

観測タワーとライダーの併用による風況観測*

Wind climate assessment by using meteorological mast and LiDAR

石原 孟**

Takeshi ISHIHARA

川竹 拓也***

Takuya KAWATAKE

荒川 洋***

Hiroshi ARAKAWA

山口 敦****

Atsushi YAMAGUCHI

1. はじめに

近年、風車の大型化に伴い、風車ハブ高さが100mを超える風車が登場している。風力発電量予測のためには、ハブ高さにおける風況を正確に予測する必要がある。一方、高度度の風況を観測するにはトラスタワーが一般的に用いられているが、観測タワーの影響を受けるため、その補正方法を確立する必要がある。また、風車ハブと同じ高さの観測タワーを建設するには、コストおよび許認可の面に困難が伴うため、高高度の計測にはドップラーライダー等のリモートセンシング技術が用いられている。しかし、ドップラーライダーを用いた風況観測は、風況観測タワーに比べ、欠測が発生しやすい上、乱流強度を十分な精度で得られず、IEC61400-12-1¹⁾ではドップラーライダー単独での計測は認められていない。

本研究では、銚子沖洋上風力発電実証サイトにおける観測タワーの影響の補正方法を提案するとともに、ドップラーライダーが発生した欠測データを観測タワーから得られた風況データにより推定する方法を提案し、観測から得られた風況データと比較することにより、その推定精度を検証する。

2. CFDを利用した風況観測データの補正

洋上風況観測タワーは、千葉県銚子沖から離岸距離3.1km、水深は11.9mの地点に位置する。風況観測機器の配置と洋上風況観測タワーの外観を図1に示す。本観測システム²⁾では、タワー本体の平面形状を三角形としたトラス構造とし、各辺からそれぞれ3本のブームを方位角120度間隔で平行に張出し、その先端に三杯式風速計と矢羽根式風向計を設置している。また、ライダーはプラットフォーム上に設置されており、60~200mを20m間隔で8高度計測している。

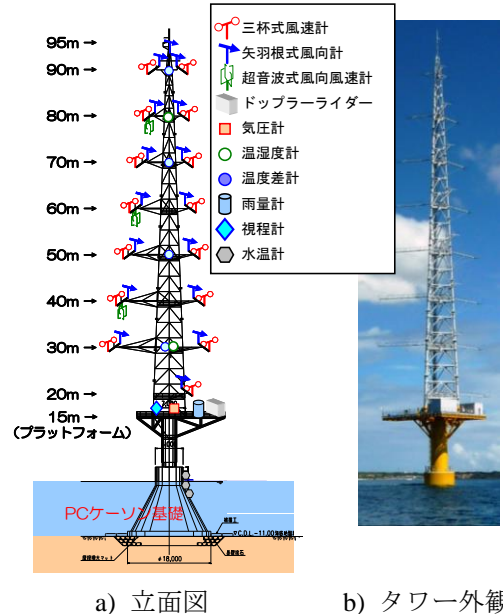


図1 風況観測機器の配置とタワー外観

本観測システムと同様に三角形断面のトラスタワーを用いた洋上風況観測の事例として、オランダのEgmond aan Zee 洋上風力発電所での風況観測³⁾と、ドイツのFINO3⁴⁾が挙げられる。Egmond aan Zeeでは風上側の風速計、FINO3では側面側の風速計と、両事例で選択される風速データは異なるが、いずれも、同時刻における平均風向に応じて、観測タワー本体の影響を受けにくいと考えられる位置にある風速計を採用するという考えに基づいたものである。本サイトにおいても両事例に倣い、検証した結果、観測タワー本体の影響の少ない風速データを得ることができるが、それだけではタワー本体の影響を排除し切れないことが確認された。そこで、CFD解析を行い、得られた風速分布から風速データの補正係数を決定した。

* 令和元年12月5日第41回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東京大学大学院工学系研究科教授 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 会員 株式会社水域ネットワーク

