

観測波形記録に基づく 2003 年十勝沖地震津波の特性

永井紀彦*・小川英明**・額田恭史***・久高将信****

本研究は、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)が捉えた 2003 年十勝沖地震津波波形を、港内検潮記録とともに解析し、本津波の特性をとりまとめたものである。沖合波浪記録(10 観測所)および潮位記録(23 観測所)の観測記録をもとに、津波到達時刻、第 1 波の偏差(水位の天文潮位からの差)、最高偏差(水位の天文潮位からの差が最大の値)とその起時、ならびにゼロアップクロス法で定義した波高・周期の分布を整理した。また、津波エネルギーの周波数分布を見るため、周波数スペクトル解析を試みた。この際、津波の非定常性を考慮し、時間帯毎の解析を試み、時間とともに変化する津波エネルギーの周波数分布を考察した。

1. はじめに

かつては、港内に設置された検潮井戸による水位変動記録が、唯一の津波波形観測手法であった。しかし、検潮井戸による海面上下変動の観測は、導水管という物理的ローパスフィルターにより、周期の短い変動成分は除去されるため、津波を過小に評価されることがあることが、問題視されている(合田, 2002)。

このため、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の海底設置式波浪計を活かした長周期波・津波の観測解析を行うことが、1981 年に答申された運輸技術審議会答申第 10 号で、波浪と海上風の観測に関する技術目標の一つに設定された(合田, 2001)。津波のような非定常で周期の長い波形を捕捉するには、切れ目のない連続的な観測データの取得が必須となる。当時の情報処理システムの制約上、切れ目なく連続的にデータを収録することは困難であり、通常波浪解析に最低限必要な、2 時間毎に 20 分間だけ 0.5 s 間隔でデータを収録せざるを得なかった。

切れ目のない連続観測システムの構築は、1983 年日本海中部地震津波(谷本ら, 1983)、1993 年北海道南西沖地震津波(永井ら, 1993; 1994a)といった度重なる津波被災を受けて、1994 年に開発着手された。システム構築途中(試験運用期間中)にも、1994 年北海道東方沖沖地震津波(永井ら, 1994b; 1995)、1996 年イリアンジャヤ地震津波(小舟ら, 1996)の際に、沖合津波連続波形記録の測得に成功している。

1996 年以降、全国ネットワークとしての運用が開始され(永井ら, 2002)、2001 年ペルー地震津波の観測記録を捉え、周期帯長周期波高としての津波波高の表記法を確立した(永井ら, 2001)。

あわせて、波浪観測機器も、近年、海象計(橋本ら, 1995)や GPS 津波計(永井ら, 2003)が開発され、ナウファスを活用した津波観測網の充実が図られた。

本報は、沖合波浪観測網が捉えた 2003 年十勝沖地震津波波形(永井ら, 2004a; 2004b)を港内検潮記録とともに解析し、津波特性をとりまとめたものである。

2. 2003 年十勝沖地震津波波形の観測状況

表一に示す沖合波浪記録(10 観測所)および潮位記録(23 観測所)をもとに、波浪高周波成分と、天文潮低周波成分を、ともに数値フィルターでとり除き、津波の影響と思われる水位変動分を抽出した。波浪観測点のうち、海象計導入 5 地点(十勝・苫小牧・久慈・石巻・小名浜)および流速計型波向計併設 1 地点(八戸)では、水位変動に加えて流速変動記録も得られている。また、大船渡沖では、実機試験中の GPS ブイおよび津波防波堤内外の水圧式波高計の、合計 3 か所の沖水位変動記録が得られている。これらの観測記録をもとに、津波到達時刻、第 1 波の偏差(水位の天文潮位からの差)、最高偏差(水位の天文潮位からの差が最大の値)とその起時、ならびにゼロアップクロス法で定義した波高・周期の分布を整理した。また、津波エネルギーの周波数分布を見るため、

