

## 技術展望

# ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）の現況と今後の課題

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE JAPANESE COASTAL WAVE OBSERVATION NETWORK (NOWPHAS)

永井紀彦

Toshihiko NAGAI

正会員 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長  
(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**Key Words**: NOWPHAS, waves, wave observation, wave statistics, Tsunami

本論文は、沿岸波浪観測情報の活用目的と波浪観測に関する基礎事項を紹介し、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）に関する最近の下記4項目の技術開発成果を述べ、沿岸波浪観測の現況と今後の課題を示したものである。

- ①波浪観測機器（海象計）の開発・改良（海象計の開発：1989.4—1995.3）
- ②波浪観測統計の信頼性向上と解析結果の統計解析（1993.3メンテナンスマニュアル作成，1996.5同改訂）
- ③津波・長周期波観測（連続データ収集システムの開発）（1993.4—1996.3）
- ④カムインズ波浪・気象情報提供システムの開発（1995.4—1997.3）

## 1. はじめに

波浪は、海洋および沿岸域の開発・利用・防災にあたって、最も特徴的かつ支配的な自然条件である。このため、海域の波浪条件を的確に把握することは重要である。しかし一方、波浪は、その現象が複雑でありかつ海洋上の現象であり、計器による測定が困難であったため、風や潮位などの他の気象海象データに比較して観測の歴史が浅く、実測データの蓄積が少ない。

こうした中で、沿岸・海洋土木に従事する数多くの技術者は、港湾および海岸事業の計画・調査・設計・施工・防災のための必要に迫られて、戦後、我国沿岸の波浪特性の把握に向けて、全力を挙げて取り組んできた。我国の沿岸波浪観測で現在最も汎用的に用いられている超音波式波高計に代表される波浪計の開発、波浪計を全国の各港湾海域に配置したネットワーク波浪観測の実施、観測データの港湾技術研究所での集中的な解析管理、等の一連の活動は、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）と呼ばれている。

本論文は、ナウファスが平成9年度土木学会技術開発賞を受賞し、沿岸波浪観測に関する技術開発がはじめて土木学会の中で評価を得たことを記念して、ナウファスの現況と最新の成果を述べ、沿岸波浪観測の今後の課題

を紹介するものである。

## 2. 波浪観測情報の土木への貢献

波浪観測情報は、多くの場面で、土木事業実施にあたって重要な役割を果たしているにもかかわらず、一般にその重要性が認知されることが少ないのが現状である。以下に、波浪観測情報の活用される場面を紹介するが、従来は、こうした要請に十分対応できるだけの波浪観測データを得ることは極めて困難であった。

### (1) 海洋・沿岸開発計画策定

例えば、港湾計画の策定にあたっては、防波堤等の外郭施設の配置計画を行わなければならない。どういった位置にどの程度の長さの防波堤を配置すればよいかは、港内の静穏度の評価によって決定されることになる。

沖合からの来襲波浪条件を与えれば、数値計算や水理模型実験によって、防波堤の配置に応じて港内の波高や周期がどのように変化するかを、評価することは可能である。しかし、肝心の沖合の波浪条件が、すなわち、どのような方向からどのような波高・周期の波がどんな頻度で来襲するかが、明らかにならなければ、年間を通じての波高や周期が許容値以下となる日数、すなわち港湾の稼働率を、適切に評価することができず、合理的な港湾計画を策定することができない。

## (2) 海洋・沿岸の施設（構造物）の設計

土木構造物の設計にあたっては、設計外力を適切に見積もらなければならないことは言うまでもないが、波浪は、海洋・沿岸構造物に作用する最も支配的かつ特徴的な外力であるため、設計対象外力（設計波）の波高・周期・波向の合理的な算定が重要となる。このため、長期間の波浪（特に高波）の観測データの蓄積をもとに、極値統計解析を行い、設計波を設定しなければならない。

## (3) 施工

海上工事では、来襲波浪の波高や周期が許容値を超え施工を休止しなければならないことが多い。全体工程の中で、このような休止率をどの程度見込むかに応じて、施工方法が選定されるとともに、積算が行われる。したがって、やはり、長期間の波浪観測統計の裏づけがあって、はじめて、合理的な施工計画を策定することが可能になる。

## (4) 海上工事の安全管理

波高・周期・波向などの波浪実況の把握は、工事安全管理情報の基本である。一般に、海上作業（係留荷役やケーソン設置）は2—3日間の連続工程となることが多く、また一度作業に着手すると中断が困難となることが多い。すなわち、施工時の安全管理が重要である。安全な施工を行うためには、波浪観測実況情報に加えて、観測データに基づく波浪予測情報が、重要な役割を果たしている。

## (5) 災害対策その他の調査研究

海洋・沿岸構造物の被災の原因究明にあたっては、波浪・高潮・津波などの外力条件の正確な把握が重要である。このため、波形記録の確実な取得が、災害の原因究明に直接役立つものとなる。復旧計画策定にも、地域防災計画策定にも、過去の災害記録が、活かされている。

# 3. 波浪観測の基本事項

## (1) 概要

波浪観測成果は、通常、波高、周期、波向といった諸元にとりまとめられる。これらのうち、波高と周期は、海面の上下変動量を1点で観測すれば求めることができるので、比較的観測が容易であり、またデータの蓄積も相対的には多い。しかし、波向の観測にあたっては、水粒子の複雑な3次元的な運動を捉えなければならないため、より複雑な多チャンネルの同時観測が必要となる。このため、波向の観測は、波高・周期の観測よりもはるかに困難であり、波向観測の歴史やデータの蓄積もまだ十分とは言えないのが現状である。

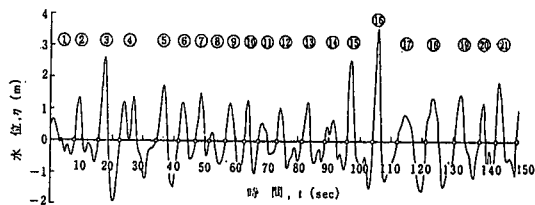


図-1 波浪観測記録の例（文献2より）

表-1 波浪観測記録の解析例（文献2より）

波番号	波高 $H$ (m)	周期 $T$ (s)	波高順位 $m$
①	0.54	4.2	21
②	2.05	8.0	12
③	4.52	6.9	2
④	2.58	11.9	8
⑤	3.20	7.3	4
⑥	1.87	5.4	17
⑦	1.90	4.4	16
⑧	1.00	5.2	20
⑨	2.05	6.3	13
⑩	2.37	4.3	10
⑪	1.03	6.1	19
⑫	1.95	8.0	15
⑬	1.97	7.6	14
⑭	1.62	7.0	18
⑮	4.08	8.2	3
⑯	4.89	8.0	1
⑰	2.43	9.0	9
⑱	2.83	9.2	7
⑲	2.94	7.9	6
⑳	2.23	5.3	11
㉑	2.98	6.9	5

ここでは、波高・周期・波向の概念の紹介を通じて、波浪観測の基本事項を述べる。

## (2) 波高・周期の定義<sup>2)</sup>

図-1は超音波式波高計で計測した、ある特定地点における海面の上下変動の時間的变化であり、波形記録と呼んでいる。この波形記録をもとに、水面が平均水位を上向きに横切る点で波形記録を区切り、その区間を一つの波（これを個別波と呼ぶ）とする。それぞれの個別波の山と谷の差を（個別波の）波高、上記の区間の長さを（個別波の）周期と定義する。

表-1は、図-1をもとに個別波の波高と周期を求めたものである。この波形記録中には21波の個別波が含まれていたことがわかる。

通常、波高や周期として用いられているのは、有義波（1/3最大波）という概念である。すなわち、観測時間中に記録された個別波を、波高の大きい順に並べ、大きい方から全体の個別波数の1/3に相当する数の個別波をとりだし、これらの波高を平均したものを有義波高、周期を平均したものを有義波周期と呼ぶ。表-1から有義波

諸元を算定するため、表中に記載されているように波高の大きい順に順位をつける。そして、全21波のうちの1/3に相当する上位7波を抽出し、波高および周期の平均値を求める。表-1の例では、波番号16, 3, 15, 5, 21, 19, 18の7波の、波高と周期の平均値を求めることになる。

