

現地観測データに基づく平成6年北海道東方沖地震津波の特性

永井紀彦* ・橋本典明** ・平石哲也*** ・清水勝義****
 市川武***** ・宮部秀一***** ・久高将信***** ・川俣 奨*****

1. はじめに

津波の実態解明は、将来発生し得る津波に備えた防災対策を検討する上で、緊急かつ重要な課題である(谷本ら, 1983, 高山ら, 1994)。平成6年10月4日22時32分に発生した北海道東方沖地震にあたって、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 (永井, 1993, Nagai et al., 1994)) 沖合波浪計および港内検潮所が、平成5年北海道南西沖地震津波に関して報告したよりも(永井ら, 1993, 永井ら, 1994)、さらに詳細に津波波形を捉えることができたので、その解析結果とあわせてここに報告する。(永井ら, 1995, Nagai et al., 1995)

2. 観測津波波形の概要

苫小牧, むつ小川原, 八戸, 大船渡の各港沖合および波崎観測機橋先端における波浪観測記録, および北海道と本州東北部沿岸における各港港内検潮記録を収集し解析した。これらの観測地点では連続観測がおこなわれていたため、地震発生前の22:00から翌日の6:00までの観測記録を検討対象とした。

苫小牧および波崎における観測記録は0.5秒間隔でデジタル化されていたものを用いた。他の記録は、ローパスフィルターを経たアナログ記録紙上に、紙送り速度2cm/時で記録されていたため、0.2mm(36秒)毎に数値化整理した。特に、むつ小川原港では、沖合水位変動および流向流速記録と港内検潮記録の同時取得に成功した。

観測津波波形記録から潮位変動分を除去した後、ゼロアップクロス法で定義される津波の波高と周期を求めた

結果を図-1に示す。観測された最大津波偏差は、第1波によるものではないが、沖合波浪高計記録では八戸港沖(水深24m)で5日1:58に+61cm, 港内検潮記録では久慈港検潮所で1:46に+138cmであった。津波の周期は、測地点毎に若干異なる値を示したものの、平均値は40分程度となっており、M8.1という巨大地震の津波波源域

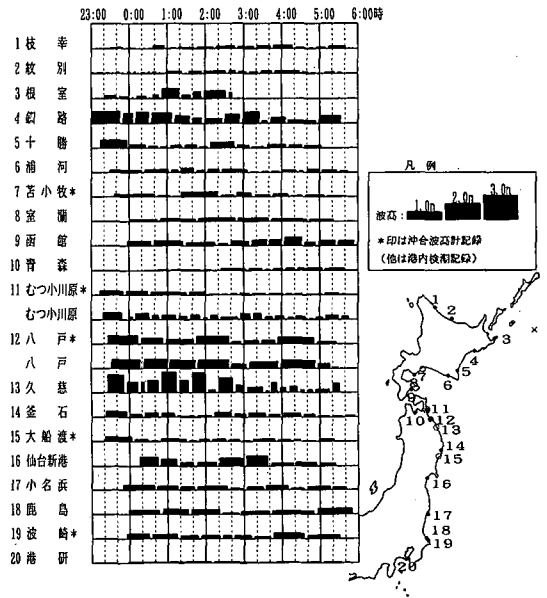


図-1 津波波高・周期の経時変化

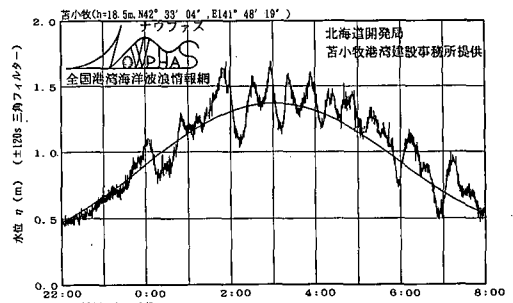


図-2 苫小牧港沖合津波観測記録

- * 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長
- ** 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 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
- **** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
- ***** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長
- ***** 正会員 北海道開発局港湾部港湾建設係長
- ***** 正会員 (株)エコー 波浪プロジェクト室長
- ***** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

