SO₃ Concentration Measurement Using Ultraviolet Absorption Spectroscopy and Thermal Conversion

Tetsuo Fukuchi Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

Hideki Ninomiya Non-member (Shikoku Research Institute)

Keywords : sulfur trioxide, sulfur dioxide, fossil fuel power generation, exhaust gas, absorption spectroscopy

Sulfur trioxide (SO₃), which exists in flue gas in fossil fuel-burning power stations, is highly reactive and corrosive, as it forms sulfuric acid upon reaction with water vapor. Presently, sampling methods are employed to measure the SO₃ concentration, but a continuous, real-time method is desired. Ultraviolet absorption spectroscopy can provide such capabilities, and has been used for measurement of various flue gas constituents such as NO_x, SO₂, and NH₃.

To evaluate the possibility of applying ultraviolet absorption spectroscopy to SO₃ measurement, the absorption characteristics of SO₂ and SO₃ were measured. Fig. 1 shows the effective absorption cross section of SO₂, measured by flowing a gas mixture containing SO₂ (SO₂ 1%, O₂ 10%, N₂ 89%) through an absorption cell of length 5 cm. Fig. 2 shows the effective absorption cross section of SO₃, measured by flowing the gas mixture through an oxidizing catalyst (vanadium oxide) heated to 400°C before the absorption cell. The cross section, shown in Fig. 2, had a peak value near 200 nm.

Fig. 1. Absorption characteristics of SO₂

Fig. 2. Absorption characteristics of SO₃

The result showed that the absorption of SO₃ near 200 nm is about one order lower than that of SO₂, so SO₃ measurement by absorption spectroscopy alone may pose some difficulty. Therefore, an alternative method to measure SO₃ concentration, which makes use of the reduction of SO₃ to SO₂ at elevated temperatures, was conceived. A laboratory test was performed using the setup shown in Fig. 3. The gas mixture containing SO₃ was heated up to 500°C (by heater 2) before entering the absorption cell. The gas mixture in the connecting tubes and absorption cell was maintained above 200°C (by heater 1) to prevent condensation of SO₃. The converted SO₂ density as a function of temperature of heater 2 is shown in Fig. 4. The result showed that SO₃ can be converted to SO₂ by heating, so a SO₃ measurement method based on this principle may be feasible.

Fig. 3. Experimental setup for verification of the thermal conversion method

Fig. 4. Temperature dependence of the conversion amount from SO₃ to SO₂

紫外吸収分光法と加熱変換を用いた SO₃ 濃度測定

正 員 福地 哲生* 非会員 二宮 英樹**

SO₃ Concentration Measurement Using Ultraviolet Absorption Spectroscopy and Thermal Conversion

Tetsuo Fukuchi*, Member, Hideki Ninomiya**, Non-member

Ultraviolet absorption spectroscopy was used to measure the absorption cross section of SO₃. The measured cross section had a peak value of about 9×10^{-19} cm² near wavelength 200 nm. In addition, a method to measure the concentration of SO₃ by thermal conversion of SO₃ to SO₂ at elevated temperatures was developed. Laboratory experiments showed that SO₃ can be converted to SO₂ at temperatures of about 870K. These methods are potentially applicable to flue gas monitoring in fossil-burning power plants.

キーワード：三酸化硫黄，二酸化硫黄，火力発電，排ガス，吸収分光法

Keywords：sulfur trioxide, sulfur dioxide, fossil fuel power generation, flue gas, absorption spectroscopy

1. はじめに

火力発電所排ガス中に数十 ppm オーダで存在する SO₃ は設備の主たる腐食原因となっている⁽¹⁾。腐食防止のために NH₃ 注入による中和が行われているが、注入量の最適化には排ガス中の SO₃ 濃度を実時間で連続的に測定する必要がある。現状においては間欠的なサンプリングによる化学分析が行われているが⁽²⁾，SO₃ は水分と反応し硫酸へ変化して結露するため気体としての存在時間が短く，また炉内の状態や負荷変化に伴い濃度が大きく変動することから，実時間の連続濃度測定が望まれている。光学的測定法を用いれば排ガス中の SO₃ 濃度を連続的に測定でき，従来の分析手法に比べ，排ガス中の SO₃ 濃度の監視の信頼性と利便性の向上，および NH₃ 注入の最適化が期待できる。

