

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.49 NO.4 December 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# GPS 波浪計ネットワークを用いた平成 22 年 (2010 年) チリ 地震津波の日本沿岸における変形特性の解析

河合 弘泰\*・佐藤 真\*\*・永井 紀彦\*\*\*・川口 浩二\*\*\*\*

## 要 旨

全国港湾海洋波浪情報 NOWPHAS では東北～四国沿岸の水深 100～300m の地点に 11 基の GPS 波浪計を導入しており、これらがネットワークとして初めて 2010 年チリ津波を捉えた。NOWPHAS の GPS 波浪計や沿岸波浪計、潮位計で得られた津波波形を解析し、以下の結果が得られた。

- ①GPS 波浪計において、最大波は 0.1～0.3m 程度であり、周波数スペクトルでは 50min 以上の成分が卓越した。38～65km で近接する三陸沿岸の GPS 波浪計の間でも、潮位偏差の波形の峯・谷の変化に違いが見られた。ブイの振れ回りにも津波の影響が現れた。
- ②GPS 波浪計～沿岸波浪計（水深 20～50m）では、主として概ね 30min 以上の長周期成分が増幅した。沿岸波浪計～潮位計（海岸）では、主として 10～20min 程度の短周期成分が増幅しており、2003 年十勝沖地震津波など 2003～2006 年に日本周辺で発生した津波と同じ周期での増幅が顕著であった。
- ③沿岸波浪計の主力機種である海象計の中には、上・中・下層でほぼ同時刻にほぼ同じ流速で岸向・沖向の流れを繰り返す、津波の振る舞いを捉えたものもある。

キーワード：全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）、2010 年チリ津波、GPS 波浪計、海象計、潮位計、周波数スペクトル

---

\* 海洋・水工部海洋情報研究領域海象情報研究チームリーダー（海洋情報研究領域長心得兼務）  
\*\* 海洋・水工部海洋情報研究領域海象情報研究チーム研究官  
\*\*\* 研究主監  
\*\*\*\* 海洋・水工部海洋情報研究領域海象情報研究チーム主任研究官  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号  
電話：046-844-5048 Fax：046-842-5246 E-mail: kawai@pari.go.jp  
<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/index.htm>, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

## **Analysis on Shallow-water Transformation of the 2010 Chilean Tsunami on the Japanese Coast by GPS Buoy Network**

**Hiroyasu Kawai\***

**Makoto Satoh\*\***

**Toshihiko Nagai\*\*\***

**Koji Kawaguchi\*\*\*\***

### **Synopsis**

The 2010 Chilean Tsunami has been observed by a line of the eleven GPS buoys of NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS), drifting on the sea surface at the location of 100-300m in depth on the Tohoku to Shikoku District Coast of the Pacific Ocean, Japan. The comparison among the tsunami record on the GPS buoys and their neighbor seabed wave gauges and coastal tide gauges led the following results.

- (1) On the GPS buoy record, the maximum tsunami anomaly was 0.1-0.3m and the predominant period was longer than 50min. The distance between one GPS buoy to the next is short between 38 and 65 km on the Sanriku Coast, Tohoku District, Japan, however the tsunami crest and trough on one GPS buoy does not meet those on the next at the same time. The tsunami effects could be found on the drifting of some of the GPS buoys.
- (2) The tsunami components of longer than 30min in period were significantly amplified from the GPS buoys to the seabed wave gauges near the GPS buoys, installed at spots of 30-50m in depth and then the shorter components of 10-20min were amplified from the seabed wave gauges to the coastal tide gauges due to the local bathymetry. Such the significant amplification from the seabed wave gauges to the coastal tide gauges had been observed in three tsunamis in 2003 to 2006.
- (3) Some of the Doppler-type Wave Directional Meters, a major type in the seabed wave gauges on NOWPHAS, recorded a similar time series of the tsunami current velocity and direction among the surface, middle and bottom layers of the sea.

**Key Words:** NOWPHAS, 2010 Chilean Tsunami, GPS buoy, Doppler-type Wave Directional Meter, coastal tide gauge, frequency spectrum

---

\* Deputy Director, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\* Researcher, Marine Information Group, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\*\* Distinguished Researcher

\*\*\*\* Senior Researcher, Marine Information Group, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, 239-0826, JAPAN

Phone: +81-46-844-5048

Fax: +81-46-842-5246

E-mail: [kawai@pari.go.jp](mailto:kawai@pari.go.jp)

<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/index.htm>, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 津波の概要と日本周辺の波浪条件 .....	7
3. NOWPHASの観測機器と津波の抽出方法 .....	9
3.1 GPS波浪計 .....	9
3.2 沿岸波浪計 .....	12
3.3 潮位計 .....	13
3.4 津波の定義 .....	14
4. GPS波浪計で観測した津波 .....	17
4.1 津波による潮位偏差 .....	17
4.2 ブイの水平変位 .....	21
5. 沿岸部における津波の変形 .....	21
5.1 青森東岸沖・八戸 .....	21
5.2 岩手北部沖・久慈 .....	25
5.3 岩手南部沖・釜石 .....	29
5.4 宮城中部沖・石巻 .....	33
5.5 高知西部沖・上川口・須崎 .....	37
5.6 水深による津波高さの変化 .....	41
5.7 津波の流速 .....	42
5.8 久里浜湾の津波 .....	42
6. 結論 .....	43
7. あとがき .....	44
謝辞 .....	44
参考文献 .....	44
付録 .....	46





## 1. まえがき

国土交通省（2000年12月以前は運輸省）港湾局は1970年以來、関係機関との相互協力の下、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS）を構築し、全国の沿岸で波浪・潮位等の観測・集中処理・解析を実施してきた。これまで蓄積されてきたデータには、台風・低気圧による高波・高潮はもちろんのこと、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；高山ら，1994），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）などの近地津波や、1996年イリアンジャヤ津波（小舟ら，1996）などの遠地津波も含まれている。この間、以下に記すように、時代とともに新しい観測機器や解析方法が導入されてきた。

津波の観測は古くから検潮井戸とフロートによる潮位計で行われてきた。この形式の潮位計は天文潮を捉えることに主眼をおいたものであり、数分以下の短周期成分は井戸と外水との間にある導水管で減衰する。また、津波が防波堤の開口部から潮位計に達するまでの間に、様々な構造物や海底地形によって変形するため、沖合からその港に到達する津波の代表的な特性を捉えているとは限らない。これらの制約があるため、潮位計の観測データを解析する一方で、波浪計によって港外の水位を観測する技術の開発にも大きな力が注がれてきた。

1983年日本海中部地震津波の頃の沿岸波浪計の観測は毎偶数時をはさむ20分間に限られ、かなり空白の時間があった。それでも深浦の1回の観測の中に津波の一部を捉えることができた（谷本ら，1983）。

1993年北海道南西沖地震津波の頃も常時は毎偶数時をはさむ20分間の観測であったが、有事にはマニュアル操作で30分毎に20分間観測して10分間休むモードに切り替えが可能になった。海底設置式流向流速型波向計の導入も進んだ。その結果、秋田や輪島などで津波の水位や流れの変化をほぼ連続して捉えることができた（永井ら，1993；高山ら，1994）。そして、波浪観測に連続観測の導入が開始された（永井，1997；永井ら，1999）。

この取り組みはまず、2003年十勝沖地震津波の解析において実を結んだ。北海道～東北沿岸の沿岸波浪計で津波の水位や流速を捉えたのである（永井ら，2004）。超音波で水位と流速を計測する海象計（高山ら，1992；橋本ら，1995）の導入も始まった。続く2005年宮城県沖地震津波では久慈、釜石、大船渡、石巻、小名浜において、

2006年千島列島地震津波でも十勝、釜石、石巻、鹿島において、それぞれ沿岸波浪計と潮位計の両方が津波を捉え、沿岸部における津波の伝播・増幅特性の解明も進んだ（永井ら，2006；清水ら，2007）。

その一方で、東京大学地震研究所を中心とするグループが大船渡沖のGPS津波計で2001年ペルー沖地震津波を（加藤ら，2003；永井ら，2003），室戸沖のGPS津波計で2004年東海道沖地震津波を捉えた（永井ら，2005）。これらをきっかけとして、NOWPHASにもGPS波浪計が導入された。まず2008年から東北沿岸で2基の本格運用が開始され、2010年2月には東北～四国沿岸の11基に増加した。

このような状況の下、2010年2月27日（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，2003，2005）はあるが、ネットワークとしての例はない。本報は、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計という3種類の観測施設によるデータを解析し、沿岸部の津波の伝播・増幅特性を明らかにしようとするものであり、八戸、久慈、釜石、石巻、須崎を中心にとりあげる。

## 2. 津波の概要と日本周辺の波浪条件

日本時間で2010年2月27日15時34分に、ナスカプレートと南米プレートの境界付近に位置するチリ中部沿岸（南緯36度02分、西経72度35分；サンティアゴの南西、コンセプションの北北東）の深さ約20kmを震源として、東西方向に圧力軸を持つ逆断層型で、モーメントマグニチュード  $M_w$  が8.8の地震が発生した（気象庁，2010b）。この断層で生じた津波は、チリ沿岸を直撃するとともに、太平洋の広範囲に伝播した。太平洋津波警報センターPTWC(2010)によると、15時53分にチリのタルカワノで2.36m、17時52分にコキンボで1.32m、翌2月28日の2時41分にフランス領ポリネシアのマルキーズ諸島ヒバオア島で1.79m、6時47分に米国ハワイ州カフルイで0.98mの最大津波高さを記録した。

日本沿岸にも早ければ13時頃から到達し始める見込みとなったため、9時33分に気象庁は青森～宮城県の太平洋沿岸に津波警報（大津波）、その他の太平洋沿岸や一部の日本海沿岸に津波警報（津波）あるいは津波注意報を発令した（気象庁，2010a）。そして津波は実際に、12時43分に南鳥島、13時47分に根室市花咲に到達し、続いて本州、四国、九州の沿岸や沖縄地方にも到達した。17時01分には久慈港で1.2m、19時42分には須崎港でも1.2mの最大津波高さを記録した。これほどの規模の遠

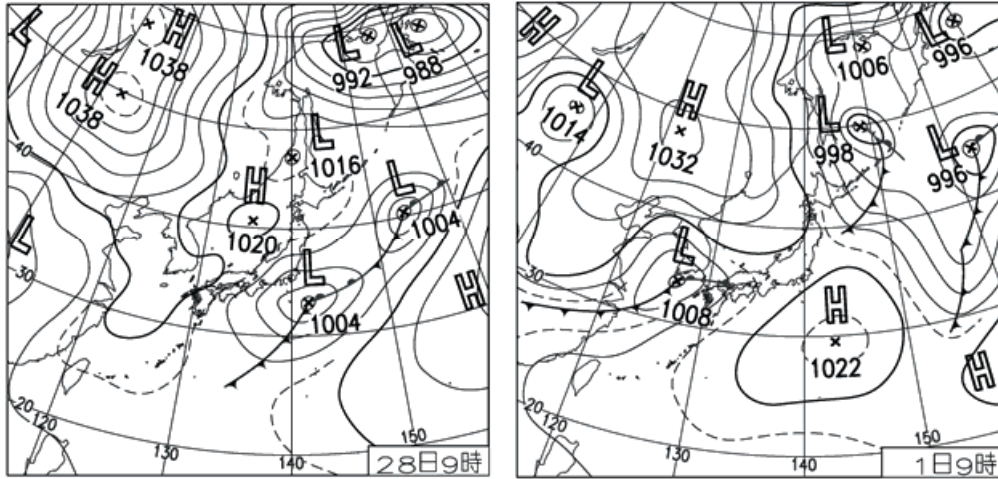


図-2.1 津波来襲前後の天気図

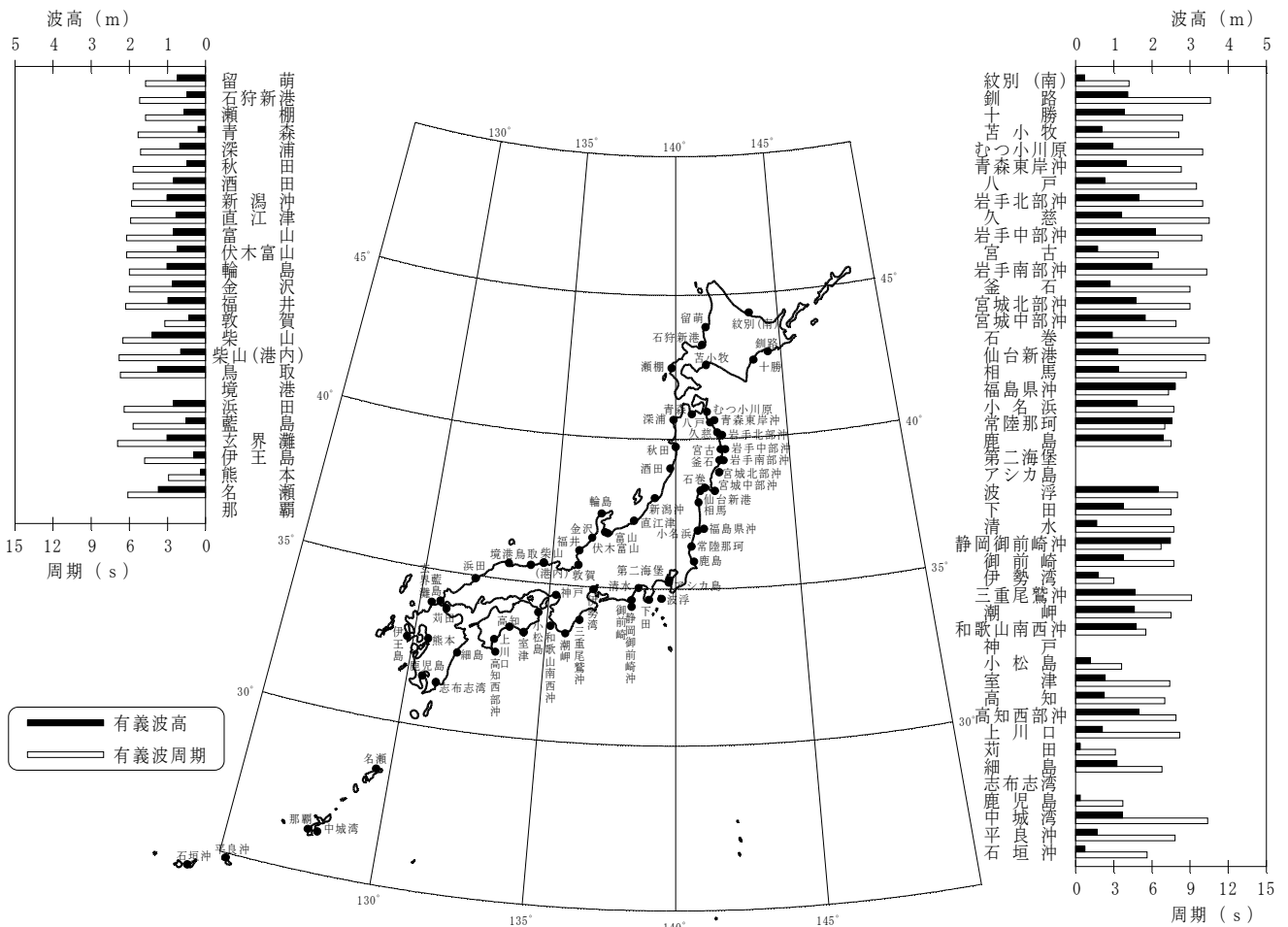


図-2.2 津波が到達した頃の全国各地の有義波

地津波が日本に来襲したのは、1960年のチリ津波以来のことである。津波警報や注意報が全て解除されたのは翌3月1日の10時15分であった（気象庁，2010c）。

図-2.1は津波が日本に到達する数時間前の2月28日9時と、まだ完全には終息していない翌3月1日9時の天気図を示す。

この間は前線を伴った低気圧が関東南岸から東へ遠ざかりつつある状況であった。

図-2.2は津波の来襲時刻に近い、2月28日16時の日本各地の有義波の分布を示したものである。北海道～沖縄地方の太平洋沿岸では、GPS波浪計で1.5～2.5m、5～10s、沿岸波

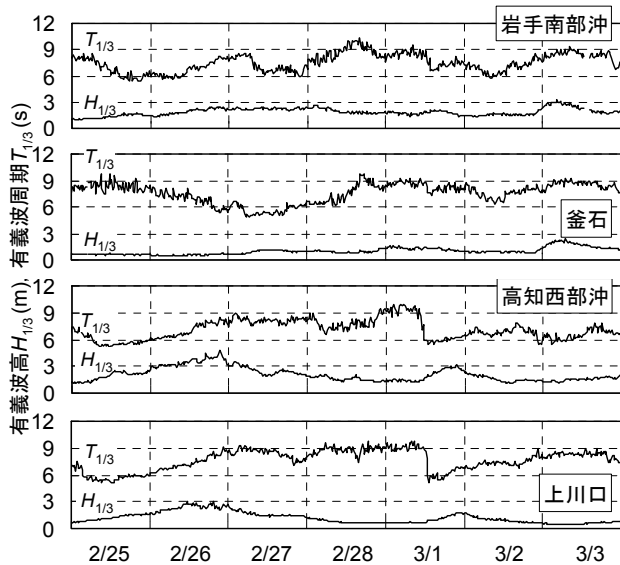


図-2.3 代表地点の有義波の変化

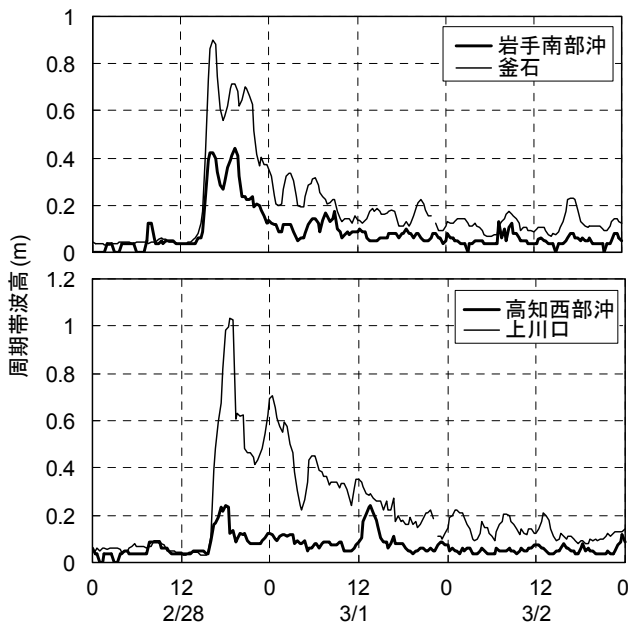


図-2.4 津波来襲による周期帯波高の変化

浪計で0.5~2.5m, 5~9sの有義波を観測していた。

図-2.3は、岩手南部沖のGPS波浪計、釜石の沿岸波浪計、高知西部沖のGPS波浪計、上川口の沿岸波浪計を例に、津波の来襲時期を含む一週間ほどの有義波の変化を示したものである。3月1日の昼頃に四国沿岸で有義波周期が減少したのを除けば、津波来襲中の有義波の変化は緩やかであった。なお、この程度の有義波は過去の津波来襲時においても観測されており、津波の解析に大きな支障はない。

図-2.4は、図-2.3と同じ地点について、周期300s以上の周期帯別波浪(永井ら, 1999)の経時変化を示す。津波来襲前には概ね0.1m以下であったが、津波来襲時には岩手南

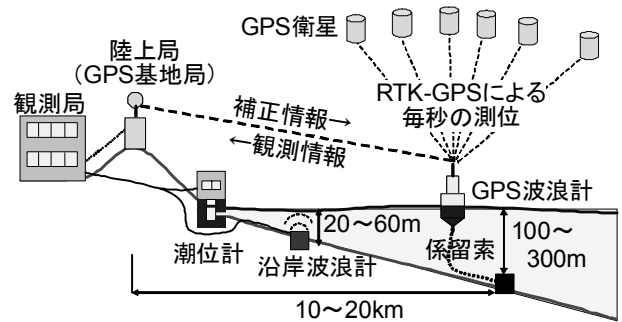


図-3.1 三層の観測網

部沖と高知西部沖のGPS波浪計でそれぞれ0.4m, 0.2mを超える波高になっており、釜石と上川口の沿岸波浪計ではそれぞれ0.9m, 1.0mに達している。このように、周期帯波浪情報でも津波を捉えることができた。

### 3. NOWPHASの観測機器と津波の抽出方法

津波観測に対しNOWPHASの観測機器は、図-3.1に示すように、沖側から、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計、の3つのカテゴリからなっている。

#### 3.1 GPS 波浪計

##### (1) 機器の特徴

GPS波浪計は、海岸から概ね10~20km, 水深100~300mの海面に、GPS受信機を搭載したブイを海底から鎖で一点係留したものである。ブイ上で必要となる電力はブイに搭載したソーラーパネルでまかない、観測したデータはGPS測位の合間をぬって電波で陸上局へ伝送している。

GPS受信機の三次元座標は、GPS衛星と陸上局からの信号、いわゆるRTK-GPSによって1s間隔で計測している(清水ら, 2006a; 永井ら, 2008b)。その計測誤差の標準偏差は、電波環境が良くFIX解が得られた条件下で、離岸距離が20kmでも数cmと小さい。ブイが常に鉛直に浮かび、波浪に追従して上下動をすれば、ブイの上部にあるGPS受信機の上下動を水面の上下動と見なせる。実際にはブイはしばしば数度ほど傾斜するが、その傾斜角もジャイロによって1s間隔で計測しており、ブイが直立していた場合のGPS受信機の高度を割り出している(清水ら, 2006a)。GPS波浪計の最大の特長は、ブイの高度をGPSで計測するため、長周期波や潮汐のようなゆっくりとした上下動も捉えられることにある。ただし、係留索の張力も作用するため、その挙動は単純ではない。

##### (2) 解析方法

GPS波浪計では、GPS受信機で1s毎に計測した高度の時系列をもとに、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, 2006b)で波浪成分を除去したも

のを潮位と扱っている。厳密に言うとGPS測位基準面に対するブイ上部のGPS受信機の高さであるが、「GPS受信機の高さと海面の高さをそれぞれある程度の長い時間で平均すれば、その差は一定になる」という仮定に基づいている。120s間にFIX解が一定の割合で含まれていない場合は、その潮位を欠測とする。潮位から天文潮位を差し引いたものが潮位偏差である。GPS波浪計のリアルタイム処理では、過去に観測した潮位データを調和解析し、得られた調和定数から天文潮位を計算している(清水ら, 2006b)。

こうして得られた天文潮位や潮位偏差に対し、電波環境や演算処理による異常値(ミスフィックス)と考えられる部分も欠測扱いにした。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。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大きく動揺しており、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、岩手北部沖と福島県沖で98%台、その他は99%以上と、何れも高か

った。以上のプロセスを経たものを速報値とし、港湾局を窓口として大学等に提供する一方で、著者らも基礎的な解析を行った(河合ら, 2010a, 2010b, 2010c; 宮田ら, 2010)。

しかしながら、この潮位偏差の速報値には、通常考えられる天文潮以外の短周期で不規則な潮位の変化か、あるいは電波環境の変化によるGPS測位の揺らぎであるか、その区別は難しいが、明らかに津波ではない成分が少し残っている。津波の全体像をつかむのには支障ないが、後述するゼロアップクロス法による個別波の定義では、この成分が第一波の到達時刻や個別波の波高・周期の解析に影響を及ぼす。そこで、速報値の潮位から、気象庁の潮位解析にも採用されているカットオフ周期(透過率50%)が209分の数値ハイパスフィルタ(岩崎, 1996)で天文潮、異常潮や電波環境の揺らぎなどによる数時間周期の変動を取り除き、潮位偏差を求め直した。本報ではこのデータを基本に用いる。

(3) 対象地点

表-3.1はNOWPHASの全ての沿岸波浪計とGPS波浪計の設

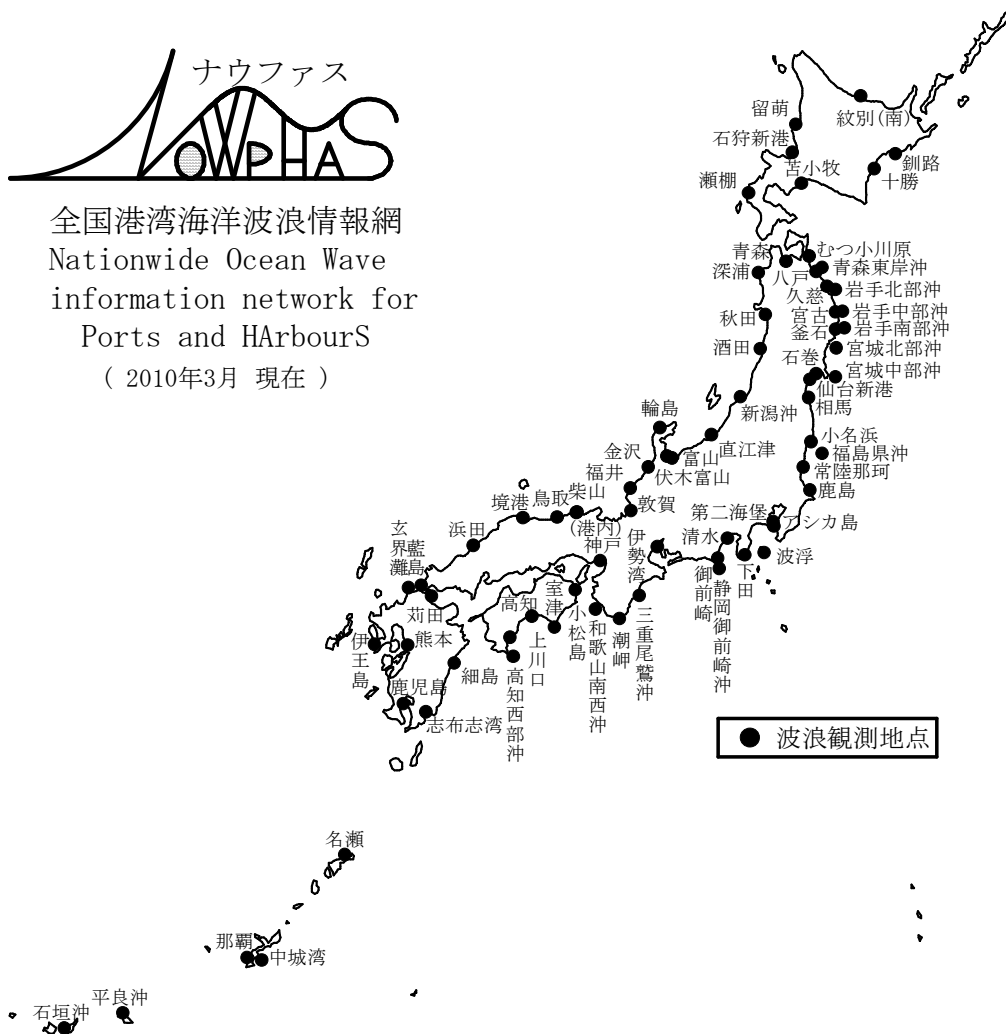


図-3.2 GPS波浪計と沿岸波浪計の配置

表-3.1 沿岸波浪計とGPS波浪計の諸元

整理番号	解析対象	地点名	波高計				波向計					
			機種	水深(m)	設置高(m)	北緯(WGS)	東経(WGS)	機種	水深(m)	設置高(m)	北緯(WGS)	東経(WGS)
1		留萌	海象計	49.8	0.8	43° 51' 59"	141° 28' 07"	同左				
2		石狩新港	海象計	22.4	1.6	43° 14' 55"	141° 16' 44"	同左				
3		瀬棚	U S W	52.9	0.8	42° 26' 39"	139° 49' 03"	CWD	20.0	2.7	42° 26' 00"	139° 49' 58"
4		青森	U S W	24.9	2.0	40° 51' 10"	140° 44' 21"					
5		深浦	U S W	51.0	1.9	40° 39' 34"	139° 54' 42"					
6		秋田	U S W	29.4	2.3	39° 44' 16"	140° 00' 26"	CWD	29.4	2.8	39° 44' 16"	140° 00' 26"
7		酒田	U S W	45.9	1.2	39° 00' 31"	139° 46' 45"	傾斜計	45.9	—	39° 00' 31"	139° 46' 45"
8		新潟沖	海象計	34.5	1.2	38° 00' 17"	139° 07' 34"	同左				
9		直江津	海象計	32.7	1.2	37° 14' 09"	138° 16' 25"	同左				
10		富山	海象計	20.0	1.2	36° 46' 40"	137° 12' 18"	同左				
11		伏木富山	海象計	46.4	1.2	36° 49' 15"	137° 04' 29"	同左				
12		輪島	海象計	52.0	1.2	37° 25' 51"	136° 54' 08"	同左				
13		金沢	海象計	21.1	1.2	36° 36' 50"	136° 34' 03"	同左				
14		福井	海象計	36.7	0.7	36° 09' 50"	136° 04' 30"	同左				
15		敦賀	U S W	18.8	1.3	35° 41' 17"	136° 04' 36"					
16		柴山	海象計	41.1	0.5	35° 40' 17"	134° 40' 37"	同左				
17		柴山(港内)	U S W	11.1	0.5	35° 39' 32"	134° 39' 58"					
18		鳥取	海象計	30.9	0.5	35° 33' 16"	134° 09' 41"	同左				
19		境港	U S W	12.0	1.5	35° 31' 56"	133° 16' 36"					
20		浜田	海象計	50.1	0.9	34° 54' 19"	132° 02' 11"	同左				
21		藍島	海象計	21.1	0.6	34° 00' 43"	130° 47' 35"	同左				
22		玄界灘	海象計	39.5	1.8	33° 56' 02"	130° 28' 05"	同左				
23		伊王島	U S W	31.9	1.7	32° 42' 59"	129° 45' 15"	CWD	31.9	2.5	32° 42' 59"	129° 45' 15"
24		熊本	空中発射	4.2	7.9	32° 45' 08"	130° 33' 53"					
25		名瀬	海象計	54.6	0.6	28° 27' 07"	129° 31' 18"	同左				
26		那覇	海象計	51.0	1.5	26° 15' 29"	127° 38' 51"	同左				
27	○	紋別(南)	海象計	52.6	0.8	44° 19' 04"	143° 36' 25"	同左				
28	○	釧路	海象計	50.1	0.9	42° 54' 38"	144° 23' 50"	同左				
29	○	十勝	海象計	23.0	0.9	42° 39' 06"	143° 41' 08"	同左				
30	○	苫小牧	海象計	50.7	0.9	42° 32' 39"	141° 26' 46"	同左				
31	○	むつ小川原	U S W	43.8	0.9	40° 55' 30"	141° 25' 27"	CWD	27.8	2.6	40° 55' 12"	141° 24' 44"
32	○	八戸	U S W	27.7	1.9	40° 33' 39"	141° 34' 06"	CWD	27.7	3.1	40° 33' 39"	141° 34' 06"
33	○	久慈	海象計	49.5	1.1	40° 13' 04"	141° 51' 36"	同左				
34	○	宮古	U S W	24.2	1.3	39° 38' 22"	141° 59' 09"					
35	○	釜石	U S W	49.8	0.9	39° 15' 54"	141° 56' 06"					
36	○	石巻	海象計	20.8	0.5	38° 20' 49"	141° 15' 16"	同左				
37	○	仙台新港	U S W	21.3	3.2	38° 15' 00"	141° 03' 58"	CWD	21.3	3.5	38° 15' 00"	141° 03' 58"
38	○	相馬	U S W	17.1	1.7	37° 51' 28"	140° 58' 52"	CWD	17.1	2.8	37° 51' 28"	140° 58' 52"
39	○	小名浜	海象計	23.8	1.6	36° 55' 04"	140° 55' 18"	同左				
40	○	常陸那珂	海象計	30.3	2.4	36° 23' 42"	140° 39' 12"	同左				
41	○	鹿島	U S W	24.0	2.8	35° 53' 55"	140° 45' 14"	CWD	24.0	3.5	35° 53' 55"	140° 45' 14"
42	○	第二海堡	海象計	28.8	0.7	35° 18' 13"	139° 44' 52"	同左				
43		アシカ島	U S W	21.7	1.0	35° 12' 38"	139° 44' 06"					
44	○	波浮	U S W	48.3	1.0	34° 40' 35"	139° 27' 08"	CWD	29.7	2.5	34° 40' 31"	139° 26' 19"
45	○	下田	U S W	51.1	1.0	34° 38' 48"	138° 57' 11"					
46	○	清水	海象計	51.8	0.6	35° 01' 16"	138° 32' 05"	同左				
47	○	御前崎	海象計	22.8	0.6	34° 37' 17"	138° 15' 33"	同左				
48		伊勢湾	海象計	26.9	0.5	34° 55' 12"	136° 44' 25"	同左				
49	○	潮岬	海象計	54.7	0.6	33° 25' 59"	135° 44' 50"	同左				
50		神戸	海象計	17.0	0.5	34° 38' 50"	135° 16' 36"	同左				
51	○	小松島	海象計	20.8	1.5	34° 02' 24"	134° 38' 37"	同左				
52	○	室津	海象計	27.7	0.2	33° 16' 18"	134° 08' 50"	同左				
53	○	高知	海象計	24.1	0.5	33° 28' 57"	133° 35' 13"	同左				
54	○	上川口	U S W	27.9	0.6	33° 01' 54"	133° 03' 29"					
55	○	菊田	U S W	9.6	1.4	33° 47' 59"	131° 04' 20"	CWD	9.6	1.9	33° 47' 59"	131° 04' 20"
56	○	細島	海象計	48.3	0.4	32° 26' 36"	131° 43' 42"	同左				
57	○	志布志湾	海象計	35.0	0.7	31° 25' 02"	131° 06' 36"	同左				
58	○	鹿児島	海象計	35.0	1.7	31° 31' 06"	130° 33' 08"	同左				
59	○	中城湾	海象計	39.6	0.5	26° 14' 32"	127° 57' 55"	同左				
60	○	平良沖	海象計	44.1	0.7	24° 51' 39"	125° 14' 08"	同左				
61	○	石垣沖	海象計	34.8	0.7	24° 21' 55"	124° 06' 10"	同左				
62	○	青森東岸沖	G P S	87	海面	40° 38' 00"	141° 45' 00"					
63	○	岩手北部沖	G P S	125	海面	40° 07' 00"	142° 04' 00"					
64	○	岩手中部沖	G P S	200	海面	39° 37' 38"	142° 11' 12"					
65	○	岩手南部沖	G P S	204	海面	39° 15' 31"	142° 05' 49"					
66	○	宮城北部沖	G P S	160	海面	38° 51' 28"	141° 53' 40"					
67	○	宮城中部沖	G P S	144	海面	38° 13' 57"	141° 41' 01"					
68	○	福島県沖	G P S	137	海面	36° 58' 17"	141° 11' 08"					
69	○	静岡御前崎沖	G P S	120	海面	34° 24' 12"	138° 16' 30"					
70	○	三重尾鷲沖	G P S	210	海面	33° 54' 08"	136° 15' 34"					
71	○	和歌山南西沖	G P S	201	海面	33° 38' 32"	135° 09' 24"					
72	○	高知西部沖	G P S	309	海面	32° 37' 52"	133° 09' 21"					

置位置や水深などの諸元，図-3.2はそのうち津波解析の対象地点の位置を示す。GPS波浪計は以下に記す11地点に設置されており，本報ではその全てを解析対象とする。

青森東岸沖，岩手北部沖，岩手中部沖，岩手南部沖，  
宮城北部沖，宮城中部沖，福島県沖，静岡御前崎沖，  
三重尾鷲沖，和歌山南西沖，高知西部沖

### 3.2 沿岸波浪計

#### (1) 機器の特徴

沿岸波浪計はNOWPHASの伝統的な波浪観測装置であり，一般に，海岸から概ね3km以内の水深20～60mの海底に波浪計本体を設置し，陸上から敷設した海底ケーブルで電源供給とデータ伝送を行っている。サンプリング間隔は

0.5sである。このデータに後述するフィルタ処理をすることで，潮位や潮位偏差を求めることができる。本報の対象地点は太平洋沿岸を中心としており，これらの地点では現在，海底設置型超音波式波高計または海象計が使われている。

超音波式波高計は，海底から海面に向けて超音波を発射し，それが海面で反射して戻るまでの時間を計測することで，海面の高さを求めるものである。海底の水平二成分流速を超音波で計測し，共分散法により主波向を求めるための波向計を併設している場合が多い。一方，海象計は，図-3.3に示すように，海底から鉛直上方に向けて発射した超音波で海面の高さを計測し，斜め上方の3方向に向けて発射した超音波で上・中・下層の水粒子速度

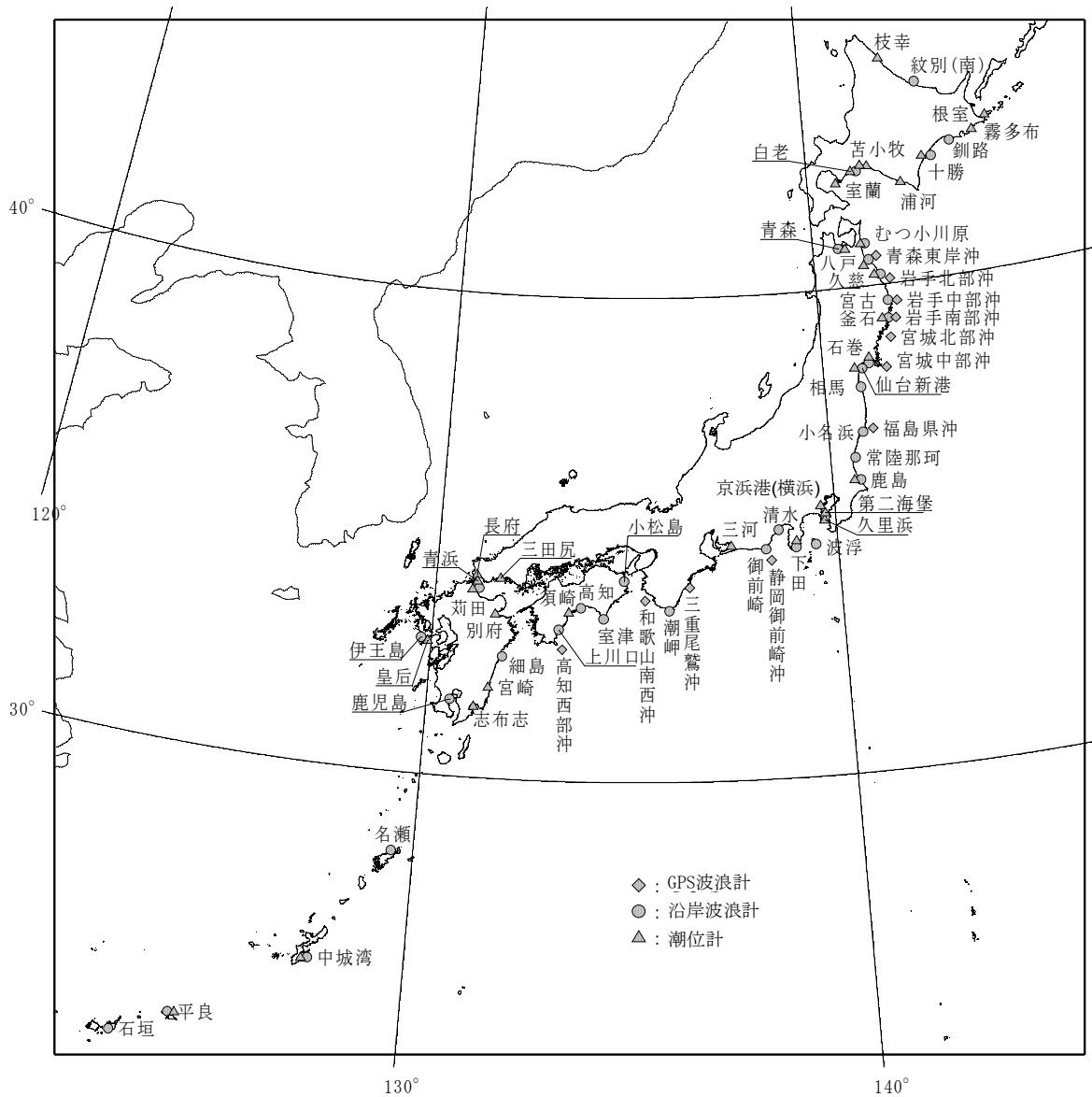


図-3.2 解析の対象地点

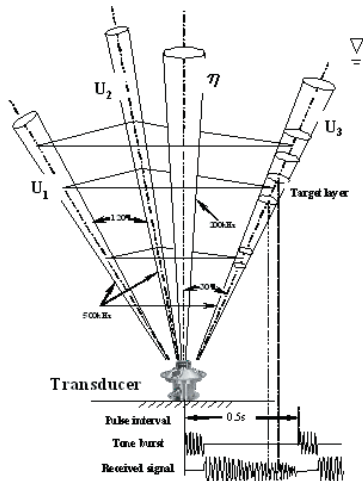


図-3.3 海象計のしくみ

を計測するものである。現在のリアルタイム処理では海面の高さと上層の水粒子速度から拡張最尤法EMLMで波浪の方向スペクトルを計算している（橋本ら，1995）。2003年十勝沖地震津波や2004年東海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。

## (2) 解析方法

沿岸波浪計ではセンサから海面までの高さを計測しており，本報ではこれを平滑化したものを潮位とみなすことにする。沿岸波浪計の0.5s間隔の水位波形には波浪成分が含まれているため，まずはフィルタ長が±60s，カットオフ周期が120sの長周期波抽出フィルタ（岩崎，1996；永井ら，1999）で波浪成分を除去しながら5s間隔の水位データに変換した。次に，この水位データから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，2006b）で潮位を求めた。さらに，潮位データからカットオフ周期が209分の数値フィルタによって，天文潮位と潮位偏差とに分離した。以上は，NOWPHASにおける標準的な処理方法であり，既往の津波の解析に対しても採用されている。

ただし，この処理方法では，津波によって湾内に周期が数時間の顕著な副振動が生じた場合に，この副振動の成分も天文潮に分類されてしまう。このような地点では，1ヶ月分の潮位をもとに調和解析を行い，得られた調和定数で天文潮位を求めなおした。

海象計には水圧式波高計と超音波式波高計の両方が装備されており，どちらの水位データを用いて津波の解析を行うこともできる。一般に超音波式波高計は，水圧式波高計より感度が良いが，ノイズを含んだりドリフトが生じていたりすることがある。そこで本報では，超音波式波高計の波形を水圧式波高計の波形と比較して異常がないことを確認した上で，超音波式波高計による波形を解析に用いた。

## (3) 対象地点

本報では，表-3.1に示した沿岸波浪計のうち，図-3.2にも示した以下の32地点に対し，津波の解析を行う。なお，表-3.1において，海象計とは超音波ドップラー式波浪計の一種である海象計であり，USWとは超音波式波高計，CWDとは超音波式流速計型波向計である。水深とは，水表面から海底面までの距離の平均値より主要4分潮の振幅の和を減じた値である。設置高とは，海底面から観測センサまでの高さのことである。

紋別(南)，釧路，十勝，青森，むつ小川原，八戸，久慈，宮古，釜石，石巻，仙台新港，相馬，小名浜，常陸那珂，鹿島，波浮，下田，御前崎，清水，潮岬，小松島，室津，高知，上川口，荻田，細島，鹿児島，伊王島，名瀬，中城湾，平良沖，石垣沖

## 3.3 潮位計

### (1) 機器の特徴

NOWPHASの潮位計の多くはフロート式，すなわち岸壁など陸側に井戸を掘るか，岸壁前面の海上に観測塔を建ててその柱の一部を井戸とし，井戸上の滑車から導索（ワイヤー）で浮きとカウンターウェイトを吊し，水面の上下で生じる浮きの上下動を滑車の回転量から計測するものである。井戸と外部とは導水管によって接続されている。導水管は，波浪による短周期の水位変化を井戸の中に伝えず，潮汐による長周期の水位変化のみを伝える，ローパスフィルタの役割を担っている。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。なお，北海道開発局の一部の地点では，岸壁等に立てた支柱から海面に向かって超音波を発射して距離を計測する，空中発射型超音波式潮位計も使われている。

NOWPHASでは，潮位も0.5s間隔で観測している。港湾事務所ごとに波浪（水位と水粒子速度），潮位，風のデータをまとめて港湾空港技術研究所に伝送するしくみになっているためである。

### (2) 解析の方法

潮位計の処理方法は沿岸波浪計と同じである。

### (3) 解析対象地点

潮位計も全国で69地点がオンラインで接続されているが，本報では表-3.2と図-3.2に示す以下の33地点を対象とする。

枝幸，根室，霧多布，十勝，浦河，苫小牧東，苫小牧西，白老，室蘭，青森，むつ小川原，八戸，久慈，釜石，石巻，仙台新港，鹿島，久里浜，第二海堡，京浜港（横浜），下田，三河，須崎，三田尻，長府，青浜，荻田，別府，宮崎，志布志湾，皇后，中城湾，平良



表-3.2 解析の対象とする潮位計の諸元

潮位観測地点	機器	経度(北緯)	経度(東経)	所属機関
枝幸	フース	44° 56' 19"	142° 35' 21"	北海道開発局
根室	フース	43° 20' 36"	145° 35' 04"	北海道開発局
霧多布	空中発射	43° 04' 42"	145° 06' 59"	北海道開発局
十勝	フース	42° 17' 49"	143° 19' 20"	北海道開発局
浦河	フース	42° 09' 51"	142° 46' 15"	海上保安庁
苫小牧東	フース	42° 36' 21"	141° 49' 02"	北海道開発局
苫小牧西	フース	42° 37' 47"	141° 37' 16"	北海道開発局
白老	フース	42° 31' 18"	141° 19' 14"	北海道開発局
室蘭	フース	42° 20' 40"	140° 57' 12"	北海道開発局
青森	フース	40° 50' 07"	140° 45' 50"	東北地方整備局
むつ小川原	フース	40° 55' 35"	141° 23' 17"	東北地方整備局
八戸	フース	40° 31' 59"	141° 33' 20"	東北地方整備局
久慈	フース	40° 11' 32"	141° 47' 48"	東北地方整備局
釜石	フース	39° 16' 24"	141° 53' 21"	海上保安庁
石巻	フース	38° 24' 29"	141° 16' 00"	東北地方整備局
仙台新港	フース	38° 15' 56"	141° 01' 45"	東北地方整備局
鹿島	フース	35° 55' 46"	140° 41' 38"	関東地方整備局
久里浜	フース	35° 13' 39"	139° 43' 16"	港湾空港技術研究所
第二海堡	フース	35° 18' 31"	139° 44' 36"	関東地方整備局
京浜港(横浜)	フース	35° 27' 54"	139° 38' 25"	関東地方整備局
下田	フース	34° 40' 31"	138° 57' 33"	中部地方整備局
三河	フース	34° 44' 00"	137° 19' 13"	中部地方整備局
須崎	フース	33° 23' 14"	133° 17' 33"	四国地方整備局
三田尻	フース	34° 02' 02"	131° 35' 18"	中国地方整備局
長府	フース	34° 00' 53"	131° 00' 14"	九州地方整備局
青浜	フース	33° 56' 56"	131° 01' 07"	九州地方整備局
苅田	フース	33° 47' 09"	130° 59' 18"	九州地方整備局
別府	フース	33° 17' 55"	131° 30' 13"	九州地方整備局
宮崎	フース	31° 54' 10"	131° 27' 23"	九州地方整備局
志布志湾	フース	31° 28' 30"	131° 06' 32"	九州地方整備局
皇后	フース	32° 43' 21"	129° 50' 05"	九州地方整備局
中城湾	フース	26° 19' 25"	127° 50' 24"	沖縄総合事務局
平良	フース	24° 48' 29"	125° 16' 44"	沖縄総合事務局

