

論文

分離型 VOC 吸着装置用センシングモジュールの開発

武田 有志^{*1)} 森川 潔^{*2)} 阪口 文雄^{*2)} 高野 善一^{*2)} 佐藤 俊彦^{*2)}

Development of a VOC Sensing Module for Separated Adsorption Machines

Yuji Takeda^{*1)}, Kiyoshi Morikawa^{*2)}, Fumio Sakaguchi^{*2)}, Yoshikazu Takano^{*2)}, Toshihiko Sato^{*2)}

A sensing module of Volatile Organic Compounds (VOC) for separated adsorption machines has been developed. Conventionally, VOC purifying machines are very expensive because the adsorption process and detaching process are unified. So, factories using low cost VOC cannot introduce these machines, and VOC gas is released which pollutes our environment. Thus, we have proposed a separated VOC recovery system. In this system, the two processes are separated, and the detaching process is performed by other equipment. This reduces costs of factories, because they have the option of installing only adsorption machines. However, the capture capabilities of the adsorption machines must be monitored in order to minimize exchange times of the captured materials. Thus, we developed a VOC sensing module for our proposed system. As a result, the sensing module can detect the capture capabilities in the adsorption machine, and the foundations of this recovery system have been constructed.

キーワード：センシングモジュール, 分離型吸着装置, 回収システム, 揮発性有機化合物

Keywords : Sensing module, Separated capture machine, Recovery system, Volatile Organic Compounds

1. はじめに

揮発性有機化合物 (VOC : Volatile Organic Compounds) は、塗装や印刷における溶剤, あるいは IT 関連機器における基板洗浄剤など, 我々の生活において不可欠である。しかし, 光化学オキシダントに関わる諸原因とされており, 我々の健康への被害や地球環境の悪化を引き起こす物質でもある。これに対し環境省は, 平成 22 年度までに平成 12 年度比で年間排出量の 3 割 (147 万トン) の削減目標を掲げている⁽¹⁾。日本の VOC 排出源の 9 割は, 工場等に起因するとされており, 環境省の示す目標を達成するためには, 排出源に対して VOC ガスを捕集するための処理装置等を設置し, 大気への放出を抑制することが必要である。

VOC ガス処理装置には, 回収型と直接燃焼型が存在する。前者は捕集した VOC を回収する装置, 後者は排出された VOC ガスをその場で燃焼させる装置である。回収型では, 工場からの VOC ガスを活性炭等の吸着材で捕集し, 吸着材が VOC をこれ以上吸着できない状態, いわゆる破過状態に至る前に吸着材をその場で加温して真空脱着する。脱着された VOC ガスは, 濃縮され, 液化して再利用することが可能であり, 直接燃焼型に比べて, 近年のエネルギー価格の高騰, ならびに, CO₂ 問題に対して有効な手段である。しかし, 回収型の処理装置は, 初期導入コストが 1,000~2,000 万円以上と高額になるだけでなく, 設置スペース, 脱着エ

ネルギーを要する。そのため, 回収に見合わない低コストの VOC を扱う工場では, 装置の導入が進まず, VOC ガスの大気への放出が続いている。

こうした問題を解決するため, 我々は, 図 1 に示す吸脱着を分離した新しい VOC 回収システムを提唱している。本システムの特徴は, 脱着装置を専用工場に設置し, 排出源に設置した複数の吸着装置から破過の起こった吸着材を回収して, 一度に再生する仕組みを採っている。これにより, 前述の装置導入に対する問題が改善される。しかし, 本システムを達成するには, 吸着材の回収をできるだけ減らす, すなわち, 吸着材の状況を遠隔で監視するための仕組みが不可欠である。そこで, 吸着材の破過を検出し, 吸着量を累積計量するための, ネットワーク対応型の VOC センシングモジュールを開発した。

