

## 契約件名 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)

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

問い合わせ先: 吉田 茂雄  
国立大学法人佐賀大学(九州大学兼任)  
E-mail: yoshidas@ioes.saga-u.ac.jp  
TEL: 0952-28-8807

# 事業概要

## 1. 期間

- 開始 : 2019年01月
- 終了(予定) : 2023年03月

## 2. 最終目標

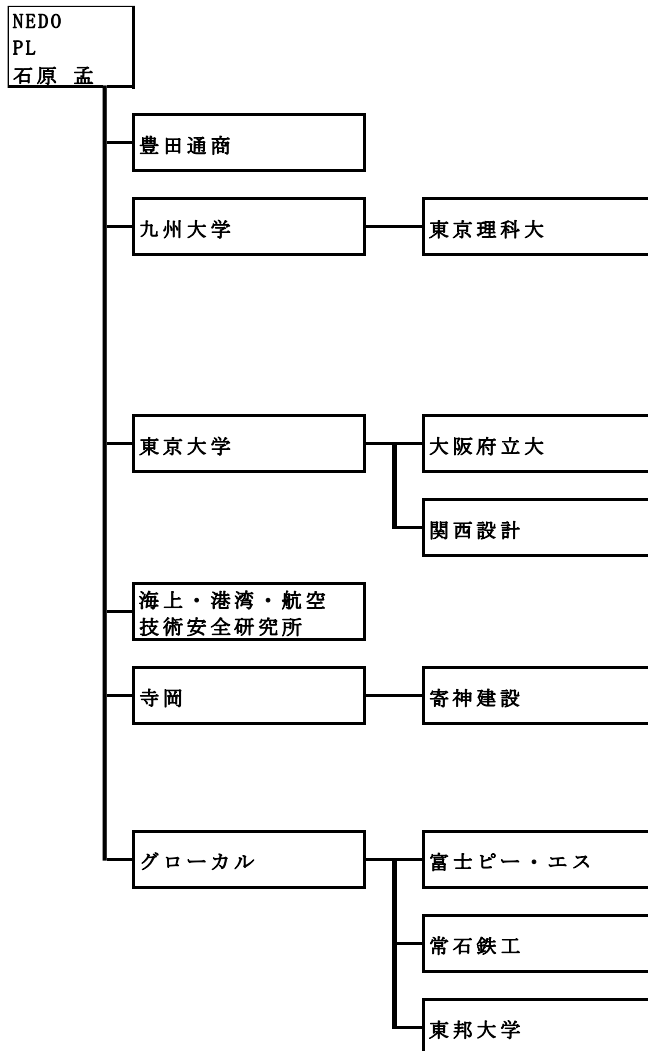
2030年に発電コスト20円/kWh以下を達成できる浮体式洋上風力発電システムの技術を確立する.

## 3. 成果・進捗状況

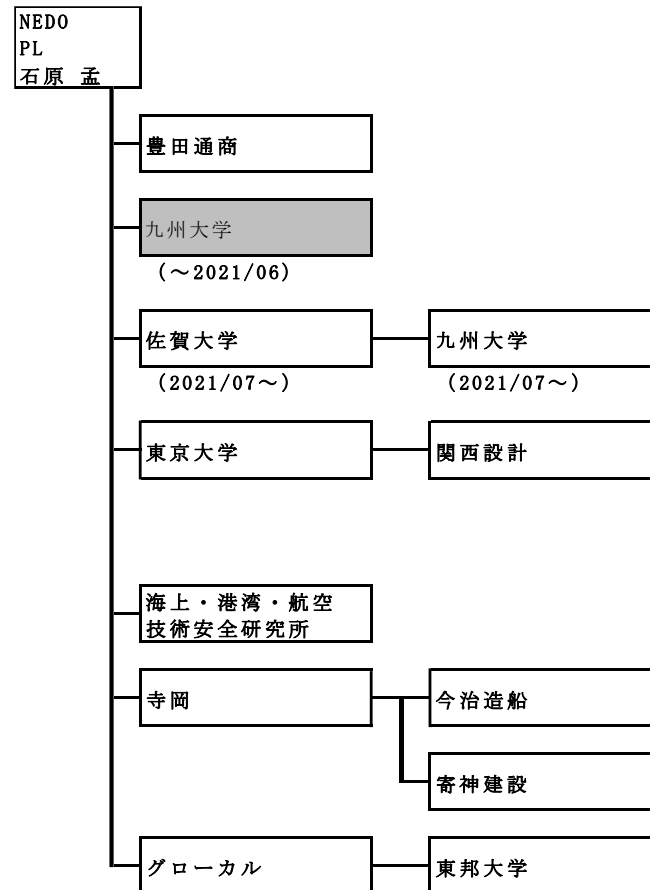
- HAZID会議によりリスクの洗い出しを行い, 設計へ反映し, 候補地点(北九州市響灘)の条件で, 浮体, タレット, ガイワイヤほかの構造が十分な強度を持つことを確認した. 以上により, 本システムの設計・検討に関して事前承認を得た.
- 他の浮体形式との定性および定量比較により, 本コンセプトの経済性の優位性を確認した.

# 体制

## FS(～2020/12)



## 実証(2021/01～)



# 委託先ごとの実施内容と報告内容

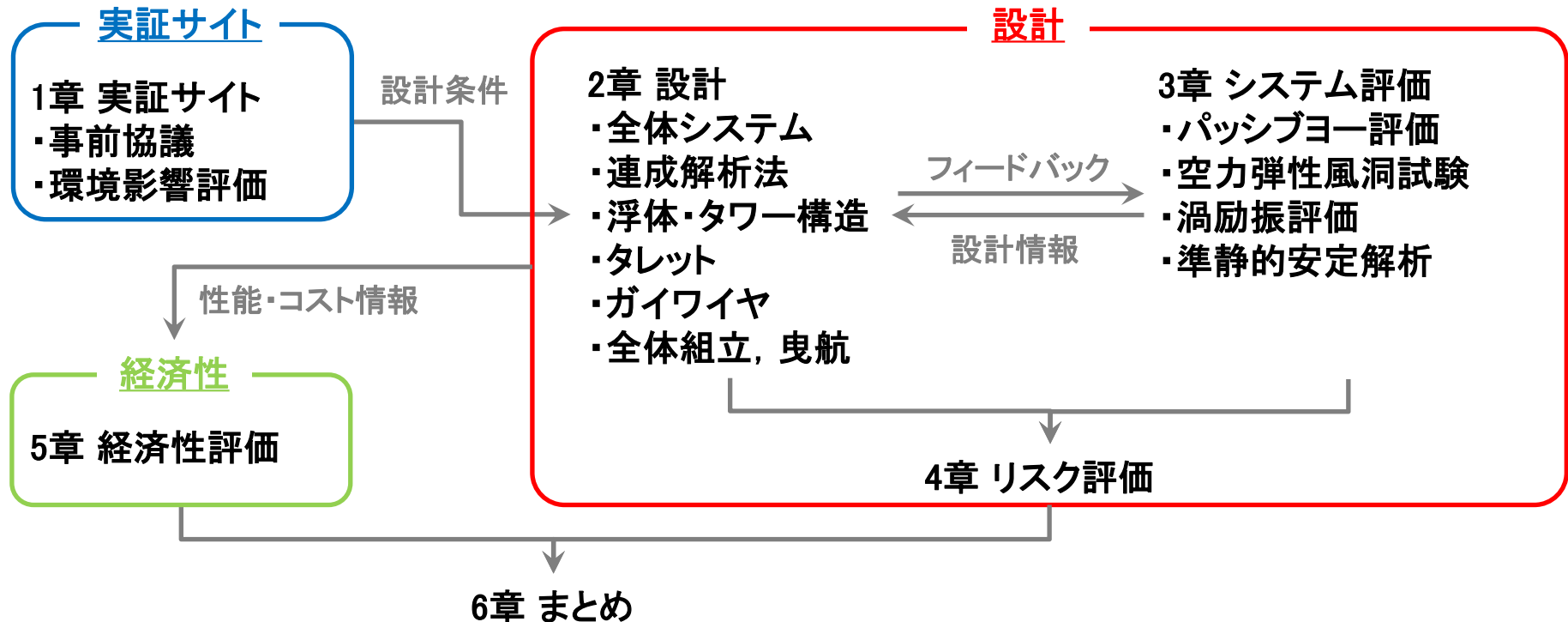
委託先	2020年度	2021年度(～06月)
豊田通商	環境影響評価, 経済性・事業性評価.	環境影響評価, 経済性・事業性評価.
九州大学 (佐賀大学)	システムの評価: 全体技術検証, 空力弾性振動評価.	システムの評価: 全体技術検証.
東京大学	—	システムの評価: 水槽試験計画・準備.
海上・港湾・航空 技術研究所	計測システム開発	計測システム開発 一点係留安全ガイドライン追加検討WG
寺岡	全体組立, 曳航方法検討. (寄神建設)設置施工方法検討.	全体組立, 曳航. (寄神建設)設置施工方法検討.
グローバル	事前協議 浮体式洋上風力発電システム基本設計: 連成解析, 仕様決定, 風車設計, 浮体設計, タレット・係留系設計, リスク評価, 船舶安全法適合性の確認, 原価積算. (常石鉄工)タレット製造方法検討, 組立方法及び施工方法検討. (東邦大学)国民との対話	事前協議 浮体式洋上風力発電システム基本設計: 連成解析, 仕様決定, 風車設計, 浮体設計, タレット・係留系設計, リスク評価, 船舶安全法適合性の確認, 原価積算. (常石鉄工)タレット製造方法検討, 組立方法及び施工方法検討. (東邦大学)国民との対話

青文字: 2020年度報告会報告内容.

