

室内空気質評価システムの開発

北陸職業能力開発大学校 植 平 一 郎 滝 本 貢 悦
中 谷 一 高 田 実
鈴 木 太 朗* 金 子 哲 也

Development of an Evaluation System for Indoor Air Quality

Ichiro UEHIRA, Kouetsu TAKIMOTO, Hajime NAKATANI
Minoru TAKATA, Taro SUZUKI and Tetsuya KANEKO

要約 住居環境の高気密化・高断熱化指向に伴い、内装材や塗料等に含まれる化学物質による健康障害が社会問題化している。この原因化学物質として揮発性有機化学物質(VOC)が挙げられる。今回、主な原因ガスである複数のVOCを高感度で検出する室内空気質評価システムの開発を実施した。本システムの開発では、原因ガスとされるホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、酢酸エチルの4種に対し個別の酸化物半導体センサを複合化させ、組み込み型コンピュータからの制御によりガス感度検出データを取り込み、ガスの特定と濃度測定を行う方式をとった。システムの開発に当たっては、小型軽量化を図るとともに、計測に要する時間を短くすることを目指した。

平成13年度までの試行期間を踏まえ、センサ部の小型化の実現が可能となったが、感度の向上の面でさらに改善が求められる。データ取得ハードウェア部はセンサ部への温度制御を短時間で安定化が図れることが可能となるとともに、GUIの面で操作性の良好なものとなった。ガス種の特定と濃度測定については、複合ガスに含まれるガス種の概ねの検出と濃度測定が可能となった。

I はじめに

最近、新築住宅に入居後やリフォーム後に身体の不調を訴える人が増え、「新築病」や「シックハウス症候群」と言われて社会問題となっている。これらは、住宅の内装材、接着剤等に含まれるホルムアルデヒドやキシレン、トルエンをはじめとするVOCと呼ばれる揮発性有機化合物に起因していることが多い。これらを受け平成15年7月1日からは建築基準法改正によるシックハウス対策をスタートさせるなど、いくつかのVOCについては、濃度測定における公定法が定められている。

しかし、これらの化学物質の濃度計測や新築病を引き起こしている原因物質の探索は、時間もかかる上高価な分析装置を用いることが多いため多大な費用がかかるという問題点がある。そのため、関連業界を中心に安価で簡易に多種類にわたる原因物質を有効に測定可能な測定システムが望まれている。

そこで、測定手法や装置等の現状を調査する中から、個別のガス種に特異的に反応するセンサを複数組み合わせることにより、多種類のVOCガスを特定し、その濃度についても測定可能なシステムの開発を行う。開発に当たっては、測定に要する時間を短く携帯可能な住宅内の空気汚染度を総合的に評価するガスセンサシステムを目指す。

II 本システムの開発目標

本開発については、平成12年度から富山県電子電機工業会の会員企業と試行を実施している。その結果、多種類のガスの存在する環境のもとで個別のガス濃度値を示すことが出来た。これは今までの測定システムでは期待できなかったものであり、さらに製品化に向けた取組みを実施する。

具体的には、特に精度の向上と全体のシステムのコ

コンパクト化を目標に、以下の5点を内容として実用に耐える完成度と付加価値を高めた製品開発を目指す。

- (1) 装置の小型軽量化
- (2) センサ基板の小型化
- (3) センサ温度の測定方法改善
- (4) センサ温度の制御改善
- (5) センサ出力感度測定方法の改善

また、本システムを開発する過程において得られた技術的ノウハウを、能力開発セミナー・企業人スクール等の能力開発事業に活かす。

表1 室内空気質評価システムの仕様

OS	Windows98 SE
データ解析用ソフト	Visual Basic Excel
表示装置	10" TFT液晶 VGA
入力装置	10" タッチパネル
インターフェース	USB×2 RS232C×2
	LAN×2 PCMCIA×2
最大消費電力	30W
外形寸法	380×310×110

