

# 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

松良精三\*・渥美洋一\*\*・菅沼史典\*\*\*・宮本義憲\*\*\*\*

## 1. まえがき

波群性のうねりによる長周期漂流力と係留系の相互作用により、係留船舶が数分程度の長周期動揺を示す場合があることは従来から指摘されているところであるが、近年いくつかの港で、風もなく、風の状況であるにもかかわらず船舶が長周期動揺を示すことが報告され、利用上著しい障害となっているケースがある。

一方、波群の中にトラップされた長周期拘束波（セットダウン波）は、浅水変形や防波堤による回折を受ける過程で拘束が解け、自由進行長波として港内に入射して長周期擾乱を引き起こす可能性が指摘されており（喜岡ら、1990）、船体動揺をこの点と関連づけた報告もなされている（永井ら、1994）が、動揺の実態を観測し、定量的に評価した報告例はみられない。

本論文では、現在、苫小牧東港区で「底うねり現象」と呼称されている係留船舶の長周期動揺について、動揺発生時の動揺量観測と港外、港内の波浪観測を実施し、動揺特性とその支配要因について検討した。

## 2. 船体動揺発生時の同時観測

### 2.1 苫小牧東港区における船体動揺現象と観測体制の概要

苫小牧東港区は昭和55年より一部供用が開始されている。（図-1参照）。現在、中防波堤、東防波堤の延伸により、東水路地区では岸壁前面で有義波高50cm以下の期間が、年間通じて98%以上確保されており、計画上確保すべき静穏度の問題はないとされている。しかしながら、利用頻度が高まるにつれて、港内が比較的静穏であるにもかかわらず、係留船舶が数分近い長周期動揺を示すことが報告されるようになった。動揺の振幅は、時としてサージ方向で10m近くに達し、係留索張力の調整でも対応できず、荷役の中断にとどまらず、係留索の破断、防舷材の破損を引き起こしている。もっとも被害が集中している札幌丸の係留の概要を図-2に示す。

こうした動揺現象は、特に太平洋南方海上を低気圧が通過する9～11月に集中して発生することが報告されており、観測時期もこの期間に絞ることとした。観測は東水路地区内の3地点に設置した波高計、流速計（水平2成分）、港外1地点の波高計により4時間毎に2時間の連続観測を90日間にわたり実施するとともに、事務所では、対象船舶の札幌丸に長周期動揺が発生した場合に、直ちに現場に赴き、ビデオ撮影を行う体制を敷いた。観測地点の概要を前掲の図-1中に示す。

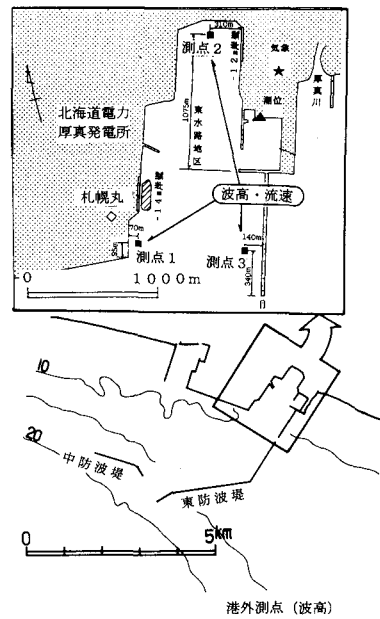


図-1 苫小牧東港区調査位置

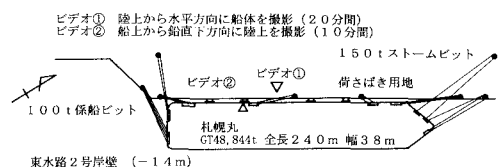


図-2 札幌丸係留状況

\* 正会員 工修 運輸省港湾局  
 \*\* 苫小牧港湾建設事務所 第二計画課  
 \*\*\* 正会員 工修 苫小牧港湾建設事務所 第二計画課長  
 \*\*\*\* 正会員 工修 釧路開発建設部 次長

本論文では、平成5年10月8日～10日、ならびに11月13日～15日に発生した長周期動揺の観測について報告する。このうち、10月の船体動揺を陸上、ならびに船上からビデオ集録することに成功した。撮影の概要を前掲の図-2中に示す。

