

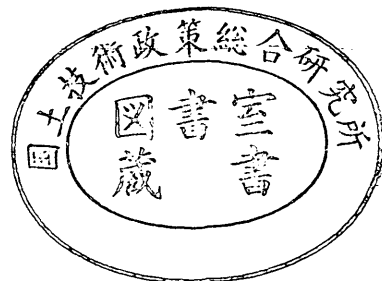
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 31 NO. 2 JUNE 1992

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第31巻 第2号 (Vol.31, No.2) 1992年6月 (June.1992)

目次 (CONTENTS)

1. Numerical Simulation of the Shoaling of Irregular Waves Using a New Boussinesq Model
.....Okey Nwogu, Tomotsuka Takayama and Naota Ikeda3
(新ブシネスモデルによる不規則波の浅水変形計算
.....Okey Nwogu・高山知司・池田直太)
2. 波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験における観測データの解析結果
.....高橋重雄・安達 崇・中田博昭・大根田秀明・加藤久雄・鹿籠雅純.....21
(Field Experiment of Wave Power Extraction Caisson Breakwater
-Date Analysis of Wave Forces and Power Conversion-
.....Shigeo Takahashi, Takashi Adachi, Hiroaki Nakada,
Hideaki Ohneda, Hisao Katoh and Masazumi Shikamori)
3. 単地点出力型スペクトル法による波浪推算システム
.....後藤智明・青野利夫.....55
(A Spectral Wave Prediction System For A Single Point
.....Chiaki Goto and Toshio Aono)
4. 箱型浮体の波浪による断面力の計算法
.....上田 茂・白石 悟・石崎崇志.....75
(Calculation Method of Forces and Moments Induced on Pontoon Type Floating
Structures in Waves
.....Shigeru Ueda, Satoru Shiraishi and Takashi Ishisaki)
5. 地形的圍繞の認識と空間規模との関係に関する研究
.....斎藤 潮・竹下正俊・上島頭司107
(A Study on Human Scale of Space Surround With Hills and Capes
.....Ushio Saitoh, Masatoshi Takeshita and Kenji Ueshima)

3. 単地点出力型スペクトル法による波浪推算システム

後藤 智明*・青野 利夫**

要 旨

台風や季節風による高波をパーソナルコンピュータで推算することを目的として沖波を対象としたスペクトル法による単地点出力型波浪推算システムを開発した。

この波浪推算システムは、風推算の方法により台風モデル推算と傾度風モデル推算の2種類で構成されている。台風モデルを利用した推算では、過去の台風を想定した追算計算および台風の規模・経路を任意に与えた予測計算が可能である。傾度風モデルを利用する方法では、天気図の読み取り結果を入力することにより自動的に海上風、波浪を一貫して推算することができる。また、波推算手法としては、スペクトル法を採用しており、有義波法に比べ、うねりを合理的に取り扱うことができる。

推算結果から、海上風の推算方法により推算特性が多少異なるものの面的な推算結果とほぼ同等な精度を有すること、また、高波浪の波浪追算および台風接近時の高波浪予測などに利用できることなどが明かとなった。

キーワード：単地点出力、波浪推算システム、スペクトル法、台風モデル、傾度風モデル、パーソナルコンピュータ

* 水工部海洋エネルギー利用研究室長

** 水工部海洋エネルギー利用研究室 (科学技術特別研究員)

3. A Spectral Wave Prediction System For A Single Point

Chiaki GOTO*

Toshio AONO**

Synopsis

In order to predict wind waves by typhoon and monsoon, wave hindcast system imagined use of personal computer, which based on a spectral method at single point, has been developed.

The system is divided into two calculation systems by the difference of wind computation method, typhoon wind model and gradient wind model. In the typhoon wind system, it can be easily carried out not only wave hindcast in past typhoon by use of typhoon data base but also wave forecast by estimated typhoon parameter. In the gradient wind system, atmospheric pressure data is given, then a series of hindcast from generation of grid point values of pressure to wind and wave computations are automatically carried out.

The wave model is based on a discrete spectrum propagation of the radiative transfer equation in which the source functions consists of energy change processes originated from momentum transfer between wind and wave. And the model is able to obtain more accurate results for swell propagation compare with significant wave hindcast method.

It is concluded that the system gives same accuracy of hindcast results as conventional models for two dimensional area. And the system would be much avail to practice wave forecast or hindcast because a computation for 5 days weather condition is able to finish within 2 minutes by personal computer.

Key Words : Single point, Wave hindcast system, Spectral model, Typhoon model, Gradient model, Personal computer

* Chief, Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Ocean Energy Utilization Laboratory, (National Institute Post Doctoral Fellow), Hydraulic Engineering Division

目 次

1. まえがき	59
2. 単地点出力型波浪推算システム	60
2.1 システムの構成	60
2.2 台風モデル推算	60
2.3 傾度風モデル推算	61
2.4 支援システムおよびデータベース	61
3. 数値解析手法	63
3.1 台風モデルによる風推算	63
3.2 台風の暴風圏情報と台風定数の関係	63
3.3 傾度風モデルによる風推算	64
3.4 スペクトル法による波浪推算	66
4. 波浪推算システムの適用性に関する考察	68
4.1 推算精度	68
4.2 演算時間	73
5. まとめ	73
参考文献	73
主要記号一覧表	74

1. まえがき

波浪予測、波浪災害の原因究明および港湾構造物の設計波浪算定などを目的とした波浪推算の事例は多い。しかし、波浪推算には、気象データ作成、気象データの格子点補間、気圧値の時間内挿、風推算そして波推算という手順が必要であり、かつ、各手順に比較的多くの演算時間を要する。このような理由により、現地港湾事務所で波浪予測などを目的として推算作業を実施するためには、即時性および簡便性に問題が残されていた。そこで、現地港湾事務所に設置されているパーソナルコンピュータにより、台風や季節風による高波が波浪推算できる波浪推算システムの開発を行った。

システム化した波浪推算モデルは、沖波を対象としたスペクトル法による単地点出力型波浪推算システムであり、これは特定した1地点に着目し、来襲する波浪エネルギーを同地点から放射状に展開した波向線ごとに計算し、総和をとることによって波浪諸元を算出するものである。したがって、2次元的な拡がりのある場を計算する通常の格子点法に比較して、計算点が少なく済み、また、各波向線上の計算点において特定した波向の波浪エネルギー成分のみを計算すればよいという利点がある。

波浪の発達・減衰のアルゴリズムとしては、各種の波浪推算業務に関して実績があることと、単地点出力の演算時間上の利点が生かせる成分波モデルであることから磯崎・宇治¹⁾の開発したMRI法を用いている。ただし、MRI法は特殊な伝播スキームを利用しており、そのまま

では単地点出力型推算モデルに組み込みことが難しい。このため、伝播スキームに関してのみ通常の差分スキームに変更している。

提案した単地点出力型波浪推算システムは、風推算の方法により台風モデルと傾度風モデルの2種類で構成されている。台風モデルを利用した推算では、過去の台風を想定した追算計算および台風の規模・経路を任意に与えた予測計算が可能である。また、傾度風モデルを利用する方法では、天気図の読み取り結果を入力することにより自動的に海上風、波浪を一貫して推算することができる。演算速度の面では、台風モデルを用いた波浪推算であると、32ビットのパーソナルコンピュータを用いて5日間の擾乱を約2分で推算することが可能であり、現地の港湾事務所などで高波浪の概算的な波浪追算および台風接近時の高波浪予測などに利用できるシステムである。

なお、同種の波浪推算モデルに関しては、山口ら^{2),3)}が研究を実施しているが、彼らのモデルに比べ、本システムは演算速度が2倍程度速いこと、一連の波浪推算処理がシステム化されていることなどが異なる。推算精度に関しては、本システムが成分波モデルを採用しているのに比べ、山口らの最新のものがハイブリッド・パラメータモデルを用いている点が異なるものの両者ともほぼ同等であると考えられる。