通常、統計的に信頼できる有義波高や有義波周期を算定するためには、100波以上の個別波の中から算定することが望ましいとされているので、ある程度長時間にわたって水面の上下変動を観測した上で、観測波形記録を統計的に処理・解析しなければならない。通常の波浪観測では、1観測について、0.5秒間隔で20分間のデータサンプリングを行い、2400データを取得し、有義波諸元を求めている。

### (3) 波のスペクトル

波浪のように、様々な周期(周波数)を持つ成分が合成された現象を表示するには、一般にスペクトルという概念が用いられる。

様々な周期(周波数)や方向成分のエネルギー分布を表示したものを波のスペクトルと呼んでいる。なお、波の進行方向の不規則性を考えずに、周波数に対するエネルギー分布のみを表示したものを周波数スペクトルと区別して言うこともある。

波浪の特性は周波数スペクトルのみでは十分に記述することができない。各種の方向の成分波の連なり具合を表示するために、方向スペクトルの概念が用いられる。これは波のエネルギーが周波数だけでなく方向についてもどのように分布しているかを表示するものである。

一般に、波浪の方向スペクトルは、式(1)で表現される<sup>3)</sup>。

$$E(f, \theta) = G(f; \theta) \cdot S(f) \quad (1)$$

ここに、 $f$ は周波数、 $\theta$ は方向を意味する。 $S(f)$ は周波数スペクトル密度であり、各周波数毎の波エネルギー(波高の自乗に相当)を示している。 $E(f, \theta)$ は方向スペクトル密度関数あるいは単純に方向スペクトルと呼ばれ、 $G(f; \theta)$ は方向分布関数または方向関数と呼ばれ、方向関数は方向別のエネルギー分布状態を表すが、その関数形は周波数ごとに異なるのが普通なので、周波数をパラメータとして包含する。また、方向関数は次元を持たず、正規化され表示される。

### (4) 波向の定義

上記のように、波の来襲方向を方向スペクトルとして捉えると、波向という概念の定義が複雑になる。通常、波浪台帳に記載されている波向とは、3成分以上の観測値をもとに、方向スペクトルの算定を行うことなく共分散法によって求めることができる値を採用している場合

が多い。共分散法によって求められる波向は、式(1)の $E(f, \theta)$ の、 $S(f)$ によって重み付けされた $\theta$ の平均値にほぼ一致するものであり、平均波向と呼ばれている<sup>4)</sup>。

平均波向は、必ずしも方向スペクトルのピーク、すなわち、 $E(f, \theta)$ が最大値を示す $\theta$ とは一致しない。特に、風波とうねりが共存する2方向波浪場においては、平均波向と方向スペクトルのピーク波向は、大きく食い違うことが多い。

単一のパラメータで複雑な波浪の方向スペクトルを表現することは困難である反面、複雑すぎる波向表記も混乱を生ずる危惧があり、波浪観測台帳における波向の表記方法に関しては、基本的な問題であるにもかかわらず、今後、検討の余地が多く残されている。

## 4. 既存の代表的波浪観測機器とその特徴

### (1) 波高計

#### a) 水圧式波高計

我が国における波浪の定常観測では、1950年代から60年代にかけては、海底における圧力変動を計測する水圧式波高計が最も一般的に採用されていた。

しかし、深海波(波長が水深の1/2以下の比較的周期が短い波)では波による水粒子の運動は海底まで到達しないため、短周期の波に対するほど水圧式波高計の感度は鈍くなる。このため、水圧式波高計で記録される波形は、表面波形そのものではなく、表面波形から短周期成分を取り除いたような形状になる問題点を有している。

すなわち、水圧式波高計では、直接海面の上下変動を計ることはできず、ローパスフィルターを通した観測記録を得ることになる。このため、超音波による直接水位変動計測に比べれば、観測データの精度と信頼性は、低いものにならざるを得ない。しかし、近年、水圧変動から表面波形を精度よく換算する手法が開発・改良され、簡易かつ安価に波浪観測ができる水圧式波高計の活用場面が再び広がりつつある<sup>5), 6)</sup>。

#### b) 超音波式波高計

1960年代になって超音波式波高計(USW)が開発された。USWは、水圧式波高計に比べて直接水面波形が得られる点で有利であることから、ナウファスの主力波高計として、全国各地において用いられるようになった。

USWは、海底に設置されるセンサー、センサーと陸上観測局とを結ぶ海底ケーブル、および陸上観測局に設置されるアンプ(波高計本体)から構成されている。海底または海中の適当な水深位置に固定設置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射し、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

信する。発射から受信までに要した経過時間と、センサーと海面の距離は比例的に対応するため、短い時間間隔(0.5秒程度)で、この経過時間を測定すれば表面波形の測定が可能となる。

砕波などによって海面近くで多くの気泡を巻き込むような条件のもとでは、海面の位置の検出が困難となる欠点はあるものの、定常波浪観測としてはタワーなどを建設することなく比較的安価に精度よく表面波形を直接測定できる長所を有している<sup>7),8)</sup>。

大水深波浪観測地点への適用も可能であり、50m以上の水深を有する地点における設置例も多い。他方、栈橋上部に取り付け、直下の水位変動を計測する空中発射型も実用化されている。

### c) ブイ式波高計

ブイに設置された鉛直加速度計によって、水面の上下運動を計測するものである。水平加速度計を取り付けることによって、波向や方向スペクトルの測定も可能となる長所を有している。データは陸上観測局へ無線で送られるタイプのものが多くケーブル設置工事の必要がないこと、大水深における設置も容易であることなどが長所として挙げられる。このため、海底設置センサーのメンテナンスが困難であるとされる水深50m以深の大水深波浪観測には、ブイ式波高計が採用されることが多い。しかし、加速度の小さい長周期成分の検出はできない短所を有しており、津波などの長周期波の観測に適用することはできない。

## (2) 波向計

### a) ブイ式波向計

鉛直および水平2成分の加速度を測定することによって波向および方向スペクトルを測定するものである。ブイ式波高計と兼ねて、単一のセンサーで波高・周期・波向を観測することができる。しかし、長周期成分の検出はできない問題に加えて、風や係留系の影響によってブイの運動と波に伴う水粒子運動が必ずしも一致しない場合があり、観測波向の信頼性が必ずしも高くはない問題点がある。

### b) 超音波式流速計型波向計(CWD)

超音波式流速計型波向計の測定原理は、超音波が水中の2点間を伝搬するとき、水が流れている場合にはその流速成分に対応して伝搬速度が変化することを応用している。センサー設置水深における水粒子の運動を測定するため、波高が小さい場合や周期の短い波は測定できない。このため、波向の計測を目的とする場合の設置できる水深は30m以浅となることが多い。すなわち、沖波の波向測定はできず屈折の影響を受けた浅海波の波向しか測定できない重要な問題点を有している。しかし、CWDは、ブイ式と異なり表面ではなく海底の水粒子の運動を

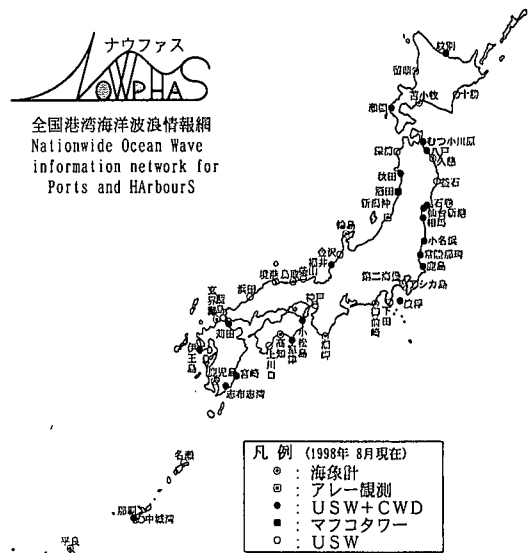


図-2 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)

