

洋上での風況調査

日本気象株式会社 高祖研一，荒木龍蔵，西嶋 裕，坂田啓朗

1. はじめに

1.1 背景と目的

わが国において、再エネ海域利用法に基づく洋上風力発電事業者の公募が開始されるなど洋上風力発電の導入に向けた動きが活発化してきている。先行する欧州では、90年代から洋上風力発電所が設置され、現在では北海で大規模な発電所が運用されている。

洋上風力発電所の設置に向けて事業性評価、ウィンドファーム認証（工事計画届）を行う必要がある。事業性評価においては、重要な指標の一つ「発電量」の評価のために、風況調査が行われる。ウィンドファーム認証においては、風力発電所を建設するサイトの環境条件において安全性が設計上担保されていることを確認するために、高精度な風況調査が求められる。

風況調査においては、現地観測と数値シミュレーションを用いるが、先行する欧州ではこれら手法の確立や発展が進んでおり、わが国においても同様の発展が必要である。

本稿では風況調査について、海外の洋上風況調査事例をまとめ、わが国の動向、今後の展望について示す。

1.2 文書構成

本稿では、第2章で海外の洋上風況調査の事例と発展について、第3章でわが国における洋上風況調査の事例、最新研究プロジェクトについて述べ、第4章で今後の展望について記述する。

また本稿で記述するライダーとは、リモートセンシング技術のひとつで、ドップラー効果により、観測対象の相対的な移動速度と変位を観測することで風向風速を算出するドップラーライダーである。その種類には、スキャニングドップラーライダー（以降、スキャニングライダー）、フローティングドップラーライダー（以降、フローティングライダー）とある。

2. 海外の洋上風況調査

2.1 概要

本章では、欧州を中心に海外の風況調査手法や先進的な研究事例について紹介する。まず、気象観測マスト、スキャニングライダー、フローティングライダーといった洋上風況現場観測手法について説明し、その

後に数値シミュレーションによる風況調査について説明する。

2.2 洋上気象観測マストの事例

この節では、欧州で行われた代表的な洋上気象観測マストの事例を紹介する。洋上気象観測マストでの観測は非常に大きなコストがかかるものの、研究の面からは、洋上の気象・海象、海底地形・地質、環境など幅広い調査が実施でき、実際にウィンドファームを建設する際の貴重で重要な知見が得られている。本稿では洋上風況観測に関して記述しているため、風況観測手法の技術進展を中心にいくつかの事例とその周辺地域の現状を紹介する。

オランダ沖において洋上気象観測マストの運用が2005年夏より開始された。¹⁾海面高は116mであり、高度21m, 70m, 116mを観測しており、これはハブ高70mの風車における、ブレード上端付近までをカバーすることを想定している。このマストは3つの軸で構成され、各軸からブームが出ており、その先に観測機器が設置されている。つまり、各観測高度に3つの観測機器が設置されている。観測値の解析結果から、風上側にある風速計を用いることでマスト自身による乱れの影響の少ない値が得られることがわかった。

このマストはEgmond aan Zee Wind Farm建設後には、風車のウェイク観測、負荷、発電性能の調査といった目的で用いられている。なお、Egmond aan Zee Wind Farmの総設備容量は108MWである。

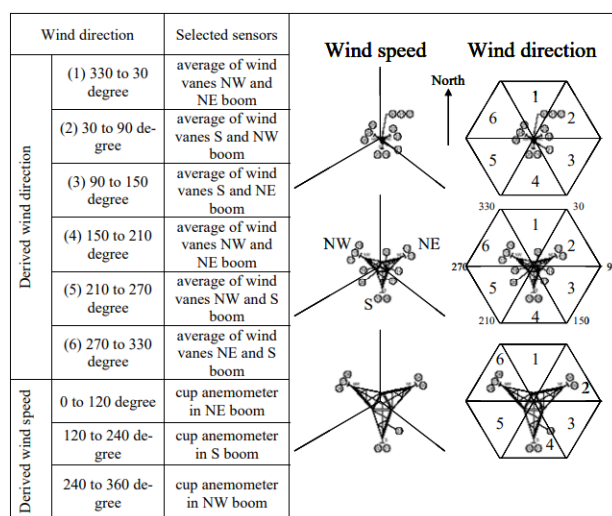


図 2.1 Egmond aan Zee での各風速計の対象風向¹⁾

2002 年 1 月にドイツ政府は、北海とバルト海における計画・申請段階にある主要な洋上風力発電所近傍のうちの 3 ヶ所に、2 つの研究開発目的のプラットフォームを建設することを決定した。このプロジェクトが FINO (独: Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee, 北海とバルト海の研究プラットフォームの意) である。²⁾建設されたプラットフォームは計画順に FINO1, FINO2, FINO3 と呼ばれている。このプロジェクトの目的は 2 つあり、1 つ目がウィンドファーム設備の技術設計に関する未解決の課題の解明へ寄与することで、風況と海象の測定、海底状況の把握や雷の測定が行われている。2 つ目はウィンドファームに関連する環境に関する知識不足を補完することで、バードストライクやイルカ、底生生物に関する調査・研究、さらに、船舶衝突に伴う環境被害の防止に関する研究が行われている。このような観測・調査・研究によって、ウィンドファーム建設に関する知見を得た結果、現在では各プラットフォーム周辺には大規模なウィンドファームが建設・計画されている。本項では、FINO1 と FINO3 について紹介する。

FINO1 は、ドイツ沿岸の北海上(54°00' 53.5" N, 6° 35'15.5" E)に設置され、2003 年夏に稼働したプラットフォームである。³⁾ヘリポートが搭載されており、ヘリコプターでもアクセスができる。

地点の水深は 28.0m であるのに対して、ジャケット式の基礎は海面下 58.0m までである。海面高は 101.5m で、現在の大型化する風車のハブ高度も 100m を少し上回るくらいであることを考えると、稼働から 20 年近い現在でも風況調査にも十分活用できるスペックである。4 つの軸で構成された四角形のマストから、T 字に風速計が 1 高度あたり 2 機設置されている。

この構造の場合、T 字に対して相対に風が吹走する場合は、観測機器が乱れの影響を受けにくい。逆に T 字に平行に風が吹走する場合は、マスト自体の乱れの影響を受けやすいことが指摘されている。⁴⁾そのため、観測値の補正手法が研究され、“UAM mast correction” (UAM = uniform ambient flow mast correction) という手法が提案されている。これは Westerhellweg et al., (I)⁵⁾に詳述されている。

周辺にはドイツで初となる洋上ウィンドファームである Alpha Ventus が 2009 年から稼働している他、Borkum Riffgrund, Trianel Windpark Borkum と称される総設備容量数百 MW 級の大規模なウィンドファームが建設・計画されている。⁶⁾

