

スパー型洋上風力発電浮体の立て起こしおよび横倒しに関する実験と移動格子解析

柳澤 創¹・高橋 研也²・西畑 剛³・大槻 真輝⁴・柴田 和也⁵

¹正会員 五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

E-mail: hajime.yanagisawa@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設（株）横浜営業支店（〒231-0023 神奈川県横浜市中区山下町23）

³正会員 五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

⁴東京大学工学部システム創成学科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

⁵東京大学大学院工学研究科システム創成学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

本研究では、スパー型洋上風車施工における、スパー型浮体の立て起こし・横倒し時の水理模型実験と再現数値解析を実施した。縮尺1/100の浮体模型へ注排水を行い、浮体のトリム角と浮体上端の最大合成加速度を計測した。実験は隔壁の有無やバラスト材の有無など種々の条件で実施した。バラスト材を敷設した状態から注排水した場合、あるトリム角でバラスト材が崩壊して急激に立て起こし・横倒しがなされ、トリム角が短周期動揺し、その際の最大加速度は0.25 Gとなった。また、3次元数値流体力学ツールのOpenFOAMを用いてバラスト材なしの条件で再現数値解析を実施した。浮体の周囲に球形の移動格子領域を設けた解析を行い、実験結果を良好に再現することができた。さらに、浮体の立て起こし・横倒しの挙動に、重心位置の偏心量が大きく影響することが分かった。

Key Words : *spar-type floating wind turbines, upending, ballast, OpenFOAM, moving mesh analysis*

1. はじめに

近年、温室効果ガスの削減に向け、再生可能エネルギーの普及拡大が世界各国で進められており、日本では海に囲まれている島国の利点を生かし、洋上風力発電施設の導入が急がれている。既に欧州などでは、着床式洋上風力発電施設の導入が進められてきた。一方、日本周辺海域には着床式洋上風力発電施設の適地である水深50 m以浅の海域が少なく¹⁾、水深200 m程度の海域に設置可能な浮体式洋上風力発電施設の導入が検討されている。

本研究は、浮体式洋上風力発電施設の中でも、多くの海域で導入が検討されているスパー型洋上風力発電施設に着目する。スパー型洋上風力発電施設の基礎部であるスパー型浮体（以下、スパー）は、洋上への水平曳航、注水立て起こしの後、ウィンドファーム海域まで鉛直曳航を行う。また、供用機間を過ぎて撤去やメンテナンスを実施する場合は、逆の手順でスパーの排水横倒しの工程が必要となる。スパーの立て起こしおよび横倒し自体には数時間の時間を要するが、静水面に対するスパーのPitch角度（トリム角）が大きく変位する時間は短く、スパーの動揺量や加速度の把握が施工の安全管理や部材選定の観点から重要である。先行研究として、巽ら²⁾はバ

ラスト水を注排水し、スパーの立て起こしおよび横倒しを水理模型実験で再現した。また、静的なつり合い位置から動揺解析を実施し、スパーの挙動の再現が可能であることを示した。さらに、スパー内部にバラスト碎石を敷設した状態における立て起こしおよび横倒しを水理模型実験で再現し、バラスト材が崩壊した際にスパーのPitch動揺が激しくなることを確認した³⁾。また、柏木ら⁴⁾は、立て起こしに関する非線形シミュレーションを実施し、スパー内部の隔壁の有無による立て起こし時の加速度を評価することで隔壁の有効性を示した。同様の研究は海外でも実施されている⁵⁾。一方で、実験からスパー挙動の加速度を比較した研究や、OpenFOAM等による詳細な数値流体解析はこれまで実施されていない。

本研究は、水理模型実験により隔壁の有無やバラスト材（碎石、砂）の有無など、種々の条件における立て起こしおよび横倒しの動揺特性を、トリム角変位やスパー上端の最大合成加速度から評価すること、および最先端の3次元数値流体力学ツールであるOpenFOAM⁶⁾を用いて、スパーの重心回りにスパーの回転に追従する球形移動格子を設ける手法により実験の再現解析を実施することを目的とする。

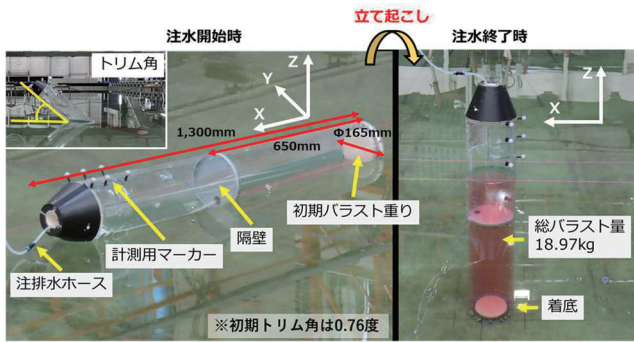


図-1 スパー型浮体模型

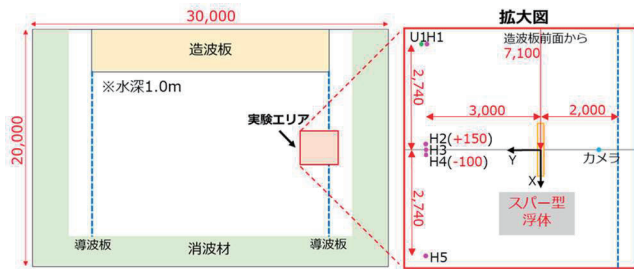


図-2 実験平面図

(単位: mm, H: 容量式波高計, U: 電磁流速計)

