

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1372 June 2020

荷役限界波高に基づく離島港湾における
船舶の係留方式の評価

米山 治男

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 研究内容	4
3. 荷役限界波高の算定方法	4
3.1 対象港湾	4
3.2 係留船舶の動揺シミュレーション	5
3.3 荷役限界波高の算定	7
4. 係留ブイによる船舶係留方式の荷役限界波高	9
4.1 概要	9
4.2 船舶の最大動揺量および係留索の最大張力	9
4.3 荷役許容動揺量等の限界値の設定	14
4.4 荷役限界波高の比較	15
5. 新たな船舶の係留方式の考案	18
5.1 概要	18
5.2 係留ブイを用いない船舶係留方式の検討	18
5.3 高強度ワイヤによる船舶係留方式の評価方法	20
6. 高強度ワイヤによる船舶係留方式の荷役限界波高	21
6.1 概要	21
6.2 船舶の最大動揺量および係留索等の最大張力	21
6.3 荷役許容動揺量等の限界値の設定	24
6.4 荷役限界波高の比較	25
7. 高強度ワイヤによる船舶係留方式の現地適用性	27
8. 結論	28
9. おわりに	28
謝辞	29
参考文献	29

Evaluation of Mooring Methods for a Ship in Remote Island Ports Based on Allowable Wave Heights

Haruo YONEYAMA*

Synopsis

In this study, I carried out the simulation of oscillation for a ship moored using mooring buoys subjected to wave forces in the ports of Nanboku-Daito Islands. I then evaluated the effects of the mooring method by calculating the allowable wave heights of the moored ship based on the simulation results. In addition, I devised a new mooring method for a ship using a high-strength wire instead of the mooring buoys in order to improve cargo handling efficiency. I also confirmed its effectiveness based on the allowable wave heights obtained by the simulation of oscillation for a moored ship. The main conclusions of this study are as follows:

- 1) In the ship mooring method using mooring buoys and the cargo handling method using a mobile crane adopted in the ports of Nanboku-Daito Islands, the allowable wave heights of a moored ship tend to be higher than those of the usual cargo handling and mooring methods using fenders and bollards.
- 2) It is possible to calculate the allowable wave heights more accurately by setting the allowable ship motions by referring to the cargo handling and mooring situation of a ship on site and by considering the limit values for mooring rope tensions in addition to the allowable ship motions.
- 3) For the new ship mooring method using a high-strength wire, it is possible to ensure the same allowable wave heights as the current ship mooring method using mooring buoys by appropriately setting the separation distance between the ship and the high-strength wire.

Key Words: remote island port, moored ship, mooring method, allowable wave height, simulation of oscillation

* Director, Coastal and Ocean Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute (PARI)
Phone : +81-46-844-5114 e-mail: yoneyama@p.mpat.go.jp

荷役限界波高に基づく離島港湾における船舶の係留方式の評価

米山 治男*

要 旨

本研究では、南北大東島の港湾を対象として波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションを実施することにより、係留ブイを用いて係留された船舶の荷役限界波高を算定し、その係留方式の効果を評価した。また、荷役効率を向上させることを目的として、係留ブイの代わりに高強度ワイヤによる新たな船舶の係留方式を考案し、船体動揺シミュレーションで得られた荷役限界波高に基づいてその有効性を確認した。本研究の主な結論は、以下の通りである。

- 1) 南北大東島において採用されている係留ブイによる船舶の係留方式および移動式クレーンによる荷役方式では、通常防舷材と係船柱を用いた係留方式および荷役方式よりも係留船舶の荷役限界波高が大きくなる傾向にある。
- 2) 現地での船舶の荷役係留状況を参考にして荷役許容動揺量を設定し、荷役許容動揺量に加えて係留索の張力に対する限界値も考慮する方がより正確に荷役限界波高を算定することができる。
- 3) 高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式については、船舶と高強度ワイヤとの離隔距離を適切に設定することにより、係留ブイを用いた現状の船舶の係留方式と同等の荷役限界波高を確保することが可能である。

キーワード：離島港湾，係留船舶，係留方式，荷役限界波高，動揺シミュレーション

* 海洋研究領域長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5114 e-mail: yoneyama@p.mpat.go.jp

1. はじめに

沖縄本島の東方に位置する南北大東島の港湾では、外洋に取り囲まれた非常に厳しい海象状況や島の周囲の急峻な海底地形の影響により防波堤が整備されておらず、係留施設は外洋波浪の影響を直接受ける。このため、係留施設への船舶の接岸・係留時には、岸壁上の係船柱と沖合に設置された係留ブイを用いた特殊な係留方式を採用している。この係留ブイへの船舶からの綱取りは、港湾に配備された小型船の乗組員により実施されており、このことが船舶の荷役効率の低下にも影響している。そこで、係留船舶の荷役効率を向上させるような新たな船舶の係留方式を開発することが期待されている。しかしながら、現在まで、厳しい海象条件下にある離島港湾において、一般的に就航している貨物船などの船舶に対する新形式の係留方式について検討された事例はないのが現状である。

係留船舶の荷役効率を評価する際には、一般的に荷役限界波高や荷役稼働率という指標が用いられる。荷役稼働率は、対象岸壁の前面における波浪の出現頻度と荷役限界波高から求められるものであり、特定地点の海象条件の影響を受ける。一方、荷役限界波高は、対象地点の海象条件を考慮することなく、係留船舶自体の荷役の安全性を推定するものであり、船舶の係留方式を評価する場合に有効な指標である。通常、荷役限界波高は、係留船舶の動揺シミュレーションを用いて算定するが、この係留船舶の荷役限界波高の算定手順やその評価方法については、港内長周期波影響評価マニュアル（(財)沿岸技術研究センター、2004）（以下、マニュアルと記す）や港湾技研資料 No.779（上田ら、1994）に詳細に記述されている。

港湾内に係留される船舶の荷役限界波高の算定では、通常は係留船舶の動揺 6 成分に対する荷役許容動揺量としてマニュアルによる提案値を採用している。しかしながら、海洋上の離島港湾のように海象条件が厳しく一般的な係留方法や荷役方式を採用していない係留施設では、マニュアルによる提案値が実態に即していない可能性が高いと考えられる。このため、このような離島港湾では、荷役限界波高の算定において、現地での荷役作業時の判断基準を参考にして荷役許容動揺量を設定する方が適切である。また、現地の判断基準を参考にした荷役許容動揺量の設定値によっては、船舶の動揺量に加えて係留索の張力等も考慮に入れる必要がある（米山ら、2017）。

以上の背景から、本研究では、南北大東島の係留施設を対象として、波浪外力に対する船体動揺シミュレーションを実施して係留船舶の荷役限界波高を算定し、現状の係留ブイによる船舶の係留方式の効果を評価した上で、

荷役効率向上のための新たな船舶の係留方式を提案することを目的とする。

2. 研究内容

南北大東島の港湾を対象として波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションを実施することにより、係留ブイを用いて係留された船舶の荷役限界波高を算定し、その係留方式の効果を評価する（米山ら、2017）。また、荷役効率を向上させることを目的として、係留ブイの代わりに高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式を考案し、船体動揺シミュレーションで得られた荷役限界波高に基づいてその有効性を確認する。

本研究では、まず、波浪に対する係留船舶の動揺シミュレーションを行う上で、南北大東島に就航している貨客船を対象としてその諸元を設定するとともに、南北大東島のうち対象とする2か所の係留施設に対して船舶の係留方法を設定する。そして、設定した対象船舶および係留施設に対して、波浪荷重作用時における係留船舶の動揺シミュレーションを実施する。この計算結果に基づいた係留船舶の最大動揺量（および係留索の最大張力）と対象船舶に対して設定した荷役許容動揺量を用いて、対象係留施設における荷役限界波高を算定し、一般的に用いられているマニュアルの荷役限界波高と比較してその特徴や効果について考察する。次に、南北大東島において現在利用されている係留ブイを用いない形式の高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式を考案し、係留ブイによる係留方式の場合と同様な手順で荷役限界波高を算定する。そして、係留ブイによる船舶係留方式の荷役限界波高と比較することにより、高強度ワイヤによる新たな船舶係留方式の有効性を検証する。最後に、荷役限界波高の算定結果および考案した係留方式の施工性・維持管理性を考慮して、高強度ワイヤによる船舶係留方式の現地適用性について考察する。

3. 荷役限界波高の算定方法

3.1 対象港湾

(1) 南北大東島

南北大東島は、沖縄本島の東方約 360km の海上に位置する絶海の孤島である。図-3.1 に示すように北大東島と南大東島は南北に位置する 2 つの島々であり、両島の間は約 10km の距離である。現在、南北大東島と沖縄本島とは、主に貨物を輸送するための貨客船「だいとう」が、週に 1~2 便運航されている。



図-3.1 南北大東島と港湾の位置

(2) 対象岸壁

南北大東島では、北大東島および南大東島にそれぞれ北大東港および南大東港がある。各港湾は、それぞれ3地区の岸壁から構成されている。いずれの港湾も防波堤がなく係留施設が直接外海に面しており、非常に厳しい海象条件であることから、船舶の接岸時には波浪状況によって3つの地区岸壁を使い分けている。本研究では、各島から1岸壁ずつ選定することにし、北大東港では西地区岸壁、南大東港では亀池地区岸壁を荷役限界波高の算定のための対象係留施設とした。岸壁は、鋼管矢板式の直立岸壁であり、設計資料等を参考にして、岸壁前面の水深を7.5m、天端高をDL+6.0mと設定した。また、岸壁前面の潮位は、LWL (=+0.0m) とした。

(3) 船舶の係留方法

南北大東島では、防波堤が整備されていないため、海に直接岸壁が面している。このため、図-3.2のように、船舶(貨客船「だいとう」)は、岸壁上の係船柱とともに沖側の2地点に設置されている係留ブイに係留索を繋ぐことにより岸壁に係留される。このとき、船舶は岸壁からある程度(約8m)の距離をもって係留されるため、防舷材は用いられない。これは台風等による高波浪時に防舷材が波によって破壊・損傷してしまうため、防舷材を使用することが難しいからである。なお、岸壁上での乗客・貨物の荷役においては、船舶の荷役作業時ごとに配備される移動式クレーンにより行われている。

3.2 係留船舶の動揺シミュレーション

(1) 運動方程式

波浪外力が作用する場合の係留船舶の動揺および係留索の張力を計算するために、係留船舶の動揺シミュレーション手法を用いている。係留船舶の動揺シミュレーション



図-3.2 貨客船「だいとう」の係留状況

ョンでは、一般的に用いられる係留船舶の動揺6成分の運動方程式を時系列的に計算する(上田ら, 1983)。波浪外力が作用する場合の係留船舶の動揺に関する運動方程式は、次式のように表される。

$$[M + m(\omega_0)]\ddot{x} + N(\omega_0)\dot{x} + Bx + R(x) = F \quad (1)$$

ここで、 M : 船舶の質量・慣性モーメントマトリクス (kNs^2/m)、 $m(\omega_0)$: 船舶の付加質量・付加慣性モーメントマトリクス (波角周波数 ω_0 に対応) (kNs^2/m)、 $N(\omega_0)$: 造波減衰係数マトリクス (波角周波数 ω_0 に対応) (kNs/m)、 B : 静水圧的復元力マトリクス (kN/m)、 $R(x)$: 係留索張力ベクトル (kN)、 F : 波浪外力ベクトル (kN)、 x : 動揺変位ベクトル (m)、 \dot{x} : 動揺速度ベクトル (m/s)、 \ddot{x} : 動揺加速度ベクトル (m/s^2) である。なお、速度の2乗に比例する抵抗成分である粘性抵抗力は考慮していない。波力および流体力は、喫水面下の船体断面形状をルイスフォーム (Lewis Form) 近似により簡易化して設定し、流体力を計算するストリップ法により算定している。運動方程式では、流体力は、ある特定の波周期に対して一定値とする方法(上田ら, 1983)を採用しており、波の有義波周期に対応した流体力を用いる。また、波浪外力として、ブレットシュナイダー光易型の波浪スペクトルを用いて不規則波を生成する。ここでは、波に対する岸壁の反射率として、直立岸壁に対して一般的に用いられている0.9を採用し、岸壁による反射波の影響も考慮した重複波としての波浪外力を用いている。なお、荷役限界波高への風荷重の影響は小さいと考えられることから、外力として風荷重を用いず波浪荷重のみを採用している(上田ら, 1994)。

図-3.3は、船舶の動揺6成分の定義を示したものである。ここで、船舶の動揺は、前後動揺(サージ, SURGE)、左右動揺(スウェイ, SWAY)、上下動揺(ヒープ, HEAVE)の並進運動3成分と、長軸周り回転動揺(ロール, ROLL)、

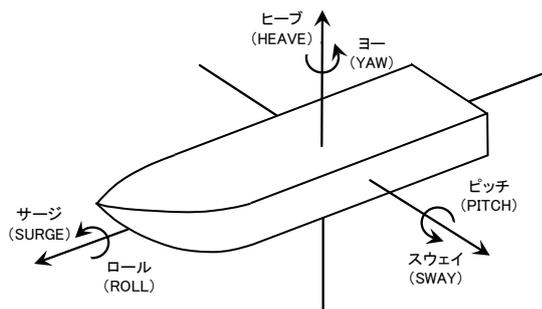


図-3.3 動揺6成分の定義

短軸周り回転動揺（ピッチ，PITCH），鉛直軸周り回転動揺（ヨー，YAW）の回転運動3成分の動揺6成分から構成される。係留船舶の動揺シミュレーションでは、波浪の波向，有義波周期および有義波高を変化させて船舶の最大動揺量（6成分）および係留索の最大張力を求め、荷役許容動揺量および係留索の限界張力を限界値（閾値）として荷役限界波高を算定する。

(2) 船舶条件

対象船舶は、沖縄本島から南北大東島に定期的に運航している貨客船「だいとう」とした。貨客船「だいとう」は、総トン数 690.0GT（載貨重量トン数 1,076.9DWT），全長 83.62m の比較的小型の船舶である。この船舶は、旅客定員 55 名の貨客船であり、乗客とともにコンテナも運搬することができ、南北大東島に必要な生活物資などの貨物を輸送している。表-3.1 は、貨客船「だいとう」の主要諸元を示したものである。対象船舶は、南北大東島に貨物等を運搬してくることから、満載状態で入港するとして喫水および重心位置（船底からの高さ）を設定した。メタセンタ高さは、船体の重心とメタセンタ（傾心）との距離を表し、船舶の横揺れ固有周期とは、船舶の横揺れ運動（ロール）の固有周期のことである。船舶の横揺れ固有周期は、対象船舶の横揺れ周期曲線図を用いて、喫水とメタセンタ高さから求めた。なお、ブロック係数とは、船舶の垂線間長，型幅，喫水を掛け合わせた直方体の体積に対する船舶の水線面以下の排水体積の比である。船体断面形状については、貨客船「だいとう」の船体形状データを手できなかったため、貨物船の標準的な船型形状（ルイスフォーム近似のもの）を利用した。係留索は、船舶に艀装されている係船用の索とした。図-3.4 は係留索の伸縮特性を示したものである。係留索は、ダイニーマとパイレンマルチを組み合わせた高強度繊維索であり、索径は 65mm である。また、係留索の伸びと荷重との関係は非線形であり、破断張力は 520kN となっている。なお、係留船舶の動揺シミュレーションでは、係留索の初期張力は破断張力の 7% の値（36.4kN）とした。

表-3.1 貨客船「だいとう」の主要諸元

項目	内容
船種	貨客船
総トン数	690.0 GT
全長	83.62m
垂線間長	74.00m
型幅	13.40m
型深さ	6.9m
喫水（満載）	3.95m
重心高さ	5.56m
メタセンタ高さ	1.38m
排水量	2322.74t
横揺れ固有周期	8.4s
ブロック係数	0.59

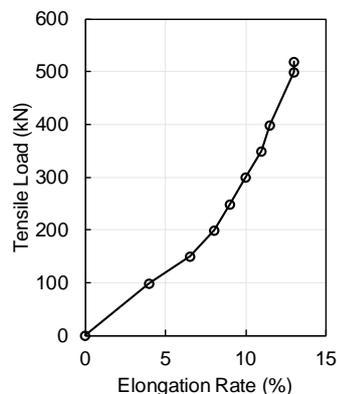


図-3.4 係留索の伸縮特性

(3) 係留条件

対象岸壁は、北大東島は北大東港西地区岸壁，南大東島は南大東港亀池地区岸壁である。図-3.5 および図-3.6 は、それぞれ北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイを用いた船舶係留時の係留索の配置を示す。係留索の配置は、現地における船舶の係留状況の写真や係留施設設計資料に基づいて設定した。各岸壁では、船舶は、一般的に沖合の2か所の係留ブイと岸壁上の4か所の係船柱を用いて、全部で6本の係留索により係留される。係留索には、①～⑥の番号が振られており、係留索①および④が係留ブイに接続されている。なお、係留船舶の動揺シミュレーションでは、係留ブイは動揺しない海面上の固定点として扱っている。係留船舶は、北大東港西地区岸壁では右舷接岸，南大東港亀池地区岸壁では左舷接岸である。波向は、係留船舶の船首から船尾方向に海側に向かって、0°～180°と定義している。また、船舶は、岸壁から8m程度の離隔距離をおいて係留されるため、船舶の中心と岸壁との距離は14.7mとなる。したがって、船舶の係留中は船体が岸壁に接触しないことから、防舷材は設定していない。この係留方式は、南北大東島の各係留施設で採用されている通常の船舶係留方式である。

