

# 洋上風力発電用風車／浮体連成解析 プログラムの開発

日本海事協会共同研究支援事業

# 1. 研究体制

- 国立大学法人 東京大学
- 独立行政法人 海上技術安全研究所
- 三井造船株式会社
- 三菱重工業株式会社
- ジャパン マリンユナイテッド株式会社
- 株式会社風力エネルギー研究所
- 一般財団法人 日本海事協会

# 2. 実施期間

2011年5月31日 ~ 2013年6月30日

### 3. 開発の背景

- 浮体式洋上風力発電の事業化に向けて検討を進めている各国では、実証実験、設計基準・ガイドラインの整備に加えて、風車－浮体連成応答解析法の開発を行っており、わが国においても独自の風車－浮体連成応答解析法の開発が必要である。
- 風車－浮体連成応答解析法に関しては、設計段階における設計ツールとして汎用性があり、試行錯誤に利用でき、大きな計算機資源を要求しない比較的軽い計算コードが求められている。
- 既存の解析法は浮体部分については剛体として取扱うものが多く内力計算機能の強化が必要である。

### 4. 共同研究の実施内容

- 風車－浮体連成応答解析法(UTWind)の開発
- 検証実験の実施
- 実験および数値計算との比較による解析法の検証

# 風車—浮体連成応答解析法(UTWind) の定式化

# 風車ロータ弾性応答解析 (風車翼固定座標系)

## 概要

- 風車ロータは回転座標系で記述する
- 翼は梁でモデル化し応答は微小変形とする
- 風車翼ピッチ制御による角度変更ごとに剛性行列の再設定を行う
- 浮体動揺による相対風速を考慮して流入風速を算定する

## 外力

- 重力
  - 物体力  
風車ブレード密度,コード長・翼厚に依存
- 遠心力
  - 回転座標系慣性力  
ブレード質量・ロータ回転角速度に依存
- コリオリ力
  - 回転座標系慣性力  
ブレード質量・ブレード変位速度に依存
- オイラー力
  - 回転座標系慣性力  
ブレード質量・ロータ回転角速度変化量に依存
- スラスト力
  - 空気力  
翼素理論・運動量理論より算出
- トルク
  - 空気力  
翼素理論・運動量理論より算出

# 浮体支持構造弾性応答解析（空間固定座標系）

## 概要

- 浮体弾性応答解析は微小変形とする
- 骨組み構造としてモデル化する
- 波力はHooftの方法により評価（細長部材はモリソン式改良）

## 細長部材へのモリソン式の適用

- 部材直径／波長が小さい（簡易なディフラクション力評価）
- 波高／部材直径が大きい（粘性抗力）

## 外力

- 重力
  - 物体力  
要素密度,要素体積に依存
- Froude-Krylov Force
  - 流体力  
細長部材はモリソン式
- Diffraction Force
  - 流体力  
細長部材はモリソン式
- 流体抗力
  - 流体力  
細長部材はモリソン式
- 風車タワー風抗力
  - 空気力  
風速,風車タワー投影面積に依存
- 浮力,係留力
  - 復原力  
要素ごとの浮力、線形バネ係留存

