

JFE エンジニアリングにおける洋上風力基礎事業への取り組み

JFE Engineering's Initiatives in Offshore Wind Power Foundation Business

森 浩章 MORI Hirofumi JFE エンジニアリング 洋上風力プロジェクトチーム 基礎ユニット 技術グループ長
上野 秀治 UENO Shuji JFE エンジニアリング 洋上風力プロジェクトチーム 基礎ユニット 工場建設グループ長
水上 亮 MIZUKAMI Ryo JFE エンジニアリング 洋上風力プロジェクトチーム 営業ユニット 見積・投サグループ

要旨

近年日本でも導入が進んでいる洋上風力発電をさらに普及するためには、基礎構造の設計技術の向上が課題となっている。洋上風力発電事業で先行している欧州では、基礎構造の設計に、風車構造と基礎構造のモデル化を個別に行う等価分離解法が広く用いられており、本稿でその妥当性を確認した。また、国内でモノパイル基礎を製造できる企業が存在せず、海外から調達せねばならない状況となっていることから、当社では国内初のモノパイル製造事業の実現に向け、モノパイル工場の建設、出荷・輸送および品質管理体制の確立に取り組んでいる。

Abstract:

In recent years, offshore wind power generation has been introduced in Japan. In order to further spread this business, it is necessary to improve the design techniques of the foundation structure. In Europe, which is a leader in this field, the superelement approach, in which a wind turbine and a foundation are modeled separately, is widely adopted for the design. The validity of this approach is confirmed in this paper. In addition, there are no companies capable of manufacturing monopile foundations in Japan. As a result, project owners are forced to procure them from overseas. To establish the first monopile manufacturing business in Japan, we are working on the construction of a monopile factory and establishment of shipping, transportation, and a quality control system of monopiles.

1. はじめに

洋上風力発電は再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札と考えられ、欧州を中心に全世界で導入が拡大している。国内では、2030 年まで 10 GW、2040 年までに 30～45 GW の案件形成が政府方針として掲げられている。既に国内 4 ヶ所の促進区域の発電事業者が決定し、2026 年には現地工事の着工が想定されている。

洋上風力発電の基礎形式には、浅い水深海域に設置される着床式と深い海域に設置される浮体式があり、着床式にはモノパイル式、ジャケット式、重力式の 3 型式がある。まず浅い水深海域の着床式から開発が進み、建設費が相対的に安価なモノパイル式が主流になると想定される。ジャケット式はモノパイルの施工が困難な岩盤海域や水深がより深い海域から順次適用され、次第に拡大していくと考えられる。

モノパイル式基礎は直径 10 m 程度の超大型鋼管構造で、単体重量も 1 000 t 前後となり、現在国内で製造できるメーカーは存在しない。一方、ジャケット形式は当社をはじめと

して国内で多数の製作実績はあるものの、洋上風力向けは全く新しい分野となる。当社は、今後基礎形式の主流となるモノパイルの製造工場を新たに建設し市場に供給するとともに、実績豊富なジャケットについては洋上風力に必要な設計技術力を確保したうえで製作することで、洋上風力の着床式基礎のフルラインアップ製作体制構築を目指している。

ここでは、洋上風力向けジャケット式基礎の設計技術開発と、国内初となるモノパイル製造工場の建設に向けた取り組みについて述べる。

2. 洋上風力基礎ジャケットの設計技術開発

2.1 洋上風力発電事業における基礎設計業務

国内の洋上風力発電事業では、電気事業法に基づく工事計画届出の許認可に必要な認証として、ウィンドファーム認証（以下、設計認証）の取得が義務付けられている。この認証は、風力発電所を建設するサイトの環境条件の評価およびその環境条件に基づいた風車と支持構造物の設計適合評価であり、経済産業省の風車専門家会議により審査され