III 本システムの全体概要

本システムの主な仕様を表1に示す。OSをWindows 98としたのは、液晶タッチパネルがVGAモードのみに対応しているのに対し、Win2000以降では標準でXGA以上のサポートとなっているからである。また、入力をタッチパネルとすることで測定時の作業の簡略化を図っており、さらに、測定後のデータ集積もLANを利用して効率的に行えるシステムとなっている。図1にシステム全体を示す。筐体は携行型ジュラルミン・ケースであり、センサ・ユニット、ケーブル類等必要部品は全てケース内に収納される。また、測定時には図に示すようにセンサ・ユニットをケースから引出して使用する。



図1 システム全体図

IV ハードウェア部の製作

1 装置の小型軽量化

本システムの使用環境を考慮すると携行が容易であることと、新築家屋での電力未供給時における測定もあり得ることから、バッテリー駆動も可能な低消費電力であることが求められる。そして、これらの要求を満たすため、組み込みコンピュータを中心とした小型軽量・低消費電力の構成としている。表2にその構成要素を示す。ここで電源はAC/DCコンバータを用いているが、将来的にはバッテリー駆動の機能も付加する必要がある。

表2 室内空気質評価システム構成要素

機 器 名		メーカー	型 式	数	備 考
コン ポ ー ラ	CPUボード	Evalue	ECM-3410	1	CPU 300MHz, 電源5V 2A
	PCカード用モジュール	Evalue	EPM-1110	1	2スロット, PC/104対応
	メモリ	NB	PC100-256MB	1	ノートパソコン用
	2.5" HDD	IO-DATA	HDNV-N30G	1	30GB
	TFT液晶パネル+ タッチパネル	GUNZE	SC-S10V-25F01	1	SHARP LQ104V1DG11 VGA TFTパネル
	タッチパネル用 インターフェースカード	GUNZE	AHL-61-B	1	USB またはRS232C
	液晶パネル用インバータ	TDK	CXA-0217	1	最大7W 2出力
	アナログ入出力PCカード	CONTEC	AD12-8 (PM)	1	12bit AD 8チャンネル 入力 12bit DA 2チャンネル 出力
	電源 (AC入力3DC出力)	COSEL	LDC60F-1	1	5V 5A,12V 2A,-12V 0.5A
	測定レンジ設定用マイコンシステム		新規開発	1	H8/3664F使用
センサ・ユニット			新規開発	1	4素子 小型

消費電力は全システムで30Wであるが、液晶パネルのバックライトがその半分を占めているので、自動測定が可能となれば測定中の照明は不要となり、ノートパソコン程度のバッテリーでも数時間の使用に耐えられるようになる。また、ファン冷却による雰囲気破壊を防ぐため、低発熱であることも要求される。そこで本システムでは自然空冷のみとしている。

2 センサ基板の小型化

センサは4種の酸化物半導体 (In_2O_3 、 SnO_2 、 WO_3 、 ZnO) がセラミック基板上の電極間に塗布された物であり、ガスの有無及び温度変化による各素子の電気抵抗値の変化を検出する。

図2にセンサ基板の試作型と新型を示す。左側が試作型で右側が新型である。また、上図がセンサ面、下図がヒータ面である。

センサのセラミック基板を小型化することによって、センサ部の熱容量を小さくすることができ、温度制御の高速化と安定性の向上をもたらす。また、400℃での消費電力は約30Wから4W弱に減少し、長時間のバッテリー駆動も可能となった。

3 センサ温度の測定方法改善

センサ各素子の電気抵抗値は温度によって変化し、この変化の度合いから混合ガスの成分を分析するものである。センサの温度を高精度で制御する必要がある。試作システムではセンサ部にアルメル・クロメル (Kタイプ) の熱電対を、絶縁カバー用厚膜ペーストによって接合したものを用いていたが、セラミック基板に熱的不均一が生じるとともに、セラミックと接合用ペーストの膨張率の差異が原因と見られる基板の破断が450℃前後で頻繁に発生した。図2の試作型センサにその破断の様子がみられるが、接合用ペースト上およびヒータ・フィラメントに沿った形で亀裂が生じる。この傾向は全ての破断した基板に共通のものである。この破断を防ぐため、試作システムでは基板を急激に加熱しないよう225℃まで徐々に温度を上昇させていた。