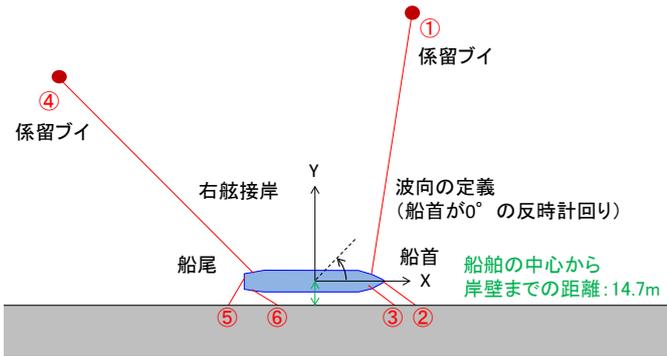


図-3.5 係留配置 (北大東港西地区岸壁)

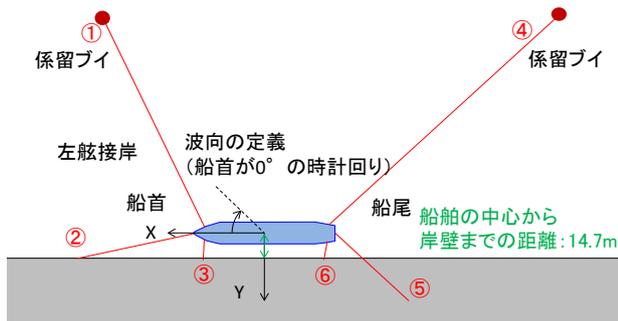


図-3.6 係留配置 (南大東港亀池地区岸壁)

(4) 波浪条件

表-3.2 は、荷役限界波高を算定するための外力となる波浪条件を示す。波浪条件は、マニュアルを参考にして、波向は係留船舶の船首方向 (0°) から船尾方向 (180°) まで 30° 刻みの 7 種類とし、有義波周期は 4s, 6s, 8s, 10s, 12s および 15s の 6 種類とした。また、荷役限界波高を算定する際には、有義波高をパラメトリックに変化させて係留船舶の動揺シミュレーションを実施する必要がある。ここでは、南北大東島の岸壁では比較的高波浪時においても船舶が係留されることから、比較的高めの有義波高として 0.5m, 1.0m および 2.0m の 3 種類と設定した。なお、係留船舶の動揺シミュレーションの時間は、有義波周期 4s, 6s に対しては 2,500s、有義波周期 8s~15s に対しては 5,000s であり、係留索に破断張力を超えた張力が作用した場合でも動揺シミュレーションは継続している。また、船舶の動揺量の統計解析には、シミュレーションの開始から 1,500s 以降のデータを用いている。

3.3 荷役限界波高の算定

(1) 荷役限界波高の算定手順

係留船舶の動揺シミュレーションの結果を用いて、対象係留施設における荷役限界波高を算定する。荷役限界波高の算定における詳細な手順については、港湾技研資料 No.779 (上田ら, 1994) を参考にした。荷役限界波高

表-3.2 波浪条件

パラメータ	設定値
波向	$0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$
有義波周期	4s, 6s, 8s, 10s, 12s, 15s
有義波高	0.5m, 1.0m, 2.0m

は、各係留施設における対象船舶に対して、それぞれ波向、有義波周期ごとに求められる。荷役限界波高を算定する際には、係留船舶の荷役の可否を判定するための基準となる条件として、船舶の動揺量等の限界値 (閾値) を設定する必要がある。

(2) 荷役許容動揺量等の限界値の考え方

船舶の動揺量に対する限界値として船舶の荷役許容動揺量があり、対象船舶の荷役許容動揺量が不明な場合には、マニュアルに記載されている値を用いることが一般的である。しかしながら、対象船舶が特定される場合には、船長を含む運航関係者や荷役作業に従事する荷役関係者などに船舶荷役の運用上の限界値について調査することにより、精度の高い荷役限界波高を求めることができる。本研究では、対象船舶の荷役許容動揺量として、マニュアルに示されている一般貨物船に対する提案値を用いるとともに、南北大東島の海運会社へのヒアリング結果に基づいて設定した値も採用している。また、南北大東島では、沖合の 2 か所に設置された係留ブイと岸壁上の係留柱を使用した大東島特有の係留方法を採用しており、乗客・貨物の荷役においては荷役作業時ごとに配備される移動式クレーンにより行われている。このため、ヒアリング結果に基づいて荷役許容動揺量を設定する場合には、通常よりも荷役許容動揺量が大きくなる可能性がある。このような場合には、係留索の張力が限界値 (破断張力) を超えることも想定されるため、係留索の張力に対する限界値として破断張力を考慮した荷役限界波高も算定している。なお、係留索の張力の限界値として許容張力を用いる方法もあるが、ここでは南北大東島における厳しい海象条件や船舶係留方法の特殊性を考慮して破断張力を採用することとした。

(3) 荷役限界波高の算定方法

波向、有義波周期および有義波高を組み合わせた各波浪条件に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより、各係留方式における対象船舶の動揺量が時系列として算定される。この時系列から、船舶の動揺 6 成分の最大動揺量を求める。最大動揺量の定義は、動揺の平均値からの最大値あるいは最小値の振幅のうち絶対値の大きい方とした (上田ら, 1994)。なお、左右動揺成分 (スウェイ) に

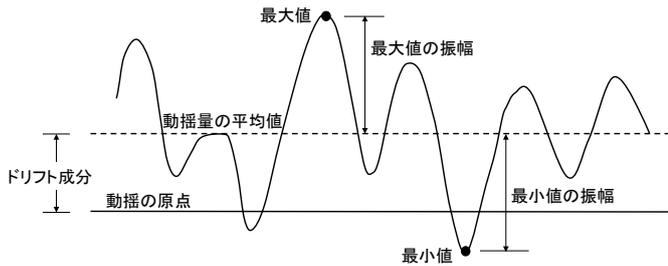


図-3.7 動揺量の最大値・最小値の定義

ついても、岸壁から離れる方向の動揺の最大値ではなく、同様の定義を用いている。図-3.7は、係留船舶の動揺量の最大値・最小値の定義を図示したものである。次に、船舶の動揺6成分の時系列から抽出された各動揺成分の最大動揺量について、有義波高に対して次式を用いた線形1次回帰分析を実施する。

$$y = ax + b$$

(2)

ここで、 x ：有義波高、 y ：各動揺成分の最大動揺量、 a ：直線回帰式の傾き、 b ：直線回帰式の y 切片である。3種類の有義波高(0.5m, 1.0m, 2.0m)に対して動揺成分ごとに3種類の最大動揺量が得られており、これらの線形1次回帰分析から有義波高に対する各動揺成分の最大動揺量の直線回帰式が求められる。対象船舶の荷役限界波高は、動揺成分ごとに求められた最大動揺量の直線回帰式と動揺成分ごとの荷役許容動揺量との交点に対応する有義波高を逆算し、得られた有義波高の中の最小値として算定される。通常の荷役限界波高の算定では、船舶の動揺6成分の最大動揺量のみを考慮するが、これに係留索の最大張力も加える場合には、この最大張力に対しても同様に有義波高に対する線形1次回帰分析を行い、荷役限界波

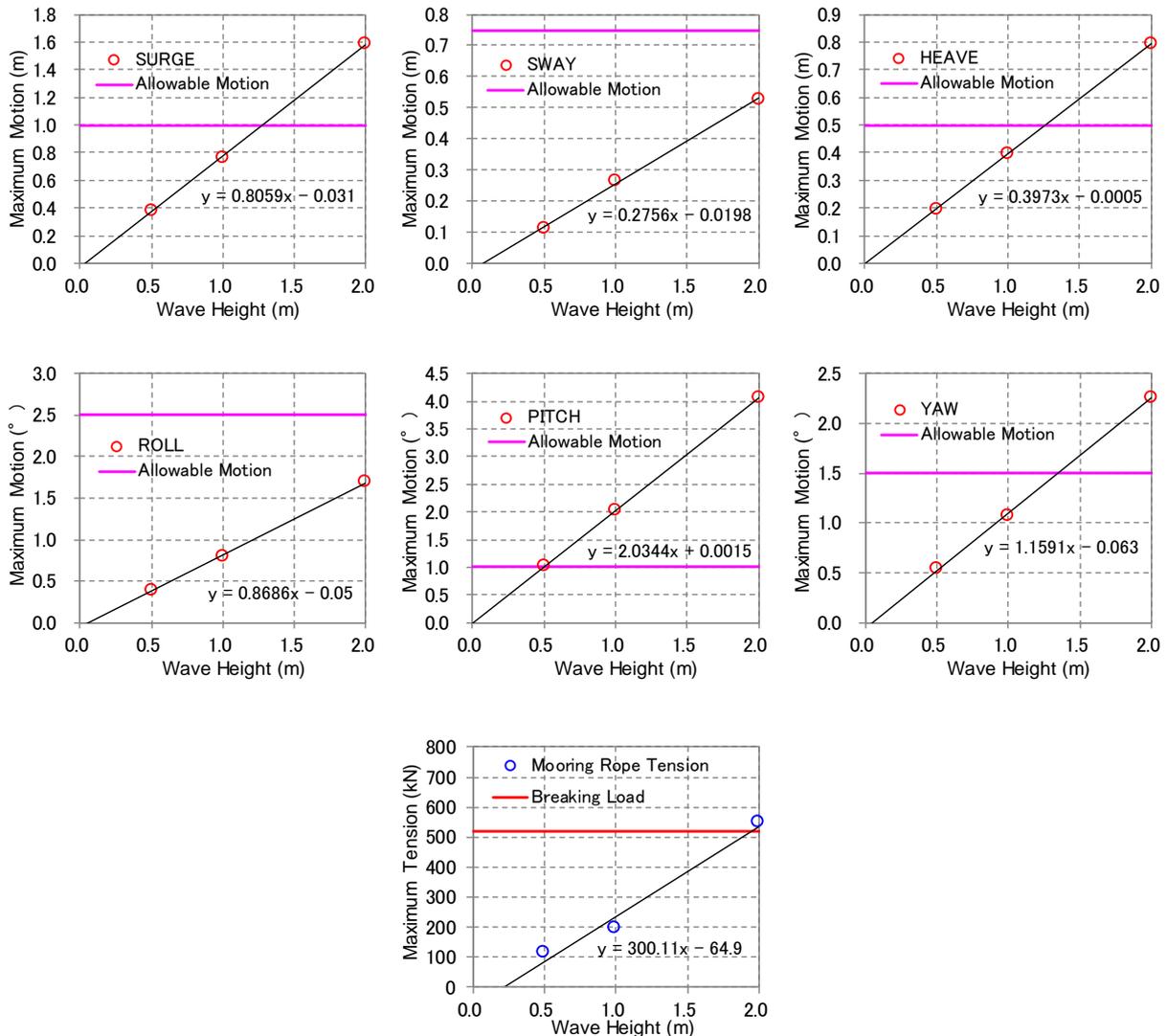


図-3.8 有義波高に対する動揺量および係留索張力の相関関係と直線回帰式の例

(北大東港西地区岸壁、波向 30°, 有義波周期 10s, 荷役許容動揺量：一般貨物船 (マニュアルの提案値))

高を求めることになる。ただし、係留索の最大張力については、船舶の動揺量とは異なり、係留索の張力の原点（張力 0kN）からの最大値として定義している。この荷役限界波高の算定方法について、図-3.8 は、有義波高に対する船舶の動揺量および係留索張力の相関関係と得られた直線回帰式の一例を示したものである。これは、北大東港西地区岸壁において係留ブイによる船舶係留方式を対象とした波向 30°、有義波周期 10s の波浪条件のケースで、荷役許容動揺量としてマニュアルの一般貨物船に対する提案値を用いた場合のものである。この図では、係留船舶の動揺 6 成分の最大動揺量と係留索の最大張力を示しているが、係留索の最大張力については船舶の係留方式で用いられている複数の係留索の最大張力の中で最も大きいもののみを示している。この例では、ピッチの動揺成分に対する荷役限界波高が最も小さくなっており、最終的にこの船舶係留方式に対する荷役限界波高は約 0.5m と決定することになる。なお、波高が 3.0m を超えるような場合には、現実的には荷役作業が実施できないものと想定されることから、荷役限界波高の上限値を 3.0m としている。

4. 係留ブイによる船舶係留方式の荷役限界波高

4.1 概要

南北大東島の係留ブイによる船舶係留方式を対象として、北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における貨客船「だいとう」の荷役限界波高を算定した。まず、波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより、各波浪条件における対象船舶の動揺 6 成分の最大動揺量および係留索の最大張力を計算した。次に、対象船舶の荷役許容動揺量として、マニュアルに示されている一般貨物船に対する提案値、南北大東島の海運会社へのヒアリング結果に基づく設定値を採用するとともに、これらに加えて係留索の張力の限界値として破断張力も考慮した。そして、各波浪条件における対象船舶の動揺 6 成分の最大動揺量と荷役許容動揺量、また係留索の最大張力と破断張力との相関関係から係留ブイによる船舶係留方式に対する荷役限界波高を求めた。ここでは、各岸壁における係留ブイを用いた船舶係留方式の係留船舶の最大動揺量および係留索の最大張力について比較して考察する。また、算定された荷役限界波高に関して、マニュアルに示されている一般的に用いられている荷役限界波高と比較するとともに、荷役許容動揺量としてマニュアル提案値およびヒアリング設定値を用いた場合の相違や係留索の破断張力を考慮した場合の影響などについて考察する。

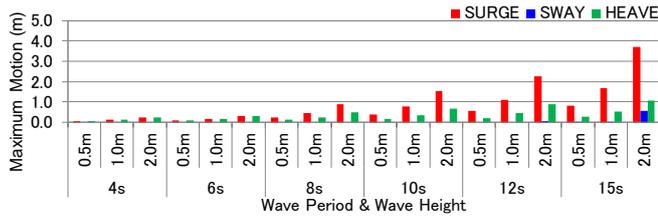
4.2 船舶の最大動揺量および係留索の最大張力

(1) 船舶の最大動揺量の比較

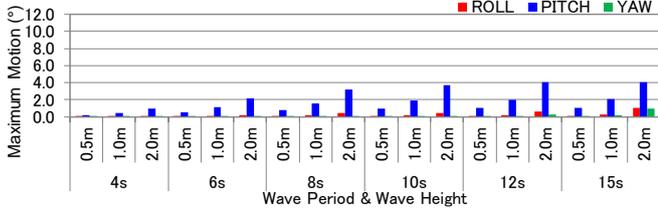
北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイによる船舶係留方式の係留船舶の最大動揺量について比較する。図-4.1～図-4.14 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の最大動揺量について、0°～180°の7種類の波向ごとに示したものである。ここで、奇数番号の図は、北大東港西地区岸壁に、また偶数番号の図は、南大東港亀池地区岸壁に対応している（以下、同種の図においても同じ）。これらの図から、並進運動成分については、波周期が長くなるほど、また波高が高くなるほど最大動揺量は増大する傾向にあることがわかる。一方、回転運動成分については、基本的には並進運動成分の傾向と同じであるが、ロールは船舶の横揺れ固有周期 8.4s に近い波周期 8s のときに大きくなっている。船舶の動揺成分ごとにみると、船首方向および船尾方向から波が作用するときにサージおよびピッチが、また船側方向から波が作用するときにスウェイおよびロールが増大しており、この傾向は一般的な係船柱と防舷材を用いた係留方法の場合と同じ特徴である。また、係留索の配置がほとんど変わらないことから、両岸壁における最大動揺量は概ね同じ傾向である。

(2) 係留索の最大張力の比較

北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイによる船舶係留方式の係留索の最大張力について比較する。図-4.15～図-4.28 は、それぞれ各岸壁における係留索の最大張力について、0°～180°の7種類の波向ごとに示したものである。図には、係留索の破断張力 520kN も赤線で示している。これらの図から、係留索①および④の最大張力は波浪条件にかかわらず小さいが、これら以外の係留索の最大張力は波周期が長く、波高が高いときに増大する傾向にあることがわかる。これは、係留索①および④が係留ブイに繋がれる長い係留索で張力が発生しにくく、係留索②、③、⑤および⑥が岸壁上の係船柱に繋がれる短い係留索で張力が発生しやすいからである。短い係留索については、波浪条件によっては波高 1.0m 以上で最大張力が破断張力 520kN を超えている場合もある。ただし、南大東港亀池地区岸壁における係留索②および⑤は比較的長い係留索であり、それほど大きな張力が発生していない。また、波向の影響についてみると、係留船舶の船首方向あるいは船尾方向から波が作用するときではなく、船側方向で特に船体の斜め方向（波向 30°～60° または 120°～150°）から波が作用するときに係留索の最大張力が増大する傾向にある。以上のことから、船舶を係留する際には、可能な範囲内である限り短い

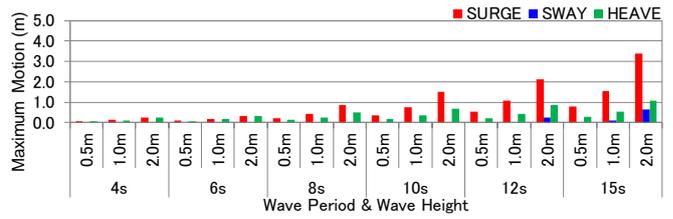


(a) 並進運動 3 成分

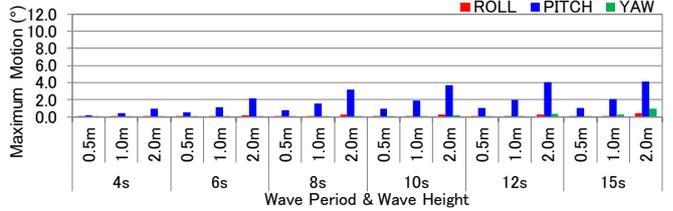


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.1 最大動揺量 (北大東港, 波向 0°)

