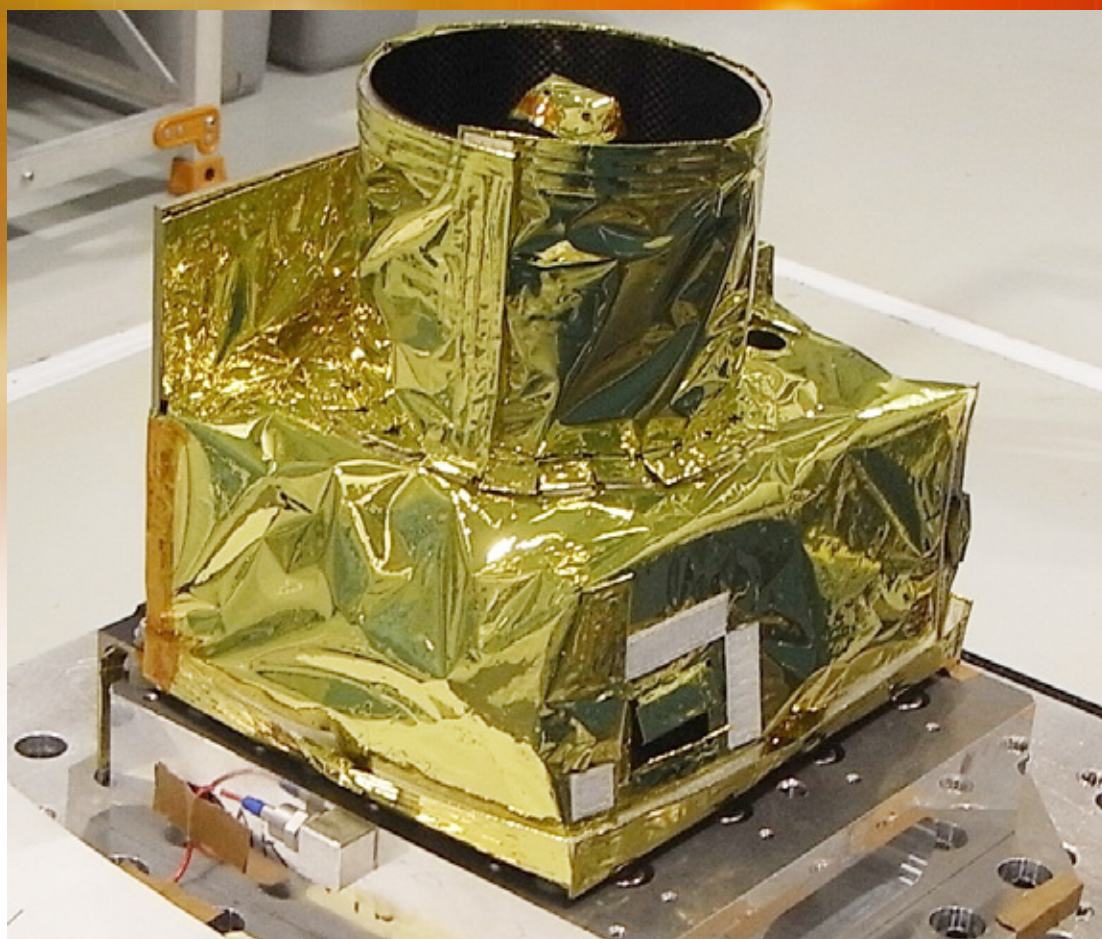


レーザセンシング学会誌

2021
Vol.2 No.1

◆特集◆

ライダー技術 I



31 ページの記事参照

レーザセンシング学会誌
Journal of Laser Radar Society of Japan
Volume 2, Number 1 (April 2021)

特集：ライダー技術 I
Special Issue on Lidar Technology I

巻頭言

Prefatory note

ライダー技術の発展と産業応用

Progress of LIDAR technology and its industrial application

平野嘉仁 Yoshihito Hirano 1

解説

Technical Review

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ

Visible and UV Laser by Frequency Conversion for Sensing Application

廣橋淳二, 宮崎達也, 星正幸, 今井浩一, 富張康弘

Junji Hirohashi, Tatsuya Miyazaki, Masayuki Hoshi, Koichi Imai, Yasuhiro Tomihari 4

解説

Technical Review

セキュリティ分野におけるレーザリモートセンシング

Security applications of laser remote sensing

伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 大海聡一郎, 藏田真太郎, 染川智弘, 江藤修三,
真子直弘, 堀澤秀之, 山口 滋, 藤井 隆, 久世宏明

Jun Izawa, Takeshi Yokozawa, Takao Kurata, Soichiro Oomi, Shintaro Kurata, Toshihiro Somekawa, Shuzo Eto,
Naohiro Manago, Hideyuki Horisawa, Shigeru Yamaguchi, Takashi Fujii, Hiroaki Kuze 10

解説

Technical Review

1.5 μm レーザ光を用いたドップラーライダーによる風計測技術

Wind velocity measurement technology by coherent Doppler lidar using 1.5- μm laser

辻 秀伸, 今城勝治, 廣澤賢一, 亀山俊平, 柳澤隆行

Hide Nobu Tsuji, Masaharu Imaki, Kenichi Hirose, Shumpei Kameyama, Takayuki Yanagisawa 17

解説

Technical Review

水中 LiDAR への取り組み

Challenges to Realize Underwater LiDAR

島田雄史, 鈴木謙一

Takeshi Shimada, Ken-Ichi Suzuki 25

解説

Technical Review

月・惑星探査用ライダー

Lidar for Lunar and Planetary Exploration

加瀬貞二, 水野貴秀, 荒木博志, 千秋博紀

Teiji Kase, Takahide Mizuno, Hiroshi Araki, Hiroki Senshu 31

編集後記 37

ライダー技術の発展と産業応用

平野 嘉仁

三菱電機株式会社 (〒100-0031 東京都千代田区丸の内 2-7-3)

Progress of LIDAR technology and its industrial application

Yoshihito HIRANO

Mitsubishi Electric Corporation, 2-7-3, Marunouchi Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

(Received February 20, 2021)

Regarding the progress of LIDAR technology and its industrial application, I describe my experiences for the last 30 years and the latest technical progress of newly commercialized “LiDAR”. With the maturity of LIDAR technology and the clarification of social needs, I hope that LIDAR will make a leap forward as a “remote sensing technology that makes invisible things visible” and that our traditional Laser Radar Society of Japan will be activated.

最近、世間で“LiDAR”という名前が広く知られるようになった。高速・高精度に立体空間を撮影するカメラとして、車の自動運転、ロボットの目、拡張現実（AR）生成などの用途で注目を集めている。最初は、2013年頃、マイクロソフトがゲームなどに用いるモーションセンサ Kinect に、強度変調した反射光の位相から反射点までの距離を取得する iToF (indirect Time of Flight) 方式を導入したことに遡る。イメージセンサの素子毎に位相差を検出する方式は、CMOS カメラとの整合性が高く、高分解能な距離画像を得られるとともに、比較的安価であることから、その後、深度測定、暗所でのオートフォーカス、顔認証といった用途でスマートフォンに搭載されるようになってきた。更に、昨年、光パルスの往復時間から距離画像を取得する dToF (direct Time of Flight) 方式の“LiDAR”スキャナが iPhone に搭載され登場した。長距離、屋外での使用に優れるとして注目にされており、ここに来て、まさに 1 人に 1 台の“LiDAR”時代が到来した。

さて、メイマンがルビーレーザーを発振させてから 60 年が経過した。レーザーは、人類がレーザー応用技術に新天地を求め開発を進めた結果、通信、加工、ストレージ、計測、医療、照明といった産業分野で、社会に欠かせないものとなっている。この中で、レーザー光をターゲットに照射して、ターゲット

から反射や散乱で戻ってきた光の情報を取得するライダー計測も、測距や大気観測を中心に広範囲の応用に向けて開発が進んできた。本学会の前身であるレーザーセンシング（レーザー・レーダ）シンポジウムの 1972 年の第 1 回報告をホームページで眺めると、稲場文男先生や山中千代衛先生などの日本のレーザー界の生みの親を筆頭に、現理事の小林先生や内野氏の名前も拝見できる。高度成長期における大気汚染の計測や、超高層の計測、超長距離（人工衛星）の距離計測など多様な報告がなされており、黎明期における熱気がうかがえる。また、企業からの発表も多く、産業応用への期待感もあったように思われる。さて、その後 50 年間のシンポジウムの変遷をみると、発表件数は 3 倍程度に増えてはいるが、企業からの発表件数はスペースライダーなど一時的なトピックスを除いて増えていないことは残念である。ただ、この間、産業応用への努力が無かったわけではない。手前味噌ではあるが、少し、30 年にわたって私と仲間たちで行った挑戦について述べさせていただく。

本学会での私の最初の発表は 1989 年の福岡で開かれた第 13 回である。もともと光通信デバイスを開発をしていた私は、当時の上長である伊東尚氏から固体レーザーの開発を命じられ、スタンフォード大の Byer 教授等により提案された半導体レーザ

(LD) 励起固体レーザーの研究を始めた。LD 励起は、固体レーザーの電気効率をランプ励起に比べ 10 倍近く向上し、熱による出力限界を緩和する。これにより高ビーム品質の高繰返しレーザーが実現可能になるため、高い空間分解能で高速 2 次元測距を必要とするヘリコプタの電線検知などへの応用に向けた LD 端面励起 Nd:YLF レーザの開発結果を発表した。今では平凡な結果だったが、空冷を含め手に載るサイズのレーザーを設計から製作まで 1 人で行ったのは良い経験となった。その後、LD 励起固体レーザーは、その寿命の長さから宇宙での利用が注目され始めた。私も、1990 年後半は、本学会の笹野氏、中島氏、浅井先生、小林先生、内野氏、長澤先生等、多くの皆様にお世話になりながら、“ELISE” 等、衛星搭載ライダー向けに、各種のレーザーシステムを開発させて頂いた。伝導冷却 Nd:YLF レーザや、横基本モード Nd:YAG レーザでは、平均出力の世界記録も達成し、ライダーのプロトタイプの製作まで行ったが、残念ながら実用にはいたらなかった。

1990 年台末になり、高出力の希土類添加光ファイバが登場すると、ライダーの大きさ、価格、信頼性などの改善に向けて、送受信の光学系以外は、光通信用の部品と光ファイバ増幅器で構成した全光ファイバ型ライダーの検討をスタートした。光通信の波長帯 1.5 μm がフィールドで使いやすいアイセーフ波長であることや、コヒーレント光通信用の部品や技術も豊富であったことから、当時、研究所でライダー事業化を模索していた我々は 1.5 μm のコヒーレントドップラーライダー (CDL) の製品化に梶をきった。なかでも風計測は、ヒートアイランド現象や環境影響物質の拡散といった都市環境監視、晴天乱気流や後方乱気流といった航空機の脅威監視、風況調査や到来風を予測しての制御といった風力発電の効率化等、数多くの産業応用テーマが考えられたからである。全光ファイバ型ライダーは、思惑通り比較的簡単に製品化できたが、光ファイバの弱点として、その細いコア径での非線形効果、特に狭スペクトル幅の光伝搬時におこるブリルアン散乱のため、送信ピークパワーに限界があることもわかった。ライダーとして観測距離が数 100 m と短く、広範囲の風況分布をリアルタイムに測定するような用途には使えないのである。その頃、丁度良いタイミングで、高効率な非線形素子である周期分極反転素子 PPLN (Periodic Poled: LiNbO_3) の大口径化が三菱電線の谷口氏等により成され、高出力な光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) への応用を思い立った。最終的に、OPA を全光ファイバ型ライダーに付加し、気象レーダで

使用している高速信号処理装置と組み合わせることで、半径 10 km、360 度周回データを 1 分程度で測定できる設置型 CDL が完成した。当時、本ライダーの最初のユーザである北大の藤吉先生から、リアルタイムで変化する細かい風の動きを可視化して見せて頂いた時には本当に感激した。また、この結果を、当時、小林先生の推薦で CLEO (サンフランシスコ)、浅井先生の推薦で CLRC (アスペン)、それぞれで招待講演させて頂いている。ただ、OPA は励起光源として 1 μm 帯の大型の固体レーザーが別途必要で、製品の小型化・高信頼化に苦勞した。CDL 製品で先行していた競合のロッキード・マーチン社も同様の苦勞があったようで、2005 年頃に、使用するレーザーを、波長 2.1 μm 帯の大型固体レーザーから、光ファイバレーザー励起で小型化・高信頼化に向く波長 1.6 μm 帯の固体レーザーに変更した。我々も、別のタイプの出力増幅器を模索した。当初、光ファイバ増幅器の高出力化に向けて、非線形効果の影響を減じるファイバコア径の拡大やファイバ長の短尺化なども進めたが、抜本的な出力向上までには至らなかった。最終的に、光ファイバ増幅器と同じエルビウム添加ガラスを用い、バルクと 2 次元導波路 (光ファイバ) の中間にあたる平面導波路型増幅器を独自開発することで課題の解決を図った。結果、高出力化により観測距離は半径 30 km 近くまで拡大し、空港の乱気流監視向けに適用可能となった。また、小型化により航空機搭載が可能になり、JAXA (調布) 殿に Boeing 747 での晴天乱気流検出試験を実施いただくに至っている。

その他、CDL 以外の用途で開発した全光ファイバ型ライダーに CO_2 観測 LAS (Laser Absorption Spectrometer) がある。 CO_2 吸収線上の ON/OFF 2 波長に、異なる強度変調周波数を割り当てて 2 波同時・同光路で送信し、変調周波数毎での受信光強度比から長距離パスでの吸収を高精度に測る方式を考案した。開発品は、JAXA (筑波) 殿の航空機搭載実証等で精度検証頂いており、将来の衛星搭載につながることを期待したい。

この後、2010 年頃から始めた開発が、カメラ並みのフレームレートで動作する 3D イメージングライダーである。長距離で高分解能なデータを取得する場合、すべての点を順次スキャンする方法では、飛行時間のためフレームレートが制限される。解決には、複数点同時の測距処理が必要で、1 次元の APD アレイと、その出力を同時に測距データに変換する TDC (Time to Digital Converter) アレイ IC を開発した。この受信モジュールで垂直方向のデータを一括に取得し、水平方向はスキャナでビームを

掃引することで、距離 1.2 km の 3D 画像を 30 フレーム/秒で取得することに成功している。今後、道路、鉄道、航空滑走路などの路面・路線監視、宇宙や海底といった極限環境でのイメージングなどに適用が広がることを期待している。

さて、ここまで、我々の経験で紹介したように、新しい技術の導入によりライダーは着実に進歩し、産業への適用事例も増えつつある。さらに、近年、世界的な SDGs に基づく社会課題解決への意識の高まりから、地球環境保全や気象予測に向けての社会ニーズも高まっているように思う。“遠隔からみえないものを見る技術”として広視野の体積データをリアルタイムで取得できるような高性能なライダーを小型・低コストで提供できるようになれば、ライダーの社会実装がより進むだろう。最後に、これからのライダー技術の進展について考えたい。

冒頭で述べた“LiDAR”は、人が目をつかっておこなってきた認識の仕事を機械が受け持つためのツールとして開発されている。車やロボットの目や、人の視覚認識を AR/VR サイバー空間で共有するためのセンサとしての市場規模は膨大で、実用化には多くの資金とエンジニアリングリソースが投入されている。多くの技術的イノベーション同様、“LiDAR”における今回の非連続な技術進歩も、集積化に優れ、量産化にも適する半導体技術の活用から生まれている。例えば、iPhone に搭載の“LiDAR”では、送信にレーザープリンタなどの量産実績をもつ面発光レーザー（VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser）が、受光に CMOS イメージセンサで培われた高度な製造技術で作られた SPAD（Single Photon Avalanche Diode）が用いられ、生産性や信頼性を担保した上でスマートフォンに搭載可能な低価格も実現している。方式は、機械駆動のない、所謂、フラッシュライダーであり、なんとといっても、センサチップ上で 2 次元のフォトンカウンティングとデジタル演算を行い、距離・強度データを直接出力するのは、まさに半導体設計・製造技術の賜物である。フラッシュ方式以外にも、シリコンフォトニクス技術で製作した光のフェーズドアレイアンテナを用い、電子的に高速ビーム掃引する FM-CW 方式なども開発されているが、小型・高信頼・低コストを実現するのに半導体プロセスを用いているのは共通である。現在、SPAD やシリコンフォトニクスの動作波長領域の拡大も進んでおり、これらの技術導入でライダーの受信器は大きく進化

するだろう。

一方、“LiDAR”とライダーで最も異なるのが送信パワーである。大気散乱を対象とした長距離計測となれば格段に高い送信パワーが要求される。これについて最近のトピックスがあるので簡単にふれておく。一つは、京大の野田先生等の発明であるフォトニクス結晶面発光レーザー（PCSEL: Photonic Crystal Surface Emitting Laser）である。PCSEL は、通常の VCSEL と異なり、レーザー共振が活性層に平行でありながら垂直方向にビームを出射する。このため、広い共振領域の活性層内に蓄積された高いエネルギーが利用可能である。また、垂直方向に出射するビーム形状が共振の光強度分布に比例するため、大口径（～mm）の横基本モードビーム形成が可能である。現在、低次横モードでのエミッタ出力として 70 W と従来の VCSEL の数千倍が報告されているが、理論的には更なる高出力化も期待でき、今後の実証を待ちたい。面発光であるためアレイ化も容易で、ビーム出射方向も設計で変えることができるので、電気的に高出力ビームを掃引できるライダー向きの半導体レーザーが実現できる日も近い。

二つ目は、高エネルギー発生に適した小型固体レーザー技術である。一般に、高エネルギーを扱う固体レーザーでは、損傷を抑えるためにレーザービームの大口径化が有効であり、レーザー素子としてディスク形状が良く用いられる。しかし、ディスクは排熱のために厚みを薄くとる必要があり、蓄積エネルギーが小さくなることから単一素子からの出力が制限されていた。これに対し理研の平等先生等は、複数枚の薄ディスク素子を熱伝導率の高いサファイア冷却板でサンドイッチしながら独自技術で接合した DFC（Distributed Face-Cooled）構造の素子を提案しており、すでに体積数立方センチの超小型素子から J 級の高エネルギー発生を実証している。また、J 級の出力を波長変換可能な大口径の PPLN も同時に実現しており、各種波長のライダーに適用できそうである。アイセーフ波長で出力すれば、超小型で長距離のフラッシュライダーも夢でなくなるかもしれない。

これまで述べてきたように、ライダー技術は成熟を迎えつつあるとともに、社会ニーズも明確になりつつある。今こそ“遠隔からみえないものを見る技術”としてのライダーの産業応用での飛躍と、伝統あるレーザーセンシング学会の更なる活性化に期待したい。

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ

廣橋 淳二, 宮崎 達也, 星 正幸, 今井 浩一, 富張 康弘

株式会社オキサイド (〒408-0302 山梨県北杜市武川町牧原 1747-1)

Visible and UV Laser by Frequency Conversion for Sensing Application

Junji HIROHASHI, Tatsuya MIYAZAKI, Masayuki HOSHI, Koichi IMAI, and
Yasuhiro TOMIHARI

Oxide Corporation, 1747-1, Maginohara, Mukawa, Hokuto, Yamanashi 408-0302

(Received February 1, 2021)

Visible and UV lasers for sensing application were investigated. In order to realize compact, relatively high repetition rate, high peak power, and reasonable price pulsed lasers, pulsed fiber laser with 1064 nm, 50 kHz repetition rate, and 1 ns pulsed width laser was selected as a fundamental source. Frequency conversion part, proper non-linear optical materials were selected and the focusing and device dimension were adjusted to achieve compact frequency convertors. For visible (532 nm) laser, convertor size was achieved down to 100 cc size by utilizing PP-Mg:SLT device. For UV (355 nm and 266 nm) lasers, by selecting PP-Mg:SLT, PP-LBGO, and BBO devices, 100~200 mW level output power were achieved with the convertor size of 120~220 cc. Those compact configurations were available for mounting them on drones.

