

風力発電向けナセル搭載 ドップラーライダ試作機

高林幹夫* 小竹諭季***
梶山 裕** 柳澤隆行**
崎村武司*

Nacelle Mounted Doppler LIDAR Prototype for Wind Energy

Mikio Takabayashi, Yutaka Kajiyama, Takeshi Sakimura, Nobuki Kotake, Takayuki Yanagisawa

要 旨

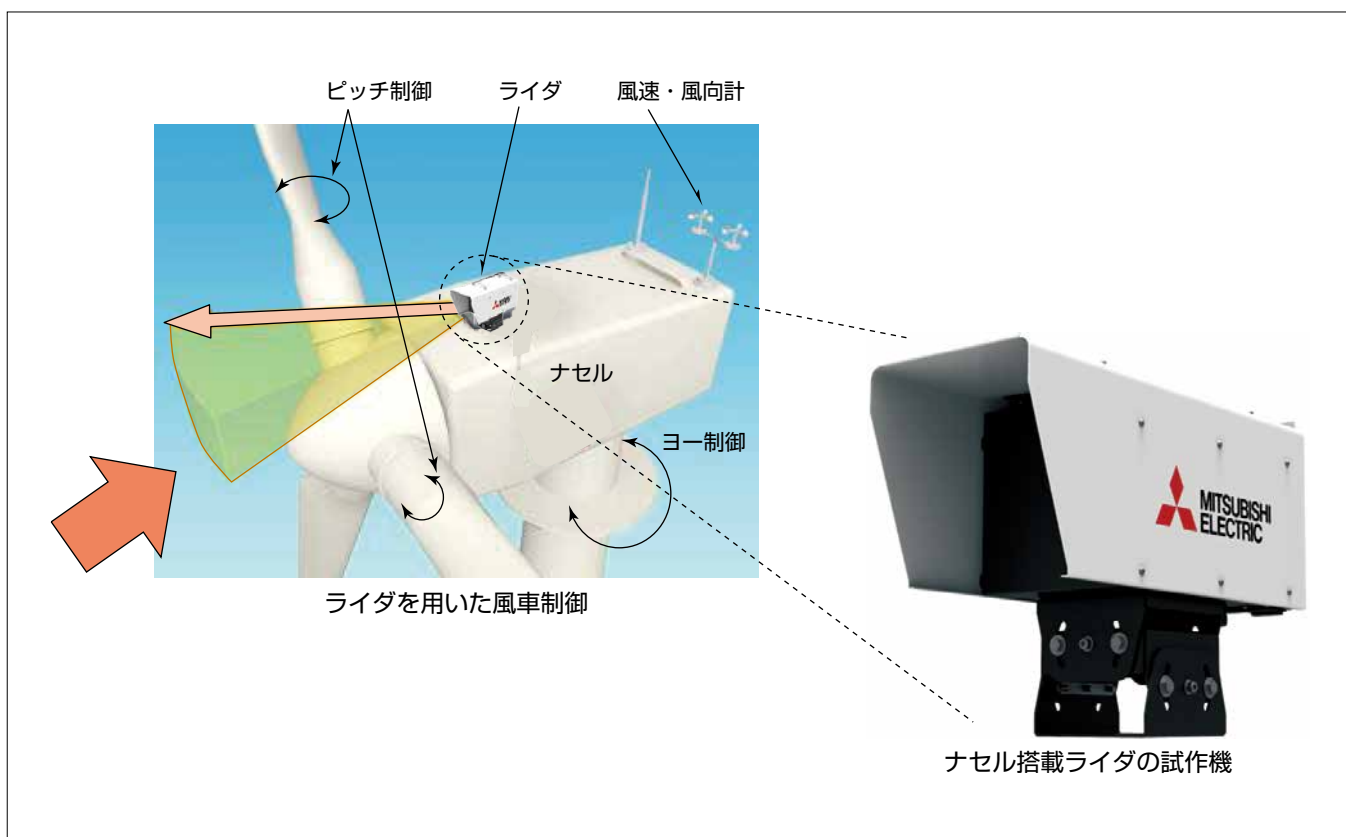
風計測ドップラーライダ(Light Detection And Ranging : LIDAR)は、大気中のエアロゾルに対してレーザ光を送受信し、受信光のドップラー周波数シフトから風速を計測するリモート風センサである。昨今、風力発電分野での風計測ドップラーライダの活用が進んでいる。特に近年では、風車のタワー上に設置される発電部を収納したナセルと呼ばれる部分にドップラーライダ(以下“ライダ”という。)を搭載するナセル搭載ライダの実用化に向けた評価が進んでいる。ナセル上に搭載されたライダで風車への到来風を事前に測定することで、ヨー制御による発電効率の向上や、ピッチ制御による風車各部の過重負荷の低減、風車

