

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.50 No.4 December 2011

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 50 卷 第 4 号 (Vol. 50, No. 4), 2011 年 12 月 (December 2011)

目 次 (CONTENTS)

1. 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震津波の特性河合弘泰, 佐藤真, 川口浩二, 関克己 3 (Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake TsunamiHiroyasu KAWAI, Makoto SATOH, Koji KAWAGUCHI, Katsumi SEKI)
2. 土丹層に支持された鋼管杭の軸方向抵抗力の検討水谷崇亮, 菊池喜昭, 杉本貴之, 小濱英司 65 (Study on Vertical Bearing Capacity of Steel Pipe Pile Driven into MudstoneTaka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI, Takayuki SUGIMOTO, Eiji KOHAMA)
3. 既存矢板壁に対する控え工増設の補強効果とその評価法の開発森川嘉之, 菊池喜昭, 水谷崇亮 107 (Development of Design Method for Anchored Sheet Pile Wall Reinforced by Additional Anchorage WorkYoshiyuki MORIKAWA, Yoshiaki KIKUCHI, Taka-aki MIZUTANI)
4. 内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の再現に適した震源のモデル化手法野津厚 133 (Modeling Semi-Short-Period Ground Motions from Crustal Earthquakes Using Characterized Source ModelsAtsushi NOZU)
5. 下新川海岸における長周期うねりの越波発生機構とその対策加島寛章, 平山克也 197 (Experimental Study on Mechanism and Countermeasures for Wave Overtopping of Long-Period Swell in Shimonikawa CoastHiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA)

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性

河合 弘泰*・佐藤 真**・川口 浩二***・関 克己**

要 旨

全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS の GPS 波浪計, 沿岸波浪計, 潮位計の観測データによって, 2011年3月11日14時46分の平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波の特性を調べた. その結果を要約すると, 以下の通りである.

- ①岩手北部沖～福島県沖の6基のGPS波浪計(設置水深125～204m)では15時12分～15時19分に高さ2.14～6.13m(地盤沈下の影響を補正した後の値)の最大波を記録した. 岩手南部沖では比較的高い波が7波続いた. その第1波の峯は, 2段階に立ち上がり, 緩やかな峯に鋭い峯が重なったような波形に見える. 宮城中部沖では最大波の後に6.00m(補正後の値)も引いた.
- ②仙台塩釜港の沿岸波浪計(設置水深21.3m)が津波の第1波の途中まで捉えた範囲でも, 高さは6.65m(補正前の値), 流速は3.22 m/sに達した.
- ③津波はGPS波浪計, 沿岸波浪計, 潮位計の順に到達し, 岸側で高くなった.
- ④関門海峡, 有明海・八代海, 琉球諸島, 北海道のオホーツク海・日本海沿岸のように, 東北地方太平洋沖の波源から遠く離れた地点でも津波が観測された. 北海道～東北地方の太平洋沿岸では引き, それ以外では押しから始まる地点が多かった.
- ⑤海象計による多層の流れの観測によって, 津波の流速と流向が鉛直方向に概ね一様であることを示した.

キーワード: 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス), 2011年東北地方太平洋沖地震津波, GPS波浪計, 海象計, 潮位計

* 海洋情報研究領域上席研究官(高潮防災研究担当), 海洋情報研究領域長心得兼務
** 海洋情報研究領域海象情報研究チーム研究官
*** 海洋情報研究領域海象情報研究チームリーダー
〒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/>

Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami

Hiroyasu KAWAI*
Makoto SATOH**
Koji KAWAGUCHI***
Katsumi SEKI**

Synopsis

The profile of the tsunami triggered by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, at 14:46, 11 March 2011 at the Japanese Standard Time, observed with the GPS buoys, coastal wave gauges and coastal tide gauges of NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS), has been investigated. The major results as follows:

- (1) Six GPS buoys, drifting on the sea surface at the location of 125-204m in depth, on the Tohoku District coast recorded the highest tsunami crest of 2.14-6.13 m at 15:12-15:19. The South Iwate GPS buoy recorded major seven tsunami crests. The first crest looks the composition of a sharp short crest with a mild long crest. The Central Miyagi GPS buoy recorded the tsunami trough of 6.00 m following the highest crest.
- (2) The coastal wave gauge at the spot of 21.3 m in depth in Sendai-Shiogama Port, Tohoku District recorded the tsunami profile until its height and current speed reached 6.65 m and 3.22 m/s respectively.
- (3) The tsunami arrived at GPS buoys earlier than their nearby coastal wave gauges and coastal tide gauges. The tsunami height increased on the coast.
- (4) The tsunami reached locations far from the source on the Tohoku coast, such as the Kanmon Strait, Ariake Bay, and Yatsushiro Bay coast, on the Kyushu Island; the Pacific Ocean and East China Sea coast of the Ryuku (Okinawa) Islands; and the Okhotsk Sea and the Sea of Japan coast of the Hokkaido Island. The tsunami began with a negative wave on the Pacific coast of Hokkaido and Tohoku Districts and with a positive wave on the other.
- (5) The Doppler-type Wave Directional Meter, named Kaisho-kei in Japanese, detected a vertically constant distribution of the tsunami current speed and direction.

Key Words: NOWPHAS, 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, GPS buoy, Doppler-type Wave Directional Meter, coastal tide gauge

* Research Director, Marine Information Field

** Researcher, Marine Information Group, Marine Information Field

*** Head, Marine Information Group, Marine Information Field

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

Phone: +81-46-844-5048

Fax: +81-46-842-5246

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/>

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 地震・津波の概要	7
3. NOWPHASの観測システムと津波の抽出	8
3.1 GPS波浪計	9
3.2 沿岸波浪計	12
3.3 潮位計	15
3.4 津波時の波浪条件	15
3.5 津波波形の基本的な処理	16
4. GPS波浪計で観測した太平洋沿岸の津波	21
4.1 東北～四国地方沿岸の概況	21
4.2 東北地方沿岸の第1波かつ最大波の特徴	23
4.3 東北地方沿岸における津波による流れ	24
4.4 東北地方沿岸における過去の津波との比較	25
5. 沿岸波浪計・潮位計で観測した日本各地の津波	27
5.1 東北地方の太平洋沿岸	27
5.2 北海道の太平洋沿岸	28
5.3 東京湾の湾口部	30
5.4 四国の沿岸	33
5.5 その他の沿岸	35
6. 結論	38
7. あとがき	38
謝辞	39
参考文献	39
付録	40

1. まえがき

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、独立行政法人港湾空港技術研究所（以下では「当所」と略す）は、1970年以来協力して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、全国各地の波浪・潮位等の観測・集中処理・解析を実施してきた。これまで蓄積してきたデータには、台風・低気圧による高波・高潮はもちろんのこと、以下に記すように、多くの津波も含まれている。また、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（河合ら、2010c, 2011）。

津波を含む潮位の観測は、古くから検潮所の潮位計で行われてきた。検潮所は波浪の静穏な港奥に設置されることが多く、この潮位計が捉える津波は防波堤などの構造物や港内の海底地形によって変形したものである。また、多くの潮位計は、海のそばに井戸を掘り、井戸の底と海底とを細い管でつないで、海面の上下動を井戸の水位の上下動として計測する仕組みになっている。この管の内径や長さは、数秒の周期をもつ波浪がほとんど減衰し、数時間の周期をもつ天文潮は減衰しないように、設計されている。津波による海面の上下動が急激な場合には井戸の水位が追従できないこともある。そのため、これまでの津波研究では、潮位計の貴重な観測データを解析する一方で、沖合から港に迫って来る津波を波浪計で捉えることにも大きな力が注がれてきた。波浪計は波浪の峯や谷を捉えるために短い時間間隔で水位を計測するものであり、その波形を平滑化すれば潮位も得られる。

NOWPHASの沿岸波浪計が初めて顕著な津波を観測したのは、1983年日本海中部地震津波のときである。当時の観測は毎偶数時の正時をはさむ20分間に限られていたが、深浦港の20分間の観測がその一部を捉えた（谷本ら、1983）。1993年北海道南西沖地震津波のときには、30分毎に20分間観測して10分間休止するモードに切り替えることができるようになり、流向流速型波向計も導入され、秋田港、輪島港などで津波の水位と流れを、切れ目の少ない状態で捉えた（永井ら、1993；高山ら、1994）。

その後、波浪の連続観測が開始され（永井、1997；永井ら、1999）、1994年北海道東方沖地震津波や2003年十勝沖地震津波では水位や流れを切れ目なく取得できた（永井ら、1995、2004）。1台で水位と流れを計測できる海象計（高山ら、1992；橋本ら、1995）が導入され、2005年宮城県沖地震津波や2006年千島列島地震津波のときには、沿岸波浪計と潮位計とで津波波形のスペクトルの比較も

なされた（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GPSを搭載したブイ（GPS津波計）を開発し、大船渡沖で2001年ペルー沖地震津波を捉え（加藤ら、2003；永井ら、2003）、室戸沖でも2004年東海道沖地震津波を捉えた（永井ら、2005）。これらの成功を切っ掛けに、このブイはGPS波浪計という名称でNOWPHASにも導入されることになった。まず、2007年に東北地方の太平洋沿岸で2基の整備が始まった。そして、2010年2月には東北～四国地方の太平洋沿岸の11基がネットワークとして2010年チリ津波を捉え、八戸港、久慈港、釜石港、石巻港、須崎港では、GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計という3種類の観測機器による津波波形から、沿岸部の変形特性が明らかにされた（河合ら、2010a, 2010b, 2010c, 宮田ら、2010, Kawai et al., 2011）。

そして、2011年3月11日14時46分の東北地方太平洋沖地震によって津波が発生した。15時10分頃には、釜石港沖合の水深204mの地点に設置された岩手南部沖GPS波浪計で津波の高さが3mを超え、気象庁が宮城県沿岸の津波の予想高さを6mから10m以上に上方修正するきっかけの一つにもなった。15時12分～15時16分には、岩手中部沖、岩手南部沖、宮城北部沖のGPS波浪計で高さが6m程度の峯が観測された。その後、東北地方や関東地方北部の太平洋沿岸には、沿岸波浪計や潮位計を破壊するほどの高さとなって来襲し、陸上への遡上高が20mを超えた地域もある（高橋ら、2011；東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、2011）。この津波は、瀬戸内海、日本海、東シナ海、有明海、八代海、オホーツク海でも観測された。このような津波の観測データは、稀にしか発生しない巨大津波に対する理解を深める上で非常に貴重なものである。また、そのデータの解析を通じて得られる知見は、今後の津波防災にも資すると期待される。

そこで、NOWPHASの日本各地にあるGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計で観測された水位データを収集して津波を抽出し、東北地方の太平洋沿岸を中心に日本各地の津波特性を明らかにした。

2. 地震・津波の概要

2011年3月11日14時46分に、牡鹿半島の東南東約120km、太平洋プレートと北アメリカプレートの境界である日本海溝付近において、Mw9.0の規模で、逆断層型の地震が発生した（気象庁、2011b）。図-2.1にその位置を示す。この地震の規模は、日本では観測史上最大であり、1900年以降の世界でも1960年のチリ地震(Mw9.5)、

表-2.1 津波の第1波と最大波（気象庁，2011a，2011c，2011d，2011eより作成）

海域	地点	所管	第1波		最大波		備考
オホーツク海	枝幸港	港湾局	+0.2m	11日17時45分	0.4m	11日23時36分	
日本海	新潟	港湾局	+0.1m	11日18時02分	0.2m	12日04時54分	
太平洋	えりも町庶野	気象庁	-0.1m	11日15時18分	3.5m	11日15時44分	
	宮古	気象庁	+0.2m	11日14時48分	8.5m	11日15時26分	途中から欠測
	大船渡	気象庁	-0.2m	11日14時46分	8.0m	11日15時18分	途中から欠測
	石巻市鮎川	気象庁	+0.1m	11日14時46分	8.6m	11日15時25分	途中から欠測
	相馬	国土地理院	+0.3m	11日14時55分	9.3m	11日15時51分	途中から欠測
	大洗	茨城県	+1.8m	11日15時15分	4.2m	11日16時52分	
	横須賀	海上保安庁	+0.9m	11日15時52分	1.6m	11日17時16分	
	尾鷲	気象庁	+1.0m	11日16時17分	1.7m	11日17時12分	
	須崎港	港湾局	+1.4m	11日17時00分	2.6m	11日20時59分	
	南鳥島	気象庁	+0.5m	11日16時51分	0.5m	11日16時55分	
	宮古島平良港	港湾局	+0.5m	11日18時37分	0.7m	11日19時34分	
瀬戸内海	下関港長府	港湾局	+0.3m	11日19時33分	0.4m	11日23時00分	
東シナ海	佐世保	海上保安庁	+0.4m	11日19時32分	0.7m	11日21時52分	
	天草市本渡港	港湾局	+0.3m	11日19時08分	0.8m	11日21時05分	
	那覇	気象庁	+0.2m	11日18時03分	0.6m	11日21時12分	

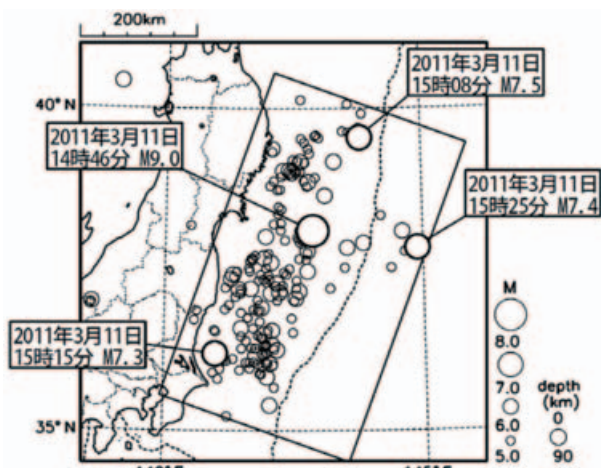


図-2.1 地震の分布（気象庁，2011b）

2004年のスマトラ島沖地震（Mw9.1～9.3）、1964年のアラスカ地震（Mw9.2）に次ぐ4番目である。この地震は気象庁により「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」と命名された。

釜石港沖合の水深204mの地点に設置された岩手南部沖GPS波浪計では、地震の直後から引き波が生じ、地震から26分後の15時12分には沈下した地盤を基準に高さ6.67m、沈下前の状態を基準に6.13mの峯が通過した。岩手中部沖、宮城北部沖、宮城中部沖のGPS波浪計（設置水深144～200m）でも、これに近い高さの峯が15時12分～15時16分に通過した。釜石港の検潮所でその高さを観測することはできなかったが、気象庁は15時21分に最大波が到達したと推定しており（気象庁，2011a）、グリーンの法則で概算しても津波防波堤の周辺での高さは10m程度となる。当所における数値計算でもその頃にその程度の最大波が得られた（高橋ら，2011）。現地の痕

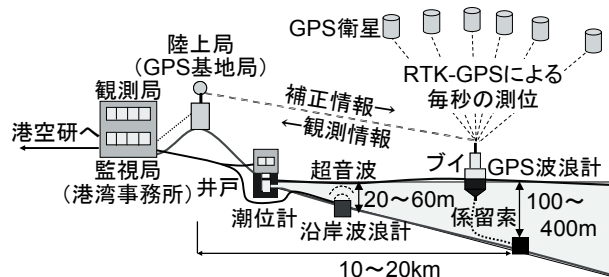


図-3.1 三層の観測網

跡調査によると、陸上への遡上高さは、岩手県と宮城県を中心とする南北約290kmにも及ぶ沿岸で20mを超え、宮古市では40mに達した地点もある（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2011）。

表-2.1はNOWPHAS以外にも含む各地の検潮所で観測された津波の第1波と最大波（気象庁，2011a）を抜粋したものである。津波の高さは、全国的に見ると東北地方の太平洋沿岸で最も高かった。潮位記録が途中で切れて必ずしも最大波を捉えているとは限らず、地震によって観測基準面がずれた可能性もあるが、宮古で8.5m、大船渡で8.0m、石巻市鮎川で8.6m、相馬で9.3mに達する波形が記録された（気象庁，2011c，2011d，2011e）。このうち相馬の値は、日本の検潮所の記録として史上最高である。この津波はオホーツク海、日本海、瀬戸内海、東シナ海にも伝播した。下関港長府は関門海峡の瀬戸内海側の入口、天草市本渡港は有明海と八代海の海峡に位置し、何れも太平洋からは遠く離れた地点である。

3. NOWPHASの観測システムと津波の抽出

NOWPHASの観測機器には、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 種類がある。そのうち GPS 波浪計と沿岸波浪計は、波浪による海面の凹凸を捉えるために、それぞれ 1s および 0.5s 間隔で水位を計測している。この水位の時系列を平滑化することで潮位を求めることができる。つまり、波浪計という名称ではあるが、潮位計としての機能も備えている。これら 3 種類の観測機器のデータは、各港湾事務所から当所へ専用回線やインターネットでリアルタイムに伝送され、GPS 波浪計と潮位計の潮位はさらに気象庁にも伝送されている。

図-3.2 は久慈港、釜石港、仙台塩釜港を例に、周辺の海底地形と観測機器の位置を示す。何れの GPS 波浪計も、リアス地形の外側ではほぼ直線等深線地形のところらに設置されており、各港に入射する代表的な津波を捉えるのに適している。沿岸波浪計の位置は港によって異なり、久慈港ではリアス地形の縁、釜石港ではリアス地形の内側、仙台塩釜港（仙台）では遠浅な仙台湾の奥にある。

3.1 GPS 波浪計

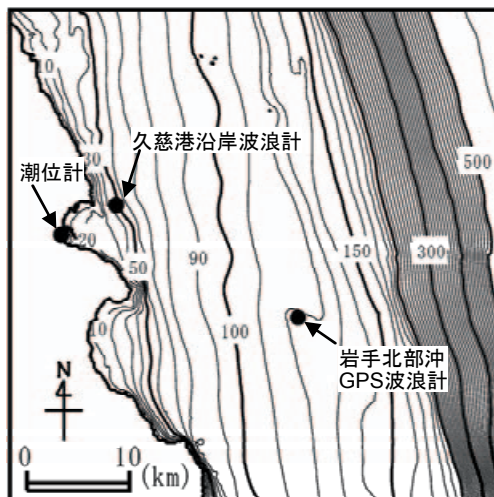
(1) 機器の特徴

GPS 波浪計は、図-3.1 で示したように、海岸から概ね 10~20km、水深 100~400m 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。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, 2008)。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 である。潮位は毎秒のデータを平滑化して求めるため、この計測誤差のうちの少なくとも短周期な成分は除去される。

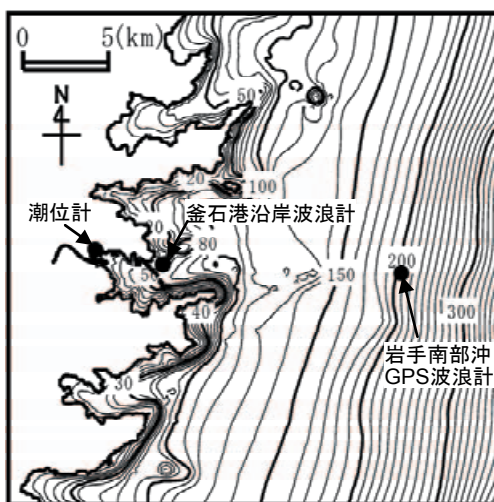
GPS 波浪計は「ブイが海面の上下動に追従し、GPS 受信機の高度の変化を海面の上下動と見なせる」という前提に立っている。ブイが傾斜すると海面から GPS 受信機までの高さも変化するので、ジャイロによってブイの傾斜角も同時に計測し、傾斜の影響を補正している(清水ら, 2006a)。従来のブイ式波浪計が鉛直方向の加速度を計測し、それを時間積分して海面の高さにするのに対し、GPS 波浪計はブイの高度を直接 GPS で計測するため、長周期波や潮汐のようなゆっくりとした上下動も捉えやすい。ただし、ブイに係留索の張力が作用することは従来のブイ式波浪計と変わらないため、少なくとも cm 単位未満の潮位の議論は難しい。

(2) 解析の対象地点

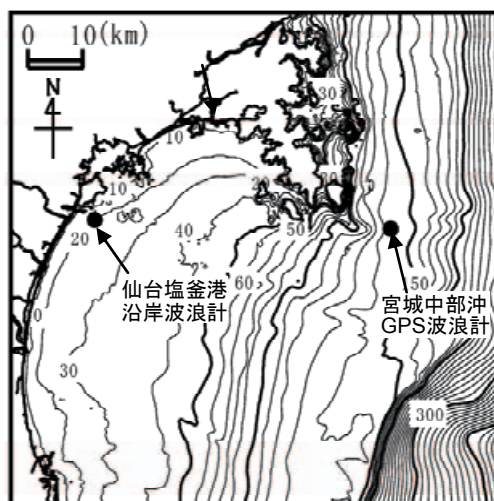
表-3.1 および図-3.3 に GPS 波浪計の設置条件とデータ処理方法を示す。本報では、津波発生前から機器調整



(a) 久慈港周辺



(b) 釜石港周辺



(c) 仙台塩釜港周辺

図-3.2 観測地点周辺の海底地形

表-3.1 GPS波浪計の設置条件とデータ処理方法

No.	地点名 (通称名)	地点code	水深 (m)	緯度	経度	処理	備考
1	青森東岸沖 (八戸沖)	805G	87	40° 38' 00"	141° 45' 00"	—	津波前から機器調整中
2	岩手北部沖 (久慈沖)	807G	125	40° 07' 00"	142° 04' 00"	P	
3	岩手中部沖 (宮古沖)	804G	200	39° 37' 38"	142° 11' 12"	P	
4	岩手南部沖 (釜石沖)	802G	204	39° 15' 31"	142° 05' 49"	P	
5	宮城北部沖 (広田湾沖)	803G	160	38° 51' 28"	141° 53' 40"	P	
6	宮城中部沖 (金華山沖)	801G	144	38° 13' 57"	141° 41' 01"	P	
7	福島県沖 (小名浜沖)	806G	137	36° 58' 17"	141° 11' 08"	P	
8	静岡御前崎沖	812G	120	34° 24' 12"	138° 16' 30"	N	
9	三重尾鷲沖	811G	210	33° 54' 08"	136° 15' 34"	R	
10	和歌山南西沖 (白浜沖)	813G	201	33° 38' 32"	135° 09' 24"	R	
11	徳島海陽沖	815G	430	33° 27' 38"	134° 29' 48"	R	
12	高知西部沖 (足摺沖)	814G	309	32° 37' 52"	133° 09' 21"	—	津波前から機器調整中

[処理] R印：リアルタイム処理値を使用，P印：陸上局から回収したデータを使用，N印：傾斜角を無視，—印：解析対象外

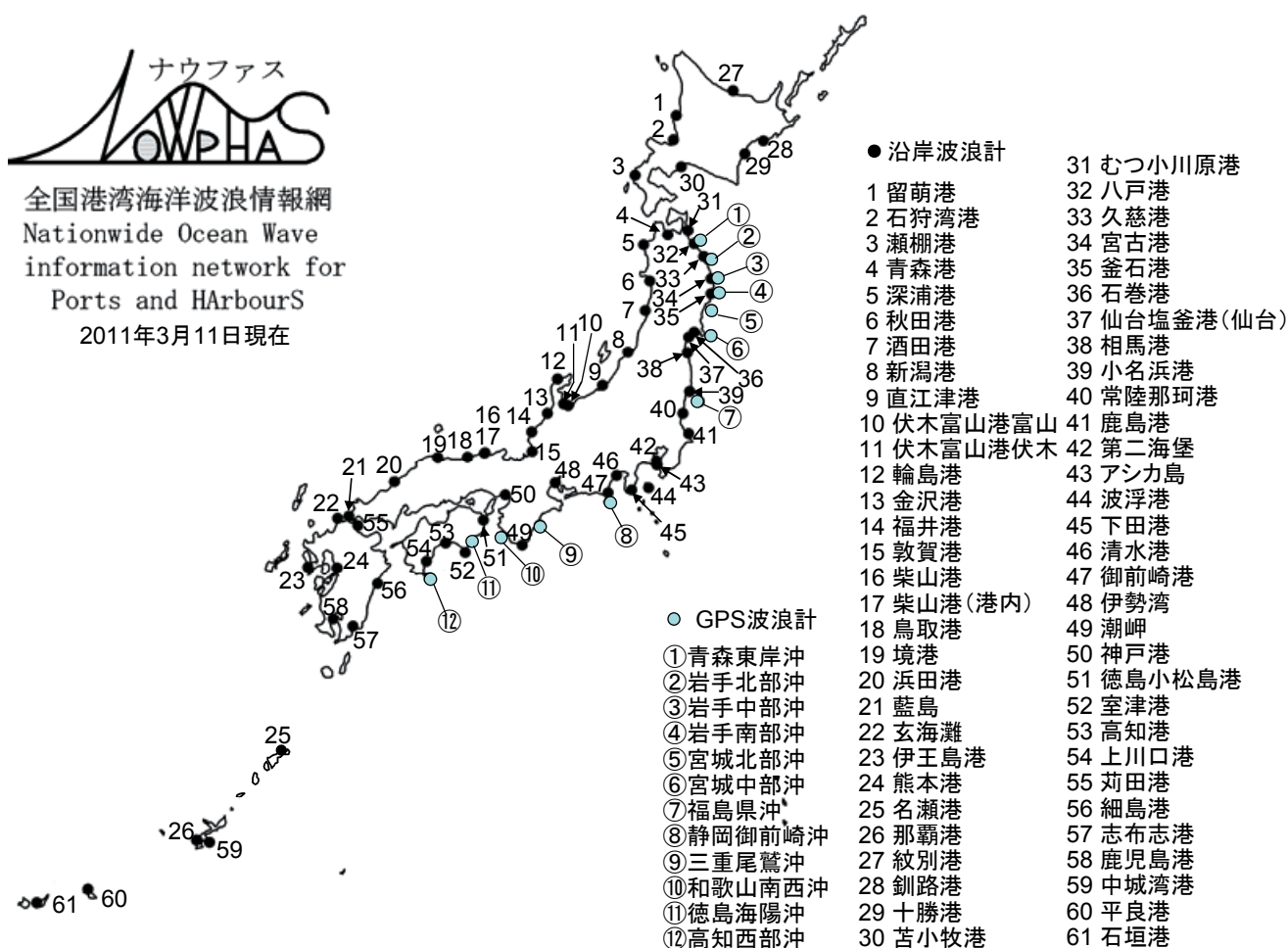


図-3.3 GPS波浪計と沿岸波浪計の配置

のため観測を停止していた青森東岸沖と高知西部沖を除く10地点を解析の対象とする。

(3) 解析方法

GPS波浪計ではブイの高度を1s間隔で計測している。リアルタイムなデータ処理では、図-3.4に示すように、ブイの高度の時系列から120sの単純平均とハミング・ウ

イ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。そしてその潮位から天文潮位を差し引いたものが潮位偏差である。その天文潮位の計算においては、毎日決まった時刻に調和解析を行い、調和定数を更新している。調和定数を切り替えた瞬間に天文潮位に段差が生じるのを避けるため、前

の調和定数による天文潮位から新しい調和定数による天文潮位に滑らかにすり合わせている。こうして得られた潮位偏差は、高潮、海流の変化などに起因する異常潮が顕著でなければ、概ね津波成分とみなすことができる。本報では、2011年3月9日の前震による津波については全てのGPS波浪計で、2011年3月11日の本震による津波については後述する事情により三重尾鷲沖、和歌山南西沖、徳島海陽沖のGPS波浪計に限り、このリアルタイム処理値を用いることにする(表-3.1の処理の欄にRと記載)。

2011年3月11日の本震の際には、東北地方の通信障害によって、東北地方沿岸のGPS波浪計からのデータが途絶えた。図-3.5は、データの途絶えた地点の例として岩手南部沖、正常に続いた地点の例として徳島海陽沖を選び、リアルタイム・ナウファスWeb(国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所, 2011)に表示された潮位と潮位偏差の波形を示す。幸いなことに、陸上局のデータ記録装置には毎秒のブイの高度のデータが残っており、これを回収し、リアルタイム処理と同じ数値フィルタで潮位を求めることができた。ただし、天文潮位の計算については、リアルタイム処理と全く同じ演算の環境を再現するのに手間がかかるため、過去1年分の潮位を用いて調和解析を行い、解析対象期間を通じて同じ調和定数に基づく天文潮位を用いた(表-3.1の処理の欄にPと記載)。そのため、算出した天文潮位はリアルタイム処理と概ねmm単位の差が生じ、それが潮位偏差の差としても生じた。

静岡御前崎沖のGPS波浪計については、リアルタイム処理されたデータ自体は正常に受信できたが、傾斜計が不調であり、処理された潮位や潮位偏差の波形にノイズが頻繁に現れた。そこで、ブイの傾斜を補正せずに潮位を求めなおした(表-3.1の処理の欄にNと記載)。

さらに、全てのGPS波浪計について、毎秒の測位信頼

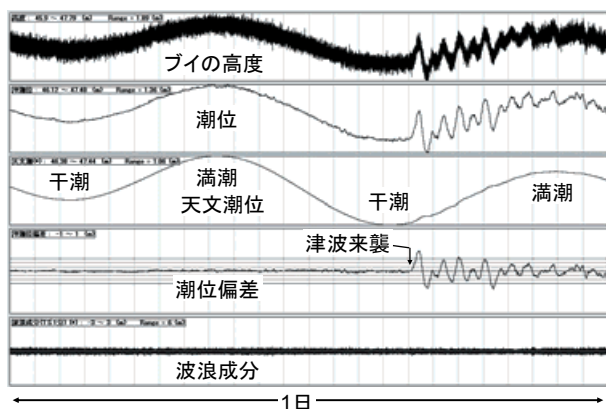


図-3.4 潮位と潮位偏差の算出

度, PDOP 値 (GPS 衛星の配置が測位に有利な状態かを表す指標), 捕捉衛星数, 演算使用衛星数など GPS 測位に関する値の異常が長時間継続していないか, 短時間であっても繰り返していないかを確認した。その結果, 東北地方の太平洋沿岸と静岡御前崎沖の GPS 波浪計では, 図-3.6に示すように地震発生の頃に数十秒間も FIX しなかったことが分かった。その時間帯は, 震源に近い宮城中部沖で最も早く, 北あるいは南に行くほど遅い。FIX しない状態が継続した原因としては, 地震による陸上局のアンテナの揺れや磁界の乱れが考えられる。

表-3.2は、各GPS波浪計において2011年3月9日～12日にFIX解が得られた割合(小数点以下3桁は切り捨



(a) 岩手南部沖 GPS 波浪計



(b) 徳島海陽沖 GPS 波浪計

図-3.5 リアルタイム・ナウファス web の画面表示の例

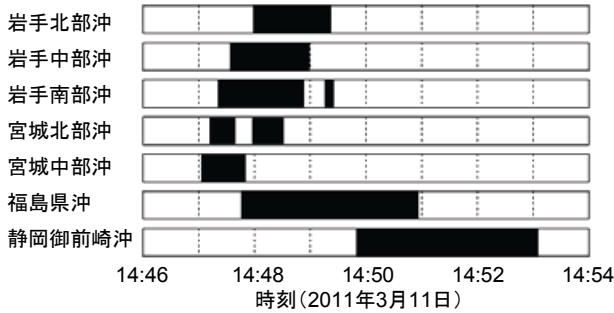


図-3.6 FIX 解が得られなかった時間帯

表-3.2 各 GPS 波浪計における FIX 解の割合

	FIX 解の割合 (%)			
	9 日	10 日	11 日	12 日
岩手北部沖	100.00	100.00	99.97	100.00
岩手中部沖	100.00	100.00	100.00	100.00
岩手南部沖	100.00	100.00	100.00	99.60
宮城北部沖	99.99	99.99	99.99	99.99
宮城中部沖	100.00	97.46	100.00	98.30
福島県沖	100.00	100.00	99.90	100.00
静岡御前崎沖	98.18	98.36	97.69	100.00
三重尾鷲沖	99.79	99.97	100.00	100.00
和歌山南西沖	100.00	100.00	100.00	100.00
徳島海陽沖	-	-	100.00	100.00

て)を示す。ただし、図-3.6 に示した地震発生頃の測位異常は除外して集計したものである。津波が発生した当日の FIX 解の割合は、静岡御前崎沖で 97%以上、その他の地点では 99%台または 100%と高かった。

なお、潮位は前後 1 分間の毎秒のブイの高度から算出しており、一定以上の割合で FIX 解のデータが得られていれば、有効な潮位の算出値として扱っている。したがって、潮位としての測得率は表の値より若干高い。

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機器であり、一般には図-3.1 で示したように、海岸から概ね 3km 以内の水深 20~60m の海底にセンサを設置している。データのサンプリング間隔は 0.5s であり、このデータに後述する数値フィルタをかけると潮位が得られる。

NOWPHAS の沿岸波浪計は超音波式波高計と海象計に大別できる。超音波式波高計は、海底から海面に向けて超音波を放射し、それが海面で反射して戻までの時間を計測して、センサから海面までの高さを求めるものである。超音波式流速計型波向計（海底付近の水平二成分流速を計測して共分散法により主波向を求めるもの）を併設している場合が多い。一方、海象計は、図-3.7 に

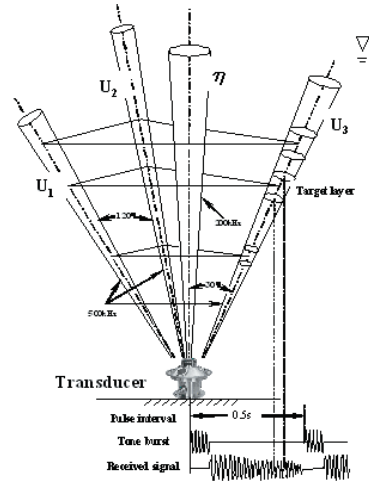


図-3.7 海象計のしくみ

示すように、海底から鉛直上方に向けて放射した超音波で海面の高さを計測し、斜め上方の 3 方向に向けて放射した超音波のドップラー効果によって上・中・下層の水粒子速度を計測するものである（橋本ら、1995）。