キーワード：非線形光学, 疑似位相整合, ファイバレーザ

Key Words: Nonlinear optics, Quasi phase matching, Fiber laser

1. はじめに

近年, 各種分析やセンシングの用途において, レーザ光はさまざまな分野で利用, 実用化されている。その中で, レーザの種類は, 駆動方式 (連続波やパルス波 (ns, ps, fs)), 波長 (赤外・可視・紫外), 価格帯など, 多種多様であり, 用途に合わせた装置が開発されてきた。

レーザを用いたセンシング用途の代表的なものとして近年ライダー (LIDAR: Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) 計測技術が進歩しており, 採鉱, 土木建築, 森林管理などで必要とされる広範囲な 3D データ取得する技術なども実用化されている。また, 自動車の自動運転に向けた基礎データの計測, および自動運転向け用のリアルタイム計測など, ライダーの応用分野は拡大している。現在, 3D 計測には主に赤外光 (1.5 μm 帯) のパルスファイバレーザが用いられている

が, 可視, 紫外光を用いることにより, 更なる応用展開の可能性が期待されている。

可視光を用いたライダーの適用事例としては, 水中への応用があげられる。水は赤外光が透過しないため, 透過率の高い波長帯域である青色から緑色 (波長 440~540 nm 付近) が有効であり, 資源探査, 沈没船捜索, 海中地形測量などへの応用が期待される。従来の超音波を用いたソナーと比べ, ライダーは高解像度でかつ 3 次元計測が可能であり, 従来と比べて得られる情報の量および精度が飛躍的に拡大・向上する。具体的には, 光の届かない深海の潜水調査艇による海底調査の例がある。深海では, 太陽の光が減衰して多くは届かないため, 光学カメラでの遠距離での計測が難しい。一方, 532 nm の可視レーザを用いたライダーでは数十メートル離れた位置からの測定で高解像度の地底観測ができることが報告されている¹⁾。また, 航空機に搭載して上空から河川や海底の地形をマッピングする航空レーザ

測深 (ALB: Airborne LiDAR Bathymetry) も報告されている。この方式の場合には、赤外光と組み合わせることで、陸上、水面、水底のいずれにも対応できることが報告されている²⁾。

一方、紫外光を用いたライダーへの応用は、上空における火山灰の微小なチリの計測や、空気の薄い層での風の流れを読み取るための窒素分子の蛍光を用いたライダー計測への応用が期待されている。これら計測を行うためには、波長の短い赤外光 (355 nm, 266 nm) のパルス光源が期待されている。

これらライダー用の計測光源として求められる性能としては、計測の観点からは分解能やノイズを低減させるために、繰り返し周波数が高いこと、ピークパワーが高いことが求められる。さらに、実用上は潜水調査艇や航空機に搭載する場合、小型で持ち運びができ、かつ価格的にも普及可能な価格帯であることが望まれる。特に、近年では Drone への搭載が期待されており、そのサイズ・重量の小型化および低消費電力化への要求は大きくなっている。このような用途向けのパルスレーザの特徴について、その構成方式による比較を Table 1 に示す。

一般に、DPSS ベースのレーザは、高繰り返しの構成をとるとサイズが大きくなり、可搬が難しくなる。一方でマイクロチップレーザなどに代表されるパッシブ Q スイッチ方式のレーザなどは、小型化が可能である一方で、繰り返し周波数を上げることが難しく、パルスジッターもあり、計測上問題となる場合がある。そこでわれわれは高繰り返し、高ピークパワー、可搬性を兼ね備えたレーザ光源として、ファイバレーザベースの特長に着目し、これらと波長変換を組み合わせた波長変換レーザの開発を進めている。

本稿では、パルスファイバレーザとして、1064 nm レーザを適用し、これと組み合わせた波長変換レーザについて説明する。パルスファイバレーザは加工用途に多く適用されているが、そのほとんどは波長線幅が数 nm でランダム偏光となっており、波長変換効率が極端に悪く適していない。そこで本稿

では、波長 1064 nm, 平均出力約 1 W, ピーク出力最大 25 kW, 繰り返し周波数 50 kHz, パルス幅約 1 ns のパルスファイバレーザで、波長変換で重要となる波長線幅は 200 pm 以下、直線偏光で LMA (Large mode area) の PM ファイバ (コア径 20 μm) で伝搬されたものを採用した。サイズは 120 mm × 120 mm × 27 mm と比較的コンパクトで先端は FC/APC コネクタで終端されている。以下では本光源を基本波レーザとして用いた可視、紫外レーザについて報告する。

2. 小型可視レーザ

水中での計測を考えた場合、水に対して最も透過率の高い 460~480 nm 近傍の青色が適しているが、これらの波長を直接発振、または 920~960 nm 帯の波長変換をする構成を考えた場合、計測の感度を上げるための高ピークパワーレーザを実現することが難しい。そのため、水中ライダーの用途には、現在の実現可能な技術としては、より高いピークパワーを容易に得られる 1030~1070 nm 帯の赤外基本波を波長変換する方式がコスト・性能の面で優れている。赤外光を緑色に変換する波長変換材料としては、角度位相整合を用いた LBO と疑似位相整合を用いた PP-KTP, PP-Mg:LN, PP-Mg:SLT など多くの候補がある (LBO: LiB₃O₅, KTP: KTiOPO₄, Mg:LN: Mg-doped LiNbO₃, Mg:SLT: Mg-doped near stoichiometric LiTaO₃)³⁻⁴⁾。その中でも、前記の基本波レーザに対する波長変換素子として、Walk-off がなく常温動作が可能で、且つ光損傷 (フォトリフラクティブやグレートラック) に対する耐性の強い PP-Mg:SLT を採用した。波長変換デバイスの選定においては、変換効率、材料耐性 (ピークパワー、平均出力) のバランスを考えて最適化が必要である。デバイス長とピークパワー密度 (フォーカシング条件) を複数の条件で検討した結果、2 mm 長を選定することで、Fig. 1 に示すように変換効率約 50% の出力を得ることができ、出力ビームは中央部が特に

Table 1 Comparison of pulsed laser properties by different laser configuration.

	DPSS High rep. rate	DPSS Low rep. rate	Fiber laser
Rep. rate	High	Low	High
Jitter	Small	Large	Small
Peak power	Low	High	Medium
Portability	Unable	available	available
Cost	High	Low	Medium

DPSS laser: diode pumped solid state laser

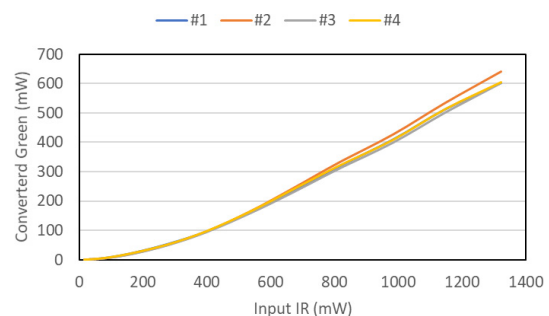


Fig. 1 Frequency conversion property of 532 nm generation for different units,



532nm/500mW
40(W) × 40(H) × 62(L)mm³

Fig. 2 532 nm laser module.

バックコンバージョンすることなく、ほぼ円形のビームを得ることができた。さらに、複数素子に対して検証した結果、ほど再現することを確認した。

この基礎データに基づき、波長変換レーザを構成した。波長変換素子は機能させるためには温度制御が必要であるが、そのための温度制御回路は波長変換モジュール内に搭載する設計として、ファイバレーザと波長変換部の両方の小型化を図った。その結果、Fig. 2 に示すように、100 cc 以下の波長変換モジュール構成を実現できた。

現在この構成は Drone に搭載された水中計測ライダーへの応用が進んでいる。また、近年では、高出力化、赤外と可視の2波長同時出力化、より青に近い波長のレーザなどの要望も多く、現在それぞれの用途に合わせた設計条件の最適化も進めている。

3. 小型紫外レーザ

次に、紫外レーザについて説明する。はじめに355 nm レーザを考えた場合、355 nm を発生させるためには、SHG (Second harmonic generation) および THG (Third harmonic generation) の2つの波長変換過程が必要となる。Table 2 に両過程の波長変換素子の組み合わせ候補を示す。

上記の中で、潮解性がなく変換光のビームが円形を保つことのできる No. 3 と No. 4 のペアについて検討した。なかでも No. 3 のペアについては、同じ材料を用いていることから、一つの素子に2つの波長変換機能をインテグレートしたモノリシック波長変換素子を設計、作製した。Fig. 3 に波長変換の光学系を示す。

モノリシック構造のそれぞれの変換過程の最適化をするため、SHG 部の素子長を2~4 mm、THG 部の素子長を3~7 mm とした複数の素子水準の組み合わせを検討し、あわせて各組み合わせに対して基本波の集光条件も複数確認し、最適となる素子長、集光条件の組み合わせについて、実験的に確認をし

Table 2 Comparison Nonlinear optical device pair for 355 nm generation⁵⁻⁸⁾.

Pair	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
SHG	LBO	PP-Mg:SL	PP-Mg:SLT	PP-Mg:SLT
THG	LBO	LBO	PP-Mg:SLT	PP-LBGO
Beam shape	Elliptical	Elliptical	Circle	Circle
Operation temp.	150°C	R. T.	R. T.	R. T.
Power durability	High	High	Low	Medium
Hygroscopicity	Weak	Non	Non	Non
Efficiency	Low	Low	High	Low

LBGO: LaBGeO₅, R.T: room temperature
SHG: second harmonic generation
THG: third harmonic generation

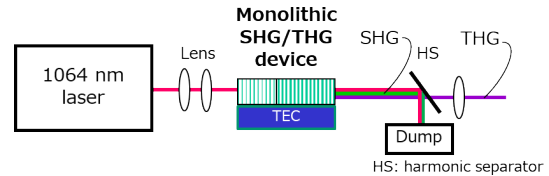


Fig. 3 Schematics of THG setup for monolithic device.

た。

その中で、最もロバストな組み合わせのひとつとして、SHG 部を2 mm、THG 部を4 mm、全長6 mm としたモノリシックデバイスに対する最適な集光条件を見出した。Fig. 4 に355 nm の出力が最大となるように調整した集光条件における入力-出力特性の結果を示す。1素子で1064 nm からの変換効率で10%程度、平均出力100 mW 以上の355 nm の出力条件を見出すことができた。従来の方式の場合、波長変換素子が必ず2つ必要なり、2つの素子間にコリメート/集光のレンズが必要であり、さらにそれぞれの温度調節が必要であった。一方、本構成の場合、SHG 素子の素子長が2 mm 程度で温度、

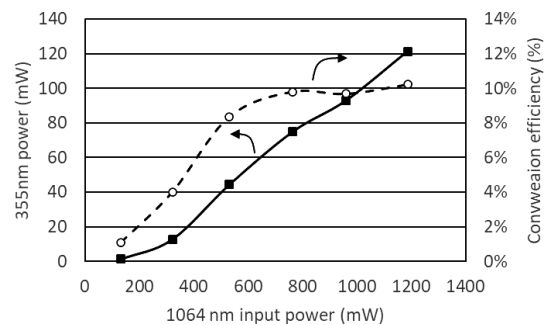


Fig. 4 Frequency conversion property of 355 nm generation by monolithic PP-Mg:SLT device.

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ (廣橋 淳二)



Fig. 5 Compact 355 nm laser module.

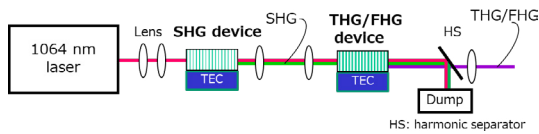


Fig. 6 Schematics of THG/FHG setup. (FHG: forth harmonic generation)

波長共に許容幅が十分広い設計をしたことから、一つの温度調節機能のみで SHG/THG の両方の位相整合条件を満たす構成を実現できた。

これらの基礎データに基づき、小型波長変換器の試作を行った結果、Fig. 5 に示すように 532 nm レーザとほぼ Compatible な 355 nm レーザを実現することができ、変換モジュールのサイズも 120 cc 程度に抑えることができた。

前記で述べた 355 nm 波長変換レーザの場合、小型化のメリットはあるが、材料の吸収の関係のため、最大出力は~100 mW 程度で制限されてしまう。そこで、より出力の高い変換器を目指すに当たり、Table 2 に示す No. 4 のペアの構成について検討した。一般的な加工機等に用いられているレーザの場合、高出力耐性を優先し、SHG/THG の組み合わせとしていずれも LBO を用いたものが多くみられる。一方で、LBO の場合、Walk-off によるビーム整形が必要であることから、本開発では Walk-off がなくビーム整形が容易な PP-LBGO 素子に着目して検討を行った。

Fig. 6 に、355 nm の波長変換の評価系を示す。SHG 部には PP-Mg:SLT 素子を用い、THG 部に PP-LBGO 素子を用いた。PP-LBGO 素子の形状は、厚み 0.5 mm、幅 7 mm、長さ 10 mm、周期約 6.4 μm の 1 次 QPM 構造のものを用いた。SHG/THG 部それぞれ TEC により個別に温度制御されている。Fig. 7 は基本波 1064 nm の入力に対する 355 nm 光の出力特性である。ここで、基本波に対する波長変換効率は 15% 以上、平均出力として 200 mW 以上の変換を得ることができた。その時の温度許容幅として

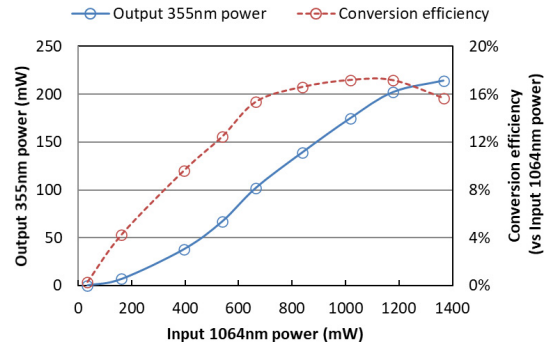


Fig. 7 Frequency conversion property of 355 nm generation by PP-Mg:SLT and PP-LBGO devices.

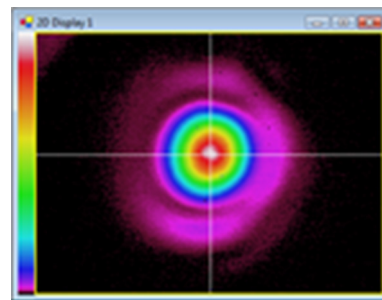


Fig. 8 355 nm beam profile generated by PP-LBGO.

は SHG/THG とともに 5°C 以上の半値幅があり、安定性が高いことが確認できた。また、Fig. 8 に示すように、出力ビームは Walk-off のない円形のビームを得ることができた。

次に、同様の構成で、THG デバイスを FHG デバイスに変更し、深紫外 (266 nm) の波長変換について検討した。532 nm 発生部の波長変換素子としては、Walk-off のない PP-Mg:SLT を用いその集光条件および素子長は前章の 532 nm 変換器の条件を踏襲した。

その後、1064 nm 光は分離し 532 nm のみ FHG デバイスに集光した。266 nm への波長変換素子の候補としては、BBO, CLBO, PP-LBGO が挙げられる⁹⁻¹⁰⁾。それぞれ、BBO は変換効率が高い、CLBO は Walk-off が小さく出力耐性が高い、PP-LBGO は潮解性がなく Walk-off がない、という特長がある。一般的には BBO が最も多く用いられているが、近年ではより高出力が必要な加工・検査用途においては CLBO も用いられる。これらの材料は Walk-off や潮解性の点で不利な点も存在するためこれらの問題が存在しない PP-LBGO もデバイスの候補として挙げられる。本稿では、基本波レーザの強度の最もマッチングのよい BBO に着目し、素子長や集光条件を変えて変換効率やビームのプロファイル特性の評価を行った。

Fig. 9 に素子長 3 水準および集光ビーム径 3 水準

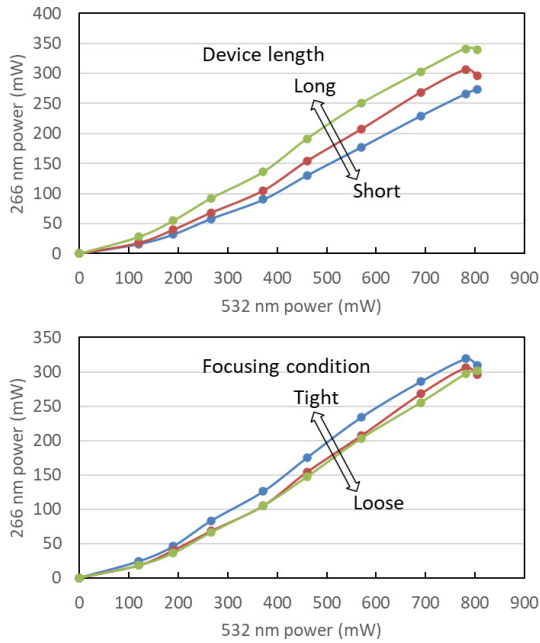


Fig. 9 Conversion properties of 266 nm in different focusing condition and device length.

に対する変換効率特性を示す。いずれの素子長，集光条件に対しても出力 200 mW 以上の出力を得た。その中でも最もロバストな条件として，集光条件，及び素子長水準を一つずつ決定し，ビーム径の評価及びビーム整形の光学系の選定を行った。

Fig. 10 に素子からの伝搬距離に対するビーム径について，ビーム整形前とビーム整形後のビームプロファイルを示す。ビーム整形前においては，BBO の Walk-off を大きく反映した楕円形のビームが確認された。一方，ビーム整形を施すことで，ほぼ円形となり，かつ伝搬距離に大きく依存せずコリメートに近い状態を実現できる解を見出した。

以上の結果に基づき，2 素子の構成による 355 nm および 266 nm 波長変換レーザーモジュールの設計・試作を行った。Fig. 11 に外観写真を示す。いずれも，リアパネルおよびフロントパネルについては小型のレーザーモジュールを踏襲した互換性のある構造で，全長が 355 nm 用で 128 mm (204 cc)，266 nm 用で 138 mm (220 cc) とほぼ同程度のサイズの構成を実現できた。波長変換特性は基本設計で得られた基礎特性を確認できた。また，コネクタ着脱により容易に波長を切り替えられることも確認した。

4. まとめ

本稿では，計測用途に適した高繰り返し，高ピークパワーのファイバレーザをより高機能化させる観点で，波長変換技術を用いて実現した可視，紫外パルスレーザについて述べた。ファイバレーザおよび

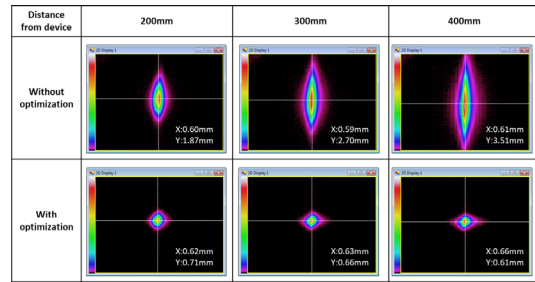


Fig. 10 Beam profile of BBO with and without optimization.

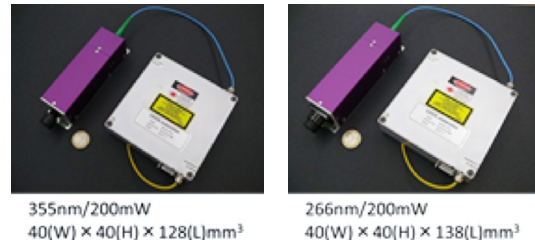


Fig. 11 355 nm (left) and 266 nm (right) laser module.

波長変換モジュールともに小型に構成することで，Drone への搭載も可能なサイズ・重量を実現した。今後は，これまで航空機では計測できなかった狭小なエリアにおいても上空からのセンシングを適用できるようになるなど，計測分野がより身近なところまで展開できると考えられる。また，本開発で実現したレーザの可搬性はその他の応用分野としてウイルスの不活性化用途などにおいても注目されており，今後応用範囲がより広がることを期待される。

謝辞

本研究の一部は，(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究事業の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 石橋正二郎，光技術コーディネートジャーナル「OPTRONICS」/株式会社オプトロニクス社，2016，Vol. 35，58 (in Japanese).
- 2) 中村圭吾，水環境学会誌 Vol. 42 (A)，174，2019 (in Japanese).
- 3) S. Wang et al., J. Appl. Phys. **96**, (2004) 2023.
- 4) K. Kitamura et al., Ferroelectrics **257**, (2001) 235.
- 5) A. A. Kaminskii et al., phys. Stat. sol (a) **125**, (1991) 671.
- 6) S. Miyazawa, et al., Phys. Stat. Sol., A **208** (2011) 1195.
- 7) J. Hirohashi, et al., CLEO 2014, SM4I. 6, San Jose (2014).
- 8) J. Hirohashi et al., Advanced solid state laser 2014, Atu4A. 4 (2014).
- 9) M. Nishioka et al., J. Cryst. Growth **279** (2005) 76.
- 10) J. Hirohashi, et al., CLEO 2015, STh3H. 5, San Jose (2015).

