

直接数値シミュレーションを用いたバージ型浮体の 流体力係数の予測と水槽試験による検証*

Numerical prediction of hydrodynamic coefficients for a barge platform
by using direct numerical simulation and validation by water tank tests

大鳥弘雅**

Hiromasa OTORI

菊地由佳**

Yuka KIKUCHI

石原孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

浮体式洋上風力発電の低コスト化に向け、バージ型浮体の実用化が求められている。セミサブ型が細長部材で構成されるのに対し、バージ型は大きな四角形の浮体であり、薄いスカートを持つため、流体力の非線形性が強い。合理的設計のため、非線形流体力を高精度に予測し、動揺予測を行うことが重要である。

数値流体解析（CFD）を用いた非線形流体力の評価が行われてきた。Pan and Ishihara¹⁾は、セミサブ型浮体に働く非線形流体力を、LES を用いて予測するとともに、離散化誤差を体系的に評価し、リチャードソン外挿を用いて高精度の解を得た。しかし、バージ型浮体に働く流体力について、同様の研究を行った例はない。

流体力は、レイノルズ数と振幅に依存することが知られる。Liu and Ishihara²⁾は、セミサブ型浮体について、実験および数値流体解析で予測した流体力係数を基に、レイノルズ数と KC 数を考慮した非線形流体力モデルを構築し、異なる波周期・波高における動揺の予測精度を向上した。バージ型浮体についても、KC 数を考慮した流体力モデルの構築が求められる。

バージ型浮体の動揺解析について、Kosasih ら³⁾は、不規則波中の動揺予測を行い、予測値が水槽実験による観測値とよく一致することを示した。しかし、流体力は水槽実験における規則波の観測値より同定する手法を用いていたため、ピッチ方向において予測値が観測値を過大評価することが報告されている。

本研究では、直接数値シミュレーションによりバージ型浮体に作用する流体力係数を予測するとともに、リチャードソン外挿により格子依存しない解を評価する。次に、予測した流体力係数に基づいて、KC 数を考慮したバージ型浮体の非線形流体力モデルを構築する。最後に、構築した非線形流体力を用いて、浮体の動揺を予測するとともに、水槽実験を用いて検証する。

2. 水槽試験と数値モデル

2.1 水槽試験

本研究では、動揺予測精度を検証するために 1/100 スケールバージ型浮体の水槽実験を実施した。流体力を計測する強制動揺試験と浮体動揺を計測する浮体動揺試験を実施した。図 1 に水槽試験の写真を示すとともに、図 2 および表 1 に浮体の主要な諸元と座標系を示す。厚さ 3.5mm の薄いスカートとムーンプールを有する点が特徴である。係留索は 4 本のカテナリー係留を用いた。

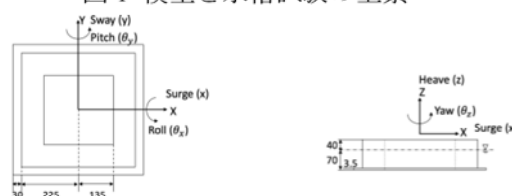


(a) 強制動揺試験



(b) 浮体動揺試験

図 1 模型と水槽試験の全景



(a) 上面図

(b) 側面図

図 2 浮体模型の諸元と座標系 (単位: mm)

表 1 浮体の主要諸元

項目	単位	値
排水量	kg	9.27
重心高さ（底面から）	m	0.1335
喫水	m	0.07
慣性モーメント	kg・m ²	0.356

2.2 直接数値シミュレーションによる流体力評価

直接数値シミュレーション（DNS）により、浮体の強制動揺試験を解析し、流体力を評価した。自由表面を考慮するために VOF 法を用い、ソフトウェアは OpenFOAM を用いた。流体力係数の予測値の数値誤差を体系的に評価するとともに、リチャードソン外挿を

*令和 4 年 12 月 2 日第 44 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**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

用いた。流体力の厳密解 ϕ は、式(1)に示すように格子間隔 h における近似解 ϕ_h と離散化誤差 ε_h の和として表され、離散化誤差 ε_h は十分細かい格子においてテイラー級数の主要項に比例する。

$$\phi = \phi_h + \varepsilon_h, \quad \varepsilon_h \approx \alpha h^p + H \quad (1)$$