捉えるので、観測結果の信頼性は高い。

### c) 波高計アレーによる観測

CWDには上述のような問題点があったため、精度と信頼性の高い沖合の方向スペクトルを観測するため、いわき沖および新潟沖では3-4台の波高計をアレー配置する観測が実施された<sup>9),10),11)</sup>。アレー観測は、各波高計による水位変動記録のクロススペクトルをもとに、方向スペクトルを推定するものである。精度と信頼性は優れているが、通常の波浪観測に比べて多大な経費がかかるため、多くの観測地点にアレー方式を導入することはできなかった。

## 5. ナウファスの開発・改良

### (1) ナウファス

図-2は、1998年8月時点におけるナウファス波浪観測地点の分布を示したものである。日本海側および太平洋側それぞれについて、北海道から沖縄に至る我国の沿岸全体に観測地点が分布している状況が理解できる。全国49観測地点で観測されるデータは、運輸省港湾技術研究所で集中的に解析が行われ、1970年以降、毎年欠かすことなく刊行されている波浪観測年報<sup>12),13)</sup>や、概ね5年毎に刊行されている長期波浪観測統計報<sup>14),15)</sup>にとりまとめられ、数多くの関係機関に幅広く活用されている。

### (2) ナウファスの発展の経緯

運輸省港湾局、第一から第五までの各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局、および港湾技術研究所は、2.で述べたような港湾および海岸事業の計画・調査・

設計・施工のための必要に迫られて、戦後、我国沿岸の波浪特性の解明に向けて、多くの努力を払ってきた。

ナウファスは、1950年代の水圧式波高計の開発研究から、その基礎が開始された。その後、今日に至るまで、一貫して、①波浪観測機器の開発・改良、②波浪観測ネットワークの充実、③波浪観測データの収集解析システムの高度化、④波浪観測情報のより一層の有効活用のための研究開発、によって、開発・改良が進められてきた。

1970年当時の初期の段階では、港湾技術研究所のデータ処理・解析システムの制約もあったので、港湾技術研究所でデータを受入れた波浪観測地点数も6観測地点と少なく、また、波高計の機種も海底面における水圧変動を測定する水圧式波高計が主体であった。その後、USW、CWDさらに海象計を主体とした今日の49観測地点を有する波浪観測ネットワークへとナウファスは発展した。

全国の沿岸波浪観測データを集中的に処理・解析・管理するためには、3.(2)で述べたように、1地点1観測(2時間毎)当たり2400個におよぶ膨大な量の観測データを、合理的効率的に収集しなければならない。当初は、PT(紙テープ)にデータを収録することによって開始された。その後、1978年から順次CMT(カートリッジ式マグネティックテープ)に収録する方式に移行した。このCMT郵送方式をさらに省力化し、リアルタイムにデータ収集を行うように改良したものが、1990年になって実用化された電話回線を利用した波浪情報システムである。観測局で取得されたデータは、公衆電話回線を経由して毎観測時間後に収集することが、このシステムによって可能になった。

### (3) 最近の技術開発成果

ナウファスの歴史の中においても、特に、最近の約5年間の間には、以下に紹介するようなめざましい技術開発がなされ、波浪観測データの汎用的な活用が飛躍的に進められた<sup>16)</sup>。以下に、最近の約5年間に行われた技術開発の内容を、下記項目に示す。

#### ①波浪観測機器(海象計)の開発・改良

(海象計の開発:1989.4-1995.3)

#### ②波浪観測統計の信頼性向上と解析結果の統計解析

(1993.3メンテナンスマニュアル作成,1996.5同改訂)

#### ③津波・長周期波観測(連続データ収集システムの開発)

(1993.4-1996.3)

#### ④カムインズ波浪・気象情報提供システムの開発

(1995.4-1997.3)

以下に、上記各項目について解説する。

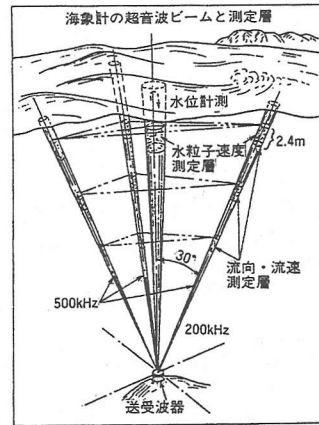
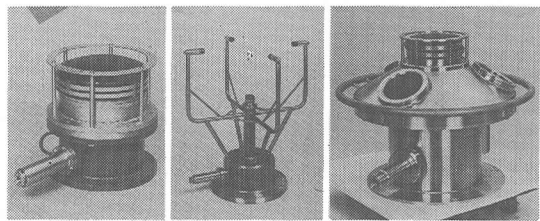


図-3 海象計の測定原理



USW

CWD

海象計

写真-1 USW、CWDおよび海象計の海中検出部

## 6. 海象計の開発

### (1) 海象計開発の経緯

ブイ式波向計は信頼性が十分とは言えない。CWDによる観測波向は、屈折の影響を受けた海底地形に依存する局所的な波向であり、海域を代表する波向とは必ずしも言えない。他方、アレー方式は経費がかかりすぎる。こうした背景によって、センサーは海底面上に設置されるものの、海底面と水表面の中間層における水粒子速度を測定できる観測機器の開発が望まれていた。このため、1989年から1996年にかけて、運輸省港湾技術研究所と(社)海洋調査協会は、民間計測機器メーカーとの共同研究によって、波高・周期・波向を一体的に観測し、なおかつ、屈折の影響を受ける前の沖波(深海波)の波向(方向スペクトル)の観測を単一のセンサーで行うことができる、海象計を開発した<sup>17), 18), 19), 20)</sup>。

### (2) 海象計の波向計測原理

沖波(深海波)の波向(方向スペクトル)の観測を従来よりも簡易かつ安価に行うため、海底設置センサーを用いて海底面と水表面の中間層における水粒子速度を測定できる観測機器の開発が望まれていた。海象計は、こうした期待に応えたものである。

図-3に、海象計の概念図を示す。写真-1は、海象計の

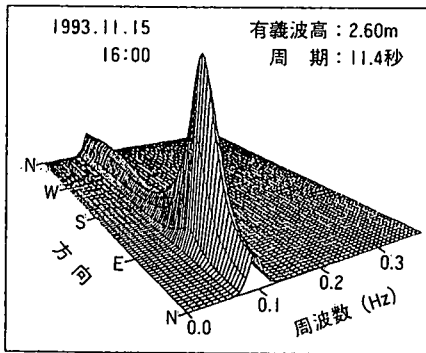


図-4 海象計によって観測された方向スペクトルの例

海中検出部を、4.で紹介した1960年代に開発された超音波式波高計(USW)、および1970年代に開発された超音波式流速計型波向計(CWD)とともに、示したものである。

海象計は、鉛直上方および斜め3方向の合計4方向に、超音波の発信と受信を繰り返し、海面の上下変動(波高・周期)と波浪の方向スペクトル(波向)を、同時に観測することができる。多層式流速計の測定層は任意で、陸上部より設定可能となっている。このため、海底と水面との間の任意水深地点における流向流速の測定が可能となるので、海底面で水粒子の水平運動が観測できない深海海に関しても、波向や方向スペクトルの測定が可能となる。

海象計は、メンテナンス作業の実用的な限界水深とされる最大水深50mまで設置可能な送受波器、陸上の観測小屋内に設置される増幅器・データ演算収録器、および両者を結ぶ海中ケーブルから構成される。海中ケーブルは多重伝送方式をとっているため、観測チャンネル数の増加にもかかわらず、従来のUSWで使用されている4芯ケーブルをそのまま利用することが可能である。

図-4は、海象計によって観測された方向スペクトルの一例を示したものである。

### (3) 海象計の展開

海象計は、1995年に実用化されたばかりの新しい観測機器ではあるが、図-2に示したように1998年8月現在で、ナウファス49観測地点中の9観測地点(留萌、輪島、鳥取、玄界灘、苦小牧、久慈、御前崎、潮岬、高知)にまで導入が進んでおり、ナウファスの主たる波浪観測機器になっている。また、建設省、地方自治体、電力会社等による波浪観測にも、海象計が採用される事例が多くなっており、1998年8月現在で、ナウファス9地点に加えて、さらに全国15観測地点に、海象計が展開されている。