計測用パルス可視・紫外波長変換レーザ (廣橋 淳二)

廣 橋 淳 二 1999年東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士前期課程修了, 2000年三井化学株式会社, 2003年 Royal Institute of Technology, Sweden, Applied Physics department 客員研究員を経て2006年同校博士課程修了, Ph.D. 同年より株式会社オキサイドにて主に強誘電体材料の分極制御・非線形光学材料による波長変換デバイスおよびそれを用いたモジュール設計に従事.

セキュリティ分野におけるレーザーリモートセンシング

伊澤 淳¹, 横澤 剛², 倉田 孝男¹, 大海 聡一郎¹, 藏田 真太郎¹,
 染川 智弘³, 江藤 修三⁴, 眞子 直弘⁵, 堀澤 秀之⁶, 山口 滋⁶,
 藤井 隆⁴, 久世 宏明⁵

¹株式会社 IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原 1 番地)

²明星電気株式会社 (〒372-8585 群馬県伊勢崎市長沼町 2223)

³(公財)レーザー技術総合研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-3)

⁴(一財)電力中央研究所 (〒240-0916 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)

⁵千葉大学 環境リモートセンシング研究センター (CEReS) (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)

⁶東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

Security applications of laser remote sensing

Jun IZAWA¹, Takeshi YOKOZAWA², Takao KURATA¹, Soichiro OOMI¹, Shintaro KURATA¹,
 Toshihiro SOMEKAWA³, Shuzo ETO⁴, Naohiro MANAGO⁵, Hideyuki HORISAWA⁶,
 Shigeru YAMAGUCHI⁶, Takashi FUJII⁴, and Hiroaki KUZE⁵

¹IHI Corporation, 1, Shin-nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama, 235-8501

²MEISEI ELECTRIC CO., LTD., 2223, Naganuma-cho, Isezaki, Gunma, 372-8585

³Institute for Laser Technology, 2-6, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

⁴Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1, Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196

⁵Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

⁶Tokai University, 4-1-1, Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292

(Received February 8, 2021)

We describe the application of laser remote sensing technology to a wide range of environments by using our laser radar technology based on Mie scattering lidar, with various laser-sensing methods such as spectroscopy and image acquisition. Among various targets, this paper focuses on the field of security, namely, CBRNE (Chemical, Biological, Radioactive, Nuclear, and Explosive) remote detection. The use of a high-power, compact femtosecond laser (terawatt laser) enables classifying cesium aerosol (radioactive and nuclear simulated) and riboflavin aerosol (biological simulated) at a stand-off distance of 10 m and identifying different plastics (explosive simulated). In turbid water that simulated seawater, visualization of the 1951 USAF (U.S. Air Force) resolution test chart was achieved using a pulse laser as part of turbid water visualization technology. Since no information was available from a normal camera, the results have confirmed the superiority of our method. We also describe laser Raman measurements that have shown the ability to identify underwater substances.

キーワード：レーザーリモートセンシング, LIBS, nPEF, イメージング, ラマン分光

Key Words: Laser remote sensing, LIBS, nPEF, Imaging, Raman spectroscopy

1. はじめに

レーザーセンシングは、対象物にレーザーを照射し、対象物とレーザー光の相互作用によって発生する信号光を受光して分析することにより対象物の情報を得

る技術である。その相互作用の物理現象に応じて手法と得られる信号情報を適切に選択することにより、対象物の位置、形状および色彩コントラスト、材質、含有微量成分などの様々な情報を得ることができる。さらに高出力レーザー及び送受信光学系・高

セキュリティ分野におけるレーザーリモートセンシング (伊澤 淳)

感度検知素子/手法を組み合わせたレーザーリモートセンシング技術に発展させることができる。これにより、遠方や通常ではアクセス不可能な危険な環境においても非接触で安全に計測することが可能である。

特にセキュリティ分野においては、有害な物質や爆発物など危険性が潜む環境や、水中や上空などの極限環境での計測が求められる。我々 IHI グループ (株式会社 IHI および関連会社) では、ミー散乱ライダー粉塵計測システムでライダー技術を長年培ってきた。この技術をベースに、社外共同研究者と連携して様々な計測手法を組み合わせ、セキュリティ事業への適用を想定したレーザーリモートセンシングシステムの研究開発を行っている。

2. IHI グループにおけるレーザーリモートセンシングシステム

Table 1 は、我々が取り組んでいるレーザーリモートセンシングシステムの一覧である。パルスレーザを光源として、散乱、ブレイクダウン発光、多光子励起蛍光、ラマン、光吸収などの物理現象から時間波形、波長スペクトル、画像信号などが得られる。これを用いて、粉塵環境、有害物質/爆発物、水中、悪天候下、高温などの様々な条件において環境、交通、セキュリティ、生産技術等の多岐にわたる適用先へ展開を試みている。また、レーザ以外のランプ光や太陽光などの自然光源を用いた吸収分光を利用

した計測技術・装置の研究開発も行っている。

3. セキュリティ分野への適用事例

本節では、Table 1 に示した適用事例のうち、セキュリティ分野への適用事例の概要を紹介する。これらの研究は、IHI グループと社外研究機関で研究グループを構成して実施している。社外研究機関が実施した基礎研究の成果をもとに当研究グループで応用に関する共同研究を実施し、最終的には IHI グループでのシステム化・製品化を目指している。

3.1 CBRNE 物質遠隔検知システム

あらかじめ計測対象種別が予測できる場合には、その物質に対して最適な手法を選択することが可能である。しかしながら、このような予測が事前にできない場合や計測対象が多種にわたる場合には多数の計測手段を用意しておくことが必要であり、システム構築が難しい。よって、一種類の装置 (システム) によって複数 (可能であれば全部) の種別の物質を検知できるような手法が望ましい。一方、高出力フェムト秒レーザ (いわゆるテラワットレーザ) により発生する非線形現象を用いた計測手法を用いることにより、1 台の装置で複数の種別に対応するシステムを実現できる可能性がある。我々は、高出力フェムト秒レーザによる大気中のエアロゾル物質などの遠隔検知技術を研究しており、これを CBRNE (Chemical; 化学, Biological; 生物, Radio-

Table 1 Application examples of laser remote sensing in the IHI-Group campaniles.

No.	手法	計測環境	計測対象	検知対象	用途	参考文献
1	フェムト秒LIBS (Laser Induced Bleakdown Spectroscopy)	空中	エアロゾル	C (Chemical) R (Radioactive) N (Nuclear)	セキュリティ	1)-6)
2	多光子励起蛍光 (n-Photon Exited Fluorescence : nPEF)	空中	エアロゾル	B (Biological)	セキュリティ	2), 4), 6)-8)
3	フェムト秒LIBS	地上	ハード ターゲット	E (Explosive)	セキュリティ	2), 4), 6), 9)-11)
4	レンジゲート + 画像計測	水中	ハード ターゲット	不審物の画像情報	セキュリティ	† 1
5	ラマン	水中	水中漏洩物	オイル	資源 エネルギー	12)-14)
6	ミー散乱ライダー	空中	エアロゾル	粉塵濃度の空間分布 (排煙, 石炭ヤード等)	各種産業	15), 16)
7	コヒーレントライダー	空中	エアロゾル	風向風速	航空, 環境	17)
8	LIF (Laser Induced Fluorescence)	無重力下	火炎	燃焼成分 (OHラジカル他)	宇宙開発	18)
9	TOF (Time of Flight) + 点群計測	空中	ハード ターゲット	踏切内異物の種別 (人, 車両等)	交通	19)-22)
10	時間ゲート + 波長フィルタ	溶接部	溶接溶融部	溶接の状態 (溶融状態等)	生産	23)
11	差分吸収	空中	大気	CO ₂ 濃度	環境	24)-26)

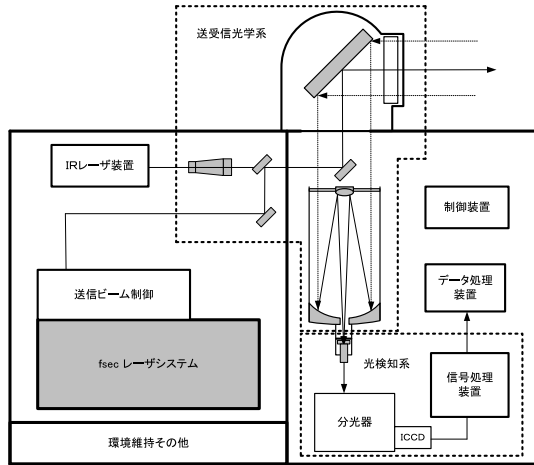


Fig. 1 Schematic of our proposed lidar system for detecting and classifying CBRNE aerosols by LIBS or TPF using a high-power femtosecond laser⁶⁾.

active；放射性物質，Nuclear；核，Explosive；爆発物）物質の遠隔検知システムへの適用を検討している。Fig. 1 にシステム構成を示す⁶⁾。システムはミー散乱ライダーによる検知部と、高出力フェムト秒レーザーによる識別部からなる。通常は検知部のナノ秒パルスレーザーを対象空間に照射・走査し、空間全体を持続的に監視する。監視中に不審なエアロゾルを検知した場合に、その距離と方向を抽出し、高出力フェムト秒レーザーを照射して識別を行う。

システムの究極の目標は、数百 m から数 km の距離領域において、高出力フェムト秒レーザーを用いた LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy；レーザー誘起ブレイクダウン分光) と、nPEF (n Photon Excited Fluorescence；多光子励起蛍光) の一種である TPF (Two Photon excited Fluorescence；2光子励起蛍光) の手法を用いて様々なエアロゾルのスタンドオフ検知および識別を行うことである。

高出力フェムト秒レーザー光の照射により、高いピークパワーを用いた非熱的過程による低温プラズマが生成される。このため、プラズマの熱輻射によるバックグラウンドノイズを抑制したコントラストの高いスペクトルが得られ、高感度計測の観点から有望である。加えて、フィラメンテーション現象を用いて遠距離において相互作用長の長い集光チャネルを生成することが可能であり、遠隔での物質検知に有用である。

さらには検知手法として用いた LIBS および nPEF は高出力フェムト秒レーザーを用いることにより同一のシステムで実現可能であり、計測対象種によって手法を使い分けることができる。

LIBS は高い強度のレーザー光を物質に集光し、ブレイクダウンさせてプラズマを生成する。プラズマ

中の電子がイオンに再結合する際、エネルギー単位間を遷移することにより、そのエネルギー差に相当するエネルギー（波長）を持つ光を発光する。エネルギー構造に由来するその発光波長は物質（原子、ラジカル等）の種別により異なるため、分光測定データを既知の波長データベースと照合することにより対象物の種別を特定することができる。LIBS はレーザーの波長を選ばず、簡易な構成で多種の物質を検知対象とすることができる上、発光波長の線幅が狭く分離が容易であることから、微量成分の検知にも適している。

nPEF は、光の物質への吸収過程において複数の光子（多光子）が同時に吸収され、 n 倍のエネルギー（ $1/n$ の波長）の単位に励起される現象を用いた計測手法である。紫外レーザーに比べて製作が容易な可視～近赤外レーザーで、高いエネルギーをもつ準位に励起することが可能になる。多光子励起の吸収係数は光強度に対して非線形で、高出力フェムト秒レーザーのような高いピークパワーを持つレーザーにおいて顕著に現象が現れる。

分子（特に有機物のような構造の複雑な分子）においては、分子の共鳴現象に由来する発光が多数かつ微細・複雑なスペクトル形状を持ち、通常の計測においては複数のスペクトルが結合した広い線幅のスペクトルとして観測される。このスペクトルは同一の元素組成を持つ物質においても分子構造の違いにより中心波長ないしは形状が異なる。このため検知したのち種別を識別する際、特に有機物のように元素組成が類似しているが、分子構造が異なる物質の種別を識別するのに有利である。

高出力フェムト秒レーザーを用いるもう一つのメリットであるフィラメンテーションでは、自己収束現象による連続的な集光チャネルが形成される。これは、空気ないしはレンズ等の透過媒質の、光強度に対して非線形な屈折率の分布により、レーザービームの断面内が局所的に集光し、光の伝搬方向に連続した集光領域（チャネル）を生成する現象である。ピークパワーが高いほど屈折率の分布は大きくなり、高出力フェムト秒レーザーのような高いピークパワーを持つレーザーにおいて影響が顕著になる。フィラメンテーションの結果として集光領域においてブレイクダウンが生じ、プラズマの連続的なチャネルが生成される。従来のナノ秒レーザーではプラズマ化させるために強く集光させる必要があり、100 m を超えるような遠距離でのプラズマ化は難しい。一方フェムト秒レーザーでは、このフィラメンテーション現象を用いることにより、レーザー光は平行光もしくは緩やかな集光状態であってもレーザー光自身の自己

セキュリティ分野におけるレーザーリモートセンシング (伊澤 淳)

収束により遠距離での集光，プラズマ化が可能である。高出力フェムト秒レーザーを用いたフィラメンテーション現象の実例として，Fujii らの報告がある²⁷⁾。この報告では，フィラメンテーション現象による大気中のプラズマ化を多数の筋状の発光として観測しており，ビームパターン断面中にフィラメンテーション現象による複数の集光スポットを確認している。LIBS 計測により，距離 16 m において塩化ナトリウム（食塩）エアロゾル中のナトリウムの遠隔検知に成功している²⁷⁾。

フェムト秒レーザーはナノ秒レーザーと比較してより高度なレーザー技術に基づいており，特にテラワットレーザーと称されるような高出力フェムト秒レーザーに関しては，これまで実験室レベルでの運用しかできなかった。近年になってレーザー技術と取扱いノウハウの向上により専用コンテナでの運用が可能となり，屋外での移動と試験が可能となった。レーザーの小型化と耐環境性の向上は継続して研究開発が進んでおり，将来的にはより運用性の高いシステムの実現が期待できる。

R, N 物質のような元素物質の検知を模擬して，セシウムの検知試験を実施した。Fig. 2 は，計測された LIBS スペクトルの典型例である⁴⁾。中心波長 852.1 nm にて，セシウムに由来する急峻なピークが観測されている。現状では，計測距離 10 m でセシウムエアロゾル濃度 3.2 $\mu\text{g/L}$ におけるスペクトルピークの有無を判別できた⁴⁾。

B 物質のような有機物エアロゾルの検知は，リボフラビンを模擬物質として用いた。Fig. 3 は観測された典型的な TPF スペクトルである⁷⁾。蛍光のピークは，約 500 nm から 550 nm の波長範囲で観察された。この結果は，リボフラビンの TPF 検出に関する過去の報告と一致している²⁸⁾。現状では距離

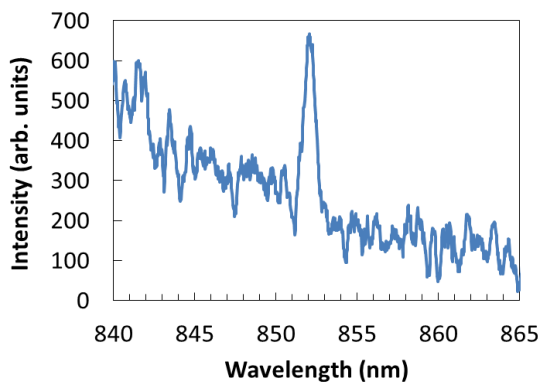


Fig. 2 LIBS spectrum observed for cesium aerosol, with laser energy of 181 mJ/pulse, pulse width of 1000 fs, beam size of 3×5 mm (at the aerosol position), concentration of the cesium aerosol of 3.2 $\mu\text{g/L}$ (0.001 wt% of cesium chloride in aqueous solution)⁴⁾.

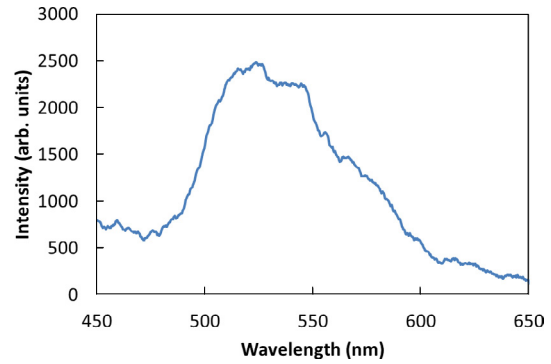


Fig. 3 TPF spectrum observed for riboflavin aerosol, with laser energy of 10 mJ/pulse, pulse width of 100 fs, laser beam size of ~ 3 mm of diameter at the aerosol position, riboflavin aerosol concentration of 1.3 $\mu\text{g/L}$ (0.0032 wt% of riboflavin in aqueous solution).⁷⁾

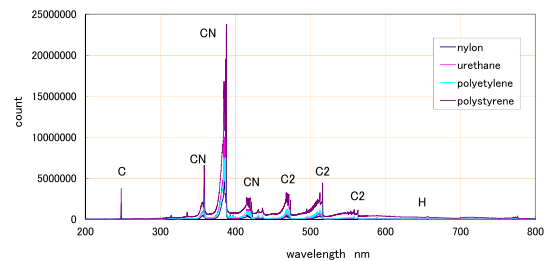


Fig. 4 LIBS spectrum observed for bulk organic plastic samples, with laser energy of 0.6 mJ, the actual pulse width of 150 fs (slightly longer than the nominal value of 120 fs), the spot diameter of approximately 0.1 mm (an estimated value)⁹⁾.

10 m において 1.3 $\mu\text{g/L}$ のリボフラビンエアロゾル濃度におけるスペクトルピークの有無を判別できている⁴⁾。

E 物質の検知については，有機プラスチックを模擬物質とした LIBS により行っている。Fig. 4 にナイロン 6，ウレタン，ポリエチレン，ポリスチレン試料についての LIBS スペクトルを示す⁹⁾。小型フェムト秒レーザーを用いた机上試験により，CH, CN, C₂ のラジカル発光が，C, H の元素のピークに加えて観察されている。この試験では，検知に加え，各試料における LIBS スペクトルからの種別の違いについての類別を行っている。単純なピーク波長の違いだけでは，すべての試料がほぼ同じ化学種で構成されているので，同じ波長にピークが現れ類別ができない。我々はスペクトルのピーク強度比を用いた類別を試み，Fig. 5 に示すように 2 種（2次元）の強度比を用いることにより各々の類別ができることを確認した¹¹⁾。このような分析には，PCA (Principal Component Analysis；主成分分析) や PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis；部分的最小二乗判別分析) などの多変量解析手法が

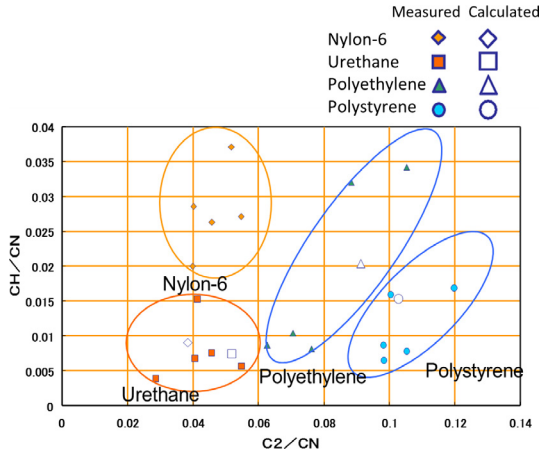


Fig. 5 Classification of LIBS spectra of organic materials based on 2D plot of peak intensity ratios¹¹⁾.

有用と考えられる⁹⁾.

3.2 水中画像および水中成分計測

近年、資源探査などの海洋利用が盛んになってきている。ROV (Remotely Operated vehicle; 遠隔操作型の無人潜水機), UUV (Unmanned Underwater Vehicle; 無人水中航走体) 等に水中カメラを搭載した海底探査が従来技術として確立しているが、沿岸域などでは通常のカメラでは数 m 以上の距離が観測困難な濁水域が大半である。水中では電磁波も使用できないため、濁水中の計測ではこれまで超音波計測が主流であった。光を用いた方式では、パルスレーザーを用いた TOF (Time of Flight; 飛行時間) による距離計測をベースとした点群計測による形状構築技術が水中計測へ適用されてきた (Table 1 の No. 9 が空中での適用事例である)。我々は検知された物体の種別を認識するために、空間分解能の向上やコントラスト情報などの付加価値増加を目的として、レーザーと超高速ゲート付き超高感度カメラによる濁水中の画像計測技術に取り組んでいる。

Fig. 6 にシステム構想を示す^{†1)}。ROV, UUV 等の水中機器に搭載し、ソナー等による広域探索で検知された不審な物体・障害物に対して本システムによる計測を行い、物体の画像計測と識別を行う。本システムは、パルスレーザーとゲート付高感度カメラを用いた高感度画像計測システムである。レーザーを目標物に照射し、散乱光を撮像装置にて画像計測する。この時、撮像装置入射部に取り付けた高速シャッターにより目標物からの散乱光が撮像装置に到達するタイミングに合わせて時間ゲートをかける。

^{†1)}IHI パンフレット “濁水中可視化技術”, Subseatech Japan 2018.