ここで、 H は誤差の高次項を表す。3 種類の異なる計算格子において流体力の近似解 $\phi_{h_1}, \phi_{h_2}, \phi_{h_3}$ を評価することにより、係数 α と指数 p が式(2)に示すように同定され、厳密解 ϕ が式(3)に示すように評価される。

$$\alpha = \frac{\phi_{h_3} - \phi_{h_2}}{h_3^p (\lambda^p - 1)}, \quad p = \frac{\log(\frac{\phi_{h_2} - \phi_{h_1}}{\phi_{h_3} - \phi_{h_2}})}{\log \lambda} \quad (2)$$

$$\phi = \phi_{h_2} + \frac{\phi_{h_2} - \phi_{h_1}}{\lambda^p - 1} \quad (3)$$

ここで、 λ は格子サイズの比率であり、 $h_1 = \lambda h_2 = \lambda^2 h_3$ となる。本研究では、 λ を2とした。

強制動揺試験において、浮体変位 $x(t)$ は振幅 a_0 、振動数 ω_0 を用いて式(4)により表される。式(5)に示すように全体の流体力 $F_{Total}(t)$ から静水圧 F_b 、静的な復元力 F_K を除き、動的流体力 F_H を求めた。 F_H は、式(6)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(7)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。

$$x(t) = a_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

$$F_H(t) = F_{Total}(t) - F_b - F_K(t) \quad (5)$$

$$F_H(t) = -A\ddot{x}(t) - N\dot{x}(t) \quad (6)$$

$$C_d = \frac{N - B}{\frac{4}{3\pi} \rho_w S a_0 \omega_0} \quad (7)$$

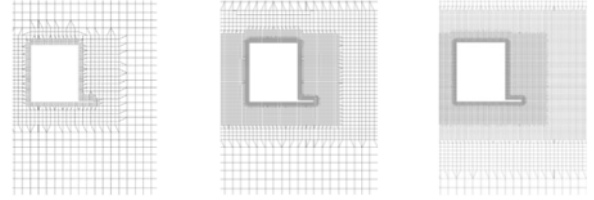
ここで、 C_d は抗力係数、 ρ_w は水の密度である。 S は代表面積であり、スカート底面積を用いた。

2.3 浮体の動揺解析

浮体-係留の連成解析を Orcaflex ver.11.2d を用いて実施した。流体力について、線形流体力は AQWA を用いてポテンシャル理論により評価し、抗力係数は第3章で提案する非線形流体力モデルを用いて評価する。また、数値流体解析において可視化した渦の分布に基づき、抗力の分布を定めた。水平方向の抗力は、浮体本体の喫水の中心位置に分布した。鉛直方向の抗力は、浮体のスカート部を10要素に分割して分布させた。動揺解析における KC 数は、各要素において、対応する振幅から求めた。係留については、FEM による動的係留モデルを用いた。

3. 直接数値シミュレーションによる流体力の評価

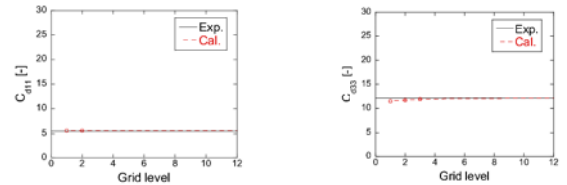
DNS の実施にあたり、3 つの異なる格子を、図3に示すように作成した。スカートから発生する渦を高精度に予測するため、浮体近傍ほど細かいメッシュとなるよう、3層に分けて作成した。



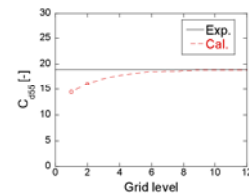
(a) 格子1 (b) 格子2 (c) 格子3

図3 浮体まわりの格子分布

作成した格子を用いて、直接数値シミュレーションを実施し、加振周期1.2秒において、格子解像度別に抗力係数の予測値と実験値とを比較した結果を図4に示す。粗いレベル1の格子において、サージ方向とヒープ方向の抗力係数は実験値とよく一致した一方、ピッチ方向の抗力係数は観測値を過小評価した。レベル2とレベル3の結果を用いて、リチャードソン外挿を適用することにより、実験値とよく一致した解を得た。ここで同定した p を用い、その他の周期および振幅において、式(3)を用いて、解を評価した。



(a) サージ方向 ($KC=1.23$) (b) ヒープ方向 ($KC=0.99$)



(c) ピッチ方向 ($KC=0.55$)