なお、浦河と釜石は海上保安庁の機器で観測したものを港湾局が共同利用しているものである。

こうして得られた潮位と潮位偏差の波形を巻末の付図A-1~77に示す。津波発生前の2月28日0時から津波が完全におさまった3月3日0時までの記録を示したものであり、津波の全体的な様子と、津波来襲前の副振動の有無を確認することができる。

### 3.4 津波の定義

前節の要領で得られた潮位偏差の波形をもとに、図-3.4に示す要領で、

- ①津波の到達時刻
- ②第1波の偏差(天文潮位からの差)
- ③最大偏差(天文潮位からの差が最大の値)とその起時
- ④ゼロアップクロス法で定義した波高と周期

を整理した。第1波の決定にあたっては、まず明らかに津波到達前の時間帯で偏差の標準偏差を求めておき、津波到達時間と考えられる時間帯で偏差がこれの5倍を超えるゼロ

アップクロス波を第1波の候補とした。ただし、今回の津波のような遠地津波では、津波の振幅が小さく、もともと津波とは関係のない副振動が発生している地点もあるため、このようなアルゴリズムは万能ではない。そこで、波形の目読や隣接地点との相関性を見ながら、第1波を修正した。こうして得られた各地点の値を表-3.3に示す。この表から以下のことが分かる。

- ①津波の第一波の到達時刻は、北海道地方の太平洋沿岸で13時台後半から14時台、東北・関東・中部地方の太平洋沿岸では概ね14時台、近畿・四国・九州の太平洋沿岸では15時台、沖縄本島から石垣島にかけては概ね16時台であり、周防灘にも18時台に到達した。
- ②久慈、石巻、仙台新港、須崎、志布志湾の5箇所では、3~9波目に1mを超える最大偏差を記録した。

巻末の付図B-1~5は、付図Aに示した潮位偏差のうち2月28日12時~3月1日12日を引き伸ばしたものであり、↓印で第一波、▼印で正の最大偏差、▽印で最大波の山を示す。

なお、第一波が不明瞭な場合には↓印をつけておらず、正

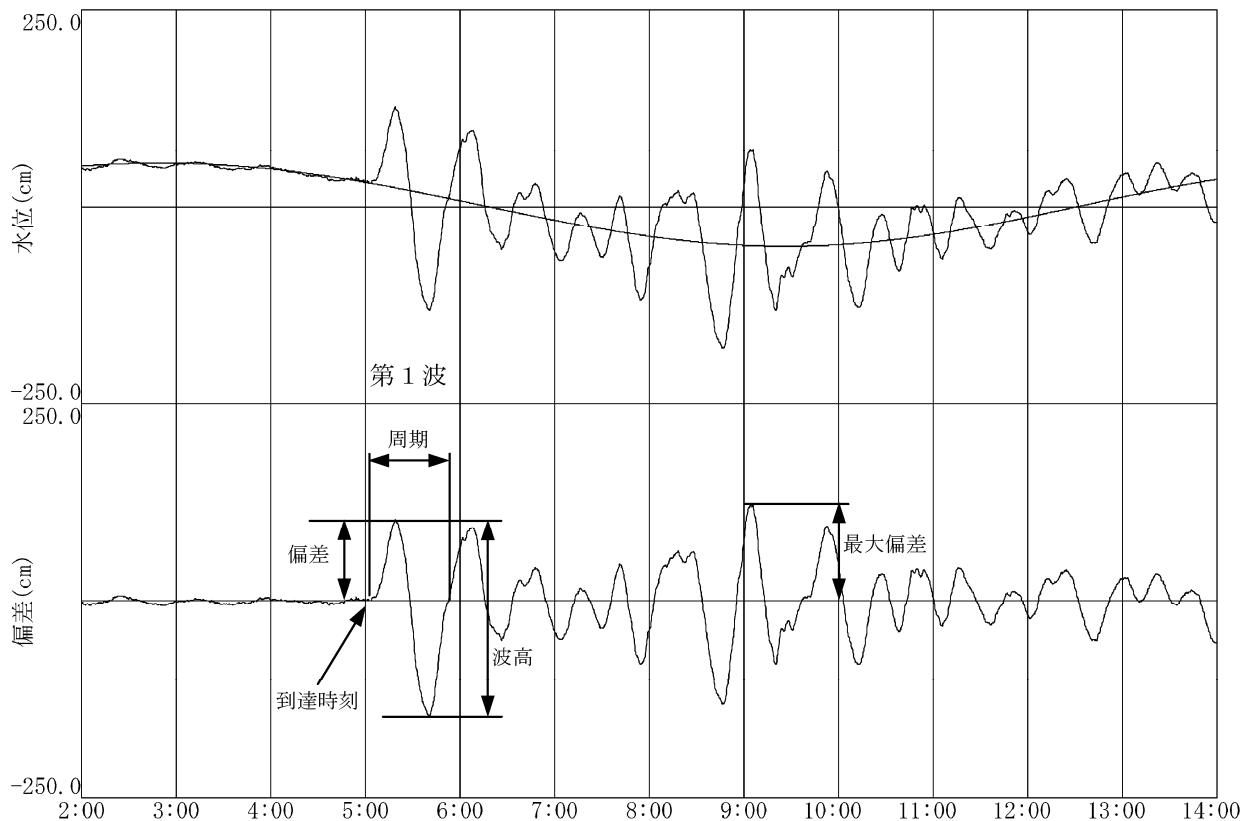


図-3.4 津波の波形記録の整理法

表-3.3 ゼロアップクロスによる津波の解析結果

観測地点		第1波				最大偏差				最大波				
地点名	観測機器	到達時刻		偏差 (cm)	起時 (時分)	No.	偏差 (cm)	起時		No.	波高 (cm)	周期 (min)	起時	
		日	時分					日	時分				日	時分
枝幸	潮位計			困難			19.9	28日	19:10		39.0	33	28日	19:06
紋別(南)	沿岸波浪計			困難			7.4	1日	4:23		14.5	73	28日	16:04
根室	潮位計			困難			20.3	28日	18:47		36.2	43	28日	17:56
霧多布	潮位計	28日	13:52	16.2	14:01	10	79.1	28日	19:53	10	137.4	40	28日	19:41
釧路	沿岸波浪計	28日	13:46	10.6	15:01	2	24.7	28日	15:56	1	37.1	116	28日	13:46
十勝	沿岸波浪計	28日	13:59	10.0	14:16	4	57.2	28日	17:33	4	112.6	51	28日	17:18
十勝	潮位計	28日	13:45	17.1	14:18	11	64.5	28日	21:32	4	122.3	50	28日	15:55
浦河	潮位計	28日	14:30	11.4	14:47	6	66.6	28日	17:09	6	131.0	33	28日	17:04
苫小牧	沿岸波浪計	28日	14:34	18.2	15:35	2	22.7	28日	16:59	1	42.5	132	28日	14:34
苫小牧東	潮位計	28日	14:56	20.8	15:32	22	50.7	1日	6:24	12	88.3	63	28日	23:06
苫小牧西	潮位計	28日	14:57	25.1	15:34	12	35.5	1日	0:25	1	69.4	105	28日	14:57
白老	潮位計	28日	14:42	17.3	15:32	8	28.4	28日	20:33	12	51.9	39	28日	22:33
室蘭	潮位計	28日	15:01	23.2	16:01	31	27.4	2日	23:47	29	52.4	261	2日	14:25
青森	沿岸波浪計	28日	15:46	14.1	16:26	3	21.5	28日	19:59	3	34.2	72	28日	19:45
青森	潮位計	28日	15:48	12.8	16:29	3	28.2	28日	20:00	3	43.7	75	28日	19:41
むつ小川原	沿岸波浪計	28日	14:11	15.6	15:10	4	29.1	28日	17:27	3	50.8	52	28日	16:23
むつ小川原	潮位計	28日	14:11	7.4	14:17	3	57.0	28日	15:52	7	114.4	43	28日	18:15
青森東岸沖	GPS波浪計	28日	14:12	14.9	15:01	3	28.1	28日	16:18	3	52.5	57	28日	16:06
八戸	沿岸波浪計	28日	14:21	13.2	14:46	3	50.5	28日	16:24	3	105.1	51	28日	16:08
八戸	潮位計	28日	14:26	17.8	14:46	3	85.0	28日	16:20	3	168.0	52	28日	16:10
岩手北部沖	GPS波浪計	28日	13:55	7.3	14:21	3	21.1	28日	16:00	3	38.3	56	28日	15:45
久慈	沿岸波浪計	28日	14:09	8.6	14:29	3	36.1	28日	15:57	2	65.4	49	28日	14:57
久慈	潮位計	28日	14:14	25.6	14:39	5	118.4	28日	17:01	3	245.9	52	28日	15:26

表-3.3 ゼロアップクロスによる津波の解析結果(続き)

観測地点		第1波				最大偏差				最大波				
地点名	観測機器	到達時刻		偏差 (cm)	起時 (時分)	No.	偏差 (cm)	起時		No.	波高 (cm)	周期 (min)	起時	
		日	時分					日	時分				日	時分
岩手中部沖	GPS波浪計	28日	13:59	5.2	14:23	7	16.4	28日	18:17	2	37.8	54	28日	14:39
宮古	沿岸波浪計	28日	14:07	13.1	14:32	6	59.8	28日	18:25	6	110.8	49	28日	17:58
岩手南部沖	GPS波浪計	28日	14:02	14.5	14:53	5	23.8	28日	18:21	5	43.7	75	28日	17:49
釜石	沿岸波浪計	28日	14:06	10.5	14:24	3	39.1	28日	15:42	2	73.9	56	28日	14:35
釜石	潮位計	28日	14:10	12.3	14:19	7	55.6	28日	18:25	3	102.9	33	28日	15:34
宮城北部沖	GPS波浪計	28日	14:06	14.8	14:58	3	21.4	28日	17:32	3	42.4	60	28日	17:13
宮城中部沖	GPS波浪計	28日	14:15	16.6	14:50	3	21.7	28日	16:12	1	42.9	82	28日	14:15
石巻	沿岸波浪計	28日	14:49	25.1	15:20	6	74.6	28日	20:50	6	143.1	119	28日	20:30
石巻	潮位計	28日	14:54	41.2	15:44	3	101.3	28日	17:28	3	218.5	102	28日	17:12
仙台新港	沿岸波浪計	28日	14:59	41.6	15:36	2	58.8	28日	17:07	1	110.6	119	28日	14:59
仙台新港	潮位計	28日	14:59	27.0	15:13	9	105.1	28日	20:52	2	180.8	91	28日	15:30
相馬	沿岸波浪計	28日	14:49	33.7	15:34	3	40.4	28日	17:04	7	86.9	98	28日	19:47
福島県沖	GPS波浪計	28日	14:15	20.8	14:51	1	20.8	28日	14:51	1	38.7	107	28日	14:15
小名浜	沿岸波浪計	28日	14:28	35.7	15:01	6	42.4	28日	19:41	5	81.4	63	28日	18:32
常陸那珂	沿岸波浪計	28日	14:28	27.0	15:01	2	52.5	28日	16:30	2	93.4	66	28日	16:06
鹿島	沿岸波浪計	28日	14:27	27.0	14:38	3	62.1	28日	16:30	4	92.1	37	28日	16:53
鹿島	潮位計	28日	14:34	29.2	15:00	3	88.5	28日	16:49	3	161.0	63	28日	16:34
久里浜	沿岸波浪計	28日	14:38	19.1	15:02	9	24.0	28日	21:00	9	51.2	81	28日	20:42
第二海堡	潮位計	28日	14:42	13.9	15:15	7	17.7	28日	23:18	1	39.8	90	28日	14:42
京浜港(横浜)	潮位計	28日	15:09	19.1	15:40	2	41.7	28日	16:52	2	67.9	94	28日	16:34
波浮	沿岸波浪計	28日	14:19	12.9	14:54	2	15.0	28日	16:17	1	25.6	98	28日	14:19
下田	沿岸波浪計	28日	14:37	12.0	15:08	3	17.4	28日	16:37	11	36.2	67	28日	20:47
下田	潮位計	28日	14:40	12.9	15:06	2	42.3	28日	16:22	2	83.5	32	28日	16:00
静岡御前崎沖	GPS波浪計	28日	14:45	12.0	15:20	2	12.3	28日	16:46	1	23.1	101	28日	14:45
御前崎	沿岸波浪計	28日	14:56	17.8	15:18	7	19.6	28日	18:59	1	39.0	79	28日	14:56
清水	沿岸波浪計	28日	14:56	18.5	15:21	1	18.5	28日	15:21	1	49.1	76	28日	14:56
三河	潮位計	28日	16:27	18.0	16:51	2	20.5	28日	18:12	1	45.9	82	28日	16:27
三重尾鷲沖	GPS波浪計	28日	15:05	14.1	15:22	3	23.5	28日	17:05	3	38.1	57	28日	16:51
潮岬	沿岸波浪計	28日	15:02	9.5	15:27	1	9.5	28日	15:27	3	16.1	40	28日	16:42
和歌山南西沖	GPS波浪計	28日	15:11	10.5	15:33	1	10.5	28日	15:33	9	16.1	91	28日	19:50
小松島	沿岸波浪計	28日	16:00	13.1	16:15	2	16.8	28日	18:07	3	28.7	74	28日	18:31
室津	沿岸波浪計	28日	15:20	14.0	15:44	4	27.3	28日	17:33	3	53.9	33	28日	16:55
高知	沿岸波浪計	28日	15:37	28.7	16:09	8	29.5	28日	21:59	1	59.4	97	28日	15:37
須崎	潮位計	28日	15:45	40.2	16:13	5	127.6	28日	19:43	5	206.9	38	28日	19:36
高知西部沖	GPS波浪計	28日	15:28	13.9	16:13	3	14.9	28日	17:39	2	21.5	39	28日	16:42
上川口	沿岸波浪計	28日	15:41	27.2	16:01	3	65.3	28日	17:37	3	109.5	49	28日	17:08
三田尻	潮位計	28日	17:21	7.9	17:54	12	12.9	1日	12:24	11	21.9	137	1日	9:31
長府	潮位計	28日	18:46	7.6	19:33	2	22.1	28日	21:33	2	40.1	134	28日	21:06
青浜	潮位計	28日	18:21	6.3	19:26	2	18.1	28日	21:39	2	32.9	138	28日	21:05
荇田	沿岸波浪計	28日	18:29	6.2	19:05	1	6.2	28日	19:05	1	14.5	133	28日	18:29
荇田	潮位計	28日	18:31	6.9	18:52	2	7.3	28日	21:22	1	18.2	127	28日	18:31
別府	潮位計	28日	16:46	17.2	17:19	2	41.1	28日	19:17	2	84.4	115	28日	18:48
細島	沿岸波浪計	28日	15:38	20.5	16:10	3	25.4	28日	17:52	3	31.8	55	28日	17:38
宮崎	潮位計	28日	15:43	35.8	16:13	16	65.2	1日	3:23	16	142.2	51	1日	2:54
志布志湾	潮位計	28日	15:54	35.9	16:23	5	102.8	28日	19:55	5	156.3	55	28日	19:30
鹿児島	沿岸波浪計	28日	17:03	10.2	17:23	4	22.9	28日	21:26	3	37.5	122	28日	18:48
皇后	潮位計	28日	17:44	19.2	18:03	18	22.5	1日	8:36	20	41.6	42	1日	9:37
伊王島	沿岸波浪計	28日	17:35	12.2	17:58	1	12.2	28日	17:58	7	18.5	92	28日	22:58
名瀬	沿岸波浪計	28日	15:52	9.1	16:31	3	9.2	28日	17:42	1	19.3	60	28日	15:52
中城湾	沿岸波浪計	28日	16:00	12.9	16:31	3	15.2	28日	17:45	2	25.9	31	28日	17:11
中城湾	潮位計	28日	16:22	32.4	16:55	2	39.9	28日	17:58	1	79.7	72	28日	16:22
平良沖	沿岸波浪計	28日	16:48	12.9	17:20	2	21.2	28日	18:02	2	39.7	56	28日	17:48
平良	潮位計	28日	16:48	14.2	17:23	2	42.7	28日	18:03	2	83.6	52	28日	17:52
石垣沖	沿岸波浪計	28日	17:02	6.6	17:27	3	8.5	28日	19:08	2	12.5	51	28日	18:00

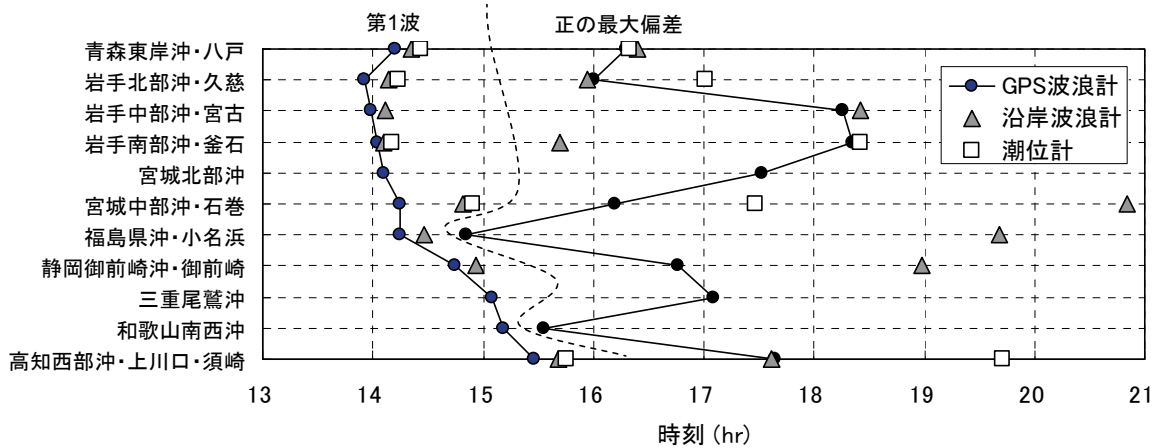


図-3.5 第1波と正の最大偏差の起時の比較

の最大偏差と最大波の山が同じ場合は▼印のみを付している。

図-3.5は、全てのGPS波浪計とそれに隣接する沿岸波浪計、潮位計で得られた第1波と正の最大偏差の起時をまとめたものである。第1波の到達は、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の順序になっており、例えば八戸では、GPS波浪計から9分後に沿岸波浪計、さらに5分後に潮位計で第1波が得られている。ただし、ここで言う「到達」とは、図-3.4で定義したゼロアップクロス点であり、必ずしも押し波や引き波の初動ではない。

#### 4. GPS波浪計で観測した津波

##### 4.1 津波による潮位偏差

図-4.1にGPS波浪計で得た潮位偏差の経時変化を示す。(a)は、リアルタイム処理で得られた波形に対してごく一部の異常値を削除し、速報値として既に公開しているもの(港湾局・港湾空港技術研究所, 2010)である。3.1節でも述べたように、潮位偏差の算出には調和定数から計算した天文潮位を用いており、潮位が得られればすぐに潮位偏差も得られる。津波来襲前の2月28日9時~14時にも、数cmほどのシフトや数時間周期の揺らぎが見られる。このような不規則な偏差は平時から生じており、その原因としては電波環境すなわちGPS測位の揺らぎ、天文潮以外の海の現象、GPS波浪計の係留状態の変化などが考えられる。今回の津波においては、14時から15時にかけて複数の地点で一斉に偏差が概ね0.1mを超えることで、通常にないパターンの偏差の発生、すなわち津波の来襲を認識できた。津波の振幅が小さいために第一波の詳しい到達時刻を議論することは非常に難しい。第一波の振幅が例えば30cmを超えるような顕著な津波であれば、ゼロアップクロス法による解析にもそれほど支障はないと思わ

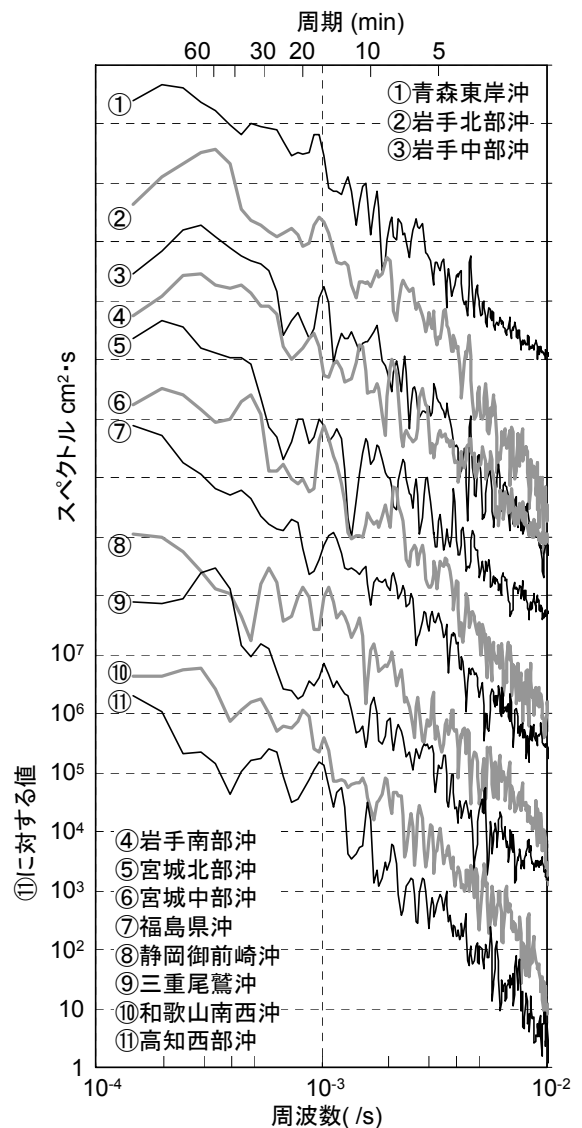
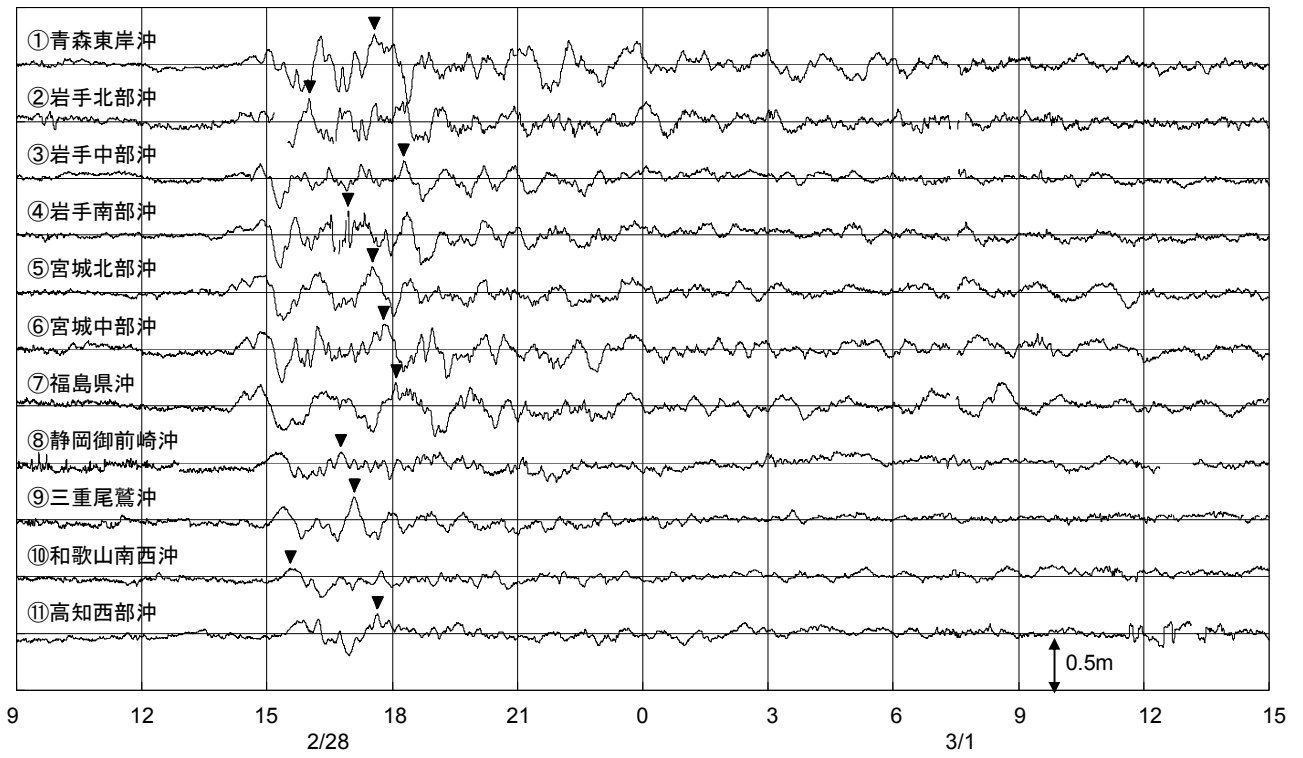
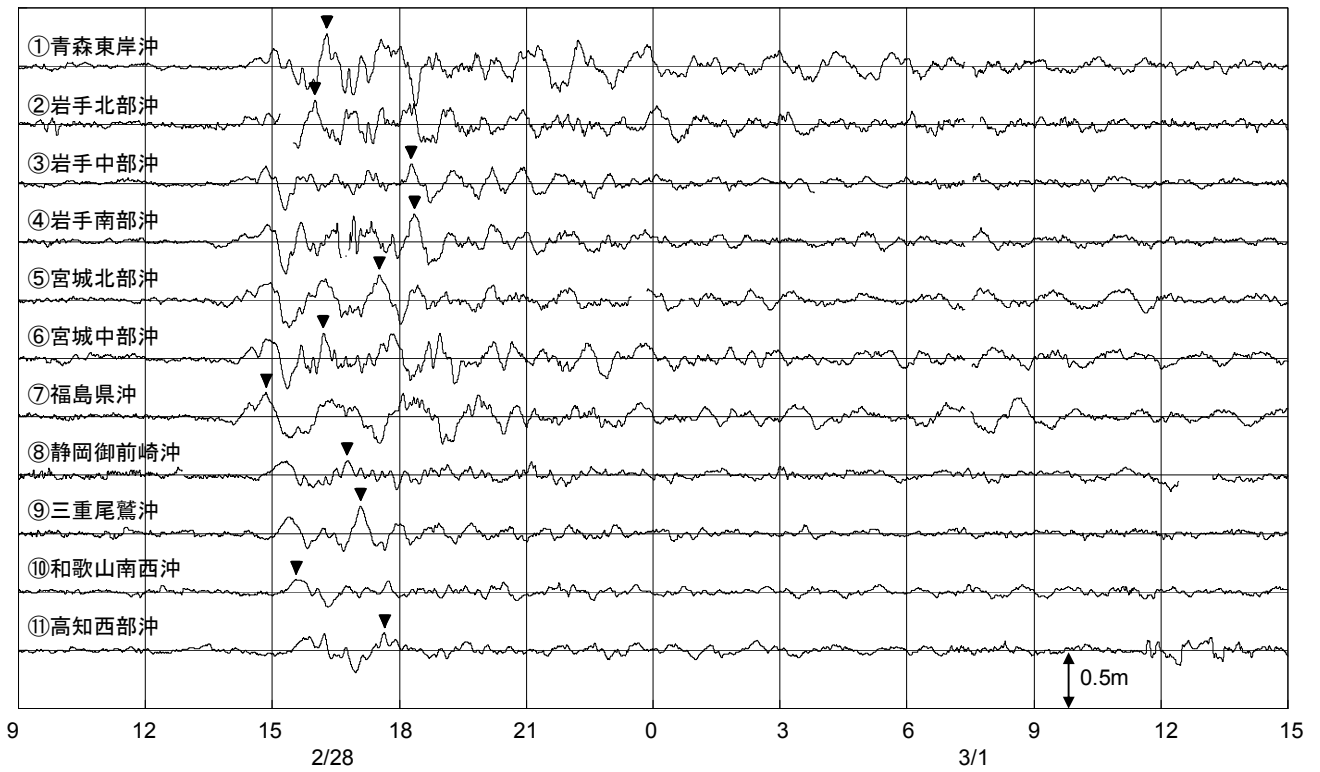


図-4.2 GPS波浪計のスペクトル

れるが、今回の津波では平時の揺らぎと大差のない津波を吟味しなければならない。そのため、本報ではカット



(a) 波形の速報値



(b) 本報で解析に用いる波形

図-4.1 GPS波浪計で得た潮位偏差

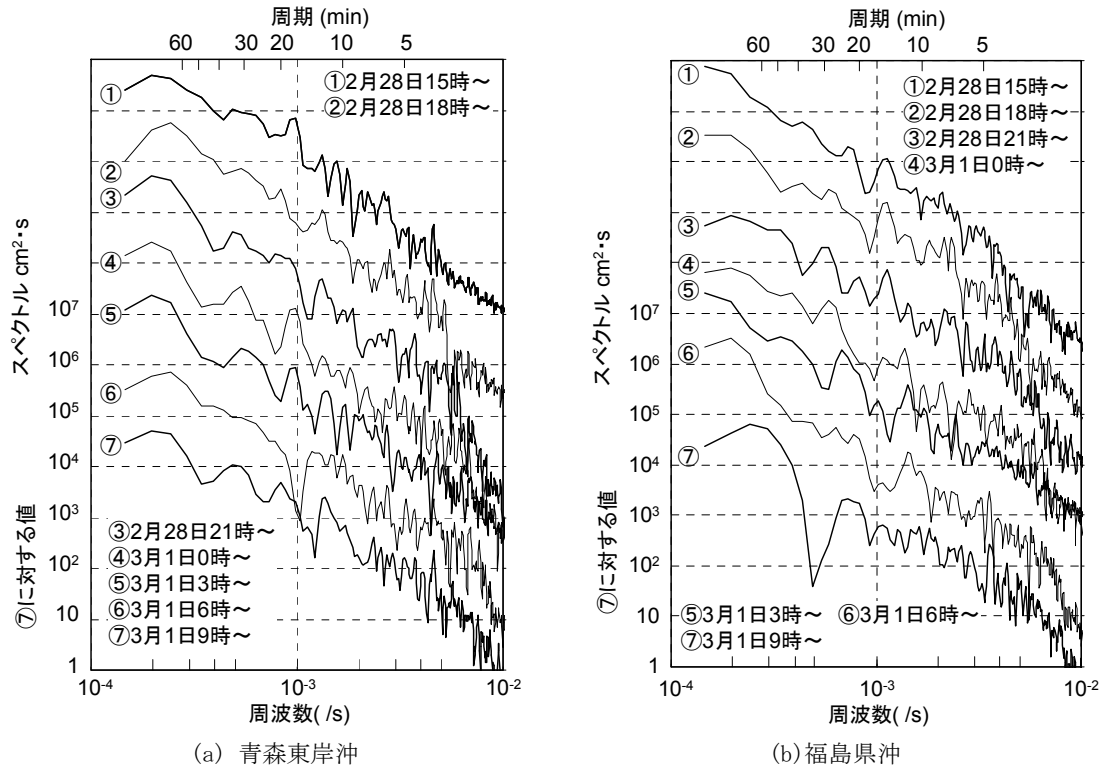


図-4.3 時間にスペクトルの変化

オフ周期が209分のフィルタで波形(b)を求め、これをもとに解析をすることにした。前掲の表-3.3および図-3.4もこの波形に対する解析結果である。この処理方法は、潮位偏差を求めたい時刻をはさんで前後3時間以上の潮位を用いるため、事後解析に適した方法である。ただし、(b)は(a)を上下方向に少し補正しただけで、津波の峯や谷の波形にほとんど影響はない。

この図の▼印は正の最大偏差を示したものであり、(a)と(b)を比較すると、①青森東岸沖、④岩手南部沖、⑥宮城中部沖、⑦福島県沖の4地点で別の波になっている。これらは、(a)と(b)においてそれぞれ最大と第二位の偏差が非常に接近しているために生じたものである。

さて、波形(b)においても、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基全てで明瞭に観測され、東北沿岸①～⑦には14時過ぎ、中部～四国沿岸⑧～⑩には15時前後に到達した。三陸沿岸の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。この距離は、水深200mにおける周期60minの長波の波長160kmの約1/4～1/3に相当する。これらの第一波の峯はよく対応しているが、二波目以降、時間が経つにつれ、隣接地点であっても峯・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。最大波は、⑦福島県沖と

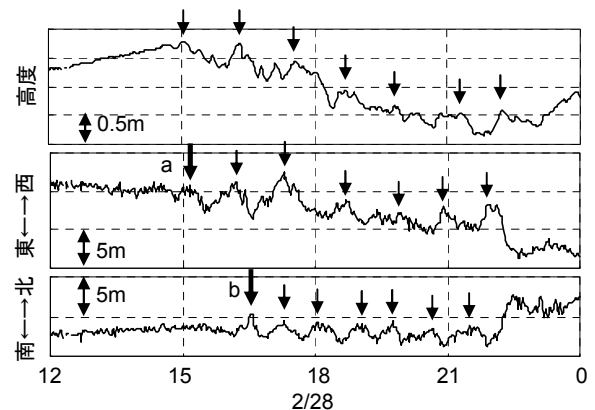


図-4.4 青森東岸沖GPS波浪計の高度・位置

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程度であり、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。

図-4.2は、各GPS波浪計の2月28日15時から5s間隔で4096個(約5.7時間)の潮位偏差を用いてスペクトルを求め、北から西に並べたものである。全地点に共通して概ね50min以上の長い周期にピークのあることが分かる。ただし、詳しく比較すると、図-4.1の波形でも類推できた

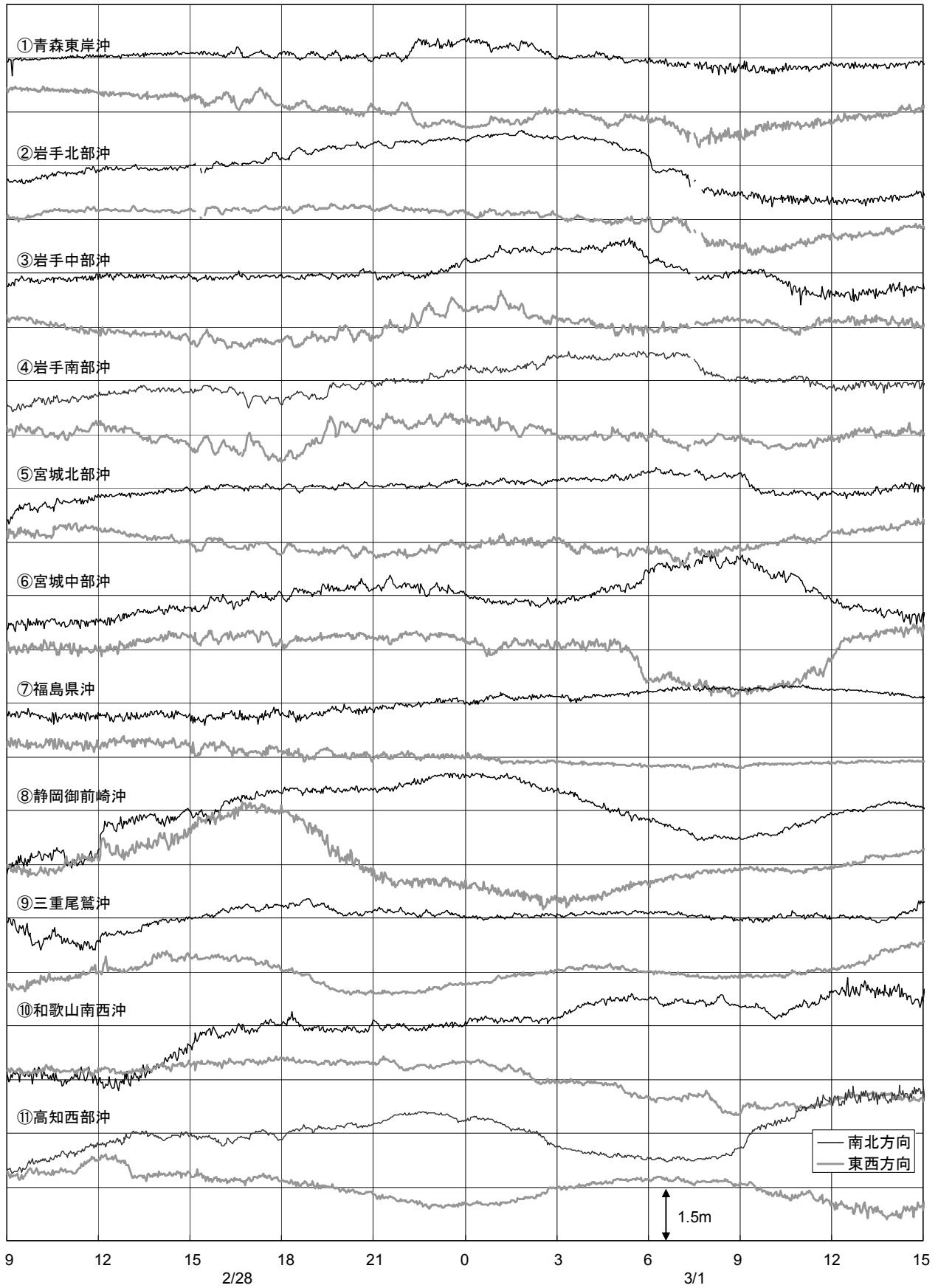


図-4.5 ブイの水平位置

ように、隣接するGPS波浪計であっても明確な違いがあり、これらの中では⑦福島沖と⑩高知西部沖が長く、②岩手北部沖、⑧静岡御前崎沖、⑨三重県尾鷲沖で短い。

図-4.3は、①青森東岸沖と⑦福島県沖を例に、スペクトル解析に用いる潮位偏差のデータの始まりの時刻を2月28日15時、18時、21時、3月1日0時、3時、6時、9時と3時間ずつずらした結果である。データの長さは図-4.2と同じ約5.7時間であるため、15時からのデータを半分ほどずらしたものが18時からのデータ、ということになる。このような時間をずらした解析は既報(永井ら、2006；清水ら、2007)においても行われている。今回の津波においては、①青森東岸沖で、60min以上と30min付近にピークを保ちながら、10min以上の成分が概ね同じ割合で減衰している。⑦福島県沖では60min以上の成分の減衰が急になったり鈍ったりする、複雑な変化をした。

#### 4.2 ブイの水平変位

図-4.4は、①青森東岸沖を例に、2min平均したブイの高度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、概ね津波の峯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。

図-4.5に示すように、このような津波に起因すると考えられる顕著な振れ回りは、③岩手中部沖の東西方向、④岩手南部沖の東西方向でも確認された。

### 5. 沿岸部における津波の変形

#### 5.1 青森東岸沖・八戸

図-5.1は青森東岸沖のGPS波浪計、八戸港の沿岸波浪計および潮位計の位置を示す。図-5.2はこれらの地点で得た潮位偏差の経時変化であり、図中の▼印は正の最大偏差を示す。これら三地点の波形はよく似ており、峯・谷も概ね対応している。

表-5.1(a)~(c)に各地点のゼロアップクロスによる波別解析の結果を示し、図-5.3に波高・周期の分布を第1~

10波(前)、11~20波(中)、21~30波(後)に分けて示す。この図から、三地点における波高・周期の頻度分布もよく似ていることが分かる。

図-5.4は、2月28日15時から5s間隔で4096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。GPS波浪計~沿岸波浪計(設置水深27.7m)で20min前後と40min以上の成分が増幅し、沿岸波浪計~潮位計では10min前後の短周期成分が増幅した。図-5.5は、2003年十勝沖地震津波(永井ら、2004)と沿岸波浪計~潮位計の増幅率を比較したものであり、今回の津波はこれとよく似ている。

図-5.6は三地点の相関性を示す。この図は9枚のグラフから構成されており、左上から右下の対角線上にGPS波浪計(G)、沿岸波浪計(U)、潮位計(T)のスペクトルを示している。対角線の右上側の3枚のグラフに三地点間の相関係

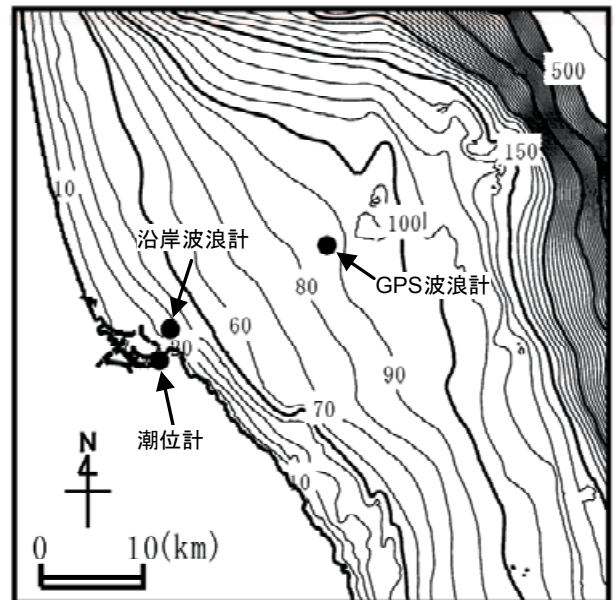


図-5.1 観測地点(青森東岸沖・八戸)

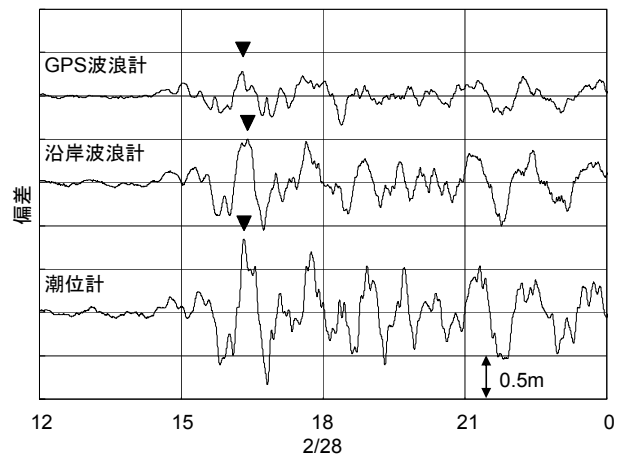


図-5.2 潮位偏差の経時変化(青森東岸沖・八戸)



表-5.1 個々の津波の波高と周期 (青森東岸沖・八戸)

(a) GPS波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:12	14.9	15:01	-1.7	15:16	16.6	68
2	15:20	5.7	15:24	-19.8	15:50	25.5	46
3	16:06	28.1	16:18	-24.4	16:55	52.5	57
4	17:03	22.7	17:34	-14.2	17:16	36.9	67
5	18:10	8.4	18:42	-33.8	18:23	42.1	38
6	18:48	11.4	18:53	-9.9	19:08	21.3	32
7	19:20	11.0	19:48	-11.7	20:02	22.7	48
8	20:08	7.5	20:17	-13.6	20:40	21.0	37
9	20:45	17.5	21:17	-21.9	21:48	39.4	80
10	22:05	22.2	22:14	-19.6	23:02	41.8	78
11	23:23	18.5	23:51	-9.5	0:35	27.9	88
12	0:50	9.2	0:58	-6.6	1:38	15.8	70
13	2:00	2.9	2:03	-7.5	2:16	10.3	34
14	2:34	13.8	2:59	-5.9	3:18	19.6	51
15	3:26	0.8	3:27	-13.4	3:46	14.2	31
16	3:57	12.8	4:19	-1.3	4:41	14.1	46
17	4:43	1.1	4:44	-11.9	5:15	13.1	41
18	5:24	11.7	5:39	-11.5	6:19	23.2	70
19	6:34	7.8	7:04	-3.4	6:50	11.3	46
20	7:20	3.6	7:22	-9.0	7:39	12.6	33
21	7:52	4.2	8:10	-6.1	8:23	10.3	40
22	8:33	5.9	9:12	-6.1	9:50	12.0	91
23	10:04	8.3	10:31	-1.5	10:07	9.8	43
24	10:46	1.5	10:48	-7.3	11:07	8.9	37
25	11:23	7.3	11:37	-0.8	11:53	8.1	30
26	11:54	3.5	12:13	-7.6	12:23	11.1	45
27	12:39	3.9	12:52	-3.1	13:06	7.0	35
28	13:14	4.4	13:18	-7.0	13:33	11.4	28
29	13:42	6.0	13:57	-2.8	14:26	8.8	46
30	14:28	2.4	14:34	-3.4	14:52	5.9	28

(b) 沿岸波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:21	13.2	14:46	-3.4	15:01	16.6	44
2	15:04	17.6	15:18	-38.3	15:47	56.0	63
3	16:08	50.5	16:24	-54.7	16:44	105.1	51
4	16:58	10.4	17:00	-22.2	17:09	32.6	31
5	17:29	46.8	17:39	-0.5	17:58	47.3	30
6	17:59	0.6	17:59	-36.1	18:32	36.7	41
7	18:39	27.3	18:53	-29.0	19:13	56.2	53
8	19:32	23.6	19:38	-20.9	19:50	44.5	26
9	19:58	17.3	20:03	-14.9	20:31	32.2	38
10	20:36	33.0	21:06	-50.2	21:47	83.3	82
11	21:59	37.3	22:27	-1.3	22:36	38.6	38
12	22:36	2.0	22:37	-33.6	23:10	35.5	41
13	23:18	23.5	23:49	-20.7	0:40	44.2	88
14	0:46	14.2	1:05	-13.1	1:26	27.4	50
15	1:37	17.6	1:46	-20.2	2:13	37.8	47
16	2:23	22.1	3:04	-21.2	3:29	43.3	98
17	4:01	17.7	4:27	-6.2	4:45	24.0	49
18	4:50	1.6	4:51	-25.1	5:13	26.8	36
19	5:26	25.5	5:38	-16.2	6:25	41.6	79
20	6:45	13.4	6:52	-0.4	6:45	13.7	28
21	7:13	10.8	7:20	-8.8	7:37	19.6	34
22	7:48	5.4	8:03	-14.6	8:24	20.0	44
23	8:31	8.2	9:02	-2.7	8:53	10.9	38
24	9:09	10.9	9:19	-14.3	9:40	25.2	43
25	9:52	11.8	10:35	-17.8	11:07	29.6	89
26	11:21	13.6	11:49	-8.6	12:11	22.2	57
27	12:18	2.5	12:20	-5.9	12:45	8.4	35
28	12:54	9.7	13:03	-8.4	13:39	18.2	51
29	13:45	10.6	14:05	-5.8	14:37	16.4	58
30	14:43	3.4	14:52	-10.6	15:18	14.0	39