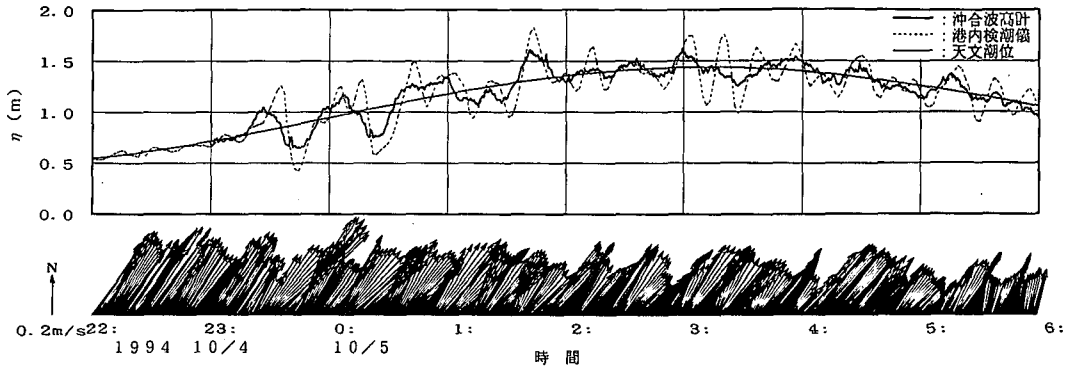


図-3 むつ小川原港波高計・検潮儀・流速計記録

の大きさを示す、極めて周期の長い津波であったことが確認された。

3. 観測された津波波形の解析結果

(1) 津波波形記録

図-2は、苫小牧港沖合波高計(超音波式:設置水深18m)が捉えた津波波形を示したものである。有義波高3mにもおよぶ周期の比較的短い風波の影響を除去するため、水位変動記録に対して±120秒間の三角数値フィルターを与えて作図を行った。22時から翌日の6時にかけて長周期水位変動の中心線がゆっくり変化しているのは、潮汐の影響によるものである。津波波形は23:40頃の水位上昇(押し)から現れている。津波の高さは夜間を通じてあまり減衰せずに、午前4時頃まで両振幅50cmとなっている。ゼロアップクロス法で定義される津波の周期は極めて長く、30から60分程度である。

図-3は、むつ小川原港沖合の波高計(超音波式:設置水深49m)、流速計(設置水深27.8m)、および港内検潮記録であり、ローパスフィルターをかけたアナログ記録紙の連続波形記録を再整理したものである。流れの記録の中では、津波によるものとは考えにくい周期が長く変化がゆっくりとした秒速30-40cm程度の成分が顕著に現れているが、以下には、潮位変動や平均的な流れの影響を取り除いた後の波形解析結果を示す。

(2) 周波数スペクトル

図-4は、むつ小川原港における沖合波高計記録と港内検潮記録の周波数スペクトルを重ねて図化したものであり、両者の比である応答関数も下段に示している。さらに、その後発生した1994年12月28日の三陸はるか沖地震津波についても、周波数スペクトルと応答関数を示している。スペクトルの計算にあたっては、図-3に示す8時間の観測記録を36秒間隔でデジタル化した波形記録を直接フーリエ変換した。

北海道東方沖地震津波の場合、沖合波高計・港内検潮

所とも0.0002 Hz(約80分)から0.0013 Hz(約13分)の間の周波数でエネルギーのピークが現れており、図-1で求められた津波周期とよい対応を示している。スペクトルのピークはなだらかであり、上記の周波数帯に広く津波エネルギーが分布している状況が理解される。

一方、三陸はるか沖地震津波では、0.001 Hz(約17分)よりも高周波数側では、津波のエネルギーは北海道東方沖地震津波とほぼ同じオーダーとなっているものの、それより低周波数側におけるピークは存在しておらず、全体としての津波のエネルギーが小さくなっている。

