

# 動揺シミュレーションによる長周期波に対する 係留船舶の荷役限界波高の評価と考察

## NUMERICAL SIMULATION OF SHIP MOTIONS MOORED TO QUAY WALLS IN LONG-PERIOD WAVES AND EVALUATION OF ALLOWABLE WAVE HEIGHTS FOR CARGO HANDLING

白石悟<sup>1</sup>・新保潤平<sup>2</sup>

Satoru SHIRAISHI, Junpei SHINPO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北海道工業大学教授 空間創造学部 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7-15-4-1)

<sup>2</sup>㈱つうけん (研究時北海道工業大学) (〒003-0026 札幌市白石区本郷19-南6-8)

This paper proposes maximum allowable wave heights for cargo handling determined by numerical simulations of ship motions for general cargo ships, grain carriers, ore carriers, container ships and car ferries. Also studied is how maximum allowable wave height relates to the spectrum of long-period waves, the characteristics of mooring ropes and wave directions. The proposed maximum allowable wave height is used to calculate the wharf operation efficiency of ports and harbor that face open seas.

**Key Words :** *Cargo handling in a port, ship motions, long-period waves, numerical simulation, wharf operation efficiency*

### 1. 概要

外洋に面した港湾では長周期波の影響により係留船舶の動揺が大きくなり荷役が困難となることがあり, 通常波浪成分と同様に長周期波成分に対しても静穏度を評価することが必要になる. 静穏度を評価する指標として荷役稼働率があり, 評価には長周期波に対する荷役限界波高を設定する必要がある. 港湾の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>では, 表-1に示すように荷役限界波高として0.20m, 0.15m, 0.10mの3段階の水準と, これに対応する適用条件が示されているが, すべての船種や船型について示されているわけではなく, 判断に迷う場合も多い. また, 荷役稼働率の向上対策については, 防波堤などの外かく施設の整備により港内の長周期波高を低減させる対策のほかに, 係留系の改善による対策もあり, 基準・同解説に示されている指標のみでは, 荷役稼働率の向上効果の評価ができない場合もある.

そこで, 本研究では, 一般貨物船, 鉱石運搬船, コンテナ船, 穀物運搬船, 長距離フェリー, 中短距離フェリーについて長周期波に対して動揺シミュレーションを行い, 長周期波荷役限界波高を求めた. 船舶の長周期動揺は船種・船型・波向, 載荷状態ごとに異なり, また, 係留索の特性や長周期波のスペクトル特性の影響を受ける. そこで, 本研究ではこ

れらのパラメータが長周期波荷役限界波高に及ぼす影響について詳細に検討し, 考察した.

表-1 長周期波に対する荷役限界波高

長周期波の有義波高のレベル	想定される条件	荷役限界波高(m)
1	サージングについて荷役許容動揺量が比較的大きな船種又はサージングの固有周期が1.5min以下の船舶 (中型船: 1,000~5,000 DWT)	0.20
2	サージングについて荷役許容動揺量が中程度の船種及びサージングの固有周期が1.5min以下の船舶 (一般貨物船: 5,000~10,000 DWT)	0.15
3	サージングについて荷役許容動揺量が小さな船種及びサージングの固有周期が2~3minの船舶(コンテナ船, 鉱石船等: 10,000~70,000 DWT)	0.10

## 2. 長周期波荷役限界波高の算定法

### (1) 長周期波荷役限界波高算定の概要

荷役稼働率の計算方法としては「港内長周期波影響評価マニュアル<sup>2)</sup> (以下、マニュアル)」に示されている標準解析法と詳細解析法とがあるが、本研究では詳細解析法の手順を用いて、長周期波に対する動揺シミュレーションを行って、長周期波荷役限界波高  $H_L$  を求める。その際にマニュアルに示されている荷役許容動揺量の提案値 (表-2)<sup>3,4)</sup> を用いる。各条件に対して長周期波高 (有義波高) が 0.05m, 0.10m, 0.15m の 3 ケースを計算し、計算で得られた動揺量と各船種での荷役許容動揺量の比較から  $H_L$  を求める。 $H_L$  は各動揺成分から求められる限界波高の最小値から求める方法もあるが、本論文では長周期動揺の主たる成分であるサージングの限界波高から求めた結果を示す。

