

半導体センサーによる 4 床病室の換気制御の検証

Evaluation of Indoor Chemical Substance Monitoring System and Control of Ventilation by Semiconductor-Based Sensor in the Ward

山口 一*

Makoto Yamaguchi

Summary

There are no systems capable of simply and 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) and odor using a semiconductor sensor was developed and the development results were presented in the previous report. This paper reports the evaluation results of the characteristics of semiconductor sensors installed in office building and ward with 4 patients, and the results of confirmation that the semiconductor sensors could be used for monitoring the concentration of chemical substance and the adequate regulation of ventilatory volume in the mockup of ward with 4 patients by the above monitoring result.

キーワード：半導体センサー、室内空気質、臭気、換気制御

Keywords：Semiconductor-Based Sensor, IAQ, Odor, Control of Ventilation

1. はじめに

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、病室の空調による最小換気回数（外気導入量）は 2 回/h と定められている。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したり、食事やオムツ替え等で臭気が発生した場合に換気回数（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。

2. 研究の目的

我々は、これらの課題を解決するため、室内の VOC や臭気を半導体センサーによってモニタリングできる

手法を確立し、これらのセンサーによって、実際の事務所ビルの化学物質のモニタリング性能を検証した²⁻⁴⁾。本報では、病室の省エネや臭気対策のため、半導体センサーによる室内化学物質や臭気のモニタリングとこれらのモニタリング結果を基にした換気制御について、センサーの性能劣化を含めた基礎的検証を実施した（図 1）。

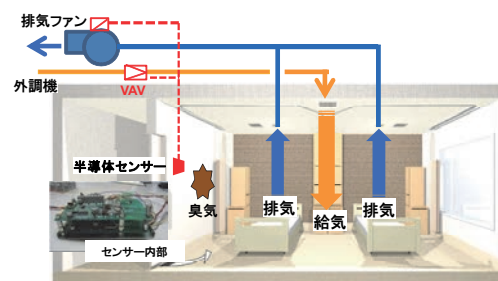


図 1 半導体センサーを用いた換気制御の概念図

* 工学部 建築学科 かおりデザイン専攻

表1 事務所ビルの建物概要御の概念

住所	東京都江東区越中島3丁目
主要用途	技術研究所(事務所)
竣工年	2003年11月
階数	地上6階
構造	鉄骨造、一部鉄筋コンクリート造
建築面積	1,828m ²
延床面積	9,634m ²
屋根	構造用デッキプレート、断熱材、シート防水
外装	ガスケットカーテンウォール、アルスター鋼板
内装	床: GRC製フロアフロー用OAフロア(一部通常OAフロア) 壁: スチール製収納壁、ガラス、一部石膏ボード(珪塗)、 天井: フラットデッキ、一部岩綿吸音板

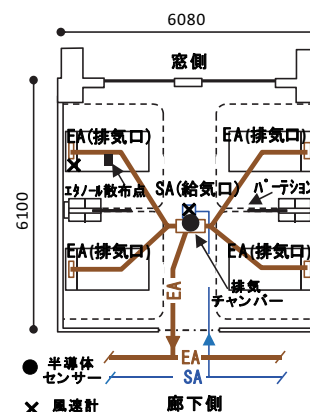


図2 病室内でのセンサー、風速及び薬剤散布位置
 査対象とした3Fのフロア容積は、約6,400m³であった。

3. 実験概要

3.1 半導体センサー

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⁵⁾。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センサーを選択した³⁾。また、半導体センサーは、専用ユニットに組み込んだ。

