

汎用解析コードを用いた洋上風力浮体基礎の動揺解析手法の提案

小俣 哲平^{*1}・織田 幸伸^{*1}・本田 隆英^{*1}・橋本 貴之^{*1}

Keywords : offshore wind power facility, hydraulic model experiment, motion analysis, mooring, mirror model, drag coefficient
洋上風力、水理模型実験、動揺解析、係留、鏡像、抗力係数

1. はじめに

浮体式洋上風力施設の浮体基礎の設計や施工計画では、浮体への流体力や係留索張力の検討など浮体の動揺解析が必要である。動揺解析には、精度検証がなされた汎用的な動揺解析コードの適用が実務では求められるが、護岸係留時の護岸反射波や抗力係数の影響について十分に検討されていない。そこで本研究では、これらの課題に対する動揺解析コードの適用手法について検討し、水理模型実験により取得したデータに基づき妥当性を検証した。本検討では、浮体が護岸に係留された状態と沖合で係留された状態の2つのケースを対象とした。

護岸係留された浮体は、護岸による反射波の影響を考慮した動揺解析が必要であり、鏡像の原理を適用することが有効とされている。護岸前面に係留された浮体の動揺解析に鏡像の原理を適用した既往研究は種々あり、例えば、Oortmerssen¹⁾はグリーン関数に鏡像の原理を用いることで、岸壁からの影響を考慮した3次元船体動揺解析を行っている。著者らも既報²⁾において、実務に適用される汎用的な動揺解析コードに対し鏡像浮体の考え方を適用し、鏡像浮体と実浮体の2つの浮体を鏡像配置する手法を提案した。しかし、解析の経過とともに2浮体の鏡像運動が非対称となるといった課題があった。そこで、1浮体のみで完全対称な動揺をする鏡像浮体の存在を考慮することが可能となる手法を提案し、模型実験の再現解析を行うことで同手法を検証した。

沖合係留された浮体については、波の非線形性と抗力係数の影響について検討した。ここで波の非線形性

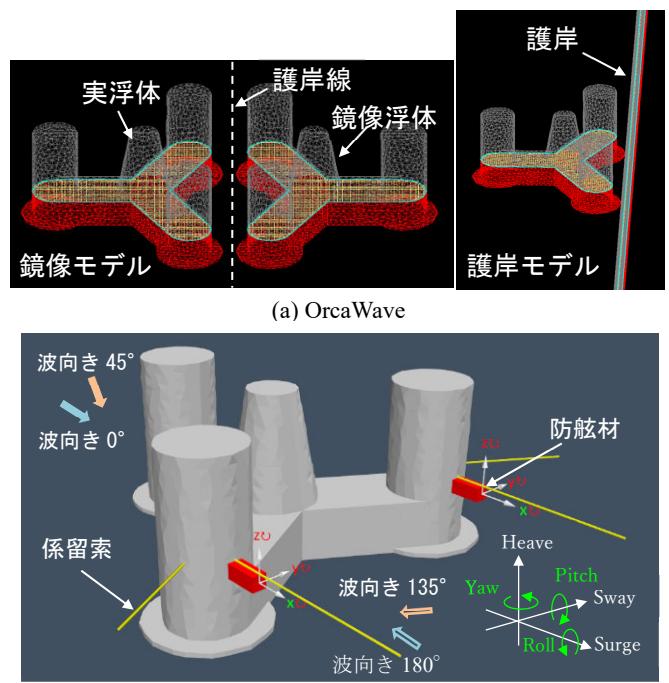


図-1 解析モデル

Fig.1 Calculation model

は、波力と波高が比例関係とならないといった特性であり、動揺解析コードによっては考慮できない場合がある。また抗力係数は、水の抵抗力を表現するパラメータであり、汎用的な動揺解析コードでも考慮可能であることが多いが、浮体形状ごとに係数を同定する必要がある。これらについて、沖合浮体を対象とした水理模型実験およびその再現解析を実施することで、浮体動揺への影響について検討した。

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

2. 護岸係留浮体の解析

2.1 解析モデル

動揺解析には汎用的な動揺解析コードである OrcaWave, OrcaFlex を用いた。OrcaWave は浮体に作用する流体力係数と波強制力を算定するポテンシャル解析コードであり、OrcaFlex は、OrcaWave で算定した流体力係数を使用し、非線形な係留力等を考慮した 6 自由度（2 浮体の場合は 12 自由度）の運動方程式を解く、時系列動揺解析が可能なコードである。