沖合波高計記録と港内検潮記録のスペクトル応答関数は2つの津波でほぼ一致しているが、このことは、非定常な津波波形であってもスペクトル解析が可能であり、結果には妥当性があることを間接的に検証している。

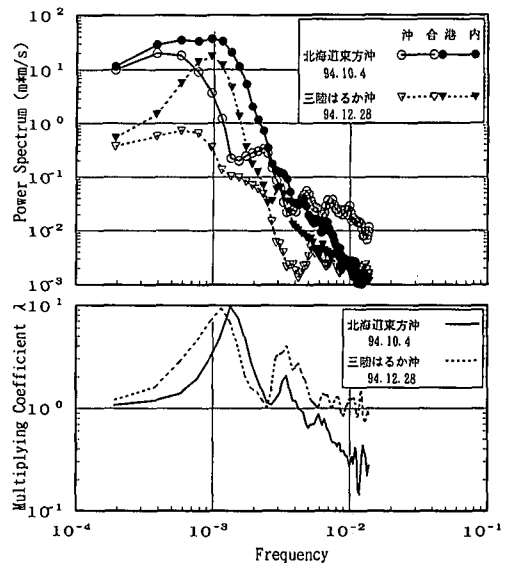


図-4 波高計・検潮儀の周波数応答スペクトル

(3) スペクトルの相関

図-5はむつ小川原港における沖合波高計記録と港内検潮記録の周波数スペクトルの相関を、図-6は波高計と水平2成分流速計との相関を、それぞれ図化したものである。対角線上の図はそれぞれの記録の周波数スペクトルを、右上の図はコヒーレンス(相互相関の強さ)を、左下の図は位相角の差を示している。

図-5のコヒーレンスの値は、0.001 Hz (約17分)よりも低周波数側では周波数が低くなるほどコヒーレンスの値が大きくなり、0.0006 Hz (約28分)より低周波数側では1.0に近い値となっている。位相角の変化もコヒーレンスに対応しており、周波数の減少とともに位相角は0°に漸近している。図-6の波高記録と流速記録のコ

ヒーレンスは、東西・南北両方向とも0.0003 Hz (約56分)から0.0006 Hz (約28分)にかけての周波数帯でピークを示し、ピークの値は、東西方向流速に対して約0.8、南北方向流速に対して約0.5となっている。東西方向の流速と波高の位相角差は、0.001 Hz (約17分)より低周波数側ではほぼ90°の一定値である。

(4) 沖合における水位変動と流速との関係

図-7は、津波到達初期におけるむつ小川原港における沖合波高計による水位変動 η と、流速 u (ここでは東西方向のみを考え、岸向きすなわち西向きの流れを正としている)との関係をとりまとめたものである。図中の斜線は、波高計と流速計との水深差を考慮した進行長波の微小振幅波理論から推定される両者の関係である。

