

デンマークの洋上風力発電と 風力発電普及への取り組み

日本気象株式会社 西嶋 裕・高祖研一・神田 勲

1. はじめに

弊社では 1985 年に設立して以来、気象調査・解析、局地天気予報、気象情報提供など気象に関する事業を総合的に取り組んでまいりました。

その中で、再生可能エネルギーに関しては、スマートエネルギーサービスとして太陽光発電量予測を VPP などの電力事業者へ提供サービスに取り組んでおります。風力発電では、2000 年頃より風況精査業務を行っております。また、2016 年にはデンマークにコペンハーゲンオフィスを設置しました。

本稿では、前半でデンマークを例に欧州の風力発電事情について紹介し、後半で、弊社が取り組む風力発電技術について紹介します。

2. デンマークの洋上風力発電について

当社は優れた技術やサービスだけでなく、その背景にある政策や制度に関しても広く海外事例を調査し、日本へ提言することによって風力発電の普及に貢献することを目標としています。そのため、2016 年に風力発電の先進国であるデンマークの国立工科大学(DTU)キャンパス内にオフィスを設置しました。

2.1 デンマークの洋上風力発電の現況

デンマークでは、2050 年までに化石燃料を使用しない“緑への転換 (Grønne Omstilling)”を達成するため、特に洋上風力発電が促進されています。

1991 年、Vindeby に世界初の洋上風力発電所(5MW)が設置されました。それ以来、2015 年にはデンマークの洋上風力発電の総設備容量が 1271MW に達し、イギリスの 5066.5MW、ドイツの 3294.6MW に次いで世界第 3 位となっています。

2015 年の統計では、デンマークの風力発電は国内電力消費の 42%を賄い、GDP の 4% (約 1.5 兆円)を占め、約 3 万人の雇用を創出しています。風力発電産業は、売上高の 55%が輸出によるものであり、グローバルに活躍している企業がほとんどです。

近年の風力発電促進は、2012 年に政府与党と野党

の間で合意されたエネルギー協定に基づいています。エネルギー供給の全てを 2050 年までに再生可能エネルギーへ転換することを目標とし、電力消費の 50%を風力発電で賄うとしています。2020 年はそれに向けた重要な通過点であり、以下の目標を達成しようとしています。

- Kriegers Flak に 600MW、Horns Rev 3 に 400MW の洋上風力発電所を設置する
- 500MW のニアショア (沿岸) 風力発電所を設置する
- 500MW の陸上風力発電設備を追加する (主にリパワリングによって)

風力発電による売電には、いまだ補助金が適用されているので、その国民負担を軽減するため、過度なサポートを控え、健全な市場の成長を促し、市場電力価格の動向に合わせて補助金を削減していくこととしています。

人口では北海道と、面積では九州とほぼ同じのデンマークには現在 13 ヶ所の洋上風力発電所があり (図 1)、さらにスウェーデンの公営電力会社 Vattenfall 社が 2021 年にかけて 4 ヶ所の洋上風力発電所を設置することになっています (図 2)。



図 1. 現在稼働中の洋上風力発電所^[1]



図 2. Vattenfall 社が設置予定の洋上風力発電所^[2]

洋上は陸上よりも設備利用率が高く、2016 年は 13 カ所の平均で 41.6%を記録しています。2013 年に稼働したデンマーク最大の Anholt 洋上風力発電所（400MW）では年間 47.4%の設備利用率を達成しました（表 1）。

表 1. デンマークの洋上風力発電所の設備利用率^[3]