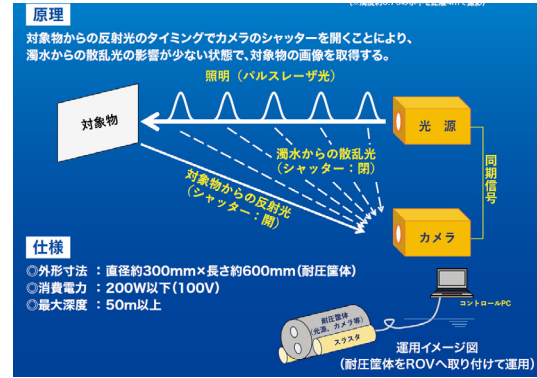


Fig. 6 Schematics of the underwater visualization system^{†1)}.

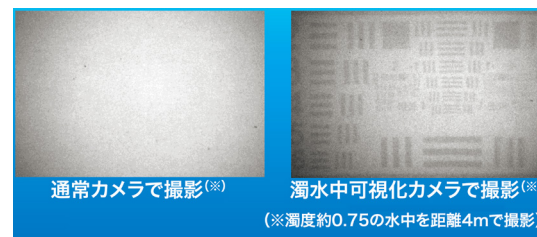


Fig. 7 Examples of visualization of USAF chart in turbid water by a normal camera and the underwater visualization system^{†1)}.

これにより目標物手前の濁水からの散乱光を除去し、濁水中でも鮮明な画像を得ることができる。

Fig. 7 に、実海域を模擬した濁水中での計測例を示す^{†1)}。水槽内の水道水に濁度標準試料 (カオリン) を混合して濁度 0.75 の濁水を調整し、距離 4 m で撮影している。左が通常カメラおよび通常照明、右が本システムによる撮影画像である。本システムでは、照明光源に波長 532 nm の Nd:YAG SHG (最大出力 50 mJ, パルス幅約 5 ns) を使い、A4 サイズの USAF (U.S. Air Force) 解像度テストチャート (1951 USAF resolution test chart) をターゲットとして全面に拡散照射し、散乱光を ICCD (Intensified Charge-Coupled Device; 光増幅機能付き電荷結合素子) カメラで撮影している。ICCD のゲインを制御して約 20 ns の時間ゲートをかけ、濁水からの散乱光を排除している。通常カメラでは光量は十分であるものの、濁水からの散乱によって白濁してしまい、ターゲットの描画を判別することができない。一方で本システムによる画像は、時間ゲートにより濁水からの散乱光を排除し、鮮明な画像が得られている。

海中におけるレーザーセンシングの適用先として、形状・画像計測の他に海中成分の検知識別も有用である。海中は海底パイプラインなどのエネルギー・資源の輸送手段としても活用されている。広域にわ

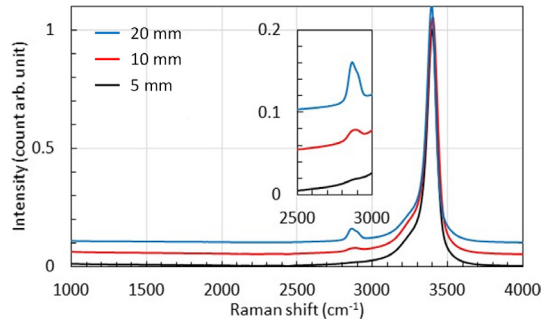


Fig. 8 Raman spectra of canola oil with thicknesses of 5, 10, and 20 mm located 2 m away in the water tank¹⁴⁾.

たるパイプラインの漏洩監視および早期発見の手段として、広範囲にわたる領域を短時間でモニタリングできる手法の開発が望まれている。海水中の漏洩成分を検知し、パイプライン由来の成分（油分）を識別する手法として、ラマン散乱の分光計測に取り組んでいる。

Fig. 8 に、水中ラマン計測の例を示す¹⁴⁾。水槽中に油膜厚さ 5~20 mm のオイルセルを設置し、波長 532 nm の Nd:YAG SHG (最大出力 10 mJ, パルス幅約 10 ns) を水槽窓から照射した。水槽窓からオイルセルまでの水中距離は 2 m である。信号光をレーザー近傍に設置した受光光学系および分光計測装置にてスペクトル計測し、ラマン信号を検出した。100 回積算信号の 5 回平均のスペクトル (露光時間: 4 ms) を取得した。測定波長の波長分解能は 1.4 nm である。本図では、観測視野に含まれる水がほぼ均一であることを利用し、3400 cm^{-1} に見られる水のラマン信号 (O-H の対称伸縮モード) で規格化している。さらに見やすいように、信号強度にオフセットをかけて並べてある。油からは信号強度の大きな 2910 cm^{-1} の C-H の対称伸縮モードが水のラマン信号の裾に観測されている。挿入図に油の 2910 cm^{-1} 部分の拡大図を示しているが、油膜厚さに応じて油のラマン信号が大きくなっていることがわかる。

本結果により、水中の油に対してもラマン法による遠隔測定は可能であり、海底パイプラインの油流出事故を遠隔から観測できる可能性を示した¹⁴⁾。

4. おわりに

本稿では、セキュリティ分野のレーザーリモートセンシングにおける当研究グループの取り組み例として、高出力フェムト秒レーザーを用いた CBRNE 物質の遠隔検知と、濁水中の可視化技術ならびにラマン分光による海中成分検知技術について紹介した。今後もレーザーリモートセンシング技術と分光・画像計測技術をはじめとする各種レーザーセンシング技術を融合させて、セキュリティ分野並びに環境・エネル

ギー・生産技術などの様々な分野への適用を進めていく。

参考文献

- 1) J. Izawa, T. Kurata, T. Yokozawa, S. Eto, and T. Fujii: "Stand-off detection of cesium aerosol by LIBS using a ns-pulsed laser", Proceedings of International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering (LANE'13), Yokohama, Japan, April 23-25, (2013) 35.
- 2) 横澤 剛, 伊澤 淳, 倉田孝男, 松永 易, 染川智弘, 眞子直弘, 久世宏明: 「エアロゾル識別用スタンドオフ計測システムの検討」, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, B-4, (2013) 20.
- 3) 伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 松永 易, 江藤修三, 藤井 隆: 「レーザー誘起ブレイクダウン分光法によるセシウムエアロゾルの遠隔検知」, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, F-4, (2013) 120.
- 4) J. Izawa, T. Yokozawa, T. Kurata, A. Yoshida, Y. Matsunaga, T. Somekawa, S. Eto, N. Manago, H. Horisawa, S. Yamaguchi, T. Fujii, and Hiroaki Kuze: "Stand-off detection and classification of CBRNE using a lidar system based on a high power femto-second laser", Proc. SPIE, **9253**-10 (2014).
- 5) 藤井 隆, 伊澤 淳, 倉田孝男, 横澤 剛, 江藤修三: 「フェムト秒レーザーを用いたレーザー誘起ブレイクダウン分光によるセシウムエアロゾルの遠隔検知」, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, P-11, (2015) 46.
- 6) 国内特許, 2018 年, 第 6425351 号.
- 7) 伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 松永 易, 染川智弘, 眞子直弘, 久世宏明: 「フェムト秒レーザーによる多光子吸収過程を用いた生物由来エアロゾルの遠隔検知」, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, P-22, (2013) 86.
- 8) 伊澤 淳, 横澤 剛, 倉田孝男, 三代 周, 松永 易, 染川智弘, 眞子直弘, 久世宏明: 「フェムト秒レーザーを用いた多光子吸収過程における生物由来エアロゾルの蛍光特性」, 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, P-25, (2014) 86.
- 9) 倉田孝男, 伊澤 淳, 松永 易, 横澤 剛, 堀沢秀之, 山口 滋: 「レーザー誘起ブレイクダウン分光を使った有機化合物の識別」, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, P-23, (2013) 88.
- 10) 倉田孝男, 伊澤 淳, 堀沢秀之, A. 横澤 剛 B. 松永 易, 山口 滋: 「レーザー誘起ブレイクダウン分光を使った有機化合物の識別」, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会講演予稿集 E11a I 9 (2015).
- 11) 国内特許, 2018 年, 第 6307903 号.
- 12) 染川智弘, 伊澤 淳, 藤田雅之, 河仲準二, 久世宏明: 「レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発」, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 415p-B409-2 (2020).
- 13) T. Somekawa, J. Izawa, M. Fujita, J. Kawanaka, and H. Kuze: "Remote detection of oils in water using laser Raman spectroscopy", Opt. Commun. **480** (2020) 126508.
- 14) 染川智弘, 伊澤 淳, 藤田雅之, 河仲準二, 久世宏明: 「レーザーラマン分光を利用した水中油の遠隔計測技術の開発」, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, A-1, (2020).

- 15) 中島勇人, 山本貴史, 松坂文夫, 原 熙, 藤井政光, 甲斐憲次:「アイセーフ・レーザーによる大気環境計測」, レーザー研究 **25** 巻 1 号, (1997) 50.
- 16) 横沢 剛, 東川 孝, 伊澤 淳, 眞子直弘, 久世宏明: 第 44 回 光波センシング技術研究会 講演路文集, 「アイセーフライダーシステムの産業応用」, LST-44-22, (2009) 147.
- 17) 中島勇人, 山本貴史, 松坂文夫, 原 熙:「アイセーフコヒーレントレーザーレーダの開発」, 第 19 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, B-2, (1998) 13.
- 18) 濱野靖徳, 小原正孝, 藤森俊郎, 山口 滋, 佐藤順一:「小型可搬型 LIF 測定装置の開発」, 石川島播磨技報 **36** 巻 2 号, (1996) 84.
- 19) 関本清英, 鎌上則夫, 久光 豊, 小野一也, 永田宏一郎:「三次元レーザーレーダの開発」, 石川島播磨技報 **43** 巻 4 号, (2003) 114.
- 20) 高野武寿, 山口 真, 平岩勇樹, 寺内 強, 中村寿夫:「小型三次元レーザーレーダの開発」, 石川島播磨技報 **47** 巻 2 号, (2007) 81.
- 21) 久光 豊, 関本清英, 永田宏一郎, 上原 実, 大田栄一:「三次元レーザーレーダ式踏切障害物検知装置の実用化」, IHI 技報 **48** 巻 1 号, (2008) 1.
- 22) 関本清英, 永田宏一郎, 白木博文, 兼坂 薫:「三次元レーザーレーダによるさらなる交通安全社会の実現に向けて」, IHI 技報 **51** 巻 4 号, (2011) 77.
- 23) 大脇 桂, 森田一郎, 高橋秀夫, 八木武人, 海老名信一:「溶接部可視化装置 (iL Viewer) の開発と応用」, 石川島播磨技報 **42** 巻 5 号, (2002) 270.
- 24) 伊澤 淳, 大海聡一郎, 稲元智行, 久保田伸彦:「レーザーを用いた広域 CO₂ 漏えい検知技術の開発」, IHI 技報 **52** 巻 4 号, (2012) 50.
- 25) 伊澤 淳, 倉田孝男, 馬場隼也, 間野正美, 犬伏和之:「広帯域赤外 OPO を用いた実森林における大気中 CO₂ の濃度計測」, 第 34 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, E-9, (2016) 58.
- 26) 伊澤 淳, 倉田孝男, 馬場隼也, 間野正美, 犬伏和之:「広帯域赤外 OPO を用いた実森林内での CO₂ 濃度変動の検知能力」, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会講演予稿集 E408a I 03 (2017).
- 27) T. Fujii, N. Goto, M. Miki, T. Nayuki, and K. Nemoto: "Lidar measurement of constituents of microparticles in air by laser-induced breakdown spectroscopy using femtosecond terawatt laser pulses", Opt. Lett. **31** (23), (2006) 3456.
- 28) G. Méjean, J. Kasparian, J. Yu, S. Frey, E. Salmon, and J.-P. Wolf: "Remote detection and identification of biological aerosols using a femtosecond terawatt lidar system", Appl. Phys. B **78**, (2004) 535.

伊 澤 淳 1994 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒, 1996 年 3 月同大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了. 同年 4 月より石川島播磨重工業株式会社 (現 株式会社 IHI) に勤務し, 現在に至る. 主にレーザー光源及び周辺装置, レーザ計測技術に関する研究開発に従事. 2001 年 3 月学位取得 (工学博士, 岡山大学). レーザーセンシング学会・レーザー学会・電気学会会員.



1.5 μm レーザ光を用いたドップラーライダーによる 風計測技術

辻 秀伸, 今城 勝治, 廣澤 賢一, 亀山 俊平, 柳澤 隆行

三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

Wind velocity measurement technology by coherent Doppler lidar using 1.5- μm laser

Hidehito TSUJI, Masaharu IMAKI, Kenichi HIROSAWA, Shumpei KAMEYAMA, and
Takayuki YANAGISAWA

Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna Kamakura, Kanagawa 247-8501

(Received February 15, 2021)

Technology for visualizing wind is required for weather forecasting and aviation safety. A wind LIDAR has been developed for measuring wind remotely as movement of aerosols and molecules in the atmosphere by detecting laser scattering. Especially, the coherent Doppler LIDAR can detect wind with high sensitivity regardless of day or night and it is put in operational service as a measuring instrument for airport weather to prevent aircraft accidents due to downbursts and wind shears, wind power generation efficiency improvement and wind turbine damage prevention. This article describes the history and the types of wind measurement lidar, and introduces the configuration and performance of the coherent Doppler lidar system commercialized and under development by Mitsubishi Electric.

キーワード：コヒーレントドップラーライダー, 風計測, 航空安全, 水蒸気計測

Key Words: coherent Doppler LIDAR, wind measurement, aviation safety, water vapor density measurement

1. はじめに

我々がいつも身近に感じられる「風」は、目に見えない空気の流れであり、直接肌で感じることはできるが「見る」ことは難しい自然現象の一つである。大気の循環である風は、気象に影響を与える低気圧や高気圧の発生や、災害を引き起こす梅雨や台風などに大きな影響を与えるものであり、風を知ることが我々が今後安全・安心な生活を営んでいく上で非常に重要である。また風を知ることが、安全・安心な生活に欠かせない気象予報の分野でも重要であり、特に地表の影響を受けにくい上空の風の計測が重要である。一般的に風の計測には、カップ形状の羽で風をうけてその回転速度で風を計測する風杯型風速計や、プロペラで風を受ける風車式風向風速計、超音波の伝搬速度の差から空気の流れを計測する超音波風向風速計、電流により加熱された熱線が風により冷却されることで風速を導出する熱式風速

計等の計測方法が用いられている。これらの計測方法は、我々が肌で風を感じているのと同様、いずれも in-situ (その場) 計測であり、風を「見る」ことに相当する遠隔計測や、上空の風を計測することはできない。そこで、気象台や測候所ではラジオゾンデを上空に上げて風向風速を計測している。しかし、観測場所や観測頻度が限られるため気象予測への適用は限定的である。

遠方の風を可視化する方法の一つとして、風計測ライダー (LIDAR, Light Detection And Ranging) が開発されている¹⁻³⁾。ライダーとは、レーダ (RADAR, RAdio Detection And Ranging) が使用する波長 mm~km 程度の電磁波である「電波」 (Radio) を、波長 0.3 μm ~10 μm の電磁波である「光」 (Light) に置き換えたものに相当し、その光源には主にレーザー光が用いられる。ライダーは光を用いたりモートセンシング (遠隔からの観測) を行う手段の一つであり、パルス光、または強度や位相を変調した連続光

1.5 μm レーザ光を用いたドップラーライダーによる風計測技術 (辻 秀伸)

を遠方の対象に照射し、その反射光を受信して検出することにより、対象までの距離、速度、成分等の特性を計測する。

大気中には目に見えないエアロゾル粒子や分子が数多く存在し、これら対象物をライダーにより計測することで、大気の様々な情報を引き出すことができる。例えばエアロゾル粒子とは大気中に漂う微細な粒子であり、そのサイズは分子やイオンとほぼ等しい1 nm から、花粉のような100 μm まで幅広く分布している。ライダーに使用するレーザー光は電波と同様に電磁波の一種であり、波の性質を持つため、原則、光の波長より大きな物体の反射が検出できる。大気中にはライダーに使用される光の波長と同等以上のエアロゾル粒子が数多く存在するため、光の幾何学的な反射による直接計測することが可能である。さらに、この反射だけでなく、ミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱等、分子やフォノンを介した複数の散乱過程による散乱光や、照射した光を励起光とした蛍光、および大気成分の分子による吸収を計測することが可能である。このように、ライダーは大気の様々な情報を引き出すことができるため、気象観測や大気観測に多く用いられている。

本稿では、ライダーを用いた風計測技術について、その歴史と原理、三菱電機の製品である風計測ライダー DIABREZZA^{TM†1} の紹介、および今後の風計測ライダー技術の展開について述べる。

2. 風計測ライダー開発の歴史

1970年にNASA(当時)のHuffakerらにより、世界で初めてレーザーを用いた風計測が行われた¹⁾。波長10.6 μm の連続発振CO₂レーザーを用いて、航空機の後方に発生する翼端渦(後方乱気流)の計測を行い、渦による風速の時間変化の計測に成功している。その後、1990年頃までは、主にCO₂レーザーを用いて、大気境界層における風速分布計測^{4,5)}や航空機搭載による晴天乱気流計測が行われた⁶⁾。一方で、波長10 μm 帯のライダーでは、使用できる光学部品が限定され高価であること、冷却型の検出器が必要であること、長時間動作ができないことなどの実用化に向けた課題が生じていた。そこで、1987年にスタンフォード大学のKaneらが、風計測ライダーに適した固体レーザー光源として、LD励起単一周波数Nd:YAGレーザー(波長1.064 μm)をスラブレザー増幅器で高出力化した固体レーザー装置の開発を行い、それを用いた風計測ライダーをNASAと共同で開発した⁷⁾。これに続いて、1989年にCoher-

ent Technology Inc.(現在はLockheed Martin社が買収)のKavayaらは、本レーザー装置を用いてライダーシステムを構築し⁸⁾、1993年にNASAのロケット射場の風況モニタとして使用されたことが報告されている⁹⁾。

上記風ライダーでは波長が1.064 μm に変更されたことで、いくつかの課題が解決されたが、目に対する安全性が課題として残った。風計測ライダーは、屋外にむけてレーザー光を照射することが前提になる。大気中のエアロゾル粒子による微弱な散乱光を受信するには、高いレーザー出力が必要となるが、レーザー光はその集光性の高さから、目に対する安全性が厳しく規定されている。目への最大許容露光量(MPE)が大きいアイセーフ波長と呼ばれる波長は1.4 μm ~2.6 μm であり、特に1.5 μm ~1.8 μm は可視光に比べて6桁大きいMPEを有する¹⁰⁾。そこで、Coherent Technology社(米)のHendersonらは、レーザー発振にて高ピークパルス動作が可能なTm, Ho系固体レーザー材料を用いた、アイセーフ波長である2 μm 帯の風計測ライダーを開発し^{11,12)}、製品化(製品名Wind Tracer^{†2})を実現した。本装置は、空港周辺の航空機事故の原因となる乱気流検出に対する有効性が認められ、2002年に民間空港では初めて香港空港に24時間常時観測機器として設置され、その後の空港に設置される風計測ライダーの主流となった。

上記ライダーに使用されている2 μm 帯とは別のアイセーフ波長帯として、1.5 μm 帯が挙げられる。この波長帯は目に対する安全性の高さに加え、光通信に開発された廉価で高性能な光源、検出器、光ファイバや光学部品が使えること、大気中の水蒸気の吸収線が少なく吸収による伝搬損失を避けるための波長選択が必要無きこと等のメリットを有する。2001年には、三菱電機の柳澤らが波長1.54 μm で発振するEr,Yb:Glassをレーザー材料として用いた単一周波数高ピークパルスレーザーを開発し¹³⁾、波長1.5 μm 帯のパルスレーザーでは初めて、最大計測距離6 kmの風計測結果を報告した¹⁴⁾。さらに、2003年には、単一周波数Yb:YAGディスクレーザーを基本波とした1.5 μm パラメトリック増幅(OPA)により高出力化をはかり、北海道大学の藤吉、山下らにより本レーザーを搭載した地上設置型のライダーを用いて都市環境における広域風計測の有効性を実証した¹⁵⁾。三菱電機は、2006年にはパルス光を用いた全光ファイバ型の風計測ライダーを世界に先駆けて製

