

数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性

永野修美*・今村文彦**・首藤伸夫***

1. はじめに

今日に至るまで、日本近海で発生した津波の数値計算は数多く行われており、主に痕跡記録との比較を通して計算精度が検討されてきた。その結果、近地津波の最大打ち上げ高に関しては、精度良く再現できることが示されている。しかし、1960年チリ津波のような日本各地に被害をもたらした遠地津波の数値計算例は僅かであり、現在でもその精度や特性は明らかにされていない。遠地津波の場合、近地津波にはなかった被害、例えば、引き波時の時間が長くなるために発生する火力・原子力発電所での冷却水の取水問題、従来の津波では波高増幅の顕著ではなかった大規模湾での大被害、等の生じる可能性がある。そのため、遠地津波の挙動を精度良く予測できる計算法を確立する必要がある。

本研究では、日本沿岸における1960年チリ津波の挙動を数値計算により再現し、遠地津波の数値計算精度の検討を行う。まず基礎検討として、格子間隔の選定問題に関連して、水位と流速の離散化誤差を調べることににより、両者の数値計算精度およびその差を明らかにする。次に、最高水位について痕跡記録と比較し、本計算の再現性について検討する。さらに、近地津波の計算結果と比較することにより、水位に関する遠地津波の分布特性を調べる。最後に、現在まで検討がなされなかった流速について、養殖筏の被害分布と比較することにより、その再現性を考察する。

2. 計算方法

遠地津波の沿岸部での挙動を数値計算で再現する試みが従来ほとんど行われなかった理由として、外海境界条件の与え方が困難であったことが挙げられる。過去、日本沿岸での数値計算は、代表的な振幅や周期を合わせた正弦波や、伊豆大島・江ノ島などでの検潮記録から得られる波形を外海境界条件として代用してきた(羽鳥・相田, 1983)。しかし、対象領域が広くなると外海境界条件

も場所により変化しているはずであり、これらの方法には限界がある。本研究では、著者らによる外洋伝播計算結果(今村ら, 1987)を浅海域計算の外海境界条件として与え、波源から沿岸まで一貫した数値計算とする。

図-1はこの外洋伝播計算結果の一例で、計算による日本沿岸での最大波高と水位経時変化を痕跡記録及び検潮記録と比較したものである。最大波高の計算出力地点では水深が大きいので、これを補正するため記録値を1/4倍している。図より北海道・東北地方で津波高の大きい傾向がよく一致していることが分かる。経時変化に関しても、小さな押し波で始まり、次に大きな引き波の生じる特徴が良好に再現されている。日本近海計算は、この外洋伝播計算結果による波形を、外海境界から強制入力することにより実施する。近海計算対象領域は三陸沖および熊野灘沖である。支配方程式として線形長波理論、浅水理論を採用し、Leap-frog法で差分化して計算を行う(後藤・小川, 1979)。

3. 離散化誤差の評価

数値計算を実行する上で、格子間隔の選定は最も重要な問題の1つである。これを誤ると、打ち切り誤差や地

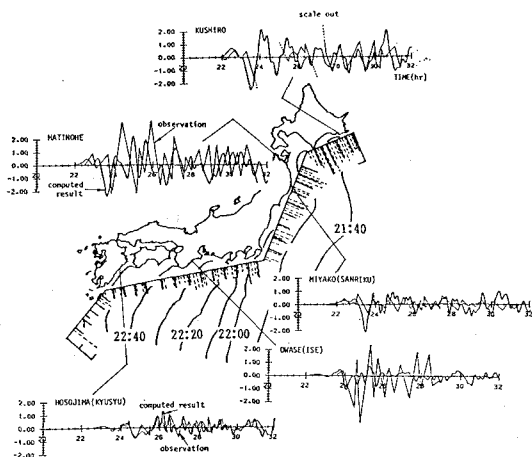


図-1 外洋伝播計算による日本海での結果
実線の棒グラフ：計算による最大波高，
点線の棒グラフ：痕跡記録

* 正会員 工修 電源開発(株) 総合技術試験所
** 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

形形状の近似度により離散化誤差が増大するため、本来の解と性質の異なる結果が得られ、また、格子間隔の大きさにより計算結果が大きく異なることとなる。このような離散化誤差を評価しようとしても、複雑な条件下では厳密解が存在しないため、現実には不可能となる。実際には何例かの格子間隔を変えた計算を行い、その差を調べることで判断しているが、厳密解との比較でないため疑問が残る。

