

長周期波共存場における船舶動揺の軽減に資する係留対策

Mooring Countermeasures for Reduction of Ship Motions due to the Long Period Waves

田端 竹千穂*・田所 篤博**・山口 豊**・高橋 伸一**・白石 悟***・石見 剛***・永松 宏一****
Takechiho Tabata, Atsuhiro Tadokoro, Yutaka Yamaguchi, Shin'ichi Takahashi, Satoru Shiraishi,
Gou Ishimi, Koichi Nagamatsu

In Noshiro Port, troubles for cargo handling activity occur by long period waves. In this study, the characteristics of long period ship motions due to long period waves are examined, and countermeasures of the mooring system which consists of mooring ropes and rubber fenders are also discussed with numerical simulations. For large ship motions, it is confirmed to occur when the dominant period of long period waves agrees with the natural period of surge motion. To reduce ship motions due to long period waves, it is valid to adjust the natural period of mooring systems to avoid dominant period of long period waves.

Keywords: (Mooring facilities, Motions of moored ship, Long period waves, Fender)

1. はじめに

港湾に進入する長周期波の影響によって船舶が大きく動揺し、荷役活動に支障を生じたり係留索が切断する事故が報告されている(白石ら, 1995)。長周期波に関する現地観測は仙台港(永井ら, 1994)、苫小牧港(松良ら, 1994)および能代港(田端ら, 1995)で実施され、荷役に障害を与える長周期波は波群に拘束されたセットダウン波を要因として発生することが指摘されており、港内に進入する長周期波の卓越周期と係留船舶のSurgeの固有周期とがほぼ一致するため、船舶の動揺が増幅するものと考えられている。動揺量を抑制する対策としては、①長周期波の進入を抑止する、②船舶の固有周期と長周期波の周期をずらし共振現象が発生しないようにする方法が考えられる。①の方法は港湾の形状を変える等の抜本的な対策が必要であるが、②の方法では防舷材や係留系の変更で対処が可能である。

本研究では、図-1に示す能代港に新設される-13m岸壁における係留船舶の動揺数値シミュレーションを行い、長周期波の作用に対する船舶の動揺特性を明らかにするとともに、船舶の動揺量の軽減に資する防舷材を含めた係留系の改善効果について検討を行ったものである。

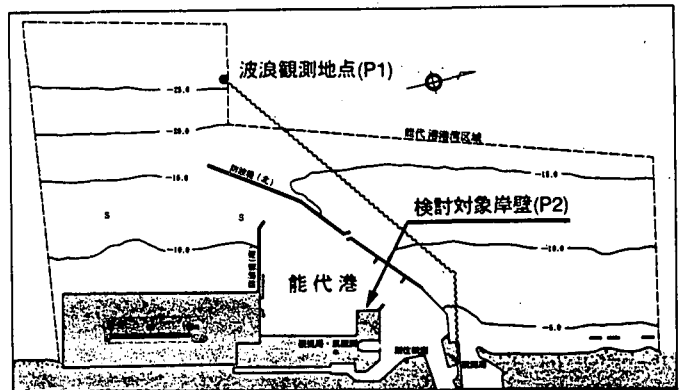


図-1 能代港の港湾形状

2. 長周期波の増幅特性

能代港では、図-1に示す水深25mの地点において波浪観測が実施されている。本研究では、波浪観測結果および副振動の数値計算によって得られる長周期波の増幅率との関係から検討対象岸壁前面での波浪スペクトルを推定した。副振動の計算法は、流量の連続式と長波近似された運動方程式を連立させた差分近似式を各タイムステップ毎に解くもので、各周波数毎に規則入射波の伝播を計算し、港内の応答関数を計算するものである(高山ら, 1988)。

波浪観測地点に対する検討対象岸壁での長周期波高の増幅率の計算結果を図-2に示す。長周期波高の増幅率は、全体的に周期の長い場合に大きく、周期30分程度にピークを有している。周期10分以