長寿命化に寄与することが期待されている。

また、ナセル搭載ライダは既存風車への設置も想定されており、可搬性も想定した構造が好ましい。

今回、風車制御に必要な性能と、コンパクトで軽量を両立させるナセル搭載ライダを開発した。コンパクト化の鍵は、主要光部品を1枚の基板上で実装する統合光送受信ボードと、複数のビームを一つの光学系で構成する単一・多方向送受光学系である。

今後、開発した試作機で第三者評価を行い、性能評価を進めていく。また、実際に風車に搭載し、風車制御と接続させることでフィールド実証も進めていく。



ライダを用いた風車制御とナセル搭載ライダの試作機

風力発電用風車のナセルと呼ばれる部分にライダを搭載し、ライダによって到来風を測定して流入風を予測し、風車制御を行う。ヨー制御は、ナセル搭載ライダによって予測された流入風向に対して正対するよう制御することで発電効率を向上させる。ピッチ制御は、予測された流入風に対してピッチをフィードフォワード制御することで風車のタワー、ブレード、ロータへの荷重負荷を低減する。

1. ま え が き

風計測ライダは、大気中のエアロゾルに対しレーザ光を送受信し、受信光のドップラー周波数シフトから風速(風に乗って移動するエアロゾルの速度)を計測するリモート風センサである。このセンサの風力発電での利用が進んでおり、ウィンドファーム建設前後の風況調査、風車出荷前及び設置後の評価等、利活用の幅が拡大している。近年では、風車のタワー上に設置される発電部を収納したナセルと呼ばれる部分にライダを搭載するナセル搭載ライダの実用化に向けた評価が始まっている。

ナセル搭載ライダを用いて風車前方の風を計測し、その値に基づき風車を制御することで発電を高効率化する技術は、2000年代中頃から理論実証や実験が開始された⁽¹⁾。これらの経験によって、ナセル搭載ライダが風車のヨー制御による発電高効率化、ピッチ制御による風車荷重負荷低減とそれに伴う風車の長寿命化に寄与することが理論、実験から実証されている。

ヨー制御は、ナセル上に既設置されている風向計を用い流入風に対し正対するよう制御することで発電効率を向上させる。しかし、ナセル上での風向計では、ブレード回転によって風車後方に風の乱れが発生し、正確な流入風向の計測は困難である。これに対しナセル搭載ライダを用いて乱れを受けない風車前方領域で流入風向を正確に計測し、この計測値に基づきヨー制御を行うことで、発電量向上が可能になる⁽²⁾。

一方、ピッチ制御は、ナセル搭載ライダを用いて到来風によって流入風を予測し、ピッチをフィードフォワード制御する。この制御によって、風車(タワー、ブレード、ロータ)への荷重負荷を低減することが可能になり、風車の長寿命化に貢献する⁽³⁾。さらに、風車出力の安定化に寄与でき、これが実現できれば、実運用時の出力上限値を風車定

格出力近くまで引き上げ、年間発電量向上への寄与も期待できる⁽⁴⁾。

このようなナセル搭載ライダによる制御は、効果は検証されていたものの、開発当初は風車の発電出力も数百kWと小さい一方で、ライダ装置が大きくて価格も高いことから、学術的検証にとどまっていた⁽²⁾。しかし、2010年代に入り、発電出力が3MWから洋上では6~7MWクラスの風車が登場し、費用対効果の視点からもナセル搭載ライダの有益性が認められ始めており、期待が高まっている。