2022 年 3 月 23 日受付

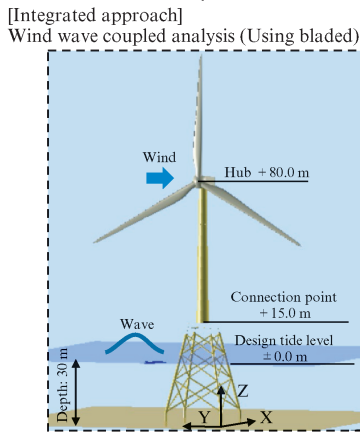
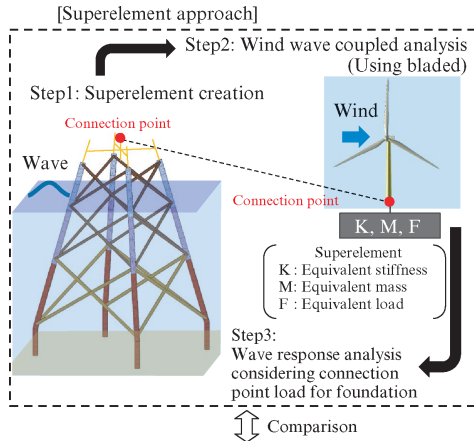


図 1 等価分離解法と一体解析の比較

Fig. 1 Comparison of superelement approach and integrated approach

表 1 解析条件

Table 1 Analysis condition

Wind	Wave	Static load	Mass
Turbulent wind, $V = 47.5 \text{ m/s}$, Yaw error $\theta = 8^\circ$	Constraint non-linear waves applied Pierson-Moskowitz wave spectra, $H_s = 7.5 \text{ m}$, $T_p = 12 \text{ sec}$, Wave direction $= 0^\circ$	1) Dead load 2) Buoyancy load	1) Structural mass 2) Added mass
Damping	Pδ effect	Simulation time	Time step
Rayleigh damping	Considering	600 sec	0.01 sec

る。審査はおおむね 1~1.5 年程度の期間を要するが、認証取得およびファイナンスクローズ後速やかに工事着手することは、発電事業の早期運転開始につながり、事業採算面から極めて重要である。そのため、基礎構造の詳細設計も審査と平行して実施することになる。

一方、洋上風力の基礎構造物の設計では、風車から伝達される風荷重と波の影響を適切に評価できる風波連成解析

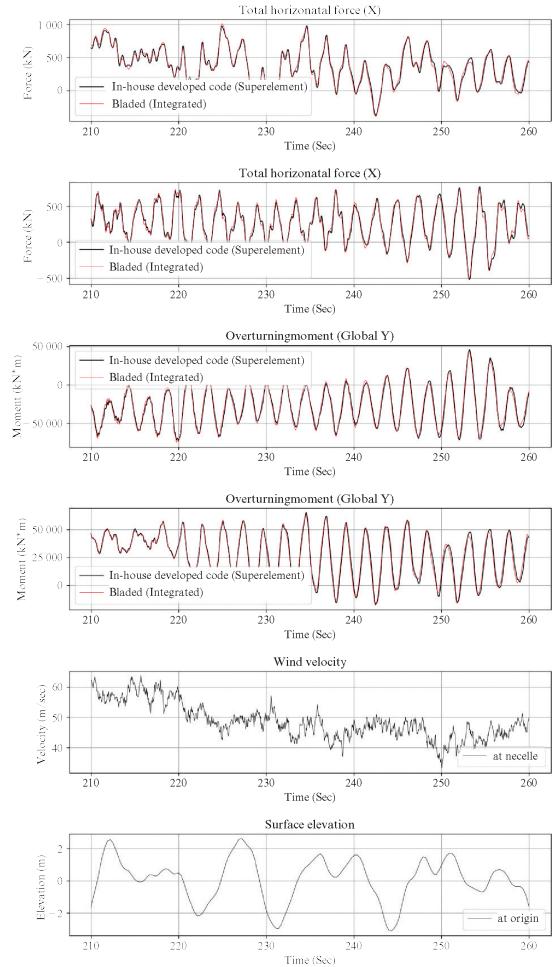


図 2 総水平力と総転倒モーメントほか (210~260 sec)

Fig. 2 Total horizontal force and total overturning moment, etc. (210 to 260 sec)

が必要である。特にジャケットの場合、風波連成解析が数千ケースにおよび、また動的解析や分離解析、疲労設計等の技術レベルが非常に高いため、国内で設計できる会社が極めて少なく、欧州系設計コンサルが設計するケースが多い。