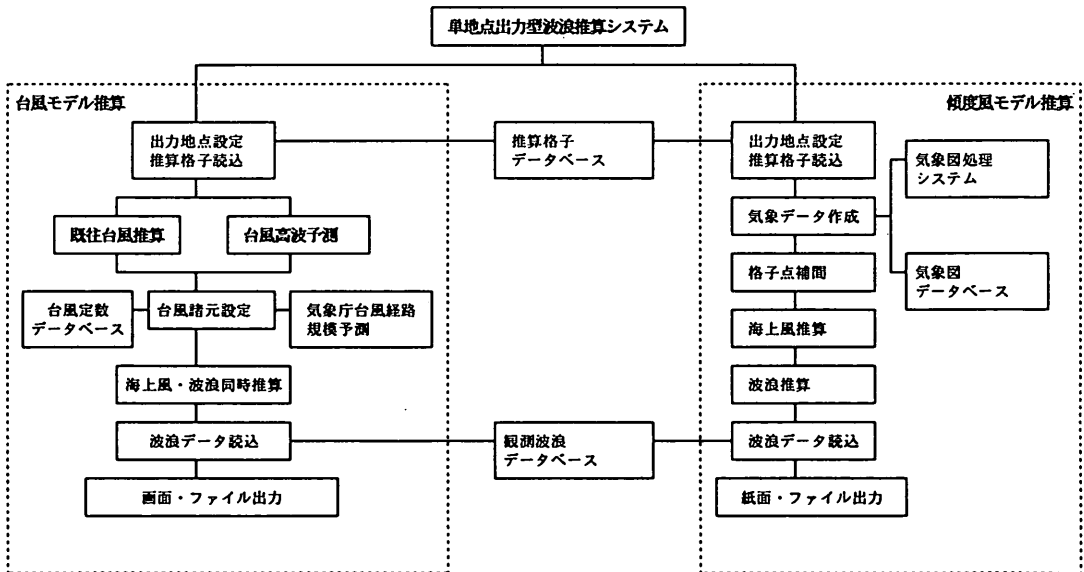


図-1 単地点出力型波浪推算システム

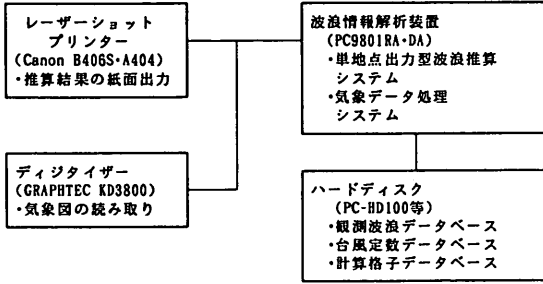


図-2 単地点出力型波浪推算システムの機器構成

2. 単地点出力型波浪推算システム

2.1 システムの構成

単地点出力型波浪推算システムの構成を図-1に示す。システムは、風推算の違いにより、台風モデル推算と傾度風モデル推算の2つに分けられる。また、波浪推算を支援するシステム・データベースとしては、気象図処理システム、気象図データベース、推算格子データベースそして観測波浪データベースがある。

本報では、パーソナルコンピュータのひとつである NEC PC9801DAに組み込んだ単地点出力型波浪推算システムに関して説明する。機器の構成を図-2に示す。パーソナルコンピュータ本体としては、80386の演算チップおよび数値演算プロセッサが搭載されていること、および5メガ程度のメモリの拡張が必要な条件となる。また、本システムを利用するためには、観測波浪データベースの容量が大きいため、パーソナルコンピュータ本体のハードディスク以外に外付けのハードディスクが必要である。さらに、紙面出力のためにレーザーショットプリンター、そして気象図を読み取るためにデジタイザーが必要である。ただし、デジタイザーに関しては、新たに気象図を読み取る場合のみ必要となる。プリンターについては、本システムがLBPLOTというレーザーショットプリンターへの図化出力専用のソフトライブラリーを利用しているためLIPSモードが利用できる機種に限られる。なお、レーザーショットプリンターが用意されていないと、本システムのうち台風モデル推算だけが実施可能となる。

2.2 台風モデル推算

既往台風の推算は、出力地点および既往台風番号を指定すると、計算地点の緯度・経度座標データおよび各計算格子座標を収納した推算格子データベースと6時間ごとの台風の位置と規模に関するデータを収納した台風定数データベースに自動的にアクセスし、海上風と波浪の

推算を同時に実施する。推算結果は台風経路・諸元とともにパーソナルコンピュータ画面に表示され、波浪観測がなされている地点に関する推算であれば自動的に観測波浪の経時変化も出力される。また、推算最大波高出現時に関しては、推算の方向スペクトル、周波数スペクトルおよび方向別エネルギー分布が表示される。

写真-1は、高知沖に関して台風8213号の波浪推算した場合のパーソナルコンピュータ画面を表す。画面には、まず、緯度・経度座標(黄色)、日本海岸線(緑色)、台

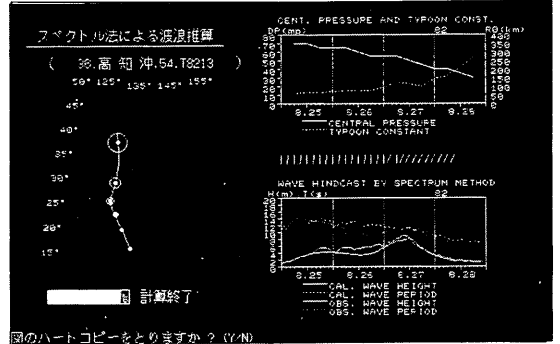


写真-1 既往台風推算のパーソナルコンピュータ画面出力(台風経路と経時変化)

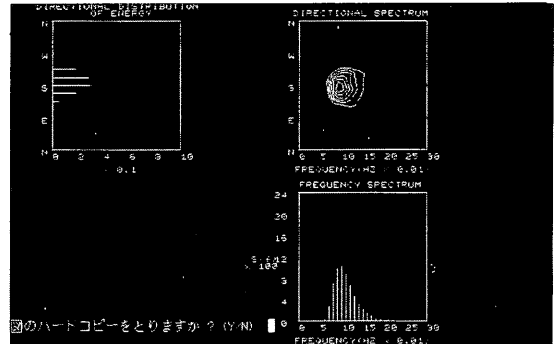


写真-2 既往台風推算のパーソナルコンピュータ画面出力(スペクトルと方向分布)

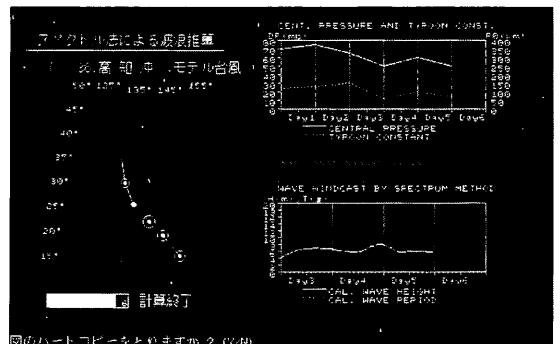


写真-3 台風モデルによる予測計算のパーソナルコンピュータ画面出力(台風経路と経時変化)

風経路 (白色), 台風規模 (白色), 観測波浪の経時変化 (赤色) が表示され, 計算の進行とともに有義波高, 周期, 波向に関する推算値 (白色) が表示される。写真-2 は, 推算最大波高出現時の推算の方向スペクトル, 周波数スペクトルおよび方向別エネルギー分布に関する画面出力例である。なお, 最終的な推算結果の保存としては, 画面のハードコピーまたは推算値のファイル出力が利用できる。

台風の高波予測は, 台風諸元として予想経路および規模をマウスまたはキーボード入力した値を利用して波浪推算するものである。推算方法としては, まず, 入力時間間隔を指定し, 台風の予想経路および規模を必要日数だけ入力する。その後, 自動的に推算が行われ, 写真-3 のような画面出力が現れる。やはり, 写真の右下の白線が推算値を表す。また, この予測計算に関しても写真-2 と同様なスペクトルおよび方向分布が表示される。

なお, 台風の規模に関しては, 藤田⁴⁾の台風モデルにもとづくパラメータ r_0 (台風中心から最大風速出現地点までの半径) と Δp (台風の中心示度) の組み合わせ, または気象庁により予想された台風の暴風圏 (台風中心から風速25m/sの半径) に関する情報が利用でき, 後者を利用すると台風モデルに関する知識を必要としないで現地港湾事務所において簡便に台風による高波の予測が可能となる。

2.3 傾度風モデル推算

傾度風モデル推算は, 天気図の気圧データを用いた波浪推算である。このシステムは, 台風モデルを利用する推算に比べ海上風の計算が複雑であるため, 気象データの作成, 格子点補間, 時間内挿, 海上風推算, 波推算の手順でシステムの構成がなされている。まず, 対象とする気象擾乱に関して気象データを作成する。気象図データベースに収録されていない場合は, 気象図処理システムを利用して気象図を数値化する。次に, スプライン補

