

## 洋上気象観測塔設置工事での作業限界の検証

岩下 遼	深田サルベージ建設株式会社
黒田 俊治	深田サルベージ建設株式会社
西森 拓哉	深田サルベージ建設株式会社
望月 孝	日本風力開発株式会社
長倉のり子	日本風力開発株式会社

### Verification of the operational limits during offshore meteorological mast installation

Ryo IWASHITA	Fukada Salvage & Marine Works Co., Ltd. E-mail:iwashita.ryo@fukasal.co.jp
Shunji KURODA	Fukada Salvage & Marine Works Co., Ltd.
Takuya NISHIMORI	Fukada Salvage & Marine Works Co., Ltd.
Takashi MOCHIZUKI	Japan Wind Development Co., Ltd.
Noriko NAGAKURA	Japan Wind Development Co., Ltd.

#### Abstract

Japan Wind Development Co., Ltd. planned the installation of offshore meteorological observation masts for offshore wind farm at two locations in Aomori. Fukada Salvage & Marine Works Co., Ltd. received an order for the fabrication and installation, and both projects were completed in 2020. During the project's inception phase, a meteorological statistics analysis of the sites was conducted, and a coupled analysis of the motion of crane barge and the behavior of lifted objects was carried out. Based on the results, a medium-sized crane barge was adopted, resulting in reduced costs. While executing the offshore construction activities, measurements of wave heights and motion of crane barge were obtained. The verification process focused on offshore lifting operation limits. As a result, the established operational limits were confirmed to be reasonable. This implies that, in future selections of a crane barge, conducting preemptive planning grounded in operational conditions can foster the economical and rational deployment of suitable work vessels.

#### 1 はじめに

洋上新法が施行され促進海域の指定も進むなど、我が国でも漸く各地で洋上風力発電施設の建設が進んでいる。

日本風力開発(株)は、洋上風力発電開発に向けての風況観測に伴い、青森県内2箇所で、まず Fig.1 に示す洋上気象観測塔を計画し、2019年、計画地点での地盤調査を実施して、観測塔の設計を最終化した。製作及び設置工事を請け負った深田サルベージ建設(株)は、これら2箇所の工事を2020年夏に竣工した。

本稿では事前の種々の検討から施工費を最少化すべく、中型の旋回式起重機船で計画・竣工し、施工中に波高及び動揺を計測して、設定した作業限界について検証したので報告する。

#### 2 事前検討

外洋に面した海域での揚重作業の場合、SEP船(自己昇降式作業台船)あるいは旋回式起重機船が使用されるが、起重機船の場合には船体動揺による吊荷の挙動を考慮した検討が作業可否を判断する上で重要である。

本工事の計画段階で、過去のデータから当該海域の海象特性を分析し、候補とする起重機船の動揺性能に加え、船体・吊荷の動的挙動を検討し、結論として中型旋回式起重機船での施工が可能であるとの判断に至った。



Fig. 1 Offshore meteorological mast

## 2.1 施工海域の海象特性

対象海域は東側と南側が陸地に面しており、施工予定期間の卓越風向は東（出現率 30% 頻度）であり、陸風となるため吹送距離が短く、風浪は発達できない。しかし、外洋に面している北側から西側の範囲からうねりが来襲するという特性がある。

過去 5 年間（'15～'19）の現場近辺の海象データを分析した。作業限界として有義波高 0.8m 以上、有義周期 6sec 以上を目安とすると、施工期間のオペレーションウィンドウ（連続作業日数）1 日の場合の出現率は 5 割を超え、作業中止となった場合でも有義波高 1.2m 未満であれば、現地待機可能であるという前提で、ウィンドウを 2～3 日確保できれば施工上、十分現実的であると判断した。

## 2.2 旋回式起重機船の動揺特性

施工する杭は、2 分割で構成し、現場溶接で接合することにし、杭の重量及び長さを軽減することで、起重機船に要求される能力（吊荷重、揚程等）を下げた。その上で、経済性を考慮した、Fig. 2 に示す最大吊上げ荷重 310t、ブーム長 70m の作業能力を持つ中型の旋回式起重機船「第二豊号」を選定した。

動揺特性の把握のため、船級協会 DNV の船体動揺解析プログラム SESAM で規則波中応答関数を算出した。縦揺れ固有周期  $T\theta$  は 7～8 sec であり、波周期 6 sec 以下であれば波高 0.8 m まで作業可能であると判断した。また、横揺れ固有周期  $T\phi$  は 5～6 sec と短く、複数方向から波が入射するような場合には厳しいが、陸風による風浪の発達は小さいことから、本船の起用を妨げなかった。



