

南関東津波計算システムの開発

Development of Tsunami Simulation System for the Coast of South Kanto

柴木秀之*・戸引 勲**・額田恭史***・後藤智明****

Hidenori. Shibaki, Isao. Tobiki, Kyoshi. Nukada and Chiaki. Goto

In order to investigate hindcasting and forecasting of tsunami, a numerical simulation system is developed. This system is constitute three subsystem and data-bases for supporting analysis with the aid of Engineering Work Station and Personal Computer. Basic concept of system is creating of hight quality information with easy operation. With the application of this system to hindcating the Kanto Great Earthquake Tsunami, reliable information can be used to design of maritime construction.

Keywords: Tsunami simulation system, South Kanto coast,
the Kanto Great Earthquake Tsunami

1. はじめに

1993年7月12日に発生した北海道南西沖地震による津波は、波源域に位置する奥尻島を中心に死者・行方不明者190名に及ぶ大災害をもたらした。1983年に発生した日本海中部地震津波からわずか10年後の悲劇である。今回の津波で防災上重要な点は、奥尻島の防災施設の設計外力が、既往最大の津波水位を記録した日本海中部地震津波により決められたことである。すなわち、過去最大規模の津波を設計目標値とする従来の設計思想に基づけば、安全と考えられた地域に、それをしのぐ規模の津波が来襲したのである。我々は、改めて自然災害を完全に防ぐ防災施設を建設することが不可能に近いことを、貴重な教訓として得た。

この突発的な津波災害を経験した我々は、防災計画ならびに災害予知に対する迅速な対応が可能な津波数値計算システムの開発の必要性を痛切に感じた。とりわけ、東京湾は、東京港・京浜港・千葉港等の特定重要港湾を中心に、日本の経済・流通施設の中核が集中している。また、首都圏の水際線として、新たな臨海開発が急速に進んでいる。それに伴い、沿岸部の防災上の重要度が増すとともに、その脆弱さも懸念される。もし、我々の経験を越える大規模な津波が来襲した場合、未曾有の大災害が発生し、その影響は全国に波及する危険性をはらんでいる。

そこで、東京湾沿岸を中心に南関東沿岸を対象とする津波数値計算システム（『南関東津波計算システム』）を新たに開発した。開発したシステムの設計思想ならびに解析手法は、日本沿岸全てを対象とすることが可能な汎用性のあるもので、その適用事例として南関東海域を取り扱うものである。このシステムは、突発的な津波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して開発され、データ作成、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、簡単な操作のみで可能なように設計されている。そして、煩雑な解析処理と高度な知識を必要とすることなく、専門技術者と同等の成果を迅速に出力することを基本にしている。

本論文では、津波計算システムの使用機器、システム構成等の設計概要と、大正12年関東地震津波の追算を扱った南関東海域への適用事例および今後のシステムの展開と改良の方向性について述べる。

2. システムの設計概要

『南関東津波計算システム』は、図-1に示す機器構成ならびにシステム構成でまとめられる総合的な津波計算システムである。使用機器は、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る。EWSは、津波の数値シミュレーションを行う。ただし、EWSの主記憶容量（例えば64MB）を越える計算を行う場合には、スーパーコンピュータ等の大型機を必要とする。PCは、計算に必要な入力データ作成、観測値と計算値の解析、計算結果の画面と紙面への出力を行う。EWS（または大型機）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

* 正会員 株式会社エコー 第一技術部解析調査課（〒116 東京都荒川区南千住1-59-7）
（前運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室（研修生））

** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所調査課

*** 株式会社エコー 第一技術部解析調査課

**** 正会員 東海大学工学部土木工学科（前運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室）

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、ディ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) が計算値の一時保管、PC のハードディスク (300MB) が津波痕跡値等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水深図および計算値データベース等の大容量データの保管、ディジタイザーが水深図アナログ情報のデジタル化である。