海象計は、多項目の海象観測の効率化への貢献という観点で、海洋土木以外の分野からも評価を受け、(財)日

本水路協会の平成7年度水路技術奨励賞を受賞した。

## 7. 波候統計の信頼性の向上

### (1) 波候統計とは

気象の特性のことを気候と呼ばれるように、波浪の特性のことは波候という用語で表現される。

沿岸波浪観測データから明らかにされる波浪の出現特性は、通常、統計解析によって求められる。ただし、統計解析は、通常、時間的スケールから、短期統計と、中・長期統計とに区分される。ここで、短期統計とは、通常、波浪観測の単位である20分間の間に観測される0.5秒間隔の水位・流速変動記録の統計解析のことであって、例えば、平均波高・有義波高・最高波高の相互の大きさの比などを検討するものとして用いられることが多い。

しかし、通常、波候統計と言う場合は、主として、中・長期間の波浪出現特性の統計を意味しており、1年以上の期間における波浪観測データをもとに、波高の季節変動・経年変動の検討、あるいは波高階級別の波浪の出現頻度分布の海域別・季節別の検討などを意味する。より、長期間の統計、例えば設計などに用いられる50年確率波高の検討なども、波候統計の中に入れて考えることができるが、こうした、実際の波浪観測が行われた期間よりも長い期間を対象として外挿によって確率波の波高や周期を検討しなければならない統計は、特に、極値統計と呼ばれている<sup>21)</sup>。

ナウファス波浪観測データの1970年以降の蓄積・管理・解析によって、最近になって、ようやく観測データに基づいた信頼性の高い波候統計の解析が、行われるようになった。この結果、1997年11月の全国統計連合会総会で、ナウファス波候統計は、海洋調査部門では初めての統計の最高峰である大内賞を受賞し、正式に統計の1分野として認知されるに至った<sup>22)</sup>。以下に、波浪観測データの統計的信頼性を高めるための観測機器のメンテナンスと、長期波候統計の解析結果と将来に向けての課題を紹介する。

### (2) 海象観測機器のメンテナンス

図-2に示したように、全国のナウファス波浪観測地点では、日々昼夜、沿岸波浪観測が継続して実施されており、こうしたデータの蓄積によってはじめて波候統計解析が可能となる。したがって、波候統計解析の精度と信頼性は、観測データの精度と信頼性に依存する。

我国の沿岸波浪観測は、4.および6.で述べたように、主として海底設置式の超音波送受波器で行われている。海底設置式の超音波送受波器は、長期間放置しておけば、海中生物等の付着や腐食の影響によって、異常データの混入が次第に多くなることは避けられない。このた

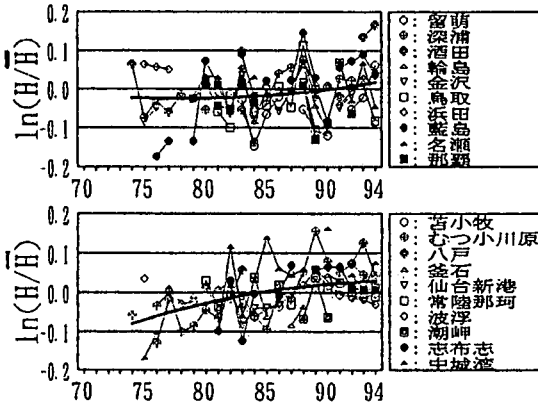


図-5 平均有義波高の長期変動

め、機器の定期的なメンテナンスが重要となる。しかし、従来は機器のメンテナンスは、それぞれの波高計・波向計を管理する担当者の個別判断にゆだねられており、メンテナンスの実施内容や頻度は、観測地点毎に大きく水準が異なっていたのが実態であった。

こうした状況をふまえて、それまでのメンテナンス事例をふまえた上で統一的な基準（メンテナンスマニュアル）をとりまとめ、1993年以降、ナウファス各観測地点の機器メンテナンスを、計画的に統一基準に基づいて実施することとなり、観測データの統計的信頼性の向上をめざすこととなった。メンテナンスを一括実施する、(社)海洋調査協会では、有識者を集めた審査委員会を組織し、毎年のメンテナンスの向上と合理化に努めている。メンテナンスマニュアルも、毎年のように、見直し改善が進められており、ナウファス波浪観測データの信頼性がよりいっそう、確かなものとなっている。

### (3) 長期波候統計の解析例と今後の課題

沿岸波浪の出現特性を的確に把握することは重要であるが、観測の困難さ故に波浪観測データの蓄積は必ずしも十分とは言えない。しかし、ネットワークとしての沿岸波浪観測開始後25年が経過し、その観測データの蓄積も次第に充実されつつある。日本沿岸で観測された長期間の波浪記録をとりまとめ、沿岸波浪の海域別出現特性を考察し、環境モニタリングとしての波候統計を充実させるとともに、設計波を求めるための極値統計に関する研究が進められている。

図-5は、日本海側・太平洋側両海域の、各観測地点毎の各年の平均有義波高を累年平均値で除して無次元化した値の対数値を示したものである。ここで、各年の平均値のプロットは、当該年におけるすべての月で平均データ測得率が50%を超えた場合のみ行っている。

太平洋側で波が高い年は日本海側で低く、太平洋側で低い年は日本海側で高い傾向が、見られるようである。また、北太平洋の船舶からの波浪目視観測解析結果とも

表-2 極値統計解析における母分布関数の推定例

地点名	N	λ	適合・棄却検定									H <sub>100</sub> (m)	
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	最適	G型
苫小牧	293	21.47	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	6.39	7.48±0.43
むつ小川原	358	16.85	▲	◇	○	▲	●	○	▲	●	○	10.58	10.05±0.53
八戸	431	20.57	◇	○	○	▲	●	○	▲	●	○	9.45	9.45±0.44
宮古	117	11.14	◇	○	○	○	○	○	○	○	6.50	6.50±0.61	
釜石	375	24.11	◇	○	○	○	○	○	○	○	8.30	8.30±0.47	
仙台新港	406	27.40	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	7.15	7.15±0.37
相馬	224	18.59	◇	○	○	○	○	○	○	○	7.23	7.23±0.47	
小名浜	352	27.48	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	9.67	9.67±0.55
常陸那珂	426	29.12	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	8.78	8.78±0.44
鹿島	188	22.60	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	9.71	9.71±0.70
波浮	409	22.67	■	▼	◇	▲	●	○	▲	●	○	9.68	9.68±0.44

注：1)鹿島ではG型分布がDOL基準で棄却限界にあるがMIR基準では最適と判定される。

2)100年確率波高のうちG型分布の±の後の数値は推定値に対する標準偏差である。

記号	分布関数	記号	適合・棄却判定
A	FT-II型(k=2.50)	◎	MIR基準による最適分布
B	FT-II型(k=3.33)	○	MIR基準による次点の最適分布
C	FT-II型(k=5.00)	◇	棄却基準に該当しない分布
D	FT-II型(k=10.00)	▲	REC基準により棄却される分布
E	FT-I型分布	▼	DOL基準により棄却される分布
F	ワイブル分布(k=0.75)	■	両基準により棄却される分布
G	ワイブル分布(k=1.00)		
H	ワイブル分布(k=1.40)		
I	ワイブル分布(k=2.00)		

一致して、1980年代を通じて太平洋側では年平均波高の増加傾向が見られるが、日本海側についても、やはり同様な平均波高の増加傾向が見られる。

こうした経年変動の要因は必ずしもまだ明らかではないが、平均気温や海水温度等の気象海象現象との対応の検討など、多くの課題が残されている<sup>23), 24)</sup>。

### (4) 極値波候統計の現状と今後の課題

極値波候統計は、設計波を選定するための基礎資料であり、長年の波浪観測の成果に基づいて信頼できる極値分布を定めるものである。波浪の極値の母分布関数は、理論的に決めることはできないので、これまでは、観測値に最も適合する分布関数を選択せざるを得なかった。

しかし、選ばれた分布が真の分布関数でない場合には、50年、100年、200年確率波高などに大きな片寄りが生ずる恐れがある。このため、極値波浪統計の母分布関数を見出すことが急務になっているが、10-20年間といったある程度の期間にわたった同一条件での波浪観測データの蓄積がなされるようになったのは、ごく最近のことであり、現在は、実測データに基づく波浪の極値の母分布関数の検討が、ようやく可能になったばかりの段階である。