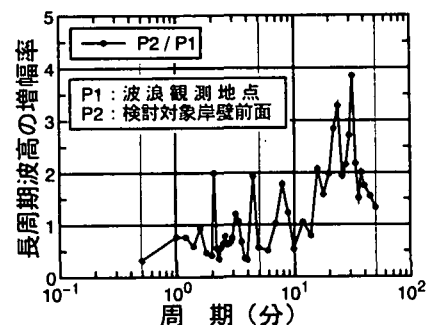


図-2 長周期波高の増幅率

* 正会員 関西国際空港(株) (前 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所)

** 正会員 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 (〒952 新潟市白山浦1-332)

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室

**** 正会員 (株)エコー 横浜事務所

下では増幅率はあまり大きくならないけれども、係留船舶のSurgeの固有周期に近い周期2分程度での増幅率が大きくなっており、船舶の動揺を増大させている可能性があることを示している。

検討対象とする岸壁前面（P2）においては長周期波の観測が実施されていないので、長周期波成分については波浪観測地点（P1）の有義波高が4m以上になった期間のスペクトル解析結果の平均値と長周期波高の増幅率の計算結果をもとに、式（1）を用いてスペクトルを求めた。ただし、短周期成分については、港外波に対して高山方式（1981）で得られる波高比によって低減させた波高・周期に対するBretschneider・光易型スペクトルとした。

$$S_{P2}(f) = S_{P1}(f) \times M_{P2/P1}(f)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S(f)$ は周波数スペクトル密度、 $M(f)$ は長周期波高の増幅率、 f は周波数であり、添字のP1、P2はそれぞれ波浪観測地点および検討対象岸壁を示す。

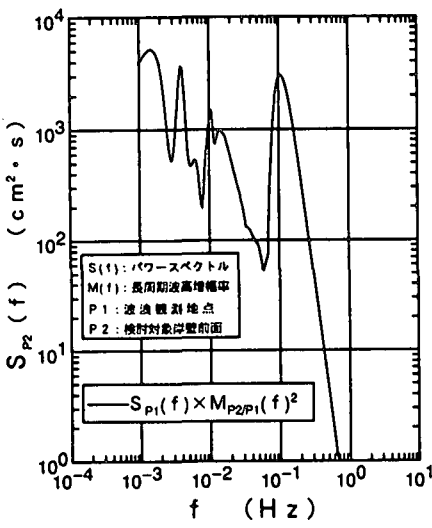


図-3 岸壁前面のスペクトル

3. 解析条件および方法

係留船舶の動揺数値シミュレーション（上田，1984）を行い、船舶の動揺量、防舷材の変形量および係留索の張力等を求めた。動揺数値シミュレーションでは、風波と長周期波が共存する波浪条件を扱う必要があることから、長周期動揺に対して粘性抵抗力を考慮する手法（久保ら，1988，白石ら，1995）を用いた。

外力条件として波浪は、図-3に示した長周期波および通常の花波成分（以下、通常波浪と呼ぶ）とし、両者の動揺量を比較した。長周期波の短周期成分および通常波浪はともにBretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波であり、波高 $H_{1/3}=0.60\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=9.0\text{s}$ とした。長周期波は港口方向（45°）から入射するものとし、通常波浪は沖防波堤の開口部方向（73°）および港口方向の2方向から波が作用するものとした。風については、風速を $U_{10}=10, 15\text{m/s}$ の2種類とし、風向を強風の卓越方位であるW（79°）および港口方向からの風向である45°の2条件とした。波力の計算では、単位波高に対する波力振幅を求めておいて、これと波スペクトルを50～60の周波数に分割して求めた成分波の振幅から、これらを各成分波の位相を考慮して合成して求めた。風荷重はDavenportの周波数スペクトルを用いて計算し、変動風として取り扱った。係留船舶に対する外力の作用方向の関係を図-4に示す。