2.2 船体動揺発生前後の港外・港内の波浪特性

船体動揺発生前後の波高、周期の変化を図-3に示す。10月の場合、8日深夜から動揺が発生し、動揺は最大でサージングで3.0mに達し、係留索の破断、防舷材破壊などの被害が生じた。港外の有義波高は最大で2m程度で特に高くなってはいないが、有義周期が船体動揺発生前後から10数秒を超えているのが特徴的である。また、図-4に港内外の波浪スペクトルの経時変化を示す。動

揺発生前の港外波浪には周期10数秒付近にエネルギーピークがあり、動揺が発生する10月9日からさらにピーク付近へのエネルギー集中がみられる。同時に、30秒程度以上の長周期エネルギーの増加傾向がみられ、動揺がおさまる10日には長周期成分は減衰している。

港内のスペクトルでも10数秒付近にピークがみられるが、エネルギーレベルは港外よりはるかに低く短周期の波浪成分は港内で減衰している、一方、30秒以上の長周期成分は、港内でもほとんど減衰していない。

ここで、港外測点と港内の測点1のスペクトルの30秒～10分までのエネルギー積分  $m_0$  を求め、

$$H_L = 4\sqrt{m_0}, \quad m_0 = \int_{1/600}^{1/30} S(f) df$$

により長周期成分波高を算定して両者を比較したのが、図-5である。

図-5で港外と港内の長周期成分の波高は非常に相関が高く、港内波浪の長周期成分は港外から進入している可能性が高いと考えられる。一方、10月9日正午前に行った船体動揺のビデオ撮影の解析から得られた動揺のエネルギースペクトルを3つの並進運動について図-4に示す。ヒービングとスウェイングには波浪のスペクトル

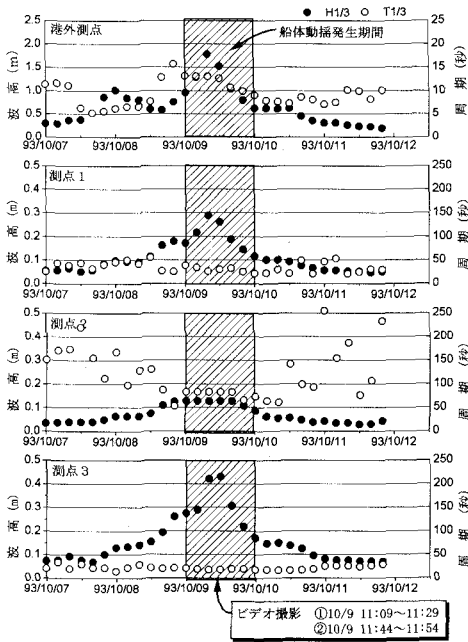


図-3 船体動揺前後の波浪特性の変化

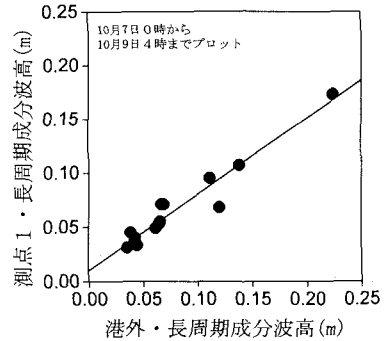


図-5 港外長周期成分波高と測点1長周期成分波高

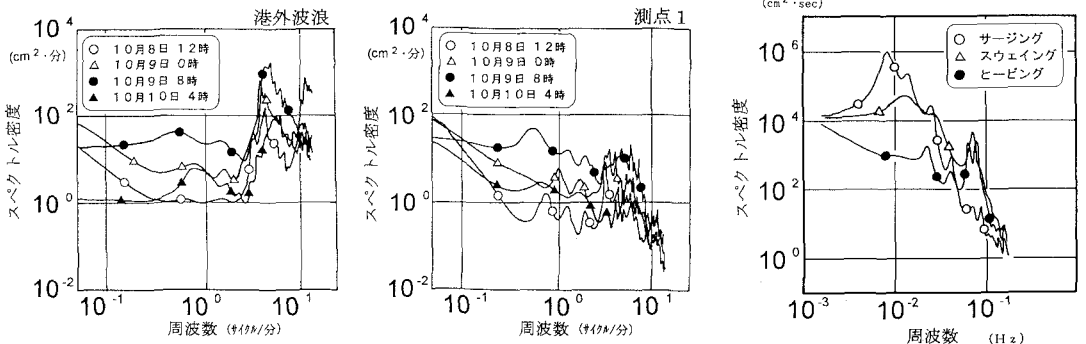


図-4 波浪スペクトルの経時変化と船体動揺スペクトル

でみられた10数秒付近のピークに対応したエネルギーピークがみられるが、サージングにはこうした短周期のピークはなく、逆に図-4に示した測点1の波浪スペクトルと同様に、周期100秒前後の長周期に明確なエネルギーの増大がみられる。スウェイングにもサージングほど明確ではないが、長周期のエネルギー増大がみられる。