分子の代表的な光学的測定法として，紫外・可視吸収分光法，フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR)，波長可変半導体レーザー分光法 (TDLS)，レーザ誘起蛍光法 (LIF)，反ストークスラマン散乱分光法 (CARS) がある。このうち，LIF 以外の手法は SO₃ の測定に用いられた実績がある^{(3)~(6)}。本研究では装置構成が最も安価で，連続無人運転に適している吸収分光法を選択した。

2. 紫外吸収分光法による SO₃ 測定

〈2・1〉 吸収分光法の概要 分子は固有の吸収スペクトル (光吸収の波長依存性) を持つ。分子の吸収スペクトルはデータベース化されており，試料の吸収スペクトルを測定することにより試料中の分子成分およびその密度 (単位体積あたりの分子数) を得ることができる。SO₃ は中赤外域～遠赤外域，および紫外域に吸収帯を有するが⁽⁴⁾⁽⁶⁾，反応性が強く，吸収スペクトルの測定が難しいことから，測定例も少なく，データベース化されていない。

吸収分光法では Beer-Lambert の法則に基づき測定対象分子の単位体積あたりの密度 n を得る。波長 λ における，測定対象分子が長さ L の測定領域中に存在しない場合の透過光のスペクトル強度を $I_0(\lambda)$ ，存在する場合のスペクトル強度を $I(\lambda)$ とすると，(1) 式の関係が成り立つ。

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

ここで $\sigma(\lambda)$ は測定対象分子の吸収断面積である。また，吸光度 $\alpha(\lambda)$ は単位長さ (通常は 1cm) あたりの吸収を表すもので，(2) 式で与えられる。

$$\alpha(\lambda) = n\sigma(\lambda) \dots\dots\dots (2)$$

吸収分光法の原理的な測定下限密度を決定するのは $\alpha(\lambda)$ であるため，まず SO₃ の吸収断面積を評価する必要がある。

SO₃ の電子励起準位間の遷移は波長 190~240nm にかけて存在し，吸収のピークは 205 nm 付近にある⁽¹⁾。しかし，この波長域においては SO₂ の強い吸収があり，煙道中排ガス中のように SO₂ と SO₃ が混在する場合は SO₃ と SO₂ による寄与を分離する必要がある。これを行う手法としては，SO₃ の吸収が存在しない波長 300 nm 付近における吸光度から

* 電力中央研究所 電力技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Electric Power Engineering Research Laboratory, Central Research
Institute of Electric Power Industry
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

** 四国総合研究所 電子技術部
〒761-0192 高松市屋島西町 2109-8
Electrotechnical Department, Shikoku Research Institute
2109-8, Yashima-Nishimachi, Takamatsu 761-0192

SO₂ 密度を算出し、この値に基づき波長 200 nm 付近における SO₂ による吸光度を計算し、実験的に得られた吸収度から SO₂ の寄与を差し引いて SO₃ による吸光度を得る方法が考えられる。この手法の適用には分光装置の性能を考慮した SO₂ と SO₃ の実効吸収断面積が必要となるため、ここでは双方を測定した。