(c) 潮位計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:26	17.8	14:46	-7.6	15:08	25.4	47
2	15:13	23.8	15:21	-60.5	15:49	84.3	57
3	16:10	85.0	16:20	-82.9	16:49	168.0	52
4	17:02	21.5	17:06	-21.8	17:21	43.3	33
5	17:34	69.6	17:45	-32.2	18:08	101.8	45
6	18:19	14.1	18:21	-47.7	18:37	61.8	27
7	18:46	53.7	18:56	-60.8	19:19	114.4	46
8	19:32	51.5	19:43	-42.8	19:56	94.3	32
9	20:04	22.0	20:23	-33.8	20:37	55.8	56
10	21:00	53.6	21:19	-54.4	21:49	108.0	63
11	22:02	37.6	22:30	-47.6	22:58	85.2	80
12	23:22	34.6	23:43	-6.5	0:00	41.0	41
13	0:03	16.2	0:11	-36.6	0:36	52.8	45
14	0:48	28.5	1:13	-22.4	1:30	50.8	53
15	1:41	36.2	1:51	-38.4	2:15	74.6	44
16	2:25	22.1	2:31	-9.6	2:53	31.7	31
17	2:56	32.7	3:10	-37.4	3:33	70.1	51
18	3:47	32.2	4:30	-12.9	4:41	45.1	62
19	4:49	6.1	4:56	-28.2	5:17	34.3	39
20	5:27	36.3	5:42	-21.0	6:06	57.3	48
21	6:15	3.5	6:17	-25.6	6:40	29.2	34
22	6:49	32.8	6:56	-7.1	7:21	39.9	35
23	7:23	8.5	7:35	-16.7	7:40	25.2	31
24	7:55	18.9	8:11	-17.9	8:27	36.8	37
25	8:32	16.5	8:45	-7.7	8:35	24.1	32
26	9:04	19.2	9:23	-21.2	9:43	40.5	52
27	9:56	12.9	10:02	-10.0	10:17	22.8	30
28	10:26	26.1	10:40	-29.8	11:12	56.0	54
29	11:20	14.9	11:24	-19.5	12:12	34.4	64
30	12:24	12.0	12:30	-20.1	12:50	32.2	36

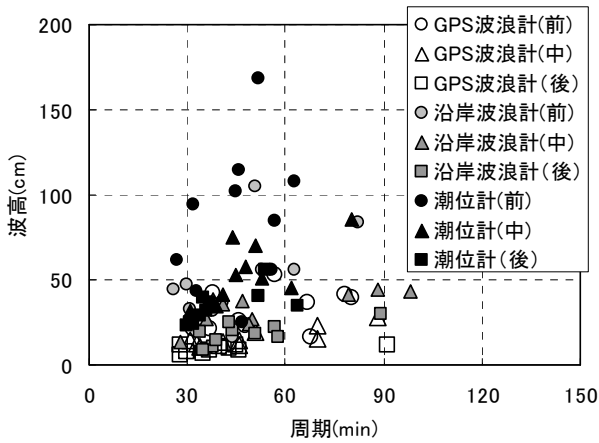


図-5.3 津波の波高・周期の分布（青森東岸沖・八戸）

数，左下側の3枚のグラフに位相差を示している．GPS波浪計～沿岸波浪計では，津波の主要な成分である周期40min以上の成分の相関係数が0.9以上で位相差も0degに近く，津波の波形の対応が非常に良いことを裏付けている．沿岸波浪計～潮位計でも，周期40min以上の成分に対して相関係数が0.9以上であり，位相差も45度以内である．

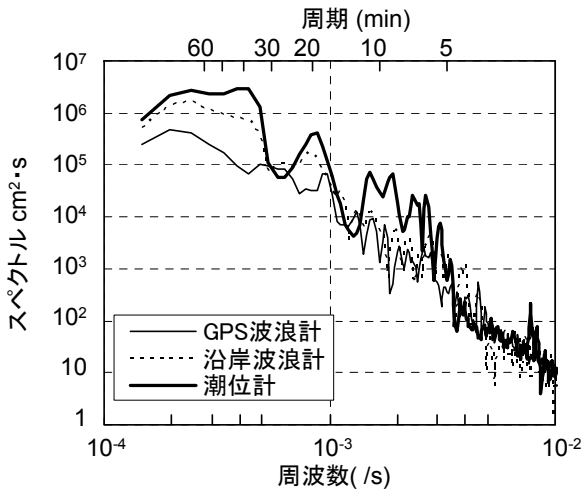


図-5.4 潮位偏差のスペクトル（青森東岸沖・八戸）

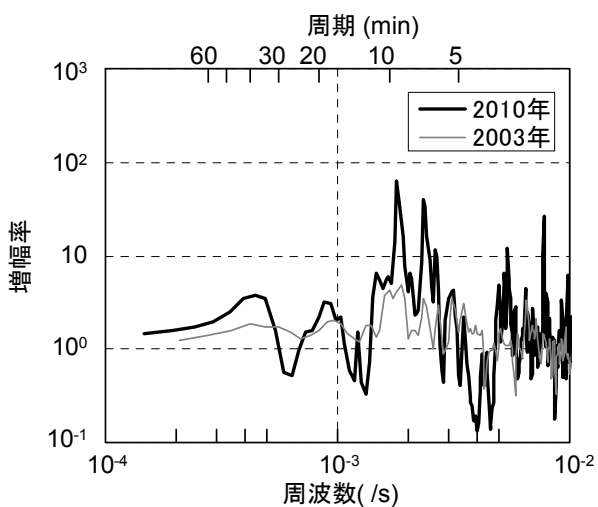


図-5.5 沿岸波浪計～GPS波浪計の増幅特性（青森東岸沖・八戸）

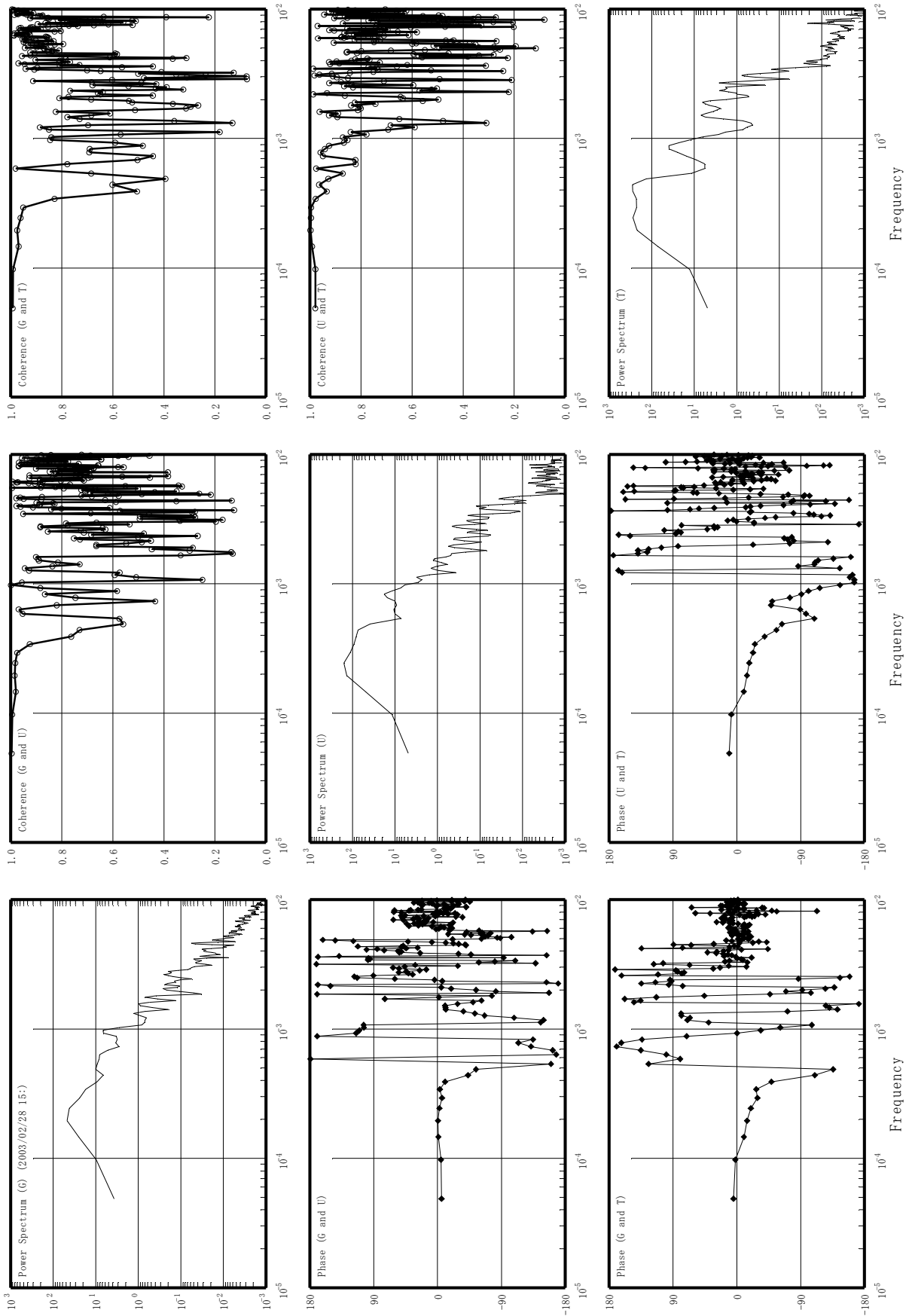


図-5.6 三地点の相関性 (青森東岸沖・八戸)

## 5.2 岩手北部沖・久慈

図-5.7は、岩手北部沖のGPS波浪計、久慈の沿岸波浪計および潮位計の位置を示す。図-5.8は、これらの地点で得た潮位偏差の経時変化を示す。GPS波浪計と沿岸波浪計の峯・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。

表-5.2(a)～(c)に各地点のゼロアップクロス法による波別解析の結果を示し、図-5.9に波高・周期の分布を示す。GPS波浪計と沿岸波浪計で捉えた周期は30～70minに満遍なく分布しており、周期が長いほど波高も大きいという傾向も見られる。これに対し潮位計の周期は30min程度に集中している。

図-5.10は、潮位偏差でスペクトルを求めた結果である。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。図-5.11は、2003年十勝沖地震津波（永井ら、2004）や2005年宮城県沖地震津波（永井ら、2006）のときの沿岸波浪計～潮位計の増幅率と今回の津波とを比較したものである。既往の津波では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。今回の津波でも同様な増幅が生じ、20min強での増幅が特に顕著であった。

図-5.12は三地点の相関性を示す。GPS波浪計～沿岸波浪計において、相関係数が0.9以上で位相も0degに近いのは、周期が概ね60min以上に限られる。沿岸波浪計～潮位計では、周期が30min以下で相関係数が高い。つまり、図-5.8からは沿岸波浪計～潮位計よりGPS波浪計～沿岸波浪計の方が波形の対応が良い印象を受けがちであるが、スペクトル解析によると、むしろ沿岸波浪計～潮位計の方が幅広い周期帯で対応がとれている。

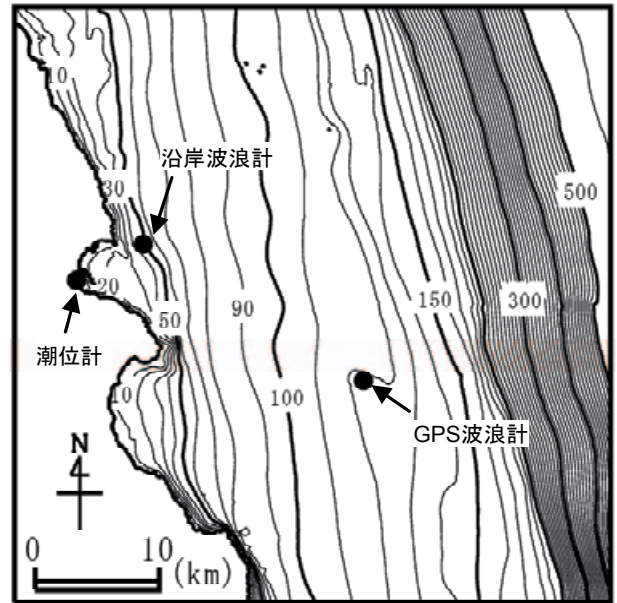


図-5.7 観測地点（岩手北部沖・久慈）

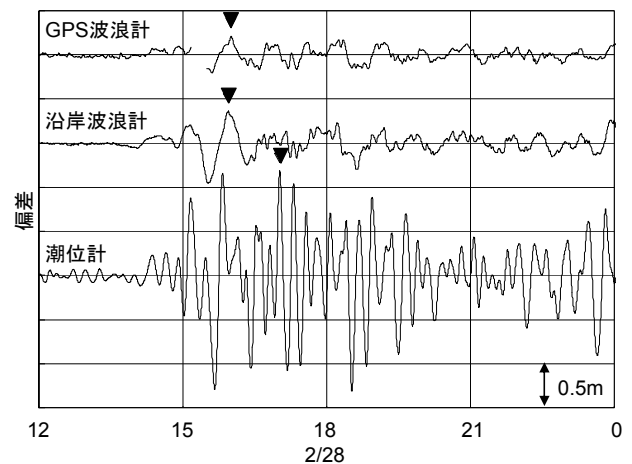


図-5.8 潮位偏差の経時変化（岩手北部沖・久慈）

表-5.2 個々の津波の波高と周期 (岩手北部沖・久慈)

(a) GPS波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	13:55	7.3	14:21	-1.7	14:06	9	52
2	14:47	9.5	14:55	-20.3	15:36	30	58
3	15:45	21.1	16:00	-17.2	16:36	38	56
4	16:41	13.2	16:45	-15.9	17:12	29	34
5	17:15	14.8	17:36	-16.4	17:23	31	34
6	17:49	17.5	18:15	-15.5	18:52	33	68
7	18:57	14.5	19:12	-10.0	19:35	25	57
8	19:55	6.8	19:56	-8.2	20:12	15	35
9	20:30	12.9	20:55	-11.5	21:14	24	56
10	21:25	8.5	21:44	-4.9	21:30	13	27
11	21:53	9.1	21:59	-10.2	22:23	19	35
12	22:28	2.5	22:30	-9.8	22:54	12	36
13	23:04	7.0	23:19	-5.4	23:37	12	46
14	23:49	15.8	0:05	-15.9	0:35	32	63
15	0:52	8.1	1:12	-1.5	1:27	10	36
16	1:28	4.0	1:40	-11.1	1:55	15	42
17	2:10	5.5	2:26	-2.9	2:40	8	32
18	2:43	10.8	3:12	-9.4	3:34	20	71
19	3:54	5.4	4:26	-4.0	4:36	9	44
20	4:38	2.1	4:45	-6.2	5:02	8	31
21	5:10	4.1	5:14	-3.1	5:38	7	36
22	5:46	11.3	6:07	-2.8	6:14	14	39
23	6:25	2.4	6:45	-9.7	6:40	12	26
24	6:52	5.2	7:19	-3.1	7:32	8	42
25	7:34	6.7	7:46	-8.9	8:08	16	52
26	8:25	4.8	8:40	-2.8	9:02	8	37
27	9:03	7.0	9:10	-1.0	9:31	8	29
28	9:32	6.5	9:44	-7.0	10:09	14	50
29	10:22	5.1	11:09	-7.2	10:30	12	69
30	11:30	3.6	12:02	-3.6	11:39	7	44

(b) 沿岸波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:09	8.6	14:29	-5.7	14:53	14.2	47
2	14:57	20.3	15:09	-45.1	15:32	65.4	49
3	15:46	36.1	15:57	-24.5	16:20	60.5	47
4	16:33	10.5	16:54	-7.0	16:46	17.5	26
5	16:59	13.9	17:09	-17.3	17:23	31.2	38
6	17:37	23.2	18:13	-29.8	18:37	53.1	78
7	18:55	17.9	19:12	-9.8	19:19	27.7	31
8	19:26	10.2	19:53	-13.6	20:14	23.8	61
9	20:27	14.2	20:51	-11.2	21:40	25.4	77
10	21:44	9.4	21:55	-9.6	22:07	19.0	33
11	22:17	12.4	22:28	-15.6	22:42	28.0	40
12	22:57	10.6	23:19	-13.7	23:37	24.2	50
13	23:47	26.4	23:56	-20.7	0:33	47.1	68
14	0:55	12.1	1:00	-13.6	1:39	25.7	58
15	1:53	9.4	2:22	-12.8	2:45	22.1	57
16	2:49	22.7	3:07	-18.3	3:25	41.0	68
17	3:57	9.2	4:02	-7.3	4:18	16.5	27
18	4:24	17.9	4:33	-15.5	4:48	33.5	37
19	5:00	9.4	5:26	-10.3	5:12	19.6	51
20	5:51	10.6	5:59	-2.1	6:26	12.7	36
21	6:28	1.1	6:28	-13.3	6:38	14.4	27
22	6:54	8.5	7:09	-4.0	7:19	12.5	30
23	7:24	10.4	7:36	-10.8	7:49	21.3	57
24	8:21	2.4	8:36	-5.0	8:42	7.4	26
25	8:46	9.4	8:56	-0.5	9:18	9.9	32
26	9:18	1.2	9:21	-3.1	9:26	4.3	28
27	9:46	1.1	9:47	-2.3	10:04	3.4	25
28	10:11	1.3	10:13	-2.6	10:23	3.8	26
29	10:37	5.1	11:09	-10.5	11:32	15.7	64
30	11:41	7.7	11:48	-2.3	12:05	10.0	27

(c) 潮位計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:14	25.6	14:39	-17.4	14:47	43.1	37
2	14:51	87.6	15:10	-49.9	15:21	137.5	35
3	15:26	116.3	15:50	-129.6	15:40	245.9	52
4	16:18	57.1	16:32	-104.8	16:25	161.9	28
5	16:47	118.4	17:01	-107.8	17:11	226.1	29
6	17:15	103.8	17:19	-101.7	17:27	205.5	28
7	17:43	70.6	18:04	-49.8	17:58	120.3	32
8	18:15	62.4	18:41	-131.6	18:32	194.0	39
9	18:54	89.1	18:57	-90.0	19:30	179.1	41
10	19:35	70.1	19:39	-57.7	19:48	127.7	28
11	20:02	20.2	20:05	-51.5	20:14	71.7	29
12	20:31	33.0	20:49	-12.6	20:58	45.7	29
13	21:00	43.2	21:04	-35.9	21:11	79.1	27
14	21:27	29.3	21:46	-22.3	21:41	51.6	28
15	21:55	36.5	22:01	-59.9	22:11	96.4	59
16	22:54	61.5	23:28	-90.7	23:39	152.2	51
17	23:45	75.5	23:49	-29.8	0:14	105.3	32
18	0:17	19.7	0:25	-52.9	0:32	72.6	36
19	0:53	40.9	1:06	-23.5	1:13	64.5	28
20	1:21	54.2	1:25	-29.5	1:46	83.6	30
21	1:51	33.7	1:55	-26.1	2:11	59.8	25
22	2:16	36.4	2:24	-32.0	2:41	68.3	28
23	2:44	87.6	3:05	-36.4	2:54	124.0	31
24	3:16	22.1	3:19	-39.7	3:26	61.8	27
25	3:43	24.4	4:01	-24.9	3:55	49.3	25
26	4:08	86.3	4:32	-68.4	4:22	154.7	32
27	4:41	59.0	5:02	-58.1	4:51	117.1	33
28	5:14	81.8	5:31	-70.7	5:42	152.5	32
29	5:46	33.0	5:49	-37.3	6:13	70.2	30
30	6:16	42.6	6:25	-58.2	6:35	100.8	39

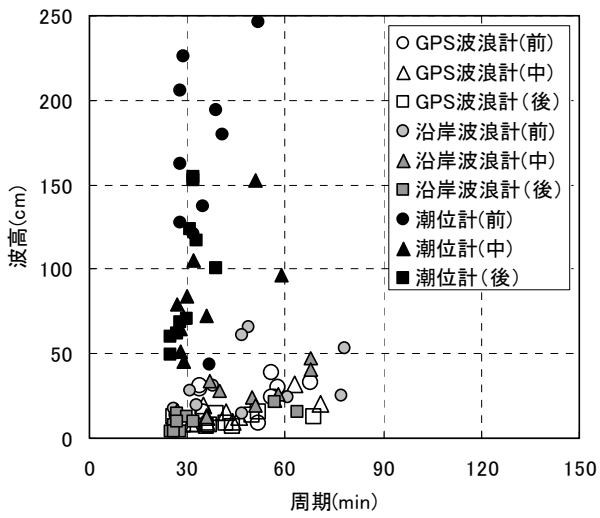


図-5.9 津波の波高・周期の分布 (岩手北部沖・久慈)

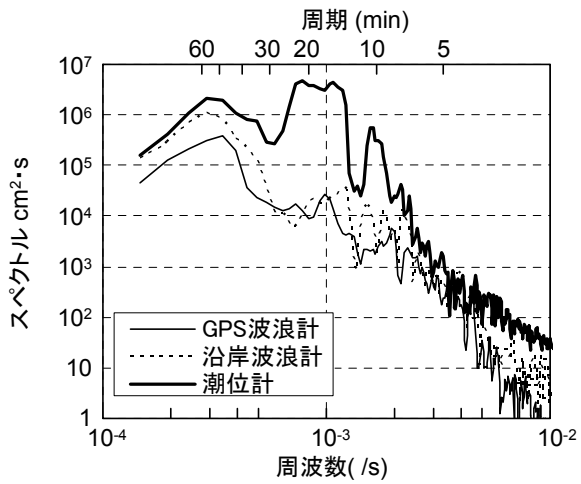


図-5.10 潮位偏差のスペクトル (岩手北部沖・久慈)

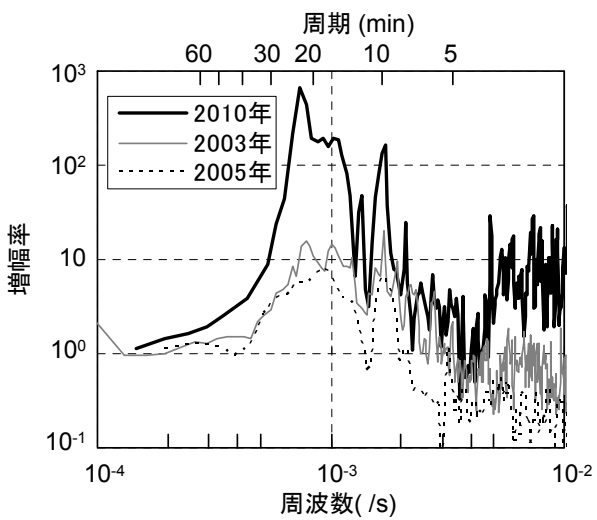


図-5.11 沿岸波浪計～潮位計の増幅特性 (岩手北部沖・久慈)

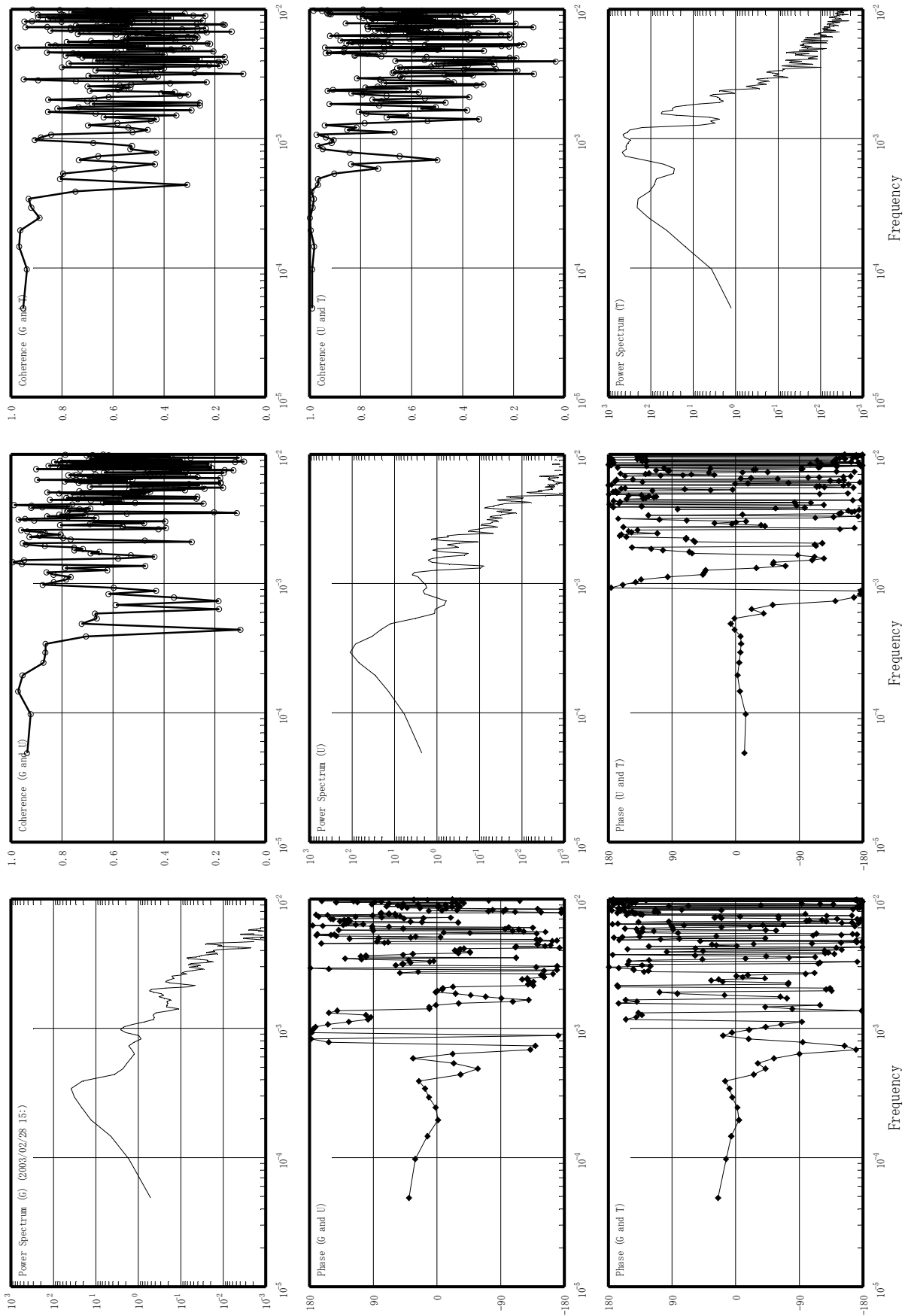


図-5.12 三地点の相関性 (岩手北部沖・久慈)

### 5.3 岩手南部沖・釜石

図-5.13は、岩手南部沖のGPS波浪計、釜石港の沿岸波浪計および潮位計の位置を示す。図-5.14はこれらの地点で得た潮位偏差の経時変化を示す。2月28日16時頃まではGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の峯・谷の対応が良い。それ以降は、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。

表-5.3(a)～(c)に各地点のゼロアップクロス法による波別解析の結果を示し、図-5.15に周期の分布を示す。GPS波浪計と沿岸波浪計では60minを超える周期もあるが、潮位計では60minを超えることはなく、概ね30～60minに分布している。

図-5.16は、潮位偏差でスペクトルを求めた結果である。GPS波浪計～沿岸波浪計（設置水深49.8m）では30min以上の成分が増幅し、沿岸波浪計～潮位計では10 min前後と20min前後の成分が増幅した。図-5.17は、沿岸波浪計～潮位計における増幅率を、2003年十勝沖地震津波（永井ら，2004），2005年宮城県沖地震津波（永井ら，2005），2006年千島列島地震津波（清水ら，2007）と比較したものであり、これら既往の津波では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。今回の津波でも10min前後と20min前後に顕著な増幅が生じている。

図-5.18は三地点の相関性を示す。GPS波浪計～沿岸波浪計の相関性は、30～60minの成分で相関係数が0.9程度である他は低い。沿岸波浪計～潮位計の相関係数は20minから少なくとも60minを超える幅広い周期帯でほぼ1が得られており、両者の波形の対応が非常に良いことを裏付けている。

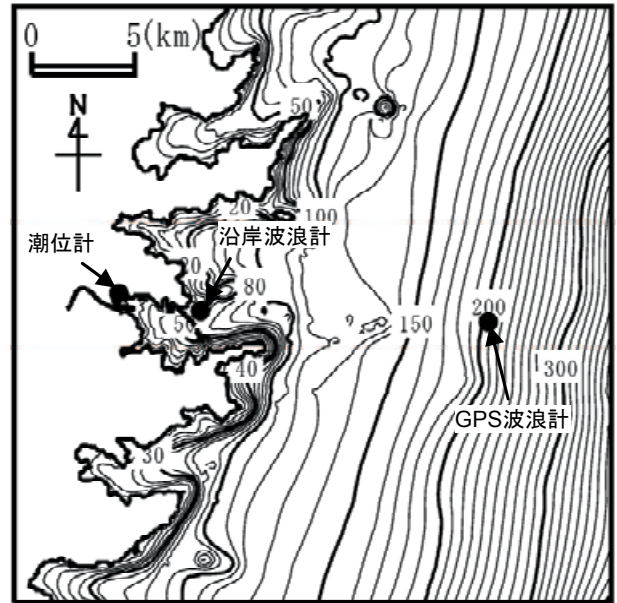


図-5.13 観測地点（岩手南部沖・釜石）

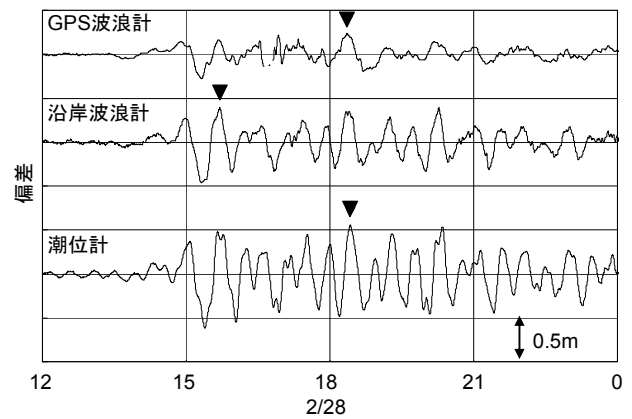


図-5.14 潮位偏差の経時変化（岩手南部沖・釜石）



表-5.3 個々の津波の波高と周期 (岩手南部沖・釜石)

(a) GPS波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:02	14.5	14:53	-27.8	15:19	42.3	91
2	15:33	16.1	15:41	-12.4	16:04	28.5	41
3	16:14	15.7	16:32	-14.4	16:43	30.0	35
4	16:50	22.3	16:55	-10.7	17:00	33.0	59
5	17:49	23.8	18:21	-19.8	18:42	43.7	75
6	19:04	7.3	19:10	-4.9	19:29	12.2	32
7	19:36	3.6	19:38	-6.7	19:55	10.3	27
8	20:02	14.6	20:10	-2.2	20:30	16.8	30
9	20:32	7.9	20:59	-11.5	21:15	19.4	59
10	21:31	9.4	21:55	-9.4	22:36	18.7	77
11	22:48	5.6	22:57	-6.7	23:19	12.3	40
12	23:27	10.0	23:49	-1.3	0:09	11.4	46
13	0:14	4.4	0:17	-5.3	0:36	9.7	38
14	0:51	1.7	0:54	-3.7	1:16	5.4	28
15	1:20	5.8	1:38	-6.0	1:51	11.7	47
16	2:06	5.6	2:14	-2.7	2:44	8.3	41
17	2:47	2.9	3:13	-1.2	3:00	4.0	36
18	3:23	1.9	3:25	-4.7	3:51	6.6	44
19	4:07	3.2	4:27	-4.4	4:45	7.6	41
20	4:48	8.4	5:03	-8.8	5:28	17.2	56
21	5:44	3.5	5:48	-3.6	6:00	7.1	28
22	6:12	4.5	6:28	-2.6	6:46	7.1	37
23	6:48	1.5	7:02	-4.6	7:16	6.1	41
24	7:30	11.9	7:45	-7.7	8:10	19.5	55
25	8:25	0.6	8:25	-4.8	8:43	5.4	32
26	8:57	4.0	9:29	-0.8	9:34	4.8	38
27	9:35	5.1	9:41	-6.1	10:03	11.2	69
28	10:44	6.0	10:53	-3.2	11:29	9.1	48
29	11:32	0.7	11:59	-6.4	11:46	7.1	35
30	12:07	4.1	12:13	-2.3	12:22	6.4	28

(b) 沿岸波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:06	10.5	14:24	-0.5	14:35	11	29
2	14:35	27.4	15:00	-46.5	15:19	74	56
3	15:31	39.1	15:42	-34.5	15:57	74	35
4	16:05	18.6	16:33	-32.8	16:50	51	57
5	17:03	24.8	17:25	-22.5	17:41	47	47
6	17:49	34.7	18:24	-29.9	18:07	65	76
7	19:05	28.7	19:15	-21.6	19:31	50	32
8	19:37	17.8	19:44	-33.1	20:00	51	29
9	20:06	38.9	20:16	-22.9	20:28	62	35
10	20:41	18.7	21:02	-31.2	21:19	50	45
11	21:27	17.6	22:00	-7.0	21:47	25	46
12	22:13	0.9	22:13	-17.2	22:41	18	37
13	22:50	17.8	23:00	-20.4	23:11	38	31
14	23:21	12.4	23:48	-4.4	0:05	17	48
15	0:09	6.8	0:18	-11.3	0:35	18	37
16	0:47	8.6	0:54	-12.9	1:06	22	27
17	1:13	12.2	1:40	-20.1	1:57	32	51
18	2:05	14.8	2:13	-6.6	2:29	22	30
19	2:34	7.5	3:06	-7.4	2:48	15	36
20	3:11	9.7	3:35	-11.5	3:48	21	48
21	3:59	11.9	4:32	-10.9	4:44	23	54
22	4:53	18.2	5:02	-10.6	5:27	29	46
23	5:39	9.5	5:48	-13.4	6:06	23	35
24	6:14	15.7	6:24	-7.2	6:39	23	39
25	6:53	4.4	6:58	-6.8	7:27	11	38
26	7:31	14.3	7:46	-11.4	8:05	26	49
27	8:20	4.2	8:23	-5.5	8:43	10	38
28	8:57	7.8	9:07	-1.7	9:21	9	25
29	9:22	7.2	9:40	-9.5	10:10	17	58
30	10:21	3.1	10:22	-9.3	10:41	12	29

(c) 潮位計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:10	12.3	14:19	-10.3	14:42	22.5	36
2	14:47	37.1	15:05	-61.8	15:23	98.9	48
3	15:34	48.1	15:39	-54.7	16:02	102.9	33
4	16:08	28.8	16:16	-43.8	16:57	72.7	53
5	17:01	44.5	17:32	-40.8	17:46	85.4	52
6	17:53	33.3	18:00	-48.2	18:12	81.5	25
7	18:18	55.6	18:25	-41.3	18:42	96.9	35
8	18:53	45.7	19:18	-37.6	19:35	83.4	47
9	19:40	28.2	19:50	-45.9	20:05	74.1	30
10	20:09	53.1	20:21	-36.4	20:34	89.5	31
11	20:41	27.1	21:09	-44.3	21:25	71.4	50
12	21:31	29.7	21:35	-23.8	21:50	53.5	56
13	22:26	7.9	22:29	-25.9	22:42	33.9	26
14	22:52	26.6	22:59	-36.0	23:17	62.6	31
15	23:23	21.6	23:54	-10.6	23:40	32.2	37
16	0:00	10.2	0:23	-17.9	0:44	28.1	48
17	0:48	15.0	0:58	-20.6	1:11	35.5	28
18	1:16	20.6	1:42	-30.0	2:00	50.7	51
19	2:06	30.5	2:15	-15.3	2:30	45.8	29
20	2:35	17.4	3:04	-13.5	2:55	30.9	53
21	3:28	16.2	3:36	-21.6	3:53	37.8	29
22	3:57	14.3	4:37	-19.8	4:51	34.0	58
23	4:55	31.5	5:04	-23.5	5:20	55.0	47
24	5:42	18.8	5:54	-18.3	6:11	37.1	35
25	6:17	21.5	6:27	-10.0	6:44	31.5	32
26	6:48	6.7	7:05	-7.7	7:20	14.3	48
27	7:36	18.5	7:43	-19.7	8:08	38.2	42
28	8:18	7.8	8:30	-10.1	8:45	17.9	38
29	8:56	11.7	9:09	-7.4	9:27	19.1	37
30	9:33	12.1	9:46	-9.9	10:01	21.9	50

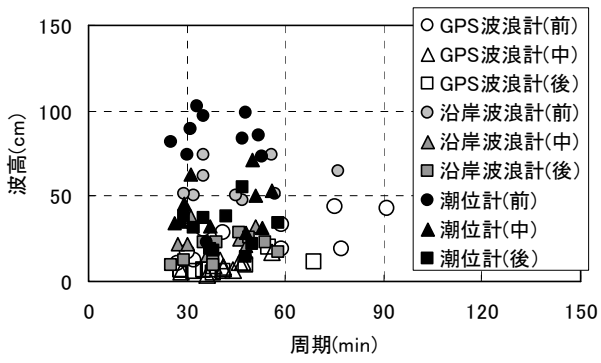


図-5.15 津波の波高・周期の分布 (岩手南部沖・釜石)

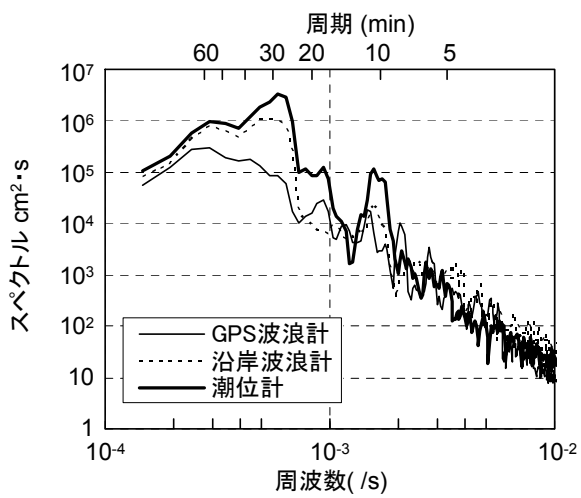


図-5.16 潮位偏差のスペクトル (岩手南部沖・釜石)

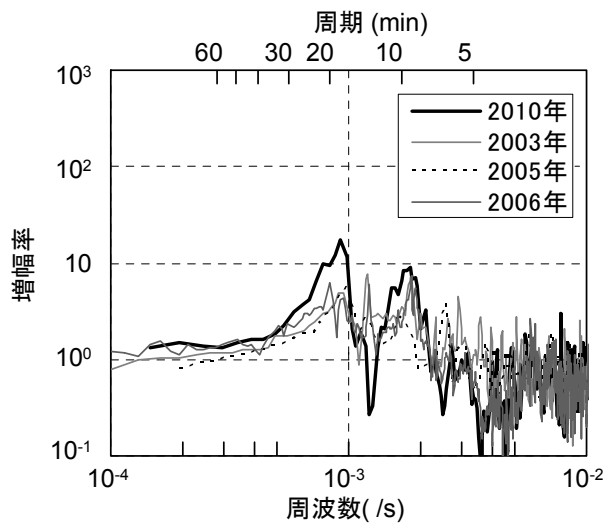


図-5.17 沿岸波浪計～潮位計の増幅特性 (岩手南部沖・釜石)

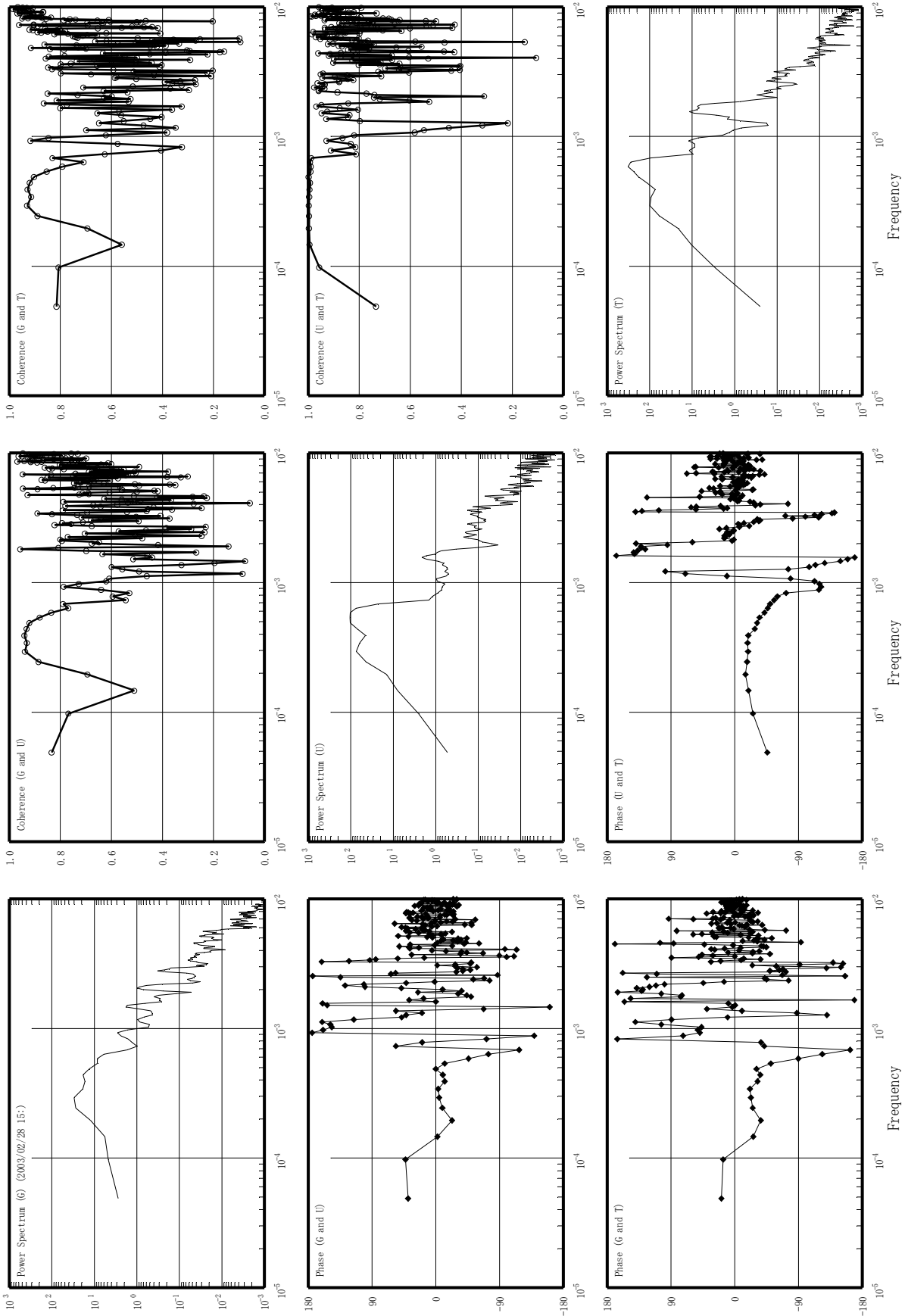


図-5.18 三地点の相関性 (岩手南部沖・釜石)

#### 5.4 宮城中部沖・石巻

図-5.19は、牡鹿半島の東に位置する宮城中部沖のGPS波浪計、牡鹿半島より西の仙台湾に面した石巻の沿岸波浪計および潮位計の地点を示す。図-5.20はこれらの地点で得た潮位偏差の経時変化を示す。これまで記してきた青森東岸沖・八戸、岩手北部沖・久慈、岩手南部沖・釜石とは違い、GPS波浪計から沿岸波浪計・潮位計が離れ、牡鹿半島もあるためか、GPS波浪計と沿岸波浪計とに山・谷の対応は見られない。

表-5.4(a)～(c)に各地点のゼロアップクロスによる波別解析の結果を示し、図-5.21に周期の分布を示す。GPS波浪計に90minを超える周期はなかったが、沿岸波浪計や潮位計には120min程度の周期も現れている。

図-5.22は、潮位偏差でスペクトルを求めた結果である。GPS波浪計～沿岸波浪計（設置水深27.9m）では、40min以上の長い周期の成分が顕著に増幅し、沿岸波浪計～潮位計では20～40minのやや短い周期の成分が増幅している。

図-5.23は、沿岸波浪計～潮位計の増幅率について、2003年十勝沖地震津波（永井ら，2004）、2005年宮城県沖地震（永井ら，2006）、2006年千島列島地震津波（清水ら，2007）と比較したものである。今回の津波でも既往の津波と同様、20min付近に顕著な増幅が生じている。

図-5.24は三地点の相関性を示す。GPS波浪計と沿岸波浪計の相関性は低く、波形が似つかないものに変形していることを裏付けている。沿岸波浪計～潮位計では、周期50min以上の成分の相関係数がほぼ1で、位相差も小さい。

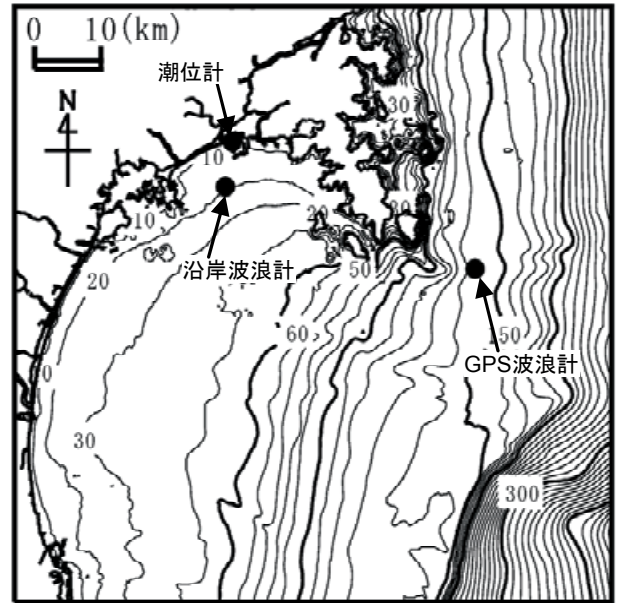


図-5.19 観測地点（宮城中部沖・石巻）

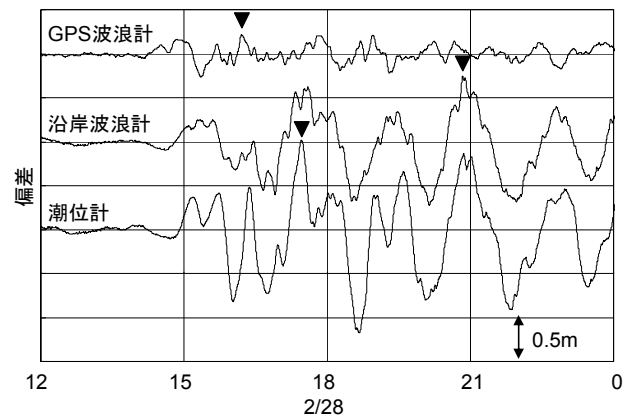


図-5.20 潮位偏差の経時変化（宮城中部沖・石巻）

表-5.4 個々の津波の波高と周期 (宮城中部沖・石巻)