**** 会員 東京大学大学院工学系研究科特任准教授

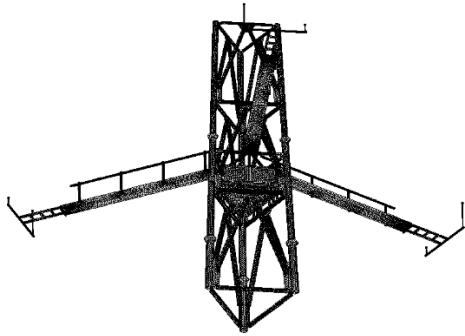


図2 数値流体解析で用いたタワー部分モデル

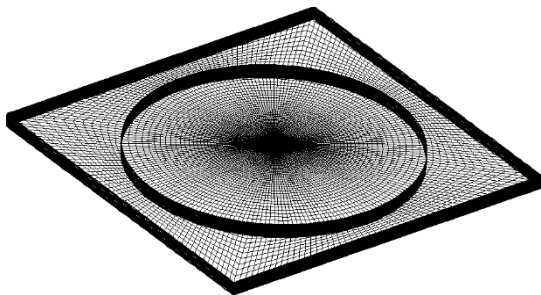


図3 解析領域全体

図2に示すように、風況観測タワーの形状は複雑である。本研究では、このタワー周りの流れ場の解析を行うために、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて定常解析を行ったケース、および LES にて非定常解析を行ったケースの二通りの解析を実施し、その影響を評価した。本解析は風洞実験のスケール(1/100)で行い、解析領域は幅、奥行き共に 1km とし、高さは風速計が設置されたブームから上下各 5m の 10m とした。また、解析領域は全体モデル同様、中心から半径 4m の部分とその外側の部分に分けて作成し、中心部分を回転可能にした(図3) 数値模型を解析領域の中心に設置し、中心部分を回転することにより、所定風向の解析を行う。観測タワーの周りの領域を分割し、領域内のタワーモデルは非構造格子でモデル化し、これ以外の領域を構造格子でモデル化した。

図4に数値解析から得られた風速計取り付け部付近の風速場を示す。ブームの手すりや風速計によって流れ場が影響を受けており、正確な観測タワー影響の評価のためには細かい部材を再現する必要があることがわかる。図5に、風速計2と風速計1との風速比について、観測結果の風向ビン平均値、 $k-\epsilon$ モデルによる解析結果、LESによる解析結果を示す。北風(風向0deg.付近)では、観測タワーの後流に入る風速計1で計測した風速が減少するため風速比は大きくなり、風速計2が観測タワーの後流に入る南東風(135deg.付近)で

は風速計2での計測値が減少するために、風速比が小さくなっていることがわかる。 $k-\epsilon$ モデル、LESいずれの解析結果もこの傾向を捉えることができているが、 $k-\epsilon$ による解析では風速比の減少および増大を若干過小評価している。一方、LESによる解析は観測結果とよく一致している。このため、本研究では、FINO3ルールに基づいて平均風向に応じた風速データを選択した後、LESによる解析結果から決定した補正係数を乗じることで補正を行うこととした(以下、銚子ルールと称する)。

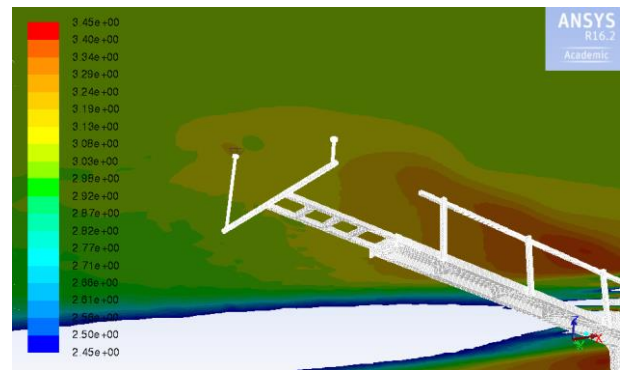


図4 風速計取り付け部付近の風速場の解析結果

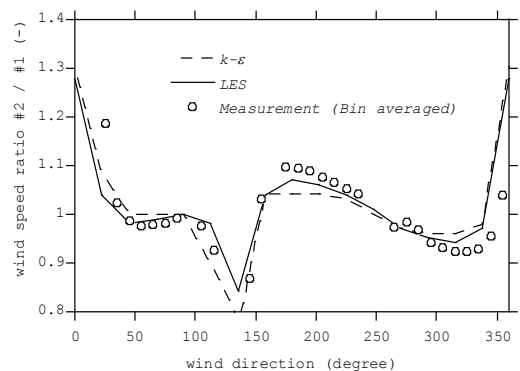


図5 解析結果と観測結果の比較

2016年1月~12月の観測データ(M.S.L.+80m)を対象に、Egmond aan ZeeルールとFINO3ルールおよび銚子ルールにより評価した月平均風速の比較結果を図6に示し、各処理方法による年平均風速の比較を表1に示した。また観測だタワーの影響を受けないライダーによる観測結果を比較するために示した。ここでは、ライダーと三杯式風速計のいずれか一方でも欠測となった期間を排除している。図6および表1から、CFD解析結果に基づいた補正係数を用いることにより、ライダーによる観測結果に最も近い結果が得られることが分かる。

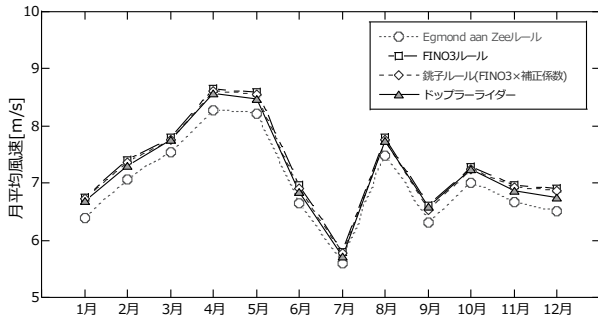


図6 各処理方法による月平均風速の比較(M.S.L.+80m)