赤文字: 2021年度報告会報告内容.

# 本報告の流れ

FSから実証研究へ移行するための以下のフローで調査・研究を実施した。



# 1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ

# 1.1 事業概要, 実証海域

## 1. 事前協議

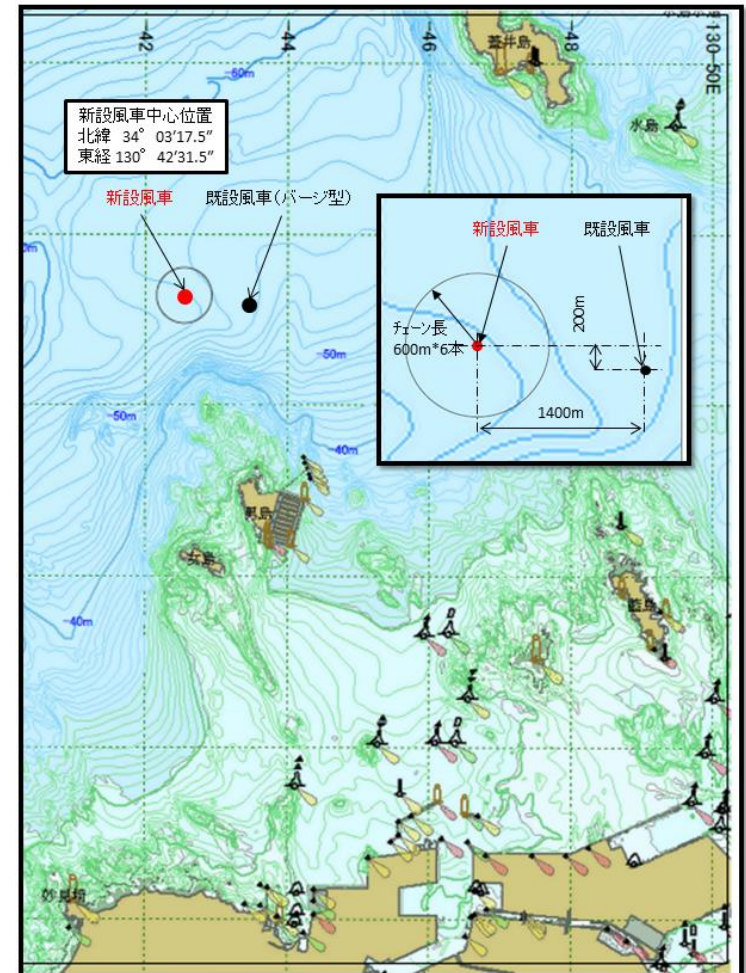
- 航行安全検討調査専門委員会(学識経験者, 海事関係者及び関係官公庁職員で構成)を設置し, 実証研究実施海域を決定するとともに, 同海域での実証研究実施の了解を取得した.
- 風車の設置ポイントを選定し, 福岡県に対して海面占有許可の申請を行った.

## 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.
- 環境影響評価の事前調査(第一回目)として, 水質・底質・鳥類・海生哺乳類・魚類および水中音の調査を実施した(2021/07/01~13).

## 実証海域

- 北九州市沖合約13km



## 2. 基本設計

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ



## 2.1 システムの概要・特徴と課題

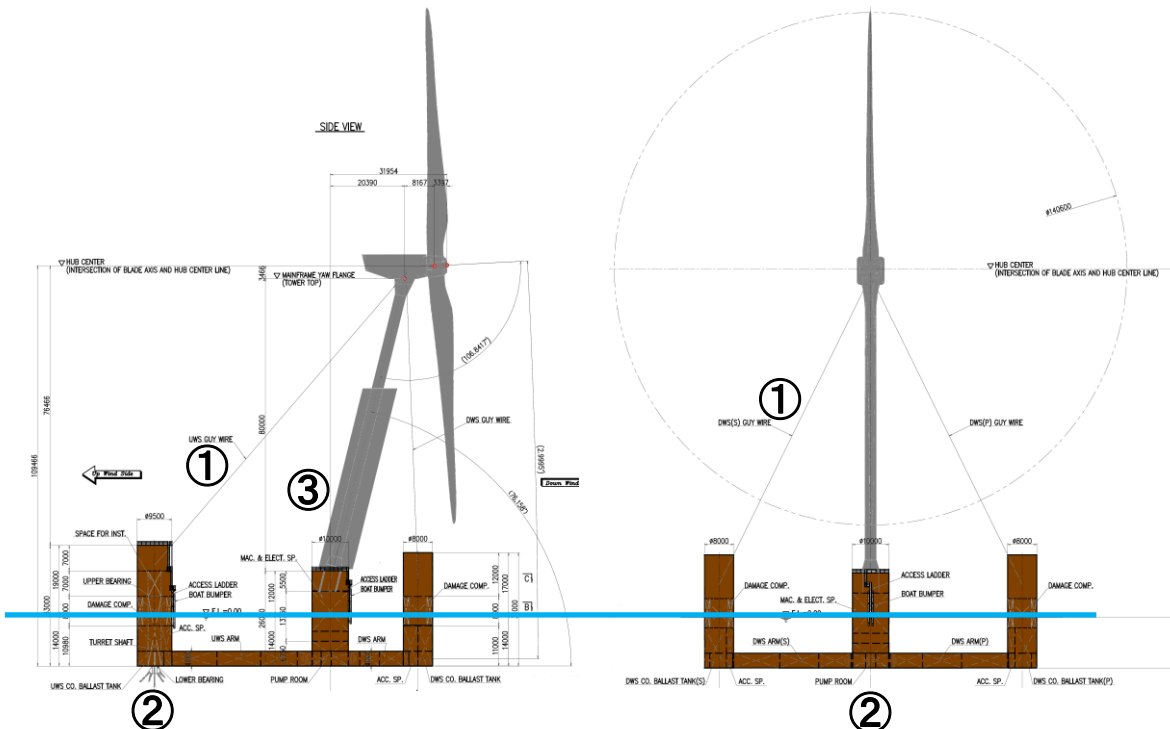
## 1. システムの特徴

- ①ワイヤ:タワーの補強・補剛  
②タレット・一点係留:パッシブヨー制御  
③翼型・傾斜タワー:風向追従性向上

## 2. システムの特徴に対する課題

- 課題1)発電時の風向追従性(←②③)→FY2019済  
課題2)タレットの設計・強度(←②)→本資料2.4  
課題3)ガイワイヤの強度・耐久性(←①)→FY2019済  
課題4)浮体・タワー構造空力弾性振動(←①③)

➔本資料3.2-3.8



## 風車概要

- ・風車機種:2B6
- ・メーカー:2B Energy
- ・ブレード枚数:2
- ・ロータ位置:ダウンウィンド
- ・ロータ直径:140m
- ・定格出力:6MW

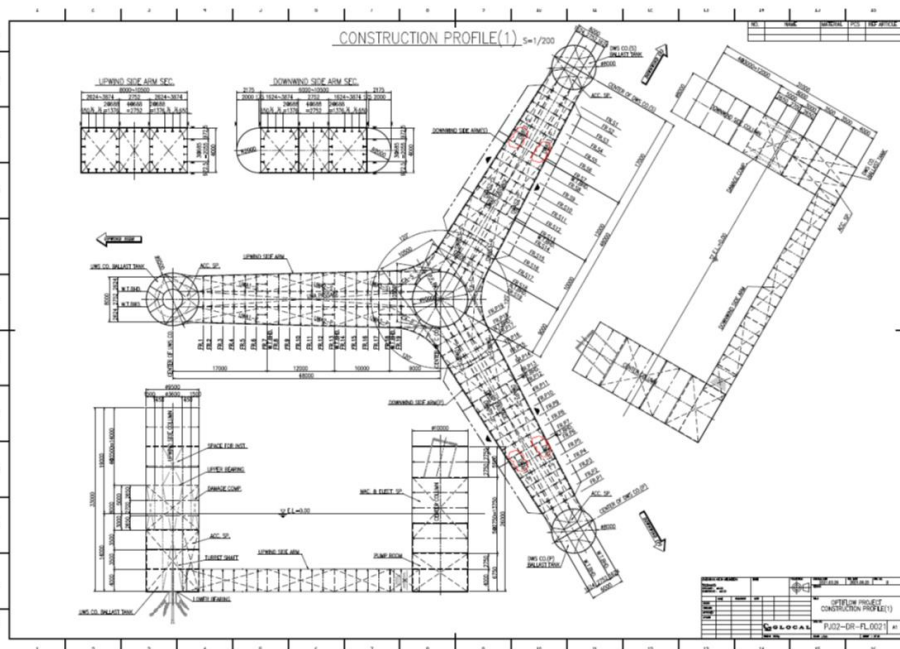
## 浮体概要

- ・形式:一点係留・セミサブ型
- ・全長:81m←前年度90m
- ・全幅:91m←前年度93m

## 2.2 浮体・タワー構造設計概要

### 1. 概要

- 浮体の建造、組み立ての簡素化のため以下の構造変更を行い、連成解析、係留検討、構造解析を行いその成立を確認した。



浮体基本構造図

### 2. 浮体構造の主な変更点

- 風上アームを風下アームと同じ長さとし、全長を短縮することによって建造可能なヤードの選択肢を増やした。これによる、風向追従性に対する影響は僅少であることを連成解析で確認した。
- 各コーナーコラムを単純な円柱形状とし、下端部はアーム部底部と同一レベルとして構造を簡素化した。風上コラムの直径は、タレットの設計変更を考慮して設定した。