システムは、①地形・水深データ作成システム、②数値計算システム、③計算結果図化システムの3つのサブシステムと、5つの支援データベース(水深、計算格子・格子点水深、断層パラメータ、津波痕跡値、計算値)により構成されている。

地形・水深データ作成システムは、水深図データベースに登録されている海図・海底地形図等のアナログ情報をディジタイザーで数値化した情報、既に数値化されている水深・海岸線・標高等の数値情報を用いて、津波計算の入力データとなる計算格子・格子点水深データを作成するものである。作成されるデータは、陸域と海域の区別がなく、任意の範囲と格子間隔で半自動的に作成される。ここで、半自動的に述べたのは、データベースの識別番号、計算範囲、格子間隔等の最小限の情報は入力

する必要があるためである。港湾・海岸等の詳細な地形を必要とする場合には、港湾の計画平面図ならびに深淺測量図等をデータベース化すれば、同様な格子情報が作成できる。このシステムで作成されるデータは、計算格子・格子点水深データベースに保管され、津波計算に限らず波浪変形等の他の数値計算にも利用可能となる。後述する結果の図化システムも含めて、処理はコントロールデータを画面対話形式で入力すれば実行可能である。また、処理の効率化を図るために、結果の出力は紙面のみならず画面で行うことができる。

津波の数値計算システムは、多領域同時計算が可能な多層レベルモデルが組み込まれており、線形長波・非線形長波・非線形長波遡上計算の3種類の方法を選択することが可能である。また、南関東海域以外の使用プログラムの作成に伴う過ちを防ぐために、コントロールデータ入力のみで、プログラムを自動作成する機能を備えている。最高水位・時系列等の計算値は、計算値データベースに保管され、解析の反復実行を可能にしている。

計算結果図化システムは、解析結果を画面と紙面で出力することが可能なものである。計算の進捗過程の確認や有為性を迅速に判断する上で、画面出力は有効である。また、計算値の検証等の処理は、津波痕跡値データベースと計算値データベースを利用すれば、簡単に両者の比較を行うことが可能である。

このように、システム全体は、津波計算に関する一連の解析処理を系統的に整理し、簡単な入力操作のみで実行可能なように設計されている。同時に、熟練者以外でも処理できるように、画面による対話形式の入力と出力をシステム設計の基本としている。なお、この津波計算システムは、南関東沿岸に限らず日本沿岸を海域別にシステム化することを前提に設計されている。

図-2は、設計潮位解析の流れと開発した計算システムの関係を整理したものである。この図に従って、システムの利用方法をまとめる。

設計潮位は、通常、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水位を定める。そして、要因となる外力として、津波であれ