解析に用いた OrcaWave のモデルを図-1(a)に示す。解析は、別途実施した水理模型実験の模型スケール（縮尺 1/50 を想定）で実施し、浮体はセミサブ型浮体基礎（サイドカラム径 0.35 m、高さ 0.71 m）を対象とした。水深は 0.3 m、浮体の喫水は 0.2 m とした。図-1(a)左図の鏡像浮体を用いた解析では、護岸位置に対し対象な、実浮体と鏡像浮体の 2 つの浮体構造物が、それぞれ独立して動揺するマルチボディを考慮することで、鏡像モデルに相当する解析手法（2 浮体鏡像モデル）を適用した。図-1(a)右図は、護岸を構造物として直接モデル化する方法（以降、護岸モデルと称す）である。

時系列動揺解析に用いた OrcaFlex の解析モデルを図-1(b)に示す。なお、本論では鏡像モデルとして、後述する 2 浮体鏡像モデルと 1 浮体鏡像モデルを対象とする。図-1(b)には 1 浮体鏡像モデルについて示しているが、2 浮体鏡像モデルの場合は、これに護岸で完全対象となる仮想の浮体を適用している。

図-1(b)には、波向きと、浮体の 6 自由度の動揺の定義も併記した。ここで 6 自由度の動揺とは、水平や鉛直方向の並進運動である surge（前後揺れ）、sway（左右揺れ）、heave（上下揺れ）と、それぞれの軸方向に対する回転運動である roll（横揺れ）、pitch（縦揺れ）、yaw（船首揺れ）である。係留索として、4 本の係留索（図中の黄色線）をサイドカラムに気中部分で接続し、引張のみを線形ばねでモデル化し、護岸側に引き寄せる形で初期張力を設定した。また、護岸と浮体との間には防舷材モデル（図中の赤色部材）を設定した。防舷材の剛性は、Surge 方向の圧縮側のみに変位量に応じた反力が生じる設定とした。なお、本来の防舷材は非線形な剛性を持つため、本検討では途中で剛性の傾きが変わる 2 段階の反力特性を設定することで非線形性を模擬した。解析の初期状態は、係留索張力と防舷材反力が釣り合い、防舷材に押し当てられた静止状態となるが、動揺解析時には浮体が防舷材から離れる場合がある。動揺時の浮体と防舷材の接触判定は、

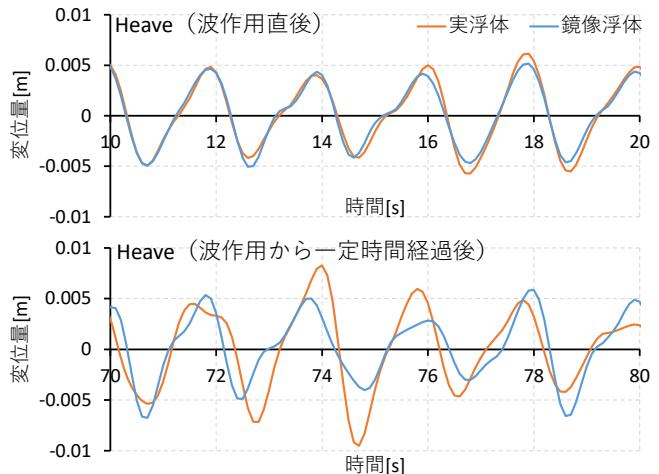


図-2 2 浮体モデルによる実浮体と鏡像浮体の動揺
(上図：波作用直後、下図：一定時間経過後)

Fig.2 Motion of real and mirror image floating body by two Floating bodies model(Upper figure: Immediately after wave action, lower figure: After a certain period of time)

OrcaFlex に搭載されている接触判定機能を使用した。鏡像モデルでの入射波の入力は、護岸で完全反射条件とするため、図-1(b)に示すように入射波と同じ波を、護岸位置で位相が一致するように陸側から同時に入射させた。