〈2・2〉 実験装置構成 SO₂ および SO₃ の吸収特性を測定する装置を製作した。装置構成を図 1 に示す。SO₃ は SO₂ 混合ガス（体積比 N₂ 89%, O₂ 10%, SO₂ 1%）を必要に応じて N₂ ガスで希釈し、400℃に加熱した硫酸触媒（ハンダートブソーインターナショナル製 VK38）を通過させ発生させる。ガス流量は流量計によって 10～100ml/min の範囲で制御した。硫酸触媒の加熱には電気炉（ADVANTEC 製 FUPO30PA）、電気炉の温度制御には熱電対と温度コントローラ（TOHO 製パールサーモ）を用いた。温度安定度は約 ±2℃であり、硫酸触媒の変換効率を一定とみなすには十分な精度である。紫外光源には重水素ランプ（浜松ホトニクス製 L7295）、ランプ駆動にはヒータ用直流電源（高砂製作所製 TMO35-2、印加電圧 7V、印加電流 1A）と陽極電源（菊水電子工業製 PAD-0.6A、印加電圧 350V、印加電流 0.3A）を用いた。吸収分光用セルは両側に合成石英製の窓を取り付けたステンレス製で、実効光路長は 5cm である。SO₃ は約 150℃以下で液化することから、セルの内壁および窓への SO₃ の結露を防止するために、セルおよび電気炉とセルの接続部分を電熱線によって 200℃に加熱した。温度制御には熱電対と温度コントローラ（Fine 製 FHP-201）を用いた。セルを透過したランプからの光は分光器へ入射し、スペクトルを測定した。セルを通過したガスはポンプによって排気した。ガス出口は開放系になっている。

〈2・3〉 SO₂ の吸収特性測定 SO₂ の吸収断面積に関しては多数の文献値があるが^{(7)~(10)}、ここでは分光器の分解能、回折格子および光検出器の光学的効率などを含めた実効断面積が必要となる。よって、既知の濃度の SO₂ 混合ガスの吸収特性を測定し、実効断面積を求めた。

図 1 SO₂・SO₃ の吸収特性測定装置の構成図
Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus used for measurement of absorption characteristics of SO₂ and SO₃.

はじめに、触媒を加熱しない状態（25℃）でセル内の SO₂ 濃度が 3600ppm となるように SO₂ 混合ガスを流し、分光器（Acton Research 製 Spectra Pro-500i）に刻線数 150 lines/mm の回折格子を用い、入射スリット幅を 10μm として吸光度を測定した。この条件における波長分解能は約 1nm である。吸光度から得られた波長 190～320nm における SO₂ の実効吸収断面積を図 2 に示す。ここでは波長分解能が低いため、吸収スペクトルの微細構造は現れていない。また、0.1～1.0 気圧、25～200℃において吸収特性に差異が認められなかったことから、圧力拡がり、ドップラー拡がりの影響はないと考えられる。

〈2・4〉 SO₃ の吸収特性測定 次に、SO₃ の実効吸収断面積を測定するために、触媒を 400℃に加熱して混合ガス中の SO₂ を SO₃ に変換し、上記と同じ分光器を用いて吸光度の測定を行った。硫酸触媒の変換効率は 98%以上であるので、この状態ではセル内に SO₂ は殆ど存在しない。波長 300 nm 付近においては SO₂ の吸収のみが存在するため、触媒によって変換されなかった残留 SO₂ の有無は波長 300nm 近辺の吸光度から確認できる。触媒温度を 25℃と 400℃とした場合に得られた吸光度を図 3 に示す。

触媒温度を 25℃とした状態では SO₃ は存在しないため、吸光度は SO₂ による吸収を表す。図 3 に示す触媒温度 25℃における吸光度と図 2 に示す実効吸収断面積から求めたセル内の SO₂ 密度は $3.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ であった。

触媒温度を 400℃とした状態では、波長 300nm 付近の吸光度がほぼ 0 となり、触媒によって SO₂ が SO₃ に変換されたことが確認された。SO₂ が全て SO₃ に変換されたと仮定し（ $n_{\text{SO}_2} = 0$, $n_{\text{SO}_3} = 3.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ）、求めた SO₃ の実効吸収断面積を図 4 に示す。吸収のピークは波長 200nm 付近にあるが、これは文献値⁽³⁾と一致する。ばらつきは演算誤差であると考えられるため、実際の吸収断面積は図 4 に示した多項式を用いた近似曲線に近いものと思われる。

SO₂ と SO₃ が混在する場合、吸光度は(3)式で与えられる。

$$\alpha(\lambda) = n_{\text{SO}_2} \sigma_{\text{SO}_2} + n_{\text{SO}_3} \sigma_{\text{SO}_3} \quad \text{..... (3)}$$

波長 300nm 付近においては SO₃ による吸収がないため、 $\sigma_{\text{SO}_3} = 0$ と仮定でき、SO₂ 密度は(3)式から求める。

図 2 SO₂ の吸収特性
Fig. 2. Absorption characteristics of SO₂.

