

係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発及び 現地観測による評価

上田 茂* ・永井紀彦** ・平石哲也***
白石 悟**** ・清水正巳***** ・小林昭男*****

1. まえがき

港湾の機能のうち最も重要なことは、船舶を安全に係留し、かつ荷役を効率良く行うことである。港内の静穏度は従来これを示す指標として用いられてきているが、一般には港内の波高で与えられている。

従来港湾は、東京湾、大阪湾、伊勢湾などの湾奥に立地していたが、湾内は半島や島嶼により遮蔽されていて外洋の波が直接港内に影響を及ぼすことはなかった。したがって、港内の静穏度の検討の対象となる波は、台風時及び冬期の季節風時に発生する周期の短い湾内発生波である。これに対して外洋に面した港湾においては、外洋の波が直接港内に影響を及ぼす。すなわち、周期十数秒の長周期波が港内の係留船舶に影響し、ときに大きな動揺を引き起こし、係留の安全性及び荷役に支障をきたす。長周期波では波高が数十センチであっても係留船舶の大きな動揺を引き起こすことがある。しかし、このように小さな波高は目視することが難しく、また係留船舶に及ぼす影響は、船種、船型、係留施設の配置などによって異なる。以上のことから、港内の波浪及び係留船舶の動揺の予測システムを開発し、港湾計画における施設配置計画、港湾工事施工計画、係留船舶の安全性の確保及び荷役の効率化に寄与することとした (Ueda et. al 1994, 上田他 1994a 及び 1994b)。

本予測システムは、平成5年8月、東北石油㈱仙台製油所の26万トン原油タンカーバースに設置され、また、特に設置した係留船舶の動揺観測装置と併用し、施設の安全かつ効率的な運用に活用されている。本論文では、予測システムの概要及び現地観測によるシステムの評価について述べる。

2. システムの構成

2.1 全体構成

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は、以下に示す4種類のシステムから構成される。

- ① 港外波浪特性値伝送システム
港外の波浪観測データから算出した波浪特性値を伝送する。
- ② 港内波浪推算システム
港内の波の反射、回折などを考慮した港内波高分布及び方向スペクトルを算定する。
- ③ 船体動揺推算システム
港内の波浪状況を考慮した係留船舶の動揺計算を行う。
- ④ データ処理システム
①～③の各システムのデータの受け渡し、解析結果

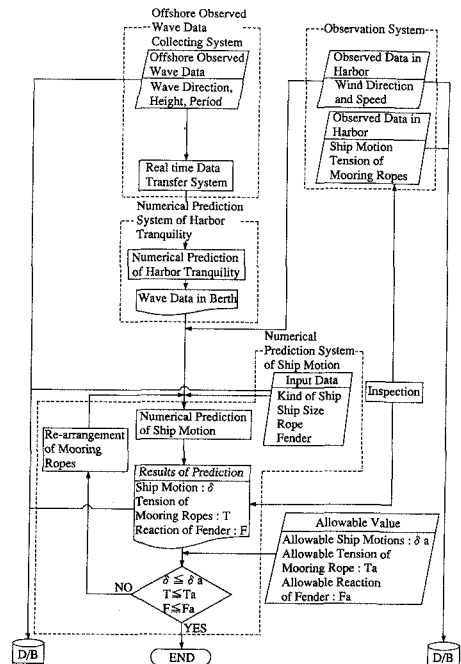


図-1 予測システムのブロックチャート

* 正会員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 海象調査研究室長
 *** 正会員 工 博 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官
 **** 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室長
 ***** 正会員 大成建設株式会社 土木設計部
 ***** 正会員 工 博 大成建設株式会社 技術研究所

の表示などの機能を有する。

図-1は本システムのブロックチャートを示したものである。演算装置は東芝製のエンジニアリングワークステーションAS4050GXで、対話形式で入出力を行う。入力とは簡易化されていて、係留船舶の諸元の詳細が不明であっても、船舶の重量トン数、喫水、当該港湾の係留バース等が分れば、船舶の諸元及び防舷材や係留索などの係留施設の条件がすべて自動的に入力され、港内における複雑な波の反射及び屈折などの影響を考慮して係留船舶の動揺が計算される。計算結果としては、動揺波形の時刻歴、係留船舶の許容動揺量または係留索の張力などが管理値を超えた場合の警告などが、モニターに表示される。

