

洋上風力発電の現状と将来展望

PRESENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS OF OFFSHORE WIND POWER GENERATION

牛山 泉

Izumi USHIYAMA

工博 足利工業大学教授 工学部機械工学科 (〒326-8558 足利市大前町 268-1)

In recent years, offshore wind power systems are public attentions as the new frontier, because the cumulative capacities on land in Europe were considerably increased.

In our country, although the introduction of wind power generating systems on land were increased in the last decade, there are difficult problems inherent in establishing a large number of installation. Therefore, in order to promote offshore wind farms in Japan, this study assessed some issues of installing offshore wind farms based on the current state of development of offshore wind power generation systems in Europe.

Keywords: *Wind power, Wind power generation, Offshore wind power, Renewable energy*

1. はじめに

近年, 欧州諸国においては陸上における風力発電の導入が相当程度発展したため, 今後の新たなフロンティアとして洋上風力発電が注目されている. 特に, デンマーク, オランダ, イギリス, スウェーデンなどでは, 大規模な洋上風力発電の導入計画が推進されている.

わが国においては, 陸上における風力発電の導入が, この数年急激に伸びているものの, 設置サイトの不足や土地価格, 道路アクセス等の問題から風力発電の導入には一定の制限がある. このため, 今後は, 膨大な風力エネルギーが賦存する洋上への展開が不可欠といえる.

本稿では, 洋上風力発電の新技術開発に焦点を当て, 欧州における実証試験研究に伴う課題を整理するとともに, 日本周辺の対象海域における, 洋上風力発電の可能性と技術的, 社会的等の課題を抽出した.

2. 洋上風力発電の現状と課題

2.1 欧州における洋上風力発電の現状

欧州における洋上風力発電の調査研究は 1980 年代に開始され, 具体的な事業はデンマーク, スウェーデンおよびオランダにおいて着手された. 2000 年末時点で 10 施設の洋上風力発電が建設あるいは建設中となっており, 風車総数は 93 基, 総発電容量は 95.72MW に達している. 表 1 に示すこれらの洋上風力発電施設は, いずれも実証試験用として位置付けられ, その設置場所も沿岸近傍

(1—6km 沖合) や湖沼 (オランダのアイセル湖) となっている. また計画中のもの 10 箇所も同表に記した.

デンマークはバルト海群島の内湾に建設された Vindeby と Tunoe Knob およびコペンハーゲン近傍海域の Middelgrunden の合わせて 3 箇所の洋上風力発電施設がある.

イギリスは, 2000 年末に北東部の北海に面する都市ニューカッスル近傍の Blyth 港沖に Blyth 洋上風力発電を建設した.

スウェーデンは, 世界ではじめて洋上風力発電 (Nogersund) に取り組んだ国で, 現在は同じバルト海の Bockstigen, Utgrunden および Yttre Stengrund の合わせて 4 箇所の洋上風力発電施設がある.

オランダは, アイセル湖 (Ijsselmeer) 内に Lely および Dronten の 2 箇所の施設がある.

2.2 欧州における洋上風力発電の課題

(1) 地点選定と風車配置

一般的条件として, 洋上風況マップ上で風が強く, 安定的に吹き, 遠浅で海流の流速が低いところが望ましい. また, 洋上でのウィンドファームは大規模になるため, 定期船舶あるいは航空機の妨げにならないような地点に設置する必要がある. さらに, 電源線敷設, 電力供給などの面についても, 遠浅の海底状況であれば設置作業も容易で, 経費も低減できる. また, 動植物の棲息に悪影響を及ぼさない場所であることが必要条件である.

