

2020年度

浮体式洋上風車を設置するための作業船の開発

報告書

2021年3月31日

## 目次

### 目次

1. 目的・背景.....	6
1.1 業務名称.....	6
1.2 業務目的.....	6
1.3 業務目標.....	6
1.4 業務実施内容.....	6
2. 水槽試験.....	8
2.1 水槽試験概要.....	8
2.1.1 水槽試験目的.....	8
2.1.2 水槽試験実施場所及び時期.....	8
2.1.3 水槽試験ケース.....	9
2.1.4 水槽試験模型.....	10
2.2 水槽試験結果.....	12
2.2.1 数値計算解析.....	12
2.2.2 結果比較.....	12
3. 機器の設計と設置方法のレビュー.....	16
3.1 概要.....	16
3.2 風車設置用機器の設計.....	17
3.3 設置方法のレビュー.....	18
4. 全体仕様の取り纏め.....	21
4.1 既存設備の撤去.....	21
4.2 風車設置用機器及び風車の搭載.....	21
4.3 船体の改造.....	23
4.3.1 船体の改造（コラムスポンソン追加）.....	23
4.3.2 船体の改造（ローハル追加）.....	24
4.3.3 船体改造結果.....	25
5. 作業限界の決定と稼働率推定.....	27
5.1 計算前提.....	27
5.1.1 計算アプリケーション.....	27
5.1.2 想定海域.....	27
5.1.3 計算条件.....	30
5.1.4 風車搭載SPAR浮体の概略設計.....	31
5.1.5 稼働可否判断基準(作業限界).....	32
5.2 計算結果.....	33

5.3	稼働率算出結果.....	34
6.	改造費用の算定.....	35
7.	稼働率に基づく費用対効果の推定.....	36
8.	Ecosse IP社の状況.....	38
9.	まとめと今後の課題.....	40

## 1. 目的・背景

### 1.1 業務名称

本業務の名称は以下である。

- ・ 邦文:浮体式洋上風車を設置するための作業船の開発
- ・ 英文: Concept Development of offshore wind turbine installation semi-sub rig

### 1.2 業務目的

本業務は、風車設置作業船としてセミサブ式を採用することにより、有義波高2.5mでの海気象条件で風車設置の作業を行うことを可能とし、これにより通年での作業を可能とする、効果的な設置作業船のコンセプト開発を行うことを目的とする。

### 1.3 業務目標

浮体式洋上風車を設置するための作業船(以下、本船と呼称する)の開発の目標は以下である。

- ・ 有義波高2.5mでの海気象条件で風車設置の作業を行う。
- ・ 対応水深は30m～200mを対象とする。
- ・ 10MWまでの風車を対象とする。
- ・ セミサブ式風車設置作業船のコンセプトを模擬試験により確認する。

### 1.4 業務実施内容

2020年度の業務実施内容は下記の通りである。

- (1) 水槽試験と動揺解析
- (2) 機器の設計と設置方法のレビュー
- (3) 全体仕様の取り纏め
- (4) 作業限界の推定と稼働率の推定
- (5) 改造費用の算定
- (6) 稼働率に基づく費用対効果の推定
- (7) 上記(1)から(6)の成果をまとめた日本財団向けの報告書(以下「成果報告書」という)の作成

また、2019年度～2020年度の2年間の全体業務実施内容を表 1.1に示す。

表 1.1 : 2年間の全体業務実施内容

所掌分担		
2019年	JDC	JMU
風車搭載		
	○	
	○	
改造検討		
	○	
		○
	○	
	○	
	○	
報告書	○	

所掌分担			
2020年	JDC	JMU	
採算検討			
	○		
	○		
改造検討			
	○		
		○	
性能検討			
	○		
			○
			○
			○
報告書	○		

また、本業務の全体スキーム図を図 1.1に示した。

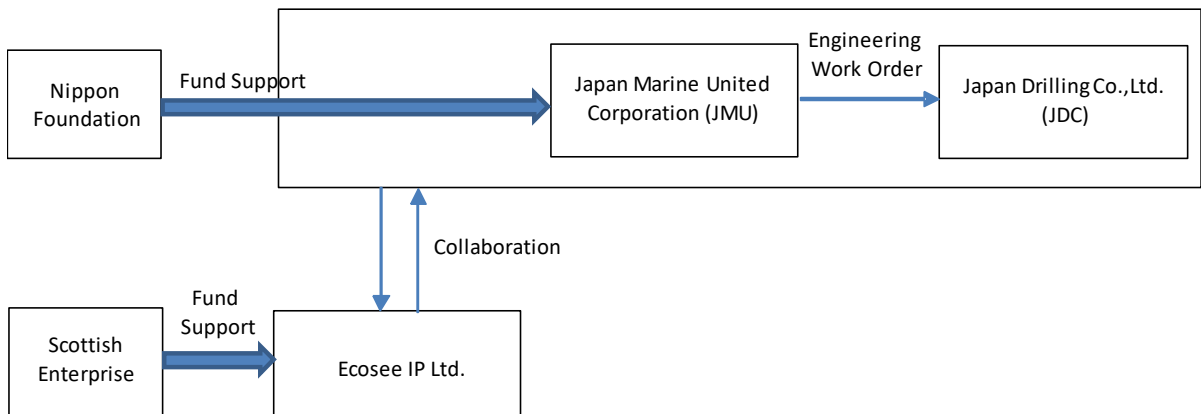


図 1.1 : 全体スキーム図

## 2. 水槽試験

### 2.1 水槽試験概要

#### 2.1.1 水槽試験目的

本水槽試験の目的は、セミサブ風車設置船の動揺特性を確認することである。作業喫水と想定されるd17.5mでの動揺特性について数値解析結果との比較を行う。これら2つが一致することは、後々風車設置船の稼働率推定計算を行う際、船の動揺を良く再現できており、算出された稼働率に信頼性があることを証明する一助となる。風車設置船の動揺特性また、ローハルが水面上に出入りする浅喫水のケースについても動揺特性の確認を行う。

#### 2.1.2 水槽試験実施場所及び時期

本水槽試験はジャパンマリンユナイテッド株式会社 技術研究所 運動性能水槽にて実施した。

また、本水槽試験の実施時期は2020年9月17日~2020年9月28日、及び同年11月19日~11月27日である。



図 2.1 : セミサブ風車設置船水槽試験

### 2.1.3 水槽試験ケース

本試験では自由動揺試験及び規則波中波浪動揺試験が行われた。自由動揺試験では Pitch,Roll,Heave に対し自由動揺を計測し、模型の各運動モード固有周期及び減衰係数の解析を行っている。規則波試験では模型の波浪中運動応答を計測し、解析により模型の周波数応答関数を算出した。規則波中波浪動揺試験の試験ケースを以下の表 2.1 に示す。なお、表内波向の定義は図 2.2: 波向定義に示される。

試験ケースはセミサブの状態により大きく4つに大別される。Case1(d9.2m)、Case2(d10.0m)、Case3(d17.5m)及びd10mの条件下で風車を取り外して試験を行ったCase4である。自由動揺試験は各Caseに対して行われている。Case1,2,4は2.1.1にて述べた浅喫水のケースとなる。

表 2.1 : 水槽試験ケース

Case		1	2	3	4
draft	m	9.2	10	17.5	10
風車		有	有	有	無
波向	deg	0,270	0,270	0,45,90,270	0,270
波高	m	1.5	1.5	1.5	1.5
波周期	s	5~25	5~25	5~25	5~25

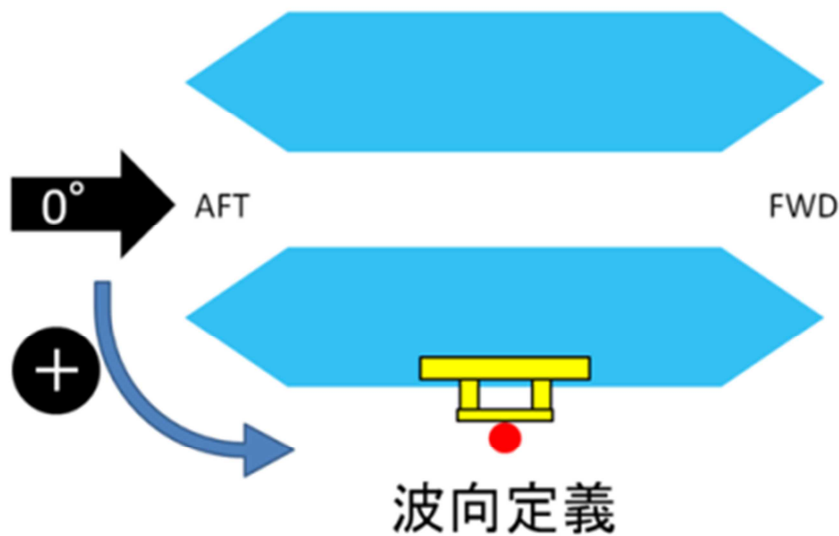


図 2.2 : 波向定義

#### 2.1.4 水槽試験模型

水槽試験模型は1/64スケールで作成された。水槽試験の計画はHuisman社の風車設置用機器について精密な情報を入手する前に行われた。このため、機器の重量重心データが計画に用いられているものとは異なり、また後述するセミサブの改造(ローハル及びコラムスポンソンの追加)が行われていない点に注意が必要である。また、本試験において風車ブレードやセミサブデッキ上建屋は試験結果に影響を及ぼさないため、再現していない。

