

洋上風力発電設備基礎の設計技術の確立 ～北九州市沖における国内初のジャケット式洋上風力基礎の実現～

Establishment of design technology for the offshore wind turbine foundation
～Implementation of the Japan's first jacket-type foundation
for the offshore wind turbine in Kitakyusyu offing～

犬飼 壮典 Takenori INUGAI

海洋事業部
海洋設計技術部
鋼構造設計第一室

鈴木三樹雄* Mikio SUZUKI

海洋事業部
海洋設計技術部
鋼構造設計第一室マネージャー

片山 能輔 Yoshisuke KATAYAMA

海洋事業部
商品企画・プロジェクト部
プロジェクト室シニアマネージャー
(元鋼構造設計室長)

入江 敬 Kei IRIE

海洋事業部
海洋設計技術部
鋼構造設計第一室

抄 録

平成23年から独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)による「洋上風力発電システム実証研究」が進められている。本プロジェクトにおいて、当社は国内初となるジャケット式の洋上風力基礎の設計を実施した。本稿では、この設計上のポイントと設計技術の一部を紹介する。

Abstract

A study on the offshore wind turbine system has been conducted by New Energy and Industrial Technology Development Organization(NEDO) since 2011. In this project, NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING co., ltd. had designed the Japan's first jacket-type foundation for the offshore wind turbine. This paper presents the points and a part of the technologies in this design.

1 緒言

世界的に再生可能エネルギーの活用が進められる中、特に高い賦存量が見込まれる風力発電に注目が集まっている。風力発電は陸上で行うものと洋上で行うものに分けられるが、陸上では風力発電の適地が減少していることから、我が国の長い海岸線の特徴を活かした洋上風力発電の本格的導入が期待されている。

洋上風力発電は、既にデンマーク、イギリスなどを中心に積極的な導入が進んでいるが、欧州と我が国では気象・海象条件が異なっており、欧州での事例をそのまま適用することはリスクが大きいとされ

ている。このような状況の中、洋上風力発電を実施するに当たり必要な技術の実証を行うことを目的として、NEDOによる「洋上風力発電システム実証研究(北九州市沖)」が平成23年に開始された。当社はNEDOとの共同研究先である電源開発株式会社(以下、J-Power)からの再委託先として、2.0MW風車用のジャケット式基礎の詳細設計を実施し、平成24年3月に国土交通大臣認定を取得した。図1に洋上風力発電設備の設置場所を、図2に研究実施体制を示す。

既存の洋上風力発電設備基礎の多くはモノパイル式で、ジャケット式の事例は世界的にも少なく、特に日本国内では初の試みとなる。また、設計におい



図1 洋上風力発電設備の設置場所¹⁾(写真)
Fig. 1 The installation point of the offshore wind turbine (Photo)

ては大規模地震の影響や波による衝撃碎波など、日本特有の厳しい自然条件に加え、洋上でのアクセス性や維持管理作業を考慮した二次部材への配慮も必要となる。本稿では、洋上風力基礎としてのジャケット構造の設計上のポイントを中心に、設計概要と設計技術について述べる。

2 洋上風力発電設備の概要と主要設計条件

2.1 設計条件

主要設計条件を表1に示す。

表1 支持構造物の主要設計条件
Table 1 Design condition for the foundation

項目	内容
風荷重	設計風速51.6m/s(暴風時、ハブ高さ)
地震荷重	地震動の最大入力速度 20.0cm/s(レベル1)、40.0cm/s(レベル2)
水深	D.L. -14.5m
設計潮位	H.W.L.=D.L. +1.60m、L.W.L.=D.L. +0.09m
設計波	有義波高 $H_{1/3}=6.3\text{m}$ 、最高波高 $H_{\text{max}}=10.9\text{m}$
風と波の同時生起	極大風(Ve50)と極大波(Hmax)が同時かつ同一方向に作用すると考える。
設計海潮流	$V=0.5\text{m/s}$ ($\div 1$ ノット)
地盤条件	▼ D.L. -14.5m 2.0m ↑ 強風化花崗岩 N=60相当, $V_s=310\text{m/s}$ $\gamma_{\text{sat}}=18\text{kN/m}^3$ $c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$
	▼ D.L. -16.5m 風化花崗岩 (工学的基盤) N=80相当, $V_s=470\text{m/s}$ $\gamma_{\text{sat}}=20\text{kN/m}^3$ $c=60\text{kN/m}^2$, $\phi=30^\circ$
共振点条件	$f_i < f_0 < f_b$ (soft-stiff 条件) f_0 : タワー及び基礎を含めた全体の固有振動数 f_i : ローターの回転振動数=運転最高回転数 $(1.2 \times 19\text{rpm}) / 60 \times 1.05 = 0.40\text{Hz}$ f_b : 翼の通過振動数=最低回転数 $(9.5\text{rpm}) / 60 \times 3 \times 0.95 = 0.45\text{Hz}$
タワー基部荷重 (暴風時)	水平力: 877kN 軸力: 2,551kN 転倒モーメント: 44,947kNm ねじりモーメント: 1,541kNm

