

東北～四国沿岸のGPS波浪計ネットワークで捉えた2010年チリ津波

2010 Chilean Tsunami Observed by GPS-mounted Buoy Network on Tohoku to Shikoku Coast, Japan

河合弘泰¹・佐藤 真²・永井紀彦³・川口浩二⁴

Hiroyasu KAWAI, Makoto Satoh, Toshihiko NAGAI and Koji KAWAGUCHI

The 2010 Chilean Tsunami has been observed by a line of the eleven GPS-mounted buoys of NOWPHAS, drifting on the sea surface at the location of 100- 300m in depth on the Tohoku to Shikoku Coast, Japan. The maximum tsunami anomaly was 0.1-0.3m and the predominant period was longer than 50min. The tsunami components of longer than 30 min in period were significantly amplified from the GPS-mounted buoys to the seabed wave gauges near the GPS-mounted buoys, installed at spots of 30-50m in depth, and then the short components of 10-20min were amplified to the coastal tide gauges due to the local bathymetry. Such the significant amplification was observed from the seabed wave gauges to the coastal tide gauges in three tsunamis in 2003 to 2006.

1. はじめに

全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASでは1970年以来、波浪・潮位等の観測・集中処理・解析をしてきた(河合ら, 2010)。その蓄積されたデータには、台風・低気圧による高波はもちろん、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(高山ら, 1994)、1996年イリアンジャヤ津波(小舟ら, 1996)、2003年十勝沖地震津波(永井ら, 2004)、2004年東海道沖地震津波(永井ら, 2005)、2005年宮城県沖地震津波(永井ら, 2006)、2006年千島列島地震津波(清水ら, 2007)等の津波も含まれている。NOWPHASでは時代とともに新しい観測機器や解析方法が導入され、2010年2月には東北～四国沿岸に11基のGPS波浪計が本格運用されていた(国土交通省港湾局・(独法)港湾空港技術研究所, 2010)。

このような状況の下、2010年2月27日15時34分(日本時間)にチリ中部沿岸の地震で発生した津波は、翌28日の午後に日本の太平洋沿岸にも到達した。これまでGPS津波計・波浪計が単機で津波を観測した例(加藤ら, 2003; 永井ら, 2005)はあるが、ネットワークとしての例はない。GPS波浪計に近接する沿岸波浪計や潮位計の観測データも合わせて解析し、沿岸部の津波特性を明らかにする必要がある。

2. NOWPHASにおける三段階の津波観測システム

NOWPHASの観測機器は沖側から、①GPS波浪計(海岸から概ね10～20km, 水深100～300mの海面にGPSを搭載したブイを海底から鎖で一点係留)、②沿岸波浪計(海岸から概ね3km以内, 水深30～50mの海底に水圧・超音波センサを設置)、③潮位計(岸壁等に設置した井戸にデジタル・フースを設置)、の三段階で構成されている。図-1にGPS波浪計と沿岸波浪計の配置を示す。津波が来襲した2月28日は、前線を伴った低気圧が関東南岸から東へ遠ざかるときであり、図-2に例示するように、GPS波浪計で1.5～2m, 7～10s, 釜石等の沿岸波浪計でも0.5～1.5m, 7～9sのうねり性波浪を観測していた。この波浪成分を除去して津波波形を求める必要がある。

(1) GPS波浪計

従来のブイ型波浪計は、加速度を時間積分して上下動

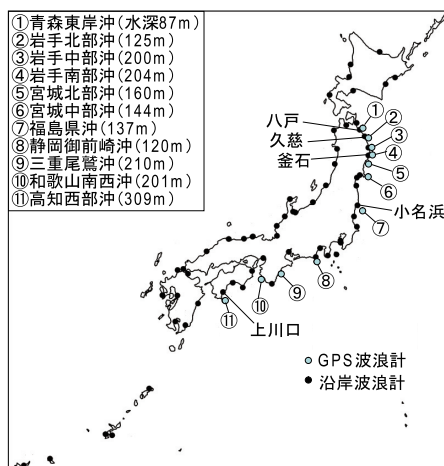


図-1 GPS波浪計と沿岸波浪計の配置

- | | | |
|----------|------|------------------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋情報研究領域長心得 |
| 2 | | (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究チーム研究官 |
| 3 フェロー工博 | | (独法) 港湾空港技術研究所研究主監 |
| 4 正会員 | 博(工) | (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究チーム主任研究官 |