試験模型の写真を図 2.3及び図 2.4に示す。

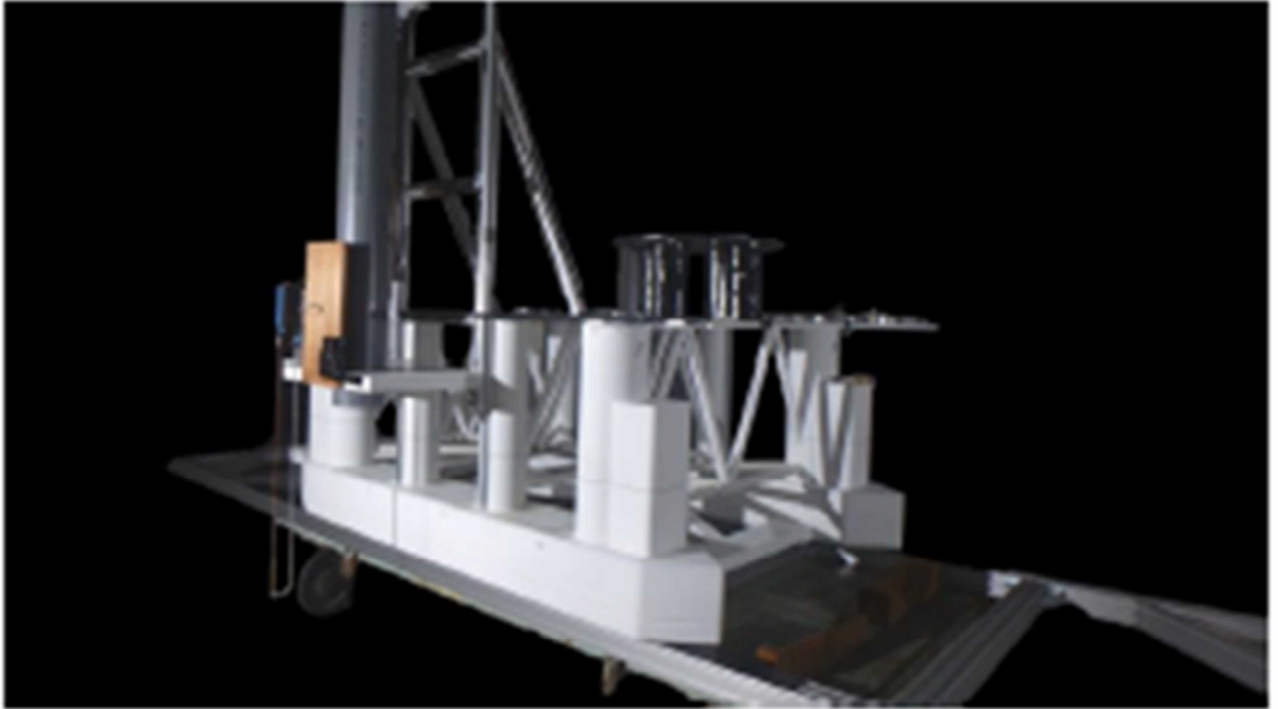


図 2.3 : 水槽試験模型





図 2.4 : 水槽試験模型

なお、測定機器は光学式非接触型三次元動揺計測装置(3点)、ジャイロセンサ、及び係留索張力計を搭載した。更に水槽内にサーボ式波高計を配備している。

自由動揺試験においては、これら機器を用いて①波高②6モード模型運動③回転系変位④係留索張力の計測を行っている。規則波中試験では、これに加え模型加速度及び角速度の計測を行った。

## 2.2 水槽試験結果

### 2.2.1 数値計算解析

水槽試験とは別途に数値解析を行い、本船の動揺性能を調査した。2.1.1で述べた通り、水槽試験結果と数値解析結果を比較し、計算の妥当性を確認することが目的となる。

数値解析を行うにあたり、まず改造元のリグ「第五白竜」の計算を行い、実船と計算結果で運動性能が一致していることを確認した。続いて、重量・重心等の諸元を変更し、水槽試験模型と同様の条件として運動性能の確認を行った。

水槽試験結果と数値解析結果の比較は、稼働喫水であるCase3(d17.5m)に対して行った。数値解析はOrcina社のOrcaWave及びOrcaFlexを使用して行った。計算モデル(水線面下)を以下に示す。なお、第五白竜はd15m～37.5mの間に斜めのブレースが存在するが、本モデルにおいては計算結果への寄与の少なさ及び計算不安定化を考慮し、再現を行っていない。

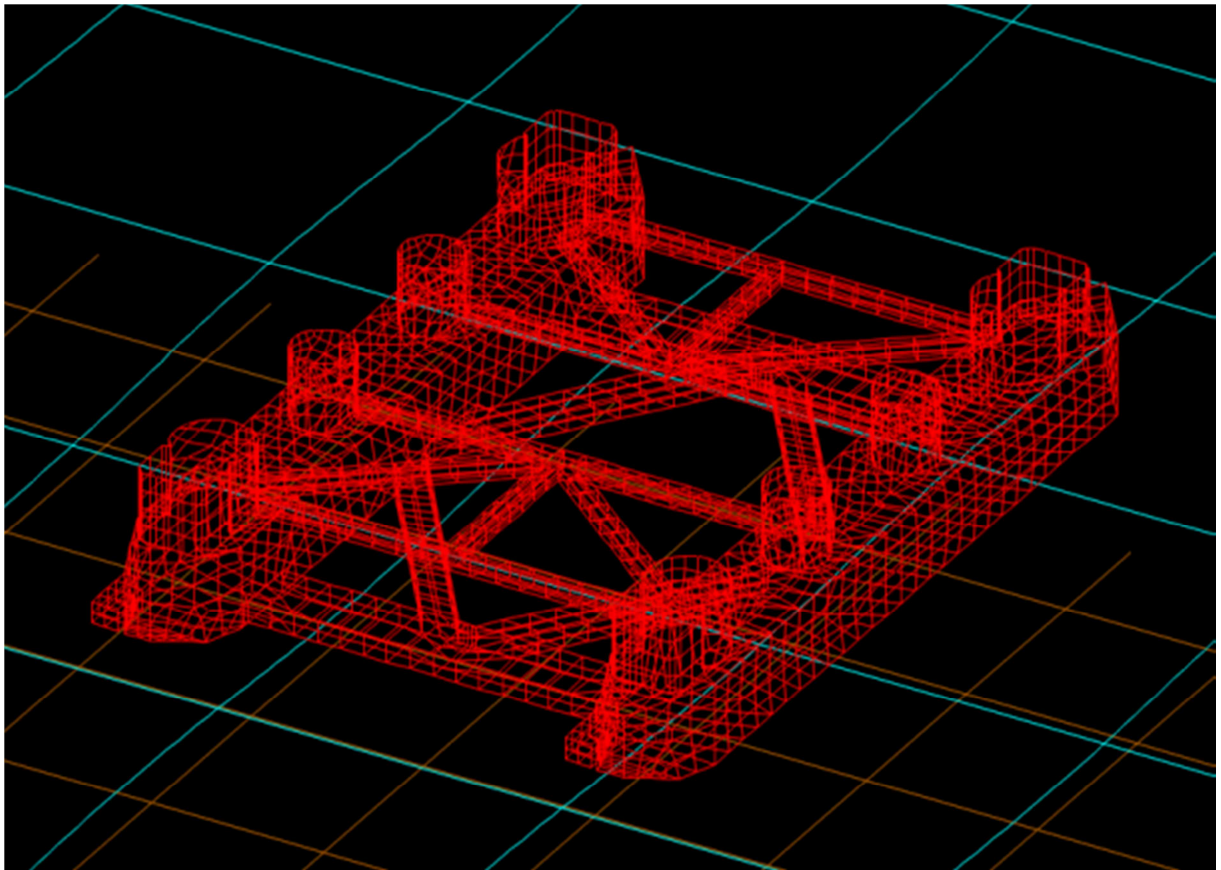


図 2.5 : 本船数値解析モデル

### 2.2.2 結果比較

Case3、波向0deg・90degの場合について、船体動揺の比較を行う。比較パラメータはアッパーハル中心における船体加速度とする。結果をそれぞれ以下に示す。

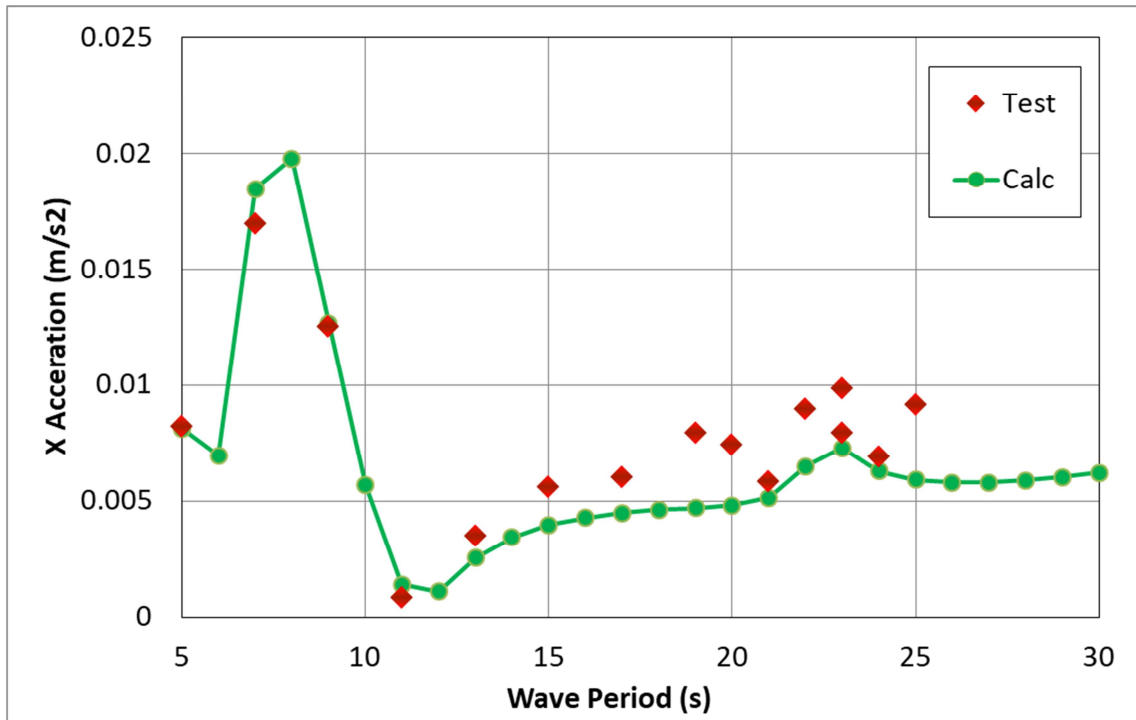


図 2.6 : 船体加速度比較(波向 0deg・x 方向加速度)

