

## 高空間分解能酸素分布モニタリング技術の実現に向けた実験的検証

(株)四国総合研究所 電子技術部 荻田 将一  
(株)四国総合研究所 電子技術部 市川 祐嗣  
(株)四国総合研究所 電子技術部 星野 礼香  
(株)四国総合研究所 電子技術部 杉本 幸代  
(株)四国総合研究所 電子技術部 三木 啓史  
(株)四国総合研究所 電子技術部 朝日 一平

キーワード： レーザラマン分光  
酸素欠乏症  
遠隔計測  
L I D A R  
マルチガス計測

Key Words : Laser Raman Spectroscopy  
Oxygen deficiency  
Remote sensing  
LIDAR  
Multi-gas measurement

### Experimental verification of high-resolution monitoring technology for oxygen concentration distribution

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department  
Masakazu Ogita, Yuji Ichikawa, Ayako Hoshino, Sachiyo Sugimoto, Hirofumi Miki, Ippei Asahi

#### Abstract

More than fifty industrial accidents have been reported to be caused by oxygen deficiency for the last ten years. Those kinds of accidents often lead to death and it is necessary to prevent them beforehand. A common method to prevent accidents in the work site, for example, when inspecting tunnels, manholes, or pipelines, is to measure oxygen concentration at any time, which requires a contact-type sensor body of a portable oxygen detector to be exposed to the environment there, but there are a lot of issues about the safety of the method. Therefore, there is a growing need to develop remote oxygen concentration measurement techniques. We experimentally verified a new high-resolution LIDAR system for monitoring oxygen concentration distribution with high position specification accuracy using remote gas concentration measurement technology applying Raman LIDAR that we had developed. In this paper the configuration of the system and the results of the verification test are presented in detail.

## 1. 序論

酸素欠乏症による労働災害は、平成 18～27 年度の 10 年間で 50 件以上の発生が報告されている<sup>1)</sup>。酸欠による事故は致死率が極めて高く、死に至らずとも脳に障害が残る危険性があり、事故を未然に防ぐことが必須である。一方、トンネルやマンホール、あるいは管路点検等の作業時の酸欠事故の防止策として主流となっている手法は、携帯型の酸素検知器を用いて、作業箇所の酸素濃度を随時測定して安全性の確認を行うものである。この手法は、酸素分子とセンサ素子が直接接触することにより検知する接触式センサを用いるため、センサ本体を測定環境に曝す必要がありオペレータの安全性に課題がある。また、センサが置かれた 1 点における酸素検知を行うものであり、空間的な濃度分布計測や遠隔からの計測は困難である。したがって、酸素濃度の空間的な分布を遠隔から安全に計測する技術が現在求められている。これらの背景を踏まえて、本稿では、著者らがこれまでに開発を行ってきたガス濃度遠隔計測技術<sup>2)</sup>を応用して、高い位置特定精度を有する酸素濃度空間分布モニタリングを目的としたライダシステム(以下、本装置)の実現に向けた実験的検証を行ったので、その装置構成及び機能検証試験の詳細について述べる。

## 2. 計測手法

### 2.1 ラマン効果

本装置は計測原理としてラマン効果を用いる。ラマン効果の概念を図 1 に示す。

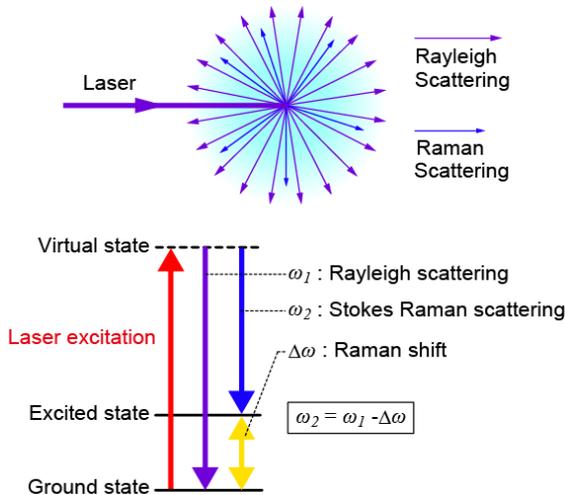


図 1 ラマン効果の概念(上)とエネルギー準位(下)