当社としては、事業者様が設計認証を取得した後、スムーズに製作に着手できるよう、詳細設計の段階から事業者様あるいは EPC 事業者様をサポートできるジャケット設計の技術力を保有することが極めて重要であると考えている。

2.2 当社における洋上風力基礎設計

当社は 2010 年頃から本格的に洋上風力基礎設計の技術開発に着手し、ある案件でのウィンドファーム認証対応を通して、一般的な土木構造物とは大きく異なる洋上風力基礎の荷重特性、構造特性など技術の蓄積を図ってきた。

ここでは、洋上風力基礎設計の技術開発の一例として、風車構造と基礎構造のモデル化を個別に行う等価分離解法¹⁾の妥当性検証について述べる。

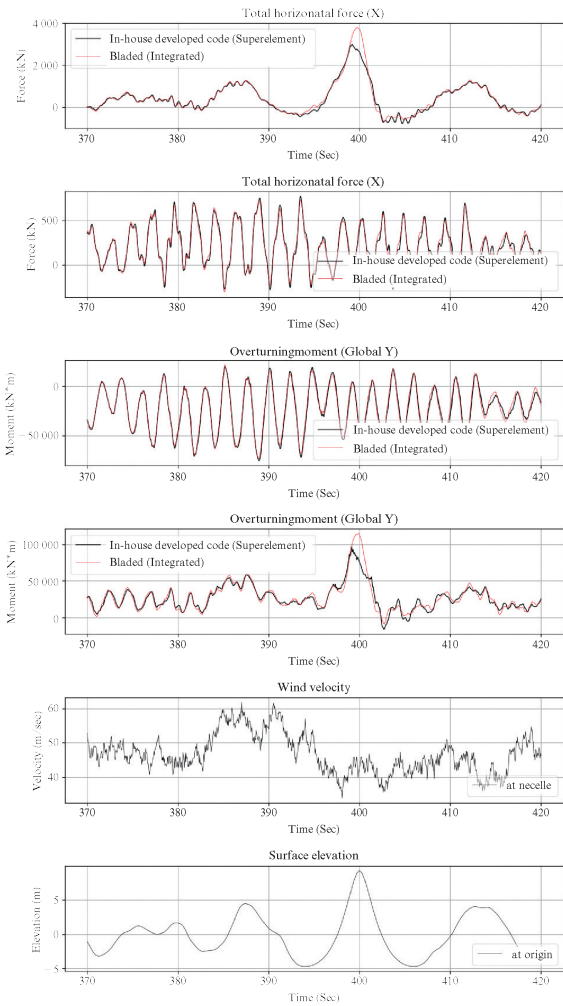


図3 総水平力と総転倒モーメントほか (370~420 sec)
 Fig. 3 Total horizontal force and total overturning moment, etc. (370 to 420 sec)