以下、①～③の各システムについて述べる。

2.2 港外波浪特性値伝送システム

運輸省港湾局と港湾技術研究所を含むその関係機関は、協力して全国沿岸の波浪特性の解明に努めており、NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS) と呼ばれる波浪観測ネットワークを形成している(永井他, 1992)。本予測システムは、NOWPHASで得られた波浪情報を活用する。

ここでは、塩釜港仙台港区におけるシステムについて説明する。図-2はデータの転送システムを示したものであり、以下に示すように3段階のシステムから構成される。

第1段階は、①に位置するセンサーから②に位置する波浪観測小屋の波浪計本体(アナログ信号増幅機)までの4芯ケーブルによるアナログ信号伝送である。

第2段階は、図中③に位置する運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所までの無線テレメータ(TLR-600-00)によるデータ伝送である。

第3段階は、図中の④の東北石油(株)の原油タンカーバースの前面に位置する事務所までの、一般公衆電話回線を用いた波浪データの伝送である。ここには、一連の

システムが組み込まれているワークステーションが設置されている。一般公衆電話回線を用いた波浪データの伝送は、ファクトリーコンピュータ(WD-600)相互のモデムを介したデジタル通信によって行われている。すなわち、④から③へ電話をかけて③に設置されたファクトリーコンピュータのディスクに集録されているデータを、④に設置されたファクトリーコンピュータのディスクに伝送している。

2.3 港内波浪推算システム

図-3は港内の係留船舶に作用する入射波の状況を示したものである。港内に入射する波は港口部から回折し伝播する。また、岸壁または護岸による反射波が船体に作用する。

港内の波高分布計算手法は、多くの場合線形ポテンシャルの定常問題として取り扱われ、水深を一定とするとヘルムホルツ方程式を解く問題として取り扱うことができる。ここでは、港内水深を一定として厳密解を重ね合わせる手法(高山, 1981)を用いて港内の波高分布及び方向スペクトルを求める。

港内に進入する波は方向スペクトルを有する多方向不規則波とし、最初に各成分波ごとに港内波高 H_{mn} を求め、合成波高は成分波高の線形重ね合わせとする。本システムでは方向分割数を15、周波数分割数を30とした。

2.4 船体動揺推算システム

本システムの係留船舶の動揺計算法は、ストリップ法に基づいて計算される波浪中で運動する船舶に作用するフルードクリロフの力、散乱波による力、風による力、流れなどによる力を外力とし、ラディエーション流体力から求められる付加質量及び付加慣性モーメント、減衰係数、係留系による反力、静水圧的復元力を運動方程式に組み込み、数値積分によって解を求めるものである(上田, 1984)。数値積分によって解を求めるのは、外力が不規則であることと、防舷材や係留索の変位復元力特性が非線形であることによる。

