

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 2 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
水槽試験・解析結果

令和 6 年 3 月 8 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	水槽試験	1
2.1	試験施設	1
2.2	模型船, 係船索, 錨鎖, フェンダーの仕様	1
2.3	計測項目及び計測方法	3
2.4	設営	3
2.5	環境条件及び試験条件	6
2.6	試験結果	7
2.6.1	LNG 燃料船が単船の場合	7
2.6.2	バンカー船が接舷した StS 状態の場合	9
2.7	水槽試験まとめ	15

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。そこで本年度は、単錨泊中の LNG 燃料船とそれに接舷したバンカー船の 2 船を対象とした水槽試験や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 水槽試験

2.1 試験施設

本施設の水槽部は長さ 44.5 m、幅 27.1 m、最大水深 2.0 m で付帯設備として曳引台車、規則波及び不規則波の造波が可能な造波装置、潮流発生装置（最大流速 0.3 m/s）及び着脱式の風発生装置（最大風速 12m/s）が装備されている。波、風、流れを同時に発生させることが可能な水槽で、排水することで浅水域の試験も行うことが可能な国内唯一の大型施設である。船舶や海洋構造物も含めた複合外力条件下での動揺試験や荷重計測試験など、多目的利用が可能である。図 3.1 に試験施設の外観を示す。水槽試験では水深を 1.0 m（実機スケールで 70 m 相当）に設定した。

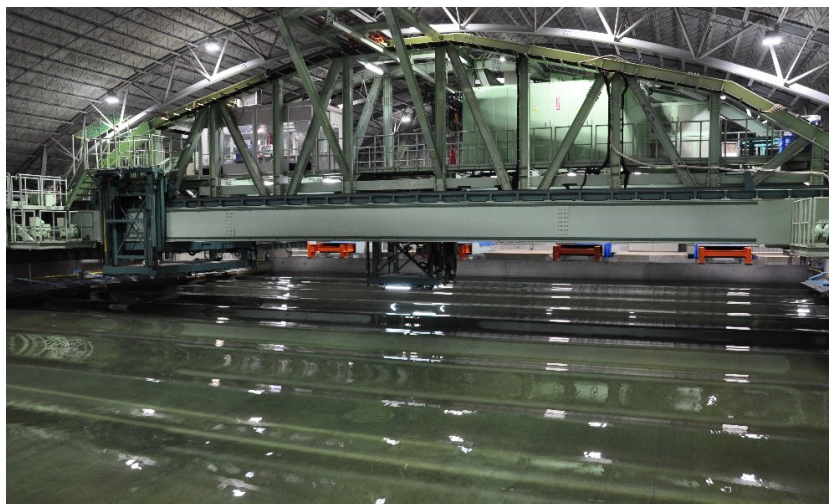


図 2.1 海洋構造物試験水槽で造波中の様子

2.2 模型船，係船索，錨鎖，フェンダーの仕様

今回実施した水槽試験で使用した模型船，係船索，錨鎖，フェンダーの仕様を表 2.2.1 から

表 2.2.4 に示す。数値は全て実機スケールに換算して記載している。LNG 燃料船は PCC 船型、バンカー船は内航 LNG 船型とし、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。重心高さ (KG) やメタセンター高さ (GM) は水槽試験前のウエイト調整時に計測した値、排水量や風圧面積は、新規製作した模型船から算出した値である。係船索はワイヤーとつる巻きばねを用いて線形な特性とした。フェンダーは 2 枚の板ばねを組み合わせることで、非線形な反力特性を模擬した。表 2.2.4 に示す錨鎖は想定実機に近い市販のチェーンを用い、事前に水槽底との摩擦係数計測を行った。

表 2.2.1 模型船の諸元

項目	LNG 燃料船	バンカー船
垂線間長 L_{PP} (m)	196.00	76.20
型幅 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)	26664.82	3314.07
KG (m)	15.14 ※GM から算出	5.94 ※GM から算出
GM (m)	6.26	3.24
横揺れ慣動半径 (m)	$0.45B$	$0.39B$
正面風圧面積 (m ²)	1294.25	250.08
側面風圧面積 (m ²)	6451.37	892.83

表 2.2.2 2 船間係船索の仕様

本数 (本)	4
ヘッドラインのばね定数 (kg/m)	2,601.90
フォアスプリングラインばね定数 (kg/m)	5,439.00
アフトスプリングラインのばね定数 (kg/m)	11,833.50
スターンラインのばね定数 (kg/m)	2,558.45

表 2.2.3 フェンダーの仕様

基数 (基)	2
板ばねのばね定数 (kN/m)	600.25 と 964.81 の組み合わせ

表 2.2.4 錨鎖の仕様

長さ (m)	300.00
単位長さ重量 (kg/m)	152.12
線系 (mm)	98.00
軸剛性 (kN)	2,016,840
水槽底での摩擦係数	0.67

2.3 計測項目及び計測方法

本試験では以下の2状態を計測対象とした。また、水槽試験における計測項目と計測方法を表 2.3.1 に示す。

- LNG 燃料船単独
- LNG 燃料船の左舷に LNG バンカー船を横付け (StS 状態)

なお、計測した時系列データは解析時に波周期成分と長周期成分に分離し、船体の振れ回り運動は長周期成分の振幅、船体動揺は波周期成分の振幅、また、防舷材反力や索張力、錨鎖張力、把駐力については、分離しない時系列データに対する最大値と風速との関係を整理した。

表 2.3.1 計測項目

	計測項目	備考
1	船体運動	非接触型 3 次元挙動計測装置で 2 船の運動を計測
2	係船索張力	索はワイヤー、伸び特性は弦巻ばねにて模擬。張力は 1 軸検力計にて計測
3	防舷材反力	防舷材模型を使用。板バネにて反力特性を模擬。内蔵の検力計にて反力を計測
4	錨鎖張力	錨鎖は模型スケールに換算した単位重量に近い市販チェーンを使用。張力は 3 軸検力計で計測
5	把駐力	防水型 6 軸検力計で計測
6	波高・流速	容量式波高計及び電磁流速計で計測。運動計測中に同時計測を予定

