

大型ロジスティックスハブの弾性影響を考慮した ローディング・アンローディング評価に関する研究

前田 克弥*, 齊藤 昌勝*

Study on evaluation for loading / unloading operability on floating logistics hub considering elastic behavior

by

Katsuya MAEDA, Masakatsu SAITO

Abstract

It has a great influence on the operation of development facilities that the transportation of personnel, drilling equipment, materials, foods, and so on to offshore facilities for developing offshore oil and gas fields such as drilling vessels, FPSOs, support vessels, etc. In particular, when the offshore facility becomes unable to operate due to some kind of failure, the downtime until fixed repair is the amount of damage, so it is important from the viewpoint of operational cost to shorten the transportation time.

Since the transportation time depends on simply the distance between the offshore facility and the transportation base (logistic hub), it is desirable to provide a logistics hub near the development facilities.

On the other hand, in case of installing the logistic hub in the vicinity of the offshore facilities, the sea conditions are severe depending on the location, the relative motions between the logistics hub and supply vessel become large, and the availability rate of the logistics hub itself may decrease.

Therefore, in this study, we investigated the method of evaluating the availability rate for loading and unloading operation, when the logistic hub is not able to ignore the elastic deformation like Mega-float.

* 海洋開発系

原稿受付 平成29年8月7日

審査日 平成29年10月2日

目 次

1. まえがき	54
2. ロジスティックスハブのコンセプト	54
2.1 コンセプト	54
2.2 設置位置と大きさ	55
2.3 検討浮体	55
3. 評価手法	55
3.1 評価指標	55
3.2 弾性浮体挙動プログラム	56
3.3 不規則波中弾性挙動の算出	57
3.4.2 浮体シミュレーション	57
3.5 弾性運動を考慮した波漂流力	58
3.6 評価手法の流れ	58
4. 評価例	59
4.1 対象浮体	59
4.2 QTF に対する弾性の影響	59
4.3.2 浮体シミュレーション	62
4.4 ロジスティックスハブの弾性挙動	63
4.5 クレーンとシャトル船の相対変位	64
5. まとめ	65
参考文献	65

1. まえがき

海洋油ガス田開発に用いられる掘削船や FPSO に代表される生産施設（以下、開発施設）への人員移送や資機材や食料等の物資移送は、開発施設の運用に大きな影響を及ぼす。特に、開発施設が何らかの故障によって稼働できなくなった場合では、修理までに要する時間が損害額となるため、輸送に要する時間を短縮させることが開発のオペレーションコストの観点から重要となる。この輸送に要する時間は単純に開発施設と輸送基地（ロジスティックスハブ）との距離に依存するため、開発施設付近にロジスティックスハブを設けることが望ましい。一方、開発施設付近にロジスティックスハブを設置する場合、設置場所によっては海気象条件が厳しく、浮体動揺が大きくなり、ロジスティックスハブそのものの稼働率が低下する恐れがある。洋上における 2 浮体問題、例えば FPSO や FLNG とシャトルタンカーの場合といった剛体同士に関する研究は数多く行われている^{1,2)}が、弾性体と剛体の場合での検討はなされていない。そこで、本研究では、ロジスティックスハブがメガフロートのような弾性変形を無視できない浮体の場合における稼働率の評価、すなわち物資輸送のためのローディング・アンローディングの評価方法について整理した。

なお、弾性変形については平成 7 年当時に実施されたメガフロートの研究開発の成果である領域分割法による矩形ポンツーンを対象としたプログラム³⁾を適用することとした。このプログラムは、防波堤に囲まれたポンツーンによる回折波を考慮することが可能である。

2. ロジスティックスハブのコンセプト

2.1 コンセプト

海洋油ガス田開発に代表される海洋資源開発では複数の開発施設によって開発が行われる。そのため、それらの開発施設から等距離となる位置にロジスティックスハブを設置し、「ハブ&スポーク方式」による物資輸送が最

も効率的になると考えられる。すなわち、図1に示すように開発に用いられる物資は世界各地のサプライヤーから、ロジスティクスハブへ大型船による大量輸送によって輸送され、そこからPSV等の作業船(以下、シャトル船)によって各開発施設へ必要な物資を個別輸送する方法である。また、開発施設から廃棄物等の不必要な物資がロジスティクスハブへ集約され、そこから陸上の処理施設等へ送られることとなる。

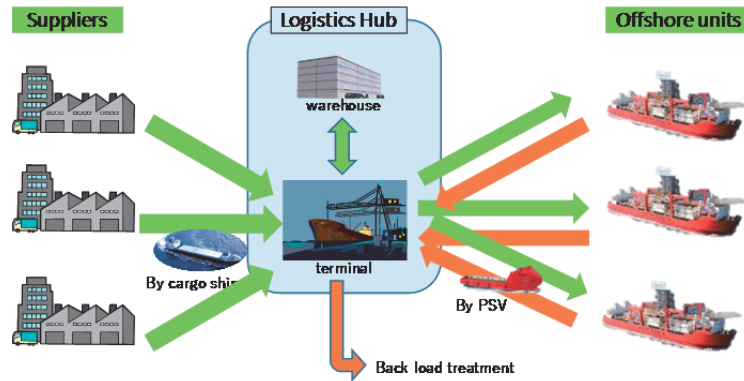


図1 物資輸送全体の流れ

2.2 設置位置と大きさ

設置位置の選定にあたっては、物資の輸送効率のみならず、コスト(初期投資と運用費用)メリットの観点が必要となる。物資の輸送効率のみを考慮した場合、ハブ&スポーク方式での物資輸送を考えると、各生産施設間の中心に設置し個別輸送の総距離を最小とすることが、輸送効率の面からは最適位置となり、一般的に沖合に設置することとなる。この場合、海気象条件は沿岸域と比較して厳しくなるため、ロジスティクスハブ浮体の構造強度等に十分配慮する必要があり、場合によっては別途消波構造物が必要となること、水深が大きくなるために係留システムが大規模となること等の理由によって、初期投資費用が大きくなりすぎ、コストダウンにつながらない場合がある。一方、沿岸域に設置した場合では、沖合に設置する場合と比較し初期投資費用は抑えられるが、総輸送距離が大きくなるため運用費用が沖合よりも高くなる。これら初期投資と運用費用によるコストがロジスティクスハブを用いない場合のコストよりも小さくなる設置位置を選択する必要がある。