一方、当社は、2003年にはナセル搭載ライダの実証実験を開始し、2014年には風況計測用の小型ライダを商用化してきた(図1)⁽⁵⁾。また、2015年には9ビームのナセル搭載ライダを学術機関向けに開発・納入してきた実績を持つ⁽⁶⁾。今回、これらの実績、技術を活用し、商用化を見据えたより軽量、コンパクトなナセル搭載ライダの試作機を開発した。

2. 装 置 概 要

図2にナセル搭載ライダ試作機の外観を示す。このライダは、W290×H300×D670(mm)の筐体(きょうたい)内部に、光送受信部と演算部を内蔵した一体型構成であり、質量は18kg(アライメント治具を除く)である。このようなコンパクトな構成は、後述する統合光送受信ボードと単一・多方向送受光学系によって実現した。

また、このライダではパルス方式を採用している。通常ライダは、CW(Continuous Waves)とパルスの2方式があり、前者が前方の単一距離だけの風計測であるのに対し、後者は複数距離の風計測(風速分布計測)が可能である。

2.1 主 要 性 能

ナセル搭載ライダ試作機の主要性能を表1に示す。このライダは40mから400mでの4方向の視線方向風速を計測する。また、それらの視線方向風速を合成することによって、各レンジでの風向を観測することが可能である。



図1. 風況観測用ライダ

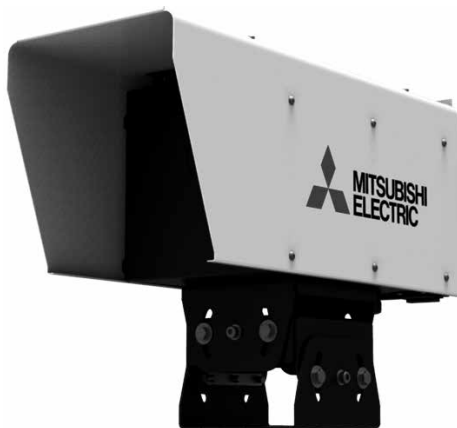


図2. ナセル搭載ライダ試作機

表 1. ナセル搭載ライダ試作機の主要性能

項目	性能
観測距離	40~400m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m
走査パターン	スイッチ切替方式
ビーム送受方向数	4
レンジ数	7レンジ
出力/表示データ	・各レンジでの視線方向風速 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	-10~60m/s
風向風速更新周期	最速1sec以内
レーザ波長	1.55 μ m帯の単一波長(JIS C 6802 クラス1Mに相当)
耐環境性	IP66, 重塩害仕様
本体寸法・質量	・W290×H300×D670(mm) (突起物は除く) ・18kg(アライメント治工具は除く)
電源条件	DC+24V $\pm$ 10%
有効データ取得率向上	環境適応制御アルゴリズムを実装

