

長周期波の港内侵入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討

渥美 洋一* 若山 義樹** 國田 淳** 関口 信一郎***
川口 勉**** 平石 哲也***** 青木 伸一***** 上田 茂*****

1. はじめに

苫小牧港東港区においては、港外から侵入する長周期波により、係留中の大型船舶に「底うねり」と呼称される大きなサージング動揺被害が発生する。

この船体の長周期動揺被害のメカニズムについては、動揺、及び波浪観測の同時観測結果等に基づき、侵入波浪中に含まれる長周期成分と、船体係留系の固有振動モードとの共振により、サージ動揺が増幅されていることが定量的に確認できた。(菅沼ら, 1995; 松良ら, 1994)

また、3ヶ年の長周期波実測値の解析に基づき、長周期波の稼働率評価手法を構築し、港口防波堤の長周期波抑止効果を定量的に示した。(神谷ら, 1996; 菅沼ら, 1995)

本論文では、被害が発生する現地において非常に要請が高い、対策工が施されるまでの荷役障害回避手法として、ソフト的な対策として考えられている、船体動揺予測手法の検討作業を中心に報告する。

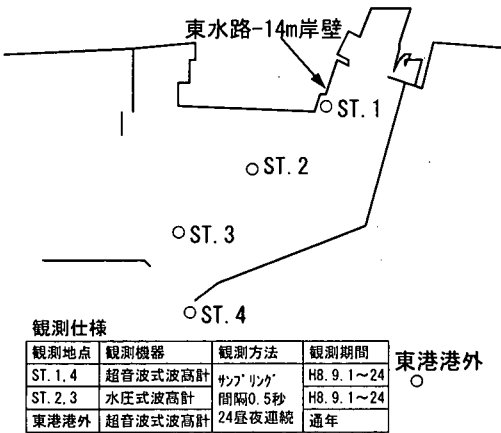
係留地点における船体動揺予測は、港外長周期波予測値を基に、係留地点における長周期波高予測値を、水位変動シミュレーションで計算するのが基本となるが、この数値計算においては、港外長周期波を波群拘束波と仮定し、港内では見かけ上拘束を解かれた自由進行波として取り扱っている。そこで、港外から岸壁前面までの長周期波の港内侵入過程を明らかにするために、現地観測によって、各観測点における拘束波と、自由進行波の比率を求め、数値計算上の取扱の妥当性を検証した。

その上で、長周期波実測値を用いて、長周期波高予測式5パターンについて精度検証を実施した。なお、精度検証のための基礎データは、H4年からH8年にかけて蓄積された、長周期波高が卓越する期間55ケースとし、波高階級別・予測精度の時系列的变化等の観点から、実際の運用上の適否を検証した。

2. 港内侵入過程の現地観測

2.1 現地観測体制

H8年度の現地観測体制を図一に示す。



図一 現地観測体制

2.2 船体動揺発生時の波浪

観測期間中のH8年9月20日に、係留中の石炭運搬船「DAPHNE OCEAN 号」(総トン数38,891t, 227m)で、ヒアリングによる最大 surge 動揺量10m、係留索12本切断に及ぶ船体動揺被害が発生した。そして動揺開始(9月20日4時)から、緊急離岸時(9月21日5時20分)までの連続25時間の波高データを取得した。

動揺開始時・荷役中止時・緊急離岸時の3段階における波高スペクトル形状の変化を図二に示す。今回は、船体動揺画像は観測できなかったが、H6年9月18日に「ENEGY PIONEER 号」で発生した動揺現象と同様に、エネルギーピークが90秒~180秒にある、周期30秒以上の長周期成分のエネルギー量が船体動揺の激化に対応し、大きく増大していることが、3点の波高スペクトル解析結果により確認できた。

3. 港内侵入波のセットダウン波比率の検討

3.1 解析手法

本年度の港内観測各地点における観測データから、

* 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第二計画課
** 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第二計画課
*** 工修 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所長
**** 日本データサービス株式会社
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所
***** 正会員 工博 豊橋技術科学大学工学部建設工学系
***** 正会員 工博 鳥取大学工学部土木工学科