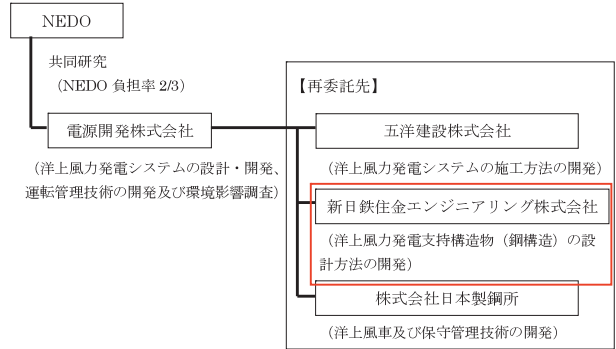


図2 研究実施体制²⁾
Fig. 2 Organization of the research

2.2 構造概要

発電設備の全体図およびジャケットの構造概要とポイントを図3に示す。ジャケットにコンクリート製の重力式基礎を組み合わせたハイブリッド構造である。

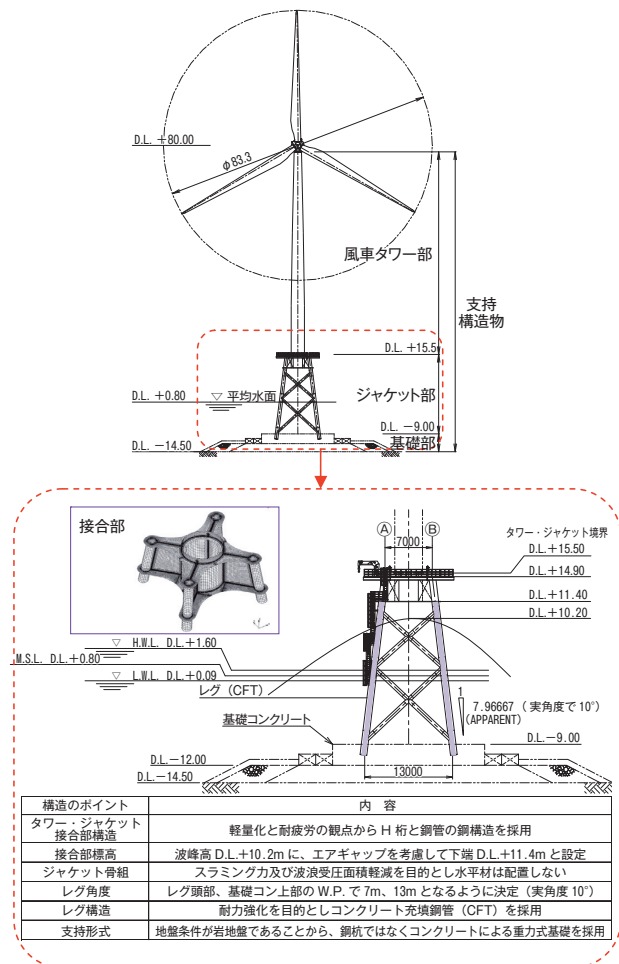


図3 洋上風力発電設備の全体構造とジャケットの構造概要
Fig. 3 Overall structure of the offshore wind turbine power generation system and outline of the jacket-type foundation

3 洋上風力基礎設計上のポイント

3.1 風車との共振の回避

着床式基礎の場合、タワーと基礎を含めた支持構造全体の一次固有振動数を、風車ローターの回転数（1P振動数）およびローターの回転に伴いタワー前方を3枚翼が通過する振動数（3P振動数）の間に入れる、いわゆる soft-stiff 構造とし、支持構造物の剛性を調整して風車との共振を避ける必要がある（図4）。

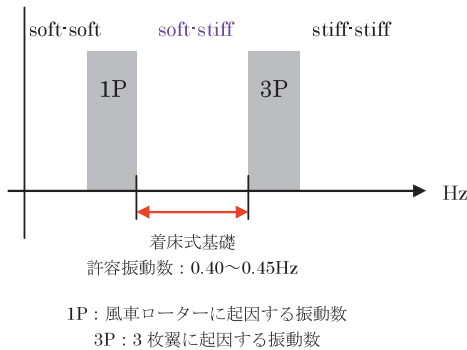


図4 許容固有振動数帯
Fig. 4 Allowable natural frequency band

3.2 衝撃碎波力の評価

欧州に比べ日本近海は急な海底勾配を有しているため、碎波が発生する海域（碎波帯）が多い。この帯域に風力基礎が設置される場合、衝撃碎波力の影響を適切に評価する必要がある。

3.3 疲労耐久性の確保

洋上風力基礎に作用する荷重の特徴として、自重などの固定荷重は小さいが、風車、支持構造物に作用する風荷重、波荷重が大きいという特徴がある。風荷重、波荷重ともに不規則性をもつ変動荷重であり、これに対し合理的な手法に基づき疲労寿命を評価する必要がある。

