

蛍光量子ドットを用いたオゾンガスセンシング技術の開発

安 藤 昌 儀, 茂 里 康

1 はじめに ——生活空間の空気質を見守るガスセンサー——

生活空間における高い安全性・快適性が求められ、健康志向が従来にも増して強まる中で、空気質を見守るガスセンサーはなくてはならないデバイスである。一方で、省エネや防音のために気密化が進んだ建物や乗物、自然換気が難しい地下街等において、有害・危険性ガス（毒性・悪臭・可燃性・爆発性・腐食性等）が、人体に影響のあるレベル以上の濃度、あるいは発火・爆発の危険が生じるレベル以上の濃度となる可能性が潜在している。

大気中の各種有害・危険性ガスを検知し、濃度を測定するために現在実用化されている代表的なガスセンサー（ガスクロマトグラフィーのような分析装置を除く）としては、半導体式および接触燃焼式ガスセンサーが主であり、他に、電気化学式、光学式等がある¹⁾²⁾。半導体式は、400℃程度に加熱した酸化物半導体の電子濃度が、ガスとの接触時に変化し、酸化物半導体の電気伝導度に変化する現象を利用する。接触燃焼式では、白金線を埋め込んだ触媒の温度が、ガスとの接触時に反応熱で変化し、白金線の電気伝導度が変化するを用いる。電気化学式では、ガスが電極と電解質溶液に接触する時に起こる酸化還元反応に伴って流れる電流値をガス濃度に変換する。光学式は、ガス自体の紫外・可視・赤外波長域での吸収や屈折率を測定する方式や、ガスとの反応でセンサー材料が示す蛍光・りん光・化学発光・光吸収等の変化でガスを検知する方式がある。また、1回のみ使用可能なのでセンサーに分類されない場合もあるが、ガスと不可逆的に反応して色変化を生じる試薬をシリカ粒子等に担持してガラス管中に封入したガス検知管も広く用いられている。

電気信号でガスの検知を出力するセンサーと比較して、光学式ガスセンサーは、電磁氣的ノイズに強い、遠隔非接触で信号読み出しが可能、電気火花発生の危険がないので防爆性・安全性が高い等の利点があるた

Development of Ozone Gas Sensing Technique by Using Photoluminescent Quantum Dots.

め、次世代型のガスセンサーとして期待されている^{3)~6)}。

2 オゾンの性質とその利用

本稿では、有害・危険性ガスの中で、オゾンに対するセンサーを取り上げる。オゾン (O_3) は薄青色で特有の臭気をもち、一定濃度以上では猛毒である⁷⁾⁸⁾。強力な酸化力を有し、また、徐々に自己分解する性質があり、分解後は無毒の酸素になるので、様々な用途に用いられている⁹⁾¹⁰⁾。高濃度域 (5~8%) で半導体産業におけるフォトリソ除去やシリコンウェハー洗浄、中濃度域 (200 ppm 程度) では病院や医薬品製造施設での殺菌・脱臭に使用され、低濃度域 (0.01~数 ppm) ではクリーンルーム、食品・畜産業、建物内の空間や水の殺菌・脱臭に幅広く利用されている。また成層圏のオゾン層 (10~20 ppm) は太陽からの紫外線を吸収し、地上の生物を守っている。地上付近の大気は通常 0.005 ppm 程度のオゾンを含む。しかし、オゾンは有用な反面、大気中約 1 ppm 以上では、目や呼吸器、神経等の重い中毒症状を引き起こし、50 ppm を超えると生命の危険が生じ、1000 ppm 以上では短時間で死亡する。光化学オキシダントの主成分ともなる。近年、一般家庭の居住空間脱臭用に、空気清浄機として小型オゾン発生装置が市販されているが、狭い室内空間で使用すると、作業環境許容濃度（日本では 0.1 ppm、欧米諸国では 0.05 ppm あるいは 0.1 ppm）を大きく超過し得ることが問題となってきた。また、オゾンは放電や紫外線により空気中で容易に発生する。静電除去装置・溶接機・電気モーター・複写機・プリンター等からもオゾンが発生するので注意が必要である。

