

島周辺における津波の挙動

酒井哲郎*

1. まえがき

日本海中部地震津波による被害調査によって、震源から遠く離れた西日本の日本海沿岸においてもかなりの被害があり、特に隠岐ノ島においては、人命の犠牲はなかったものの、総額9億円の被害を受けたことがわかった。

日本海中部地震津波の被害を受けた島は、隠岐以外に北から奥尻島、佐渡ヶ島、舩倉島がある。ここでは、隠岐の他に奥尻島の被害調査をも加え、島による長波のトラップ現象に関する従来の理論的研究と、島周辺における津波の変形の数値計算によって、島周辺における津波被害の特徴を明らかにする。

2. 隠岐地方の津波被害調査

隠岐地方の津波被害調査は、津波が発生した1983年5月26日から約1カ月たった6月30日から7月2日にわたって行なわれた。新聞報道で被害の大きかった場所を選んで、現地調査を行なった。その結果の詳細は、自然災害資料センターに保存するために東北大学工学部に提出した日本海中部地震津波調査資料に示した。ここでは以下に簡単にその概要を述べる。

図-1は、聞き込み調査による遡上高を示したものである(実線)。破線は、島根県漁

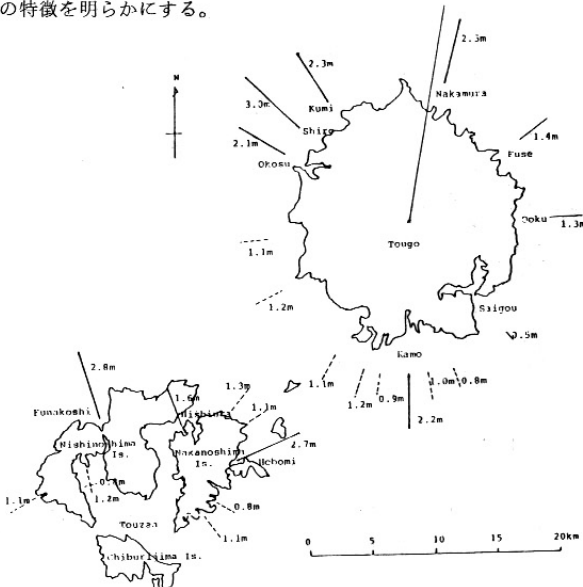


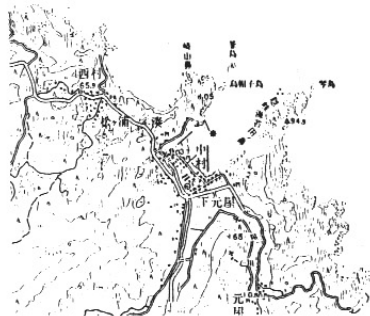
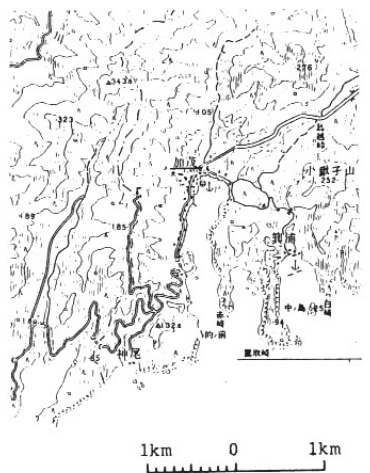
図-1. 隠岐における津波遡上高の分布 (基準: 平均海面)

* 京都大学助教授, 工学部

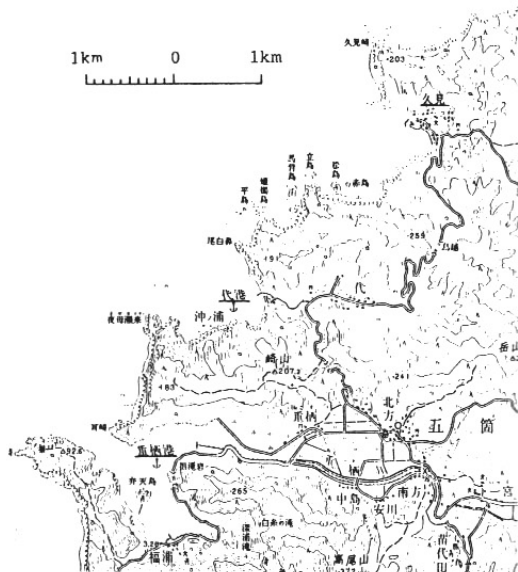
港課による調査結果である。値は、平均海面を基準としている。この図から明らかなように、遡上高の大きいところは、島後の加茂、中村、久見、代、重栖、西ノ島の船越、中ノ島の菱浦、保々見である。なお唯一の検潮所のある西郷湾では、その最大偏差は0.5 mにすぎない。

3. 局所的地形の効果

上述した遡上高の大きかった地点の中には、いわゆる水路幅の減少による波高増加、および湾水振動による波高増加が生じた可能性がある。そこで特に島後の各地点について、その局所的な地形の効果を検討する。



(1)



(2)

