

現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討

菅沼史典*・神谷昌文**・渥美洋一***・小泉信男****

1. はじめに

苫小牧東港で「底うねり」と呼称される長周期動揺は、港外から侵入した港内波浪中の長周期成分に起因することが、ほぼ昨年度の動揺と波浪の同時観測結果(松良ら、1994)で確認され、波群に拘束されたセットダウン波が長周期波の有力な成因の一つとして考えられることが示された。

長周期波の成因については、セットダウン波だけでは現象を説明しきれない部分があるが(神谷ら、1995)、こうした要因の把握と併せて、長周期波の静穏度への影響度や、当面の障害、事故の未然防止といった実務的な側面からのアプローチも重要である。

本論文では、現在被害が発生している係留岸壁を対象に、まず、船体動揺量の連続観測から長周期波と動揺量の定量的関係を示し、長周期動揺における荷役限界状態を検討する。ついで、長周期波の港内増幅特性を評価するとともに、平成5年9月から一年間にわたる港外長周期波の連続観測の結果より、長周期波の発生頻度の実態を示し、係留岸壁の荷役障害への影響度を検討する。さらに、船舶の入港に際して、事前に荷役可否判断の目安を得る一手法として、既存の波浪予測を組み合わせた長周期動揺の簡易発生予測法について検討する。

2. 長周期船体動揺の連続観測と荷役限界

現地観測の調査位置図を図-1に示す。東港港外においては、平成5年9月～平成6年9月までは4時間毎の2時間の、それ以降は24時間連続観測をおこなった。西港では毎正時に波高・波向を通年観測している。着岸地点ST.1では平成5年9月～11月および平成6年9月～12月に連続波浪観測を実施した。さらに、平成6年9月～12月に港口ST.2で、港内への入射波向をとらえるために波高・波向の連続観測をおこなった。また、主要船舶着岸時には、船体側方より、着岸時から離岸時までのビデオ撮影をおこなった。

平成5年9月～11月の動揺については前報(松良ら、1994)のとおりである。平成6年9月19日早朝に発生した石炭運搬船「Energy Pioneer」(総トン数36,493t、船長225m)の船体動揺の動揺前後の波高・周期の変化を図-2に示す。図中には、斜線で特に顕著な動揺発生期間を示した。船体動揺は、9月17日深夜から発生し、最大でサージング両振幅8m程度に達し、係留索の破断等の被害が生じた。この間、18日午前3時30分に荷役中断、8時30分に係留索を解いて緊急離岸している。この時の港外の有義波高は1m程度から最大5m程度まで発達したが、動揺が顕著になりはじめた時の有義波高は1m程度であった。ST.1においては、有義周期が発生前後から10数秒を超えているのが特徴的である。図-3に主要な地点の波高スペクトルとサージングの動揺スペクトル

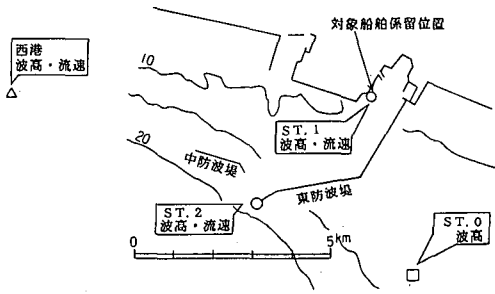


図-1 調査位置図

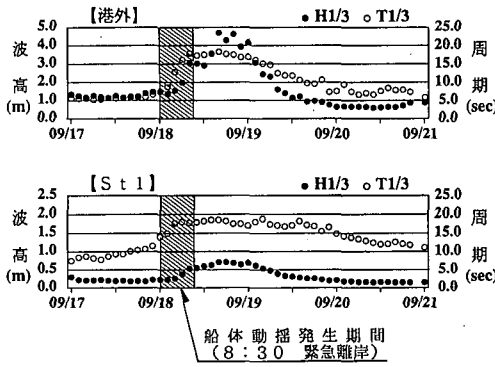


図-2 動揺前後の波浪条件

* 正会員 工修 第五港湾建設局 四日市港工事事務所 所長
** 正会員 工修 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所 第2計画課
*** 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所 第2計画課
**** 正会員 工修 北海道開発局 小樽開発建設部 次長

