

スパーク型浮体曳航時の動揺解析に関する研究

小林 拓磨¹・西畑 剛²・野崎 文也³

¹正会員 五洋株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:takuma.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp(Corresponding Author)

²正会員 五洋株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

³株式会社IDAJ 解析技術8部 (〒220-8137 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-2-1-37F)

E-mail:nozaki.fumiya@idaj.co.jp

スパーク型浮体式洋上風車の施工過程において、浮体製作場所から外洋のウィンドファーム海域までのスパーク型浮体曳航時における動揺特性を把握し、作業可否基準を定める必要がある。そこで、本研究では、横波作用時のスパーク型浮体曳航に関する水理模型実験結果を基に、OpenFOAMによる動揺解析を行い、同解析手法による再現性を確認した。OpenFOAMによる解析では、係留系の影響が卓越するRollingの動揺特性を概ね再現できた。また、波高と波周期に追従するPitchingとHeavingの動揺を良好に再現できることが分かった。また、曳航索に作用する張力は、破断荷重に対する安全率を考慮すると、安全設計に使用できる精度であることが分かった。以上のことから、OpenFOAMによる曳航解析の有用性が示唆された。

Key Words : offshore wind turbine, OpenFOAM, Overset Mesh, interDyMFoam, linerSpringDamper

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた有望な再生可能エネルギーの一つとして、洋上風力発電が注目されている。特に浮体式洋上風力発電は、着床式洋上風力発電に比べてエネルギーの賦存量が大きい¹⁾ため、その導入が期待されている。スパーク型浮体式洋上風車の施工過程において、浮体製作場所から外洋のウィンドファーム海域までのスパーク型浮体曳航時における動揺特性を把握し、作業可否基準を定める必要がある。特に、横波を受ける際に、浮体のRollingが懸念されるため、施工計画管理上、非常に重要である。既往の研究では、安野ら (2010) や道前ら (2018) が、ポテンシャル理論に基づく長大ケーソン曳航時の動揺解析を行っている^{2),3)}が、長大円筒構造物を対象とした数値解析によるシュミレーション事例は見られない。本研究の対象となる円柱構造物の解析手法としては、非構造格子を用いた数値解析ツールが有用であると考えられる。例えば、3次元流体力学ツールであるOpenFOAM⁴⁾は、任意多面体の非構造格子に対応した有限体積法を用いているため、複雑形状での解析が容易である⁵⁾。加えて、オープンソースソフトウェアであるため、コードを変更して機能を拡張できることも特徴である。橋本ら (2020) は、クレーン船を対象とした水理模型実験ならびにOpenFOAMによる再現解析を実施し、

計算コストが大きいものの、再現性が高いことを示している⁶⁾。

そこで、本研究では、横波作用時のスパーク型浮体曳航に関する水理模型実験結果を検証データとして、OpenFOAMによる動揺解析を行い、同解析手法の再現性を確認することを目的とした。施工時は、写真-1のように前方で牽引する主曳船と後方でブレーキなどの制御を担う補助曳船が配置される。実験では、主曳船と浮体間には浮体側に2点係留点があるY字係留、補助曳船と浮体間にはV字で係留されている。しかし、OpenFOAMの標準のライブラリを用いた場合、補助曳船側のV字係留は再現できるが、曳航ロープが二股に分かれたY字係留での解析を実施できない。そこで、OpenFOAMにY字係留機能を実装し、既存のV字係留として解析した場合との比較を行い、実務上での有用性の観点から評価を行った。



写真-1 スパーク型浮体曳航時の様子

(<https://www.youtube.com/watch?v=RHcy4uOEKYY>)