図-2. 隠岐島後において高い遡上高を示した地点の地形
 (1) 加茂、中村
 (2) 久見、代、重栖

図-2は、順に加茂、中村、久見、代、重栖の付近の5万分の1の地形図である。図から明らかなように、いわゆる水路幅の減少による波高増大の生じる可能性のある地点は重栖のみである。一方、湾水振動の生じる可能性のある地点は、加茂、中村、重栖が考えられる。

まず加茂であるが、湾水振動の可能性を調べるために、一様水深の長方形湾としてその固有周期を計算すると、水深10~15m、湾長1.7kmとして9~11min.となる。図-3は、西郷の検潮記録の一部である。この図からは6~7min.程度の周期の振動が卓越している。聞き込み調査および東海大学の調査結果¹⁾では、津波の周期は4~5min.となっ

ている。このことから考えて、加茂では湾水振動が発達したとは言いがたい。

つぎに中村は、水深10m、湾長1kmとして同様に計算すると約7min.となり、もし西郷の検潮記録に見られる卓越周期が中村に米襲した外海の津波の周期とすると、湾水振動の可能性はある。しかし中村での聞き込み調査および東海大学の調査では、津波の周期は4~5min.、最大の波は第1波目から20min.後(すなわち、4~5波目)ということである。湾水振動が発達するには、やや時間が短いと思われる。

最後に重栖であるが、その地形は複雑で簡単な解析ではわからない。

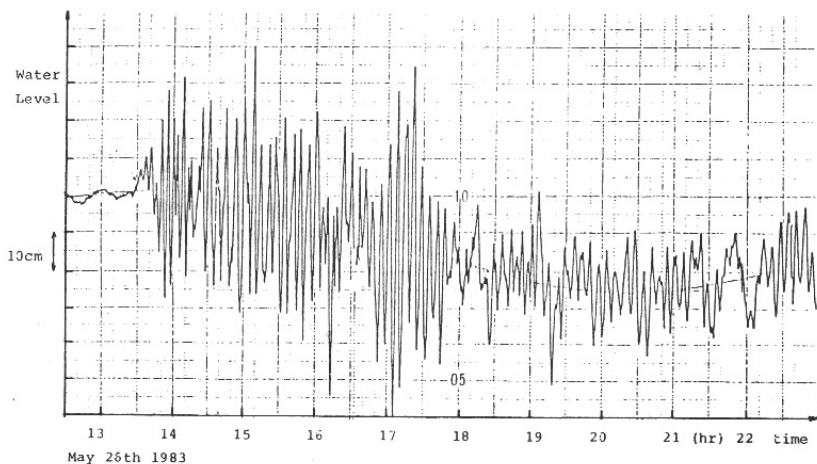


図-3. 西郷の検潮記録の一部

4. 津波の屈折

つぎに、隠岐の島後の島周辺における津波の幾何光学的な屈折の現象を調べてみる。

最初に一辺が男鹿半島を通り、もう一辺が新潟海岸にはほぼ平行で、大和堆の一部と島根半島および隠岐を含む、350km×800kmの

長方形領域を考えた(図-4)。この領域を10kmメッシュに分割し、格子点で水深を与えた。水深は海図から読みとった。波の周期を5min.とし、男鹿半島を通る一辺からそれに直角に波向を与え、時間ステップを周期と同じ5min.として計算した。

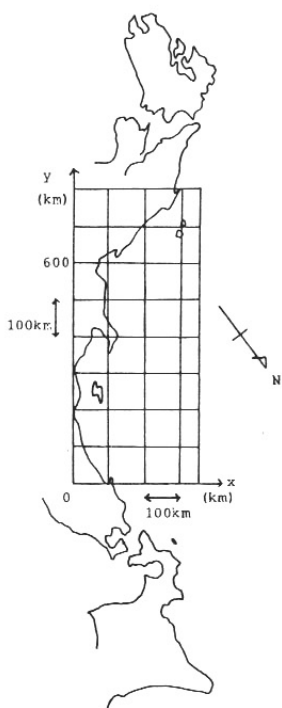


図-4 屈折計算の領域

図-5にはいくつかの波向線を示している。図から明らかなように、隠岐に到達する波向線は限られており、隠岐の約150 km北東に存在する隠岐堆によって分岐する波向線の一部が隠岐に到達している。

もう少し詳細に隠岐の近辺での津波の屈折の様子を見るために、図-5のy軸の600 kmのところから、図-5の同じ場所での波向で、時間ステップを周期の半分の150 secとして計算をした。

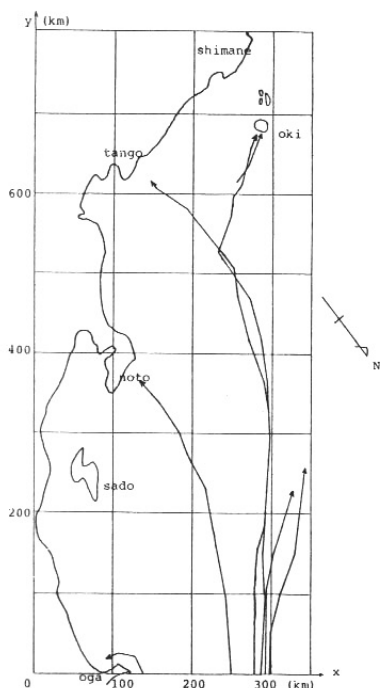


図-5 屈折計算結果
(1) (波源～隠岐)

