2019年度成果報告会　　プログラムNo.W-02

風力発電等技術研究開発
/洋上風力発電等技術研究開発
/次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究
（要素技術実証）

発表者：吉田茂雄（九州大学）
*委託先：豊田通商（株），（国）九州大学，（国）東京大学，（国研）海上・港湾・航空技術研究所，（株）寺岡，（株）グローカル
*再委託先：（学）東京理科大学，（公）大阪府立大学，関西設計（株），寄神建設（株），（株）富士ピー・エス，常石鉄工（株），（学）東邦大学

問い合わせ先：吉田 茂雄
九州大学・応用力学研究所
E-mail: yoshidas@riam.kyushu-u.ac.jp
TEL: 092-583-7747

事業概要

1. 期間

開始：2019年01月
終了（予定）：2019年09月

2. 最終目標

2030年に発電コスト20円/kWh以下を達成できる浮体式洋上風力発電システムの技術を確立する.

3. 成果・進捗状況

- 北九州市響灘で設置海域を決定し，地元の了解・合意を得た.
- 候補海域の調査を行い，海底の地形や地質の条件を確認した.
- 同サイトにおける設計条件を定義し，同条件で概略成立する浮体（タレットによる一点係留，ガイワイヤ支持セミサブ浮体）を設計した（詳細検討継続）.
- 弾性相似モデルの水槽試験により，浮体の運動・変形に関連する基本特性を取得した.

内容

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

1. 研究・開発の概要

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

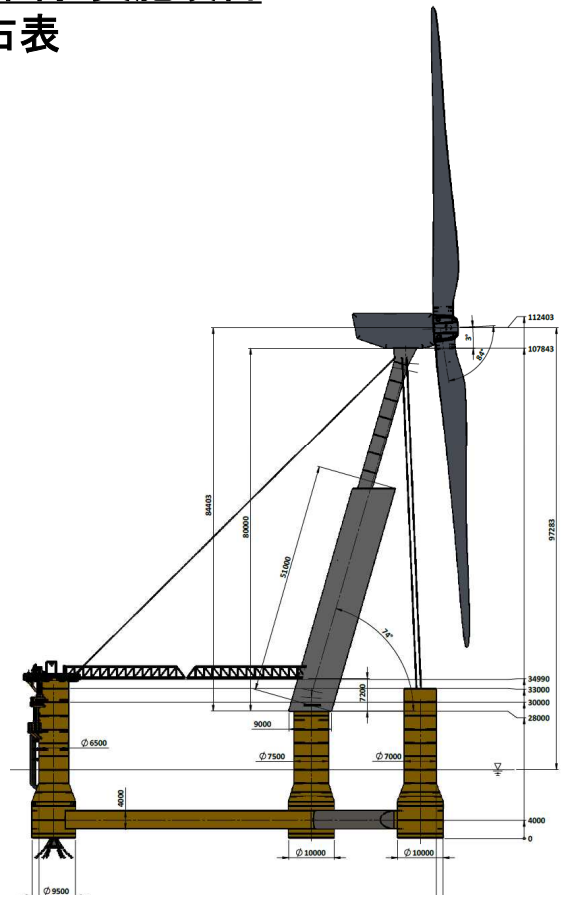
1.1 研究開発概要

1. 研究開発の概要

- システム概要：一点係留セミサブ型浮体式洋上風車（下図）
- 実証試験海域：北九州市沖合約13km

2. 体制・実施項目

- 右表



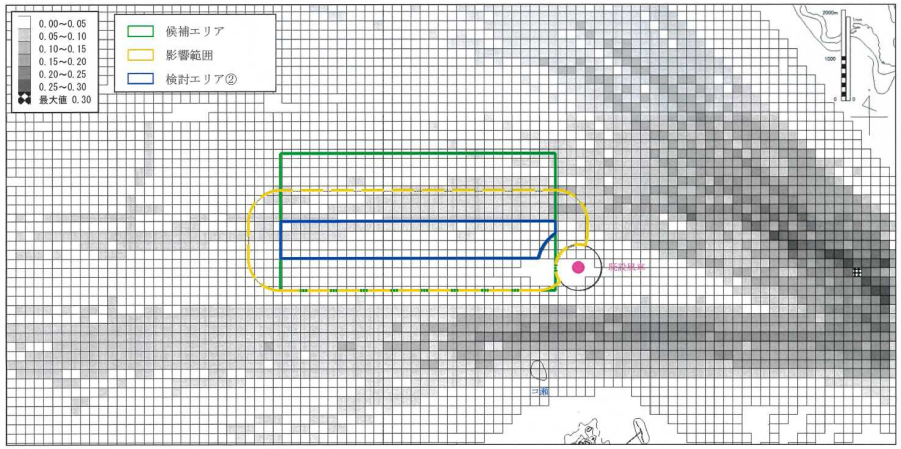
	項番	タイトル	実施者												
			委託先						再委託先						
			豊田通商	九州大学	東京大学	海上・港湾・航空技術研究所	寺岡	グローカル	東京理科大学	大阪府立大学	関西設計	寄神建設	富士ピー・エス	常石鉄工	東邦大学
FS	F1	事前協議													
		F1-1) 社会的制約や許認可条件等の調査						○							
		F1-2) 関係機関調整						○							●
		F1-3) 連系協議						○							
	F2	候補海域調査													
		F2-1) 気象・海象調査						○							
		F2-2) 海底地形・土質調査													
		F2-2-1) 既存資料調査						○							
		F2-2-2) 現地調査						○							
	F3	浮体式洋上風力発電システム基本設計													
		F3-1) 連成解析及び仕様決定						○							
		F3-2) 風車の設計						○							
		F3-3) 原価積算						○							
	F4	システムの評価													
		F4-1) タワー空力特定検討		○					●						
		F4-2) 全体技術検証		○											
		F4-3) 水槽試験による浮体動揺・構造応答の確認			○						●				
		F4-4) 浮体構造の設計検証			○										
		F4-5) 一点係留の回頭特性検討			○					●					
	F5	船舶安全法適合性の確認						○							
	F6	タレット製造方法検討						○						●	
	F7	風車，タワー，ガイワイヤ製造方法検討						○							
	F8	浮体製造方法検討					○								
	F9	組立方法及び施工方法検討													
		F9-1) 風車，タワー，ガイワイヤ組立方法検討						○						●	
		F9-2) 全体組立，曳航，設置施工方法検討					○					●			
	F10	環境影響評価	○												
	F11	経済性・事業性の評価	○												
	F12	観測システム基本計画				○									
その他，システム技術の確立に必要な項目	O1	コンクリート製浮体部の製造・組立方法の検討						○					●		

