

平成5年北海道南西沖地震の沖合津波波形

永井紀彦* ・菅原一晃** ・橋本典明***
浅井 正**** ・東山 茂***** ・戸田和彦*****

1. はじめに

平成5年7月12日22:17に発生した北海道南西沖地震に伴う津波は、日本海を広く伝播し沿岸に大きな被害をもたらした。この津波の実態を解明することは、今後の津波に対する防災対策を検討する上で重要な課題である。

検潮井戸における津波波形記録は、導水管を通過した観測値であるため、いわば、ローパスフィルターを通った波形である。このため、津波の観測は沖合波浪計を有効に活用すべきであることが、指摘されていた。

本報告は、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の沖合波浪計が取得した波形記録を示し、その特性を検討したものである（永井ら1993b）。

2. ナウファスの波浪観測

運輸省港湾局、各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局および港湾技術研究所は、協力して全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS）を構築し、20年以上にもわたって継続的に我国の沿岸域における波浪観測を実施し、その成果を、毎年の波浪観測年報（永井ら1994）、波浪観測資料（運輸省港湾局1993a；運輸省港湾局1993b）、および長期統計報（永井ら1993a）などに報告している。

ナウファスは、2時間毎に20分間の波形記録取得を原則としているため、過去の津波波形記録としては、日本海中部地震時の深浦における1983年5月26日11:50-12:10の記録が唯一のものであった（谷本ら1983）。しかし、その後、①観測地点数（特に波向観測点）の増加、

②データ即時通信システムの普及、等の改良が精力的に行われたため、今回、図-1に示す観測地点中、表-1に示す地点における津波波形記録の測得に成功した。

3. 津波観測地点と解析対象時

表-1は、各観測地点および観測時刻における観測波形の、長周期の変動の諸元別最大値をとりまとめたものである。風波による変動を取り除くため、0.5秒毎に取得されている生データに対して、プラスマイナス10秒の三角形型数値フィルターをかけて解析した結果を示した。

超音波式波高計（USW）による水位変動 η は、各観測時毎の20分間に記録された水位の最大値と最小値の差を意味している（m単位）。水圧変動 P も、長周期波においては水位変動分がそのまま圧力変動として現れるため、水位変動と同様に水位の最大値と最小値の差を意味している（m単位）。また、波向計（CWD）による水平2成分流速のデータは、観測時間20分の間に記録された流速の絶対値の最大値 U （m/s単位）と、その時の流向 θ

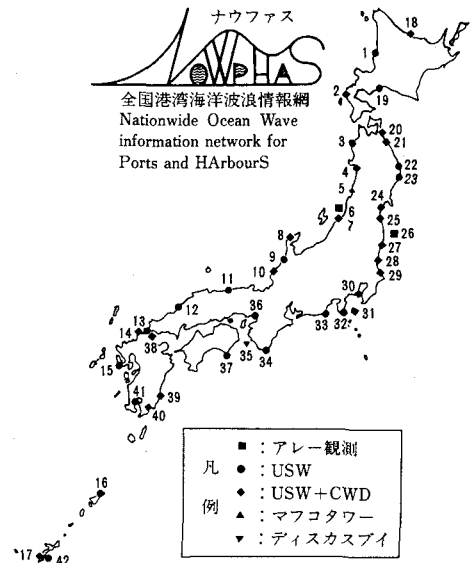


図-1 全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）

* 正会員	運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室長
** 正会員	運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官
*** 正会員 工博	運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室長
**** 正会員 工修	前運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室 現運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室
***** 正会員	運輸省港湾局技術課補佐官
***** 正会員 工修	前(財)沿岸開発技術研究センター主任研究員 現福島県土木部空港建設課長

表一 長周期波観測結果の諸元別最大値一覧表 (観測地点番号は図一に対応)

