

4 洋上における海洋構造物の建設オペレーションに関する研究

海洋開発系 * 大坪 和久, 荒木 元輝, 長谷川 賢太, 石田 圭, 佐藤 宏

1. はじめに

オフショアにおける石油・天然ガスの開発が高度化するのに伴い、開発機器のサブシー化が現在進みつつある。テニスコートほどの巨大な大きさを持つセパレータやコンプレッサーも開発されてきている。これらは機器と言うよりもサブシー構造物と呼ぶ方が適当であろう。このような構造物を水深 1,500m を超えるような海底に安全かつ正確に設置することは困難な作業であるため、計画段階での安全・稼働性評価は必要不可欠である。

洋上でサブシー構造物を設置するためには、海気象が落ち着くのを待ち、構造物を海底へ降下させる必要がある。本論文ではこの作業を揚降作業と呼ぶ。構造物を船上クレーン設備で吊り上げ、大型作業船であれば船尾フレームから海底へ降下させることが多いが、中小型作業船の場合には舷側から横吊状態で揚降作業が行われることもある。揚降時に発生する振れ回りやスラミング衝撃力は揚降作業のボトルネックになる。水深 1,500m を超えるような場合には降下作業にも多大な時間を要するため、吊荷ロープの変動張力（スラックも含）についても評価しておく必要がある。揚降作業だけを見ても、事前評価しておくべき事項は数多く存在する。

これらの背景を踏まえ、今期中期計画から重点研究「海洋資源開発に係る基盤技術及び支援技術に関する研究」の一つとして「SURF (Subsea Umbilical, Riser and Flowline) システムの Installation 技術等の安全性評価」を進めている。本研究では揚降作業に着目し、水槽試験による検証を通じた評価ツール開発を行うことによって、揚降作業に関する安全・稼働性評価法の確立を目指すことを目標としている。

そこで本論文ではこの研究の取り組みの中から、(1) 揚降物の振れ回り運動評価法、(2) 揚降物が着水した後に作用する変動流体力評価法について報告する。

2. 研究対象船等の諸元

本研究で対象とする作業船の基本諸元を表-1 に、その模型船を図-1 に示す。このような作業船は多目的作業船と呼ばれ、世界で数多く建造されている。揚降作業を行う際には右舷船尾にある大型クレーンを使用する。通常、多目的作業船の吊荷能力(SWL: Safety Working Load)は排水量の数%程度であることから本船の吊荷能力を排水量から換算して128ton 程度(作業船排水量の約 2%)と設定した。その他の特徴としてはミッドシップ付近にムーンプールがある。位置保持には自動位置保持(DPS)を使用するため、船首には2基のトンネルスラスタ、船尾には2基のアジマススラスタを搭載する。揚降物の重量次第では大きく喫水が変わる可能性はあるが、喫水変化は軽微と考え、本研究では喫水は稼働状

態のみを対象とした。

表-1 模型船の諸元

	Actual	Model	Note
Length (L_{oa})	78.00m	2.60m	
Length (L_{pp})	75.20m	2.51m	
Breadth	21.50m	0.72m	
Depth	7.50m	0.23m	
draft	5.61m	0.19m	Operational Condition
Displacement	6,623ton	239kg	
GM_T	4.28m	0.14m	
SWL	132ton	4.88kg	