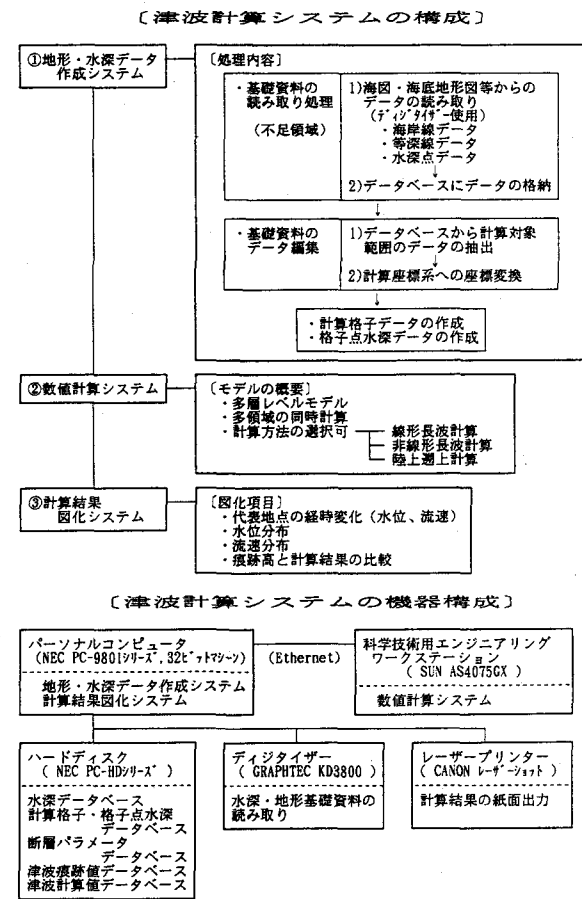


図-1 津波計算システムの機器構成とシステム構成

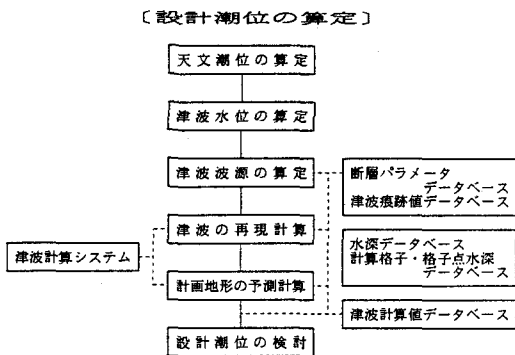


図-2 設計潮位解析処理の流れと津波計算システムの関係

ば波源を選定する。選定された津波の波源を初期条件として、対象津波の追算を行う。数値計算を行うためには、計算範囲の決定と、計算格子・格子点水深・断層パラメータ等の入力データの作成が必要となる。津波の数値計算は、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て計算する。これは、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ながら、効率的に計算を行うためである。通常は、津波の波長の 1/20 から 1/30 以上細かい格子間隔を適用する^{1), 2)}。既往最大の津波追算を行った後、計画断面に関して予測計算を行う。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、モデル断層による予測計算を行う。開発した津波計算システムは、図-2に示す一連の潮位解析に関する処理の省力化を図り、それぞれの処理段階において、簡単な入力のみで成果を得るように工夫されている。

3. システムの計算理論とデータベース

津波のように波長の長い波の運動は浅水理論によって表される。浅水理論は、波高Hと波長Lの比H/Lおよび水深hと波長の比h/Lがいずれも小さいものとして、近似的に導かれる。この近似では、圧力は静水圧分布となり、水平流速は鉛直方向に一様な分布となる。津波の数値計算は、海底から水面までを鉛直方向に積分した非線形長波の連続式と運動方程式で行う。

本計算システムの数値モデルは、空間差分にスタックカード格子を、時間差分にリーブ・フロッグ法を用いる。

津波数値計算は、海底の断層運動に伴い海面に生ずる水位分布を初期条件として与え、その後の津波の挙動を追跡する手法である。初期の海面水位分布は、断層パラメータを用いる。断層変位モデルにより計算された海底面の鉛直変位分布から推定される。断層パラメータは、断層面の開始位置(緯度・経度)・走向・傾斜角・すべり方向・すべり量・長さ・幅・上縁の深さがデータベースに保管されている。

本計算システムで用いるプログラムは、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、自動的に作成され、入力データも同時に作成される。すなわち、編集された1つのコントロールデータから、計算に必要なプログラムと、計算格子・格子点水深データ、計算範囲・格子間隔・時間間隔・断層パラメータなどの入力情報が自動的に連結し、計算準備が完了する。使用する計算格子・格子点水深は、前述した専用データベースに収録されている。既往津波の計算では、津波番号を指定すれば、断層パラメータデータベースから入力データ化される。メインプログラムの作成は、計算の流れに沿って種々のサブプログラムを連結する方式が採用されており、多領域の同時接続計算を行う場合は、領域数だけサブプログラムが列挙される。このため、領域結合に合わせてメインプログラムを作成する必要がある。