図3 触媒温度 25°Cにおいて測定した SO₂ の吸光度、触媒温度 400°Cにおいて測定した SO₃ の吸光度
Fig. 3. Absorbance of SO₂ obtained at catalyst temperature 25°C, and absorbance of SO₃ obtained at catalyst temperature 400°C.

図4 SO₃ の吸収特性
Fig. 4. Absorption characteristics of SO₃.

$$n_{\text{SO}_2} = \alpha(\lambda \approx 300\text{nm}) / \sigma_{\text{SO}_2} \quad (4)$$

一方、波長 200nm 付近においては、SO₂ と SO₃ の吸収帯が混在するが、SO₂ 密度が既知であるため(3)式から SO₃ 密度が求まる。つまり、波長 300nm 付近における吸光度から SO₂ 密度を決定し、その密度に対応する波長 200nm 付近における吸光度を計算し、実際の吸光度から減算することにより SO₃ による吸光度が求まる。

$$n_{\text{SO}_3} = [\alpha(\lambda \approx 200\text{nm}) - n_{\text{SO}_2} \sigma_{\text{SO}_2}] / \sigma_{\text{SO}_3} \quad (5)$$

なお、(4)式における σ_{SO_2} は波長 300nm 付近、(5)式における σ_{SO_2} は波長 200nm 付近における SO₂ の吸収断面積を指す。

よって、波長域を使い分けることにより SO₂ と SO₃ が混

図5 SO₃, NH₃, NO, NO₂ の吸収断面積
Fig. 5. Absorption cross sections of SO₃, NH₃, NO, NO₂.

在する場合でも各々の密度を求めることができる。

〈2・5〉 SO₃ 測定における他の成分の影響 波長 200nm 付近には SO₂, SO₃ 以外にも NH₃, NO, NO₂ の吸収帯が存在するため、吸収分光法による SO₃ 測定に影響を及ぼすことが予想される。波長 190~240nm における NH₃, NO, NO₂ の吸光断面積⁽¹⁾と図4に示した SO₃ の吸収断面積(近似曲線)を図5に示す。

上記の物質のうち、NH₃ の吸収帯は SO₃ の吸収帯と重なっているため、SO₃ 測定においては NH₃ の影響が最も大きいと考えられる。煙道中では SO₃ を中和するために NH₃ 注入が行われているが、注入点より上流側では NH₃ が存在しないことから、上流側で SO₃ 測定を行うことにより NH₃ の影響を回避できる。注入点の下流側では残留 NH₃ が存在するため、図5から、SO₃ の測定下限濃度は残留 NH₃ 濃度の 1.5 倍程度と考えられる。NH₃ の場合は 200nm 近傍以外に吸収帯が存在しないことから、SO₂ の場合のように SO₃ の吸収がない波長域においてその濃度を求め、200nm 近傍の吸光度への寄与を差し引くことができない。NH₃ と SO₃ による吸光度をどの程度分離できるかは、実際に煙道内で測定を行った上で評価する必要がある。

また、NO, NO₂ に関しては、吸収スペクトルが SO₃ と大きく異なるため、容易に分離が可能である。特に、NO₂ の場合は吸収帯が 500nm 近傍まで延びているため、SO₂ と同様の処理でその影響を差し引くことができる。NO に関しては、SO₃ の吸収スペクトルが緩やかであるのに対し、NO の吸収スペクトルは顕著なピークを複数有する構造となっているため、吸収スペクトルから容易に区別できる。いずれにせよ、NO と NO₂ に関してもそれらの影響を分離できるかは実際に煙道内で測定を行った上で評価する必要がある。また、紫外光は散乱による減衰が大きいため、煙道内に煤塵が存在する場合はその影響も評価する必要がある。