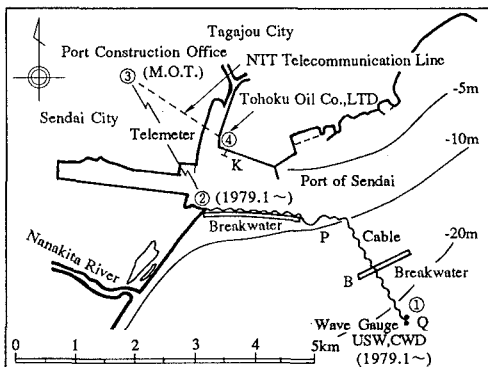


図-2 港外波浪特性値伝送システム

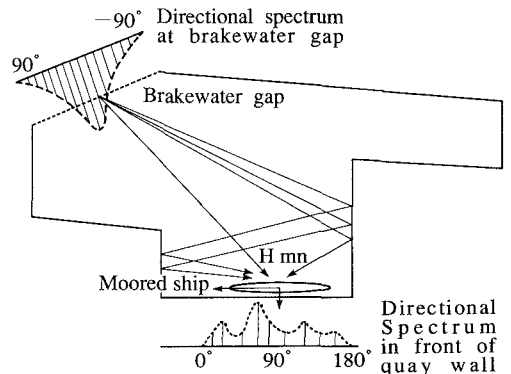


図-3 港内の係留船舶に作用する入射波

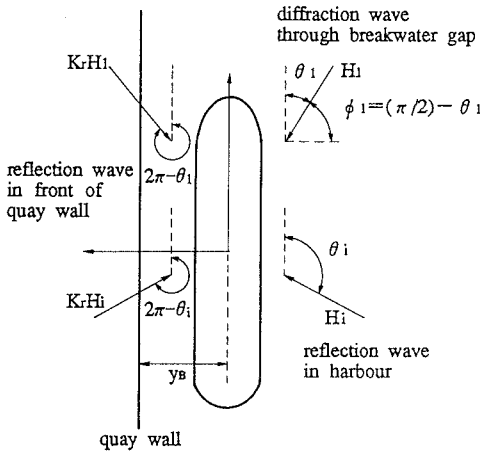


図-4 係船岸前面の船舶に作用する波

従来の動揺計算プログラムでは、船舶が係留される係船岸からの反射波の影響を考慮できるが、船舶に作用する入射波は港口進入波のみで、複雑な形状の港湾で生じている波の多重反射による影響を考慮することができない。そこで、2.3 で示した港内波浪推算システムにおける波向別の波浪スペクトルの出力を船体動揺推算システムの入力データとして取り込むことにより、港内における波の多重反射の影響を考慮した動揺シミュレーションを行なうこととした。

図-4は、係船岸前面における船舶に作用する波の作用状況を示したものであり、港口部からの回折波のほかに、他の係船岸からの反射波が作用する。それらの諸元を波向 θ_i 、波高 H_i とする。ただし、 $i=1$ は港口進入波、すなわち、港口部からの回折波、 $i \geq 2$ は他の係船岸からの反射波である。一方、これらの波に対してそれぞれ、当該係船岸からの反射波が係留船舶に作用する。これは、当該係船岸の反射率を K_r とすると、波向が $2\pi - \theta_i$ 、波高が $K_r H_i$ である。係留船舶に作用する波力はこれらの波による波力を合成することによって求める。

3. 現地におけるシステムの運用及び動揺等の観測

3.1 動揺観測システム

2. で述べたシステムは、東北石油(株)仙台製油所の26万トンタンカーバースに設置され、併設された動揺観測システムによる観測結果によってシステムの実用性の検討が行なわれている。

図-5は、係留船舶の動揺の観測システムの全体概要を示したものである。このシステムは気象・海象及び船舶の係留状態の計測、計測データの処理、その結果の画面出力及び保存を行うコンピュータシステムから構成さ

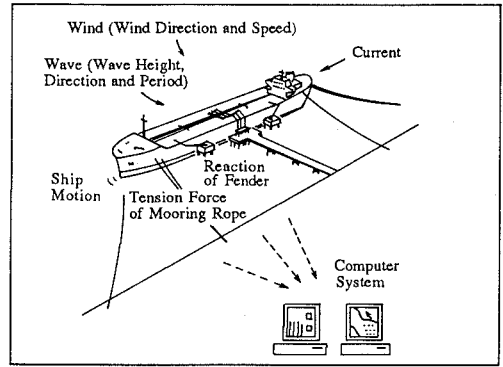


図-5 観測システムの概要図

れる。この観測システムは、従来の目視による経験的な係留・荷役管理を、機械的に計測したデータによる管理に切り替えるために開発したシステムであり、管理者の正確な作業状態把握や管理判断支援に用いられるものである。従って、係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムにおいて観測システムは必ずしも必要ではないが、本予測システムによるシミュレーション結果を検証するために利用している。なお、観測システムの計測データの一部(風向、風速及び潮位)は係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの入力データとして用いている。

