

港湾工事におけるスペクトル法による波浪予測システムの開発・導入について

Development and Practical Use of Ocean Wave Forecasting System by Spectrum Method for Construction Management of Harbor

小林 正典*・佐々木哲郎*

Masanori.Kobayashi, Tetsuro.Sasaki

In order to manage the harbor construction, the computer system of ocean wave forecast by spectrum method has been developed and practically used for the first time in Japan since Jan.1991, in the project of Haramachi thermal power plant.

In this system, it is possible to forecast ocean wave condition during next three days.

In deciding to do daily works, the probability that the forecast proves right is more than 75%, and the correlation coefficient against the observed values is almost more than 0.7.

This system is useful enough to plan for daily construction works.

Keywords : ocean wave forecast, spectrum method

1. はじめに

東北電力(株)原町火力発電所(石炭専焼, 出力 100万kW×2基)新設工事の港湾関係工事において, 工事管理を目的としたスペクトル法による波浪予測システムを開発, 我が国で初めて本格導入し, 平成3年1月より3日間予測の運用を開始した。

本稿では, この波浪予測システムにおける予測手法と情報処理メニューの概要等についてまとめるとともに, 観測値との比較による予測値の精度について報告するものである。

予測値の精度については, 工事の可否判断に着目した場合, 1日予測が84%, 2日予測が77%, 3日予測が75%であり, 予測波高と観測波高との相関についても高い値を示している。

2. 波浪予測システムの概要

原町火力発電所の新設工事においては, 発電所敷地となる約46haの埋立地前面に, 60,000DWT級揚炭棧橋2バース, 重油・石膏等の3,000DWT級物揚棧橋2バースを有する大型専用港湾を建設する計画となっている(図-1)。

これら港湾工事は, 太平洋に直面した風波とうねりが混在する厳しい波浪条件の下での急速施工が要求されており, 効率的かつきめ細かな工程管理が不可欠であることから, 予測精度・客観性等の向上を目的として, 従来一般的であった現地予測者による有義波法を用いた波浪推算に変えて, スペクトル法によって現地の波浪推算を行う現地パソコンシステムを開発, 我が国で初めて本格導入し, 平成3年1月に3日間予測の運用を開始した。

この波浪予測システム(以下, 「本システム」という。)は, MICOS (Meteorological Information Comprehensive Online Service)・MARINDES (Marine Wave Information and Data Editing System)により情報処理される原町地点の気象・海象予測システムの中の1システムとして組み込まれているものであり, 予測計算は, 気象庁気象資料総合処理システム(COSMETS, Computer System for Meteorological Service)と専用回線で結ばれた(株)日本気象協会で行い, その

