

沿岸域の防災数値解析と津波・高潮ハザードマップへの活用

Numerical Research for Prevention and Estimation of Coastal Disaster and Its Application to Hazard Map for Tsunami and Storm Surge Disaster

柴 木 秀 之
Hidenori SHIBAKI

1. 近年の日本沿岸の防災とその変遷

日本の国土は、環太平洋地震帯の真上に位置しており、千島海溝、日本海溝、南海トラフ及び日本海東縁部を震源とする海溝型地震が繰り返し発生している。この地震に伴い、日本の沿岸部は、度々甚大な地震・津波災害に見舞われている。大規模な被害が発生した代表的な地震津波に明治三陸地震津波と1960年のチリ地震津波が挙げられる。また、日本は台風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、高潮・波浪災害により、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はその代表例と言える。

このような沿岸域の大災害を契機に、沿岸部を津波・高潮災害から防護するため、防波堤や海岸堤防を中心とする海岸保全施設が精力的に整備されてきた。しかし、1994年北海道南西沖地震津波により被害を受けた奥尻島では、10年前に発生した1983年日本海中部地震津波を設計外力とする津波防護施設の建設がなされていたにもかかわらず、それを超過する規模の津波が来襲した。また、1999年の台風18号では、既往最大値を超過する高潮時の潮位により、九州沿岸から周防灘沿岸の広範囲において、浸水に伴う大規模な人的・物的被害が発生した。とりわけ、阪神・淡路の震災では、安全と考えられていた社会基盤自体が破壊しうることを経験した。これらの地震や津波・高潮の災害以降、津波・高潮の防護施設は、設計外力を超過する危険性が十分あり、防護施設を中心とするハード対策には限界のあることが、広く認識されるに至った。

このような超過外力による災害の経験を踏まえて、津波・高潮災害の防護の基本的な考え方は、防護施設によるハード対策から、ハード対策と避難を中心とするソフト対策を組み合わせた対策へと変化した。このハードとソフトの一体的な防災の基礎情報として、陸域で発生する浸水状況を地図上に表示した浸水危険度マップがある。現在、ソフト対策の柱として、浸水危険度マップに避難路や避難場所等の情報を付加したハザードマップを整備することが、防災の緊急の課題となっている。

このような全国規模の防災・減災への取り組みのなか、2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震に伴うインド洋津波による甚大な災害は、記録的な人的・物的被害規模になった。この災害により、従来の津波防災では、それほど注目しなかった漂流物による被害の拡大や構造物の破壊が、新たな対策上の課題となった。さらに、2005年8月25日にアメリカ合衆国南部沿岸で発生したハリケーン・カトリナによる高潮災害は、超過外力による防護施設の破壊が、災害を広域かつ甚大な規模まで拡大させることを改めて認識させた。日本においても、2004年に観測史上最多の上陸台風を記録し、全国各地で多数の高潮・波浪による災害が発生した。さらに、日本政府が設置した中央防災会議の想定によれば、西日本を中心とする広域の沿岸において、東海・東南海・南海地震及びそれに伴う津波による地震・津波災害の発生が危険視されている。

2. 総合的な沿岸防災解析のシステム化の背景

日本の沿岸域における津波・高潮防災の総合的な解析とは、主に、日本の沿岸域で発生する津波・高潮による災害現象の分析や、ハード・ソフト対策の有効性を検証することである。高潮や津波は、時空間規模の

大きな水理現象であるため、それに伴う災害も広範囲の沿岸域で発生する可能性が高い。このような津波・高潮による災害現象を、広範囲で同時に、かつ迅速に解析し、全沿岸域の津波・高潮による災害及び防災の関連情報を集積・管理するためには、何らかの仕組み作りが必要となる。災害要因の解明では、災害現象を科学的な手段を用いて再現することが必要条件となり、次に、明らかとなった要因をふまえて、将来の災害の発生を予測する。一連の解析作業においては、時空間的に密な津波・高潮に関する情報が必要となる。時空間規模の大きい津波・高潮による災害現象を解析する方法としては、数値解析（数値シミュレーションによる自然現象や人工構造物の影響等の解析と定義）が最も適切なものと言える。数値解析は、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を考えると、有効な手法であると言える。ただし、沿岸防災の数値解析を行うためには、災害や防災の関連情報を収集し、この情報を整理・分析し、関連情報を迅速に利用できるような、解析を支援する仕組みも望まれる。数値解析は高度な技術が集積されたものであり、解析を実施するのにあたって、多大な労力を要する点が障害となるためである。

一方、波浪・高潮・津波に関する数値解析技術の高度化と実用化を図るためには、数値解析の計算精度の評価や現地への適用性の評価を行う必要がある。このために、数値解析の処理過程を分析し、解析の流れを整理したシステム化を図ることは意義がある。津波・高潮による災害は、陸域への浸水とそれに伴う資産（港湾・海岸の資産も含む）の流出による災害が主であり、数値解析において使用する地形情報は共通である。また、その対策も、背後地の浸水、資産の流出、人的被害最小化のための対策等、共通する内容である。数値解析の処理や必要な情報が共通するため、津波・高潮の数値解析を統合するシステム化を行うことは効率的（経済的）である。数値解析のシステム化が必要な理由や条件は、表-1 のようにまとめることができる。表に示す項目を満足する具体的な仕組みとして、「沿岸域の総合的な防災数値解析システム」がある。

表-1 沿岸域の総合的な防災数値解析システムに求められる条件の一覧

広域解析が必要な理由

- 津波・高潮の現象は時空間規模が大きく、影響は広域に及び、現象の解明は広域を対象とする。
- 数値計算の入力条件は、広域において共通である。（例：津波波源条件、高潮時の台風条件）
- 数値解析の品質は、広域において同水準が確保され、相互比較が可能である。
- 広域災害の解析を同時に行い、同じ基準により被災状況を評価する。
- 広域災害の防災計画を作成するために、同一の情報（データ）と解析手法を使用する。

解析方法に求められる条件

- 港湾・海岸及びその背後における被災情報の収集・分析と数値解析による評価が共通する。
- 解析に使用する情報（データ）及び手法は、特徴が同じ沿岸域で共通する。
- 災害現象の解明や防護水準の現状評価及び対策立案が迅速に実施できる。
- 地域間の災害現象の比較や対策の必要性を同じ基準で評価する。
- 災害関連情報を提供する場合の基礎資料の作成が容易である。
- 定期的な解析情報の更新や最新の解析手法の導入が容易である。

解析結果に求められる条件

- 災害情報に関する共通の管理がなされ、地域の被災危険度を同基準で評価する。
- 個々の災害現象が高い精度で再現され、対策立案に必要な情報が提供できる。
- ハード対策を計画するための災害発生時の外力を確率的に評価できる。
- ソフト対策の前提条件となる想定最大規模の外力条件を設定できる。
- 共通手法による費用効果分析の基礎情報が提供でき、地域間の比較が可能である。
- 効率的かつ効果的な災害対策事業に有効な情報として提供できる。

データベースが必要な理由

- 災害現象の解析において、複数の情報を迅速に抽出し、解析に活用できる。
- 情報毎に共通する書式によって保管され、効率的な活用ができる。
- 多数の利用者への情報提供が、迅速かつ容易にできる。
- 情報が最新の状態に更新され、維持管理が容易にできる。

3. 沿岸域の防災総合数値解析システムの概略設計

3.1 数値解析処理の分析

国及び港湾・海岸管理者は、管理する港湾・海岸の防護水準を決定し、これに基づいて、防護施設の整備計画や被災時の避難計画を盛り込んだ地域防災計画を作成する。防災計画を作成するにあたり、次の2点について計画の実効性を評価する必要がある。

○計画条件（計画津波高、計画潮位（天文潮位・潮位偏差）、計画波浪）に対する対策効果の評価

○超過条件（計画を超過する想定条件）に対する対策効果の評価と被災状況の予測

数値解析は、沿岸地域個々の地形条件や外力条件を忠実に表現した解析が可能であり、この結果は、ハード・ソフトの一体的な対策に基づく防災計画の実効性を評価するための情報として提供される。防災計画において評価を行う具体的な対策の事例を、次に挙げておく。

○ハード対策：防波堤・防潮堤・水門・陸閘・流出防止施設の整備（新設・改良）

○ソフト対策：水門・陸閘の閉鎖体制、避難路・避難場所の整備、避難情報の提供

○一体的対策：ハードによるソフト対策の補完、避難ビルの建設、防災緑地・高台の整備

以上に述べた防災計画の作成において、最も重要な作業が、防災のための計画条件に関する解析である。ここでは、計画潮位条件の解析及び計画波浪条件の解析における作業過程の分析を行う。そして、解析作業のフロー化を行うとともに、解析を効率的に行うためのシステム化についてまとめる。図-1は、計画潮位及び計画波浪の解析過程を作業フローとして分析した結果である。個々の作業項目を実行するにあたり、必要となる解析手法と使用するデータを関連図として整理する。複雑な一連の作業は、多数の作業項目に分割され、それらが連続的に関連する。図より、個々の作業項目は、複数の解析手法とデータを利用することが明らかになる。このような複雑に関連した全体の作業を、システム化するという観点で個々の作業毎に分析すると、数値解析システムの全体構成図がまとめられる。

3.2 システムの構成要素とその概説

前述した潮位及び波浪の計画条件に関する解析作業を分析すると、沿岸域の防災総合数値解析システムは、5つのシステムとデータベースによる構成としてまとめられる。さらに、5つのシステムには、複数のサブシステムが組み込まれる。このシステムの構成は、図-2 上図のように表される。図によれば、多数の要素により全体のシステムが構成されていることがわかる。また、サブシステムを構成する多数の要素の個々の概説は、図-2 の下図にまとめる。

システムを構成する5つのシステム及びデータベースは、大別すると、波浪・高潮・津波の数値計算システムと、計算を支援する解析用システム及び解析用データベースの3種類に分類される。波浪推算システムは、3次元気流数値計算モデル等による海上風推算、WAMによる沿岸の波浪推算と外洋侵入波の波浪推算の3解析手法で構成される。高潮推算システムは、沿岸の高潮推算と外洋側の境界位置の高潮推算の2解析手法で構成され、沿岸高潮推算はWave Setupによる水位上昇を考慮できる。また、海上風推算は波浪推算システムと共有する。津波計算システムは、東南海・南海地震等に伴う近地津波とチリ地震に代表される遠地津波の計算の2解析手法で構成され、津波の特性により、線形・非線形の長波モデルと分散波モデルを選択する。支援データベースは、気象・海象情報、地形・構造物情報、推算値情報、災害関連情報の4種類で構成され、維持管理及び更新により最新情報が保管される。個々のサブシステムは、簡易な操作性を重視し、対話型入力のためのメニュー画面により、マニュアルレス化を図っている。