表一 波浪観測機器の設置条件

観測地点	計器	緯度(北緯)	経度(東経)	離岸距離(km)	港口距離(km)	水深(m)
十勝港沖	海象計	42°39'06"	143°41'08"	4.5	50.4	23.0
苫小牧港沖	海象計	42°32'39"	141°26'46"	4.0	15.8	50.7
八戸港沖	波高計・流速計	40°33'39"	141°34'06"	2.0	3.5	24.0
久慈港沖	海象計	40°13'05"	141°51'37"	3.0	7.1	50.0
釜石港沖	波高計	39°15'54"	141°56'06"	0.6	3.4	50.0
大船渡港沖	GPS ブイ	39°00'36"	141°47'06"	1.5	4.5	53.0
大船渡港外	水圧計	39°00'42"	141°45'30"	0.4	1.9	16.4
大船渡港内	水圧計	39°02'03"	141°44'19"	0.4	2.0	25.0
石巻港沖	海象計	38°20'48"	141°15'19"	6.3	7.2	20.0
小名浜港沖	海象計	36°55'04"	140°55'18"	2.3	2.4	24.0

* 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部海象情報研究室長
** 前(独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部海象情報研究室
*** 工修 (財)沿岸開発技術研究センター 波浪情報部主任研究員
**** 正会員 (株)エコー 海象解析部長

周波数スペクトル解析を試みた。この際、津波の非定常性を考慮し、時間帯毎の解析を試み、時間とともに変化する津波エネルギーの周波数分布を考察した。

3. ゼロアップクロス解析による津波特性

表-2 に津波の到達時刻と諸元を示す。2003 年 9 月 26 日未明に発生した本津波は、各観測地点に共通して、水面上昇から始まったため、津波到達時刻は、津波による水面上昇が始まった時刻と定義した。岩手県北の久慈港沖では、5:31 に津波が到達したが、これは、苫小牧沖の 5:37 より 6 分早い。これは、津波の伝播速度は水深の 1/2 乗に比例するため、水深大きいほど早く津波が伝わるためだと考えられる。同様な到達時刻の逆転は、小名浜と石巻に関しても見られた。

同一港湾海域内で、沖合波浪観測点と港内検潮所の到達時刻を比較すると、港内への到達は、数分間程度遅れることが確認された。相対的時刻の誤差が小さい、ナウファスシステムによる同時収集観測点に注目すると、十

勝では 5 分、久慈では 4 分、釜石では 4 分の時刻差となっている。津波の減衰には長い時間を要し、すべての観測点で半日間以上、津波波形が継続した。最大偏差や最大波高が到達後数時間後に発生した地点も多かった。

4. 観測津波波形に関する考察

図-1 に十勝港沖合と港内の観測波形記録の例を示す。上から順に、水深 23 m の沖合水位変動、岸方向を縦軸にした流速ベクトル、港内検潮記録を意味している。第 1 波の周期は、沖合・港内とも 1 時間に近く極めて長い。その偏差は沖合で約 1 m、港内で約 2.5 m であり、約 2.5 倍の沖から港内への増幅が見られた。流れについてみると、始めの 2 時間弱はもっぱら岸沖方向成分のみであったが、その後は沿岸方向の成分が発達し、ベクトルの向きが斜めに変化した。これは、襟裳岬と霧多布岬の間の弧状海岸線形状地形の中で、沿岸方向の津波成分（エッジ波）が発生発達したものと思われる。