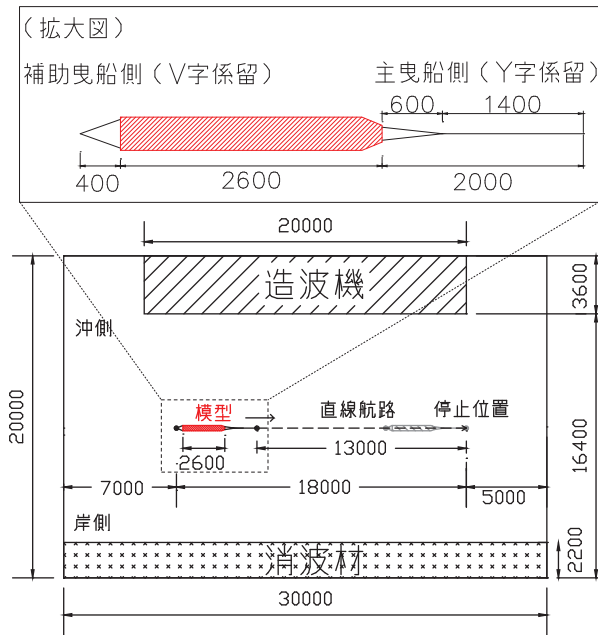


図-1 実験平面図 (単位: mm) ※縮尺 1/50

表-1 浮体諸元 (縮尺 1/50)

長さ L	2.6 m
直径 ϕ	0.33 m
平均喫水 d	0.064 m
排水重量 W	27.17 kg
慣性モーメント I	0.57 kg · m ² (長手方向軸周り) 22.04 kg · m ² (横方向軸周り) 21.86 kg · m ² (鉛直方向軸周り)
重心高さ KG	0.165 m

2. 研究手法

(1) 水理模型実験概要

実験は、平面水槽 ($L=30\text{ m}$, $B=20\text{ m}$, $H=1.0\text{ m}$) を用いて、フルードの相似則に基づく 1/50 スケールで実施した (図-1)。水中に敷設したレールに沿って台車を一定速度で航行させ、水中の台車から気中に支柱を張り出し、スパー型浮体と曳航ロープで連結することで主曳船および補助曳船の牽引、係留を模擬している。曳航ロープは、バンコード $\phi 4\text{ mm}$ (ポリウレタン) を用いて、前の主曳船側は Y 字係留、後ろの補助曳船側は V 字で係留した (写真-2)。スパー型浮体に関する主な諸元を表-1 に示す。水深は 0.8 m、波は規則波で、波高 30 mm、波周期は 0.71 s (現地スケール: 5.0 s) ~ 1.27 s (現地スケール: 9.0 s) の範囲を現地スケール換算で 1.0 s 間隔になるように設定し、波の入射角は 90° (左舷側) とした。曳航速度は 0.11 m/s (現地スケール: 1.5 kt \approx 0.77 m/s), 0.22 m/s (現地スケール: 3.0 kt \approx 1.54 m/s), 0.36 m/s (現地スケール: 5.0 kt \approx 2.57 m/s) の 3 ケースで実施した。本研究では、代表的なケースとして、周期 0.99 s、曳航速度 0.22 m/s で検証した。

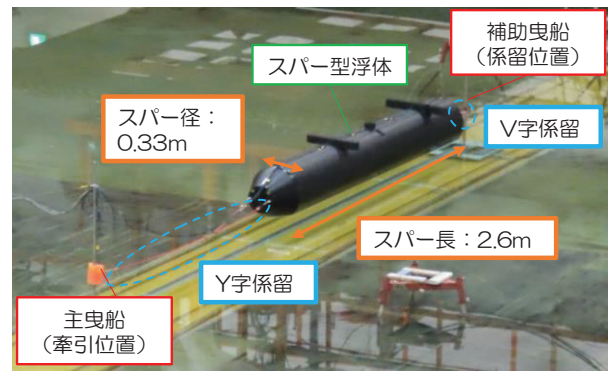


写真-2 実験概況

ル: 5.0 kt \approx 2.57 m/s) の 3 ケースで実施した。本研究では、代表的なケースとして、周期 0.99 s、曳航速度 0.22 m/s で検証した。

(2) 解析手法

解析には、OpenFOAM (v2012) の interDyMFOam ソルバーを用いた。interDyMFOam は、非圧縮性の気相・液相の二相流ソルバー (interFoam) に重合格子 (overset メッシュ) 法の機能が追加されたものであり、自由表面流れを解析する手法として、VOF (Volume of Fluid) 法⁷⁾ が用いられている。