尚、センサー値 (S) と化学物質濃度 (C) は、ヒトの嗅覚と同様に、次式 (1) のように Weber-Fechner の法則の関係にあることが知られている(A, B は定数)^{2,4)}。

$$S = A \times \log_{10} C + B \cdots \cdots (1)$$

3.2 チャンバー試験

12m³ の大型チャンバーに半導体センサーを設置し、酢酸エチル、トルエン、イソブタノール及びアセトアルデヒドを別々に気化させ、センサー値をモニタリングしながら、段階的にチャンバー内の対象化学物質を希釈させた。同時に、TENAX GR 管で対象物質を捕集し、ガスクロマトグラフ (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。アセトアルデヒドの測定には、DNPH (2,4-ジニトロフェニルトラジーン) サンプラ (Waters 製) を用いて、30L 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) で分析・定量した。試料空気の捕集は、床から 1.2m とした。

3.3 事務所ビル

本建物の概要を表1に示す。本建物は、2003年に竣工した地上6F、延床面積が約9,600m²の事務所ビルで、内装も通常の事務所仕様であった。

半導体センサーは、3F 執務室に設置した。また、調

3.4 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

事務所ビルの場合、室内の化学物質 (TVOC) 濃度に応じたセンサーの出力値 (1-5V) と温湿度を、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ーでも、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⁴⁾。その他の試験の場合は、センサーユニットを試験対象室へ設置し、半導体センサーの出力値を直接データロガー (CADAC21、江藤電気) で収集した。温湿度の測定は、半導体センサーと同じ位置に温湿度センサー (おんどとり、TR-72S、ティアンドディ) を設置し、連続的にデータを収集した。

3.5 事務所ビルでの室内化学物質濃度の測定

VOC とカルボニル化合物の測定は、3.2 節と同じ条件で行った。TVOC 濃度は同じ 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 A19046) に準拠しトルエン換算した。また、VOC 成分の同定は、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS ; 島津製作所 QP-5050、キャピラリーカラム) を用いた。

空気試料は、定期的に毎月 20 日、機械換気運転 (午前 7:00~18:00) 前の比較的化学物質が高濃度の時間帯

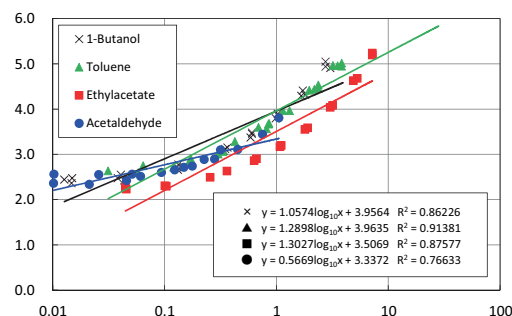


図3 半導体センサー値と化学物質濃度の関係

に捕集した。厚生労働省の方法⁷⁾に準じ、対象建物では窓は嵌殺しのため、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捕集とした。

3.6 4 床病室

4 床病室 (6m×6.1m、約 96m³) にて、試験を実施した。隣り合うベッド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 2)^{注1)}。本実験室の換気風量は、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 (本体 ; System6242、プローブ ; 0964-01、カノマックス) を天井の給気口とベッド直上の天井排気口に設置した。模擬ガスであるエタノールは、窓側のベッド位置より発生させた (図 2)^{注2)}。

4. 結果

4.1 半導体センサーと化学物質濃度

4 種類の化学物質の臭気強度を、大型チャンバー内で当初 3 ~ 4 になるように調整し⁸⁾、清浄空気⁹⁾で換気し、チャンバー内の化学物質濃度を段階的に低下させた。同時にチャンバー内の化学物質を測定し、半導体センサー値と化学物質濃度の相関を求めた (図 3)。各々の物質は、センサー値と Weber-Fechner の法則に則り、よい相関を示すが、若干反応性が異なることを確認した。また、エタノールや事務所内の複合臭も同様な相関を示すことを確認している^{2,4,9)}。

