

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 33 NO. 1 MAR. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第33巻 第1号 (Vol.33, No.1), 1994年3月 (Mar.1994)

目次 (CONTENTS)

1. 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究
—親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第3報)— ……高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎…………… 3
(Experimental Study on People's Carriage into the Sea Caused by Overtopping Waves
on Breakwaters — A Study on Amenity-oriented Port Structures (3rd Rept.) —
……………Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH and Zen-ichirou MURO)
2. グチ式造流堤による流れの解析 —模型実験と数値計算による検討—
……………古川恵太・平野隆幸・細川恭史……………37
(Flow Analysis on Tidal Flow Generator
—Hydraulic Experiments and Numerical Simulation —
……………Keita FURUKAWA, Takayuki HIRANO and Yasushi HOSOKAWA)
3. 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—
……………上田 茂・永井紀彦・平石哲也・白石 悟・木内里美・小林昭男……………67
(Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour
……………Shigeru UEDA, Toshihiko NAGAI, Tetsuya HIRASHI, Satoru SHIRASHI,
Satomi KIUCHI and Akio KOBAYASHI)

3. 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—

上田 茂*
永井紀彦**
平石哲也***
白石 悟****
木内里美*****
小林昭男*****

要 旨

本報告では、外洋に面した港湾における、港湾計画及び港湾工事施工計画、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の予測システムについて述べる。本報告で示すシステムは、①港外の波浪観測データの伝送システム、②港内波浪推算システム、③係留船舶の動揺推算システムから構成され、入港及び在港船舶の動揺をリアルタイムで計算しモニターに表示するものである。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、対話形式で入力を行う。入力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、当該船舶の係留バースが分れば、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、動揺量または係留索の張力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。本システムは、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、特に設置され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。

キーワード：係留船舶の動揺量、リアルタイム予測システム、船舶の着棧管理、波浪データ伝送システム、港内波浪推算システム、動揺推算システム、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)

*構造部長

**海洋水理部 海象調査研究室長

***水工部 主任研究官(浮体運動解析担当)

****構造部 海洋構造研究室長

*****大成建設株式会社

3. Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour

Shigeru UEDA*

Toshihiko NAGAI**

Tetsuya HIRAISHI***

Satoru SHIRAISHI****

Satomi KIUCHI*****

Akio KOBAYASHI*****

Synopsis

This paper describes a system for predicting the wave height distribution and movement of moored ships in harbour. The system has been developed to contribute to the planning and construction of harbour facilities and to improve the safety and efficiency of ship mooring and cargo handling operations in ocean facing harbours. Consisting of systems for transferring of observed wave data from outside the harbour, numerically predicting wave height distribution in harbour, and numerically predicting of the motion of moored ships, the overall system described in this paper performs realtime calculations of the motion of ships entering to the harbour or staying it, and displays the calculated results on a monitor. The input system is simplified. Even if the detailed properties of moored ships are unknown, the sytem can determine these data from other information such as the gross tonnage, draft, and mooring berth. In addition to these data, mooring conditions such as ropes and fenders are automatically input to the system. Then, the motion of the moored ships is calculated by considering the effect of reflected and refracted complex waves. The calculation results which appear on the monitor include the time history of the motions of moored ships and warnings issued when allowable values such as motions or tensions of mooring ropes are exceeded. At present, this system is installed at the 260,000 DWT crude oil tanker berth at the Sendai Refinery of Tohoku Oil Co., Ltd. The system, together with certain observation apparatus installed to loading arms, is in full operation and has ensured safe and efficient operation of the facilities.

Key Words : Movement of moored ship, Realtime predicting system, Ship berthing operation, System for transferring wave data from outside the harbour, Numerical prediction of wave height distribution inside the harbour, Numerical prediction of ship motion, NOWPHAS

*Director of the Structural Engineering Division

**Chief of the Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

***Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

****Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

*****Taisei Corporation

目 次

要旨	67
1. まえがき	71
2. 港外波浪特性値伝送システム	71
2.1 NOWPHAS	71
2.2 仙台新港における波浪観測	71
2.3 港外波浪特性値伝送システム	74
3. 港内波浪推算システム	74
3.1 港内波浪の計算手法	74
3.2 システムへの適用	76
4. 船体動揺推算システム	77
4.1 係留船舶の動揺計算法	77
4.2 港内の波浪状況を考慮した係留船舶の動揺解析	78
4.3 港内の反射波を考慮することによる計算値の差異	79
5. 係留船舶の動揺の観測システム	85
6. リアルタイム予測システムの構成	88
6.1 システムの概要及び構成	88
6.2 データ処理システム	90
7. 利用方法及び留意点	93
7.1 利用方法	93
7.2 利用に対する留意点	93
8. あとがき	93
謝辞	94
参考文献	94
主要記号表	95

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。港内の静穏度を高めるため、港湾は防波堤で十分に遮蔽される。日本においては、1960年代から国土の総合的開発及び地域格差の是正並びに流通機構の改善などを目標とした施策がとられ、大規模工業地帯が沿岸域に形成され、その中核となる港湾が外洋に面して建設されてきた。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。

本論文で示すシステムは、①港外の波浪観測データの伝送システム、②港内波浪推算システム、③係留船舶の動揺推算システムからなり、入港及び在港船舶の動揺をリアルタイムで計算しモニターに表示するものである。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(Engineering Work Station, EWS) AS4050 GXで、対話形式で入出力を行う。入力に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。本システムは、平成5年8月、東北石油(株)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^{1),2)}。

2. 港外波浪特性値伝送システム

2.1 NOWPHAS

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、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス: 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。図-2は、我が国におけるNOWPHASの波浪観測拠点を示したものである。信頼性の高い波浪観測機器の開発と改良³⁾、波浪計の全国展開による観測ネットワークの構築⁴⁾、全国の沿岸海域で取得された波浪観測データの港湾技術研究所への集積による1970年以降の波浪観測年報の定期的刊行⁵⁾、5年間程度毎の長期波浪統計報⁶⁾などが、NOWPHASの活動であり、その成果は、港湾・海岸・空港事業などのウォーターフロントの開発や利用のための計画・設計・施工に広く活用されている。

本研究では、図中の地点番号24に対応する仙台新港(塩釜港仙台港区)を実験海域として設定し、この地点におけるリアルタイム波浪観測データを用いて、港内に係留された船舶の動揺を予測することとした。

2.2 仙台新港における波浪観測

図-3は、仙台新港における波浪観測を示したものである。水深約20mに設置されている波浪計(勝カイジョー製)は、他の多くのNOWPHAS波浪観測施設と同様に超音波式波高計(USW, USW-132B)と超音波式流向流速計型波向計(CWD, RC-210A)から構成されている。USWとは、海底に設置固定されたセンサーからパルス状の超音波信号を鉛直上方に発信し、海面で反射された超音波信号を同じセンサーの位置で受信し、発信から受信までの経過時間を測定することによって海面の水位を求めるものである。一方、CWDとは、水平方向2成分の流速計と水圧計から構成されており、3成分の同時観測データから波向や方向スペクトルの算定ができるものである。

波高及び波向(合計4チャンネル)の観測は、2時間ごとに0.5秒間隔で20分間のデータを取得して行われているため、取得される波浪データの量は、2時間ごとの各観測毎に、2400データ/チャンネル×4チャンネル=9600データである。このような大量データを効率的に転