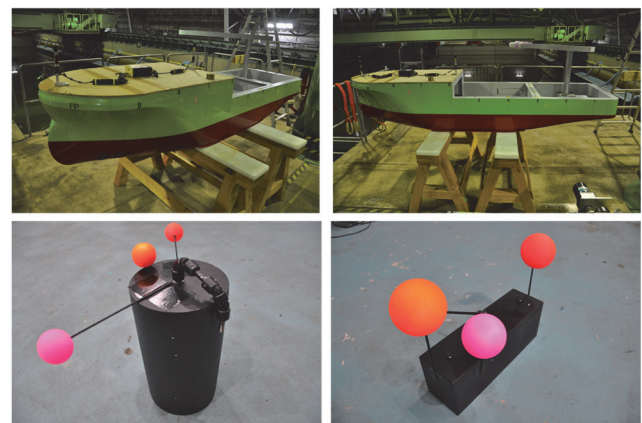


図-1 対象模型船（上）と揚降物模型（下）

本研究は研究初期の段階にあるということを考慮し、揚降物については具体的なサブシー構造物ではなく、出来るだけ適用範囲が広く、構造が容易な円筒及び角柱型構造物を研究対象とした。表-2 は後節の水槽模型試験（空中振れ回り運動評価）で使用した円筒型構造物の基本諸元を示す。これら形状は模型製作が比較的容易でかつ安価であるとともに、これまでの流体力解析に関する過去の研究蓄積があるなどの利点もある。

表-2 揚降物の諸元

	Actual	Model
Diameter	4.5 m	0.15 m
Depth	8.1 m	0.27 m
Weight in Air	78.0 ton	2.89 kg

3. 揚降物の振れ回り運動

3. 1 概要

揚降物を作業船デッキ上で吊り上げて舷側まで移動させ、横吊状態から海底へ徐々に降下させていくまでの間、揚降物には船体運動に起因する加速度がクレーンジブを通じて伝わるために特有の運動が発生する。これを本論文では振れ回り運動と呼ぶ。その運動は作業船に対する波向きによって当然変化する。一定以上の振れ回り運動が発生すれば人命や船上機器にとってリスクとなるため、作業は中断され稼働率は大幅に低下することになる。このようなことから海洋工事分野では振れ回り問題に対する研究が1970-80年代に活発に行われた²⁾。ほとんどの研究は大型クレーンバージのような箱船を対象としている。本研究で対象とする多目的作業船を対象とした研究例は少なく、また、舷側から揚降物を懸下するような横吊を想定した研究は、野尻らの研究³⁾を除いてはあまりないと思われる。

上記は揚降物の振れ回り運動に着目して述べたが、作業船の排水量に対する揚降物重量の比が大きくなるほど、船体運動に影響を与えることが想定される。船級協会ガイドライン⁴⁾では揚降物が軽量である場合は船体運動と揚降物の連成運動を考慮しない評価法が提示されているが、どの程度の重量比の場合にその方法が適用できるのか明瞭にされていない。

3. 2 揚降物懸下状態での波浪中動揺試験

前節で述べたような背景に基づき、まず、波浪中での揚降物の振れ回り運動を把握するため、円筒型及び角柱型揚降物（縦：12.0m、横：3.6m、高さ：4.5m）を懸下した状態での作業船の波浪中動揺模型試験を本所深海水槽にておいて実施した。円筒型は空中状態、角柱型は揚降物が半没状態での試験を行った。懸下状態での揚降物に作用する風の影響も無視することは出来ないが、作業船には風速に対する安全作業基準が必ず存在しており、風速影響が無視できるほどの環境下でクレーン作業は行われているため、本研究では風影響については考慮しないこととした。

