

LNG 燃料の夜間・錨泊中のバンカリング実施 に向けた検討委員会

第 3 回委員会資料

錨泊船及び LNG バンカー船の 2 船間係留に係る 解析結果

令和 6 年 3 月 15 日

株式会社 日本海洋科学
公益社団法人 日本海難防止協会

目 次

1	目的	1
2	数値計算	1
2.1	計算条件	1
2.1.1	対象船及び座標系	1
2.1.2	風荷重係数	2
2.1.3	流れ荷重係数	4
2.1.4	係船索	5
2.1.5	フェンダー	7
2.1.6	錨鎖及びアンカー	8
2.1.7	環境条件	8
2.2	解析方法	9
2.3	計算結果	11
2.3.1	計算モデルの検証	11
2.3.2	風が無い場合の運用限界条件	13
2.3.3	風が有る場合の運用限界条件	15
2.4	索の増し取りの効果	17
3	まとめ	21
4	参考文献	22

1 目的

国土交通省が平成 25 年 6 月に策定した LNG バンカリングのガイドラインに対する検討では、岸壁係船中に加えて錨泊中バンカリングの運用条件も議論したが、錨泊時特有の現象である船体の振れ回り運動がオペレーションに及ぼす影響までは考慮されていない。そこで第 2 回委員会で報告した水槽試験に加えて、単錨泊中の LNG 燃料船とそれに接舷したバンカー船の 2 船を対象とした数値計算を実施することで、風、波、流れの環境外力下で振れ回り運動する 2 船体の Ship to Ship (以下、StS) 方式による LNG バンカリングの安全性評価を実施し、その運用限界条件を検討するとともに、平成 25 年度に策定した岸壁係留時に対する運用限界条件との比較を行い、LNG 燃料船の振れ回り運動が錨泊中バンカリングの運用条件に及ぼす影響（振れ回り有無による運用条件の違い）を明確にする。

2 数値計算

LNG 燃料船の左舷にバンカー船を横付けした StS 状態を対象として、実機スケールにて 3 時間相当の時間領域計算を実施する。計算エンジンには商用解析ツール OrcaFlex を使用する。数値計算で得られる船体運動や係船索張力等の時系列データに対して、水槽試験と同様に波周期成分と長周期成分に分離し、船体動揺や防舷材反力、把駐力は波周期成分の時系列データ、索張力や錨鎖張力は分離しない時系列データに対し極値統計解析を行うことで最大値を求め、閾値との比較により運用可否を判断する。なお、数値計算の目的は以下とする。

- 錨泊中 LNG バンカリングの運用条件の検討
- LNG 燃料船の振れ回り運動の有無による運用条件の違いの比較

2.1 計算条件

2.1.1 対象船及び座標系

対象とする LNG 燃料船とバンカー船の諸元を表 2.1.1 に示す。LNG 燃料船は PCC 船型、バンカー船は内航 LNG 船型とする。主寸法やメタセンタ高さ (GM) は実船を参考に決定した。LNG 燃料船は波による船体動揺が増すバラスト喫水、バンカー船は LNG 燃料の移送中であることを想定して、搭載する LNG タンク半載でトリム調整まで考慮した場合の喫水を設定した。排水量や風圧面積は、第 2 回委員会で報告した水槽試験で用いた模型船の形状に基づき算出した値である。

表 2.1.1 対象船の諸元

項目	LNG燃料船	バンカー船
垂線間長 L_{PP} [m]	196.00	76.20
肩幅 B [m]	38.00	18.00
型深さ D [m]	14.23	7.80
喫水 d [m]	7.30	3.93
排水量 Δ [ton]	27312.36	3,424.94
重心高さ KG [m]	13.42	5.87
メタセンタ高さ GM [m]	7.95	3.30
慣動半径 κ_{xx} [-]	0.35B	0.42B
正面投影面積 A_T [m ²]	1,294.25	250.09
側面投影面積 A_L [m ²]	6,451.37	892.84
載荷状態	バラスト	半載

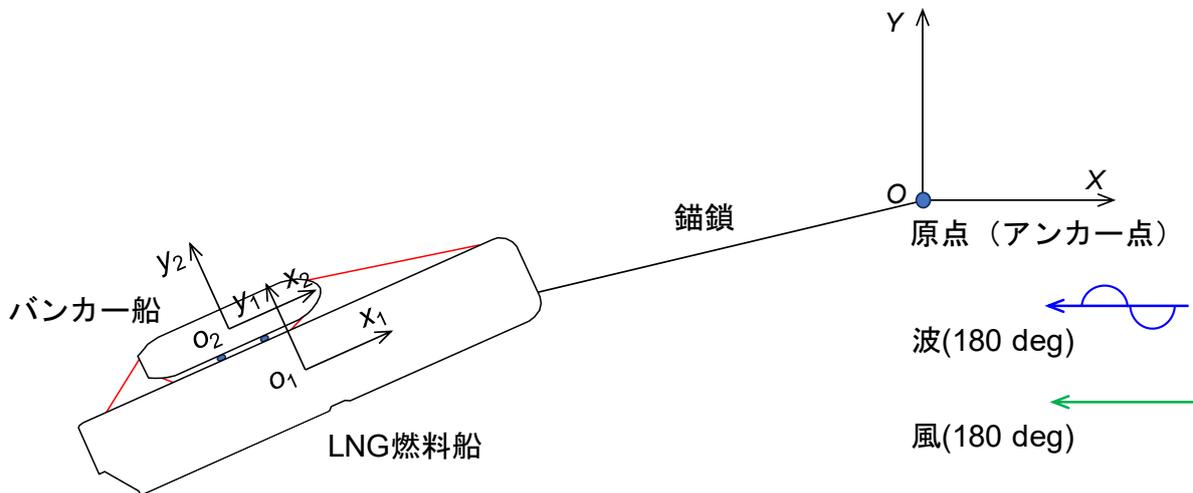


図 2.1.1 座標系

また、LNG 燃料船とバンカー船に作用する付加質量や造波減衰力、波強制力、波漂流力についてはパネル法に基づく商用ツール WAMIT を用いて、StS 状態における 2 船の相互干渉影響を考慮して推定を行った。

使用する座標系を図 2.1.1 に示す。空間固定座標系及び船体固定座標系にはそれぞれ右手系直交座標系を用い、船体固定座標系は 2 船の重心にそれぞれ原点 o をとり、船首側を x 軸、左舷側を y 軸、鉛直上向きを z 軸の正方向と定義する。空間固定座標はアンカー一点に原点 O をとり、船体固定座標系と同様に鉛直上向きを Z 軸の正方向と定義する。波や風の入射方向は空間固定座標の X 軸正方向へ進行する場合を 0 deg 、反時計回りに入射角をとり、 X 軸の負の方向へ進行する場合を 180 deg と定義する。