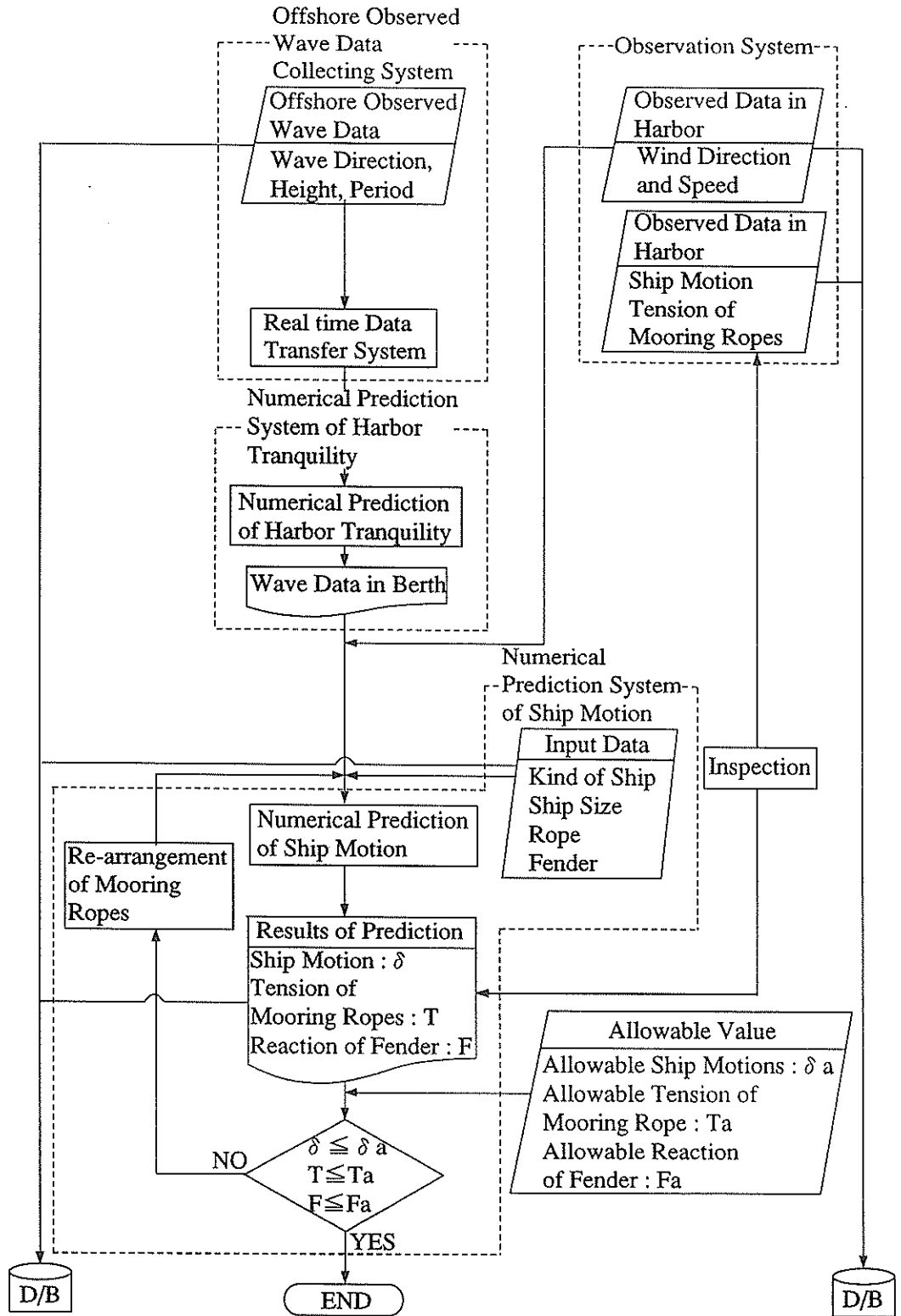


図-1 動揺のリアルタイム予測システムのブロックチャート

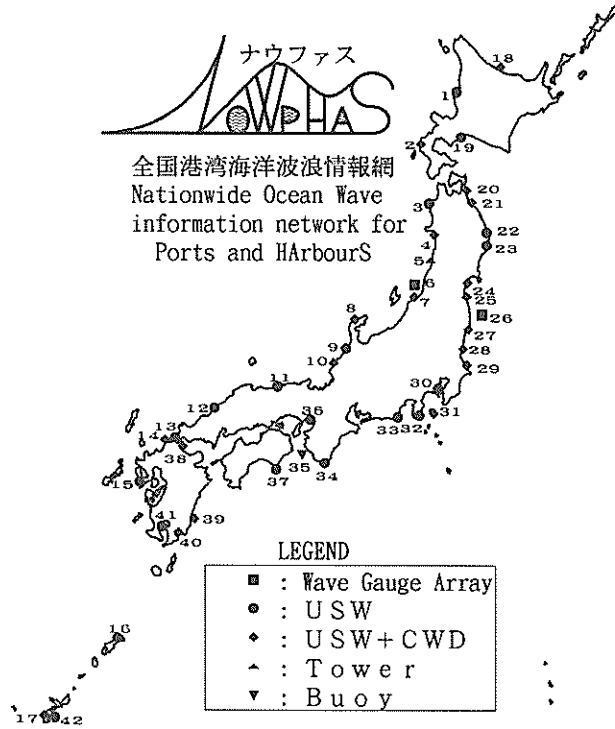


図-2 NOWPHASネットワークシステム

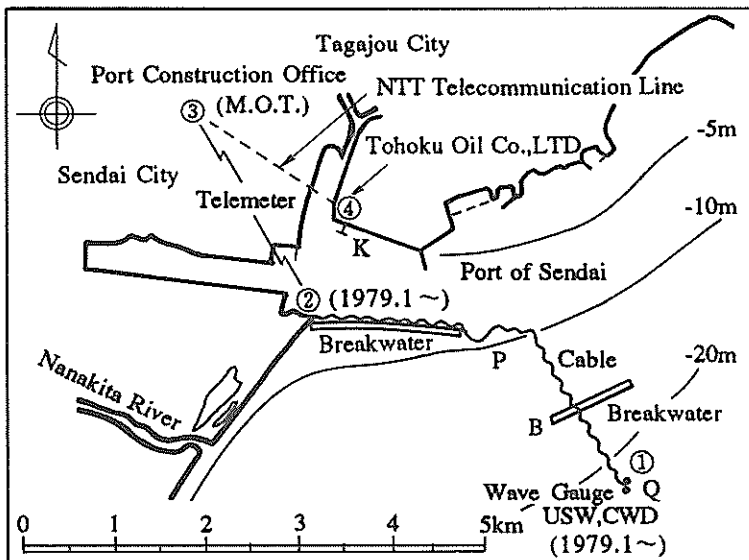


図-3 仙台港における観測及びデータ通信システム

送することが、NOWPHASの重要な技術課題であった。このようなことから波浪データの効率的な伝送システムの開発改良を進めてきた。

2.3 港外波浪特性値伝送システム

図-3は本研究における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段階のシステムとなっている。

第1段階は、①に位置するセンサーから波浪計本体(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転送である。図中②に位置する波浪観測小屋には商用100V電源が供給されており、波浪計本体はここに設置されている。波浪観測小屋をこの位置に設置しているのは、信号の減衰が顕著にならないように波浪計ケーブルの延長をなるべく短くしたためである。

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土工事務所までの無線テレメータ(TLR-600-00)によるデータ転送である。取得された波浪データは、この事務所において、港湾施設の計画・設計及び海上工事の施工計画の策定・施工管理・安全管理などに活用されている。また、NOWPHASの一環としての波浪観測年報の作成のため、波浪データは定常的にこの事務所から港湾技術研究所へ転送されている。

第3段階は、図中の④の東北石油㈱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転送である。ここでは、3.以下で解説する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転送は、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転送している。

なお、④の事務所内部で、ファクトリーコンピュータからエンジニアリングワークステーションへのデータ転送が必要となるが、本研究の現地実験の段階ではこのデータ転送はオフラインのフロッピーディスクを介して、オペレータが行うこととした。将来的には、室内ランを組み、オンラインで自動的にエンジニアリングワークステーションへデータを転送することができる。

3. 港内波浪推算システム

港内の波高分布計算手法は、多くの場合線形ポテンシ

ヤ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、高山⁷⁾が提案した厳密解を重ね合わせる手法を用いて港内の波高分布及び方向スペクトルを求めた。

3.1 港内波浪の計算手法

港内波浪は種々の原因で発生する波が重合したものであり、その主なものは次の二つである。

①港口進入波

港口進入波とは沖合いから港口に達した波が港口部で回折し、防波堤の背後に回り込んで港内奥深く進入する波である。

②港内反射波

港内反射波は、港口進入波が港内の防波堤や岸壁、護岸などで反射される波のことである。この反射波は港内で多重反射を起こし、港内波高に影響を及ぼす。

高山による計算法では、港口進入波及び港内反射波による港内の回折波高を個々に計算し、計算結果を重ね合わせることによって港内波高を推算する。規則波の回折波高は、流体運動が非圧縮・非回転であると仮定し、Laplace方程式及び港内の境界条件を満足する水粒子の速度ポテンシャルを求めることによって計算できる。

(1) 港口進入波の計算

図-4は港口進入波の計算の説明図である。防波堤I及びIIを半無限堤と仮定すると、Sommerfeldの解析解を用いて、防波堤Iによって回折した波の港内点Pにお

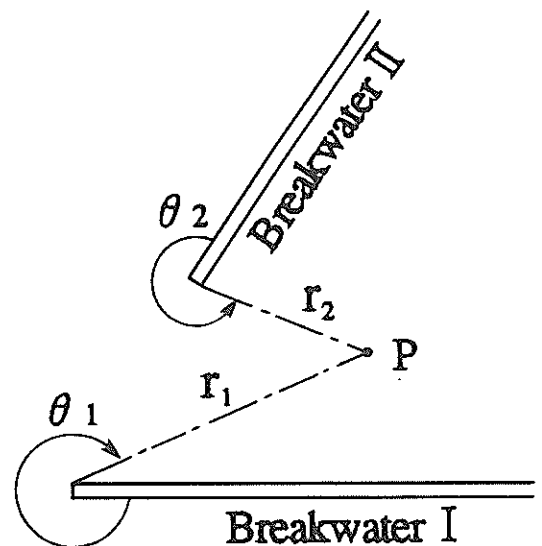


図-4 港口における防波堤の配置

る速度ポテンシャル $\phi_l(r_l, \theta_l)$ が計算できる。防波堤IIによる回折波の点Pにおける速度ポテンシャル $\phi_{II}(r_{II}, \theta_{II})$ も同様に計算できる。 r 及び θ は、それぞれ防波堤先端から点Pまでの距離及び直線 r と防波堤のなす角度を示す。このほかに、一方の防波堤で反射された波が他方の防波堤で回折する場合の点Pにおける速度ポテンシャルなどを計算し、 ϕ_l と ϕ_{II} 及びそれらをすべて加えると、港口進入波による港内の点Pの速度ポテンシャル ϕ_m が計算できる。

なお、港湾内へ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て扱い、最初に各成分波毎に上述の速度ポテンシャルから港内波高 H_{mn} を計算する。合成波高は、成分波高の線形重ね合わせとして次式で計算できる。

$$H = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N H_{mn}^2} \quad (1)$$

ここで、添字 m 及び n は、それぞれ m 番目の方向及び n 番目の周波数成分を示し、 M 及び N は、方向及び周波数分割数を示す。本システムでは、 $M=15$ 、 $N=30$ とした。(2)港内反射波の計算

図-5は、港内に進入した波を多方向波として考えた場合、各方向の成分波が進む方向を波向ベクトルとして示したものである。点Mから入射した波は、点 S_1 、 S_2 、 \dots に達し、各点で反射され、 R_1 、 R_2 、 \dots のように進む。港内反射波は、 S_1 、 S_2 などの反射点において、波長の2倍の長さを持つ島堤が存在するものとして、島堤からの回折散乱波と反射波の和として計算できる。

図-6のように岸壁の一部を島堤と仮定する。港口進入

波が入射した場合には、港内の点Pにおける波の速度ポテンシャルは、島堤の左端を堤端とし、右側に半無限に延びた防波堤による回折波のポテンシャル $\phi_R(r_l, \theta_l)$ と、島堤の右端を堤端とし、左側に半無限に延びた防波堤による回折波の速度ポテンシャル $\phi_L(r_2, \theta_2)$ を重ね合わせ、入射波と反射波の速度ポテンシャルを差し引いたものとして計算できる。この速度ポテンシャルから入射波の速度ポテンシャルを除いたものが港内反射波の速度ポテンシャルである。

岸壁で反射された波は、対岸の岸壁で再度反射されて港内の波高を増大させるため、本計算では、図-5に示すように、 R_1 、 R_2 などの反射波が岸壁に達した S_{21} 、 S_{22} などの点で島堤を仮定し、2次反射波の計算まで行っている。

波のスペクトルの一般形は、通常、式(2)のような形で表される。

$$S(\theta; f) = S(f)G(\theta; f) \quad (2)$$

ここに、
 $S(\theta; f)$: 波の方向スペクトル
 f : 周波数 (s⁻¹)
 θ : 波の主方向からの偏角
 $S(f)$: エネルギー密度 (m²s)
 $G(\theta; f)$: 方向関数
 である。

このうち、波の周波数スペクトルは式(3)に示すBretschneider・光易型^{9),10)}を用いた。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \cdot \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (3)$$

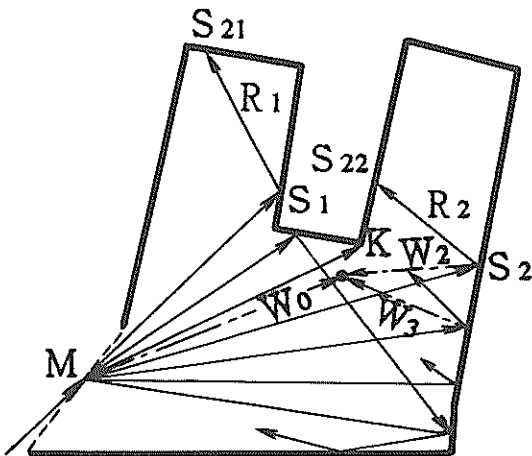


図-5 港内における波向ベクトル

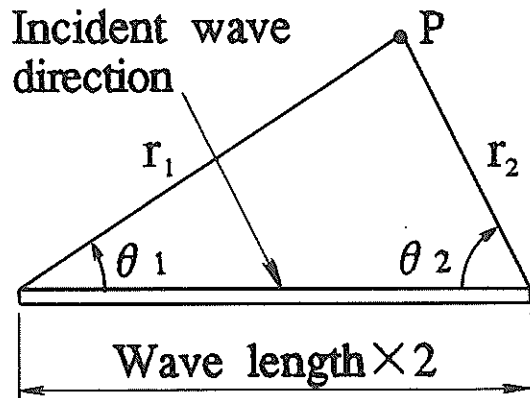


図-6 島堤による波の回折計算の座標系

ここに、

T_{113} : 有義波周期 (s)

