特集

洋上風力発電（着底式）の現状と展望

Current states and future prospects of sea bottom mounted offshore wind turbines

関田欣治 *1

Kinji SEKITA

1. まえがき

現在、風力発電の導入量は世界全体で 4,800 万 kW を超え、量と質の点で優れる海上風を利用する洋上風力発電施設が 1991 年ころからオランダやデンマークで建設されるようになった。わが国でも、海に臨んだ風況の優れる沿岸や港湾域の陸域に建設され、2003 年ころから北海道瀬棚町(設備容量 1.3MW)や山形県酒田港(同 16MW)など防波堤内であるが、海に風力発電が建設された(図-1 参照のこと)。

ここでは、ヨーロッパで展開されている着底式洋上風力発電の現状等を紹介しながら、さらにわが国の海岸地形等の特徴や最近の研究成果を踏まえ、今後の洋上風車の展望を述べたい。

2. 洋上風力発電の現状

2.1 ヨーロッパにおける洋上風力発電

デンマークや英国には、100MW を超える大規模な洋上windfarmが建設されている。表-1にあるように、アイルランドの Arklow 堆では 525MW と大規模な計画がなされ、2003 年にその一期分が竣工した。

これらは、いずれも遠浅な海岸の海底に固定される着底式洋上風力発電施設である。洋上風車は、最初オランダの湖沼などの内海から設置され、次第に外洋

図-1 北海道瀬棚町(上から風車、タワー、水中基礎)

に向かった歴史があり、最近の大規模なwindfarmには離岸距離 20km、設置される水深も 20m に達するものもでてきた。離岸距離は海底送電ケーブルの敷設費上昇要因となるが、この事例は大型機の発達により採算性が成立するようになりつつあることを示唆する。

表-1 北欧における大規模洋上windfarmの立地

洋上 windfarm	離岸距離(km)	水深(m)	容量(MW)	竣工(年)
Horns Rev(DK)	14-20	6-12	160	2002
North Hoyle(英国)	6	10-20	60	2003
Arklow Bank(IRE)	10	5	25	2003
Nysted(DK)	10	5-9.5	165.6	2004

*1 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 教授

Professor, Department of Ocean Civil Engineering, School of Marine Science & Technology,
Tokai University

大型機導入の背景には、洋上は騒音影響等の問題が少ないこと、大型建設機械が使用できること、適確な風車配置ができる広大な海域が確保できやすいこと、等から送電ケーブルや水中基礎などにかなりのコスト増があっても発電コストを低減できることにある。

実際、使用されている発電機は Horns 礁, North Hoyle で 2MW, Nysted で 2.3MW, Arklow 堆で 3.6 MW 機と大容量であり、それぞれは欧米の風車メーカーである Vestas, Bonus 及び GE 社により製造された。

将来的には、5MW 機が洋上でも普及し始め、2010 年には世界の洋上で 6,000 万 kW の設備容量に達するとヨーロッパ風力協会 EWEA は予測している。

2.2 海洋石油ガス開発産業からの技術移転

北海の洋上風力の展開が着実に進められている背景には、海底油田ガス開発で培った海洋建設技術の洋上風車への技術移転がある。その石油ガス関連産業と風車産業間で相互交流が活発化す機運にあるので、幾分紙面を割いてふれておきたい。

1970 年ころから始まった北海の海底ガス・油田は衰退期に入り採算性の低い、いわゆるマージナル田が開発されている。このような中、固定式生産プラットフォームが当地では 600 基余り建設されてきたが、一部では撤去もされている。その一つであるスコットランド北東部沖 25km に位置する Beatrice 油田では、近傍に 5MW 風車 2 機を設置し、既存の 2 基のプラットフォームを発電基地として再利用する計画が進行している。

石油ガス関連産業は、長い開発の経緯があるために取り巻く規制や制約が今ではそれほど厳しくなく、かつ金・物・人の面で潤沢である。もう一方の風車産業は、関わるプロジェクトの規模がさほど大きくなく、許認可の申請や環境問題へのきめ細かい対応が必要であり、その上相当なコスト削減を図っていかなければならない状況にある。かように、同じ海洋産業でも歴史や企業環境が異なるが、新しい産業と在来の産業が共通する海洋建設技術を通して結びつこうとしている。

