

令和 6 年度
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

錨地における 2 船間係留解析結果

令和 7 年 3 月 7 日

株式会社 日本海洋科学

目 次

1	錨地における 2 船間係留解析結果	1
1.1	目的	1
1.2	検討方法	1
1.3	解析モデルの改良	1
1.3.1	LNG 燃料船とバンカー船の流れ荷重係数の見直し	1
1.3.2	計算時間の変更	2
1.3.3	計算条件の見直し	2
1.3.4	モデル改良	2
1.4	計算条件	3
1.4.1	対象船舶	3
1.4.2	座標系	4
1.4.3	風荷重係数	4
1.4.4	流れ荷重係数（昨年度検討から変更）	6
1.4.5	係船条件	6
1.4.6	環境条件	11
1.5	評価方法	13
1.6	解析及び評価結果	14
1.6.1	相対動揺量等の解析結果	14
1.6.1	評価結果	24
1.7	結果のまとめ	29
1.7.1	錨地における 2 船間係留の解析結果	29
1.7.2	相対動揺量に対する許容値について	30
1.7.3	錨地での StS 移送限界条件設定について	30

1 錨地における 2 船間係留解析結果

1.1 目的

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により、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、移送限界条件を検討する。

1.2 検討方法

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。

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、波周期成分と長周期成分に分離し、2 船の相対動揺や防舷材反力、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。

1.3 解析モデルの改良

今年度は、以下の点について昨年度の解析モデルの改良を行った。

1.3.1 LNG 燃料船とバンカー船の流れ荷重係数の見直し

昨年度の解析モデルでは、OCIMF に掲載されている類似船型（単船）の係数を錨泊地の水深に応じて補正したデータを用いていたが、今年度は、対象船の 1/70 縮尺模型を用いて海上技術安全研究所にて実施された 2 船体の流れ荷重計測試験（科研費 23K26324，図 1.3.1）の解析結果を引用し、2 船間相互作用及び浅水影響を考慮した流れ荷重係数を解析モデルに反映するものとした。

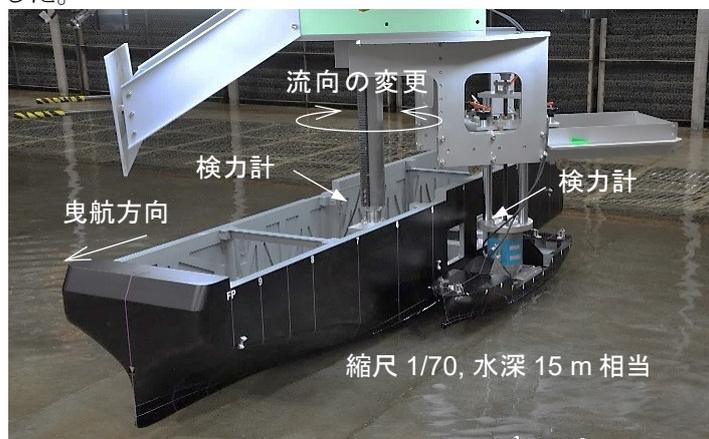


図 1.3.1 2 船体の流れ荷重計測試験（平水中における 2 船体拘束曳航試験）

1.3.2 計算時間の変更

昨年度の解析では、助走時間 1,080 sec（本計算時間の 10%）、本計算時間 10,800 sec（3 時間相当）としていたが、今年度は、振り回り運動が十分発達した状態で評価できるように助走時間 3,240 sec、本計算時間 32,400 sec とし、後半 10,800 sec（=180 分=3 時間）のデータを解析するものとした。

1.3.3 計算条件の見直し

(1) 配索方法

バンカリング事業者にヒアリングを実施し、配索方法（詳細は後述）を見直した。

(2) 波浪周期

バンカリングが行われる錨地を想定し、東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海における波浪観測データ（ナウファス）に基づき、波高と周期の関係（詳細は後述）を見直した。

1.3.4 モデル改良

(1) 錨鎖の船首接触状況の考慮

錨鎖と LNG 燃料船船首部の接触状況を考慮した（図 1.3.2）。

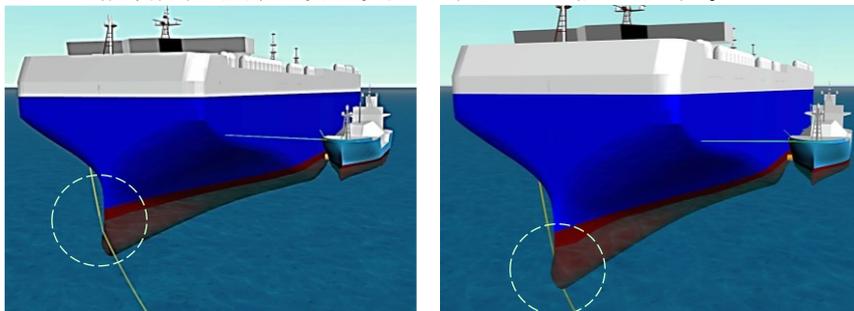


図 1.3.2 錨鎖と LNG 燃料船船首部の接触

(2) サンクンビットを用いたバイト取りモデル

サンクンビットを用いた係船を対象とした解析モデルを作成した（図 1.3.3）。

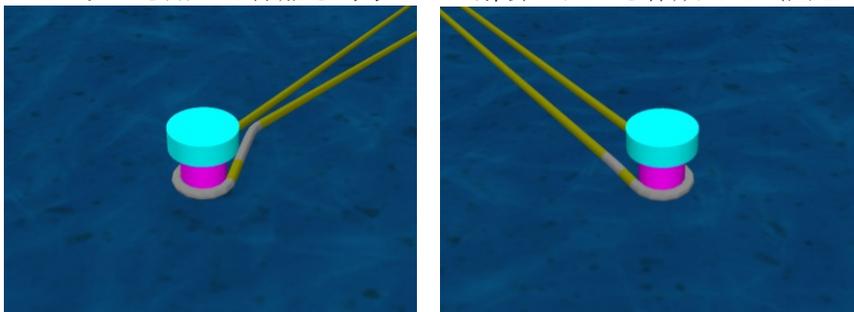


図 1.3.3 サンクンビットへのバイト取りのモデル化（船体非表示）

1.4 計算条件

1.4.1 対象船舶

検討対象とする LNG 燃料船とバンカー船の諸元を表 1.4.1 に示す。

LNG 燃料船は、単錨泊中の振れ回りが大きい自動車運搬船とし、バンカー船は国内において実績のある船舶をモデルとした。

表 1.4.1 対象船の諸元

項目	LNG 燃料船	バンカー船
垂線間長	196.0	76.20
型幅	38.0	18.0
型深	14.23	7.80
喫水	7.30	3.93
排水量	27,312.36	3,424.94
重心高さ	13.42	5.87
メタセンタ高さ	7.95	3.30
環動半径	0.35B	0.42B
正面投影面積	1,292.25	250.09
側面投影面積	6,451.37	892.84
載荷状態	バラスト	半載

図 1.4.1 に数値計算モデルの外観を示す。

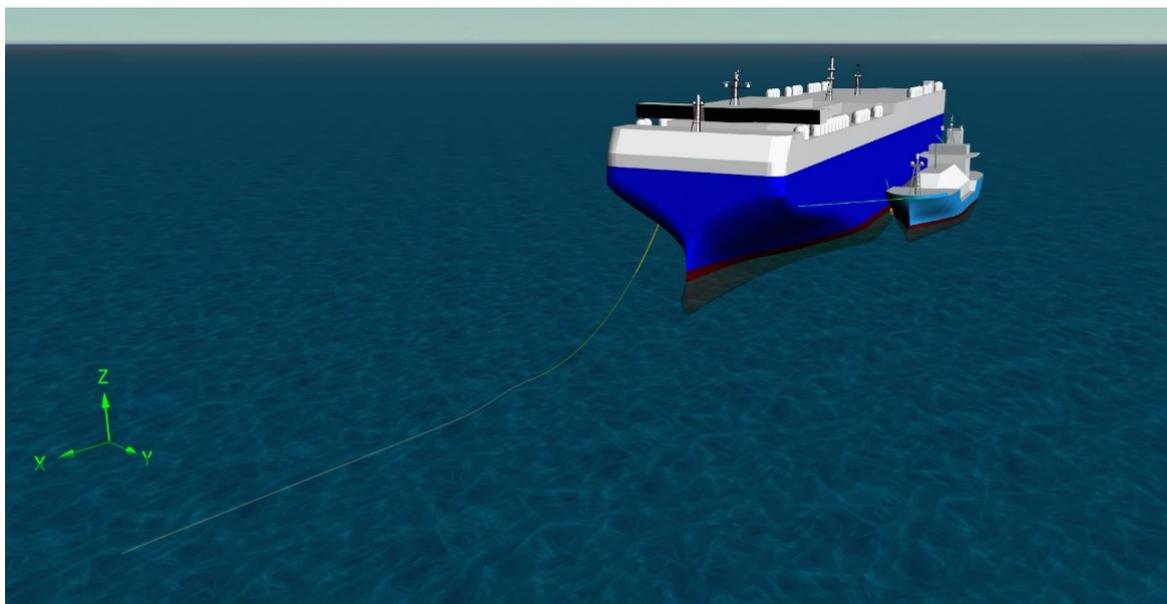


図 1.4.1 数値計算モデルの外観

1.4.2 座標系

使用する座標系を図 1.4.2 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。

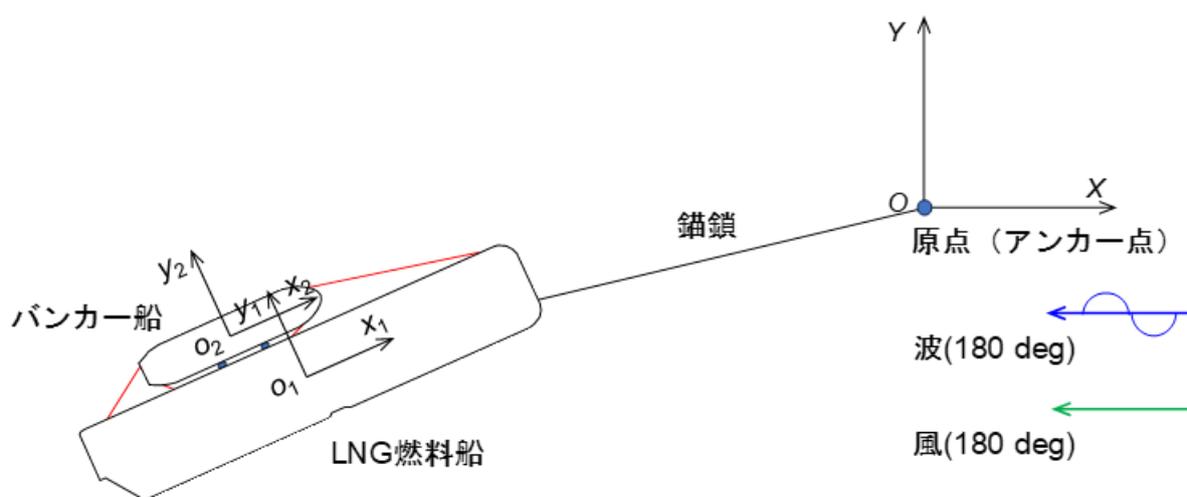


図 1.4.2 座標系

1.4.3 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 1.4.3 に示す。

風荷重係数は、昨年度実施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、無次元係数として整理したものである。