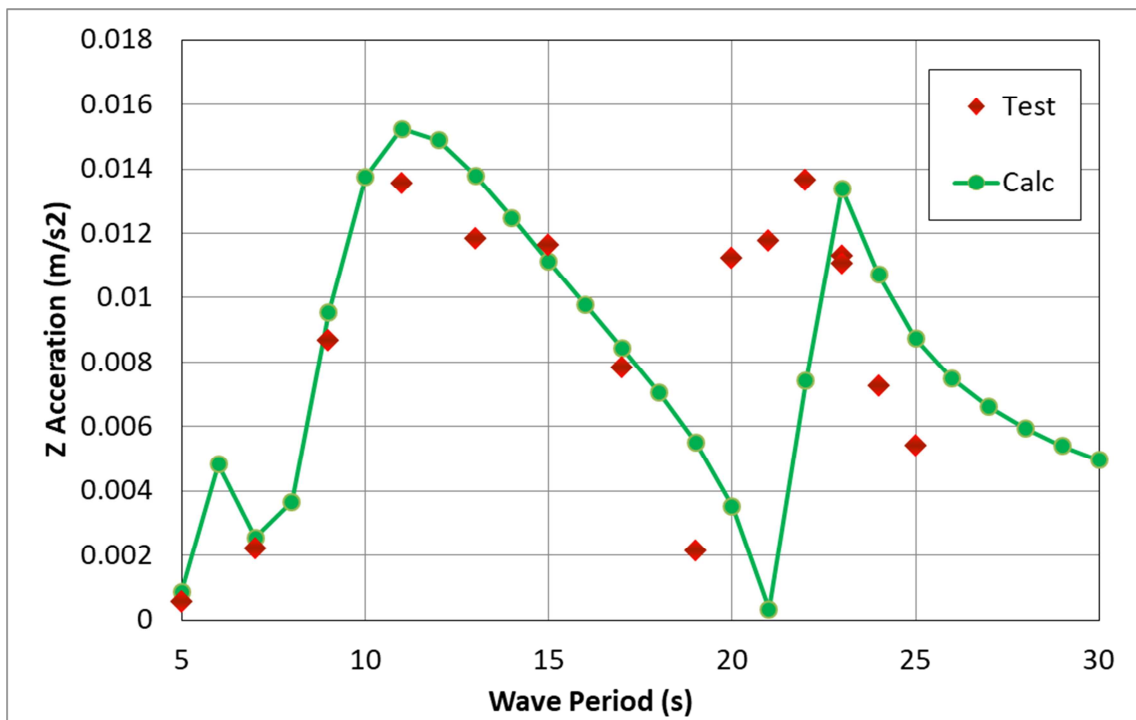


図 2.7 : 船体加速度比較(波向 0deg・z 方向加速度)

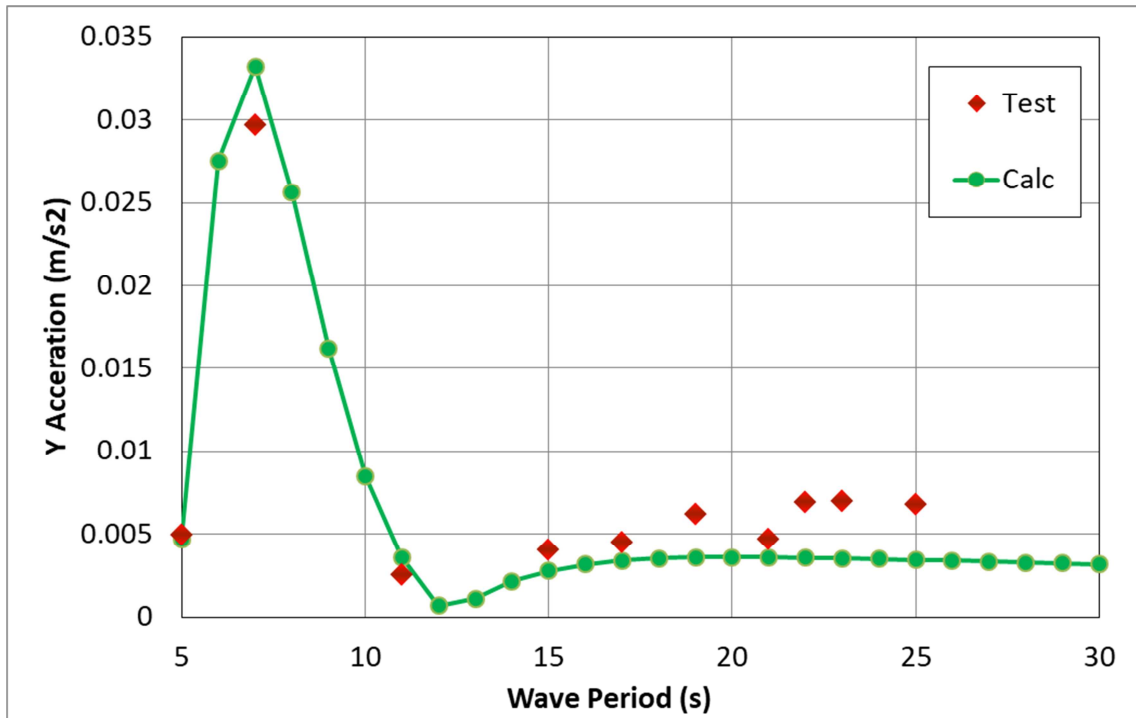


図 2.8 : 船体加速度比較(波向 90deg・y 方向加速度)

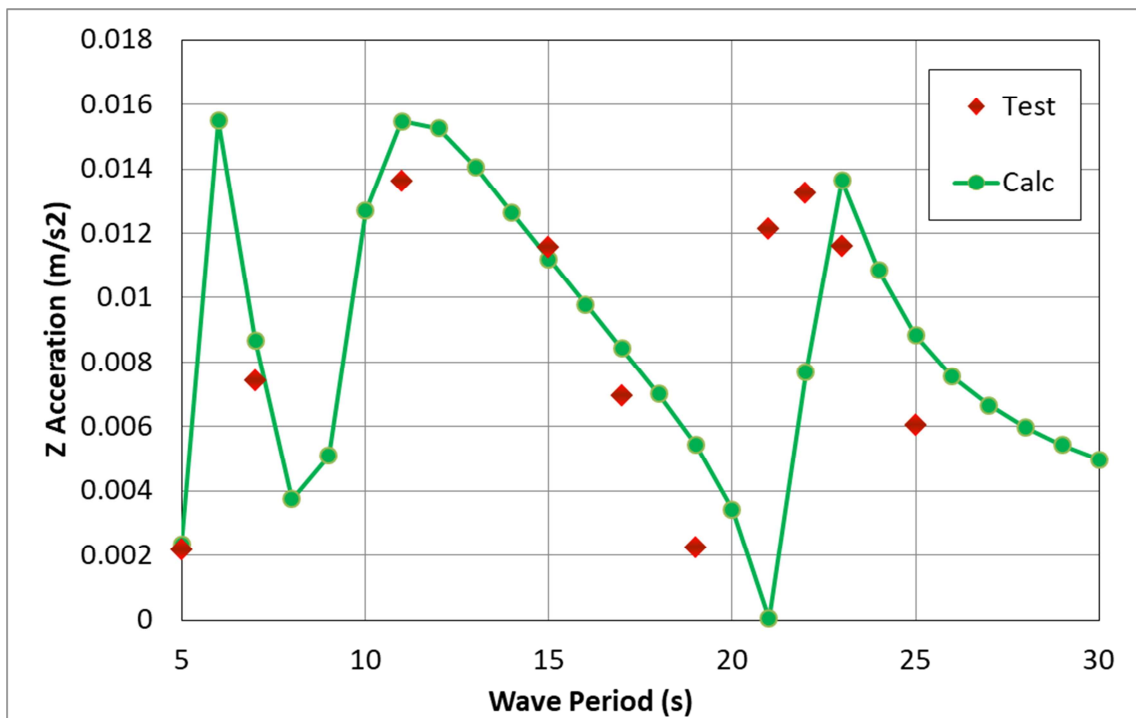


図 2.9 : 船体加速度比較(波向 90deg・z 方向加速度)

どのケースにおいても、短周期(波周期 $\sim 15$ s)においては水槽試験と数値解析のデータ傾向が一致し、再現に成功している様子が見られる。一方で、長周期(波周期 $15$ s $\sim 25$ s)では水槽試験と数値解析の加速度に差がみられる点がある。特に波周期 $20$ s付近でのz方向加速度にこの傾向は顕著に見受けられる。この原因としては以下に挙げられるものが想定される。

- ・長周期の波を起こす試験では、水槽内での波のはね返りの影響が増加し、水槽試験の精度が下がる。
- ・Heaveの減衰係数の精度が悪く、Heave固有周期付近での動揺量の再現精度が悪化している。

しかし、長周期波でも概ね加速度の傾向は一致しており、この結果をもって数値解析により本船の船体運動を再現することに成功していると判断した。



### 3. 機器の設計と設置方法のレビュー

#### 3.1 概要

昨年度、風車設置用機器として、Huisman社のWind Turbine Shuttleに用いられる機器を選定した。本年度は、図 3.1に黄色破線で示した風車設置用機器を設計した。