2. 水理模型実験

(1) 実験模型

本研究では、10MW級風車を想定し、Froudeの相似則に従った縮尺1/100の亚克力製スパー型浮体模型を使用してスパーの立て起こしおよび横倒しの水理模型実験を実施した。スパー型浮体模型の概形を図-1に示す。スパー内部の底面から650 mmの位置にバラストの逆流を防ぐ隔壁（以下、隔壁）を設けられる機構とした。この隔壁には、直径5 mmの通気口があり、隔壁より下部に空気が溜まらない仕組みとなっている。また、注排水にはゴム製で直径4 mmのホースを使用し、スパー底面から25 mmの位置からバラスト水が注排水されるように模型を製作した。スパー底面にはコンクリートバラストを模した初期バラスト重りを設置し、初期状態のトリム角が僅かにプラスになるようにし、波による動揺で転覆しないようにしている。模型重心は、計測用マーカーが常に上側になるようにわずかに偏心させている。スパーの重心位置および慣性モーメントは、直立状態におけるスパー底面中心を原点として、表-1に示す通りである。

(2) 実験方法

図-2に実験平面図を示す。実験は平面水槽（全長20 m, 全幅30 m, 水深1.0 m）において実施した。実験時には、波浪場が乱れないよう、水槽内に造波方向と平行に導波板を設置した。導波板側面にビデオカメラを2台設置し、立て起こしおよび横倒しの挙動を水中と気中から撮影した。スパーは導波板から2.0 mの位置に、スパー底面が造波板方向になるように設置した。また、スパーの側面

表-1 スパー模型諸元

	x	y	z
重心_隔壁無し(mm)	0.0	0.0	519.5
重心_隔壁有り(mm)	0.0	0.0	525.8
慣性モーメント_隔壁無し($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	6.73×10^{-1}	6.73×10^{-1}	1.74×10^{-2}
慣性モーメント_隔壁有り($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	6.77×10^{-1}	6.77×10^{-1}	1.80×10^{-2}

表-2 実験 Case 一覧

Case	バラスト	注排水	波	隔壁
1	水のみ	立て起こし(注水)	無し	無し
2			有り	有り
3			無し	無し
4			有り	有り
5	水のみ	横倒し(排水)	無し	無し
6			有り	有り
7			無し	無し
8			有り	有り
9	水+砕石	立て起こし(注水)	無し	無し
10			有り	有り
11			無し	無し
12			有り	有り
13	水+砂	立て起こし(注水)	無し	無し
14		横倒し(排水)	無し	無し

表-3 バラスト材諸元

	砕石	砂(4号珪砂)
粒径(mm)	2.5-5.0	0.6
密度(g/cm^3)	2.64	2.64
気中安息角(deg)	43.1	35.3
水中安息角(deg)	44.8	33.3
空隙率	0.49	0.40

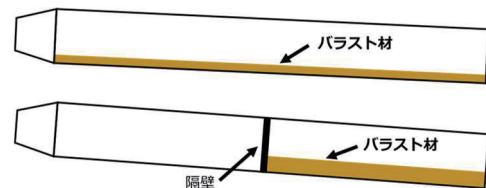


図-3 バラスト材敷設イメージ
(上図: 隔壁無し, 下図: 隔壁有り)

に沿って2本の水系を張り、スパーのPitch方向の動揺に影響が出ない程度に、Yaw方向の回転を抑制した。一部、規則波を作用させる実験を行うため、図中に示す位置に容量式波高計および電磁流速計を配置し、水位および水平流速をサンプリング周波数20 Hzにて計測した。スパーの動揺計測は3次元リアルタイムモーション計測システムを用いて、スパーに設置した6つの反射マーカを複数台の高性能カメラで捉える手法で実施した。バラスト水の注排水速度は、実際の施工条件に基づき、昼間施工（実施工時間6時間以内）を満足する0.54 L/minとした。

(3) 実験条件

実験Caseを表-2に示す。Case1～8はバラスト水のみを注排水しており、Case1, 2, 5, 6は静水時、Case3, 4, 7, 8では波高1.5 cm, 周期0.8 sの規則波を作用させた。波向は実施工の検討条件と同様にPitch方向に作用させた。Case9～14では4.13 kgのバラスト材を敷設した状態で注排水を行

