

南海道津波計算システムの開発と近地・遠地津波への適用について

南 兼一郎* ・ 平石 哲也** ・ 佐藤 清二***
柴木 秀之**** ・ 額田 恭史****

1. はじめに

四国から紀伊水道にかけての南海道沿岸は、過去大規模な地震津波が度々発生している津波常襲地帯であり、南海道沖を波源とする宝永、安政、昭和の南海地震及び遠地を波源とする1960年チリ地震津波の被害を受けている。さらに、近い将来、次の南海地震津波が来襲する可能性も指摘されており、津波防災に対する注目度も高い。このような状況を踏まえると、南海道沿岸の津波防災計画を総点検することは緊急課題であり、来襲する津波規模等の情報を提供する津波計算システムの構築は急務となる。本論文で述べる南海道津波計算システムは、南海地震津波及び遠地津波に対する適切な港湾防災計画の立案に向けての情報提供を目的に開発された。特筆すべき点は、従来、個別に行われていた港湾・海岸を対象とする津波計算ではなく、南海道沿岸全域を対象とする広域津波計算を行うという点である。

本論文は、新たに開発した南海道津波計算システムの概要、1996年イリアンジャ地震津波と昭和南海地震津波の追算への適用性及び予測計算に基づく津波防災解析に関して報告する。

2. 南海道津波計算システム

(1) 津波計算理論

南海道沿岸の津波計算は、非線形長波理論より導かれる連続式と運動方程式を数値的に解く。それに対し、外洋の津波伝播計算は、水深が深いので、線形長波としての近似が可能となる。しかし、遠地津波は外洋を長距離伝播するため、波数が違う成分波の伝播速度の差に起因する分散性を無視できない。そこで、後藤(1991)にならない、線形分散波理論を適用する。

津波数値シミュレーションの連続式と運動方程式の差分化は、空間差分にスタッガード格子、時間差分にリーブ・フロッグ法を用いる。津波を励起する初期の海面水位分布は、断層パラメータから推定する。

(2) 計算範囲と計算領域の構成

計算範囲は、南海地震の波源となる南海道沖を網羅するもので、沿岸の地形近似は、津波の波長の近似精度に配慮して決定する。長波の分散関係より浅海の津波の波長は短くなるため、計算範囲内の波形近似精度を一定とするには、浅海域の格子間隔を小さくする必要がある。そこで、今村ら(1986)、長谷川ら(1987)の研究にならい、数値計算の離散化誤差及び打ち切り誤差を小さく抑えるように、津波の波長の $1/20 \sim 1/30$ 程度の格子間隔で波形近似することを制約条件とする。この関係をもとに、南海道の計算範囲を格子間隔が異なる複数領域に分割し、範囲内の領域構成を計画する。これら複数の領域間は連結して同時計算する。

図-1は、左図に南海道津波計算システムの領域構成を、右図に計算範囲と等深線を表す。図の沖側領域は、3.6 km格子により地形近似を行う。沿岸格子の設定は、津波の周期を10分と仮定し、各領域で最も波長の短くなる最低水深において、波長が格子間隔の20倍以上となるように計画する。こうして、1.8 km、600 m格子と浅海の地形近似度を上げ、海岸全域は200 m格子による地形近似を基本とし、津波波形の計算精度の向上を図る。

さらに、宿毛湾港・上川口港・須崎港・高知港・室津港・日高港・和歌山下津港・小松島港の8港の港湾区域は、陸上遡上と防潮堤等の越流を扱い、海域・陸域を含めて50 m格子で地形近似を行う。こうして、完成したシステムの領域構成は、領域数40、総格子数815,000個(約 900×900 個)となる。なお、対象港湾は随時追加可能である。

(3) 南海道沿岸津波計算の沖側境界条件

南海地震津波の場合は、沖側境界で自由透過条件を用いるが、遠地津波の場合は、外洋から領域内に伝播する津波の波形を利用する。沖側境界は、南と東の2方向であり、境界線上で2方向から領域内に入射する波形を与え、反射波は透過させる。ここで、入射波と反射波の分離は、特性曲線法を利用して行い、入射波成分のみを沖側境界で与える。この理由は、外洋伝播計算による海岸からの反射波と沿岸津波計算による反射波が、両者の地形近似精度の違いにより一致せず、沖側境界で外洋伝播

