

スパー型浮体の流体力と動揺の数値予測に関する研究*

Numerical study on hydrodynamic forces and dynamic response of spar type floater

菊地由佳**

Yuka KIKUCHI

鄧小康***

Xiaokang DENG

大鳥弘雅***

Hiromasa OTORI

石原孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

浮体式洋上風力発電の導入が期待される中、2022～2023年度に実施されたグリーンイノベーション基金事業では、低コスト化のため多角形断面スパー型浮体が提案された。動揺予測には非線形流体力の評価が重要であり、Pan and Ishihara¹⁾は数値流体解析とリチャードソン外挿を用いて、セミサブ型浮体に作用する格子解像度によらない非線形流体力を評価した。Ishihara and Liu²⁾は非線形流体力モデルを提案したが、多角形断面スパー型浮体に作用する非線形流体力を評価した例はない。スパー型浮体は喫水が深く、サージ方向の流体力の分布が一様ではないことが考えられる。Otori et al.³⁾はバージ型浮体についてヒープ方向の流体力の分布を考慮することにより、ピッチ方向の流体力を説明できることを示した。スパー型浮体についても、サージ方向の流体力分布を明らかにし、ピッチ方向の浮体動揺に与える影響を評価する必要がある。さらに、スパー型浮体において、ピッチ方向の固有周期がヒープ方向の固有周期の整数倍となった際に、マシュ・インスタビリティと呼ばれる不安定現象が発生することが知られている⁴⁾。不安定現象の予測には非静水圧モデルが必要であるが、従来のシングルボディによる解析では静水圧近似となっている。

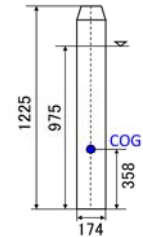
そこで、本研究では、数値流体解析を実施し、リチャードソン外挿を用いて、多角形断面スパー型浮体に作用する格子解像度に依存しない非線形流体力を評価する。次に、サージ方向の強制加振時の非線形流体力の分布を明らかにすることにより、ピッチ方向の浮体動揺に対する効果を明らかにする。評価した非線形流体力を用いるとともに、マルチボディによる浮体モデルを構築することにより、水槽実験で観測された不安定現象を高精度で予測する。

2. 数値流体解析による非線形流体力の予測と検証

本研究では、予測精度を検証するため 1/100 スケールの多角形断面スパー型浮体の水槽実験を実施した。強制動揺試験により流体力を、浮体動揺試験により浮体動揺を計測した。図 1 に水槽試験の写真を示すとともに、浮体の諸元を示す。喫水は模型スケールで 975 mm で、青点で示す浮体の重心位置は浮体底部から 358 mm に位置する。本研究で用いた浮体は、従来の実証試験で用いられた浮体の細長比に対して、長さが短いことが特徴である。



(a) 強制動揺試験



(b) 浮体の諸元

図 1 模型と水槽試験の全景

数値流体解析を用いて、浮体の強制動揺シミュレーションを実施し、流体力を評価した。OpenFOAM(v1606+)⁵⁾を用い、自由表面を考慮するために VOF 法を用いた。Pan and Ishihara¹⁾の研究に基づき、流体力係数の予測値の誤差を体系的に評価し、リチャードソン外挿を用いて格子解像度に依存しない解を求めた。

強制動揺試験およびシミュレーションにおいて、浮体変位 $x(t)$ は振幅 a_0 、振動数 ω_0 を用いて式(1)により表される。式(2)に示すように全体の流体力 $F_{Total}(t)$ から静水圧 F_b 、静的復元力 F_K を除き、動的流体力 $F_H(t)$ を求めた。 $F_H(t)$ は、式(3)に示すように付加質量 A と減衰 N に分解した。抗力係数 C_{d11} は、式(4)に示すように、減衰からポテンシャル理論に基づく造波減衰 B を除くことにより求めた。

$$x(t) = a_0 \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

$$F_H(t) = F_{Total}(t) - F_b - F_K(t) \quad (2)$$

$$F_H(t) = -A\ddot{x}(t) - N\dot{x}(t) \quad (3)$$

$$C_{d11} = (N - B) / \left(\frac{4}{3\pi} \rho_w S a_0 \omega_0 \right) \quad (4)$$

