

津波危険度評価のための高まり係数

木下武雄*・小西達男**・都司嘉宣***

国立防災科学技術センター

Magnification Factor for Tsunami Risk Evaluation

By

Takeo Kinosita, Tatsuo Konishi and Yoshinobu Tsuji

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The coastal areas in Japan, which have been rapidly developed for ports and harbours, industrial and recreation areas in recent years, are vulnerable to a tsunami (a tidal wave caused by an earthquake). The tsunami risk evaluation is needed very much from the view point of disaster prevention and preparedness at the coastal area. The estimations of the magnitude of the forthcoming earthquake and the frequency of its occurrence have been well discussed based on modern seismology. Therefore the magnitude of the forthcoming tsunami, the frequency of its occurrence and the generation place will be able to be assumed. The propagation of the tsunami in an open ocean can be easily made clear by the numerical simulation or the hydraulic simulation. But a difficulty is found at the analysis of the propagation through a continental shelf. The accuracy of the simulation is not sufficient on the continental shelf because of the complicated technique in numerical modeling or hydraulic testing at the discontinuity of the bottom topography at the continental shelf.

The authors propose the magnification factor which is defined as the ratio of the observed tsunami height to the calculated tsunami height. The observed tsunami height here means the height of the maximum tsunami wave above the mean sea level observed at the Japan Sea coast by the authors immediately after the Nihonkai-Chubu Earthquake, 1983. The calculated tsunami height means the height of the maximum tsunami wave obtained at the shelf edge, which is defined as the isobath of 200 m, by the numerical calculation with the 5 km meshes all over the Japan Sea carried out by the authors. The basic equations of the calculation are shown in Eqs.(2) and (3). The

* 第1 研究部, ** 第1 研究部風水害防災研究室, *** 平塚支所主任研究官

correspondence of the calculation point and the observed point is simply determined by the line normal to every isobath between the coast and the shelf edge. The resultant magnification factor, R , has the trend increasing with the distance between the sea coast and the corresponding shelf edge as shown in Fig. 2 where the abscissa is the distance. The trend is somewhat bent on the figure, but it may be simply expressed by Eq.(4) for operational purpose,

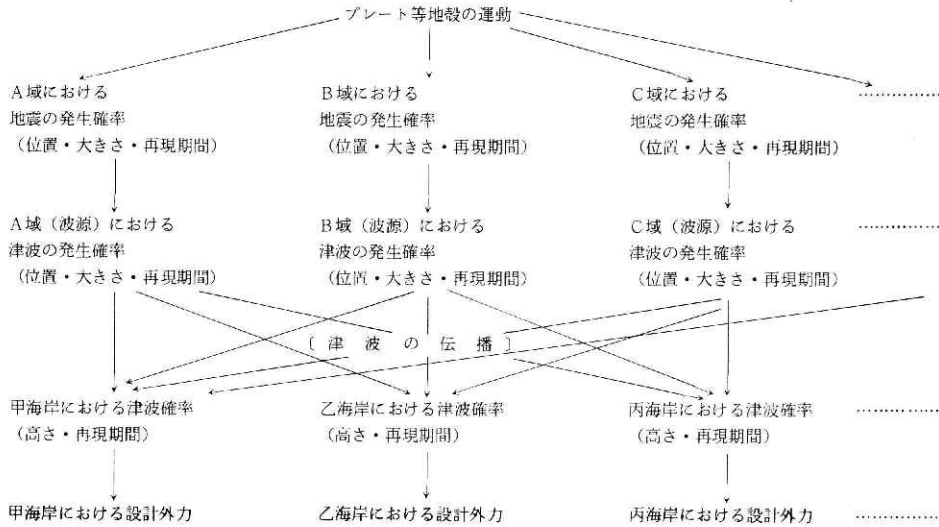
$$R = 2 \quad L < 4 \text{ km} \quad \dots\dots (4)$$

$$R = 0.151L + 1.451 \quad 4 \leq L \leq 35 \text{ km}$$

where L is the distance in km. The broken curves in the figure mean the run-up height relation proposed by Shuto (1972). The trend of the magnification factor is well agreed to the run-up height relation within some assumptions. It is concluded that the magnification factor is useful to increase the accuracy of the estimation of the tsunami height at the coastal line for risk evaluation of tsunami.