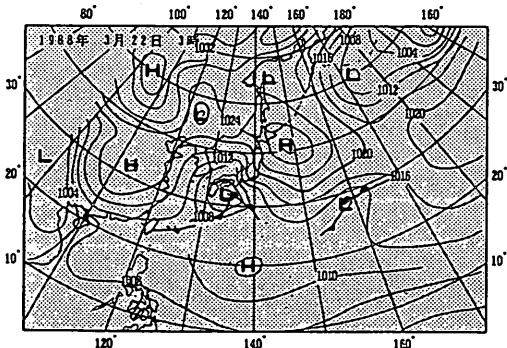


図-3 天気図出力例

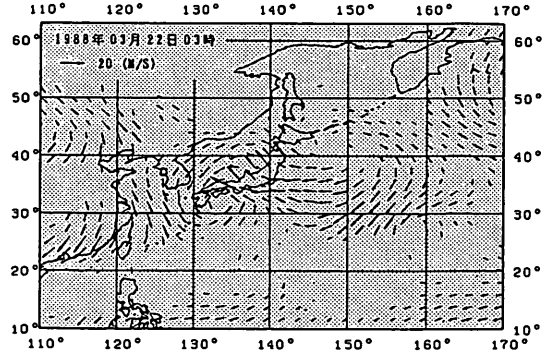


図-4 風ベクトル図出力例

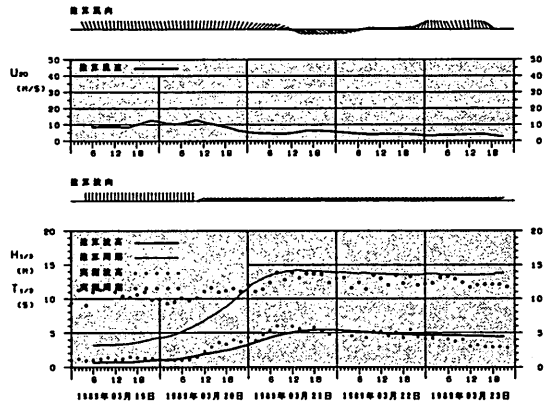


図-5 波浪推算経時変化図出力例

間により推算格子に気圧値が割り付けられ, 気圧値の時間内挿および海上風の推算が行われる。最後に, 推算された海上風を用いて波浪が計算される。以上のような手順が波浪推算に必要であり, しかも格子点補間の演算時間が比較的長いため, 傾度風モデル推算は推算結果をレーザーショットプリンターへの紙面およびファイル出力のみに限定している。ただし, 推算作業の効率化をはかるため, 複数地点および複数擾乱の推算作業を連続して実施可能なようにシステム化されている。

傾度風モデル推算の紙面出力結果の一例として, 日本の北太平洋沿岸に高波をもたらした低気圧に関する気象図, 風ベクトル図およびむつ小川原港の波浪の経時変化を図-3から図-5に示す。図-5の経時変化図において, 実線が推算風速, 風向, 有義波高, 有義波周期を表し, 黒丸・白丸が観測有義波高, 有義波周期である。

2.4 支援システムおよびデータベース

2.4.1 推算格子データベース

単地点出力型波浪推算モデルにおいては, 対象とする出力地点を中心にして放射状に波向線を組み, 同心円状

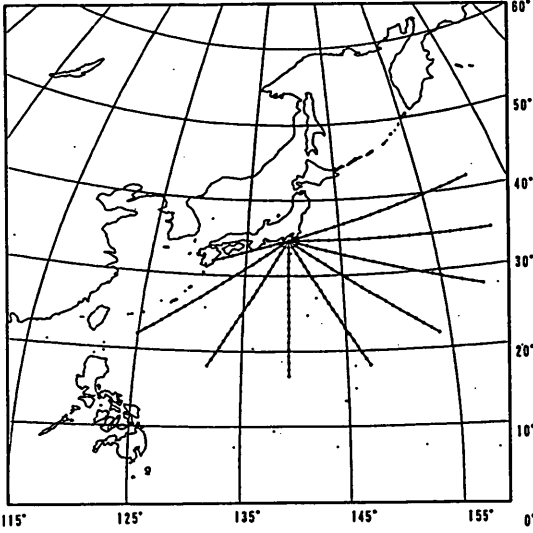


図-6 推算格子の一例 (波浮)

表-1 推算格子データベースの収録地点

1. 留 萌	11. 鳥 取	21. 八 戸	31. 下 田	41. 郷ノ浦
2. 瀬 棚	12. 浜 田	22. 宮 古	32. 御 前 崎	42. 片 泊
3. 深 浦	13. 藍 島	23. 釜 石	33. 潮 岬	43. 小 江 港
4. 秋 田	14. 玄 海 灘	24. 仙 台 新 港	34. 御 坊 沖	44. 脇 崎 港
5. 酒 田	15. 伊 王 島	25. 相 馬	35. 神 戸	
6. 弾 崎	16. 名 瀬	26. 小 名 浜	36. 高 知 沖	
7. 新 潟 西	17. 那 覇	27. 常 陸 那 珂	37. 油 津	
8. 輪 島	18. 紋 別	28. 鹿 島	38. 志 布 志 湾	
9. 金 沢	19. 苫 小 牧	29. 浜 金 谷	39. 中 城 湾	
10. 福 井	20. むつ小川	30. 波 浮	40. 川 内	

の推算格子を設定する。したがって、対象地点ごとに推算格子が異なる特徴がある。図-6は波浮に関する推算格子を一例として示したものである。図中の黒丸が各波向線に沿った計算点を表す。なお、陸地に遮蔽されている波向に関しては描いていない。

推算格子データベースは対象地点ごとの各計算格子点の緯度・経度座標値および各波向線の遮蔽率を収録しているものであり、現在のところ、データベース化されている地点は表-1に示す44地点である。

2.4.2 気象図処理システム

この支援システムは、気象図の読み取りとデータ編集をするものである。気象図の読み取りは、デジタイザーを用いて6時間ごとの極東天気図に記載されている等圧線、前線、台風諸元、低気圧と高気圧の位置を緯度・経度座標として数値化し、ファイル出力するシステムである。写真-4に気象図の読み取り処理に関するパーソナルコンピュータ画面の一例を示す。等圧線、前線を色別に表示し、また、デジタイザーのトレースモードを利用す

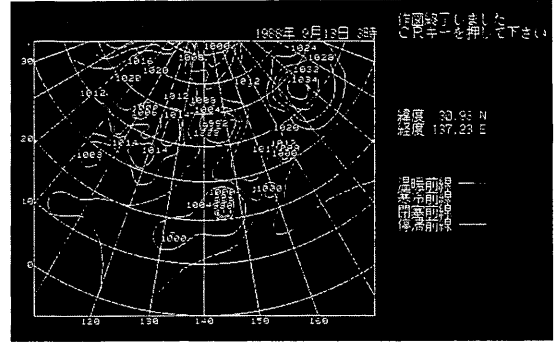


写真-4 気象図読み取り実施中のパーソナルコンピュータ画面出力

表-2 台風定数データベースの収録台風

1. T5313	21. T6303	41. T7505	61. T8719
2. T5405	22. T6309	42. T7506	62. T9019
3. T5412	23. T6420	43. T7611	63. T9109
4. T5415	24. T6515	44. T7617	64. T9119
5. T5522	25. T6523	45. T7707	
6. T5526	26. T6524	46. T7709	
7. T5609	27. T6615	47. T7808	
8. T5612	28. T6619	48. T7912	
9. T5615	29. T6624	49. T7916	
10. T5707	30. T6734	50. T7920	
11. T5710	31. T6804	51. T8013	
12. T5817	32. T6810	52. T8110	
13. T5821	33. T6909	53. T8124	
14. T5906	34. T7010	54. T8213	
15. T5914	35. T7119	55. T8219	
16. T5915	36. T7123	56. T8305	
17. T6016	37. T7209	57. T8310	
18. T6118	38. T7220	58. T8410	
19. T6207	39. T7310	59. T8513	
20. T6213	40. T7416	60. T8613	

るなど人的なミスを軽減する工夫がなされている。また、台風に関しては、藤田モデルにもとづく台風定数の算定プログラムも完備されている。

また、気象図データ編集システムは、6時間単位で数値化したデータを1日単位のデータとして編集し、データベース化するものである。

2.4.3 気象図データベース

気象図処理システムにより作成された気象図データファイルは、5インチフロッピーに収録され、オフライン形式でデータベース化されている。収録形式は面的な波浪推算システムと共通であり、現在のところ、昭和30年以降のデータとして約1,500日分が収録されている。

2.4.4 台風定数データベース

これは、台風モデル推算を支援する目的で開発したデータベースである。6時間ピッチの台風中心の緯度・経度座標ならびに藤田モデルにもとづく台風定数が収録されている。現在のところ、収録したデータは表-2に示す64個の台風である。

2.4.5 観測波浪データベース

推算結果の精度の検証のために、観測波浪データベースが完備されている。本波浪推算システムが起動すると、観測波浪データベースに対し推算期間および地点に関する観測データを自動的に検索し、適合する観測データがあると推算結果と同時に経時変化を図化出力するように設定されている。

このデータベースは、代表波諸元のうち有義波と最高波に関するものであり、日本沿岸で観測された波浪のうち港湾技術研究所において集中解析処理した2時間ピッチのデータが収録されている。期間的には最長もので20年分のデータであり、観測地点数は約40地点である。港湾技術研究所において集中解析処理している観測地点および期間に関しては、毎年出版されている波浪観測年報を参照されたい。