FINO3 は、ドイツ沿岸の北海上(55° 11.7' N, 7° 9.5' E)に設置され、2009 年 8 月に稼働したプラットフォームである。衛星通信によってデータをモニタリングしている。ヘリポートが搭載されており、ヘリコプターでもアクセスができる。

地点の水深が 22.0m であるのに対して、モノパイル式の基礎は海面下 52.0m までである。マストの海面高は 120m で、3 つの軸で構成された三角形の形状をしている。塔の上から見た場合に三角形の各辺から反時計回りに伸び出た先に風速計があり、同高度に 3 機置されている。このように、各風速計が前後 60°ずつ、つまり 120°ずつ観測する(図 2.2 の 3 色の扇型が観測風向を表している)ことで、マストによる乱れの小さい、風向によって導き出された位置の観測が選択される仕組みとなっている。⁵⁾これが俗に「FINO3 ルール」と呼ばれるもので、IEC の基準にもこの内容が記載されている。このように風速計の選択一つをとっても FINO による技術の進歩がみられる。なお、FINO1 の項での記述と矛盾しているようにも思えるが、これはマストの構造の違いによって乱れの構造が異なったためと考えられる。そのため、構造に合わせた処理が行われることが期待されることがわかる。

なお、周辺では、2010 年半ばより総設備容量 300MW 程度の Butendieck, DanTysk, Sandbank⁸⁾⁹⁾といった大規模なウィンドファームが建設されている。

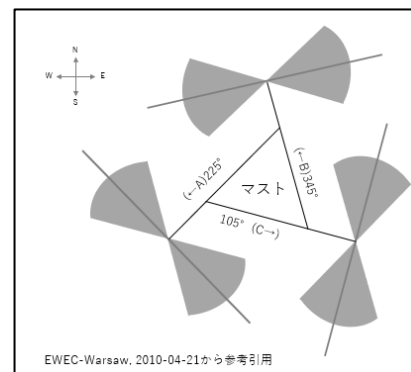


図 2.2 FINO3 の各風速計の対象風向⁴⁾

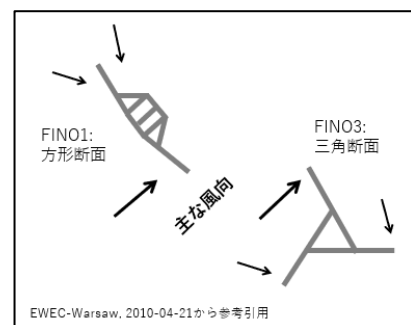


図 2.3 FINO1 と FINO3 の模式図⁴⁾

本節では欧州での洋上風況調査における気象観測マストの事例とその風況観測手法について述べた。欧州でも、初期段階ではこうした気象観測マストによって風況調査を行っており、導入に伴って、その風況観測についても、技術が発展していることがうかがえる。また、その風況観測の知見を以て、ウィンドファームが建設されたり、その後の研究に活用されたりと非常に有意義に生かされている点もわが国は見習わなければならない。

2.3 スキャンングライダーの実証

スキャンングライダーは陸上に設置するため、設置計画、工事が比較的容易な調査である。欧州では New European Wind Atlas project (NEWA)¹⁰⁾での実証実験を代表として風況調査に導入するための研究が進んでいる。しかし、計測できる距離がせいぜい 10km 程度先までであるため、欧州で主流の離岸距離数十 km 以上のウィンドファーム建設のための風況調査には採用できないためか、洋上での導入は他の手法と比べると欧州での研究事例が少ないように思われる。この節では、欧州で行われたスキャンングライダーによって洋上の観測が行われた実証実験の 2 事例を紹介する。

1 つ目は、2015 年 11 月から翌年 2 月にデンマークで行われた NEWA の一つの実証実験である RUNE (Reducing uncertainty of near-shore wind resource estimates using onshore LiDAR)プロジェクトによるものである。スキャンングライダーに関する幾つかの検証が行われており、陸上での事前検証では 116.5m の気象観測マストとの比較において良い結果を示し¹¹⁾、洋上の実証観測では、デュアル観測とシングル観測の比較¹²⁾やスキャンングライダー観測と衛星観測との比較¹³⁾などが行われた。

2 つ目は、2016 年 1 月から同年 5 月にアイルランドのダブリン湾で、デュアル観測を中心に実証実験が行われた。¹⁴⁾沿岸と洋上のリファレンスの鉛直照射型ライダーを用いて、2 機種を精度を比較検証している。また、デュアル観測がシングル測定よりも大幅に精度が良いことを示した。洋上観測との比較が行われており、先進的な検証である。

本節では欧州での洋上風況調査におけるスキャンングライダーの実証実験の 2 事例を紹介した。スキャンングライダーの精度検証が進みつつあり、今後の精度の確立と今後の発展が期待される。

2.4 フローティングライダーの発達

Carbon Trust 社の資料 (2018 年) によると、13 機種の FLS (フローティング・ライダー・システム) があり、北ヨーロッパを中心に北アメリカや台湾などを含めて 40 サイト、84 プロジェクトにおいて FLS が採用されている。¹⁵⁾また、現在も新しい機種の開発は継続され、採用されるサイトやプロジェクトの数も増えており、韓国や日本でも採用されている。



図 2.4 FLS の歴史¹⁵⁾

FLS は従来の洋上風況観測タワーに取って代わり、大幅なコスト削減と自由な移設が可能なることから開発が進められてきたが、2013 年 Carbon Trust OWA において、その商用化に向けたロードマップが作成された。そこでは、以下の表のように、技術の習熟度に合わせたレベル分けがなされ、それぞれのレベルを達成するための技術要求基準が設定されている。¹⁶⁾

表 2.1 FLS の商用化ロードマップ

レベル	条件と内容
Baseline (Stage1)	条件: 陸上プロジェクトにおいて実績のあるライダー機種を採用している
	内容: 洋上風況観測塔への補完的使用が可能
Pre-Commercial (Stage2)	条件: Stage2 の基準をクリアしている
	内容: 条件付きで商用利用が可能
Commercial (Stage3)	条件: Stage3 の基準をクリアしている
	内容: 洋上観測塔と同様に(設備稼働率, 風向風速データ精度, データ取得率において)商用利用が可能

※15)より筆者記

Stage 2 や Stage 3 を達成するためには、6 ヶ月間のトライアル、あるいは Wind Resource Assessment (WRA; 風況資源量調査)の期間中に設備稼働率、データ取得率、風向風速の精度に関する基準をクリアしなければならない。

2018 年にはロードマップのバージョン 2 が発表され、主に Stage 3 の技術要求基準が改定された。¹⁷⁾現在のところ Stage 3 を達成している機種は無いが、Stage 2 にあっても、事業者によっては WRA に採用することもあり、そのようなプロジェクトが近年増えてきている。例えば、DONG Energy 社（現 Ørsted 社）の Burbo Bank Extension は世界で初めて FLS によって取得したデータをもとに WRA を行い、資金調達を行ったプロジェクトである。¹⁸⁾