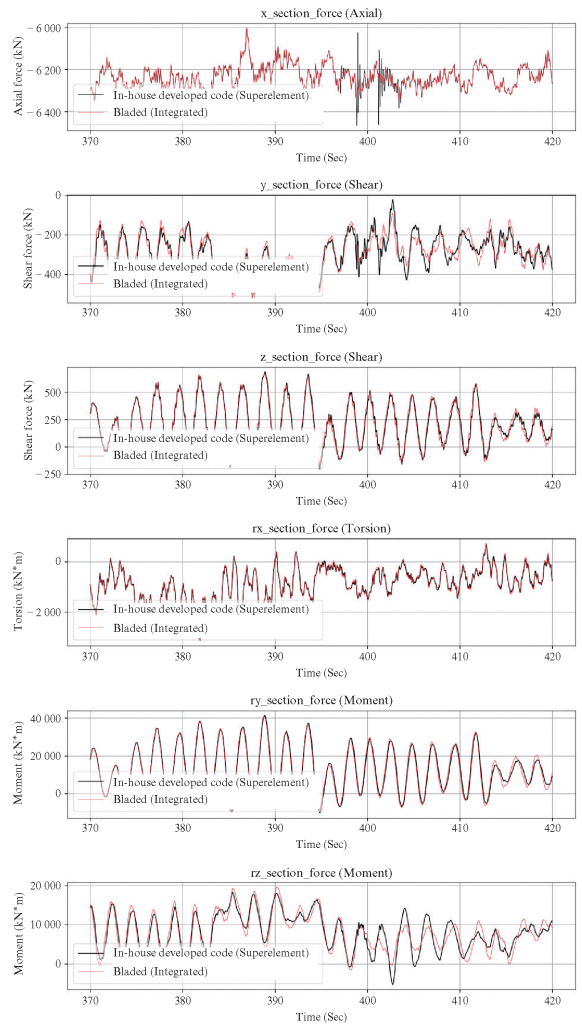


図4 接続点の断面力 (370~420 sec)
 Fig. 4 Section force at connection point (370 to 420 sec)

2.2.1 モデルと解析コード

検証のため、風車構造と基礎構造の一体モデルを用いた解法（以下、一体解析）と等価分離解法を比較する。風車モデルとして Bladed²⁾ 標準 5 MW 風車を適用し、基礎形式はジャケットとする。一体解析では風車と基礎構造のモデル化、風波連成解析をすべて Bladed で行う。一方、等価分離解法では風車構造側のモデル化、風波連成解析にのみ Bladed を用い、それ以外はすべて自社開発コードを用いる。基礎構造の動特性の表現のためにはスーパーエレメントの手法を用いる。一体解析と等価分離解法の比較を図 1 に示す。

2.2.2 解析条件

解析条件を表 1 に示す。

ここで、ヨーエラー 8° はローター向きと風向のミスライメントを指し、荷重条件は IEC 61400-3-1³⁾ で規定された DLC6.1 相当となるよう決定した。

Bladed を用いた一体解析では、不規則波動場を構築しながら 400 sec に最大波高相当の Stream Function 波を埋め込

む。等価分離解法では Bladed の波動場を再現して波力を算出する。

2.2.3 総水平力と総転倒モーメント比較

図 2、図 3 に海底面における総水平力と総転倒モーメントの時刻歴グラフを示す。対象とする解析時刻はそれぞれ 210~260 sec と 370~420 sec とし、同時刻の風速と水位変動の時刻歴グラフも併せて示す。

等価分離解法と一体解析の結果を比較すると、全体的に両者は良好に一致していることがわかる。ただし、時刻 400 sec 近傍で差異が見られる。これは等価分離解法では Stream Function 波の埋め込み時間帯の波動場再現が困難だったためである。実務における等価分離解法では、基礎構造側で埋め込み波を考慮した不規則波動場を構築し、図 1 のステップ 1 およびステップ 3 の波力を算出するため、埋め込み波近傍の波動場再現は不要である。したがってこれらの差異は実務に影響しない。

2.2.4 接続点の断面力比較

図 4 に接続点における断面力の時刻歴グラフを示す。対

象とする解析時刻は370~420 secとし、軸力、せん断力(2成分)、ねじり、モーメント(2成分)の6つすべての成分を示す。結果を比較すると全体としては良好に一致しているが、時刻400 sec近傍で差異が見られる。これは総水平力と総転倒モーメントの時刻歴グラフを比較した際と同様、埋め込み波時間帯の波動場再現が困難だったためである。しかし、実務では波動場再現は不要であるため、これらの差異は生じない。

2.2.5 等価分離解法の妥当性検証結果

一体解析と等価分離解法の結果を比較すると、総水平力、総転倒モーメント、接続点の断面力のすべてにおいてよく一致しており、等価分離解法が妥当な解法であることを確かめることができた。

3. モノパイル製造工場の建設

3.1 洋上風力基礎市場予測と工場生産能力

当社のモノパイル製造事業は、モノパイルおよびトランジションピース素管の製造を笠岡の新工場(以下、新工場)、トランジションピースの組立を津製作所で実施する計画である(図5参照)。新工場は、国内の洋上風力プロジェクトが本格化する2024年度からの稼働を目指して建設計画を策定した。

新工場の生産能力は、1案件(発電規模は平均500MWと想定)の基礎を1年間で製造できる能力とした。具体的な生産数量は、10MWの風車基礎の場合、年産50セット、8~10万トンである。なお、モノパイルの市場規模は2027年度以降に約16万トン/年の発注量で推移するものと想定している。