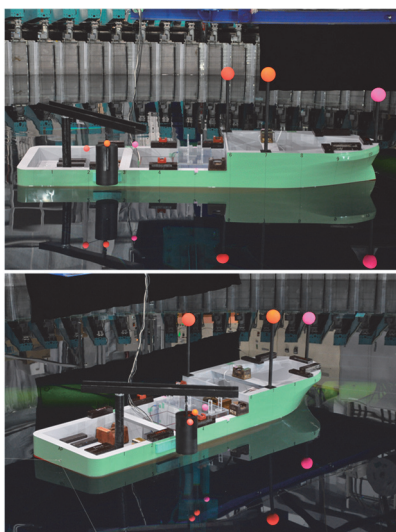


図-2 模型船のセットアップ

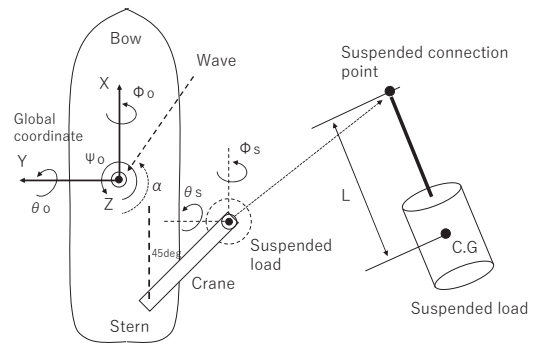


図-3 座標系

作業船はDPSによって位置保持するが、揚降物の振れ回り運動は主に船体ロール、ピッチに大きく支配されると思われる為、係留方式でもDPSでも振れ回り運動の相違は小さいものと考え、本研究では試験が容易な4点係留方式によって作業船の位置保持を行った。模型のセットアップ状態を図-2に示す。模型船及び揚降物模型に装着されたマーカーはカメラを使って運動を計測するためのもので、3つのマーカーの3次元座標データから重心座標及び回転運動を計算した。図-3は本論文で採用する座標系である。係留状態において規則波、不規則波を発生させ、その時の船体及び揚降物の運動等を計測した。規則波結果についてはフーリエ解析によって振幅を求め、同解析を使って求めた入射波の振幅結果で除することで応答関数を求めた。不規則波については、運動と入射波のクロススペクトルを入射波のオートスペクトルで除することで複素応答関数を求め、絶対値として応答関数を求めた。スペクトル解析はBlackman-Tukey法を採用し、三角周波数フィルターを使って平滑化処理を施した。

3. 3 試験結果と数値計算

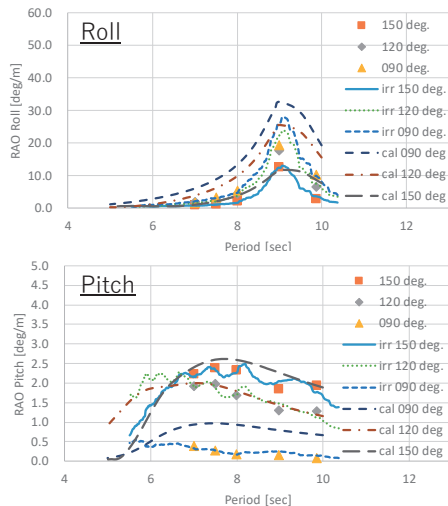
本論文では揚降物の空中での振れ回り運動に関する試験結果について示す。図-4は作業船応答関数の比較であり、上は作業船が単独状態、下は作業船に円筒型揚降物が懸下された状態である。揚降物の振れ回りに大きな影響を及ぼすと思われる運動2成分の結果を示している。図中には実験結果に加えて計算結果についても表記した。数値計算は作業船と揚降物の連成運動をLagrange方程式から求めて、微小運動仮定の下で運動方程式を線形化して導出した。係留による影響は初期状態における線形復原力を方程式に組み、作業船に作用する付加質量、造波減衰及び波強制力については境界要素法によって別途求めた。なお、揚降物運動における空気や摩擦等による減衰影響は軽微と考えて考慮しなかった。

揚降物の重量は作業船の排水量の約1%であるために揚降物による船体運動への影響はほとんどないものと考えていたが、実験及び数値計算においてロールの短周期域（6秒付近）に小さな応答のピークが確認された。作業船のロール、ピッチの固有周期はそれぞれ8.96秒、6.55秒、揚降物の振り子としての固有周期は6.10秒であるので（図中に併記）、揚降物の連成影響が表れていると思われる。ピッチについては数値計算において前述した短周期域でピークが確認され

たが、実験結果にはそのような兆候は確認されなかった。

また、ロールの固有周期が長周期側へシフトしていることが明瞭に確認される。これは揚降物との連成効果によるもので、野尻³⁾は作業船のスウェイ、ロールと揚降物の運動との連成運動に対し、固有周期シフトを解析的に示している。このように吊荷が軽量であっても、作業船の応答特性に大きな変化を生じさせることが分かる。