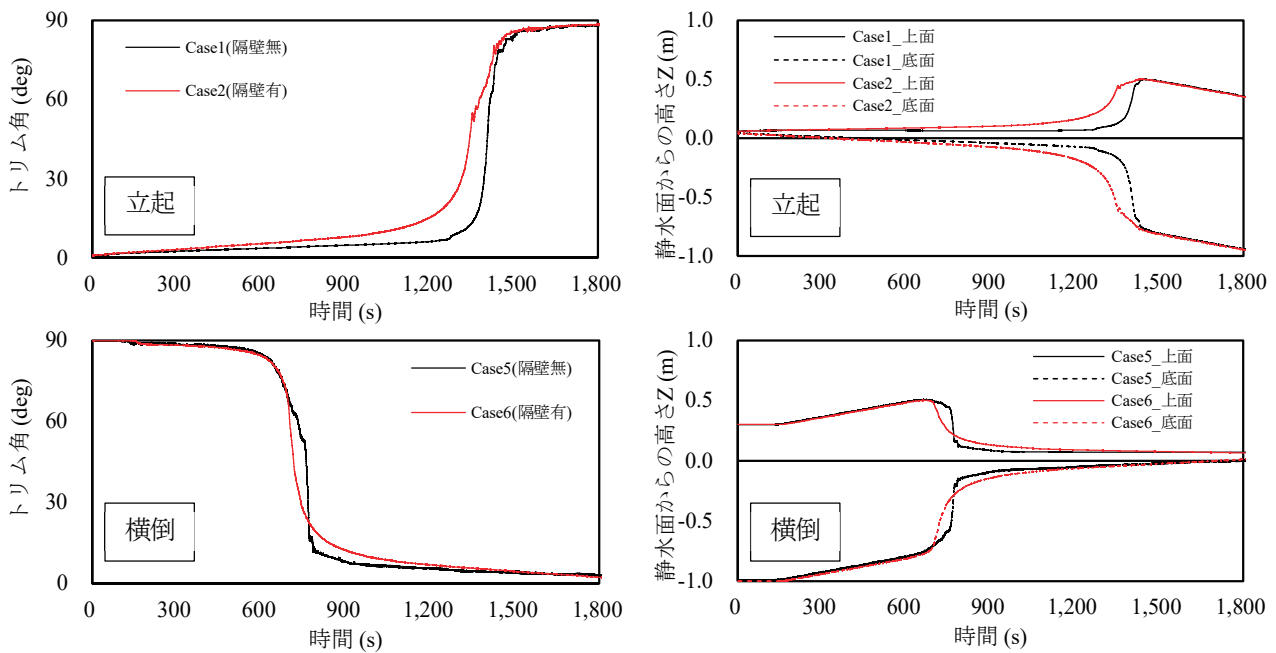


図4 隔壁の有無によるトリム角 (左図) およびスパー上面・底面中心軌跡 (右図) の比較

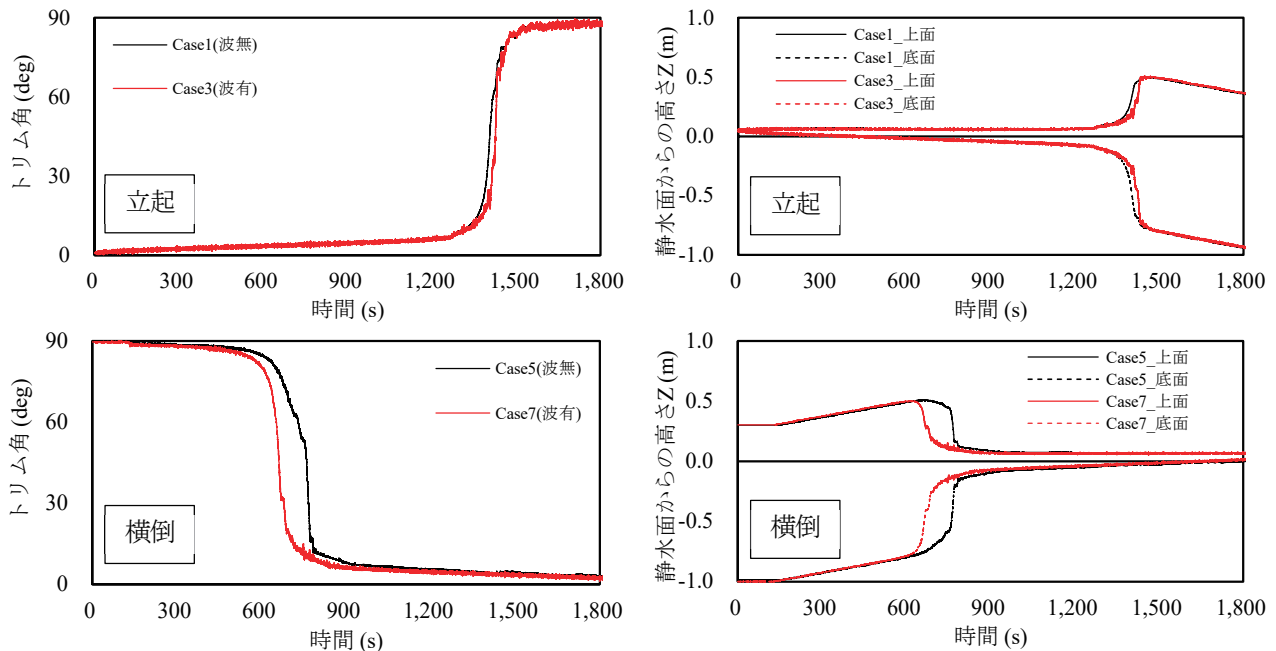


図5 波の有無によるトリム角 (左図) およびスパー上面・底面中心軌跡 (右図) の比較

った。図-3のように、隔壁無しの場合はスパー全体に一樣に、隔壁有りの場合は隔壁下部に一樣に敷設した。バラスト材 (碎石・砂) の諸元を表-3に示す。バラスト水の注水量は立て起こし完了時のバラスト総重量 (バラスト材とバラスト水の合計) が18.97 kgとなるようにした。バラスト量は実際の施工条件に基づいて決定した。

(4) 実験結果

隔壁の有無による実験結果を図-4に示す。左図にはトリム角の時系列グラフ、右図にはスパー上面中心・底面中心それぞれの静水面からの高さZの軌跡を示した。立