浮体の 6 自由度剛体運動計算には、OpenFOAM に実装されている sixDoFRigidBodyMotion ソルバーを用いて、流体力、重力および係留索の張力が作用して生じる浮体の運動を計算した。浮体の運動は、重心の並進運動である式(1)と重心周りの回転運動である式(2)の運動方程式を解くことで算出した。

$$M \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} = N_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

ここで、添え字の i は座標軸の番号、 M は浮体の質量 (kg)、 r_i は重心座標 (m)、 F_i は浮体表面に作用する流体力と浮体の重力および係留索の張力の合力 (N)、 I_i は主慣性モーメント (kg · m²)、 φ_i は各慣性主軸周りの回転角 (rad)、 N_i は各慣性主軸周りの流体力・係留索の張力によるモーメントである。

本研究のような移動物体問題に対する解析手法としては、メッシュモーフィング (移動メッシュ) による方法と重合格子法が考えられる。本解析対象は並進移動量が大きく、モーフィングではセル品質の低下による計算の破綻や計算精度低下が問題となる可能性が高いと考えられる。そこで本研究では、物体周りのメッシュを変形させることなく移動物体計算を行うことができる重合格子法を採用した。この手法では、解析メッシュは図-2 に示すように、平面水槽領域に対応する Background メッシュ

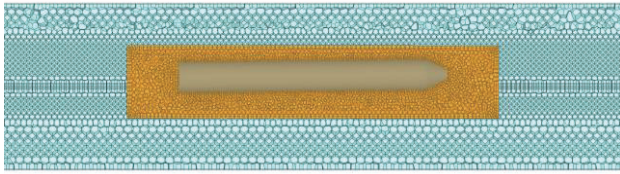


図-2 Background と Overset メッシュ領域

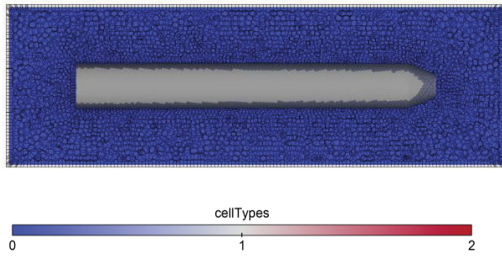
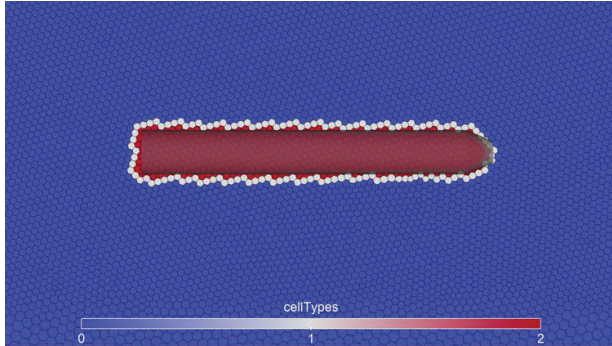


図-3 メッシュのセルタイプ

(青色) とスパー周囲のOversetメッシュ (橙色) から構成される。これらのメッシュ領域は形状的にオーバーラップしているが、連結はしていない。重合格子法の計算では、これらの形状的に独立したメッシュ間で互いに物理量の補間値を受け渡ししながら、連係して計算を行う。メッシュ間での物理量の補間計算に使用するセルの探索やBackgroundメッシュにおいて計算領域外となるスパー内部のセル (Hole) の検出などの処理も行われる。

interDyMFoamを実行すると、図-3に示すように、異なる処理が行われるタイプ毎にセルの分類が自動的に行われる。ここで、上がBackground側のメッシュ、下がOverset側のメッシュの断面図であり、比較のためにスパーの形状を重ねて表示している。青色で示したセルは、通常通り流れの支配方程式を離散化して解かれる。白色で示したセルでは、相手側のメッシュの対応するセルから物理量が補間される。赤色で示したセルは、物体内部として認識されたHoleのセルであり、計算領域外の扱いとなり流体計算は行われない。