2.2 2 浮体鏡像モデルによる動揺解析

図-1(b)に示す浮体とこれを鏡像配置した浮体の 2 浮体鏡像モデルを用いた解析結果を、Heave 方向の動揺量について図-2 に示す。波向きは 0° （同時に 180° の波を入射）とし、周期 2.0 s、波高 0.023 m の波を作成させた。同図より、時間経過とともに実浮体と鏡像浮体の運動が異なってきており、鏡像の条件が成立せず正しい解析になっていない。2 浮体モデルでは両浮体が独立に動揺できるため、完全に対称な入力条件を与えて、数値誤差の影響により、解析が進むにつれて必ずしも鏡像運動とはならない場合がある。流体力において、2 浮体の動揺が完全に対称な場合に護岸での完全反射条件が成立するため、わずかな誤差で対称性が損なわれると流体力が非対称になり、これをきっかけに両浮体の動揺の非対称性が大きくなる。そこで、流体力のみを 2 浮体鏡像モデルで解析し、動揺解析は 1 浮体鏡像モデルで実施する手法を適用した。

2.3 1 浮体鏡像モデルによる動揆解析

時系列動揆解析では、例えば x 方向に運動方程式(1)が用いられる。

$$(M + m_a)\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

ここで、 M は浮体の質量、 m_a は付加質量、 C は造波減衰係数、 K は復元力、 F は波等の外力である。ここで、

付加質量 m_a 及び造波減衰係数 C の2つの係数（以降、流体力係数）はそれぞれ、浮体が運動し波を起こす際に生じる抵抗の加速度比例成分（見掛けの質量）と速度比例成分を表し、ポテンシャル解析により算定される。2浮体鏡像モデルは、片方の浮体自身の運動に加えて、他方の浮体の運動の影響も考慮するため、両者の運動を計算する必要があり、式(1)に基づく各浮体6自由度の運動方程式、すなわち計12自由度の連立方程式となる。ここで鏡像浮体では、2浮体の Sway, Heave, Roll 方向の運動は同じであり、Surge, Pitch, Yaw 方向の運動は大きさが同じで正負が逆となるため、運動の拘束条件として式(2)が成立する。

$$\{x_2, y_2, z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2\} = \{-x_1, y_1, z_1, \alpha_1, -\beta_1, -\gamma_1\} \quad (2)$$

ここで、 x, y, z は浮体の並進運動の変位であり、 α, β, γ はそれぞれ x, y, z 軸まわりの回転運動の変位である。また、式中の添え字1, 2はそれぞれ実浮体、鏡像浮体を表す。本式を式(1)に代入することにより、12自由度の連立運動方程式を、実浮体のみの6自由度の方程式に変換することが出来る。これは、時系列解析の前に、予め鏡像浮体の流体力係数を実浮体の流体力係数に組み込む変換を行うことを意味している。この変換した流体力係数を入力条件として、単一浮体で、完全対称な動揺をする鏡像浮体を考慮した場合と同等の時系列解析が可能となる。なお、上述の流体力係数の変換手法の妥当性については、別途検証済み⁴⁾であるが、ここでは一例として、Surge 方向の流体力係数について護岸モデルと1浮体鏡像モデル（以降、単に鏡像モデルと称す）を比較した結果を図-3に示す。両者は良く一致しており、変換手法の妥当性が確認できる。

2.4 鏡像モデルと護岸モデルの比較

図-4に、鏡像モデルと護岸モデルによる動揺解析の時系列結果を示す。ただし、比較を容易にするため、係留系の反力を線形化（防舷材はなく、3本の線形ばねで拘束）した条件により解析した。入射波は波向き 0° の波高0.02mの規則波で、周期1.7sと周期4.0sの2種類とした。同図より、Surge, Pitch 方向の時系列結果は鏡像モデルと護岸モデルで概ね一致している。一方、Heaveについては、周期1.7sのケースでは、動揺の位相は一致しているが振幅が異なっており、周期4.0sのケースでは、動揺の振幅は概ね一致しているが位相に違いが生じている。これらの違いについて検証するため、流体力係数の算定³⁾と Heave の波外力の算定⁴⁾を別途実施した。その結果、周期1.7sのケースでは、流体力係数は鏡像モデルと護岸モデルで一致しているが、