(2) 解析の対象地点

沿岸波浪計は図-3.3 および表-3.3 に示すように全国で 61 地点に設置してある。本報ではそのうち、表の処理の欄に「F」、「T」、「TA」の何れかを記した 38 地点を対象とする。「-」を記した地点は、毎偶数時の観測のために波形が連続しない地点、オンラインで接続されていない地点、津波前から機器調整のために欠測していた地点、観測は継続していたがノイズや欠測が多く津波の解析に適さなかった地点、津波によって機器が破壊されてデータが喪失した地点、の何れかであり、これらは除外した。

なお、表-3.3 において、USW とは超音波式波高計である。水深とは、海底面から平均潮位までの高さから主要 4 分潮の振幅の和を減じた値である。設置高とは、海底面からセンサまでの高さである。

(3) 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 $\pm 60s$ 、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（表-3.3 の処理の欄に「F」と記載）。以上は、NOWPHAS における標準的な処理方法で

表-3.3 沿岸波浪計の機種, 設置条件とデータ処理方法

No.	地点名	地点 code	機種	水深 (m)	設置 高(m)	緯度	経度	処理	備考
1	留萌港	604W	海象計	49.8	0.8	43° 51' 58"	141° 28' 06"	F	
2	石狩湾新港	611W	海象計	25.0	1.6	43° 14' 53"	141° 16' 06"	—	機器調整中
3	瀬棚港	603W	USW	52.9	0.8	42° 26' 38"	139° 49' 03"	F	
4	青森港	220W	USW	24.9	2.0	40° 51' 10"	140° 44' 21"	F	
5	深浦港	201W	USW	51.0	1.9	40° 39' 34"	139° 54' 42"	F	
6	秋田港	101W	USW	29.4	2.3	39° 44' 16"	140° 00' 26"	—	機器調整中
7	酒田港	102W	USW	45.9	1.2	39° 00' 31"	139° 46' 45"	F	
8	新潟港	112W	海象計	34.5	1.2	38° 00' 17"	139° 07' 34"	—	毎偶数時観測
9	直江津港	114W	海象計	32.7	1.2	37° 14' 09"	138° 16' 26"	F	
10	伏木富山港富山	115W	海象計	20.0	1.2	36° 46' 40"	137° 12' 18"	—	毎偶数時観測
11	伏木富山港伏木	113W	海象計	46.4	1.2	36° 49' 15"	137° 04' 29"	—	毎偶数時観測
12	輪島港	105W	海象計	52.0	1.2	37° 25' 51"	136° 54' 08"	—	調整中
13	金沢港	106W	海象計	21.1	1.2	36° 36' 50"	136° 34' 03"	F	
14	福井港	117W	海象計	36.7	0.7	36° 09' 47"	136° 04' 30"	F	
15	敦賀港	122W	海象計	50.1	0.7	35° 46' 16"	136° 02' 22"	F	
16	柴山港	310W	海象計	41.1	0.5	35° 40' 05"	134° 40' 46"	F	
17	柴山港 (港内)	313W	USW	11.1	0.5	35° 39' 32"	134° 39' 58"	—	オフライン
18	鳥取港	304W	海象計	30.9	0.5	35° 33' 16"	134° 09' 41"	F	
19	境港	312W	USW	12.0	1.5	35° 31' 56"	133° 16' 36"	—	オフライン
20	浜田港	305W	海象計	50.1	0.9	34° 54' 19"	132° 02' 11"	—	毎偶数時観測
21	藍島港	406W	海象計	21.1	0.6	34° 00' 43"	130° 47' 35"	—	観測波形不良
22	玄界灘	405W	海象計	39.5	1.8	33° 55' 26"	130° 28' 05"	F	
23	伊王島港	404W	USW	31.9	1.7	32° 42' 47"	129° 45' 23"	F	
24	熊本港	420W	空中発射	4.2	7.9	32° 45' 08"	130° 33' 53"	—	毎偶数時観測
25	名瀬港	402W	海象計	54.6	0.6	28° 27' 07"	129° 31' 18"	F	
26	那覇港	702W	海象計	51.0	1.5	26° 14' 47"	127° 41' 08"	F	
27	紋別港	609W	海象計	52.6	0.8	44° 19' 03"	143° 36' 24"	F	
28	釧路港	613W	海象計	50.0	0.8	42° 54' 38"	144° 23' 50"	TA	
29	十勝港	607W	海象計	23.0	0.9	42° 39' 06"	143° 41' 08"	TA	
30	苫小牧港	602W	海象計	50.7	0.9	42° 32' 38"	141° 26' 45"	FA	
31	むつ小川原港	202W	USW	43.8	0.9	40° 55' 30"	141° 25' 27"	T	
32	八戸港	203W	USW	27.7	1.9	40° 33' 39"	141° 34' 06"	TA	
33	久慈港	219W	海象計	49.5	1.1	40° 13' 04"	141° 51' 36"	T	
34	宮古港	213W	USW	24.2	1.3	39° 38' 22"	141° 59' 09"	—	データ喪失
35	釜石港	204W	USW	49.8	0.9	39° 15' 54"	141° 56' 06"	—	データ喪失
36	石巻港	218W	海象計	20.8	0.5	38° 20' 49"	141° 15' 16"	—	データ喪失
37	仙台塩釜港	205W	USW	21.3	3.2	38° 15' 00"	141° 03' 58"	T	
38	相馬港	214W	USW	17.1	1.7	37° 51' 28"	140° 58' 52"	—	データ喪失
39	小名浜港	206W	海象計	23.8	1.6	36° 55' 04"	140° 55' 18"	—	データ喪失
40	常陸那珂港	209W	海象計	30.3	2.4	36° 23' 42"	140° 39' 12"	—	データ喪失
41	鹿島港	222W	海象計	24.0	2.8	35° 53' 55"	140° 45' 14"	—	データ喪失
42	第二海堡	217W	海象計	28.8	0.7	35° 18' 13"	139° 44' 52"	F	
43	アシカ島	901W	海象計	21.7	1.1	35° 12' 39"	139° 44' 04"	TA	
44	波浮港	212W	USW	48.3	1.0	34° 40' 35"	139° 27' 08"	—	機器調整中
45	下田港	504W	USW	51.1	1.0	34° 38' 48"	138° 57' 11"	TA	
46	清水港	505W	海象計	51.8	0.6	35° 01' 16"	138° 32' 05"	—	機器調整中
47	御前崎港	501W	海象計	22.8	0.6	34° 37' 17"	138° 15' 33"	TA	
48	伊勢湾	506W	海象計	26.9	0.5	34° 55' 12"	136° 44' 25"	—	観測波形不良
49	潮岬	301W	海象計	54.7	0.6	33° 25' 59"	135° 44' 50"	TA	
50	神戸港	306W	海象計	17.0	0.5	34° 38' 50"	135° 16' 36"	—	観測波形不良
51	徳島小松島港	320W	海象計	20.8	1.5	34° 02' 24"	134° 38' 37"	F	
52	室津港	307W	海象計	27.7	0.2	33° 16' 11"	134° 08' 42"	TA	
53	高知港	309W	海象計	24.1	0.5	33° 28' 48"	133° 35' 12"	TA	
54	上川口港	308W	USW	27.9	0.6	33° 01' 54"	133° 03' 29"	TA	
55	荻田港	409W	USW	9.6	1.4	33° 47' 59"	131° 04' 20"	F	
56	細島港	411W	海象計	48.3	0.4	32° 26' 36"	131° 43' 42"	TA	
57	志布志港	407W	海象計	35.0	0.7	31° 26' 02"	131° 06' 36"	—	毎偶数時観測
58	鹿児島港	408W	海象計	35.0	1.7	31° 31' 06"	130° 33' 08"	F	
59	中城湾港	701W	海象計	39.6	0.5	26° 14' 32"	127° 57' 55"	F	
60	平良港	703W	海象計	44.1	0.7	24° 50' 56"	125° 15' 13"	F	
61	石垣港	705W	海象計	34.8	0.7	24° 20' 29"	124° 07' 39"	F	

[処理] F印: カットオフ周期209分の数値フィルタ, T印: 天文潮位を差し引き, A印: 気圧補正など特別な処理, —印: 解析対象外

表-3.4 潮位計の形式、設置条件とデータ処理方法

No.	地点名	地点 code	形式	緯度	経度	処理	備考
1	杵形港	614T	フース	45° 11' 22"	141° 08' 16"	F	
2	留萌港	604T	フース	43° 57' 02"	141° 38' 06"	F	
3	石狩湾新港	611T	フース	43° 12' 57"	141° 18' 26"	F	
4	小樽港	610T	フース	43° 10' 59"	141° 02' 00"	F	
5	瀬棚港	603T	フース	42° 27' 14"	139° 56' 44"	F	
6	岩内港	619T	フース	42° 59' 12"	140° 30' 36"	F	
7	江差港	620T	フース	41° 52' 14"	140° 07' 31"	F	
8	奥尻港	621T	フース	42° 10' 27"	139° 31' 05"	F	
9	青森港	220T	フース	40° 50' 10"	140° 45' 47"	F	
10	秋田港	101T	フース	39° 44' 46"	140° 03' 57"	—	機器調整中
11	酒田港	102T	フース	38° 55' 03"	139° 49' 25"	F	
12	新潟港東	121T	フース	37° 59' 26"	139° 13' 02"	F	
13	新潟港西	120T	フース	37° 56' 26"	139° 03' 40"	F	
14	伏木富山港新湊	119T	フース	36° 46' 31"	137° 07' 05"	F	
15	伏木富山港伏木	113T	フース	36° 47' 35"	137° 03' 44"	F	
16	七尾港	118T	フース	37° 02' 58"	136° 58' 06"	F	
17	輪島港	105T	フース	37° 23' 51"	136° 54' 10"	F	
18	金沢港	106T	フース	36° 37' 04"	136° 36' 10"	F	
19	敦賀港	122T	フース	35° 39' 30"	136° 03' 55"	F	
20	北九州港門司	435T	フース	33° 56' 43"	130° 57' 27"	F	
21	下関港弟子待	430T	フース	33° 55' 29"	130° 55' 37"	F	
22	下関港田ノ首	431T	フース	33° 54' 55"	130° 55' 57"	F	
23	下関港大山の鼻	432T	フース	33° 54' 48"	130° 54' 18"	F	
24	北九州港砂津	437T	フース	33° 53' 32"	130° 53' 29"	F	
25	北九州港日明	436T	フース	33° 54' 34"	130° 52' 45"	F	
26	南風泊港	433T	フース	33° 56' 54"	130° 52' 37"	F	
27	唐津港	414T	フース	33° 28' 01"	129° 57' 42"	F	
28	平戸瀬戸	423T	フース	33° 21' 41"	129° 34' 32"	F	
29	郷ノ浦港	424T	フース	33° 47' 37"	129° 41' 17"	F	
30	長崎港皇后	418T	フース	32° 43' 21"	129° 50' 05"	F	
31	熊本港	420T	フース	32° 45' 08"	130° 33' 53"	F	
32	本渡瀬戸	416T	フース	32° 25' 47"	130° 12' 35"	F	
33	八代港	415T	フース	32° 30' 43"	130° 34' 00"	F	
34	枝幸港	615T	フース	44° 56' 19"	142° 35' 21"	F	
35	紋別港	609T	フース	44° 21' 18"	143° 21' 43"	F	
36	根室港	617T	フース	43° 19' 27"	145° 35' 16"	F	
37	霧多布港	618T	空中発射	43° 04' 42"	145° 06' 59"	F	
38	十勝港	607T	フース	42° 17' 49"	143° 19' 20"	T	
39	浦河〔海上保安庁〕	612T	フース	42° 09' 51"	142° 46' 15"	—	大部分が欠測
40	苫小牧港東	623T	フース	42° 36' 21"	141° 49' 02"	TA	
41	苫小牧港西	624T	フース	42° 37' 47"	141° 37' 16"	FA	
42	白老港	625T	フース	42° 31' 17"	141° 19' 14"	FA	
43	室蘭港	626T	フース	42° 20' 40"	140° 57' 12"	FA	
44	森港	622T	空中発射	42° 06' 36"	140° 35' 30"	F	
45	むつ小川原港	202T	フース	40° 55' 35"	141° 23' 17"	T	
46	八戸港	203T	フース	40° 31' 59"	141° 31' 20"	T	
47	久慈港	219T	フース	40° 11' 32"	141° 47' 48"	T	
48	釜石〔海上保安庁〕	204T	フース	39° 16' 24"	141° 53' 21"	—	データ喪失
49	石巻港	218T	フース	38° 24' 29"	141° 16' 00"	—	データ喪失
50	仙台塩釜港（仙台）	205T	フース	38° 17' 17"	141° 01' 17"	—	データ喪失
51	鹿島港	222T	フース	35° 55' 46"	140° 41' 38"	—	データ喪失
52	京浜港（横浜）	221T	フース	35° 28' 06"	139° 38' 13"	T	
53	第二海堡	217T	フース	35° 18' 31"	139° 44' 36"	T	
54	久里浜	901T	フース	35° 13' 39"	139° 43' 16"	TA	
55	下田港	504T	フース	34° 40' 31"	138° 57' 33"	TA	
56	三河港	507T	フース	34° 44' 00"	137° 19' 13"	TA	
57	小松島〔気象庁〕	320T	フース	34° 00' 33"	134° 35' 14"	F	
58	須崎港	316T	フース	33° 23' 14"	133° 17' 33"	TA	
59	与島港	315T	フース	34° 23' 04"	133° 49' 23"	F	

〔処理〕 F印：カットオフ周期 209 分の数値フィルタ，T印：天文潮位を差し引き，A印：気圧補正など特別な処理，—印：解析対象外

表-3.4 潮位計の形式、設置条件とデータ処理方法 (続き)

No.	地点名	地点 code	形式	緯度	経度	処理	備考
60	青木港	318T	フース	34° 21' 53"	133° 41' 12"	F	
61	多度津港	319T	フース	34° 16' 30"	133° 44' 44"	F	
62	来島航路	317T	フース	34° 07' 36"	132° 59' 01"	F	
63	三田尻中関港	413T	フース	34° 02' 02"	131° 35' 18"	F	
64	宇部港	412T	フース	33° 56' 19"	131° 14' 35"	F	
65	下関港長府	429T	フース	34° 00' 51"	131° 00' 15"	F	
66	北九州港青浜	434T	フース	33° 56' 56"	131° 01' 07"	F	
67	荻田港	409T	フース	33° 47' 37"	131° 00' 02"	F	
68	別府港	438T	フース	33° 17' 55"	131° 30' 13"	F	
69	宮崎港	419T	フース	31° 54' 10"	131° 27' 23"	TA	
70	志布志港	407T	フース	31° 28' 30"	131° 06' 32"	TA	
71	中城湾港	701T	フース	26° 19' 25"	127° 50' 24"	F	
72	平良港	703T	フース	24° 48' 29"	125° 16' 44"	T	

[処理] F印: カットオフ周期 209 分の数値フィルタ, T印: 天文潮位を差し引き, A印: 気圧補正など特別な処理, -印: 解析対象外

あり, 既往の津波解析でも採用されてきた。

ただし, この方法では, 津波によって生じる周期が数時間の副振動も除去してしまう。そこで, 過去の1年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地点もある (表-3.3の処理の欄に「T」と記載)。そして, 得られた潮位偏差が時間とともに漸増または漸減する地点では気圧補正 (1hPa=0.01m) も行った (表-3.3の処理の欄に「A」と記載)。

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も津波解析に用いることができる。本報では既往の津波解析と同様, 超音波式波高計の波形を水圧式波高計と比較して異常のないことを確認した上で, 感度の良い超音波式波高計の波形を用いることにした。

3.3 潮位計

(1) 機器の特徴

潮位計は, 岸の近くで海面の高さを観測する機器であり, 波浪が静穏な港奥の岸壁や護岸のそばに設置されることが多い。NOWPHASの潮位計の多くはフロート式(海のそばに井戸を掘り, 井戸の底と海底とを細い管でつないで, 海面の上下動を井戸の水面に浮かべたフロートの上下動として計測するもの)である。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している(岩崎ら, 2006)。その一方で, 北海道開発局の一部の地点では, 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。何れの機種にせよ, NOWPHASでは潮位も0.5s間隔で観測している。港湾事務所ごとに沿岸波浪計と潮位計のデータを1つのファイルにまとめて当所に伝送するし

くみになっているためである。

(2) 解析の対象地点

表-3.4に示す72地点の潮位計がオンラインで接続されている。本報では処理の欄に「F」、「T」、「TA」の何れかを記した66地点を解析の対象とする。「-」印の地点は, 津波前から機器調整中で欠測した地点, 津波によって機器が損傷してデータが喪失した地点, 津波の大半の部分が欠測した地点, の何れかであり, これらは除外した。なお, 浦河と釜石は海上保安庁, 小松島は気象庁が管理する観測施設であり, その観測データを港湾局も共同利用している。

(3) 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。

3.4 津波時の波浪条件

本報では, 波浪の静穏なところに設置された潮位計だけでなく, GPS 波浪計や沿岸波浪計の水位データからも津波を抽出する。波浪による短周期の水位変化は数値フィルタで除去するが, 静穏なほど除去すべき成分が小さいので得られる津波の精度は高い。そこで, 津波来襲時の波浪条件を確認しておく。

図-3.8は, 津波発生の6時間ほど前の2011年3月11日9時と, 津波が減衰しつつある翌12日9時について, 日本周辺の天気図を示す。この間は, 北海道の北東に低気圧, 九州ないし四国の周辺に高気圧があって, 東北地方では日本海から太平洋に風が吹く状態であった。

図-3.9は, 岩手南部沖 GPS 波浪計, 釜石港と潮岬の沿岸波浪計を例に, 津波発生前から概ね終息するまでの3日間の有義波を示す。岩手南部沖 GPS 波浪計と釜石港の沿岸波浪計は途中から欠測した。この図から, 三陸沿岸のリアス海岸の外側でも有義波高は概ね 1m 以下であ

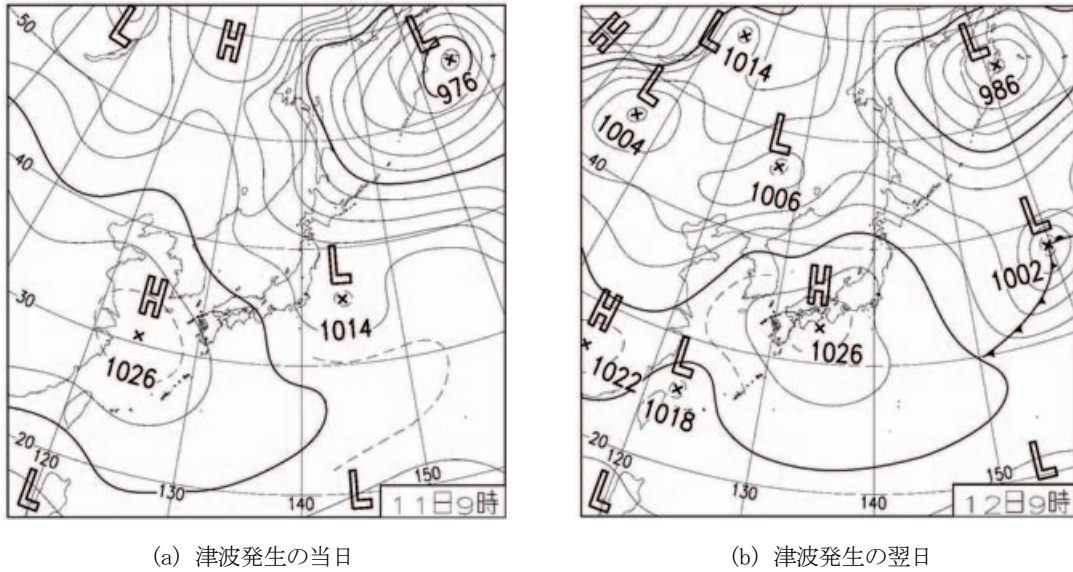


図-3.8 津波発生前後の天気図 (<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2011/201103.pdf>)

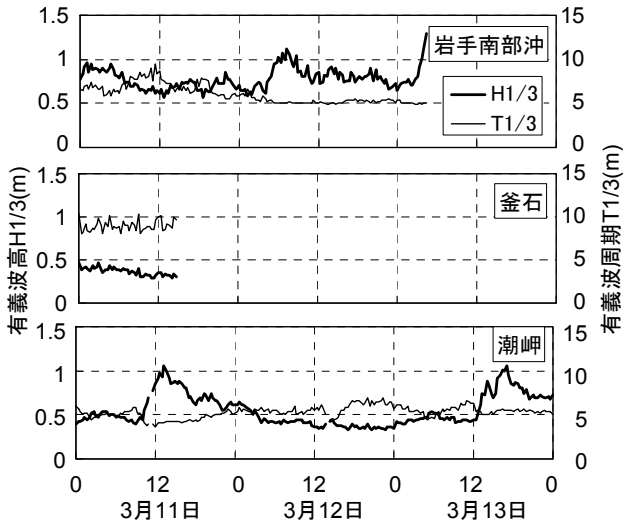


図-3.9 津波発生前後の有義波の経時変化

り、釜石港のようにリアス地形によって波浪が遮蔽されやすいところでは0.5m以下と、静穏な状況であったことが分かる。

図-3.10 は津波発生時刻に近い、3月11日14時の日本各地の有義波の分布を示したものである。NOWPHASの一部の波浪観測地点では毎偶数時のみの観測をしているため、津波発生になるべく近い14時を選んだ。この図に「14時」と記してある地点が毎偶数時の正時に観測を実施している地点である。「14時0分」と記してある地点は、連続観測を実施しており、20分毎の有義波の値がある。この図によると、北海道～沖縄地方の太平洋沿岸の有義波高は、静岡御前崎沖 GPS 波浪計が2m程度であるのを除くと、ほとんどの地点で1m以下と、静穏であっ

た。有義波周期は、岩手県から福島県にかけて8s程度であるが、その他は4s程度と短かった。日本海沿岸の有義波高は1～2mであり、太平洋沿岸に比べて高かった。この程度の有義波は過去の津波の来襲時にも観測されており、津波解析において大きな支障はない。

3.5 津波波形の基本的な処理

前節 3.1～3.3 の要領で得た潮位偏差の波形から、図-3.11 に示す既報（最近では、河合ら、2010c）と同じ要領で、①押しの第1波の到達時刻、②正の最大偏差（最大波）とその起時、③負の最大偏差とその起時、を求めた。具体的には、押しの第1波の到達時刻は、地震発生前の時間帯（3月11日8時30分～14時30分）で偏差の標準偏差を求め、到達時刻と考えられる時刻の前後で潮位偏差がこれの5倍を超えるゼロアップクロス波を押しの第1波の到達時刻の候補とした。しかしながら実際にこのアルゴリズムで判定すると、津波の振幅が小さな地点では第1波を適切に識別できなかった。このような地点に対しては、到達時刻と思われる前の1時間ほどの潮位偏差の平均値が0になるように潮位偏差を微調整してゼロアップクロスをしたり、隣接地点との相関性も見ながら波形を目読して、第1波の修正を試みた。

こうして得た全地点の潮位偏差の波形、押しの第1波、正・負の最大偏差を巻末の付録 A-1～12、B-1～11 に示す。図中の↓印が押しの第1波、▽印が正の最大偏差（最大波）、△印が負の最大偏差を示す。

また、各諸元を表-3.5にも示す。地点 Code に G, W, T が付いているものがそれぞれ、GPS 波浪計、沿岸波浪

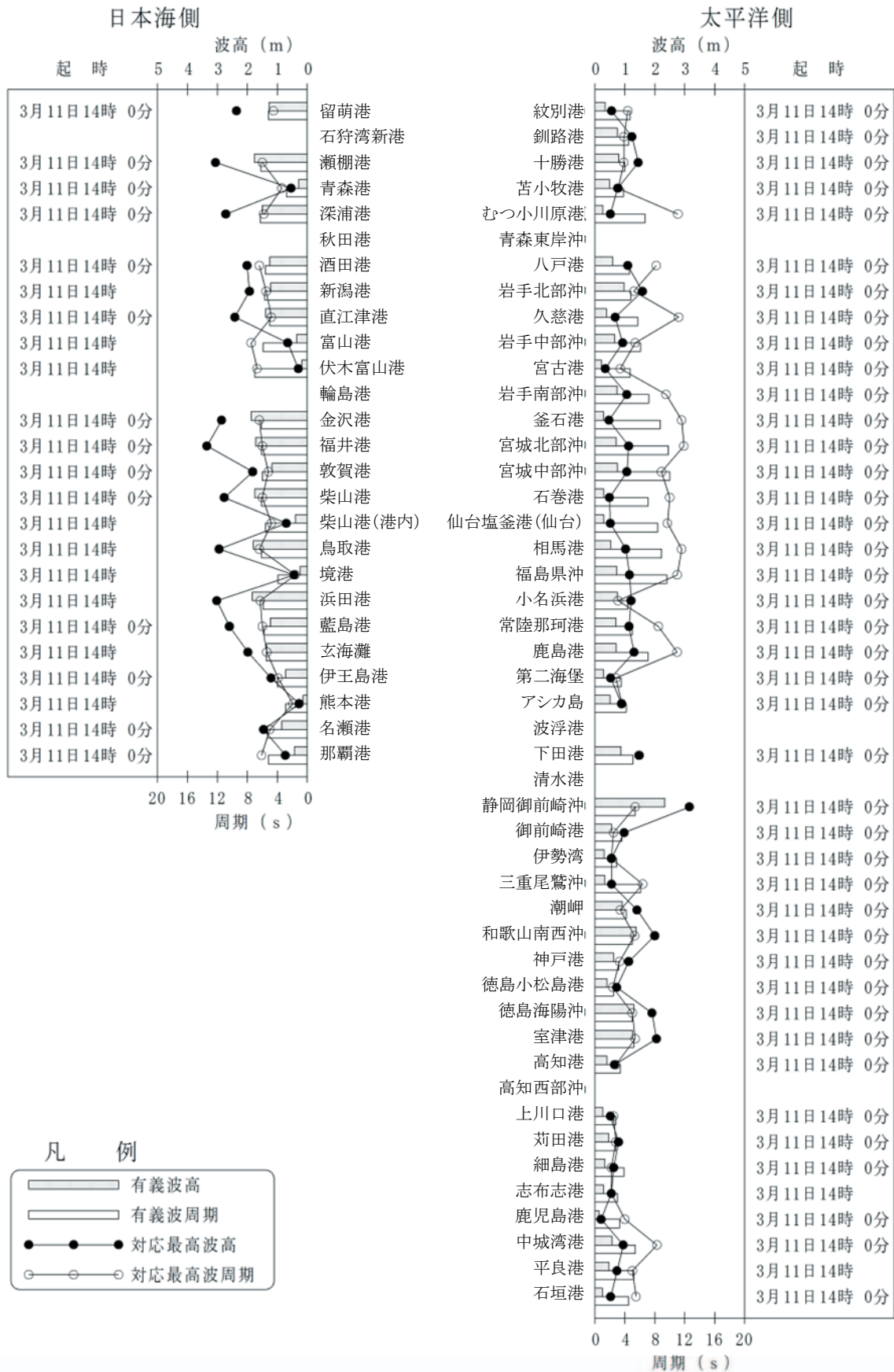
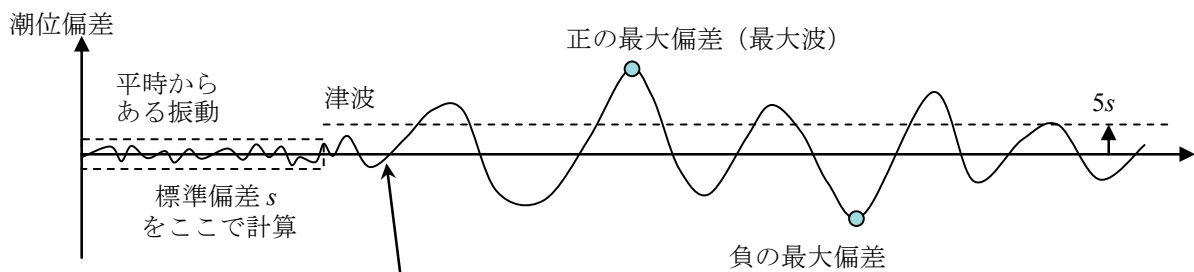


図-3.10 津波発生前の全国各地の有義波

計、潮位計である。押しの第1波については、識別の難しいものに「-」を記した。正・負の最大偏差については、津波の到達時刻から欠測して最大偏差を捉えていない可能性の高いものを「-」とし、津波の途中から欠測して最大偏差を捉えていない可能性のあるものを斜字体で区別した。岩手北部沖～福島県沖のGPS波浪計については、観測値が陸上局の沈下の影響を受けていると考えられ、補正前と補正後の値を併記した。補正の詳細については4.1節で後述する。仙台塩釜港の沿岸波浪計も影響を受けていると思われるが、補正すべき量が不明なため、補正前の値のみを記した。

なお、気象庁による「第1波」の解析では、引き波または押し波の先に始まった時刻を求めている。これに対

して本報では、引き波から始まった地点に対しても、判読のしやすい「押しの第1波」を求めた。また、本報で採用した潮位偏差の算出方法には、天文潮位の算出や気圧補正などの処理において気象庁と若干の違いがある。これらの理由により、本報で記す「押しの第1波」の時刻は、引き波で始まった北海道～東北地方の太平洋沿岸を中心とする地点では気象庁の「第1波」より数十分遅く、押し波で始まったそれ以外の地点でも数分以上の前後がしばしば生じる。本報の「正の最大偏差」は気象庁の「最大波」と同じ定義であるが、やはり潮位偏差の微妙な違いに影響される。以上の点をあらかじめ、ご了承ください。津波の全体的な傾向をつかむための目安としてご参照いただきたい。



本報における「押しの第1波」の到達時刻（最初のゼロアップクロス点）

図-3.11 津波の波形記録の整理方法

表-3.5 押しの第1波と正負の最大偏差 (1/3)

No.	地点名	地点 Code	押しの第1波	正の最大偏差 (最大波)		負の最大偏差		備考
1	杓形港	614T	-	0.11m	11日 23時 41分	-0.10m	12日 09時 05分	
2	留萌港	604W	-	0.18m	12日 09時 23分	-0.12m	12日 08時 57分	
3	留萌港	604T	-	0.23m	12日 05時 34分	-0.22m	12日 02時 53分	
4	石狩湾新港	611T	-	0.29m	12日 01時 07分	-0.30m	12日 01時 50分	
5	小樽港	610T	-	0.31m	12日 09時 59分	-0.34m	12日 06時 07分	
6	瀬棚港	603W	-	0.09m	12日 23時 57分	-0.07m	12日 06時 40分	
7	瀬棚港	603T	-	0.23m	11日 19時 15分	-0.14m	12日 05時 45分	
8	岩内港	619T	-	0.25m	12日 02時 22分	-0.25m	12日 02時 35分	
9	江差港	620T	-	0.15m	11日 21時 28分	-0.13m	11日 21時 53分	
10	奥尻港	621T	-	0.15m	11日 15時 29分	-0.15m	11日 15時 25分	
11	青森港	220W	-	-	-	-	-	初期が欠測
12	青森港	220T	-	-	-	-	-	初期が欠測
13	深浦港	201W	-	-	-	-	-	初期が欠測
14	酒田港	102W	-	-	-	-	-	初期が欠測
15	酒田港	102T	-	-	-	-	-	初期が欠測
16	新潟港東	121T	11日 18時 09分	0.25m	12日 02時 54分	-0.20m	12日 03時 16分	
17	新潟港西	120T	11日 18時 06分	0.19m	12日 04時 56分	-0.17m	12日 01時 27分	
18	直江津港	114W	11日 21時 07分	0.08m	12日 00時 29分	-0.08m	12日 08時 45分	
19	伏木富山港新湊	119T	11日 21時 22分	0.09m	12日 04時 49分	-0.09m	12日 03時 16分	
20	伏木富山港伏木	113T	11日 21時 30分	0.08m	12日 20時 29分	-0.08m	12日 14時 05分	
21	七尾港	118T	-	0.18m	11日 20時 48分	-0.18m	11日 19時 30分	
22	金沢港	106W	11日 21時 53分	0.10m	12日 07時 57分	-0.09m	12日 02時 35分	
23	金沢港	106T	11日 21時 57分	0.19m	12日 12時 56分	-0.22m	12日 02時 43分	
24	福井港	117W	-	0.05m	12日 10時 20分	-0.08m	12日 11時 54分	
25	敦賀港	122W	-	0.11m	12日 08時 18分	-0.09m	12日 06時 50分	

表-3.5 押し第1波と正負の最大偏差 (2/3)