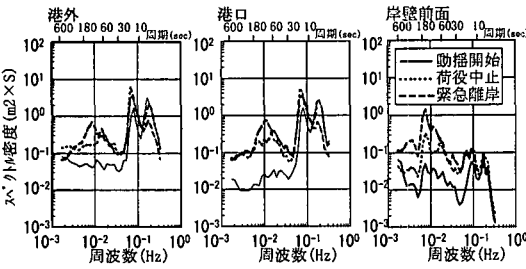


図-2 波のスペクトル密度の時間的及び空間的变化

セットダウン波と、自由進行波の比率を計算することにより、現計算手法における港内侵入波を見かけ上、拘束を解かれた自由進行波として取り扱うことの妥当性を検証した。この解析手法を図-3に示す。

ここで、港外及び港内各点における自由進行波 (H_f) は、観測長周期波高 (H_i) から、波群拘束波 (H_a) を引いたものとして算出した。次に港内において、理論的に求めたセットダウン波高 (H_d) と、観測長周期波高 (H_i) の比率を求めた。表-1, 2に H_d/H_i を求めたものを示す。なお、この計算は、ST.3が9月15日以降欠測したため、港内侵入過程の4点が同時観測できた9月1日~14日の期間(期間1)と、観測期間中長周期波が最も卓越した9月23日~24日(期間2)の、2つの期間について行った。

3.2 自由進行波比率の解析結果

表-1に示すように、まず期間1については、港外における拘束波の比率は53.1%であり、これが港口通過前後(ST.4, 3)では、37.5%から18.8%と減衰し、岸壁前面(ST.1)では拘束波の比率は16.4%となるので、大部分の長周期波が見かけ上自由進行波とみなすことができる。

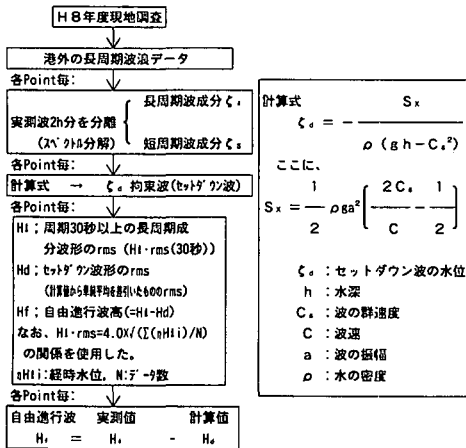


図-3 計算フロー

表-1 4点同時観測時の長周期波に対するセットダウン波の比率 (H_d/H_i) (%)

期間 1	セットダウン波高/長周期波高×100 (%)				
	東港港外	St. 4	St. 3	St. 2	St. 1
9月1日~14日	53.1	37.4	18.8	20.9	16.4

表-2 長周期波卓越時の長周期波に対するセットダウン波の比率 (H_d/H_i) (%)

期間 2	セットダウン波高/長周期波高×100 (%)				
	東港港外	St. 4	St. 3	St. 2	St. 1
9月23日~24日	93.2	91.5	欠測	57.9	18.6

次に、長周期波が最も卓越した期間2では、波群性がより強まることを反映し、港外では93.2%と、期間1に比べ非常に高くなっている。ただしST.3が欠測しているため、港口通過前後の拘束の度合いの変化はわからないが、岸壁前面(ST.1)では18.6%と、期間1と同様にほぼ大部分が自由進行波として扱えることがわかる。

3.3 港口長周期波高の計算による再現性

港外に存在する長周期波の発生要因がセットダウン波であると考えた場合、長周期波がその伝播波であるうねり成分波浪とほぼ同じ波向を持つことから、その波向は通常の波向と同じとして(神谷ら, 1996)、100%自由進行波であると仮定し、自由進行波を境界入力して水位変動シミュレーションで各測点の長周期波高を計算し、実測値と比較した結果を期間1と2に分けて図-4、および5に示す。

波群性が高いと考えられる期間2では、拘束波の比率が高くなっているため、より相関係数が高い。全体として期間1, 2の両方で、ほぼよい相関が得られ、実際の港内長周期波高の推定においては、港外を波群に拘束された長周期波と仮定し、港内で見かけ上拘束を解かれた