3.2 モノパイル製造工場の概要

新工場は、JFEスチール西日本製鉄所福山地区構内(笠岡市)の溶接管工場の南方1.5kmに位置している(図6)。

図7に工場概要と概略図を示す。

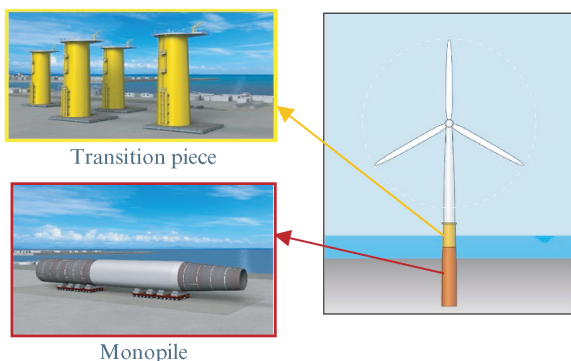


図5 トランジションピースとモノパイル

Fig. 5 Transition piece & monopile

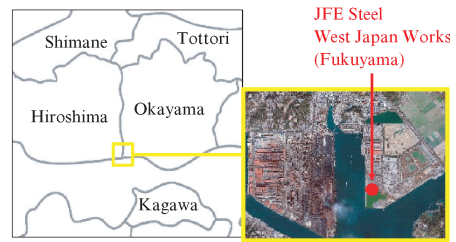


図6 新工場位置図

Fig. 6 New factory location map

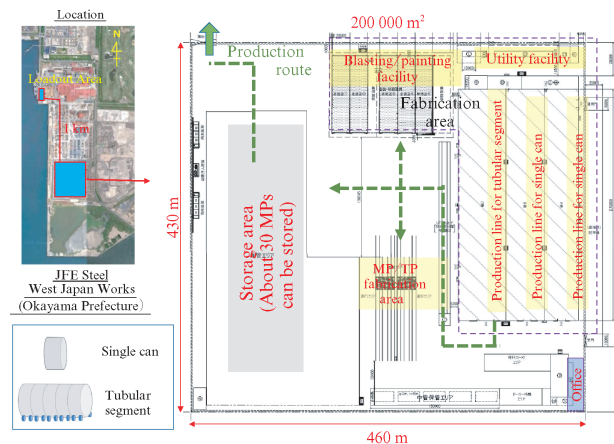


図7 モノパイル新工場 概要図

Fig. 7 Overview of new monopile factory

- 敷地面積: 20 ha (430×460 m)
- 生産能力 最大口径: 約12 m
- モノパイル保管能力: 22~30本(保管エリア不足の場合、北側の溶接管工場保管ヤードを一時使用)
- 出荷岸壁: 溶接管工場の出荷岸壁使用(岸壁水深11 m)