* 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所長

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

*** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局高知港工事事務所長

**** 正会員 工修 (株)エコー 第一技術部 解析調査課

計算領域の領域構成

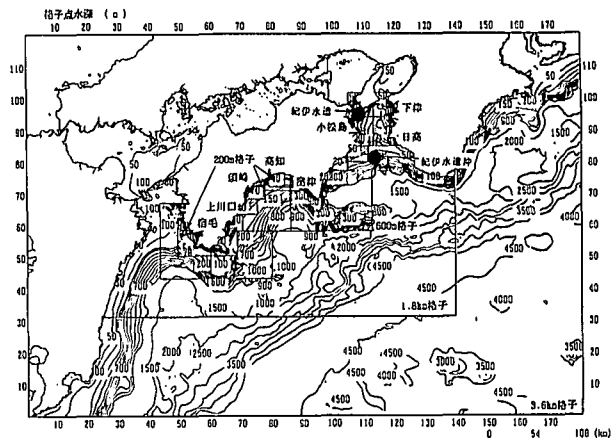
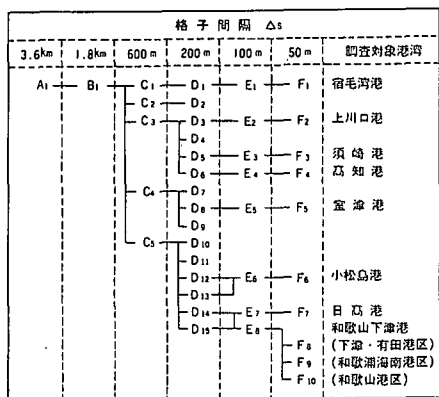