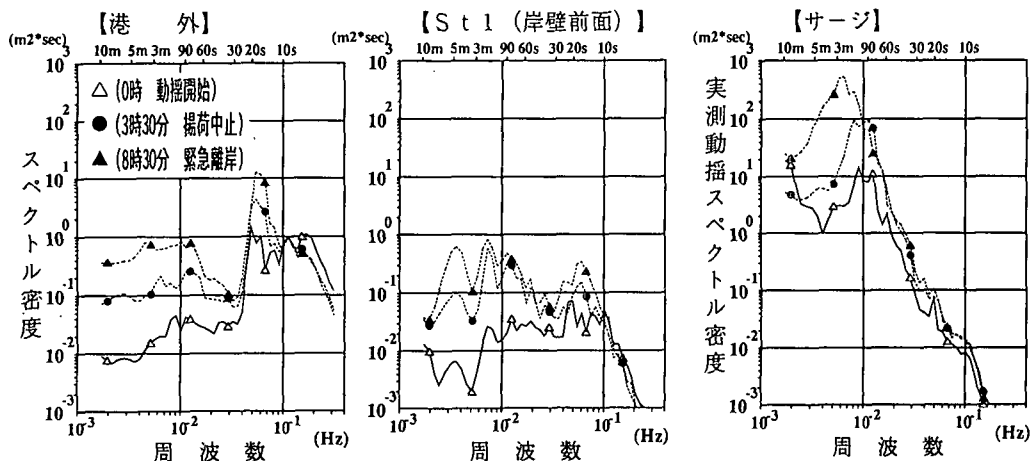


図-3 波高スペクトルと船体動揺スペクトルの経時変化

の経時変化図を示す。港外と港内の波高スペクトルの比較で、港内に進入する過程で長周期側ではあまり減衰がみられないことなど、基本的に今回の観測でも、前報(松良ら, 1994) とほぼ同様の結果が得られた。

図-3の動揺スペクトルは動揺発生に伴い長周期側で顕著な増大傾向を示している。ここで、前報にならない定義した長周期波高と動揺量の経時変化を図-4に示す。長周期波高の変化は、動揺量の経時変化とよく対応しており、長周期動揺が長周期波高でほぼ定量的に評価できることがわかった。実際に荷役を中断した3時30分の最大動揺量はサージ両振幅で2.6 m程度を示した。Ueda・Shiraishi (1988) による鉱石運搬船の荷役許容動揺量 ± 1 mと比較するとやや大きい。動揺周期が非常に長い今回のケースではこの許容値と必ずしも一致しないことを勘案し、ここでは荷役限界状態を実測に基づき、長周期波高で0.15 mと設定することとする。

3. 長周期波の港内伝達特性と副振動

3.1 港外波高比に対する波向きの影響

ここで対象とする数分程度の長周期波では、通常の周期十数秒程度までの波浪と異なり、いわゆる港内副振動の影響が現れることが予想される。

長周期波の港内伝達特性を検討するため、はじめに長波近似方程式による水位変動計算の試算例を図-5に示す。計算は港外で観測した平成6年9月18日6時～8時の実測波高スペクトルを48周波数の波に分解したのち、個別波のエネルギーを波高に換算し規則波の条件で与えた。結果をST. 1/ST. 0の波高比(以下、港外波高比と呼ぶ)として表した。また、入射波向きの影響を検討するため、計算領域内の港湾の向きを3種類に変えて試算しており、それぞれ、波向きSE, SSE, WSWに該当す