一般に、光が気体中を進行すると、分子による光の散乱が起こる。その大部分は、レイリー散乱と呼ばれ、照射された光と同じ波長の散乱光となるが、極一部は、元の光と異なる波長となって散乱される。この現象をラマン効果、元の波長と異なる波長となった散乱光のことをラマン散乱光と呼ぶ。ラマン効果は、入射光と、散乱体である気体分子との間でエネルギーの授受が行われることによって生じる現象であり、その結果、散乱光波長がシフトする。分子は、分子種ごとに固有の内部エネルギーを有するため、ラマン散乱光の波長は分子種ごとに固有の値となる<sup>3)</sup>。ラマン散乱光にはいくつかの種類があるが、本装置では、ストークス光と呼ばれるラマン散乱光を検出することによって酸素濃度のモニタリングを行う。ストークス光は、入射光のエネルギーの一部が分子の内部エネルギーに転化することによって生じるもので、入射光よりもエネルギーの低い光となる。したがって、ストークス光の波長は、入射光よりも長くなる。

表 1 に、大気の主成分である窒素及び酸素と、代表的な可燃性ガスである水素及びメタンのラマンシフト及びラマン散乱波長を、図 2 に窒素及び酸素のラマンスペクトルの一例をそれぞれ示す。

表 1 各種ガスのラマン散乱波長(355nm 励起)

Molecular species	Raman shift [cm <sup>-1</sup> ]	Raman scattering wavelength [nm]
O <sub>2</sub>	1556.0	375.8
N <sub>2</sub>	2330.7	387.0
H <sub>2</sub>	4160.2	416.5
CH <sub>4</sub>	2914.0	396.0

表 1 に示すように、ラマン散乱光の波長は散乱体となるガスの種類によって異なるため、分光器や光学フィルタ等で分光して計測することにより、複数のガスが存在する環境下でも、対象とするガスのみを分離して検出することが可能である。また、図 2 に示すように、355nm のレーザー光で励起した場合、酸素のラマン散乱波長は、大気中に多量に存在する窒素分子のラマン散乱波長に対し 10nm 以上離れていることから、透過波長

域が比較的広い汎用的な光学フィルタを用いて酸素のみの観測が可能であり、励起レーザ光とも十分に分離することができる。

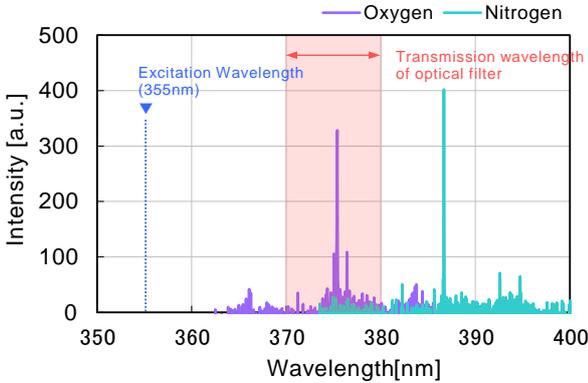


図2 窒素と酸素のラマンスペクトル (355nm 励起)

また、ラマン散乱光の強度は分子の数、即ちガス濃度に比例する。したがって、ラマン効果を捉えることにより、分子種の特特定と濃度の定量化を同時に行うことができる。図3に、ガスセル内に充填した酸素ガス濃度を段階的に変化させた場合におけるラマン散乱光強度計測結果を示す。

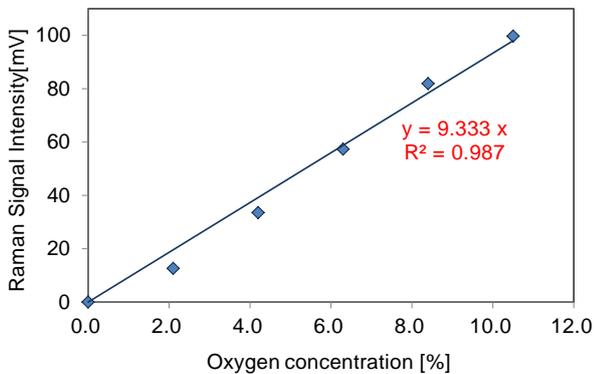


図3 酸素ラマン信号強度の濃度依存性

酸素濃度とラマン信号強度の相関係数は、図3に示すように、0.9以上の高い線形の相関を示している。このように、事前に検量線を取得しておくことで、未知の酸素濃度を計測することができる。