これにとどまらず、浮体式風車の建設を志向する大水深の海岸が多い南欧や米国でも、1,000m 級の高まで制覇した石油ガス関連技術を活用する研究が始まっている。以下、具体的な事例を紹介したい。

1) 建設費の削減工法

洋上風車は、風車とそれを載せる支持構造、それらを支える水中基礎からなる。ヨーロッパではモノパイルが一般的であり、厚肉の鋼板を巻き太径にしたパイル(杭)や支持構造(タワー)が用いられ、各部材はボルト・ナット、溶接、グラウトにより結合される。

この着底式工法は、波浪の厳しい北海に面する英国の Blyth, North Hoyle, 及び Scroby Sand なるウィンドファームに適用されている。据付け作業は、波浪の影響を受けにくい自己昇降式作業船を用いて行なわれ、壊れやすい重要部品であるローターやナセルは甲板上を自走するクローラークレーンで搭載される。それは、吊り荷重が数 100t と小さいことから成立するものであるが、船価の高い大型旋廻クレーン船を用いないで済む結果、建設費が大幅に削減できる。

2) モノタワー

オランダでは石油メジャーの Shell 社が、マージナル油田開発のため徹底して上載構造を軽量化し、モノタワーをキーとする、自己昇降式作業船とクローラークレーンの組合せ施工を実現した。この K17 と呼ばれるモノタワーは、水深 30m の海底に直径 4.2m モノパイルを打設しそれに直径 2.6m の円筒状タワーを繋ぎ、さらにその上に 150t の油井設備が搭載された。最終的に、モノタワーは全高 100m となり、重量、高さ及び水深の点で、まさに 2MW 級の洋上風車に匹敵する。英国でも類似のモノタワーを据付ける海洋建設業が風車設置に携わっている。

デンマークでは Horns 礁ウィンドファームに続いて、設備容量 200MW になる Nysted farm の建設がバルチック海 Rødsand で進められており、これにかかわる Rønboll 社は、一方でデンマーク沖水深 70m に石油開発に供するモノタワーを設置している。この国はもともと戦略的であり、風や波浪に対する風力発電施設の動的解析や疲労評価などの設計面から、気象海象の厳しい北海での建設作業や維持管理面においてまで、石油ガス関連の海洋構造物のノウハウや経験を活用しながら産官学で積極的に開発を押し進めている。

3) アクセシシステム

波浪や風が激しい北海では、維持管理のための洋上発電施設へアクセスは安全と操業費低減のため重要

な課題であり、この分野でも石油ガス開発関連の経験が生かされている。洋上施設への移動は、タワーに設けられたボートランディングへ作業ボートが係船し行なわれるのが普通である。しかし、海が荒れしかも大規模なウィンドファームでは、ヘリコプターからナセルへ、物資と人を直接降ろす。Viking Life-Saving, Vestas や Rømboll 社等が共同で、変動する波浪中で乗り降り可能なボートや最適な係船システムの設計、さらには浮体式生産設備に用いらてきたアルミ網製の折り畳み階段と、海と空からのアクセスシステムを開発している。

4) Jチューブ

プラットフォームで分離された原油やガスを輸送するための海底パイプラインは、その近くにおいて船舶アンカーによる引掛け事故や落下物の衝突事故が多く、パイプラインの立上構造の設計には慎重な注意を要す。海底ケーブルでも水中基礎と海底間で切断事故が起こり易いので、Jチューブという保護管に送電ケーブルを納め敷設される。特に、潮位差が大きい Scroby Sand のウィンドファームでは流れにより海底の洗掘が生じケーブルの破断が危惧されたので、送電線を納めた J チューブが海底のマウンドの中まで埋設されている。

3. わが国の沿岸の特徴

3.1 わが国の沿岸域の広さ

ここから、わが国沿岸の海底における沿岸の特徴について述べる。

わが国の沿岸は、概ね海底勾配が急で、夏季は太平洋側で冬季は日本側で波浪が厳しく、また台風などの低気圧の発生が多く、最大限界風速が大きいという特徴がある。

さて、海底に杭で固定される海洋構造物、ジャケットが石油ガス開発のため世界中で 8,500 基あまり設置され、そのうち最も深い記録はメキシコ湾 450m である。着底風力発電が経済的に建設できる水深は、今のところ 25m までといわれるが、100m までの水深に対するわが国の海域面積²⁾を表-2に示す。これから分かるように、水深 20m 以浅の海域面積は日本の国土面積 378,000km²の約 1 割の 31,000km²に達し、平均離