1. はじめに

わが国の経済発展は言うまでもなく海外との貿易による所が大きく、新しく港湾が各地に建設された。また発電施設なども海岸に作る例が多く、これらはわが国の発展に大いに貢献した。さらに、海岸がますますリクリエーションに利用されるという事実も海岸地域の防災上、見逃すわけには行かない。構造物・施設の防災設計には、過去の災害についての記録の解析から危険度を評価し、その設計のための外力を決定するのが一般的である。近年、海岸の構造物・施設などを全くの砂浜に作る例も多く、このような場合の危険度の評価・設計のための外力の決定には過去の記録に乏しい。昔から利用の進んだ湾内はともかく、砂浜で殊に何十年又は何百年に一度の津波による設計外力の決定に役立つ資料は皆無に近い。そこで、次のように地殻の運動から津波被害危険度評価までの作業の流れにおいて設計のための外力の作成方法を考える(下表参照)。まず、プレート等の地殻の運動によって、各地(A域、B域、C域……)で地震が発生する確率があり、それぞれに位置・地震の大きさ、再現期間が設定される。これは近年の地震学の知見から色々明らかになって来た。これによって各地(A域、B域、C域……)で津波が発生する確率が決まるが、地震に対応してそれぞれに位置・津波の大きさ、再現期間が設定される。発生する津波の波源での大きさなどには不確定な面があるが、一応、海底の変位などから多くの推定がなされている。ひるがえって、甲海岸における津波危険度をみると、A域からの津波伝播、B域、C域……からの津波伝播が考えられ、これらは次のべるように推算可能である。こうして、甲海岸では確率としての津波の高さ・再現期間などが求められ設計のための外力が求められる。乙、丙……の海岸についても同様である。こうして、任意の海岸において、津波危険度の評価のための外力としての津波高の確率が求められる。



ところで、津波伝播の推算の手法は 電子計算機の発展によって著しく進歩し、さらに模型実験による検証が近い将来のこととして日程にのぼりつつあるが、海岸近くでの津波の変形等において未だ十分明らかでない面がある。そこで筆者らは津波の推算のうちの十分でない部分に「高まり係数」なる概念を導入し、昭和58年（1983年）日本海中部地震においてえられた結果より、高まり係数の値を提案するものである。すなわち、沿岸での津波の計算は、津波自身が沿岸近くで急激に尖鋭化するので数値計算では非常に細かい差分が要求される事、あるいは模型実験では、実験技術として実施しにくい浅海部で精度を上げねばならないこと、非線形性、海底摩擦の影響を正しく評価せねばならない事等から、信頼度の高い結果を得るのは難しい。よって、信頼度も高く、比較的計算が容易な大陸棚以深を数値計算の主たる対象として大陸棚縁での津波高（気象庁海洋観測指針にいう最高津波水位）を求め、その値を沿岸での津波高と客観的な手法で結びつける事ができれば津波高の推定の精度向上が期待される。こうして上で述べた再現期間と組みあわせると、ある海岸に対しての津波危険度の評価・構造物・施設の設計のための外力としての津波高が求められる。

本論文では、大陸棚縁の津波高と沿岸での津波高を結びつける高まり係数Rとして

$$R = \frac{C_{obs}}{S_{cal}} \dots\dots\dots (1)$$

（ここで C_{obs} , S_{cal} はそれぞれ沿岸での実測津波高、および200m等深線上での計算津波高である。）を定義し、1983年日本海中部地震による津波の実測津波高(国立防災センター、1984)、 C_{obs} と数値計算による津波高(科学技術庁、1984)、 S_{cal} からRを求め、こ

れを大陸棚の平均勾配の関数として係数を定めた。同様に相田（1977）も十勝沖津波等で同様の計算を行い比較しているが、この小文では後述するL（海岸線から大陸棚までの水平距離）との対応に注目した。

2. 津波数値計算の方法と結果

日本海中部地震による津波の数値計算で使用された手法及び結果は、科学技術振興調整費による報告書（科学技術庁，1984）に詳しく示されている。簡単にその方法を述べると、日本海全域（大陸棚を含め陸岸まで）を計算対象海域として、東西方向、南北方向とも5 km 間隔の格子に分割し、次の運動方程式、及び連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を差分化して解いた。日本海全体を対象にしたこと、及びこの海域における代表的な水深での津波の波長を海岸で測られた周期から推定しそれを表現できるように格子間隔を5 kmと決めた。x, y座標はそれぞれ東西方向、南北方向にとり、u, vは、x, y方向の流速成分、 ζ は平均水面からの水位変位、hは水深である。運動方程式では、移流の項、コリオリ項および粘性項が無視されているが、今考えている大陸棚以深の津波の計算では十分許される近似である。陸岸境界では、陸岸に直交する流速成分を0とし、日本海が大洋とつながる海峡では津波が海峡の内側水位に応じて流出するように条件を定めた。

