

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 1 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・解析の実施方針（案）

令和 5 年 12 月 20 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	対象船, 係船索及び錨鎖の仕様	1
3	水槽試験	3
3.1	試験施設	3
3.2	計測状態及び計測項目	4
3.3	計測条件	6
3.3.1	環境条件	6
3.3.2	係船索及び錨鎖	7
4	数値計算	8
4.1	計算条件	8
4.1.1	環境条件	8
4.1.2	係船索及び錨鎖	9
4.1.3	検討フロー及び評価項目	9
5	参考文献	11

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。本年度の検討では単錨泊中の 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、その運用限界条件を検討するとともに平成 25 年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。具体的には、錨泊中の安全なバンカリングに必要な錨の把駐力、係船索、防舷材等の要件を検討する。

2 対象船、係船索及び錨鎖の仕様

本検討で対象とする LNG 燃料船とバンカー船の諸元を表 2.1 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、水槽試験用に新規製作する模型船の形状に基づき算出した値である。

表 2.1 対象船の諸元

項目	LNG 燃料船	バンカー船
垂線間長 (m)	196.00	76.20
型幅 (m)	38.00	18.00
型深さ (m)	14.23	7.80
喫水 (m)	7.30	3.93
排水量 (ton)	27,312.36	3,424.94
GM (m)	7.95	3.30
正面投影面積 (m ²)	1307.32	270.92
側面投影面積 (m ²)	6451.37	902.69

図 2.1 に LNG 燃料船とバンカー船の係船配置を示す。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係船する。係船には直径 48 mm の合成繊維索を 4 本使用し、2 船間にはバンカー船が所有する直径 2 m、長さ 3 m のフォーム式防舷材を 2 基使用する。係船索と防舷材の仕様を表 2.2 及び表 2.3 に示す。

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) ³⁾を参考にして 135 m とする。錨及び錨鎖の仕様を表 2.4、表 2.5 にそれぞれ示す。