(a) GPS波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:15	16.6	14:50	-26.3	15:21	42.9	82
2	15:37	10.9	15:41	-13.7	16:03	24.6	30
3	16:07	21.7	16:12	-8.8	16:33	30.5	36
4	16:43	2.2	17:00	-12.8	17:07	15.1	32
5	17:15	20.4	17:52	-19.3	18:16	39.7	81
6	18:36	21.3	18:58	-8.4	18:48	29.7	33
7	19:09	1.1	19:10	-22.1	19:18	23.2	48
8	19:56	14.1	20:14	-10.4	20:28	24.4	37
9	20:33	14.6	20:40	-6.0	21:09	20.6	40
10	21:13	8.2	21:24	-11.2	21:52	19.4	62
11	22:15	12.9	22:27	-17.5	22:54	30.4	49
12	23:04	5.9	23:10	-0.7	23:21	6.6	25
13	23:29	12.6	23:42	-2.1	0:07	14.7	45
14	0:14	1.9	0:16	-11.5	0:30	13.4	28
15	0:42	2.4	1:04	-6.6	0:57	8.9	34
16	1:16	9.7	1:49	-5.9	2:09	15.6	57
17	2:13	6.2	2:20	-8.0	2:32	14.2	26
18	2:39	7.5	2:58	-6.3	3:11	13.8	39
19	3:18	2.8	3:41	-5.9	3:54	8.6	42
20	3:59	0.9	4:00	-5.8	4:24	6.7	45
21	4:44	6.5	5:37	-8.6	5:54	15.1	88
22	6:12	6.1	6:17	-5.2	6:48	11.3	43
23	6:55	3.9	6:59	-8.0	7:38	12.0	51
24	7:46	9.6	8:01	-1.4	8:26	10.9	42
25	8:27	2.9	8:29	-10.4	8:52	13.3	32
26	9:00	7.3	9:34	-0.7	9:04	8.1	42
27	9:41	3.3	9:44	-8.3	10:08	11.6	45
28	10:26	7.9	11:02	-1.3	11:12	9.2	47
29	11:14	4.5	11:24	-9.4	12:00	13.9	74
30	12:28	5.3	12:59	-7.0	13:23	12.3	74

(b) 沿岸波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:49	25.1	15:20	-32.3	16:05	57.3	98
2	16:27	0.7	16:27	-60.3	16:55	61.0	36
3	17:03	61.8	17:36	-68.1	18:31	130.0	119
4	19:02	33.8	19:28	-3.6	19:07	37.4	40
5	19:43	9.3	19:46	-72.2	20:08	81.5	48
6	20:30	74.6	20:50	-68.4	21:58	143.1	119
7	22:29	39.5	22:48	-44.5	23:32	84.0	82
8	23:51	41.8	0:19	-37.3	0:51	79.2	120
9	1:51	33.8	2:16	-0.1	2:51	34.0	60
10	2:51	0.7	2:52	-30.1	3:16	30.8	46
11	3:37	12.6	4:05	-43.5	4:39	56.0	89
12	5:06	56.1	5:32	-0.4	5:59	56.5	53
13	5:59	1.2	6:00	-23.4	6:30	24.6	56
14	6:55	5.6	7:15	-8.6	7:02	14.2	28
15	7:23	29.3	8:29	-0.8	8:57	30.1	95
16	8:58	1.4	9:00	-31.9	9:30	33.3	51
17	9:49	27.5	10:01	-16.5	10:45	44.0	67
18	10:56	31.7	11:26	-25.5	12:12	57.2	115
19	12:52	16.1	13:01	-13.3	13:34	29.4	61
20	13:53	27.0	14:18	-32.7	15:06	59.7	102
21	15:35	7.7	15:44	-10.4	16:15	18.1	50
22	16:26	12.8	16:42	-0.6	16:57	13.4	32
23	16:58	17.3	17:25	-17.1	18:16	34.5	141
24	19:19	25.5	19:48	-15.9	20:41	41.3	126
25	21:25	7.0	21:45	-13.2	22:16	20.2	58
26	22:23	32.0	22:52	-36.1	23:41	68.1	105
27	0:09	26.8	0:29	-4.0	1:21	30.8	77
28	1:25	17.8	2:03	-14.8	2:44	32.6	103
29	3:09	18.3	3:46	-2.1	4:12	20.5	72
30	4:21	17.1	4:38	-5.9	5:08	23.0	66

(c) 潮位計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	14:54	41.2	15:44	-81.5	16:02	122.8	82
2	16:16	47.8	16:22	-72.5	16:44	120.3	56
3	17:12	101.3	17:28	-117.2	18:40	218.5	102
4	18:54	38.4	18:59	-20.4	19:16	58.8	28
5	19:22	66.2	19:36	-80.2	20:04	146.4	69
6	20:31	86.1	20:52	-91.1	21:50	177.1	118
7	22:29	46.6	22:59	-65.4	23:28	111.9	88
8	23:57	71.2	0:12	-64.7	1:00	136.0	75
9	1:12	19.6	1:17	-47.0	1:37	66.7	36
10	1:48	38.5	2:28	-45.5	3:19	84.0	104
11	3:32	26.5	3:43	-58.3	4:39	84.8	91
12	5:02	58.4	5:43	-35.2	6:08	93.6	111
13	6:54	9.6	7:07	-11.9	7:20	21.5	30
14	7:24	17.9	7:41	-14.8	7:57	32.7	41
15	8:05	33.2	8:39	-6.8	8:59	40.0	68
16	9:13	0.1	9:13	-44.6	9:30	44.8	35
17	9:48	45.3	10:06	-25.8	10:40	71.2	70
18	10:58	34.7	11:22	-31.0	12:08	65.6	114
19	12:52	26.9	13:11	-28.8	13:29	55.6	55
20	13:47	38.6	14:28	-43.0	15:02	81.6	98
21	15:25	14.3	15:57	-21.7	16:14	36.0	64
22	16:29	16.4	16:42	-14.2	17:05	30.5	47
23	17:17	26.8	17:36	-21.3	18:29	48.1	94
24	18:50	0.2	18:51	-19.3	19:07	19.5	30
25	19:20	27.0	19:58	-23.5	20:48	50.5	101
26	21:01	4.3	21:09	-12.7	21:17	17.0	31
27	21:32	16.2	21:40	-20.4	22:14	36.5	56
28	22:28	36.0	22:54	-54.2	23:53	90.2	101
29	0:09	36.9	0:17	-6.9	1:31	43.8	90
30	1:39	22.0	2:00	-19.4	2:39	41.4	97

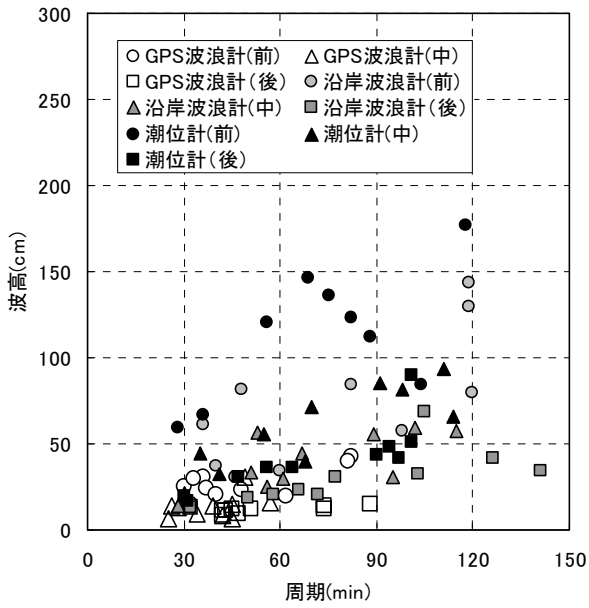


図-5.21 津波の波高・周期の分布 (宮城中部沖・石巻)

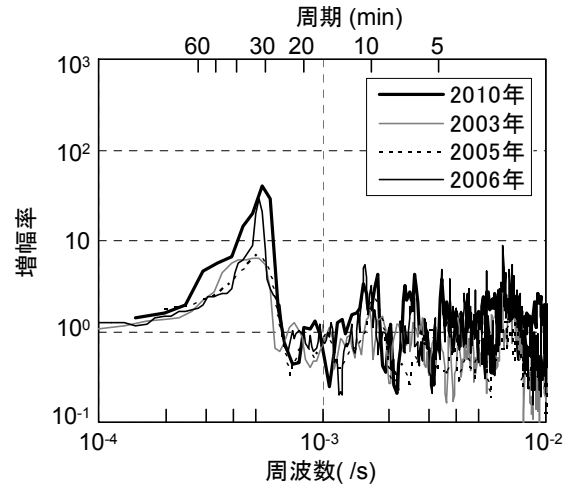


図-5.23 沿岸波浪計～潮位計の増幅特性 (宮城中部沖・石巻)

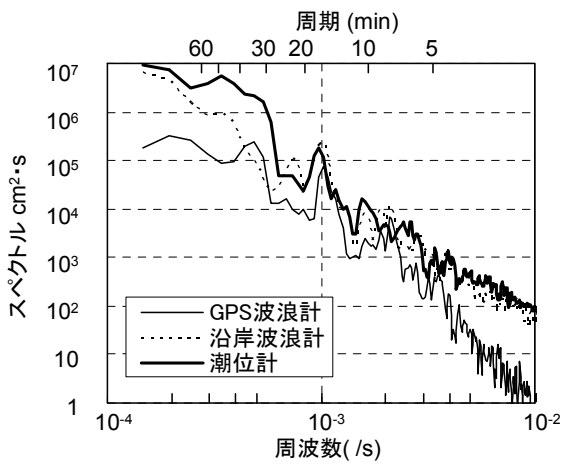


図-5.22 潮位偏差のスペクトル (宮城中部沖・石巻)

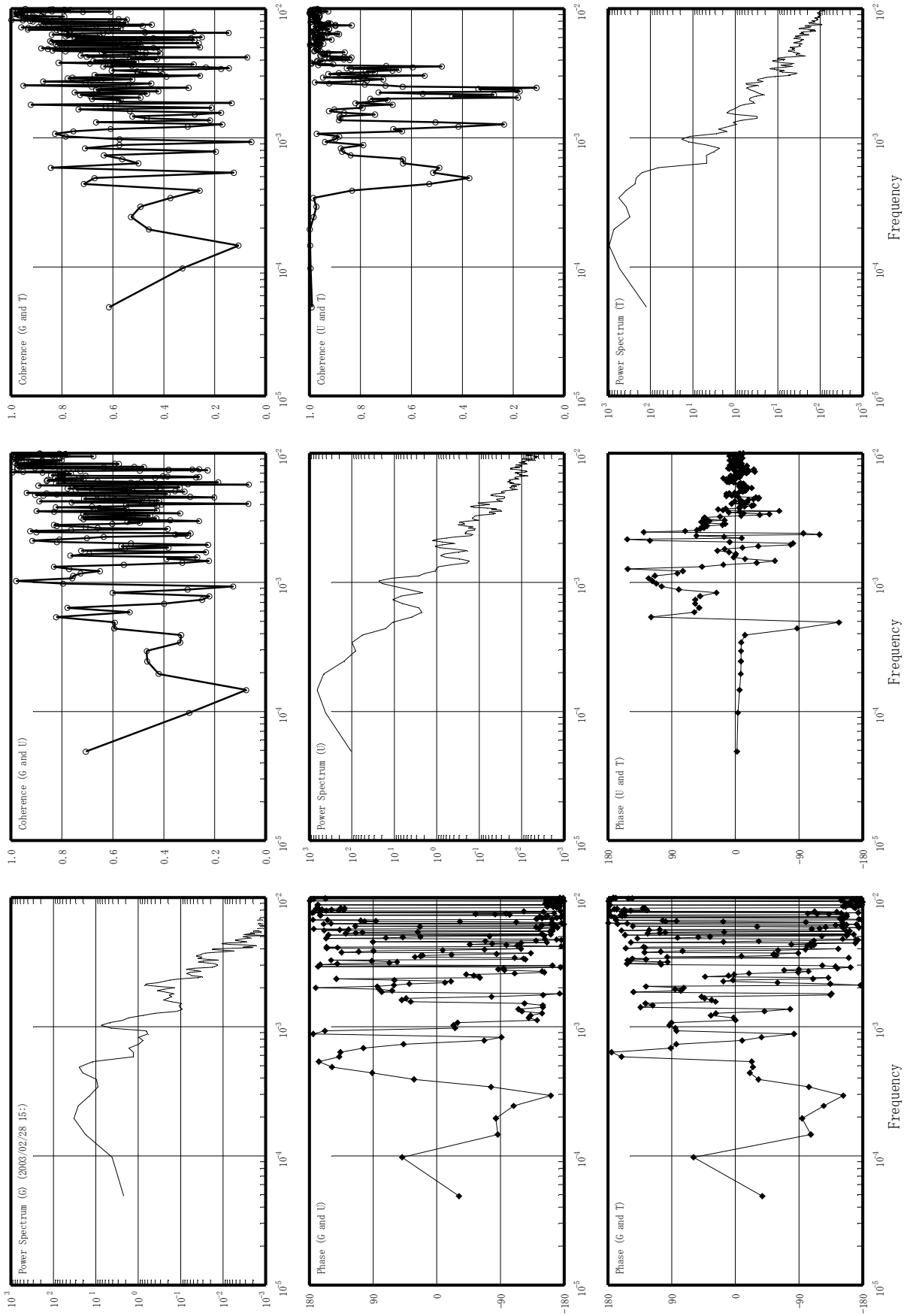


図-5.24 三地点の相関性 (宮城中部沖・石巻)

5.5 高知西部沖・上川口・須崎

図-5.25は、高知西部沖のGPS波浪計、上川口の沿岸波浪計、須崎の潮位計の位置を示す。図-5.26はこれらの地点で得た潮位偏差の経時変化を示す。これらは、前述の東北沿岸の4組ほど地理的に近接していないこともあって、第一波を除き峯・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。

表-5.5(a)～(c)に各地点のゼロアップクロスによる波別解析の結果を示し、図-5.27に周期の分布を示す。この図から、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計ともに、津波の周期が概ね30～60minであることが分かる。

図-5.28は、潮位偏差でスペクトルを求めた結果である。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。

図-5.29は三地点の相関性を示す。GPS波浪計～沿岸波浪計では、周期50min以上の成分で相関係数が0.9以上であるのを除き相関性は低い。沿岸波浪計～潮位計でも同様に、周期が長い成分に限って相関性が高い。

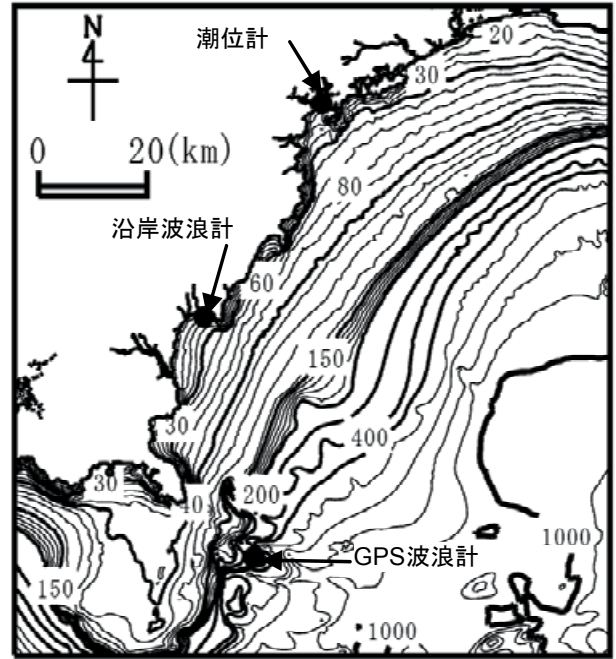


図-5.25 観測地点（高知西部沖・上川口・須崎）

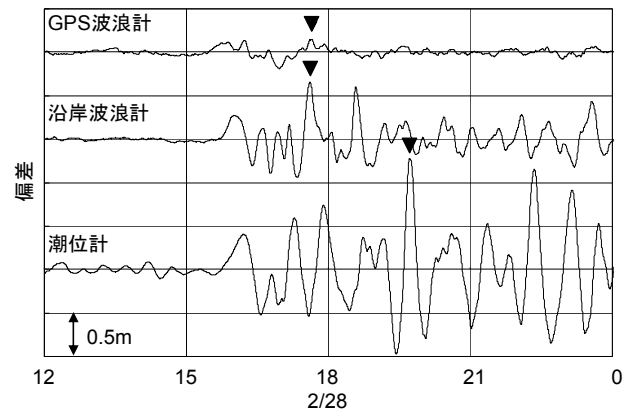


図-5.26 潮位偏差の経時変化（高知西部沖・上川口・須崎）



表-5.5 個々の津波の波高と周期（高知西部沖・上川口・須崎）

(a) GPS波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	15:28	13.9	16:13	-7.3	16:24	21.2	74
2	16:42	2.4	16:44	-19.0	16:58	21.5	39
3	17:21	14.9	17:39	-0.2	18:03	15.1	42
4	18:04	5.0	18:09	-6.9	18:43	11.9	52
5	18:56	2.8	19:20	-7.6	19:07	10.4	29
6	19:25	7.2	19:34	-2.0	19:48	9.2	25
7	19:50	4.7	20:05	-3.3	20:19	8.0	42
8	20:32	3.2	20:38	-2.9	20:56	6.2	32
9	21:03	0.8	21:05	-5.1	21:31	5.9	32
10	21:36	4.3	21:57	-3.3	22:07	7.7	41
11	22:17	6.3	22:37	-1.0	22:21	7.3	28
12	22:44	1.1	22:47	-8.0	22:58	9.1	41
13	23:25	6.5	23:39	-0.7	23:53	7.2	30
14	23:55	5.1	0:31	-8.1	1:00	13.3	77
15	1:12	4.5	1:21	-6.2	1:37	10.7	53
16	2:05	8.2	2:28	-2.2	2:43	10.5	41
17	2:46	3.6	2:52	-6.8	3:27	10.4	61
18	3:47	4.8	4:16	-1.3	3:57	6.1	42
19	4:29	3.4	4:32	-4.2	5:07	7.6	49
20	5:17	3.4	5:45	-4.3	6:06	7.7	58
21	6:16	3.5	6:24	-4.7	6:49	8.2	45
22	7:00	3.7	7:03	-3.9	7:36	7.7	39
23	7:39	7.8	8:19	-2.6	8:31	10.4	54
24	8:33	3.2	8:35	-4.6	8:57	7.9	46
25	9:19	2.2	9:54	-3.1	9:24	5.4	38
26	9:57	5.3	10:13	-0.5	10:23	5.7	27
27	10:24	2.3	10:26	-2.2	10:55	4.5	34
28	10:58	1.0	11:02	-3.2	11:38	4.2	41
29	11:39	8.9	11:41	-13.0	12:27	21.9	50
30	12:30	11.2	13:12	-9.9	13:28	21.1	60

(b) 沿岸波浪計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	15:41	27.2	16:01	-31.1	16:24	58.3	50
2	16:31	12.6	16:36	-39.5	16:47	52.0	37
3	17:08	65.3	17:37	-44.2	17:21	109.5	49
4	17:57	7.8	18:04	-26.8	18:11	34.6	33
5	18:30	60.3	18:35	-31.6	18:56	91.9	36
6	19:06	20.9	19:38	-17.8	19:51	38.7	53
7	19:59	25.5	20:27	-20.2	20:50	45.8	59
8	20:57	13.7	21:03	-10.8	21:14	24.5	28
9	21:26	12.6	21:36	-12.7	21:45	25.4	30
10	21:56	27.8	22:05	-22.0	22:17	49.8	33
11	22:29	20.6	22:40	-32.2	23:12	52.8	49
12	23:18	43.3	23:34	-18.5	23:49	61.8	45
13	0:03	16.1	0:26	-27.6	0:51	43.7	55
14	0:58	26.7	1:03	-29.1	1:55	55.8	62
15	2:01	13.7	2:35	-13.6	2:57	27.2	65
16	3:05	9.1	3:14	-10.8	3:40	19.9	39
17	3:44	6.3	3:48	-4.3	4:07	10.6	27
18	4:11	22.1	4:28	-22.5	4:51	44.6	61
19	5:12	16.3	5:29	-11.8	5:51	28.1	47
20	5:59	22.5	6:06	-19.4	6:28	42.0	49
21	6:48	15.3	7:19	-18.0	7:39	33.3	67
22	7:56	15.1	8:15	-0.8	8:25	15.9	30
23	8:26	14.3	8:52	-16.3	9:22	30.6	63
24	9:29	8.3	9:38	-8.7	9:58	17.0	37
25	10:06	13.4	10:21	-16.6	10:55	30.0	61
26	11:07	14.7	11:13	-16.7	11:34	31.3	34
27	11:41	10.2	11:53	-1.3	12:10	11.5	30
28	12:11	0.0	12:11	-11.7	12:28	11.7	30
29	12:41	13.8	12:50	-11.2	13:05	25.0	32
30	13:13	7.4	13:20	-11.1	13:42	18.5	35

(c) 潮位計

No.	到達時刻 (h:m)	正の偏差 (cm)	起時 (h:m)	負の偏差 (cm)	起時 (h:m)	波高 (cm)	周期 (min)
1	15:45	40.2	16:13	-52.1	16:34	92.3	83
2	17:08	58.9	17:17	-54.1	17:35	113.0	37
3	17:44	74.2	17:54	-47.6	18:27	121.8	55
4	18:39	37.0	18:44	-97.2	19:26	134.2	57
5	19:36	127.6	19:43	-79.3	20:03	206.9	38
6	20:13	41.2	20:36	-68.2	21:02	109.4	60
7	21:13	52.9	21:22	-19.5	21:39	72.4	31
8	21:44	17.4	21:49	-63.9	22:05	81.3	27
9	22:12	115.5	22:22	-85.0	22:42	200.5	46
10	22:58	91.6	23:09	-74.0	23:26	165.6	39
11	23:37	52.6	23:43	-22.6	23:57	75.2	26
12	0:02	65.3	0:10	-78.6	0:25	143.9	38
13	0:41	70.3	0:50	-38.3	1:16	108.6	52
14	1:33	51.9	1:45	-71.1	2:05	123.0	43
15	2:15	46.2	2:23	-45.4	3:07	91.6	64
16	3:19	31.8	3:36	-73.9	3:58	105.7	47
17	4:06	108.6	4:16	-56.1	4:33	164.7	37
18	4:43	24.1	4:47	-41.9	5:03	66.0	28
19	5:11	41.3	5:19	-29.3	5:36	70.6	35
20	5:46	48.3	5:57	-31.8	6:21	80.1	60
21	6:46	32.5	6:56	-2.3	7:13	34.9	29
22	7:15	5.1	7:21	-18.9	7:33	24.0	28
23	7:42	11.3	7:48	-11.8	8:03	23.1	27
24	8:09	12.9	8:19	-4.5	8:31	17.4	29
25	8:38	19.1	8:48	-21.8	9:08	40.8	39
26	9:17	17.6	9:23	-29.6	9:43	47.2	34
27	9:51	29.5	10:02	-8.2	10:21	37.7	36
28	10:28	3.7	10:51	-32.3	11:12	36.0	53
29	11:21	30.3	11:31	-7.0	11:46	37.3	29
30	11:51	19.0	12:00	-25.7	12:18	44.6	39

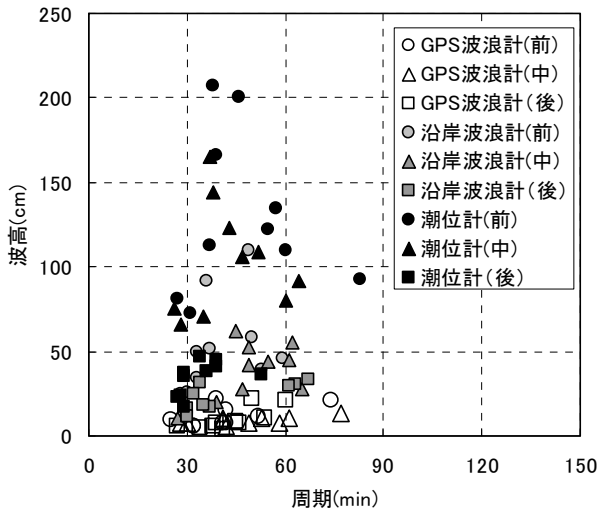


図-5.27 津波の波高・周期の分布 (高知西部沖・上川口・須崎)

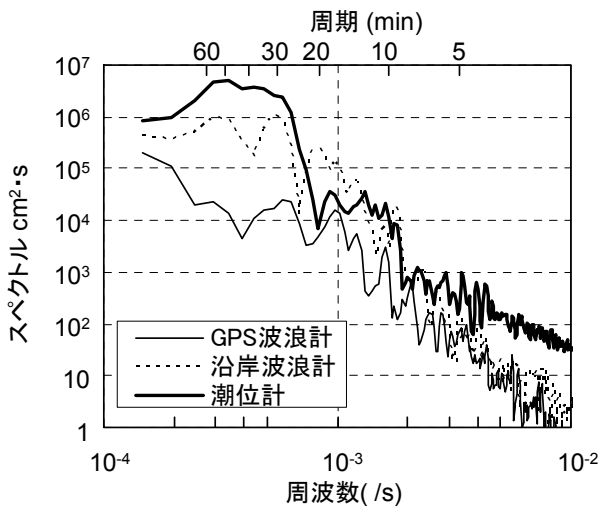


図-5.28 潮位偏差のスペクトル (高知西部沖・上川口・須崎)

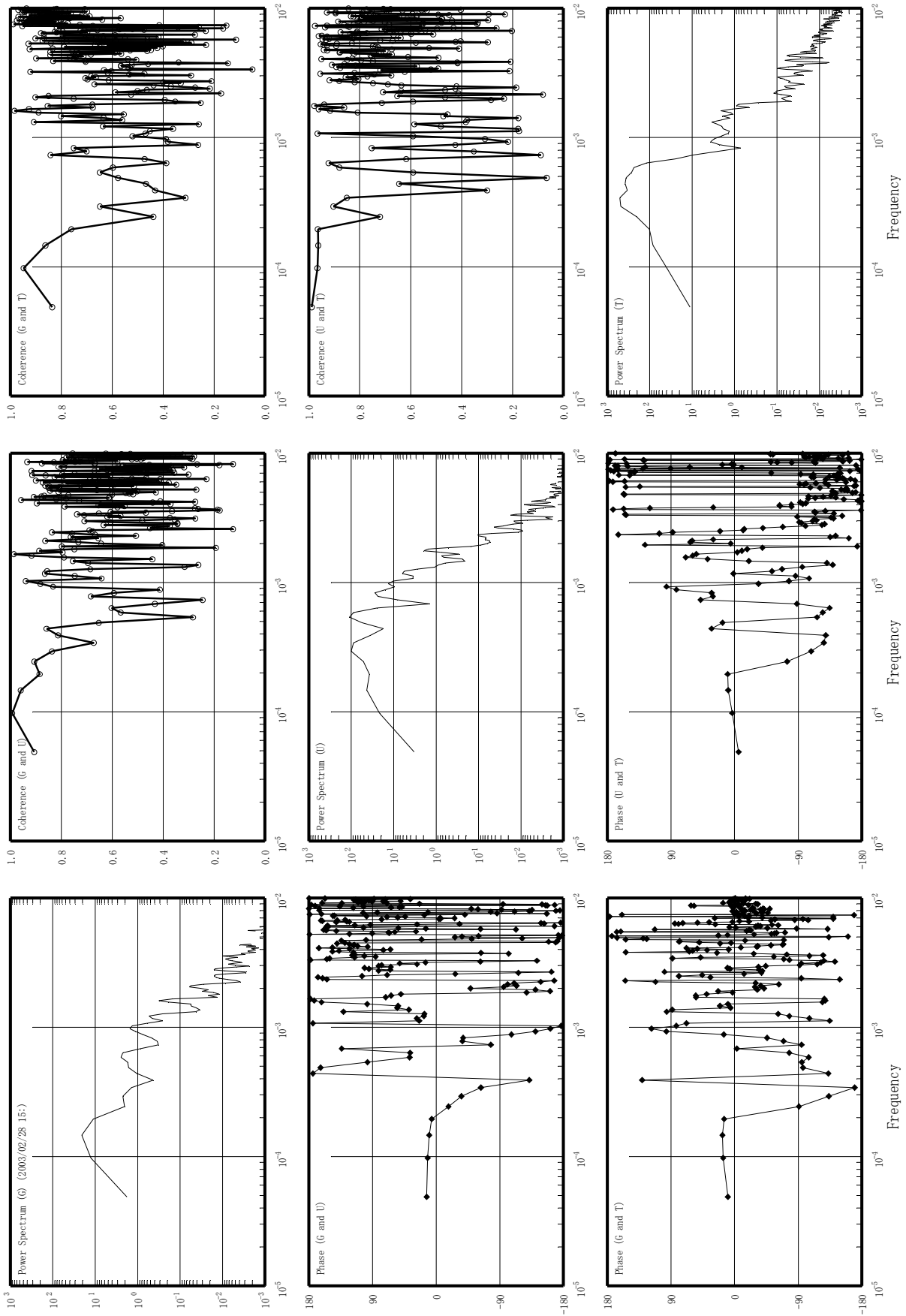


図-5.29 三地点の相関性 (高知西部沖・上川口・須崎)

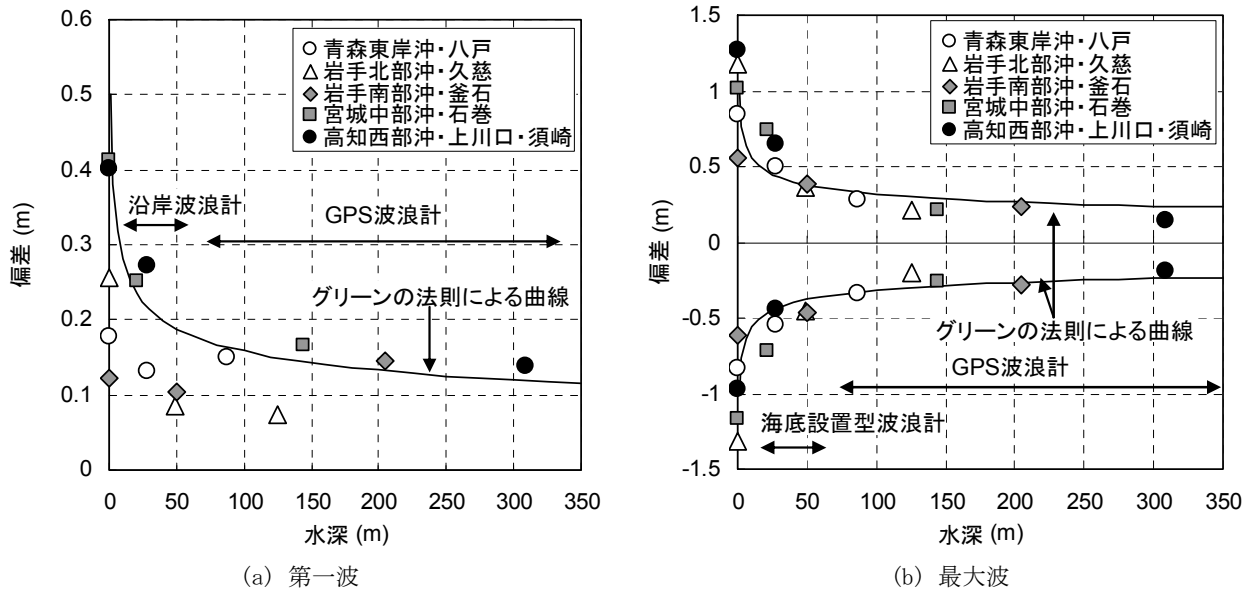


図-5.30 水深による津波高さの変化

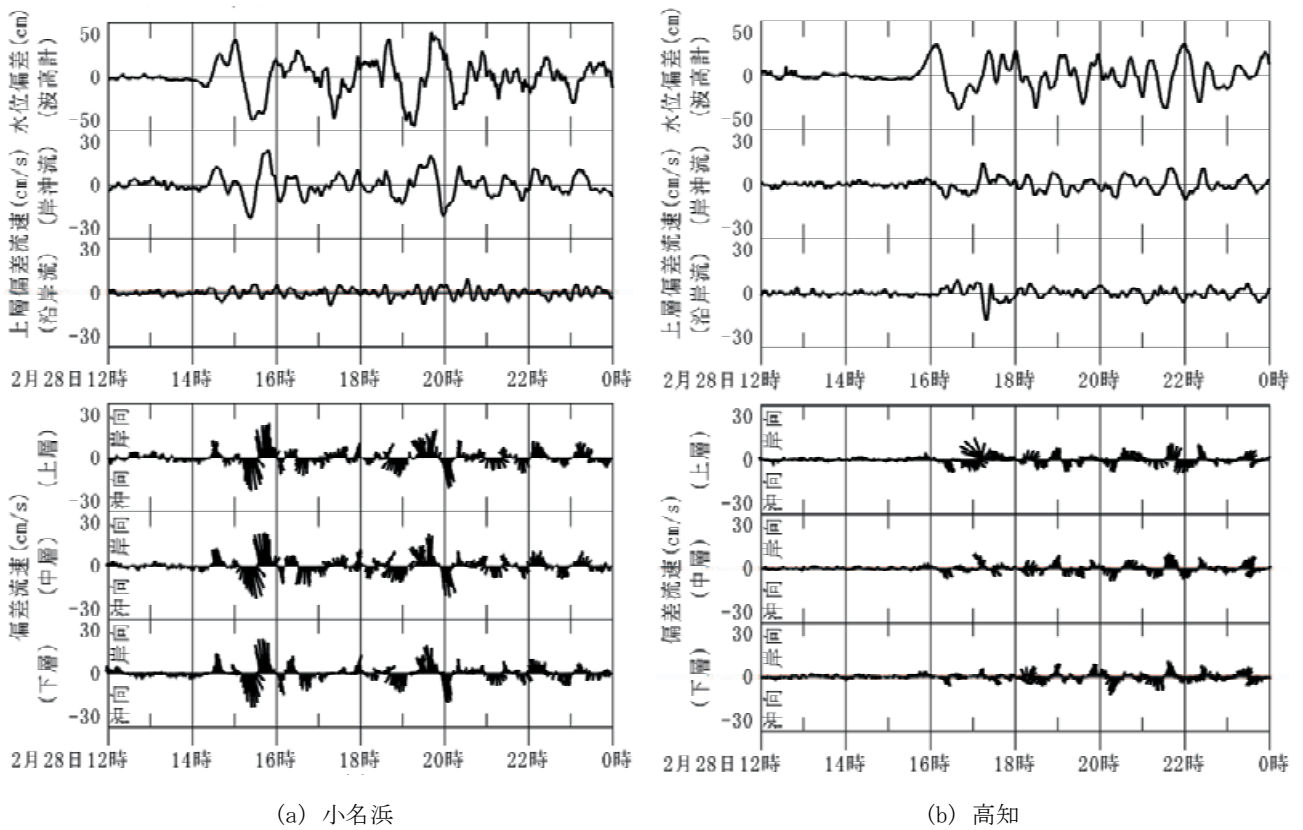


図-5.31 海象計で捉えた流速の経時変化

### 5.6 水深による津波高さの変化

図-5.30(a)は第一波の峯の高さ、(b)は正・負の最大偏差について、GPS波浪計・沿岸波浪計・潮位計の組み合わせ別のシンボルで示したものである。この図から、津波の高さは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で増加し、潮位計のある海岸でさらに増加したことが分かる。図には水深の $-1/4$ 乗に比例する線も引いてある。グリーンの法則は無反射を仮定するなど、この観測値の整理方法とは少し違う前提に立ったものであるが、今回の正・負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。

### 5.7 津波の流速

図-5.31は、小名浜と高知の海象計で観測した上・中・層の流速に対し、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。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。小名浜の設置水深は23.8m、上・中・下層は海面下8, 13, 18mであり、高知の設置水深は24.1m、10m, 15m, 19mである。上層、下層という表現を用いたが、いわゆる表層というほど海面には近くなく、底層というほど海底に近くはない。また、ここでの岸向とは、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、小名浜では真北から時計回りに283°（WとWNWの間）、高知では29°となった。この図によると、小名浜では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し始め、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。一方、高知でも、三層ともほぼ同時刻に岸向と沖向の流れを繰り返し、最大で約0.1m/sを記録した。ただし、津波到達から初期の段階である2月28日16時から18時にかけては、上層の流速が大きく下層の流速が小さい。

なお、過去の津波でも流速が観測され、長波の水粒子運動の速度と概ね一致することが確認されている。1993年北海道南西沖地震津波では輪島や福井の超音波式流速計型波向計で海底付近の最大流速として約0.3~0.4m/sを観測し（永井ら、1993）、1994年北海道東方沖地震津波でもむつ小川原で約0.2m/sを観測した（永井ら、1995）。2003年十勝沖地震津波では十勝の海象計で上層の最大流速として約0.8m/sを観測し（永井ら、2004）、2004年東海

道沖地震津波でも室津で約0.2m/sを観測した（永井ら、2005）。海象計の三層の流速を比較したのは今回の津波が初めてである。

### 5.8 久里浜湾の津波

東京湾口の久里浜湾に面した港湾空港技術研究所では、1958年から構内の潮位計で潮位を観測してきた。図-5.32はそのアナログ記録装置の概観である。ガラスケースの中に日巻き、その後方のスチールケースの中に長期巻きのアナログ記録紙がセットされている。これら両方の記録紙で今回のチリ津波を捉えることができた。図-5.33は、長期巻きのアナログ記録紙をスキヤナで読み取ってデジタル化したものである。今回の津波は地震発生から約23時間半後の2月28日15時頃に到達し、21時頃には正の最大偏差として24cmを記録した。最初の3波の周期は約80minである。この津波は少なくとも36時間たった3月2日3時を過ぎても収まっていない。



図-5.32 潮位計の概観

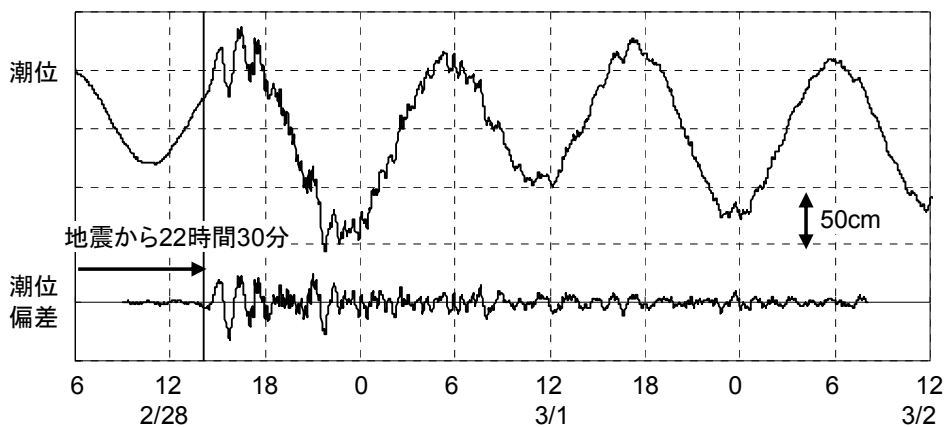


図-5.33 2010年のチリ津波の波形

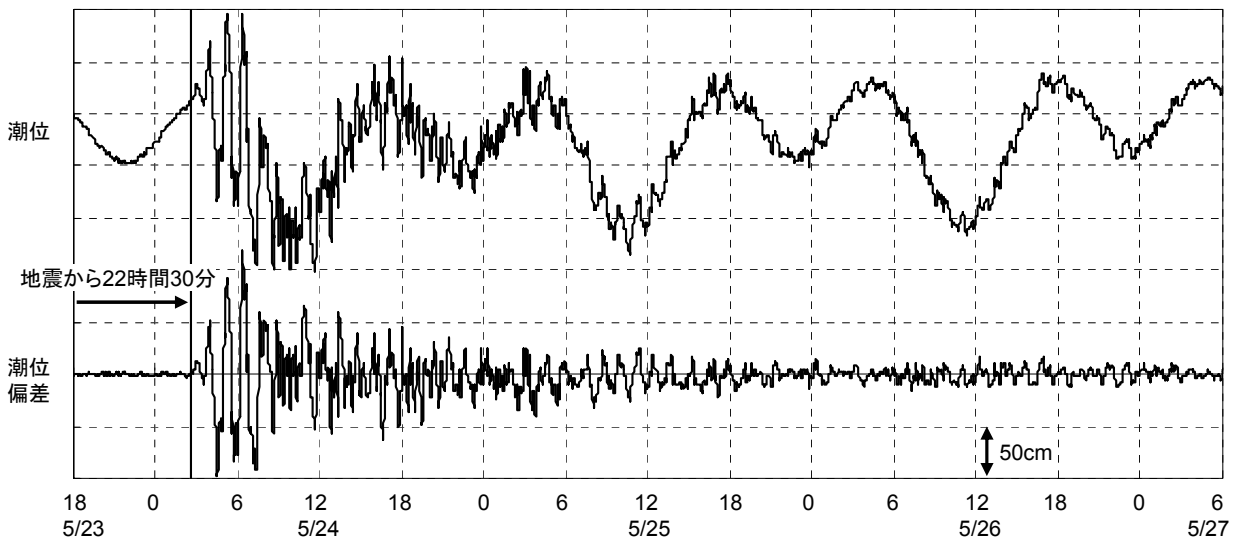


図-5.34 1960年のチリ津波の記録

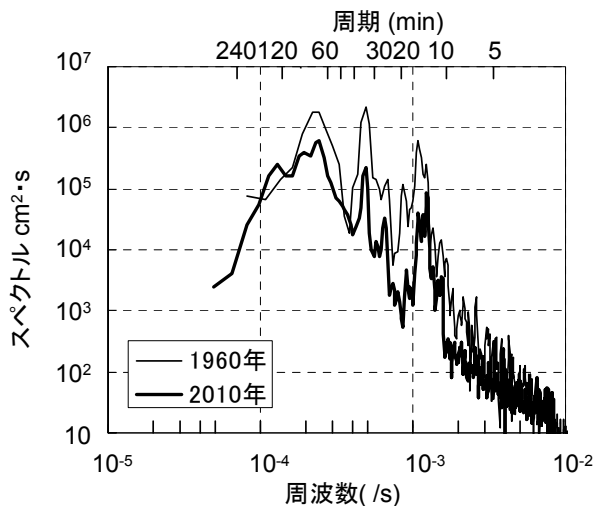


図-5.35 チリ津波のスペクトルの比較

図-5.34は、1960年のチリ津波の波形（永井ら，1996）である。このときは1960年5月23日4時11分（日本時間）にモーメントマグニチュード9.5の地震があり、それによって発生した津波は約23時間半後の5月24日3時頃に久里浜湾へ到達した。正の最大偏差は1mを超えている。津波が到達してすぐの頃は80min程度の成分が卓越したが、時間とともに東京湾口の久里浜～浜金谷間の固有振動に対応する15min程度の成分が増幅された。

図-5.35は、今回の津波と1960年のチリ津波のスペクトルを比較したものである。両方とも70～80min付近、その半分、1/3、1/4に相当する35min付近、25min付近、13min付近の4つのピークが見られる。東京湾口では2つのチリ津波で似たような増幅が生じたことが分かる。

## 6. 結論

NOWPHASでは1970年以来、水深が概ね60m以内の海底に設置した沿岸波浪計や岸壁などに設置した潮位計で観測したデータの集中処理・解析を行ってきた。さらに2008年からは水深100～300mの地点でGPS波浪計の本格運用も開始し、2010年2月22日には東北～四国沿岸の11基に達した。このような状況の下で同月28日に、太平洋沿岸に設置されたGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計がチリからの津波を捉えた。複数のGPS波浪計が同時に津波を捉え、GPS波浪計相互や沿岸波浪計・潮位計との比較によって沿岸部における津波の変形を明らかにしたのは、初めてのことである。これらのデータを解析した成果をまとめると、以下の通りである。

①津波来襲時の太平洋沿岸では、低気圧の影響によりGPS波浪計で1.5～2.5m程度、沿岸波浪計で0.5～2.5m程度の有義波を観測する状況にあったが、観測した水位データを平滑化し潮位を求めることで、リアルタイムに津波の来襲を認識することができた。ただし、GPS波浪計のデータには、平時から電波環境の揺らぎなどに起因する数cmの揺らぎあり、今回の津波においては潮位偏差が概ね10cmを超えるまでは津波の認識が難しかった。

②事後解析として、GPS波浪計で観測した水位データにカットオフ周期が209分のフィルタを通し、なるべく津波以外の成分を除去する処理を行って、ゼロアップクロス法による波の定義やスペクトル解析を行った。その結果、GPS波浪計の何れの地点でも、最大波（正の最大偏差）は0.1～0.3m程度であり、周波数スペクトルでは50min以上の成分が卓越した。三陸沿岸に38～65kmの間

隔で並ぶGPS波浪計の波形を比較すると、第一波の峯・谷はよく対応しているが、それ以降は峯・谷の変化に違いが見られた。青森東岸沖などいくつかの地点では、津波来襲時にブイが1時間程度の周期で1~2m程度振れ回る現象も見られた。

- ③八戸、久慈、釜石、須崎の周辺を例に、GPS波浪計（水深100~300m）、沿岸波浪計（水深20~50m）、潮位計（海岸）で得られた潮位偏差の波形を比較すると、水深が浅くなるにつれて第一波の峯の高さや正・負の最大偏差は大きくなっていった。周波数スペクトルの解析によると、GPS波浪計~沿岸波浪計では、主として概ね30min以上の長周期成分が増幅した。沿岸波浪計~潮位計では、主として10~20min程度の短周期成分が増幅しており、場所に固有な周期に顕著な増幅が見られた。この固有な周期の顕著な増幅は、2003年十勝沖地震津波、2005年宮城県沖地震津波、2006年千島沖地震津波でも見られた。
- ④沿岸波浪計の主力機種である海象計の中には、上・中・下層でほぼ同時刻にほぼ同じ流速で岸向・沖向の流れを繰り返す、津波の振る舞いを捉えたものもある。小名浜では最大で約0.2m/s、高知でも最大で約0.1m/sを記録した。

## 7. あとがき

NOWPHASでは平時から、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計で観測したデータを、気象庁に配信するとともに、リアルタイム・ナウファスwebを通して一般にも公開してきた。今回の津波では、本格運用している11基全てのGPS波浪計の観測波形からリアルタイムに津波を認識することができた。気象庁からはGPS波浪計として初めて津波の到達や最大波の情報が発せられ、港湾関係者を含む多くの人々がリアルタイム・ナウファスwebの画面で津波を含む潮位波形を閲覧した。また、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計と水深が浅くなるにつれて津波が高くなる現象を明確に捉えた。この観測データはリアルタイム津波予測計算の検証データとしても非常に貴重である。今後も様々な場面で、GPS波浪計をはじめとするNOWPHASの様々な観測機器で観測されたデータが、津波のリアルタイムな防災に役立つことを期待したい。

当所では、2003年十勝沖地震津波などこれまでの顕著な津波に対しては、沿岸波浪計と潮位計で観測した波形を比較することで、沿岸部の変形特性が議論されてきた。今回の津波では、GPS波浪計で観測した波形も比較に加えることで、もう少し沖合からの変形特性に迫ることができた。チリ沿岸で発生した津波は、自ら分散性を持ち、海溝や島嶼

を含む複雑な海底地形の影響も受けながら、日本沿岸に到達した。本報で示した観測データが現地被災調査の結果とともに、数値計算モデルの検証に使われることで、太平洋全体や日本沿岸における津波の伝播・変形過程に対する科学的な理解がより深まり、津波防波堤の効果の検証にも生かされ、平時からの備えという面からも防災に資することを期待したい。

(2010年8月13日受付)

## 謝辞

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の久高将信氏、額田恭史氏、三原正裕氏にご助力いただいた。ここに記して、関係各位に謝意を表したい。

## 参考文献

- 岩崎峯夫(1996)：デジタルフィルターを用いた津波計，カイジョー一技報，vol. 2, No. 4, (株)カイジョー，pp. 51-58.
- 岩崎峯夫・永井紀彦・清水勝義・安立重昭(2006)：検潮井戸の周波数応答計測システムの開発，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1416-1420.
- 加藤照之・寺田幸博・松岡幸文・高田美津雄(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.
- 河合弘泰・辰巳大介(2010a)：GPS波浪計によるチリ津波の観測結果と数値計算，財団法人沿岸技術研究センター機関誌，CDIT，vol. 32, pp. 16-17.
- 河合弘泰・佐藤 真・永井紀彦・川口浩二(2010b)：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，海岸工学論文集，第57巻，印刷中.
- 河合弘泰(2010c)：ナウファスにおける波浪・潮位等の観測の現状と今後の課題，2010年度（第46回）水工学に関する夏期研修会講義集Bコース，土木学会，B-8, 20p.
- 気象庁(2010a)：2010年2月27日15時34分頃にチリ中部沿岸で発生した地震について（第5報），<http://www.jma.go.jp/jma/press/1003/01a/kaisetsu201003011000.pdf>，2010年3月1日10時00分.
- 気象庁(2010b)：平成22年2月27日のチリ中部沿岸の地震について，<http://www.jma.go.jp/jma/press/1003/09c/kaisetsu100309.pdf>，2010年3月9日16時.

