

日本海中部地震津波による災害について*

土屋 義人・酒井 哲郎・河田 恵昭・中村 重久
芝野 照夫・吉岡 洋・山下 隆男・島田富美男

1. 緒 言

1983年5月26日11時59分57.5秒（気象庁），秋田県能代市沖100kmを震源地とするマグニチュード7.7の日本海中部地震が発生し，これに伴う津波が北海道から山口県，さらに韓国を含む日本海沿岸全域に伝播し，多大の被害を与えた。日本海におけるこのような規模の大きい津波の広範囲にわたる伝播は過去に例がなく，津波の挙動とその災害の研究上，非常に貴重な情報を残してくれた。著者らは津波災害の発生直後から現地調査を開始し，それと同時に津波と災害に関する資料の収集を行ってきた。とくに，富山県から島根県に至る日本海沿岸については，各市町村をはじめ各漁港を訪れ，津波調査票に基づき津波の特性や情報伝達などについて聞き取り調査を実施した。

今回の津波の特徴は幾つか指摘されようが，その1つは，三陸津波のように太平洋沿岸に來襲する津波の周期に比べて40 min程度と短いうえ，津波が奥尻島や隠岐島などの島に集中し，能登半島や島根半島にトラップされたことであろう。そのほか，舞鶴への津波の來襲時刻がそれより西の島根半島や隠岐島よりも遅れたことなどであろう。一方，災害面からは地震発生直後に青森・秋田両県の日本海沿岸に津波が來襲し，遠足中の小学生，港湾工事中の作業員，さらに釣り人らを中心に100名に及ぶ痛ましい犠牲者が出たことが挙げられる。また，能登半島や島根半島に2 mから4 m程度の津波が來襲し，水産関係を中心とした多大の被害が発生した。被害発生の過程で，津波警報や注意報の発令と伝達，住民や漁船の避難に関して多くの教訓を得ることができた。

本研究は，自然災害総合研究班による突発災害調査として，日本海中部地震による災害調査が実施されたうち，著者らが担当した富山以西の沿岸における津波災害の調査結果を中心として，津波の伝播特性，陸棚における津波の変形，島による津波の変形および津波による災害について調査・研究した成果をまとめたものである。

2. 津波の伝播特性

2.1 津波の波源域

津波は海底における地殻変動により起こり，長波として伝播し，その波源域は震源域にほぼ一致する。さらに，震源域は余震域にほぼ対応するので，余震観測データを詳細に調べれば震源域が最小公約数的に把握でき，また津波の検潮記録を基に逆屈折図を描けば津波の波源域が最大公約数的に推定される。すなわち，余震域と津波の到達時刻が複数地点で得られておれば，津波の波源域が推定される。

ここでは，以上のような考えに基づいて，日本海中部地震津波の波源域を，以下のような方法で推定する。まず，海図上に格子網を描く。この場合，35°N線上において， $\Delta S = 10$ kmとなるようなきざみ幅とする。格子点上における水深を読み取り，メルカトル図法の利点である方位の正確さを生かして，格子のきざみ幅を次式によって修正し，距離補正する。

$$\Delta S_i = \Delta S_0 \left(\frac{l_i}{l_0} + \frac{l_0 - l_i}{l_0} \cdot \frac{i}{N} \right) \dots\dots\dots (1)$$

* 特別講演として，土屋が講演したものに，富山以西における災害調査の成果を追加したものである。

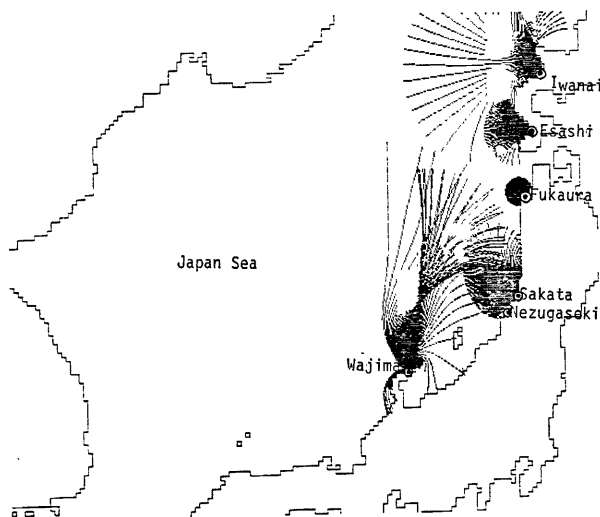


Fig. 1 Inverse refraction diagram of tsunami

ここに、 ΔS は格子のきざみ幅、 l_i は i 点の緯度における単位経度当りの距離、 N は原点 (45°N , 142°E) から距離の基点とした緯度 (35°N) までの格子点数、および i は原点からの緯度方向の格子点番号である。

次に、津波の到達時刻がかなり正確にわかっている検潮記録として、次の6地点を選定し、それぞれの逆屈折図を作成する。

1. 岩内 (35 min), 2. 江差 (17 min),
3. 深浦 (7 min), 4. 酒田 (40 min),
5. 鼠ヶ関 (50 min), 6. 輪島 (75 min)

ここに、() 内は津波の到達時間であり、検潮記録の質の判断は、運輸省港湾技研資料¹⁾によった。これら6地点における津波の来襲方向は正確に判っていないので、それぞれの点において、 1° 毎に全方向に波向線と到達時間を計算して Fig. 1 に示す。一方、Fig. 2 は乗富ら²⁾ による5月26日12:00から5月31日17:25の間における余震域の概略(破線)と Fig. 1 に示した逆屈折図の最終波峰線を示したもので、両者から津波の波源域が推定できる。すなわち、余震域を包含し、かつ津波の波峰線に接する領域を波源域とす

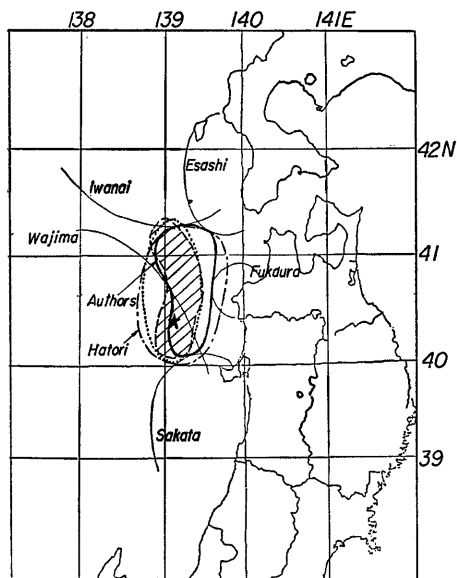


Fig. 2 Estimated source areas of tsunami and area of aftershocks

れば、太い破線で示した領域として決定される。なお、図中の一点鎖線で示した領域は、羽鳥²⁾によって推定された日本海中部地震津波の波源でありまた、点線で示した楕円は、次節で述べる津波の伝播特性を検討するために、本論文で用いた波源域で、その中心は、139°E、40°36'N にあり、長軸および短軸の長さはそれぞれ、南北に180km および東西に80kmの楕円として表される。

2.2 津波の伝播特性

一般に、津波は長波近似を用いて解析され、その伝播速度は水深 h の場では重力の加速度 g を用いて $\sqrt{gh}$ で表わされる。後述するように、この津波の場合は周期約7～8minで比較的短周期の津波であると推定されるが、Fig. 3 に示す周期波の波速と水深、周期の関係から明らかなように、今回の津波の場合においても、波速を $\sqrt{gh}$ で計算して伝播特性が議論できることがわかる。

津波の屈折計算の基礎方程式は、次式で示される波向線方程式および波向線間隔方程式を数値積分して、波向線の位置および屈折係数を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \\ \frac{d^2\beta}{dt^2} + q_1 \frac{d\beta}{dt} + p_1\beta &= 0 \\ p_1 &= -\left(\cos \alpha \frac{\partial x}{\partial c} + \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial y}\right) \\ q_1 &= c\left(\sin^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \sin \alpha \cos \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta = \frac{b}{b_0} = K_r^{-2} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 α ； x 軸と波の入射方向のなす角度、 c ；波速、 β ；波向線間隔係数、 b ；波向線の間隔および K_r ；屈折係数である。ここで、注意しなければならないことは、海底地形を如何に的確に平滑化して与えればよいかという点で、波長に比べて非常に細かい変化まで取り込むことは逆に誤差を生じる要因となる。しかしながら、どの程度までの平滑化が「的確」であるかについては、必ずしも明確にされていないが、一般に、波の場合、波長程度以下の不規則性を取り除くように、深淺図上の等深線を平滑化の方がよいとされている。ここでは、津波の屈折・伝播特性が、日本海沿岸の各地点で観測された検潮記録と聞き込み調査の資料から明らかにされた津波の集中箇所および到達時刻によく一致するために、どの程度の範囲に渡る水深の平滑化が適当であるかを検討する。

水深は、できる限り細かく読み取ることには若くはないが、こ

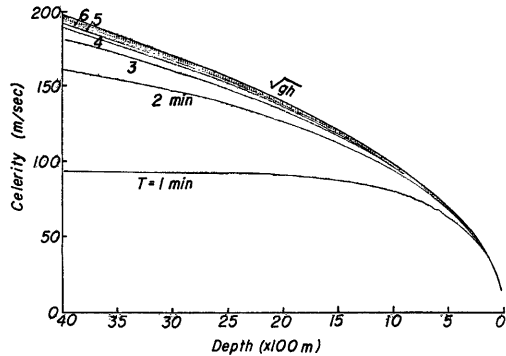


Fig. 3 Relationships among water depth, wave period and wave celerity calculated by small amplitude wave theory

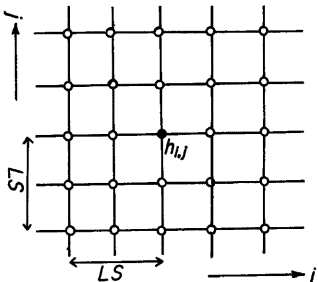


Fig. 4 Grid systems of smoothing of bottom topography

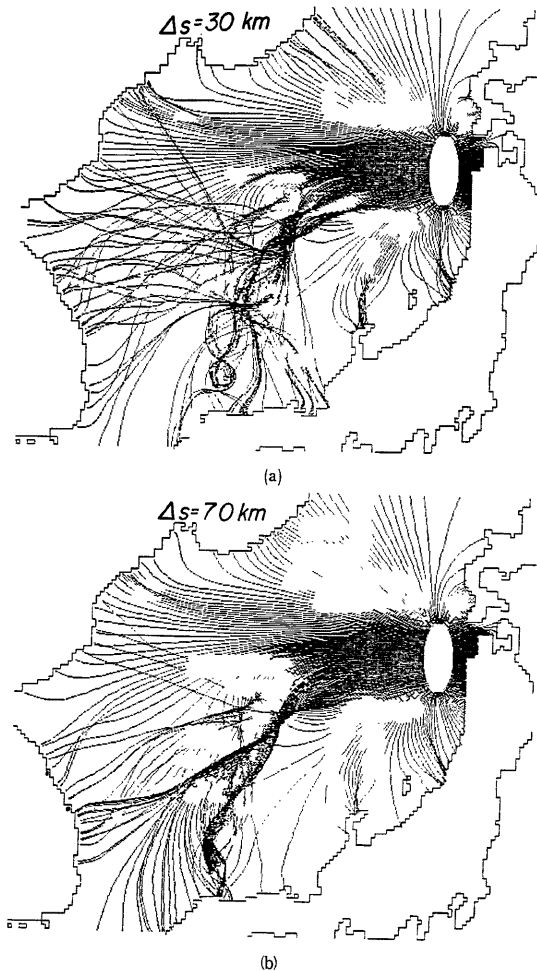
では前述したように、 $\Delta S=10\text{ km}$ で読み取ったものを用いて、以下の方法によって平滑化する。