表1 世界の洋上風力発電施設の一覧

記号	位置・国名	設置年次	風車台数	風車メーカー／定格出力	設備容量(MW)	水深／離岸距離 (m)	基礎
既存設備							
A	Nogersund, スウェーデン	1990	1	Wind World / 220kW	0.22	6 / 250	モノパイル
B	Vindeby, デンマーク	1991	11	Bonus / 450kW	4.95	2～6 / 1500	ケーソン
C	Lely*, オランダ	1994	4	NedWind / 500kW	2.0	5～10 / 800	モノパイル
D	Tunoe Knob, デンマーク	1995	10	Vestas / 500kW	5.0	3～5 / 6000	ケーソン
E	Dronten*, オランダ	1997	28	Nordtank / 600kW	16.8	1～2 / 50	モノパイル
F	Bockstigen, スウェーデン	1997	5	Wind World / 550kW	2.75	6 / 4000	モノパイル
G	Blyth, イギリス	2000	2	Vestas / 2MW	4.0	11 / 1000	モノパイル
H	Middelgrunden, デンマーク	2000	20	Bonus / 2MW	40.0	3～5 / 2000	ケーソン
I	Utgrunden, スウェーデン	2000	7	Tacke / 1.43MW	10.0	6～10 / 12500	モノパイル
J	Yttre Strenggrund, スウェーデン	2000	5	NEG Micon / 2MW	10.0	?	モノパイル
計画中のもの							
1	Mouth of the Western Scheldt River, オランダ	—	—	—	—	—	—
2	Limuiden, オランダ	—	—	—	—	—	—
3	Horns Rev, デンマーク	—	—	—	—	—	—
4	Laeso, デンマーク	—	—	—	—	—	—
5	Omo Stalgrunde, デンマーク	—	—	—	—	—	—
6	Gedser Rev, デンマーク	—	—	—	—	—	—
7	Rodsand Rev, デンマーク	—	—	—	—	—	—
8	Lillgrund Bank, スウェーデン	—	48	Enercon / 1.8MW	86.4	—	—
9	Gunfleet Bank, イギリス	—	—	—	—	—	—
10	Scroby Sands, イギリス	—	—	—	—	—	—

*) アイセル湖 (Ijsselmeer) に設置

風車の配置に関しては、風車後流の影響や相互干渉を避ける必要がある。また、沿岸部に近いところでは景観障害に留意する必要がある。デンマークの Middelgrunden では住民の意見を入れて最終的な風車の配置を決めている。

(2) 土木・据付工事・タワー強度

基礎の設計条件として、波浪と風力を組み合わせた最大荷重と疲労強度の算定、最大風荷重と氷荷重を組み合わせた最大荷重データの算定が課題となる。また、風車列の中の特定の1基の故障停止に起因する乱流による最大荷重、疲労荷重の増加、性能の低下、風車と基礎への影響なども考慮する必要がある。

(3) 電気設備・系統連系

大規模な洋上風力発電所から陸上の電力消費地までの送電には、送電系統の増強が不可欠である。しかし、近年は架空の交流高圧送電線の建設には反対が多い。また技術的・経済的にも HVAC 送電は長距離 (100km 以上) かつ大容量 (300MW) 送電には向いておらず、むしろ HVDC 送電が適している。

一方、不安定な風力電力を電力市場に参入させるためには、発電出力の確度の高い予想が不可欠であり、風力発電の出力予想技術の確立が求められる。

(4) 発電システムの設計

洋上風力発電のための風車の要求仕様は、タワーとナセルの機密性確保、除湿システムの導入、腐食防止のための表面加工、ナセル上に 300kg 程度まで吊り上げ可能なクレーンを設置、大型部品吊り上げ用クレーンの取り付け設備 (必要に応じて)、変圧器、遮断機のタワー内への収納などが挙げられる。

(5) 経済性

従来、洋上設備は陸上設備に比べて約 1.5 倍の経費増大が見込まれ、海底基礎構造物に関して経費が増大するが、これを避けるには、構造形式など再検討を要する。港湾、海底地形、流水、風況、波高などすべてを考慮できる基礎構造物の最適設計法の確立によりコスト低減を図るべきである。波浪外力の低減を目的とした消波システムとの複合化なども考えられる。

(6) 事前調査

洋上風力開発に関わる事前調査内容としては、風況条件、設計条件、立地条件、環境条件に関するものに付けて調査が実行されており、その概要を表2に示す。また、環境条件については、陸上との比較で表3のような比較が行われており、各項目における必要性の度合いを示唆している。

(7) メンテナンスと各種対策

洋上風力発電事業においては立地環境の特殊性から、メンテナンスについてはその実施方法が事業の採算性 (運転費、発電コスト) に大きく影響する。風車へのアクセスが多ければ運転費が増大することから、アクセス頻度を最小限にすることが運転費低減のキーファクターとなる。

3. 日本における洋上風力発電の可能性

わが国における洋上風力発電に関わる賦存量については、複数の研究がなされている。筆者らの、算定条件として沿岸から沖合い方向に 1km 離れた海域を対象として、500kW 風力発電機の設置を想定したものでは 936—2,550 億 kWh/年の範囲にあり、¹⁾ 2000kW 風力発電機の設置