H_{113} : 有義波高 (m)

である。

また、方向関数形は光易型¹¹⁾を合田・鈴木¹²⁾が改良したものをを用いた。改良光易型の方向関数は次式で示される。

$$G(\theta; f) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (4)$$

ここに G_0 は $\int_0^\pi G(\theta; f) d\theta = 1$ を満たすための定数である。

また、パラメータ S は次式に示す周波数の関数である。

$$S = \begin{cases} S_{max}(f/f_p)^5 & : f \leq f_p \text{ の場合} \\ S_{max}(f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \text{ の場合} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 S_{max} は、波の方向集中度を示すパラメータで、 S_{max} が大きくなるほど、波は単一方向波に近くなる。図-7 は、 $S(f)$ が最大となるピーク周波数 f_p における方向関数形 $G(\theta; f_p)$ を示したものである。

3.2 システムへの適用

2. で示した港外波浪特性値伝送システムにより、港外波の方向スペクトルが観測されると、 $G(\theta; f_p)$ の観測値が得られる。そこで、観測値の $G(\theta; f_p)$ のピークの値と、図-7 に示した設定したように、 S_{max} から計算した $G(\theta; f_p)$ の値が一致するように、本計算で用いる S_{max} を決定した。

現地では、港外波浪観測点 Q の直背後に、前出の図-3 に示すような防波堤 B が建設中である。港内波浪の計算は、仙台新港の南防波堤の先端部 P における波を入射波として行う。したがって、 Q で観測された波が防波堤 B で一度回折して基準点 P に到達することになり、防波堤 B の影響を考慮しなければならない。本システムでは、防

表-1 基準点 P における波高比 R_H と周期比 R_T

No.	T_0	θ_0	S_{max}	R_H	R_T	No.	T_0	θ_0	S_{max}	R_H	R_T
1	10	E	75	.92	1.01	19	8	SE	75	.90	1.01
2	10	E	25	.92	1.01	20	8	SE	25	.90	1.02
3	10	E	10	.92	1.01	21	8	SE	10	.90	1.02
4	10	ESE	75	.91	1.01	22	8	SSE	75	.89	1.02
5	10	ESE	25	.91	1.01	23	8	SSE	25	.89	1.02
6	10	ESE	10	.91	1.01	24	8	SSE	10	.89	1.02
7	10	SE	75	.90	1.02	25	6	E	75	.90	1.02
8	10	SE	25	.90	1.01	26	6	E	25	.90	1.02
9	10	SE	10	.91	1.01	27	6	E	10	.90	1.02
10	10	SSE	75	.90	1.02	28	6	ESE	75	.89	1.02
11	10	SSE	25	.90	1.02	29	6	ESE	25	.89	1.02
12	10	SSE	10	.90	1.02	30	6	ESE	10	.89	1.02
13	8	E	75	.91	1.01	31	6	SE	75	.88	1.03
14	8	E	25	.92	1.01	32	6	SE	25	.88	1.02
15	8	E	10	.92	1.01	33	6	SE	10	.89	1.02
16	8	ESE	75	.90	1.01	34	6	SSE	75	.88	1.03
17	8	ESE	25	.90	1.01	35	6	SSE	25	.88	1.02
18	8	ESE	10	.91	1.01	36	6	SSE	10	.88	1.02

(Unit : T_0 (sec))

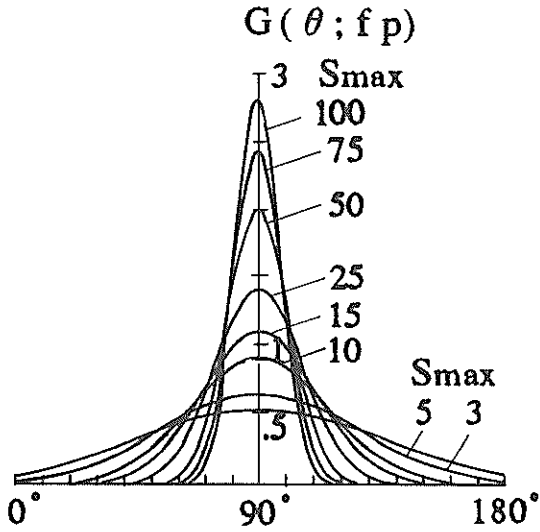


図-7 S_{max} による方向関数形の変化

波堤Bを島堤と考えて、あらかじめ沖波の波向、周期毎に基準点Pの波高比及び周期比を計算しておき、観測値に乘ずることとした。

表-1は、沖波の周期 T_0 、波向 θ_0 、 S_{max} に対して計算した点Pの波高比 R_H 及び周期比 R_T を示す。波向及び周期が変化しても波高比及び周期比は大きく変化しないので、本システムでは波高比及び周期比をそれぞれ0.9及び1.0に固定した。

4.に示す係留船舶の動揺計算では、船舶係留点において異なる方向から伝播する成分波の波高が必要になる。今、図-5に示す点Kに船舶が係留されているものとする。係留船舶の動揺計算の外力となる波は港口進入波と港内反射波である。港口進入波の点Kにおける波高は3.1に示した手法で計算できる。点Kに達する回折波の波向を厳密に定義することは困難である。本システムでは波向を、港口の開口部の midpoint Mと点Kを結ぶ直線 W_0 で代表させる。すなわち、船舶係留点には、波高 $H_{0,K}$ の波が W_0 の方向から来襲するものとした。

港内反射波については、反射を考慮する島堤がJ個あるものと考え、それぞれの島堤からの反射波高 H_j ($j=1\sim J$)が計算できる。それぞれの反射波の波向は島堤の中央点と点Kを結んだ W_j ($j=1\sim J$)と設定した。したがって、船舶係留点Kには、合計 $J+1$ 個の方向から不規則波が作用することになる。これらを、船舶に作用する波と考えて係留船舶の動揺計算を行えばよい。

4. 船体動揺推算システム

4.1 係留船舶の動揺計算法

本報告に示す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^{13),14)}。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。

フルードクリロフの力と散乱波による力は波力として一括して取り扱うことができる。また、風による力、流れなどによる力も高次の荷重として一括して取り扱うこととすると、運動方程式は式(6)で表現することができる。式(6)は運動方程式をマトリックス表示したものである。

$$(M+K)\ddot{x}+N\dot{x}+C\dot{x}|x|+Bx+R(x) = P_0+P \tag{6}$$

ここに、

- M : 質量及び慣性モーメント
- K : 付加質量及び付加慣性モーメント
- N : 線形減衰係数
- C : 非線形減衰係数
- R : 静水圧的復元力係数
- $R(x)$: 係留系の反力
- P_0 : 定常荷重を含む高次の荷重
- P : 波力
- \ddot{x} : 加速度
- \dot{x} : 速度
- x : 変位、ただし、 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ であり、 x_1 =Surge, x_2 =Sway, x_3 =Heave, x_4 =Roll, x_5 =Pitch, x_6 =Yaw

である。

外力のうち、波はブレッドシュナイダー・光易^{9),10)}またはJONSWAP¹⁵⁾等の周波数スペクトル、風はダベンポート¹⁶⁾または日野¹⁷⁾などの周波数スペクトルに基づいて変動波浪荷重及び変動風荷重を与える。また、防舷材及び係留索については、その変位復元力特性が一般的に非線形性を有することを考慮してモデル化されている。防舷材は履歴特性を有するものについてもモデル化している。このように設定された6元2階連立微分方程式の解を数

値積分によって求める。数値積分はタイムステップ Δt を比較的大きくとることのできるWilson- θ 法¹⁸⁾によって行なうものとする。以上のようにして得られた係岸船舶の動揺量及び係留系の変位、反力の時刻歴について統計処理して振幅及び周期などの有義値などを求める。

なお、通常、係留船舶の動揺計算においては、船舶の断面形状、風抗力係数、防舷材及び係留索などの変位復元力特性など多くのデータ入力が必要である。動揺計算において必要な諸量をデータベース化し、表-2に示す比較的小数のデータの入力によって動揺計算及び結果の統計解析を自動的に行なうプログラム¹⁹⁾が組み込まれている。

4.2 港内の波浪状況を考慮した係留船舶の動揺解析

4.1で示した動揺計算プログラムにおいては、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、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する。実際の港湾では、係船岸前面における波は図-8に示すように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。なお、本システムでは考慮できる波向は最大30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。以上のように当該係船岸前

面における波を定義すると係船岸前面に係留されている船舶に作用する波力の時刻歴 $P(t)$ は式(7)で定義される。

$$\begin{aligned}
 P(t) &= \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{ij}(t) + P_{Rij}(t)) \\
 &= \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N a_{ij} \cos(k_{ij} y_B \cos \phi_i + \sigma_{ij} t + \varepsilon_{ij}) P_{ij}^* \\
 &\quad + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N K_r a_{ij} \cos(-k_{ij} y_B \cos \phi_i \\
 &\quad + \sigma_{ij} t + \varepsilon_{ij}) P_{Rij}^* \tag{7}
 \end{aligned}$$

ここに、

- i : 波向の番号
- j : 成分波の番号
- $P_{ij}(t)$: 波向 i 、成分波 j の入射波(規則波)の波力
- $P_{Rij}(t)$: 波向 i 、成分波 j の反射波(規則波)の波力
- a_{ij} : 当該係船岸に入射する波の成分波の振幅
- k_{ij} : 成分波の波数
- y_B : 反射面から係留船舶の重心までの水平距離
- ϕ_i : 係船岸に作用する波向 ($\phi_i = \pi/2 - \theta_i$)
- σ_{ij} : 成分波の角周波数
- ε_{ij} : 成分波の位相
- P_{ij}^* : 波向 i 、成分波 j の入射波(規則波)の単位振幅当たりの波力
- P_{Rij}^* : 波向 i 、成分波 j の反射波(規則波)の単位振幅当たりの波力

である。

式(7)で計算された波力の時刻歴を運動方程式(6)に代入することにより、港内における波の多重反射を考慮した係岸船舶の動揺量及び係留力が計算される。

表-2 数値シミュレーションの入力条件

Input Items	Data Items
Kind of Ship Ship Size	Kind of Ship, Ship Size Loaded Condition
Wave and Wind Conditions	Wave Direction, Significant Wave Height Significant Wave Period Wind Direction, Average Wind Speed
Fender and Rope	Kind of Fender, Number of Fender, Fender Size Kind of Rope, Number of Rope, Rope Diameter Initial Tension of Rope