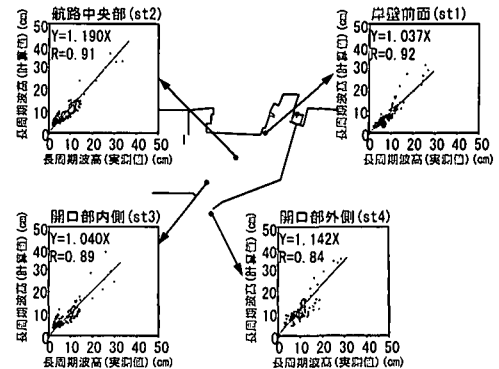


図-4 (期間1)の計算及び実測長周期波高の相関図

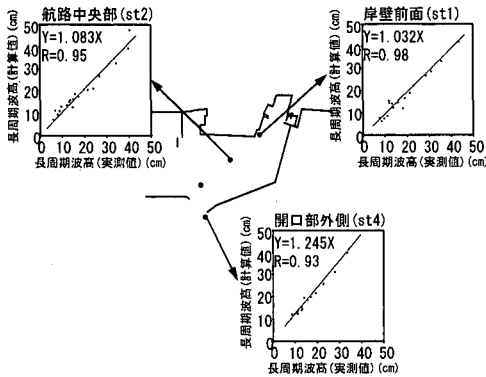


図-5 (期間2) の計算及び実測長周期波高の相関図

自由進行波として取り扱って、近似的には問題がないことがわかる。

5. 長周期波高予測式の検討

5.1 長周期波高予測作業の問題点

船体動揺予測は、船舶係留地点の長周期波高を予測することで成立する。この長周期波高予測作業の困難な点は、以下の2点である。第1に、長周期波高予測に使用する情報は、波浪予測により得られるものである。従って、長周期波高予測の精度は、本来、波浪予測の精度に依存する。第2に、係留中の石炭運搬船の荷役限界長周期波高が10～15 cmと非常に低く、しかもその立ち上がり時刻が重要であるため、長周期波高予測においては、波高の大きさだけでなく、時系列変化まで含めた予測精度が必要となる。の2点である。

5.2 長周期波高予測回帰式の検討手法

(1) 予測回帰式の基本パターン

ここで検討した、波浪予測有義値 ($H_{1/3} \cdot T_{1/3}$) を用いた長周期波高推定式を、表-3に示す、5パターンについて検討する。長周期波高回帰式の検討に用いる、実測長周期波高データは、東港沖観測地点において、H4年7月からH8年8月の観測期間の、長周期波高卓越時 ($H_L \geq 5$ cm) 55ケースを使用した。

ここで③式の T_p は、実際の波浪予測では、現在は予測されないものである。ここでは、55ケースの実測データより図-6に示す、 $T_{1/3}$ を使用した T_p 回帰式を作り、これより得る T_p 回帰値: T_{py} を用いた④式も検討した。

一般的な風波における $T_p \approx 1.05 \sim 1.1 \times T_{1/3}$ に比べ、長周期波卓越期間を対象としているので、傾きが1.119と大きくなっている。

(2) 天気図及び波向きを考慮しない場合

まず、天気図及び波向きを考慮せず、55ケースの全データを対象として、基本式5パターン毎に決定した回帰式と相関係数算出結果を図-7に示す。

表-3 長周期波高予測式の基本パターン

① $H_L = a(H_{1/3})^2$	ここで
② $H_L = aH_{1/3} \cdot T_{1/3}$	$H_{1/3}$: 実測
③ $H_L = aH_{1/3} \cdot T_p$	$T_{1/3}$: 有義値
④ $H_L = aH_{1/3} \cdot T_{py}$	T_p : スペクトルピーク周期
⑤ $H_L = a(H_{1/3})^2 T_{1/3}$	$T_{py} : T_{1/3}$ を用いた回帰式

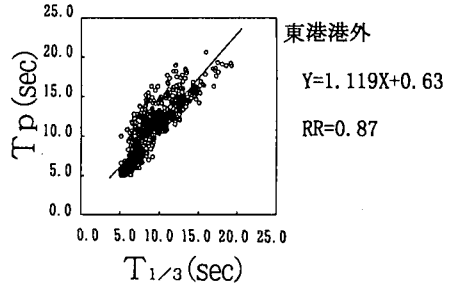


図-6 T_p と $T_{1/3}$ の相関

天気図パターンや、波向別による予測精度の検証を行う以前に5本の式中、①と⑤については相関係数0.663及び0.832と他に比べ著しく低いので、この2本の基本式は除外し、基本式②、③、④について予測精度の向上を図るための解析を実施する。

