

長周期波予測に基づくバース荷役可否判断 支援システムの開発と運用実績

DEVELOPMENT OF SUPPORT SYSTEM FOR JUDGMENT OF CARGO HANDLING
WITH LONG-PERIOD WAVE FORECASTING AND RESULTS OF USING THE SYSTEM

興野俊也¹・安田勝則¹・阿部光信²・長舩徹³

Toshiya KYONO, Katsunori YASUDA, Mitsunobu ABE and Toru OSAFUNE

¹正会員 東京電力株式会社技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

²正会員 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

³ 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

For offering the information to judge whether or not it can make the cargo handling safe, to berth master, we developed the “support system for judgment of cargo handling”. This system estimates waves, which include long-period waves, and moored ship motions at the berth from wave forecast at offshore. This system estimates waves, long-period waves and moored ship motions at the berth from wave forecasting at offshore. In this system, correlative equation estimated from wave observation of long term is used for calculation of waves and long-period waves at the berth. The database calculated by ship motion analysis is used for estimation ship motions of moored vessel. This system was used experimentally at the coal berth in HITACHI-NAKA Port from September, 2003. When the system was used in 28 coal ships which entered port during examination periods of one year, accuracy of the judgment was about 97%. But threat score by this system was about 30%, then will be wanted to improve more. Already, this system is using to prevent troubles of emergency departure from the port and cutting rope beforehand.

Key Words : *port management, cargo handling, wave forecasting, long-period waves, moored ship motions, ship motion analysis*

1. まえがき

通常の港湾における係留船舶の荷役作業の可否は、沖合での波浪予報や港内での波浪実況をもとに、荷役限界波高等の運用基準と照らし合わせて適宜判断されることが多い。しかし、実際の荷役作業の可否を決定するのはバース位置での波浪ではなく、係留船舶の動揺状況である。このため、波浪情報のみによる荷役可否の判断では情報が不足しているのが現状である。特に、港内での長周期波は、波高値は非常に小さいにも係わらず、その周期が大型船舶の係留系固有周期と一致する領域にあるため、係留船舶の大きな動揺を引き起こし、荷役作業の中断や係留索の破断等の障害の発生原因となっている。

長周期波による荷役障害に対する対応策としては、波浪制御構造物による長周期波進入防止対策、係留系改造による船舶動揺制御対策、波浪予測による危険予知対策がある¹⁾。このうち、波浪予報による危険予知対策は、

バース位置での波浪・長周期波を予測し、それらをもとに係留船舶の動揺状況を推定して荷役作業の可否を予測するもので、長時間の荷役作業中断や緊急離棧、係留索破断等の障害を未然に防ぐことが可能となる。この対応策は防波堤や係留施設等の港湾施設の改造を伴わないため、その導入が比較的容易であり、さらに、現地での運用実績を分析することにより、バース位置での波浪・長周期波や係留船舶の動揺状況の予測方法の修正等、現場状況を考慮した改良が可能な実用的な方法であると考えられる。

このような背景から、本研究では、沖合の波浪予報値から港内のバース位置での波浪・長周期波と係留船舶の動揺量を予測し、バース管理者に対して荷役作業可否判断の基礎データを提供する「バース荷役可否判断支援システム」を開発した。