3. 数値解析手法

3.1 台風モデルによる風推算

台風モデルを用いた風推算では、台風の中心位置と台風規模を表現するパラメータがわかれば計算が可能である。台風の気圧分布推定式としては、Myersモデル、藤田モデルなどがあるが、本波浪推算システムでは、気象庁における実績を考慮して、次式で表される藤田モデルを利用する。

$$P = P_c - \Delta P / \sqrt{1 + (r/r_0)^2} \quad (1)$$

ここに、 P は台風の中心から距離 r における気圧、 P_c は台風の中心気圧、 ΔP は中心示度($\Delta P = P' - P_c$)、 P' は台風から遠くはなれた地点での気圧、 r_0 は台風定数(台風中心から最大風速地点までの距離に相当する)である。

気象図処理システムを用いて天気図から台風の中心位置および等圧線を読み取ることにより、式(1)のモデル定数である ΔP と r_0 が計算される。 ΔP と r_0 が求められると任意地点での気圧分布が式(1)から計算され、中心対称風場の風、合成風がそれぞれ以下のように推算される。

中心対称風は、台風が停止していると仮定したときの風で、コリオリ力、遠心力、気圧傾度力が釣り合うと考えた傾度風モデル式(2)で計算することができる。

$$V = \frac{fr}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{\rho f^2 r} \frac{\partial p}{\partial r}} \right] \quad (2)$$

ここに、 r は台風中心から風推算点までの距離、 f はコリオリパラメータ、 ρ は大気密度、 V はスカラー傾度風速で

ある。風向は、台風中心と風推算点を結ぶ直線に直角な方向である。

さらに、式(2)で表される傾度風速は摩擦を考慮していないため、式(3)を用いて傾度風速を海上風速に補正する。

$$V_1 = C_1 V \quad (3)$$

ここに、 C_1 は理想気体の傾度風から海上風への補正係数であり、本システムでは $C_1 = 0.7$ を採用している。また、風向に関しては、風速ベクトルから半時計回りに 30° の補正を行っている。

場の風は、宮崎⁹⁾に従い、台風の移動速度と中心対称風に比例し、かつ台風の移動方向に平行な風であると仮定する。具体的には、台風の移動速度を V_T とすると場の風速 V_2 は式(4)で表される。

$$V_2 = C_2 \frac{V(r)}{V(r_0)} V_T \quad (4)$$

C_2 は比例定数であり、本システムでは、 $C_2 = C_1$ とした。

合成風の風速は、式(3)と(4)のベクトル和として計算する。

このような台風モデルを用いた風推算は、場の風という気圧場の時間変化を取り込み、風推算が簡便かつ高速に行える特徴がある。しかも、台風の気圧分布が同心円で近似できる範囲では、他の風推算手法に比べ精度が同等であると考えられる。そのためパーソナルコンピュータで高速に波浪推算を行うには、最も適した手法であるということもできる。

3.2 台風の暴風圏情報と台風定数の関係

本推算システムでは、台風定数を用いる推算の他に、テレビなどにより比較的入手しやすい情報である台風の中心気圧と暴風圏の半径を用いた波浪の予測手法についても検討している。すなわち、台風定数と暴風圏半径との関係を明らかにし、仮想的な台風定数を算出して風推算を行う方法である。

台風定数と暴風圏の半径との関係は、中心対称風の推定式(2)に気圧分布(1)を代入して、整理することにより求められ、式(5)のようになる。

$$R(1+R)^{-3/2} = \left(\frac{\rho V}{\Delta P} \right) (V + fr) \quad (5)$$

ここに、 $R = (r/r_0)^2$ である。なお、台風中心からの暴風圏

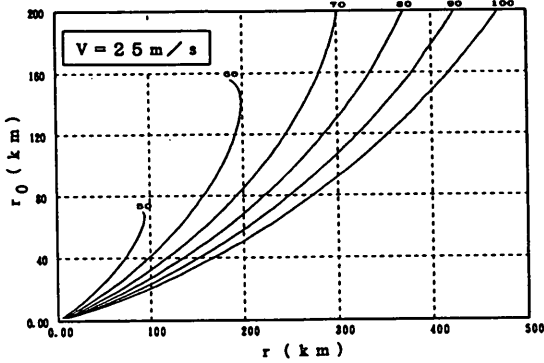


図-7 暴風圏の半径と r_0 の関係

の半径に関する情報は暴風圏の平均的な値であるため、場の風の効果については無視している。本システムにおいては、台風モデル推算において暴風圏情報を選択すると自動的に式(5)を用いて台風定数に換算して推算を実行するようにプログラム化されている。

図-7は、暴風圏半径(台風の中心から風速25m/s以上の暴風域の半径) r が与えられたときの台風定数を式(5)に $V=25\text{m/s}$ を代入し、逐次近似法により算定したものである。図中の数字は、中心示度を表している。中心示度が60以下に関しては、台風定数 r_0 の実数解が存在する範囲のみ図化している。気象予測では、風速25m/s以上の暴風圏の他に風速20m/s以上で定義した強風圏があり、強風圏の情報を用いる場合には、式(5)に $V=20\text{m/s}$ を代入した算定式が利用できる。

3.3 傾度風モデルによる風推算

3.3.1 スプライン法による格子点補間

採用したスプライン補間法は、読み取った気圧線データを拘束条件として、弾性体の微小変位理論に基づく張力と曲げの歪エネルギーを最小にする解を利用して格子点に気圧データを補間するものである。^{6),7)}具体的には、歪エネルギーを最小にする4階の偏微分方程式を誘導し、差分法を用いて数値的になめらかな気圧面を作成する方法である。

(1)基礎方程式

対象とする解析領域 S において、次式で示されるエネルギー E を最小とする曲面 $Z(x, y)$ を定義する。

$$E = \frac{1}{2} \iint_S [(\Delta Z)^2 + \sigma(\nabla Z)^2] dx dy \quad (6)$$

ここに、

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} \quad (7)$$

であり \hat{i}, \hat{j} はそれぞれ x 方向, y 方向への単位ベクトルを示す。式(6)の第1項は歪エネルギーに比例する項で、第2項は張力による伸びエネルギーに比例する項である。 σ はこれらの項の復元力の強さを表し、 $\sigma=0$ で最も滑らかな曲面を、 $\sigma=\infty$ で平面を表す。

式(6)の第一変分を0と置き、部分積分すると、

$$\delta E = \iint_S (\Delta^2 Z - \sigma \Delta Z)^2 \delta Z dx dy + \int_C \Delta Z \delta \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right) dC - \int_C \frac{\partial (\Delta Z)}{\partial n} \delta Z dC + \sigma \int_C \frac{\partial Z}{\partial n} \delta Z dC = 0 \quad (8)$$

となる。ここに、領域 S の境界 C 上で

$$\frac{\partial Z}{\partial n} = \Delta Z = 0 \quad (9)$$

とすれば、式(8)は領域 S 内で式(10)または式(11)のように変形される。

$$(\Delta Z)^2 - \sigma(\nabla Z)^2 = 0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 Z + \sigma \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y} \right)^2 \right] = 0 \quad (11)$$

式(11)において

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = P \quad (12)$$

とおくと式(11)は式(13)とおくことができ、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \sigma P = 0 \quad (13)$$

このとき、境界 C 上の条件式(9)は式(14)となる。

$$\frac{\partial Z}{\partial n} = 0, P = 0 \quad (14)$$

また、 $Z(x, y)$ は N 個の地点で与えられたデータを満足しなければならない。

$$Z(x_i, y_i) = Z_i \quad i=1, N \quad (15)$$

したがって、天気図から得られたデータを用いて、条件式(14)、(15)の下で、式(12)、(13)を連立させて解けば格子点上への内挿が行えることになる。

(2)差分計算

式(12)を2階の中央差分で表示すると式(16)となる。

$$\frac{Z_{i+j} - 2Z_{i,j} + Z_{i-j}}{\Delta x^2} + \frac{Z_{i,j+1} - 2Z_{i,j} + Z_{i,j-1}}{\Delta y^2} - P_{i,j} = 0 \quad (16)$$

ここで、 $\Delta x = \Delta y = h$ とおくと式(16)は式(17)となる。

$$\frac{1}{h^2}(Z_{i+j} + Z_{i-j} + Z_{i,j+1} + Z_{i,j-1} - 4Z_{i,j}) - P_{i,j} = 0 \quad (17)$$

同様に、式(13)は、

$$\frac{1}{h^2}(P_{i+j} + P_{i-j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1} - 4P_{i,j}) - \sigma P_{i,j} = 0 \quad (18)$$

となる。ここで、 i, j はそれぞれ x, y 方向の格子点を示す。

いま、図-8のような格子点上で斜線の領域を考える。図中に P で示したように読み取った天気図データがこの斜線部に存在する場合に、原点を Z_1 とする局所座標 α 軸、 β 軸を考え点 $P(x, y)$ との距離をそれぞれ α^*, β^* とす

ると

$$\alpha = \frac{\alpha^*}{\sqrt{2}h} \quad \beta = \frac{\beta^*}{\sqrt{2}h} \quad (19)$$