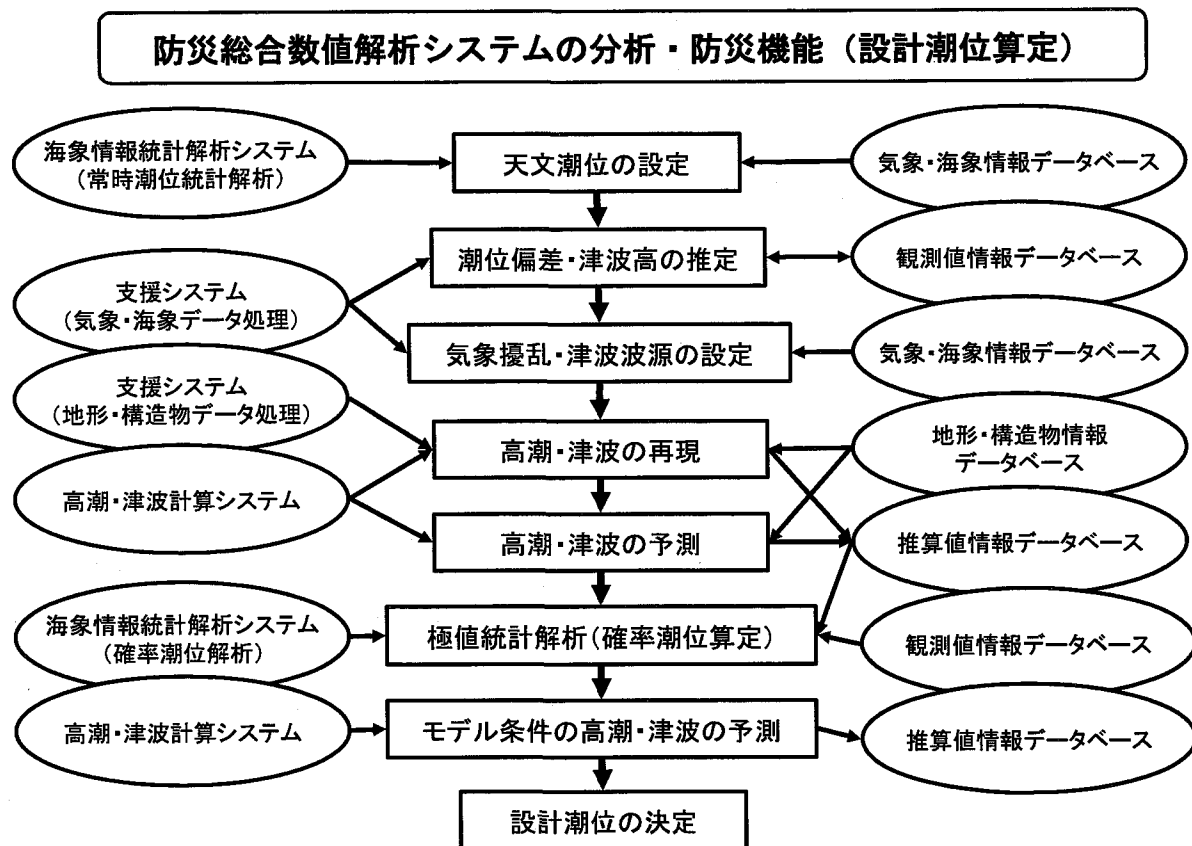
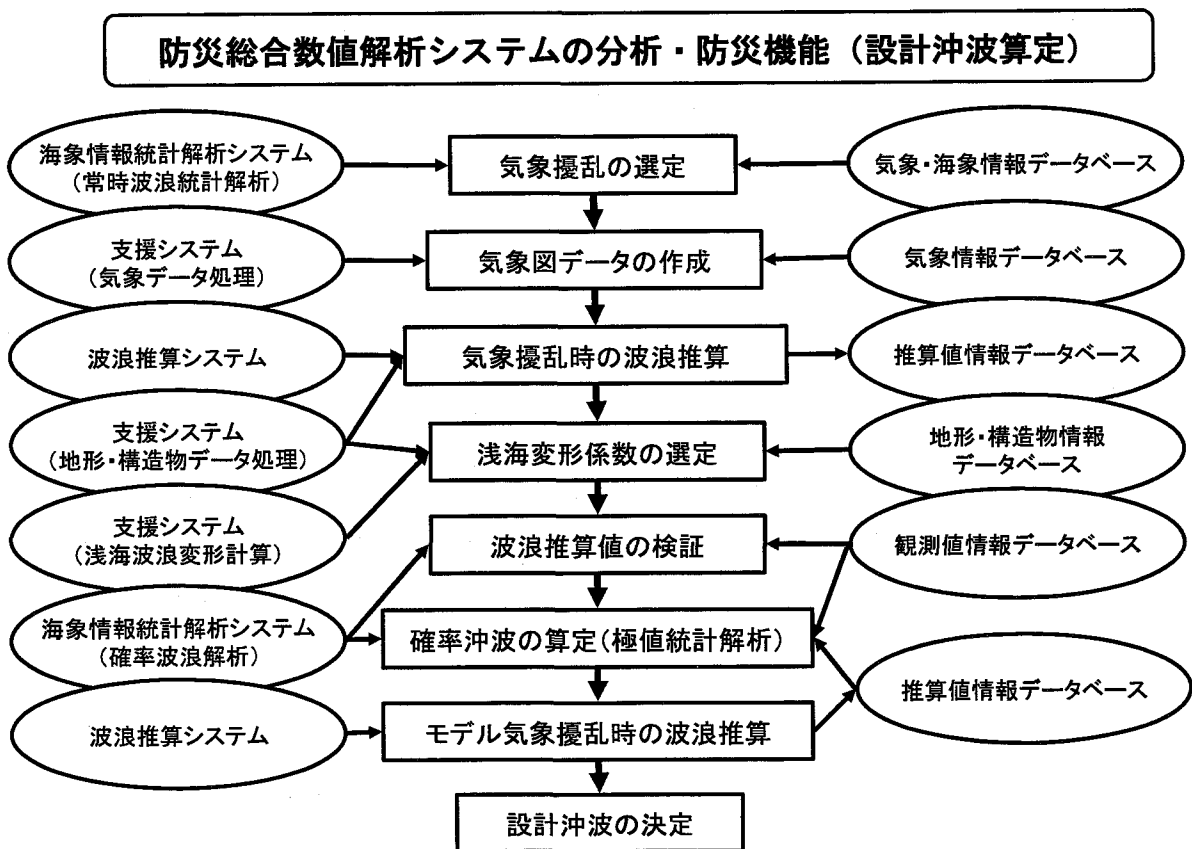
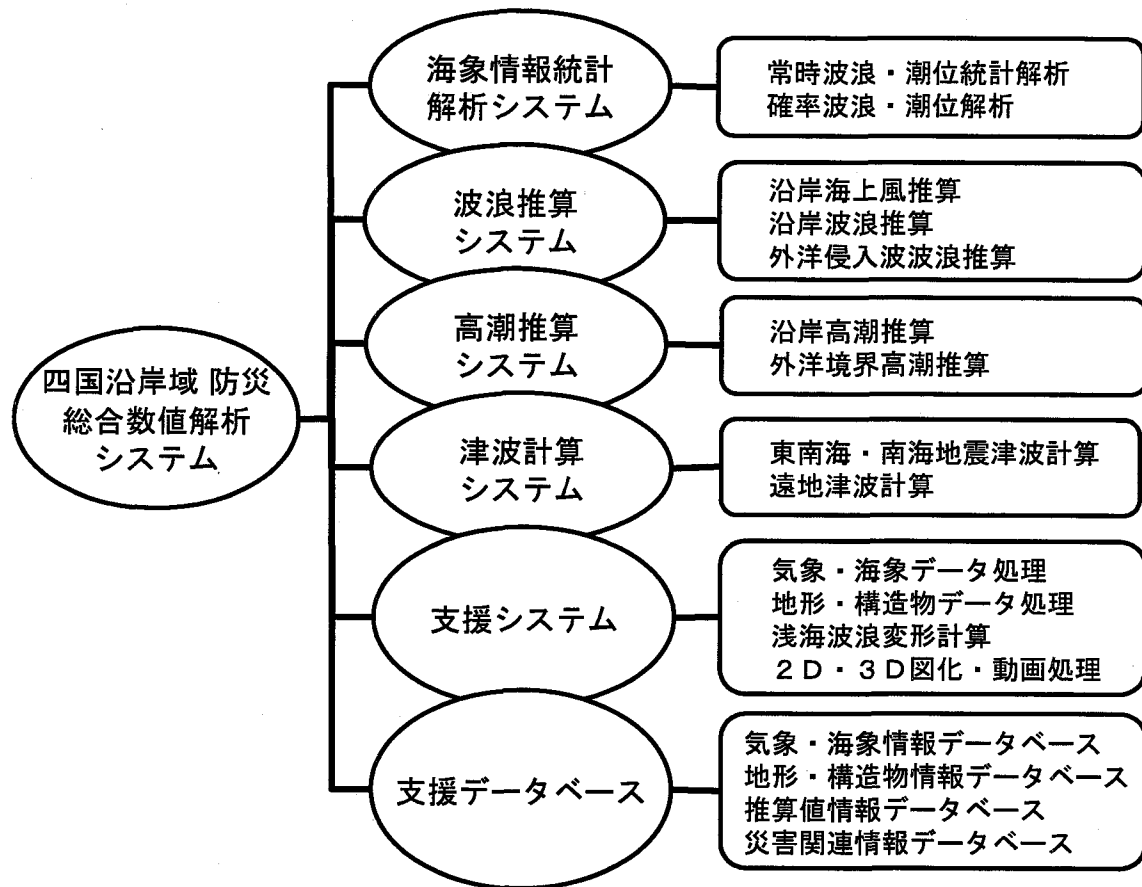