港内でのバース運用予測のためのシステムとしては、上田ら²⁾の港内波浪と係留船舶動揺のリアルタイム予測

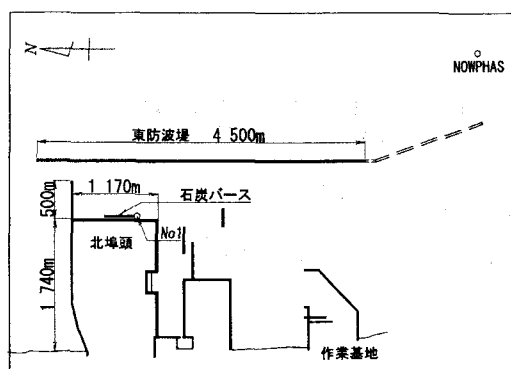


図-1 常陸那珂火力発電所石炭バース位置図

システムが既に開発・実用化されている。上田らのシステムは数値解析による予測を用いているのに対して、本研究で開発したシステムでは、現地データを活用した予測方法を極力取り入れることを基本とし、港内波浪の予測には現地波浪観測に基づく予測式を用いていること、港内波浪に加えて港内長周期波高も予測できること、係留船舶動揺量の予測には運用実績に応じて修正が容易なデータベースを用いていること、などの特徴を有している。

本論文では、開発した「バース荷役可否判断支援システム」の概要を述べるとともに、図-1に示す東京電力(株)常陸那珂火力発電所石炭バースにおいて実施した試験運用の結果について報告する。

2. バース荷役可否判断支援システムの概要

(1) システムの全体構成

図-2は、常陸那珂(火)石炭バースを対象に開発したバース荷役可否判断支援システムの全体フローである。

常陸那珂港では、国土交通省鹿島港湾・空港整備事務所が「長周期波高予測システム」を構築し、港湾利用者に対して港内外での波浪・長周期波の予報情報を提供し

ている。本システムにおいては、この予報情報のうち、港外 NOWPHAS 地点での有義波高、有義波周期、波向(16方位)の3日間予報値を基本データとして用いることとした。

NOWPHAS 地点での有義波高・周期、波向の3日間予報値から港外での長周期波高およびバース地点での有義波高、長周期波高を予測する方法については、別途実施した港内外波浪観測³⁾の結果に基づく予測式を用いることとした。また、係留船舶の動揺量の推定方法については、係留船舶船型とバース地点での波浪・長周期波をパラメータとした船体動揺解析結果に基づく船体動揺量データベースを用いることとした。

本システムは、これらの予測式やデータベースによってバース位置での今後3日間の1時間ごとの波浪・長周期波高、船体動揺量を予測し、別途設定する荷役作業の管理値(荷役作業限界条件)をもとに荷役可否判定を行い、それらの予測結果の台帳と経時変化図をパソコン上に表示する。

(2) 港内外波浪・長周期波の推定方法の検討

沖合での長周期波高の予測については、気象データを用いた予測手法の研究⁴⁾などが進められているが、現状での実務への適用には課題が残されていることから、本システムでは、別途提供される NOWPHAS 地点での有義波高、有義波周期、波向の予報値から推定する方法を用いることとした。

図-3は2003年7月～2004年6月のNOWPHAS 地点での長周期波の有義波高と有義波諸量の相関関係の代表例(NOWPHAS 地点での波向がEの例)である。ここで、NOWPHAS 地点での長周期波については、2時間間隔20分間データ(0.5秒ピッチ)の観測波形データをもとに、25秒を境界周波数としてFFT法により波浪成分と長周期波成分を分離して波形データを作成し、波別解析により有義波高を求めた。