(1) 平滑化は ΔS を基準として、平滑化領域を示すパラメーター LS を Fig. 4 のように定義する。すなわち、平滑化された水深 $\bar{h}_{i,j}$ は、次式のように表わされる。

$$\bar{h}_{i,j} = \sum_k \sum_l h_{k,l} \quad \left\{ \begin{array}{l} (k=i-LS, i-LS+1, \dots, i+LS) \\ (l=j-LS, j-LS+1, \dots, j+LS) \end{array} \right\} \quad (4)$$

(2) いま、全領域に渡って式(4)のような平滑化を行った場合には、大陸棚における水深を一般に、深くすることになり、大陸棚においては平滑化が逆に誤差を生じさせることになるため、式(4)中における $h_{k,l}$ の要素のうち、1つでも陸にかかる場合は平滑化を行わないこととする。

Fig. 5 は、 $LS=1, 3$ および 5 の場合についての屈折図であり、 $LS=1$ の場合は、式(4)から明らかなように、 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ の格子内の平滑化を施したことに対応し、 $LS=3$ では $70\text{ km} \times 70\text{ km}$ 、 $LS=5$ では $110\text{ km} \times 110\text{ km}$ の格子領域の平滑化となる。ここで、津波を周期 8 min、水深 2,000 m と仮定すると、その波長は約 67.2 km であり、 $LS=3$ の場合はほぼ津波の波長程度の領域に渡る平滑化をしたことに対応する。図から明らかなように、 $LS=1$ の場合には、Fig. 6 に示す北大和堆および大和堆において³⁾、波向線が複雑に交叉しているが、 $LS=3, 5$ については、この浅瀬が「凸レンズ」のような効果を示し、隠岐、島根半島と朝鮮半島とに「分光」している様子がよく表わされている。すなわち、大和堆が球面浅瀬のような効果を持ち、そこで時計回りに屈折した津波は隠岐周辺の大陸棚に集中し、反時計回りのものは朝鮮海台に集中したものと考えられる。さらに、大陸棚の発達している能登半島においても、津波の集中がみられる。このような波源域から遠く離れた特定地域への津波の集中現象は、日本海中部地震津波の大きな特色であるが、これを津波の屈折特性を用いて説明するためには、どの程度の水深の平滑化が適当であろうか。このような観点から Fig. 5 をみると、30 km の平滑化で



は、島根、朝鮮半島への顕著な集中が再現されておらず、それ以上の平滑化が好ましいことがわかる。さらに、平滑化領域を大きくとりすぎると、局所的な津波の集中が再現できなくなるため、ここで示す 110km 程度が上限であろう。

一方、平滑化が津波の到達時間に及ぼす影響についても検討しておく必要があるため、Fig. 5 に示した 3 通りの場合について検潮記録のある地点の到達時間を示したものが Fig. 7 である。図中、Rank はデータの質を示しており、A：良好、B：やや良好および C：問題ありを意味する。ここに、津波の到達時間の定義は、津波の影響であると考えられるじょう乱が検潮記録に現われた時刻から求めたもので、島根半島のように大和堆によって屈折して来襲したものと、直接入射したものとでは到達時刻に大きな差を生じるため、検潮記録における顕著なじょう乱の到達時間を * で示してある。この図から明らかなように、松前、能代および船川の検潮記録から求めた到達時間には問題があるようであるが、その他のものは計算結果とよく一致している。しかしながら、能登半島以西では、前述したような大和堆での屈折により、いわゆる津波の第 1 波の到達時間からは 20~30 min 程度遅れており、* で示す到達時間にほぼ一致している。また、水深の平滑化を $\Delta S=30\text{km}$ としたものでは、波向線の屈折のため、一樣に到達時間が遅くなっており、観測値とも一致しない場合が多いことも示されている。これらの結果から判断して、水深の平滑化領域としては、 $\Delta S=70\sim 110\text{km}$ とすることが適切であるといえよう。

以上のように、日本海中部地震津波の伝播特性として、大和堆が球面浅瀬のような役割を演じ、島根半島および朝鮮半島西岸に津波が集中した点が特記され、これを津波伝播図によって再現するためには、 $\Delta S=70\sim 110\text{km}$ 程度の範囲に渡る海底地形の平滑化が必要であることがわかった。ただし、平滑化の方法としては、できる限り細い格子データを用いて平均操作をすることが望ましい。

2.3 津波のスペクトル特性

今回の津波は北は宗谷海峡から南

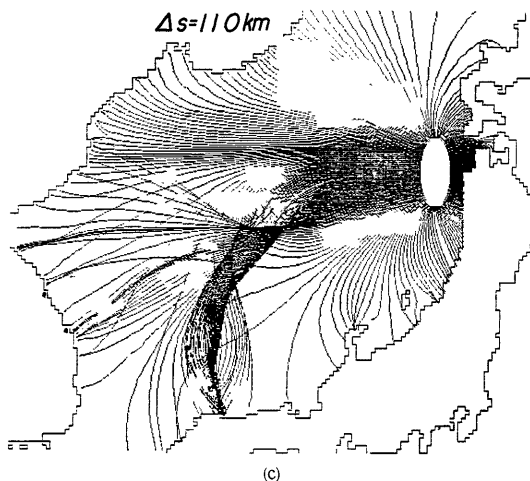


Fig. 5 Effects of depth smoothing in tsunami refraction

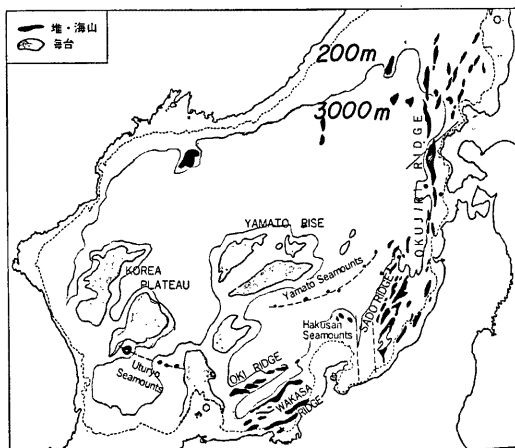


Fig. 6 Bottom topography of Japan Sea

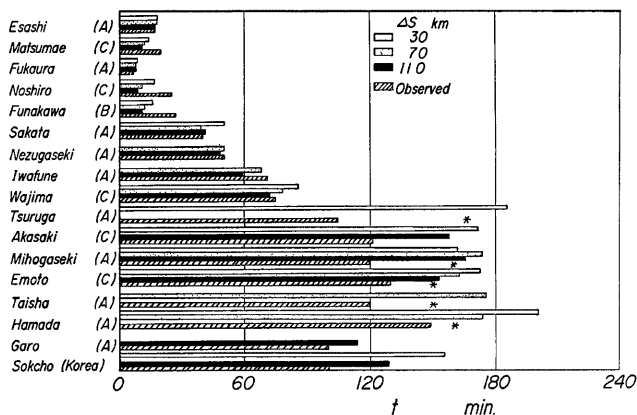


Fig. 7 Comparison between calculated arrival time of tsunami and observed one

は対馬海峡にいたる日本海沿岸の検潮所において、明瞭な波形記録を残している。記録上の津波の波高は、現地の津波観測高に比べて一般に小さくなり、その程度も場所によって大きく異なることが報告されている。この原因として、最大観測をもたらし到達初期の津波周期が6～8 minと短周期であったため、検潮所の導水管によるローパスフィルターの影響が大きかったことが挙げられる。

津波波形の特徴として、島および半島の先端、例えば、粟島、西郷および輪島などでは、津波到達後すぐに最大波高となり、振幅は大きい、数時間で減衰している。これに対して、広い陸棚海域に臨んだ直線状海岸、例えば、秋田、酒田、新潟、金沢および境港などでは、振幅はそれほど大きくないが、到達して半日以上も減衰せずに20 min以上の長周期変動が持続し、その最大振幅の発生も到達直後とは限らないことが指摘されよう。

各地の津波の記録からパワースペクトルを求め、主要なスペクトルピークを選出して、その沿岸方向分布

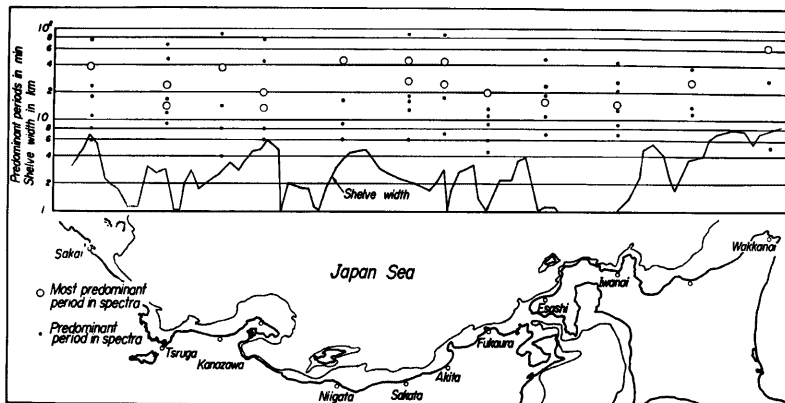


Fig. 8 Tsunami periods estimated from peak frequency of power spectrum and width of continental shelves along Japan Islands

を Fig. 8 に示す。そこには、陸棚の幅の目安として水深 200m の等深線の離岸距離を示してある。最も顕著なピーク (○印) の周期と陸棚の幅との間には、Merian の公式が成立するようである。すなわち、江差、岩内および深浦のような、陸棚の幅の狭いところでは、15min 程度の周期が卓越し、稚内、秋田、酒田、新潟、金沢および境港のように陸棚の幅の広いところでは 40 min 以上の周期が卓越している。輪島は広い陸棚をひかえている反面、半島の先端という特殊な条件のためか、卓越周期は短くなっている。

一方、震源に近いところでは、6～9 min の周期が共通して現れており、しかも津波到達初期に顕著であることから、震源地から直接伝播する津波の周期に相当するものと思われる。そして、それ以上長周期の振動は、陸棚にトラップされた津波の振動であろう。その例として Fig. 9 に敦賀のスペクトルを示す。A は津波到達直前、B は到達直後、そして C は到達 6 時間後の、それぞれ 6 時間の潮位記録から求めたものである。B と C を比べると、 10^{-1} 1/sec より長周期の振動はほとんど減衰していないのに対して、B において顕著であった周期 9 min のピーク (×印) が C では消滅しているのが特徴的である。すなわち、最初に侵入してきた津波の周期が 9 min であり、それがより長周期の陸棚や港にトラップされた振動を引きおこし、後者は長く持続するのである。