を想定した場合には、1342—4027 億 kWh／年と大きな値になっている。²⁾ 一方、藤井による賦存量は推定値は、2550—7650 億 kWh／年と大きくなっている。³⁾ さらに、Leutz は 7080 億 kWh／年としている。⁴⁾ 賦存量の推定値が研究者により異なるのは推計の前提が異なることになるものであるが、推計値の小さな値 (936 億 kWh／年) を基準としても、NEDO の風況マップに基づく陸上の風力発電賦存量 (0.34 億 kWh／年：シナリオ 2 の 10Dx3D のケース) の約 2750 倍の潜在賦存量を有し、洋上風力発電のポテンシャルの大きいことが示唆される。

4. 風力発電の環境負荷低減効果

IEA (国際エネルギー機関) では、風力発電による CO₂ 排出削減可能性に関する調査を実施し、その概要を 2000 年 11 月にハーグでの COP6 において報告している。⁵⁾ 風力発電が最初に選ばれたのは、確立された技術であり、低コスト、CO₂ の高い削減可能性などがその理由である。この報告では、大型オフショア、小型オフショア、オフショアの 3 シナリオに分けて発電コストを示しており、風力発電に適した地域では、大規模発電によるスケールメリットから、化石燃料による発電コストと同等になるとしている。

表 2 洋上風力開発に係る事前調査内容

風況条件	各種風況特性、風況シミュレーション
設置条件	海象条件 (波浪、流況)、海底地形・地質
立地条件	水域利用 (漁業、船舶航行、レクリエーション)
環境条件	海生生物、鳥類、景観、電波、海底底質、考古学上の物件

表 3 洋上風力と陸上風力における環境影響の比較

環境影響	陸上に比較して洋上は？
景観障害	減少：視点から遠い
騒音障害	減少：受音点から遠い
鳥類の衝突	地点による
電磁波障害	減少
マイクロ波障害	地点による
シャドウフリッカ	問題とはならない
海中騒音と振動	洋上風力特有

2020 年に 800 億ドルのコストで、2000GW の風力発電 (現在は 20GW) を行うと 40 億トンの CO₂ 削減が可能になると予測している。特に、年間 100 億ドルのコストでは地域的に中国での投資効果が大きく、約 5 億 7 千万トン、EU15 カ国と米国ではその 1／3 の 2 億トンにとどまるとしている。

このように、風力発電の導入により環境負荷を大きく減少できるわけである。

5. 洋上風力発電の将来

5. 1 欧州の風力エネルギー賦存量

デンマークの Risoe 研究所は 1989 年に洋上風況マップを作成し、欧州における洋上風力エネルギー賦存量に関する初期の情報を提供した。この洋上風況マップは、対象海域を海岸から 10km 以上離れた範囲に限定している。一方、欧州の風力エネルギー賦存量に関わる本格的な研究は Matthies らにより行われている。⁶⁾ これによれば、沿岸から 30km までの沖合いの海域で、かつ水深 40m までの EC 海域を対象として海上風力分布図 (ハブ高 60m) を作成している。これから、年平均 8m/s 以上の良好な風速の出現する海域は、バルト海に面するドイツ沿岸からフランスのブルターニュ半島南部 (ビスケー湾) に至る沿岸域、イギリス・アイルランドの沿岸域に認められる。表 4 は EC における洋上風力エネルギー潜在賦存量である。

海上風力分布図に基づいて洋上風力エネルギー潜在賦存量が算出され (風車の設置可能容量：6MW/km²)、EC 全体の洋上風力エネルギー潜在賦存量は 3028TWh／年と推算され、これは 1994 年当時の EC 全体の電力需要量 (1845TWh／年) の約 1.6 倍に相当する規模であった。

表 4 EC における洋上風力エネルギー潜在賦存量

最大水深 m	離岸距離 km		
	<10	<20	<30
<10	551	587	596
<20	1,121	1,402	1,523
<30	1,597	2,192	2,463
<40	1,852	2,615	3,028

表 5 欧州各国の洋上風力エネルギー潜在賦存量

国名	潜在賦存量 TWh／年*	合計電力需要量 (1994) TWh／年
イギリス	986	321
デンマーク	550	32
フランス	477	355
ドイツ	237	432
アイルランド	183	13
イタリア	154	235
スペイン	140	137
オランダ	136	75
ギリシャ	92	34
ポルトガル	49	25
ベルギー	24	63
EC 合計	3,028	1,846