表-2は、こうした検討の一例である<sup>25)</sup>。太平洋北東岸を対象に、各ナウファス観測地点の極値母分布関数を、記号AからIに示す9種類の候補母関数の適合性の検討を行ったものである。ここに、MIR基準とは、あては

めた分布と観測値との自乗平均誤差が最小となるものを選択する基準を意味している、また、REC 基準とは、相関係数が低い値にとどまっている時は、当該母関数を棄却する基準を意味しており、ここでは、あらかじめ母分布関数毎に求められている相関係数の95%信頼区間を超えた時に、候補母関数は棄却されるものとしている。DOL 基準とは、データ中の最大値が分布関数から予測される範囲を超えた時に、候補母関数は棄却されるものとする基準であり、やはりここでは95%信頼区間を基準とした。

表より、太平洋北東岸海域で最も MIR 基準で選択されることが多く、かつ、REC 基準や DOL 基準で棄却されることが少ない分布が、パラメータ  $k=1.0$  のワイブル分布であることがわかる。

もっとも、表-2の作成にあたっては、欠測データを始めから存在しないものとして扱ったため、欠測データが全観測期間の30%を超える鹿島港観測地点のように、本来含まれるべき高波を除外している可能性の高い地点も多いので、十分な注意が必要である。波浪観測データが欠測である場合、天気図等をもとに波浪推算(数値計算によって波浪を推定すること)を行い、観測値を補足することが必要となる。この場合にも、波浪推算の誤差と信頼性については、観測値に基づく十分な検証が必要である。

現地波浪観測データには、ある程度の欠測は避けることができない以上、波浪推算法の改良などによって、どのように欠測データを補完して極値統計の信頼性を高めていくかが、今後の重要な課題になっている。

### (5) 波浪の方向スペクトル解析

港湾開発は今後ますます大規模化・大水深化する傾向にある。波浪に関する正確で総合的な情報をとらえることは、その計画・設計・施工のいずれの分野においても重要で、今後、現在用いられている有意義波諸元に加えて、波浪を総合的に記述する方向スペクトルの特性把握の必要性が増大していくものと思われる。

ここでは、海象計が開発される前にいわき沖で行われた大水深海域における方向スペクトルの観測事例を述べ、世界でもはじめての沖合波浪の方向スペクトル波候統計を紹介する。

いわき沖波浪観測システム(以後、いわき沖と呼ぶ)は、運輸省第二港湾建設局が1986年10月に完成させた波浪観測システムである。いわき沖の観測局は塩屋崎灯台北東約54km(北緯 $37^{\circ}17'49''$ 、東経 $141^{\circ}27'47''$ )の水深-154mの地点に位置し、天然ガス開発用のプラットフォームの脚を利用して、従来では困難とされてきた沖波の波浪観測を実施した。観測局では、波浪観測機器として4台のステップ式波高計および水圧式波高計の装備

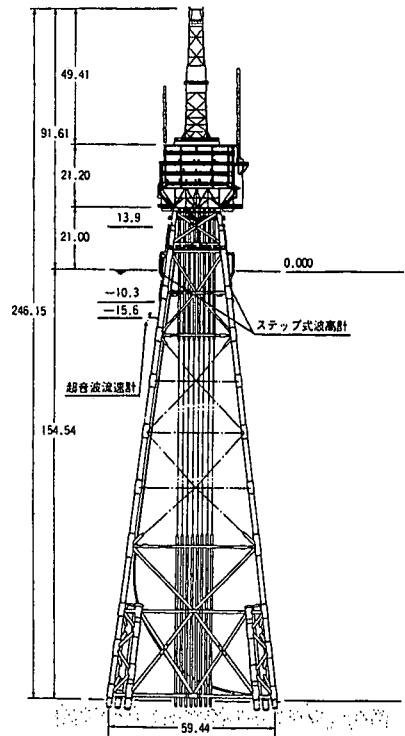


図-6 いわき沖方向スペクトル観測地点

された超音波式の水平2成分流速計が設置され、7成分の観測データを取得した。図-6に、観測地点の概要を示す。

方向スペクトルを波向に関して積分して得られる波向別のエネルギー分布の年別・月別平均値を、図-7に示す<sup>1)</sup>。ここで対象とした方向スペクトルの解析対象期間は1986年10月1日の観測開始から1993年12月31日までの約7年間とした。データの取得は、毎偶数正時前後10分間の計20分間実施し、0.5秒間隔のサンプリングでA/D変換を行っている。方向スペクトルの推定は拡張最大エントロピー原理法(EMEP)<sup>26), 27), 28)</sup>を用いた。

月別の全観測平均エネルギーでみると、10月~3月の秋季の終わりから春期の始めにかけてはE~N系の比較的周期の長い波浪系が、4月~8月にはS~E系の比較的周期の短い波浪系がそれぞれ支配的である。9月は方向別分布は台風の通過経路の時的な違いにより8月と10月の中間的な形状となっている。

比較的波が静穏な時期である5~7月を除いては月別平均値は年によりかなりのばらつきがあり、特に波向別エネルギー分布は、年毎に大きく異なっている状況が理解される。すなわち、方向スペクトルの変動は、主要な気象擾乱の発生に強く依存している。例えば、1991年2月には、台風並に発達した低気圧のゆっくりとした通過により、周期10~14秒、波高4m以上が約4日間も続く



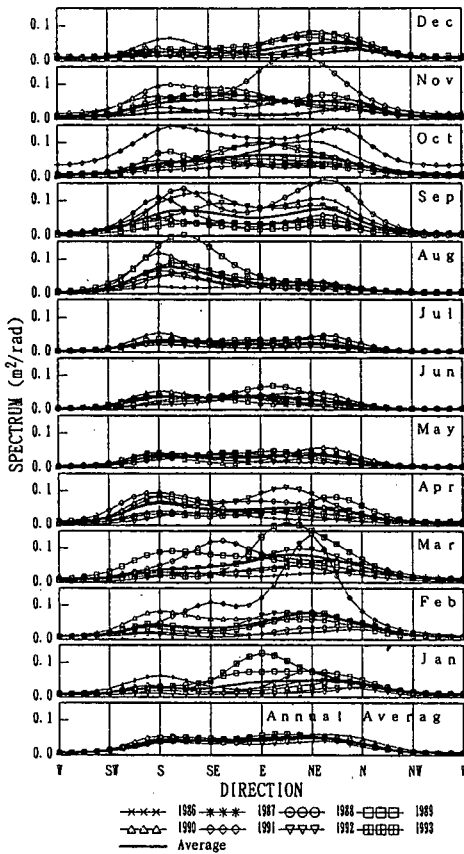


図-7 いわき沖で観測された累積方向別波エネルギー

という2月としては他の年にはみられない大きな気象擾乱が発生した。このため1991年の2月のエネルギー分布は、例年と極めて異なった形状となっている。

このように、一つの擾乱でその月の平均的な方向スペクトルの特性が大きく変動するので、方向スペクトルの季節変動の特性を議論するためには、さらに長期間の観測が必要であると考えられる。

今後は、海象計の展開によって、方向スペクトル波候統計は、いわき沖ばかりでなく、多くのナウファス観測地点で解析可能となる。現在、多くの港湾・海洋構造物の設計にあたっては光型型方向関数<sup>2),3)</sup>が仮定されているが、今後、波エネルギーの方向分布特性が、多くの観測値によって明らかにされ、より合理的な設計に結びつくことが期待されている。