3 従来のオゾンガス検知技術

空気中のオゾン検知と濃度測定について、実用化されている代表的な技術を表1にまとめた。半導体式¹¹⁾と電気化学式¹²⁾は、繰り返しあるいは連続測定が可能なガスセンサーであるが、前者は駆動に要する消費電力が大きく、また高温部の取り扱いについて安全上の注意が必要であり、後者は内部に電解質溶液を内蔵し

表 1 空気中のオゾンを検知に測定する従来技術

検知方法	原 理	特徴（長所と短所）
半導体式 ¹¹⁾	400℃程度に加熱した酸化インジウム(In_2O_3)や酸化インジウムスズ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) (ITO)の電気伝導度が、空気中のオゾン濃度に応じて可逆的に増減する現象を利用。	センサーは小型軽量化しやすい。しかし、センサー素子をヒーターで常時高温加熱するので消費電力が大きく、高温部に対する安全面の注意が必要。
電気化学式 ¹²⁾	オゾンを含む気体が電解液と作用ガス電極に接触すると電解反応によりオゾンが酸素に変換され、電流が流れる。この電流値がオゾン濃度に比例することを利用。	センサーは比較的小型化しやすく、半導体式よりも少ない電力で駆動できるが、電解液を内蔵しており、全固体式ではない。
紫外線吸収式 ¹³⁾	オゾンガスは波長253.7 nmをピークとして200–300 nmに特性吸収を示す。オゾンを含む空気をガスセルに導入し、紫外線がガスセルを透過した後の光強度減少からオゾン濃度を求める。	長いガスセルと高精度な光学系を用いれば高い測定精度が得られるが、一般的に装置が大型で重く、高価。
ガス検知管 ¹⁴⁾¹⁵⁾	ガラス管中に封入したシリカゲル担体等に吸着させたインジゴ色素等が、オゾンと反応して不可逆的に化学変化し脱色する現象を利用。ガス検知管の一端からガスを導入し、脱色層の長さでオゾン濃度を測定。	小型、軽量で安価であるが、1本のガス検知管は1回のみ使用可であるので、自動的な繰り返し/連続測定はできない。
ヨウ素法 ¹⁶⁾	ヨウ化カリウム水溶液にオゾンガスを吸収させ、遊離したヨウ素をチオ硫酸ナトリウムによって還元滴定し、オゾン定量。	精度が高いが、手作業で化学分析を行うので、自動的な繰り返し/連続測定はできない。
化学発光法 ¹⁷⁾¹⁸⁾	エチレン等のオレフィン類とオゾンガスが反応する際に生成するカルボニル化合物が発する化学発光を利用してオゾンを検知。	光化学オキシダント濃度の測定に用いられているが、分析化学的な操作を要する。

ているので、全固体型ではないことへの注意が必要である。紫外線吸収式¹³⁾は、オゾンセンサーというよりもむしろオゾン濃度計である。高精度を得るため長いガスセルを内蔵するので、一般的に大型で重く、高価である。ガス検知管¹⁴⁾¹⁵⁾は、小型、軽量で安価であるが、1本のガス検知管は1回のみ使用可能であるので、自動的な繰り返し測定あるいは連続測定はできない。そのため、ガスセンサーに分類されない場合もある。ヨウ素法¹⁶⁾と化学発光法¹⁷⁾¹⁸⁾は、分析化学的なオゾン

定量法であり、操作を手作業で行うので、自動的な繰り返し測定あるいは連続測定はできない。

4 新しい光学式オゾンセンサー材料の探索

上述のように、空気中のオゾンを検知する従来技術には一長一短があった。筆者らは、常温で蛍光や光吸収がオゾンに感応して可逆変化するセンサー材料を得られれば、遠隔非接触で信号読み出しが可能でノイズに強く安全性が高いという光学式の利点を生かした、高感度・小型センサーに繋がると考えた。以前に、ポリアニリン薄膜が、室温で空気中の数 ppm のオゾンガスに感応して光吸収変化を示す現象を見いだした¹⁹⁾²⁰⁾。しかし、センサー材料の吸光度変化を用いる方法よりも、蛍光等の発光強度変化を用いる方法が、出力信号のダイナミックレンジ拡大と高感度化に有利である。そこで、オゾンガスに感応して蛍光変化（強度、波長等）を示す材料を探索した。その結果、蛍光性の化合物半導体ナノ粒子（量子ドット）が、オゾンガスセンサー材料として有望であることを見いだした。後述するように、CdSe 系コアの表面に ZnS 系シェルを形成したコアシェル型量子ドットの薄膜が、室温・大気圧下において、空気中のオゾンに感応して可逆な蛍光強度変化を示し、0.1~500 ppm の広い濃度範囲のオゾンを検知可能であることを確認した²¹⁾。

