

風力エネルギーを後押しする 風力タービンライダ

ゲイル・オーバートン

光検出と測距(ライダ)技術の最もエキサイティングな商用アプリケーションの1つは、現在の風力タービンの性能を最適化するために風速と風向を評価することだ。

光検出と測距(ライダ)技術は、大気センシング、地形と農業の評価、3次元(3D)産業マッピングと空間解析などの広範囲に応用されている。しかしながら、ライダの最もエキサイティングな用途の1つは、地球の再生可能エネルギーの将来において重要な役割を果たすと考えられる風力タービンの性能を向上させるために、風速と風向を評価することである。

多くの商用の風力発電施設(ウインドファーム)は風力タービンライダなしで稼働しているが、科学界は風力エネルギー産業部門において、徐々に勢いを増す、すなわち出力を上げるようなより小型でより低価格、そしてよりロバストなシステムを作り続けている。

エネルギー生産性の向上

ドイツのボンに本部を置く世界風力エネルギー協会(www.wwindea.org)によれば、風力タービンの世界市場は指数関数的成長を続け、2011年には、全規模が史上最高の42GWに達した。これは世界の総風力エネルギー容量(239GW)または総電力需要の3%に相当する(図1)。

風力評価データは、地上ライダステーションの設置に最適なウインドファームの場所を予測するために利用されている一方、風力タービンのナセル、スピナー、ブレードなどに搭載されたレーザベ

ースの風速計または風力タービンライダシステムはタービンプレード前方の風速と風向を予測することによって風力エネルギーの生産性を高める。これによるエネルギー増加は普通5%以下であるが、いくつかのメーカーは10%またはそれ以上改善できると主張している⁽¹⁾。

今日の商用風力タービンドップラーライダシステムはスコットランドのナチュラル・パワー社(Natural Power)からのZephIRのような連続波(CW)システムと、仏アベント・ライダ・テクノロジー社(Avent Lidar Technology)製のWind Irisや仏キャッチ・ザ・ウィンド社(Catch the Wind:CTW)製のVindicator Optical Control Systemなどのパルス波システムとがある。

連続波ライダ

再生可能エネルギー(風力、波、潮汐、バイオマス)のコンサルタントと製造を業務とするナチュラル・パワー社の製品開発・販売ディレクターであるアレックス・ウッドワード氏(Alex Woodward)は、「風力エネルギーへのライダの応用は1980年代に開始されたが、当時のシステムは本格的に導入するにはあまりにも大型で、高価であった」と語っている。「しかし、1990年代の情報通信ブームを契機に光ファイバと他の部品を利用した新しい世代のライダが

登場し、これと同時に風力産業が急成長したことによって、状況は劇的に変化した。最初の全ファイバライダシステムは1990年代後期に実証され、2003年の初めには商用のプロトタイプユニットであるZephIRがタービンに搭載され、ローター面前方の風速検出を実証した」と付け加えた。

2003年以来、ZephIRシリーズの約600台のライダ配備が商用風力タービン用に、複数の秘密裡の搭載例も含めて委託された。元来英QinetiQ社によって開発されたZephIRを、現在はナチュラル・パワー/ゼフィア社(Natural Power/Zephir Ltd.)がイギリス、ヨーロッパ、カナダ、アジア太平洋エリアに提供し、アメリカ国内には米キャンプベル・サイエンティフィック社(Campbell Scientific)が独占的に提供している。

アイセーフな1550nm近傍帯域のクラス1レーザで動作する、ZephIR CWコヒーレントドップラーライダシステムは約1Wの平均パワーレベルでターゲット(この場合、風力タービン前方の空気中の粒子)を照射し、その光の一部が受信器へと後方散乱される。ビーム方向に沿ったターゲットの運動はその光の周波数をドップラー効果によってシフトさせる。ライダシステムに向かう運動は周波数の上昇(「青方偏移」)を発生させ、離れる運動は波長の伸長つまり低周波数の低減(「赤方偏移」)をもたらす。この周波数シフトは、リターン信号をオリジナルビームの一部(参照ビーム)と混合させ、結果として生じる光検出器上の差周波数ビートを