2.4 設営

本試験の座標系及び設営図を図 2.4.1、LNG 燃料船とバンカー船の係船配置を図 2.4.2 に示す。また、水槽施設での設営状況を図 2.4.3 に示す。

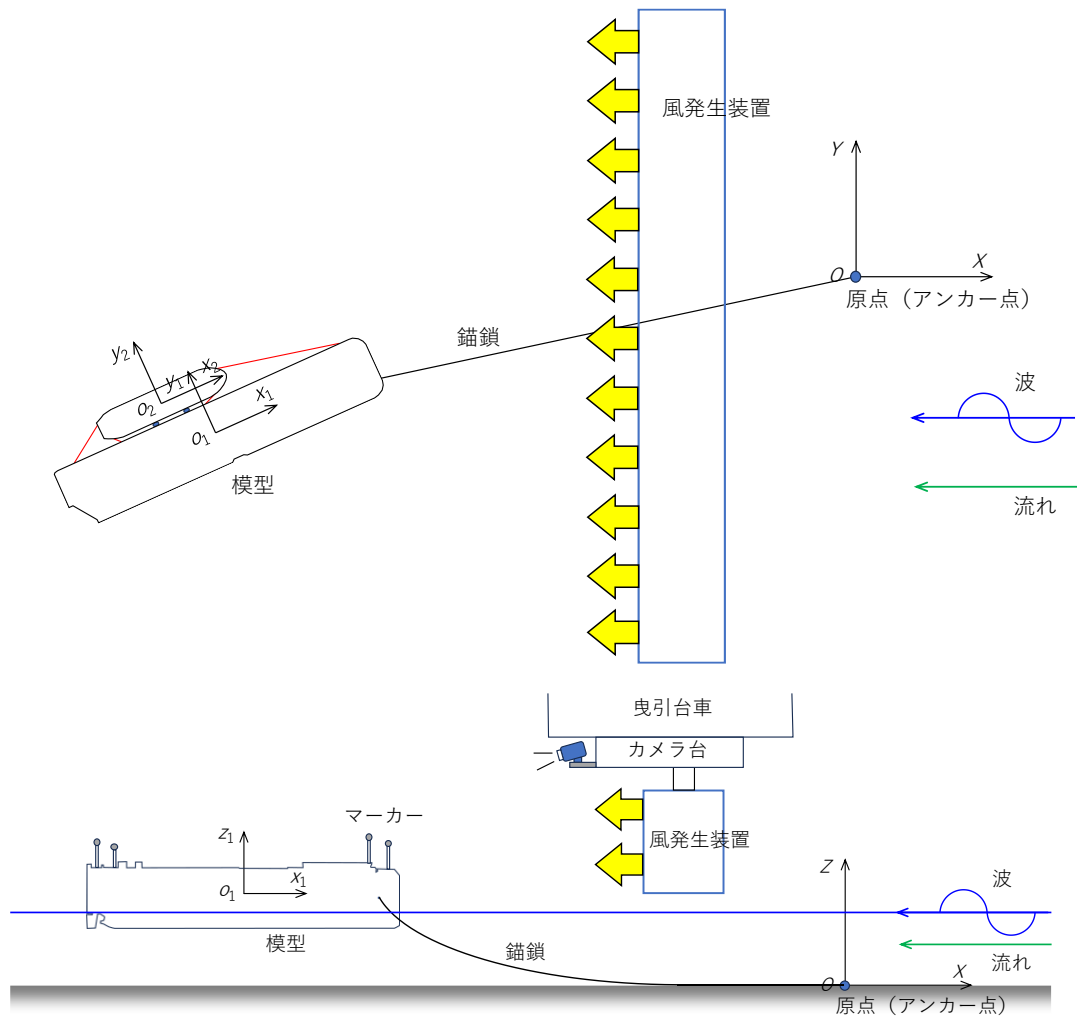


図 2.4.1 水槽試験の座標系及び設営図

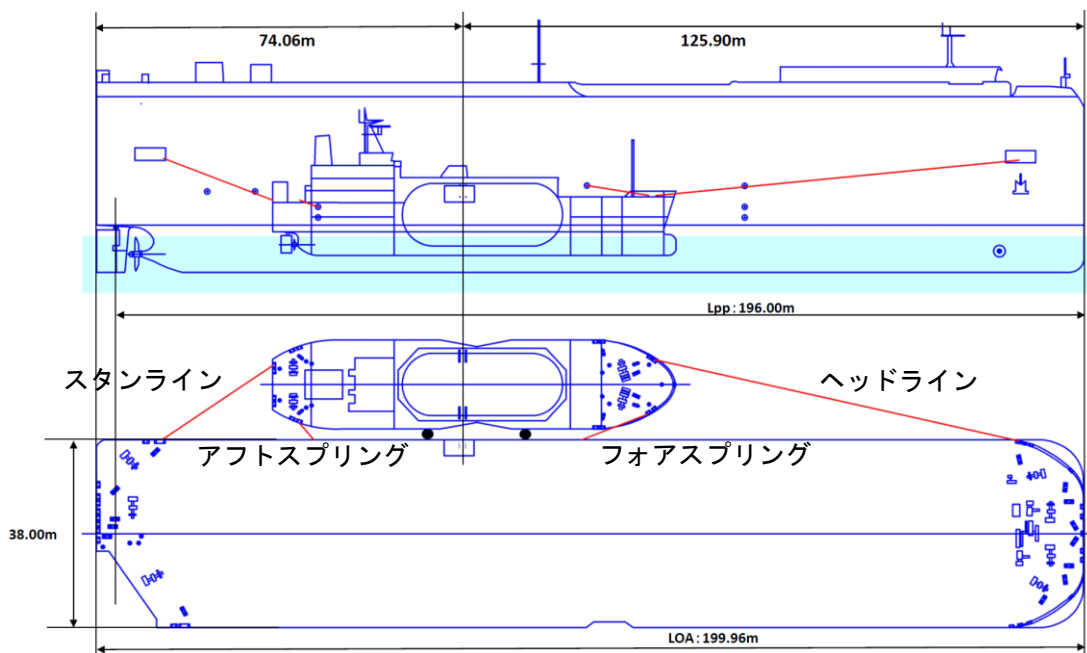
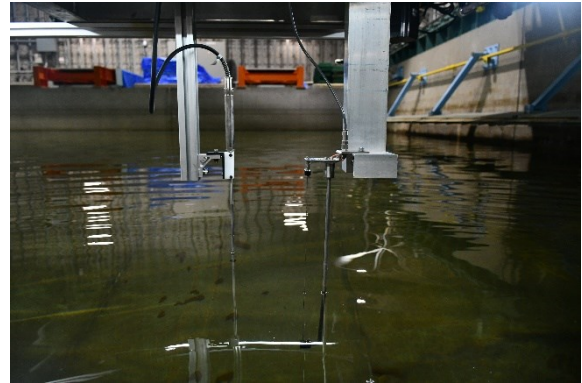


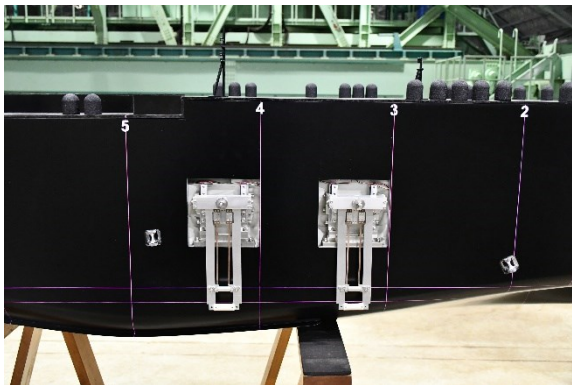
図 2.4.2 LNG 燃料船とバンカー船の係船配置



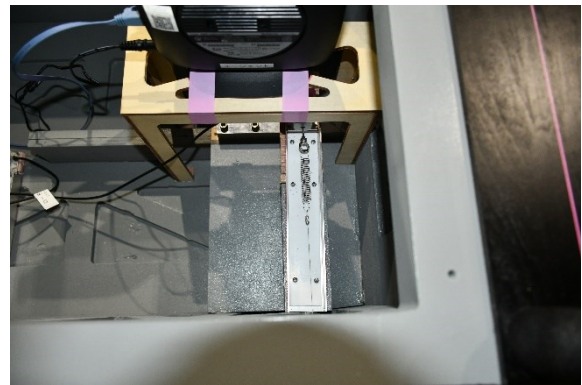
(a) 風発生装置



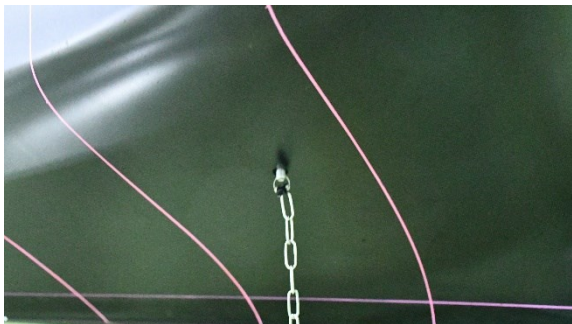
(b) 波高計及び流速計



(c) フェンダー模型



(d) 係船索模型 (ワイヤー及びばね)