No.	地点名	地点 Code	押し第1波	正の最大偏差 (最大波)		負の最大偏差		備考
				最大偏差	到達時刻	最大偏差	到達時刻	
26	敦賀港	122T	—	0.26m	12日06時21分	-0.24m	12日05時46分	
27	柴山港	310W	—	0.09m	12日00時02分	-0.10m	12日01時35分	
28	鳥取港	304W	—	0.06m	12日07時52分	-0.07m	12日14時50分	
29	北九州港門司	435T	11日20時13分	0.32m	11日23時11分	-0.21m	11日21時54分	
30	下関港弟子待	430T	11日20時16分	0.27m	11日23時09分	-0.18m	12日10時39分	
31	下関港田ノ首	431T	11日20時21分	0.24m	11日23時11分	-0.17m	12日12時48分	
32	下関港大山の鼻	432T	11日20時22分	0.22m	12日03時28分	-0.17m	12日00時45分	
33	北九州港砂津	437T	11日20時21分	0.23m	12日03時29分	-0.19m	12日00時43分	
34	北九州港日明	436T	11日20時22分	0.20m	12日03時22分	-0.18m	12日00時42分	
35	南風泊港	433T	11日20時34分	0.12m	12日03時25分	-0.11m	12日00時37分	
36	玄界灘	405W	—	0.10m	11日23時34分	-0.09m	12日20時02分	
37	唐津港	414T	11日20時50分	0.18m	11日23時17分	-0.15m	12日03時56分	
38	平戸瀬戸	423T	11日19時42分	0.32m	11日22時00分	-0.27m	11日21時26分	
39	郷ノ浦港	424T	—	0.11m	12日05時13分	-0.14m	12日04時45分	
40	長崎港皇后	418T	11日19時01分	0.59m	11日21時23分	-0.41m	11日21時50分	
42	伊王島港	404W	11日18時54分	0.24m	11日21時19分	-0.19m	11日21時52分	
43	熊本港	420T	11日19時53分	0.14m	11日22時32分	-0.15m	11日23時26分	
44	本渡瀬戸	416T	11日19時17分	0.70m	11日21時05分	-0.81m	11日20時47分	
45	八代港	415T	11日20時00分	0.22m	12日20時17分	-0.27m	11日23時07分	
46	名瀬港	402W	11日17時29分	0.25m	11日17時40分	-0.18m	11日19時04分	
47	那覇港	702W	11日18時05分	0.32m	11日21時10分	-0.36m	11日20時54分	
48	枝幸港	615T	11日17時47分	0.42m	12日05時04分	-0.41m	12日05時26分	
49	紋別港	609W	—	0.17m	11日22時48分	-0.16m	11日22時23分	
50	紋別港	609T	—	—	—	—	—	初期が欠測
51	根室港	617T	11日16時12分	0.68m	12日00時03分	-0.51m	12日07時03分	
52	霧多布港	618T	11日15時42分	2.63m	11日22時20分	-2.17m	12日00時29分	
53	釧路港	613W	11日15時27分	1.29m	11日15時42分	-1.01m	11日23時13分	
54	十勝港	607W	11日15時35分	2.47m	11日17時18分	-2.38m	11日17時42分	
55	十勝港	607T	11日15時44分	2.79m	11日15時58分	-1.67m	11日17時09分	途中から欠測
56	苫小牧港	602W	11日15時52分	1.41m	11日16時04分	-1.93m	11日16時59分	
57	苫小牧港東	623T	11日16時05分	2.46m	11日16時17分	-2.83m	11日16時54分	途中から欠測
58	苫小牧港西	624T	11日16時02分	2.05m	11日17時31分	-2.46m	11日17時02分	
59	白老港	625T	11日15時54分	1.69m	11日16時02分	-1.91m	11日16時58分	
60	室蘭港	626T	11日16時13分	0.98m	11日20時06分	-1.09m	11日21時40分	
61	森港	622T	11日16時16分	1.56m	11日19時36分	-0.95m	11日18時42分	
62	むつ小川原港	202W	11日15時31分	2.46m	11日16時18分	-2.78m	11日17時26分	
63	むつ小川原港	202T	11日15時37分	3.43m	11日15時45分	-3.68m	11日17時30分	
64	八戸港	203W	11日15時39分	3.32m	11日15時46分	-0.55m	11日15時37分	途中から欠測
65	八戸港	203T	11日15時45分	4.55m	11日16時52分	-2.98m	11日16時39分	途中から欠測
66	岩手北部沖	807G	11日15時17分	4.02m	11日15時19分	-2.79m	11日15時53分	
67	久慈港	219W	11日15時27分	5.39m	11日15時28分	-0.65m	11日15時21分	途中から欠測
68	久慈港	219T	11日15時34分	2.39m	11日15時36分	-1.37m	11日15時30分	途中から欠測
69	岩手中部沖	804G	—	6.07m (6.30m)	11日15時12分	-2.00m (-1.77m)	11日15時28分	観測基準面の沈下0.23m
70	岩手南部沖	802G	—	6.13m (6.67m)	11日15時12分	-3.54m (-3.00m)	11日15時32分	観測基準面の沈下0.54m
71	宮城北部沖	803G	—	5.02m (5.68m)	11日15時14分	-3.90m (-3.24m)	11日15時19分	観測基準面の沈下0.66m
72	宮城中部沖	801G	—	4.83m (5.78m)	11日15時16分	-6.00m (-5.05m)	11日15時23分	観測基準面の沈下0.95m
73	仙台塩釜港	205W	—	— (6.65m)	11日15時49分	— (-0.90m)	11日15時31分	観測基準面の沈下量不明
74	福島県沖	806G	—	2.14m (2.62m)	11日15時16分	-1.03m (-0.65m)	11日15時56分	観測基準面の沈下0.38m
75	アシカ島	901W	11日15時32分	0.93m	11日15時53分	-1.17m	11日16時26分	
76	久里浜	901T	11日15時38分	0.89m	11日17時11分	-0.86m	11日16時34分	部分的に欠測
77	第二海堡	217W	11日15時45分	1.27m	11日17時08分	-1.16m	11日16時38分	
78	第二海堡	217T	11日15時44分	0.99m	11日17時11分	-0.91m	11日16時41分	
79	京浜港(横浜)	221T	11日16時10分	1.62m	11日17時42分	-1.39m	11日17時10分	

(注) 岩手中部沖～福島県沖の正・負の最大偏差の値は、上段が地盤沈下の補正後、下段のカッコ書きが補正前の値である。仙台塩釜港の沿岸波浪計は補正前の値のみ記した。

表-3.5 押しの第1波と正負の最大偏差 (3/3)

No.	地点名	地点 Code	押しの第1波	正の最大偏差 (最大波)		負の最大偏差		備考
80	下田港	504W	11日15時36分	0.93m	11日15時51分	-0.56m	12日00時08分	
81	下田港	504T	11日15時42分	0.82m	11日22時56分	-0.59m	12日21時43分	
82	静岡御前崎沖	812G	11日14時50分	0.42m	11日16時01分	-0.24m	11日16時53分	
83	御前崎港	501W	11日15時49分	0.61m	11日16時09分	-0.42m	11日16時47分	
84	三河港	507T	11日17時18分	0.59m	11日20時16分	-0.83m	11日21時01分	
85	三重尾鷲沖	811G	11日16時07分	0.48m	11日16時26分	-0.43m	11日19時25分	
86	潮岬	301W	11日16時10分	0.37m	11日16時29分	-0.26m	11日19時37分	
87	和歌山南西沖	813G	11日16時22分	0.33m	11日16時38分	-0.32m	11日17時22分	
88	徳島海陽沖	815G	11日16時27分	0.36m	11日16時44分	-0.30m	11日19時52分	
89	徳島小松島港	320W	11日17時00分	0.36m	11日17時19分	-0.35m	11日20時38分	
90	徳島小松島港	320T	11日17時09分	0.68m	11日19時50分	-0.84m	11日20時44分	
91	室津港	307W	11日16時28分	0.49m	11日16時50分	-0.51m	12日00時15分	
92	高知港	309W	11日16時47分	0.98m	11日18時34分	-0.91m	11日17時41分	
93	上川口港	308W	11日16時47分	1.17m	12日01時44分	-0.97m	11日19時10分	
94	須崎港	316T	11日17時01分	2.65m	11日21時00分	-1.90m	11日20時43分	
95	与島港	315T	11日19時50分	0.10m	11日20時09分	-0.10m	12日01時24分	
96	青木港	318T	—	0.07m	12日00時11分	-0.06m	12日03時18分	
97	多度津港	319T	11日20時10分	0.09m	12日00時15分	-0.09m	12日03時07分	
98	来島航路	317T	11日19時31分	0.11m	12日00時14分	-0.10m	11日23時19分	
99	三田尻中関港	413T	11日18時49分	0.17m	11日19時06分	-0.19m	11日22時12分	
100	宇部港	412T	11日19時18分	0.14m	12日07時16分	-0.15m	12日07時48分	
101	下関港長府	429T	11日20時05分	0.31m	11日23時00分	-0.26m	11日21時56分	
102	北九州港青浜	434T	11日20時04分	0.25m	11日23時04分	-0.22m	11日21時58分	
103	荻田港	409W	11日19時45分	0.10m	12日04時22分	-0.11m	11日21時24分	
104	荻田港	409T	11日19時45分	0.15m	12日04時26分	-0.13m	11日21時34分	
105	別府港	438T	11日18時01分	0.54m	11日20時32分	-0.58m	11日21時25分	
106	細島港	411W	11日16時56分	0.54m	11日17時18分	-0.38m	12日14時58分	
107	宮崎港	419T	11日17時15分	1.60m	12日03時33分	-1.81m	12日02時06分	
108	志布志港	407T	11日17時14分	1.10m	11日17時39分	-1.14m	12日04時39分	
109	鹿児島港	408W	11日18時13分	0.24m	12日00時52分	-0.28m	11日21時15分	
110	中城湾港	701W	11日17時38分	0.27m	11日17時50分	-0.19m	11日23時14分	
111	中城湾港	701T	11日18時02分	0.65m	11日18時17分	-0.71m	11日18時39分	
112	平良港	703W	11日18時34分	0.26m	11日19時30分	-0.30m	11日19時09分	
113	平良港	703T	11日18時39分	0.64m	11日19時35分	-0.65m	11日19時15分	
114	石垣港	705W	11日18時49分	0.29m	11日19時41分	-0.22m	11日19時24分	

4. GPS波浪計で観測した太平洋沿岸の津波

4.1 東北～四国地方沿岸の概況

(1) 東北地方で観測した津波波形

図-4.1 は東北～四国地方の太平洋沿岸の GPS 波浪計で観測した津波波形を示す。詳細については(3)項で述べるが、この波形は陸上局の地盤沈下の影響を除去する前

の観測値である。

この図によると、岩手北部沖～宮城中部沖の 5 基では、0.17～0.51m の引き波から始まり、これに続く峯が最大波となった。一方、福島県沖では、少なくとも明瞭な引き波はなく、押し波から始まった。これら東北地方の 6 基には、14 時 46 分の地震発生から 26～33 分後の 15 時 12 分～15 時 19 分に最大波の峯が通過し、その時刻は岩手中部沖と岩手南部沖で最も早かった。最大波の高さは

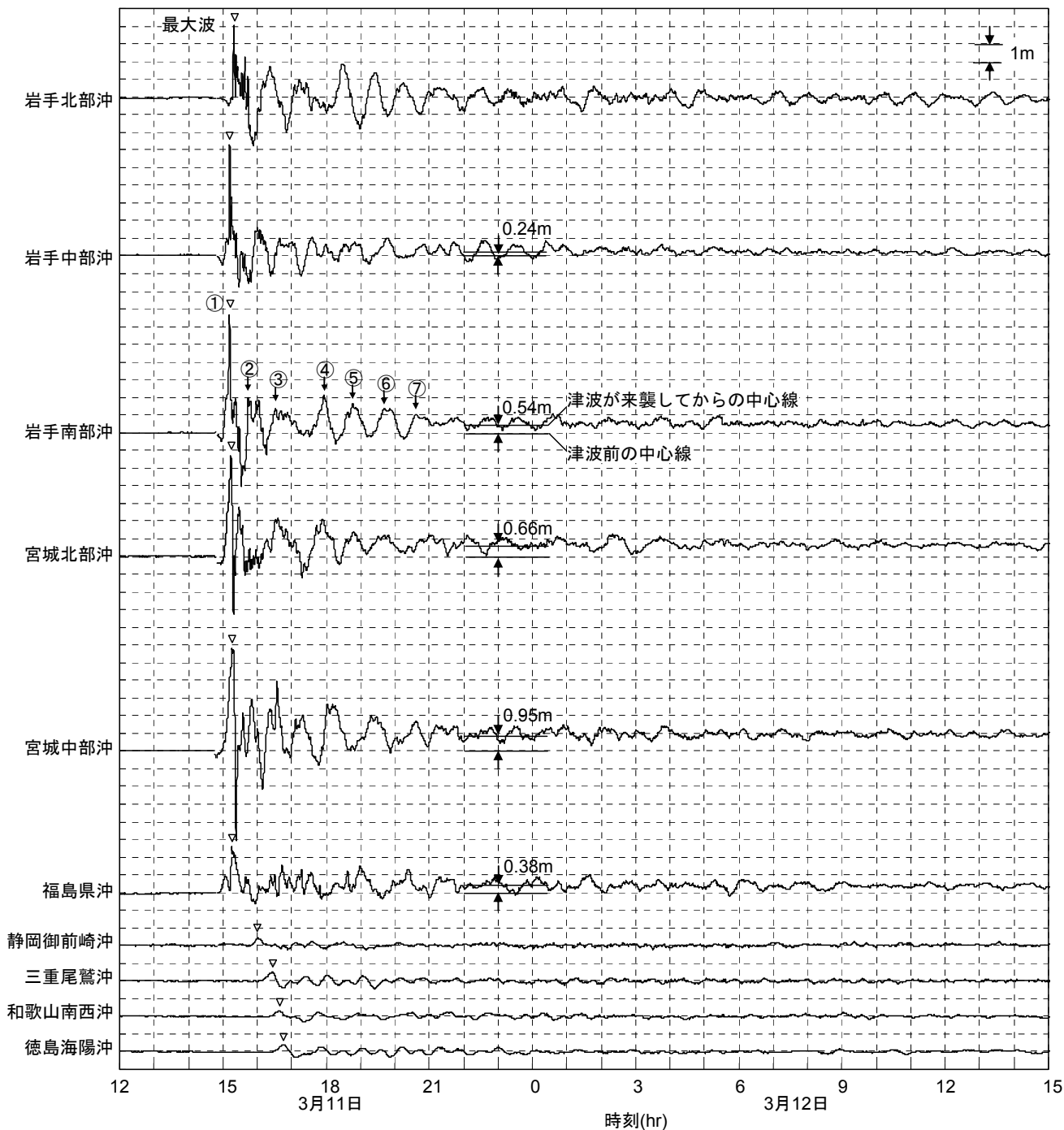


図-4.1 全国の GPS 波浪計で捉えた津波波形

2.62～6.67m であり、最高は岩手南部沖であった。宮城中部沖では最大波に続いて 5.05m の引き波が生じた。

岩手北部沖～宮城中部沖の 5 基では、地震発生から 21 時までの約 6 時間に、7 波程度の比較的高い波が続いた。ただし、この波形だけで 2 波目以降が、沖合の波源から来た波、三陸海岸で反射した波、三陸海岸沿って伝わるにエッジ波、の何れであるかを見分けることは難しい。岩手南部沖の波形を例に見ると、第 1 波の峯 (図の①) が突出して高く、第 2～7 波の峯 (図の②～⑦) は徐々に低くなった。第 1～3 波は周期も峯の形も不規則であるが、第 4～7 波は周期が 50 分程度で似たような形状の波が繰り返した。岩手北部沖と宮城中部沖でも、18 時から 21 時にかけて、似たような形状の波が 50 分程度の周期で繰り返したことを確認できる。

(2) 中部～四国地方で観測した津波波形

静岡御前崎沖～徳島海陽沖の 4 基には、図-4.1 に示すように、東寄りの地点から順に第 1 波が到達し、その峯が最大波となった。その高さは 0.33～0.48m、起時は地震から 1 時間 15 分～1 時間 58 分後の 16 時 01 分～16 時 44 分であった。これら 4 基で最も波源に近い静岡御前崎沖では、第 1 波の高さが第 2 波以降と比べて突出している。しかし、波源から遠い和歌山南西沖や徳島海陽沖では、同じくらいの高さの波が数波続いた。

(3) 岩手中部沖～福島県沖における地盤沈下

図-4.1 の波形を見ると、地震発生前である図の左端で

はゼロ線をはさんだ小刻みな上下動になっている。ところが、岩手中部沖～福島県沖の 5 基では、津波が発生して振幅が小さくなった頃には既に、上下動の中心が高くなっている。その変化量を津波発生翌日の 24 時間の潮位偏差の平均値として求めると、0.24～0.95m であった。

国土地理院(2011)によると、地震によって東北地方を中心に地殻変動が生じ、宮城中部沖に近い牡鹿では 1.20m という沈下量を記録した。GPS 波浪計では、あらかじめ陸上局の絶対的な高度を計測しておき、常時は陸上局を基準にブイの相対的な高度を計測し、これらを合わせた高度をブイの絶対的な高度としている。したがって、図-4.1 は、途中で地震により沈下した地盤を基準に測り続けた潮位偏差の波形ということになる。

この仕組みを理解した上で、図-4.1 のうち東北地方の津波の初期の部分を拡大した図-4.2 の波形を見ると、14 時 46 分の地震の頃に、測位異常のために一時的な欠測が生じているが、先に述べた 0.24～0.95m の上昇はまだ見られない。地震時に、地殻、陸上局、海、GPS 波浪計ブイが概ね同じ量だけ沈下したとすれば、この状況を説明できる。そして、岩手南部沖の GPS 波浪計には高さ 6.67m の津波が来襲するが、この高さは沈下した座標系から見た値ということになる。やがて津波が終息すると海面は地震前の状態に戻るのに、沈下した座標系から見れば、図-4.1 で示したように、地震前より高い値に落ち着く。

一方、沈下しない座標系で見れば、潮位は地震とともに

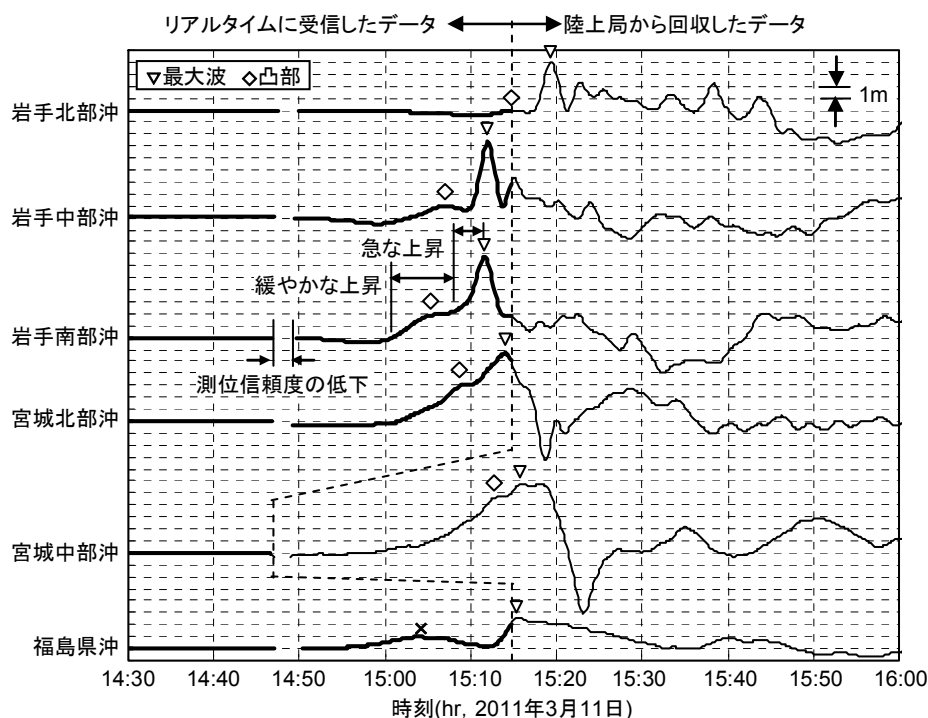


図-4.2 東北地方沿岸の GPS 波浪計で捉えた津波の初期の部分

下がった後、津波による上下動を繰り返しながら、元の高さになじんでいっただろう。陸上局の絶対的な高度の経時変化が分かれば、この座標系による波形を正確に描けた。この座標系で津波の高さを再評価すると、表-3.5 に記したように、岩手南部沖の最大波は 6.67m から 0.54m を差し引いた 6.13m、宮城中部沖での引き波（負の最大偏差）も -5.05m から -6.00m になる。福島県沖の最大波（図-4.1、4.2 の▽印）も細かく数えれば第 2 波になる。

4.2 東北地方沿岸の第 1 波かつ最大波の特徴

図-4.2 は、先にも述べたように、図-4.1 の一部を拡大したものである。縦に引いた破線の左側は、リアルタイムに web で公開され、気象庁にも伝送された部分であり、岩手中部沖、岩手南部沖、宮城北部沖では最大波を含んでいる。右側は、通信障害で受信できず、事後に陸

上局からデータを回収して描いたものである。

これら 6 基で最高の最大波を記録した岩手南部沖では、15 時 01 分から 6 分ほどで約 2 m 緩やかに、続く 15 時 07 分からの 4 分ほどでさらに 4m 以上も潮位が急上昇した。このような 2 段階の立ち上がりは岩手北部沖～宮城中部沖の 5 基で確認できる。東北地方の沖合には緩やかな峯を生み出す波源と鋭い峯を生み出す波源とがあり、GPS 波浪計には緩やかな峯が先に通過し（図の◇印）、それにやや遅れて鋭い峯が重なり、全体として非常に高くなった（図の▽印）、と推察される。緩やかな峯は南側で高く、鋭い峯は北側で高い。何れの峯の到達時刻も、岩手南部沖で最も早く、その南北で遅い。

一方、福島県沖では 2 段階の立ち上がりが明瞭ではない。宮城北部沖や宮城中部沖との並びで見ると、鋭い峯が小さくて目立たないのかも知れない。その代わり、15

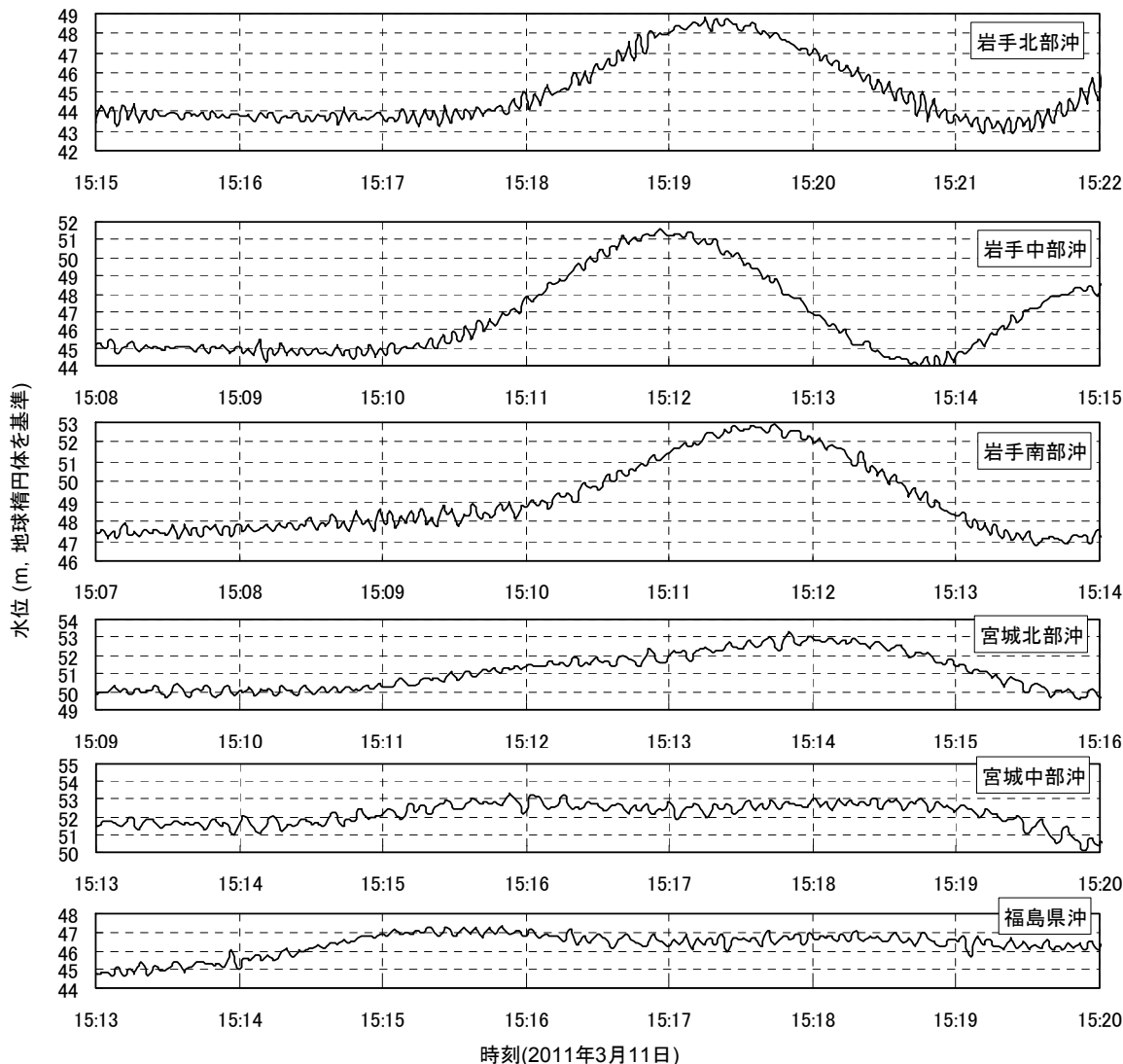


図-4.3 東北沿岸の最大波の峯の形状

時 04 分に 0.96m の峯 (図の×印) があり, この時刻は岩手南部沖の緩やかな峯 (◇印) よりもやや早い。

図-4.3 は, 東北地方の各地点の最大波の峯の付近について, 地球楕円体を基準とする毎秒の高度 (波浪や天文潮を除去する前の生データ) を描いたものである。大きく滑らかな峯を描く津波と, 周期が数秒で振幅が数十 cm の波浪の, 両方を捉えている。例えば, 岩手南部沖の設置水深は 204m であり, この水深における長波の位相速度は 45m/s, 1 分間で進む距離は 2.7km である。15 時 10 分 0 秒から 15 時 11 分 30 秒間に潮位が約 3.2m 上昇しており, この部分の勾配を求めると約 1/1260 である。鳥瞰して津波をたやすく見分けられる勾配ではない。

4.3 東北地方沿岸における津波の流れ

GPS 波浪計ブイの係留チェーンの長さは地鎖を含めて設置水深の 3 倍程度あり, ブイは天文潮や沿岸流の他, 津波によっても振れ回る。ブイは水粒子と一体になって動くことはできないが, ブイの軌跡は津波の流れを定性的に捉える手がかりにはなるだろう。

図-4.4 は, 岩手南部沖を例に, ブイの緯度・経度方向の位置を, 3 月 11 日 14 時を原点として示したものである。この図の潮位とは, 地球楕円体を基準とした毎秒の高度を平滑化したもの (天文潮を含む) である。第 1 波の峯のときに, ブイは西へ約 70m, 北へ約 40m 漂流した。その後も潮位と経度方向 (概ね岸沖方向) の位置の経時変化はよく対応している。

図-4.5 は, 東北地方の 6 基について, 図-4.4 と同じ時間帯について, 3 月 11 日 14 時のブイの位置を原点に, 平面的な軌跡を描いたものである。○印は 15 時 12 分～15 時 16 分の第 1 波の峯のピークのときの位置であり, 岩手北部沖では西, 岩手中部沖～宮城中部沖の 4 地点で

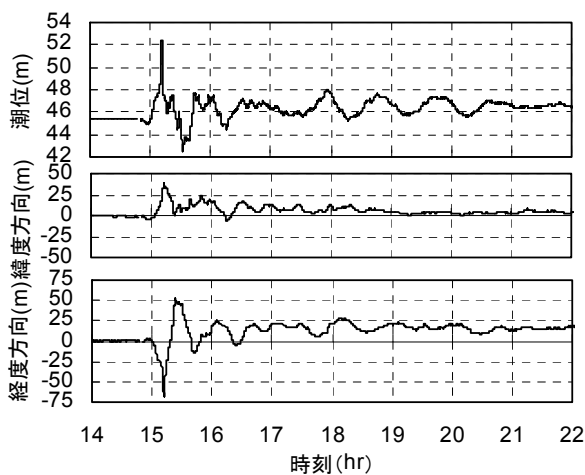


図-4.4 岩手南部沖 GPS 波浪計での潮位とブイの位置

は西北西, すなわち概ね岸向きにブイが漂流した。波高が 12m (片振幅で 6m), 周期が 40 分の長波の水粒子は, 水深 200m において, 水平方向に約 500m の振幅で移動するので, ブイはこの 1/5 程度の動きをしたことになる。福島県沖でも北西に漂流したが, この移動距離は普段の天文潮や沿岸流でも生じる範囲である。◇印は○印に続く谷のときの位置であり, 岩手北部沖～宮城北部沖の 4

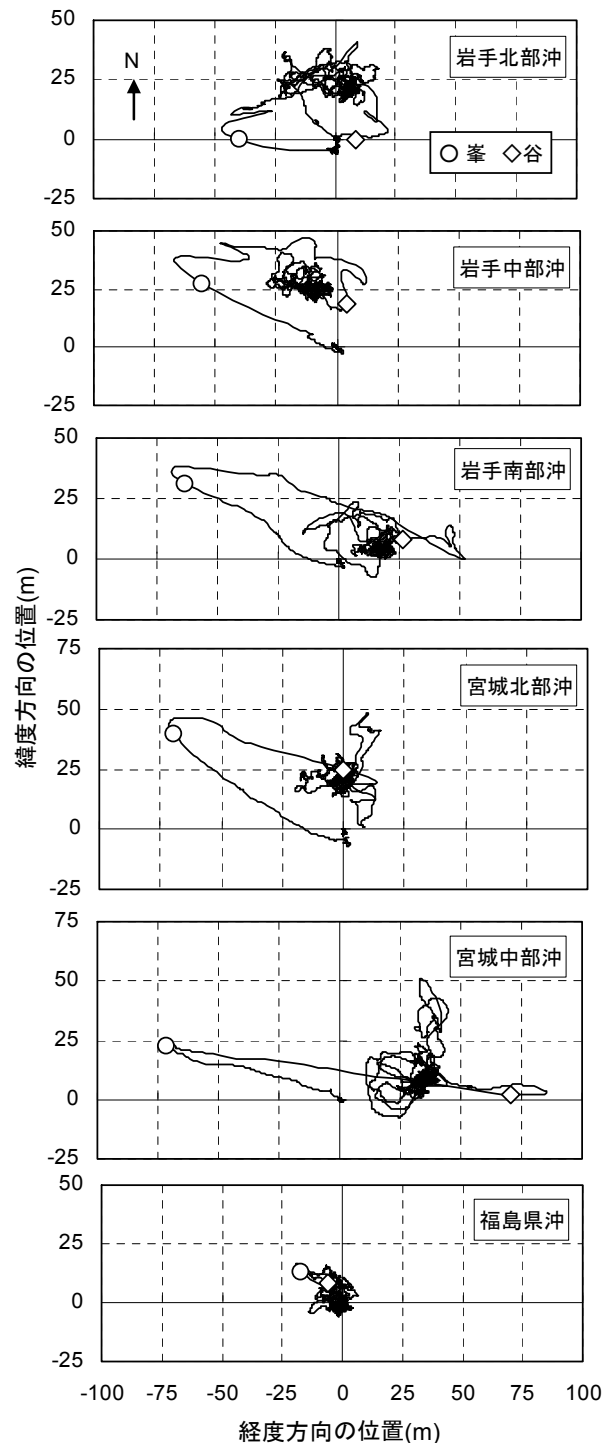


図-4.5 津波によるブイの水平方向の挙動

地点では津波前の位置の近くまで戻り、宮城中部沖では東へ漂流して峯のときと対称に近い位置に到達した。

図-4.6 は、岩手南部沖を例に、津波来襲前の平時のブイの動きを示したものである。3月9日0時の位置を原点として描いている。ブイの動きは、天文潮だけでなく、海流や風の影響も受ける。そのため、単純に満潮や干潮

と対応するとは限らず、複雑な動きをしている。ただし、振れ周りの範囲は、図-4.5 の岩手北部沖～宮城中部沖と比べて非常に狭い。

4.4 東北地方沿岸における過去の津波との比較

東北地方沿岸の GPS 波浪計は、2011 年 3 月 11 日以前にも津波を捉えている。

(1) 2011年3月9日の津波

2011 年 3 月 9 日 11 時 45 分に三陸沖で $M_w7.2$ の地震が発生した。この地震は3月11日の前震と考えられている。

図-4.7 は、この地震で発生した津波の波形であり、地震発生から 11～16 分後の 11 時 56 分～12 時 01 分に岩手中部沖～宮城中部沖の 4 基に第 1 波が到達した。その峯が 12 時 06 分～12 時 10 分に最大波となり、最も高い宮城北部沖では 0.16m を記録した。3 月 11 日の津波と比べて、津波の波高は桁違いに小さく、周期も 10～20 分と短く、概ね終息するまでの時間も半日未満と短かった。津波の規模が小さかったのは、断層の規模が小さいかったためと考えられる。一方、岩手北部沖と福島県沖では津波の振幅が小さいために、到達時刻の識別は難しい。

図-4.8 は、津波前の時間帯（3月9日6時20分～12時01分15秒の5s間隔のデータ）と津波後の時間帯（12時20分～18時01分15秒）のスペクトルであり、全地点で周期5～30分の成分が増幅したことを確認できる。

(2) 2010年チリ津波

2010 年 2 月 27 日（日本時間）にチリ中部で発生した $M_w8.8$ の地震による津波は、当時東北～四国地方の沿岸に配置されていた 11 基全てで観測された(河合ら, 2010a,