3. 加熱変換法による SO₃ 測定

〈3・1〉 測定原理 排ガス中の SO₃ 濃度は他のガス成

分に比べ低いいため、吸収分光法による測定では SO_3 の吸光度が得られない可能性が高い。一方、 SO_2 は他のガス成分の吸収が少ない波長 300nm 付近に特徴的な吸収スペクトル構造を持つことから、測定が容易である。 SO_3 は 500℃ 以上に加熱すると SO_2 に変換されることから、 SO_2 と SO_3 が混在するガスを 500℃ 以上に加熱すれば SO_2 濃度は SO_3 から変換された分だけ増加する。よって、 SO_3 含有ガスを加熱し、 SO_2 の濃度変化を見る測定手法（以下、これを「加熱変換法」と呼ぶ）を考案し、実験的検討を行った。

〈3・2〉 実験装置 加熱による SO_3 の SO_2 への変換に伴う SO_2 の密度変化を確認するための実証実験を行った。実験装置の構成を図 6 に示す。ここでは硫酸触媒とセルの間に加熱管を設け、電熱線 (heater 2) によって 500℃ まで加熱できるようにした。加熱管は内壁と内部を流れるガスの間に十分な熱交換が行われるよう、長さ 1.5m のステンレス管をコイル状に巻いたものとした。 SO_3 の結露を防止するため別の電熱線 (heater 1) によって加熱管は 200℃ 以上、セル

図 6 加熱変換法の実証実験に用いた装置構成
Fig. 6. Schematic of apparatus used for verification of the thermal conversion method.

図 7 加熱変換実験における SO_2 と SO_3 の密度変動の模式図

Fig. 7. Schematic of SO_2 and SO_3 density variation in the thermal conversion experiment.

は 200℃ に保った。また、 SO_2 の吸光度を正確に測定するために刻線数 2400lines/mm、波長分解能約 0.1nm の分光器 (Ocean Optics 製 HR2000) を使用した。分光器の強度分解能は 12 ビットであるため、 $1/4096=2.4 \times 10^{-4}$ の強度変化を捉えることができる。実際は、 ± 2 程度のノイズがあるため、分解能は $4/4096=10^{-3}$ 程度と見積もられる。

本装置における SO_3 と SO_2 の密度変動を図 7 に模式的に示す。硫酸触媒によって SO_2 は一旦 SO_3 に変換されるが、加熱によって SO_2 に戻る。但し、硫酸触媒の変換効率がほぼ 100% であるのに対し、加熱管の変換効率はより低いと考えられるため、加熱管出口 (セル入口) では SO_3 が一部残留していると考えられる。

〈3・3〉 実験結果 本実験では SO_2 による吸収のみが存在する波長 280~320nm において測定を行った。触媒温度を 25℃、加熱管温度を 200℃ とした場合に得られた吸収度を図 8(a) に示す。この状態では触媒は機能せず、 SO_2 は変換されずに触媒と加熱管を通過してセルに入る。吸光度から得られた SO_2 密度は $1.47 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ であった。次に、触媒温

図 8 (a)触媒を 25℃、加熱管を 200℃、(b)触媒を 400℃、加熱管を 200℃、(c)触媒を 400℃、加熱管を 500℃ とした場合の吸光度

Fig. 8. Absorbance at (a) catalyst at 25°C and heating tube at 200°C, (b) catalyst at 400°C and heating tube at 200°C, (c) catalyst at 400°C and heating tube at 500°C.

図9 SO₃ から SO₂ への変換量の温度依存性

Fig. 9. Temperature dependence of the conversion amount from SO₃ to SO₂.

度を 400°C, 加熱管温度を 200°C とした場合に得られた吸収度を図 8(b) に示す。この状態では触媒によって SO₂ が SO₃ にほぼ完全に変換されたため、吸光度が 0 に低下した。更に、触媒温度を 400°C に保ったまま加熱管温度を 500°C としたときの吸光度を図 8(c) に示す。SO₂ による吸収が現れており、加熱管内において SO₃ が SO₂ へ変換されたことが分かる。吸光度から得られた SO₂ 密度は $7.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であったため、触媒を通過した SO₂ 混合ガスの流量が変わらなかったと仮定すると、加熱によって 48% の SO₃ が SO₂ へ変換されたことになる。