そこで、次に示す Richardson により示唆された事後接近の方法 (藤川, 1982) を用いて、数値計算による近似解から微分方程式の厳密解を推定し、離散化誤差を評価することとする。但し、ここで言う厳密解とは、格子間隔を零の極限に近づけたときの数値解の収束値である。

今、 u を厳密解とし、格子間隔 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ に対する近似解を u_1, u_2, u_3 とする。離散化誤差が Δx のべき乗に比例すると仮定すると、

$$\left. \begin{aligned} u - u_1 &= A(\Delta x_1)^p \\ u - u_2 &= A(\Delta x_2)^p \\ u - u_3 &= A(\Delta x_3)^p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

と表され、 u を求めるには、この連立方程式を解けばよいことになる。例えば、 $\Delta x_1 = \Delta x_2/2 = \Delta x_3/4$ であれば、

$$P = \log_2 \left(\frac{u_3 - u_2}{u_2 - u_1} \right), \quad u = \frac{(\Delta x_2)^p u_1 - (\Delta x_1)^p u_2}{(\Delta x_2)^p - (\Delta x_1)^p} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここでは検討例として、図-2 に示した三重県の矢湾を対象に、 $\Delta x_1 = 50 \text{ m}$, $\Delta x_2 = 100 \text{ m}$, $\Delta x_3 = 200 \text{ m}$ の場合について計算を実施し、水位及び流速の離散化誤差を調べる。

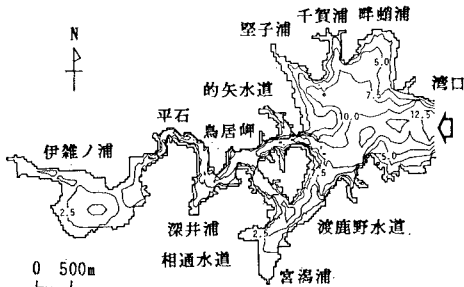


図-2 的矢湾(紀伊半島)の地形・水深分布

図-3, 4 は厳密解に対する数値解の相対誤差分布である。これらより、湾口とそれに連続する比較的広い水面を持った湾内では誤差は小さく、格子間隔の細分化により誤差が減少していることが分かる。一方、湾後半部の水道および湾奥の伊雑ノ浦では、格子間隔を細かくしても、なかなか精度は向上していない。水位と流速とを比較すると全体的にみて、流速の精度向上の方が難しい。図中には湾全体として平均誤差を括弧書きで示してい

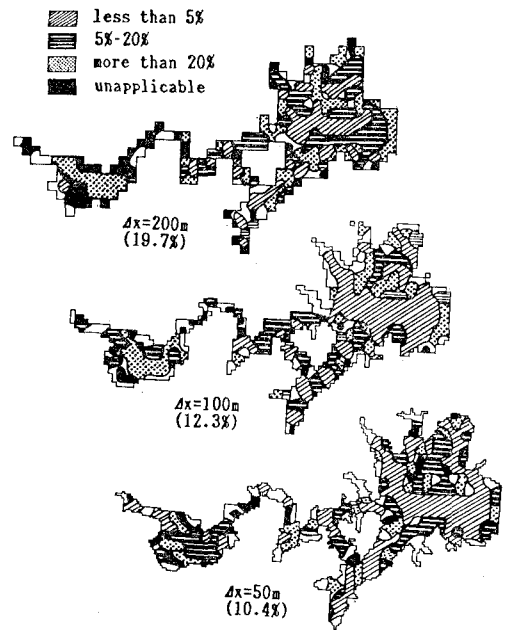


図-3 最大流速に関する離散化誤差

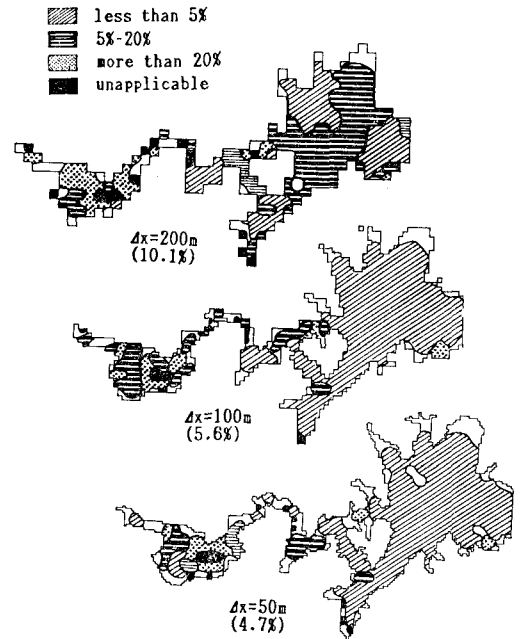


図-4 最高水位に関する離散化誤差

る。同じ格子間隔では、流速は水位に比べ2倍程度精度の低いことが分かる。この場合、平均の許容誤差を10%程度に設けると、水位計算では格子間隔を200m以下、流速計算では50m以下にする必要があると判断できる。