表1 各処理方法による年平均風速の比較(M.S.L.+80m)

処理ルール	年平均風速(m/s)	ライダーとの比
Egmond aan Zee	7.01	0.967
FINO3	7.32	1.010
銚子	7.28	1.004
ライダー	7.25	1.000

3. 観測タワーとライダーの併用による風況観測

ドップラーライダーを用いた風況観測は、風況観測タワーに比べ、欠測が発生しやすい。2013年2月~2014年1月の1年間の風況観測データ(M.S.L.+80m)の取得率が97.7%であるのに対して、ライダーが78.1%であり、十分なデータ取得率が得られていない。本研究で、MCP(Measure-Correlate-Predict)法により、三杯式風速計の観測風速からライダーの各高度における風速を推定し、欠測データの補正方法を提案する。本研究ではドップラーライダーによる風況観測は文献5に示す方法に従って行われた。

三杯式風速計で観測された風速データを U_α 、ライダーで観測された風速データを U_β とすると、その相関関係は以下のように表すことができる。

$$U_\beta(z_i, \theta_j) = a(z_i, \theta_j) \times U_\alpha(z_r, \theta_j) + b(z_i, \theta_j) \quad (1)$$

ここで、 $U_\alpha(z_r, \theta_j)$ は参照高さ z_r と風向 θ_j の三杯式風速計により計測された平均風速、 $U_\beta(z_i, \theta_j)$ は高度 z_i と風向 θ_j のライダーにより計測された平均風速を表す。また、 $a(z_i, \theta)$ と $b(z_i, \theta_j)$ はそれぞれ、高度 z_i と風向 θ_j における slope と offset であり、三杯式風速計とライダーの観測風速から高度別・風向別の係数を求める。ライダーにおける高度 z_i と風向 θ の風速の時刻歴データ $U_\beta(z_i, \theta, t)$ は以下の式(2)により算出される。

$$U_\beta(z_i, \theta, t) = a(z_i, \theta) \times U_\alpha(z_r, \theta, t) + b(z_i, \theta) \quad (2)$$

ここで、 θ は任意風向を表し、この風向に対応する

slope と offset は式(1)から得られた値の内挿により求める。高さ z_i での風速が欠測された場合には、式(2)により求める。

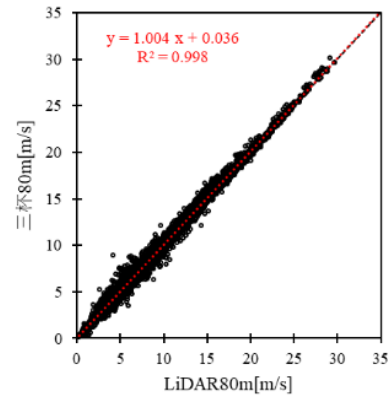


図7 三杯風速計とライダーの観測値の相関関係(80m)

2013年2月~2014年1月の1年間のデータを用いて本提案手法の予測精度を検証した。まず、三杯式風速計とライダーの観測データの相関を調べた。図7には2013年2月から2014年1月の1年間の三杯風速計とライダーの同時刻の観測値(M.S.L.+80m)の相関関係を示す。回帰直線の傾き(Slope)は1.004、決定係数 R^2 は0.998であり、両者はよく一致していることが分かる。

次に、この観測データを用いて提案した補正手法を検証する。ここで、参照高さ z_r は80mとし、三杯式風速計の80m高度の観測風速からライダーの各高度の風速を予測した。図8には各高度の予測値とライダーによる観測値との関係を示す。図8の横軸は観測値、縦軸は予測値を表す。図8から、参照高さである80mの3/2倍高度の以内である100mと120mの予測値は観測値とよく一致している。一方、80mの3/2倍高度より高い高度である160mと200mの予測値はばらつきが大きいことが分かる。表2には、各高度の予測精度の評価を示す。100mと120mの回帰直線のSlopeが±3%以内かつ決定係数 R^2 が0.97以上のクライテリアを満足しているが、160mと200mの回帰直線のSlopeが±3%を超過し、決定係数 R^2 も0.97より小さいことが分かる。従って、MEASNET⁶⁾に示されているハブ高さの2/3以上である風況計測の要求事項は妥当であることが以上の解析結果から裏付けられている。

図9には平均風速の予測値と観測値の鉛直分布の比較を示す。両者の鉛直分布はよく一致していることが分かる。200mの高度においては平均風速の予測値のばらつきが大きい、平均値のBiasは-0.003m/sと非常に小さい。従って、本手法により求める平均風速お

