

## 紫外吸収分光法を用いた高温ガス濃度計測装置の開発

(株)四国総合研究所 電子技術部 朝日一平 杉本幸代 星野礼香 二宮英樹  
(株)長峰製作所 長峰 勝 高地一美 萱原祥仁 黒田眞司 藤井達也 山地貴史 中元優介 井上 拓  
(株)テクノ・サクセス 戸井 弘 福田和秀

キーワード： 紫外吸収分光法  
ガス濃度計測  
高温ガス  
硫黄酸化物  
窒素酸化物  
アンモニア

Key Words : Ultra-violet absorption spectroscopy  
Gas concentration measurement  
High temperature gas  
SO<sub>x</sub>  
NO<sub>x</sub>  
NH<sub>3</sub>

### Development of high temperature gas concentration measurement system by ultraviolet absorption spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Ippei Asahi, Sachiyo Sugimoto, Ayako Hoshino, Hideki Ninomiya

Nagamine Manufacturing Co., Ltd.

Masaru Nagamine, Kazumi Takachi, Yoshihito Kayahara, Shinji Kuroda, Tatsuya Fujii, Takafumi Yamaji

Yusuke Nakamoto, Taku Inoue

Techno-Success, Inc.

Hiroshi Doi, Kazuhide Fukuta

### Abstract

A compact, low-cost gas measurement and monitoring system using ultraviolet absorption spectroscopy was developed. The system consists of the main body, which includes the light source and receiver, a sensor chip, and a monitor for display and control. The sensor chip is connected to the light source and receiver by a heat-resistant optical fiber. The dimension of the main body is 213 x 125 x 75 mm, and its weight is 1460 g. The sensor chip, whose dimension is 30 x 67 x 13 mm, is mounted on a ceramic optical bench along with optical components made of quartz, which enables the sensor to be used in a high temperature environment. The system can measure SO<sub>2</sub> or NH<sub>3</sub> with a detection limit of less than 1 ppm. This sensor can operate at a temperature of 200 °C, so the system can be applied to measurement and monitoring of exhaust gas in high temperature furnaces.

## 1. 序 論

近年、各種プラント等における合理化・省エネルギー化や、次世代エネルギー利用の推進等に伴い、ガス計測技術の高度化、具体的には装置の小型・低コスト化に加え、高感度化、対象ガス種のマルチ化、応答の高速化などが強く求められている。これまでに著者らは、光学的計測原理と各種微細加工技術の融合により、これらの高度化を実現するガスセンサシステムに関する研究開発及び製品化研究を進めてきた<sup>[1]</sup>。ここでは、各種熱機関の排気ガス成分測定や、大気環境モニタリングとしてニーズの高い  $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  や、工業、医療分野に用いられる各種有機化合物を対象に開発した、紫外吸収分光法に基づく小型光学式マルチガスセンサについて、研究開発の成果及び製品モデルの性能等について報告する。

## 2. 計測原理

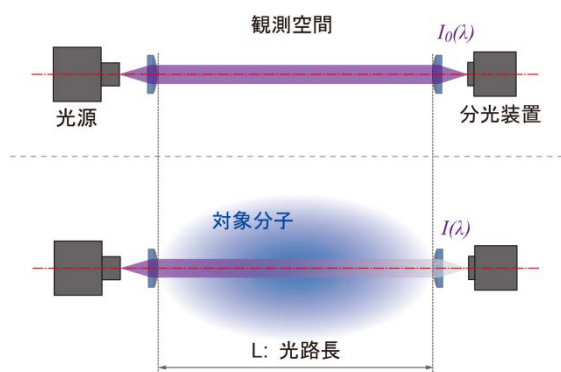


図1 吸収分光法のご概念

図1に示すように、吸収分光法は、観測空間を透過した光を分光測定し、対象分子によって吸収された場合のスペクトルと対象分子が存在しない場合のスペクトルを比較することによって、分子種とその密度または濃度を求める手法である。ある特定の分子により吸収され、分光装置に導入される光強度は、Beer-Lambertの法則として(1)式で表される<sup>[2]</sup>。

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-n\sigma(\lambda)L} \quad (1)$$

ここで、 $I(\lambda)$ は、対象分子が存在する場合の光強度、 $I_0(\lambda)$ は、対象分子が存在しない場合の光強

度、 $n$ は対象分子の密度(単位体積当たりの分子数) $[\text{cm}^{-3}]$ 、 $\sigma(\lambda)$ は吸収断面積 $[\text{cm}^2]$ 、 $L$ は光路長 $[\text{cm}]$ である。吸収断面積は、分子による光の吸収量の指標となる。ガス濃度 $c$ は、単位体積当たりの総分子数を $M[\text{cm}^{-3}]$ として $c=n/N \times 10^6[\text{ppm}]$ により求められる<sup>[2]</sup>。