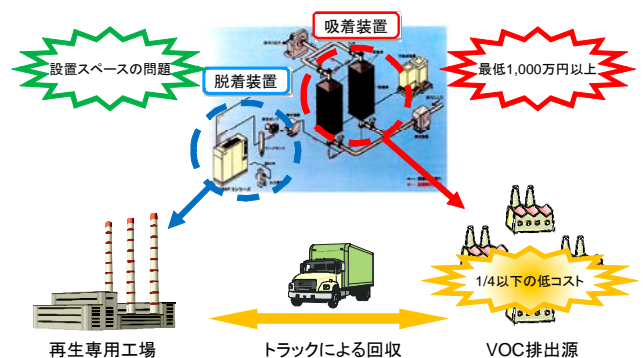


図 1. 分離型 VOC 回収システム

^{*1)}情報技術グループ

^{*2)}株式会社モリカワ

2. 分離型吸着装置とセンサの構成

分離型 VOC 回収システムにおける重要な要素の 1 つは、VOC ガス濃度を計測するためのセンサの選定である。システムにおけるセンサの主な役割は、吸着材が破過しているか否かを的確に監視し、そして、吸着材の破過がいつ生じるのかを予測するための VOC の連続計量することの 2 点である。センサの選定条件としては：

- 吸着材の破過を感知するために、低濃度 VOC ガスの検出に優れる。
- 吸着材への吸着量を計量するために、高濃度 VOC ガスを連続的に計測できる。
- センサの校正作業を容易とするために、1 種類のセンサで構成する。
- 使用実績があり長寿命であること。また、入手性が良く低コストである。

である。以上を満足するためには、普及されており、かつ、低濃度から高濃度まで、すなわち、0~2,000ppm の範囲等で計測できることが望ましい。

これに対し、VOC ガスセンサの 1 つである半導体式ガスセンサ（フィガロ技研 TGS823）に着目した。本センサは、400℃まで加熱された金属酸化物の半導体表面の酸素を VOC が奪うことにより抵抗値が低下するという特徴を持つ。本センサは、0~500ppm の範囲で感知可能であり、センサの抵抗値は、ガス濃度に対して対数で変化するため、吸着材の破過状態を示す低濃度の 50ppm 程度のガス濃度を敏感に検出できる。しかし、その一方で、高濃度に対しては不向きであることから、何らかの機構を設置する必要がある。半導体式ガスセンサは、感知する VOC に対する選択性が無いため、ガスクロのように VOC 種の判別目的に対しては不向きであるが、排出される VOC は排出源によって特定できること、また、連続的に濃度が変化する VOC ガスをとらえるには反応速度が重要であることから、本センサを

採用した。固体センサは、半導体式センサ以外にも接触燃焼式、熱伝導式などが存在するが、他のセンサは 500ppm 以上を対象とするため、前述の選定条件により対象から外した。

図 2 は、構築した分離型吸着装置を示しており、吸着槽をベースに、破過監視機構、累積計量機構で構成されている。VOC は、VOC ガス発生器により気化され、活性炭が充填された吸着槽においてブローの吸引力によって通り抜ける際に捕集される。円形は VOC ガスセンサの設置場所を示しており、吸着槽から排出されるガス濃度は、破過監視機構における電動バルブ MV102 および MV106 を開くことでセンサ 3A によって検知できる。また、MV103 および MV106 を開くことで活性炭を通った外気を標準ガスとして用いることが可能であり、双方を Rs, Ra として交互に計測することで確実に破過状態を検知できるようにしている。一方、累積計量機構は、活性炭を通った標準ガスによって、ある一定の割合で VOC ガスを希釈する。そのため、高濃度ガスに対しても同一の半導体式センサで計測可能である。累積計量では、前述の破過監視と異なり、連続的に計測できることが重要である。そこで、バルブによる切換えを無くし、2 つのセンサ 5A, 6A によって VOC ガスと標準ガスを常に計測する方法を採用している。

なお、VOC ガス発生器の前段にはセンサ 4A が設置されている。これは、VOC ガス発生器以外の VOC ガスが混入されていないかを確認するために設置している。

3. センシングモジュールのアーキテクチャ

センシングモジュールを開発するに当たり、次のコンセプトで設計を行った：

- センシングには電動バルブの制御と監視が伴い、また、可燃性ガスを扱うことから、リアルタイム性と高信頼化が必要である。
- 破過状態を、インターネットを通じて管理サーバに送信するため、イーサネットの非同期通信を扱うプロトコルスタックが必要である。
- 小規模であれば装置全体を制御できるように、装置のコントローラで用いられているプログラミング言語、LD（ラダー図）の移植が容易である。

以上を実現するに当たって FPGA/SoC を採用した。FPGA を用いることにより、制御と監視が並列化に動作するようハードウェアで構成でき、汎用プロセッサを組込むことで、既存のプロトコルスタックを利用でき、開発効率を向上できる。さらに、システムに特化したアーキテクチャとすることで、センサの校正パラメータや各種制御パラメータなど、改竄されにくくなるという利点を持つ。