図-5 は(2)式中の P 値の分布である。格子間隔を小さくするにつれ、精度の向上する地域では、 $P > 0.7$ と

なっている所が多い。

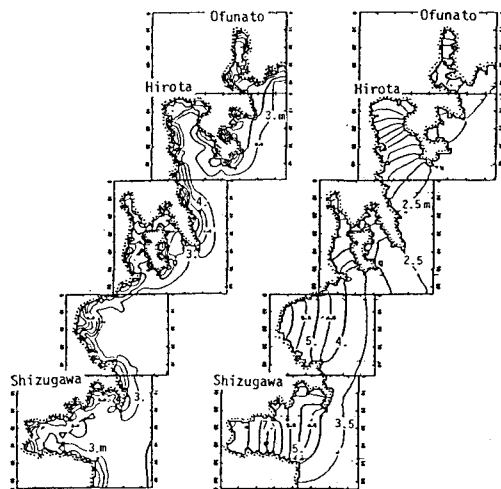
収束の悪い地域は、大別すると次の三つである。まず、広い面積を有する部分の中央北側で、ここでは流速の精度が向上しない。これは北側の三つの枝湾（堅子浦、千賀浦、畔嶋浦）から流出して来る津波の合流点付近であり、地形表現精度を高めるにつれ、流れが複雑に影響されるからであろう。第二は、汀線を含む格子点付近であり、やはり流速精度が改善されにくい。この計算では、いずれも汀線では鉛直壁を仮定しているため、流速は零となる。このようにもともと小さい流速値になる筈であるから、格子寸法の違いから生ずる地形表現の変化が大きく影響したものと考えられる。第三は、狭い水道部での流速と、その直後の場所での流速・水位の精度が向上しないことである。例えば、平地地点では、水道幅が200~300 mの程度である。 $\Delta x=200$ mでは1ないし1.5の格子しかない。50 m格子にしても6個程度であり、ここでの流速は、地形表現の影響を大きく受ける。これにより、通過する流量が変化するため、その直後で水位の精度が上がらない。また、流速・水位の最大値は湾内での津波挙動がほぼ完成したときに生ずる。つまり、湾奥からの反射波をも含んで、重複波的になっているため、水位と流速の精度の向上しない場所が交互に表れているのであろう。

上記の三つのいずれの場合にも、地形表現の精度が直接効いていると考えられる。

4. 最高水位の再現性について

(1) 近地津波との相違

図—6 には、大船渡から志津川に至る南三陸での最高水位分布を表わす。近地津波の例として 1896 年明治三陸大津波の計算結果も併記する。格子間隔は 200 m を採用している。大船渡はチリ津波による被災の最も大きかった場所である。図より、最高水位の分布特性の差が明確に分かる。三陸津波では等深線に沿って水位が大きくなるのに対し、チリ津波では湾口から湾奥にかけての水位増幅が著しい。この付近では、固有振動周期の長い（1時間前後）大規模湾が多く、チリ津波の周期がこれとほぼ近いものであり、湾内で共振現象の生じたものと理解できる。実際、Watanabe (1964) の研究によっても、この現象は確かめられている。