図-1 南海道津波計算システムの計算範囲、領域構成と等深線分布

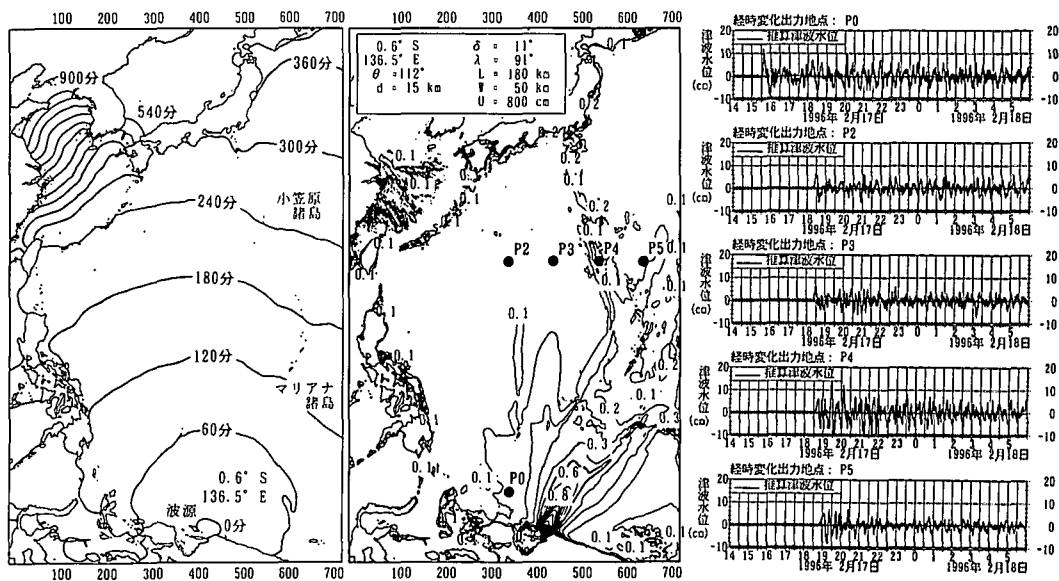


図-2 1996年イリアンジャヤ地震津波の伝播図、外洋における最大津波高分布、断層パラメータと外洋伝播波形

計算から求められる入射合成波を与えると、境界で二次的な波が発生するためである。

3. 1996年イリアンジャヤ地震津波の計算

(1) 外洋計算領域と入射波境界

1996年イリアンジャヤ地震津波の波源から日本沿岸までの伝播を追跡する外洋計算は、球面座標系を用い、格子間隔は2.5分(約4.5 km)、時間間隔は6秒を採用する。範囲は緯度 $6.0^{\circ}\text{S}\sim 44.0^{\circ}\text{N}$ 、経度 $119.0^{\circ}\text{E}\sim 149.5^{\circ}\text{E}$ とし、格子数は 732×1152 である。南海道沿岸津波計算の沖側境界線に該当する格子では、津波の入射波成分を6.0秒毎に保存し、これを、時間間隔1.0秒、3.6 km格子毎に時空間内挿して、沿岸計算の沖側境界条件とする。

(2) 外洋の津波伝播と水位分布の特性

1996年イリアンジャヤ地震の断層パラメータは、図-2の中図に表すハーバード大速報値を利用する。この地震の特徴は低角逆断層(傾き 11°)で、断層の走行は 112° となり、波源と日本列島を結ぶ方向と津波の主伝播方向が 20° 程度ずれる。また、伝播する津波の周期が15分程度と短いのは、断層規模に起因する特徴である。

図-2の左図は津波伝播図を、中図は外洋の最大津波高分布を表す。伝播図から、日本沿岸への伝播に、4～6時間を要することがわかる。また、水深4000 m以上の深海を伝播する津波が日本により速く到達し、マリアナ諸島から小笠原諸島を経由する津波は30分程度到達が遅い。

最大津波高分布に見られる特徴は、津波の NNE 方向への指向性と諸島沿いの高い津波高である。津波エネルギーが伝播する主方向は、波源の短軸方向であるため、断層の走向角が 90° であれば、日本沿岸に到達する津波高は大幅に増大する可能性があった。波源遠方地点の津波高分布及び到達時刻を解析することも、津波の波源条件を確定する上で有益な情報となりうる。

図-2 の右図は、中図内の黒丸で表す 5 点の外洋伝播波形の時系列を表す。全点とも長時間振動が継続し、深海に位置する P2, P3 点は、18 時 30 分に第 1 波のピークとなるが、諸島周辺の P4 は 18 時 45 分、P5 は 19 時以降となる。すなわち、諸島周辺の浅海部の伝播に伴い 30 分の差が生ずる。津波高を見ると、浅海部の P4 の津波増幅が顕著である。伝播波形の特徴は、波源近傍の P0 点の波形に 2 時間程度の周期の波形形状が現れていることである。一般に、進行する 2 波の共鳴現象として説明されるが、この場合は、第 1 の波群が初期伝播波、第 2 の波群がイリアンジャヤ島等からの反射波に起因するものと推定される。イリアンジャヤ島の波源に面する海域は水深 500 m 程度であり、波源と海岸との距離は 250 km 程度であるから、初期波が島から反射し、P0 点に到達する所要時間は 2 時間後となり、波群の周期とほぼ一致する。この波形の特徴は、太平洋深海を伝播する P2, P3 の波形にも見られ、深海を伝播する過程でも残る。波形形状の発生過程の詳細は、今後検討すべき課題であろう。

(3) 南海道沿岸の津波高分布と津波波形

イリアンジャヤ地震津波が南海道の西部沿岸に伝播すると、海岸で増幅し、図-3 に表す最大津波高分布となる。特に、凹状の海岸では、集中による高い津波高が計算される。この海域内で、津波が観測された黒丸地点と、図-1 右図の小松島港の計算波形を抽出し、観測波形との比較を行う。ここで、観測波形は検潮記録である。

図-4 は、宿毛湾、土佐清水、須崎及び小松島における計算波形と観測波形の比較図である。各点とも観測波形の変化傾向を良く再現している。特に、土佐清水に見られる波群形状は、外洋の伝播波形にも見られるものであり、沿岸の津波増幅により、特徴が強調されている。速報波源情報を用い、かつ太平洋伝播計算後の波形であるにもかかわらず、沿岸波形の追算精度は良好と評価できる。