を計算するために、長周期成分の検出が難しかった。これに対しGPS波浪計は、図-3に示すように、ブイの上部に搭載したGPSで1s毎に高度を計測する。その観測誤差の標準偏差は、電波環境が良くFIX解が得られた場合に、離岸距離が20kmでも数cmと小さく、この毎秒の高度を平滑化した潮位の観測精度は高いと考えられる。

津波来襲時（2月28日12時～3月1日12時）は、波浪によってブイが動揺しており、電波が通過する大気も必ずしも理想的な状態ではなかったと考えられる。それでもFIX解の割合は、②岩手北部沖と⑦福島県沖で98%台、その他は99%以上と、何れも高かった。このように得た毎秒の高度に対し、120sの単純平均とハミング・ウィンドからなる数値フィルタ（清水ら，2006）で波浪成分を除去して潮位を求め、さらに天文潮位を差し引いて潮位偏差を求めた。ブイの加速度や傾斜角に連続して異常値が現れていないことも確認した。

(2) 沿岸波浪計

沿岸波浪計は、海底から水圧または超音波で0.5s間隔

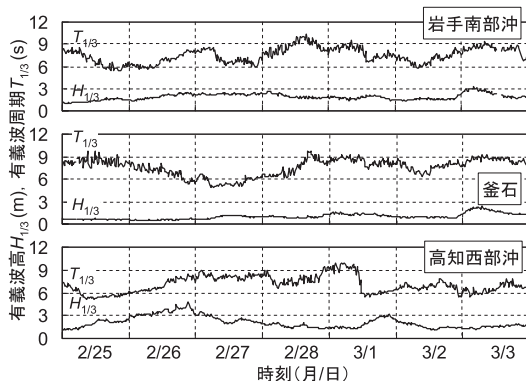


図-2 津波来襲前後の有義波の変化

の海面高さを計測しており、これに数値フィルタをかけることで潮位を求めることができる。NOWPHASの主力機器である海象計はさらに、海底から斜め上の3方向に発射した超音波で上・中・下層の水粒子速度も計測しており、平時はこの上層のデータを波向の計算（橋本ら，1995）に用いている。2003年十勝沖地震津波や2004年東海道沖地震津波では上層のデータから津波の押し・引きを捉えており（永井ら，2004，2005），今回は三層のデータによる流れの比較も試みる。

(3) 潮位計

潮位計は外水と導水管で接続された井戸に設置しており、非常に短周期の水位変動は導水管で減衰する。周期の長い今回の遠地津波に対して解析上の支障は小さい。

3. GPS波浪計で観測した津波

(1) 津波による潮位偏差

図-4にGPS波浪計で得た潮位偏差の経時変化を示す。津波来襲前の2月28日9時から既に、短周期で小さな振動が見られるが、これは電波環境に左右された測位の誤差等によるものと考えられる。津波は11基全てで明瞭に