図-6はその結果を示している。やはり隠岐堆の影響で波向線が交差しているが、島状の地形による波向線の集中の傾向がある程度見られる。

つぎに、さらに詳細に見るために、 $y=650$ km地点から、波向をy軸方向にとり、水深データを5 km間隔で入力し、時間ステップを80 secとして計算した。図-7がその結果であり、やはり波向線の集中が見られる。

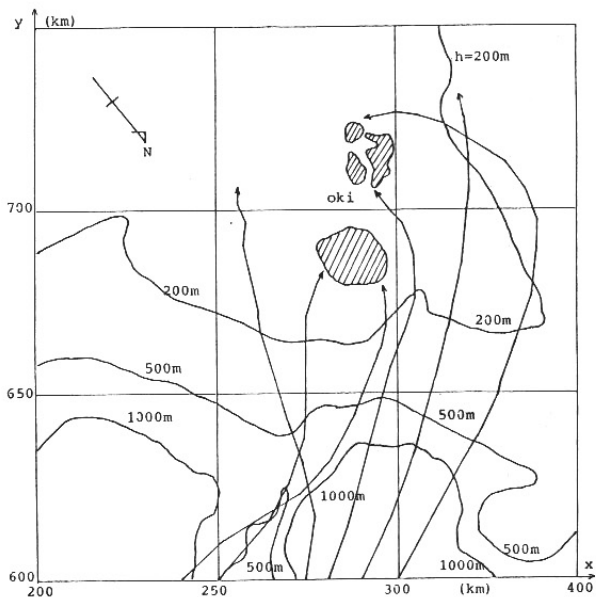


図-6. 屈折計算結果 (2) (隠岐近辺(1))

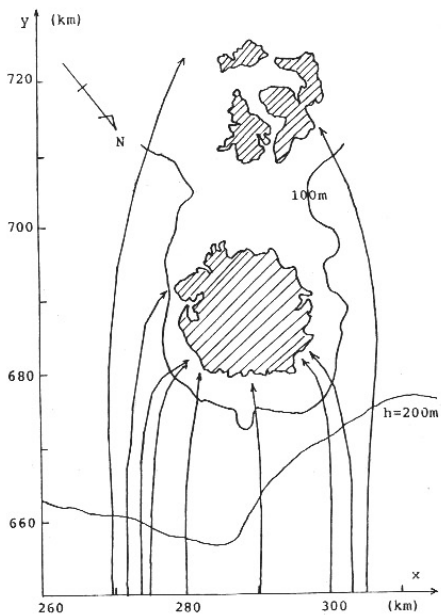


図-7. 屈折計算結果 (3) (隠岐近辺(2))

5. 島の周りでの波のトラップ

図-6の計算で、 $y = 650 \text{ km}$ 地点では、波長が約 16 km で、隠岐の島後の直径約 20 km とあまり変わらない。本来幾何光学的屈折の考えでは、波のスケール内では水深が大きく変化しないことを仮定しており、その意味で上述の計算の結果は定性的な傾向を示すものとして解釈する必要がある。

1967年に、Longuet-Higgins²⁾は、島の周りでの波のエネルギーのトラップに関する論文を発表した。この研究は、ニュージーランドの Macquarie 島での検潮記録に現われた、2日間にわたる周期6分の顕著な振動を説明することがきっかけになっている。

この島の長さは約 33 km で、まわりを数百mの水深の陸棚に囲まれ、その全体が水深約 $4,000 \text{ m}$ の海洋底の上に存在している。隠岐の島後は、島の直径が約 20 km で、まわりを水深約 200 m の陸棚に囲まれてはいるが、その外側は、水深 $2,000 \text{ m}$ 以上の部分もあるもの、南側は約 10 km で島根半島であり、東北東には隠岐堆があって、海底形状は複雑である。

しかし、そのスケールはほぼ同じであり、Longuet-Higgins の示した島による波のエネルギーのトラップの可能性も考えられるので、ここではその面からの検討を加える。

彼の考えは、いわゆる陸棚波あるいはエッジ波の考えを同心円状の等深線を有する海底形状に対して拡張したものである。この場合には、2種類のごく水深部が接続された形の陸棚の場合と異なって、完全な波のトラップは不可能であることを示した。その物理的理由として、同心円の内側から外側に向かう波が内側に反射するためには、水深が動径方向に動径の自乗以上のはやきで増加する必要があることを挙げた。

しかし、完全な波のトラップはありえないものの、実質的にはトラップとみなされる場合があることを示し、平らな円筒で表現され

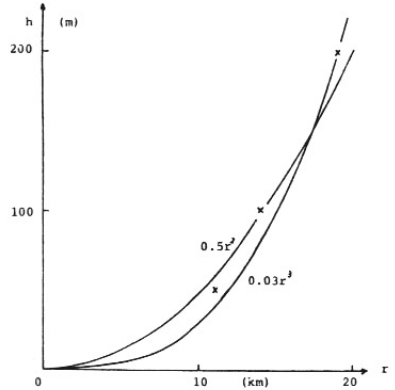


図-8. 動径方向の水深増加の割合 (隠岐島後)