ところで、この基板の加熱に用いている発熱体は、白金ペーストをフィラメント状に基板に印刷したものである。フィラメント自体の抵抗から温度の推定が可能であると考えられる。

そこで、ヒータ・フィラメント両端間の電位差を0.5Vから6Vまで0.5V毎に変化させ、各電位差でのヒータ電流とセンサ基板温度を測定した。電圧・電流はデ

ジタル・マルチメータ、温度は放射温度計によって測定した。この結果を図3に示す。これは3回繰返し測定した値をそのままプロットしたものであるが、履歴も見られず、高精度な温度制御が可能であることを示している。

この結果では、200℃以上においてフィラメント印加電圧と温度とは比例している。電圧のみで温度を制御することも可能と思われるが、外気温や湿度によりヒータからの放熱量が変動するため、電圧を一定に保持しても温度が制御されているとは言えない。したがって、抵抗値を一定に保持することが必要となる。

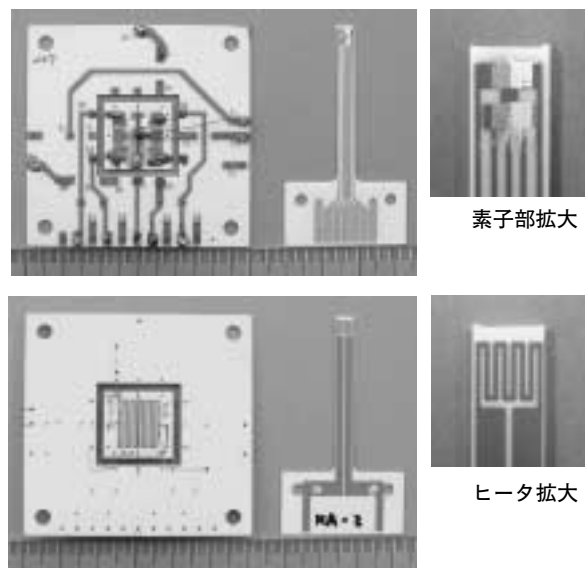


図2 新旧センサ基板の比較
(左：試作型、右：新型)

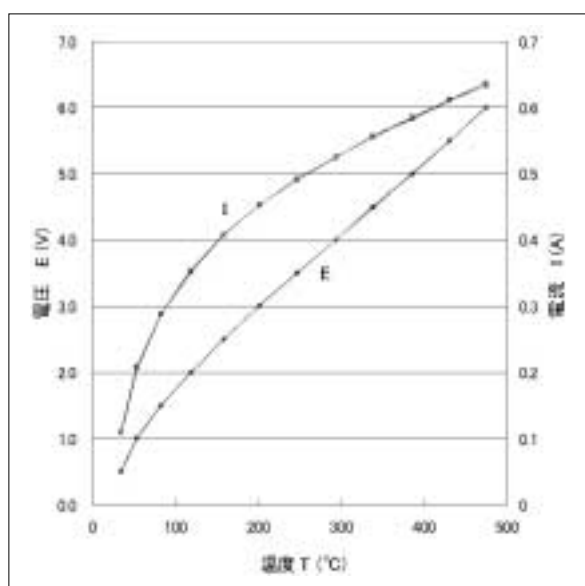


図3 センサ温度とヒータ・フィラメント
印加電圧・電流

電圧と電流から算出した抵抗値と、これに対するヒータ温度との関係を図4に示す。これよりフィラメント抵抗と温度とはほぼ比例する結果が得られた。図中では温度を抵抗値の2次式で近似しているが、ガスの測定は225℃と400℃の2点で行われることから、200℃以上における1次式近似で十分な精度が得られる。

なお、センサのヒータの特性は個体差があるので、温度校正用のプログラムも用意する必要がある。

図5に温度校正の実施例を示す。作業を簡単にするため、他のセンサから推定される225℃と400℃での電圧をフィラメントに印加し、各々の電圧での温度を放射温度計で測定する。この測定値をプログラムに入力し、2点での結果からフィラメント抵抗に対するヒータ温度の1次近似式を求める。