表-2(1) 荷役許容動揺量<sup>3)</sup>

動揺成分	一般貨物船	穀物運搬船	鉱石運搬船
サージング (m)	±1.0	±1.0	±1.0
スウェイング (m)	+0.75	+0.5	+1.0
ヒービング (m)	±0.5	±0.5	±0.5
ローリング (deg)	±2.5	±1.0	±3.0
ピッチング (deg)	±1.0	±1.0	±1.0
ヨウイング (deg)	±1.5	±1.0	±1.0

表-2(2) 荷役許容動揺量<sup>4)</sup>

動揺成分	コンテナ船50	コンテナ船100	フェリー
サージング (m)	±1.0	±0.5	±0.4
スウェイング (m)	+1.0	+0.5	+0.5
ヒービング (m)	±0.6	±0.4	±0.4
ローリング (deg)	±3.0	±1.5	±1.0
ピッチング (deg)	±1.0	±0.5	±0.5
ヨウイング (deg)	±1.0	±0.5	±0.5

コンテナ船 50 : 50% 荷役効率, コンテナ船 100 : 100% 荷役効率

### (2) 動揺シミュレーション手法

係船岸に係留されている船舶の動揺は図-1 に示す 6 自由度の運動である。このうち、長周期波の影響を顕著に受ける成分がサージング (図では Surge と表記) である。波向は図に示すように船の長軸方向から時計回りにとっている。波向  $0^\circ$  以外については係船岸からの反射波を考慮し、反射率は 0.9 としている。

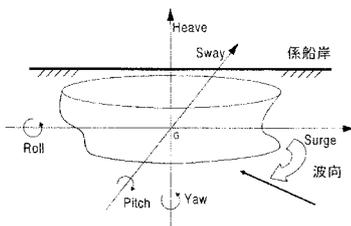


図-1 船舶の動揺成分と波向の定義

係留船舶の動揺シミュレーション手法としては式 (1) で示す一定係数法と式 (2) で示す遅延関数法がある。

$$[M + m(\omega_0)]\ddot{x} + N(\omega_0)\dot{x} + D(\dot{x}) + Bx + R(x) = F_0 + F \quad (1)$$

ここで、 $M$  : 質量マトリックス,  $m(\omega_0)$  : 付加質量マトリックス,  $N(\omega_0)$  : 造波減衰係数マトリックス,  $D(\dot{x})$  : 粘性抵抗ベクトル,  $B$  : 静水圧的復元力係数マトリックス,  $R(x)$  : 係留力ベクトル,  $F_0$  : 定常外力を含む高次の外力ベクトル,  $F$  : 変動外力ベクトル,  $x$  : 変位ベクトル,  $\dot{x}$  : 速度ベクトル,  $\ddot{x}$  : 加速度ベクトルである。

$$[M + m(\infty)]\ddot{x} + \int_{-\infty}^t L(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + D(\dot{x}) + Bx + R(x) = F_0 + F \quad (2)$$

ここで、 $m(\infty)$  : 不変付加質量マトリックス,  $L(\tau)$  : 遅延関数マトリックス,  $t$  : 時間である。

式 (1) および式 (2) の粘性抵抗ベクトルは式 (3) で表わされる。式 (3) の  $a_i$ ,  $b_i$  は式 (4) および式 (5) で求める。

$$D_i(\dot{x}_i) = a_i \dot{x}_i + b_i |\dot{x}_i| \dot{x}_i \quad (3)$$

$$a_i = 4\alpha_i (M_{ii} + m_{ii}) / T_i \quad (4)$$

$$b_i = 3\beta_i (M_{ii} + m_{ii}) / 4 \quad (5)$$

ここで、 $i$  : 船舶の動揺成分,  $\alpha_i$  : 線形の粘性項,  $\beta_i$  : 非線形の粘性項,  $T_i$  : 船舶の動揺固有周期,  $M_{ii}$  : 船舶の質量,  $m_{ii}$  : 船舶の付加質量である。

実船観測により減衰係数を求めた事例は非常に少なく、本研究では久保ら<sup>5)</sup> が求めた数値を参考に表-3 の数値を与えて計算する。なお、長周期波に対する動揺計算の精度については笹ら<sup>6)</sup>、白石ら<sup>7)</sup> が検討している。実船観測との比較検討の結果によれば、遅延関数法による計算結果がより精度の良い結果を示しているが、長周期波荷役限界波高の設定において支配的な成分であるサージングについては両者の計算結果の相違は大きくない。そこで、本研究では取扱いのより容易な一定係数法を用いて計算した。