観測地点	設置水深	項目	7/12 22:00	7/13 0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	最大
1. 留萌	50.0 m	η	0.12	—	0.23	0.40	0.18	0.25	0.33	0.20	0.20	0.41	0.15	0.37	—	0.16	0.41
18. 紋別	18.0 m	η	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.12	0.10	0.12
	52.0 m	U	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
3. 深浦	49.6 m	θ	NW	ESE	ESE	ESE	SSE	SE	NNW	SE	NNW	NE	ESE	WNW	SE	WSW	ESE
		η	0.03	0.55	—	—	—	0.25	—	—	—	0.23	—	—	—	0.30	0.55
4. 秋田	29.5 m	η	0.06	0.17	0.26	0.34	0.38	0.25	0.28	0.29	0.18	0.20	0.24	0.21	0.20	0.20	0.38
		P	0.02	0.17	0.27	0.33	0.39	0.26	0.27	0.29	0.16	0.20	0.25	0.21	0.19	0.19	0.39
		U	0.03	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.09	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09
		θ	S	WSW	E	E	ESE	E	NW	SW	ESE	WNW	E	WSW	WSW	E	SW
5. 酒田	45.0 m	η	0.07	0.28	—	—	—	0.26	—	—	—	0.28	—	—	—	0.15	0.28
6. 新潟沖	35.0 m	η	0.14	0.39	—	—	—	0.32	—	—	—	0.21	—	—	—	0.16	0.39
		U	0.03	0.14	—	—	—	0.15	—	—	—	0.06	—	—	—	0.05	0.15
		θ	WSW	NW	—	—	—	SE	—	—	—	NNW	—	—	—	NNW	SE
		P	0.14	0.45	—	—	—	0.42	—	—	—	0.22	—	—	—	0.23	0.45
8. 輪島	50.0 m	η	0.04	0.87	0.62	0.40	0.27	0.16	0.37	0.27	0.24	0.24	0.21	0.26	0.16	0.37	0.87
	27.0 m	U	0.02	0.35	0.29	0.17	0.19	0.23	0.16	0.23	0.13	0.09	0.10	0.12	0.07	0.15	0.35
		θ	SE	NW	NNW	N	NNW	NNW	S	NNW	NNW	SSE	NW	N	N	NNW	NW
10. 福井	21.3 m	η	0.05	0.31	—	—	—	0.40	—	—	—	0.28	—	—	—	0.29	0.40
		U	0.02	0.06	—	—	—	0.13	—	—	—	0.08	—	—	—	0.05	0.13
		θ	SW	WSW	—	—	—	WNW	—	—	—	ESE	—	—	—	E	WNW
12. 浜田	51.0 m	η	0.08	0.06	—	—	—	0.21	—	—	—	0.15	—	—	—	0.11	0.21

超音波波高計 η : $\eta_{max} - \eta_{min}$ (m), 水圧式波高計 P : $P_{max} - P_{min}$, 超音波流速計 U : U_{max} (m/s), 流向 θ : U_{max} 時(16方位)

(16方位表示)に整理して示している。

本報告中では表一に加えて、秋田県港湾課から提供を受けた、能代港沖合水深25.5m地点のUSWによる波形記録も用いている。ここでは地震発生直後22:56に波高計の観測を連続観測に切り替えたため、第1波来襲前から翌朝に至るまで、連続した津波波形記録が、紙送り速度0.5mm/sの記録紙に残されていた。また、沖合波形記録と港内の検潮記録の比較を行うための検潮記録は第一港湾建設局新潟調査設計事務所から提供を受けた。

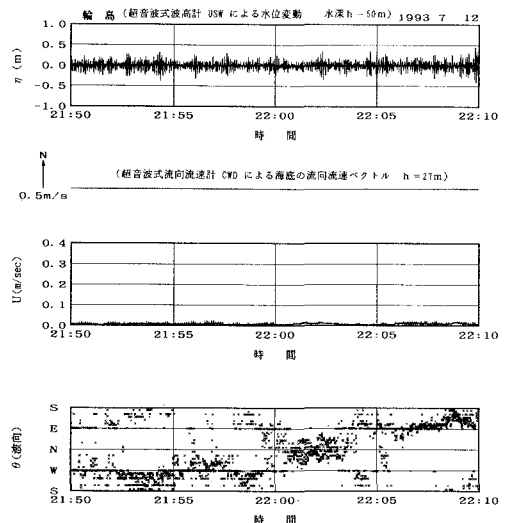
表一の右には、地点別の各項目の最大値を表示しており、表からわかるように、最も顕著な津波波形を観測したのは、輪島であった。能登半島の最北に位置する輪島は、地震の震源からは遠く離れてはいるものの、能登半島を取り囲む大陸棚のために、津波を屈折させて、津波のエネルギーを集中させやすい地形となっている。

4. 沖合津波波形記録の例

図二および図三は、それぞれ津波来襲前後の輪島における観測波形を表示したものである。上から順に、水位変動 η (m), 流向流速のベクトル表示 (上向きが北に向かった流れ), 流速の絶対値 U (m/s), 流向 θ (流れの上流側の方向) を示している。図中には、プラスマイナス10秒間の三角形型数値フィルターをかけた長周期波形記録も太線であわせて表示した。