ナウファスでは、2 時間毎の観測データのスペクトル

表-2 津波の到達時刻と諸元

整理 番号	観測地点		到達 時刻	第1波		最大偏差波		最大波			港内／沖合増幅率				
				偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	波高 (cm)	周期 (分)	ゼロアップ クロス時刻	第1波 偏差	最大偏差	最大波
01	花咲	フース	5:28	88.1	5:40	1	88.1	5:40	1	210.2	29	5:28			
02	霧多布	空中発射	4:55	44.2	5:32	6	123.8	8:26	6	216.5	46	8:18			
03	厚岸	空中発射	5:08	42.3	5:39	3	102.1	7:11	3	165.8	55	6:56			
04	厚岸	フース	5:04	41.5	5:40	3	96.3	7:11	3	166.7	56	6:56			
05	釧路	フース	5:03	102.6	5:19	7	122.1	9:06	1	249.6	50	5:03			
06	十勝港沖	海象計	4:51	100.2	5:14	4	118.0	6:42	4	260.2	66	6:13			
07	十勝	フース	4:56	256.4	5:24	1	256.4	5:24	1	426.4	58	4:56	2.56	2.17	1.64
08	苫小牧港沖	海象計	5:37	22.0	5:54	6	36.9	9:06	5	58.6	31	8:25			
09	苫小牧東港	フース	5:49	34.6	6:00	6	99.3	9:06	6	181.7	30	8:59	1.57	2.69	3.10
10	苫小牧西港	フース	5:48	33.1	6:15	11	93.5	12:31	11	119.5	24	12:25	1.50	2.53	2.04
11	室蘭	フース	5:58	28.5	6:22	1	28.5	6:22	2	60.5	63	7:14			
12	函館	フース	6:09	24.5	6:22	3	73.3	8:20	3	111.0	31	8:10			
13	青森	フース	6:46	12.8	7:13	4	25.6	8:53	4	50.8	83	8:46			
14	大湊	フース	7:16	13.0	8:01	4	25.9	12:06	4	31.3	73	11:17			
15	むつ小川原	フース	5:30	61.4	5:40	6	69.3	7:51	6	133.2	26	7:43			
16	八戸港沖	波高計・流速計	—	—	—	—	44.7	10:21	—	79.3	67	10:06			
17	八戸(新湊)	フース	5:47	57.4	5:54	5	95.6	8:18	5	189.5	39	8:08	—	—	—
18	八戸(鰐)	フース	5:45	50.5	6:08	5	86.8	8:21	5	150.4	36	8:10	—	—	—
19	久慈港沖	海象計	5:31	42.2	5:38	1	42.2	5:38	7	86.8	49	8:23			
20	久慈	フース	5:35	113.5	5:48	6	174.9	7:08	13	238.9	26	9:14	2.69	4.14	2.75
21	宮古	フース	5:29	59.7	5:45	1	59.7	5:45	1	110.7	35	5:29			
22	釜石港沖	波高計	5:35	25.2	5:46	11	25.7	10:12	1	50.5	34	5:35			
23	釜石	フース	5:39	42.1	5:48	4	42.9	6:38	4	90.3	25	6:34	1.67	1.67	1.79
24	大船渡港沖	GPS ブイ	5:36	15.5	5:50	13	17.6	10:25	15	32.0	94	11:47			
25	大船渡港外	水圧計	5:38	24.9	5:51	10	28.6	12:06	1	40.4	55	5:38	1.61	1.63	1.26
26	大船渡港内	水圧計	5:39	26.5	5:54	6	36.0	10:31	3	45.8	44	7:12	1.71	2.05	1.43
27	大船渡	フース	5:39	26.1	5:49	13	28.7	10:27	12	40.7	57	9:14	1.68	1.63	1.27
28	鮎川	フース	5:58	18.3	6:05	20	34.7	12:00	13	50.7	24	8:57			
29	石巻港沖	海象計	6:18	5.9	6:20	8	38.4	12:22	8	51.1	105	11:47			
30	石巻	フース	6:23	16.2	6:36	6	57.1	12:23	6	76.5	88	11:39	2.75	1.49	1.50
31	仙台新港	フース	6:32	29.3	6:44	8	37.6	10:13	7	79.9	32	9:34			
32	小名浜港沖	海象計	6:05	11.6	6:17	7	25.5	13:03	7	37.9	83	12:32			
33	小名浜	フース	6:12	13.7	6:24	11	23.3	12:57	4	43.4	59	8:11	1.18	0.91	1.15

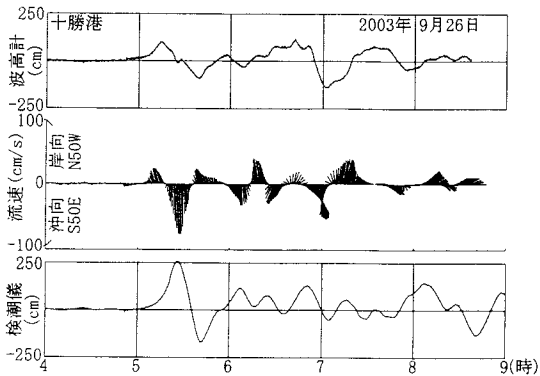


図-1 十勝沖と港内の津波波形

解析結果をもとに、周期帯換算波高によって長周期波の出現特性の整理が定常的に行われている (合田, 2001)。

図-2 は、周期 600 s 以上の周波数スペクトルの積分値の平方根の 4 倍として定義される、2 時間毎の長周期波高と、これに対応した 2 時間毎の津波最大偏差との比較を試みたものである。観測地点を凡例で区別し、津波来襲以前の記録を含む 6:00 (4:10 から 6:10 まで) の観測値のプロットは白抜きで示し、8:00 以降の黒抜きのプロットと区別した。縦軸と横軸の対応は比較的良好であり、ほぼ直線上にプロットが並んでいることがわかる。ただし、白抜きのプロットは、津波来襲前の静穏な記録を含んだ解析結果であるため、他のプロットよりも上側に、すなわち横軸の周期帯波高が縦軸の最大偏差に比べて過小になっている。