現在 Stage 2 の FLS は 8 機種あり¹⁹⁾、日本や日本と似た気象海象条件を持つ台湾や韓国において導入された実績があるのは Fugro 社、Axys Technology 社、そして Eolos 社であり、それぞれ日本に支社やパートナーが存在する。

Fugro 社の FLS は、ノルウェーやオランダ、イギリスで実績がある。

Axys Technology 社の FLS は、アジア地域では 2013 年に台湾で初めて導入され、その後 7 プロジェクト以上に携わっている。そして、2020 年には日本で初めて同社の FLS が NEDO プロジェクトにおいて、むつ小川原港沖に導入された。

Eolos 社の FLS は、アジア地域では 2020 年に韓国の蔚山（ウルサン）に初めて導入され、3 プロジェクトに携わっている。Royal Dutch Shell 社が開発を行うプロジェクトでは、蔚山の沖合 60km、水深 150m の場所に同社の FLS が設置されている。²⁰⁾

近い将来 Stage 3 を達成されると言われる FLS もあり、今後さらに FLS の採用が増えると考えられる。



図 2.5 Eolos フローティングライダー（Eolos 社提供）

2.5 数値シミュレーション

数値シミュレーションは風況調査における発電量推定から風車設計強度の算定に至るまで、様々な役割を果たしている。この節では、風況調査における数値シミュレーションの役割と海外での技術発展について説

明した上で、最新の海外の最新の研究について言及する。

数値シミュレーションはそのスケールの違いによって、様々な役割を果たしている²¹⁾（図 2.6）。

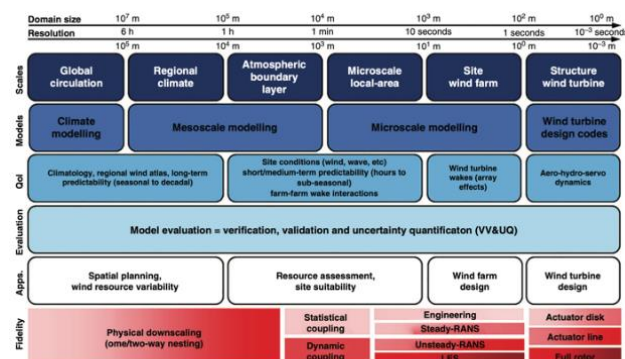


FIGURE 2 | Wind assessment modeling framework indicating typical model scale ranges, relevant outputs for different applications, and high-level fidelity levels (the shading indicates the computational cost). All the models share a common model evaluation framework although each model category has different quantities of interest (QoI) and performance metrics depending on the intended use (application).

図 2.6 風況調査のモデルのフレームワーク²¹⁾

まず、グローバル～メソスケール（解像度 10km 以上）のモデルでは気候変化による長期変動の把握に用いられる。欧州では、客観解析値を代表とする全球モデルを用いて風速の長期変動を調べた研究が行われてきている。その研究結果の例を挙げると、欧州での近い将来（10 年～20 年単位で）の発電所の出力量の変化が-12%から 8%の間で変化するという研究²²⁾や欧州における 21 世紀内の風速の変化はほとんどの地域で±5%程度とする研究²³⁾などがある。このように全球モデルによって、風速の長期的な変動を予測する技術が確立してきており、その予測が進みつつある。

次にメソスケール（解像度 1~10km）のモデルでは、発電量推定を中心とした風況調査が行われる。このメソスケールモデルとして近年普及しているのがアメリカ大気研究センターとアメリカ環境予測センターを中心に作成された WRF (the Weather Research and Forecast model) である。WRF は客観解析値や衛星観測値を取り込んでダウンスケーリングすることにより、メソスケールの風況推定値を算出している。WRF の特徴として、力学的な効果だけでなく、大気安定度を代表とする熱力学的な効果も考慮できるため、熱力学的な影響の大きい洋上では熱的な要素を考慮できない流体モデルと比較して優位性がある。この WRF を用いた風況調査の研究が進められており、最近では、NEWA プロジェクトの一つとして、欧州周辺の風況再現が行われている。²⁴⁾

マイクロスケールモデルでは、風車同士のウェイクの影響や風車自体の設計についてのシミュレーション

が行われる。欧州では、現場観測値を取り込むマイクロスケールモデル WAsP（線形）によるシミュレーションもサイト固有のローカルな風況特性を把握するために古くから用いられていた。最近では、洋上ウィンドファームの導入に従って、風車ウェイクの考慮が重要であることが明らかになってきた。その再現のために様々なマイクロスケールのモデルが開発されている。また、近年では、メソスケールの WRF の計算を取り込んだり、カップリングしたりして、さらにダウンスケールを行って、ウェイク再現を行うモデルが開発されつつある。^{21) 25)}

数値シミュレーションによって風況に関する様々な知見を得て、研究・開発が進んでいる。こうした発展は計算技術の発達に伴ったものである。今後も計算技術の発展が見込まれるため、数値シミュレーションによる、より詳細な風況調査が行われることを期待する。

2.6 まとめ

海外の洋上風況調査は、現地観測手法においては、気象マストを主で用いながらも、最近では気象マストからリモートセンシング技術（ドップラーライダー）へ移行も見られている。

数値シミュレーションではダウンスケーリングによって 1km 以下のスケールでのシミュレーションが行われ、資源量評価だけでなくウェイクの再現なども行われている。

3. 日本の洋上風況調査

3.1. 概要

本章では、わが国において取り組まれている洋上での風況調査について、実証実験をはじめ先進的な事例について紹介する。気象観測マスト、スキャニングライダー、フローティングライダーといった洋上風況観測手法について説明し、その後に数値シミュレーションによる風況調査について説明する。

3.2 洋上気象観測マスト

この節では、わが国で行われた代表的な洋上気象観測マストの事例を紹介する。

3.2.1 千葉県銚子市の事例^{26) 27)}

千葉県銚子沖に 2012 年 8 月に観測タワー（海面上 95m；重力式基礎）、同年 10 月に洋上風力発電施設（2400kW 機；重力式）を設置（図 3.1）し観測された。

観測タワーには三杯風速計 22 台、矢羽根風向計 23 台、超音波風向風速計 3 台、ドップラーライダー 1 台が設置され、風況観測以外にも、気圧、温湿度、雨量など計測されている。



図 3.1 着床式洋上風力発電実証研究施設（銚子沖）²⁶⁾

風速計の設置基準、観測値の処理方法について FINO3 と同様の方法を用いており、一定の精度の風速値が得られている。また、一定精度の風速値が得られるとしたものの、さらに良い精度にするため、CFD によるタワー周りの乱れの解析を行い、それによって、流れとの相対的な風速比（補正係数）を求め、観測値に乗じている（銚子ルール）。これによりさらに良い精度となったことが示されている。