る高まりを有する形状の場合には、その共振周期も計算している。その結果から、Macquarie 島の場合には、島の周りを一周するのに約6分、すなわち検潮記録に見られた卓越周期と同程度の時間を要するような波が共振モードとして存在しうることを示した。

以上のように、Longuet-Higgins の論文は、もっぱらきわめて単純な形状の島の場合の共振周期の議論に終始し、島の周りの波高の分布に関しては議論していない。

上述した波のエネルギーのトラップが生じるための必要条件である水深の動径方向の増加の割合について、隠岐の島後の場合について調べたのが、図-8である。この図は、図-1中の細線で示した線に沿う水深の変化を示したもので、少なくともこの部分では条件を満たしている。しかしながら他の部分では動径の自乗よりゆるやかな水深増加の部分が見られる。

既に図-3で示した西郷湾にある検潮所の記録には6~7 min.の卓越周期が見られる。図-9は、西郷湾の5万分の1の地形図である。西郷湾の固有周期を、Neumannの方法³⁾で簡単に計算した結果、約13~14 min.と

なった。したがって、6~7 min.の卓越周期は、西郷湾の固有周期ではなく、来襲した外海の津波の周期か、または上述のLonguet-Higginsのいう機構によって島の周りにトラップされた波の周期であるかもしれない。

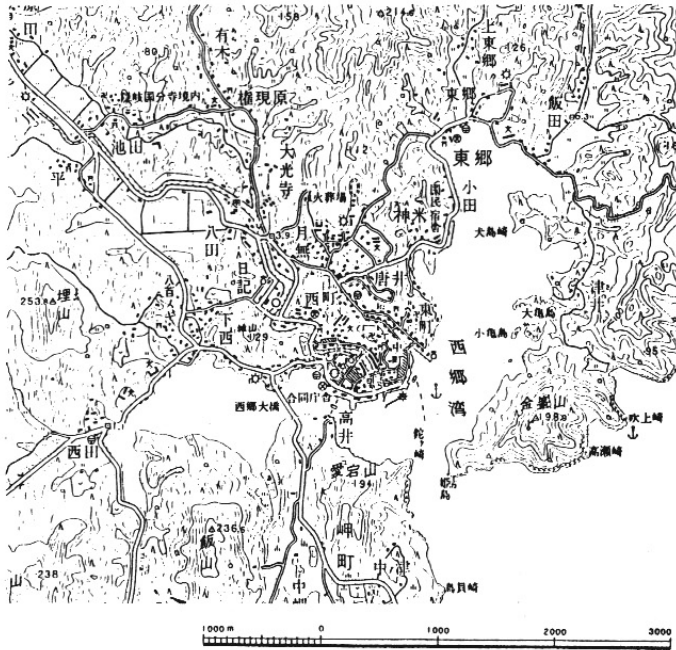


図-9. 西郷湾

6. 島の周りでの津波の変形に関する数値計算

以上のように、調査結果からLonguet-Higginsのいう島による波のトラップの現象を確認することはむずかしい。Longuet-Higgins自身も、共振モードのうち振幅が大きいモードの波が島のまわりを一周するのに要する時間が、検潮記録に見られる6分の卓越周期に近いことを述べているにすぎない。

ここでは、隠岐の島後の島の海岸に沿う特

微的な遡上高の分布が、長波の数値計算によって説明できないかどうかを検討してみる。

数値計算は差分法を用いており、基本的なところはいわゆる数値波動解析法⁴⁾に基づいている。すなわち、未知量として線流量と水位をとり、沖側境界条件として反射波が自由に沖側に通過する条件を、側方および島の反対側の境界の条件としては無反射の条件を用いた。

ただし、水位が海底面のレベルより低くなった場合は水位を海底面のレベルにし、また

移流項を含めた。陸地の境界条件は完全反射としており、その意味で、計算結果に定量的な精度は期待できない。

計算領域は、図-10に示すように、隠岐の4つの島を含む80 km × 40 kmの長方形である。長い辺の方向は屈折計算における長い辺の方向（y方向）に一致している。この領域を1 kmメッシュの格子網で分割し、格子点で水深を与えた。水深は、20万分の一の地勢図と海図を参考にして決定した。ただし、入射側の境界よりさらに入射側に、いわゆる沖側境界条件を与える、入射方向に3メッシュ分の領域を付け加え、そこでの水深は300mの一樣水深として、その付近の水深は300mに滑らかに変化するように修正して与えた。

