

# 沿岸域の防災に関する 総合数値解析システムの開発

柴木秀之<sup>1</sup>・青野利夫<sup>2</sup>・見上敏文<sup>3</sup>・後藤智明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) エコー (〒116 東京都台東区北上野2-6-4)

<sup>2</sup>正会員 工博 東亜建設工業 (株) 技術研究所 (〒230 横浜市鶴見区安善町一丁目3)

<sup>3</sup>正会員 (株) アルファ水工コンサルタンツ (〒063 札幌市西区発寒 9-14-516-336)

<sup>4</sup>正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-12 平塚市北金目 1117)

海象災害に関する数値解析の流れを整理し、その解析方法をシステム化した沿岸防災に関する総合数値解析システム (INSPECT system) を新たに開発した。開発したシステムは、日本沿岸を対象に、高波・高潮・津波による突発災害の追算と災害予測を、効率的に処理することを目的とするものである。本論文では、数値解析システムの設計に当たっての基本方針と設計概要について述べる。また、システムの根幹をなす数値シミュレーション理論と日本沿岸の外力解析への適用事例について述べる。

**Key Words :** INSPECT system, numerical research, coastal disaster, wave, storm surge, tsunami

## 1. はじめに

わが国は、台風と地震の常襲地域に位置し、冬期に強い北西季節風が吹くという厳しい自然環境にある。そのため、沿岸域は、海象災害により幾度となく甚大な被害を受けてきた。1959年の伊勢湾台風による高潮災害、翌1960年のチリ地震津波による災害はその代表的なものと言えよう。この2大災害を契機に、沿岸防災に関する研究が脚光を浴び、防災施設の建設も精力的に行われた。しかしながら、1994年北海道南西沖地震津波による奥尻島の甚大な被害例は、過去の被災を踏まえた防災施設の建設により、自然災害を完全に防ぐことに限界があるという貴重な教訓を我々に与えた。そして、同時に、突発的な海象災害に迅速な対応が可能で、かつ日本沿岸の広範囲における適用が可能な沿岸防災の総合的な解析技術の必要性を痛感した。

沿岸防災を解析する場合、まず始めに行われるのは、発生する災害を引き起こす現象の解明である。現象を科学的な手段を用いて再現し、さらに、将来の再発を予測するのである。このような災害現象の解明を行う場合に、数値シミュレーションは、今日のように電子計算機が発展・普及し、その機能が飛躍的に増大している点から判断すると、最適な手法であると言えよう。しかしながら、数値シミュレーションによる災害現象の解析は、高度な専門技術を必要とする。

そこで、この問題を解決するために、防災に関する既往の数値解析の研究成果を有機的に結び付け、解析の処理方法をシステム化した沿岸防災に関する総合数値解析システム (INSPECT system) を新たに開発した。開発したシステムは、日本沿岸を対象とし、突発災害の追算と災害予測を効率的に処理することを目的とするものである。また、高度な知識を必要とする従来の解析に比べ、データ作成から数値シミュレーション、結果の評価にいたる一連の処理を半自動化している。本論文では、解析システムを設計するに当たっての基本方針とその方針に沿って開発したシステムの設計概要について述べる。また、システムの根幹をなす高波・高潮・津波の数値シミュレーション理論の概要と日本沿岸の外力解析への適用事例について述べる。

## 2. 数値解析システムの設計方針

### (1) 数値解析システムの設計方針

沿岸防災総合数値解析システム (Integrated Numerical research System for Prevention and Estimation of Coastal disaster : INSPECT system) は、日本沿岸に海象災害をもたらす代表的な現象である波浪・高潮・津波の数値シミュレーションとその一連の解析を、簡単な操作により処理することを目的に開発された一種

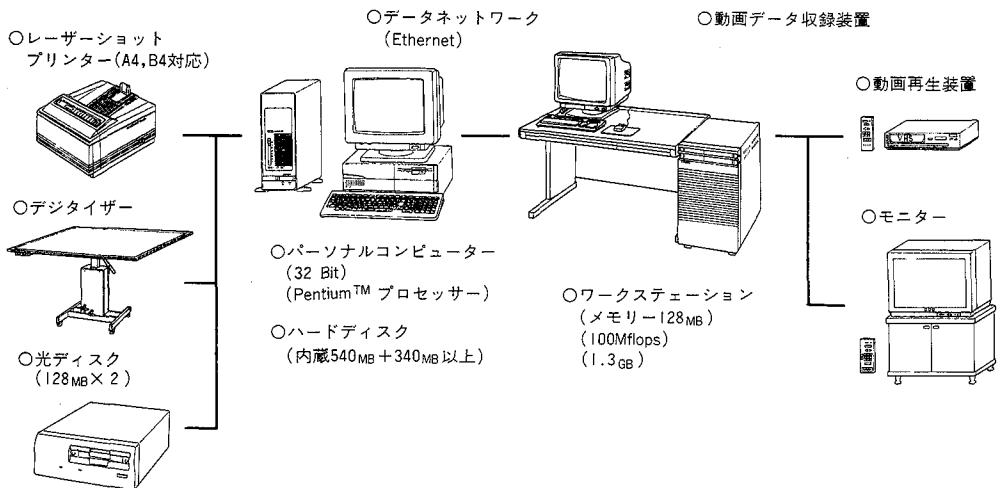


図-1 沿岸防災総合数値解析システムの機器構成

の防災数値解析のエキスパートシステムである。システムを設計するに当たり、基本とした方針は、煩雑な解析処理と高度な専門知識を必要とすることなく、専門技術者の処理と同等の成果が迅速に出力できるという点である。操作の簡便さを目標とするため、多種にわたる解析処理は対話形式を基本とし、簡単なデータ入力のみで一連の解析が可能ないように配慮されている。

## (2) 解析システムの機器構成

簡単な操作を基本とするため、当然ながら、使用する機器も操作が簡便なものを選択する必要がある。本数値解析システムは、図-1に表すエンジニアリング・ワークステーション(EWS)とパーソナルコンピュータ(PC)とその周辺機器により構成され、各々の機器は、その特徴を生かして処理を分担している。これらの機器は、操作が容易でかつ経済的であることから、近年急速に普及している。

システム内において、EWSが分担する機能は、システムの根幹となる波浪・高潮・津波の数値シミュレーションを行うことである。また、PCは、計算に必要な入力データ作成、計算値と観測値の解析、計算結果の画面と紙面への出力を行う。EWSとPCの間は、ネットワークにより接続され、入・出力情報が相互に伝達される。システムの周辺機器は、EWSとPC各々のハードディスク、PC側に、レーザープリンター・光ディスクユニット・デジタイザーが配備されている。周辺機器が分担する機能は、EWSのハードディスク(1GB)が推算結果の一時保管、PCのハードディスク(300MB以上)が観測値データベースの保管、レーザープリンターが図表の紙面出力、光ディスクユニットが推算値・気象図・水深図データベース等大容量データの保

管、デジタイザーが気象図・水深図アナログ情報のデジタル化である。また、計算結果を動画処理するために、専用のEWS、ビデオの編集・再生等の機器も用意されている。

## (3) システムの構成と解析処理

解析システムのソフトウェアは、図-2に表すように、波候統計解析・波浪推算・高潮計算・津波計算・計算支援の5つのメイン解析システムと支援データベースから構成されている。さらに、メイン解析システムと支援データベースは、各々複数のサブシステムとサブデータベースにより構成されている。

5つのメイン解析システムのうち、波候統計解析は、日本全国の波浪観測値を統計処理するための波浪統計解析と、港湾等の設計波(確率波)を算定するための確率波統計解析の2つのサブシステムが準備されている。波浪推算は、傾度風・台風ハイブリッドモデルと境界層モデルを併用する海上風推算、平面出力型スペクトル法モデルによる日本沿岸を対象とする深海波浪推算、平面出力型パラメータ法モデルによる内湾波浪推算(短フェッチ海域)、波の発達・減衰と浅海波浪変形を考慮した平面出力型スペクトル法モデルによる浅海波浪推算、物理因子重回帰モデルによる日本沿岸の波浪予測、単地点出力型スペクトル法モデルによる台風時の波浪予測の6つのサブシステムと、結果の出力システムが準備されている。高潮計算は、多層レベルモデルによる高潮計算、経験則・マスコンハイブリッド風推算モデルによる内湾海上風推算、波浪による水位上昇を考慮した高潮・波浪ハイブリッドモデルによる高潮計算と、結果の出力システムが準備されている。津波計算は、日本近海の波源津波を対象とする

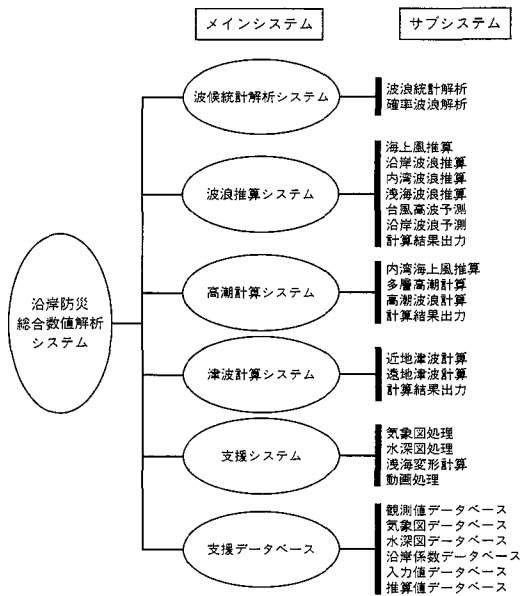


図-2 沿岸防災総合数値解析システムの構成

近地津波計算、遠方の波源から大洋を伝播する津波を対象とする遠地津波計算と、結果の出力システムが準備されている。

計算支援システムは、波浪・高潮・津波計算に共通して用いられ、数値シミュレーションの入・出力を支援するものである。支援システムのうち、気象図処理は、天気図に描かれた気圧等のアナログ情報をデジタル化し、データベース化する。このデータベース化された気圧情報が、波浪・高潮の発達の外力となる海上風推算に利用される。水深図処理は、海底地形図・海図・地形図・深浅測量図等のアナログ情報をデジタル化し、データベース化する。この水深・標高のデジタル情報が、波浪・高潮・津波計算に使用する計算格子と格子点水深データを作成する基礎資料となる。浅海変形計算は、多方向・多周期の浅海域波浪変形計算を行い、任意地点における波向・周期別の屈折・浅水係数表をデータベース化する。本システムでは屈折・浅水係数を合わせて沿岸係数と呼び、この沿岸係数のデータベースは、深海波浪推算により計算される沖波の時系列情報を浅海情報に変換するのに用いられる。動画処理は、波浪・高潮・津波の計算結果を動画処理し、現象の動的評価を行うことを目的とする。