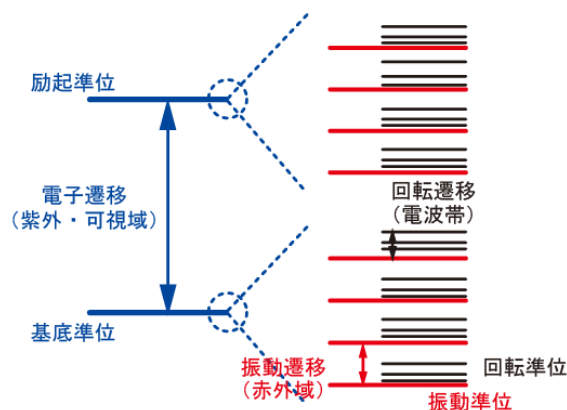


図2 分子のエネルギー準位と吸収バンド

物質による光の吸収は、分子の励起エネルギーに一致した電磁波の入射に伴い、分子内のエネルギー状態がある準位から他の準位へ遷移することにより生じる。分子のエネルギー状態は電子準位、振動準位、回転準位などにより規定され、図2に示すように、各電子準位には幾つかの振動準位が、更に各振動準位には幾つかの回転準位が存在する。即ち、物質が吸収する電磁波の波長域についてみると、準位間エネルギーが高い電子準位間遷移では紫外から可視域、振動準位間遷移では赤外域、回転準位間遷移では電波帯となる。高温ガス濃度計測を目的としたガス分析計として、市販されている製品の多くは、分子の振動準位間遷移、即ち赤外領域における光の吸収を用いた装置である。これは、比較的波長が長い光源を用いることで、計測時に対象ガスと共に観測空間に存在する煤塵等の微粒子の影響を抑制できること、半導体レーザーを主体として光源の選択性が高いことなどによる。しかしながら、赤外域には観測空間に通常存在する  $\text{H}_2\text{O}$  の吸収が広範囲にあり、その干渉を防ぐための方策が必須となる。また、高感度検出を実現するためには、場合によりメートルオーダー以上の長い光路長が必要になるため、必然的に装置が大型且つ高価になる。これに対し、本研究では紫外領域における光吸収に注目する。図3

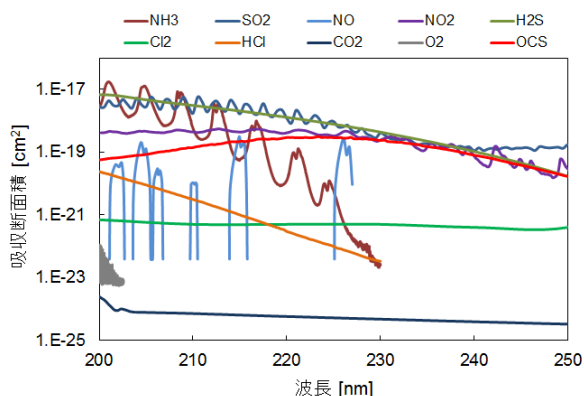


図 3 深紫外域における各種分子の吸収断面積

に示す紫外領域 (200~250nm) に吸収をもつ物質の代表例をみると、高温ガス濃度計測において対象となる多くの化合物が吸収を示す一方で、 $\text{H}_2\text{O}$  の吸収は存在しない。また、吸収断面積  $\sigma$  についてみると、例えば  $\text{NH}_3$  は 200~215nm において  $10^{-17}\text{cm}^2$  オーダとなっている。一方、赤外域 ( $1.5\mu\text{m}$  帯) では  $10^{-22}\text{cm}^2$  オーダである<sup>[3]</sup>ため、単純に比較すると紫外領域の吸収が  $10^5$  倍程度感度が高い、即ち光路長を  $10^5$  分の 1 程度まで縮小でき、装置の大幅な小型化が実現できる可能性が示唆される。また、近年では、小型重水素ランプや深紫外 LED など、汎用性の高い紫外光源や、紫外線の照射によって生じる光学的な劣化を抑制する紫外線用の各種光学部品の開発が進んでいる。これらを総合的に勘案し、本研究では紫外吸収分光法を原理として用い、測定部に耐熱性材料を適用することで高温環境への適用を可能とする、小型且つ低コストなガス濃度計測装置の研究開発を行った。機能として既存のガス分析計と同等以上を目指し、検出対象を、電気事業等において比較的ニーズの高い  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$  を中心とするマルチガス成分とし、検出限界を  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  について 1ppm、耐熱温度  $200^\circ\text{C}$  以上を目標とした。

### 3. 装置構成

#### 3.1 概要

図 4 に、本研究における装置構成の概要を示す。光学的計測手法を用いた高温ガス中の成分濃度分析における計測方式は、観測空間内に光送受信光学系を配置する直接挿入型と、観測空間から高