このような波群形状を有する外洋伝播波形の増幅特性が、全沿岸で共通して生ずるのかを確認するために、図-5 に、足摺、高知、紀伊水道の沖合と沿岸の津波波形の比較を行い、波形の変化をとらえる。3 箇所の沖合波形には、波群形状が幾分認められるが、沿岸部の波形は、足摺を除き変化する。このように、浅海で増幅される波形は、各海域の固有の振動（陸棚共振、湾水振動）が該当す

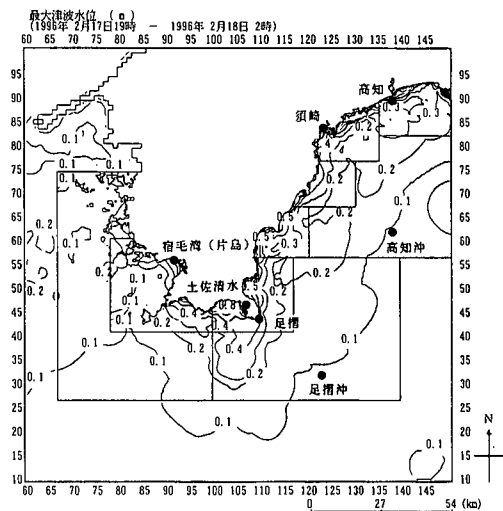


図-3 南海道西部沿岸におけるイリアンジャヤ地震津波の最大津波高分布

る）へと変化し、必ずしも外洋伝播波形の特徴とは一致しない。また、その変化は早い段階から起こることがわかる。

4. 1946 年昭和南海地震津波の計算

(1) 津波高分布と追算値の補正

ここでは、近地津波への適用事例について述べる。図-6 の左図は、相田 (1981) の断層モデルから推定される昭和南海地震津波時の南海道沿岸における最大津波高分布であり、追算は津波発生後 5 時間行った。数値シミュレーションの利点は、図-6 のような津波の詳細な時空間情報が得られる点にある。しかしながら、南海道全域のような広域計算の場合、一般に、計算誤差は全海岸で一致しない。そこで、計算値を近隣の津波観測値（又は痕跡値）に近い値とする補正係数を港湾毎に定め、これを利用して予測計算を行う。この補正係数は、計算値と観測値の幾何平均値から定め、断層モデルから推定される初期津波水位にそのまま乗ずる。図-6 の右図は、0.82 倍の補正により求められる須崎港の昭和 21 年地形当時の最大津波高分布を表す。図中の陰影は、計算の浸水範囲を表し、これと実線で囲む現地調査による浸水範囲はほぼ一致している。

(2) 須崎港における想定津波高と浸水区域

次に、須崎港における想定地形の津波予測計算を行い、昭和 21 年当時の津波高との比較を行う。想定地形のうち、防波堤計画地形は、高山・平石 (1986) にない、計画高の防潮堤と港口防波堤を設置し、仮想防潮堤地形は防潮堤を無限高さとする。

図-7 は、須崎港の防波堤計画地形と仮想防潮堤地形

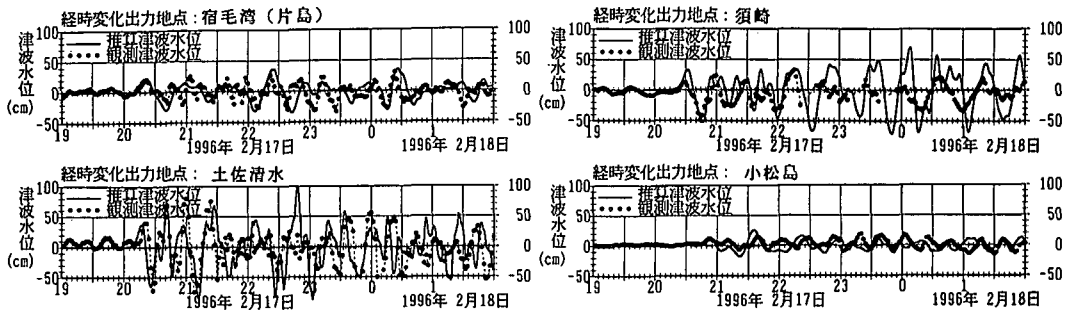


図-4 南海道沿岸のリアンジャ地帯津波の波形比較 (宿毛湾, 土佐清水, 須崎, 小松島)