図-1 設計潮位及び設計波浪の算定における処理フローと個別の解析手法との関連



常時波浪・潮位統計解析 確率波浪・潮位解析	常時の観測値・推算値の統計解析（波浪・潮位出現頻度等） 年最大値・極大値の極値統計解析（設計波浪・潮位の算定等）
沿岸海上風推算 沿岸波浪推算 外洋侵入波波浪推算	複雑な陸上地形の影響を考慮した海上風の推算 瀬戸内海沿岸を対象とする浅海波浪推算 外洋境界からの侵入波浪を対象とする深海波浪推算
沿岸高潮推算 外洋境界高潮推算	瀬戸内海沿岸を対象とする陸域浸水を考慮した高潮推算 外洋境界で発生する高潮時の偏差を対象とする高潮推算
東南海・南海地震津波計算 遠地津波計算	東南海・南海地震による津波を対象とする津波浸水計算 遠地から伝播する津波（チリ津波）を対象とする津波浸水計算
気象・海象データ処理 地形・構造物データ処理 浅海波浪変形計算 2D・3D図化・動画処理	天気図・GPVデータの処理を行うサブシステム 海岸線・水深・地盤高・構造物データの処理を行うサブシステム 海岸までの浅海域の波浪変形計算を行うサブシステム 計算結果の2D・3D図化・動画等の作成処理を行うサブシステム
気象・海象情報データベース 地形・構造物情報データベース 推算値情報データベース 災害関連情報データベース	気象・海象観測値・天気図・GPV等を保管するデータベース 海岸線・水深・地盤高・構造物情報を保管するデータベース 波浪・高潮・津波の推算値情報を保管するデータベース 沿岸部災害・防災関連情報を保管するデータベース

図-2 沿岸域の防災総合数値解析システムの構成と構成要素の概説

3.3 沿岸域の防災総合数値解析システムの機能

この防災総合数値解析システムが担う機能は、図3に表す3つに分類する。速報機能は、災害現象と災害危険度に関する任意の時刻の状況を、短時間に予測することを目指し、分析機能は災害現象の再現と災害要因の分析を行い、防災機能は災害危険度の評価や防災対策の機能を評価する。解析結果は、支援システムに登録された2D・3Dの図化・動画処理サブシステムを援用して、拡大・縮小機能を有する画面や紙面への出力と画像データ形式の出力により迅速に処理される。図化・動画処理は、災害・防災関連の報告等の作成において、視覚的な理解を補助する有効な手法として期待される。

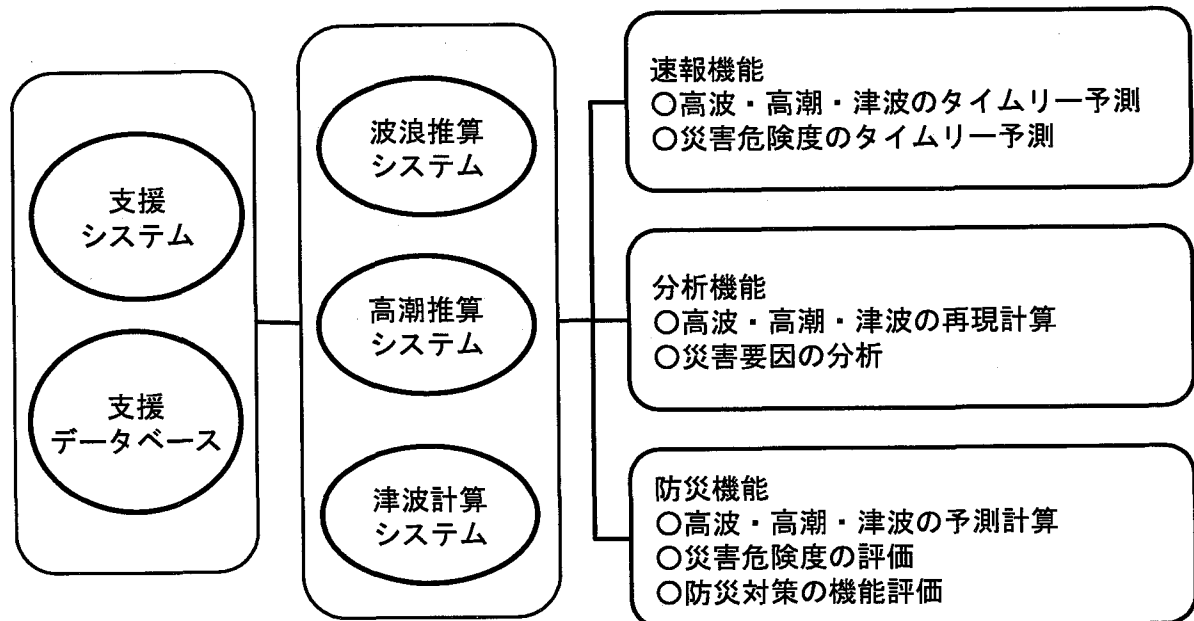


図-3 沿岸域の防災総合数値解析システムに期待される機能

3.4 システムの適用範囲とその段階的な拡充

図4に表すように、沿岸域の防災総合数値解析システムは、太平洋、日本海沿岸、三大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）や瀬戸内海等の日本の沿岸全域を対象とする広域を適用範囲とし、同時に、重要な港湾・海岸区域等について、詳細な解析を行うことを基本とするシステムである。日本の沿岸域における波浪・高潮・津波の現象を精度良く再現するためには、外洋に面する太平洋沿岸や、水道を通じて外洋と接する半閉鎖的な内湾に見られる多数の島々や複雑な海岸・海底地形をデータ化する必要がある。また、港湾・海岸の構造物等の微細な地形も表現するデータ化を行う必要がある。さらに、港湾・海岸周辺の地形は、人工的に変化するため、常に、最新情報を維持する必要がある。このような地形の高精度なデータ化が、波浪・高潮・津波の数値計算の精度を左右する。日本の沿岸全域の地形データ化を行うことは、多大な時間と労力を要する。そのため、システムの維持管理及び更新の1項目として、日本沿岸の重要港湾区域をはじめ、地方港湾区域や海岸保全区域等について、段階的に地形の詳細なデータ化を行い、地形・構造物情報データベースを拡充していく。この維持管理及び更新により、システム全体の完成度が高まるとともに、広域の数値解析を迅速に行うことが可能になる。

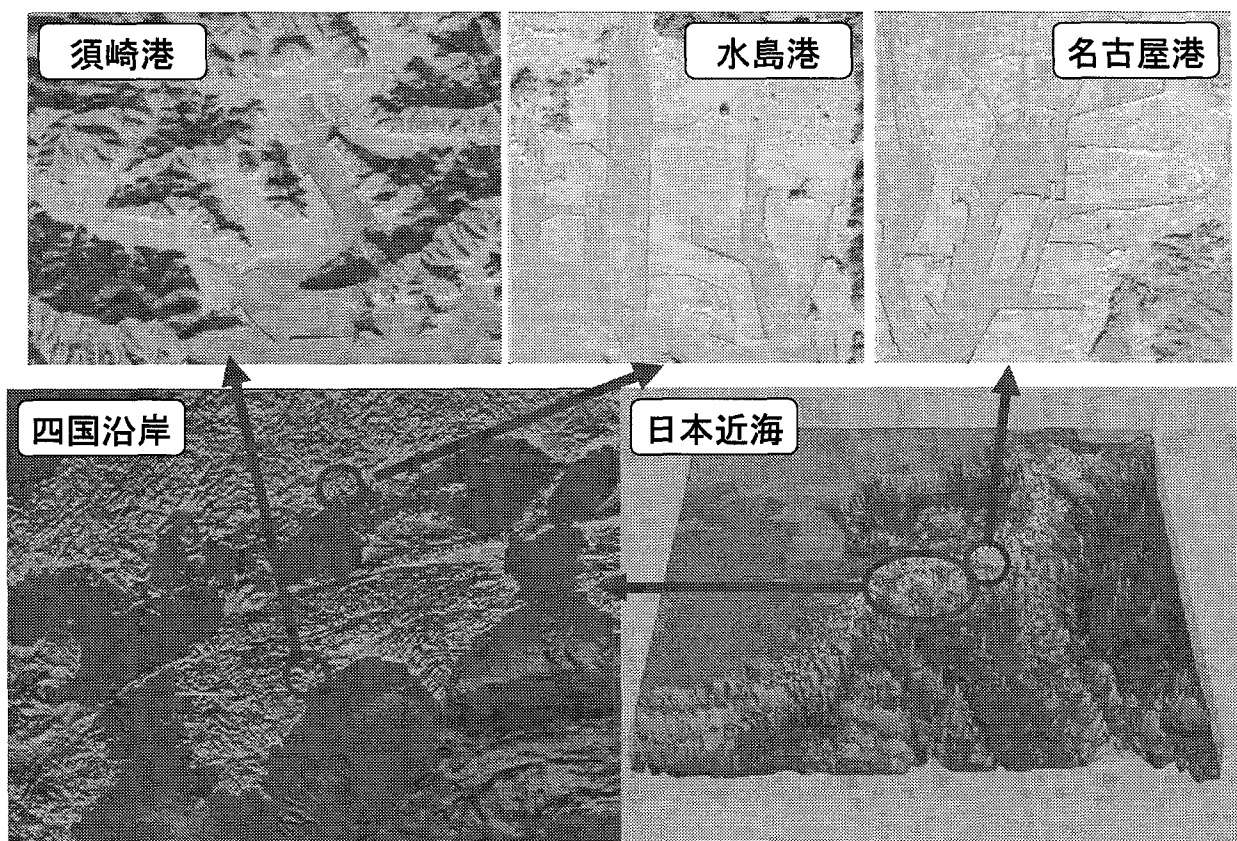


図-4 沿岸域の防災総合数値解析システムの適用範囲と港湾・海岸区域の詳細な地形データ化

3.5 防災総合数値解析システム構築の効果

沿岸域の防災総合数値解析システムを構築することにより、多くの効果を期待できる。ここでは、現状の解析と構築後の解析を比較することにより、期待される効果をまとめる。図-5 は、システム構築に伴う効果を模式的に表すものである。