## 2.2 ライダによる気体の空間分布遠隔計測

ライダ(LIDAR : Light Detection And Ranging)はレーザレーダとも呼ばれる光を用いた遠隔計測

技術であり<sup>4)</sup>、一般的に知られている電波帯の電磁波を送信波として用いるレーダ(RADAR : Radio Detection And Ranging)計測とは異なり、ライダ計測では送信波に光の波長帯域の電磁波であるレーザ光を用いている(図4)。ライダは、レーザ光の単色性や指向性等の特性を利用し、遠方にある物質までの距離やその形状、及び濃度等の諸情報を遠隔計測する手法である<sup>5)6)</sup>。

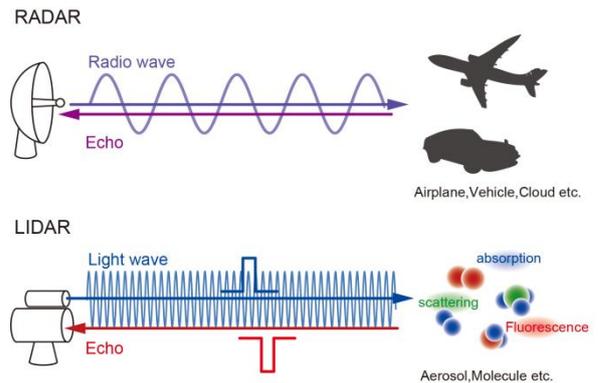


図4 ライダの概念

ライダの基本原理は、観測空間にパルスレーザ光を照射し、被検物質と光の間に生じる散乱光、吸収、蛍光等の相互作用をライダエコーとして検出するものである。測定対象となる物質や得られる情報は、ライダエコーとして受信する相互作用によって異なり、一般的には、エアロゾル<sup>7)8)</sup>、水蒸気<sup>9)</sup>、風速<sup>10)</sup>等の大気観測に用いられている。本稿では、ライダによる観測としては近距離となる10m程度を対象とし、被検ガスの位置特定と濃度情報を得るためにライダエコーとしてラマン散乱光を捉えるシステムを開発する。

ラマンライダによる遠隔計測において、離隔距離 $r$ の位置から得られるエコー信号強度 $P(r)$ は一般に(1)に示すライダ方程式によって記述される<sup>11)12)</sup>。

$$P(r) = P_L \frac{c\Delta\tau}{2} \eta_R \sigma_R N(r) \frac{A}{r^2} \xi(r) e^{-(\alpha_L + \alpha_R)r} \dots (1)$$

ここで $P_L$ はレーザ出力、 $c$ は光速、 $\Delta\tau$ はレーザ光パルス幅、 $\eta_R$ はラマン散乱光の受光効率、 $\sigma_R$ は対象分子の後方ラマン散乱断面積、 $N(r)$ は距離 $r$ の位置における被検ガスの分子密度、 $A$ は受光面積、 $\xi(r)$ は視野重なり関数、 $\alpha_L$ と $\alpha_R$ はレーザ波

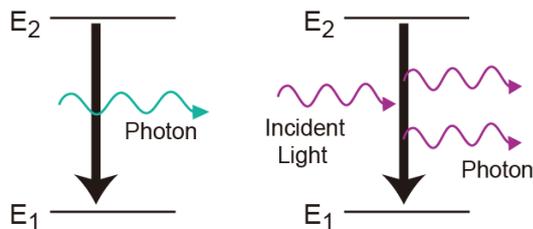
長とラマン散乱波長における消散係数である。

(1)式により、ライダーエコーとして得られるラマン信号強度は、送信系のレーザ出力または受信系の受光面積を増大するほど強くなるが、これは装置の大型化に繋がり、またレーザ出力については、大気空間中への放射に制約が生じる。受光効率 $\eta_R$ は、ライダーを構成する光学系の分光透過特性や、検出器の量子効率等に依存し、視野重なり関数 $\xi_r$ は、ライダー送受信光学系の配置に依存する。また両者はアライメント精度の影響を大きく受ける。これらを踏まえ、酸素ラマンライダー開発の指針は、光学系の材質や配置の観測波長域での最適化と、受光面積の拡大を必要最小限に留めるものとし、コンパクトかつレーザの出力を可能な限り抑えた上で、十分なライダーエコーを取得できる光学系の実現を目指した。