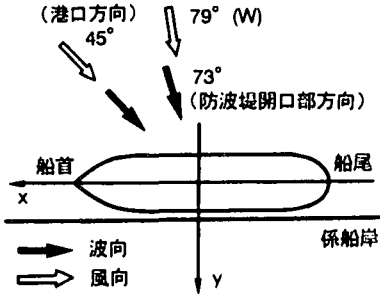


図-4 船舶動揺計算の座標系

対象とした船舶は40,000DWTと15,000DWTの貨物船であり、載荷状態を空載と満載に変化させた。係留索はナイロンエイトロープとポリプロピレンとし、係留索の径は船種・船型ごとに艀装数によって定められた標準係船装備によるものとした。係留索の配置本数および係留方法は、実態にもとづいて決めたものを基本型とし、係留索の取り方や本数を数種類に変化させて係留系の相違による船舶の動揺特性を調べた。さらに、防舷材を定反力型と反力漸増型に変更して、反力特性の相違による動揺量の違いを比較した。係留索の変位復元力特性を図-5に、防舷材の反力特性曲線を図-6に示す。なお、係留索の初期張力は、係留索の引張り強さの7%を一律に与えた。計算水深は $h=13.5\text{m}$ であり、岸壁からの反射率を0.40として計算を行った。

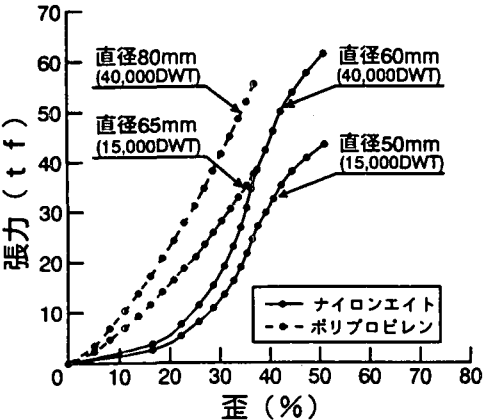


図-5 係留索の変位復元力特性

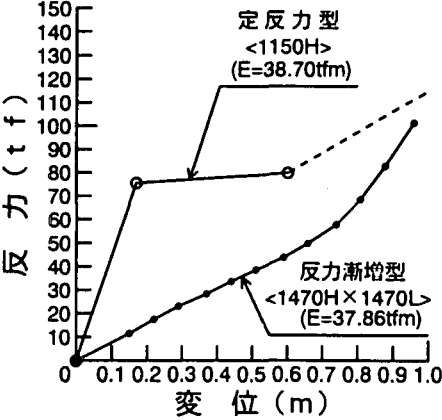


図-6 防舷材の反力特性

4. 長周期波の作用による船舶の動揺特性

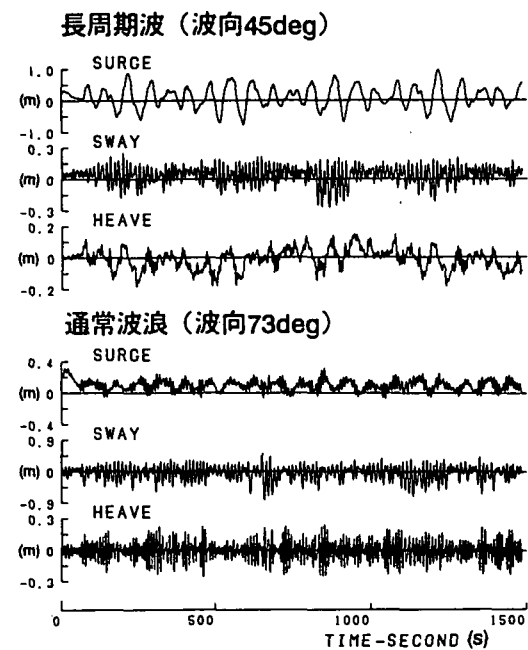
長周期波と通常波浪を作用させた場合の動揺量の比較を表－1に、この時の動揺波形の一部を図－7に示す。計算条件として、船舶は40,000 DWT（空載）、防舷材は定反力型、係留方法は長周期波の作用に対する動揺量の軽減に有効であった係留法（図－9参照）であり、係留索にはポリプロピレンを用いている。また、風条件として風向は79°、風速は15m／sを与えている。