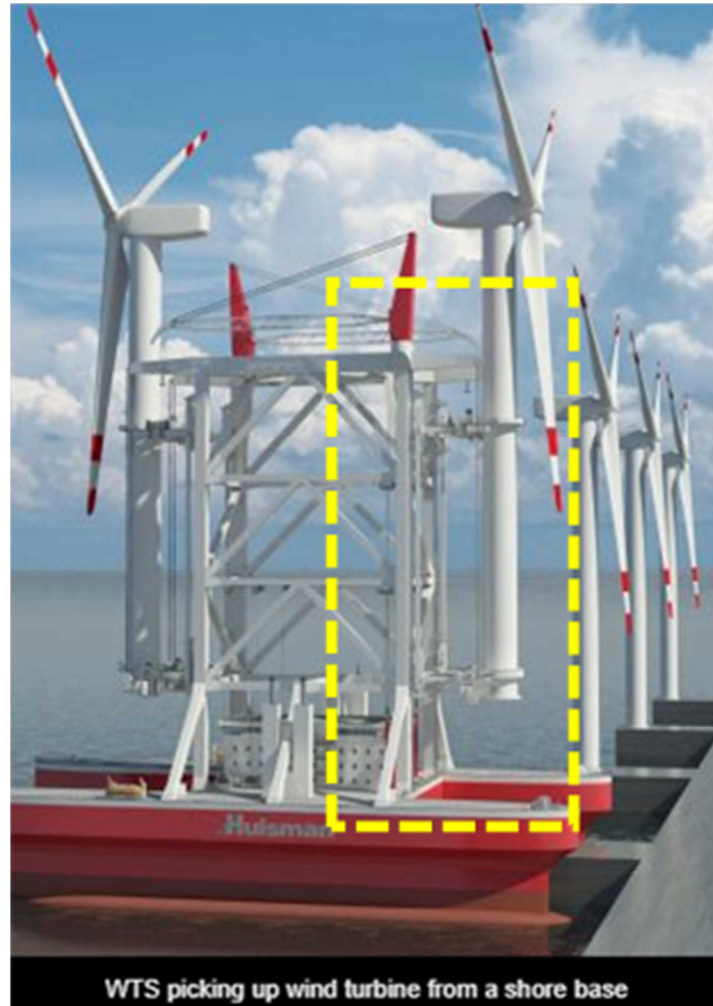


図 3.1 : Huisman 社の Wind Turbine Shuttle (出典 : Huisman カタログ)

本システムにおいて、風車タワーと基礎との接続時のフランジのボルト締めの際に、遠隔操作で仮留めをするツールとしてFCT (Flange Clamp Tool)を適用する。

FCT は世界初の商用浮体式ウインドファームであるHywind Scotlandプロジェクトで使用され、ボルト締めの数は120本程度に対して、FCTの数は8本であった(図 3.2参照)。



図 3.2 : Hywind Scotland プロジェクトで使用された FCT (出典 : IHCIQIP 社カタログ)

FCT (Flange Clamp Tool)は、風車の上側フランジに仮設置され、基礎の下側フランジとの接続後、遠隔操作でFCT内のシリンダを延ばしロック機構を働かせ、上側フランジと下側フランジを仮留めすることが出来、その後、両フランジのボルト締めを行うことが出来る。

### 3.2 風車設置用機器の設計

前節にて述べたWind Turbine Shuttleの風車設置用機器は双胴船上での運用を前提として設計されており、また15MW級の風車2基をハンドリングすることが可能である。本船のハンドリング対象風車は10MW級1基であるので、Wind Turbine Shuttle上の機器よりも軽く、小さい機器を搭載できることが想定される。そこでHuisman社に委託し、以下の要求事項を満たす風車設置用機器の設計を行った。

- ・ タワー基部径9mの10MW級風車1基をハンドリング可能とする
- ・ ホールド能力は1,500tとする

### 3.3 設置方法のレビュー

風車設置作業の手順を以下に取り纏めた。

- (1) 陸上のクレーンを用いて、岸壁上に風車を組み立てる。
- (2) 本船の風車設置用機器を用い、風車を載貨する。
- (3) Sparへ風車を設置する海域まで、セミサブを曳航する。
- (4) プリセットしていた係留索にセミサブ側の係留索を接続し、位置保持する。
- (5) DPS付きの船がSparを保持しながら、セミサブに近づいてSparを風車直下に配置する。
- (6) セミサブのトリムコントロールと風車設置用機器のMotion Compensation Systemを活用し、風車をSpar上に搭載する。
- (7) DPS付きの船が風車搭載後のSparを稼働海域まで運ぶ。
- (8) 本船は次の風車を載貨するために基地岸壁まで曳航される。

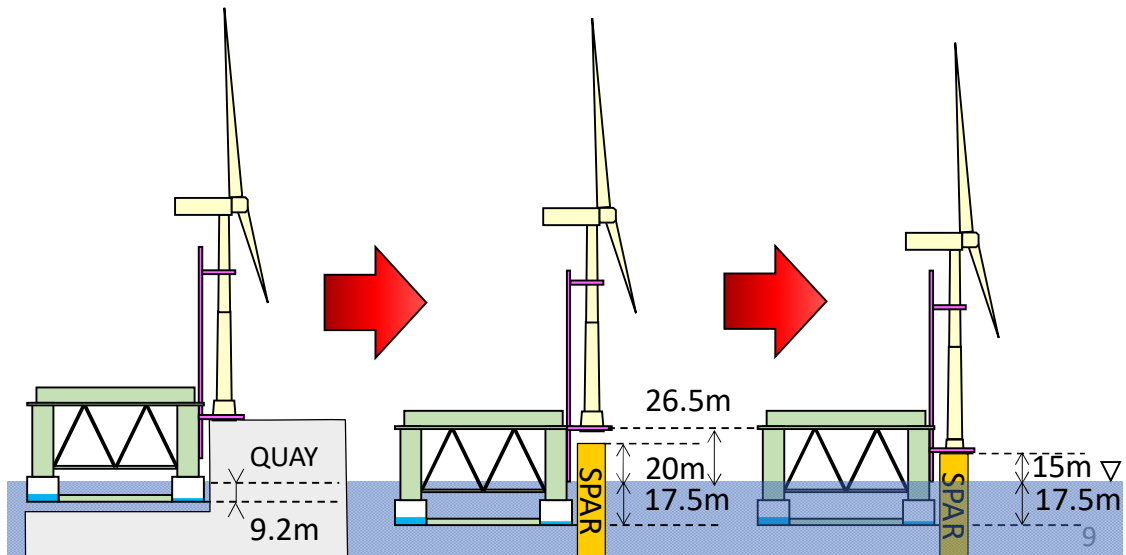


図 3.3: 風車設置作業の手順



表 3.1 : 風車設置時の位置調整の手順

No.	イメージ図	概要説明
1		<p>風車を Spar へ搭載する場所へセミサブを曳航する。</p> <p>プリセットしていた係留索にセミサブ側の係留索を接続し、位置保持する。</p> <p>緑色の円: 風車</p>
2		<p>DPS 付きの船が Spar を保持しながら、セミサブに近づく。</p> <p>オレンジ色の円: Spar</p>
3		<p>船が移動し、Spar を風車の直下に配置する。</p> <p>セミサブのドラフト調整等により、風車を Spar に搭載する。</p>
4		<p>船が風車搭載の Spar をロケーションに運ぶ。</p>

表 3.2に岸壁で風車をピックアップする時の推測所要時間を、表 3.3にSparに風車を設置するときの推測所要時間を示した。なお、表 3.3内の「プリセット」はあらかじめ設置した係留索にセミサブ側の索を接続する方法、「ノーマル」はセミサブ係留索のみを使う方法で係留することを指す。

ジャパン マリンユナイテッド 株式会社

表 3.2 : 岸壁で風車を載貨する時の推測所要時間

作業項目	推測所要時間
本船接岸 (2点自力投錨+タグボートによりアプローチ)	1時間
風車載貨のためのバラスト作業(水入れ)	2時間
風車載貨作業	1時間
デバラスト作業(水抜き)	3時間
本船離岸作業	1時間
計	1時間

表 3.3 : Spar に風車を設置するときの推測所要時間

作業項目	推測所要時間	
	ノーマル	プリセット
係留方式		
アンカリング作業(8点係留、ボート1隻)	24 時間	12時間
バラスト作業	4時間	4時間
風車をSpar上に設置する作業	12時間	12時間
Spar +風車、ロケーション離脱	4時間	4時間
デアンカー作業(8点係留、ボート1隻)	18時間	12時間
計	62時間 (2.6日間)	44時間 (1.8日間)

#### 4. 全体仕様の取り纏め

本章では、風車設置船の全体仕様について取りまとめる。

##### 4.1 既存設備の撤去

本船の改造元である第五白竜はOil & Gas掘削用リグである。このため、風車設置には必要ない機器（掘削用やぐら、クレーン等）がデッキ上に多く設置されている。また、船内にもMud PitやBulk Tank等、風車設置には必要ない重量物が積載されている。これら重量物の除去により、本船重量を軽くするとともに、十分な作業スペースを確保することを考える。

撤去可能な物品は大きく3つに分けられる。掘削用やぐら(Derrick)、やぐらの支持構造物(Derrick Substructure)、前述したMud PitやBulk Tank、BOP Crane等の掘削やOil & Gas生産に用いる機器(Drilling Equipment)である。これらの重量、及び本船底からの重心高さを昨年度検討結果から見直し、その結果を表 4.1に示す。

表 4.1 : 既存設備の撤去と Light Weight の変化

Light Weight 名称	Weight	VCG
	重量	重心位置
	t	m
撤去前LW	17,033	24.28
Derrick	-255	72.50
Derrick Substructure	-300	46.50
Drilling Equipment	-1,073	42.25
計	15,405	21.73