図4 異なる格子サイズの C_d の予測値と実験値との比較

図5には、異なる加振周期における流体力について、レベル2の格子による予測値、リチャードソン外挿を用いた予測値、および実測値を示した。ヒープ方向の付加質量係数およびピッチ方向の減衰力において、レベル2の格子は実験値を過小評価する一方、リチャードソン外挿を用いた予測値は実験値とよく一致した。

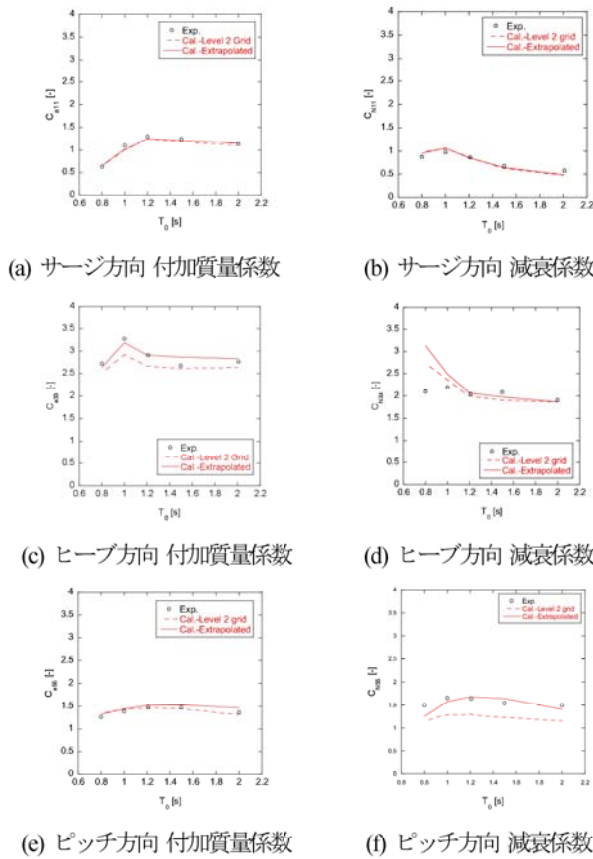


図5 異なる加振周期における流体力の予測値と実験値との比較

抗力係数の分布を可視化するため、強制加振時の渦の剥離を Q-Criterion を図6に示し、大きな渦の位置を点線で囲った。サージ方向については、浮体本体の角で最も大きな渦が発生しており、剥離点の下流側の浮体表面の動圧が広い範囲で減少し、サージ方向の抗力に大きく寄与する。一方、ヒープ方向とピッチ方向では、スカートに大きな渦が発生している。ピッチ方向については、スカートの回転中心から遠い場所ほど流速が大きく、強い渦が生じている。

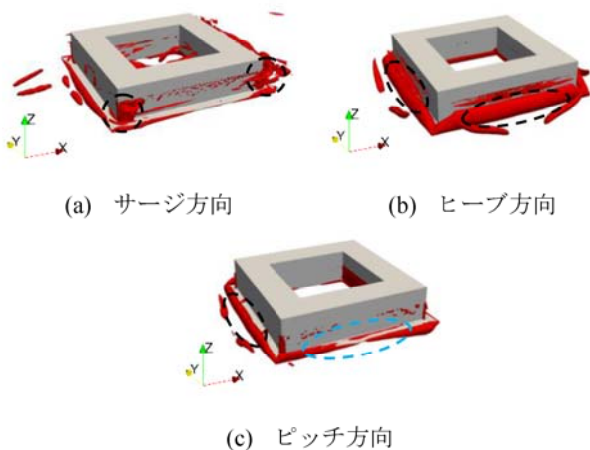


図6 Q-Criterion による渦度の可視化 (Q=20)