^{†1} <http://www.mitsubishielectric.co.jp>

^{†2} <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/windtracer.html>

品化¹⁶⁾、2013年にはデータ取得率を向上するためのアダプティブ制御を搭載した風況調査用ライダーを製品化した¹⁷⁾。また、海外では、英国防省研究所 (QinetiQ) において、連続光を用いた全光ファイバ型の風計測ライダーを開発し^{18, 19)}、その開発者らにより ZephIR 社 (英)^{†3)}、Halo photonics 社 (英)^{†4)} が設立された。さらに、仏国立航空宇宙研究所 (ONERA) は、パルス光を用いた全光ファイバ型の風計測ライダーを開発し²⁰⁾、その開発者らにより Leosphere 社 (仏)^{†5)} が設立された。気象用計測器最大手の VAISALA (フィンランド) が、2020年に Leosphere 社を買収して今に至っている。

3. 風計測ライダーの種類

風計測ライダーにはいくつかの方式があり、大きくドップラー方式、分布変化検出方式の2つに大別される。

ドップラー方式では、単一周波数のレーザー光を大気に照射し、大気中のエアロゾル粒子からの後方散乱光を受信する。エアロゾル粒子は大気の流れである風とともに移動しているため、後方散乱光は風速に相当するドップラーシフトが発生する。このドップラーシフト量を計測することで、風速を検出する。

このドップラーシフト量の計測方法に関して、コヒーレント方式 (ヘテロダイン検波方式) とインコヒーレント方式 (直接検波方式) の2種類の方式がある。コヒーレント方式¹⁾では、送信光の一部と受信光を合波してヘテロダイン検波し、送信レーザー光と受信光の周波数差を計測することで、ドップラーシフト周波数を計測する。このドップラーシフト周波数から、送信光の視線方向の風速を算出する。本方式は送信光と受信光の干渉効果を利用するため、太陽光等の背景光の影響を受けずに、昼夜問わず安定した計測が可能になる。

インコヒーレント方式²⁾では、受信光を二つの異なる波長通過帯域を持つエッジフィルタに通し、これら二つのフィルタの透過強度比から、受信光のドップラーシフトによる波長変化量を計測する。本方式ではレイリー散乱がより強く発生する紫外光が利用できる。このためエアロゾル粒子が少ない上空における観測では、大気分子によるレイリー散乱光を利用可能なインコヒーレント方式が有効である。一方で、ドップラーシフトの検出に受信強度の変化

量を利用するため、太陽光等の背景光に影響を受けやすい。また、レーザー光源波長に対するエッジフィルタのカット波長の変動は、受信強度に対して大きく影響するため、レーザー光源の波長安定制御やカット波長変動を抑えるためのフィルタの温度管理が必要になる。

このように、二つの方式にはそれぞれ特徴があるため、目的に合わせて使い分けができる。例えば、成層圏においてはエアロゾル粒子が少なく主に大気分子の散乱を観測することになるため、レイリー散乱によるインコヒーレント方式が適している。一方で、航空安全や都市環境計測、風力発電向け等の産業用途では、昼夜を問わない24時間計測が要求されることから、コヒーレント方式が適している。

分布変化検出方式では、直接検波によるエアロゾル粒子の分布の時間変化を計測する。そのため、送信光に単一周波数の光源が不要で、受信も強度のみを検出すれば良く、ドップラー方式に比べて廉価に構成できる。一方で、強度分布の時間変化から移動量を検出するため、相対的に空間分解能が低下する遠方の風速や局所的に分布が変化する乱気流等の検出は困難で、航空気象等の安全確保のための風速観測には不適である。

5章以降で紹介する三菱電機の風計測ライダーでは、産業用途への適用を念頭に波長1.5 μmを用いたコヒーレント方式を採用している。ドップラー方式のライダーでは、波長制御された単一周波数の光源が必要となるが、特にコヒーレント方式では、インコヒーレント方式と比較して、大気からの散乱光を光ヘテロダイン検波するため、その送信光およびローカル光として干渉に適したコヒーレントな光源が要求される。これらに対し、波長1.5 μm帯では、ファイバ増幅器出力を固体レーザーによりさらに高出力に増幅することで、高エネルギー出力可能なコヒーレント光源を実現し、本方式に適用している²¹⁾。また波長1.5 μm帯は、アイセーフ帯であること、通信用で高い信頼性が得られている光ファイバ構成が可能であること等の利点がある。さらに、後述のコヒーレント方式における感度の高さから、インコヒーレントに比べ小さな光学系で必要とされるSNRを得ることができる。

4. コヒーレントライダーの原理

Fig. 1に、コヒーレント方式の風計測ライダーの測定原理と装置構成例を示す。変調の方式やパルス化の方式は複数の方式が用いられているが、Fig. 1では一般的なAOM (Acousto-Optic Modulator) を想定

^{†3)} <https://www.zephirlidar.com>

^{†4)} <http://www.halo-photonics.com>

^{†5)} <http://www.leosphere.com>

1.5 μm レーザ光を用いたドップラーライダーによる風計測技術 (辻 秀伸)

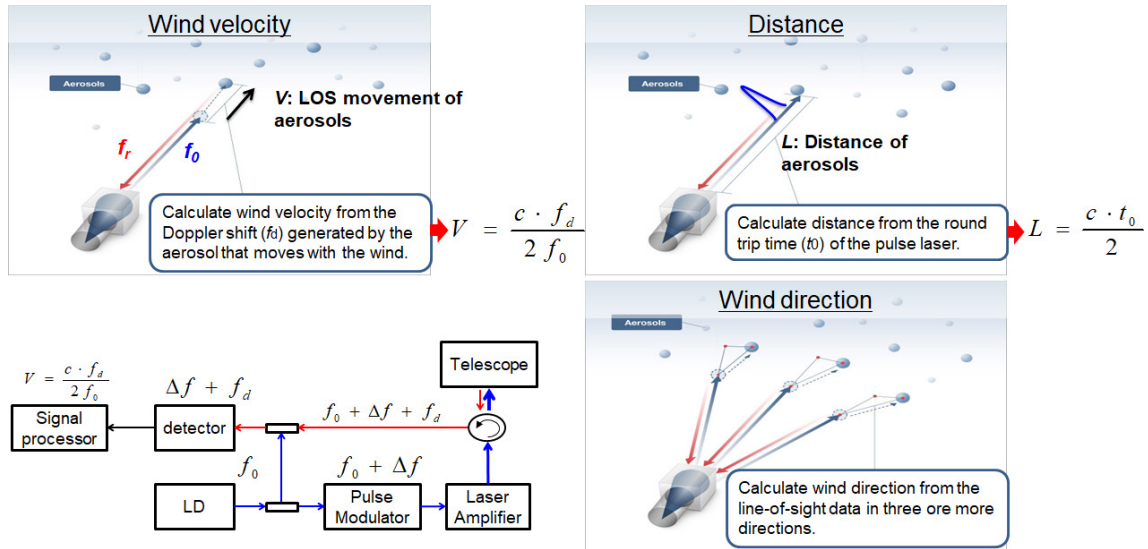


Fig. 1 Measurement principle and configuration of a coherent Doppler LIDAR.

した構成を示している。LD から出力された周波数 f_0 のレーザー光は二つに分岐され、一つは送信光として、もう一つはヘテロダイン検波のローカル光として利用される。分岐された送信光はパルス変調器によりパルス化されるとともに、中間周波数シフト Δf が付加される。送信光はパルス変調器を通過後、レーザー増幅器により増幅され、送受分離部を通過したのち送受信光学望遠鏡によりビーム径を拡大され、大気中に照射される。照射された送信光はエアロゾル粒子により散乱され、その散乱光を送受信望遠鏡で集光される。この散乱光は、大気に照射した光の周波数に、風によるエアロゾル粒子の移動速度に応じたドップラーシフト周波数 f_d が付加された周波数になる。集光された散乱光は、送受分離部により送信系と分離され、ローカル光と合波し、ヘテロダイン検波する。これにより、受信した散乱光の周波数からローカル光の周波数を差し引いた周波数、つまりパルス変調器による中間周波数シフト Δf とドップラーシフト周波数 f_d が加算された周波数が検出される。その後、信号処理部で Δf を差し引くことで、ドップラーシフト周波数 f_d 、さらには風速が算出される。また、パルス化された送信光の送信から受信までの時間を計測することで、距離を算出する。さらに、視線方向を複数切り替えて風速を観測することで、風向を算出することができる。

式 (1) に、コヒーレント方式の SN 比を示す²²⁻²⁴⁾。 P_s は受信信号強度 [W]、 P_{LO} はローカル光強度 [W]、 η は量子効率、 e は電気素量 [q]、 h はプランク定数 [Js]、 ν は光周波数 [Hz]、 B は受信に用いる帯域幅 [Hz] である。

$$SNR = \frac{\left(\eta \frac{e}{h\nu} \sqrt{2P_s P_{LO}}\right)^2}{2\eta \frac{e^2}{h\nu} P_{LO} B} = \frac{\eta P_s}{h\nu B} \quad (1)$$

コヒーレント方式においてはローカル光が十分強ければ、一般的な光検出器雑音成分である暗電流や熱雑音が、ローカル光ショット雑音に対して十分小さくなる。その結果、SN 比は式 (1) に示すように、検出器雑音成分に依存せず、理想的にはショット雑音限界の SN 比が得られ、理論限界に近い高感度受信が可能となる。

5. 三菱電機ドップラーライダーシステム 「DIABREZZA」

5.1 地上/洋上設置型単距離ライダー (DIABREZZA_W)¹⁷⁾

本ライダーは風力発電向けの小型高分解能な風計測ライダーであり、ウインドファームにおける風況観測への適用を想定している。ライダーの外観を Fig. 2 に示す。本ライダーでは、鉛直方向 1 視線の風速と、天頂角 15° に傾けた 4 方向の視線方向風速をそれぞれ



Fig. 2 Outlook of the compact and high-resolution coherent Doppler LIDAR for wind power.

Table 1 Specifications of the compact and high-resolution coherent Doppler LIDAR for wind power.

Parameter	Value	Note
Range	40 to 250 m	depends on aerosol
Resolution	20/25/30 m	
Measuring wind range	-30 to 30 m/s	
Measuring Direction	5 line of sight (fixed)	by optical switch
Direction	North, South, East, West, and Zenith	
Output data	Wind velocity and direction, SNR	
Laser wavelength	1.55 μ m	
Laser output	10 μ J \times 16 kHz	
Size	W 0.5 \times H 0.6 \times D 0.6 m	

計測し、ベクトル合成により風向を導出する。これにより、マストでは計測困難な、高度 40 m～250 m までの水平風向風速・鉛直風速（3次元風ベクトル）の高度分布の計測を可能にしている。Table 1 に本ライダの主要性能を示す。

風計測ライダはエアロゾル粒子からの散乱光を受信するため、気象条件が変化してエアロゾル粒子の数が減少した場合、風計測ライダの受信 SN 比が減少し、結果として風計測可能な距離が短縮されることがある。一方で、ウインドファームにおける風況観測では長期間の安定した風況観測が必要とされる。そこで本ライダには天候条件等に応じて観測パラメータを自動調整して、所望の高度でのデータ取得率を最大化する環境適用制御機能を備えている。

また、洋上風力発電向けのオプション機能として、洋上浮体への設置することを想定した遠隔監視制御機能・動揺補正機能が用意されている。

5.2 地上設置型長距離ライダ (DIABREZZA_A)

本ライダは空港向けの大型で長距離観測可能な風計測ライダであり、航空機が安全に発着できるよう、空港近辺のウインドシアやダウンバーストの観測への適用を想定している。

本ライダは、空港周辺の広い領域をカバーするため、長距離な計測が必要となる。これを実現するには、ピークパワーが kW クラスのレーザー出力が要求される。

そこで我々は、固体レーザー媒質を用いた高利得平面導波路型レーザー増幅器を開発した。このレーザー増幅器の導波路は、Er,Yb 添加リン酸ガラスレーザー媒質をコアとして使用し、無添加リン酸ガラスを第 1 クラッドに、光学ガラスを第 2 クラッドに用いたダブルクラッド構造を特徴としている。この構造により、高ピーク動作が可能な固体レーザーを用いて光



Fig. 3 Outlook of the long-range coherent Doppler LIDAR.

Table 2 Specifications of the long-range coherent Doppler LIDAR.

Parameter	Value	Note
Range	34 km (max)	depends on aerosol
Resolution	30/75/150 m	
Measuring wind range	-38 to 38 m/s	
Measuring Direction	Omnidirectional	by scanning mirror
Direction	Azimuth 0 to 360 degree Elevation -5 to 185 degree	
Output data	LOS wind velocity, Wind and SNR distribution	
Laser wavelength	1.55 μ m	
Laser output	3 mJ \times 1 kHz	
Size	W 2.2 \times H 2.2 \times D 2.6 m	

ファイバ並の高増幅利得 24 dB を達成し²⁵⁾、遠距離測定に適した高出力動作を実現した。

Fig. 3 に、地上設置型風計測ライダの外観を、Table 2 に地上設置型計測ライダの主要性能を示す。前述の開発したレーザー増幅器を用いることで、最大計測距離 34 km を実現している²⁶⁾。本ライダは、国内は羽田空港（2014 年）、成田空港（2016 年）、関西空港（2018 年）に設置され、空港近辺の風観測を行っている。また、海外では香港、トルコ、北京、フランスの空港に設置され、世界の航空機の安全を見守っている。

また、2010 年から開発を開始した平面導波路型レーザー増幅器は継続的に改良が加えられ²⁷⁾、2019 年には最大出力 15.8 mJ が報告されている²⁸⁾。

5.3 地上設置型中距離ライダ (DIABREZZA_S)

本ライダは可搬型を特徴とした、コンパクトな全光ファイバ型風計測ライダであり、様々な用途に対して汎用的に持ち運んで観測する運用を想定している。

Fig. 4 に、地上設置型中距離ライダの外観を、Table 3 に地上設置型中距離ライダの主要性能を示す。本ライダは送受望遠鏡およびスキャナ部を本体から分離し、現地で組み立て可能とすることで、可



Fig. 4 Outlook of the All-Fiber Doppler LIDAR system.

Table 3 Specifications of the All-Fiber Doppler LIDAR system.

Parameter	Value	Note
Range	3 km at 150m resolution	depends on aerosol
Resolution	30/75/150 m	
Measuring wind speed	More than 30 m/s	
Measuring Direction	Omnidirectional	by scanning mirror
Beam scanning angle	180 degrees in Azimuth 90 degrees in Elevation	
Output data	Doppler velocity Spectrum width Signal to Noise Ratio Vertical wind distribution Horizontal wind distribution	
Laser wavelength	1.5 micrometer band	
Laser output	10 μJ × 16 kHz	
Size	W 0.2 × H 0.4 × D 0.4 m W 0.6 × H 0.3 × D 0.6 m	Optical Antenna Laser Transceiver & Signal Processor

搬型でコンパクトな構成を実現している。また、汎用的な利用を想定することから、本ライダーが照射するレーザー光はアイセーフ条件を満足しており、目に対する安全を考慮している。本ライダーの観測距離として、気象条件にも依存するが、大気境界層内であれば水平距離 3 km まで計測可能である。適用分野として、例えば上層風の鉛直プロファイルや局所風の計測等の気象観測分野や、ビル風、高速道路などの突風、および小型航空機の横風計測等の都市災害、安全分野等を想定している。

6. 風計測ライダー技術の展開

風計測ライダー技術の今後の展開として、風計測ライダーにより計測された風向・風速情報を元に、対象をリアルタイムに制御することで、危険を回避し、円滑な運用を維持する等の産業応用に向けた開発が加速すると考えられる。また、風計測ライダー技術を応用した水蒸気計測についても近年開発が進められている。ここでは二つの開発中のライダーについて紹介する。

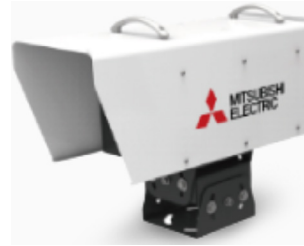


Fig. 5 Outlook of the Nacelle-mounted LIDAR.

Table 4 Specifications of the the Nacelle-mounted LIDAR.

Parameter	Value	Note
Range	40 - 400 m	Longer range as option
Resolution	20/30/45 m	
Measuring wind speed	-10 to 60 m/s	
Measuring Direction	4 line of sight (fixed)	
Output data	LOS, Real-time / 10 min average wind direction, velocity	
Size	W 0.3 × H 0.3 × D 0.5 m	Optical Antenna

6.1 ナセル搭載型ライダー

本ライダーは風力発電用の風力タービンの回転軸を保持する部分にあたるナセルに搭載し、風力タービンに流入する風の風向・風速を測定する運用を想定している。計測された風向・風速情報を元に、タービンをリアルタイムに制御することで、効率的な発電を実現する。Fig. 5 に、ナセル搭載型ライダーの外観を、Table 4 にナセル搭載ライダーの主要性能を示す。本ライダーはナセルに搭載することを前提に、全てのコンポーネントが1つのユニットに統合されており、小型軽量化を実現している。また、大気条件に応じた観測パラメータの自動最適化によりデータ取得率を最大化している。

6.2 水蒸気・風速同時計測向けコヒーレント方式差分吸収ライダー^{29, 30)}

本ライダーはこれまでのコヒーレント方式風計測ライダーの技術を応用し、風速の他に水蒸気も観測可能にしたライダーである。水蒸気と風を同時に観測することで、豪雨発生源となり得る水蒸気フラックスを把握し、高精度な豪雨予測が可能になると考えられており、豪雨被害を最小限に抑えることのできる防災・減災社会への貢献を目指している。

Fig. 6 に本ライダーの構成図を示す。本ライダーでは水蒸気の吸収波長に合わせたレーザー光源 (1531.383 nm) と、水蒸気非吸収波長に合わせたレーザー光源 (1531.575 nm) の二つの波長のレーザー光源を、

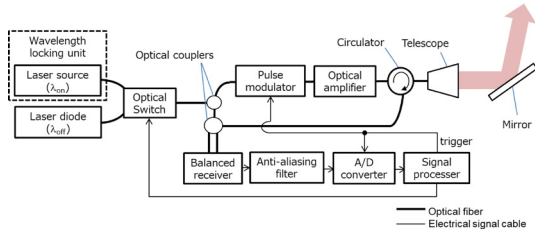


Fig. 6 Schematic of 1.53- μm coherent DIAL.

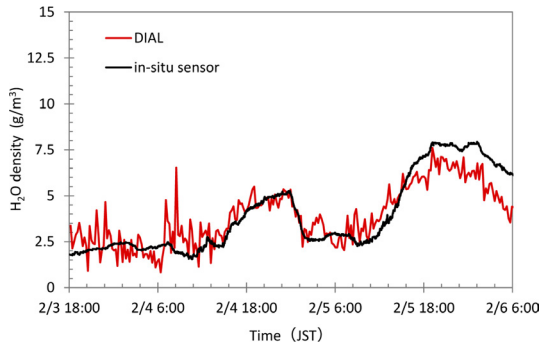


Fig. 7 Comparison with DIAL and in-situ sensor H₂O data.