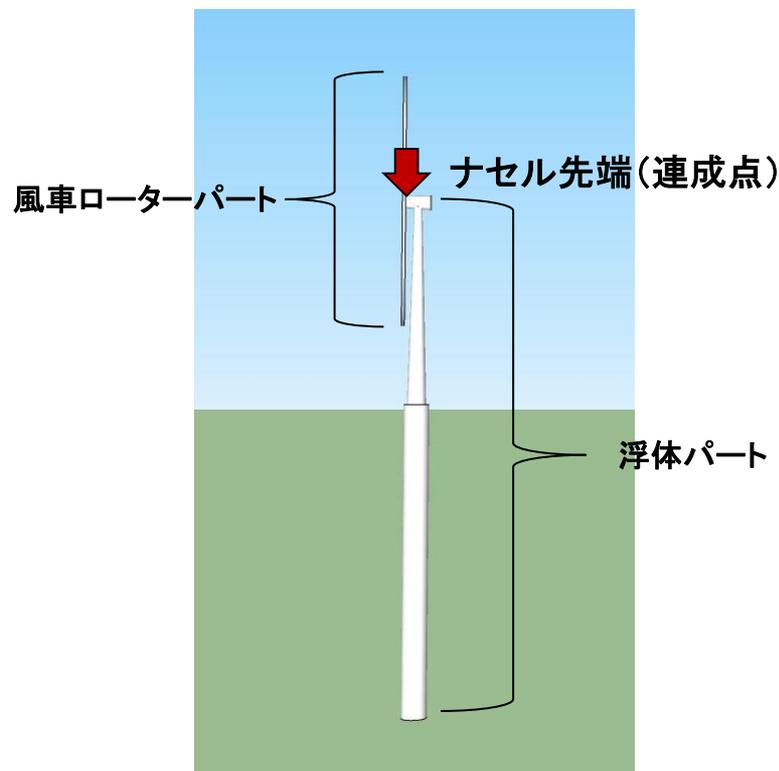
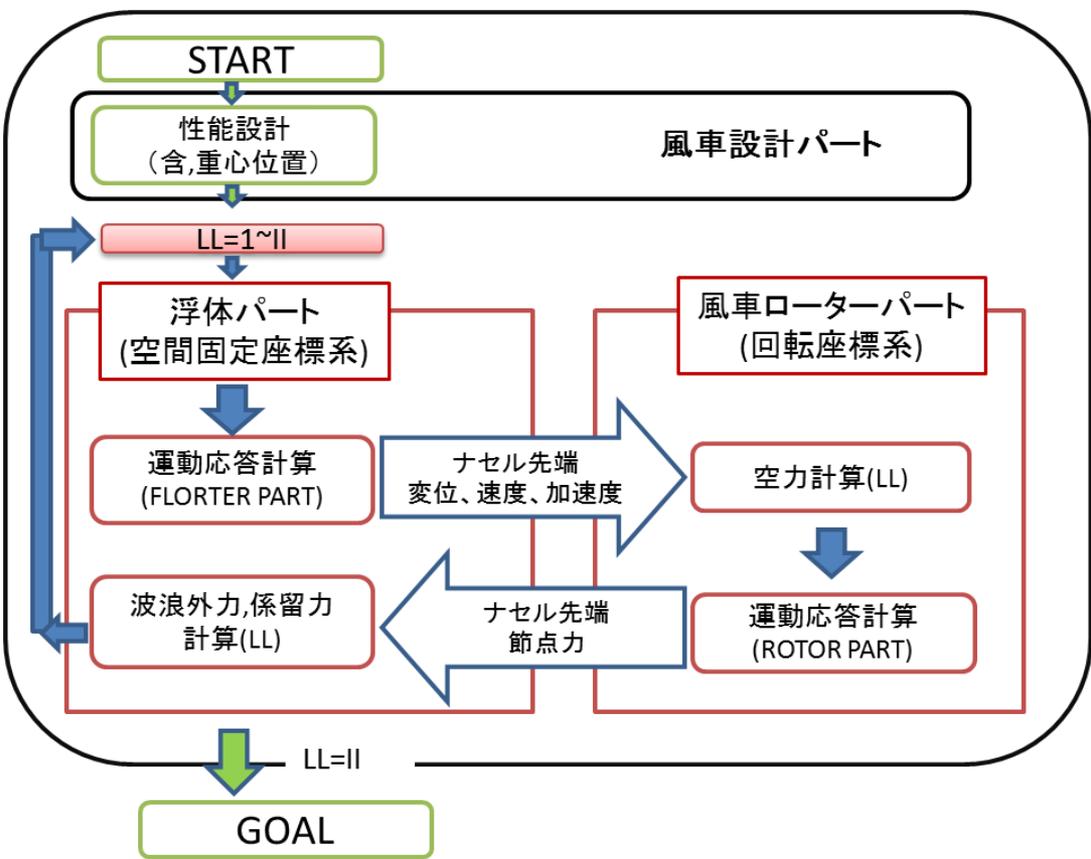
# UTWindの計算フロー