Vessel only



Vessel + Suspended Load

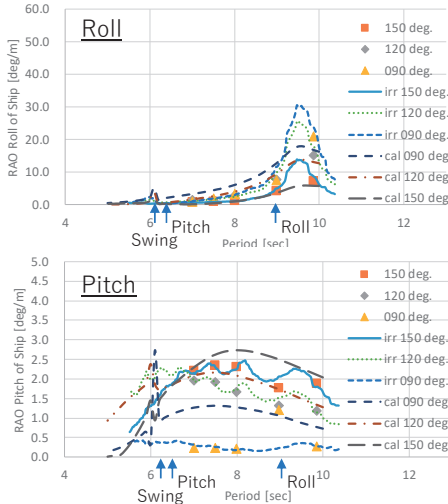


図-4 作業船運動の応答特性

次に揚降物の振れ回り特性をまとめたものを図-5に示す。入射波角の違いによって違いはあるものの、ロールは明確な2つのピークを有する応答関数になっている。9秒付近のピークは作業船のロールによるもの、短い6秒付近のピークは揚降物の振り子としての固有周期や作業船のピッチに対応するものと思われる。振れ回りが非常に激しいものであることがこれらの結果から見て分かる。

過去に研究が行われてきたクレーンバージの場合、クレーン先端が海面から60mほど高いところにあるため、図-6から分かる通り、振り子としての固有周期が15秒程度の長周期

に存在するものと考えられるが、50～200tonの吊荷能力を有する多目的作業船はデッキスペース等の関係からクレーンバージのような大型クレーン設備が搭載されることは考え難いため、ロープ長が極端に短くなり、振り子としての固有周期が6-8秒付近になるものと思われる。したがって、本船の場合はピッチの固有周期に振り子の固有周期が最接近することになる。ピッチの固有周期は短いために大きな加速度を生じさせ、振れ回り運動も激化することが考えられる。吊長次第でこのような状況が多目的作業船では発生し得ることを作業者は把握しておく必要がある。

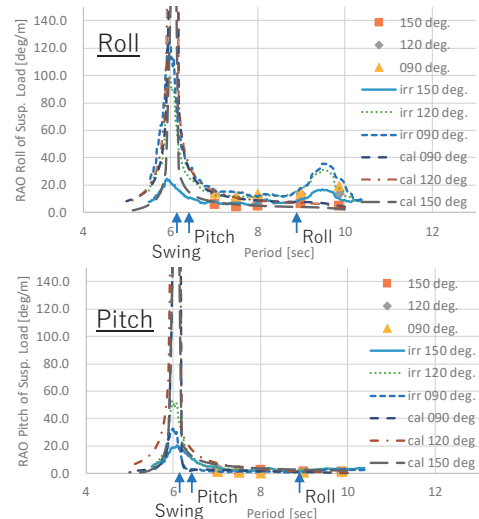


図-5 揚降物の振れ回り運動特性

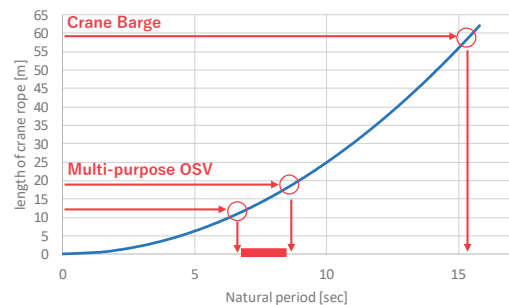


図-6 吊長と固有周期の関係

3. 4 吊点に対するパラメトリック解析

前節においては揚降物を海底投入する直前の箇所における振れ回り運動の評価を行ったが、実際の揚降作業では船上デッキから揚降物を吊り上げ、クレーンジブを移動させることによって舷側を超えて揚降物を移動させるという一連の動きの流れが当然発生する。吊点位置によっては揚降物の振れ回り特性が異なることも考えられる。そこで吊点の影響を見るため、数値計算を使ったパラメトリック解析を行った。前節の数値計算は減衰影響を軽微として考慮しなかったが、ここでは減衰成分を運動方程式に組み込み、実験結果に概ね近い特性になるようにして解析を行った。