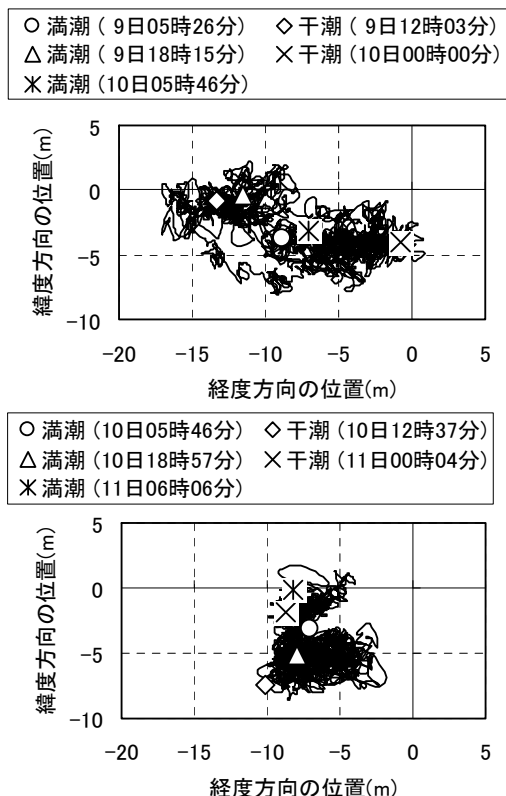


図-4.6 平時のブイの動き

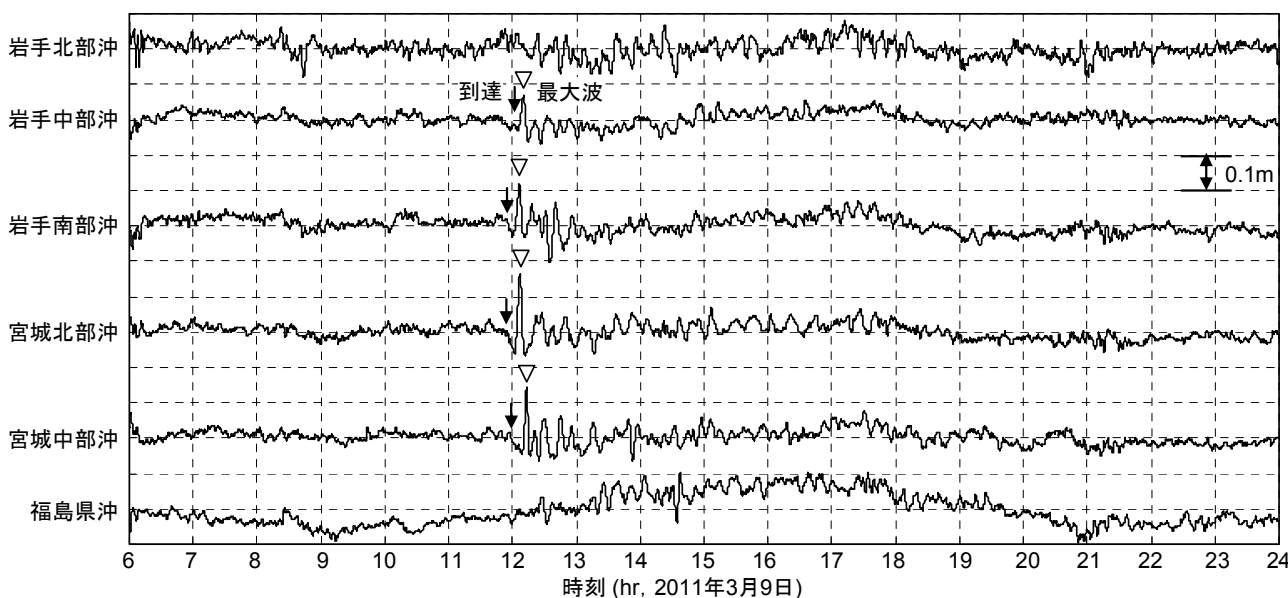


図-4.7 2011 年 3 月 9 日の地震による津波

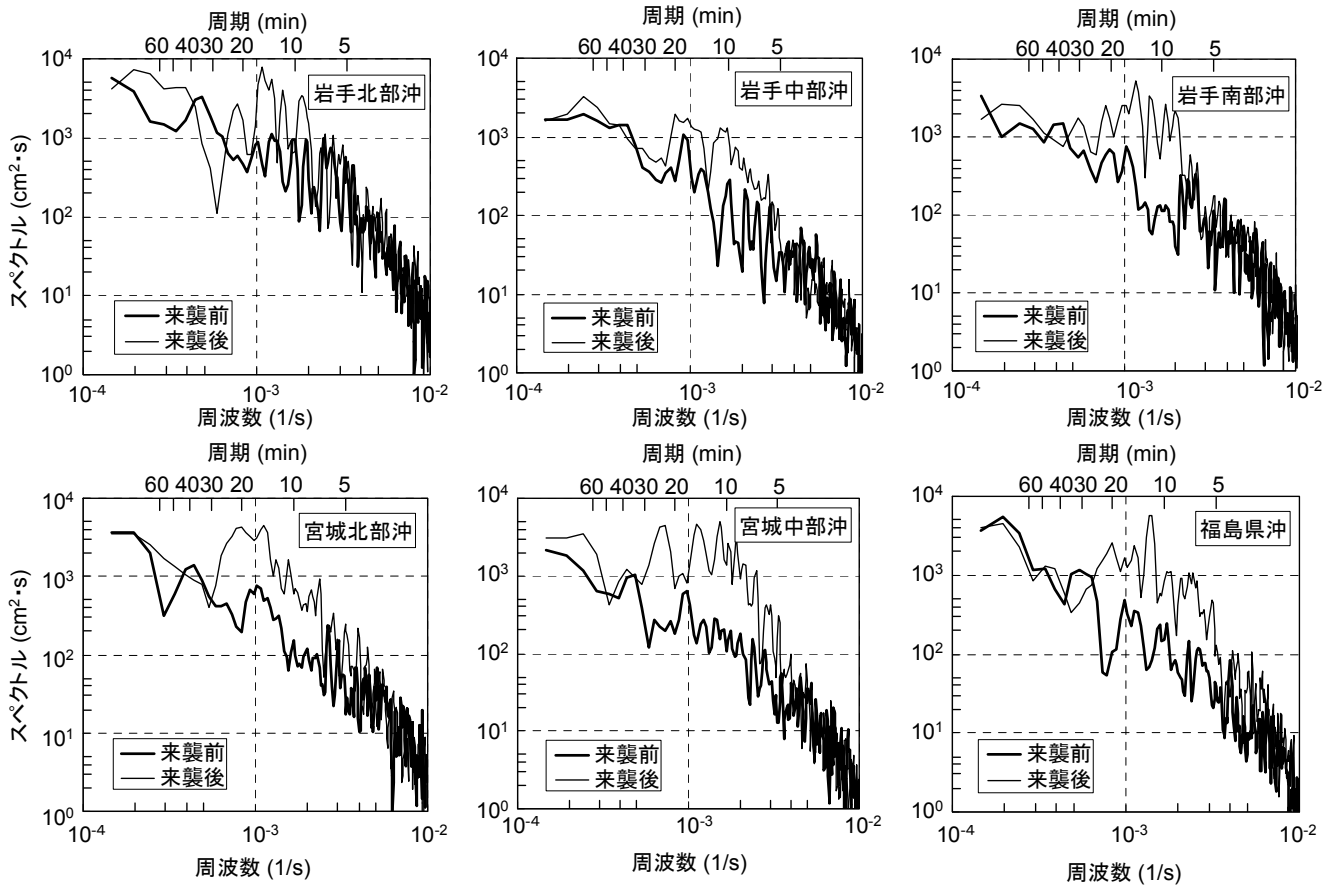


図-4.8 津波の来襲前後におけるスペクトルの変化

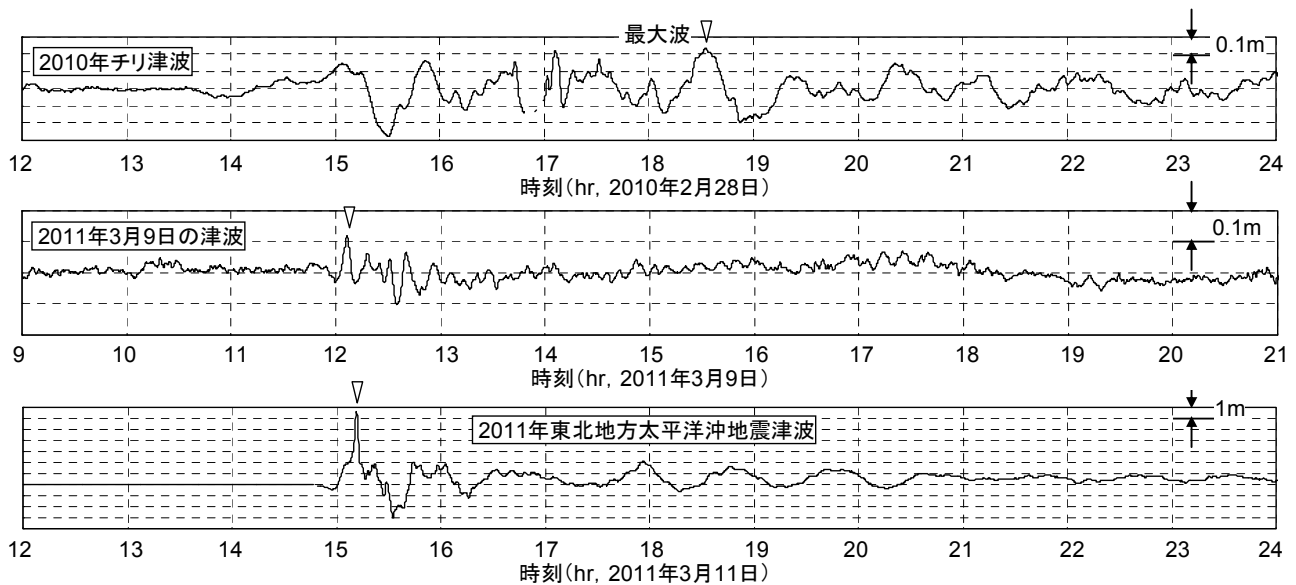


図-4.9 岩手南部沖 GPS 波浪計が捉えたこれまでの津波

2010b, 2010c ; 宮田ら, 2010 ; Kawai et al., 2011).

岩手南部沖を例に, この津波の波形を図-4.9 に示す。2010年のチリ津波は, 第5波の0.24mが最大波であり, その高さは2010年東北地方太平洋沖地震津波 ($M_w 9.0$)

に比べて桁違いに低い。ただし, 大規模な断層を伴う地震で津波の周期が1時間程度と長いという共通点はある。

5. 沿岸波浪計・潮位計で観測した日本各地の津波

5.1 東北地方の太平洋沿岸

図-5.1 は、東北地方の太平洋沿岸で津波を捉えた全ての沿岸波浪計と潮位計に加え、これらに近接する岩手北部沖（久慈沖）と宮城中部沖（金華山沖）の GPS 波浪計の波形を示したものである。むつ小川原港では沿岸波浪計と潮位計の両方で津波の全容を捉え、八戸港と久慈港では沿岸波浪計と潮位計、仙台塩釜港（仙台）では沿岸波浪計が、それぞれ津波の初期の部分のみを捉えた。それ以降の時間帯は、あまりに高い津波で観測装置が損傷し、データを回収できなかった。

沿岸波浪計と潮位計の波形が途中で切れているために正確な比較はできないが、いくつかの GPS 波浪計、沿岸波浪計、潮位計の組み合わせにおいて、津波が沖側から順に到達し、津波の振幅が岸側で大きくなったことを確認できる。以下に各港の状況を記す。

なお、4.1 節で述べたように、東北地方では顕著な地

盤沈下が生じた。八戸港、久慈港、仙台塩釜港（仙台）の沿岸波浪計や潮位計は、途中でデータが途切れたため、地盤沈下の影響の有無を確認できない。GPS 波浪計では岩手中部沖（宮古沖）から福島県沖（小名浜沖）にかけて地盤沈下の影響が顕著に現れており、仙台塩釜港の沿岸波浪計が最も大きな影響を受けていると考えられる。

(1) むつ小川原港

むつ小川原港では、図-5.1 に示すように、沿岸波浪計と潮位計の両方が切れ目なく津波を捉えた。

沿岸波浪計も潮位計も微弱な引きから始まった。第 1 波の峯の時刻はそれぞれ 15 時 43 分、潮位計が 15 時 45 分であり、沿岸波浪計の方がやや早かった。その後、沿岸波浪計でも潮位計でも第 4 波（17 時 20 分頃）までは、周期が 30 分程度でよく似た形状の波が続いた。この周期は後述する八戸港潮位計や岩手北部沖 GPS 波浪計の半分程度である。沿岸波浪計では第 1 波、2 波、4 波の高さがほとんど同じであり、その僅かな差によって第 2 波の 2.46m が最大波となった。潮位計では第 1 波の 3.43m が最大波である。第 5 波以降は、沿岸波浪計では周期が 50

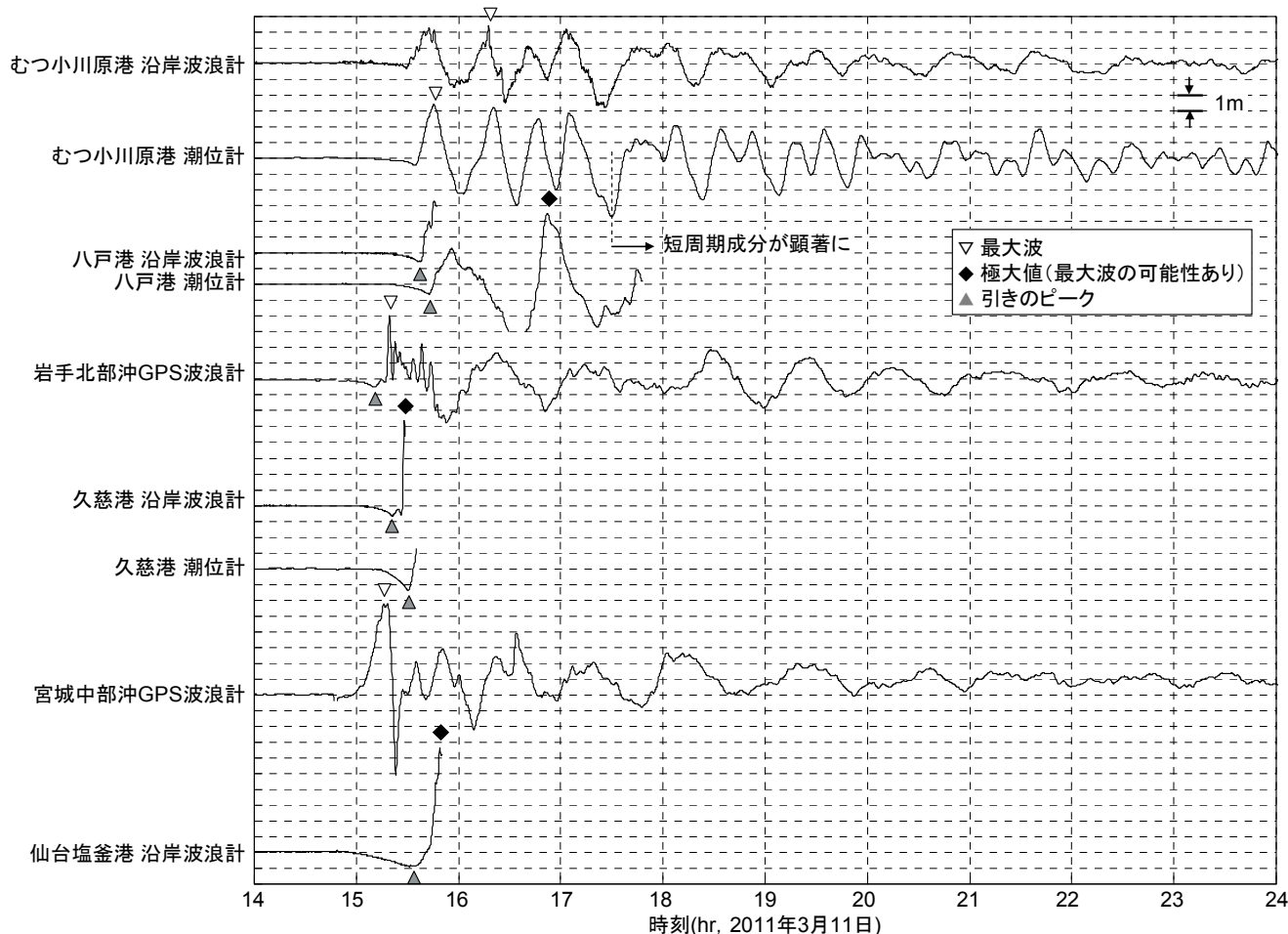


図-5.1 東北沿岸の津波波形

分程度に延び、潮位計では 20 分程度に縮まった。

(2) 八戸港

八戸港では、図-5.1 に示すように、沿岸波浪計が第 1 波の途中、潮位計が第 3 波の途中までを捉えた。潮位計の波形の下の方が部分的に切れているのは、潮位の観測値が下げ止まっていた部分を欠測扱いとしたためである。

沿岸波浪計、潮位計ともに引きから始まった。最も引いた時刻と潮位偏差は、それぞれ、15 時 37 分に -0.55m 、15 時 43 分に -0.59m であり、沿岸波浪計の方が 6 分早かった。この引き波に続いて峯が鋭く立ち上がった。潮位計が捉えた第 1 波と第 2 波の峯では 4.55m の第 2 波の方が高く、これら 2 波の周期は約 60 分であった。

(3) 久慈港

久慈港では、図-5.1 に示すように、沿岸波浪計と潮位計の両方が最初の引きとそれに続く峯の立ち上がりを捉えた。沿岸波浪計の波形は小さな凸部の直後に途切れたが、潮位計は上昇の最中に途切れた。これらの波形に第 1 波の本当のピークが含まれているかは不明である。

最も引いた時刻と潮位偏差は、岩手北部沖 GPS 波浪計で 15 時 10 分に -0.49m 、沿岸波浪計で 15 時 21 分に -0.65m 、潮位計で 15 時 30 分に -1.37m であり、岸側ほど後の時刻に大きな引きであった。GPS 波浪計の最大波は 15 時 19 分の 4.02m である。沿岸波浪計が捉えた 15 時 28 分の極大値が最大波であるとしても、その起時は GPS 波浪計より 9 分後、高さは 1.34 倍の 5.39m となる。

なお、2010 年チリ津波の第 1 波は、GPS 波浪計に到達して 14 分後に沿岸波浪計、さらに 5 分後に潮位計に到達している (河合ら, 2010c)。

(4) 仙台塩釜港 (仙台)

仙台塩釜港 (仙台) の沿岸波浪計は、図-5.1 に示すように、最初の引きとそれに続く峯の立ち上がりを捉えた。この波形が第 1 波のピークまで含んでいるかは不明である。

牡鹿半島 (金華山) の沖合にある宮城中部沖 GPS 波浪計では 15 時前から潮位の上昇が始まり、気象庁(2011e)によると牡鹿半島の鮎川では 15 時 08 分頃から始まった。そして、仙台湾の奥にある仙台塩釜港 (仙台) の沿岸波浪計では、15 時 31 分に (地盤沈下の補正なしの値として) -0.90m まで引いた後に上昇に転じた。沿岸波浪計の波形は、途切れる寸前に僅かに凸状になっている。この極大値が最大波であるかは不明であるが、宮城中部沖 GPS 波浪計の最大波から 33 分後の 15 時 49 分に、高さは 6.65m に達した。

図-5.2 は、沿岸波浪計を構成する超音波式流速計型波向計で計測した底層 (水深 21.3m の海底から 3.5m の高さ) の流速である。水位から潮位を求める際に用いた数値フィルタと同じもので流速の波浪成分を除去し、さらに 6 分の

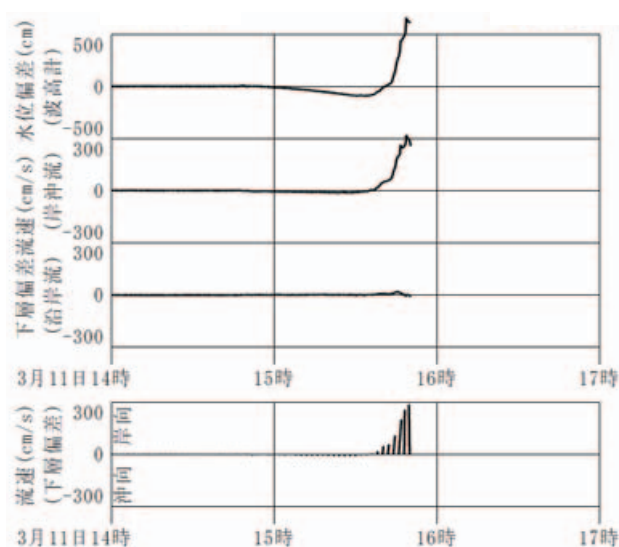


図-5.2 仙台塩釜港の沿岸波浪計で観測した流れ

三角フィルタで平滑化したものである。また、岸向きは、これまでの津波解析 (最近では、河合ら, 2011c) と同様、偏差流速のエネルギー (流向別の流速の 2 乗値の和) が最大となる方向として定義し、北から時計回りに 290° (E と ENE の間) に向かう方向となった。この図から、引きのときの流れは非常に弱く、押しになって最大で 3.22m/s という速い流れが生じたことが分かる。半波高が 6.65m 、水深 21.3m における微小振幅波の水粒子の速度は最大で 4.51m/s であり、流速計で計測した値は現実的なものである。

なお、1993 年北海道南西沖地震津波のときに輪島港や福井港では超音波式流速計型波向計によって約 $0.3\sim 0.4\text{m/s}$ の底層の流速 (永井ら, 1993)、2003 年十勝沖地震津波のときに十勝港の海象計によって約 0.8m/s の上層の流速 (永井ら, 2004)、2010 年チリ津波のときに小名浜の海象計で約 0.2m/s の上・中・下層の流速 (河合ら, 2010b, 2010c) が観測されており、長波の水粒子運動の速度と概ね一致することも確認されている。仙台塩釜港 (仙台) の超音波式流速計型波向計が計測した 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速は、これらを遙かに上回るものであった。

5.2 北海道の太平洋沿岸

北海道の太平洋沿岸で数地点を選び、その津波波形を図-5.3 に示す。この地域では、東北地方の太平洋沿岸のような津波による観測装置の損傷やデータの欠測は少なく、多くの地点で津波を捉えた。

(1) 霧多布港

図-5.3 に示すように、霧多布港では、潮位計によって津波を切れ目なく捉えることができた。津波は微弱な引きから始まり、地震発生の 56 分後の 15 時 42 分には押しの第

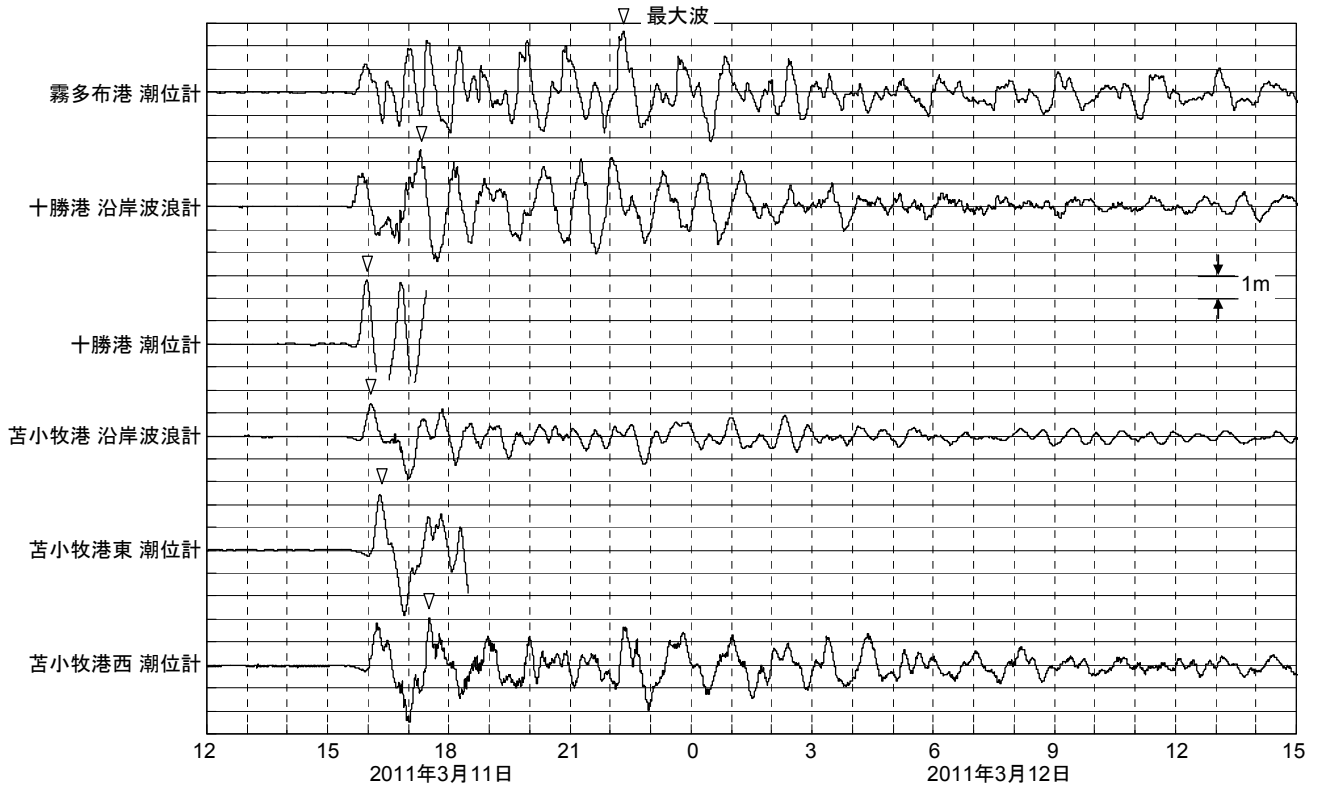


図-5.3 北海道沿岸の津波波形

1 波が始まった。その後は周期が 30~40 分の波が続き、22 時 20 分の 2.63m の峯が最大波となった。

(2) 十勝港

十勝港では、図-5.3 に示すように、沿岸波浪計が津波の全容を捉え、潮位計が第 3 波の途中までを捉えた。潮位計の波形の下の方が部分的に切れているのは、潮位の観測値が下げ止まった部分を欠測扱いにしたためである。実際の潮位偏差は下に凸な曲線を描いていたと考えられる。

沿岸波浪計も潮位計も微弱な引きから始まった。第 1 波の峯の時刻と高さはそれぞれ、15 時 51 分に 1.43m、15 時 58 分に 2.79m であり、潮位計の方が 7 分ほど後に約 2 倍の高さとなった。沿岸波浪計では、周期が 60 分程度の波が続き、高さ 2.47m の第 2 波が最大波となった。潮位計で観測した第 1 波と第 2 波とでは、2.79m の第 1 波が高かった。この 2.79m という記録は、北海道沿岸にある NOWPHAS の沿岸波浪計・潮位計の中では最大の値であり、気象庁が監視する他機関の潮位計を含めても、えりも町庶野の 3.5m に次ぎ、根室市花咲の 2.8m とほぼ並ぶものである。

十勝港の沿岸波浪計の機種は海象計であり、水位だけでなく上・中・下層の流れも計測できる。図-5.4 はその海象計で捉えた各層の流れを示す。流速の平滑化に用いた数値フィルタは前述の仙台塩釜港(仙台)と同じである。海象計の設置水深は 23.0m、上・中・下層は海面下 8, 13, 18m

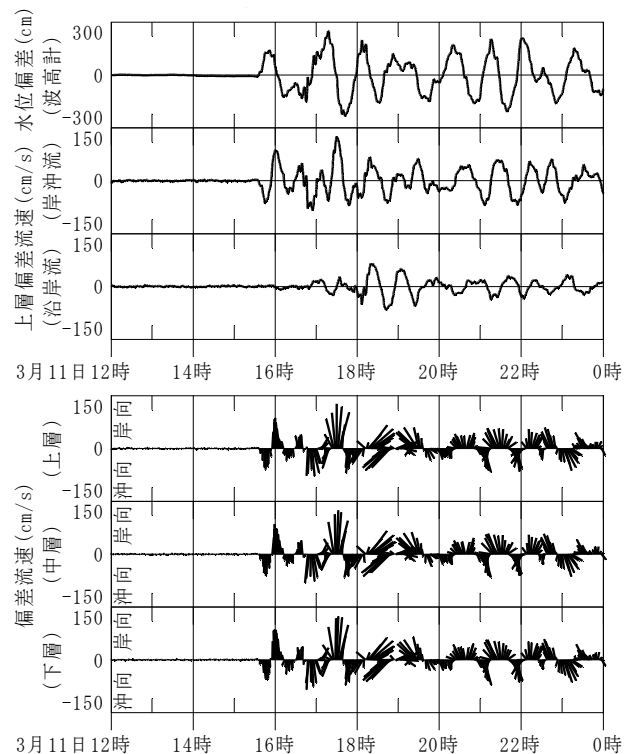


図-5.4 十勝港沿岸流速計で捉えた流れ

である。また、真北から時計回りに 123° (WSW と SW の間) の方向を岸向と定義している。この図によると、3 月

11日15時半過ぎから三層とも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。流速は三層ともほぼ同じ値をとり、最大で1.27m/sを記録した。

(3) 苫小牧港

苫小牧港では、図-5.3に示すように、沿岸波浪計と港の西部にある潮位計が津波を切れ目なく捉え、東部にある潮

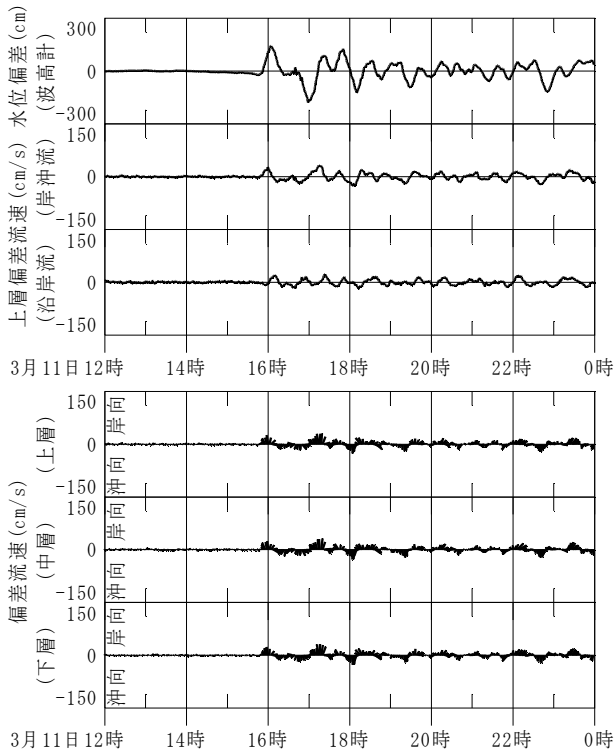


図-5.5 苫小牧港沿岸流速計で捉えた流れ

位計は第3波の途中までを捉えた。

何れの地点でも引きから始まった。最も引いた時刻とそのときの潮位偏差は、沿岸波浪計で15時47分の-0.21m、西の潮位計で15時55分の-0.28m、東の潮位計で16時00分の-0.27mであった。第1波の峯も同じ時刻順で現れており、その時刻と高さはそれぞれ、16時04分の1.41m、16時13分の1.82m、16時17分の2.46mであった。沿岸波浪計では第1波、西の潮位計では第2波が最大波となり、東の潮位計では波形の取得できた範囲で第1波の峯が最高の高さとなった。

図-5.5は図-5.4と同じ要領で苫小牧港の海象計で観測した流速を示す。設置水深は沿岸波浪計として全国でも深い地点に分類される50.7m、上・中・下層はそれぞれ海面下10m、20m、30mであり、真北から時計回りに13°(NとNNEの間)を岸向きと定義した。三層ともほぼ同時刻にほぼ同じ流速で岸向と沖向の流れを繰り返した。最大流速は0.34m/sであった。

5.3 東京湾の湾口部

(1) 津波の概況

図-5.6は東京湾の湾口部にある沿岸波浪計と潮位計で観測した津波波形を示す。久里浜潮位計の波形は、長時間の停電によるバッテリー切れによって、一時的に途切れた。

ここに示す何れの地点でも、津波は押しから始まり、第3波(3月11日19時頃)までは周期が70分程度の波が続いた。アシカ島には、津波が15時32分頃に到達し、第1波の峯が0.93mの最大波となった。第2波の峯の高さは第1波と同じくらいで、周期は第1波より長い。久里浜や第

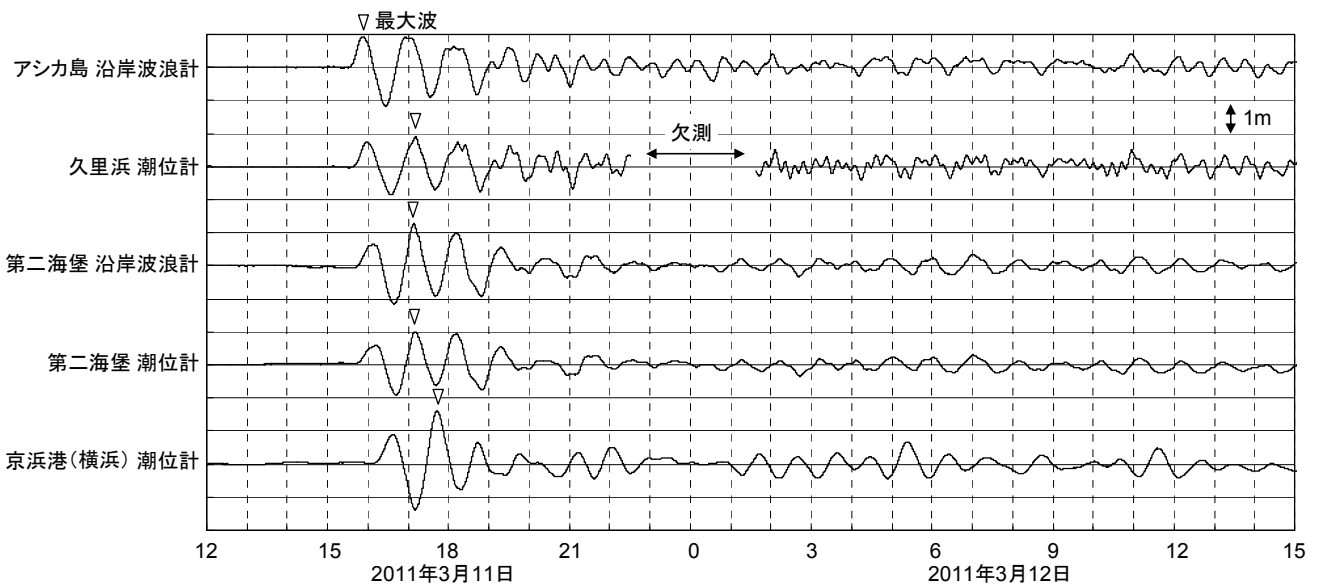


図-5.6 東京湾口における津波波形

二海堡では、アシカ島よりそれぞれ 6 分、13 分ほど後に津波が到達し、第 2 波が最大波となった。京浜港（横浜）にはアシカ島の 38 分ほど後に津波が到達した。第 2 波が第 1 波と第 3 波に比べて顕著に高く、最大波と比較するとアシカ島の約 2 倍の 1.62m に達した。