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。

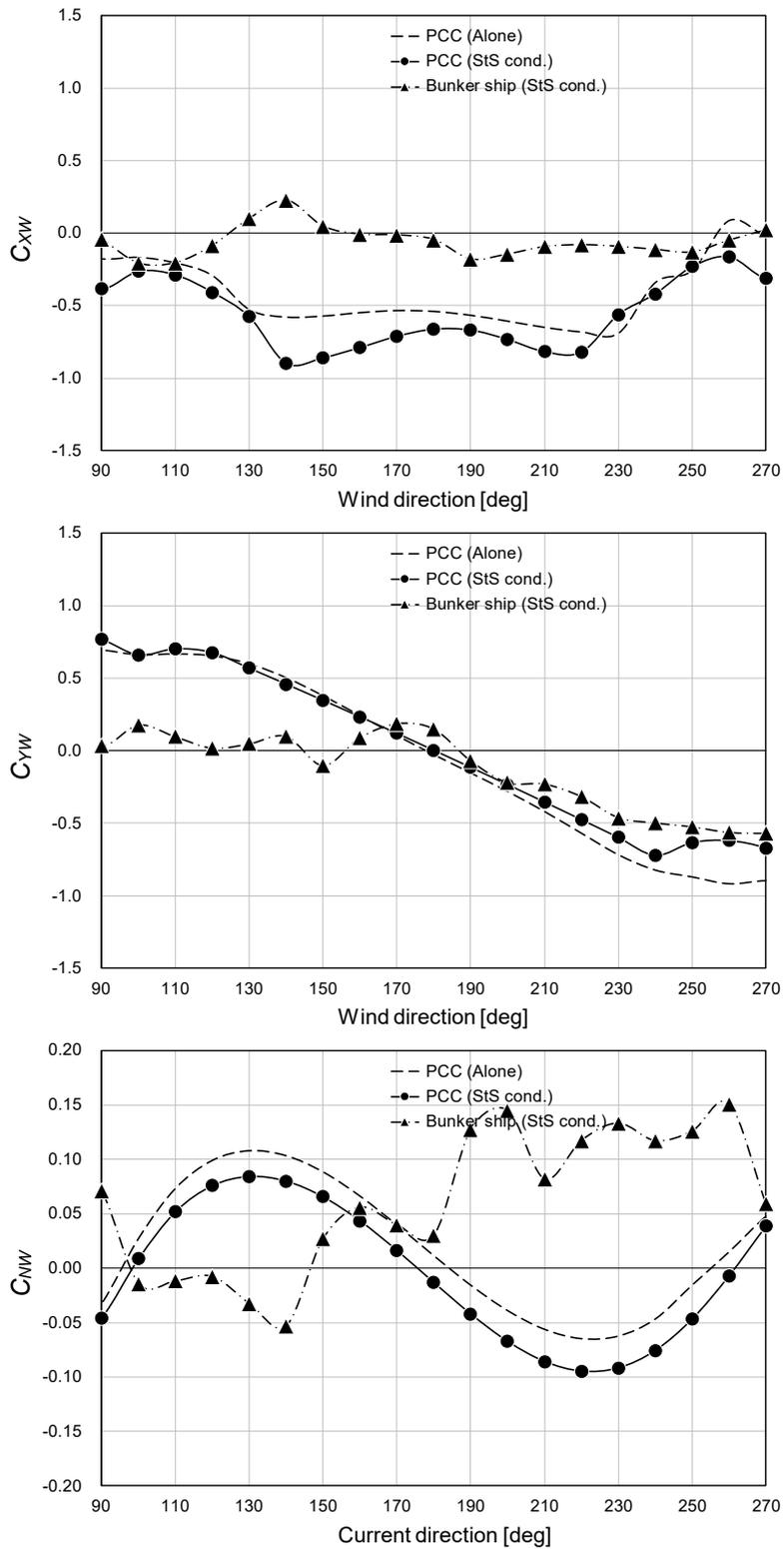


図 1.4.3 LNG 燃料船及びバンカー船に作用する風荷重係数

1.4.4 流れ荷重係数（昨年度検討から変更）

前述の「1.3.1 LNG 燃料船とパンカー船の流れ荷重係数の見直し」に示すとおり、対象船の 1/70 縮尺模型を用いて海上技術安全研究所にて実施された 2 船体の流れ荷重計測試験（科研費 23K26324）の解析結果を引用し、2 船間相互作用及び浅水影響を考慮した流れ荷重係数を解析モデルに反映した。

1.4.5 係船条件

(1) 使用する係船索の索径と材質（昨年度検討から変更）

係船索は表 1.4.2 に示すとおりとした。

国内の LNG バンカリング事業計画者及びロープメーカーへのヒアリング結果に基づき、索の材質は、化繊索の主流となっているポリプロピレン・ポリエステル混撚索（CE コンパウンド）8 打ちとし、索径は、事業者が使用している最小径 37mm（破断荷重 213kN）～最大径 55mm（破断荷重 453kN）を対象とした。

表 1.4.2 索仕様

索径	37mm、48mm、55mm
材質	ポリプロピレン・ポリエステル混撚索
破断荷重	213kN（φ37）、352kN（φ48）、453kN（φ55）
安全率	2.0
安全使用荷重	106.5kN（φ37）、176.0kN（φ48）、226.5kN（φ55）

索の伸び特性は、メーカーカタログに基づき図 1.4.4 に示すとおりとした。カタログに示される索径 60mm での特性曲線を最小破断荷重比で索径 37mm、48mm、55mm の索特性に修正を行った。

なお、昨年度は、メーカーカタログより索の伸び率曲線を設定していたが、カタログの曲線は NK 鋼船規則に従って規格荷重の 5 %の初期張力が与えられている（伸び率ゼロで張力が発生する）ため、索の伸び率曲線が原点を通るよう修正した。

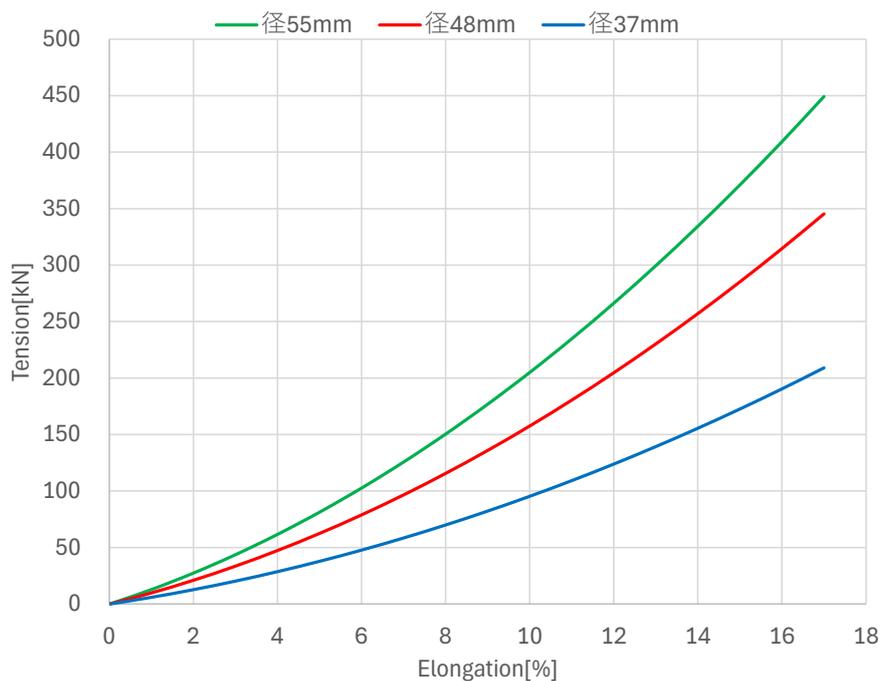


図 1.4.4 索径と伸び率

(2) 係船方法（昨年度検討から変更）

LNG バンカリング事業者へのヒアリング結果を踏まえ、錨地における LNG 燃料船とバンカー船の係船索配置、索径 55mm を 4 本使用する場合と索径 48mm 及び 37mm を 8 本使用する場合のそれぞれで図 1.4.5 と図 1.4.6 に示すとおりとした。

対象の LNG バンカー船は、ホーサードラムを船首側に 4 基、船尾側に 4 基備えており、平常時は最大 8 本の索を使用することができる。また、バンカー船のムアリングデッキとほぼ同じ高さにサンクンビットが設置されている燃料船に対しては、これらサンクンビットに索をバイトに取ることによって平面方向の拘束力を維持した係船が可能である。

位置は 2 船のマニホールド中心を合わせるようにし、LNG 燃料船の左舷にバンカー船を係船するものとした。

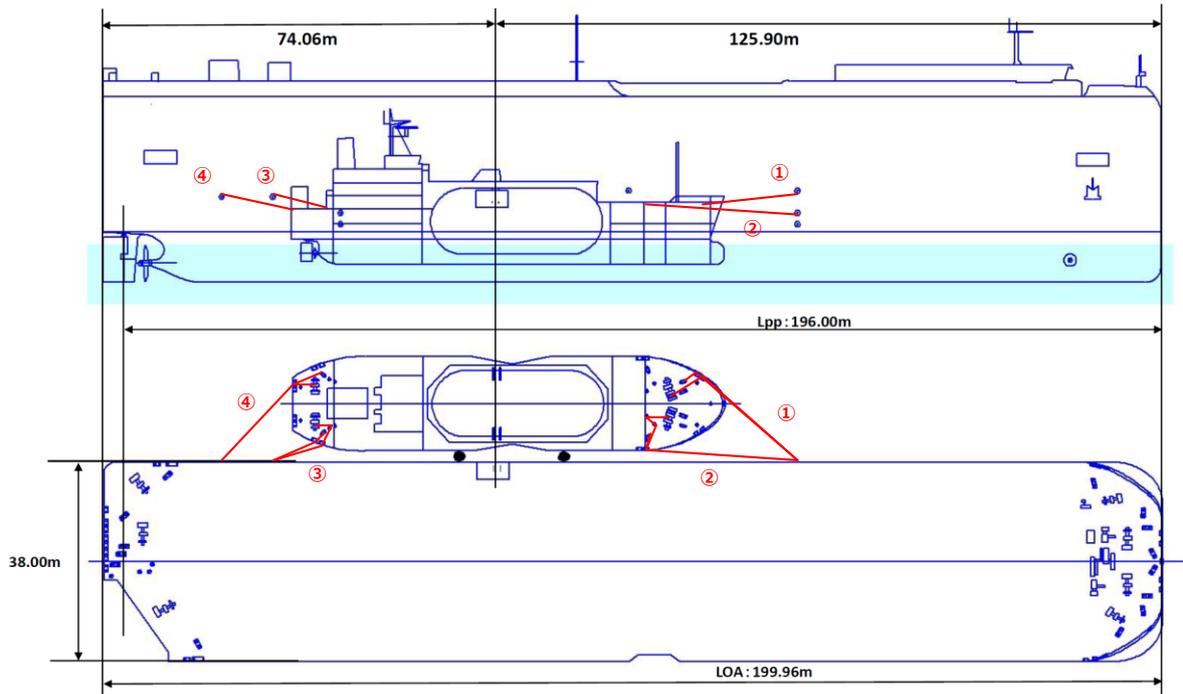


図 1.4.5 LNG 燃料船とバンカー船の係船方法 (径 55mm×4 本)