白抜きのプロットを除けば、各観測点における縦軸と横軸の相関は良好で、その傾きは 0.6 程度であり、津波偏差は、周期帯長周期波高の約 60% となっている。すなわち、ナウファス周期帯長周期波高から、津波の偏差をある程度予測できることを示している。ただし、周期 10 分以下の比較的短い周期帯のエネルギーが大きい、相対的に震源域の狭い津波に関しては、今後の観測記録に基づくさらなる実証的な検証が必要である。

図-3 は、十勝沖海象計が捉えた水面変動 (波高計) と水圧変動 (水圧計) を、地震発生時刻に近い 5 分間について図示したものである。ただし、この波形記録は、ナウファスで採用されている前後 50 s 間のデータを用いた平滑化による、周期 30 s 以下の短周期波成分を除去した後の波形である。4:51'50" に、水圧の顕著な極大値が観測されている。震源域海底地盤から伝わった水中疎密波 (音波) による海震 (大町ら, 2001) を検知したものと考えられる。

この極大値前後の平均的な水面高および水圧を比べると、両者に共通して、10 cm 程度の不連続があり、見かけ上、水深が増加していることがわかる。この原因として

は、地震によって海底地盤が沈降したこと、波浪観測機器の架台が海底地盤中に沈んだこと、などが考えられるが、原因確定のためには、今後の調査結果を待たなければならない。

図-4 は、十勝沖における水面変動と岸沖流速との関係を整理したものであり、縦軸は観測岸沖流速を、横軸は岸向き進行長波を仮定した場合の水位変動から計算される流速を、それぞれ示している。初期の時間帯以外は、縦軸と横軸が等しい 45° 線からプロットは大きくはずれている。これは、入・反射波が重なった重複波としての複雑な津浪波形性状を意味している。

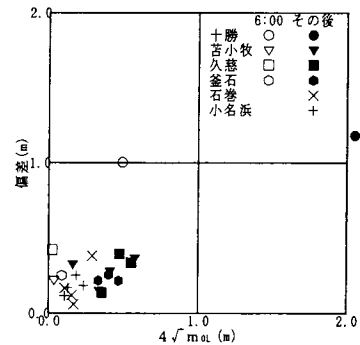


図-2 周期帯津波波高と 2 時間毎の最大偏差

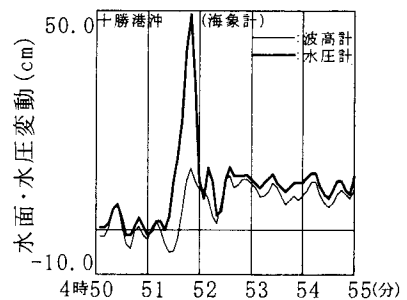


図-3 地震発生前後の水面・水圧変動

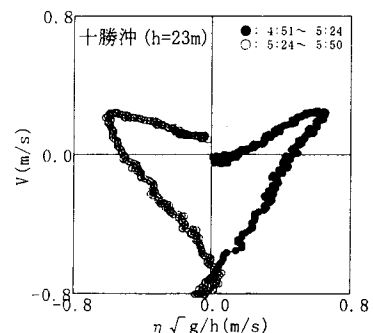


図-4 水面変動と岸沖流

5. スペクトル解析の試行

図-5は、久慈沖と港内の水位変動を、5:00の津波来襲前から14:00にかけての9時間にわたって比較したものである。津波が長時間継続したこと、沖合から港内にかけて顕著な津波増幅が見られたことがわかる。

こうした非定常な津波の特性把握のため、周波数スペクトル解析にあたって、観測波形記録の前半部分と後半部分を分けて計算し、両者を比較することによって、周波数帯毎の増幅・減衰特性の相違を明らかに示そうと試みた。図-6は、久慈沖における周波数スペクトルを示したものであり、前半(5:00-9:16の30s間隔512データ)、後半(9:16-13:32の30s間隔512データ)および全区間(5:00-13:32の30s間隔1024データ)の3区間の解析結果をあわせて表示した。

周波数スペクトルのピークは、0.0004 Hz (約40分)付近と0.0007 Hz (約24分)付近の2箇所に見られる。前者は前半から後半にかけて減衰しているが、後者は逆に若干の増幅が起こっており、津波の周波数スペクトル特性は、時間とともに変化していることがわかる。