2. 事前協議

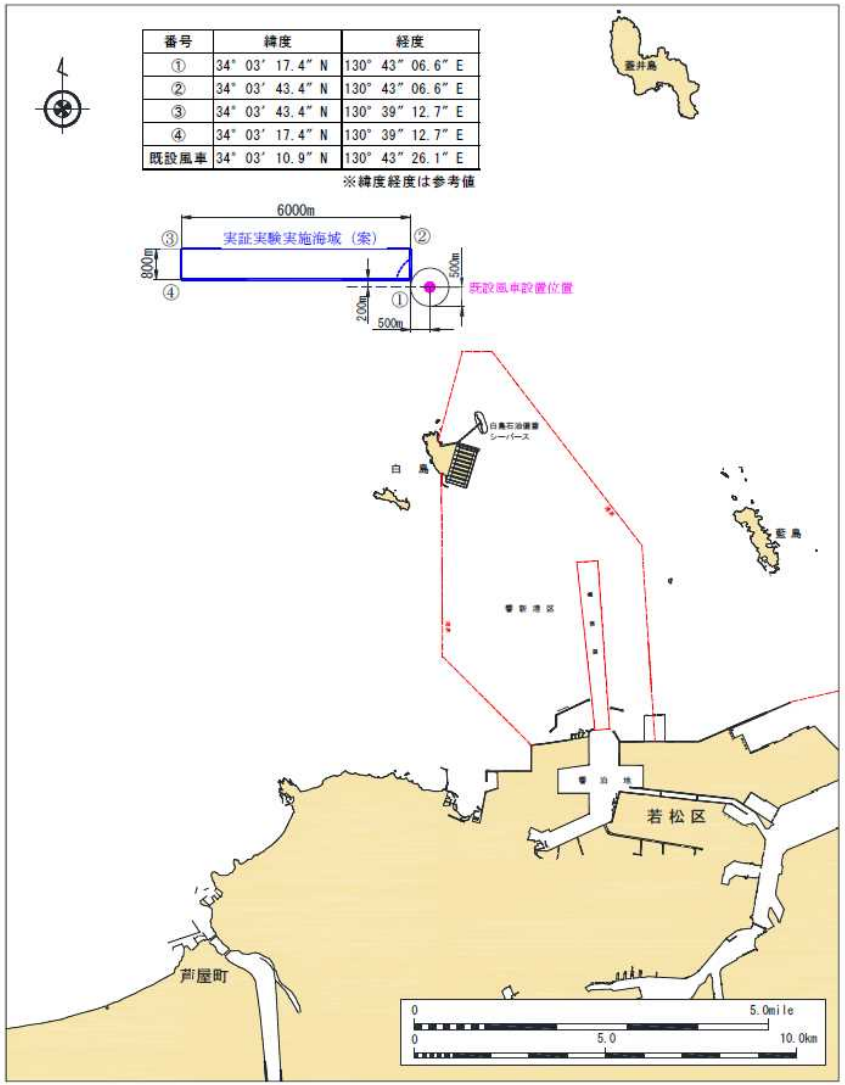
1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

2.1 事前協議

- 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究適地選定に伴う航行安全検討調査専門委員会（学識経験者，海事関係者及び関係官公庁職員で構成）を設置し，実証研究実施海域を決定するとともに，同海域での実証研究実施の了解を取得した．
- 引き続き，海底調査の結果をもとに，実証研究実施海域内に風車の設置ポイントを選定し，福岡県に対して一般海域使用等許可申請を行う．



実証研究実施エリア付近航跡密度図

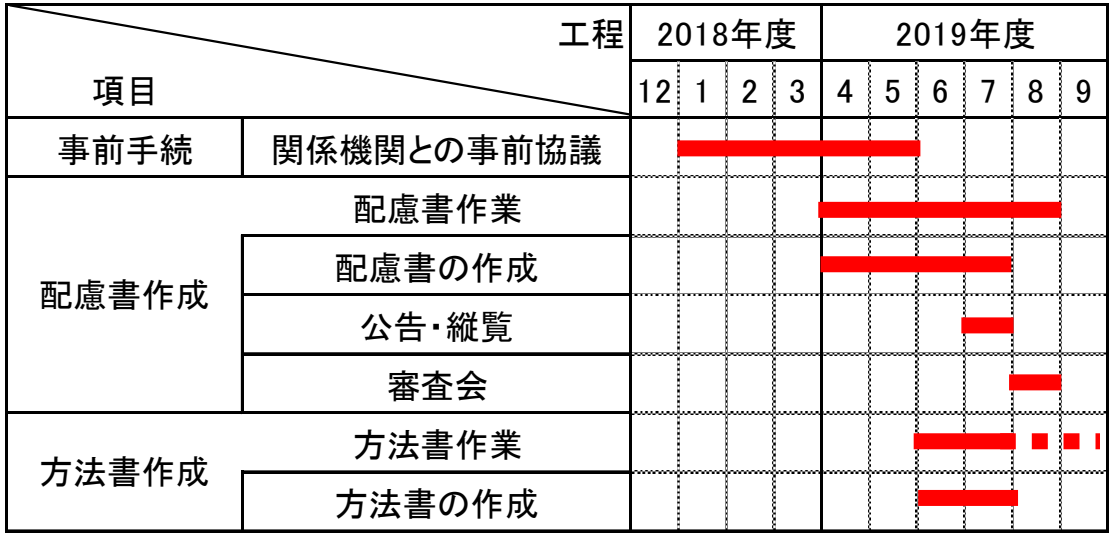


実証実験実施海域（案）

2.2 環境影響評価

- 北九州市の条例（5MW以上）に従って環境影響評価を実施する.
- 事前手続：北九州市，福岡県，及び山口県と事前協議し，北九州市条例にてアセスを行うことで調整済み.
- 配慮書：配慮書を完成し，7月1日から公告・縦覧開始，8月に審査会開催.
- 方法書：市民等からの意見書を踏まえ，方法書を作成.

アセスの工程（配慮書及び方法書）



配慮書における評価項目

評価項目	選定理由
鳥類	供用時におけるバードストライク等の影響
海生動物	供用時における海棲哺乳類、魚類に対する水中音の影響

※なお、方法書において評価項目が変わる場合がある.

3. 候補海域調査

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

3.1 候補海域調査概要

1) 予備調査(既存文献・資料)

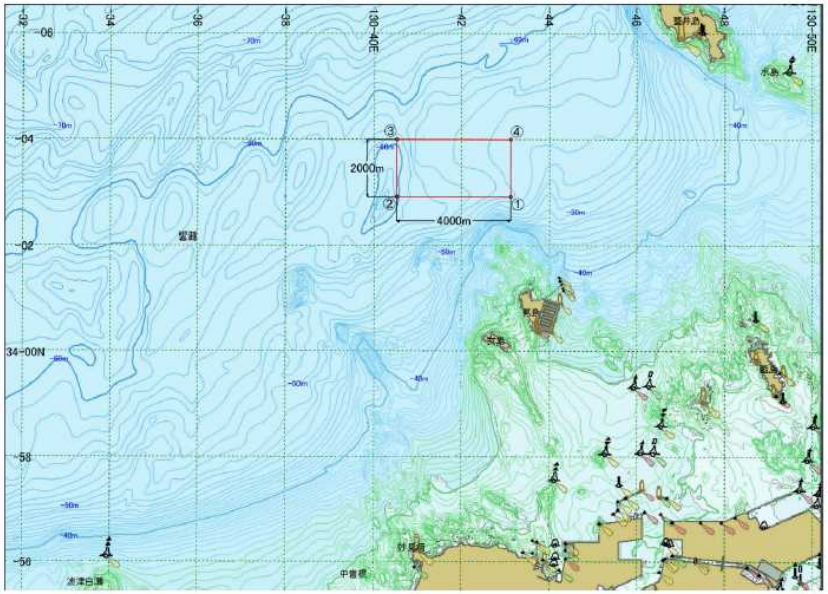
- 海底地形・土質:調査・検討済.

2) 海底地形調査(ナローマルチビーム測深)

3) 海底面調査および海底地質構造調査

4) 底質調査

→実施済(2019年5月17日～26日).