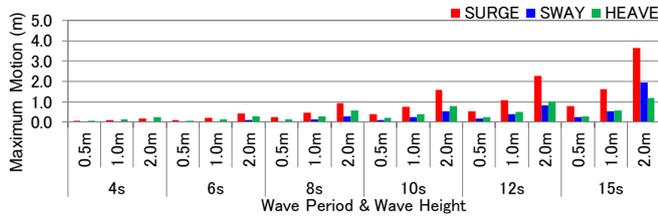


(a) 並進運動 3 成分

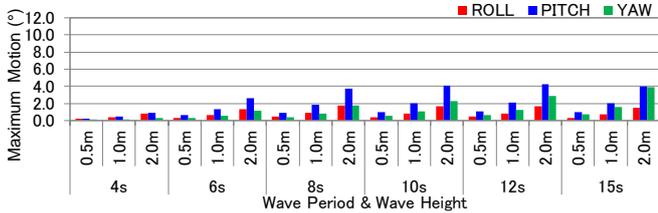


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.2 最大動揺量 (南大東港, 波向 0°)

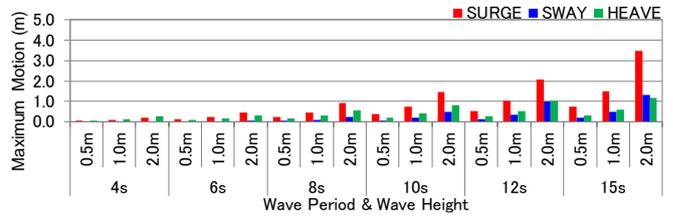


(a) 並進運動 3 成分

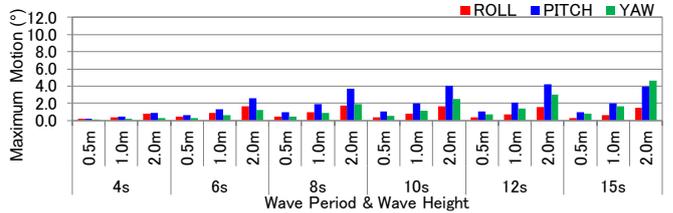


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.3 最大動揺量 (北大東港, 波向 30°)

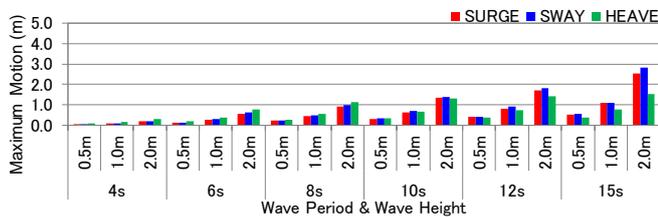


(a) 並進運動 3 成分

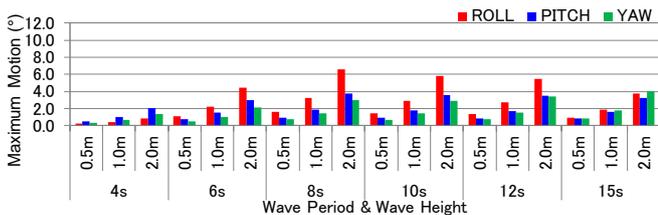


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.4 最大動揺量 (南大東港, 波向 30°)

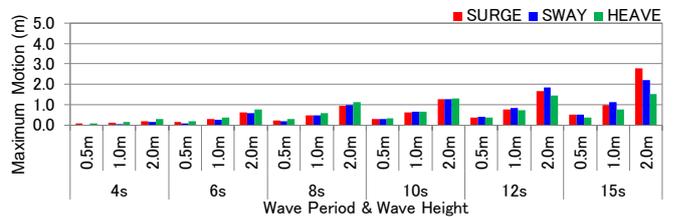


(a) 並進運動 3 成分

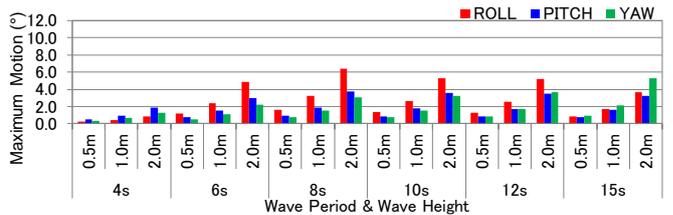


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.5 最大動揺量 (北大東港, 波向 60°)

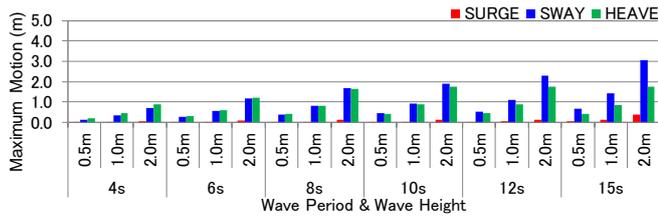


(a) 並進運動 3 成分

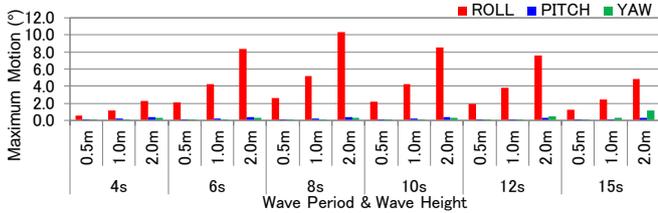


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.6 最大動揺量 (南大東港, 波向 60°)

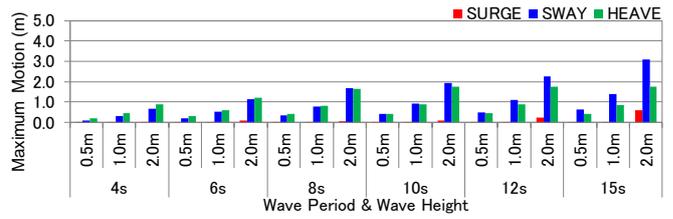


(a) 並進運動 3 成分

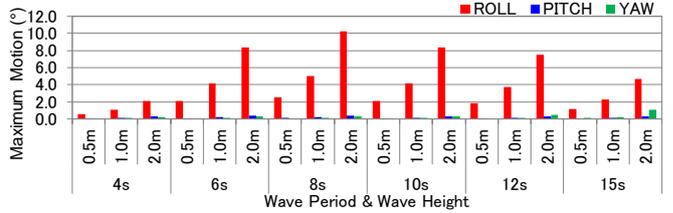


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.7 最大動搖量 (北大東港, 波向 90°)

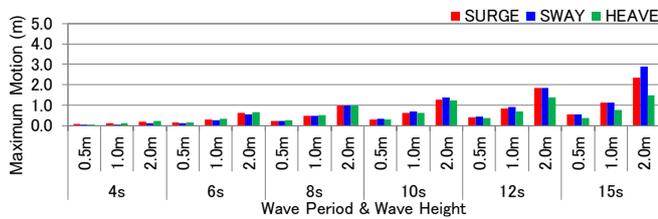


(a) 並進運動 3 成分

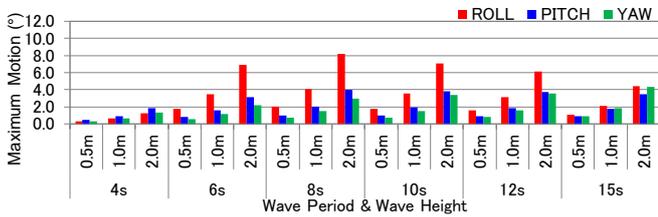


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.8 最大動搖量 (南大東港, 波向 90°)

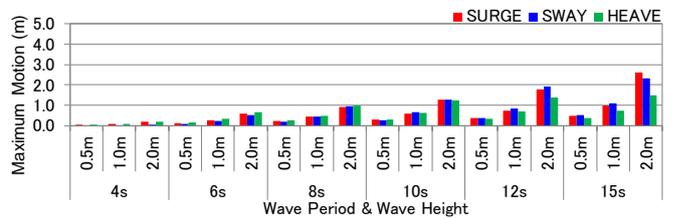


(a) 並進運動 3 成分

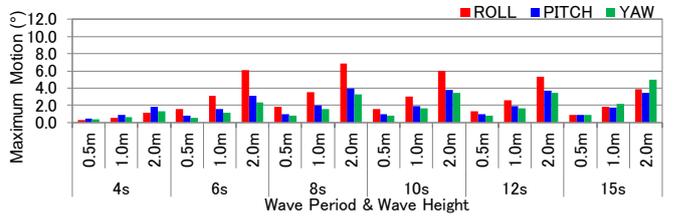


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.9 最大動搖量 (北大東港, 波向 120°)

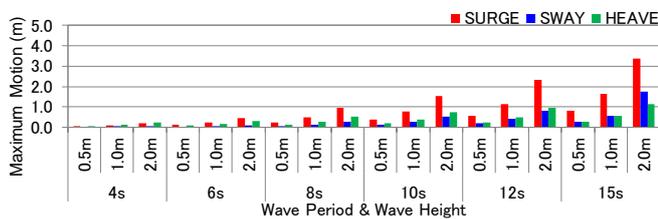


(a) 並進運動 3 成分

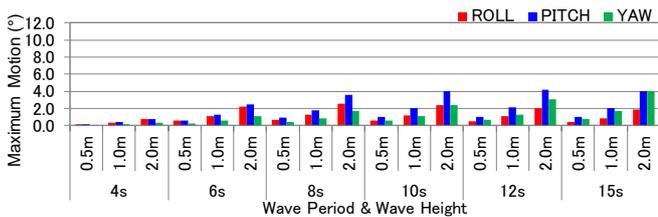


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.10 最大動搖量 (南大東港, 波向 120°)

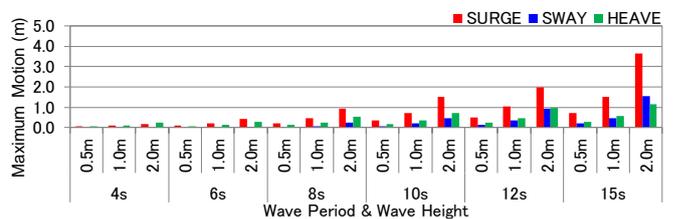


(a) 並進運動 3 成分

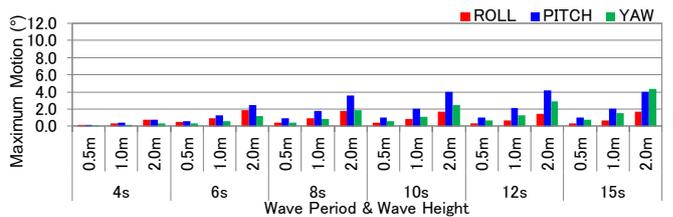


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.11 最大動搖量 (北大東港, 波向 150°)

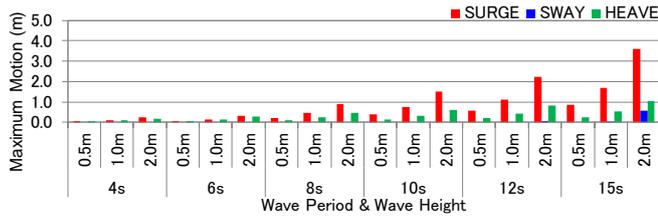


(a) 並進運動 3 成分

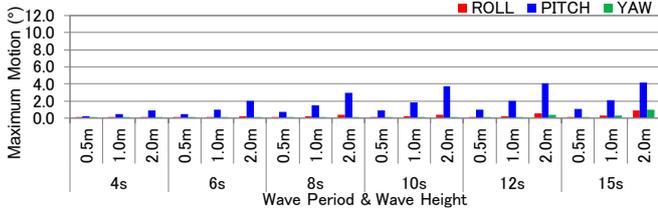


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.12 最大動搖量 (南大東港, 波向 150°)

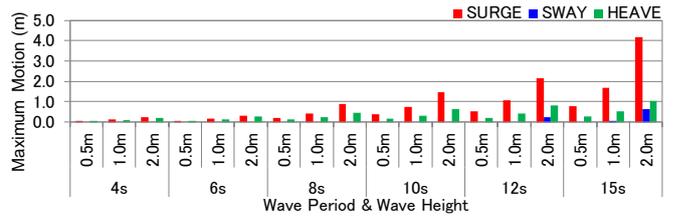


(a) 並進運動 3 成分

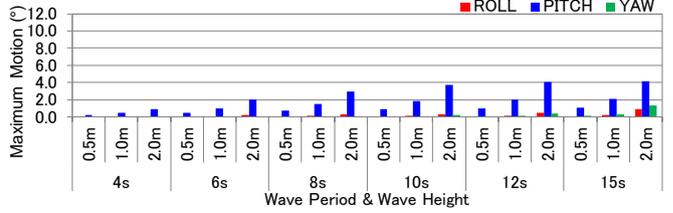


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.13 最大動搖量 (北大東港, 波向 180°)

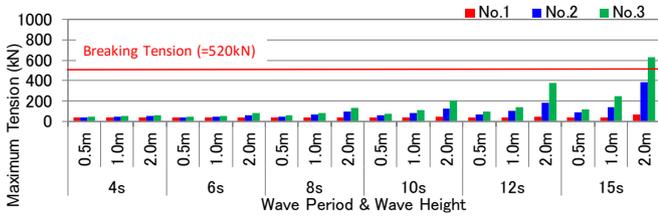


(a) 並進運動 3 成分

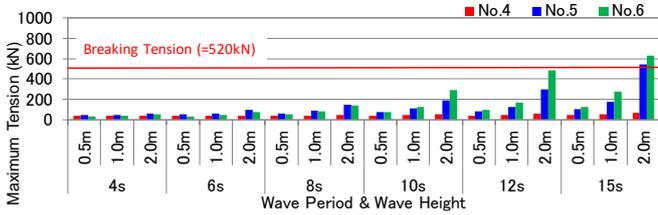


(b) 回轉運動 3 成分

圖-4.14 最大動搖量 (南大東港, 波向 180°)

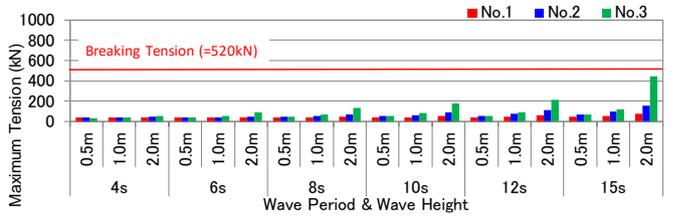


(a) 係留索①, ②, ③

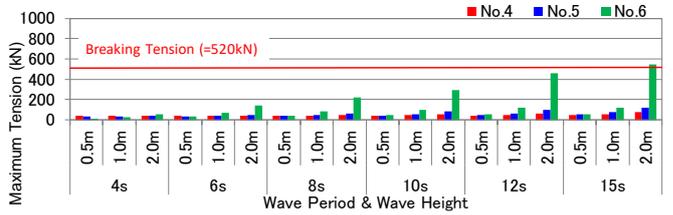


(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.15 最大張力 (北大東港, 波向 0°)

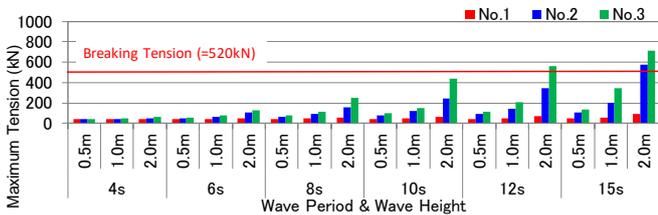


(a) 係留索①, ②, ③

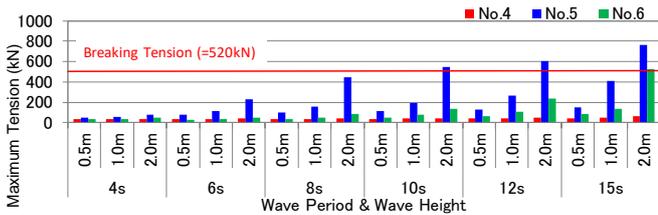


(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.16 最大張力 (南大東港, 波向 0°)

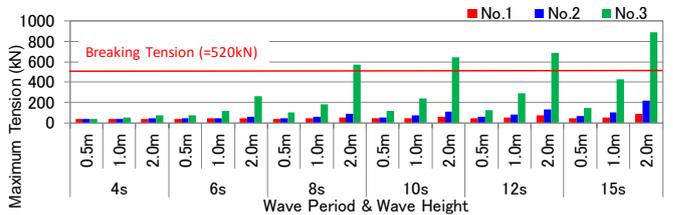


(a) 係留索①, ②, ③

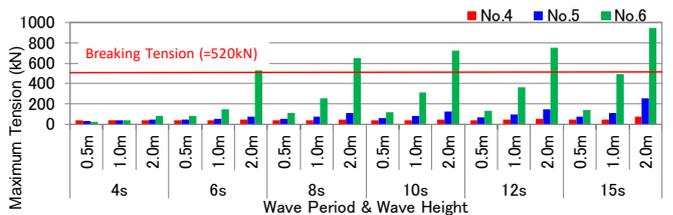


(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.17 最大張力 (北大東港, 波向 30°)