て起こし時の隔壁有無の比較結果(Case1, 2)から、隔壁有りの場合、スパー下側半分にバラスト水が溜まっていくため、立て起こし開始が早まることが分かる。一方、立て起こし完了時刻はほとんど変わらず、隔壁を設けることによって立て起こし時のトリム角の変化速度が抑制されることが示された。次に、横倒し時の隔壁有無の比較結果(Case5, 6)から、横倒しタイミングは隔壁の有無によらずほぼ一致している。これは、横倒し開始時に既にバラスト水の水位が隔壁以下に下がっており、隔壁の影響がないためと考えられる。ただし、横倒し時のトリム角の変化は、隔壁がある方が緩やかになる。よって、トリ

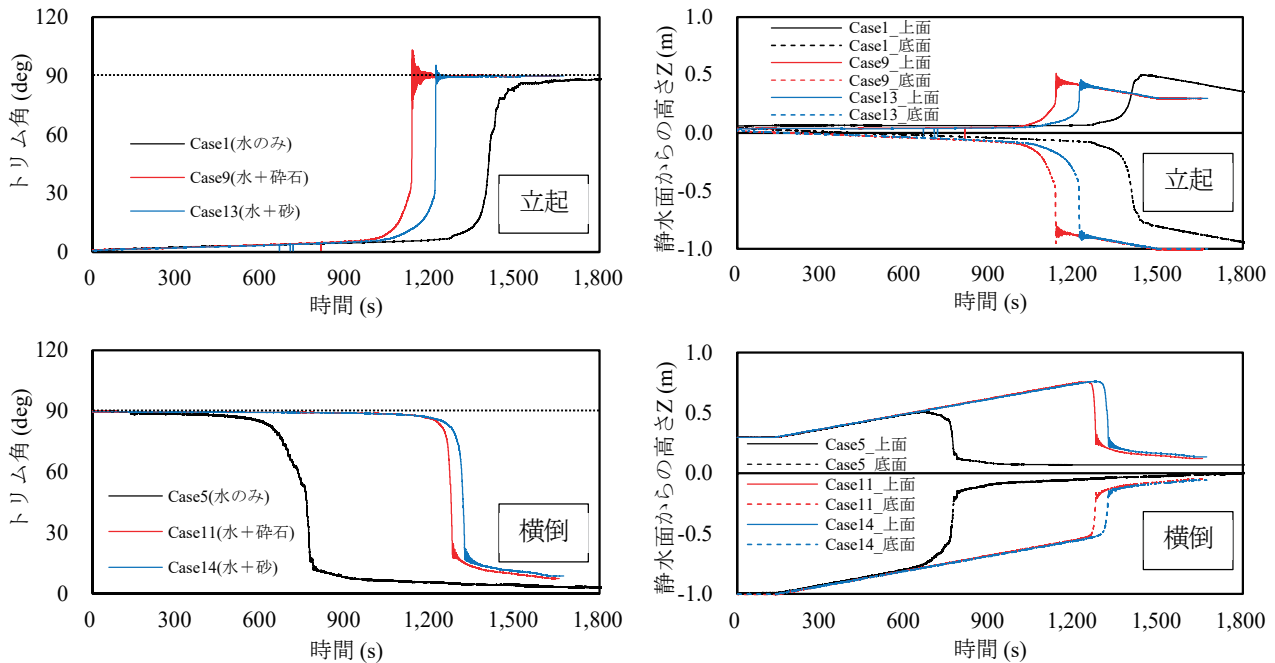
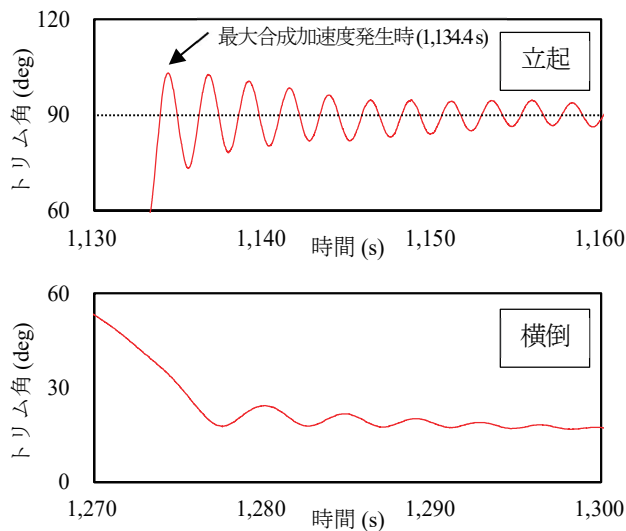