	世界測地系		平面直角座標第Ⅱ系	
	北緯	東経	X	Y
①	34° 02′ 54.3″	130° 43′ 06.5″	116308.037	-25991.558
②	34° 02′ 54.3″	130° 40′ 30.5″	116319.887	-29991.179
③	34° 03′ 59.2″	130° 40′ 30.5″	118319.699	-29984.829
④	34° 03′ 59.2″	130° 43′ 06.5″	118307.846	-25986.055

調査区域位置

調査数量

調査項目	測線間隔	測 線 長	本数	検測	調査数量	調査日数
海底地形調査	70m	4.0km	30	無	約 120km	4
海底面調査・ 海底地盤調査注1)	150m	4.0km 2.0km	15 3	有	約 66km	3
底質調査	—	—	—	—	3 点注2)	1

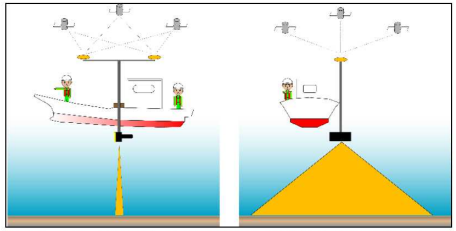


図 7-5 ナローマルチビーム測深機(Sonic2024)による調査実施イメージ

ナローマルチビーム測深機
調査実施イメージ

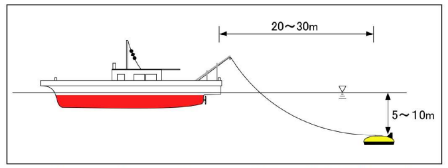


図 7-8 EdgeTech 2000-DSS による海底面探査・地質構造調査実施イメージ

海底面探査
地質構造調査実施イメージ

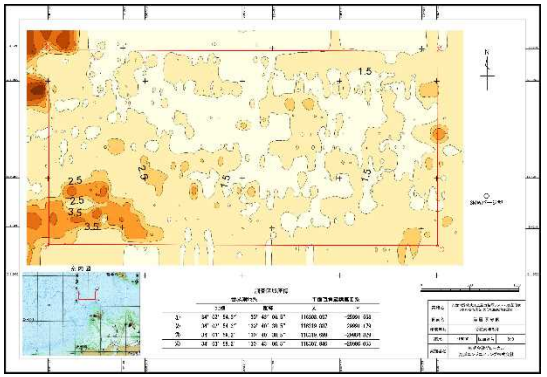
3.2 海底地形・地質等の調査

1) 海底地形
- 水深は約55m～61.5m
- ほぼ全域で微小な波状起伏が分布する.

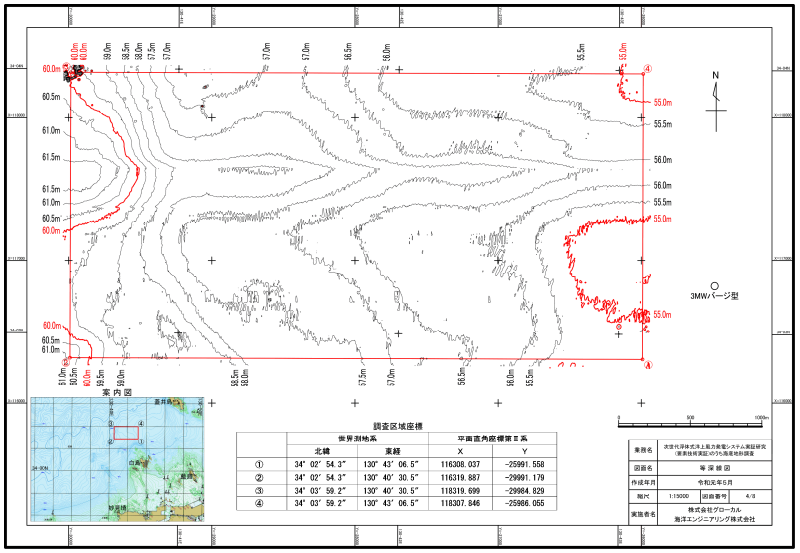
2) 地質構造
- 未固結堆積層(砂質)の厚さは概ね1m～2m.
- 未固結堆積層の直下には礫質層が分布する.

3) 海底面
- 波状起伏に対応するリップルが分布する.
- 北西端には砂採取跡らしき記録が認められる.

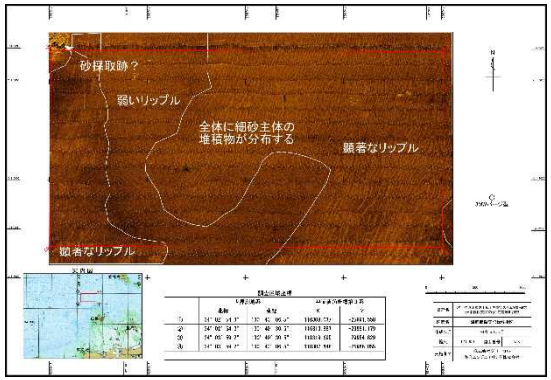
海底面探査・地質構造調査



等層厚線図



等深線図

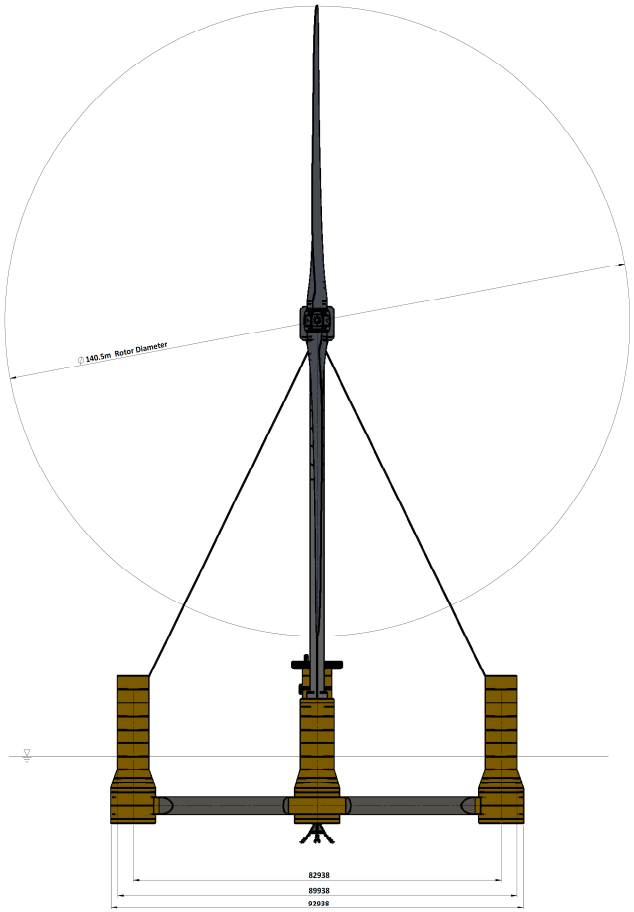


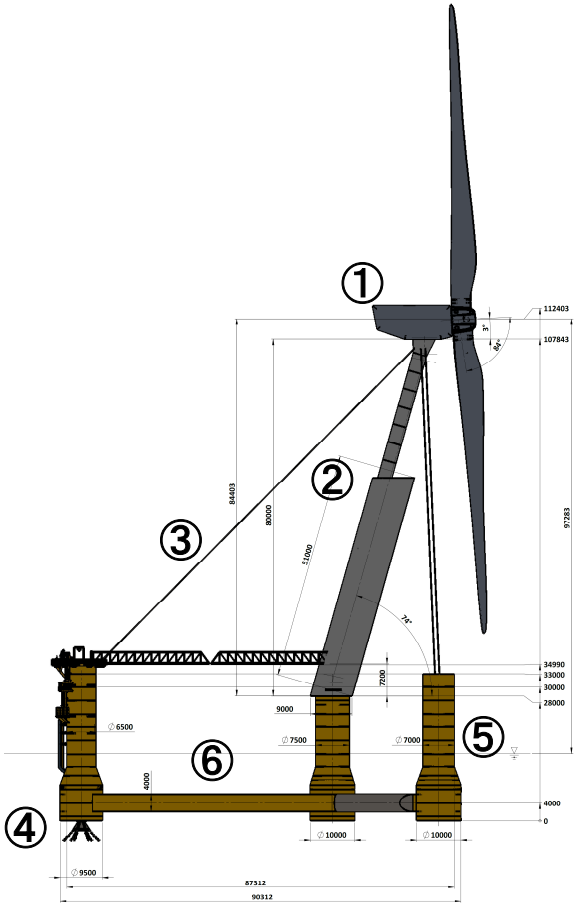
海底面探査記録解析図

4. 基本設計

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

4.1 システム全体概要





全長：90m
全幅：93m

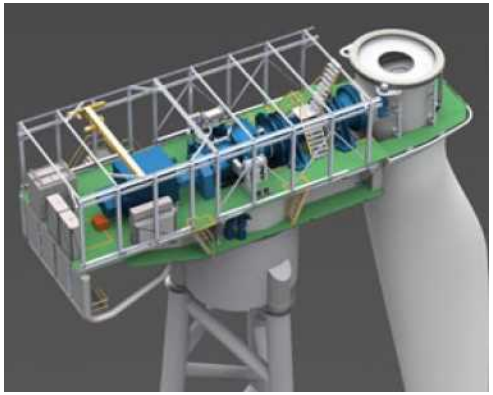
①風車：2B Energy 6MW
②タワー
- 断面形状：Eppler862v3（33%）
- 翼弦長：9.0m
- 翼型高さ：基部～65%高さ