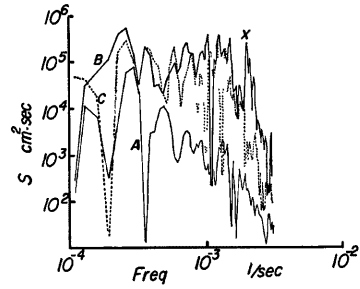
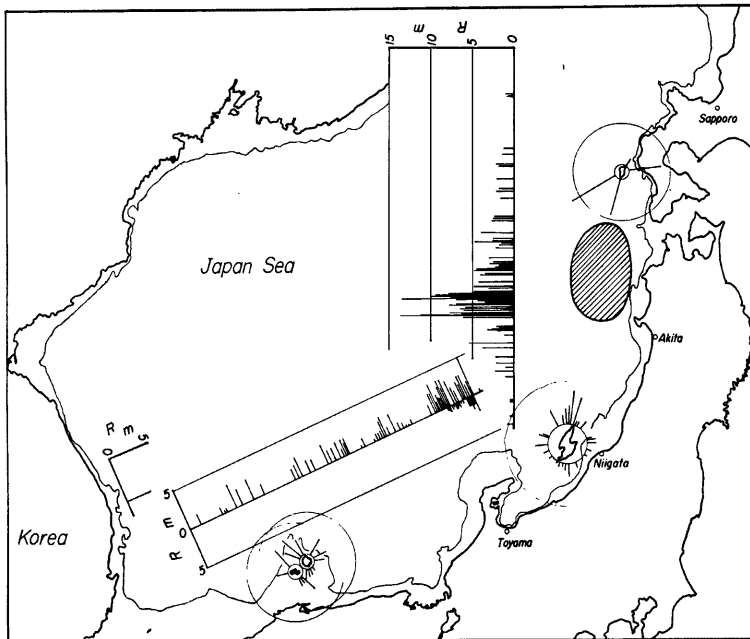
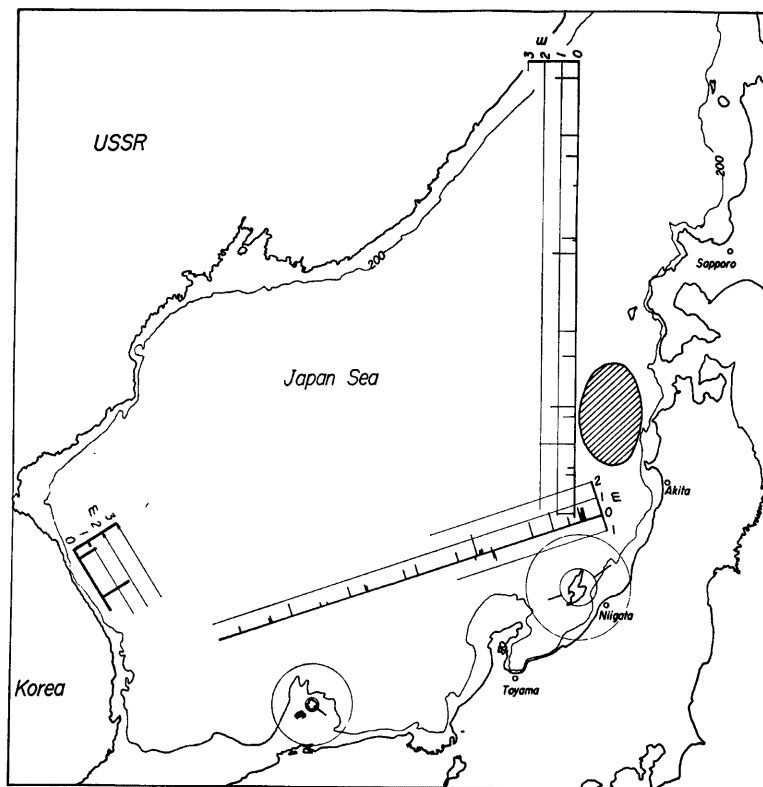


Fig. 9 Power spectra of tsunami observed at Tsuruga



(a)



(b)
Fig. 10 Longshore distribution of tsunami height

2.4 津波の分布

ここでは、著者らが分担した、富山以西島根県に至る現地踏査に伴う聞き込み調査と富山以北については、他の諸機関による調査資料に基づいて、津波の分布について考察する。

Fig. 10 は聞き込みおよび痕跡調査による、津波の遡上高の分布を示したもので、波源域の南側に近い沿岸部において、そ上高は高く、とくに秋田県北部から男鹿半島北側にかけて大きく、峰浜海岸および釜谷浜海岸では最大約 14m にも達している。この地域以外はほとんど 5m 以下の遡上高で、しかも波源域から遠ざかるほど、津波遡上高さが小さくなっている。

一方、富山県以西における聞き込み調査では津波の大きさとして、海面が最も上昇した点と最も下降した点との和として定義しており、これはほぼ最大波高に対応する。ここでは最も大きな最大波高を示すのは、能登半島北端の狼煙漁港であるが、それ以外では最大 3m 程度となっている。能登半島の北側と富山湾に面した沿岸とでは、最大波高は非常に異なり、北側に比べてその値は $1/3 \sim 1/4$ 程度となっており、これは前述した津波の屈折特性において、能登半島北端に波向線が集中していることに一致している。さらに、能登半島より西側沿岸では、最大波高の大きい所と小さい所が、一見周期的に存在するようである。これは、主

に沿岸部の微細な地形特性に原因するものと考えられるが、能登半島以西は、大和堆による屈折と対岸からの反射とが混在した領域と考えられるため、ここでの最大波高はその発生起時と、津波の屈折計算から推定される第1波の到達時刻とを考慮して検討する必要がある。

そこで、ここでは著者らが聞き込み調査を行った結果および検潮記録から得られた津波の最大波高発生時刻について検討し、最大波高を発生させた要因が、第1波の津波であるのか、あるいは反射波や副振動成分のような2次の要因によるものなのかを明らかにしておく必要がある。**Fig. 11** は聞き込み調査から得られた津波の到達時刻を示すもので、最大波高の発生時刻と考えられる時刻に対応している。この図と**Fig. 7** で示した屈折計算による波向線の到達時刻とを比較すると、以下のような点が明らかになる。

- | | | | |
|-----------|---------------------|-----------|------------------------------------|
| (i) 能登半島 | 聞き込み調査 13:00~13:30 | (ii) 島根半島 | 聞き込み調査 14:00~15:00 |
| | 波向線の到達時刻 13:15 | | 波向線の到達時刻 14:00 (美保関)
14:10 (恵曇) |
| (iii) 若狭湾 | 聞き込み調査 14:00~14:50 | | |
| | 波向線の到達時刻 14:52 (敦賀) | | |

以上のことから、観測者の認識した津波は、ほぼ波向線の到達時刻と一致しており、これは**Fig. 7** に示した検潮記録の第1波の到達時刻とはかなり相違し、検潮記録において微小じょう乱を除去した第1波として著者らが定義した*によく対応していることがわかる。さらに若狭湾、島根半島においては聞き込み調査から得られる到達時刻のバラツキは大きく、能登半島では小さい。このことは、前者の地域においては、第1波とそれ以後のじょう乱（反射、大陸棚でトラップされた成分、副振動等）の強さが同一オーダーであり、後者の地域においては、じょう乱が小さいことを示しているものと考えられる。すなわち、津波が直接集中した島や半島においては、第1波がかなり顕著であるが、その他の地域では、対岸での反射・大陸棚でのトラップ等の効果が同程度に大きかったといえよう。

3. 陸棚における津波のソリトン分裂*

今回の津波においては、能代沖に来襲した津波が浅海において数個の短周期波に分裂したことが多くの人びとによって目撃され、また撮影された⁴⁾。また、能代海岸においては、来襲した津波が反射し、それが進行波と干渉したり、屈折して、さらに数多くの短周期波に分裂したことも視察されたようである。これらの現象は、いずれも遠浅な陸棚における津波の非線形挙動として理解すると、きわめて興味深いものであるし、またこのことは浅海における津波の特性を知るうえにおいても重要なことと思われる。

ここでは、このような遠浅な陸棚における津波の挙動を究明する第一歩として、津波の先導波がなぜ陸棚において短周期波に分裂するかを非線形長波の変形特性として考察する。すなわち、現象を一次的に取扱いい、傾斜海岸上における非線形長波に対する KdV 方程式を用いて、既知の条件を与えて、その空間発展形の方程式の数値解を求め、能代沖のような遠浅な陸棚において果して津波がソリトン群に分裂するかどうか、また短周期波に分裂したと考えられるかについて考察する。

* 土屋義人・安田孝志・山下隆男・芝野真次：陸棚における津波のソリトン分裂，東北大学工学部津波災害実験所報告による。

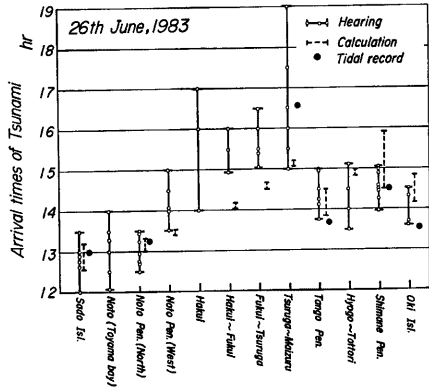


Fig. 11 Arrival time of tsunami obtained from hearing and tidal records

3.1 基礎方程式と数値解

陸棚上における津波の一次元変形を理論的に取扱うために、ここでは一様勾配の傾斜海浜上における非線形長波に対する KdV 方程式を用いることにする。陸棚の沖に発生した津波が陸棚上で、どのような挙動をするかを対象とするので、その空間発展形の方程式を示し、その計算法について述べる。

1) 空間発展形の KdV 方程式

傾斜海浜上における KdV 方程式は、すでに角谷⁵⁾によって導かれ、また土屋ら⁶⁾によってその高次項の導入が行われている。この場合、流体力学の基礎方程式にたとえば逓減摂動法を用いて KdV 方程式が導かれるが、対象とする現象によっては、時間発展形かあるいは空間発展形の方程式を誘導するかを定めなければならない。幸い Gardner-Morikawa 変換を用いれば、いずれの発展形方程式も導くことができるが、対象とする現象に対して時間発展形あるいは空間発展形になるようにこの変換を選べばよい。すなわち、ここで対象とする陸棚上における津波の挙動は、前述したように空間発展形の方程式系として取扱うべきであることから、Gardner-Morikawa 変換は次のように選ばれる。

$$\tau = \varepsilon^{3/2} x^*, \quad \xi = \varepsilon^{1/2} \left(\int dx^* / c_0 - t^* \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $x^* = x/h_1$ 、 $t^* = t\sqrt{g/h_1}$ および $c_0 = \sqrt{h/h_1}$ であり、Fig. 12 に示すように、 x ；陸棚先端からの距離、 h_1 ；陸棚先端における水深、 h ；任意地点の水深、 g ；重力の加速度、および ε ；微小展開パラメータで、水深 h_1 における波長を L_1 として $\varepsilon = (h_1/L_1)^2 \ll 1$ で表わされる。式(5)による変換を用い、逓減摂動法によって KdV 方程式を誘導すれば、次のような空間発展形の方程式が得られる。

$$\eta_\tau + \frac{3}{2c_0^3} \eta \eta_\xi + \frac{c_0}{6} \eta_\xi \xi - \frac{B^*}{4c_0^3} \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\eta = z'/h_1$ 、 $B^* = B/h_1$ で、 z' ；Fig. 12 に示したように水位変動、および B ；は基準面から海底までの距離である。