(d) 錨鎖模型



(e) アンカー模型



(f) 模型船



図 2.4.3 水槽試験の設営状況

2.5 環境条件及び試験条件

平成 25 年度に実施した検討内容も参考にして、LNG 燃料船単船及び StS 状態における計測条件を設定した。それぞれの計測条件を表 2.5.1 と表 2.5.2 に示す。風、波、流れは試験施設の付帯設備を使用して発生させた。風と流れは定常風及び定常流、波は規則波とし、風と波、流れの方向は全て同一とした。なお、波高は平成 25 年度の条件を参考にしつつ、改めて学術的根拠に従って条件を設定し直す必要があると考え、風速と吹送距離（本検討では 30 km と仮定）に基づく Wilson の波浪推算式により決定した。概ね平成 25 年度の検討で使用した波高条件に近い結果が得られている。また、波周期は水槽施設の造波能力の関係から安定した造波が可能な周期 8.0 sec を中心として、船体運動に対する波周期影響を確認するために 6.0 及び 10.0 sec を追加した。流れは付帯設備で安定した流速が得られる条件とした。

表 2.5.1 LNG 燃料船単船での計測条件（実機スケール）

Case	風速 (m/s)	波高 (m)	波周期 (sec)	流速 (m/s)
1	8.0	—	—	—
4		0.7	8.0	—
2	10.0	—	—	—
5		1.0	8.0	—
3	12.0	—	—	—
6		0.7	8.0	—
7		1.2	8.0	—
8		1.2	8.0	0.84
9		—	—	0.84

表 2.5.2 StS 状態での計測条件（実機スケール）

Case	風速 (m/s)	波高 (m)	波周期 (sec)	流速 (m/s)
1	6.0	0.5	6.0	—
2			8.0	—
3			10.0	—
4	8.0	—	—	—
5		0.7	6.0	—
6			8.0	—
7			10.0	—
8	10.0	—	—	—
9		1.0	6.0	—
10			8.0	0.84
11			8.0	—
12		10.0	—	—
13			10.0	0.84
14	12.0	—	—	—
15		1.2	6.0	—
16			8.0	0.84
17			8.0	—
18		10.0	—	—
19			10.0	0.84

2.6 試験結果

LNG 燃料船が単船の場合とバンカー船が接弦した StS 状態での計測結果を以下に示す。なお、水槽試験は数値計算で必要となるデータの取得や数値計算モデルの検証を主目的として実施しており、以下に示す計測結果には傾向がわかりやすいように想定実機に対する許容値も併記しているが、水槽施設や縮尺模型の制限から環境条件、船体諸元や係船索、フェンダー反力などに関して想定実機のオペレーション環境や諸元、特性を模擬できていない部分もある。そのため、以下の試験結果で想定実機の性能を直接評価できないことにご注意頂きたい。

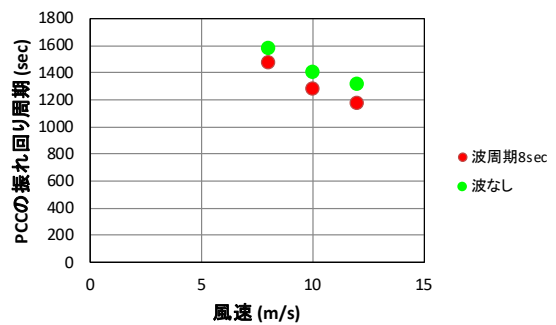
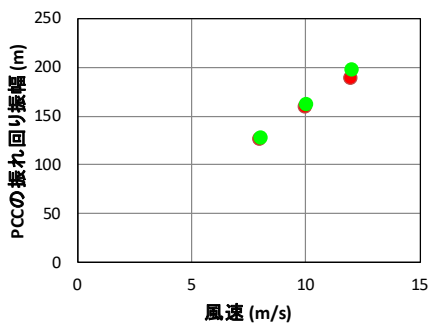
2.6.1 LNG 燃料船が単船の場合

(1) 振れ回り運動

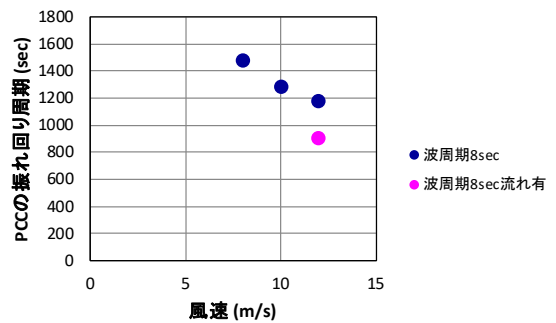
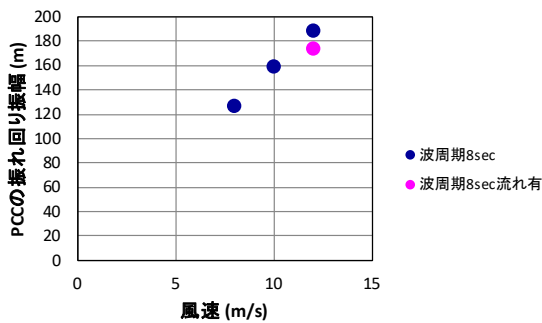
図 2.6.1 に錨泊中 LNG 燃料船の振れ回り振幅及び周期の結果を示す。図中の①に波の有無による比較結果を示しているが、風速が大きくなるに従い、振れ回り振幅は増加し、振れ回り周期は減少する傾向がわかる。風のみの場合と比べて、波があることで振幅と周期は若干小さくなる。

図中の②に流れの有無が振れ回り振幅と周期に及ぼす影響を示す。風と波に加えて流れを伴うことで、LNG 燃料船の振れ回り振幅と周期も小さくなるのがわかる。

① 振れ回り運動に及ぼす波の影響



② 振れ回り運動に及ぼす流れの影響



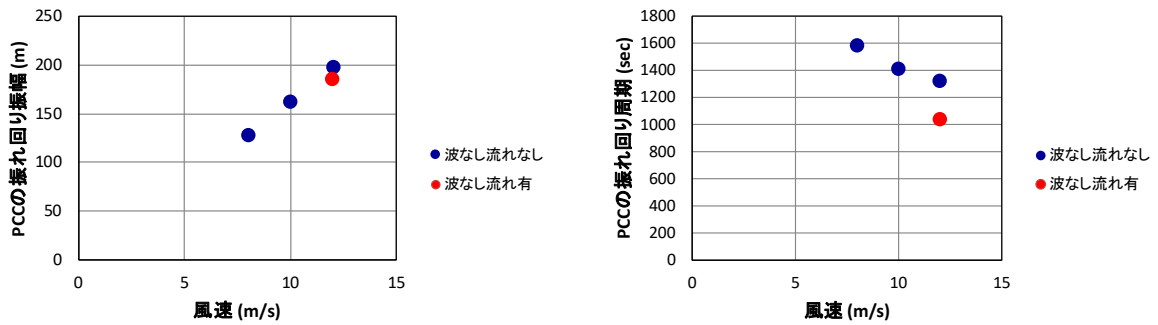


図 2.6.1 LNG 燃料船の振れ回り運動の結果

(2) 錨鎖張力及びアンカー把駐力

図 2.6.2 に錨泊中 LNG 燃料船の錨鎖張力及びアンカー把駐力の結果を示す。図中の①に波の有無による比較結果を示しているが、風速が大きくなり、LNG 燃料船の振れ回り運動が大きくなるに従い、錨鎖張力及びアンカー把駐力も増加する傾向がわかる。但し、図中の太線で示す許容値に比べると十分小さい値であることがわかる。