よびウインドシアは風車および支持構造物の設計に用いることが可能である。

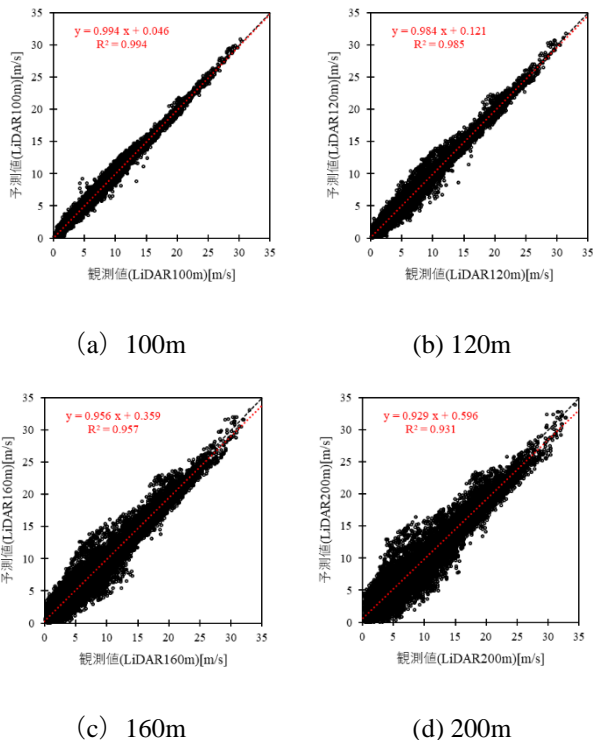


図 8 各高度の予測値と観測値の関係

表 2 本手法による予測値の精度評価

高度	Slope	Offset	R ²	Bias
100m	0.994	0.046	0.994	-0.001
120m	0.984	0.121	0.985	-0.002
160m	0.956	0.359	0.957	-0.002
200m	0.929	0.596	0.931	-0.003

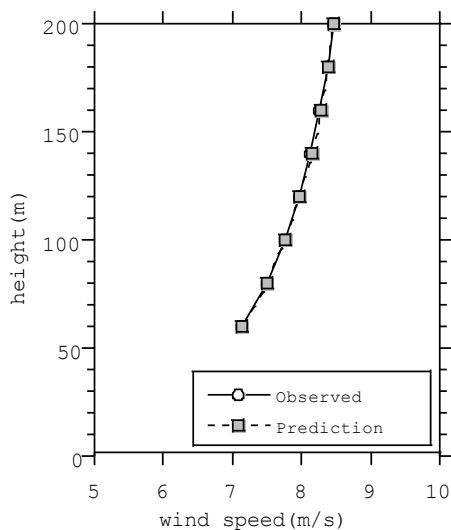


図 9 平均風速の鉛直分布の比較

4. まとめ

本研究では、観測タワーの影響の補正方法を提案するとともに、風況観測タワーとライダーの併用による風況観測方法を示し、以下の結論が得た。

- 1) 観測タワーに取り付けられた三杯式風速計は、各時刻における平均風向に対して側面側の風速計のデータを採用し、さらに CFD 解析結果に基づく補正係数を用いることにより、誤差 1%以下の精度で年平均風速を観測できることを示した。
- 2) 三杯式風速計の観測データからライダーの欠測データを推定する方法を示し、風況観測データにより、その予測精度を検証した。その結果、基準高さである 80m の 3/2 倍高度の範囲内における予測精度は Slope が±3%以内かつ決定係数R²が 0.97 以上のクライテリアを満足するが、それより高高度を予測する場合には、このクライテリアを満足できないことが分かった。また平均風速の予測誤差 1%未満であり、平均風速の値および平均風速から求めたウインドシアは風車および支持構造物の設計に用いることが可能である。

参考文献

- 1) IEC:61400-12-1 Wind turbines -Part 12-1:Power performance measurements of Electricity producing wind turbines, Ed.2,2017.
- 2) 助川 博之, 福本 幸成, 山中 徹, 大窪 一正, 石原 孟, 「銚子沖 3.1km における洋上風況観測」, 風力エネルギー利用シンポジウム, 35 巻, pp.260-263, 2013.
- 3) P. J. Eecen, L. A. H. Machielse, A. P. W. M. Curvers, “Meteo- rological Measurements OWEZ Half year report”, 01-07-2005 - 31-12-2005, 2007.
- 4) D. Kindler and A. Gütschow, The FINO3 Wind Energy Research Platform in the North Sea: First Results & Comparison to Concurrent FINO1 Data, Bremen, 2010.
- 5) IEA Wind RP15 Ground-based, vertically-profiling remote sensing for wind resource assessment, 2015.
- 6) MEASNET, Evaluation of site-specific wind conditions, Version 2, April 2016.