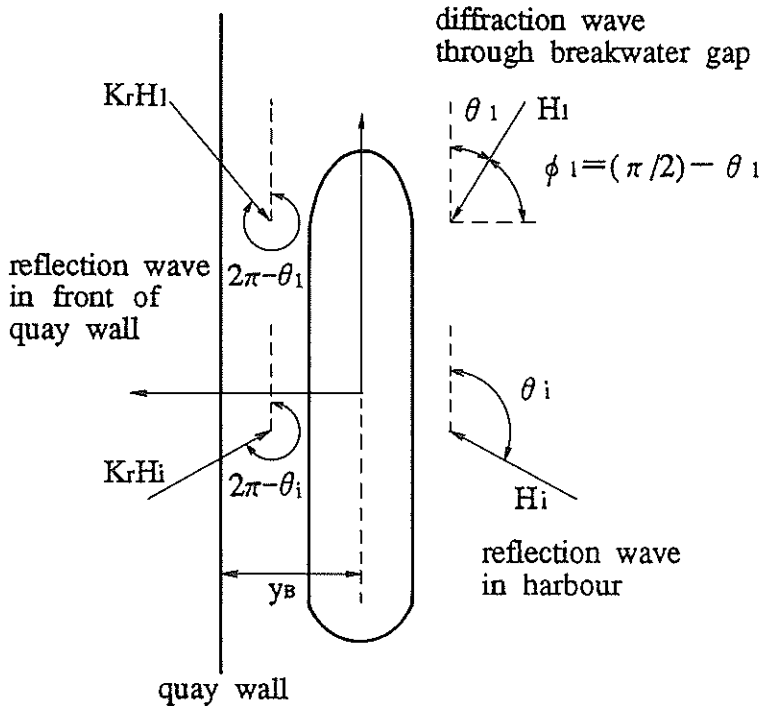


図-8 係船岸前面の係留船舶に作用する波の状況

4.3 港内の反射波を考慮することによる計算値の差異

上記の計算手法を用いて、東北石油(株)仙台製油所第一棧橋に係留される243,850DWTの原油タンカーについて動揺シミュレーションを行ない、港内における反射波を考慮した計算手法についての検討を行なう。

図-9は係留系の配置を示したものである。図中で、番号1~17は原油タンカー上のビットを示し、1'~14'は係船岸側のビット位置を示す。また、係留索は表-3に示すように合計19本であり、番号5から15までが $\phi=42\text{mm}$ のワイヤロープ、その他は $\phi=75\text{mm}$ の3つよりマニラロープである。各ラインには初期張力として5.0tfがかかっているものとする。

防舷材は表-4に示すように5個設置されており、H型またはユニット型で高さは1600mmから2250mmの範囲である。

ここでは港内における反射波が係船船舶の動揺に及ぼす影響を検討するため、以下の2つの方法による計算結果を対比する。まず、第一の方法は、入射波の波向を港口進入波の一方波とする解析方法(以後、Method-1と記す)である。Method-1においては、港口部と船体係留位置とを直線で結んだ角度の一方から波を作用させる。しかも、方向分散は考慮しない。ここで示す計算例では、

船首から時計まわりに計った角度で 198° から波が作用するものとして計算する。また、動揺計算で入力する係船岸前面における波高は港内波高分布計算で得られる波高比に港口部の波高を乗じたものとする。

次に、第二の方法は、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する方法(以後、Method-2と記す)である。この方法では、港口部に入射する波は方向分散を考慮している。ここで示す計算例では、船舶に作用する波は図-10に示すように7方向である。すなわち、船舶の船首方向から時計まわりに計った角度で、それぞれ $196^\circ, 261^\circ, 312^\circ, 339^\circ, 325^\circ, 325^\circ, 333^\circ$ の方向から波が作用する。このうち、港口進入波は、波向 196° のものである。それぞれの波向の入射波及びそれらを合成した波の諸元を表-5に示す。

表-6は、Method-1及びMethod-2による計算結果を比較したものである。表には各成分の動揺量の最大値(X_{max})及び最小値(X_{min})、有義両振幅($A_{1/3}$)、有義周期($T_{1/3}$)を示している。また、図-11及び図-12は、それぞれ、Method-1及びMethod-2による動揺の時刻歴を示したものである。これらの図表から両者の計算結果の相違について考察する。

Method-1においては、波がほぼ船尾方向(198°)から作用するため、サージ及びピッチが卓越し、これらの成分

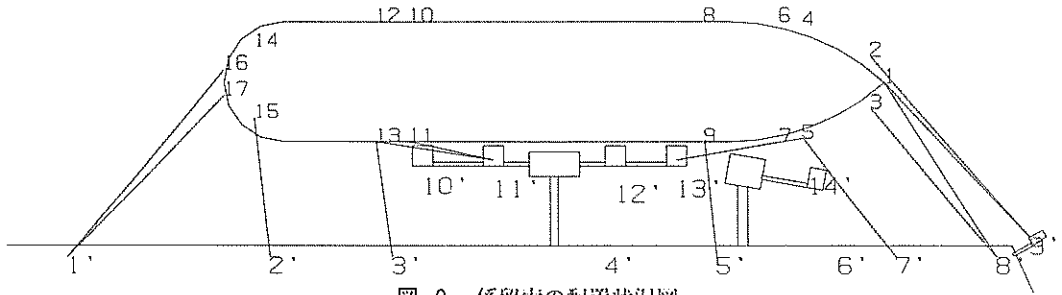


図-9 係留索の配置状況図

表-3 係留索の一覧表

No.	No. of Ship Side	No. of Quay Side	Type of Rope	Diameter (mm)	Initial Tension (tf)	Number
R-1	1	9'	Manila	75.0	5.0	1
R-2	2	9'	Manila	75.0	5.0	1
R-3	1	8'	Manila	75.0	5.0	1
R-4	3	8'	Manila	75.0	5.0	1
R-5	5	7'	Wire	42.0	5.0	1
R-6	5	13'	Wire	42.0	5.0	1
R-7	7	13'	Wire	42.0	5.0	1
R-8	7	13'	Wire	42.0	5.0	1
R-9	9	5'	Wire	42.0	5.0	1
R-10	9	5'	Wire	42.0	5.0	1
R-11	11	11'	Wire	42.0	5.0	1
R-12	11	11'	Wire	42.0	5.0	1
R-13	13	11'	Wire	42.0	5.0	1
R-14	13	3'	Wire	42.0	5.0	1
R-15	15	2'	Wire	42.0	5.0	1
R-16	16	1'	Manila	75.0	5.0	1
R-17	16	1'	Manila	75.0	5.0	1
R-18	17	1'	Manila	75.0	5.0	1
R-19	17	1'	Manila	75.0	5.0	1

表-4 防舷材の一覧表

No.	X (m)	Y (m)	Z (m)	Number	Type	Grade	Height (cm)	Length (mm)
F-1	65.00	-2.69	2.55	1	Unit	K	2250	2000
F-2	30.00	-1.70	2.60	1	H Type	S2	1700	2100
F-3	-30.00	-1.60	2.25	1	Unit	S1	1600	1000
F-4	-60.00	-2.25	2.55	1	Unit	K	2250	2000
F-5	-124.90	-2.00	2.30	1	Unit	K	2000	1600

表-5 船舶に作用する波の方向別の諸元

No.	θ (°)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
1	195.7	0.063	13.4
2	260.6	0.061	14.9
3	312.1	0.049	14.1
4	339.4	0.051	13.3
5	324.8	0.052	12.0
6	324.8	0.053	14.4
7	333.3	0.055	14.1
Composed Wave	—	0.151	14.5

についてはMethod-2による計算結果よりも大きな値を示す。すなわち、サージの有義両振幅はMethod-2が0.03mであるのに対して、Method-1では0.11mである。また、ピッチの有義両振幅はMethod-2が0.03°であるのに対して、Method-1では0.11°である。

一方、スウェイ、ロール、ヨウについてはMethod-1では船尾方向からの一方向波であるので、あまり動揺振幅が大きくない。これに対して、Method-2では港内における他の係船岸による反射波のうち、波向261°の成分が船体の横方向から作用するので、スウェイ、ロール、ヨウの動揺が大きくなる。すなわち、スウェイの有義両振幅

はMethod-1が0.03mであるのに対して、Method-2では0.06mである。また、ロールの有義両振幅はMethod-1が0.17°であるのに対して、Method-2では0.83°である。ただし、ヨウの有義両振幅については相違がそれ程大きくなく、Method-1及びMethod-2によるものが、それぞれ、0.03°及び0.04°である。

以上示したように、Method-1とMethod-2の計算結果には差異がみられ、港内の反射波を考慮したMethod-2では、反射波に起因するスウェイ、ロールがこれを考慮しない計算に比べて大きく計算される。

表-6 船舶の動揺量の計算値の比較

Wave outside the port	$H_{1/3}=1.5\text{m}$ $T_{1/3}=12.0\text{s}$, $S_{\text{max}}=75$, Wave Direction SE							
Wave in the port	$H_{1/3}=0.6\text{m}$, $T_{1/3}=11.9\text{s}$							
Wind in the port	$U_{10}=5.0\text{m/s}$, $\theta=225^\circ$							
Method of Computation	Method-1				Method-2			
	$\theta=198^\circ$							
Ship Motions	Xmax	Xmin	$A_{1/3}$	$T_{1/3}$	Xmax	Xmin	$A_{1/3}$	$T_{1/3}$
Surge (m)	0.11	-0.07	0.11	13.9	0.04	-0.01	0.03	17.8
Sway (m)	0.00	-0.04	0.03	14.7	0.02	-0.07	0.06	15.6
Heave (m)	0.07	-0.07	0.10	13.7	0.04	-0.04	0.06	15.2
Roll (deg)	0.15	-0.10	0.17	15.1	0.60	-0.53	0.83	16.1
Pitch (deg)	0.08	-0.09	0.11	14.6	0.03	-0.03	0.03	15.9
Yaw (deg)	0.02	-0.03	0.03	16.1	0.03	-0.03	0.04	16.7

