

# 複合外力を考慮した浮体式洋上風力発電システムの 水槽試験と動揺予測

石原孟\* 加賀谷健\* 菊地由佳\*

\*東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

## 目的

2013年、世界初の浮体式洋上ウィンドファーム実証研究<sup>1)</sup>が福島沖において開始した。洋上風車用の浮体は、石油・ガスの分野で用いられる大型浮体と異なり、経済性追求のために細い部材により構成されているため、流体力の非線形効果や部材の弾性挙動が重要となる。



そこで、洋上風力発電システムの動的応答を精度よく予測するために、風車-浮体-係留の連成解析プログラムCAsT<sup>2),3)</sup>が開発されてきた。本研究ではこのプログラムを用いて以下の問題を解決する。

1. 非線形減衰モデルを用いたヒープ方向の動揺予測と線形減衰モデルを用いた動揺予測との比較
2. 不規則波における長周期動揺の発生メカニズムの解明
3. 波と潮流の相互作用の解明

## 水槽試験

動揺予測の検証を行うために、水槽試験を実施した。フルードの相似則に従い、実証試験で用いられているセミサブ型浮体の1/50スケールの剛体模型を作成した。模型のセンターカラム上には、風車の重さを模擬するためのタワーを設置した。浮体の3つのコーナーに設置された垂直コラムの浸水深さを20cm、風水洞の水深を2.5mに設定した。水槽の長さは55m、幅は8mである。サージ、ヒープ、ピッチ方向の動揺を再現するために、浮体の前後に4本のカテナリー係留チェーンを取付け浮体の位置を保持した。



浮体の固有周期  
( )内は実機スケール

	固有周期
Surge	7.6 sec (53.7sec)
Heave	2.4 sec (17.0sec)
Pitch	3.0 sec (21.2sec)

## 動解析モデル

風車-浮体-係留の連成解析プログラムCAsTでは、有限要素法に基づき、次式に示す運動方程式を解く。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_R\} + \{F_E\} + \{F_G\} + \{F_W\}$$

ここで $F_R$ は係留索の張力、 $F_E$ は非静水圧による復元力、 $F_G$ は流体力、 $F_W$ は空気力である。

### ■ 鉛直方向の流体力モデル

鉛直方向の流体力の評価には、フーティングの部材直径が大きい場合、モリソン式を適用することができない。そこで、フリードリクソフ力 $F_{EM}$ 、ディフラクション力 $F_{EW}$ 、粘性影響による抗力 $F_{ED}$ から求めた。

$$\begin{aligned} \{F_E\} &= \{F_{EM}\} + \{F_{EW}\} + \{F_{ED}\} \\ F_{EM} &= \rho_w \iint (\ddot{u} \cdot \vec{n}) dS \quad F_{EW} = (C_M - 1) \rho_w V (\dot{u} - \ddot{x}) \\ F_{ED} &= 0.5 \rho_w C_D A \{u - \dot{x}\} \{u - \dot{x}\} \end{aligned}$$

$F_{ED}$ が本研究で導入した非線形減衰モデルである。比較のために用いた線形減衰モデルは $\zeta=15\%$ <sup>4)</sup>とした。

### ■ 流体力係数

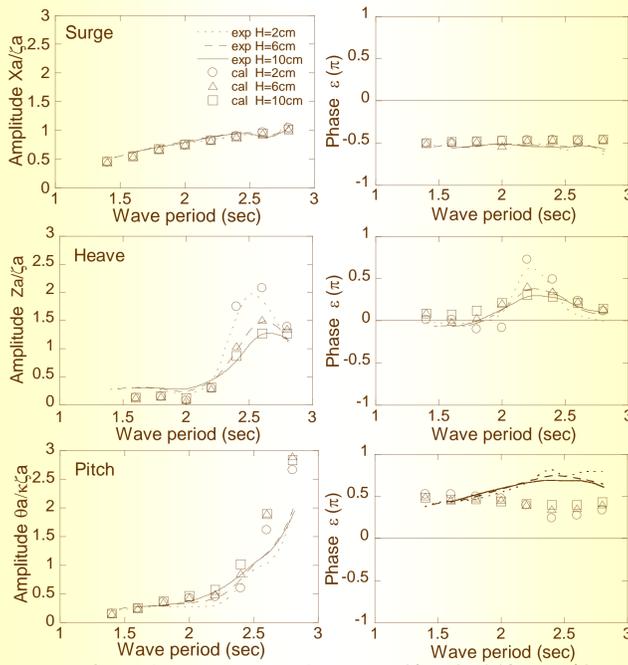
浮体の流体力係数および係留索の質量係数は規則波中試験の結果から同定し、係留索の抗力係数はDNV<sup>5)</sup>に示す値を参考に設定した。

解析に用いた流体力係数  $C_D$ ,  $C_M$

		$C_D$	$C_M$
浮体	水平	1.5	2.2
	鉛直	2.0	3.0
係留索		1.3 <sup>4)</sup>	2.2

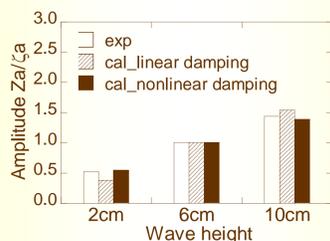
## 鉛直方向の動揺予測

異なる波高に対する予測精度を評価するために、非線形減衰モデルを用いて、波高2, 6, 10cmのケースについて規則波中の動揺予測を行った。サージ方向の予測値は振幅、位相ともに実験値とよく一致している。ヒープ方向の予測値は共振領域では実験値とよく一致しているが、波周期の短い領域では過小評価がみられる。またピッチ方向では波周期が長い領域で過大評価となっている。