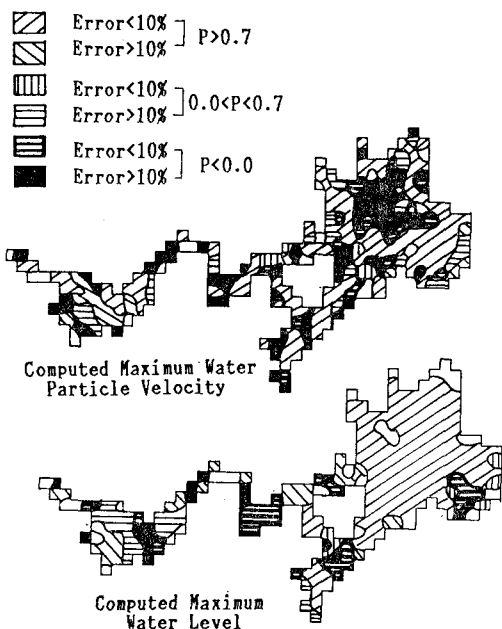


1896 Sanriku tsunami 1960 Chilean tsunami

図—6 近地津波と遠地津波の最高水位分布の比較

(2) 計算値と痕跡記録の比較

次に計算結果を痕跡記録と比較することにより、最高水位計算値の再現性を調べる。図—7 は三陸における計算による沿岸での打ち上げ高と痕跡記録を比較した一例である。縦軸が記録値、横軸が計算値である。図では、右下半分に点が分布し、計算結果が過大評価であることを示している。特に、唐丹湾・広田湾ではその傾向が著しい。一方、大船渡湾・吉浜湾・越喜来湾での一致は比較的良好である。ここで具体的に数値計算の再現性を調べるために、三陸全体での結果に対して相田の指標 K , κ (Aida, 1978) を求めた。 K は全領域での計算値に対する記録値の比の幾何平均値であり、 κ はそれからのバラツキを表わす。本計算の K , κ は、湾内に対して $K=0.79$, $\kappa=1.78$, 湾外に対して $K=0.84$, $\kappa=1.43$ とな



図—5 P 値の分布状況

った。 K に対しては、陸上遡上効果を考えていないため 2 割程度計算値の方が大きいものの、良好な再現性であると言える。 K に関しても、近地津波の計算例において 1.2~1.6 程度の値であることを考えると、従来の近地津波計算結果と同程度の精度は得られていると判断できる。

Records(m)

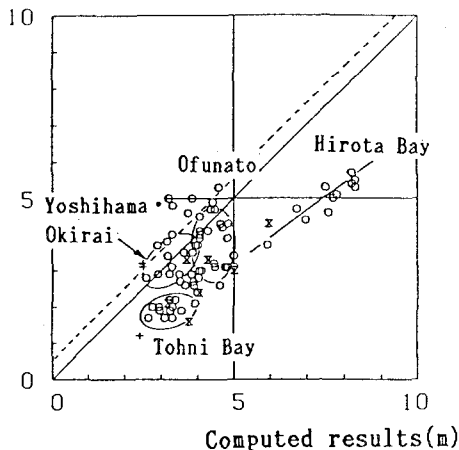
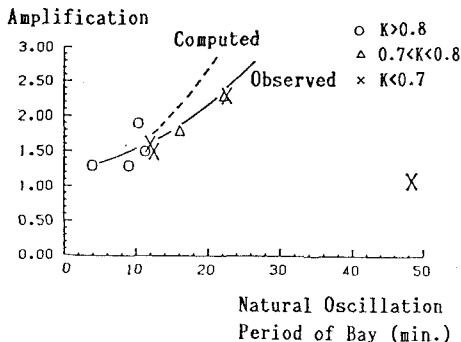


図-7 三陸沿岸での痕跡記録と計算値の比較

図-8 は湾内水位増幅率・固有振動周期と再現性の関係について調べた結果である。ここでの固有振動周期は湾の形状および湾口補正を行ったもので、直方体近似した結果より小さい値となっている。図中の記号は実測値の増幅率であるが、計算値の再現精度により分類して示しており、実線はそれらの平均的な曲線である。固有振動周期が 14 分より小さい湾では再現性が良いが、湾長が長くなると計算値の増幅率が実際よりも大きくなる。それにとまって、当然ながら相田の指標が悪くなっている。このことは、大規模湾でのエネルギー損失や陸上遡上の効果などを、さらに考慮する必要があることを示している。

図-8 湾内増幅率・固有振動周期と再現性の関係 (K : 相田の指標)

5. 最大流速に関する再現性について

チリ津波による波高は小さかったものの、被害の大きかった紀伊半島付近での検討を行う。この付近では津波の押し引きに伴う流速により、養殖筏の移動・破壊などの被害を受けている。特に、的矢湾・英虞湾・五ヶ所湾では被害が甚大であった。この種の被害に対しては、流速値の推定が重要であるが、従来、津波数値計算の精度と云えば水位のみ、それも最高水位の精度が主に注目され、流速の精度はあまり検討されていなかった。流速に関する現地での実測値等の比較対象が存在しなかったからである。1960 年チリ津波の場合、三重県の的矢湾において養殖筏の被害分布の記録 (佐藤, 1960) が残っておりこれと比較することにより、流速の計算精度について検討する。

図-9 (上) は津波発生後 20 時間から 30 時間までの最大流速値を示す。水道部や湾口での流速の大きい場所では 2.0 m/s 以上、伊雑ノ浦・千賀浦・畔蛸浦・宮潟浦では 1.0 m/s 以下となっている。津波来襲時に流速の大きかった場所では、平常時の潮汐による流れも同様な傾向を示すようである。この付近での流速が海岸地形 (水道部など) に影響されるからであろう。

