

# 洋上風力発電の動向・展望－支持構造物

## Trends and Prospects of Offshore Wind Power Generation - Support Structures

宇都宮智昭\*

### 1. はじめに

本稿では、現在主流となっている水平軸型プロペラ風車を対象として、その支持構造物についての基礎的事項ならびに最近の動向・展望について記したい。支持構造物は、大きく、タワー、下部構造および基礎に分かれるが、タワーに関しては、洋上風車においても陸上風車と同様、単純な鋼製円筒シェル構造がもっぱら用いられている。そこで、ここでは特に洋上風車を特徴づける下部構造・基礎に着目する。

図1に、洋上風力発電施設の概念図と水深との関係を示す。水深の浅い海域においては、着床式と呼ばれる、下部構造を直接、海底に固定する形式がもっぱら用いられており、欧州や中国をはじめとして、世界各地での導入が進んでいる。一方、水深が深くなると、水の浮力により風力発電機ならびにタワーの重量を支える浮体式が施工面やコスト面において有利になると考えられており、その開発・実証が世界中で精力的に進められている。現在は、本格的な

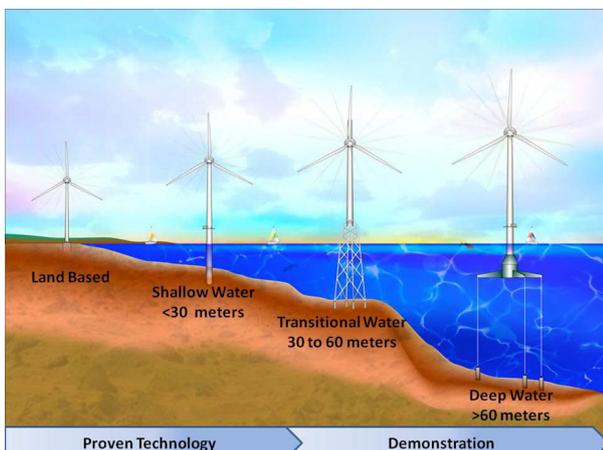


図1 洋上風力発電施設の概念図と水深との関係<sup>1)</sup>

商用化の一步手前の状態にあるとあってよい。

以下、まず着床式について述べた後、浮体式についての動向・展望について記したい。

### 2. 着床式基礎

#### 2.1 重力式基礎

図2に、重力式基礎の概念図を示す。主に鉄筋コンクリートでできた基礎を海底面に設置し、その自重によりタワーから伝達される転倒モーメントや重力式基礎自身に作用する波力・流体力に対して抵抗する構造形式である。

特に、導入初期の洋上ウインドファームにおいて比較的多く用いられた基礎形式であるが、風車が大型化した現在においては、重力式基礎自身が巨大化するため、その重量物のストックや運搬が困難と

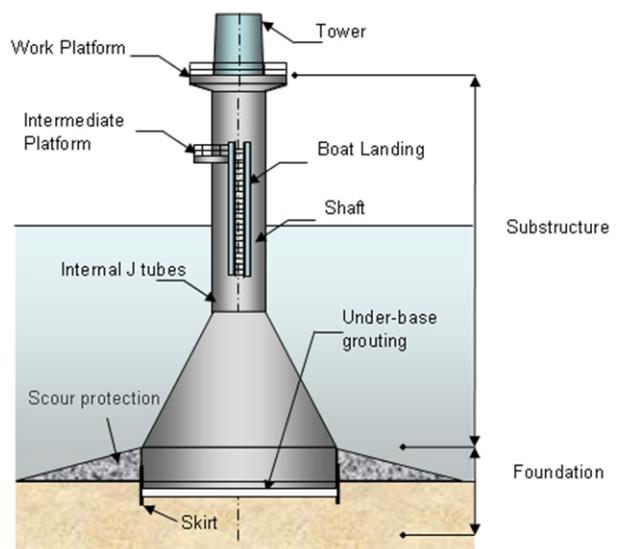


図2 重力式基礎の概念図<sup>2)</sup>

\* 九州大学大学院工学研究院 教授

なっていること、比較的広い範囲の海底地盤の整地（フラット化）が必要となること、流れのある海域では洗掘対策も必要になること、等の理由により、近年の実績はほとんどない。

2001年に運転開始したコペンハーゲン港沖のMiddelgrunden ウィンドファーム（図3）は、重力式基礎となっているが、その設置水深は4m～8m程度となっている。