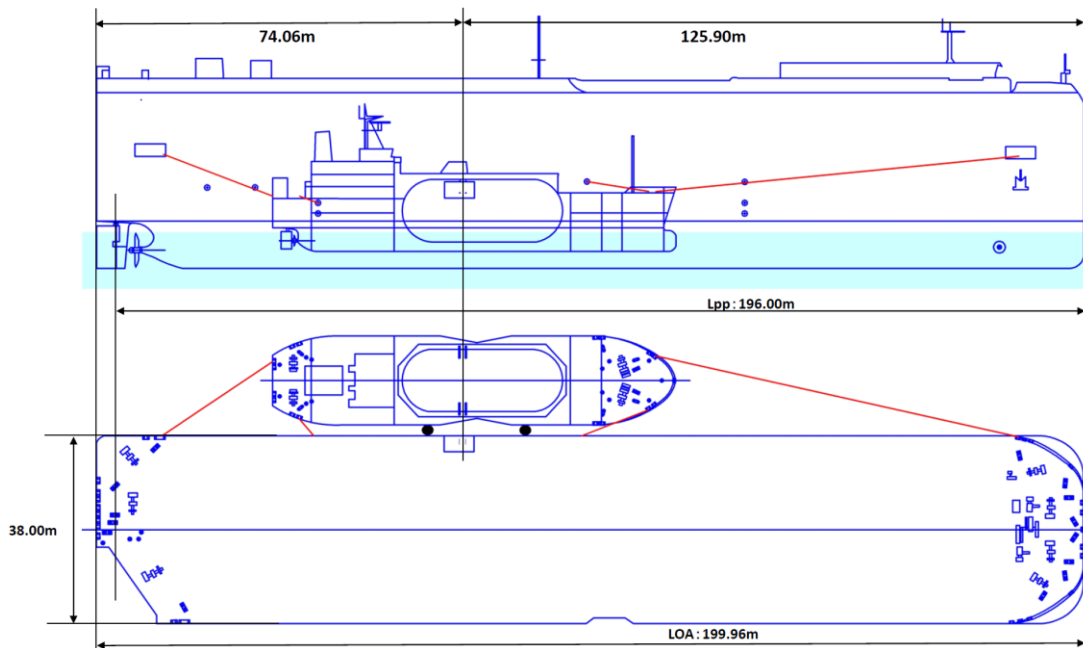


図 2.1 LNG 燃料船とバンカー船の係船配置

表 2.2 2 船間係船索の仕様¹⁾

種類	CE コンパウンド
索径 (mm)	48
単位質量 (kg/m)	1.33
最小破断荷重 (kN)	352
本数 (本)	4

表 2.3 防舷材の仕様²⁾

種類	フォーム式防舷材
直径 (mm)	2,000
長さ (mm)	3,000
設計たわみ率 (%)	60
反力 (kN) ※ 60 %たわみの場合	688

表 2.4 錨の仕様

タイプ	AC-14 型ストックレスアンカー
重量 (kg)	9,225

表 2.5 錨鎖の仕様

グレード	G3
スタッド有無	スタッド有り
系 (mm)	87.0
1 シャックル長さ (m)	27.5
1 シャックルの空中重量 (kg)	4,670
シャックル数量 ※ 錨鎖長 135 m の場合	4.9
最小破断荷重 (kN)	5,500

3 水槽試験

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽において、新たに製作する縮尺 1/70 模型を用いた水槽試験を実施する。実施期間は準備、設営/撤去も含めて令和 5 年 12 月 18 日（月）から令和 6 年 1 月 26 日（金）までの予定とし、水槽試験の目的は以下とする。

- 錨泊中における 2 船体バンカリングの現象把握（船体運動，係留力等）
- 数値計算で必要となるデータの取得
- 数値計算モデルの検証用データの取得

3.1 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 及び図 3.2 に試験施設と風発生装置の外観を示す。



図 3.1 海洋構造物試験水槽で造波中の様子



図 3.2 多連式ファンによる風発生装置

3.2 計測状態及び計測項目

事前計測での計測項目を表 3.1 に示す。LNG 燃料船とパンカー船模型の艤装完了後、喫水及び重心位置を合わせるためにウエイトを積み付け、傾斜試験により GM を調整する。その後、数値計算で使用する 2 船の粘性減衰係数を取得するために、自由動揺試験を実施する。また、風発生装置と模型船の距離を決定するために、風発生装置後流の風速分布を計測したのち、2 船に作用する風荷重の計測を行う。

表 3.1 事前計測項目

	計測項目	備考
1	GM	喫水の調整後、傾斜試験により所要の GM に合うようにウエイトの配置を調整
2	慣動半径	ウエイト配置の決定後に Roll の慣動半径を計測
3	粘性減衰係数	自由動揺試験により Roll, Pitch, Heave 成分を計測
4	風速分布	風速計にて風発生装置後流の風場を計測
5	風荷重	張力計を介したワイヤーで模型船を四方へ係留し、風圧下で作用する張力から模型に働く風荷重を計測。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、計測後 2 船の係船索張力と防舷材反力を用いて各船に作用する荷重に分離する。

本試験では以下の 2 状態を計測対象とする。また、水槽試験における計測項目と水槽の設営を表 3.2 及び図 3.3 に示す。また、使用する模型船と係船のイメージを図 3.4～図 3.6 に示す。

■ LNG 燃料船単独

■ LNG 燃料船の左舷に LNG パンカー船を横付け (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、把駐力は分離しない時系列データに対する最大値について、風速との関係性を評価する。