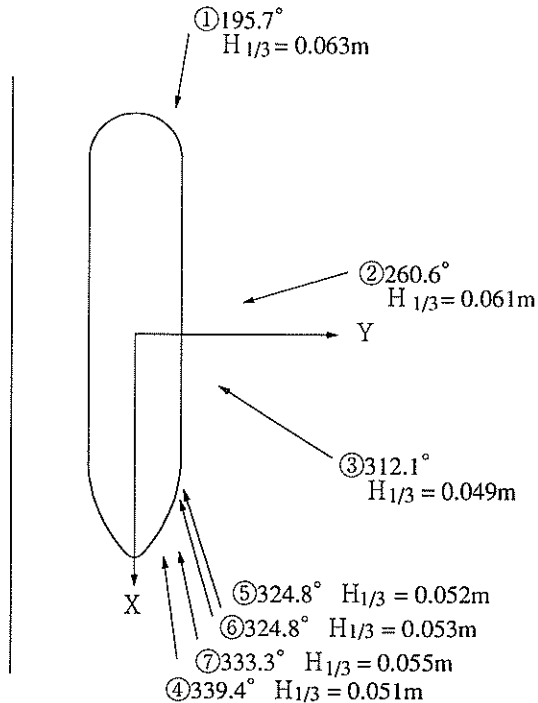


図-10 船舶に作用する入射波の波高・波向

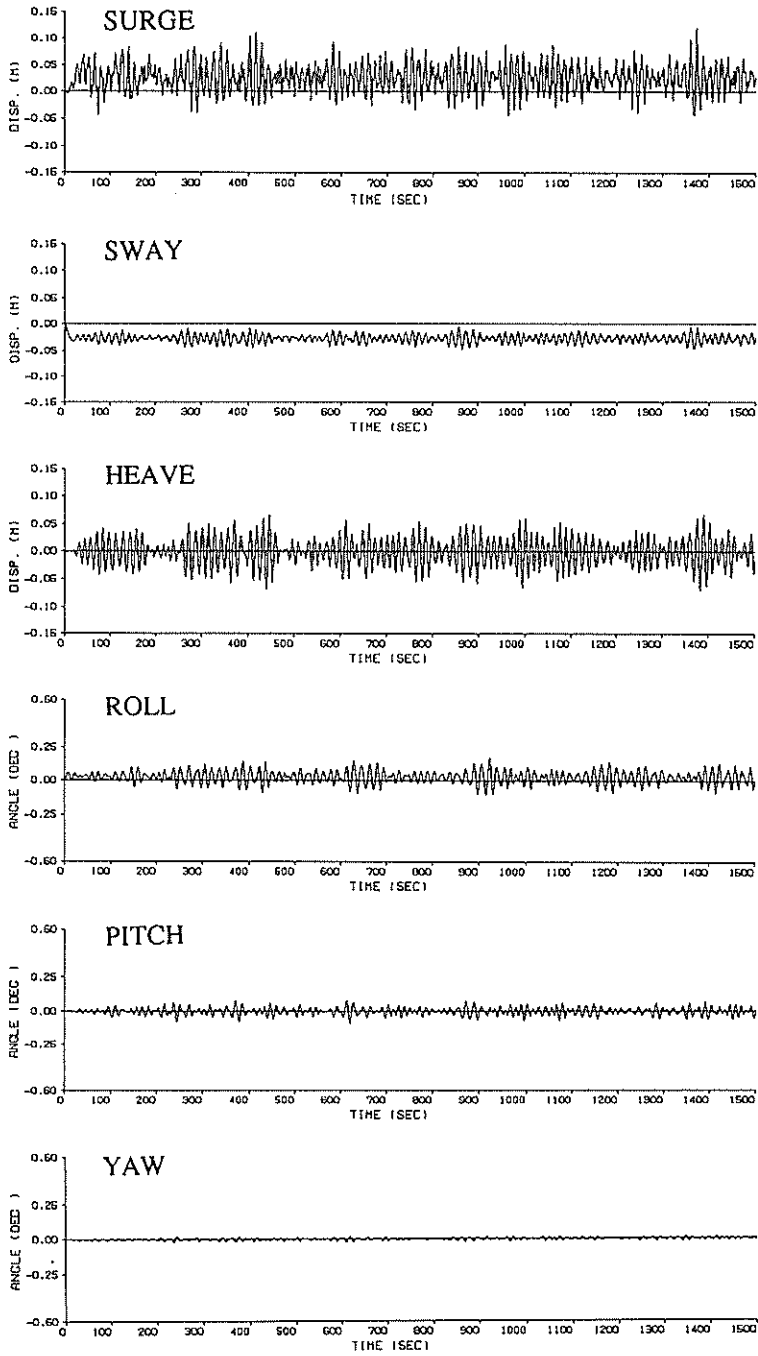


図-11 動揺量の時刻歴 (Method-1)

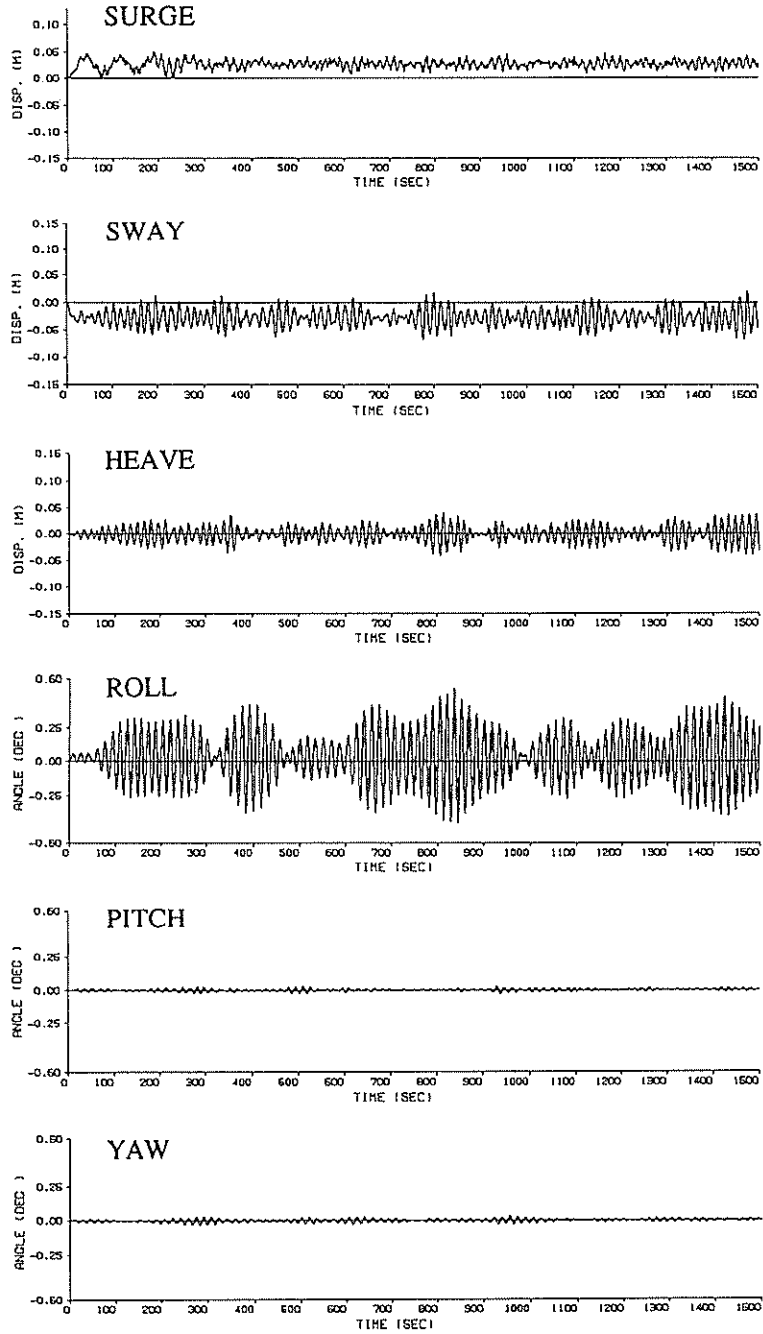


図-12 動揺量の時刻歴 (Method-2)

5. 係留船舶の動揺の観測システム

図-13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、本予測システムの現地試行において、シミュレーション結果を検証するために利用している。また、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。本章では、この観測システムの構成・特徴を示す。

(1)気象・海象計測サブシステム

観測システムで計測されるバース位置の気象・海象データは、①風向、風速、②波向、波高、波周期、③潮位である。これらのデータ計測は自動的に、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。このうち、①風向、風速及び③潮位のデータが係留船舶の動揺予測システムの入力データとして用いられ、②波向、波高、波周期のデータは、港内波浪推算システムのシミュレーション結果の確認に用いられている。

(2)船舶係留状態計測サブシステム

船舶係留状態に関する計測項目は、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）であり、船舶が係留されている間は連続的に計測される。これらは、それぞれ以下に示す専用の計測機器を用いて計測される。

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-14は、この計測機器の概要図を示したものである。

係留船舶の動揺量は、荷役機械の稼働に影響を及ぼす。特に、原油および石油製品の荷役の場合には船体とローディングアームが直接接続されるので、船体の動揺によってローディングアームが作動の許容範囲から逸脱することを避けなければならない。図-15は、ローディングアームの移動状況を計測するシステム（㈱新潟鉄鋼製）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ブソリュート形エンコーダ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の先端位置と船舶との接続点の水平位置及び上下位置を間接的に求めるものである。ローディングアームの先端位置の水平位置（船の前後方向及び左右方向）はインボードアーム長、アウトボードアーム長、及び平面旋回角度、インボードアームの鉛直角度、アウトボードアームの鉛直角度から幾何学的に計算される。また、鉛直位置はライザーパイプの長さ、インボードアーム長、アウトボードアーム長、及び平面旋回角度、イ