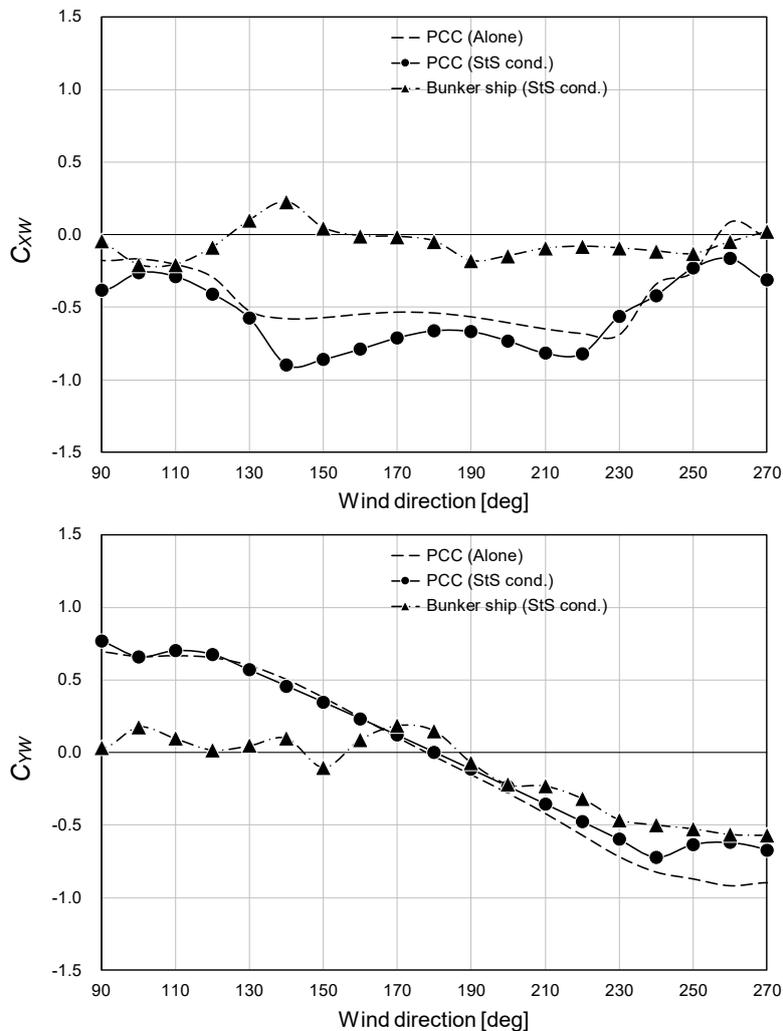
2.1.2 風荷重係数

LNG 燃料船とバンカー船に作用する風荷重係数を図 2.1.2 に示す。風荷重係数は第 2 回委

員会にて報告した水槽試験において、張力計を介したワイヤーで模型船を四方へ係留し、向い風（180 deg）を中心に右舷側の横風（90 deg）から左舷側の横風（270 deg）までの範囲に対し、風圧下で作用するワイヤー張力から船体に作用する風荷重 3 成分（前後力 F_{XW} 、横力 F_{YW} 、回頭モーメント M_{ZW} ）を計測し、次式により無次元係数として整理したものである。

$$C_{XW} = \frac{F_{XW}}{1/2 \rho_a A_T U_a^2}, \quad C_{YW} = \frac{F_{YW}}{1/2 \rho_a A_L U_a^2}, \quad C_{NW} = \frac{M_{ZW}}{1/2 \rho_a L_{PP} A_L U_a^2} \quad (2.1)$$

但し、 ρ_a は空気密度、 U_a は風速を表す。LNG 燃料船単船での計測に加えて、StS 状態の 2 船でも計測した。StS 状態の場合は、計測後に 2 船の係船索張力とフェンダー反力を用いて LNG 燃料船とバンカー船のそれぞれに作用する荷重に分離した。バンカー船に作用する風荷重は LNG 燃料船の遮蔽影響により小さい値をとったり、LNG 燃料船に対し符号が反転したりする傾向が見られる。LNG 燃料船に作用する風荷重係数も単船時に比べて StS 状態ではバンカー船の影響により若干差が生じている。



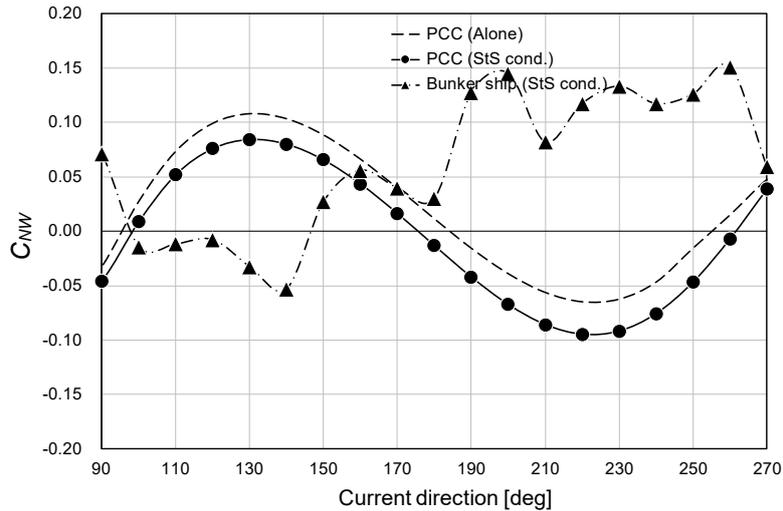


図 2.1.2 LNG 燃料船及びバンカー船に作用する風荷重係数

2.1.3 流れ荷重係数

LNG 燃料船とバンカー船に作用する流れ荷重係数を図 2.1.3 に示す。LNG 燃料船に作用する流れ荷重は、過去に国土交通省の走錨対策に関する事業で対象としたフェリー船型（本検討で対象とする PCC 船型と同様に痩せ型船）の拘束曳航試験による結果を用いた。深水状態（水深喫水比 H/d が 6.0 以上）で計測した値のため、OCIMF のガイドライン¹⁾に記載されているタンカー船型の流れ荷重係数から流向毎に H/d と係数の関係を算出し、水深 15.0 m での LNG 燃料船の水深喫水比 ($H/d=2.05$) となるように拘束曳航試験の結果を修正して用いた。バンカー船に作用する流れ荷重は、OCIMF のガイドラインの係数を用いた。これは OCIMF による V 型船首の LNG 運搬船に作用する係数で、 H/d が 3.0 の場合の係数を採用した。水深 15 m の場合、バンカー船の H/d は 3.82 であるため、若干安全側の係数を採用している。流れ荷重は船体に作用する荷重 3 成分（前後力 F_{XC} 、横力 F_{YC} 、回頭モーメント M_{ZC} ）を次式により無次元係数として整理した。

$$C_{XC} = \frac{F_{XC}}{1/2 \rho_c L_{PP} d U_c^2}, \quad C_{YC} = \frac{F_{YC}}{1/2 \rho_c L_{PP} d U_c^2}, \quad C_{NC} = \frac{M_{ZC}}{1/2 \rho_c L_{PP}^2 d U_c^2} \quad (2.2)$$

但し、 ρ_c は海水密度、 U_c は流速を表す。なお、波強制力や波漂流力、風荷重と異なり、流れ荷重には LNG 燃料船とバンカー船総合の干渉影響は考慮せず、StS 状態でも単船の荷重係数をそれぞれ用いていることに注意して頂きたい。