また、ロジスティクスハブの浮体サイズは、対象とする生産施設数と距離、物資輸送の頻度により、大型船およびシャトル船の運用スケジュールが立てられ、ロジスティクスハブにおけるローディング・アンローディングのタイミングが決まる。このスケジュールによって、同時に着積する船舶数が決まることから、これを元にロジスティクスハブのサイズが決まることとなる。

2.3 検討浮体

上述の通り、ロジスティクスハブの浮体サイズや構造、係留方法などは、開発海域によって大きく異なることとなるため、標準的なサイズは無い。そこで本研究では、ロジスティクスハブの弾性変形が十分に発生する長さ960m、幅200m、型深さ4.0m、喫水1.5mのポンツーン型を仮定し、本浮体がドルフィン係留可能な沿岸域に設置されることとした。また、シャトル船は簡単のためバージ船とし、ロジスティクスハブに係船するものとした。

3. 評価手法

3.1 評価指標

ロジスティクスハブのローディング・アンローディングの稼働率評価に関わる指標としては以下の項目が考えられる。

- ① クレーンとシャトル船の相対運動

大型船・シャトル船とのローディング・アンローディングは基本的にロジスティックスハブに備えられているクレーンを用いて行われる。本移送作業において、シャトル船とロジスティックスハブとの相対運動が大きいとクレーンの操作が困難になり、稼働率が低下することから、シャトル船とクレーンとの相対運動を指標値とした。なお、相対運動にはロジスティックスハブの弾性運動も考慮し、またクレーン基部からアーム上端までは簡易的に剛体とした。

② シャトル船・ロジスティックスハブデッキ面の傾斜及び上下加速度

作業限界指標として、通常、船体の傾斜と上下加速度が用いられる。ロジスティックスハブの場合、浮体全体の傾斜と上下運動はほとんど無く、弾性挙動による局所的な傾斜と上下運動が発生すると考えられる。

③ シャトル船の係船索の張力

シャトル船の退避の指標として、係船索の張力が考えられる。

以下、これらの指標の推定法を示す。

3.2 弾性浮体挙動計算プログラム

弾性浮体挙動計算プログラムについて簡単に説明する。詳細は文献3)を参照されたい。

弾性浮体挙動計算プログラムは領域分割法による周波数領域の流弾性計算プログラムで、長波頂規則波中の弾性浮体挙動を計算する。防波堤を考慮しない「VLFS」と防波堤を考慮した「VLFSb」がある。浮体は厚みが無い(喫水 $d=0$) 矩形浮体としてモデル化されている。弾性挙動はモードの線形組み合わせによって表現される。

プログラムの入出力を表1に示す。

弾性浮体挙動計算プログラムは沿岸域などの浅海域を対象として開発されたものであるが大水深海域でも適用可能である。水深影響の例として、水深のみを変化させた場合における波上側および波下側のメガフロート中央部の弾性応答の計算結果を図2に示す。水深200mと600mでは一致した結果となっており、200mよりも深い海域では弾性応答は水深の影響を受けないことが判る。

表1 弾性浮体挙動計算プログラムの入出力パラメータ

入力	水深 (m)	防波堤の本数・分割数
	入射波の周波数, 入射角度	一本の防波堤長
	波浪図のメッシュ数	防波堤分割数
	浮体の寸法 (長さ×幅)	防波堤の接線方位
	単位面積あたりの浮体重量	防波堤端点座標
	単位幅当たりの浮体剛性	ポアソン比
	浮体分割数	固有関数の数
	弾性運動のモード次数	
出力	浮体上面の格子点の上下変位の複素振幅	波浪図メッシュ点の水位変動の複素振幅
	浮体上面の格子点の傾斜の複素振幅	浮体周囲のノード点の相対水位の複素振幅
	浮体正面格子点の傾斜方向	

※：出力は単位振幅入射波に対する値である。

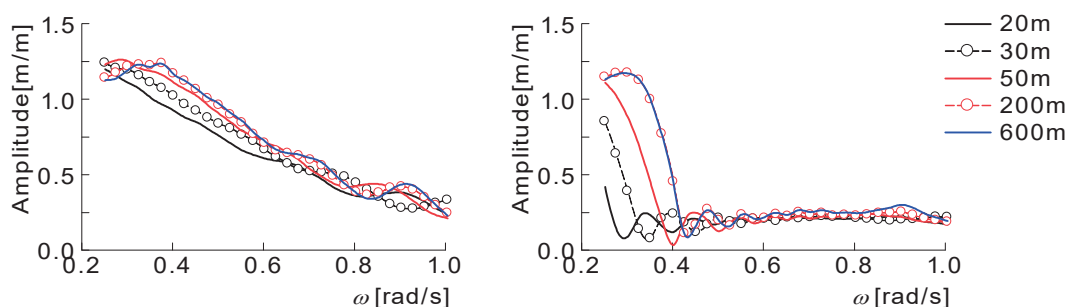


図2 弾性応答の水深影響

3.3 不規則波中弾性挙動の算出

不規則波中の弾性挙動による格子点の上下運動は周波数毎の複素振幅と波スペクトルの重畳積分で求める事ができる。

$$\zeta_{ij}(t) = \int \left((Z_{rij} \cos(\alpha) + Z_{iij} \sin(\alpha)) \cos \omega t + (Z_{iij} \cos(\alpha) - Z_{rij} \sin(\alpha)) \sin \omega t \right) \sqrt{2S(\omega)} d\omega \quad (1)$$

ここで、 ij は格子点番号、 $Z_r \cdot Z_i$ は格子点の上下運動の複素振幅(実部・虚部)、 S は波スペクトル、 α は不規則波のランダム位相である。

上下加速度は(1)式を2階微分すればよいので、 $-\omega^2$ をかけて ω の積分をすれば良い。ただし、(1)式は線形なので(1)式の積分を実行して時系列を求めなくてもMPM(Most Probable Maximum: 最大値の最頻値)を求める事はできる。