図中の②に流れの有無が錨鎖張力とアンカー把駐力に及ぼす影響を示す。錨鎖張力もアンカー把駐力も流れの有無による影響は非常に小さい。

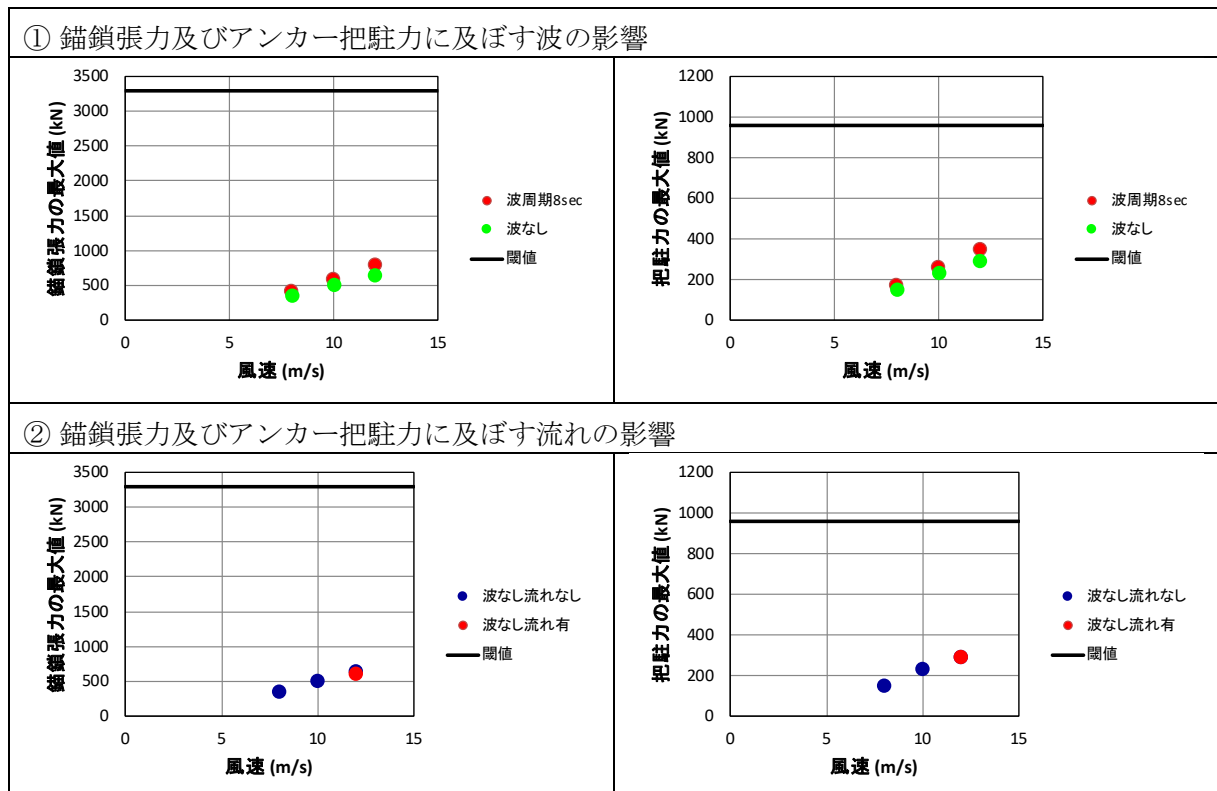


図 2.6.2 錨鎖張力 (左) 及びアンカー把駐力 (右) の結果

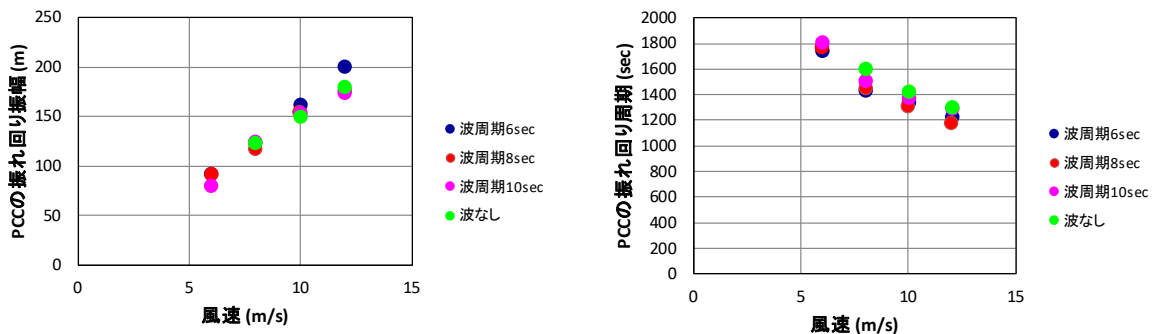
2.6.2 バンカー船が接舷した StS 状態の場合

(1) StS 状態にある LNG 燃料船の振れ回り運動

図 2.6.3 にバンカー船を接舷した StS 状態になる LNG 燃料船の振れ回り振幅と周期の結果を示す。図中の①に波の有無による比較結果を示しているが、単船の場合と同様に風速が大きくなるに従い、振れ回り振幅は増加し、振れ回り周期は減少する傾向がわかる。風のみの場合と比べて、波があることで周期が若干小さくなる。

図中の②に流れの有無が振れ回り振幅と周期に及ぼす影響を示す。風と波に加えて流れを伴うことで、StS 状態にある LNG 燃料船の振れ回り振幅は若干小さくなり、振れ回り周期も小さくなる傾向がわかる。