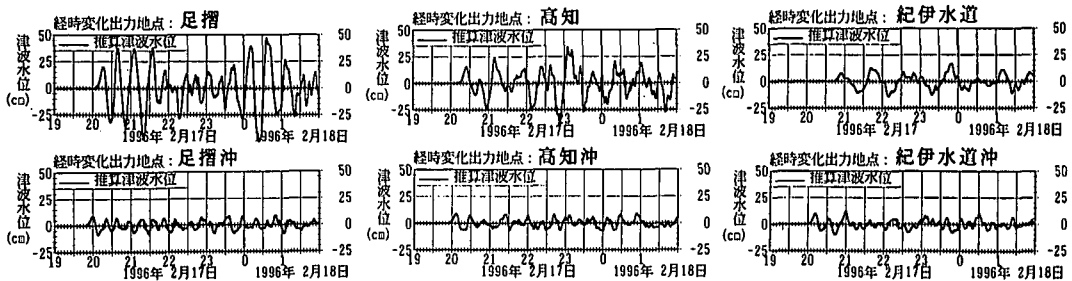


図-5 南海道沿岸と沖合の津波波形比較 (足摺, 高知, 紀伊水道)

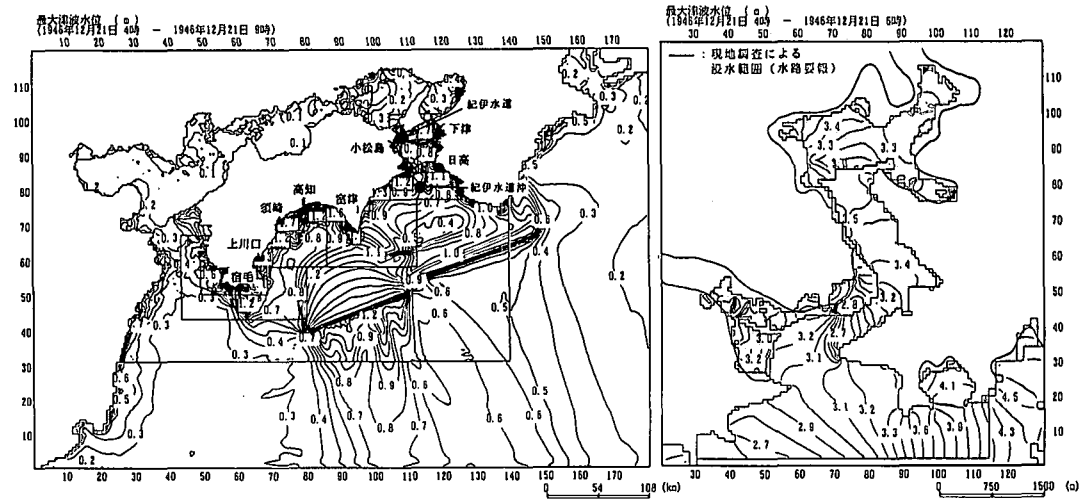


図-6 南海道沿岸の昭和南海地震津波の最大津波高分布と須崎港の計算浸水範囲と現地調査結果の比較

において予測される昭和南海地震津波時の港内最大津波高の分布である。図-6の右図に表した津波発生当時の港内津波高と比較して、仮想防潮堤地形は1.0 m以上水位が上昇する。つまり、陸上浸水を完全に防ぐには、5.0 m以上の防潮堤を必要とすることになる。これは、埋立に伴う水域面積の減少による津波増幅率の増加と防潮堤天端高の嵩上げによる陸上浸水量の低下が要因と推定される。一方、防波堤を建設すると、港内水位は港口で50

cm, 港奥で10 cm程度低下する。かつ、陸上浸水範囲、浸水高もかなり小さくなる。つまり、防潮堤と防波堤の複合的な対策が港内水位の低下と港湾利用の両面から効果的であることがわかる。数値シミュレーション情報を利用する防災対策検討の一例である。

