

スキャニングドップラーライダーの精度検証と風況計測への応用

Performance Evaluation of Scanning Doppler Lidar and its Application to Wind Field Measurement

ゴイト ジェイ プラカス*¹
Jay Prakash GOIT

山口 敦*²
Atsushi YAMAGUCHI

石原 孟*³
Takeshi ISHIHARA

*¹ Project Assist. Prof, The Univ. of Tokyo., Dept. of Civil Eng., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
Fax:03-5841-7454, E-mail: jay.goit@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

*² Project Asso. Prof, The Univ. of Tokyo, Dept. of Civil Eng., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

*³ Professor, The Univ. of Tokyo, Dept. of Civil Eng., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Abstract

This study evaluates scanning Doppler Lidar-based wind field measurement and analysis techniques for wind energy applications. The Lidar measurements are first validated against measurements from existing V1 Lidar. It is found that the availability of 20% (30 data per 10 minutes) is sufficient to produce fairly good 10 minutes averaged wind speed and direction. The vertical profile measurements for wind blowing from land and that from sea are then performed using DBS configuration. The averaged wind speed for the former is lower than for the later. Two more scan modes, RHI and PPI, are employed to investigate the effect of coastal terrain on the near shore velocity profiles and to characterize the wind turbine wake. An internal boundary layer develops from the shore and persists up to 2000 m offshore. Lidar measurement data are also used to validate numerical simulations by a mesoscale model. The measured and predicted wind speeds agree well up to the height of 500 m. Finally, measurements of flow field around wind turbine shows the velocity deficit in the wind turbine wake and agree with those predicted by a wake model.

キーワード : スキャニングドップラーライダー, 風況計測, 内部境界層, 風車後流
Key Words : Scanning Doppler Lidar, Wind field measurement, Internal boundary layer, Wind turbine wake

1. はじめに

風況観測は、風力発電所の発電予測、ウィンドファーム配置の最適化、風車の制御など、風力エネルギー分野で幅広く利用されている。これまでの風況観測では、観測タワーのいくつかの高度において風向・風速計を設置し、風向・風速の計測を行っているが、建設コスト等の制約から、陸上の観測タワーの高さは60 m以下が一般的である。しかし、近年大型風車のハブ高さは80~120 m、ブレードの長さは40~80 mに大きくなっているため、ロータの全領域(40m~200m)をカバーする風況計測は困難である。そのため、近年、風力発電の分野において、ドップラーライダーを利用したりリモートセンシング技術が注目を集めている。ドップラーライダーは高高度および幅広い範囲での風速

の計測が可能であるという利点がある他、輸送や設置も観測タワーに比べ、格段に安価となる。

ドップラーライダーを用いて風速の鉛直分布を計測する方法としては Velocity Azimuth Display (以後、VAD法と呼ぶ)と Doppler Beam Swinging (以後、DBS法と呼ぶ)がある。VAD法は気象レーダの計測で広く用いられている[1]。この方法では360°の円錐スキャンを行い、視線風速を計測する。各高度での視線風速を最小二乗法等の統計手法を用いてフーリエ級数にフィッティングすることにより、風速の鉛直分布を求める[1]、[2]。DBS法では4つまたは5つのビームを使用し、解析式を用いて各高さでの風速を算出する。DBS法に比べ、VAD法の精度が高いと言われているが、360°のスキャンが必要であるため、データのサンプル数が少ない。

観測タワーに設置された風速計によりドップラーライダーによる計測との比較に関する研究が多く行われた。例えば、Smithら[3]は、スキャニングドップラーライダーから計測された風速と観測タワー上に設置さ

*1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 特任助教
(〒113-8656 東京都文京区本後 7-3-1)

E-mail: jay.goit@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

*2 同大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 特任准教授

*3 同大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
(原稿受付: 2017年7月26日)

れた3杯風速計との比較を行った。ドップラーライダー計測と3杯風速計の間の相関が高く、高さ100mでの決定係数(R^2)は0.98であるという結果が得られた。Sathe[4]らはLeosphere社のPulsedライダーとZephIR社のContinuous Waveライダーの計測結果を超音波風速計の測定結果との比較を行い、Pulsedライダーの方は相関が比較的高いことを報告している。Vogstad[5]らは複雑地形においてドップラーライダーによる計測を行い、高さ50mの観測タワーに設置した風速計の計測と比較を行い、高い相関($R^2 > 0.99$)を報告している。しかし、LangとMcKeon[6]が複雑地形で行った計測ではドップラーライダーと3杯風速計との間のバラツキが大きく、 R^2 は0.97に下がることを報告した。ドップラーライダーと従来型の風速計の比較(文献[7],[8]を参照)に関して他にも多くの研究が発表されているがこれらの研究は高度100m前後の計測を行っており、高高度の計測結果を発表していない。

上述のVADやDBS法は水平方向の風速の空間変化を考慮できないという制約があるため、広域スキャンや体積スキャンから速度場を算出することができない。そこで、Easterbook[9]がVelocity Volume Processing(VVP)を提案した。しかし、VVP法は方位角や仰角の幅に依存し、計測の解像度が低い[10]ため、風力の分野ではほとんど利用されていない。風力分野でよく使われているアプローチは平均風向の方向に計測し、風速場を求める手法が提案されている[11]。しかし、この手法を検証した研究例が存在しない。