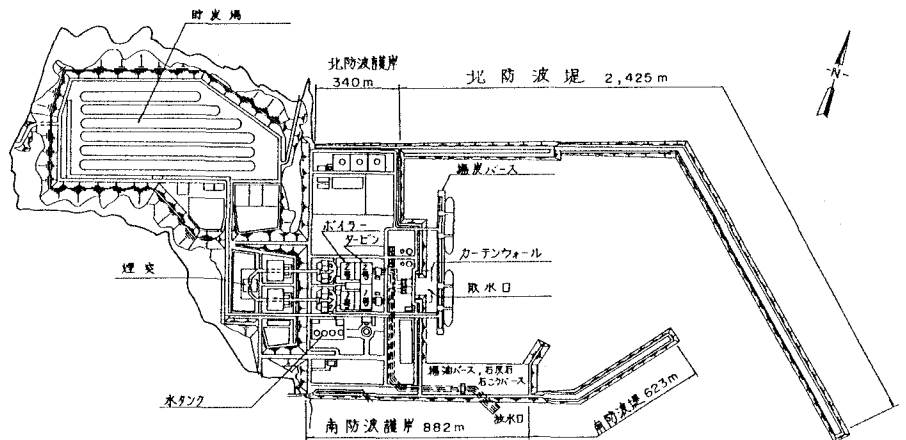


図-1 発電所一般平面図

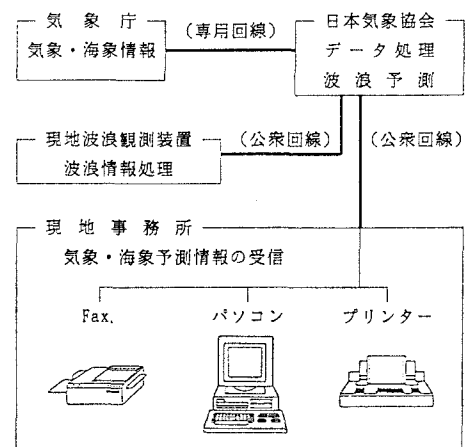


図-2 ネットワーク概要図

* 正会員 東北電力(株)原町火力建設準備本部 (975 福島県原町市上波佐字原田 225-45)

結果が現地のパソコン端末に提供されるシステムとなっている。
 (財)日本気象協会と現地事務所および現地波浪観測装置とはオンラインで結ばれ、現地では、波浪推算を含む各種気象・海象予測情報を随時得ることができるになっている。
 図-2にネットワークの概要を示す。

3. 予測手法の概要

(1) 予測の概要

本システムにおいては、現在、1日1回、向う3日先までの3時間毎の波浪予測数値を求めているが、そのフローを図-3に示す。波浪予測値は、気象庁日本近海48時間波浪予測資料と72時間予想天気図から海上風を計算し、これを入力データとして、スペクトル法による波浪予測数値計算を広領域から狭領域へと行い、さらに原町地点沿岸における変形を考慮した沿岸波浪計算を行うものであり、現地波浪観測装置設置地点（沖合約1.8km）における値を計算する。予測モデルは気象庁のMRIモデルを基本としており、エネルギー平衡方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} S(f, \theta, x, t) = -C_g(f) \cdot \nabla S(f, \theta, x, t) + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad \cdots (1)$$

ここに、

- $S(f, \theta, x, t)$: 成分波の方向スペクトル密度関数
- $C_g(f)$: 成分波の群速度ベクトル
- F_3 : 砕波等によるエネルギー消散
- F_5 : 逆風による消散
- x : 座標ベクトル(x, y)
- f : 成分波の周波数
- t : 時間

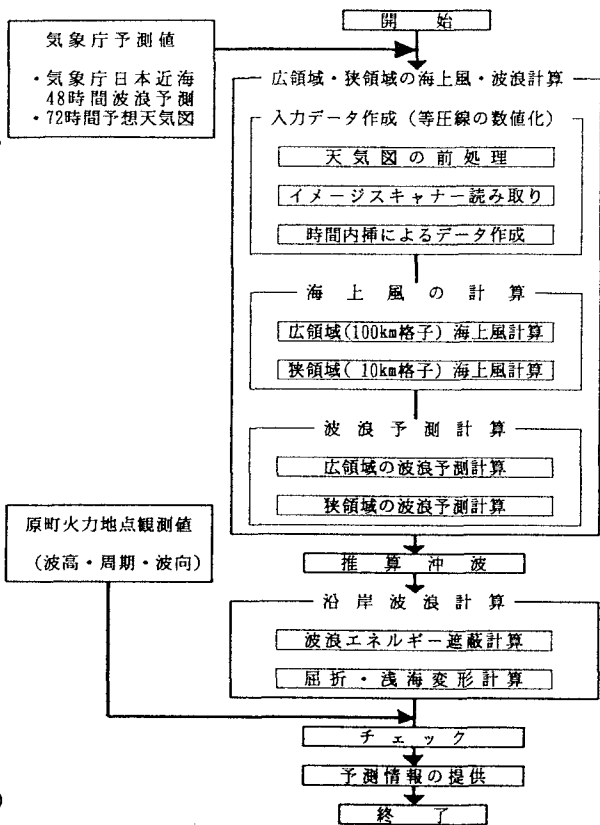


図-3 波浪予測システムのフロー

- F_2 : 風から波へのエネルギー輸送量
- F_4 : 内部摩擦等によって失うエネルギー
- θ : 成分波の方向
- ∇ : 微分演算子($\partial/\partial x, \partial/\partial y$)