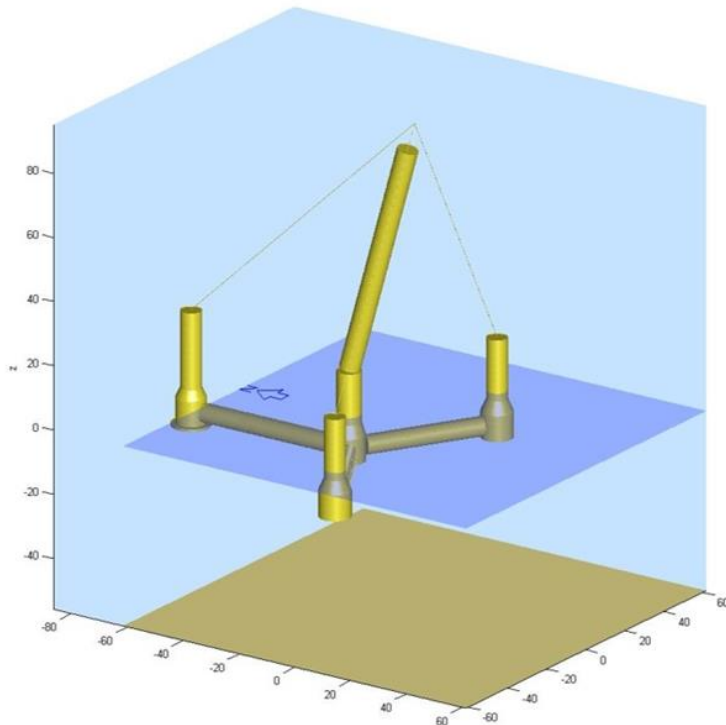
### 3. 構造設計の主な成果と今後の対応

- 代表的な設計荷重ケース(DLC)の連成解析を行い、その結果に基づき一般部の強度評価、疲労評価を実施して部材寸法を決定し基本構造図を作成した。
- 必要な全てのDLCに関する連成解析を行い、それに基づき強度評価、疲労評価を行う。また、コラム・アーム接合部などの隅角部に対してFEM解析を用いた局部構造の精査を行う。

## 2.3 連成解析法(1/2): Bladed

### 1. 概要

- 本システムの設計に必要な応答・荷重の計算には、商用の連成解析ソフトであるBladed (DNV GL)を改修して使用する。
- 同解析法・モデルを弾性相似1/60模型の水槽試験結果により検証した。

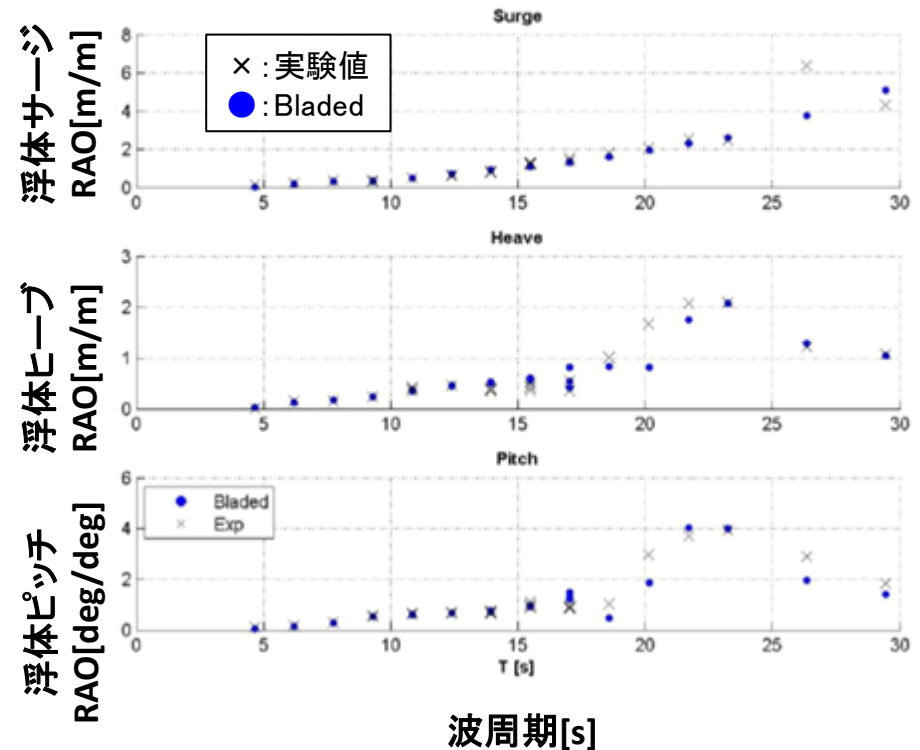


モデル概要

### 2. 検証結果

- 規則波応答(RAO)のうち、サージは概ね一致しているが、ヒープとピッチは周期が20sを超えると応答が過小評価されている。

→入力パラメータを調整し、実計算に対応する。



波周期[s]  
浮体規則波応答RAO(実機スケール)

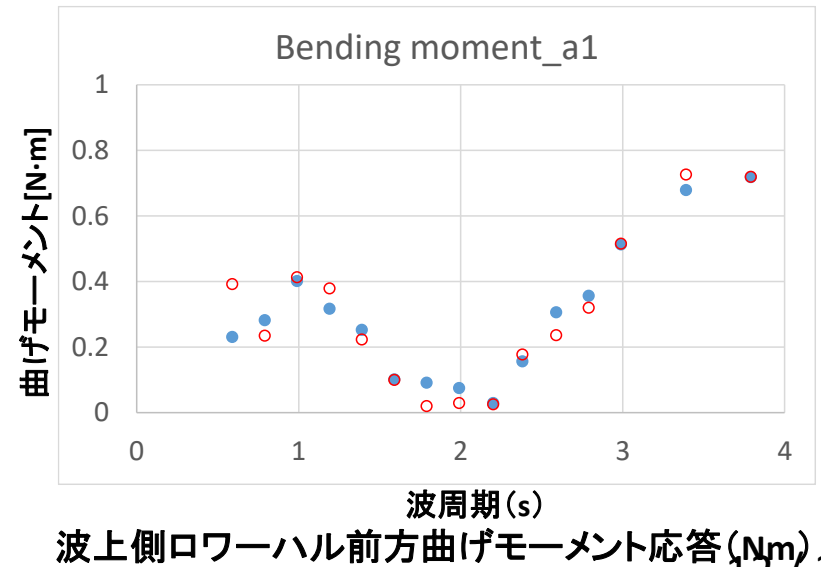
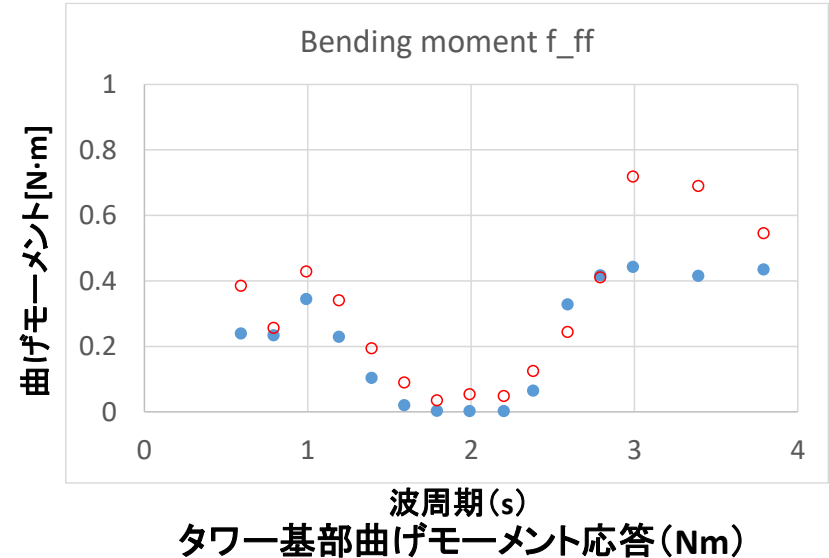
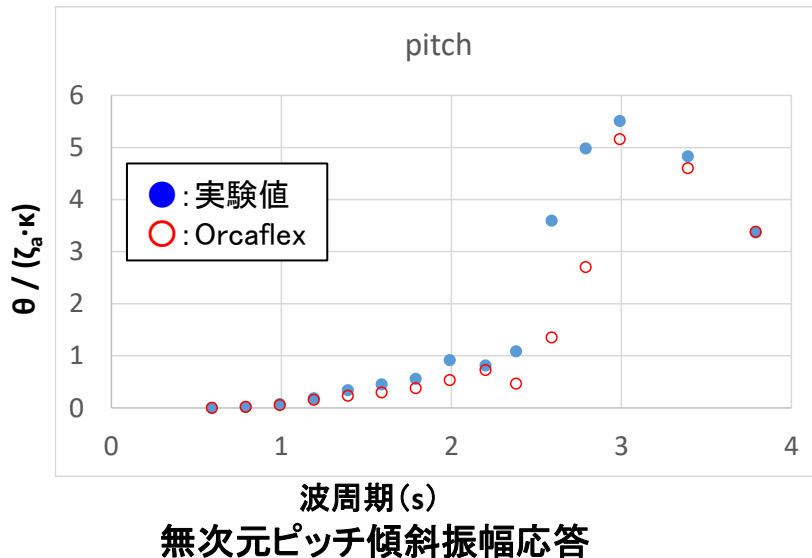
## 2.4 連成解析法(2/2): Orcaflex