Fig. 2 Floating crane “Daini Yutaka”

## 2.3 吊荷の挙動解析

既述の SESAM を用いて Fig. 3 に示すような解析モデルを作成し、船体動揺と吊荷の連成運動を時間領域解析で検証した。なお、本モデルは鉄塔上部吊上げ時において、後述する吊荷動揺制御システムをモデル化したものである。解析例として下記条件での吊荷の水平変位を Fig. 4 に示す。

単一波向	: 不規則波
波スペクトル	: JONSWAP
有義波高・周期	: 0.8m , 7.0sec
波向	: 30° (斜め追波)
吊荷荷重	: 4.0t
吊荷からフックまでの距離	: 5.0m

振れ回りを抑制する治具を工夫して Fig. 4 に示したように吊荷変位は ± 1 m 程度に抑えられることから、作業は可能と判断した。

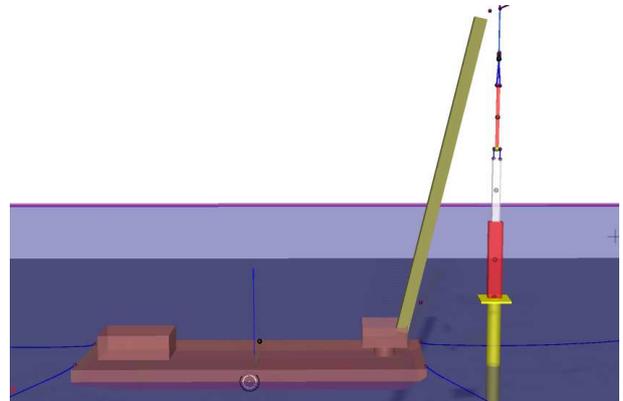


Fig. 3 Analytical model

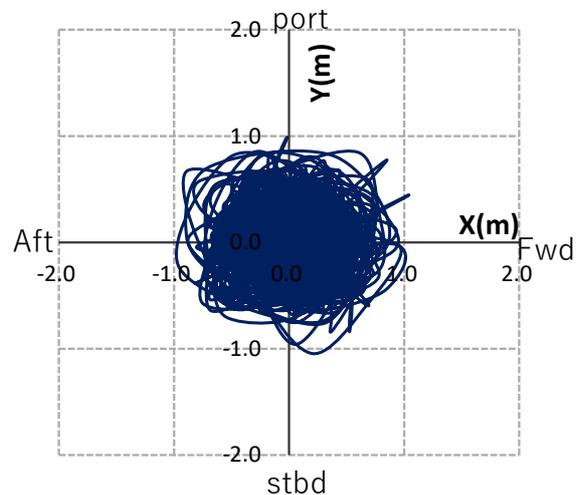


Fig. 4 Horizontal displacement of Suspended load

## 3 工事概要

下記に施工の流れを記載する。

### 3.1 大口径杭・鉄塔の製作・輸送

2020 年春から材料手配を開始し、高松で大口径杭（φ 2.8m）及びデッキ部、北九州で鉄塔を製作し、3000t 積台船に積み込み現地へ輸送した。

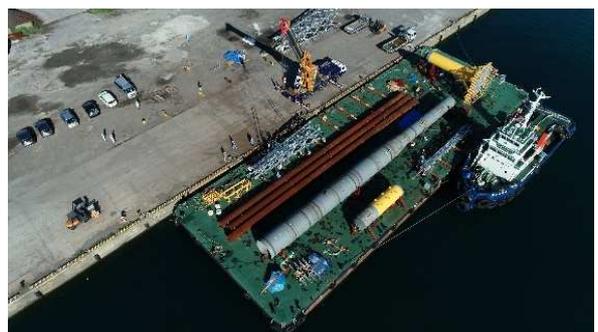


Fig. 5 Pile, deck and mast loaded on barge

### 3.2 大口径杭(モノパイル)の打設

波動方程式法による杭の打撃挙動解析に基づき選定した油圧ハンマーで杭を打設した。

船体動揺がある吊作業の場合、吊荷を据え付ける側に誘導するための機構が必要で、下杭と上杭との接合では、上杭にスタビングガイドを設け、下杭に挿入した後、溶接接合した。その後、設備が搭載されるデッキ部を据え付け、現場溶接で一体化した。