そこで、本研究では、銚子沖洋上風況観測タワーのプラットフォームに設置されているLeosphere社スキャニングドップラーライダー(WINDCUBE 100S、以後スキャニングライダーと呼ぶ)[12]を用いて、スキャニングライダーの計測精度を検証するとともに、計測データの適切な処理方法を提案する。また、陸風と海風の鉛直分布や陸の影響を考慮した沿岸近傍の洋上風速の鉛直分布を計測する。さらに、ライダー観測値を用いて、気象シミュレーションによる高さ500mまでの高高度における予測風速及び沿岸の予測風速との比較を行い、予測精度を検証する。最後には風車周りの風速場の計測を行い、後流モデルの精度検証を行う。

2. 風速の計測方法

ドップラーライダーによる風速計測に関して様々な方法が提案されている。本章ではドップラーライダー観測の概要を示すとともに、本研究で使用した3つのスキャンモードについて説明する。

2.1 ドップラーライダー観測の概要

図1にはドップラーライダーによる風速計測の基本原則を示す。大気中に照射されたレーザー光は、移動しているエアロゾルによって反射され、反射光の周波数はドップラー効果により元のレーザー光のそれと異なる。この周波数の差からビーム方向の視線風速を求められる。

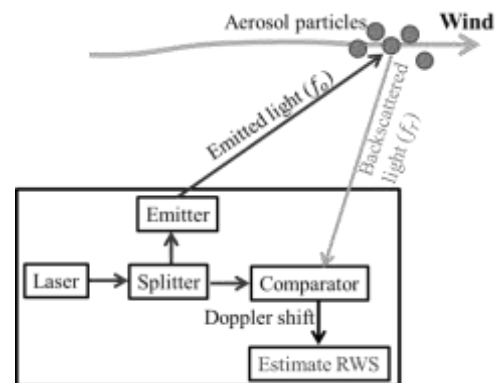


Fig. 1 Schematic of how a Doppler wind Lidar works[13].

本研究では、スキャニングライダーを用いて、風況観測を行った。図2に示すようにスキャニングライダーは銚子沖洋上風況観測タワーのプラットフォームに設置されている。観測タワーは、洋上風車(MH92/2.4、ロータ直径92m、ハブ高さ80m)の東方285m離れた地点に位置する。また、スキャニングライダーの精度検証のために、風向・風速の鉛直分布を計測できる既設のWINDCUBE V1(以後V1ライダーと呼ぶ)を使用した。V1ライダーに関しては超音波風速計による精度検証を行った。

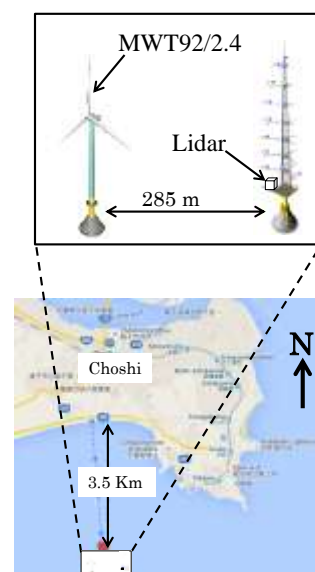


Fig. 2 Choshi offshore wind energy test facility. The zoom in shows the position of the wind turbine and the met mast.

2.2 DBS 法による風向・風速の計測と精度検証

DBS 法による計測では、図 3 に示す視線風速から各風速成分を求める方法が広く使われている。DBS 法による風速の計測では、レーザービームを北、東、南、西に向けてスキャンを行い、視線風速を計測する。計測した視線風速から各高度における各風速成分を次式から算出する。

$$\begin{aligned} u &= \frac{u_{rE} - u_{rW}}{2 \cos \phi} \\ v &= \frac{u_{rN} - u_{rS}}{2 \cos \phi} \\ w &= u_{rV} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u, v, w は西東方向、南北方向及び垂直方向の風速成分である。 $u_{rE}, u_{rW}, u_{rN}, u_{rS}, u_{rV}$ は、東、西、南、北方向及び垂直方向の視線風速である。また、 ϕ は仰角であり、垂直方向のスキャンを除いて 62° に設定されている。なお、鉛直方向のスキャンを行わない場合には w 成分は以下の式から求める。

$$w = \frac{u_{rE} + u_{rN} + u_{rW} + u_{rS}}{4 \sin \phi} \quad (2)$$

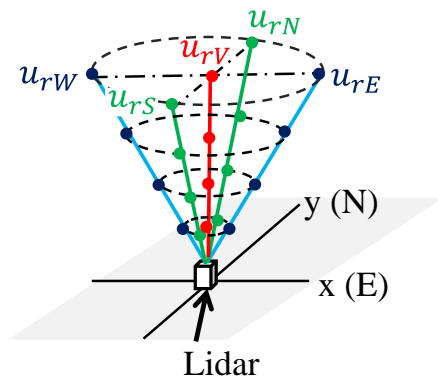


Fig. 3 Doppler beam swinging (DBS) scan configuration.

DBS 法を用いた鉛直分布の計測は 2016 年 3 月 17 日～7 月 10 日まで行った。スキャニングライダーの走査速度は 20 秒/周、V1 ライダーの走査速度は約 5 秒/周であり、スキャニングライダーのデータ数は、V1 ライダーの約 1/4 である。また、天気の影響により、取得データ数はさらに少なくなる場合がある。従って、計測した風速の精度の取得率への依存性を評価する必要がある。風速データの 10 分間の取得率は次式のように定義される。

$$\eta = \frac{N_{mes}}{N_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

ここで、 η は取得率、 N_{max} は 10 分間に計測可能なデータ数、 N_{mes} は実際に計測から得られたデータ数を示す。スキャニングライダーの場合には、 N_{max} は 140 個である。 η が低い時に 10 分間の平均値を求める際に使用可能なデータ数が少なくなり、平均値の誤差が大きくなる可能性がある。