All numbers are to the end of December 2016. Analysis by EnergyNumbers.info. Raw data from ens.dk	Latest rolling 12-month capacity factor	Life capacity factor	Age (y)	Installed capacity (MW _s)	Total elec. gen. (GWh)	Rolling annual capacity factors (click to enlarge)
Anholt 1	47.4%	48.1%	3.8	399.6	6 312	
Horns Rev II	47.1%	47.7%	7.3	209.3	6 416	
Rønland I	44.5%	44.4%	14.0	17.2	934	
Horns Rev I	40.7%	41.9%	14.2	160	8 335	
Nysted (Rødsand) II	39.3%	43.6%	6.5	207	5 178	
Nysted (Rødsand) I	34.1%	37.1%	13.6	165.6	7 286	
Avedøre Holme	33.7%	38.1%	6.5	10.8	234	
Samsoe	33.4%	39.2%	13.9	23	1 097	
Sprogø	29.9%	34.6%	7.2	21	457	
Frederikshavn	29.3%	30.7%	13.6	7.6	278	
Tune Knob	28.5%	30.2%	11.6	5	286	
Middelgrunden	24.0%	25.5%	16.0	40	1 429	
Vindeby	4.0%	22.2%	25.4	4.95	244	
Total	41.6%	41.2%		1272	38 487	

2.2 デンマークで洋上風力発電が拡大した背景

デンマークで洋上風力発電が拡大してきた背景には、政府がプロジェクトのリスクを軽減してきたことがあります。オークション方式とオープンドア方式の 2 つがありますが、基本的にはエネルギー庁が入札プロセスを一貫して管理し他省庁とのやり取りを一手に引き受ける、One Stop Shop サービスを提供しています。特にオークション方式では、サイト候補地の選定をエネルギー庁が中心の政府委員会が行い、電力系統管理会社 energinet.dk がエネルギー庁から環境影響調査を請け負い、実施することによって、プロジェクトの不確実性を可能な限り軽減し、ディベロッパが実現可能性の高い、採算性のある入札価格を提示できるようにしているのが特徴です^[4]。

また、風力発電の発展には当初から地域住民の参

加が大きな役割を果たしてきましたが、洋上風力発電の拡大にも住民の参加とサポートが欠かせません。デンマークでは地域のエネルギー資源は地域のものという考えが強く、地域住民による風車の個人所有や共同所有の比率が高くなっています。地域住民が風車を所有することによって自分たちが利益を享受できることが分かると、景観問題や騒音などに対し、住民自体が反対することが少なくなりました。風車のサイズが大きくなり、また風力発電所としての規模が大きくなってくると、共同であっても全体を所有することができなくなってきたので、2008 年再生可能エネルギー促進法において、風力発電所から 4.5km 以内に住む人々に対し、所有権の最低 20%を風車株として購入する機会を提供することが、風力発電所のオーナーに義務付けられました（図 4）。2012 年エネルギー協定に基づいて入札が行われた沿岸風力発電所、Vesterhav Nord/Syd においてもサイトから 16km 以内の住民に対し、同様に風車株の購入機会の提供が義務付けられています（図 3）。さらに、住民所有の割合が 30%を超えると入札売電価格に 0.01DKK（0.17 円）/kWh が上乘せされます。

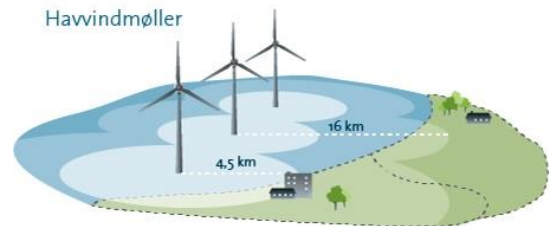


図 3. 沿岸風力発電所の風車株購入権の範囲^[5]



図 4. 筆者が風車株を所有する風力発電所

2.3 今後の課題

政府や国民のサポートによって風力発電が拡大してきましたが、2008 年のリーマンショック以降下落してきた市場電力価格がこのまま推移する、あるいはさらに下落すれば、電力料金を通して支払う PSO（Public Service Obligation）賦課金が高くなり、国民負担が大きくなるという問題が発生しました。デンマークの洋上風力に関する固定売電価格は、