表-3 実船試験による粘性係数 (久保らによる)

動揺成分	$\alpha_i$	$\beta_i$
サージング	0.5	0.0
スウェイング	1.0	0.0

なお、本研究では動揺計算を行う際に通常波浪成分は入力していない。その理由は現状では荷役稼働率の評価が通常波浪成分と長周期波成分について、

それぞれの出現頻度表を用いて別個に行われており、本研究はこのうち長周期波成分のみの影響を評価する際の指標を得ることを目的としているからである。したがって、動揺シミュレーションにおいて変動漂流力は考慮しておらず、また波漂流減衰力の影響についても考慮していない。

### (3) 長周期波スペクトル

周期の範囲が 30~300s, 30~450s, 30~600s の一様スペクトル 3 種類、および平石<sup>8)</sup>により提案されている式(6)で示されるピーク型スペクトルを用いてスペクトルのピーク周期 $T_p$ が異なる 6 種類を計算に使用する長周期波のスペクトルとした。

$$S(f) = 0.257 H_{\ell/3}^2 T_{\ell/3} (T_{\ell/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{\ell/3} f)^4] \quad (6)$$

ここに、 $S(f)$  : 周波数スペクトル密度,  $H_{\ell/3}$  : 長周期波の有義波高 (m) ( $H_{\ell/3} = K_H H_{1/3}$ ),  $T_{\ell/3}$  : 長周期波の有義波周期 (s) ( $T_{\ell/3} = K_T T_{1/3}$ ),  $H_{1/3}$  : 有義波高,  $T_{1/3}$  : 有義波周期,  $f$  : 周波数,  $K_H$  : 長周期波側のスペクトル形状を設定する際の波高に関するパラメータ,  $K_T$  : 長周期波側のスペクトル形状を設定する際の波周期に関するパラメータである。

ここでは、平石の研究にしたがい P-L 型では  $K_H = 1/30$ ,  $K_T = 8.58$ , P-S 型では  $K_H = 1/30$ ,  $K_T = 6.02$  とした。

表-4 は本研究で用いたスペクトル条件を示す。

表-4 スペクトル条件

スペクトル条件	条件	ピーク周期 $T_p$ (s)
U-1	一様 (30~300s)	165
U-2	一様 (30~450s)	240
U-3	一様 (30~600s)	310
P-L1	ピーク型 $T_{1/3} = 10s$	85.8
P-L2	ピーク型 $T_{1/3} = 12s$	103
P-L3	ピーク型 $T_{1/3} = 14s$	120
P-S1	ピーク型 $T_{1/3} = 10s$	60.2
P-S2	ピーク型 $T_{1/3} = 12s$	72.2
P-S3	ピーク型 $T_{1/3} = 14s$	84.3

### (4) 計算時間および計算タイムステップ

3. 以降で示す計算に先立ち数値計算のタイムステップ  $\Delta t$  と計算時間が計算結果に及ぼす影響を検討した。計算船舶は 50,000DWT 一般貨物船、空載状態とし、係留索はナイロン索 (初期張力 7%) を用いている。動揺シミュレーションは  $\Delta t$  を 0.2~1.0 秒の範囲で変化させて実時間で 25 分行い、数値計算の初期の 20% のデータを除いた 20 分を有効計算時間としている。図-2 より  $\Delta t$  が 0.5 秒以下については計算結果の相違が少ないことがわかる。

次に  $\Delta t$  を 0.5 秒として有効計算時間が計算結果に及ぼす影響を検討した。図-3 に示すように有効

計算時間が 45 分までの計算結果には相違がないが有効計算時間を 60 分とした場合に計算値が大きくなっている。これはシミュレーションにおける最大波高が有効計算時間 60 分のケースにおいて大きくなっている影響である。表-2 の荷役許容動揺量を求めた際の有効計算時間が 20 分であったこともふまえ、以下の計算においては有効計算時間を 20 分、タイムステップ  $\Delta t$  を 0.5 秒とした。