次に、加熱管内における SO₃ から SO₂ への変換量の温度依存性を調べるために、触媒温度を 400°C に保ち、加熱管温度を 200°C から 500°C まで変え、変換後の SO₂ 密度を測定した。結果を図 9 に示す。加熱管温度が 200°C の場合、SO₂ による吸収が現れなかったことから、触媒によって混合ガス中の SO₂ は全て SO₃ へ変換されたと仮定した。この場合、加熱管入口における SO₃ 密度は約 $2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であった。加熱管温度が 350°C のときから変換の兆しが現れ、昇温とともに変換量が増加した。図 9 に示す曲線は 500°C 以上の高温においては 100% に近づき、飽和すると考えられる。本実験結果は飽和領域には達していないが、加熱変換部の温度を 500°C 以上とし、流量を抑えることにより加熱管壁と内部のガスとの熱交換を促し、SO₃ を全て SO₂ へ変換できると考えられる。実験終了後に吸収分光用セルに使用した合成石英窓を調べた結果、高温の SO₃ ガスによる腐食や紫外線透過率の変化は観察されなかった。

〈3・4〉 煙道内ガス測定への適用に関する課題 加熱変換法を煙道内の SO₃ 測定に適用した場合の SO₂ と SO₃ の密度変動の模式図を図 10 に示す。実線は加熱管を昇温した場合、破線は加熱管温度を煙道内と同じ温度とした場合である。火力発電所煙道内には SO₂ が約 1000ppm, SO₃ が数十 ppm の濃度で存在する⁽¹⁾。加熱変換によって約 50ppm の SO₃ を全て SO₂ へ変換したとすると、加熱の有無によって SO₂

図 10 煙道内ガス測定における SO₂ と SO₃ の密度変動の模式図

Fig. 10. Schematic diagram of density variation of SO₂ and SO₃ in flue gas.

濃度は約 1000ppm から約 1050ppm に変化する ($\Delta n=50\text{ppm}$)。吸収分光法による SO₂ 測定において同濃度のガスを複数回測定した場合のばらつきから推定される SO₂ 濃度の測定誤差は 10ppm 程度であったため、本実験と同様の光学系でこの変化を捉えることが可能であると考えられる。

現場に適用可能な装置の製作においては、いくつかの課題がある。まず、加熱管は高温環境下において腐食性ガスを流すため、金属製であると腐食して変換効率が低下する恐れがある。よって、石英又はセラミック製が適切と考えられるが、他の金属製配管部品といかに接合するかが課題となる。また、加熱管内のガス流量が多いと変換効率が低下する。本実験では最大 100ml/min 程度の流量を用いたが、現場適用においてはサンプリングによる化学分析に用いられている 3liter/min 程度の流量が望ましい。加熱による SO₃ から SO₂ への変換を促すにはガスと高温表面との接触面積を増やす必要があるため、赤外線電気炉を用いて石英管内に設置したセラミックなどの吸収体を加熱する方法も考えられる。また、光源からセル、セルから分光器への紫外光の伝達には光ファイバが最も現場に適していると考えられる。光ファイバを用いることにより光軸調整などの作業が不要となるほか、光源や分光器を高温部から離して自由な位置に設置することができる。しかし、セルは SO₃ の結露を防止するために煙道と同じ温度に保つ必要があるため、光ファイバおよび接続部の耐熱設計が必要である。

4. まとめ

硫酸触媒を用いて SO₃ を発生させる装置を製作し、紫外吸収分光法を用いて SO₂ と SO₃ の吸収特性を測定した。SO₃ の吸収帯は波長 200nm 付近に極大値を有することが分かった。SO₃ は 500°C 以上に加熱すると SO₂ に変換される特性を利用し、加熱の有無における SO₂ 濃度の差異から SO₃ 濃度を求める「加熱変換法」を考案した。硫酸触媒を用いて生成した SO₃ を加熱した結果、SO₂ に変換されることを実験的に確認した。

今後、紫外吸収分光法および加熱変換法を用いた火力発電所煙道中の SO_3 濃度測定を行う予定である。

(平成 17 年 12 月 16 日受付, 平成 18 年 5 月 31 日再受付)

