津波に対する島のレンズ効果

その1. 1993年北海道南西沖地震津波

日本歯科大学新潟短期大学* 阿部 邦 昭

Focusing Effect of Islands on a Tsunami

Part 1. A Case of the 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake Tsunami

Kuniaki ABE

Niigata Junior College, Nippon Dental University,
Hamaura-cho 1-8, Niigata, 951 Japan

(Received December 8, 1994; Accepted January, 29, 1996)

Local amplifications of tsunami were found on the maximum inundation heights at Japanese 10 coasts facing islands in the 1993 Hokkaido nansei-oki earthquake tsunami. For each island-coast geography a peak height (H) at a coastal focus, a background average height (H_0), a peak width (Wd), a coastal focus distance from the island (L) and an island size (L_0) are defined on the space distribution of maximum heights obtained in the surveys and the relations are discussed.

Main results are as follows: Amplification ratio H/H_0 , plotted as a function of coastal focus distance from an island, are distributed in the vicinity of 2. The peak width relative to the island size Wd/L_0 is proportional to the focus distance relative to the island size L/L_0 . There is a negative correlation relation between the amplification ratio and the relative peak width. These facts suggest that the amplification was caused by a superposition of incident waves on the sea in the rear of the island slope after being separated into two and refracted on the slope. Thus, the amplification at the coast facing islands is explained from a focusing effect of islands on a tsunami.

Key words: Hokkaido nansei-oki earthquake tsunami, Focusing effect of islands.

§1. はじめに

津波エネルギーが島に向かって収束することは、島が深海から円筒状に突き出ているのではなく、周囲に裾野をもって立ち上がっている事と津波の速度が水深の平方根に比例していることに由来する。HOMMA (1950) は回転放物面状の水深分布を持つ島に正弦波が入射した場合の島の周囲での増幅度の解析解を求めている。1960年のチリ津波ではハワイ諸島で水位の増加が見られたために、モデル実験や数値実験が盛んに行われた [例えば、WILLIAMS and KARTHA (1967), VASTANO and REID (1967) など]。一方、同じ津波がポリネシアやハワイ諸島を通過することによって、日本のような後背地に高水位をもたらす可能性に注目した今村・他 (1990) は、こ

の津波が太平洋を横切って伝わる数値実験を行い、島の周囲の浅瀬が原因で津波が収束している事を確認した。これは島によって2つに別れた波がそれぞれ周囲の浅瀬によって島の中心方向に屈折して同じ位相で重ね合わさるためと考えられる。ちょうどこれは凸レンズによって光波が屈折し収束する状態に似ているので、レンズ効果と呼ばれている。1983年日本海中部地震津波の際に、都司・他 (1984) は朝鮮半島の東海岸で津波が異常に高かったことに注目し、その原因を説明できる4つの可能性の1つとして鬱陵島によるレンズ効果をあげているが具体的な検討はしていない。

1993年7月12日の北海道南西沖地震 ($M=7.8$) による津波は、1983年日本海中部地震津波を凌ぐ高さに発達し、奥尻島や北海道本島南西部で多数の犠牲者と家屋の流失を出している。この時新潟県の粟島の対岸にあた

* 〒951 新潟市浜浦町 1-8

Fig. 2(c). Observed tsunami heights and parameters for Heizima.

Fig. 2(e). Observed tsunami heights and parameters for Tobisima.

Fig. 2(d). Observed tsunami heights and parameters for Murotusima.

Fig. 2(f). Observed tsunami heights and parameters for Awasima.