## 2.2 モノパイル式基礎

図4に、モノパイル式基礎の概念図を示す。先端が開放した（閉塞していない）単純な円筒形状の鋼管製の杭を油圧ハンマーにより海底に打ち込み、その上にトランジションピース・タワー・ナセル・ブレードを順次接続するもので、杭が1本のみであるため、モノパイル式と呼ばれる。現在、最も主流となっている基礎形式である。

ここで、モノパイルの打設時には、杭が傾斜しないよう、SEP（Self Elevating Platform；自己昇降型プラットフォーム）に装着したパイルグリッパーに



図3 Middelgrunden ウィンドファーム

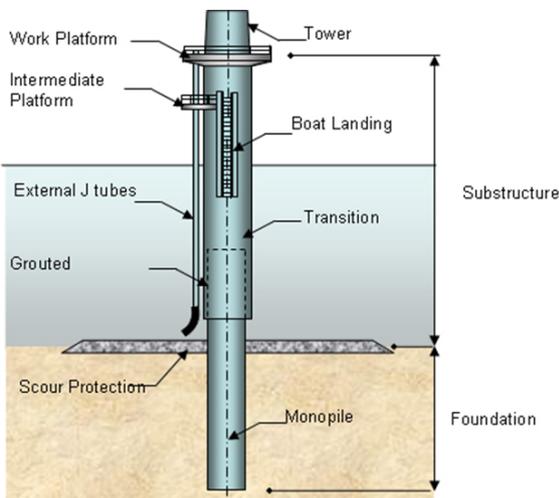


図4 モノパイル式基礎の概念図<sup>2)</sup>

より杭ができるだけ鉛直になるよう調整、保持した上で、油圧ハンマーにより打設する（図5、図6）。

ただ、いくら注意深く打設しても、杭を完全に鉛直に打設することは難しい。また、基礎とタワーとの接続はボルトで行われるが、そのためのボルトフランジも必要となる。そこで、打設したモノパイルにトランジションピースと呼ばれる鋼製の筒をかぶせた上で、モノパイルとトランジションピースの隙間に下部から高強度のモルタルを注入し、グラウト（接合）する。

トランジションピースには、あらかじめ、アクセス船着棧のためのポートランディングや送電用の海底ケーブルを内部におさめ、これを保護するJチューブなどが装着される。また、トランジションピースの上部には、タワー内部に人や機材を出入りさせるためのプラットフォームやタワーとの接続用のボルトフランジが設けられる。

図7は、モノパイルの打設からトランジションピース接続に至るモノパイル式基礎構築に関わる洋上施工の手順を概念的に示している。図7では、非自航型のSEP台船を用いる場合の例を示している

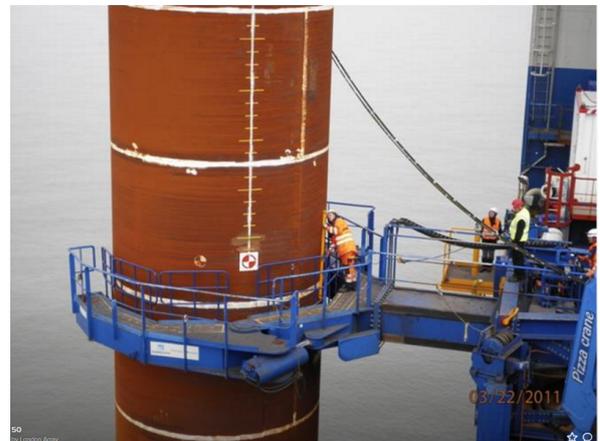


図5 モノパイルの位置決め状況<sup>3)</sup>



図6 SEP台船 Sea Worker でのモノパイル打設状況<sup>3)</sup>

が、洋上風力発電の施工に特化した自航型のSEP船を用いる場合には、ほとんど全ての洋上施工を1隻の専用船のみで済ませることができ、効率的な施工が可能となる(図8)。

### 2.3 ジャケット式基礎

図9に、ジャケット式基礎の概念図を示す。小口径の鋼管を溶接により接合し、トラス構造としたもので、4本脚のほか、3本脚の事例もある。一般には、やや深い水深(30m~60m)に適しているとされるが、岩盤を含めた様々な地盤への適応性が高いことから、水深面からはモノパイル式の適用範囲であっても、海底地盤への適応性の観点から、ウインドファーム全体にジャケット式が採用される事例もある。

