

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

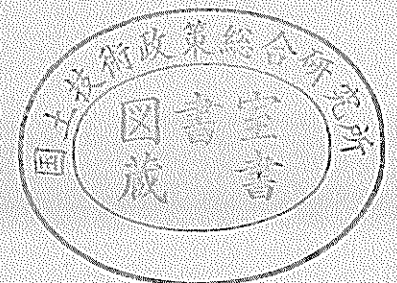
REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 32      NO. 4      DEC. 1993

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第32巻 第4号 (Vol.32, No.4), 1993年12月 (Dec.1993)

## 目次 (CONTENTS)

1. Dynamic Soil and Water Pressures due to Saturated Backfills  
on Non-Yielding Rigid Vertical Walls  
.....Isao ISHIBASHI, Tatsuo UWABE and Makoto OSADA and Takemitsu TAKANO..... 3  
(水中の剛な鉛直壁に作用する裏込土の地震時土圧と動水圧  
.....石橋 勲・上部達生・長田 信・高野剛光)
2. 海洋波の方向スペクトルの推定における拡張最大エントロピー原理法の修正  
—入・反射波共存場を対象として—  
.....橋本典明・永井紀彦・浅井 正.....25  
(Modification of Extended Maximum Entropy Principle Method for Estimating  
Directional Spectrum in Incident and Reflected Wave Field  
.....Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI and Tadashi ASAI)
3. 平成5年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報  
.....永井紀彦・橋本典明・浅井 正.....49  
(The Hokkaido-Southwest-Earthquake Tsunami Profiles Observed  
at the NOWPHAS Offshore Stations  
.....Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI)

### 3. The Hokkaido-Southwest-Earthquake Tsunami Profiles Observed at the NOWPHAS Offshore Stations

Toshihiko NAGAI\*

Noriaki HASHIMOTO\*\*

Tadashi ASAI\*\*\*

#### Synopsis

The Hokkaido-Southwest-Earthquake occurred at 22:17 on July 12th in 1993. It was reported that the magnitude of the earthquake was 7.8, and the hypocenter was N 42°47' in latitude, E 139°12' in longitude, and 34km in depth. Tsunami caused by the earthquake attacked coast lines all around the Japan Sea Basin.

This report presents the tsunami profiles observed at the offshore stations of NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS). Among the 42 NOWPHAS wave observation offshore stations all around Japan, ultrasonic type wave height gauges and current meter type wave direction gauges of the following stations caught the tsunami profiles at the water depth of 20 to 50m.

Hokkaido Coast: Rumoi, Monbetsu

Honshuu Coast : Fukaura, Noshiro, Akita, Sakata, Niigata, Wajima, Fukui,  
Hamada, Ainoshima, Mutsuogawara

This report also introduces several interesting results of the tsunami profile shown as follows:

- (1) Relation between water surface fluctuation and seabed water pressure fluctuation
- (2) Relation between water surface fluctuation and seabed horizontal current
- (3) Horizontal movement of the water particles at seabed
- (4) Relation between offshore tsunami profiles and tide stations' records inside of ports by means of the frequency spectrum analysis

**Key Words** : NOWPHAS, Tsunami, Long Waves, Hokkaido-Southwest-Earthquake

---

\* Chief, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\* Member, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 目 次

要旨	49
1. はじめに	55
2. 全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の波浪観測とデータ処理解析の概要	56
2.1 観測地点および波浪計の設置条件	56
2.2 波浪観測データ収集システム	57
3. 津波波形観測地点と解析対象観測時	57
3.1 リアルタイムデータ収集観測地点	57
3.2 CMT郵送ノンリアルタイム収集観測地点	57
3.3 解析に用いたその他の波形記録	58
4. 地点別観測波形記録	58
4.1 総括表	58
4.2 輪島における波形記録	59
4.3 他の観測地点における波形記録	61
5. 津波波形に関する二・三の検討	70
5.1 水位変動と水圧変動	70
5.2 水位変動と水平流速	71
5.3 水粒子の運動変位	74
5.4 検潮記録との比較	79
6. 沖合津波波形に対する潮位時系列の応答	80
6.1 津波伝達時の潮位時系列	80
6.2 検潮儀の応答特性	82
6.3 パワースペクトル解析	83
6.4 沖合津波記録と検潮記録のスペクトルの比較	84
6.5 相互のスペクトルの相関性	88
7. まとめ	92
8. おわりに	93
参考文献	94
主要記号表	95

1. はじめに

平成5年7月12日22:17に発生した北海道南西沖地震に伴う津波は、奥尻島や北海道南部日本海沿岸に大きな人的物的被害をもたらしたばかりではなく、日本海を広く伝播し、青森県、秋田県、佐渡島を含む新潟県、石川県の能登半島、隠岐島を含む島根県沿岸にまで被害範囲がおよぶものであった。この地震の震源は、北緯42度47分、東経139度12分、深さ34kmであり、マグニチュードは7.8であったと発表されている。