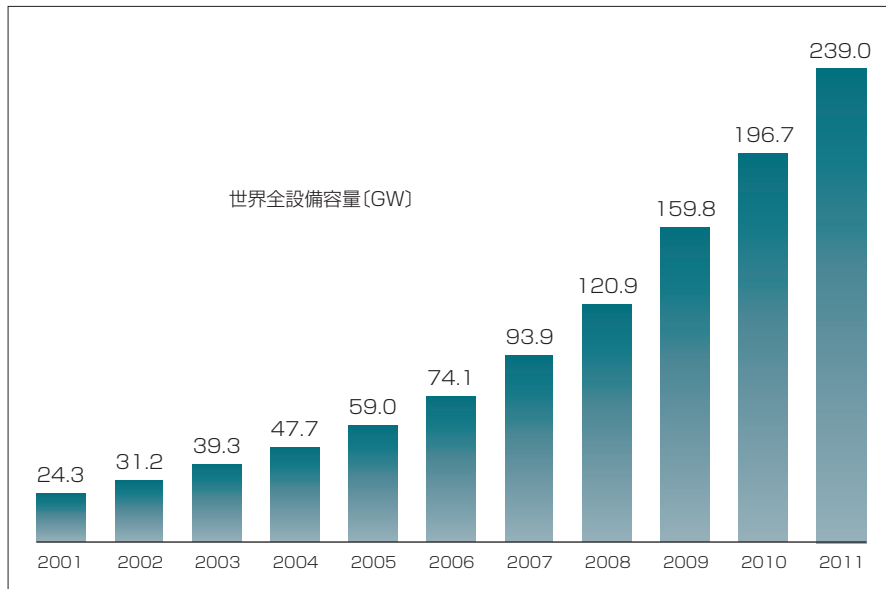


図1 世界的な風力エネルギー生産量は成長を続け、2011年には約239GWの史上最高記録に達した。(資料提供:世界風力エネルギー協会)

検出することで測定される。

参照ビームまたは局部発振器 (LO) は測定過程において重要な役割を果たす。第1に、ビート信号の検出に必要な光を散乱させる空間領域を定義する。第2に、コヒーレントライダシステムが背景光の効果をほとんど受けませんように他の光源 (太陽光など) からの放射を空間的、スペクトル的に遮蔽する。LOも安定な参照周波数を提供して非常に精密な速度決定を可能にするので、結果として、コヒーレントライダシステムによるドップラーシフト測定は本質的にキャリブレーションされた状態になる。最終的に、LOはビート過程によって信号を増幅し、ショット雑音 (または量子) 限界に近い感度での動作を可能にする。この非常に高い感度のおかげで、自然のエアロゾルによる弱い後方散乱の検出だけを頼りに、シードなしで大気中のコヒーレントシステムを動作させることが可能になる。

ZephIR ライダ (「全ファイバ」システム) はアラインメントの簡素化とロボスタ性の向上を目指して自由空間ミラ

ーに代えて光ファイバを使っているが、その性能を理論限界に近づけるには、検出過程はLOビームからのショット雑音以外の雑音はなしにする必要がある。このレーザーはその相対強度雑音 (RIN) 性能に厳密な要求を課すような大きな振幅雑音を発生してはならない。ビームは往復する間にコヒーレンスを厳密に維持する必要はないが、光ファイバ内の寄生反射間の干渉によって生成される雑音はレーザー線幅に対してより厳しい要求をつきつける。

風速は、大気中の粒子によるビームの後方散乱が起源であるライダ信号から導かれる。一般に、ダスト、花粉などの有機物質、煤、水滴から成る粒子はドップラー解析に十分な信号を提供し、それらの運動は風の流れに忠実に従っていることが前提条件になる。

風が検出される範囲は目標距離にビームを集光させることによって定義される。地上動作型の ZephIR システムは遠方10m から300m までの範囲を測定するが、ZephIR の前方に関してはわずか数フィートまでの極めて近い範囲

を容易に測定できる。これらは、風力場がタービンに向かって伝搬するように発展している限り、より優れたタービン制御にとって好ましいことである。このような近距離を測定する能力はCWライダシステム固有の特性である。

標準的な ZephIR は単一ビームによる単純な円錐走査法を使って、タービン回転翼の円形360°経路掃引の前後に20ms 間隔で測定を実施し、緻密にサンプリングする。しかし、3つの走査ビームを使用して複雑な流れを高速インテロゲーションする用途に対しては、WindScanner などの改良 ZephIR 版がデンマークのリソ DTU 社 (Riso DTU) の協力の下で開発された⁽²⁾。