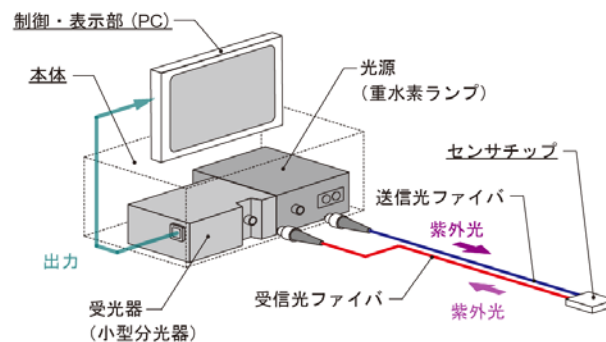


図 4 紫外吸収分光法を用いたガス濃度計測装置の構成

温ガスをサンプリングし、煤塵や水蒸気等計測を阻害する要因を除去・調整した後、光送受信光学系内に配置されたガスセルへ導入するサンプリング型に大別される。

図 4 に示すように、本装置は、光源・受光器等の主要機器が格納された本体と、観測空間に配置し、対象ガスへの光の照射および透過光の受光を行うセンサチップ及び、計測結果の表示と装置の制御を行う制御・表示部により構成され、センサチップに耐熱性をもたせることで、高温ガスの計測が可能となる。本装置構成では、センサチップを観測空間へ配置することで直接計測型に適用でき、ガスセル内にセンサチップを組込むことでサンプリング型に適用することができる。光源から照射された紫外光は、送信光ファイバによりセンサチップへ伝送され、センサチップ上において被検ガスによる吸収作用を経て、受信光ファイバにより小型分光器へ導入される。出力信号は任意の PC により演算処理・表示される。

#### 3.2 センサチップの構成

本装置では、被検ガス雰囲気中を紫外光が伝搬する距離が長い程感度が向上する。一方、センサチップは小型である程用途は拡大する。両者を満たすためには、センサチップ上において紫外光を反射し、往復させる必要があるが、一般的な光学ミラー等の反射素子は耐熱性の制約により用いることができない。ここでは、プリズムの全反射によって光路を曲げ、センサチップ内において紫外光を複数回伝搬させることにより、光路長を確保した。図 5 は、製作したセンサチップの光学系構成の一例(光路長 320mm モデル)であり、図 6

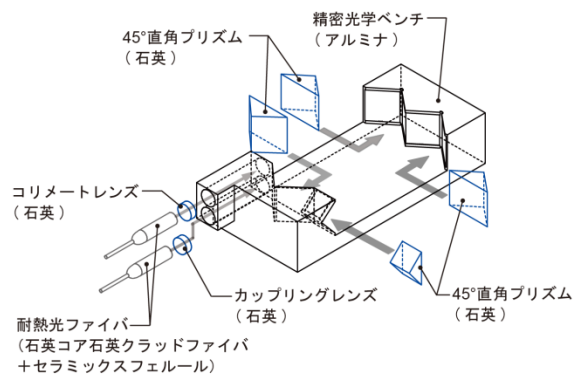


図5 センサチップの構造例  
(光路長 320mm モデル)

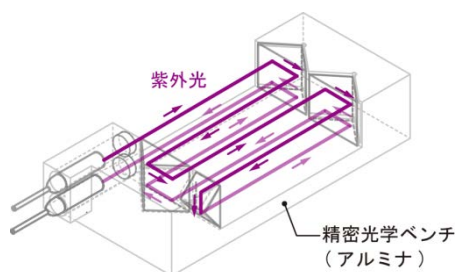


図6 センサチップ上における光路  
(光路長 320mm モデル)

は同センサチップ上における紫外光の光路を示す。

図5に示すように、送信光ファイバからコリメートレンズ(シグマ光機社製、合成石英製球面平凸レンズ、SLSQ-05-12P)を介してセンサチップ上に放射された紫外光は、4個のプリズム(THORLABS社製、UV溶融石英直角プリズム、PS610×3、シグマ光機社製、合成石英製45°直角プリズム、RPSQ07-2L×1)により、センサチップ上を上下段各4回通過し、320mmの光路長を経て、カップリングレンズ(シグマ光機社製、合成石英製球面平凸レンズ、SLSQ-05-15P)により受信光ファイバへ結合される。同様の方式により、光路長が80mm、160mm、320mmの3種類のセンサチップをそれぞれ製作し、対象ガスの濃度域により適当なセンサチップを用いることとした。

これらの反射を含む光学系を精度よく配置固定し、高温に耐えうるベースとして、アルミナセラミックスを用いた精密光学ベンチを開発した。

アルミナは、セラミックスとしては一般的な材料であり、熱膨張率が低く、高温時における相転移等の特異現象も生じないため、光学ベンチ材料に適している。また、光学ベンチは、各種光学部品を固定するため、全体としては凹凸、斜面等が混在した複雑な形状となる。ここでは、全体の構造を複数の部品に分割し、個々のパーツを金型を用いた射出成形が可能な形状として設計した。これによって、量産化への移行が容易となる。製作したセンサチップの一例(光路長 320mm モデル)の外観を図7に示す。