図-7に、十勝港と久慈港における、沖合と港内のスペクトルを比較した例を示す。沖から沿岸に至る津波の増幅特性は、港湾毎に大きく異なり、港湾毎の地形に伴う

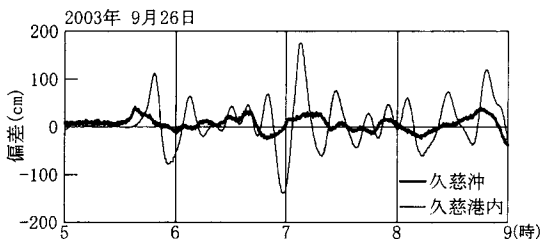


図-5 久慈沖と港内の津波波形

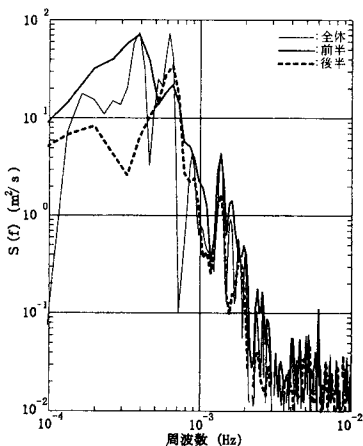


図-6 久慈沖のスペクトル経時変化

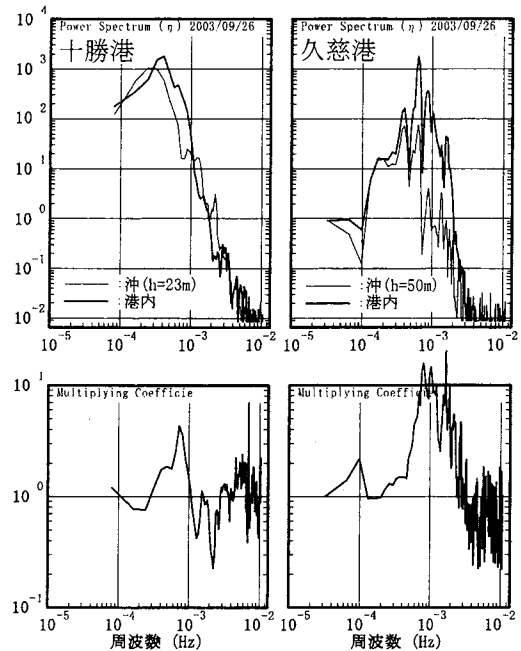


図-7 沖合と港内のスペクトル

共振周期とスペクトル応答特性があることがわかる。

図-8は、十勝沖合水位変動と沿岸方向および岸沖方向の流速のスペクトルとのそれぞれの相関を示したものである。図-1で示したように、十勝沖では海底ケーブル事故が発生したため、8:40以降は欠測となっている。このため、スペクトル解析は、5:00から7:53'20"までの5s間隔2048データ、およびこの前半後半の各半分のデータを、図-6と同様の凡例で表示した。ただし、コヒーレンスと位相差の図は、煩雑さを防ぐため全区間の解析結果だけを表示した。ここにHは水面変動を、Uは沿岸流速を、Vは岸沖流速を、それぞれ意味している。

H, U, Vの相互のコヒーレンスは、HとVの間が最も強く、UとHおよびVの間は、比較的弱い。HとVの間では、コヒーレンスの周波数変動特性は、パワースペクトルの値の大きい0.0006 Hz (約28分)よりも低周波領域では0.9以上の高い値となっており、波形の相関性は極めて高い。そして、この周波数領域ではHとVの位相差が90°となっており、ここで観測された津波は、水粒子運動が横長の楕円軌道を描く進行波ではなく、直線状を往復する重複波の性質を有していることを意味している。これに対して、UとHおよびVの間では、同じ低周波数領域でコヒーレンスは0.8前後の値となっており、また位相差も一定ではなく、相対的に相関性が低い。