(2) 海上風の計算

アジア太平洋地上天気図と海況旬報からイメージスキャナーで画像を読み取り、ノイズ処理等を行った後、気圧・気温・水温の等値線データを作成し、これをもとに格子点上の気圧・気温・水温データを2次元スプライン法により補間する。

海上風の計算は、Cardoneの数値モデルによる地表層における風の鉛直分布を求め、台風域内の気圧・風速の補正はMyersの式で行うCardone-Myersハイブリッドモデルにより高度20mにおける値を求めるものである。

(3) スペクトル法による波浪予測計算

上記の海上風数値計算結果に基づき、広領域および狭領域のスペクトル法（FFT法）による波浪予測計算を行う。本システムでは、(1)式のエネルギー平衡方程式により波浪予測数値計算を行うが、成分波の分割は、

$$\begin{aligned} & (\text{周波数 } f : 22\text{成分}) \times (\text{方向 } \theta : 16\text{成分}) = 352\text{成分} \\ & f : 0.04 \sim 0.25\text{Hz (周期 } 4 \sim 25\text{sec) の間で } 22\text{成分, } \Delta f = 0.01\text{Hz} \\ & \theta : 16\text{成分 (16方位), } \Delta \theta = 22.5^\circ \end{aligned}$$

として計算を行っている。

ソース関数 $F_2 \sim F_5$ を考慮し、(1)式をまとめると、基本的には次の3つの状態で表される。

- ①波が発達する過程では、風から波へのエネルギー輸送と発達に伴う砕波によるエネルギー消散を考慮する。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -C_g \cdot \nabla S + (A + B S) \left\{ 1 - \left(\frac{S}{S_\infty} \right)^2 \right\} \Gamma(\theta) \quad (S \leq S_\infty, \theta < 90^\circ) \quad \cdots (2)$$

- ②波が十分に発達した後では、周波数の4乗に比例する内部摩擦によるエネルギー消散を考慮する。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -C_g \cdot \nabla S - D f^4 S \quad (S > S_\infty, \theta < 90^\circ) \quad \cdots (3)$$

- ③波が伝播途上で逆風を受ける場合においては、波の成長とは逆の効果を及ぼすものと仮定する。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -Cg \cdot \nabla S - \{B\Gamma(\theta) + Df^4\} S \quad (\theta \geq 90^\circ) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 θ は波向と風向とのなす角、 D は定数であり、風波の周波数スペクトルは(7)式のPierson-Moskowitzのスペクトルを用いている。また、 S_∞ は、波の発達に伴って増大する砕波によるエネルギー消散量が風から波へのエネルギー輸送量と平衡し、波の成長が止まる極限の状態におけるスペクトルであり、(8)式で表される。

$$S(f) = 8.10 \times 10^{-3} \frac{g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \times \exp\left\{-0.74 \left(\frac{2\pi U_{19.5} f}{g}\right)^4\right\} \quad \dots\dots(5)$$

$$S_\infty(\omega) = \frac{0.83 \times 10^{-2} g^2}{\omega^5} \times \exp\left\{-0.74 \left(\frac{g}{u\omega}\right)^4\right\} \quad \dots\dots(6)$$

ここに、

$S(f)$: 周波数スペクトル $U_{19.5}$: 19.5m高度の風速 g : 重力加速度
 ω : 角周波数, $\omega = 2\pi f$ u : 風速

AおよびBは風波スペクトルの成長に関する井上の経験式であり、 Γ は $\cos 2$ 乗則に従う方向分布関数である。波浪予測計算は、図-4に示す広領域および狭領域について行い、この計算結果を推算沖波として浅海変形領域における沿岸波浪計算を行っている。

- ①広領域 : 日本を中心とする南北約 4,500km, 東西約 4,700kmの領域, 格子間隔 100km
- ②狭領域 : 千葉県沖から宮城県沖にかけての南北約 380km, 東西約 250kmの領域, 格子間隔10km
- ③浅海変形領域 : 原町地点沖合の南北約50km, 東西約35kmの領域