図-3は、南関東海域を対象とする津波数値計算のメインプログラム作成のためのコントロールデータの例である。コントロールデータにより与える情報は、計算層数、層厚(各層の下端の水深で上層から順に与える。単層または最下層の水深は、 1.0×10^{10} mとする。)、計算領域条件(計算基準点の緯度・経度、領域数、各領域のx, y方向の格子数、格子間隔、領域左下の計算基準点からのx, y距離、領域の最低水深)、計算方法(線形、非線形、非線形+遡上)、領域結合条件(結合領域数、結合する領域の番号)、計算時間条件(終了時間、時間間隔、結果の出力間隔、代表地点の出力間隔)、対象津波

```

=====
>> GLONG MAIN.CNT( CASE:KANT 200-Q1 ) Ver.1(1993/09/30) <<
=====
** 計算方法 および 層数 **
1: (15) 計算方法 {津波計算=1、高潮計算=2} ..... DATA 1
15: (15) 計算層数 {1以上} ..... DATA 2
** 各層の層厚 **
-1. .... (5F10.0) ..... DATA 3
| 各層の下端水深 (m)を上層から順に入力。設定層数に応じて
| DATA 3行を追加。単層または最下層は、-1.を入力。
** 計算領域 **
139. 30. 0.: (3F5.0) 計算基準点の緯度 { . ; . } ..... DATA 4
35. 0. 0.: (3F5.0) 経度 { . ; . } ..... DATA 5
10: (15) 計算領域数 {1以上} ..... DATA 6
210 230 3600. -396000. -540000. 50. 91: 領域1-A ..... DATA 7
-----
135 138 200. -63000. -51000. 0. 93: 領域10-D07 **注**
( 15. 15. F10.0. F10.0. F10.0. F5.0. 15 )
(x) (y) (x) (y)
・格子数 ・格子間隔 (m) ・基準点からの距離 (m) ・計算方法 91:線形計算
92:非線形計算
93:非線形+遡上計算
・最低水深(m)
| 領域数 DATA 7行を追加。
** 計算領域の結合 **
15: (15) 結合領域数 ..... DATA 8
1 2: (215) 左:外側(大)領域、右:内側(小)領域 ..... DATA 9
9 10:
| 結合数 DATA 9行を追加。外側(大)領域から内側(小)領域
| にかけて順に入力。結合数が0でもDATA 9は1行必要(クォーター)。
** 計算時間間隔 および 計算結果出力間隔 **
120. 0.: (F6.0) 計算終了時間(分) : 高潮計算ではクォーター ..... DATA 10
1. 0.: (F6.0) 計算時間間隔(秒) ..... DATA 11
1800. 0.: (F6.0) 途中結果の出力時間間隔(秒) ..... DATA 12
60. 0.: (F6.0) 代表地点の出力時間間隔(秒) ..... DATA 13
** 計算条件 **
0. 00.: (F7.0) 潮位 (m) ..... DATA 14
** 断層モデル **
19230101: (14. 212) 断層モデルの登録番号 {津波} ..... DATA 15
0. 0.: (F8.0) 断層補正係数 {津波} ..... DATA 16
** 入力データファイル名 **
KANTDEP1 : (A20) 水深データ ..... DATA 17
KANTMAP1 : (A20) 計算格子データ ..... DATA 18
KANTPNT1 : (A20) 代表地点データ ..... DATA 19
DUMMY : (A20) 台風データ {高潮} ..... DATA 20
** 出力ファイル名 **
GLPNTKQ1 : (A20) 代表地点経時変化データ ..... DATA 21
GLSUFKQ1 : (A20) 水位データ (途中結果) ..... DATA 22
GLVELKQ1 : (A20) 流速データ { " } ..... DATA 23
GLSPDRQ1 : (A20) 風速データ { " } {高潮} ..... DATA 24
GLPRSRQ1 : (A20) 気圧データ { " } {高潮} ..... DATA 25
GLMAXKQ1 : (A20) 最高水位データ ..... DATA 26
GLSUKQ1 : (A20) 初期水位データ {津波} ..... DATA 27
GLDEPKQ1 : (A20) 変位後水深データ {津波} ..... DATA 28
GLTKKQ1 : (A20) 最高水位発生時刻 ..... DATA 29
GLTSFKQ1 : (A20) 第1波到達時刻 {津波} ..... DATA 30
=====