津波の実態を解明することは、今後の津波に対する防災対策を検討する上で重要な課題である。従来、津波の波形記録は、検潮所による水位記録だけが残されたデータであった。しかし、検潮所におけるデータは、導水管を通過した観測値であるため、沖合の津波波形とはかなり異なった記録となっていること、また、導水管を通った水位の上下変動を測定しているため、いわば、ローパスフィルターを通った波形となり、数分以下の周期の変動成分は測定できないこと、などの問題点を含んでいるため、津波の実態解明のためには不十分なものであった。このため、津波の観測は、沖合に設置された波高計を有効に活用すべきであることが、研究者の間から指摘

されているところであった。

運輸省港湾局、各港湾建設局、北海道開発局、沖繩総合事務局および港湾技術研究所は、協力して全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス: NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)を構築し、20年以上にもわたって継続的に我国の沿岸域における波浪観測を実施し、その成果を、毎年波浪観測年報<sup>1)-3)</sup>や波浪観測資料<sup>4),5)</sup>、ほぼ5年毎に刊行される長期統計報<sup>6)-10)</sup>などに報告している。

ナウファスの波浪観測は、2時間毎に0.5秒間隔で20分間データの取得を原則としており、現状では、連続観測ができるシステムとはなっていない。このため、10年前の1983年5月26日に発生した日本海中部沖地震に伴う津波波形として、沖合の波高計がとらえたデータは、深浦港における1983年5月26日11:50-12:10の波形記録が唯一のものであった。<sup>11)</sup>

このたびの北海道南西沖地震に伴う津波の波形に関しては、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の波高計および波向計が、多くの観測地点において、より詳細にとらえることができた。これは、以下の理由によるものである。

①1983年当時と比べて、ナウファス波浪観測地点数は増

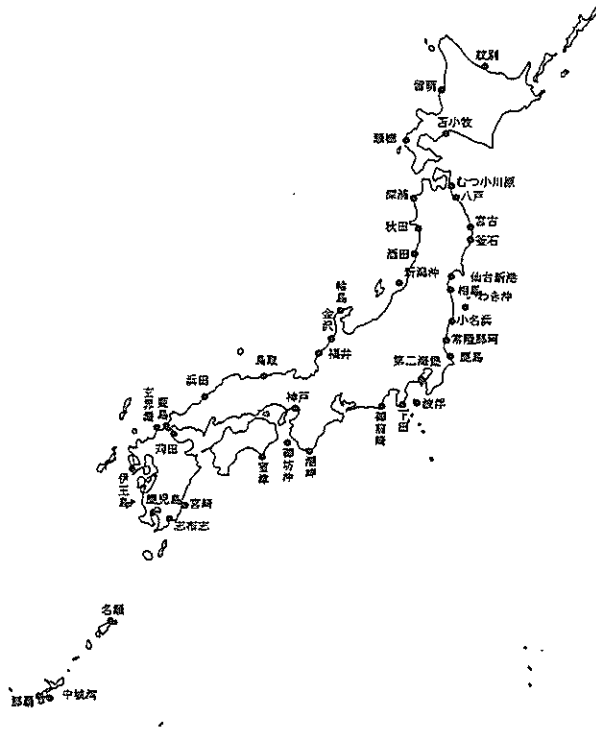


図-1 全国港湾海洋波浪観測地点位置図

加しており、多くの地点の波形記録を収集することができた。

- ②1983年当時には、まだあまり普及していなかった海底設置式流向流速計型波向計による波向観測が、多くのナウファス波浪観測地点で実施されるようになったため、津波による流れのデータも取得できた。
- ③リアルタイム波浪データ収集が、多くのナウファス波浪観測地点で実現するようになったため、港湾技術研究所からの遠隔操作によって、通常は2時間毎の観測を、30分毎の観測に切り替えることが、数箇所の観測地点で実行できた。各観測のデータ取得時間は20分間なので、ほぼ連続的なデータ取得ができたわけである。

本報告は、以下に示す観測地点において取得された水位変動、水圧変動および海底の流向流速記録を示し、検潮記録との比較による沖合における津波波形の特徴と、地形に伴う反射屈折等を考慮した津波波形に関する考察

をおこなったものである。

- 北海道開発局 : 留萌, 紋別
- 第二港湾建設局 : 深浦, むつ小川原
- 第一港湾建設局 : 秋田, 酒田, 新潟沖, 輪島, 福井
- 第三港湾建設局 : 浜田
- 第四港湾建設局 : 藍島
- 秋田県 : 能代