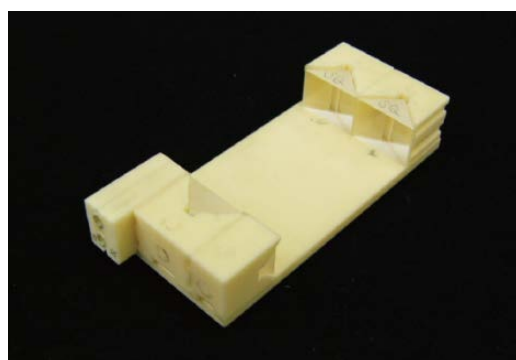


図7 耐熱センサチップ外観  
(光路長 320mm モデル)

センサチップへの光の導入と、センサチップ上を通過した光の伝送をファイバにより行うため、これらの光ファイバにも耐熱性を付加する必要がある。ここでは、石英コア、石英クラッドの光ファイバ素線(Ceram Optec社製、Optran UV100/110, UV200/220)と、セラミックスフェルールをシリカ系耐熱接着剤で固定した耐熱光ファイバを製作し、センサチップへ適用した。耐熱光ファイバの構造と外観を図8に示す。セラミックスフェルールは、200℃以下で用いる場合、汎用のジルコニアフェルール(THORLABS社製、Ø2.5 mm セラミック製フェルール、CF126-10, CF230-10)を適用し、より高温の雰囲気に応用する場合はアルミナフェルール(長峰製作所社製、特注仕様)を適用する。また、熱膨張率の低いシリカ系接着(オーデック社製、セラムボンド、618N)を用いることにより、高温時における部品の膨張・変形による光ファイバの破損を防止し、光伝送特性の変化を抑制した。製作した耐熱光フ

ファイバを高温炉内において対向配置により光結合し、紫外光を伝送した場合における、伝送光強度の温度依存性を図 9 に示す。

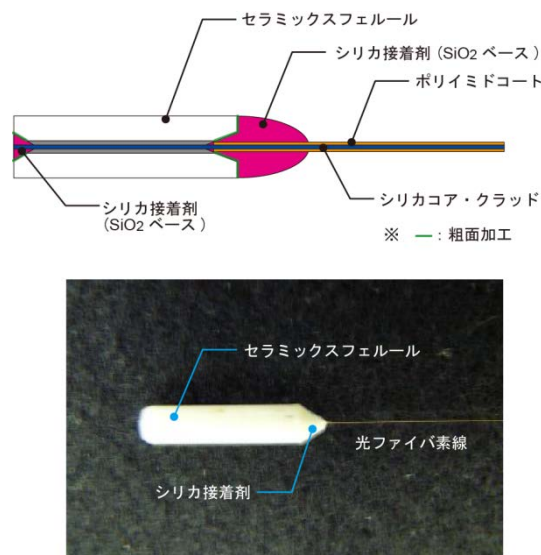


図 8 耐熱光ファイバの構造(上)と外観(下)

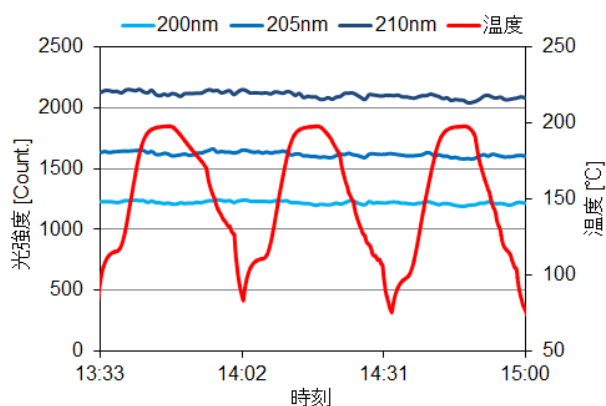


図 9 耐熱光ファイバ：伝送光強度の温度依存性

図 9 に示すように、耐熱光ファイバの伝送特性は、70℃~200℃の温度変化に影響を受けず、いずれの波長においても安定した光伝送がなされていることがわかる。

これらの、石英製小型光学部品、セラミックス光学ベンチ、耐熱光ファイバをシリカ系接着剤で接合することにより、石英とセラミックスのみにより構成される耐熱性を有する小型センサチップが完成した。寸法は 30×67×13mm、重量は 52g である。本センサチップを用いることで、200℃以上の高温環境においても光送受信機能が維持