### 2.3 短パルスレーザ励起による高空間分解能化

#### (1) レーザ装置の動作原理

図5に示すように、原子、分子、半導体などで、異なる2つのエネルギー状態 $E_1$ 、 $E_2$ が存在し、エネルギーの高い状態から低い状態へと遷移が起これる時、そのエネルギー差に対応した波長の光が放出される。この過程を自然放出と呼ぶ。これに対し、励起状態にある分子などが、外部からのエネルギーの入射に伴いより低い準位へ遷移すると共に、これに相当するエネルギーを光として放射する現象を誘導放出と呼ぶ。誘導放出によって放射される光は、位相、波長、偏光等の光学的特性が入射した光と一致する。レーザは、この誘導放出を利用して増幅された光であり、単色性、直進性等、通常の光と比較して際立った特徴を持つようになる<sup>13)</sup>。



(a) spontaneous emission (b) stimulated emission

図5 自然放出(a)と誘導放出(b)

誘導放出により光を増幅させるには、下位のエネルギー準位よりも上位のエネルギー準位に存在する電子が多い状態(反転分布)が必要であり、反転分布の状態を形成できる物質がレーザ装置のコアとなるレーザ媒質に用いられている。一般にレーザ媒質が固体であれば固体レーザ、気体であれば気体レーザと呼称し、それぞれ代表的なものとしては、YAG(Yttrium Aluminum Garnet)結晶、CO<sub>2</sub>などが用いられている<sup>14)</sup>。励起の方法には、光照射、放電等がある。また、誘導放出によって生じた光は、共振器内に閉じ込めることによって更に効率的に増幅される。典型的なレーザ共振器は、2枚の高反射ミラーを向い合わせにした構造になっており、出射側のミラーの反射率は、反対側のミラーに比べていくらか低く、閉じ込めた光の一部を透過させることによってレーザ光が発振される。したがって、レーザ装置はいずれも図6に示すように、励起エネルギー源、レーザ媒質、光共振器からなる構造となっている。

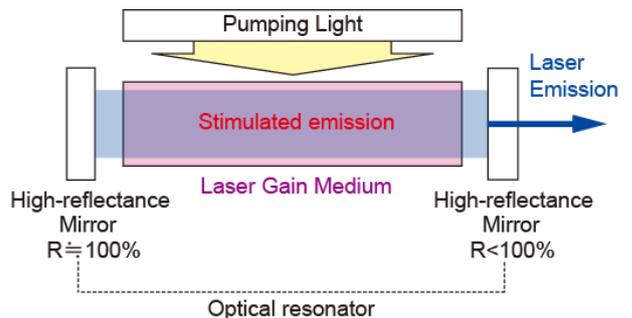


図6 レーザ装置の仕組み

#### (2) DPSS マイクロチップレーザの適用

本装置の送信系の光源として、マイクロチップDPSS(Diode-Pumped Solid-State)レーザを用いる。マイクロチップDPSSレーザの基本構造を図7に示す。

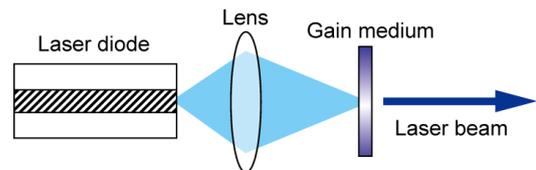


図7 マイクロチップDPSSレーザの構造

DPSSレーザは、半導体レーザを励起光源とす

る固体レーザーの一種である。一般にレーザー発振器は、光の照射や電流を流すなどして内部のレーザー媒質を励起させてレーザー光の発振を行うが、DPSS レーザの場合、半導体レーザー(Laser diode, 以下 LD) の照射で媒質を励起させる。また、レーザー媒質の長さが mm オーダ以下の固体レーザーはマイクロチップレーザーと呼ばれている。これはレーザー装置におけるレーザー媒質と光共振器、更には波長変換結晶や受動 Q スイッチ素子の機能をわずか数 mm 角のモノリシックデバイスに集積化したものである。したがって、DPSS マイクロチップレーザーは、励起用の LD とマイクロチップにより構成され、LD と同等のサイズながら、高出力化・高機能化が容易であるため、近年急速に開発が進められている<sup>20)</sup>。