取得率の下限値 η_{lim} を決定し、取得率がその値より小さくなる時に 10 分間平均値を除く。取得率 η_{lim} を 0%～80% に区分し、V1 ライダーの計測結果と高度 140m で比較し、散布図を図 4 に示す。また各統計値の比較を表 1 に示す。ここで、10 分間に一個でもデータが取れたら、その 10 分間の平均値を有効にし、 $\eta_{lim} = 0\%$ とした。これらの図表から、 η_{lim} が小さい場合にはバラツキが多く、決定係数 (R^2) が小さい傾向にあることが分かる。また η_{lim} が 20% の R^2 は η_{lim} が 80% の値と大きく変わらないことが分かる。

図 5 には η_{lim} を 0%～80% まで変えて観測高度別の 10 分間平均風速データの取得率 η_{10} を示す。 η_{10} は次式により求める。

$$\eta_{10} = \frac{\text{No. of 10 min avg data for } \eta \geq \eta_{lim}}{\text{Maximum possible 10 min avg data}} \quad (4)$$

Table 1 Comparison of the measurements of scanning Lidar and V1 Lidar

η_{lim} [%]	Minimum number of data	Slope	Offset	R^2
0	1	0.99	+0.14	0.95
20	28	0.99	+0.13	0.96
40	56	0.99	+0.13	0.96
60	82	0.99	+0.12	0.97
80	112	0.99	+0.12	0.97

図 5 に示すように、 η_{lim} を高く設定する程 η_{10} が低くなる。例えば、 $\eta_{lim} = 80\%$ とした場合に、500 m での η_{10} は 40% 程度であるに対し、 $\eta_{lim} = 20\%$ とした場合同じ高さでも η_{10} は約 70% になる。 η_{lim} を高く設定すると、平均風速データの精度が高くなるが、高い高度での有効なデータ数が大幅に減ってしまう欠点がある。また表 1 から分かるように η_{lim} を 20% と設定した場合でも誤差が殆ど変わらない。従って、本研究

では $\eta_{lim} = 20\%$, すなわち, 10 分の間に取得するデータ数が 30 個程度あれば, 有効なデータとして使用した。

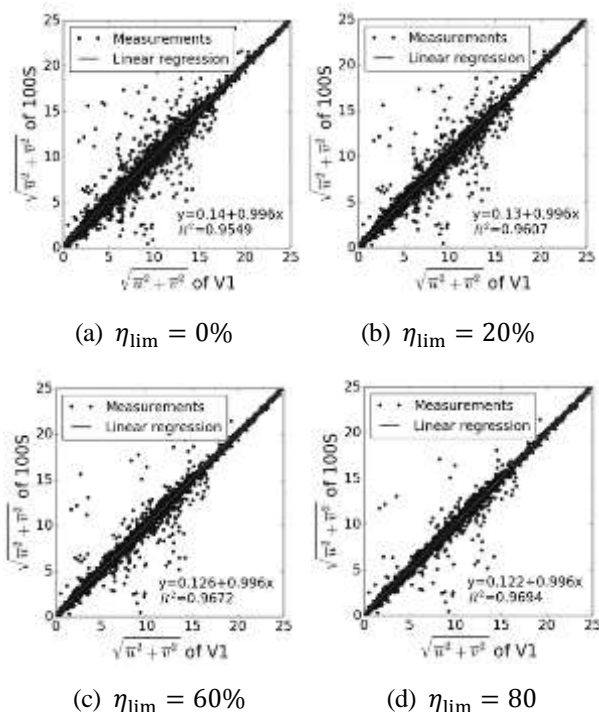


Fig. 4 Comparison of 10 minute average wind speed of scanning Doppler Lidar and V1 Lidar at 140 m height.

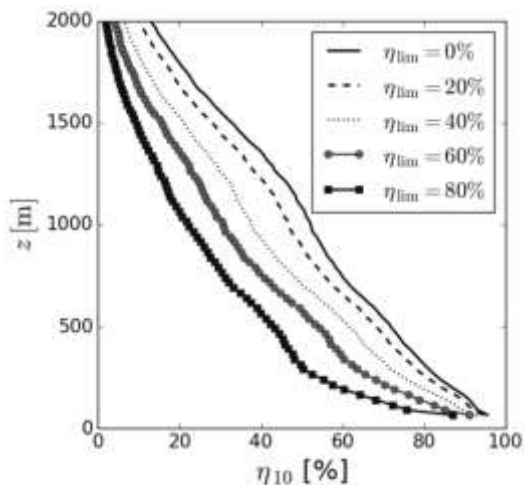


Fig. 5 Vertical profiles of data availability for various η_{lim} values.

2.3 RHI と PPI スキャンによる風向・風速の計測

スキャニングライダーは鉛直方向の風速計測以外に, ヘッド操作により扇形や垂直スライススキャンを用いた風況計測が可能である[12]. 図 6 にはスキャニングライダーでよく使用されるスキャンモードを示す。

Range height indicator (RHI) スキャンは方位角を固定

し, 高度角を変えながら垂直方向にスキャンを行うモードである. Plan-position indicator (PPI) スキャンは高度角を固定し, 方位角を変えながら扇形スキャンを行うモードである。