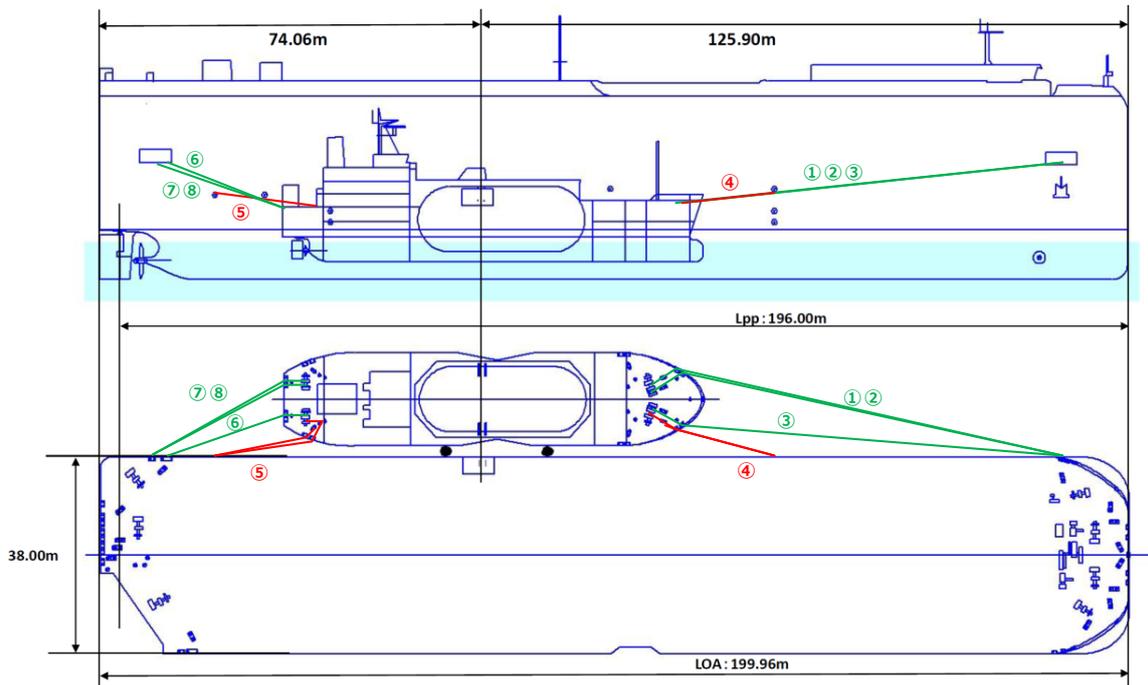


図 1.4.6 LNG 燃料船とバンカー船の係船方法 (径 37mm×8 本、径 48mm×8 本)

(3) 係船索の初期張力（昨年度検討から変更）

係船索の初期張力は、おおむね破断荷重の 10%程度とし、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調整した。

数値計算で用いた初期張力は、図 1.4.7～図 1.4.9 に示すとおりである。

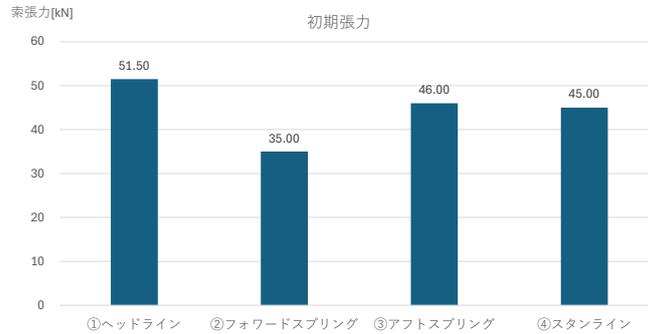


図 1.4.7 初期張力の調整結果（索径 55mm×4 本）

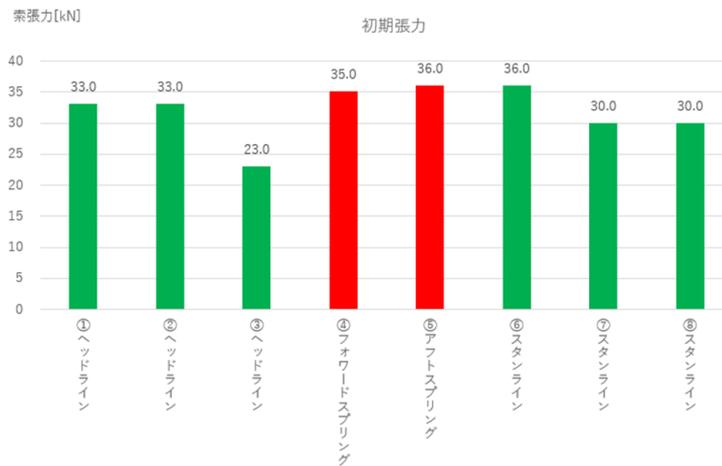


図 1.4.8 初期張力の調整結果（索径 48mm×8 本）

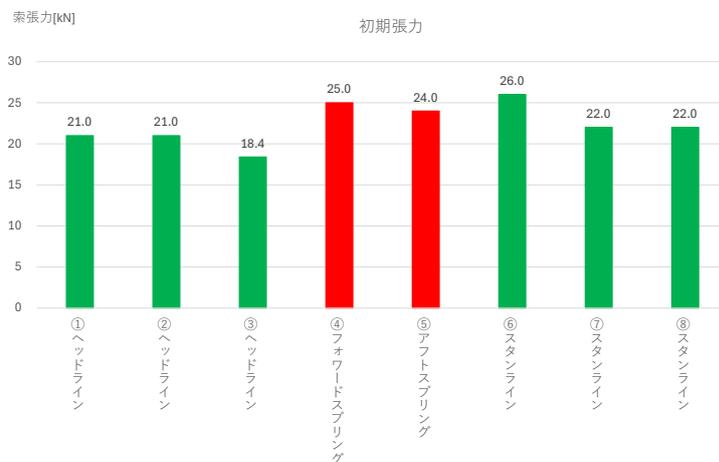


図 1.4.9 初期張力の調整結果（索径 37mm×8 本）

(4) 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は、メーカーカタログより、表 1.4.3 及び図 1.4.10 に示すとおりとした。

表 1.4.3 フェンダーの仕様

種類	フォーム式フェンダー
直径	2000 mm
長さ	3000 mm
設計歪率	60 %
反力	688 kN

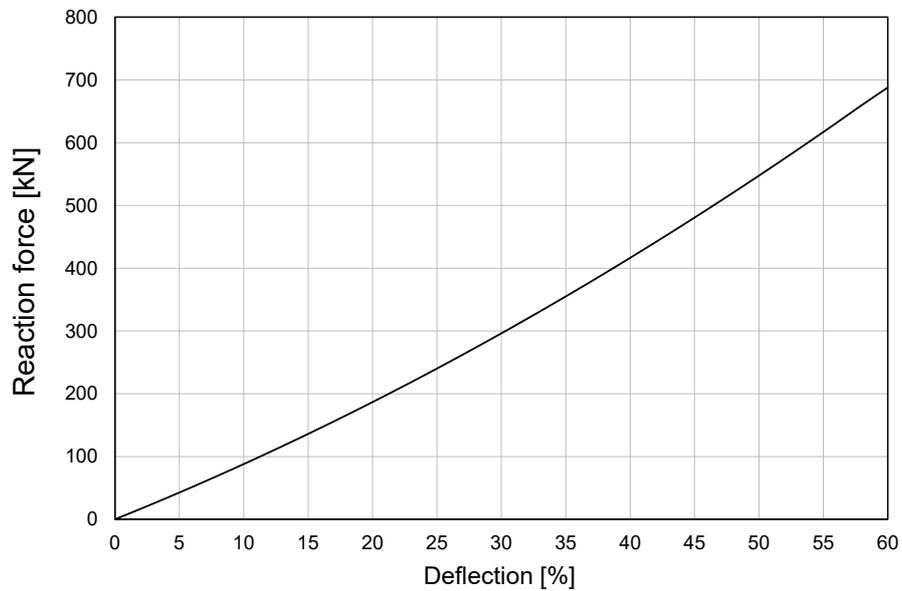


図 1.4.10 フェンダーの反力特性

(5) 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）を参考にして 135 m とした。

アンカーは AC-14 型ストックレスアンカーとし、錨鎖とアンカーの仕様を表 1.4.4 に示す、また、底質は泥と仮定して錨鎖の摩擦抵抗係数には 1.0 を使用した。

表 1.4.4 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
径	87 mm
空中単位重量	171.3 kg/m
錨鎖長	135 m
最小破断荷重	5499 kN
海底との摩擦係数（泥）	1.0

■錨

タイプ	AC-14 型ストックレスアンカー
重量	9225 kg

1.4.6 環境条件

(1) 水深条件

燃料船が港内に錨泊している状態を想定し、水深 15m（燃料船の水深喫水比：2.05）と設定した。

(2) 波高と波周期の設定（昨年度（令和 5 年度）検討から変更）

波高と波周期の関係は、国土交通省港湾局の全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）より、錨地バンカリングの実施が想定される、東京湾（第二海堡）、伊勢湾（伊勢湾）、大阪湾（神戸）、瀬戸内海（苅田）の各観測点（2018～2022 年）での有義波高と有義波周期を解析し、各波高区分（波高 1.0m は波高 0.95～1.04m、波高 0.9m は波高 0.85～0.94m、波高 0.8m は波高 0.75～0.84m、波高 0.5m は波高 0.45～0.54m）の範囲の最頻値周期を設定するものとした。

その結果、波周期は各波高で以下のとおり設定した。

- ・波高 0.5m のときの波周期：3.1sec
- ・波高 0.8m のときの波周期：3.6sec
- ・波高 0.9m のときの波周期：3.9sec

・波高 1.0m のときの波周期：4.1sec

(3) 風向と波向の設定

昨年度（令和 5 年度）検討と同様、風と波の方向は全て同一とした。

(4) 風速と波高・波周期の設定（昨年度（令和 5 年度）検討から変更）

環境条件は、各索径・索本数のケースごとに表 1.4.5 に示す風速と波高の組み合わせで実施した。

表 1.4.5 環境条件（風速・波高）の設定

風速	風速 5m/sec				風速 6m/sec		
	波高 0.5m	波高 0.8m	波高 0.9m	波高 1.0m	波高 0.5m	波高 0.8m	波高 1.0m
径 55mm ×4 本		✓	✓	✓			✓
径 48mm ×8 本	✓			✓		✓	
径 37mm ×8 本	✓			✓		✓	

昨年度は風と波の相関を考慮していたが、今年度（令和 6 年度）は 2 船体の振れ回り運動に対する個々の影響を把握するため、風と波をそれぞれパラメータとして変化させることにより移送限界条件を検討した。

なお、数値計算を実施していずれかの許容値（閾値）を超えて移送不可と判断された場合は、それ以上の外力条件での計算実施は行わないものとした。

数値計算で再現する風は、Davenport のスペクトルによる変動風とし、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た。

1.5 評価方法

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 1.5.1 に示す閾値との比較から運用可否を判断した。

バンカー船のマニホールド位置における相対運動（以下、相対動揺量）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 : $MPM\ value = \mu + \sigma\sqrt{2\ln(n)}$ 、ただし、 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)により評価した。

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った。

表 1.5.1 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 : $\pm 1.0\ m$ Sway : $+0.75\ m$ Heave : $\pm 0.5\ m$ Roll : $\pm 4.0\ deg$ Pitch : $\pm 2.0\ deg$ Yaw : $\pm 2.0\ deg$	平成 25 年の検討に準拠。 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 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
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
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

- 単錨泊中の燃料船にバンカー船が係留できる条件は、係船索に作用する張力と 2 船間に設置される防舷材に作用する圧縮量の許容値を用いる。
許容値は、係留索については索の破断荷重の 50%（安全率 2.0 : OCIMF 基準）以下、防舷材については圧縮率 60%（メーカーカタログ値）以下とする。
- 単錨泊中の燃料船へのバンカー船の StS 方式による LNG 燃料移送限界条件は、バンカー船と燃料船のマニホールド位置における相対運動量（6 モード）の許容値を用いる。
許容値は、岸壁係留タンカーの一般荷役を対象とした限界値（Surge : $\pm 1.0m$ 、Sway : $+0.75m$ 、Heave : $\pm 0.5m$ 、Roll : $\pm 4.0deg$ 、Pitch : $\pm 2.0deg$ 、Yaw : $\pm 2.0deg$ ）以下とする。