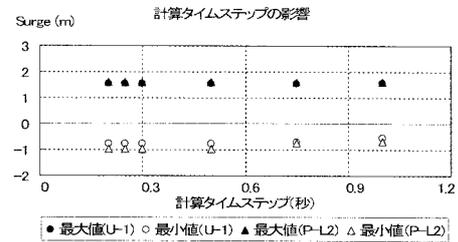


図-2 計算タイムステップの影響

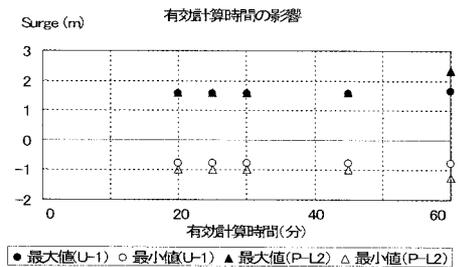


図-3 有効計算時間の影響

## 3. スペクトル・船舶の载荷条件による影響の検討

### (1) 計算条件

スペクトル、船舶の载荷条件を変化させた計算は、一般貨物船 10,000DWT, 30,000DWT, 100,000DWT の 3 船型の満載時および空載時について表-4 に示したスペクトル条件に対して行った。表-5 は計算した船舶のサージングの固有周期  $T$  を示す。ただし、係留索は各船型に対して鋼船規則から算定されるぎ装数から求まるナイロン索の径を用い、初期張力は切断荷重の 7% とした。防舷材は船舶の接岸速度を 0.1m/s とし、接岸エネルギーを計算し、求められたサイズのものを使用している。

表-5 一般貨物船のサージングの固有周期

载荷重量トン (DWT)	载荷状態	固有周期 $T$ (s)
10,000	空載	71.1
10,000	満載	94.1
30,000	空載	106
30,000	満載	128
100,000	空載	177
100,000	満載	217

## (2) 計算結果

図-4 はピーク型スペクトルを用いた場合の一般貨物船に対する長周期波荷役限界波高  $H_L$  を示したものであり、図の横軸は  $T_p/T=1.0$  としている。船型や荷荷条件によらず  $T_p/T=1.0$  のときに  $H_L$  は最も小さくなる。この条件のときには長周期波スペクトルのピーク周期  $T_p$  と船舶の固有周期  $T$  が近接するためサージングの共振が生じて動揺が大きくなるためである。

図-5 は一様スペクトルを用いた場合の一般貨物船に対する  $H_L$  を示したものであり、図の横軸は図-4 と同じく  $T_p/T$  としている。この場合は、図-4 に見られたように  $T_p/T=1.0$  のときに  $H_L$  が最も小さくなるという傾向は見られない。一様スペクトルとしたためピーク型スペクトルを用いたときほど応答特性が顕著にあらわれないことによる。

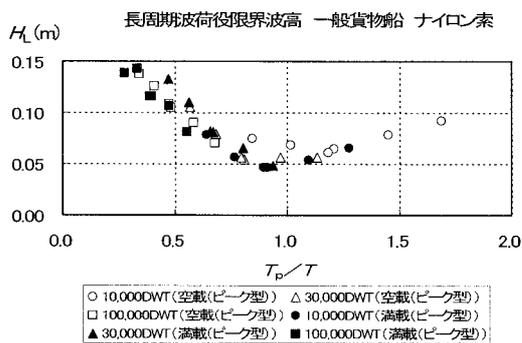


図-4 ピーク型スペクトルに対する  $H_L$

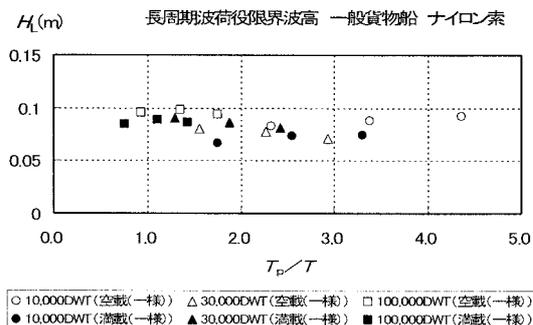


図-5 一様スペクトルに対する  $H_L$

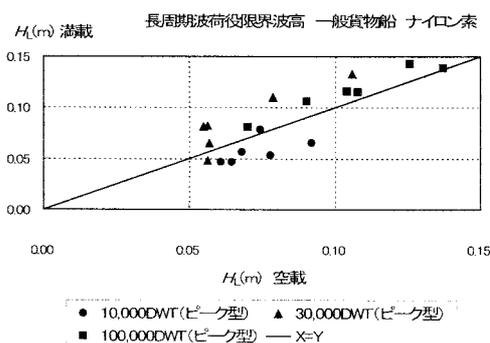


図-6 荷荷状態と  $H_L$  の比較 (ピーク型スペクトル)