図5では電圧が一定値になっても電流は減少していく様子が見られる。これは電圧の変化に対し温度が遅れて上昇していることを表す。なお、このプログラムは後述の温度制御システムを使用して抵抗値を算出している。

この抵抗値からセンサ温度を推定することにより、熱電対とその接合用ペーストが不要となり500℃以上でも破断が起こらなくなった。また、急激な温度上昇にも耐えられるので、温度制御が単純かつ高速になり得る。

4 センサ温度の制御方法改善

センサの温度制御は図6に示すコンピュータによる比例積分制御としている。

ヒータ・フィラメント印加電圧 V_r と、電流を電圧に変換した値 V_i をADコンバータによってコンピュータに取込み、これらにより抵抗値 R を計算する。また、センサ温度校正プログラムによって取得した係数 a 、 b によって温度に変換する。この値と設定温度との偏差が0になるようにP I制御する。トランジスタ T_r 前段の増幅回路は、ここで用いているアナログ入出力インターフェースカードの電圧出力が0～+4.096Vに設定されているので、これを2倍に増幅するためのものである。

制御プログラムにおいて、比例・積分の各係数 P 、 I を調整することにより、急速な立ち上がりと長時間に亘る安定した温度制御が可能となった。(図8参照)

5 センサ出力感度測定方法の改善

センサ抵抗は素子によって大きく異なり、約500Ωから10MΩに亘るので、測定装置のダイナミック・レ

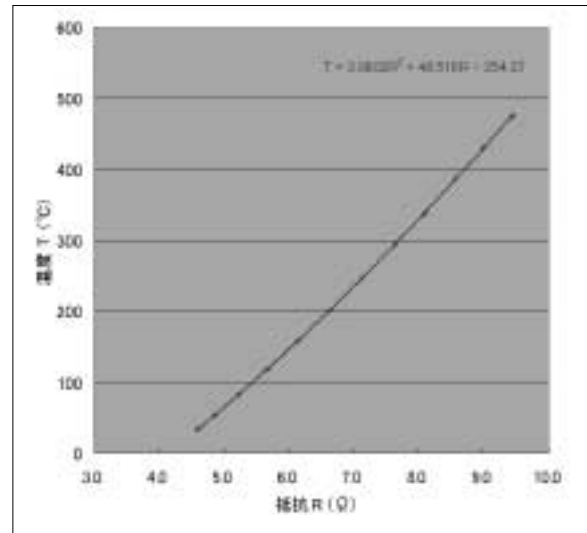


図4 ヒータ・フィラメント抵抗とセンサ温度

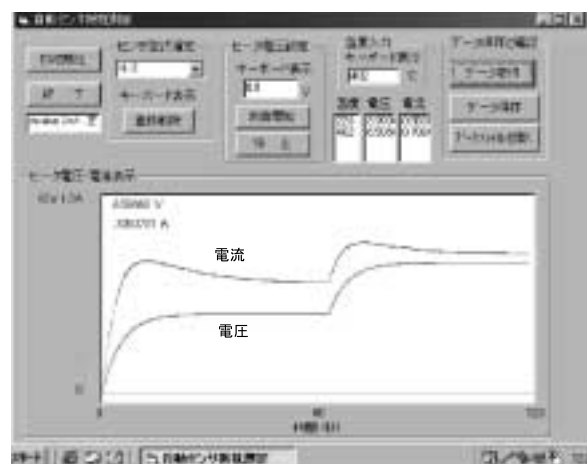


図5 センサ温度校正プログラム

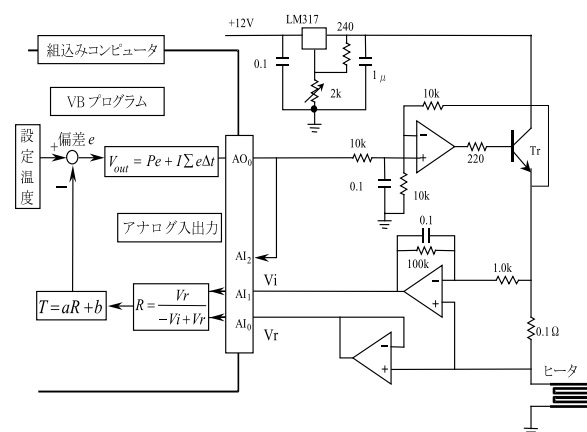


図6 温度制御システム

ンジを広くとらなければならない。そのため各素子の抵抗値を固定レンジで測定すればADコンバータの量子化誤差が無視できなくなる。これを避けるために、本システムではデジタル・ポテンシオメータを用いてマイクロ・コンピュータで最適な測定条件に設定するシステムを採用した。この概略図を図7に示す。