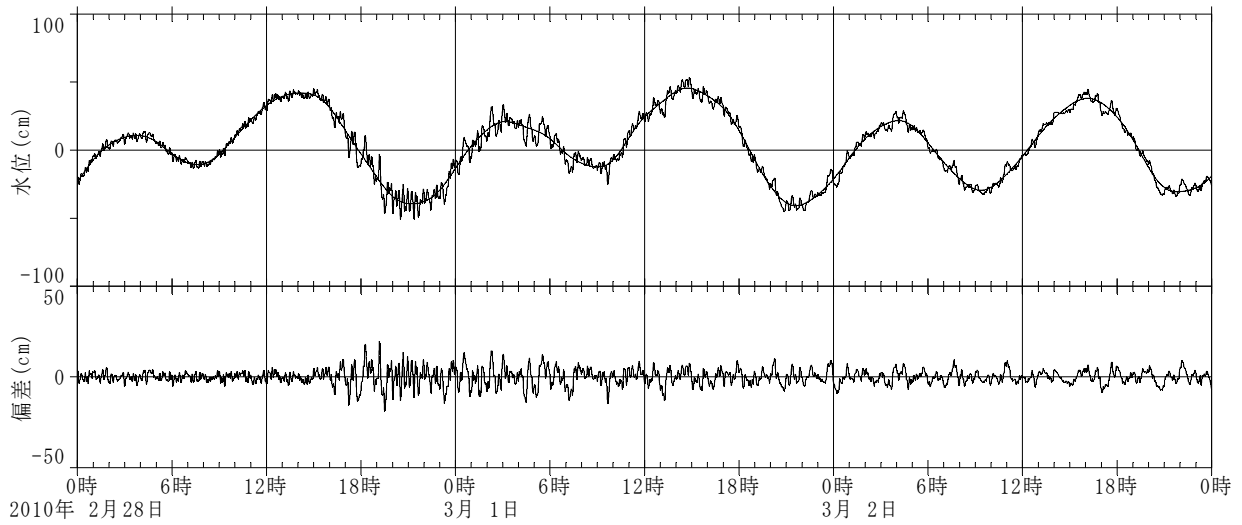
- 気象庁(2010c):チリ中部沿岸の地震による津波における津波警報作業等,第6回津波予測技術に関する勉強会資料1, [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami\\_benkyokai/benkyokai6/siryoul.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami_benkyokai/benkyokai6/siryoul.pdf), 2010年5月14日.
- 国土交通省港湾局・(独法)港湾空港技術研究所:リアルタイム・ナウファスWeb(オンライン),<http://www.mlitt.go.jp/kowan/nawphas/index.html>, 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, 港湾技研資料, No. 842, 96p.
- 清水勝義・永井紀彦・里見 茂・李 在炯・久高将信・藤田 孝(2006a):ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1406-1410.
- 清水勝義・永井紀彦・李 在炯・泉 裕明・岩崎峯夫・藤田 孝(2006b):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, Vol. 22, 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, 港湾技研資料, No. 775, 225p.
- 高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木 弘(1992):水中ドップラー式波向(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 176-180.
- 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, 港湾技研資料, No. 470, 299p.
- 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・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1995):平成6年(1994年)北海道東方沖地震津波の特性, 港湾技研資料, No. 802, 97p.
- 永井紀彦・菅原一晃・渡邊 弘・川口浩二(1996):久里浜湾における長期検潮記録解析, 港湾技術研究所報告, 第35巻, 第4号, pp. 3-35.
- 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃(1999):ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長周期波の観測, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第1号, pp. 29-69.
- 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, pp. 1411-1415.
- 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を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 42巻, pp. 1081-1085.
- 宮田正史・小林 孝・河合弘泰・佐藤 真(2010):GPS波浪計によるチリ地震津波の観測結果について, 雑誌港湾, 社団法人日本港湾協会, Vol. 87, 2010年7月号, pp. 12-13.
- Pacific Tsunami Warning Center(2010):Tsunami Bulletin Number 015, <http://www.prh.noaa.gov/ptwc/messages/pacific/2010/pacific.2010.02.27.202736.txt>



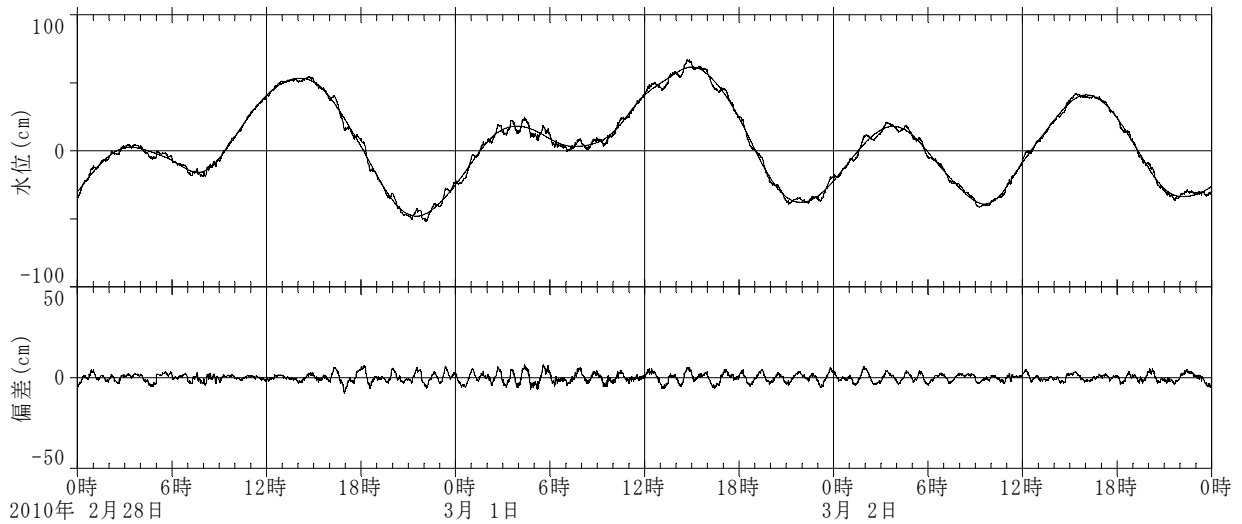
## 付録

付図-A.1～A.77は、図-3.2に示した地点で観測した水位と偏差を示す。概ね北から南に向かう順になっている。各図の見出しにGPS、海象計、波高計、潮位計と記してある。GPSとはGPS波浪計のことであり、その詳しい諸元は表-3.1の整理番号62～72を参照いただきたい。海象計は沿岸波浪計の一種である海象計、波高計は海象計以外の機種（USWまたは空中発射式）の沿岸波浪計であり、その詳しい諸元は表-3.1の整理番号1～61で解析対象の欄に○印のついたものを参照いただきたい。潮位計とは岸壁等に設置された潮位計のことであり、その詳しい諸元は表-3.2を参照いただきたい。

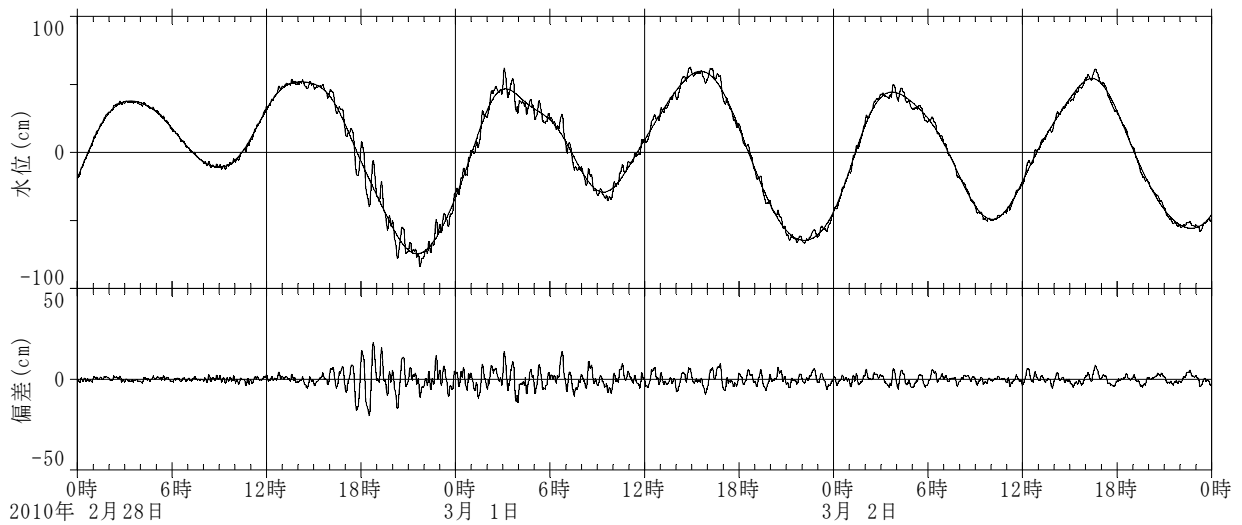
付図-B.1～B.5は付図-Aの図のうち2月28日12時～3月1日12時の潮位偏差を引き伸ばしたものである。図中の↓印は第一波（ゼロアップクロス点）、▽印は最大波（山から谷までの差が最大）、▼印は正の最大偏差（山の高さ）を示す。



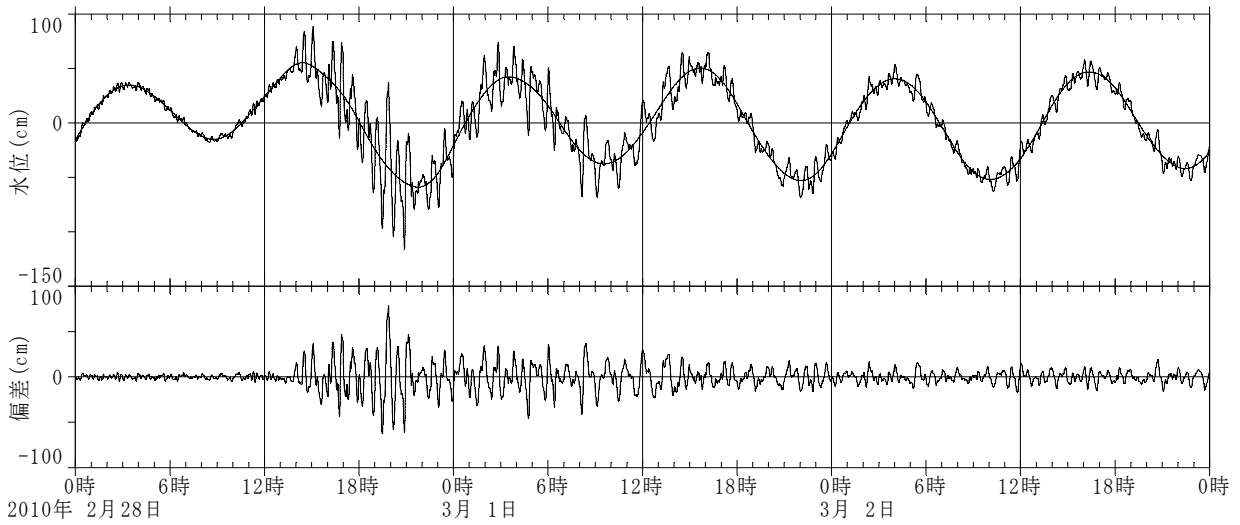
付図A-1 津波波形記録 (枝幸, 潮位計)



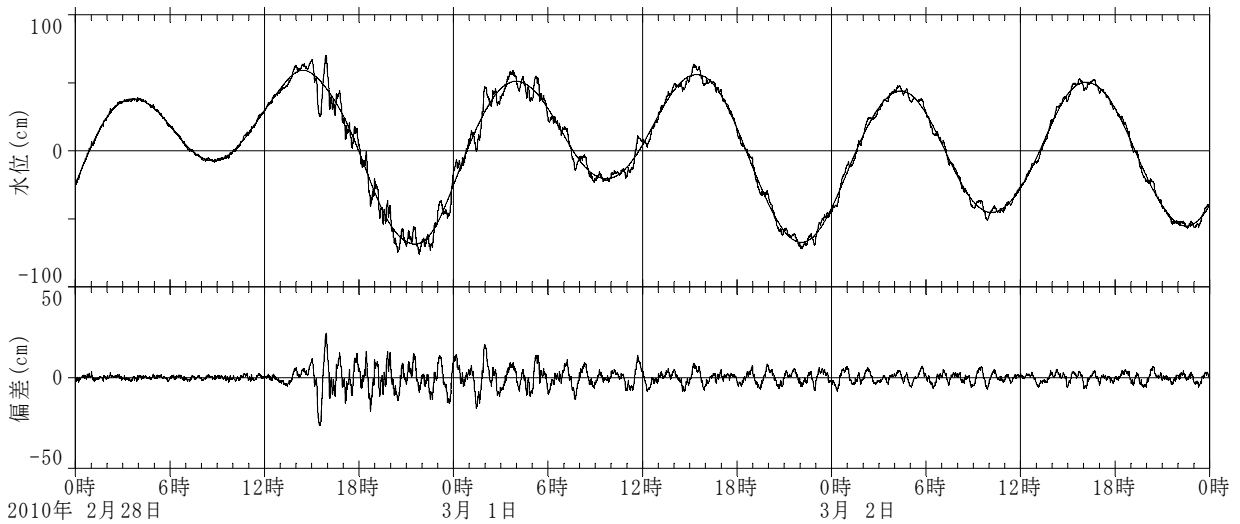
付図A-2 津波波形記録 (紋別(南), 海象計)



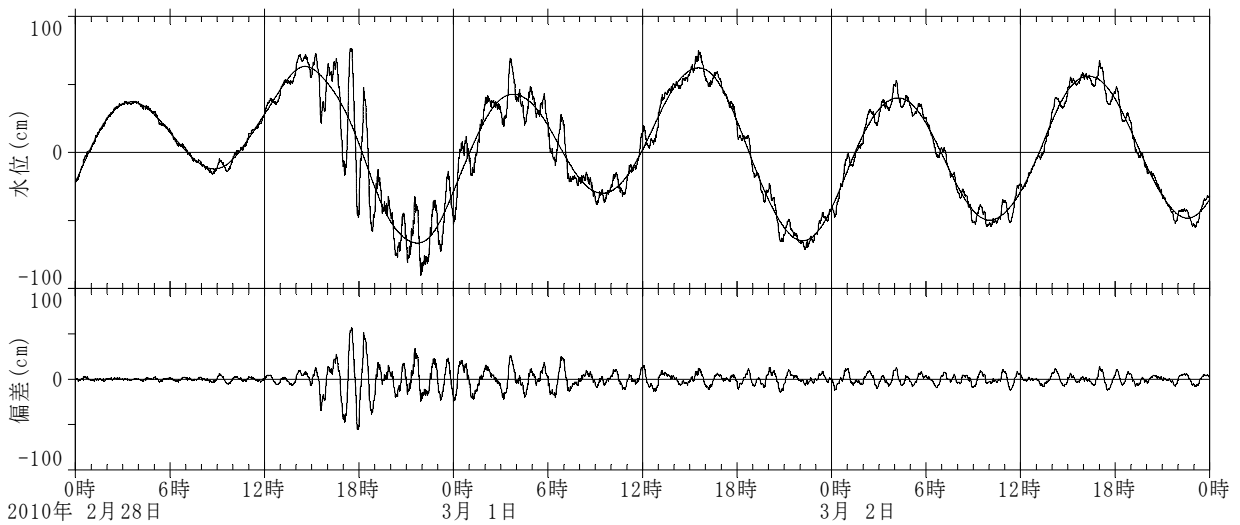
付図A-3 津波波形記録 (根室, 潮位計)



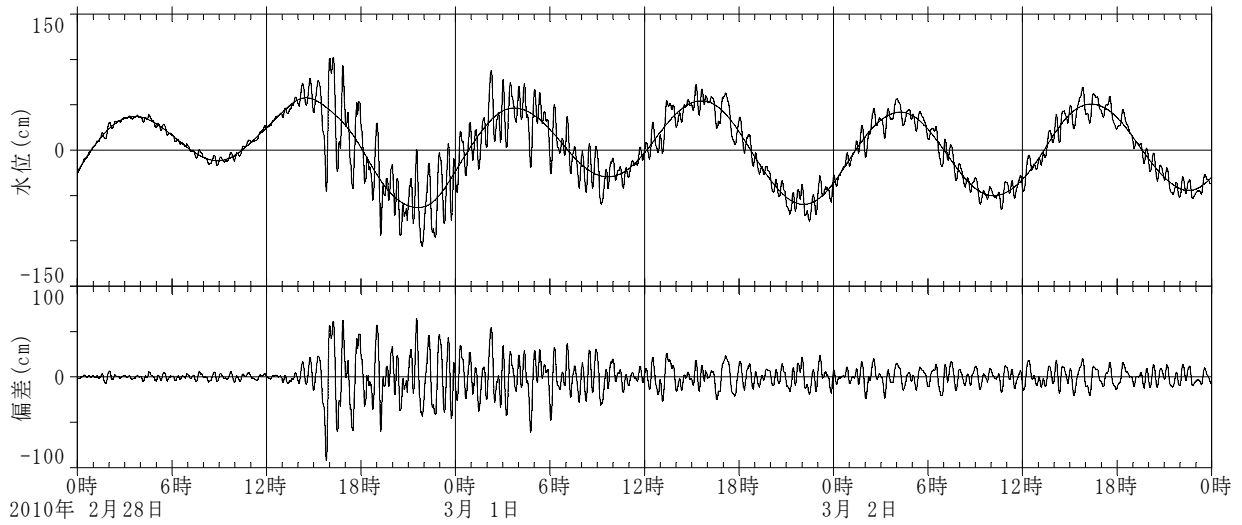
付図A-4 津波波形記録（霧多布，潮位計）



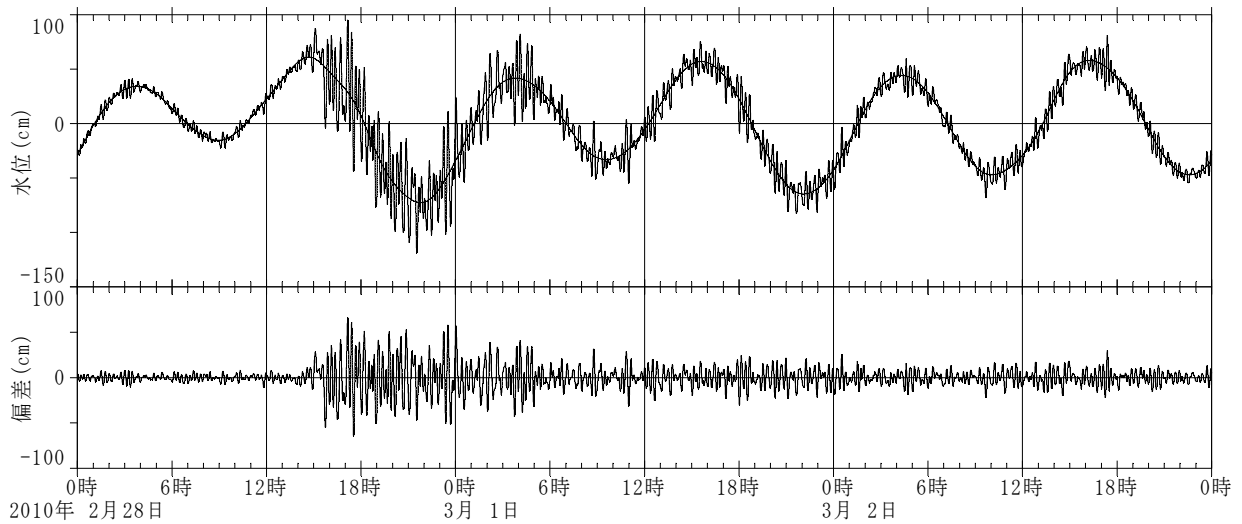
付図A-5 津波波形記録（釧路，海象計）



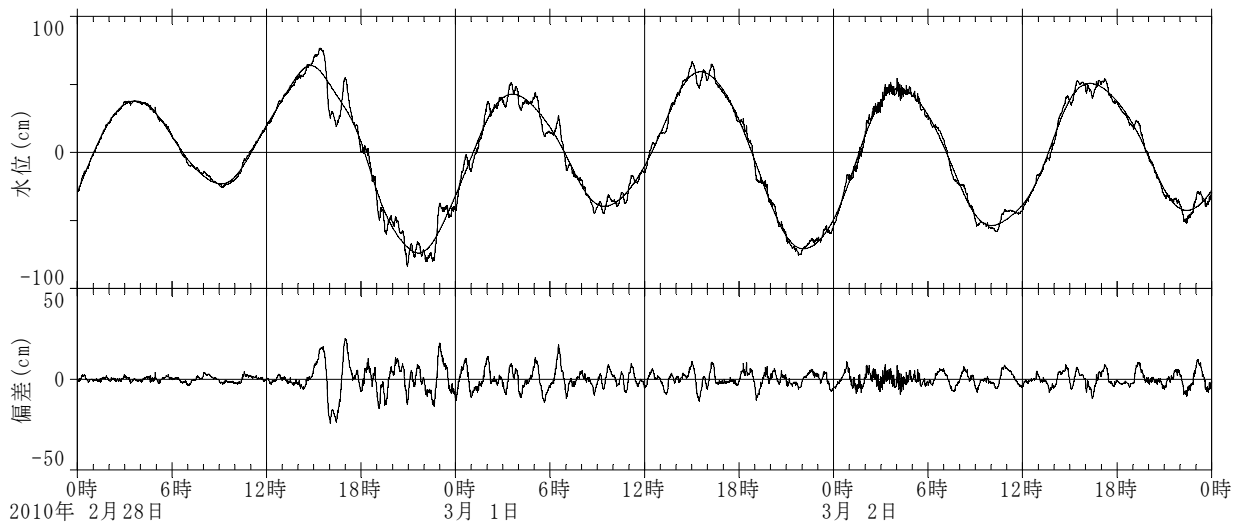
付図A-6 津波波形記録（十勝，海象計）



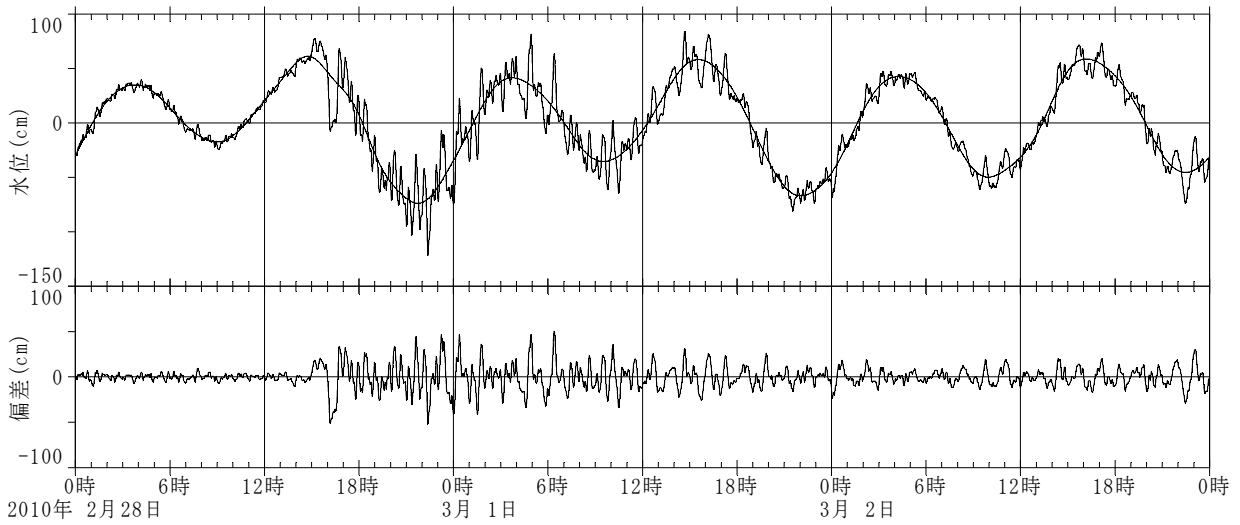
付図A-7 津波波形記録（十勝，潮位計）



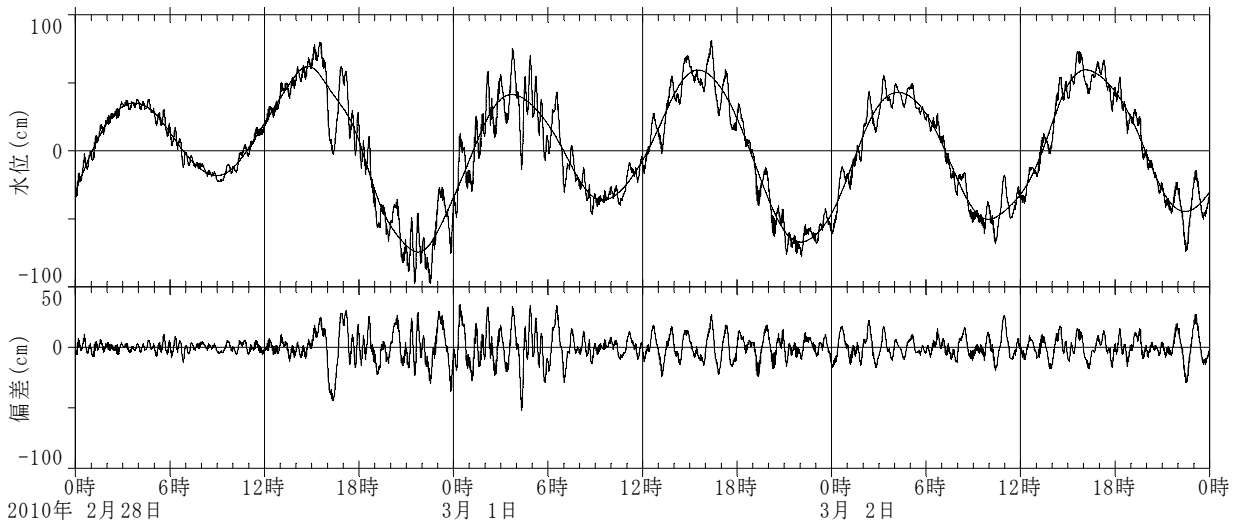
付図A-8 津波波形記録（浦河，潮位計）



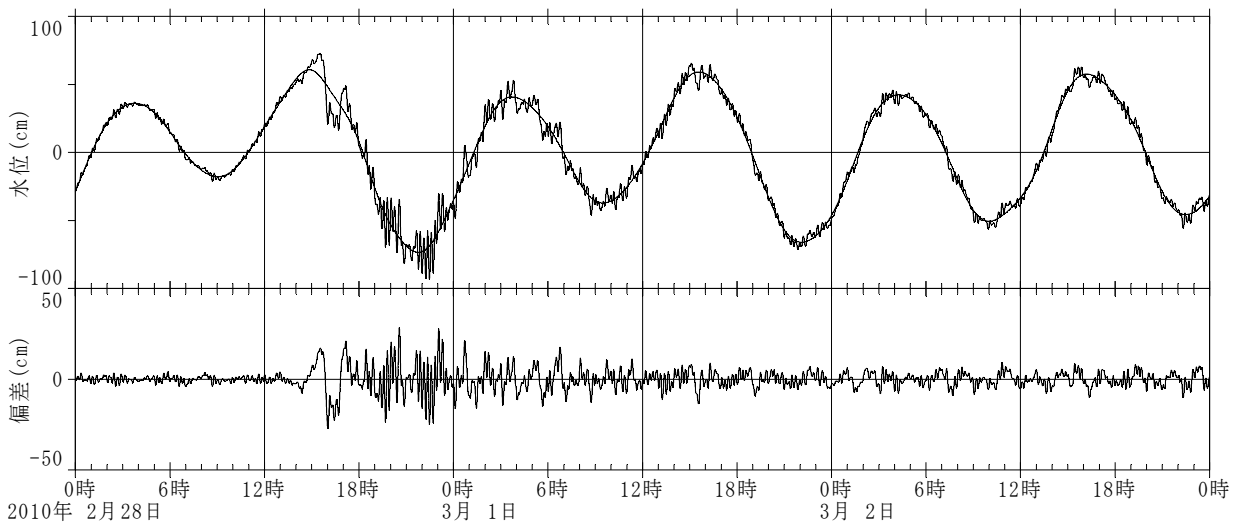
付図A-9 津波波形記録（苫小牧，海象計）



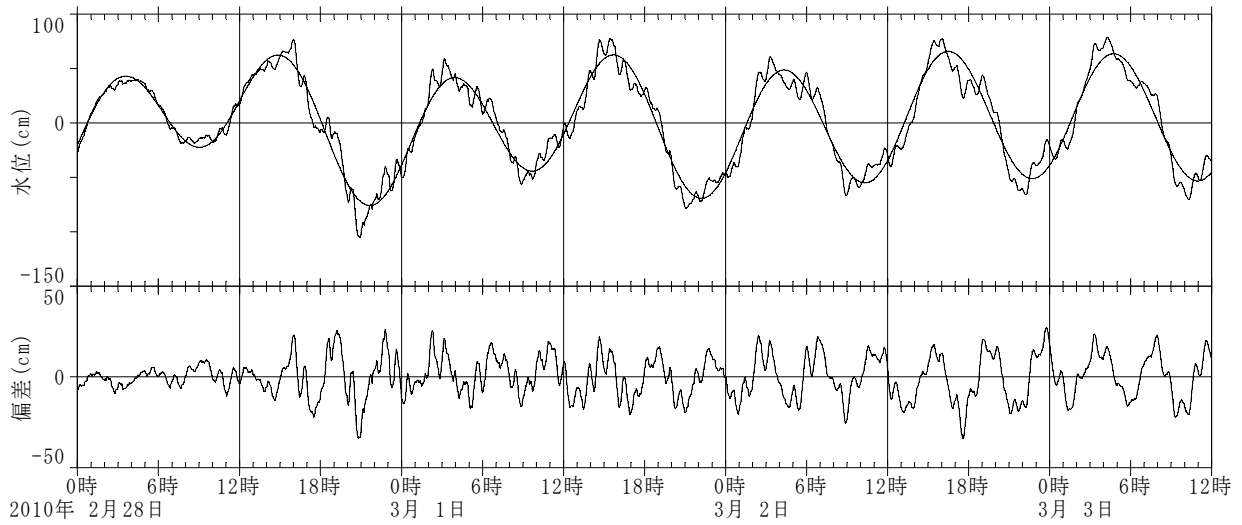
付図A-10 津波波形記録（苫小牧東，潮位計）



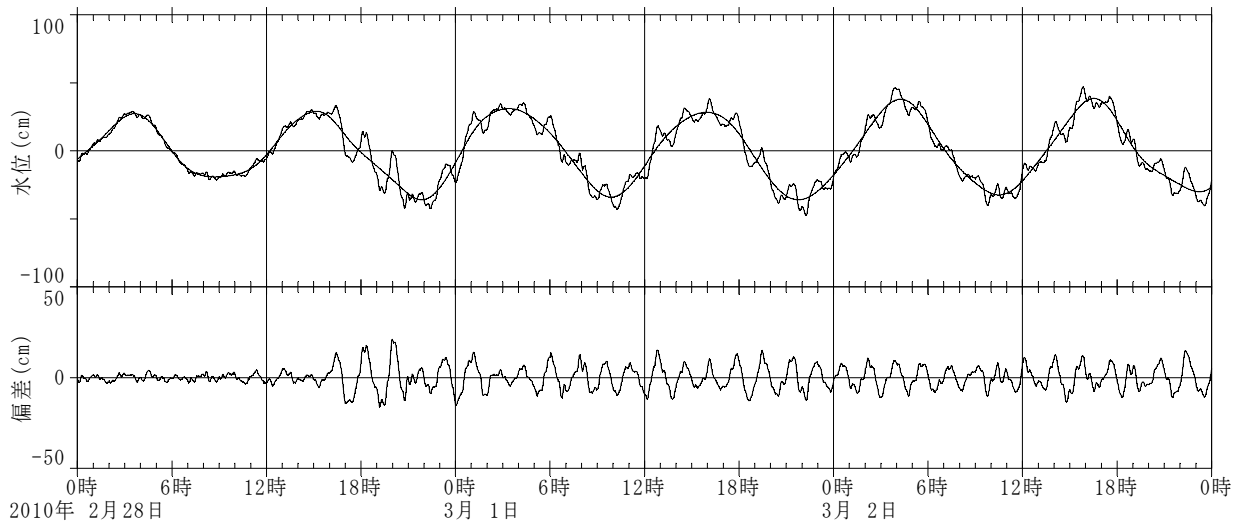
付図A-11 津波波形記録（苫小牧西，潮位計）



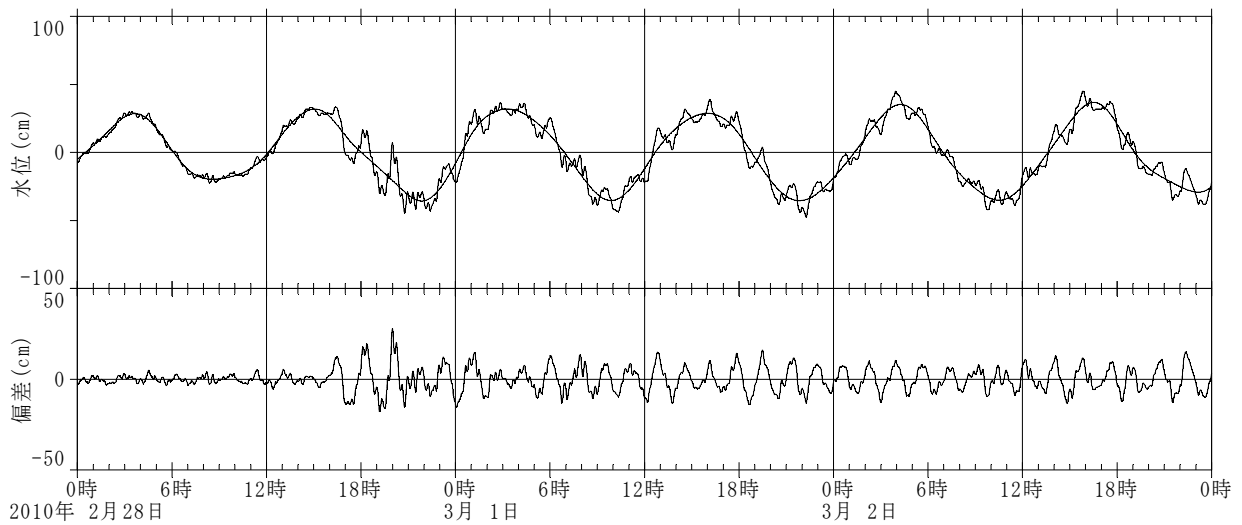
付図A-12 津波波形記録（白老，潮位計）



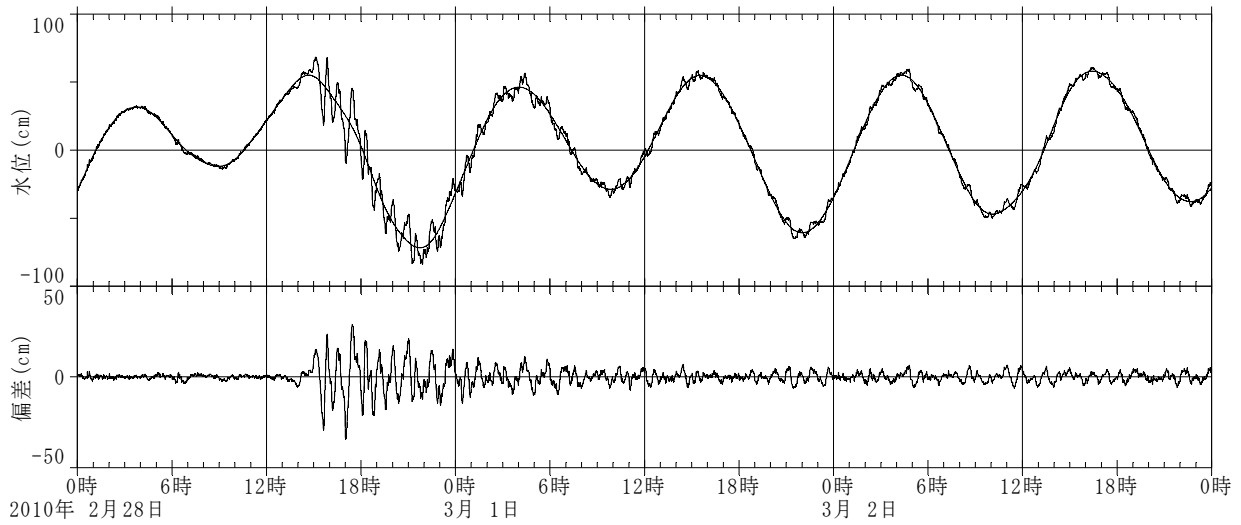
付図A-13 津波波形記録(室蘭, 潮位計)



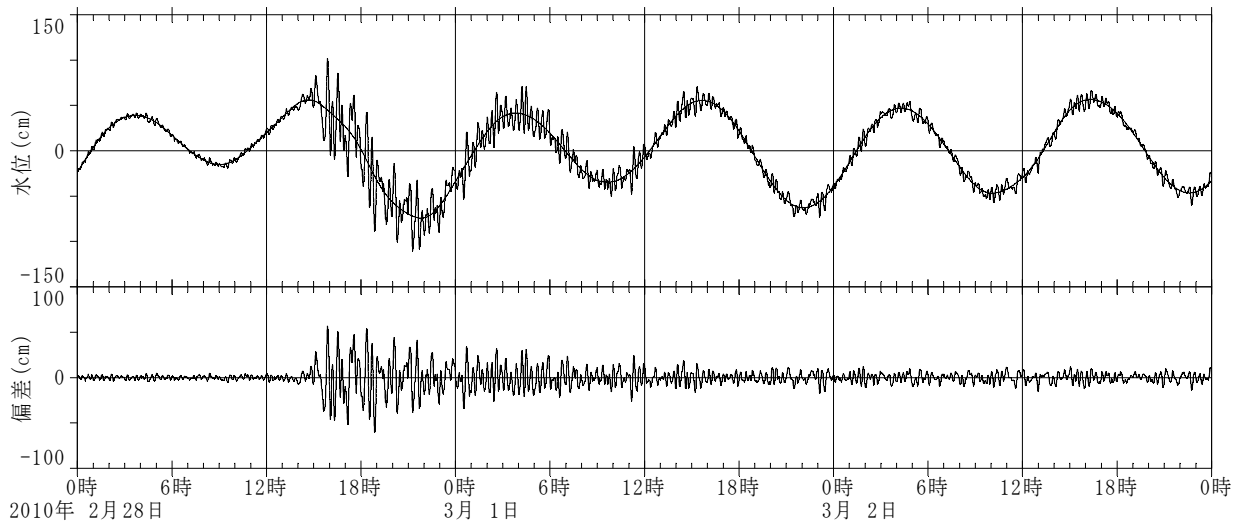
付図A-14 津波波形記録(青森, 波高計)



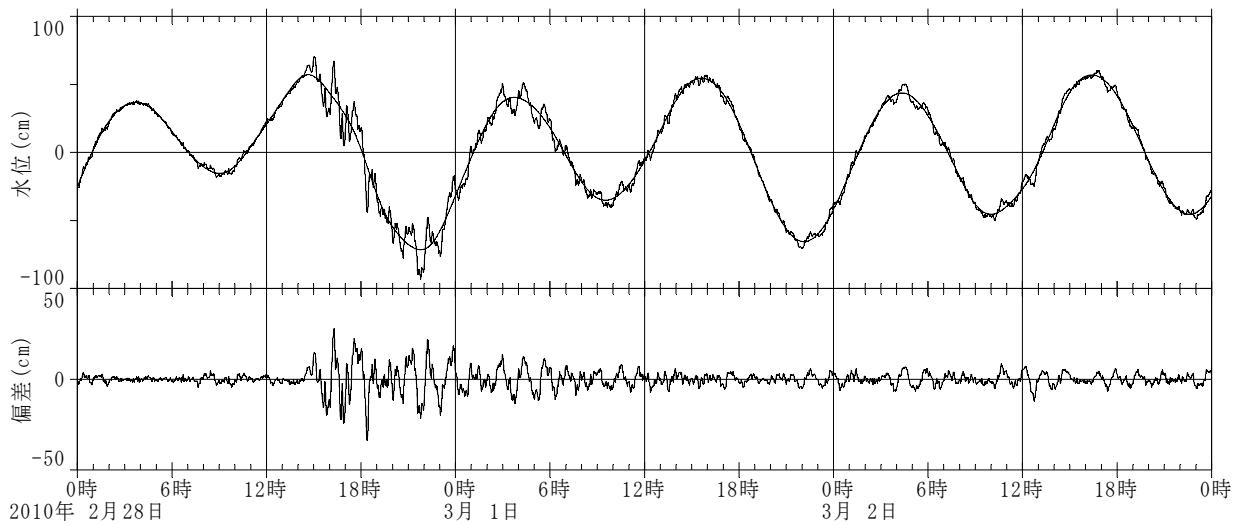
付図A-15 津波波形記録(青森, 潮位計)