いま、Fig. 12 に示したように、座標原点における波高を H_1 、陸棚の勾配を $\tan \theta$ とし、かつ $\eta' = z'/H_1$ として表わせば、式(6)は次のように変形される。

$$\eta'_\tau + \frac{3U_r}{2c_0^3} \eta' \eta'_\xi + \frac{c_0}{6} \eta'_\xi \xi - \frac{\tan \theta}{4\varepsilon^{3/2} c_0^3} \eta' = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $U_r = H_1 L_1^2 / h_1^2$ で定義される Ursell 数である。

なお、式(7)を数値計算するに当たり、津波の先導波は近似的に周期 T の周期波であり、それが保存されるとすれば、 $\xi' = c^* \xi$ を用いて次式のように変形される。

$$\eta'_\tau + \frac{3U_r c^*}{2c_0^3} \eta' \eta'_{\xi'} + \frac{c_0 c^*}{6} \eta'_{\xi'} \xi' - \frac{\tan \theta}{4\varepsilon^{3/2} c_0^3} \eta' = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $c^* = c/\sqrt{gh_1}$ である。

したがって、沖波としての津波波形を与えて陸棚の先端における諸条件を shoaling として計算し、これを式(7)の境界条件として与えれば、陸棚上における津波の非線形挙動、すなわち任意地点における時間波形を計算することができる。

2) 数値計算法

式(7)の数値計算に当っては、周期条件のもとに陰解法を用いて、次のように差分表示することにした。ただし、式(7)における η' および ξ' は η および ξ と表わす。

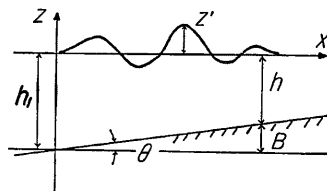


Fig. 12 Coordinate system and definition of variables

$$\begin{aligned}
 \eta_j^{*+1} - \eta_j^* &+ \frac{U_s c^*}{4c_0^3 d \xi} (\eta_{j+1}^{*+1} - \eta_j^{*+1}) (\eta_{j+1}^* + \eta_j^* - \eta_{j-1}^*) \\
 &+ \frac{c_0 c^*{}^3}{12(d\xi)^3} (\eta_{j+2}^{*+1} - 2\eta_{j+1}^{*+1} + 2\eta_j^{*+1} - \eta_{j-2}^{*+1}) \\
 &- \frac{\tan \theta}{4c^{3/2} c_0^2} \eta_j^{*+1} = 0 \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

すなわち、未知数 η_j^{*+1} ($j=1, 2, \dots, N$) の連立 1 次方程式として、 $n, n+1, n+2, \dots$ と逐次数値計算によって求めることができる。

3.2 津波のソリトン分裂

前述した基礎方程式を用い、浅海における津波の非線形挙動として、能代沖で目撃されたように、発生した津波が果して短周期波に分裂するかどうかを数値計算によって考察する。

1) 対象海域

この数値計算において対象とした海域は、Fig. 13 に示すように、能代海岸からその陸棚の海域である。図中には、推定された津波の波源の東端部を点線で示してある。この海域において、能代港より波源に直交な方向および東西方向の 2 測線（それぞれ A-line および B-line）における海底地形の断面を示すと、Fig. 14 のようになる。これらからわかるように、この海域は非常に遠浅で、離岸距離約 30km までは平均勾配約 1/400 程度で、陸棚の先端の水深は 100m 程度であり、それより急深している。また、より浅海部では、海底勾配は 1/50 程度となっている。したがって、本数値計算では、陸棚の先端における水深を 100m とし、水深 20m まで勾配 1/425 とし、それ以浅では勾配 1/50 とする。

2) 数値計算の条件

発生した津波の特性として既知なものは、次のようである。まず、津波の入力波形は、先導波を対象として、簡単のために正弦波とする。その周期は、津波スペクトルの一例を Fig. 15 に示すように、7 min から 8 min 程度であるが、波高または振幅については不明であるから、ここでは能代港における津波の最大偏差および最高潮位を比較の対象とする。しかし、能代港では検潮記録の一部が欠測していたが、港湾技術研究所¹¹⁾によれば、第 1 波の最大偏差は 1.94m で最高潮位は 2.08m と見積られている。したがって、本数値計算

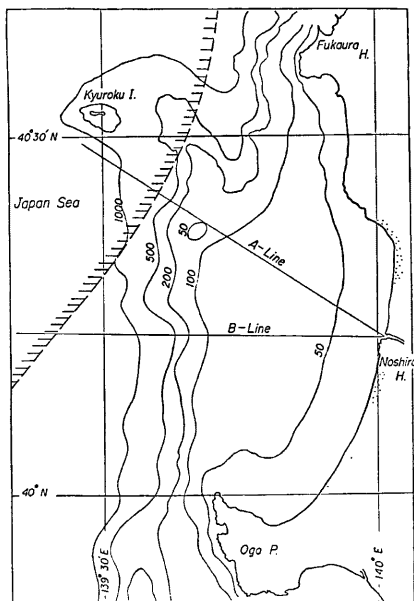


Fig. 13 Bottom topography off Noshiro and survey lines of bottom profile

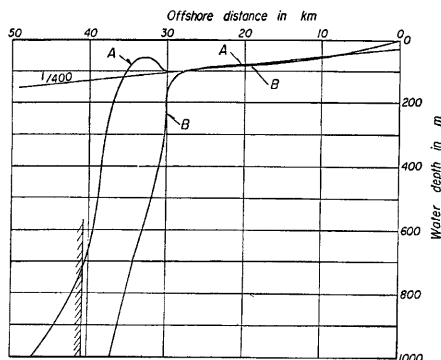


Fig. 14 Bottom profiles along A-A and B-B lines defined in Fig. 13

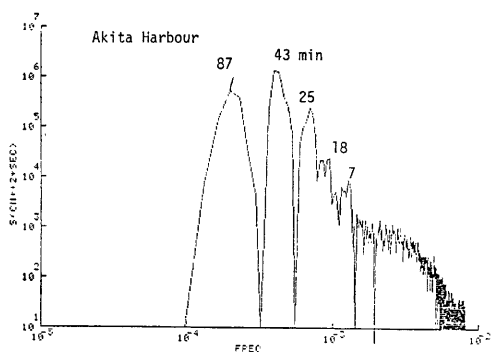


Fig. 15 Power spectra of tsunami observed at Akita harbour

における初期波形は陸棚の先端におけるものであり、そこから50ステップごとに逐次 $x=x/h_1$ ($h_1=100\text{m}$) の距離における波形を示している。

これらの結果によると、いずれの場合にも、津波は伝播し、非線形性が卓越するに従って、波高が増大し、波の峰部の曲率が大きくなっていくが、あるところで見掛上短周期波と思われるようにソリトン群に分裂することがわかる。そして、分裂したソリトン群は3個または4個程度で、見掛上の周期は5sec から 12sec 程度である。これらのうち、周期7min および8min で波高1m の場合には、陸棚の先端における shoaling factor はそれぞれ約3.3および3.4となっているので、ソリトンに分裂したときの平均水位に相当する偏差はそれぞれ2.2m および2.3m 程度と推定される。したがって、このまま能代港に進入したとすれば、これらの値は前述した能代港における津波偏差と一応対比できるものであることがわかる。また、これから推定される最高潮位も、日本海沿岸における潮位偏差が小さいことを考慮すれば、能代港における前述した実測値と対比できるものと思われる。

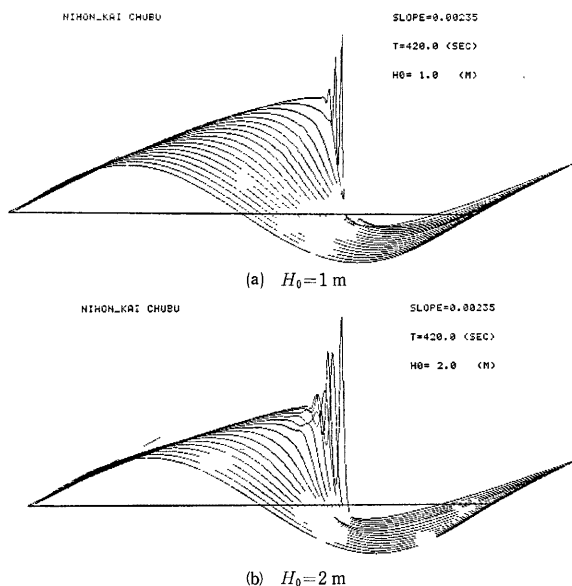


Fig. 16 Transformation of tsunami to solitons by numerical simulation ($T=7\text{ min}$)

においては、周期を7min および8min とし、入射波の沖波波高を適当に変えて、能代港付近において、前述した最大偏差および最高潮位の値になるような場合に、果して津波が短周期波に分裂するかどうか、また分裂した場合の個数などを確かめることにする。

3) 数値計算の結果

前述した条件によって数値計算した結果の数例を Figs. 16 および 17 に示す。Fig. 16 は周期7min で、沖波の入射波高と1m および2m とした場合であり、また Fig. 17 は周期8min の場合である。ただし、これらの図に

ling factor はそれぞれ約3.3および3.4となっているので、ソリトンに分裂したときの平均水位に相当する偏差はそれぞれ2.2m および2.3m 程度と推定される。したがって、このまま能代港に進入したとすれば、これらの値は前述した能代港における津波偏差と一応対比できるものであることがわかる。また、これから推定される最高潮位も、日本海沿岸における潮位偏差が小さいことを考慮すれば、能代港における前述した実測値と対比できるものと思われる。これらのことを総合すれば、能代沖の陸棚においては、今回の地震津波がその非線形挙動として3個程度のソリトン群に分裂したことをある程度裏付することができるであろう。

一方、今回の津波の非線形挙

動に関して、港湾技研では、縮尺 1/200 の水理模型実験を実施して、短周期波への分裂のみならず、反射波との干涉によってさらに数多くの短周期波に分裂することを確認している。ただし、海底勾配は 1/200 であって、前述した数値計算の条件とはかなり異なるが、発生したソリトン群の大きさについて比較してみることは興味がある。すなわち、初期波形と海底勾配が異なるので、直接の比較はできないが、発生したソリトンの特性はかなり実験結果と対比できるものとなっている。

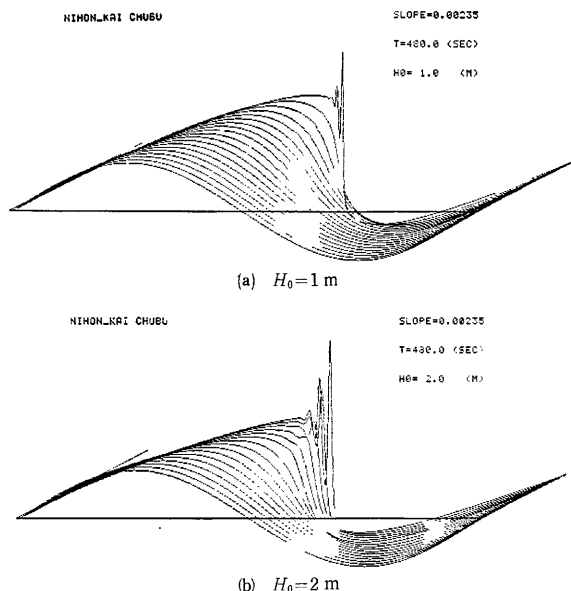


Fig. 17 Transformation of tsunami to solitons by numerical simulation ($T=8$ min)