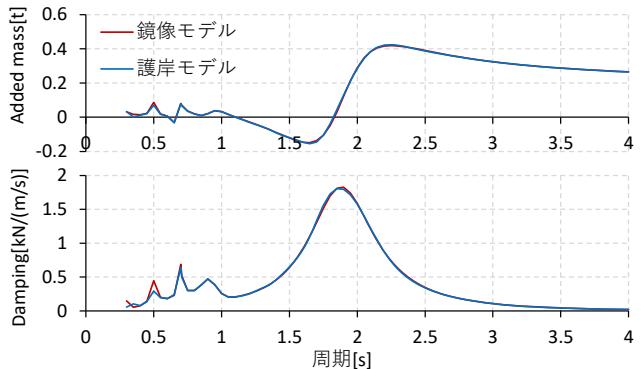


図-3 1浮体モデルによる Surge-Surge 成分の流体力係数
(上図：付加質量、下図：造波減衰係数)

Fig.3 Hydrodynamic force coefficients for Surge-Surge component with one floating body model Calculation model
(Upper figure: added mass, lower figure: damping coefficient)

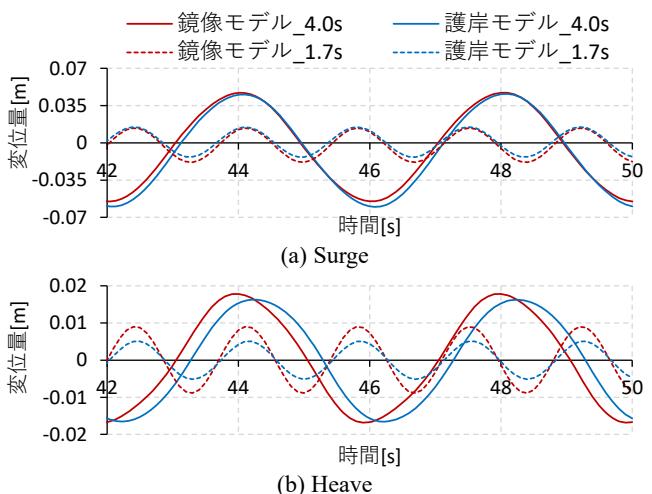


図-4 鏡像モデルと護岸モデルの動揺量（波向き 0° ）
Fig.4 Displacement of mirror image model and seawall model
(wave direction 0 degree)

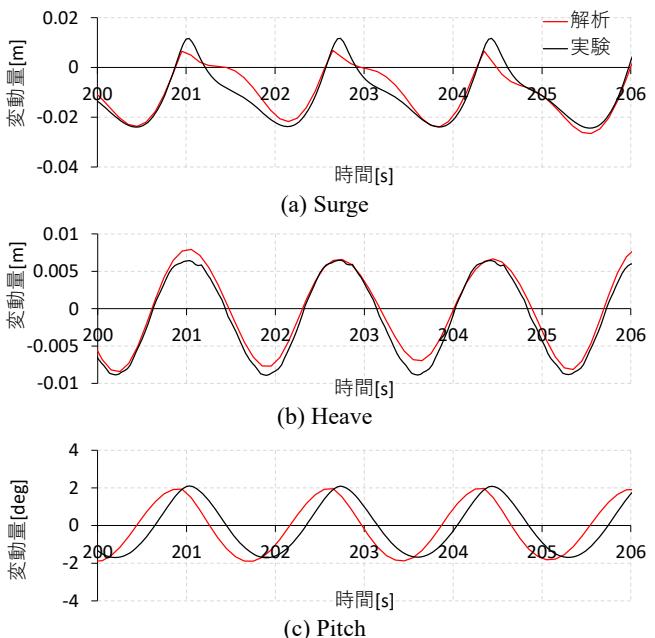


図-5 動揺量時系列結果（波向き 0° 、周期1.7s）

Fig.5 Time series result of displacement
(wave direction 0 degree, period 1.7s)

Heave の波外力が異なるため、振幅に差が生じたと考えられる。周期 4.0 s のケースでは、Heave の波外力は一致しているが、流体力係数の付加質量が若干異なるため、位相に差が生じたと考えられる。これらの違いは、護岸モデルにおける護岸長の有限性により生じており、変換された流体力係数を用いた 1 浮体モデルの、護岸モデルに対する優位性が確認された。

2.5 水理模型実験の再現解析

本手法を用いた鏡像モデルによる解析の妥当性確認のため、別途実施した水理模型実験の再現解析を行った。実験は、図-1(b)に示した条件で実施しており、解析には同図で示したモデルを使用した。実験の詳細については既報³⁾を参照されたい。