3.4 タワー・ジャケット接続部構造

タワーとジャケットの接続部構造として、図5に示すような欧州の事例がある。しかし、既往の洋上風力基礎は世界的にモノパイル形式が主流でジャケット式は実績が少なく、ジャケット式の接続部構造は試行錯誤の段階にある。風車タワーに発生する荷重をスムーズにジャケットに伝達できる接続部構

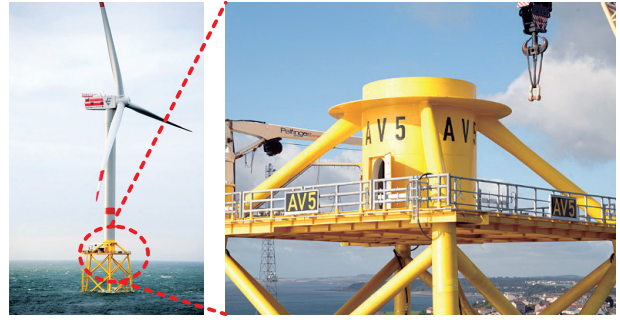


図5 ジャケット式の接続部の事例(写真)
(Burntisland Fabrications Limited HP より)
Fig. 5 Practical example of connection of the jacket-type foundation (Photo)

造が求められる。

3.5 二次部材の計画・設計

風力発電設備は、定期的な維持管理が必要とされる。そのため、船からのアクセス設備や作業用デッキなどの二次部材は、洋上という厳しい自然条件に設置されることを前提に、使用性や安全性に配慮して計画・設計する必要がある。

4 設計概要

4.1 設計フロー

洋上風力用ジャケット式基礎の設計フローを図6に示す。なお、耐震検討はプロジェクト実行上の都合により当社所掌外だったため本稿での記載は省略している。

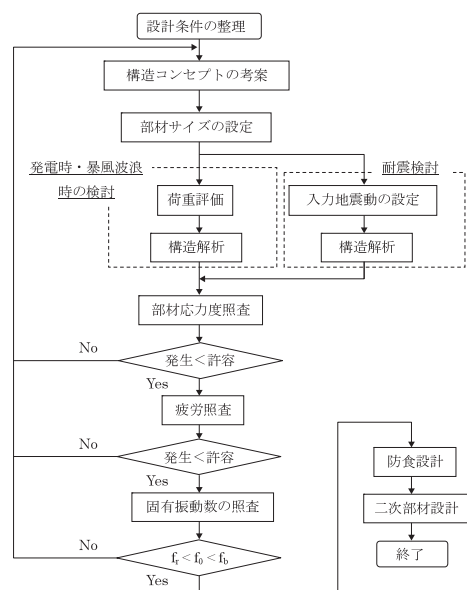


図6 ジャケットの設計フロー
Fig. 6 Design procedure of jackets

4.2 発電・暴風・波浪時の設計

(1) 構造解析モデルと荷重ケース

ジャケットの応答値は図7に示す3次元骨組みモデルによる静的解析により算定した。荷重作用方向は構造の対称性を考慮し0°および45°の2方向とした。作用荷重および荷重ケースを表2に示す。ジャケットの各部材に作用する波力は、流れ関数法により波の運動を評価し、モリソン式により荷重値を算定した。

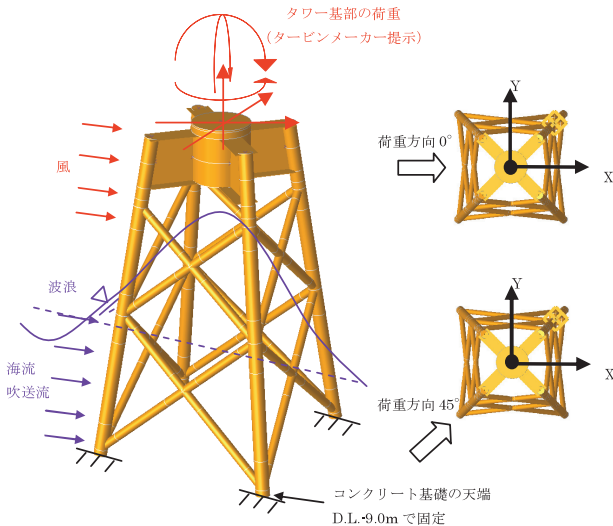


図7 構造解析モデル
Fig. 7 Analytical model

表2 荷重の組み合わせ
Table 2 Load combination

荷重状態	G	P	S	R	T	T'	We	Wred	K	K'	Kw	Ha	Hb	Hc	Hred	Hsh	Oc	Ow	K _T	
長期	常時	○	○			○														
	積雪	○	○	○									○							
	暴風時	○	○					○												
短期	波浪時	○	○												○	○				
	発電時	○	○																	
	地震時	○	○						○			○	○							
極稀	地震時	○	○									○	○							
	津波時	○	○																	○