3つの周期において予測した抗力係数と KC 数との関係を図7に示す。予測した波周期の範囲で周期依存性は小さく、各方向における抗力係数を KC 数の関数でモデル化した。最小二乗法によるフィッティングにより、式(8)~(10)に示すようなバース型浮体の非線形減衰力モデルを提案した。

$$C_{d11} = C_{d11,ref} \{-0.45(2.83KC + 1)^{0.33} + 1.93\} \quad (8)$$

$$C_{d33} = C_{d33,ref} \{-0.45(28.3KC + 1)^{0.33} + 1.93\} \quad (9)$$

$$C_{d55} = C_{d55,ref} \{-0.45(28.3KC + 1)^{0.33} + 1.93\} \quad (10)$$

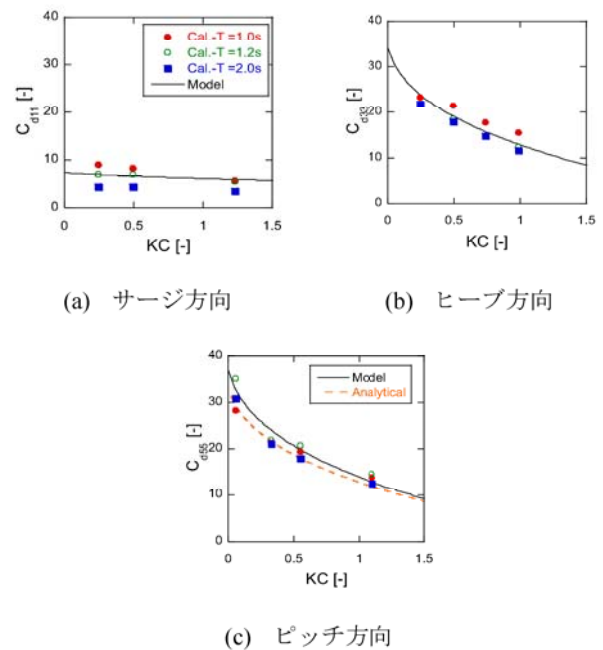


図7 抗力係数の予測値と実験値の比較

4. 浮体動揺に及ぼす非線形流体力の影響

提案したサージとヒープ方向の抗力係数モデルにより抗力係数を評価し、浮体の動揺解析を行った。自由減衰試験の結果を図8に示す。比較のため、ポテンシャル理論による予測値も示した。各方向の固有周期の予測値は、抗力係数の考慮によらず実験値とよく一致し、構築した浮体モデルの妥当性が確認された。減衰比については、ポテンシャル理論による値が過小評価されたが、提案モデルによる予測値は実験値をよく再現した。

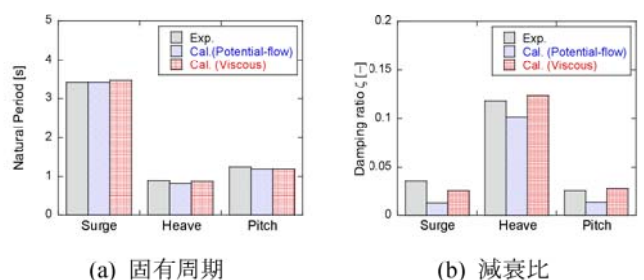


図8 自由振動試験による実験値と予測値との比較

小波高 0.02m と大波高 0.18m における規則波中解析を実施し、浮体の周波数応答関数(RAO)の実験値と予測値との比較を図 9 に示した。小波高において、ヒープとピッチ方向の固有周期における共振領域において、提案モデルを用いた予測値は実測値とよく一致している。大波高においても、線形流体力のみではサージ、ヒープ、ピッチ方向の振幅を過大評価する一方、提案モデルでは予測値は観測値とよく一致した。小波高と比べて、大波高においては、ポテンシャル理論による予測値と非線形減衰を考慮した予測値との差がヒープとピッチ方向において小さくなっているが、これは、大波高において係留索に働く抗力の影響が大きくなることによる。