今の吊点位置を基準にそのままセンターライン上に移動

させた場合、ミッドシップ付近に移動させた場合の2ケースのロールの計算結果を図-7に示す。センターライン上へ移動させた場合にはピークが若干増加する一方、ミッドシップ付近に移動させた場合には低下している。ここでは平面方向の影響について確認したが、吊点高さも作業中変化する可能性も十分に起こり得ると考える。船上作業者はクレーンジブの可動範囲及び作業の流れを十分把握した上で揚降物の振れ回り特性解析を事前を実施しておく必要があると思われる。

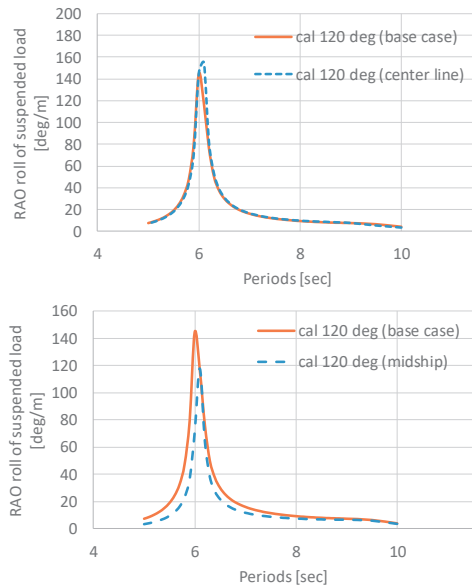


図-7 揚降物の振れ回り特性（ロール）の比較（上：センターライン，下：ミッドシップ付近に吊り点を移動した場合）

4. 揚降物に水中で作用する変動流体力

4.1 概要

揚降作業では舷側から徐々に海底へ揚降物を降ろす作業が行われるが、水深1,500メートルを超えるような海域においては長時間その作業に費やされる。降下中、揚降物には様々な変動流体力が作用する為、付加質量や造波減衰（海面近傍を通過する時）、粘性減衰に関する流体力の推定は吊荷ロープに作用する変動張力評価のために必要となる。その場合、ポテンシャル理論を基本とした流体力解析はもちろんのこと、CFDも重要な評価ツールとなる。本節では揚降物に作用する変動流体力に関する研究について報告する。

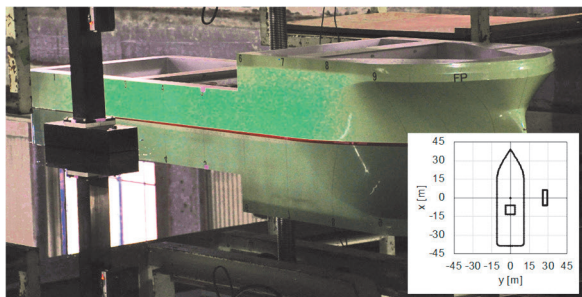
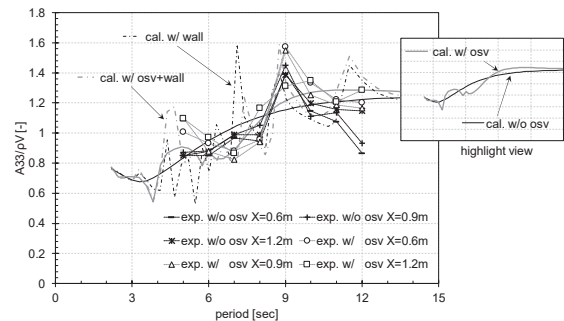