表-2 わが国の水深別の海域面積

海域	面積(km ²)	平均離岸距離
国土面積	377,720	(km)
水深 0 - 20m	30,880	0.89
20-- 50m	49,850	2.32
50--100m	79,740	4.61

岸距離は、海岸線総延長 34,812km で除し 900m となる。これは 50m 水深まで広げると 2,300m までに拡大する。

ここで一つの試算をしてみたい。仮に 20m 以浅の海底に、5MW 機（ローター直径 D=120m）を一定面積（10D×3D）の海域に一基備え付けるとすれば、約 71,500 箇所建設できることになる。この数は、2010 年の政府導入手目標値 300 万 kW をすべて 5MW 機でまかなえば、必要な施設は 600 基に過ぎず、如何に大きなものか理解できよう。

ちなみに、洋上では設備利用率が 30% は期待できることを考えると、20m 以浅の海から 9.39×10^{11} kWh の年間発電量が産まれる。これは、わが国の 2005 年度の予想使用電力量 8620 億 kWh に等しい。当然のことではあるが、浅水域は物流、港湾や漁業活動など利用されている。そこで、利用可能な海域を 20% と見込めば、それはわが国の石炭火力による発電量に匹敵する。

これだけでも、着定式洋上風力の可能性はわが国でも小さくないと、ご理解いただければ。

図-2 わが国の周辺の等水深線の分布と風速⁵⁾

3.2 海底勾配

海底勾配が急な海岸が多いといわれる中、約 1% の緩勾配の海岸を挙げれば、太平洋側では九十九里沿

岸、鹿島灘、有明海であり、少し急な2%勾配の海岸は常磐沿岸、駿河海岸、遠州灘、土佐湾などである。日本海側についても、新潟西海岸、秋田県本庄海岸が1%勾配で、石川県松任海岸、鳥取皆生海岸が2%勾配である。これらの多くが風況にも恵まれる。

次に、平面的広がりと風況を両面から概観するため、日本近海における水深100m線と予想風速分布を図-2に示した。これは、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の援助を受け東海大学含め産官学で進めてきた浮体式洋上風力発電に関する研究成果³⁾の一つであるが、図にあるように100m等水深線の広がり、前述の代表的な遠浅海岸が重なる。総じて、宗谷海峡、国後島周辺、噴火湾、仙台湾、北部九州玄界灘が相当広い。年平均風速と水深を考慮すると、留萌、瀬棚、秋田、輪島、境港、屋久島、那覇、平良、石垣、和歌山、御前崎、鹿島沖及び伊豆大島周辺などが候補地である。

このうちから、陸上の系統の整備状況を勘案し更に絞ると、留萌、秋田、御前崎、鹿島沖が適地かと思われる。

4. 着底式洋上風力発電に用いられる水中基礎

4.1 水中基礎の種類

洋上風車を支える水中の基礎は、今のところ着底式基礎である。これを分類すると、図-3に⁴⁾示すようにヨーロッパの実績ではモノパイル、重力式、ジャケット(トライポッド)であり、わが国では組杭である。

組杭とは、例えば4脚の鋼管杭を海底に杭打ち機で打設貫入させ、杭頭をフーチングと呼ばれる鉄筋コンクリート製の版で結合したものであり、その上に支持構造である円筒タワーが載る。前掲の図-1の写真には、防波堤内の静穏な水面上に黒色の高密度ポリエチレンで表面を防食した杭と白色の直方体フーチングが外観できる。組杭は、海中では波力を受けにくい構造であるが、風荷重などによる水平荷重に対してはあまり有利な構造でなく、風が強く荒海象で深い水深では使われにくい。

重力式基礎は、ヨーロッパで水深が10m未満の静穏海域で広く供され、約30%の実績を占めている。円錐台状のコンクリート製が多い。これは、上部の風車やタワーに作用する風荷重やタワーの基部及び水中基礎に加わる波浪荷重によるせん断力や回転モーメン

トに対し、基礎の自重と幅により滑動や転倒を生じないよう設計する。鉛直力に対しては沈下や傾斜を起こさないような海底の地盤強度が大きいところで用いる。しかし、マウンドを設けその上に基礎を築くので、水中での捨石の均し作業に多額の費用を要す。