③ガイワイヤ：鋼製
④タレット：没水型，気中スリップリング，係留索6本
⑤コーナーフロータ
- 形状：2段円筒

⑥アーム断面形状：風下側：長円/風上側矩形

4.2 風車

Manufacturer	2-B Energy
Wind Turbine	2B6
Rotor	2 Bladed Downwind
Rotor Diameter	140.6m
Rated Power	6.0MW
RNA Mass	450t
Drivetrain	GB+SG (High Speed, Individual)
Design Class	IC
Operation	Under Operation
Certification Status	C (2016) A (2019 Planned)
Maintainability	Excellent



2-B Energy 6MW

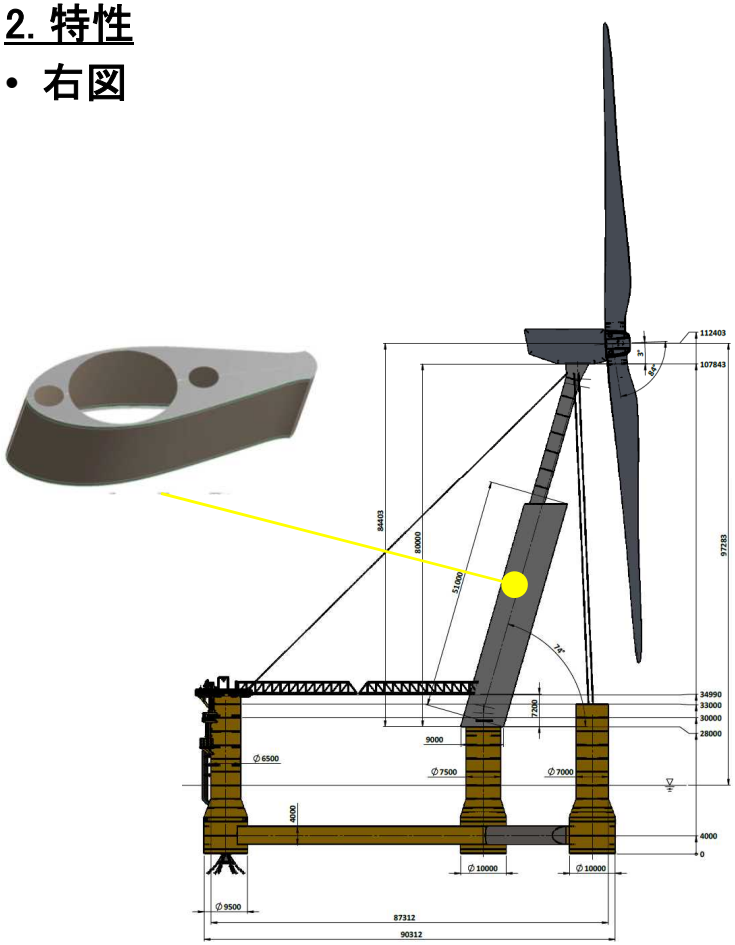
4.3 タワー

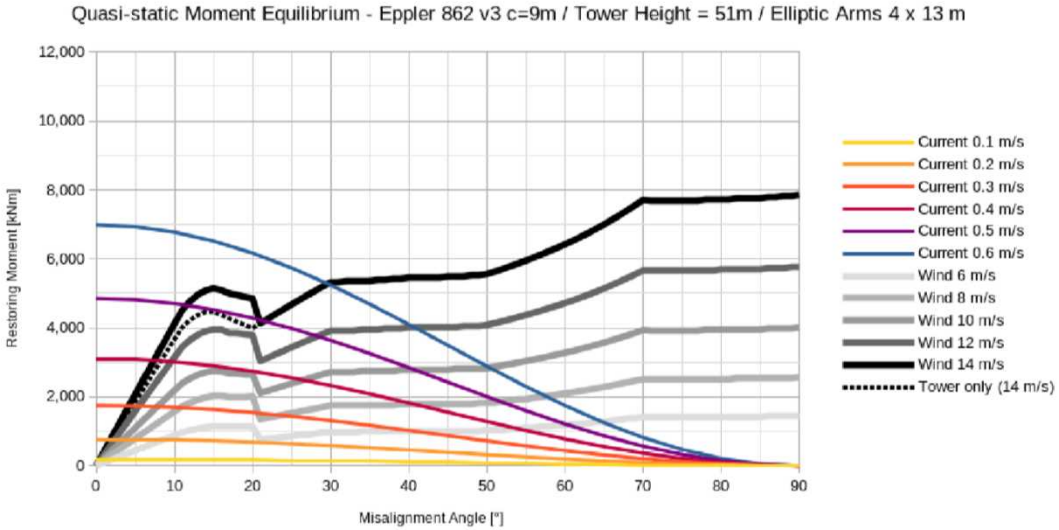
1. 形状

- 断面形状：Eppler862v3（33%）
- 翼弦長：9.0m
- 翼型高さ：基部～65%高さ

2. 特性

- 右図





風・潮流ミスアラインメントに対する浮体ヨーイングモーメント

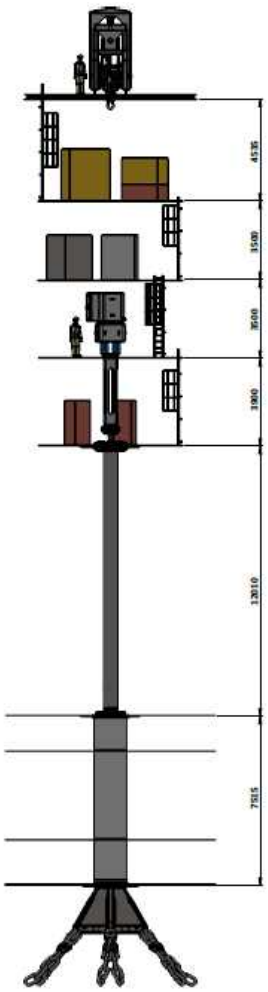
Wind-current angle 90°		Current speed 0.1 m/s	0.2 m/s	0.3 m/s	0.4 m/s	0.5 m/s	0.6 m/s
Wind speed	6 m/s	2	10	24	55	61	65
	8 m/s	2	6	13	42	53	58
	10 m/s	1	4	9	28	43	51
	12 m/s	1	3	6	11	30	42
	14 m/s	1	2	5	8	13	32