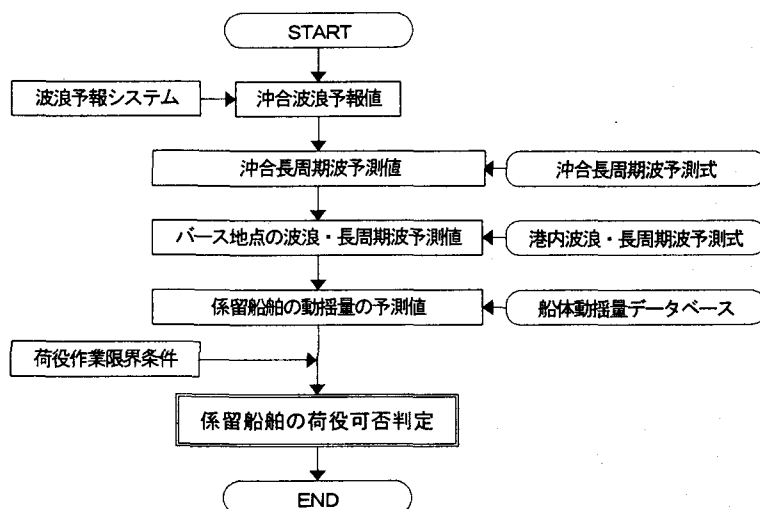


図-2 バース荷役可否判断支援システムの全体フロー

これらによれば、港外での長周期波高は波浪成分の有義波高×有義波周期と非常に良好な相関関係が見られ、

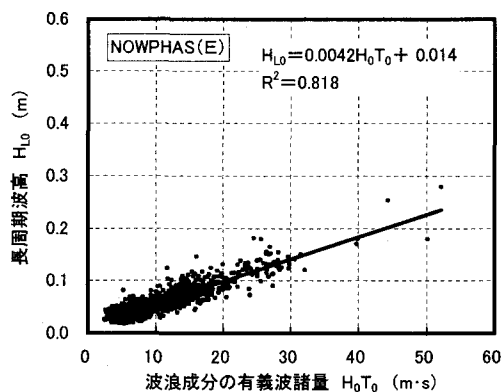


図-3 港外の長周期波高と有義波諸量の関係

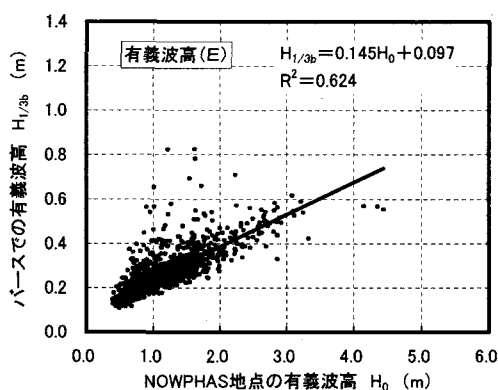


図-4 港外とバース位置の有義波高の関係

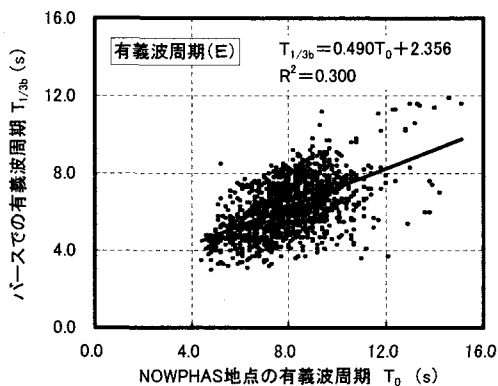


図-5 港外とバース位置の有義波周期の関係

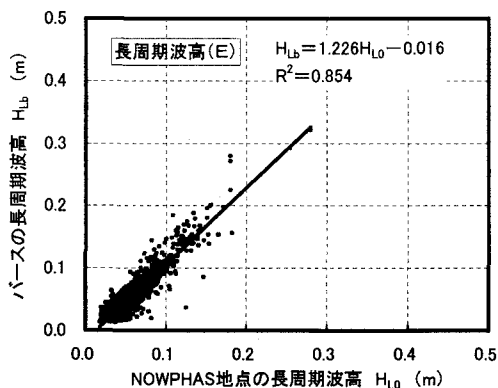


図-6 港外とバース位置の長周期波高の関係

その比例係数は0.0042～0.0045である。この傾向はいずれの波向においても同様である。

このことから、本システムにおける港外での長周期波高は、NOWPHAS 地点の波向ごとに設定する次の相関式を用いて推定することとした。

$$H_{LO} = \alpha_1 H_0 T_0 + \beta_1 \quad (1)$$

ここで、 H_{LO} は港外での長周期波高、 H_0, T_0 は「長周期波高予測システム」で提供される NOWPHAS 地点での有義波高、有義波周期、 α_1, β_1 は波向別に設定する係数である。