3.2.2 福岡県北九州市の事例²⁸⁾

福岡県北九州市沖に、2012 年 6 月に観測タワー（海面上 85m；ハイブリッド重力式基礎）、2013 年 3 月に洋上風力発電施設（2000kW 機；ハイブリッド重力式基礎）を設置し観測された。

観測タワーには三杯風速計 12 台、矢羽根風向計 9 台、超音波風向風速計 4 台、ドップラーライダー 1 台が設置され、風況観測以外にも、気圧、温湿度、雨量など計測されている。センサーの観測タワーの影響の補正のために CFD による解析が行われている。

今後 CFD モデルによる再現が建設前の検討や風速の補正の主流になる可能性も示唆されている。

3.2.3 福島のプラットフォーム²⁹⁾

2013 年 11 月から 2019 年 3 月に福島県沖にて日立製作所製 2MW、5MW 風車、三菱重工業製 7MW 風車、洋上変電所の複数基による浮体式洋上風力発電システムの実証が行われた。洋上発電所のプラットフォームとしてジャパンマリンユナイテッド社製のアドバンス

トスパー浮体が使用された。浮体は、上部ハル、コブ、中間ハル、下部ハルの4つから構成されている。上部ハルには気象観測用タワーとヘリポートがあり、上部ハル内に変電設備が設置されている。また、垂直状態での建造・曳航を可能とするため、下部ハルにはコンクリートを充填して重心を低くしている。浮体の高さは71mで、計画喫水は50m、係留索本数は4本である。設置から4年8ヶ月の経過時点では、稼働率が100%であること、維持管理費が、気象観測用タワーの部品交換を除くと、同じアドバンストスパー浮体を使用した5MW浮体と同水準になることから可用性の高い浮体であることが示されている。

観測タワーには三杯風速計9台、矢羽根風向計10台、ドップラーライダー1台が設置され、風況観測以外にも、波高・波周期、流速・流向など計測されている。さらに洋上変電所が許容できる加速度や傾斜が緩和されれば、最適化による資本費の低減の可能性も示されている。

3.3 スキャニングライダーの実証事例

この節では、スキャニングライダーの現状を書く。欧州と比較すると、わが国の候補海域が沿岸地域に多いため、需要が高い。そのためか欧州と比較しても劣らないような実証実験が進んでいる。

3.3.1 茨城県神栖市の事例³⁰⁾

2014年3月から翌年2月に茨城県神栖市の波崎海洋研究施設棧橋の周辺で三菱電機製 LR-S1D2GA 1機または2機を用いた様々な観測実験が行われた。シングル観測・デュアル観測の双方が行われたほか、WRF計算との比較が行われた。しかし、他の観測手法による観測値との精度検証はなされていない。

3.3.2 千葉県銚子市の事例³¹⁾

2016年に千葉県銚子沖の観測タワーのプラットフォーム上にLeosphere製 WINDCUBE 100S 1機が設置され、RHI法やPPI法による水平方向への照射とDBS法による鉛直方向の照射による観測が行われた。直近の実証機の風車上のナセル風速計との比較により決定係数0.98という良い相関を得た。比較に用いたナセル風速計の値は、ナセルの影響を除いた実際の風速値となるように補正されたものである。他にも風車ウェイクの観測が行われ、風車から離れたところでは、計測された風速とウェイクモデルの予測値は同じ傾向を示すことが確認された。

3.3.3 兵庫県洲本市の事例³²⁾

2016年11月から翌年4月に兵庫県洲本市五色町にてWood Group製 Galion ライダー G4000によるデュアル観測が行われた。最初の1ヶ月は陸上の観測マスト地点を照射することで精度検証が行われた。風向・風速共に決定係数が0.98以上となり、かなり良い精度で観測ができていることが示された。その後、洋上での観測を1年間行い、洋上の風況調査に関する研究に用いた。

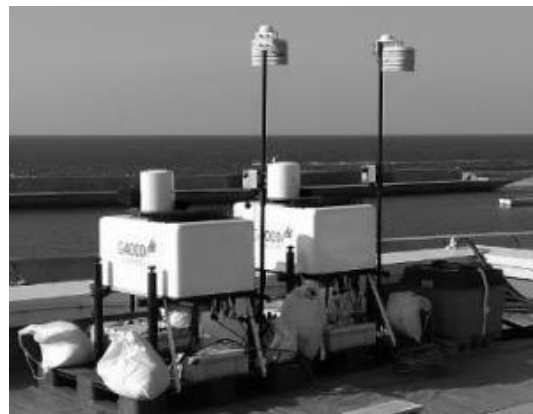


図 3.2 Galion ライダーの写真³²⁾

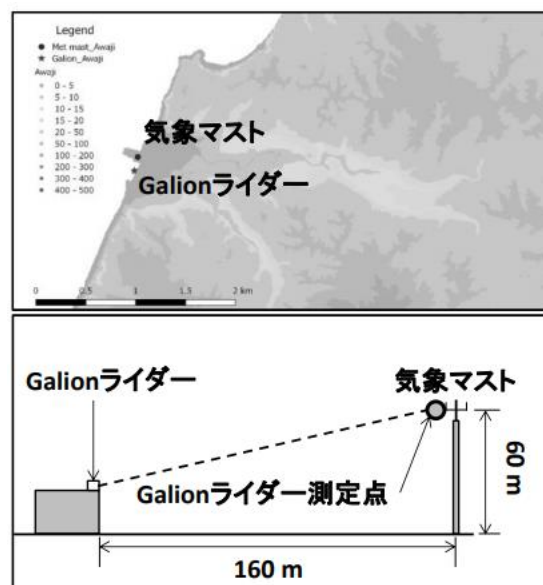


図 3.3 洲本市のライダーと気象マスト位置図（上）及びライダー測定点の概略図（下）

3.3.4 茨城県神栖市の事例2³³⁾

2018年に茨城県神栖市の波崎海洋研究施設棧橋の周辺でLeosphere製 WINDCUBE 100S, 200Sを用いた観測が行われた。シングルライダー視線風速観測の精度検証では、400m離れた鉛直照射型ライダーや地表面付近の超音波風速計との比較により行われ、かなり

良い精度で観測できることを示された。シングルライダー観測が気象観測マストや浮体式ライダーを置き換えることができる精度を持つことを主張された。

3.3.5 日本海側の事例³⁴⁾³⁵⁾

パターン A として 2020 年 2 月中旬から 3 月中旬の 1 ヶ月間に日本海側沿岸において、Leosphere 製 WINDCUBE 200S を用いた FIXED 手法によるデュアル観測が行われた。防波堤以上の気象観測マストとの比較の結果、風速風向に関しては決定係数が 1.00、乱流強度については、90%タイル値の類似が確認され、風速・風向・乱流強度に関して高い精度で観測できるとする結果を得た。