##### 4.2 風車設置用機器及び風車の搭載

前述した風車設置用機器、及び10MW級風車1基が新しく本船に搭載されることになる。

10MW級風車の諸元としては、DTU 10MW Reference Turbineのものを使用した。諸元は表 4.2に示される。該当風車は商用に最適化されているわけではないが、近年の傾向を踏まえた大型風車となっており、様々なプロジェクトにおいて検討に用いられていることから本検討に使用するのとは妥当であると考えられる。



図 4.1 : DTU Reference Wind Turbine (出典: Christian Bak , “The DTU 10-MW Reference Wind Turbine” )

表 4.2: The DTU 10 MW Reference Wind Turbine Design Summary (出典: Christian Bak , “The DTU 10-MW Reference Wind Turbine” )

Description	Value
Rating	10MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 blades
Control	Variable speed, collective pitch
Drivetrain	Medium speed, Multiple stage gearbox
Rotor, Hub diameter	178.3m, 5.6m
Hub height	119m
Cut-in, Rated, Cut-out wind speed	4m/s, 11.4m/s, 25m/s
Cut-in, Rated rotor speed	6RPM, 9.6RPM
Rated tip speed	90m/s
Overhang, Shaft tilt, Pre-cone	7.07m, 5° , 2.5°
Pre-bend	3m
Rotor mass	229tons (each blade ~41tons)
Nacelle mass	446tons
Tower mass	605tons

## 4.3 船体の改造

### 4.3.1 船体の改造（コラムスポンソン追加）

4.1では掘削機器等の撤去により、船体を軽量化し風車及び風車設置用機器の搭載に備えることを考えた。しかし、撤去可能な機器(合計凡そ1600t)に対し風車及び風車設置用機器は重く(合計4285t)、また重心が高い。このため、掘削機器の撤去を行うだけでは、復原性能が足りず本船に風車及び風車設置用機器を搭載できないことが判明した。このため、本船にコラムスポンソンを追加し水線面積を増やすことで、復原性能を増加させることを検討した。

追加されたコラムスポンソンの概形は以下の図 4.2に示される。左右舷の第二、第三コラムに沿わせる形でL9m・B8m・D18mのコラムスポンソンを合計4本追加した。なお、追加されたコラムスポンソンは今後VOIDとして扱うこととした。追加されたコラムスポンソンの鋼材重量については、既存のコラムスポンソンの鋼材重量より算出した。結果は表 4.3に示される。

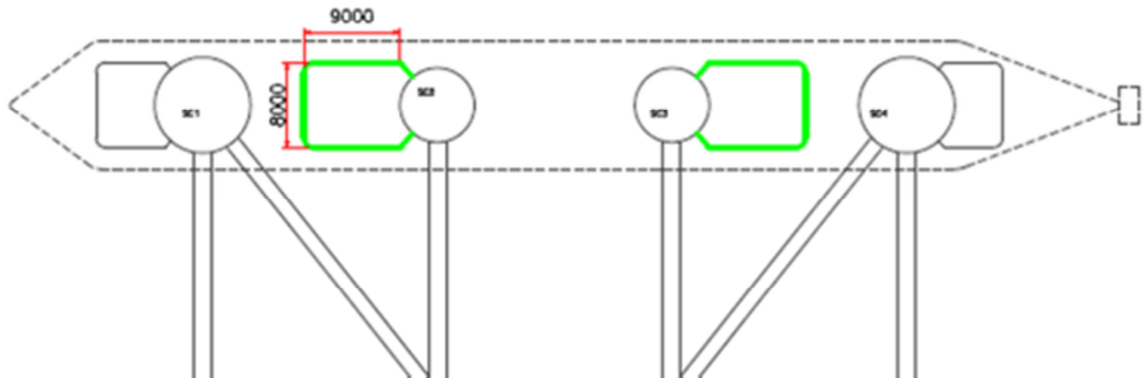


図 4.2 : 追加コラムスポンソン（右舷側）

表 4.3 : 追加コラムスポンソン鋼材重量

	排水量	最大高さ	重心	推定重量
	m <sup>3</sup>	m	m	t
既存 スポンソン	3,500	27.5	18.6	500
追加 スポンソン	5,223	27.5	18.6	746

#### 4.3.2 船体の改造（ローワーハル追加）

また、本船では右舷に風車及び風車設置用機器を搭載するため、Ballast Water無しでは大きく右舷側に傾斜する。これを避け、Even Heel & Even Trimの状態を作成するためには、対応するBallast Waterをカウンターウェイトとして左舷ローワーハル内に搭載しなければならない。このため、左舷側のBallast Tank容量が大きく逼迫され、d9.2mや10mといった浅喫水を再現できなくなることが想定される。

これを避ける為、右舷側にローワーハルを追加することを検討した。追加されたローワーハルの浮力が風車及び風車設置用機器にかかる重力と相殺されるため、左舷側のBallast Water量を減らすことができ、結果として幅広い範囲の喫水でEven Heel & Even Trimの状態を作成することができるように期待される。

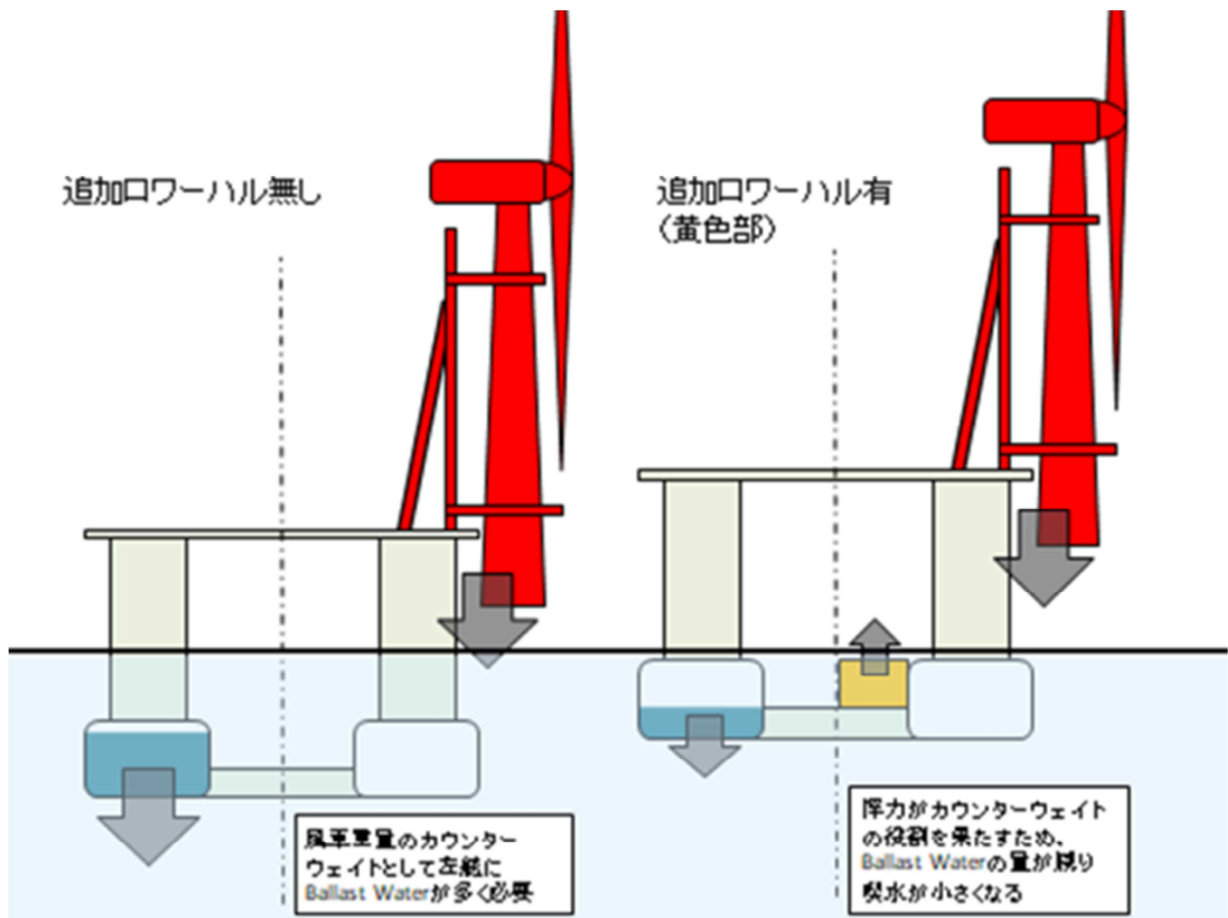


図 4.3 : ローワーハルの追加

追加されたローワーハルの概形は以下の図 4.4に示される。右舷の既存ローワーハル内側に、Deep Dishの上に載る形でL73m・B8.5m・D7mのローワーハルを追加した。なお、追加されたローワーハルは6分割され、船首/船尾の2区画はバラスタタンク、それ以外はVOIDとして扱うこととした。追加されたローワーハルの鋼材重量については、コラムスポンソンと同様に算出した(表 4.4参照)。