光スイッチにより切り変えて交互に照射する。照射したそれぞれのレーザー光に対して、Fig. 1で示したコヒーレント方式風計測ライダと同様にヘテロダイン検波する。検波された受信信号を吸収波長と非吸収波長で比較すると、吸収波長では大気の水蒸気による減衰により受信信号が低下する。この吸収波長と非吸収波長の受信信号の差から水蒸気量を算出する。さらに、通常のコヒーレント方式風計測ライダと同様、ヘテロダイン検波により大気のエアロゾル粒子の移動速度に相当するドップラーシフトを観測することで、風速も同時に計測可能である。Fig. 7に本ライダによる水蒸気観測結果と観測地点に設置した温湿度計から算出した水蒸気測定値の時間変化を比較した結果を示す。Fig. 7より、水蒸気量の時間変化が両機器で誤差 0.56 g/m^3 の範囲内で一致しており、本センサが正しく水蒸気を計測していることが確認されている。

現在、高精度な豪雨予測に関して様々な研究がされており、例えば気象研究所では、観測誤差が比湿で 1 g/kg と仮定した水蒸気鉛直分布のライダ観測データを利用することで、豪雨の降水予測精度が改善されることをシミュレーションにより実証している³¹⁾。今後は、本ライダを用いて水蒸気フラックスを観測し、この観測結果を反映させた豪雨予測技術を開発する予定である。

7. おわりに

赤外線レーザーを用いたドップラーライダによる風計測技術として、三菱電機の製品である風計測ライ

ダ DIABREZZA™ の紹介、および今後の風計測ライダ技術の展開について概要を説明した。

本稿では、民間企業の一製品としてのライダを紹介したが、製品は研究用途における開発といくつかの相違が発生する。

まず、風計測ライダは野外の過酷なフィールドでの運用が想定されるため、単純化して言えば「いつでも、どこでも」所望の性能が得られるように製造しなければならない。このためには、部品一つ一つに至るまで温度、湿度、塩分等の環境条件への適応性能の確認が必要になり、適応できない部品が一つでもあれば、製品として成立しないことになる。

また、製品は仕様に基づいた同じ性能を担保する必要があるが、一方で構成する部品一つ一つにはそれぞればらつきがあるため、組み上げた製品にも性能にばらつきが生じる。このため、部品のばらつきを考慮した部品選定や設計、試験が必要になる。

これらの様々な検討を重ねて設計された装置は、研究用途における開発時の装置よりも高コストになる。しかし、製品の価格は購入する方々のニーズにより決まるため、ニーズにより決定された製品価格に対し、設計した装置の製造コストが上回れば、その装置は製品化できない。その場合、製品化するためには低コスト部材の選定や、機能の見直し等、低コスト化が必要になる。

今回紹介した風計測ライダの製品は、以上のような製品化に対するいくつかのハードルを越えてきたものになる。風計測ライダ技術の展開で示したいくつかの技術が今後製品化されるかは、今後これらのハードルが超えられるかにかかっている。風計測ライダのように気象観測を目的としたセンサは、一般消費者向けというよりは産官学向けであるため、ニーズを掘り起こすためには産官学が一緒になって技術開発、有用性の実証、適用分野の提言等を行うことが重要と考える。民間企業としては、一緒に掘り起こしたニーズを製品の形で実現することで、安全・安心社会の実現に向けて貢献していきたい。

参考文献

- 1) R. M. Huffaker and A. V. Jelalian: "Laser-Doppler System for Detection of Aircraft Trailing Vortices", Proc. IEEE, **58** (1970) 322.
- 2) C. Laurence Korb, B. M. Gentry and C. Y. Weng: "Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind", Appl. Opt., **31** (1992) 4202.
- 3) I. Afek, N. Sela, N. Narkiss, G. Shamai and S. Tsadka: "Wind measurement via direct detection lidar", Proc. SPIE, **8894** (2013) 889404.
- 4) F. F. Hall, Jr., R. M. Huffaker, R. M. Hardesty, M. E. Jackson, T. R. Lawrence, M. J. Post, R. A. Richter, and B. F. Weber:

1.5 μm レーザ光を用いたドップラーライダーによる風計測技術 (辻 秀伸)

- "Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar", *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2503.
- 5) F. Kopp, R. L. Schwiesow and C. Werner: "Remote Measurements of Boundary-Layer Wind Profiles Using a CW Doppler Lidar", *Journal of Climate Applied Meteorology*, **23** (1984) 148.
 - 6) J. W. Bilbro, C. DiMarzio, D. Fitzjarrald, S. Johnson and W. Jones: "Airborne Doppler lidar measurements", *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3952.
 - 7) T. J. Kane, W. J. Kozlovsky, and R. L. Byer: "Coherent laser radar at 1.06 μm using Nd:YAG lasers", *Opt. Lett.*, **12** (1987) 239.
 - 8) M. J. Kavaya, S. W. Henderson, J. R. Magee, C. P. Hale and R. M. Huffaker: "Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system", *Optics Letters*, **14** (1989) 776.
 - 9) J. G. Hawley, R. Targ, S. W. Henderson, C. P. Hale, M. J. Kavaya, and D. Moerder: "Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment", *Appl. Opt.*, **32** (1993) 4557.
 - 10) JIS C 6802:2014 レーザ製品の安全基準, 日本規格協会, 2014年9月22日発行.
 - 11) S. W. Henderson, C. P. Hale, J. R. Magee, M. J. Kavaya, and A. V. Huffaker: "Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 μm using Tm, Ho:YAG lasers", *Opt. Lett.*, **16** (1991) 773.
 - 12) S. W. Henderson, P. J. M. Suni, C. P. Hale, S. M. Hannon, J. R. Magee, D. L. Bruns, and E. H. Yuen: "Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers", *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, **31** (1993) 4.
 - 13) T. Yanagisawa, K. Asaka, K. Hamazu and Y. Hirano: "11-mJ, 15-Hz single-frequency diode-pumped Q-switched Er,Yb:phosphate glass laser", *Opt. Lett.*, **26** (2001) 1262.
 - 14) K Asaka, T. Yanagisawa, and Y. Hirano: "1.5- μm eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement", *Proc. SPIE*, **4153** (2001) 321.
 - 15) C. Fujiwara and K. Yamashita: "Dust Devil-Like Vortices in an Urban Area Detected by a 3D Scanning Doppler Lidar", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50** (2011) 534.
 - 16) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano and S. Wadaka: "Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing", *Appl. Opt.*, **46** (2007) 1953.
 - 17) N. Kotake, M. Imaki, and S. Kameyama: "Concept of wind LIDAR system with the adaptive parameter tuning to atmospheric condition", *Proceeding of 17th Coherent Laser Radar Conference* (2013) Day 3 session 11.
 - 18) C. J. Karlsson, F. Å. A. Olsson, Di. Letalick and M. Harris: "All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements", *Appl. Opt.*, **39** (2000) 3716.
 - 19) G. N. Pearson, P. J. Roberts, J. R. Eacock and M. Harris: "fiber lidar for aerosol backscatter applications", *Appl. Opt.*, **41** (2002) 6442.
 - 20) Jean-Pierre Cariou, B. Augere and M. Valla: "Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology", *Comptes Rendus Physique*, **7** (2002) 213.
 - 21) T. Yanagisawa, T. Sakimura, K. Hirosawa, T. Takasaki, N. Samejima, M. Furuta, H. Tanaka, S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, and Y. hiarno: "History of 1.5 μm laser source for the coherent Doppler LIDAR in Mitsubishi Electric", *Proceeding of 19th Coherent Laser Radar Conference* (2018) We9.
 - 22) 小林喬郎, M. Hanza, 石原久寛, 稲場文男: 信学技報 OQE-80-141 (1981) 101.
 - 23) R. Frelich: "Velocity error for coherent Doppler lidar with pulse accumulation," *J. Atmos. Oceanic, Technol.* **21** (2004) 905.
 - 24) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka: "Performance of Discrete-Fourier-Transform-Based Velocity Estimators for a Wind-Sensing Coherent Doppler Lidar System in the Kolmogorov Turbulence Regime", *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, **47** (2009) 3560.
 - 25) T. Sakimura, Y. Watanabe, T. Ando, S. Kameyama, K. Asaka, H. Tanaka, T. Yanagisawa, Y. Hirano, and H. Inokuchi: "1.5- μm high average power laser amplifier using an Er,Yb:glass planar waveguide for coherent Doppler LIDAR," *Proc. SPIE*, **8526** (2013) 852604.
 - 26) S. Kameyama, T. Sakimura, Y. Watanabe, T. ando, K. asaka, H. Tanaka, T. Yanagisawa, Y. Hirano, and H. Inokuchi: "Wind sensing demonstration of more than 30 km measurable range with a 1.5 μm coherent Doppler lidar which has the laser amplifier using Er,Yb:glass planar waveguide," *Proc. SPIE* **8526** (2013) 85260E.
 - 27) K. Hirosawa, T. Sakimura, N. Samejima, T. Yanagisawa, and S. Kameyama: "9-mJ laser amplifier at 1540 nm for a coherent lidar system with 250 Hz repetition", in *19th Coherent Laser Radar Conference (CLRC 2018)* (2018) paper Mo8.
 - 28) T. Sakimura, K. Hirosawa, Y. Watanabe, T. Ando, S. Kameyama, K. Asaka, H. Tanaka, M. Furuta, M. Hagio, Y. Hirano, H. Inokuchi, and T. Yanagisawa: "1.55- μm high-peak, high-average-power laser amplifier using an Er,Yb:glass planar waveguide for wind sensing coherent Doppler lidar", *Optics Express* **27** (2019) 24175.
 - 29) M. Imaki, K. Hirosawa, T. Yanagisawa, S. Kameyama, and H. Kuze, "Wavelength selection and measurement error theoretical analysis on ground-based coherent differential absorption lidar using 1.53 μm wavelength for simultaneous vertical profiling of water vapor density and wind speed", *Appl. Opt.*, **59** (2020) 2238.
 - 30) M. Imaki, H. Tanaka, K. Hirosawa, T. Yanagisawa, and S. Kameyama, "Demonstration of the 1.53- μm coherent DIAL for simultaneous profiling of water vapor density and wind speed", *Optics Express* **28** (2020) 27078.
 - 31) S. Yoshida, S. Yokota, H. seko, T. sakai, and T. nagai: "Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar Using LETKF System," *SOLA*, **16** (2020) 43.

辻 秀伸 2009年東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻博士後期課程単位取得退学。同年より三菱電機(株)情報技術総合研究所に入社。3次元距離計測用レーザーセンサの研究開発に従事。2011年3月東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻博士(理学)取得。現在、ライダー等の光学センサ設計・開発に従事。



水中 LiDAR への取り組み

島田 雄史, 鈴木 謙一

株式会社トリマティス (〒272-0023 千葉県市川市南八幡 4-2-5 いちかわ情報プラザ 407)

Challenges to Realize Underwater LiDAR

Takeshi SHIMADA and Ken-Ichi SUZUKI

Trimatiz Limited, 407 Ichikawa Business Plaza, 4-2-5 Minamiyawata, Ichikawa, Chiba 272-0023

(Received February 15, 2021)

This paper describes our challenges to realize underwater LiDAR. We have provided a LiDAR kit suitable for developing prototype LiDAR's for various applications. Based on our developing experiences regarding these LiDAR's, we have started to challenge the research and development of an underwater LiDAR. In this paper, firstly we introduce ALAN consortium that promotes underwater optical wireless technologies including underwater LiDAR. Secondly, we explain loss characteristics of underwater optical propagation and optical devices usable in underwater, which are important issues for developing an underwater LiDAR. After that, we explain our developed prototyping underwater LiDAR and also show a 3D scan image of an object located in underwater, which were successfully obtained using that.

キーワード：ライダー，水中ライダー，タイムオブフライト，可視光レーザーダイオード

Key Words: LiDAR, Underwater LiDAR, Time of Flight, Visible light laser diode

1. はじめに

LiDAR (Light Detection and Ranging) は、レーザー光を用いて測距や環境測定を行う装置である。特に測距に用いる場合を LiDAR と略することが多く、レーザー光を対象物に照射することによって生じる反射光の戻ってくるまでの時間が、対象物との距離によって異なることを利用して距離を測定する¹⁾。また LiDAR は、空間分解能が数 cm 以下と高く、レーザー光を走査することにより多点測定を行い対象物の形状や動きを把握することが可能である。そのため、最近では、電波の損失の大きい水中や海中の探査、河川や電波を反射しにくい非金属物質が分布する地形の探査、人の動きを正確に計測するためのセンサー²⁾や自動運転のセンサーなどに LiDAR が広く利用されはじめている。特に、最近の自動運転の機運の高まりにより、自動運転向けのセンサーとしての LiDAR の市場が立ち上がることで³⁾、LiDAR の小型・低コスト化が進み、その普及にはずみがかかることが期待される。

一方、水中や海中向けの LiDAR については、ほとんどが学術研究分野での利用^{4,5)}にとどまっていたが、水中に光無線技術などの水中光技術を適用した LAN (Local Area Network) の構築を目的とした ALAN (Aqua LAN) コンソーシアム⁶⁾により、水中光技術の一つとして水中 LiDAR の産業化に向けた研究開発が推進されている。本稿では、これまでに開発してきた空間 LiDAR 及びこれからの市場拡大が期待される水中 LiDAR、特に測距に特化した LiDAR への取り組みについて紹介する。

2. 空間 LiDAR への取り組み

我々は、これまでにパルス状のレーザー光を対象物に照射することによって生じる反射光が戻ってくる時間が、対象物との距離によって異なることを利用した距離測定 (ToF; Time of Flight)、及びスキャナによる多点観測が可能な LiDAR の開発を行ってきた。開発した LiDAR は、様々な用途を想定した LiDAR の研究開発、実験に使えるように、測定距離レンジ、スキャン角度、測距精度、波長 (光デバ

水中 LiDAR への取り組み (島田 雄史)

イス選定による可視光～近赤外への対応), 出力などのカスタマイズや, 投光部, 受光部, 制御回路部のカスタマイズに対応可能となっている⁷⁾. 例えば人の目に害を与えにくい 1,500 nm 帯波長の光源を用いた「アイセーフ LiDAR」や, 水中での損失の小さい可視光光源を用いた「可視光 LiDAR」等, 様々な用途を見越した LiDAR のプロトタイプ開発に適用されている.

開発したアイセーフ LiDAR の外観と測定例を Fig. 1 に示す. 光源として波長 1550 nm, 平均パワー 20 mW, パルス幅 10 ns, 繰り返し周波数 10 kHz, ビーム径約 2 mm のパルス光源を用いた. ここで 1550 nm 帯のレーザー光の最大許容露光量 (MPE: Maximum permissible exposure) は, 905 nm 帯に比べ単パルス領域において大きくなる⁸⁾. 例えば本装置に用いた光源のパルス幅 10 ns で MPE を比較すると, 約 240 倍大きくなるため, 1550 nm 帯ではピークパワーの高出力化が可能である. 本装置では, 光源を短パルス化し, 低繰り返し周波数で動作させることにより, 平均パワーを上げずにピークパワーの高出力化を実現している. なお平均パワー, パルス幅, 及び繰り返し周波数から換算した光パルスのピークパワーは約 200 W である. また本装置は, 受光部, TDC 回路でのパルスエッジ検出精度から 0.5 cm 程度の距離分解能, 測定間隔から角度分解能 0.05° を有していると考えられる. Fig. 1 (b) の測定例に示す通り, アイセーフ波長 (1,550 nm) を使用することによりピークパワーを

高出力化したことで, SN 比 (Signal to Noise Ratio) の厳しい長距離でも正確な距離測定, 3D スキャンによる街中の風景の 3D 画像化, 電線の観測が可能で高い空間分解能 (10 Gb/s 系高速デバイス適用によるミリ単位の高分解能) を実現している. なお, 本レーザーシステムでは, 低周波数で動作させるとパルスエネルギーが増加し, ピークパワーが高出力化することから, 画像取得に微動ステージを用いた測定で約 4.5 時間, ガルバノミラーを用いた測定で約 1 時間程度要している.

3. ALAN コンソーシアム

日本を取り巻く広大な海洋及びその資源を活用する機運が高まっており^{9,10)}, これらの海洋や資源を有効活用するためには, 海中に情報インフラを整備する必要がある. そこで, 海中や水中を一つの生活圈として捉え, それを支える情報インフラとして水中に Local Area Network (LAN) を構築する目的で, 電子情報技術産業協会 (JEITA: Japan Electronics and Information Technology Industries Association) 「共創プログラム」として ALAN (Aqua LAN) コンソーシアムが設立された⁶⁾.

しかしながら海中を代表する水中環境は, 音波等限られた手段しか使えない「最後のデジタルデバイス領域」であり, 音波のみの利用では, 地上並みの通信ネットワークを構築することは困難である. そのため ALAN では, 新たな可能性として水中光技術に着目し, 水中ネットワークの構築を推進することとなった.

これらを踏まえた ALAN で検討を行う水中光技術について述べる. 光は, 特に通信において高速伝送が可能であること, 伝送遅延が小さいという特長がある. また 100 m 程度であれば水中で数 100 Mbps 以上の伝送速度で通信が行える可能性を秘めている¹¹⁾. また数 m 程度であれば, 1 Gbps を超える伝送速度での通信が可能であることが報告されている¹²⁾.

距離測定や多点測定による 3D 探査では, 自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) に搭載した水中 LiDAR (3D レーザースキャナー) による, 海底地形の 3D 可視化が報告されている³⁾. また音波が苦手な近距離の測定が可能であることから, 両者を組み合わせた測定範囲の広い距離測定方式の実現が期待できる. 給電については, 光を使った非接触給電が可能になれば, 遠隔操作型無人潜水機 (ROV: Remotely Operated Vehicle) などの水中ロボットの活動時間の延伸が期待できる.

これら水中光無線技術などを活用した水中ネット

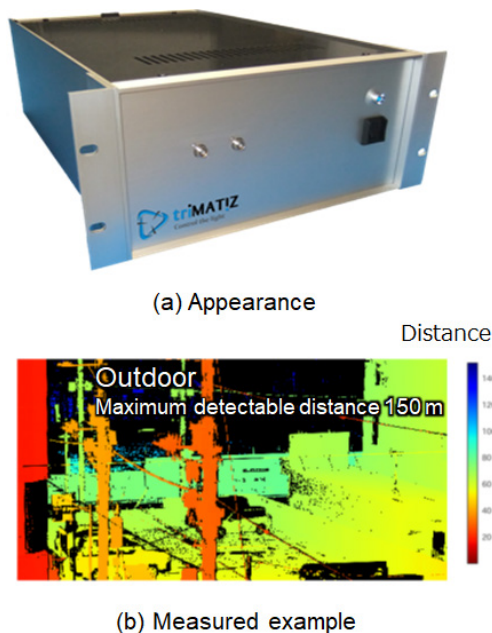


Fig. 1 (a) Appearance of eye safe LiDAR and (b) measured example.

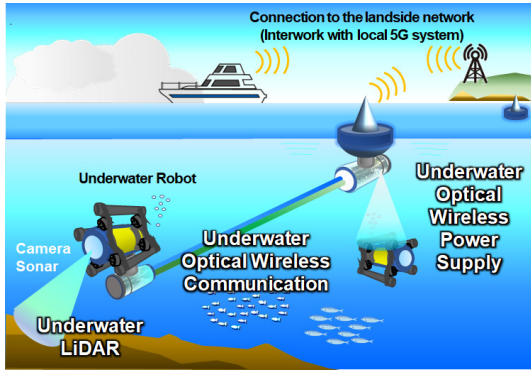


Fig. 2 Concept image of underwater network utilizing underwater optical wireless technologies in ALAN consortium.

ワークの概念図を Fig. 2 に示す。ここでは、水中ロボットが水中 LiDAR やカメラで取得した海中のデータを、水中光無線通信により海上に浮かぶ水中光無線中継装置を介して地上へ転送することを想定している。これが実現することにより、地上と水中でリアルタイムでのデータ共有が可能となることが期待される。

4. 水中での光の損失

比較のため、音波及び電波の周波数と水中（海中）での損失を Table 1 に示す^{13, 14, 15}。なお音波の値は、文献 13 などを基にした文献 14 の計算ツール、電波の値は文献 15 式 (2) より算出した。Table 1 に示すように、水中では電磁波の損失が大きく、通信や計測には音波がもっぱら用いられてきた。一方長波領域では、水中での電磁波の損失が小さくなることから、超長波領域（VLF 帯）の電磁波を用いた水中通信が行われている¹⁵。

電磁波は、高周波になるほど水中での損失が大きくなっていくが、可視光領域で損失が小さくなることが知られている¹⁶。可視光の波長と水域毎の損失を Table 2 に示す。なお表中の値は文献 16, Fig. 3 (a) より算出した。

Table 2 に示すように、光の水中での損失はファイバ通信に比べ 3 桁ほど大きいですが、ALAN で想定

Table 1 Underwater propagation loss of sound wave and radio wave in their frequencies.

Frequency [kHz]	Propagation loss[dB/m]	
	Sound wave	Radio wave
0.1	1.3×10^{-6}	0.386
1	7.0×10^{-5}	1.22
10	1.1×10^{-3}	3.86
100	2.8×10^{-2}	12.2
1000	0.44	38.6

Table 2 Propagation losses of visible lights as relationships between their colors and wavelengths in each sea area.