図-5 に波向き 0°、周期 1.7 s の動搖量の時系列結果を示す。なお、解析では漂流力を考慮していないため、定常漂流力による変位を再現できない。そこで、Surge の結果については動搖中心の位置を実験結果に合うように調整した。図-5 によると、解析結果は実験結果を良好に再現していることが分かる。Pitch については、解析と実験で位相のずれが生じているが、これは Surge の漂流位置の再現が不十分であり、護岸との離隔が実験と解析で異なるためと考えられる。解析精度のさらなる向上のためには、漂流力の考慮が必要であると考えられる。Surge 動搖においては、動搖の波形が正弦波形ではなく、非線形性が強く表れていることが分かる。動搖解析では、流体力は線形近似に基づいており、係留系のみ非線形性を考慮している。解析は実験結果の非線形性の特徴をある程度表現できていることから、この非線形な動搖特性は、主に防舷材反力に由来すると考えられ、防舷材剛性の非線形性や、圧縮時と伸長時での剛性傾向の違いをより正確に再現することで、解析精度はさらに向上すると考えられる。

3. 沖合係留浮体実験の再現解析

3.1 水理模型実験の概要

OrcaFlex の計算における波の非線形性および抗力係数の影響を確認するため、沖合での係留状態を想定した水理模型実験を実施した。実験の概要を図-6 に示す。実験は護岸係留実験と同様のセミサブ型浮体模型（縮尺 1/50）を用いて行った。模型は、4 本のカラムとそれらを接続する 3 本のポンツーンから構成される。風車の代わりに先端に風車分のウェイトが付いたアルミパイプの設置した。また、浮体の重量分布の調整を行い、想定する実機の重量（実機スケールで 37,000 t）、重心、

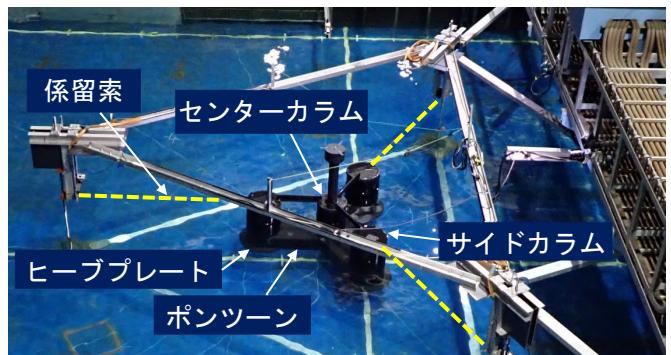


図-6 水理模型実験（動搖実験）

Fig.6 Hydraulic model experiment (Oscillation experiment)