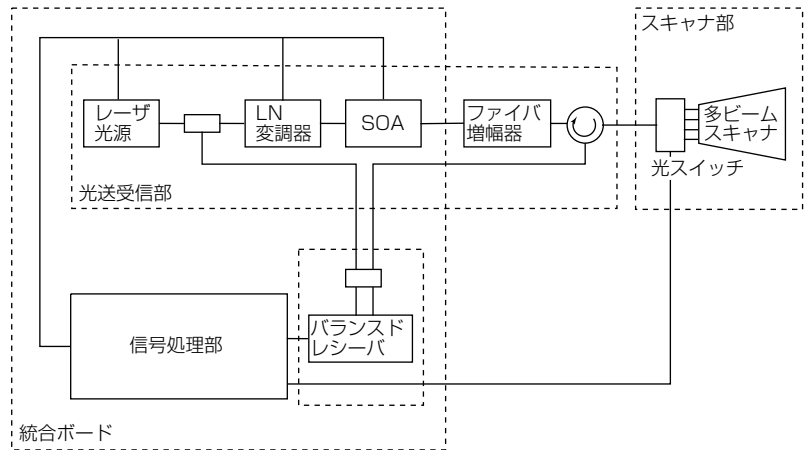


図 3. ナセル搭載ライダ試作機のシステム構成

4方向の観測は、固定ビームを電氣的に切り替えてそれぞれのビーム方向からの視線方向速度を計測する。従来の機械的スキャンに比べて瞬時に計測が可能であり、駆動系をなくしたことでメンテナンスフリー化と長寿命化を実現している。また、アイセーフ波長(近赤外、不可視)のクラス1Mのレーザを用いており、目の安全も考慮した装置となっている。さらに、このライダでは、環境適応制御アルゴリズムを実装している。一般にライダの測定可能距離は、SNR(Signal to Noise Ratio)に依存し、その値は大気中のエアロゾル濃度等の大気環境に影響される⁽⁷⁾。そこで、計測された距離-SNRに対して、所望の測定距離の風速値を得るために最適な積算回数を自律的に調整する“環境適応制御”が可能なアルゴリズムを開発した⁽⁸⁾。このアルゴリズムは風況観測用ライダに実装しているが、同様の機能をこのライダにも適用し、高可用性を実現している。

3. 装置の特長

図3に今回開発したライダのシステム構成を示す。このライダは、主に光送受信部、信号処理部、スキャナ部で構成している。今回、光送受信部の一部と信号処理部を1枚の基板に集約した統合光送受信ボードと、複数ビームを一つの光学系で構成する単一・多方向送受光学系を開発した。これらの成果を用いることで、2章で述べたとおり軽量・小型化を実現している。

3.1 統合光送受信ボード

図4に試作した統合光送受信ボードの外観を示す。この装置は、主に光送受信部と信号処理部で構成している。150×250(mm)の基板にサーキュレータとファイバ増幅器を除く光送受信部と、光部品制御と観測データ処理を行う信号処理部を実装している。

ここで光送受信部はレーザ光源とLN(ニオブ酸リチウム)変調器、半導体光増幅器(SOA)で構成している。一般

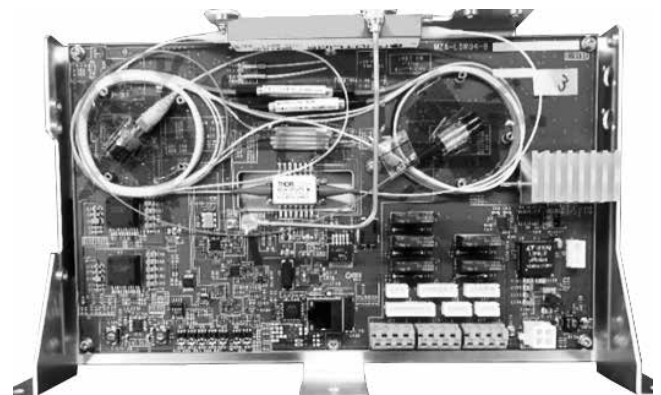


図 4. 試作した統合光送受信ボード

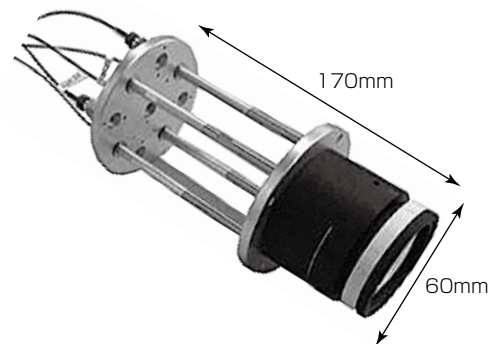


図 5. 単一・多方向送受光学系試作機

にパルス方式ライダでは、音響光学変調器(AOM)が用いられているが、フットプリントが大きくて小型化と実装で不利である。そこでSOAとLN変調器の構成によってパルス化を実現する構成を採用している。SOAだけのパルス変調では、変調時の消光比の問題によって受信信号に妨害信号が混入するが、LN変調器によるセロダイン変調を付加することでこの問題を解決している⁽⁹⁾。