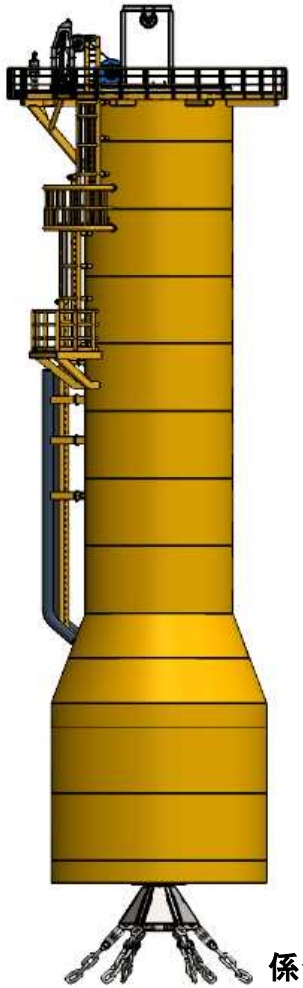
Yaw misalignment in degrees

Power > 97%
Power > 95%
Power >85%
Power 0%

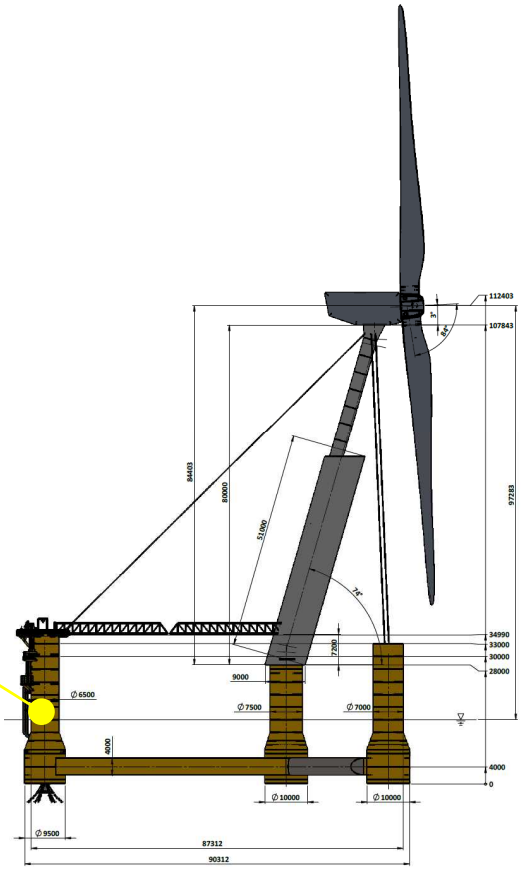
ヨーミスアラインメントと出力
（風・潮流ミスアラインメント90deg）
＊現地の表層流速（海流、潮流、吹送流含む）
発生頻度は，0.4m/s以下が99%.

4.4 タレット





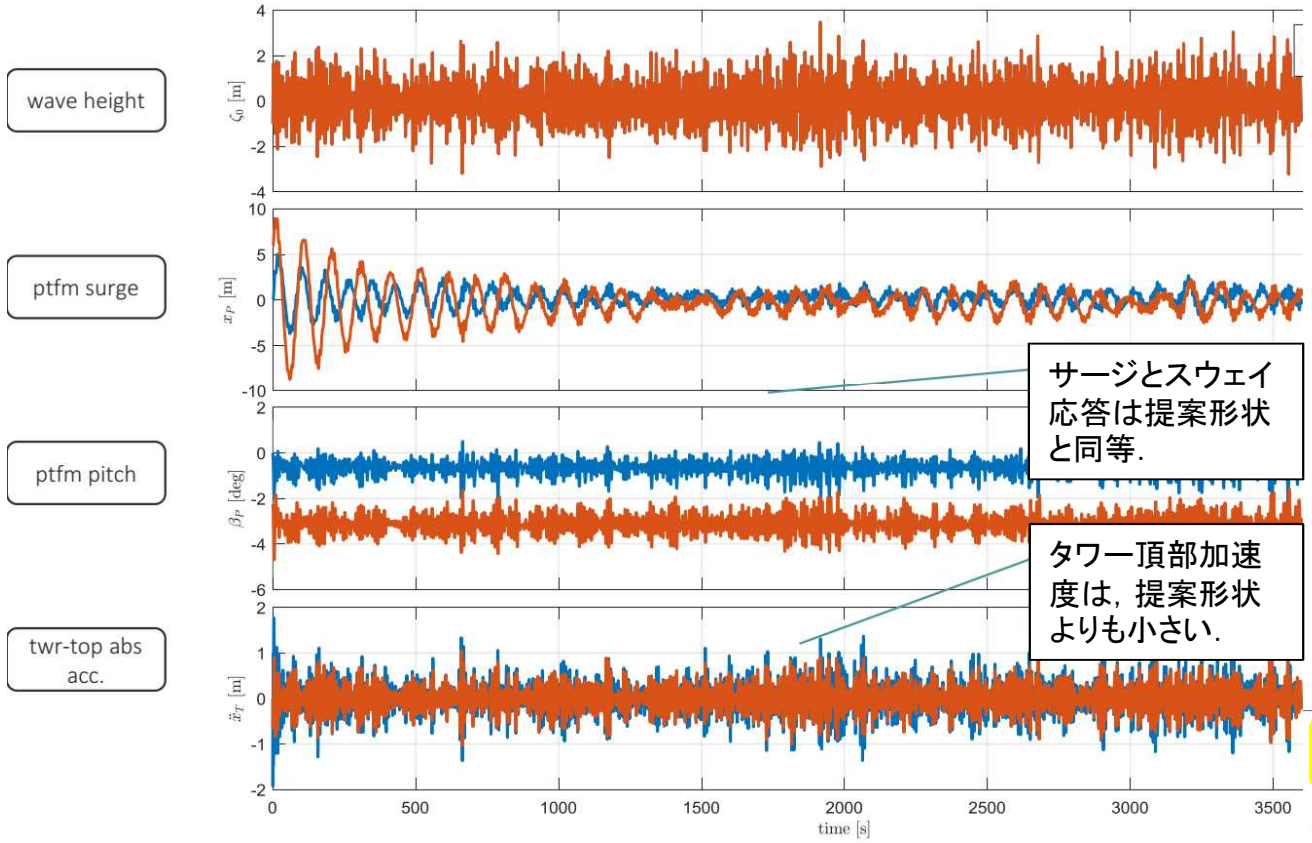
係留索×6本

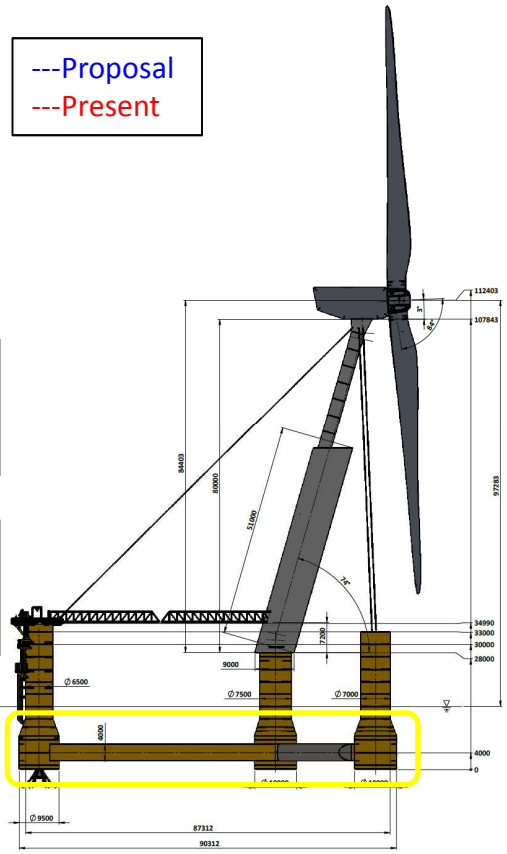


風上側コーナーフロータ内部　　同外観

4.5 コーナーフロータ形状

- 傾斜円筒→垂直円筒：製造性，施工性，タレットとの相性を重視.
- 円筒→2段円筒：動揺抑制を考慮.
- ガイワイヤ締結部：コーナーフロータ頂部.