され、高感度ガス濃度計測が可能となる。

### 3.3 システム構成

本装置は、光源に小型重水素ランプ光源(浜松ホトニクス社製、小型紫外-可視 S2D2 ファイバ光源, L10671)、分光装置として、ガス濃度計測の感度やマルチ計測機能を高めるために、観測する波長領域を限定し、波長分解能と感度が最適化された小型分光器(Ocean optics 社製、小型ファイバ光学分光器, USB2000+)を用い、本体には、これらとリチウムイオンバッテリーが内蔵されている。分光装置からのスペクトル情報に関する出力信号は、専用のソフトウェアがインストールされたタブレット PC 等の任意の電算機に送信され、演算処理、表示がなされる。

本手法では、前述のとおりある一つの波長に注目し、対象成分が存在しない場合における透過光スペクトル(以下基準スペクトル)と対象成分が存在する場合における透過スペクトルにより吸光度を求め、これを事前に取得したデータベースの値と比較することで、原理的にはガス濃度を求めることができる。しかし、実際の計測の過程においては、光学部品の劣化など種々の要因により基準スペクトルに時間変化が生じるケース、或いは混合ガス成分にブロードな吸収スペクトルを示す物質が含まれるケースなどが考えられ、これらの場合、単一波長における値のみを用いる方法ではガス濃度の計測が困難になる。したがって、本装置では、吸光度パターンの山(以下ピーク波長)と谷(以下ボトム波長)に注目し、それぞれの波長における基準スペクトルとの比を用いて、分子密度を求める手法をとる。図 10 に NH<sub>3</sub> ガスの場合における本手法の適用例を示す。

図 10 の場合、NH<sub>3</sub> の吸光度のピーク波長(A:204.8nm)とボトム波長(B:206.9nm)の差をとり、光路長  $L$ 、吸収断面積  $\sigma$ (データベース)を用いて、

$$n = \frac{\ln B - \ln A}{L \cdot (\sigma_{@204.8nm} - \sigma_{@206.9nm})} \quad (3)$$

により比較することで分子密度を求めた。この時、吸光度の測定値が自然対数による値であるか常用対数による値であるかに留意が必要である。また、吸収断面積は温度依存性を有するため、観測

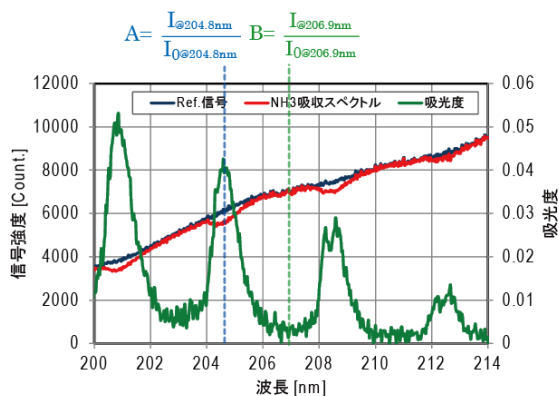


図 10 NH<sub>3</sub> 計測における濃度演算手法

空間の温度域に合わせ、データベースを取得しておく必要がある。

本体にセンサチップ(光路長 80mm モデル)を接続した本装置外観を図 11 に示す。

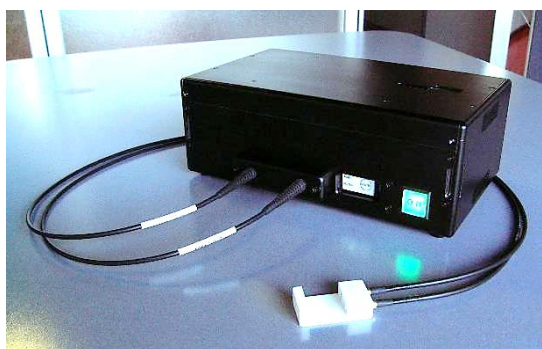


図 11 装置外観

本体寸法は 213×125×75mm, 重量 1460g(バッテリー含む)であり, 十分に携帯可能である。これにより, 市販の光学式ガス分析計と比較して大幅な小型軽量化が実現された。

#### 4. 機能試験

本装置を用いて, ガス濃度計測機能試験を行った。室温環境において, ガスセル内にセンサチップを配置し, セル内に導入したガスの設定濃度値と, 計測結果を比較した。ガス種は NH<sub>3</sub>(N<sub>2</sub> ベース, 5ppm 標準ガス), 及び SO<sub>2</sub>(N<sub>2</sub> ベース, 10ppm 標準ガス)とし, 導入するガス濃度は, 100%N<sub>2</sub> ガスとの流量比を調整することにより制御した。