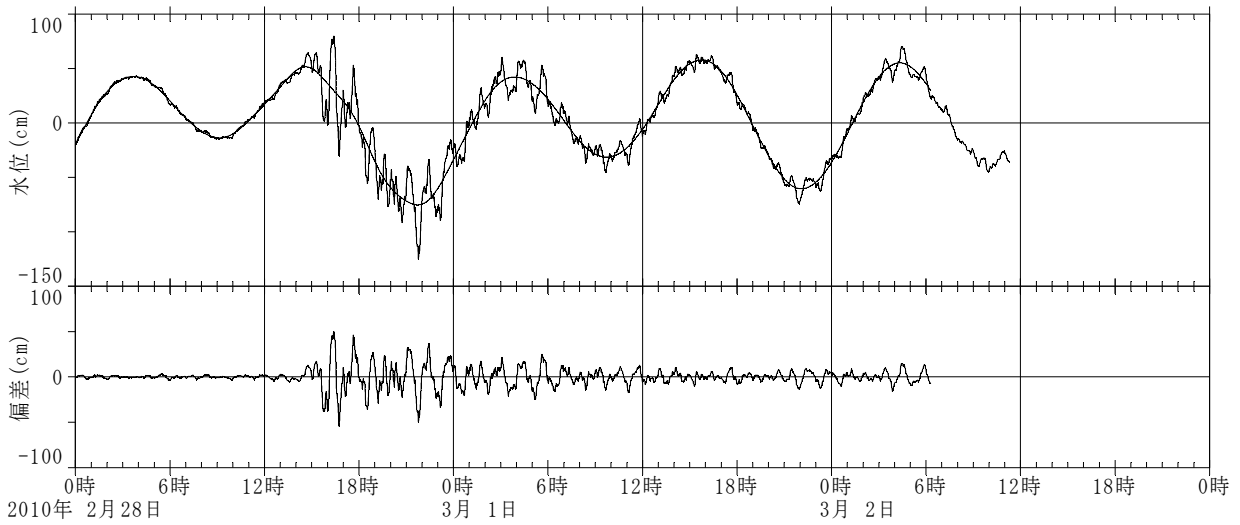
付図A-16 津波波形記録（むつ小川原，波高計）



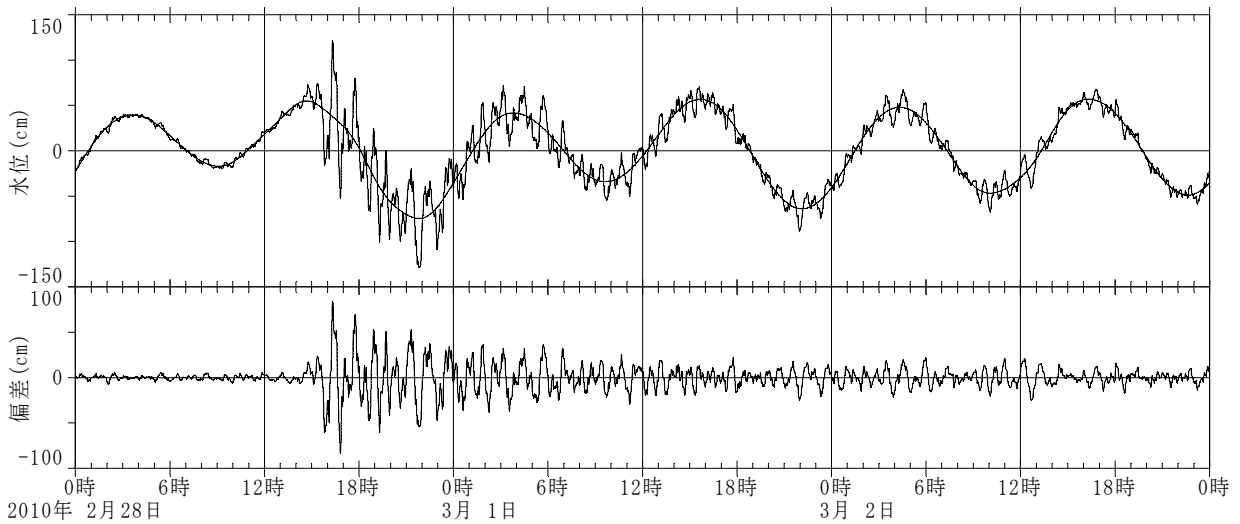
付図A-17 津波波形記録（むつ小川原，潮位計）



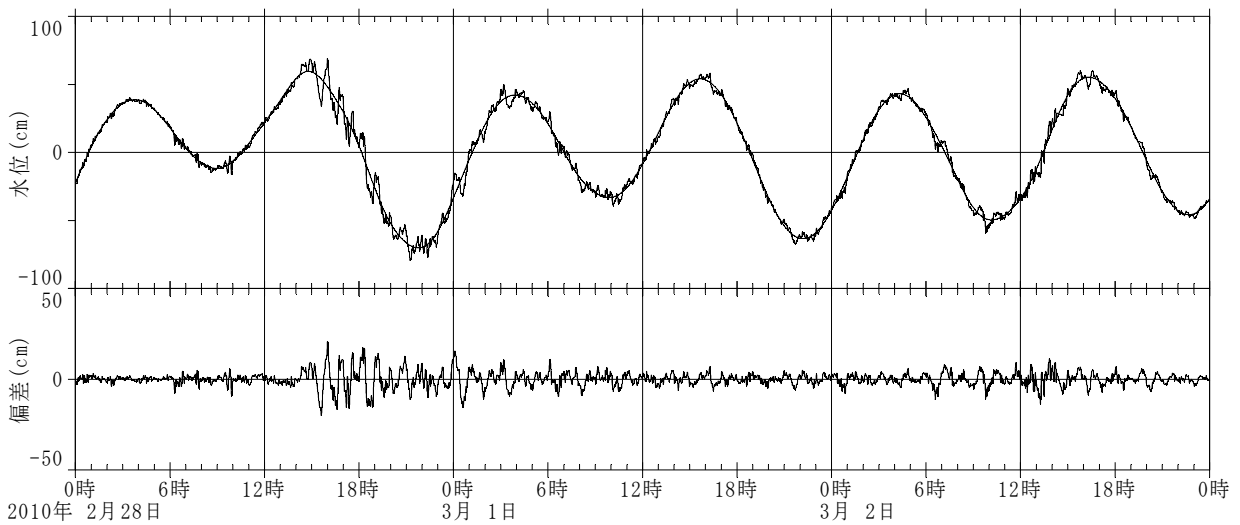
付図A-18 津波波形記録（青森東岸沖，GPS）



付図A-19 津波波形記録（八戸，波高計）

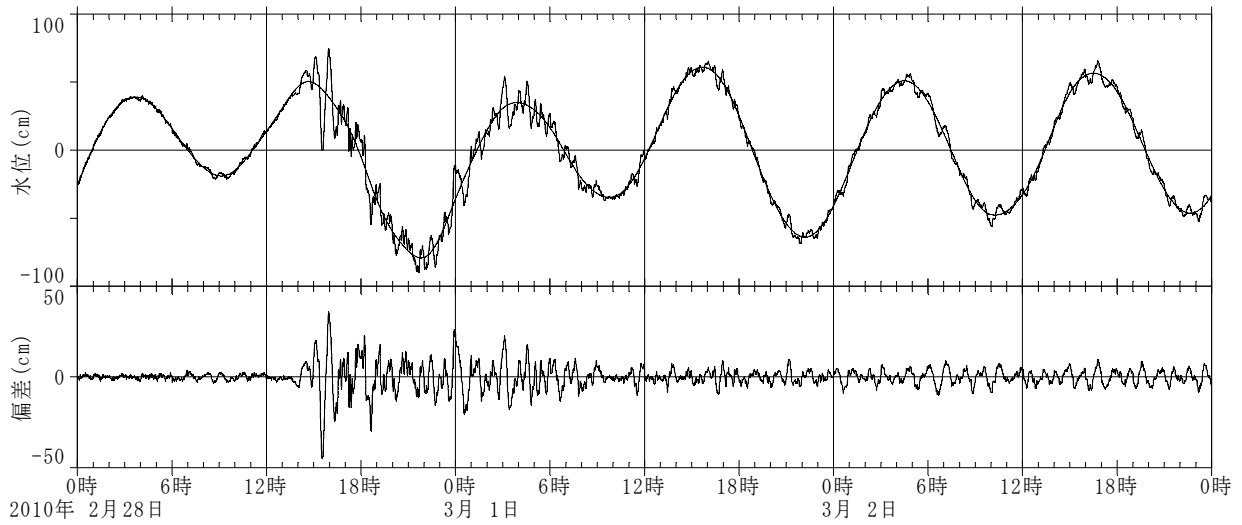


付図A-20 津波波形記録（八戸，潮位計）

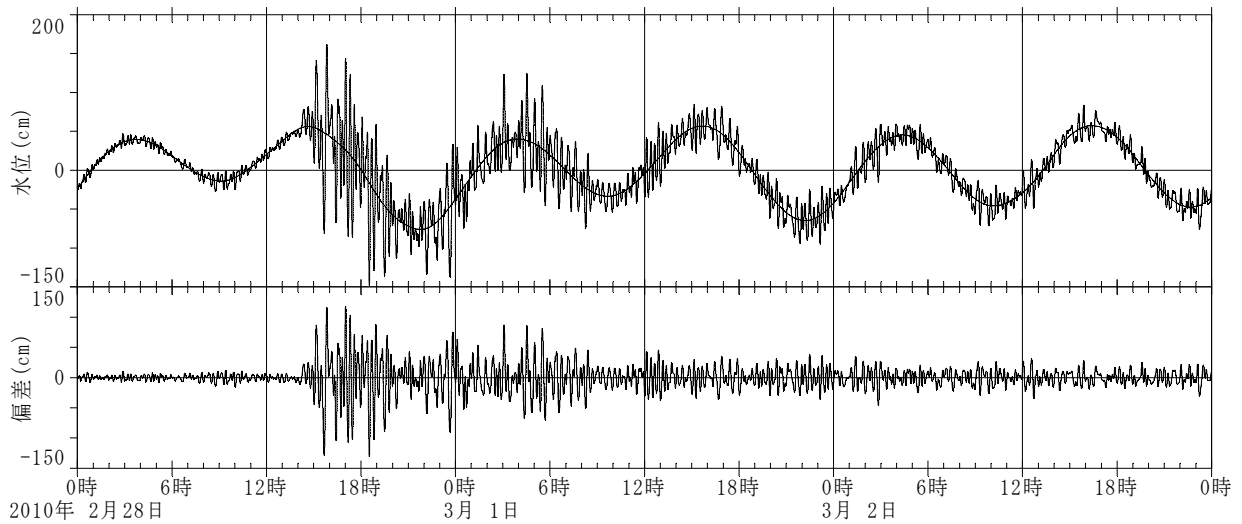


付図A-21 津波波形記録（岩手北部沖，GPS）

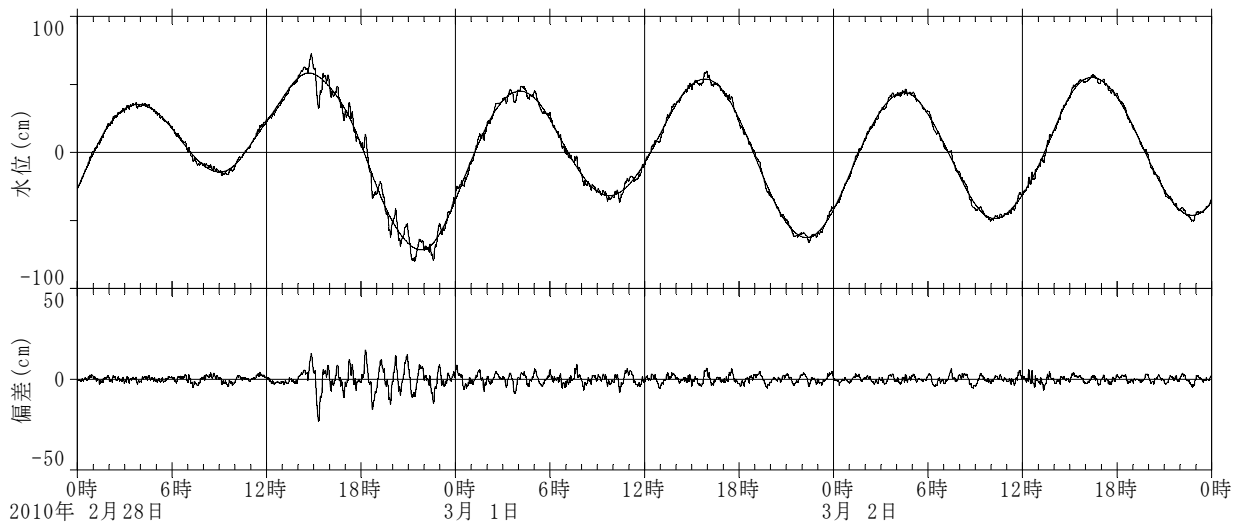




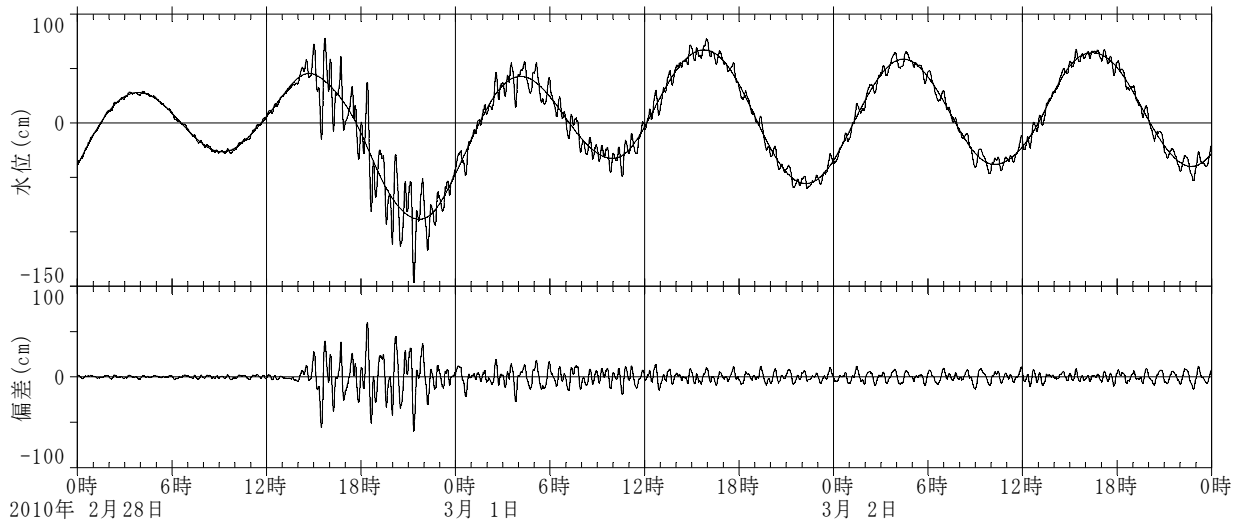
付図A-22 津波波形記録（久慈，海象計）



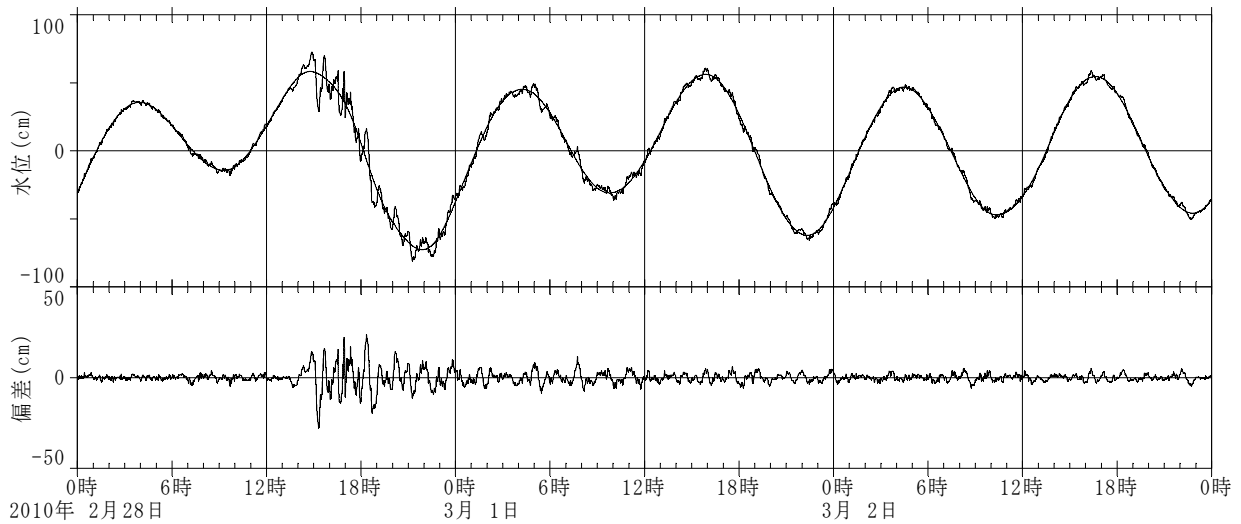
付図A-23 津波波形記録（久慈，潮位計）



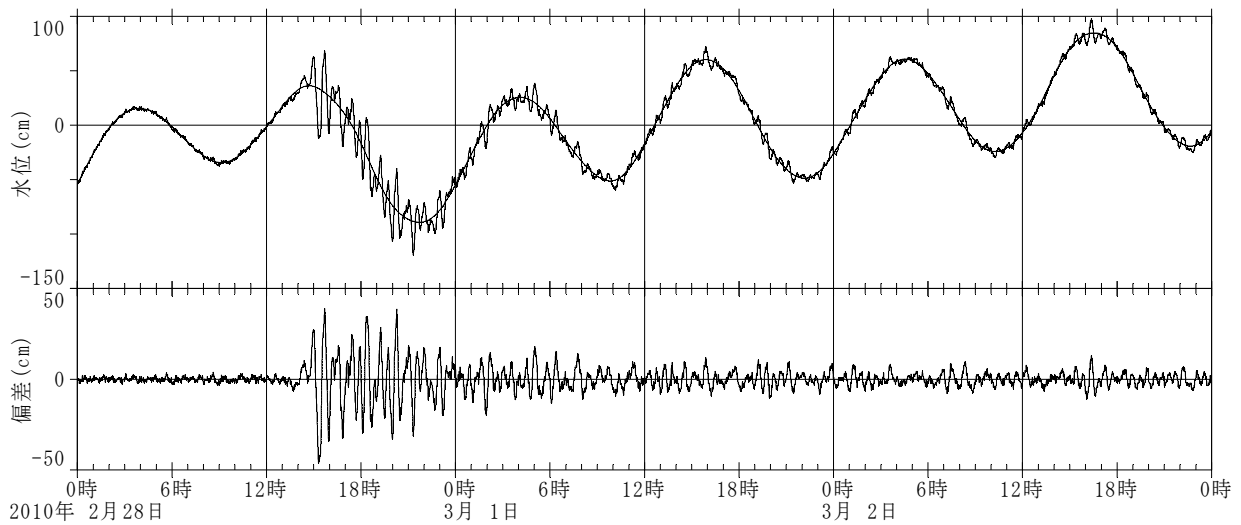
付図A-24 津波波形記録（岩手中部沖，GPS）



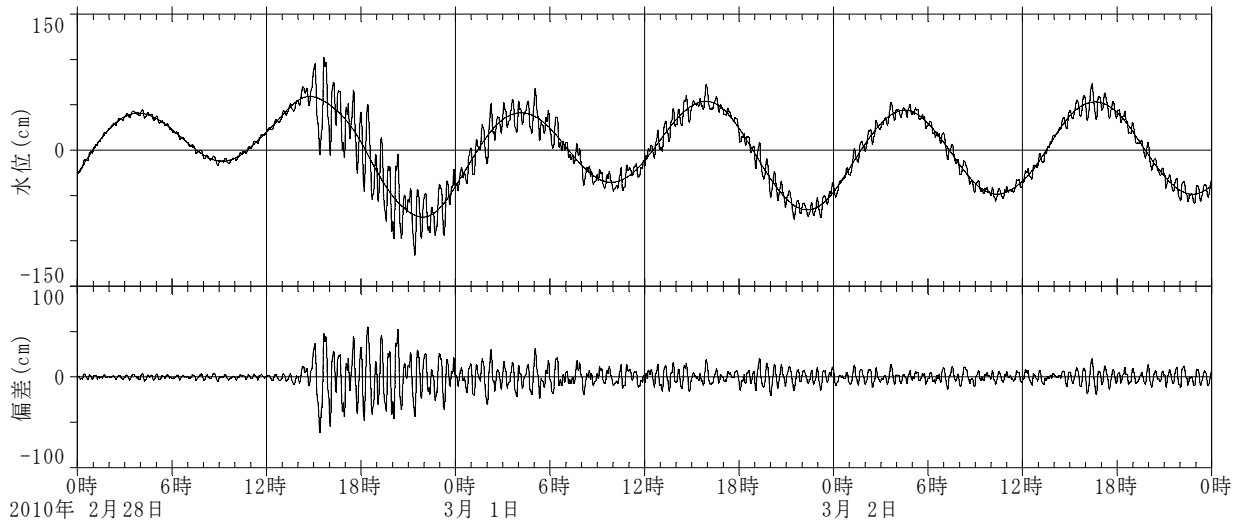
付図A-25 津波波形記録（宮古，波高計）



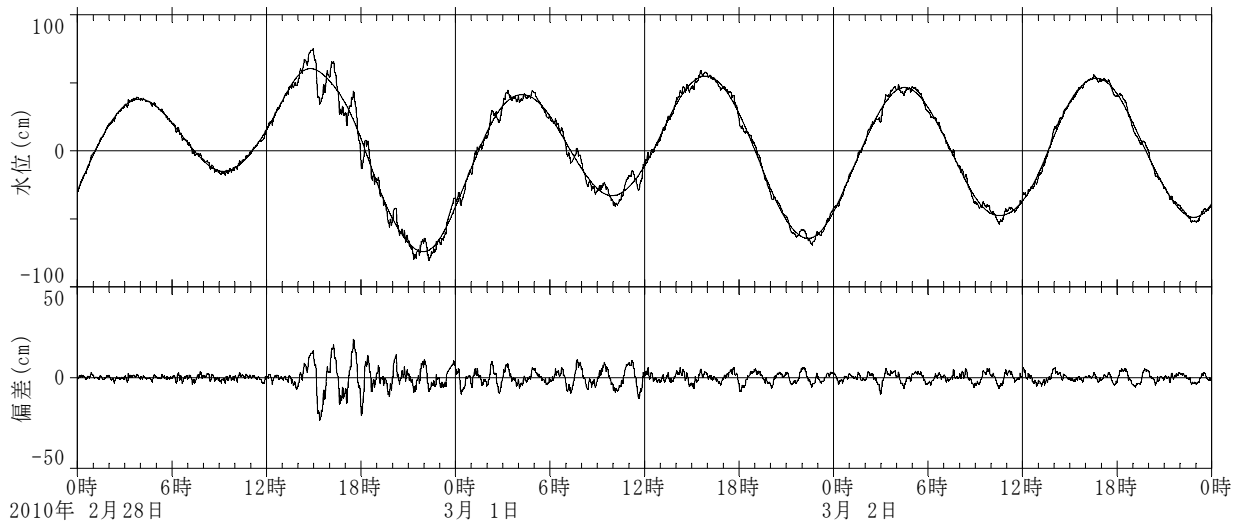
付図A-26 津波波形記録（岩手南部沖，GPS）



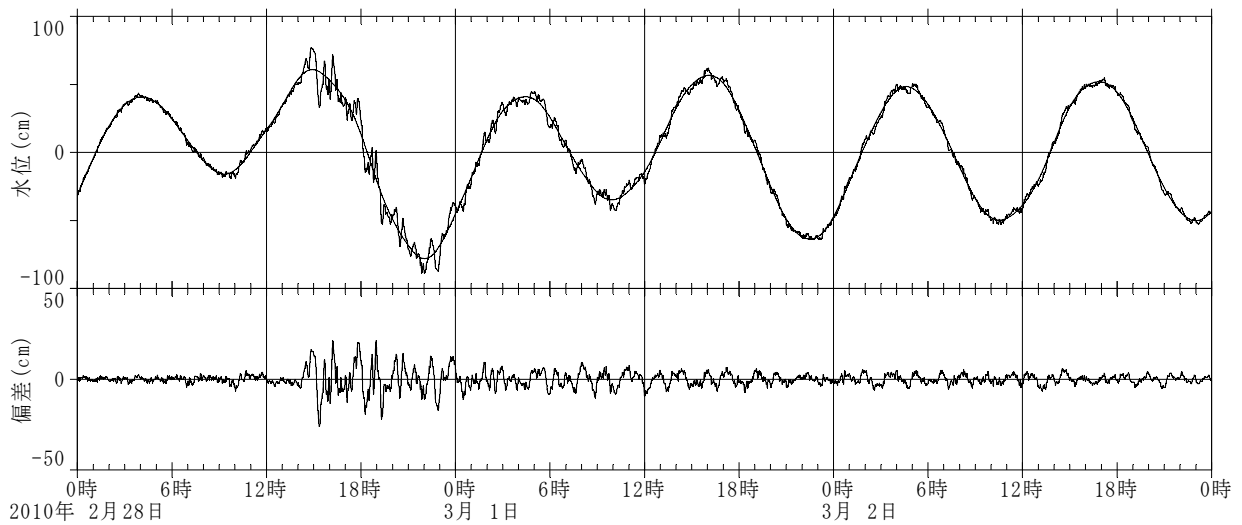
付図A-27 津波波形記録（釜石，波高計）



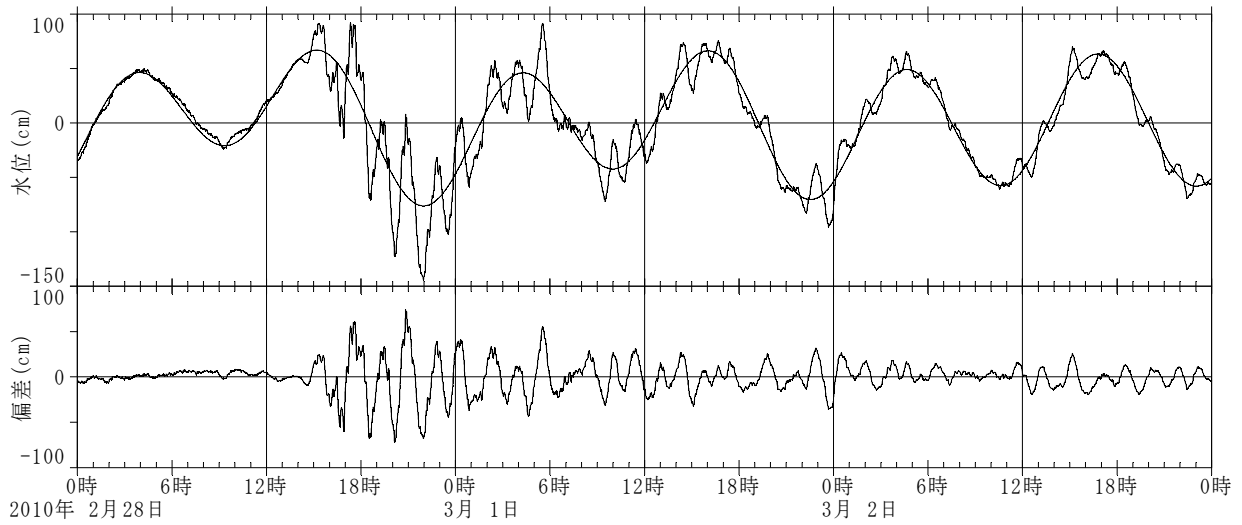
付図A-28 津波波形記録（釜石，潮位計）



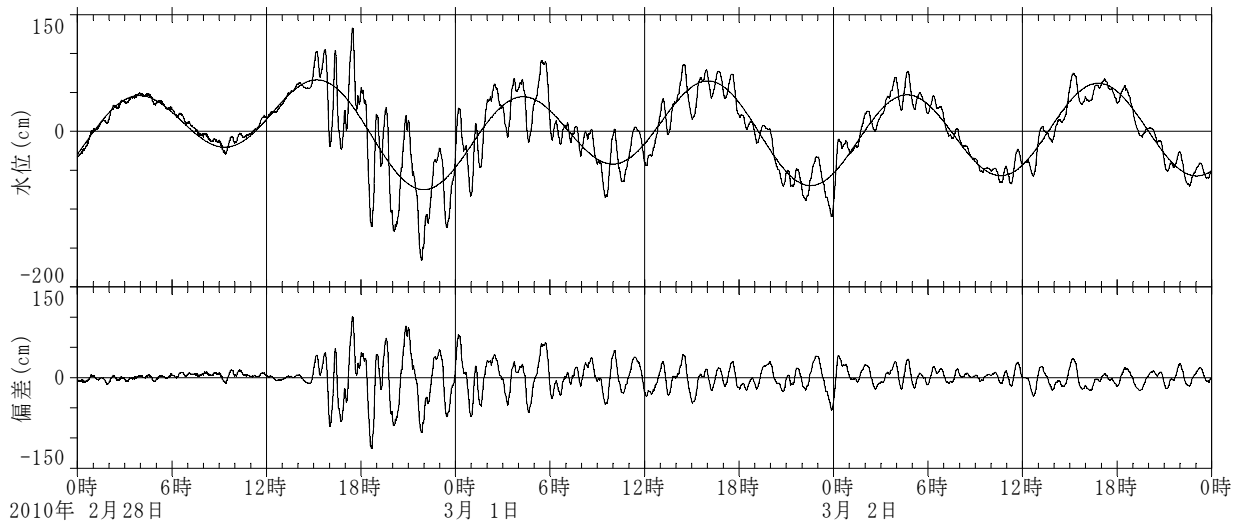
付図A-29 津波波形記録（宮城北部沖，GPS）



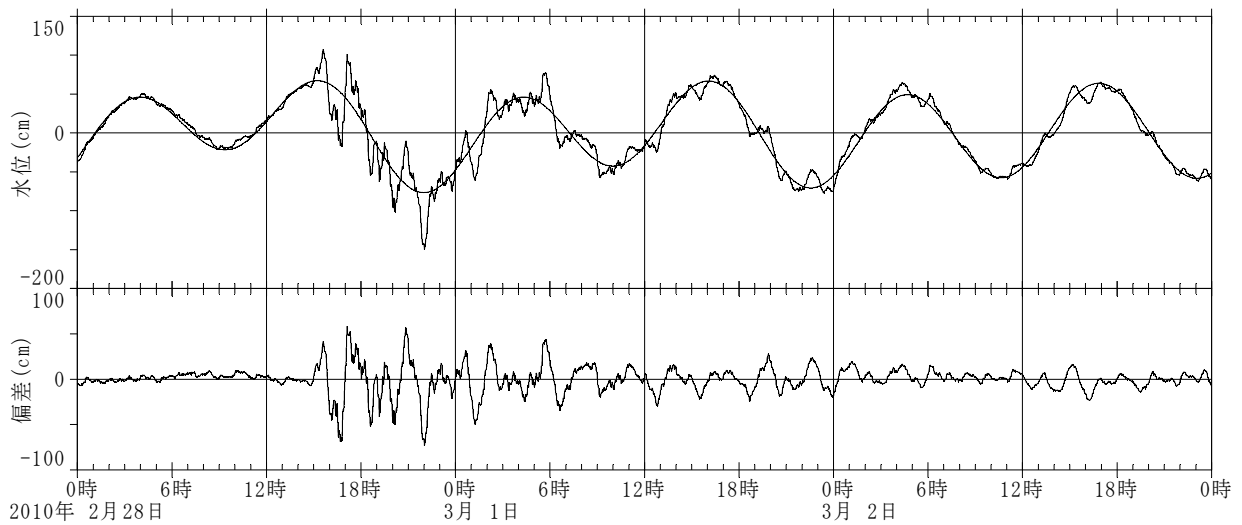
付図A-30 津波波形記録（宮城中部沖，GPS）



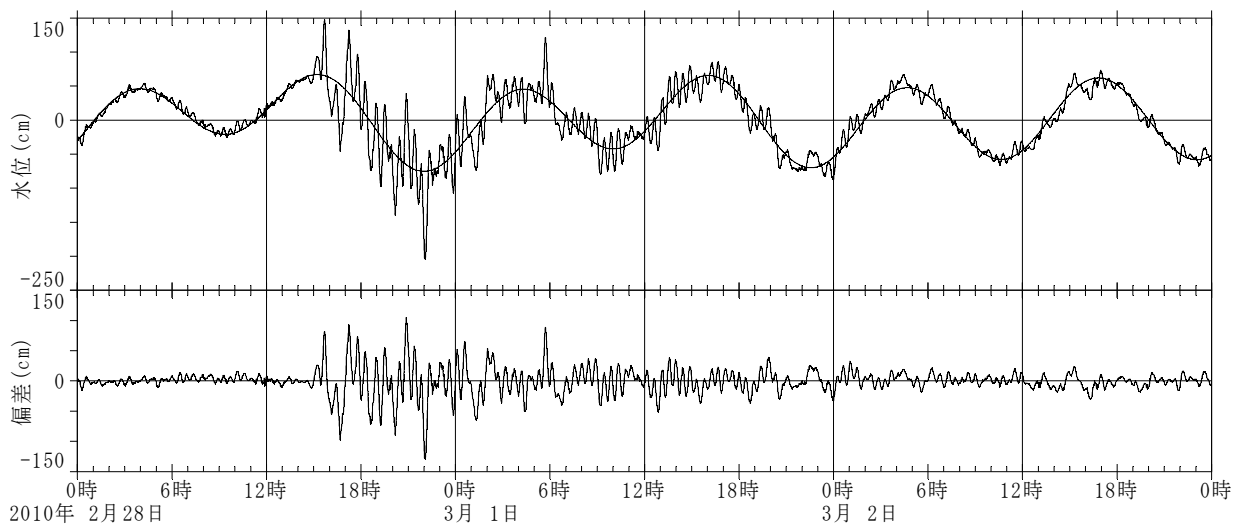
付図A-31 津波波形記録 (石巻, 海象計)



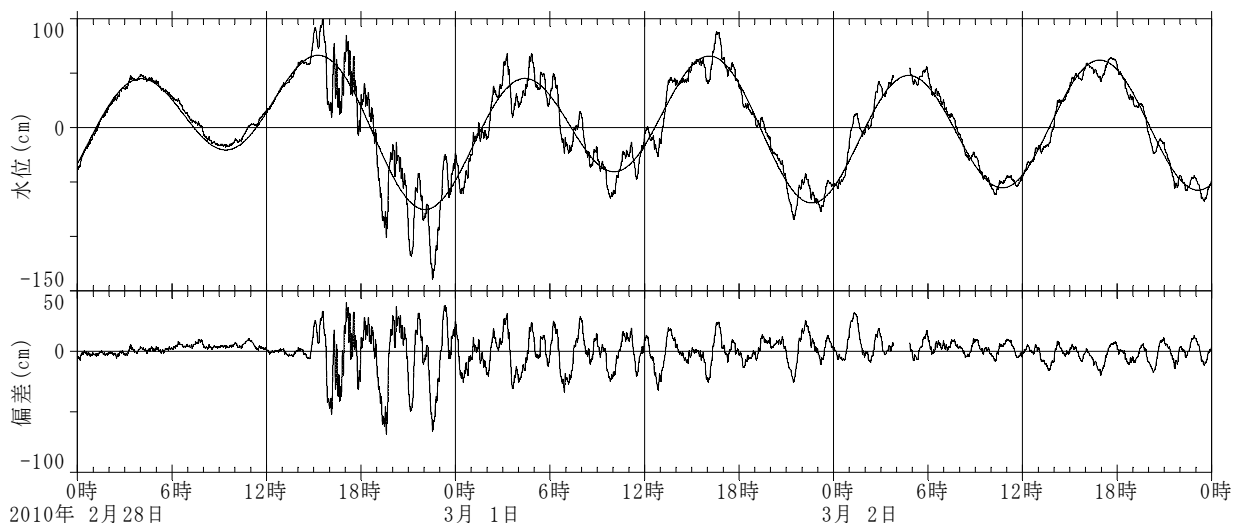
付図A-32 津波波形記録 (石巻, 潮位計)



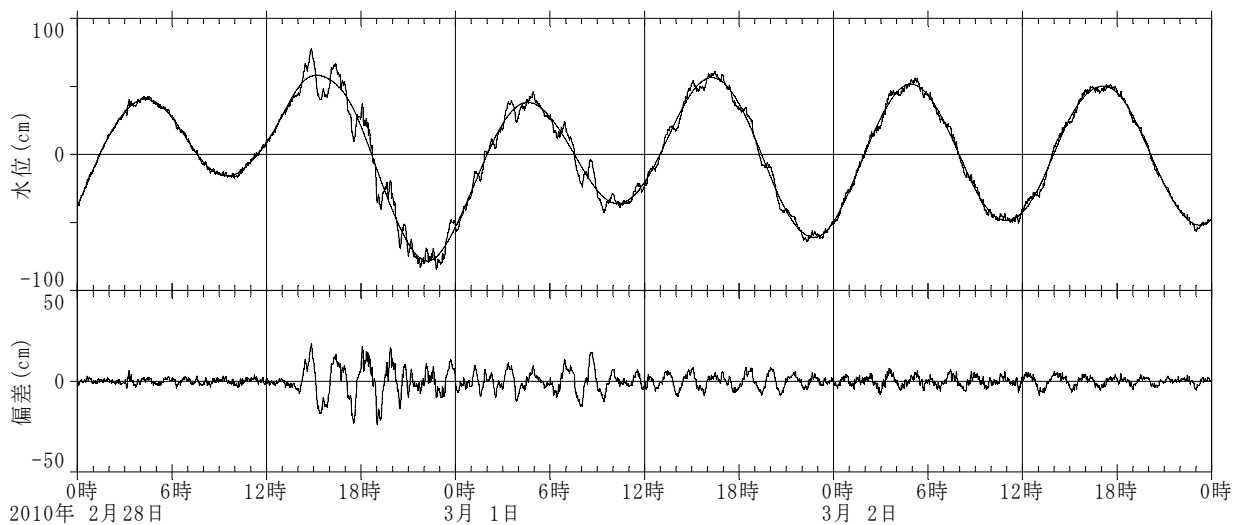
付図A-33 津波波形記録 (仙台新港, 波高計)



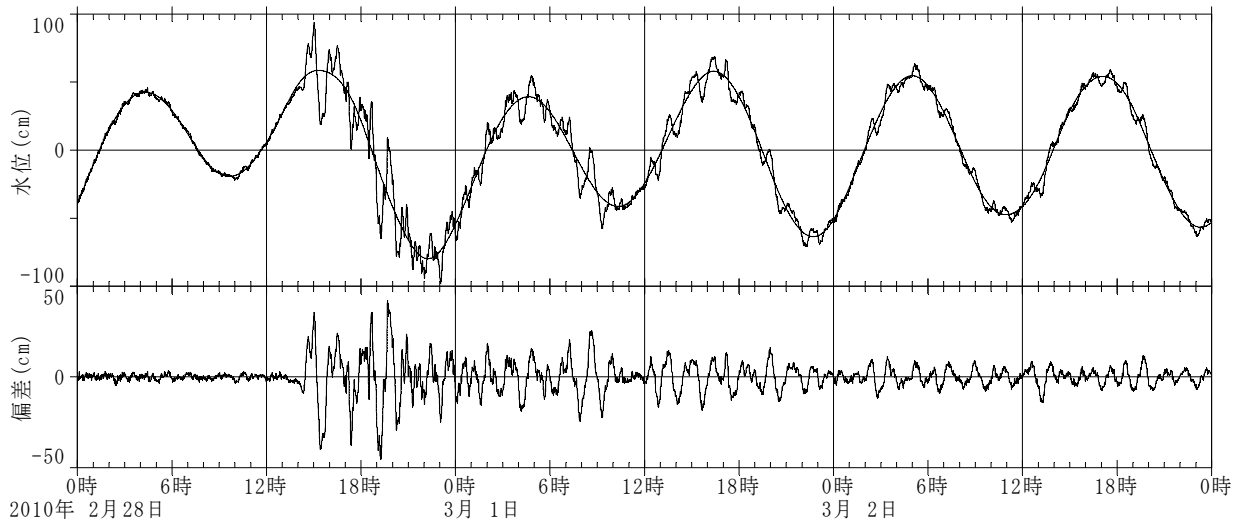
付図A-34 津波波形記録（仙台新港，潮位計）



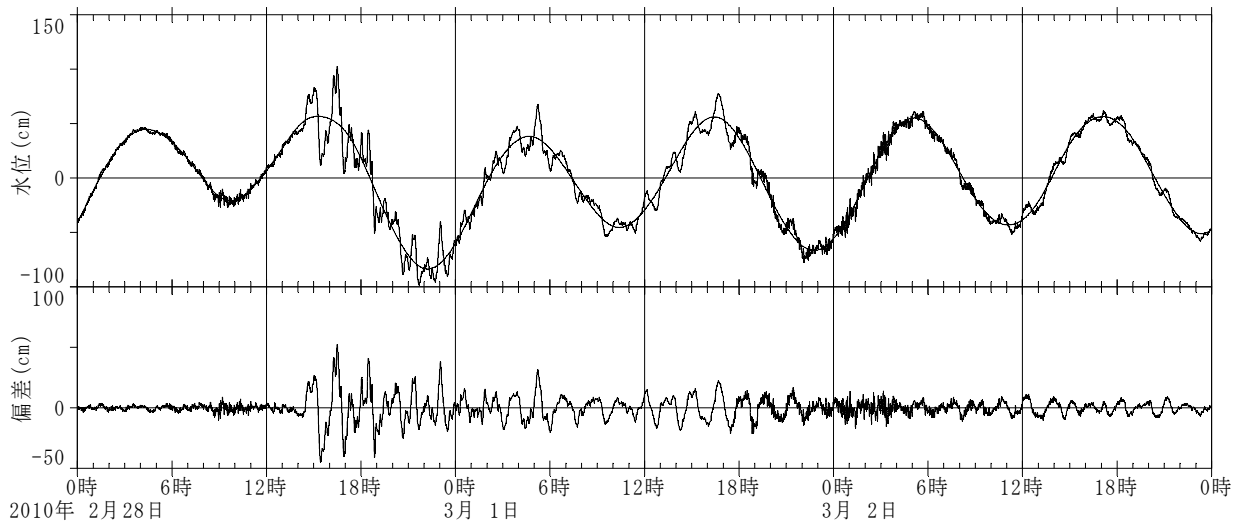
付図A-35 津波波形記録（相馬，波高計）



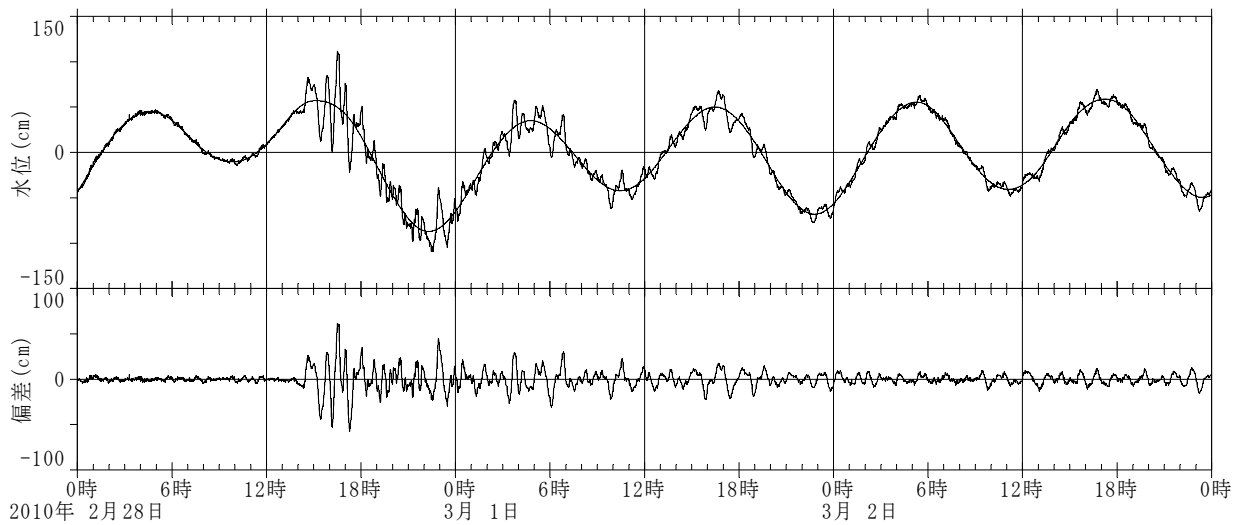
付図A-36 津波波形記録（福島県沖，GPS）



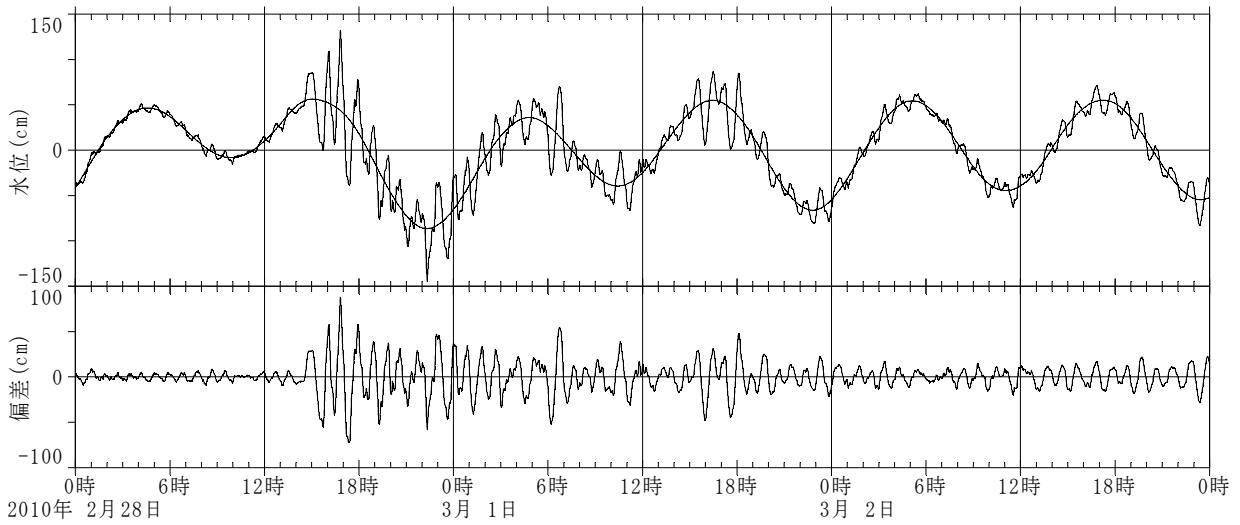
付図A-37 津波波形記録 (小名浜, 海象計)



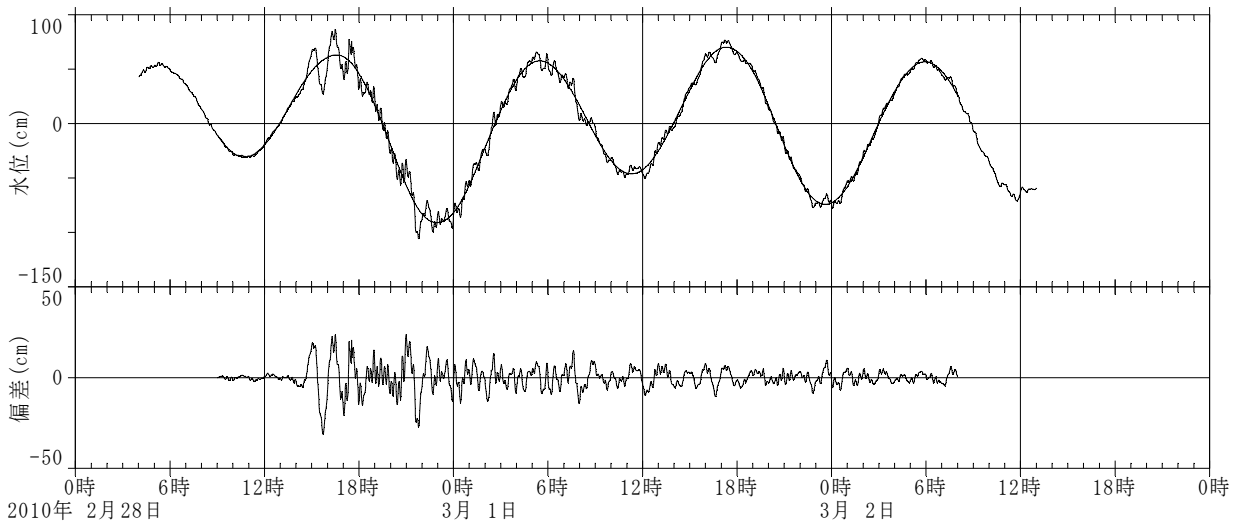
付図A-38 津波波形記録 (常陸那珂, 海象計)



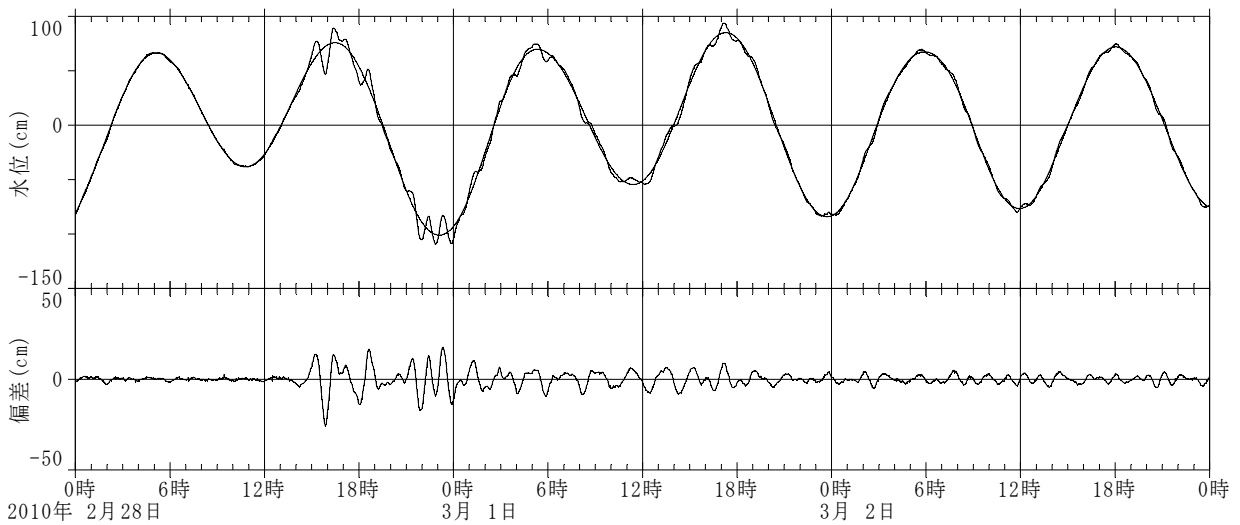
付図A-39 津波波形記録 (鹿島, 波高計)