① StS 状態にある LNG 燃料船の振れ回り運動に及ぼす波の影響



② StS 状態にある LNG 燃料船の振れ回り運動に及ぼす流れの影響

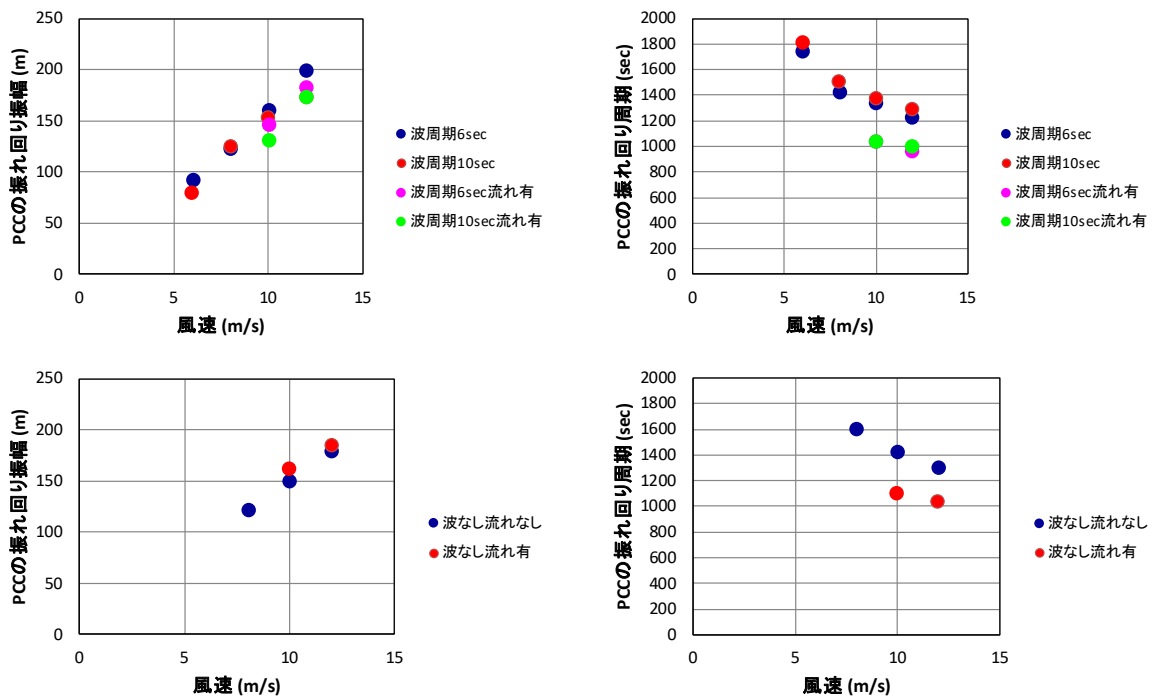


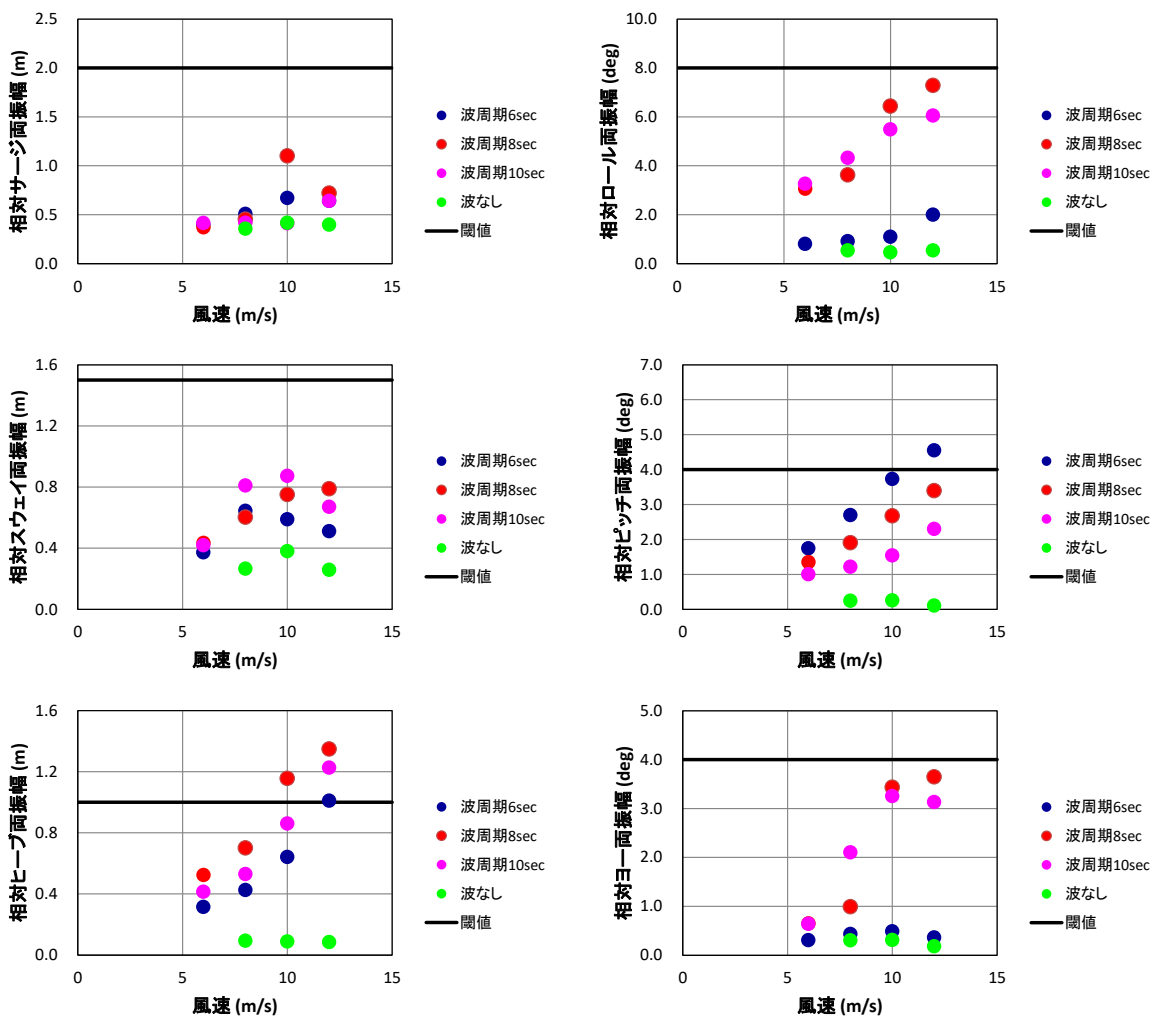
図 2.6.3 StS 状態にある LNG 燃料船の振れ回り振幅及び振れ回り周期の結果

(2) LNG 燃料船に対するバンカー船の相対動揺

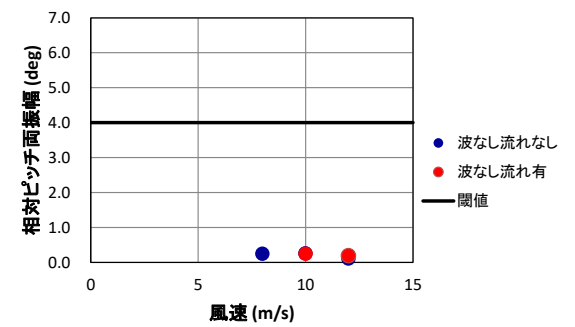
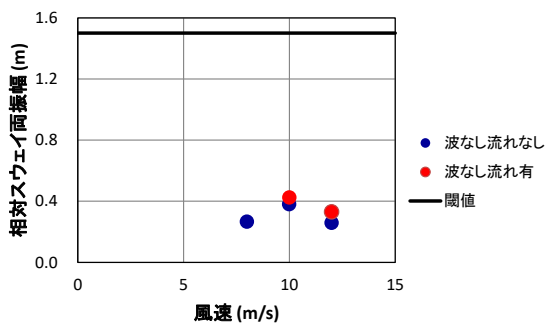
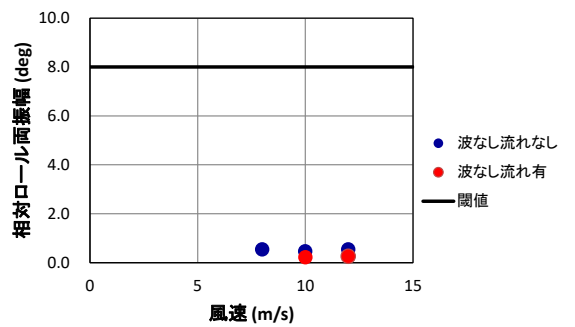
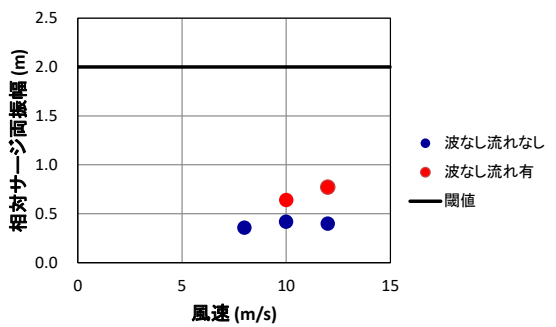
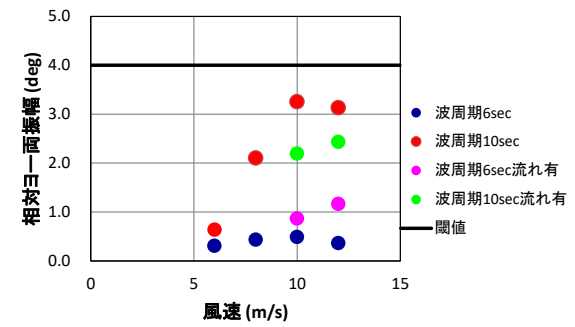
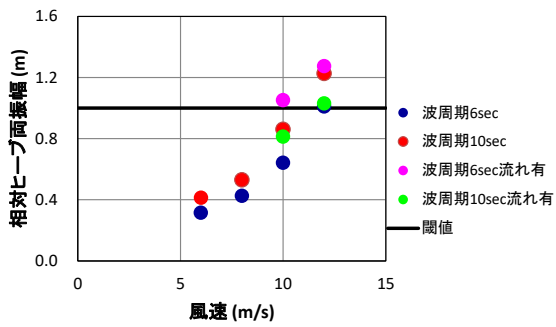
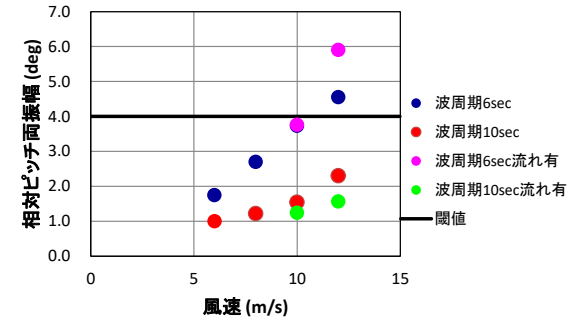
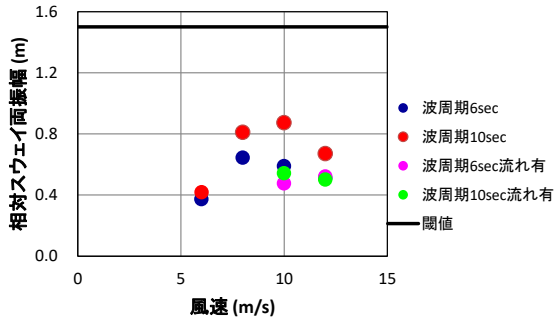
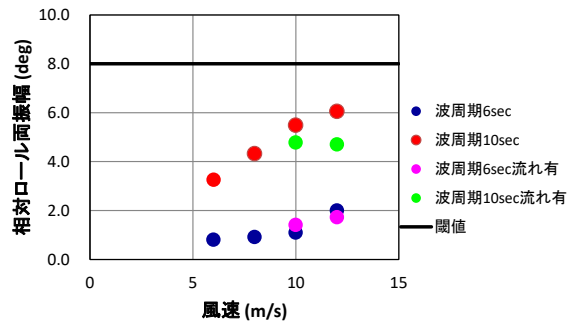
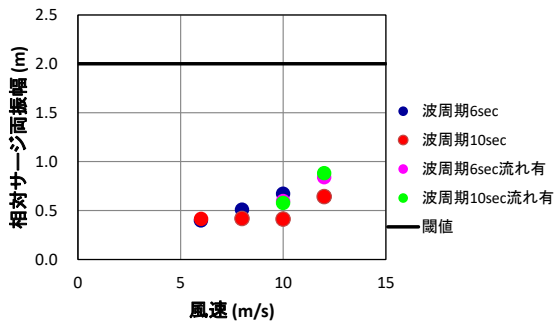
図 2.6.4 に LNG 燃料船に対するバンカー船の相対動揺の結果を示す。図中の①に波の有無による比較結果を示しているが、波周期が短い場合は相対ピッチ運動が大きく、逆に波周期が長い場合は相対ロール運動やヒープ運動、ヨー運動が大きくなる。風速が 10 m/s 以上になるとヒープ運動、ピッチ運動が許容値を超える結果となった。相対サージ、相対スウェイ、相対ヨーも風速よりも波の影響が大きい。