*令和 6 年 11 月 29 日第 46 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

会員 *学生会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

ここで、 ρ_w は水の密度、 S は代表面積である。図 2 には周期 1.2 秒、振幅 0.02m のサージ方向の強制動揺シミュレーションの結果を示す。抗力係数の予測値、リチャードソン外挿値および実験値との比較を図 2(a)に示す。外挿値は実験値と一致し、CFD の妥当性が検証された。評価した非線形流体力を考慮した自由振動における動揺予測結果を図 2(b)に示す。線形流体力のみを考慮した減衰率は、実験値を 82%過小評価しているが、抗力係数 C_{d11} を考慮することにより、過小評価は 3%に減少した。

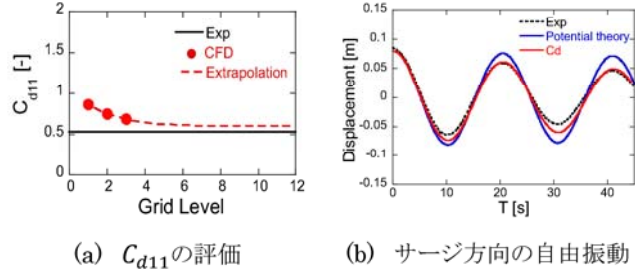


図 2 非線形流体力の予測値と実験値との比較

図 3 には周期 3.5 秒、振幅 0.05m ($KC=0.32$) のサージ方向の強制動揺シミュレーションの結果を示す。図 3(a)に示すように、浮体端部で大きな渦が発生することが確認された。浮体に作用する非線形流体力の分布を、浮体最下端から均等に 10 分割して各セクションで求めた。図 3(b)には各セクションの抗力係数を浮体全体の抗力係数で割った分布係数 $\gamma_{d11,i}$ を示す。浮体の端部効果により抗力係数が大きくなり、水面付近が小さくなっていることが分かる。

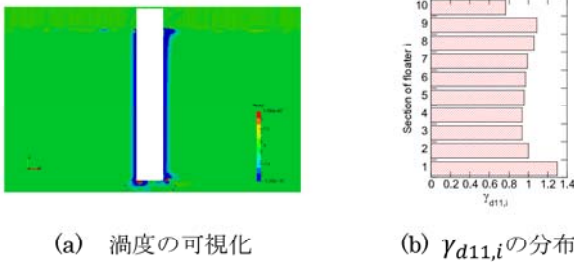


図 3 サージ方向の非線形流体力の分布

ピッチ動揺時には、回転中心からの距離に比例して、動揺振幅が大きくなる。図 4(a)に示すように、サージ方向の抗力係数 C_{d11} は振幅の増大により減少し、 KC 数の一次関数としてモデル化した。図 4(b)には各セクションの動揺振幅を考慮して評価した $C_{d11,i}$ の分布を示す。

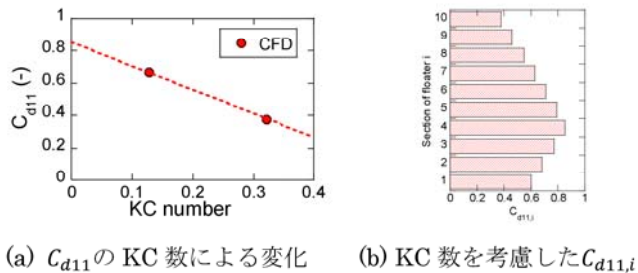


図 4 KC 数を考慮した各セクションにおける $C_{d11,i}$

振幅依存性を考慮して評価した抗力係数 $C_{d11,i}$ に浮体端部および自由表面の効果を考慮した分布係数 $\gamma_{d11,i}$ を乗じることにより、各セクションにおけるサージ方向の抗力係数 $C'_{d11,i}$ を図 5(a)に示すように評価し、ピッチ方向の自由振動解析を行った結果を図 5(b)に示す。ポテンシャル理論に基づく造波減衰 B のみを考慮したピッチ方向の減衰率の予測値は、実験値を 50%過小評価しているのに対して、 $C'_{d11,i}$ を考慮することにより、過小評価は 2%に減少し、予測精度が向上した。