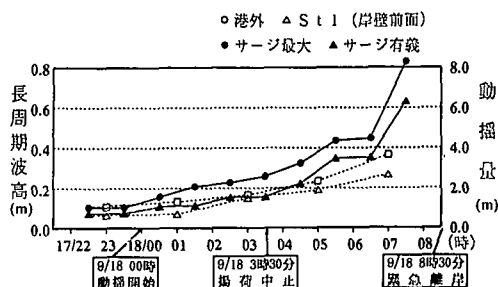


図-4 実測動揺量と長周期波高の時系列

る。

計算によると、波向がSSE, SSWではある程度波高が減衰し顕著な波高増幅はみられないが、入射波向がWSWになると周波数によっては波高比が8倍程度に増大することがわかる。波高比が1を超えるのは、第一に港内での多重反射など港固有の副振動の影響が考えられるが、現況の港形は西側が大きく開いた形であるため、波向きが西寄りになると西側の汀線境界で反射した波が港内に侵入するために波高比がさらに増大するものと推定される。

一方、図中に破線で示す係留岸壁での実測波高比には顕著な増大は見られず、また、図-6に示す港口のST. 2における方向スペクトルの推定結果では、観測期間中の入射波向きは、短周期から長周期までほぼSSE～SSWの範囲に分布していることから、計算での港口のエネルギー減衰や海底摩擦などの不確定要因はあるものの、実測波高比の周波数特性は、概ね水位変動の計算結果と一致するものと判断される。

以上より、観測した係留地点については、長周期波の入射波向きがかなり西寄りにならない限り、顕著な波高

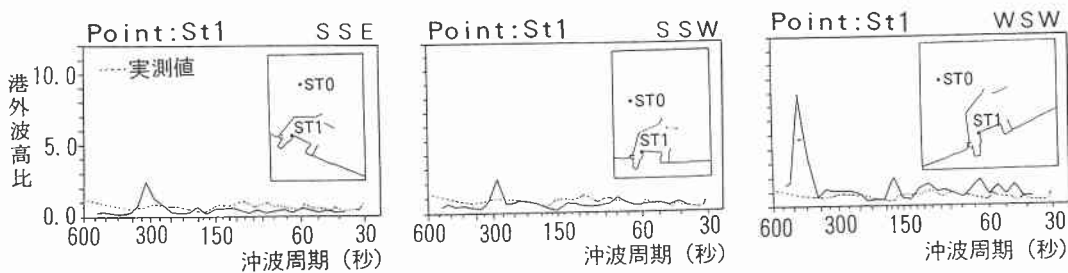


図-5 港外波高比の数値シミュレーション例 (波向きによる変化)

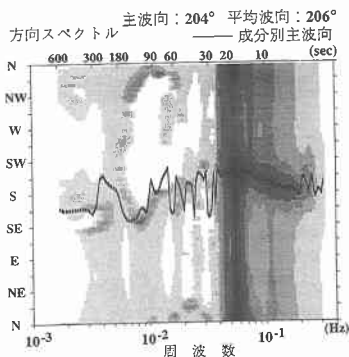


図-6 港口での方向スペクトル

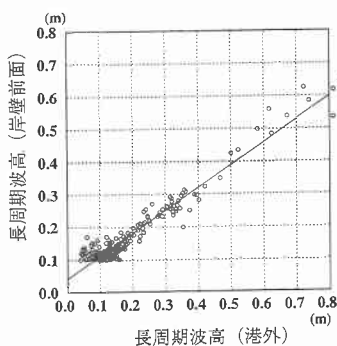


図-7 港内外の長周期波高の相関

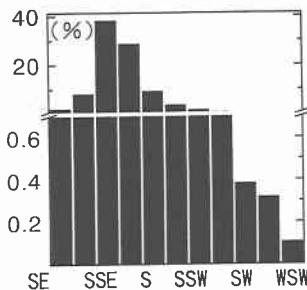


図-8 波向別出現頻度 (西港)