0.3 m であるので、実質の波は津波最大水位より 0.3 m 程度低いと考えられるが、最大水位の到達時刻がわからないので実質の高さを正確に知ることができない [阿部・他 (1994)]。そのため実質の波の高さに代わって最大水位で議論する。

水位分布の特徴を表現するための定数を定義しておく (Fig. 1)。島の対岸で極大値の現れているところを海岸焦

点 (coastal focus) と呼ぶことにし、この海岸焦点と島の中心を結ぶ線分の長さを海岸焦点距離 (distance of coastal focus) とし L で表す。これはいわゆる焦点距離ではなく、海岸で発現した極大値点までの距離という意味である。この線分を島から海岸にむく焦点ベクトルと呼ぶことにし、その方位を北から時計回りの方向に測った海岸焦点の方位角と呼び、 θ で表す。またこの

Fig. 2(g). Observed tsunami heights and parameters for Sado Island.

Fig. 2(i). Observed tsunami heights and parameters for Kanmurisima.

Fig. 2(h). Observed tsunami heights and parameters for Osima.

Fig. 2(j). Observed tsunami heights and parameters for Dogo (Oki Islands).

線分に直交する方向に島の断面を投影したときの断面の長さを島の大きさ (island size) とし、 L_0 とする。これで島のサイズを代表させる。これは海岸焦点からみた島の断面の長さである。もし島が2つ以上近接してある場合は、断面が重なる場合に限り1つの島とみなして、断面

の長さで定義することにする。また島の中心から測った震央距離を L で表わす。水位分布は焦点ベクトルに直交する面に射影したもので考え、海岸焦点の水位である極大値を H 、島から遠く離れて島の影響がないとおもわれる2,3地点の水位からもとめた平均値を H_0 とする。

Table 1. Parameter list. Epicentral distance (Δ) is defined to a center of island. Underlined value for Wr or Wl is repetition of the opposite side because of data lacking or the case of twin islands. The definitions are shown in Fig. 1.

islands	島	Δ (km)	L (km)	L_0 (km)	θ (deg)	H (m)	H_0 (m)	Wr (km)	Wl (km)	Wd (km)
Teuritou	手売島	280	30	5.6	102	1.4	1.1	24.0	24.0	48.0
Okusiri	奥尻島	110	35	19	84	9.0	6.2	6.0	7.0	13.0
Heizima	平島	100	0.75	0.1	105	31.7	16.6	0.1	0.1	0.2
Murotusima	室津島	130	6.8	0.36	22	19.2	10.7	0.4	0.3	0.7
Tobisima	飛島	450	29	3	105	2.0	1.3	20.0	20.0	40.0
Awasima	粟島	530	20	7	115	2.9	1.7	12.0	19.2	31.2
Sado	佐渡島	580	57	55	148	2.0	1.7	7.0	13.0	20.0
Osima	大島	660	24	0.4	190	3.5	1.3	9.4	7.4	16.8
Kanmurisima	冠島	910	13	0.6	188	3.5	1.3	2.1	2.1	4.2
Oki-dogo	隠岐島後	970	76	34	193	3.4	1.1	3.2	9.6	12.8

その水位分布が極大値から小さくなって、一度平均値を下回った後、再び平均値に回復することに注目し、平均値を下回った点で最も海岸焦点に近い点を島に向かって右と左でそれぞれ選び、海岸焦点からそこまでの断面図上の直線距離をそれぞれ Wr , Wl とする。そしてその和を高水位域の幅すなわちピーク幅 Wd と定義する。適当な位置にデータが無くて片方しか定義できない場合は片方の距離の2倍を使って幅 Wd とする。