以上の結果から、港外にみられる長周期エネルギーがあまり減衰することなく港内に進入し、係留船舶の長周期動揺を引き起こしている可能性が高いと考えられる。

今回の観測期間中の風は平均2~5m/sで、数値計算での検討では、動揺への影響は非常に小さいことがわかっていて。また、係留系の非対称性などが長周期動揺を助長する場合は考えられるが、この点については動揺の対策を検討する段階で考慮すべき課題であると思われる。また、波群そのものによる長周期漂流力は、観測による港内での波高が低いので、直接の影響は少ないと考えられる。

### 3. 波群に拘束された長周期波と増幅特性

#### 3.1 来襲波の波群特性と長周期拘束波

波浪の波群指標としてここでは永井ら(1994)にならいい、図-6で定義される波群周期をもとめた。波高の閾値としては平均波高を用いている。図-7に動揺発生前後の平均波群周期、長周期成分波高の変化を示す。10月には動揺発生時に平均波群周期と長周期成分波高が連動して大きくなっているが、11月ははじめに長周期成分波高の顕著な増加がみられ、波群周期は次第に増加しつつ、長周期波が低下し、動揺がおさまった後も80秒前後の値を維持している。今回計算した長周期成分の範囲が30秒~10分と幅を持つため、11月には10月に比べて最初に比較的短い長周期成分が卓越し、全体のエネルギーは低下しつつも、次第にさらに長い長周期成分にエネルギーピークが残ったためにこのような相違が生じたことが考えられる。また、各時刻の平均波群周期は、おおむね対応する波浪スペクトルの長周期側の卓越周波数に該当するとみられる。

さらに、波群に拘束されたセットダウン波形を永井ら(1994)と同様に、ラディエーション応力に基づく方法で推定し、スペクトルの30秒~10分のエネルギーからフーリエ成分波を求めて再合成した波形と比較したものを図-8にしめす。また、推定したセットダウン波の波高と長周期成分波高を比較すると図-9のようになる。波高の小さい部分では、若干推算値の方が小さめであるが、全体として、港外波浪中に含まれる長周期成分は、波群性の強い波浪で発生する長周期の拘束波と考えることができる。