G	固定荷重によって生じる力	Ha	年平均波浪によって生じる力
P	積載荷重によって生じる力	Hb	耐久性評価用波浪によって生じる力
S	積雪荷重によって生じる力	Hc	暴風時波浪によって生じる力
T	発電時の平均風圧力の最大時に生じる力	Hred	暴風時波浪によって生じる力(低減値)
R	年平均風荷重の風速時の風圧力によって生じる力	Hsh	衝撃砕波により生じる力
T'	発電時の最大風圧力によって生じる力	Oc	海流・潮流によって生じる力
We	暴風時風圧力によって生じる力	Ow	風による海面付近流によって生じる力
Wred	暴風時風圧力によって生じる力(低減値)	K _T	津波によって生じる力
K	レベル1地震応答解析によって生じる力	Kw	地震時の動水圧によって生じる力
K'	レベル2地震応答解析によって生じる力		

(2) 衝撃砕波力による応答値の評価

砕波(表2で示されるHsh)は、浅水変形によって波が崩れ、波エネルギーが瞬間的に逸散される現象であり、海洋構造物にとってクリティカルとなる

荷重の一つである。衝撃砕波は瞬間的に起こる動的現象であり、構造物の固有振動数によっては高次モードの応答が励起され大きな応答を示す可能性がある。この影響を適切に評価するため、衝撃砕波による応答は別途動的解析により算定した。具体的には、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説2010年版(土木学会)に従って設定した砕波力の荷重モデル(図8)を、図9に示す構造解析モデルに動的に入力した。部材応答値の例を図10に示す。

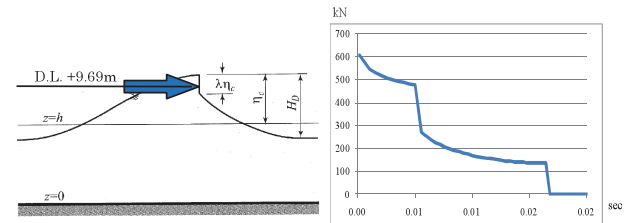


図8 衝撃砕波力の入力荷重モデル
Fig. 8 Load model of impact braking wave force

【主な解析条件】

①減衰定数	0.5%(Rayleigh型比例減衰)
②付加質量	水中部に海水の付加質量を考慮
③荷重入力	衝撃砕波力の作用範囲中点(D.L. +9.69m)に集中荷重として載荷
④解析時間	10秒
⑤解析ステップ	0.001秒

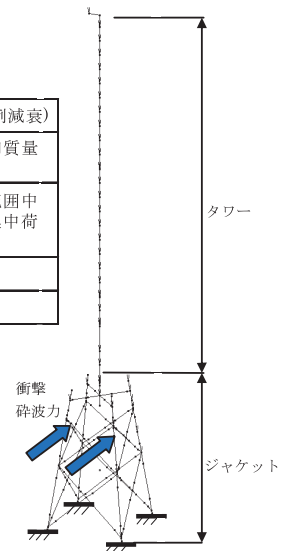


図9 衝撃砕波力評価用の解析モデル
Fig. 9 Analytical model for the estimation of impact braking wave force

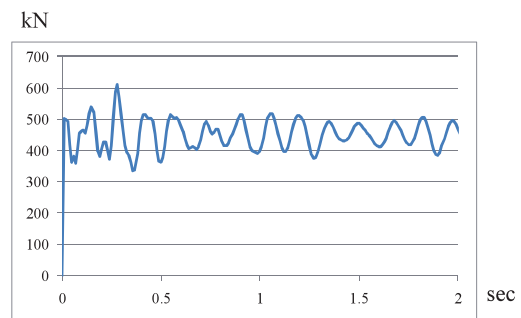


図10 応答値の例(レグのせん断力の時刻歴)
Fig. 10 Example of response (time historical shear force at the leg)

4.3 疲労設計

(1) 疲労設計フロー

疲労設計は、DNV-OS-J101 DESIGN OF OFF-SHORE WIND TURBINE STRUCTURES(以下、DNV-OS-J101)に準拠して実施した。図11に疲労設計フローを示す。