市場電力価格と PSO 賦課金で支えられています。したがって、市場電力価格の変動に伴い、PSO 賦課金も上下するのですが、2008 年のリーマンショック以降市場電力価格は下落傾向にあり、一方で洋上風力発電が増加しているため、PSO 賦課金負担が増加してきています。2015 年の一般家庭の PSO 賦課金負担は電気料金の 11.5%でした。デンマークで徴収された PSO 賦課金は国内の風力発電、分散型電源、バイオマス・ガス、研究開発、系統強化への補助金に充てられているのですが、電力輸入元である海外の発電事業者はこの補助金が得られないことが理由で、EU からデンマーク政府は PSO 賦課金を廃止するか、海外の発電事業者にも補助金を適用するかを迫られ、結局 2017 年から 2022 年までに段階的に PSO を廃止することを決定しました。その代わりにの財源は、所得税の最低税率を引き上げ、国の税金から賄うこととしています。

このような国民負担を軽減するためには、洋上風力発電プロジェクトの入札売電価格の引き下げと、市場電力価格の低下を防ぐことが必要です。

入札売電価格の引き下げに関して、スウェーデンの公営電力会社 Vattenfall 社はコストダウンを確信し、2012 年のエネルギー協定で設置目標とされた Horens Rev 3 (400MW)、Vesterhav Nord/Syd (350MW)、Kriegers Flak (600MW) のプロジェクトをこれまでより大幅に低い価格で立て続けに落札し、国民負担軽減にも貢献しています。それぞれの売電価格は kWh 当たり 0.77DKK (約 13 円)、0.475DKK (約 8 円)、0.372DKK (約 6.3 円) です^[4]。

市場電力価格の低下を防ぐためには、以下の方策が考えられています。

- 周辺諸国への国際連系線の強化
- CHP プラントでの大型ヒートポンプと蓄熱タンクの活用促進
- 電気自動車の普及
- スマートグリッドの導入
- 迅速でより高精度な出力予測の活用

2.4 まとめ

25 年以上の歴史があるデンマークの洋上風力発電に日本はすぐに追いつくことはできないかもしれませんが、意欲的な目標を掲げ、プロジェクト遂行に関する不確実性を可能な限り軽減するという国の取り組みは参考になります。地域住民による風車株の購入を通して風力発電への理解が進めば、風力発電促進に関するリスクの軽減にも繋がるので、日本でもこれらを推進する政策が期待されます。

3. 日本気象株式会社の取り組み

弊社では、欧州の進んだ風力発電技術を日本に適合したものにし、国内に広めていきたいと考えています。ここでは、弊社が現在までに取り組んでいる技術について紹介します。

3.1 ドップラー・ライダー Galion

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す。

弊社は、英国の再生可能エネルギーコンサルタント会社 SgurrEnergy 社と提携の下、風力発電用ドップラー・ライダーである Galion Lidar を取り扱っています。

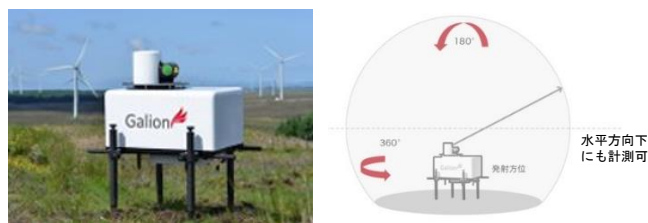


図 5. Galion Lidar (左) と測定範囲の説明 (右)

(1) 技術的特徴

Galion Lidar 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ことです。

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(ウエイク)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ます。

(2) 国内実績

Galion Lidar は、欧州を中心とした諸外国では既に多くの実績ありますが、近年、日本国内においても実績を積んでいます。以下に紹介します。

(2)-1 NEDO のプロジェクトでの採用

Galion Lidar は、2 件の NEDO のプロジェクトにおいて採用されました。

◎電力系統出力変動対応技術研究開発事業 風力発電予測・制御高度化/予測技術系統運用シミュレーション(国立大学法人 東京大学)

◎洋上風力プロジェクト 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電システム実証研究(北九州市沖) (電源開発株式会社)