長周期波と通常波浪を比較すると、両者で明らかに異なるのはSurgeの動揺量であり、波向45°で両者を比較すると長周期波の動揺量の方が6.7倍程度大きくなっている。Surgeの動揺波形によると、通常波浪では入射波の周期に対応するように船舶の動揺を生じることを示しているが、長周期波の場合には長い周期で船舶の大きな動揺を生じており、長周期波成分の影響によって船舶の動揺を大きくしていることを裏付けている。同様に長周期波を作用させた場合のHeaveの動揺波形からは、長い周期の水面変動に加えて、入射波の周期成分を伴うような動揺を生じることを示しており、通常波浪を作用させた場合の動揺量と大きく違わないけれども、船舶動揺の形態は大きく異なることを示している。

Sway, Rollの動揺量について見ると、波向45°の場合には長周期波と通常波浪で動揺量の差異は小さい。ところが、通常波浪における波向73°のケースでは、波向45°よりも動揺量が大きくなるとともに、Swayの動揺量の増加に関連して防舷材の変形量および係留索に作用する張力も大きくなっている。このことから、Sway, Rollの動揺量および防舷材の変形量に対する長周期波の影響はあまりなく、むしろ波向による影響が大きいことがわかった。したがって、長周期波ではSurgeの動揺量を軽減する係留系を評価し、通常波浪の波向変化に対する計算結果からSwayの動揺量や防舷材の変形量に与える影響を評価することが妥当である。

表－1 長周期波と通常波浪の動揺量の比較

波 浪 条 件		長周期波	通 常 波 浪	
入 射 波 向		45deg	45deg	73deg
S u r g e (m)	m a x	0.976	0.215	0.316
	m i n	-0.778	-0.046	-0.080
S w a y (m)	m a x	0.215	0.276	0.517
	m i n	-0.274	-0.363	-0.829
H e a v e (m)	m a x	0.151	0.070	0.247
	m i n	-0.186	-0.093	-0.260
R o l l (deg)	m a x	2.251	1.774	5.482
	m i n	-3.207	-2.978	-6.578
P i t c h (deg)	m a x	0.218	0.198	0.461
	m i n	-0.197	-0.201	-0.444
Y a w (deg)	m a x	0.440	0.469	0.424
	m i n	-0.345	-0.282	-0.323
防舷材最大変形量 (m)		0.241	0.251	0.443
係留索最大張力 (tf)		-14.50	-14.40	-17.90



図－7 長周期波と通常波浪の動揺波形の比較

5. 船舶動揺量の軽減に資する係留系の改善効果

(1) 係留系の改善効果

係留索の種類および係留方法の変更に対する動揺量の比較を図－8に示す。船舶は40,000、15,000 DWTについて示してあり、ともに空載状態である。船舶の係留方法は、前述の基本型を基準にして40,000 DWTでは3種類に、15,000 DWTでは2種類に係留索の本数や係留方法を変更（改良－1～3と呼ぶ）しており、係留索にはナイロンエイトロープとポリプロピレンを用いている。40,000 DWTは改良－3、15,000 DWTは改良－2における係留方法を図－9に示す。なお、図－9においてR1～R8を用いる係留方法が係留船舶の実態から定められた基本型に相当しており、改良型では係留索の本数を増やしたり、係留索の取り方を適宜変更している。図－8には、Uedaら（1988）によって提案された一般貨物船の荷役における係留船舶のSurgeの許容動揺量（±1.0m）を併記してあるが、この値を満足するように係留系を調整している。また、防舷材には定反力型を、外力条件として波浪は長周期波を、風は風速15m／s、風向45°を作用させた計算を行っている。

図－8によると、係留索の材質、係留索の本数および係留方法を変えることによって動揺量が小さくなっており、長周期波の作用に対する動揺量の軽減に効果があることを示している。係留索に着目すると、ナイロンエイ