5. システムの評価

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

5.1 水槽試験概要

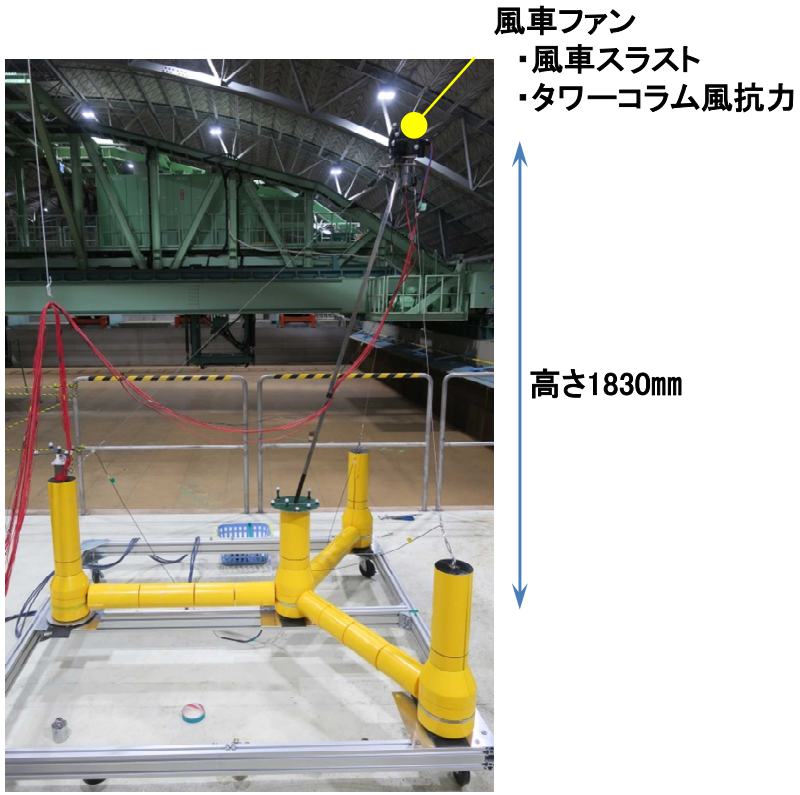
1. 目的
- 浮体動揺・構造応答の確認
- 一点係留の回頭特性検討

2. 供試体
- 動力学的に相似な弾性相似模型(1/60)
- 幾何学的相似, Froude則, 弾性相似, 慣性力相似, 波力の相似

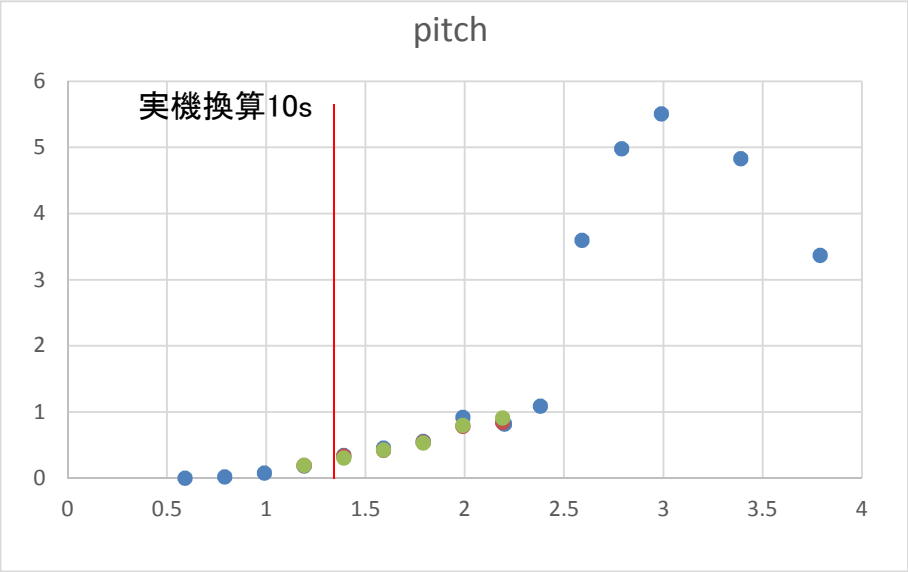
3. 試験施設・試験期間
- 試験施設:海技研　海洋構造物試験水槽
- 試験期間:5月7日～5月24日

4. 計測項目
- ハンマリング試験
- 動揺(6自由度)
- ロワーハル曲げモーメント(9カ所)
- タワー基部曲げモーメント(2方向)
- ガイワイヤー張力(3点)
- 係留張力(3点)

5. 試験条件
- 波浪中試験(規則波25条件, 不規則波3条件, 横波16条件, 横波+風試験40条件)
- 回頭試験(風のみ, 風波共存33条件, 風潮流共存18条件)

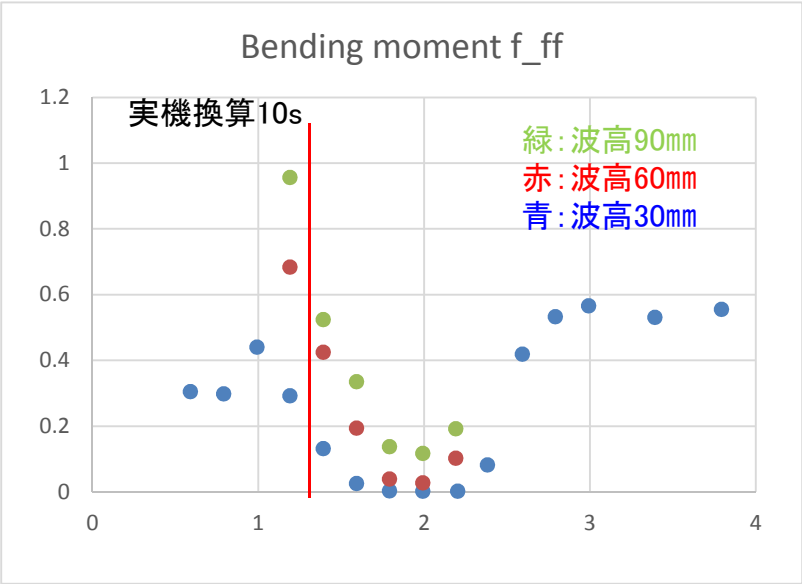


5.2 水槽試験結果：浮体運動・荷重



波周期（s）

無次元ピッチ傾斜振幅RAO



波周期（s）

タワー基部曲げモーメントRAO（Nm）

5.3 シミュレーション概要

- 水槽試験による評価を設計展開するためのOrcaflexを用いたシミュレーションモデルを構築.
- Orca.の形状・質量および浮体の剛性は模型に合わせる.
- Orca.の係留系は下記に示す実機の縮尺値を用いる（弾性模型の要素を併記）.