a) 気象・海象計測サブシステム

観測システムでは、位置の気象・海象データとして、①風向、風速、②波向、波高、波周期、③潮位を計測している。これらのデータ計測は自動的かつ連続的に解析処理用のパーソナル・コンピュータに送られる。

b) 船舶係留状態計測サブシステム

観測システムでは、①係留ラインの張力、②船舶の動揺量(荷役機械の動作状況)が船舶係留中に連続的に計測される。

係留ラインの張力は、陸上のクイックリリースフックに装着されたロードセルピン(Strainstall Ltd.製)で計測される。図-6は、この計測器を示したものである。本システムでは、8箇所の張力をモニターしている。

図-7は、ローディングアームの移動状況を計測するシステム((株)新鴻鉄鋼製)を示す。これは、ローディングアーム1基につき、インボードアームの平面旋回角度及び鉛直角度、アウトボードアームの鉛直角度をアプソリュート形エンコーダーによる角度センサーを用いて測定し、これらの組合わせでローディングアーム先端位置の水平位置及び上下位置を間接的に求めるものである。なお、計測の最小分解能は50mmである。ただし、ロール、ピッチ、ヨウについては計測していないので、ローディングアーム先端位置の水平方向および鉛直方向の変位から船舶の重心位置の動揺量には換算できない。

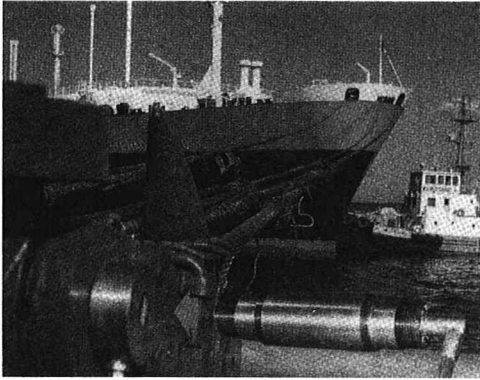


図-6 係留索の張力の観測システム

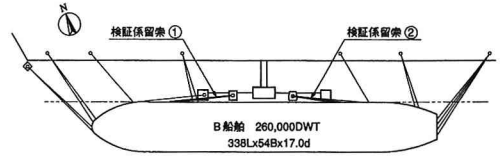


図-8 船舶の係留状況図 (B船)

(65,916 DWT) である。図-8 は、前後動の有義両振幅が 22.8 cm と比較的動揺が大きかった B 船の係留状況図である。船舶は合計 20 本の係留索(船首及び船尾索はナイロン $\phi 90$, プレストライン及びスプリングラインはワイヤー $\phi 42$) で係留されている。なお、係留索の張力は、合計 8 点で計測されているが、ここでは、図中で①, ②で表示されているラインの張力の計測値を示す。

図-9 は、B 船のローディングアーム位置の前後動(回転成分の影響が小さいため、サージとほぼ等しい) と係留索番号①, ②の張力の時系列を示したものである。これらの係留索はスプリングラインであるので、張力の時系列は①は前後動と似ている。また、②は①と対称位置にあるため、張力の増減の逆転した波形となっている。ゼロアップクロス解析による前後動と係留索張力①, ②の有義周期は、それぞれ、98.7 s 及び 84.5 s, 77.0 s である。

表-1 は 3 船について、本システムによる予測計算値と観測値を比較したものである。動揺成分のうち、スウェー及びヒープの観測値は極めて小さかったので、ここでは示していない。計算値のうち、Method-1 として示しているのは、入射波の波向を港口進入波の一方方向波とする解析方法による結果である。この方法については、港口部と船体係留位置とを直線で結んだ角度の一方方向から波を作用させる。しかも、計算において方向分散は考慮しない。Method-2 として示しているのは、本システムで開発した港内における反射波の影響を考慮して解析したものである。この方法では、港口部における入射波の方向分散を考慮している。

