

第I部門

2024年9月6日(金) 10:40 ~ 12:00 A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(2)

座長：木村 吉郎（東京理科大学）

11:10 ~ 11:20

[I-330] 数値流体解析を用いたスパーク型浮体に働く流体力予測に関する研究

*若原 巧実¹、菊地 由佳¹、石原 孟¹ (1. 東京大学大学院工学系研究科)

キーワード：数値流体解析、非線形流体力、浮体式洋上風力、スパーク型浮体、動揺予測

本研究では、数値流体解析による強制動揺シミュレーションとリチャードソン外挿を用いて、多角形断面スパーク型浮体に働く非線形流体力を予測し、従来の線形流体力のみを考慮した場合に対して浮体の動揺予測精度を向上した。まず、サージ方向の非線形流体力を予測し、実験値とよく一致することを示した。予測した非線形流体力を用い、サージ方向の浮体動揺予測精度を向上した。次に、サージ方向の非線形流体力分布を3次元効果と振幅依存性を考慮することにより評価し、ピッチ方向の浮体動揺予測精度を向上した。最後に、ヨー方向の非線形流体力を評価し、非線形流体力を考慮することで動揺予測精度を向上した。

数値流体解析を用いたスパー型浮体に働く流体力予測に関する研究

東京大学 学生会員 ○若原 巧実
 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システムの高精度な動揺予測において、浮体に作用する流体力の予測が重要である。ポテンシャル理論により評価される線形流体力に加えて、非線形流体力の評価が重要であるが¹⁾、多角形断面スパー型浮体の非線形流体力を評価した例がない。また、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. (2023)²⁾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、スパー型浮体は水線面積が小さく抵抗力が小さいため、ヨー方向の浮体動揺予測が重要となるが、ヨー方向の非線形流体力が評価された例はない。

そこで、本研究では、数値流体解析による強制動揺シミュレーションを実施することにより、多角形断面スパー型浮体におけるサージ方向の非線形流体力を評価し、水槽実験により検証する。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。最後に、ヨー方向の非線形流体力を予測し、ヨー方向の浮体動揺に対する効果を明らかにする。

2. 水槽試験と数値モデル

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。

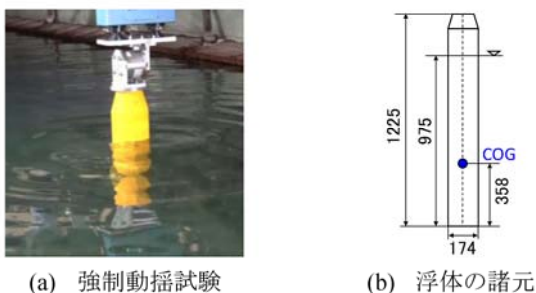


図 1 模型と水槽試験の全景

数値流体解析では、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+) を用い、自由表面を考慮するために VOF 法を用いた。Pan and Ishihara (2019)³⁾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 に分解することができる。抗力係数は、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。

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

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

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

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

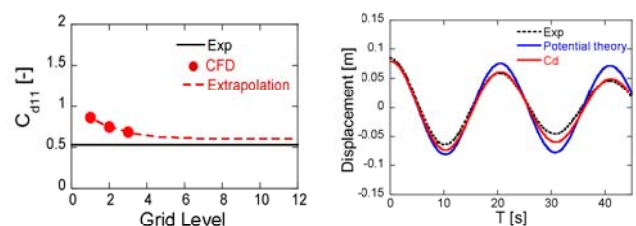
ここで、 C_d は抗力係数、 ρ_w は水の密度である。 S は代表面積であり、 y - z 方向の投影面積を用いた。風車-浮体-係留の連成解析は Orcaflex を用いて実施した。

3. 解析結果と考察

3.1 サージ方向の非線形流体力の評価と動揺予測

周期 1.2 秒、振幅 0.05 m のサージ方向の強制動揺シミュレーションにおいて評価した抗力係数の予測値とリチャードソン外挿による外挿値、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、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サージ方向の減衰率は、実験値を 82% 過小評価しているが、 C_{d11} を考慮することにより、3% の過小評価になり、予測精度が向上した。



(a) C_{d11} の評価

(b) サージ方向の自由振動

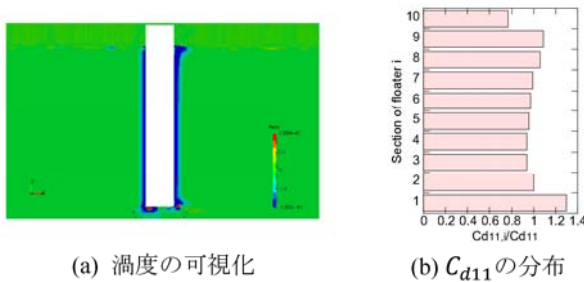
図 2 サージ方向の非線形流体力の評価と動揺予測

キーワード 数値流体解析、非線形流体力、浮体式洋上風力、スパー型浮体、動揺解析

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 TEL 03-5841-6083

3.2 非線形流体力分布の評価とピッチ方向の動揺予測

周期 3.5 秒, 振幅 0.05m のサージ方向の強制動揺シミュレーションを実施した. 図 3(a)に示すように, 浮体端部で大きな渦が発生し, 3 次元効果が確認された. 浮体に作用する非線形流体力の分布を評価するため, 浮体最下端から均等に 10 分割した各セクションにおいて評価した抗力係数 $C_{d11,i}$ を浮体全体で評価した抗力係数 C_{d11} で割った値を評価し, 図 3(b)に示した. 浮体端部において 3 次元効果により抗力係数が大きくなっていることが分かる.