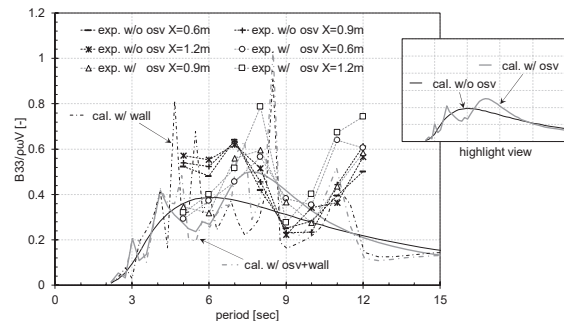
図-8 試験の様子と配置（実機スケール）

4.2 作業船近接状態での揚降物強制動揺試験

揚降物を海底降下させる際、揚降物は作業船に近接した状態になる。したがって、作業船の存在が揚降物に与える影響を調査する必要がある。そこで本所動揺水槽において角柱型揚降物模型の強制加振試験を行った。図-8に試験の様子を示す。本来、クレーンジブの可動範囲で揚降物を加振する必要があるが、設備の都合から揚降物模型は作業船の右舷側、ミッドシップ近傍で強制加振させた。強制動揺装置にロードセルを取り付け、揚降物模型と共に規則加振（スウェイ、ヒープ方向）させることで作用する流体力データを計測し、ポテンシャル流体力（付加質量と造波減衰力）を把握するために結果をフーリエ解析した上で、同位相成分を付加質量、逆位相成分を造波減衰として周波数解析した。加振周期は5.0～12.0 sec（1.0 sec 刻み）とし、振幅は0.6, 0.9, 1.2mの3種類とし、揚降物模型は半没状態とした。



(a) 付加質量



(b) 造波減衰

図-9 揚降物に作用する流体力（ヒープ加振）

4.3 試験結果と数値計算

図-9にヒープ加振させた場合に揚降物に作用する付加質量及び造波減衰の実験結果（記号）と数値計算結果（実線）を示す。三角記号は角柱揚降物模型のみの実験結果を示すが、同条件の計算結果（黒色実線）と比較すると周期による変化が付加質量・減衰係数ともに顕著である。これは試験を実施した水槽の側壁影響（水槽幅は作業船型幅の11倍程度）と考えられ、数値計算で試験環境を模した側壁を再現した結果（青色実線）で同様の傾向が確認できた。丸記号は作業船が有る場合の実験結果で、作業船と側壁を考慮した計算結果を赤色の実線で示している。明確な差異は分かりづらいが、側壁影響無しで作業船有りの計算結果（黄色実線）と作業船

無しの計算結果（黒色実線）において黄色の実線が黒色実線を上回っている箇所では実験結果も同様の傾向にある事が分かり作業船の有無による影響が確認できる。揚降物に作用する付加質量は主に文献⁴⁾で推奨されている簡易的な換算式を用いる事が多い。揚降作業の時間領域シミュレーションにおいて揚降物の流体力係数を上記換算式やポテンシャル理論、CFD で検討している例⁵⁾もあるが、本研究で見られたような作業船との相互干渉影響はあまり考慮されていない。サブシー構造物の大型化が今後進めば干渉影響はより顕著になると思われる為、吊りロープに作用する変動張力の評価を行う際には無視できないと考える。

4. 4 マルチボディダイナミクスと CFD の統合シミュレーション

前節においてはポテンシャル流体力についての評価を目的に試験結果との比較を行ったが、粘性影響の評価も本来重要である。粘性評価においては、CFD は有望な評価法である。ただ、揚降物を懸下した状態においては、船体運動と揚降物は2体剛体系の連成運動が生じるため、本来は多体剛体系の連成運動を扱うことができるマルチボディダイナミクスに基づく計算を行う必要があると考える。そこで本研究では本所で開発された CFD ソルバーNAGISA⁶⁾と今回新たに開発したマルチボディダイナミクスソルバー（以降、MBD）を統合し、3.2 節で示した水槽試験（揚降物が半没した状態）を模擬したシミュレーションを行った。

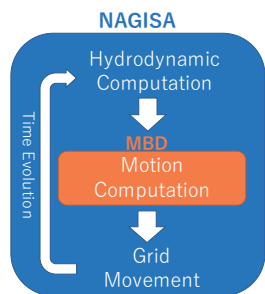


図-10 NAGISA と MBD の関係

MBD と NAGISA の統合に関しては図-10 に示すようにモデル化された MBD を NAGISA 内に組み込み、NAGISA で計算された流体力を外力として MBD に与え、MBD 内で運動計算を行い、得られた運動を基にして、NAGISA 内で計算格子を移動させ、時間発展を進める。

船体の近くで船体とは異なる動きをする揚降物の運動を再現するため、今回は時々刻々計算格子の重合情報を更新する動的重合格子法を用いることにした。ただし、時間刻みごとに全ての計算格子の重合情報を再計算すると膨大な計算時間となるため、船体と同じ運動を行うビルジキールやスケグ等の再計算を行わないようにし、重合計算の時間削減を図った。また、複数の格子を重合させることでムーンプールを有する船体やビルジキール、スケグなどの形状を再現している（図-11 参照）。