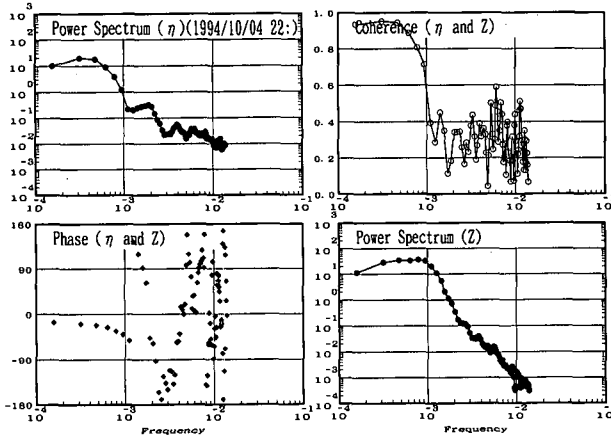


図-5 波高計・検潮儀のスペクトル相関

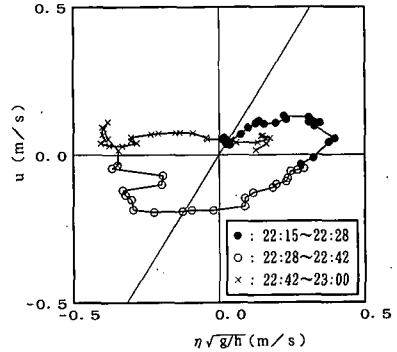


図-7 むつ小川原港沖合の η と U の関係

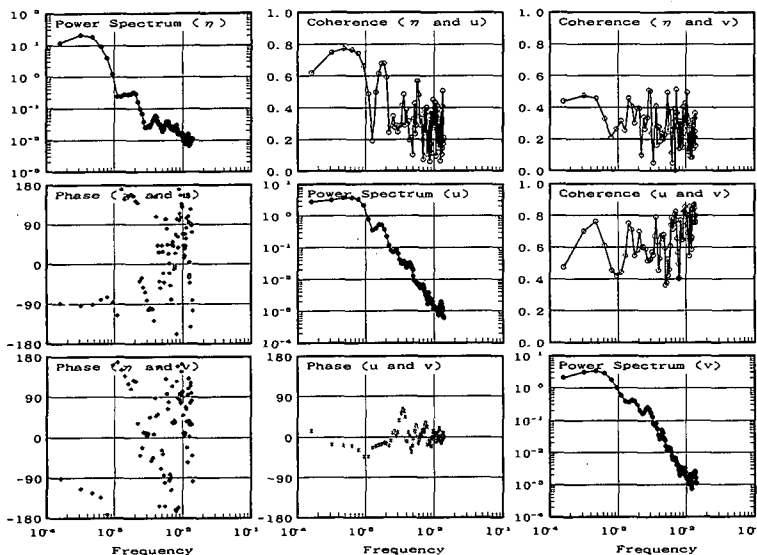


図-6 波高計・流速計のスペクトル相関

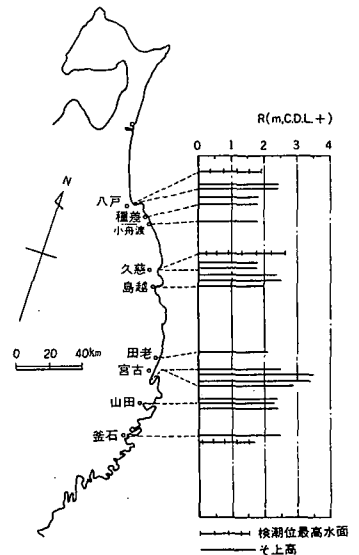


図-8 遼上高調査記録

表一 津波の断層モデル (東北大 DCRC-3b モデル)

北緯	東経	長さ	幅	走行	傾斜角	滑り角	深さ	変位
43.210°	146.120°	140 km	70 km	52°	77°	128°	30 km	7.62 m

表二 津波初動時刻と最高水位 (実測結果と計算値)

観測地点		水深	初動時刻	第1波 最高水位	第1波 記録時刻
釧路	計算値	14.0 m	22:53	64 cm	23:10
	港内検潮儀		23:02	63 cm	23:17
苫小牧	計算値	13.5 m	23:37	28 cm	23:51
	沖合波高計	18.5 m	23:37	16 cm	24:01
むつ小川原	計算値	8.0 m	23:18	42 cm	23:31
	沖合波高計	49.0 m	23:13	24 cm	23:26
	港内検潮儀		23:19	43 cm	23:35
八戸	計算値	26.4 m	23:26	51 cm	23:38
	沖合波高計	24.0 m	23:26	46 cm	23:36
	港内検潮儀		23:32	47 cm	23:42
大船渡	計算値	12.2 m	23:29	61 cm	23:42
	沖合波高計	19.0 m	23:22	34 cm	23:35
小名浜	計算値	3.3 m	23:51	32 cm	24:05
	港内検潮儀		23:50	33 cm	24:02
鹿島	計算値	3.0 m	23:56	37 cm	24:11
	港内検潮儀		23:59	20 cm	24:10
波崎	計算値	1.0 m	23:53	38 cm	24:08
	超音波波高計	4.4 m	23:55	26 cm	24:03