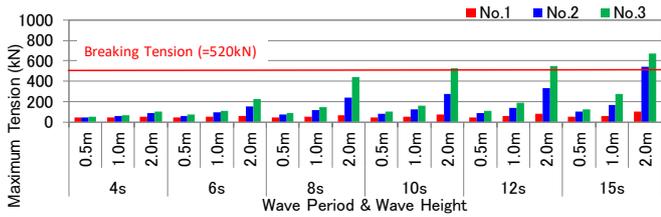


(a) 係留索①, ②, ③

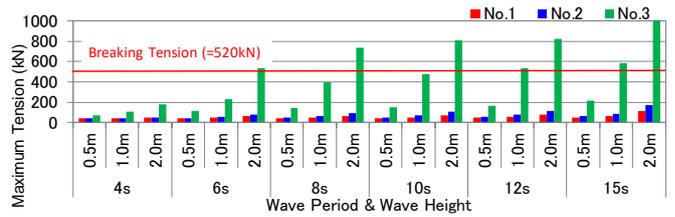


(b) 係留索④, ⑤, ⑥

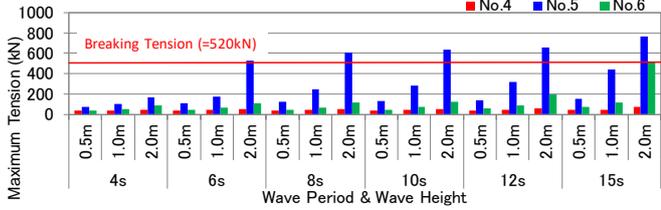
圖-4.18 最大張力 (南大東港, 波向 30°)



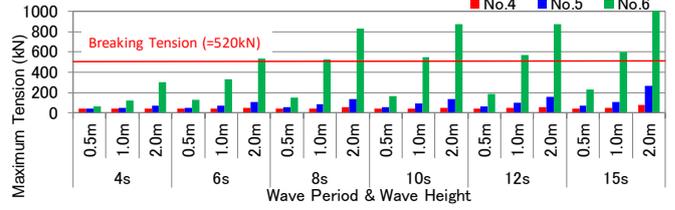
(a) 係留索①, ②, ③



(a) 係留索①, ②, ③



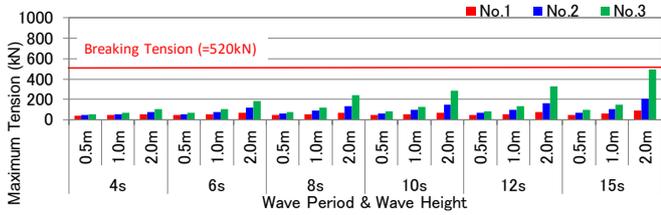
(b) 係留索④, ⑤, ⑥



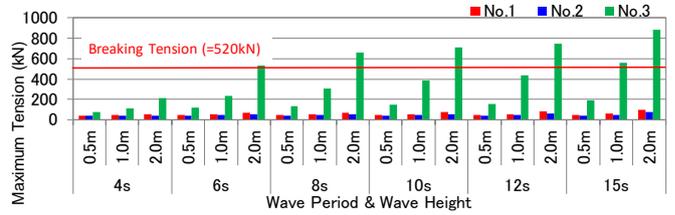
(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.19 最大張力 (北大東港, 波向 60°)

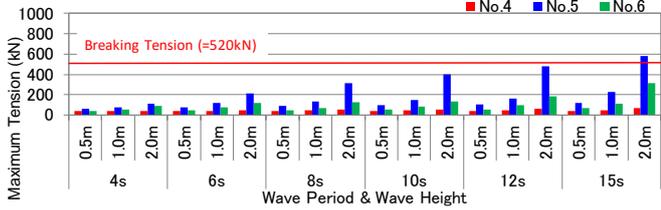
圖-4.20 最大張力 (南大東港, 波向 60°)



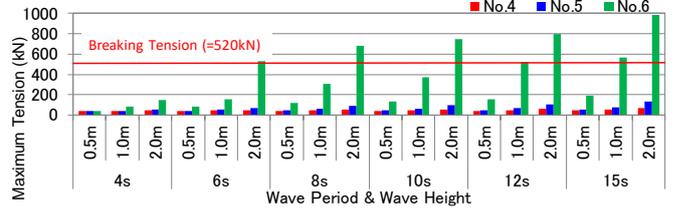
(a) 係留索①, ②, ③



(a) 係留索①, ②, ③



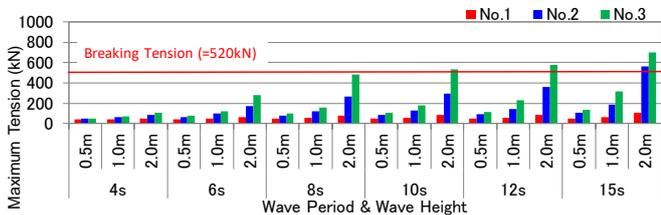
(b) 係留索④, ⑤, ⑥



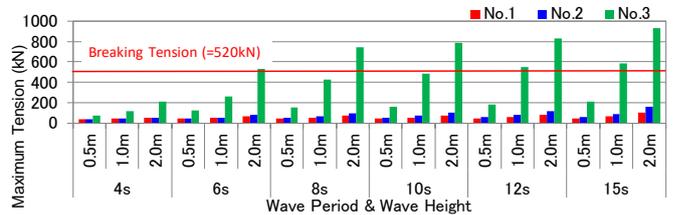
(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.21 最大張力 (北大東港, 波向 90°)

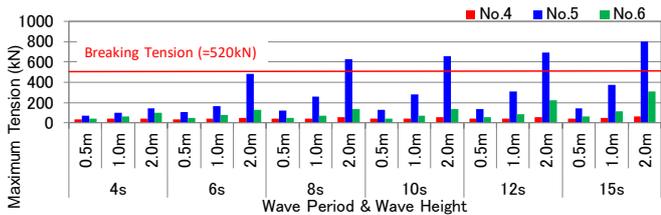
圖-4.22 最大張力 (南大東港, 波向 90°)



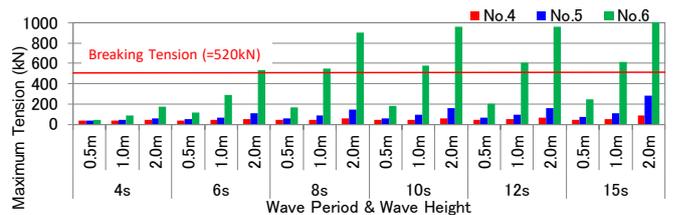
(a) 係留索①, ②, ③



(a) 係留索①, ②, ③



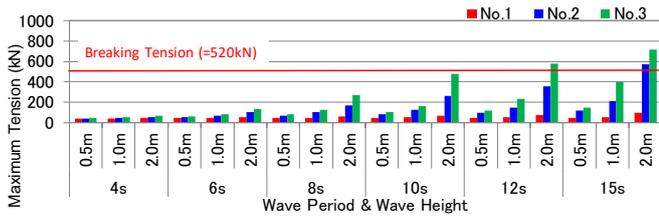
(b) 係留索④, ⑤, ⑥



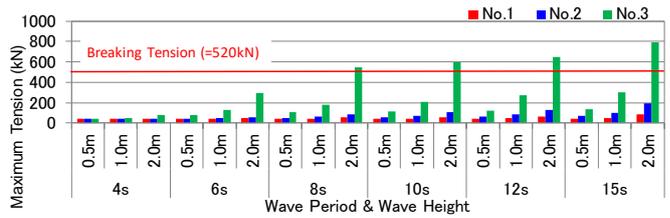
(b) 係留索④, ⑤, ⑥

圖-4.23 最大張力 (北大東港, 波向 120°)

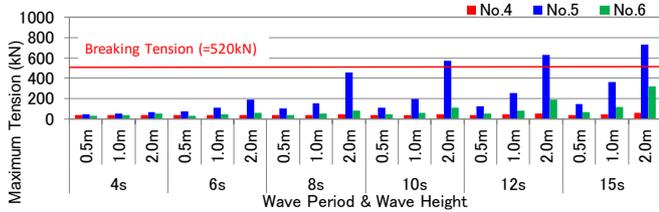
圖-4.24 最大張力 (南大東港, 波向 120°)



(a) 係留索①, ②, ③

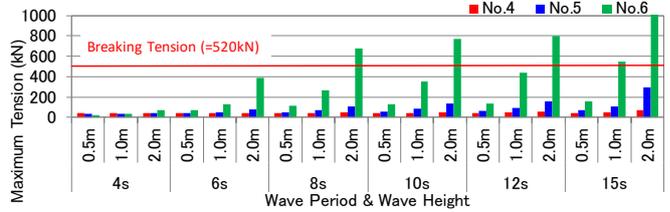


(a) 係留索①, ②, ③



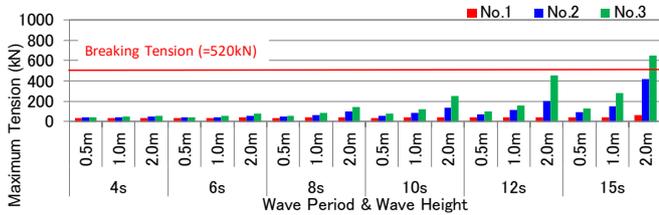
(b) 係留索④, ⑤, ⑥

図-4.25 最大張力 (北大東港, 波向 150°)

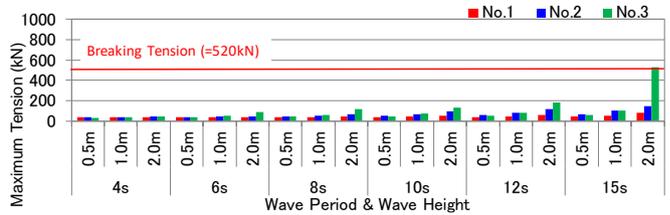


(b) 係留索④, ⑤, ⑥

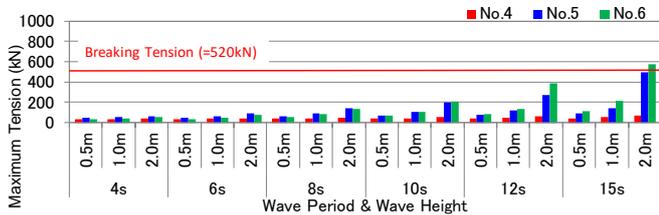
図-4.26 最大張力 (南大東港, 波向 150°)



(a) 係留索①, ②, ③

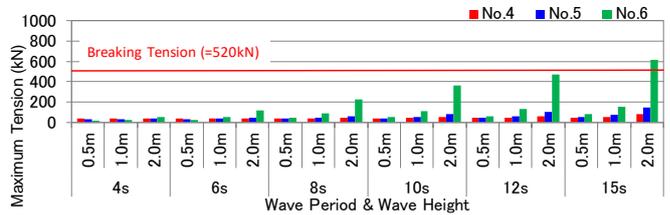


(a) 係留索①, ②, ③



(b) 係留索④, ⑤, ⑥

図-4.27 最大張力 (北大東港, 波向 180°)



(b) 係留索④, ⑤, ⑥

図-4.28 最大張力 (南大東港, 波向 180°)

係留索がないようにバランスよく係留索を配置することが重要であるとわかる。なお、両岸壁における係留索の最大張力は、全体的に見れば概ね同じ傾向であると言える。

4.3 荷役許容動揺量等の限界値の設定

(1) 荷役許容動揺量の設定方法

対象船舶の荷役限界波高を算定する際の荷役許容動揺量は、まずは標準的な値として、マニュアルに提示されている一般貨物船に対する提案値を採用した。また、南北大東島の現地における運用上の荷役限界波高を把握するため、海運会社へのヒアリング結果に基づいて設定した荷役許容動揺量も採用した。

(2) 現地運用上の荷役限界基準の調査

係留ブイによる船舶の係留方式について、南北大東島

の現地における運用上の荷役限界基準を把握するため、海運会社に対して係留施設の運用方法等のヒアリングが実施されている。このヒアリング調査の主な結果を以下に取りまとめて示す。

- ・現地の波（風波・うねり）および風の状況から船舶の接岸岸壁を選定している。

- ・船舶の運航基準として波高 1m, 風速 15m/s を用いており、台風の影響がある場合には運航を延期している。

- ・クレーンによる荷役作業では、波高 1m 以下、風速 15m/s 以下が望ましいとされている。

- ・船舶の動揺（ロール）が両振幅で $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ であれば荷役作業は実施する。船舶の前後左右の動揺はクレーンが追従できるため、制約条件とはならない。

- ・船舶の係留可否は、小型船（網取船）の出航可否の条件

表-4.1 荷役作業中の判断基準（現地）

波高	1m 以下
風速	15m/s 以下
船舶動揺 (前後左右)	制約無し (クレーン追従可)
船舶動揺 (ロール)	10° ~15° (両振幅)

表-4.2 荷役許容動揺量の設定値

	動揺成分					
	SURGE (m)	SWAY (m)	HEAVE (m)	ROLL (°)	PITCH (°)	YAW (°)
荷役許容動揺量 (マニュアル、一般貨物船)	±1.0	±0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
荷役許容動揺量 (ヒアリング結果参考)	-	-	±1.0	±5.0	±5.0	±5.0

である波高 1m 以下によって判断しており、係留可能な状態と荷役可能な状態は同じ条件となる。表-4.1 は、ヒアリング結果に基づいた現地における荷役作業中の判断基準を取りまとめたものである。

(3) 荷役許容動揺量の設定値

表-4.2 は、マニュアルにおける一般貨物船の荷役許容動揺量と海運会社へのヒアリング結果に基づいた荷役許容動揺量を示している。ヒアリング結果によると、クレーンによる荷役作業は、波高 1m 以下、風速 15m/s 以下が望ましく、船舶の動揺（ロール）が両振幅で 10° ~15° であれば実施されており、前後左右の動揺はクレーンが追従できるため、制約とはならないとのことである。そこで、サージおよびスウェイはクレーンの追従により荷役作業が可能であるため考慮せず、ヒープは±1.0m に、回転運動成分（ロール、ピッチ、ヨー）は±5.0° を荷役許容動揺量とした。なお、マニュアルでは、防舷材と係留索を用いた通常の係留方式および一般的な荷役機械による荷役方式を対象とした場合の荷役許容動揺量を示していることに注意が必要である。

(4) 係留索の張力の限界値

南北大東島では、一般的な方法と比較して特殊な船舶係留方法および荷役方式を採用していることから、ヒアリング結果に基づいて設定した荷役許容動揺量は、一般的に用いられるマニュアルの一般貨物船の荷役許容動揺量よりも大きくなっている。このような場合には、波浪作用時における係留船舶の動揺が通常よりも大きく許容されることになるため、係留索の張力が破断張力を超えている可能性がある。そこで、ヒアリング結果に基づいた荷役許容動揺量を用いる場合は、係留索の張力に対する限界値として係留索の破断張力を考慮したときの荷役限界波高も算定した。先に示したように、対象船舶が装備している係留索の破断張力は 520kN である。

4.4 荷役限界波高の比較

(1) 荷役許容動揺量（マニュアル提案値）の場合

北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイによる船舶係留方式の係留船舶について、荷役許容動揺量としてマニュアル提案値を用いた場合の荷役限界波高を示す。表-4.3 および表-4.4 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分を示したものである。また、表-4.5 および図-4.29、表-4.6 および図-4.30 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高を示したものである。荷役許容動揺量としてマニュアル提案値を用いた場合の荷役限界波高は、北大東港西地区岸壁、南大東港亀池地区岸壁ともに概ね同じ傾向を示す結果となった。荷役限界波高の最小値は、北大東港西地区岸壁で 0.47m（波向 30°，波周期 12s）、南大東港亀池地区岸壁で 0.47m（波向 30°，波周期 12s）である。荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分については、波向 90° 以外ではピッチが卓越し、波向 90° ではロールおよびヒープが卓越していた。沖合の係留ブイを用いた係留配置では、船舶の並進運動を拘束するような係留配置となっており、また岸壁からある程度離れて船舶が係留されているため岸壁近傍の重複波の影響も小さいことから、サージやスウェイの並進運動の動揺は比較的小さく抑えられ、相対的に回転運動の動揺が顕著になるものと考えられる。算定された荷役限界波高は最小でも約 0.5m であり、マニュアルに示されている通常の係留方式および一般的な荷役機械による荷役方式に対する一般貨物船の荷役限界波高と比較してかなり大きいと言える。

(2) 荷役許容動揺量（ヒアリング設定値）の場合

北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイを用いた船舶係留方式の係留船舶について、荷役許容動揺量としてヒアリング設定値を用いた場合の荷役限界波高を示す。表-4.7 および表-4.8 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分を示したものである。また、表-4.9 および図-4.31、表-4.10 および図-4.32 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高を示したものである。表では、3.0m を超えて算定された荷役限界波高を「>3.00」として表記している（以下、同種の表においても同じ）。荷役許容動揺量としてヒアリング設定値を用いた場合の荷役限界波高は、マニュアル提案値の場合と同様に北大東港西地区岸壁、南大東港亀池地区岸壁ともに概ね同じ傾向を示す結果となった。荷役限界波高の最小値は、北大東港西地区岸壁で 0.97m（波向 90°，波周期 8s）、南大東港亀池地区岸壁で 0.99m（波向 90°，波周期 8s）である。

表-4.3 波高の決定成分（北大東港，マニュアル提案値）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
6s	PITCH	PITCH	PITCH	ROLL	PITCH	PITCH	PITCH
8s	PITCH	PITCH	PITCH	ROLL	PITCH	PITCH	PITCH
10s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
12s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
15s	PITCH	PITCH	PITCH	SWAY	PITCH	PITCH	PITCH

表-4.4 波高の決定成分（南大東港，マニュアル提案値）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
6s	PITCH	PITCH	PITCH	ROLL	PITCH	PITCH	PITCH
8s	PITCH	PITCH	PITCH	ROLL	PITCH	PITCH	PITCH
10s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
12s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
15s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH

