

日本海での津波の挙動特性

李 昊俊*・今村文彦**・首藤伸夫***

1. はじめに

近年、日本海では頻繁に津波が発生しており、しかも津波高さが予想外に大きい場所があって問題となっている。例えば、日本海中部地震津波である。波源近くの秋田海岸及び輪島を除いて5 m 以上を記録した場所はないが、震源から遠く離れた韓国東沿岸の臨院、北朝鮮の羅津、及びロシア沿海州のナチュなどで2-5 m にも及ぶ高い津波が到達している。この原因として、日本海中央部に横わる大和堆のレンズ効果が挙げられ（都司・小西, 1985）、津波のエネルギーが浅瀬に向かって収束する効果が指摘されている。このような大和堆と日本海東縁部の様々な波源の位置関係は津波エネルギーの伝播特性に大きく影響し、日本海での特有な津波挙動を形成している。本研究では、過去の津波や想定津波を対象にこのような津波の挙動に関する検討を行うことを目的とする。

ところで、浅瀬のように波の屈折が大きい場所において精度の高い数値計算を行うためには、空間格子間隔の選定が重要であると言われている（李ら, 1997a; 1997b）。ここではまず、対象とする地形をどの程度の空間格子で離散化すればよいのかを、Fractal の概念（Imamura, 1994）を導入して議論する。例として、大和堆周辺での必要な格子間隔を選ぶ。ついで、この格子間隔を用いた津波数値解析を実施し、大和堆の影響による津波の伝播特性及び日本海東縁部の想定地震津波の波源位置による伝播特性を詳細に検討する。

2. 格子間隔の選定

図-1 に示すように日本海を中心部には、日本、大和、対馬海盆に取り囲まれるように大和堆が存在し、日本海東縁部で発生した津波のほとんどはこの浅瀬で屈折し、エネルギー集中などが起こる。このように、日本海での津波の挙動には大和堆の役割が重要であるから、数値計算を行うにあたってこの付近の地形を十分表現できる適切な離散間隔の基準が必要である。ここで、大和堆付近

の地形（図-1 の A 領域および図-2）を対象に、いくつかの離散間隔の選定基準を検討する。

2.1 地形近似による基準

長さスケールに対する様々な現象の遷移・変化は Fractal 概念を導入して説明するのが便利である。Imamura (1994) は、海岸線の解析にこの拡張概念を導入し、Fractal 次元の変化により様々な遷移領域を区分した。この方法を二次元の海底地形に適用することを試

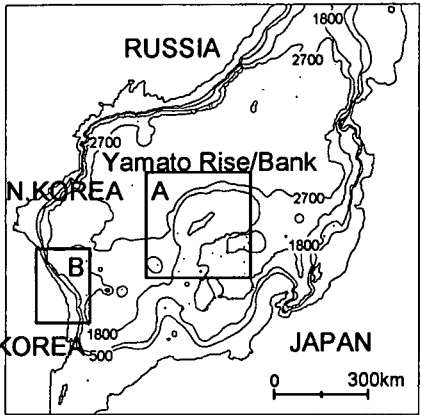


図-1 日本海海底地形

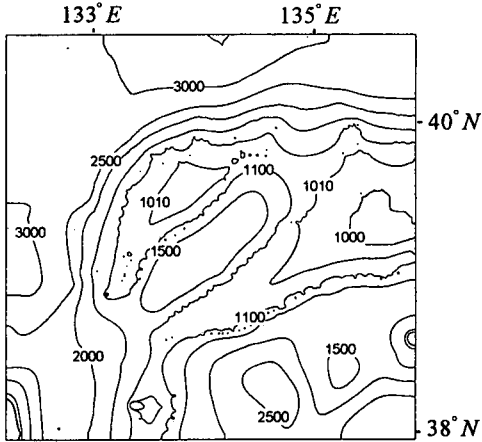


図-2 大和堆周辺の海底地形

* 学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科
 ** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター
 *** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