図 3.4 スキャニングライダー設置状況³⁴⁾

パターン B としてスキャニングライダーの精度検証についても研究が進められている。間野、石原³⁵⁾は離岸距離や、天候の影響によるデータ取得率の低下や、フィルタリングの重要性などについて示されている。離岸距離が離れていくことで、データの取得率が低下すると考えられている。雨や雪など天候が加味されるとさらにデータ取得率が低下することが示されており、データ取得率の検証は極めて重要だと考える。また観測精度を向上させるためには、ただデータ取得率を上げるだけではなく計測精度の低いデータを除去する必要があることについて触れられている。スキャニングライダーの特徴でもあるセクターサイズ（有効なデータがカバーした角度）について検証が行われており、観測精度は有効データ数よりもセクターサイズに強く依存することも示されている。

3.4 フローティングライダー実証

この節では、フローティングライダーの現状を書く。欧州と比較すると実証実験の例が少なく、今後、わが国の台風や低気圧などのある気象海象条件下での実証実験が必要である。

わが国では 2015 年に初めて佐賀県唐津市加部島沖に Fugro 社の FLS が設置された。Fugro 社では以来、現在まで 7 機の FLS が日本に導入されている。³⁶⁾

次に 2016 年度～2019 年度の 4 ヶ年のスケジュールで山形県庄内沖にて三菱電機製のフローティングライダーとスパーブイを組み合わせた洋上風況観測が行われた。³⁷⁾ 本事例では国内での先行事例とは異なる、沖合での実証が行われた。データ取得率は、ターゲットとする高度 100m で 99.2%と非常に高い数値が示された。データの信頼性についても、洋上ブイ直近の海岸に同機種のライダーを設置し、並行観測を行った。結果として、強い相関関係が見られ決定係数 R^2 は全データの場合で 0.932、海風のみを抽出した場合には 0.972 となることが示された。

3.5 数値シミュレーションの活用

わが国の洋上風況調査においても数値計算技術の活用が進んでいる。

例えば、グローバルスケールとメソスケールモデルを用いて長期解析についての研究がいくつか進んでおり、WRF を用いた日本沿岸海域における風速の増減傾向マップより、北陸以北の日本海沿岸と南西諸島沿岸において風速は増加傾向にある一方、東北以南の太平洋沿岸の多くの海域において減少傾向にあることが示されている。³⁸⁾

また、WRF を用いた風況調査として日本沿岸海域の洋上風況マップ NeoWins³⁹⁾がある。これは WRF によって沿岸地域の風況として 500m 格子の計算結果が用いられている。この NeoWins の精度はハブ高度において、バイアス $\pm 5\%$ であることが示されており⁴⁰⁾、有力候補海域の絞り込みには非常に有用である。

今後、わが国においては、さらに小さなスケールでのシミュレーションが必要になってくる。また、洋上のシミュレーションでは大気安定度の考慮が重要になってくる。特に現在公募海域に多い沿岸地域では海陸のコントラストの影響で、離岸距離方向の風況の変化が大きい。こういった再現については、WRF や日本の風況調査でよく活用されている MASCOT も再現性の十分な検証が必要であることが示されている。⁴¹⁾ そういった大気安定度や海陸コントラストの影響を再現し、その上で、現場観測値を取り込んだり、マイクロスケールのモデルと組み合わせたりできるシミュレーション技術によって風車ウェイクまで考慮した風況推定や風車への負荷影響評価などができるシミュレーションの開発が今後求められるであろう。

3.6 NEDO 事業について

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)において進められている事業を紹介する。

3.6.1 NEDO 着床式洋上 WF 開発支援事業(一般海域における洋上ウィンドファーム基礎調査 I)

洋上風力発電の基本設計に必要なデータを収集することを目的とした観測を秋田県にて実施している。陸上風況観測マスト、鉛直ライダー、スキャニングライダーを用いて、洋上沖合 2km を対象とした 1 年間の観測を行っている。スキャニングライダーの観測項目は、洋上における 10 分間平均風速、10 分間平均風向であり、観測高度は、40m、100m、160m の 3 高度である。スキャニングライダーで洋上の風況を観測、鉛直ライダーと気象観測マストで陸上沿岸の風況データを観測する。洋上観測地点(スキャニングライダー)の欠測時には、陸上沿岸のデータを用いた MCP 法(Measure-Correlate-Predict)による補完を行っている。この手法により、充足率の高い洋上風況データの取得を可能としている。観測の概要図を図 3.5 に、観測機器の設置状況について図 3.6 に示す。

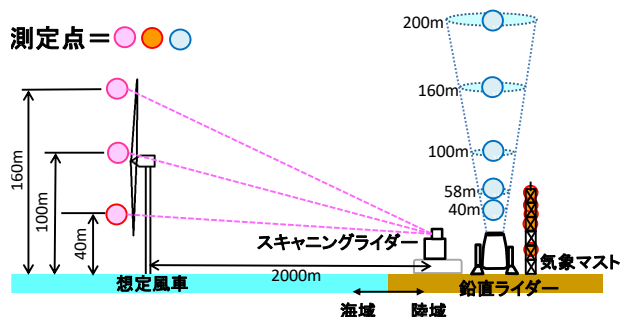


図 3.5 観測概要図

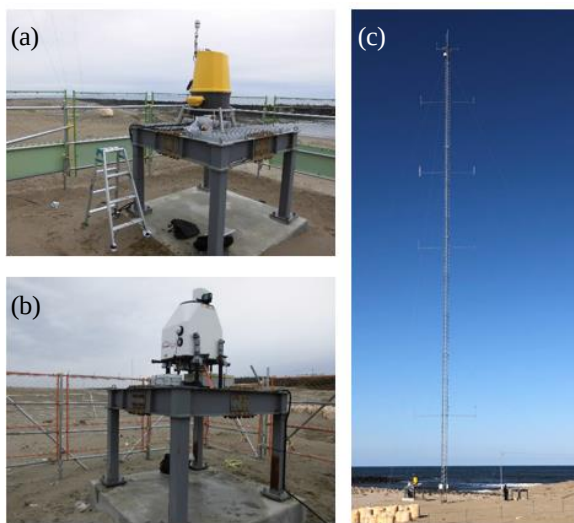


図 3.6 観測機器の設置状況：(a) 鉛直照射型ライダー、(b) スキャニングライダー、(c) 気象観測マスト

1 年間の現地観測終了後には、観測データをナッジング手法で取り込んだ WRF 計算により、洋上風車の設置が見込まれる海域全体を評価する予定である。

洋上の乱流強度と極値風速の算出には $k-\epsilon$ モデルを用いる。乱流強度は、気象観測マストで観測された実測値を入力値とし、16 方位別の気流解析による風向別の補正係数を乗じることにより算出する。極値風速は、土木学会指針による方法と、建築学会指針による方法の 2 つの推定方法により算出する。