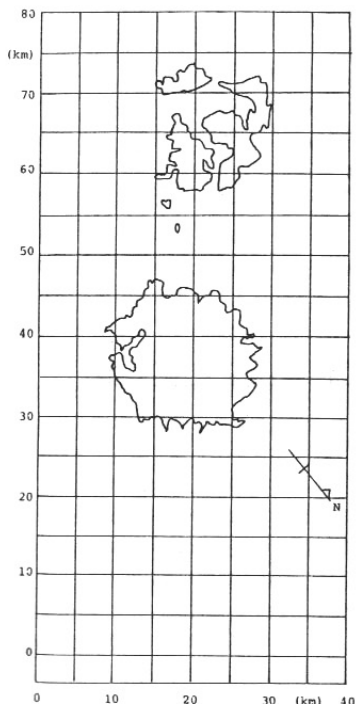


図-10. 隠岐周辺の津波変形の数値計算の領域

計算の時間ステップは12 secとし、波の周期は、5 min. から10 min. まで1 min. おきに6種類の値を与えた。入射波の振幅は1 mとした。

図-11は、計算結果を示している。島の周辺の海岸の1 kmメッシュの格子で表現される各地点において、5波目までの波の峰高の最大値を示している。ただし、周期5分から8分までは6 m以上のもののみ、9分と10分のは10 m以上のもののみを示した。既に述べたように、値そのものはあまり意味はない。なお、5波目までに限ったのは、島後の2 m以上の遡上高を示した地点のうち、最大の遡上高を生じた時間が聞き込み調査でわかっているところは、いずれも最初の数波までの間であったからである。

図-1の遡上高が2 m以上の場所とその高さを、図-11と比較してみる。図-1では、高い遡上高を示した地点は、島のはほぼ北、北西、南である。周期5分の計算結果の傾向は、北西を除いて異なり、北および南の高い遡上高が説明できない。6分についても北および南の高い遡上高が説明できず、実際の遡上高と異なって、北東から南東（すなわち計算において、入射波に対する側）が大きくなっている。7分になると、実際とは異なる北東から東側でやはり大きいものの、実際の場合と同様、北、北西、南にも大きいところがある。8分は、7分とはほぼ同様である。9分の結果では、7分および8分の結果と比較して、北東および南東がなくなる一方、南に高い波高がない。10分でも、南に高い波高がない。

以上のように定性的に比較してみると、計算では入射波に対向する方向の東側で、実際とは異って波高が大きくなる点を除けば、周期が7分と8分の計算結果が実際の調査結果に近い。

既に述べたように、西郷の記録に見られる卓越周期は6~7分、また運輸省の港研資料⁵⁾では、スペクトル解析の結果で7分がピークになっている。このように、差分法による島

周辺での長波の変形計算結果による波高の大きな地点の分布と実際の調査結果による分布の定性的な類似性から判定した周期は、西郷の検潮記録に見られる卓越周期と一致する。したがって、島の周辺の遡上高の分布が周期約7分の津波の変形結果として説明しうるのかもしれない。

しかし、すでに述べたように、7分という時間は、Longuet-Higgins²⁾のいう島による長波のトラップによる共振周期という可能性も否定できない。とすれば、島による長波のトラップによる共振周期を入射波の周期とした計算結果が、実際の遡上高の分布と一致しても、それは数値計算の妥当性を意味しない。

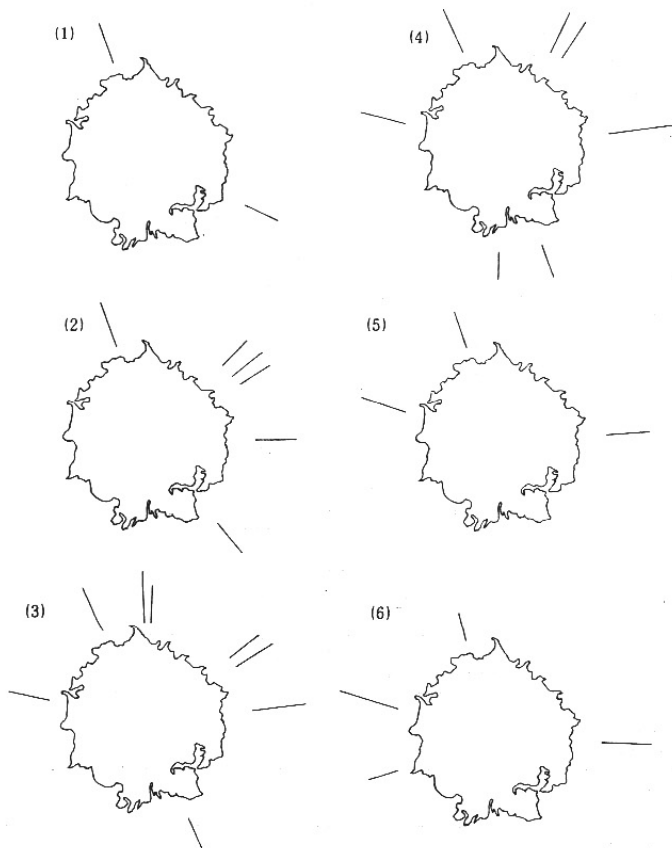


図-11. 隠岐周辺の数値計算結果

- (1) 周期 5分 (2) 周期 6分 (3) 周期 7分
 (4) 周期 8分 (5) 周期 9分 (6) 周期 10分

7. 考察

もう一度今回の津波の特徴を考えてみる。まず周期であるが、西郷の検潮記録に見られる6~7 min. の卓越周期は、波源のスケールが70~80 km、日本海の中央部の水深が3,000 m とすると、波速が線型長波として約170 m/sec となり、70 km が波長とすると、この距離を通過するのに要する時間は、 $70 \text{ km} / 170 \text{ m/s} = 7 \text{ min.}$ となって一致する。したがって、隠岐に来襲した津波自体が約7 min. の周期を有していたと考えても無理ではない。