マイクロチップ DPSS レーザは、媒質の吸収特性に応じて、狭いスペクトルで励起が行われることから、励起効率が非常に高く、加えて曲率加工を施さずとも励起に付随した熱レンズ効果で安定した共振器が形成されるため、飛躍的に高輝度で高いビーム品質を持ったレーザー光の発振が可能となる。また、フラッシュランプ励起の固体レーザー等と比較して、小型で軽量、周波数・強度雑音が高い、波長変換が容易、長寿命で保守が容易であるなどの特徴を持ち、非線形光学波長変換素子や Q スイッチ素子との組合せにより、LD 単体では困難であった様々な機能を実現することができる特徴がある。これらの特徴は、ライダシステムの実用化に向けて、極めて重要な要素である。

一方、ライダ計測における空間分解能  $\Delta r$  は、送信レーザー光のパルス幅  $\Delta \tau$  により、 $\Delta r = c \cdot \Delta \tau / 2$  として決定される。本装置は、10m 程度の近距離での測距を行うため、従来のライダシステムにおける m~数十 m オーダの空間分解能に対し少なくとも 10 倍以上の高い空間分解能が必要となる。マイクロチップレーザーは、共振器等がモノリシック化された構造となっているため、一般に、ns ~数百 ps でパルス発振が可能となる。これは、空間分解能として数 cm~十数 cm に相当し、従来のライダシステムと比較して大幅な高空間分解能化が実現できる。また、ラマン散乱光強度は、パルスレーザー光の瞬間的な尖頭出力に依存するため、短パルス化することにより、実質的には励起エネルギーを抑えることができる。

### 3. 酸素ラマンライダの装置構成

図 8 に酸素ラマンライダシステムの光学系構成を示す。ライダ光学系の配置としては、光送受信軸が分離された biaxial 型(双頭型)とした。biaxial 型は、受信光軸に対する送信光軸のなす角度に依存するブラインドエリアが生じる一方、光学系の構成としては比較的シンプルなため構成が容易であり、かつ、送信ビームに起因するノイズ成分が少ないといった特徴を持つ。送信系の光源にマイクロチップレーザー(波長 355nm, パルスエネルギー 42μJ, パルス幅 1.5ns, パルス繰返し周波数 1kHz)を用い、受信系は、屈折式望遠鏡によりライダエコーを集光し、光電子増倍管(浜松ホトニクス社製, R7400U)により検出する構成とした。レーザー光は、放射後ビームエキスパンダによりコリメートされ観測空間中に照射した。これに伴って生じるラマン散乱光は、ライダエコーとして開口径 170mm のアクリル製フレネルレンズにより受信光学系内に集光され、エッジフィルタ(レーザー波長遮断率  $<10^{-6}$ )によるレーザー波長成分の除去と干渉フィルタ(中心波長 375.1nm, 帯域幅 1.0nm)による酸素のラマン散乱光(波長 375.1nm)の抽出を経て、光電子増倍管に結合される。光電子増倍管の出力はオシロスコープ(Tektronix 社製, DPO7104C)に伝送され、時間波形として取得される。測定更新周期は 1 秒である。また、レーザーパルス光を一部分岐検出し、オシロスコープのトリガ信号として用いた。