これらのセルタイプの分類処理やメッシュ間での物理量の補間計算を行う手法として、OpenFOAMにはcellVolumeWeight, inverseDistanceなどの手法が実装されている。本研究で使用したcellVolumeWeightは、ボリウムメッシュの重なり判定にAABB (Axis-Aligned Bounding

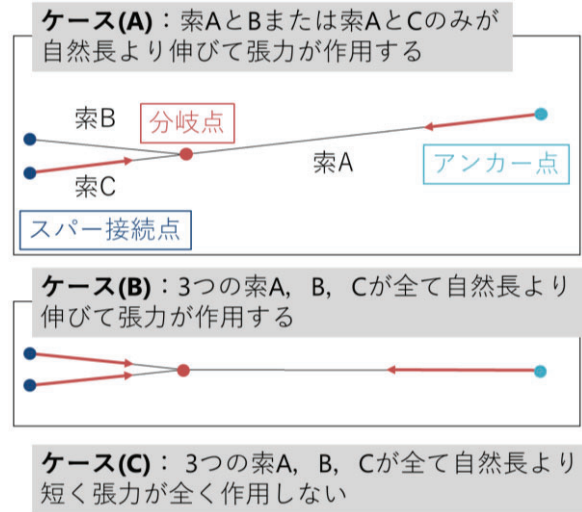


図-4 Y字係留索モデル

Box) 木を使用し、オーバーラップするセル体積を重みとして補間計算するものであり、物理量の保存性が良いが、他の手法に比べて重みの計算に時間を要する。もう一方のinverseDistanceは、セル中心間の距離の逆数を重みとしたもので、計算時間が短いですが計算安定性はcellVolumeWeightに比べると劣る傾向がある⁹⁾。

また、スパーに作用する外力の1つである係留索による張力は、6自由度剛体運動計算のrestraintsモデルを使用し考慮した。使用したlinearSpringDamperモデルでは、浮体の係留点と曳船の係留点間の直線距離がロープの自然長より長くなった場合に、次の式(3)および式(4)で示す張力と減衰力を浮体の接続点に作用させる。

$$-\frac{w_n^2 m}{n} (|r_i| - L_s) e_i - \frac{2\psi m w_n}{n} (e_j v_j) e_i \quad (3)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

上式(4)の第一項がばねによって作用する張力、第二項が減衰力である。ここで、 m は浮体の質量 (kg) , n は係留索の本数, r_i は曳船の係留点から見た浮体係留点の相対位置ベクトル (m) , $e_i = r_i / |r_i|$ は r_i を正規化したベクトル, v_i は浮体係留位置速度 (m/s) , L_s は係留索の自然長 (m) , ψ は減衰比, w_n は振動数 (Hz) , k はばね定数 (N/m) を表す。実験で計測された前後の曳船の位置座標の時系列データを曳船の係留点位置として与えることにより浮体の曳航をモデル化した。

OpenFOAMの標準ソルバーでは、V字係留のように2点間を直線で結ぶ係留モデルしか再現できない。そこで、linearSpringDamperモデルと同様に自然長から伸びがある場合のみ、ばね力と減衰力が作用する静的なY字係留索モデルをOpenFOAMに実装した (図-4) 。このモデルは、