図-9 (下) は佐藤 (1960) による筏被害の分布を示している。最大流速に対応し、流速の大きい所では被害も大きく、流速の小さい所では被害も小さい。図-9 の結果では最大流速と被害状況の対応が良く、本計算結果により定性的な流速分布は再現できているといえる。さらに計算による最大流速と被害状況との関係を明確にするため、図-9 の結果をもとに、計算最大流速値および計算最高水位値と被害程度の間連を見たのが図-10 である。

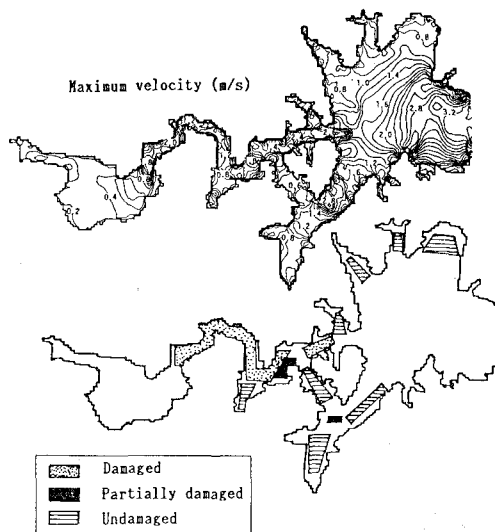
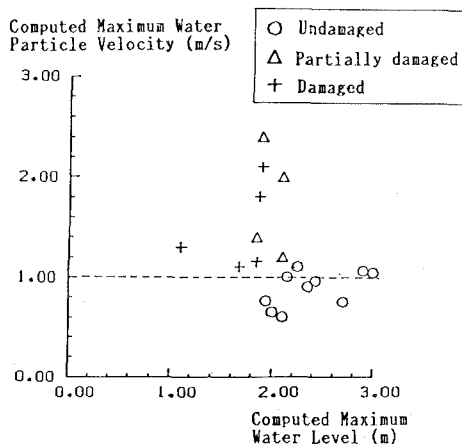


図-9 計算による最大流速分布(上)と筏被害状況(下)

この図より被害は最高水位にはあまり関係がなく、主に流速に関係することが分かる。また、被害有りと無しの境界が流速約 1.0 m/s のところに存在しており、この値が養殖筏に被害の生じ始める最低の流速であると予想される。



図—10 筏被害の発生条件

6. おわりに

数値計算により 1960 年チリ津波の沿岸域における挙動の再現を試みた。最高水位には痕跡記録、最大流速には養殖筏の被害状況を比較の対象とし、ほぼ妥当な計算結果であることが分かった。最高水位に関しては、2 割程度の誤差で再現が可能である。さらに、養殖筏被害の有無を推定するには、計算による最大流速 1.0 m/s 程度が基準となるようである。他の湾での被害、筏の構造や係留状況などを今後考慮すべきではあるが、筏被害の程度を数値計算により推定することも可能である。しか

し、事後接近法による離散化誤差の評価を行った結果、水位計算に比べ流速計算の精度は悪いいため、細かな格子間隔を用いる必要があることが明らかになった事を考えると、別の面からも流速精度の向上を検討する必要がある。この問題を明確にし解決するためには、比較できる資料・記録をさらに整理するとともに、大型水理実験との比較などが必要となろう。特に、地形との関連における空間格子寸法の決定は今後の重要な問題点である。

謝辞：この研究の一部は、文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者、東北大学・理・平沢朋郎教授）により行われた。また、数値計算にあたって、運輸省港湾技研・後藤智明主任研究員には多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 今村文彦・永野修美・後藤智明・首藤伸夫 (1987): 1960 年チリ沖津波に対する外洋伝播計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, pp. 1~26.
- 佐藤忠勇 (1960): 三重県下におけるチリ地震津波と養殖イカダの被害状況, 水産増殖, Vol. 8, No. 3, pp. 193~202.
- 羽鳥徳太郎・相田 勇 (1983): 陸上での津波の挙動, 文部省科研費自然災害特別科学研究成果 No. A-58-2, 「陸上に氾濫した津波の挙動と津波の流動による被災のメカニズムに関する研究」, pp. 27~36.
- 藤川洋一郎 (1982): 電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社, pp. 144~145.
- Aida, I. (1978): Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, pp. 57~73.
- Watanabe, H. (1962): The motion of tsunami at the inner part of bays, especially on the distribution of maximum height of tsunami, J. Oceanogr. Soc. Japan, 20th Anniversary Volume, pp. 330~345.