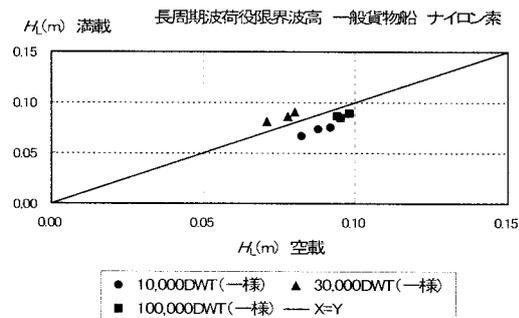


図-7 荷荷状態と  $H_L$  の比較 (一様スペクトル)

図-6 および図-7 はピーク型スペクトルおよび一様スペクトルについて空載時と満載時の長周期波限界波高  $H_L$  を比較したものである。荷荷状態やスペクトルによって空載時と満載時のどちらの  $H_L$  が大きくなるかは一定していない。

## 4. 係留索の特性の影響の検討

### (1) 計算条件

一般貨物船 10,000DWT と 50,000DWT の空載時について、係留索の材質をナイロン、ポリプロピレン、ポリエチレンと変化させた際の長周期波荷役限界波高を求めた。なお、係留索の初期張力は切断荷重の 7% とした。また、長周期波スペクトルはピーク型スペクトル 6 種類を用いている。図-8 は 10,000DWT 一般貨物船の船首側の係留索の変位復元力特性を各材質について示している。

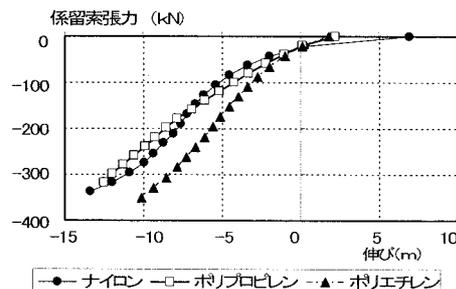


図-8 係留索の変位復元力特性 (10,000DWT 貨物船)

表-6 は計算した船舶のサージングの固有周期を示す。より剛性の大きなポリプロピレン、ポリエチレンにおいて固有周期が短くなる傾向がみられる。

表-6 一般貨物船のサージングの固有周期

荷荷重量トン (DWT)	係留索の材質	固有周期 $T$ (s)
10,000	ナイロン	71.1
10,000	ポリプロピレン	53.3
10,000	ポリエチレン	49.2
50,000	ナイロン	152
50,000	ポリプロピレン	116
50,000	ポリエチレン	110

(2) 計算結果

図-9 は一般貨物船 10,000DWT と 50,000DWT について、係留索の材質をナイロン、ポリプロピレン、ポリエチレンとした際の長周期波荷役限界波高  $H_L$  と周期比 ( $T_p/T$ ) の関係を表したものである。係留索の材質が異なっても  $T_p/T$  が 1.0 に近づくと  $H_L$  が小さくなる傾向は共通している。また、10,000DWT、50,000DWT のいずれについても、 $T_p/T$  が同一のときには、係留索がナイロンの場合より、ポリプロピレンやポリエチレンの場合の方が  $H_L$  は大きくなっている。これは、ナイロンよりもポリプロピレンやポリエチレンが硬い素材であることによる。港内の長周期波のスペクトル特性においてある特定のピーク周期が観察される港湾においてはピーク周期を把握し、 $T_p/T$  を 1.0 からできるだけ離れるように係留索の特性を適切に選定することによって、 $H_L$  を大きくできる可能性がある。