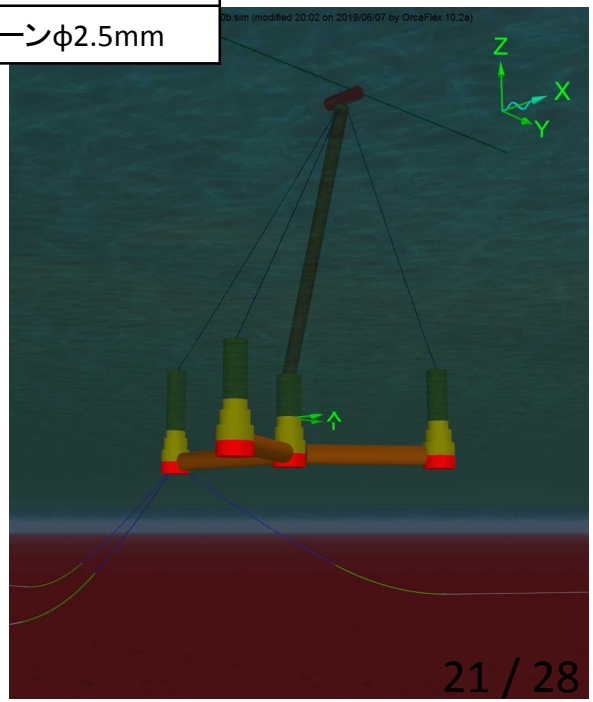
要素 (from Anchor)	呼び径 (mm)	長さ (m)	気中重量 (kN/m)	水中重量 (kN/m)	模型
チェーン	132	50	3.42	2.972	ステンレスチェーンφ2.5mm
ワイヤー	128	400	0.821	0.697	ステンレスワイヤーphi2.5mm
錘付チェーン	132+2×160	100	13.44	11.70	ステンレスチェーンφ2.5mm 両端に0.22kgの質量
チェーン	132	60	3.42	2.972	ステンレスチェーンφ2.5mm

- Orca.のガイワイヤの性能は弾性模型に従う

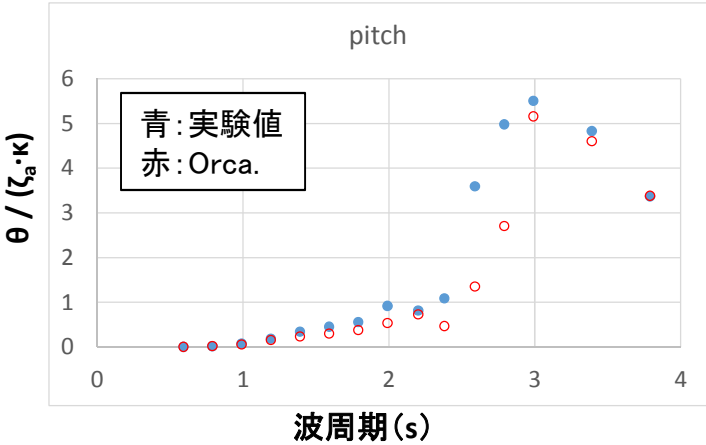
	実機	模型
Guy Wire	NEW-PWS187 （東京製綱）	実機換算でヤング率206000MPa, 断面積17671mm^{2}に相当

- Orca.によるシミュレーション結果と模型実験との比較を実施（次頁）

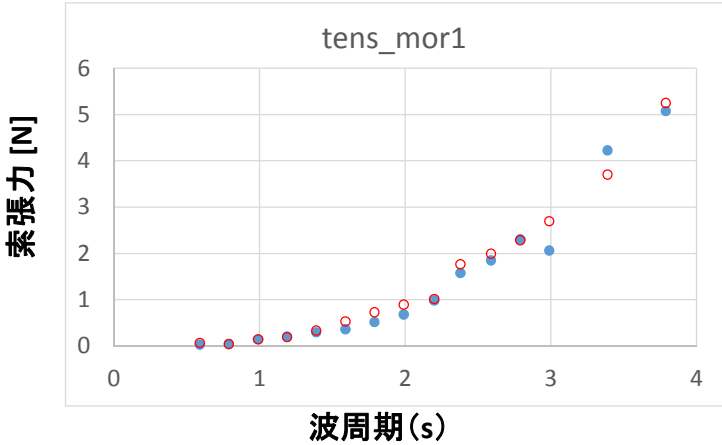
→Orcaflexを用いたシミュレーションの有用性を確認した.



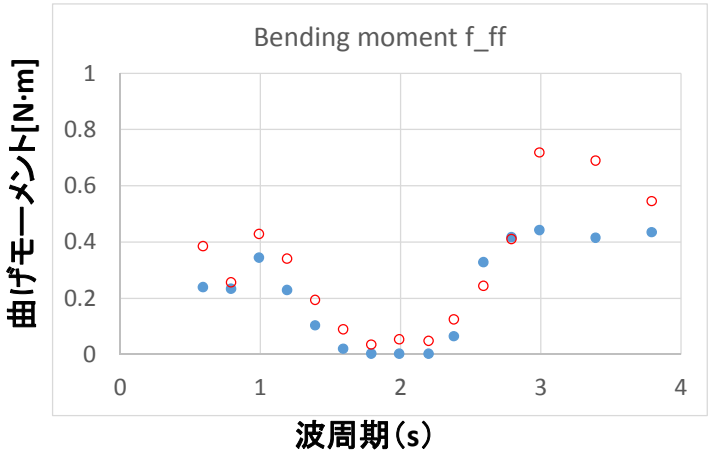
5.4 シミュレーション結果



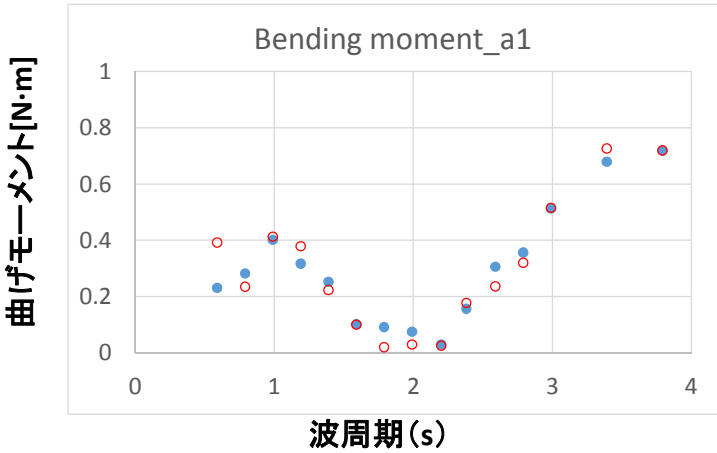
無次元ピッチ傾斜振幅応答



波上側係留索張力振幅応答



タワー基部曲げモーメント応答（Nm）



波上側ロワーハル前方曲げモーメント応答（Nm）

5.5 一点係留の回頭特性

1. 回頭試験方法

- ファンを起動して，一定時間後に風向を瞬間的に変化させる.
- モーションキャプチャー装置により浮体式洋上風車の角度 ϕをリアルタイムで読み込み，それに対応した接線方向の風荷重を模擬した力を浮体上部に取り付けたファンで発生させる.

2. 試験条件

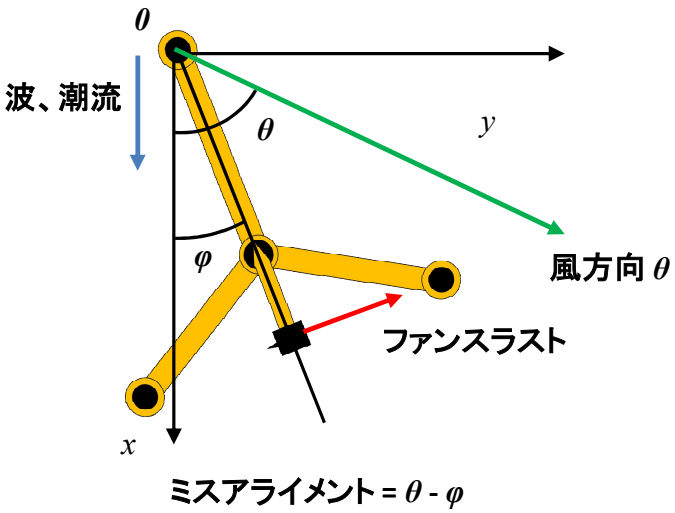
- 風条件：11m/s（定格風速），25m/s（カットアウト風速），41.9m/s（暴風時）
- 風向変化量：30，60，90deg
- 風向変化継続時間：1.0s（実機約8s相当）