5 高輝度蛍光を発する量子ドット (QD) と従来の応用

II–VI 族化合物半導体 (CdSe, CdTe, ZnSe 等) や III–V 族化合物半導体 (InP, GaAs 等) を微粒子化し、そのサイズを約 20 nm 以下まで小さくすると、電子状態がバルク体と大きく異なってくる。これは、電子が狭い半導体粒子内部に閉じ込められて運動の自由度が制限されるため、電子が取り得るエネルギーが離散化し、価電子帯と伝導帯のバンドギャップエネルギー (Eg) が大きくなるからである（量子サイズ効果）。Eg が大きくなると、光の吸収・発光が短波長シフトするので、バルク体では赤外波長域に現れていた蛍光が可視波長域に現れる。特に、粒径が 2~10 nm 程度の半導体ナノ粒子は量子ドット (quantum dot, QD) と呼ばれ、量子サイズ効果により、粒径の僅かな違いで Eg が変化し、青色・緑色・赤色等の鮮やかな蛍光色を発するので、新しい高輝度蛍光体として注目されている^{22)~26)}。QD は、1980 年代に研究が始まったが、初期にはまだ品質が低く表面欠陥が多かったため、明るい蛍光を発しなかった。その後、粒径が揃い表面が平滑な QD を合成する技術が進歩した。並行して、QD 表面を界面活性剤で被覆して表面欠陥を不活性化し、同時に凝集を抑える技術や、QD コアの表面に Eg の大きな別の半導体シェルを形成して電子の染み出しを抑える技術が開

発された。その結果、長期安定性に優れた高輝度な蛍光 QD が得られるようになった。

II-VI 族や III-V 族の QD は典型的には直接遷移型であり、発光の減衰時間が数十 ns 程度と、間接遷移型の希土類イオンと比較して 4~5 桁も短い。そのため、光吸収と発光のサイクルを速くすることができ、励起光強度を高めた際に発光強度が飽和しにくく、高輝度化に有利である。また、有機色素に比べると、QD は一般的に耐光性が格段に高く、また励起光と発光の波長を離すことができるので、単一波長の励起光で発光色の異なる複数種類の QD を発光させることができる。

このように種々の利点を有する蛍光 QD の応用について、これまでは、ディスプレイ・照明等の電子材料やバイオ用蛍光試薬を目指した研究開発が主流であり^{27)~29)}、そのため、物理的・化学的な環境変化に影響されずに長期間同じ強度の発光を維持する QD の作製や QD 表面修飾の技術等が研究された。

6 ガスとの接触で起こる QD の蛍光変化を利用した光学式オゾンセンシング

このような従来の研究とは異なる方向性で、筆者らは、QD の蛍光強度や波長が表面状態に敏感であることを逆にセンサーに応用することを着想した。QD は表面原子の割合が大きいので、QD の表面にガス分子が吸脱着することによって、表面欠陥の変化、あるいは QD 内部の電子の状態変化が起こる等して蛍光強度が変化し、光学式ガスセンサーに応用できると予想した。QD の蛍光特性変化を利用したガスセンサーの研究はほとんど前例がなかったので³⁰⁾、筆者らは、まず、蛍光利用オゾンガスセンサー特性を測定するための実験装置を構築した。

図 1 に装置のガス流路構成を示す。オゾン発生器（エコデザイン EG-OG-L-AIST）から、所定濃度のオゾンを含む空気を供給し、QD 薄膜を格納した石英製ガスセル（澤田石英 C 型）に流通する。ガスセル中の雰囲気気を空気からオゾン含有空気に交互に速やかに切り替えるため、もう 1 本の合成空気ポンペを、三方コックを介してガス流通系に接続した。使用したオゾン発生器は、チャンバー内で波長 185 nm の紫外線を合