1.6 解析及び評価結果

1.6.1 相対動揺量等の解析結果

図 1.6.1～図 1.6.3 は、径 55mm×4 本の係船条件、風速 6m/sec と波高 1.0m（周期 4.1sec）の外力条件下において実施した解析結果を示し、図 1.6.4～図 1.6.6 は、径 48mm×8 本の係船条件、風速 6m/sec と波高 0.7m（周期 3.7sec）の外力条件下において実施した解析結果を示す。図 1.6.7～図 1.6.9 は、径 37mm×8 本の係船条件、風速 5m/sec と波高 1.0m（周期 4.1sec）の外力条件下において実施した解析結果の事例を示す。いずれも相対動揺量に対する許容範囲を超えたケースである。なお、これらグラフは解析開始時刻を 0 としている。

各図の波線（青線）は、相対動揺量や索張力等の解析結果を示し、直線（赤線）はそれぞれの許容範囲の目安として、表 1.5.1 に示す閾値を示している。相対動揺量は、燃料船のマニホールド位置を起点としたバンカー船の動きを示し、Surge は船首側、Sway は左舷側、Heave は鉛直上向き、Roll は右舷下げ方向、Pitch は船首下げ方向、Yaw は Z 軸で反時計回りを正（+）とし、Surge と Sway、Yaw は長周期成分、残りは波周期成分に分離した結果を示している。

なお、前述の「1.5 評価方法」で示したとおり、計算中に許容値（閾値）を超えることはなくとも極地統計解析によって求めた最大値が許容値（閾値）を超えた場合は移送不可と評価される。

索 55mm×4 本のケースは、燃料船のサンクンビットを活用することにより横方向の拘束力が増し、Sway 方向や Yaw の相対動揺量を抑制することができた。一方、径 48mm×8 本と 37mm×8 本のケースでは、使用する係船索が前後方向に長く横方向の拘束力が小さくなったため、径 37mm×8 本のケースでは、Surge 方向に加えて Sway 方向と Yaw の許容値（閾値）も超えた。

相対動揺量を抑制するためには、バンカー船のムアリングデッキとほぼ同じ高さにある燃料船側のサンクンビットを活用することで水平方向の拘束力を高めることが有効である。また、使用する係留索は、できるだけ伸び率の小さい材質で大きな径のものを使用するのが望ましく、燃料船側の支援を受けて燃料船デッキ上のボラードに係船索をとるときは、平常時に使用できる索本数（ホーサードラム数）を最大限活用するのが望ましい。

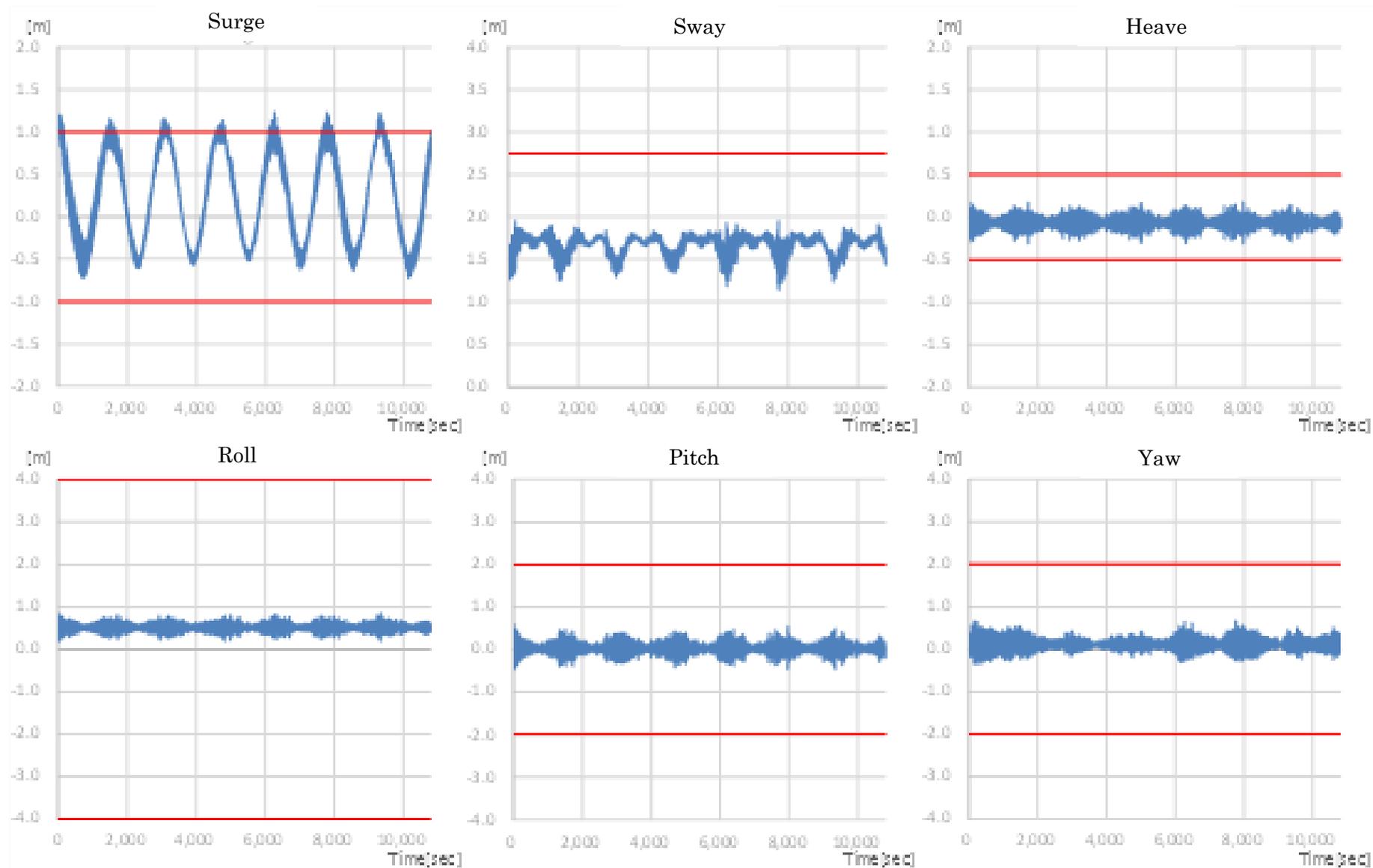


图 1.6.1 相对動揺量 (径 55mm×4 本 : 風速 6m/sec、波高 1.0m)