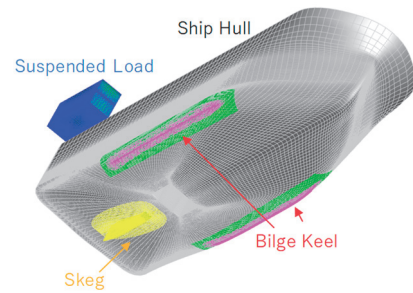


図-11 物体表面における計算格子

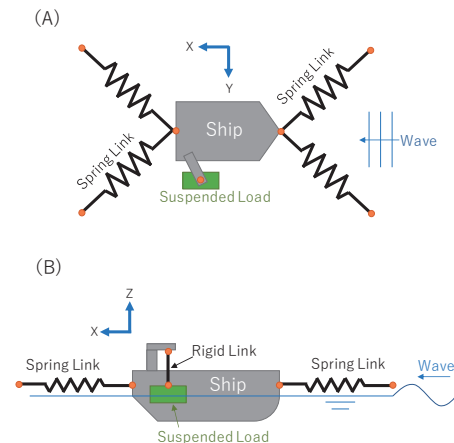


図-12 運動モデルにおける拘束条件
(A) 上面図、(B) 側面図

CFD の計算条件としてはレイノルズ数を 1.0×10^6 と仮定し、作業船垂線間長と真水の動粘性係数を用いて導いた代表速度と重力加速度から算出したフルード数を約 0.08 とした。乱流モデルは壁関数型 $k-\omega$ SST⁸⁾を用いた。また時間発展における内部イタレーション回数は5回とし実時間刻みは波周期の1/50とした。

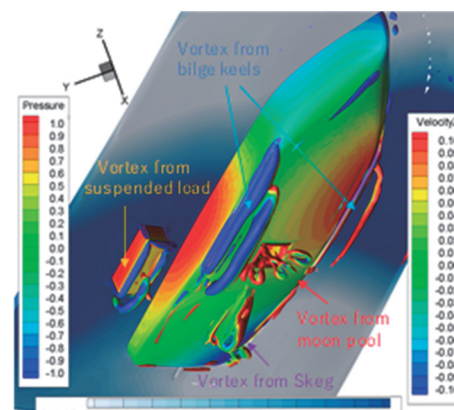


図-13 CFD の計算結果（斜向波中）

船体と揚降物の運動計算における拘束条件は、図-12 に示すように船体の船首・船尾においてそれぞれ左右から2本のバネで拘束され、船体と揚降物はマスレスリンク（一定距離を保つ質量のない棒）で接続されていると設定し、できるだけ模型試験状態を再現した。ただし、それぞれの拘束点にお

いては回転自由としている。

図-13 に斜向波(150deg)中における船体周囲流場を可視化したものを示す。同図には自由表面と物体表面上の圧力分布、さらに物体周りの渦を可視化するために速度勾配テンソルの第二不変量 Q 値=100 の等値面とその等値面上に Z 方向(鉛直上向き正)の流速分布を示している。同図では船体中央が波の山〜登り波面付近にあり、船体が右舷方向へ横揺れし、揚降物も右舷方向へ引っ張られている状況である。そのため揚降物、ビルジキール、スケグ、ムーンプール、スケグのエッジから放出された渦が左舷へ流されている。

次に向波(180deg)中における船体重心と揚降物重心の軌跡および船体重心から見た揚降物の重心位置の軌跡を図-14に示す。同図では空間固定座標系と船体重心固定座標系における正面(YZ 平面)からみた軌跡を示しており、青色のボックスはそれぞれ船体と揚降物初期位置と姿勢を表している。図-14(A)の空間固定座標系から見た船体と揚降物の重心軌跡図から、両方の重心が右舷方向にずれつつあるが、これはスウェイだけでなく回頭によって重心が移動していると考えられる。また船体の上下動に比べ揚降物の上下動が比較的大きいことが分かる。図-14(B)の船体重心固定座標系から見た揚降物の軌跡は船上作業員から見た揚降物運動と考えることもできる。同図より、規則波を受けているにもかかわらず、船体重心から見た揚降物の軌跡は不規則な運動をしており、単純な単振子の運動ではないことがわかり、船体と揚降物の運動を連成して解く重要性が確認できる。今後、試験結果との比較検証を行っていく予定である。