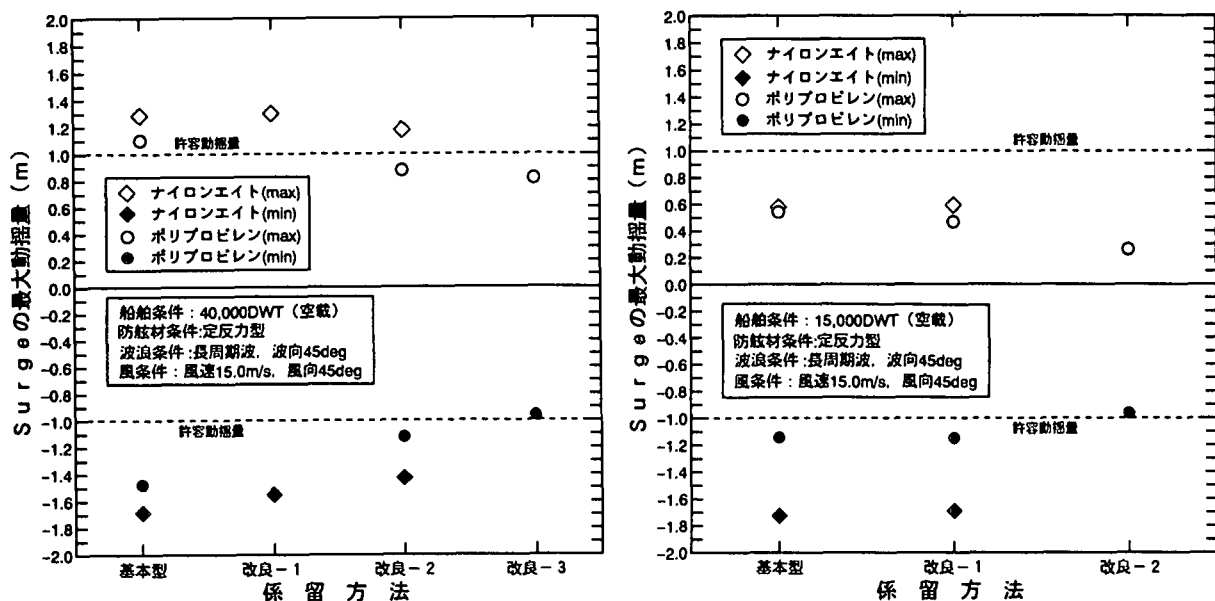


図-8 係留索の材質および係留方法の変更による動揺量の比較

トロープを用いるよりもポリプロピレンを用いる方が動揺量が小さくなっており、動揺量の軽減効果は係留索の本数や係留方法を変える場合よりも高い。係留索の変位復元力特性からは、ポリプロピレンの方が変位曲線の立ち上がりが急であり、ナイロンエイトロープよりも伸びにくい材質であることを示している。すなわち、長周期波の作用に対する動揺量の軽減効果を得るには、ポリプロピレンのように硬い材質の係留索を用いることが有効であることを示している。

船舶の動揺量について見ると、15,000 DWTではマイナス側にシフトして動揺するために、負の動揺量が大きくなる傾向にあるが、係留索にポリプロピレンを用い、係留方法を改良-2とすることで

荷役における許容動揺量以下にすることができた。40,000 DWTでは15,000 DWTよりも動揺振幅量が大きくなるけれども、係留索をポリプロピレンとし、係留方法を改良-3とすることで、長周期波の作用に対する動揺量の軽減に資する係留系の条件を得た。なお、いずれ条件においても係留索の最大張力は許容値以下であった。

(2) 固有周期と動揺量との関係

係留船舶のSurgeの固有周期とSurgeの最大動揺振幅量の関係を図-10に示す。計算条件は図-8と同じであり、それぞれの係留系に対する固有周期との関係をプロットしたものである。ただし、風速10m/sの計算結果を加えてある。

仙台港等の現地観測結果から、長周期波の卓越周期と係留船舶のSurgeの固有周期とがほぼ一致するため、船舶の動揺が増幅するものと考えられていたが、本計算結果からも固有周期が長いほど船舶の動揺が大きくなっており、港内に進入する長周期波の影響によって船舶の大きな動揺を生じることが確認された。また、図-10では係留索の本数や係留方法の変更あるいは係留索の材質を変えることで固有周期を調整できることを示していて、係留索をナイロンエイトロープからポリプロピレンに変える、いいかえれば硬い材質の係留索を用いる方が固有周期を短くするのに効果が高いことを表している。このことは、固有周期が短くなるように係留系を調整するこ