初期条件(地震による波源の水位上昇)として、相田(1984)のモデルNo.10を使用した。以下の議論では相田のモデルNo.10による初期変位が量的にも正しく、したがって数値計算等で得られた陸棚縁での計算波高も現実をよく再現していたと仮定して話をすすめる。このモデルによると南北2枚の断層変位が想定されているが、これに相当する水位変化を与え、流速は地震発生直後には全域で無しとして計算を始める。鉛直水位変化は最大で約4 m、2枚の断層の大きさは北側東西60 km, 南北30 km, 南側東西40 km, 南北30 kmに及ぶ。

最も大きい津波が襲った秋田、青森の海岸を中心に、大陸棚縁での計算津波高を図1に示す。ここで、大陸棚縁は、200 mの等深線と定義する。図1の計算結果は、200 m等深線をはさむ東西2個の格子点での算出水位のうちの大きい方の値を採用している。この図には、我々が主要災害調査として現地調査から得た実測した津波高も示されている。計算と実測の分布形状は全体として良く似たパターンを示している。両者の値の大きさを比較すると、実測値は計算値に比べて、2～7倍程度大きい事がわかる。

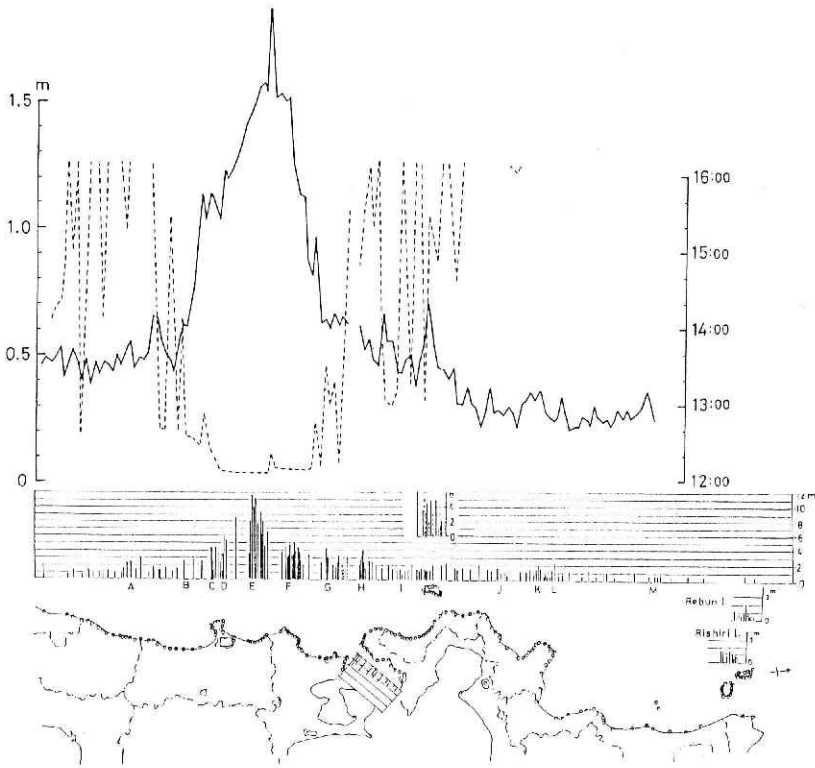


図1 大陸棚縁（200 m等深線）での計算津波高（実線）及び実測津波高（棒グラフ）。点線は計算津波高の出現時刻を示す。

Fig.1 Calculated tsunami height at the shelf edge (the solid line) and observed tsunami height at the coast (the bar graph). Broken line shows the occurrence time of the calculated tsunami height.