4. 島による津波の変形*

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を考慮しながら、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の変形の特徴を明らかにする。

4.1 隠岐島後および奥尻島周辺の海底地形と津波の特徴

(1) 隠岐島後

Fig. 18 は、隠岐の諸島のうち島後の南の西郷湾の検潮記録の一部である。この図からわかるように、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、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複雑な状況と考えられる。

この場合には、いわゆる陸棚波が発生し、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。

* 酒井哲郎：島周辺における津波の挙動，東北大学工学部津波災害実験所報告による。

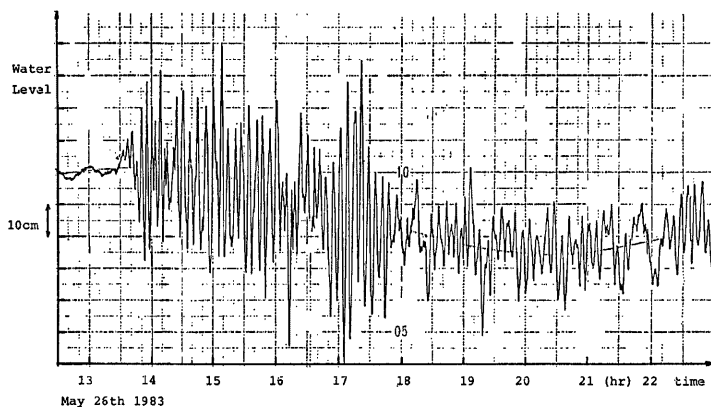


Fig. 18 Tidal record of tsunami obtained at Saigou in Tougo Island, Oki

Table 1 Occurrence times of maximum anomaly and run-up height in Oki Island

Sites	Authors' survey		Survey by Tokai Univ. ⁷⁾	
	wave height	run-up height	wave height	run-up height
Tougo Is.				
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: 20			1: 50
Kumi	2: 00 (4th wave)			
Nishinoshima Is.				
Funakoshi	3: 30-4: 00			
Nakanoshima Is.				
Hishiura	1: 50 (2nd wave)	2: 30		

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

後に述べる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、痕跡高が2 m以上の地点では加茂, 中村, 久見の3箇所であり, 島後以外, また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⁷⁾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, **Table 1**のとおりである。ただし西郷は **Fig. 18** から求めた。なお最大偏差か最大遡上高かの区別のつかない地点については両欄の中間に記入している。

偏差が週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時までには最大になった地点は、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 Fig. 18 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週上高は大きくならなかったのかもしれない。

(2) 奥尻島

一方、奥尻島の周辺は、隠岐と異なり陸棚はそれほど発達しておらず、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3,000mになっている。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。

4.2 島による波のトラップ

1967年に、Longuet-Higgins⁹⁾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れた、2日間にわたる周期6min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33kmで、まわりを数100mの水深の陸棚に囲まれ、その全体が水深約4,000mの海洋底の上に存在している。

(1) 隠岐島後

隠岐の島後の場合は、島の直径が約20kmで、まわりを水深約200mの陸棚に囲まれてはいるが、その外棚は、水深2,000m以上の部分もあるものの、南側は約10km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。

Longuet-Higgins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種類の一樣水深部が接続された形の陸棚の場合と異なっており、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6min、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ことを示した。

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場合について、隠岐の島後の場合について調べたのが、Fig. 19である。この図は、Fig. 27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

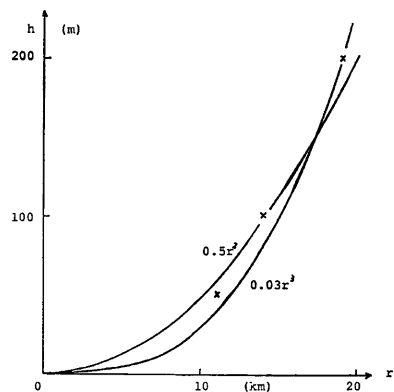


Fig. 19 Increase of water depth in radial direction of Tongo Island, Oki

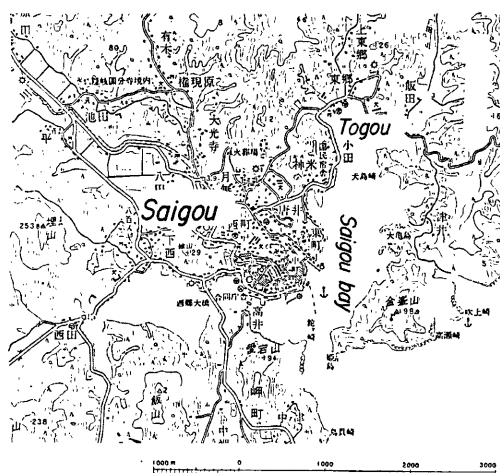


Fig. 20 Shape of Saigou bay and its hinterland

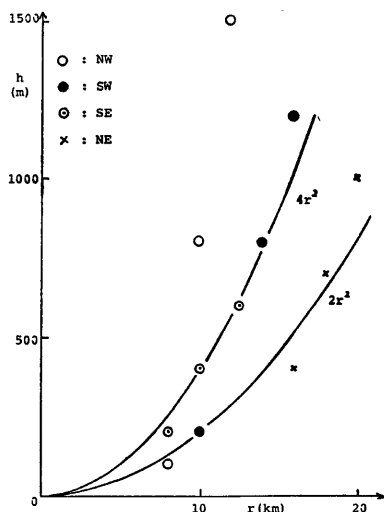


Fig. 21 Increase of water depth in radial direction of Okujiri Island

自乗よりゆるやかな水深増加の部分がかなり見られる。

既に Fig. 18 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。Fig. 20 は、西郷湾の 5 万分の一の地形図である。西郷湾の固有周期を、Neumann の方法⁹⁾ 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。

(2) 奥尻島

奥尻島に関して、隠岐の場合と同様に、Longuet-Higgins⁸⁾ 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、Fig. 21 である。この場合は隠岐と異なり、NW, SW, SE, NE のいずれの方向でも、水深は動径の自乗以上のはやきで増加しており、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¹⁰⁾ に示されている奥尻港での水位記録を Fig. 22 に示しておく。この図からは約 10 min 程度の卓越周期が見られる。

4.3 島による津波の変形の数値計算

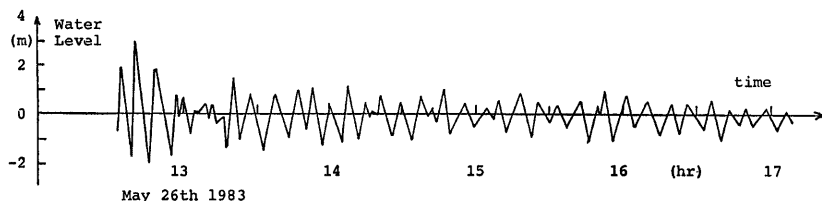
(1) 隠岐島後

ここでは、隠岐の島後の島の海岸に沿う特徴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¹¹⁾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。なお

移流項を含めたものの、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、Fig. 23 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。この領域は、山陰沖に発達している陸棚の一部を含んでいる。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 万分の一の地形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

Fig. 22 Tidal record obtained at Okujiri Island¹⁰⁾

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。

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。

Fig. 24 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波目までの波の峯高の最大値を示している。ただし、周期5 min から8 min までは6 m 以上のもののみ、9 min と10 min のものは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。

(2) 奥尻島

計算方法は、(1)の隠岐での場合と同様である。計算領域（この領域は水深2,000mの部分を含んでいる）の大きさも、Fig. 25 に示すように、80km×40km で同じである。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⁷⁾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。

Fig. 26 は、計算結果（5波目までの最大値）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いため示していない。

4.4 島周辺の遡上高分布と計算結果の比較

(1) 隠岐島後

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月たった6月30日から7月2日にわ

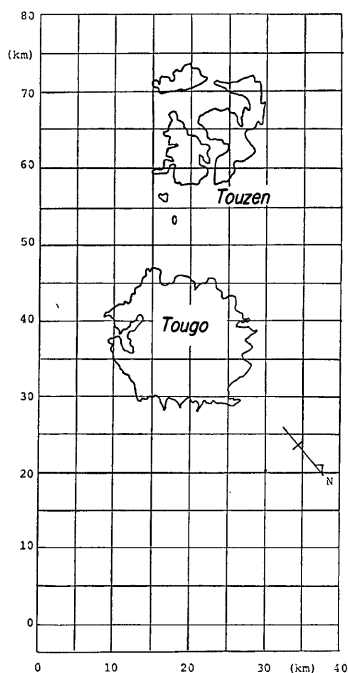


Fig. 23 Region for numerical calculation of tsunami transformation near Oki Island

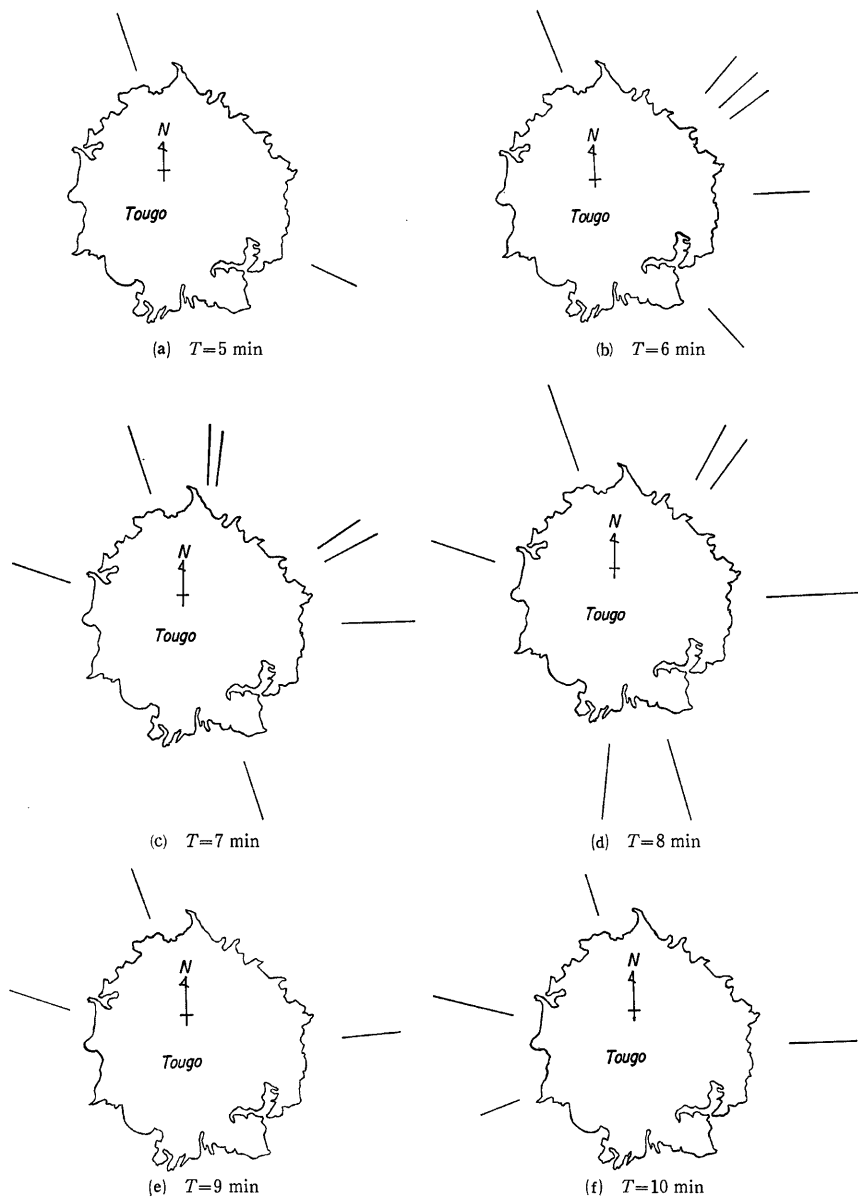


Fig. 24 Results of numerical calculation around Tougo Island, Oki (solid line shows direction of inundated tsunami with high amplitude)