表 3.2 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

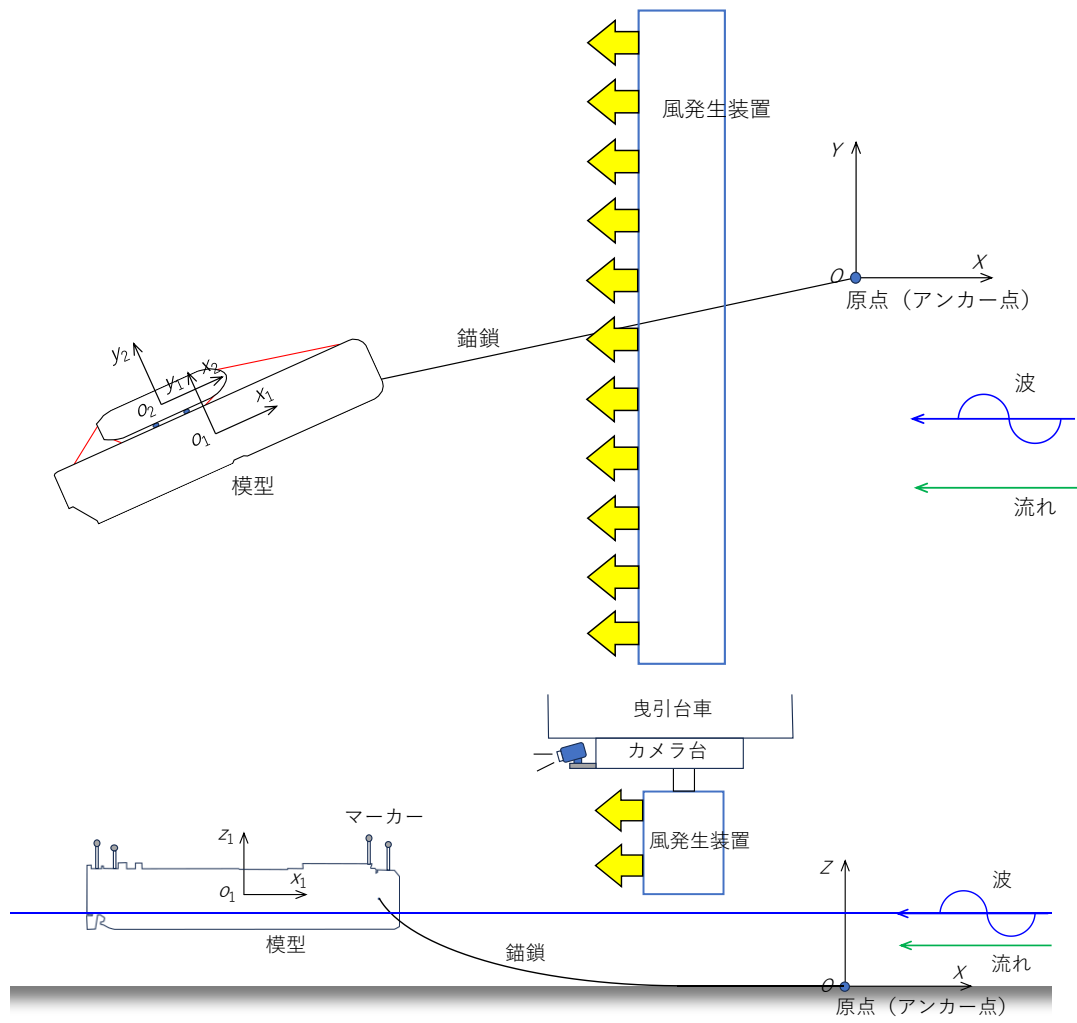
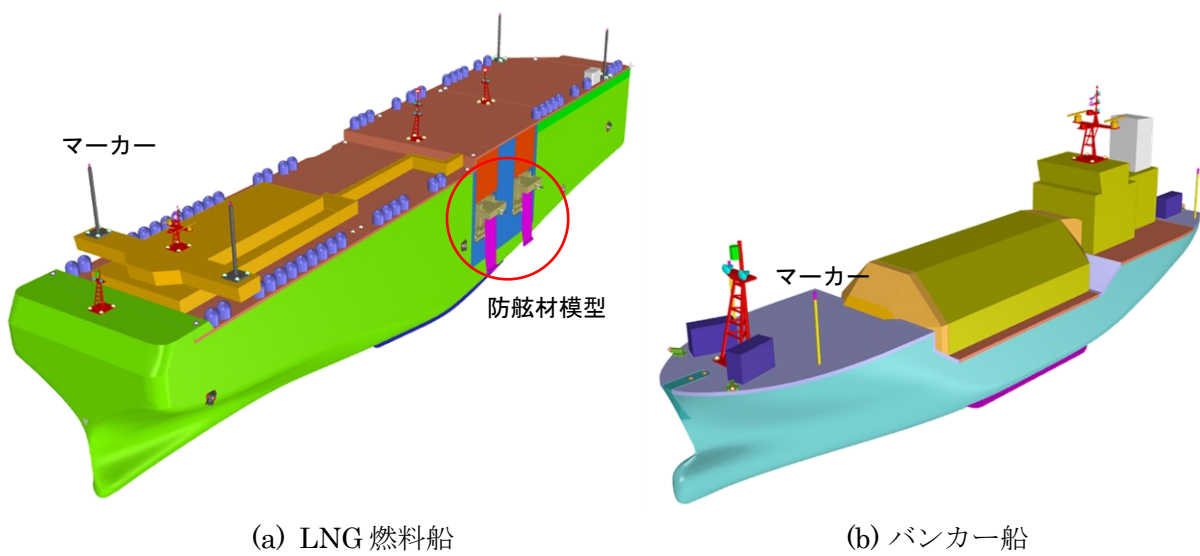