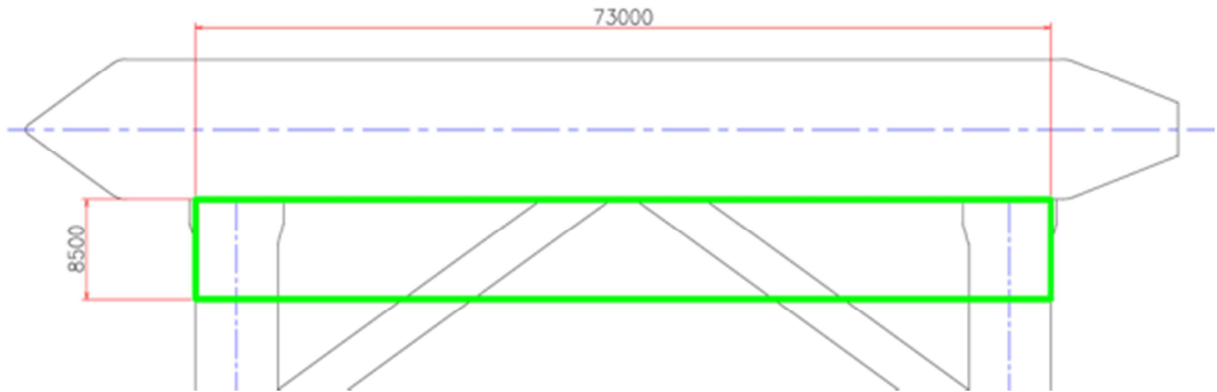


図 4.4 : 追加ローワーハル

表 4.4 : 追加ローワーハル鋼材重量

	排水量	最大高さ	重心	推定重量
	m <sup>3</sup>	m	m	t
追加 ローワーハル	4,344	9.5	6.0	620.3

#### 4.3.3 船体改造結果

改造後の船体イメージ図(アッパーハルより下)を図 4.5に示す。船体改造により、d8.9m~18.2mの間においてGOMが正であり、船体傾斜が無い状態を作成することができると確認された。また、港湾作業喫水であるd9.2m、及び沖合での風車設置作業喫水であるd17.5mにおいて、非損傷時復原性と損傷時復原性がNK規則P編を満たしており、安全に作業を行うことができると確認した。

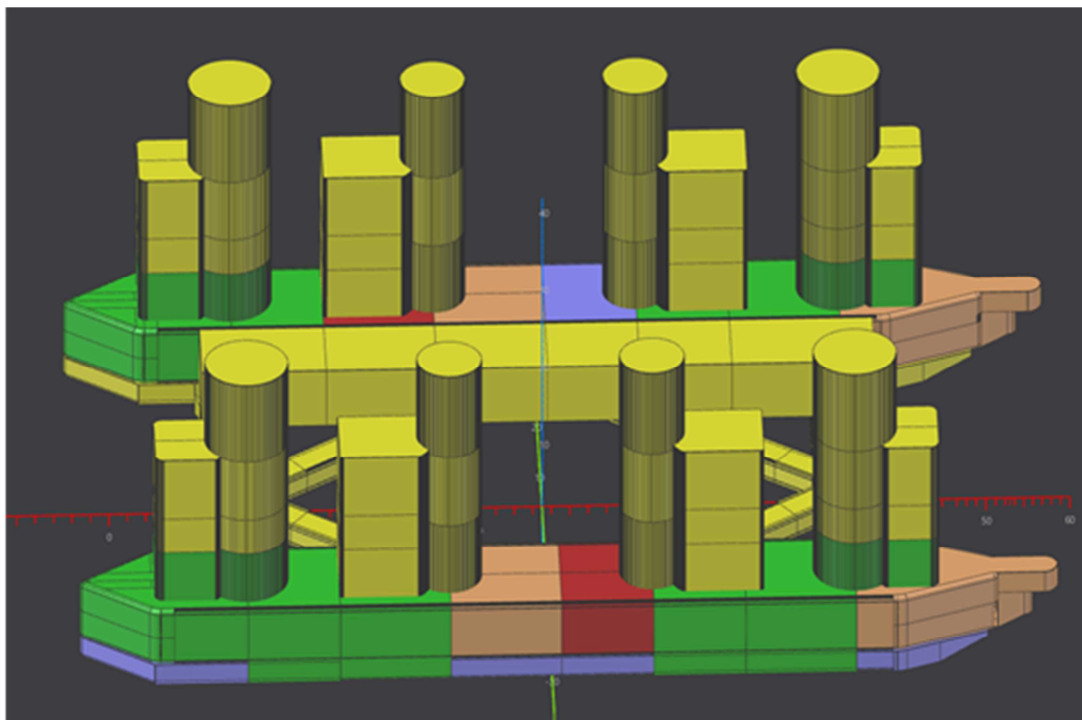


図 4.5 : 改造後船体イメージ図



図 4.6 : 本船稼働イメージ



## 5. 作業限界の決定と稼働率推定

本章では、本船の稼働率を算出する。荒れた海象下で本船を稼働させようとしても、風車タワー基部-Spar頂部間の相対変位量が大きくなり、風車をSpar上に設置することはできなくなる。このため、本船はあらゆる期間・海域で稼働できるわけではない。本章では、ある海域において一年のうち何%の期間本船が作業することができるかを示す値を稼働率と呼ぶ。これは本船の採算性を考察する上で極めて重要な指標となる。

稼働率の算出は、以下の手順によって行われる。

- ① 本船の作業限界(稼働可否の判断基準)を策定する。
- ② 様々な海象下での風車タワー基部-Spar頂部間の相対変位量を算出する。
- ③ ①②を組合せ、本船が稼働可能な海象条件を求める。
- ④ ③と想定海域での波浪頻度表(各海象が発生する確率をあらわす表)を組合せ、本船が稼働できる確率を求める。これが稼働率となる。

### 5.1 計算前提

#### 5.1.1 計算アプリケーション

本計算にはOrcina社の「Orcaflex」及び「Orcawave」を使用した。Orcawaveは特異点分布法プログラムであり、波浪中動揺を計算することができる。Orcaflexはランプトマス法による時刻歴解析プログラムであり、特に係留・ライザー解析に用いられることが多いが、近年洋上風力発電に関する計算についても整備されつつある。

#### 5.1.2 想定海域

本船の想定稼働海域は日本近海となっており、特に次の2通りの海域で稼働することが想定される。

- ① ウインドファームが建設される海域にてSpar立て起こし・風車搭載工事が行われる場合、本船はウインドファーム予定地にて稼働する。
- ② Spar立て起こし・風車搭載工事が静穏かつ水深が深い工事専用海域にて行われ、Spar及び風車が搭載後ウインドファームまで曳航される場合、本船はより海象条件の穏やかな海域で稼働することが想定される。

本研究においては、上記を考慮したうえで、以下の表に示される4地点を想定海域とし、海象データを稼働率の算出に用いることとした。No.1(いわき沖)は国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所のデータベースにおけるエリア44のデータを、No.2~4は港湾空港技術研究所のNOWPHAS1970-1999年統計データを参照した。No.1(いわき沖)は太平洋沖合、No.2(御坊沖)は太平洋沿岸、No.3(鹿児島)は湾内、No.4(阿賀沖)は日本海側のデータとなっており、日本近海のデータはこれら4地点のどれかに似た傾向を示すことが多い。なお、No.3(鹿児島)の水深は23mと浅く、実際には風車設置作業を行うことができない海域であることには注意が必要である。

表 5.1:想定海域

No	サイト名	水深(m)	緯度	経度
1	いわき沖	-	-	-
2	御坊沖	170	33'40'00"	135'00'00"
3	鹿児島	23	31'33'02"	130'34'30"
4	阿賀沖	80	38'02'57"	139'06'33"



図 5.1 : 想定海域位置

各海域における波浪頻度表をそれぞれ以下に示す。

表 5.2 : No.1 いわき沖波浪頻度表

波浪頻度表:いわき沖		有義波周期(s)											
		5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
有義波高 (m)	2.0~	0.0	4.5	15.3	66.0	45.9	25.1	15.7	7.6	3.8	0.9	0.0	0.0
	2.0	2.8	13.9	79.1	39.5	34.5	22.0	8.6	3.5	1.1	0.1	0.0	0.0
	1.5	21.1	73.3	56.1	65.2	46.6	27.8	7.7	1.9	0.5	0.1	0.0	0.0
	1.0	58.7	34.8	45.1	50.1	29.9	16.1	4.7	1.1	0.2	0.0	0.0	0.0
	0.5	34.0	6.6	9.3	10.7	5.2	2.6	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0

表 5.3 : No.2 御坊沖波浪頻度表

波浪頻度表:御坊沖		有義波周期(s)											
		5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
有義波高 (m)	2.0~	0.0	2.7	10.9	13.1	12.1	10.2	7.5	7.8	11.0	1.0	0.0	0.0
	2.0	0.4	33.1	20.2	14.4	11.0	8.3	6.7	6.0	3.1	0.1	0.0	0.0
	1.5	31.1	81.9	38.5	30.0	20.9	13.7	8.6	4.5	2.5	0.1	0.0	0.0
	1.0	80.1	87.1	79.0	80.3	51.4	25.4	8.6	3.4	1.3	0.0	0.0	0.0
	0.5	34.1	20.7	33.3	41.6	29.4	10.8	1.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0

表 5.4 : No.3 鹿児島湾波浪頻度表

波浪頻度表:鹿児島湾		有義波周期(s)											
		5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
有義波高 (m)	2.0~	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.5	2.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0	22.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	969.2	3.7	0.7	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 5.5 : No.4 阿賀沖波浪頻度表

波浪頻度表:阿賀沖		有義波周期(s)											
		5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
有義波高 (m)	2.0~	1.1	25.1	57.2	49.0	29.1	8.5	1.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	13.3	31.3	19.7	15.8	4.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.5	46.0	35.8	26.7	16.8	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0	153.6	55.8	30.4	7.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	310.3	36.2	14.6	4.1	1.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### 5.1.3 計算条件

本計算の代表的な条件を以下に示す。

表 5.6 : 計算条件

計算時間		h	2	
時間刻み		s	0.1	
繰り返し回数			3	
本船	喫水	m	17.5	
Spar	位置	x	m	0.0
		y	m	45.0
	喫水		m	79.8
	排水量		t	19,676
水深		m	150	
波	有義波高	min	m	0.5
		max	m	2
	ピーク波周期	min	s	5
		max	s	20
	波スペクトル			ISSC
	波向き			8方向
風			無し	
潮流			無し	

本計算の計算時間は2時間と設定した。実際に工事が行われる際、海象の予報が凡そ2~3時間単位で為されると思われるので、実工事を行うか否かの判断もこの予報に沿って2~3時間おきに行われると想定している。

また、計算に不規則波を使用するため、計算結果に不規則波の乱数影響が発生することが想定される。この影響を抑える為、本計算を3回繰り返し行い、結果の平均値を稼働可否の判断に用いることとした。