ポテンシオメータAD7376AN100は約1k～100kΩの範囲で128段階の設定が可能である。図中Ch1～Ch4はセンサ素子を表し、これをアナログ・スイッチADG432で切替える。左側の増幅回路は各センサ素子への印加電圧を変更するためのものであり-0.98V～-9.8Vに設定される。この電圧はアナログ入出力カードの入力ポートAI₄～AI₇にてコンピュータに取込まれる。センサ素子の電流は右下の増幅回路によって電圧に変換されAI₂とマイクロ・コンピュータH8/3664Fのアナログ入力AN0に入力される。マイコンはこの入力値がオーバフローしないように各デジタル・ポテンシオメータの抵抗値を自動的に設定する。そして現在測定中の素子番号と各ポテンシオメータの設定値をコンピュータにシリアルで送信する。コンピュータはこれらの情報とAI₂、及びAI₄～AI₇の入力値から各素子の抵抗値を計算する。

このシステムによりコンピュータ上の操作だけで測定が行えるようになり、遠隔操作による集中管理も可能となった。また、このマイコンシステムをセンサと一体化することにより、今後さらにセンサの種類の増加や機能の向上があった場合にも、本体に変更を加えずにセンサ部のみの変更で対応可能となる。

6 センサ部の特性測定

測定例を図8に示す。これはトルエンの濃度1ppm、温度が400℃から225℃に変化した時の結果である。図中、実線で示されているのが温度で±0.5℃に安定している。破線は各素子の抵抗値であり対数で表示されている。温度による抵抗値の変化は、ガスの種類や濃度によって傾向が異なるので、これを分析することによって混合ガスの成分が推定できると考えられる。なお、ガス濃度1、10、100ppmでの測定結果と、この測定に先立って行ったガスの存在しない状態での測定値とから算出した感度を表3のようにファイルに保存する。ここで抵抗値の単位は[kΩ]である。表3の感度を図示すると図9のようになる。