3. 高まり係数：Rの求め方

高まり係数を定義する際に問題となるのは、海岸での実測津波高と大陸棚縁のどの位置の計算値との比をとるかという事である。合理的だと思われるのは、実測津波高が得られている海岸から逆伝播図を作製しその波面が最初に200m等深線に到達した地点での計算津波高を採用する事だろう。実際に逆伝播図を作製してみると波面が曲率をもつ為に最短の径路を決めにくい場合がある。よってここでは海岸から次々と等深線に垂線をたてて、200mの等深線に到達した点での計算津波高と実測津波高を対比する。こうして決めた海岸から200 m等深線への距離は逆伝播図から決めたものと大きな違いはない。計算津波高を求めている地点は境界（海岸）から離れているので上に述べたような浅海や境界が計算結果に及ぼす悪影響はうけていない。径路図は 海上保安庁発行の大陸棚の基本図上で作製した。逆伝播図に

よる径路との違いや誤差を考慮して、上で決めた点に最も近い計算格子点とその南北の計算津波高の3つの値の平均値を、陸棚縁での計算津波高、 S_{cal} とした。

このようにして定めた計算津波高と実測津波高の比 R を200m等深線までの距離、もしくは、陸棚勾配に対して示すと図2のようになる。選ばれた21個の実測点は、秋田、青森両県で、最高波が第1波に近く、選択した点の間の距離がほぼ一様で比較的信頼できる測定値が得られている場合である。鱒ヶ沢と八竜橋の2点を除けば、ある一意的な関係を示しているように見える。八竜橋は、八郎瀨につながる川を海岸から中に入った所にある事、鱒ヶ沢は防波堤に守られた漁港内の測定点である事を考慮すると、高まり係数 R は、大陸棚部分での平均勾配でほぼ定まるようである。大陸棚の勾配が比較的急で $1/50$ 程度では R は2~3に、 $1/100$ 勾配で4~5に、 $1/150$ よりも陸棚勾配が緩くなると R は6~7になっている。200m等深線上の津波高を沖合津波の片振幅と考えれば、海岸から大陸棚までの水平距離、 L (km)が小さくなれば R は2に近くなる事が推定される。これを考慮して、さらに上述の理由から八竜橋、鱒ヶ沢を除外して実験式を求めると、

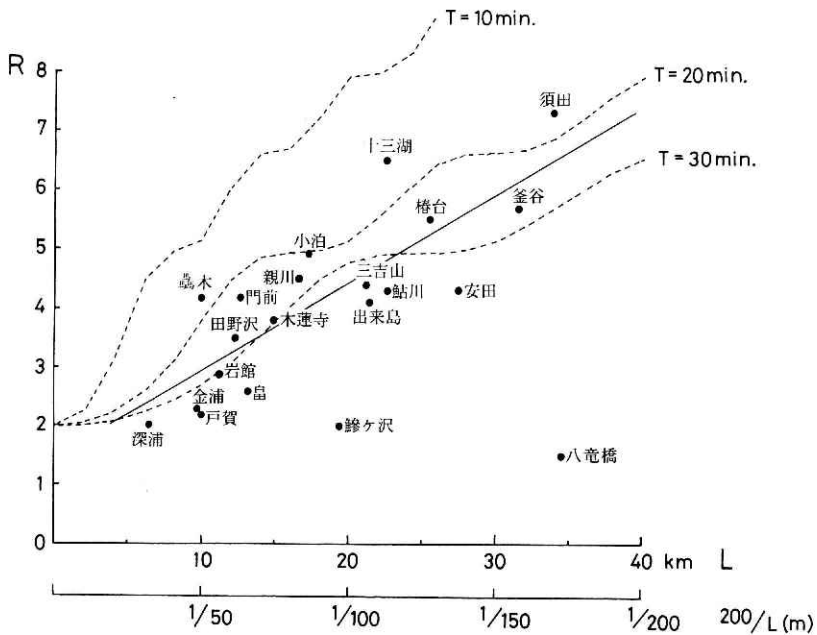


図2 大陸棚縁までの距離と高まり係数の関係。
図内の実線は実験式(4)を示す。点線は T を周期とする入力波について首藤の式(5)の計算結果を示す。

Fig. 2 Magnification factor with the distance between the shelf edge and the coast (or the shelf gradient). Solid line is the empirical relation (4). Broken curves are calculated by the Shuto's relation (5), being supposed that the period, T is equal to 10, 20 or 30 minutes.

