

10MW 級風車を搭載するスパーク型浮体の動揺特性に関する研究
—その2 動揺解析と水槽実験による検証—

○東京大学 正会員 菊地 由佳
東京大学 非会員 町田 暁信
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

浮体式洋上風力発電の普及が期待される中、スパーク型浮体はコスト優位性が高く、商用化が望まれている。合理的設計のため、精度の高い動揺予測が必要となるが、従来の準静的係留モデルを用いた動揺予測では、ヨー方向の固有周期を過大評価するとともに、ピッチ方向の減衰を過少評価することが問題であった¹⁾。また、既往研究において非線形流体力係数は実験値から同定することにより求められているが^{2,3)}、水槽実験によらない予測をするためには、レイノルズ数を考慮した流体力モデルより評価する必要がある。最後に、既往研究では、サージ・ヒープ・ピッチ方向について予測値と実測値がよく一致することが示されているが^{2,3)}、ヨー方向においては十分な検証が行われていない。水線面積が小さいスパーク型浮体はヨー方向の慣性モーメントが小さく、ヨー方向の動揺予測を実施する必要がある。

本研究では、準静的係留モデルと動的係留モデルを用いた数値解析を実施し、水槽試験と比較することにより、動揺予測精度を検証する。次にレイノルズ数を考慮した流体力モデルより非線形流体力を評価し、ヨー方向を含めた周波数応答関数の予測精度を評価する。

2. 水槽実験と動揺解析

2.1 水槽実験

本研究では、参考文献 2) に示す 1/50 スケール 10MW 級風車搭載スパーク型浮体の水槽実験の値を用いて、動揺予測精度を検証する。波方向に 2 本のカタナリー係留を設置し、また浮体の横流れを抑制するために水平にワイヤーを浮体両側に設置している。風車と浮体、係留索の諸元を表 1 および表 2 に示す。実験の詳細については参考文献 4) を参照されたい。解析にあたり、重心高さがピッチの固有周期に大きな影響を与えることが示された。重心高さは、-1.29m が設計値であるが、解析において、ピッチ方向の固有周期より、-1.495 m と同定した。また、水平係留システムの重量は、Yaw の固有周期が合うように 0.079 kg/m と同定した。

表 1 風車・浮体の諸元 (実験スケール)

項目	単位	値
風車・浮体質量	kg	156.14
排水体積	m ³	0.159
重心高さ (水面から)	m	-1.29
喫水	m	2.00
慣性モーメント I _{xx} , I _{yy}	kg・m ²	151
慣性モーメント I _{zz}	kg・m ²	2.34

表 2 係留索の諸元 (実験スケール)

項目	単位	値
単位重量	kg/m	0.182
展開半径	m	15.16
アンカー深さ	m	4.50
フェアリーダ位置	m	0.44
主要係留索長さ	m	16.30
ブリドル係留索長さ	m	0.44

2.2 動揺解析

浮体・係留索の連成解析を FAST v8.10 および Orcaflex ver.10.3a を用いて実施した。係留された浮体式洋上風力発電システムの 6 自由度運動は次式のように表される。

$$(M + A)\ddot{x} + B\dot{x} + D\dot{x} + K(x - \eta) = f_{hydro} + f_{mooring} \tag{1}$$

ここで、 M は浮体構造物の質量、 A は付加質量、 B は造波減衰力、 D は構造減衰、 K は復元力、 f_{hydro} は流体力、 $f_{mooring}$ は係留力である。

流体力のうち、浮体の水平方向および鉛直方向の非線形流体力は次式のように評価される。

$$f_{nonhydro} = \frac{1}{2} C_D \rho A |u - \dot{x}| (u - \dot{x}) \tag{2}$$

ここで、 C_D は抗力係数、 ρ は水密度である。 A は代表面積であり、水平方向には浮体の投影面積、鉛直方向には浮体の断面積となる。表 1、2 に従って風車・浮体・係留モデルを作成し、自由振動試験および規則波試験について動揺解析を実施した。

3. 係留モデルが浮体動揺に及ぼす影響

準静的係留モデルを FAST を用いて、動的係留モデルを Orcaflex を用いて構築し、浮体の固有周期を評価した結果を表 3 に示す。ヨー方向の固有周期は、実験値

の 27.1 秒に対して、準静的モデルでは 1308 秒と過大評価している。FAST における準静的モデルは係留索のヨー方向慣性モーメントが考慮されないことが原因である。一方、動的係留モデルでは、ヨー方向の慣性モーメントが考慮され、27.1 秒と実測値とよく一致した。