傾斜については、 $\tan \theta \cong \theta$ となるような微小傾斜で、波の周波数によらず傾斜方向が一定であれば線形重ね合わせが成り立ち、(1)式において $Z \rightarrow \theta$ と置き換えることで傾斜の時系列 $\theta_{ij}(t)$ を求める事ができる。ここで θ は傾斜の複素振幅である。しかし、同じ波方位でも弾性浮体の傾斜方向は周波数によって異なるため、先ず上下変位の分布を求め、そのX方向とY方向の差分からそれぞれの方向の傾斜を求める方が良い。各位置での全方位で最大傾斜はX方向傾斜とY方向傾斜の自乗和の平方根で与えられる。

3.4 2浮体シミュレーション

ロジスティックスハブとシャトル船との相対運動は時間領域の2浮体挙動シミュレーションにより求める事とした。図3はドルフィン係留されたロジスティックスハブに係船索と空気フェンダーに係船されたシャトル船のイメージ図である。2浮体挙動シミュレーションを行うには、2浮体間の相互干渉を考慮する必要があるが、剛体間の相互干渉を考慮した2浮体挙動シミュレーションは、現在一般的に行われており、2浮体の相互干渉について検討が行われている¹⁾が、弾性体と剛体の相互干渉を考慮した例は見受けられない。そこで本研究では弾性体と剛体の相互干渉を以下の様に扱うこととした。

ロジスティックスハブの弾性挙動(縦運動)は水平方向の波漂流力に影響を与えるが、水平運動が縦運動に与える影響は微小であると考えられる。透過波・反射波・発散波を含むロジスティックスハブの縦運動がシャトル船の6自由度運動に与える影響は、現状では推定方法が無い。そこで、初期計画用の1次近似を目指し、今回は取り扱わないこととした。シャトル船の6自由度運動によるロジスティックスハブの縦運動への影響も浮体の大きさの比較からやはり微小であると仮定した。

以上のことから、ロジスティックスハブの縦運動(弾性挙動)はロジスティックスハブの水平運動とシャトル船の6自由度運動(合計9自由度)を分離してシミュレーションを行うこととした。

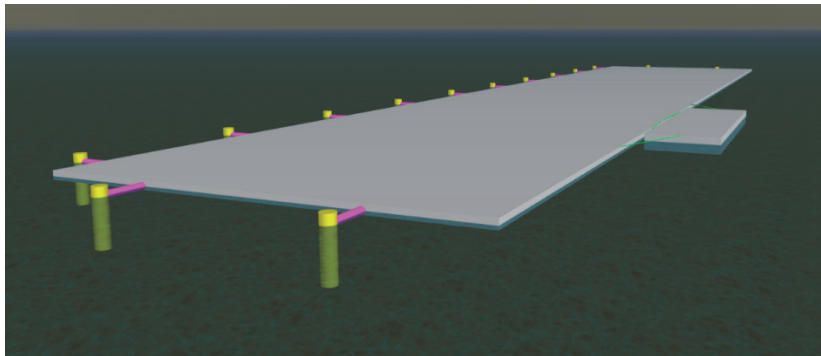


図3 大型ロジスティックスハブに係船されたシャトル船のイメージ図

3.5 弾性運動を考慮した波漂流力

弾性浮体に波が入射する場合、剛体浮体に波が入射する場合に比べて、波の透過率が大きくなり、波漂流力が減少することが容易に考えられる。難波等⁴⁾は弾性浮体の周囲の相対水位分布を用いた波漂流力の簡易推定式を定式化した。

二つの周波数成分からなる2成分波中における変動漂流力の複素振幅は次の簡易式で与えられる。

$$F_{jk} = -\frac{\rho g a_j a_k^*}{4} \oint \xi_j \xi_k^* \vec{n} dC \quad (2)$$

ここで、 j, k は成分波の識別、 ρ は海水密度、 a は成分波の複素振幅、 ξ は単位振幅成分波中での浮体周囲の相対水位の複素振幅、 \vec{n} は浮体側壁の法線ベクトル、 $*$ は共役複素数、積分は浮体周囲の周積分を表す。(2)式の2倍がQTF (Quadratic Transfer Function) $H_2(\omega_1, -\omega_2)$ である。不規則波中の浮体に作用する変動波漂流力はQTFを用いて次式で表される。

$$f(t) = Re \left[\iint_0^\infty H_2(\omega_1, -\omega_2) \exp(i((\omega_1 - \omega_2)t + \alpha_1 - \alpha_2)) \sqrt{S(\omega_1)S(\omega_2)} d\omega_1 d\omega_2 \right] \quad (3)$$

3.6 評価手法の流れ

評価手法の流れを図4に示す。

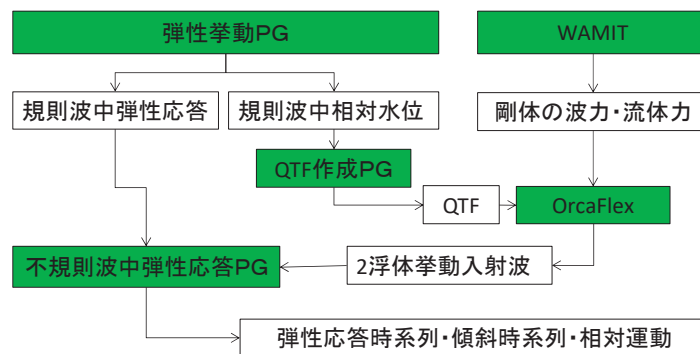


図4 評価手法の流れ

弾性浮体挙動計算プログラムは浮体の弾性応答関数と浮体周囲の相対水位応答関数を出力する。

相対水位応答関数から(2)式に基づき波漂流力の変換関数であるQTFを作成する。一方、剛体としてのロジスティックスハブの波力・流体力とシャトル船の波力流体力を商用ソフト(WAMIT)で求める。弾性影響を考慮したQTFと剛体の波力・流体力を商用の浮体挙動シミュレーションソフト(OrcaFlex)にインポートして、ロジスティックスハブの水平3自由度・シャトル船の6自由度を対象とした時間領域の2浮体挙動シミュレーションを行う。

OrcaFlexからは、不規則波の成分波情報、2浮体の運動の時系列、ロジスティックスハブの係留反力時系列、シャトル船の係船索の張力の時系列が出力される。

不規則波中弾性応答プログラムに弾性応答関数と成分波情報を入力して、(1)式に基づきクレーン直下の上下運動・傾斜の時系列、上下加速度分布、傾斜分布が求められ、クレーン直下の上下運動・傾斜の時系列とシャトル船の上下運動の時系列からクレーン上端とシャトル船の相対運動時系列が求まる。