本装置により得られた NH<sub>3</sub> 及び SO<sub>2</sub> の吸光度パターンを図 12, 図 13 に示す。

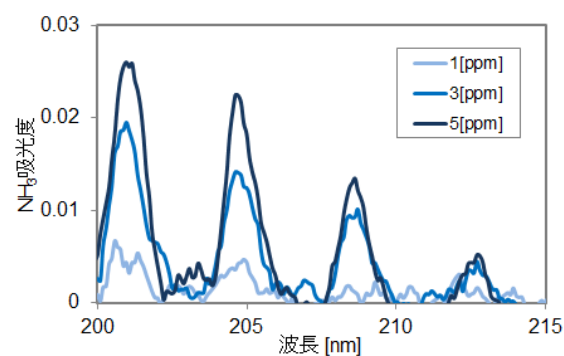


図 12 計測結果：NH<sub>3</sub> 吸光度パターン

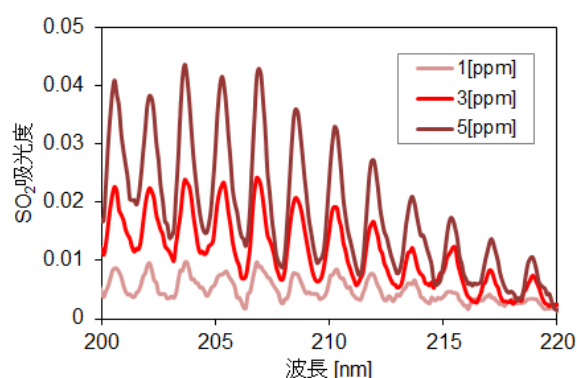


図 13 計測結果：SO<sub>2</sub> 吸光度パターン

図 12, 13 により, 両ガスとも紫外領域における特徴的な吸光度パターンが極めて良好に取得されていることがわかる。これらの結果に基づき, NH<sub>3</sub> について 204.8nm のピーク値を, SO<sub>2</sub> について 207.5nm のピーク値を設定濃度値と比較した結果を図 14 に示す。

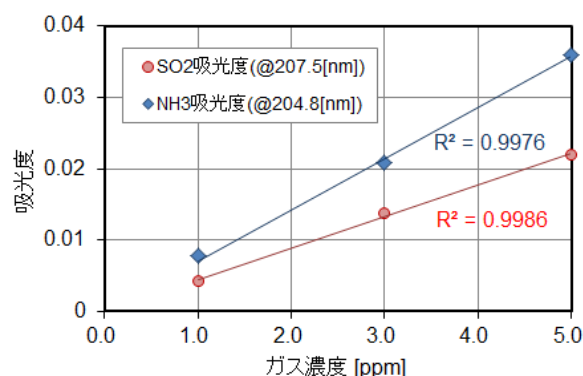


図 14 計測結果：吸光度のガス濃度依存性

図 14 により, 本装置により得られた吸光度パターンのピーク値が, ガス濃度に対し極めて良好

な線形性を示すことが検証された。相関係数はいずれも 0.99 以上である。また、これらの結果から、検出限界 1ppm が十分に達成されていることがわかる。

次に混合ガスについてマルチガス濃度計測機能試験を行った。ガス種は燃焼機関排気ガス成分を模擬し、SO<sub>2</sub>(N<sub>2</sub> ベース, 1200ppm 標準ガス), NO(N<sub>2</sub> ベース, 1000ppm 標準ガス), NO<sub>2</sub>(N<sub>2</sub> ベース, 200ppm 標準ガス)を用い、これらを混合してガスセルに導入した場合における、各ガスの設定濃度値と、測定値の比較を行った。

混合ガスから得られる吸光度パターンを基にマルチガス計測を行う手法は、想定される温度、圧力等の環境条件において、使用する装置による対象分子種すべての吸光度データベースが取得されていることを前提として、

- ① 各ガスの吸光度パターンから、干渉がない或いは影響が少ない波長域を選択し、混合ガスにより得られた吸光度パターンから濃度を特定できるガス種の吸光度パターンを順次差し引くことにより、全種のガス濃度を求める。
- ② 混合ガスの成分数に合わせた複数の波長における吸光度に注目し、得られる連立方程式を解き、全種のガス濃度を求める。
- ③ 予め混合ガスのスペクトルパターンをデータベース化しておき、多変量解析により全種のガス濃度を求める。

などの手法が用いられる。現行の製品の多くは③の手法によりマルチガス計測が行われているが、ここでは、①の手法によりマルチガス計測を行った。

混合ガスにより得られた吸光度パターン及び、データベースに基づき分離した SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> の吸光度パターンを図 15 に、各ガスの設定濃度値と計測結果から得られる濃度値との比較を表 1 にそれぞれ示す。なお、濃度の演算に用いた波長は、SO<sub>2</sub> について 300.47nm, 301.72nm, NO について 212.47nm, 213.52nm, NO<sub>2</sub> について 231.59nm であり、SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> の順に定量化を行った。

図 15 により、本手法を用いて、混合ガスの吸光度パターンから、各ガスの吸光度パターンを分離することができ、表 1 により、測定値と設定値が良好に一致していることが確認された。ここで、