風車の設置はSparを立て起こした状態で行われるため、Sparの喫水を考慮し十分に深い海域で行う必要がある。本計算ではこれを考慮し、海域の水深は一律で150mとした。前述した想定海域における水深とは異なる点がある点に注意が必要である。なお、Sparの設計については次節で触れる。

波については不規則波とし、ISSCスペクトルを仮定して与えた。有義波高は0.5m、1.0m、1.5m、2.0mの4ケースについて計算し、有義波高が2mを超える場合は波周期に関わらず作業を行うことができないとした。当初の業務目標は有義波高2.5mで稼働できる船舶であったが、波浪頻度表内で有義波高が2.5mを超える頻度が非常に少なかったこと、有義波高2.5mで稼働可能となる海象条件が限定されていたことから、上記の設定を行った。

波向は45度刻みの8方向について考慮し、各波方向における結果の平均値を稼働可否判断の結果

に用いる。

また、本計算においては風・潮流の影響は考慮しないものとする。本船における風車設置では、クレーンを使用し風車を吊ることはないため、風により風車が大きく動揺することはないと考えた。また、潮流についても水深が深い沖合で作業が行われることが想定されるので、波と比較して船体動揺に与える影響が小さいと考えられる。

#### 5.1.4 風車搭載Spar浮体の概略設計

風車タワー基部-Spar頂部間の相対変位量を算出するうえで、風車搭載対象であるSparの諸元が必要となる。本節では稼働率推定計算において仮定したSpar諸元について述べる。

本研究にて取り扱うSpar型浮体は、単純な円柱形状を想定する。実際のSpar浮体は頂部がくびれた円柱形状をしていることが多いが、Spar浮体の運動性能が頂部の形状により大きく変化しないため、本研究では頂部の形状変化は考慮しないこととした。

本浮体の要求性能として、図 4.1のDTU 10MW Wind Turbineを搭載した状態で乾舷15mであることとした。また、DTU 10MW Wind Turbine稼働時に最大Thrust力が働いた状態で、本浮体の傾斜が7°以下となるよう設計した。

なお、本浮体にはコンクリートバラスト(密度2.3t/m<sup>3</sup>)及び水バラスト(密度1.025t/m<sup>3</sup>)を搭載することとし、コンクリートバラストを浮体底に敷き詰め、その上に水バラストを配備することを想定した。

上記条件を満たすよう、算出したSpar浮体の主要目及びイメージを以下に記す。なお、「風車無し」状態とは、バラスト量を風車設置後の状態と揃えたうえで風車を取り払った状態、すなわち本船による風車設置直前のSpar浮体の状態を表す。また、表内の重心高さについては、Spar浮体底を0とした値である。

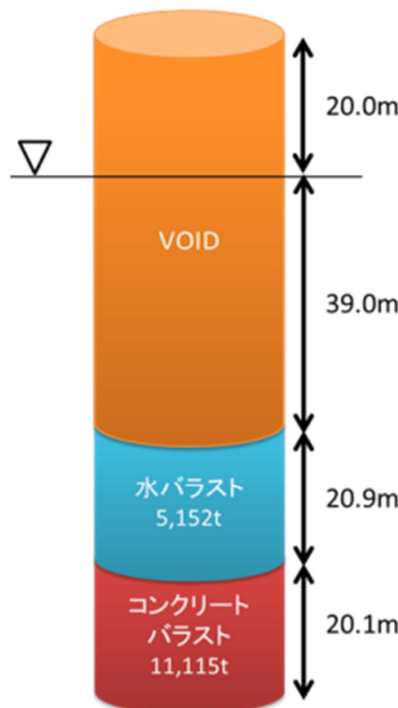


図 5.2 : Spar イメージ図

表 5.7 : Spar 諸元

			風車あり	風車無し
浮体部	直径	m	17.5	
	高さ	m	100.0	
	喫水	m	85.0	80.0
	乾舷	m	15.0	20.0
	鋼材重量	t	3,400	
	鋼材重心高さ	m	50.0	
風車部	風車重量	t	1,280	0
	風車重心高さ(Spar 底～)	m	183.0	0.0
	Max Thrust	kN	1,500	0
積付	水バラスト量	t	5,152	
	水バラスト重心高さ	m	30.5	
	コンクリートバラスト量	t	11,116	
	コンクリートバラスト重心高さ	m	10.0	
Total	排水量	t	20,956	19,676
	総重心高さ	m	32.1	22.3
	GOM	m	10.6	17.8

### 5.1.5 稼働可否判断基準(作業限界)

稼働率を算出するためには、本船の作業限界を設け、時刻歴計算の結果によって得られた各海象条件下での最大相対変位量に対し、本船を稼働して作業を行うことができるか否かの判断を行う必要がある。本計算では、風車搭載用機器のMotion Compensation Systemの可動域をこの判断基準にすることとした。すなわち、最大相対変位量がMotion Compensation Systemの可動域以下であるならば、同Systemによって風車タワー基部-Spar頂部間相対変位を0にすることができ、設置作業を行うことが可能であろうと想定した。

同Systemの可動域は以下の表 5.8内のCase1に示される。また、Compensationの可動域を半分としたCase2についても、Case1と同様に稼働可否の判断を行うことにした。Case2でも十分な稼働率を確保できるのであれば、Motion Compensation Systemのスペックを下げることができ、より低いコストでの本船改造及び運用が可能になる。

表 5.8 : 稼働可否判断基準

	波周期(s)	Case 1	Case 2
		限界値(m)	限界値(m)
鉛直方向 相対変位 判断基準	12	1	0.5
	10	0.8	0.4
	8	0.6	0.3
	6	0.5	0.25
水平方向相対変位判断基準		2.5	1.25



## 5.2 計算結果

各波高・ピーク波周期に対する相対変位量の最大値をそれぞれ以下に示す。図内黄色で塗られた領域が本船稼働可能な範囲となる。

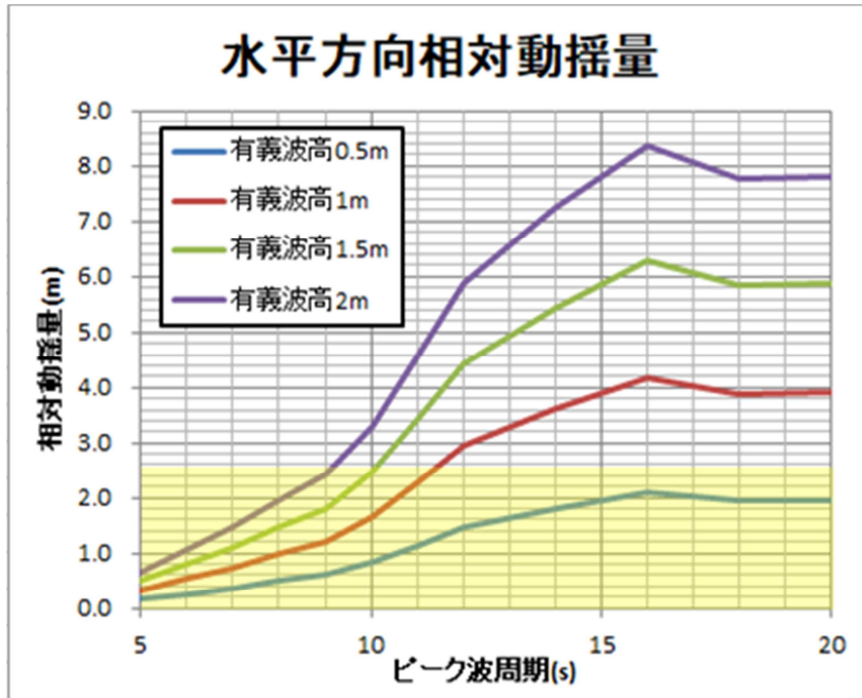


図 5.3 : 水平方向相対動揺(変位)量

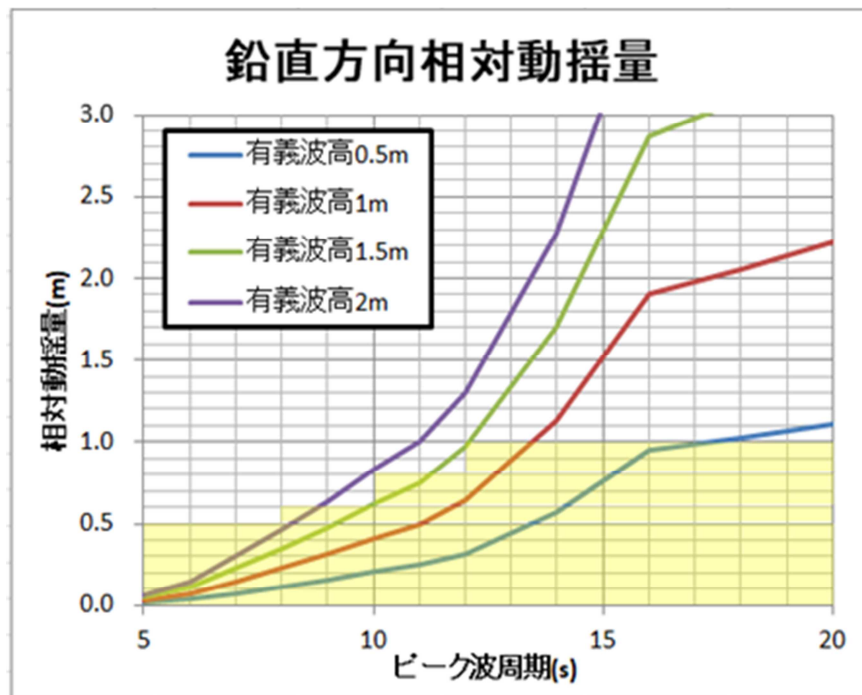


図 5.4 : 鉛直方向相対動揺(変位)量

### 5.3 稼働率算出結果

波浪頻度表(表 5.2～表 5.5)、稼働可否判断基準(表 5.8)、算出された相対変位量(図 5.3・図 5.4)より、稼働率を算出することが可能である。表内Case1、Case2それぞれの稼働率は以下の表 5.9に示される。