一方、港内のバース位置での波浪・長周期波の予測については、港内波浪解析によって推定することも容易であるが、当該地点ではバース位置（図-1、No.1 地点）で連続して波浪観測を実施していることから、これらの現地観測データを用いて推定することとした。

図-4、5、6 は、それぞれバース位置での波浪観測を実施した 2003 年 7 月～2004 年 6 月の NOWPHAS 地点と No.1 地点の有義波高、有義波周期、長周期波高の相関関係の代表例（NOWPHAS 地点での波向が E の例）である。ここで、No.1 地点での波浪・長周期波は、1 時間間隔 60 分間データ（0.5 秒ピッチ）の観測波形をもとに NOWPHAS 地点と同様の方法で波浪成分と長周期波成分の分離を行い、それぞれ波別解析法によって求めた。

これらによれば、港内外での有義波高と長周期波高は非常に良好な相関関係が見られ、バース位置での有義波高は NOWPHAS 地点での有義波高の 0.2 倍程度、バース位置での長周期波高は NOWPHAS 地点での長周期波高とほぼ同程度である。また、港内外での有義波周期はやや相関が低いものの、バース位置での有義波周期は NOWPHAS 地点の有義波周期よりも 2 秒程度小さい。これらの傾向はいずれの波向においても同様である。

以上のことから、本システムにおけるバース位置での有義波高、有義波周期、長周期波高は、NOWPHAS 地点の波向ごとに設定する次の相関式を用いて推定することとした。

$$H_{1/3b} = \alpha_2 H_0 + \beta_2 \quad (2)$$

$$T_{1/3b} = \alpha_3 T_0 + \beta_3 \quad (3)$$

$$H_{Lb} = \alpha_4 H_{LO} + \beta_4 \quad (4)$$

ここで、 $H_{1/3b}, T_{1/3b}, H_{Lb}$ はバース位置での有義波高、有義波周期、長周期波高、 H_0, T_0 は「長周期波高予測システム」で提供される NOWPHAS 地点での有義波高、有義波周期、 H_{LO} は式(1)で求められる NOWPHAS 地点での長周期波高、 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ は波向別に設定する係数である。

(3) 係留船舶の動揺量の推定方法の検討

係留船舶の動揺量については、当該バースに入港予定

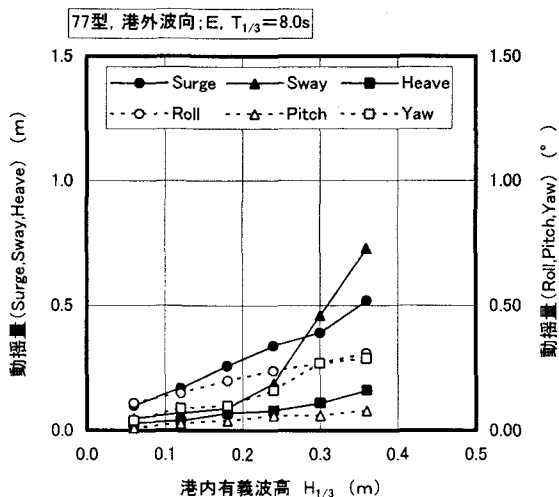


図-7 船体動揺解析結果の一例

の幅広パナマックス船 (77,000DWT 級, 通称 77 型) と ケーブサイズ船 (154,000DWT 級) の 2 船種の石炭船を対象として船体動揺解析を行い, その結果に基づいてバース位置での波浪諸元に対する各船種の 6 成分動揺量を整理したデータベースを作成し, これを用いて推定することとした。データベースを用いることの利点は, 動揺量の予測が瞬時にできること, 動揺量の予測値が実測と異なった場合の分析・補正が比較的容易であること等が挙げられる。

