように断熱材を施した。換気設備は1次空調処理した外気をモデル病室の天井中央部から供給し、各ベッド上部の天井面から排気する方式とした。半導体センサーを廊下側ベッド横の床から1,200mmに設置した（写真2）。本実験室の換気風量は、センサー値（1-5V）によって、外調機側のVAV（VAV-FW3-4、協立エアテック）の開度と排気ファンをインバーターで制御した。

### 3.1.3. 4 床病室

実際の新築の4床病室（6m×6.1m、約96m<sup>3</sup>）で効果を検証した。隣り合うベッドの間には伸縮可能な仕切り什器（パーティション）を設置し、半導体センサーは天井懐の排気チャンバー内に設置した（図4、写真3）。本実験室の換気風量は、上記の「3.1.2 4床病室ハーフカットモデル」と同様に、センサーの出力値によって、外調機側のVAV開度と排気ファンをインバーターで制御した。また、風速計を天井の給気口とベッド直上の天井排気口に設置した（図4）。

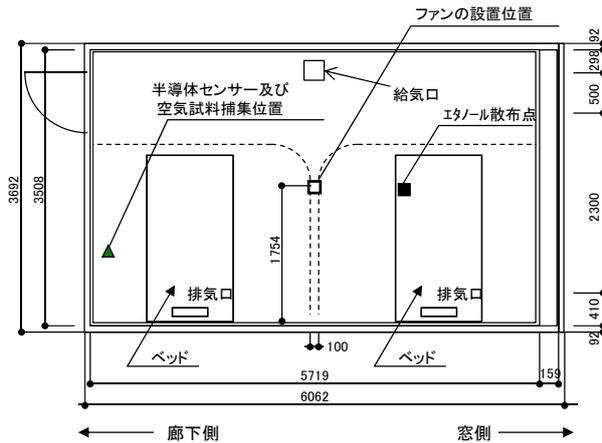


図3 4床病室ハーフカットモデル  
センサーと薬剤散布・採取位置



写真2 4床病室ハーフカットモデル内観  
(廊下側)

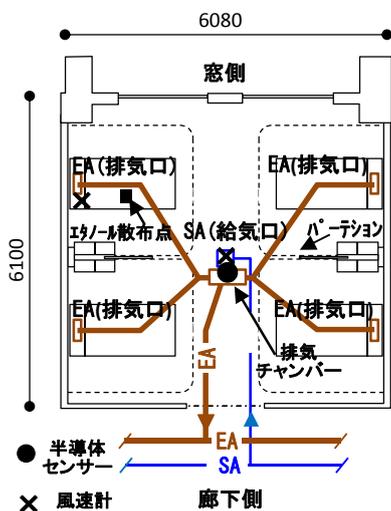


図4 4床病室内のセンサー、風速計及  
び薬剤散布位置



写真3 4床室の内観

### 3.2 4床病室関連試験でのガス散布と濃度測定

排便時や病院でのVOCや臭気発生等を模擬し、エタノール（99.5%）を試験ガスとして使用した。ハーフカットモデルルームの試験では、通常はエタノール散布を換気（外気導入）なしの条件で行った。室内エタノールの基本濃度が1.15ppmvとなるように<sup>注1)</sup>、エタノール濃度

6,000ppm (10L) のテドラーバッグを窓側のオーバーベッドテーブル上に設置したバット中に置き、テドラーバッグをカッターナイフで切り裂いて、数秒間でガス化したエタノールを床面に設置したファンを用いて室内空気を攪拌した (58m<sup>3</sup>/min)。気中のエタノールの採取は、6L キャンスターを4床病室モデルルームの廊下側のオーバーベッドテーブル上に設置し、一定時間毎に室内空気の捕集を行った (図3)。本試験での室内エタノール濃度の測定は、マイクロスケールパージ&トラップ・ガスクロマトグラフ質量分析法で行った<sup>19)</sup>。実際の4床病室でのエタノール散布は、上記のハーフカットモデルルームの試験と同じ条件で実施した (図4)。