以上により、3.1項の評価指標を求める事ができる。

4. 評価例

4.1 対象浮体

2.3節で検討した弾性浮体であるロジスティックスハブと、そこに係船索とフェンダーで係船されたシャトル船の2浮体を計算対象とした。図5左図は浮体配置の平面図である。波方位の定義はX軸方向に向かう波が0deg, Y軸方向に向かう波が90degである。

浮体の要目を表2に、表3に係留の要目を示す。固有周期は付加質量を仮定して求めた近似値である。

また、図4右図はクレーンとシャトル船との位置関係を示している。クレーンは剛体としてロジスティックスハブの舷側から7m内側に位置し、作業半径16m, アーム長さ41.2mとした。

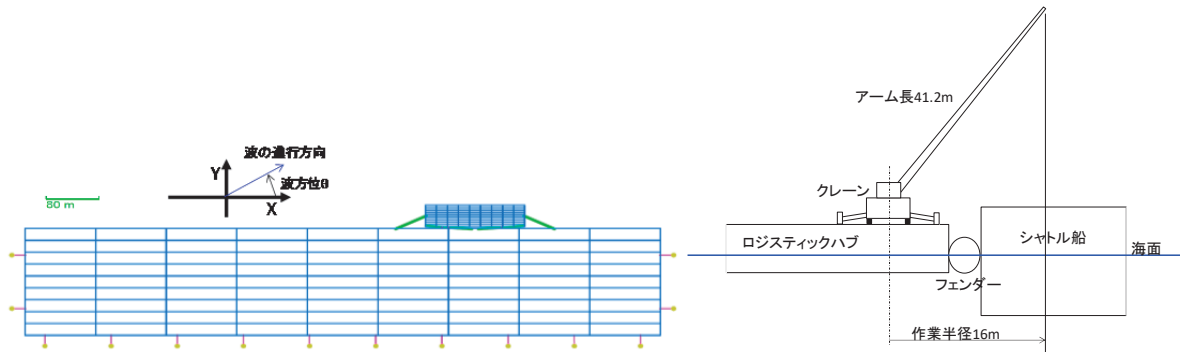


図5 浮体配置の平面図とクレーンとの位置関係

表2 ロジスティックスハブとシャトル船の要目

	ロジスティックスハブ	シャトル船
長さ/幅/型深さ[m]	960 / 200 / 4.0	150 / 40 / 9.0
喫水[m]	1.5	5.0
排水量[ton]	295,200	30,750
形状	箱形	箱形

表3 係留の要目

	ロジスティックスハブ	シャトル船
形式	ドルフィン・フェンダー	係船索・空気フェンダー
数量	長辺10基, 短辺4基	4セット
ばね定数	4,500kN/m	106,000kN/m (フェンダー)
剛性		29,000kN (係船索)
固有周期 Surge	36sec	4.7sec
Sway	23sec	8.9sec
Yaw	0.3sec	49.7sec

4.2 QTF に対する弾性の影響

弾性浮体の曲げ剛性を変えた場合の規則波中定常漂流力を比較した。図6～図8にそれぞれ Surge, Sway, Yaw の定常漂流力係数を示す。浮体の単位幅あたりの曲げ剛性は $EI=10^9 \sim 10^{12}$ で変化させた。Re は(2)式を用いて相対水位から求めた定常漂流力, Rigid は WAMIT で計算された剛体の定常漂流力である。また、図6および図7には比較のため遠場法によりコチン関数から求めた定常漂流力を Far として載せている。

Surge と Sway については剛性が小さくなると、低周波側で剛体よりも定常漂流力が小さくなる傾向が観られる。また、入射角が深くなると、低周波側では波の進行方向と逆向きに定常漂流力が働く傾向がある。しかし、6sec～10sec の波に対しては剛体に作用する定常漂流力と差はほとんど無い。