これらのサブシステムを支援するデータベースとしては、観測波浪・高潮偏差・津波痕跡高等の観測値データベース、気象図データベース、水深図データベース、沿岸係数データベース、台風・断層パラメータ・計算格子・格子点水深等の数値シミュレーションの入力値データベース、波浪・高潮・津波の推算値

データベースの6種類がある。これらのデータベースを複合的に利用することにより、数値シミュレーションの入力データ作成、観測値と推算値の比較等、解析処理を迅速に行うことが可能となる。

### 3. システムの解析理論

#### (1) 波浪解析

##### a) 風解析

数値解析システムの根幹をなすのは、波浪・高潮・津波現象の数値シミュレーションである。本システムで行う数値シミュレーションの計算理論は次のように概説される。はじめに、波浪発達の外力となる海上風と波浪の計算理論をモデル別に述べる。ここで、海上風とは海上10m高度の風向・風速で定義される。

海上風は、前述した気象図データベースの気圧情報を利用して計算により求める。海上風推算は、傾度風モデルと台風モデルを併用したハイブリッドモデル<sup>1)</sup>による自由大気の風推算と境界層モデル<sup>2)</sup>による海上風への変換の過程を踏む。

自由大気の風推算の1つである傾度風モデルの風推算は、自由大気において、気圧傾度力・コリオリ力・遠心力の力学バランスを仮定し、緯度・経度0.5°間隔の格子点気圧値から計算する。この格子点気圧値は、緯度・経度座標系に改めたスプライン平面補間法<sup>3)</sup>により、気象図データベースの気圧情報を空間補間して求める。台風モデルの風推算は、台風の中心位置・中心気圧と台風規模を表現するパラメータである台風半径から風を推算する。台風の気圧分布は、台風中心から圏外までの気圧を指数関数で近似するMyersモデルを用いる。このモデルで計算される気圧分布から、台風を中心とする対称風（傾度風）、台風移動により発生する場の風と2つの合成風が計算される。台風モデルを用いる風推算は、場の風という気圧移動に伴う変圧効果を取り込んでいるため、台風影響圏内の風を良く再現することが知られている。

2つのモデルを併用する傾度風・台風ハイブリッドモデルは、気圧分布の同心円近似が可能な台風影響圏内を台風モデルで風推算し、同心円での近似が不可能な気圧場を傾度風モデルで風推算する。そして、2つのモデルの推算風を経験的な関数により空間内挿し、台風影響圏内と傾度風適用範囲を滑らかに接続する。これにより、推算風は、台風中心からの距離が増加するとともに、次第に傾度風速に漸近する。

推算される自由大気の風を海上風へ変換するために用いる境界層モデルは、大気を自由大気と大気境界層の2層に分離し、自由大気は気圧傾度力とコリオリ力、

大気境界層は気圧傾度力・コリオリ力・渦動粘性力がバランスすると仮定するモデルである。大気境界層の全てにおいて、3つの力がバランスし、高度とともに風向・風速は変化する。この力学バランスから、海上風鉛直分布の解析解が求められ、この解から、任意高度の風が高度と海面摩擦速度の関数として計算される。なお、海面の摩擦速度は、海上風の速度と、本多・光易<sup>4)</sup>の海面抵抗係数から求める。ここで、境界層モデルの自由大気風に関する基礎式は、直交座標系の力のバランスを表す。これを、曲座標系に変換すれば、遠心力項が力のバランスに現れる。したがって、前述した傾度風・台風ハイブリッドモデルとは、扱う座標系が異なるものの、基礎式の内容は同じである。

#### b) スペクトル法深海波浪推算

スペクトル法による深海波浪推算は、周波数と波向の関数として表される方向スペクトルの時間的変化を追跡する方法で、基礎式はエネルギー平衡方程式である。本システムでは、磯崎・宇治<sup>5)</sup>のMRI法を、波浪の発達・減衰のモデル化に利用している。このモデルは、気象庁の波浪予測業務、港湾施設の沖波設計波算定等に多くの実績を持つものである。深海波浪推算では、水深無限大と仮定し、エネルギー伝播速度を周波数のみの関数として定義している。そのため、計算される波浪は、浅海変形の影響を受けない沖波に相当するものとなる。

#### c) パラメータ法波浪推算

スペクトル法が方向スペクトルを追跡するのにに対し、パラメータ法波浪推算<sup>6)</sup>は、波浪を規定する1つのパラメータである風波のエネルギー変化を追跡するものである。この計算法の波浪発達式は、無次元フェッチと無次元エネルギーの1乗則、無次元波高と無次元周期の3/2乗則の2種類の風波に関する経験則を定式化したものである。風波を対象とする波浪推算法であるため、主に内湾のような短フェッチ海域に適用される。また、風波の経験則を採用していることから、風に対する高い応答性を必要とする低波高の風波の推算に適する特徴を有する。

#### d) スペクトル法浅海波浪推算

深海波浪推算が浅海変形を受けない沖波を対象とする計算であるのに対し、スペクトル法浅海波浪推算<sup>7)</sup>は、波浪の発達・減衰と浅海変形を同時に考慮することが可能である。浅海波浪推算も、深海波浪推算と同様に、エネルギー平衡方程式を基礎式とする計算法である。そして、発達・減衰は深海波浪推算モデルと同様の計算を行い、浅海変形は、波浪エネルギーの伝播速度を周波数と水深(空間座標)の関数と定義することにより、屈折と浅水変形を計算する。発達量を無視できない長フェッチ浅海域や湾外からの侵入波が無視

できない半閉鎖性内湾の波浪推算において適用する。ただし、波浪変形を計算する上で、計算格子間隔を1km～数100m程度にする必要があり、広範囲の計算に適用すると、多大な計算時間を要する。そこで、計算時間を節約するために、外洋域を対象とする深海波浪推算モデルと併用する方法が効率的である。

#### e) 波浪変形計算

ここまでは波浪推算の理論について述べたが、港湾・海岸構造物の設計波を算定するためには、波浪推算だけでは不十分である。第一段階として求められる沖波値から構造物前面における波を推定するためには、浅海域で生ずる浅水・屈折・回折・反射・砕波の諸効果が重要となる。本システムでは、このような浅海効果を考慮した波を推定する方法として、伝播項のみで定式化されたエネルギー平衡方程式による波浪変形計算<sup>8)</sup>を用いる。

#### f) 波浪予測

次に、平面出力型波浪推算による波浪解析と同様に、沿岸波浪を予測することも、防災上の重要な課題である。波浪推算法は、発達過程にある波を推定することに重点を置いて基礎式が定められていることから、主に高波の推定に用いられるが、波浪予測は低波浪から高波浪までの全ての波高階級を対象とする。特に、施工管理等に波浪予測を利用する場合は、有義波高1.0m以下の波高階級が計算対象となる。このような低波高階級も含めて、精度の高い波浪予測を行うために、本システムでは、物理因子重回帰モデル<sup>9)</sup>を用いる。

物理因子重回帰モデルは、予測式を波浪の発達・伝播・減衰に関する線形回帰式で表し、風波とうねりの波浪エネルギーを説明変数に用いる。この波浪予測モデルは、予測地点のみにおける有義波諸元を計算することを目的とするため、始めに予測地点を中心とする16方向の波向線を放射状に設定し、各々の方向について波浪が独立に発達するものと仮定し、この波向線上で、波向別の成分波の発達量、伝播量を計算する。そして、全波向から予測地点に伝播する成分波の波浪エネルギーを合成することにより、予測地点の波浪を推定する。

一方、台風来襲時のみを対象とする場合には、波浪推算モデルを利用した波浪予測を行う。この波浪予測法は、予測地点を中心とする波向線上で波浪の方向スペクトルを追跡し、予測地点に到達する方向スペクトルの全成分を合成することにより波浪を推定する。予測の過程で行う計算は、台風モデルによる海上風推算、スペクトル法による波浪推算であり、結果の出力は予測地点のみとする。そのため、本システムでは、この予測方法を単地点出力型スペクトル法<sup>3)</sup>と呼ぶ。

## (2) 高潮解析

### a) 高潮の多層レベルモデル

次に、高潮の計算理論について概説する。高潮による災害は、波浪災害よりも出現頻度は少ないが、一旦発生すると大規模なものとなる。この高潮現象の規模は、発生要因となる気象擾乱、すなわち台風の大きさとほぼ一致し、水深に比べてはるかに大きい。そのため、高潮は、後述する津波と同様に長波理論式で表される。高潮現象は、長波として扱われるが、その特徴は気圧変化による水面の昇降と、暴風による吹き寄せという継続的に作用する外力によりもたらされる強制的な水面変動という点にある。この点は、自由波として伝播・変形する津波と現象が大きく異なる。したがって、高潮の基本方程式は、津波計算の運動量方程式に、気圧勾配項と海面応力項を加えたものとなる。

高潮現象のうち、吹き寄せによる水位上昇は、強風により発達する吹送流が、沿岸部に集中することから発生する。吹送流は、表面流速が最大で、水深が深くなるとともに流速が減少する鉛直分布構造を持つ。このため、吹送流を単層モデルにより近似すると、流れは全水深一様な断面平均流に置き変わり、流量を近似することが可能であるものの、上層流速を過小に評価し、下層流速を過大に評価する問題を含む。そこで、高潮計算では、多層レベルモデル<sup>10)</sup>を用いて、吹送流の近似精度を高める。さらに、本システムの高潮計算モデルは、海岸護岸の越流と陸域への浸水についても計算することが可能である。