到達直後の津波は進行長波であるため斜線右上がりになり η と u は推移するが、間もなく海岸からの反射の影響で、重複波の腹に近い性質を示すようになり、斜線よりも横軸上に近づく、すなわち η に比べて u が小さくなっていく状況が理解できる。

4. 津波遡上高現地調査結果との比較

図-8に、1994年10月11日から3日間にわたり八戸～釜石の海岸部について、ヒアリング調査を中心に現地遡上高調査を行った結果と観測記録との比較を示すが、両者の間に大きな差はないことがわかる。これは、北海道東方沖地震津波の周期は長く、検潮井戸の応答特性の問題が生じなかったためであると考えられる。

5. 津波伝播数値シミュレーションとの比較

(1) 計算方法と計算条件

計算モデルは線形長波理論を用いた。(Aida, 1962) 計算格子間隔は3000 m、時間間隔は6秒、沖側境界条件は自由透過、岸側境界条件は鉛直壁としてある。

初期条件となる波源モデルには表-1に示す東北大学災害制御研究センター発表のDCRC-3bモデルを用いた。

(2) 太平洋上伝播特性

図-9は数値計算によって得られた最高水位分布を示したものである。津波の大きなエネルギーを有する断層の短軸方向成分のうち、北西へ向かったものは色丹、国後、択捉の3島に到達して多重反射やエネルギーのトラップ等により波高の増大をもたらす一方、南東へ向かった成分の大半は太平洋上沖合いへ抜けてゆく。北海道南西岸及び本州北東岸に到達した津波はエネルギーの比較的小さい断層長軸方向の成分である。このため、沿岸での最高水位は、色丹、国後、択捉の3島沿岸が高い。また、屈折によるエネルギーの集中のため、襟裳岬東側、三陸北部の沿岸で、周辺に比べて高い結果となった。

(3) 沿岸各地点での計算結果

各観測地点における初動時刻、第1波の到達時刻および最高水位の、計算結果と観測記録との比較を表-2に示す。初動時刻、第1波到達時刻はともに良好な一致を示したが、第1波最高水位については計算値の方が全体的にやや大きい。

計算波形と観測波形を比較したものを、図-10および図-11に示す。むつ小川原、八戸ともに第2波までの数値計算の波形再現性は良い。港内検潮儀の記録と計算値には、初動時刻に時間的なずれが見られるが、3 km 格子の数値計算では、港内での複雑な津波挙動の再現は困難である。一方、沖合波高計記録と計算値を比較すると、

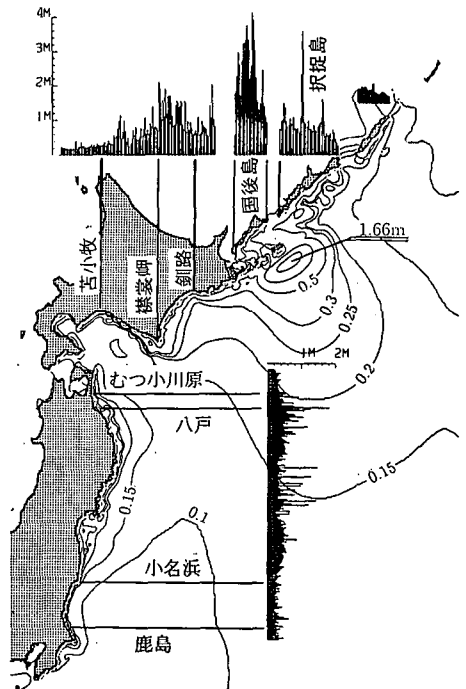


図-9 数値計算による最高水位分布

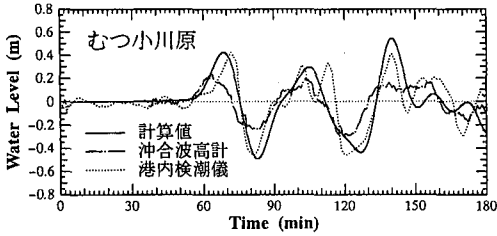


図-10 実測および数値計算津波波形(むつ小川原港)