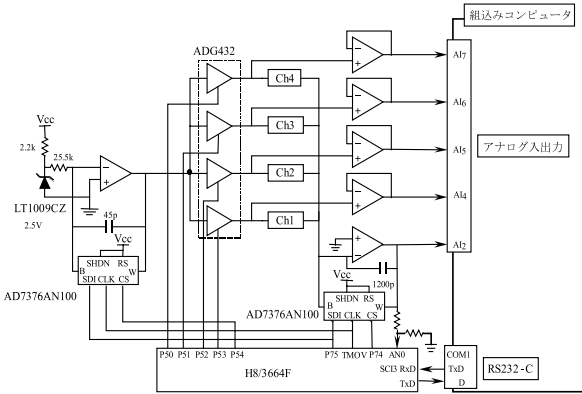


図7 センサ抵抗測定回路

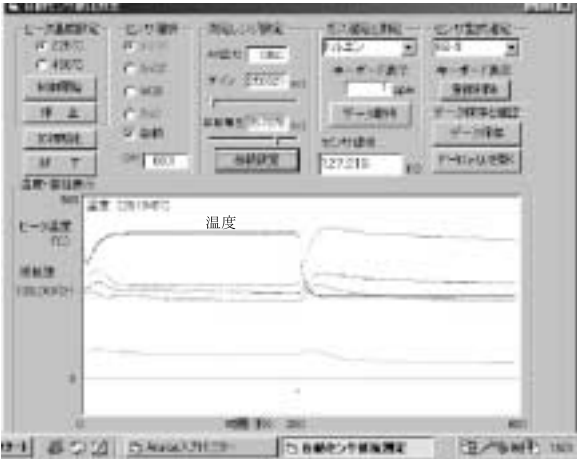


図8 測定例（トルエン1ppm）

表3 センサ抵抗の測定結果と感度

抵 抗 (kΩ)					
ガス名	ホルム・アルデヒド		センサ型式		KB-3
濃度(ppm)	温度(°C)	In ₂ O ₃	SnO ₂	WO ₃	ZnO
0	225.5995	3.682982	5662.008	694.988	203.6343
1	224.543	1.032686	1093.173	451.6219	153.1139
10	225.0266	0.504555	425.8479	230.7148	119.1705
100	225.1915	0.258605	90.46312	291.9836	87.88361
0	399.8091	5.194935	398.8837	219.3223	175.4359
1	399.684	2.654144	339.6813	128.6086	110.3173
10	400.3178	1.351607	194.9362	88.12254	68.89194
100	399.9431	0.485063	38.23447	38.98843	22.84124

感 度					
濃度(ppm)	温度(°C)	In ₂ O ₃	SnO ₂	WO ₃	ZnO
1	224.543	2.56641	4.179425	0.538871	0.329953
10	225.4361	6.29946	12.29585	2.012325	0.708764
100	225.1915	13.24171	61.58913	1.38023	1.317091
1	399.684	0.957292	0.174288	0.705347	0.590285
10	400.3178	2.843525	1.046227	1.488833	1.546537
100	399.9431	9.709822	9.432568	4.625318	6.680664

V ガスの分析ソフトの制作と測定結果

本開発の目的の一つは、測定システムのコンパクト化にある。コンピュータ本体は汎用のOSが使用可能であるが、入力にはキーボードやマウスに替わってタッチパネルで行うようにシステムが作られた。その意味で測定・分析においても、ソフトウェアの簡素化・操作の簡単化が図られた。

ここでは、

- ① 単独で実行可能なプログラムとする。
- ② 入力はタッチパネルによる項目の選択のみで行う。
- ③ 表示内容は、必要最小限としてわかりやすく簡素化する。

という観点から、開発言語をVisual Basicとして測定・分析プログラムを開発した。

測定・分析プログラムが持つ機能は以下である。

- ① 基本データ測定 センサの基本データを測定し、濃度と感度の特性を求める。
- ② 未知のガス測定 未知のガスの感度を測定し、その成分を分析する。
- ③ データの保存 各測定データをファイルに保存する。

これらの機能を実現すべく、プログラムの大まかな構成を図10に示す。

既定のガスでの抵抗値から、各センサの感度と濃度との特性は以下の手順で求められる。まず、空気中の抵抗 R_a とガス中での抵抗 R_g とから、感度 y は次式として定義される。(ここでは、濃度 x がゼロ、すなわち空気中での感度 y をゼロとなるように定義した。)

$$y = \frac{R_a - R_g}{R_g} = \frac{R_a}{R_g} - 1 \quad (1)$$

感度 y と濃度 x との間に、よい近似として以下の指数関係が認められ、その係数 a, b は最小二乗法より求められる。(以下の表4参照)

$$y = ax^b \quad (2)$$

或いは $\log y = b \log x + \log a$

単独ガスにおける濃度と感度の測定より(表3参照)、関係式(2)が求められる。たとえば、最小二乗法によるホルムアルデヒドの場合の関係式は、表4、図11のようになり、この近似が良い近似であると認められる。ここで、濃度 x はppmを単位とし、感度 y と係数 a, b は無次元である。