#### 4. 多床病室内の室内化学物質濃度の挙動調査

多床病室内の臭気等の化学物質が1日の中でどのような挙動を示すかを把握するため、病院スタッフに、臭気発生の原因となり得るオムツ交換大便、オムツ交換尿、便 (尿) 破棄 (以下、便ハキ)、食事、創処置 (傷口を手当して処置すること)、清拭 (患者の体を拭くこと)、パウチ交換 (体の表面に取り付け、体からの排泄物や浸出液を受け入れ貯留するための袋体を交換すること)、換気 (窓開け換気) 等の行為を行った時は、各々のイベント名を記述してもらった (図5)。1日の病室におけるイベントの概要をまとめることで、センサー値の変動原因を把握する一助となると考えられる。

各センサー値は、データロガーにて1週間連続して記録した。一例として泌尿器科の1日の結果を示す。便ハキ、尿量測定及びパウチ交換の頻度が高かった。各イベントに対して若干の時間差がみられるものの、センサー値と良い相関性がみられる場合が多く観察された。食事や看護師による処置を行う時間帯に、高いピークが確認できた。昼間のイベントが発生しない時間帯には、センサー値は低下傾向がみられ、0時から5時までの夜間の時間帯については緩やかに低下していることがわかる (図5)。

今回の調査では、センサー値とイベントの若干の誤差や記録したイベント以外でもセンサー値の増減が観察された。この現象は、今回の調査が、実際に運営されている病院の満床病室が対象で、センサーの設置場所が限られ、換気方式も第3種換気であり、発生した臭気を迅速にモニタリングできなかつたこと。更に、多忙である看護スタッフによるイベント記入であったので、全てのイベントを精確に記録できなかつたことが一因であると考えられる。しかし、窓側の両端のベッド脇に別々に設置された2つのセンサーの出力値は (図2、5)、波形のずれや異なつた波形も若干観察されたが、殆ど同じセンサー値の挙動を示し、更に科目毎に臭気特性が異つたことを考慮すると、今回使用した半導体センサーによって、病室内の臭気等の化学物質をモニタリングできる可能性が高いと考えられる。

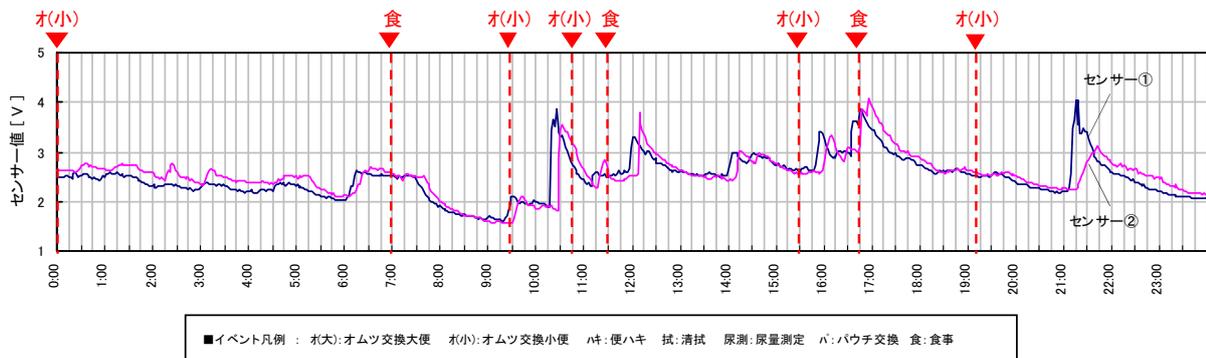


図5 病室でのセンサー値

## 5. 半導体センサーによるモニタリングと制御の試行

### 5.1 模擬ガスによる基本試験

当初 100CMH (1.67 回/h) で外気導入し、エタノール散布後も 100CMH で継続運転した場合と (図 6)、センサー値が 3V 以上となった時点で外気導入量を 200CMH (3.33 回/h) に増加させた場合 (図 7) について比較した。今回の試験では、試験開始時のセンサー値が 2.5V で、0.5V 上昇した 3.0V (エタノールの嗅覚閾値 0.52ppm<sup>20</sup>) と同等濃度) で外気導入量を上げるように制御した。前者は、エタノール散布から 4 分後に最高値 (3.38V) に達し、センサー値が最高値の 10% となるまでの時間 (以下、10% 減衰所要時間と呼ぶ) は 84 分であったが、試験開始時のセンサー値に戻るまでの時間 (以下、復帰所要時間と呼ぶ) は、150 分以上経過しても達成できなかった<sup>注 2)</sup>。後者は 1 分以内にセンサー値が 3V となり、2 分後には最高値 (3.3V) に達した。外気導入量を増加させ強制的にエタノールを排気し、センサー値は 44 分後に最高値の 10% まで、67 分後には開始時の値に戻った。エタノール濃度上昇をモニタリングし、外気導入量を増加することで、対象物質の室内濃度の効果的な低減を確認できた。