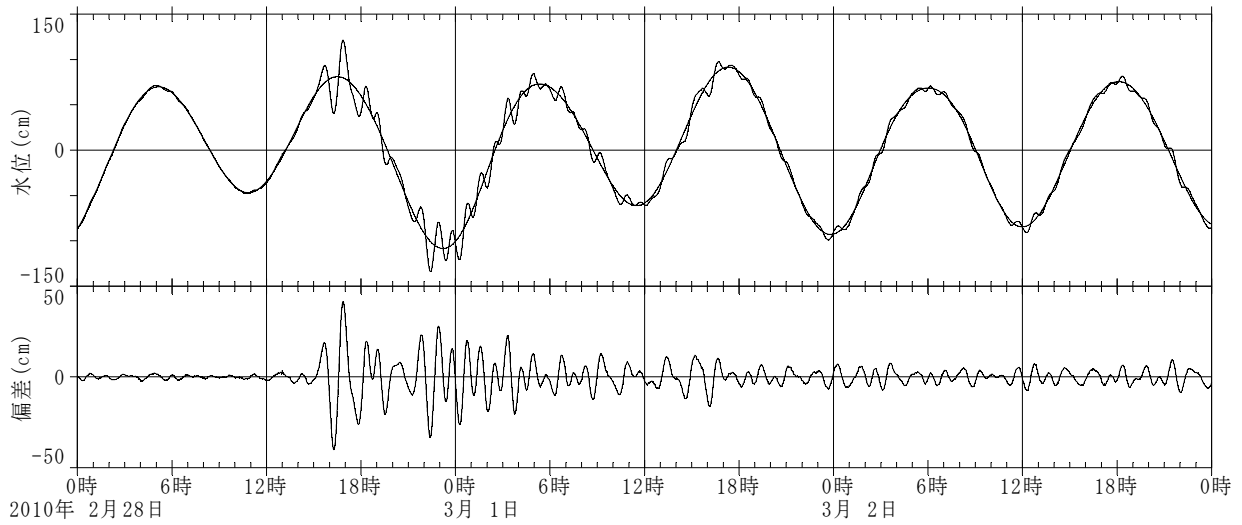
付図A-40 津波波形記録（鹿島，潮位計）



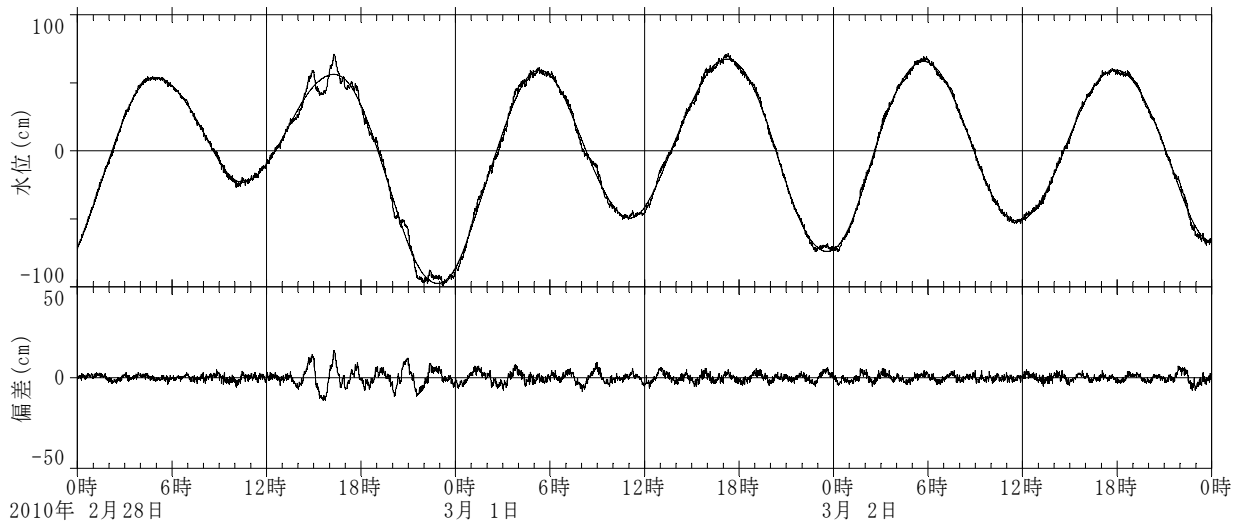
付図A-41 津波波形記録（久里浜，潮位計）



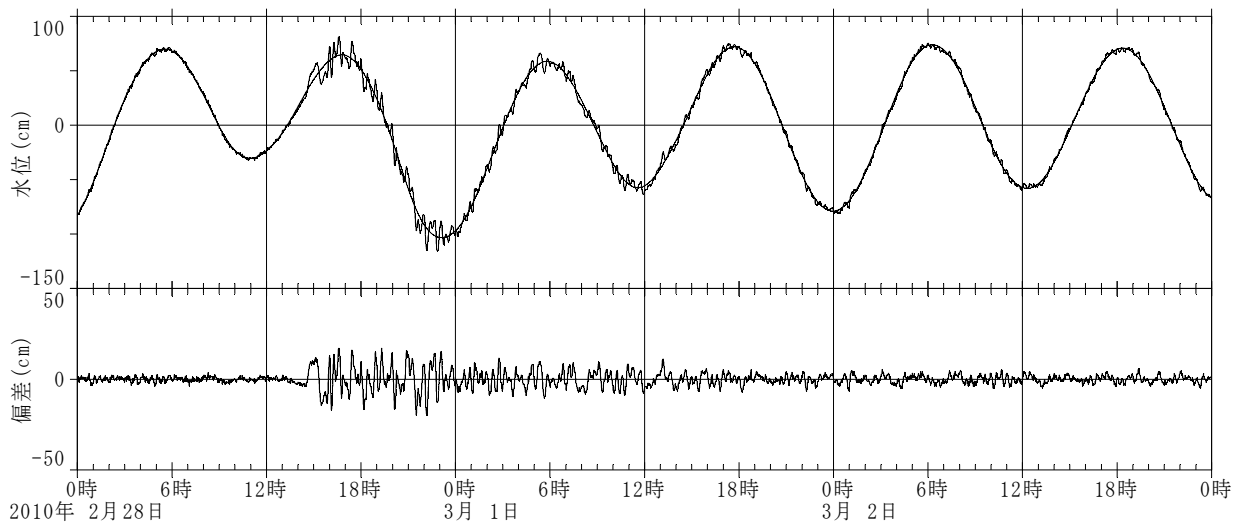
付図A-42 津波波形記録（第二海堡，潮位計）



付図A-43 津波波形記録 (京浜港(横浜), 潮位計)

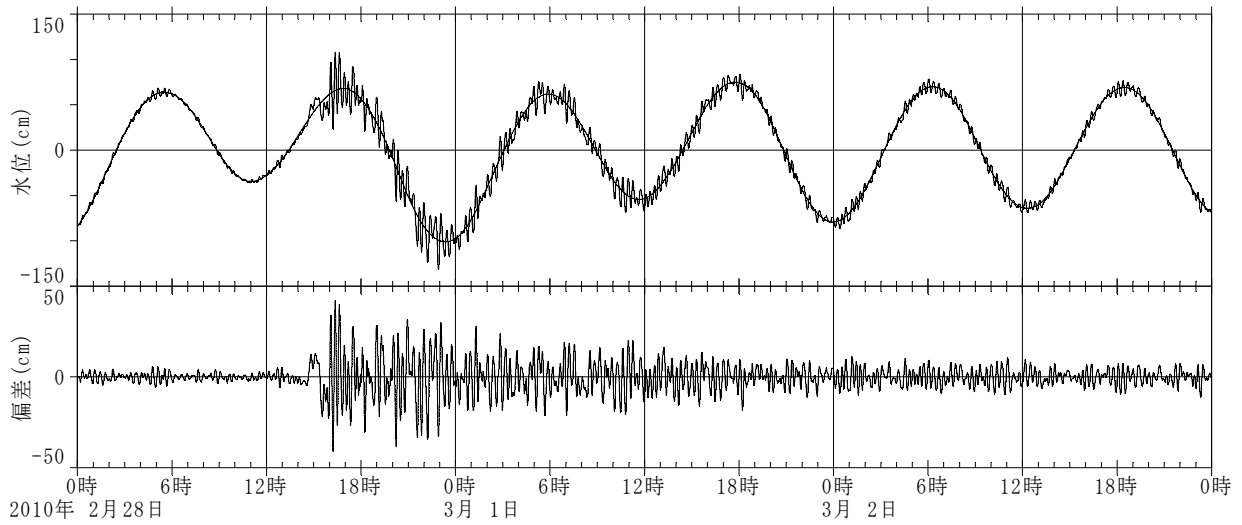


付図A-44 津波波形記録 (波浮, 波高計)

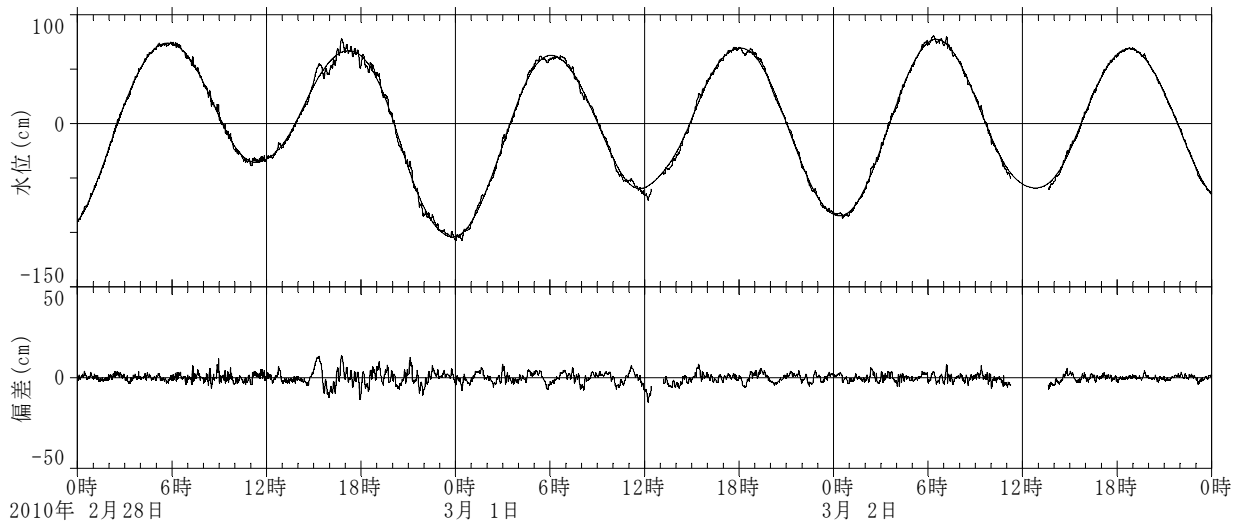


付図A-45 津波波形記録 (下田, 波高計)

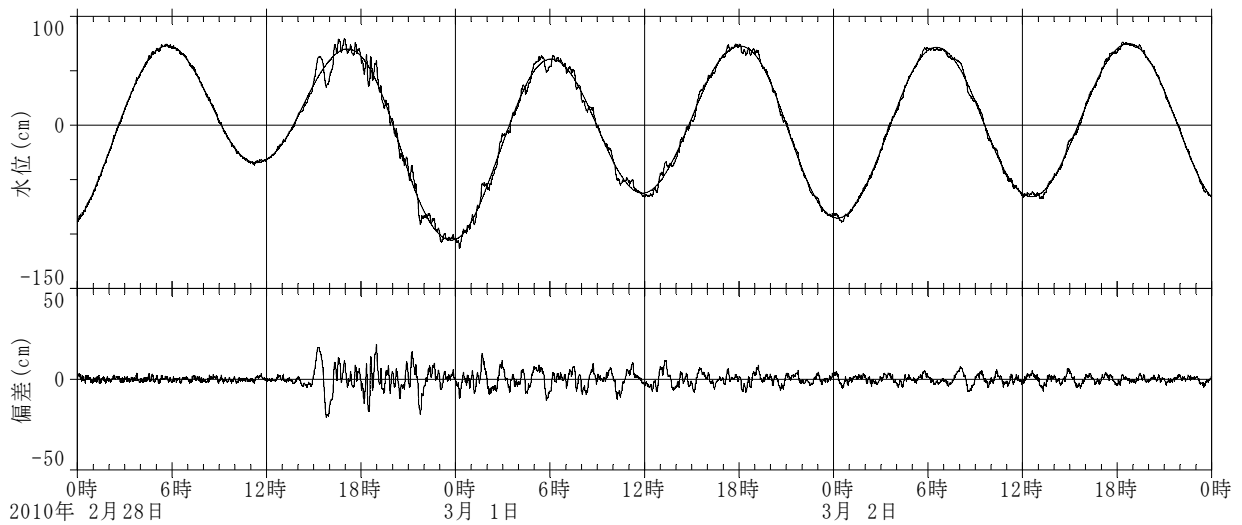




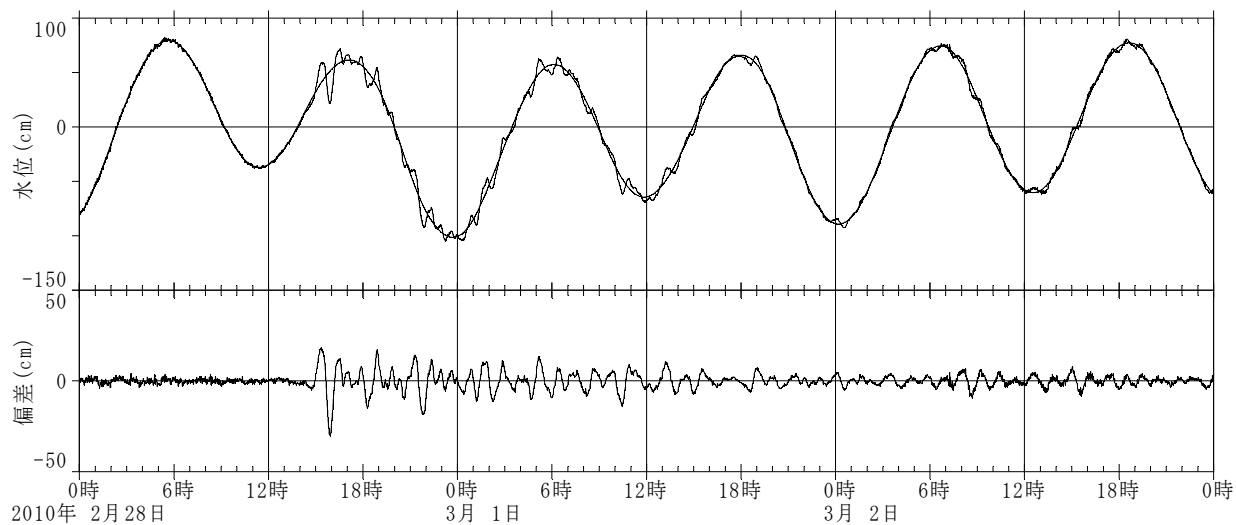
付図A-46 津波波形記録（下田，潮位計）



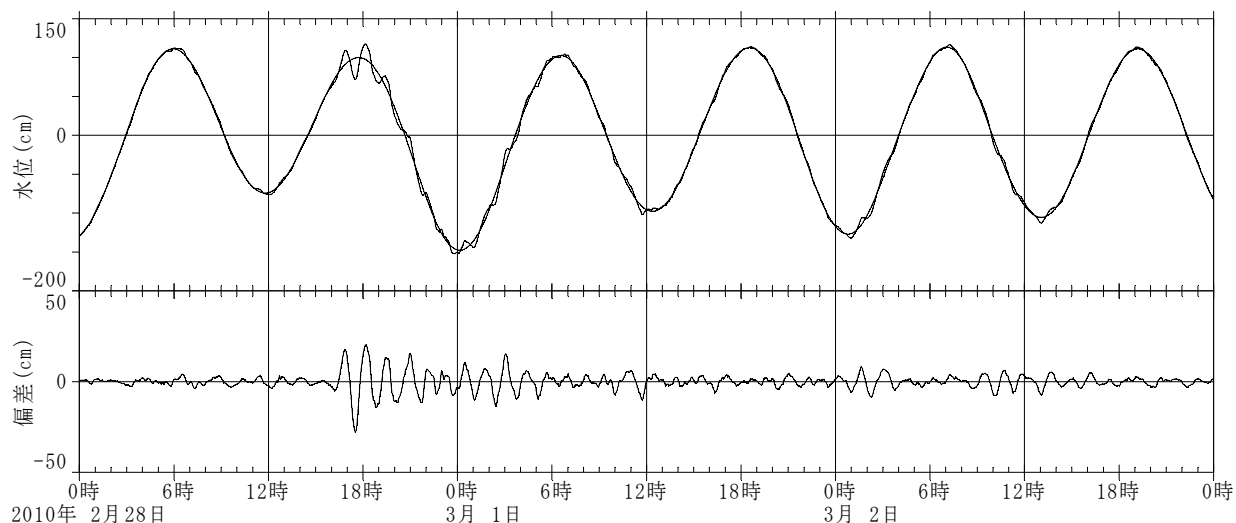
付図A-47 津波波形記録（静岡御前崎沖，GPS）



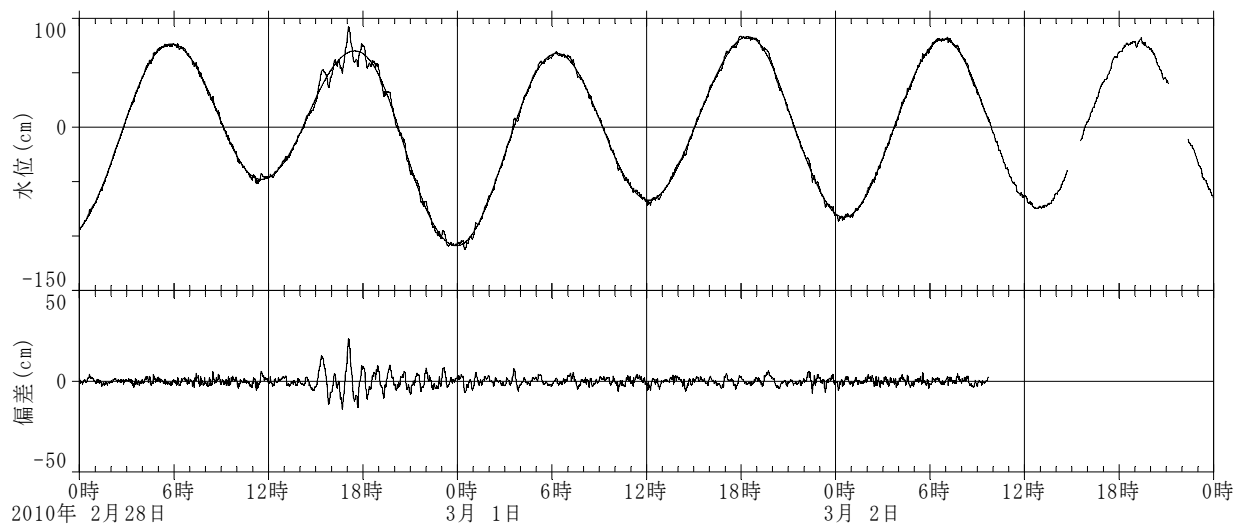
付図A-48 津波波形記録（御前崎，海象計）



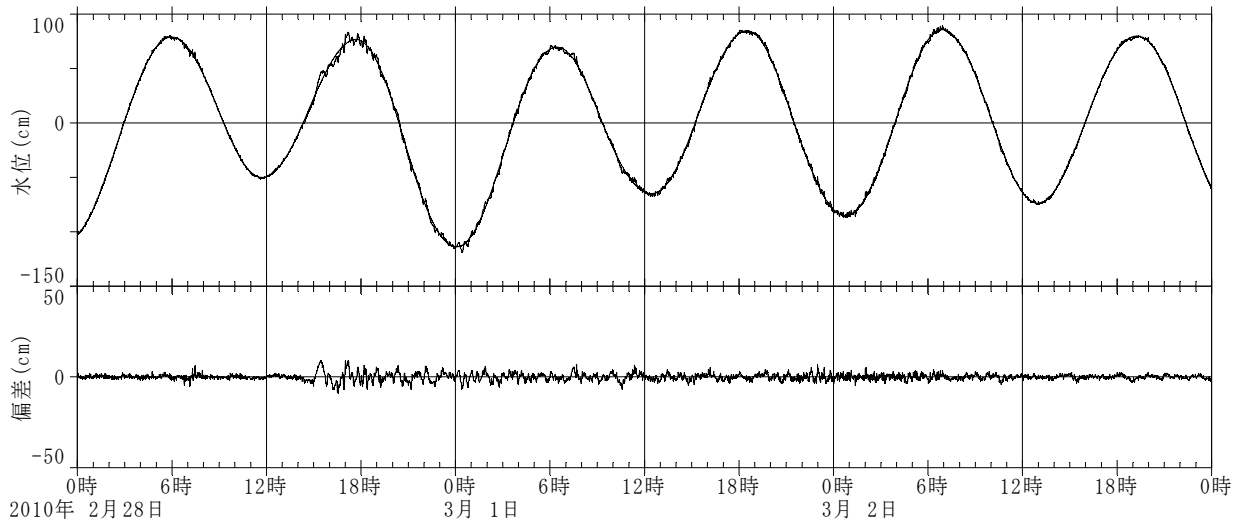
付図A-49 津波波形記録 (清水, 海象計)



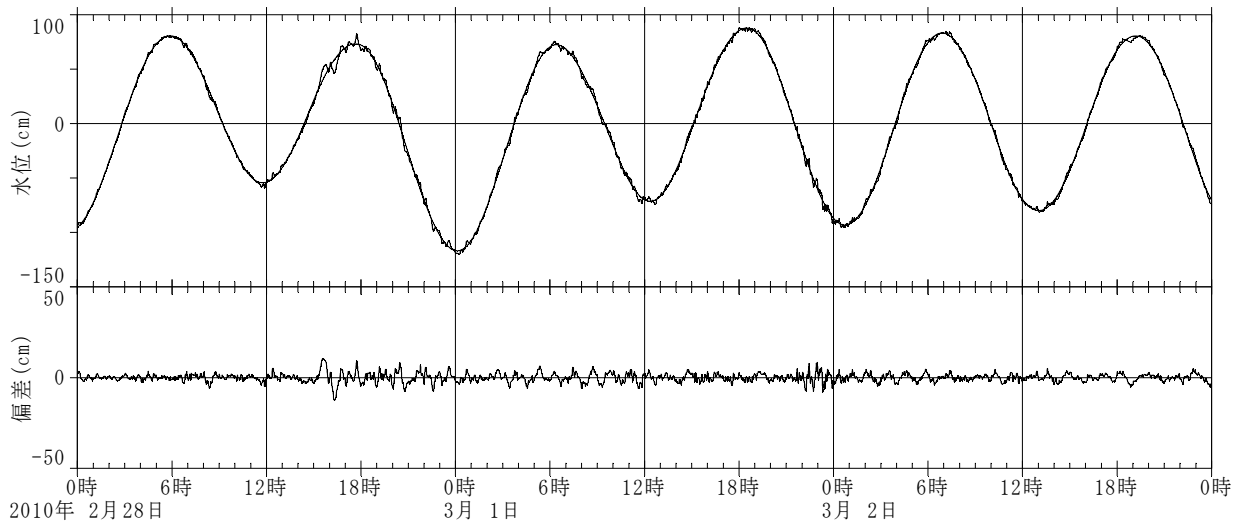
付図A-50 津波波形記録 (三河, 潮位計)



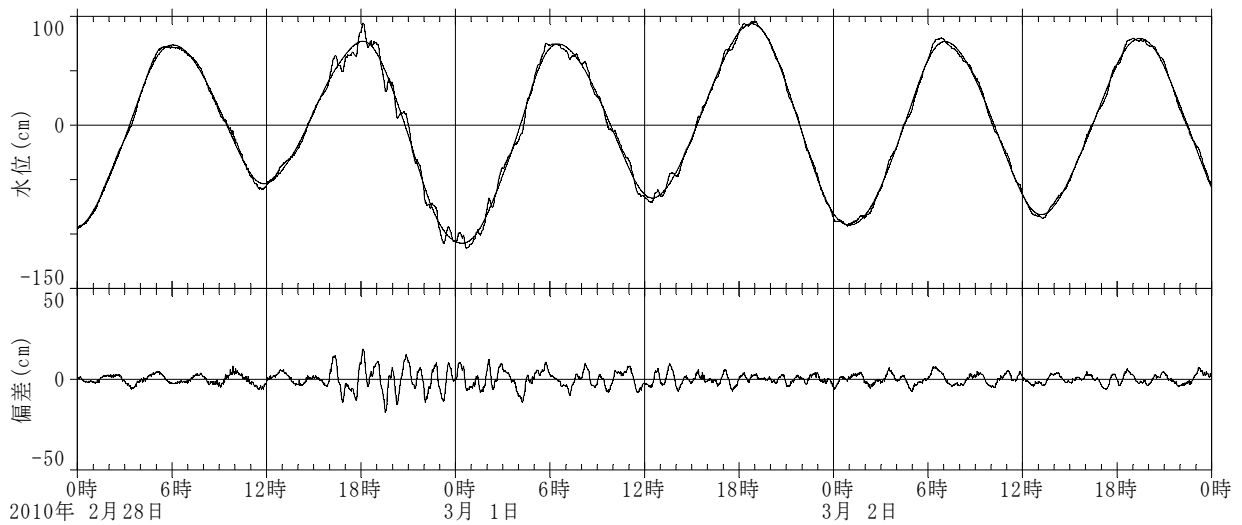
付図A-51 津波波形記録 (三重尾鷲沖, G P S)



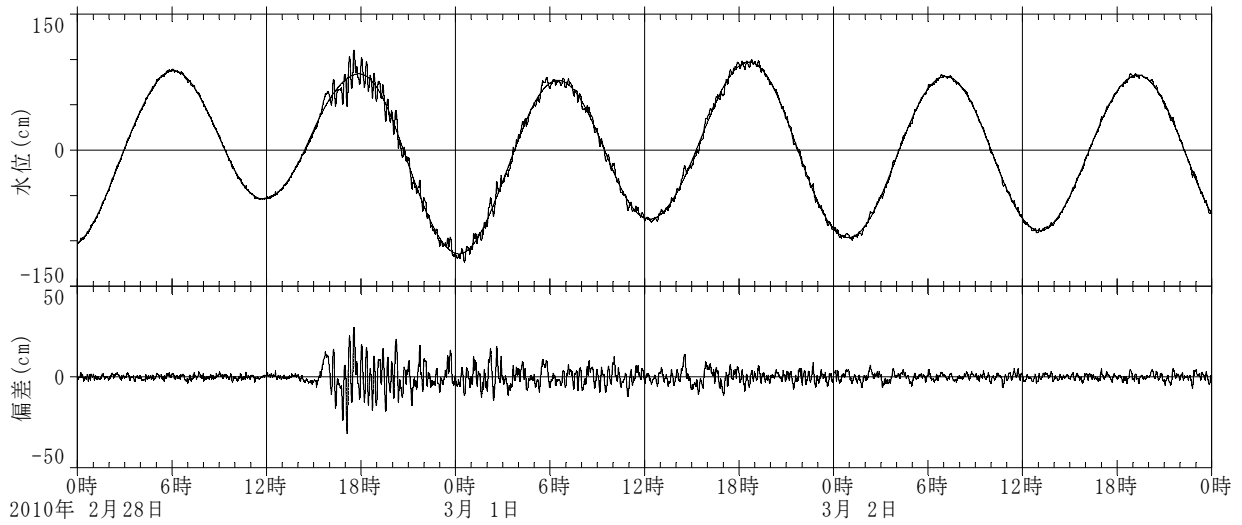
付図A-52 津波波形記録 (潮岬, 海象計)



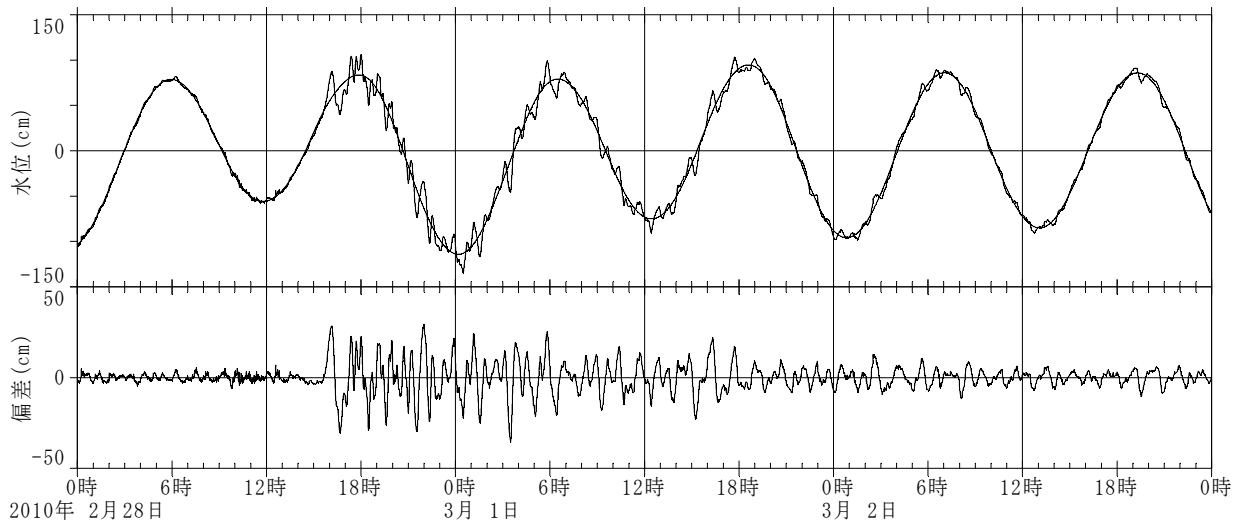
付図A-53 津波波形記録 (和歌山南西沖, GPS)



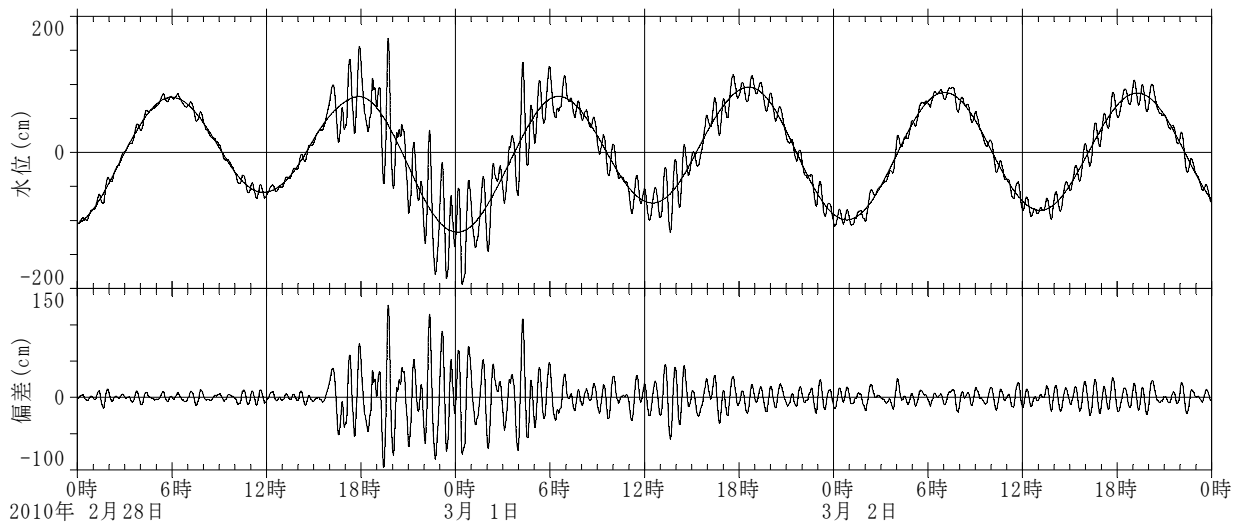
付図A-54 津波波形記録 (小松島, 海象計)



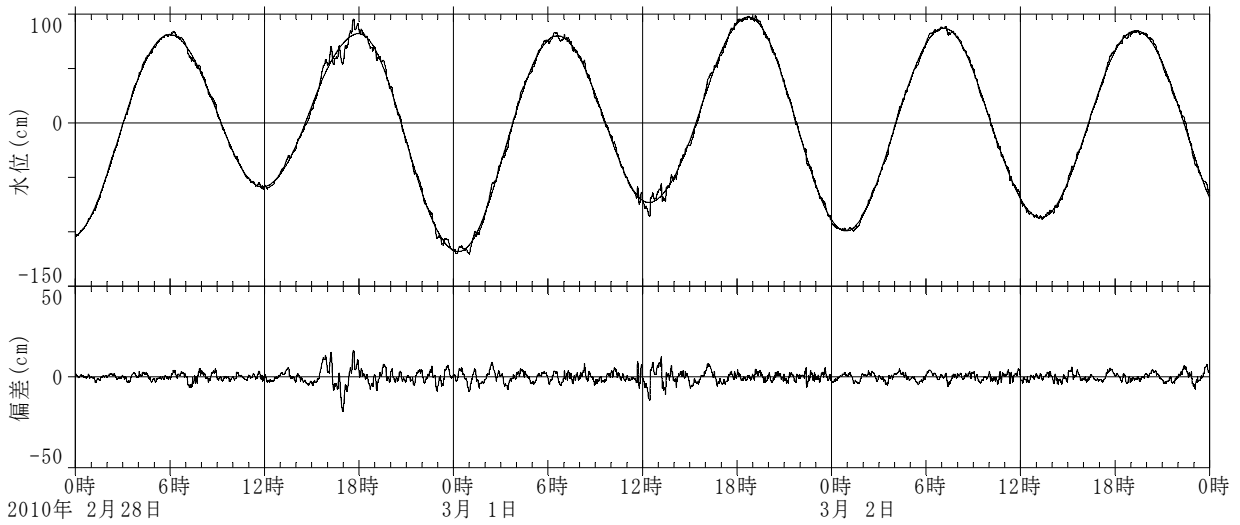
付図A-55 津波波形記録（室津，海象計）



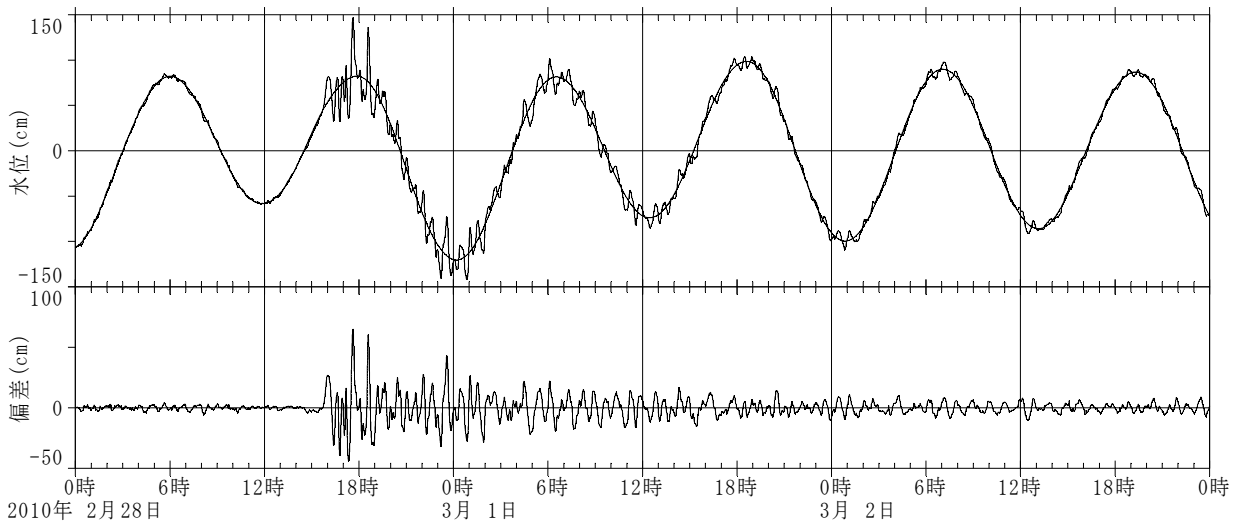
付図A-56 津波波形記録（高知，海象計）



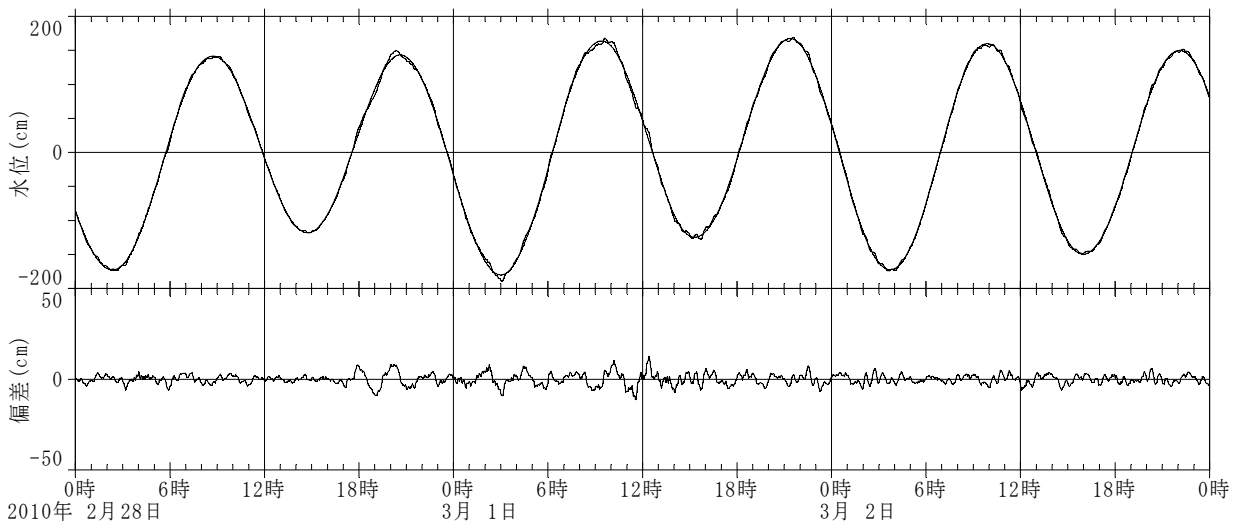
付図A-57 津波波形記録（須崎，潮位計）



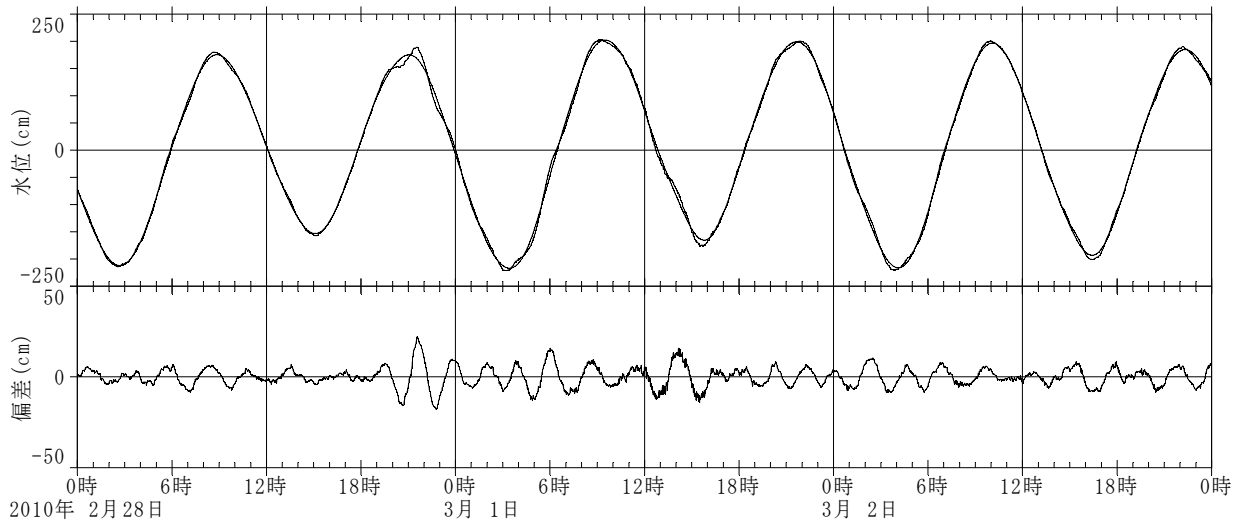
付図A-58 津波波形記録（高知西部沖，GPS）



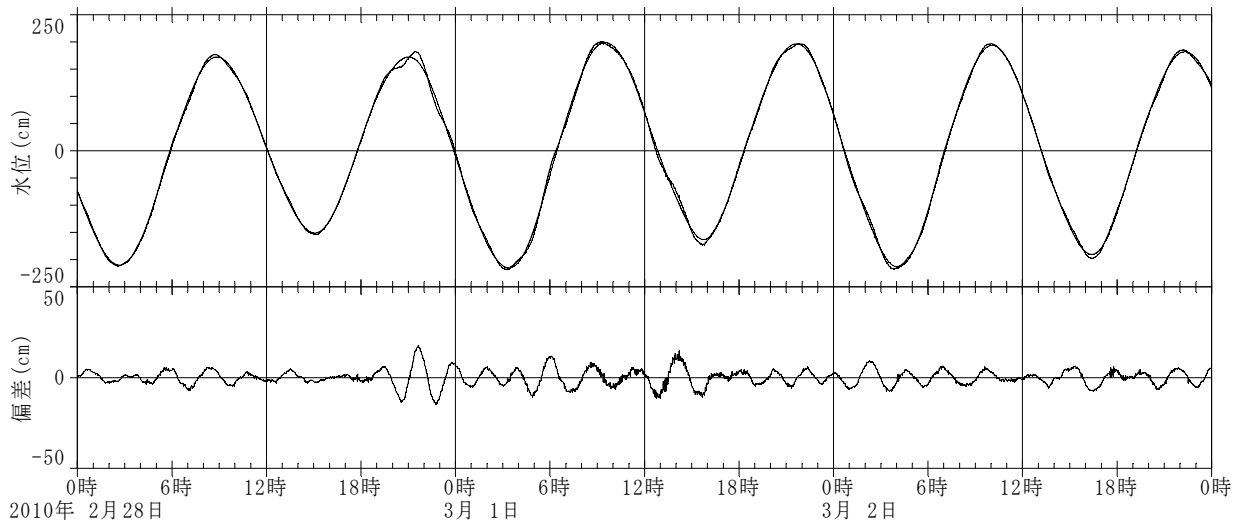
付図A-59 津波波形記録（上川口，波高計）



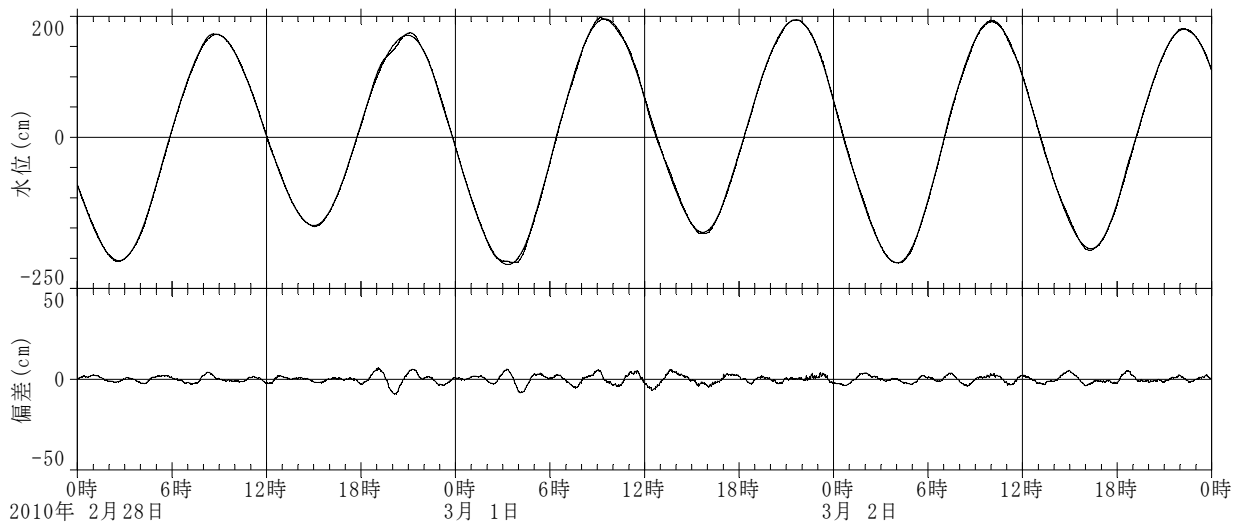
付図A-60 津波波形記録（三田尻，潮位計）



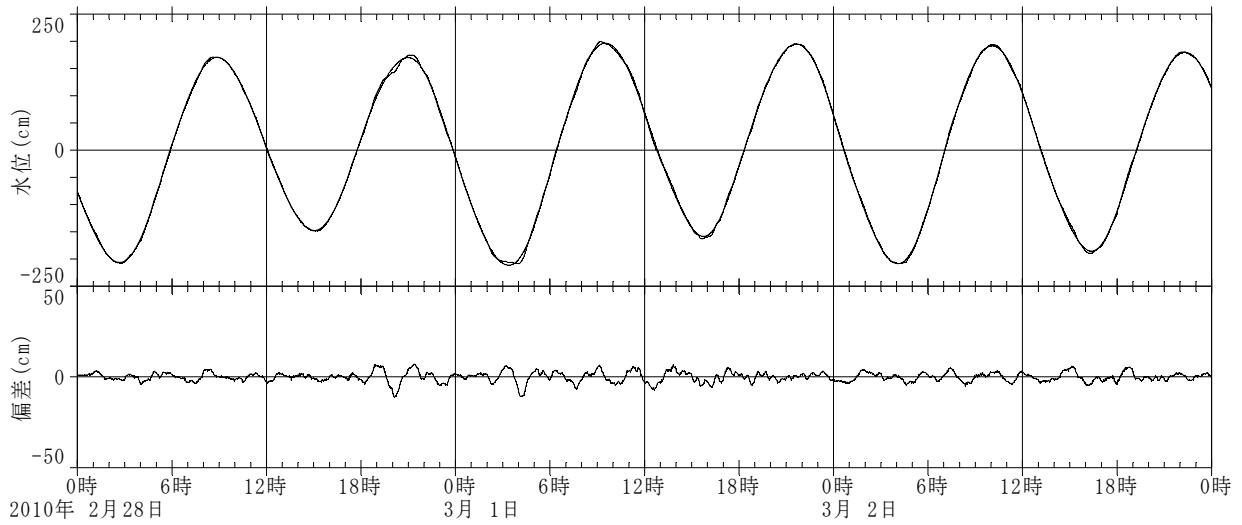
付図A-61 津波波形記録 (長府, 潮位計)