```

図-3 数値計算プログラムを自動作成するコントロールデータ

条件（地震断層パラメータのデータベース登録番号，大正12年関東地震津波は，19230101），入力ファイル名（水深データ，格子データでデータベースの登録名を与える．），出力ファイル名（代表地点経時変化，水位分布，流速分布，第一波の到達時刻，最高水位，初期水位，地盤変位後の水深）である．

図-4は，計算対象とする南関東沿岸の計算格子と格子点水深から描いた等深線を表し，東京湾内については拡大して表した．格子間隔は，最大3.6kmで，沿岸部に近づくとともに200mにまで地形近似精度を上げている．また，東京湾内と陸域は，50m格子で地形近似を行っている．

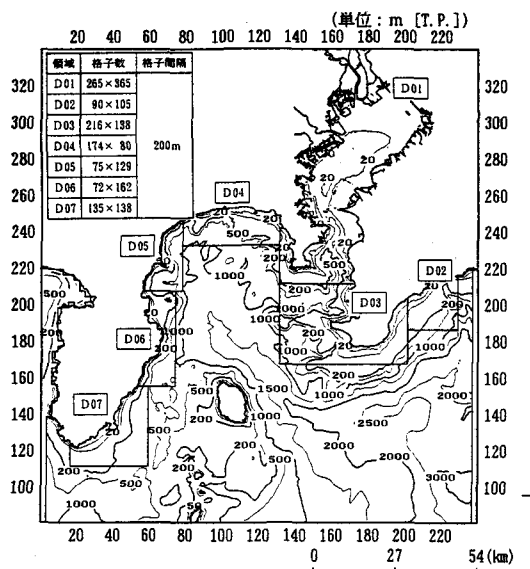
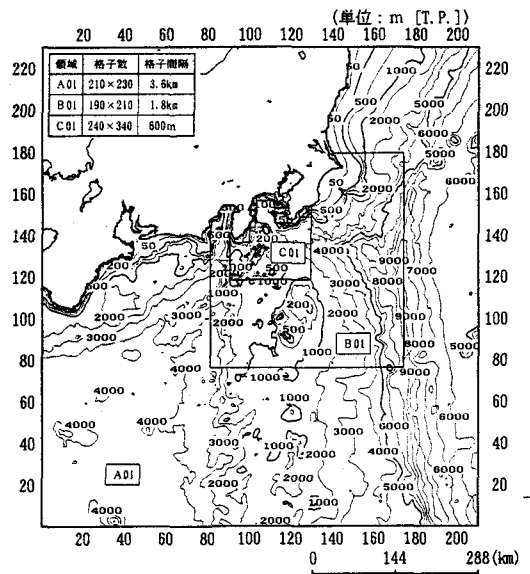
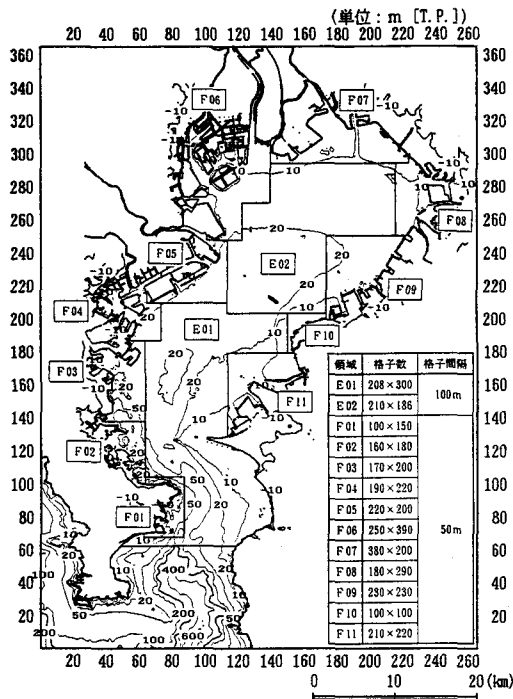