第 4 波以降は、場所によって津波の周期に顕著な違いが現れた。アシカ島では 30 分程度の周期になった。久里浜では、少なくとも欠測前の 3 月 11 日 22 時 30 分までは 30 分程度であり、欠測後の 3 月 12 日 1 時 37 分には既に 15 分程度になっている。この 15 分程度の成分は既往の津波でも確認され、東京湾の湾口部における横幅方向（久里浜～浜金谷）の固有振動であると指摘されている（永井ら，1996）。一方，第二海堡や京浜港（横浜）では 1 時間程度のみである。また，京浜港（横浜）では津波の波高が，3 月 12 日 0 時頃に極小となった後，再び増加

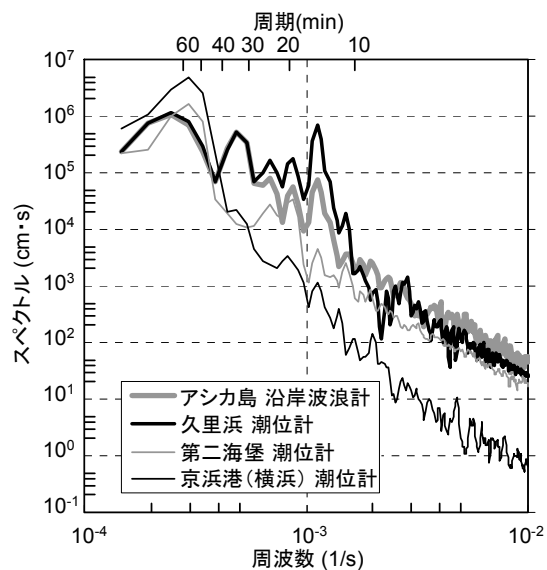


図-5.7 東京湾の湾口部における津波のスペクトル

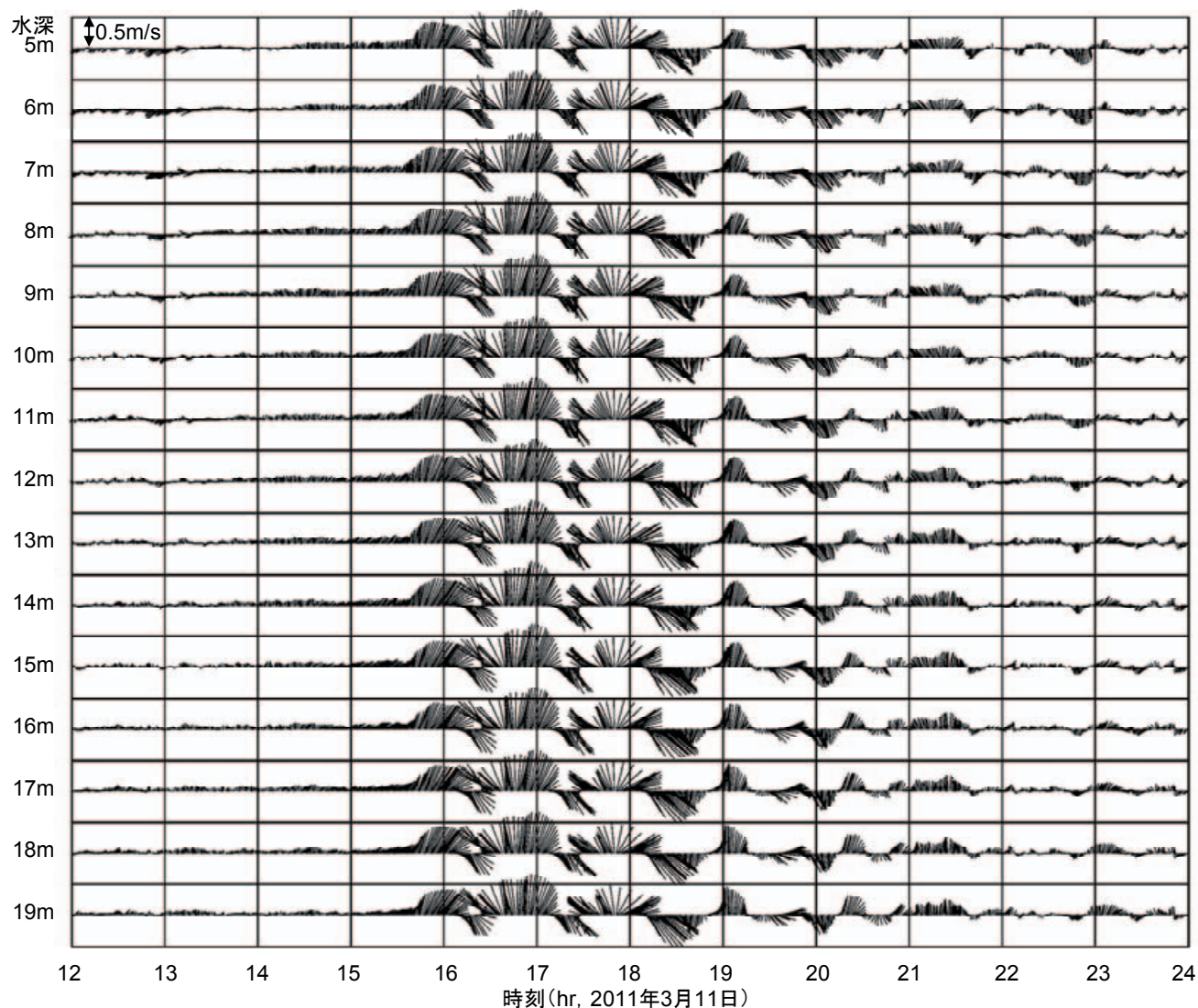


図-5.8 アシカ島の沿岸波浪計で捉えた流れ

している。

図-5.7は、3月12日2時から5s間隔で4096個の潮位偏差から求めたスペクトルである。久里浜のスペクトルはアシカ島に比べ、周期が30分以上の成分はほとんど同じであるが、10~30分の成分は大きく、15分付近のピークが高い。第二海堡のスペクトルはアシカ島や久里浜に比べて、10~40分の成分が低く、15分付近にピークは見られない。京浜港（横浜）のスペクトルはアシカ島、久里浜、第二海堡と比べて、40分以下の成分が低く、15分にピークもないが、50分以上の成分は高い。したがって、周期が15分程度の振動はアシカ島と久里浜の周辺に固有なものである。

(2) アシカ島での流れの観測

アシカ島の沿岸波浪計の機種は海象計である。この海象計は水深21.7mの海底に設置され、水位だけでなく、水深5~19mの1m毎の位置で流れを計測することもできる。図-5.8は、当所の海洋情報研究領域海洋環境情報研究チームから提供された各層の毎分のデータを図化したものである。天文潮は除去されていない。上向きの羽根が北へ向かう流れ、すなわち太平洋から東京湾への流入を表す。この図から、津波が到達した15時半過ぎから全ての層で東京湾への流入と流出を繰り返しており、流入する流速は3月11日16時53分に0.71m/sに達したことが分かる。また、鉛直方向に流速・流向が一様になっていることも確認できる。

(3) 久里浜での過去の津波

久里浜では当所が1958年から構内の潮位計で潮位観測を継続してきた。図-5.9に2011年東北太平洋沖地震津波のときに使われた装置の外観を示す。

図-5.10は、1960年チリ津波の波形（永井ら、1996）や2010年チリ津波の波形（河合ら、2010c）を2011年東北太平洋沖地震津波の波形と比較したものである。1960年チリ津波は、1960年5月23日4時11分（日本時間）のチリ中



図-5.9 久里浜の潮位計の概観

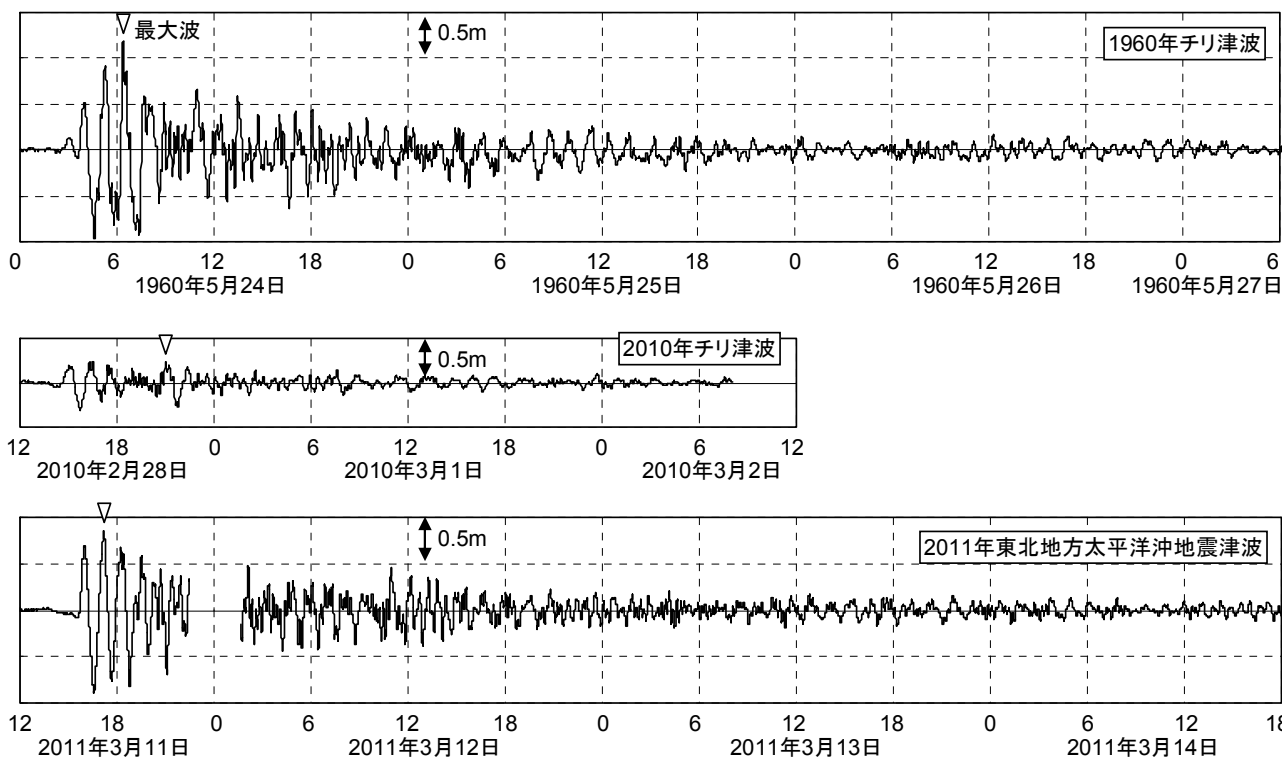


図-5.10 久里浜における過去の津波との比較

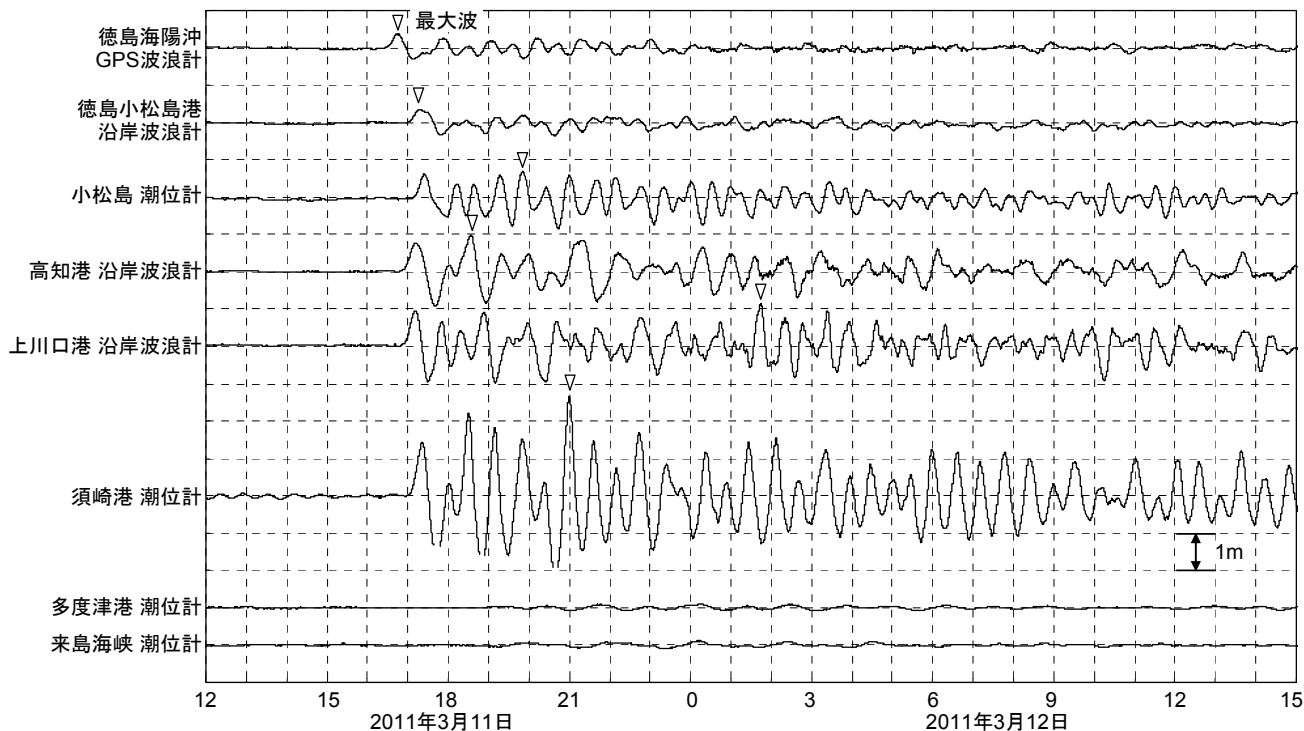


図-5.11 四国沿岸の津波波形

部沿岸の $M_w 9.5$ の地震によって発生した。久里浜に到達したのは、地震発生から約 22 時間半後の 5 月 24 日 2 時 40 分頃である。第 4 波として 1m を超える最大波を観測した。津波到達からすぐの頃は 80 分程度の成分が卓越したが、時間とともに 15 分程度の成分が増幅した。津波来襲から 3 日後の 5 月 27 日未明でも津波は消えなかった。

2010 年チリ津波は、2010 年 2 月 27 日 15 時 34 分（日本時間）のチリ中部沿岸の $M_w 8.8$ の地震によって発生した。久里浜に到達したのは、地震発生から約 23 時間後の 2 月 28 日 14 時 38 分である。最大波は 0.24m であり、1960 年チリ津波より低い。最初の 3 波の周期は 80 分程度と長いですが、それ以降は周期が短くなっている。

以上のように久里浜においては、2011 年東北地方太平洋沖地震津波は最大波の高さと津波の継続時間という点で 1960 年チリ津波に匹敵するものであった。津波が到達して数時間経つと 15 分程度の周期の振動が卓越するという点は、1960 年チリ津波や 2010 年チリ津波と共通している。

5.4 四国の沿岸

図-5.11 は、四国沿岸にある沿岸波浪計と潮位計を数地点選び、徳島小松島港に近い徳島海陽沖 GPS 波浪計と合わせて、津波波形を示したものである。須崎港潮位計の波形で下の方が部分的に切れているのは、潮位の観測

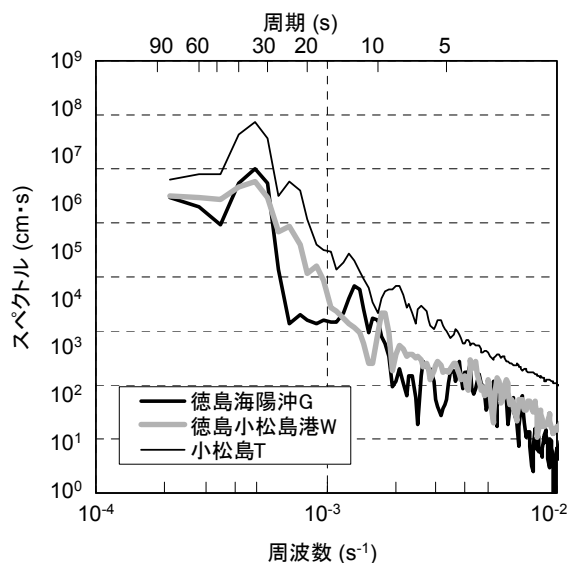


図-5.12 四国東岸における津波のスペクトル

値が下げ止まった部分を欠測扱いにしたためである。津波は四国の太平洋沿岸だけでなく、瀬戸内海にも微弱ながら伝播したことが分かる。

(1) 徳島小松島港

四国東岸の徳島海陽沖 GPS 波浪計は、図-5.11 に示すように、徳島小松島港の沿岸波浪計や潮位計より 30~40 分ほど津波を捉えた。第 1 波の峯の到達時刻と高さは、GPS 波浪計で 16 時 44 分に 0.36m、沿岸波浪計で 17 時

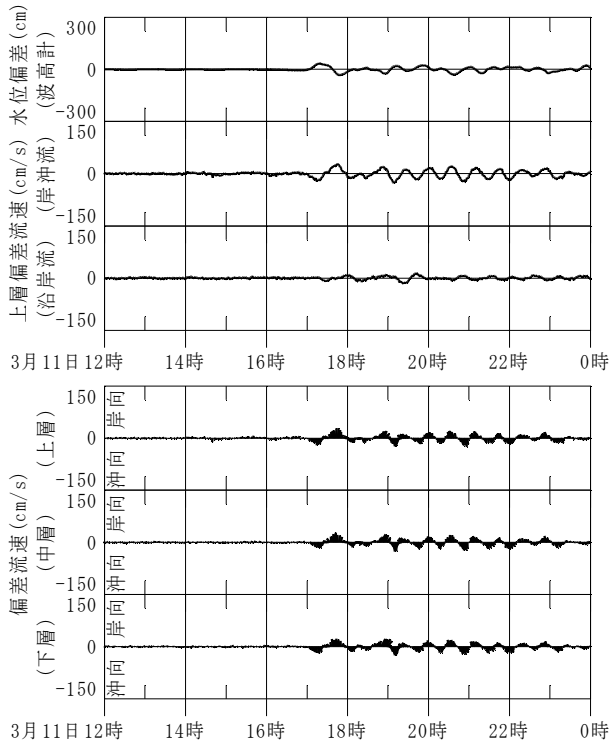


図-5.13 徳島小松島港沿岸波浪計で捉えた流れ

19分に0.36m、潮位計で17時24分に0.61mであった。GPS波浪計と沿岸波浪計では第1波が最大波となり、潮位計では津波到達から約3時間後の19時50分の第5波が高さ0.68mの最大波となった。何れの地点でも第1波は、押しから始まり、60分程度の周期であった。第2波以降は30分程度に短くなっている。

図-5.12はこれらの地点の周波数スペクトルを示す。GPS波浪計から沿岸波浪計までの間に20分前後の成分が増幅し、沿岸波浪計から潮位計までには幅広い周期で増幅した。

図-5.13は徳島小松島港の海象計で観測した流れである。設置水深は20.8m、上・中・下層は海面下10m、12.5m、15mであり、真北から時計回りに131°（ESEとSEの間）を岸向と定義した。三層ともほぼ同時に岸向と沖向の流れを繰り返す、最大で0.29m/sを記録した。

(2) 高知港・上川口港・須崎港

図-5.11に示したように、高知港と上川口港の沿岸波浪計、須崎港の潮位計にも、押しから始まる第1波が到達した。ただし、この峯の高さは突出しておらず、最大波は津波到達からそれぞれ、約1時間半、約9時間、約4時間後となった。須崎港での最大波は2.65mであり、これは西日本で最高の記録である。須崎港では2010年チリ津波の際にも全国で最高の1.28mを記録した(河合ら, 2010c)。

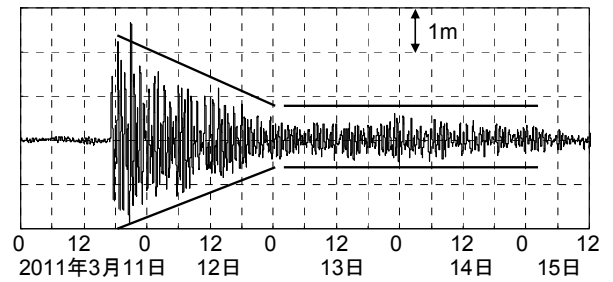


図-5.14 須崎港における津波の減衰

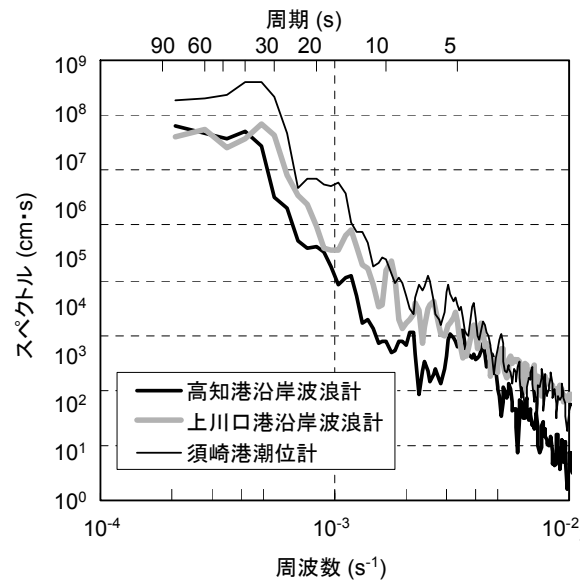


図-5.15 四国南岸における津波のスペクトル

図-5.14は、須崎港の波形を図-5.11より長時間にわたって描いたものである。波形の上下の包絡線を見ると、津波到達から3月13日0時頃までの1日と6時間ほどの間は、振幅が時間に比例して減少している。その後はなかなか減衰していない。数時間の周期で包絡線の幅がくびれたり広がったりしているのも分かる。

図-5.15は、高知港、上川口港、須崎港の波形のスペクトルを示す。上川口港は高知港に比べて40分以下の成分のエネルギーが大きい。須崎港は上川口港に比べて、15~20分と30分以上の周期帯での増幅が見られる。なお、2010年チリ津波のときには30分以上の周期帯での増幅は見られたが、15~20分の周期帯では見られなかった(河合ら, 2010c)。

図-5.16は高知港の海象計によって観測した流れである。設置水深は24.1m、上・中・下層は海面下10m、15m、19mであり、真北から時計回りに217°（SWSとSWの間）を岸向と定義した。三層ともほぼ同時に岸向と沖向の流れを繰り返す、最大で約0.45m/sを記録した。

5.5 その他の沿岸

2011 年東北地方大洋沖地震津波は、先に述べた北海道～四国地方の太平洋沿岸や瀬戸内海だけでなく、全国各地に伝播した。関門海峡、有明・八代海、南西諸島、北陸地方の日本海沿岸、北海道のオホーツク海・日本海沿岸についても、以下に概要を記しておく。

(1) 関門海峡

図-5.17は関門海峡とその周辺にある全ての潮位計で観測した津波波形を示す。これらの地点は概ね瀬戸内海

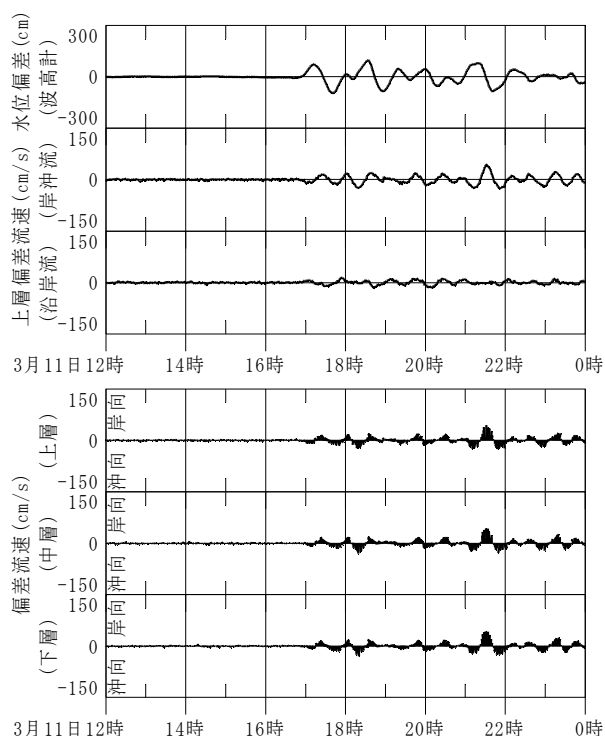


図-5.16 高知港沿岸波浪計で捉えた流れ

から日本海に向かう順に並べており、そのうち下関港長府、下関港弟子待、下関港田の首、下関港大山の鼻、南風泊は本州にあり、その他の地点は九州にある。

関門海峡の瀬戸内海側の入口に近い下関港長府には 3 月 11 日 20 時過ぎに津波が到達し、周期が 2 時間程度の波が繰り返し、3 月 11 日 23 時 00 分には 0.31m を記録した。3 月 11 日 19 時頃からの微弱な引きで始まったという波形の見方もあるだろうが、津波の振幅が小さいため、この波形だけをもって結論づけるのは難しい。下関港長府から北九州港日明までの津波は、高さも波形もよくそろっている。ただし、詳しく見ると、図に破線(a)で示す第 1 波の峯の時刻は、瀬戸内海から日本海に向かって少しずつ遅れている。(b)で示す谷の時刻は逆に瀬戸内海側で遅い。(c)で示す峯は日本海側で顕著である。このように、関門海峡全体の上下動を基本としつつ、関門海峡に固有な振動も加わった。

(2) 有明海・八代海沿岸の津波

図-5.18 は、有明海に面した熊本港、有明海と八代海間の細い海峡にある本渡瀬戸、八代海に面した八代港で、それぞれ潮位計によって捉えた津波波形を示す。これらの地点は、太平洋から見て九州の反対側の内湾に位置する。

熊本港の津波は、振幅が小さいために判読が難しいが、地震発生から 3 時間ほど後の 19 時 53 分頃から約 2 時間の周期で、少なくとも 3 波は確認できる。最大波はその第 2 波であり、3 月 11 日 22 時 32 分に 0.14m であった。本渡瀬戸では 19 時 17 分頃に押しで始まり、周期が 50 分程度の波が繰り返した。その中では第 2 波と第 3 波が比較的高く、21 時 05 分の第 3 波が 0.70m の最大波となった。八代港も 20 時 00 分頃に押しで始まり、周期が 40

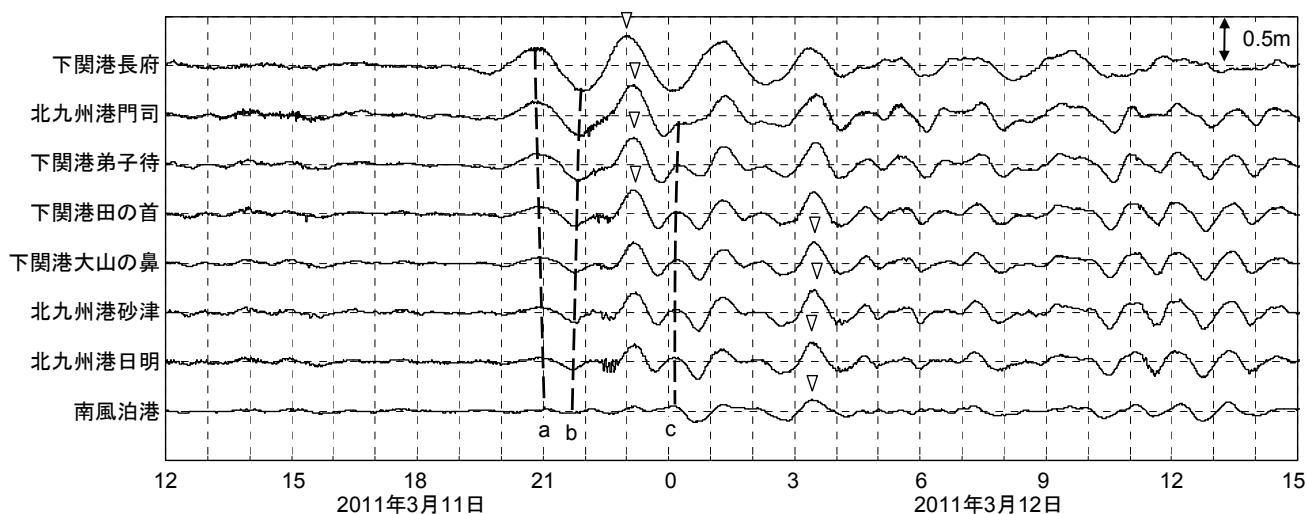


図-5.17 関門海峡の津波波形

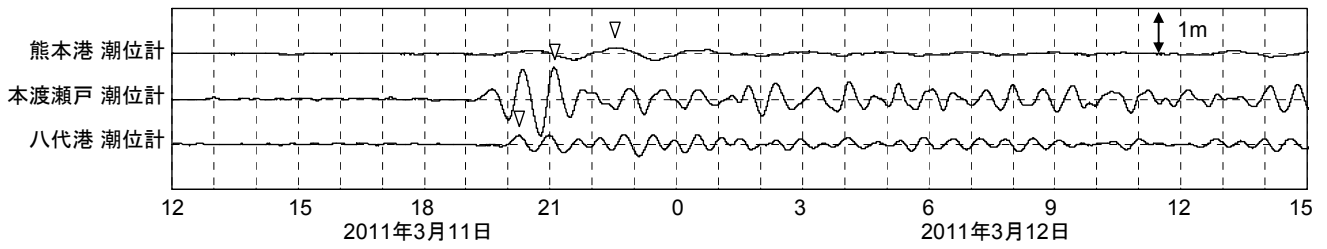


図-5.18 有明海・八代海沿岸の津波波形

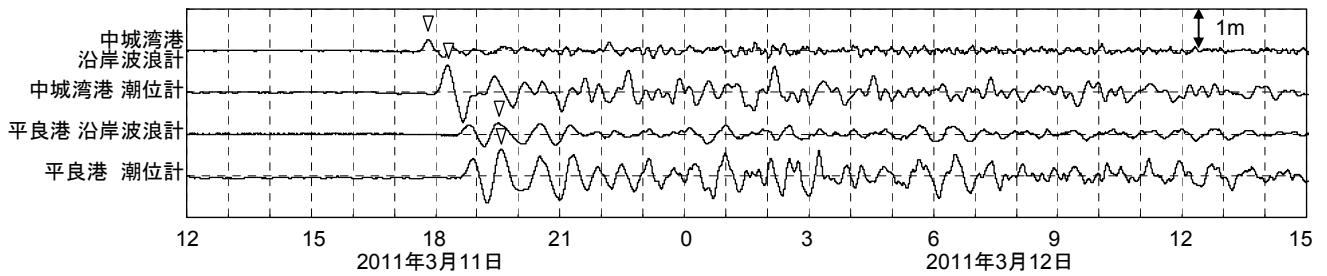


図-5.19 琉球諸島の津波波形

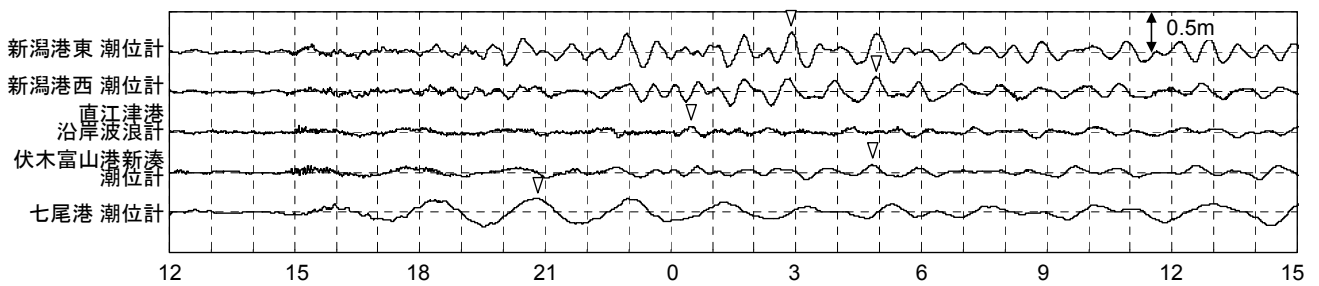


図-5.20 北陸地方の日本海沿岸の津波波形

分程度の波が繰り返した。第1波が0.22mの最大波となったが、第2波以降の高さもほとんど変わらない。以上のように観測地点によって津波の周期が異なるのは、各海域に固有な振動周期があるためと考えられる。

(3) 琉球諸島

琉球諸島の観測地点として中城湾港と平良港の沿岸波浪計と潮位計を選び、図-5.19にその津波波形を示す。

中城湾港は震源から直線で2,000kmほど離れている。沿岸波浪計には地震発生から3時間ほど後の17時38分、潮位計には18時02分に津波が到達した。沿岸波浪計も潮位計も押しから始まっている。これらの到達時刻は先に述べた関門海峡、有明海・八代海の地点より早い。沿岸波浪計も潮位計も第1波の峯が最大波となり、その時刻と高さはそれぞれ、17時50分に0.27m、18時17分に0.65mである。第2波以降は第1波よりやや低い波高で繰り返した。