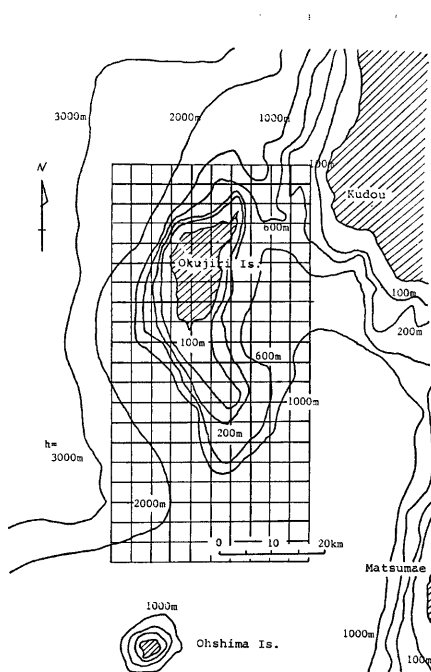


Fig. 25 Region for numerical calculation near Okujiri Island

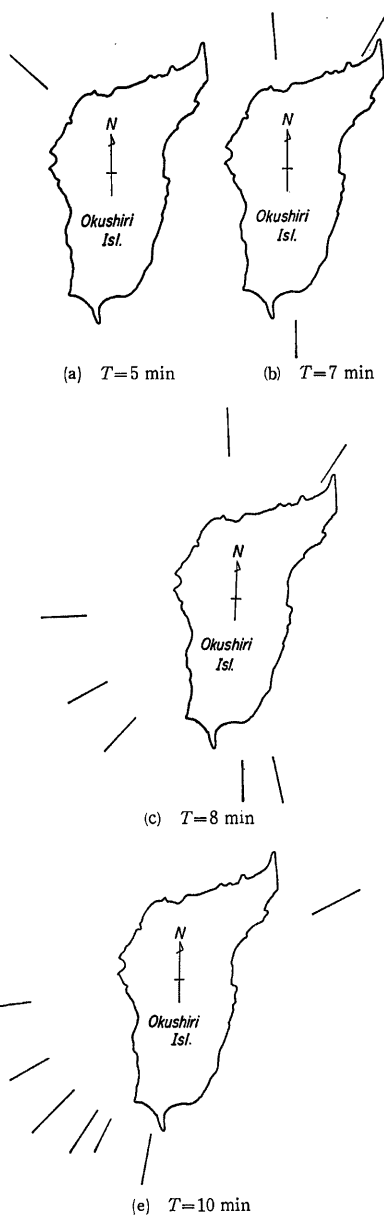


Fig. 26 Results of numerical calculation around Okujiri Island

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。

Fig. 27 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、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、0.5mにすぎない。

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した。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。湾水振動の可能性に関しては、調査結果と簡単な計算から、その可能性が少ないことがわかった。重栖については、その地形が複雑で簡単な解析ではわからない。

Fig. 27 の遡上高が2 m以上の場所とその高さを、**Fig. 24** と比較してみる。**Fig. 24** では、高い遡上高を示した地点は、島のほぼ北、北西、南である。周期 5 min の計算結果の傾向は、北西を除いてかなり異なる。

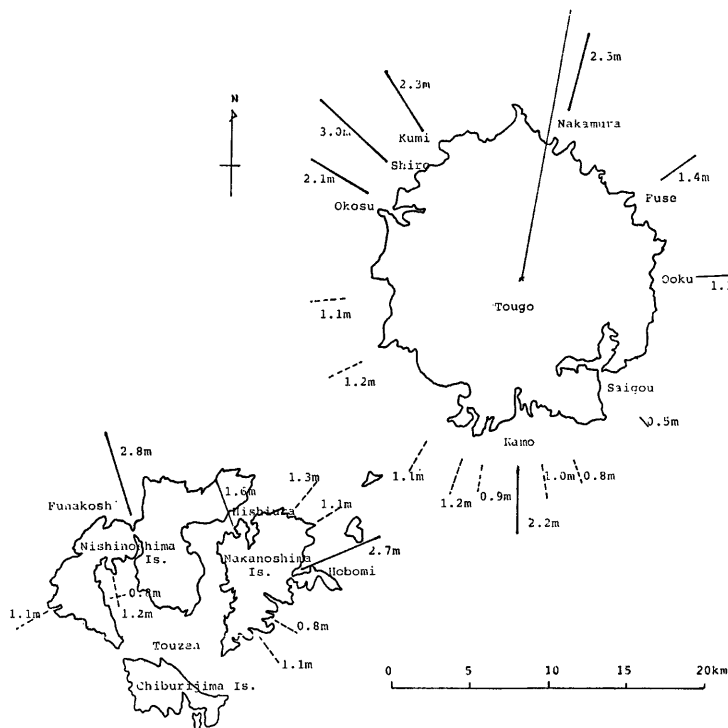


Fig. 27 Distribution of tsunami run-up height in Oki Island (datum; mean sea level)

り、北および南の高い遡上高が説明できない。6 min 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 min 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 min は、7 min とほぼ同様である。9 min の結果では、7 min および 8 min 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 min 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応する方向の東側で、実際とは異って波高が大きくなる点を除けば、周期が 7 min と 8 min 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 min、また運輸省の港研資料¹⁾では、スペクトル解析の結果で 7 min 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。

(2) 奥尻島

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¹⁰⁾である。Fig. 28 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⁷⁾でも記述があり、さらに運輸省港湾技術研究所資料¹¹⁾でも報告されている。Fig. 28 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), 7)によると、津波は最初の2, 3波が大きく、その周期は10 min 程度であった。

Fig. 26 と比較して明らかなように、周期 8～10 min の計算結果が Fig. 28 の痕跡高の分布に近い。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ことがわかる。

ここでは、隠岐の島後と奥尻島の被害調査で遡上高が高かった地点の島周辺に沿う分布の定性的傾向が、非線形項を含んだ長波の方程式の差分近似による数値計算によってほぼ説明しうることを示した。

しかしこの結論には重要な留意事項がある。すなわち、隠岐の島後の西郷湾における検潮記録から、日本海という閉じた水域の対岸からの津波の反射波の到達の可能性、島をとり囲む陸棚での津波のトラップの可能性が考えられるが、数値計算ではこれらの効果が考慮されていない。それにもかかわらず、島に沿う遡上高の分布の定性的傾向がこの数値計算によってほぼ説明しえたのは、天文潮の最高位の時刻が津波が到達してから数波目であったことによるのかもしれない。

今後閉じた水域の対岸からの反射波の存在や陸棚による波のトラップの現象も含めた島による津波の変形の現象を明らかにするとともに、その場合に実用的な数値計算が可能かどうかを検討する必要がある。

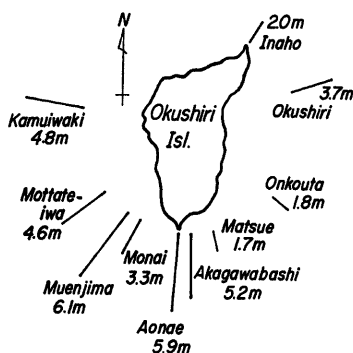


Fig. 28 Distribution of tsunami run-up height in Okushiri Island (datum; Tokyo Pile)^{7),10),12)}

Table 2 Victims, damaged houses and ships and

	Hokkaido	Aomori	Akita	Yamagata
Number of the dead*	4	17	83	—
Persons injured	24	25	265	—
Persons afflicted	162	6,045	14,916	—
Number of afflicted house-hold	48	1,374	3,957	—
Ruined house	5	447	1,132	—
Half-ruined houses	16	865	2,622	—
Partially ruined houses	69	3,018	2,867	—
Innundated above floor	27	62	65	—
Innundated under floor	28	152	277	—
Ruined cabins	29	2,582	2,621	—
Number of damaged ships and fishing boats	637	853	681	22

* Number of the dead by tsunami is 100.

5. 津波による災害

5.1 被害状況

Table 2 は日本海中部地震津波による各県別被害の一覧を示したものである。今回の被害の特徴は、1) 津波による人的被害が圧倒的に多く、かつ、死者のうち地元住民の死者数と他地区の住民の死者数との比がほぼ等しい、2) 震源地から遠く離れた能登半島や隠岐・島根半島で水産関係の津波災害が発生しているという2点があげられる。

まず、1)については、死者104名中、津波による死亡者が100名と圧倒的に多く、かつ **Table 3**¹²⁾ に示すように約50%の死者が地元民以外の人達であるという事実である。テレビニュースや新聞報道等で明らかにしているように、これらの犠牲者のほとんどが海岸あるいはその付近で遭難しており、三陸津波などのよ

Table 3 Number of the dead by tsunami¹²⁾

	Number of the dead (A)	Number of local resident in (A)	Number of persons on working in (A)
Noshi ro city	37	16	37
Oga city	22	5	5
Hachimori town	10	5	5
Minehama village	5	5	3
Hachiryu town	3	3	2
Akita city	2	2	0
Shiura village	6	4	0
Kodomari village	5	3	3
Ajigasawa town	3	2	3
Fukaura town	2	1	1
Iwasaki village	1	0	0
Okushiri town	2	1	1
Matsumae town	1	1	1
Kumaishi town	1	1	1
Sum	100	49	62

fishing boats in Nihonkai-Chubu Earthquake, 1983

Niigata	Ishikawa	Kyoto	Hyogo	Tottori	Shimane	Yamaguchi	Sum
—	—	—	—	—	—	—	104
2	3	—	—	—	5	—	324
—	25	—	—	—	330	—	21,478
—	5	—	—	—	139	—	5,523
—	—	—	—	—	—	—	1,584
—	2	—	—	—	—	—	3,505
—	—	—	—	—	—	—	5,954
—	3	—	—	—	141	—	298
2	3	3	—	—	277	—	742
—	1	10	—	—	103	—	5,346
40	34	25	27	4	319	9	2,651

うに津波が背後地をそ上した結果、住民が溺死するというパターンではない。具体的には、能代港の港湾工事関係者、魚釣りや遠足中のレジャー客や小学生が78名犠牲になっている。これらの人達は、いずれも人口密集地から離れた所で遭難していることが特徴である。このような情報伝達網のほとんど途切れた地区の住民に何如にして迅速・正確に情報を伝えるかという問題は今後ますます重要になっていく。ただ1つ改善方法として考えられるのは、津波による死者が出た地域はいずれも震度4以上の地震発生域であって、地震と津波との関係に対する日頃の知識があれば、かなりの程度死者数を減らせたと推定される。今回の災害では津波経験のない出稼ぎ労働者や山国の小学生が被災していることから、たとえ沿岸付近の住民だけでなく、日頃海に接しない住民に対しても津波に対する知識の普及をはかる必要性があらう。