### b) 内湾海上風の推算

周囲を陸地で囲まれた内湾の海上風は、陸上地形の影響を受けて、外洋の海上風と異なる風場を形成する。この地形効果は、内湾の波浪・高潮の計算精度を大きく左右する。日本沿岸の大規模な高潮は、伊勢湾・大阪湾のような内湾で発達することから、内湾海上風の計算精度の向上は重要な問題となる。

本システムでは、内湾海上風の推算に、経験則・マスコンハイブリッドモデル<sup>11)</sup>を用いる。経験則<sup>2)</sup>は、内湾海上風が、有効吹送距離に代表される地形的制約条件に関係する特性を、観測データをもとに定式化したものである。風計算では、陸上地形を3次元計算格子で近似し、地形の起伏を入力データ化する。この後、初期条件として、各格子点に経験式から推定される海上風場を与え、3次元マスコンモデルを用いて、海上風の風場を求める。マスコンモデルは、質量保存則を束縛条件とする変分方程式を解くものであり、質量保存則を満たすように調整された風向・風速の収束解が求められる。

### c) 高潮・波浪ハイブリッドモデル

外洋に面する地点で観測される高潮潮位には、波浪

による水位上昇量も含まれていることが数多く報告されている<sup>12)</sup>。理論解析<sup>13)</sup>によれば、海岸部の波浪による水位上昇量は、来襲波高の1割程度に達することが確認されている。このような現象を再現するために、前述した浅海波浪推算により計算される平面波浪場を利用して、Radiation 応力を求め、この応力項を含む運動量方程式を基本式とする高潮計算を行う。ここで、平面波浪場は、気象擾乱の移動に伴い時間変化するものである。本システムでは、この計算法を、高潮・波浪ハイブリッドモデルと呼ぶ。ただし、このモデルの計算精度を高めるためには、海岸近傍を100m程度の格子間隔で近似することが必要となる。

## (3) 津波解析

### a) 断層モデル

高潮と同様に、津波による災害も、一旦発生すると大規模なものとなる。この津波現象を再現する数値シミュレーションは、初期条件として、地震に伴い生ずる海底地盤変位と同等の海面水位変動を与える。この初期に与える水位は、地震断層モデルから計算される。断層モデルとは、断層面を矩形で近似し、地盤の運動を震源位置と断層の走向・長さ・幅・すべり量・すべり方向・傾斜角の6個のパラメータで幾何学的に表すものである。この断層パラメータを与えさえすれば、弾性理論により断層近傍の海底地盤の鉛直変位が計算で決められ、この鉛直変位分布が初期水位分布となる。

### b) 近地津波の数値計算

断層モデルにより震源域の初期水位分布、すなわち初期平面波形が与えられると、周囲との水圧差により、水面波となって伝播していく。この波は津波と呼ばれ、波長が数10km以上に達するものとなるため、長波近似が可能となる。したがって、津波の現象は長波理論式で記述される。津波の数値シミュレーションとは、津波の水位と流速が、水深と海岸地形の空間的な変化のために、伝播過程で浅水・集中・共鳴効果を受けて変形する過程を数値的に追跡する手法である。この津波数値シミュレーションのうち、日本近海で発生する津波を対象とする場合に、近地津波計算と呼ぶ<sup>14)</sup>。

本システムでは、既往の研究成果<sup>15)</sup>に基づいて、計算領域の最低水深に応じて、非線形長波理論と線形長波理論の2つの支配方程式を選択して適用する。選択の基準として、非線形項の大きさが線形項の大きさの10%を超える浅海域では、非線形長波理論(浅水長波理論)を適用する。沖側の境界では、進行性長波の特性曲線の関係をもとに、領域内の波を自由透過させる条件を用いる<sup>16)</sup>。また、陸上への津波の遡上は、非線形長波理論式を用いる場合のみ考慮し、海域格子の水位と陸域格子の地盤高の差を基に、遡上計算の判

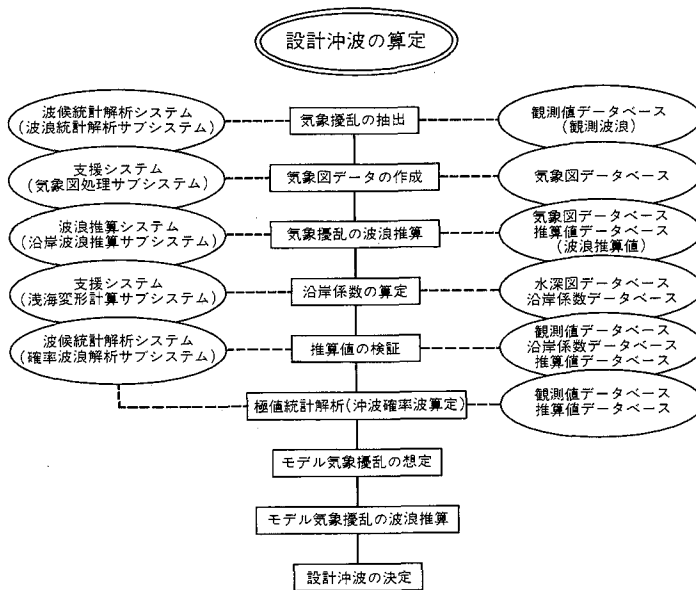


図-3 設計波浪の解析手法とシステムとの関係

定を行う。さらに、領域内の防波堤・堤防等については、前面水位がその天端高を越える場合に、越流公式を用いて越流量を計算する。

#### c) 遠地津波の数値計算

日本近海で発生する伝播距離の短い津波に対して、チリ津波のように 10,000km 以上の距離を伝播する津波を遠地津波と呼ぶ<sup>17)</sup>。この遠地津波の現象を扱う場合は、伝播距離の精度を高めるために、緯度・経度で表示される球面座標系を用いる必要がある。また、現象が大規模で、波数分散性を無視することができないため、支配方程式は、コリオリ力を考慮した線形分散波理論を適用する。初期条件、沖側境界条件については、近地津波計算と同様である。しかし、海岸線境界では、陸上への遡上を考慮しない。

### 4. 日本沿岸の外力解析への適用

#### (1) 波浪解析と解析システム

##### a) 設計波浪解析の流れと解析システム

始めに、解析システムを利用する日本沿岸の外力解析のうち、波浪解析への適用例について述べる。波浪解析のなかで、重要かつ頻度の高い解析は、沿岸構造物の施設規模を左右する設計波諸元(波高・周期・波向)を決定することである。この設計波浪解析では、波浪災害の原因究明、確率波の算定が主な調査課題となる。図-3は、港湾の設計沖波を算定する過程を取り上げ、解析手法と関係するシステムを整理したもの

である。設計沖波の算定は、気象擾乱の抽出、気象図データの作成、気象擾乱時の波浪推算、沿岸係数の算定、推算値の検証、極値統計解析、モデル気象擾乱の想定、モデル気象擾乱の波浪推算、設計沖波の決定の順に行われる。関連する解析システムは、波候統計解析、波浪推算システムと支援システムの中の気象図処理、浅海変形計算のサブシステムである。設計波浪解析の手順に沿って、サブシステムは次のように利用される。

気象擾乱の抽出では、対象地点に來襲する高波の発生要因となる気象擾乱を、長期間にわたり期間的な偏りなく決定する。この処理では、波浪統計解析サブシステムにより、年別高波一覧表・期間最大有義波分布等が出力される。これらの情報は、年最大波・極大波に相当する気象擾乱を抽出する場合の根拠となる。図-4は、1990年の日本沿岸における最大有義波高・有義波周期と最大波諸元を面的に出力したものである。気象擾乱が抽出されると、この気象擾乱期間の気象図データの作成を行う。気象図データは、風推算の基礎情報となるもので、気象図処理サブシステムにより作成される。図-5は、気象図データベースに保管された極東天気図と、気圧情報から推算された海上風出力例である。気象図データが作成されると、風推算・波推算を行い、対象地点における高波発生時の有義波高・有義波周期・波向の時系列を計算する。波浪推算システムでは、領域と期間を指定し、EWSにより、連続的に気圧の格子点補間・風推算・波推算が行われる。風推算は、波浪解析の理論でも述べたように、傾度