- 現 状：波浪推算・高潮推算・津波計算は、独立した数値解析業務として実施される。そのため、各々の業務において、入力データの作成と計算処理が行われる。また、波浪・潮位の観測データの解析も、独立した解析業務として実施される。そのため、各々の業務において使用するデータの質は異なり、情報の統一化が図られない。
 - 構築後：数値計算から観測データの解析処理まで、1つのシステムにより実施ことが可能になり、地形データや観測データを共有化できる。また、数値解析の入力データを管理・更新することにより、全ての数値解析業務は、同程度の品質を有するデータにより実施することが可能になる。
 - 付加価値：高潮災害の典型的なパターンとして発生する高潮と波浪との複合的現象である越波と、それに伴う陸域への浸水に関する数値解析が、1つのシステムのなかで効率的に実施できる。図-6 は、計算システムを利用した解析の事例として越流・越波による浸水計算の概念図を表す。
- また、波浪推算・高潮推算・津波計算のサブシステムを構築すると、次のような利用用途が期待される。
- 台風接近時における潮位・波浪の任意時刻の予測と沿岸域の防災行動への寄与
 - 港湾・海岸で発生した高潮災害の迅速な要因分析とその対策の立案
 - 広域計算と、沿岸域の詳細な計算の効率的な処理による重複作業の解消
 - 地域防災計画を立案するための迅速かつ容易な支援情報の提供

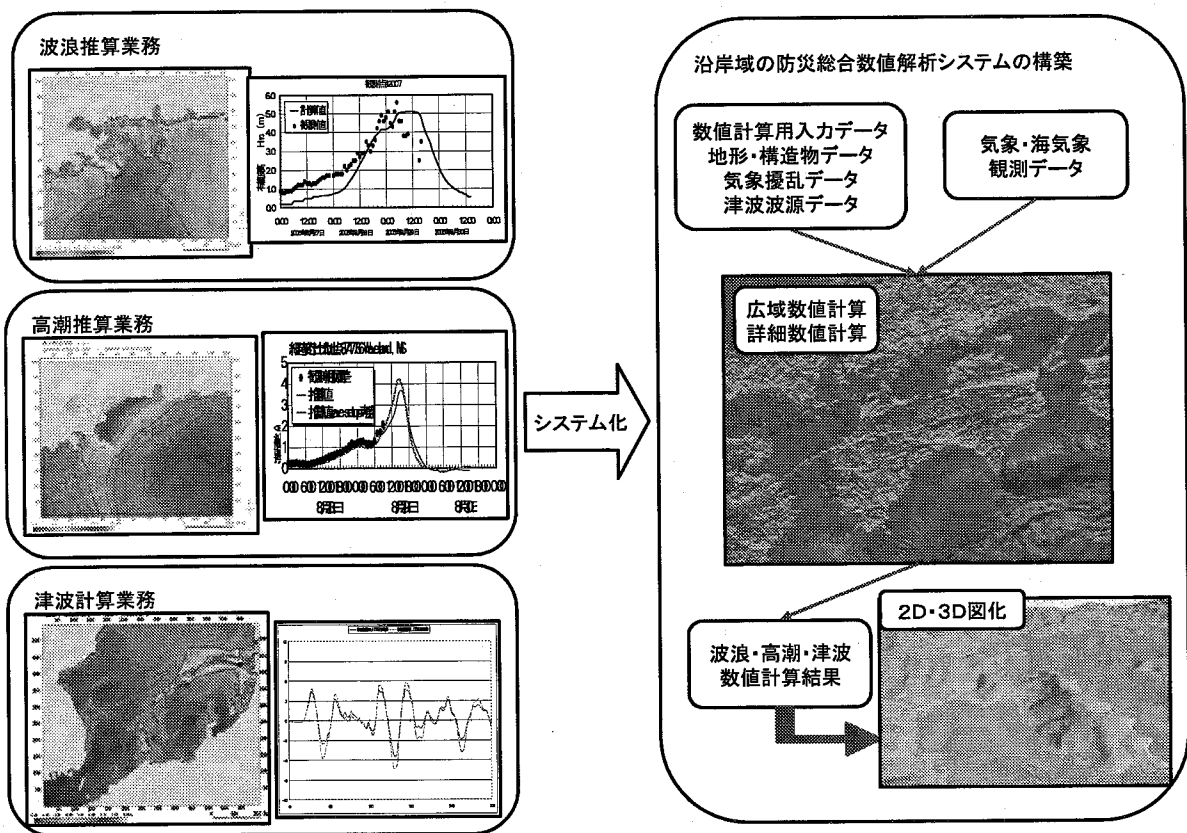


図-5 防災総合数値解析システムの構築に伴い処理過程において期待される効果の模式図

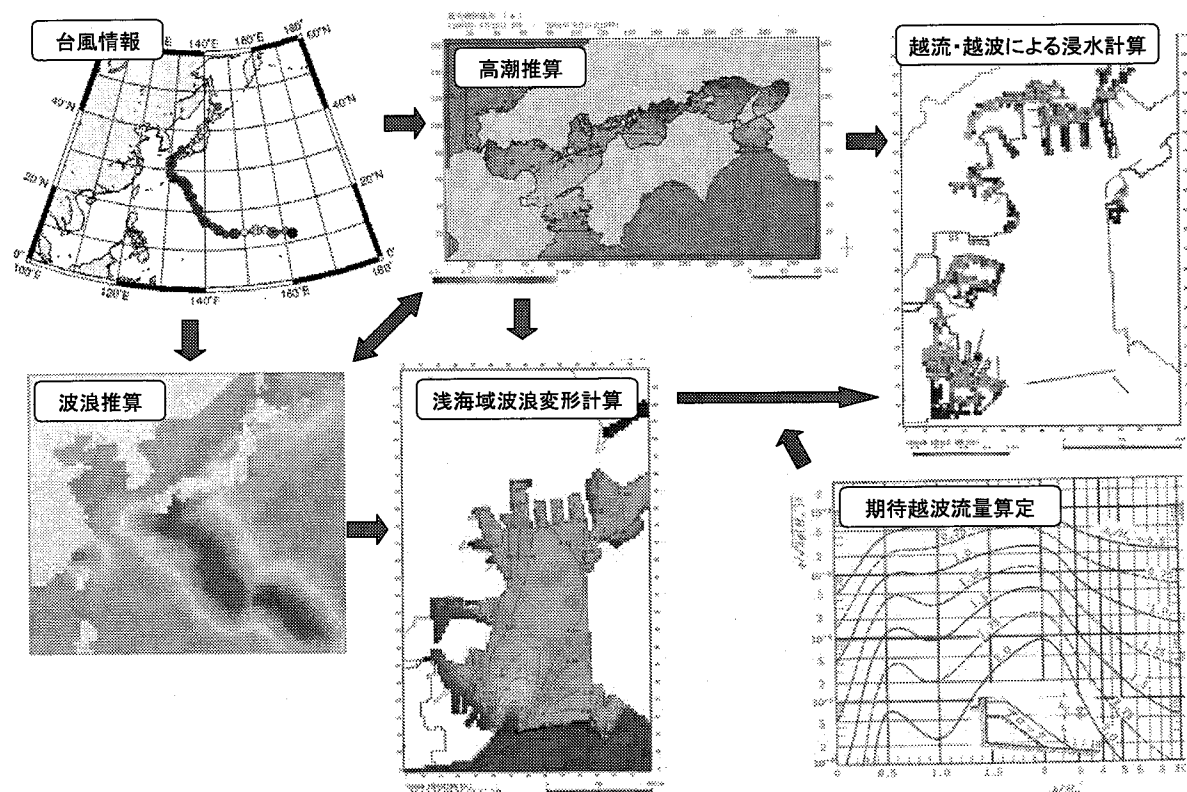


図-6 防災総合数値解析システムを利用した越流・越波による浸水解析の概要図

3.6 システムのハードウェアの構成

沿岸域の防災総合数値解析システムのハードウェア環境は、容易に入手することが可能な市販のパーソナルコンピュータとその周辺機器により構成する。これにより、システムのハードウェア環境の整備は容易に実行可能となる。数値計算の高速化の課題は、パーソナルコンピュータを用いた並列演算処理により解決する。図-7は沿岸域の防災総合数値解析システムに必要な基本ハードウェアの構成を表す。なお、図中の機種は、現在の仕様例であり、年々、処理能力が向上する。そのため、適宜機種の更新を行い、作業環境を向上させることが望ましい。

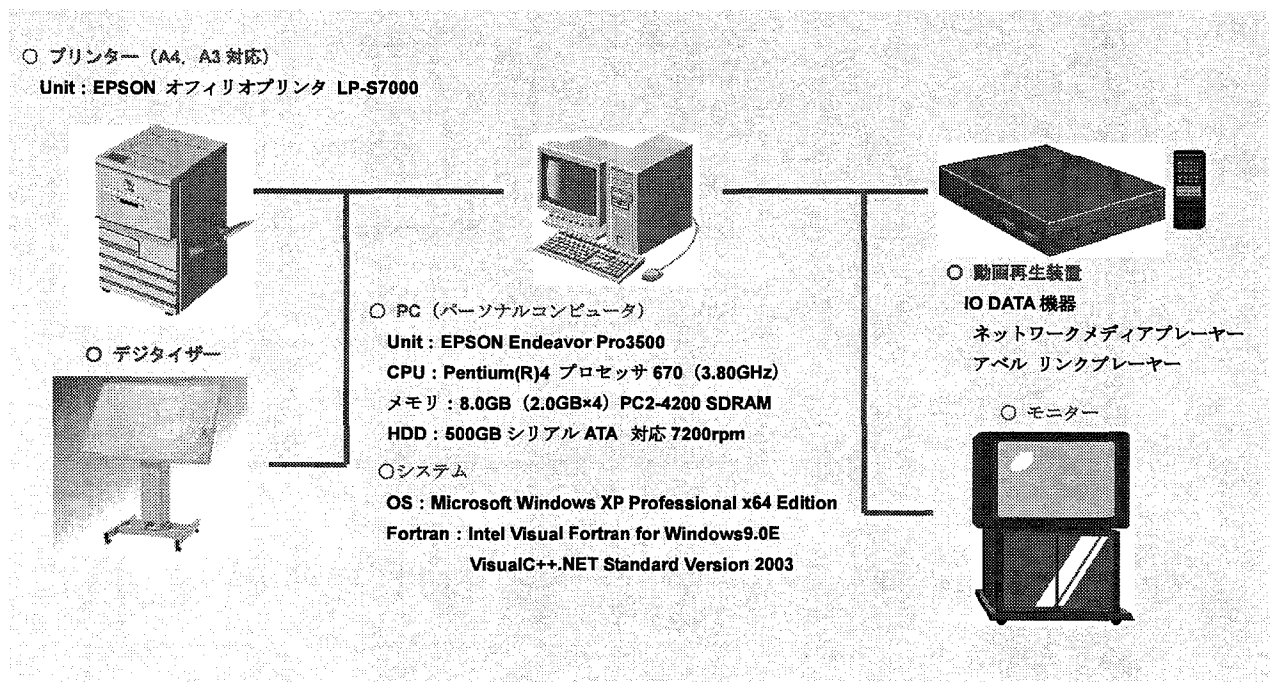


図-7 沿岸域の防災総合数値解析システムのハードウェアの構成例

3.7 ハードウェア及びソフトウェアの構成とその関連

ここでは、高潮推算サブシステムを例として、システムが利用するハードウェアとシステムに登録されるソフトウェアの構成、及びその関連をまとめる。図-8は、処理過程をフロー図の形式で表すものであり、図中にハードウェアとソフトウェアの関連を表す。図中に記載されるハードウェア及びソフトウェアは以下のものである。