計算領域のすべての格子点において風も波も全くないという初期条件の下で海上風のデータを与えて計算を開始することとし、境界条件につ

いては、沖合から海岸に到達する波は海岸で反射することなく砕波等によって全てのエネルギーを消散すると仮定し、海岸線より陸側においてエネルギーが0としている。広領域の計算は、日本近海の波浪場の計算から狭領域での計算のための境界値を求める目的があり、狭領域の計算においては、広領域で計算された波高・周期・エネルギー等を狭領域格子点上に内挿したデータを初期条件あるいは境界条件としている。

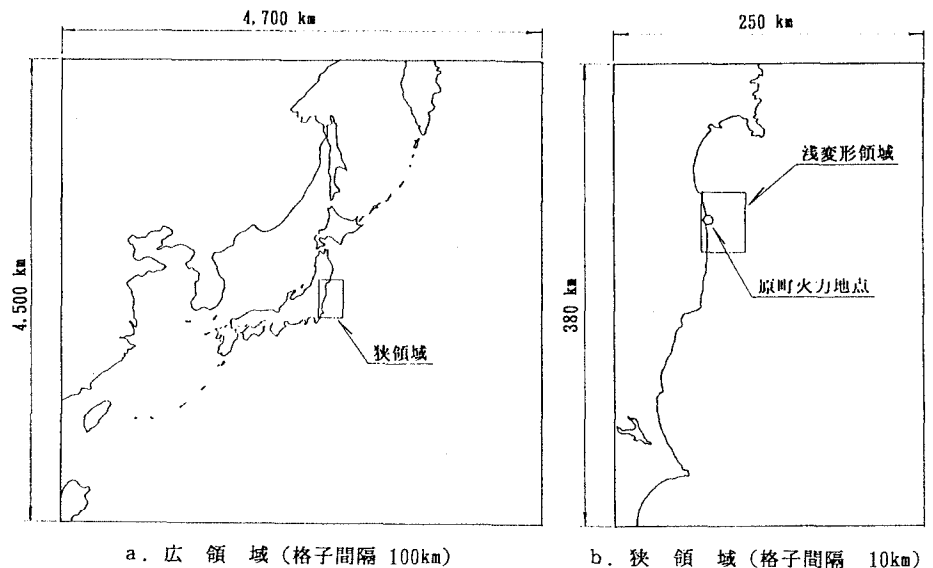


図-4 計算領域

(4) 沿岸波浪計算

狭領域における波浪予測計算結果を推算沖波として、原町地点周辺海域の海岸地形による波浪エネルギーの遮蔽計算、海底地形による波浪の屈折、浅海変形を求め、原町地点の現地波浪観測装置設置地点(沖合約 1.8km)における予測値を計算する。

エネルギーの遮蔽計算には、波浪予測計算と同じスペクトルモデルを用いた伝播計算に基き、また、浅海変形計算には、波の2次元方向スペクトルの浅海変形をエネルギー輸送方程式を用いて数値計算する高山の方法に基づいている。

最終的に、原町地点の予測値(波高・周期)は、浅海変形計算が方向スペクトルの各成分波について行われることから、次式により求められる。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{\sum \sum S(f_i, \theta_i) \Delta f_i \Delta \theta_i} \quad \dots\dots(7)$$

$$T_{1/3} = \frac{1}{0.9 \sqrt{\sum \sum f_i^2 S(f_i, \theta_i) \Delta f_i \Delta \theta_i}} \quad \dots\dots(8)$$