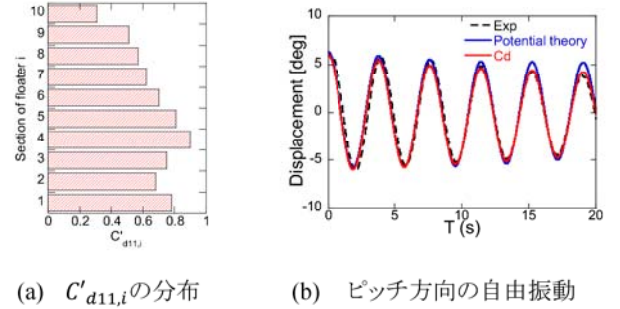


図 5 非線形流体力分布の評価とピッチ方向の動揺予測

サージ方向抗力係数 C_{d11} については、Ishihara and Liu²⁾がセミサブ浮体に対して提案した流体力モデルの評価手法を参考に、今回の強制動揺シミュレーションおよび細長カラムに対する過去の実験から、式 (5) に示すようにモデル化した。

$$C_{d11} = \begin{cases} 2.25 \tanh(2.88 \log Re - 14.9) + 2.6, & Re \leq 10^{4.8} \\ -0.18 \tanh(6 \log Re - 30) + 0.75, & Re > 10^{4.8} \end{cases} \quad (5)$$

また、ヒープ方向抗力係数 C_{d33} は、Ishihara and Liu²⁾により提案された予測式がスパー浮体にも適用できると判断し、式 (6) を用いた。

$$C_{d33} = -0.56(1.5KC + 0.44)^{-2.0} + 0.83 \quad (6)$$

3. マルチボディモデルによる浮体動揺の予測

浮体動揺水槽試験の全景および風車・浮体模型を図 6 に示す。表 1 および表 2 に、風車・浮体および係留索の緒元を示す。本実験において、風車の重量は 20MW に相当する質量となっている。係留索にはブライドル係留を用いた。

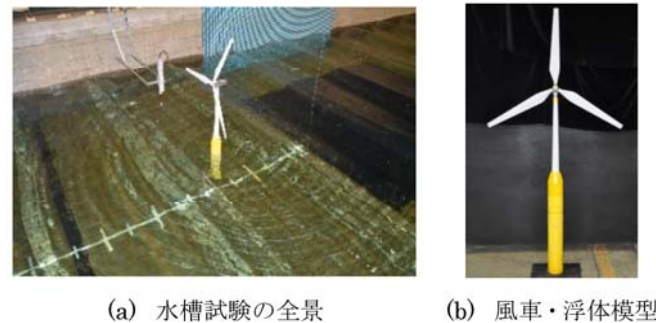


図 6 水槽試験と模型の全景

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	-1.25
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
ブライドル係留索長さ	m	0.44

動揺解析には Orcaflex[®]を用い、係留索の解析には動的モデルを用いた。線形流体力はポテンシャル理論により評価し、二次波力はAQWA⁷を用いて、Full QTFにより評価した。またサージとヒープ方向の非線形流体力は2節で示したレイノルズ数とKC数の関数として評価した。係留索に用いた抗力係数とともに、表3に示した。スパー型浮体のマシュー・インスタビリティは、浮力の時間変化により発生する自励振動であることが知られている⁴⁾。本研究では、浮力の時間変化を考慮するために、浮体を10個のマルチボディによりモデルした。

表4には、構築したモデルを用いて、浮体の固有周期を予測し、実験値と比較した結果を示す。各方向の固有周期の予測値は実験値とよく一致し、モデルの妥当性を示した。また、ピッチ方向の固有周期がヒープ方向の固有周期の1.86倍となり、2倍に近く、マシュー・インスタビリティの発生条件を満たしている。

表 3 動揺解析で用いた抗力係数

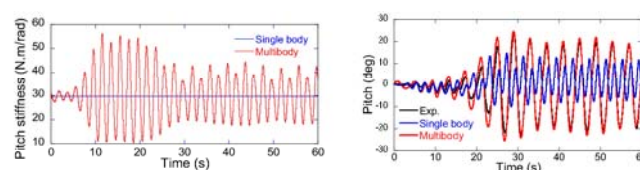
浮体	サージ方向	Eq. (5)により評価
	ヒープ方向	Eq. (6)により評価
係留	法線方向	2.4
	軸方向	0.008

表 4 固有周期の実験値と予測値との比較 (秒)

	実験値	予測値	誤差
サージ	20.3	20.3	0.0 %
ヒープ	2.03	2.03	0.0 %
ピッチ	3.78	3.77	-0.2 %
ヨー	4.10	4.16	+2.0 %