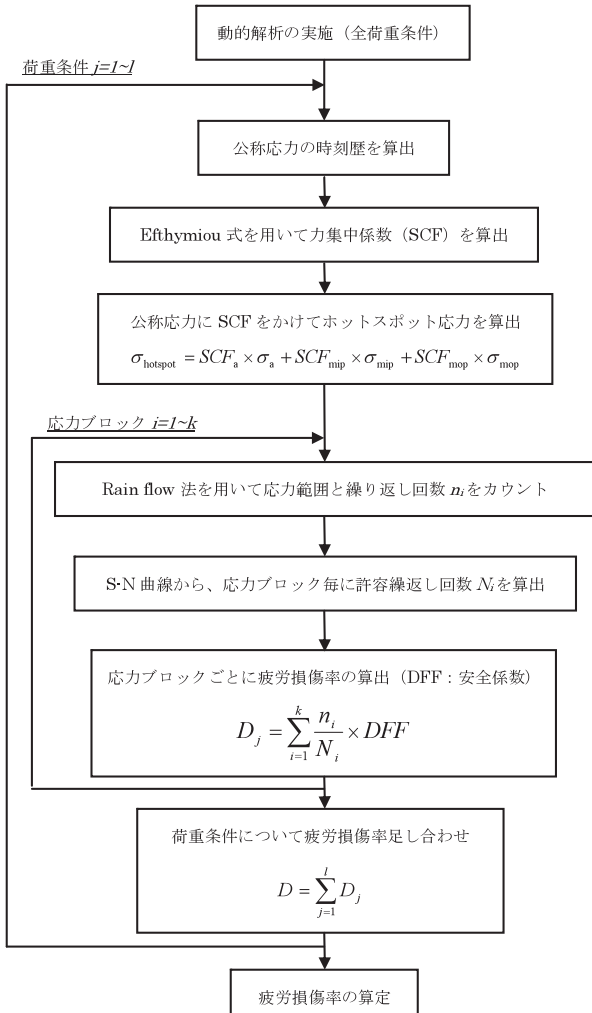


図11 疲労設計フロー
Fig. 11 Fatigue design procedure

(2) 構造解析モデル

通常、道路橋などの鋼構造物では、ある一つの卓越した変動荷重に対して荷重値と作用頻度を設定し、それを基に静的解析による頻度分布法により疲労強度を評価することが多い。一方、洋上風力の支持物構造物には、風と波という不規則性を持つ二つの卓越した変動荷重が同時に作用するため、これらの動的相互作用を考慮して疲労強度を評価する必要がある。そこで、風と波の動的荷重を同時に入力する動的解析(図12)により、ジャケットの応答を算定

した。表3に主要な解析条件を示す。

なお、荷重ケースは風力発電設備支持物構造設計指針・同解説2010年版(土木学会)に従って発電時のみとし、発電時以外の疲労損傷率は発電時の変動荷重サイクル数に対して1.05を乗じることで考慮した。

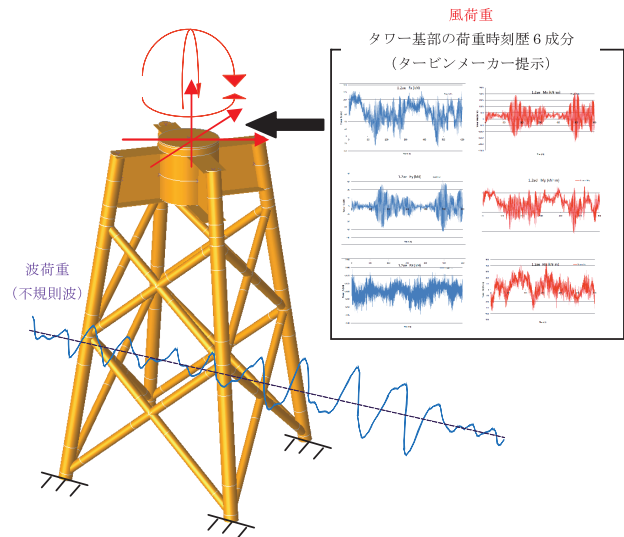


図12 疲労用動的解析モデル
Fig. 12 Dynamic analytical model for fatigue design

表3 主要な動的疲労解析の条件
Table 3 Principal condition for dynamic fatigue analysis

供用年数	20年
荷重方向	0°、45°の2方向を考慮し風と波は同一方向に作用するものとする。 荷重方向は完全な独立事象と考え、いずれの方向に20年分の疲労荷重が作用しても累積疲労損傷率が1.0以下になることを確認する。
解析ケース	12(風速ビン)×3(Yaw エラー)=36ケース/方向
風荷重	タービンメーカーから提示されたタワー基部の6成分の時刻歴荷重を D.L.+15.5m 位置に動的に入力
波荷重	JONSWAP スペクトルによる不規則波
減衰定数	1.0% (Rayleigh 型比例減衰)
解析時間	600sec/ケース
解析ステップ	0.01秒

(3) S-N 曲線と疲労安全率

疲労に対する安全率(Design Fatigue Factor、以下 DFF)は、DNV-OS-J101に従い、位置ごとに表4のように設定した。

表4 S-N 曲線と疲労安全率
Table 4 S-N curves and design fatigue factor

位置	調査・補修	防食	S-N カーブ	DFF
大気中	可	塗装	大気中	1.0
飛沫帯	可	塗装	塗装しているため「大気中」とする	2.0
海中	可	電気防食	海中	2.0

(4) ホットスポット応力(Hot Spot Stress)

鋼管継ぎ手部のホットスポット応力(以下、HSS)は、DNV-OS-J101に従い、Efthymiou 式により応力集中係数を求め、それに公称応力を乗じることで算定できる。一方、タワー・ジャケット接続部のような構造複雑部においては、応力集中係数の算定式が存在しないため、図13に示すFEM解析による2点外挿法により各溶接線位置のHSSを算出した。