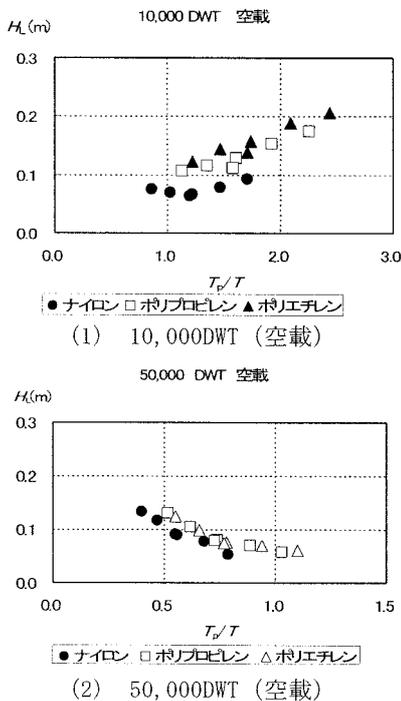


図-9 係留索の材質の違いによる  $H_L$  の比較

5. 船種・波向による影響の検討

(1) 計算条件

船種、船型と波向の影響を考慮し、長周期波荷役限界波高を求めた。ここでは、長周期波スペクトルは、周期30~300秒の一樣スペクトル(U-1)、係留索の特性としてはナイロン(初期張力7.0%)とした。船舶の載荷状態は空載状態とした。

(2) 計算結果

表-7~表-11 は計算を実施した船舶のうち、一般

貨物船、鉱石運搬船、穀物運搬船、コンテナ船について船型別に固有周期と波向  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  に対する長周期波荷役限界波高  $H_L$  を求めたものである。コンテナ船についてのみ荷役効率 50%と 100%に対する  $H_L$  を示している。

表-7 一般貨物船の固有周期、長周期波荷役限界波高

DWT	T(s)	長周期波荷役限界波高(m)		
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
1,000	33.0	0.131	0.152	0.167
3,000	67.7	0.081	0.092	0.102
5,000	58.1	0.095	0.113	0.131
10,000	71.1	0.082	0.100	0.111
30,000	106.2	0.076	0.088	0.098
50,000	139.3	0.076	0.087	0.097
100,000	177.2	0.080	0.093	0.104
150,000	241.7	0.074	0.086	0.096

表-8 鉱石運搬船の固有周期、長周期波荷役限界波高

DWT	T(s)	長周期波荷役限界波高(m)		
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
10,000	78.5	0.070	0.084	0.098
30,000	113.9	0.083	0.096	0.107
50,000	131.4	0.105	0.120	0.132
55,000	151.5	0.102	0.118	0.131
100,000	175.6	0.100	0.115	0.128
150,000	227.5	0.076	0.087	0.098

表-9 穀物運搬船の固有周期、長周期波荷役限界波高

DWT	T(s)	長周期波荷役限界波高(m)		
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
20,000	89.3	0.069	0.082	0.091
30,000	113.9	0.081	0.093	0.104
40,000	120.9	0.079	0.091	0.102
60,000	143.0	0.076	0.088	0.098
100,000	187.3	0.074	0.086	0.096

表-10 コンテナ船の固有周期、長周期波荷役限界波高

DWT	T(s)	長周期波荷役限界波高(m)		
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
20,000	78.8	0.116	0.134	0.148
30,000	98.2	0.091	0.105	0.116
40,000	107.0	0.093	0.107	0.118
50,000	116.0	0.094	0.107	0.119

(荷役効率 50%)

表-11 コンテナ船の固有周期、長周期波荷役限界波高

DWT	T(s)	長周期波荷役限界波高(m)		
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
20,000	78.8	0.058	0.067	0.074
30,000	98.2	0.046	0.052	0.058
40,000	107.0	0.047	0.053	0.059
50,000	116.0	0.047	0.054	0.059

(荷役効率 100%)

図-10 は一般貨物船について波向と長周期波荷役限界波高  $H_L$  の関係を示している。船舶の長軸方向から長周期波が入射する場合、すなわち波向  $0^\circ$  において  $H_L$  は小さくなる。

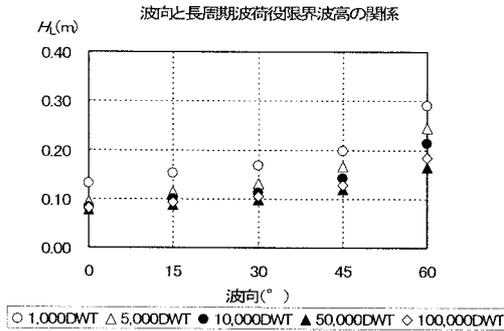


図-10 波向と長周期波荷役限界波高の関係

図-11 は、一連の計算結果をとりまとめ、マニュアルの長周期波荷役限界波高  $H_L$  との比較を示したものである。波向  $15^\circ$  の計算結果で得られた  $H_L$  は、おおむねマニュアルの数値と一致していることがわかる。ただし、長距離フェリー、中短距離フェリー、およびコンテナ船(荷役効率 100%)は、マニュアルの数値よりも  $H_L$  が小さくなっている。これらの船種は、表-2 に示すように荷役許容動揺量が他の船種よりも小さいためである。