Fig. 6 Pile driving



Fig. 7 Joining the upper and lower piles

### 3.3 鉄塔据付け

デッキ部設置後、風向風速計を取り付けた 4 本脚の立体パイプトラス構造の塔を設置した。鉄塔の据付け及び連結時はガイドストッパーとスタビングガイドに加えて、バックテンションウィンチを使用したタグラインも併用した吊荷動揺制御システムを考案し、吊荷の振れ回りを抑制して誘導し接合した。



Fig. 8 lifted objects steadying control system

## 4 作業中止基準と現場計測

### 4.1 計測項目と計測方法

計測項目と計測方法を Table 1, 計測機器の配置を Fig. 9 に示す。波高は Fig. 10 に示す通り、船尾から後方に張り出したマイクロ波式波高計を用いてサンプリング間隔 0.5sec で計測し、船体動揺は動揺計で計測した。

Table 1 Measurement items and method

計測項目	単位	計測方法
波高 時系列	m	マイクロ波式波高計
波向き	方位	目視観測
6 自由度運動	m,deg	動揺計(OCTANS)

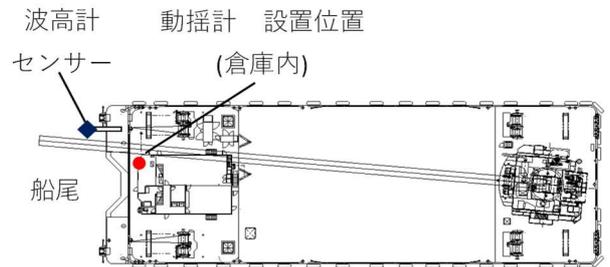


Fig. 9 Arrangement of measuring instrument



Fig. 10 Microwave type wave height meter

### 4.2 下部工施工中の海象について

下部工を施工した 6 日間の有義波高を Fig. 11 に示す。目安とした作業限界の有義波高 0.8m を大幅に下回る穏やかな海象であったため、起重機船の係留作業から下杭及び上杭の打設、デッキ部の設置まで連続して施工することができた。

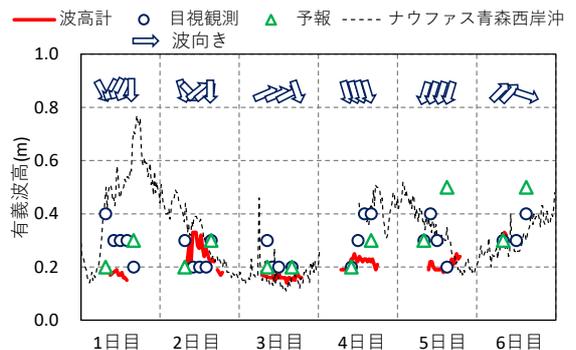


Fig. 11 Sea conditions during foundation construction

### 4.3 作業中止判断前後での計測結果

鉄塔設置のために再度入域したが、うねりが残っており、海象が悪かった。当初計画した係留状態では、船体動揺によりクレーン作業が不可能で、作業中止判断をせざるを得なかったが、計測は継続し、得た計測データを解析した。

Fig. 12 に作業中止判断時の波向きと起重機船の船首方向を示す。この時の計測データからは有義波高 0.41m, 有義波周期 6.5 sec, 最大波高 0.61m で, WNW と NW より来襲しており, 波出会い角  $50^\circ$  と  $75^\circ$  の 2 方向からうねりを受けていた。取得した波及び動揺の時系列データに対してフーリエ解析し, 平滑化処理を施して波と応答スペクトルを算出した。Fig. 13 の波スペクトルは横揺れ固有周期に近い 6sec にピークを有し, 大きな横揺れが発生しやすい状態であったことがわかる。

