

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

Hiddenobu 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

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、大気のよう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、ライダーは大気のよう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光源として、LD 励起単一周波数 Nd:YAG レーザ (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、高いレーザ出力が必要となるが、レーザ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 をレーザ材料として用いた単一周波数高ピークパルスレーザを開発し¹³⁾、波長1.5 μm 帯のパルスレーザでは初めて、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ることができる。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)

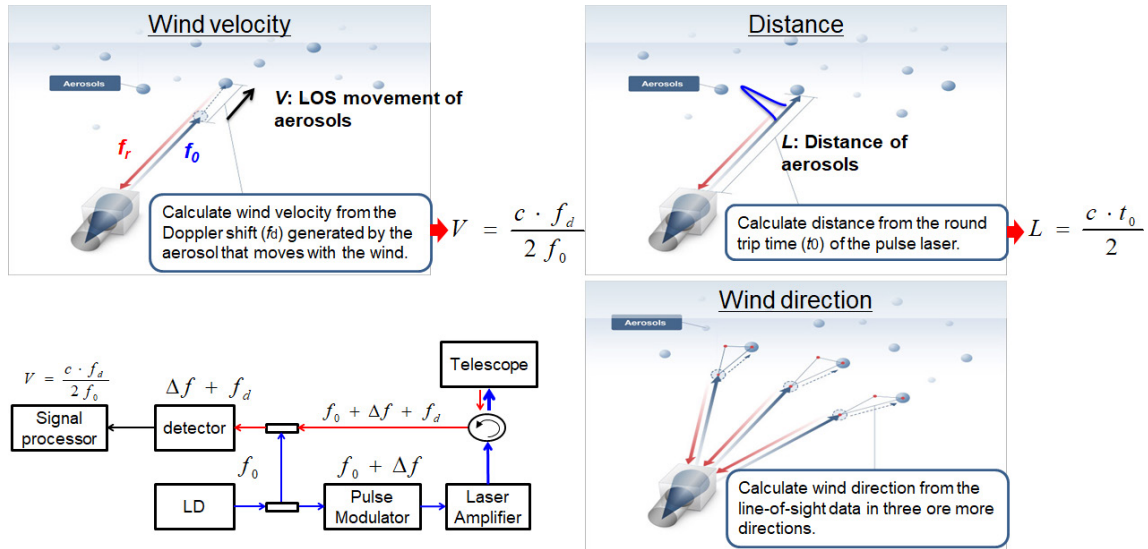


Fig. 1 Measurement principle and configuration of a coherent Doppler LIDAR.

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、ウィ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、ウィ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 クラスのレーザ出力が要求される。

そこで我々は、固体レーザ媒質を用いた高利得平面導波路型レーザ増幅器を開発した。このレーザ増幅器の導波路は、Er,Yb 添加リン酸ガラスレーザ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

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. 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 micro meter band	
Laser output	10 $\mu\text{J} \times 16 \text{ kHz}$	
Size	W 0.2 $\times$ H 0.4 $\times$ D 0.4 m W 0.6 $\times$ H 0.3 $\times$ 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 $\times$ H 0.3 $\times$ 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光源 (1531.383 nm) と、水蒸気非吸収波長に合わせたレーザ光源 (1531.575 nm) の二つの波長のレーザ光源を、

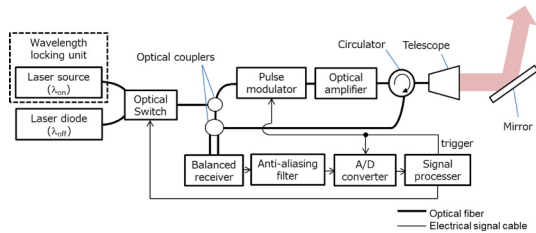


Fig. 6 Schematic of 1.53-μm coherent DIAL.

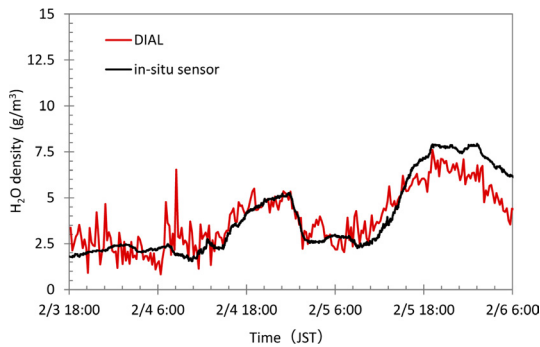


Fig. 7 Comparison with DIAL and in-situ sensor H₂O data.

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. Shamaï 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 sing 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. Atoms. 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。