Yaw については、曲げ剛性による顕著な変化は観られず、全体に定常モーメントは小さい。

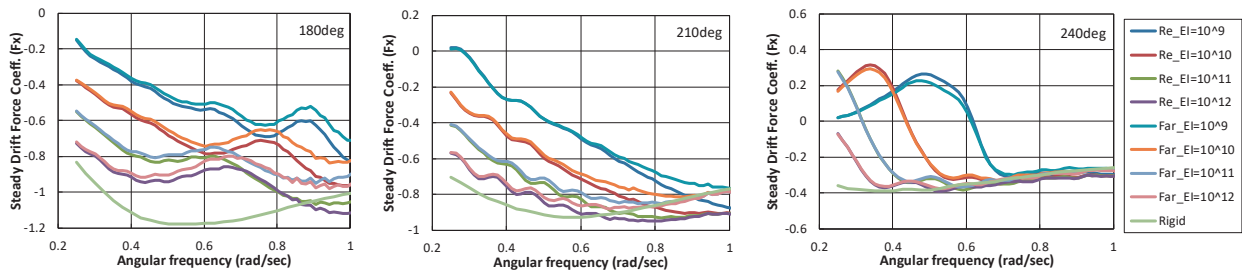


図6 Surge の定常漂流力係数

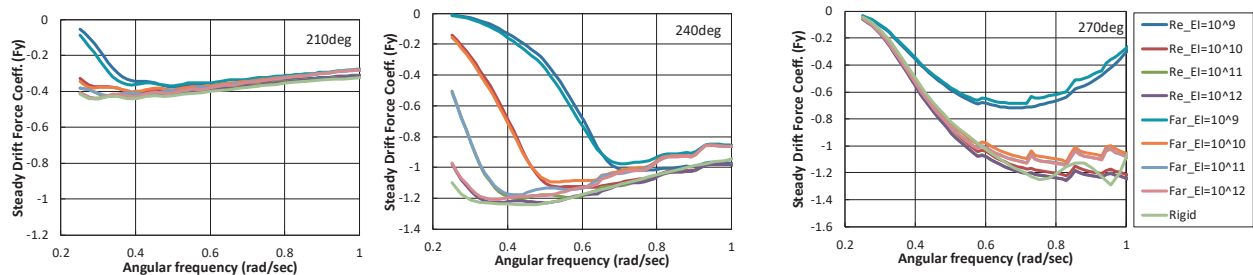


図7 Sway の定常漂流力係数

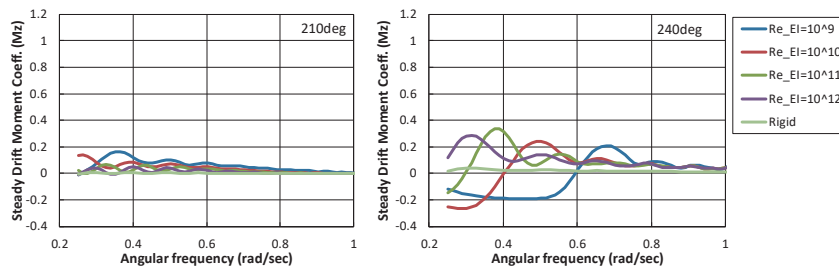


図8 Yaw の定常漂流力係数

図9～図11にそれぞれ Surge, Sway, Yaw の波漂流力の変動成分を示す。曲げ剛性による違いがあまり観られないので $EI=10^{12}$ のみについて示す。横軸は変動の角周波数で中央のゼロが定常漂流力を示している。

Surge と Sway はほぼ単峰で入射角が浅くなると裾野が広がる傾向を示す。特に Surge の正面波はほぼニューマン近似が成り立っている。Surge よりも Sway で裾野が狭く、裾野の外側に運動の固有周期が設定できれば安全性が向上する。

Yaw についてはほぼ双峰で定常モーメントが極端に小さいのでニューマン近似は危険側の推定となる。しかしながら全体に裾野が狭く、12sec 以下の固有周期であれば安全側である。