となる。局所座標系での点 $Z_k(\alpha, \beta)$ を、 $Z_i (i=1, 4)$ を用いて表現すると

$$Z_k(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\alpha, \beta) Z_i \quad (20)$$

となる。ここで、関数 $N_i(\alpha, \beta)$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} N_1 &= (1-\alpha)(1-\beta) \\ N_2 &= \alpha(1-\beta) \\ N_3 &= \alpha\beta \\ N_4 &= (1-\alpha)\beta \end{aligned}$$

格子点 (i, j) では、 $(\alpha, \beta) = (1/2, 1/2)$ であり、 Z_k が点 (α_0, β_0) で与えられているとすると、 $Z(1/2, 1/2)$ は、式(21)で求められる。

$$\begin{aligned} Z\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) &= Z_k(\alpha_0, \beta_0) \\ &+ \sum_{i=1}^4 \left\{ N_i\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) - N_i(\alpha_0, \beta_0) \right\} Z_i \quad (21) \end{aligned}$$

したがって、領域内にデータが存在する場合は式(12)の代わりに式(21)で格子点 (i, j) に内挿する。

境界上では、式(14)を差分化した式(22)より求める。

$$\begin{aligned} Z_{1,j} &= Z_{2,j} \\ Z_{i,1} &= Z_{i,2} \\ Z_{imax,j} &= Z_{imax-1,j} \\ Z_{i,jmax} &= Z_{i,jmax-1} \\ P_{1,j} &= P_{i,1} = P_{imax,j} = P_{i,jmax} = 0 \quad (22) \end{aligned}$$

図-9は、それぞれ天気図からデジタイザーで入力した等圧線の分布とその結果をスプライン補間した天気図を示したものである。スプライン補間によって合理的な気圧分布が内挿されているのが認められる。なお、スプライン補間の計算格子としては、試行錯誤の結果、 0.5° メッシュを採用している。

3.3.2 海上風の計算

台風モデルによる海上風の推算は、式(1)のような簡単な式で気圧場を近似しているため、減衰期の台風のよう

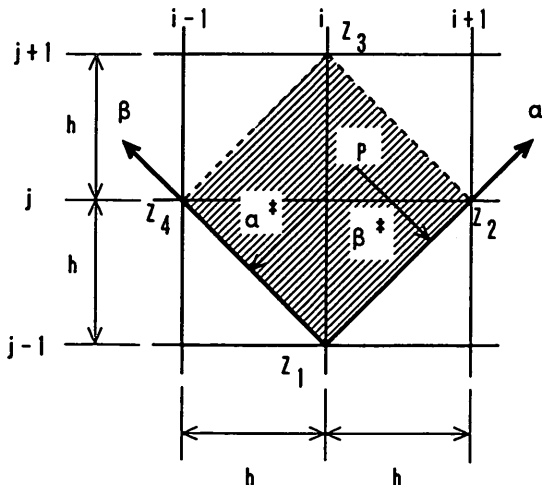


図-8 データ検索範囲と局所座標系

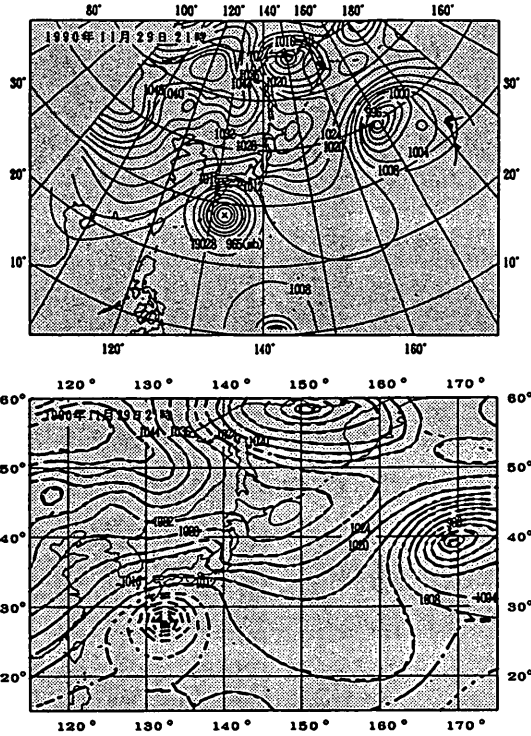


図-9 スプライン補間結果

に気圧場が同心円状からずれてきたり、台風以外の低気圧などの気象擾乱に対しては適用が難しい。このような場合、対象となる領域の気象データ（気圧データ）を読み取って、計算格子点に内挿し、風推算を行う必要がある。

本波浪推算システムにおける傾度風モデルによる海上風の計算は、3.3.1で説明した緯度・経度格子に対する気圧値のスプライン補間値を時間内挿した結果を用いて、以下の要領で行われる。まず、理想大気のを緯度および経度方向の成分ごとに地衡風を次式で求め、風向およびスカラー風速 V_g を算出する。

$$u_g = -\frac{1}{\rho f} \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (23)$$

$$v_g = \frac{1}{\rho f} \frac{1}{R \cos y} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (24)$$

$$|V_g| = \sqrt{u_g^2 + v_g^2} \quad (25)$$

ここに、 x および y はそれぞれ経度および緯度座標を表し、 u_g および v_g はそれぞれ経度および緯度方向の地衡風速である。一方、スカラー傾度風速 V は式(2)および式(25)から

$$V = \frac{V_g}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{V_g}{fr}}} \quad (26)$$

と表される。

次に、仮想的な等気圧線の曲率半径 r を

$$r = \frac{R^3 \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{1}{\cos y} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{R^2}{\cos^2 y} \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\}} \quad (27)$$

から差分化して計算すると、式(26)から、スカラー傾度風速 V が算出され、地衡風近似で求めた風向に合わせて緯度および経度方向の傾度風速ベクトルを計算する。さらに、以上の計算で求められた理想大気の傾度風から摩擦を考慮した海上風への補正は、表-3に示す気象庁が経験的に求めた係数を利用する。

最後に、緯度・経度に沿った風の推算格子から出力対象地点から放射状に展開している波の推算格子にベクトル補間して波推算の入力データとする。なお、風推算に関しても格子点補間と同じ0.5°格子で計算が行われる。

3.4 スペクトル法による波推算

3.4.1 基礎方程式

現在、提案されているスペクトル法による波浪推算モデルとしては、わが国で開発されたものに限定しても、井上⁹⁾、MRI、MRI-II⁹⁾、山口・土屋¹⁰⁾そして、東北¹¹⁾な

表-3 海上風への補正係数

緯度	補正角	補正係数
5°	3.0	0.36
10°	2.4	0.51
20°	2.0	0.60
30°	1.8	0.64
40°	1.7	0.67
50°	1.5	0.70
60°	1.5	0.71
70°	1.4	0.72
80°	1.4	0.73
90°	1.4	0.73

どのモデルがある。ここでは、気象庁の波浪予測業務または港湾施設の設計波の算定に長年利用されてきたという実績があるという理由から、磯崎・宇治の開発したMRI法を選び、単地点出力型のモデルに改良している。

図-10に示すように任意の一地点へ襲来する波浪の波向線に一致する座標系を採ると、波浪スペクトル $S(f, \theta)$ の発達・減衰・伝播を表す方程式は

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_g \frac{\partial S}{\partial s} = F \quad (28)$$

で表される。ここに、 C_g は群速度を意味し、 F は外力項である。外力項は、風から波へのエネルギーの流入、砕波による消散、内部摩擦による消散そして逆風による消散の効果が考慮されており、波向と風向のなす角 θ と平衡スペクトル S_{PM} を用いて

$$F = \begin{cases} (A + BS)[1 - (S/S_{PM})^2]\lambda(\theta) & S \leq 1.414S_{PM} \quad \theta \leq \pi/2 \\ -(Df)^4 S & S > 1.414S_{PM} \quad \theta \leq \pi/2 \\ -\{B\lambda(\theta) + (Df)^4\}S & \theta > \pi/2 \end{cases} \quad (29)$$