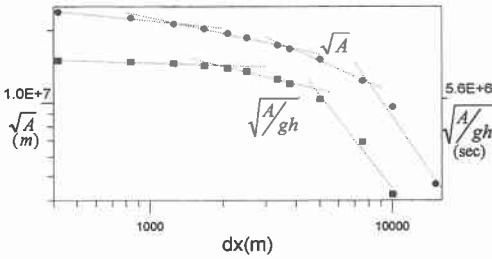


図-3 格子間隔の選択基準 (1)

みる。

今、図-2の領域を離散化間隔 dx により分割し、4 個の格子点で形成される海底小地形の斜面面積を a とする。対象地形全体に対する海底斜面面積の総和を A とすれば、拡張 Fractal 次元 D_m は次式により与えられる。

$$1-D_m = \frac{d(\log \sqrt{A})}{d(\log dx)} \dots\dots\dots (1)$$

図-3 中の黒丸で示すように、総和面積の平方根と格子間隔を両対数グラフにプロットすると、その曲線の傾きが $(1-D_m)$ に対応する。格子間隔は異なっても離散化表現された地形が同じ構造を持つならば、傾きは変化せず一定値となり、自己相似形が保持される。しかし、実際には、格子間隔の違いにより重要な地形情報が脱落すると、離散化地形の構造・特徴が変化する。図-3に見られる通り、海底総和面積曲線は、 $dx=3.4$ km, 7 km 付近で勾配がかなり変化していることが分かる。また、1.3 km 付近でも、やや変化している。

2.2 伝播速度と関連した基準

上記は、海底地形の持つ性質を表現する為の基準であり、そこでの屈折現象など、津波数値計算の直接の目的との関連は考慮されていない。しかし、同じ地形であっても、それが存在する場所の水深の大小が屈折現象には強く反映されるから、このことを取り入れた判定基準が必要となる。

そこで、離散間隔による海底総和面積 A と長波の伝播速度 $\sqrt{gh}$ (h は水深) とを考慮して、新たな指標 S_t を提案する。

$$S_t = \frac{d(\log \sqrt{A/\sqrt{gh}})}{d(\log dx)} \dots\dots\dots (2)$$

これは D_m のように無次元量ではなく、対象領域での代表的な伝播時間の離散化程度による変化を表す。 S_t が一定であれば伝播特性として違いがない。式 (2) は、高安 (1986) が分類した Fractal 次元の定義の中で、粗視度の度合いを変える方法に相当する。

この結果を図-3 に黒四角で示す。これによると $dx=2$ km, 5 km 程度で変曲点が現れ、 $1-D_m$ に比べ変化が若干早く現れている。

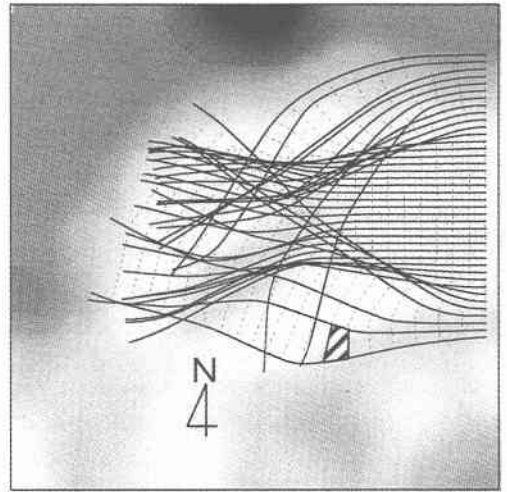


図-4 大和堆での波向線の伝播

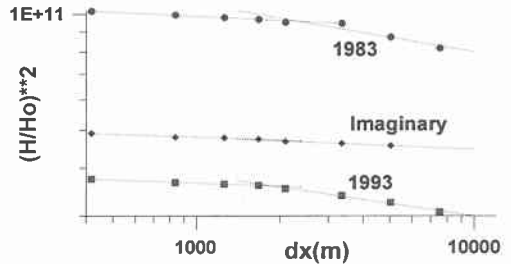


図-5 格子間隔選択基準 (2)

2.3 エネルギー伝播を考慮した基準

さらに、波源位置および波向線軌跡を考慮に入れた、津波エネルギーの伝播特性を表す新たな指標を考える。ここでは、波向線法を用いて想定波源域から波向線を求め、各波向線間での津波エネルギーの総和をとる。これまでの2つの指標では、波源位置の情報を取り入れなかったが、この指標では考慮できる。波向線を求めるには次式を用いる。