○ハードウェアの構成：パーソナルコンピュータ

データベースの保管用ハードディスク
動画表示用モニター
紙面出力用カラープリンター

○ソフトウェア構成：高潮推算ソフトウェア（計算制御プログラム、計算サブプログラム）

支援システム（地形データ処理サブシステム、気象データ処理サブシステム）
図化・動画処理サブシステム

○支援データベース：地形情報のデータベース

気象・海象情報のデータベース
推算値情報のデータベース

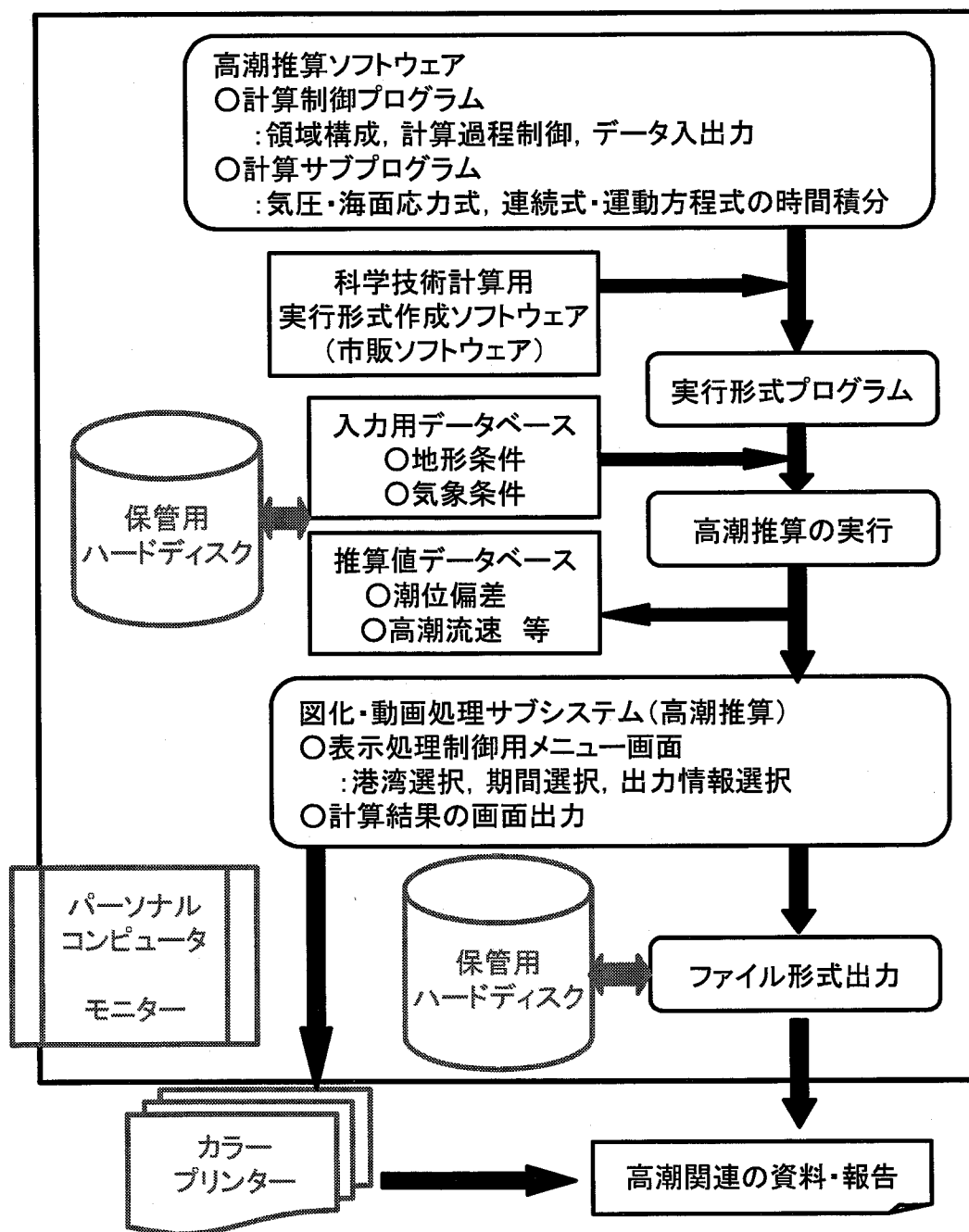


図-8 高潮推算システムのハードウェア・ソフトウェアの構成とその関連図

3.8 数値計算ソフトウェアの計算処理と出力処理

数値計算ソフトウェアにより実行される項目は、複数挙げられる。ここでは、一例として高潮推算用ソフトウェアの計算処理をフロー図としてまとめる。図-9の左図は高潮推算用ソフトウェアの処理フローを表す。図-6に表したように、高潮推算は、波浪推算及び浅海波浪変形計算と連携することにより、越流・越波による浸水計算を実行することができる。図中の○印の流れは、計算開始から終了までの繰り返し処理を意味する。また、高潮推算システムにより得られる推算結果を、図化・動画処理するフローは、図-9の右図のように表される。図化・動画処理は支援システムの構成要素として、図-2に示した。

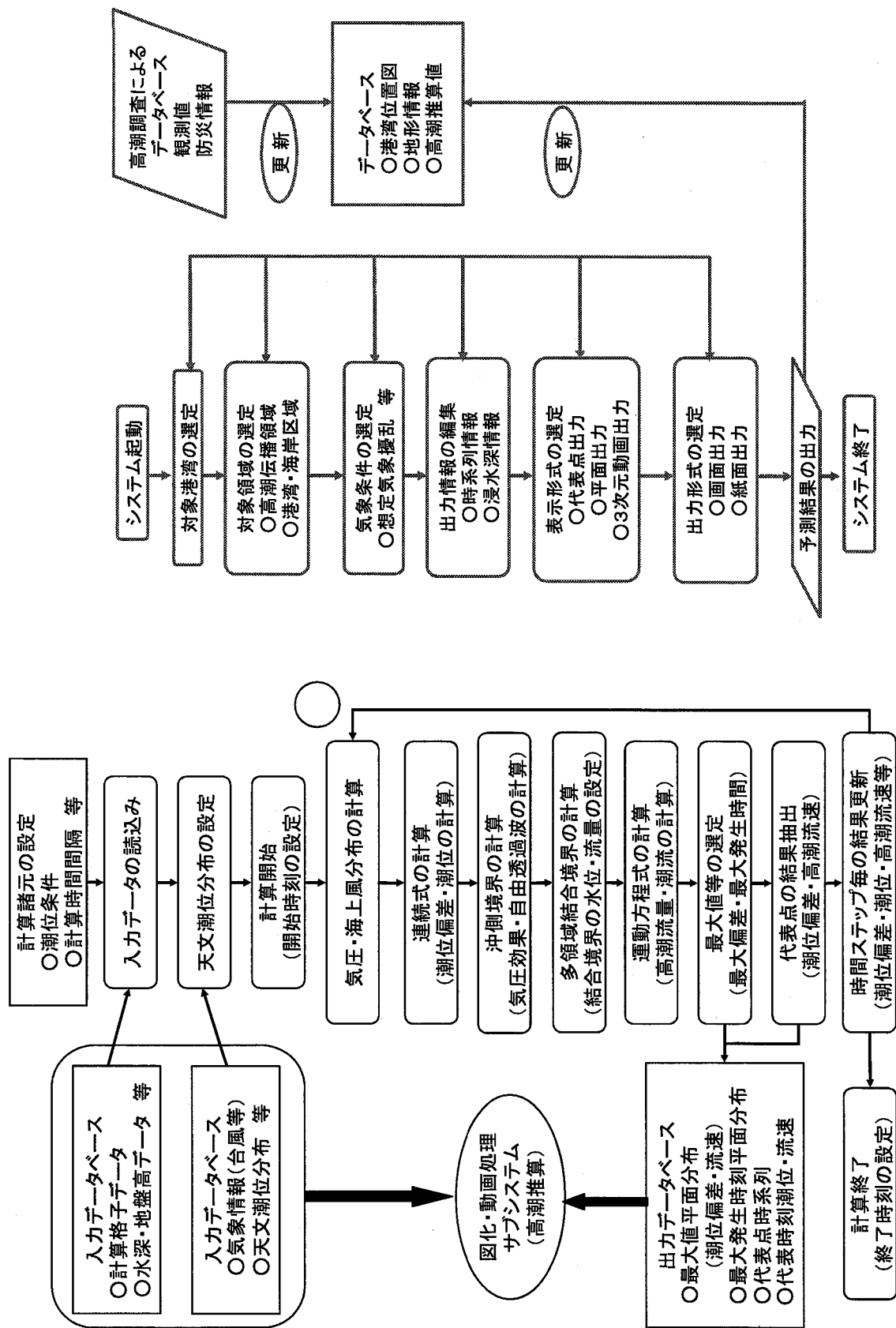


図-9 高潮推算システムのソフトウェアの実行処理フロー及び推算結果の図化・動画処理の支援サブシステムの処理フロー

4. 数値シミュレーション技術の現状と今後の動向

4.1 海上風の数値計算

海上風の推定法には、傾度風モデルを始めとする各種の風推算法、観測データの補間法、マスコンモデルによる方法、3次元気流数値計算等がある¹⁾。いずれも海上風が受ける底面摩擦の影響をどのように表現するかに重点が置かれている。特に、内湾においては、周辺の陸上地形の影響を受けるため、海上風は空間的に大きく変動し、傾度風モデル等の気圧場のみに依存するモデルでは、精度の高い推定が困難であった。