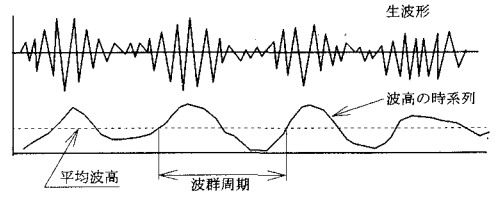


図-6 波群周期の定義

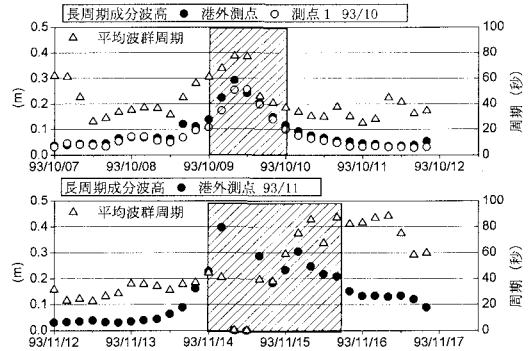


図-7 長周期成分波高と波群周期の経時変化

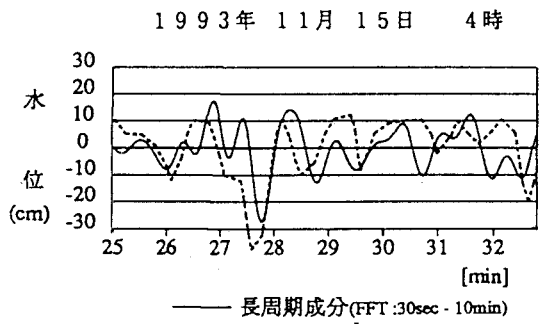


図-8 計算されたセットダウン波と長周期成分

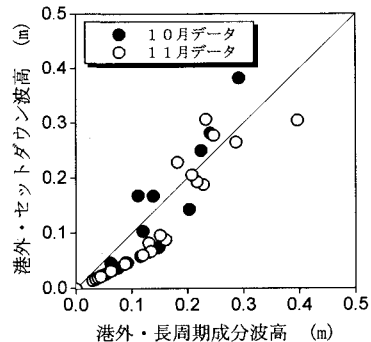


図-9 長周期成分波高とセットダウン波波高

### 3.2 港内波浪の増幅特性

港内の長周期波は港外波浪中に拘束された長周期成分に起因するものと考えられるが、船体動揺現象では、船種や、係留場所、係留方法に応じて、選択的に特定の周波数の長周期波と共振を起こすことが想定されるため、港内波浪の周波数増幅特性を明らかにすることは、動揺予測、対策の検討に当たって重要である。

図-10に港内の測点1～3でのエネルギースペクトルの増幅率経時変化を示す。増幅率は、港内の港外に対するエネルギースペクトル比の平方根として定義した。十数秒の短周期成分は増幅率は1以下で大幅に減衰している。周期1分(1サイクル/分)～10分付近で、係留岸壁前面の測点1では10分近くで若干増幅率が增大しているが、各時刻ともほぼ増幅率1付近に分布している。一方、東水路奥の測点2、東水路入り口付近の測点3ではいくつかのピークがみられ、ピーク増幅率は船体動揺の発生時期に増加する傾向がみられる。

測点1で明確な増幅傾向は確認できないため、今回の観測期間中の札幌丸の船体動揺には、港内の副振動的な増幅の影響は小さかったと考えられるが、観測ケースが限られることもあり、港内への長周期波の入射条件(波向きなど)などの影響なども含め、さらに検討を続ける必要がある。くわえて、ほかの測点では数倍程度の増幅傾向がみられる周波数があり、今後の岸壁の利用、港の将来計画にあたり、前もって適切な予測、対策を行うため、港内での増幅率の空間分布についても引き続き検討

する必要がある。

## 4. 船体動揺特性の評価と動揺予測の検討

### 4.1 動揺シミュレーションと波浪応答特性の検討

実測波浪スペクトルをもとに船体動揺の数値計算を実施し、実測の動揺スペクトルと比較した。計算方法の詳細は、松良ら(1994)を参照されたい。

図-11に並進3運動の動揺スペクトルの実測値と計算値の比較を示す。結果は入力波浪スペクトルに対する伝達率スペクトルとして表示している。ここで示した入射波向きは船首方向に対して170°で、ほぼ船尾方向である。波向きは単一方向でしか与えられないため、今回は、試算としてもっともサージングに影響が大きいと考えられる角度に設定している。

サージングでは、実測スペクトルでは120～130秒付近にピークがみられるが、計算値では200～300秒のさらに低周波数側にピークがあり、ピークエネルギーも実測よりも大きい。計算値については入射波向きや係留索のバネ定数など計算のキャリブレーションに検討の余地があり、実測に関しても、今回のビデオ収録が20分間に限定されているため長周期側のスペクトルが十分分解できていない可能性がある。しかしながら、スペクトルの分布形状はおおむね再現できており、サージングの長周期側での伝達率の増大傾向は数値計算でも再現できたと考えられる。このことからサージングの長周期動揺については、長周期波浪成分が大きく寄与していることが確認できた。

スウェイングについては、100秒未満の短周期で実測値が計算値よりかなり大きくなっているが、計算上の入射波向きをかなり船尾方向よりを設定しているため、計算値が、多少過少評価になっている可能性もある。

一方、ヒービングは特に顕著な伝達特性を示さず、波浪の上下運動がそのまま船体動揺として現れていることがうかがえる。

### 4.2 船体動揺の簡易予測

以上のように、現段階で、少なくとも港内の長周期波成分が長周期動揺に大きく寄与していることが確認されたので、予測の第一段階として、長周期成分波高を簡便な方法で見積もることを考えてみる。一例として、図-12に港外波浪の有義波高と有義周期の積に対しての港外の長周期成分波高をプロットしたものを示す。一般的な波浪予測で得られる有義波高と有義周期の予測値を利用できれば、図-5、図-12を用いて、ある程度の精度で港内の長周期波高を見積もることができ、荷役障害発生の目安を得ることができよう。