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 θ は波伝播方向、 s は波向線に沿って測った距離、 C は波速である。式 (3) を中央差分法で離散化し、多項式内挿方式を使ったDTM (土木学会編, 1975) で補間した水深の2次微分まで考慮する。また、 s に対する常微分方程式は Runge-Kutta 法を用いて4次まで近似し、波向線の方法を求めている。(丸山, 鹿島, 1983)

図-4は、こうして計算された大和堆での波向線の伝播例であり、入射 (波源) 条件として日本海中部地震津波の入射角度を用いている。空間格子寸法を変える度に、少しずつ異なった波向線図が描かれ、隣り合った二本の

波向線と二本の波峰線で囲まれる範囲でエネルギーを計算する。

各離散間隔毎に全領域でのエネルギーの総和を計算し、両対数グラフにプロットする。図-5は1983年日本海中部地震津波、1993年北海道南西沖地震津波、及び酒田沖の想定地震津波を対象とした結果である。波源位置によりエネルギーの値は大きく変わるが、格子間隔に関する変曲点は、いずれも、2 km 程度の所に見られる。

2.4 大和堆での離散間隔決定

上記の三つの結果からそれぞれの変曲点を調べ、特性が変わらない上限の値を適切な離散間隔として選定することが出来る。まず、地形近似基準の場合約1.3 km, 3.4 km, 7 km の地点で勾配が変化している。伝播速度と関連した選定基準からは2 km を、エネルギー伝播に関連した選定基準からも2 km となる。

以上の結果から、1~2 km 程度を空間格子寸法として選べば、地形表現の離散化誤差が小さく、津波の伝播特性も精度良く得ることが出来ると予想される。

この結論を確認するために、実際の津波数値計算を実施して検討を行った。ただし、格子寸法の影響を調べることであるから、津波入射条件は単純なものを与えた。また、大和堆の地形表現精度を調べるために、その他の場所の地形効果である反射、回折、湾内振動などの影響を除いて判断したい。そのため、各地点での津波第一波のみを検討対象とする。

具体的には、大和堆の東側外海境界より波高1 m の初期条件を与え、領域の西側及び南側外海境界に到達した津波の第一波の高さを計算し、これの初期波高との比の場所的分布として表した。格子間隔は5種類とした。この結果を図-6に示す。図中の曲線は、最小格子間隔837

m を用いて得られた、5 分毎の第一波先端の位置である。

大和堆の存在により、エネルギーの集中と分散が起こるが、この状況が格子寸法に依存していることは明白である。特に、西側境界では著しい。図中のK地点でのエネルギーの集中を再現するためには、格子間隔 a, b, c では粗すぎ、 d や e 程度に離散化しなければならない。同じ西側境界でもJ地点では、 d と e による結果でも差があり、さらに細分化する必要があることも示唆されている。また、南側境界では格子間隔 b 以下では大きな違いは生じていない。

このように、実際の数値計算では、場所により離散化間隔への依存度が違うが、全体的にはここで考慮した3つの指標による基準に従って1~2 km とすれば、それより細かい格子による結果との差は小さいといえる。

3. 波源位置と大和堆の影響

日本海東縁部における歴史津波および想定津波を対象に、大和堆の存在がどのように韓国沿岸を含む日本海西部の津波分布に影響するかを検討する。1993年北海道南西沖地震、1983年日本海中部地震、および酒田沖の想定地震を対象とする。計算範囲は図-1に示してある。2.の検討結果より格子間隔1.1 km を選んだ。なお、韓国沿岸では、浅海域での地形を十分取り入れるために、さらに細分化した格子間隔による領域(図-1のB)を設けている。

まず、日本海北部に波源を持つ北海道南西沖地震津波について、初期条件としてDCRC-17 A (高橋ら, 1994)を用いて計算した結果を図-7の(A)に示す。図中の実線は韓国東沿岸での最高水位を、+印は遼上高の観測値