規則波を用いた水槽試験において、ヒープ方向の固有周期に相当する波周期2秒の条件下で、ヒープ方向の動

揺が減少し、ピッチ方向の動揺が増大するマシュー・インスタビリティが観察された。図7にはシングルボディモデルおよびマルチボディモデルを用いた動揺予測における浮力とピッチ方向の浮体動揺の予測値を示す。静的復元力のみを考慮するシングルボディモデルに対して、非静水圧を考慮できるマルチボディモデルでは没水体積を正確に考慮することにより、浮力の時間変化を考慮できることが分かる。その結果、シングルボディモデルに比べ、ピッチ方向の浮体動揺の増加がよく再現され、ピッチ動揺の予測値は実験値とよく一致した。

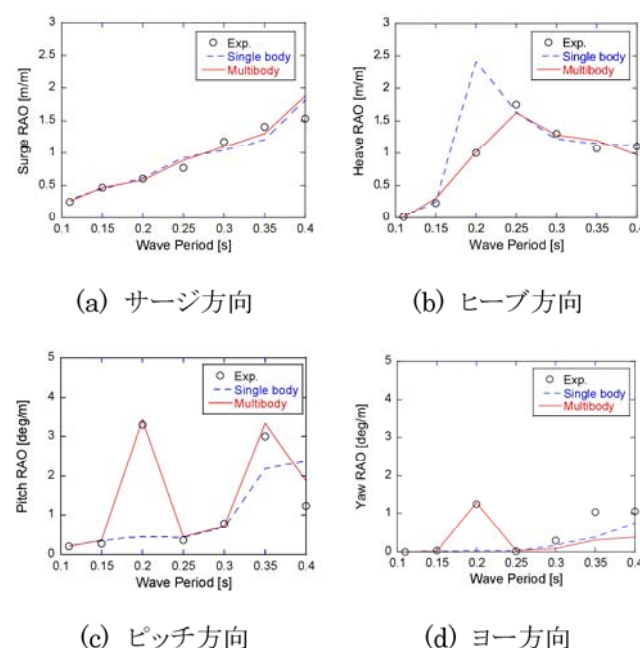


(a) 浮力

(b) 浮体動揺

図 7 ピッチ方向の浮力と浮体動揺の時系列の比較

図8には、波高0.117mの規則波試験における周波数応答関数の予測値と実験値との比較を示す。従来のシングルボディモデルは、不安定現象であるマシュー・インスタビリティを再現できないため、ヒープ方向の固有周期に近い波周期2秒において、ヒープ、ピッチ、ヨー方向の予測精度が大きく低下したが、マルチボディモデルでは、予測値は観測値とよく一致し、マシューインスタビリティによる動揺は精度よく再現されていることが分かる。



(a) サージ方向

(b) ヒープ方向

(c) ピッチ方向

(d) ヨー方向

図 8 規則波中の浮体動揺の予測値と実験値との比較

図9には、有義波高0.1m、有義波周期1.34秒の不規則波におけるシングルボディとマルチボディによる浮体動揺の予測値と実験値の比較を示す。シングルボディによる予測値がサージ、ピッチおよびヨー方向の動揺を過小評価しているのに対し、マルチボディによる動揺予測の精度は向上していることが分かる。マルチボディを用いることにより、各ボディでの波位相の変化が厳密に考慮されることにより、浮力が浮体動揺に与える影響を精度よく予測できたことによるものと考えられる。図10には浮体動揺の最大値および標準偏差の予測値と実験値の比較を示す。マルチボディを用いることにより、サージ、ピッチ、ヨー方向の動揺の過小評価が大きく改善された。