表-4.5 荷役限界波高（北大東港，マニュアル提案値）

荷役限界波高(m) 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	2.13	2.29	0.97	1.13	1.09	2.52	2.23
6s	0.91	0.76	0.67	0.60	0.64	0.80	1.00
8s	0.63	0.53	0.53	0.48	0.50	0.56	0.68
10s	0.53	0.49	0.56	0.57	0.53	0.50	0.54
12s	0.49	0.47	0.58	0.57	0.53	0.48	0.49
15s	0.49	0.50	0.62	0.55	0.58	0.49	0.49

表-4.6 荷役限界波高（南大東港，マニュアル提案値）

荷役限界波高(m) 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	2.12	2.29	1.06	1.13	1.11	2.52	2.23
6s	0.91	0.76	0.67	0.60	0.64	0.81	1.00
8s	0.63	0.53	0.54	0.50	0.51	0.56	0.68
10s	0.53	0.49	0.56	0.57	0.53	0.50	0.54
12s	0.49	0.47	0.58	0.57	0.54	0.48	0.50
15s	0.49	0.50	0.62	0.57	0.58	0.50	0.49

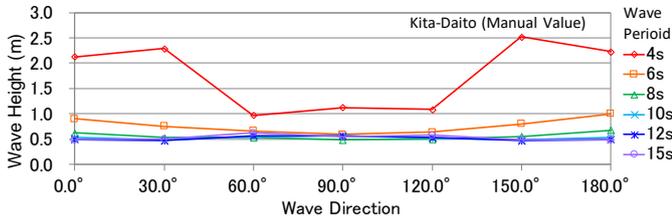


図-4.29 荷役限界波高（北大東港，マニュアル提案値）

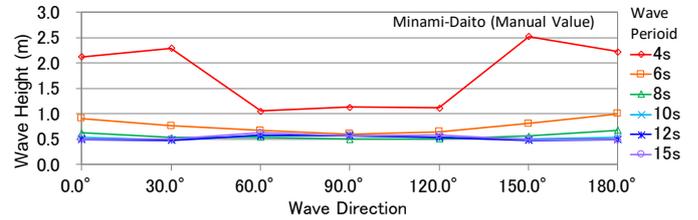


図-4.30 荷役限界波高（南大東港，マニュアル提案値）

表-4.7 波高の決定成分（北大東港，ヒアリング設定値）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	HEAVE
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH
10s	PITCH	PITCH	HEAVE	HEAVE	ROLL	PITCH	PITCH
12s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE
15s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE

表-4.8 波高の決定成分（南大東港，ヒアリング設定値）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	PITCH	PITCH	PITCH	HEAVE	PITCH	PITCH	PITCH
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH
10s	PITCH	PITCH	HEAVE	HEAVE	HEAVE	PITCH	PITCH
12s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE
15s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE

表-4.9 荷役限界波高（北大東港，ヒアリング設定値）

荷役限界波高(m) 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.26	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	>3.00	2.24	1.19	1.44	>3.00	>3.00
8s	>3.00	2.66	1.53	0.97	1.23	2.79	>3.00
10s	2.66	2.46	1.52	1.14	1.41	2.48	2.70
12s	2.28	1.96	1.39	1.13	1.44	2.06	2.43
15s	1.85	1.70	1.31	1.15	1.35	1.76	1.92

表-4.10 荷役限界波高（南大東港，ヒアリング設定値）

荷役限界波高(m) 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.26	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	>3.00	2.07	1.20	1.65	>3.00	>3.00
8s	>3.00	2.67	1.57	0.99	1.44	2.81	>3.00
10s	2.67	2.47	1.53	1.14	1.62	2.50	2.71
12s	2.28	1.96	1.40	1.13	1.44	2.06	2.44
15s	1.85	1.70	1.32	1.15	1.35	1.76	1.92

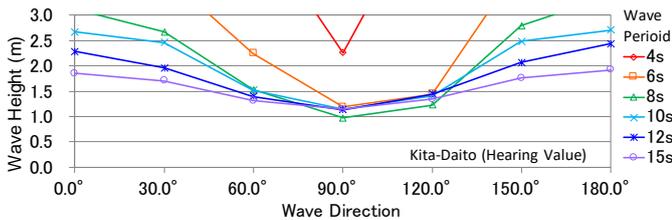


図-4.31 荷役限界波高（北大東港，ヒアリング設定値）

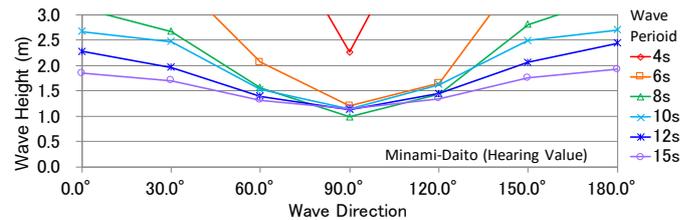


図-4.32 荷役限界波高（南大東港，ヒアリング設定値）

表-4.11 波高の決定成分（北大東港，係留索張力考慮）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	HEAVE
6s	PITCH	PITCH	係留索	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH
8s	PITCH	係留索	ROLL	ROLL	ROLL	係留索	PITCH
10s	PITCH	係留索	HEAVE	HEAVE	ROLL	係留索	PITCH
12s	係留索	係留索	HEAVE	HEAVE	HEAVE	係留索	係留索
15s	係留索	係留索	HEAVE	HEAVE	HEAVE	係留索	係留索

表-4.12 波高の決定成分（南大東港，係留索張力考慮）

決定成分 波周期	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	PITCH	PITCH	係留索	HEAVE	係留索	PITCH	PITCH
6s	PITCH	係留索	係留索	ROLL	係留索	係留索	PITCH
8s	PITCH	係留索	係留索	ROLL	係留索	係留索	PITCH
10s	PITCH	係留索	係留索	HEAVE	係留索	係留索	PITCH
12s	HEAVE	係留索	係留索	HEAVE	係留索	係留索	係留索
15s	HEAVE	係留索	係留索	係留索	係留索	係留索	係留索

表-4.13 荷役限界波高（北大東港，係留索張力考慮）

荷役限界波高(m)	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.26	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	>3.00	2.02	1.19	1.44	>3.00	>3.00
8s	>3.00	2.35	1.53	0.97	1.23	2.33	>3.00
10s	2.66	1.95	1.52	1.14	1.41	1.88	2.70
12s	2.19	1.75	1.39	1.13	1.44	1.71	2.31
15s	1.68	1.37	1.31	1.15	1.35	1.41	1.64

表-4.14 荷役限界波高（南大東港，係留索張力考慮）

荷役限界波高(m)	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.26	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	2.04	1.51	1.20	1.60	2.68	>3.00
8s	>3.00	1.66	1.21	0.99	1.12	1.61	>3.00
10s	2.67	1.51	1.15	1.14	1.06	1.40	2.71
12s	2.28	1.42	1.12	1.13	1.02	1.31	2.23
15s	1.85	1.16	0.95	1.05	0.93	1.04	1.79

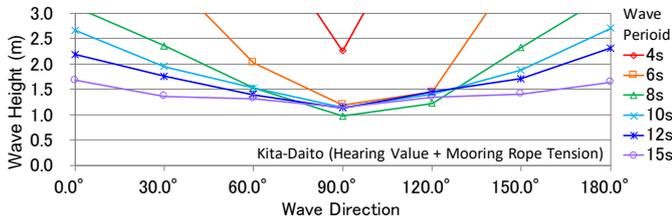


図-4.33 荷役限界波高（北大東港，係留索張力考慮）

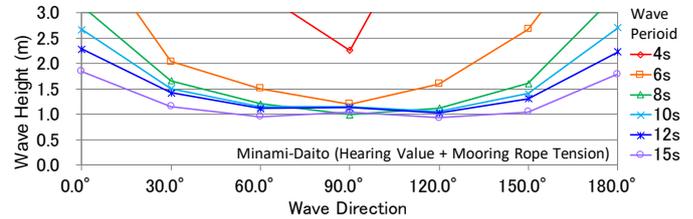


図-4.34 荷役限界波高（南大東港，係留索張力考慮）

表-4.15 荷役限界波高（北大東港，係留索張力のみ）

荷役限界波高(m)	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	>3.00	2.02	>3.00	2.19	>3.00	>3.00
8s	>3.00	2.35	1.76	>3.00	1.70	2.33	>3.00
10s	>3.00	1.95	1.67	2.65	1.64	1.88	>3.00
12s	2.19	1.75	1.60	2.22	1.55	1.71	2.31
15s	1.68	1.37	1.33	1.83	1.35	1.41	1.64

表-4.16 荷役限界波高（南大東港，係留索張力のみ）

荷役限界波高(m)	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	2.04	1.51	1.80	1.60	2.68	>3.00
8s	>3.00	1.66	1.21	1.56	1.12	1.61	>3.00
10s	>3.00	1.51	1.15	1.41	1.06	1.40	2.78
12s	2.28	1.42	1.12	1.24	1.02	1.31	2.23
15s	2.00	1.16	0.95	1.05	0.93	1.04	1.79

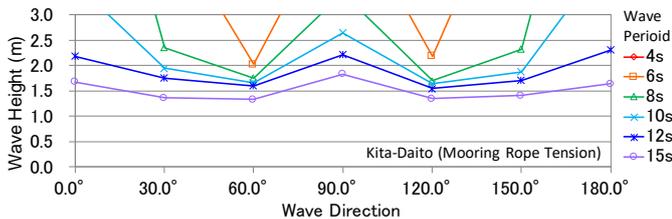


図-4.35 荷役限界波高（北大東港，係留索張力のみ）

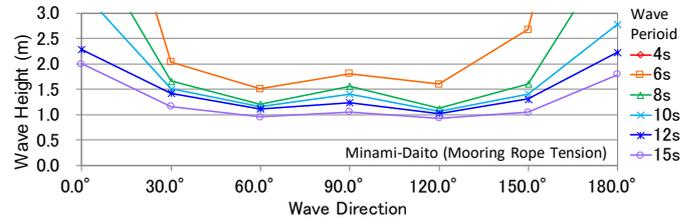


図-4.36 荷役限界波高（南大東港，係留索張力のみ）

したがって、ヒアリング設定値を用いた場合の荷役限界波高は、マニュアル提案値の場合よりもかなり大きいと言える。また、係留船舶の船首方向および船尾方向から来襲する波に対する荷役限界波高は、少なくとも1.5m以上と非常に大きくなっている。船舶の横揺れ固有周期8.4sと同調する波向90°，波周期8s以外の波向および波周期では、荷役限界波高1.0m以上が確保されており、これは

現地の荷役作業の判断基準である波高1m以下という条件と概ね一致している。

(3) 係留索の破断張力を考慮した場合

北大東港西地区岸壁および南大東港亀池地区岸壁における係留ブイを用いた船舶係留方式の係留船舶について、荷役許容動揺量としてヒアリング設定値を用いた場合に係留索の破断張力も考慮して算定した荷役限界波高を示

す。表-4.11 および表-4.12 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分等を示したものである。「係留索」の表示は、係留索の張力によって荷役限界波高が決定したことを意味している。また、表-4.13 および図-4.33、表-4.14 および図-4.34 は、それぞれ各岸壁における係留船舶の荷役限界波高を示したものである。一方、表-4.15 および図-4.35、表-4.16 および図-4.36 は、それぞれ各岸壁において限界値として係留索の破断張力のみを考慮した場合の係留船舶の荷役限界波高を示したものである。ヒアリング設定値の荷役許容動揺量に加えて係留索の破断張力を考慮した場合には、荷役限界波高の最小値は、北大東港西地区岸壁で 0.97m（波向 90°，波周期 8s）、南大東港亀池地区岸壁で 0.93m（波向 120°，波周期 15s）となり、最小値で見れば荷役許容動揺量のみに基づく荷役限界波高と大きくは変わらない結果となった。ただし、斜め波向の条件（波向 30°～60° または 120°～150°）では、係留索の破断張力により荷役限界波高が決まるケースが多いことから、荷役限界波高は最大で 1m 以上も低下している。しかしながら、どの波向に対しても概ね荷役限界波高 1.0m 以上は確保されており、係留索の破断張力を考慮しても現地の荷役作業の判断基準である波高 1m 以下という条件と概ね一致している。なお、ここでは示していないが、荷役許容動揺量としてマニュアル提案値を用いた場合には、係留索の張力が破断張力を超えるケースはなく、係留索の破断張力を考慮しても荷役限界波高に違いはなかった。以上のことから、南北大東島のように外洋波浪の影響を直接受けるような係留施設において荷役係留時の船舶の荷役限界波高を算定する場合には、荷役許容動揺量に加えて係留索の張力に対する限界値も考慮する方が、より正確に荷役限界波高を算定できると言える。

5. 新たな船舶の係留方式の考案

5.1 概要

南北大東島の係留施設における現状の係留ブイを用いた船舶の係留方式では、係留船舶の動揺シミュレーションにより算定された荷役限界波高は、防舷材と係留索を用いた通常の係留方式および一般的な荷役機械による荷役方式を対象とした場合の荷役限界波高に比べて大きく、少なくとも約 1m 以上である。しかしながら、実際の現地における荷役限界波高は、小型船の出航可否の条件である波高 1m 以下によって制限されるため、すべての波向および波周期に対して最大で波高 1m になっていると考えられる。これは、現状の係留ブイを用いた船舶の係留方式

では、係留ブイへの船舶からの綱取りが港湾に配備された小型船の乗組員により実施されており、高波浪時にはその作業が困難になるからである。すなわち、小型船による綱取りが必要でない係留ブイを用いない形式の新たな船舶の係留方式を開発することができれば、南北大東島の係留施設における船舶の荷役効率を向上させることも可能になると考えられる。

5.2 係留ブイを用いない船舶係留方式の検討

(1) 船舶の係留方式の基本要件

南北大東島における新たな船舶の係留方式の基本要件としては、係留ブイを用いない船舶係留方式であること、船舶の接岸・離岸が容易かつ安全に実行可能であること、係留船舶の荷役効率が現状よりも向上することなどがあげられる。南北大東島において係留ブイを用いた船舶の係留方法が採用されているのは、厳しい波浪にさらされる太平洋上の孤島であり、通常の係留柱と防舷材を用いた船舶の係留方式を利用することができないからである。このため、本州地方などの港湾で採用されている一般的な船舶の係留方式を適用することは難しいと考えられる。

(2) 船舶の係留技術の事例収集

新たな船舶の係留方式を考案するにあたって、通常の係留索と防舷材を用いた係留方法とは異なった船舶の係留技術について事例収集を実施した。事例収集の結果、従来の係留方式と異なった船舶の係留技術としては、岸壁上に設置されるものとして、真空式パッドや半永久磁石を用いた吸着型の機械式係留装置と岸壁側からリンクプレートやワイヤを提供し船舶側のボラードに接続する連結型の機械式係留装置と大別して 2 種類があることがわかった。これらの機械式係留装置は、欧州などの諸外国の静穏な港湾域において、フェリーなどの定期運航船に対していくつか実用化されている。一方、一般的な港湾ではないが、洋上の石油生産プラットフォームなどでは、物資輸送船などの船舶がその推進力を利用して、鋼製接岸構造物に対して船体を押し付けて接岸荷役する特殊な方式も用いられている。

(3) 新たな船舶の係留方式の検討

収集した技術情報を基にして、まずは、新たな船舶の係留方式を 2 種類ほど検討した。図-5.1 および図-5.2 は、それぞれ検討した吸着型・連結型組み合わせ方式および鋼製係留フェンダー方式による船舶の係留方法のコンセプトを示したものである。吸着型・連結型組み合わせ方式は、岸壁上に設置された真空式パッドによる吸着型の機械式係留装置とリンクプレートによる連結型の機械式係留装置の両方を用いて、船舶の接岸・係留・離岸を半自動

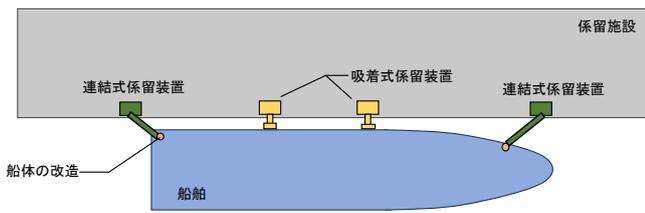


図-5.1 吸着型・連結型組み合わせ方式による船舶係留 (案)

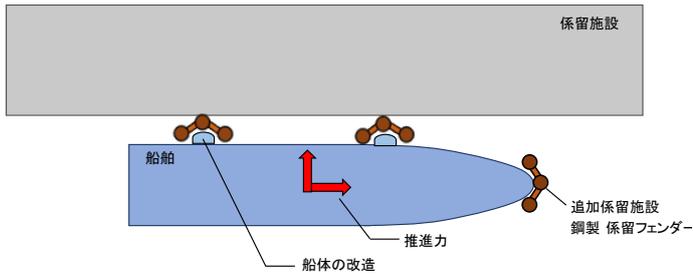


図-5.2 鋼製係留フェンダー方式による船舶係留 (案)

的に達成するものである。この方式は、機械機器から構成されるため、高波浪時における係留装置の安全性や維持管理の煩雑さなどが課題である。一方、鋼製係留フェンダー方式は、岸壁前面の海底に鋼製構造の係留フェンダーを整備し、それに対して船舶の推進力を用いた接岸を行い荷役を可能にするものである。この方式は、接岸時の船体構造の耐久性や長時間荷役の難しさなどが課題である。