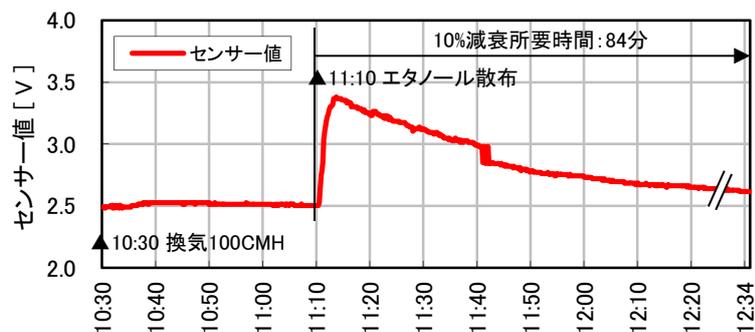


図 6 センサー試験 (外気導入量一定)

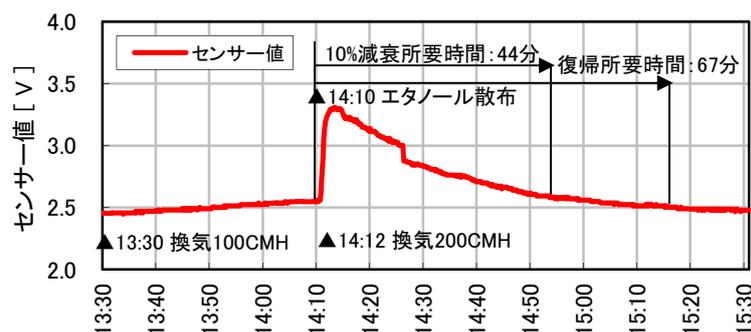


図 7 センサー試験 (外気導入量増加)

### 5.2 センサー値とエタノール濃度の相関

室内エタノール濃度を、基本濃度 (図 6)、基本濃度の 2 倍あるいは 1/2 倍等に調整し、センサー値 (センサーの応答性) とエタノール濃度の関係を調べた (図 8)。両者は、上述の(4)式に従い良好な相関を示し ( $R^2 \approx 0.95$ )、本センサーの精度が高いことを確認した<sup>注 3)</sup>。