近年の研究においては、陸上地形の影響を受けた風推算法としてマスコンモデルによる風推算^{2),3)}が、観測データ等の信頼性のある情報を有効に組み込むこと、簡易に地形情報を組み込むことから、適用例も多くなっている。ただし、マスコンモデルは、保存則を束縛条件として初期に設定する風場を調整するため、初期条件への依存性が推算精度を左右する¹⁾。したがって、陸上地形の影響を受けた海上風の特徴を反映した情報を初期条件として組み込む必要がある。また、運動方程式を使用しないため、風の収束及び発散に伴う複雑な風場の推定にも限界がある。最近では、計算機能力の飛躍的な向上に伴い、流体の基礎方程式を直接的に解く3次元気流数値計算モデル^{4),5)}が脚光を浴びている。ただし、このモデルも GPV データを始めとする初期風場の時空間精度に結果が左右され、かつ乱流に関するパラメータの調整を必要とする。また、計算容量及び計算時間に関する

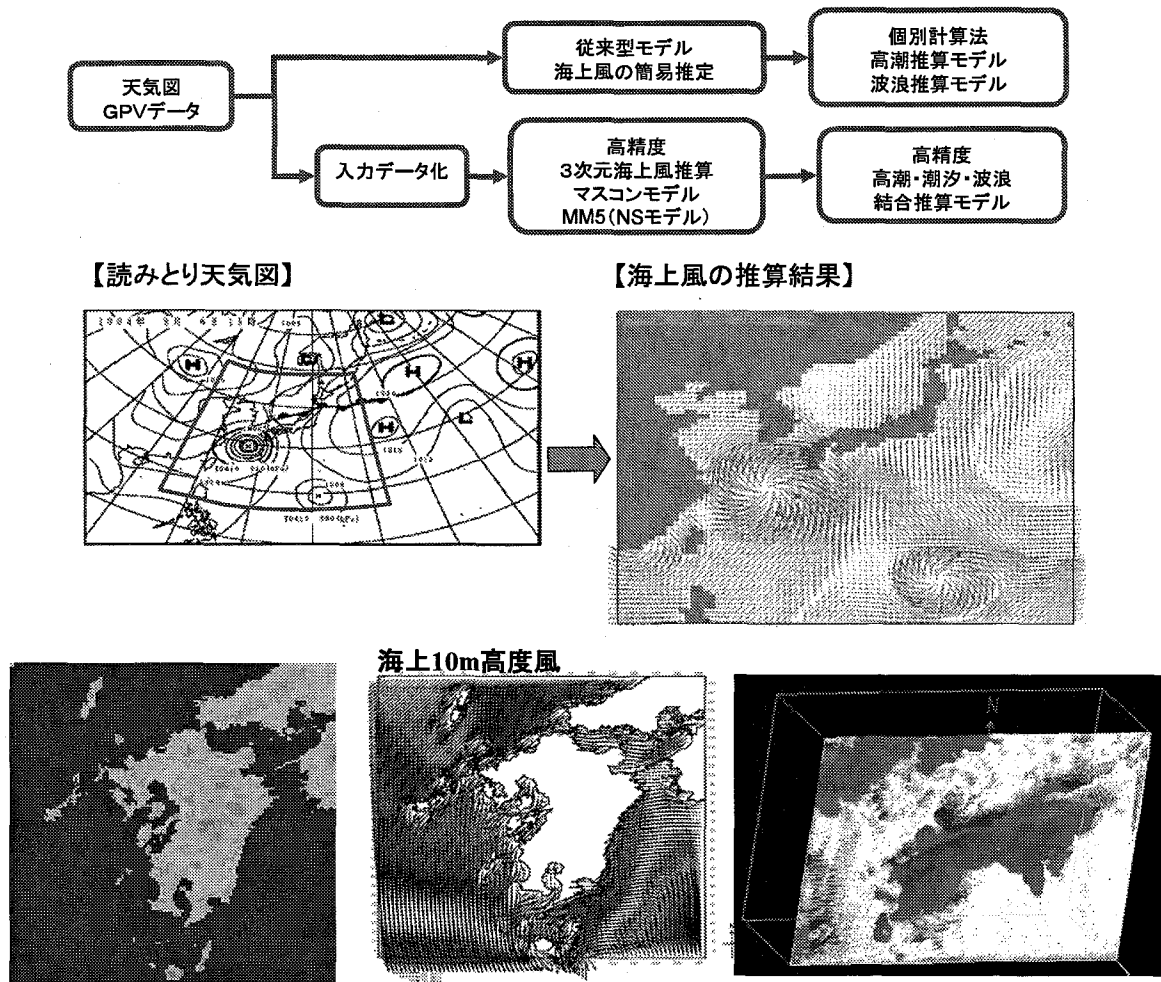


図-10 防災総合数値解析システムに組み込まれる海上風数値計算の全体構成

負荷が大きく、依然として迅速な処理は困難である。計算結果の事例を見ると、特に、台風等の比較的スケールの小さい気象擾乱の計算値が低めに見積られる等の課題も散見する。波浪・高潮推算に利用する実用的な海上風の推定法としての課題はある。しかし、今後の急速な計算機能力の発展から見ると、最も有望な海上風の推定法であることは疑う余地がない。

以上にまとめた海上風の研究動向をもとに、防災総合数値解析システムに組み込む海上風の推定法は、図-10 に表すような構成とする。外洋海上風については、気圧場に依存する理論式に基づく傾度風モデルと台風モデルを併用する。内湾海上風については、3次元マスコンモデル及び3次元気流数値計算(MM5)を採用する。内湾海上風の推算においては、陸上地形の影響により風向・風速が変形する風場を表現する。これらモデルによる推算値の精度は、沿岸域に点在する海上風の観測データを用いて検証し、必要に応じて推算値を観測値相当に補正し、実用性に力点を置いた海上風の推定を行う。推定される海上風の時空間情報は、波浪・高潮推算の入力条件となる。

4.2 波浪の数値計算

海上風により発達する波浪は、波高・周期・波向が異なる不規則な波である。このような波の現象を取り扱う方法としては、次の2種類の方法がある。第1の方法は、時空間的にみて特性が類似している数10分程度の波浪時系列のグループごとに代表波を定め、この代表波の発達・減衰・変形を記述するものである。通常用いられる代表波は、ゼロアップクロス法により定義される1波1波の波高と周期の値を、波高の高い順に並べ、最高波から1/3番目までの波高と周期の平均として定義した有義波(1/3最大波)である。この有義波の概念は、Sveldrup and Munk⁶⁾によって提案され、Bretschneider⁷⁾⁸⁾やWilson⁹⁾による観測値に基づく改良を経た後、SMB法(有義波法)と呼ばれる波浪推算法として確立された。この有義波法は、井島ら¹⁰⁾、堀川ら¹¹⁾により数値的に解く方法が開発され、閉鎖性水域の簡便な波浪推算法として現在も使用事例がある。

不規則な波を取り扱う第2の方法は、波を波高・周期・波向の異なる無数の成分波の重ね合わせと見なして、波のエネルギースペクトルで表現するものである。エネルギースペクトルの概念は、規則波として表される成分波を用いて不規則な現象を表現するもので、物理的な波の概念に沿った取り扱いを行うことが可能である。このエネルギースペクトルによる表示法には、周波数スペクトルと方向スペクトルの2種類がある。

スペクトル法波浪推算は、モデルの発展段階によって3世代の分類がなされており、Suzuki¹²⁾、橋本ら¹³⁾に良くまとめられているため、ここでは要点のみ記述する。スペクトル法の第3世代モデルは、非線形相互作用によるエネルギー輸送を直接的に解き、エネルギー平衡方程式に組み込んだモデルであり、HasselmannらによるWAMDIグループ(Wave Modelling Development and Implementation Group)¹⁴⁾が開発したWAMが代表的なものである。現在の波浪推算に関する研究は、WAMに関する内容が中心となっており、その改良モデルが提案されている。ただし、高精度な波浪の数値計算モデルとされているスペクトル法モデルもいくつかの課題がある。第3世代モデルのWAMは、発達項の時間変化量に上限が設定されており、極端な風波の発達を制御している。しかし、このような制約条件は十分な検証がなされておらず、精度を低下させる要因になる。現在、第3世代波浪推算モデルにより多数行われており、日本沿岸の広域を対象とする波浪推算に関する調査・研究等により、推算モデルの成熟度は増すものと期待される。

近年の波浪の数値計算の研究動向をふまえ、防災総合数値解析システムにおいては、外洋の波浪推算及び内湾の波浪推算ともに、非線形相互作用を考慮したスペクトル法の第3世代モデルWAMを採用する。また、WAMの浅海波浪推算の機能(潮位と水深変化に伴う波浪変形の機能)を活用する。波浪推算値についても、沿岸における波浪観測データによる精度検証を行い、必要に応じて

推算値を観測値相当に補正する手法を用い、現地への実用的な適用のための波浪の推定を行う。

図-11 は、波の発達・減衰・変形を考慮したスペクトル法浅海波浪推算モデルによる推算結果の例であり、沿岸部における最大有義波高の空間分布を図化したものである。このモデルは、風波とうねりが混在する波浪場と屈折・浅水変形を計算することができる。地形及び構造物による回折現象は、スペクトルの方向分散により近似的に表現する。また、海岸部において発生する砕波帯内の急激な波浪の減衰も表現できる。

