

# 鉛直測定型ドップラーライダー評価基準と ZX ライダー・Galion/StreamLine ライダーの紹介、乱流測定について

日本気象株式会社 高祖研一

## 1. はじめに

風力発電の風況調査において業界標準とされている測器は、カップ式風速計とされている。一方、この代替測定機器として、ドップラーライダーの研究が進められている。

ドップラーライダーはレーザーを用いて、空気中の微粒子(エアロゾル)からの反射波により、風向風速をリモートセンシングにて測定する技術で、欧州から始まり、近年は国内においても普及が進んでおり、複数メーカーから機器がリリースされている。

本稿ではドップラーライダーの中でも、我が国において広く普及してきた鉛直測定型について、欧州での機器評価基準を記載し、次に機器紹介・研究紹介として、ZX シリーズ、Galion/StreamLine シリーズの紹介と、ライダーによる乱流計測の研究事例について述べる。

## 2. 規格認証について

ドップラーライダーの各機種種の性能、精度などの評価基準として、以下の2つが挙げられる。

### 2.1. DNV GL が規定する成熟度分類

DNV-GL による基準として、ライダー機器の成熟度分類が、ステージ 1~3 で示されている(表 1)。この中で、ステージ3は風力発電のエネルギー評価において、気象マストとの比較を行わなくとも信頼性が高いとされている。各機種がどのステージに分類されているかを確認することが重要である。

### 2.2. IEC 61400-12-1:2017 による RSD の Type

#### Classification

IEC 61400-12-1:2017 では、風車のパワーカーブ試験に関連して、リモートセンシング装置(ドップラーライダー、ドップラーソーダ)を配備した際の運用要件や不確実性について、説明されている。

この IEC に準拠した機器として証明するものに Type Classification がある。ドップラーライダーのパフォーマンスは、風の鉛直シアや気温など、環境影響により、測定精度の不確実性が増加することにつながる。

Type Classification では、あらゆる環境条件下において試験が行われる。複数の異なるサイトにおいて、複数の機器による多くの分類テストが行われる。

表 1.DNV GL が規定する成熟度分類

分類	内容
ステージ 1	従来型気象観測塔の高度 50m ~ 120m において同レベルの測定精度を達成することを目的とした、市販機器の限定的な検証を実施すること。検証結果は適当な技術論文で公表されなければならない。
ステージ 2	その機器で取得されたデータを部分的に用いて正式な風況測定並びに発電量評価を実施することを目的とし、様々な気象条件において数多くのサイトで測定を行うこと。その際、従来型の風向風速計とのサイト固有の検証も必要である。
ステージ 3	正式な風況測定並びに発電量評価において、従来型の風向風速計とのサイト固有の検証が無くても、あるいは限定的であっても、その機器によるデータが定量的に使用されることが認められ、風力発電所サイトの評価に使用可能な機器と証明されていること。

例として、ZX 社(英)のドップラーライダー ZX300 型(以下、ZX300)の試験結果を見ると、風測定に影響を与えた主な重要な環境変数は、温度勾配、気温、乱流強度、ウィンドシア、風向、降水の有無、気流傾斜角とされ、風速の精度は、35 m で 0.71%、135 m で 2.64%であった<sup>1)</sup>。

この結果、ZX300 は IEC 基準を完全に満たしているとされた。

### 2.3. まとめ

我が国では鉛直測定型ドップラーライダーの普及が進んでいる。また、機種も複数機種がメーカーよりリリースされており、機種選定において選択肢は多くなっているが、その特性はメーカー、機種により異なるため注意が必要である。

本稿で示した 2 つの評価基準を参考に、目的に応じた機種選定することが重要となる。

### 3. ドップラーライダー機器紹介

本章では、ZXライダー、Galion/StreamLineライダーを紹介する。

#### 3.1. ZXライダー

英国 ZX Lidars 社が風力産業用に開発したドップラーライダーである。



図 1. ZX Lidar シリーズ  
(左から ZX300M、ZX300、ZX TM)

#### (1) ZX Lidar シリーズの紹介

ZX ライダーのシリーズには、ZX300、ZX300M、および ZX TMがあり(図1)、これらを活用することで陸上および洋上において従来の気象マストに比べ安価に、より高高度の風況測定が可能になる。

ZX 300 は、気象マストのカップ式風速計などと組み合わせ、または気象マストの代わりとして、風力エネルギープロジェクトの事前計画、開発、建設、運用の段階での風況観測に幅広く活用可能である。