### 1. 概要

- 係留系の動的な応答など、設計の一部に商業ソフトOrcaflexを使用する。
- 同ソフトとモデルの妥当性を1/60モデル水槽試験結果で検証した。

### 2. 検証結果

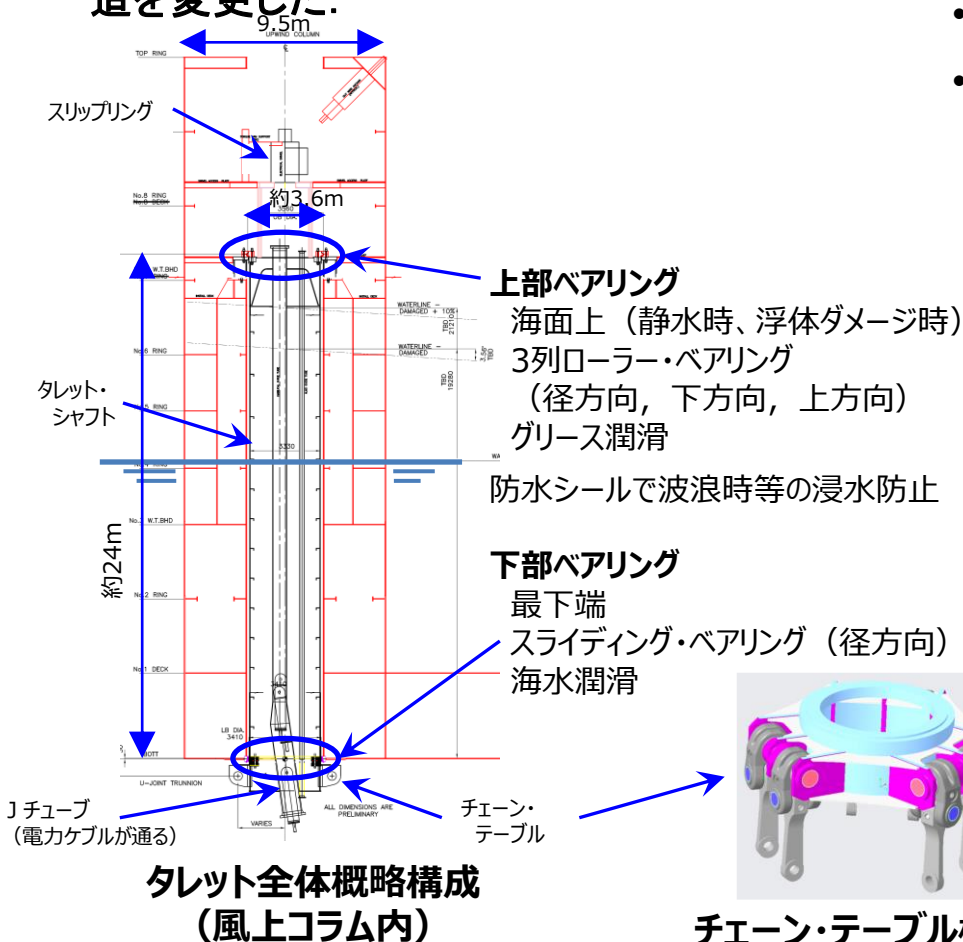
- 周期約2.5s(実機19s相当)以下で良好に一致することを確認した。



## 2.5 タレット設計

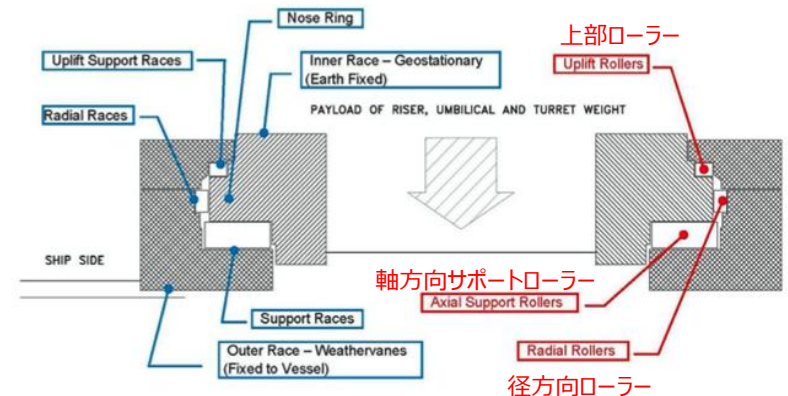
### 1. 概要

- FPSO等での実績, 信頼性, 摩擦力が低く O&Mの容易性を勘案して, タレットの形状・構造を変更した.



### 2. 主な変更点

- 上部ベアリングを実績ある3列ローラー・ベアリングに変更.
- 上部ベアリングの位置を水面上に移動.
- チェーンテーブルサイズ拡大.

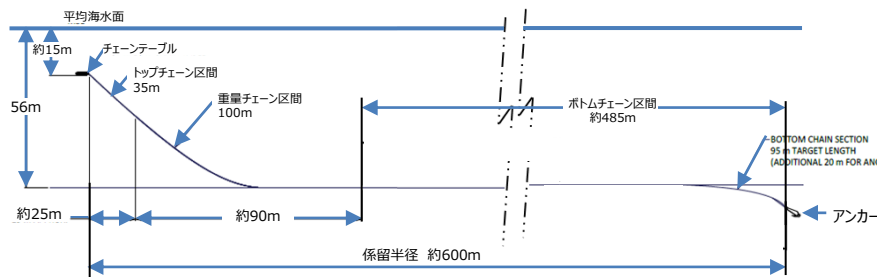


上部ベアリング用 3列ローラー・ベアリングの構造断面（例）

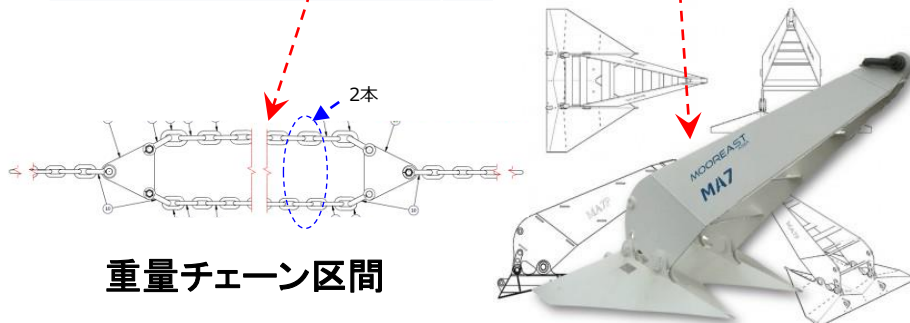
## 2.6 係留系設計

### 1. 概要

右記を考慮して係留系を設計した.