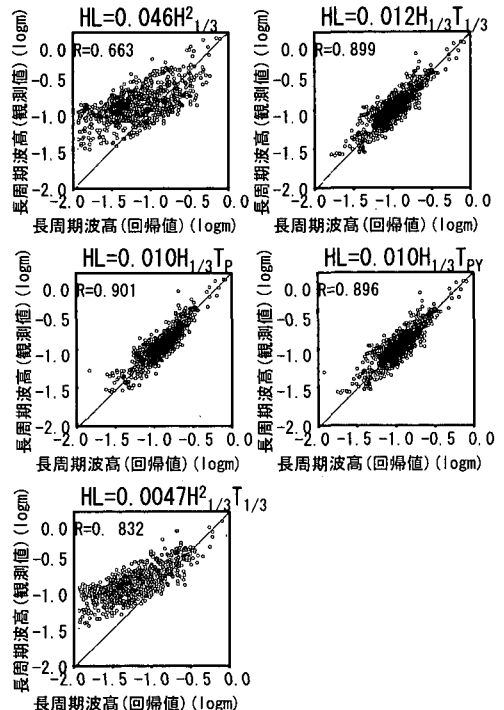


図-7 観測及び回帰式による長周期波高の相関係数算出結果

表-4 回帰式の精度検証

		出現頻度	(%)	②式	③式	④式
分類せず		55ケース	100.0%	0.899	0.901	0.896
天気別	パターン1	25ケース	45.5%	0.838	0.818	0.838
	パターン2	16ケース	29.0%	0.905	0.91	0.902
	パターン3	14ケース	25.5%	0.932	0.946	0.928
波向別	SSE	549データ	53.6%	0.842	0.823	0.838
	170°	368データ	36.0%	0.908	0.898	0.906
	180°	88データ	8.6%	0.937	0.943	0.936
	SSW	10データ	1.0%	0.662	0.68	0.664
	220°	8データ	0.8%	0.987	0.987	0.986
周期別	$T_{1/3} < 6(S)$	242データ	23.6%	0.705	0.702	0.704
	$6 \leq T_{1/3} < 10(S)$	584データ	57.1%	0.774	0.774	0.771
	$T_{1/3} \geq 10(S)$	197ケース	19.3%	0.947	0.955	0.947

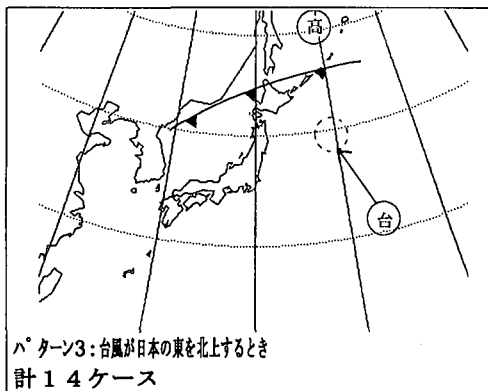
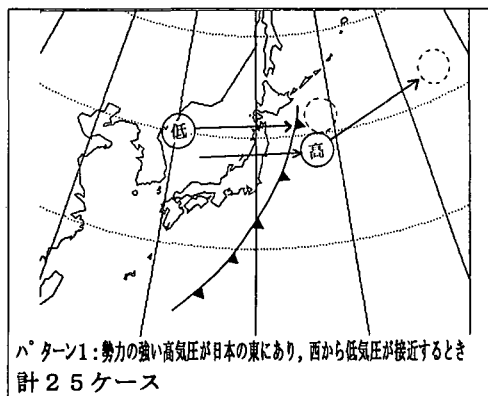


図-8 長周期波卓越期間の天気図パターン

(3.1) 長周期波卓越時の天気図パターンの分類

長周期波卓越期間 55 ケースについて対応する天気図パターンを3つに分類し、ケース数とともに、図-8に示す。この天気図パターンごとに予測精度の検証を行う。

(3.2) 長周期波卓越時の波向別・周期別の分類

長周期波高卓越時の 55 ケースのデータについて、波向別に5パターン、周期として3段階に分類し、予測精度の検証を行う。

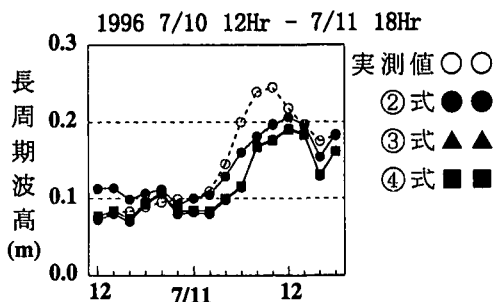


図-9 予測長周期波高の時系列変化

(3.3) 天気図・波向・周期別の予測精度の検証

基本式②, ③, ④について、天気図パターン別・波向別・周期別に予測精度を検証した結果を、表-4に示す。単純に全データと比較した場合と、全データを天気図パターン別・波向別・周期別に比較した場合の、3式の予測精度は、明確な差がないことがわかる。