図 1 には、自由振動試験におけるピッチ方向およびヨー方向の減衰比の実測値と予測値との比較を示した。動的係留モデルは流体力を考慮することにより、流体力を考慮しない準静的モデルと比較して、ピッチ方向の減衰比を精度良く評価した。一方、ヨー方向については、動的係留モデルによる予測値の精度は向上したが、実験値を約 60%過小評価した。スパー型浮体を浮体中心軸に沿った 1 本のビーム要素でモデル化しているため、浮体表面の摩擦力によるヨー方向のモーメントが評価されないためと思われる。本研究では、付加減衰比は実験から同定し、0.5%とした。

表 3 固有周期の観測値と予測値との比較 (秒)

	サージ	ヒープ	ピッチ	ヨー
実験値	168.5	20.5	32.4	27.1
準静的モデル	189.9	20.6	38.0	1308.1
動的モデル	170.3	20.7	32.0	27.1

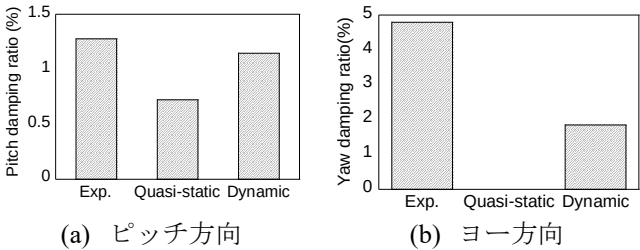


図 1 減衰比の観測値と予測値との比較

4. 非線形流体力が浮体動揺に及ぼす影響

浮体および係留索に働く非線形流体力の抗力係数を、表 4 に示すように、Ishihara and Liu⁵⁾が示したレイノルズ数を考慮した流体力係数のモデル式を用いて求めた。レイノルズ数は、自由振動試験時は 4.9×10^3 、規則波試験時は 5.3×10^4 と計算された。評価した非線形流体力係数を用いて、波高 6 m における規則波試験について動揺予測を行った。

表 4 レイノルズ数を考慮して評価した抗力係数

	水平方向		鉛直方向
	自由振動	規則波	
浮体	0.6	2.0	1.0
係留索	2.4		0.08

周波数応答関数の実測値と予測値との比較を図 2 に示す。予測値は、サージ、ヒープ、ピッチ方向において、実験値とよく一致した。ヨー方向の予測値は実験値を過小評価したが、浮体重心の波直交方向に対する偏心を 1%考慮し、予測値は観測値をよく再現した。これはバラストが砂であったため、浮体に偏心が生じたことによるものと推定された。

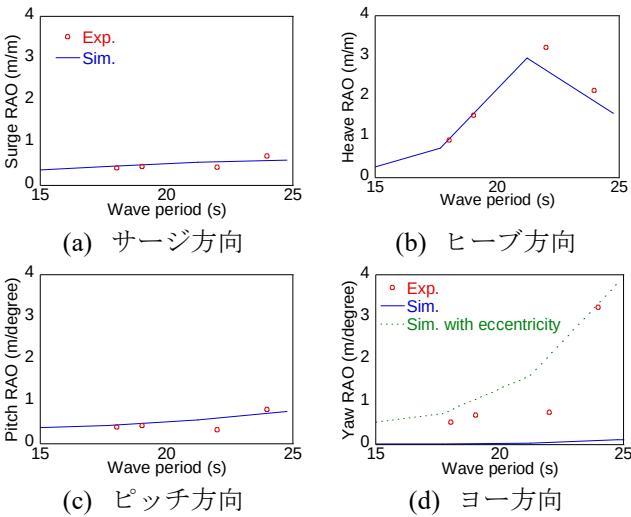


図 2 周波数応答関数の観測値と予測値との比較

5. まとめ

本研究では、以下の結論を得た。

- 1) 準静的モデルはヨー方向の固有周期を過大評価する一方、動的モデルは精度良く実験値を再現した。動的モデルは係留索の流体力を考慮できるため、ピッチ方向の減衰比も精度良く評価する。
- 2) 浮体の非線形流体力係数を、レイノルズ数を考慮して評価することにより、浮体の周波数応答関数の予測値は実験値とよく一致した。また浮体重心の偏心を考慮することにより、ヨー方向の周波数応答関数が精度良く再現できた。

参考文献

1) M. T. Anderson, F. Wendt, and M. Hall, Verification and Validation of Multisegmented Mooring Capabilities in FAST v8, 2016
2) B.J. Koo, A.J. Goupee, R.W. Kimball, and K. Lambrakos, Model Tests for a Floating Wind Turbine on Three Different Floaters, 2014
3) 宇都宮、佐藤、松熊、矢後、洋上風力発電用スパー型浮体の波浪応答実験と解析、2009
4) 西郡、富田、廣井、保木本、道前、10MW 級風車を搭載するスパー型浮体の動揺特性に関する検討—その 1 水槽実験による動揺特性の分析—、2021
5) T. Ishihara and Y. Liu, Dynamic Response Analysis of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine in Combined Wave and Hydrodynamic Models, 2020