図中の②には流れの有無がバンカー船の相対動揺に及ぼす影響を示す。全体的に相対動揺に対する流れの影響は小さい。

① バンカー船の相対動揺に及ぼす波の影響



② バンカー船の相対動揺に及ぼす流れの影響



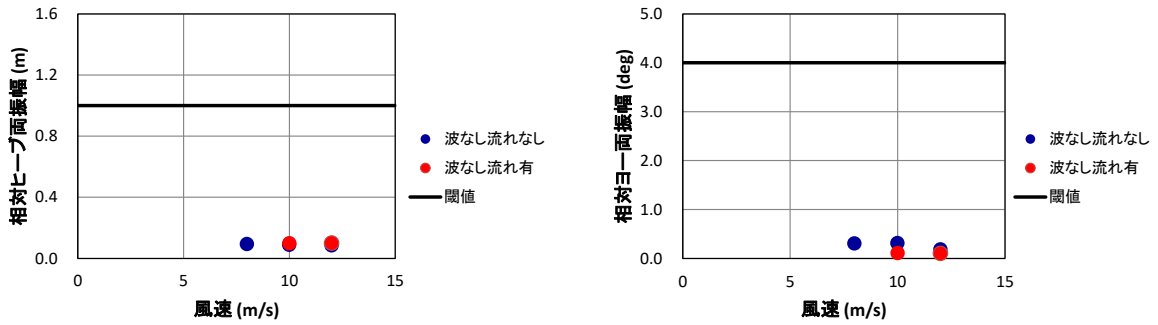


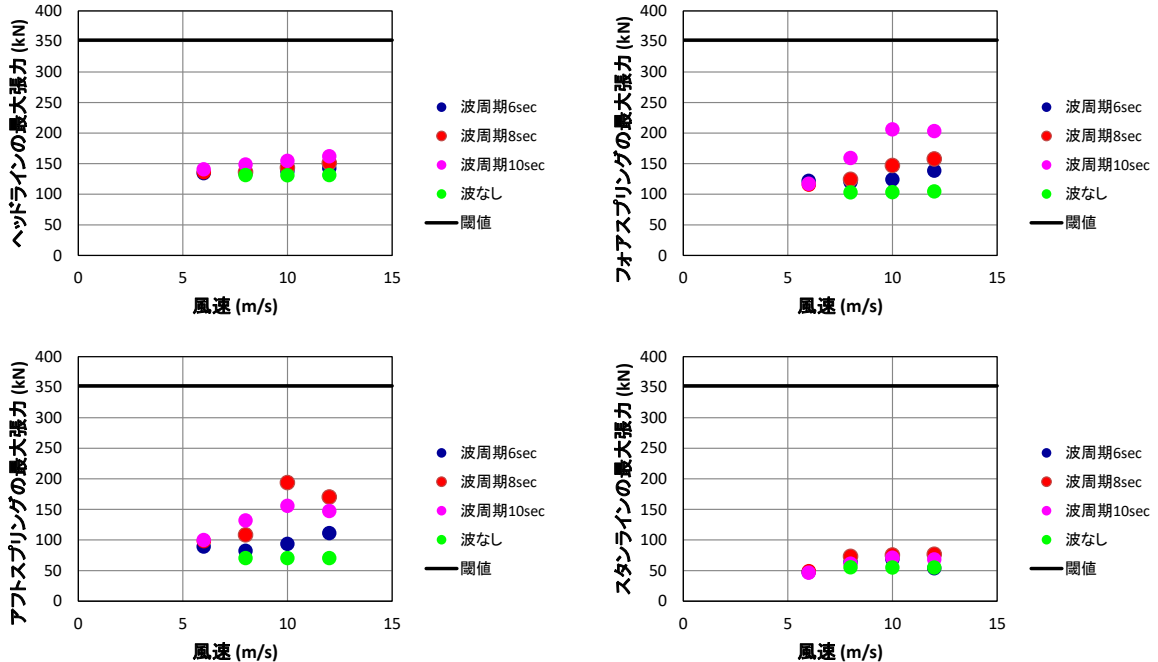
図 2.6.4 LNG 燃料船に対するバンカー船の相対動揺の結果

(3) 2 船間の係船索張力

図 2.6.5 に LNG 燃料船とバンカー船を係船する 4 本の索張力について結果を示す。図中の①に波の有無による比較結果を示しているが、風速の増加に伴い、概ね係船索張力も大きくなる傾向を示す。特にフォアスプリングラインとアフトスプリングラインが波周期に依る変化が大きい、いずれも索張力の許容値に比べると張力は小さく、安全率 2.0 を確保できていることがわかる。