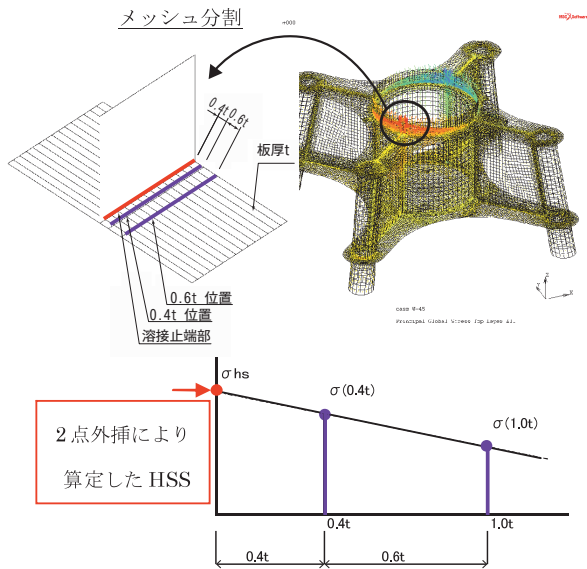


図13 FEM解析による複雑部のSCF算定
Fig. 13 Assessing SCF at complex area using by FEM

4.4 タワー・ジャケット接続部構造の設計

接続部構造は、大きくRC構造(図14右)と鋼構造(図14左)の2つのタイプが考えられる。RC構造とした場合、ジャケットトップの重量が大幅に増加することに伴い地震時の応答に悪影響を及ぼす可能性があるため、より軽量の鋼構造を採用した。

鋼構造のタワー・ジャケットの接続部に求められる性能は以下のとおりである。

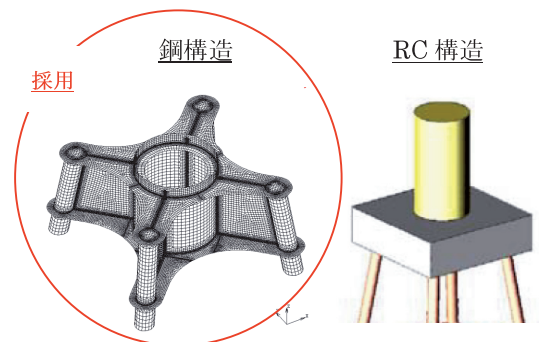


図14 接続部の構造
Fig. 14 Connection structure

- ①タワー基部の軸力と転倒モーメントをスムーズにジャケットに伝達できること
- ②溶接箇所が少なく構造がシンプルで、耐疲労性に優れること

採用した接続部構造と荷重伝達イメージを図15に示す。建築構造物の梁-柱接続部を参考に、転倒モーメントは梁フランジで偶力に置換することで伝達し、鉛直力は梁ウェブによるせん断で伝達するシンプルな構造とした。また、タワーとレグは、局部変形抑制のために梁フランジ兼用のリングプレートで補強した。

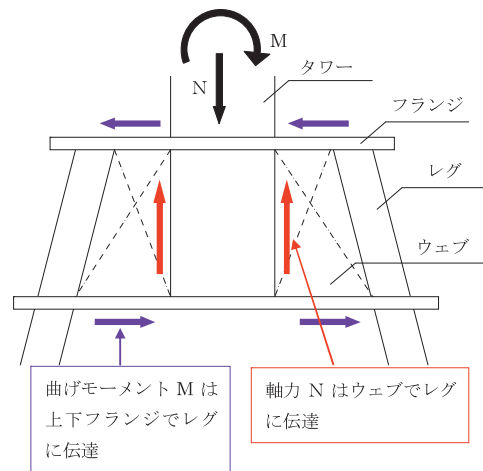


図15 荷重伝達機構
Fig. 15 Load transfer mechanism

接続部構造の耐力評価はFEM解析により行った。部材決定ケースとなるレベル2地震時では、弾塑性解析により接続部が十分な耐力を有することを確認した。レベル2地震時のMises応力コンターを図16に示す。

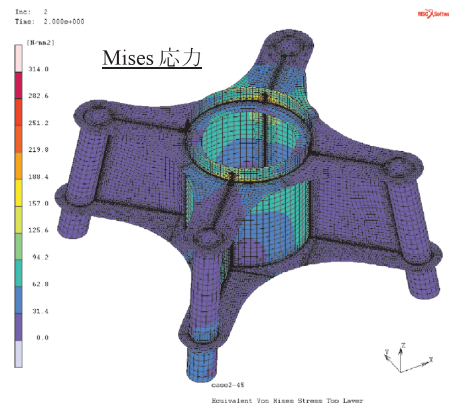


図16 弾塑性解析による耐力評価
Fig. 16 Assessment of strength by elasto-plasticity analysis

4.5 固有振動数の照査

図17に、固有値解析モデルとモード図を示す。構造全体の一次固有振動数は0.41Hzでありタービンメーカーから指定された許容帯域0.40~0.45Hzの中にあることを確認した。