図二においては、長周期変動はほとんど見られないが、図三では、対照的に顕著な長周期変動が明確にあらわれており、津波波形を捉えている。輪島港における検潮記録によると、23:50ごろ津波の第1波が到達した模様であるので、津波の初期に近い波形が取得できているものと考えられる。

図三では、秒速0.3m/s以上の顕著な水平流速が2



図二 輪島における波形記録 (津波来襲前)

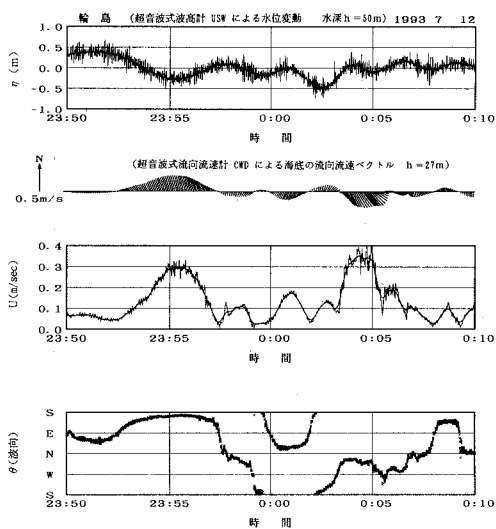


図-4 福井における波形記録 (津波来襲直後)

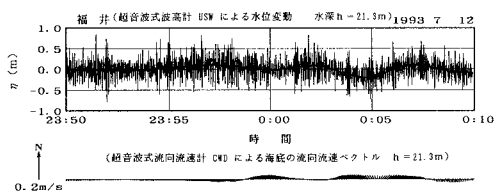


図-3 輪島における波形記録 (津波来襲後)

回、現れている。はじめのピークは 23:56 頃発生しており、流れの向きは S 方向となっている。輪島港周辺の海岸線は東西方向にのみ南側が陸となっており、また、この時の水位は平均水位よりも低く極小値を示しているので、津波の谷であったことがわかる。

一方、0:04 頃発生しているピークの流れの向きは、N 方向となっており押し波である。水位に顕著な極大値が見られないのは、陸からの津波の反射波の影響がすでに現れているためと考えられる。波浪観測地点から海岸線までの距離は約 3 km であり、平均水深を約 20 m と仮定すると、200 秒強で津波は波浪観測地点から海岸線に届くものと推定される。引き波と押し波の時間差の 2 倍を津波の周期と考えれば、津波の周期は約 960 秒程度と推定され、この 200 秒強という時間は、津波周期の約 4 分の 1 に相当する。すなわち、波浪観測地点では、入射してくる津波と海岸線で反射される津波が重複波を形成すると仮定すれば、重複波の節の近傍となり、水平流速は大きくなる一方で、水位変動はあまり顕著にならない。

図-4 は、福井における波形記録を示したものである。水位変動および流向流速ベクトルの形状、さらには福井港検潮記録における津波の到達状況から判断して、津波

の第 1 波の波形が記録中にあらわれているものと考えられる。第 1 波は、23:55 ごろから 23:59 ごろにかけて、 η が 10 cm ほど上昇しているのと同時に北西から南東に向かっての沖から岸に向う流れが観測されているので、輪島における波形記録と同様に、弱い押し波から津波がはじまった模様である。

5. 津波波形に関する検討

5.1 水位変動と水圧変動

図-5 は、秋田における津波来襲前後の水位変動 η と海底面における水圧変動 P との関係を示したものである。水圧変動 P は、海水の単位体積重量を考慮して水頭差 (m) に換算した値を表示しているため η と P は同じ m 単位となっている。それぞれの 20 分間の観測において、0.5 秒毎の各観測時におけるプラスマイナス 10 秒間の三角数値フィルターをかけた後の η と P とのそれぞれの長周期波成分をプロットしており、長波の微小振幅理論上の関係式 $\eta = P$ の線もあわせて表示している。

津波来襲前は、 η 、 P とともにほとんど原点付近にデータが集中しており、長周期成分の変動はほとんど見られていない。他方、津波来襲後は、両者の関係は $\eta = P$ の直線によくのっており、長波の微小振幅波理論がほぼ成り立っていることを意味している。

5.2 水位変動と水平流速

図-6 は、表-1 に示された各観測地点・観測時における η と U の関係を図化したものである。縦軸には観測時間 20 分間の間の最大流速をとり、横軸には η の値から進行波としての長波の微小振幅波理論から計算される水平流速の値をとっている。