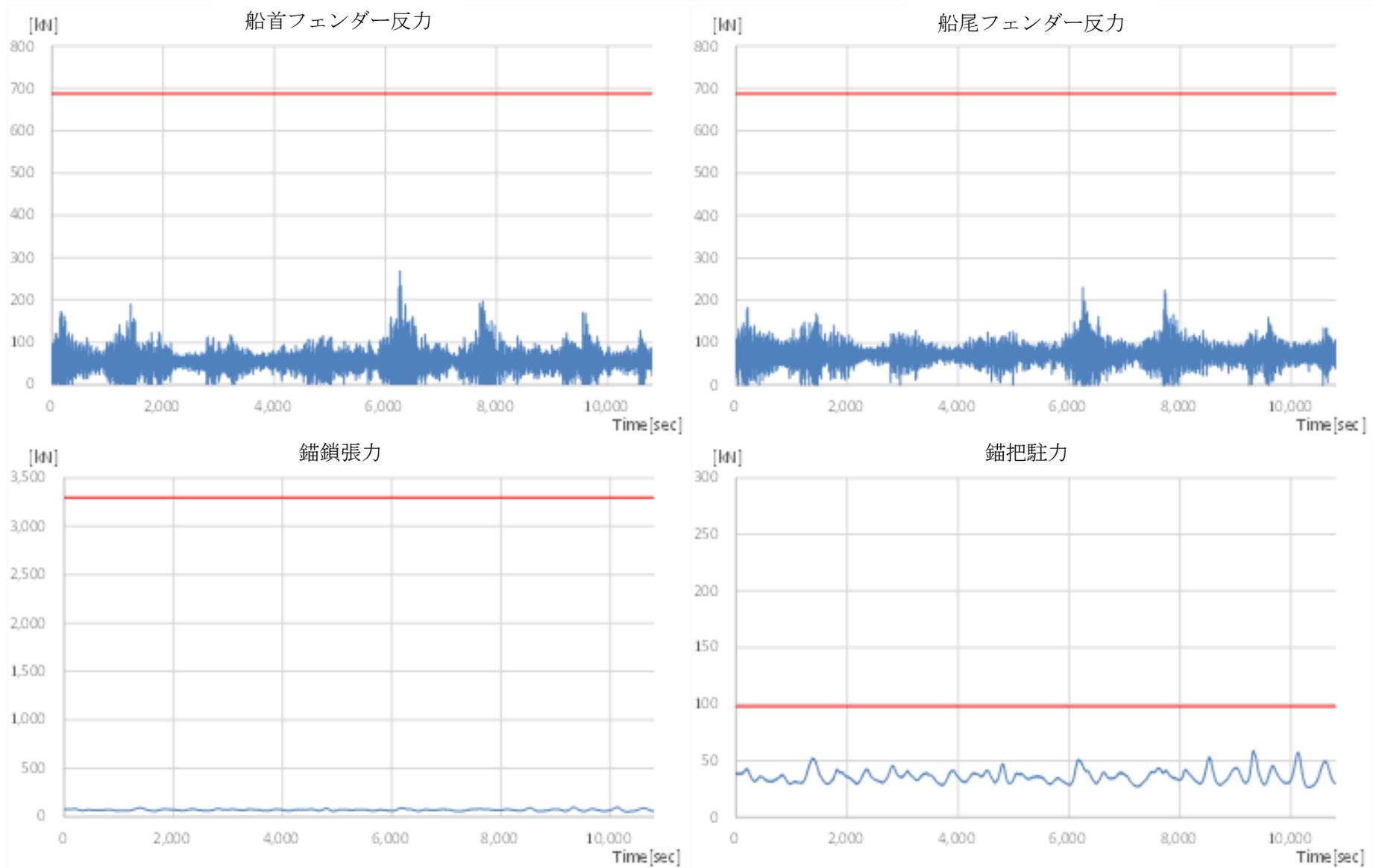


図 1.6.2 フェンダー反力、錨鎖張力・錨把駐力（径 55mm×4 本：風速 6m/sec、波高 1.0m）

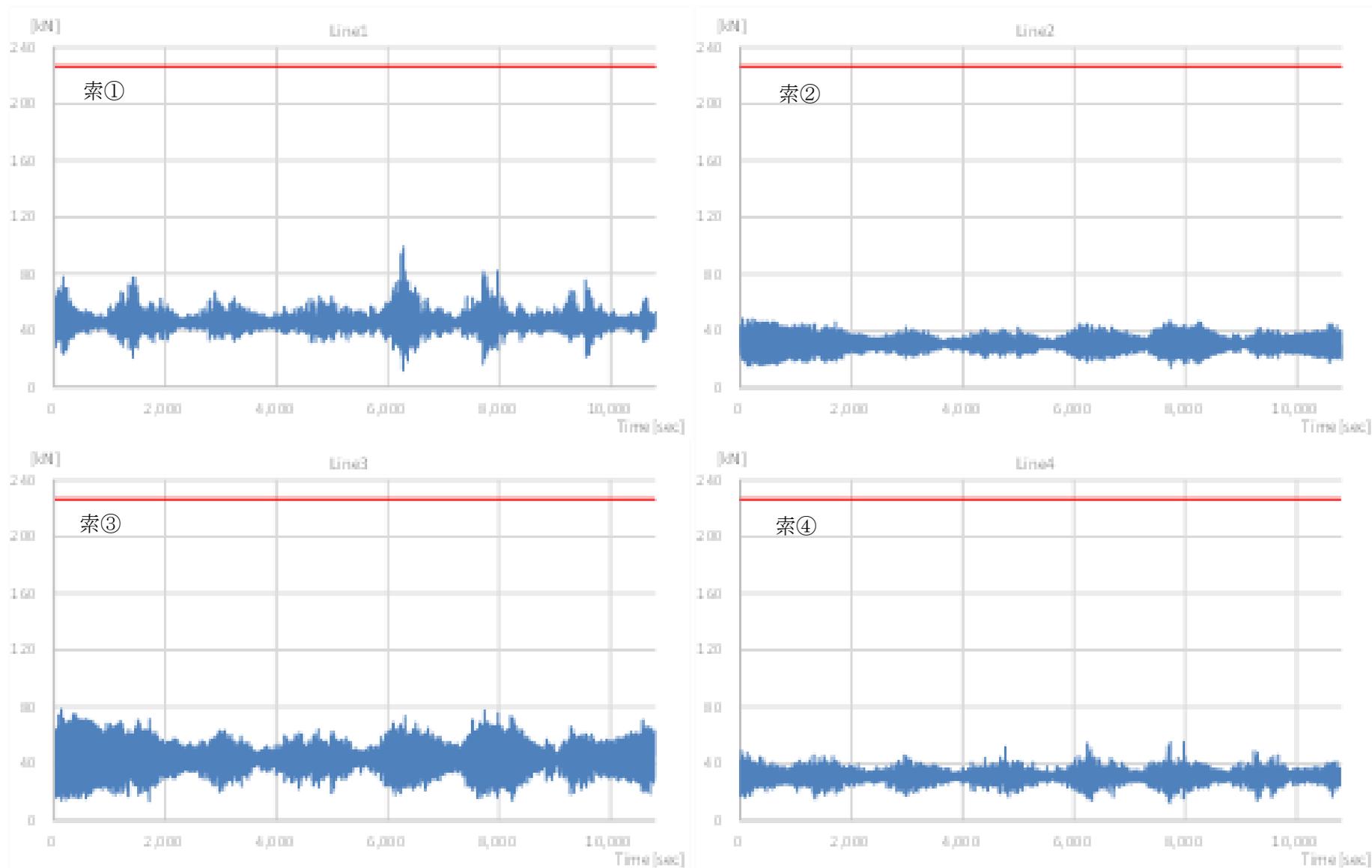


図 1.6.3 索張力 (径 55mm×4 本 : 風速 5m/sec、波高 1.0m)

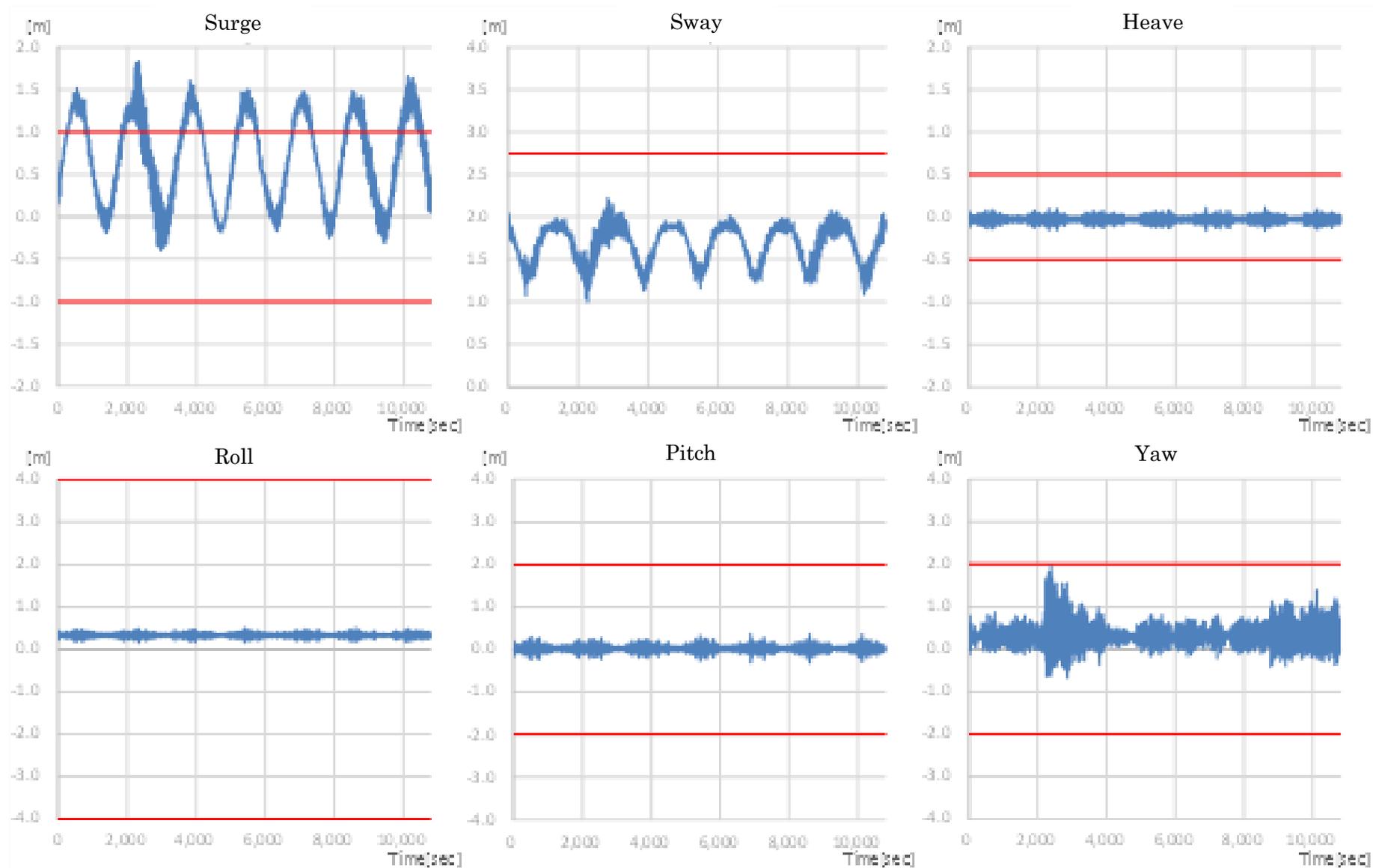


图 1.6.4 相对動揺量 (径 48mm×8 本 : 風速 6m/sec、波高 0.8m)