## 弱連成時間領域応答解析

ローター計算： ナセル先端変位⇒計算の変位境界条件

浮体計算： ロータハブに生じる力⇒計算の力学的境界条件

時間積分： ニューマークβ法



# 検証実験の実施およびUTWindとの比較による検証

# 浮体単独実験

## 実験目的

- 開発した弱連成風車-浮体連成弾性応答解析プログラムの検証
- 浮体模型の周波数応答関数を作成し、シミュレーション結果と比較する

## 計測項目

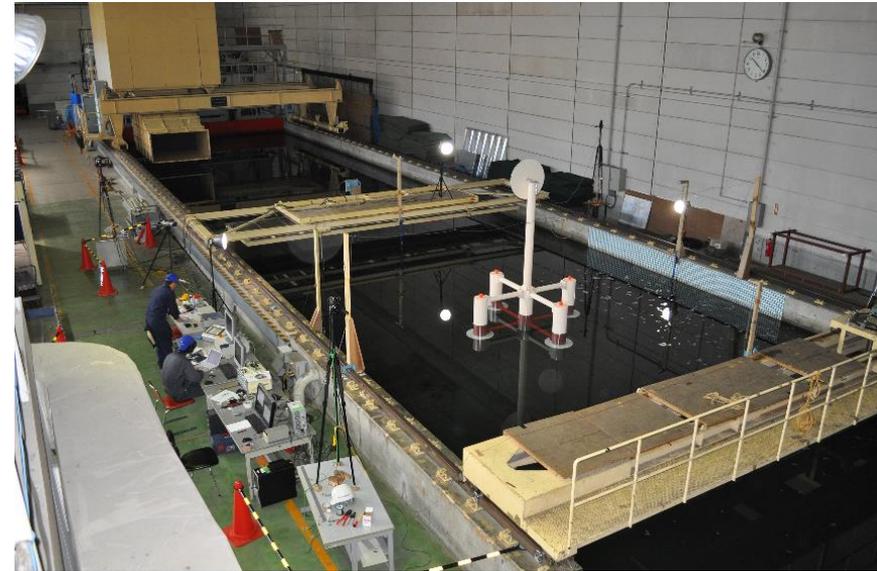
- 6自由度運動

## 実験内容

- 規則波実験
- 波向き角 0degree, 45degree

## 比較対象解析手法

- FAST-WAMIT
- ポテンシャル理論に基づいた三次元パネル法



Reference : MES

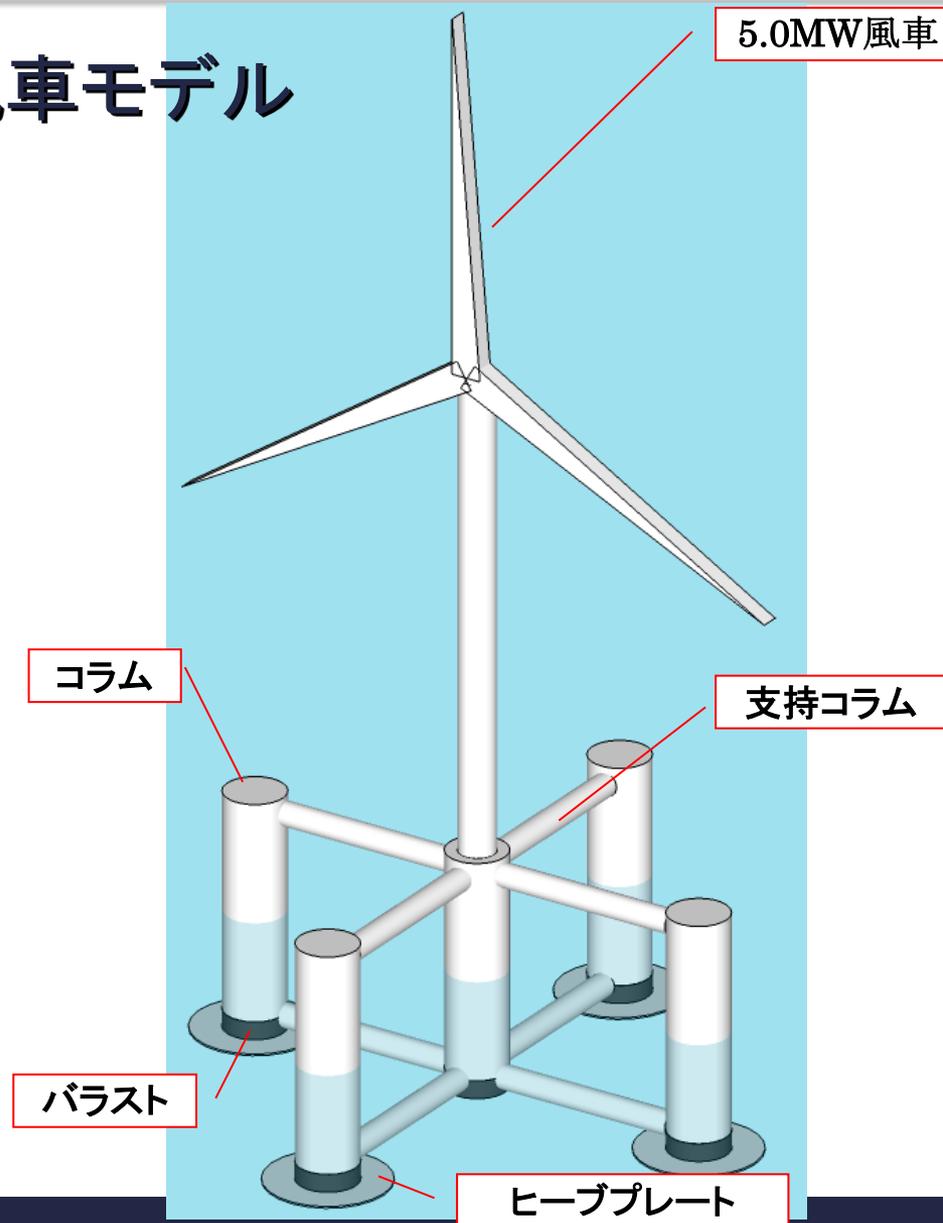
# 5MW-NKセミサブ型浮体式風車モデル

## 設計条件

- (1) 静的傾斜 5° 以下
- (2) ヒープ固有周期 15sec以上
- (3) ピッチ固有周期 20sec以上