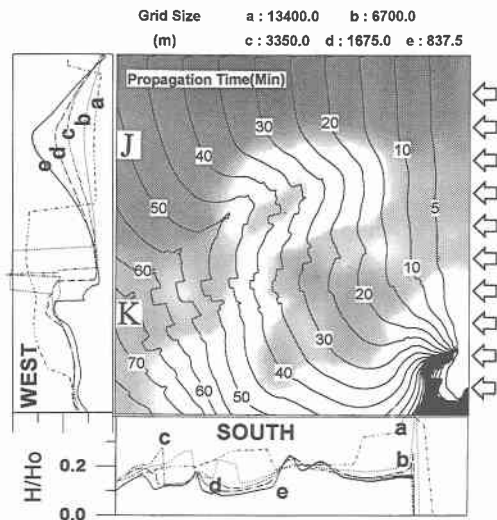


図-6 大和堆での仮想津波数値計算結果

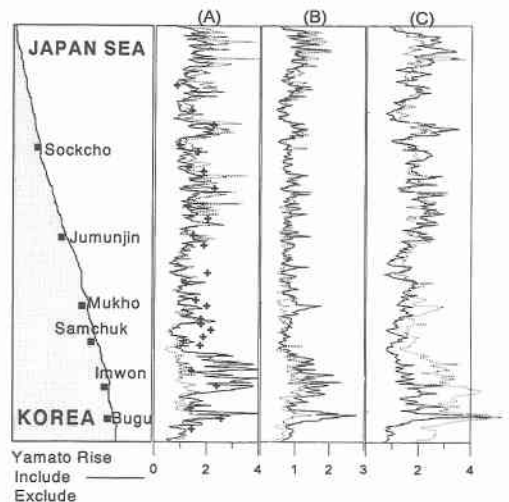


図-7 韓国沿岸での津波最大水位分布

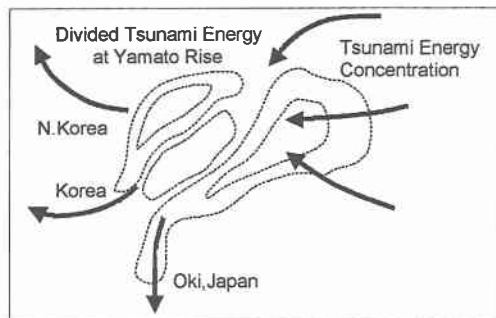


図-8 大和堆での津波エネルギーの伝播パターン

(韓国津波調査団, 1994)を表す。得られた結果は全体的に観測値に一致していると言えるが, Imwon 付近では計算値の方が過大であった。この地域は、沿岸部の水深が周辺と比べて浅く、大和堆から分岐して来る津波エネルギーの伝播経路上に位置するためであると言われている(阿部, 1996)。

大和堆の影響を評価するために、大和堆を除いた地形での数値実験を併せて行った結果を図-7(A)に点線で示す。Imwon 付近の波高の分布が、実線と、あるいは痕跡と比べて低くなった。大和堆がないことの影響は、Jumunjin の北側に高い値をもたらした。大和堆により津波の伝播方向が変化していることが分かる。

次に、相田モデル 10 (相田, 1984) を用いて日本海中部地震津波の数値計算を行った。結果を図-7(B)に示す。この場合、Imwon 付近において大和堆の有(実線)無(点線)による影響は出てはいるが、全体的に有無による差は小さい。これは、大和堆から分岐したエネルギーが、韓国より北側の北朝鮮の方へ集中したため、韓国沿岸での影響は小さかったと考えられる。

最後に、日本海東縁部における地震空白域で、最も大きい影響が予想される地震津波を対象として検討を行った。津波波源は酒田沖に位置している。津波の計算結果は図-7(C)に示す。これより、大和堆が存在する場合(実線)、無い場合の点線に比べ、最高水位が低くなることが分かる。大和堆があれば津波エネルギーが北朝鮮の方向に屈折して進むが、大和堆がないと韓国沿岸に直接到達するからである。