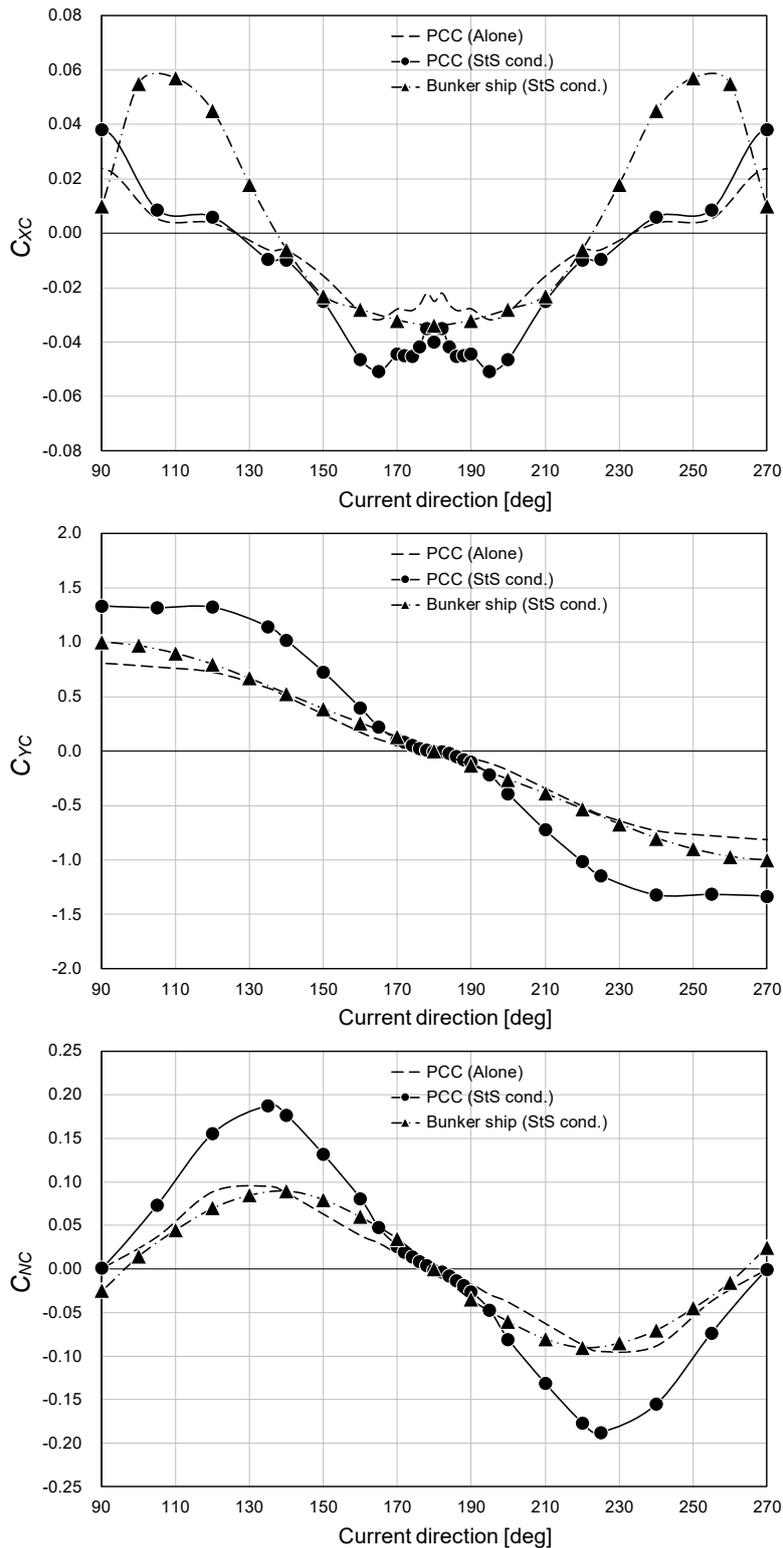


図 2.1.3 LNG 燃料船及びバンカー船に作用する流れ荷重係数

2.1.4 係船索

LNG 燃料船とバンカー船の係船配置は図 2.1.4 に従う。2 船のマニホールド中心を合わせるように、LNG 燃料船の左舷にバンカー船を直径 48 mm の合成繊維索を 4 本使用して係船

する。係船索の仕様と伸びの特性を表 2.1.2 及び図 2.1.5 に示す。仕様はメーカーカタログ²⁾に記載されている値を用い、特性は同カタログに記載されている線径 60.0 mm の特性曲線を最小破断荷重比で線径 48.0 mm の索特性に修正を行ったうえで用いた。また、平水中においてバンカー船が LNG 燃料船に対して所要の相対位置及び姿勢にて釣り合うように 4 本の係船索の初期張力を調整した。平成 25 年度の検討³⁾や OCIMF のガイドライン⁴⁾に倣い、初期張力が 30 kN に収まるようにバランス調整を行った。数値計算で用いた初期張力を図 2.1.6 に示す。

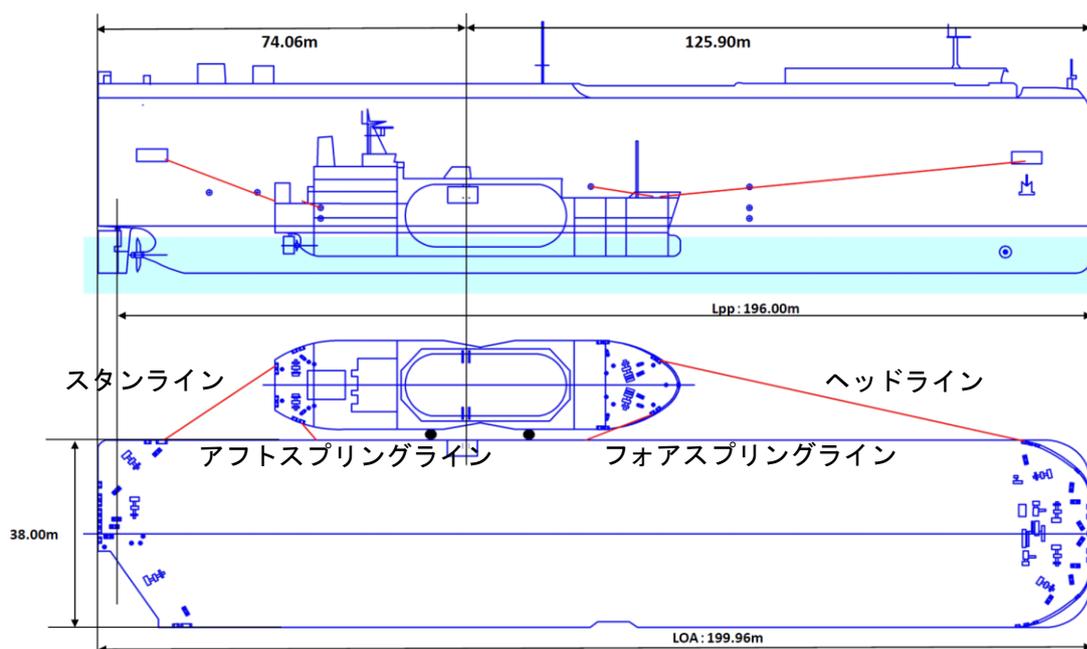


図 2.1.4 LNG 燃料船とバンカー船の係船配置

表 2.1.2 係船索の仕様²⁾

種類	CEコンパウンドロープ
索径 [mm]	48.00
単位重量 [kg/m]	1.33
最小破断荷重 [kN]	352.00
本数 [本]	4

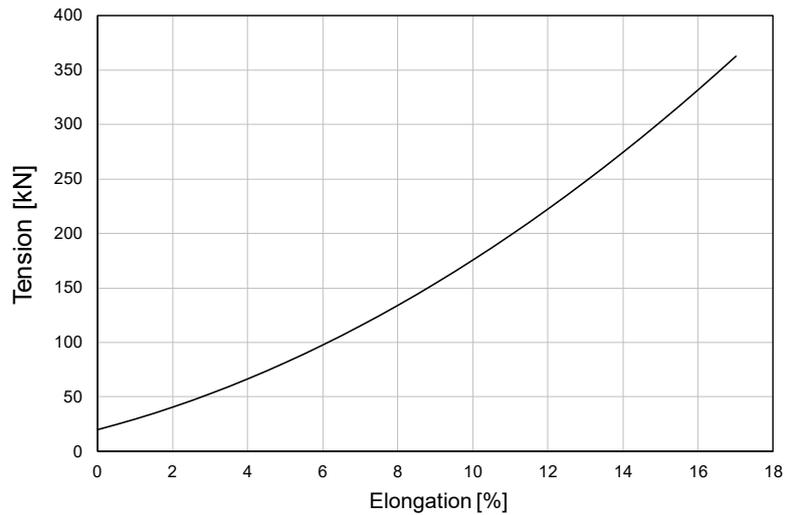


図 2.1.5 係船索の張力特性

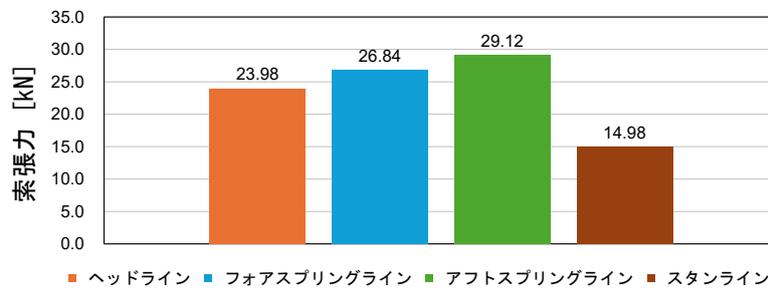


図 2.1.6 初期張力の調整結果

2.1.5 フェンダー

2 船間にはバンカー船が所有する直径 2.0 m、長さ 3.0 m のフォーム式フェンダーを 2 基使用する。フェンダーの仕様と反力特性を表 2.1.3 及び図 2.1.7 に示す。反力特性はメーカーカタログ⁴⁾に掲載されている特性曲線を用いた。

表 2.1.3 フェンダーの仕様⁴⁾

種類	フォーム式フェンダー
直径 [mm]	2,000.00
長さ [mm]	3,000.00
設計たわみ率 [%]	60.00
反力 [kN] ※60%たわみ時	688.00