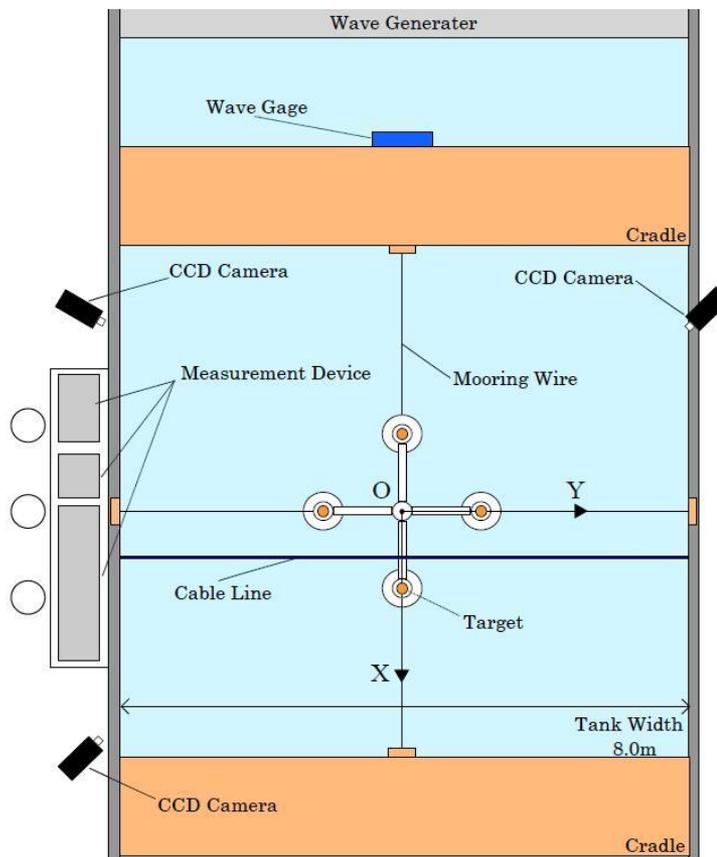
## 主要目

Item	Value	Unit
Displacement	9603.85	ton
Mass of Wind Turbine	700	ton
Mass of Floater	3913.29	ton
Mass of Ballast	4990.56	ton
Aided Mass of Surge and Sway	8849.87	ton
Aided Mass of Heave	12563.15	ton
KB	8.65	m
BM	16.74	m
KG	18.33	m
GM	18.33	m
KI	7.79	m
Rotatory Inertia	$2.25 \times 10^{10}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Static Heel Angle	1.76	degree
Natural Period of Heave	15.07	sec
Natural Period of Roll and Pitch	22.69	sec