以上のことから、波源と大和堆を結ぶ直線の延長方向に津波エネルギーを集中し、ついで特定方向に放出するといったレンズ効果が確認された。特に、Imwon と Buguの間では、波源位置に関係なく大きな津波が来襲しており、大和堆で一旦集中したものが、常にこの方向へ放出されていることが示された。同様の事は隠岐の島でも見られる。以上をパターン化すると図-8 のようにまとめられる。

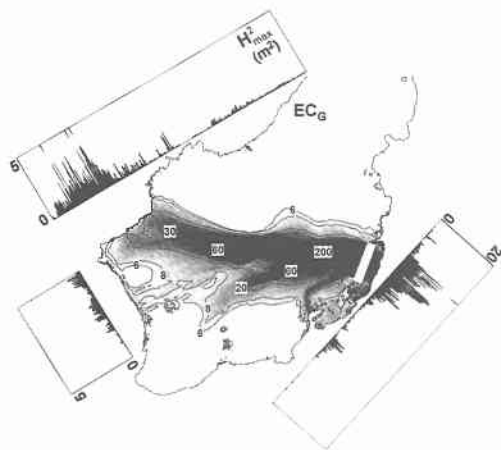


図-9 想定地震津波のエネルギー伝播率及び沿岸での最大エネルギー (図-11 中の Case 3)

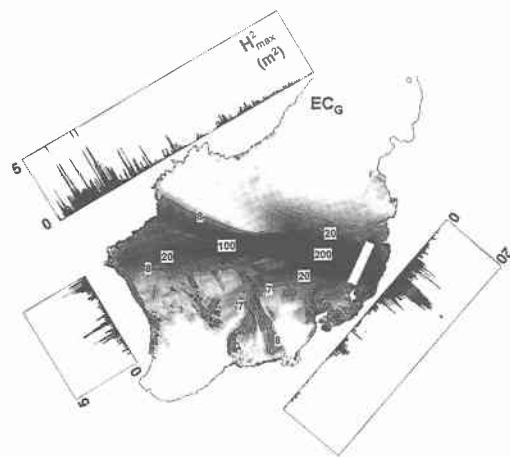


図-10 想定地震津波のエネルギー伝播率及び沿岸での最大エネルギー (図-11 中の Case 2)

4. 陸棚との位置関係による津波伝播特性

陸棚付近で生じた津波では、海底地形と波源位置との関係により、沿岸にそのエネルギーが捕捉される現象が見られる(三好, 1968; Kajiura, 1972)。この時、海岸線近くで発生する津波ほどエネルギーが多く捕捉されるが、逆に陸棚斜面やその沖であれば外海へのエネルギー放出の割合が高くなる傾向がある。これは、日本海全沿岸での津波を評価する際に重要な特性である。ここでは、将来発生が予想されている想定地震津波に対して、大和堆とも関係させながら、陸棚での波源の位置による伝播特性の変化を検討する。

酒田沖での想定地震津波の波源位置を、沿岸からの距離を図-11 に示すように 4 種類に変え、数値計算を実施

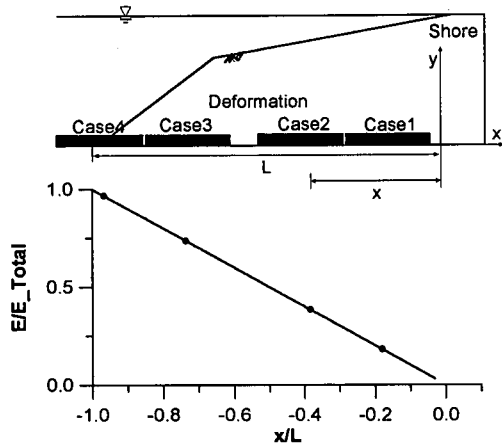


図-11 酒田沖での波源位置と外海へのエネルギー放出量

した。津波エネルギー伝播状況を見るために、日本海全域に亘ってエネルギー伝達率分布を描いた。ここでは、津波エネルギーを最大波高から計算し、式(4)にあるようにエネルギー伝達速度を乗じて津波エネルギー伝達率とした。

$$\dot{E} = EC_0 = E\sqrt{gh} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 E は津波エネルギー、 h は水深である。