現在、洋上風力発電、起伏の激しい山岳地帯のウ

インドファームにおいて、風況の把握、風車ウェイクの測定など多くの研究に活用されており、その事例を一つ紹介します。

～研究事例紹介～

「LiDAR による山岳地形における風速鉛直プロファイル分析」^[7]

日本で風車が建設されることの多い山岳地形の尾根付近において、Galion Lidar を用いた風況計測が行われました。

Galion Lidar による広範囲計測によって、山岳地形における流れの増速や剥離流の遷移の解析が可能となりました。



図 6. 山岳地形の発電所に設置された Galion Lidar

(2)-2 洋上風況調査

Galion Lidar は、日本で近年、注目度が上がっている洋上風力発電の事前風況調査に利用されています。洋上では、風況観測塔を建設することが困難であり、実測による風況を把握する手段として利用されています。



図 7. Galion Lidar 洋上風況調査
(上段左：神栖市, 大阪市, 下段：洲本市)

(2)-3 急峻な地形における乱流測定

日本では、多くの陸上風力発電所は、急峻な山岳地形に位置しています。そして、この地形が生み出す乱れが風力発電機へ大きな影響を与えている場合があると考えられています。

Galion Lidar は、このようなサイトで利用され、地形の影響による風のプロファイルの特徴や、地形が作り出す乱れの形態をとらえ得ることを確認しました。

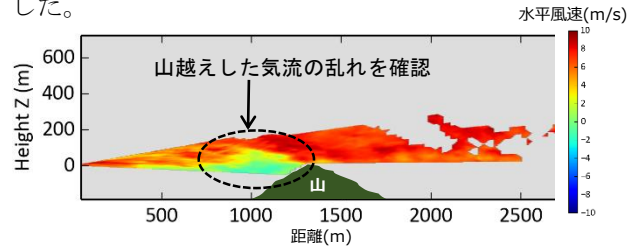


図 8. 急峻な地形が作り出す乱れの測定結果

3.2 洋上風力発電コンサルティング

弊社は、これまで取り組んできた再生可能エネルギーに関する研究や風力発電のシミュレーションの経験などを基に、最新の洋上風力発電事業技術コンサルティングの提供、および、風力発電の技術的課題の解決に取り組んでいます。

- 風況調査 (風況マスト、ドップラー・ライダー観測)
- 数値流体力学 (CFD) による風況評価
- 風況データ分析と影響評価
- 事業化後の発電予測
- リモートセンシング風況監視

また、海外企業との技術協力により、以下の分野にも取り組んでいます。

- 事業化可能性調査 (エリアマップ作成、適地選定)
- 系統連系のための評価・交渉
- 風力発電機の供給、メンテナンス契約交渉
- 技術者雇用の要件、技術仕様の作成
- 資源評価、不確実性分析のための海洋調査・監視
- プロジェクトや投資家のための財務評価
- 風力発電機の機種総評
- 利用価値分析
- 資本コストと運用コストの評価
- 事業継続性の分析
- 系統連系要件のコンプライアンス評価

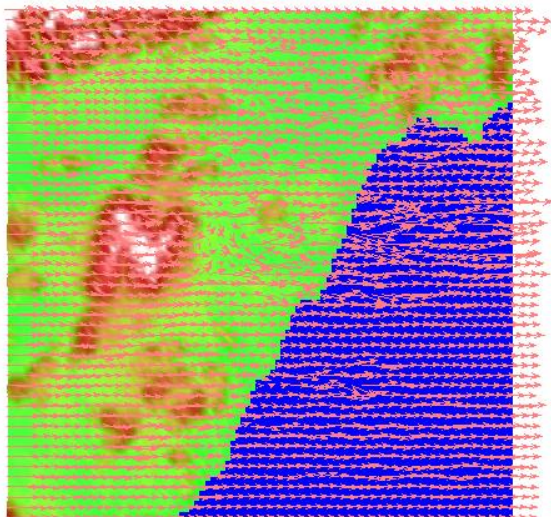


図 9. 風況シミュレーションの例

3.3 落雷検知センサー-LKDS

NEDO 故障事故調査によると、風車の故障・事故において、原因が判明しているうちで最も多いのが落雷によるものです。平成 16 年以降の統計では、その件数、発生率ともに低下の傾向は見られません。そして、最も落雷の被害に遭いやすいのがブレードで、稼働率低下による売電収入の減少、修繕費用の増加、保険料の増加などの問題を引き起こしています^[8]。