## 2. 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の波浪観測とデータ処理解析の概要

### 2.1 観測地点および波浪計の設置条件

図-1は、1991年末時点における全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)のうち、港湾技術研究所でデータの集中処理解析が行われている波浪観測地点の分布を示したものである。<sup>3)</sup>日本海側および太平洋側それぞれについて、北海道から沖縄に至る我国の沿岸全体に観測地点が分布している状況が理解できる。

表-1 津波波形観測記録地点一覧表

観測地点名	観測項目	北緯	東経	水深(m)
瀬棚	$\eta$	42° 26' 30"	139° 49' 16"	-52.9
	U, $\theta$	42° 25' 51"	139° 50' 11"	-20.0
留萌	$\eta$	43° 51' 50"	141° 28' 20"	-50.0
紋別	$\eta$	44° 24' 58"	143° 26' 00"	-52.0
	U, $\theta$	44° 23' 14"	143° 20' 40"	-18.0
深浦	$\eta$	40° 39' 25"	139° 54' 57"	-49.6
秋田	$\eta, P, U, \theta$	39° 44' 01"	140° 00' 38"	-29.5
酒田	$\eta$	39° 00' 21"	139° 47' 18"	-45.0
新潟沖	$\eta, P, U, \theta$	38° 00' 07"	139° 07' 46"	-35.0
輪島	$\eta$	37° 25' 40"	136° 54' 19"	-50.0
	U, $\theta$	37° 25' 35"	136° 53' 44"	-27.0
福井	$\eta, U, \theta$	36° 12' 39"	136° 06' 44"	-21.3
浜田	$\eta$	34° 54' 07"	132° 02' 21"	-51.0
藍島	$\eta$	34° 00' 34"	130° 47' 36"	-20.7
むつ小川原	$\eta$	40° 55' 20"	141° 25' 40"	-49.0
	U, $\theta$	40° 55' 02"	141° 24' 57"	-27.8

- $\eta$  : 超音波式波高計 (USW) による水位変動記録  
(酒田では、ステップ式波高計(SRW-V)による記録)
- P : 海底面における水圧変動記録
- U,  $\theta$  : 海底面における水平流速記録

表-1は、図-1で示された各波浪観測地点の中で、今回の津波波形を記録した観測地点における観測機器の設置条件を示したものであり、波高計および波向計の機種および設置水深と緯度経度を示したものである。<sup>3)</sup>

波高計の機種は、大部分が超音波式波高計 (USW) となっているが、酒田港では、タワーに固定されたステップ式波高計 (SRW-V) が設置されている。波向計が設置され波向観測が実施されている地点も数多く見られるが、これらの波向観測はすべて超音波式流速計型波向計 (CWD) によって、水粒子の水平2成分流速  $U, \theta$  を測定することによって行われている。

## 2.2 波浪観測データ収集システム

ナウファスにおける波高観測は、2時間毎に20分間の水面の上下変動を0.5秒のサンプリング間隔で取得することを標準としている。このため1地点1観測当たりのデータ量は波高のみを観測する場合 (1チャンネル) 2,400データであり、1日では28,800データとなる。波高に加えて波向の観測を行っている地点では、水位変動のほかに水平2成分 (2チャンネル) の流速データと水圧変動記録も同様のサンプリングタイムで取得する必要があるため、データ量は4倍となる。このような大量のデータを効率的に港湾技術研究所に収集することは、波浪観測データの集中処理解析がはじまった1970年以来、大きな技術課題となっていた。

波浪データの収集は、当初は、PT (紙テープ) にデータを収録することによって開始された。その後、1978年から順次CMT (カートリッジ式マグネティックテープ) に収録する方式に移行した。CMT1本には、1チャンネルの生データを2週間分程度収録することができる。各観測地点における波浪観測担当者 (港湾工事事務所等の調査担当職員) によってCMT交換が行われ、データが収録されたCMTは当所に郵送される。当所では、大容量の記憶媒体である光磁気ディスクにデータを転送した後、データの処理・解析を行い、再利用のためにCMTを消磁して各波浪観測担当事務所等に返送している。

このCMT郵送方式をさらに省力化し、リアルタイムにデータ収集を行うように改良したものが、電話回線を利用した波浪情報システムである。観測局で取得された波浪データは、当所の波浪データ自動監視装置からの自動呼出によって公衆電話回線を経由して、毎観測時間後に収集される。収集データは、室内LANを通じてワークステーション (EWS) に展開される。これらは、パソコンからの呼出によってモニターすることができる。このリアルタイムシステムは、1993年7月時点で、すでに20地点

において運用されている。今後、他の地点についても、CMT郵送システムから電話回線を利用した新システムへの移行が進められる予定である。<sup>12),13)</sup>