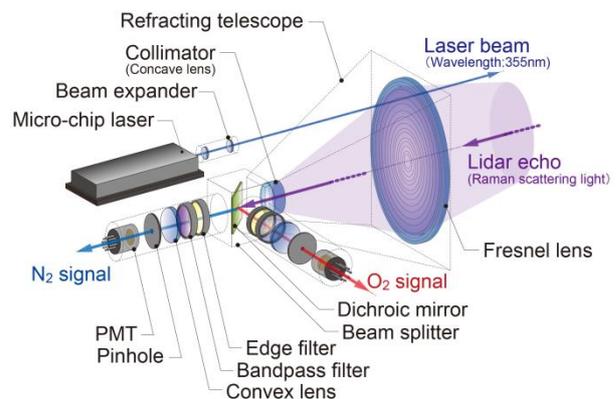


図 8 酸素ラマンライダの光学系構成

本装置では、高空間分解能を実現するために、送信系レーザー光のパルス幅が 1.5ns となっており、ラマン散乱光信号もこれと同等のパルス光とな

って光電子増倍管により検出される。即ち、光学系で得られた短パルスのラマン散乱光を、時間波形で正確にデジタル信号として取得するためには、高速に応答する光検出器と、高速 A/D 変換機能を有するデジタイザが必要である。したがってここでは、検出器として立ち上がり時間が速いヘッドオン型光電子増倍管を用い、デジタイザとして 5GS/s のサンプルレート有する高速オシロスコープを用いて信号を取得した。

#### 4. 機能検証

##### 4.1 空間分解能の評価

試作した酸素ラマンライダを用いて、装置の空間分解能の評価を行った。実験配置を図 9 に示す。

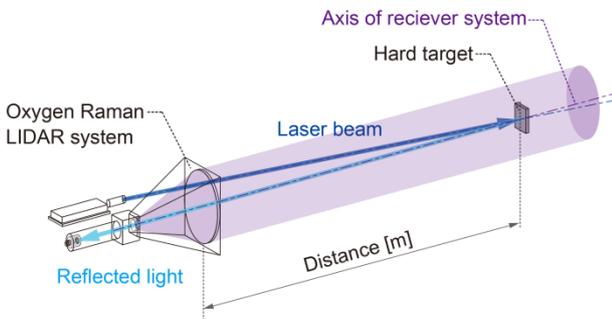


図 9 酸素濃度遠隔計測実験の配置

ライダの視野内にハードターゲットを配置し、その反射光を検出した。ターゲットの位置をレーザー光のパルス幅から求めた空間分解能 ( $\Delta r=22.5\text{cm}$ ) 程度の 20cm 毎で移動させた場合のライダエコー信号を比較することで、本装置の空間分解能を評価した。実験結果を図 10 に示す。

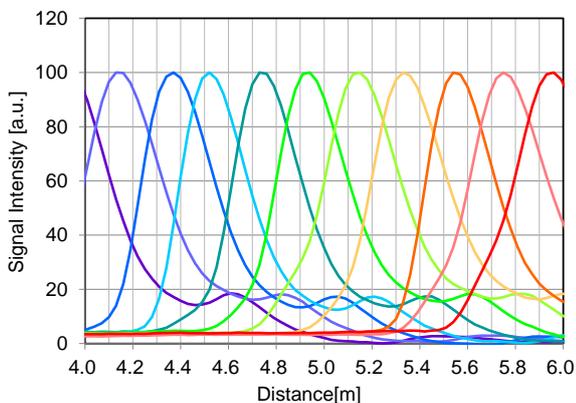


図 10 空間分解能の評価結果事例

図 10 に示すように、20cm 間隔で取得したライダエコー(ハードターゲットからの反射光)がいずれもパルス光として検出されている。実施した計測では、ライダシステムの感度に空間的な分布があるため、各位置毎にライダエコー強度は変動するが、ここでは評価のため、信号強度は規格化して表記している。空間分解能について見ると、それぞれ隣接するパルス波形についてピークが確認できる一方で、信号強度約 80% で波形が重なっており分離度は低い。ここでは、波形の分解能を半値全幅(FWHM : Full width at half maximum) の 50% における分離で評価する。これに照らし合わせると、本装置の空間分解能は約 30cm となり、パルス幅から求めた空間分解能に対し広がっている。これは、主に検出器に用いた光電子増倍管の応答速度によって、パルス光が若干時間的に広がって検出されていることに由来するものである。しかしながら、一般的なライダシステムと比較すると十分に高い空間分解能が実現されており、本装置によれば、30cm 程度の分解能で位置の特定が可能となる。

