

浮体の安定性と風車の空力特性を考慮したスパー型浮体の動揺予測に関する研究

○東京大学 正会員 町田 暁信
 東京大学 正会員 菊地 由佳
 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導入が期待される中、10～20MW 級大型風車搭載スパー型浮体を用いた洋上風力発電システムのコスト低減化が求められている。従来の大型風車搭載スパー型浮体の水槽実験¹⁾は、3 枚羽風車の空力特性を考慮していないとともに、コスト低減のため浮体を軽量化する必要があった。また、従来の浮体の動揺予測手法では、浮体に作用する浮力を一定として評価するためパラメータ励振による不安定現象を再現できない問題があった。浮体を軽量化することによって増加する浮体動揺の低減手法として、トラススパーと呼ばれる低重心化の手法がある²⁾。浮体式洋上風力発電所において、検証された動揺予測手法を用い、低重心化が動揺低減に与える影響を評価する必要がある。

本研究では、3 枚羽風車と重量を低減した浮体を用いた水槽実験を実施し、風車の空力特性と浮体の安定性が浮体動揺に与える影響を明らかにするとともに、風車の空力特性と浮体の安定性を考慮した動揺予測を実施し、試験結果を用いて検証する。最後に、構築した動揺予測モデルを用い、低重心化による浮体動揺低減の効果を評価する。

2. 水槽実験と動揺解析

水槽実験を三井造船昭島研究所で実施した。本研究では、表 1 に示すように風車に対する重量比を既往研究¹⁾と比較して 65%まで低減した浮体を用いて、1/100 スケール 20MW 級風車搭載スパー型浮体の水槽実験を実施した。また 3 枚羽を再現した風車模型を用い、係留索は 3 本のカタナリー・ブライドル係留を用いた。

表 1 浮体諸元(実機スケール)

	既往実験	本実験
定格出力 (MW)	10	20
風車部重量 (ton)	1,273	2,248
排水体積 (m ³)	19,911	23,005
I_{xx}, I_{yy} (kgm ²)	4.72E+10	9.35E+10
重心 (m)	-64.1	-61.7
復元モーメント (Nm)	2.79E+09	2.95E+09

風車-浮体-係留の連成解析を、Orcaflex を用いて実施した。風車と浮体は、質量分布を考慮するため、ナセル 3 点、タワー 50 点、浮体 11 点、バラスト 5 点でモデル化した。線形流体力については、ポテンシャル理論により求めた。非線形流体力について、既往研究のレ

イノルズ数と KC 数の関数である流体力モデルから求めた。風車の空気力は、翼素運動量理論から各ブレードを 20 点に分けて各部材に働く揚力と抗力を考慮する。また、風車の遊転現象を考慮するため、観測した風車の回転速度の時系列を入力可能なプログラムを作成した。

3. 浮体の安定性が浮体動揺に及ぼす影響

自由振動試験による観測値と予測値を表 2 に示す。表 1 で示したようにピッチ方向の慣性モーメントが増大しているためピッチ方向が長周期化している。固有周期が観測値と予測値でよく一致していることが示され、構築したモデルの妥当性が示された。

表 2 実スケール固有周期(秒)

	観測値	予測値
サージ	175	204
ヒープ	20.5	20.2
ピッチ	31.5	37.6
ヨー	31.4	41.6

波高 11.7m の規則波試験における観測値と予測値との比較を図 1 に示す。各方向、予測値は観測値とよく一致しているが、波周期 20 秒の観測値において、ヒープ方向に振幅が減少し、ピッチ方向に振幅が増加した。これは、阿部と宇都宮³⁾により示された固有周期がピッチ方向においてヒープ方向の 2 倍になるときに発生するマシュ・インスタビリティであると確認された。表 1 に示したようにピッチ方向の固有周期の長周期化により、ピッチ方向の固有周期がヒープ方向に対して 2 倍に近くなったためと考えられる。

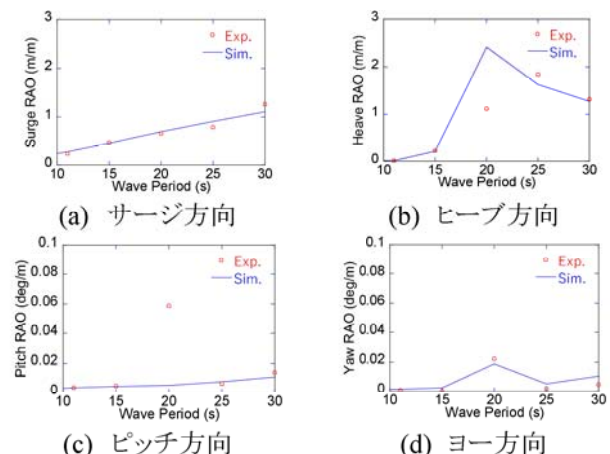
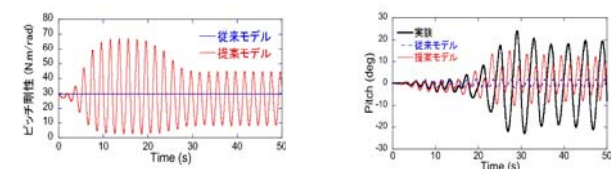