代表的気象擾乱時の沿岸波浪分布  
 <1990年1月1日-1990年12月31日>

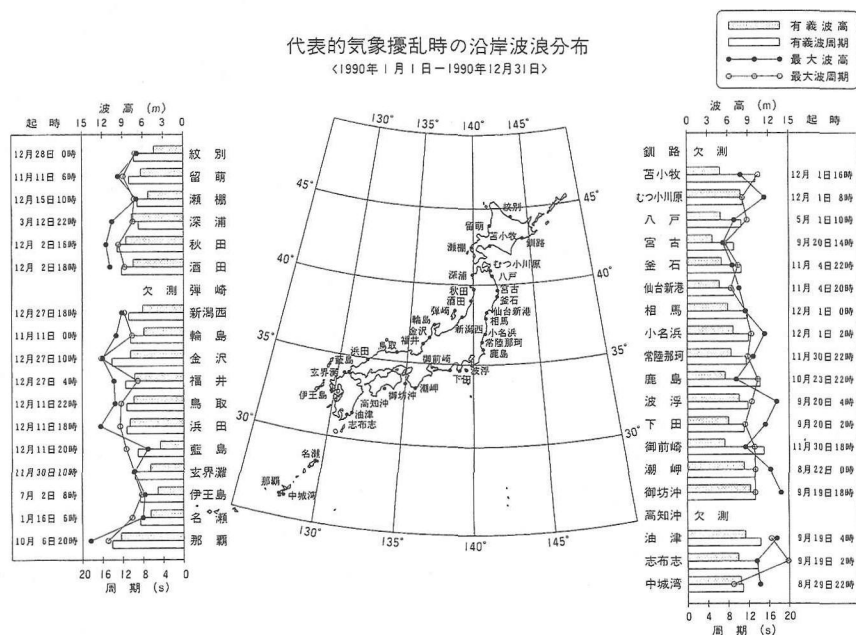


図-4 1990年の日本沿岸における最大有義波高・有義波周期の分布

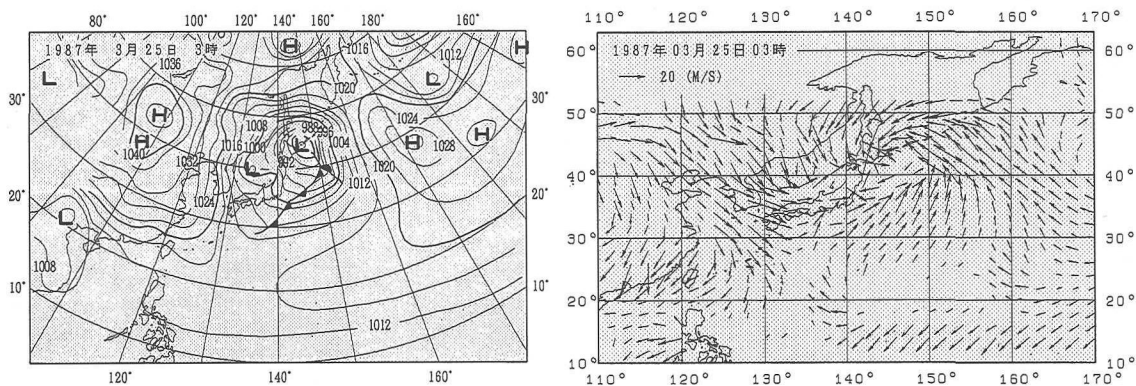


図-5 データベース化された極東天気図と推算される海上風分布の出力例

風・台風ハイブリッドモデル，大気境界層モデルを用いる。また，波推算は，海域に応じて，平面出力型のスペクトル法深海波浪推算・パラメータ法波浪推算・浅海波浪推算のいずれかを選択する。スペクトル法深海波浪推算は，主に外洋を対象とする広範囲の計算領域で計算を行うため，地球面上の距離精度が確保される緯度・経度座標系を用いる。例えば，日本沿岸の主要港湾を対象とする場合<sup>18)</sup>には，風波の発達する広い領域を $1/2^\circ$ 格子で近似し，対象港湾に近づくにつれ，陸地の遮蔽効果を表現するために， $1/8^\circ$ ， $1/24^\circ$ 格子で地形を近似する。一方，パラメータ法は，平面座標系を採用し，内湾のように比較的狭い海域に限定して計算を行う。内湾の地形は，1 km～数 100m

程度の計算格子で近似する。浅海波浪推算も，波浪変形が無視できない浅海域を主に対象として行うことから，パラメータ法と同程度の計算格子を用いる。さらに，浅海波浪推算では，外洋に及ぶ波浪の発達海域を計算領域内に含むことが必要であることから，外洋を対象とする深海波浪推算を併用する。これらの計算法から求められる結果は，全格子点において，擾乱毎に方向別最大有義波高・有義波周期の一覧表として整理され，波浪の推算値データベースに保管する。このデータベースと，次に述べる確率波浪解析システムを利用して，対象地点における設計波を算定する。

確率波浪解析システムは，対象地点の計算値データの抽出，計算値と観測値の相関解析，極値統計解析な

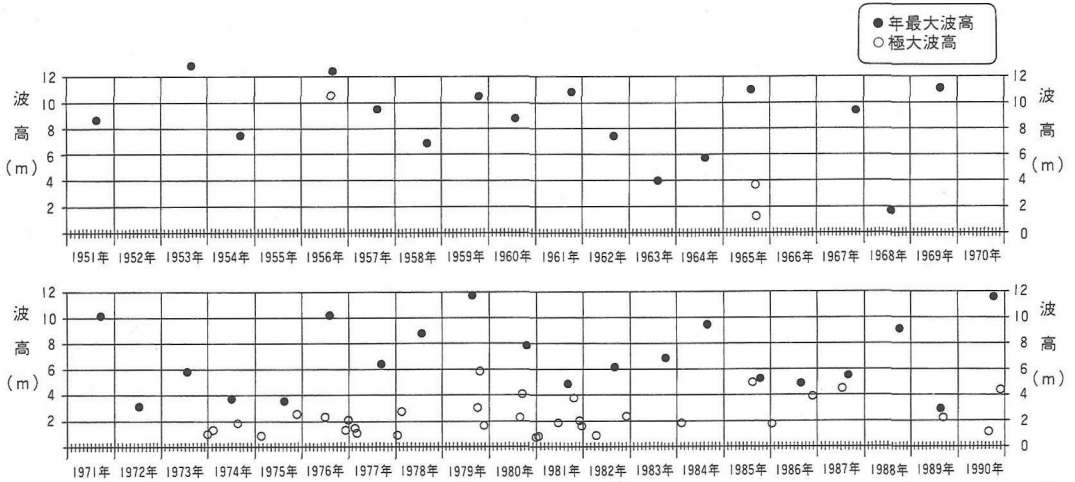


図-6 統計期間の年最大波と極大波の経年分布

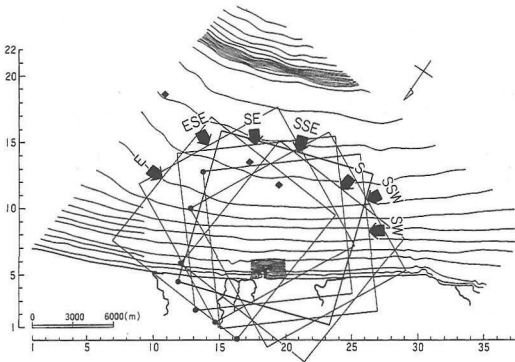


図-7 データベース化された海岸線・等深線と複数の主波向を対象とする波浪変形計算の領域区分

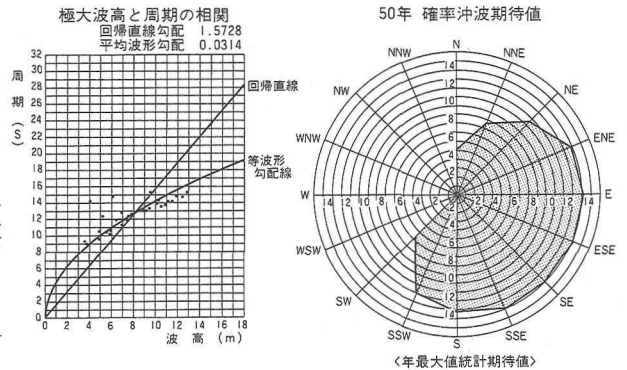


図-8 確率波高の方向分布と確率波高に相当する周期算定の相関図

どの確率波算定に必要な各種処理を行う。まず、長期間にわたる波浪の推算値データベースから、方向別の年最大有義波と極大波が年毎に抽出される。図-6は、全方位を対象とする年最大有義波と極大波の経年変化を表すものであり、これが対象地点における設計波算定の基礎資料となる。

今、深海波浪推算により計算される沖波相当の計算値が求められる場合について解説を進める。計算値と観測値の相関解析は、計算値の誤差を前提とし、より観測値に近い情報に変換する経験式(補正式)を求めるための処理である。これを迅速に行うために、計算値と同一気象擾乱時の観測値を、波浪の観測値データベースから検索、抽出する。ただし、観測波浪が浅海情報である場合には、沖波計算値を浅海情報に換算した後に、両者の比較を行う必要がある。この換算を行うために、波浪観測地点の沿岸係数を波向・周期別の一覧表の形式にまとめ、該当する波向・周期の係数を

沖波値に乗ずる。任意地点の沿岸係数表を作成するために、波浪変形計算を行うのが、浅海変形計算サブシステムである。波浪変形計算を行うためには、計算格子と格子点水深が入力データとして必要となる。これらのデータは、水深図データベースに保管される対象地点の海岸線・水深情報を利用して作成される。

図-7は、デジタル化された水深図データベースと、多方向の波浪変形計算領域の範囲を表す。各波向の計算領域は、沖波が沖側境界から直角入射するように作成される。このサブシステムでは、全計算領域の入力データ作成と全波向・周期の波浪変形計算を、簡単なコントロールデータのみで実行するように設計されている。

このようにして、観測値に近い情報へと変換される計算値を利用して、波浪極値統計解析を行う。図-8は、方向毎に算定された50年確率波高の分布例である。さらに、確率波高に相当する周期は、図に併記さ



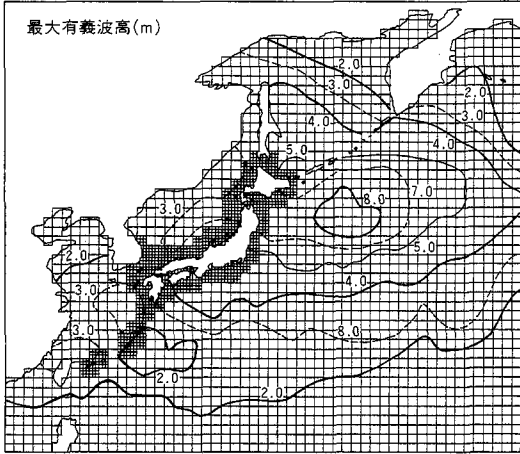


図-9 日本沿岸を対象とする深海波浪推算により計算された最大有義波高の平面分布

れる波高・周期の相關図から、等波形勾配線を利用して決定する。確率波周期の算定は、発達期から最盛期にかけての波が、一定の波形勾配を有する特性に着目し、確率波高から推定する方法を採用する。