成空気に照射することにより、光化学反応で酸素からオゾンを生産させる。オゾン発生器は紫外線吸収式オゾン濃度計（オキトロテック OZM-7000GNW）と接続し、フィードバック制御により、設定濃度（0.1~500 ppm の範囲で可変）のオゾンを生産する。オゾン発生器とガスセルは本実験のために特別に設計・製作した。紫外線照射による窒素酸化物の副生量は、ガス検知管（光明理化学 北川式 117SD）による試験によれば検出限界以下であり、オゾンのみを含む空気を供給できることを確認した。ガスセル中の QD 薄膜は、上方からバンドパスフィルターを介して照射される紫外線（波長 365 nm）によって励起され、蛍光を発する。光ファイバーで受光した蛍光は分光器に導かれ、スペクトルが測定される（図 2）。雰囲気ガス変化による蛍光の経時変化を可視全波長で同時測定するため、フォトダイオードアレイを用いた、波長スキャン不要なマルチチャンネル分光器（大塚電子 MCPD-7000）を用いた。実用的なガスセンサーの使用条件を考慮し、室温・大気圧の空気中およびオゾン含有空気中で蛍光スペクトルを測定し、吸着したガスを脱離させる過程で減圧や加熱を行わなかった。

蛍光 QD は、通常、有機溶媒や水に分散した状態、あるいは固体粉末の状態で保存されるが、ガスセンサーへの応用には固体薄膜化が好ましい。本研究では、緑色から深赤色までの種々の蛍光色を示す QD（コアシェル型 CdSe/CdZnS, CdSe/ZnS, CdSeTe/ZnS, コア型 CdTe）の有機溶媒分散液あるいは水分散液を、ガラス基板上に塗布し、次いで溶媒を蒸発除去して、QD

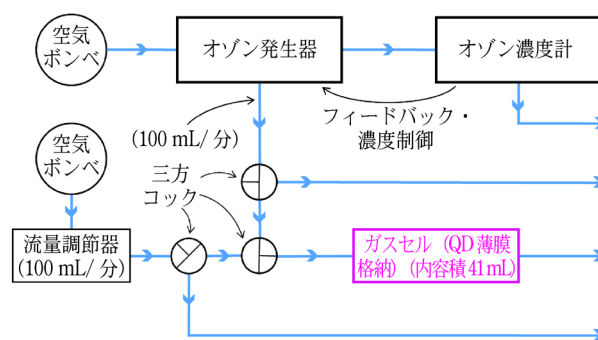


図 1 光学式オゾンセンサー実験装置のガス流路構成

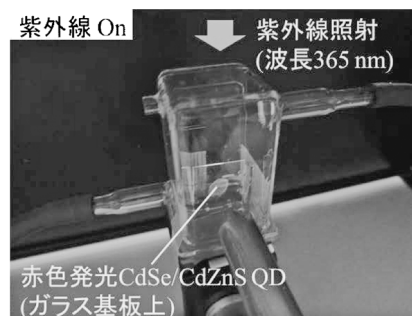


図 2 蛍光 QD 薄膜を格納した石英製ガスセル

薄膜を形成した。

図3に、赤色発光 CdSe/CdZnS QD (産総研で合成) の、空気中およびオゾン含有空気中での蛍光スペクトルを示す。この QD は粒径約 5 nm であり、蛍光ピーク波長 (609 nm) はオゾン濃度を 0 ppm から 500 ppm まで変化させても同一であった。空気中にオゾンを添加すると、蛍光強度は急速に低下した。雰囲気を空気に戻すと、蛍光強度は徐々に元の強度まで回復した²¹⁾。このような可逆変化は、本研究で初めて明らかになった現象である。本研究以前に、ロシアの研究グループが、酢酸セルロース製のメンブランフィルター上に CdSe 系 QD を堆積させた試料を用いて、真空中とオゾン含有空気中で蛍光スペクトルを測定・比較した報告があったが、オゾンとの接触によって一旦減少した蛍光強度は、真空脱気後も 5 % 程度しか回復せず、不可逆変化に近いと報告されていた³¹⁾。