図-6 バラストによるトリム角（左図）およびスパー上面・底面中心軌跡（右図）の比較

図-7 立て起こし時・横倒し時の短周期動揺
(上図：Case9, 下図：Case11)

ム角変化速度の抑制に隔壁が有効であることが示された。

波の有無による実験結果を図-5に示す。立て起こし時の波有無の比較結果(Case1, 3)から、波有りの場合はトリム角が波周期に従って振動しているが、立て起こしのタイミングについてはよく一致している。ここで、横倒し時の波有無の比較結果(Case5, 7)から、横倒しのタイミングは波の有無により異なり、波有りの方が早くなることが示された。波有りの場合、スパーは造波方向（岸向き）に倒れており、スパーに衝突する波が横倒しを早めたことが考えられる。また、立て起こし前後の特定のトリム角で、波による動揺が激しくなることが示唆された。

バラストによる実験結果を図-6に示す。バラストは、黒線が水のみ、赤線が水と砕石、青線が水と砂の結果で

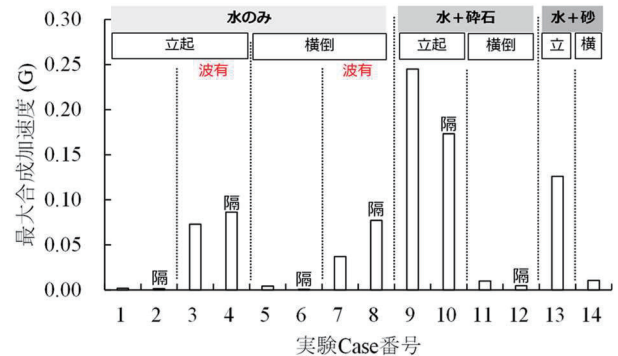


図-8 最大合成加速度

ある。立て起こし時のバラストによる比較結果(Case1, 9, 13)から、バラスト材を含んだ場合、300 s ~ 400 s 程度立て起こしが早まる。また、立て起こしの速度も速くなり、トリム角が20度から80度に変化するのに要する時間は、水のみ Case1 は84.5 sであるのに対し、水と砕石の Case9 は31.6 s、水と砂の Case13 は28.7 sであった。さらに、バラスト材有りの場合、立て起こし後にトリム角が90度を越えてスパーが反対側に倒れ、その後90度を中心とする約2.4sの短周期動揺が計測された（図-7に拡大図を示す）。これは、バラスト材がある角度を境に崩壊し、急激に立て起こされたためである。バラスト材が崩壊したときのトリム角は、砕石、砂ともに30度程度であった。表-3の水中安息角から、砂は安息角に従って崩壊した可能性があるが、砕石については、安息角以下の角度で崩壊している。また、バラスト水のみ Case1 においても、トリム角が30度付近で急激に立て起こされている。したがって、バラスト材の崩壊はトリム角が安息角を超える前に、スパーの静的なつり合いバラ

ンスが崩れたためと推測される。碎石と砂でトリム角が30度に達する時間が異なるのは、砂の空隙率が碎石より小さく、スパー全体の重心位置が低くなっており、より安定していたためと考えられる。図-6の横倒し時のバラストによる比較結果(Case5, 11, 14)から、バラスト材を含んだ場合、500s程度横倒しが遅くなり、トリム角が80度から20度になるまでに要する時間は、水のみでCase5は121.1sであるのに対し、水と碎石のCase11は28.3s、水と砂のCase14は39.7sであった。横倒しの際にも、バラスト材の崩壊によるトリム角の短周期動揺が見られるが、立て起こし時と比較すると振幅量は小さく、周期は長い。横倒し時のバラスト材の崩壊は水中安息角によるものであり、砂については、安息角が浅いため何段階かに分けて崩壊が見られた。横倒しのタイミングが遅くなる要因は、バラスト材によりスパー全体の重心位置が下がり、スパー内部のバラスト水がより少ない状態においても直立した状態で安定したためと考えられる。