ZephIR ライダシステムは、1秒ごとの走査前後に収集した50の照準線によるドップラー読みから連続的な円形走査パターンを生成する (図2)。風力タービンのノーズから水平に開始する時には、風速測定結果はタービン制御系への正確なフィードフォワード入力として役立ち、これによって最適なエネルギー抽出、速度制御、疲労とピーク荷重の軽減のために調整されるべきタービンのヨーイングとその集積的あるいは個別のピッチ制御が可能になる。ウッドワード氏は、「保守が行き届いたタービンの場合、学術機関の予測によれば、エネルギー収量増強は今のところ1%から2%の範囲で比較的小規模である。しかし、CWライダの潜在的により重要な利点はタービン寿命を増大させるメカニカルな荷重の軽減にある」と語っている。

ZephIR は全ファイバシステムなので、標準ナセル搭載設計の改良版はブレード搭載システムを含む。ここで、中心のCW光源は、ブレード迎角と他のピッチパラメータのより直接的な最適化のためにタービンブレード内に埋め込

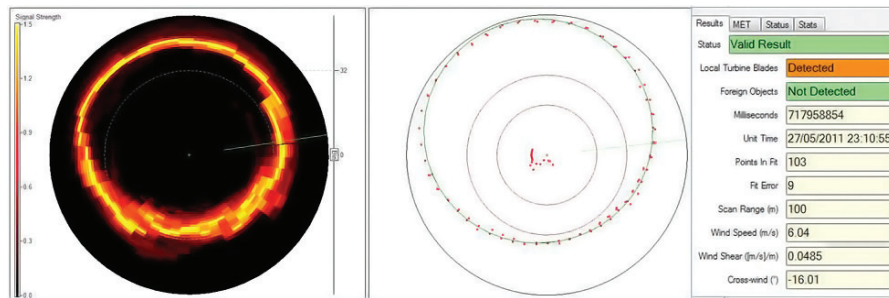


図2 リアルタイムディスプレイは風力タービンナセルに設置されたZephIRライダによって測定されたドップラーデータと風力モデル出力を示している。生データの極座標プロットはタービンローターのまわりの走査角をパラメータとする照準線 (LOS) 風速を示す (左; 放射軸はLOS風速)。プロットされた分布の幅と構造は走査体積内の空間乱流の情報を提供する。地上誘起乱流は低角領域で観測され、他のタービンからの低レベルの風ジェットとウエークも検出された。極座標プロットのリアルタイム解析 (中央) は計算されたLOS速度 (赤色の点) とフィッティングされた風パラメータ (緑色閉曲線) を示す。中心の赤の点はタービンブレードの戻りであり、フィッティング前に自動的にフィルタリングされる。最終的に、参照データと計算された風特性が緑色フィッティング (右) から計算される。(資料提供: ナチュラル・パワー社)

表1 連続波 (CW) とパルスライダ技術の比較。(資料提供: アーベント・ライダ・テクノロジー社)

パラメータ	CW ライダ	パルスライダ
速度精度	大気のコヒーレンス時間による制限	パルス幅による制限
測定プローブ距離	変動、焦点の関数として	一定、パルス長で決まる
レンジゲート数	連続評価は10回以下	最高100回、同時評価
焦点外ターゲットに対する感度	高い	なし
レーザ光源	1台のレーザ	主発振器とパルスパワー増幅器
レーザ技術	大きな平均パワー	制限された平均パワー
偏光	不要	必須

また小型軽量の望遠鏡に接続された光ファイバに光を送りこむ。ZephIRユニットにはタービンハブ (またはスピナー) も設置され、ライダ対応タービン設計内に入って来る風を遮るものなしに観測することができる。

パルスライダ

光が連続的に大気中に送られ、全ての距離から後方散乱された信号が同時に一定の平均パワーを持ち、それゆえ全ての距離で一定の感度が得られるCWライダとは対照的に、パルスライダシステムはそのパルス長と一致する時間周期の光を放出するので (表1)、異なる距離で異なる感度 (取得可能性) を持つ。精密なタイミング回路はレンジゲートと呼ばれるビームに沿った放射

状の距離の指定されたセグメントに対応する時間周期内に戻った信号を分離する。次いで、各ゲート内に含まれる後方散乱信号を処理してライダビームの経路に沿った視線速度を導出する。