図 3.3 水槽設営



(a) LNG 燃料船

(b) バンカー船

図 3.4 LNG 燃料船及びバンカー船模型の外観イメージ

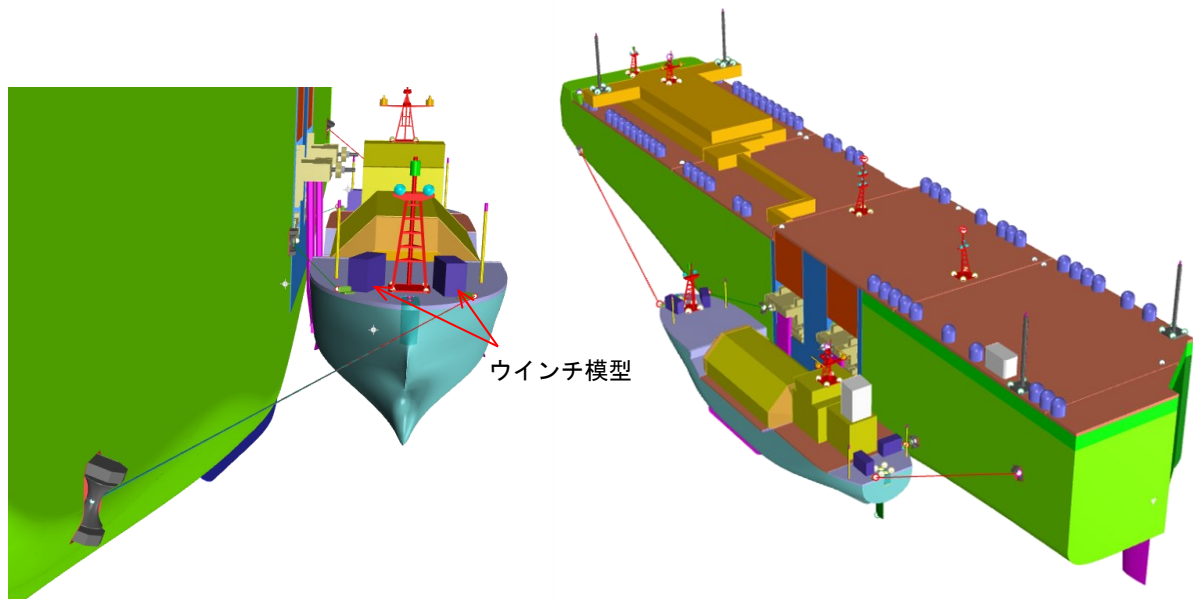


図 3.5 LNG 燃料船及びバンカー船模型の係船イメージ

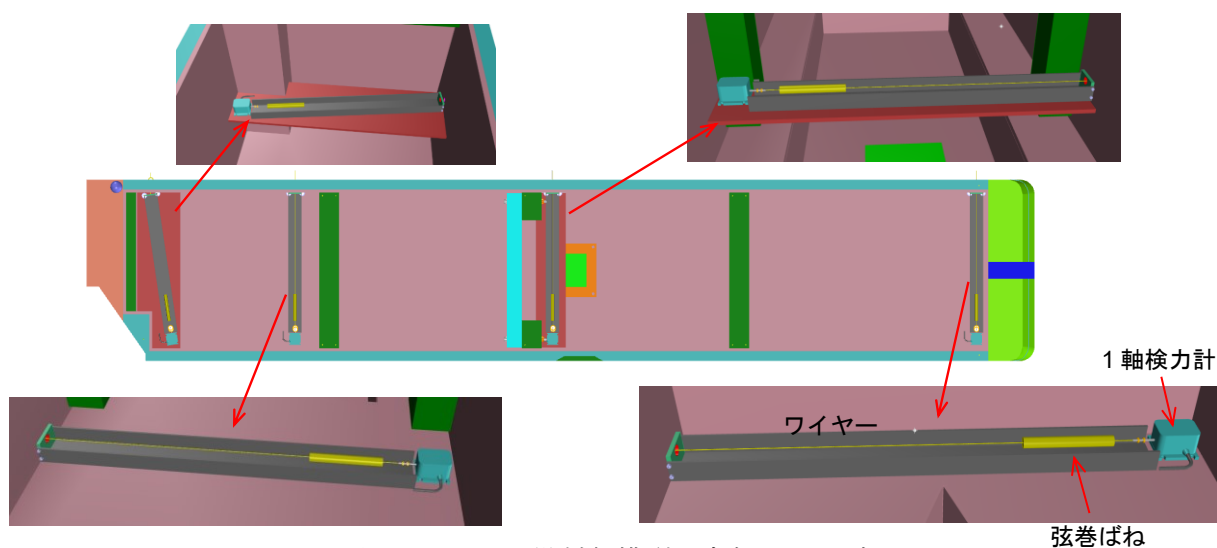


図 3.6 LNG 燃料船模型の内部イメージ

3.3 計測条件

3.3.1 環境条件

平成 25 年の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 3.3 と表 3.4 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る。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する。なお、波高は平成 25 年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⁴⁾により決定した。概ね平成 25 年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 3.3 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	—	—	—
2	10.0	—	—	—
3	12.0	—	—	—
4	8.0	0.7	8.0	—
5	10.0	1.0	8.0	—
6	12.0	1.2	8.0	—
7	Case4~6 の中で 1 条件を選択			0.84

表 3.4 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	8.0	—	—	—
2	10.0	—	—	—
3	12.0	—	—	—
4	8.0	0.7	6.0	—
5			8.0	—
6			10.0	—
7	10.0	1.0	6.0	—
8			8.0	—
9			10.0	—
10	12.0	1.2	6.0	—
11			8.0	—
12			10.0	—
13	Case4~12 の中で運用可能な最も厳しい条件を選択			0.84

3.3.2 係船索及び錨鎖

係船索については，OCIMF のガイドライン⁵⁾に基づき，最小破断荷重の 10 %（本検討では 35.2 kN）を目安として初期張力をかける．その際，平成 25 年の検討条件を参考にして防舷材の 2 % 圧縮を想定し，バンカー船が LNG 燃料船に対して所要の位置及び姿勢（図 2.1 参照）となるように初期張力のバランスを考慮する．表 3.5 に初期張力の事前検討の結果を示す．