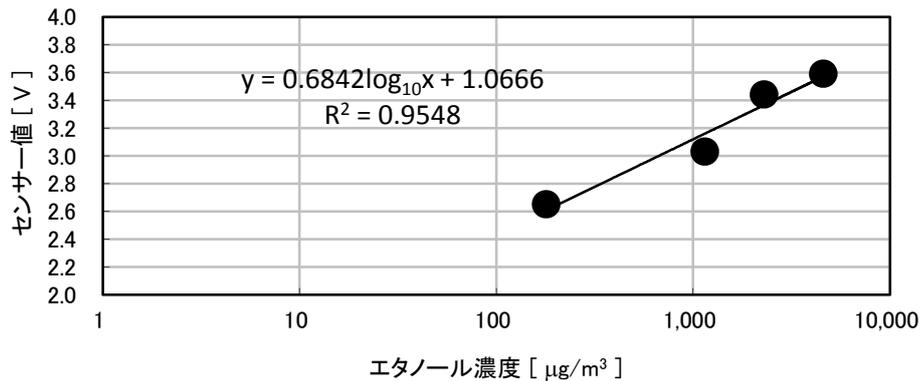


図 8 センサー値とエタノール濃度の関係

### 5.3 半導体センサーによるモニタリングと制御の検証

前節 5.1 では、半導体センサーにより病室内のエタノールによる模擬臭気のモニタリングを行い、そのモニタリング結果を基に換気（外気導入）量制御についての試行を行った。しかし、4床病室のハーフカットモデルの試験であったので、実際の 4 床病室でその効果を検証した。模擬ガスであるエタノールの発生は、窓側のベッド位置より、図 3 と同じ条件で行った。本試験では、エタノールを発生させ、10 数秒後にはセンサー値は上昇し、0.5V 以上上昇した時点で外気導入量を 1 回/h から 3 回/h に増加させるように自動制御した。測定時の温度は 22℃、相対湿度 50% であった。本試験で使用したセンサーは、上記までのセンサーと異なり自動的にブランク値を差し引くことができる。本試験ではセンサーのベースが 0V であり、0.5V 上昇時に外気導入量を制御しており、前節 5.1 の試験の制御と同じである。給気口（350mm× 350mm）の風速は、今回の試験時には約 0.25m/s から 0.75m/s へ増加した。排気口（85mm × 485mm）は 4 つあり（図 4）、風速は約 0.2m/s から 0.48m/s へ増加した。給気口及び排気口での風速測定の結果からも、ほぼ 1 回/h から 3 回/h の外気導入量制御が確認できた。

今回の試験では、復帰所要時間は約 10 分間であり、2 度目の繰り返し試験の場合も、ファン制御の精度によるものか若干復帰所要時間が伸びたが、1 度目と同様な結果を得た（図 9）。前節 5.1 では、模擬ガス発生からセンサー値上昇まで約 2 分、外気導入量を 1.67 回/h から 3.3 回/h に増加させ、復帰所要時間に約 67 分を要したとと比較すれば（図 7）、今回の外気導入量制御が 1 回/h から 3 回/h と若干条件が異なることを鑑みても、室内濃度の低減時間の短縮が確認できた（図 9）。

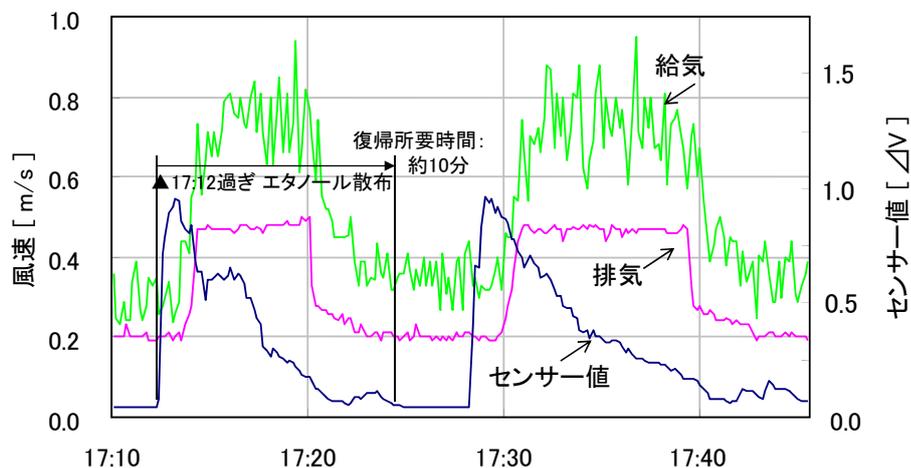


図 9 4 床病室でのセンサーによる給排気制御

これは、センサーを室内でなく排気チャンバー内に設置し、更に給排気口の位置を適正に配置することで（図 4）、発生したガスが室内に拡散する前に、迅速にセンサーで感知され排気されたことが主因であると考えられる。

## 6. まとめ

実際に運営されている急性期病院の調査では、調査の条件に多くの制限があり、センサー値とイベント間の若干の誤差や記録したイベント以外でのセンサー値の増減が観察された。しかし、本センサーの使用により、病室内の臭気等の化学物質のモニタリングの可能性が高いことを示した。（図 5）。

更に、4床病室ハーフカットモデルルームと4床病室でセンサーによる換気（外気導入）制御試験を行い、給排気口の位置・数及びセンサー位置により、模擬ガスの排気効率に違いがあることを確認した（図 6、7、9）。発生した対象ガスを室内に拡散させず、瞬時にその場で局所排気することが重要である。そのためには、対象空間において、対象物質の発生位置や発生量に応じ、センサーや給排気口の位置・数を CFD 等の解析結果に基づき、適正に配置し、センサー制御することが重要であろう。