津波が進行波としての長波の微小振幅波理論で示される波形を有していれば図中の 45° の傾きを持った太線の直線上にデータはプロットされるはずであるが、各観測地点ごとに、あるいは各観測時ごとに太線の上下方向にデータは大きくばらついている。これは、今回観測された津波の波形は、重複波としての性質を有していることから説明できるものと考えられる。すなわち、重複波の腹では $U = 0$ なので傾きは 0 となり、節では $\eta = 0$ なので傾きは無限大となる。したがって、輪島や新潟沖では

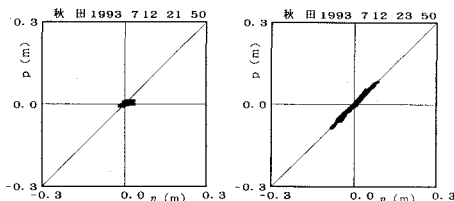


図-5 水位変動と水圧変動の比較 (秋田)

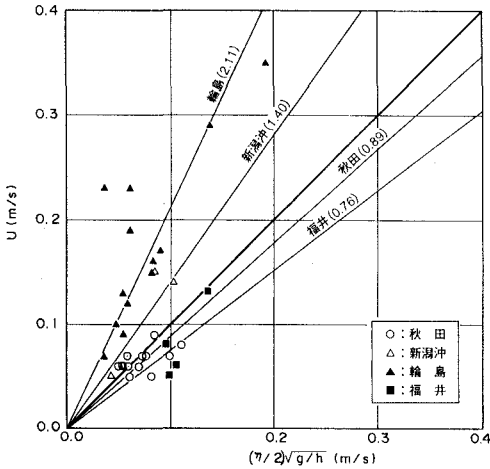


図-6 水位変動と水平流速の比較 (輪島)

重複波の節に近く、福井では腹に近い波形の性質であったことがわかるが、このことは、各観測地点周辺の地形条件によく対応している (永井ら1993b)。

ただし、輪島では他の観測地点とは異なり、 η と U の測定水深が、それぞれ50m、27mと異なっていることに注意を要する。水深27mにおける流速は、50m地点より浅水変形の影響でより速くなると考えられるからである。 U は η と $h^{-1/2}$ の積に比例し、かつ、 η はグリーンの式から $h^{-1/4}$ に比例すると仮定すれば、結局、 U は $h^{-3/4}$ に比例するので、 $h=27$ mにおける U は $h=50$ mにおける U の1.58倍になると計算される。したがって、輪島における横軸と縦軸の比例係数2.11は水深の差による影響と考えられる1.58で除して、1.34と評価する方がより適切であると思われる。

5.3 海底水粒子の水平運動

図-7は、津波来襲前後の輪島における海底水粒子の

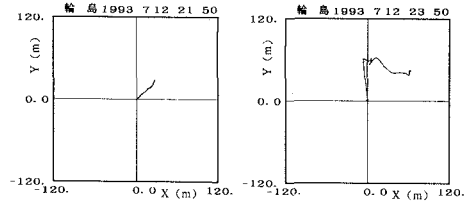


図-7 海底水粒子の水平運動軌跡 (輪島補正前)

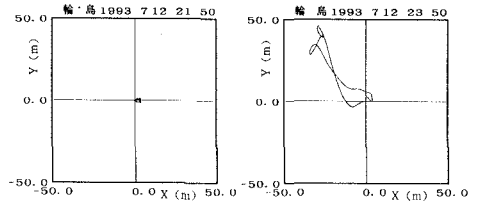


図-8 海底水粒子の水平運動軌跡 (輪島補正後)

水平運動を示したものであり、各観測開始時刻における位置を原点にとり、 X 方向 (東を正とする方向) および Y 方向 (北を正とする方向) それぞれについて、流速の値を時間積分して求めた水粒子の変位を示したものである。すなわち、20分間の各観測において、水粒子の初期位置が原点であり、20分間の間に図に示すような水平変位の軌跡を描いたことを意味している。

地震発生前の図を見ると、右上の方向に、すなわちNE方向に向かう定常的な流れが存在していることがわかる。20分間における移動距離は約40mであるので、この定常的な流れの流速は約3cm/sである。津波到達後の図でもやはり定常的な流れの存在が示唆されている。