また，水深と錨鎖長の条件を表 3.6 に示す．水槽試験での水深は安定した造波が可能な 1.0 m（実機スケールで 70 m）とし，LNG 燃料船の錨鎖長は通常天候状態での索長³⁾に基づき，実機スケールで 300 m とする．水槽試験で使用するチェーンと水槽底との摩擦係数は別途計測して求める．

表 3.5 2 船間係船索の初期張力バランス (実機スケール)

ヘッドライン	35.2 kN
船首スプリングライン	25.6 kN
船尾スプリングライン	13.5 kN
スタンライン	19.5 kN

表 3.6 水深及び錨鎖長 (実機スケール)

水深	70 m
錨鎖長	300 m
水槽底との摩擦係数	計測

4 数値計算

表 3.3 及び表 3.4 に示す LNG 燃料船単船と StS 状態での試験条件，水深及び錨鎖長と同条件にて計算を行い，水槽試験結果との比較で計算モデルの精度検証を行う．検証後のモデルを用いて，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

4.1 計算条件

4.1.1 環境条件

表 4.1 に示す条件にて数値計算を行う．風は Davenport のスペクトル⁶⁾による変動風，流れは定常流（水深方向に 1/7 乗則にて流速分布を考慮），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，流れの方向は全て同一とする．なお，波高と波周期は水槽試験の条件設定と同じ理由で学術的根拠に従って条件設定を行うため，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⁴⁾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．また，流れは日本海洋科学館が実施予定の操船シミュレータ実験における流速条件（1.0 kt 相当）に合わせた．

表 4.1 StS 状態での計算条件

Case	平均風速 (m/s)	有義波高 (m)	スペクトルピーク波周期 (sec)	表層流速 (m/s)
1	8.0	0.7	3.3	—
2	10.0	1.0	3.7	—
3	12.0	1.2	4.0	—
4	15.0	1.6	4.5	—
5	Case1~4 の中で運用可能な最も厳しい条件を選択			0.51