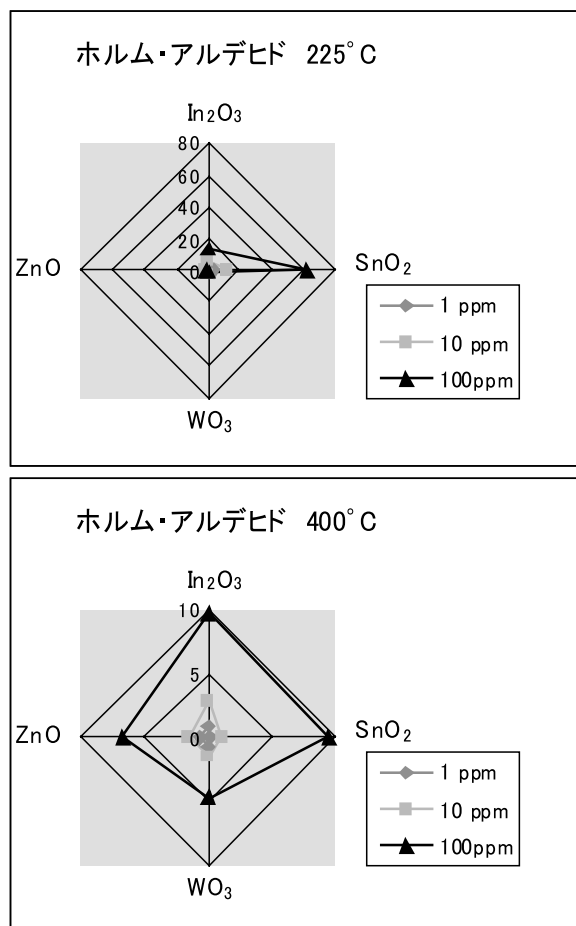


図9 感度のレーダチャート

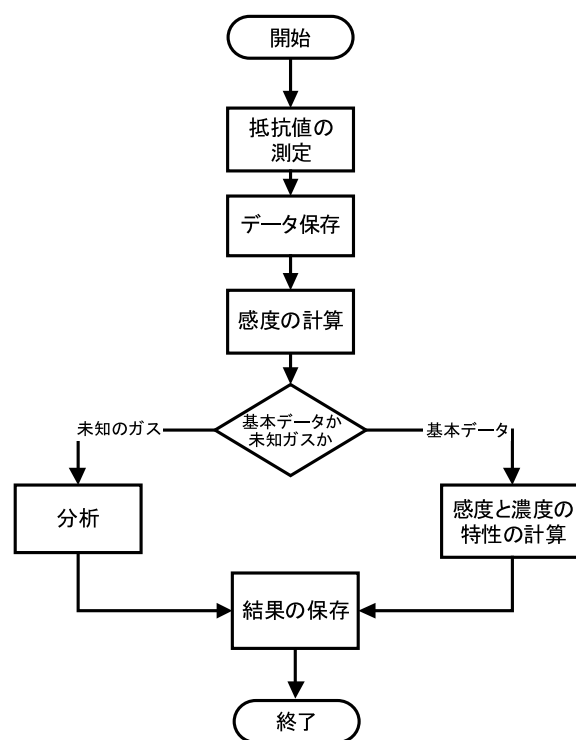


図10 処理のフローチャート

この関係式(2)の特性はガスの種類に依らず、共通のものである。ただし、感度や係数等の値そのものは、測定のごとに変化し、常に安定した値として得られるものではなかった。測定時の気温や湿度の影響及び使用回数によるセンサの劣化が原因と考えられる。

関係式(2)が求まると、単独のガスについてはその感度(抵抗値)より濃度が推定できる。

2種類以上の混合ガスは、複雑な相互作用により簡単な関係式では表されないと考えられるが、ここでは以下のように各ガスの効果は単にそれらの和として感度 y に反映されるものと仮定した。

$$y = \sum_i y_i = \sum_i a_i x_i^{b_i} \quad (3)$$

ここで、 x_i は各ガスの濃度、 y_i は各ガスの感度、 a_i 、 b_i は各ガスについての係数である。

測定された感度 y_i に対して、適当な初期値 x_i から出発して、逐次法で各ガスの濃度が求められた。実測値 y_i より $x_i \geq 0$ の範囲で(3)の方程式は必ずしも解を持ち得ないので、ここでは感度 y_i が負になったときは、0とおくという処理のもとで収束した値を解とした。