(4) 高強度ワイヤを用いた船舶の係留方式の考案

船舶の係留技術の事例収集成果を基にして検討した新たな船舶の係留方式は、南北大東島における現状の係留ブイを用いた船舶の係留方式とは大きく異なるコンセプトである。そこで、岸壁からある程度距離を離して船舶を係留し、荷役時には係留船舶の動揺をある程度許容するといった係留ブイによる船舶係留方式における基本的な考え方を踏襲し、沖合の係留ブイを用いずに岸壁側の係留機構のみを利用する船舶の係留方式を考案した。図-5.3は、考案した高強度ワイヤを用いた船舶の係留方式の

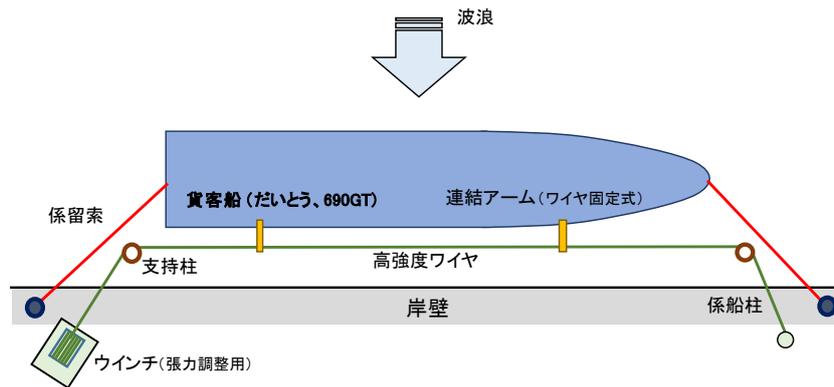


図-5.3 高強度ワイヤを用いた船舶の係留方式

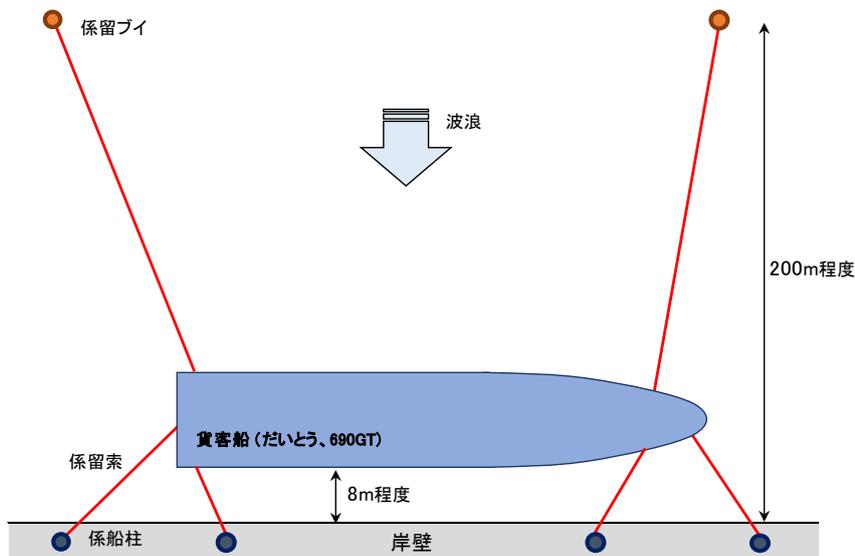


図-5.4 係留ブイを用いた現状の船舶の係留方式

コンセプトを示す。また、図-5.4 は、南北大東島における係留ブイを用いた船舶の係留方式のイメージを比較のために示す。高強度ワイヤによる船舶の係留方式では、海底に設置した 2 本の支持柱を介して岸壁上に配備したウインチにより係留柱に接続した高強度ワイヤを展張し、船上に取り付けられた 2 基の可動式連結アームを用いてこのワイヤを把持して船体を係留する。防舷材は使用せず、展張されているワイヤの反力によって船舶の岸壁への接触を妨げる仕組みである。また、係留船舶の安定性を向上させるため、船舶に装備されている係留索も併せて用いることができる。ここでは、できる限り単純な係留方法とするために、船舶の係留索の利用は船首および船尾に 1 本ずつとしている。係留ブイによる現状の船舶係留方式と比較すると、船舶が岸壁に接近する運動を抑止するために用いられていた係留ブイの代わりに高強度ワイヤが利用されており、船舶が有している係留索を用いることも含めて両係留方式のコンセプトは一致している。高強度ワイヤによる船舶係留方式では、係留設備が岸壁側のみで完結しており係留ブイを利用していない。このため、小型船の出航条件である波高 1m 以下の制限が取り除かれることから、荷役限界波高が大きくなる可能性があり係留船舶の荷役効率の向上も期待できる。

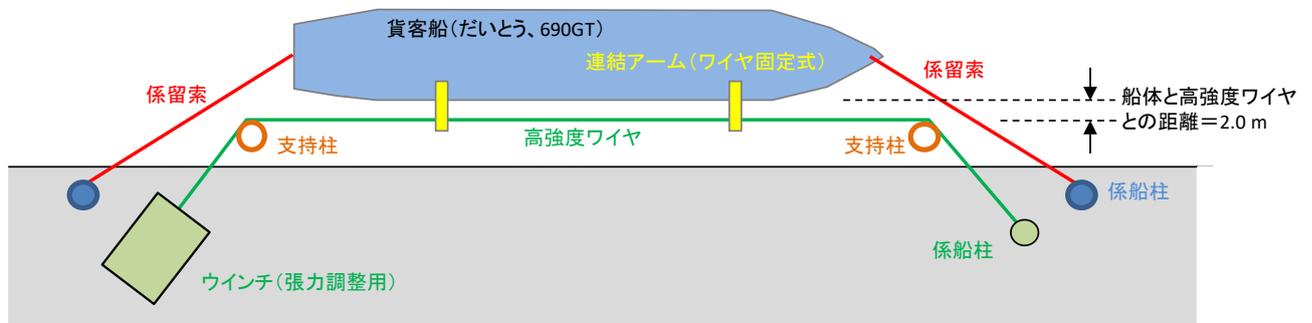
5.3 高強度ワイヤによる船舶係留方式の評価方法

(1) 係留船舶の動揺シミュレーション

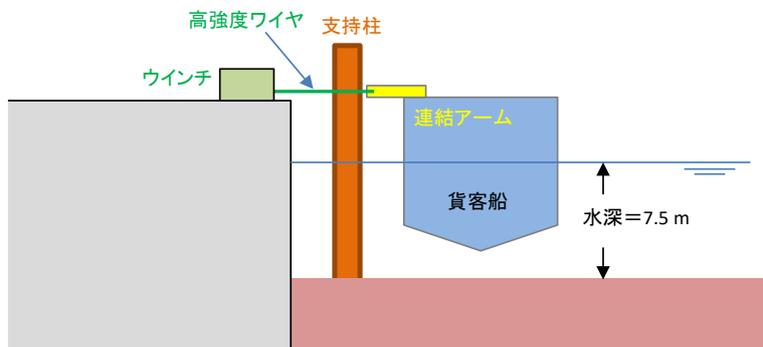
係留ブイの代わりに高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式については、係留船舶の動揺シミュレーションで算定された荷役限界波高に基づいてその有効性を確認する。波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションの実施方法は、基本的に係留ブイによる船舶の係留方式の場合と同様であり、係留条件のみが異なる。また、高強度ワイヤによる船舶の係留方式は、南北大東島のいずれの地区岸壁にも対応が可能である。

(2) 船舶の係留方式の構成

係留船舶の動揺シミュレーションにおける高強度ワイヤによる船舶の係留方式について設定する。図-5.5 は、高強度ワイヤによる船舶係留方式の模式図(平面図, 断面図)を示したものである。この係留方式では、2 本の支持柱を介して高強度ワイヤをウインチによって展張し、連結アームを用いて船舶をワイヤに固定係留する。また、船舶が有する通常の係留索も付加的に利用する。ここでは、高強度ワイヤによる船舶係留方式の効果を容易に確認できるように、船舶に装備されている係留索は船首および船尾に 1 本ずつとした。この係留方法において、各部材構造等の詳細な設計諸元は確定していないが、ここでは、船



(a) 平面図



(b) 断面図

図-5.5 高強度ワイヤによる船舶係留方式の模式図

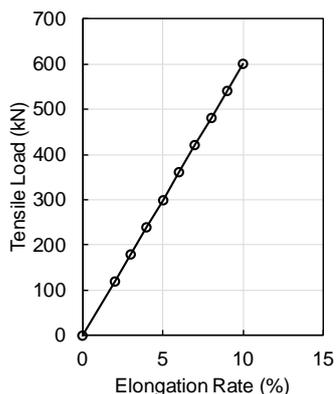


図-5.6 高強度ワイヤの伸縮特性

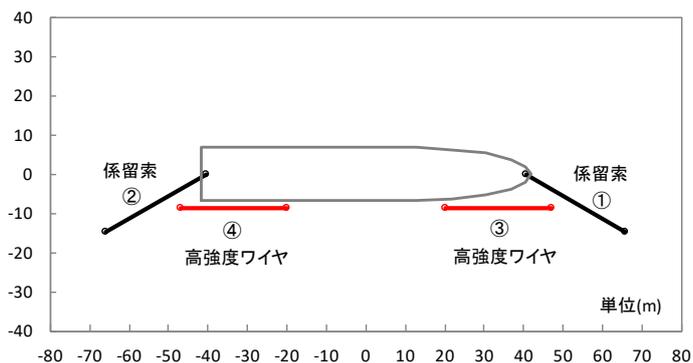


図-5.7 船体動揺シミュレーションにおける係留配置

体と岸壁との離隔距離を 8.0m とし、船体と高強度ワイヤとの距離を 2.0m としている。これは、高強度ワイヤが船体に接触しないように、また船体幅 13.40m と比べて極端に大きくないように設定したものである。この係留方式では、船舶の係留時には船体が岸壁に接触しないような機構を採用しており、防舷材を必要としない。また、2本の支持柱の間隔は、船舶の全長 83.62m よりも長くなるような諸元とする。図-5.6 は、高強度ワイヤの伸縮特性を示す。高強度ワイヤの特性については、船舶の係留索（高強度繊維索）の伸縮特性を考慮して、それよりも高強度となるように設定した。ここでは、高強度ワイヤの伸び-荷重特性は線形と仮定し、破断張力は 600kN とした。船体動揺シミュレーションでは、高強度ワイヤの初期張力は係留索と同様に破断張力の 7% の値（42.0kN）とした。

(3) 係留配置の設定

係留船舶の動揺シミュレーションでは、高強度ワイヤによる係留系の諸元や特性をそのまま考慮できないため、支持柱-高強度ワイヤ-連結アームの全体係留系の変位-反力特性を適切に反映できるように 2 本に分割して設定した。図-5.7 は、係留船舶の動揺シミュレーションにおける係留系の配置の座標を示す。図において、①および②は船舶の係留索であり、③および④は高強度ワイヤである。船体動揺シミュレーションにおいては、このように船舶の係留系は、船首側および船尾側の係留索 1 本ずつと船体長軸と同じ方向に配置された 2 本の高強度ワイヤの合計 4 本によって構成される。

(4) 船舶の係留方式の評価

高強度ワイヤによる船舶係留方式の有効性は、係留船舶の動揺シミュレーションで得られた荷役限界波高と係留ブイによる船舶係留方式の荷役限界波高を相互比較することにより検証する。また、南北大東島における施工性および維持管理性について考察し、高強度ワイヤによる船舶係留方式の現地適用性についても検討する。

6. 高強度ワイヤによる船舶係留方式の荷役限界波高

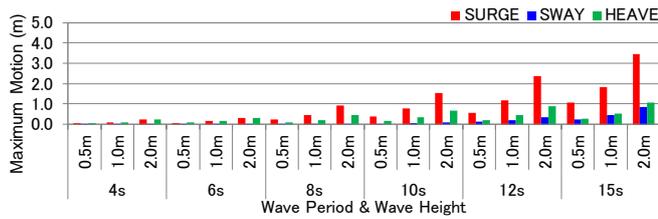
6.1 概要

高強度ワイヤによる船舶係留方式を対象として、対象係留施設における貨客船「だいとう」の荷役限界波高を算定した。まず、波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより、各波浪条件における対象船舶の動揺 6 成分の最大動揺量および係留索・高強度ワイヤの最大張力を計算した。次に、係留ブイによる船舶係留方式のときの検討結果を参考に、対象船舶の荷役許容動揺量として、南北大東島の海運会社へのヒアリング結果に基づく設定値を採用し、加えて係留索・高強度ワイヤの張力の限界値として破断張力も考慮することとした。そして、各波浪条件における対象船舶の動揺 6 成分の最大動揺量と荷役許容動揺量、また係留索・高強度ワイヤの最大張力と破断張力との相関関係から高強度ワイヤによる船舶係留方式に対する荷役限界波高を求めた。ここでは、係留ブイを用いた船舶係留方式の場合と同様に、高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶の最大動揺量および係留索・高強度ワイヤの最大張力について考察する。また、算定された荷役限界波高について、係留ブイによる船舶係留方式の場合の荷役限界波高と相互比較して考察する。なお、以下において、係留索等は、船舶の係留索と高強度ワイヤの両方を含めた意味として用いている。

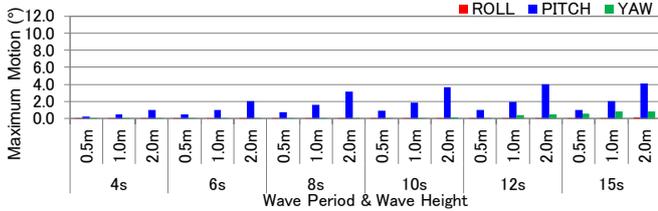
6.2 船舶の最大動揺量および係留索等の最大張力

(1) 高強度ワイヤによる船舶係留方式

高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶の最大動揺量および係留索等の最大張力について示す。図-6.1～図-6.14 は、それぞれ係留船舶の最大動揺量および係留索等の最大張力について、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の 7 種類の波向ごとに示したものである。ここで、奇数番号の図は船舶の最大

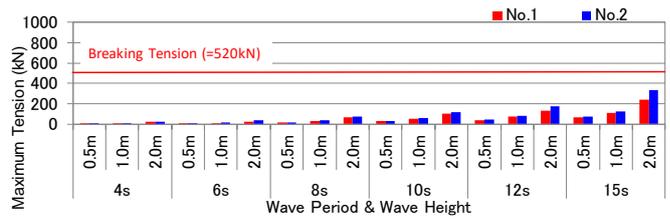


(a) 並進運動 3 成分

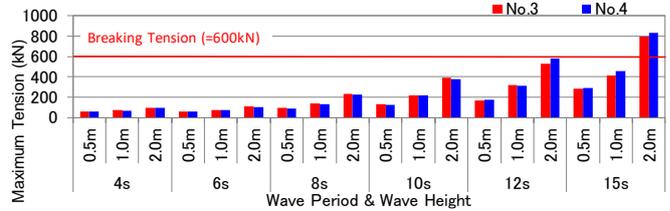


(b) 回転運動 3 成分

図-6.1 最大動揺量 (波向 0°)

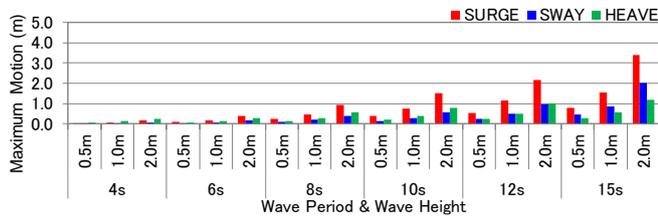


(a) 係留索①, ②

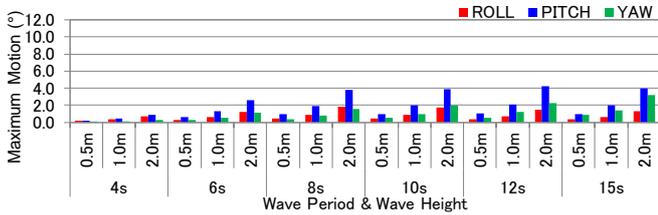


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.2 最大張力 (波向 0°)

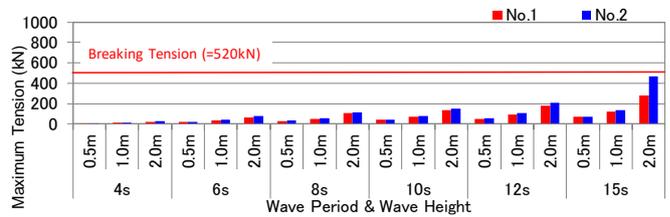


(a) 並進運動 3 成分

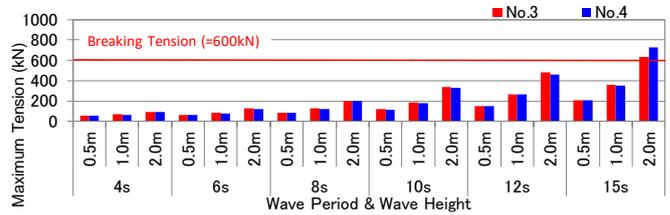


(b) 回転運動 3 成分

図-6.3 最大動揺量 (波向 30°)

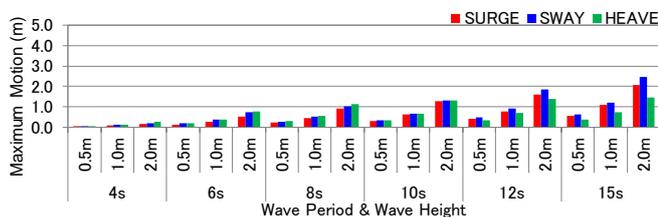


(a) 係留索①, ②

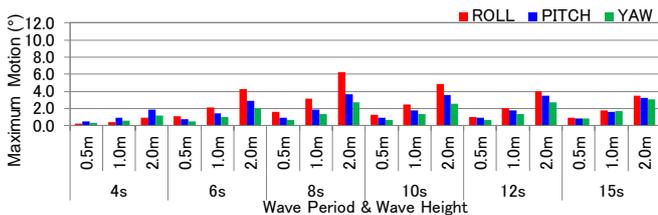


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.4 最大張力 (波向 30°)