ここに、

$H_{1/3}$: 有義波高 $T_{1/3}$: 有義波周期 $S(f, \theta)$: 方向スペクトル

表-1 気象・海象予測システムの情報処理メニュー

情報処理メニュー	内 容	配 信 間 隔
1. 観 測 日 表	原町地点の波浪観測データより、最高波・有義波の波高・周期・波向・流向・流速・潮位を2時間毎に表示。また、原町地点における過去の波浪観測の全データを検索できる。	2時間毎(偶数時)
2. 観測記録経時変化図	観測日表のデータより、有義波の波高・周期・波向・流向・流速・潮位を2時間毎の値として1画面に7日間の経時変化図として表示。また、原町地点における過去の波浪観測の全データを検索できる。	2時間毎(偶数時)
3. 予測日表・天気概況	波浪予測計算結果より、向う3日間の3時間毎の有義波の波高・周期・波向・風向・風速、天気概況を表示。波浪予測を開始した平成3年1月以降の全予測データを検索できる。	1日1回
4. 波浪予測経時変化図	観測日表および予測日表のデータより、3時間毎の有義波の波高・周期・波向・風向・風速の予測値と観測値を1画面に7日間の経時変化図として表示。	1日1回
5. 波浪予測波高分布図	波浪予測計算結果より原町地点周辺海域の6時間毎の有義波高分布図を表示。	1日1回
6. 天気図・週間予報	実況天気図と向う3日間の毎9時の天気図および週間天気予報を表示。	天気図：1日1回 週間予報：185回(6.9.12.18.21時)
7. アメダス情報	福島・宮城・新潟・山形各県のアメダスデータ(雨量・気温・風向・風速・日照時間)を表示。	毎 時 間
8. 富士山レーダー	富士山レーダーによる雨雲の様子を表示。	3時間毎(悪天時は1時間毎)
9. 府 県 予 報	気象庁発表の福島県浜通りおよび宮城県平野南部の府県予報を表示。	1日5回(6.9.12.18.21時)
10. 注 意 報・警 報	福島県及び宮城県に発令中の注意報・警報を表示。	発 令 時
11. 台 風 情 報	台風の実況図および予想図を表示。	台風発生時随時
12. 地震・津波情報	福島・小名浜・仙台・会津で観測された地震の発生時刻・震度・津波情報を表示。	発 令 時
13. スペクトル日表	原町地点の波浪観測データのスペクトル解析結果より、ピークの上位3波を表示。	2時間毎(偶数時)
14. 波浪スペクトル形状	原町地点の波浪観測データより得られたスペクトル形状を表示。	2時間毎(偶数時)
15. 台 風 情 報 データベース	昭和53年以降に発生した全ての台風について、各年毎に、発生号数、発生・消滅年月日、その間に観測された原町地点の有義波の最大波高・観測日時を一覧表に表示。また、任意の台風について、台風経路図および当該台風発生期間を含む7日間の有義波高・周期、最大波高(観測値)の経時変化図を表示。	
16. 高 波 高 順 位 データベース	昭和53年以降の観測値に基づく有義波高の最大値と高波高の継続期間および発生要因を各年および累年毎に波高順の一覧表に表示。また、高波高継続期間を含む7日間の有義波高・周期、最大波高の経時変化図、高波高の発生要因が台風の場合にはその台風経路図を表示。	

4. 情報処理メニューの概要

本システムが組み込まれている気象・海象予測システムの情報処理メニューの概要は表-1のとおりである。

観測値のスペクトル解析は、施工にあたっての工事用船舶やケーソン等に対する波のうねり成分(長周期成分)の卓越度合いという観点から、作業限界付近の波高における工実施の可否判断を精度よく行うことを目的として導入したものである。

図-5～7に、波浪予測(経時変化図)、スペクトル日表、台風情報データベースの画面の一例を示す。

波 浪 予 測 の 経 時 変 化 図 1991年2月14日～2月20日

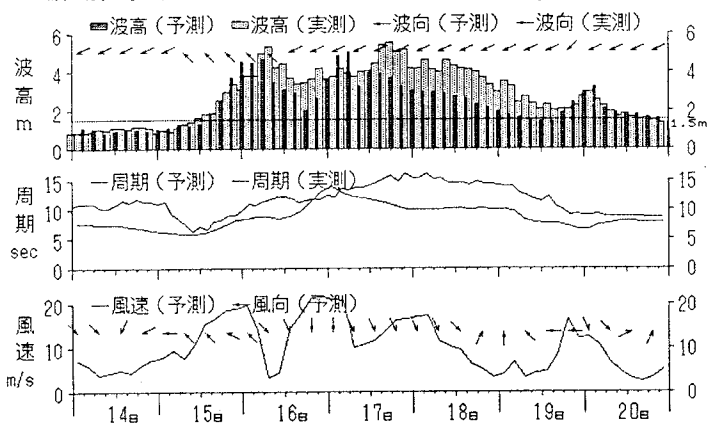


図-5 波浪予測経時変化図

海象観測スペクトル日表

1992年 2月 1日

図-6 スペクトル日表

(例：1992年2月1日)