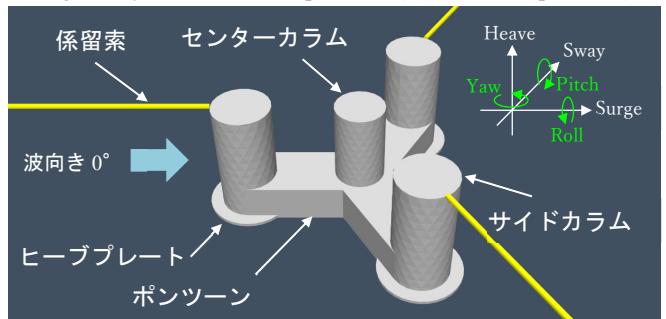


図-7 解析モデル

Fig.7 Calculation model

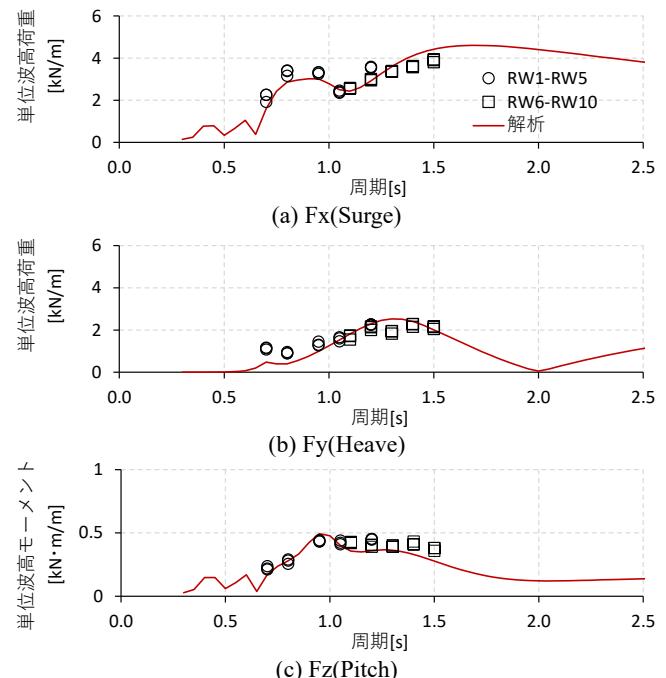


図-8 Load RAO の比較

Fig.8 Comparison of Load RAO

慣性モーメントを可能な限り再現した。浮体喫水は 0.53 m（実機スケールで 26.5 m）とし、水深は 1 m（実機スケールで 50 m）とした。また動搖はモーションキャプチャを使用して計測した。実験は、作用波力および動搖量を計測するため、固定実験、自由減衰動搖実験及び動搖実験の 3 種類の実験を実施した。固定実験では、固定した浮体に波を作らせ、浮体内部に設置された分力計により、波力を計測した。自由減衰動

揺実験では、波なしの状態で係留された浮体に初期変位を与えた状態で固定し、固定を解除後に動揺が減衰するまでの過程の変位を計測した。動揺実験では、係留された浮体に波を作らせ、浮体の動揺量を計測した。なお、固定および動揺実験で作用させた波は、弱非線形の波（RW1～RW5）および強非線形の波（RW6～RW10）をそれぞれ5波ずつ設定した。

3.2 解析モデル

図-7に係留索を設定した浮体の解析モデルを示す。解析モデルでは風車ウェイトやタワーは再現していないが、それらの浮体動揺への影響は浮体の重心の変更や慣性モーメントへの加算で考慮している。係留索は単純ばねとし、実験で使用したばね定数と初期張力となるように設定した。また、自由減衰動揺実験の再現解析における初期変位には実験で計測された値を設定した。抗力係数 C_d は、ヒープレート、ポンツーン、サイドカラム、センターカラム上部、センターカラム下部の5つに、水平鉛直方向のみをそれぞれ設定した。

3.3 固定実験の再現解析

固定実験の実験結果とOrcaWaveによる再現解析結果を、波向き 0° のSurge, Heave, Pitch方向のLoad RAOについて、図-8に示す。なおLoad RAOは、周期毎の浮体に作用する波力を単位波高あたりに換算した値である。また、作用波の非線形性の違いから、RW1～RW5と、RW6～RW10を区別して同図に記載した。なお、波の非線形性によるLoad RAOの応答傾向の顕著な違いは見られなかった。同図より、OrcaWaveは実験の結果を概ね良好に再現していることが分かる。ただし、Heave方向の短周期帯の再現性が若干低い。短周期側では浮体に作用する流体の流速が大きく、長周期側よりも抗力の影響が強く出やすいため、実験と解析に差が生じたと考えられる。また、短周期の波は波長が短いため、セミサブのカラム間でのスロッシングの発生による誤差も要因として考えられる。

3.4 自由減衰動揺実験の再現解析

自由減衰動揺実験の時系列データの振幅が再現できるように、数値解析内の抗力係数 C_d をパラメータとして、キャリブレーションを実施することで、固有周期における抗力係数を同定した。なお、抗力係数の同定は、実験開始後の始めの数回の動揺に解析結果が合うように調整した。抗力を考慮した解析結果と実験結果の比較例を、Heave方向とPitch方向について図-9に示す。同図には、抗力を考慮しない解析の結果も並記した。抗力を考慮しない解析では動揺が減衰しないが、抗力を考慮した解析は時間経過とともに動揺が減衰し