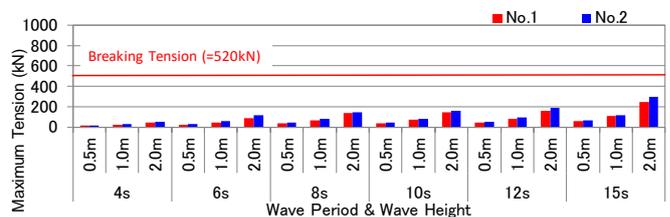


(a) 並進運動 3 成分

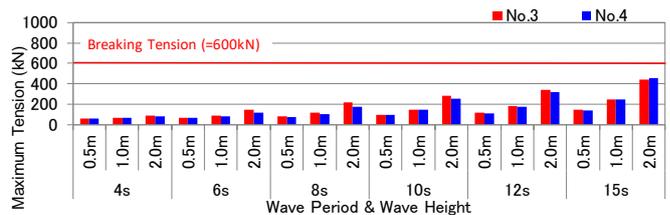


(b) 回転運動 3 成分

図-6.5 最大動揺量 (波向 60°)

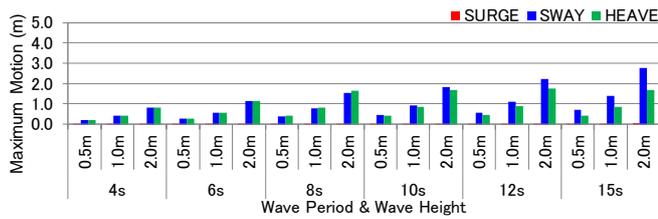


(a) 係留索①, ②

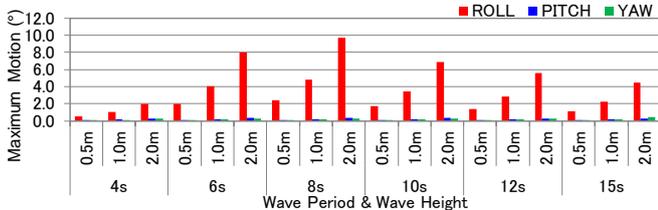


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.6 最大張力 (波向 60°)

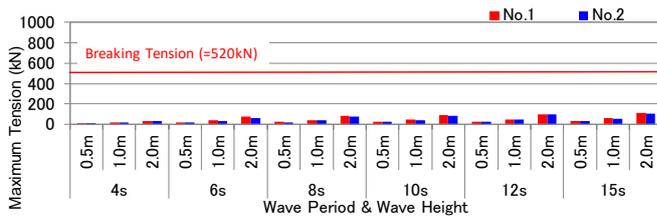


(a) 並進運動 3 成分

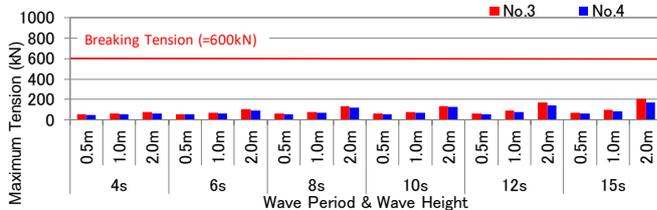


(b) 回転運動 3 成分

図-6.7 最大動揺量 (波向 90°)

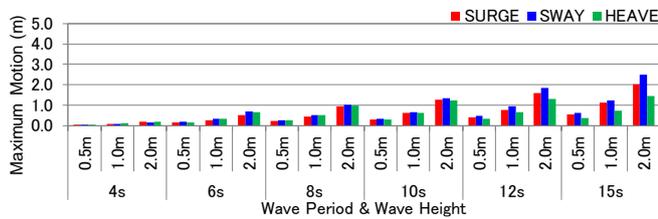


(a) 係留索①, ②

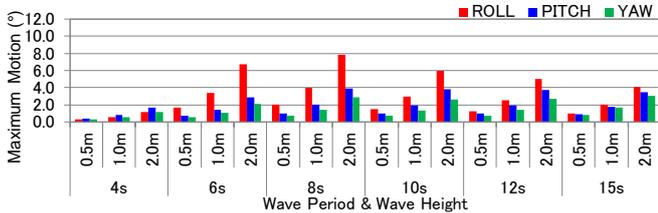


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.8 最大張力 (波向 90°)

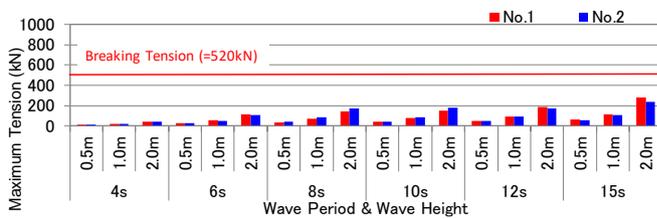


(a) 並進運動 3 成分

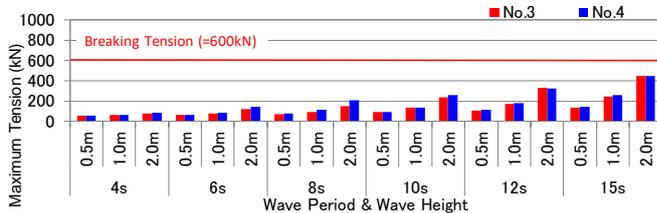


(b) 回転運動 3 成分

図-6.9 最大動揺量 (波向 120°)

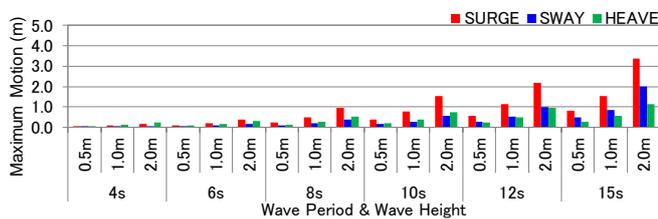


(a) 係留索①, ②

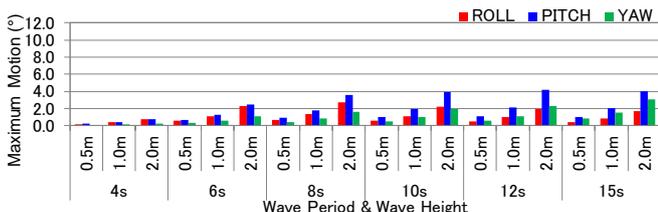


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.10 最大張力 (波向 120°)

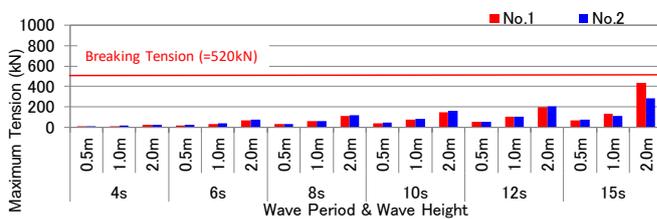


(a) 並進運動 3 成分

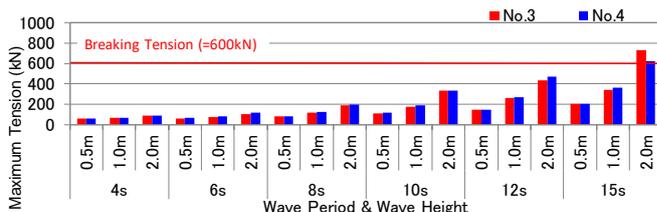


(b) 回転運動 3 成分

図-6.11 最大動揺量 (波向 150°)

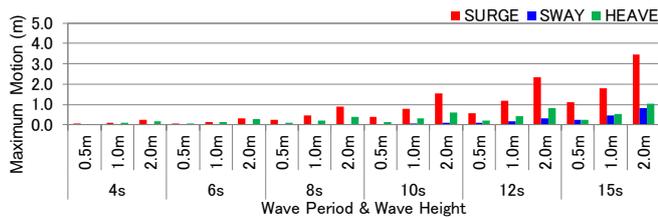


(a) 係留索①, ②

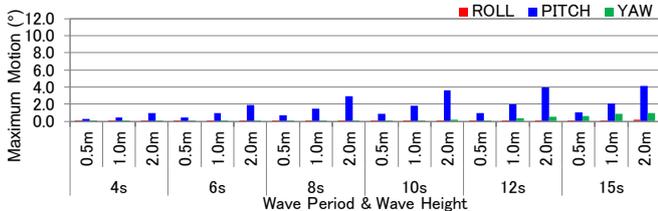


(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.12 最大張力 (波向 150°)

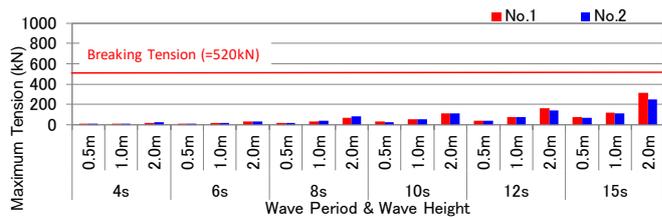


(a) 並進運動 3 成分

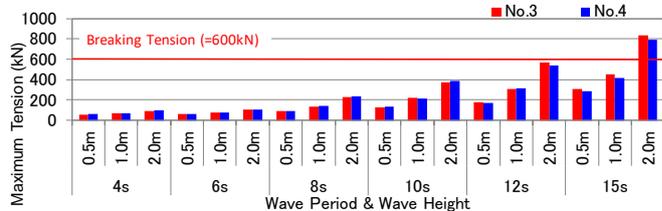


(b) 回転運動 3 成分

図-6.13 最大動揺量 (波向 180°)



(a) 係留索①, ②



(b) 高強度ワイヤ③, ④

図-6.14 最大張力 (波向 180°)

動揺量に、また偶数番号の図は係留索等の最大張力に対応している。図には、係留索の破断張力 520kN および高強度ワイヤの破断張力 600kN も赤線で示している。これらの図から、係留船舶の最大動揺量については、並進運動成分は、波周期が長くなるほど、また波高が高くなるほど増大する傾向にあることがわかる。一方、回転運動成分は、並進運動成分の傾向と基本的には同じであるが、ロールは船舶の横揺れ固有周期 8.4s に近い波周期 8s のときに大きくなっている。また、係留索等の最大張力については、高強度ワイヤ③および④の最大張力は、係留索①および②の最大張力よりも大きい傾向にあることがわかる。係留索①および②の最大張力は破断張力 520kN を超えることはないが、高強度ワイヤ③および④の最大張力は、係留船舶の船首方向あるいは船尾方向から波が作用する場合に破断張力 600kN を超えているケースがある。これは、このような長周期かつ高波高の波浪条件の場合に、高強度ワイヤが船体に作用する波浪荷重の大部分を負担しているからである。ただし、高強度ワイヤの最大張力が破断張力を超えているのは、波周期 15s かつ波高 2.0m の場合のみであり、これ以外の波浪条件では破断張力以下に収まっている。なお、この係留方式において、高強度ワイヤおよび係留索の長さや配置を適切に調整することにより、高い張力の発生を低減させることは可能であると考えられる。

(2) 係留ブイによる船舶係留方式との比較

高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶の最大動揺量および係留索等の最大張力について、係留ブイを用いた船舶係留方式の結果と比較する。図-4.1~図-4.14 の係留ブイを用いた船舶係留方式における係留船舶の最大動揺量と比べると、両係留方式における各波浪条件に対

する最大動揺量は概ね同じ傾向にあることがわかる。すなわち、係留方式を変更しても係留船舶の動揺特性は大きく変わっていないと言える。これは、両船舶係留方式において、船舶の係留の仕方に関するコンセプトが一致していることが理由と考えられる。図-4.15~図-4.28 の係留ブイによる船舶係留方式における係留索の最大張力と比べると、高強度ワイヤによる船舶係留方式において岸壁側に係留される係留索①および②の最大張力は、係留ブイによる船舶係留方式において岸壁側に係留される係留索②, ③, ⑤および⑥の最大張力と比較して小さいことがわかる。また、係留ブイによる船舶係留方式と比較して、高強度ワイヤによる船舶係留方式では、係留船舶の船側方向から作用する波に対して張力が低く抑えられている。各波浪条件に対して全体的にみると、高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留索等の最大張力は、高波浪時でも破断張力を超えることが少ない傾向にあり、係留ブイによる船舶係留方式よりも安全性が高いと考えられる。

6.3 荷役許容動揺量等の限界値の設定

(1) 荷役許容動揺量の設定値

高強度ワイヤによる船舶係留方式に対して荷役限界波高を算定する際の対象船舶の荷役許容動揺量は、係留ブイによる船舶係留方式に対する検討結果を参考に、南北大東島の海運会社へのヒアリング結果に基づく設定値を基本的に採用した。表-6.1 は、高強度ワイヤによる船舶係留方式に対して採用した荷役許容動揺量を示す。この表には、比較のため、マニュアルにおける一般貨物船の荷役許容動揺量とヒアリング結果に基づいた荷役許容動揺量も示している。ヒアリング結果による荷役許容動揺量では、ヒープ、ロール、ピッチおよびヨーの動揺 4 成分が

表-6.1 荷役許容動揺量の設定値

	動揺成分					
	SURGE (m)	SWAY (m)	HEAVE (m)	ROLL (°)	PITCH (°)	YAW (°)
荷役許容動揺量 (マニュアル、一般貨物船)	±1.0	±0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
荷役許容動揺量 (ヒアリング結果参考)	-	-	±1.0	±5.0	±5.0	±5.0
荷役許容動揺量 (高強度ワイヤ方式)	-	-2.0	±1.0	±5.0	±5.0	±5.0

表-6.2 係留索等の張力の限界値

種類	破断張力 (kN)
係留索(ダイニーマ+パイレンマルチ)	520.0
高強度ワイヤ	600.0

設定されており、サージおよびスウェイはクレーンの追従により荷役作業が可能であることから制限が課せられてない。しかしながら、高強度ワイヤによる船舶係留方式においては、係留船舶の岸壁方向へのスウェイの動揺により船体が高強度ワイヤと接触する可能性があるため、船体とワイヤとの離隔距離2.0mを荷役許容動揺量として設定した。ここでは船舶が右舷接岸であり、図-3.3の座標系からスウェイは岸壁に近づく方向が負となるため、スウェイの荷役許容動揺量は-2.0mと表される。また、高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶の荷役限界波高への影響を評価するために、スウェイの荷役許容動揺量を2.0mの半分の1.0mとした場合についても荷役限界波高を算定した。

(2) 係留索等の張力の限界値

係留ブイによる船舶係留方式に対する検討結果から考えると、荷役限界波高を算定する際に係留船舶の荷役許容動揺量として通常よりも大きな値を採用する場合には、係留索の張力に対する限界値も考慮する必要がある。そこで、高強度ワイヤによる船舶係留方式に対して荷役限界波高を算定する際には、係留船舶の荷役許容動揺量に加えて係留索等の張力に対する限界値として係留索等の破断張力を考慮した場合も検討した。表-6.2は、係留索および高強度ワイヤの破断張力の設定値を示す。対象船舶が装備している係留索の破断張力は520kN、また高強度ワイヤの破断張力は600kNである。

6.4 荷役限界波高の比較

(1) 高強度ワイヤによる船舶係留方式

高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶について、スウェイの荷役許容動揺量を2.0mおよび1.0mとした場合の荷役限界波高を示す。表-6.3および表-6.4は、それぞれスウェイの荷役許容動揺量ごとの係留船舶の荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分を示したものである。また、表-6.5および図-6.15、表-6.6および図-6.16

は、それぞれスウェイの荷役許容動揺量ごとの係留船舶の荷役限界波高を示したものである。さらに、スウェイの荷役許容動揺量に加えて、係留索等の破断張力も考慮して算定した荷役限界波高を示す。表-6.7および表-6.8は、係留索等の破断張力も考慮した場合について、それぞれスウェイの荷役許容動揺量ごとの係留船舶の荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分等を示したものである。

「ワイヤ」の表示は、高強度ワイヤの張力によって荷役限界波高が決定したことを意味している。また、表-6.9および図-6.17、表-6.10および図-6.18は、係留索等の破断張力も考慮した場合について、それぞれスウェイの荷役許容動揺量ごとの係留船舶の荷役限界波高を示したものである。ここで、奇数番号の図は、スウェイの荷役許容動揺量が2.0mの場合に、また偶数番号の図は、スウェイの荷役許容動揺量が1.0mの場合に対応している。一方、表-6.11および図-6.19は、限界値として係留索等の破断張力のみを考慮した場合の係留船舶の荷役限界波高を示したものである。スウェイの荷役許容動揺量が2.0mの場合では、荷役限界波高の最小値は、1.04m(波向90°、波周期8s)である。これは、波周期8sは係留船舶の横揺れ固有周期8.4sと同調する周期であることから、ロールの動揺量が増大したためと考えられる。荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分は、短周期側ではロールあるいはピッチであり、長周期側ではヒープである。スウェイの荷役許容動揺量が2.0mの場合は、すべての波向および波周期において、荷役限界波高は1.0m以上が確保されている。また、スウェイの荷役許容動揺量が2.0mのときに係留索等の破断張力を考慮した場合は、荷役限界波高の最小値は1.04m(波向90°、波周期8s)となり、係留索等の破断張力を考慮しない場合と同じである。その一方で、長周期側の波が船首方向あるいは船尾方向から船舶に作用するときには荷役限界波高が低下している。これは、荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分等について見ると、この条件において高強度ワイヤの張力が破断張力に達するケースが多いからである。このことは、表-6.11および図-6.19において、係留索等の破断張力のみを考慮した場合の荷役限界波高が、ほとんどの波浪条件で3m以上と非常に大きくなっているが、波向0°~30°あるいは150°~180°で波周期12sおよび15sのときには低下していることからわかる。しかしながら、係留索等の破断張力を考慮した場合でもすべての波向および波周期において、荷役限界波高は1.0m以上が確保されている。一方、スウェイの荷役許容動揺量が1.0mの場合では、荷役限界波高の最小値は0.71m(波向90°、波周期15s)となっており、荷役許容動揺量が2.0mの場合と比べて長