つぎに、2)については、今回のような日本海全域に伝播した津波災害の例が過去になかったこともあって、とくに震源地から遠く離れた隠岐・島根半島の津波による被害を事前に予想することは困難であったといえる。ただし、1964年の新潟地震に際して、隠岐では軽微ながら被害が発生していた事実があり、すでに第2章で示したような津波の伝播特性が示されていたといえよう。秋田以南では船舶被害が多かった能登半島、丹後半島・若狭湾および隠岐・島根半島では、津波来襲時に漁業関係者はもとより地元住民が護岸や岸壁上で津波見物した人が多く、負傷者の大半は逃げる途中のものである。今回の津波の規模がもう少し大きければ、これらの地域でも人的被害が多数発生したと考えられ、津波に対する住民の対応にはあまり地域差がなかったといえそうである。

5.2 富山県以西沿岸における災害

富山県から山口県に至る日本海沿岸の各県で、一番被害の大きかったのは、Table 2 に示したように、島根県であり、石川県がこれにつづく。一方、被害が皆無かそれに近かったのは、富山、福井および山口県である。ただし、福井県所属の漁船が3隻、隠岐島で被災している。つぎに、各県別の被害の概要はつぎのようである。まず、石川県では、土木関係の被害はなく、後述するように津波情報の伝達とそれによる避難が円滑に行われたので、人的被害は負傷者3名、船舶被害は小型船で港外避難せず係留していたものが34隻に留まっている。これらの被害は、能登半島沿いに、珠洲、輪島、門前、富来、志賀で発生している。なお、水産関係の被害額のうち、刺網等の漁網被害が船舶被害に比べて約10倍も大きいのが注目される。

京都府では、被害総額は少ないものの、大半は舞鶴半島と丹後半島の周辺で発生している。京都府の場合、各漁業組合等への津波注意報の伝達は津波来襲前のかなり早い時期に行われていたが、警報ではなく注意報であったため、漁船の港外避難等の措置はほとんどとられなかったようである。したがって、漁船被害は野波や旭などの津波の波高が2m以上になった漁港で発生している。これら特定の地区で津波が集中したこと

は、浸水被害が石川県について多いことからわかる。兵庫県や鳥取県では、津波の波高も1～1.5m程度であり、かつ漁港の泊地の大きさが島根県や石川県のようにリアス式海岸の地形上の制約を受けないこともあって大きく、防波堤開口部から侵入する津波による港内水位の上下動速度がかなり緩和されたようである。このため、両県では大きな被害が発生しなかった。

島根県では、隠岐島と島根半島に被害が集中している。土木被害については、軽微ながら、離岸堤、防波堤および護岸の被災がそれぞれ1件ずつ報告されている。被害のほとんどは水産被害であって、漁船・漁具等の被害の発生した漁港では、ほとんどの場合、津波が物揚場を数10cm越流している。平均海面から物揚場の天端までは、一般に、1.5m前後であるので、これらの漁港では2m程度の津波が来襲したといえる。島根県の場合、津波情報の伝達と避難の問題は次節で述べることにして、被害の特徴はつぎのようである。すなわち、イカ釣りなどの夜釣りを中心に行っている漁港では、津波来襲時に港内に漁船を係留中であり、漁船被害が大きく、その逆のところでは、わずかに無動力船の被害に留まっているところもあり、操業方式が被害額を左右している。さらに、津波に対する漁船の避難方法の知識が普及しておらず、後述するように、単なる高波と考え舳網を岸壁に緊結したり、ほかの漁港に避難するなどの措置がとられたりした結果、むしろ被害を助長した側面も指摘されよう。

5.3 舳倉島、隠岐島における被害

今回の津波が舳倉島や隠岐島に集中したことは、すでに津波の伝播特性のところで指摘した。しかし、両島の津波の高さが3m程度とあまり変らなかったのに対し、被災の程度がかなり相違する。この主たる原因として、津波情報の伝達と避難の実態が違っていることが挙げられる。

舳倉島では、12時13分に発令された津波警報が津波来襲の約30分前に海上保安署から地元に伝えられ、漁港に停泊中の漁船はいち早く港外へ避難したといわれている。このため、水産被害は漁網の流失・破損が10隻分(約108ha)にとどまった。住宅被害については、海岸付近の非住宅が1棟全壊したほか、2戸の住宅が半壊している。津波の規模に比べて浸水を含めた住宅被害が少なかったのは、立地条件が幸いしたことによると考えられる。すなわち、港に沿って道路が走っており、その背後の傾斜地に住宅が集まっており、津波はこの道路上約1mにわたって遡上したが、住宅地にはほとんど侵入しなかったことが明らかになっている。傾斜地に住宅が建てられていたことが結果的に大被害を少なくしたといえよう。

一方、隠岐島では、震源から遠く離れていたにもかかわらず、大きな遡上高を示し、また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。

島根県西郷土木建築事務所の資料によると、9億円の内訳は、住宅被害が1.7億円(床上浸水152戸、床下浸水279戸)農業関係被害が0.7億円、土木関係被害が0.9億円、水産関係被害が4.2億円(漁船の流失・大破122隻、破損99隻、定置網・刺し網の流失・破損等)、商工関係被害が1.5億円となっている。

これからわかるように、船舶を含む水産施設および養殖魚類、貝類の被害がその半分以上を占めている。とくに漁船被害だけで3億円に達している。ほかには、漁船の衝突による橋梁の損壊、護岸等の破壊(西郷町中村漁港の離岸堤1基(74m)と五箇村の久見漁港の護岸(26m))、冠水による農作物被害が挙げられる。

漁船の被害は、とくに西郷町だけで2億円であり、その大半はFig. 27に示した中村漁港での被害である。中村漁港では、中村川を漁船の係留場所として利用しており、中村川を遡上した津波によって、係留した船の転覆、流失が続出し、また流失した漁船の衝突により橋梁が破壊された。重栖港でも、重栖川を遡上する津波によって、漁船が転覆、流失した。

5.4 津波情報と避難

すでに岡部ら¹³⁾は、今回の津波に伴う秋田県における情報伝達と避難行動に関して調査し、その中で幾つかの興味ある結果を報告している。ここでは、津波が集中した隠岐・島根半島と能登半島を対象として、津波情報と避難の実態を明らかにし、岡部らの結果と対比させながらそれらの問題点と改善策を検討する。

(1) 隠岐・島根半島における津波情報の伝達と避難の実態

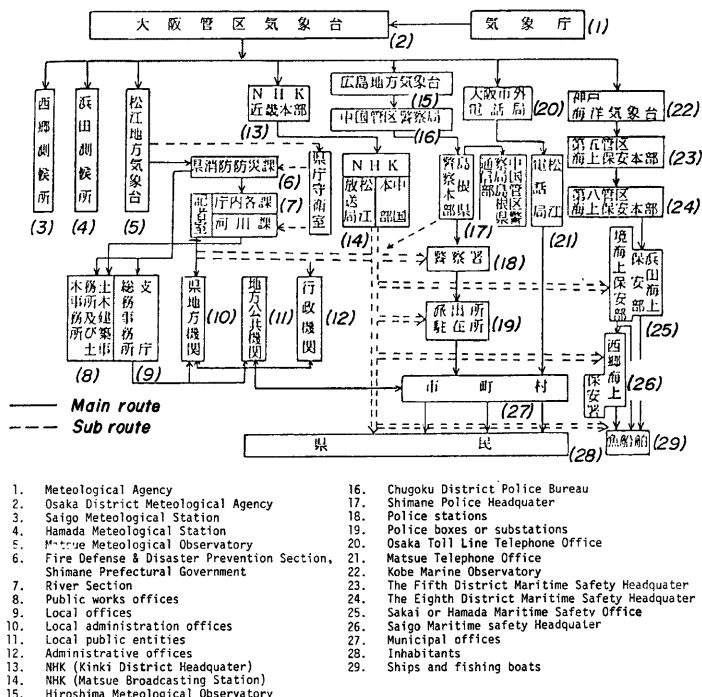


Fig. 29 Communcation route of tsunami warning in Shimane Prefecture

秋田、青森および北海道について漁船を中心とする水産関係の被害が多かった隠岐・島根半島について、津波情報の伝達と避難の問題をとりあげてみる。隠岐・島根半島は気象庁の第13区津波予報区に属し、津波情報は大阪管区気象台から松江地方気象台に伝達されることになっている。1983年5月26日13時45分、大阪管区気象台は津波注意報を発令し、松江地方気象台を経て、直通電話でほぼ同時に、島根県消防防災課にこの事実を伝えたといわれている。通報を受けた消防防災課では、庁舎内の防災行政無線を用いて、14時2分頃、県内7箇所の総務事務所と土木事務所等に通知した。市町村にはこれらの事務所より内容が伝達された。すでに、津波の伝播特性から明らかなように、これらの地方には14時前後に津波の第1波が来襲しており、そのためあって、市町村から各漁業組合への連絡が必ずしもうまくいかず、港内の異常水位に気がついた漁業関係者らの無線や電話による各個人への伝達が主であったようである。このほかにも、海上保安署から漁業組合への通報もあったといわれている。これらの伝達系統は Fig. 29 に示す改訂前の県地域防災計画¹⁴⁾に従ったものであり、この系統図に沿って初めて伝達された津波注意報であった。

(2) 能登半島における津波情報の伝達と避難の実態

すでに、Fig. 5 に示したように、前述した隠岐・島根半島のほかに津波が集中したところとして能登半島が挙げられる。両地区の規模がほぼ同じであるにもかかわらず、たとえば船舶被害については前者が319隻であるのに対し、後者はすべて5t未満の漁船であり、わずかに34隻を数えるにとどまっている。この差が生じた1つの原因として、津波情報の発令時刻とその避難方法によるものが考えられる。気象庁観測部地震課が新潟県から輪島に至る富山湾沿岸に津波警報を、さらに輪島より能登半島沿岸、越前海岸に津波注意

報を発令したのは、12時13分であり、輪島に津波の第1波が来襲した13時15分の約1時間前であった。これらの地域には、1964年の新潟地震時にやはり同様の警報と注意報が出されている。発令後10分から30分で各県庁より能登半島沿岸の市町村に津波情報が伝達され、また海上保安署や測候所からも同時にこれが伝えられたといわれている。たとえば、舢倉島では12時30分前後に津波の第1波が来襲し、この事情がフェリーボートの無線で輪島漁協に伝えられたために、約200隻の漁船が港外に避難し、被害が最小限に食い止められたといわれている。

(3) 津波の予報と情報伝達上の諸問題

現地における聞き込み調査とすでに示した津波の伝播特性を踏まえて、津波の予報と情報伝達上の問題点を明らかにするとともに、その改善方法を検討する。

(a) 日本海における津波の伝播特性の把握

すでに、Fig. 5 で示したように、今回の秋田沖の波源域から伝播した津波は、日本海海底地形に影響されて、能登半島や島根半島に集中し、かつ舢倉島や隠岐島でトラップされる特性が明らかになった。すでに、これまでに日本海で発生した海底地震の震源域の推定が行われているので、特定の波源域で発生した津波がどのような伝播特性をもつかは、今回行った数値計算によって推定することは可能であろう。すなわち、波源域の位置と津波がトラップされ、集中する場所との関係が見出せるはずである。このような関係があらかじめわかっておれば、津波の注意報や警報の発令の迅速化と精度の向上が十分期待できよう。1964年の新潟地震では、わずかに隠岐島の一部で津波による船舶被害と田畑の冠水が発生したのみで、津波が新潟から島根県沿岸に伝播したという事実は、それほど注目すべきこととして地元住民はもとより関係各方面には認識されなかったようである。津波の予報業務を行う際には、対象とする沿岸に来襲する津波の伝播特性を知ることがまず必要であろう。