図中の②には流れの有無が 2 船間の係船索張力に及ぼす影響を示す。2 船間の係船索張力に対する流れの有無による影響は小さい。

① 2 船間の係船索張力に及ぼす波の影響



② 2 船間の係船索張力に及ぼす流れの影響

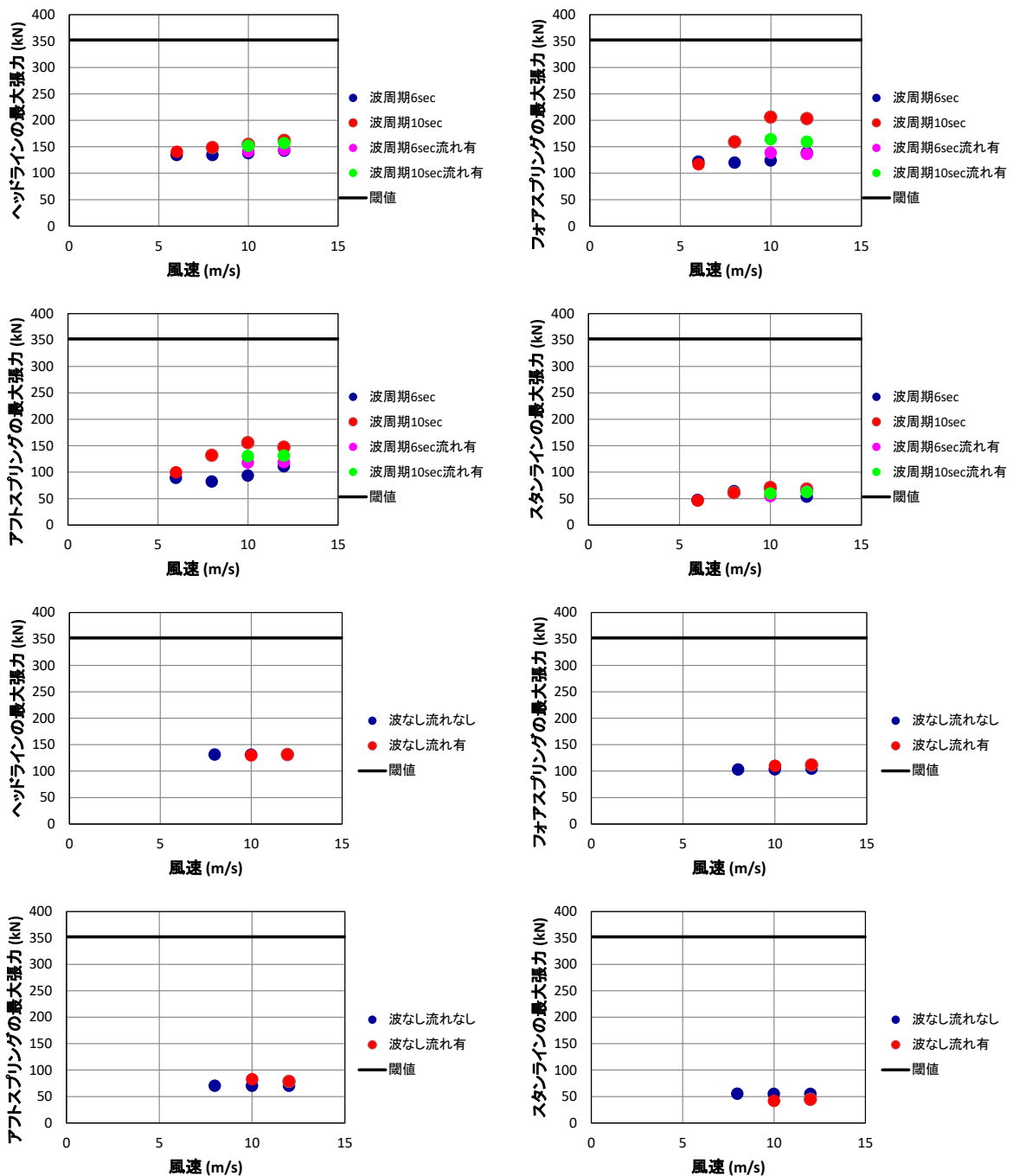


図 2.6.5 係船索張力の計測結果

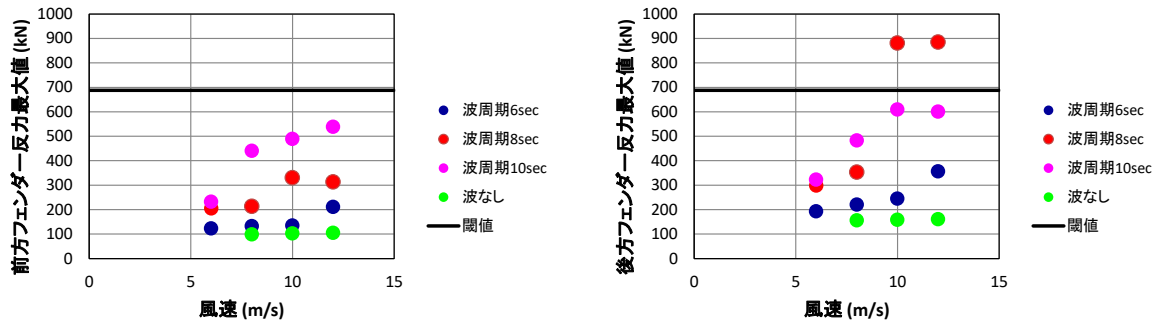
(4) 2 船間のフェンダー反力

図 2.6.6 にフェンダー反力の結果を示す. 図中の①は波の有無による比較結果を表しており, 風速の増加に伴い 2 基のフェンダー反力も大きくなる傾向を示す. 船尾側のフェンダー反力の方が大きく, 風速 10 m/s 以上になると波周期 8 sec の場合に許容値を超える. 錨泊時は波や風の入射方向に船首を向けて船体は振れ回り運動を行うが, StS 状態の場合は, 波によりバンカー船の相対スウェイ運動やヨー運動が発達し, 特に波周期 8 sec の場