5. おわりに

本論文は、新たに開発した南海道津波計算システムの

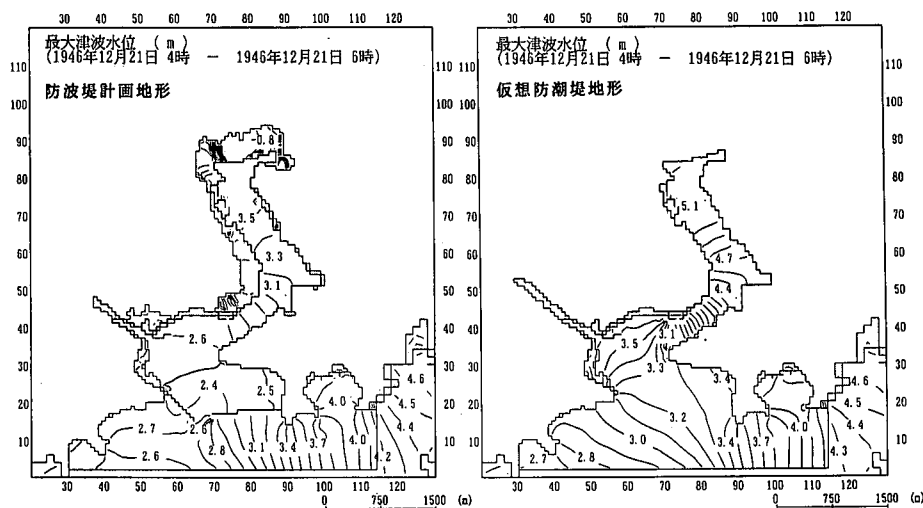


図-7 昭和南海道地震津波来襲時に想定される須崎港の最大津波高分布

概要と現地への適用事例について述べたものである。主な成果を次にまとめる。

① 南海道津波計算システムは、南海道沿岸全域を対象とする広域システムであり、海岸全域を200 m格子で地形近似する。また、港湾は50 m格子による地形近似を行い、陸域への浸水・防潮堤の越流等を扱う。計算範囲は40領域に分割され、格子点数は815,000個を数える。

② 遠地津波の伝播計算の結果、波源近傍の津波波形に波群形状が見られる。この特徴は、深海の伝播過程でも残り、浅海で増幅するか、浅海域固有の振動へと変化する。

③ 遠地津波の外洋伝播計算と南海道沿岸計算を結びつけ、遠地津波計算の高精度化を試みた。イリアンジャヤ地震津波の速報波源情報を用いているにもかかわらず、沿岸の計算波形と観測波形は良好な一致をみた。

④ 昭和南海道地震津波の追算を行い、南海道沿岸の最大津波高と観測値との比較から、港湾別の計算値補正係数を定め、現象をより忠実に再現する方法を述べた。

⑤ 港湾の想定津波高分布を須崎港を例に述べた。予測される津波は、港内形状の変遷に伴い、当時の津波高よりも増幅することがある。このような状況をふまえて、津波の計画高を定める必要がある。また、防災構造物の

計画では、防潮堤と防波堤の複合的な対策が防災と利用の両面から効果的であることがわかった。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、東海大学工学部 後藤教授より数々の御助言を頂いた。断層パラメータ情報は、東北大学工学部災害制御研究センター 今村助教授より提供して頂いた。また、建設省近畿地建、四国地建、高知県、徳島県、和歌山県の関係各位から貴重な地形情報を提供して頂いた。ここに謝意を表します。なお、本計算では、海上保安庁水路部の水深数値情報、国土地理院の標高数値情報を利用したことを付記する。

参 考 文 献

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所彙報, 第56号, pp. 713-730.
- 今村文彦・後藤智明 (1986): 差分法による津波計算の打ち切り誤差, 土木学会論文集, 第375号, pp. 241-250.
- 後藤智明 (1991): 遠地津波の外洋伝播計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp. 1-19.
- 高山知司・平石哲也 (1986): 須崎港における津波に関する水理模型実験, 港湾技研資料, No. 549.
- 長谷川賢一・鈴木孝夫・稲垣和男・首藤伸夫 (1987): 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, 第381号, pp. 111-120.