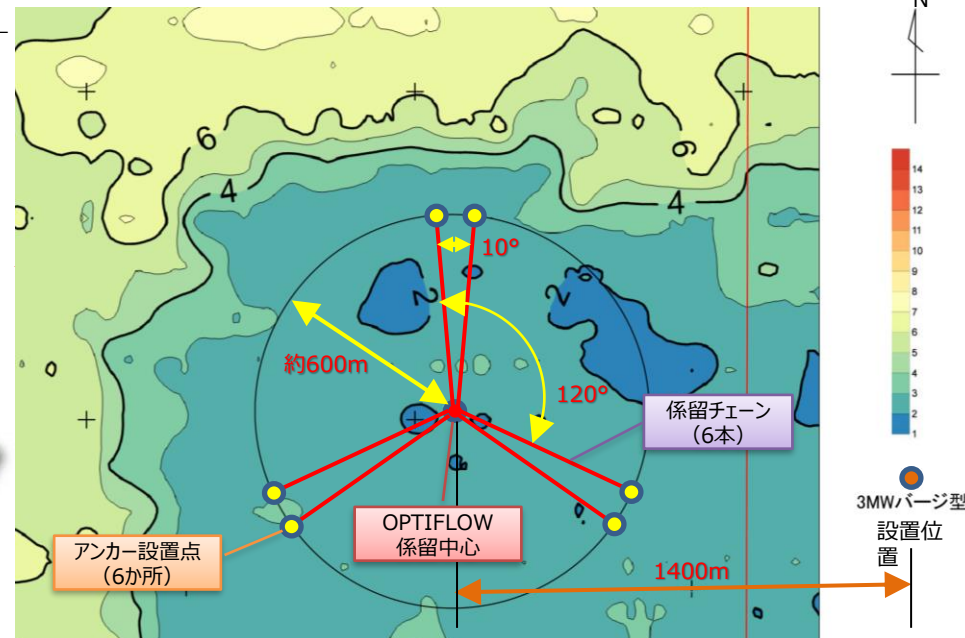


諸元		
レイアウト	係留索レイアウト	10°間隔2本バンドル × 3方向 (120°間隔)
	係留半径	約600m
チェーン構成	トップチェーン	132mmスタッドレス R4(or R4S) 35m
	重量チェーン(並行チェーン)	132mmスタッドレス R4(or R4S) × 2本 100m
	ボトムチェーン	132mmスタッドレス R4(or R4S) 約485m
アンカー	50t 高把駐カドラッグアンカー	



重量チェーン区間

- ダイナミックケーブルと係留チェーンの接触回避.
- 係留チェーンにかかる最大張力の低減.
- 重量チェーン区間でチェーン同士の接触回避.
- 国内調達可能な132mmスタッドレスR4(or R4S)採用.



海底堆積層 等層厚線図

高把駐カドラッグアンカー(例) 出典: 海洋エンジニアリングによる海底地形調査結果による図面



## 2.7 全体組立

### 1. 概要

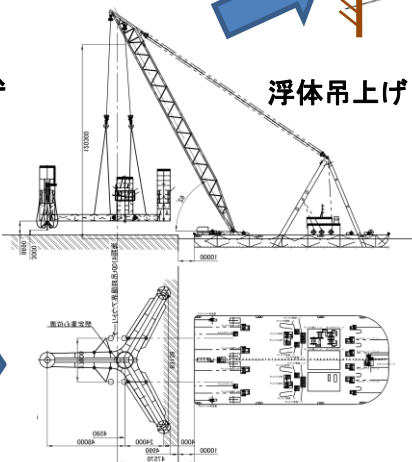
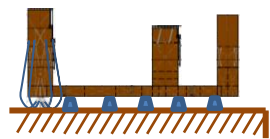
浮体・全体システムの組立方法を検討した。

浮体本体製造



浮体各部ブロック製造

浮体本体組立、タレット組込  
トップチェーン取付



浮体吊上げ

回航

浮体浜出し・係留

浮体艗装、大型電気設備設置

回航

全体組立



電気設備、計測設備設置  
全体組立、浮体艗装

タワー・ガイワイヤ・RNA搭載

## 3. システム評価

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ



# 3.1 浮体・タワー構造空力弾性振動評価概要

## 1. 概要

本システムの特徴である翼型タワーでは空力弾性的な不安定振動や渦励振を発生しやすい。これらの影響を確認するため、以下の(1)～(3)検討を行った。

## 2. 結果概要

以下の検討により、本浮体・タワー構造の空力弾性振動に対する安全性を確認した(前年度報告済)。

### (1) 弾性相似モデル風洞試験(本資料3.2～3.3)

- 1/40空力弾性モデルによる風洞試験を行い、ヨー角90～150degにおいて、比較的大きな渦励振が発生することを確認した。これに関しては、(2)で追加検討した。
- 傾斜の影響や、ピッチ故障などの条件をブレードピッチ角の設定により設定したが、いずれも安全性には影響がない。
- いずれの条件においても、ワイヤ張力は安全な条件に保たれる。

### (2) タワー渦励振の影響(本資料3.5～3.6)

- 風洞試験で確認されたヨー角90～150degにおける渦励振に対してCFDとFEMにより強度・疲労を検討した。
- 設計極値風速条件でこの渦励振が発生した場合でも、強度に対する荷重は21%、疲労損傷度は1.4%と十分小さい。

### (3) 準静的安定解析(本資料3.7～3.8)

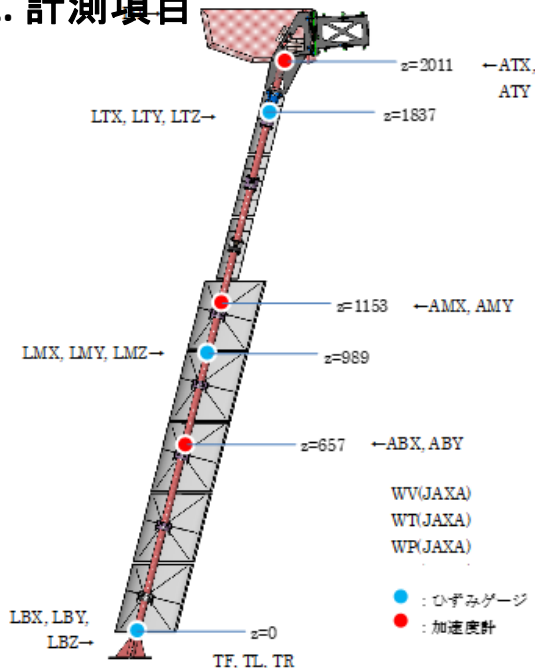
- 2次元翼型の空力特性とFEMによるモード解析により、本システムの準静的な安定解析を実施した。
- 1～2次モードについて、いずれも十分な安定性が確保される。
- 安定性に対して、ブレードの揚力傾斜による減衰の効果が大きく、通常の2次元翼型の5%程度のわずかな揚力傾斜が得られれば、安定性を確保できる。

## 3.2 弾性相似モデル風洞試験(1/3): 試験概要

### 1. 概要

本システムの特徴であるワイヤで補強・補剛した翼型断面を持つ傾斜タワーは複雑な構造を持ち、空力弾性不安定振動と渦励振が懸念される。これらの影響を確認するため、1/40弾性相似モデルによる風洞試験を実施した(前年度報告済)。

### 2. 計測項目



(a)歪みゲージ, 加速度センサの位置

### 3. 試験条件

- 風洞: JAXA
- 風速: 8m/s (実機51.2m/s相当), 1~12m/s
- ヨー角: 0~180deg
- ブレード: なし/あり(水平保持)
- 浮体傾斜の影響: ブレードピッチ角で模擬
- ピッチ故障: ブレードピッチ角で設定



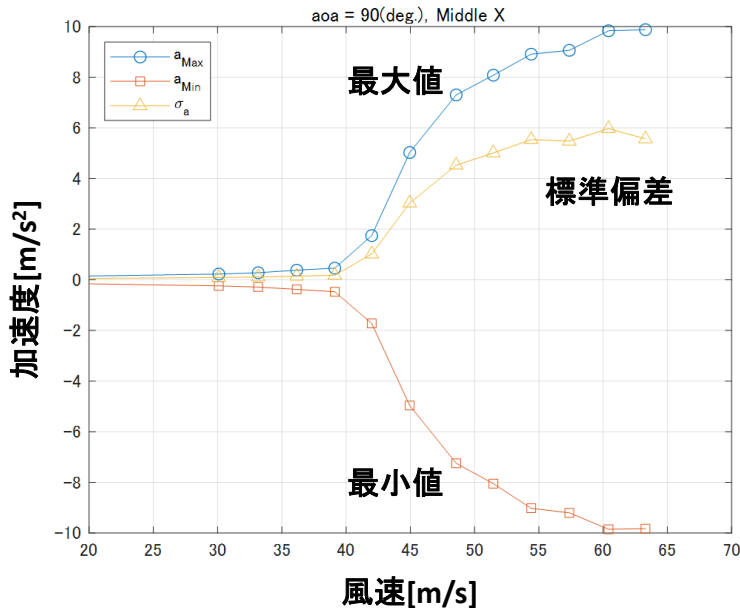
(b)模型のJAXA風洞への設置状況  
(左)ブレードなし  
(上)ブレード水平保持

## 3.3 弾性相似モデル風洞試験(2/3): 加速度

### 4. 試験結果

#### (1) 加速度

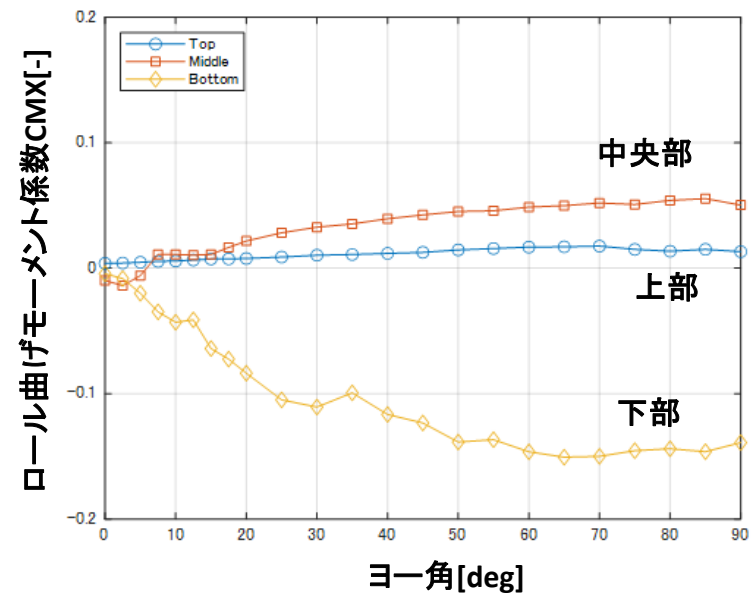
- 風直交方向(90degにおけるX方向)に大きな振動が発生する.
- 頂部と比較して中央部の振動が大きく, 2次モードが顕著.