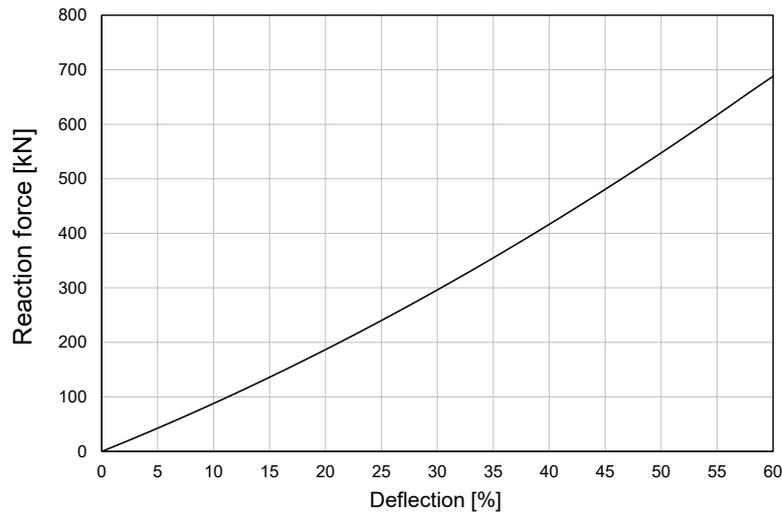


図 2.1.7 フェンダーの反力特性

2.1.6 錨鎖及びアンカー

LNG 燃料船は水深 15 m の錨泊地にて単錨泊を行うこととする。右舷側から錨鎖を伸ばし、錨鎖長は通常天候状態での索長の目安 (3H+90 m, H は水深) ⁵⁾を参考にして 135 m とする。アンカーは AC-14 型ストックレスアンカーとする。錨鎖とアンカーの仕様を表 2.1.4 に示す。また、海底質が泥と仮定して錨鎖の摩擦抵抗係数には 1.0^{5),6)}を使用した。

表 2.1.4 錨鎖及びアンカーの仕様

■ 錨鎖	
グレード	G3
スタッド有無	有り
径 [mm]	87.00
空中単位重量 [kg/m]	171.30
錨鎖長 [m]	135.00
最小破断荷重 [kN]	5,499.00
海底との摩擦抵抗係数 (泥)	1.00
■ アンカー	
タイプ	AC-14型ストックレスアンカー
重量 [kg]	9,225.00

2.1.7 環境条件

数値計算で用いる環境条件を表 2.1.5 に示す。風は Davenport のスペクトル⁷⁾による変動風、波は浅水域の波浪場を再現している Bretschneider-光易型のスペクトルによる不規則波とし、風と波の方向は全て同一とする。また、波高と波周期は学術的根拠に従って条件設定を行うこととし、風速と吹送距離 (本検討では 30 km と仮定) に基づく Wilson の波浪推算式⁸⁾により決定し、それぞれ平均風速、有義波高、スペクトルピーク波周期として条件設定を行った。

一例として図 2.1.8 に数値計算で使用する Case04 の風速（平均風速 10.0 m/s）と波高（有義波高 1.0 m，スペクトルピーク波周期 3.68 sec）の時系列データを示す。なお，第 2 回委員会で報告した水槽試験結果において，流れは LNG 燃料船の振れ回り運動やバンカー船の相対運動，係船索張力，フェンダー反力等に及ぼす影響は小さいことが分かったため，数値計算では風と波の組み合わせを条件とした。

表 2.1.5 計算条件（環境条件）

■ 風無しの場合

Case No.	平均風速 [m/s]	有義波高 [m]	スペクトルピーク波周期 [sec]
01	—	0.28	2.17
02	—	0.50	2.77
03	—	0.75	3.26
04	—	1.00	3.68
05	—	1.25	4.04

■ 風有りの場合

Case No.	平均風速 [m/s]	有義波高 [m]	スペクトルピーク波周期 [sec]
01	4.00	0.28	2.17
02	6.00	0.50	2.77
03	8.00	0.75	3.26
04	10.00	1.00	3.68
05	12.00	1.25	4.04

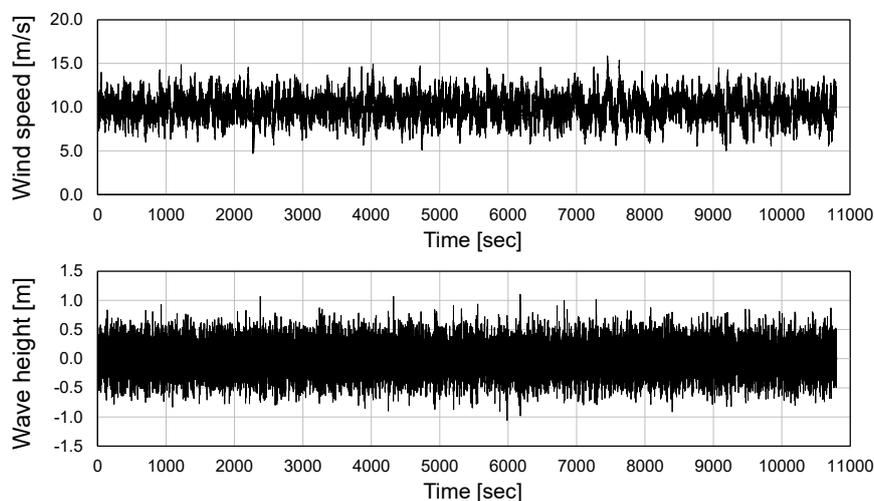


図 2.1.8 数値計算で使用する風速及び波高の時系列データ（Case04）

2.2 解析方法

2.1 節の条件に基づき，数値計算モデルを構築した。解析のための計算エンジンには，商用解析ツール OrcaFlex を用いた。図 2.2.1 に数値計算モデルの外観を示す。時間刻み 0.1 秒で 3 時間相当の時間領域計算により得られる各評価項目の時系列データに対し，極値統計解析を行う

ことで最大値を求め、表 2.2.1 に示す閾値との比較から運用可否を判断し、運用限界条件を検討する。なお、船体運動については時間領域解析による時系列データから得られる極値分布がレイリー分布に従うものと仮定し、3 時間中における期待値である MPM 値 (Most Probable Maximum Value) ⁹⁾により評価する。MPM 値は (2.3) 式で表される。また、その他の係船索張力や錨鎖張力、フェンダー反力等については極値分布の非線形性が強いと考えられるため、極値分布をワイブル分布でフィッティングすることで得られる 3 時間再現値により評価を行う。

$$\text{MPM value} = \mu + \sigma\sqrt{2\ln(n)} \quad (2.3)$$

但し、 μ は平均値、 σ は標準偏差、 $n(=T/T_z)$ はピークの数、 T_z はアップクロス平均波周期を表す。

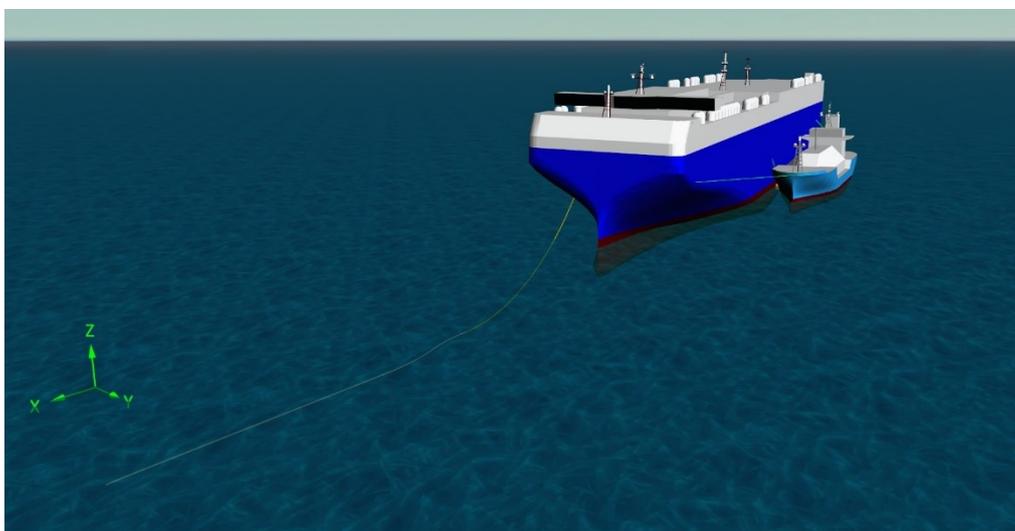


図 2.2.1 数値計算モデルの外観

表 2.2.1 安全性評価の評価項目及び閾値

評価項目	閾値	備考
LNG 燃料船に対するバンカー船の相対運動 (マニホールド位置)	Surge : ± 1.0 m Sway : ± 0.75 m Heave : ± 0.5 m Roll : ± 4.0 deg Pitch : ± 2.0 deg Yaw : ± 2.0 deg	平成 25 年の検討に準拠 ^{3),10)} なお、この閾値は岸壁係留タンカーの一般荷役を対象としたものであり、本評価においては、バンカー船の荷役設備がより動揺に対応した設計であることが一般的であることが考慮し得る
係船索張力	安全率 2.0	OCIMF ¹⁾ に記載されている合成繊維索の安全率に準拠
防舷材反力	688 kN	メーカーカタログ記載の設計たわみ 60 %での反力 ⁴⁾
錨鎖張力	安全率 1.67	ISO の定める係留ラインに対する動的計算時の安全率に準拠 ⁹⁾