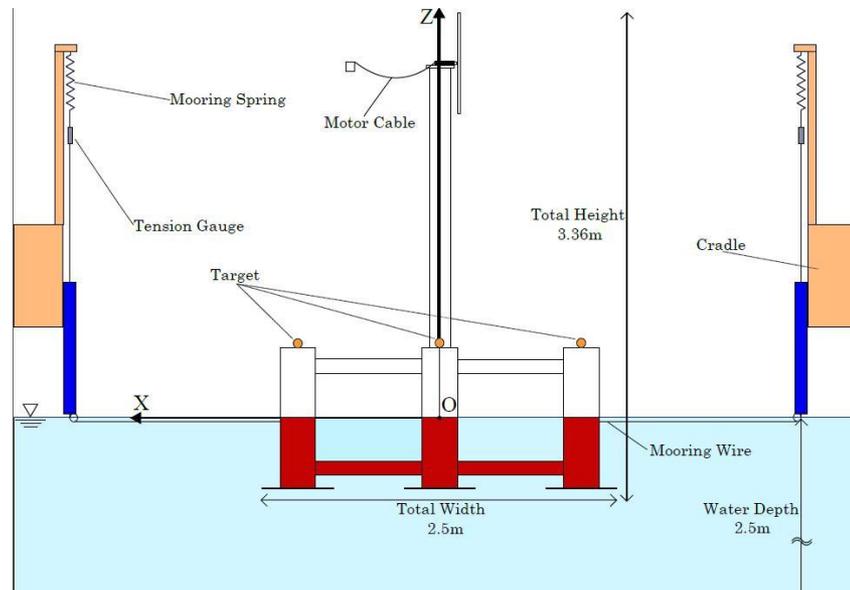


# 実験モデル配置 (波向き角 $0^\circ$ )

## XY座標系

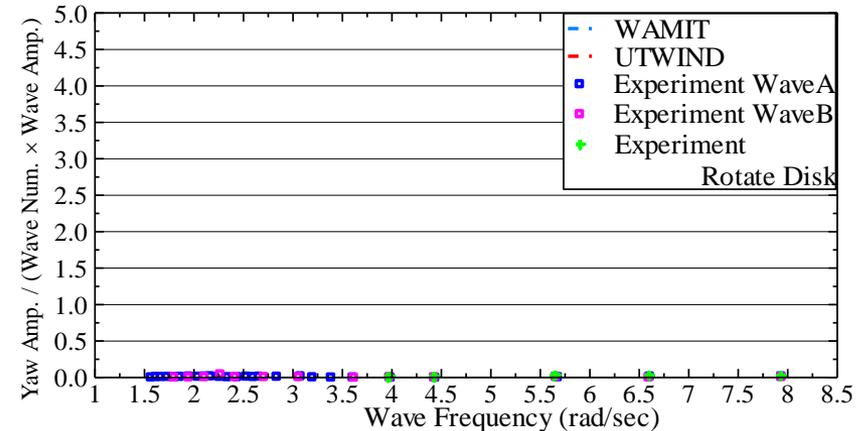
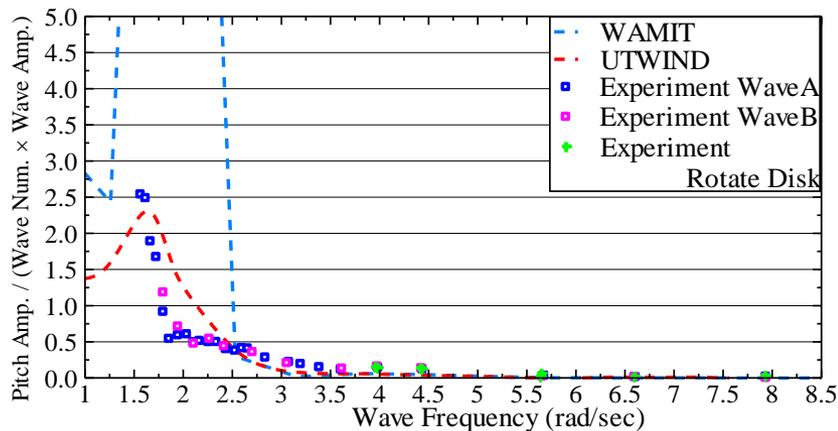
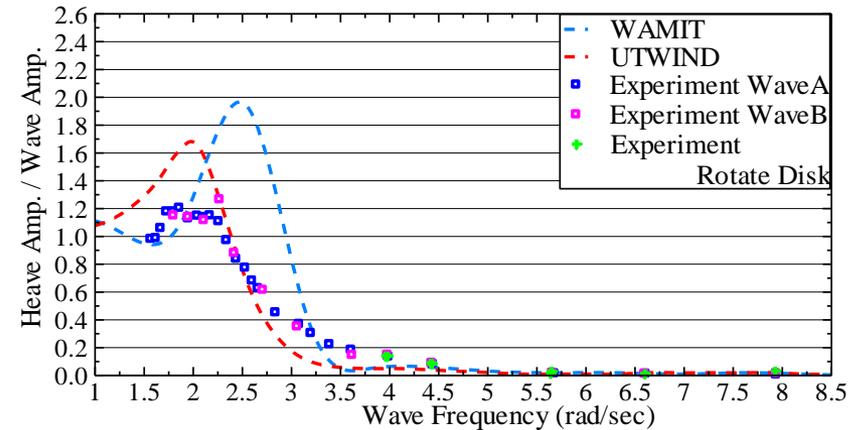
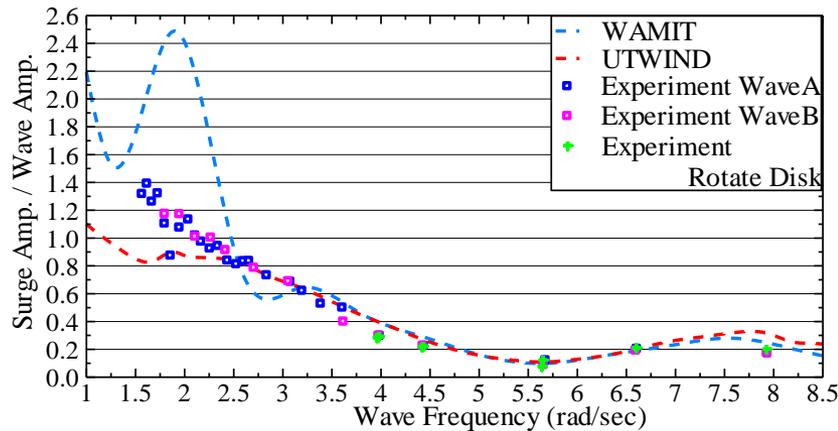