低気圧が東海上で発達しながら北海道東方へ向けて通過した時のものである。

低気圧が遠ざかるに従い、スペクトルピーク1の周期が長くなっており、うねり成分が卓越していく様子がわかる。

時刻	有義波 H(m) T(s)	波 向	相当波高 (m)	スペクトルピーク 1 H(m) T(s) 波向	スペクトルピーク 2 H(m) T(s) 波向	スペクトルピーク 3 H(m) T(s) 波向
0	1.14 4.7	E	1.14	1.08 4.5 E	0.36 2.7 E	
2	1.74 5.2	E	1.73	1.68 5.3 E	0.41 2.5 E	
4	2.26 6.4	E	2.29	1.78 6.7 E	1.24 5.1 E	0.72 3.3 E
6	2.26 6.8	E	2.31	2.22 7.9 E	0.41 2.9 E	0.48 2.3 E
8	2.36 7.4	E	2.41	2.41 8.0 E		
10	2.79 8.2	E	2.69	2.67 8.5 E	0.31 2.0 E	
12	2.62 8.6	ENE	2.52	2.45 9.0 ENE	0.54 4.1 ENE	0.28 2.4 ENE
14	2.34 9.0	NE	2.26	2.25 9.7 N	0.25 2.2 NNE	
16	2.52 9.1	ENE	2.50	2.50 10.5 NNE		
18	2.28 9.8	ENE	2.42	2.39 11.5 ENE	0.39 2.8 ENE	
20	2.58 11.1	E	2.69	2.65 12.6 E	0.45 3.8 E	
22	3.27 11.6	E	3.51	3.49 11.6 E	0.21 2.6 C	0.29 2.3 E

図-7 台風情報データベース

データベース【台風情報】

1991年 発生号数 29

1991年には29の台風が発生しているが、1例として18号について経路図と波浪観測の経時変化図を示す。

経路図には毎9時の中心気圧と原町地点の観測波高が示されている（例えば図中右上は、20日9時、気圧990mb、波高2.91mである）。

経路図と経時変化図から、台風の進路に伴う波浪の変化がわかる。

号数	発生 m. d. h	消滅 m. d. h	最高波高(cm) (m. d. h)	号数	発生 m. d. h	消滅 m. d. h	最高波高(cm) (m. d. h)
1	3. 5. 9-	3.16.15	163 (3. 9.14)	17	9.10. 9-	9.17. 3	173 (9.13. 2)
2	3.20. 9-	3.27.21	214 (3.23.20)	18	9.14. 9-	9.22. 3	301 (9.20. 6)
3	4.23.15-	4.28.15		19	9.13. 9-10. 1. 9		286 (9.20. 2)
4	5. 6. 9-	5.18.15	178 (5.16.18)	20	9.14. 9-10. 3.15		286 (9.20. 2)
5	6.12. 9-	6.17.15	102 (6.14. 2)	21	10. 3. 9-10.16. 3		405 (10.12. 8)
6	7. 9.15-	7.15. 9		22	10. 4.15-10.14.15		405 (10.12. 8)
7	7.14.21-	7.21. 3		23	10.19.21-11. 3. 9		206 (10.25.20)
8	7.19.15-	7.25.15		24	11. 1. 9-11.15.15		194 (11. 9. 2)
9	7.22. 3-	7.30.21		25	11. 1. 9-11. 8.21		173 (11. 3.14)
10	8.10. 9-	8.19.15	212 (8.19. 2)	26	11. 5.15-11.14. 3		194 (11. 9. 2)
11	8.11.15-	8.18.21	165 (8.18.14)	27	11.14.15-11.20. 9		130 (11.18.20)
12	8.15. 9-	8.25. 3	213 (8.20.20)	28	11.22. 9-12. 3.21		271 (12. 3. 8)
13	8.26. 9-	8.31. 9	158 (8.27. 8)	29	11.27.15-12. 7. 9		271 (12. 3. 8)
14	8.29. 3-	9. 2.21	180 (8.31.12)				
15	9. 2.15-	9.12.15	217 (9. 9.18)				
16	9. 3.21-	9. 8.21	186 (9. 8.14)				