風速に対する加速度:  
中央X方向, ヨー角90deg

#### (2) タワー荷重

- 風直交方向(90degにおけるX方向)に大きな振動が発生する.
- 頂部と比較して中央部の振動が大きく, 2次モードが顕著.

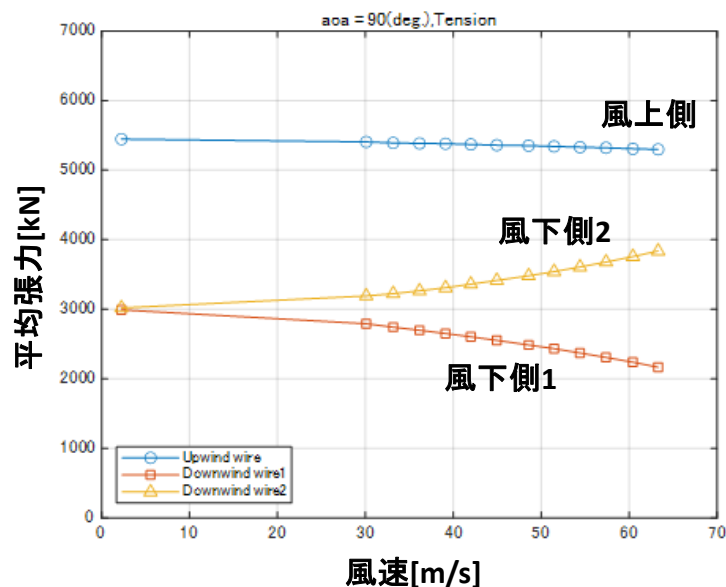


ヨー角に対するロール方向曲げ  
モーメント係数 CMX

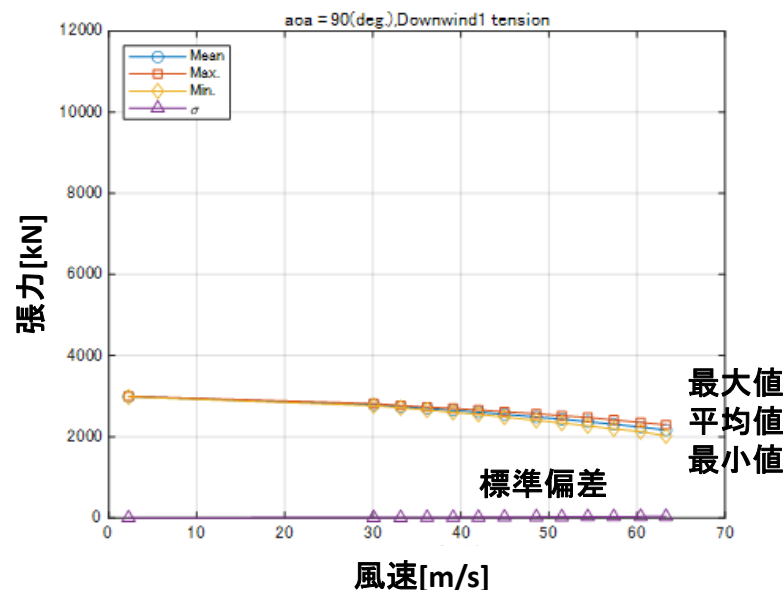
## 3.4 弾性相似モデル風洞試験(3/3): ガイワイヤ張力

### (4) ガイワイヤ張力

- ・ ヨー角90degにおける風速に対するガイワイヤ張力を(a)に示す. 風速の上昇に伴い風下側の左右のガイワイヤの張力が増減しているが, いずれも十分な張力が維持されている.
- ・ それらのうち, 張力が最も小さい風下側1のガイワイヤ張力の風速毎の統計値を(b)に示す. いずれも変動は非常に小さい.



(a) 風速に対するガイワイヤ平均張力:  
ヨー角90deg



(b) 風速に対するガイワイヤ・風下側1張力:  
ヨー角90deg

## 3.5 タワー渦励振(1/2): 概要

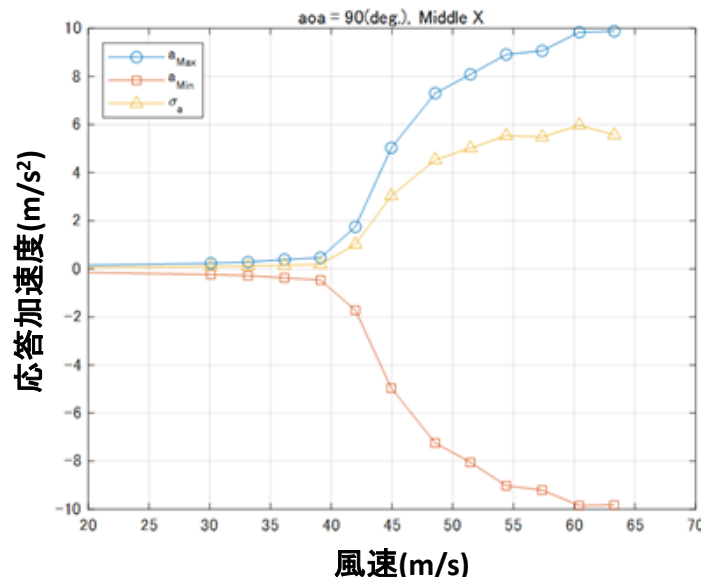
### 1. 概要

本システムの特徴の一つである翼型タワーでは、通常の円筒タワーには見られない強い渦励振が発生する。また、ワイヤがタワーの振動特性に影響する。

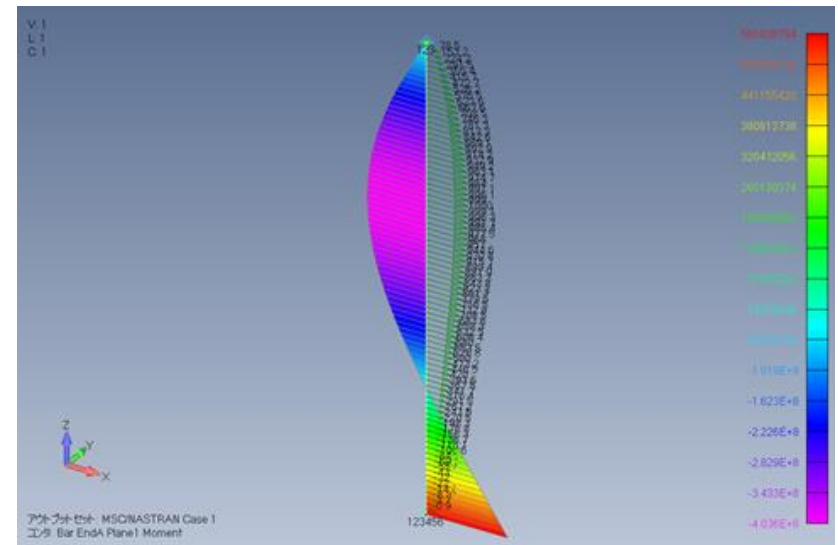
ここでは、弾性モデル風洞試験の結果、ならびに、関連のFEMならびに二次元CFD渦により、タワーの強度・疲労を検討した(前年度報告済)。

### 2. 解析方法

- 1) FEMにより曲げモーメントの分布を求める。
- 2) 二次元CFDによる揚力変化と弾性モデル風洞試験によるタワー加速度から、全迎角域の加速度を推定する。
- 3) 以上から、渦励振によりタワー基部に発生する最大曲げモーメントを計算する。
- 4) さらにこれにより応力を計算し、強度・疲労を評価する(材料:S355鋼材, 突合せ溶接)。