注* 沿岸から 30km 沖合で、水深 40m までの海域で、かつ 10m/s までを前提に試算。風車のハブ高 60m で 1km² 当たり 6MW 設置されると課程。

国別では、表 5 に示すように、イギリスが最も多く 986TWh／年で EC 全体の 1／3 を占める。ついで、デンマークの 550TWh／年、フランスの 477TWh／年、ドイツの 237TWh／年の順である。なお、スウェーデンの洋上風

力潜在賦存量は 139TWh／年と報告されており、これはスペインと同等である。また、スウェーデンの風力開発業者 Vindkompaniet によると、同国周辺海域の洋上風力エネルギー潜在賦存量は、1MW 風車 4000 基を建設可能としており、これはデンマークの電力消費量の約 7％に相当する。

5.2 欧州の洋上風力発電開発目標

欧州主要国における洋上風力発電の将来計画の概要を表 6 に示す。デンマークを筆頭に 100—数千 MW 規模の事業計画が立てられている。

また、洋上に設置される風力発電装置も、初期のものは陸上タイプの風車に、外部設備の防食と制御システムへの塩分を含む外気の流入防止方策を追加するとともに、洋上における強風を考慮したものであった。近年、各風車メーカーは積極的に洋上専用の風車開発を行っており、その具体例を表 7 に示す。

これによれば、陸上タイプに比べて定格風速、回転数が高くなっており、また、タワーについても相対的に低く設計されている。翼枚数については 3 枚が主流であるが、2 枚翼は軽量で、かつ運搬も容易であることから洋上

仕様としては有望視されている。2 枚翼風車は高速回転に伴う騒音問題があり、景観上の観点からも陸上では敬遠されてきたが、洋上ではこのような問題はなく、また、3 枚翼に比べて空力的な効率は 1—2％減少するが、軽量化と運搬の容易さなど発電コスト低減に有効と考えられる。

おわりに

わが国における洋上風力発電の潜在可能性はきわめて大きいことは明らかであるが、まず、洋上における風況調査を実施し、より精度の高い実現可能性を見積もる必要がある。また、わが国は遠浅の沿岸が乏しく水深が急激に深くなるため、基礎施工費が高くつくこと、沖合いになるほど電源線が長くなりコスト高になること、既存の電源線の位置や容量により設置場所が限定されること、漁業権の問題や各種法規制など検討課題はきわめて多いのが現状である。しかし、欧州諸国におけるように、国家プロジェクトとして長期的な展望に立って技術開発を推進してゆくことは国際貢献国家として不可欠な課題といえる。国家プロジェクトとしての洋上風力発電の展開提案を表 8 に示す。

表 6 ヨーロッパ主要国における洋上風力発電の将来計画

国名	洋上風力発電の将来計画
デンマーク (環境エネルギー省)	・ 2005 年までの風力発電導入目標は、1,500MW、この内、洋上風力発電は 200MW である。 *1 ・ 2030 年までの風力発電導入目標は 5,500MW。この内、洋上風力発電は 4,000MW である。 *2
イギリス (貿易産業省)	・ 2010 年までに電力消費の 10％を再生可能エネルギーによる電力とするために、洋上風力発電導入量 1GW 以上が必要である。 ・ NFFO-4 (Non-Fossil Fuel Obligation：非化石燃料使用電力購入義務)計画の下で、2 つの洋上風力発電計画が承認されている。
スウェーデン (産業技術開発局)	・ 洋上風力発電施設(総設備容量 750MW)の建設が許可。当面、25～80 機の風車を建設する計画(1.5MW 級の風車で総数は約 500 機：2TWh／年)となっている。ただし、スウェーデンでは、環境に係る法律の規制が厳しく、計画の進展が見られていない。
オランダ (経済省)	・ 2020 年までに電力消費の 10％を再生可能エネルギーによる電力とするために、風力発電導入量 2,750MW が必要。この内、洋上風力発電は約 1,250MW である。
ドイツ (民間)	・ 総設備機数 1,200 台程度の計画がある。
フィンランド	・ 風力発電導入目標は、2005 年までに 150MW、2010 年までに 500MW である。
アイルランド (民間)	・ 2005 年までの再生可能エネルギー導入目標は、200MW であり、その大半が風力発電となる見込み。
フランス (民間)	・ 2005 年までの洋上風力発電導入目標は 500MW である。
ノルウェー	・ 2010 年までの風力発電導入目標は 3TWh／年、総設置容量で約 1,100MW である。
ベルギー (環境省)	・ 総設置容量 100MW の計画がある。
スペイン (民間)	・ 大多数の自治体が次の 10 年間に 10,000MW を超える風車の建設を目標とする地方毎の風力発電導入計画を立てている。 ・ タラゴナ南方のエプロ河口の水深 15m 以浅の海域に総設置機数 21 機(総発電量 21MWh／年)の計画がある。*3