合にはバンカー船の相対ヨー運動も大きく、船尾側のフェンダーを強く押し付ける状況にあったと考えられる。

図中の②には流れの有無がフェンダー反力に及ぼす影響を示す。流れがフェンダー反力に及ぼす影響は小さい。

① フェンダー反力に及ぼす波の影響



② フェンダー反力に及ぼす流れの影響

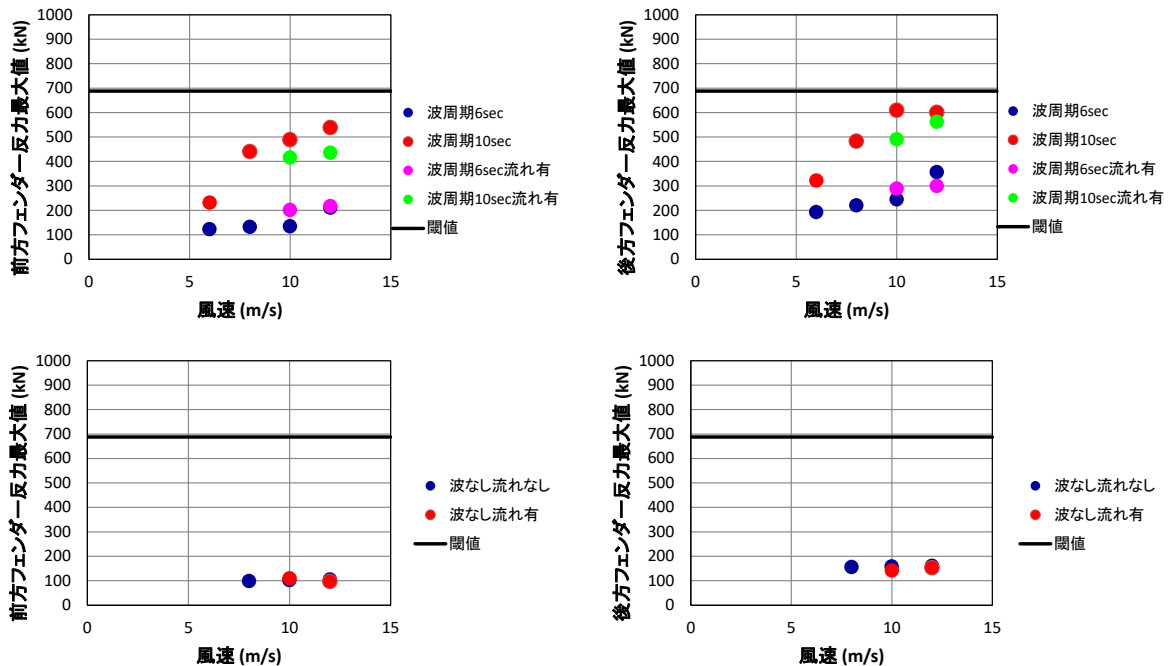


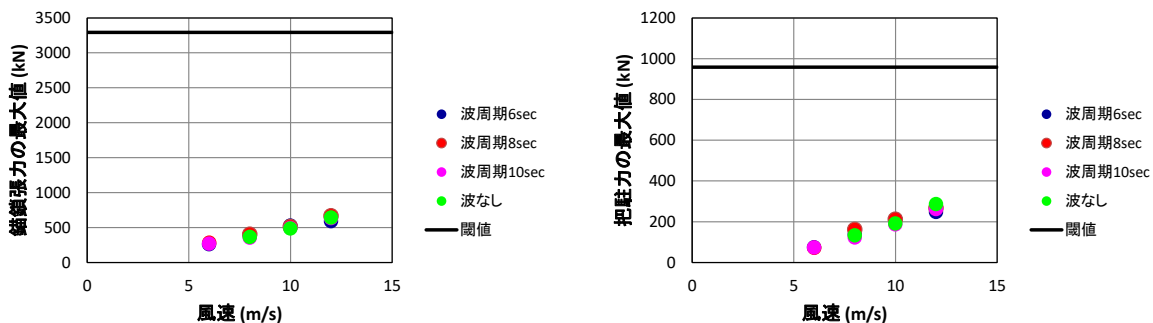
図 2.6.6 フェンダー反力の計測結果

(5) 錨鎖張力及びアンカー把駐力

図 2.6.7 に錨鎖張力及びアンカー把駐力にフェンダー反力の結果を示す。図中の①は波の有無による比較結果を表しており、風速の増加に伴い StS 状態にある 2 船の振り回り運動が大きくなることで、錨鎖張力や把駐力も増加する傾向にあるが、波の有無や波周期による差がほとんど無く、許容値に比べても十分小さい値であることがわかる。

図中の②には流れの有無が錨鎖張力やアンカー把駐力に及ぼす影響を示す。流れが錨鎖張力及びアンカー把駐力に及ぼす影響は小さい。

① 錨鎖張力及びアンカー把駐力に及ぼす波の影響



② 錨鎖張力及びアンカー把駐力に及ぼす流れの影響

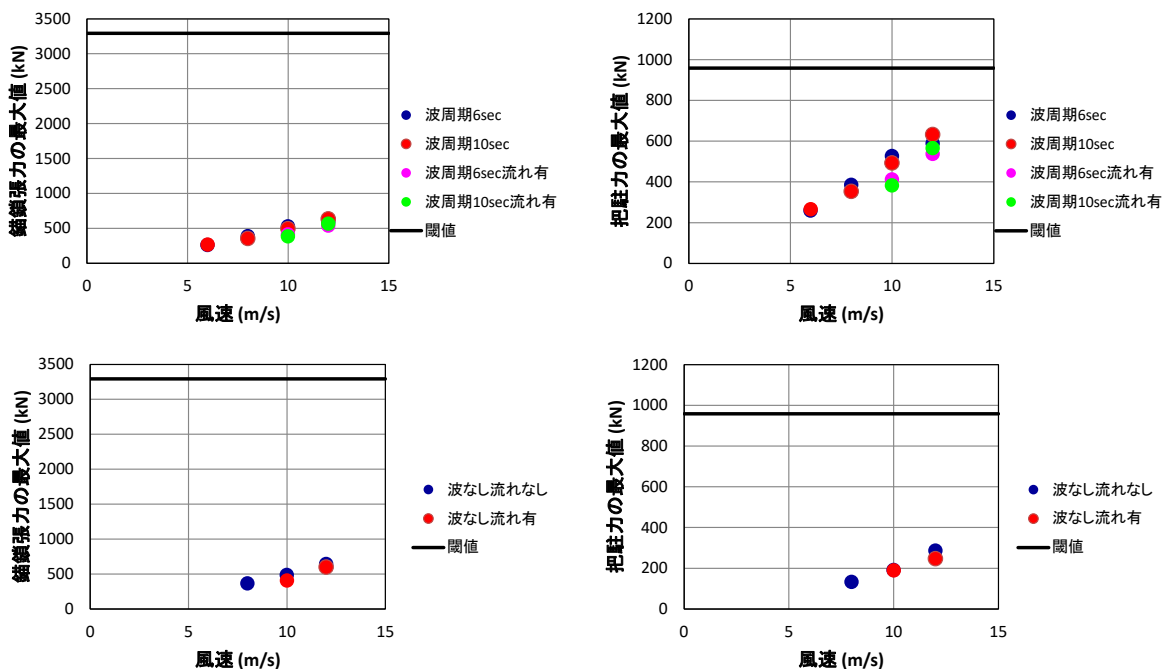


図 2.6.7 錨鎖張力 (左) 及びアンカー把駐力 (右) の計測結果

2.7 水槽試験まとめ

錨泊中の LNG 燃料船とそれに接触したバンカー船の 2 船を対象とした StS 状態での水槽試験を実施した。試験を行った条件下において、次の結果を得た。

- 環境外力のうち、錨泊中の LNG 燃料船（単船や StS 状態に依らず）の振れ回り運動に大きく寄与するのは風である。流れが振れ回り運動に及ぼす影響は小さい。波はバンカー船の相対運動とそれに伴う係船索張力、フェンダー反力に影響を及ぼす。
- 風速 10 m/s 以上の条件において、バンカー船の相対運動（サージ運動、ヒープ運動、ピッチ運動）と後方のフェンダー反力が許容値を超えた。
- 係船索張力や錨鎖張力、アンカー把駐力は許容値に対して小さな値を示した。

錨泊時は波や風の入射方向に船首を向けて船体は振れ回り運動を行うが、StS 状態の場合は LNG 燃料船とバンカー船の間に入射する波により、バンカー船の船首が LNG 燃料船に対し離れる方向にヨー運動が発達し、船尾側のフェンダーを強く押し付ける状況になり、その状態でバンカー船は LNG 燃料船に対し、相対スウェイ運動を行う現象が確認された。相対スウェイは許容値内に収まっているが、バンカー船がフェンダーから離れる場合があり、衝撃的なフェンダー反力が発生して許容値を超える状態が発生している。

ただし、これは縮小した模型縮尺での実験結果であり、実機を再現できていない部分もある。このため、同じ縮小縮尺等の条件での数値計算シミュレーションを行った結果との比較による数値計算モデル検証用に用いるものとし、最終的な評価は、想定実機の縮尺等の条件を模擬した数値計算シミュレーションにより評価するものとする。