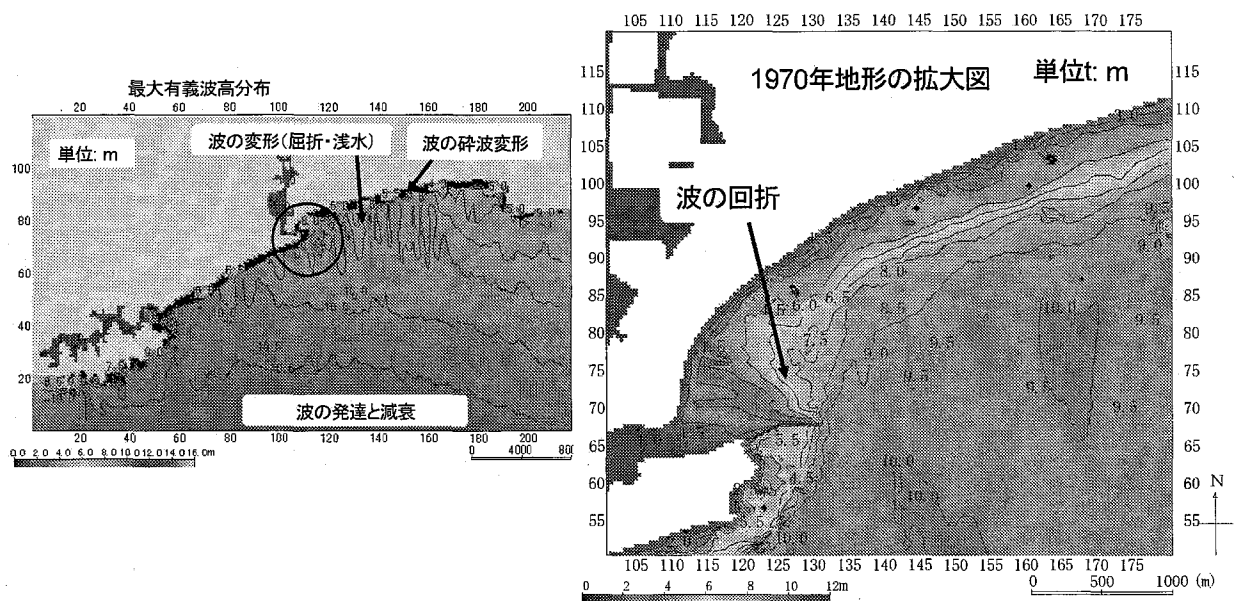


図-11 スペクトル法浅海波浪推算モデルにより計算された沿岸域の最大有義波高の空間分布の例

4.3 高潮の数値計算

高潮の数値計算は、伊勢湾台風を契機とする伊勢湾の高潮調査¹⁵⁾、東京湾の高潮調査¹⁶⁾において実用化され、高潮推算モデルの基礎がほぼ構築された。その後、土屋らの高潮氾濫解析¹⁷⁾や2層レベルモデルの導入¹⁸⁾等、高精度化を図るための改良が行われ、Konishi¹⁹⁾により高潮数値計算法を用いた実時間の予測に至り、第1段階としての高潮数値モデルの実用化は完了したと言える。

高潮研究の進展の過程で、高潮推算において考慮すべき複数の条件が挙げられている。例えば、Hearn and Holloway²⁰⁾は、高潮時の流れが鉛直方向に一樣でないため、流れを多層近似する必要性を示した。山下ら^{3),21)}は、外洋に面する沿岸において密度成層の形成によって高潮の振幅が増大し、また、海上風が陸上地形の影響を受けて変化し、これが高潮に影響することを例示した。さらに、磯崎²²⁾と小西²³⁾は、Wave Setup が高潮観測値に含まれる可能性を指摘した。特に、外洋に面する沿岸域で発生する高潮は、高潮数値解析における重要な課題とされ、その代表的な事例が、土佐湾において発生した台風7010号による外洋性の異常高潮である。この高潮の再現は、密度成層に伴う高潮の増幅効果とWave Setupによる水位上昇の効果を、直接的に数値計算に組み込みことでほぼ観測値を再現することに成功した²⁴⁾。また、近年、九州沿岸に甚大な被害をもたらした台風9918号の高潮についても、台風中心で発生する傾度風速を超過する海上風に着目したモデルや気圧分布のひずみを考慮した気圧場・海上風場の計算を利用し、高潮の再現性が向上した例²⁵⁾はある。ただし、湾内全体で、発達から減衰までの一連の高潮現象を表現する推算モデルの高度化までには至っていない。

今後の高潮研究の方向は、高潮と他現象との相互作用が挙げられる。高潮の数値計算を単独で行

うのではなく、海上風の数値計算や波浪の数値計算と同時に実施し、海上風・波浪・高潮の相互作用を組み込んだモデル構築の試み²⁶⁾が、既に新たな高潮研究として始められている。このようなモデルの日本沿岸への適用が高潮現象を精度良く再現するための基礎的な研究として注目されている。

以上の高潮の数値計算に関する研究動向を踏まえ、防災総合数値解析システムにおける高潮の数値計算法は、外洋に面する沿岸において発生する高潮について、密度成層に伴う高潮の増幅効果と Wave Setup による水位上昇の効果を、直接的に数値計算に組み込みことにより、多様な沿岸への適用を可能にする方法を採用する。さらに、最新の研究動向を反映させて、高潮と波浪の相互作用を考慮した高潮・波浪結合型の推算法を採用する。

図-12の左図は、多層流、密度成層、Wave Setup、河川流出及び陸域浸水の効果を考慮した多層の高潮推算モデルによる計算例であり、高潮による最大潮位偏差の空間分布を表す。海岸の碎波帯内側における Wave Setup による急激な潮位偏差の上昇及び陸域への浸水が表現されている。Wave Setup 量は、浅海波浪推算モデルにより計算される Radiation 応力の発散項を高潮運動方程式に組み込むことにより評価できる。この Radiation 応力は、Longuet-Higgins and Stewart²⁷⁾の定式化に基づいて、層別に積分することにより多層の応力を算定する。高潮推算モデルの詳細については既往文献²⁸⁾に記載しているため、ここでは省略する。

4.4 津波の数値計算

津波の数値解析に関する研究は、後藤²⁹⁾が詳細をまとめている。ここでは、その概要を述べる。津波を数値計算により取り扱ったのは、Isozaki and Unoki³⁰⁾の東京湾の津波、Ueno³¹⁾のチリ地震津波から始まるとされている。その後、津波の初期水位分布の推定法としての地震断層モデル³²⁾の適用、津波計算による津波波源の確定³³⁾、構造物の越流³⁴⁾、陸上遡上³⁵⁾に関する技術の進展により、数値計算の基本はほぼ確立された。本格的な津波数値計算が実用化したのは、数値計算精度に関する理論的な分析を行った研究^{36),37)}によるところが大きい。これらの研究は、近地で発生する津波に主眼が置かれていた。一方、1960年チリ地震津波のように、波源が遠方にある津波を、数値計算により再現することは、津波の伝播域が太平洋の広範囲に及ぶことから、困難な研究課題であった。

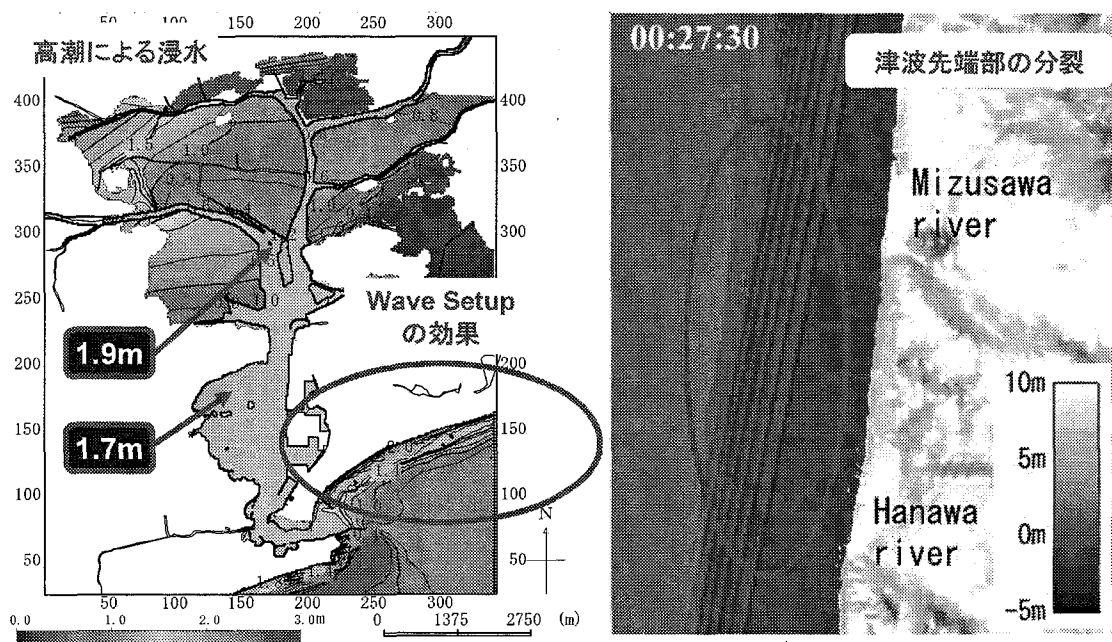


図-12 台風 7010 号来襲時の最大潮位偏差の空間分布と津波伝播時のソリトン分裂の計算例

しかし、近年の計算機能力の飛躍的な向上により、外洋伝播津波を数値計算によって再現できるようになった。後藤³⁸⁾の研究では、遠地津波の計算精度を高めるための分散波理論に基づく計算法が提案された。ただし、この遠地津波の外洋伝播計算も、格子間隔は10分程度(約18km)であるため、沿岸域の地形近似精度が不十分である。そこで、日本の沿岸域のみを対象とする地形近似精度の高い津波計算と連結し、近地津波と遠地津波の計算を総合的に網羅した広域津波計算システムの原型³⁹⁾が開発され、ほぼ現在の津波計算技術は確立した。さらに、首藤ら⁴⁰⁾による津波予報に関する研究のように、数値計算による津波予報の実現に向けた取り組みも行われている。

一方で、1983年日本海中部地震により確認されたソリトン分裂による津波現象が、研究課題として着目されている。最新の津波数値計算に関する研究において、岩瀬ら⁴¹⁾による非線形分散波によるソリトン分裂波を扱った事例がある。また、正村ら⁴²⁾による3次元津波計算法の開発等、より高精度な計算技術の開発へと推移している。さらに、スマトラ沖地震に伴うインド洋の大規模津波の被災を契機として、津波による漂流物の発生及び構造物に被害についても、津波数値計算の課題として着目されている。

このような津波の数値計算に関する研究動向を踏まえ、防災総合数値解析システムにおける津波の数値計算法は、線形・線形分散・非線形・非線形分散の4種類の方程式系を選択する。ただし、他の津波防災関連の業務との整合性を図る必要があるため、現在、最も適用例の多い非線形長波方程式を、通常型の数値計算法として採用する。これらの数値計算法は、近年、日本沿岸域で整備された波高計による津波の伝播波形の観測データを利用して、計算精度の検証が行われている。

図-12の右図は、非線形分散性、砕波、陸上条件に応じた底面摩擦を考慮した津波計算モデルによる1983年日本海中部地震津波の伝播過程にある津波波形の計算例を表す。海岸に近い浅い水深帯において、津波先端部で発生するソリトン分裂の現象が表現されている。また、図-13は1960年チリ地震津波の太平洋伝播計算により推定された最大津波高の空間分布を表す。この計算は、緯度・経度座標系を用いた線形分散波モデルを適用した事例である。この太平洋伝播計算から推定された三陸沖の津波入射波形を境界条件として、沿岸部を対象とする非線形長波モデルによる津波の浸水計算を行った。