と記述される。ここに、 A はPhillipsの共鳴理論に対応した発達係数、 B はMilesの不安定理論による発達係数である。ともに井上⁸⁾によって、

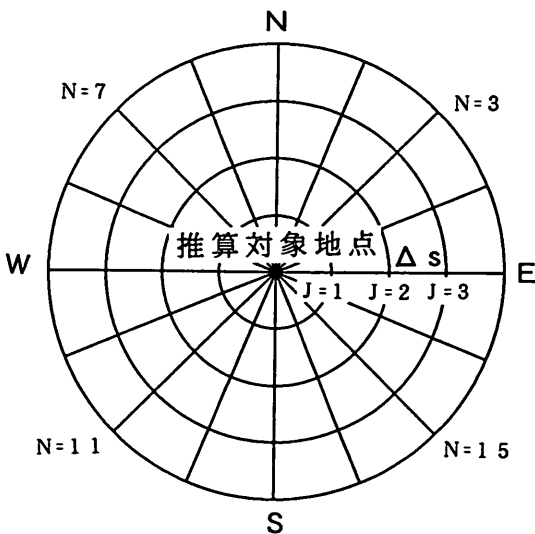


図-10 推算格子の座標

$$A(f, u) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{9.84 \times 10^{-15} (2\pi f)^{5.25} u^{2.25}}{\left[\frac{1}{4} \left(\frac{2\pi f}{u} \right)^2 + (k \sin \theta)^2 \right] \left[\frac{1}{9} \left(\frac{2\pi f}{u} \right)^2 + \left(k \cos \theta - \frac{2\pi f}{u} \right)^2 \right]} d\theta \quad (30)$$

$$B(f, u_*) = \{0.00139 \exp\{[-7000(u_*/C) - 0.031]^2 + 0.725(u_*/C)^2 e^{-0.0004(u_*/C)^2}\} \} f \quad (31)$$

と定式化されている。ここに、 u は19.5m高度の風速、 u_* は摩擦風速、 C は成分波の波速、 f は成分波の周波数、 k は成分波の波数を表す。また、 D は内部摩擦によるエネルギー減衰係数（本システムでは3.0を採用している）であり、 $\lambda(\theta)$ は方向分布関数である。十分に発達した波のエネルギーを表す平衡スペクトル S_{PM} としては、Pierson-Moskowitzスペクトル

$$S_{PM}(f) = 8.10 \times 10^{-3} g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-0.74 \left(\frac{uf}{g}\right)^{-4}\right] \quad (32)$$

を仮定している。

なお、エネルギースペクトルから有義波高および有義波周期を算定する式としては、

$$H_{1/3} = 4 \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta} \quad (33)$$

$$T_{1/3} = 1.18 \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f S(f, \theta) df d\theta} \quad (34)$$

を用いている。

3.4.2 数値計算法

式(28)に基づくエネルギー伝播計算には、演算速度が速いこと、および方向・周波数の離散化が比較的粗いときに高精度なスキームを用いるとエネルギーの集中化をもたらす場合があることから、1次の風上差分を用いる。まず、式(28)の右辺を零とおいた伝播方程式と伝播項を零においた発達方程式とに分けて扱う。伝播方程式の差分式は、

$$S_{j,N}^{k+1} = S_{j,N}^k - C_g \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) [S_{j+1,N}^k - S_{j,N}^k] \quad (35)$$

となる。次に、波浪の発達・減衰に関して差分化すると

$$\bar{S}_{j,N}^{k,1} = S_{j,N}^{k,1} + \Delta t F_{j,N}^{k,1} \quad (36)$$

となる。ここで、(J, N, K)はそれぞれ距離、波向、時間方向の格子点を表し、 $S_{j,N}^{k,1}$ 、 $\bar{S}_{j,N}^{k,1}$ は伝播計算後と発達計算後の方向別エネルギーである。

なお、本システムでは、著者の一人が行った検討¹²⁾から格子幅、時間間隔、周波数分割幅、方向分割幅をそれぞれ100km, 1s, 0.01Hz, 22.5°と固定している。また、方向分布関数形として $\cos^2\theta$ 則を用いている。なお、本推算モデルにおいては、陸地による遮蔽効果を波向線の遮蔽率の形で考慮している。

以上の説明で明らかなように、外力項の定式化は従来のMRI法と同じであり、特にパーソナルコンピュータの利用を前提とした顕著な修正を行っていない。ただし、従来のものに比べ演算時間を短縮するため、発達・減衰過程の計算に必要な種々の関数を全て離散化し、データテーブルとして取り扱う手法を採用している。

4. 波浪推算システムの適用性に関する考察

4.1 推算精度

単地点出力型波浪推算システムによる推算精度を調べる目的で、台風モデル推算に関して20擾乱、傾度風モデル推算に関して14擾乱の波浪推算を実施した。

図-11および図-12は、それぞれ台風モデル推算および傾度風モデル推算に関して最大観測有義波高と最大推算有義波高の相関を調べたものである。台風モデル推算は、名瀬、那覇、中城湾、油津、高知沖、波浮の5地点に関して図化している。また、傾度風モデル推算は、紋別、留萌、輪島、浜田、玄界灘、那覇、中城湾、油津、御前崎、むつ小川原の10地点に関するものである。どの地点も水深50m程度以上に観測機器が設置されており、観測波浪は大きな浅海変形を受けていない沖波として考えられる。

図から、台風モデル推算および傾度風モデル推算ともに多少相関データがばらつくものの、平均的には45°の線に乗っており本システムから得られた推算値は良好な精度を有することがわかる。ただし、台風モデル推算は低波浪・高波浪に関わらず一定の精度があると考えられる

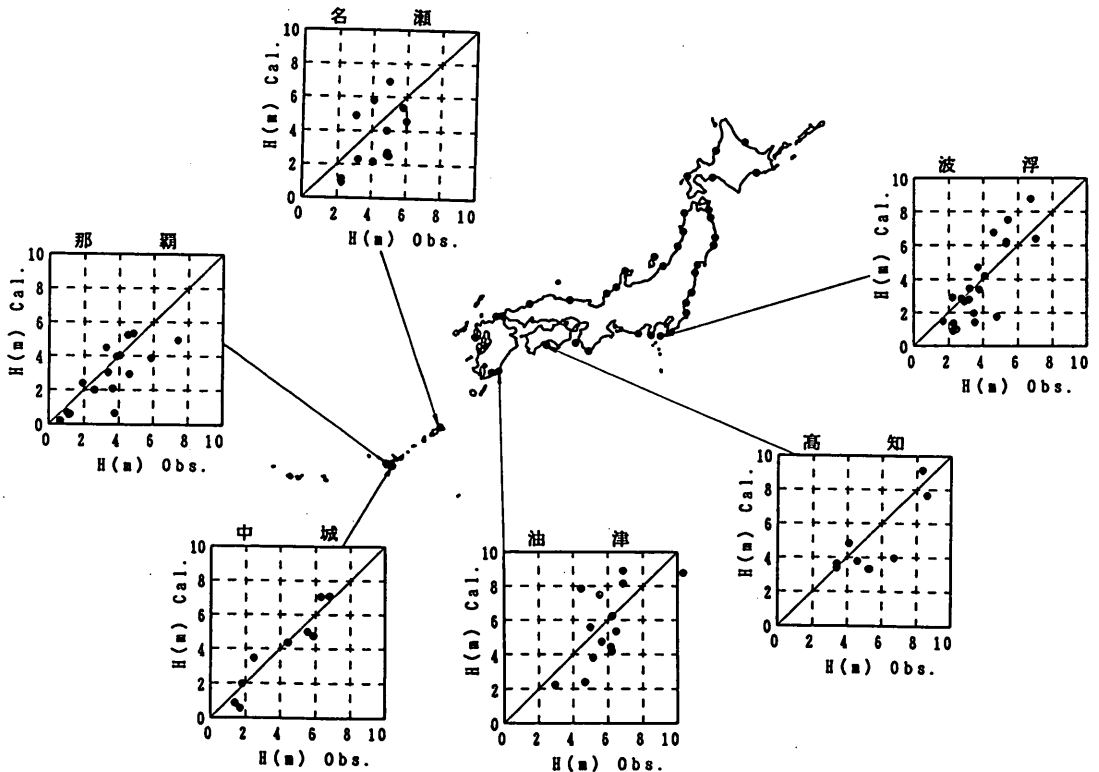


図-11 最大有義波高に関する観測値と推算値の比較 (台風モデル推算)