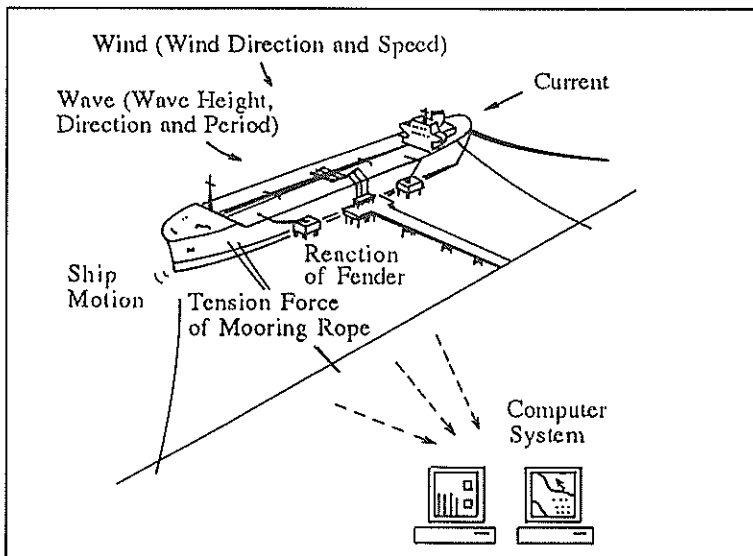


図-13 観測システムの概念図

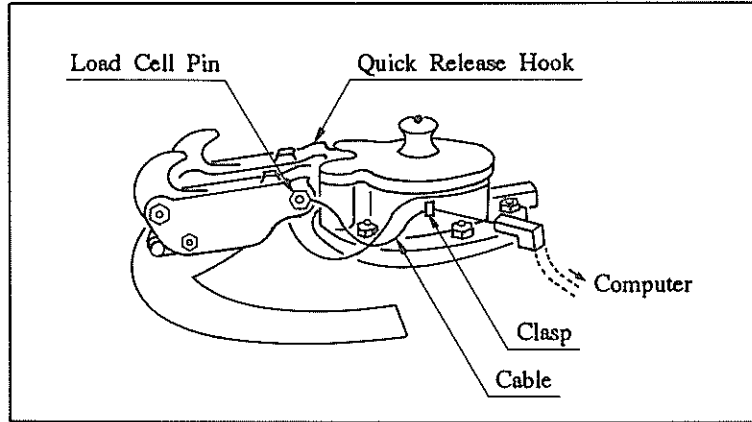


図-14 係留ライン張力計測システム

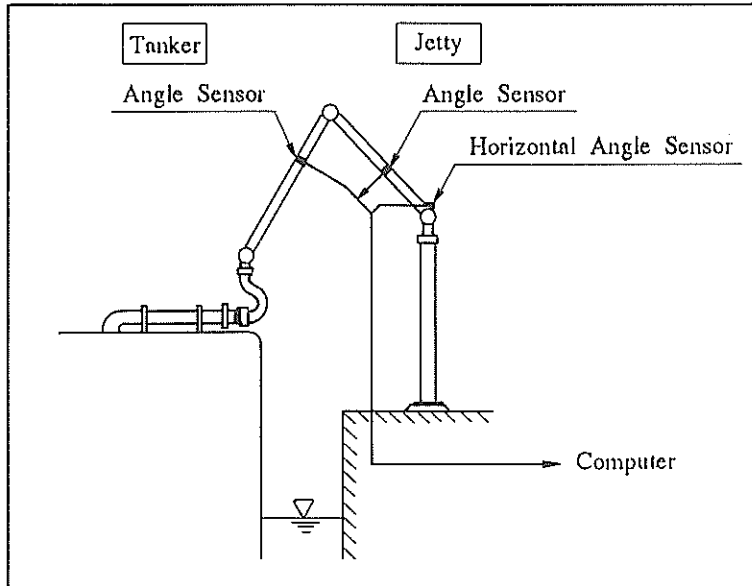


図-15 ローディングアーム先端位置の計測システム

ンボードアームの鉛直角度、アウトボードアームの鉛直角度から計算される。これらの計測の最小分解能は50 mm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動揺量から船舶の重心位置の動揺量には換算できない。したがって、係留船舶の動揺推算システムにおい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。

船舶係留状態計測サブシステムは、これらの計測システムを統合し、計測データを自動的かつ連続的にパーソナル・コンピュータに送るシステムである。係留船舶の

動揺量及び係留索の張力のデータは、本予測システムの係留船舶の動揺シミュレーション結果との比較に用いられている。

(3)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。気象海象の計測データについては、20分間の計測データから、①風向、平均風速、②平均波向、③潮位、④流速、⑤有義波高・有義波周期、⑥最大波高・最大波周期が求められ、それらがパーソナル・コンピュータのモニター画面に表示される。図-16は本システムによる気象・海象状態を表示した事例である。

船舶の係留状態の計測データは、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であり、これらを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。図-17は、本システムによる船舶の係留状態を表示した事例である。画面の左側は各係留ラインの張力の変動を棒グラフで示したものであり、右側はローディングアームの先端の位置を表示している。ローディングアームの先端位置の移動が画面上でモニターされ、これと作動範囲の管理値とが比較して示されている。

本システムの特徴の一つに警告表示がある。係留ラインの張力が、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。また、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も同様である。

なお、各係留ラインの張力及びローディングアームの先端の動揺量の計測結果は、画面表示のみではなくハードディスクにも保存され、予測システムによる係留船舶の動揺計算結果との比較に利用されている。

図-18は、本観測システムの機器配置を示したものであり、その観測データは事務所のコンピュータに送られて処理され、バース管理者が船舶の係留状況を把握できるようになっている。図-19は、本観測システムのコンピュータの全景を示したものである。

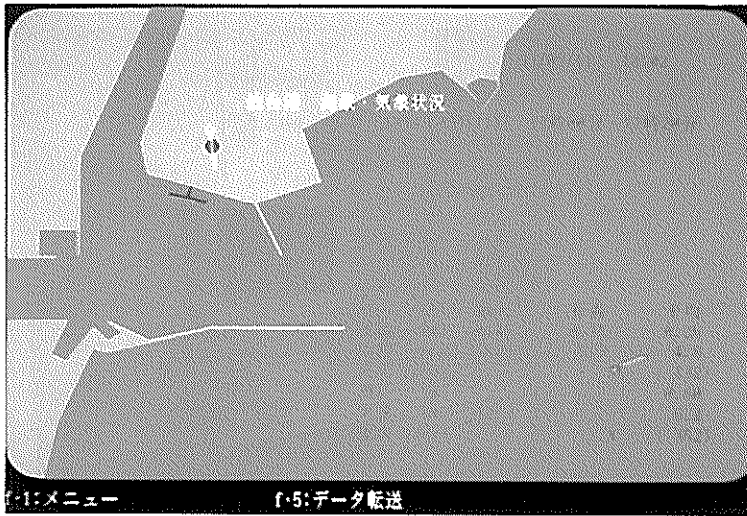


図-16 気象・海象データのディスプレイ

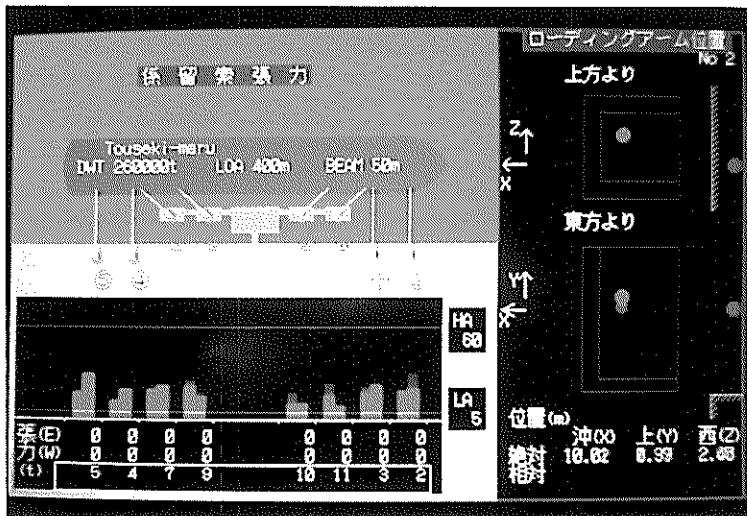


図-17 船舶係留状態データのディスプレイ

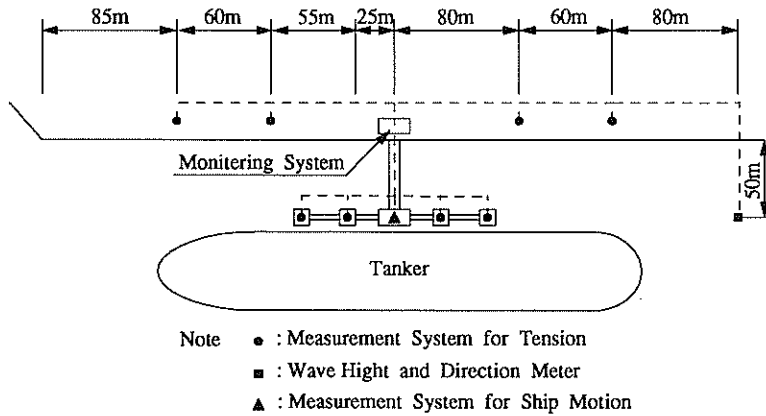


図-18 観測機器の配置



図-19 気象・海象及び船舶係留状態の観測システムの全景

6. リアルタイム予測システムの構成

6.1 システムの概要及び構成

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3種類のシステムからなる。

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なう。

ここでは、これらのシステムを相互に結合し、データの受け渡し、解析結果の表示などの機能を有するデータ処理システムについて説明する。

リアルタイム予測システムのハードウェアは、港外波浪特性値伝送システム用のパーソナルコンピューター及び予測システム用のエンジニアリングワークステーション (EWS) で構成されている。予測システム用のEWSは、シミュレーション計算に必要となるデータ及び計算結果のデータベース用の記憶装置を備えている。

図-20はシステムのハードウェアの構成を、図-21は稼働中のEWSの全景を示したものである。

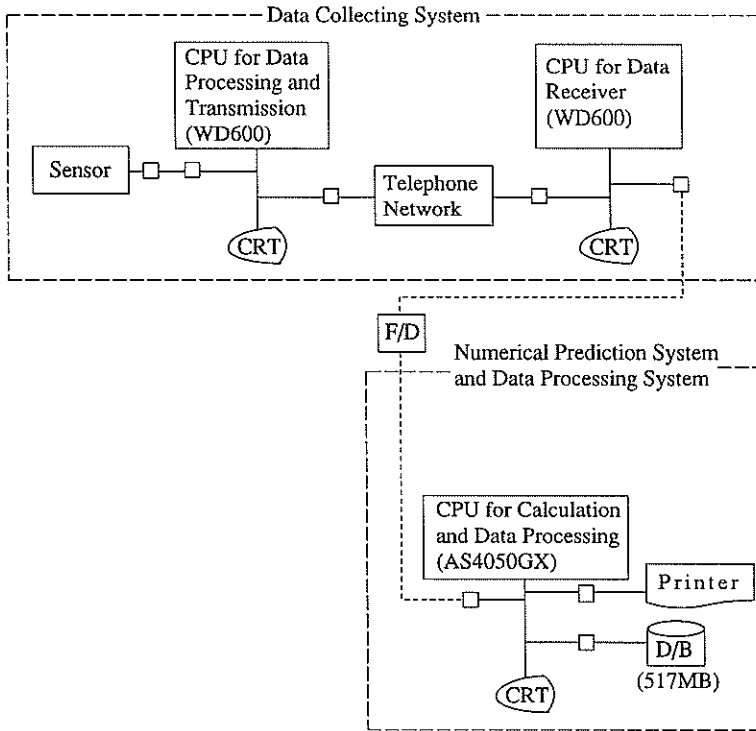


図-20 システム装置構築図

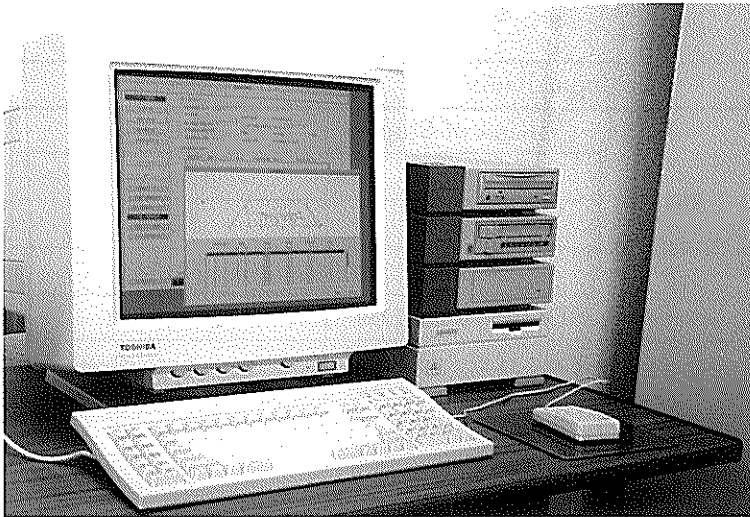


図-21 エンジニアリングワークステーションの全景

6.2 データ処理システム

(1)データ処理システムの役割

データ処理システムは、各システム間のデータの出入力制御機能と、港湾管理者やバースマスターの利用が容易なマン・マシン・インターフェースを備えており、以下の特徴を有する。