アーベント・ライダ・テクノロジー社の科学製品マネージャを務めるサミュエル・ダブースト氏 (Samuel Davoust) は、「風力タービン用途では、CWライダは望遠鏡レンズのメカニカルな再焦点合わせが必要になるが、パルスライダはこれを戻った光パルスの異なる飛行時間選択を通して達成する。それゆえ、CWライダと違って、パルスライダは可動部が不要になるため、それだけ信頼性が高くなる」と語っている。

2009年に大気ライダ技術会社の仏レオスフェア社 (Leosphere) と米NRG

システムズ社 (NRG Systems) によって創立された、タービン設置システムにおける20年を超える経験を持つ風測定システムのメーカーであるアーベント・ライダ・テクノロジー社はナセル設置型のパルスドップラーウインドアイリス (Wind Iris) システムを開発した (図3)。Wind Irisは1540nmのCW光源とパルス増幅器を使った固定光学設計であり、40~400mの範囲の10のレンジにおける風速と風向を0.1s (10Hz) のサンプリングごとに収集する。測定は、-10m/s (タービンから離れて移動する風) ~ +40m/s (タービンに向かって移動する風) の風速範囲を15°から30°の半角範囲、あるいはカスタム3D幾何学で0.1m/sの証明済み精度でサンプリングする。

CTW社の技術・製品ラインマネージャを務めるフレッド・ベレン氏は、「タービンの前面は基本的に垂直面であり、接近する風を評価するにはデータが垂直体積内にあることが重要である。われわれのパルスドップラー Vindicator ライダシステムにおける第二世代OCS (光学制御系) は毎秒千のウィンドスナップショットを取得し、1~10Hzでその体積の統計的見地を提供する。われわれが1kHzのデータ転送速度で同時測定を実施する理由は、媒質が常に動き、変化しているためである。同時に取得されなかった測定は、常に、空間コヒーレンスと時間コヒーレンスの両方に関係する問題がある」と語っている。

CTW社は様々なメーカーからの風力タービン上で10万時間以上動作する市販のテレコムグレード光学系を使ってレーザドップラー速度計を生産している。同社のVindicatorライダシステム群は、眼に安全な1550nm帯のパルスレーザと固定式単一静的望遠鏡光学を使用して、タービンのヨーイングと

集団的なピッチコントロール(同時にすべてのブレードのブレードピッチを調整)を制御するための2Dの風速と風向情報を生成し、他方、3つ以上のビームを使ったシステムは3D情報を生成し、各ブレードのピッチを個々に知的に制御することを含む先進的タービン制御にとって重要な剪断変形も見積もることができる。

すべてのライダ技術は、風ベクトル数学を計算するために測定間のコヒーレンスに一定程度の信頼を置いている。ベレン氏は、「われわれはすべてのビーム上で同時にキロヘルツのパルスレートを使用し、OCSが複数のゲートと距離で風データを高速かつ独立に測定することを可能にした」と語っている。「走査CWライダまたは連続パルスライダとの比較で、この同時アプローチは、動的な風の流れの測定間における時間コヒーレンスの仮定を不要にする。その結果、非常に高いデータ転送速度と制御系にほぼリアルタイムで情報を提供するユニークな能力を持つ」と語っている。

CTW社の固定光学設計は、光学場の調整またはキャリブレーションを除去し、テレコムグレードの分布帰還形(DFB)レーザと商用グレードのポンプレーザで励起された標準的な2段階の光増幅器を使用する。ベレン氏は、「われわれはいくつかのトリックを使ってレーザの外部放射性波長をブロードにする増幅段階の非線形効果を避けている」と付け加えた。

風力タービンライダの最終利益は風力エネルギー生産効率を高める能力による。ベレン氏は、「今や、われわれは複数のタービンタイプで10%以上のパワー増加を確認した。われわれはタービンの制御とさらに多く生産できるパワーはどの程度であるかを理解する