4.1.2 係船索及び錨鎖

係船索については、水槽試験と同様に初期張力のバランス（表 3.5 参照）を考慮する。水深と錨鎖長の条件を表 4.2 に示す。錨泊地の水深は 15.0 m と仮定し、LNG 燃料船の錨鎖長は通常天候状態での索長³⁾に基づき 135 m とする。錨鎖の摩擦抵抗係数には底質が泥と仮定して 1.0^{3),7)}を使用する。

表 4.2 水深及び錨鎖長

水深	15 m
錨鎖長	135 m
海底との摩擦抵抗係数（泥）	1.0

4.1.3 検討フロー及び評価項目

数値計算の検討フローを図 4.1 に示す。また、運用条件を検討するための評価項目と各閾値を表 4.3 に示す。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、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、船体運動や防舷材反力、把駐力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)⁸⁾により評価する。MPM 値は (4.1) 式で表される。また、係船索張力や錨鎖張力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。

$$\text{MPM value} = \mu + \sigma\sqrt{2\ln(n)} \quad (4.1)$$

但し、 μ は平均値、 σ は標準偏差、 $n(=T/T_2)$ はピークの数、 T_2 はアップクロス平均波周期を表す。

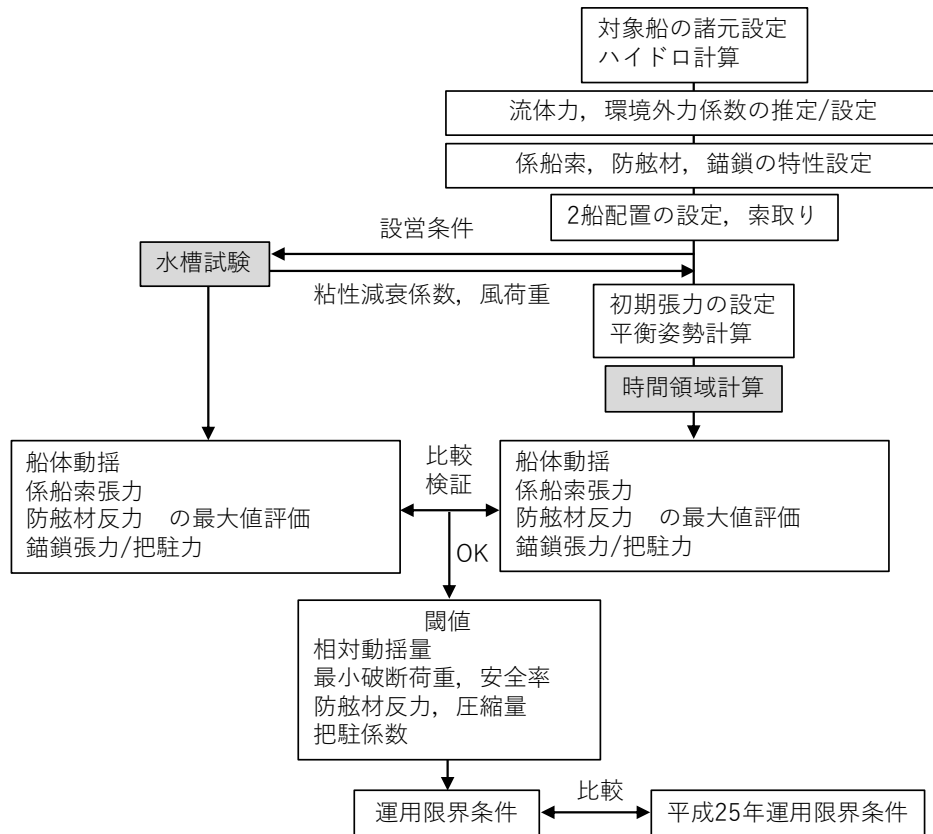


図 4.1 数値解析の検討フロー

表 4.3 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	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 ⁹⁾
係船索張力	安全率 2.0	OCIMF ⁵⁾ 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 ²⁾ . LNG 燃料船とバンカー船が 離れる場合 (防舷材反力が 2 基とも 0 kN) は不可.
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 ⁸⁾
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 ³⁾

5 参考文献

- 1) 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.
- 2) Trelleborg：フォーム式防舷材カタログ，2021.
- 3) 海難防止協会：走錨海難の防止対策，海と安全，No. 579 (53 巻)，2018.
- 4) 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.
- 5) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF)：Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition (MEG3)，2008.
- 6) 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.
- 7) 本田啓之輔：操船通論 (6 訂版)，成山堂書店，2001.
- 8) 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.
- 9) 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.