最後に、立て起こし時および横倒し時にスパーに作用する加速度を評価するため、各Caseのスパー上面におけるの最大合成加速度を図-8に示した。最大合成加速度 A_{xyz} は、 X 軸方向の最大加速度を A_x 、 Y 軸方向の最大加速度を A_y 、 Z 軸方向の最大加速度を A_z とすると、式(1)のように表される。

$$A_{xyz} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1)$$

図-8より、Case9で最大合成加速度が最大になった。最大合成加速度の発生時刻は、急激に立ち上がり反対側に倒れてから折り返す時であり(図-7に矢印を图示)、この時の最大合成加速度は0.25Gである。次いでCase10, 13の順に最大合成加速度が大きく、バラスト材有りの立て起こし時に加速度が大きくなることが示された。また、Case3, 4, 7, 8も最大合成加速度が大きく、これらは波による動揺によって生じると考えられる。静水時(Case1, 2, 5, 6)の最大合成加速度は0.005G以下と微小であった。以上の結果から、バラスト材を用いた施工は加速度の観点から注意が必要であり、海象条件によっては加速度が増幅される可能性が示唆された。

3. 数値流体解析

(1) 解析ツールと解析条件

本章においては、前章において得られた実験結果を用いてOpenFOAM(v2212)⁹⁾による再現解析を実施した。OpenFOAMはNavier-Stokes方程式と連続式を基礎方程式とし、自由表面の処理法にVOF法を用いた解析手法である。本研究ではinterFoamというソルバーを用いた。

本研究では、Case1, 2, 5, 6を再現解析の対象とした。図

-9に示す通り矩形領域を設定し、その内部にスパーの重心回りに球形移動格子領域を設けた。この領域はスパーの回転に追従して一緒に回転する。初期状態において自由水面は領域底面から1.0mであるが、スパーの並進運動に追従して計算領域が変化するため、自由水面の位置は時間とともに変化する。2つの領域間ではメッシュサイズが異なるが、cyclicAMI境界条件によって物理量の補間処理を行っている。メッシュは非構造格子であるポリヘドラルメッシュにより分割した。2つの領域界面のメッシュサイズは0.040m、スパーのメッシュサイズは0.015mである。図-10にスパー中心を通るA-A断面におけるメッシュ分割例を示す。総メッシュ数は338175メッシュであり、30分間の計算実行に8並列で約12日程度の計算時間を要した。なお、注排水境界を実際のホース端部の位置に設け、メッシュ数削減のため形状は正方形とした。計算の安定化のため、運動の自由度をPitch方向(トリム角)とHeave方向の2自由度に拘束した。

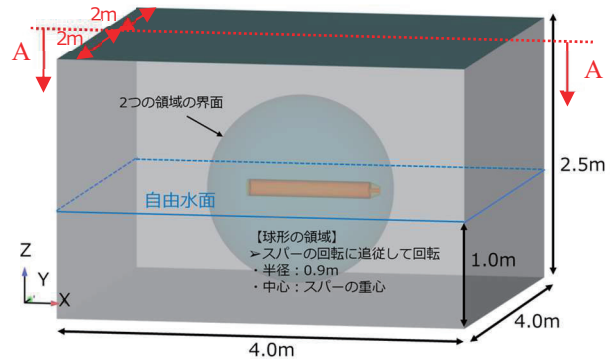


図-9 計算領域

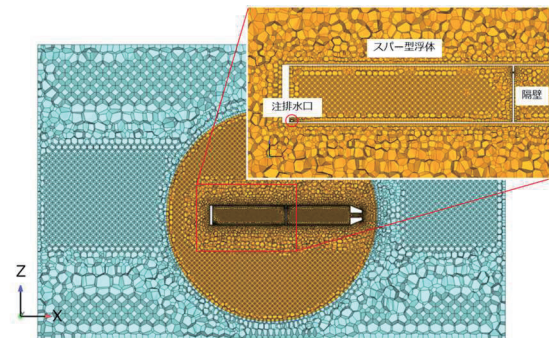


図-10 メッシュ分割例(スパー中心位置: A-A断面)