(b) 津波情報の伝達システムの整備

津波情報の伝達に際して、管区気象台から発令された津波予報をいかに正確にかつ速やかに地元へ伝えるかが重要であろう。この場合、地元とは市町村役場ではなく、海に臨む集落、漁港や港および漁業協同組合を指す。Fig. 29 からわかるように、島根県の場合、県消防防災課から各市町村への情報伝達は途中2ヶ所で中継されている。改訂後の系統図では中継点はなくなっているので従前に比べて早く伝達されると期待される。しかし、島根県の場合地元の新聞によれば、町役場から沿岸集落への連絡は非常に遅かったり、極端な場合、連絡がなかったそうである。むしろ、テレビを見ていた漁業組合員や消防団員の個人的な活動が随分、被害を軽減したと考えられる。Fig. 30 は秋田県の場合の気象警報、津波警報の伝達ルートを示す。Figs. 29 と 30 を比べると、島根県の場合、一般的にかなり複雑な経路を経て情報が伝達されることがわかる。たとえば、漁船や漁業協同組合にまっ先に連絡が届くであろう海上保安部についてみると、秋田の場合、地方気象台から専用電話で直ちに通報されるのに対し、島根では、何故か神戸の海洋気象台、第5管区海上保安本部、舞鶴の第8管区海上保安本部を経由して、地元の海上保安部に通知されている。NHK や警察の場合も途中、広島が中継点に選ばれており、やはり情報伝達の遅れは避けられないだろう。もちろん、情報の多様な伝達ルートのあることが望ましいので、これらのルート上で中継点を減らす努力が必要であると思われる。また、これらの伝達ルートを使って津波注意報が流されたのは今回が初めてであり、防災の日等に実際に模擬情報を伝達し、その徹底について訓練すべきであろう。

(c) 津波に関する知識の普及

新聞報道によれば、広報体制の不備として、津波注意報の連絡遅れとともに地元住民の津波に関する知識が不足していたことが挙げられている。島根県に大被害を与えた津波としては、1026年の万寿の津波が指摘される。羽島¹⁵⁾によれば、日本海沿岸に来襲した津波は太平洋側に比べて結構多いようであるが、軽微なものが大半であって、この地方の住民にとって経験がなかったといっても過言ではないであろう。島根県の場合、聞き込み調査では、漁民の多くは津波とは具体的にどのような波か知らなかったのも、ともかく隣り合う船を舳舳と緊結したり、岸壁と結びついたりして、高波に対処しようとしたことがわかった。また、経験

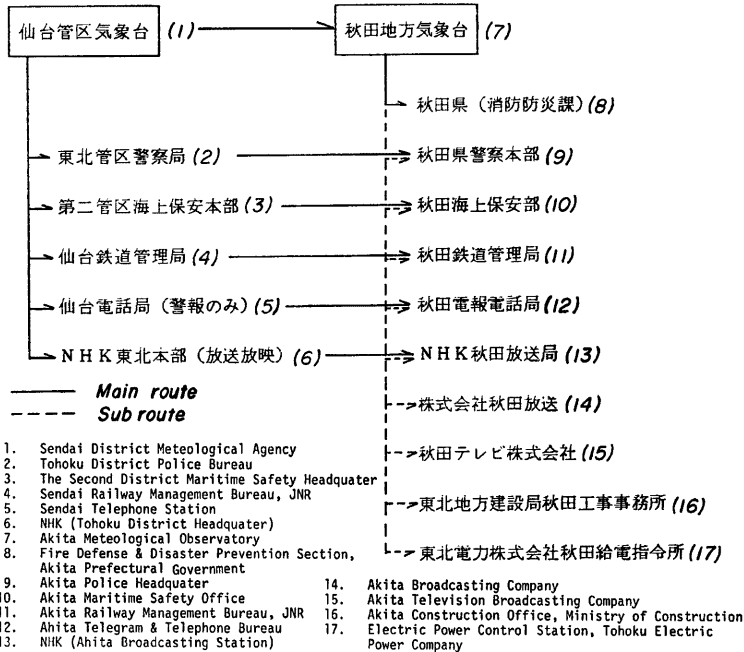


Fig. 30 Communication route of tsunami warning in Akita Prefecture

がなく、ただ海をながめているだけの人が多かったといわれている。調査した漁港のうち、漁船被害が少なかったのは、偶然出漁中だったためで、被害が多かったのは、イカ釣り等の夜釣り中心の漁港で、緊急のことゆえ漁船を動かす人手もなく、瞬時に被災したことが明らかになっている。

一方、岡部ら¹³⁾が実施したアンケート調査では、秋田県内で54%いた津波警報を聞いた人のうち、「津波がくるとは思わなかった」人が50%もあり、わずかに9.9%の人が「大きな被害をもたらす津波がくる」と思っているにすぎない。これらは、当日震度5を経験した住民の回答であることを考えると、震度1以下の島根県でこれ以上の対応を期待することは無理と考えられる。津波注意報が津波の来襲のかなり前に地元には到達した但馬海岸では、異常水位や津波を見るために、わざわざ岸壁に住民が集まり、来襲時にあわてて逃げた人が多かった事実はこのことを裏付けていよう。したがって、たとえば津波情報が地元市町村役場や漁業協同組合に届いたあと、つぎのことを実行する必要がある。(i) 防災無線や電話、あるいはサイレン等で住民に情報を徹底周知させる。(ii) 警報の場合は、あらかじめ決められた避難場所へすぐに移動する。(iii) 港内停泊中の漁船は港外のできるだけ水深の大きい海域へ退避する。(iv) 地震が発生したら、テレビやラジオをつけ、災害情報を正確に把握する。そのほか、地域に発生する可能性のある自然災害に対する的確な知識の普及を関係行政機関は啓蒙するべきであろう。

6. 結 語

日本海中部地震津波の伝播とそれに伴う幾つかの特徴的な現象を解析するとともに、その災害の実態について検討を加えた。今回、日本海沿岸各地の潮位観測網がほぼ完全に機能を発揮し、各地で津波の波形を記

録できたこともあいまって、これまでほとんど検討されなかった日本海における津波の挙動の特性がかなり明らかにできたと考えられる。とりわけ、これまで試行錯誤的に決められてきた津波の伝播計算における海底地形の与え方に1つの基準を示すことができたことや、KdV方程式の適用による陸棚上における津波のソリトンへの分裂および隠岐島や奥尻島への津波の集中の現象がかなりうまく説明できたといえよう。

つぎに、人的被害については、集落への津波の氾濫に伴う災害というより、むしろ海岸付近で仕事あるいは遠足や釣りを楽しんでいた人達の犠牲がほとんどであって、これまでの津波の警報・注意報の伝達や避難の対象のいわば盲点にあたるところで発生している。したがって、今後ますます増加するであろう海岸付近の一時的な停留者に対するきめの細かい情報提供をどのようにすればよいかなどについての問題が提起されよう。また、漁船被害からの教訓として、津波の特性についての基本的な知識の普及などが必要であり、これらのことから判断すれば、津波に対する防災教育は日常的に海に接して生活している人はもとより、そうでない人も対象にすべきことがわかる。

最後に、本研究を行うに当たり御協力をいただいた関係諸官庁に謝意を表明する。津波の伝播特性を検討するに当たり、海底地形の取扱について御指導いただいた工学部岩垣雄一教授に謝意を表明するとともに、本研究の一部は文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害調査(研究代表者乗富一雄, No 58022002)の補助金を受けて行われたものであることを明記し、津波調査グループ代表である東北大学工学部首藤伸夫教授の労に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・高山知司・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, 港湾技術資料, No. 470, 1983, p. 299.
- 2) 乗富一雄: 1983年日本海中部地震による災害の調査速報, 第20回自然災害科学総合シンポジウム, 1983, pp. 21-28.
- 3) 茂木昭夫: 日本近海海底地形誌—海底俯瞰図表, 東京大学出版会, 1977, 90p.
- 4) 土木学会東北支部日本海中部地震調査委員会: 日本海中部地震報告, 土木学会誌, Vol. 68, 1983, pp. 67-78.
- 5) 角谷典彦: 分散性媒質中の非線形波動—Korteweg de Vries 方程式を中心として—, Nagare, Vol. 3, No. 2, 1971, pp. 5-26.
- 6) 土屋義人・安田孝志: 浅海における波の変形—特に Soliton の発生について—, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 397-401.
- 7) 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. 113p.
- 8) Longuet-Higgins, M. S.: On the trapping of wave energy round islands, Jour. Fluid Mech., Vol. 29, 1967, pp. 781-821.
- 9) 土木学会編: 水理公式集, 昭和46年改訂版, 1971, pp. 564-565.
- 10) 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, 日本海洋学会秋季大会プログラム概要集, 1983, pp. 331-332.
- 11) 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, 1975, pp. 35-58.
- 12) 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, 国立防災科学技術センター, 1984, pp. 1-164.
- 13) 岡部慶三・田中二郎・藤崎 暹・寛 和夫・首藤伸夫・乗富一雄: 秋田県における情報伝達と避難行動, 1983年日本海中部地震による災害の調査速報, 自然災害科学総合シンポジウム, 1983, pp. 1-12.
- 14) 島根県防災会議: 島根県地域防災計画(震災編), 1983, pp. 1-60.
- 15) 羽鳥徳太郎: 日本海中部地震と歴史津波, 予防時報, 135, 1983, pp. 22-27.

TSUNAMIS CAUSED BY THE NIHONKAI-CHUBU
EARTHQUAKE, 1983 ; THEIR PROPAGATION
AND DISASTERS

By *Yoshito* TSUCHIYA, *Tetsuo* SAKAI, *Yoshiaki* KAWATA,
Shigehisa NAKAMURA, *Teruo* SHIBANO, *Hiroshi* YOSHIOKA,
Takao YAMASHITA and *Fumio* SHIMADA

Synopsis

On May 26, 1983, a great earthquake by which huge tsunamis were taken place occurred off Noshiro, Akita Prefecture in the Japan Sea. The tsunamis resulted in disasters along the coastal areas of the Japan Sea. Hundred persons were killed by the tsunamis, the breakwaters in Noshiro Harbour which are under construction were partially broken, and disasters of fishing boats were also taken place in many fishery harbours.

A research group for studying this disasters was organized by the Japanese Group for the Study of Natural Disaster Science to which a Grant-in-Aid in Natural Disasters has been given by the Ministry of Education, Science and Culture of Japan so that the authors' group surveyed disasters in the coastal areas between Toyama and Shimane Prefectures. In this report, some characteristics of the tsunamis such as their spectra, propagation around the Japan Sea and deformation on shelf and around isands are first investigated both by numerical simulations of tsunami propagation and spectral analysis of tidal records. Disasters in the areas and energy concentration of the tsunamis are secondly studied in relation to the announcement of necessary refuge warning which was taken at the disasters.