①沿岸波浪データ受渡しの円滑化

港外波浪特性値伝送システムにより伝送された沿岸波浪データは、船体動揺推算システムの波浪条件として入力されるが、同時にデータベースとして保存される。

②データ入力の簡易化

データ入力は対話形式で行なわれ、入力データのデータベース化により極めて簡易に入力ができ、また、係留索配置図等の画面出力によりデータを容易に確認できる。

③解析結果出力の多機能化

解析結果出力は、解析結果を様々な観点から分析・利用できるように、数値一覧表示、時刻歴表示及びスペクトル表示が可能である。また、解析結果と動揺量及び係留索張力の管理値とを比較することにより、係留可否の判定を行うことができる。さらに、解析結果はデータベースに保存され、バースの管理・運営・計画等で有効に活用できる。

(2)データの種類

本システムの入力データと出力データの種類は以下の通りである。

a)入力データ

本システムが解析に必要とする入力条件は、気象・海象条件、バース・船舶条件である。気象条件はバース位置の風向、風速であり、海象条件はバース位置の波向別の波高の周波数スペクトルであり、これらは港外波浪特性値伝送システム及び港内波浪推算システムの解析結果より自動的に入力される。また、バース・船舶条件は、船舶諸元、バースの防舷材および係留索の配置等であり、これらはデータベース化されているため、船名及びバース名を指定することにより自動的にシミュレーションに必要な条件が入力される。従って、システム利用者は、最小限のデータ入力により予測システムを使用できる。ただし、船舶の諸元が明らかな場合には、これを入力することにより精度が良い推算値が得られる。

入力データの一例として、原油タンカーバースに着桟する24万DWT級タンカーの場合の入力データを表-7に示す。また、入力画面の一例を図-22に示す。

b)出力データ

本システムの出カとして港内波浪分布、係留船舶の動

表-7 入力データの一例

Input Items		Input Data
Ship Conditions	Kind of Ship	Oil Carrier
	Draft;d	15.45m
	Length;L	325m
	Depth;D	28.5m
	Dead Weight;DW	243,850t
Wave Condition	Wave Height; $H_{1/3}$	1.5m
	Wave Period; $T_{1/3}$	12.0sec
	Wave Direction; θ	202°
	Spreading Parameters	75
Wind Condition	Wind Speed;V	5.0m/sec
	Wind Direction; θ	225°
Rope	Head,Stern Line	Manila heap Rope; ϕ 75
	Breast, Spring Line	Wire Rope; ϕ 42

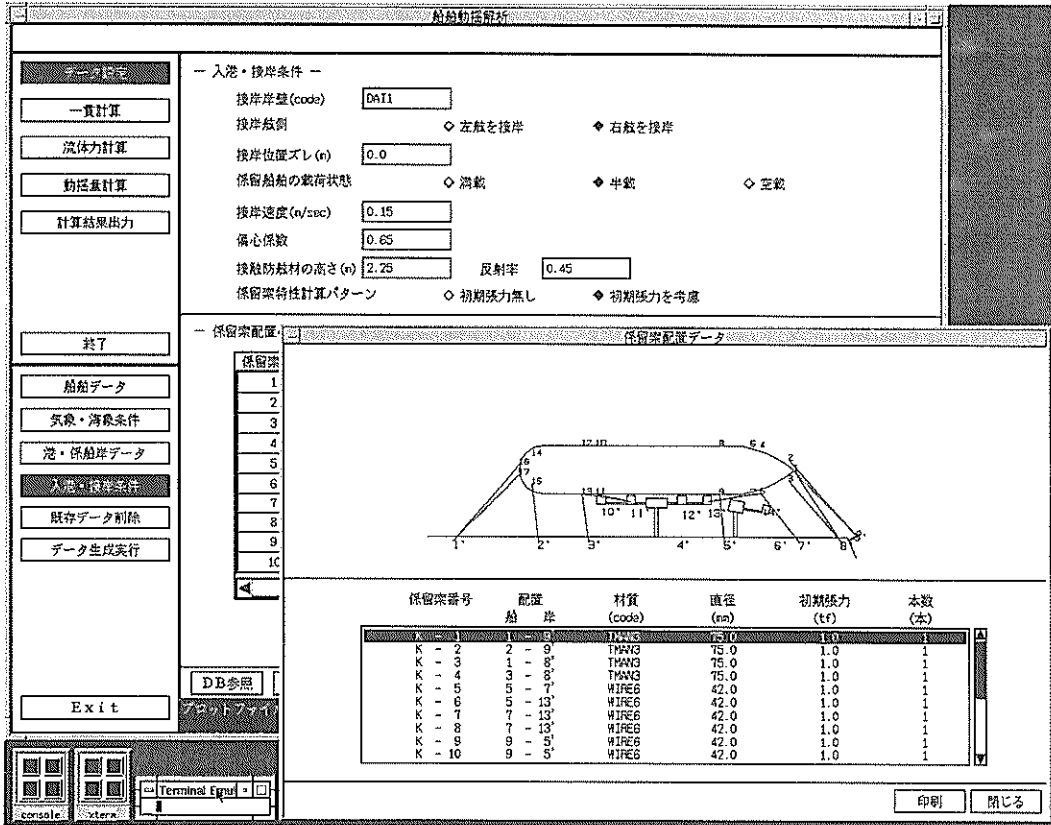


図-22 入力画面の例

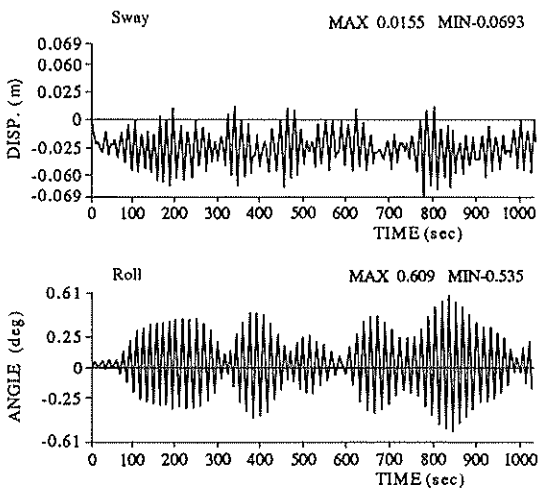


図-23 解析結果の時刻歴表示

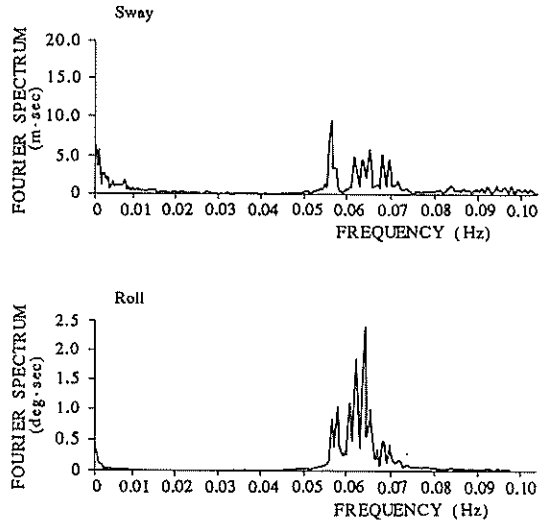


図-24 解析結果のスペクトル表示

表-8 解析結果の数値一覧

Motion of Ship						
	Management value (m,deg)	Max (m,deg)	Min (m,deg)	Ave (m,deg)	$A_{1/3}$ (m,deg)	$T_{1/3}$ (sec)
Surge (U_x)	±1.50	0.04	-0.01	0.01	0.03	17.8
Sway (U_y)	+0.75	0.02	-0.07	-0.03	0.06	15.6
Heave (U_z)	±0.50	0.04	-0.04	0.00	0.06	15.2
Roll (θ_x)	±3.00	0.60	-0.53	0.03	0.83	16.1
Pitch (θ_y)	±1.50	0.03	-0.03	0.00	0.03	15.9
Yaw (θ_z)	±1.50	0.03	-0.03	0.00	0.04	16.7

Tension of Mooring Ropes				
Mooring ropes	Max (tf)	Ave (tf)	Significant value (tf)	Management value (tf)
head line	5.1	5.0	0.2	10.4
breast line (head side)	20.1	3.7	15.7	39
spring line (head side)	13.0	5.1	10.4	39
breast line (stern side)	24.7	4.4	17.3	39
spring line (stern side)	16.6	3.9	12.8	39
stern line	5.1	5.0	0.2	10.4

Reaction of Fenders				
Fender	Max (tf)	Ave (tf)	Significant value (tf)	Management value (tf)
Main dolphin (head side)	75.3	27.9	75.7	328.6
Sub dolphin (head side)	0.0	0.0	0.0	105.1
Sub dolphin (stern side)	0.0	0.0	0.0	105.1
Main dolphin (stern side)	84.1	28.2	68.6	328.6

揺量及び係留力の数値一覧、時刻歴、スペクトルが画面に表示される。

画面出力の一例として、表-7の入力データに対する予測システムの解析結果を表-8、図-23、図-24に示す。表-8は係留船舶の動揺量、係留索張力及び防舷材反力の数値一覧表示例であり、あらかじめ入力されたバースの各管理値が解析結果と並んで表示されており、その管理値を満足しない解析結果には警告を表示する機能を有している。原油タンカーバースではローディングアームの作動範囲が係留船舶の動揺量を制約する。このほか、係留船舶の荷役の許容動揺量については、Bruun²⁰⁾、上田・白石²¹⁾が提案したものがある。これらに基づいて動揺量の管理値が決められている。図-23は動揺量6成分のうちスウェイとロールの時刻歴出力例であり、図-24はそれらのスペクトル表示の出力例である。これらの図により、船舶の動揺特性を容易に把握することができる。

7. 利用方法及び留意点

7.1 利用方法

本システムは、港湾管理者あるいはバース管理者が、船舶の係留及び荷役作業の可否判断を行うための支援システムである。ここでは、本システムを利用する際の活用方を述べる。