データベースの作成にあたって使用した船体動揺解析手法は, 流体力および波浪強制力の周波数解析はストリップ法, 船体動揺の運動方程式の時系列解析は粘性減衰を考慮した遅延関数法である^{5), 6)}。この船体動揺解析手法は, 別途実施した GPS を用いた動揺計測結果に基づく検証により, Surge と Sway については $\pm 0.1 \sim 0.2 \text{ m}$ の解析精度であることを確認している³⁾。

船体動揺解析における波浪条件については, バース位置での波向は南側港口から入射波を想定して SE ($\beta = 45^\circ$) の単一方向波とし, 有義波周期が $T_{1/3} = 6.0 \text{ s}, 8.0 \text{ s}, 10.0 \text{ s}, 12.0 \text{ s}$ の 4 ケースのそれぞれに対して有義波高をパラメータとした。また, バース位置での長周期波の周波数スペクトルについては, 港外での周波数スペクトルを平石らの標準スペクトル (近似型)⁷⁾を参考に次式で矩形近似し, 線形長波方程式に基づく港内波浪解析によっ

て設定した。

$$S_L(f) = m_{0L} / (f_{L\max} - f_{L\min}) \quad (5)$$

$$m_{0L} = H_{0L}^2 / 16 \quad (6)$$

ここで, $S_L(f)$ は長周期波の周波数スペクトル, H_{0L} は式(1)で求められる長周期波高である。また, $f_{L\max}, f_{L\min}$ は長周期波の周波数帯で, ここでは $f_{L\max} = 0.04 \text{ Hz}$, $f_{L\min} = 0.0033 \text{ Hz}$ とした。

また, 船体動揺解析における石炭船の係留方法については, バース管理者と協議して標準的な係留索配置を設定し, これを用いた。

図-7 に係留船舶動揺量のデータベースを作成するために実施した船体動揺解析結果の代表例 (77 型石炭船, 港外波向 E, $T_{1/3} = 8.0 \text{ s}$) を示す。

3. 常陸那珂火力でのシステムの適用性の検討

(1) 代表船舶の荷役可否判断の例

本システムで推定する石炭船の荷役可否判定の精度には, 港外波浪予報値の予測精度, 港内波浪・長周期波の予測式による予測精度, 係留船舶動揺量のデータベースに基づく推定精度の 3 つの要因が影響するものと考えられる。

ここでは, 係留船舶動揺量のデータベースに基づく推定精度を把握するため, 当該バースを利用した代表石炭船を対象に, 係留中の船体動揺量の現地計測を行い, 本システムでの動揺量の予測結果との比較検討を実施した。比較検討対象とした石炭船は, 2003 年 9 月から 2004 年 3 月に当該バースを利用した石炭船のうちの 6 隻で, 全てパナマックス船 (70,000~77,000DWT 級) である。動揺計測は, 船上に GPS を 3 台と TSS を 1 台, 陸上に GPS 基準局を設置して, 0.5 秒ピッチの位置データを取得し, 6 成分の動揺量に変換した。動揺計測中の波浪は石炭バース近傍の No.1 地点での観測データを使用し, 動揺計測データ収録用パソコンの時刻セットで同期を取った。なお, 当該バースでは 8 時から 20 時までが荷役可能時間帯となっている。また, 動揺量の荷役管理値は, Surge が $\pm 0.5 \text{ m}$, Sway が $\pm 1.0 \text{ m}$, Heave が $\pm 0.25 \text{ m}$ である。