4.2 事務所ビルでの半導体センサーと TVOC 濃度の関係

竣工時 (2003 年 11 月) から、定期的に建物内の

室内化学物質濃度を測定と半導体センサーによるモニタリングを継続してきた。しかし本建物は、2006 年 6 月に内装の改修等を行ったため、本報では、2006 年 7 月からの室内の温湿度、TVOC 濃度及びセンサーの測定結果を図 4 に示す。夏季には、若干ではあるが、TVOC 濃度が上昇することを確認した。これは、TVOC 濃度の測定が空調稼動前であり、外気の導入がなく室内温度が高いこと、建材ばかりでなく什器・備品からの化学物質の放散量が高くなるのが主要な原因と考えられる。空調 (機械換気) 稼動時には、常に室内 TVOC 濃度は暫定目標値の 400 μg/m³ 以下であることを確認している。

センサー値は、上記の経時的な TVOC 濃度と変化と共に増減した。更に、通常、平日の 8:00 から 18:00 までの就業時間で、外気が導入され TVOC 濃度が低下する間は低下し、空調停止後に上昇することが確認できた (図 4)。

次に、実際の室内 TVOC 濃度とセンサー値の関係を調べた。本調査では、センサーの長期間試験によるブランク値の変動を考慮し、前年のセンサーのブランク値を差し引いた差分値と実際に測定した TVOC 濃度の相関を求めた。2006 年 7 月から 2013 年 6 月までの両者の決定係数は約 0.53 を維持していた (図 5)。確かにセンサーの性能劣化も確認されたが⁴⁾、季節変化やリニューアル時の化学物質の増減等のモニタリングや、その結果を用いた外気導入等の制御ツールとして活用できると考えられる。