先の水位調査データをもとに日本海で島のある所の対岸の津波水位分布を調べたところ、島の無い所に比較して多かれ少なかれ水位の増加が10個所で認められた。これは北から手売島（焼尻島と2つあるが沖合い側にある手売島で代表させる）、平島（奥尻島藻内沖）、室津島（奥尻島青苗沖）、奥尻島、飛島、粟島、佐渡島、大島（能登半島輪島沖）、冠島（若狭湾）、島後（隠岐ノ島）の対岸部である。なお津波波源に近い渡島大島、小島の対岸には津軽海峡があって島の津波に及ぼす影響を確認できない。水位の増加が見られた島の対岸での水位分布を再現したのが Fig. 2(a)-(j) である。各図には海岸焦点の位置、その水位および周辺の水位、ピーク幅などが示してある。得られたパラメータ Δ , L , L_0 , θ , H , H_0 , Wr , Wl , Wd の値を表で示したのが Table 1 である。島のサイズ L_0 は小さいもので 0.1 km から大きいものは 22 km におよび、海岸焦点距離 L は 0.7 km から 78 km にわたっている。これらのデータの中には少ないデータを使って得られたもの（手売島、冠島）や偏っているデータによっているもの（飛島、冠島）などが交じっており、個々の値には相当任意性がある事を認めなければならない。そうした状況のなかでできる限り一貫性を保てるように決めたのがこれらのパラメータである。

得られた結果から焦点ベクトルの向きを図示すると Fig. 3 が得られる。これを見ると震源近くでは波源域境

Fig. 3. Coastal focuses and azimuths of the focal vectors observed in the 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake Tsunami. Epicenter (solid star) and assumed tsunami source area (dotted line) which was modified from that by Hatori (1994).

界線と直交する方向に近く、中程度の距離にある手売島や本州各島では海岸線に直交する方向に近くなっているのが特徴である。手売島、飛島、粟島などは波源域に対する方位とこのベクトルの方位の間に大きなずれが見られるが、後で述べるようにこの高水位は島の周囲で屈折した波の重なりあったものだとすると高水位に寄与した津波はこのベクトルの方向に入射したのと考えられる。この津波の伝搬図が羽鳥(1994)や岡田・中村(1994)によってだされているが、それによるとこれらの島の周辺では海岸により斜めに入射しているように見える。この違いは伝搬図に示されるものは津波の第1波の波面であり、高水位に寄与したのは遅れて沖の方から

Fig. 4. Tsunami average heights (open rectangles) above mean sea level at Tokyo bay and the increase at the coastal focuses (solid half circles) for epicentral distances of islands opposite to the focuses.

やってきた波であるとするばよい。反射や回折があるとこのような事が起こりえる。観測された水位の平均値 H_0 と極大値 H を関連する島の震央距離 Δ に対してプロットした図が Fig. 4 である。これをみると震央距離とともに減衰している平均値 H_0 のレベルから 2 倍程度まで極大値 H が増加しているのがわかる。震央距離による変化を良く見ると 280 から 500 km のあたりで増幅度が比較的小さい。このあたりが先に指摘した焦点ベクトルの方向が第 1 波の伝搬方向と異なる点に対応している。

レンズ効果の尺度として極大値を周囲の平均値で割った値 H/H_0 すなわち増幅度を取ったとき、10 例について増幅度は 1.0–1.5 が 3 例、1.5–2.0 が 4 例、2.0–3.0 が 2 例、3.0–4.0 が 1 例となり、1.5–2.0 の場合が最も多い分布になっている。この点で興味深いのは奥尻島藻内で観測された 31.7 m という高い値である。ここは平島の対岸になっていて V 字形の谷をかけあがったとされているが、この値は平均値 16.6 m のほぼ 2 倍になっており特別他の島の場合と増幅度が変わらないことが注目される。また佐渡や奥尻などの比較的大きな島の対岸でも平均値より高い水位（増幅度にして 1.18, 1.45）が観測されていることである。この点は奥尻、佐渡では増幅度が 1 より小さいとした結果 [阿部 (1994)] と違うが、これは両島において海岸焦点での水位の高い点が見落とされていたためである。

§ 3. レンズ効果による水位分布の特徴

まず島のサイズと海岸焦点距離の関係を見たのが Fig. 5 である。海岸焦点距離が任意に取れる値ではなく対岸までの最短距離に近い固定的なものと考え、対象としている島がサイズに関して 3 種類に分類でき、これらの対岸距離もサイズに応じてグループ分けができる。つまりサイズの 1 km 未満が 4 島、1 km 以上 10 km 未満が 3 島、10 km 以上 100 km 未満が 3 島である。この内対岸距離が相対的に幅広く分布するのは最も小さいサイズの島だけであり、ほかは分布が 10 km のオーダーに限られる。得られたデータはこのような制約下にある。結果的には同じサイズのものは類似の結果を