表-6.3 波高の決定成分 (スウェイ : 2.0m)

決定成分	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
10s	PITCH	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	PITCH	PITCH	
12s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	
15s	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	

表-6.4 波高の決定成分 (スウェイ : 1.0m)

決定成分	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
10s	PITCH	HEAVE	SWAY	SWAY	SWAY	PITCH	PITCH	
12s	HEAVE	HEAVE	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	HEAVE	
15s	HEAVE	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	HEAVE	

表-6.5 荷役限界波高 (スウェイ : 2.0m)

荷役限界波高(m)	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.39	>3.00	>3.00	>3.00	
6s	>3.00	>3.00	2.35	1.25	1.48	>3.00	>3.00	
8s	>3.00	2.66	1.60	1.04	1.27	2.79	>3.00	
10s	2.70	2.52	1.53	1.19	1.63	2.57	2.76	
12s	2.28	1.96	1.43	1.13	1.52	2.07	2.44	
15s	1.85	1.70	1.36	1.19	1.39	1.76	1.93	

表-6.6 荷役限界波高 (スウェイ : 1.0m)

荷役限界波高(m)	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.39	>3.00	>3.00	>3.00	
6s	>3.00	>3.00	2.35	1.25	1.48	>3.00	>3.00	
8s	>3.00	2.66	1.60	1.04	1.27	2.79	>3.00	
10s	2.70	2.52	1.51	1.08	1.50	2.57	2.76	
12s	2.28	1.96	1.08	0.89	1.08	2.01	2.44	
15s	1.85	1.06	0.82	0.71	0.80	1.07	1.93	

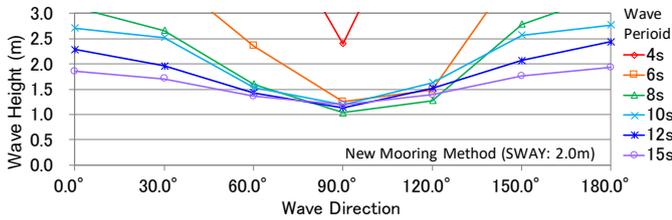


図-6.15 荷役限界波高 (スウェイ : 2.0m)

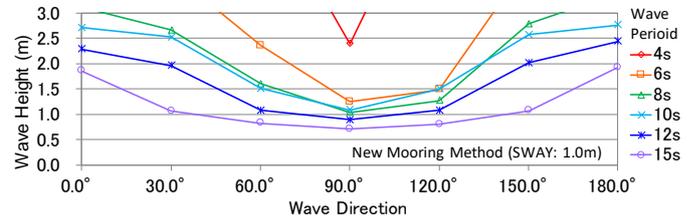


図-6.16 荷役限界波高 (スウェイ : 1.0m)

表-6.7 波高の決定成分 (スウェイ : 2.0m+係留索張力考慮)

決定成分	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
10s	PITCH	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	PITCH	PITCH	
12s	ワイヤ	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	HEAVE	ワイヤ	
15s	ワイヤ	ワイヤ	HEAVE	HEAVE	HEAVE	ワイヤ	ワイヤ	

表-6.8 波高の決定成分 (スウェイ : 1.0m+係留索張力考慮)

決定成分	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	HEAVE	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	HEAVE	PITCH	
6s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
8s	PITCH	PITCH	ROLL	ROLL	ROLL	PITCH	PITCH	
10s	PITCH	HEAVE	SWAY	SWAY	SWAY	PITCH	PITCH	
12s	ワイヤ	HEAVE	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	ワイヤ	
15s	ワイヤ	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	SWAY	ワイヤ	

表-6.9 荷役限界波高 (スウェイ : 2.0m+係留索張力考慮)

荷役限界波高(m)	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.39	>3.00	>3.00	>3.00	
6s	>3.00	>3.00	2.35	1.25	1.48	>3.00	>3.00	
8s	>3.00	2.66	1.60	1.04	1.27	2.79	>3.00	
10s	2.70	2.52	1.53	1.19	1.63	2.57	2.76	
12s	2.06	1.96	1.43	1.13	1.52	2.07	2.11	
15s	1.37	1.65	1.36	1.19	1.39	1.64	1.37	

表-6.10 荷役限界波高 (スウェイ : 1.0m+係留索張力考慮)

荷役限界波高(m)	波向							
	波周期	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
4s	>3.00	>3.00	>3.00	2.39	>3.00	>3.00	>3.00	
6s	>3.00	>3.00	2.35	1.25	1.48	>3.00	>3.00	
8s	>3.00	2.66	1.60	1.04	1.27	2.79	>3.00	
10s	2.70	2.52	1.51	1.08	1.50	2.57	2.76	
12s	2.06	1.96	1.08	0.89	1.08	2.01	2.11	
15s	1.37	1.06	0.82	0.71	0.80	1.07	1.37	

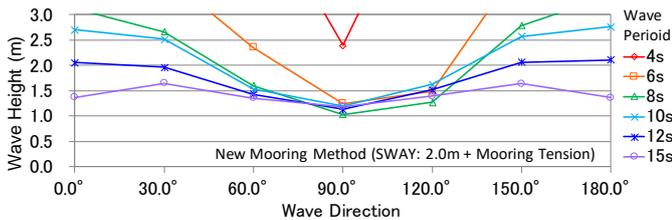


図-6.17 荷役限界波高 (スウェイ : 2.0m+係留索張力考慮)

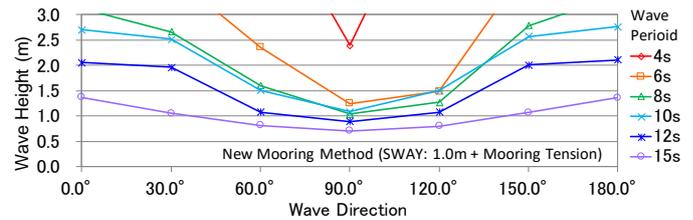


図-6.18 荷役限界波高 (スウェイ : 1.0m+係留索張力考慮)

表-6.11 荷役限界波高（係留索張力のみ）

荷役限界波高(m)	波向						
	0.0°	30.0°	60.0°	90.0°	120.0°	150.0°	180.0°
波周期							
4s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
6s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
8s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
10s	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
12s	2.06	2.52	>3.00	>3.00	>3.00	2.59	2.11
15s	1.37	1.65	2.71	>3.00	2.74	1.64	1.37

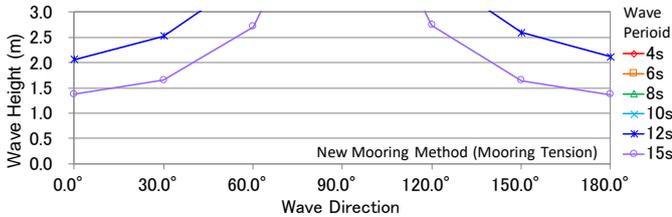


図-6.19 荷役限界波高（係留索張力のみ）

周期側の波が船側方向から船舶に作用するとき荷役限界波高が低下している。荷役限界波高が決まる要因となった動揺成分は、短周期側ではロールあるいはピッチであるが、長周期側ではスウェイが多くなっており、スウェイの荷役許容動揺量による動揺制限の影響が大きいことがわかる。すなわち、高強度ワイヤによる船舶の係留方式では、船舶の岸壁方向の動揺に対して制限が厳しい条件設定とすると、長周期側において荷役限界波高が低下することになる。また、スウェイの荷役許容動揺量が 1.0m のときに係留索等の破断張力を考慮した場合では、荷役限界波高の最小値は 0.71m（波向 90°，波周期 15s）であり、係留索等の破断張力を考慮しない場合と同じである。その一方で、長周期側の波が船首方向あるいは船尾方向から船舶に作用するときには荷役限界波高が低下している。これは、荷役許容動揺量が 2.0m の場合と同様に、この条件において高強度ワイヤの張力が破断張力に達するケースが多いからである。このため、高強度ワイヤによる船舶係留方式を採用する場合には、船舶が装備している係留索を使用して船首尾方向の係留索の増し取りを行うなどすることにより、高強度ワイヤに作用する張力を低減させることも必要と考えられる。

(2) 係留ブイによる船舶係留方式との比較

高強度ワイヤによる船舶係留方式の係留船舶の荷役限界波高について、係留ブイによる船舶係留方式の結果と比較する。表-4.7～表-4.14 および図-4.31～図-4.34 の係留ブイによる船舶係留方式における係留船舶の荷役限界波高を見ると、係留ブイによる船舶係留方式の荷役限界波高については、どの波向および波周期に対しても概ね 1.0m 以上となっている。このため、高強度ワイヤによる船舶係留方式を用いる場合に同等の荷役限界波高を確

保するためには、スウェイの荷役許容動揺量として少なくとも 2m 程度は必要であると考えられる。すなわち、高強度ワイヤによる船舶係留方式を用いる場合には、船体と高強度ワイヤとの離隔距離として 2m 以上は必要になる。一方、表-4.15 および表-4.16、また図-4.35 および図-4.36 の係留ブイによる船舶係留方式において係留索の破断張力のみを考慮した場合の係留船舶の荷役限界波高と比べると、長周期側で船首方向あるいは船尾方向から波が作用する場合を除いて、高強度ワイヤによる船舶係留方式の荷役限界波高がかなり大きいことがわかる。これは、ほとんどの波浪条件において、係留索等の破断張力によって係留船舶の荷役限界波高が決定せず、係留船舶の荷役許容動揺量によって決定することを意味している。したがって、荷役係留時における係留船舶の安全性の点からも、高強度ワイヤによる船舶係留方式の有効性を評価することができる。

7. 高強度ワイヤによる船舶係留方式の現地適用性

高強度ワイヤによる船舶係留方式に対する係留船舶の動揺シミュレーションの結果によると、この係留方式を採用した場合の荷役限界波高は、スウェイの荷役許容動揺量の設定値によって異なるが、その値を少なくとも 2m 程度とすれば現状の係留ブイによる船舶係留方式と概ね同等の荷役限界波高 1.0m を確保できると考えられる。このため、高強度ワイヤによる船舶係留方式における船体と高強度ワイヤとの離隔距離として 2m 以上は必要であり、このことはこの船舶係留方式を実用化する際の連結アームの構造や強度等に関する制限事項になると言える。

係留ブイによる船舶係留方式と比較して高強度ワイヤによる船舶係留方式を採用した場合の具体的なメリットについては、どちらの方式でも荷役限界波高は概ね同等となるため、係留ブイの製造・設置・維持管理等に関するコストが縮減されること、小型船による係留索の係留ブイへの綱取りが不要になることなどである。一方、本研究では高強度ワイヤによる船舶係留方式に関するコストを試算していないが、この係留方式を適用する場合には、ウインチ、支持柱、連結アーム等の製造・設置や船舶の改造などが必要になるため、係留ブイによる船舶係留方式よりも高コストになると考えられる。したがって、高強度ワイヤによる船舶係留方式を現地に適用する場合には、可能な限りのコスト縮減を図るとともに係留ブイへの綱取り作業における人員削減やそれに伴う安全性向上などをメリットとして考慮する必要がある。なお、高強度ワイヤによる船舶係留方式では、小型船による係留ブイへの綱

表-7.1 高強度ワイヤによる船舶係留方式の
現地適用における技術的課題と対応策（案）

構成部分	技術的課題	対応策
システム全体	定期的な検査や維持管理の方法	維持管理計画の策定と定期的な点検診断・維持補修
高強度ワイヤ	摩耗劣化に対する取替の判断手法	日常的な目視点検と劣化判定技術の確立
ウインチ	高波浪時における岸壁後方への移設手段	軌道式移動方法とアンカーによる固定技術の適用
支持柱	岩盤などの強固な海底地盤に対する施工法	オールケーシング工法の適用等
連結アーム	船舶の部分的改造の方法と船舶側との調整	新造船の建造に合わせた船舶構造の改造

取りが必要ないため、小型船の出航限界波高 1m という制限が取り除かれることから、クレーンオペレータの荷役技術によっては荷役効率の向上が期待できる。

高強度ワイヤによる船舶係留方式の施工においては、ウインチ、支持柱、連結アームについてそれぞれ留意すべき点がある。ウインチは岸壁上に設置するが、高波浪時に波を受けて被災・損傷する可能性があるため、岸壁後方の内陸部に移動できる可動式とする必要がある。この場合、通常利用時におけるウインチの岸壁上への固定方法や岸壁後方への移動方法等について十分な検討が必要である。また、支持柱は鋼管杭等の杭構造を海底に設置するものであり、海底地盤の状況により施工方法が異なることになる。例えば、対象地点が岩盤などの強固な海底地盤の場合には、通常の砂粘土地盤と比べて杭の施工には大きな困難が伴うため、コストも増大すると考えられる。一方、連結アームは船舶に搭載されることから船舶の部分的改造が必須であり、海運・荷役側との調整も重要になってくる。高強度ワイヤによる船舶係留方式の維持管理においては、ウインチや連結アームは金属機械であり、定期的な検査や整備を実施するために長期的な維持管理費が必要になる。また、高強度ワイヤは、その使用状況によっては大きな摩耗劣化を生じることから、定期的な検査と取り替えが必要となる。

表-7.1 は、高強度ワイヤによる船舶係留方式を現地に適用するための技術的課題とその対応策の案を取りまとめたものである。高強度ワイヤによる船舶係留方式を南北大東島の現地に適用するためには、施工面および維持管理面において解決しなければならない技術的課題がある。しかしながら、これらの技術的課題は、現状の港湾構造物に対する施工技術や維持管理技術を応用することで対処できるものと考えられる。

8. 結論

南北大東島の港湾を対象として波浪外力に対する係留船舶の動揺シミュレーションを実施することにより、係留ブイを用いて係留された船舶の荷役限界波高を算定し、その係留方式の効果を評価した。また、荷役効率を向上させることを目的として、係留ブイの代わりに高強度ワイヤによる新たな船舶の係留方式を考案し、船体動揺シミュレーションで得られた荷役限界波高に基づいてその有効性を確認した。

本研究の主な結論は、以下の通りである。

- 1) 南北大東島において採用されている係留ブイによる船舶の係留方式および移動式クレーンによる荷役方式では、通常防舷材と係船柱を用いた係留方式および荷役方式よりも係留船舶の荷役限界波高が大きくなる傾向にある。
- 2) 現地での船舶の荷役係留状況を参考にして荷役許容動揺量を設定し、荷役許容動揺量に加えて係留索の張力に対する限界値も考慮する方がより正確に荷役限界波高を算定することができる。
- 3) 高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式については、船舶と高強度ワイヤとの離隔距離を適切に設定することにより、係留ブイを用いた現状の船舶の係留方式と同等の荷役限界波高を確保することが可能である。

9. おわりに

本研究の成果は、南北大東島に就航する船舶について将来的な荷役効率向上のための参考資料になるとともに、他の離島港湾における係留施設に対しての参考情報にもなると考えている。本研究では、現状の係留ブイを用いた船舶の係留方式の効果に関する評価は十分に行っているが、高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式については、その考案と船体動揺シミュレーションによる有効性の確認を実施したのみである。このため、高強度ワイヤによる船舶係留方式について、現地に適用するための詳細な機器構成や部材構造などの試設計の実施、その建設や運用を見据えた施工方法や維持管理手法の十分な検討などが今後の課題である。また、この新たな船舶係留方式を実現させるためには、係留ブイによる船舶係留方式よりも荷役効率を大幅に向上させることも重要な検討課題と考えられる。

(2020年6月5日受付)

謝辞

本研究において、南北大東島の港湾施設を対象とした係留船舶の船体動揺シミュレーションに基づく荷役限界波高の算定は、内閣府 沖縄総合事務局からの受託研究「平成28年度 沖縄管内における港湾空港施設整備等高度化研究委託 - 離島港湾における荷役の安全性に関する検討-」および「平成30年度 沖縄管内における港湾空港施設整備等高度化研究委託 - 離島港湾における荷役の安全性に関する検討-」による研究成果の一部である。また、高強度ワイヤを用いた新たな船舶の係留方式は、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 海洋開発系の前田克弥 上席研究員および港湾空港技術研究所 海洋研究領域 海洋利用研究グループの玉田和也 客員研究員（現 日鉄エンジニアリング株式会社）と協力して考案したものである。ここに記して関係の方々に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 上田茂・白石悟（1983）：係留船舶の動揺計算法とその評価，港湾技術研究所報告，第22巻第4号，pp.181-218.
- 上田茂・白石悟・大島弘之・浅野恒平（1994）：係留船舶の動揺に基づく荷役許容波高および稼働率，港湾技研資料，No.779，44p.
- （財）沿岸技術研究センター（2004）：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.21，86p.
- 米山治男・峯村浩治・森谷拓実（2017）：離島港湾における係留船舶の荷役限界波高の算定方法に関する検討，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.73，No.2，pp.I_803-I_808.

港湾空港技術研究所資料 No.1372

2020.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。