図-3 着底式洋上風力発電のための水中基礎

最近、沖合のより深い水深で建設されるようになると、4-5m直径の太径鋼管杭基礎であるモノパイルが主流を占めるようになってきており⁵⁾、その実績も60%を上回る。モノパイルは70mm程度にもなる厚鋼板から造られ、通常、杭打ハンマーにより海底下20～30mに打ち込まれる。油圧で作動するハンマーが打設できる杭の最大直径は約1.8mである。そのため、太いモノパイルに対応するため、特殊な拡張継ぎピースを使用する。このピースの径が変化する部分では、ハンマーの打撃力が減衰し十分に杭に伝達されず、地盤によっては杭が打ち込めなくなる。そのため、途中まで貫入した杭の内側を中掘し、内部の土砂を取り除いてさらにハンマーで所定の根入れ長さを確保するまで打ち込むこともある。杭が打設できないような硬質地盤では、掘削により太径の立坑を築造しその中に杭を挿入し、最後にモルタルグラウトにより杭と地盤を一体化する。

一例の実績があるが特殊な杭としては5-6mの円筒状のサクシオン杭がある。これは口元が狭く次第に広がるラッパ形状をしており、底側が開口し海底に置かれると自重で少し貫入する。ついで、海底と杭内部にある海水をポンプで吸引すると土砂もろとも吸い上げられて、その結果杭は深く入る。比較的簡便な設

備で、砂でも粘土地盤でも急速施工でき、浮体のアンカーとしてまた固定式海洋構造物の基礎として一部使われてきた。

トライポッドと呼ばれる三脚ジャケットも、現在のところ実績が一例あるだけであるけれども使われた。ジャケットは海底面上の複数本の杭を束ねることで、剛性を高め、風や波がもたらす水平荷重や曲げモーメントに効果的に抵抗し、風車やタワーの自重を地盤に伝達するものである。また、その靱性も高いので耐震性に優れることから、わが国のような地震が多く、猛烈な風を送り込む台風が頻繁に来襲するところでは有力な水中基礎となりえると期待される。

5. 今後の展望

洋上及び沿岸域で風車を建設しようとする、連結すべき陸上の系統の受け入れ状況、海上占有に伴う諸規制、漁業問題等様々な克服すべき課題があり、本格的な洋上風車立国を目指すためには、これらを一つひとつ解決していかねばならない⁹⁾。(財)沿岸技術研究センターの場合でも、港湾域及びその沖合の活用のための推進策が産官学で研究されてきた⁷⁾。

ここでは紙面の関係からそのような議論は割愛し、洋上立地でコストダウンに不可欠な大型洋上発電のための支持構造と水中基礎に絞って展望する。

5.1 トラストタワーの可能性

過去、陸上ではラティスという送電鉄塔に似た支持構造が採用されていたが、これに鳥が巣を作る、部材数が多くて組み立て工程が長くなる、等の理由で次第に、小型の陸上風車を除いて、ラティス構造は姿を消してきた。しかしながら、ダウンウィンド風車では勿論、アップウィンド風車でも、後流域での流れが阻害されにくい透過性の高いラティス構造は、発電効率や振動影響の点でそのメリットは棄てがたい。

1) 大型化に伴う疲労問題

スケールメリット追求の結果、発電機が大型化してくると洋上風車全体の曲げ1次固有周期は長くなる。その結果、水平変位が大きくなり、支持構造の疲労問題が顕在化する。大型化に伴い、ナセルとローターの質量やナセルの高さが増加し、さらに風車全体の受ける風荷重も増える。同時に支持構造や水中基礎も大型

図-4 大型化に対する固有周期と疲労損傷

化により作用する波力も増大する。このような前提の元に実施した筆者らの研究では、1次固有周期は、図-4のように1MW機に対し5MW機では2倍の5-6sに、9MW機では7-8sと台風時の波浪周期に近づく。その結果、固有周期と同調し易く疲労損傷度も増加する。ある海域での海気象出現頻度から、波浪と風荷重に対する時間領域の動的解析を行い、レインフロー計数により応力範囲の出現回数を求め、マイナー則によって支持構造の疲労損傷度を推算した⁹⁾。

結論として、大型化は疲労寿命を損なう。疲労損傷度はサイトサイトの自然環境条件で異なるものの、このような傾向は一般性があり、大型の風車を搭載するようになると支持構造の疲労対策が必要となる。