図 3 は、試作したセンシングモジュールを示している。センシングモジュールは、FPGA ボード、デジタル I/O ボード、アナログ入力ボードの 3 枚の基板から構成されている。FPGA ボードには、Altera 社製 Cyclone EP1C6Q240C8 ならびに各種ペリフェラルが搭載されており、他の 2 枚の基板と

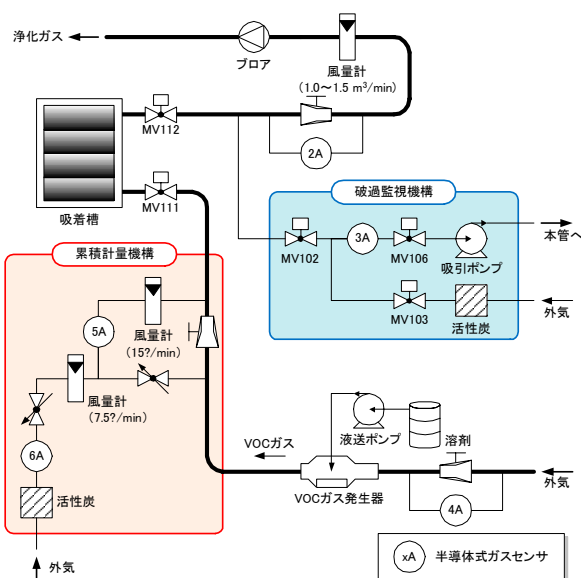


図 2. 分離型吸着装置とセンサの構成

ケーブルで接続される。一方，デジタル I/O ボードは，工業用として用いられている DC24V 系の入力 20 点，出力 20 点の信号を，光絶縁素子を介して制御できる。アナログ入力ボードは，18 ビット，12 チャンネルの A/D 変換チップを有しており，また，光絶縁素子により回路を保護している。3 枚の基板は重ねた状態で電源を含め，W240×H140×D340 (mm) のケースに収まる。基板が大きいのは，DIP 部品に起因するが，表面実装部品に置き換え，基板層数を増やすことで少なくとも 1/3 程度に小型化できる。

一方，図 4 は，FPGA ボードのアーキテクチャを示している。左から順に，プロセッサ，メモリおよび I/O インタフェース，そして，ペリフェラルを表している。汎用プロセッサには 32 ビット RISC である NiosII/s を，OS には μ ITRON を使用している。FPGA とペリフェラルと接続するデータバスは，SDRAM 専用の 32 ビットバスと，それ以外のペリフェラルに対する 8 ビット共有バスの 2 種類が存在する。FPGA では，すべてを専用バスとして引くことで，リアルタイム性を向上させることが可能であるが，今回の開発では低コスト化を重視するため，FPGA ボードを 4 層に抑えており，その結果，PQFP (Plastic Quad Flat Package) での最大 240 ピンという制約により，バスの共有化を図っている。

図中，最下段に位置する Error Detector は，電動バルブを制御するための I/O を常に監視し，異常を検知した場合にはプロセッサに対して割込みを発行するためのハードウェアモジュールである。Error Detector には，電動バルブ開閉における組合せ違反の検出回路，開閉状況の確認信号に対するウォッチドッグタイマ，そして，それらを有効にするか否か，異常箇所を知らせるためのレジスタで構成されている。例えば，図 2 において，ブローへの負荷を軽減するためには，電動バルブ MV111，MV112 の双方が開いていることが必要である。そのため，ブローが稼働し，かつ，MV111 と MV112 の双方が開いていない場合にはウォッチドッグタイマを ON にし，その設定時間を越えた場合には，プロセッサに対して割込みが発行される。プロセッサは，異常箇所を取得し，ブロー停止などの異常時処理を実行する。これらのリアルタイム監視によって，センシングモジュールの信頼性を向上している。

表 1 は，図 4 で示した FPGA の配置配線結果を示している。FPGA デバイスの 62% 程度の容量が必要であることが分かる。FPGA の容量は，今後の修正等を含めて 70~80% 程度が限度とされており，容量としては妥当なデバイスを選定していると言える。一方，表 2 は， μ ITRON で実装したソフトウェア規模を示しており，使用 FLASH メモリは，376KB / 8MB (4.7%)，使用 SDRAM は 507KB / 16MB (3.2%) と，十分なメモリ容量を確保している。