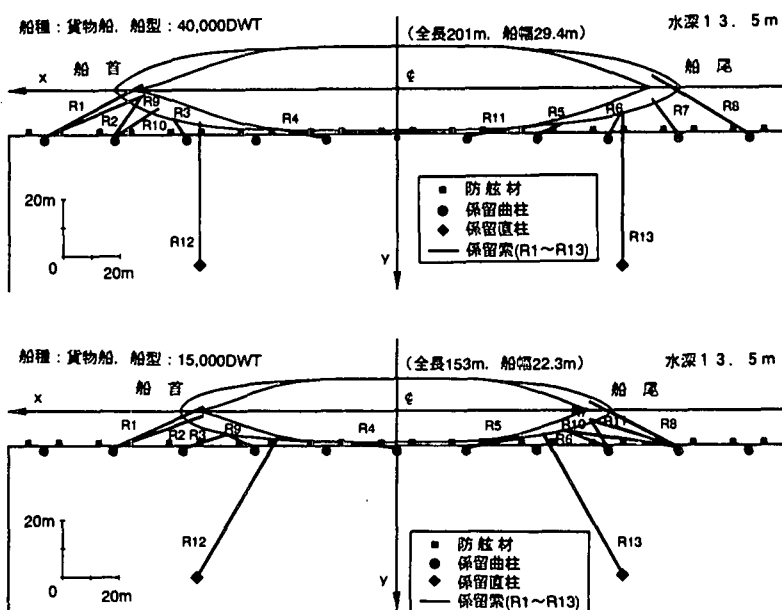


図-9 長周期波の作用に対する動揺量の軽減に資する係留方法
(40,000 DWT : 改良-3, 15,000 DWT : 改良-2)

とが長周期波の共存場における動揺量の軽減に有効な対策になることを示しており、係留系の改善によって長周期波の作用に対する動揺量の抑制効果が得られることがわかった。そして、長周期波の影響によって船舶の大きな動揺を生じている港湾において、係留柱の本数や強度の制約から係留索の本数を増やすことが困難な場合には、固有周期の調整に効果が高い係留索を硬い材質のものに変更することが、長周期動揺の軽減に有効な対策となるものと考えられる。

(3) 船舶の載荷状態の相違による動揺量の比較
船舶の載荷状態の相違による動揺量の比較を図-11に示す。図中、係留船舶のSurgeの固有周期を示してある。計算条件として、船舶の係留方法は40,000DWTは改良-3、15,000DWTは改良-2であり、係留索はポリプロピレンである。波浪は長周期波と通常波浪について比較してあり、通常波浪の波向は73°である。また、風速は10、15m/sであり、風向は79°である。

一般的には、空載状態の方が動揺量が大きいとされているが、図-11からは通常波浪は空載状態の動揺量が大きくなっており、この傾向と一致している。ところが長周期波では、40,000DWTでは1.2倍、15,000DWTでは1.6倍程度満載状態の方が動揺量が大きくなっており、通常波浪とは逆の傾向を示している。これは、満載状態の方が係留船舶のSurgeの固有周期が長くなるためであり、図-10に示したように長周期波の作用に対しては固有周期が長いほど動揺量が大きくなるため、満載状態の動揺量が大きくなったものと考えられる。したがって、長周期波の共存場における係留施設を検討する際には、船舶の載荷状態を変更した数値シミュレーションを実施して満載あるいは半載状態での動揺量をチェックし、適切な係留条件を求めることが望ましいものと思われる。