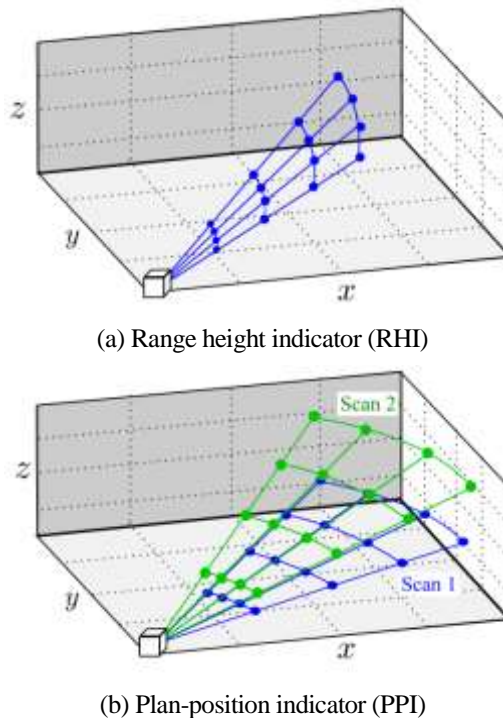


Fig. 6 Two scan modes used in the current study.

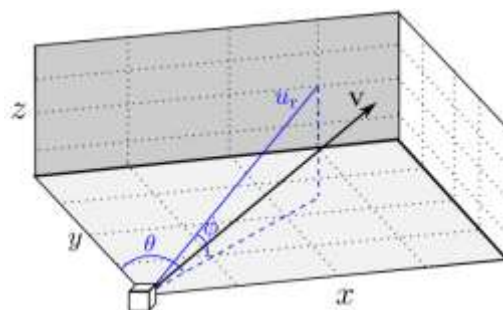


Fig. 7 Relationship between radial wind speed (u_r) and velocity vector (\mathbf{V}).

スキャニングライダーによる測定された視線風速 u_r から, 風速ベクトル \mathbf{V} を求めるには追加処理が必要である. ここではまず RHI スキャンおよび PPI スキャンにより広域の速度場を算出する方法を紹介する. 図 7 に示すように, 視線風速 u_r は, 速度ベクトル \mathbf{V} をレーザービーム方向へ投影することにより, 式 (5) により求めることができる。

$$u_r = \mathbf{V} \cdot \mathbf{a}_r = u \cos \phi \sin \theta + v \cos \phi \cos \theta \quad (5)$$

ここで, \mathbf{V} は風速ベクトル, \mathbf{a}_r は視線方向の単位ベク

トル, θ は方位角, ϕ は仰角である. 垂直速度成分 w は非常に小さいと仮定し無視した. 速度成分 u と v 及びスカラ風速 V の関係は次式により表せる.

$$u = V \sin \alpha, \quad v = V \cos \alpha \quad (6)$$

ここで, $V (= \sqrt{u^2 + v^2})$ はスカラ風速, α は風向である. 測定領域内の全計測点の風向 α は観測タワーまたは風車ナセルに設置された風向計から得られた風向を使用し, 風速は式(5)と(6)から求めた. 本研究では広域場の風速や風車の後流の計測にこの方法を使用した. なお, 風向についてはスキャニングライダーのビームを 360° 回転させ, 視線速度が最大となる方向を風向とするように求めることができる. ただし, この手法では風向を求める場合に 360° のスキャンが必要となるため, 風速計測のサンプル数が減るという欠点がある.

スキャニングライダーの計測精度を検証するために, 観測タワーに隣接する洋上風車のナセル上の風速計の観測値との比較を行った. スキャニングライダーの観測は PPI スキャンにより行い, 風速計測のイメージは図 8 に示す. PPI スキャンではレーザービームがナセル風速計の位置を通るように, 仰角 ϕ を 13.2° に設置し, 風車を中心に方位方向に 40° の範囲にわたってスイープすることによりスキャンを行った. なお, 風車の後流による影響を回避するため, この計測は風車停止時に行った.

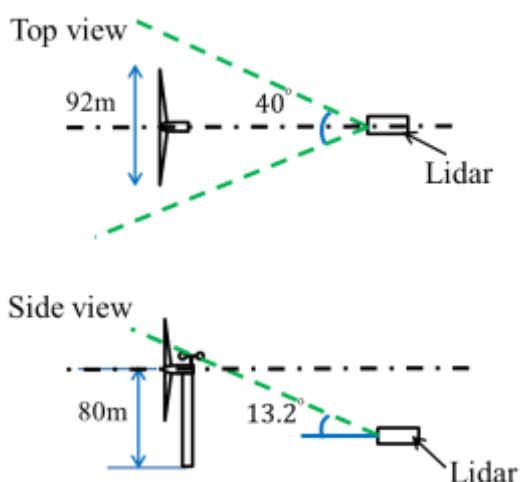


Fig. 8 Illustration of wind speed measurement using PPI scan.

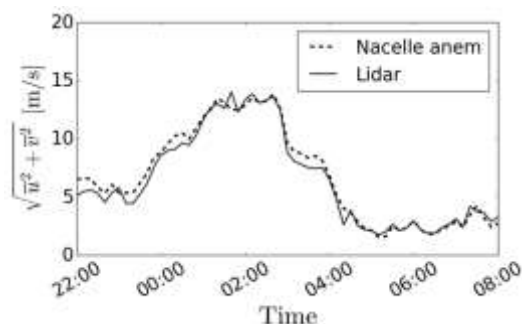
ナセル上の風速計による計測した風速はナセルの影響により実際の風速と異なる. ナセル風速計の計測値

と観測タワーの高さ 80 m で設置された風速計の観測の比較を行った. 80 m で設置された三つの三枚式風速計から FINO3 法を用いて風速を求めた. その結果, ナセル風速計の値は式 (7) に示すように観測タワーの値より平均的に 5.7% 増大していることが分かった.