文 献

- (1) N. Arai, Ed. : Formation and suppression technology of combustion products, TechnoSystem, Tokyo (1997) (in Japanese)
新井紀男監修: 燃焼生成物の発生と抑制技術, テクノシステム(1997)
- (2) J. Bionda : "Flue Gas SO_3 Determination - Importance of Accurate Measurements in Light of Recent SCR Market Growth", Proc. of the 2002 DOE/NETL Conference on SCR and SNCR Reduction NO_x Control, Pittsburgh, USA (2002)
- (3) T. Kurata, J. Izawa, S. Kusama, and K. Suzuki : "Development of SO_3 Concentration Measurement System", Ishikawajima Harima Technical Report Vol.43, No.2, pp.52-57 (2003) (in Japanese)
倉田孝男・伊澤 淳・草間 滋・鈴木孝平: 「 SO_3 連続分析計の開発」, 石川島播磨技報, **43**, 2, pp.52-57 (2003)
- (4) A. Maki, T. Blake, R. Sams, N. Vulpanovici, J. Barber, E. Chrysostom, T. Masiello, J. Nibler, and A. Weber : "High-Resolution Infrared Spectra of the ν_2 , ν_3 , ν_4 , and $2\nu_3$ Bands of $^{32}\text{S}^{16}\text{O}_3$ ", *J. Mol. Spectrosc.*, Vol.210, pp.240-249 (2001)
- (5) T. Berkoff, J. Wormhoudt, and R. Miake-Lye : "Measurement of SO_2 and SO_3 using a tunable diode laser system", *Proc. SPIE*, Vol.3534, pp.686-693 (1998)
- (6) E. Chrysostom, N. Vulpanovici, T. Masiello, J. Barber, J. Nibler, A. Weber, A. Maki, and T. Blake : "Coherent Raman and Infrared Studies of Sulfur Trioxide", *J. Mol. Spectrosc.*, Vol.210, pp.233-239 (2001)
- (7) S. Ahmed and V. Kumar : "Quantitative Photoabsorption and Fluorescence Spectroscopy of SO_2 at 188-231 and 278.7-320 nm", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol.47, No.5, pp.359-373 (1992)
- (8) S. Manatt and A. Lane : "A Compilation of the Absorption Cross- Sections of SO_2 from 106 to 403 nm", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol.50, No.3, pp.267-276 (1993)

- (9) A. Vandaele, P. Simon, J. Guillemot, M. Carleer, and R. Colin: " SO_2 Absorption Cross Section measurement in the UV using a Fourier Transform Spectrometer", *J. Geophys. Res.*, Vol.99, pp.25599-25605 (1994)
- (10) D. Freeman, K. Yoshino, J. Esmond, and W. Parkinson: "High resolution absorption cross section measurements of SO_2 at 213 K in the wavelength region 172~240 nm", *Planet. Space Sci.*, Vol.32, pp.1125-1134 (1984)
- (11) Applied Analytics, Inc.: "Monitoring ammonia, nitrogen oxide & nitrogen dioxide in a denox process", Product Brief OMA-517-W, Publication #517-060400 (2004)

福 地 哲 生

(正員) 1962 年生まれ。1995 年 8 月カリフォルニア大学ロスアンゼルス校大学院物理学部より Ph.D.。1996 年 2 月 (財) 電力中央研究所入所, 現在に至る。放電現象のレーザ計測技術の開発, 排ガスの光測定技術の開発, 漏洩ガスの可視化技術の開発, レーザ超音波研究, レーザレーダ研究に従事。応用物理学学会会員。

二 宮 英 樹

(非会員) 1952 年生まれ。1981 年 10 月甲南大学自然科学研究科物理学専攻博士課程修了 (理学博士)。1982 年 1 月四国電力 (株) 入社, 1987 年 10 月 (株) 四国総合研究所出向, 現在に至る。プラズマの光診断に関する研究, 金属蒸気レーザ・エキシマレーザ研究, 放電・レーザ生成プラズマの研究, 液体・気体のレーザ計測, レーザ超音波研究, 真空紫外光の発生・応用研究に従事。応用物理学会, レーザー学会会員。