表 5.9:稼働率算出結果

No.	サイト名	Case 1	Case 2
1	いわき沖	77%	46%
2	御坊沖	88%	74%
3	鹿児島湾	100%	100%
4	阿賀沖	83%	77%

この結果より、Case1では日本近海であればほぼどのような地点においても、稼働率70%以上となるであろうことが推測される。Motion Compensation Systemのスペックを下げたCase2であっても、いわき沖以外では70%以上の稼働率となった。いわき沖でも通年での稼働率が46%となり、荒天期を除けば十分に稼働できる結果となった。



## 6. 改造費用の算定

表 6.1に改造費用を取り纏めた。

表 6.1 : 改造費

項目	金額 億円
風車設置用機器 (Huisman社)	103
上載設備改造費 (Keppel FELS社)	12
船体改造費	7.7
計	123.9

また、改造費および期待される稼働率から表 6.2にデイレートを求めた。

表 6.2 : 必要なデイレート

項目	ケース1	ケース2
計算条件	以下の通り	以下の通り
中古セミサブ購入費	44億円	10億円
年間稼働率	60%	60%
操業費	2.6百万円/日	2.6百万円/日
操業期間	12年間	12年間
必要なデイレート	15百万円/日	13百万円/日

## 7. 稼働率に基づく費用対効果の推定

本章では、2016年に実施された5MW浮体式洋上風力発電船「ふくしま浜風」の風車部の搭載工事における実際の工程と、本船を用いた風車部搭載手順の比較を試みた。「ふくしま浜風」の風車部の搭載は、大型起重機船を用いて行われ、比較的静穏な海域である淡路島沖において実施された。工事は6段階に分けて搭載が行われ、タワー搭載開始からブレード取り付け完了までの風車部の組立作業も合わせて1週間を要している。

一方で、当該海域で同作業を本船で実施すると想定したケースでは、風車部の組立作業は陸上の岸壁で実施されるため、洋上における作業期間が削減可能となる。風車部の組立工事は非常に繊細な部分が多いため、洋上で実施する場合には海象気象条件に左右されることも多く、長期に及んでしまうと作業船の傭船費も高額となるため、できるだけ洋上における作業は削減することが望ましい。陸上において風車部の組立ができる本船を使つての施工は、洋上における作業と比較して、時間読みがしやすく、工程も短縮することが可能である。

下表のとおり、起重機船を用いた場合の7日間と比較して、本船では洋上における作業は3日間で完了可能である。また起重機船の場合には、うねりのない静穏な海域や季節的な影響を考慮する必要があるが、本船の場合には多少のうねりがあるところでも60%の稼働率が確保できるという結果が出たため、稼働可能となるロケーションの選択肢は広く取ることができる。浮体式風車が実際に設置される海域、もしくはできるだけ設置海域から近いロケーションでの風車部搭載で、全体の施工期間短縮と費用削減が可能となる。また、特にSpar型浮体への風車搭載については、Sparを立て起こした状態で風車を搭載せざるを得ず、水深およそ100m以上の深い海域が必要となる。日本近海で水深が深く、かつ起重機船が稼働できるような静穏海域は非常に限られることから、稼働海域を広い範囲から選択できる本船はSpar型浮体への風車搭載に有利であると考えられる。

ジャパン マリンユナイテッド 株式会社



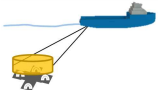
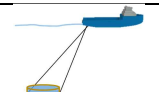
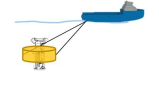

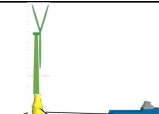



図 7.1 起重機船と本船の作業日数比較

## 8. ECOSSE IP社の状況

本事業のスコットランド側パートナーのEcosse IP社(EIP社)のスコープは、「小型で低コストの船舶を使用して、さまざまな海底タイプで、深海に浮かぶ洋上風力発電用の費用効果の高い統合係留システムの設置のコンセプト開発を実施する」ことである。具体的には、TLP型の浮体システムを開発する。

表 8.1にEIP社設備の設置手順を示した。

表 8.1 : EIP 側設備の設置手順

No.	製品の特徴	主な製品
1		Ambient Lifter is used to float out the micro-pile template, towed from shore using a tug or anchor handler vessel (AHV).  Micro-piles are suitable for all seabed types and are considerably stronger and ~50% the installation cost of monopiles
2		Ballast is pumped into the Ambient Lifter and it lowers the micro-pile template to the seabed.
3		Ballast is removed from the Ambient Lifter and it returns to the surface to collect subsea drilling unit.
4		Ambient Lifter manoeuvres micro-pile drilling unit to template, each micro-pile is drilled into the seabed, activated by ROV.  The template is grouted into place and provides an extremely strong foundation.
5		Floating transition piece, wind turbine and tension leg wires are assembled onshore and towed out to site using AHV or tug.
6		Transition piece is ballasted down and tension wires are manoeuvred into place, by an ROV, to secure the wires onto the micro-pile template.
7		Ballast is removed from the floating transition piece which rises and creates tension in the wires. The tension wire system is suitable for all water depths.
8		Armoured static riser cable is pulled through collar & J-tube and connected to the offshore asset to provide power (or can be installed as part of a windfarm).

本事業のスコットランド側パートナーのEcosse IP社(EIP社)の本年度のスコープは下記である。

- Review of current floating wind concepts
- Floating transition piece concept design

- Validation of transition piece design and determination of loading requirements
- Transition piece optimization
- TLP tendon analysis review
- Micropile beach trial
- Micropile foundation design
- System integration modelling
- Harbor trial of micropile template installation

本年度の主な結果として以下が得られた。

- TLPには、8本の24in径の鋼製のテンドンが必要なことが判った。
- 8本の24in径の鋼製のテンドンの設置には、Ambient Linerを用いることにより、低コストで設置可能になっている。

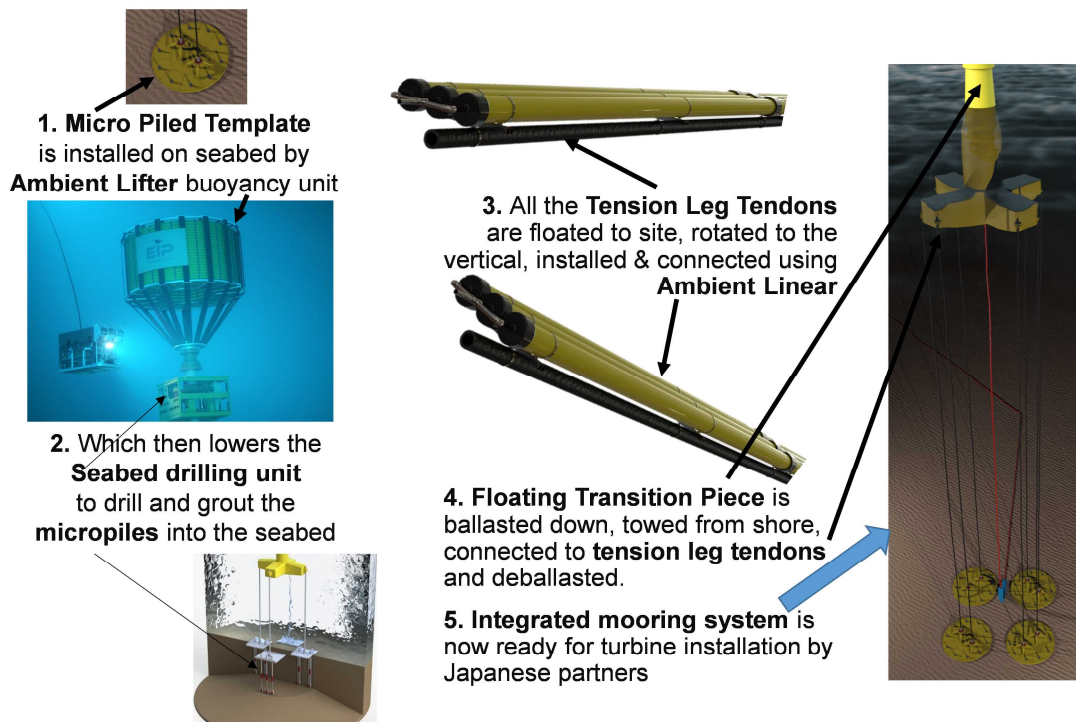


図 8.1:2020 年度における SIP 側の成果

## 9. まとめと今後の課題

現在、Spar型浮体への風車搭載は、静穏かつ水深が深い工事専用海域にて起重機船を用いて行う以外の方法が存在しない。本開発においては、風車設置作業船としてセミサブ式を採用し、風車設置専用の機器を搭載することで、より海象条件の厳しい海域での風車設置が可能なコンセプトを提案した。日本近海において本船は概ね高い稼働率で通年での作業が可能であり、工事専用海域ではなく風車稼働海域での風車設置も可能であることが示された。本船は様々な風車基礎に設置を行うことが可能だが、特に今回検討に用いたSparタイプの浮体式風車についてはセミサブ式の優位性が確認でき、合わせて費用対効果も確認できた。

セミサブ式は沖合での工事に適していると考え、本開発ではセミサブリグのHakuryu-5での転用をベースとして検討を進め、改造を行うことで10MWの風車を1基搭載が可能であることが確認できた。本開発ではHakuryu-5の制約を考えながらコンセプトを固めていったが、既存リグを使用するには大規模改造が必要という、10MW以上の大型風車の搭載への課題も確認できた。今後は大型風車を搭載するための船体サイズなどの最適化を行いながら、セミサブ式を用いた浮体式風車設置船のコンセプトデザイン製作に取り組みたい。

以上