2) 高剛性支持構造

着底・浮体式に関わらず、波浪や風による変動荷重周期との同調を避け、振動軽減や疲労損傷の軽減する必要がある。着底式の場合はさらに地震も含め、制振・免震対策⁴⁾も求められよう。

そのため、筆者は図-5のような従来の太径モノタワーに変わる中径鋼管でトラスを組んだ支持構造により、この問題を対処できないかと考えている。

モノタワーは剛性強化が必要な結果、タワーの直径は5MW規模では7m程度であるものが、将来8MW以上になると高張力鋼により90mm程度と薄肉化を期待できるものの直径は10m程度になると試算⁹⁾される。モノタワーでは長くなりやすい固有周期をトラスにすることで約7割と短くできる。これには鋼材重量の増加は免れないが、疲労は大きく軽減するので将来の大型化に弾みがつくものと期待できる。

5.2 新型基礎

十分な剛性と強度を有し風の力を受けにくい形状であるべき支持構造は、さらに現地の様々な土質に適応し、靱性や変形性能も望まれる。そこで、強度や剛性面からモノパイルに代わる太径の水中基礎の候補として、前述のサクシオン杭があげられる。二つ目は、国内で橋梁の基礎に用いられる鋼管矢板井筒基礎であろう⁷⁾。後者は鋼管中径の鋼管矢板を連結し鉄筋コンクリートの上部工からなり、海底地盤と一体になり大きな剛性が得られる。洋上では、急速施工が求められるのでこれを解決した施工法は不可欠である。

5.3 タワーと基礎の一体化

タワー直径に対応し基礎も大型化する。これを克服し、同時に靱性や変形性能を向上させるため、筆者は図-5のようなアイデアを提案している。一つは、現状のモノパイルをガイドケーブルで補強し剛性をあげる。二つ目は、打設限界に相当するような直径の杭を用いたジャケット基礎にする。しかも、支持構造と水中基礎を一体化する。この場合、ラティスのような複雑な支持構造は施工や腐食の面で不利と思われるので、より単純化した鋼管トラスとジャケットを組合せた着底式支持構造が最適と考えており、現在風洞実験等で検証しているところである。

結論としては、今後もっとトラスやラティス支持構造を活用されるのではないかと予想している。

6. 最後に

わが国には、陸域に送電線が整備され、離岸距離が短く着底式基礎が経済的に建設される遠浅な海岸は少なくない。勿論、そのような条件を満たしながらも急深な海域もある。したがって、着底・浮体式にとらわれず、相互の技術的課題を克服しながら、経済的で合理的な基礎を開発すべきものと思う。そのために、機械・電気・造船・土木という垣根を超え、産官学の知恵や力を結集しながら研究開発を進め、わが国本格的な洋上発電を実現することを願うものである。

図-5 支持構造と水中基礎の融合案

参考文献

- 1) Offshore Engineer, "Wind can learn from oil", pp.12-13, March, 2004, "Centered thinking on Knowledge Hill", pp.x-xi, Sep., 2005
- 2) 磯部雅彦, "日本の海岸の現状と問題点. 海岸の環境創造—ウオーターフロント学入門—", 朝倉書店, pp. 1-8, 1994
- 3) 大川豊, 矢後清和, 太田真, 山田義則, 高野幸, 関田欣治, "代替燃料創出を目指した浮体式風力発電施設に関する基礎的研究", 土木学会, 海洋開発論文集, VOL. 20, pp. 1217-1222, 2004
- 4) 関田欣治, "着底型洋上風力発電の動的設計に関わる研究", (独)海上技術安全研究所, (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 洋上風力発電フォーラム講演集, pp. 110-116, 2004
- 5) N.F.Gjersoe, "Design of monopole foundations for large offshore wind turbines -Experiences from the first projects offshore the British coast", Proc. of 15th ISOPE, pp.433-440, 2005
- 6) 関田欣治, "産声上げた洋上風力発電", エネルギー, 12月号, pp. 72-76, 2004
- 7) (財)沿岸研究センター, "港湾・沿岸域における風力発電推進に関する研究報告書", 平成17年2月
- 8) A.Yamashita, and K.Sekita, "Analysis of the fatigue damage on the large scale offshore wind turbines exposed to wind and wave loads", Proc. of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.166-171, 2004