計算されたエネルギー伝達率を図-9、10に示すとともに、沿岸での最大エネルギーも併せて示してある。

図-9は津波波源が沖側に位置している場合である。断層短軸方向に放射された津波エネルギーは大和堆に捕捉され日本海の中心部に集中し、その後、韓国、北朝鮮、隠岐に向けて放出されている。

図-10は波源が陸側に位置している場合である。北朝鮮へのエネルギー伝達率は図-9とあまり変わらないが、韓国・隠岐へのエネルギー伝達率は極端に減少した。これは、放出される津波エネルギーの幅・方向と大和堆の位置との関係で生じた結果であり、大和堆へ集中する津波の方向や強さの若干の変化でも、韓国・隠岐への屈折を左右していることが分かる。

次いで、酒田沖での波源位置と外海への津波エネルギー放出量の関係を調べたのが図-11である。津波初期エネルギーに対する外海放出エネルギーの比を、波源の沿岸からの距離の関数で表した。ここで、放出エネルギーは韓国、北朝鮮及びロシア沿岸に到達した最大エネルギーの総和を用いている。図中の回帰線の下側は外海へのエネルギー放出率、上側は日本沿岸での捕捉率を表す。このように、波源の位置により、放出率が大きく変化することが分かる。これは、想定津波を設定する際に、規模だけでなく位置が重要であることを示している。

5. おわりに

日本海東縁部で発生する津波の挙動特性を検討した。

まず、日本海中央部の大和堆が津波の伝播に大きく影響することを重視し、津波の屈折の精度が地形表現の精度と密接に関係することから、空間格子間隔決定の基準を検討した。

地形表現、伝播時間表現、屈折係数表現の見地から、3つの方法が提案された。いずれも大和堆の場合には、近い結果を与え、数値計算に適切な格子間隔を選定できた。

また、日本海東縁部での歴史地震津波及び想定地震津波を数値計算し、波源の位置と大和堆のレンズ効果の関連を調べた。大和堆がエネルギーを集中させ、その後北朝鮮、韓国、隠岐の島の3つの方向へ特に放出する現象が見られた。

最後に、陸棚での波源位置が外海へのエネルギー放出量を左右するだけでなく、大和堆での屈折現象にも大きな影響を持つことが示された。

参考文献

- 相田 勇 (1984): 1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 地震研究所彙報, Vol. 59, pp. 93-104.
- 阿部邦昭(1996): 津波に対する島のレンズ効果 その2, 1983年日本海中部地震津波, 地震第2輯, Vol. 49, pp. 11-17.
- 韓国海岸海洋工学会津波調査団 (1994): 日本北海道南西沖地震津波による韓国東海岸での津波調査, 韓国海岸海洋工学会誌, Vol. 6 (1), pp. 117-125.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・Modesto Ortiz (1994): 津波を説明するための北海道南西沖地震断層モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 251-255.
- 高安秀樹 (1986): フラクタル, 朝倉書店, 186 p.
- 都司嘉宣・小西達男 (1985): 日本海に発生した地震津波と数値計算結果, 国立防災科学技術センター研究報告, Vol. 35, pp. 277-297.
- 土木学会編(1975): 土木工学における数値解析/計画手法編, サイエンスライブラリ情報電算機28, サイエンス社, pp. 121-130.
- 丸山康樹・鹿島遼一 (1983): 波向線法による屈折計算法の検討, 電力中央研究報告, 40 p.
- 三好 寿(1968): 津波の指向性についての再考察(I), 地震第2輯, Vol. 21, pp. 121-138.
- 李 昊俊・今村文彦・首藤伸夫 (1997a): 韓国東沿岸での津波に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, pp. 202-203.
- 李 昊俊・今村文彦・首藤伸夫 (1997b): 屈折現象に注目した津波数値計算の精度, 海岸工学論文集, 第44巻, 印刷中.
- Imamura, F. (1994): Analysis of Coastal Lines By Multi Fractals, FORMA, J. Soc. for Sci. on Form, Vol. 9, No. 2, pp. 83-90.
- Kajiura, K. (1972): The Directivity of Energy Radiation of the Tsunami Generated in the Vicinity of a Continental Shelf, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 28, pp. 260-277.