注*1 CO₂の排出量：20％削減(1988～2005 年までの排出量)、再生可能エネルギー：12～14％(エネルギー供給に占める割合)、電力消費の 12％
注*2 CO₂の排出量：50％削減(2020 年以前の排出量)、再生可能エネルギー：35％(エネルギー供給に占める割合)、電力消費の 40～50％
注*3 当該海域が好漁場であることから計画変更を検討中。

参考文献

- 1) 長井浩, 牛山泉, 日本におけるオフショア風力発電の可能性, 風力エネルギー, Vol.22 No.1, 1998
- 2) 長井浩, 牛山泉, 日本沿岸のオフショア風力発電の可能性, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, Nov. 2000
- 3) 藤井朋樹, An Estimation of the Potential of Offshore Wind Power in Japan by Satellite Data, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, Nov. 1999

- 4) Leutz R., Ackermann T. A.Suzuki, and T. Kashiwagi, Offshore Wind Energy Potentials of Japan and South Korea, (投稿中)
- 5) Newsletter, Greenhouse Issues, Jan. 2001
- 6) Study of the Offshore Wind Energy in the EC JOULE I (JOULE0072), 1995

表 7 各社の洋上風車の仕様

風車メーカー	AN Bounus	NEG Micon	Nordex	Tacke	Vestas
型番	2MW/76	NM2000/72	N80	TW2.0 Offshore	V80/2.0MW
定格出力 (kW)	2000	2000	2500	2000	2000
定格風速 (m/s)	15	14	14	14	15
カットイン風速	3	4	3	4	4
カットアウト風速	25	25	25	25	25
ロータ直径 (m)	76	72	80	70.5	80
回転数 (rpm)	17/11	18/12	10.3~19.2	10~23	9~19
翼枚数	3	3	3	3	3
ハブ高さ (m)	60~80	60~80	60~80	65	61~78
出力制御	コンピ ストール	アクティブ ストール	ピッチ	ピッチ	ピッチ

表 8 21 世紀風力開発展開表

項目	内 容	年 次 展 開			
		2001 年 (現在)	2010 年	2030 年	2050 年
目 標	設備容量	150MW	3000MW	30000MW	300000MW
	一次エネルギーに占める割合	0.01%	0.2%	2%	20%
	風力開発ステージ	ウィンドファーム	沿岸・山岳・離島風力	洋上風力	航海型風力
	風資源	陸上	強風地帯全般	洋上近海	洋上遠海
	CO ₂ 削減量				
	発電単価	11.5 円/kWh	6 円/kWh	5 円/kWh	3 円/kWh
	建設費	24 万円/kW	12 万円/kW	10 万円/kW	6 万円/kW
	市場規模	50~500 億円	500~5000 億円	数兆円規模	10 兆円以上
*市場規模 (円/年) =年間導入量 (kW/年) ×建設費 (円/kW) +累積導入量 (kW) ×保守管理費 (円/kW)					
開 発 順 位	即効的実証プラント		普及		
	洋上風力 A (Ncer-shore)		実証 普及		
	洋上風力 B (Off-shore)		基礎 実証	普及	
	洋上風力 C (Floating System)		基礎	実証 普及	
	洋上風力 D (Sailing System)			基礎 実証	普及 普及
戦 略	〔即効的実証プラント〕即効的な風力開発を通じて 3000MW (2010 年) を達成する基盤を形成する。 期間：2002 年～2005 年即効的実証プラント開発	即効的実証プラント			3000MW 目標実現
	① (サイト) 好風況地域全体の開発を行う。	サイト開発			
	② (技術開発) 2MW 級の日本型風車の確立を軸として即効性を重視する。	新技術開発			
	③ (コスト) 当初は補助会に依拠しつつ, 2010 年時点で既存電力と競合できる発電単価を獲得する。その条件は, 集合設置・量産効果および各種制約条件でこれらを可能ならしめる日本型風車技術の確立にある。	コスト削減			コスト目標実現

(出典, JEMA/松宮)