このようにして、本システムを利用すると、日本沿岸の全てを対象とする波浪推算値データベースの蓄積と、これを利用する日本沿岸の波候統計解析<sup>19)</sup>、沿岸確率波分布の作成等の種々の調査を容易に行うことが可能である。図-9は、日本沿岸を対象とする深海波浪推算により計算された1990年8月8日から12日までの期間最大有義波高の分布である。この波浪推算では、日本沿岸を対象とする $1/3^\circ$ 格子と、その外側の $1^\circ$ 格子で領域構成がされている。 $1^\circ$ 格子の範囲は、北緯 $15^\circ$ から $48^\circ$ 、東経 $115^\circ$ から $170^\circ$ であり、太平洋上で発達する波浪を十分に考慮するように設定されている。また、波浪の推算値データベースには、 $1/3^\circ$ 格子点全てについて、推算期間内の方向別最大有義波諸元が保管される。

次に、外洋と通じる内湾の設計波を算定するために、浅海変形を考慮する必要がある場合は、浅海波浪推算を利用することができる。図-10は、浅海波浪推算により求められた伊勢湾台風時の最大有義波高の分布である。領域内の地形は、熊野灘から遠州灘にかけての沿岸を $1.8\text{km}$ 、伊勢湾を $600\text{m}$ 格子で近似している。計算される平面波浪場を見ると、水深が $150\text{m}$ 以浅の海域において波浪変形が生じ、波高が減衰する。また、伊勢湾内の西部海域は、外洋からの侵入波の影響を受けていることが確認できる。なお、計算領域の沖側境界では、外洋を対象とする深海波浪推算を先行して行い、この計算から求められる境界格子の方向スペクト

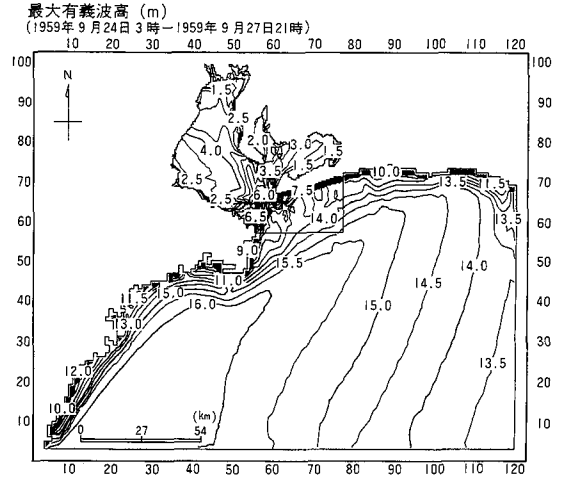


図-10 浅海波浪推算により求められる伊勢湾台風時の最大有義波高の平面分布

ルが、計算時間間隔毎に境界条件として与えられる。

#### b) 沿岸波浪予測

波浪解析の中で、設計波浪解析とともに重要なものに、波浪予測がある。本システムの波浪予測法には、日本沿岸を対象に、低波浪期から高波浪期を通じて適用可能な物理因子重回帰モデルによる波浪予測と、台風期を対象とする単地点出力型の波浪予測モデルが挙げられる。

物理因子重回帰モデルによる波浪予測は、予測する時刻と予測計算を行う現時刻の推算波浪エネルギーと、現時刻の観測波浪エネルギーを説明変数とする線形重回帰式を波浪予測式として用いる。ここで、予測式中の各説明変数に係る重回帰係数は、過去の予測値と観測値との重回帰解析からあらかじめ決めておくことになる。予測計算においては、説明変数である推算波浪エネルギーを計算するために、現時刻と予測時刻の風推算が必要となる。そこで、現時刻の風推算は速報天気図、予測時刻の風推算は予報天気図から得られる気圧情報を利用して行う。推算海上風から計算される推算波浪エネルギーと観測波浪エネルギーを、波浪予測式に代入すると、瞬時に予測値が計算できる。

図-11は、物理因子重回帰波浪予測モデルを用いた1983年2月の常陸那珂港における12時間後の波浪予測結果である。予測波浪は、風波とうねりの2成分に分離して出力される。上から順に、風波とうねりの合成波の予測波向、予測有義波高と観測値の経時変化、予測有義波周期と観測値の経時変化、風波とうねりの成分波波向、風波とうねりの相当有義波高と相当有義波周期の各経時変化である。低波浪期、高波浪期とも波浪期、高波浪期ともに、観測値とよく合致する良好

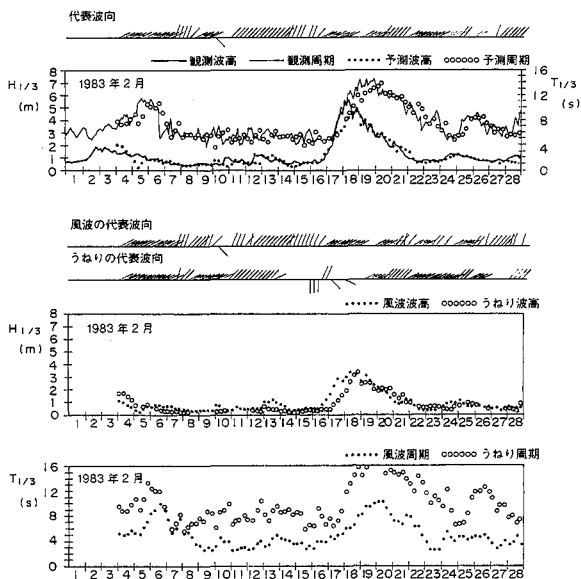


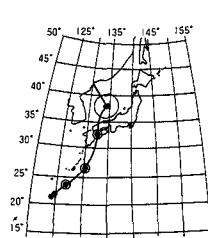
図-11 物理因子重回帰波浪予測モデルによる常陸那珂港の12時間波浪予測結果及び風波とうねりの分離結果

な予測結果である。ここで、予測結果を基に、波浪特性について考察を加える。

まず、波浪発達期を見ると、合成波の波向は風波の波向と一致し、波浪減衰期を見ると、合成波の波向はうねりの波向と一致する。また、風波とうねり各々の成分有義波高を見ると、最大の高波が発達した17日は、風波成分が卓越し、20日～21日にかけての波浪減衰期は、うねり成分が卓越する。周期についても、波浪の発達期は、風波成分と合成波の周期がほぼ同じとなる。ここに述べたように、本システムの波浪予測モデルは、有義波高予測のみならず、有義波周期、波向の予測、風波成分とうねり成分の分離が可能である。さらに、この沖波予測値は、浅海域の複数地点において沿岸係数データベースを準備すれば、浅海波浪情報に変換することが可能である。すなわち、従来の沖波予測のみならず、港湾・海岸周辺の複数地点を対象とするきめ細かい波浪予測へ応用することが可能である。

一方、台風来襲時のみの波浪予測を目的とする場合、より簡単な方法として単地点出力型の波浪予測モデルがある。図-12は、高知沖を対象とする台風8219号の波浪追算結果を、PC画面に出力したものである。画面には、台風経路・台風規模・観測波浪の経時変化が表示され、計算の進行とともに有義波高・周期・波向に関する計算値が表示される。この結果は、既往台風の経路・規模等を入力値として与え、台風モデルによる風追算と波浪追算を行ったものであるが、台風の予

スペクトル法による波浪推算  
(36, 高知沖, 56, T8219)



6 計算終了

図のハードコピーをとりませんか?(Y/N)

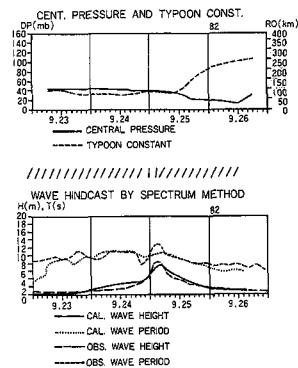


図-12 単地点出力型波浪推算モデルによる台風時の高波予測の画面出力

測経路および規模等の情報を入力すると、台風時の波浪予測を行うことが可能である。なお、入力はマウス・キーボードで行い、予測計算も全てPCのみで行われる。試算の結果、5日間を対象とする波浪予測の所要時間は約1分である。

## (2) 設計潮位解析と解析システム

### a) 設計潮位解析の流れと解析システム

波浪とともに、沿岸構造物の設計を行う場合に必要となる外力解析に、設計潮位の解析が挙げられる。特に、沿岸防災を目的とする海岸保全施設等の設計では、設計潮位を定めることが重要な課題となり、設計潮位として高潮・津波により生ずる異常潮位が用いられる。ここでは、本システムを利用する設計潮位解析の流れを述べるとともに、海域別の設計潮位解析への適用事例を挙げる。

設計潮位の算定ならびに防災構造物による潮位の低減効果等を調べるために、高潮・津波の数値シミュレーションがよく用いられる。図-13は、数値シミュレーションを中心とする設計潮位解析と解析システムの関係を整理したものである。設計潮位は、通常、高潮・津波により生じた既往最大値を基本とする。そのため、始めに、設計潮位に該当する既往最大の高潮・津波水位を定める。そして、既往最大水位の要因となる現象が、高潮であれば台風を、津波であれば波源を選定し、この条件下で、高潮・津波の再現計算を行う。数値シミュレーションを行うためには、計算範囲の決定と、計算格子・格子点水深による地形近似が必要となる。また、高潮計算であれば台風パラメータ、津波計算であれば断層パラメータ等の入力データ作成が必要となる。