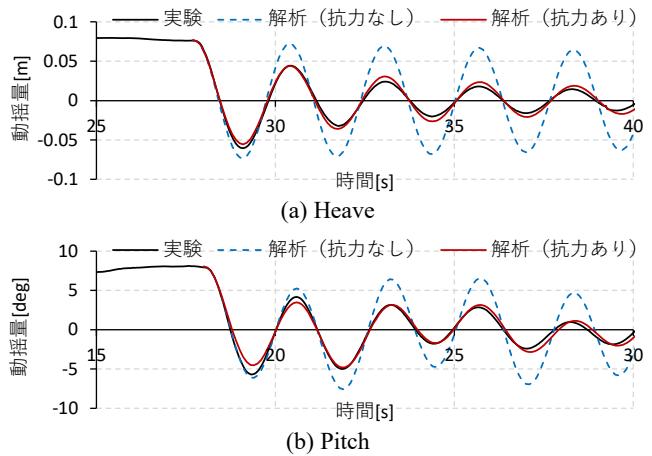


図-9 変位時系列結果（自由減衰動揺実験）

Fig.9 Displacement time series results(free decay experiment)

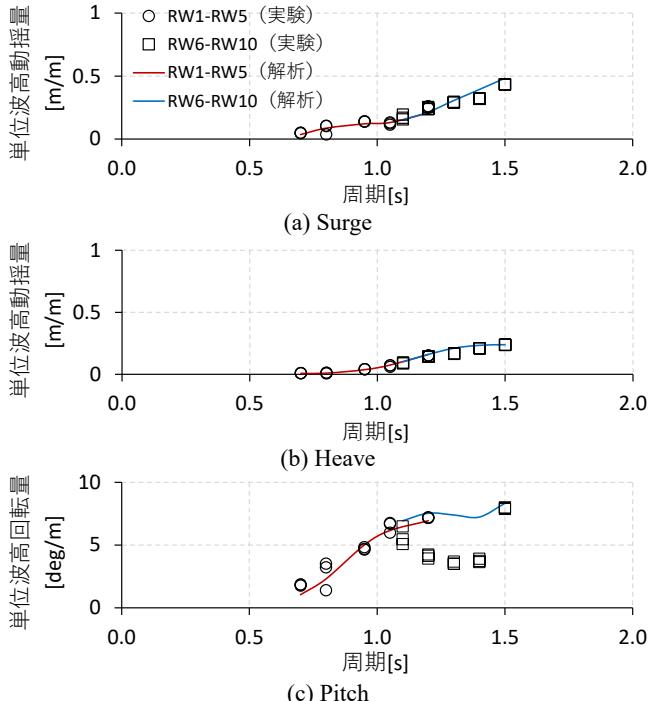


図-10 動揺 RAO の比較

Fig.10 Comparison of Displacement RAO

ていることが確認でき、実験結果を良好に再現している。ただし、自由振動実験は浮体の固有周期で動揺するため、同定した抗力係数は固有周期での値となる。抗力係数の動揺振幅への依存性の検討は、浮体を強制的に振動させる実験が必要であり、今回の実験や解析では考慮できない。

3.5 動揺実験の再現解析

規則波の動揺実験の動揺 RAOについて、再現解析結果を図-10に示す。動揺解析には自由減衰動揺実験により同定した抗力係数を使用した。まず、実験結果について、Surge, Heaveでは、周期1.2秒において、弱非線形の波と強非線形の波の結果が一致していることから、非線形性の影響がほとんどないと考えられる。一方で、Pitchでは、周期1.2秒の結果において、弱非線形の波

の方が強非線形の波より、単位波高あたりの動搖量が大きいことが確認できる。図-8によれば、Load RAOでは、これほど顕著な差異は生じていないことから、強非線形の波における浮体の動搖量に対する抗力の影響が要因として考えられる。強非線形の波は、浮体の動搖量も大きいため浮体に作用する流体の相対流速も大きい。抗力は流体の流速に依存するため、強非線形の波では抗力の影響が、弱非線形の波より大きくなる。その結果、単位波高あたりの動搖量で比較した場合、強非線形の波の方が小さい応答になったと考えられる。ただし、抗力の浮体動搖への作用は、波の位相と浮体動搖の位相の関係に影響されるため、波の周期によっては動搖を低減させるのではなく、動搖を助長させる可能性がある。次に、解析結果を見ると、Surge, Heave の並進運動については、解析は実験結果を良好に再現している。一方で、Pitch の回転運動の解析の再現性が低い。前述したように、強非線形の波では動搖に由来した相対速度が大きくなると考えられる。一方で、抗力係数は自由減衰動搖実験に基づき同定しているため、大きな相対速度の状況に対して適切な値となっていない可能性がある。また、抗力係数は固有周期付近を対象とした値であり、本来、周期により適切な抗力係数は異なることの影響も考えられる。解析精度の向上のためには、周期毎に異なる抗力係数を設定する等、評価方法をさらに検討する必要がある。