3.2 単一・多方向送受光学系

図5に試作した単一・多方向送受光学系の外観を示す。従来の送受光学系は1台の光学系について、1方向のレー

ザ送受を行うものであった。これに対し、この試作機(単一・多方向送受光学系)には、取り付けるファイバコネクタの位置によってレーザ射出方向の切替えを可能にする機能を付加した。つまり、従来の性能(波面収差, 損失, ビーム径, 有効開口径)を持ちつつ, 送受光学系に係る必要体積を, 4ビームの場合1/4にできる⁽¹⁰⁾。今回のライダシステムのビーム送受方向数は4であるが, コネクタ数によって走査数を可変にできるため, 機能拡張が容易であることも単一・多方向送受光学系のメリットと言える。

4. 試作評価

図6に試作したナセル搭載ライダによる観測風景を示す。今回2台を製作し, それぞれの風速測定結果を比較して両者が一致することを確認した(図7)。また観測距離400mを実現できていることも確認した。



図6. ナセル搭載ライダ試作機による観測風景

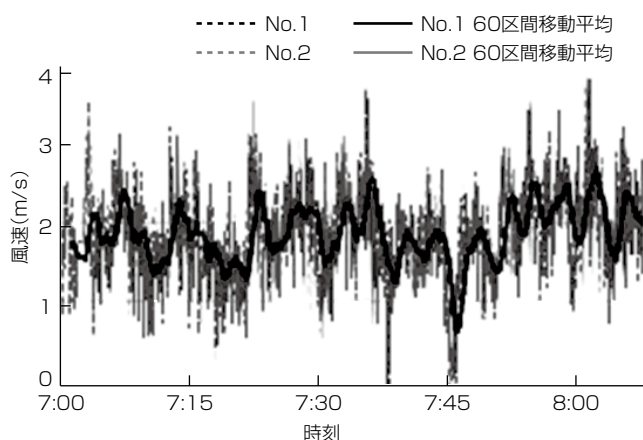


図7. 2台のナセル搭載ライダによる風速測定比較

5. むすび

風力発電向けナセル搭載ライダの試作機について述べた。今後, 第三者評価を行うとともに, 実際に風車上に搭載し, 風車制御との接続を行うことで発電効率向上, 風車荷重負荷低減などの効果検証を行っていく。

参考文献

- (1) Schlipf, D., et al.: Field Testing of Feedforward Collective Pitch Control on the CART2 Using Nacelle-Based Lidar Scanner, Journal of Physics, Conference Series, **555**, 012090 (2014)
- (2) Fleming, P.A., et al.: Field-test results using a nacelle-mounted lidar for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment, Journal of Physics, Conference Series, **524**, 012002 (2014)
- (3) Scholbrock, A.K., et al.: Field-Testing LIDAR Based Feed-Forward Control on the NREL Controls Advanced Research Turbine, Proc. of 51st AIAA Aerospace Science Meeting, including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2013)
- (4) Barber, S.K., et al.: The effect of wakes on the fatigue damage of wind turbine components over their entire lifetime using short-term load measurements, Journal of Physics, Conference Series, **753**, 072022 (2016)
- (5) 三菱電機ドップラーライダシステム
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/lidar/>
- (6) Kamada, Y., et al.: Status of research and development for lidar-assisted wind turbine control in Japan, 19th CLRC (2018)
- (7) Kameyama, S., et al.: Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for win sensing, Appl. Opt, **46**, No.11, 1953~1962 (2007)
- (8) 梶山 裕, ほか: 風況観測用ライダ“DIABREZZA”, 三菱電機技報, **89**, No.3, 182~186 (2015)
- (9) Haraguchi, E., et al.: Pulsed serrodyning technique as applied to coherent laser transmitter for wind sensing, 18th CLRC (2016)
- (10) Kotake, N., et al.: Coherent Doppler LIDAR system switching the LOS direction by wavelength of laser, 19th CLRC (2018)