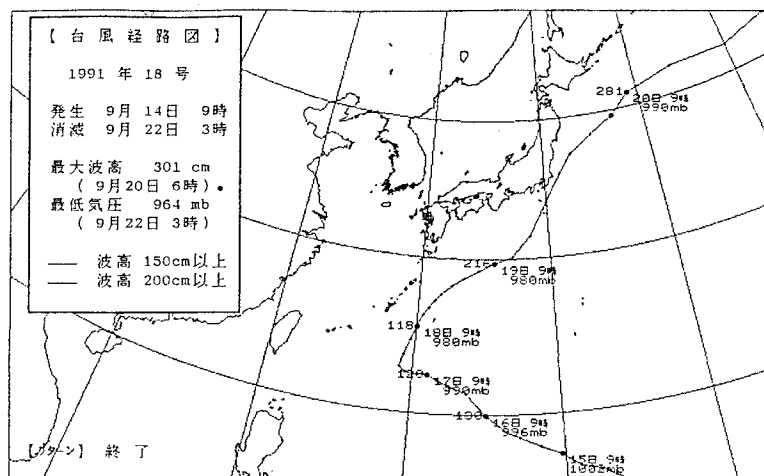
a. 発生台風一覧表

5. 予測値と観測値との比較

本システムが向う3日間の予測を開始してから予測値と観測値との比較を行った。ただし、平成3年1月は予測実績が少ないこと、7月は波浪観測の欠測が多ことから、この2ヶ月については検討対象から除外している。

(1) 工事実施の可否判断について

本システムの目的である工事管理の観点から、工事実施の可否判断に対する予測値の精度を把握するため、原町地点における堤体陸上巻出しの作業限界波高に相当する有義波高 1.5m に対する適中率を以下の方法で求めた。



b. 台風経路図 (例: 1991年18号)

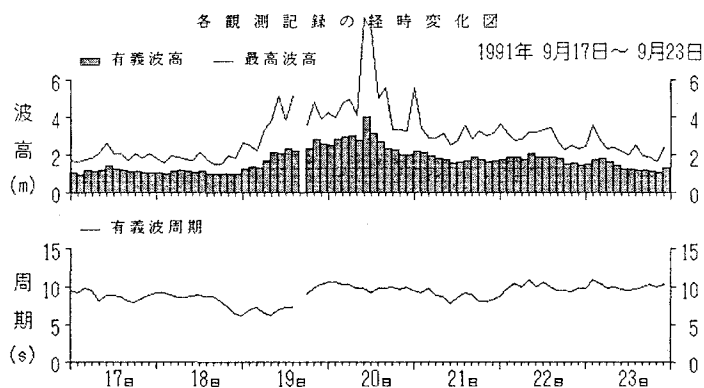
①作業時間帯を考慮し、9時から20時までの間の予測波高と観測波高の最大値を比較する（3時間毎の値として表示される予測波高と観測波高との位相差等による差異を考慮し、作業時間帯内を1データとして扱う）。

②予測波高と観測波高の最大値がともに 1.5 m 以上（予測結果も観測結果ともに作業不可）または 1.5m 以下（予測結果も観測結果ともに作業可）であった場合を「適中」とする。

③予測波高の最大値が 1.5m 以上で観測波高

の最大値が 1.5m 以下（予測結果が作業不可で観測結果が作業可）または予測波高の最大値が 1.5m 以下で観測波高の最大値が 1.5m 以上（予測結果が作業可で観測結果が作業不可）であった場合を「はずれ」とする。

平成3年2月から平成4年2月までの適中率は表-2のとおりである。1日先の予測（1日予測）で84%，2日予測で77%，3日予測で75%となっており、高い適中率を示している。



c. 観測波浪経時変化図 (例: 1991年18号)

表-2 工事実施の可否判断に関する適中率

(単位: %)

	平成 3 年												平成 4 年		計
	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月		
1 日予測	93	89	90	93	72	—	79	72	76	96	74	93	86	84	
2 日予測	93	75	80	63	72	—	79	73	80	76	61	87	90	77	
3 日予測	71	64	80	50	89	—	57	86	67	80	73	87	90	75	