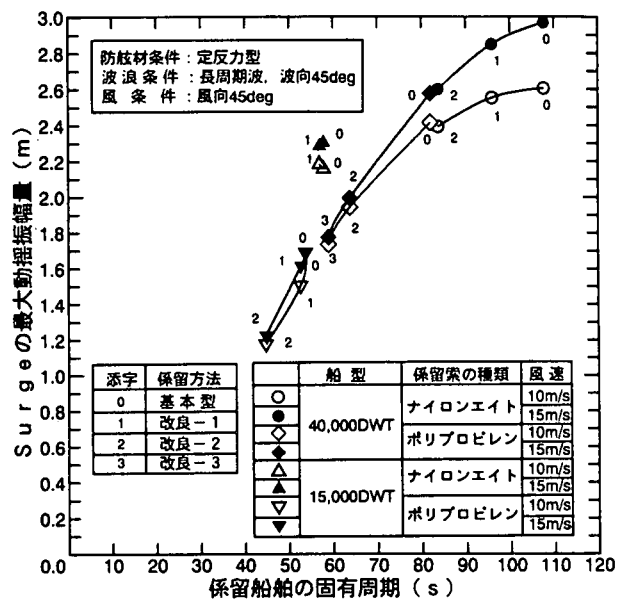


図-10 Surgeの固有周期と動揺量との関係

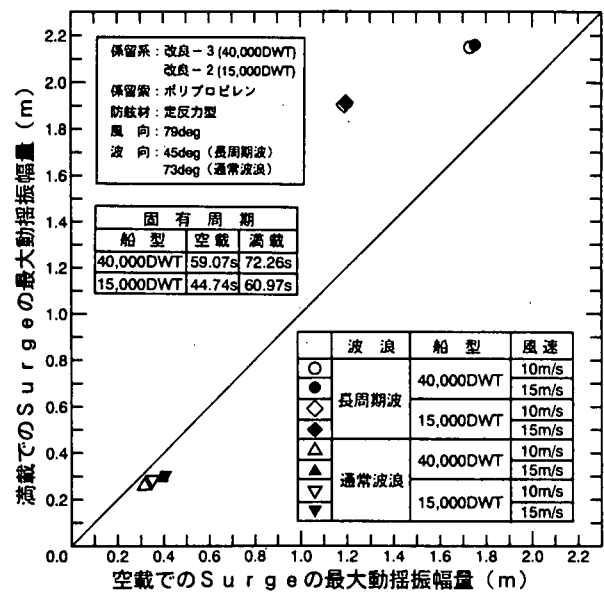


図-11 載荷状態の相違による動揺量の比較

6. 防舷材の反力特性の相違による動揺量の比較

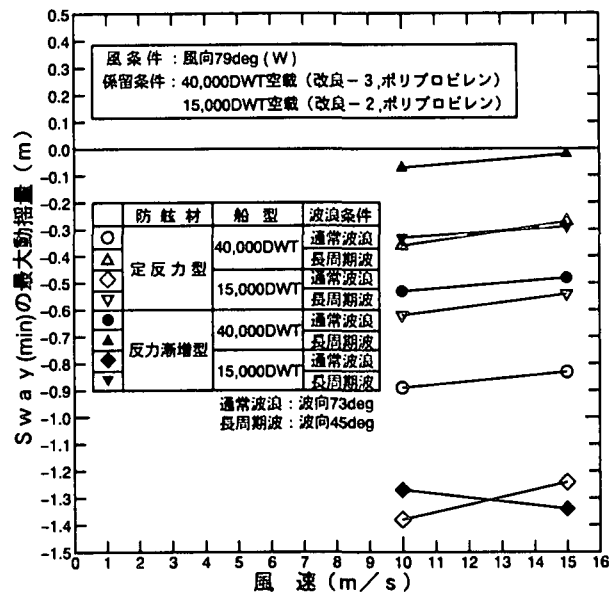
防舷材の反力特性の相違による動揺量の比較を表-2に示す。計算条件として、船舶は40,000DWT（空載）であり、係留方法は改良-3、係留索はポリプロピレンである。表-1に示した長周期波と通常波浪の動揺量の比較結果から、通常波浪の波向73°の場合にSwayの動揺量および防舷材に対する影響が大きくなると判断されたことから波浪はこの条件を用いており、風速は10m/s、風向は79°としている。