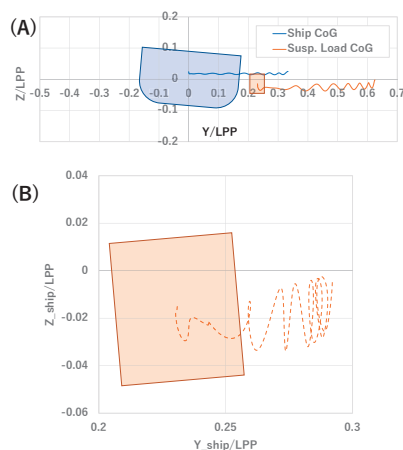


図-14 船体と揚降物の重心軌跡

(A 図：空間固定座標系での船体と揚降物、B 図：船体重心固定座標系での揚降物の重心軌跡)

5. まとめ

近年のオフショア石油ガス開発は様々な大型サブシー構造物を大水深の海底に設置する必要があるが出てきている。海技研は重点研究として揚降作業に着目し、その安全・稼働性評価のために要する基盤ツールの開発を行っており、本論文はその取り組みについて報告した。

本論文では次のような成果を得た。

- ・ 揚降物の振れ回り運動を評価するために水槽模型試験と数値計算を行い、吊荷重量が排水量の 1%程度と軽量であっても、作業船応答には揚降物運動との連成影響があることを実験、計算の両方において確認した。船級協会ドキュメントでは揚降物が軽量の場合、連成効果を考慮しない評価法が提示されているが、揚降物の重量に関わらず、連成影響を考慮した数学モデルに基づく評価が好ましい。
- ・ 吊長だけでなく吊点によって揚降物の振れ回り特性が変化することを明らかにした。クレーンジブ可動範囲を正確に把握した上で揚降物の振れ回り特性を評価する必要がある。
- ・ 揚降物に作用する流体力は揚降物による干渉影響を受けることを水槽模型試験及び数値計算によって確認した。吊荷ロープの変動張力への影響も考えられる為、その評価においては流体力の干渉影響を考慮した方が好ましい。
- ・ 粘性流体力の評価を行うために、CFD と MBD を統合化したシミュレーションを開発した。今後は水槽試験結果との比較検証を行って評価に活用していく。

参考文献

- 1) The Construction Vessel Register 2011, Clarkson Research.
- 2) 社団法人日本作業船協会：特殊作業船の大型クレーンの安全に関する設計指針調査研究，(1978)。
- 3) 野尻信弘：クレーンバージと吊荷の連成運動について(その 2：斜波中の 3 次元応答)，西部造船会々報，第 65 号，(1983)，pp.95-106。
- 4) DNV-GL, 2014, Modeling and Analysis of Marine Operations, DNV-RP-H103.
- 5) Solaas, F., Sandvik, P. C., Pakozdi, C., Kendon, T., Larsen, K., Myhre, E., 2017, Dynamic Forces and Limiting Sea States for Installation of GRP Protection Covers, Proc. of the 36th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, June 25-30, Trondheim, Norway, OMAE2017-62499.
- 6) Ohashi K., Hino T., Kobayashi H., Onodera N., Sakamoto N., 2018, Development of a structured overset Navier-Stokes solver including a moving grid with a full multigrid method, Journal of Marine Science and Technology, pp.1-18.
- 7) Baumgarte W. J., 1972, Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.1, Issue 1, pp.1-16.
- 8) Ohashi K., Hino T., 2012, Numerical study on the application of wall function models for the flow around an appendage attached to a body, AIAA 50th Aerospace Science Meeting Papers, AIAA 2012-0445.