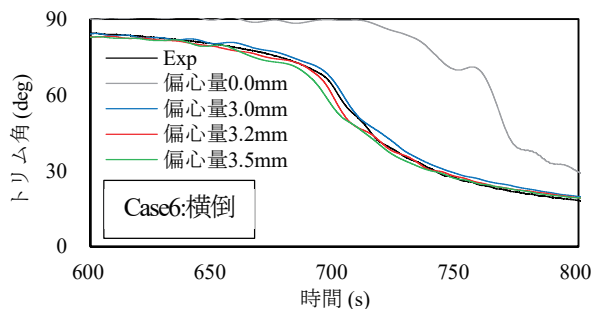


図-11 スパー重心位置偏心量のパラメータスタディ

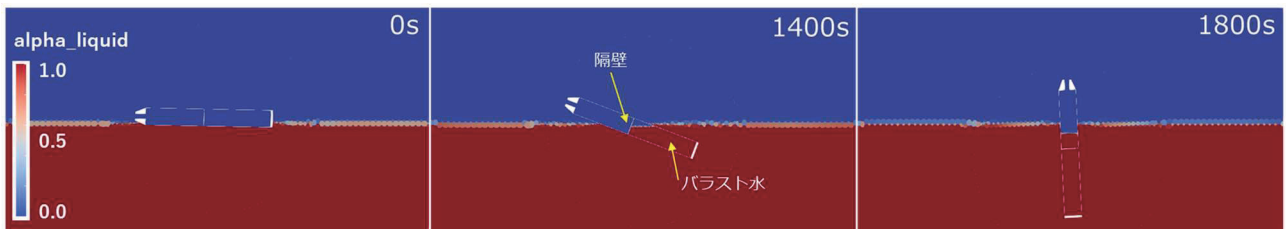


図-12 OpenFOAMによる再現解析結果画面(Case2)

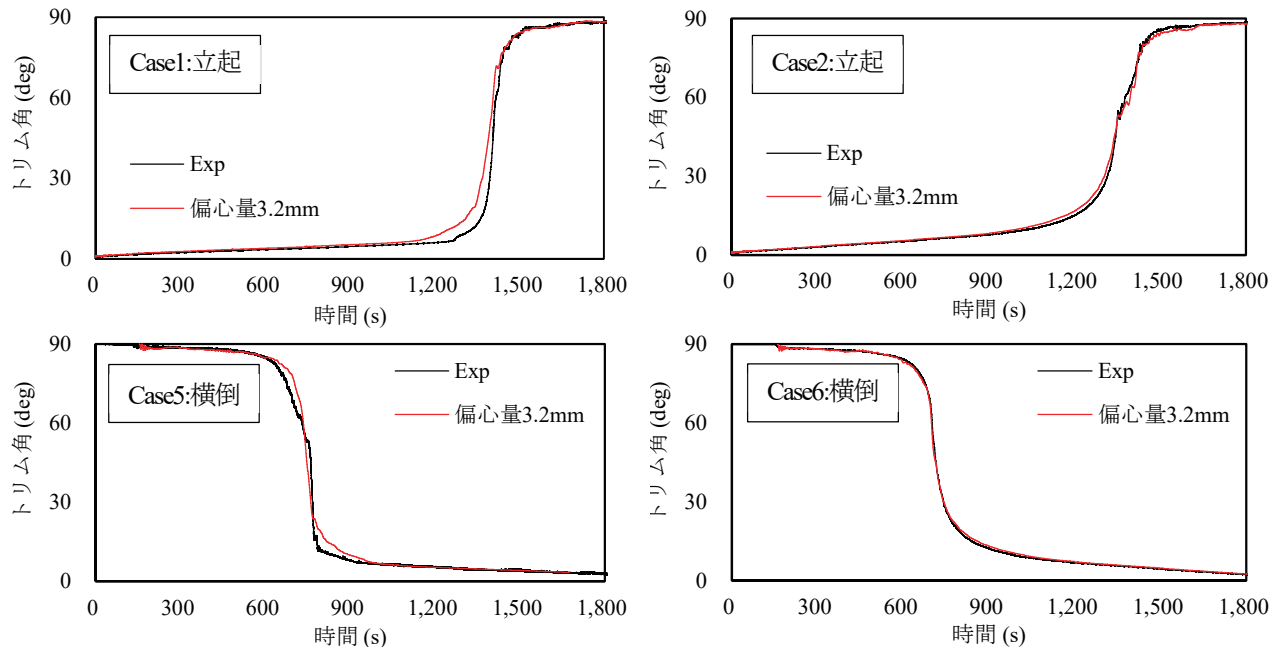


図-13 OpenFOAMによる再現解析結果

(2) 解析結果

はじめに、重心位置を模型設計上の位置（偏心量0.0 mm）として再現解析を実施した。模型の重心位置および慣性モーメントは表-1に示す通りである。その結果、Case6の再現解析結果である図-11の灰色線（0.0 mm）に示す通り、黒線の実験値と大きく乖離した結果となった。これは実際の模型の重心位置が、Roll回転を抑制するために設計位置から僅かに偏心しており、横倒しの場合より早く倒れる状態であったためと推測される。一方で模型の偏心量を正確に把握するには計測上の限界がある。そこで、図-11に示す通り解析上でスパー重心位置の偏心量をパラメータスタディし、RMSEを比較して最も実験結果と整合する偏心量3.2 mm（スパー径の2%）を正として再現解析を実施した。実験模型の偏心量が動揺に与える影響については、これまでも菊池ら⁷⁾によって議論されている。図-12にCase2の再現解析結果画面を示す。計算領域の中心がスパーの重心位置となるように、スパーの並進運動に従って静水面座標が時間変動している。図-13にCase1,2,5,6のトリム角の実験値と解析値の比較を示す。パラメータスタディで合わせ込んだCase6以外にも、実験値と解析値はよく一致しており、再現精度は高かった。