6. おわりに

本研究では、過去の津波では得ることができなかった

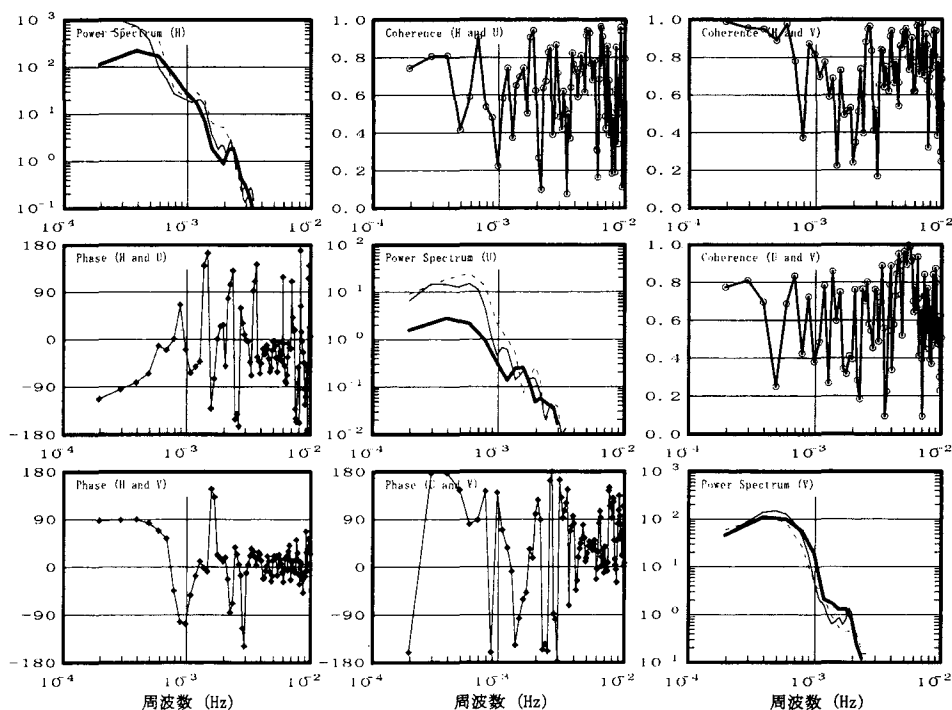


図-8 沖水位と流速のスペクトル相関 (十勝沖)

数多くの沖合波浪観測記録と港内検潮記録とを対比することによって、本津波の特性を捉えることができた。

本稿で紹介した2003年十勝沖地震津波波形データは、下記のホームページからダウンロード可能である。

<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/>

最後に、本稿で紹介した津波波計観測記録は、北海道開発局と東北地方整備局管内のナウファスデータ、海上保安庁海洋情報部および気象庁による港内検潮データ、および東京大学地震研究所・日立造船㈱などの共同研究によるGPSブイ海象データ(文部科学省産学官連携イノベーション創出事業費補助金:独創的革新技術開発研究提案公募制度:課題番号14401)の解析結果であることを述べ、これら機関の関係の方々に謝意を表する。

参考文献

- 大町達夫・松本浩幸・築山 洋 (2001): 震源断層の破壊過程が津波に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第48巻, 土木学会, pp. 331-335.
- 合田良実監修 (2001): 波を測る (沿岸波浪観測の手引), (財)沿岸開発技術研究センター, 212 p.
- 合田良実監修 (2002): 潮位を測る (潮位観測の手引), (財)沿岸開発技術研究センター, 188 p.
- 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義 (1996): 1996年イリアンジャヤ地震津波の特性, 港技研資料, No. 842, 96 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): 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港技研資料, No. 470, 299 p.
- 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記録解析速報, 港湾技術研究所報告, 第32巻第4号, pp. 51-97.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正・東山 茂・戸田和彦 (1994a): 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 (1994b): 平成6年(1994年)北海道東方沖地震津波の特性, 港技研資料, No. 802, 97 p.
- 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 (1995): 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, 海岸工学論文集, 第42巻, 土木学会, pp. 351-355.
- 永井紀彦・富田孝史・佐藤和敏・額田恭史 (2001): 我が国沿岸の沖合波高計と港内潮位計が捉えた2001年ペルー地震津波, 第13回研究成果発表会講演要旨集, 海洋調査技術学会, pp. 16-17.
- 永井紀彦・額田恭史・岩崎峯夫・久高将信 (2002): 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム, 海洋開発論文集, 第18巻, 土木学会, pp. 149-154.
- 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信 (2003): GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp. 1411-1415.
- 永井紀彦・小川英明 (2004a): 平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1070, 92 p.
- 永井紀彦・小川英明・額田恭史・久高将信 (2004b): 波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用, 海洋開発論文集, 第20巻, 土木学会, pp. 173-178.
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部恵雄・鈴木敏夫 (1995): 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, 土木学会, pp. 1081-1085.