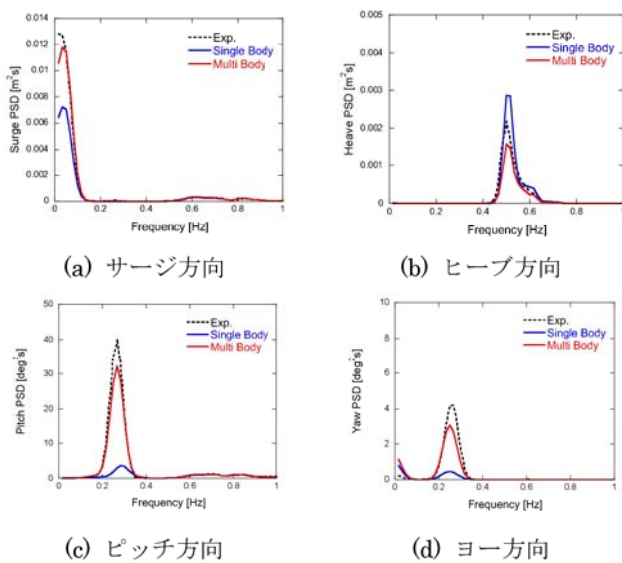


図9 不規則波におけるPSDの予測値と実験値との比較

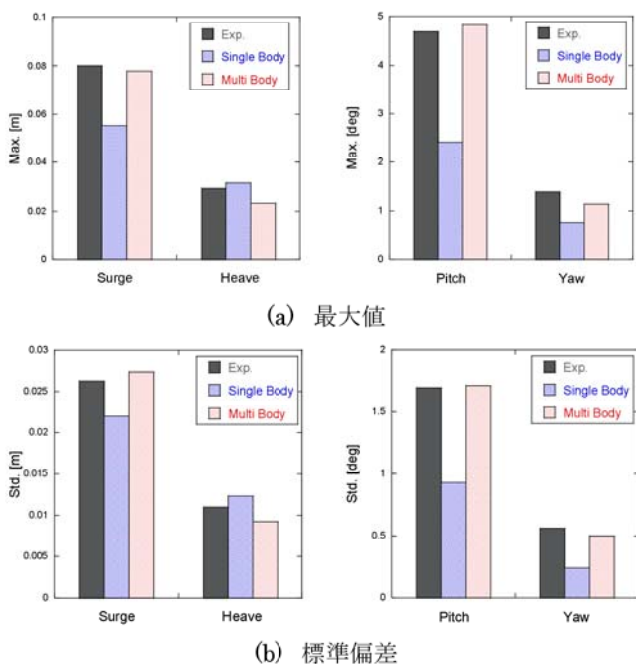


図10 不規則波中の浮体動揺の予測値と実験値との比較

4. まとめ

本研究では、大型風車を搭載するスパー型浮体の1/100縮尺模型について数値流体解析による動揺予測を行い、水槽試験の結果と比較することにより、予測精度を評価し、以下の結論を得た。

1. 数値流体解析とリチャードソン外挿を用いて、格子解像度に依存しない多角形断面スパー型浮体の水平方向の非線形流体力を評価し、水槽試験の結果とよく一致する結果を得た。
2. サージ方向の非線形流体力の分布を浮体端部と自由表面効果および浮体振動の振幅依存性を考慮することにより評価し、ピッチ方向の自由振動における減衰比の予測誤差は-50%から-2%まで低減した。
3. 本研究により評価した非線形流体力および非静水圧を用いるとともに、マルチボディによる浮体モデルを構築することにより、水槽試験で観測された規則波で発生した不安定現象マシュー・インスタビリティを高精度に予測するとともに、規則波中および不規則波中での動揺予測精度を向上した。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究「グリーンイノベーション基金事業／浮体式大量導入に向けた大型スパー浮体式基礎の製造・設置低コスト化技術の開発」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) Ishihara, T., Pan, J. "Numerical prediction of hydrodynamic coefficients for a semi-sub platform by using large eddy simulation with volume of fluid method and Richardson extrapolation." J. Phys. Conf. Ser. 2019, 1356, 012034.
- 2) Liu, Y. and Ishihara, T. "Prediction of dynamic response of semi- submersible floating offshore wind turbines by a novel hydrodynamic coefficient model", Journal of Physics Conference Series, 1356:012035, 2019.
- 3) Otori, H. et al., "Numerical study of hydrodynamic forces and dynamic response for barge type floating platform by computational fluid dynamics and engineering model." Ocean Engineering, Vol. 284, 2023
- 4) 宇都宮智昭, 佐藤朋希, 松熊秀和, 矢後清和, 洋上風力発電用スパー型浮体の波浪応答実験と解析, 海洋開発論文集, 第25巻, 2009.
- 5) OpenFOAM, framework version 1606+.
- 6) Orcaflex, Release 11.2d, Orcina Ltd.
- 7) AQWA, Ansys, Inc.