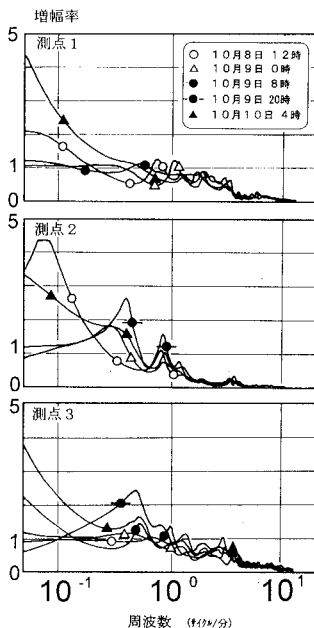


図-10 増幅率周波数特性の経時変化

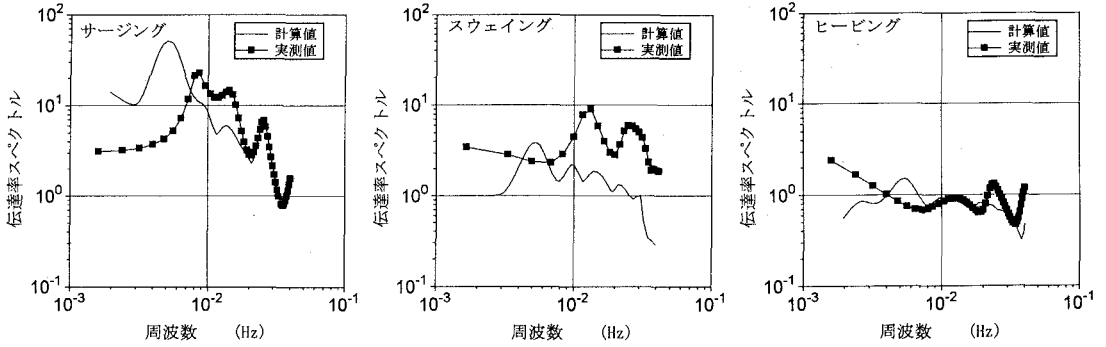


図-11 動揺の伝達率スペクトルの比較

5. あとがき

本報告で得られた主要な結論をまとめる。

- ① 港外の長周期成分は波群性の波浪に伴うセットダウン波であることが定量的にも裏付けられた。
- ② 係留船舶と長周期波の関係は、サージングで特に伝達率が大きいことから、荷役障害時の長周期動揺が港内の長周期波によるものであることがほぼ確認された。
- ③ 港内での増幅率の周波数特性は、場所によって最大数倍程度の値を示した。今回の対象船舶の係留場所では明確な増幅を示しておらず、港外の長周期波のエネルギーがほぼそのまま到達している可能性が高く、今回の観測に関しては、顕著な副振動増幅は認められなかった。

今後、動揺の予測・対策の観点から、来襲波浪のセットダウン波の予測手法や、拘束波が進行波として港内へどのように入射、伝搬、増幅して船舶に到達するのかをモデルの構築を前提に検討を進める必要がある。特に、気象条件の相違や波向きの影響なども、今後も引き続き観測を継続し、明らかにしていきたい。

一方、実際の荷役障害と動揺量の関係についてもデータ、情報の蓄積を続けるとともに、動揺量の算定手法の評価、パラメータの同定が必要である。

最後に、観測、解析を進めるに当たり、「苫小牧港海域調査委員会（委員長・谷野賢二 北海道開発局開発土木研究所水産土木研究室長）」で審議いただき、ご意見、ご

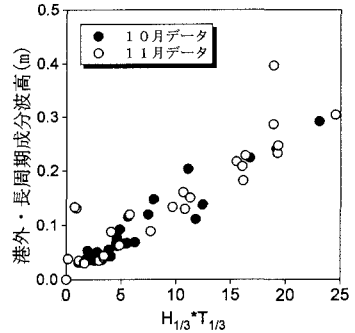


図-12 港外長周期成分波高と  $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$  の相関

指導を賜った。ここに厚く御礼申し上げる次第である。また、日本データサービス（株）にはデータ解析、図面作成にご尽力いただいた。あわせて御礼申し上げる。

参考文献

喜岡 渉・飯田耕三・水谷隆夫 (1990): 離岸堤まわりの長周期水位の変動の変形特性, 海岸工学論文集, 37 巻, pp. 609-613.  
 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・柴田孝雄 (1994): 波群特性を考慮した港内静穏度指標について, 第 12 回海洋工学シンポジウム論文集, 日本造船学会, pp. 343-348.  
 松良精三・渥美洋一・菅沼史典 (1994): 苫小牧東港における船体動揺特性の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 50 巻, pp. 618-623.