## 8. 切れ目のない連続観測による津波・長周期波の観測

### (1) 津波波形を捉える

津波は、一瞬のうちに沿岸域に多大な人的物的な被害を幾度となく与え続けてきた。最近では、1993年北海道

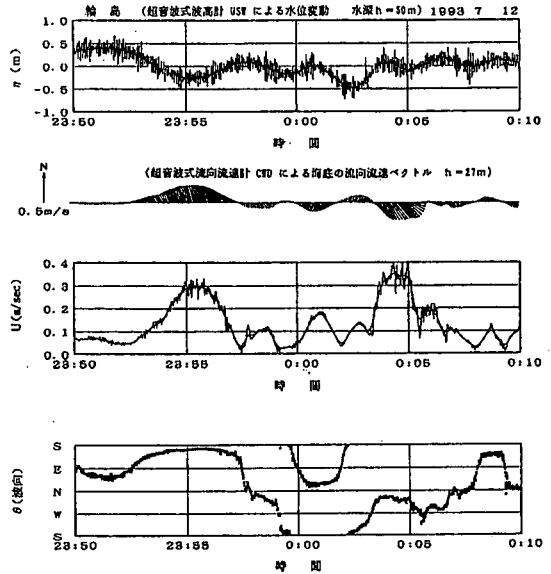


図-8 1993年北海道南西沖地震津波の沖合波形

南西沖地震津波の被害が、多くの人々の記憶に生々しいところである。しかし、津波の実態を、その波形記録から明らかにすることができるようになったのは、ごく最近のことであり、1993年北海道南西沖地震津波より前に発生した津波の現地実測データとして活用されてきたのは、遡上痕跡と検潮記録だけであった。

遡上痕跡と検潮記録は、もちろん津波の実態解明のために重要なものではあるが、十分なものではない。特に、港内の検潮井戸で測定される潮位変動記録は、導水管を経ている水位変動記録であるため、10分程度以下の周期の短い振動成分を正確に把握することは事実上きわめて困難である。このため、沖合における津波の波形記録の取得が重要な意味を持つことになる。

図-8は、津波来襲後の沖合波浪計による津波波形記録の典型的な例であり、1993年北海道南西沖地震津波を輪島港沖合で記録したものである。この地震は、7月12日22:17に発生したものであるが、日本海を伝播したため、23:50から0:10までの輪島港沖合波浪観測時にちょうど第1波目を観測することができたことが、港内の検潮記録との比較によって明らかにされている。

横軸に20分間の観測時間をとり、上から順に、水深50m地点における超音波式波高計によって測得された水位変動 $\eta$  (m)、水深27m地点における流向流速計による水平流れのベクトル表示結果(方向とスケールは凡例の示す通り)、水平流速の絶対値 $U$  (m/s)、水平流の方向 $\theta$  (度)を表示している。秒速0.3m/s以上の顕著な水平流速が2回、記録中に現れている。はじめのピークは23:56頃発生しており、この時の流れの向きはS方向であり、津波の進行方向とは逆向きの引き波であった

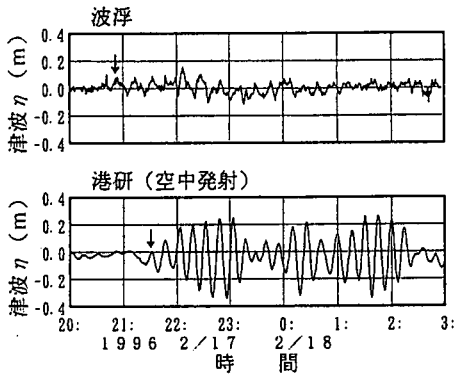


図-9 1996年イリアンジャヤ地震津波の波形記録

ことを意味している。2番目の流速の顕著なピークは、0:04頃発生しているが、この時の流れの向きはN方向となっており、今度は津波が押し波であったことを意味している。引き波と押し波の時間差の2倍を津波の周期と考えれば、津波の周期は約16分と推定される<sup>29)</sup>。

## (2) 切れ目のない連続観測による津波波形捕捉

図-8に示す津波波形記録の取得を契機として、沖合波浪計の津波観測の役割が改めて認識された。そして、従来は、2時間毎に20分間だけ0.5秒間隔でデータをサンプリングすることが一般的であった波浪観測データを、切れ目なく連続的にデータ収集するように観測を実現させることが強く望まれ、システムの増強にすぐ着手した。この結果、その後の1994年北海道東方沖地震津波、1996年イリアンジャヤ地震津波来襲時にあたっては、切れ目のない沖合連続津波観測記録が複数の地点で記録されるようになった<sup>30), 31), 32)</sup>。

図-9は、沖合波浪計の連続観測による津波波形の特性把握事例を示したものである<sup>32)</sup>。図中には、伊豆大島波浮港沖合波浪計と東京湾口に位置する横須賀市久里浜湾(港研:港湾技術研究所)岸壁前面波浪計における、1996年イリアンジャヤ地震津波の、風波成分(周期30秒以下)と潮位変動をとり除いた観測波形記録を、示したものである。

図中の矢印は津波第1波のピークを示すが、波浮では港研よりも40分程度津波到達が早かったこと、港研では波浮に比べて津波が大きく増幅されたことが、示されている。港研における波形は、はじめの数波に関して次第に振幅が増加し、ビート形状を示していることから、共振増幅されていることがわかる。これは、久里浜金谷間の反射モードによる固有周期(15分程度)と津波周期が比較的近かったためである。

こうした沖合波浪計と港内検潮器との一体的な切れ目のない連続観測記録は、津波の伝播・増幅過程を明らかにする重要なデータになっている。

## (3) 見えない波(長周期波)

沖合波浪計の切れ目のない連続的な観測データによって得られる周期の長い波(長周期波)に関する情報は、津波来襲時ばかりではなく常時においても有用であることが期待されている。

最近、従来から用いられている有義波高だけでは、港湾の静穏度が正しく評価できないことが多く指摘されている。有義波高が低く港湾の中の波は穏やかに見える時であっても、長周期波の影響で、港湾内の船舶や作業船の動揺が大きく、係留索が切断して荷役ができなかったり、海上工事の中断を余儀なくせざるを得ない事例が、数多く報告されているためである。長周期波は、たとえ波高が小さくても港湾の静穏度を大きく左右する。これは、長周期波は、港湾の地形に伴う湾の固有周期(数分から数十分のオーダー)、あるいは、船舶の質量と係留索のパネ定数によって生ずる係留系の持つ固有周期(やはり数分から数十分のオーダー)などと共振現象を引き起こすからである。

波浪の長周期波エネルギーと波浪諸元との関係を調べるために、沖合いで観測した有義波高 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 、波の全エネルギー $m_{01}$ 、周期30秒以上の長周期波エネルギー $m_{01-cal}$ の経時変化を図-10に示す<sup>33)</sup>。図には一方向伝播を仮定して2次干渉理論により風波成分から求めた拘束長周期波エネルギー $m_{01-cal}$ も示している。

この事例は、台風通過後、有義波高の低下を確認し係留・荷役を行った時に船体の大きな動揺が観測された仙台新港における事例であり、台風9424号の海象擾乱を対象に、1994年9月17日～20日の4日間のデータを解析したものである。9月17～19日は台風9424号通過に伴い高波浪となり、船舶は沖待たした。台風通過後の20日7:30に有義波高の低下を確認し、係留・荷役開始の判断が行われた。同日13:30に着棧、14:20に荷役を開始した。荷役中の14時から18時の期間中にサージング振幅で約50cmの大きな動揺が発生した。

波浪発達・減衰期の長周期波の特徴として、図中の矢印で示す様に、 $H_{1/3}$ に比べて、 $m_{01}$ の発達が早く減衰が遅いことが上げられる。波浪発達期および減衰期の長周期波と波浪諸元の関係を検討すると、 $m_{01}$ は $m_{01-cal}$ に比べて1～2オーダー大きく、波浪発達期の長周期波エネルギーを2次干渉理論のみでは定量的に説明できない。ここで示した理論値の長周期波エネルギー $m_{01-cal}$ は一方向伝播を仮定して求めたもので、現地波浪の方向分散性を無視したため、現地の拘束長周期波を過大評価していると考えられる。それに関わらず、実測の長周期波エネルギーが $m_{01-cal}$ より大きくなることは、拘束波以外の長周期波の存在を示唆している。