このことは、図-9に示す、時系列的な予測精度の変化を見ても同様で、3式の予測精度について明確な差がない。さらに、天気図パターン別・波向別・周期別の3式のそれぞれを考慮した予測精度も、単純に全データをパターン分けしないで行ったものに比べ、顕著な予測精度の向上が得られていない。

以上より、3式の予測精度については、大差ないことと、基本式③, ④については、ともに T_p に依存する式であり、現行予測では T_p が予測されないことから、波浪予測で得られる、 $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ を用いた基本式②を用いることが、最も実用的であると考えられる。

6. 長周期波高推定式の決定

長周期波高推定式として波浪予測有義値 $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ を用いた基本式②を用い、しかも天気図パターン・波向・周期等の特性要素別の補正を行わず、単純に全データ対

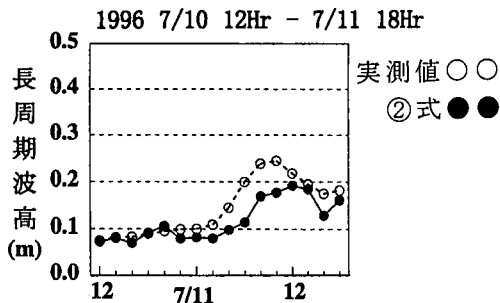


図-10 予測精度の時系列変化 (期間1)

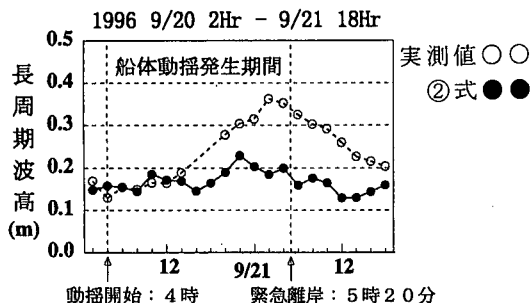


図-11 予測精度の時系列変化 (期間2)

象として相関をとり、式 $H_t = 0.012 H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ を採用することとしたが、この式について時系列的な予測精度の変化を、観測期間中に船体動揺被害が発生した期間 (期間2) を含む、2つの期間について検証した結果を図-10, 11に示す。

期間1では、7月11日6時～12時付近の長周期波高実測値が20cmを越えて卓越するときは、予測値の方は波高をかなり低く評価するが、荷役限界長周期波高である10cm前後の波高においては、実測値の立ち上がり時刻まで含めて予測ができています。この傾向は、船体動揺が発生した期間2でも同様で、実測値が20cmを越える9月20日14時以降は、実測値と予測値の乖離は大きくなるが、10～15cm前後の立ち上がりについては、ほぼ予

測ができています。

船体動揺の予測は係留不可能時ではなく、荷役作業不可能時の長周期波高の発生時刻を予測することが、最も重要であると考えます。従って、荷役限界長周期波高の立ち上がりをほぼ予測し得る、この長周期波高推定式を用いることで、船体動揺被害を回避するシステムの構築が可能であると考えられる。

7. 結 論

本研究で、得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 本年度の現地観測期間中に発生した船体動揺現象について、波高スペクトルの解析結果より、船体動揺の増大に対応し、周期30秒以上の長周期成分のエネルギー量が著しく増大することを確認した。

(2) 港内における長周期波が「見かけ上波群の拘束を解かれた自由進行波」として取り扱えることを、港内侵入過程の現地観測、自由進行波の比率計算等により検証した。

(3) 天気図パターン別・波向別・周期別の予測精度検証作業により、波浪予測有義値を用いた長周期波高推定式として、 $H_t = 0.012 H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ を提案した。

最後に、検討を進めるにあたり、「苫小牧港東港区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) より、貴重な御意見を賜ったことに謝意を表する。

参 考 文 献

- 神谷昌文・渥美洋一・國田 淳・関口信一郎・木村克俊・平石哲也・白石 悟・上田茂 (1996): 長周期波に対する荷役稼働率の評価法とその改善策, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 891-895.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信夫 (1995): 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, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.
- 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.