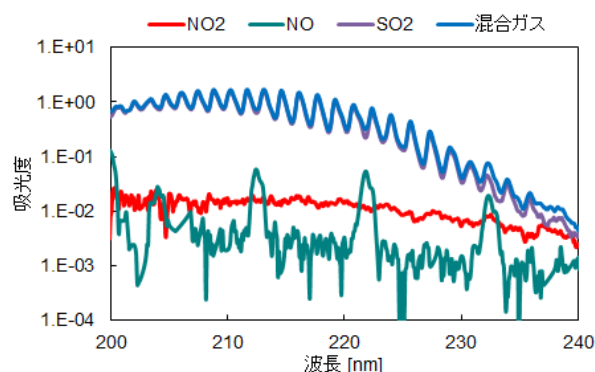


図 15 SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> 混合ガスの吸光度パターン

表 1 混合ガス濃度計測結果

|           | SO <sub>2</sub> | NO   | NO <sub>2</sub> |
|-----------|-----------------|------|-----------------|
| 設定値 [ppm] | 240             | 40   | 40              |
| 測定値 [ppm] | 240.6           | 40.6 | 47.9            |

本実験では、濃度制御にフロー式流量計を用いているため、設定値には仕様上の誤差が含まれていることに留意が必要である。また、混合ガスの成分濃度計測においては、成分の組合せやその濃度比によって、適用する手法に詳細な検討が必要である。

紫外吸収分光法を用いた計測ではこれまでに、数百 ppm オーダの高濃度 SO<sub>2</sub> 中における数 ppm オーダの微量 NH<sub>3</sub> 計測を行う手法<sup>[2]</sup>、高濃度 3 種混合成分からマルチ濃度計測を行う手法<sup>[13]</sup>などが報告されているが、混合ガス条件や環境条件に合わせ、上述の①~③等から最適な手法を選定し、用いる必要がある。

## 5. 高温ガス濃度計測試験

本装置を用いて、高温ガス濃度計測試験を行った。対象ガスは、石炭ガス化炉により生成される高温混合ガスである。混合成分は、NH<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>S の 3 種について計測を行った。NH<sub>3</sub> については、既設のガスクロによる測定値との比較を行ったが、他の 2 種についてはモニタリングがなされていないため、本装置による計測結果のみとなる。

対象ガスは、前処理としてフィルタによる煤塵

除去がなされており、結露防止のため 200℃で温調されている。センサチップは光路長 160mm タイプを用い、高温ガス導入用のガスセル内に配置した。ガスセルは 200℃に加温した。計測環境の圧力は大気圧である。高温ガス導入用のガスセルの構造及び外観を図 16 に示す。

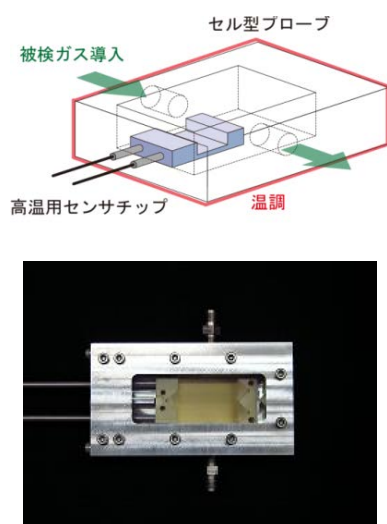


図 16 高温ガス導入用のガスセルの構造(上)と外観(下)

基準スペクトルは、計測直前にガスセル内に Ar ガスを導入し取得した。

本試験により得られた高温ガスの吸収スペクトル及び吸光度パターンを図 17 に、また、対象 3 成分のガス濃度のトレンドグラフを図 18 に示す。なお、ガス濃度は、NH<sub>3</sub>については事前取得したデータベースによる本装置の測定値を示す。その他 2 種については、文献値(HITRAN データベース)に基づく値を用いたものであるため、参考値に留まる。

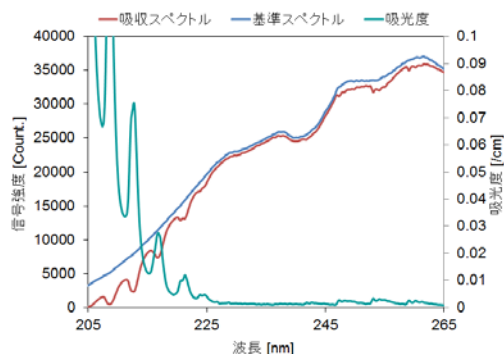


図 17 対象ガスの吸収スペクトルと吸光度パターン例

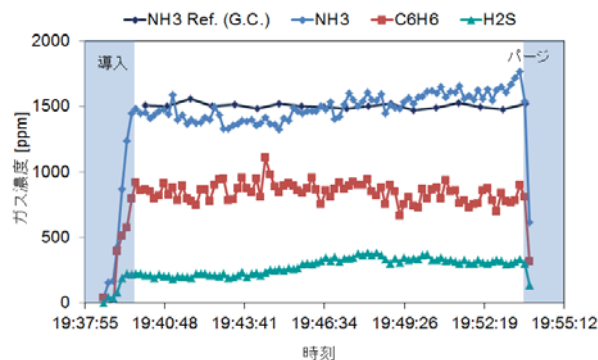


図 18 高温雰囲気における NH<sub>3</sub>、C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub>S 濃度トレンドグラフ