仙台新港で係留船舶に大きな動揺が生じた9月20日は、風波の減衰期にも関わらず長周期波のエネルギーが

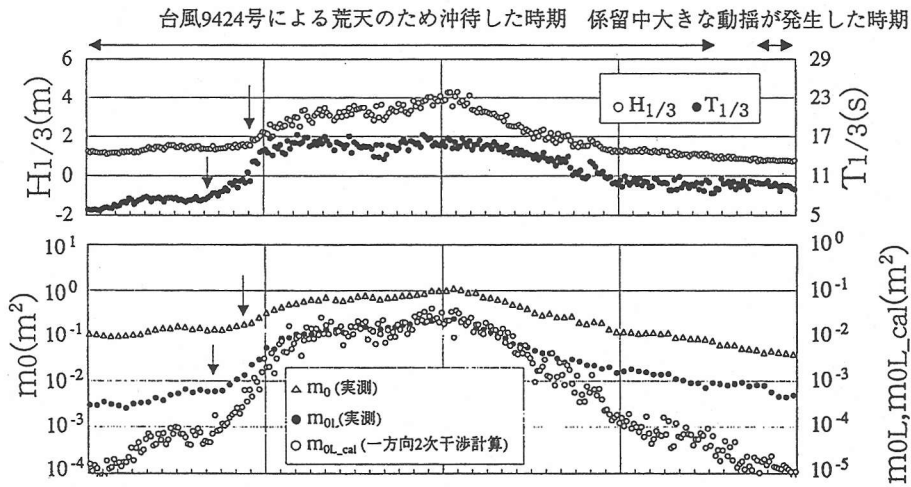


図-10 長周期波エネルギーの経時変化

相対的に大きい時期にあたる。よって、係留船舶の動揺は、風波が低下した後も比較的大きな長周期波が来襲したことにより引き起こされたと言える。

通常、係留開始の判断は港内波浪が所要の波高・周期に低下した後行われる。しかし、上記の検討から、波浪が減衰してもしばらくは長周期波が自由波となって残存する事例が指摘された。よって、波浪減衰期では、風波の波高が低下しても、相対的に大きな長周期波が来襲する可能性があり、係留船舶に大きな動揺が発生する原因となる。よって、係留可否の判断には、「時化が去っても長周期波は残る」という現象に注意する必要があるとともに、今後は長周期波のモニタリングと出現特性の検討を行わなければならない。

## 9. 波浪予測

精度と信頼性の高い波浪予測・実況情報は、港湾をはじめとした海上工事の実施にあたって非常に重要なものとなる。このため、1981年に示された、運輸技術審議会答申第10号では、運輸省港湾局と気象庁が相互に協力をして波浪観測網の整備を行い、観測データのリアルタイム活用をめざす沿岸波浪センター（仮称）を設立することを、目標として掲げていた。

その後、さまざまな紆余曲折はあったが、1995年になって、(財)沿岸開発技術研究センターの中に波浪情報センターが設立された。波浪情報センターでは、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）波浪観測データと気象庁による各種気象海象情報を統合し、精度と信頼性の高い波浪予測・実況情報を提供する沿岸気象海象情報配信システム（カムインズ：COMEINS：Coastal Oceanic MEteoric INformation System）の開発を行い、1997年より運用を開始した<sup>34)</sup>。

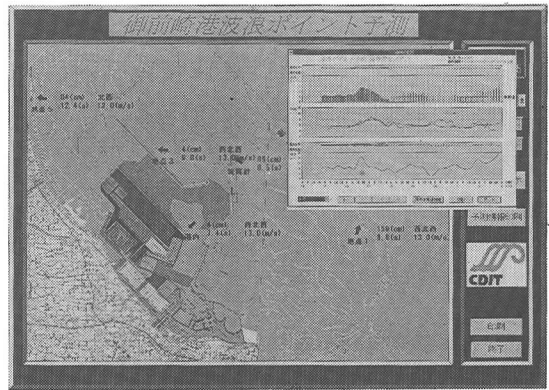


写真-2 カムインズによるポイント波浪予測例

カムインズとは、気象庁が配信する数値気象情報とナウファスによる沿岸波浪観測実況情報を統合したシステムであり、波浪実況情報、波浪・海上風予測情報（ポイント予測も可）、地震・津波を含む各種気象海象情報を、リアルタイム表示するものである。写真-2は、カムインズによって表示される波浪のポイント予測の表示例を示したものである。カムインズは平成9年から本格運用を開始したばかりであるが、写真に示される御前崎港をはじめとして、平成10年3月時点で既に全国20地点にその端末が設置されており、平成10年度中には、全国30以上の地点にその端末が設置される見込みであり、我国沿岸の波浪情報ネットワークの充実がはかられている。

あわせて、カムインズは、日本海重油流失事故にあたってただ1隻しかない外洋油回収船清龍丸の安全かつ効率的な稼働の支援に大きな役割を示した。運輸省第三港湾建設局では、高知県須崎市に大型海象情報表示盤を設置し、カムインズの情報を住民にリアルタイムで示し、津波・高潮・高波災害の防止に貢献している<sup>35)</sup>。

## 10. まとめ

本論文では、ナウファスの現況と最新の成果を述べ、今後の沿岸波浪観測の今後の課題を紹介したが、以下にその要点をとりまとめる。

### (1) 波浪観測情報は、

- ①海洋・沿岸開発計画策定、
- ②海洋・沿岸の施設（構造物）の設計
- ③施工
- ④海上工事の安全管理
- ⑤災害対策その他の調査研究

など、海洋・沿岸土木に広範に要請される重要な情報である。しかし、従来は観測が困難であったために、十分な情報を得ることができなかった。

(2) 波浪観測成果は、通常、波高、周期、波向といった諸元にとりまとめられる。ここでは、波高・周期・波向の概念の紹介を通じて、波浪観測の基本事項を紹介した。あわせて、既存の代表的波浪観測機器とその特徴についても概要を解説した。

(3) 運輸省港湾局、第一から第五までの各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局、および港湾技術研究所は、港湾および海岸事業の計画・調査・設計・施工のための必要に迫られて、以下の4項目をその内容とする全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）を構築・運営している。

- ①波浪観測機器の開発・改良
  - ②波浪観測ネットワークの充実
  - ③波浪観測データの収集解析システムの高度化
  - ④波浪観測情報のより一層の有効活用のための研究開発
- (4) ナウファスの歴史の中においても、特に、最近の約5年間の間には、下記4項目のめざましい技術開発がなされ、波浪観測データの汎用的な活用が飛躍的に進められた。

- ①波浪観測機器（海象計）の開発・改良  
（海象計の開発：1989.4—1995.3）
- ②波浪観測統計の信頼性向上と解析結果の統計解析  
（1993.3メンテナンスマニュアル作成、1996.5同改訂）
- ③津波・長周期波観測（連続データ収集システムの開発）  
（1993.4—1996.3）
- ④カムインズ波浪・気象情報提供システムの開発  
（1995.4—1997.3）

(5) 海象計は、水中超音波信号のドップラー効果を応用したものであり、海底センサーから発信される信号と受信信号の周波数の差を検出することによって、海底と表面の間の任意中間層における流速を検出することができ、大規模なアレー観測を行わなくても、単一センサーによって沖波の方向スペクトルを精度よく算定することが可能となる、画期的な波浪観測機器である。現地実証

実験の結果、その有用性が検証された海象計は、ナウファスばかりでなく、建設省・地方自治体・電力会社等による波浪観測にも、広く採用されている。

(6) 波浪観測データがある程度蓄積されたことによって、沿岸波浪観測データから波浪の出現特性（波候統計）に関する検討を実施することができる条件が、最近になってようやく整った。

波候統計の精度と信頼性を確保するため、ナウファスでは、1993年以降、統一的な基準（メンテナンスマニュアル）をとりまとめ、計画的な観測機器の点検を実施している。1980年代を通じた太平洋側および日本海側で平波高の増加傾向を明らかにするなど、ナウファス波候統計は、地球環境モニタリングにも貢献している。設計波を選定するための極値波候統計にあたっては、実測データに基づく波浪の極値の母分布関数の検討が、可能になった。あわせて、沖合波浪の方向スペクトル波候統計についても、紹介を行った。

今後は、海象計による方向スペクトル観測データの蓄積が進み、波候統計のよりいっそうの充実が行われる見込みであり、より合理的な海洋構造物の設計手法の確立に寄与するものと期待されている。また、波浪観測データには、ある程度の欠測は避けることができないため、波浪推算法の改良などによって、欠測を補完して統計的信頼性を高めることも、今後の重要な課題となっている。