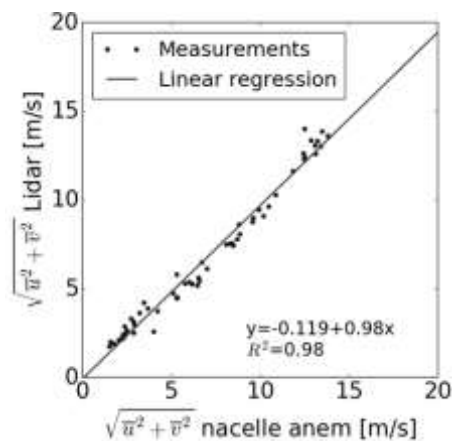
$$\bar{V}_{nac} = 1.057 \bar{V}_{met,80} \quad (7)$$

ここで, \bar{V}_{nac} はナセル風速計の 10 分間平均風速, $\bar{V}_{met,80}$ は観測タワーの高さ 80 m での 10 分間平均風速である. ナセル風速計の値を式 (7) の風速比, 1.057 を用いて補正を行った後, スキャニングライダーの測定値の精度検証を行った.

図 9 には, スキャニングライダーにより測定された 10 分間平均風速とナセル風速計で測定された風速の時系列および相関図を示す. 両者はほぼ一致しており, 決定係数は 0.98, 回帰線の傾きは 0.98 である.



(a) Time series data



(b) Scatter plot

Fig. 9 Comparison of mean wind speeds from the scanning Lidar and the nacelle anemometer. Measurement period: 25 Oct. 2016 22:00 to 26 Oct. 2016 8:00.

3. スキャニングライダーによる計測例

本章ではスキャニングライダーを用いて, DBS 法に

よる風速の鉛直分布, RHI スキャンによる沿岸風速の水平と鉛直分布および PPI スキャンによる風車後流の計測例を示す.

3.1 DBS 法による風速の鉛直分布の計測例

DBS 法により得られた計測データを用いて, 観測地点での鉛直風速分布の特性を明らかにするとともに気象シミュレーションの結果をライダー観測結果と比較することによりその予測精度を検証する. 気象シミュレーションにはメソスケールモデル WRF Ver. 3.4.1 を用いており, その詳細については石原ら[14]を参照されたい.

図 10 には, 2016 年 5 月の高度 215m における 10 分間平均風速の予測値と観測値の時系列の比較を示す. WRF による予測は 2km, 667m 及び 222m の 3 通りの格子解像度を用いて行った. 風速の予測値は解像度に関わらず観測値とよく一致していることが分かる.

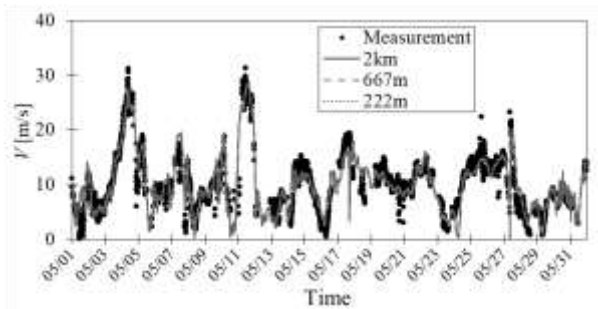
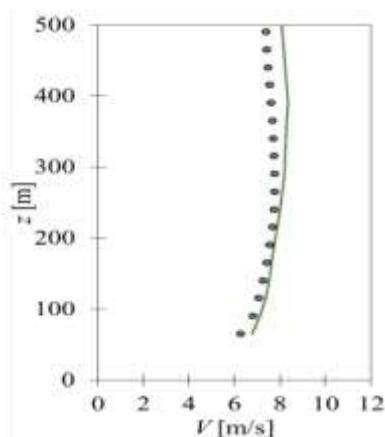
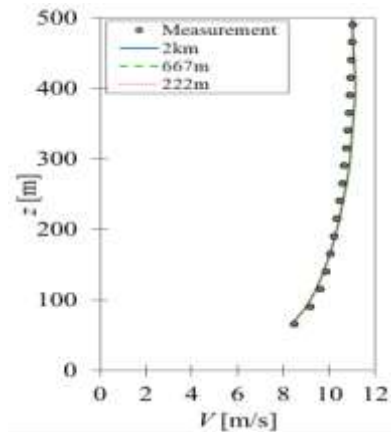


Fig. 10 Time series of wind speed obtained from the mesoscale simulation and the Lidar measurement (for May 2016).



(a) From land



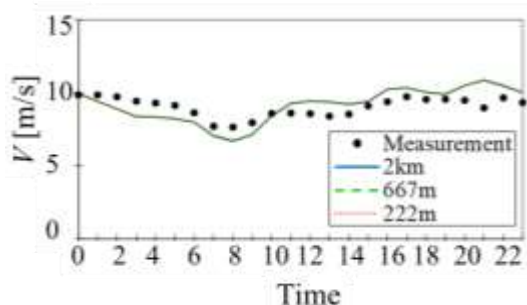
(b) From sea

Fig. 11 Vertical profiles of horizontal velocity for wind blowing from land and that from sea (for May 2016).