4. 実験結果と考察

分離型吸着装置における破過監視と累積計量を行うため，図 2 の構成に基づいた図 5 に示す実験装置を開発した。写真中央には制御盤が設置されており，上段にあるセンシ

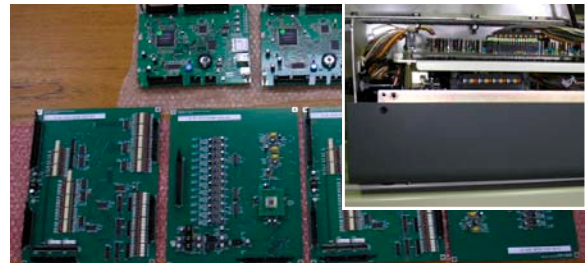


図 3. センシングモジュールの基板構成

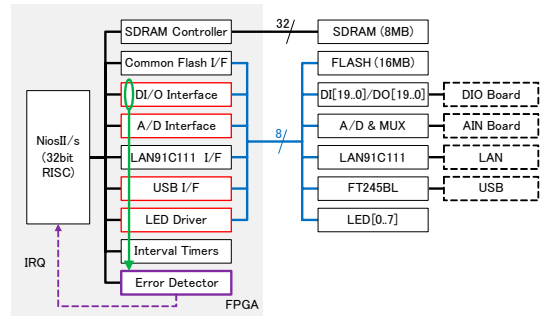


図 4. FPGA ボードのアーキテクチャ

表 1. 配置配線結果

Quartus II Version	6.1 Build 201 11/27/2006 SJ Full Version
Family	Cyclone
Device	EP1C6Q240C8
Total logic elements	3,678 / 5,980 (62%)
Total pins	171 / 185 (92%)
Total memory bits	46,720 / 92,160 (51%)
Total PLLs	1 / 2 (50%)

表 2. ソフトウェア規模

クラス	tsk	flg	mtx	cyc	alm	isr	行数	
							*.h	*.cpp
CtrlProc	1	0	0	0	0	0	45	137
IOProc	1	1	1	2	0	0	142	191
ErrorProc	3	1	0	0	2	0	89	169
CtrlProc	4	0	0	0	2	0	144	246
AnalysisProc	1	1	1	0	0	0	98	203
TCPProc	2	0	0	0	0	0	74	121
USBProc	2	1	0	0	0	1	82	151
MonitorTask	1	0	0	0	0	0	109	317
合計	15	4	2	2	4	1	783	1,535

ングモジュールの DC24V の制御信号は，制御盤内部にあるリレーを経由することで AC200V に変換され，実際の電動バルブへと伝わる。センシングモジュールの破過監視および累積計量結果は，LAN と USB を経由して手前に設置してあるパソコンでモニタリングできる。双方に送られるデータは同一であるが，LAN は回収システムの管理サーバを想定しており，USB は現場でのメンテナンスを想定している。

制御盤の右奥には吸着槽が設置されており，内部には円筒形の筒が 25 本，千鳥状に縦に並んでいる。筒には粒状活性炭 14.2kg が充填されており，吸着能力としては，新炭で 50%，再生炭で 15% に当たる VOC 重量を吸着できる。VOC ガス発生器には，トリクロロエチレン，もしくは，トルエンの溶剤缶にある溶剤が液送ポンプを通して供給されている。溶剤缶には，気化重量を測定できるように，重量計が設置されている。