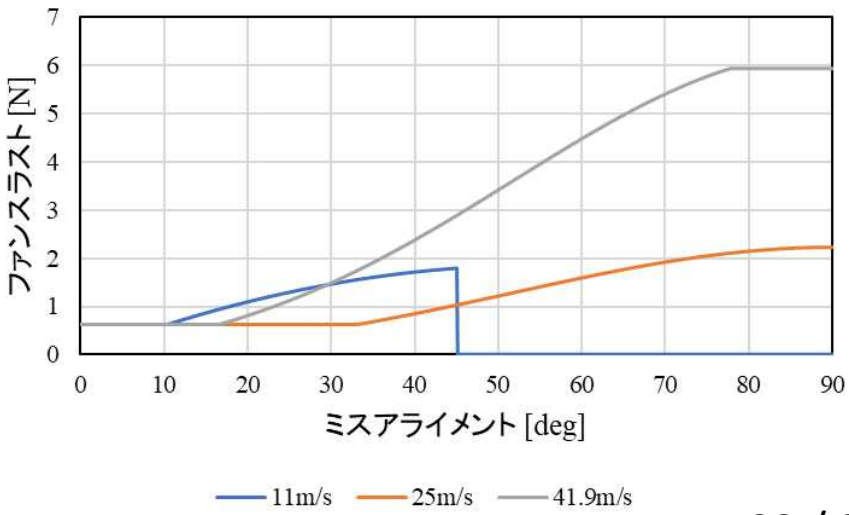
1) 波浪中試験（波高 60mm）

- 波周期: 1.0，1.4，1.8，2.6s

2) 潮流中試験

- 流速：0.049，0.084m/s
  （実機0.74，1.26 knot相当）



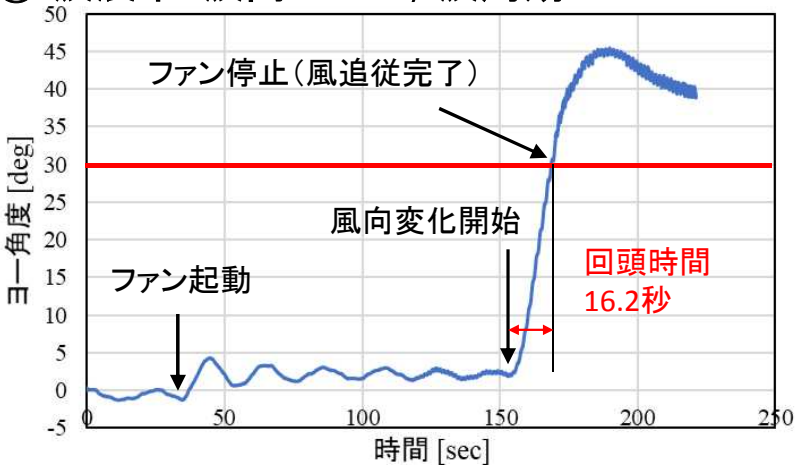


5.6 一点係留の回頭特性

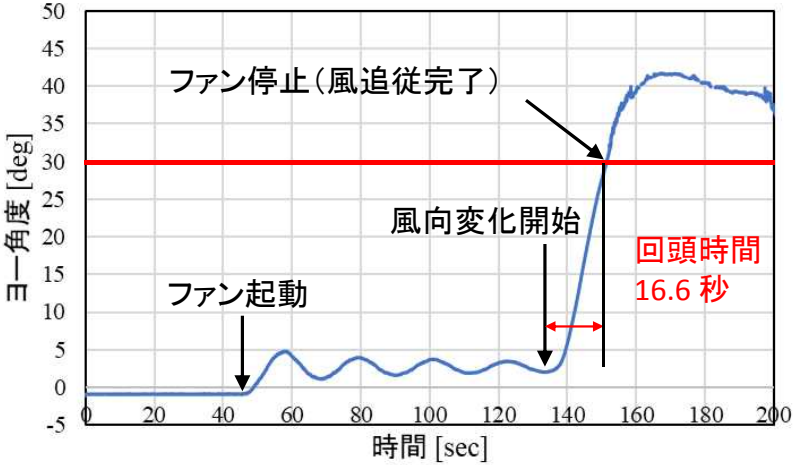
- 一点係留の回頭特性について明らかにした.
- 静水中及び波浪中において，一点係留は機能し，風に追従することが確認された.
- 潮流方向と風向に角度差がある場合，浮体にミスアラインメントが生じることが確認された.

- 定格風速（11m/s），風向変化30degの試験例

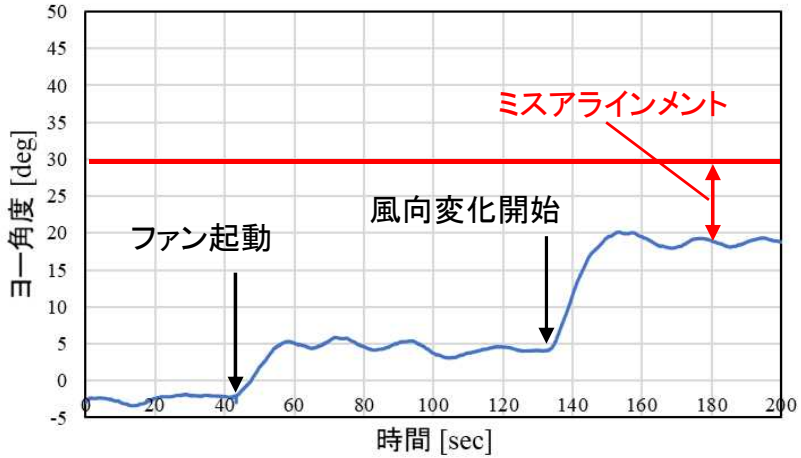
② 波浪中：波高 60mm，波周期 1.4s



① 静水中試験



③ 潮流中試験：流速 0.049m/s



5.7 船舶安全法適合性確認の概要

	審査項目（申請案）	NKガイドライン
①	設置海域の外部条件に基づく設計条件の検討	2.2, 2.3, 3.2
②	設置海域の風況を考慮した風車クラスの検討	(IEC61400-1-6.2)
③	復原性や喫水線等に関し，浮体施設の主要寸法，仕様が適切に設定されていること	7.1.1～7.1.3, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5
④	風車/浮体連成解析に用いるツールの精度確認が水槽試験結果との比較等により適切になされていること	3.1, 3.1.1
⑤	設置海域の環境条件による連成解析から得られる運動に対し，風車，タワー，浮体，係留の主要部分が強度等を考慮し適切に設計されていること	2.2, 2.3, 3.1, 3.1.1～3.1.7（但し3.1.6除く），6.2～6.5, 5.6
⑥	建造に係る主要な材料・機器・部品の調達先を明示し，その品質管理体制が適切であること	1.3

5.8 経済性・事業性評価の概要

実施項目	2019/06	2019/07	2019/08	2019/09
比較対象（既存浮体式風車）の検討・データ収集・選定				
モデルベースによる現状のコスト試算				
比較対象とのコスト比較				
コスト比較の検証と課題の把握				
課題に向けた対策				
長期的な経済性の検証				

6. まとめ

1. 研究・開発の概要
2. 事前協議
3. 候補海域調査
4. 基本設計
5. システムの評価
6. まとめ

6.1 成果まとめ（8月中旬時点）

1. 成果概要

- 北九州市響灘で設置海域を決定し，地元の了解・合意を得た.
- 候補海域の調査を行い，海底の地形や地質の条件を確認した.
- 同サイトにおける設計条件を定義し，同条件で概略成立する浮体（タレットによる一点係留，ガイワイヤ支持セミサブ浮体）を設計した（詳細検討継続）.
- 弾性相似モデルの水槽試験により，浮体の運動・変形に関連する基本特性を取得した.

2. 今後の予定

- 低コスト化の実現可能性を評価する.
- ステージゲート審査を通過した場合，実証研究を実施する.