一方、図-3からわかるように、津波は16時半頃一旦小さくなってから、再び大きくなっている。このことは、日本海という閉じた水域を伝播した津波が陸岸で反射され、直接来襲した津波が通過した後で隠岐に到達したことが考えられる。

さらに隠岐諸島の近辺の海底形状をあらためて見ると、島根半島の前面の陸棚の上に隠

岐諸島が存在していると考えられる。したがって、5.で述べた Longuet-Higgins の扱った、孤立した同心円状の海底形状ではなく、中国地方の日本海沿岸（山陰沿岸）の陸棚の上に島が存在するというさらに複雑な状況と考えられる。

この場合には、いわゆる陸棚波も発達し、その他に島状の地形による波のトラップも考えられることになる。西郷の検潮記録で、津波が長時間にわたって継続しているのは、日本海全体としての振動によるものかもしれないし、また山陰沖の陸棚によってトラップされた波によるものかもしれない。

そう考えると、6.で示した解析ではこのような現象を説明出来ない。すなわち、数値計算では、隠岐諸島を囲む80 km × 40 km の領域に津波が入射し通過すると仮定しており、山陰沖の陸棚でトラップされる波や山陰沿岸で反射された波は考慮できない。できる可能性のあるのは、島状地形による波のトラップのみである。

表-1. 最大偏差と最大遡上高の発生時刻¹⁾

site	author's survey		survey by Tokai Univ.	
	wave height	run-up height	wave height	run-up height
Tougo				
Kamo	1:40-1:50		2:00 (4th wave)	3:30
Saigou	5:20 (from tide gauge record)	3:10		
Fuse	3:40			
Nakamura	2:00			1:50
Kumi	2:00 (4th wave)			
Nishinoshima Is.				
Funakoshi	3:30-4:00			
Nakaoshima Is.				
Hishiura	1:50 (2nd wave)	2:30		

(The first wave reached Saigou Bay at 1:33 p.m.. The wave period is assumed to be 7 min..)

6. で述べたように、島後の調査で最大の偏差又は遡上高が生じた時間がわかっている地点は、遡上高が2 m以上の地点では加茂、中村、久見の3箇所であり、2 m以下の地点も含めて、今回の調査および東海大学の調査で最大偏差あるいは最大の遡上高が生じた時間のわかっている地点とその時間は表-1のとおりである。ただし、西郷は図-3から求めた。また最大偏差か最大遡上高かの区別のつかない地点が多く、その場合は両欄の中間に記入している。

偏差か遡上高かわからない地点を含めると、津波の第1波が1時半頃に来たとして、それから約半時間つまり2時までになつた地点は、加茂、中村、久見、菱浦で、一方、西郷、布施、船越では、約1時間半後の3時以降である。

したがって、これだけの資料からは、山陰沖の陸棚によるトラップが顕著であったかどうかはわからない。また図-3からわかるように、津波の第1波が来襲した午後1時半頃は天文潮位の最高位の頃で、以後減少しているため、かりに山陰沖でのトラップによってかなり長い時間にわたって振動が持続し、その振幅の最大の波がかなり後で発生したとし

ても、天文潮位との和としての最大遡上高は大きくならなかったのかもしれない。

今後、山陰沿岸およびその沖の陸棚を含めた広範囲の数値計算を行なう必要がある。

8. 奥尻島での津波に関する調査^{1), 5), 6)}

奥尻島に関して、日本海中部地震津波の資料として最初に入手したのは、昭和58年度の日本海洋学会秋季大会で発表された防災センターの木下らの現地調査の報告⁶⁾である。図-12は、その中で示された奥尻島での水位分布の図である。

その後、奥尻島に関しては、東海大学の調査報告¹⁾でも記述があり、さらに運輸省港湾技術研究所資料⁵⁾でも報告されている。図-12には、この2つの報告による水位も記入している。

若干の差はあるが、水位分布の傾向は、奥尻島の南端の青苗岬より外海側（西側）のとくに南側で水位が高く、それ以外には東北に位置する奥尻港でやや高くなっている。2つの資料^{1), 5)}によると、津波は最初の2、3波が大きく、その周期は10分程度であった。