増幅特性は示さないものと推定される。

3.2 長周期波高に基づく港外波高比の定義

船体動揺現象は、船や係留系固有の振動特性と入射波スペクトルの相互作用によるため、厳密には前述のような港外波高比の周波数特性を直接考慮する必要があるが、ここでは係留地点、対象船舶などを限定した簡易的な評価・予測手法に結びつけるため、港外波高比についても2.で検討した長周期波高を用いて表すことを考える。

長周期波の港内伝達海底摩擦や港口でのエネルギー減衰などにより、港外波高比の周波数特性が波高の絶対値で変化することが予想される。事実、図-7に示す平成5年9月～12月と平成6年9月～12月のST.0とST.1の長周期波高の相関では、波高の比較的大きな領域で波高比の減衰が見られる。しかし、今着目している荷役限界波高付近ではほぼ1に近い波高比を示しており、荷役限界長周期波高0.15mに対応する波高比として0.96となる。

3.1の波向きの影響については、現時点では通年にわたる長周期波浪の方向別発生頻度のデータが欠如しているため確定的な議論は出来ないが、前報で報告した長周期波の発生要因の一つとしてセットダウン波を考えた場合、長周期波がその搬送波であるうねり成分波浪とほぼ同じ波向きを持つとしても一義的には正しいと考えられ

る。

そこで、図-8の西港で観測した通常波浪の5か年分の波向き別出現頻度統計で波向き別の出現頻度を調べてみた。220°を超える波向きの出現頻度は0.8%程度で、後掲の図-9から荷役限界を超える長周期波の発生頻度は年間で3.3%程度であることから、仮にこれらすべてで顕著な長周期波が発生していると仮定しても、その影響は相対的には大きくないと考えられる。

以上のことから、荷役限界付近に限定されたレンジにおいては、図-7で求めた長周期波高比0.96を波向きによらず一定値として用いても大きな誤差にはならないと思われる。

4. 長周期波の発生頻度特性と長周期動揺

過去の経験では、今回の観測時と同様に有義周期が長く、うねり性の波浪が侵入する場合に長周期動揺が発生することが報告されているが、長周期波そのものについては、これまでその実態がほとんど把握されていない。

長周期波の発生要因については、松良ら(1994)、神谷ら(1995)の検討でも、現時点で、確定的な要因の推定には至っていないが、港湾の将来計画などへの現実的な対応を今後検討する上でも、観測データに基づく長周期波の実態把握を進める必要がある。

図-9に平成5年9月～平成6年8月の1年間の港外

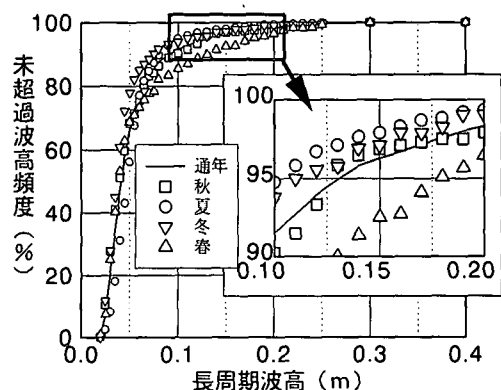


図-9 長周期波の未超過波高発生確率

長周期波高の未超過発生確率を通年、及び四季別に示す。長周期波高は4時間間隔で一年にわたり取得した2時間ずつの波形記録からこれまでと同様の方法で算定した。苫小牧港の場合、三陸沖から関東の東、小笠原近海といった範囲で南または南東の風が吹いた場合に、半日から一日程度遅れてうねりが進入してくる場合が多い。これは、季節的には、移動性高気圧が日本の東に抜けるたびに、短い周期で日本海付近に低気圧が進んでくる春、秋に多い気圧配置である。また、これとは別に秋季には日本の南や小笠原近海に進んできた台風によるうねりが加わり、春、秋は相対的に高長周期波高の頻度が高くなっているものと推定される。