ここで、比較した 3 例については、前後動については、Method-1, Method-2 とも A 船, C 船では計算値の方が、B 船では、実測値の方が大きくなっている。係留索の動揺には、長周期成分が影響するので、これらの 3 例について、平均波群周期 T_g (永井他, 1994) を求めると、A 船, B 船, C 船について、それぞれ、50, 95, 65 s である。観測値では、平均波群周期の最も長い B 船の前後動が大きいが、B 船の固有周期の計算値は 86.2 s であり、このときの平均波群周期とほぼ等しい。しかしながら、B 船の計算値では短周期の動揺となっているのは、港内波浪推算の際に、港口部においてブレッダシュナイダー・光易の

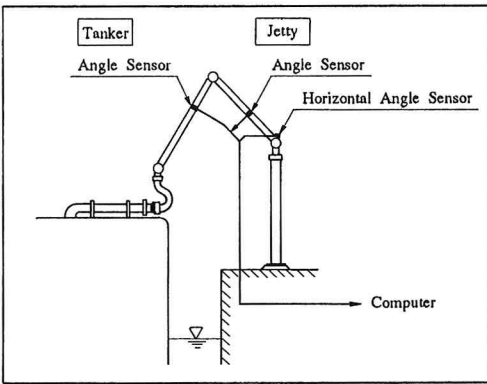


図-7 ローディングアーム先端の位置の観測システム

したがって、船舶の動揺量の計算値からローディングアーム先端の変位を計算し、計測値と比較できるようにしている。

c) 計測データ解析サブシステム

上述の計測データは、すべて、パーソナル・コンピュータで統計処理され、その結果が画面に表示される。

各係留ラインの張力と船体動揺量及びローディングアームの先端の位置は、リアルタイムで見やすくパーソナル・コンピュータのモニター画面に表示する。係留ラインの張力が管理値を超えた場合、あるいは、ローディングアームの先端がその作動範囲の管理値を超えた場合には、赤色表示の警告と警報が鳴るように工夫されている。

3.2 観測結果と予測システムの計算値との比較

本栈橋には、月 2~5 船が着桟している。1994 年 1 月~3 月の入港船舶数は 12 隻である。船舶係留時の港内波高はおおむね 0.25 m 以下であり、波周期は 6 s 以下であった。このため、現在のところ動揺量が大なる事例は観測していない。ここでは、その中でも比較的有意な動揺が生じている事例について計算値と比較する。これらは、A 船 (259,992 DWT), B 船 (260,000 DWT), C 船

表-1 観測値と計算値の比較

| 船舶 | 年/月/日 /時 | 解析方法 ・計測 | 港外波浪 | | | | 港内波浪 | | | 風速 | | 動揺量(SURGE) | | 張力① | | 張力② | |
|--|--------------------|-------------|------------------|--------------------|-----------|-----|------------------|--------------------|-----|--------------|-----|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (sec) | S_{max} | 波向き | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (sec) | 波向き | V (m/sec) | 風向き | $A_{1/3}$ (cm) | $T_{1/3}$ (sec) | $A_{1/3}$ (tf) | $T_{1/3}$ (sec) | $A_{1/3}$ (tf) | $T_{1/3}$ (sec) |
| A 船舶 260,000 DWT 333 L×60 B×11.4 d | 1994/2/2 10:00 | Method-1 | 0.74 | 7.4 | 25 | SE | 0.24 | 7.7 | SE | 15.0 | NW | 10.7 | 43.4 | 2.7 | 39.6 | 3.1 | 44.5 |
| | | Method-2 | | | | | 0.24 | 7.7 | 多方向 | | | 11.4 | 57.0 | 2.9 | 59.7 | 3.2 | 58.7 |
| | | 観測値 | | | | | 0.18 | 4.0 | — | | | 3.7 | 31.0 | 2.3 | 36.9 | 2.0 | 36.4 |
| B 船舶 260,000 DWT 338 L×54 B×16.9 d | 1994/2/28 18:00 | Method-1 | 0.95 | 12.5 | 50 | ESE | 0.44 | 11.6 | SE | 7.0 | N | 7.2 | 14.0 | 2.1 | 13.9 | 2.3 | 13.7 |
| | | Method-2 | | | | | 0.44 | 11.6 | 多方向 | | | 1.9 | 18.0 | 1.6 | 16.2 | 3.0 | 16.8 |
| | | 観測値 | | | | | 0.15 | 4.6 | — | | | 22.8 | 98.7 | 4.1 | 84.5 | 2.3 | 77.0 |
| C 船舶 66,000 DWT 236 L×32 B×12.8 d | 1994/3/10 14:00 | Method-1 | 1.29 | 10.9 | 25 | SE | 0.53 | 10.8 | SE | 7.0 | NNW | 24.1 | 56.4 | 5.5 | 28.7 | 7.4 | 54.6 |
| | | Method-2 | | | | | 0.53 | 10.8 | 多方向 | | | 23.5 | 57.1 | 5.5 | 54.3 | 7.5 | 56.6 |
| | | 観測値 | | | | | 0.19 | 5.4 | — | | | 15.2 | 57.1 | 4.3 | 50.8 | 2.5 | 46.1 |