図-4 計算領域の構成と水深データ

（右上図は南関東外洋領域，
右下図は南関東沿岸領域，
左図は東京湾領域）

4. 津波数値計算の計算精度（再現計算）

大正12年関東地震は，震源が小田原市付近で，関東平野を中心に死者99,331人，行方不明者43,476人という大規模な災害をもたらし，関東大震災として有名なものである．この地震は，2次災害の火災に注目が集まり，地震に伴い発生した津波への関心は，小規模な被害のために薄かった．しかしながら，津波高さは，熱海で12m，房総半島先端の相浜で9m，伊豆半島岡田で12mとなり，相模湾沿岸や房総半島先端で局所的にはかなり高い痕跡値が記録されている．³⁾

図-5は，南関東海域を対象に，大正12年関東地震津波発生時の最高水位の分布を計算した結果である．計算は，地震発生後2時間まで行った．発生した津波高さが高い地域は，伊豆半島から相模湾沿岸と房総半島先端部に集中し，東京湾内は1.0m以下となっている．東京湾内での興味深い点は，湾の長軸を振動方向とする周期70~80分程度の副

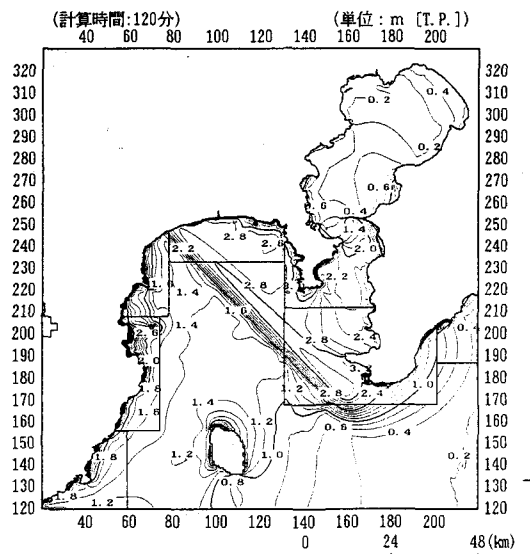


図-5 大正12年関東地震津波の最高水位の空間分布（再現計算）

振動と、湾口に近い海域の短軸を振動方向とする周期15~20分程度の副振動が生じている点である。一般に、東京湾のような閉鎖性水域は、津波の第一波よりも、その後に発生する複数の周期の湾内振動の重ね合わせによって最高水位が発生するため、その発生起時と最大値の分布は複雑になる。

図-6は、大正12年関東地震津波発生後に各地で測定された津波痕跡高の記録と、計算から求められた最高水位とを比較し、追算精度を検証したものである。比較地点は、伊豆半島下田から相模湾沿岸・三浦半島・東京湾・房総半島先端の相浜を経て、房総半島東岸の小湊に至るまでの沿岸である。黒丸は実測痕跡高を表している。ただし、同じ測定地点でも、測定者と測定箇所の違いにより痕跡高が幅を持つため、縦棒で痕跡高の最高値と最低値、黒丸でその平均値を表す表現法を採用している。計算は、Scholz & Kato(1978)により提案されている断層モデル⁴⁾をそのまま使用した場合と、より痕跡高を整合するように修正を加えた場合とを行った。断層モデルの修正は、断層の走行・長さ・幅は同じで、ずれ角を30°から45°に変化させてScholz & Kato(1978)モデルより縦ずれ量を大きくしたものである。図-6から判断すると、修正モデルによる計算結果は、伊豆半島から相模湾西側における津波高さの再現性が向上している。