図3に示すように、蛍光強度減少率はオゾン濃度に依存し、1 ppm で 5 %、10 ppm で 16 %、500 ppm で 60 % 減少した。オゾンに対する応答が可逆であることと、蛍光ピーク波長が、オゾンの有無によらず一定であることは、この QD が 500 ppm までのオゾンによって劣化せず、分解や凝集も起こっていないことを示唆している。

オゾンによる蛍光強度変化は、種々の CdSe 系 QD 薄膜において認められた。図4は、赤色発光 CdSe/ZnS QD (Invitrogen Q21721MP) が、空気中の 0.5 ppm のオゾンによって示した蛍光強度変化の時間応答である。この QD (粒径約 11 nm) の、0.5 ppm のオゾンによる蛍光強度減少率は 9 % であり、蛍光ピーク波長は変化せず 658 nm であった。空気中のオゾン濃度を 0 ppm から 0.5 ppm に周期的に変化させると、蛍光強度の可逆的な減少・増大が再現性良く起こった。また、比較のために、雰囲気を空気から 100 % の酸素、窒素、アルゴン、二酸化炭素、1 % の水素を含む空気にそれぞれ切り替えたところ、QD の蛍光強度変化が観測されなかったことから、オゾン選択性が高いことがわかった²¹⁾。

CdSeTe/ZnS QD (Invitrogen Q21761MP) も、同様に空気中のオゾンに反応して可逆な蛍光強度変化を示した。この QD は Se よりも原子量大きい Te がコアに添加され、重原子効果により蛍光波長が深赤色 (692 nm) まで長波長シフトしている。0.5 ppm のオゾンによる蛍光強度減少率は 12 % であった²¹⁾。

緑色発光 QD は赤色発光 QD よりも粒径が小さく、表面原子の割合が高いことから、高感度が期待される。粒径約 4 nm の緑色発光 CdSe/ZnS QD は、空気中の 0.1 ppm という低濃度のオゾンによって蛍光強度が 28 % 減少し、1 ppm のオゾンで 55 % 減少した。このように、予想どおり、CdSe 系 QD は、粒径が小さくな