図 1 規則波試験の観測値と予測値の比較

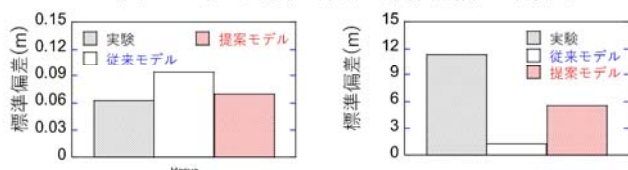
マシュ・インスタビリティは、浮力の時間変化により発生

する係数励振による自励振動であることが知られている³⁾。従来の動揺解析は浮力による静的復元力を考慮していたが、浮力の作用点を50点に分割して分布させ、図2(a)に示すように浮力の時間変化を考慮できるようにした。その結果、浮体動揺のピッチ方向の増加(図2(b))、が概ね再現され、予測値は実験値に近づいた(図3)。



(a) 浮力 (b) 浮体動揺

図2 ピッチ方向の浮力と浮体動揺の時系列



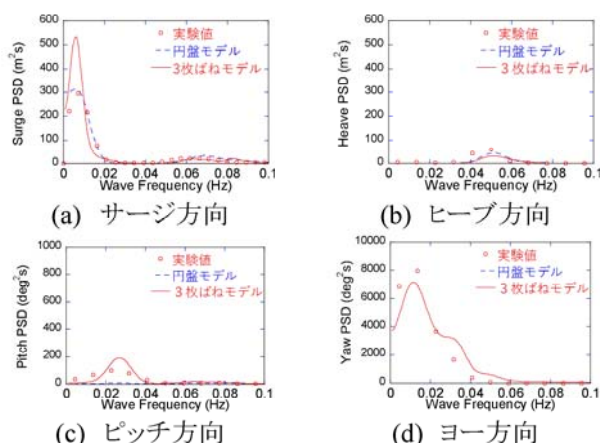
(a) ヒープ方向

(b) ピッチ方向

図1 周期20秒の規則波における浮体動揺の標準偏差

4. 風車の空力特性が浮体動揺に及ぼす影響

暴風波浪試験(風速50m/s、有義波周期13.4秒、有義波高10m)における実験値、従来モデルである円盤による予測値と本研究モデルである3枚羽風車モデルによる予測値との比較を図4に示す。図4(d)に示すように円盤モデルはヨー方向の動揺が発生しないのに対して、3枚羽モデルでは動揺を再現し、遊転する風車の空力特性によりヨー方向の動揺が励起されていることが分かる。また図5には既往研究と本研究における浮体動揺の標準偏差を示す。風車の空力特性の影響により、ヨー方向において、浮体動揺が増加することが示された。



(a) サージ方向

(b) ヒープ方向

(c) ピッチ方向

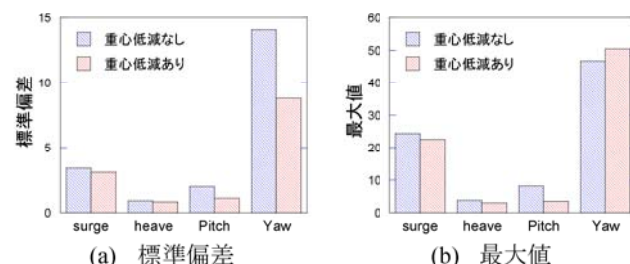
(d) ヨー方向

図4 暴風波浪時の実験値と予測値の比較

5. 低重心化による浮体動揺低減

検証した浮体動揺予測手法を用いて、低重心化が浮体動揺に与える影響を評価した。浮体内部にあるバラスト16,610tonを浮体下部30mに吊り下げることにより、浮体の

重心を-61.7mから-86.4mに下げた。また、ヨー方向の動揺を低減するために $1.0 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ の付加減衰を与えるリブを取り付けた。動揺予測の結果、低重心化による慣性モーメントの低減により、ピッチ方向の固有周期が37.6秒から27.5秒と27%短くなり、マシューインスタビリティの発生が抑えられた。図5には、暴風波浪時における異なる重心の予測値を示す。ピッチ方向においては、浮体動揺の標準偏差(図5(a))が大きく低減し、最大値(図5(b))も低減したが、ヨー方向については平均値の増大により最大値が増加した。



(a) 標準偏差

(b) 最大値

図2 暴風波浪時の浮体動揺の標準偏差と最大値の比較

6. まとめ

本研究を通して、下記の結論を得た。

- 1) 水槽実験により、大型風車に対して浮体を小さくすることにより、ピッチ方向の固有周期が長くなり、不安定現象が発生する可能性を示唆した。動揺予測において、浮力による復元力の時間変化を考慮することにより、不安定現象を予測できることを定性的に示した。
- 2) 3枚羽風車の空力特性と遊転の影響により、暴風波浪時においてヨー方向の動揺が大きく増加することを示した。
- 3) 浮体の低重心化により、ピッチ方向の固有周期が長周期化し、マシューインスタビリティの発生を抑えるとともに、暴風波浪時において、ピッチ方向において、浮体動揺の最大値が低減した。

謝辞: 本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構の委託研究の一部として行われた。関係者の皆様に謝意を表する。

参考文献

- 1) 菊地由佳, 富田真之, 西郡一雅, 石原孟, 10MW 風車を搭載するスパー型浮体の動揺に関する数値予測と実験による検証, 日本風力エネルギー学会論文集, 2023
- 2) 安野浩一郎, 国元将生, 関本恒浩, 福本幸成, 鈴木英之, 飯島一博, 浮体式洋上風力発電施設のトラススパー型・セミサブ型浮体の構造特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第24巻, 2008
- 3) 安倍久美子, 宇都宮智昭, スパー型浮体におけるパラメータ励振に関する研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 2012