本装置による実験方法は，次の通りである：

- (1) トルエンのガス濃度とセンサ出力値の検量曲線を求



図5. 実験装置の外観

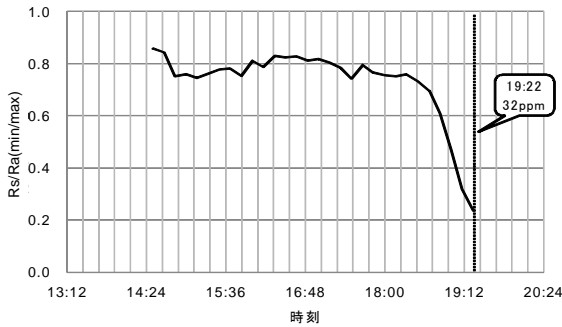


図6. 破過監視結果

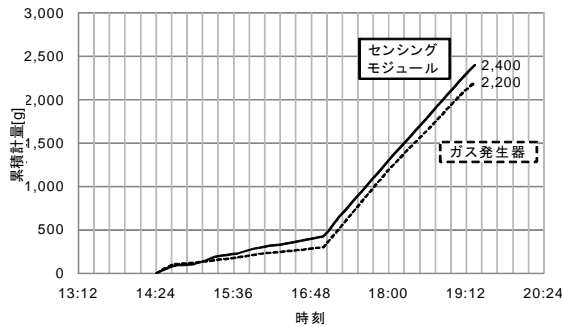


図7. 累積計量結果

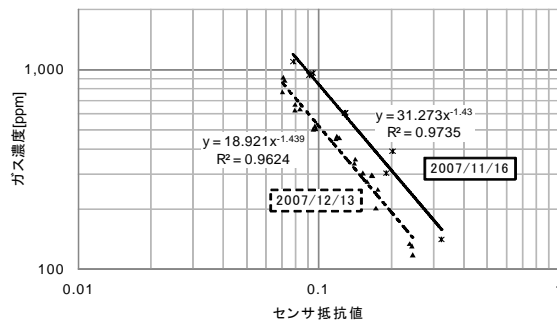


図8. 測定時期における検量曲線の違い

め、センシングモジュールに補正アルゴリズムを実装する。検量曲線を求めるに当たり、VOC発生量を100ppm単位で変化させながら、ガスクロとの同時計測で実施する。

- (2) ガス発生器により100~2,000ppmに調整したトルエンガスを装置入口に投入する。
- (3) 破過監視機構と累積計量機構のセンサ出力、排気側の風量計の出力をセンシングモジュールで処理し、それぞれの値をモニタリングする。
- (4) 気化させたトルエンの重量と、センシングモジュールによる計測結果を比較する。

ここでの重要なポイントは、(1)において、VOCガスが絶えず流れている動的環境下で補正するという点である。センサのデータシートには、濃度に対する出力値が示されているが、真空瓶等で生成した静的環境下で求めていることが多く、実環境での値と異なるためである。また、(3)において、活性炭の破過到達時の排気側濃度は、活性炭の材質や吸着槽への充填方法等に依存し、一意に決定することが困難であるため、厚生労働省が定める作業環境の管理濃度(トルエンでは50ppm)⁽²⁾に近づいた時を破過状態であると見なした。そして、累積計量値は、濃度と風量の積をセンシングモジュールで積算することにより求める。

図6は、破過監視結果を示しており、標準ガスに対するVOCガスでの抵抗値の比を時刻に対してプロットしている。この結果、32ppmになると抵抗値の比(Rs/Ra)が0.25となり、急激に低下している。このことから、破過監視機構を設置することにより、吸着材の破過状態を十分に監視できることが明らかとなった。また、図7は、累積計量結果を示しており、ガス発生器での気化重量とセンシングモジュールによる双方の値を時刻に対してプロットしている。この結果、気化重量と比べて10%の差となったが、その重量を連続的に変化させるガス濃度から求められることが分かった。しかし、図8は2つの測定時期におけるセンサ抵抗値に対するガスクロでのガス濃度をプロットした検量曲線を示しているが、1か月余りの差で平行移動している。この平行移動により、前述の10%の差が生じた11/16に比べ、12/13に取得した検量曲線では-25%の差を生じさせる。よって、確実な破過の時期を予測することは難しく、破過監視機構との併用によりVOCガスが大気へ放出されていないかを監視する必要がある。また、半導体センサは、温度および湿度等の環境に対する影響を受けやすいと言われており、検量曲線の精度を向上するためには、別のセンサによって補正する必要がある。

5. おわりに

本論文では、分離型VOC回収システムを提示するとともに、吸着装置用センシングモジュールについて述べた。吸着材の破過監視が可能になったことで、吸着材の回収コストを抑制でき、また、精度が低いものの累積計量がリアルタイムに行えるため、破過到達時刻を予測できる。従来のVOCガス処理装置において、センシングを行っていない状況を鑑みると、本開発は、処理装置の効率化に対する大きな前進と言える。センシングモジュールの開発により、分離型VOC回収システムの基礎が完成した。

(平成20年7月7日受付、平成20年8月8日再受付)

文 献

- (1) 「揮発性有機化合物(VOC)の排出規制制度の概要」, 環境省 <http://www.env.go.jp/air/osen/voc/seido/001.pdf>
- (2) 管理濃度等検討会: 「作業環境測定対象物質の管理濃度・許容濃度等一覧」, 厚生労働省(2008) <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2008/06/dl/s0610-8d.pdf>