ZX 300M は洋上用として防水性能が高く、洋上の固定式、浮体式プラットフォームの両方で風況観測が可能である。また、フローティングライダーにも搭載されている。

ZX TMは風力発電機の本セルまたはハブに取り付けられ、タービンのキャリブレーションに活用できる。

#### (2)技術的特徴

特徴は連続波を使用することである。これにより、パルス波ライダーに比べ、下層部分において空間解像度が高い観測が可能である。この特徴は、風の鉛直プロファイルの勾配が大きい場所での風況観測や、気象マストとの比較に適している。また、毎秒最大 50 の視線測定が行われ、連続波ライダー独自の高品質で可用性の高い風況測定が保証される。ZX300 は Class 1 カップ式風速計に匹敵する、または場合によっては、それよりも優れた極めて低い不確かさの風況測定が可能である。

#### (3)実績

ZX ライダーは、IEC 準拠の英国リモートセンシングテストサイトで検証され、優れた精度を示す結果が得られた。英国では銀行融資レベルのデータを提供できると認められている。これまでにフィールドで 1,000 万時間以上の運用と 3000 を超える展開の実績がある。

#### 3.2. Galion/StreamLine ライダー

英国の再生可能エネルギーコンサルタント WOOD グループ、そして HaloPhotonics 社が扱う、風力発電用ドップラーライダーである。



図 2. Galion Lidar(左)と測定範囲の説明(右)



図 3. 鉛直型 StreamLinePro(左)とスキャニング型 StreamLineXR(右)

#### (1)Galion/StreamLine ライダーの紹介

スキャニング測定型と鉛直測定型の 2 種類ある。

スキャニング測定型 Galion G4000/StreamLineXRは、上空だけでなく水平方向にもレーザーが可能な、スキャニング型パルス式ドップラーライダーである。斜めにレーザーを照射することで、沿岸から 1,000m 以上沖合の風況データを測定できる。

鉛直測定型 StreamLine Pro は、下層大気のプロファイリングに適した、パルス式ドップラーライダーである。高度 200m 以上の観測が可能で、従来の気象マストの代わりとして活用できる。

#### (2)技術的特徴

特徴は、レーザーの方位角、仰角を自在に制御し、水平、鉛直、斜めなど任意のスキャンが可能な点である。この技術を用いると、風況観測塔の建設が困難な場所での風況測定、風力発電機風下の後流(ウェイク)の測定、地形性乱流の評価など、風力発電に関わる重要な情報を取得することができる。

また、陸上から洋上に向かって照射することで、洋上風況調査が陸上から可能になる。今後研究が進むと、複数台用いることでデータの精度を向上させ、洋上風況観測塔の代わりとなることも期待されている。

#### (3)実績

欧州を中心とした諸外国では既に多くの実績があるが、近年は日本国内においても、国プロジェクトを初め、複数の洋上風力開発のサイトで用いられている。

#### 4. ライダーによる乱流測定

過去に実施されたライダーの実証試験は、その多くが、銀行融資レベルの風資源評価で使用するために、水平方向の風速を正確に測定する能力を実証した。これまでの実証試験より、単純な地形における従来の風速計(カップ風速計)と、複雑な地形における数値シミュレーションの結果とライダーの実測値とが非常に良く一致していることが、風力業界に受け入れられている。

そして、現在研究が進められているのが、ライダーによる乱流測定の能力である。乱流強度の正確な測定は、サイトの風力資源評価、サイトのキャリブレーション、タービンの選択、予想されるエネルギー収量において重要な役割を果たす。

ライダーとカップ式風速計では、乱流の測定方法が大きく異なる。ライダーは観測範囲全体で乱流を評価するのに対して、カップ式風速計はピンポイントの測定値から乱流を評価するためである。

従って、ライダーとカップ式風速計によって測定された乱流強度を、さまざまな地形の複雑さや大気条件において、さまざまな高さで比較することが、その理解を深めることに繋がる。

##### 4.1. ZX ライダーによる乱流測定<sup>2)</sup>

###### 4.1.1. 乱流測定の定量化

風力エネルギーの用途では、乱流強度(TI)を使用して、通常 10 分間に風がどの程度変化するかを定量化する。TI は、式 1 のように、10 分の風速系列の標準偏差を、その同じ期間の平均風速で除算して計算される。

$$TI = \frac{\alpha U}{U} \text{ ----- 式 1}$$

カップ式風速計はピンポイント測定と見なすことができるが、リモートセンシングシステムは観測範囲全体を評価する。そのため、観測範囲全体の平均の結果として生じる TI の違いを考慮して、表1の補正係数を使用する。この補正係数は、ライダーの平均 TI 値を、カップ式風速計の TI 値と同等のポイント測定値に変換することを目的としている。式 2 に補正係数の実装方法を示す。