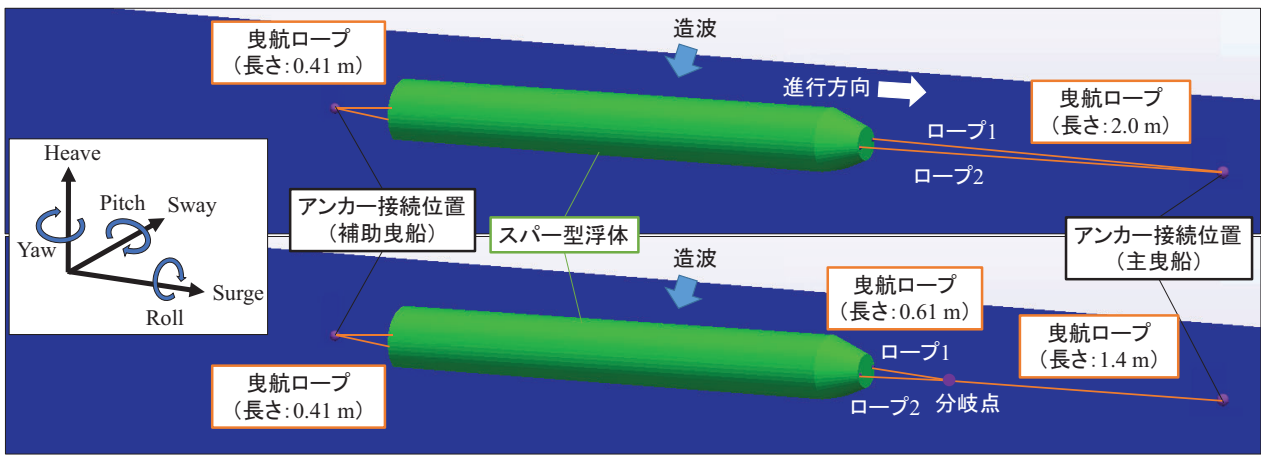


図-5 OpenFOAMの解析モデル (上: V字係留のケース, 下: Y字係留のケース)

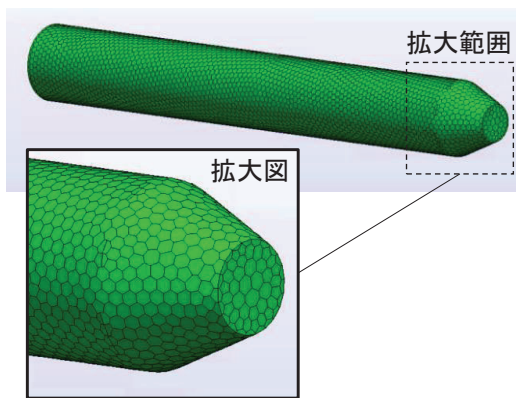


図-6 ennova for CFDによるスパーのメッシュ作成

図に示した(A)~(C)の3つの状況を考慮している。そのため、伸びが無い場合も含め分岐点におけるばね力の静的なつり合い式からその推定位置を求め、その位置とアンカー点およびスパー接続点間の直線距離、自然長の大小関係から、3つの状況を場合分けした。そして、自然長より伸びている係留索のスパー接続点において、式(4)および式(5)より計算した力を作用させた。主曳船側のV字係留ならびにY字係留の左舷側と右舷側をそれぞれロープ1、ロープ2と定義し、実験で計測した張力と比較した。以上をまとめた解析モデルを図-5に示す。

(3) 計算条件

メッシュ生成および解析設定には、ennovaCFD for OpenFOAMを使用した。計算時間間隔は、ステップ毎に更新され、クラン数が1.0を超えないように自動調整した。Background領域のメッシュサイズは、波長を約30分割する0.05 mを基本とし、反射波の影響を抑えるため、流出境界に近づくにつれてサイズを大きくした(最大0.3 m)。計算格子は、ポリヘドラル形状を採用した(図-6)。ポリヘドラルメッシュは、隣接するセルのボリュームを滑らかに変化させられるため、オクトツリー

メッシュと比較して数値的な波の反射を低減することができる。また、6面体のメッシュよりもメッシュ数を小さくできるため、計算コストが削減できる¹⁰⁾。加えて、メッシュ数の増加を抑制しながら、波高の減衰を抑えて波の伝播の計算精度を良くするため、初期の水面位置の上下に0.01 mのレイヤーメッシュを3層ずつ生成した。