図9の例では、ジャケットを海底に設置した後に、杭を四隅に設けたパイルスリーブ内に通した上で海底に打設し、その後、パイルスリーブと杭をグラウト材で接合する、という施工手順が想定される。しかしながら、この手順だと、杭の打設に時間がかかることから、結果的に施工期間全体が長期化することになる。

そこで、最近では、先行して全ての杭を海底に打設しておいて、その杭の内側にジャケットの脚を差し込み、ジャケットの脚の外周面と杭の内周面をグラウト材で接合する工法がとられている<sup>5)</sup>。この場

合の杭は、ピンパイルとも呼ばれる。

この際、ピンパイルの間隔がジャケット脚の間隔と一致するよう、杭の打設時にはテンプレートと呼ばれるガイドを海底に設置し、このガイドを利用して所定の杭間隔になるように調整する。

ピンパイル工法においては、時間のかかる杭の打設を先行して実施できることや、杭の打設やジャケットの設置において(数が少なく、かつ、備船費が一般に高価と言われる)SEP船が不要で、一般的な起重機船があれば施工可能など、多くのメリットがあり、国内外において実績が増えている。

一方、図10は、Seagreen Offshore Windfarmの3本脚ジャケットであるが、その基礎は、サクシヨ

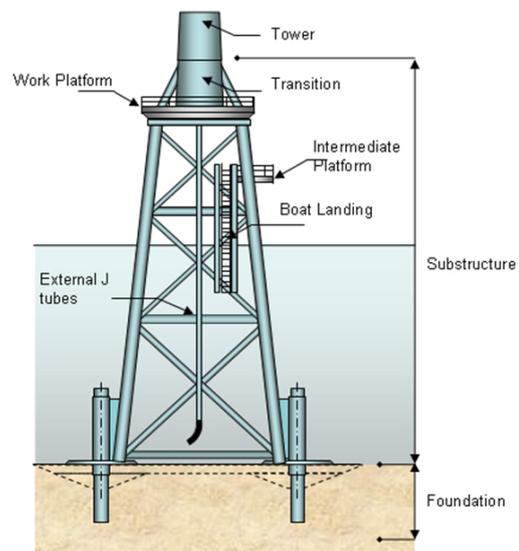


図9 ジャケット式基礎の概念図<sup>2)</sup>

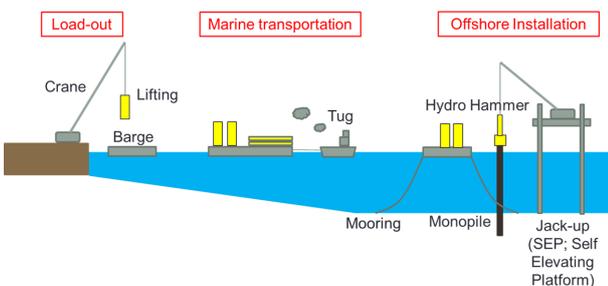


図7 洋上施工手順の概念図



図8 洋上施工専用船 (MPI Adventure)<sup>4)</sup>



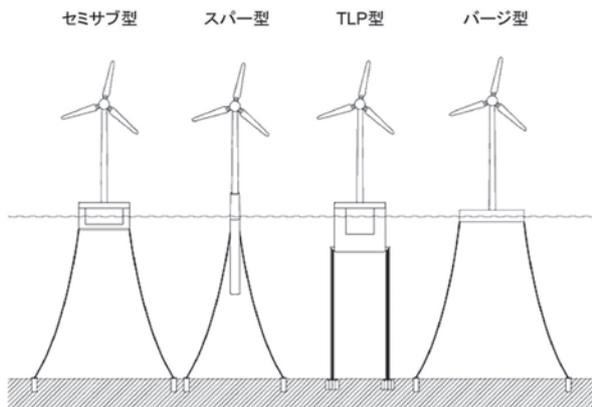
図10 サクシヨンバケット基礎を有する3本脚ジャケット<sup>6)</sup>

ンバケットと呼ばれるものになっている。これは、サクシオンバケット内の海水をポンプで排水することでサクシオンバケットを海底地盤内に貫入させるもので、サクシオンバケット天板の面積×内外水圧差が貫入力として作用することになる。従って、ある程度の水深が必要となることや、粘土地盤であることが望ましい、等、いくつかの制約条件がつくものの、条件が揃えば、効率的な施工が可能となる。なお、Seagreen Offshore Windfarmは、現時点で、着床式洋上ウインドファームとして世界最大水深(59m)での事例となっている<sup>6)</sup>。