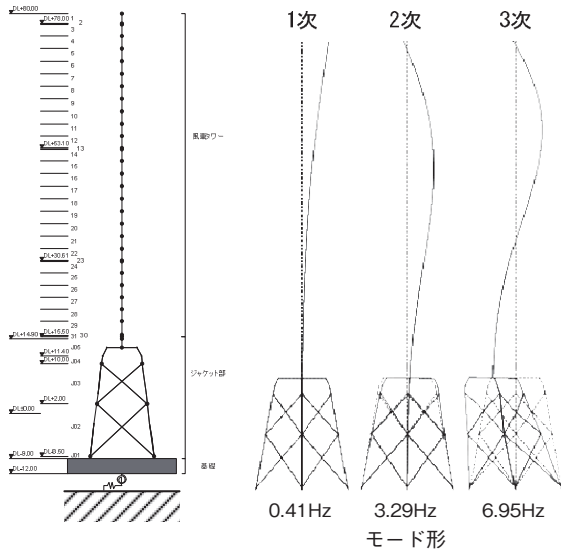


図17 解析モデル(左)と振動モード図(右)
Fig. 17 Analytical model(left) and mode shape(right)

4.6 二次部材設計

作業デッキやボートランディングなどの二次部材に共通して配慮すべき点として、以下があげられる。

- ①使用荷重および暴風、波浪荷重に対する耐力を確保すること
- ②風・波による疲労耐久性を確保すること
- ③組立・溶接などの製작성に配慮した構造とすること

上記に加え、ハンドレールなどの細長い部材は、風との共振を回避するため、道路橋示方書や DNV-RP-C 205 ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS を参考にし、共振しない部材サイズ、ピッチとしている。

主な二次部材で個別に配慮した点について以下に述べる。

1) 作業デッキ

タービン内機器を交換するために必要な作業スペースと、非常時にナセル上部脱出口から退避するためのスペースを確保した。デッキ上には荷揚げ用のホイストクレーン、航路標識灯などが配置される

ため、デッキの梁は部分的にこれらの構造の取り合いや荷重を考慮して設計している。また、メンテナンス性・荷重軽減の観点から、床材には、防食対策が不要で軽量のFRP グレーチングを採用した(図18)。

2) ボートランディング

船の接舷反力、係留力に対して構造設計を行った。また、船が接舷したときの安定性と船からのアクセス性を考慮して防舷材を二つ配置しその間に昇降用のラダーを設置する構造とした(図19)。

3) アクセス設備

アクセス設備は安全性に配慮し、ボートランディングと作業デッキの間に二カ所踊り場を設置した。ラダーには背カゴを設けた。二カ所の踊り場のうち、波がかかる下側の踊り場は、波浪時の揚圧力に対して十分な強度を有するよう設計した。



図18 作業デッキ(写真)
Fig. 18 Working deck(Top side deck) (Photo)

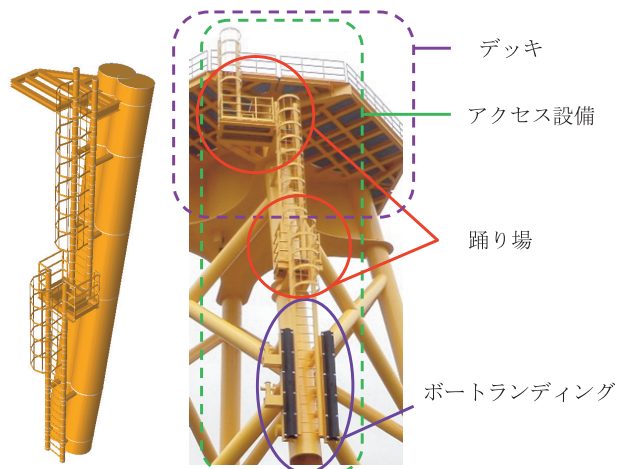


図19 アクセス設備の解析モデル(左)と実構造(右)
Fig. 19 Analytical model for access equipment(left) and actual structure(right)

4.7 防食設計

防食システムは、腐食環境、供用年数、実績、コスト、維持管理などを勘案して決定する必要がある。本プロジェクトでは既往の港湾鋼構造施設での実績も多いL.W.L.-1.0m以浅を被覆塗装、M.S.L.以深には電気防食を施すシステム(図20)とした。

被覆塗装は、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル2009(沿岸技術研究センター)および欧州の洋上風力発電基礎の事例を参考にしながら、ジャケットへの適用性、耐用年数、実績、コストなどを比較した上で、海洋厚膜エポキシ系塗装を選定した。海上大気中の主要部材および干満飛沫帯の全部材にはIM-A塗装を、大気中の二次部材にはCM-A塗装を採用し(表5)、実際の塗り区分は部材の取り合いなどを勘案して決定した。