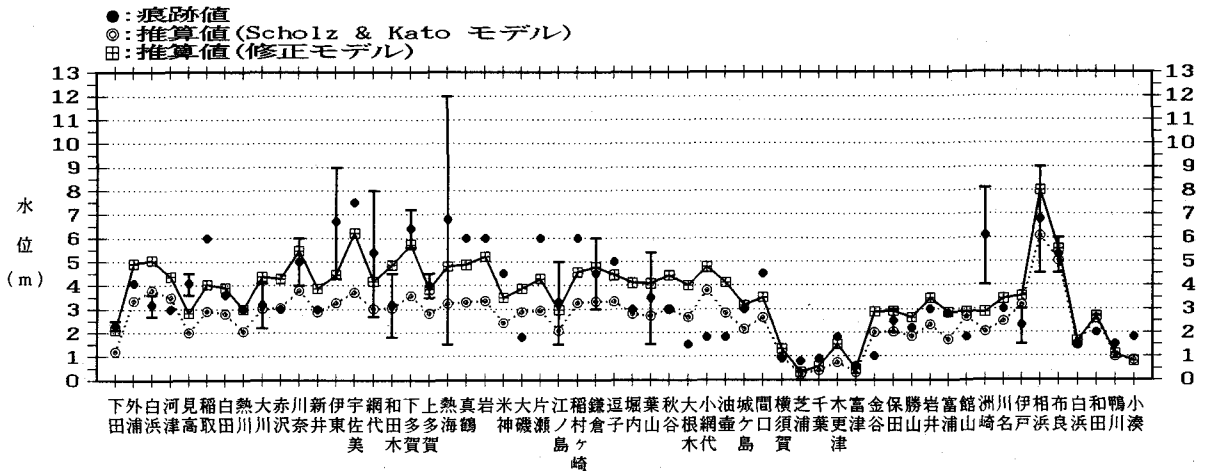


図-6 現地調査による痕跡高と計算値との比較

5. 南関東における津波の挙動(予測計算)

津波現象において防災上重要な点は、最高水位と第一波の到達時刻である。北海道南西沖地震津波の場合は、波源域に奥尻島が位置していたために、5分以内で第一波の最高値が島に襲し、十分な避難活動を行うことすらできなかった。大正12年関東地震津波の場合に当てはめると、やはり同様なことが言える。相模湾一带と東京湾南部海域は波源域におおわれ、地震発生直後から既に水位がかなりの高さとなっている。

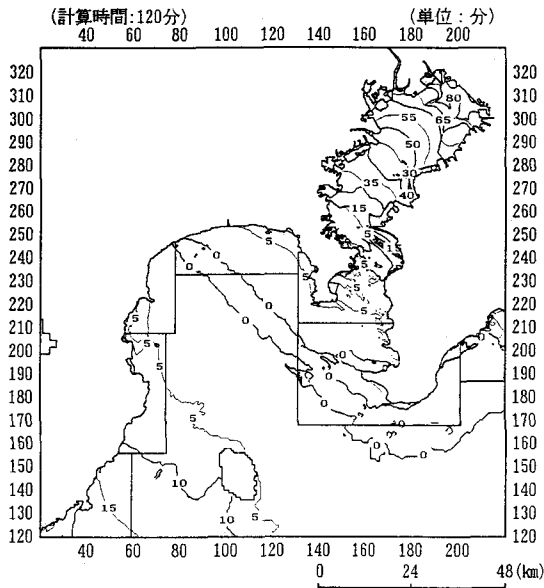


図-7 大正12年関東地震津波発生時の津波第一波の最高水位発生時刻の空間分布(予測計算)