図 17 より、本装置を用いて、高温ガス中においても光送受信機能が維持され、良好に吸収スペクトルが取得できることがわかる。図 18 より、3 成分のガス濃度を同時に計測されていること、NH<sub>3</sub>については既設のガスクロによる指示値と良い一致を示すことがわかる。また、本装置を用いることで、既設の分析計に対し 5 倍以上の高い時間分解能が実現されていることがわかる。

以上から、本装置による高温ガスを対象としたマルチガス濃度計測機能が検証された。

## 5. 結論

紫外吸収分光法を用いて、高温雰囲気中におけるマルチガス濃度計測を目的とした、小型且つ低コストなガスセンサに関する研究開発を行い、以下の成果を得た。

- (1) 本体寸法 213×125×75mm、重量 1460g、センサチップ寸法 30×67×13mm、重量 52g により構成されるガス濃度計測装置を開発し、既存のガス分析計に対し大幅な小型化、低コスト化を実現した。
- (2) 本装置を用いて、光路長 320mm のセンサチップにより NH<sub>3</sub> 及び SO<sub>2</sub> ガスの検出限界 1ppm 以下が実現可能であることを検証した。
- (3) 室温環境において、SO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub> による混合ガス濃度計測を行い、それぞれのガス濃度を同時に定量化できることを検証した。
- (4) 200℃の高温環境において混合ガス濃度計測を行い、光送受信が良好に機能すること及び、それぞれのガスを分離して同時に定量化

できることを確認した。

今後は、各種ガスのデータベースの整備やフィールド試験を実施し、既存のガス分析計の代替えを目指し、実用化研究を進める予定である。また、工業・医療関係等、他分野への適用に向けた可能性調査を進める予定である。

### 【謝辞】

本研究の一部は、平成 24・25 年度経済産業省「地域イノベーション創出実証研究補助事業：小型光学式マルチガスセンサの製品化研究」の一環として行われたものであり、ご協力いただいた関係者各位に深く感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- [1] 朝日 一平, 杉本 幸代, 二宮 英樹, 下川 房男, 高尾 英邦, 大平 文和, 筒井 靖之, 林 宏樹, 今野 隆: “マイクロマシン技術を用いた小型光学式マルチガスセンサ [II]: ラマン散乱型と紫外吸収分光型ガスセンサの特性”, 電気学会論文誌 E, センサ・マイクロマシン部門誌, Vol.133, No.9, pp. 260-266(2013)
- [2] 福地哲生, 二宮英樹: “高濃度 SO<sub>2</sub> 含有ガス中における微量 NH<sub>3</sub> の紫外分光測定”, 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門誌, Vol.131, No.7, pp. 540-546(2011)
- [3] F. Chen, D. judge, C. Wu, J. Caldwell :”Low and room temperature photo absorption cross sections of NH<sub>3</sub> in the UV region”, *Planetary & Space Sci.*, Vol.47, pp.261-266 (1999)
- [4] HITRAN database : NH<sub>3</sub>, Cheng (2006), 298K, 140-230nm
- [5] HITRAN database : SO<sub>2</sub>, Vattulainen (1997), 293K, 195-350nm
- [6] HITRAN database : NO, Thompson (1963), 298K, 186-227nm
- [7] HITRAN database : NO<sub>2</sub>, Schneider (1987), 298K, 200-710nm
- [8] HITRAN database : H<sub>2</sub>S, WuChen (1998), 295K, 160-260nm
- [9] HITRAN database : Cl<sub>2</sub>, Hubinger Nee (1995), 298K, 190-500nm
- [10] HITRAN database : CO<sub>2</sub>, Shemansky (1972), 298K, 169.57-300.00nm

[11] HITRAN database : O<sub>2</sub>, Yoshino (1992), 300K, 199.8-202.6nm

[12] HITRAN database : OCS, Wu(1999), 295K, 200-260nm

[13] N. Higashi, H. Yokota, S. Hiraki, Y. Ozaki: “Direct Determination of Peracetic Acid, Hydrogen Peroxide, and Acetic Acid in Disinfectant Solutions by Far- Ultraviolet Absorption Spectroscopy”, *Anal. Chem.*, Vol.77, No.7, pp.2272-2277 (2005)