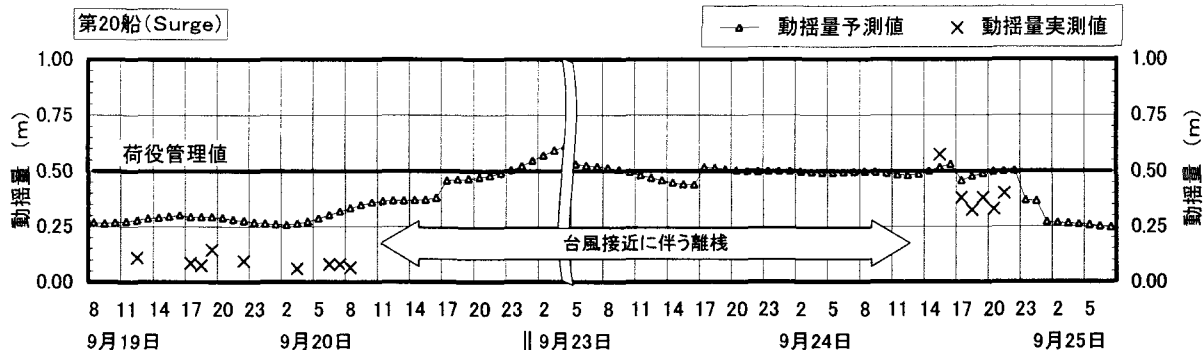


図-8 第 20 船の動揺量の予測結果と計測結果

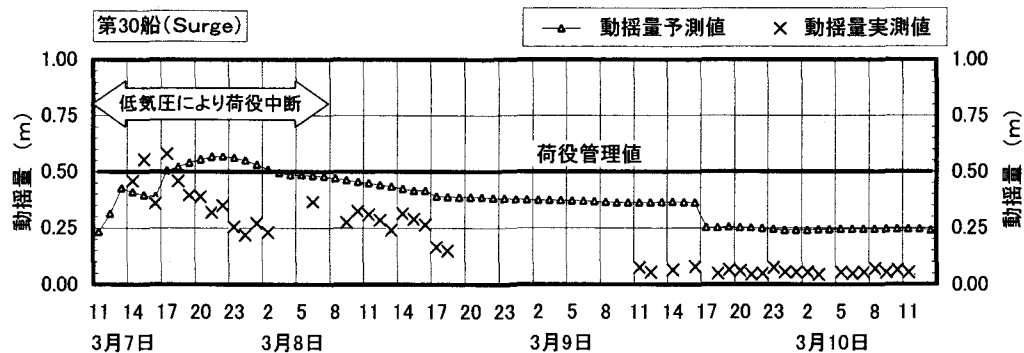


図-9 第30船の動揺量の予測結果と計測結果

図-8 は 2003 年 9 月に入港した第 20 船の Surge 動揺量の予測結果と計測結果を比較したものである。この石炭船は、9 月 19 日に着棧して荷役を開始したが、20 日朝に台風の接近に伴って緊急離岸した。その後、24 日に再入港して荷役を再開し、25 日まで荷役作業を続けた。緊急離岸した期間以外では荷役中断は無かった。

本システムでの予測結果では、緊急離岸した 20 日 8 時から再入港した 24 日 14 時までの Surge 動揺量が荷役管理値をオーバーしており、台風接近による荷役不可を予測することができた。また、再入港後の 24 日 14 時以降に Surge 動揺量の予測結果が $\pm 0.50 \sim 0.53 \text{m}$ と荷役管理値を若干オーバーする結果となった。この間は、実際には荷役が行われているが、Surge 動揺量の計測結果は $\pm 0.58 \text{m}$ で、予測結果とほぼ一致している。

図-9 は 2004 年 3 月に入港した第 30 船の Surge 動揺量の予測結果と計測結果を比較したものである。この石炭船は、7 日朝に入港・着棧したが、その直後から動揺量が大きくなって荷役を中断した。翌日からは動揺量も小さくなり、順調に荷役が進み、10 日に離棧した。

本システムでの予測結果では、7 日は低気圧の影響により波浪が徐々に高くなったが、Surge 動揺量から荷役不可と予測したのは 7 日 17 時からで、半日程度の差が生じてしまった。この原因としては、7 日 16 時までは港外 NOWPHAS 地点での有義波高・周期の予測値が小さかったため、バース位置での長周期波高を過小評価し、結果として Surge 動揺量の予測値を小さく見積もってしまったことによると考えられる。