しかし、NEDO の落雷リスクマップに記された雷対策重点地域に設置された風車でも、①耐雷保護レベルが高い、②ブレード毎にレセプターを複数個付けている、③落雷検知後すぐにメンテナンスをすれば、故障・事故発生率が低いので、このような十分な対策を採れば、落雷による被害は最低限に抑えられると言えます^[9]。

弊社は、デンマークの Global Lightning Protection Service (GLPS) 社と日本販売代理店契約を結び、正確で詳細な落雷検知情報を提供する Lightning Key Data System (LKDS) を日本の皆様へ提案しています。

LKDS は落雷を検知すると、以下の 4 つの重要なパラメーターを記録します^[10]。

- ピーク電流 (kA)
- 比エネルギー (MJ/Ω)
- 電荷量 (C)
- 最大ライズタイム (kA/μs)

記録された情報は、オンラインでも SD カードでも入手することができ、不必要なダウンタイムを短くし、発電量を最大化するために活用されます。例えば、緊急点検を行う、運転を停止・継続・再開する、

あるいはメンテナンス計画を変更するという判断を行う際、記録された落雷情報はとても有用です。

今後、国のプロジェクトにおいて、LKDS の評価が行われる予定です。また、3 月に東京ビッグサイトで開催される Wind Expo や 9 月に名古屋で開催される ICOLSE において展示を行う予定です。

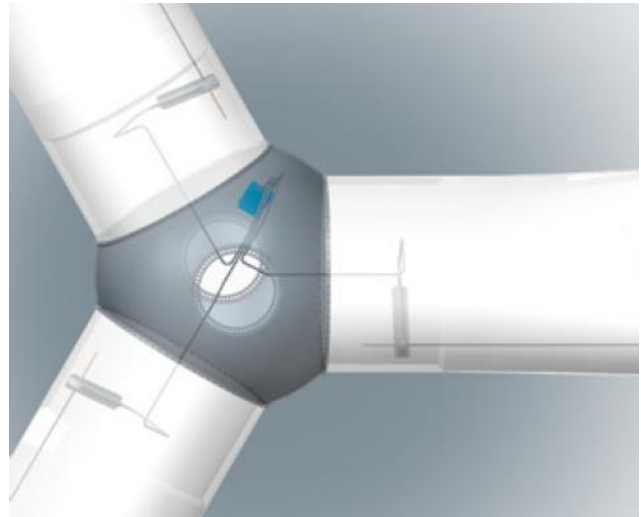


図 10. LKDS の設置例 (GLPS 社提供)

3.4 パワーフォーキャスト

電力は需要と供給がバランスしていないと周波数変動し、産業や医療などに悪影響が及びます。一方、風力発電の出力は風向、風速によって変動します。変動分は、火力発電などの応答の速い電源によって相殺しますが、全電源に対する風力発電の比率が増加すると、調整量が大きくなりトラブルのリスクが高くなります。

需給バランスを円滑に維持するための方策の 1 つとして、発電量予測 (パワーフォーキャスト) があります。パワーフォーキャストの最も単純な手順は、気象予測によって得られた風速を風車のパワーカーブ (風速と発電量の関係式) に代入するというものです。ところが、気象予測にもパワーカーブにも偏差やばらつきがあるため、実際には、過去の実績を基に統計学習させることによって予測精度を向上させています (図 11)。予測対象の風車の数や空間的拡がり、利用可能な実績データの種類と量によって、最適な気象予測や統計学習の方法を選択する必要があります^[11]。