把駐力	把駐係数 10.6	AC-14 型アンカーの底質が泥の場合の標準把駐係数 ⁵⁾
-----	-----------	--

2.3 計算結果

2.3.1 計算モデルの検証

数値計算モデルの精度を検証するために、第2回委員会で報告した水槽試験と同条件（船体諸元や索特性、フェンダー特性、錨鎖特性等）にて計算を行い、両者の結果を比較した。LNG 燃料船単船での振れ回り運動の振幅と周期、錨鎖張力と把駐力の最大値を比較した一例を図 2.3.1 に示す。横軸が風速、図中の■印が数値計算結果、○印が水槽試験結果を表す。数値計算結果は、全て風速に対して水槽試験と同様な傾向を示している。LNG 燃料船の振れ回り周期が若干短い評価結果となっているが、2.1.3 項で述べた通り、流れ荷重係数に同じ瘦せ型船であるフェリー船型の拘束曳航試験結果を適用している点の一つの要因であると考えられるが、その他の数値計算結果は概ね水槽試験結果と同程度の値を示している。

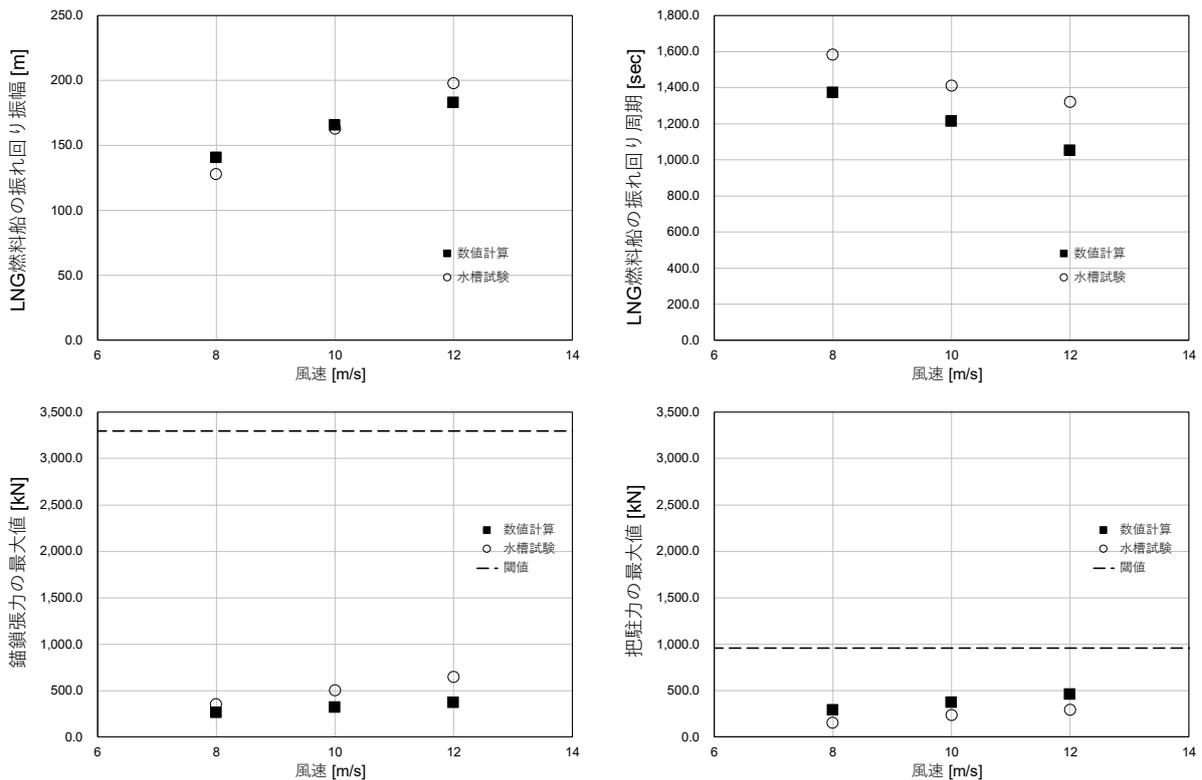


図 2.3.1 LNG 燃料船単船の場合の比較例

次に、LNG 燃料船とバンカー船の StS 状態での係船索張力、フェンダー反力、錨鎖張力と把駐力の最大値を比較した一例を 2.3.2～図 2.3.4 に示す。全て波周期が 6.0 sec の条件に対する比較結果を示しており、横軸が風速、図中の■印が数値計算結果、○印が水槽試験結

果を表す。2.1.3 項で述べた通り、バンカー船に作用する流れ荷重係数として OCIMF に掲載されている LNG 運搬船の係数を適用しているため、数値計算結果と水槽試験結果に若干差が見られる所もあるが、数値計算結果は風速の変化に対して水槽試験結果と同様の傾向、同程度の値を示している。