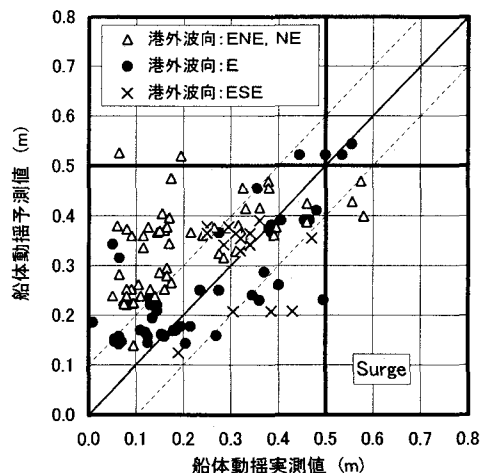
(2) 本システムの係留船舶動揺量の推定精度の検討

図-10 は、係留船舶の動揺計測を行った 6 隻の石炭船について、Surge と Sway の動揺計測結果と本システムでの予測動揺量の関係を港外 NOWPHAS 地点での実測波向別に整理したものである。図中の実線は動揺量の予測値と実測値が一致するラインで、その前後の点線の範囲が船体動揺解析手法の誤差の範囲である。

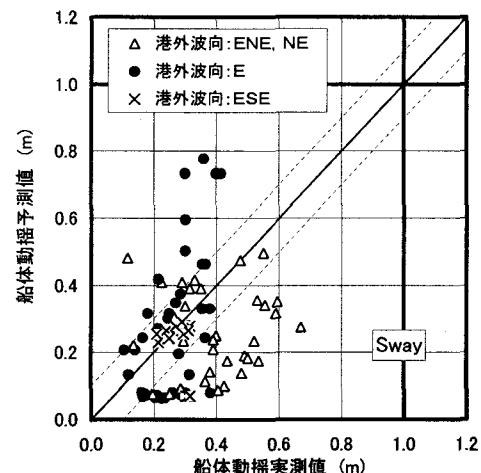
これによれば、Surge 方向動揺量については、港外波向が E、ESE の場合には予測動揺量と計測結果が概ね一致しているが、港外波向 ENE、NE の一部では予測動揺量が船体動揺解析の誤差範囲を上回る大きめの評価を与

えているケースが見られる。この原因としては、予測したバース位置での有義波周期が実測と異なっていたこと、船体動揺解析における周波数スペクトルが実測値と異なっていたことなどが考えられる。

一方、Sway 方向動揺量については、いずれの波向においても予測動揺量と計測結果がほぼ一致しているが、港外波向 E の一部で予測動揺量が船体動揺解析の誤差範囲を上回って大きめに評価していること、港外波向 ENE、NE の一部で予測動揺量が船体動揺解析の誤差範囲より



(1) Surge



(2) Sway

図-10 船体動揺解析結果の一例

表－1 システム適中率 (2003 年 9 月～2004 年 9 月)

システム判定	荷役実績	比率
○	○	95.2%
×	×	1.4%
×	○	1.1%
○	×	2.3%

[凡例] ○：荷役可，×：荷役不可

も過小に評価していることが見られる。これらの原因としては、前者は予測した港外波向が実測と異なっていたこと、後者は予測したバース位置での有義波周期が実測と異なっていたことが考えられる。

(3) 本システムの予測適中率

表－1 は、試験運用を開始した 2003 年 9 月から 1 年後の 2004 年 9 月までに入港した計 25 隻の石炭船に対して、前日の波浪予報に基づく本システムでの荷役可否予測の適中率を整理したものである。