4. 結論

本研究においては、スパーの立て起こしおよび横倒しの挙動について把握するため、水理模型実験およびOpenFOAMによる3次元数値流体解析を実施した。

実験によるトリム角変位および最大合成加速度の評価から、スパー内部の隔壁がトリム角の変化速度抑制に効果的なことが分かった。また、バラスト材として碎石や砂を用いた場合、施工時間が短縮される一方で、立て起こしおよび横倒し直後に短周期動揺が見られ、この時のスパー上端における最大合成加速度は0.25 Gであった。波を作用させた場合、作用する加速度がさらに増幅する可能性があり、部材設計に影響を与える可能性が示唆された。また、矩形計算領域内にスパー重心を中心とする球形移動格子を設ける手法により、スパーの立て起こしおよび横倒しの挙動を精度良く再現することが可能であることが分かった。また、スパーの僅かな偏心量の違いが実験結果や解析結果に大きく影響することが示された。

今後は、碎石や砂などのバラスト材を含んだ実験についても同様の手法で再現解析を実施し、スパーの立て起こしおよび横倒しに対するOpenFOAMの適用性を検証していく予定である。

REFERENCES

- 1) 長井浩：わが国の風力エネルギーポテンシャルと長期導入ロードマップ，日本風力エネルギー学会誌，Vol. 36，No. 2，pp. 224-230，2012. [Nagai, H.: Wagakuni no Furyoku Energy Potential to Tyoukidounyu Road map, *Journal of Japan Wind Energy Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 224-230, 2012.]
- 2) 巽謙太朗，宇都宮智昭，佐藤郁：スパー型浮体の注排水による立て起こし及び横倒し挙動に関する実験と解析，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第30号，pp. 681-684，2020. [Tatsumi, K., Utsunomiya, T. and Sato, I.: The Experiment and Analysis of Spar-Upending and Spar-Topping by Pumping and Drainage, *Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 30, pp. 681-684, 2020.]
- 3) 巽謙太朗，宇都宮智昭，佐藤郁：砕石バラスト積みスパー型浮体のアペンディング挙動に関する実験と解析，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第34号，pp. 535-541，2022. [Tatsumi, K., Utsunomiya, T. and Sato, I.: Experiment and Analysis on Upending and Topping Behavior of Spar with Stone Ballast, *Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 34, pp. 535-541, 2022.]
- 4) 柏木正，高島新一朗，小濱耕二，西村真知，保木本智史，森屋陽一，西郡一雅，十川靖弘：スパー型洋上風力発電浮体の立て起こしに関する波浪中での時間領域大振幅シミュレーション，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第34号，pp. 549-558，2022. [Kashiwagi, M., Takashima, S., Kohama, K., Nishimura, M., Hokimoto, S., Moriya, Y., Nishikouri, K. and Sogawa, Y.: Time-Domain Large-Amplitude Simulation for Upending of a Spar-Type Offshore Wind Turbine in Waves, *Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 34, pp. 549-558, 2022.]
- 5) Prislun, I., Steen, A. and Halkyard, J.: Upending of a Spar Offshore Platform: Prediction of Motions And Loading, *International Offshore and Polar Enghleering Conference*, Vol. 11, pp. 421-426, 2001.
- 6) OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, 参照 2024-05-15. [OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, Reference 2024-04-30.]
- 7) 菊池由佳，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，Vol. 47，No. 1，pp. 9-19，2023. [Kikuchi, Y., Tomita, M., Nishikouri, K. and Ishihara, T.: Numerical prediction of the dynamic response of spar type floating platform with a 10MW wind turbine and its validation by using water tank tests, *journal of JWEA*, Vol. 47, No. 1, pp. 9-19, 2023.]

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT AND MOVING GRID ANALYSIS OF UPSTANDING AND TIPPING SPAR TYPE OFFSHORE WIND TURBINE

Hajime YANAGISAWA, Kenya TAKAHASHI, Takeshi NISHIHATA, Masaki Otsuki
and Kazuya SHIBATA

In this study, hydraulic model experiments and CFD analyses were conducted to confirm the behavior of a spar-type floating body during upstanding and tipping in the construction of a spar-type offshore wind turbine. Water was pumped or drained into a 1/100 scale model of a floating body, and the trim angle and the maximum acceleration of the floating body were measured. Experiments were conducted under various conditions, including with and without bulkheads and with and without ballast material. When water is pumped or drained with crushed stone or sand as initial ballast, The ballast material collapsed, resulting in a sudden upstanding or tipping, and the trim angle oscillated with a short period, resulting in a maximum acceleration of 0.245G. Numerical simulations were performed without ballast material using a 3-D computational fluid dynamics tool. A spherical moving grid around the floating body was used in the analysis, and the results generally reproduced the experimental results. Furthermore, it was found that the eccentricity of the center of gravity had a significant effect on the upending and tipping behavior of the floating body.