

審査の結果の要旨

論文提出者 東 亮一

本論文は、「紫外線 LED・近赤外 DFB レーザを用いた吸光法による複数成分ガス濃度計測」と題し、燃焼制御および排ガス監視に求められる複数成分のガス濃度を同時に測定することを目的として、紫外線 LED と近赤外 DFB レーザを光源とする新たな吸収分光法の研究を行ったもので、5 章より構成されている。

第 1 章は序論であって、研究の背景、動機、目的と、論文の構成が述べられている。発電所やゴミ焼却施設などのボイラや煙道においては、燃焼制御や排出規制物質の監視のために、ガス濃度の連続測定がなされている。排ガス監視においては、窒素酸化物 (NO_x) や二酸化硫黄 (SO₂) の吸光法による測定がなされてきたが、これらのガスは中赤外領域と紫外領域にそれぞれ吸収スペクトルを有するため、従来は光源として中赤外光を含むフィラメントや紫外線を含むランプが用いられてきた。一方、燃焼制御においては、燃焼ガス中の一酸化炭素 (CO) と酸素 (O₂) の濃度を同時に連続測定することにより制御の最適化が可能であることが知られており、CO 用に波長 2330nm 帯の分布帰還型 (DFB) レーザ、O₂ 用に波長 760nm 帯の DFB レーザを用いた吸収分光法が研究されてきたが、1 台のガス分析計によって 2 成分のガス濃度を燃焼制御に必要な 1 ppm (CO), 1 vol% (O₂) の検出限界で安定に測定することが課題であった。そこで、必要とされる各検出限界以下で、複数成分のガス濃度を同時に測定することを目的として、近赤外 DFB レーザと紫外線発光ダイオード (LED) を光源とする吸収分光法の研究を行ったものである。

第 2 章は「吸収分光法の理論」と題し、測定の原理について述べている。測定対象ガスは特定の波長の光を吸収するために、その吸収量から光路上のガス濃度の平均値が推定できる。吸収波長スペクトルは、ガスの種類によって各々異なるため、光の波長によって成分を分離することが可能である。紫外領域に吸収を有する NO_x, SO₂ には波長の異なる複数の紫外線 LED を用い、近赤外領域に吸収を有する CO と O₂ には波長の異なる複数の半導体レーザを用いることによって、各々のガス濃度を同時に測定することができる。

第 3 章は「紫外線 LED による排ガス監視用 NO_x, SO₂ ガス濃度計測」と題し、紫外線 LED を用いた NO_x/SO₂ ガスの同時濃度測定の研究結果について述べている。NO₂ ガス検出用には波長 400nm の LED を、SO₂ ガス検出用には波長 280nm の LED を夫々使い、LED を交互にパルス点灯させて、シリコンフォトダイオードでガスの吸収による光の減衰を検出した。また NO 検出波長である 226nm の光源を現状では入手できないため、検出の前処理としてオゾナイザによる NO から NO₂ への変換を行い、変換の有無により NO_x 濃度の検出を行う構成としている。試作機において、NO₂/SO₂ の 2 成分ガス濃度が同時に測定できることが実証された。濃度レンジ 0-100ppm において検出限界はそれぞれ 140ppb (NO₂), 800ppb (SO₂) であり、排ガス監視に必要な 1ppm 以下の高感度化が達成されている。一方、光源の出力変動によるドリフトや、ガス流通セルの内面に吸着した水分による濃度指示値の変動などの課題も明らかになった。これに対し、光量モニタによる出力変動のキャンセル、2 波長の LED を近接させレンズでコリメートすることによるガス流通セル内面の影響の低減、等の対策を施した結果、ドリフトおよび水分干渉による濃度指示値変動を 1ppm 以下に抑制することができ、現行の排ガス用分析計と同等の水準の性能を得ることに成功している。またオゾナイザによる NO から NO₂ への変換については、過剰オゾンによる NO₂ から N₂O₅ への酸化が問題となったが、加熱セルの追加による過剰オゾンの分解と N₂O₅ の NO₂ への還元、および紫外線 LED による残留オゾン量のモニタリングと補正により、90%以上相当の変換効率を確認、実証している。

第 4 章は「近赤外 DFB レーザによる燃焼制御用 O₂, CO ガス濃度計測」と題し、燃焼制御用の CO/O₂ ガス濃度同時測定を試みたことについて述べている。測定には、発光波長が単一で、電流や温度制御により波長を変えられる DFB レーザを用いている。CO ガス吸収線の測定には、吸収強度の大きさと水分の吸収を考慮して、波長 2330nm 帯の

素子を選択した。O₂ ガスの吸収線用には、波長 760nm 帯の素子を選択している。DFB レーザの波長可変性を利用し、ガス吸収線全体にわたり波長掃引を行って検出している。また高感度検出のために、駆動電流に正弦波を重畳し、正弦波周波数の 2 倍の周波数でロックイン検出を行っている。2 波長のレーザビームを 1 本の光軸に結合するために、波長 2330nm のレーザは中心に穴の開いた放物面鏡による平行光への変換を行い、波長 760nm のレーザは非球面レンズによる平行光への変換と上記放物面鏡の穴を貫通する光学系を考案している。吸収信号の検出のために、InGaAs フォトダイオードを用い各々のレーザを交互に点灯することにより、2 波長の受光信号を分離した。試作機を評価した結果、CO/O₂ の 2 成分ガス濃度を同時に測定できることが確認された。CO ガス濃度レンジ 0-200ppm, O₂ ガス濃度レンジ 0-25vol%において、それぞれの検出限界は 0.4ppm (CO) , 0.1vol% (O₂) であり、燃焼制御に必要な高感度化を達成している。集光レンズ端面のエタロン効果に起因する振幅変調が O₂ ガス濃度測定に±5%FS のドリフトを引き起こしたため、無反射コーティング等の対策を施し、ドリフトを±2%FS 程度に低減している。一方 CO 濃度計測時に波長 2326.8nm の吸収線において、燃焼炉の温度 800°C, 水分濃度 10%以上で水分干渉が初めて観測された。この対策として、CO の吸収線と近接しているが分離可能な水分の吸収線から水分濃度を推定し、水分干渉を±2%FS 程度に低減することに成功した。

第 5 章は結論であって、得られた成果を総括するとともに将来展望について述べている。

以上のように本論文は、紫外線 LED を光源とする排ガス監視用の NO_x, SO₂ ガス濃度計測法を提案し、アレイ化された 2 波長の紫外線 LED を用いて 2 成分同時計測を実証し、かつ従来法よりも簡易な構成でありながら各種性能指標において同等レベルであることを示した。また近赤外 DFB レーザによる燃焼制御用 O₂, CO ガス濃度計測法を提案し、2 波長のレーザ光を空間光学系で多重化する新たな構成により、2 成分同時計測を実証し、かつ燃焼制御に必要な高感度化を達成したもので、先端学際工学、特に光計測技術分野に貢献するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。