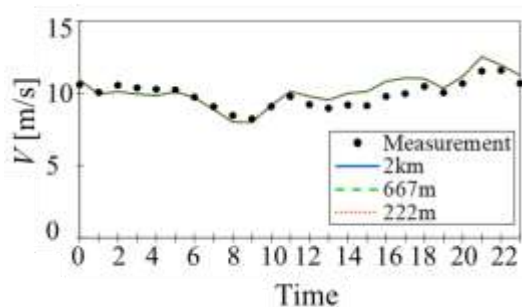
陸風と海風の違いを調べるために, 海岸線を考慮し, 反時計周り $78.75^\circ \sim 258.75^\circ$ の範囲を陸風, 時計回り $78.75^\circ \sim 213.75^\circ$ の範囲を海風と定義した. 図 11 は 2016 年 5 月の月平均風速の鉛直分布を示す. この図から, 気象シミュレーションにより予測した月平均風速の鉛直分布は, 海風時の観測値とよく一致していることが分かる. 陸風に関しては, 高度約 300m までの気象シミュレーションによる予測値は観測値をよく再現しているが, それより高いところでは気象シミュレーションの予測値は最大 10% 程度で過大評価されている.

予測値と観測値の月平均風速の Bias は, 高度 140m, 215m 及び 490m でそれぞれ, 0.7%, 1.8%, 2.3% 程度である. 解像度による月平均風速の違いは, 最も高い 490m で 0.05% 程度である. さらに, 図 11 からは 500m の上空まで陸風に比べ海風のほうが強いことが分かる. 風車のハブ高さでは陸風が 6.8m/s に対し, 海風は 9.2m/s であり, 35% も高いことが分かる. このことから海岸線近傍の洋上風力発電所では風向により発電出力が大きく変化することが考えられる.

図 12 に同じく 2016 年 5 月(1ヶ月分) のデータを使って, スキャングライダーの計測値と気象シミュレーションの予測値の高度別日変化を示す. ここで代表的に高さ 140m と 490m での 1 時間平均風速を示す. 気象シミュレーションから得られた日変化は計測値と同じ傾向を示している. ただし, 深夜から 9:00 までは観測値に比べ, 気象シミュレーションの方は若干過小評価され, それ以降の時間帯には若干過大評価されている. その差は低い高度の 140m で比較的大きいことが分かる.



(a) Height: 140m



(b) Height: 490m

Fig. 12 Diurnal cycle of mean wind speed from the mesoscale simulation and the Lidar measurement (for May 2016)

3.2 RHI スキャンによる沿岸風速の計測例

沿岸風速の計測例として、洋上観測タワーから海岸までの風速を計測した。スキヤニングライダーを北に向けて $\phi = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲内においてRHI スキャンにより計測を行った。観測期間は、2016年11月17日から2017年1月23日までの約2ヶ月間で、図13の風配図に示すように、北北西の風が卓越しているが、北風の割合も少なくない。今回行った計測では、風向は観測タワーで計測した値を使用し、風速を式(5)と(6)を用いて算出した。

観測データは、図14に示すように $\delta y \times \delta z = 50 \times 50 \text{ m}^2$ の領域に分けて、領域内の平均風速を求めた。またスキヤニングライダーから離れた位置のデータ数が少なくなることを勘案し、領域平均には3時間分のスキヤンデータを使用した。1分間に1回のRHI スキャンを実施しているため、3時間に任意の計測点で180個のデータが得られている。

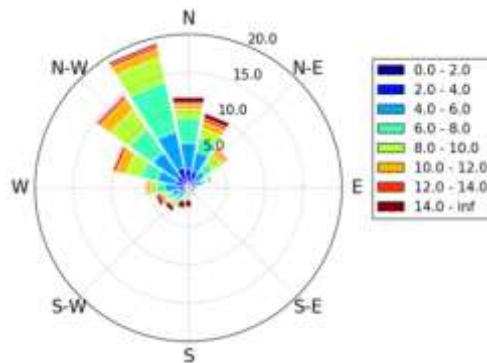


Fig. 13 Wind rose showing wind speed and wind direction as measured at 80 m height at met mast (from 17 Nov 2016 to 23 Jan 2017).

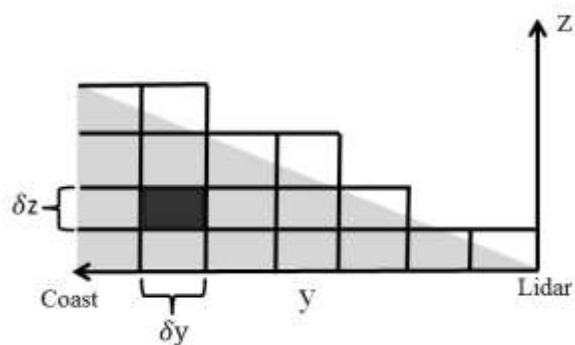


Fig. 14 Schematic of the domain averaging approach.

図15は高度100mにおける離岸距離と風速の関係を示す。気象シミュレーションとスキヤニングライダーの計測から得られた風速の水平分布が、ほぼ同じであることが分かる。しかし、計測値では、陸に近い1000m付近では風速の低下が見られ2000mまで緩やかに上昇している。陸から発達した内部境界層の回復により、風速が上昇していると考えられる。一方、気象シミュレーションでは、風速は離岸距離によらずほぼ一定の値を示しているため、内部境界層の回復が完全に再現出来ていないことが分かる。