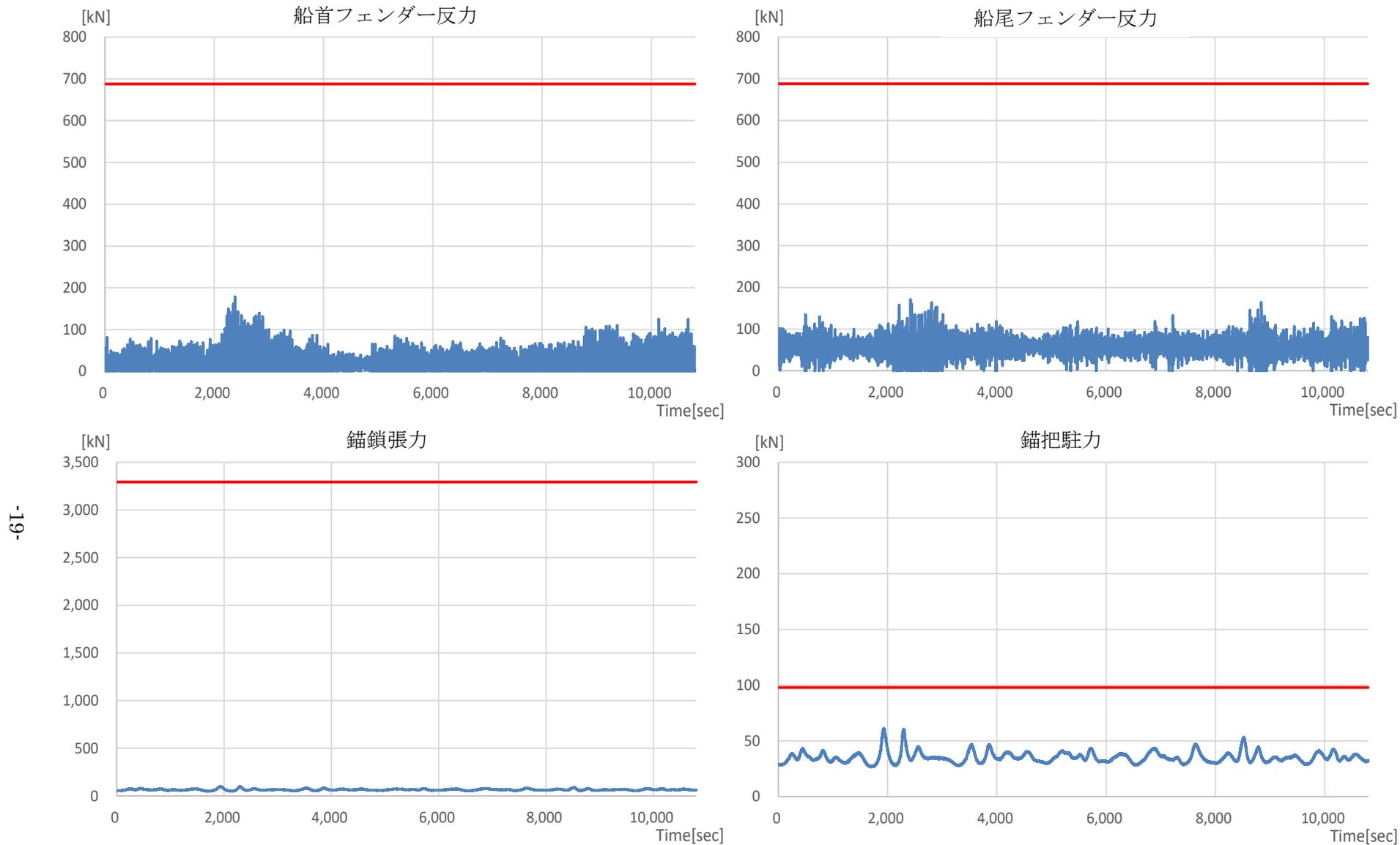


図 1.6.5 フェンダー反力、錨鎖張力・錨把駐力（径 48mm×8 本：風速 6m/sec、波高 0.8m）

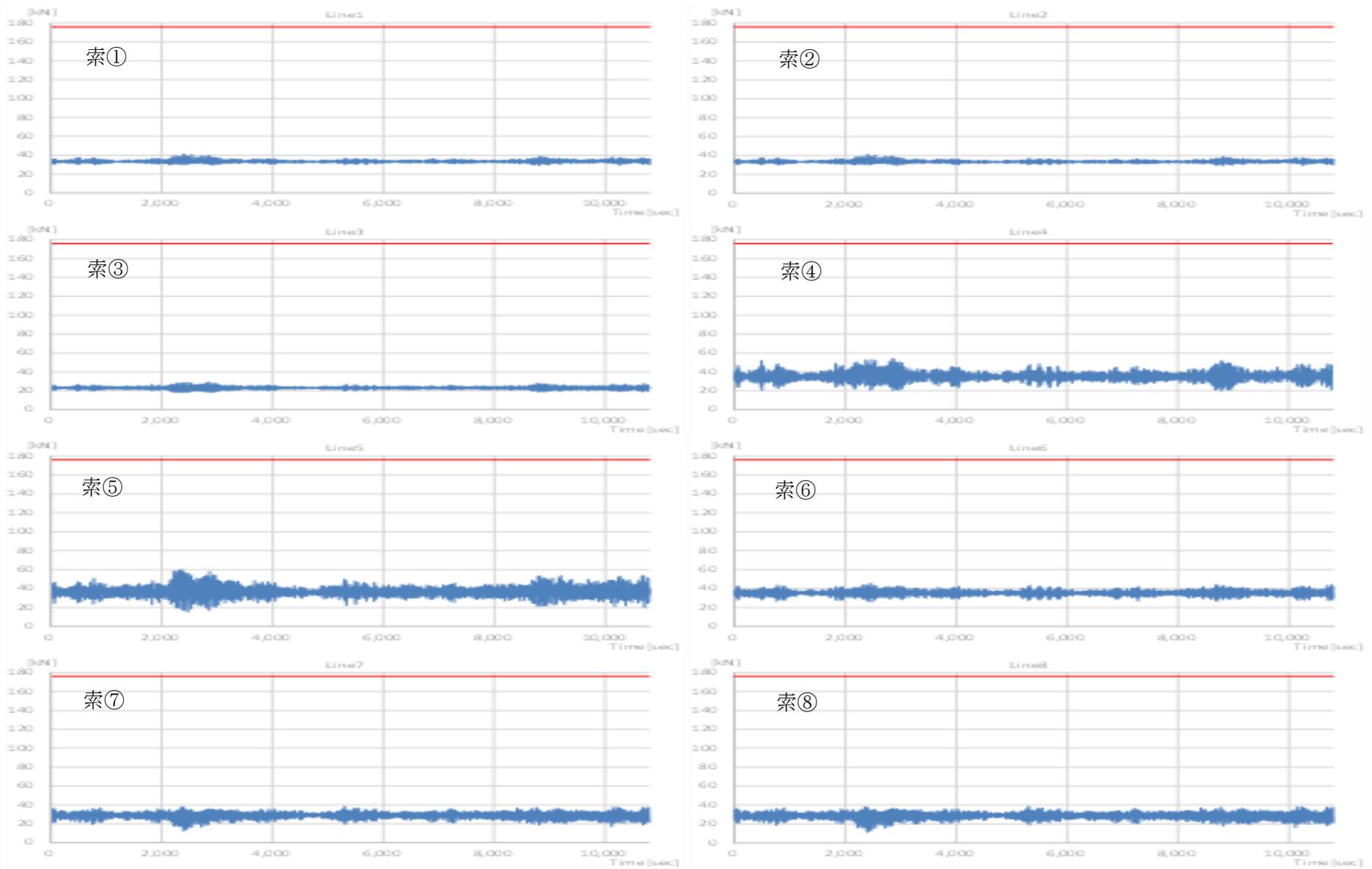


図 1.6.6 索張力 (径 48mm×8 本 : 風速 6m/sec、波高 0.8m)

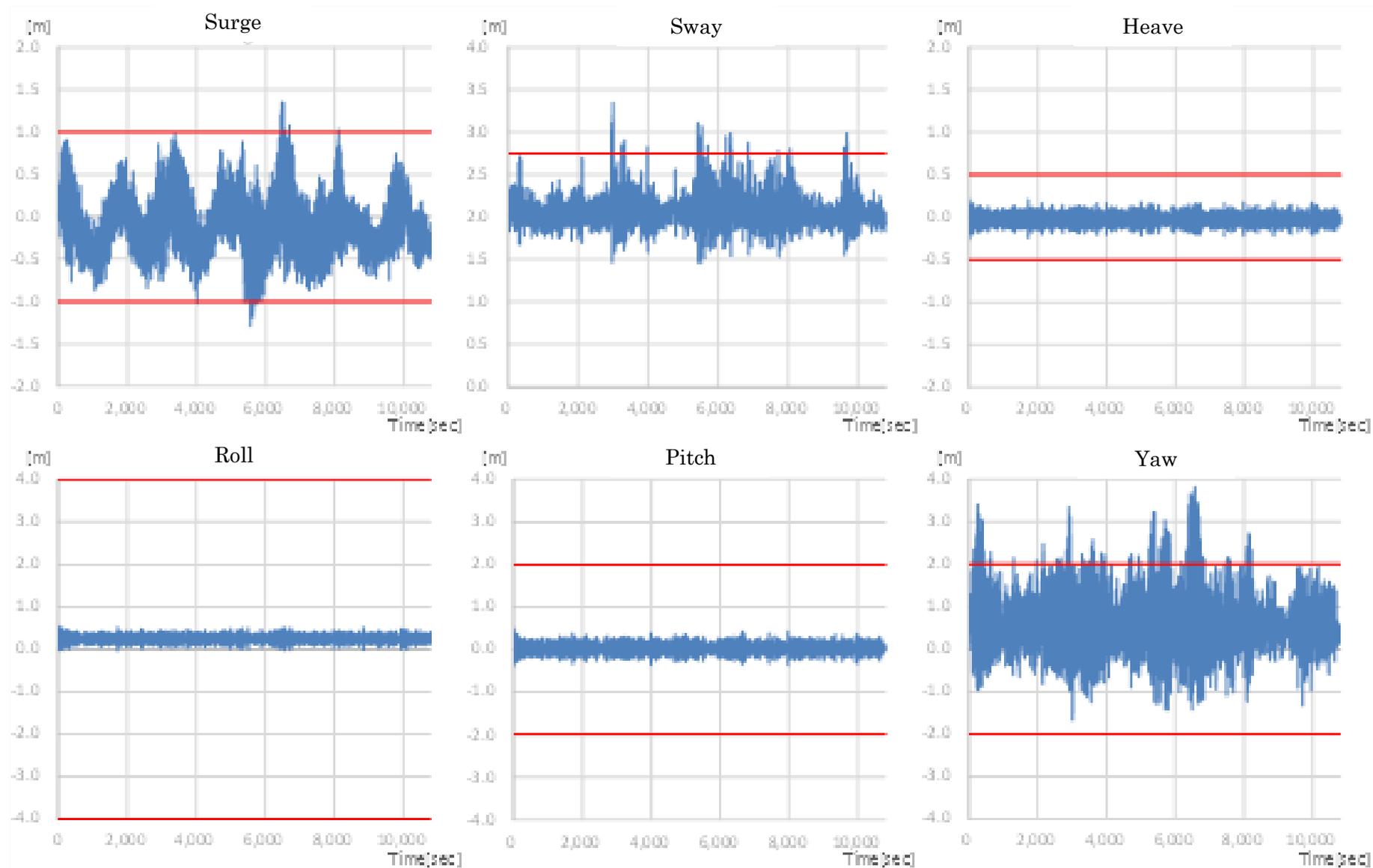


图 1.6.7 相对动摇量 (径 37mm×8 本 : 风速 5m/sec、波高 1.0m)

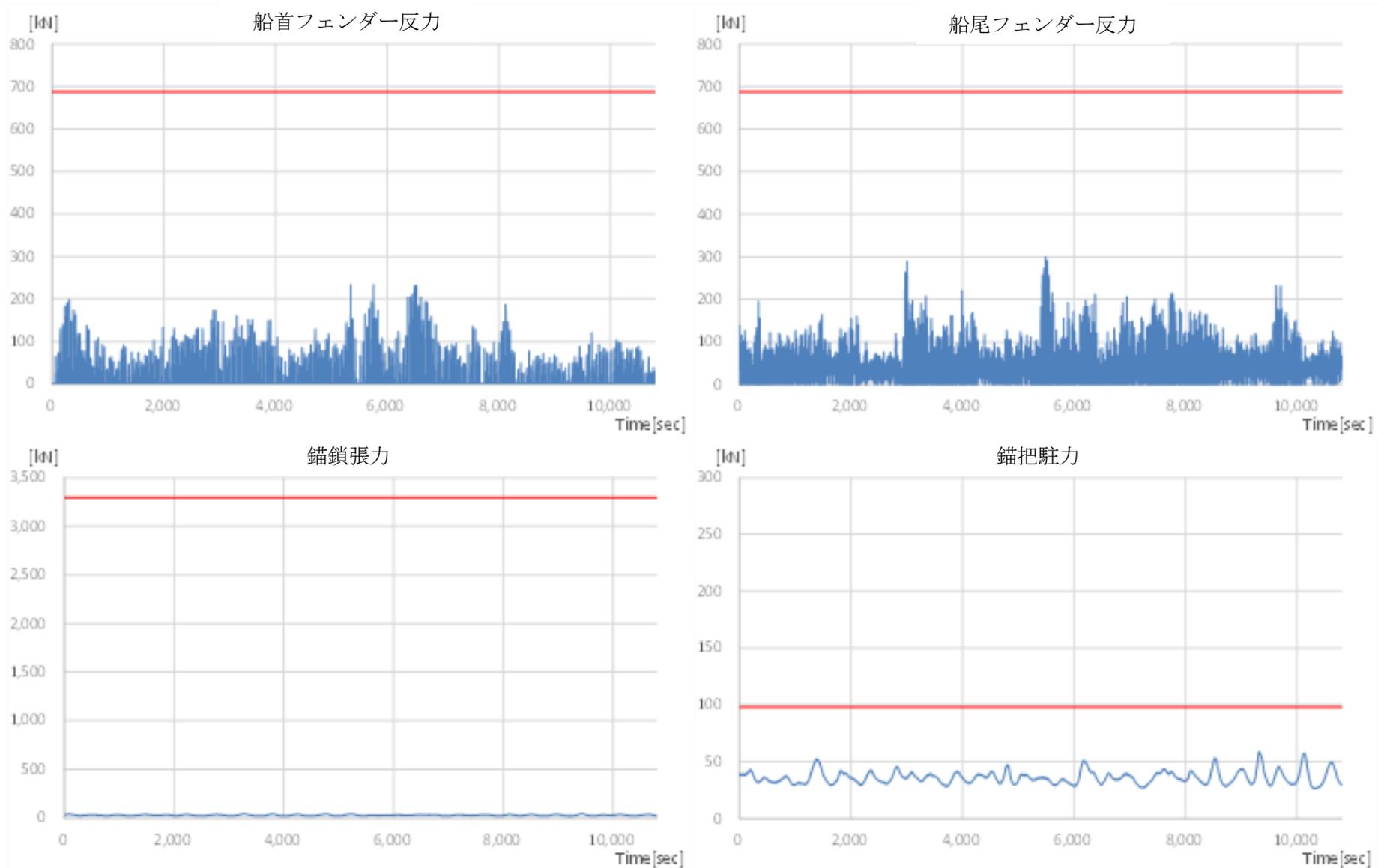


図 1.6.8 フェンダー反力、錨鎖張力・錨把駐力 (径 37mm×8 本 : 風速 5m/sec、波高 1.0m)