造波境界では、Stokes波の第2次近似解(StokesIIモデル)を使用して規則波の造波を行った。流出境界では、反射波の影響を小さくするため、波の吸収境界条件であるshallowWaterAbsorption条件を使用した。この境界条件では、反射波による水面高さの変化を相殺するように境界法線方向の流速成分を式(5)により補正する。

$$U_c = \sqrt{\frac{|g|}{h}} \eta_R \quad (5)$$

ここで、 η_R は反射波による水位の変化(m)、 h は水深(m)、 g は重力加速度(m/s^2)である。 η_R は、造波モデルから求まる目標水位と境界隣接セルのVOF値から評価した実際の水位との差を各時間において算出した値である。側面は、壁面接線方向の速度勾配を0とするスリップ条件とし、底面は滑り無し壁面、上面は大気開放条件をそれぞれ設定した。解析領域は、浮体から1波長程度離れた位置を造波境界として、 $L=20$ m、 $B=11$ m、 $H=1.2$ mとした。linearSpringDamperモデルのばね定数 k は、実験時に計測した値(181.6 N/m)を用いた。ロープの特性上、振動は小さいと考えてばねの減衰比 ψ は1.0とした。

3. 解析結果

実験値と解析結果(V字係留, Y字係留)におけるRolling, Pitching, Heavingの時系列データの比較を図-7に示す。Rollingの最大振幅に着目すると、実験値では約 3.7° 、V字係留時は約 5.5° 、Y字係留時は約 5.9° であり、