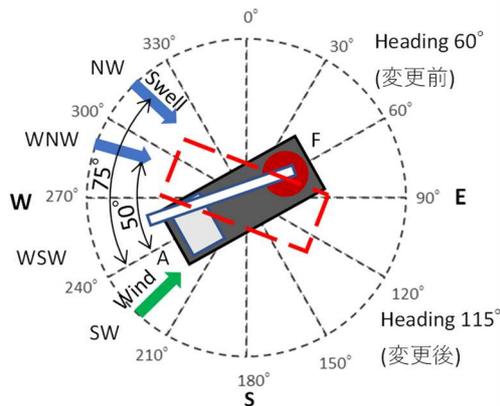


Fig. 12 Sea conditions and heading

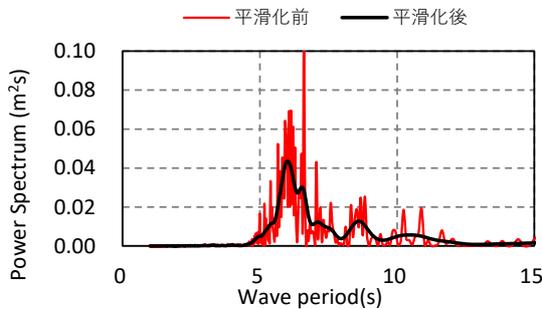


Fig. 13 Wave spectrum

次に得られた波と応答スペクトルから応答関数を算出した。Fig. 14 に横揺れの応答関数を示す。ピークが 5sec に現れており, 固有周期は 5 sec であると推定され, 出会い角  $75^\circ$  の計算結果と概ね合致している。

Fig. 15 に縦揺れの応答関数を示す。横方向から波を受けている状態での計測であったため, 縦揺れは小さく, 顕著なピークは現れていないが, 殆ど波のパワーの無い周期 5sec 以下の部分は除き, 固有周期は 5~7sec 程度であると推定され, 出会い角  $50^\circ$  の計算結果と概ね合致している。

作業継続を一旦中断して, 揺れを低減するため, アンカーを打ち替えて波に対して船体を立て, 波出会い角  $0^\circ$  とし, 追波を受ける状態とした。この変更前後の横揺れの時刻歴を重ねたグラフを Fig. 16 に示す。変更前の有義値 1.7deg に対して,

変更後は 0.8deg であり, 大幅に動揺が低減されていた。この時の減揺率は 53% で, アンカーを打ち替え, 揺れが減少したことで作業可能となったが, 既に日が暮れてきており, 夜間作業はできないことから, この日の作業を終了し, 翌日鉄塔を据付けた。

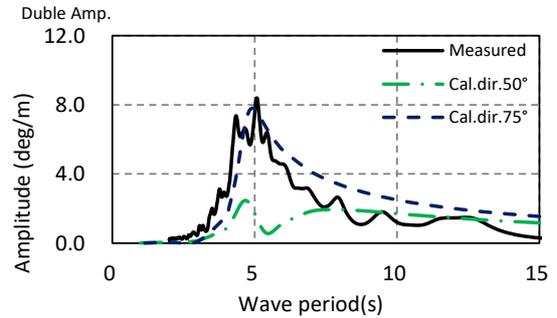


Fig. 14 Amplitude of floating crane's "ROLL"

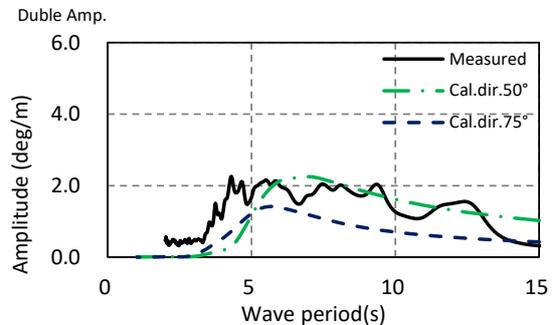


Fig. 15 Amplitude of floating crane's "PITCH"

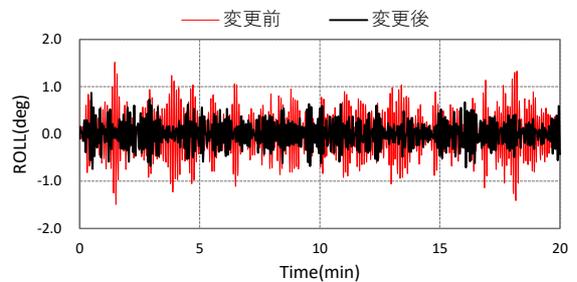


Fig. 16 Time series of "ROLL"

### 5 おわりに

洋上気象観測塔設置工事での現場計測結果から船体応答関数を検証し, 設定した作業限界については妥当なものであったと考える。

本工事は, 今後の外洋域での旋回式起重機船等の選定において, 作業条件に応じた周到な事前検討と準備, そして塔の設計を工夫することで, 経済的かつ合理的な作業船の起用が可能であることを示すものとする。

### 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：リアルタイムナウファス(全国港湾海洋波浪情報網) <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>