M.S.L.以深に施す電気防食は、大きく流電陽極方式と外部電源方式の2種類に分類されるが、維持管理の観点から流電陽極方式(3.5A、20年耐用)を採用した。

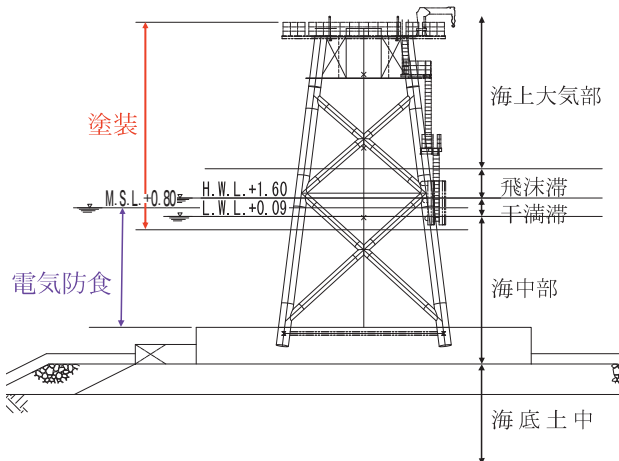


図20 防食システム
Fig. 20 Corrosion protection system

表5 塗装の適用環境と塗装系
Table 5 Coating and adopted environmental condition

腐食環境	部位	塗装系
大気中 (D.L.+4.0m以上)	主要部材	IM-A
	二次部材	CM-A
飛沫干満帯 (D.L.+4.0m以深)	主要部材	IM-A
	二次部材	

5 洋上風力用ジャケット式基礎の導入に向けた今後の課題

本プロジェクトは水深14.5mと浅く、地盤も良質な岩地盤であったが、本来、ジャケット式基礎は水深20m以上の比較的中～大水深の軟弱地盤に杭支持で適用される場合が多い。

図21に、水深20m、軟弱地盤で杭支持されたケースでの試設計の結果を示す。レグの傾斜角が上述のジャケットよりも大きくなっているが、これは3.1および4.5で述べた風車との共振を避けるために行った固有振動数の照査を満足するようにジャケットの剛性を上げた結果である。このように、設計条件によっては固有振動数が構造決定要因となるケースもある。耐震性、耐波浪性、耐疲労性に加え、ジャケットの剛性にも配慮し、これらを全て満足する構造としなければならない。

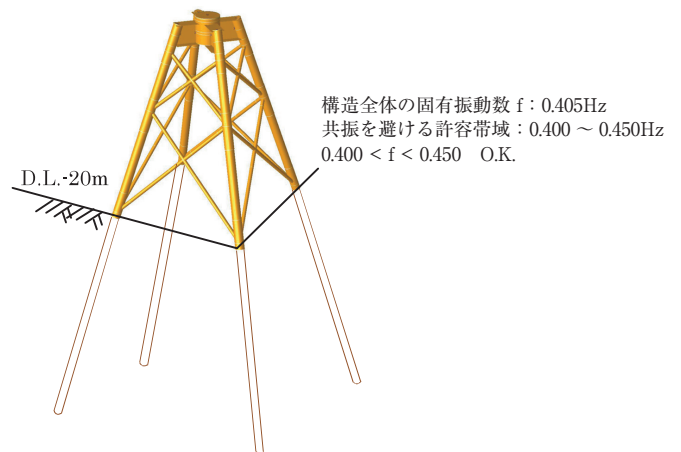


図21 軟弱地盤におけるジャケットの試設計例
Fig. 21 Trial design of a jacket type foundation at the soft ground

6 結言

以上、NEDOの「洋上風力発電システム実証研究(北九州市沖)」におけるジャケット式基礎の設計上のポイントと設計技術の一部について述べた。今後、日本国内では先の東日本大震災によるエネルギー問題を受け洋上風力発電の積極的導入が見込まれるが、そのためには日本の自然条件に適した設計技術の確立が必要である。本プロジェクトで得られた知見と、当社の海洋鋼構造物の設計・施工技術を組み合わせ、国内洋上風力発電の積極的な導入に貢献していきたい。

参考文献

- 1) NEDO : <http://www.nedo.go.jp/fuusha/index.html#map>
- 2) NEDO : <http://www.nedo.go.jp/content/100145558.pdf>
- 3) 北九州市沖における洋上風況観測システムならびに洋上風力発電システム実証研究における指示構造物の設計, 藤田岳, 鷺尾朝昭, 坂本登(電源開発), 電力土木 No. 360, Page. 66-70, 2012. 07. 05.
- 4) 衝撃碎波力が作用する洋上風力発電設備支持構造物の断面力評価, 嶋田健司、石原孟、第32回風力エネルギー利用シンポジウム、P195-198、2010. 11. 25
- 5) NEDO : 洋上風力発電技術開発平成20年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査(委託先)電源開発株式会社