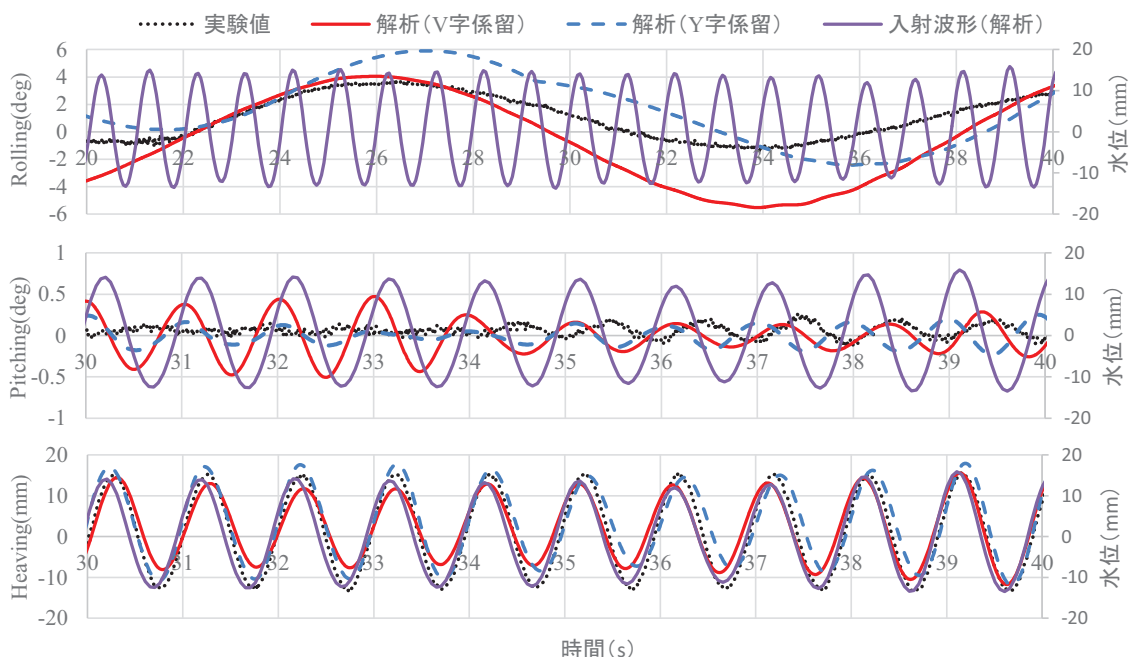


図-7 波高30mm，周期0.99sの実験結果と解析結果の時系列動揺量（上段：Rolling，中段：Pitching，下段：Heaving）

計算値の方が大きくなっている。しかし、Rollingの動揺周期に着目すると、実験時の動揺周期は14 s程度であり、V字係留ならびにY字係留の解析においても16 s程度であること踏まえると、概ね一致している。実験では入射波よりも係留系の影響が卓越することにより、係留系を含めた固有周期14 s付近での動揺が生じたと推察されるが、解析結果においても、このような係留系による動揺特性を定性的に再現できていると考えられる。次に、Pitchingの結果を見ると、実験値とY字係留時では、最大振幅が約 0.2° であり、概ね一致している。V字係留時は、最大振幅が約 0.5° 程度で過大になっている。また、解析では実験と位相がずれているものの、実験と同様に波周期0.99 s程度で動揺しており、動揺の周期は概ね再現できているといえる。最後に、Heavingの結果に着目すると、実験の動揺量ならびに動揺周期は、入射波の波高30 mm、波周期0.99 sに追従している。解析値においても、同様の挙動を示しており、Heavingの動揺特性を良好に再現できているといえる。

ところで、本研究で対象とするような円柱構造物は、Roll方向に大傾斜しても没水部分の形状が変化しないため、船舶とは異なり転覆の恐れがない。そのため、施工を想定したシミュレーション時に確認すべき事項として、 90° 以上の大傾斜によって曳航治具に過度な面荷重が作用する事が挙げられる。実験では上記のような現象が起らないことを確認でき、解析結果のRollingは、やや過大な値になったものの、同様の傾向が示された。加えて、PitchingならびにHeavingにおいても、動揺特性を概ね再現できているため、スパー曳航時の施工シミュレーションにおいては、十分な精度であると判断できる。

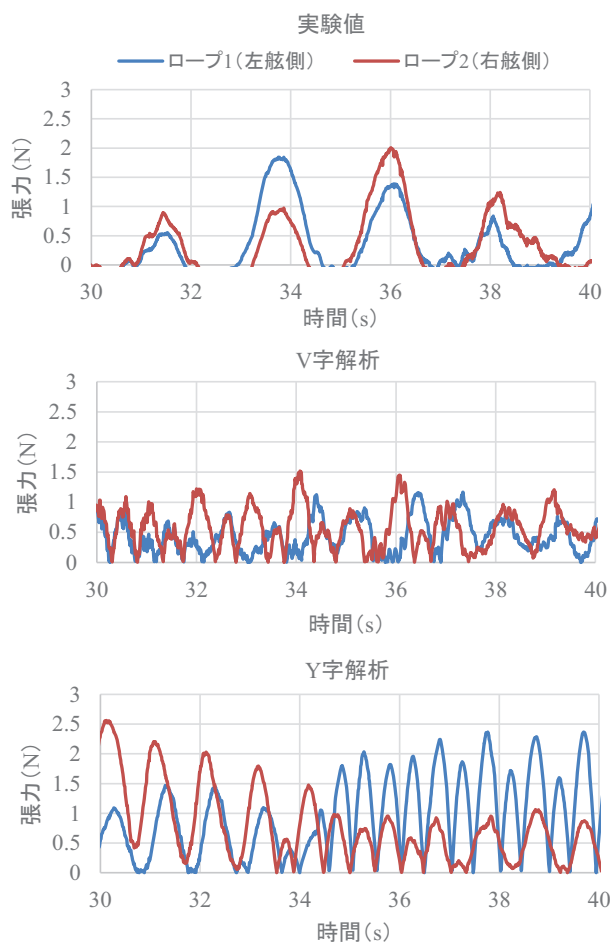


図-8 曳航ロープに作用する張力

また、V字係留とY字係留において、動揺量の再現性に大きな差はないことが分かった。

主曳船側の曳航ロープに作用する張力に関する実験値

と解析結果の比較を図-8に示す。ここで、ロープ1, 2はそれぞれ波の上流側, 下流側のロープを表す。実験時に作用する張力の周期は、周期2.0~2.5 s程度で作用しているのに対し、V字係留ならびにY字係留では周期0.5~1.0 s程度となっており、解析で位相と周期の再現はできていない。しかし、張力の最大値と比較すると、実験値は最大2 N, V字係留は最大1.5 N, Y字係留は最大2.5 Nとなっており、実験値に対する解析結果の誤差は±25%程度である。設計時で荷重に安全率3を掛けて破断を照査する¹¹⁾ことを想定すると、破断強度に対する安全設計に実用できる精度であると考えられる。