図-8は、前述した定常的な流れを取り除き、観測開始時刻と同じ位置に20分後に水粒子が戻ると仮定して閉じた曲線を描いたものである。これらの図から、津波は

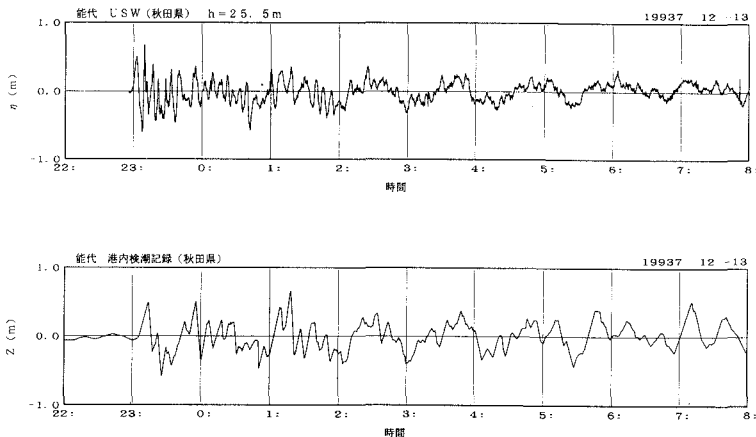


図-9 沖合波形記録と港内検潮記録 (能代)

通常の波浪に比べて非常に周期の長い波であるため、海底の水粒子は数10mにも及ぶ大きな振幅の水平運動をしていることがわかる。

5.4 沖合波形記録と港内検潮記録

図-9は、秋田県港湾課から提供を受けた能代港における沖合い波高計記録の長周期成分と港内検潮記録を、比較したものである。

上下の波形は、大きく異なったものとなっており、沖合記録に見られる周期5分程度以下の変動成分は検潮記録には現れていない。これは、検潮記録は導水管を経て短周期成分を取り除いた、いわばローパスフィルターをかけた記録となっていることに起因する。しかし、1時間程度の比較的周期の長い波形成分が、両者の記録に共通してあらわれており、この長周期変動成分に限って両者を比較すれば両者はよく対応していることがわかる。

この1時間程度の長周期変動成分の原因は明らかではないが、海底地形や海岸線形状によって、日本海全域に数多く発生したであろうと考えられる津波の重複波の1つのモードによるものである可能性が高いと考えられる。

6. おわりに

本報告では、ナウファスが捉えた平成5年北海道南西沖地震津波の波形記録を示し、検討を行った。しかし、今回の報告で、沖合における津波波形が十分に解明されたとは、まだ結論づけることはできない。

津波に代表される長周期波は定常的なものではないために、ナウファスの2時間毎の各観測の間に100分間も休止時間があつては長周期波の把握は困難である。津波来襲時ばかりではなく常時においても、長周期波の存在は、港内係留船舶の動揺に大きく影響を与えていることが認識されつつあり、沖合における長周期波特性の解明は、今後の重要な課題となっている。このため、現在、

連続観測実施のための新しいシステム開発に、関係各方面の協力を得て、取り組んでいるところである。

ナウファスは、運輸省港湾局、各港湾建設局、北海道開発局、沖繩総合事務局および港湾技術研究所の数多くの関係者により構築され運営されている。本報告のとりまとめにあたっては、秋田県港湾課からデータの提供を受け、また、(財)沿岸開発技術研究センター、(株)エコー、沿岸海洋調査(株)および(株)カイジョーのナウファスデータ解析担当チームの皆様方のご助力をいただいた。改めてここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局監修/(財)沿岸開発技術研究センター発行 (1993a): 全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS 1991), 825 p.
- 運輸省港湾局監修/(財)沿岸開発技術研究センター発行 (1993b): 全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS 1992), 836 p.
- 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): 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, 299 p.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 (1993b): 平成5年北海道南西沖地震津波波形解析速報, 港研報告第32巻第4号, pp. 49-95.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 (1993a): 全国港湾海洋波浪観測20か年統計 (NOWPHAS 1970~1989), 港湾技研資料 No. 744, 247 p.
- この他3か年統計, 5か年統計, 10か年統計, 15か年統計は, それぞれ, 港湾技研資料 No. 208, No. 234, No. 401, No. 554を参照。
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 (1994): 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1992), 港湾技研資料 No. 770, 301 p.
- この他1970年から1991年までの波浪観測年報は, それぞれ, 港湾技研資料 No. 137, No. 158, No. 178, No. 209, No. 233, No. 258, No. 282, No. 311, No. 332, No. 373, No. 417, No. 445, No. 480, No. 517, No. 545, No. 574, No. 612, No. 642, No. 666, No. 712, No. 721, No. 745を参照。