一般に、高潮・津波の数値シミュレーションは、台風または波源を含む沖合海域から対象とする海岸・港湾区域にかけて、格子間隔の異なる領域を順次結合し、

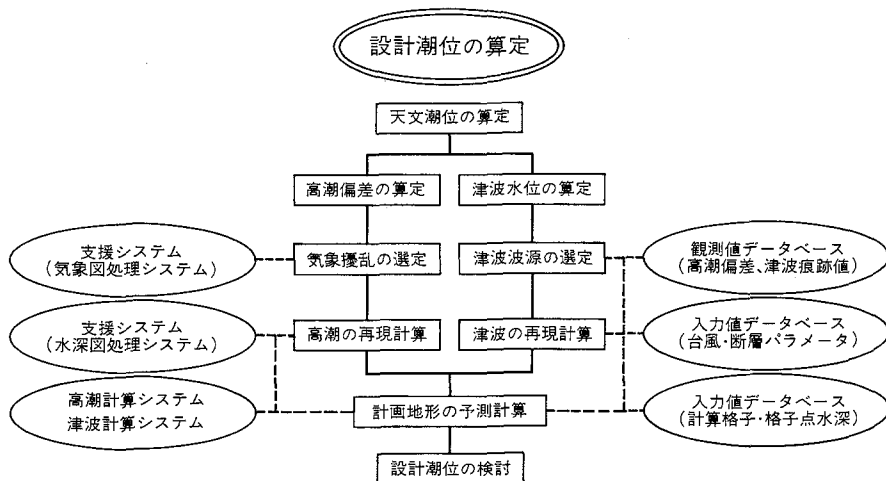


図-13 設計潮位解析と解析システム

同時計算を行う。計算を短時間で効率的に行うためには、大きい計算格子間隔で地形近似を行えばよい。しかしながら、計算において、数値計算上で現れる離散化誤差と打ち切り誤差を小さく抑えるためには、波長の  $1/20$  から  $1/30$  以上の細かい格子間隔を適用する必要がある<sup>20), 21)</sup>。高潮・津波の波長は、沖合の深海域で長く、水深が浅くなるとともに短くなる。そのため、計算誤差を小さく抑え、かつ計算を効率的に行うためには、波長が長い深海域で格子間隔を大きくし、波長が短い浅海域で格子間隔を小さくする格子配置計画が重要となる。ここで、本システムでは、沿岸格子を  $200\text{m}$  で地形近似することを基本としている。

このようにして、既往最大の高潮・津波の再現計算を行った後、計画地形に関する予測計算を行うという段階を踏む。計算結果が得られると、結果の解析と設計潮位の検討が行われる。さらに、必要に応じて、モデル台風・モデル断層による予測計算を行う。

本解析システムは、日本沿岸の海域を選択することで、図に示す一連の潮位解析に関する処理を行うことが可能な数値解析システムとして設計され、どの海域についても適用可能な汎用的システムである。

解析システムの根幹をなす数値シミュレーションの最大の特徴は、決められた書式のコントロールデータを編集するだけで、海域・外力別の計算プログラムを作成し、入力データを入力データベースから抽出するように設計されている点である。このコントロールデータの編集は PC 画面による対話形式で行い、1つのデータにより、高潮・津波計算に必要な計算格子・格子点水深と、計算範囲・格子間隔・時間間隔・断層パラメータまたは台風定数等の入力情報とが連結し、すばやく計算準備が完了する。

ここで、数値シミュレーションに使用する計算格子・格子点水深は、あらかじめ入力値データベースに登録する。計算格子・格子点水深データは、水深図処理サブシステムと水深図データベースを利用することにより、日本沿岸の海域・陸域の区別なく、任意の計算範囲、任意の格子間隔で作成することが可能である。また、港湾・海岸等において詳細な地形近似を必要とする場合には、対象港湾・海岸の計画平面図や深淺測量図等をデータベース化すれば、詳細な格子情報が作成できる。

先に、数値シミュレーションにおいて海域を選択すると述べたが、高潮・津波の計算システムは、日本沿岸を海域別に分割してシステム化することを基本としている<sup>14), 22)</sup>。これは、日本沿岸の全てを詳細な地形近似で同時に計算することが効率的ではないことと、海域別に対象とする台風、津波の波源が異なるためである。海域別のシステムは、それ自体で完成されたものであるが、海域内の新たな港湾・海岸を対象とする計算を行う必要が生じた場合には、対象とする港湾・海岸の計算格子等の入力データを、入力値データベースに随時追加・拡張すれば良い。また、断層・台風の情報には、識別番号が割り当てられ、既往高潮の計算では、台風番号を選択して、台風データベースから入力データを作成する方法を採用しており、既往津波の計算であれば、津波番号を選択することにより、断層パラメータデータベースから入力データが作成される。

このようにして実行される数値シミュレーションの計算結果は、高潮・津波の出力サブシステムにより画面または紙面に出力される。また、格子点毎の最大高潮偏差・最大津波高等の情報が、高潮・津波の推算値データベースに収録される。この計算値は、観測値デ

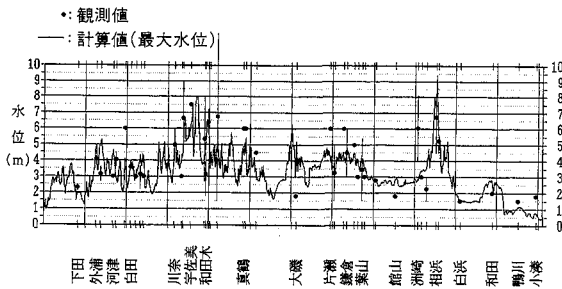


図-14 大正12年関東津波来襲時における南関東沿岸の津波痕跡高と計算値の分布比較

データベースに収録されている高潮偏差または津波痕跡高のデータと照合され、計算精度の検証ならびに計算値の補正を容易に行うことが可能となる。図-14は、大正12年関東地震津波来襲時の南関東沿岸における津波痕跡高と最大津波高計算値の沿岸分布を比較したものであり、痕跡高と計算値の沿岸分布に良好な一致が見られる。

#### b) 海域別高潮解析システム（伊勢湾）

次に、海域別高潮・津波の解析システムの適用例として、過去最悪の高潮災害となった伊勢湾台風時の伊勢湾の高潮解析について述べる。伊勢湾の設計潮位の解析では、伊勢湾台風による高潮の平面分布が、そのまま設計潮位条件を決定するための基礎資料となる。この高潮解析の中心となる高潮数値シミュレーションを精度良く行う上で、計算範囲と計算領域内の地形近似の精度を決定することは、計算準備段階の重要な検討項目となる。

高潮は、台風接近時刻に顕著となるが、台風が遠方に位置する場合も、台風圏内で発生した自由波が外洋を伝播し、湾内に侵入して水位を上昇させることがある。いわゆる高潮前駆波の1要因である。さらに、外洋で発生する吹送流が沿岸部に吹き寄せられ、湾口部から湾内全域の水位上昇に影響を及ぼすことも考えられる。このため、高潮計算の領域は、大陸棚と内湾を中心とする海域と台風の通過海域を含む広範囲の外洋域で構成する。

一方、沿岸部は、港湾構造物等の微細な地形が高潮に与える影響を評価可能なように、数100m程度の格子近似は最低必要となる。また、水深の浅い内湾域では、天文潮位の影響を無視できない。特に、高潮に伴う陸上浸水量を計算する場合には、精度の高い天文潮位の計算が必要となる。ただし、現在の潮汐計算の技術では、外洋の潮汐計算と内湾の高い精度を必要とする潮汐計算を同時に行うことは、外洋境界条件の情報不足もあり、適切な方法とは言えない。このような点

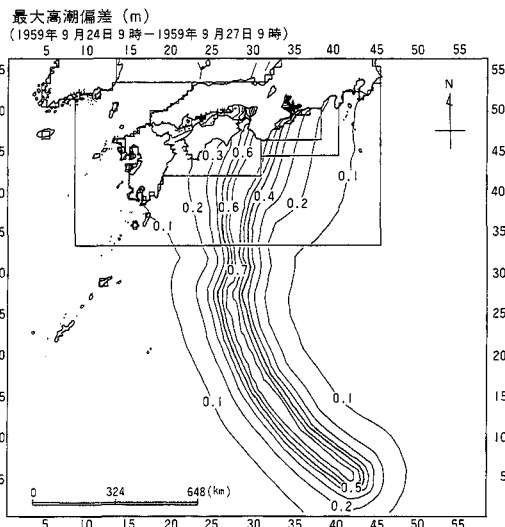


図-15 伊勢湾高潮計算における外洋領域と伊勢湾台風時の最大高潮偏差の分布

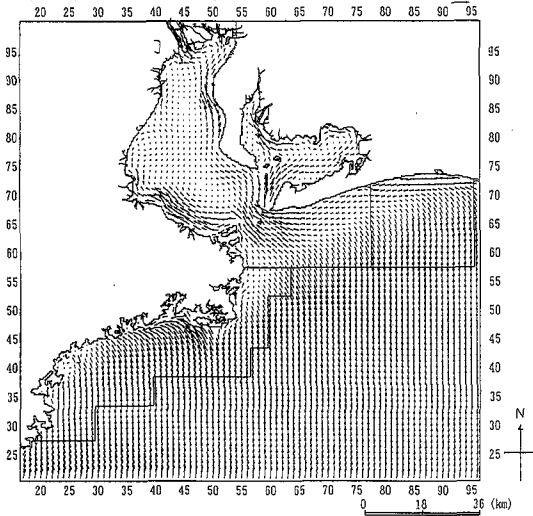
を考慮し、高潮の計算システムでは、計算領域を、外洋領域と内湾領域に分離する方法を採用し、計算の効率化を図る。ここでは、伊勢湾を比較的粗い計算格子で地形近似した外洋領域の高潮計算の例を述べる。

図-15は、伊勢湾高潮解析システムを利用して計算された外洋領域における伊勢湾台風時の最大高潮偏差の分布である。太平洋を含む広範囲を対象とする外洋領域は、計算を効率的に行うために、8領域で構成し、3240m格子の外洋域から600m格子の伊勢湾を中心とする沿岸域へと、次第に小さい格子により地形を近似する。各々の領域は、1/2または1/3の比率で、段階的に格子結合がなされ、全領域で連続計算を行う。

次に、流速に着目してみる。図-16は、上層厚を30mとする2層モデルにより計算された伊勢湾台風時の沿岸域における上・下層の流速分布である。図を見ると、風向と同方向の強流速帯が上層に現れている。一方、下層は逆流が生じている。このように、多層化を行うことにより、上層の流速分布は現象により近いものとなる。