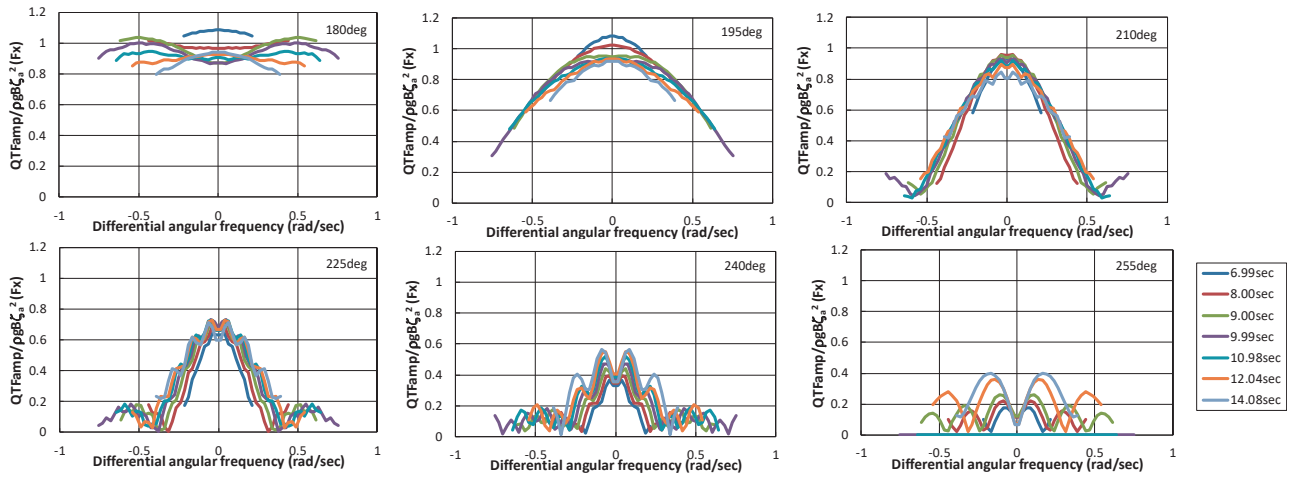


図9 Surgeの漂流力の変動成分

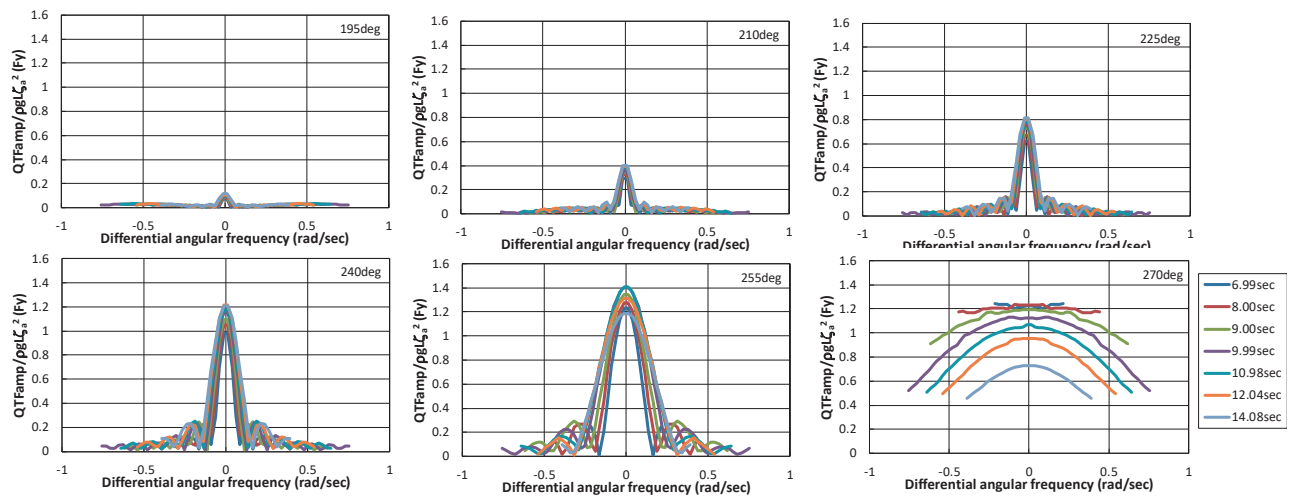


図10 Swayの漂流力の変動成分

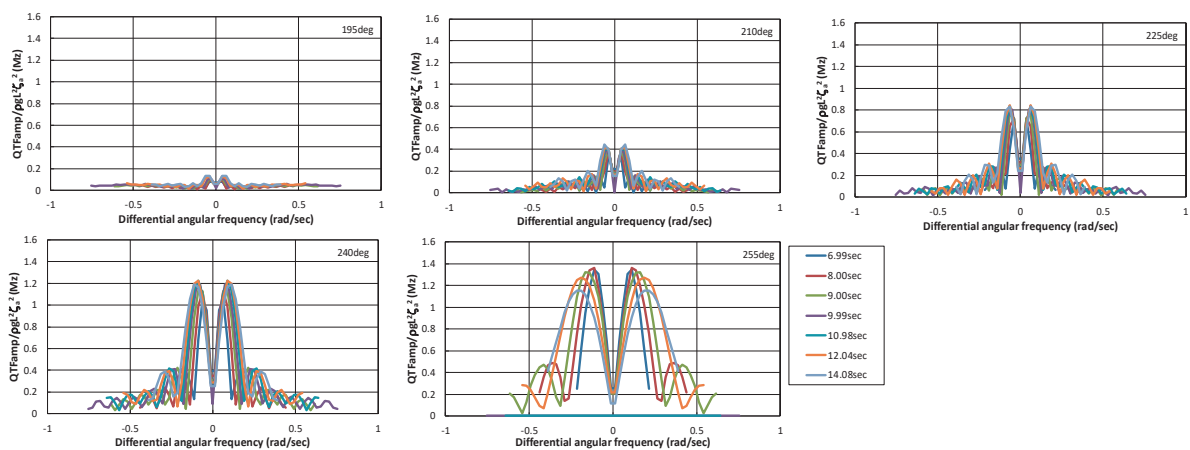


図11 Yawの漂流モーメントの変動成分

4.3 2 浮体シミュレーション

ロジスティックスハブとシャトル船の2浮体シミュレーションの計算条件および入射波時系列を表4および図12に示す。また計算結果例として波方位225度の場合でのロジスティックスハブの水平面内運動の時系列を図13に示す。図13中青線はロジスティックスハブ浮体を剛体として計算した結果であり、赤線は弾性体として計算した結果である。本図から、剛体の場合と弾性体の場合とで有意な差は見られない。

また、図14にシャトル船の6自由度の運動時系列を、評価指標③である係船索張力の時系列を図15にそれぞれ示す。なお、図15において青線は波上側の張力を、赤線は波下側の張力を示している。

表4 計算条件

波種類	JONSWAP
波方位	180~270度 (15度ピッチ)
有義波高	1.0m
ピーク波周期	7.92sec

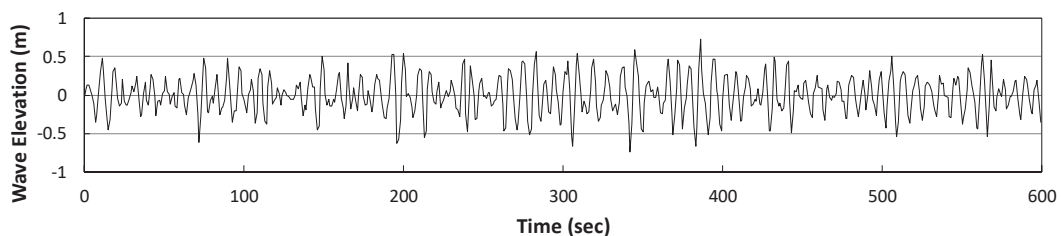


図12 入射波時系列

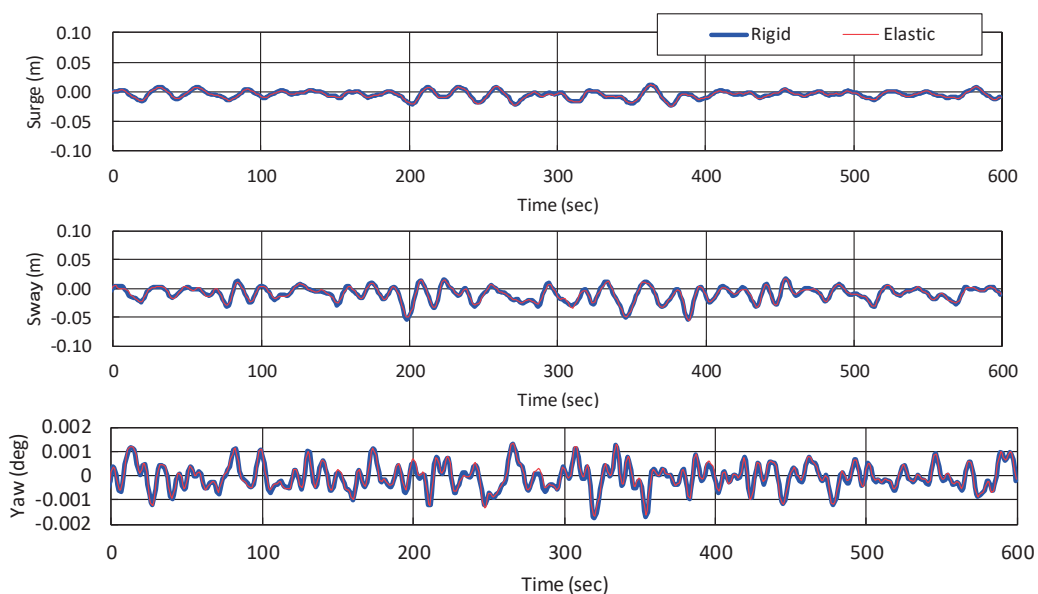


図13 ロジスティックスハブの水平運動時系列 (上段 Surge, 中段 Sway, 下段 Yaw)