(2) 予測数値の精度について

個々の予測値と観測値のうち、有義波高および周期についての誤差を表－3に示す。周期については、観測値に比較して長周期を予測する傾向がみられ、誤差が大きくなっている。モデル解析を実施した結果、離岸風のエネルギーを風波成分の周期に付加することにより精度の向上がみられることから、システムの改良を行うところである。

また、平成4年1月20日から2月20日までのすべての予測波高と観測波高（有義波）とについて、回帰係数、相関係数を求めた結果を表－4に示す。原町地点においては、うねり成分の寄与の度合いが大きいことから、うねり成分を分離した回帰係数、相関係数も併せて示す。いずれも回帰係数は1.0に近く、相関係数もほぼ0.7以上となっており、統計的誤差の観点からも十分な精度であることを示している。なお、この期間の最大有義波高は3.77m（2月2日、低気圧による）である。

表－3 波 高 ・ 周 期 の 適 中 出 現 率 (単位：%)

		平成 3 年												平成 4 年		計
		2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月		
波 高 波高差50cm以下ま たは誤差30%以内	1日予測	83	84	78	71	65	—	79	67	84	78	78	89	73	77	
	2日予測	80	74	73	78	64	—	78	53	82	68	68	82	77	73	
	3日予測	67	61	82	85	93	—	63	78	59	60	60	80	81	72	
周 期 周期差 2秒 以内	1日予測	38	57	80	75	88	—	79	54	48	29	62	69	59	62	
	2日予測	39	48	75	66	84	—	78	55	39	28	47	61	61	57	
	3日予測	35	44	59	70	81	—	80	55	38	27	44	60	61	55	

(3) 予測精度の向上について

本システムは、気圧・気温・水温等の予測データからの数値解析に基くものであり、予想天気図に依存したものとなっている。従って、台風や低気圧の急激な発達のように気圧配置が短時間に变化する場合、冬季のオホーツク海高気圧の勢力バランスが微妙に変化する場合等には、予想天気図の違いから波高のピークの時間的・数値的ずれを生じやすい傾向が見られる。逆に、これら予測値がはずれたケースについて、予想天気図に変えて実際の天気図を用いて予測計算を行うと、ほぼ観測値に近い予測値が得られることも確認されている。

このようなことから、予測精度のより一層の向上を図るため、

- ①予想天気図からのデータの読取り・数値化に関する誤差を低減するため、平成4年度より気象庁からの提供が予定されているアジア域の格子点数値データ（24～192時間の予報値）の採用
- ②台風発生時における現場での補助的な波浪予測を行うため、現在導入している台風情報データベースを整備してこれまでの台風経路を類型化し、このモデル台風を実際の台風の進路に応じて検索するシステムの構築等のシステム改良を現在検討中である。

6. おわりに

本システムを本格導入して1年が経過したが、これまでのところ十分な予測精度を示しているといえる。原町地点では、平成5年度後半からほぼ3ケ年にわたり、約100函の3,500t級ケーソン据付けを計画している。今後、より一層の予測精度の向上、メニューソフトの充実等と併せて、現在実施している向こう3日間の予測から、ケーソン据付け作業に対応した向う7日間の予測システムへの拡張を行っていく計画である。なお、本システムの構築には、(財)日本気象協会の協力を得ていることを付記する。

－ 参 考 文 献 －

1. 港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版（第2編，第3章）；(社)日本港湾協会，平成元年2月
2. 水理公式集 昭和60年版（p.479～496）；(社)土木学会
3. 太平洋岸における波浪推算手法の研究報告書；(財)日本気象協会，昭和62年3月
4. 海岸工学，新編海岸工学；堀川清司，東京大学出版会，1973年，1991年
5. 原町火力発電所新設工事におけるスペクトル法による波浪予測システムの導入について；小林，佐々木，土木学会平成2年度東北支部技術研究発表会，1991年

表－4 予測値と観測値の相関（有義波高）

	回 帰 係 数	相 関 係 数
1日予測	1.03 (0.98)	0.685 (0.721)
2日予測	1.02 (0.97)	0.776 (0.793)
3日予測	1.14 (1.10)	0.757 (0.779)

注) ()内はうねり成分の値である。