Fig. 5. Relation between coastal focus distance L and island size L_0 . Islands are classified according to island sizes into three groups, which are large sized (solid triangle, $L_0 \geq 10$ km), middle sized (solid squares, $1 \leq L_0 < 10$ km) and small sized (solid circles, $L_0 < 1$ km).

Fig. 6. Variations of peak width Wd versus island size L_0 . The same classification as in Fig. 5.

示すので以下この分類を使うことにし、小サイズの島の場合は黒丸、中サイズは黒四角、大サイズは黒三角でプロットする。

高水位域の幅 Wd を縦軸に、島のサイズ L_0 を横軸に

Fig. 7. Variation of peak width relative to island size, Wd/L_0 , versus relative coastal distance, L/L_0 .

Fig. 8. Dependence of amplification ratio H/H_0 on coastal focus distance L .

Fig. 9. Dependence of amplification ratio H/H_0 on relative peak width Wd/L_0 .

取ってプロットしたのが Fig. 6 である。これは大サイズの 3 島がやや小さくなったことを除けば Fig. 5 と似た分布を示す。このことから高水位域の幅 Wd は海岸焦点距離 L と比例することが予想できる。それを見たのが Fig. 7 である。大サイズの 3 島を除けば良い比例関係を示している。島のサイズが 100 倍の範囲で変わるのに高水位域の幅 Wd を絶対値で扱うのは一般的ではないので島のサイズ L_0 で規格化してプロットしてある。直線性がかなりよいので最少自乗法を適用すると式

$$Wd/L_0 = 0.47(L/L_0)^{0.99}$$

が得られる。次数は 0.99 となることから相対幅は相対距離の 1 次式で近似され、両者は比例していることが確かめられる。これを詳細にみると中サイズの 3 島は勾配は同じながらも小サイズの島の幅より大きな幅をもって推移し、大サイズの島の幅は小サイズの島の幅と同じ傾向を示す事がわかる。平均より上にでている 3 つの中サイズの島の場合震央距離が中規模であって波源を海岸に対して斜め方向にみる点にあるという意味で共通の位置関係にある。このことと平均より大きく推移することの間には何等かの関係があるかもしれない。

次に増幅度 H/H_0 の海岸焦点距離 L との関係を見たのが Fig. 8 である。この図では増幅度 2 に対して点線を引いてあるが海岸焦点距離が小さいもの程 2 に近づくようにみえる。これは文字どおり解釈すると 2 倍からずれるにはそれなりの海岸焦点距離を必要とすることを意味する。次に増幅度と島のサイズに相対的なピーク幅の関係を見たのが Fig. 9 である。これをみると増幅度とピーク幅は無関係かややピーク幅とともに増加する傾向をしめしていることがわかる。ピーク幅と海岸焦点距離は比例するのだから、増幅度と海岸焦点距離の関係もこれと類似した関係になる。

増幅度に影響をあたえるものとして、島の周囲の海底勾配が考えられる。そこでその海底勾配を焦点ベクトルの逆方向にたどり (Fig. 1 参照)、島のサイズの 3 倍の水平距離での水深を取ってその比をその島の海底勾配とする。水深を見込む角度を α とするとき $\tan \alpha$ であるこの海底勾配に対して増幅度を取ったのが Fig. 10 である。

Fig. 10. Correlation between amplification ratio H/H_0 and gradient of sea bottom in front of island $\tan \alpha$ (see Fig. 1).