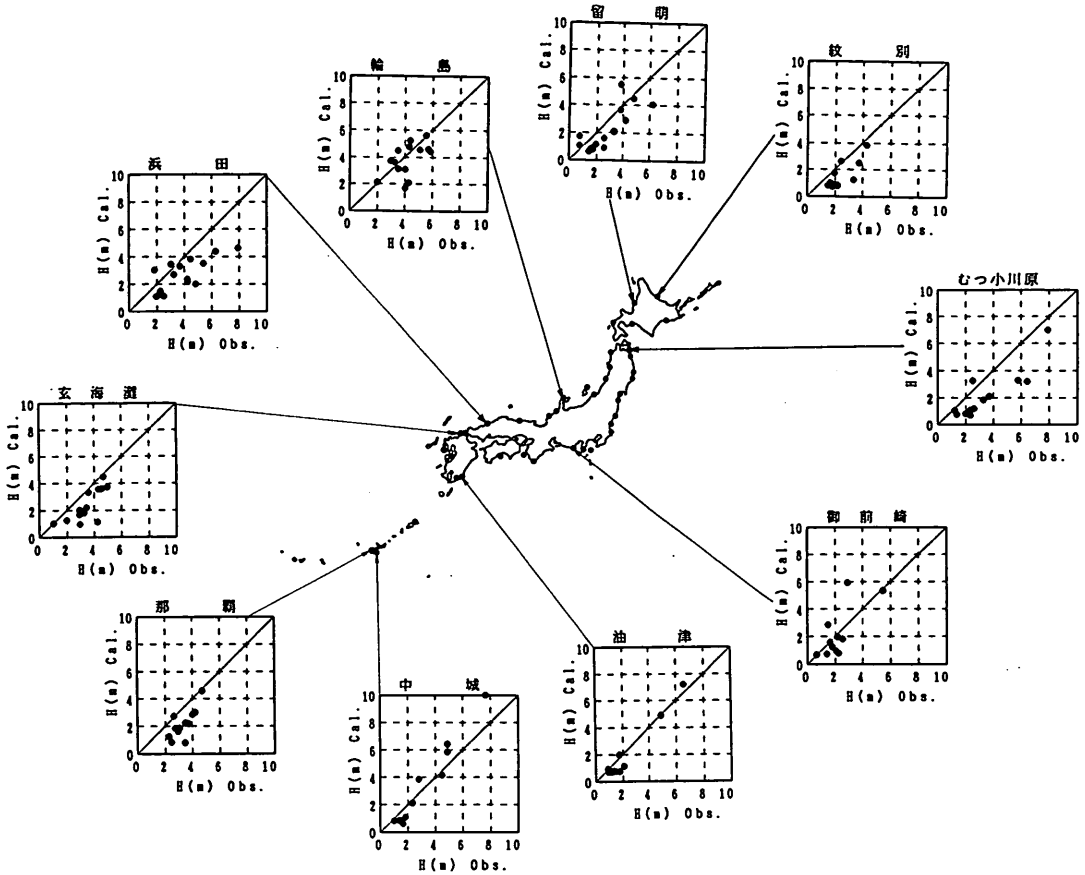


図-12 最大有義波高に関する観測値と推算値の比較 (傾度風モデル推算)

が、傾度風モデル推算では多少観測値に比べ推算値が小さくなるケースが見られる。これは、台風モデルにおいては場の風という形で気圧場の時間変化の効果を考慮しているのに対し、傾度風モデル推算では定常の気圧場を仮定して風を計算していることに起因していると考えられる。個々の推算結果をみると、やはり、比較的スケールの長い気象擾乱に関しては観測波浪と相関が良く、前線を伴ったり移動速度が速い気象擾乱とは一般的に相関が悪い傾向がある。したがって、天気図の気圧データを利用する傾度風モデル推算に関しては、気圧場の時間変化の効果を考慮することが今後の課題となる。また、本システムの推算結果は、観測値から大きくずれているものもあり、設計波算定あるいは極値統計に本システム波浪推算を用いる場合には、観測データとの照合が必要である。

図-13は、過去に港湾設計波調査などで実施した面的な波浪推算値と観測値の最大有義波高に関する相関の一例

である。推算手法としては、Cardonの風推算と面的なMRI法による波浪推算を組み合わせたモデル(スペクトル法)と傾度風推算と井島により開発された追跡型有義波法(有義波法)である。ここに、Cardonの風推算モデルとは、傾度風モデルに気温・水温差および温度風の効果を考慮した方法であり、スペクトル法は100km格子、有義波法は1°格子による推算である。本システムの相関結果である図-11および図-12を面的な波浪推算の相関結果の図-13と比較すると、両者の相関データのばらつきは同じ程度であり、単地点出力型波浪推算システムは面的な波浪推算モデルと遜色のない推算精度を有することがわかる。

一方、観測有義波周期と本システムで推算した有義波周期の最大有義波高出現時に関する相関を調べたものが図-14および図-15である。図-14が台風モデル推算、図-15が傾度風モデル推算に関するものである。最大有義波高と同様に、両者に比較的良好な相関があり、有義波周期

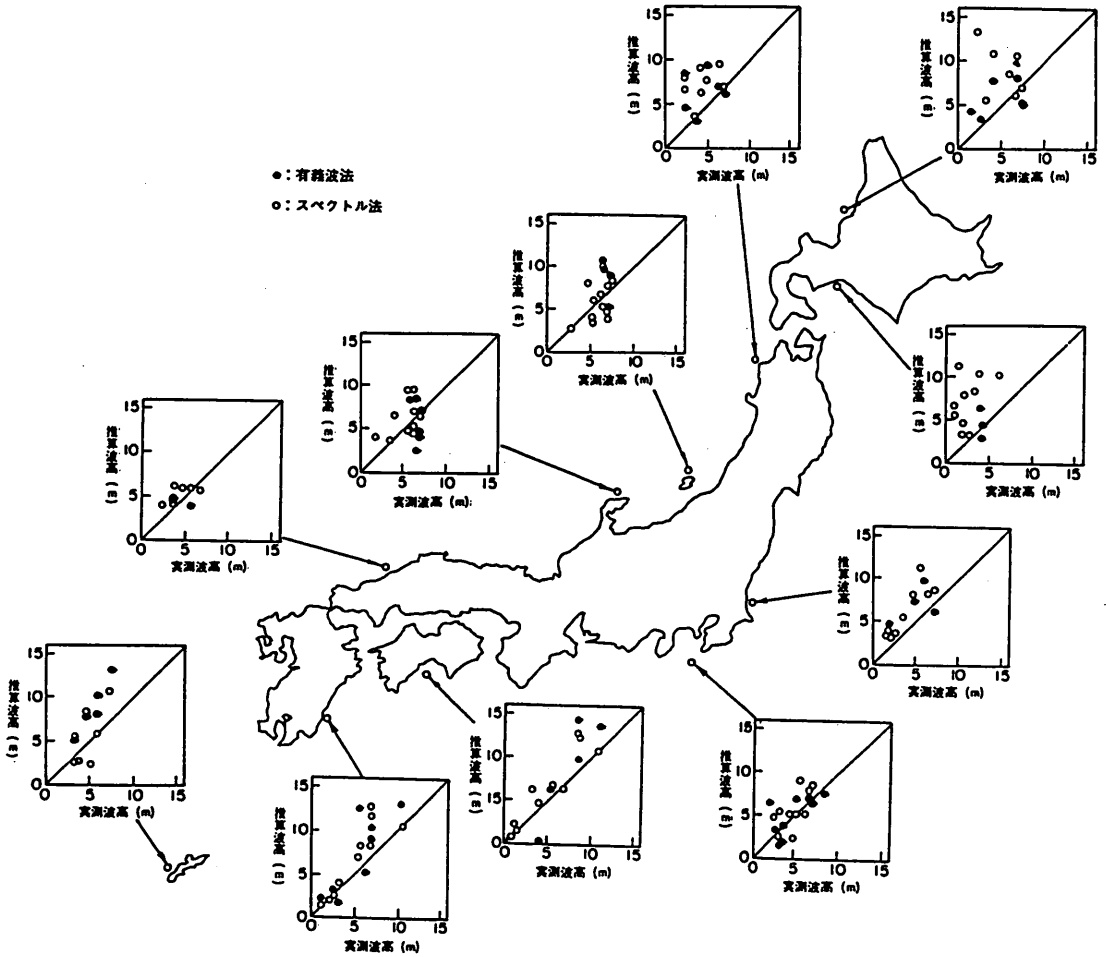


図-13 最大有義波高に関する観測値と推算値の比較 (従来の面的波浪推算)