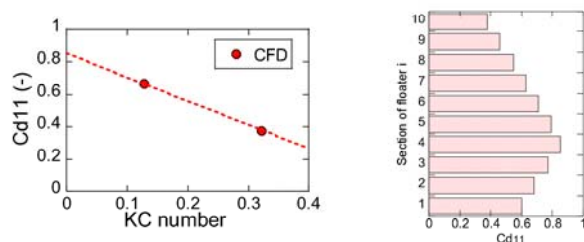


(a) 渦度の可視化

(b) C_{d11} の分布

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. そこで, サージ方向の抗力係数を 2 つの異なる振幅で評価し, 図 4(a)に示すように KC 数の一次関数として C_{d11} をモデル化した. 提案モデルに基づいて, 各セクションの C_{d11} を評価した結果を図 4(b)に示す.

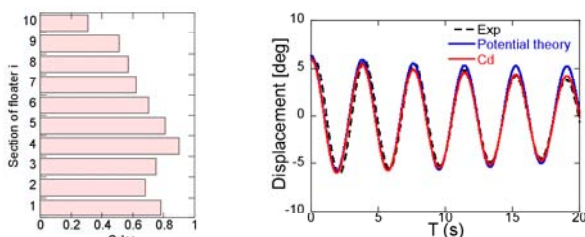


(a) KC 数と C_{d11} との関係

(b) KC 数を考慮した C_{d11}

図 4 各要素に働く C_{d11}

3 次元効果を考慮した分布に, 振幅依存性を考慮して評価した抗力係数に乗じることにより, 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. 線形流体力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} を考慮することにより, 2%の過小評価になり, 予測精度が向上した.



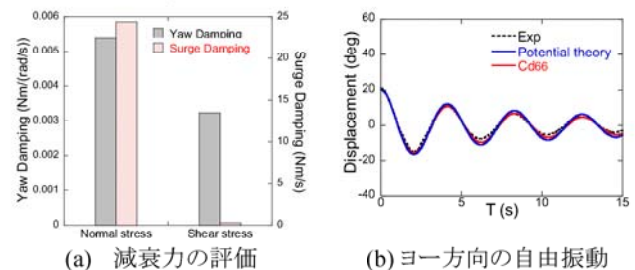
(a) C_{d11} の分布

(b) ピッチ方向の自由振動

図 5 非線形流体力分布の評価とピッチ方向の動揺予測

3.3 ヨー方向の非線形流体力の評価と動揺予測

周期 1.2 秒, 振幅 20deg のヨー方向の強制動揺解析を行い, 非線形流体力を発生起因別に評価した結果を図 6(a)に示す. サージ方向に比べ, ヨー方向ではせん断力による寄与が大きく, 0.0086Nm/(rad*s)と評価した. サージ方向では, 渦の発生に起因する減衰が支配的であるのに対し, ヨー方向では, 周面摩擦に起因する減衰が全体の 40%を占めている(図 6(a)). 図 2(b)には数値流体解析により評価した非線形流体力を用いて自由振動計算の結果を示す. 線形流体力のみを考慮したヨー方向の減衰率は, 実験値を 20%過小評価しているが, C_{d66} を考慮することにより, 0%の過小評価になり, 予測精度が向上した.



(a) 減衰力の評価

(b) ヨー方向の自由振動

図 6 ヨー方向の非線形流体力の評価と動揺予測

4. まとめ

本研究では数値流体解析による強制動揺シミュレーションを実施し, 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するとともに, 水槽実験と比較することにより, 下記の結論を得た.

- 1) 数値流体解析によるサージ方向の非線形流体力の予測値が実験値と一致することを示し, 非線形流体力を用いてサージ方向の自由振動における減衰比の予測精度を-82.4%から-3%まで向上した.
- 2) サージ方向の非線形流体力分布を3次元効果と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精度を-50%から-2%まで向上した.
- 3) ヨー方向の非線形流体力を評価し, ヨー方向の自由振動における減衰比の予測精度を-20%から 0%まで向上した.

参考文献

- 1) Ishihara, T., Zhang, S. "Numerical study of hydrodynamic coefficients of multiple heave plates by large eddy simulations with volume of fluid method." Ocean Engineering, Vol. 163, pp: 583-598, 2018
- 2) 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
- 3) 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.