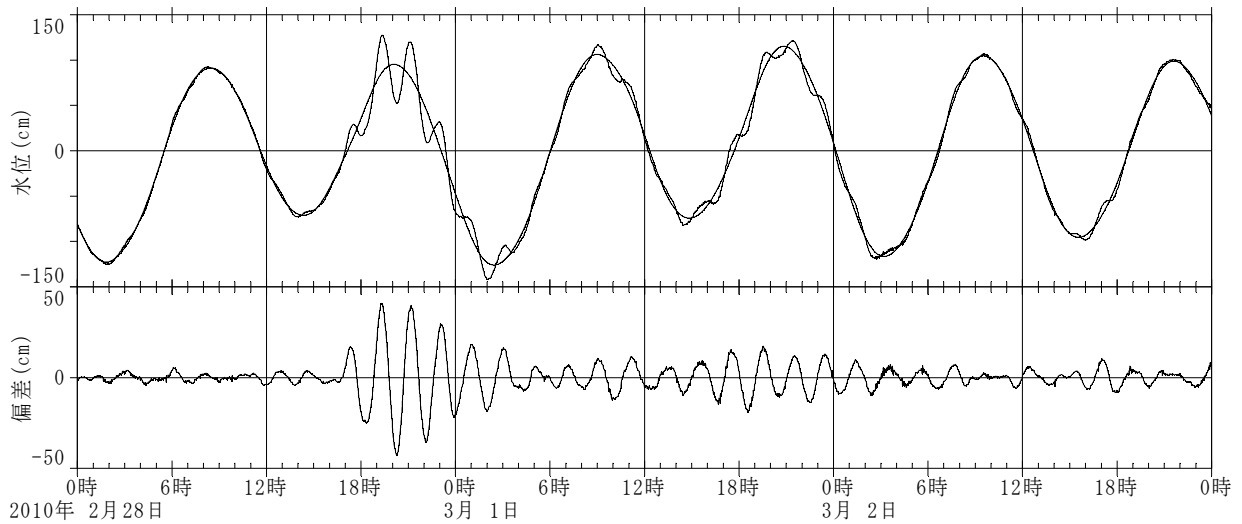
付図A-62 津波波形記録 (青浜, 潮位計)



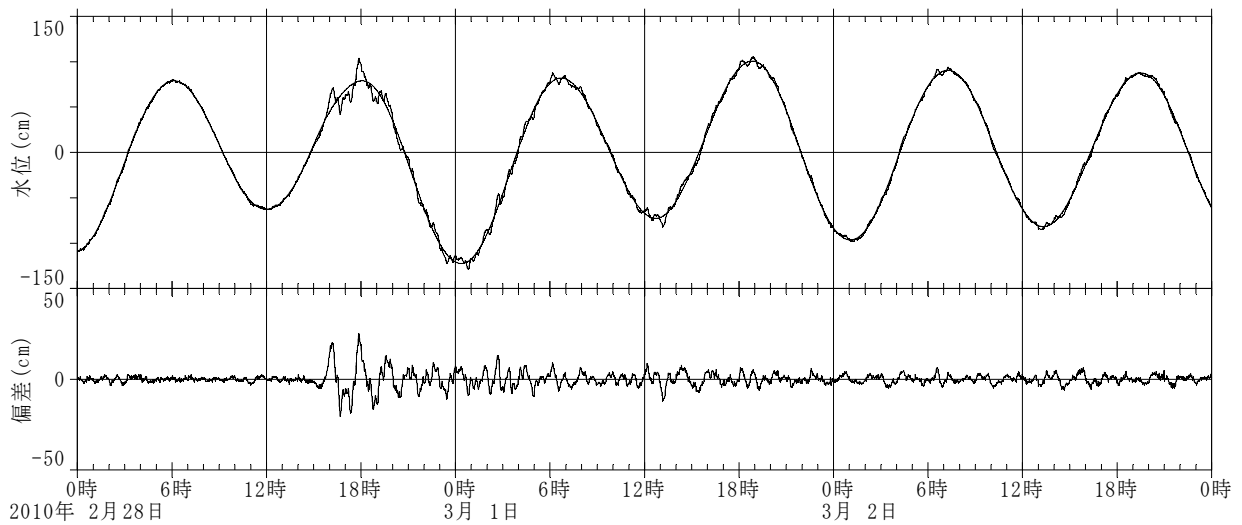
付図A-63 津波波形記録 (荻田, 波高計)



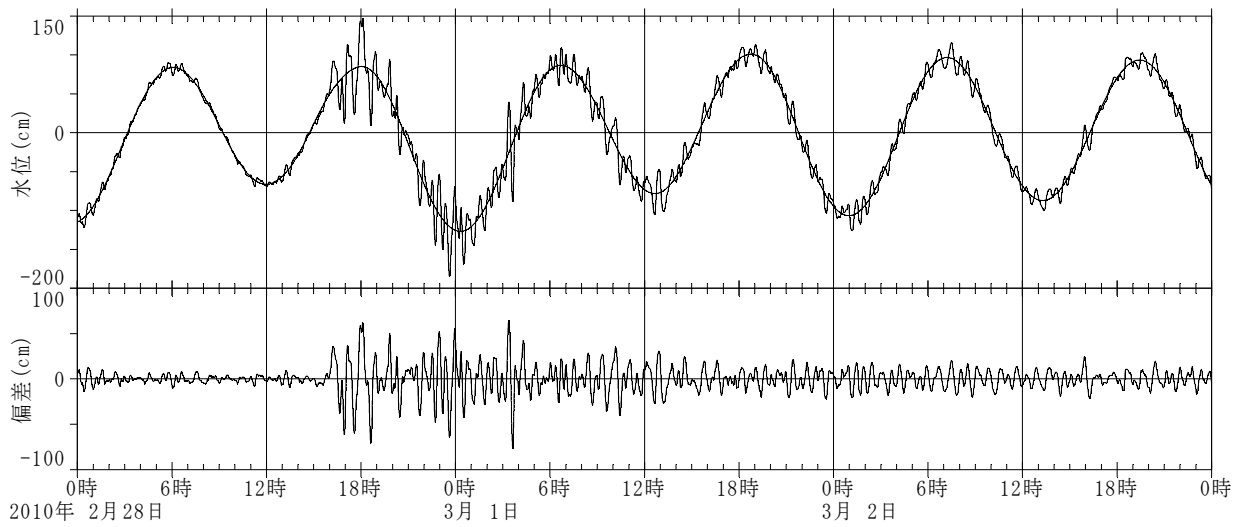
付図A-64 津波波形記録（荻田，潮位計）



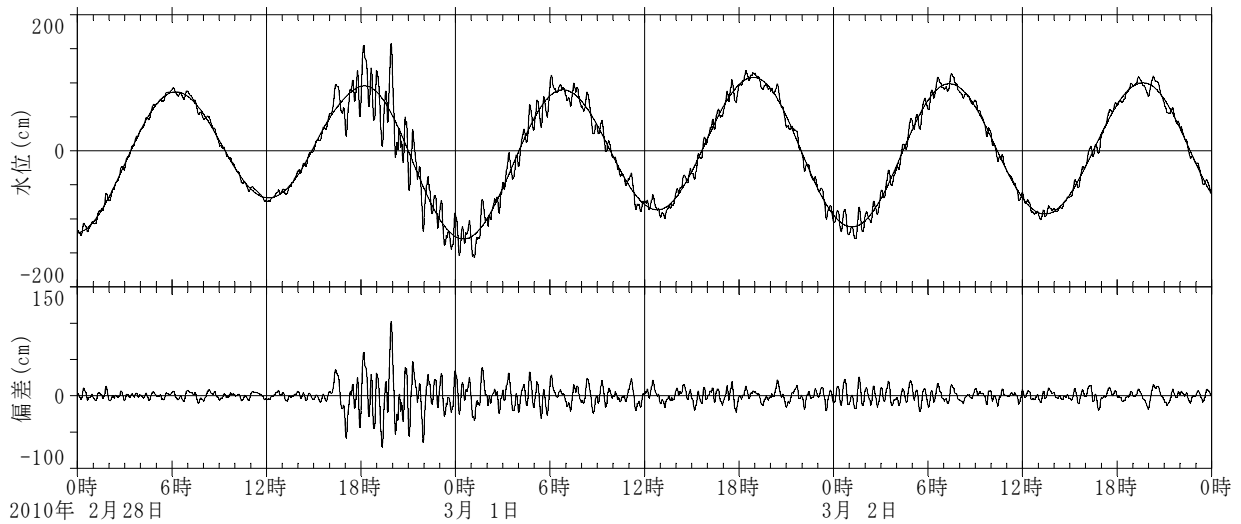
付図A-65 津波波形記録（別府，潮位計）



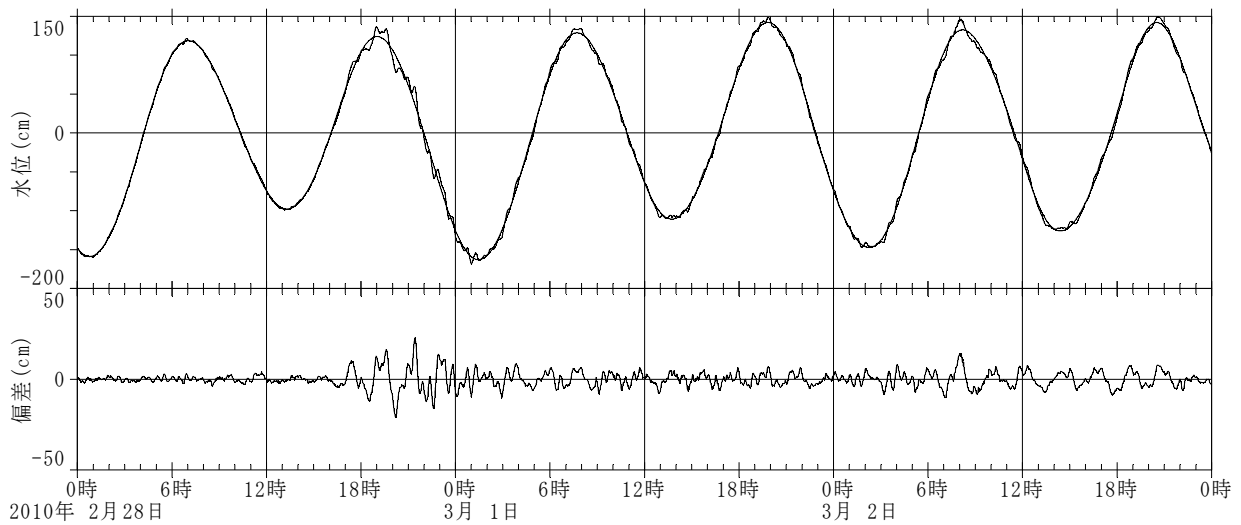
付図A-66 津波波形記録（細島，海象計）



付図A-67 津波波形記録（宮崎，潮位計）

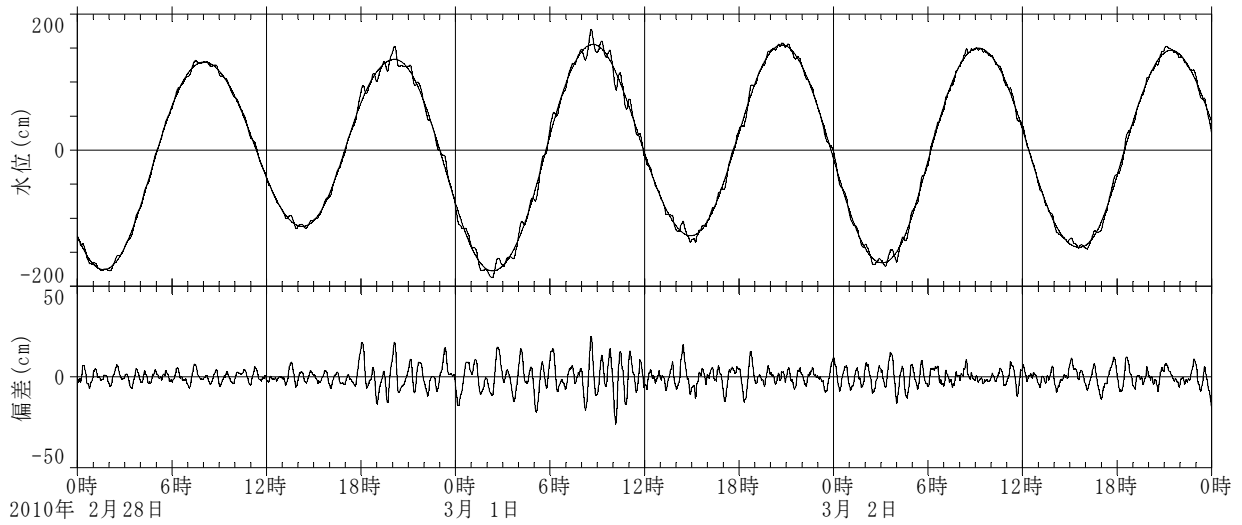


付図A-68 津波波形記録（志布志湾，潮位計）

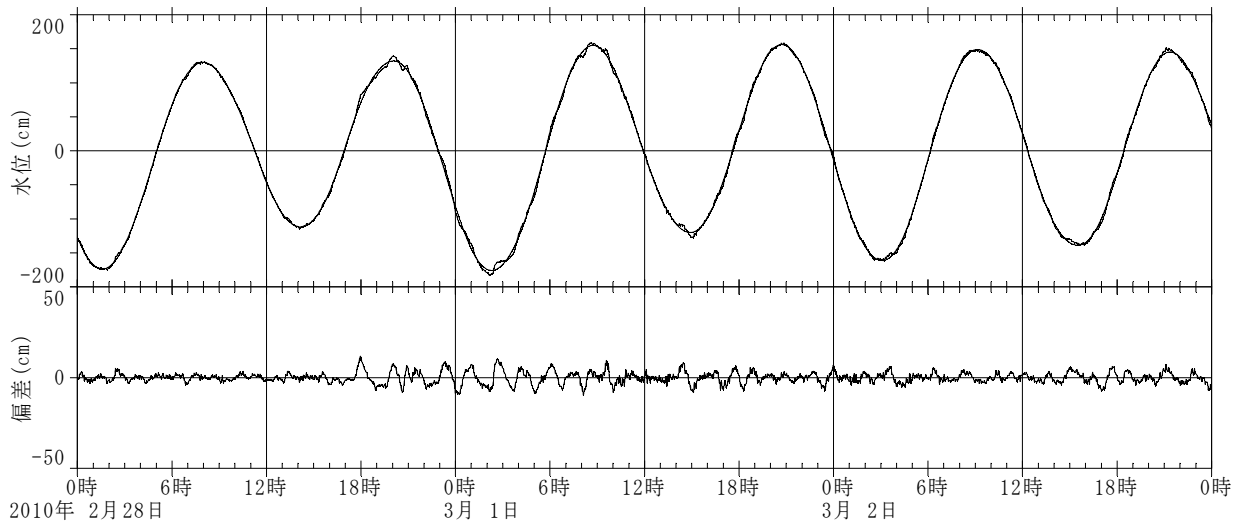


付図A-69 津波波形記録（鹿児島，海象計）

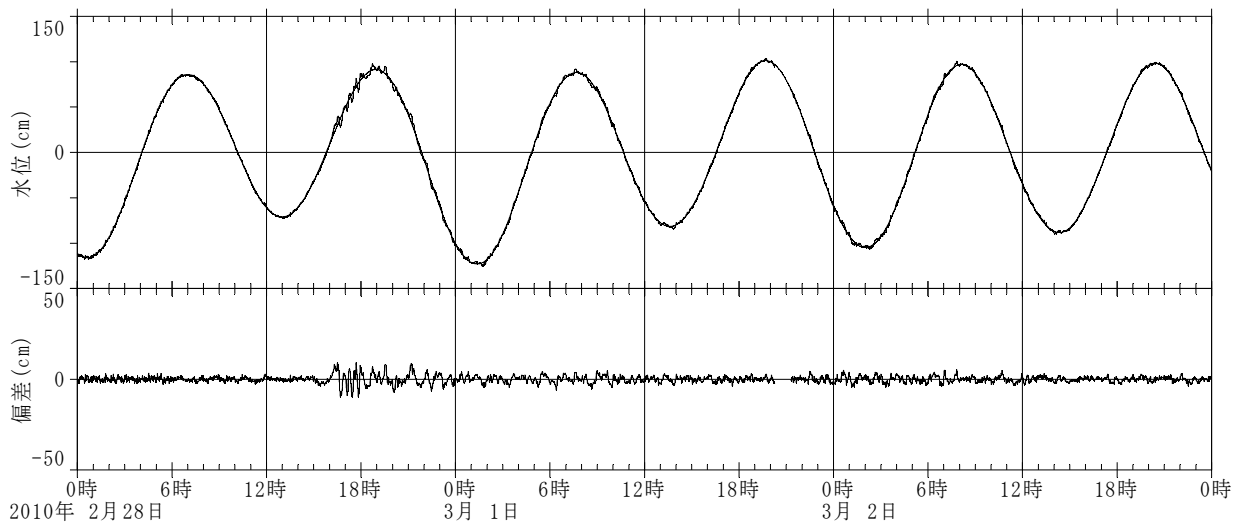




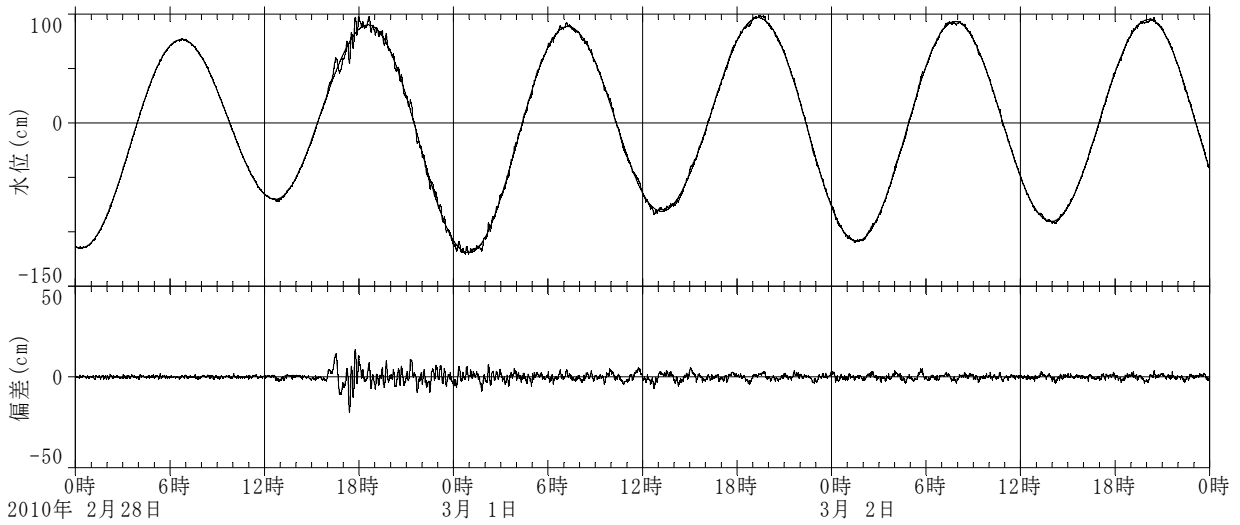
付図A-70 津波波形記録（皇后，潮位計）



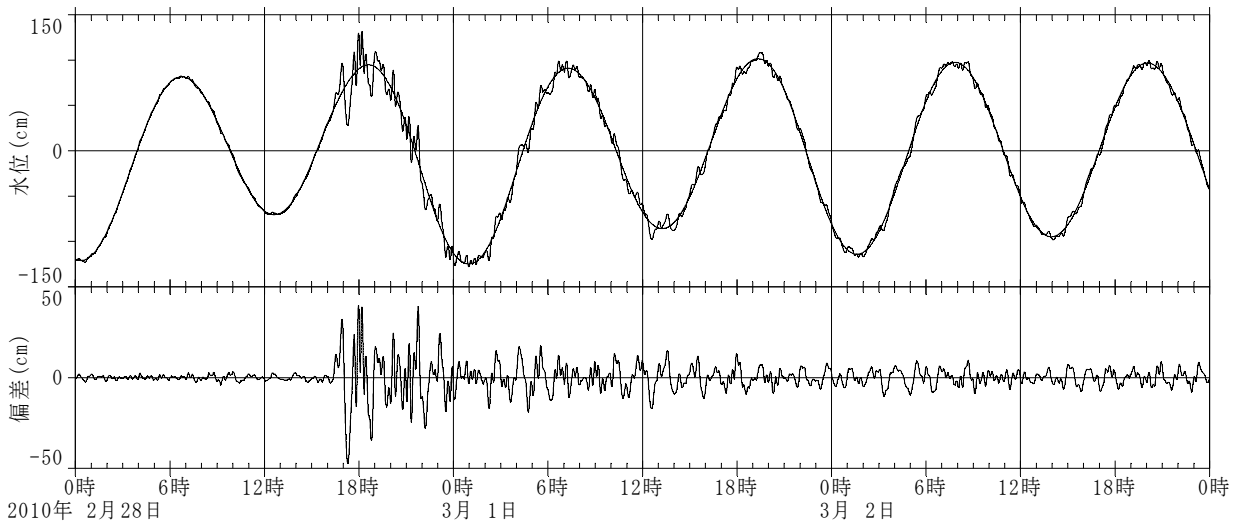
付図A-71 津波波形記録（伊王島，波高計）



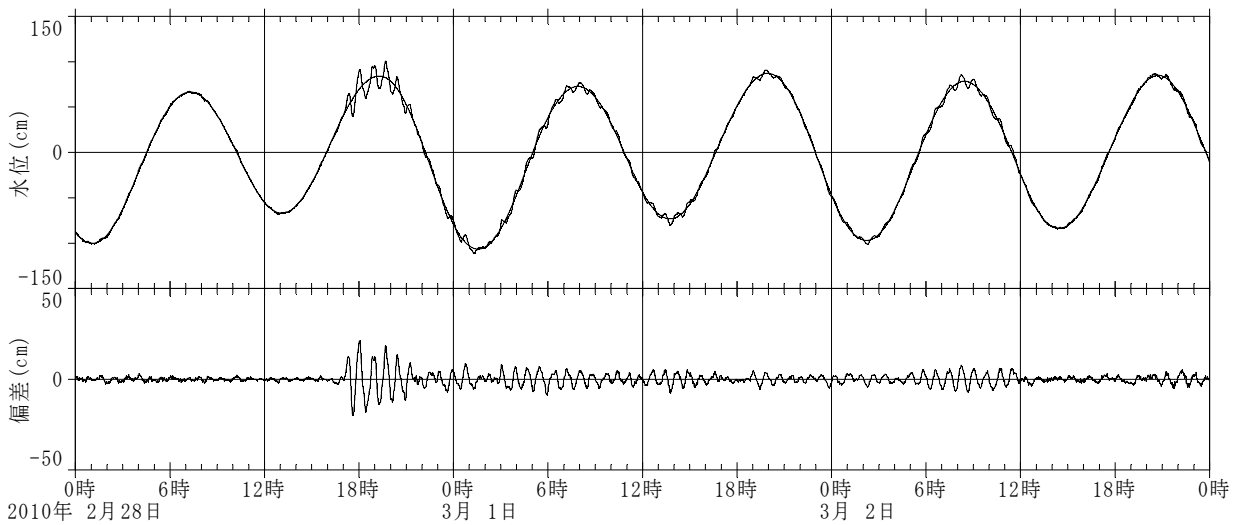
付図A-72 津波波形記録（名瀬，海象計）



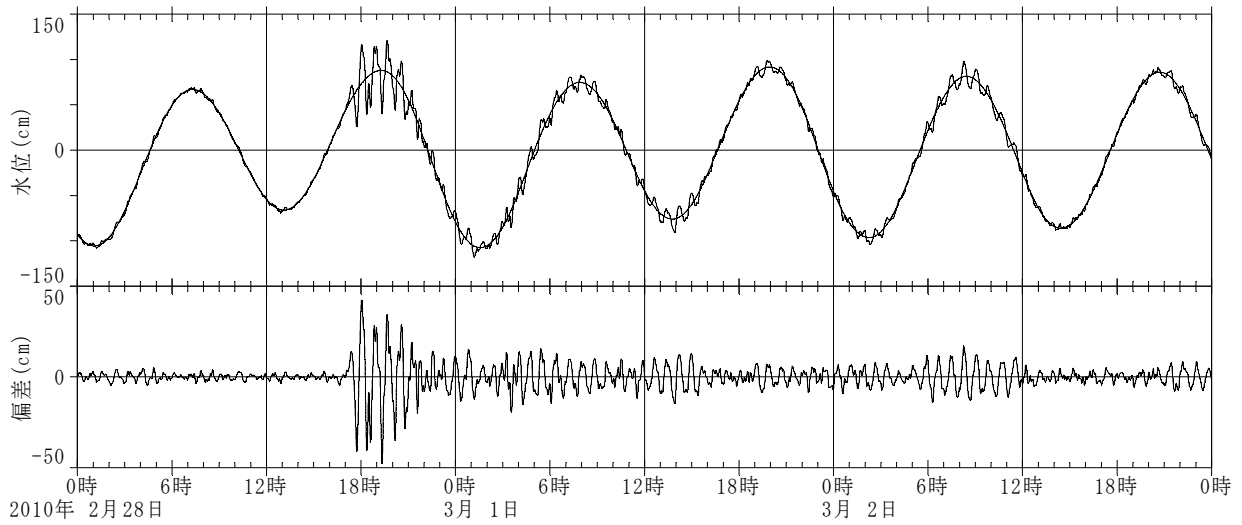
付図A-73 津波波形記録 (中城湾, 海象計)



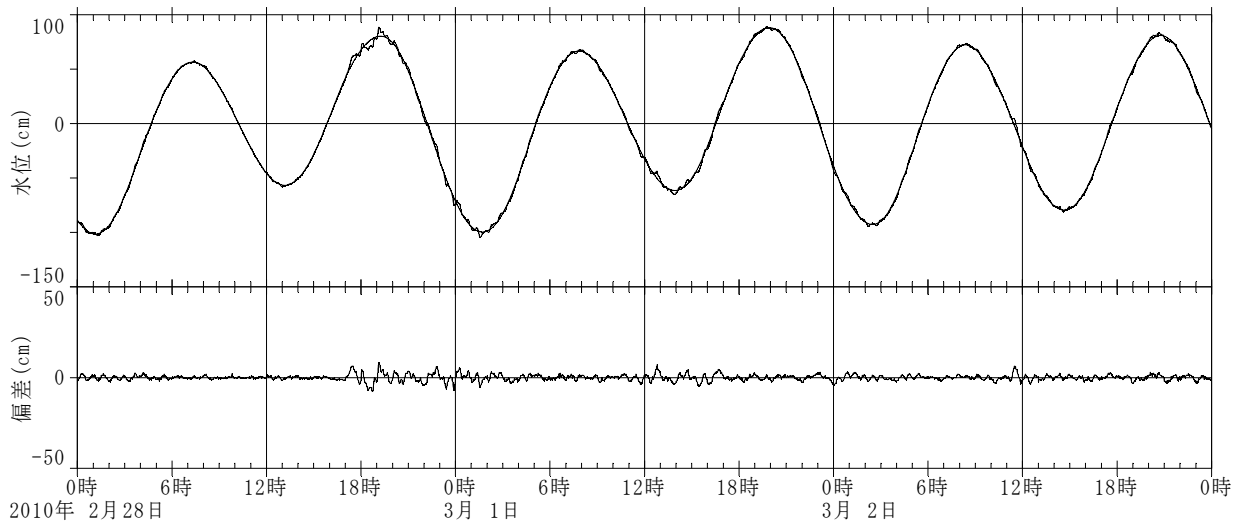
付図A-74 津波波形記録 (中城湾, 潮位計)



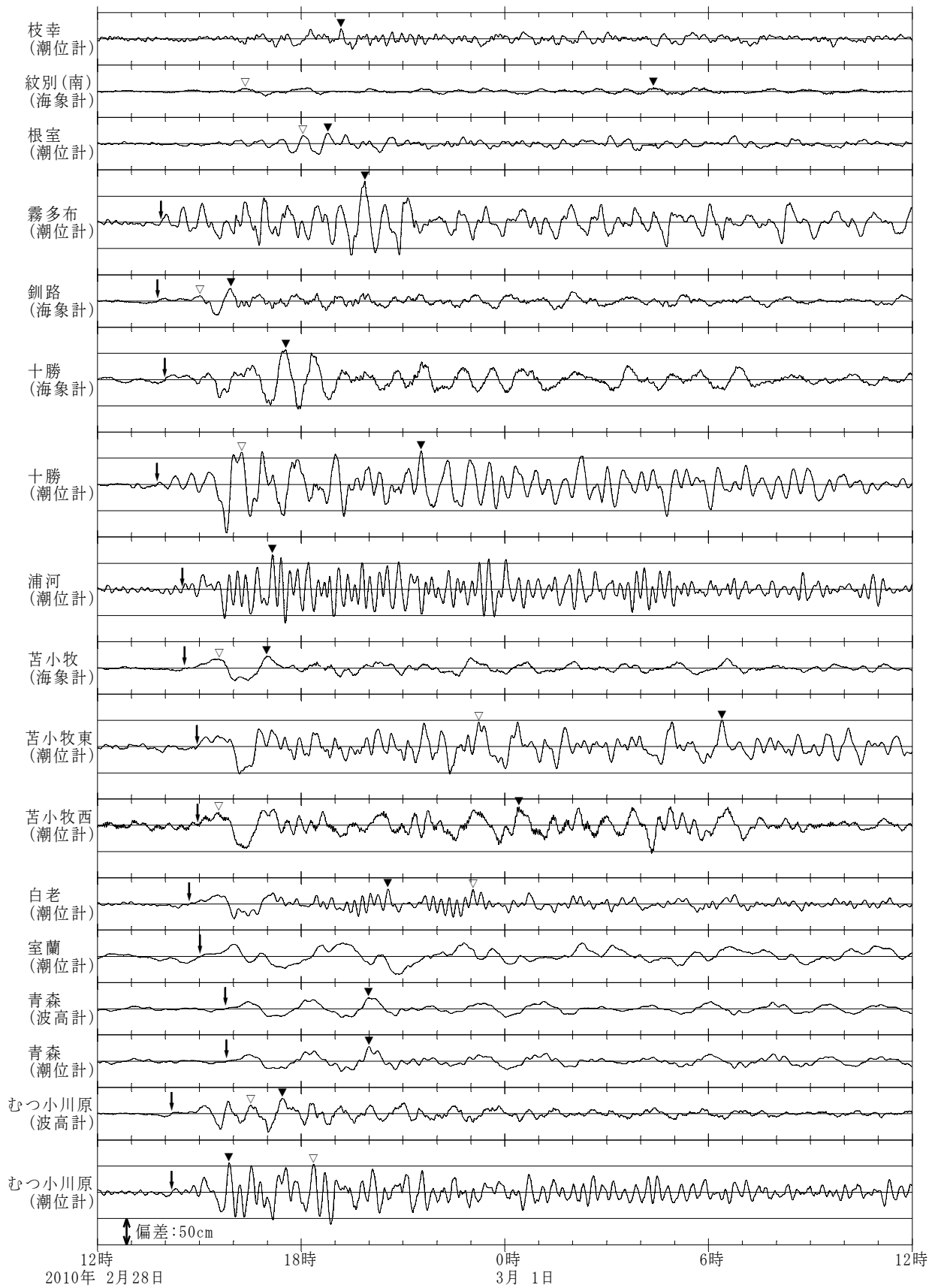
付図A-75 津波波形記録 (平良, 海象計)



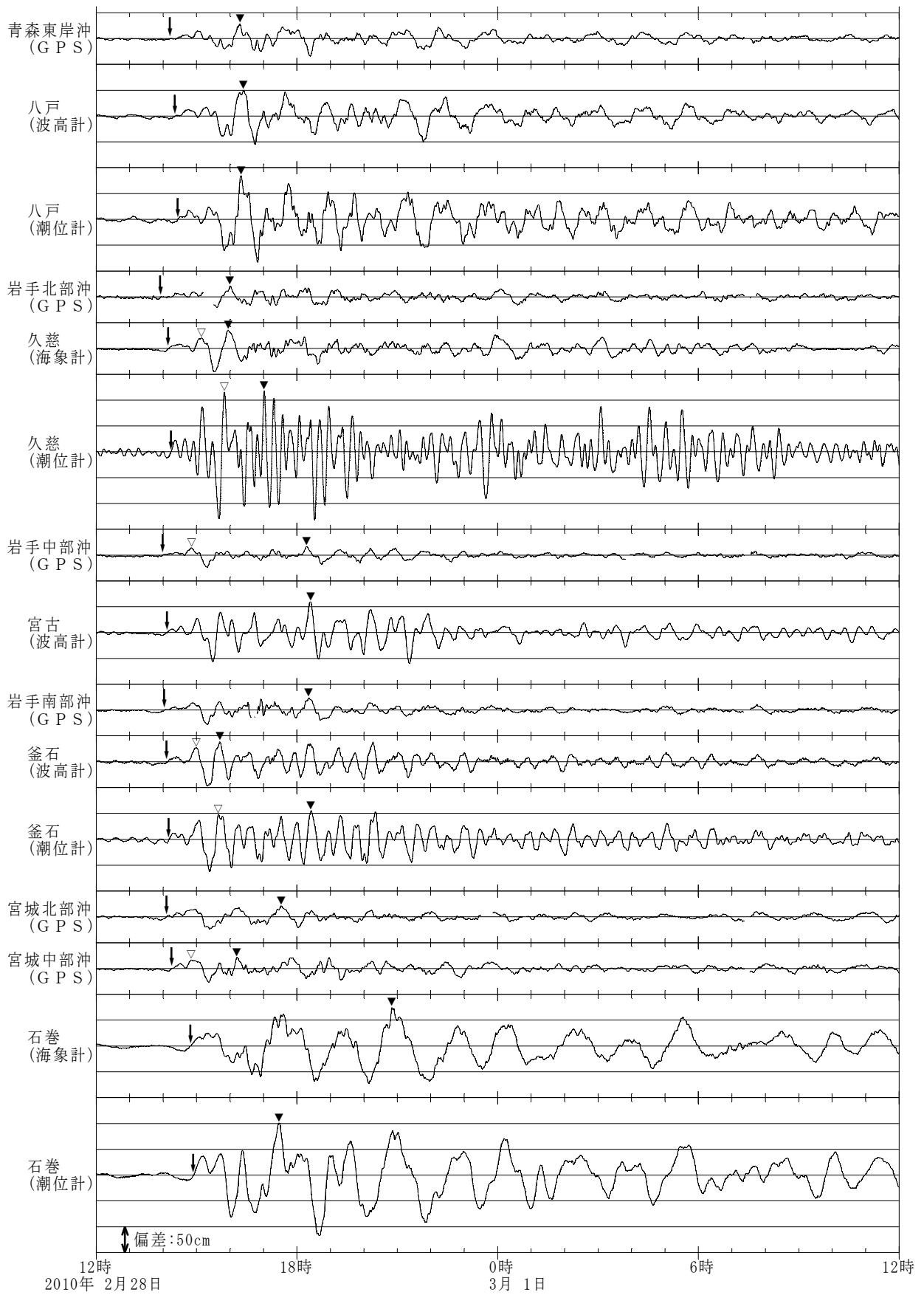
付図A-76 津波波形記録（平良，潮位計）



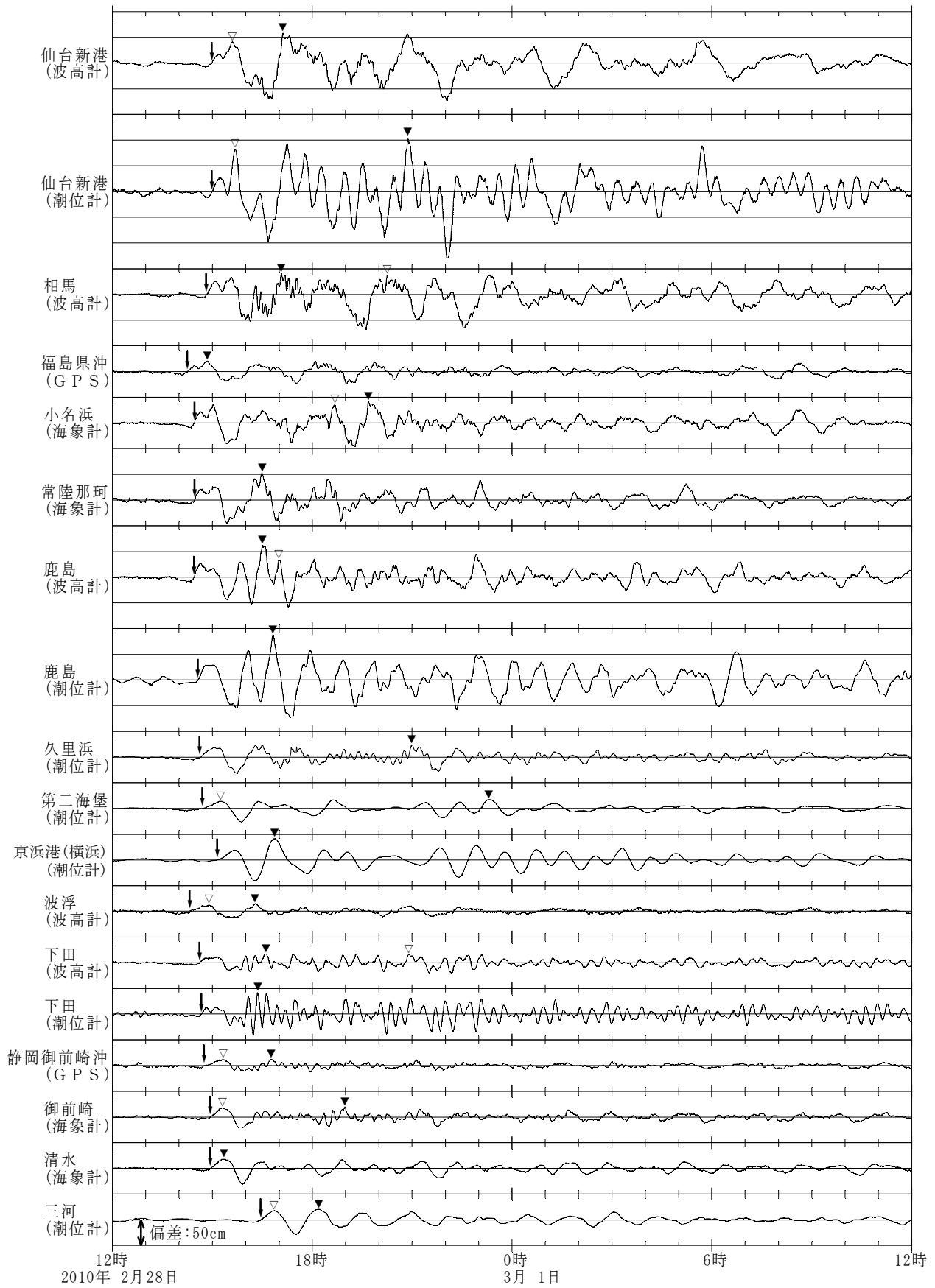
付図A-77 津波波形記録（石垣沖，海象計）



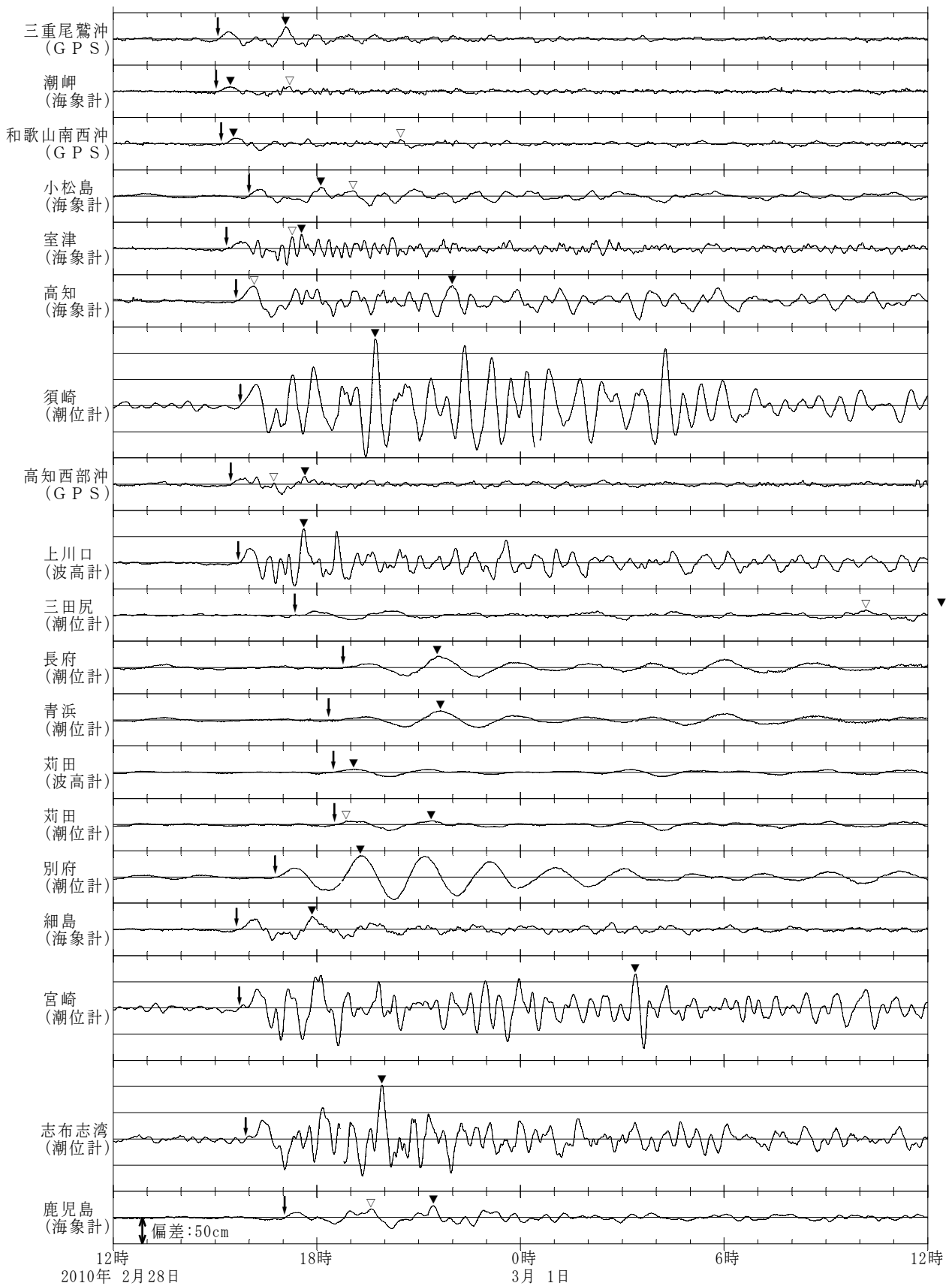
付図-B.1 潮位偏差の経時変化と第1波, 正の最大偏差, 最大波 (枝幸~むつ小川原)



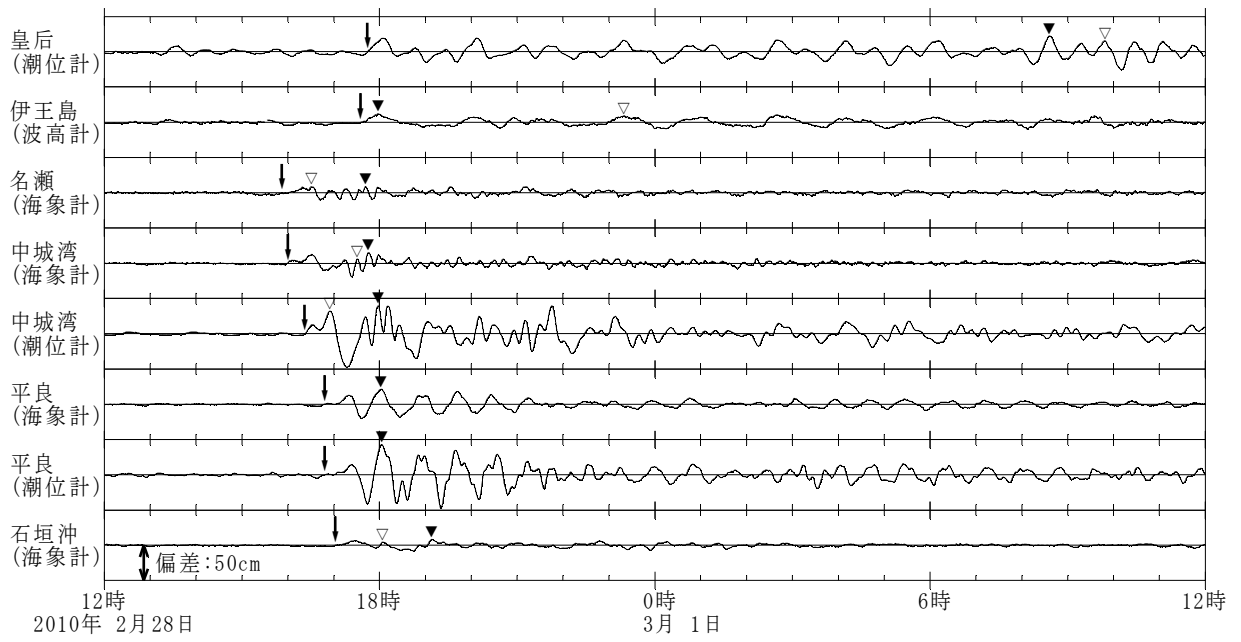
付図-B.2 潮位偏差の経時変化と第1波，正の最大偏差，最大波（青森東岸沖～石巻）



付図-B.3 潮位偏差の経時変化と第1波, 正の最大偏差, 最大波 (仙台新港~三河)



付図-B.4 潮位偏差の経時変化と第1波, 正の最大偏差, 最大波 (三重尾鷲沖~鹿児島)



付図-B.5 潮位偏差の経時変化と第1波, 正の最大偏差, 最大波 (皇后~石垣沖)



港湾空港技術研究所報告 第49巻 第4号

2010.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Analysis on Shallow-water Transformation of the 2010 Chilean Tsunami on the Japanese Coast by GPS Buoy Network ..... Hiroyasu Kawai, Makoto Satoh, Toshihiko Nagai, Koji Kawaguchi .....	3
---	---