##### 4.2 大気中酸欠モニタリング機能の評価

大気中に酸欠状態を模擬した空間を形成し、本装置による低酸素領域の検出機能を評価した。実験配置を図 11 に示す。

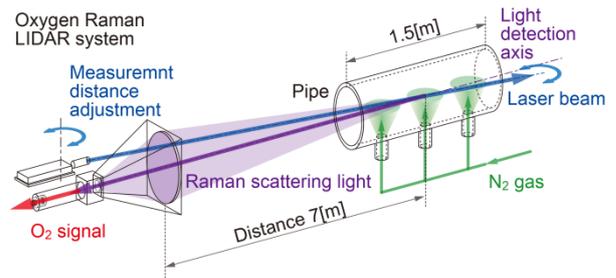


図 11 酸素濃度遠隔計測実験の配置

本装置の観測領域に長さ 1.5m の塩化ビニル管を 7m 離隔して設置し、管内に窒素ガスを放出することにより低酸素領域を模擬した空間を再現した。管内にレーザー光を照射し、発生する酸素ガスのラマン散乱光をライダエコーとして取得した。得られた信号を通常の大気中において取得した酸素のラマンエコーと比較した。また、管内に設置した接触式酸素濃度計の指示値とライダに

より得られた酸素濃度とを比較することにより、定量性を評価した。

ライダの観測領域は 6m から 12m とし、6m の位置が焦点となる光学系配置とした。図 12 に、大気中及び低酸素領域における酸素ラマン信号を比較した結果を示す。

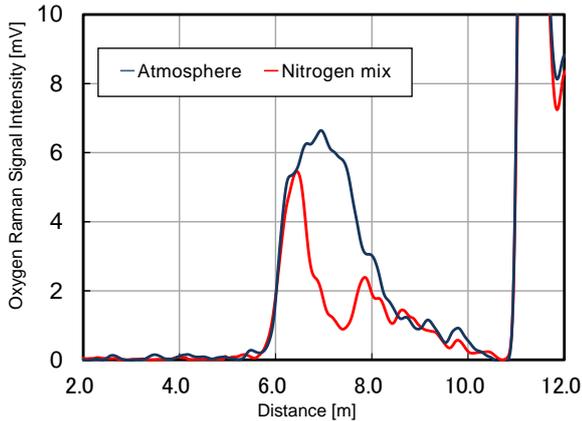


図 12 大気中及び低酸素時における酸素のラマン散乱光信号

図 12 における通常の大気中における酸素のラマン信号波形についてみると、本装置の観測領域である 6m から 12m の領域で焦点位置から後方の約 7m 付近にピークを持つ酸素ラマン信号の分布が確認できる。これは *biaxial* 型のライダシステムにおけるラマンエコーの典型的な時間波形となっており、本装置が遠隔計測装置として良好に機能していることを示している。低酸素領域を形成した場合の波形についてみると、塩化ビニル管が設置された 7m 地点を中心に約 2m の領域における信号が著しく低下していることが確認できる。これは本装置が、大気中における酸素濃度の空間分布モニタリングが可能であることを示す結果である。

次に、管内下方 3 箇所配置した接触式センサにより測定した酸素濃度と、本装置により取得した各センサ配置箇所における酸素ラマン信号強度を比較した結果を図 13 に示す。

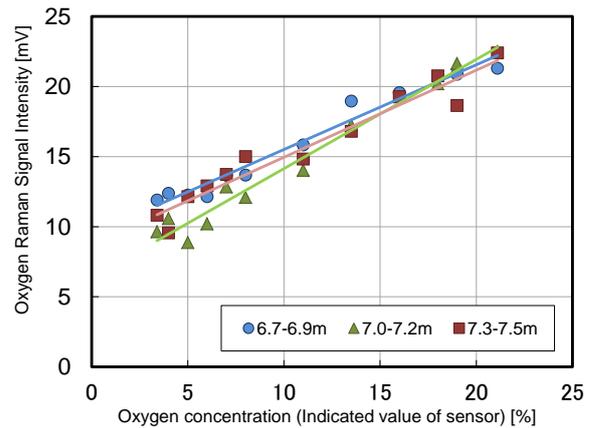


図 13 酸素ラマン信号とセンサによる酸素濃度指示値の比較

図 13 によると、低酸素領域のいずれの箇所においても、接触式センサの指示値に対して良好な相関が得られており、本装置の酸素の定量性が示されている。実用においては、図 12 における大気中の酸素によるラマン信号を事前に取得し、これを酸素濃度 20.95% (一定) として、濃度換算することができる。本結果における相関のバラつきや線形近似直線の勾配の差は、主に酸素センサ設置位置と測定箇所(レーザー照射位置)の差異に起因するものと考えられる。