### 3. 浮体式基礎

#### 3.1 はじめに

図11に、浮体式洋上風車の主要な形式の概念図を示す。以下、商用化が既に始まっているスパー型



浮体式洋上風車の主な形式

図11 浮体式洋上風車の主な形式

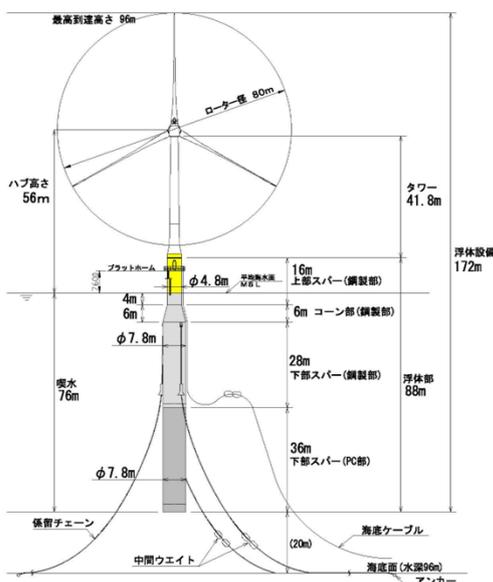


図12 ハイブリッド・スパーの概要<sup>7)</sup>

とセミサブ型について、それぞれの形式の概要や特徴などについて記したい。なお、その他の形式については、現時点では実証段階と考えられるため、本稿での説明は割愛する。

#### 3.2 スパー型

図12に、スパー型浮体式洋上風車の一事例として、環境省浮体式洋上風力発電実証事業において開発・実証されたハイブリッド・スパーの例を示す。基本的には、細長い円筒形状の浮体を縦に浮かべたものであって、重心が浮心よりも常に下に位置するようにすることで安定性を確保する構造となっている。このため、浮体内部には、重いバラスト材および喫水調整用の海水が投入されている。

図12の例では、3本のチェーンおよびアンカーにより海底に係留されている。チェーンは、海中中部において懸垂線形状(カテナリー形状)となるが、このような係留方式をカテナリー係留と呼んでいる。

スパー型浮体では、バージ型やセミサブ型との比較において、波に対する揺れを小さく抑えることが可能である。また、単純な形状のため、浮体自身の生産性も高く、製作ヤードに必要となる面積や地耐力も小さく抑えることができる。

一方、浮体の喫水が深いため、現状では、タワーやナセル・ブレードの取付を水深の深いところで行わざるを得ず、洋上施工面における考慮・工夫が必要となる。

五島市沖の事例では、タワーとスパーをあらかじめ製作ヤードで接続したものを、洋上で一体として立て起こしている。その後、ナセルとブレードを起重機船により設置している。

図13の事例では、あらかじめ岸壁で組み立てた風車・タワーを一体として、セミサブ型の大型クレーン船を用いて、静穏なフィヨルド内でスパー型浮体上に設置している。



図13 Hywind Scotlandの風車設置施工の様子<sup>8)</sup>

一方、図 14 の事例では、喫水の深いスパーを仮置き可能な水深の深い岸壁において、リングクレーンと呼ばれる超大型の陸上クレーンを用いて、岸壁からクレーンジブを伸ばすことで、タワー・ナセル・ブレードの設置をおこなっている。急峻な海底地形を有するノルウェーならではの工法ともいえる。

### 3.3 セミサブ型

図 15 に、セミサブ型浮体式洋上風車の一事例として、WindFloat Atlantic (8.4MW × 3 基) の例を示す。

基本的な形状としては、3 本ないし 4 本のカラムと呼ばれる浮力体を、ある程度の距離をとって水平方向に互いに接続したものとなっている。浮体が傾斜すると、それぞれのカラムには喫水差が生ずるが、その喫水差 = 浮力の差となり、これが浮体を元の傾斜角に戻そうとする復原モーメントとして作用することとなる。

図 16 に、WindFloat Atlantic におけるタワー・ナセル・ブレードの設置施工の様子を示す。セミサブ型は喫水を浅くすることができるため、岸壁から一般的なクローラクレーンを用いてこれらの設置が可能となる。このように、風車・タワーの設置が容易という点で、セミサブ型には優位性がある。