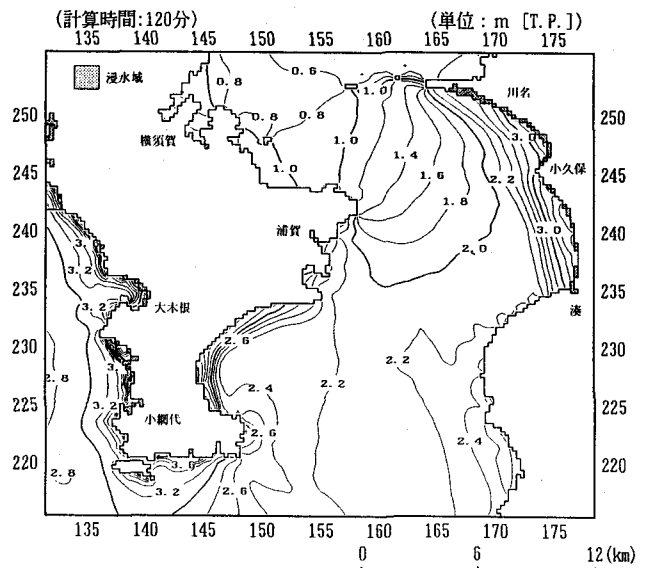


図-8 大正12年関東地震津波発生時に想定される浸水区域の例(予測計算)

図-7は、津波第一波の最高水位発生時刻であるが、伊豆半島、房総半島で地震発生後約5分以内、東京湾湾口で約5~10分となり、地震発生後まもなく危険な状況が生ずることが推定される。防災計画上、留意すべき事項となるであろう。

図-8は、津波において浸水が想定される箇所の一例を表したものである。浸水区域は、伊豆半島、相模湾の一部、浦賀水道沿岸、房総半島先端の最高水位が高い区域に限定されており、東京湾内では浸水は発生していない。

東京湾の設計津波が、大正12年関東地震津波の規模である限り、湾内の被害はそれほど大きくはならないであろう。しかしながら、次に東京湾に襲撃する津波が、全く同じものである保証はない。設計津波として、いかなる断層モデルを設定するかは、今後の防災計画上、困難ではあるが重要な研究課題になる。

6. おわりに

本研究においては、東京湾を中心とする南関東沿岸の津波防災計画の基礎資料作成を目的として、新たに開発した津波計算システムの概要を述べた。主要な結論は以下のとおりである。

①従来、膨大な労力と時間を要した津波数値計算における入力データ作成から数値計算・結果の解析に至る一連の処理を、迅速に行うことが可能な総合的な数値計算システムを開発した。

②南関東津波計算システムは、東京湾・南関東沿岸を対象として開発されたものである。しかしながら、システムを構成するサブシステムとデータベースは汎用性の高いものであり、日本全国の沿岸に適用可能である。

③適用事例として、大正12年関東地震津波発生時の追算を行った。最高水位分布等の情報は、東京湾の設計潮位ならびに防災計画を検討する上の基礎資料となる。

②の結論で述べたように、今回開発した津波計算システムは、計算格子・格子点水深データベースの整備を行うことにより、全国沿岸に適用することが可能なものである。今後、津波の危険区域として想定される地域について、地区別システムの開発を精力的に行うことが必要である。また、今回の南関東における適用事例は、既往最大に相当する大正12年関東地震津波であった。今後は、災害予測の利用価値を高める上でも、設計津波を対象とする計算を行い、より積極的な防災計画の基礎情報を作成することが望まれる。そのためには、設計津波（設計波源モデル）の設定方法に関する研究とモデル断層パラメータのデータ整備を行う必要がある。

近い将来、開発した津波計算システムを用いて、日本全国の津波被害区域と被害規模の分布が防災計画立案における情報として役立つことを願うものである。

謝辞：南関東津波計算システムの開発にあたり、運輸省港湾技術研究所波浪研究室の平石主任研究官より津波計算における丁寧な指導と貴重な助言を頂いた。運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所の関係各位には、データ収集の便宜を図って頂いた。また、(株)エコー第一技術部の小沢保臣氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。なお、水深・地形等のデータベースは、海上保安庁水路部の数値情報(JBRD)と国土地理院国土数値情報を利用した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧，東京大学出版会，1985.
- 4) 佐藤良輔編：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，pp.146，1989.