$$R = 2 \quad L < 4 \text{ km}$$

$$R = 0.151L + 1.451 \quad 4 \leq L \leq 35 \text{ km} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。さらにLが大きくなるとある値へ漸近するか、もしくは小さくなるものと思われる。

4. 高まり係数の1つの解釈

本節では、高まり係数の物理的な意味を考えてみる。幅や水深が変化する水路での長波変形を表わす有名な式にグリーン (Green) の公式

$$\zeta \propto h^{-\frac{1}{4}} b^{-\frac{1}{2}}$$

がある。ζは水位変化、hは水深、bは水路幅を表わす。この式の前提として 摩擦はなく伝播途中で反射を生じないという仮定がある。もしも一様勾配の緩い斜面にこの式を適用すれば海岸での水位の上昇は無限大という事になる。実際は反射をうけ、摩擦をうけて有限にとどまる。図2の1つの解釈はこのグリーンの公式にみられるような増幅と反射、もしくは摩擦による減衰の関係を示していると考えうる。すなわち、陸棚勾配が急(L:小)であればそれだけ大きな反射をうけるし緩勾配(L:大)では無反射のまま海岸まで津波のエネルギーは運ばれるだろう。

図2に挿入した3本の点線は、首藤(1972)が斜面の遡上高について導いた線型定常解である。これは次式で与えられる。

$$R'/a = 2 [J_0^2(4\pi L/S) + J_1^2(4\pi L/S)]^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

R': 遡上高, a: 斜面以深に仮定した平坦面での津波片振幅, L: 斜面の水平長さ, S = $\sqrt{gh_0} \cdot T$ で h₀ は平坦面水深 (ここでは200 m), T: 入力波の周期, J₀, J₁ は0次, 1次のベッセル関数である。首藤の計算は周期的な正弦波についてのものなので本報告の例とは幾分異なるが、傾向は極めて類似している。もしも、この首藤の式で高まり係数が表現できているとみれば、実測遡上高は水深減少による波高増幅と反射による減衰で説明可能となる。いまの場合、首藤の式の入力波の周期Tを25分程度と考えると最も良く合う結果を与えるようである。

上で提案した高まり係数Rは、海岸を単純化して考えているのでV字型の湾等へ適用する場合には、湾口の値は高まり係数で求め湾奥の値はグリーンの公式等で補正する必要があるだろう。また、海岸に沿って伝わる波等は考慮されてないので、第1波が最大となるような震源に近い海岸において適用すべきであろう。ある意味で、この高まり係数は津波の防災計画に変更を求めていると思われる。今まで津波が危険なのはV字型の湾であるとされてきた。しかしながら、上式の高まり係数Rが示すように、V字湾以外でも前面に緩勾配の陸棚斜面

を持つ海岸付近で地震が起これば、極めて大きな津波を考えなければならないし、その危険度評価は本報告で述べた手法で可能である。

5. 結論

日本海中部地震による津波の実測津波高と日本海全域についての数値計算結果から高まり係数を定義、算定した。この値を使えば、大陸棚以深で起きた津波が直線に近い海岸にほぼ直角に入射した場合、大陸棚縁（200m等深線）の数値計算値から沿岸での津波高を推定する事が可能であり、地震の生起頻度や再現期間の計算を組み合わせる事で海岸構造物に対する津波危険度評価のための外力算定が可能である。

高まり係数Rは、Lを海岸から200m等深線までの距離（km）として

$$\begin{aligned} R &= 2 & L < 4 \text{ km} \\ R &= 0.151L + 1.451 & 4 \leq L \leq 35 \text{ km} \end{aligned}$$

となる。

謝辞

これまでの津波調査でご協力頂いた方々及び基本的な示唆を与えられた大竹政和氏に謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 相田 勇 (1977) : 200 m等深線上の津波波形と浸水高, 地震, 第30巻, 11~23頁.
- 2) 相田 勇 (1984) : 津波波源モデル. 1984年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, B1, p. 303.
- 3) 科学技術庁研究調整局 (1984) : 1983年 (昭和58年) 日本海中部地震による津波の数値計算. 印刷中.
- 4) 国立防災科学技術センター (1984) : 昭和58年 (1983年) 日本海中部地震による災害現地調査報告. 主要災害調査第23号, 164 pp.
- 5) Shuto, N. (1972) : Standing Waves in front of a Sloping dike, Coastal Engineering in Japan, 15, p.13~23.

(1984年6月14日 原稿受理)