これによれば、本システムでの荷役可否判定と実際の荷役可否が一致した適中率は約 97% と高い値を示した。また、荷役作業の安全管理では緊急離棧や係留索破断等の障害が発生しないようにすることが重要であることから、本システムが荷役可と判定しているにも係わらず実際には荷役不可となるケースを極力少なくする必要がある。今回の試験運用では、このケースを 2.3% に抑えることができた。以上のことから、本システムは、係留船舶の荷役作業可否を判断する上での重要な情報となるものと考えられる。

ただし、本システムの判定と実績がともに荷役可と判断した時間を除いたスレツトスコアは 30% 弱であり、予測システムの精度としてはさらに改善の余地が残ると考えられる。荷役可否判定の精度には、沖合波浪予報値の予測精度と係留船舶動揺量のデータベースの推定精度の 2 つの要因が主に影響するが、本システムでの判定が荷役可で実際には荷役できなかったケースを詳細に分析すると、そのほとんどが前者によるものである。したがって、今後は本システムの予測適中率の監視を継続するとともに、沖合波浪予報の予測精度を分析し、気象擾乱や天気図概況の影響等について検討することが望まれる。

4. あとがき

本研究では、港内での荷役作業の安全性を確保するため、長周期波に対するソフト面での対策として、「バース荷役可否判断支援システム」を開発した。

本システムは常陸那珂(火)石炭バースで活用することとし、現地波浪観測、船体動揺計測および解析を実施し、港内波浪・長周期波の予測式と係留船舶動揺量のデータベースを検討した。これらの現地観測結果等を取り入れて構築したシステムでは、常陸那珂港の利用者を対象に

提供されている沖合での 3 日間波浪予報値を用いて、1 時間ごとのバース位置での有義波高、有義波周期、長周期波高、並びに係留船舶の動揺量を予測して荷役の可否を判断することができ、緊急離棧や係留索破断等の障害を未然に防止し、荷役作業の安全性の確保が可能となる。

本システムの試験運用では、波浪予報に基づき迅速に荷役可否判断を行えるとともに高い適中率を示しており、現場での荷役作業の可否判断での情報として大いに役立つっている。

なお、本システムは、各種データベースを整備することにより他港湾での荷役作業の安全管理に役立つものと期待している。

謝辞:本システムの開発にあたっては、「常陸那珂石炭バース長周期波検討会（主催；東京電力(株)）」を設置し、磯部雅彦東京大学教授、平石哲也(独)港湾空港技術研究所波浪研究室長、池野正明(財)電力中央研究所上席研究員をはじめ各委員よりご意見・ご指導を頂いた。常陸那珂港 NOWPHAS データの利用にあたっては、永井紀彦(独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長に特別なご配慮頂いた。また、常陸那珂港長周期波高予測システムの利用については、国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所のご了解を得た。ここに記して謝意を表し感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 1)(財)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.68-84, 2004.
- 2)上田茂・永井紀彦・平石哲也・白石悟・木内里美・小林昭男：港内の波浪及び係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発（第 1 報）－システムの開発及び現地への設置－、港湾技術研究所報告、第 33 巻、第 1 号、pp.67-96, 1994.
- 3)安田勝則・興野俊也・長舩徹・阿部光信：大規模港湾における長周期波観測と GPS を用いた船体動揺観測に基づく係留船舶の動揺特性、海岸工学論文集、第 52 巻、2005. (投稿中)
- 4)橋本典明・嶺泰宏・永井紀彦・吉松みゆき・三原正裕：船舶の荷役可否判定を目的とした気象データに基づく長周期波の統計的予測、海岸工学論文集、第 48 巻、pp.246-250, 2001.
- 5)上田茂：係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究、港湾技研資料、No.504, pp.1-372, 1984.
- 6)笹健児・白石悟・榊原繁樹：係留船舶の長周期動揺の各種数値解析法による再現性に関する比較検討、港湾技研資料、No.931, pp.1-80, 1999.
- 7)平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて、海岸工学論文集、第 44 巻、pp.246-250, 1997.