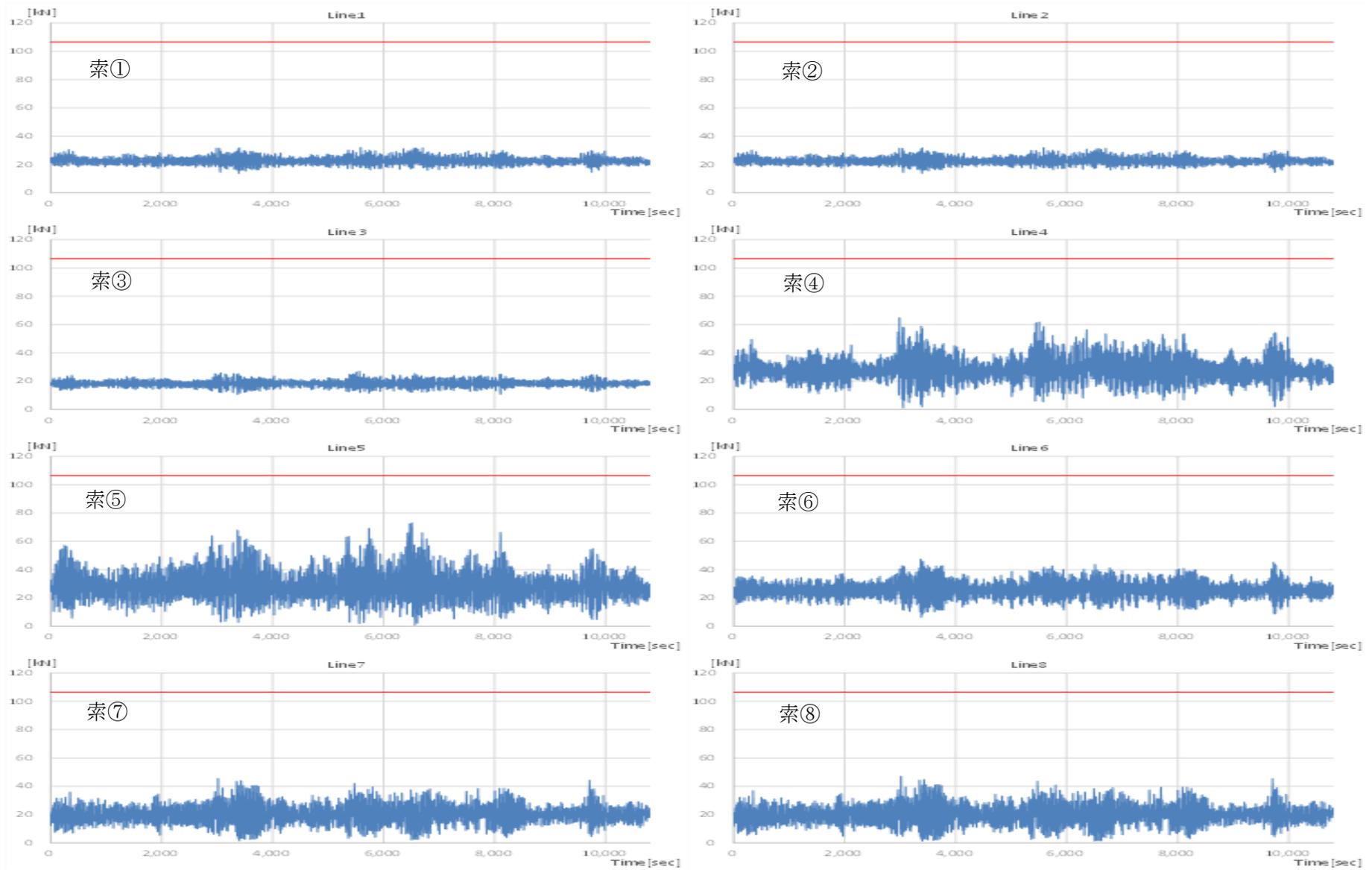


図 1.6.9 索張力 (径 37mm×8 本 : 風速 5m/sec、波高 1.0m)

1.6.1 評価結果

種々の外力条件で実施した解析結果より、極値統計解析による相対動揺量等の最大値が許容範囲内（閾値）に収まっているかどうかを評価した。

表 1.6.1～表 1.6.4 は、索径 55mm×4 本の場合、表 1.6.5～表 1.6.8 は、索径 48mm×8 本の場合、表 1.6.9～表 1.6.12 には、索径 37mm×8 本の場合の評価結果を示す。

いずれの係船条件（径 37～55mm、索本数 4 本と 8 本）、いずれの外力条件（風速 6m/sec 以下、波高 1.0m 以下）でも、索張力、フェンダー反力、錨鎖張力・錨把駐力は許容値内となった。

一方、2 船間係留状態での振れ回り運動が、風が強くなるにつれ大きくなり、バンカー船が振れ回る燃料船に追従しようとするため、平面方向の運動が大きくなり、一部の係船条件、外力条件下においてマニホールド位置の Surge 方向と Sway 方向及び Yaw の相対動揺量が閾値を超えた。

本検討で設定した評価値全てが許容値を満足した環境条件（風速及び波高の組み合わせ）は、索径と使用する索本数ごとに以下のとおりとなった。

- 径 55mm×4 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 1.0m 以下のとき
- 径 48mm×8 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 1.0m 以下のとき
- 径 37mm×8 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 0.5m 以下のとき

図 1.6.10 は、マニホールド位置における Surge 方向の相対動揺量が閾値以内に収まった、径 55mm×4 本での風速 5m/sec、波高 1.0m のケースを示し、図 1.6.11 は閾値を超えた風速 6m/sec、波高 1.0m のケースを示している。

前掲の図 1.4.2 に示すとおり、空間固定座標上、原点はアンカーの位置、X 軸は風向・波向軸を示し、Y 軸は X 軸に直交する平面座標を示す。燃料船の振れ回り運動において、X 軸は燃料船重心の前後方向の偏位（船首側を正）、Y 軸は横方向の偏位（左舷側を正）を示している。

マニホールド位置における Surge 方向の相対運動は、一般に 8 の字を描く単錨泊中の船体振れ回り運動に連動している様子がわかる。

マニホールド位置の相対運動量が閾値内に収まったケースは、燃料船重心の横（Y 軸）方向の振れ回り幅が最大 10m 程度、燃料船重心の移動速度は最大 5cm/sec 程度であり、マニホールド位置の相対運動量が閾値を超えたケースは、燃料船重心の横（Y 軸）方向の振れ回り幅が最大 35m 程度、燃料船重心の移動速度は最大で 9cm/sec 程度となった。

表 1.6.1 相対動揺量 (索径 55mm×4 本)

	バンカー船の相対運動MPM値 (片振幅)			
	Case01 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.9 \text{ m}$ $T_P: 3.9 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_P: 3.6 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$
サージ [m]	0.56	0.42	0.29	1.54
スウェイ [m]	0.24	0.19	0.14	0.40
ヒープ [m]	0.23	0.19	0.13	0.22
ロール [deg]	0.29	0.22	0.15	0.29
ピッチ [deg]	0.41	0.33	0.24	0.41
ヨー [deg]	0.44	0.33	0.30	0.53

表 1.6.2 索張力 (索径 55mm×4 本)

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]			
	Case01 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.9 \text{ m}$ $T_P: 3.9 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_P: 3.6 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$
ヘッドライン	76.44	65.31	60.63	92.00
	5.99	7.01	7.55	4.98
フォワードスプリングライン	46.62	42.85	39.64	48.29
	9.82	10.69	11.56	9.48
アフトスプリングライン	72.40	66.04	61.38	78.07
	6.33	6.94	7.46	5.87
スタンライン	47.68	43.61	43.08	57.64
	9.61	10.50	10.63	7.95

表 1.6.3 フェンダー反力 (索径 55mm×4 本)

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]			
	Case01 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.9 \text{ m}$ $T_P: 3.9 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_P: 3.6 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$
前方フェンダー	174.65	137.09	121.50	239.85
後方フェンダー	188.45	129.57	125.32	223.32

	上段：フェンダー圧縮量 (3時間再現値) [m] 下段：圧縮率 [%]			
	Case01 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.9 \text{ m}$ $T_P: 3.9 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_P: 3.6 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$
前方フェンダー	0.38	0.30	0.27	0.50
	18.81	15.09	13.58	25.22
後方フェンダー	0.40	0.29	0.28	0.47
	20.02	14.35	13.95	23.54

表 1.6.4 錨鎖張力・錨把駐力 (索径 55mm×4 本)

	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 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.9 \text{ m}$ $T_P: 3.9 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_P: 3.6 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_P: 4.1 \text{ sec}$
錨鎖張力	86.73	85.70	76.23	102.28
	63.42	64.17	72.15	53.77
把駐力	50.23	48.45	39.66	60.39
	0.01	0.01	0.00	0.01

表 1.6.5 相対動揺量 (索径 48mm×8 本)

	バンカー船の相対運動MPM値 (片振幅)			
	Case01 $U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$
サージ [m]		1.48	0.67	0.81
スウェイ [m]		0.67	0.28	0.43
ヒーブ [m]		0.12	0.04	0.23
ロール [deg]		0.16	0.06	0.28
ピッチ [deg]		0.25	0.08	0.41
ヨー [deg]		1.07	0.76	1.74

表 1.6.6 索張力 (索径 48mm×8 本)

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]			
	Case01 $U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$
ヘッドライン①		40.90	35.46	42.06
		8.61	9.93	8.37
ヘッドライン②		61.66	46.45	73.46
		5.71	7.58	4.79
ヘッドライン③		40.71	35.29	41.79
		8.65	9.97	8.42
フォアスプリングライン		44.86	39.40	50.52
		7.85	8.93	6.97
アフタスプリングライン		29.14	25.42	30.53
		12.08	13.85	11.53
スタンライン①		38.46	34.07	46.85
		9.15	10.33	7.51
スタンライン②		54.18	42.27	60.12
		6.50	8.33	5.85
スタンライン③		39.08	34.28	47.33
		9.01	10.27	7.44

表 1.6.7 フェンダー反力 (索径 48mm×8 本)

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]			
	Case01 $U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$
前方フェンダー		169.32	87.00	202.52
後方フェンダー		170.80	100.06	186.28

	上段：フェンダー圧縮量 (3時間再現値) [m] 下段：圧縮率 [%]			
	Case01 $U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$
前方フェンダー		0.36	0.20	0.43
		18.07	9.88	21.50
後方フェンダー		0.38	0.23	0.40
		18.92	11.29	19.83

表 1.6.8 錨鎖張力・錨把駐力 (索径 48mm×8 本)

	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 $U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	Case02 $U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	Case03 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	Case04 $U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$
錨鎖張力		99.39	71.43	95.32
		55.34	77.00	57.70
把駐力		59.67	33.49	49.02
		0.01	0.00	0.01

表 1.6.9 相対動揺量 (索径 37mm×8 本)

	パンカー船の相対運動MPM値 (片振幅)				
	Case01	Case02	Case03	Case04	
	$U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	$U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	
サージ [m]		1.84	0.71	1.23	
スウェイ [m]		0.54	0.14	0.76	
ヒーブ [m]		0.12	0.04	0.23	
ロール [deg]		0.15	0.06	0.28	
ピッチ [deg]		0.25	0.08	0.40	
ヨー [deg]		1.95	0.73	2.81	

表 1.6.10 索張力 (索径 37mm×8 本)

	上段：係船索長力 (3時間再現値) [kN] 下段：安全率 [-]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	
	$U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	$U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	
ヘッドライン①		29.41	23.64	32.42	
		7.24	9.01	6.57	
ヘッドライン②		54.68	34.49	74.90	
		3.90	6.18	2.84	
ヘッドライン③		29.26	23.59	32.60	
		7.28	9.03	6.53	
フォアスプリングライン		40.21	31.01	46.40	
		5.30	6.87	4.59	
アフトスプリングライン		24.17	20.11	26.51	
		8.81	10.59	8.03	
スタンライン①		38.00	27.57	45.22	
		5.60	7.73	4.71	
スタンライン②		48.03	31.56	62.83	
		4.43	6.75	3.39	
スタンライン③		38.68	27.55	46.56	
		5.51	7.73	4.57	

表 1.6.11 フェンダー反力 (索径 37mm×8 本)

	フェンダー反力 (3時間再現値) [kN]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	
	$U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	$U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	
前方フェンダー		156.51	65.60	236.15	
後方フェンダー		193.43	94.44	312.76	

	上段：フェンダー圧縮量 (3時間再現値) [m] 下段：圧縮率 [%]				
	Case01	Case02	Case03	Case04	
	$U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	$U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	
前方フェンダー		0.34	0.15	0.52	
		17.04	7.56	25.89	
後方フェンダー		0.41	0.21	0.62	
		20.38	10.73	31.16	

表 1.6.12 錨鎖張力・錨把駐力 (索径 37mm×8 本)

	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	
	$U_a: 8.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	$U_a: 6.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.8 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.6 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 0.5 \text{ m}$ $T_{1/3}: 3.1 \text{ sec}$	$U_a: 5.0 \text{ m/s}$ $H_{1/3}: 1.0 \text{ m}$ $T_{1/3}: 4.1 \text{ sec}$	
錨鎖張力		100.71	68.77	85.28	
		54.61	79.97	64.49	
把駐力		59.33	33.11	47.41	
		0.01	0.00	0.01	