(7) 切れ目のない連続観測による津波・長周期波の観測を実施することによって、沿岸の波浪観測機器は、津波波形を捉えることができる。また、長周期波に関する情報は、津波来襲時ばかりではなく常時においても有用であることを、台風通過前後の大型係留船舶の長周期動揺事例をもとに紹介した。今後は、長周期波観測情報の充実をはかり、長周期波のモニタリングと出現特性の検討を進めていかなければならない。

(8) 精度と信頼性の高い波浪予測・実況情報は、港湾をはじめとした海上工事の実施にあたって非常に重要なものとなる。このため、1981年に示された運輸技術審議会答申第10号を実現した、波浪情報センターが1995年になって設立され、ナウファス波浪観測データと気象庁による各種気象海象情報を統合し、精度と信頼性の高い波浪予測・実況情報を提供する沿岸気象海象情報配信システム（カムインズ：COMEINS：Coastal Oceanic Meteoric Information System）の開発を行い、1997年より運用を開始した。カムインズは、平成10年度中には、全国30以上の地点にその端末が設置される見込みであり、我国沿岸の波浪情報ネットワークの充実が進んでいる。

謝辞：最後に、ナウファスは、運輸省港湾局、港湾建

設局、港湾技術研究所、北海道開発局、沖縄総合事務局の相互協力の下、(社)海洋調査協会や(財)沿岸開発技術研究センター等の多くの関係機関・関係者によって支えられていることを述べ、全国の波浪観測地点で日々よりよい観測データ測得のために努力されている多くの方々に、改めて感謝いたします。また、海象計の開発にあたっては、(株)カイジョーにも共同研究者としてご協力いただいたことを付記し、あわせて感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 永井紀彦：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)、技術最前線、土木学会誌、pp. 9-11, 1997. 9号。
- 2) 合田良実：港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説(増補改訂版)、鹿島出版会、1990。
- 3) Mitsuyasu, H., Tasai, F., Sahara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., and Rikiishi, T.: Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy, *Journal of Physical Oceanography* Vol. 5, pp. 750-760, 1975.
- 4) 合田良実：共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討、港湾技術研究所報告、第20巻第3号、pp. 53-92, 1981。
- 5) 橋本典明、永井紀彦、浅井正、菅原一晃、朴慶寿：波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について、港研報告第32巻第1号、pp. 27-51, 1993。
- 6) 菅原一晃、永井紀彦、橋本典明、鈴木高二朗、清水康男、波間雅晶：波浪監視計の開発、港研資料、No. 860, 25P., 1997。
- 7) 高橋智晴、佐々木 弘、菅原一晃、鈴木福実：超音波式波高計について、港湾技術研究所報告、第12巻、第1号、pp. 59-82, 1973。
- 8) 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、pp. 3-30, 1982。
- 9) 永井紀彦、橋本典明、浅井 正：沖波の方向スペクトルの出現特性(第1報)—いわき沖の観測結果—、港研報告、第32巻、第2号、pp. 45-113, 1993。
- 10) 永井紀彦、橋本典明、浅井正：島による遮蔽を受ける海洋波の方向スペクトルの出現特性—新潟沖の観測結果—、港研資料、No. 783, 21p., 1994。
- 11) 清水勝義、永井紀彦、橋本典明：沖波の方向スペクトルの出現特性(第2報)—いわき沖における7か年方向スペクトル統計—、港研報告、第35巻、第1号、pp. 65-89, 1996。
- 12) 永井紀彦、渡邊 弘、菅原一晃、川口浩二：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 1996)、港湾技研資料、No. 894, 336p., 1998。  
1970年から1995年までの各年の波浪観測年報も港湾技研資料、No. 137, 158, 178, 209, 233, 258, 282, 311, 332, 373, 417, 445, 480, 517, 545, 574, 612, 642, 666, 712, 721, 745, 770, 796, 821, 859として既刊。
- 13) 運輸省港湾局監修／(財)沿岸開発技術研究センター発行：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1997)、1071p., 1998。  
1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996年版も既刊。
- 14) 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か年統計(NOWPHAS 1970-1989)、港湾技研資料、No. 744, 247p., 1993。  
3, 5, 10, 15か年統計報も港湾技研資料、No. 208, 234, 401, 554として既刊。
- 15) 運輸省港湾局監修／(財)沿岸開発技術研究センター発行：全国港湾海洋波浪観測25か年統計資料(NOWPHAS 1970-1994)、1996。
- 16) 永井紀彦：ナウファス(全国港湾海洋波浪観測網)による我国沿岸の波浪特性の解明、港湾技研資料、No. 863, 113p., 1997。
- 17) 高山知司、橋本典明、永井紀彦、高橋智晴、佐々木 弘：水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について、海岸工学論文集、第39巻、土木学会、pp. 176-180, 1992。
- 18) Takayama, T., Hashimoto, N., Nagai, T., Takahashi, T., Sasaki, H. and Ito, Y.: Development of Submerged Doppler-type Directional Wave Meter, *Proc. of the 24th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'94)*, vol. 1, pp. 624-634 1995.
- 19) 橋本典明、永井紀彦、高山知司・高橋智晴、三井正雄、磯部憲雄、鈴木敏夫：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発、海岸工学論文集、第42巻、土木学会、pp. 1081-1085, 1995。
- 20) Hashimoto, N., Mitsui, M., Goda, Y., Nagai, T. and Takahashi, T.: Improvement of Submerged Doppler-Type Directional Wave Meter and its Application to Field Observation, *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'96)*, vol. 1, pp. 629-642, 1997.
- 21) Goda, Y.: Wave Measuring and Utilization of Wave Data, *Proceedings of Sixth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering*, Paper C1477, 1983.
- 22) 永井紀彦：高橋智晴会員 統計の最高峰大内賞を受賞、ニュース、土木学会誌、pp. 71-72, 1998. 1号。
- 23) 永井紀彦：ナウファスによる波浪環境モニタリング、地球ウィンドウズ、土木学会誌、pp. 30-31, 1994. 3号。
- 24) 永井紀彦、清水勝義、菅原一晃、橋本典明、久高将信：長期観測データによる日本沿岸の波候特性の検討、海岸工学論文集、第43巻、土木学会、pp. 221-225, 1996。
- 25) 合田良実、小長谷 修、永井紀彦：極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究、海岸工学論文集、第45巻、土木学会、pp. 211-215, 1998。
- 26) 磯部雅彦、近藤浩右、堀川清司：方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張、第31回海岸工学講演会論文集、土木学会、pp. 173-177, 1984。
- 27) 橋本典明、小舟浩治：最大エントロピー原理MEPを用いた方向スペクトルの推定、港湾技術研究所報告、第24巻、第3号、pp. 123-145, 1985。
- 28) 橋本典明、永井紀彦、浅井正、菅原一晃：海洋波の方向ス

- ベクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張：港湾技術研究所報告，第 32 巻，第 1 号，pp. 3-25, 1993.
- 29) 永井紀彦，橋本典明，浅井正：平成 5 年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報，港湾技術研究所報告，第 32 巻，第 4 号，pp. 51-97, 1993.
- 30) 永井紀彦，橋本典明，平石哲也，清水勝義：平成 6 年 (1994 年) 北海道東方沖地震津波の特性，港湾技研資料，No. 802, 97p., 1995.
- 31) 小舟浩治，永井紀彦，橋本典明，平石哲也，清水勝義：1996 年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技研資料，No. 842, 96p., 1996.
- 32) 永井紀彦：ナウファスによる沖合津波観測，特集：津波と土木技術，土木学会誌，pp. 34-35, 1995. 7 号.
- 33) 永井紀彦，白石 悟，橋本典明，川口浩二，清水勝義，上野成三，小林昭男，東江隆夫，柴田孝雄：現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺，海岸工学論文集，第 44 巻，土木学会，pp. 226-230, 1997.
- 34) 鈴木善光：沿岸気象海象情報配信システム (COMEINS) による情報提供，技術レポート，*Coastal Development*, No. 25, (財) 沿岸開発技術研究センター，pp. 26-31, 1996.
- 35) 永井紀彦：須崎港防災表示盤が完成，ニュース，土木学会誌，p. 61, 1997. 7 号.

(1998. 10. 20 受付)