平良港は中城湾港からさらに300kmほど離れている。沿岸波浪計には18時34分、潮位計には18時39分に津

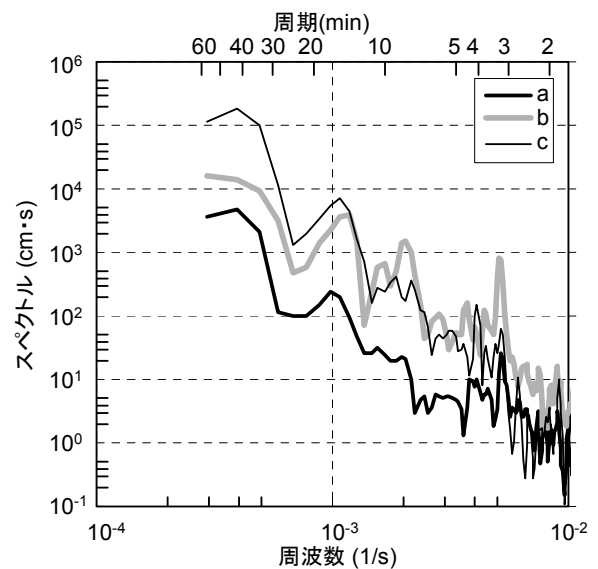


図-5.21 新潟東の潮位計で得られたスペクトル

波が到達した。ともに押しから始まっている。第1波の高さは中城湾港のように突出してはいない。

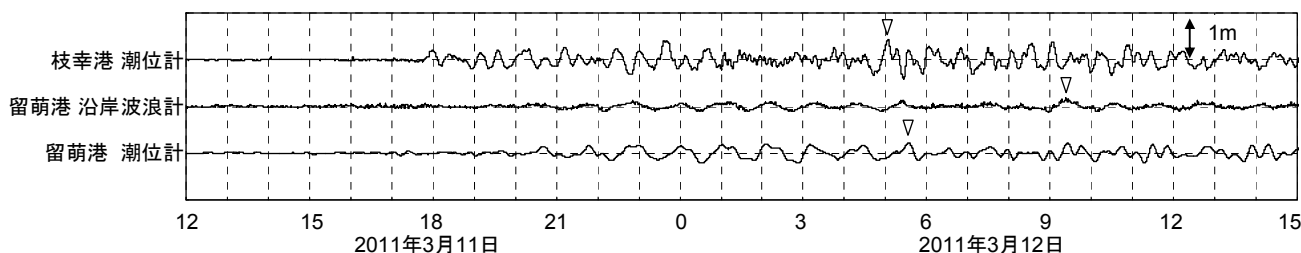


図-5.22 北海道オホーツク海・日本海沿岸の津波波形

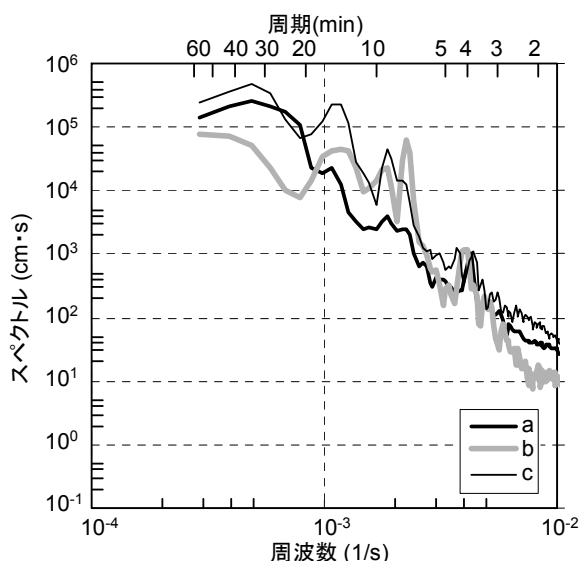


図-5.23 枝幸港の潮位計で得られたスペクトル

(4) 北陸地方の日本海沿岸

図-5.20 に北陸地方の日本海沿岸の沿岸波浪計と潮位計で観測した波形を示す。これらの地点では 3 月 11 日 15 時前後から海面に変動が生じている。地震発生が 14 時 46 分であるため、太平洋で発生した津波が津軽海峡を通過して伝播するには時間が早過ぎる。日本海沿岸にも強い地震の揺れは伝わっており、それによって生じたものと思われる。新潟港東と新潟港西の潮位計の波形を詳しく見ると、3 月 11 日 15 時～18 時は短周期の小さな振動であり、それ以降は周期が 40 分程度の大きな振動になっていることが分かる。この後半部分が太平洋から伝播した津波によるものと考えられる。図-5.21 は、概ね地震前の時間帯 a(3 月 11 日 12 時 00 分～14 時 50 分 35 秒)、地震直後の時間帯 b(3 月 11 日 15 時 00 分～17 時 50 分 35 秒) さらにその後の時間帯 c(3 月 11 日 18 時 00 分～20 時 50 分 35 秒) について、それぞれ 5s 毎の潮位偏差を用いて周波数スペクトルを描いたものである。この図から、地震前の a に比べて地震直後の b では幅広い周期帯でエネルギーが増え、その後の c では 30 分以上の周期帯のエネルギーが顕著に増加したことを確認できる。

七尾港では、地震直後から富山湾の固有振動と思われる周期が約 2 時間の規則的な波が続いた。伏木富山港新湊の潮位計でも、最初の 3 波まで(3 月 11 日 21 時頃)までは七尾港と同程度の周期で振動し、その後は短い周期になった。

なお、表-3.5 に掲載した新潟港、直江津港、伏木富山港の押しの第 1 波の時刻には、太平洋側からの津波に対応すると考えられるものを選び、七尾港は不明という意味で「-」と記した。地震直後に日本海側で生じた(増幅された)海面変動と太平洋側から伝播した津波とが混在する波形は、これまでの津波判読でほとんど経験のないものであり、「どの部分を津波と定義するのか、波形の何をもって第 1 波と判定すべきか」についてはもう少し議論が必要である。

(5) 北海道のオホーツク海・日本海沿岸

北海道のオホーツク海沿岸の地点として枝幸港の潮位計、日本海沿岸の地点として留萌港の沿岸波浪計と潮位計を選び、図-5.22 にその波形を示す。

枝幸港の潮位計では、津波が 17 時 47 分に到達し、まずは周期が 30 分程度の波が繰り返した。ところが、翌 3 月 12 日の 1 時から 4 時半にかけては周期が 10 分程度に短くなり、その後は再び 30 分程度に戻った。最大波の高さは、再び 30 分程度の周期に戻った後の 12 日 05 時 04 分の 0.42m であった。図-5.23 は、最初に周期が 30 分程度であった時間帯 a(3 月 11 日 19 時～21 時 50 分 35 秒)、10 分程度になった時間帯 b(3 月 12 日 1 時～3 時 50 分 35 秒)、再び 30 分程度になった時間帯 c(3 月 12 日 5 時～7 時 50 分 35 秒) についてそれぞれ、5 秒間隔の潮位偏差を用いて周波数スペクトルを描いたものである。時間帯 a に比べて b では、5～20 分のエネルギーが増加し、20 分以上は減少した。時間帯 b に比べて c では、15 分以上のみで増加した。その物理的要因は不明のままである。

留萌港では、津波の振幅が小さく、到達時刻を判読するのが難しい。遅くとも 3 月 11 日 20 時頃には津波とし認識でき、最大波は 3 月 12 日になってからであった。

6. 結論

本研究では、NOWPHASの全国各地のGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計で観測した水位データから、2011年3月11日14時46分の東北地方太平洋沖地震による津波を抽出し、その特性を調べた。

まず、東北～四国地方の太平洋沿岸の10基のGPS波浪計から分かったことを要約すると、以下の通りである。

- ①東北地方の6基（設置水深125～204m、リアス地形の沖合）の最大波は15時12分～15時19分に高さ2.14～6.13m（地盤沈下の影響を補正する前の観測値では2.62～6.67m）であり、岩手中部沖と岩手南部沖が最も早く、岩手南部沖が最も高かった。宮城中部では6.00m（5.05m）の引き波を記録した、中部～四国地方の4基には、東寄りの地点から津波が到達し、最大波は16時01分～16時44分に高さ0.33～0.48mであった。
- ②岩手北部沖～宮城中部沖の5基では引き、福島県沖では押から始まり、中部～四国地方の4基も押しから始まった。最大波は第1波であるが、福島県沖に限り地盤沈下の影響を補正して波を細かく数えると第2波になる。
- ③岩手南部沖では比較的高い波が7波続いた。第1～3波は周期も波形も不規則で、第4～7波は周期が50分程度の似た波形であった。ただし、第2波以降が沖合からの入射波、陸からの反射波、エッジ波の何れであるかを波形だけで判断することは難しい。
- ④岩手南部沖の第1波の峯は、二段階に立ち上がり、緩やかな峯に鋭い峯が重なった波形に見える。岩手中部沖や宮城北部沖の波形にもこのような特徴が見られ、緩やかな峯は南に行くほど高く、鋭い峯は北に行くほど高い。
- ⑤岩手北部沖～宮城中部沖では、第1波の峯のときにブイが北北西ないし西、すなわち岸側に移動し、それに続く谷のときには元の位置の近くまたは対称的な位置に移動した。

次に、沿岸波浪計や潮位計の波形も合わせて分かったことを要約すると、以下の通りである。

- ⑥GPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の欠測によって限られた組み合わせによる確認しかできなかったが、津波はGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計の順に到達し、岸側で高くなった。
- ⑦津波の高さは、全国的に見て東北地方の太平洋沿岸が最も高かった。関門海峡、有明海・八代海、北海

道のオホーツク海・日本海沿岸のように、太平洋から遠く離れた地点でも津波を観測した。北海道～東北地方の太平洋沿岸では引き、それ以外の沿岸では押しから始まる地点が多かった。

- ⑧久慈港の沿岸波浪計（設置水深49.5m）は高さが5.39m、仙台塩釜港の沿岸波浪計（21.3m）は高さが6.65m、岸向きの流速が3.22m/sになる頃まで、津波を捉えた。これらの値が本来の最大値とは限らない。
- ⑨霧多布港では津波到達から6時間ほど後に2.63mの最大波を記録し、須崎港でも4時間ほど後に2.65mを記録した。十勝港では、第3波の途中でデータが途切れたが、第1波が2.79mを記録した。
- ⑩海象計によってアシカ島では15層、十勝港、徳島小松島港、高知港では3層の流れを計測し、鉛直方向に流速や流向が一樣であることを示した。
- ⑪久里浜の潮位計では、1960年チリ津波と同程度の高さで継続時間の津波を観測した。津波が到達して数時間が経過すると15分程度の振動が卓越する点は、1960年チリ津波、2010年チリ津波とも共通している。
- ⑫北陸地方の沿岸では、地震直後から海面の振動が顕著になり、その後に太平洋側からの津波が到達した。

7. あとがき

NOWPHASの全国各地のGPS波浪計、沿岸波浪計、潮位計で捉えた2011年東北地方太平洋沖地震津波の波形データは既に、当所で速報的な処理を行い、国土交通省港湾局を通じて公開している。また、この波形を用いた基本的な解析の結果は当所のホームページでも公開している。本報は、さらに吟味した波形データを用いて、この津波の基本的な特性を描いたものである。

これらの情報が沿岸部におけるこの津波の実態の把握に役立つことを期待している。また、東北地方太平洋沖の地殻変動、それによる津波の発生、伝播、変形などのメカニズムの理解が一層深まり、その知見が東海・東南海・南海など別の地震・津波防災にも資することを願っている。例えば、結論の④に記した峯の二段階の立ち上がりは、2箇所が生じたと言われる断層の位置やすべり量を推定する際の重要な手がかりになる。⑤のブイの移動方向や⑧⑩の流速は、津波の伝播計算における流れの検証にも活用できるだろう。

以上のように、この津波の現象については既に多くの貴重な科学的知見が得られており、その知見は今後の研究によってさらに深まるものと期待している。次に発生する津波の沿岸防災に資するためにも、GPS波浪計をは

はじめとする NOWPHAS の観測・データ処理・解析の精度や信頼性の向上に努めなければならない。

(2011年8月12日受付)

謝辞

本論文で用いた GPS 波浪計, 沿岸波浪計, 潮位計のデータは, 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。2011 年東北地方太平洋沖地震津波を観測できたのは, これら関係機関の皆様の平時からの地道な努力の賜物である。そしてまた, これまで計測機器やデータ処理・解析の技術開発に携わってきた, 多くの研究者・技術者の叡智が実を結んだとも言えよう。筆者らは, 1~3 年前に NOWPHAS のデータを集中処理・解析する仕事を引き継ぎ, たまたまこの津波に巡り合わせに過ぎない。

さらに, 東北地方からのデータの回収やその一次処理では株式会社ソニック, 日立造船株式会社の技術者に, 潮位や流速の基本的なデータ処理では株式会社エコーの技術者に, それぞれ多大なご協力をいただいた。

ここに記し, 関係の皆様にご敬意と感謝を表したい。

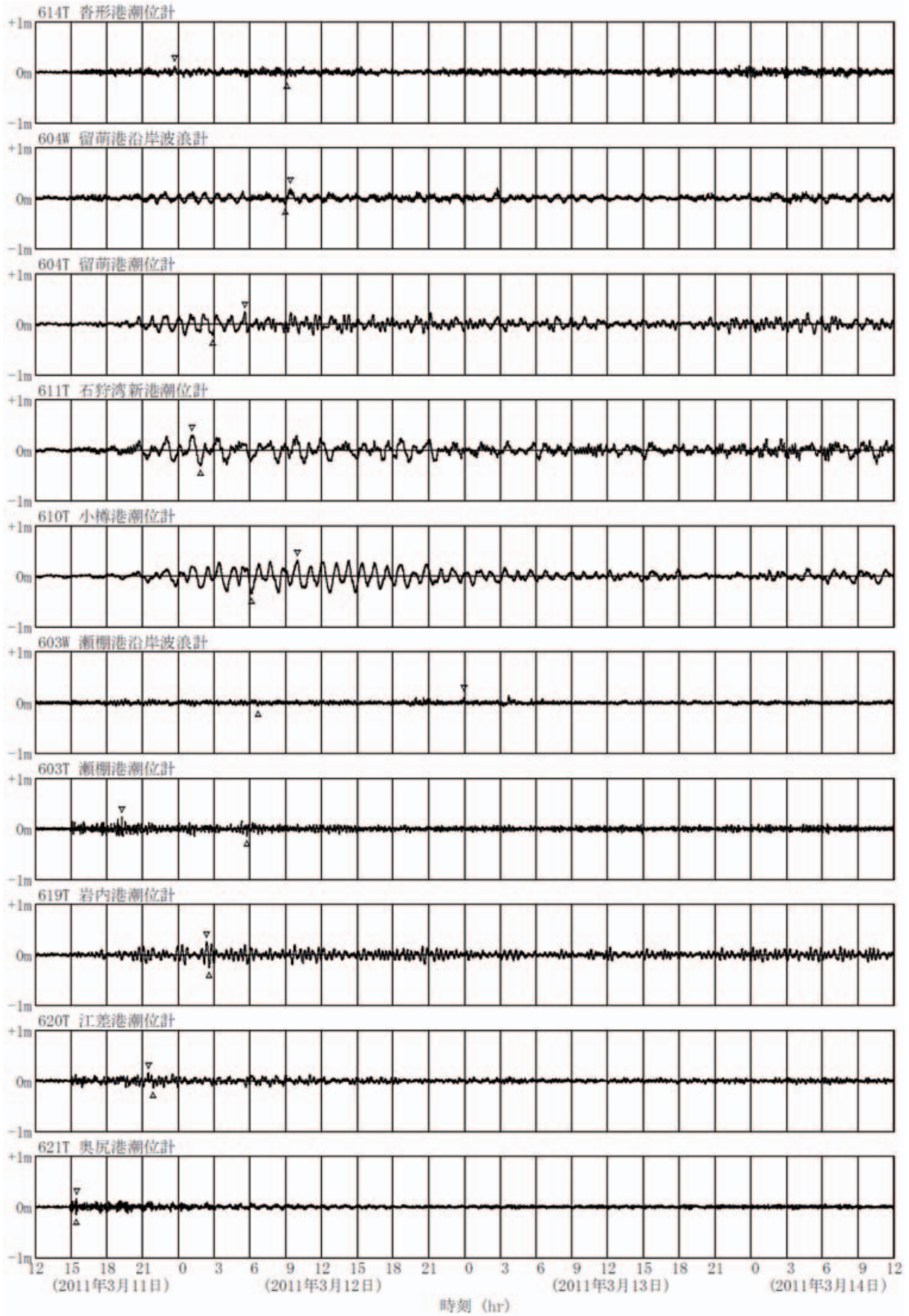
参考文献

- 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(2010a): 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.
- 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, 土木学会論文集B2, Vol.66, No.1, pp.266-270.
- 河合弘泰・佐藤 真・永井紀彦・川口浩二 (2010c): 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, 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第4号, pp.3-77.
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己 (2011): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2009), 港湾空港技術研究所資料, No.1226, 120p.
- 気象庁(2011a): 津波情報: 津波観測に関する情報, <http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/joho.html>, 2011年3月13日, 参照2011-03-14.
- 気象庁(2011b): 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第15報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/kaisetsu201103131255.pdf>, 2011年3月13日報道発表資料, 参照2011-07-13.
- 気象庁(2011c): 「宮古」, 「大船渡」の津波観測点の観測値について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/23b/stn03231400.pdf>, 2011年3月23日報道発表資料, 参照2011-07-13.
- 気象庁(2011d): 「相馬」の津波観測点の観測値について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/13a/201104131600.pdf>, 2011年4月13日報道発表資料, 参照2011-07-13.
- 気象庁(2011e): 「石巻市鮎川」の津波観測点の観測値について(続報), http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/03b/tsunami_ayukawa2.pdf, 2011年6月3日報道発表, 参照2011-07-13.
- 国土地理院(2011): GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動, http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chika_kukansi40005.html, 参照2011-05-20.
- 国土交通省港湾局・(独法)港湾空港技術研究所(2011): 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.
- 清水勝義・永井紀彦・里見 茂・李 在炯・久高将信・藤田 孝(2006a): プ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.
- 高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾 毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津 厚・岡本 修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路 徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷺崎 誠・泉山拓也・関 克己・廉 慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二(2011): 2011年東日本大震災に

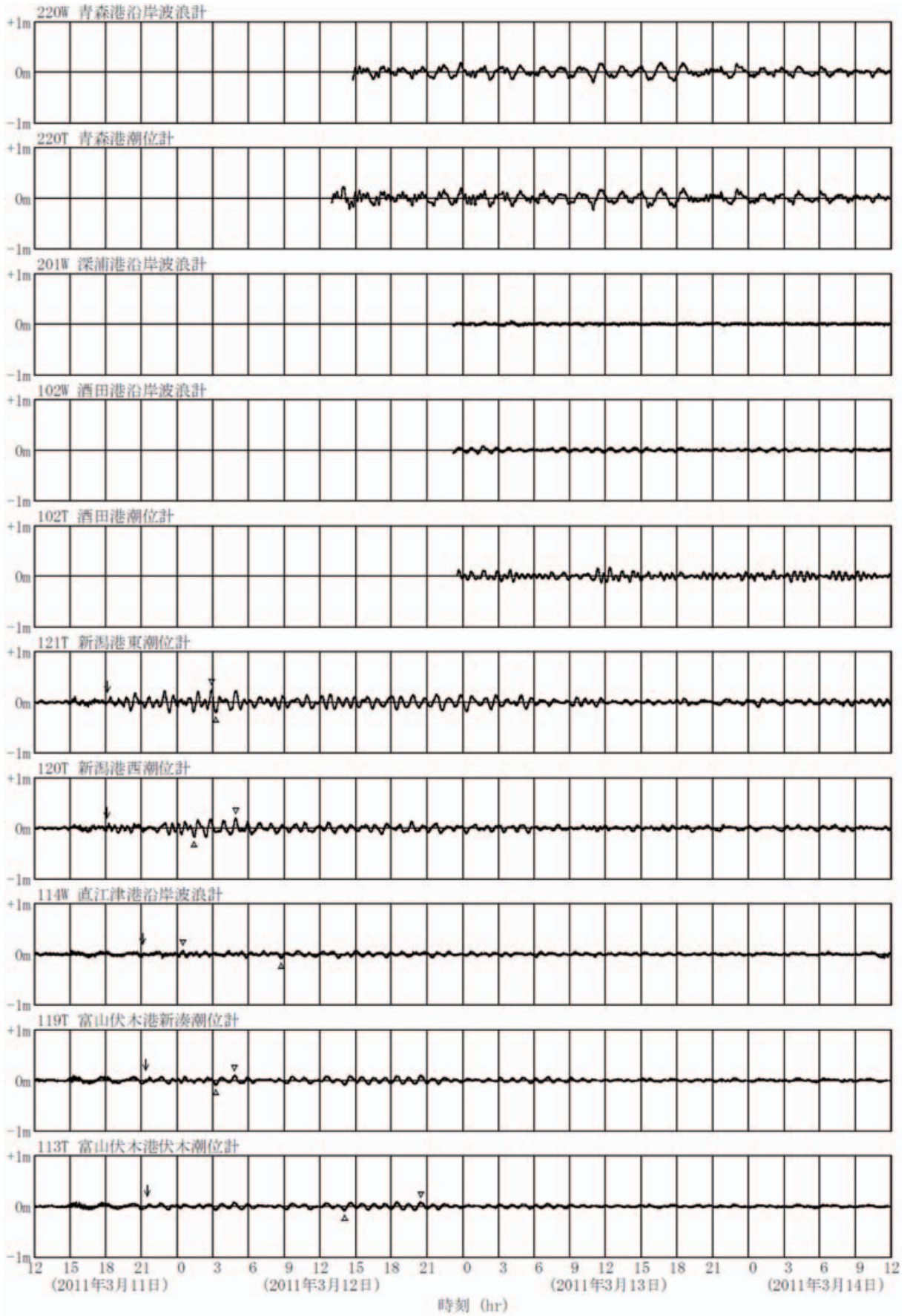
- よる港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 200p.
- 高山知司・鈴木康正・鶴谷広一・高橋重雄・後藤智明・永井紀彦・橋本典明・長尾 毅・細山田得三・下迫健一郎・遠藤仁彦・浅井 正(1994): 1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害, 港湾技研資料, No.775, 225p.
- 高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木 弘(1992): 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 176-180.
- 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・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.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011): 現地調査結果, <http://www.coastal.jp/tjt/index.php?現地調査結果>, 参照2011-07-22.
- 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(1997): ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による我国沿岸の波浪特性の解明, 港湾技研資料, No.863, 113p.
- 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.
- 永井紀彦・清水勝義・佐々木 誠(2008): 太平洋北東岸GPS波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性, 港湾空港技術研究所報告, 第47巻, 第2号, pp. 1-52.
- 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.
- Kawai, H., Satoh, M., Miyata, M. and Kobayashi, T. (2011): The 2010 Chilean Tsunami Observed on the Japanese Coast by GPS Buoys, Seabed Wave Gauges and Coastal Tide Gauges of NOWPHAS, Proceedings of the twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.3, pp.805-812.
- プレスリリース・HP 公開資料(2011年8月3日現在)
国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所(2011年3月28日): 津波は三陸沿岸で7波襲来-釜石沖 GPS 波浪計のデータ回収・分析結果-, <http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328mlit.html>.
- 独立行政法人港湾空港技術研究所(2011年3月28日): 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波のGPS波浪計による観測結果について, <http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328pari.html>.
- 独立行政法人港湾空港技術研究所(2011年4月15日): 久慈, 宮古, 小名浜の沖合のGPS波浪計による津波の観測結果について, <http://www.pari.go.jp/files/3609/130613169.pdf>.
- 独立行政法人港湾空港技術研究所(2011年4月25日): 東北地方太平洋沿岸の沿岸波浪計・潮位計による津波の観測結果について, <http://www.pari.go.jp/files/3652/1784997252.pdf>.
- 独立行政法人港湾空港技術研究所(2011年5月16日): GPS波浪計全地点における津波の観測結果について, <http://www.pari.go.jp/files/3651/303113448.pdf>.

付録

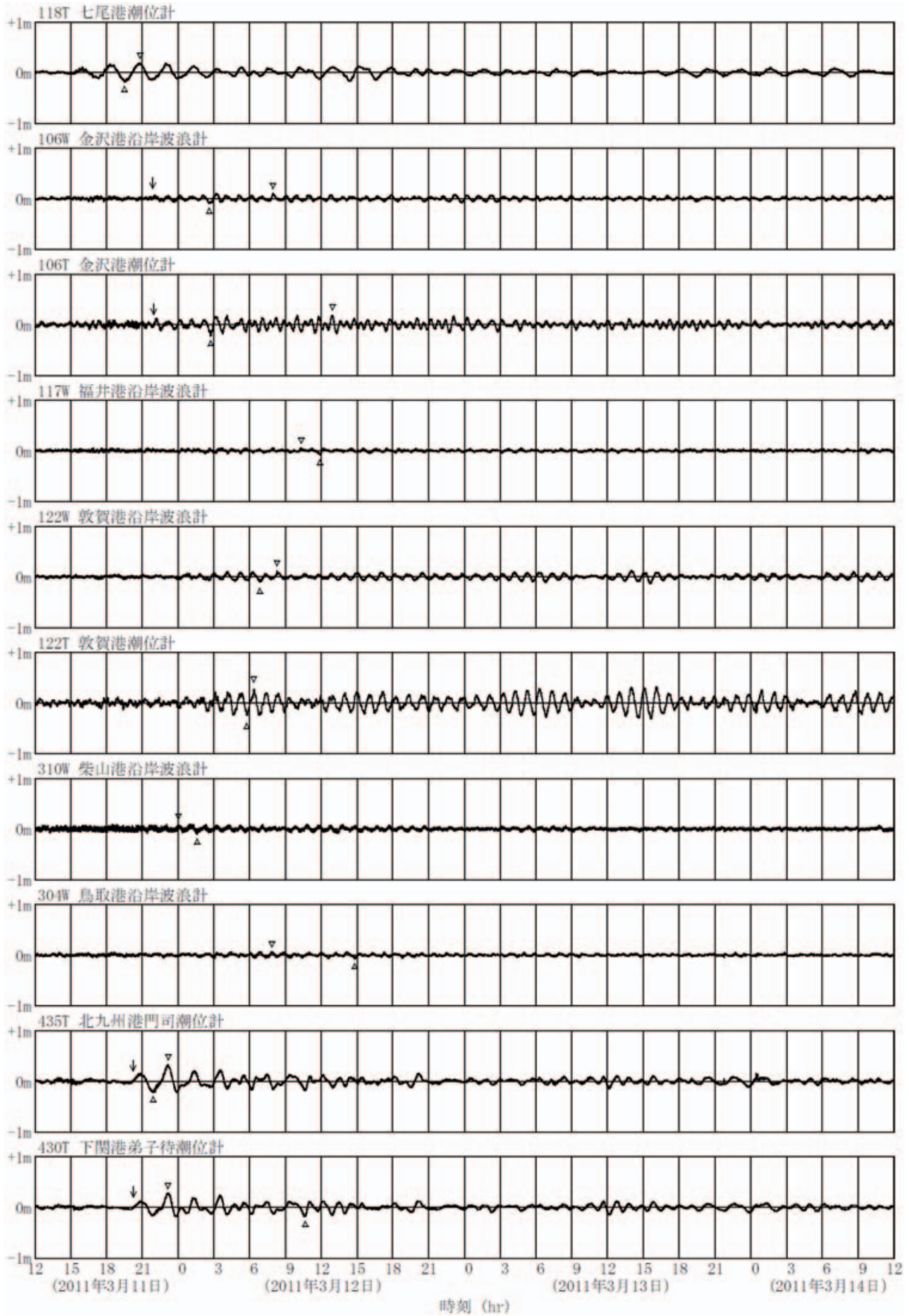
付図-A.1~A.12は,表-3.5に示した地点の3日間(2011年3月11日12時~14日12時)の津波波形を示す。また,付図-B.1~B.12は,津波発生時の付近(2011年3月11日14時~24時)を引き伸ばしたものであり,この時間帯が欠測の地点は割愛した。何れの付図も,↓印が押しの第1波の到達,▽印が正の最大偏差(いわゆる最大波),△印が負の最大偏差を示す。



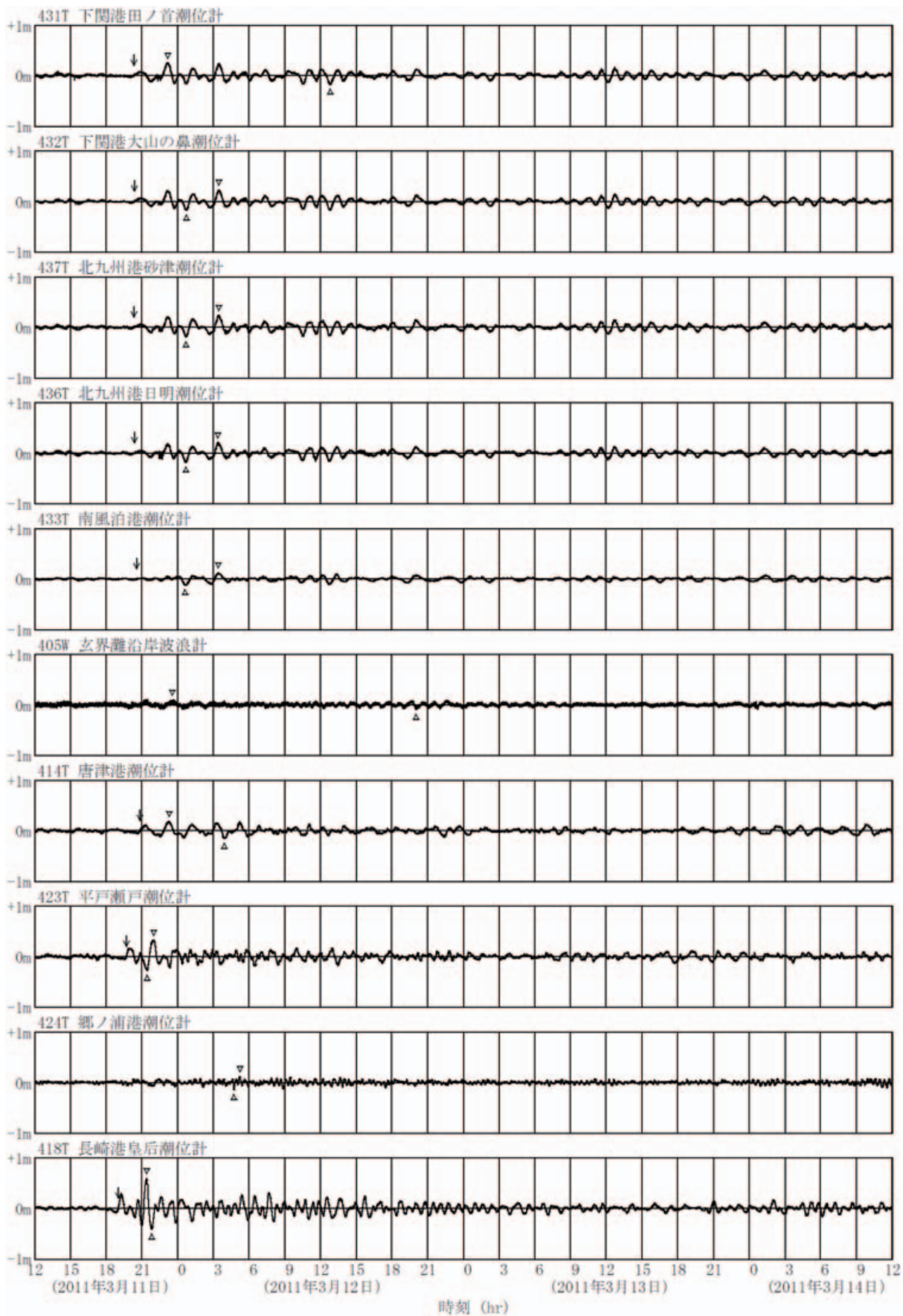
付図 A-1 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



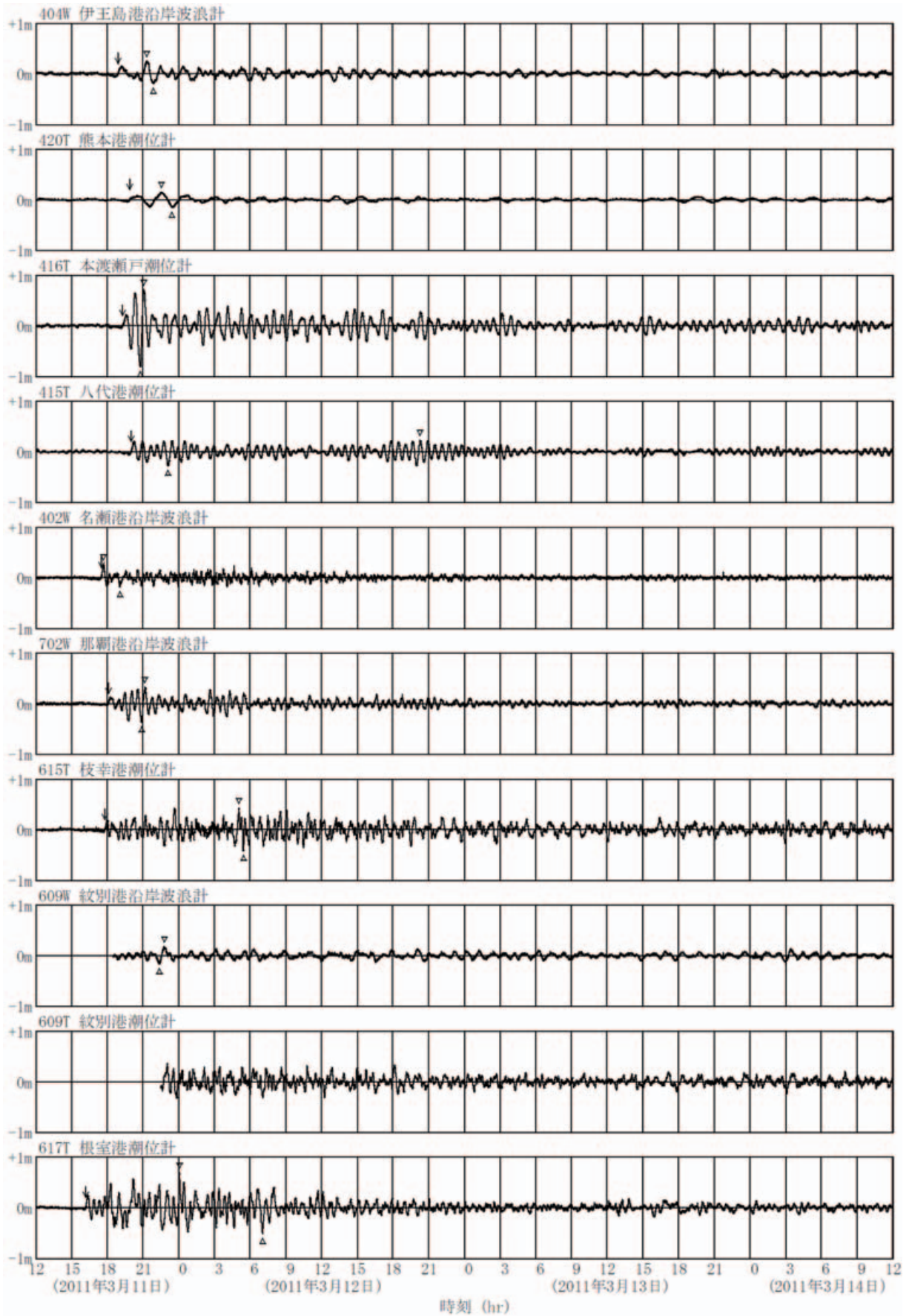
付図 A-2 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