これをみると大きくはないが負の相関関係が認められる。このことは、外海側の勾配が小さい場合により対岸に津波が収束しやすいことを示している。増幅度が2より大きくなる理由は小さい海底勾配にあるといえる。しかし海底勾配が小さいにもかかわらず、増幅度の小さかった場合もある。これは現れている島の波源にたいする位置関係からみて波線が島の近くで曲げられて、左右の波のコヒーレントな性質が失われたとか、平均水位に寄与した波と極大値に寄与した波が違うなどの原因が考えられる。最後に増幅度を縦軸に海岸焦点距離に相対的なピーク幅を横軸にとってみると、両者には負の相関が認められることを示すことができる (Fig. 11)。前にピーク幅と海岸焦点距離は比例する事を述べている。したがって横軸の持つ意味は比例関係からのずれの大きさとみなせる。比例関係からのずれの大きいものほど増幅度が小さい事になる。

§ 4. 考 察

これらの結果は大部分の島ではその対岸で増幅度が2前後に増幅され、さらに島の周囲の海底勾配が小さい場合はそれよりさらに大きく増幅されることを示している。阿部 (1995) は円錐状の裾野を持った直径 3 km の円筒状の島に津波を模した線形長波長平面波が入射する場合を数値実験で調べ、島の後ろ側での最高水位の分布を調べた。それによると島のすぐ後ろで何れも最も高くなり、入射波の周期が 20, 10, 5 分の場合に増幅度はそれぞれ 1.1, 1.3, 1.8 になり、周期が短い場合に2に近くなる事を示した。この実験では海岸の傾斜部分の影響は考慮されていないが、その事を観測された増幅度が2に近いことと比較すると、数値実験の短周期の波に対して得られたような状況が実現されたと考えることができる。ただし重ねあわせで2倍になるのは線形の場合であって、非線形の場合は推測が難しい。なお数値実験の結果では増幅度は島からの距離とともに減少する。観測では一つの島に対する結果ではなくて、種々の島に対する結果ではあるが Fig. 8 に見るように減少しているものもあるし、逆に増加しているものもある。ただしすでに指摘したように増加しているものについては海底勾配が小さいという共通の要因がある。増幅度が2より大きいものがあるということは観測結果が単純に左右の2つの波の重ねあわせだけでなく、両者はそれぞれが増幅されながら重ねあわせるようなプロセスがあることを示唆している。

また室津島の周囲の津波の振る舞いについて田中 (1994) は水理モデルによる実験を試み、対岸の高水位を非線形ソリトンの重合として説明している。その実験では室津島の左右の海域を通過した波が屈折してその背後で高くなる様子が示されている。水位分布に線形と非線形でどのような違いがでるかとは明らかでないが、室津島の左右から侵入した波が相互作用をして水位を対岸で増加させた事は間違いない。

Fig. 11. Correlation between amplification ratio H/H_0 and peak width relative to coastal focus distance Wd/L .

ピーク幅が海岸焦点距離に比例して増加することは、島に入射する平面波が2手に別れた後、島の周囲の傾斜した浅瀬にさしかかって平面波の性質を保ったままある角度で焦点ベクトルに近づく方向に屈折して、以後直進して焦点ベクトルの上で重なり合うようなモデルを考えると説明できる。このとき重なった部分の海岸に平行な方向の長さは島からの距離に比例する。

なおこのモデルからはある特定の海岸焦点距離で増幅度が極大になるいわゆる特定の焦点距離が存在するようなイメージを描くことはできない。

§5. 結 論

1993年北海道南西沖地震津波で島の対岸での津波の増幅が痕跡水位の調査結果をもとにして調べられ、10島の対岸で確認された。各島の場合に対して分布の断面図を作り、極大値 H が観測された点を海岸焦点として、そこを中心として観測された高水位分布の広がり指標となる幅 Wd が定義され、極大値と平均値 H_0 の比(増幅度)や幅の海岸焦点距離 L (極大値点と島の中心間距離)および島のサイズ L_0 との関係などが調べられた。その結果、