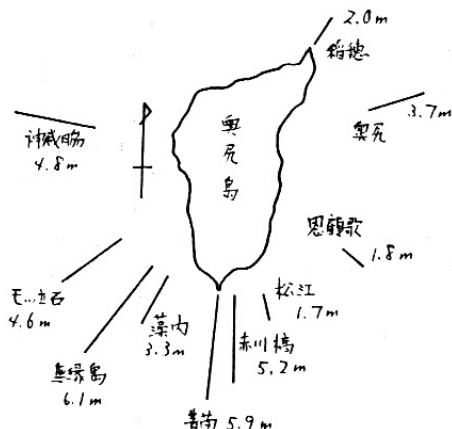


図-12. 奥尻島における津波遡上高の分布
(基準：東京湾中等潮位)^{1), 5), 6)}

9. 奥尻島周辺での津波の変形の特徴

奥尻島の周辺は、隠岐と異なり陸棚は発達しておらず、北海道の渡島半島に沿って約50 kmの幅の陸棚の外側は水深3,000 mになっている。さらに奥尻島の海岸は隠岐と異なり、地形が単調で局所的な波高の増大を起こすような海岸線の入りが無い。また、最高の水位が生じたのが2, 3波目であることから、6.で隠岐について行なった計算は、奥尻島については、実際に生じたと思われる現象に近いのではないかと想像される。

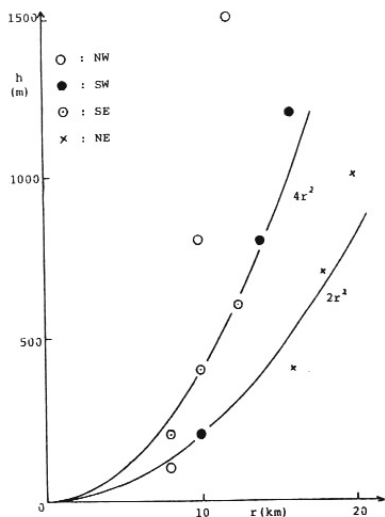


図-13. 動径方向の水深増加の割合 (奥尻島)

すなわち、陸棚が発達していないことから、陸棚での津波のトラップによる長時間にわたる振動の持続の可能性が少ないことが考えられる。事実最高水位は2, 3波目で生じている。したがって、この最高水位を説明するには、奥尻島を囲む狭い領域の一方から入射し通過することを仮定している数値計算でも可能であることが考えられる。ただし、渡島半

島での津波の反射はこの計算では説明できない。

なお、隠岐の場合と同様に、Longuet-Higgins²⁾の島による長波のトラップの必要条件としての動径方向の水深の増加の条件を調べたのが、図-13である。この場合は隠岐と異なり、北西、南西、南東、北東のいずれの方向でも、水深は動径の自乗以上のはやさで増加しており、島による津波のトラップの可能性は隠岐よりも大きいと思われる。

ただし、隠岐と同様、上述の資料だけではそれを検討することはできない。参考のために、木下らの報告⁶⁾に示されている奥尻港での水位記録を図-14に示しておく。この図からは、既に述べた調査結果による周期10分と同程度の周期が見られる。

10. 奥尻島周辺での津波の変形の数値計算

計算手法は、6.の隠岐の場合と同様である。計算領域の大きさも、80 km × 40 kmと同じであるが、その長手方向は南北方向に一致させた。津波の侵入方向は詳しくわからないが、調査結果¹⁾では、「奥尻島南端の青苗岬を南南東と南南西から包み込むようにやってきた」とある。格子間隔は、隠岐と比べて水深が深いため、2 kmとした。時間ステップは6 secとし、波の周期は隠岐と同様に、5 min. から10 min. まで1 min. おきに6種類の値を与えた。

図-15は、計算結果を示している。隠岐の場合と同様、値そのものには意味がないため、あるレベル以上の波高を示したところだけを線分の長さで相対的に示している。周期6 min. の場合はそのレベルに達する地点がなかったので、示していない。図から明らかにように、周期8~10 min. の計算結果が図-12の遡上高の分布に近い。これは、周期が10 min. 程度であったという調査結果とほぼ一致する。