その分析結果の一例を表5、図12に示す。

この結果は目下の粗い近似の中でいい値を与えており、どの種のガスが主に含まれているかという判定に役立つものと考えられる。

より精度の高い分析結果を得るためには、測定時の環境を一定にした厳密な測定が要求されるとともにセンサの使用回数を考慮した分析が必要と考える。データの再現性が得られるような厳密な測定のもとで、混合ガスの分析でも定量的な議論が可能となり、ガス間の相互作用を考えた新たな関係式の導入やニューロコンピュータなどのソフト開発を含む分析法が有効になると考えられる。

VI おわりに

今回、より小型化と信頼性を目指したシステム開発を行った。平成13年度で開発されたシステムではシーケンサとノートパソコンで処理をする方式であったが、組み込み型パソコンのみでの処理方式へと小型化が可能となった。さらにセンサ素子そのものも小型化できた。ガス判定や濃度計測においては、基本的には前回の方式を踏襲したので測定時間は短縮できたものの、測定精度は同程度のものとなった。

今後の課題としては、センサの材料である酸化金属半導体特有の性質をより多くの基礎データの取得によ

り信頼性の持てる特性を求めることである。そのことにより、精度の高いガス判定や濃度測定に結び付けていきたい。

表4 近似式の係数

	ZnO	In ₂ O ₃	SnO ₂
温度(°C)	400	225	225
係数 a	0.543085	2.633594	3.824717
べき乗 b	0.526879	0.356309	0.584194
相関係数 r	0.992996	0.998515	0.993542

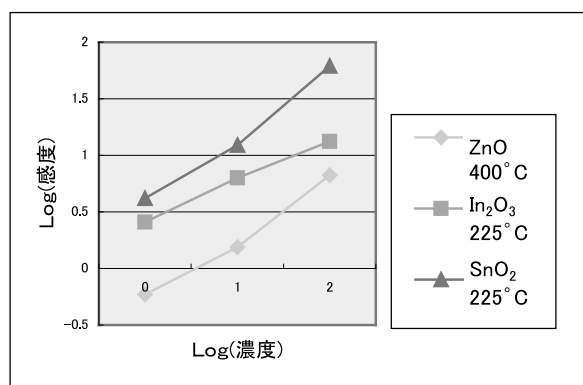


図11 測定データの分布

表5 分析結果の例

	酢酸エチル	キシレン
混合ガス	10ppm	1ppm
分析結果	9.1ppm	0.7ppm

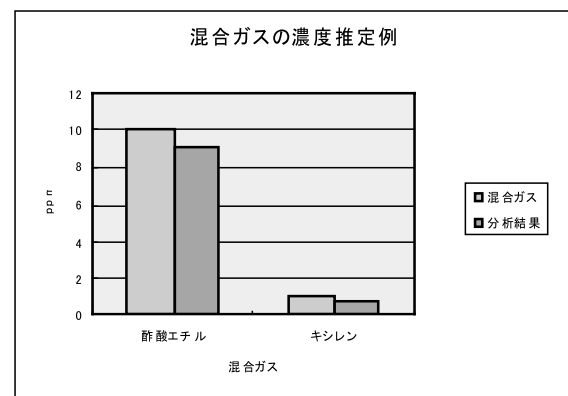


図12 混合ガスの濃度推定例

謝 辞

最後に、今回の開発を行うにあたって事業主団体研究開発事業としてご協力ご支援をいただいた富山県電子電機工業会および参加企業の方々、またVOCセンサに関してご協力をいただいた富山県工業技術センターの角崎雅弘氏にこの場を借りて厚く感謝申し上げます。

[参考文献]

- (1) シックハウスセンサー研究開発ワーキンググループ：地域高度技能活用推進事業活動報告書「室内空気汚染度評価センサ(シックハウスセンサー)の研究開発,E&I研究会,2/2002.
- (2) 酸化物半導体VOCセンサの作製とその高感度に関する研究、富山県工業技術センター、角崎雅博、3/2001