Color	Wave Length [nm]	Propagation loss[dB/m]		
		Deep sea	Inshore / Coastal water	Shallow sea / Bay water
Purple	430	0.23~	0.57~	1.2~
Blue	480	0.20 ~	0.44~	0.7~
Green	530	0.21~	0.41~	0.64~
Yellow	580	0.21~	0.44~	0.56~
Orange	605	0.41~	0.56~	0.76~

する数 m~100 m 程度の光伝搬では十分低損失である。また水域、水の透明度によって低損失波長が異なり、透明度の高い深海では青色の、透明度が若干低い近海や沿岸では緑色の、透明度が著しく低い浅海や湾内では黄色の損失が小さくなる。なおこれらの損失値は、季節ごとのにごりの変化などの水中環境条件により大きく変わる¹⁷。

5. 水中で用いられる光デバイス

水中に適用できる可視光デバイスとその性能を Fig. 3 に示す。深海で損失の低い青色光源としては、変調帯域が GHz 程度以下と狭いが、高出力化、低コスト化の進展が著しく入手性の高い窒化ガリウム LD (GaN-LD) が普及している。また GaN 系 LD は、研究開発が進み緑色光源としても期待されている。また LD より扱いにくいですが、ファイバレーザー、固体レーザーや波長変換による緑色光源が入手可能である。黄色光源としては、固体レー

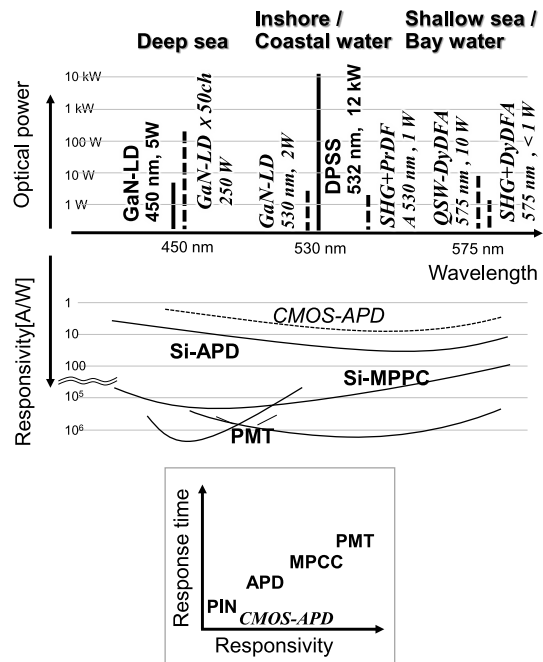


Fig. 3 Visible light devices and their performances.

水中 LiDAR への取り組み (島田 雄史)

ザーや波長変換による研究開発が行われている⁶⁾。受光素子としては、可視光に感度があり高速な Si-APD や、さらに高感度な MPPC (Multi-pixel Photon Counter)、光電子増倍管 (PMT; Photo Multiplier Tube) の利用が期待されている。

6. 水中 LiDAR

波長 450 nm, ピークパワー 1.6 W, パルス幅 6 ns, ビーム径約 4 mm×1 mm (距離 1 m で測定) の青色 LD を用いたパルス光源と MPPC 受光器, 及び TDC (Time-to digital converter) 回路, スキャナを組み合わせた可視光 LiDAR を使い, 水道水を満たしたアクリル水槽内のコンクリート片を水槽外部から測定した¹⁸⁾。観測結果を Fig. 4 に示す。比較のため, 同程度のピークパワー, パルス幅, ビーム径を持った波長 905 nm の近赤外 LD パルス光源を用いた LiDAR (NIR LiDAR: Near Infra-Red LiDAR) の測定結果も示す。NIR LiDAR は水中の対象物を計測できなかったのに対して, 可視光 LiDAR は対象物の計測が可能である。またコンクリート片の表面形状 (Fig. 4 (b) の矢印上) を Fig. 5 に示す。

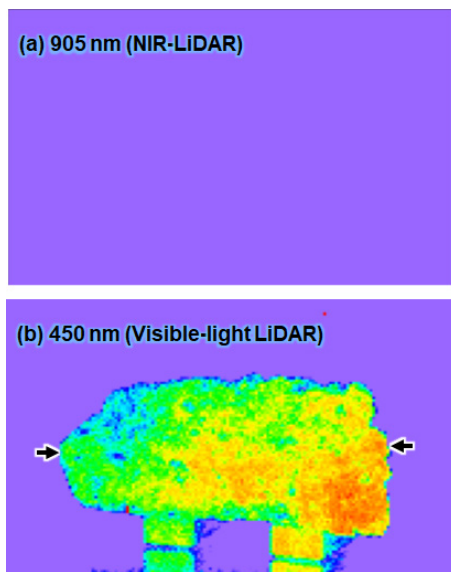


Fig. 4 Measured 3D scan images of (a) NIR LiDAR and (b) visible-light LiDAR.

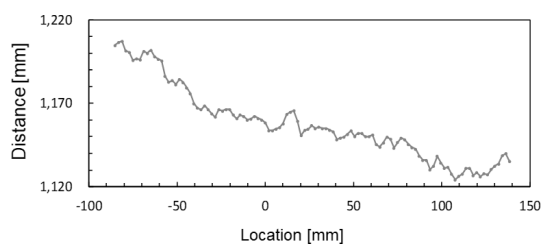


Fig. 5 Surface shape of a concrete piece.

本装置は, パルスエッジ検出精度から距離分解能 0.5 cm 程度, 測定対象物距離の 1.3 m で測定したビーム径が, 距離 1 m で測定したビーム径とほぼ変わらなかったことから空間分解能としてビーム径程度の数 mm を有していることが期待される。推定した精度については, 今後精度が明らかな計測機器との比較を行うことで確認を行いたい。

また可視光 LiDAR を耐圧容器に収容することで ROV (Remotely Operated Vehicle) に搭載可能な水中 LiDAR を開発した。開発した水中 LiDAR を Fig. 6 に示す。耐圧容器は, 内径 205 mm, 厚さ 10 mm, 全長 440 mm の円筒型容器で, 投受光器の他, 内部に可視光 LiDAR の主要部品であるスキャナ, スキャナドライバ, TDC 回路を収容している。水中 LiDAR への電源供給, 外部からの制御, 及び測距データの転送は, 水中コネクタ及びケーブルを介して行われている。

ROV に搭載した水中 LiDAR を用いて, 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 横須賀本部の多目的水槽 (全長 40 m, 全幅 4 m, 水深 2 m (最深部)) で行った 3D スキャンの測定風景及び測定結果を Fig. 7 に示す。また参考として測定対象の写真も示す。多目的水槽内に設置した測定対象物に対し, 測定距離 1 m の範囲で 3D スキャンを実施することで, 水中での 3D 測距画像の取得に成功した⁷⁾。なお画像取得に 10 分程度要している。

しかしながら, 本計測においては近端反射による影響の抑圧, 測定距離の拡大やスキャンスピードの向上などの問題点が顕在化した。現在, 社内の水中実験環境を整備するとともに, 上記の問題点への対策を実施して再実験を行っている。再実験の結果については, データがまとまったところで紹介の機会を設けたいと考えている。

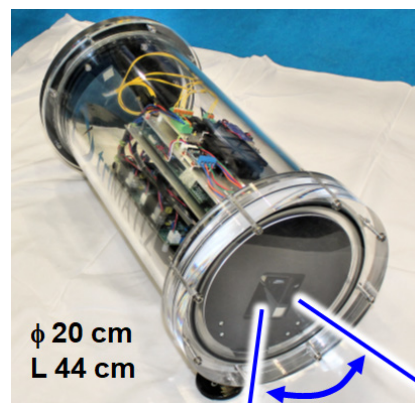


Fig. 6 Developed underwater LiDAR.

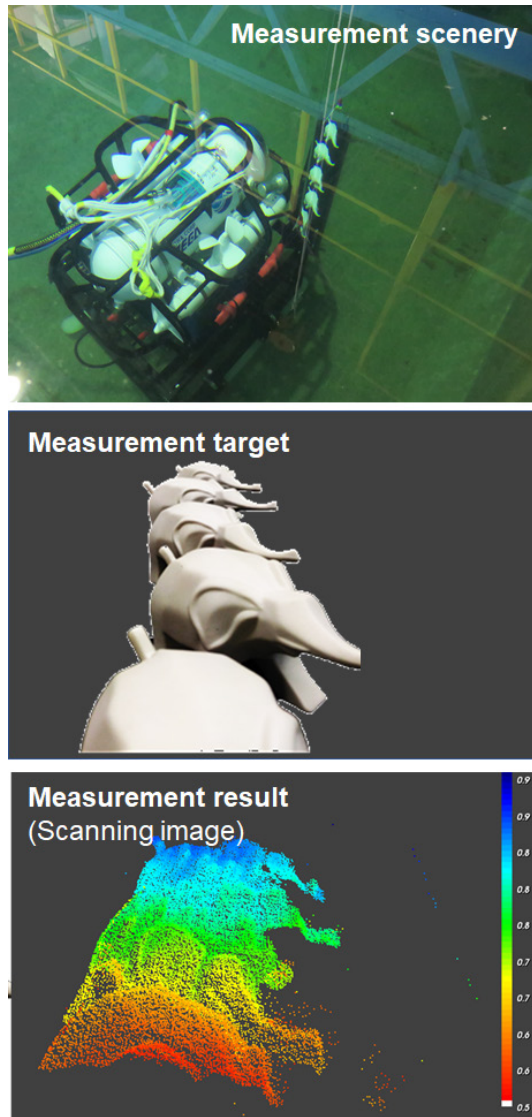


Fig. 7 Scenery and result of 3D scan measurement utilizing underwater LiDAR.

7. おわりに

これからの市場拡大が期待される可視光 LD を用いた水中 LiDAR への取り組みについて紹介した。また水中 LiDAR を含む水中光無線技術を用いた水中ネットワークの構築を標榜する ALAN コンソーシアムについて簡単に紹介した。

水中 LiDAR への取り組みについては、まず基礎となる空間 LiDAR 開発状況について述べると共に、水中 LiDAR を開発する上で重要となる水中での光損失特性及び水中で用いる光デバイスについて言及した上で、水中 LiDAR の開発状況について紹介した。

水中計測実験では、青色 LD 光源を用いた水中 LiDAR を用いることにより水中での 3D 測距画像を

取得できることを示した。今後、実験で明らかになった問題点への対策及び再実験を行い開発した水中 LiDAR の完成度を向上させる予定である。

参考文献

- 1) P. F. McManamon: "Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology," *Opt. Eng.*, **51** (2012) 060901.
- 2) 榎井昇一, 手塚耕一, 矢吹彰彦, 佐々木和雄, 「3D センシング・技認識技術による体操採点支援」, 「電子情報通信学会誌」**103** (2020) [1] 5-14.
- 3) OPTRONICS ONLINE, 「自動運転向け LiDAR 市場, 2030 年に 4,959 億円へ」(2018 年 6 月 29 日付ニュース) <http://www.optronics-media.com/news/20180629/51823/>
- 4) 石橋正二郎, 「海中探査機が視る」海底の姿—海中 3D レーザースキャナーの開発」, 月刊オプトロニクス 2016 年 12 月号, **35** (2016) [12] 58-64.
- 5) T. Somekawa, S. Kurahashi, J. Kawanaka, and M. Fujita, "Development of the marine Raman lidar system", *Proc. SPIE 10791, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV*, 1079104 (2018).
- 6) 鈴木謙一, 島田雄史, 安達文幸: 「水中ネットワークを実現する ALAN コンソーシアム」, 信ソ大 ABS-1-16 (2019).
- 7) 島田雄史, 鈴木謙一: 「青色 LD を用いた水中 LiDAR」, *O plus E*, **42** (2020) [1] 40.
- 8) 「レーザー製品の安全基準」, JISC6802 (2014).
- 9) 内閣府 海洋資源の開発及び利用 (2019 年 7 月 3 日閲覧) <https://www8.cao.go.jp/ocean/kokkyouritou/yakuwari/yakuwari03.html>
- 10) 吉田 弘, 「海中電磁気の産業応用」, 信ソ大 2019 ABS-1-11 (2019-9).
- 11) T. Sawa, N. Nishimura, K. Tojo, and S. Ito: "Practical Performance and Prospect of Underwater Optical Wireless Communication", *IEICE Trans. Fundamentals*, E102.A (2019) 156.
- 12) B. S. Ooi, X. Sun, O. Alkhazragi, Y. Guo, T. K. Ng, and M-S. Alouini: "Visible diode lasers for high bitrate underwater wireless optical communications", *OFC2019*, paper M3I. 1 (2019).
- 13) Ainslie M. A., McColm J. G., "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, **103** (1998) [3] 1671-1672.
- 14) 土屋利雄, 「海水中の吸収損失 (a) と伝搬損失 (TL) の計算」, オンラインサイト「海洋音響/水中音響研究」<http://www.tsuchiya2.org/>
- 15) 藤井直道, 佐藤弘康, 陳 強, 石井 望, 高橋応明, 吉田 弘, 菅良太郎: 「海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究」, 信学技報 A-P2018-5 (2018-04).
- 16) 林 新: 「LED を用いた適応型水中可視光無線通信システムの研究」, 信総大 2016 AS-3-2 (2016).
- 17) 高橋成五, 武藤弘樹, 奥澤宏輝, 西川直希, 高山佳久: 「東京湾表層海水の可視光透過率の通年測定」, 信総大 2019 B-10-18 (2019).
- 18) 高橋成五, 山田 直: 「水中 LiDAR によるコンクリート片による 3D 測定」, 信ソ大 2019 ABS-1-19 (2019).

水中 LiDAR への取り組み (島田 雄史)

島田 雄史 1994年成蹊大学法学部法律学科卒業。証券会社勤務を経て、1995年株式会社応用光電研究室に入社。その後、株式会社オプトクエスト、富士通東日本デジタル・テクノロジー株式会社において主に光ファイバネットワーク向け機器の技術営業に従事。2004年に有限会社トリマティス(現 株式会社トリマティス)設立、代表取締役 CEO に就任。2018年 ALAN コンソーシアム代表に就任。

鈴木 謙一 1990年宇都宮大学大学院工学研究科修了、2009年北海道大学大学院博士後期課程修了、博士(情報科学)。1990年よりNTT研究所において超高速光伝送方式や光アクセスシステムの研究開発、IEEE802.3WG, 1904WGにおいてPONの標準化に従事後2019年より現職。水中LiDARや水中光無線通信技術の研究開発に従事。OSA, IEEE, 信学会会員。

月・惑星探査用ライダー

加瀬 貞二¹, 水野 貴秀², 荒木 博志³, 千秋 博紀⁴

¹日本電気株式会社 (〒183-8501 東京都府中市日新町 1-10)

²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1)

³国立天文台 (〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1)

⁴千葉工業大学 惑星探査研究センター (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

Lidar for Lunar and Planetary Exploration

Teiji KASE¹, Takahide MIZUNO², Hiroshi ARAKI³, and Hiroki SENSU⁴

¹NEC Corporation, 1-10 Nisshin Fuchu, Tokyo 183-8501

²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency,
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210

³National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

⁴Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016

(Received February 15, 2021)

Light Detection and Ranging (LIDAR) has become an indispensable technology for lunar and planetary exploration. LIDAR for lunar and planetary exploration in Japan starts with “HAYABUSA” and leads to “Martian Moons eXploration (MMX)” via “KAGUYA” and “HAYABUSA2”. Here are some of the LIDAR technologies that have been developed so far.

キーワード：ライダー，レーザ高度計，月惑星探査

Key Words: LIDAR, Laser altimeter, Lunar and Planetary Exploration

1. はじめに

2020年12月6日、小惑星「リュウグウ」のサンプルを格納したカプセルがオーストラリアのウメラ管理区域の地面に着地した。「はやぶさ2」が2回のタッチダウン成功後、無事地球へ帰還ミッションを完了した瞬間である^{†1}。初代「はやぶさ」¹⁾を始め、世界各国で深宇宙探査ミッションが競うように立ち上がっている中、月・惑星探査に必須の技術となっているのがライダー (Light Detection and Ranging: LIDAR) である。GPS等の航法支援が得られず、地球からのリアルタイムの制御が効かない遠い深宇宙で、探査機を自律的に機能させるためには、直接距離を計測できるライダーの役割が大きい。アポロ計画²⁾以降、ライダーは探査機の高度情報を取得し様々な天体の地形観測に利用されてい

る。日本では月探査の「かぐや」³⁾や、現在進行中の「火星衛星探査 (Martian Moons eXploration: MMX)」⁴⁾、米国では月探査の Lunar Reconnaissance Orbiter⁵⁾、小惑星探査の OSIRIS-REx⁶⁾、欧州では現在水星探査中の BepiColombo⁷⁾、インドや中国ではそれぞれ月探査の Chandrayaan-1⁸⁾や Chang'E-1⁹⁾等、各国の様々な探査機にライダーが搭載されている。

近年活発になっている月・惑星探査のライダー技術を以下に紹介する。

2. 「はやぶさ」LIDAR

初号機「はやぶさ」は2003年5月に打ち上げられた小惑星探査機である。2005年に小惑星「イトカワ」にタッチダウン後、2010年6月に地球へ帰還し「イトカワ」のサンプルを含むカプセルを投下後、大気圏に再突入した。LIDARは「イトカワ」近傍から運用開始し、高度約50kmから「イトカワ」を捉え、全球マッピングやタッチダウンまでの

^{†1}<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/>

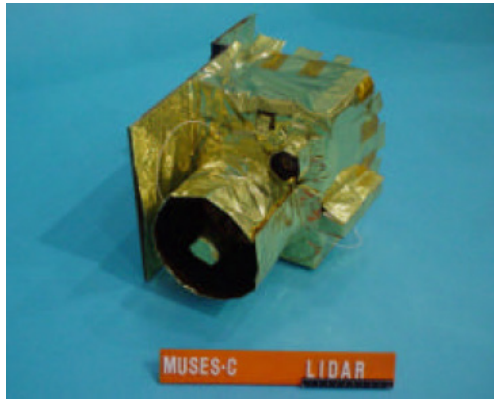


Fig. 1 HAYABUSA LIDAR.

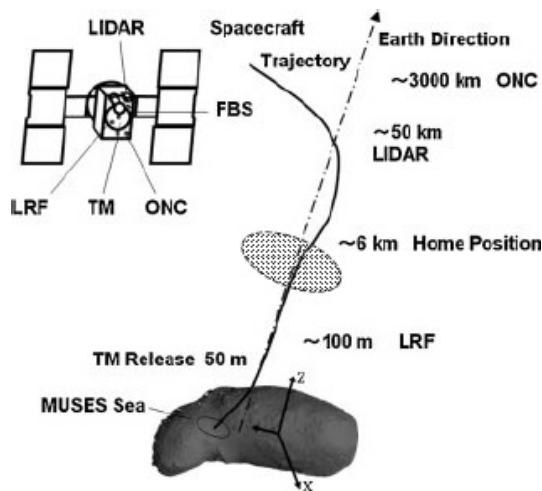


Fig. 2 Rendezvous and touchdown sequence for HAYABUSA.

航法支援を行った¹⁰⁾。

「はやぶさ」LIDAR から得られた知見は、その後の日本の月・惑星探査ミッションに大きく貢献している。厳しいシステム制約と耐環境性要求の中で 3.7 kg という装置質量を実現するため、レーザ、光学系及び電気回路の様々な点で工夫されている。

「はやぶさ」LIDAR の外観を Fig. 1 に、探査機と小惑星のランデブー及びタッチダウンシーケンスを Fig. 2 にそれぞれ示す。

Fig. 2 のようなタッチダウンまでの航法支援に利用される装置の特徴には、高高度から天体表面付近の至近距離までカバーする広いダイナミックレンジ要求がある。「はやぶさ」LIDAR の観測範囲は 50 m-50 km であり、受信パワー換算にして 60 dB 変化する中で、自律的にゲインを制御して測距精度を維持しなくてはならない。「はやぶさ」LIDAR では、光検出器の Avalanche Photodiode (APD) のゲインと複数のチャージアンプゲインの組み合わせを FPGA による制御で切り替え Automatic Gain Control (AGC) を実現している。

レーザ発振器はパルスエネルギー 8 mJ、パルス幅 14 ns、繰り返し 1 Hz の Q スイッチ Nd:YAG レーザであり、Q スイッチ素子には LiNbO₃ を使用している。受信望遠鏡は材料に Silicon carbide (SiC) を使用した口径 126 mm のカセグレン望遠鏡である。

「はやぶさ」LIDAR の軌道上でのレーザショット数は、約 3 か月間のミッション期間で約 400 万ショットである。

3. 「かぐや」レーザ高度計 (Laser Altimeter: LALT)

「かぐや」は 2007 年 9 月に打ち上げられた月探査機である。定常運用と後期運用の約 1 年半の観測を終え 2009 年 6 月に月面へ制御落下した。

「かぐや」のレーザ高度計 (Laser Altimeter: LALT) はノミナル高度 100 km (重力の影響で 50 km から 150 km の範囲で変化する軌道を定期的に約 100 km の高度に修正) から月面までの距離や反射率を観測し、月の詳細な地形図の作成に貢献した。それまで得られていなかった月の極域データ取得に成功し、月の正確な重心推定なども行われた^{11,12)}。

「かぐや」LALT は 2 つのユニットに分かれている (Fig. 3)。合計の質量は 19.1 kg、消費電力 44.2 W、距離分解能は 1 m である。光の送受信を行うレーザ送受信部 (LALT-TR) の内部構造を Fig. 4 に示す。



Fig. 3 KAGUYA LALT (Control electronics: LALT-E, Laser transmitter/receiver: LALT-TR).