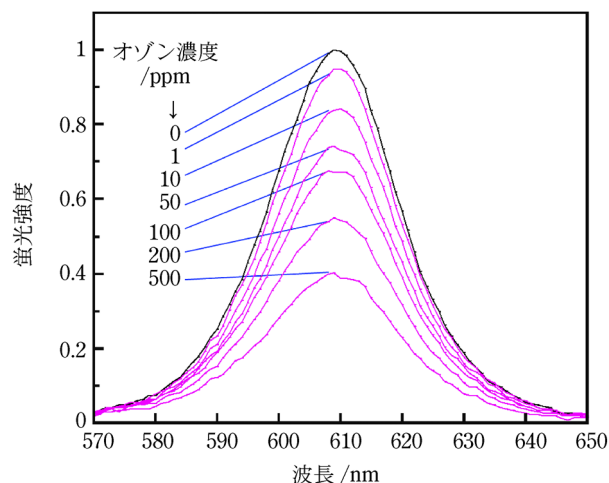


図3 赤色発光 CdSe/CdZnS QD 薄膜の、空気中およびオゾン含有空気中における蛍光スペクトル²¹⁾

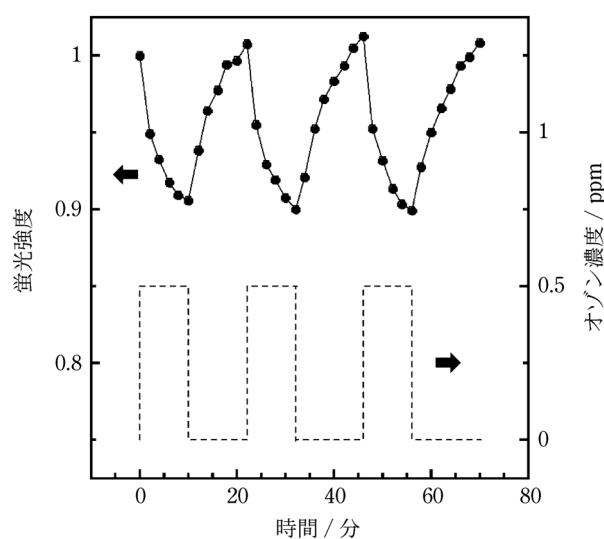


図4 オゾン濃度の周期的な変化によって赤色発光 CdSe/ZnS QD 薄膜が示す蛍光強度変化の時間応答 (波長 658 nm)²¹⁾

ると低濃度オゾンに対して高感度を示すことがわかった。しかし、この緑色発光 QD は、10 ppm を超えるオゾンに接触させると、蛍光ピークが短波長シフトし、その後、雰囲気を空気に戻しても蛍光強度が完全には回復しなかった。このように、粒径が小さいほど、QD は低濃度オゾンに対する感度が高くなる反面、高濃度オゾンによって劣化しやすいという傾向が見られた²¹⁾。

オゾンによって CdSe 系 QD の蛍光強度が可逆的に変化する機構はまだ明らかではないが、QD 表面に吸着したオゾンが、励起状態にある QD 内部の電子と反応する、あるいは、オゾンの吸着によって QD 表面の欠陥が活性化し、電子の無輻射失話が促進される機構が推測される。オゾンの吸着が蛍光強度減少の原因であることは、次の実験で裏付けられた。ポリエチレングリコールでコートされた赤色発光 CdSe/ZnS QD (Invitrogen Q21521MP) は、オゾンに接触した時の蛍光強度減少が、ポリマーコートしていない赤色発光 CdSe/

ZnS QD (Invitrogen Q21721MP) よりも著しく遅く微弱であった。これは、ポリマー層が、オゾン分子の QD 表面への吸着を阻害したためと考えられる²¹⁾。

CdSe 系コアシェル型 QD と対照的に、CdTe コア型 QD は、粒径の小さな緑色発光 QD から大きな赤色発光 QD まで、いずれもオゾンによる蛍光強度変化が微弱であった。オゾン接触時の蛍光強度減少率は、10 ppm で 4~8 % であり、100 ppm でも 7~14 % に過ぎず、低感度であった。CdTe QD は、CdSe 系 QD と異なり、無機物のシェルを付加しない状態でもコアから外部への電子染み出しが少なく、表面状態変化の影響を受けにくいことや、CdTe QD の表面被覆に使われているチオール系界面活性剤は、CdSe 系 QD の表面被覆に使われている化合物（トリオクチルホスフィンオキシド、トリオクチルホスフィン、アルキルアミン、アルキルカルボン酸）よりも QD 表面と強固に結合し、オゾンの吸着を妨げるためではないかと推測される²¹⁾。

7 まとめと今後の展望

以上のように、筆者らは、CdSe 系コアシェル型 QD が、室温・大気圧下において、空気中のオゾンに反応して可逆な蛍光強度変化を示し、蛍光強度変化率はオゾン濃度に依存することを見いだした。この結果は、光学式ガスセンサー材料という蛍光 QD の新しい応用可能性を示すものである。今後は、感度向上の指針を得るために応答機構の解明を進め、また、多量のガス吸脱着が速やかに起こる薄膜微細構造の検討や、駆動条件の最適化による応答速度向上を目指して研究を推進したいと考えている。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 26410201、および、LIXIL 住生活財団調査研究助成 13-05 を受けたものです。

文 献

- 1) G. Sberveglieri (Ed.): "Gas Sensors", (1992), (Kluwer, Dordrecht).
- 2) 軽部征夫監修: "バイオセンサ・ケミカルセンサ事典", (2007), (テクノシステム).
- 3) K. Eguchi: "Gas Sensors", Edited by G. Sberveglieri, p. 307 (1992), (Kluwer, Dordrecht).
- 4) M. Ando: *TrAC: Trends Anal. Chem.*, **25**, 937 (2006).
- 5) X. D. Wang, O. S. Wolfbeis: *Anal. Chem.*, **85**, 487 (2012).
- 6) J. Hodgkinson, R. P. Tatam: *Meas. Sci. Technol.*, **24**, Paper No. 012004, 1 (2013).
- 7) D. B. Menzel: *J. Toxicol. Environ. Health*, **13**, 183 (1984).
- 8) M. Lippmann: *JAPCA: J. Air Pollution Control Assoc.*, **39**, 672 (1989).
- 9) T. Takada: "Chemical Sensor Technology, vol. 2", Edited by T. Seiyama, p. 59 (1989), (Kodansha).
- 10) Int. Ozone Assoc., <http://www.ioa-ea3g.org/ozonethemes/ozone-and-its-application.html> (2016 年 10 月 3 日, 最終確認).
- 11) T. Takada, K. Suzuki, M. Nakane: *Sensors and Actuators*

B, **13**, 404 (1993).