## XZ座標系



- 実験モデルは実機1/40スケール
- ターゲットの変位を3台のCCDカメラで追跡する事により計測
- 浮体は4本の線形バネにより係留

# 実験と計算による周波数応答関数の比較(波向き角 $0^\circ$ )



➡ 全6自由度運動において実験と良好な一致が確認でき、  
応答解析手法の妥当性が検証できた

# 波風共存場における風車搭載実験

## (1) 2MW-NKセミサブ型浮体式風車モデルの1/50モデルを用いた実験

### 実験目的

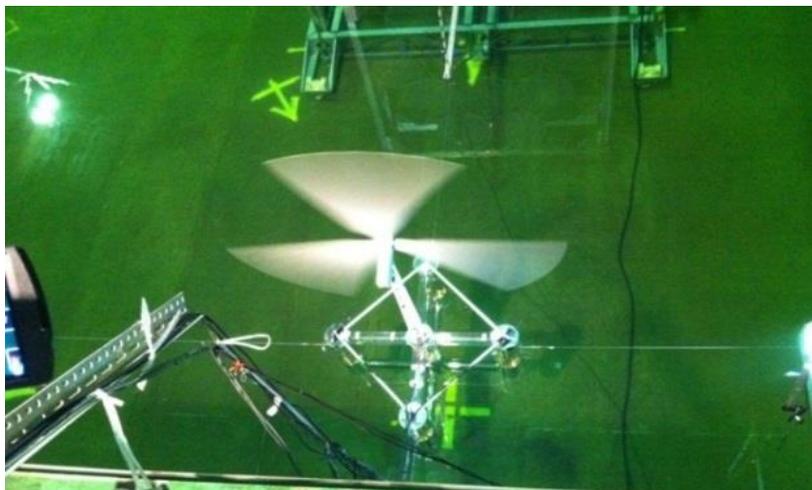
風波共存状態における風車浮体連成応答解析の精度検証

### 実験模型

模型スケール: NK 2MWセミサブ浮体式風車の1/50モデル (フルード則)

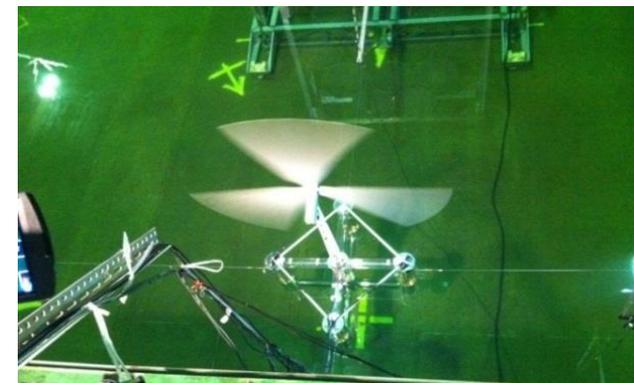
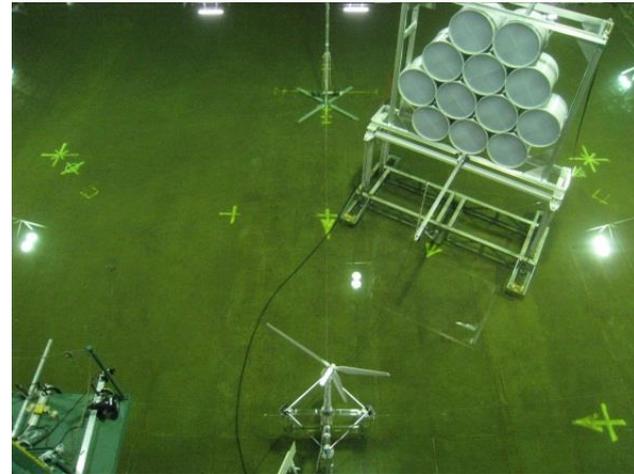
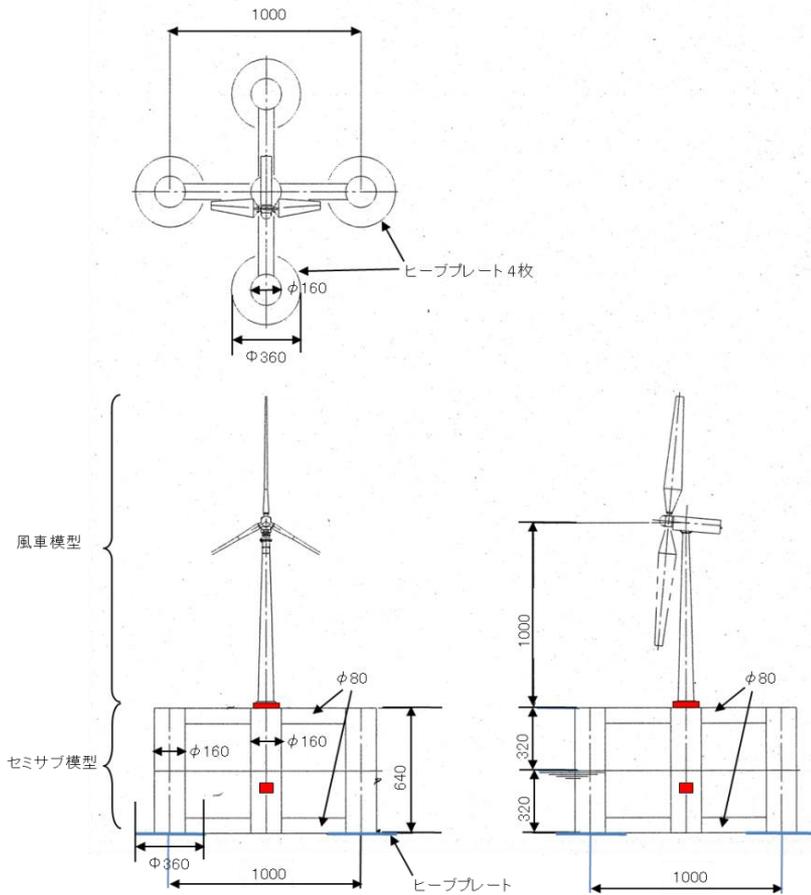
風車: ブレードピッチ制御可能な風車模型を搭載(定格時回転数一定PID制御)