(a)弾性モデル風洞試験による風速に対するX方向加速度(実機スケール):タワー中央部

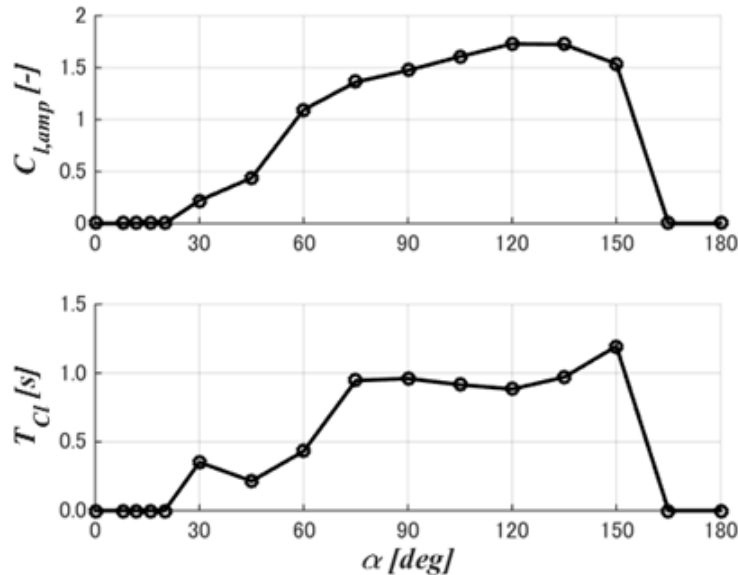


(b)1kN/mに対する曲げモーメントFEM結果  
(最大:562kNm@基部)

## 3.6 タワー渦励振(2/2):タワー二次元CFD

### 3. タワー二次元CFD

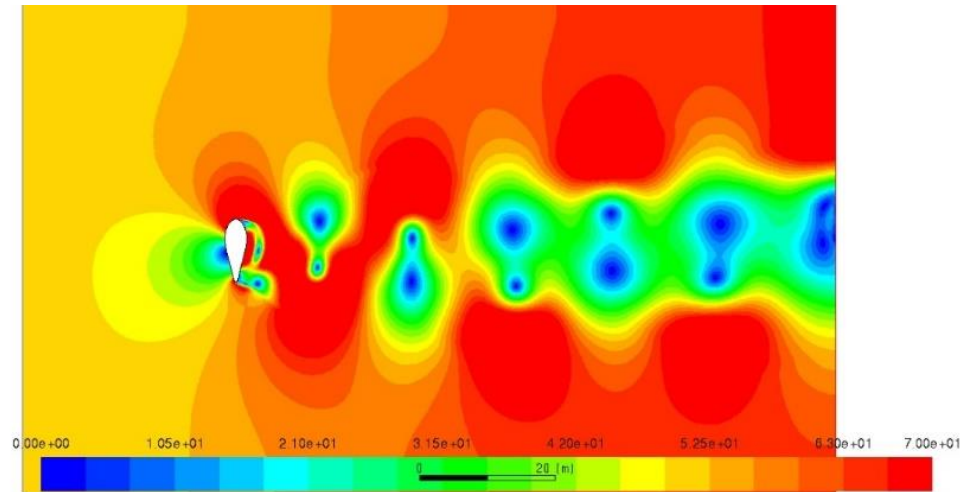
- ・タワー翼型断面に関する二次元CFDを実施した結果、90～150degで大きな励振が見られた。



(a)タワー翼型断面の二次元CFD結果:  
迎角に対する揚力振幅と周期

### 4. 強度・疲労評価

- ・エフォート(荷重/強度):21%(十分小)
- ・疲労ダメージ(10min継続時):1.4%(十分小)



(b)風速分布CFD結果:迎角90deg

## 3.7 準静的安定解析(1/2):モデル概要

### 1. 概要

本システムの特徴である翼型タワーでは、空力弾性的な不安定(フラッタ)が発生しやすい。また、ワイヤやブレードがその振動特性や加振力に影響する。これを確認するため、FEMによるモード解析と二次元CFDを用いた準静的な安定解析を実施した(前年度報告済)。

### 2. モデル概要

OPTIFLOW空力弾性風洞試験モデル

#### (1) 構造特性

- 固有振動数, 構造減衰比: 計測値(a)
- モードシェイプ: FEM(b)

#### (2) タワー翼型荷重係数(c)

#### (3) タワー円筒部荷重係数

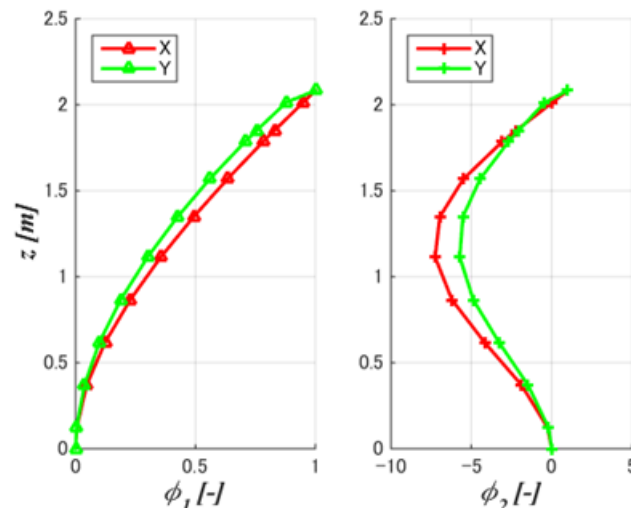
- 揚力傾斜:  $Cl\alpha C=0$
- 抗力係数:  $CdC=0.8$

#### (4) ブレード荷重係数

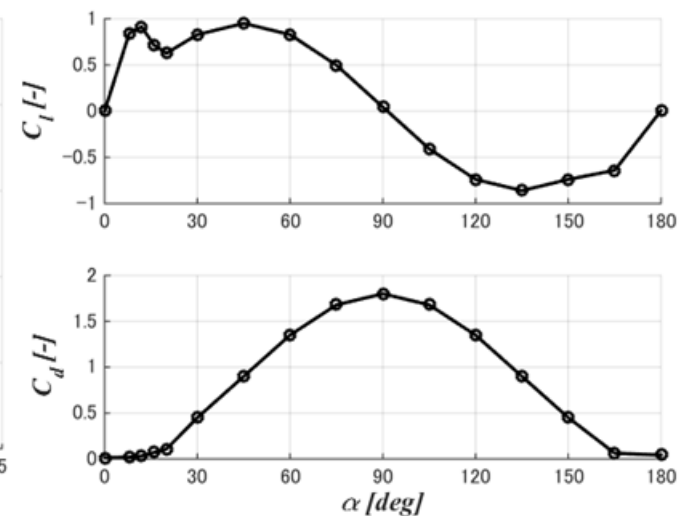
- 揚力傾斜:  $Cl\alpha B=0.11/\text{deg}$
- 抗力係数:  $CdB=0.0$ (安全側)

(a)固有振動数と構造減衰比(計測値)

	X-1次	Y-1次	X-2次	Y-2次	備考
固有振動数	5.12	4.69	11.72	11.42	20~90degの平均
減衰比	0.95	0.83	0.12	0.16	20~90degの最小値



(b)モードシェイプ: 高さz方向の  
(左)1次/(右)2次, x方向/y方向分布



(c)タワー翼型部: 迎角 $\alpha$ に  
対する揚力係数 $Cl$ /抗力係数 $Cd$



## 3.8 準静的安定解析(2/2): 解析結果

### 3. 解析結果

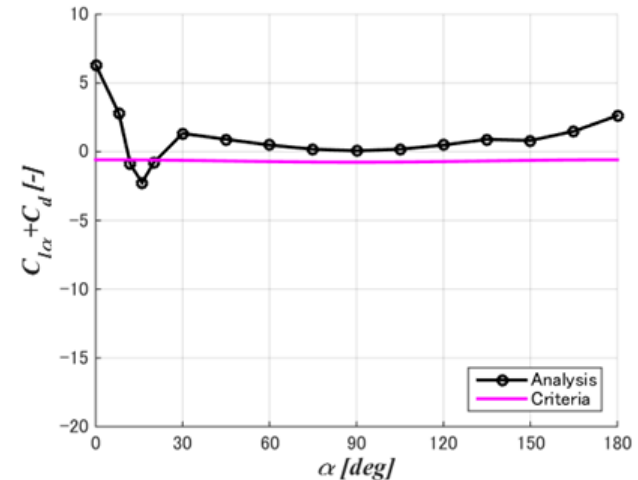
(1) 基本特性 ( $C_{l\alpha}$ : 揚力傾斜,  $C_d$ : 抗力係数,  $\alpha$ : ヨー角)

・ 1次モード(a), 2次モード(b)ともに十分安定 (Analysis > Criteria).

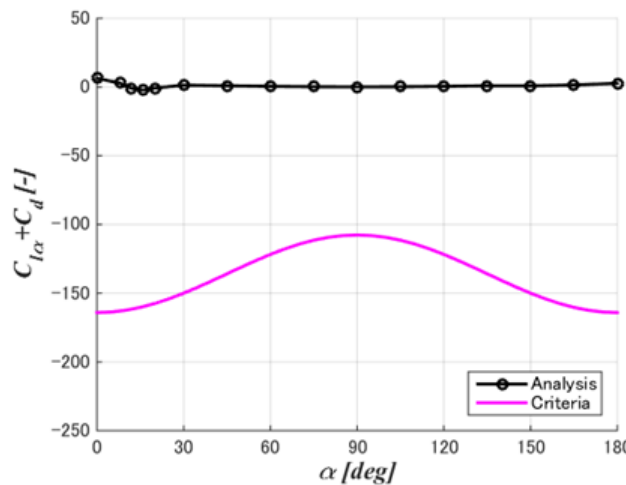
(2) ブレードの影響

・ ブレードなしの2次モード(c)では, 揚力傾斜が負になる15deg付近で不安定になる.