規則波中における動揺の予測値と実験値の比較

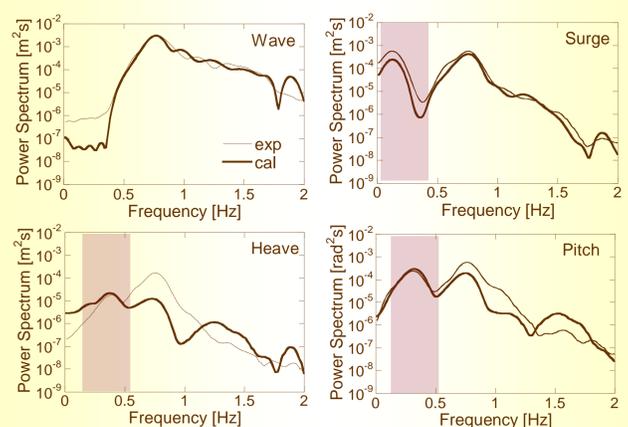
ヒープ方向の振幅について線形・非線形減衰モデルによる予測値と実験値との比較を行った。線形モデルでは、波高6cmの振幅を精度よく評価しているが、波高2cmでは過小評価、波高10cmでは過大評価となっている。一方、非線形モデルは異なる波高について精度良く評価できている。



規則波中における動揺の予測値と実験値の比較

## 長周期動揺

長周期動揺のメカニズム解明のため、不規則波中の動揺予測を行った。サージおよびピッチ方向に浮体の固有振動数成分に明確なピークが現れ、長周期動揺が確認された。しかし、波スペクトル中に浮体の固有振動数成分は殆ど存在しない。よって、不規則波が抗力を介して波周期の和と差の成分を誘引するために、長周期の外力が発生し、浮体の固有振動数で共振が励起されていることが分かった。解析結果は、0.5Hz以下の領域については入力波に差があるが、サージおよびピッチ方向の固有振動数付近の領域については予測値と実験値はよく一致している。一方、高周波数領域は、ヒープ方向の動揺が過小評価となっており、規則波中解析での結果に対応している。



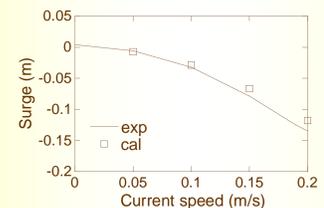
不規則波中における動揺の予測値と実験値との比較  
(有義波高: 10cm, ピーク波周期: 1.41s)

## 波と潮流の相互作用

従来、複合外力中の荷重は、波と潮流の相互作用がないと仮定し、それぞれの単純な重ね合わせで評価されていた。この場合、平均変位は潮流応答により、変動変位は波応答により求める。本研究では、波と潮流の相互作用について調べた。

### ■ 潮流中解析

潮流中の動揺を明らかにするために潮流中の動揺予測を行った。平均変位はサージ方向のみに発生し、ヒープおよびピッチ方向にはほとんど動かなかった。サージ方向の平均変位の予測値とは実験値とよく一致している。



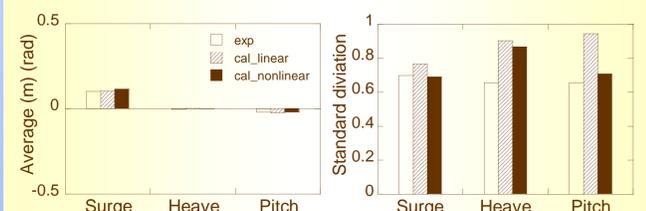
潮流中における動揺の予測値と実験値との比較

### ■ 複合外力中解析

波と潮流の相互作用を明らかにするために、複合外力中で従来の線形重ね合わせモデルと非線形モデルによる動揺予測と実験の比較を行った。

平均変位は、線形重ね合わせと非線形解析モデルの結果とも実験と一致し、波と潮流の相互作用の影響がほとんどないことが分かった。一方、変動変位は線形重ね合わせの結果が非線形解析モデルの結果や実験値を上回り、相互作用の影響が存在することが分かった。複合外力中では、潮流による速度の平均成分の増加により、水力減衰が規則波中時よりも増加し、変動変位が小さくなると考えられる。

また、波と潮流の複合外力の評価では、非線形解析が有効であることが分かった。



複合外力中における線形モデルと非線形モデルによる  
予測値と実験値の比較

(潮流速:0.2m/s, 波高:60mm, 波周期:2.8s)

## 結論

複合外力を考慮した浮体式洋上風力発電システムの水槽試験と動揺予測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 非線形減衰モデルの導入により、減衰力の振幅依存性が再現でき、予測精度が向上した。
- 2) 不規則波中の長周期動揺は、不規則波が非線形抗力を介して浮体の固有周期成分を励起することで発生する。長周期動揺の予測には非線形解析が有効である。
- 3) 複合外力中では、波と潮流の相互作用により水力減衰が大きくなる。従来の重ね合わせによる動揺評価は過大評価となり、非線形解析により予測精度が向上した。

### 参考文献

- 1) 福島洋上風力コンソーシアムホームページ, <http://www.fukushima-forward.jp/>
- 2) ファム パン フック, 石原孟, セミサブ浮体式洋上風力発電システムの動的応答予測モデルの開発と実験による検証, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.604-617, 2009.
- 3) 石原孟, Muhammad Bilal Waris, 助川博之, ヒーププレートと非静水圧の効果考慮した浮体動揺予測モデルの開発, 第31回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.209-212, 2009.
- 4) N.Srinivasan et al., Damping controlled Response of a Truss Pontoon Semi-submersible with Heave Plates, Proc. of 24th Int. Conf. on OMA, 2005.
- 5) Det Norske Veritas, Offshore Standard, DNV-OS-J101, 2010.