既に設定した東-14m岸壁での港外波高比0.96と荷役限界長周期波高0.15mより、港外長周期波高のしきい値が0.16mとなり、図-9から、対象船舶が長周期波の影響によって荷役できない確率が年間3.3%と試算される。なお、現地ヒアリングによると、対象岸壁において着岸隻数にしろる係留索が切断した船隻数の割合が最近十年間で平均8%程度(281隻中22隻)で、前掲の3.3%はこれに比べて低い数値となっている。今回の試算では荷役限界を実績に基づいて設定しているが、現実には荷役中断前にすでに係留索の破断などが生じるケースも多く、荷役限界波高の設定には再考の余地がある。また、3.の港内長周期波高の波向き依存性などの不確定要因の他、このように定義された長周期波高に基づく定量的評価の妥当性自体も含めて引き続き検討を要する。

5. 船体動揺の簡易発生予測の検討

工事施工管理などの目的で直轄工事事務所では(財)日本気象協会に委託して波浪予測を行っている。予報は、毎日16時に、当日18時を起点とした24時間先までの苫小牧港海域の風速・風向・有義波高・有義周期・波向を予測するもので、図-10に予測の概略フローを示す。いま、こうした有義統計量から長周期波高 H_L を(1)式の

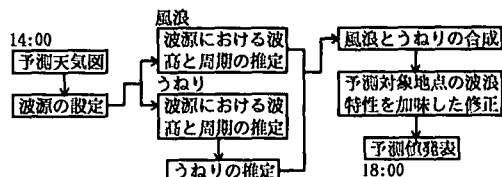


図-10 波浪予測フロー図

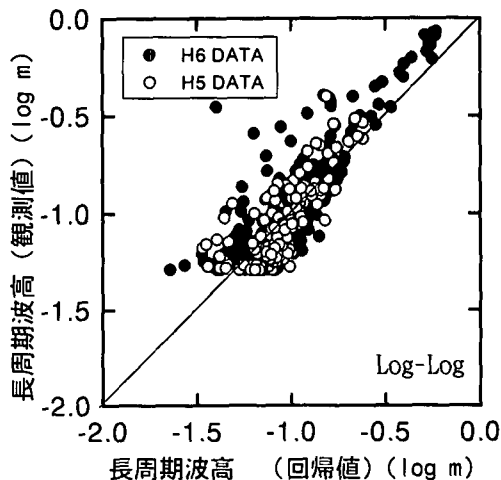


図-11 長周期波高の実測値と回帰値の相関

ような回帰式で表すものとし、平成5、6年の9～12月のデータから係数を求めるとそれぞれ以下の通りとなる。なお、5cm以下の長周期波高はカットして求めた。

$$H_L = aH_{1/3}^b T_{1/3}^c \quad (H, T \text{ は西港観測値}) \cdots (1)$$

平成5年度 $a=0.014, b=0.461, c=0.995$

平成6年度 $a=0.014, b=0.689, c=0.989$

図-11に回帰値と観測値の比較を示す。この回帰式を用いて、図-12に、平成5年10月8日～10日、および11月13日～15日、平成6年9月17～18日にかけて発生した長周期動揺について、予測長周期波高と実測長周期波高を比較したものを示す。平成6年9月のケースは、台風24号に伴う異常気象で波浪予報の精度そのものが非常に悪かったため全体の一致が悪いが、荷役限界付近ではある程度一致している。これに比較して残りの2つのケースではかなりの精度で予報期間全体で一致している。

一方、図中には図-9で用いた港外での荷役限界長周期波高0.16mを併記している。ここで、図中の矢印は、荷役中断の実際の発生時刻(↑印)と予報値が0.16mを超えるときの予測発生時刻(↓印)を表している。平成5年10月のケースでは長周期波高の予報精度は高いが実際の荷役中断の発生時刻は予報と若干ずれがあり、これは実際の荷役中断の判断の不確定性にも起因している。