3.6.2 NEDO 着床式洋上 WF 開発支援事業(洋上風況調査手法の確立)⁴²⁾

本事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所(代表機関)、国立大学法人神戸大学、イー・アンド・イーソリューションズ株式会社、日本気象株式会社及び一般財団法人日本海事協会の 5 者による共同受託事業である。また、業務の一部は株式会社ウインドエナジーコンサルティングへ再委託するものである。

スキャニングライダーやフローティングライダー等のリモートセンシング技術を活用した洋上風況観測手法を確立するための技術開発を目的として、青森県六ヶ所村むつ小川原港にて観測を行っている。

スキャニングライダー観測ではフランス Leosphere 社製の Windcube200S 及び 100S (以下、200S と 100S) とイギリス Halo Photonics 社製の StreamLineXR+ (以下、XR+) の 2 機種を使用している。シングル観測とデュアル観測の 2 つの手法により、10 分平均風速・風向・鉛直シア・乱流強度等の検証をする。



図 3.7 むつ小川原港の観測サイトと機器配置⁴²⁾



図 3.8 陸上サイトライダー設置状況 ⁴²⁾

フローティングライダー観測では、その観測データについて、近傍の防波堤に設置された気象マストと鉛直ライダーの観測データを用いた精度検証を行っている。フローティングライダーは、Fugro 社製 SEAWATCH、AXYS 社製 WindSentinel、長崎県 5 社製 MIA の 3 種類を使用している。フローティングライダーでは浮体動揺が風況観測精度に与える影響についても検証する。



図 3.9 使用したフローティングライダー ⁴²⁾
SEAWATCH (左), WindSentinel (中), MIA (右)

また、本事業では風況観測データの観測期間を短縮化した場合に年間風況推定精度にどのような影響があるかを評価するなどのシミュレーションに関する研究も行う。

3.7 まとめ

わが国では欧州とは異なる国土の特徴の中で、気象観測マスト、スキャニングライダー、フローティングライダーと実証事例を着実に積み重ねている。特にスキャニングライダーについては、欧州と比較しても劣らないような実証実験が進んでいる。

現地観測手法に加え、数値シミュレーションモデルについても、その高精度化と高解像度化やウェイクモデルなどの開発も必要である。

4 わが国の洋上風況調査の展望

4.1 洋上風況調査技術

これまで述べてきた洋上風向調査手法のまとめを図 4.1、表 4.1 に示す。

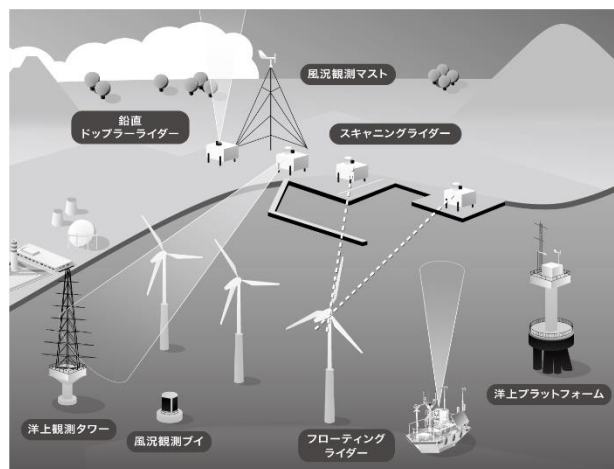


図 4.1 洋上における風況調査手法 ⁴³⁾

表 4.1 風況調査手法

観測手法	観測精度	建設費用	建設作業	離岸距離	乱流強度
①洋上風況観測タワー	高	高	困難	限定なし	○
②スキャニングライダー	△	中	容易	近距離	△※
③フローティングライダー	△	中	容易	限定なし	△
④洋上プラットフォーム	高	高	困難	△	○

○：取得可 △：研究段階

※研究段階だが、技術的に最も期待が大きい

現在、風況観測手法としては、4 つの手法が考えられている。①の洋上風況観測タワーは、観測精度が最も高く理想的な計測手法である。風力関連の研究開発が先行している欧州諸国にて、採用が多い手法でもある。しかしながら欧州と国内の沿岸海域の違いにより、国内での建設作業が難しいこと、建設に多大な費用を要すること、許認可にも長い時間を要することなどクリアする課題が多く、代替手法が望まれている。

④洋上プラットフォームは、手法①同様に、費用面と建設作業面において課題はあるものの、これからの技術研究開発により、信頼性の高い風況観測手法となる可能性があると考えられる。

リモートセンシング技術である②スキャニングライダー、③フローティングライダーは、観測精度は研究段階にあるものの、手法①、④の建設が難しいサイトでも、設置が可能であること、費用に関しても抑える

ことができるため、望まれている手法である。手法②は、離岸距離が大きくなると観測が困難になるため、離岸距離が近い部分を得意としており、手法③としては、洋上に装置を設置するため、手法②では困難な離岸距離が遠い部分でも観測可能となる。しかしながら乱流強度の観測については、手法③では研究段階であるものの浮体動揺の影響があるため難しいと考えられており、手法②では研究段階であるものの、デュアル観測技術を用いることで取得できることが示されている。

4.1.1 コンバージェントビームライダー観測/スキャニングライダー(デュアル観測)

上記手法②のスキャニングライダーのうち、現在乱流強度の測定が可能とされているコンバージェントビームライダー観測について示す。

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ある。

機器は測定方法の違いから、鉛直型ライダーと水平照射型スキャニングライダーの2種類に分けられる。スキャニングライダーの技術的特徴は、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である点である。これより水平方向に離れた位置における風向風速の測定が可能であることから、風況観測塔の建設が困難な場所、洋上における風況を陸上沿岸に設置した機器で、測定することが可能となる。

さらにスキャニングライダーの測定方法は、1台の機器を用いて測定する方法と、複数台（2台）の機器を用いる方法がある。複数台用いる方法は「コンバージェントビームライダー観測」の名称で呼ばれており、主に2台用いることから「スキャニングライダー(デュアル観測)」とも呼ばれている。

当手法では、複数台のスキャニングライダーからのレーザーを1点に集中させるようにセットすることで測定するため、細かいサンプリングが必要となる乱流計測が可能とされている。この方式は、三杯式風速計同様に特定ポイントの空間の風速を算出するWVR※モデルで算出される。