表 2 高さ依存の TI 補正係数

Height (m)	TI factor (C)
H <= 20	1.037
H >=90	0.918
20 < H < 90	Linear variation between 20 m and 90 m

$$TI = \left(\frac{1}{C}\right) \frac{\alpha U}{U} \text{ ----- 式 2}$$

###### 4.1.2. サイトにおける比較結果

図 4 は、英国リモートセンシングテストサイト(UK RSTS)における、1 か月間の気象マストと ZephIR 300 (ZX300 の旧

バージョン) 同時データの分析結果である。サイト周辺は非常に平坦な地形である。相関プロットは、地上高(AGL)の 4 つの異なる高さ(20 m、45 m、70 m、91 m)でのカップとライダーの TI の比較を示している。双方は良い一致を示しており、風力産業に適切な TI 測定値を提供できると考える。

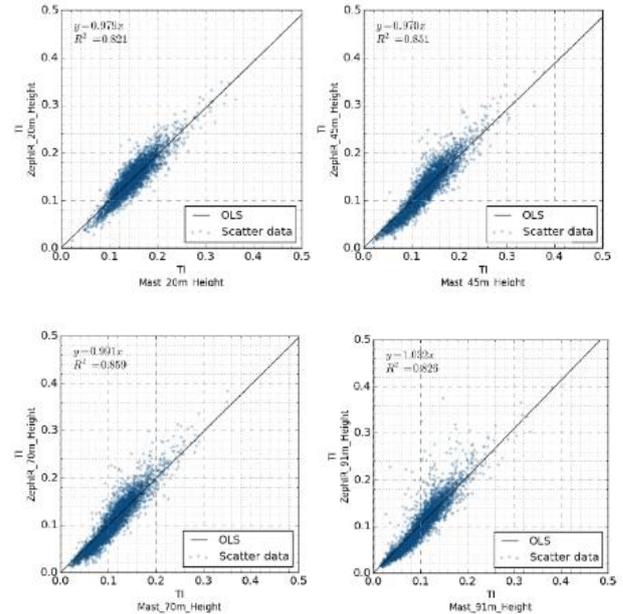


図 4 単純な地形サイトにおける TI の比較

図 5 は、南ヨーロッパの非常に複雑なサイトの 1 か月のマストと ZephIR 300 の同時データの分析結果である。相関プロットは、3 つの異なる高さ AGL(20 m、40 m、45 m)でのカップとライダーの TI の比較を示している。図 1 に比べ、散布が増加していることが確認できる。これは、複雑な地形の影響に対する TI 感度の結果である。

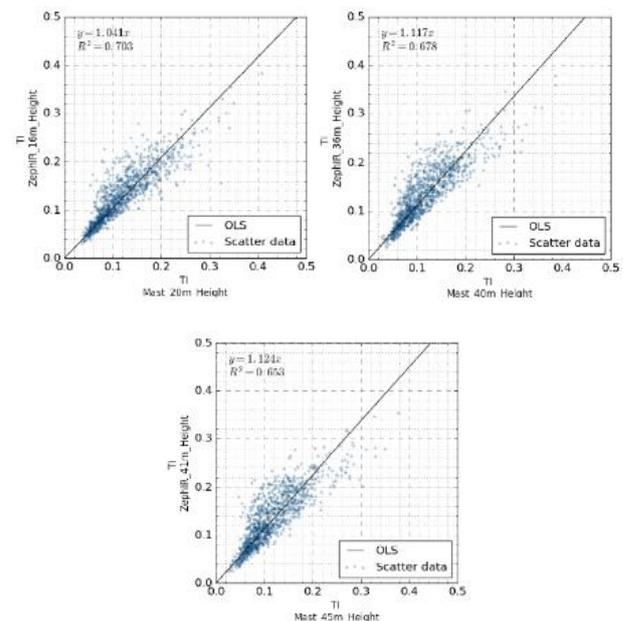


図 5 複雑な地形サイトにおける TI の比較

### 4.1.3 まとめ

ドップラーライダーとカップ式風速計の TI 測定値の違いは、測定ジオメトリとタイムスケールの違いの結果である。これらの違いは、より複雑な地形で強調されているように見えるが、流れの複雑さが大きくなると、TI 感度が大きくなるため、驚くことではない。