## 5. 結論

高い空間分解能を有する酸素濃度分布モニタリングを目的としたラマンライダシステムの実現に向け、試作機の開発と機能の実験的検証を行った。本装置の空間分解能は約 30cm であり、通常のリダシステムと比較して大幅な空間分解能の向上を実現した。また、大気中の酸素濃度の空間分布のモニタリングが可能であり、濃度の定量評価が可能であることを示した。これにより、本装置を用いて、遠隔から酸素濃度の低下とその位置及び範囲をリアルタイムにモニタリングすることができ、酸欠による災害事故防止に向けた低酸素領域の連続監視等に有効であることを確認した。

今後は、ライダシステムの小型化、高性能化を進め、更なる高分解能化の実現や、他のガス種への応用など、実用化に向けた研究開発を進めていく予定である。

**【参考文献】**

- 1) 「平成 27 年に発生した酸素欠乏症等の労働災害発生状況について」, 厚生労働省労働基準局(2016)
- 2) 朝日一平 他 : 「低出力レーザによる水素ガス濃度遠隔計測」, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.7, pp.1145-1150 (2010)
- 3) R. M. Measures: “Laser Remote Sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- 4) T. Fujii, T. Fukuchi : “Laser Remote Sensing”, Taylor & Francis, pp.1-36 (2005)
- 5) 小林喬郎 他 : 「レーザによる環境大気のリモートセンシング」, 計測と制御, Vol.16, No.12, pp908-916 (1977)
- 6) 鹿野哲夫 他:「大気環境のレーザ・リモートセンシング -レーザ・レーダシステム-」, 環境科学年報 -信州大学-, 第 12 巻, pp.1-11 (1990)
- 7) Y. Mabuchi et al. : “Multi-wavelength lidar system for the characterization of tropospheric aerosols and clouds”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, pp.2505-2508 (2012)
- 8) S. Ishii et al. : “Arctic haze and clouds observed by lidar during four winter seasons of 1993-1997, at Eureka, Canada”, Atmospheric Environment, Vol.33, pp.2459-2470 (1999)
- 9) S. M. Spuler et al. : “Field-deployable diode-laser-based differential absorption lidar (DIAL) for profiling water vapor”, Atmospheric Measurement Techniques, 8, pp.1073-1087 (2015)
- 10) S.Kameyama et al. : “Compact All-fiber Pulsed Coherent Doppler Lidar System for Wind Sensing”, Applied Optics, Vol.46, Issue 11, pp.1935-1962 (2007)
- 11) K.Stelmaszczyk,M.Dell'Aglio,S.Chudzynski,T. Stacewicz,L.Woste:”Analytical function for lidar geometrical compression from-factor calculation” Appl. Opt, Vol.44, No.7, pp.1323-1331 (2005)
- 12) 椎名達雄 : 「近距離ライダの光学設計」, 電気学会 C 部門大会予稿集, OSI-2, pp.548-553 (2011)
- 13) 片山幹郎 : 「レーザ化学 -基礎とレーザ-」, 裳華房, pp.17-123 (1985)
- 14) レーザ学会編 : 「レーザハンドブック」, オーム社, pp.177-238 (2005)
- 15) R. L. Byer : “Diode laser-pumped solid-state lasers”, Science, Vol.239, pp.742-747 (1988)
- 16) T. Y. Fan et al. : “Diode laser-pumped solid-state lasers”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-24, pp.895-912 (1988)
- 17) J. J. Zayhowski and A. Mooradian : “Single-frequency microchip Nd lasers”, Opt. Lett., Vol.14, Issue 1, pp.24-26 (1989)
- 18) T. Taira et al. : “Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd:YVO4 microchip lasers”, Opt. Lett., vol. 16, no. 24, pp. 1955-1957 (1991).
- 19) 平等拓範 : 「マイクロチップ固体レーザ」, レーザ研究, Vol.26, p.847-854 (1998)
- 20) レーザ学会編 : 「レーザハンドブック」, オーム社, pp.311-319(2005)