以上の動揺量ならびに曳航ロープに作用する張力に関する再現性より、本解析手法はスパー曳航の施工シミュレーションにおいて有用であることが示唆された。

4. おわりに

OpenFOAMによるスパー型浮体曳航時の動揺解析を行い、実験結果の再現性を確認した。主な解析結果を以下に列記する。

- ・Rollingの動揺量は、実験値に比べて大きくなったが、係留系による長周期の動揺特性を概ね再現できた。
- ・Pitchingについては、位相のずれはあるが、振幅と動揺周期は概ね一致した。
- ・波高と波周期に追従するHeavingの特性を良好に再現できた。
- ・主曳船側をV字ならびにY字とした場合でも、両者の解析結果に大きな差は見られなかった。
- ・曳航ロープに作用する張力の位相と周期は再現できなかったが、張力の最大値はロープの破断荷重に対する安全照査に使用できる精度であることが分かった。

以上より、浮体曳航時の動揺解析手法として、

OpenFOAMは有効であることが示唆された。そのため、作業限界条件や稼働率の算定に向けた運用が期待できる。しかし、同解析手法は、計算コストが大きい⁹⁾ため、実用化に向けた検討を今後も行う必要がある。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：着床式洋上風力発電導入ガイドブック，pp.24-26，2018.
- 2) 安野浩一郎，森屋陽一，山口和彦，今村正，坂井勝洋：長大ケーソン曳航時の動揺低減方策に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），vol.26，pp.825-830，2010.
- 3) 道前武尊，佐貫宏，今村正，坂井勝洋，古賀大郎，丹羽強，伊藤勇志：異形長大ケーソン曳航時の挙動特性に関する研究，土木学会B2（海岸工学），vol.74，No.2，pp.1051-1056，2018.
- 4) OpenCFD Ltd：https://www.openfoam.com/，参照 2022-5-20.
- 5) 今野雅：オープンソース CFD の国内動向とOpenFOAM 適用例，計算力学講演会講演論文集，24巻，pp.34-37，2011.
- 6) 橋本貴之，織田幸伸，小俣哲平：クレーン船の動揺と吊り荷の挙動に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），第77巻2号，pp.625-630，2021.
- 7) 川崎浩司，松浦翔，坂谷太基：3次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），vol.69，No.2，pp.748-753，2013.
- 8) 株式会社テラバイト：OpenFOAM ライブラリリファレンス，森北出版，2020.
- 9) Suyash Verma, Arman Hemmati: Performance of Overset Mesh in Modeling the Wake of Shape-Edge Bodies, *Computational Engineering*, vol.8, No.3, pp.1-19, 2020.
- 10) 王偉，曹勇，大風翼：ポリヘドラルメッシュを用いた建物周辺気流の Large-Eddy Simulations，風工学研究論文集，Vol. 26，2020.
- 11) 日本海事協会：鋼船規則 PS 編，p.15，2021.

(Received March 17, 2022)

(Accepted July 21, 2022)

STUDY ON MOTION ANALYSIS OF SPAR TYPE FLOATING TOWING

Takuma KOBAYASHI, Takeshi NISHIHATA and Humiya NOZAKI

In the construction process of a spar-type floating wind turbine, it is necessary to understand the motion characteristics during towing of a spar-type floating towing structure from the floating structure fabrication site to the wind farm area in the open sea, and to establish workability criteria. In this study, we performed an OpenFOAM analysis based on the results of hydraulic model tests on towing a spar type floating buoy under lateral wave action, and confirmed the reproducibility of the analysis by OpenFOAM. Pitching and heaving motions that follow wave height and wave period were also reproduced well. The tension force acting on the towing cable was found to be accurate enough to be used in design calculations when the safety factor was taken into account. These results suggest the usefulness of OpenFOAM for towing analysis.