単純な地形サイトにおける TI の比較では、カップ式風速計とよく一致することが示される。単純な地形での TI 値については、参考文献 2)にもレビューがあり、風力エネルギー用途での使用に適した精度で乱流測定できる ZephIR 300 の能力が示されている。

## 4.2. スキャニングライダーによる乱流測定 6ビーム法<sup>3)</sup>

ドップラーライダーを使用して乱流強度を測定するために、6ビーム法(シックスビームテクニック)が提案されている。

### 4.2.1. 6ビーム法とは、VAD法との違い

1 台のドップラーライダーから、5つのビームを等間隔に照射し、1つのビームを垂直に照射して測定する。

従来の鉛直測定型タイプの VAD 法は、視線速度の測定を高頻度で行い、直交座標に変換することで乱流統計を導き出すが、6ビーム法は、視線速度の変化を測定する方法で乱流値を計算し、水平風速の測定におけるランダムに発生するエラーの総数を最小化する<sup>4)</sup>。これにより、VAD 手法よりも、精度の高い乱流測定に繋がることが期待され、現在も研究が盛んに行われている。

### 4.2.2. スキャニングライダーによる6ビーム法

スキャニングライダーは鉛直測定型と異なり、レーザーを物理的に動かし、測定したい方向にレーザーを向け、方位角仰角を自由に調整することが可能である。これより、乱流をより詳細に計測する6ビーム法が可能な機種となる。本稿で紹介した Galion/StreamLidar も、6ビーム法が可能な機種の一つである。

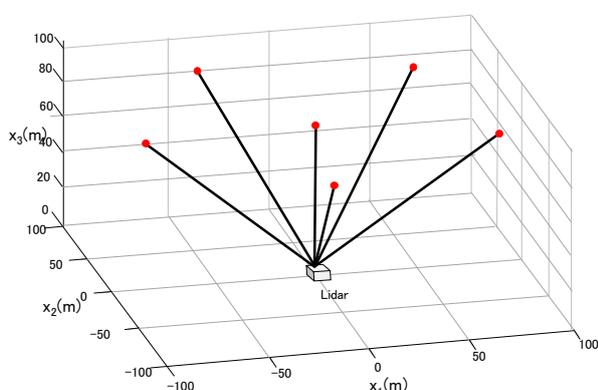


図.6 6ビーム法による測定イメージ

## 5. まとめ

近年、風車の大型化に伴い、高高度における風の観測が求められている。高さ制限がある気象マストでは、高高度での測定が出来ないため、その代替措置としてドップラーライダーと気象マストを組み合わせ用いられており、今後ドップラーライダー技術の重要性は増す。本稿で示した内容を以下に列記する。

### 「2. 規格認証について」

複数メーカーから出されている機種それぞれの評価をする規格として、DNV GL が規定する成熟度分類と IEC による RSD の Type Classification を示した。

### 「3. ドップラーライダー機器紹介」

英国製の ZX ライダー、Galion/StreamLine ライダーについて、技術的特徴、実績について示した。ZX300 は Class1 カップ式風速計に匹敵する測定が可能、Galion/StreamLine ライダーは、鉛直測定だけでなくスキャニング測定することで洋上風況調査が可能である。

### 「4. ライダーによる乱流測定」

風力発電機的设计に需要となる乱流の測定をドップラーライダーで行う技術について紹介した。ZXライダーは、単純な地形サイトにおけるカップ式風速計との TI の比較で、よく一致する結果が示された。また、より詳細に乱流を計測する手法として、6ビーム法があり、スキャニングライダーでこの測定が可能であることを示した。

今後も、我が国の風力発電産業の発展に向け、各研究機関と共に、ドップラーライダー技術開発を進めていく所存である。

### 参考文献

- 1) GL Garrad Hassan Deutschland GmbH, TYPE ZX300 LIDAR Remote Sensing Device Type-specific Classification Summary, DNV-GL Report, 2018, 18p.
- 2) W Barker et.al, Can Lidars Measure Turbulence? Comparison Between ZephIR 300 and an IEC Compliant Anemometer Mast, EWEA 2012
- 3) Ameya Sathe, Robert Banta, Lukas Pauscher, Klaus Vogstad, David Schlipf, Scott Wylie, Estimating Turbulence Statistics and Parameters from Ground- and Nacelle-Based Lidar Measurements, IEA Wind Expert Report; DTU Library; 2015, 25p.
- 4) A. Sathe, J. Mann, N. Vasiljevic, and G. Lea, A six-beam method to measure turbulence statistics using ground-based wind lidars, DTU Library; 2015, 738p.