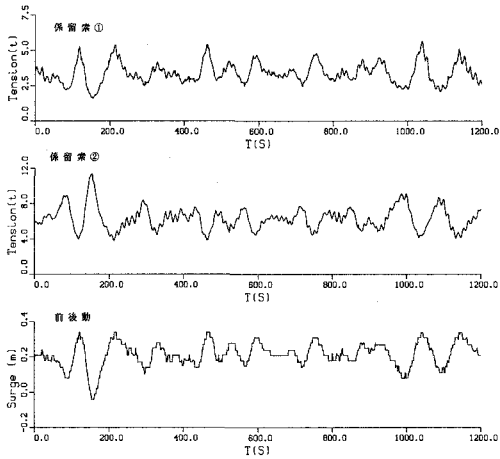


図-9 観測値の時系列 (B 船)

棧の判断

- ・係留索の増強等の判断
- ・港内避泊バースの割り当て

③ その他の利用

- ・港湾計画におけるバース配置の検討
- ・工事に用いる作業船の安全性の検討
- ・港内の浮体構造施設の荒天時の安全性の検討, 利用限界の判定

本システムは運輸省港湾技術研究所と大成建設(株)との共同研究として開発したものである。本システムの現地設置に当たっては、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所、同塩釜港工事事務所及び東北石油(株)の関係各位の協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。今後は、現地観測を継続し、システムの改良を計る予定である。

参考文献

上田 茂 (1984): 係岸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, 372 p.

上田 茂他 (1994a): 港内の波浪及び係留船舶のリアルタイム予測システムの開発, 第12回海洋工学シンポジウム論文集, 日本造船学会, pp. 349-356.

上田 茂他 (1994b): 港内の波浪及び係留船舶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.

高山知司 (1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, 140 p.

永井紀彦他 (1992): 我国の沿岸波浪観測網と波浪観測に関する最近のトピック, 第11回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, pp. 327-334.

永井紀彦他 (1994): 波群特性を考慮した係留船舶のための港内静穏度指標について, 第12回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, pp. 343-348.

Ueda, S. et. al (1994): Realtime Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour, Proc. of 28th International Navigation Congress.

周波数スペクトルに基づいて成分波を発生させ、これに基づいて港内波高を計算しているため、長周期波成分の影響が十分に考慮されていないことによると思われる。

これまでの現地観測においては、動揺の有義両振幅は最大でも 22.8 cm であったので、観測を継続し動揺量の大きな事例について比較検証を行うとともに、長周期成分の影響を考慮した解析を行う必要がある。

4. あとがき

本論文では、外洋に面した港湾における、港湾計画及び港湾工事の施工計画、係留船舶の安全性及び荷役の効率化に寄与することを目的として開発した、港内の波浪及び係留船舶の動揺予測システムについて述べた。

本システムは以下の活用が考えられる

- ① 入港予定船舶の安全係留・荷役の判断
 - ・入港船舶の係留状態の予測
- ② 係留中の船舶の安全係留・荷役の判断
 - ・気象、海象条件の変化に伴う荷役作業の中断、離