一方、セミサブ型浮体式洋上風車は、実証段階の

小規模なものにおいては、風車の設置も含めて、造船ドッグ内において完成形まで製作可能であった。しかし、風車が大型化した現在においては、セミサブ型浮体を一体として造船ドッグ内において製作することは、その寸法の大きさから、實際上、不可能になってきている。

図 17 は、中国・上海で製作された 5.5MW 浮体式実証機の事例を示している。海洋構造物用の広大な製作ヤードを用いてセミサブ型浮体が製作・浜出しされているが、今後、さらに大型化する風車を考えると、このクラスのヤードであっても面積の不足感が否めない。

従って、セミサブ型の本格的な商用化に向けては、必要なだけの地耐力を有し、かつ、多数の浮体を製作・ストック可能な十分な面積を有する製作ヤード（湾内静穏海域も含め）を確保できるかどうか、すなわち、インフラ整備面がひとつの課題になると考えられる。



図 14 Hywind Tampen の風車設置施工の様子<sup>9)</sup>



図 16 WindFloat Atlantic の風車設置施工の様子<sup>11)</sup>



図 15 WindFloat Atlantic 完成時の様子<sup>10)</sup>



図 17 中国初の浮体式洋上風車<sup>12)</sup>

#### 4. 今後の展望

現時点で世界最大の風車は、定格出力 18MW の Haliade-X (GE) であるが、今後、風車の大型化はさらに進むと想定される。そのような超大型風車を対象として考えると、着床式の大水深化がひとつの方向性として考えられる。あくまで個人的な予想であるが、水深 100m 程度までは着床式（ジャケット式）の適用範囲になるのではないかとと思われる。

一方、水深 100m 以深の海域に大きな風力エネルギーポテンシャルを有するわが国においては、浮体式の普及こそが、本格的な洋上風力導入における鍵となる。スパー型においては、タワー・風車の設置に関わる、主に洋上施工面での技術的課題が、セミサブ型においては、広い製作ヤードの確保ができるかどうかという、主にインフラ整備面での課題があることを先に述べた。これらの点に関して、野口ら<sup>13)</sup>が興味深い提案を行っており、課題解決のひとつの方向性を示していると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Walter Musial, Bonnie Ram, Large-Scale Offshore Wind Power in the United States, EXECUTIVE SUMMARY, NREL/TP-500-49229, 2010.
- 2) Wind Energy - The Facts, <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html>
- 3) <http://www.londonarray.com/offshore-2/>
- 4) <http://www.mpi-offshore.com/mpi-adventure/>
- 5) 大嶽敦郎ほか、洋上風力発電設備におけるジャケット構造の設計技術の確立、日鉄エンジニア

リング技法, Vol.14, 2023.

- 6) <https://www.seagreenwindenergy.com/>
- 7) 宇都宮智昭, 吉田茂雄, 佐藤郁, 飛永育男, 2MW 級スパー型浮体式洋上風力発電施設の構造設計について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 71, 2, I\_126-I\_131, 2015.06
- 8) Saipem 7000-Hywind Scotland Mating Operations, Saipem, [https://www.youtube.com/watch?v=PmkA6hbJ\\_j8](https://www.youtube.com/watch?v=PmkA6hbJ_j8)
- 9) Hywind Tampen - Assembly of the world's largest floating wind farm, <https://www.youtube.com/watch?v=8nAfpTahQoE>
- 10) <https://www.power-technology.com/news/semi-submersible-floating-wind-farm-windfloat-atlantic-repsol-portugal/>
- 11) Navantia Windfloat Atlantic Project, <https://www.youtube.com/watch?v=-eLU4lf9MaQ>
- 12) <https://www.offshorewind.biz/2021/06/09/chinas-first-floating-wind-foundation-sails-out-photos/>
- 13) 野口哲史, 長坂明典, 泉照久, 横島隆広, 浮体式洋上風力の大量急速施工を考える, 風力エネルギー, 第 47 巻, 第 1 号, 2023.

#### 著者略歴



宇都宮 智昭(ウツノミヤ トモアキ)  
1985年3月京都大学工学部卒業。1991年4月京都大学工学部助手, 1997年4月同助教授, 2014年4月より現職。浮体式洋上風力発電施設の動的応答解析・実証事業などに携わる。2014年9月産学官連携功労者表彰(環境大臣賞)。工学博士。