本システムは以下の目的に活用されうる。

(1)入港予定の船舶の安全係留・荷役の判断

バース管理者は、港外及び港内の海象情報に基づいて入港予定船舶の係留状態を予測し、船舶の入港前に係留及び荷役の可否を判断することができる。また、そのときの港内の気象・海象条件に即した最適な係留方法を選択できる。これにより、気象・海象条件の判断を誤り、船舶を係留したものの、動揺量が大きくなり離れざるを得なくなることは少なくなると思われる。

(2)係留中の船舶の安全係留・荷役の判断

船舶の係留中及び荷役中に気象・海象が変化し、そのままでは係留及び荷役の継続が困難になることがある。バース管理者は気象・海象の変化に応じて、係留船舶の係留状態を予測し、適切な係留方法を選択することができる。気象・海象条件がさらに悪化することが予想される場合には、荷役作業の中断及び離れざるを適切に指示できる。この場合、その気象・海象条件でも係留可能な港内の他のバースを選定し、そのバースに避泊するよう指示することもできる。

このように、本システムは、荷役の安全性の向上、係留避泊可能なバースの指示など、港湾管理に大きく貢献

する。

(3)拡張した利用方法

本システムは、前述のような荷役の安全性の向上などを主目的にしたものであるが、港湾計画におけるバース配置を決定するための検討や港湾工事に用いる作業船の安全性の検討などにも用いることができる。また、近年、日本国内で数多く提案されている港内の浮体構造物を利用したレジャー施設などにおいては、荒天時の動揺量及び係留力の把握及び、それに対する安全性の確保が重要であり、これらの管理に対しても本システムを有効に利用することができる。

7.2 利用に対する留意点

(1)港内波浪推算システム

港外波浪伝送システムにより得られる海象データは、港口から離れた海域のデータである場合がある。この場合は、波浪観測点から港口までの波浪変形を計算し、港口部における波向、波高、波周期を求める必要がある。この波浪変形計算を本システムに組み込むことは可能であるが、現時点では組込んでいない。そのため、本システムの仙台新港への導入に際しては、あらかじめ波浪変形計算を大型電子計算機を用いて行ない、波高観測点と港口部の波高比及び周期比を求めてこれをデータベース化してシステムに組込んだ。将来的には波浪変形計算を本システムに導入する計画であるが、この場合にも波浪変形計算に時間がかかる場合には、港口部に至るまでの波向、波高、波周期の変化率を予め求め、その結果をデータベース化してシステムに組み込んでおくような方法も採用できる。

(2)船舶動揺推算システム

船舶動揺量の推算精度を向上させるためには、対象船舶の重量、重心、係留ラインの特性などを正確に入力する必要がある。このために、システムの導入前に、入港予定の船舶を十分に調査して、システム内に船舶諸元のデータベースを作成しておき、利便性を向上させる必要がある。

8. あとがき

本報告では、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。

本システムは平成5年8月、現地に設置され、船舶の着積の可否の判定に活用されている。今後、併設されて

いる動揺計測システムによる船舶の動揺量及び係留索の張力の観測結果と本システムによる予測計算結果とを対比し、システムの改善を計った上で、その結果を第二報として報告する予定である。

このシステムは、対話形式で入出力を行うが、入力極めて簡易化されているので、専門的な知識がなくても利用が可能である。したがって、今後以下の場合にも活用され得ると考える。まず、台風等荒天時における港内船舶の安全係留である。日本においては、現在、台風時にはおおむね1000GRT以上の船舶に対して港外退避勧告が出されている。しかし、入港船舶の増加などにより湾内に十分に避泊錨地を確保できなくなっているところから、港内避泊対策が検討されている。本システムを活用することにより、港内避泊におけるバース割り当て、係留索の補強の勧告などが適切に行なえる。つぎに、近年日本においてはウォーターフロントの開発が活発に行われ、なかでも浮体構造物をレストラン、劇場、展示場などとして用いるものが多く見られる。この場合にも荒天時の利用条件を適切に把握する必要がある。本システムを活用することにより、浮体構造物の動揺及び係留力がリアルタイムで得られるので、安全対策を適切に講じることができる。

謝辞

本研究は運輸省港湾技術研究所（海洋水理部海象調査研究室、水工部波浪研究室、構造部海洋構造研究室）と大成建設㈱との共同研究（平成元年度～4年度）として実施したものである。本システムの開発に際しては、著者以外にも多数の人が参画した。また、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㈱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。

(1993年11月30日受付)

参考文献

- 1) Ueda, S., T. Nagai, T. Hiraishi, S. Shiraishi, S. Kiuchi and A. Kobayashi: Realtime Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour, 28th International Navigation Congress, 1994.5 (投稿済)
- 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, 1994.1, pp.349~356
- 3) 高橋智晴, 佐々木弘: 超音波式波高計の改良とその効果について, 港湾技術研究所報告, 第21巻第1号, 1982.3, pp.4~29,
- 4) 永井紀彦, 菅原一晃, 橋本典明, 浅井正, 高山知司: 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, 1992.7, pp.327~334
- 5) 永井紀彦, 菅原一晃, 橋本典明, 浅井正: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1991), 港湾技研資料, No.745, 1993.304p.
同様の観測年報として1970年から1990年の観測データに対して以下の資料がある。
No.137, 158, 178, 209, 233, 258, 282, 311, 332, 373, 417, 445, 480, 517, 545, 574, 612, 642, 666, 712, 721
- 6) 永井紀彦, 菅原一晃, 橋本典明, 浅井正: 全国港湾海洋波浪観測20年統計(NOWPHAS 1970-1989), 港湾技研資料, No.744, 1993.247p.
同様の3年, 5年, 10年, 15年統計報として以下の資料がある。
No.208, 234, 401, 554
- 7) 高山知司: 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, 1981.3, 140p.
- 8) Takayama, T.: Computation of Wave Height Distribution inside a Harbour, *Proceedings of International Conference of Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours*, 1985. pp.295~302.
- 9) Bretschneider, C. L.: Significant Waves and Wave Spectrum (Fundamentals of Ocean Engineering -Part 7), *Ocean Industry*, 1968.2, pp.40~46
- 10) 光易 恒: 風波のスペクトルの発達(2), 一有限な吹送距離における風波のスペクトル形について, 第17回海岸工学講演会論文集, 1960.11, pp.1~7
- 11) Mitsuyasu, H. et al.: Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy, *J. Physical Oceanography*, Vol.5, pp.750~760.
- 12) 合田良実, 鈴木康正: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, 1975.12, 45p.
- 13) 上田 茂, 白石 悟: 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告, 第22巻第4号,

- 1983.12, pp.181~218
- 14) 上田 茂：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.504，1984.12，372p.
- 15) Hasselman, K. et al.: Measurements of Windwave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deutsche Hydr. Zeit., Reihe A, No.12*, 1973
- 16) Davenport, A. G.: Gust Loading Factors, *Journal of the Proceedings of ASCE, ST3*, 1967.3, pp.11~34
- 17) 日野幹雄：瞬間最大値と評価時間の関係—とくに突風率について—，土木学会論文集，第117号，1965.5, pp.23~33
- 18) 戸川隼人：有限要素法による振動解析，サイエンス社，1975, pp.40~50
- 19) 上田 茂，白石 悟：係留船舶の動揺に基づく防衝工の設計について，港湾技研資料，No.729，1992.6, 55p.
- 20) Bruun, P.: Breakwater or Mooring System?, *The Dock and Harbour Authority*, 1981.9, pp.126~129
- 21) Ueda, S. and Shiraishi, S.: *The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4*, 1988.12, pp.1~61

主要記号表

- a_{ij} : 当該係船岸に入射する波の成分波の振幅
- B : 静水圧的復元力係数
- B : 沖防波堤
- C : 非線形減衰係数
- f : 周波数
- f_p : $S(f)$ が最大となるピーク周波数
- G_0 : $\int_0^\pi G(\theta; f) d\theta = 1$ を満たす定数
- $G(\theta; f)$: 改良光易型の方向関数
- H_{mn} : 港内波高，添え字 m 及び n は，それぞれ m 番目の方向及び n 番目の周波数の成分を示す
- H_{113} : 有義波高
- $H_{0,k}$: 港口部と船舶係留点を結ぶ一方向波の波高
- i : 成向の番号
- j : 成分波の番号

- K : 付加質量及び付加慣性モーメント
- K : 船舶係留点
- k_{ij} : 成分波の波数
- M : 質量及び慣性モーメント
- M : 方向分割数
- N : 線形減衰係数
- N : 周波数分割数
- P : 防波堤先端の点
- P : 波力
- P_0 : 定常荷重を含む高次の荷重
- $P_{ij}(t)$: 波向 i , 成分波 j の入射波(規則波)の波力
- $P_{Rij}(t)$: 波向 i , 成分波 j の反射波(規則波)の波力
- P_{ij}^* : 波向 i , 成分波 j の入射波(規則波)の単位振幅当たりの波力
- P_{Rij}^* : 波向 i , 成分波 j の反射波(規則波)の単位振幅当たりの波力
- $R(x)$: 係留系の反力
- R_H : 沖波に対する港口部の波高比
- R_T : 沖波に対する港口部の周期比
- Q : 港外波浪観測点
- r : 防波堤先端から P までの距離
- $S(f)$: 周波数スペクトル
- $S(\theta; f)$: 波の方向スペクトル
- S_{max} : 波の方向集中度を示すパラメーター
- T_0 : 沖波の周期
- T_{113} : 有義波周期
- W_0 : 港口部の中点と船舶係留点を結ぶ直線
- W_j : 島堤の中点と船舶係留点を結ぶ直線
- x : 変位，ただし， $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ であり， $x_1 = \text{Surge}$, $x_2 = \text{Sway}$, $x_3 = \text{Heave}$, $x_4 = \text{Roll}$, $x_5 = \text{Pitch}$, $x_6 = \text{Yaw}$
- \dot{x} : 速度
- \ddot{x} : 加速度
- y_b : 反射面から係留船舶の重心までの水平距離
- $\Phi_R(r_I, \theta_I)$: 右側に半無限に伸びた防波堤による回折波のポテンシャル
- $\Phi_L(r_{II}, \theta_{II})$: 島堤の右端を堤端とし左側に半無限に伸びた防波堤による回折波の速度ポテンシャル
- $\Phi_I(r_I, \theta_I)$: 防波堤 I によって回折した波の港内点 P における速度ポテンシャル
- $\Phi_{II}(r_{II}, \theta_{II})$: 防波堤 II による回折波の P 点における速度ポテンシャル

- Φ_{in} : 港口進入波による港内点 P の速度ポテンシャル
- ϕ_i : 係船岸に作用する波向 ($\phi_i = \pi/2 - \theta_i$)
- σ_{ij} : 成分波の角周波数
- ε_{ij} : 成分波の位相
- θ : 直線 r と防波堤のなす角度または方向分散式における波の主方向からの偏角
- θ_0 : 沖波の波向
- π : 円周率