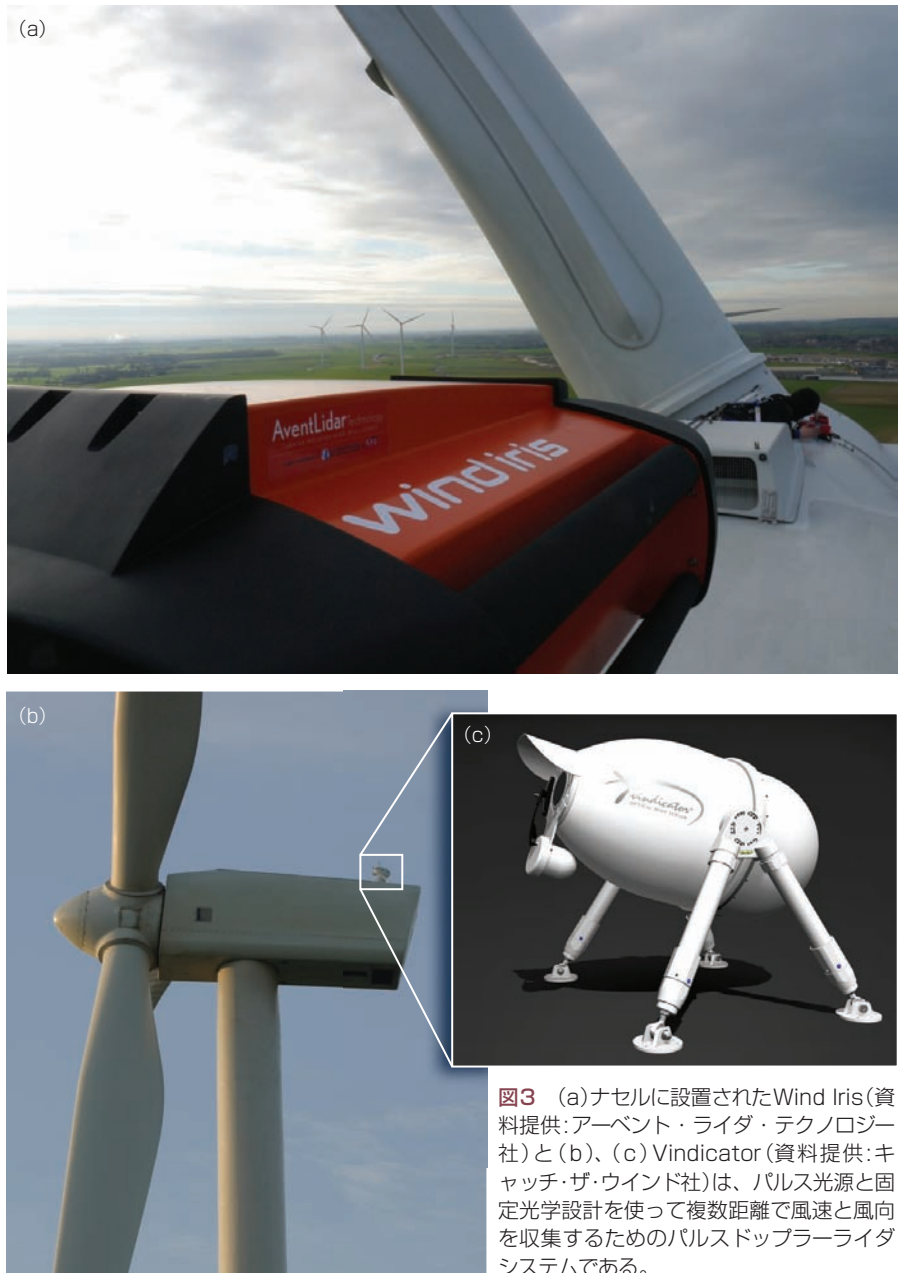


図3 (a)ナセルに設置されたWind Iris(資料提供:アーベント・ライダ・テクノロジー社)と(b)、(c) Vindicator(資料提供:キャッチ・ザ・ウインド社)は、パルス光源と固定光学設計を使って複数距離で風速と風向を収集するためのパルスドップラーライダシステムである。

ために必死で研究を続けている。この研究の一部は「秘密のソース」カテゴリーに分類されるが、一定のタービン制御アルゴリズムによって出力のかなりの最適化を達成した」と語っている。そして、彼は、「経済方程式の第2項は

定量化がかなり困難だが、簡単に言えば、タービンをより正確に風の方向に向ければ動的応力と摩擦を低減できるということである。パワーの増大と保守の軽減の両方が風力エネルギー産業にとって重要である」と断定した。

参考文献

- (1) D. Schlipf et al, "Prospects of Optimization of Energy Production by LiDAR Assisted Control of Wind Turbines," EWEA 2011 Conf., Brussels, Belgium (March 2011).
- (2) www.yourwindlidar.com/products/windscanner