図4.2、図4.3にそれぞれの測定イメージを示す。

※Wind Velocity Reconstruction

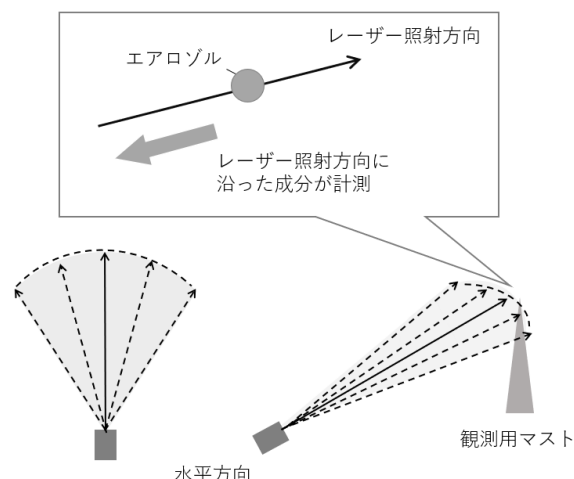


図4.2 スキャニングライダー（シングルスキャン）

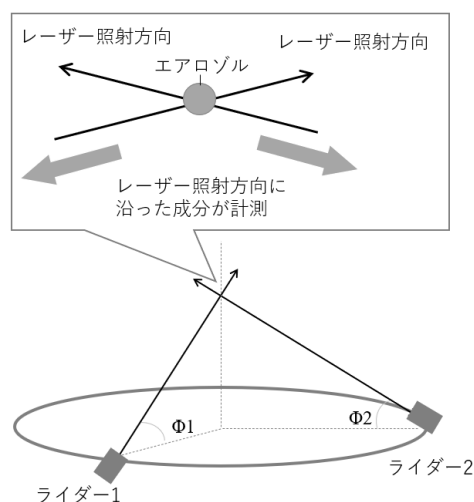


図4.3 コンバージェントビーム（デュアルスキャン）

シングルスキャンは、ある平面状にて照射角度を変えたレーザーを出力し、エアロゾルからの反射波を取得する。そのため、値を取得できる間隔（サンプリング）は、レーザー照射角度の切替え性能に依存する。速度成分はレーザー照射に沿ったものしか取得できないものの、複数のレーザー成分を合成することで、10分平均風速について、高精度なデータの取得が可能とされている。

デュアルスキャンは、レーザーの照射角度は変えず照射した反射波を取得する。そのため、サンプリングはレーザーの受光部の性能に依存するため、シングルスキャンと比較して高頻度サンプリングデータを取得することができる。

最適な構成はビームの仰角が最も低く、ライダービームによって広がる2次元平面は、水平面とできるだ

け平行であることが望ましいとされている。また、ビームの方位角が 90°に近いものが良いとされている。

一定の広さの空間を代表させるシングル測定とは異なり、コンバージェントビームライダー観測は、1ヶ所の空間をセットするため、三杯風速計同様に高詳細な測定が可能である。

この手法、細かいサンプリング測定が可能である一方、測定設定が非常に複雑で、高度な測量技術が求められる。

4.2 今後の展望

4.2.1 リモートセンシング技術の活用

わが国では、国土の自然条件、社会的制約条件から、風況調査手法にはリモートセンシング技術が望まれている。中でも、現状は海岸線近傍に促進区域や公募区域が多いため、これからの風況調査にはスキヤニングライダーの普及が期待される。現在、これらの研究開発が盛んに行われており、今後の研究結果が期待されている。また、リモートセンシング技術開発の促進のために、国内においてリモートセンシング機器の認証を取る仕組みが必要である。ドップラーライダーは観測値との比較をもとにした測定値の信頼性を評価する必要があり、現在は主に海外に依存している。国内での認証の体制を整えることが、このリモートセンシング技術の開発スピードをさらに加速させると考える。

4.2.2 事業適用範囲の拡大、発電量最大化技術開発へ

洋上風況調査は、事業開始前の事前調査だけではなく、事業計画、工事中、事業運転、撤去などすべてのプロセスでも重要な役割を担うものである。

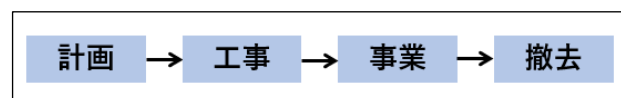


図 4.4 洋上風力発電の計画から撤去のプロセス

計画段階においては、事業性の評価や、工事計画の作成、工事段階においては、工事船の運用への気象、海象予報、事業段階においては、オペレーション、メンテナンス計画・発電量を最大化、撤去段階においては作業計画の作成など、風況調査により得られるデータから事業へ与えるメリットは多い。

わが国の洋上風力開発は今後、計画、工事ときて、事業運用段階に入っていくと考えられる。事業運用段階では風車 1 台あたりの発電量について注目され、既に海外では、新たに発電量の最大化というテーマが見

つかっている。複数台の風車を立てたとき、上流側の風車と下流側の風車で発電量の違いが発生することなどが報告されており、その対応について研究が始まっている。海外では風車を制御（特にヨー制御）することによって、ウェイクの向きをずらして、発電量を最大化することができるとする文献が見られた。⁴⁰また、ナセルライダーによる観測やマイクロスケールのシミュレーションによって後流の構造や風車間の相互影響も明らかになりつつある⁴⁵。

こうした発電量の最大化など、発電事業に大きな影響を与える課題に、わが国が取り組む沿岸海域での洋上風況調査技術を用いることで、国内事業への寄与のみならず、同様の課題を持つ他国へのアピールにもつながると考える。

5. まとめ、他国へのアピールへ

本稿では、洋上での風況調査について海外の事例、日本の事例、最新研究プロジェクトや今後の展望について述べてきた。内容を以下に示す。

(1) 海外の洋上風況調査

これまでの気象マストを用いながらも、最近では気象マストからリモートセンシング技術（ドップラーライダー）へ移行が見られている。また数値シミュレーションではダウンスケーリングによって 1km 以下のスケールでのシミュレーションが行われ、資源量評価だけでなくウェイクの再現なども行われてきている。

(本稿 2 章)

(2) 日本の洋上風況調査

わが国においても、スキヤニングライダー、フローティングライダーとリモートセンシング技術の実証事例を着実に積み重ねている。また数値シミュレーションモデルの高精度化と高解像度化や、ウェイクモデルの開発がこれからも続いていくと考えられる。(本稿 3 章)

(3) わが国の今後の展望について

わが国としてはリモートセンシング技術を軸として研究開発を進め、洋上風力発電に活用する。そして、この風況調査技術は、発電機の運転時にも寄与し、30 年以上に及ぶ洋上風力発電事業全体に貢献するものである。さらには欧州とは異なる沿岸海域での洋上風況調査技術は、国内のみならず、わが国と同様の国土・環境を持つ他国へのアピールにもつながると考えられる。(本稿 4 章)