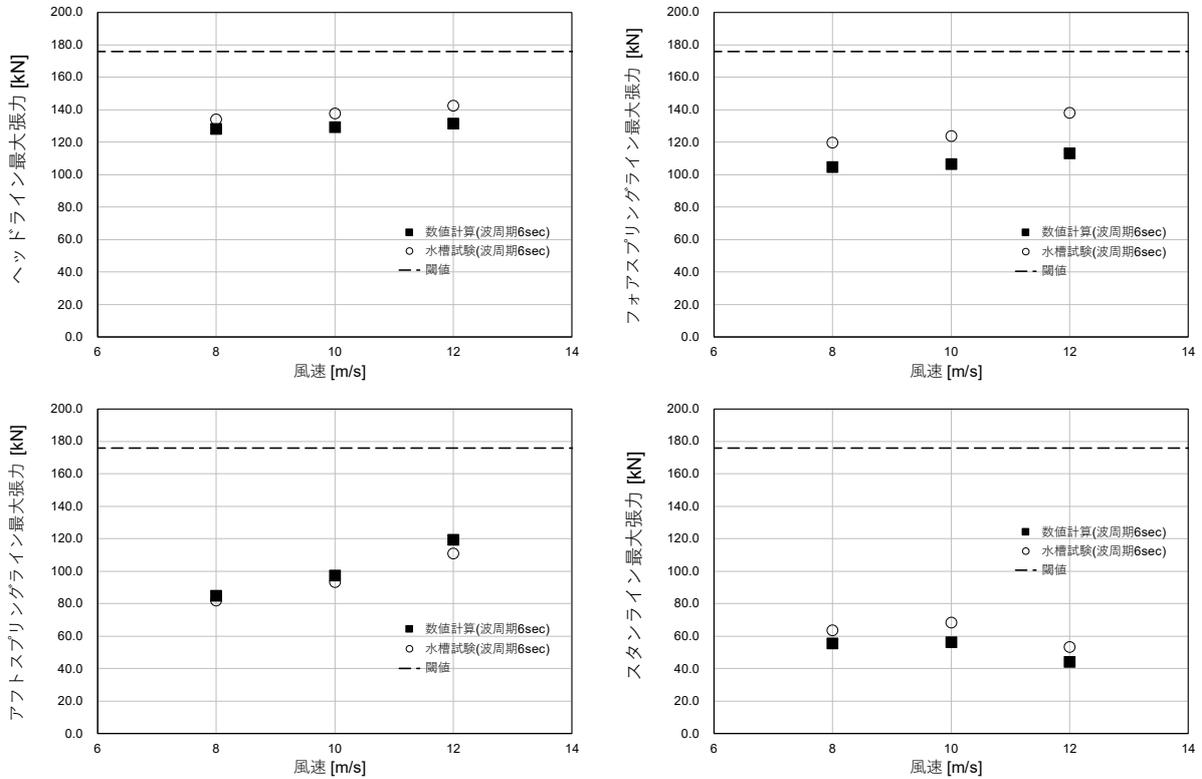


図 2.3.2 LNG 燃料船及びバンカー船の StS 状態における索張力の比較例

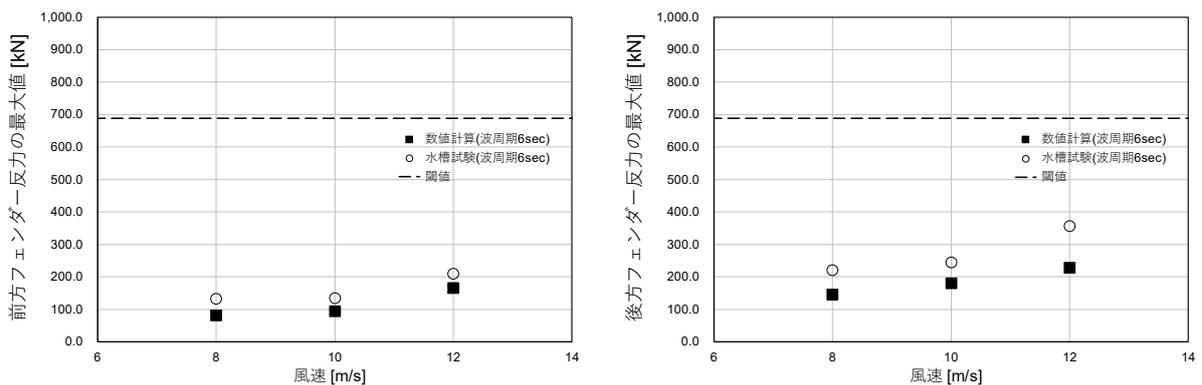


図 2.3.3 LNG 燃料船及びバンカー船の StS 状態におけるフェンダー反力の比較例

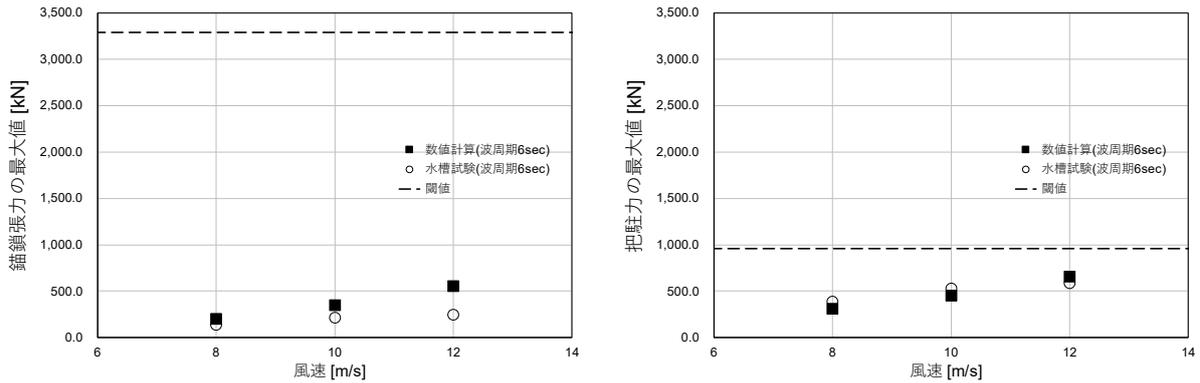


図 2.3.4 LNG 燃料船及びバンカー船の StS 状態における錨鎖張力及び把駐力の比較例

2.3.2 風が無い場合の運用限界条件

表 2.3.1～表 2.3.4 に風がない場合の数値計算結果を示す。表 2.3.1 は LNG 燃料船に対するバンカー船のマニホールド位置における相対運動の MPM 値（片振幅）であり、閾値を超えるケースに赤色のハッチをかけている。サージ運動とスウェイ運動は波周期成分と長周期成分に分離し、長周期成分の MPM 値を示している（残りの運動成分は全て波周期成分の MPM 値を記載）。有義波高 0.75 m 以上（Case03 以降）で水平運動成分（サージ運動やスウェイ運動，ヨー運動）が閾値を超える結果となった。風の無い場合は水槽試験で把握した通りに錨泊した LNG 燃料船の振れ回り運動は小さいが，バンカー船の水平運動は閾値に対して若干大きい値となっている。一方，ヒープ運動やロール運動，ピッチ運動については全てのケースで閾値を満足する結果となった。

表 2.3.1 バンカー船マニホールド位置の相対運動（風が無い場合）

	バンカー船の相対運動MPM値(片振幅)				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
サージ [m]	0.14	0.28	0.70	1.25	2.25
スウェイ [m]	0.18	0.37	0.81	1.53	2.51
ヒープ [m]	0.01	0.03	0.08	0.19	0.38
ロール [deg]	0.09	0.19	0.45	0.95	1.83
ピッチ [deg]	0.00	0.04	0.16	0.40	0.63
ヨー [deg]	0.34	0.61	1.32	2.89	5.06

係船索張力の 3 時間再現値を表 2.3.2 に示す。各ラインの上段が張力，下段が安全率を示す。有義波高 1.0 m 以上（Case04 以降）でスプリングラインが安全率の閾値（2.0）を満足できなかったが，それ以外については，全て安全率の閾値（2.0）を満足している。

表 2.3.2 係船索張力（風が無い場合）

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
ヘッドライン	26.89	31.88	44.08	77.59	130.37
	13.09	11.04	7.99	4.54	2.70
フォアスプリングライン	34.24	44.73	98.83	177.07	335.13
	10.28	7.87	3.56	1.99	1.05
アフトスプリングライン	39.59	57.25	141.02	285.41	589.89
	8.89	6.15	2.50	1.23	0.60
スタンライン	21.58	27.47	50.53	74.65	117.73
	16.31	12.81	6.97	4.72	2.99

フェンダー反力の 3 時間再現値を表 2.3.3 に示す。全てのケースにおいて閾値となるメーカーカタログに記載されている設計たわみ 60 %での反力（688 kN）に収まる結果となった。

表 2.3.3 フェンダー反力（風が無い場合）

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
前方フェンダー	23.30	55.03	166.52	383.41	687.15
後方フェンダー	65.16	80.75	138.73	224.80	438.22

錨鎖張力及び把駐力の 3 時間再現値を表 2.3.4 に示す。それぞれ、上段が錨鎖張力及び把駐力、下段が安全率及び把駐係数（把駐力をアンカー重量で除した値）を示す。全てのケースにおいて錨鎖張力の安全率及び把駐係数の閾値（それぞれ 1.67 及び 10.6）を十分満足する結果となった。

表 2.3.4 錨鎖張力及び把駐力（風が無い場合）

	上段：錨鎖張力あるいは把駐力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率あるいは把駐係数 [-]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
錨鎖張力	39.10	42.43	50.91	85.85	147.01
	140.65	129.64	108.04	64.07	37.41
把駐力	0.00	14.22	21.32	42.50	106.04
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

本節にて検討を行った風の無い場合に対する安全性評価の結果、Case03 においてバンカー船のマニホールド位置におけるスウェイ運動が閾値を 6 cm 超える結果となったが、LNG 移送アームやホースの可動域に余裕があるため、その可動域やホースの曲げやねじり

の強度で十分吸収できる範囲だと考えられる。また、この閾値は岸壁係留タンカーの一般荷役を対象としたものであり、本評価においては、バンカー船の荷役設備がより動揺に対応した設計であることが一般的であることを考慮しても、許容可能と考えられる。その他の係船索張力やフェンダー反力、錨鎖張力及び把駐力の推定結果は全て閾値を満足しているため、2.1節で設定した条件や仕様に基づく風の無い場合の運用限界条件は、有義波高 0.75 m となる。

2.3.3 風が有る場合の運用限界条件

表 2.3.5～表 2.3.8に風が有る場合の計算結果を示す。表 2.3.5は LNG 燃料船に対するバンカー船のマニホールド位置における相対運動の MPM 値（片振幅）で、風の無い場合と同様に閾値を超えるケースに赤色のハッチをかけている。サージ運動とスウェイ運動は波周期成分と長周期成分に分離し、長周期成分の MPM 値を示している（残りの運動成分は全て波周期成分の MPM 値を記載）。風速 6.0 m/s, 有義波高 0.5 m 以上（Case02 以降）でサージ運動, 風速 8.0 m/s, 有義波高 0.75 m 以上（Case03 以降）でスウェイ運動, 風速 10.0 m/s, 有義波高 1.0 m 以上（Case04 以降）ではヨー運動が閾値を超える結果となった。風が有る場合は時々刻々変化する風荷重に加えて錨泊した LNG 燃料船が振れ回り運動を伴うことで、風が無い場合に比べて小さな波高において水平運動が閾値を超える結果となった。一方、ヒープ運動やロール運動、ピッチ運動については全てのケースで閾値を満足している。