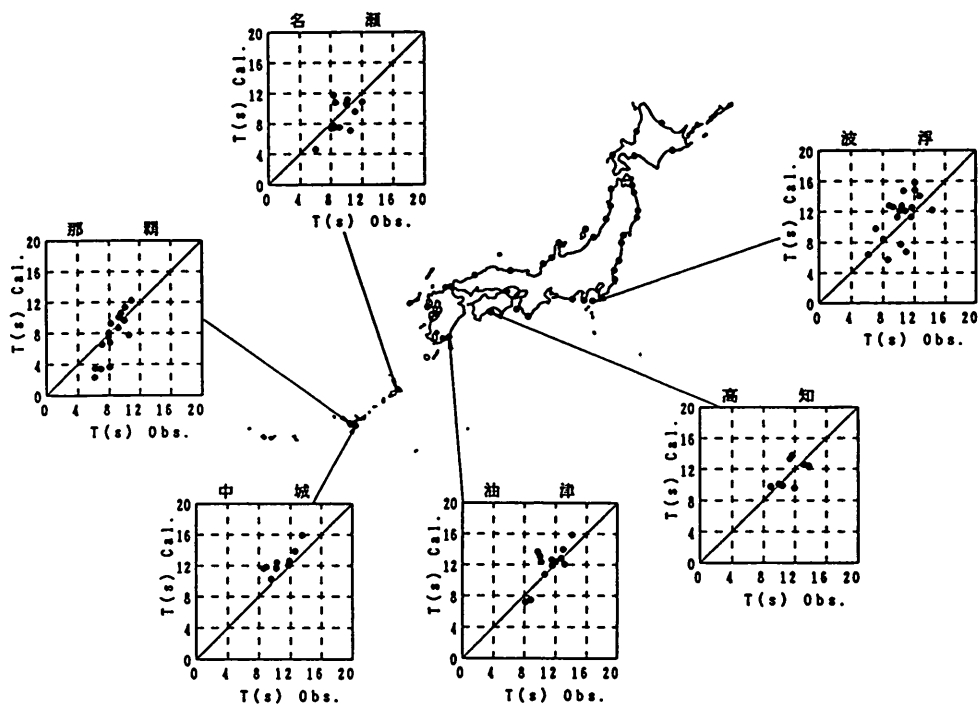


図-14 最大有義波高出現時の有義波周期に関する観測値と推算値の比較（台風モデル推算）

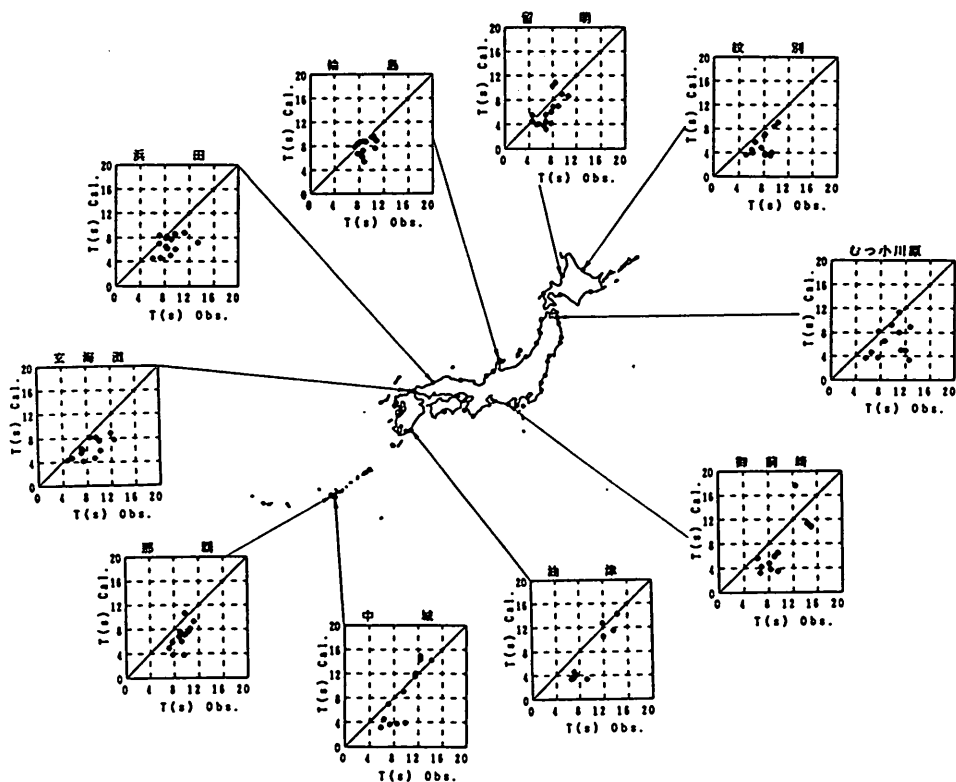


図-15 最大有義波高出現時の有義波周期に関する観測値と推算値の比較（傾度風モデル推算）

表-4 演算時間の比較

計算機	ACOS1000	PC9801M	PC9801VX	PC9801DA
台風モデル推算	5秒		427秒	127秒
傾度風モデル推算				3,560秒
面的波推算	663秒			
山口モデル1 (1987)		46時間		
山口モデル2 (1989)			720秒	

の推算精度も良好であることがわかる。

4.2 演算時間

推算対象地点によって陸地の遮蔽範囲が変わるため計算する波向線数が異なり、演算時間に影響を及ぼすが、平均的な演算時間をまとめると表-4で表される。表は、5日間の気象擾乱を想定して推算法、計算機による違いについて調べたものであり、参考のため山口らのモデルに関しても比較している。

使用する計算機種により異なるが、現状の32ビットパーソナルコンピュータを用いると台風モデル推算が2分程度で終了し、台風による高波の予測に十分に活用できることがわかる。また、面的な波浪推算モデルに比べ、本システムは1/100程度に演算時間が短縮される。一方、傾度風モデル推算は、気圧データの格子点補間に時間がかかるため、全体で60分程度の演算時間となる。したがって、傾度風モデル推算は、波浪予測の手段として考えるのは難しい。先に述べたように多数の気象擾乱を複数の地点に関して連続的に推算できるようにバッチプログラムを構成しており、波浪災害の原因究明や港湾設計波の概算調査など波浪追算の手段として活用できると考えられる。なお、最新の山口らの台風モデル推算と比べ、本システムは2倍程度の推算速度を有している。

5. まとめ

本報告では、パーソナルコンピュータを対象とした単地点出力型推算システムを開発し、現地への適用性に関する検討を行なった。得られた主要な結論を挙げると以下ようになる。

- ① パーソナルコンピュータ程度の能力で、簡便に波浪予測・追算ができる沖波を対象とした波浪推算システムを開発した。この推算システムは、現地港湾事務所などで台風による高波予測、波浪災害の原因究明や港湾設計波の概算調査に活用できる。
- ② 台風モデル推算においては、台風定数データベースを用いた波浪追算および気象庁の台風予報を利用した波浪予測が短時間で可能である。また、傾度風モデル推算では、台風以外の気象擾乱に関しても気象図処理シ

ステムおよび気象図データベースを利用したシステム化された一連の波浪推算が可能である。

- ③ 本システムを用いた波浪推算の精度は良好であり、面的な波浪推算の精度に比べ遜色がない。ただし、台風モデルおよび傾度風モデルの風推算には多くの問題が残されているため、推算結果の利用に際しては観測波浪との照合をするなど注意が必要である。

(1992年3月31日受付)

謝辞：本研究を実施するにあたり、小舟浩治前海象観測研究室長、永井紀彦海象観測研究室長、亀山豊海洋エネルギー利用研究室研究官の指導・助力を得た。また、システムの構築にあたり、(株)エコー柴木秀之氏および(財)気象協会関西本部森田務氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Isozaki, I. and Uji: Numerical prediction of ocean wind waves, Papers in Met. and Geophys., Vol.23 (4), pp.347~3569, 1973.
- 2) 山口正隆・畑田佳男・大福 学・宇都宮好博：パソコンを利用した深海波浪推算モデルとその適用性—エネルギー平衡方程式に基づく方法—, 自然災害科学, 6-3, pp.1~10, 1987.
- 3) 山口正隆・畑田佳男・早川 淳・宇都宮好博：パーソナルコンピュータを利用した現場用波浪推算モデル, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.259~262, 1989.
- 4) Fujita, T.: Pressure distribution within typhoon, Geo. Mag. 23, pp.437~451, 1952.
- 5) 気象庁海洋気象部・東京都港湾局：東京湾高潮総合報告, 1962.
- 6) 大西行雄：スプライン法を用いた2次元補間について, Jour. Oceanograph. Soc. Japan, Vol.31, pp.259~264, 1975.
- 7) 安中正・土屋義人・光田寧・藤井健・大下哲則：スプライン法を用いた海上風推算における気圧データ作成方法, 土木学会第32回海岸工学講演会論文集, pp.134~138, 1985.
- 8) Inoue, T: On the generation of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanisms and its application to wave forecasting, Dept. of Met. and Oceanogr., New York Univ., TR-67-5, 74 p., 1967.
- 9) Uji, T.: Acoupled discrete wave model MRI-2, J.

- Oceanogr. Soc. Japan, Vol.40, pp.303~313, 1984.
- 10) 山口正隆・土屋義人：有限風域場における波浪の数値予知法，第26回海岸工学講演会論文集，pp.96~100, 1979。
- 11) Kawai, S., P.S.Joseph and Y. Toba : Prediction of ocean waves based on the single-parameter growth equation of wind waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol.35, pp.151~167, 1979.
- 12) 後藤智明・小舟浩治：現地で簡単にできる波浪推算法について，土木学会第35回海岸工学講演会論文集，pp.222~226, 1988。
- D : 減衰係数
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 P : 台風の中心から距離rでの気圧 (mb)
 P_c : 中心示度 (mb)
 r : 台風の中心からの距離 (m)
 r_o : 台風定数
 S(f) : 周波数スペクトル (m^2/s)
 S_{PM} : 平衡スペクトル (m^2/s)
 $T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
 V : 傾度風速 (m/s)
 V_1 : 海上風速 (m/s)
 V_2 : 場の風速 (m/s)
 V_T : 台風の移動速度 (m/s)
 $\lambda(\theta)$: 方向分布関数

主要記号表

- A : Phillipsの共鳴理論による発達係数 (m^2/s^2)
 B : Milesの不安定理論による発達係数 (s^{-1})
 C_g : 群速度 (m/s)