さらに、高波が来襲する海岸における発生高潮の計算精度を高めるために、波浪による水位上昇量を考慮する。図-17は、気圧・風効果のみを考慮したモデルと、波浪による水位上昇も考慮した波浪・高潮ハイブリッドモデルにより求められる伊勢湾台風時の最大高潮偏差の分布を比較したものである。左図の気圧・風効果のみを考慮した場合に、熊野灘で、伊勢湾台風の上陸時の中心気圧950hPaにほぼ該当する60cm程度の最大高潮偏差が計算される。しかし、この計算値は、観測された最大高潮偏差よりも1.0m程度過小となる。

高潮流速ベクトル分布図 m/s  
(1959年9月26日20時00分) (上層) 1.0(m/s)



高潮流速ベクトル分布図 m/s  
(1959年9月26日20時00分) (下層) 1.0(m/s)

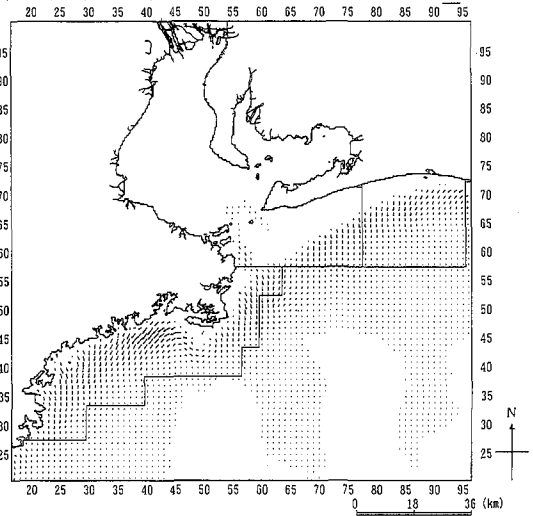
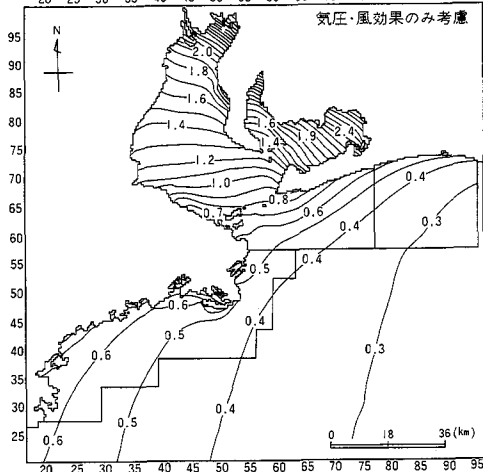


図-16 2層モデルで推算された熊野灘から伊勢湾・遠州灘にかけての上・下層の流速分布

最大高潮偏差 (m)  
(1959年9月24日9時-1959年9月27日9時) 気圧・風効果のみ考慮



最大高潮偏差 (m)  
(1959年9月24日9時-1959年9月27日9時) 気圧・風・波浪効果を考慮

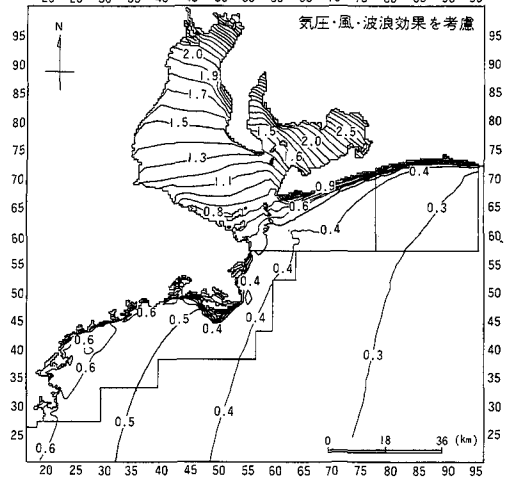


図-17 気圧・風効果のみ考慮した場合と波浪効果も考慮した場合における伊勢湾台風時の最大高潮偏差の分布比較

一方、右図に示す波浪効果も考慮した場合、熊野灘から遠州灘にかけての海岸部において、40~50cm程度の波浪による水位上昇量が風・気圧効果の上に重なって計算される。この結果は、海岸部の地形近似を600m格子で行ったものであり、波浪による水位上昇を計算する上で粗い地形近似である。そのため、波浪による水位上昇は、依然過小と考えられるが、地形近似を100m格子程度で行うと、高潮の再現性はさらに向上する。

ここで述べたように、高潮の設計条件を決定するに当たり、現象を的確に捉え、数値シミュレーションに反映することが重要な点となる。

次に、伊勢湾奥を200m格子で地形近似する港湾内の高潮予測の事例について述べる。図-18は、伊勢湾奥の名古屋港周辺における昭和34年の伊勢湾台風来襲時と高潮防波堤(開口幅500m)設置時の仮想地形の最大高潮偏差の平面分布を表す。左図が再現値、右図が予測値である。高潮防波堤による名古屋港内の高潮低減効果が予測されている。

### c) 海域別津波解析システム(三陸沿岸)

次に、津波の海域別解析の事例として、三陸沿岸を対象とする津波解析について述べる。三陸沿岸は、日本の代表的な津波常襲地帯であり、過去に、幾度となく大規模な津波災害が発生している。

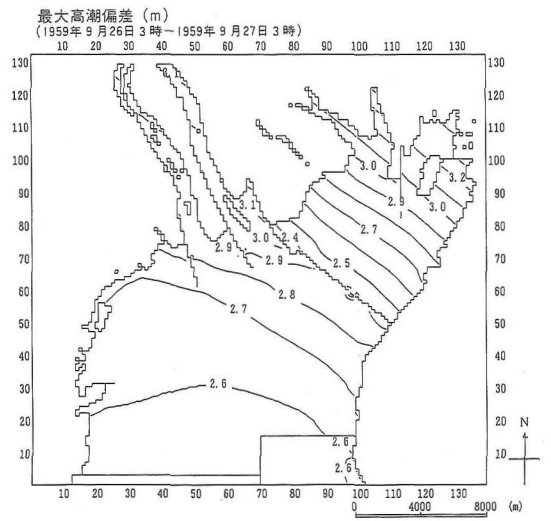
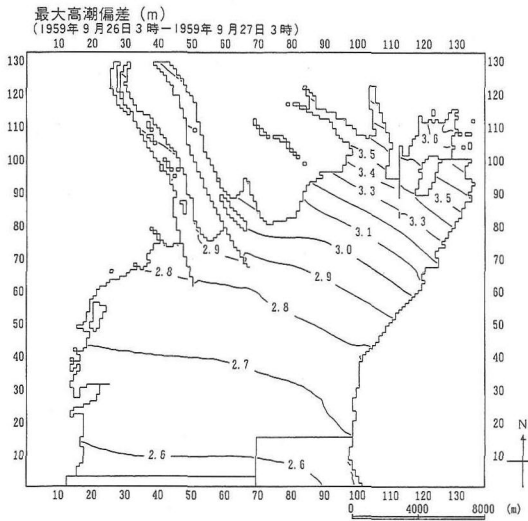


図-18 伊勢湾奥における昭和34年当時と高潮防波堤仮想地形の伊勢湾台風時の最大高潮偏差分布

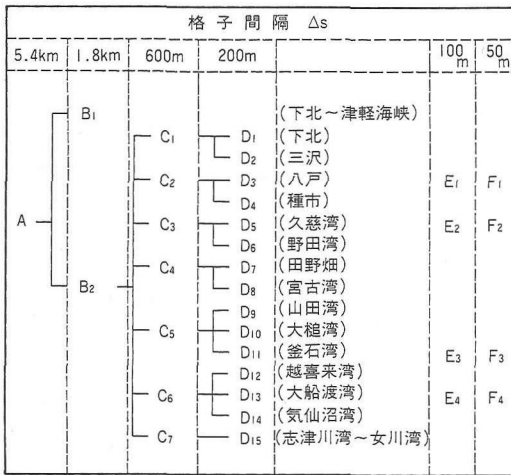


図-19 三陸沿岸海域の計算領域区分

図-19は、三陸沿岸を対象とする津波数値シミュレーションを行う海域の領域区分の構成である<sup>14)</sup>。三陸沿岸の計算領域は、領域内の水深により、前述した計算誤差を抑えるための格子間隔の設定基準を用いて、33領域に分割している。計算領域は、格子間隔AからFまでの6段階に分けられ、近地津波の波源域を網羅するA領域は格子間隔5,400m、対象港湾である大船渡・釜石・久慈・八戸の4港湾の地形を近似する、F<sub>1</sub>～F<sub>4</sub>領域は50m格子である。数値シミュレーションを行う既往の近地津波の断層パラメータは、入力値データベースに登録されている。

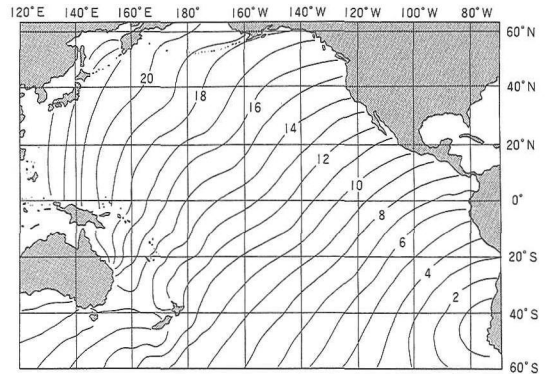


図-20 チリ地震津波の太平洋伝播計算領域と伝播図

一方、遠地津波であるチリ地震津波については、あらかじめ太平洋伝播計算を行い、三陸沿岸における津波入射波形を津波推算値データベースに登録する。そして、チリ津波の入射波形を格子間隔5400mで近似されたA領域の沖側境界において、入射波条件として与え、三陸沿岸の津波数値シミュレーションを行う2段階の方法を用いる。

図-20は、チリ地震津波の太平洋伝播計算から求められた津波の伝播図である。図の数字は、津波発生からの経過時間を表す。チリ地震津波の太平洋伝播計算の範囲は、太平洋全域を含む南緯60度から北緯60度、東経120度から西経70度、計算領域は1領域で、格子間隔は一律に緯度・経度で10分(赤道距離で約18.5km)を用い、総計算格子点数は約73万個に及ぶ。