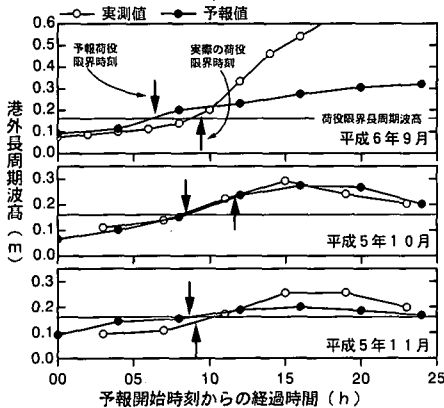


図-12 長周期波高と荷役障害の予測

ことが裏付けられた。これにより荷役限界状態を限界長周期波高で定量化を試みた。

2) 一年間の連続波浪観測より港外長周期波高の年間発生頻度特性を示すとともに、実際に障害が発生している岸壁を対象として、前面の長周期波高を港外長周期波高と関連づけることにより、限界長周期波高を考慮しつつ、長周期動揺の発生確率について試算した。

3) 港外長周期波高を有義波高と有義周期に関連づける経験式を提示するとともに、現在実用化されている有義波高、周期の定時波浪予測システムを組み合わせる長周期動揺の発生予測を試みた。これを基本として利用する波浪予測のタイミングをうまく選択すれば、荷役可否の判断にある程度利用可能と考えられる。

現時点では、長周期波の発生要因や波向き特性など不明確な点も多く、荷役限界を長周期波高で定量化することの妥当性も含めて、今後港の計画や具体的な対策工法などに反映させるにはさらに長期間の観測実績や港内波高分布などの解析・予測手法の検討の積み重ねが必要である。直轄工事事務所としても学識経験者や利用者、管理者などと連携をはかりつつ適切な対処方策の検討を進める予定である。

最後に、検討を進めるにあたり、「苫小牧港海域調査検討委員会」(委員長・谷野賢二 開発土木研究所水産土木研究室長 ～平成5年度)、ならびに「苫小牧東港静穏度対策検討委員会」(委員長・上田茂 鳥取大学工学部教授平成6年度～)より貴重なご意見を賜った。

また、データ解析、図面作成には日本データサービス(株)のご協力を得た。あわせて、ここに厚く御礼申し上げます。次第である。

参考文献

- 上田 茂 (1984): 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技術研究所, No. 504.
- 神谷昌文・渥美洋一・菅沼史典 (1995): 苫小牧東港における船体動揺に関する現地観測, 第20回海洋開発シンポジウム論文集, pp. 210-215.
- 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 S. Shiraisi (1988): The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4, Dec., 1988, pp. 3-61.

と思われる。さらに検証データを積み重ねる必要があるが、この程度の精度でも荷役可否判断の客観的な目安にはなると考えられる。

荷役業者へのヒアリングの結果による実際の運用上必要な予報の条件の一例を図-13に示す。事務所でやっている波浪予測のままでは全体を網羅しきれないが、波浪予報のタイミングをうまく選ぶことで本手法の適用性は広がると考えられる。ただし、(1)式の回帰モデル自体は当面の実用的な側面から設定しているので、現象のモデル化という観点では長周期波高による可否判断の妥当性も含めて今後再検討の必要がある。

6. あとがき

本報告で得られた結論をまとめる。

1) 動揺量の経時変化は長周期波高の経時変化と良く対応しており、動揺量は長周期波高によって評価できる

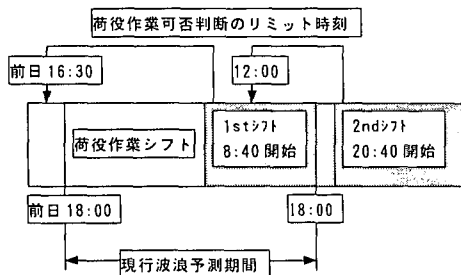


図-13 荷役可否判断のタイミングと予測