図-11に、不規則波のケースの動搖スペクトルの再現解析結果を示す。入射波の条件は、有義波高 0.11 m、有義波周期 1.28 s である。数値解析の波の入力は時系列で入力し、漂流力を考慮するため、二次波力を考慮した。同図より、再現解析の結果は概ね良好に実験結果を再現していることが確認できる。ただし、図-11(b)に示す、Heave の結果では、固有周期である 0.38 Hz 付近におけるピークの発生は再現できているが、振幅値の再現性が低い。要因としては抗力の影響が考えられるが、固有周期が入射波の周期帯とずれているため、実験水槽内での長周期波の影響も考えられることから、これについてはさらなる検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、護岸反射波や抗力係数の影響といった汎用的な動搖解析コードを使用する際の課題に対して、水理模型実験と数値解析により検討を行った。

護岸係留浮体では、護岸前面に係留されたセミサブ型浮体を対象に、動搖解析手法のひとつである鏡像モ

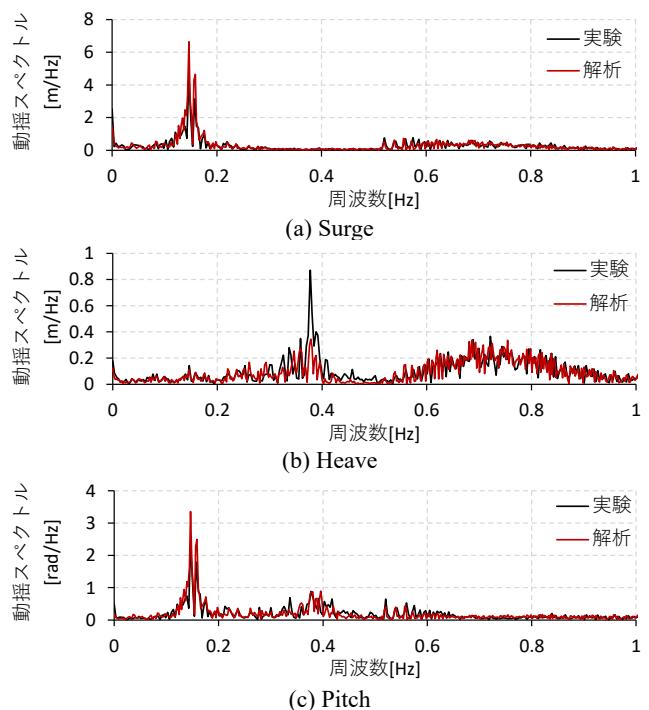


図-11 スペクトルの比較（不規則波）
Fig.11 Comparison of spectrum (irregular wave)

デルを用いた解析手法について、1浮体のみで時系列解析可能となる手法を検討した。護岸モデルや水理模型実験の結果と、同手法による結果の比較を行い、本手法の妥当性を確認した。これにより、護岸係留浮体の解析において、護岸を直接モデル化することなく、1浮体のみで動搖解析を行うことが可能となった。

沖合係留浮体では、波の非線形性や抗力係数の影響について検討した。OrcaFlex による実験結果の再現解析では、規則波の Load RAO、動搖 RAO、及び不規則波の動搖解析とともに概ね良好な結果であった。しかし、抗力係数の影響と考えられる解析の再現性の課題が確認され、波高および周期に応じた抗力係数の設定が動搖解析の再現性向上には必要であることが確認された。

参考文献

- Oortmerssen, G. V.: The motions of a ship in shallow water, *Ocean Engineering*, Pergamon Press, Vol.3, pp.221-225, 1976.
- 小俣哲平, 織田幸伸, 橋本貴之, 本田隆英: 護岸係留された浮体構造物を対象とした動搖解析手法の効率化, 大成建設技術センター報, 第 57 号, 10, 2024.
- 小俣哲平, 織田幸伸, 本田隆英, 橋本貴之: 護岸係留浮体の動搖解析における流体力係数の適用方法について, 令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会.
- 小俣哲平, 織田幸伸, 本田隆英, 橋本貴之: 開境界条件に基づく浮体動搖解析手法による護岸係留浮体の動搖解析, 土木学会論文集特集号(海洋開発), 第 80 卷, 18 号, 2025 (印刷中) .