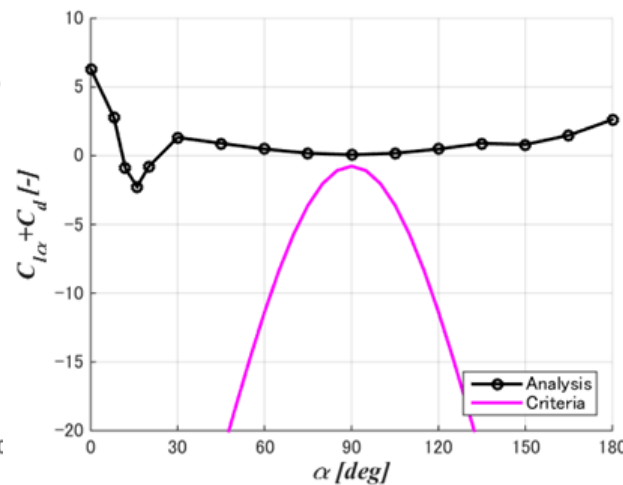
・ ブレードの揚力傾斜0.0055/deg (通常の5%)により, 2次モード(d)でほぼ中立安定になっており, わずかな揚力傾斜でも安定性が確保される.



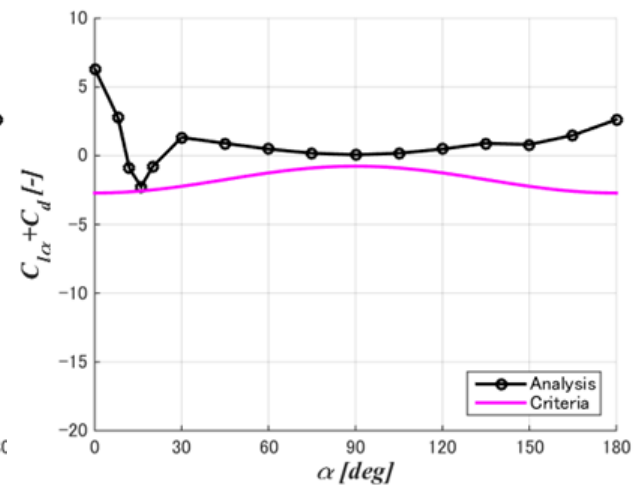
(c) 2次モード: ブレードなし



(a) 1次モード



(b) 2次モード



(d) 2次モード: ブレード揚力傾斜



## 3.9 1/60弾性相似模型水槽試験

### 1. 概要

設計変更後の波浪・潮流に対する応答の確認と、解析法/解析モデルの検証のために、弾性相似模型による水槽試験を実施した。

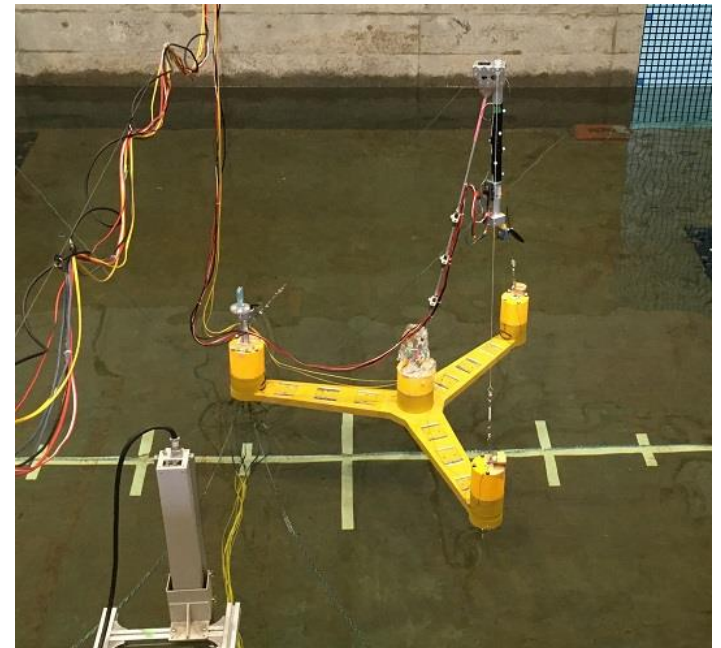
### 2. 試験概要

- ・ 試験期間: 2021/06/28～08/06
- ・ 試験場所: 三井造船昭島研究所潮流水槽
- ・ 計測条件: 規則波応答, 不規則波応答, ヨー応答
- ・ 計測項目: 姿勢角, 浮体/タワー歪み, 係留索/ガイワイヤ張力
- ・ その他: RNA/タワーの空力荷重をファンで模擬。

### 3. 試験結果

- ・ 浮体の基本的な応答特性を取得し, 大きな問題がないことを確認した。
- ・ 詳細は来年度報告予定。

(a)三井造船  
昭島研究所  
潮流水槽



(b)1/60弾性相似水槽試験模型

## 4. リスク評価

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ

## 4.1 リスク評価：概要

### 1. リスク評価概要

本システムでは、過去の浮体式洋上風力発電システムで経験のない多数の新技术を適用している。NKガイドラインに沿ってHAZID (Hazard Identification) によるリスク分析を実施した。

### 2. 結果と対応

ハザードを特定し、危害を及ぼす61件のリスクを評価した。

#### 1) 許容できないリスク指摘項目：1件

→連成解析ソフトBladed のモデルについて、前例のないOPTIFLOWコンセプトへの適用が十分検証されていないとの指摘。

→Bladedの開発元であるDNV GLより、同ソフトは、OPTIFLOWコンセプトの特徴である翼型・傾斜タワー、ガイワイヤ、1点係留などを考慮した連成解析に適しているとの確認を得た。

#### 2) 中程度のリスク(ALARP)：36件

→追加検討・検証を実施済み。

#### 3) 許容されるリスク：24 件

#### 4) 人へ危害を及ぼすリスク：1 件(ボートランディング; ALARP)

→実施設計において風下側に変更。

## 5. 経済性評価

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ

## 5. 経済性評価(1/2): 概要

### 1. 概要

一点係留方式を採用した次世代浮体式洋上風力発電システム(OPTIFLOW; One-Point Moored Floating Offshore Wind Turbine System)により, 比較的浅い海域に於いて2030年に発電コスト20円/kWh以下の達成実現性を検証した.

### 2. 結果概要

- 異なる浮体形式との定性的ならびに定量的比較を行った結果, 定性的には運動性能・ミスアライメント・ヨー機能に関してそれぞれ優劣があったものの, 定量定量的には軽量化による経済的効果, 稼働部品の故障率による売電収入への影響において, OPTIFLOWに優位性があることを確認した.
- 現在日本国内においては, 風力発電機, タワー, 浮体, タレット等の生産拠点の集約化のための環境や、組立, 輸送, 設置のための設備が十分に整備されておらず, 低コスト化の大きな課題となっているが, 将来的には量産化によって設備・環境の整備が期待でき, 更なる低コスト化が可能となると予想される.

## 5.1 経済性評価(2/2): 他の浮体形式との比較

	OPTIFLOW	セミサブ型	バージ型	備考
浮体重量	○	△	○	軽量化可能(対セミサブ型)
係留系	○	○	△	2/3程度に物量減(対バージ型)
運動性能	○	○	△	動揺が小さい(対バージ型)
ミスアラインメント	△	○	○	パッシブ・ヨーによる0.84%発電量低下
ヨー機能	○	△	△	故障や機能喪失の可能性が無い

- ・ 2枚翼, 一点係留によるパッシブヨー制御の特徴から軽量化による低コスト化, 運転維持費を抑えることが可能であることが見込まれる(昨年度報告済).
- ・ 商用化を想定した設計および調達面での更なる低コスト化の検証を継続中.

## 6. まとめ

1. 実証サイト事前協議, 環境影響評価
2. 基本設計
3. システム評価
4. リスク評価
5. 経済性評価
6. まとめ

## 6.1 成果概要

- 北九州市響灘で設置海域を決定し、地元・関係機関の了解・合意を得た。
- 同サイトの条件で連成解析と構造解析を行い、浮体、タレット、ワイヤの構造が十分な強度を持つことを確認した。
- 弾性相似モデルの風洞試験、ならびに、準静的な安定解析により、空力弾性的振動に対する安全性を確認した。
- HAZID会議を開催しリスクの洗い出しを行い、設計へ反映した。
- 経済性評価における他の浮体形式との定性および定量比較により、本コンセプトの優位性を確認した。



## 6.2 今後の技術課題

- 水槽試験による解析法/解析モデルの検証, 詳細設計とプロトタイプ/サイト認証の取得.
- 製造, 曳航, 設置計画の具体化.
- 一点係留の設計標準化.