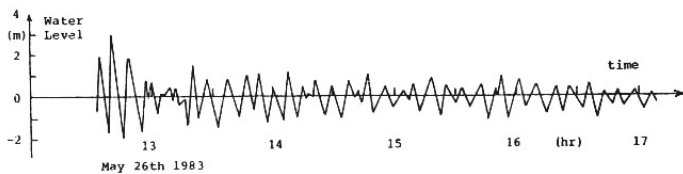


図-14. 奥尻港での潮位記録の一部⁶⁾

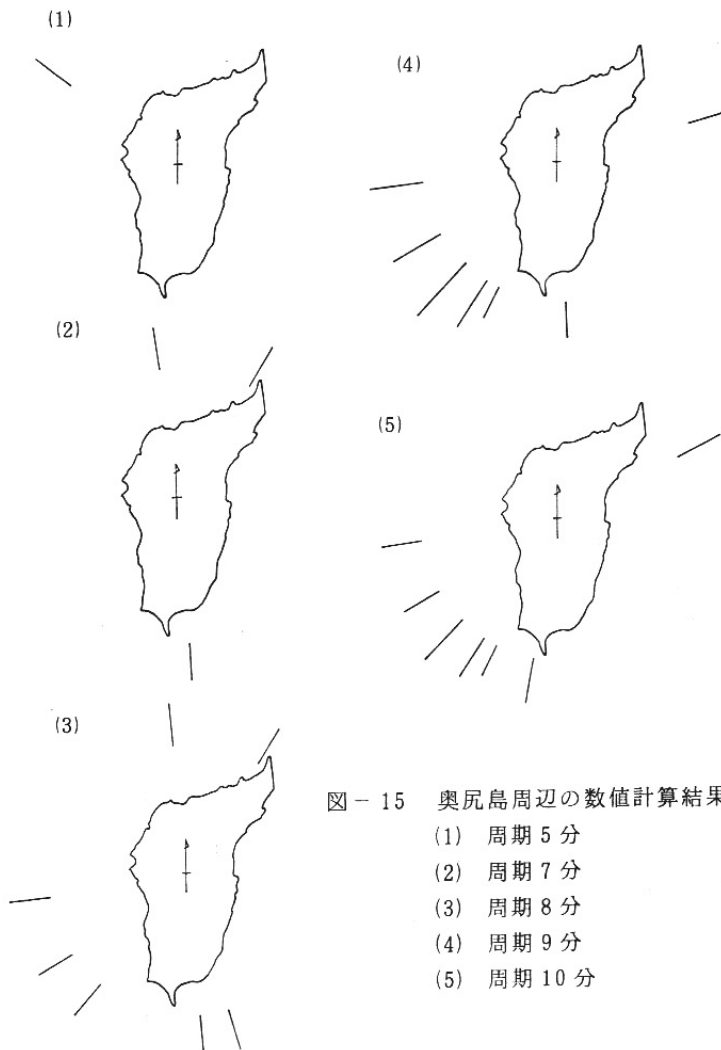


図-15 奥尻島周辺の数値計算結果

- (1) 周期 5 分
- (2) 周期 7 分
- (3) 周期 8 分
- (4) 周期 9 分
- (5) 周期 10 分

11. あとがき

昨年の5月26日に起きた日本海中部地震と津波に対する文部省の科学研究費の自然災害特別研究による突発災害調査が決まった時点で、西日本の関係のうち隠岐における被害が目に付いた。

頭の片隅にあった島による長波のトラップ現象と関係があるのではないかと思い、隠岐の、特に島後の島周辺における遡上高の分布を、Longuet-Higginsの島による長波のトラップの論文で説明出来ないかと試みたが、Longuet-Higginsの論文は単にきわめて簡単な海底形状の場合の共振周波数を与えるのみで、遡上高の分布は彼の論文では説明できないことがわかった。

そこで、差分法を用いて計算された結果と調査結果を比べ、両者が定性的に一致する計算上での入射波の周期が、調査による津波の周期と一致することを確かめることにした。その目的はほぼ達成されたと思い、この論文の原稿の前半を作った時点で、上述の数値計算では、山陰沖に広がる陸棚による波のトラップは説明できないことに気がついた。

ただし、たまたま津波が来襲したのが天文潮位の最高潮位の頃であったので、西郷での検潮記録でも明らかにわかるように、津波による振動は一度減少したのち、再度大きくなり、むしろ最大偏差はこの後半の津波によるにもかかわらず、最高の遡上高は第4波ぐらゐまでに生じた。その結果、上述の数値計算でも定性的には島の周りの遡上高の分布を説明できたのかもしれない。奥尻島については、山陰沖ほど陸棚が発達していないのでここで行なった計算でもよいのかもしれない。

隠岐に関しては、今後山陰沖の広い陸棚を含めた領域で計算をやりなおす必要がある。もちろん、これでも日本海全体での振動は考慮できない。

12. 謝辞

最後にこの研究を行なうに当りお世話になった多くの方々に御礼を言いたい。

隠岐の調査に関しては、運輸省第3港湾建設局境港工事事務所の橋間元徳所長、島根県西郷土木建築事務所の服部豊主幹はじめ多くの方にお世話になった。

また京都大学工学部の岩垣雄一教授、東京大学地震研究所の梶浦欣二郎教授、京都大学防災研究所の土屋義人教授、東北大学工学部の首藤伸夫教授には種々の有益な御助言をいただいた。

さらにこの研究の全過程において阿南工専の島田富美男講師（当時京都大学内地研員）および京都大学工学部学生石突寿啓君にお手伝いをお願いした。またこの研究の一部は昭和58年度文部省科学研究費自然災害特別研究によったことは言うまでもない。ここに謝意を表する。

13. 参考文献

- 1) 東海大学海洋学部海洋土木工学科：昭和58年日本海中部地震の津波痕跡記録把握調査報告書，1983。
- 2) M. S. Longuet-Higgins：On the trapping of wave energy round islands, *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 29, pp. 781-821, 1967.
- 3) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，pp. 564-565, 1971.
- 4) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 35-58, 1975.
- 5) 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No. 470, 1983.

- 6) 木下武雄・つじよしのぶ・小西達男・沼野夏生・阿部 修：昭和58年日本海中部地震の津波の現地調査，1983年度日本海洋学会秋季大会プログラム概要集，pp. 331-332, 1983.