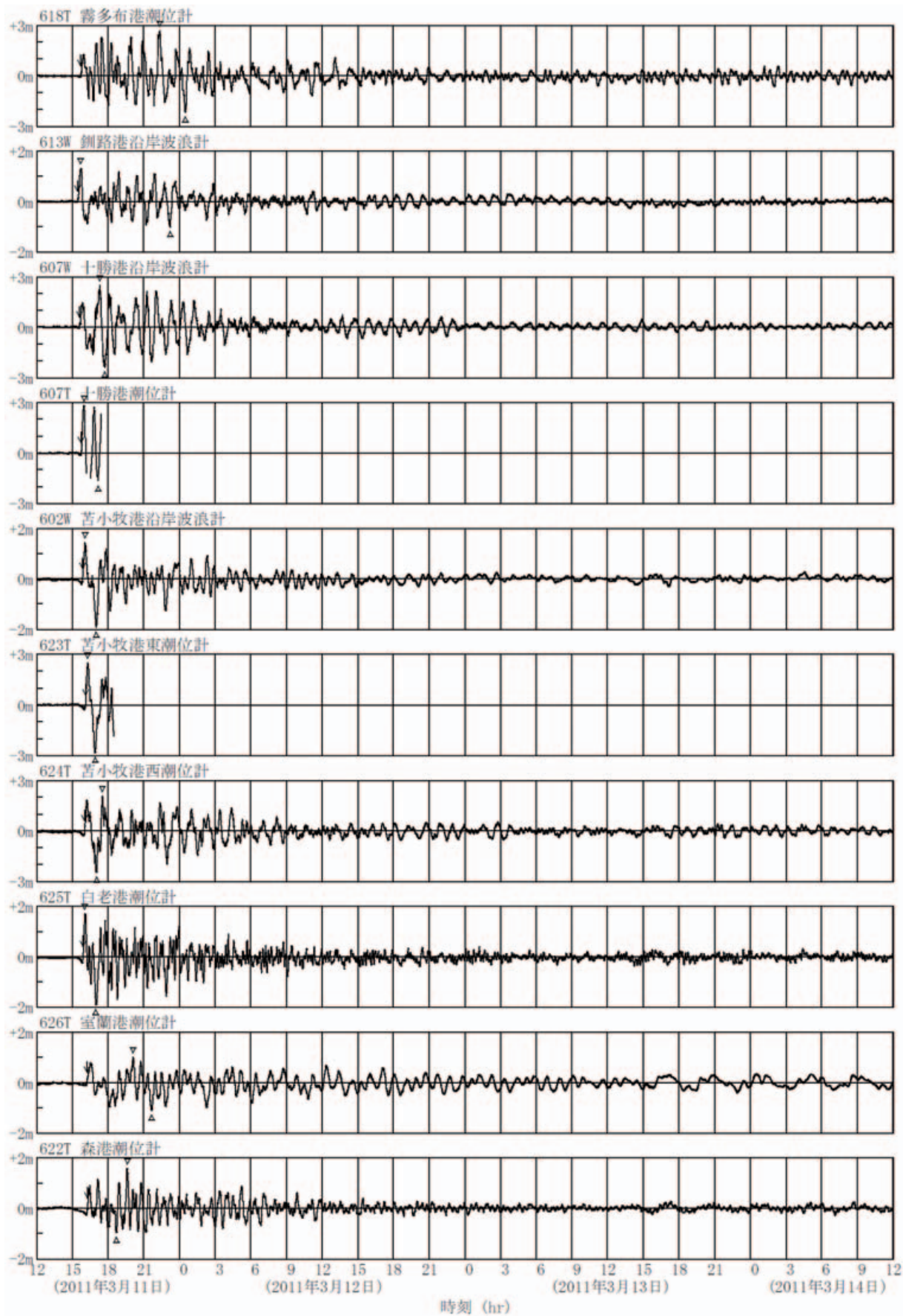
付図 A-3 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



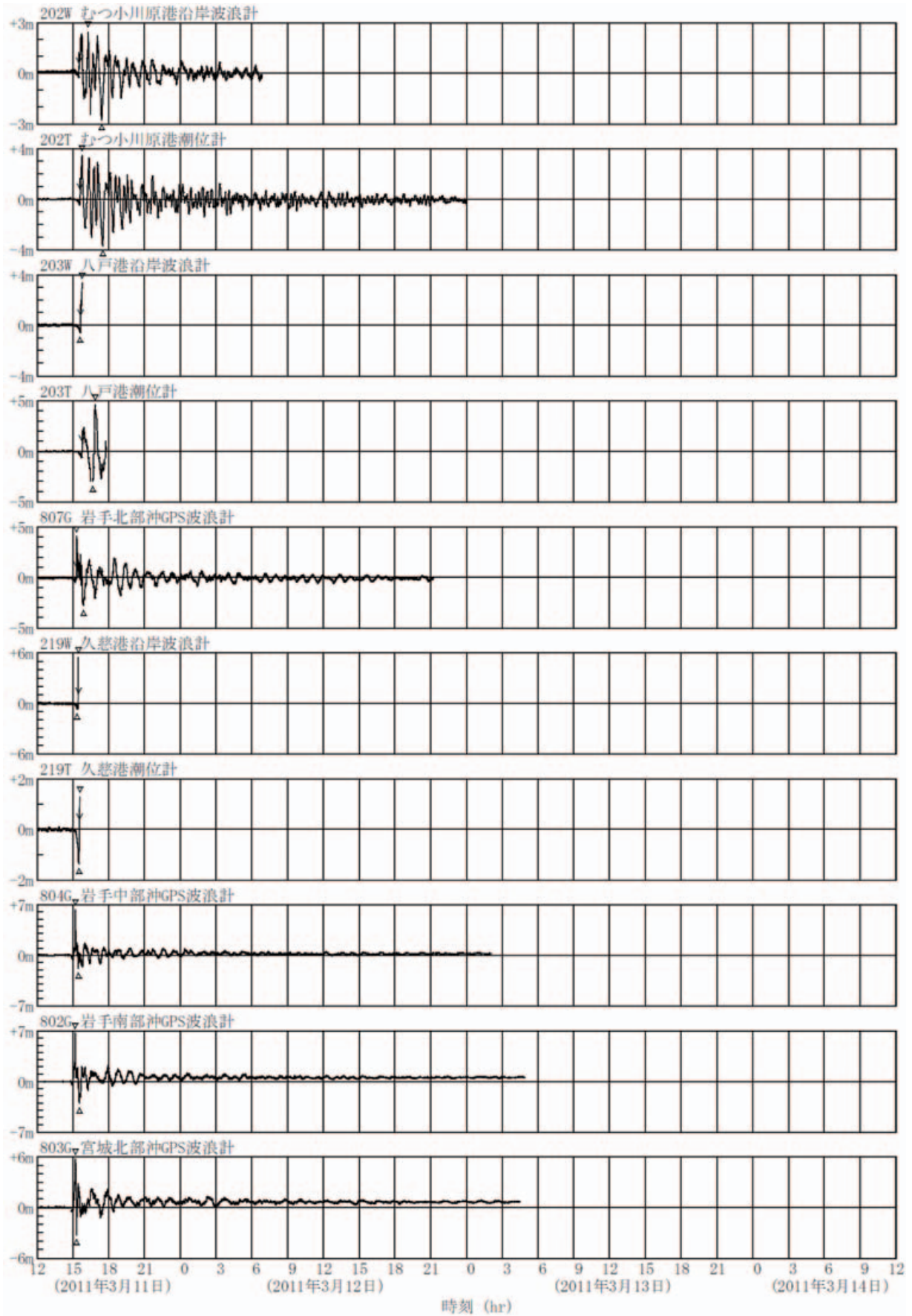
付図 A-4 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



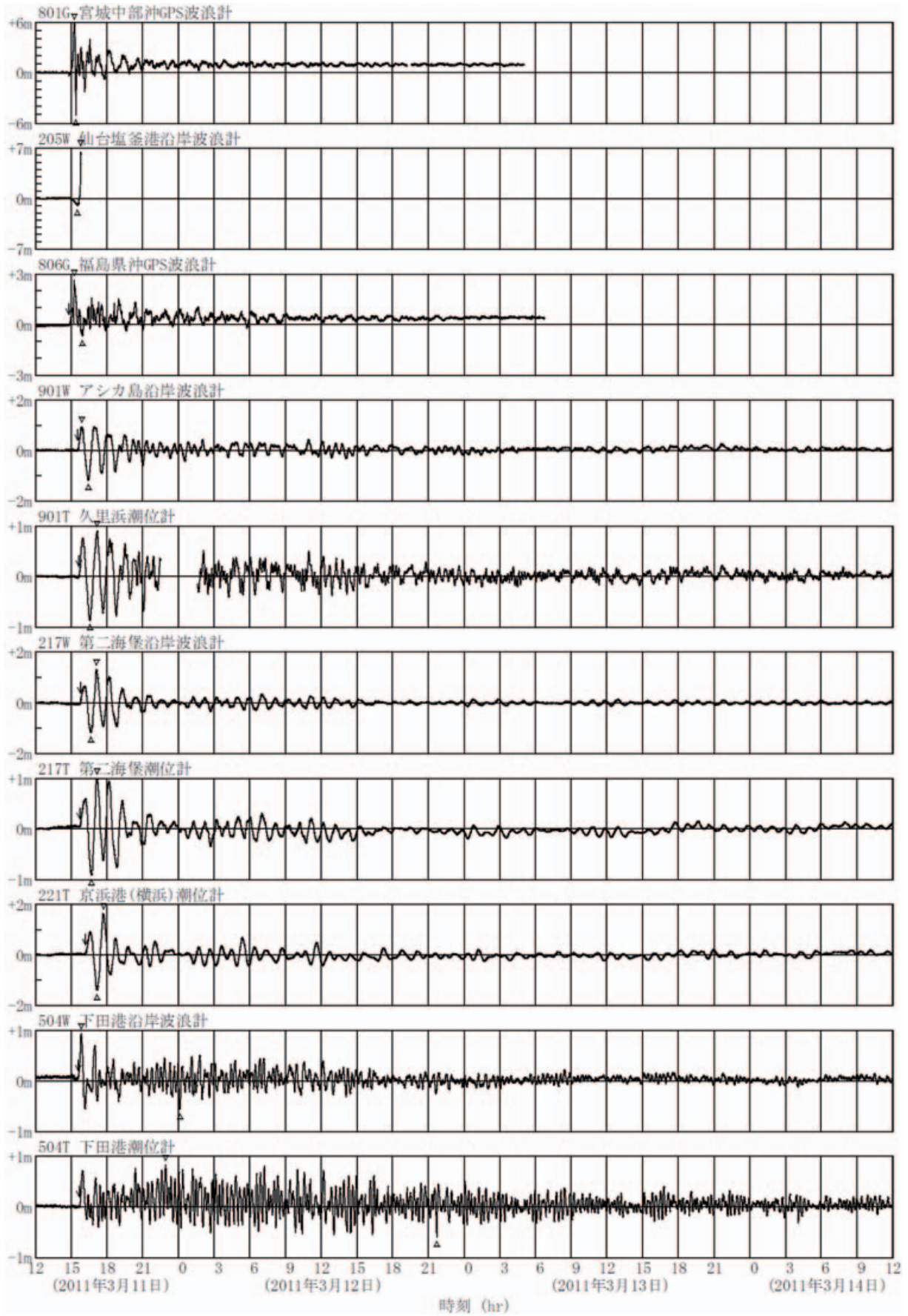
付図 A-5 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



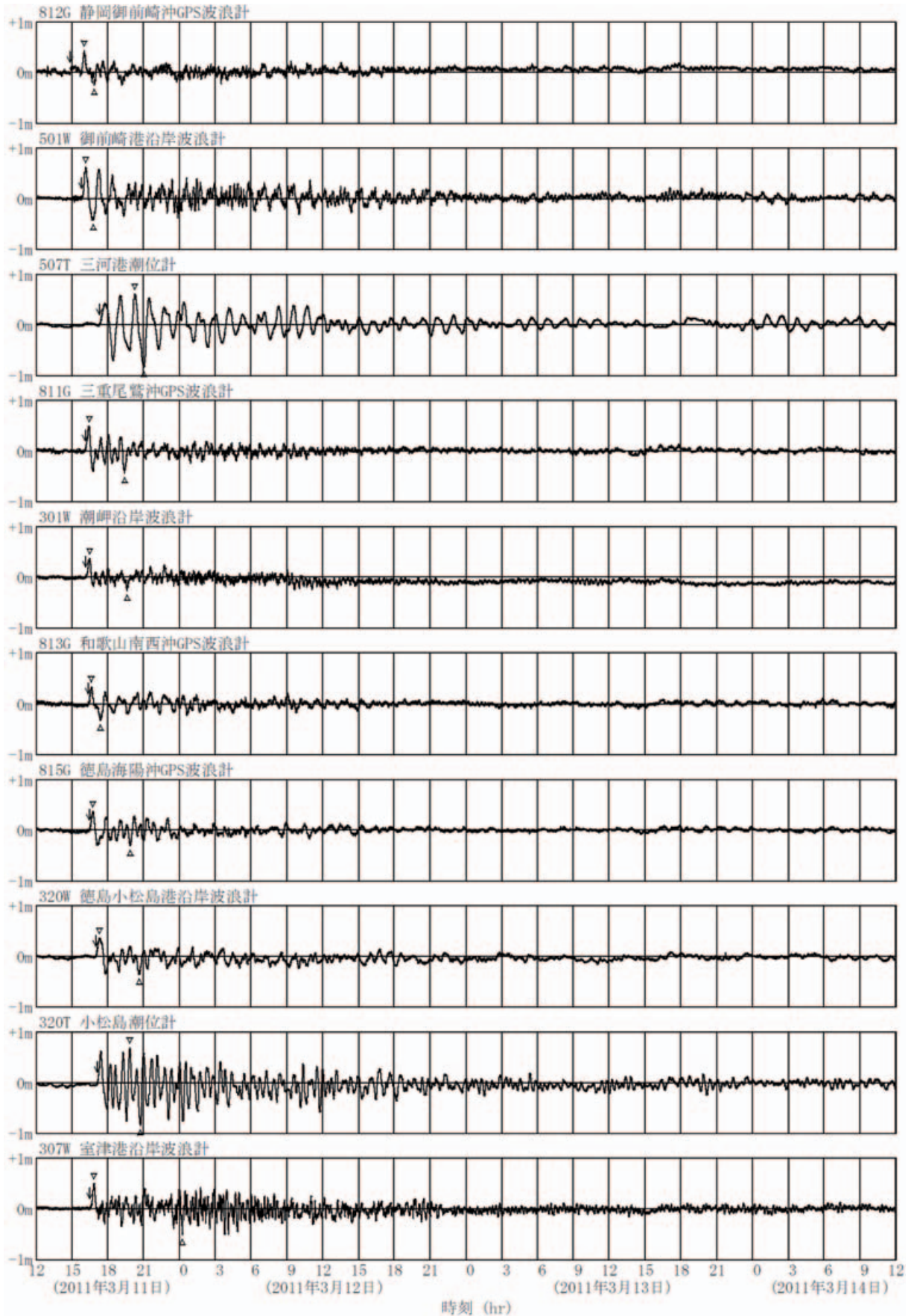
付図A-6 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



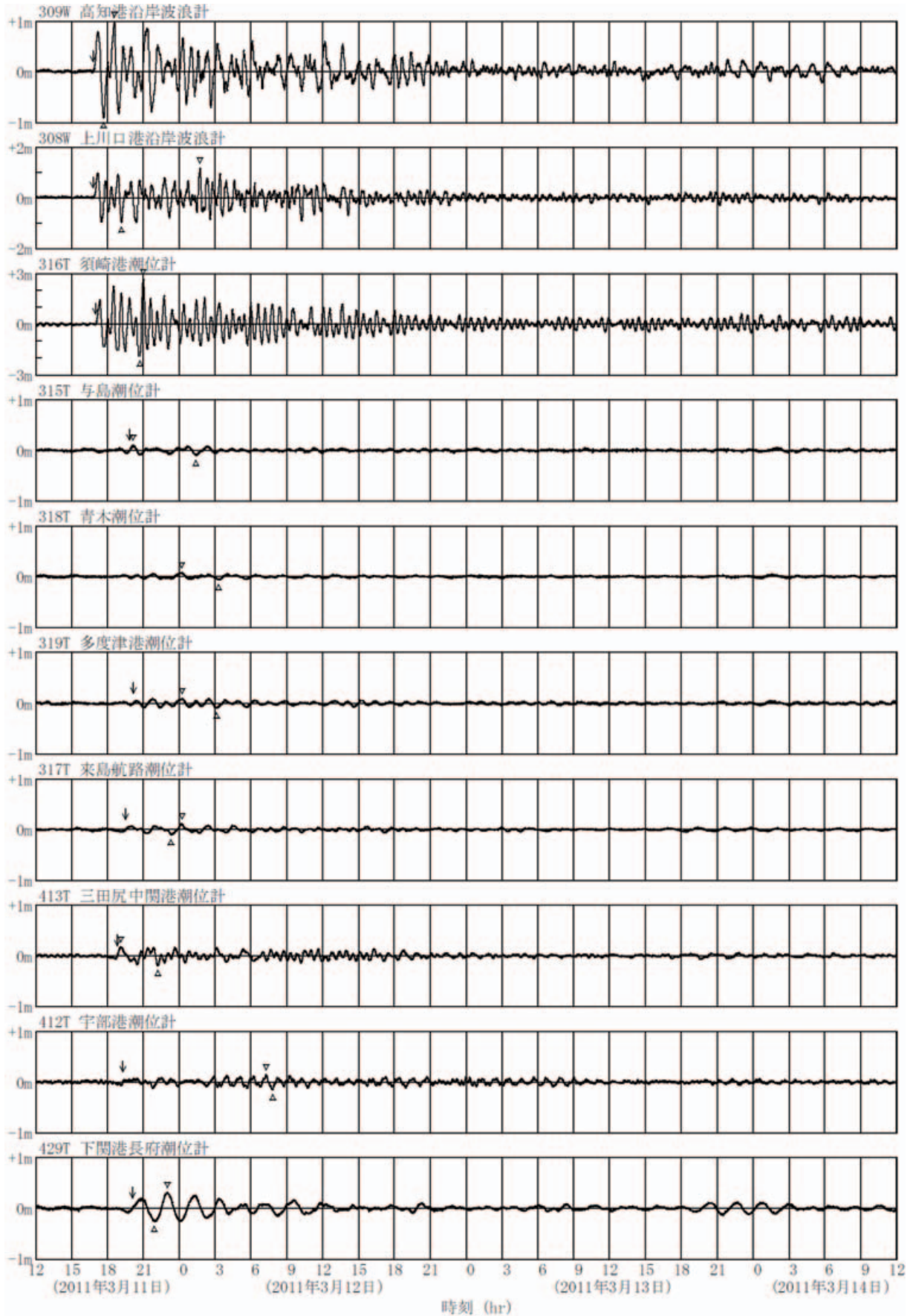
付図 A-7 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



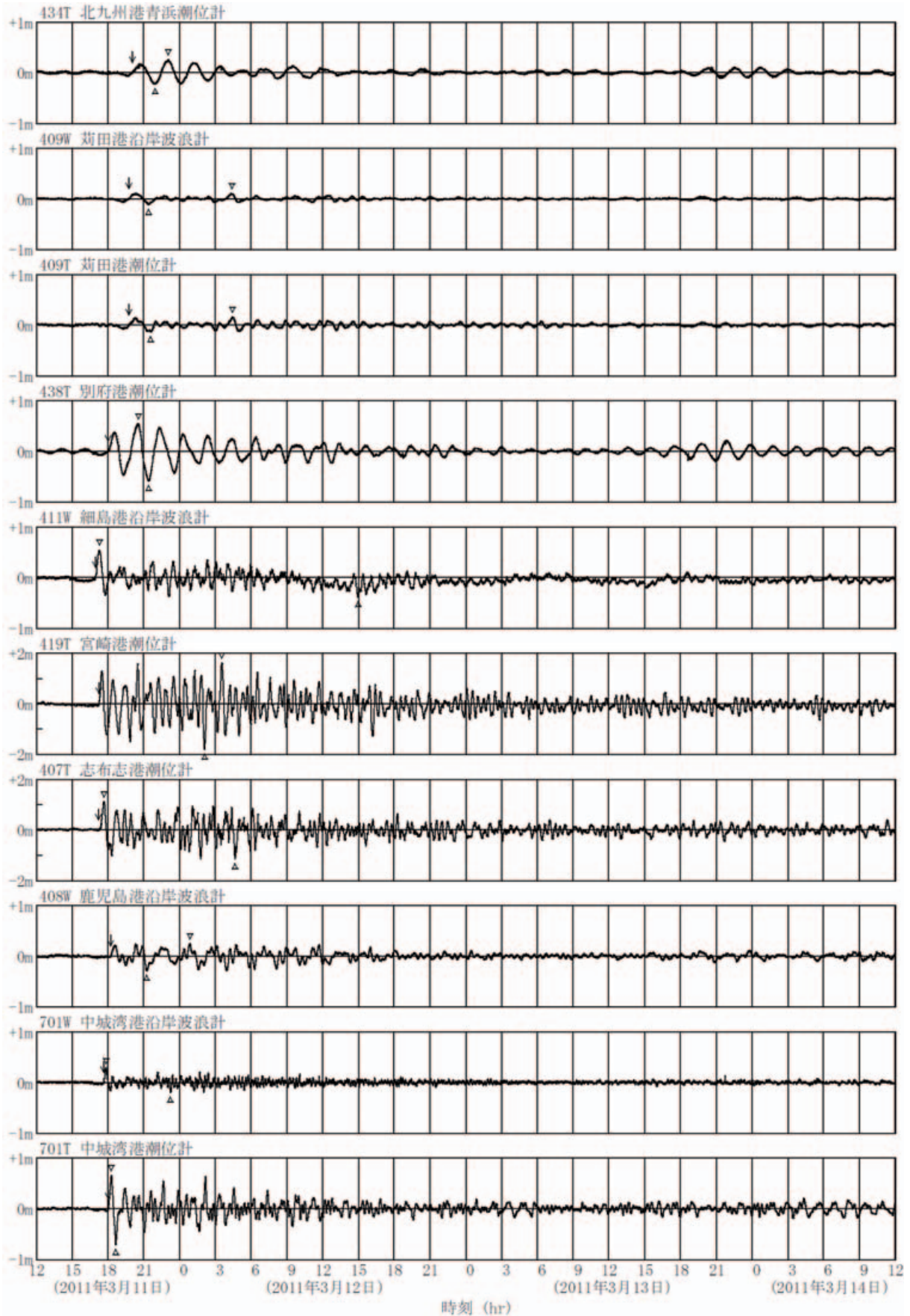
付図A-8 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



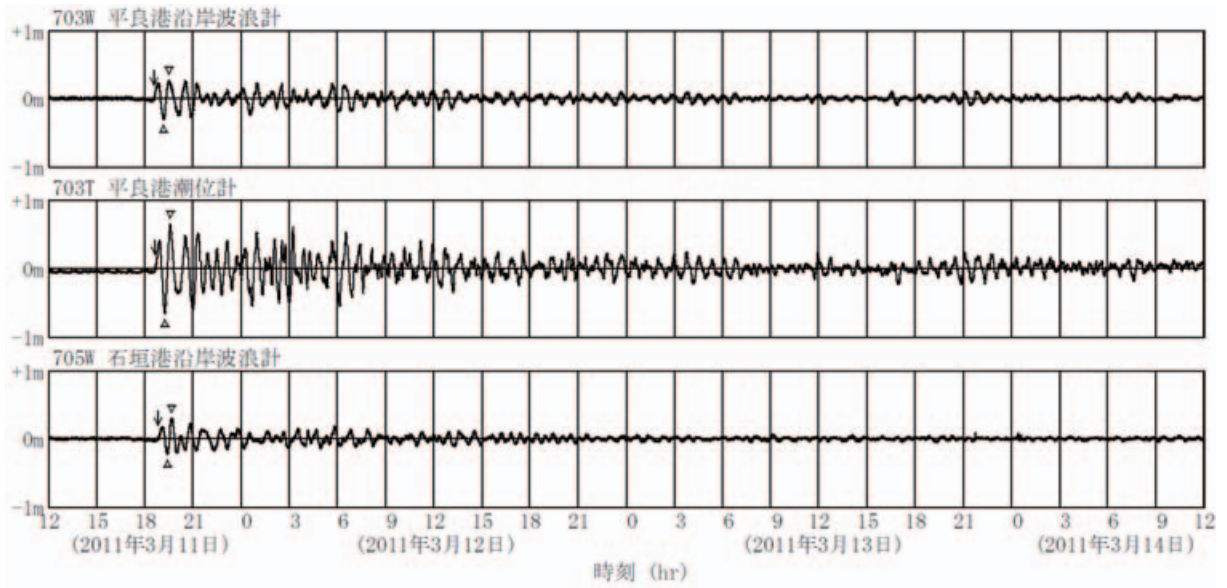
付図 A-9 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



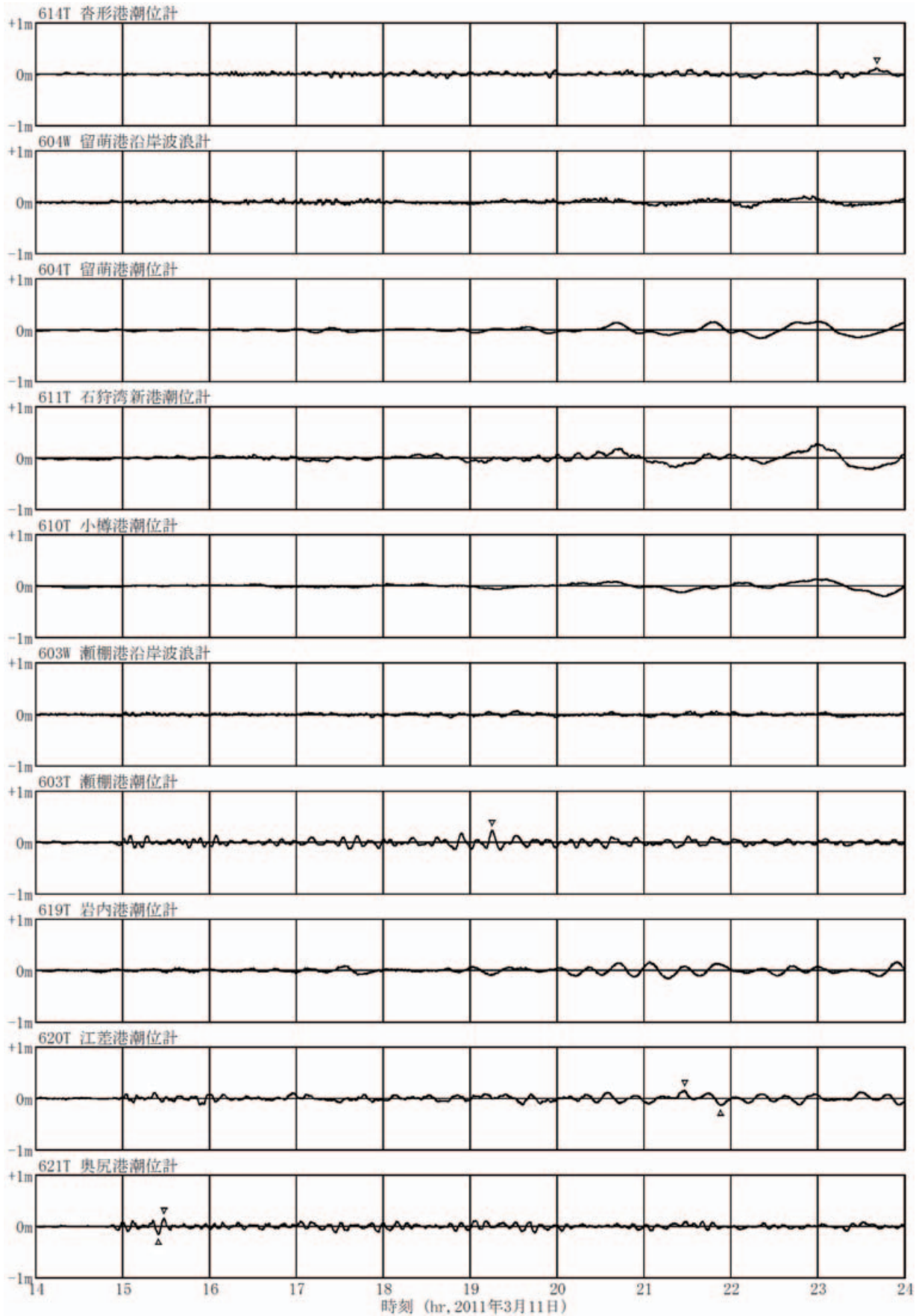
付図 A-10 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



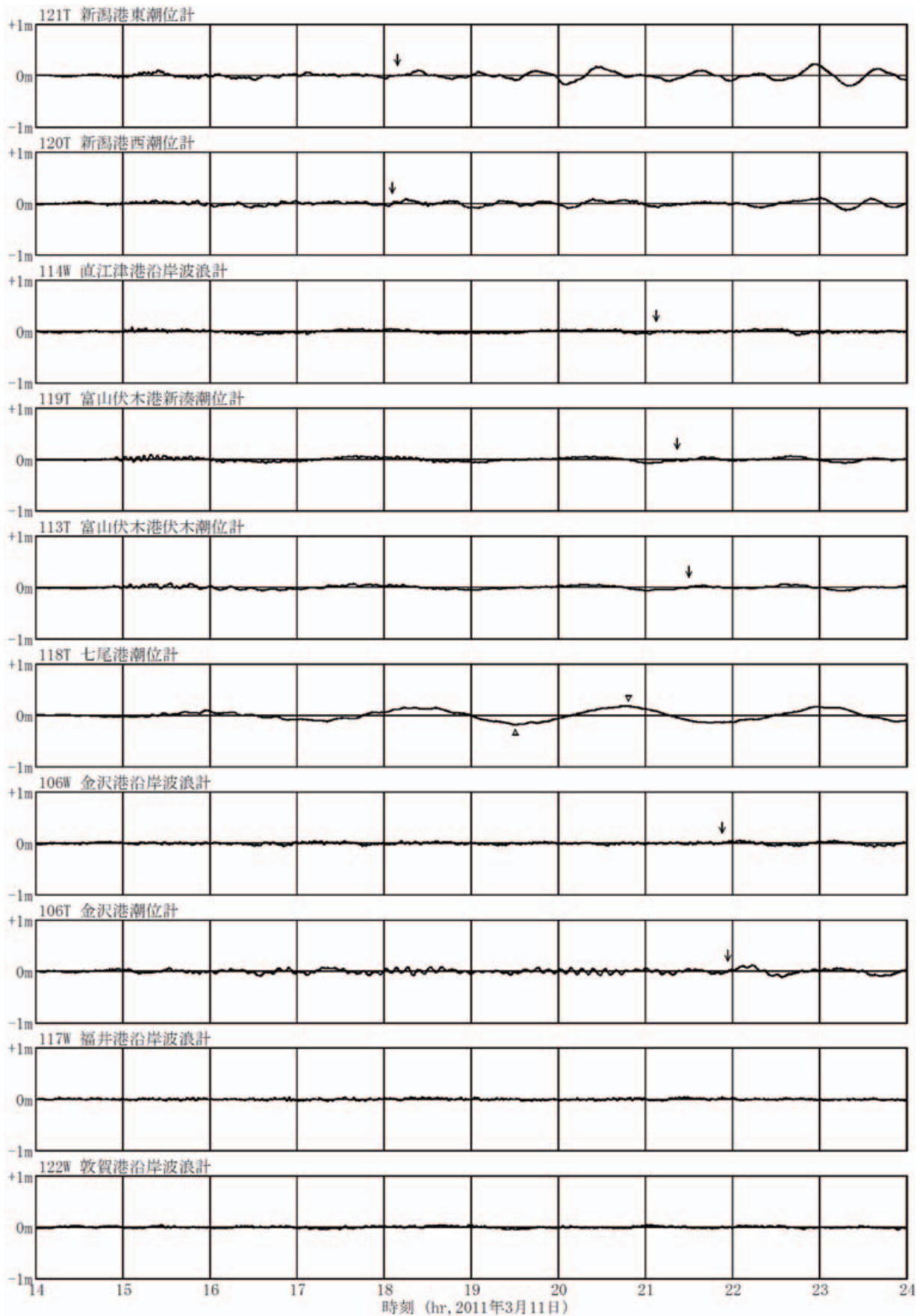
付図 A-11 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 12 時~3 月 14 日 12 時)