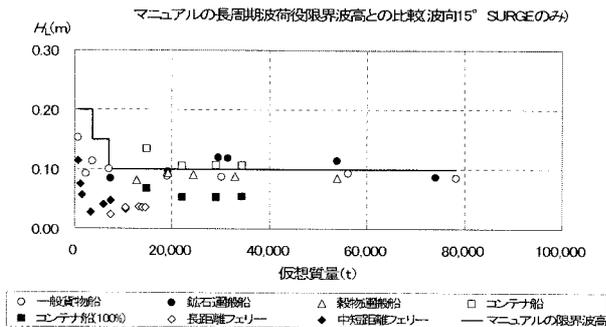


図-11 マニュアルの長周期波荷役限界波高との比較

## 6. 結論

- ①長周期波荷役限界波高  $H_L$  は、波向  $0^\circ$  の場合が最も小さく、波向が大きくなるにつれて、 $H_L$  も大きくなる。また、スペクトルのピーク周期  $T_p$  とサージの固有周期  $T$  の比  $T_p/T$  が 1.0 に近接すると、 $H_L$  は小さくなる。これは、船舶の固有周期とスペクトルの周期が近接することによって生ずるサージの共振の影響によるものである。
- ②変位復元力特性の異なる係留索(初期張力7.0%)を3種類選び、長周期波荷役限界波高  $H_L$  を比較した結果、 $H_L$  は、より硬い材質の係留索において大きくなることが分かった。係留索の材質の適切な選定によりサージ

の動揺抑制効果が得られ  $H_L$  を大きくすることができる。

- ③船種・船型・波向別に長周期波荷役限界波高  $H_L$  を示した。波向  $15^\circ$  に対する計算で得られた  $H_L$  はおおむねマニュアルの数値と一致している。なお、長距離・中短距離フェリーおよびコンテナ船(荷役効率100%)については、 $H_L$  はマニュアルの数値よりも小さくなった。これらの船舶では、荷役稼働率を求める際の  $H_L$  の設定に注意を要する。

## 7. 今後の課題

- ①本研究では係留船舶の長周期動揺の要因として長周期波成分のみを扱っているが、通常波浪成分の影響が大きな係船岸では変動漂流力による長周期動揺の影響が加わる。このような影響を考慮すること、模型実験や現地観測による検証、通常波浪成分と長周期波成分を一体的に取り扱った荷役稼働率の評価法の確立が必要である。
- ②フェリーバースの多くはL型形状で船尾側にランプを持っており防舷材で拘束されているのでこのような条件を取り入れた計算を行うことが必要である。
- ③長周期波のスペクトル形状や船舶の載荷状態(満載・空載)、係留索の材質によって計算で得られる長周期波荷役限界波高はかなり変化することから、さらに検討を進めて、より合理的な指標を示していくことが必要である。

謝辞：本研究の実施においては、北海道工業大学の卒業研究の成果を引用している。研究を行った宮崎慧、成田真一、柴田和麿、岡本紘史、廣井琢也、朝倉敏史の諸君に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の技術上の基準・同解説, p. 183, 2007.
- 2) 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, 沿岸技術ライブラリー, No. 21, pp. 17-28, 2004.
- 3) Ueda, S. and Shiraiishi, S.: The allowable ship motions for cargo handling at wharves, *Report of Port and Harbour Research Institute*, Vol.27-4, pp.3-61, 1988.
- 4) 佐藤平和, 白石悟, 米山治男：コンテナ船およびフェリーの荷役許容動揺量の解析, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 643-648, 2003.
- 5) 久保雅義, 今枝彬郎, 奥村宗行：長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について, 神戸商船大学紀要, 第2類, 第28号, pp. 289-298, 1980.
- 6) 笹健児, 白石悟, 神原繁樹：係留船舶の長周期動揺の各種計算法による再現性に関する比較検討, 港湾技術研究所資料, No. 931, 80p., 1999.
- 7) 白石悟, 米山治男, 佐藤平和, 笹健児：数値シミュレーションによる係留船舶の長周期動揺の評価に関する考察, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 137-142, 2002.
- 8) 平石哲也：長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定, 港湾技術研究所資料, No. 934, 17p., 1999.