翼流体力係数: 低レイノルズ数における $C_L$ 、 $C_D$ 係数は計算により算定



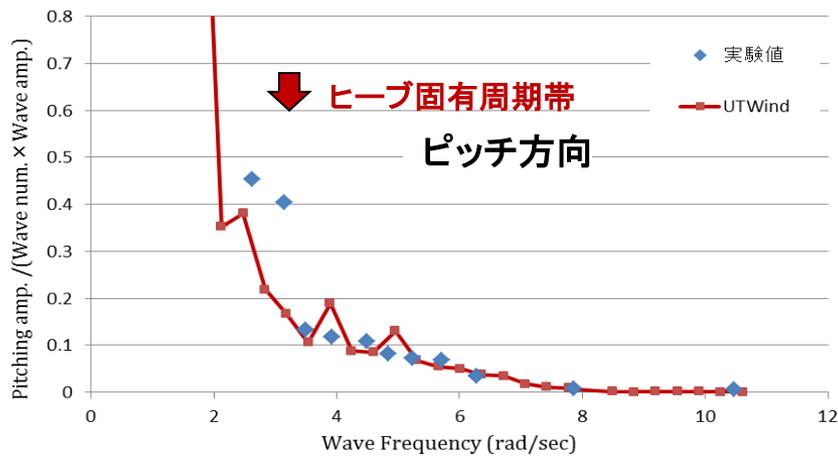
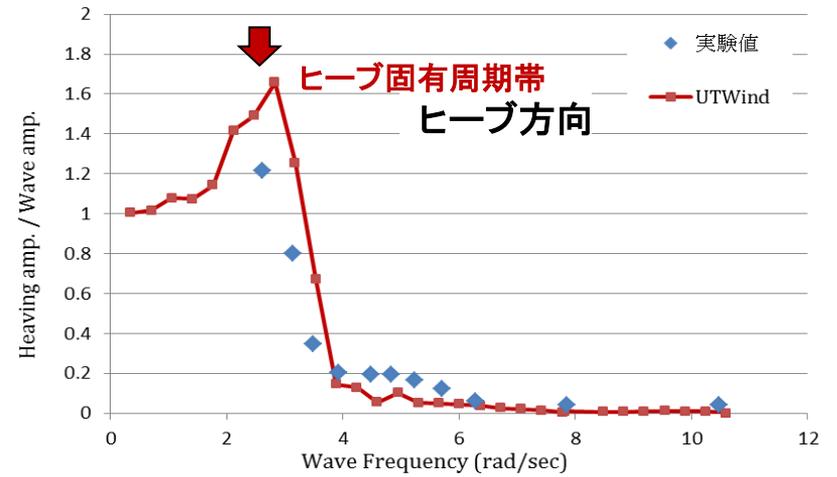
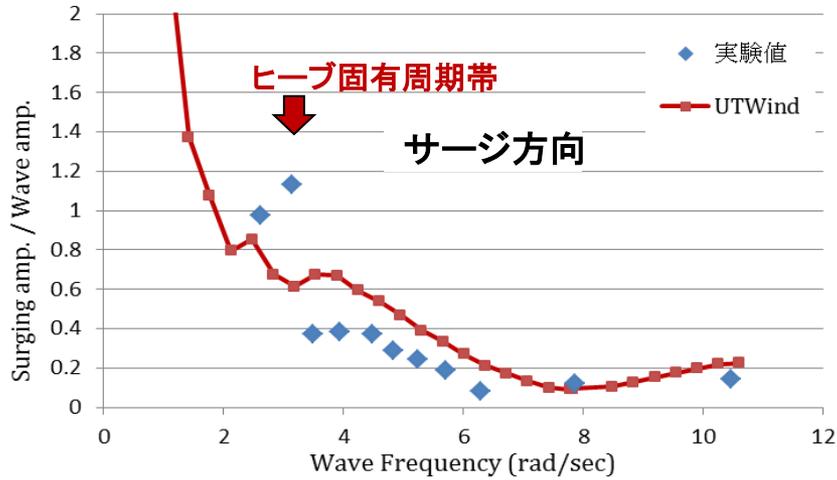
性能諸元	フルスケール	模型スケール
排水量	4992 t	37 kg
風車重量	762 t	6.96 kg
浮体重量	790 t	6.32 kg
バラスト重量	3440 t	27.52 kg
喫水	16.3 m	0.32m
KB	6.95 m	0.133 m
BM	13.09 m	0.262 m
KG	8.44 m	0.311 m
GM	4.25m	0.085 m