また、エタノールを模擬ガスとして使用した繰返し試験で、本センサーが、半導体センサーの弱点であるドリフトの可能性が低いことを確認した（図 9）。更に、半導体センサーの残る課題である湿度の影響についても<sup>16-18)</sup>、病室では HEAS-02-201315)に準拠し、夏季は 26℃で相対湿度 50%、冬季は 23℃で相対湿度 50%を維持しており<sup>15)</sup>、オフィス等の建築物においても建築物衛生法（旧ビル管理法）では、温度が 17℃以上 28℃以下、相対湿度が 40%以上 70%以下であり<sup>6)</sup>、この条件化で使用すれば湿度の影響はないと考えられる。

今後は、本報の知見に基づいて、病室での半導体センサーのよる更なる外気制御の効率化や、事務所ビル等の他用途建物への本センサーの展開を図りたい。

## <参考文献>

- 1) 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 巻、1421 号、1998
- 2) 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 巻、1438 号、1999
- 3) 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 巻、1491 号、2002
- 4) 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 巻、1521 号、2004
- 5) 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
- 6) ビル管理法令研究会：建築物衛生法、ぎょうせい、2007
- 7) 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, pp.214-231, 2004
- 8) 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
- 9) 帷子京市郎、中村克行、超弁菁、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)、pp.145-148、2005
- 10) 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、pp.1785-1788、2005

- 11) 湊敦、荒井義人、高橋満博、川島実、岩谷正通：持続可能な社会に向けた都市型超高層オフィスの研究、その6 エネルギー使用量実績、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学II、pp.1189-1190、2013
- 12) 山口一、岡田 博、布施幸則、富岡一之、鈴木道哉：臭いセンサーを活用した室内空気質、室内環境学会、1巻、1号、pp.27-34、1998
- 13) 山口一、富岡一之：半導体センサーによる TVOC の簡易測定法の開発、日本建築学会環境系論文集、599号、pp.79-87、2006
- 14) 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、pp.469-472、2007
- 15) 病院設備設計ガイドライン（空調設備編）、HEAS-02-2013、一般社団法人日本医療福祉設備協会、2013
- 16) 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巻、4号、pp.1-7、1989
- 17) 福井清、石川博：室内環境モニタリング用センサー、Electrochemistry、4巻、pp.280-284、2001
- 18) 江原勝夫：臭気の測定センサーとその動向、臭気の研究、28巻、4号、pp.1-8、1997
- 19) N. Ochiai, M.Takino, S. Daishima, D.B. Cardin: Analysis of volatile sulphur compounds in breath by gas chromatography-mass spectrometry using a three-stage cryogenic trapping preconcentration system. J. of Chromatogra. B, 762(1), pp.67-75, 2001
- 20) 永田好男、竹内教文：三点比較式臭袋法による臭気物質の閾値測定結果、大気汚染学会講演要旨集、p.528、1988
- 21) 山口 一、川上 梨沙、富岡 一之、大塚 俊裕、町田 晃一、中村友久、辻 裕次：半導体センサーによる室内化学物質濃度のモニタリングと換気制御の研究、4床病室における汚染物質除去の検証、日本建築学会環境系論文集、79巻、702号、pp.681-688、2014

#### <注釈>

- 注1) 半導体センサーは、還元性ガスに反応する<sup>16-18)</sup>。今回のモデルルームでの試験では、病院の模擬臭としてエタノールを試験ガスとして使用した。エタノールの嗅覚閾値(0.52ppm)<sup>20)</sup>を基準に、基本濃度の1/2濃度がほぼ閾値濃度となるように設定した。実際の室内濃度も設定値と同等は濃度となった(図8)。
- 注2) 100CMHのみでの外気導入量では、エタノール散布後、センサーベース値の復帰に数時間以上要した。したがって、本試験では、10%減衰所要時間と復帰所要時間とに区別して、各々の試験結果を検証した。
- 注3) 今回使用した半導体センサーは、エタノールばかりでなく、種々の単一化学物質や化学物質の組成が同一であるTVOC等と良い相関を示すことを確認している<sup>12-14,21)</sup>。