3.3 新工場の設備計画

モノパイルの製造フローを図8に示す。

素材は、JFEスチールで製造した大単重鋼板を使用する。

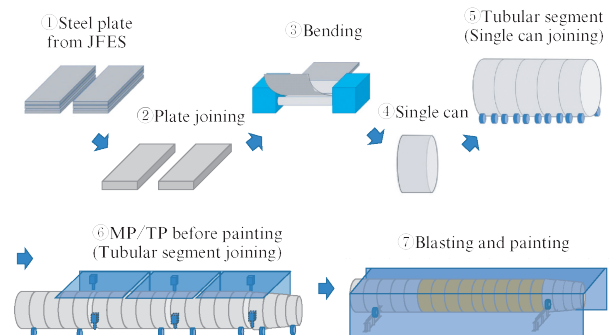


図8 モノパイル製造フロー

Fig. 8 Monopile manufacturing flow

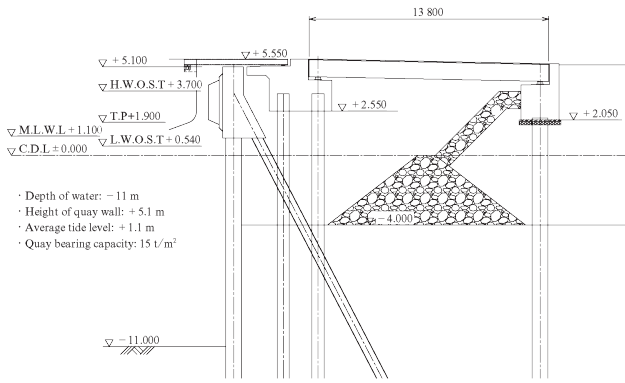


図 10 モノパイル出荷岸壁構造図

Fig. 10 Monopile shipping quay structure diagram

するが、現在供用中の溶接管の出荷作業等に影響を及ぼさないため、図 9 の出荷岸壁南端での台船縦付けとした。

当該箇所は、係留施設の背後にモノパイル出荷専用の仮設構台を設置し台船とはランプウェイで接続させることで、既設係留施設には重量物であるモノパイルの自重を作用させない構造とした(図 10)。また、周辺の護岸は傾斜堤であることから、陸側のモノパイル走行範囲は杭や地盤改良などで地盤補強を行う予定である。

3.6 モノパイルの海上輸送

重量物かつ長尺である多数のモノパイルを、季節を問わず安定的に海上輸送できる輸送船は、現在国内には存在しない。プロジェクト実施の際の海上輸送の所掌は案件毎に異なると思われるが、モノパイル製造の事業実現性の観点から、多数のモノパイルを安定的に海上輸送できる輸送船の確保が極めて重要である。

昨夏より複数の海運会社と FS・協議を重ねた結果、複数の輸送船確保に目途を付け、現在はモノパイルのロールオン・オフに対応可能なバラスト設備や輸送固縛架台の詳細検討を行っている。

3.7 新工場稼働に向けて

当社はオイル & ガスのオフショアジャケットや極厚鋼板を溶接した圧力容器や鋼製橋脚など、多数の製作実績はあるものの、洋上風力基礎のモノパイル製造は初の試みである。

今後、事業者様や EPC 事業者様からご指名いただくためには、製造および品質管理体制を確立し、事前に第三者のテクニカルデューデリジェンスを受け、信頼を得る必要があると考えている。以下に具体的対応とスケジュール(表 3)を示す。

①モックアップ試験

- ・縮小サイズ(φ4~5 m 程度)による大型化に向けた課題の洗い出し(津製作所)

表 3 製造・品質管理体制構築スケジュール

Table 3 Manufacturing and quality control system construction schedule

	FY 2021		FY 2022				FY 2023				FY 2024	
	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q
Factory construction												Commissioning
KASAOKA Factory	Planting		Procurement & construction									Operation
TSU Works			Procurement & ground improvement									Operation
Fabrication & quality management												
Mock up test	Element test						Certification of automatic UT					Mock up test
Welding method		W P Q T			W P S							
Fabrication method		Draft			Final							
Quality management method		Draft			Final							
Transportation plan	Shipping & stacking plan			Analysis of moored ship motion								Submission of final report
Confirmation by third party #												

#Third party : DNV or ClassNK etc.

- ・実サイズ(φ8~10 m 程度)による製造方法の検証(新工場)

②製造・品質管理要領書

国内基準はもとより、DNV にも準拠した要領書の作成

③出荷・輸送計画

工事ごとに準備し、マリンワランティーサーベイの審査を受けることになるが、国内初であることから、仮定条件で作成した計画書で第三者の事前審査を受ける。

4. おわりに

モノパイル工場完成予想図を図 11 に示す。今後本格化する洋上風力発電は、国内の重要なエネルギーインフラのひとつとなる。発電設備を支持するモノパイル式基礎およびジャケット式基礎を当社が供給することで、基礎製作の国産化を推進し、将来のカーボンニュートラル実現に少なからず貢献していきたい。



図 11 モノパイル工場完成予想図

Fig. 11 Conceptual drawing of monopile factory

参考文献

- 1) 洋上風力発電施設検討委員会. 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説 (令和2年3月版). 国土交通省, 190p.
- 2) Det Norske Veritas. “風力タービン設計ソフトウェア-Bladed”, <https://www.dnv.jp/services/page-3775>, (accessed 2022-02-02).
- 3) IEC 61400-3-1: 2019. Wind energy generation systems —Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines.



森 浩章



上野 秀治



水上 亮