図-21の上図は、三陸沿岸の津波計算によるチリ地震津波来襲時の大船渡湾の最大津波水位分布である。

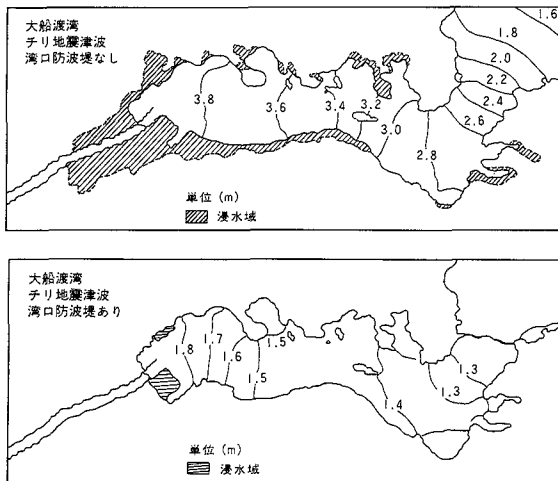


図-21 大船渡湾におけるチリ地震津波の最大水位分布  
(再現計算と湾口防波堤がある場合の予測計算)

図中の数値は、T.P. (m)を基準としている。また、図中に陸上浸水域を表す。大船渡湾のチリ地震津波は、湾口部で1.8m程度、湾奥部で4.5m程度の水位となり、湾全体でみると、湾口部から湾奥部に向かって水位が次第に高くなっている。湾の固有振動との共振による津波増幅と、市街地まで広がった陸上浸水が再現されている。

一方、下図は、大船渡湾に湾口防波堤が設置される地形を想定する場合に、予測されるチリ地震津波来襲時の最大水位分布である。図を見ると、津波の最大水位は、湾口部で1.2m程度、湾奥部で1.9m程度となり、湾内全体の津波水位は湾口防波堤により半減する。それに伴い、浸水域も、海岸線に津波防潮堤がなく、かつ地盤高の低い区域に限られることが予想される。

ここに述べた津波や、前述した高潮の数値シミュレーションにより明らかにされる水位・流速の平面情報が、港湾内の防災構造物の機能を定量的に把握し、かつ防災構造物の効果的な配置計画及び構造設計を行う上で有効となる。

## 5. おわりに

本論文は、日本沿岸における波浪・高潮・津波災害を対象とする防災関連調査の効率化を目的として、新たに開発した沿岸防災総合数値解析システム (INSPECT system) の設計概要と、システムの根幹をなす数値シミュレーションの計算理論、日本沿岸海域への適用事例について概説したものである。本システムの特徴を整理すると、以下のようにまとめられる。

①数値解析システムは、波浪・高潮・津波の数値解析に関する技術と解析方法を系統的に整理し、観測情報の整理、数値シミュレーションの入力データ作成、数値シミュレーションの実施、結果の解析、評価までの一連の処理を効率的に行えるように開発したものである。システム設計の基本方針は、技術者が、煩雑な解析処理と高度な専門知識を必要とせず、対話形式による簡単な操作で、迅速に成果を出力することである。

②使用する機器は、操作が簡単で近年広く普及しているエンジニアリングワークステーションとパーソナルコンピュータ、ならびにその周辺機器で構成されている。解析の成果は、画面・紙面出力の2種類を選択することができる。

③システムは、波候統計解析・波浪推算・津波計算・高潮計算・計算支援の5つのメインシステムと観測値・気象図・水深図・沿岸係数・数値シミュレーションの入力値・推算値の6種類の支援データベースから構成されている。各々のメイン解析システムと支援データベースには、複数のサブシステム・サブデータベースが準備されており、多数のシステムとデータベースを複合的に利用して解析処理を行うように工夫されている。

システムの根幹をなす数値シミュレーションは、海上風・波浪・高潮・津波個々の研究成果を踏まえた最新の数値計算技術に基づくものである。本論文では、システムを現地に適用した事例のうち、代表的なものを解析種類別にとりあげた。

システム開発に当たり、最新の数値シミュレーション技術の導入を目標としたが、今後改良すべき課題もいくつかある。それは、新たに開発される最新の数値計算技術を段階的に取り込むことである。例えば、風推算では、移動性低気圧や前線に見られる変圧効果を盛り込んだモデルがあり、波浪変形計算では、広領域における回折効果を考慮したモデルと海岸近傍における強非線形・強分散性を考慮した平面型モデルとの併用がある。津波計算では、ソリトン分裂する津波を計算する平面型の非線形分散波方程式モデルが挙げられる。また、高潮計算では、密度効果を考慮したモデル等が挙げられる。

今後、これらの数値計算モデルの開発を継続的に行い、システムに組み込むことにより、システム全体の技術水準を向上させる予定である。一方、既に構築済みのものの中にも、例えば、外洋伝播計算システムは、短周期の津波伝播計算精度に依然問題が残されており、近地津波計算用の海域別システムも津波周期によって、地形近似精度に問題が残る。したがって、今後の計算機能の向上に合わせて、海域別システムの継続的な地形近似精度の向上 (高精度化) を行う必要がある。

さらに、未整備の海域別システムの段階的な構築を行い、日本沿岸全域に適用事例を拡大しながら、システム全体の規模を拡張していく予定である。

謝辞：本研究は、著者らが運輸省港湾技術研究所に在籍していた時代、著者の一人が東京大学工学部土木工学科研究員として在籍していた時代を通じて、解析した結果を新たにとりまとめたものである。東北大学理学部鳥羽教授、東京大学工学部渡辺教授、磯部教授、運輸省港湾技術研究所野田所長、波浪研究室平石室長、京都大学防災研究所高山教授、神戸大学堀江教授から貴重な御指導、御助言を得た。また、港湾技術研究所海象調査研究室からは貴重なデータを提供して頂いた。さらに、運輸省第二港湾建設局佐藤技官、技術研究所根岸元職員の助力を得た。ここに、記して謝意を表す。なお、標高・海岸線データは、国土地理院国土数値情報を、水深データは、海上保安庁水路部水深統合データを利用した。

#### 参考文献

- 1) 後藤智明, 柴木秀之: 海上風の特性と陸上地形の影響を考慮した海上風推算モデル, 港湾技術研究所報告, Vol. 33, No. 3, 1993.
- 2) 柴木秀之, 後藤智明: 内湾海上風の地形依存性について, 第39回海岸工学論文集, pp. 141-145, 1992.
- 3) 後藤智明, 青野利夫: 単地点出力型スペクトル法による波浪推算システム, 港湾技術研究所報告, Vol. 31, No. 2, 1992.
- 4) 本多忠夫, 光易 恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93, 1980.
- 5) Isozaki, I. and Uji: Numerical prediction of ocean wind waves, Papers in Met. and Geophys., Vol. 23(4), pp. 347-356, 1973.
- 6) 後藤智明, 小舟治治: 現地で簡単にできる波浪推算法について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 222-226, 1988.

- 7) 柴木秀之, 渡辺 晃, 磯部雅彦: 浅海波浪推算モデルとその応用に関する研究, 第42回海岸工学論文集, pp. 341-345, 1995.
- 8) 永井康平, 堀口孝男, 高井俊朗: 方向スペクトルを持つ沖波の浅海域における伝播の計算について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 249-253, 1974.
- 9) 後藤智明, 柴木秀之, 青野利夫, 片山 忠: 波浪予測を目的とした物理因子重回帰モデル, 土木学会論文集, Vol. 473, pp. 45-53, 1993.
- 10) 後藤智明, 柴木秀之: 多層レベルモデルによる津波・高潮の数値計算法, 東海大学工学部土木工学科研究室ノート, 1994.
- 11) 柴木秀之, 後藤智明: 陸上地形の影響を考慮した内湾海上風の推算モデル, 第40回海岸工学論文集, pp. 166-170, 1993.
- 12) 小西達男: 外洋に面した港湾で生ずる高潮に対する Wave setup の寄与について, 海と空, 第66巻4号, pp. 45-57, 1991.
- 13) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 3, pp. 59-106, 1975.
- 14) 後藤智明, 佐藤一央: 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, Vol. 33, No. 2, 1993.
- 15) 首藤伸夫: 津波の計算における非線形項と分散項の重要性, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 432-436, 1976.
- 16) 後藤智明, 小川由信: Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科資料, 1982.
- 17) 後藤智明: 遠地津波の外洋伝播計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 30, No. 1, pp. 3-19, 1991.
- 18) 後藤智明, 亀山 豊, 柴木秀之: 日本沿岸波浪の推算システム, 海洋開発論文集, Vol. 8, 1992.
- 19) 青野利夫, 佐藤一央, 後藤智明, 池田明弘, 日本沿岸の極大波浪の出現特性について, 第40回海岸工学論文集, pp. 111-115, 1993.
- 20) 今村文彦, 後藤智明: 差分法による津波計算の打ち切り誤差, 土木学会論文集, Vol. 375, pp. 241-250, 1986.
- 21) 長谷川賢一, 鈴木孝夫, 稲垣和男, 首藤伸夫: 津波の数値計算における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 381, pp. 111-120, 1987.
- 22) 柴木秀之, 戸引 勲, 額田恭史, 後藤智明: 南関東津波計算システムの開発, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 265-270, 1994.

(1997. 11. 7 受付)

## DEVELOPMENT OF INTEGRATED NUMERICAL RESEARCH SYSTEM FOR PREVENTION AND ESTIMATION OF COASTAL DISASTER

Hidegori SHIBAKI, Toshio AONO, Toshifumi MIKAMI and Chiaki GOTO

This paper presented an outline of the design, basic theory of numerical research and applications of the Integrated Numerical Research System for Prevention and Estimation of Coastal disasters (INSPECT) system.

This system was developed to efficiently perform studies for preventing disasters on Japanese coasts due to wave, storm surge, and tsunami.