表 2.3.5 バンカー船マニホールド位置の相対運動（風が有る場合）

	バンカー船の相対運動MPM値(片振幅)				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
サージ [m]	0.16	1.23	1.99	2.62	3.35
スウェイ [m]	0.14	0.45	0.80	1.21	1.74
ヒープ [m]	0.01	0.03	0.05	0.11	0.20
ロール [deg]	0.07	0.17	0.31	0.61	1.36
ピッチ [deg]	0.00	0.03	0.11	0.25	0.44
ヨー [deg]	0.43	0.77	1.19	2.12	4.31

係船索張力の 3 時間再現値を表 2.3.6 に示す。各ラインの上段が張力、下段が安全率を示す。風が無い場合と同様に有義波高 1.0 m 以上（Case04 以降）でスプリングラインが安全率の閾値（2.0）を満足できなかったが、それ以外については、全て安全率の閾値（2.0）を満足している。

表 2.3.6 係船索張力（風が有る場合）

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
ヘッドライン	27.76	33.66	38.35	57.46	130.85
	12.68	10.46	9.18	6.13	2.69
フォアスプリングライン	31.29	43.23	65.95	141.68	395.00
	11.25	8.14	5.34	2.48	0.89
アフトスプリングライン	34.77	52.01	113.34	199.98	558.76
	10.12	6.77	3.11	1.76	0.63
スタンライン	19.92	27.24	36.55	60.61	109.11
	17.67	12.92	9.63	5.81	3.23

フェンダー反力の 3 時間再現値を表 2.3.7 に示す。風がある場合でも全てのケースにおいて閾値となるメーカーカタログに記載されている設計たわみ 60 %での反力（688 kN）に収まる結果となった。

表 2.3.7 フェンダー反力（風が有る場合）

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
前方フェンダー	17.07	58.78	91.48	201.77	554.16
後方フェンダー	58.17	78.44	111.20	184.06	413.13

錨鎖張力及び把駐力の 3 時間再現値を表 2.3.8 に示す。それぞれ、上段が錨鎖張力及び把駐力、下段が安全率及び把駐係数（把駐力をアンカー重量で除した値）を示す。全てのケースにおいて錨鎖張力の安全率及び把駐係数の閾値（それぞれ 1.67 及び 10.6）を十分満足する結果となった。

表 2.3.8 錨鎖張力及び把駐力（風が有る場合）

	上段：錨鎖張力あるいは把駐力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率あるいは把駐係数 [-]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
錨鎖張力	54.75	105.03	206.03	290.11	459.84
	100.45	52.37	26.69	18.96	11.96
把駐力	23.86	58.72	156.10	266.25	405.35
	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04

本節にて検討を行った風がある場合に対する安全性評価の結果、Case02 においてバンカー船のマニホールド位置におけるサージ運動が閾値を 23 cm 超える結果となったが、LNG

移送アームやホースの可動域にも余裕があるため、その可動域やホースの曲げやねじりの強度で十分吸収できる範囲だと考えられる。その他の係船索張力やフェンダー反力、錨鎖張力及び把駐力の推定結果は全て閾値を満足しているため、2.1 節で設定した条件や仕様に基づく風がある場合の運用限界条件は、平均風速 6.0 m/s、有義波高 0.5 m となる。

2.4 索の増し取りの効果

2.1 節で設定した条件や仕様に基づいて 2.3 節で安全性評価を行った結果、風の無い場合の運用限界条件は有義波高 0.75 m、風がある場合の運用限界条件は平均風速 6.0 m/s、有義波高 0.5 m となった。岸壁係留を対象とした平成 25 年度の検討結果では、風速 12.0 m/s、波高 1.0 m であったため、錨泊時の運用限界条件は岸壁係留時に比べて低い結果となった。但し、平成 25 年度の検討では、バンカー船は LNG 燃料船に対し、8 本の索で係船されていたことに対し、本検討は 4 本の索での係船を対象としてきたため、索の増し取りを行い、平成 25 年度と同様に 8 本の索にて係船を行う場合について追加の検討を行った。

増し取りした場合の LNG 燃料船とバンカー船の係船配置を図 2.4.1 に示す。前節までの検討で使用した直径 48 mm の合成繊維索を 4 本追加し、ヘッドライン 2 本、フォアスプリングライン 2 本、アフトスプリングライン 2 本、スタンライン 2 本とし、簡単のためスプリングラインは 2 本とも同じ配置で繋いでいる。平水中においてバンカー船が LNG 燃料船に対して所要の相対位置及び姿勢にて釣り合うように 8 本の係船索の初期張力を調整した。初期張力の調整結果を図 2.4.2 に示す。平成 25 年度の検討³⁾に倣い、フェンダーの初期圧縮量が 2 % となるようにバランス調整を行ったため、初期張力は 30 kN を超える設定となっている。

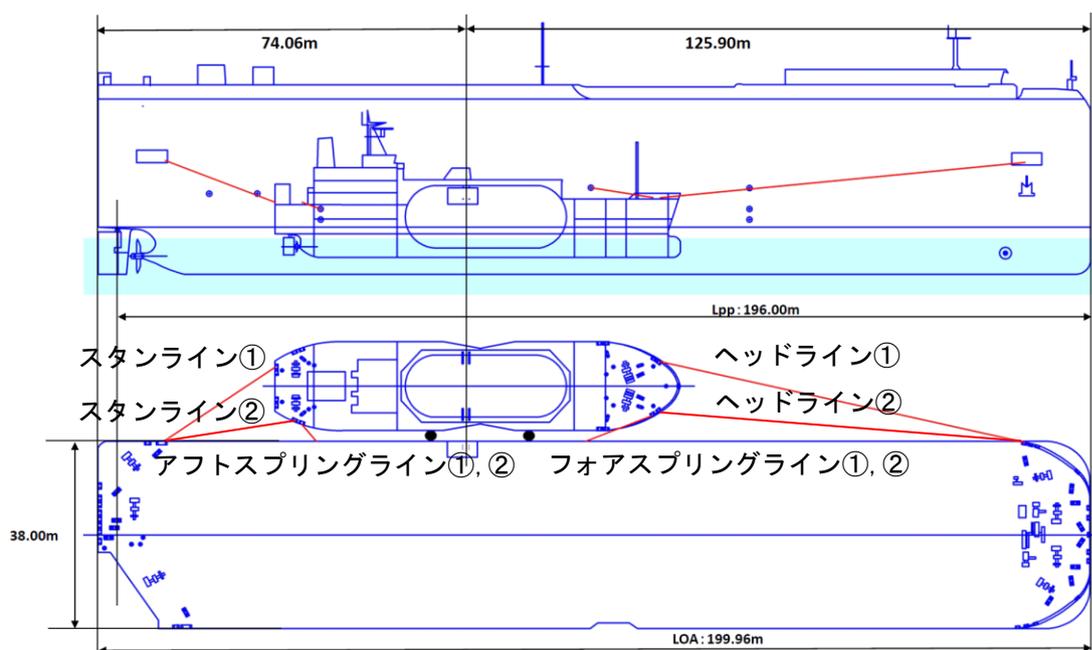


図 2.4.1 LNG 燃料船とバンカー船の係船配置 (索の増し取り)

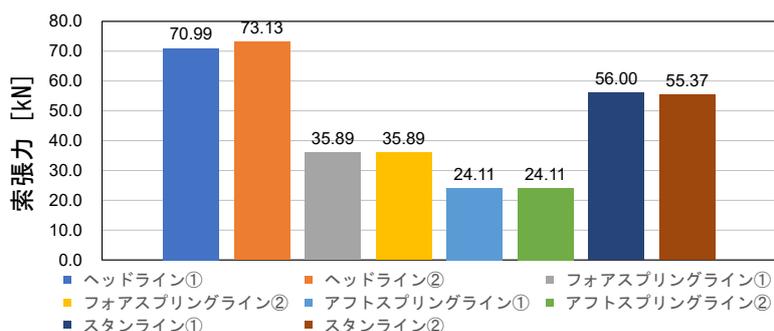


図 2.4.2 初期張力の調整結果

増し取りした場合の LNG 燃料船とバンカー船の係船配置を図 2.4.1 に示す。前節までの検討で使用した直径 48 mm の合成繊維索を 4 本追加し、ヘッドライン 2 本、フォアスプリングライン 2 本、アフトスプリングライン 2 本、スタンライン 2 本とし、簡単のためスプリングラインは 2 本とも同じ配置で繋いでいる。