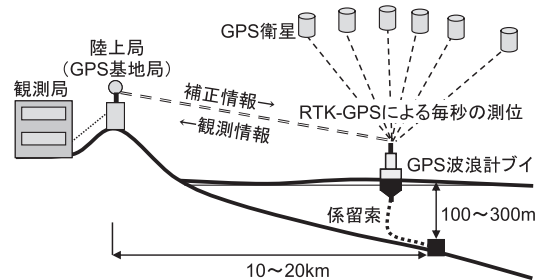


図-3 GPS波浪計のしくみ

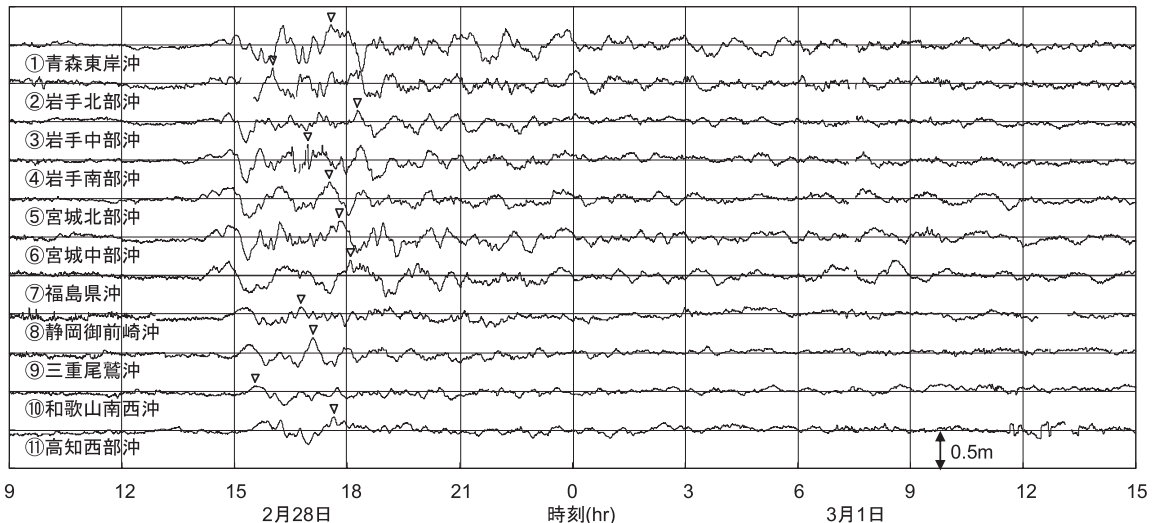


図-4 GPS波浪計で得た潮位偏差

観測され、東北沿岸①～⑦には14時過ぎ、中部～四国沿岸⑧～⑪には15時前後に到達した。①青森東岸沖～⑥宮城中部沖は38～65km間隔で配置されている。これらの第一波の峰はよく対応しているが、二波目以降、時間が経つにつれ、隣接地点でも峰・谷の対応は乱れている。津波の周期は、⑦福島県沖で90min程度である他は、概ね1時間程度である。図中の▽印は最大波（2月28日14時～3月1日3時の正の最大偏差）を示す。最大波は、⑩和歌山南西沖が第一波である他は二波目以降であり、その起時は15時台～18時台にばらついている。その高さは0.1～0.3m程度で、11基の最高記録は設置水深が最も浅い①青森東岸沖によるものである。津波はその後、時間とともに減衰するが、第一波の到達から24時間過ぎた3月1日15時でも完全には収束していない。

(2) ブイの水平変位

図-5は、①青森東岸沖を例に、2min平均したブイの高さと水平位置の経時変化を示す。ブイは、津波の来襲前から潮汐等の作用で緩やかに移動していたが、来襲中は津波に対応した動きをしている。まず、東西方向には、図中のaの西進（押し波方向）から周期約70min、片振幅1～2m程度の振動が始まり、概ね津波の峰のときに西へ寄っている。水深87m、周期70min、波高0.5mの微小振幅波では水粒子が片振幅で19m移動する計算になるが、重い係留鎖に拘束されたブイはそれほど自由には振れ回れない。この振れ回りは平時の潮汐によるものに比べ、振幅は小さいが、時間変化は急である。一方、南北方向の振動はbの北進からである。その周期は約50minで東西方向とは異なり、片振幅は1m程度とやや小さい。この海域で津波が複雑な振る舞いをしたことが分かる。

なお、このような顕著な振れ回りは、②岩手北部沖、④岩手南部沖、⑥宮城中部沖等でも確認された。

4. 沿岸部における津波の変形

(1) 峰・谷の対応と最大波の起時

図-6は、①青森東岸沖、②岩手北部沖、④岩手南部沖、⑪高知西部沖のGPS波浪計と、それぞれに近接する沿岸波浪計や潮位計で得た潮位偏差の経時変化を示す。図中の▽印は最大波である。何れの組み合わせでも振幅は岸側で大きい。峰・谷の対応の有無に差がある。

①青森東岸沖・八戸では、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の峰・谷が概ね対応し、波形もよく似ている。

②岩手北部沖・久慈では、GPS波浪計と沿岸波浪計の峰・谷はよく対応し、波形も似ている。潮位計には、津波の来襲前から短周期の振動があり、来襲中は同程度の周期のまま振幅が大きくなっている。

④岩手南部沖・釜石では、16時頃までGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の峰・谷の対応が良い。それ以降は、