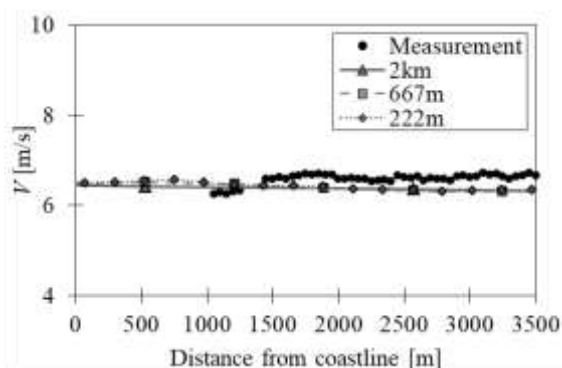
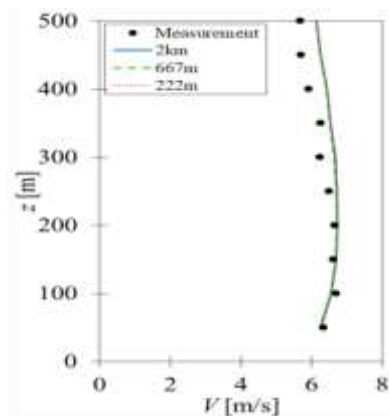
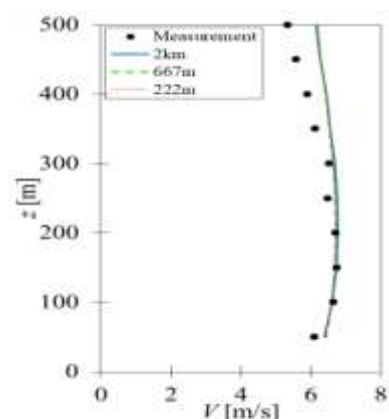


Fig. 15 Variation of mean wind speed as the function of distance from coastline at the height of 100 m.



(a) 1950 m from coast



(b) 2950 m from coast

Fig. 16 Vertical profiles of horizontal velocity for two different distance from the coastline.

図 16 は、離岸距離 1950m 及び 2950m の地点の風速の鉛直分布を示す。いずれの地点においても、格子の空間分解能による影響が殆どないことがわかる。高度 200m までの気象シミュレーションによる予測値は、離岸距離別の観測値の鉛直分布をよく再現している。200m より高いところでは、気象シミュレーションの予測値は若干過大評価されている。今回の計測範囲においては、離岸距離 2950m、高度 500m の位置での風速の差が 16% で一番大きくなっている。

これまでに気象シミュレーションにより予測された洋上風況の精度検証は観測タワーまたは V1 ライダーによる観測データが用いられているため、検証できた高度は 200m 以下である。本研究で用いられたスキャニングライダーの計測データを用いれば、気象シミュレーションから得られた 500m までの高高度の風速分布を検証できることを示した。

3.3 PPI スキャンによる風車後流の計測例

ウィンドファーム内の風車の後流は、下流側の風車

の発電出力量の減少や疲労荷重の増大をもたらすため、ウィンドファームを設計する際にはその影響を正確に評価することが不可欠である。ウェークモデルを用いて風車後流の予測を行い、その影響を評価するが、実際の観測データとの比較検証を行っている研究が少ない。本研究ではスキャニングライダーによる風車後流を計測し、石原と銭[15]により提案されたウェークモデルの検証を行った。モデルの詳細に関しては文献[15]を参照されたい。

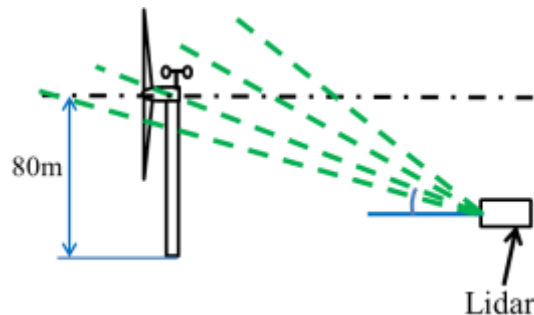


Fig. 17 Schematic of the vertical cross section of multiple PPI scans for the measurement of wind turbine wake. Dot-dashed line represents the location of the hub height plane at which wind speed data is extracted.

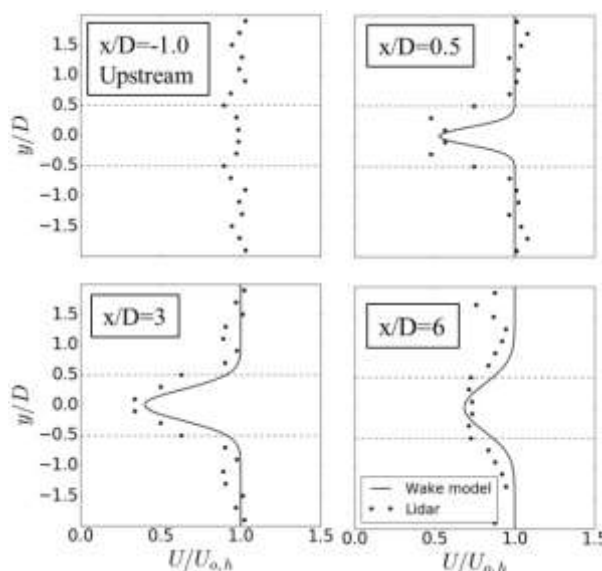


Fig. 18 Horizontal profiles of mean wind speed at hub height. Lidar data are collected on 28 Sep 2016 from 16:40 to 22:45.