表 2.1.5 に示す計算条件（環境条件）のうち、Case04（平均風速 10.0 m, 有義波高 1.0 m）に対して追加の数値計算を実施した。まず、風が無い場合の結果を表 2.4.1～表 2.4.4 に示す。増し取り後はバンカー船のマニホールド位置におけるスウェイ運動が閾値を 10 cm 超えたが、それ以外は全て閾値を満足するように改善されており、スウェイ運動は LNG 移送アームやホースの可動域で吸収できると考えると、増し取りすることで風の無い場合の運用限界条件は有義波高 1.0m に上げることができる。

表 2.4.1 バンカー船のマニホールド位置における相対運動（風が無い場合）

	バンカー船の相対運動MPM値(片振幅)	
	増し取り前	増し取り後
サージ [m]	5.97	0.52
スウェイ [m]	2.35	0.85
ヒーブ [m]	0.05	0.18
ロール [deg]	0.91	1.00
ピッチ [deg]	0.40	0.40
ヨー [deg]	2.89	1.71

表 2.4.2 係船索張力（風が無い場合）

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]		
	増し取り前		増し取り後
ヘッドライン①	77.59		103.10
	4.54		3.41
ヘッドライン②			95.48
			3.69
フォアスプリングライン①	177.07		94.07
	1.99		3.74
フォアスプリングライン②			94.07
			3.74
アフトスプリングライン①	285.41		155.26
	1.23		2.27
アフトスプリングライン②			155.26
			2.27
スタンライン①	74.65		104.56
	4.72		3.37
スタンライン②		92.45	
		3.81	

表 2.4.3 フェンダー反力（風が無い場合）

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]		
	増し取り前		増し取り後
前方フェンダー	383.41		285.13
後方フェンダー	224.80		229.89

表 2.4.4 錨鎖張力及び把駐力（風が無い場合）

	上段：錨鎖張力あるいは把駐力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率あるいは把駐係数 [-]		
	増し取り前		増し取り後
錨鎖張力	85.85		82.96
	64.07		66.29
把駐力	42.50		45.75
	0.00		0.00

風がある場合の結果を表 2.4.5～表 2.4.8 に示す。増し取り後はバンカー船のマニホールド位置におけるサージ運動が 1.27 m，スウェイ運動が 25 cm 閾値を超えたが，それ以外は全て閾値を満足するように改善されている。係船索の安全率にまだ余裕があるため，初期張力とそのバランスを調整することや軸剛性の強い索に変更することで，上記相対運動は解決できると考えられる。その場合，残りの安全性評価項目は全て閾値を満足していることから，風が有る場合も平均風速 10.0 m/s，有義波高 1.0 m を運用限界条件に設定できる。

表 2.4.5 バンカー船のマニホールド位置における相対運動（風が有る場合）

	バンカー船の相対運動MPM値(片振幅)		
	増し取り前		増し取り後
サージ [m]	2.62		2.27
スウェイ [m]	1.21		1.00
ヒープ [m]	0.11		0.12
ロール [deg]	0.61		0.52
ピッチ [deg]	0.25		0.25
ヨー [deg]	2.12		0.90

表 2.4.6 係船索張力（風が有る場合）

	上段：係船索長力(3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]		
	増し取り前		増し取り後
ヘッドライン①	57.46		90.15
	6.13		3.90
ヘッドライン②			86.51
			4.07
フォアスプリングライン①	141.68		78.82
	2.48		4.47
フォアスプリングライン②			78.82
			4.47
アフトスプリングライン①	199.98		126.51
	1.76		2.78
アフトスプリングライン②			126.51
			2.78
スタンライン①	60.61		86.95
	5.81		4.05
スタンライン②		83.19	
		4.23	

表 2.4.7 フェンダー反力（風が有る場合）

	フェンダー反力(3時間再現値) [kN]		
	増し取り前		増し取り後
前方フェンダー	201.77		180.26
後方フェンダー	184.06		178.17

表 2.4.8 錨鎖張力及び把駐力（風が有る場合）

	上段：錨鎖張力あるいは把駐力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率あるいは把駐係数 [-]		
	増し取り前		増し取り後
錨鎖張力	290.11		299.35
	18.96		18.37
把駐力	266.25		277.88
	0.03		0.03

3 まとめ

単錨泊中の LNG 燃料船とそれに接舳したバンカー船の 2 船を対象とした数値計算を実施することで、風と波の環境外力下で振れ回り運動する 2 船体の StS 方式による LNG バンカリングの安全性評価を実施し、その運用限界条件を検討した。バンカー船の相対運動（サージ運動とスウェイ運動）で一部閾値を超えるケースもあったが、初期張力のバランス調整や軸剛性の強い索への変更に加えて、LNG 移送アームやホースの可動域にも余裕があるため、その可動域やホースの曲げやねじりの強度で十分吸収できる範囲だと考えられる。検討を行った結果、2.1 節で設定した 48 mm の索 4 本と直径 2 m のフォーム式フェンダー 2 基を用いて係留した場合の錨泊中における LNG バンカリングの運用限界条件は以下となる。

- 風が無い場合：有義波高 0.75 m
- 風が有る場合：平均風速 6.0 m/s、有義波高 0.5 m

更に同じ 48 mm 径の索を 4 本増し取りして、平成 25 年度検討と同様に索 8 本で係船した場合の運用限界条件は以下となる。平成 25 年度の岸壁係船を対象とした条件に比べて、風速が小さくなっている（平成 25 年度は平均風速 12.0 m/s）。

- 風が無い場合：有義波高 1.0 m
- 風が有る場合：平均風速 10.0 m/s、有義波高 1.0 m

最後に本検討を通じて得られた索取りの注意点についてまとめる。

- 1) バンカリングの場合、LNG 燃料船に対しバンカー船が相対的に小さく、係船する場合に高い位置から低い位置に向けて索を繋ぐこととなる。その場合、初期張力を増しても水平運動（LNG 燃料船に対するバンカー船の相対サージ運動やスウェイ運動）の拘束に対する寄与が小さいため、可能な限り水平に近くなる高さで係船する方が、バンカー船の水平運動を効率的に拘束できる。
- 2) 船首側と船尾側の索長に差がある場合、所要の位置と姿勢にバンカー船を係船するためには索が長い方の初期張力を大きく、船尾側は小さくする必要があるが、錨泊時は岸壁係船時と大きく異なる点は、バンカー船が基本的に船首側から風や波の力を受けることにあり、オペレーション中にバンカー船が船尾側へ漂流し、船尾側の

索が緩む傾向になる。その場合、索が張る段階で大きなスナッフ荷重が生じることと、緩んだ際に船体の運動が大きくなるため、可能な限り船首側と船尾側の索長が近い状態で係船することで索張力やバンカー船の運動を抑制することができる。

4 参考文献

- 1) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition (MEG3), 2008.
- 2) 小浜製鋼株式会社：新世代ロープ CE コンパウンドロープカタログ，2013.
- 3) 国土交通省海事局，株式会社日本海洋科学，公益社団法人日本海難防止協会：天然ガス燃料船の航行安全対策に関する調査研究報告書，2013.
- 4) Trelleborg：フォーム式防舷材カタログ，2021.
- 5) 海難防止協会：走錨海難の防止対策，海と安全，No. 579 (53 巻)，2018.
- 6) 本田啓之輔：操船通論 (6 訂版)，成山堂書店，2001.
- 7) Davenport, A. G. : The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, Issue 372, pp.194-211, 1961.
- 8) 合田良実：Wilson 推算式による波浪の簡易計算について，ECHO/YG 技術論文，2002.
- 9) ISO : Petroleum and Natural Gas Industries -Specific Requirements for Offshore Structures-, Part 7 Stationkeeping Systems for Floating Offshore Structures and Mobile Offshore Units (ISO 19001-7), 2013.
- 10) 財団法人 沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004.