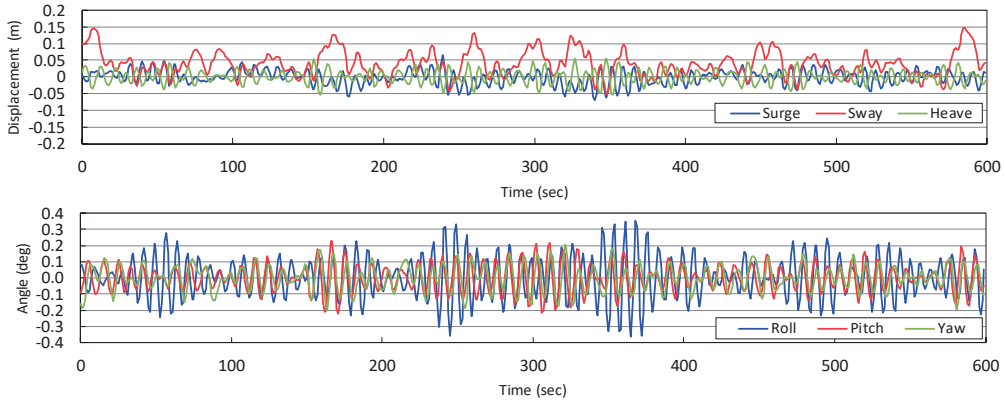


図14 シャトル船の6自由度運動時系列

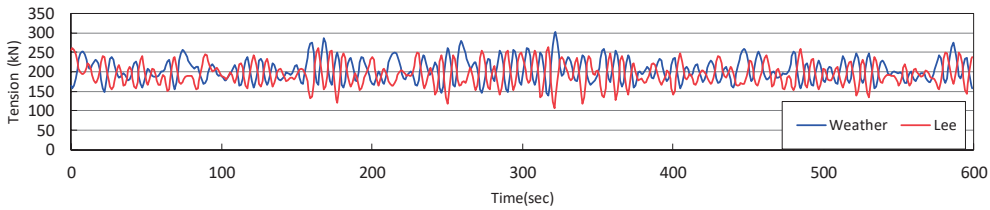


図15 係船索張力時系列

4.4 ロジスティックスハブの弾性挙動

評価指標②におけるロジスティックスハブのデッキ面の傾斜及び上下加速度に関して、図12と同じ入射波に対してロジスティックスハブの弾性挙動を求めた。図16は上下加速度が最大となった時刻での上下加速度、図17は傾斜角が最大となった時刻での傾斜角の等高線図である。

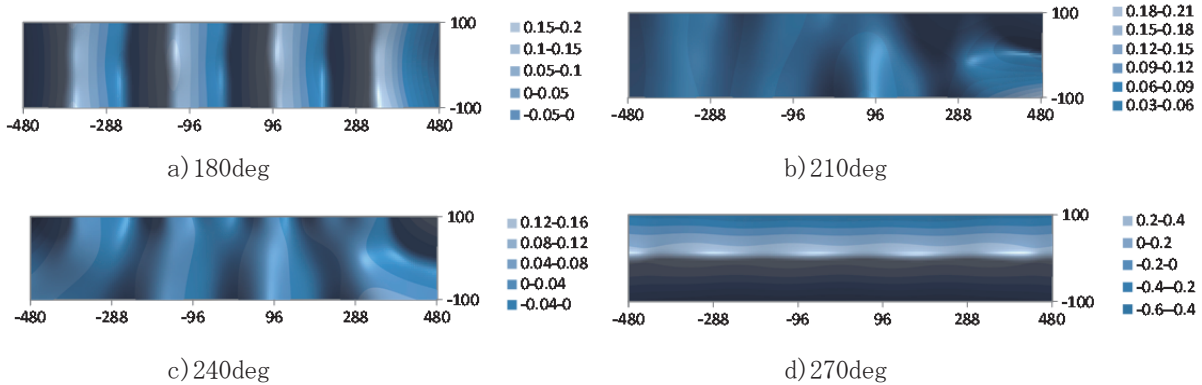
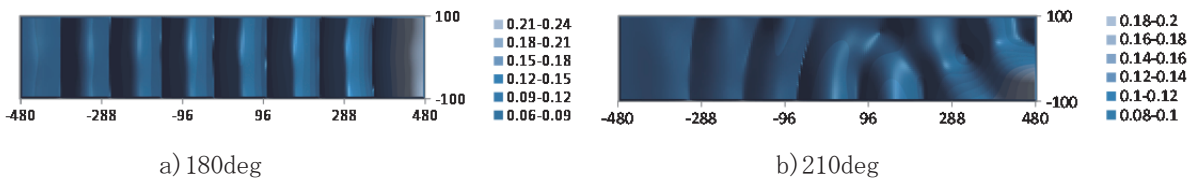


図16 ロジスティックスハブの上下加速度分布（第3軸の単位：[m/s²]



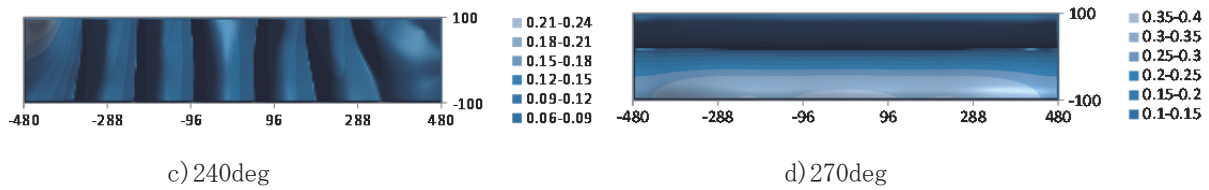


図 17 ロジスティックハブの傾斜角分布（第 3 軸の単位：[deg]）

図 18 には後述するロジスティックハブ浮体のクレーン設置位置における上下変位および傾斜角について浮体が弾性体の場合と剛体の場合とを比較した時系列を示す。図中、赤線が弾性体とした場合の計算結果であり、青線が剛体とした場合である。剛体の場合の傾斜角は横揺を意味している。図 13 に示した前後・左右揺の場合では、ロジスティックハブ浮体を剛体とした場合と弾性体とした場合とでは差が見られなかったが、図 18 から分かるとおり特に傾斜角が大きく異なる結果となった。