- 12) W. Penrose, L. Pan, J. Stetter, W. Ollison: *Anal. Chim. Acta*, **313**, 209 (1995).
- 13) D. H. Horstman, D. A. Levaggi, B. R. Appel, E. L. Kothny, J. G. Wendt: "Methods of Air Sampling and Analysis, 3rd edn.", Edited by J. P. Lodge Jr., p. 422 (1989), (Lewis, Chelsea).
- 14) "Gas detection tubes and sampling handbook, 2nd edn.", p. 80 (2013), (RAE Systems by Honeywell, TB-1001-02).
- 15) M. R. Straka, G. Gordon, G. E. Pacey: *Anal. Chem.*, **57**, 1799 (1985).
- 16) C. M. Birdsall, A. C. Jenkins, E. Spadinger: *Anal. Chem.*, **24**, 662 (1952).
- 17) G. W. Nederbragt, A. van der Horst, T. van Duijn: *Nature*, **206**, 87 (1965).
- 18) D. Bersis, E. Vassiliou: *Analyst*, **91**, 499 (1966).
- 19) M. Ando, C. Swart, E. Pringsheim, V. M. Mirsky, O. S. Wolfbeis: *Solid State Ionics*, **152-153**, 819 (2002).
- 20) M. Ando, C. Swart, E. Pringsheim, V. M. Mirsky, O. S. Wolfbeis: *Sensors and Actuators B*, **108**, 528 (2005).
- 21) M. Ando, T. Kamimura, K. Uegaki, V. Biju, Y. Shigeri: *Microchim. Acta*, **183**, 3019 (2016).
- 22) H. Weller: *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **32**, 41 (1993).
- 23) C. B. Murray, D. J. Norris, M. G. Bawendi: *J. Am. Chem. Soc.*, **115**, 8706 (1993).
- 24) B. O. Dabbousi, J. Rodriguez-Viejo, F. V. Mikulec, J. R. Heine, H. Mattoussi, R. Ober, K. F. Jensen, M. G. Bawendi: *J. Phys. Chem. B*, **101**, 9463 (1997).
- 25) D. V. Talapin, A. L. Rogach, A. Kornowski, M. Haase, H. Weller: *Nano Lett.*, **1**, 207 (2001).
- 26) N. Gaponik, D. V. Talapin, A. L. Rogach, K. Hoppe, E. V. Shevchenko, A. Kornowski, A. Eychmuller, H. Weller: *J. Phys. Chem. B*, **106**, 7177 (2002).
- 27) M. Bruchez, M. Moronne, P. Gin, S. Weiss, A. P. Alivisatos: *Science*, **281**, 2013 (1998).
- 28) P. O. Anikeeva, J. E. Halpert, M. G. Bawendi, V. Bulović: *Nano Lett.*, **9**, 2532 (2009).
- 29) V. Biju: *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 744 (2014).
- 30) P. Jorge, M. A. Martins, T. Trindade, J. L. Santos, F. Farahi: *Sensors*, **7**, 3489 (2007).
- 31) A. A. Saren, S. N. Kuznetsov, A. S. Kuznetsov, V. A. Gurtov: *ChemPhysChem*, **12**, 846 (2011).



安藤昌儀 (Masanori ANDO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31)。京都大学大学院工学研究科分子工学専攻博士課程修了。京都大学工学博士。《現在の研究テーマ》ナノ複合材料の光・表面化学特性を用いたガスセンサの開発。《趣味》クラシック音楽鑑賞。
E-mail: m-ando@aist.go.jp



茂里 康 (Yasushi SHIGERI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒761-0395 香川県高松市林町 2217-14)。京都大学理学研究科化学専攻修士課程修了。京都大学博士 (工学)。《現在の研究テーマ》質量分析法を用いた機能性分子の効率的検出法開発。《趣味》子育て。
E-mail: yasushi.shigeri@aist.go.jp