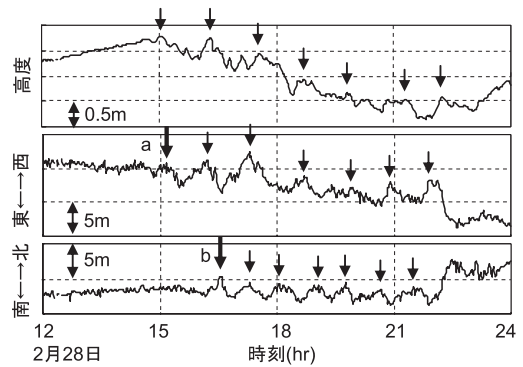


図-5 GPS波浪計の高度・位置

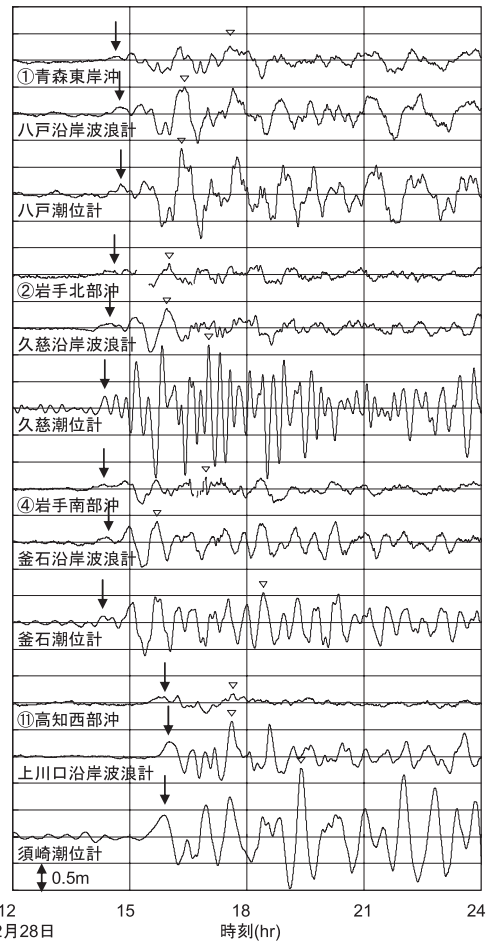


図-6 GPS波浪計・沿岸波浪計・潮位計で得た潮位偏差

特に潮位計で短周期の振動が顕著となり、潮位計での最大波は沿岸波浪計より3時間ほど後になった。

⑪高知西部沖・上川口・須崎は、前述の三組ほど地理的に近接していないこともあって、第一波を除き峰・谷の対応を見出すことは難しい。須崎の潮位計には第一波から4時間以上経過して最大波が現れた。

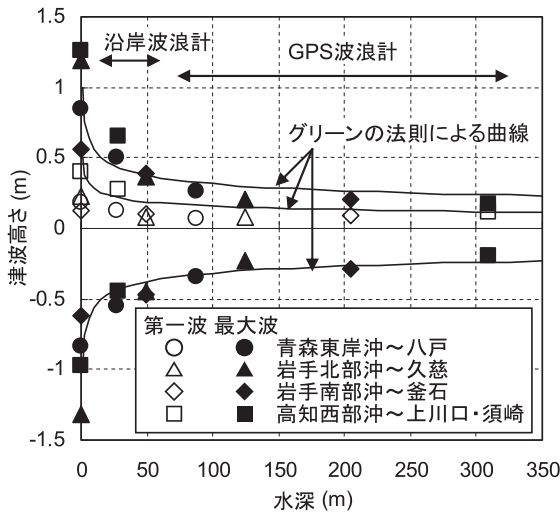


図-7 水深による津波高さの変化

(2) 津波高さ

図-7の白抜きプロットは、概ね第一波と見なせる峰(図-6の↓印)の高さをGPS波浪計・沿岸波浪計・潮位計の組み合わせ別に示す。黒抜きプロットは、第一波に限定しない正・負の最大偏差を示す。これらの値は、GPS波浪計のある水深100～300mでは小さく、沿岸波浪計のある水深30～50m、さらに潮位計のある海岸で、それぞれ大きくなっている。グリーンの法則はもともと無反射を仮定したものであるが、今回の最大偏差の変化傾向はこの曲線の特性に概ね一致している。