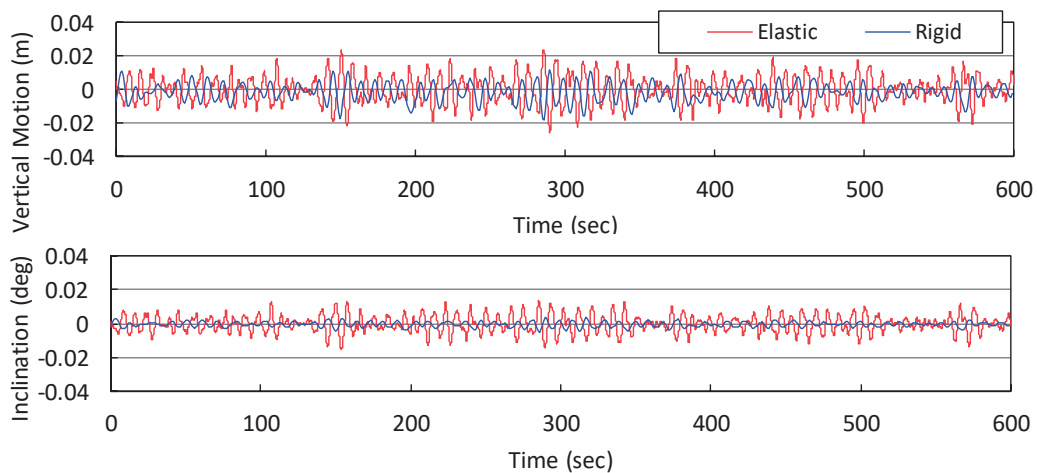


図 18 ロジスティックハブの上下変位（上段）および傾斜角（下段）の時系列

4.5 クレーンとシャトル船の相対変位

評価指標①のクレーンフックとシャトル船の相対運動に関して、シャトル船の船体中央横にあるクレーンの上端位置とシャトル船との上下方向の相対運動を図 19 に、相対加速度を図 20 に示す。図 19 および 20 において、赤線はロジスティックハブ浮体を弾性体として計算した場合の結果であり、青線は剛体とした場合である。浮体を弾性体として扱った場合のほうが剛体とした場合よりも大きな値を示しており、稼働率を評価するにあたり浮体の弾性影響を考慮する必要があることが分かる。

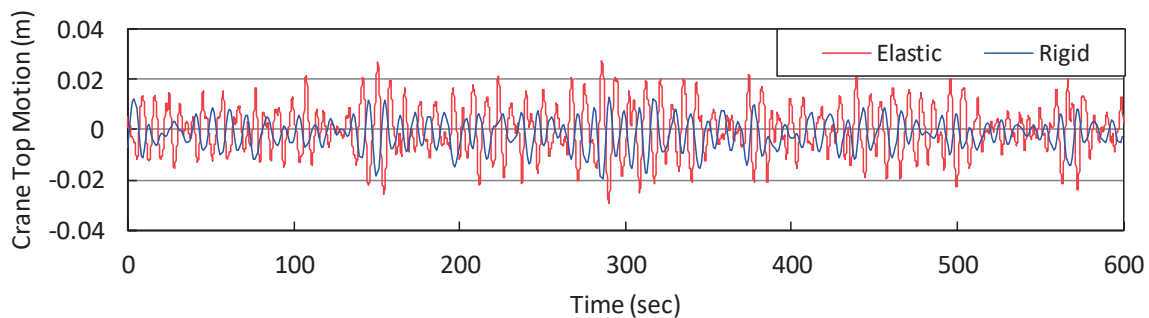


図 19 クレーン上端部の上下方向相対変位

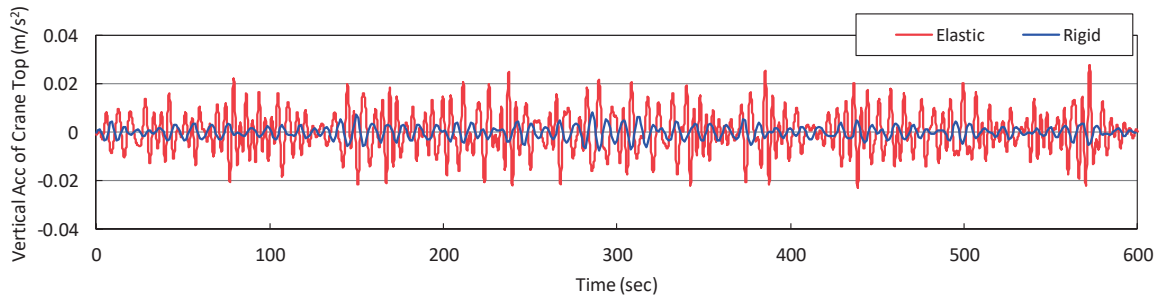


図20 クレーン上端部の上下方向相対加速度

5. まとめ

石油天然ガス開発等に用いることが想定される大型ロジスティックスハブは、浮体の弾性応答を無視することができないと考えられる。そこで、この弾性応答の推定にはメガフロートの研究成果を活用し、大型ロジスティックスハブのローディングおよびアンローディングの稼働率の評価方法を整理した。弾性応答の影響はロジスティックスハブの挙動を縦運動と水平運動に分離し考慮した。すなわち、ロジスティックスハブの弾性挙動影響を考慮した波漂流力を適用し、シャトル船との2浮体挙動シミュレーションによりシャトル船の6自由度挙動とロジスティックスハブの水平運動を求めた。ロジスティックスハブの縦運動は、不規則波中の弾性挙動を独立に算出し、クレーン上端の縦挙動を求めた。これら一連の流れの中で評価指標として設定した①クレーン上端とシャトル船の相対運動、②シャトル船・ロジスティックスハブデッキ面の傾斜及び上下加速度、③シャトル船の係船索の張力を求めた。本稿では、計算結果例のみを示しているが、実際の検討に当たっては、各評価指標における稼働条件を設定し、海気象条件を変化させ、稼働条件を満足する割合等から、稼働率の評価を行い、模型試験などによりその評価結果を確認する必要がある。また、本稿では2浮体挙動シミュレーションを行うにあたり、弾性体と剛体の相互干渉については考慮していない。より精度良く評価するためには、相互干渉を考慮する方法として、シャトル船の係船位置における波浪場と入射波との応答関数を算出し、シャトル船の波強制力・漂流力関数を補正する方法が考えられる。

参考文献

- 1) Bas Buchner, Adri van Dijk, Jeep de Wilde : Numerical Multiple Body Simulations of Side-by-Side Mooring to an FPSO, Proceedings of International Society of Offshore and Polar Engineers (2001), pp343-344
- 2) 湯川和浩, 石田 圭, 佐藤 宏, 藤原敏文, 加藤俊司, 青山憲之, 平田裕一 : バンカリング時における船舶間 LNG 移送技術の安全性評価, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 19 号 (2014), pp69-78.
- 3) 大松重雄 : 超大型ボンツーン型浮体の波浪中弾性応答計算, 日本造船学会論文集, 第 182 号 (1997), pp. 329-340.
- 4) 難波康広, 加藤俊司, 齊藤昌勝 : 超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法—その 1 : 長波頂波中模型実験—, 日本造船学会論文集, 第 186 号 (2000), pp. 235-242