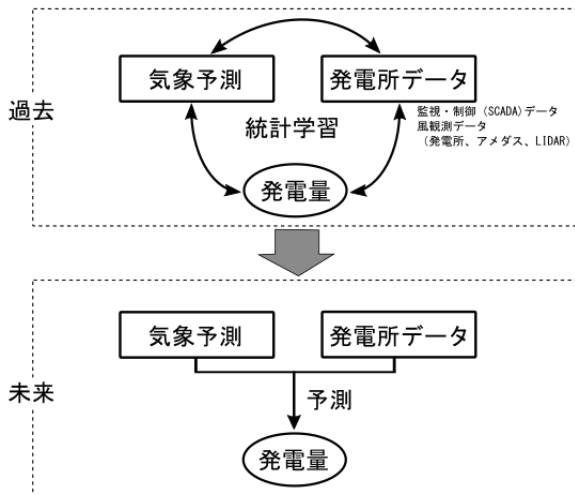


図 11. パワーフォーキャストの概念図

図 12 に予測と実績の例を示します。発電量は定格出力で規格化してあります。また、過去実績データのばらつきに基づいて、10、90 パーセントイル予測値が示されています。このように予測の確からしさを示すことによって、電力調整における意思決定に役立つ情報を提供します。

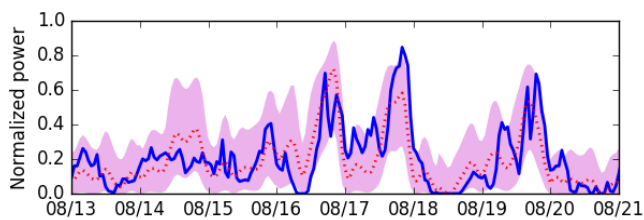


図 12. パワーフォーキャストの例

青実線：実発電量、赤点線：予測中間値、色塗り部
上下端：10、90 パーセントイル予測値

4. 終わりに

欧州の風力発電技術は、日本の 10 年先を行くと言われており、これから風力発電拡大に取り組む日本にとっては大いに参考になります。

しかし、欧州と日本では、気候条件、地形条件、さらには社会的条件も大きく異なり、欧州技術をそのまま適用することは困難です。

今後、弊社ではこうした日本特有の地形や気象条件に基づいた風況特性、社会的条件を踏まえ、研究機関や発電事業者等と連携し、実用化に向けた技術の確立に貢献したいと考えています。

参考文献

- [1] デンマークエネルギー庁ホームページ
www.ens.dk
- [2] “New Offshore Wind Tenders in Denmark”, Energystyrelsen, February 2013 に筆者が加筆
- [3] <http://energynumbers.info/capacity-factors-at-danish-offshore-wind-farms>, 2017 年 2 月 6 日付
- [4] “Danish Experiences from Offshore Wind”, Ms. Mette Cramer Buch and Mr. Erik Kjaer, the Danish Energy Agency, May 2015
- [5] energinet.dk ホームページ
www.energinet.dk
- [6] Vattenfall 社ホームページ
www.corporate.vattenfall.com
- [7] 中嶋智司、藤尾裕聡、西尾宣俊、荒川忠一、飯田誠、LiDAR による山岳地形における風速鉛直プロファイル分析、日本機械学会 2016 年度年次大会 予稿集
- [8] 風力等自然エネルギー技術研究開発 風力発電高度実用化研究開発 スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等) 平成 25 年度 風力発電故障・事故調査結果 報告書、平成 26 年 11 月、NEDO (イーアンドイー委託)
- [9] 風力等自然エネルギー技術研究開発 風力発電高度実用化研究開発 スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (リスク解析等) 国内風力運用実態調査 (平成 26 年度中間報告)、平成 27 年 4 月、NEDO (東京大学委託)
- [10] GLPS 社ホームページ
www.global-lightning.com
- [11] Giebel, G., Brownsword, R., Kariniotakis, G., Denhard, M., Draxl, C. (2011). The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power: A Literature Overview, 2nd edition. ANEMOS. plus.