(3) スペクトル

図-8は、図-6と同地点について、2月28日15時から5s間隔で4,096個(約5.7時間)の潮位偏差でスペクトルを求めた結果である。これら4基のGPS波浪計のスペクトルには共通して、50min以上の長周期にピークがある。また、GPS波浪計～沿岸波浪計～潮位計では、地点によって異なる周期帯に増幅が見られる。

①青森東岸沖・八戸では、GPS波浪計～沿岸波浪計(設置水深27.7m)で20min前後と40min以上の成分、沿岸波浪計～潮位計で10min前後の短周期成分が増幅した。

②岩手北部沖・久慈では、GPS波浪計～沿岸波浪計(設置水深49.5m)での変化は小さく、沿岸波浪計～潮位計で10min前後と20min前後の成分が著しく増幅した。沿岸波浪計～潮位計では、2003年十勝沖地震津波や2005年宮城県沖地震津波でも、久慈港周辺の固有振動に対応した8～16minの成分に顕著な増幅が見られた(永井ら, 2004, 2006)。

④岩手南部沖・釜石では、GPS波浪計～沿岸波浪計(設置水深49.8m)で30min以上、沿岸波浪計～潮位計で10min前後と20min前後の成分が増幅した。沿岸波浪計

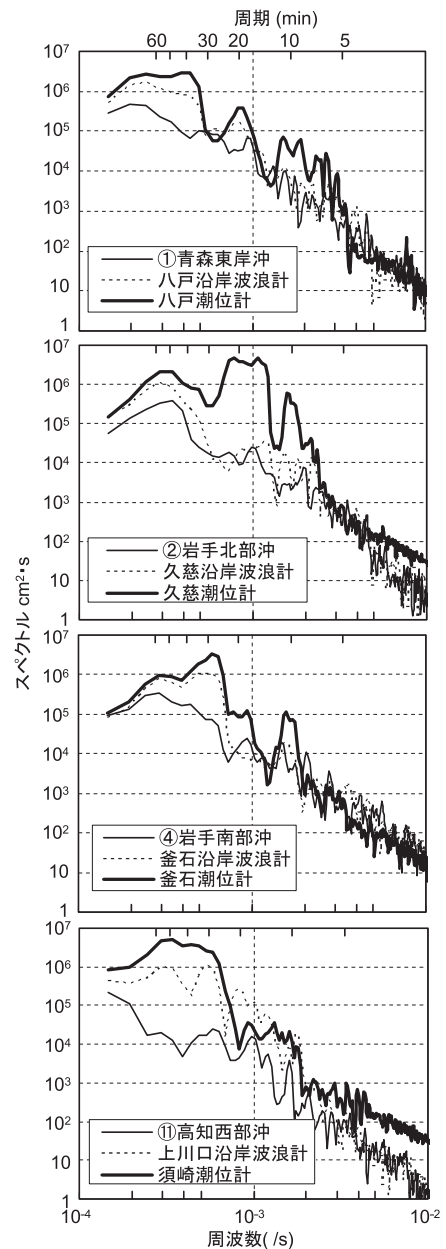


図-8 沖合から沿岸へのスペクトルの変化

～潮位計では、2003年十勝沖地震津波、2005年宮城県沖地震津波、2006年千島列島地震津波でも、釜石港周辺の固有振動に対応する5～18minの成分に増幅が見られた(清水ら, 2007)。