謝辞

本稿作成にあたり、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 新エネルギー部より、多大なるご支援とご協力を賜りました。さらには、研究機関を初め、各関係者の皆様に、貴重なご指導とご助言を賜りました。ここに記して、心より感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) P.J.Eecen, et al, Meteorological Measurements OWEZ Half year report 01-07-2005 - 31-12-2005, ECN-E--07-073, 2007, p.9-10
- 2) FINO に関して
<https://www.fino-offshore.de/en/>
(参照 2021-01-23)
- 3) FINO1 に関して
<https://www.fino1.de/en/location.html>
(参照 2021-01-23)
- 4) Detlef Kindler, FINO3 - First results from the 2nd Offshore Wind Energy Research Platform in the North Sea, EWEC - Warsaw, 2010
- 5) Annette et al, COMPARISON OF LIDAR- AND UAM-BASED OFFSHORE MAST EFFECT CORRECTIONS, EWEA 2011, Brussels
- 6) Alpha Ventus
<https://www.alpha-ventus.de/english>
(参照 2021-01-23)
- 7) BorkumRiffgrund
<https://www.4coffshore.com/windfarms/germany/borkum-riffgrund-1-germany-de04.html>
(参照 2021-01-23)
- 8) FINO3 に関して
<https://www.fino3.de/en/>
(参照 2021-01-23)
- 9) FINO3 の WF
<https://www.fino3.de/en/location/wind-farms.html>
(参照 2021-01-23)
- 10) Javier et al, The New European Wind Atlas Model Chain, NAWEA WindTech 2019
- 11) Guillaume et al, Validation of long-range scanning lidars deployed around the Høvsøre Test Station, DTU Wind Energy Department of Wind Energy, 2016
- 12) Nikola et al., Measuring offshore winds from onshore - one lidar or two?, DTU Wind Energy Department of Wind Energy, 2015
- 13) Tobias et al., Validation of Sentinel-1A SAR Coastal Wind Speeds Against Scanning LiDAR, MDPI remote sensing, 2017
- 14) Remote Wind Measurements Offshore Using Scanning LiDAR Systems, OWA Report, 2014
- 15) OWA Floating LiDAR Roadmap Update - Deployments of Floating LiDAR Systems, Carbon Trust, 2018
- 16) Carbon Trust Offshore Wind Accelerator roadmap for the commercial acceptance of floating LIDAR technology version 1.0, Carbon Trust, November 2013
- 17) Carbon Trust Offshore Wind Accelerator roadmap for the commercial acceptance of floating LiDAR technology version 2.0, Carbon Trust, October 2018
- 18) Müller M, Crockford A. Floating LiDAR - a cost effective and reliable alternative. Presented at EWEA wind Resource Workshop 2015, Helsinki, Finland. Available at:
<http://www.ewea.org/events/workshops/past-workshops/resource-assessment-2015/>
(Accessed 20 January 2021).
- 19) 2019 年, 8 番目の機種として Akrocean 社の WINDSEA FLiDAR が Stage 2 を取得した. Akrocean's WINDSEA FLiDAR Gets Stage 2 Okay, Nadja Skopljak, 29 March 2019. Available at:
<https://www.offshorewind.biz/2019/03/29/akroceans-windsea-flidar-gets-stage-2-okay/>
(Accessed 20 January 2021)
- 20) 2020 年 9 月 25 日に Eolos 社が発表したプレスリリースより.
- 21) Javier et al., Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation, Advanced Review, 2017, p6-9
- 22) Devis et al., Should future wind speed changes be taken into account in wind farm development?, IOP Publishing, 2018
- 23) Tobin et al., Climate change impacts on the power generation potential of a European mid-century wind farms scenario, IOP Publishing, 2016
- 24) Andrea et al., The making of the New European Wind Atlas – Part 1: Model sensitivity, Geoscientific Model Development, 2020
- 25) Harish et al., A coupled mesoscale–microscale framework for wind resource estimation and farm aerodynamics, Contents lists available at ScienceDirect, 2014, p24-25
- 26) 国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦

<https://www.nedo.go.jp/fuusha/photogallery.html>
(参照 2021-01-23)

- 27) 新エネルギー・産業技術総合開発機構
(NEDO), 洋上風況観測システム実証研究 (銚子沖) 報告書, 2017
- 28) 新エネルギー・産業技術総合開発機構
(NEDO), 着床式洋上風力発電導入ガイドブック (最終版), 2018, p52
- 29) 平成 30 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会報告書, 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会, 2018
- 30) 市川ら, 沿岸海上における WRF 計算値と水平照射型ライダー観測値の比較, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2015, p229-232
- 31) GOIT et al., 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, 日本風力エネルギー学会論文集 Vol.42, No.1, 2018, p7-16
- 32) 荒木龍蔵, 淡路島西岸におけるスキャニングドップラーライダーと気象マストとの風の比較観測, 日本風力エネルギー学会論文集 Vol.43, No.2, 2019, p212
- 33) 嶋田ら, 洋上 WF 開発候補海域における風況精査手法の検討 その 1)デュアルライダー, 第 40 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2018, p186
- 34) 渡邊, 石原ら, デュアルスキャニングライダーを利用した洋上風況観測の精度検証, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, p108-111
- 35) 間野, 石原ら, スキャニングライダーにおけるデータ取得率とセクターサイズの観測精度への影響に関する研究, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, p17-20
- 36) 2020 年 12 月 17 日の Fugro 社の公式 Facebook ページより .Available at :
<https://www.facebook.com/fugro/photos/a.452730424928060/1549734271894331>
- 37) 大西ら, 洋上風況観測システム BuoyLidar の開発, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.43, No.2, 2019, p202
- 38) 辻岡ら, ERA5 を用いた日本沿岸海域における風速の長期変動解析, 日本気象学会関西支部例会公園要旨集第 150 号, 2019, p1-4
- 39) NeoWins
http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html
(参照 2021-01-23)
- 40) 大澤ら, NEDO 洋上風況マップにおける WRF 計算精度, 第 38 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2016, p17-20
- 41) 小長谷ら, 複数の風況シミュレーションを用いた近海域における洋上風況推定値の比較, 第 40 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2018, p179-182
- 42) 大澤ら, NEDO 着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業 (洋上風況調査手法の確立) について, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, p136-139
- 43) 高祖ら, 日本工業出版「クリーンエネルギー」2019 年 7 月号, 洋上風力発電における高精度の気象観測技術 フローティングライダー, 2019
- 44) Wang et al., Ocean Engineering, Numerical investigations on control strategies of wake deviation for large wind turbines in an offshore wind farm, 2019
- 45) 渋谷ら, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 風車後流中の流動現象解明のための風洞実験ならびに CFD, 2020, p128-131