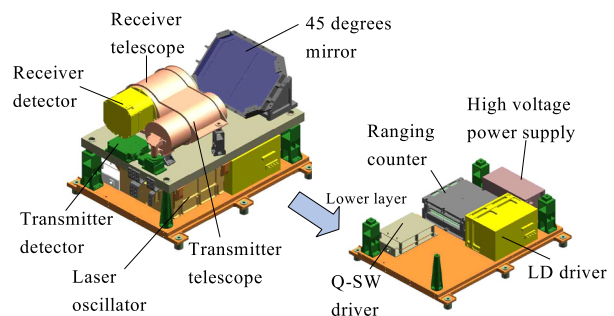


Fig. 4 Structure of LALT-TR.

LALTの特徴は100 mJクラスのレーザ出力である。「かぐや」の初期計画では傾斜角を持つ周回軌道であったことから、科学的に重要な極域を観測するため、LALTはミラーを可動させて斜めから測距する計画であった。このため高いレーザ出力と可動ミラーが必要であったが、「かぐや」の軌道が極軌道に見直されたことでミラーは45度に固定となった。レーザ出力は100 mJの設計を維持し、斜面や凹凸によって低下する受信パルスの波高値を補い、起伏の激しい月面高度データの取得率向上に貢献している^{13, 14)}。

レーザの送受信を行うLALT-TRはFig. 4に示すように2階建構造になっている。熱歪を回避したい光学系を上段に集め、下段に発熱する各種ドライバ回路を設置している。上段と下段の結合や、レーザ発振器及び送受信望遠鏡の設置にはキネマティックマウントを使用し、熱分布による歪みの影響を最小限にしている^{15, 16)}。

レーザ発振器はパルスエネルギー100 mJ、パルス幅17 ns、繰り返し1 HzのQスイッチNd:YAGレーザである。レーザ発振器の光学レイアウトをFig. 5に示す。

励起モジュールは強度分布の均一性を図るためYAGロッドの側面8方向にレーザダイオード(LD)を設置している。真空中で動作させることから、大気中評価時とのコーティングの特性変化を懸念し、無コーティングのポラライザを使用した。Qスイッチ素子には「はやぶさ」LIDARと同様にLiNbO₃を使用し、1/4波長板とポッケルスセルの1/4波長電圧動作の組合せで行うアクティブ方式である。レーザ発振器の寸法は150×170×83 mm、質量は約1.6 kgである。

送受信望遠鏡は炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製の鏡筒で一体化し、受信系は口径110 mmのカセグレン望遠鏡、送信系は10倍のガリレオ式望遠鏡を採用している。カセグレンの材料は石英である。

「かぐや」LALTの軌道上でのレーザショット数は、

18か月間のミッション期間で約2,200万ショットである。

4. 「はやぶさ2」LIDAR

「はやぶさ2」は2014年12月に打ち上げられ、2020年末にカプセルを分離し、一連のミッション完了後、次の目標に向かった。初号機と同様に「はやぶさ2」LIDARもタッチダウン直前までの航法支援と科学観測の両面で使用された¹⁷⁾。観測範囲は30 m-25 km、装置全体の質量は3.52 kg、消費電力18 W、距離分解能は0.5 mである。

「はやぶさ2」LIDARの外観をFig. 6に示す。

レーザ発振器はパルスエネルギー15 mJ、パルス幅7 ns、繰り返し1 HzのQスイッチNd:YAGレーザである。「はやぶさ」、「かぐや」の経験を踏まえ、真空中の熱歪に起因するLiNbO₃の焦電効果の影響を避けるため、Qスイッチにはパッシブ方式を採用した¹⁸⁻²⁰⁾。また、レーザ媒質とパッシブQスイッチ素子をボンディングしたコンポジット結晶を使用し、1つの光学素子で共振器を構成した(Fig. 7)。この共振器構成により、ミスアライメントや光学ダメージのリスクの低減に成功した。レーザ発振器の寸法は66×90×40 mm、質量は190 gである。レーザ発振器の外観をFig. 8に示す。

受信系のダイナミックレンジの確保は、初号機で苦労したゲイン切り替えの校正作業を避けるため、

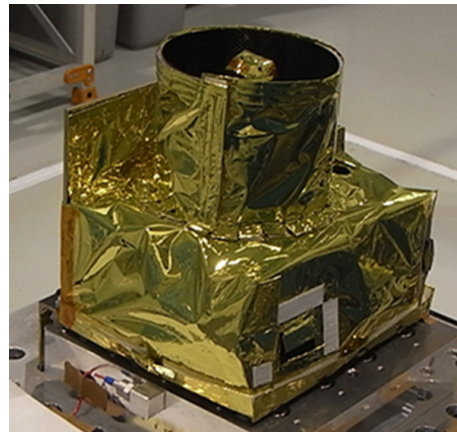


Fig. 6 HAYABUSA2 LIDAR.

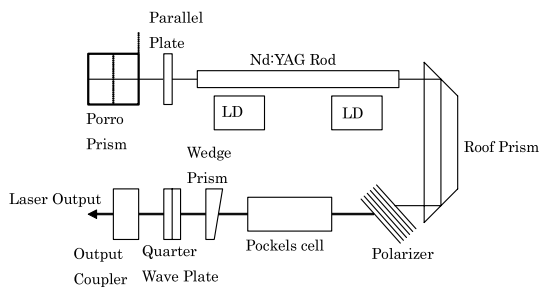


Fig. 5 LALT laser oscillator optical layout.

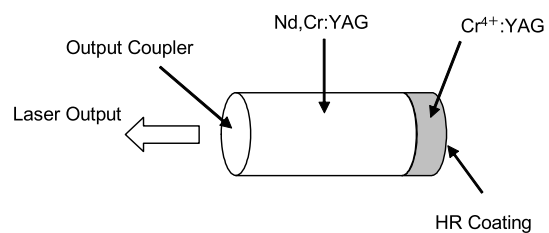


Fig. 7 Structure of resonator.

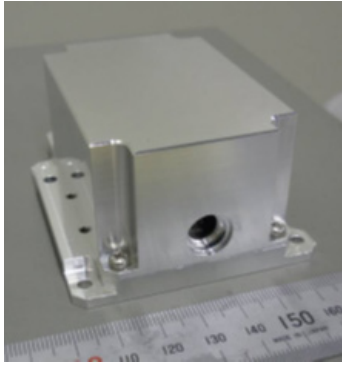


Fig. 8 HAYABUSA2 LIDAR laser oscillator (Engineering model).

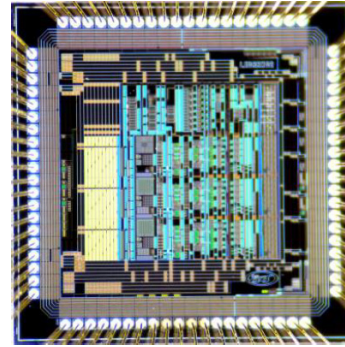


Fig. 9 Bare chip of LIDARX (Prototype).

光学系を2つに分けてそれぞれの検出器でゲイン調整を行う方式とした。遠距離系と近距離系の光学系には1345:1の面積比をつけ、APDの逆バイアス電圧を2段階に切り替える。これにより受信系のゲインを4段階に可変でき、30 mから25 kmの観測範囲で測距精度を確保した。ゲイン切り替えは、受信レベルを検出してAGCにより自律的に行った。

遠距離系の受信光学系は開口127 mm（遮蔽ロスを考慮した有効開口で110 mm）のカセグレン望遠鏡である。材料には宇宙用に開発されたNew-Technology Silicon Carbide (NT-SiC)²¹⁾を使用した。送信系には3倍のエクスパンダを設置し透過後のビーム拡がり角は2.4 mradである。

運用モードには通常の測距モードの他、科学観測を目的としたダストカウントモードと、地球の衛星レーザ測距 (Satellite Laser Ranging: SLR) 局と光リンク実験を行う光リンクモードがそれぞれある。

「はやぶさ2」LIDARの軌道上でのレーザショット数は2021年1月現在で約711万ショットである。

5. 火星衛星探査 (MMX) 用 LIDAR

MMXは現在開発中の探査機であり、2024年の打ち上げが計画されている。火星衛星（フォボス）に着陸機を降しサンプルリターンを行う計画である。MMX LIDARの観測範囲は100 mから100 kmであり、「はやぶさ2」と同程度の60 dBのダイナミックレンジが要求されている²²⁾。

MMX LIDARは「はやぶさ2」LIDARの設計を流用しつつ、レーザ出力の増大と受信回路の改良を行っている。上述の通り「はやぶさ2」では2系統の光学系としたが、JAXAで開発中であった広ダイナミックレンジの専用IC（集積回路）LIDARX²³⁾が完成し、1系統化が実現した。

LIDARXのベアチップの外観をFig. 9、回路構成をFig. 10にそれぞれ示す。

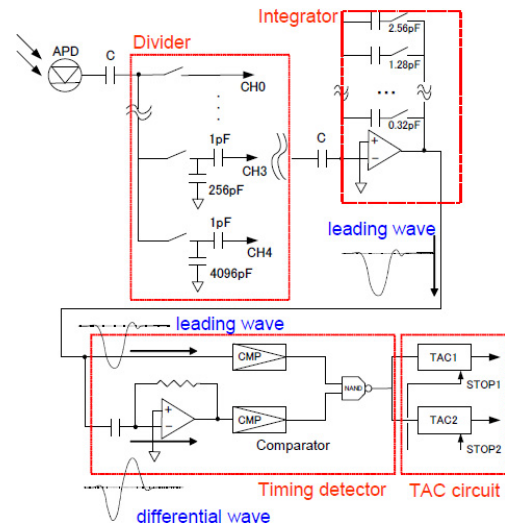


Fig. 10 Circuit structure.

LIDARXはDivider, Integrator, Timing detector及びTime-to-analog converter (TAC) circuitで構成される。Dividerは測距距離で変わるAPD出力の電荷量を適切な容量を選択して分割する。入力電荷はIntegratorで電流-電圧変換されLeading waveを生成する。Leading waveはTiming detectorの微分回路でDifferential waveに変換され、そのゼロクロス点が信号タイミングとして検出される。検出されたタイミングはTAC circuitでアナログ信号に変換され、距離がアナログレベル信号として出力される。TAC circuitを使用することで、宇宙用デバイスでは扱いが困難な高速のクロックを使用することなく、高い距離分解能を実現できる。

MMX LIDARは「はやぶさ2」LIDAR同様にパッシブQスイッチ方式のNd:YAGレーザである。レーザ出力20 mJ以上、10 ns以下、繰り返し1 Hzであり、装置質量4.7 kg以下、距離分解能0.1 m以下を目標としている。

現在、クリティカル部の部分試作評価を終え、フライトモデル製作の前に行う技術評価用のエンジニアリングモデルの開発を進めている²⁴⁾。

6. おわりに

「はやぶさ」から始まり「かぐや」, 「はやぶさ2」を経て「MMX」につながる日本の月・惑星探査用ライダーについて, 培われた技術の一部を紹介した。探査機のバス機器として, また科学観測の観測機器として, 月・惑星探査にライダーが不可欠な技術になっている。これらの技術が, 今後広がる様々な宇宙観測ミッションに活用されることを期待する。

参考文献

- 1) S. Abe, T. Mukai, N. Hirata, O. S. Barnouin-Jha, A. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, T. Hashimoto, K. Hiraoka, T. Honda, T. Kubota, M. Matsuoka, T. Mizuno, R. Nakamura, D. J. Scheeres, and M. Yoshikawa: "Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa", *Science* **312** (2006) 1344.
- 2) W. M. Kaula, G. Schubert, R. E. Lingenfelter, W. L. Sjogren, and W. R. Wollenhaupt: "Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure", *Proceedings of the Fifth Lunar Conference*, **3** (1974) 3049.
- 3) H. Araki, S. Tazawa, H. Noda, Y. Ishihara, S. Goossens, S. Sasaki, N. Kawano, I. Kamiya, H. Otake, J. Oberst, and C. Shum: "Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry", *Science* **323** (2009) 897.
- 4) 川勝康弘, 倉本 圭, 大嶽久志, 今田高峰, 馬場 肇: "火星衛星探査計画 MMX の探査シナリオと概要", 第 64 回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2020) 3D01.
- 5) L. Ramos-Izquierdo, V. S. Scott III, J. Connelly, S. Schmidt, W. Mamakos, J. Guzek, C. Peters, P. Liiva, M. Rodriguez, J. Cavanaugh, and H. Riris: "Optical system design and integration of the Lunar Orbiter Laser Altimeter", *Applied Optics* **48** (2009) 16.
- 6) M. G. Dalya, O. S. Barnouin, C. Dickinson, J. Seabrook, C. L. Johnson, G. Cunningham, T. Haltigin, D. Gaudreau, C. Brunet, I. Aslam, A. Taylor, E. B. Bierhaus, W. Boynton, M. Nolan, and D. S. Lauretta: "The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) Investigation and Instrument", *Space Sci Rev.* **212** (2017) 899.
- 7) R. Kallenbach, E. Murphy, B. Gramkow, M. Rech, K. Weidlich, T. Leikert, R. Henkelmann, B. Trefzger, B. Metz, H. Michaelis, K. Lingenauber, S. DelTogno, T. Behnke, N. Thomas, D. Piazza, and K. Seiferlin: "Space-qualified laser system for the BepiColombo Laser Altimeter", *Applied Optics* **52** (2013) 36.
- 8) J. A. Kamalakar, K. V. S. Bhaskar, A. S. Laxmi Prasad, R. Ranjith, K. A. Lohar, R. Venketeswaran, and T. K. Alex: "Lunar ranging instrument for Chandrayaan-1", *J. Earth Syst. Sci.* **114** (2005) 6.
- 9) Q. Huang, J. S. Ping, M. A. Wiczorek, J. G. Yan, and X. L. Su: "Improved global Lunar topographic model by Chang'E-1 laser altimetry data", *Proc. 41st Lunar and Planetary Science Conference*, (2010) 1265.
- 10) T. Mizuno, T. Katsuhiko, E. Okumura, and M. Nakayama: "Evaluation of LIDAR System in Rendezvous and Touchdown Sequence of Hayabusa Mission", *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences* **53** (2010) 179.
- 11) H. Noda, H. Araki, S. Goossens, Y. Ishihara, K. Matsumoto, Tazawa, N. Kawano, and S. Sasaki: "Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter", *Geophysical Research Letters* **35** (2008) L24203.
- 12) K. Matsumoto, S. Goossens, Y. Ishihara, Q. Liu, F. Kikuchi, T. Iwata, N. Namiki, H. Noda, H. Hanada, N. Kawano, F. G. Lemoine, and D. D. Rowlands: "An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features", *Journal of Geophysical Research* **115** (2010) E06007.
- 13) 田澤誠一, 加瀬貞二, 荒木博志: "かぐや搭載レーザー高度計 (LALT) のレーザー出力変化", 第 53 回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2009) 3D01.
- 14) 田澤誠一, 荒木博志, 野田寛大, 石原吉明, 坪川恒也, 河野宣之, 佐々木晶, 加瀬貞二, 村田 茂: "かぐや搭載レーザー高度計の初期運用報告", 第 26 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2008) 124.
- 15) 田澤 誠, 荒木博志, 野田寛大, 石原吉明, 坪川恒也, 河野宣之, 浅利一善, 右田恵美子, 佐々木晶, 加瀬貞二, 村田 茂, 國森裕生, 大嶽久志: "かぐや (SELENE) 搭載レーザー高度計による観測", *測地学会誌* **55** (2009) 2.
- 16) 加瀬貞二, 椎名哲男, 倉田賢一, 神原文博, 堀田智充, 村田 茂: "かぐや搭載レーザー高度計の地上試験結果", 第 26 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2008) 122.
- 17) T. Mizuno, T. Kase, T. Shiina, M. Mita, N. Namiki, H. Senshu, R. Yamada, H. Noda, H. Kunimori, N. Hirata, F. Terui, and Y. Mimasu: "Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa2", *Space Science Reviews* **208** (2017) 33.
- 18) M. E. Kushina, M. G. Grote, C. E. Wiswall, D. A. Hall, and J. B. Russek: "Clementine: Diode-pumped laser Qualification", *Proc. SPIE* **2379** (1995) 137.
- 19) 中山通雄: "宇宙用半導体レーザー励起 YAG レーザ", *東芝レビュー* **56** (2001) 6.
- 20) 加瀬貞二, 黛 克典, 川原章裕, 卯尾匡史, 大島 武, 椎名哲男, 秋山哲夫, 水野貴秀, 三田 信, 並木則行, 野田寛大, 山田竜平, 千秋博紀, 國森裕生: "「はやぶさ2」LIDAR の開発", 第 64 回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2014) 3C17.
- 21) K. Tsuno, K. Oono, H. Irikado, T. Ueda, S. Suyama, and Y. Itoh: "NT-SiC (new-technology silicon carbide): application for space optics", *Proc. SPIE* **5868** (2005).
- 22) 千秋博紀, 水野貴秀, 小西晃央, 梅谷和弘, 名倉 徹, 松本晃治, 野田寛大, 生瀬裕之, 黛 克典, 加瀬貞二, 樫根久佳: "火星衛星探査計画 MMX LIDAR 開発状況報告", 第 64 回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2020) 3D13.
- 23) T. Mizuno, H. Ikeda, and K. Kawahara: "Pulse Detection IC for a Laser Altimeter Using CMOS Technology", *Proc. The 28th International Symposium on Space Technology and Science* (2011) d-77.
- 24) 生瀬裕之, 黛 克典, 加瀬貞二, 川原章裕, 千秋博紀, 水野貴秀, 小西晃央, 梅谷和弘, 名倉 徹: "火星衛星探査機 (MMX) 用レーザー高度計 (LIDAR) の部分試作評価", 第 63 回 宇宙科学技術連合講演会講演集 (2019) 2B09.

月・惑星探査用ライダー（加瀬 貞二）

加瀬 貞二 1992年岩手大学工学部電子工学科卒業。同年、日本電気(株)入社から現在（同社電波・誘導事業部）までレーザー装置開発に従事。近年は、「かぐや」、「はやぶさ2」等の月・惑星探査用ライダーを始め、衛星レーザー測距（SLR）や宇宙機器のランデブドッキング用センサ等の宇宙用ライダー開発に携わる。レーザセンシング学会会員、応用物理学会会員。



●●● 編集後記 ●●●

今号から本学会誌の編集委員を務めさせていただくことになりました佐藤です。私だけでなく、他にも新しい編集委員の方々が加わり、今回が新しい編集委員会での初めての学会誌発行となりました。新体制での最初の仕事が今号の特集記事の企画でしたが、前号までの特集の流れも考慮した上で、今回は「ライダー技術 I」と題して、ライダー分野の第一線で活躍する国内メーカーによる最新の計測技術、要素技術及び応用技術を集めました。巻頭言では、三菱電機の平野嘉仁様に、ご自身のライダー開発のご経験を交えながら国内でのライダー開発の歩みや海外との開発競争、ライダー技術の今後の展望について解説していただきました。解説記事では、レーザ光源技術からライダーの製品化技術、ライダーのセキュリティ分野への応用や水中及び宇宙をフィールドとした応用に至るまで、様々な視点からレーザセンシング技術の研究開発動向をご紹介いただきました。今号の特集記事からもお分かりの通

り、本学会には、多くのメーカーの技術者・研究者の皆様にご参加いただいております。今後さらに、産学官問わず全てのレーザセンシング分野に関わる皆様に、成果発表あるいは情報交換の場として本学会誌をご活用いただきたいと考えており、現在、編集委員会では、そのために何をすべきか色々とアイデアを出し合いながら検討しているところです。このような編集委員会の会議では、コロナ禍で否応なしに身に付いてしまったオンライン会議のスキルが役立っておりますが、本務での新型コロナウイルス対応に追われながらの編集作業となり、その点は苦勞しました。しかし、もっと苦勞されたのはこのような状況の中、記事をご執筆いただいた著者の皆様、査読にご協力いただいた皆様かと思えます。今号の発行にあたりご協力いただきました皆様方に改めて感謝申し上げます。

編集委員会 副委員長 佐藤 篤

■編集兼発行人：レーザセンシング学会 (<http://laser-sensing.jp/>)

■企画：レーザセンシング学会編集委員会

石井昌憲，佐藤 篤，西澤智明，柴田泰邦，朝日一平，境澤大亮，津田卓雄，矢吹正教，杉本幸代，吉田 智

■連絡先：〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部
第3研究室気付 レーザセンシング学会編集委員会

■電子メール：lrsj-edit_office@laser-sensing.jp