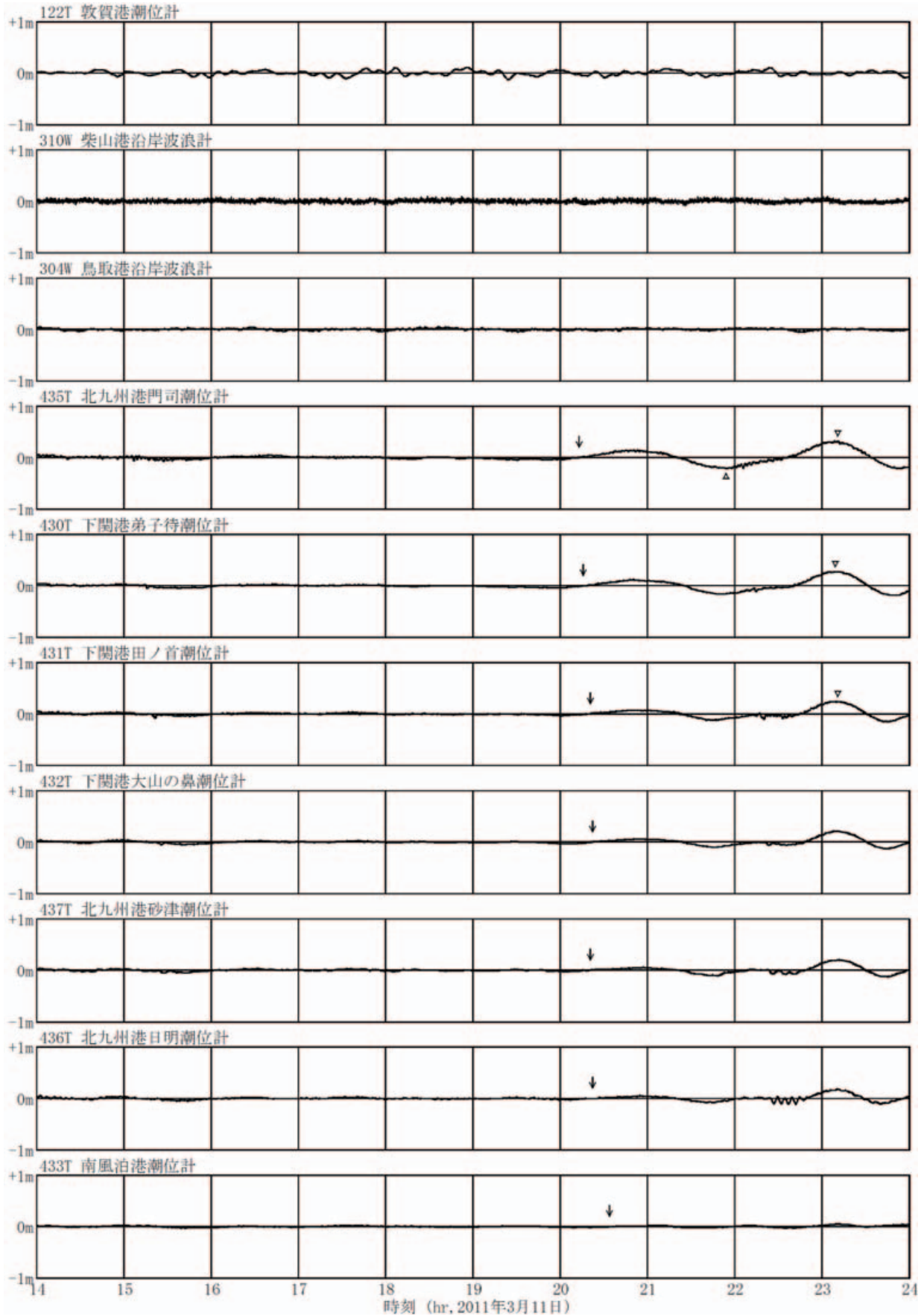
付図 A-12 津波波形 (2011年3月11日12時~3月14日12時)



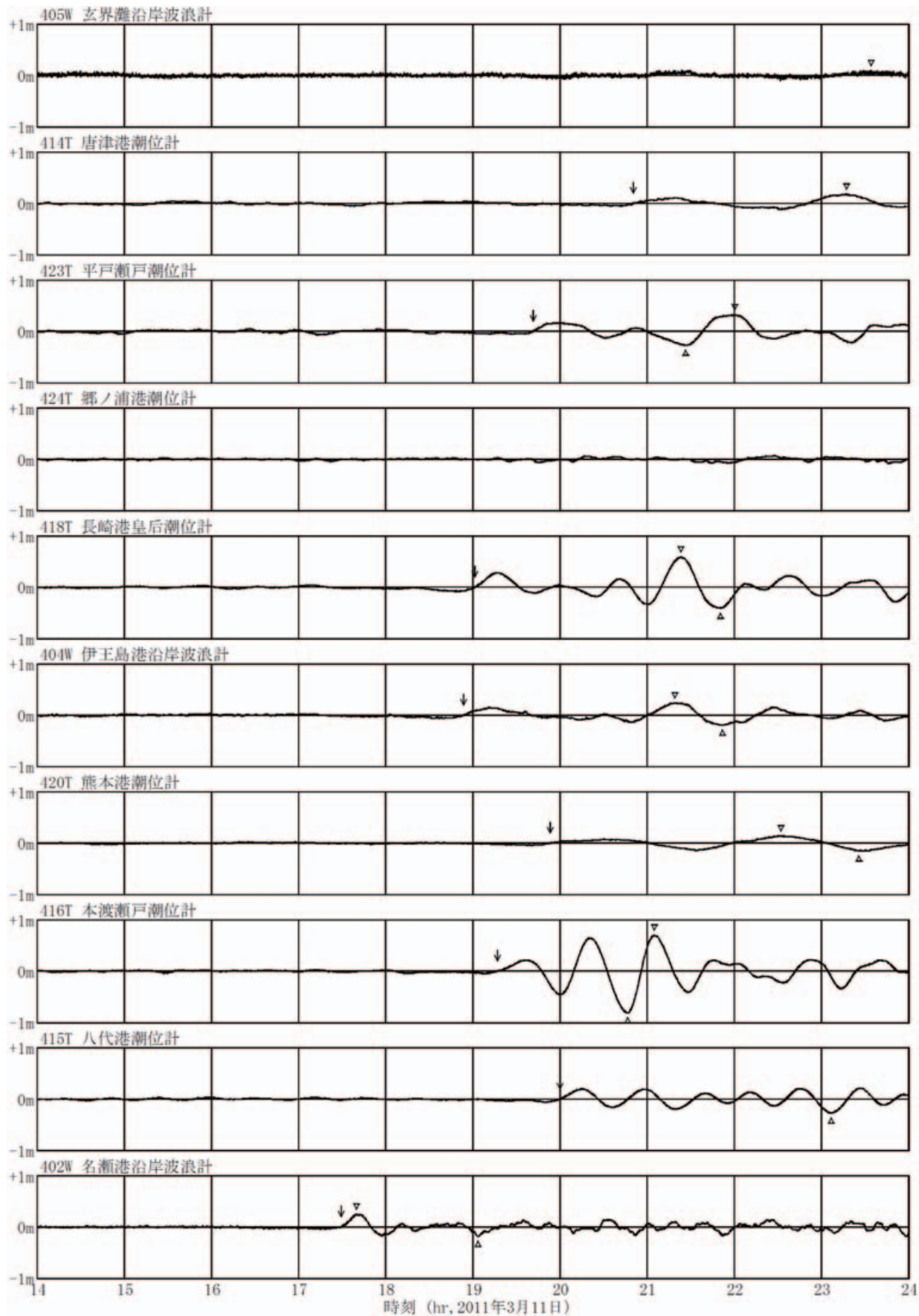
付図 B-1 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時～24 時)



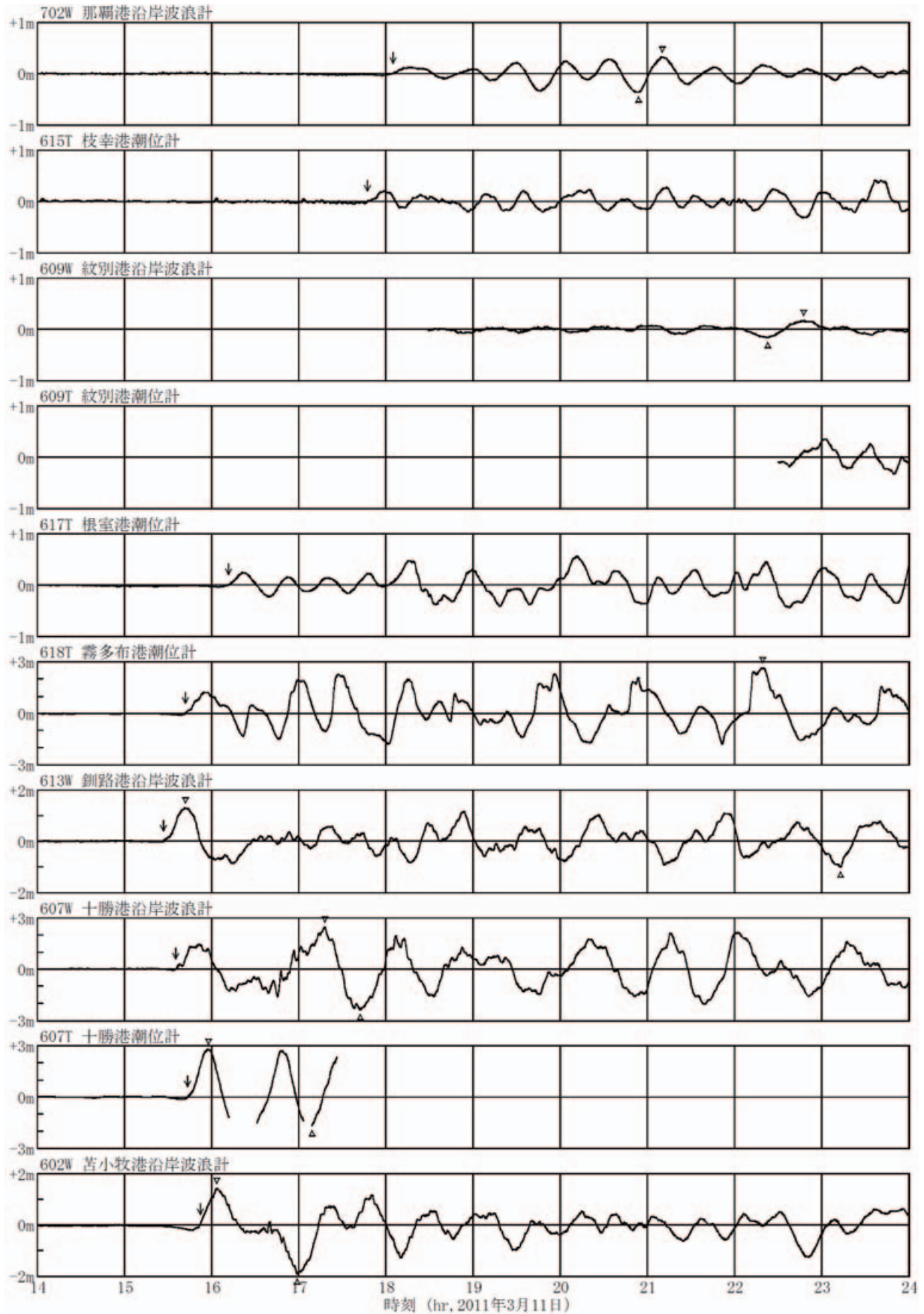
付図 B-2 津波波形 (2011年3月11日14時~24時)



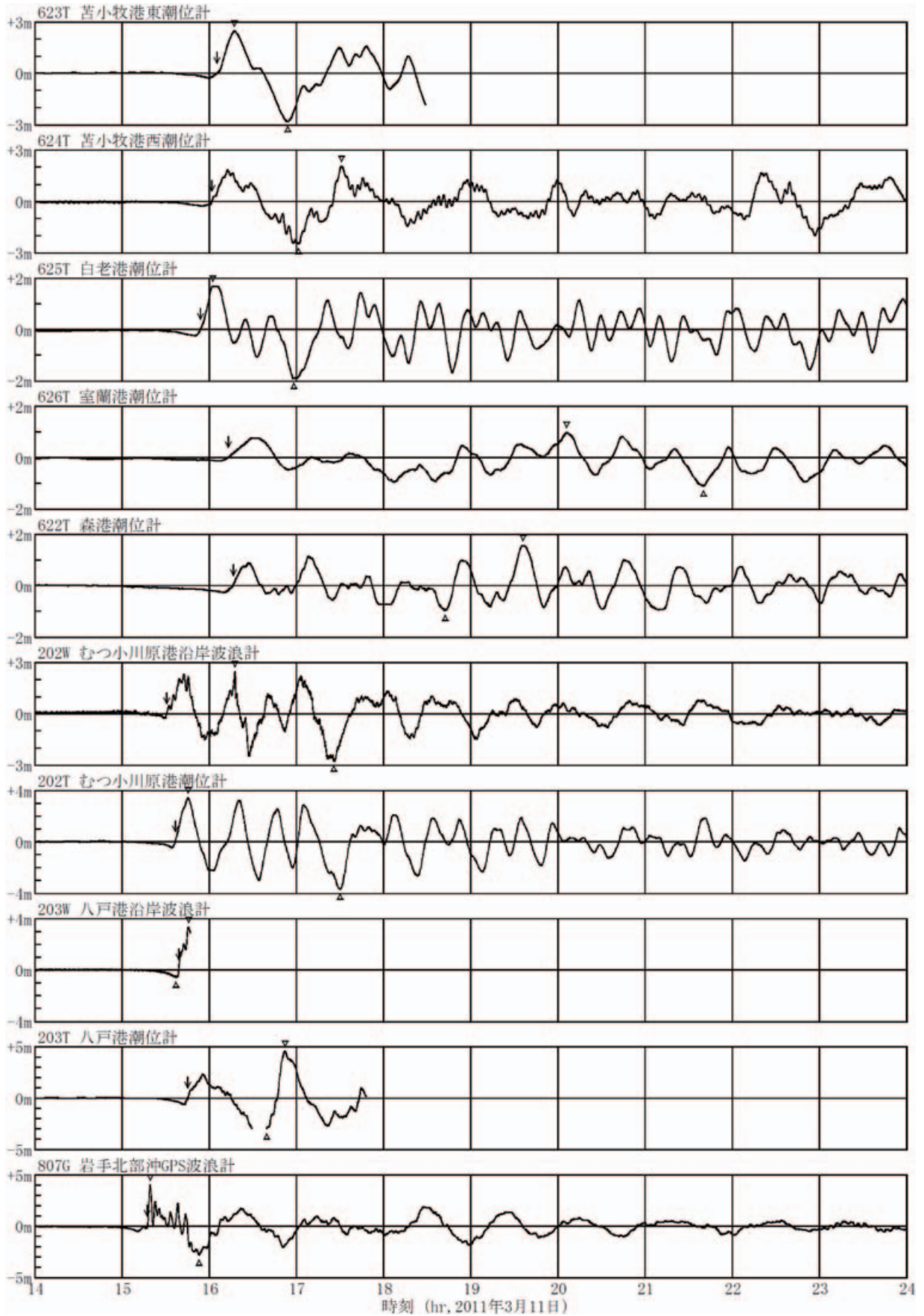
付図 B-3 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時～24 時)



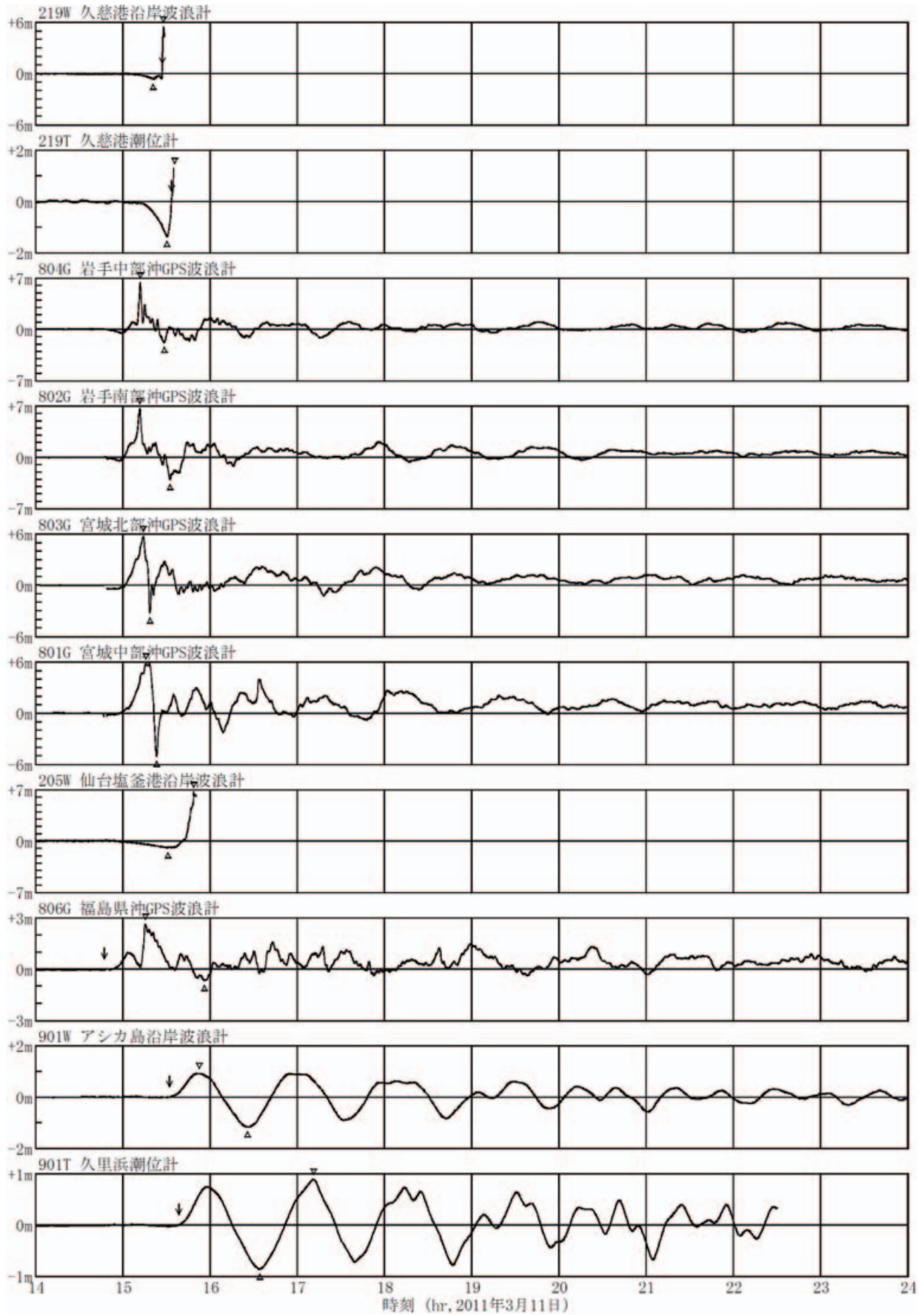
付図 B-4 津波波形 (2011年3月11日14時~24時)



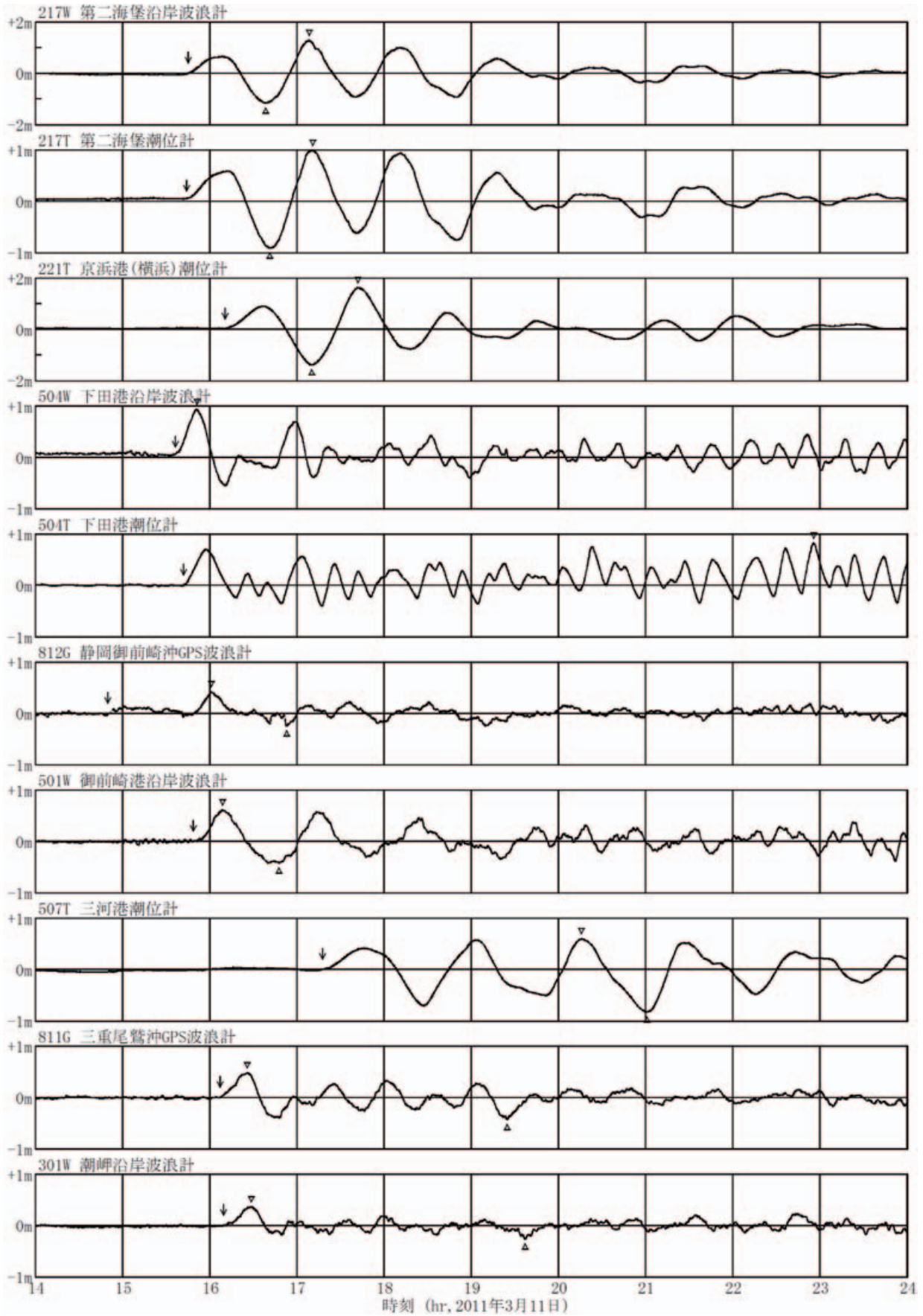
付図 B-5 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時~24 時)



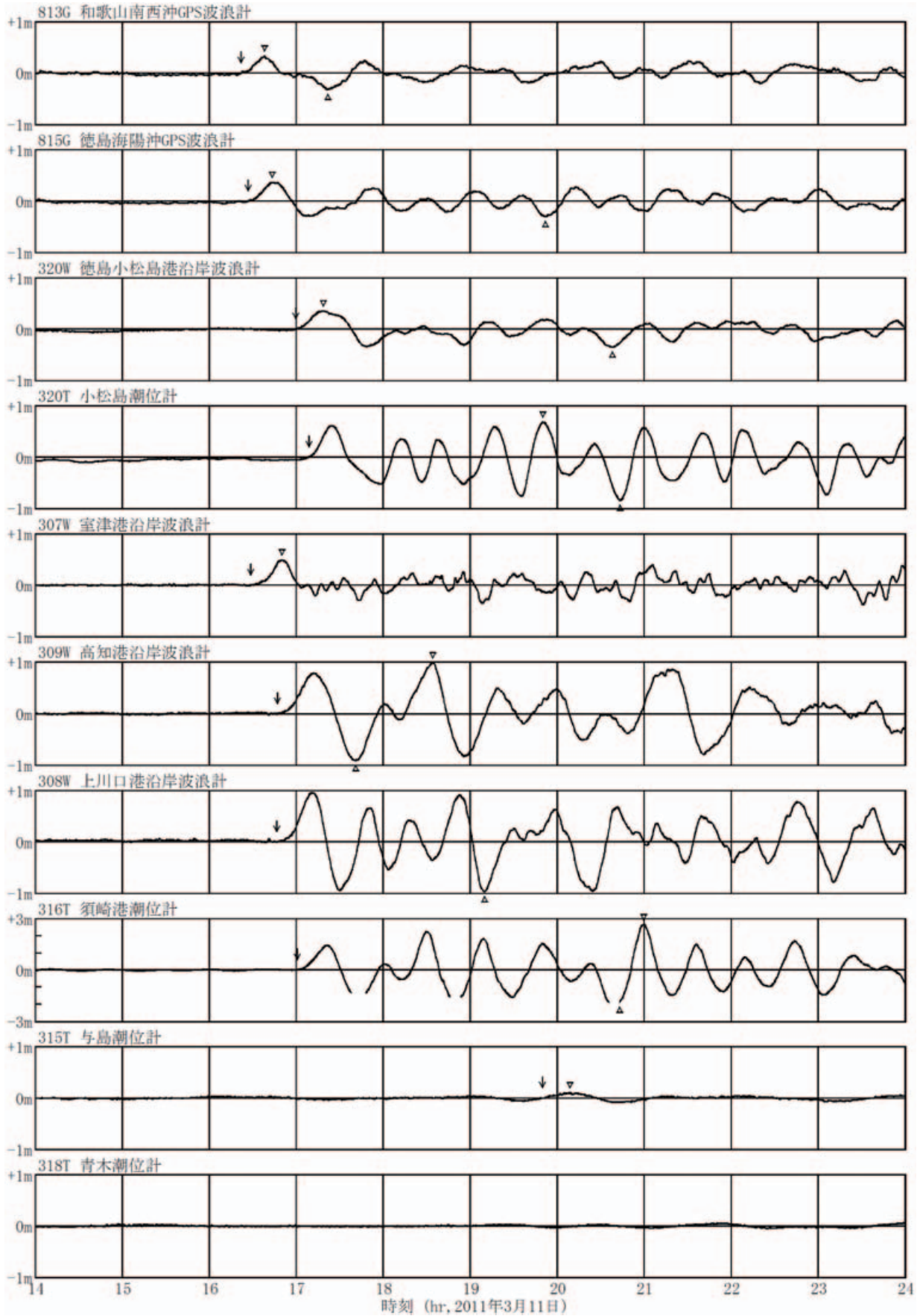
付図 B-6 津波波形 (2011年3月11日14時~24時)



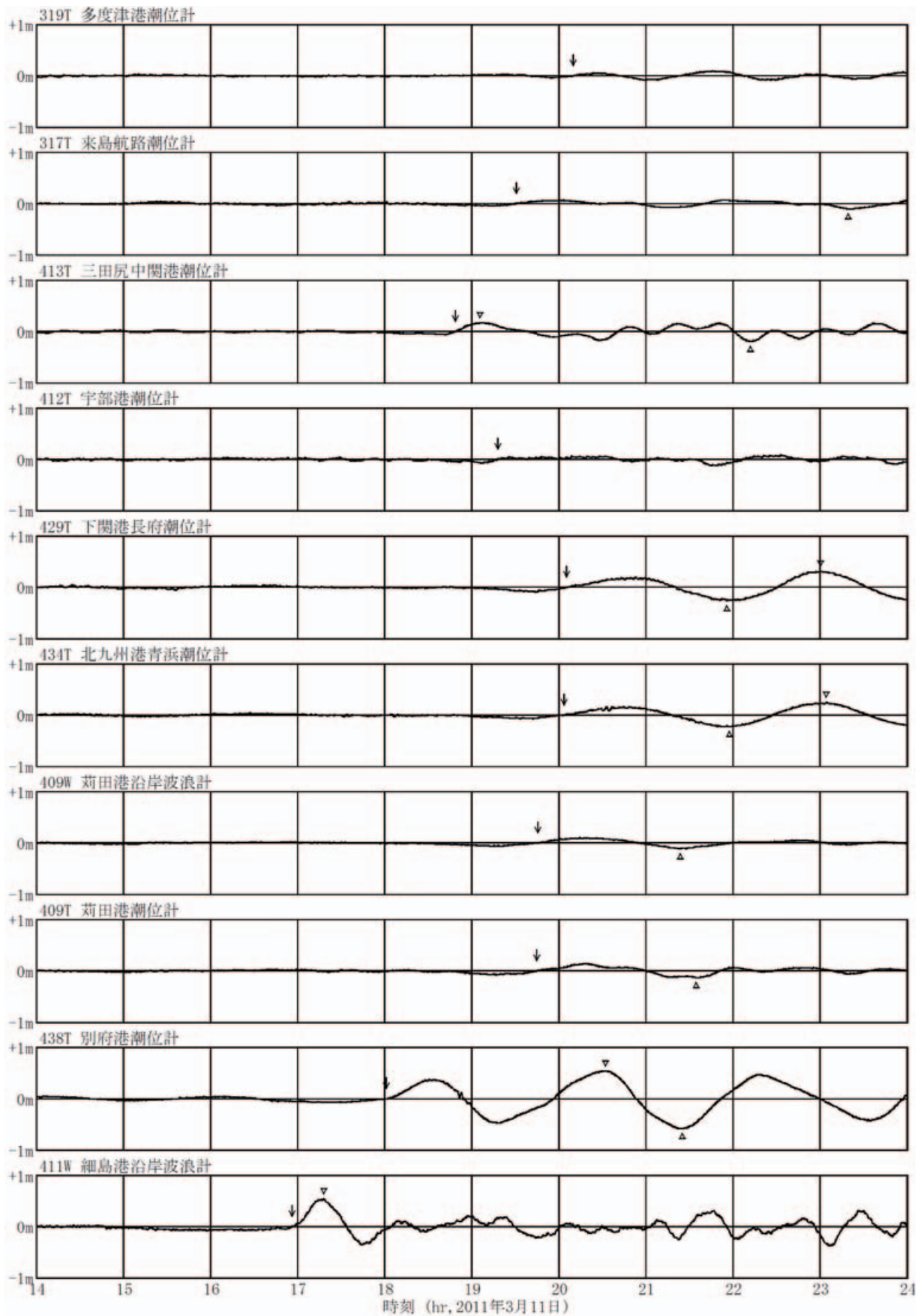
付図 B-7 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時~24 時)



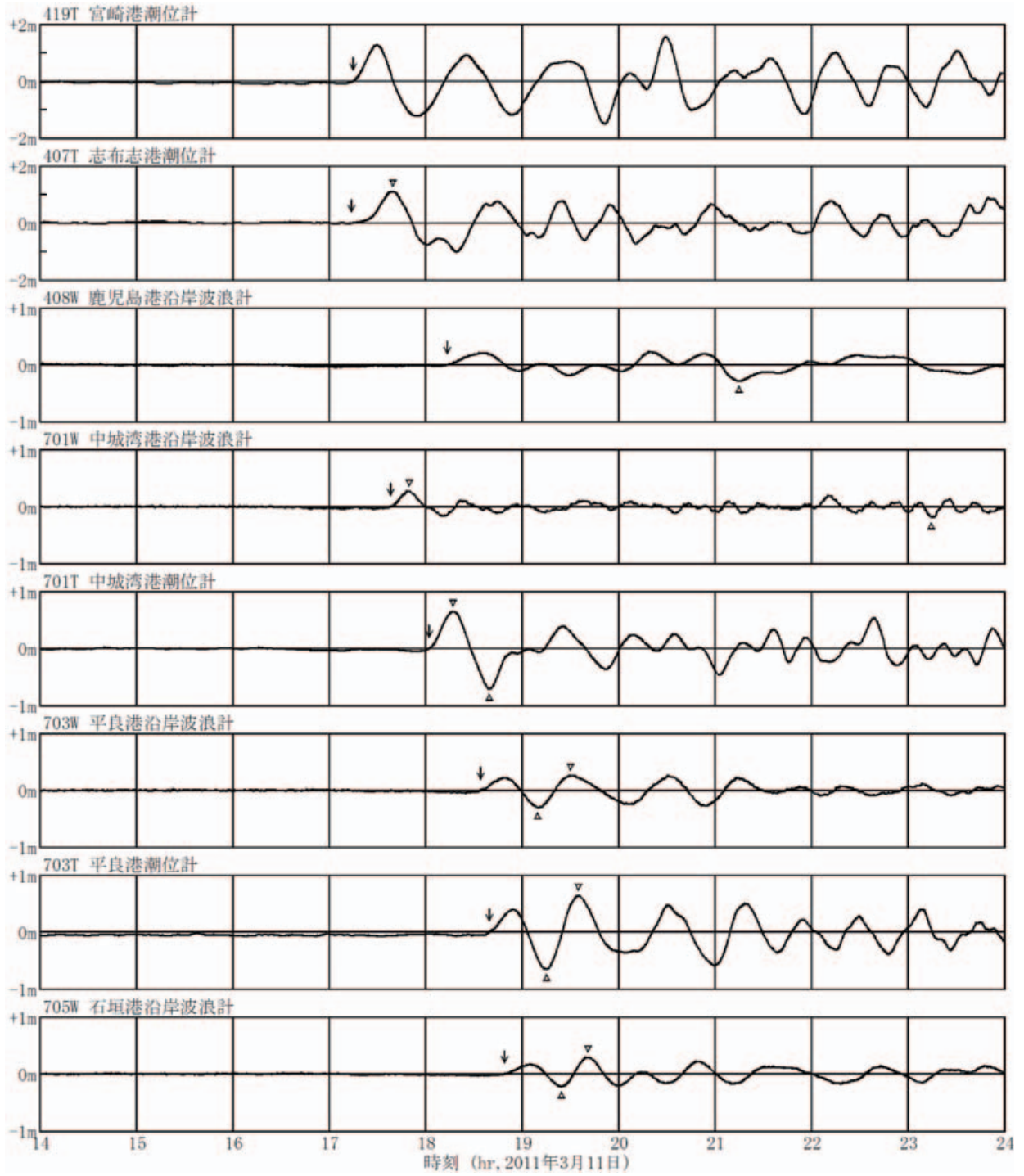
付図 B-8 津波波形 (2011年3月11日14時~24時)



付図 B-9 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時~24 時)



付図 B-10 津波波形 (2011年3月11日14時~24時)



付図 B-11 津波波形 (2011 年 3 月 11 日 14 時~24 時)

港湾空港技術研究所報告 第50巻第4号

2011. 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 © (2011) 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。