(1) 島の対岸に共通に津波水位の極大値点が現れ、その極大値 H は島から遠く島の影響がない海岸での平均値 H_0 の1.2から3.1倍に達した。平均増幅度は1.9で2に近い。

(2) 増幅度の海岸焦点距離による変化をみると距離が小さいほど2に近づく傾向にある。

(3) 増幅度が2より大きい島は、周囲の海底勾配が小さい傾向にある。

(4) 島のサイズに相対的なピーク幅は島のサイズに相対的な海岸焦点距離に比例する。

(5) 増幅度と海岸焦点距離に相対的なピーク幅は負の相関関係にある。

島の形や海底地形が複雑であるにもかかわらず、島の対岸での水位の増加には以上に述べたような規則性が認められた。極大値が平均値の約2倍であること、ピーク幅が島からの距離に比例して増加することなどから、増幅の主たる原因は島の周囲で屈折した2つの波の重ねあわせ又は相互作用にあると結論づけられる。

謝 辞

調査に協力してくださいました現地住民の方々、検潮

記録を提供してくださいました各地検潮所の方々に感謝いたします。調査にあたり、その費用の一部に文部省科学研究費の補助金を使用しました。査読の過程でのレフェリーのコメントは内容の改善に役立ちました。記して感謝いたします。

文 献

- 阿部邦昭, 1994, 北海道南西沖地震津波に対する島のレンズ効果, 月刊海洋, 7, 185-191.
- ABE, Ku., 1995, Numerical simulation of tsunami focusing effect by an island, Bull. Nippon Dental University, General Education, No. 24, 61-72.
- ABE, Ku. and H. ISHII, 1987, Distribution of maximum water levels due to the Japan Sea Tsunami on 26 May 1983, J. Oceanogr. Soc. Jpn., 43, 169-182.
- 阿部邦昭・泉宮尊司・砂子 浩・石橋邦彦, 1994, 北海道南西沖地震津波の新潟県における浸水高の分布, 地震研彙報, 69, 159-175.
- 後藤章夫・高橋浩晃・宇津木 充・小野 忍・西田泰典・大島弘光・笠原 稔・竹中博士・斉田智治, 1994, 北海道南西沖地震に伴う津波—小樽から礼文島まで—, 月刊海洋, 7, 153-158.
- 今村文彦・首藤伸夫・後藤智明, 1990, 遠地津波の数値計算に関する研究 その2 太平洋を伝播する津波の挙動, 地震 2, 43, 389-402.
- 羽島徳太郎, 1994, 1993年北海道南西沖地震津波の規模および波源域, 地震 2, 47, 1-9.
- HOMMA, S., 1950, On the behavior of seismic sea waves around circular island, Geophys. Magazine, 21, 199-209.
- 岡田正実・中村浩二, 1994, 奥尻津波と検潮記録, 月刊海洋, 7, 123-131.
- 首藤伸夫, 1994, 1993年北海道南西沖地震津波の痕跡高, 東北大学工学部災害制御センター津波工学研究報告, 11, 第2編, 調査資料, 1-12.
- 田中茂信, 1994, 北海道南西沖地震津波の奥尻島南部浅海域での挙動, 月刊海洋, 7, 159-165.
- 都司嘉宣・白 雲雙・秋 教昇・安 希朱, 1984, 韓国東海岸を襲った地震海溢, 月刊海洋科学, 9, 527-537.
- 都司嘉宣・加藤健二・荒井賢一・上田和枝, 1994, 北海道南西沖地震津波の西日本海岸での浸水高, 月刊海洋, 7, 192-200.
- VASTANO, A. C. and R. O. REID, 1967, Tsunami response for islands: Verification of a numerical procedure, J. Marine Res., 25, 129-139.
- WILLIAMS, J. A. and T. D. KARTHA, 1969, Model study of long-wave amplification by circular islands, B.S.S.A., 59, 299-316.