# 2MW-NKセミサブ型浮体式風車モデル

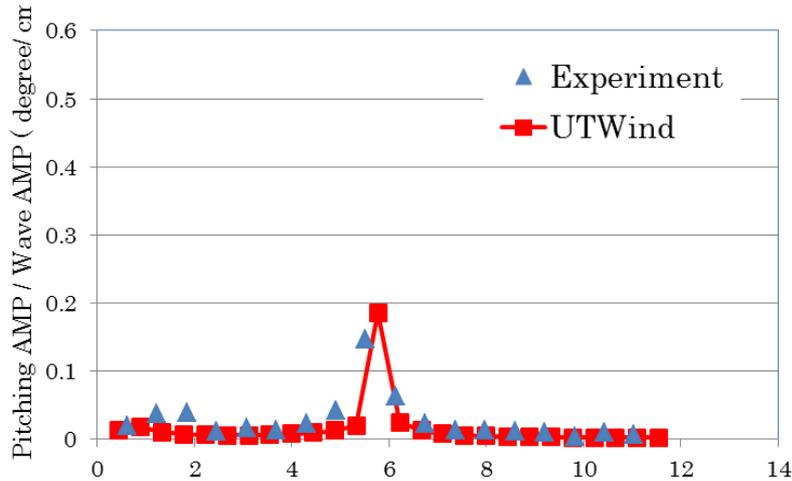


1/50スケール NK 2MWセミサブ型浮体式風車

# 風波共存時の周波数応答関数の比較(ブレードピッチ制御)

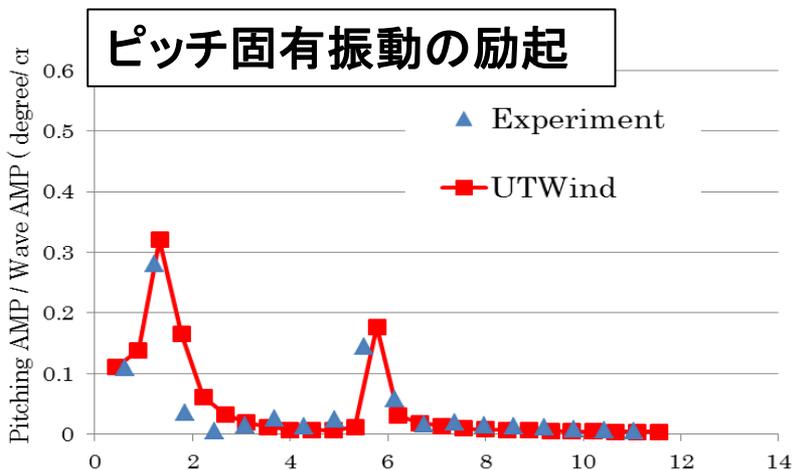


# ネガティブダンピングによるピッチ固有振動の励起



- ・波風共存場
- ・ネガティブダンピング検証

ブレードピッチ制御OFF時のFFT結果  
⇒ 波成分のみ観測される



## ピッチ固有振動の励起

ブレードピッチ制御ON時のFFT結果  
⇒ 波成分に加えピッチの固有振動の励起が観測される

## (2) その他の形式の浮体式風車モデルを用いた実験および応答計算

- 参加各社により以下の項目について実験と計算の比較を実施し、概ね妥当な結果を得た。
  - A) V字型浮体式風車モデルによる実験と計算の比較
  - B) セミサブ型浮体式風車モデルによる実験と計算の比較
  - C) アドバンストスパー型浮体式風車モデルの既存プログラムによる計算との比較
  - D) NKモデルのFASTによる計算との比較

# 研究成果

# 研究成果

## 1. 風車－浮体連成応答解析法 (UTWind) を開発した。

### ＜特徴＞

- 風車、浮体を弾性体としてモデル化した時間領域解析法である。
- 運動応答に加えて、内力計算機能を有する。
- 風車のピッチ制御機能を有する。
- セミサブ、スパー、TLPなど各種浮体形式の計算が可能である。

## 2. 模型実験、既存解析法との比較により検証を行い、**妥当な精度を有すること確認した。**

## 3. 定格出力時にネガティブダンピングによるピッチ固有振動の励起を確認した。

## 4. **設計ツールとして汎用性があり、試行錯誤に利用できるという初期の目標は達成できた。**