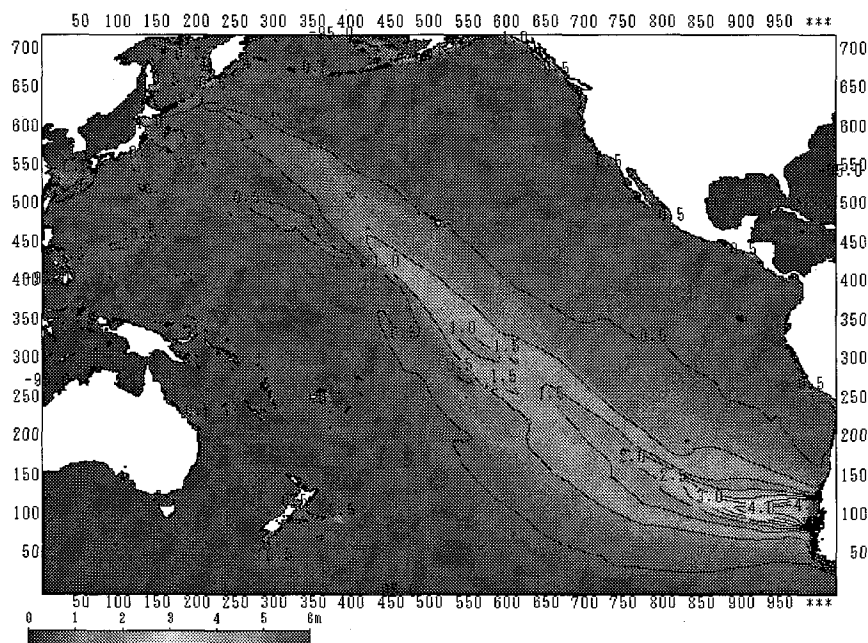


図-13 1960年チリ地震津波の太平洋伝播計算から推定される最大津波高の空間分布

5. 防災総合数値解析システムの活用事例

波浪推算・高潮推算・津波計算システムによる計算結果については、支援システムに登録されている 2D・3D の図化及び動画処理サブシステムにより、図-14 に表すような 2 次元の津波の浸水図や 3 次元の津波浸水状況の静止画が出力できる。これらの図には、浸水計算により推定される津波・高潮の水位や浸水深と、デジタル化された都市計画図や住宅地図情報が重ね合わせて表示してある。地図情報には、地盤高や建物位置とその高さ等が収められている。このような地図情報と計算結果との重ね合せは、浸水危険度の高い地域の住民が、津波や高潮によって発生する浸水状況を視覚的に理解するのを助ける。この支援システムを利用すると、津波・高潮ハザードマップの基礎資料となる 2 次元浸水図や広報用資料が簡便に作成できる。また、港湾・海岸に存在する資産を対象とする流出計算を行うことにより、地域の流出物による被災危険度を評価することができる。

図-15 は、港内に係留された小型船舶が津波来襲時に漂流する状況を予測した結果である。図中に示すように、自動車、小型船舶、木材等の流出は、津波高や浸水深により判定される。さらに、ハザードマップを利用して、地域住民の避難状況を確認することもできる。図-16 は浸水開始時間と住民の位置及び避難場所を表示し、浸水が開始する時間以降に浸水域を経由することなく、避難所まで到達することが可能かを確認した結果である。あらかじめ、個々の地域住民が、地震発生直後から避難行動に移るまでの必要時間と避難時の歩行速度を定めれば、避難所まで到達するのに必要な時間を設定することができ、きめ細かな地域防災計画を作成する補助の情報となる。

6. 防災数値解析の今後の方向性

日本の沿岸域における津波・高潮防災に関する解析を支援するために、数値解析技術とそれを支援する技術及び解析に必要な情報の管理を系統的に整理し、個々の要素技術及び情報を結合することを提案した。その具体例として、「沿岸域の総合的な防災数値解析システム」の設計概要とその活用について述べた。このシステムを構築することにより、ハード・ソフト対策を含めた防災計画の立案における基礎情報を、効率的に提供することが可能となる。このシステムは、数値解析技術の進展に伴う数値計算モデルの改良や防災関連データの更新等を継続的に行うことにより、最新の技術と情報を管理する仕組みとして利用することが期待できる。また、地域別のシステムの構築を順次実施することにより、日本の全沿岸域を網羅するシステムへと拡張することが期待される。

参考文献

- 1) 後藤智明・柴木秀之：陸上地形の影響を考慮した海上風推算，港湾技術研究所報告，Vo.33, No.3, pp65-97, 1993.
- 2) 岡田弘三・林 健次・磯崎一郎：内湾における海上風推算手法の開発，海の研究，第 4 巻，第 2 号，pp.91-99, 1995.
- 3) 山下隆男，別宮 功，Gary Watson：陸上地形および表面粗度を考慮した高潮の数値計算，海岸工学論文集，第 43 巻，pp.266-270, 1996.
- 4) 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志：メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.281-285, 2001.
- 5) 大澤輝夫・深尾一仁・安田孝志：伊勢湾海域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.181-185, 2002.
- 6) Sverdrup, H.U. and Munk, W.H.: Wind sea and swell. Theory of relation for forecasting, U.S. Navy Hydrogr. Office, Washington, No.601, 44pp., 1947.
- 7) Bretschneider, C.L.: The Generation and Decay of Wind Waves in Deep Water, *Trans. A. G. U.*, 33(3), pp.381-389, 1952.
- 8) Bretschneider, C.L.: Revision in Wave Forecasting; Deep and Shallow Water, *Proc. 6th Conf. Coastal Eng.*, pp.30-67, 1958.
- 9) Wilson, B.W.: Numerical Prediction of Ocean Waves in the North Atlantic for December, *Deut. Hydrgr.*, Vol.18, pp.114-130, 1965.



図-14 2D・3D図化・動画出力サブシステムによる津波・高潮推算結果の画面・紙面出力の例

- 10) 井島武士・副島 毅・松尾隆彦: 数値計算による台風域内の波の分布について, 第 14 回海岸工学講演会論文集, pp.29-38, 1969.
- 11) 堀川清司・西村仁嗣・小沢保臣・宮本幸始: 別府湾における台風時の波浪推算について, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp.7-12, 1971.
- 12) Suzuki, Y. : Development and Application of a Global Ocean Wave Prediction Model including Nonlinear Interactions and Dissipation, *Dr. Thesis., University of Tokyo*, 182pp., 1995.
- 13) 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦: 第 3 世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻, 第 4 号, pp.3-47, 1999.
- 14) The WAMDI Groupe : The WAM Model-A Third Generation Ocean Wave Prediction Model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, pp.1775-1810, 1988.
- 15) 気象庁: 伊勢湾高潮の総合調査報告書, 気象庁技術報告, 第 4 号, 286pp., 1960.
- 16) 気象庁: 東京湾高潮の総合調査報告, 気象庁技術報告, 第 48 巻, pp.286-290, 1962.
- 17) 土屋義人・山下隆男・杉本 浩: 高潮氾濫数値モデルの適用性に関する研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.218-222, 1984.
- 18) 土屋義人・山下隆男・岡 扶樹: 2 レベルモデルによる高潮の追算—台風 7916 号による大阪湾の高潮, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.54-58, 1981.
- 19) Konishi, T. : Numerical Forecast of Storm Surges on Real Time Basis, *Oceanogr. Mag.*, Vol.39, pp.21-42, 1989.
- 20) Hearn, C.J. and Holloway, P.E. : A Three-Dimensional Baro-tropic Model of the Response of the Australian North West Shelf to Tropical Cyclones, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.20, pp.60-80, 1990.
- 21) 山下隆男, 別宮 功: 台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算—推算誤差は波浪か成層か—, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.261-265, 1996.
- 22) 磯崎一郎: 舞阪の高潮, 沿岸海洋研究ノート, 第 8 巻 第 2 号, pp.40-47, 1970.
- 23) 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 第 4 号, pp.45-57, 1991.
- 24) 柴木秀之, 加藤史訓・山田浩次: 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.286-290, 2001.
- 25) Veltcheva, A. D.・河合弘泰: 台風の気圧の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.241-245, 2002.
- 26) Bao, J.W., J.M.Wilczak, J.K.Choi, and L.H.Kantha : Numerical Simulation of Air-sea Interaction under High Wind Conditions using a Couple Model: A Study of Hurricane Development, *Monthly Weather Review*, Vol.128, pp.2190-2210, 2000.
- 27) Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. : Radiation Stresses in Water Waves: A Physical Discussion with Applications, *Deep-Sea Res.*, Vol.11, pp.529-562, 1964.
- 28) 柴木秀之, 渡辺 晃: 密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究, 土木学会論文集, No.719/II-61, pp.47-66, 2002.
- 29) 後藤智明: 津波数値計算, 第 22 回水工学に関する夏期研修会講義集, 86-B-3, pp.B-3-1-B-3-21, 1986.
- 30) Isozaki, I. and Unoki, S. : The Numerical Computation of Tsunami in Tokyo Bay caused by the Chilean Earthquake in May, 1960, *Studies on Oceanogr., Dedicated to Prof. Hidaka in Commemoration of Sixtieth Birthday*, 389pp., 1964.
- 31) Ueno, T. : Numerical Computation for the Chilean Earthquake Tsunami, *Oceanogr. Mag.*, Vol.17, pp.389-402, 1965.
- 32) Mansinha, L. and D.Smylie: The Displacement Fields of Inclined Faults, *Bull., Seismol. Soc. Am.*, Vol.61, pp.1433, 1971.
- 33) Aida, I.: Numerical Experiments for Tsunamis caused by Moving Deformation of the Sea Bottom, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol.47, pp.849-862, 1969.
- 34) 土木学会編: 水理公式集 昭和 60 年版, pp.287-288, 1985.
- 35) 岩崎敏夫, 真野 明: オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp.70-74, 1979.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 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, pp.3-44, 1993.
- 40) 首藤伸夫・後藤智明・今村文彦: 津波予警報に対する数値シミュレーションの利用, 土木学会論文集, 第 393 号, pp.181-189, 1988.
- 41) 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明: 非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル, 土木学会論文集, No.600, pp.119-124, 1998.
- 42) 正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利幸: 2 次元・3 次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値計算, 土木学会論文集, No.670/II-54, pp.49-61, 2001.