表-2によると、Sway以外の動揺成分の動揺量はほぼ同じであることから、防舷材の反力特性の差異がSwayの動揺量に影響を及ぼすことを表しており、反力漸増型防舷材を用いる場合にはサブハーモニックモーションの抑制効果により、岸壁から沖側へ離れる方向へのSwayの動揺量の軽減に効果があることを示している。すなわち、Uedaら（1988）の提案した一般貨物船の沖側へのSwayの許容動揺量である-0.75mに対して、防舷材に定反力型を用いた場合のSwayの動揺量はわずかにこの値を上回るけれども、反力漸増型では許容動揺量以下で、かつ防舷材の最大反力も小さくなっており、荷役におけるSwayの動揺量および防舷材の反力軽減に効果が見られる。次に、沖側へのSwayの動揺量について、防舷材の反力特性、船型、波浪ならびに風速条件を変えて比較した結果を図-12に示す。なお、長周期波の波向は45°、通常波浪では73°であり、風向は79°である。

通常波浪に比べて長周期波での動揺量が小さくなるのは、波向が45°と船舶に対して斜めから作用するためであるが、すべての条件で反力漸増型防舷材の方が動揺量が小さくなっており、動揺量の軽減効果が認められる。

表－2 防舷材の反力特性の相違による動揺量の比較

波 浪 条 件		通常波浪（波向73deg）	
防舷材の種類		定 反 力 型	反力漸増型
S u r g e (m)	max	0.372	0.351
	min	0.056	0.056
S w a y (m)	max	0.379	0.602
	min	-0.888	-0.532
H e a v e (m)	max	0.247	0.250
	min	-0.259	-0.260
R o l l (deg)	max	5.724	5.735
	min	-6.367	-6.478
P i t c h (deg)	max	0.460	0.466
	min	-0.443	-0.444
Y a w (deg)	max	0.386	0.326
	min	-0.481	-0.292
防舷材最大変形量 (m)		0.423	0.572
防舷材最大反力 (tf)		77.60	42.70



図－12 防舷材の反力特性の相違によるSwayの動揺量の比較

通常波浪では、40,000DWTはいずれの風速条件でも反力漸増型防舷材を用いる方が動揺量が小さいけれども、15,000DWTでは風速15m/sの場合に定反力型防舷材を用いる方が動揺量が小さくなっており、強風の作用下においてはサブハーモニックモーションの抑制効果が得られにくくなる場合があることを示している。したがって、Swayの動揺量が問題になる港湾では、岸壁を利用する船舶の状況や風の発生頻度を考慮して防舷材の種類を選定することが必要である。

7. あとがき

- 本研究より得られた主要な結論を以下に示す。
- ①通常の風波に比べると、長周期波ではSurgeの動揺量が大きくなった。係留船舶の固有周期が1～2分であったことから、長周期波の周期との共振現象によって大きな動揺を生じることが確認された。
 - ②係留索の材質あるいは係留索の本数や係留方法を変更し、固有周期が短くなるように調整することによってSurgeの動揺量が軽減されたことから、係留系の改善による長周期波の作用に対する動揺量の抑制効果が得られることがわかった。
 - ③Swayの動揺量を抑制するためには、当該地区における船種・船型および風の作用条件を考慮して、適切な変位復元力特性を有する防舷材を選定するのが良い。

参考文献

上田茂(1984)：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.504，368p.

久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策(1988)：岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について，海岸工学講演会論文集，第35回，pp.687-691.

白石悟・久保雅義・上田茂・榊原繁樹(1995)：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策，海岸工学論文集，第42巻，pp.941-945.

高山知司(1981)：波の回折と港内波高分布に関する研究，港湾技研資料，No.367，140p.

高山知司・平石哲也(1988)：数値計算と現地観測による港内副振特性の検討，港湾技研資料，No.636，70p.

田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則(1995)：港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測，海岸工学論文集，第42巻，pp.301-305.

永井紀彦・橋本典明・浅井正・戸引勲・伊藤一教・東江隆夫・小林昭男・柴田隆夫(1994)：現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波，海岸工学論文集，第41巻，pp.931-935.

松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲(1994)：波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測，海岸工学論文集，第41巻，pp.71-75.

Ueda, S. and Shiraishi, S. (1988)：The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No.4, pp.3-61.