①高知西部沖・上川口・須崎では、GPS波浪計～沿岸波浪計(設置水深27.9m)で30min以上の成分が顕著に増幅し、GPS波浪計～潮位計でも顕著に増幅した。

限れた地点ではあるが、これらをまとめると、GPS波浪計では50min以上の長い周期にピークがあり、GPS波

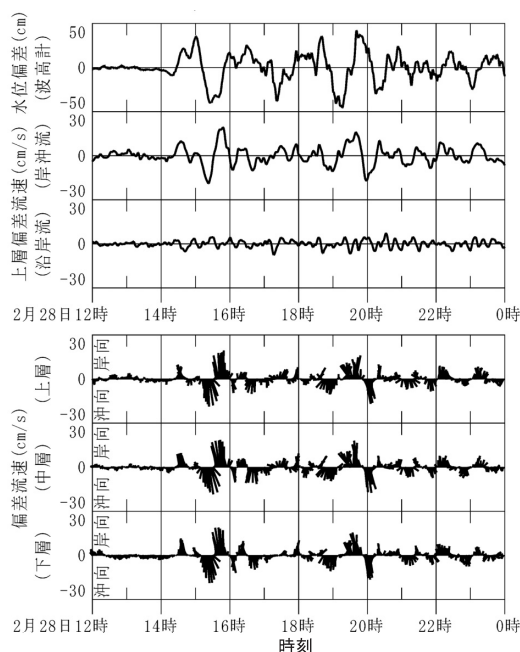


図-9 流速の経時変化

浪計～沿岸波浪計では主に長周期成分, 沿岸波浪計～潮位計では主に短周期成分が増幅する傾向がある。

(4) 津波の流速

図-9は, 小名浜の海象計(設置水深23.8m)で観測した上・中・下層(海面下8, 13, 18m)の流速に対し, 水位と同じフィルタで波浪成分を除去し, さらに6minの三角フィルタで平滑化して求めた偏差流速を示す。ここでのいう岸向とは, 上層の偏差流速のエネルギー(流向別の流速の2乗値の和)が最大となる方向であり, 真北から時計回りに283°(WとWNWの間)に進むとなった。2月28日14時半頃から, 三層ともほぼ同時刻に岸向と沖向の流れを繰り返す始め, 概ね岸向流れと水位上昇, 沖向流れと水位下降とが対応している。流速も三層でほぼ同じ値をとっており, 最大で約0.2m/sを記録した。

このような岸向流れと沖向流れの明瞭な繰り返しは, 高知の海象計でも見られた。小名浜と高知はともに, 海象計の設置地点としては浅く, 沖側に岬や島はない。

5. おわりに

NOWPHASのGPS波浪計, それに近接する沿岸波浪計や潮位計による観測値を組み合わせで解析した結果, 2010年チリ津波について以下のことが明らかになった。

①GPS波浪計(水深100～300m)における最大波は0.1～0.3m程度であり, 波形では50min以上の成分が卓越

した。38～65kmで隣接する三陸沿岸のGPS波浪計の間にも, 峯・谷の変化に違いが見られた。ブイの触れ回りからも津波を検知できた。

②GPS波浪計～沿岸波浪計(水深20～50m)では主として長周期成分, 沿岸波浪計～潮位計(海岸)では主として短周期成分が増幅した。沿岸波浪計～潮位計での増幅は, 2003年十勝沖地震津波等の近年のいくつかの津波と同じ周期帯で生じた。

③海象計(沿岸波浪計)によって, 上・中・下層でほぼ同じ時刻に同じ流速で, 岸向・沖向の流れを繰り返す津波の振る舞いを捉えた。

なお, 本論文で用いた観測データは, 国土交通省港湾局, 東北～九州の各地方整備局, 北海道開発局, 沖縄総合事務局, 国土技術政策総合研究所, 港湾空港技術研究所が協力して運営するNOWPHASで取得されたものである。データ解析の一部では株式会社エコーにご協力いただいた。ここに記して, 関係各位に謝意を表したい。

参考文献

- 加藤照之・寺田幸博・松岡幸文・田美津雄(2003):実海域におけるGPS波浪計・津波計の性能確認実験, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.839-844.
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二(2010):全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2008), 港空研資料, No.1209, 93p.
- 国土交通省港湾局・(独法)港湾空港技術研究所:リアルタイム・ナウファスWeb(オンライン), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>, 参照2010-02-28.
- 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, 港湾技術資料, No.842, 96p.
- 清水勝義・永井紀彦・李 在炯・泉 裕明・岩崎峯夫・藤田孝(2006):沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.523-528.
- 清水勝義・佐々木 誠・永井紀彦(2007):平成18年(2006年)千島列島の地震津波の観測結果, 港空研資料, No.1162, 83p.
- 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・長尾 毅・細山田得三・下迫健一郎・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, 港湾技術資料, No.775, 225p.
- 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, 港湾技術資料, No.470, 299p.
- 永井紀彦・小川英明(2004):平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性, 港空研資料, No.1070, 92p.
- 永井紀彦・里見 茂(2005):2004年東海道沖地震津波の観測結果, 港空研資料, No.1096, 22p.
- 永井紀彦・里見 茂(2006):2005年宮城県沖の地震津波の観測結果, 港空研資料, No.1119, 35p.
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫(1995):水中超音波のドップラー効果に応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 42巻, pp.1081-1085.