ハブ高さの後流域における風速を捉えるために、図 17 に示しているように PPI スキャンにより計測を実施

した。計測された視線風速データからハブ高さの視線風速データのみを抽出し、式(5)と(6)を用いて風速を算出した。計測時の平均風速は 7.6 m/s であり、これは風車の定格風速 13 m/s より低いため、推力係数を0.8として用いた[16]。乱流強度は風況観測タワーに設置されている超音波風速計から計測された値を使用した。計測時の乱流強度は 3.5% である。

図 18 にはスキヤニングライダーにより計測された風車後流域の平均風速とウエークモデルにより求めた平均風速の水平分布の比較を示す。スキヤニングライダーのデータは、2016年9月28日16:40~22:45の計測値で風向 225° ~235° の範囲内のものを用いた。また 3.2 節と同じように領域平均を行った。ただし、この計測では領域の大きさを $20 \times 20 \text{ m}^2$ とした。ウエークモデルの予測値は実測値と同じ傾向を示している。風速の減速は $x/D = 3$ の地点で最も大きく、 $x/D = 6$ の地点においても減速が続いていることが分かる。 $x/D=0.5$ では二重ピークを持つ風速分布が観察される。これはロータの半径方向の力の分布により生じ、多くの数値シミュレーションや実験で観察されている。ウエークモデルでは、風速の減速を一つのガウス分布で表現しているため、この現象が再現できない。一方、 $x/D=3$ と $x/D=6$ ではウエーク領域の乱流混合により、明確な二重ピークが見られない。ウエークモデルの予測結果も観測結果と概ね一致した。なお、本比較では、ヨーミスアライメントの影響を入れていないが、今後さらに詳細な検討を行う予定である。

4. 結論

本研究では洋上風力発電実証サイトにおいて、スキヤニングライダーの精度検証と風況計測への応用を実施し、以下の結果が得た。

- 1) スキヤニングライダーによる観測結果は、既設のドップラーライダーの観測結果と高い相関を示した。取得率は 20% あれば、精度の高い 10 分平均風速が得られることが分かった。また広域場のスキャンから得られた視線風速と別の風向計から得られた風向を使用し、広域場の風速を求める手法を提案した。この手法により求めた風速は、ナセル風速計の観測結果とよい一致を示した。
- 2) DBS 法により計測された風速の鉛直分布と気象シミュレーションと比較した結果、気象シミュレーションは海風をよく再現しているが、陸風の鉛直分布については 300m より高い高度での風速を若干過大評価している。

3) RHI スキャンを用いて沿岸風速の計測を行った結果、陸に近いところでは風速が低く観察され、離岸距離 2000m まで緩やかに上昇していることが分かった。これは陸から発達した内部境界層によるものと思われる。

4) PPI スキャンにより計測された風車後流の風速は、 $x/D=0.5$ では明確な二重ピークを持つ風速分布が観察される。風車から離れると、計測された風速とウエークモデルの予測値は同じ傾向を示した。

本研究ではスキヤニングドップラーライダーから得られた視線風速から速度ベクトルを算出する際に、観測タワーおよびナセルに設置した風向計の風向を利用したため、スキヤニングドップラーライダーの応用を制限することになるため、今後風速の計測と同時に、風向も計測する手法を開発する予定である。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」で得られた研究成果である。ライダー計測にあたり、東京電力ホールディングス佐藤功也氏と研究を進めるにあたり、東京大学中尾徹氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] I. Holleman, "Doppler Radar Wind Profiles," 2003.
- [2] K. A. Browning and R. Wexler, "The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar," *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Vol. 7, No. 1, pp. 105–113, 1968.
- [3] D. A. Smith, M. Harris, A. S. Coffey, T. Mikkelsen, H. E. Jørgensen, J. Mann, and R. Danielian, "Wind Lidar Evaluation at the Danish Wind Test Site in Høvsøre," *Wind Energy*, Vol. 9, pp. 87–93, 2006.
- [4] A. Sathe, J. Mann, J. Gottschall, and M. S. Courtney, "Can wind lidars measure turbulence?," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 28, No. 7, pp. 853–868, 2011..
- [5] K. Vogstad, A. H. Simonsen, K. J. Brennan, and J. A. Lund, "Uncertainty of Lidars in complex terrain," in *EWEA, Vienna, Austria*, 2013.
- [6] S. Lang and E. McKeogh, "LIDAR and SODAR measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purposes," *Remote Sens.*, vol. 3, pp. 1871–1901, 2011.
- [7] G. N. Kelley, N D; Jonkman, B J; Scott, "Comparing Pulse Doppler LIDAR with SODAR and Direct Measurements for

- Wind Assessment,” in *American Wind Energy Association WindPower 2007 Conference and Exhibition*, 2007.
- [8] J. Gottschall and M. Courtney, “Verification test for three WindCube WLS7 LiDARs at the Høvsøre test site,” 2010.
- [9] C. C. Easterbrook, “Estimating Horizontal Wind Fields by Two-dimensional Curve Fitting of Single Doppler Radar Measurements,” *Radar Meteorol. Conf.*, pp. 214–219, 1975.
- [10] R. Krishnamurthy, “Wind Farm Characterization and Control using Coherent Doppler Lidar,” Arizona State University, 2013.
- [11] G. V. Iungo, Y. T. Wu, and F. Porté-Agel, “Field measurements of wind turbine wakes with lidars,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 30, pp. 274–287, 2013.
- [12] Windcube, <http://www.leosphere.com/wp-content/uploads/2016/12/WINDCUBE-Scannant-Brochure-4p-20151116-HD.pdf>.
- [13] A. Clifton, “Remote Sensing of Complex Flows by Doppler Wind Lidar: Issues and Preliminary Recommendations,” Technical Report TP-5000-64634, NREL, 2015.
- [14] 石原孟, 山口敦, ゴイトジェイ プラカス, 種本純, “3D スキャニングライダーによる気象シミュレーションの予測精度の検証,” *日本風工学会誌*, Vol. 42, No. 2, pp. 87–88, 2017.
- [15] Ishihara, G.W. Qian, A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018. (Accepted)
- [16] 山口敦, サリプラサンティ ウィディヤシ, 石原孟, “風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証,” *第23回風工学シンポジウム論文集*, pp. 133–138, 2014.