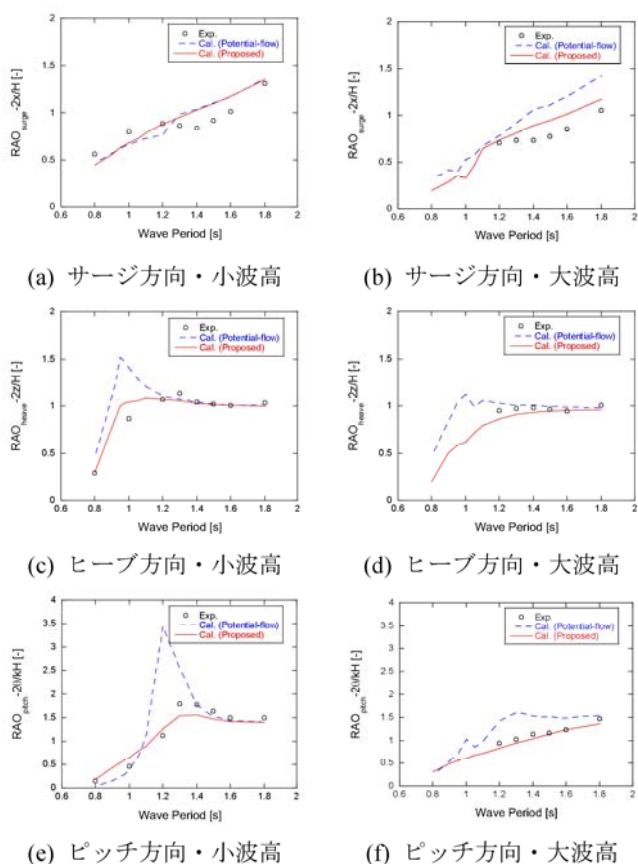


図 9 浮体の周波数応答関数の予測値と実験値との比較

有義波高 0.02m (小波高) と 0.10m (大波高) における有義波周期 1.4s の不規則波中の解析を実施し、浮体動揺のパワースペクトル密度 (PSD) の予測値と実験値の比較を図 10 に示した。規則波試験と同様に、提案モデルにより、ピッチ方向の共振領域において、予測値は実験値とよく一致した。

なお、ピッチ方向の抗力モデルを用いなかったが、これは図 7(c)に示すように、ヒープ方向の抗力モデルから幾何学的にピッチ方向の抗力モデルが導出できることを確認したためである。

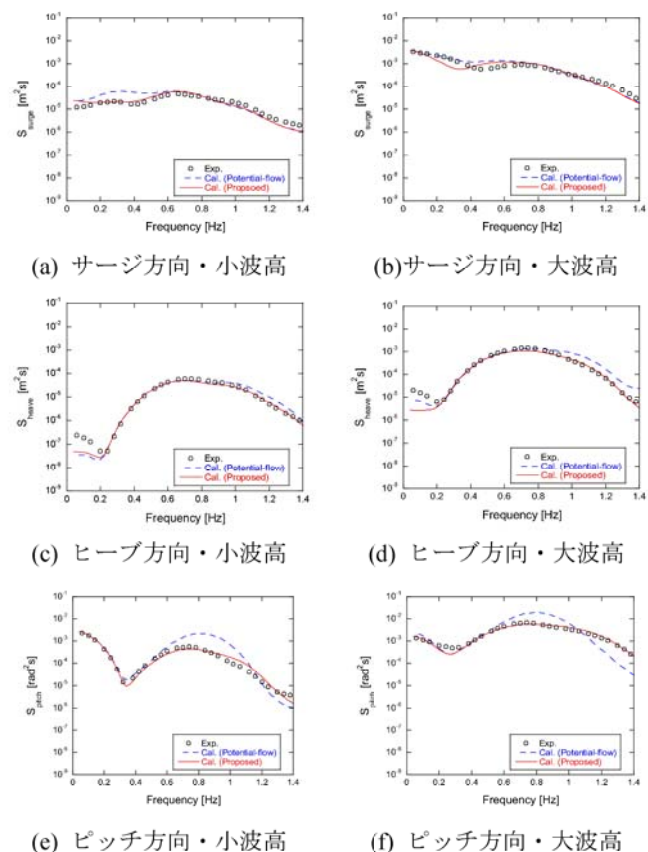


図 10 浮体動揺の PSD の予測値と実験値との比較

5. まとめ

本研究では、バージ型浮体の流体力係数を直接数値シミュレーションを用いて評価し、以下の結論を得た。

1. 直接数値流体解析によりバージ型浮体の流体力係数を評価するとともに、離散化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依存しない解を得た。
2. 非線形減衰力の予測値を基に、バージ型に作用する抗力係数のモデルを KC 数の関数として構築した。
3. 構築した流体力モデルを用いて浮体の動揺解析を実施し、異なる波高における浮体動揺の予測値は実験値とよく一致した。

参考文献

- 1) J. Pan, T. Ishihara, Numerical prediction of hydrodynamic coefficients for a semi-sub platform by using large eddy simulation with volume of fluid method and Richardson extrapolation, Journal of Physics Conference Series, 1356:012034, 2019.
- 2) Y. Liu, T. Ishihara, 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) K.M.A. Kosasih, et al., Wave Tank Experiment and Coupled Simulation Analysis of Barge-Type Offshore Wind Turbine., the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2019.