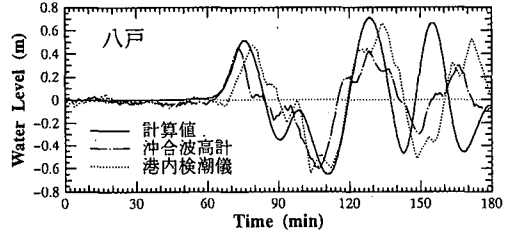


図-11 実測および数値計算津波波形(八戸港)

立ち上がり時刻とその波形の再現性は良好である。

6. まとめ

以上、北海道東方沖地震津波の特性に関して検討した結果をまとめると、以下の通りとなる。

- ① ゼロアップクロス法で定義される各観測地点における津波の経時的な両振幅波高と周期は図-1に示すように30分から60分の範囲で非常に長いものであった。多くの観測地点で、津波は押し波から始まっていた。
- ② 沖合波高計記録および港内検潮記録のスペクトル解析結果は、ゼロアップクロス法で定義される津波周期とよい対応を示した。むつ小川原港における沖合波高計記録と港内検潮記録との応答スペクトル特性は、この後発生した三陸はるか沖地震時に得られた結果とよい一致を示し、非定常な津波波形であっても、スペクトル解析が可能であり結果には妥当性があることが、示された。
- ③ むつ小川原港沖合における波高計記録と流速計記録の比較の結果、重複波の腹に近い波形特性が示された。
- ④ 検潮井戸による観測波形記録は、津波周期が比較的長かったため現地遡上高調査結果と良好な一致を示した。
- ⑤ 北海道東方沖地震津波は、初期波形が比較的単純かつ広範囲であったため、線形長波理論による3kmの粗い計算格子でのシミュレーション結果によっても、観測津波波形を比較的良好に再現することができた。

本報告で紹介した膨大な量の津波波形記録は、北海道開発局および第二港湾建設局によって観測されたものである。波崎海洋棧橋における波高観測データは当所海洋環境部漂砂研究室から、津波の初期波形モデルは東北大学から、それぞれご提供いただいた。津波遡上高現地調

査にあたっては、第二港湾建設局・青森県・岩手県の全面的なご協力をいただいた。図表等の作成にあたっては、(財)沿岸開発技術研究センター波浪情報部、(社)海洋調査協会、(株)エコー、沿岸海洋調査(株)および日本海洋コンサルタント(株)のご助力もいただいた。ここに記し重ねて謝意を表する。

参考文献

- 高山知司・鈴木康正・鶴谷広一・高橋重雄・後藤智明・永井紀彦・橋本典明・細山田得三・下迫健一朗・遠藤仁彦・浅井正(1994): 1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害, 港研資料 No. 771, 204 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, 港研資料 No. 470, 299 p.
- 永井紀彦(1993): 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)に関する最近の研究, 平成5年度港研講演会講演集, pp. 15-44.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正(1993): 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・菅原一見・橋本典明・浅井 正・東山茂・戸田和彦(1994): 平成5年北海道南西沖地震の沖合津波波形, 海岸工学論文集, 第41巻, 土木学会, pp. 221-225.
- 永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1995): 平成6年北海道東方沖地震津波の特性, 港研資料 No. 802, (印刷中)
- Aida(1962): Numerical experiments for tsunami caused by moving deformation of the sea bottom, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 471, pp. 849-862.
- Nagai, T., K. Sugahara, N. Hashimoto, T. Asai, S. Higashiyama and K. Toda(1994): Introduction of Japanese NOWPHAS system and its recent topics, Proceedings of the HYDRO-PORT '94, PHRI, pp. 67-82.
- Nagai, T., N. Hashimoto, K. Shimizu and T. Takayama(1995): Tsunami profiles observed at the NOWPHAS offshore wave stations, Second International Workshop on Wind and Earthquake for Offshore and Coastal Structure, UJNR at Berkeley, California, pp. 237-242.