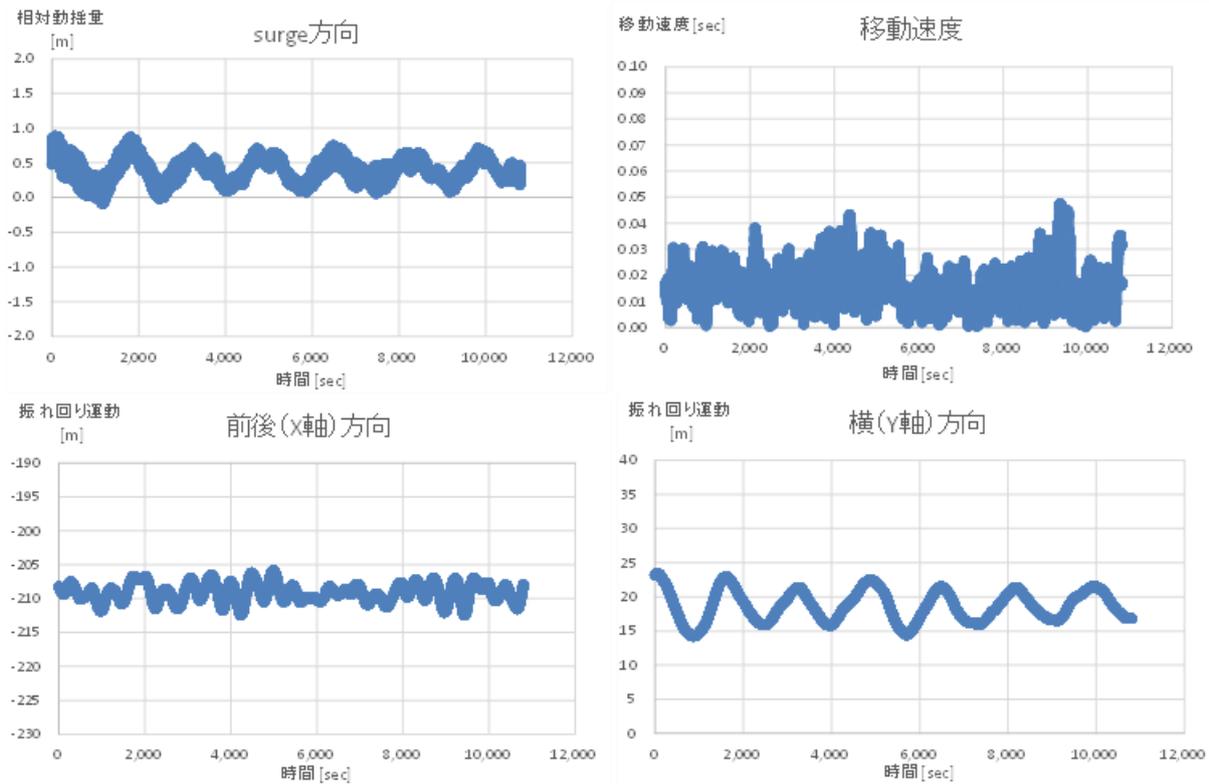


図 1.6.10 2 船間係留時のマニホール位置の相対動揺量と燃料船重心の振れ回り運動：閾値以内に収まったケース（径 55mm×4 本、風速 5m/sec、波高 1.0m での解析結果）

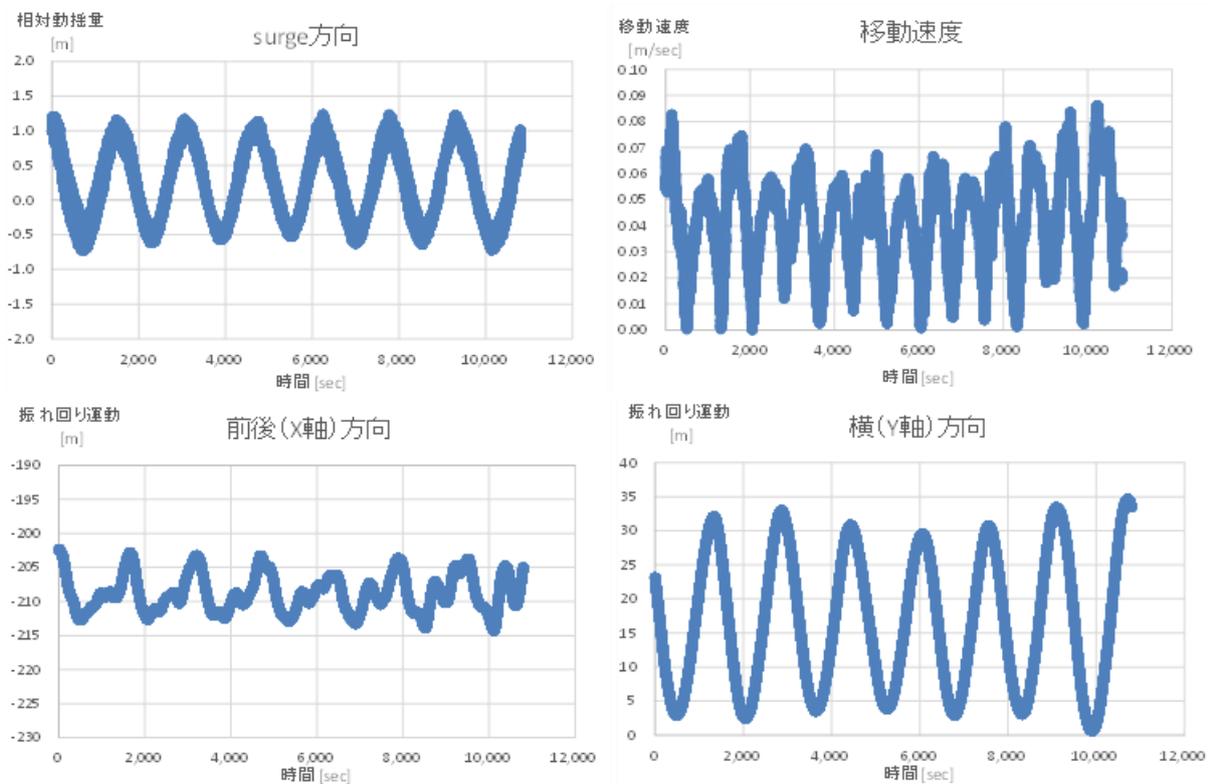


図 1.6.11 2 船間係留時のマニホール位置の相対動揺量と燃料船重心の振れ回り運動：（径 55mm×4 本、風速 6m/sec、波高 1.0m での解析結果）

1.7 結果のまとめ

1.7.1 錨地における 2 船間係留の解析結果

(1) 錨地において安全に LNG を移送できる限界条件

シミュレーションによる解析を行った結果、錨地での 2 船間係留においては、錨鎖に作用する張力や錨把駐力、係留索に作用する張力やフェンダー圧縮力については許容値を超えることはなく 2 船間係留の安全は維持できる。しかしながら、燃料船の振れ回り運動にバンカー船が追従するため、平面方向の相対動揺量（Surge、Sway、Yaw）が許容値を超える場合が見られた。

解析の結果、本検討で設定した評価値全てが許容値を満足した環境条件（風速及び波高の組み合わせ）は、索径と使用する索本数ごとに以下のとおりとなった。

- 索径 55mm×4 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 1.0m 以下のとき
- 索径 48mm×8 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 1.0m 以下のとき
- 索径 37mm×8 本の場合は、風速 5m/sec 以下かつ波高 0.5m 以下のとき

上記は、バラスト状態の自動車運搬船を燃料船として解析した結果に基づくものである。一般に自動車運搬船は、水面下の船体投影面積に対して水面上の船体投影面積が大きく、錨泊中に船体に作用する影響が支配的な風の影響を受けて振れ回り運動が大きくなると考えられる船種であるため、上記結果は他の船種と比べて厳しい条件になると考えられる。

(2) 相対動揺量を抑制するのに有効な係留方法

これまでの一連の検討結果より、錨地バンカリングの安全な実施においては、2 船間の相対動揺量を抑制するための方策が重要であり、そのためには、環境条件の設定のほか、以下の係留方法を採用することが有効であると考えられる。

- ① 係留索は、燃料船デッキ上のボラードを使用するときは、平常時に使用できる索本数（ホーサードラム数）を最大限に活用する
- ② LNG バンカー船が所定の位置・姿勢となるよう、船首側と船尾側の索長をできる限り均等とし前後方向のバランスを取るとともに十分な初期張力をかけて拘束力を確保する
- ③ 索はなるべく水平に取るようにする。水平方向の拘束力を高めるには、バンカー船のムアリングデッキとほぼ同じ高さに設置された燃料船のサンクンビットにバイトにとるのが有効である

1.7.2 相対動揺量に対する許容値について

本検討において、錨地での StS 方式による LNG 移送限界は、燃料船のマニホールド位置における相対運動量に対する許容値（Surge： $\pm 1.0\text{m}$ 、Sway： $+0.75\text{m}$ 、Heave： $\pm 0.5\text{m}$ 、Roll： $\pm 4.0\text{deg}$ 、Pitch： $\pm 2.0\text{deg}$ 、Yaw： $\pm 2.0\text{deg}$ ）以下であることを条件とした。

動揺量に対する上記許容値は、「港内長周期波影響評価マニュアル、平成 16 年 8 月、財団法人 沿岸技術研究センター」において『荷役許容動揺量』として船種ごとに提案されたもの（ここでは「内航タンカー」の許容動揺量を使用）であり、その基となるのは、上田・白石による「港湾荷役における係岸船舶の許容動揺量、1988 年 12 月、港湾技術研究所報告第 27 巻第 4 号」において、一般的な岸壁に係留した船舶を対象とした数値シミュレーションによって求めた荷役許容動揺量の暫定値を港湾荷役関係者に意見照会して修正して得た値とされている。この許容値は、船種ごと船の大きさごとに定められており、係岸荷役中の船舶の安全性や波浪影響に伴う岸壁や棧橋の稼働率を評価する基礎的指標として使用されている。

一方、錨地における 2 船間係留時の相対動揺量に対する適切な許容値が提案されていないため、本検討においては、ガイドライン策定時に実施された平成 25 年度の検討に準拠し、上記の係岸中の荷役許容動揺量（内航タンカー）を用いて評価を行った。

これまでの解析結果より、錨地での 2 船間係留は、燃料船の振れ回り運動にバンカー船が追従するため、岸壁係留中と比べて Surge、Sway、Yaw の平面的な相対運動量が大きくなり、とりわけ Surge の影響が大きくなることがわかった。

上記の荷役許容動揺量は、内航タンカーの係岸・荷役中の許容動揺量を一般化した数値であり、錨地での 2 船間係留時の移送では動揺量に対してより柔軟に対応できるフレキシブルホースが使用されることを考慮すると、今回使用した荷役許容動揺量は安全側に厳しく設定された閾値であるといえる。

1.7.3 錨地での StS 移送限界条件設定について

前述のとおり、風による振れ回り運動が比較的小さくなると考えられるバルク船等については、振れ回りの大きな自動車運搬船をもとにして設定された限界基準の風速 5m/sec を超えても相対動揺量が許容範囲内に収まることも考えられる。

また、前記に示した錨地での移送限界条件は、内航タンカーの係岸・荷役中の荷役許容動揺量に基づくものであり、本来は錨地での 2 船係留を踏まえてフレキシブルホースの仕様（長さ、最大荷重、最小曲げ半径等）や移送方法（クレーン使用の有無等、ホースの吊り上げ位置や高さ）を考慮した適切な許容動揺量を設定することが求められる。

以上のことから、LNG 移送限界条件については、すべての船種に適用可能な全国一律の基準を設定しつつ、バンカリング事業者が計画するバンカー船の大きさや使用する索径や本数、対象となる燃料船の種類等に応じた個別の安全性検討を行って実施可能な移送条件を検討することもあり得る。