4.3 半導体センサーによる換気制御の検証

排便時や病院での VOC や臭気発生等を模擬し、エタノールを試験ガスに用い、4 床病室での換気制御試験

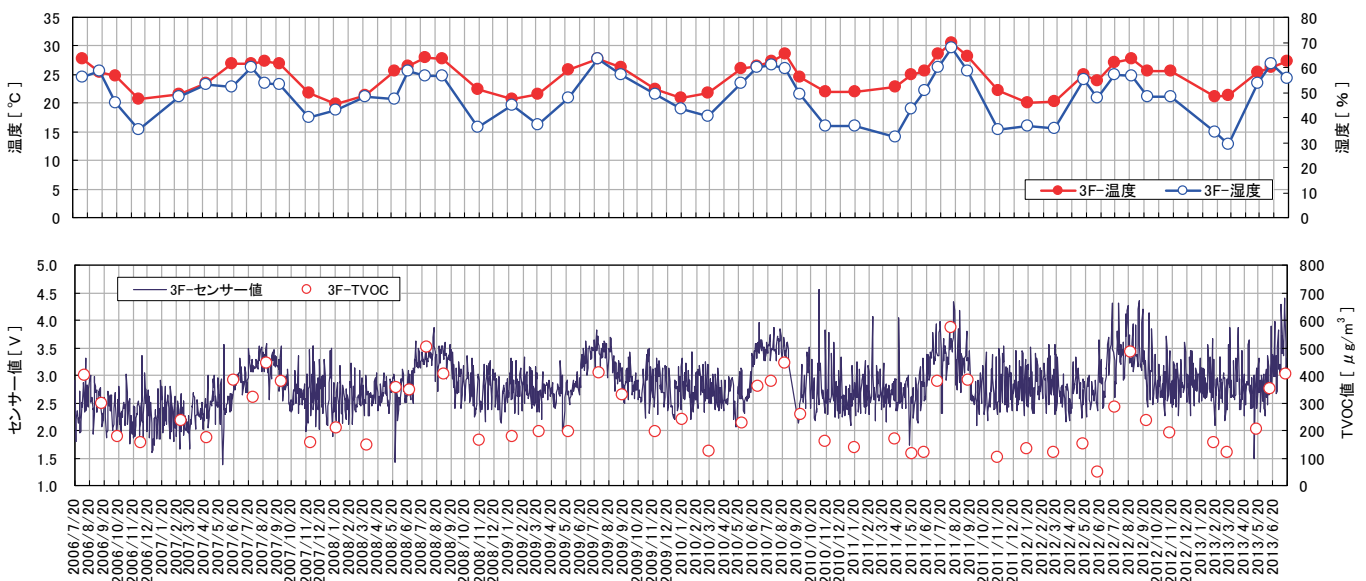


図 4 事務所ビルにおける TVOC 濃度、温湿度及びセンサー値の実測結果

を行った。17:12 過ぎよりエタノールを放散させ、10 数秒後にはセンサー値は上昇し、0.5V 以上となった時点で外気導入量を 1 回/h から 3 回/h に上昇させるように自動制御した^{注3)}。ベースラインへ復帰するための所要時間は約 10 分間であり、2 度目の繰り返し試験の場合も、ほぼ同様な結果を得ることができた。ドリフトもなく、半導体センサーの制御により効率よく対象物質の排気出来ることを確認した (図 6)。

5. 課題

今回、半導体センサーによる化学物質のモニタリングと換気制御に関し、一応の成果が得られた。センサーの長期間使用による性能劣化が確認されたが、センサーの特定を把握した上で使用すれば、当該目的を満たす可能性が高いと考えられる。

対象空間で、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や数を CFD 等の解析により適正に配置することで、発生した臭気 (ガス) が室内に拡散する前に迅速にセンサーで感知し、局所的に効率よく排気できると考えられる。

本報の知見は、病室ばかりでなく、事務所ビル等他の用途の建物にも応用可能である。

【謝辞】

半導体センサーに関する研究にご協力頂いた清水建設 (株) 及び新コスモス電機 (株) の担当の方々には、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 山口一ら：臭いセンサーを活用した室内空気質、室内環境学会、Vol.1、No.1、pp.27-34、1998
- 3) 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、pp.79-87、2006

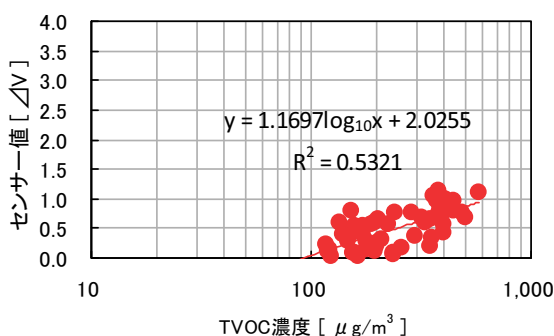


図 5 TVOC 濃度とセンサー値の関係

- 4) 山口一ら：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、室内環境、Vol.13、No.2、pp.119-129、2010
- 5) 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、Vol.20、No.4、pp.1-7、1989
- 6) 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
- 7) 厚生労働省ホームページ：<http://www.mhlw.go.jp/>
- 8) 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、pp.528、1988
- 9) 山口一ら：次世代エコホスピタルに関する研究(第 4 報) 半導体センサーを用いた換気制御による臭気除去の検証、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.505-508、2011
- 10) 町田晃一ら：次世代型エコホスピタルに関する研究 (第 1 報)、4 床病室向け放射空調システムに関する実験、空気調和衛生工学会学術講演会論文集、pp.493-496、2011

【注釈】

注 1) 今回の 4 床病室は放射空調を採用しており¹⁰⁾、外気のみ給排気となる。

注 2) 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)⁸⁾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。

注 3) 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、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いる。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、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 (図 6)。

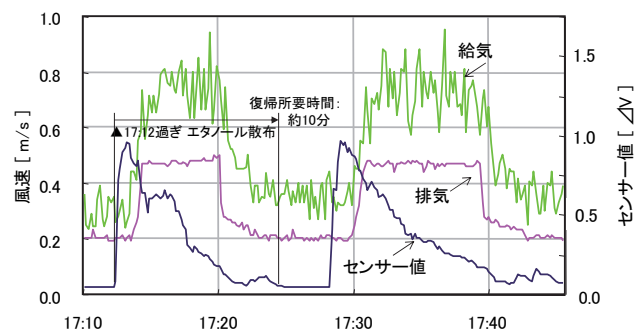


図 6 4 床病室でのセンサーによる給排気制御