表-1に示す観測地点の中では、

北海道開発局 : 紋別, 留萌, 瀬棚  
第一港湾建設局 : 秋田, 輪島, 酒田, 新潟沖  
第二港湾建設局 : むつ小川原

において、この新システムが運用されている。

## 3. 津波波形観測地点と解析対象観測時

### 3.1 リアルタイムデータ収集観測地点

地震直後12日23:30頃、海象調査研究室では、以下のリアルタイムデータ収集観測地点におけるデータ収集間隔を、通常の2時間間隔から30分間隔に切り替えて、連続データ収集をおこなった。

ナウファスの波浪データ観測は、1観測20分間のデータ収集を0.5秒間隔でおこなうので、10分の間隔をあけて、すぐ次のデータ収集をおこなったことになる。30分間隔の連続データ収集は、13日7:00の観測 (6:50から7:10までの観測) まで継続させた。

北海道開発局 : 紋別 (\*), 留萌  
第一港湾建設局 : 秋田 (\*), 輪島 (\*)  
第二港湾建設局 : むつ小川原 (\*)

下記の観測地点については、現地でのテレメータ装置の作動時間が固定されているため、通常通りの2時間間隔でのデータ収集がおこなわれた。

第一港湾建設局 : 酒田, 新潟沖 (\*)

また、震源に最も近い観測地点である北海道開発局管内の瀬棚では、22:00における観測データは正常に取得できたものの、それ以後は、現地の波浪計に何らかの異常が発生したため、データが得られていない。

上記の観測地点のうち、波向計 (水平方向流向流速計) の観測データが得られている地点を (\*) で示す。津波波形の解析にあたっては、水平方向流向流速データは、非常に有益な資料となる。

### 3.2 CMT郵送ノンリアルタイム収集観測地点

以下の観測地点において、津波波形データが得られ、海象調査研究室に郵送されている。各地点とも、通常通り2時間毎の観測波形が得られている。(\*)は、同様に波向計 (水平方向流向流速計) の観測データが得られている地点である。

第一港湾建設局 : 福井 (\*)  
第二港湾建設局 : 深浦

第三港湾建設局：浜田  
 第四港湾建設局：藍島

3.3 解析に用いたその他の波形記録

本報告中では、以上述べたナウファスネットワークの波浪観測地点で取得された津波波形記録に加えて、秋田県港湾課および同県能代港湾事務所から提供を受けた、能代港沖合、北緯40度11分55.73秒、東経139度57分34.84秒、水深25.5m地点における、超音波式波高計(USW)による波形記録も用いている。

能代港湾事務所では、地震発生直後22:56に波高計の観測を連続観測に切り替えることに成功した。このため、第1波来襲前から翌朝に至るまで、連続した津波波形記録が、紙送り速度0.5mm/sの記録紙上に残されていた。後述する図-24は、記録紙上の記録を港湾技術研究所において1秒間隔(0.5mm間隔)でデジタル読み取りを行い作成したものである。

この他、沖合波形記録と港内の検潮記録の比較を行うため、輪島港、秋田港、能代港、新潟東・西港の検潮記録や、港内波浪観測記録をそれぞれ用いているが、これらの収集整理は第一港湾建設局新潟調査設計事務所によって行われたものである。

4. 地点別観測波形記録

4.1 総括表

表-2は、各観測地点および観測時刻における観測波形の、長周期の変動の諸元別最大値をとりまとめたものである。津波来襲時における波形記録の中には、津波による数十秒以上の長周期変動成分と、波浪による十数秒以下の短周期変動成分が混在している。ここでは、波浪による変動を取り除き、津波による波形を明かに示すため、0.5秒毎に取得されている生データに対して、前後20秒間(プラスマイナス10秒づつ)の三角形数値フィルターをかけて解析した結果を示している。

水位変動 $\eta$ は、観測時間20分の間に記録された水位の最大値と最小値の差を意味している(m単位)。

水圧変動 $P$ も、長周期波においては水位変動分がそのまま圧力変動として現れるため、水位変動と同様に水位の最大値と最小値の差を意味している(m単位)。なお、水圧計は、波向計として水平方向流向流速計と一対になっているタイプのもとの、複合型波高計として、超音波式波高計と一対になっているタイプのものが存在している。しかし、前者は、新潟沖を除いてはハイパスフィルターが組み込まれており、長周期波成分をカットする構

表-2 長周期波観測結果の諸元別最大値一覧表

観測地点	項目	7/12	7/13	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	最大
		22:00	0:00													
瀬棚港	$\eta$	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05
	U	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07
	$\theta$	WNW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WNW
留萌港	$\eta$	0.12	-	0.23	0.40	0.18	0.25	0.33	0.20	0.20	0.41	0.15	0.37	-	0.15	0.41
	$\eta$	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.12	0.10	0.12
	U	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
紋別港	$\theta$	NW	ESE	ESE	SSE	SE	NNW	SE	NNW	NE	ESE	WNW	SE	WSW	ESE	
	$\eta$	0.03	0.55	-	-	-	0.25	-	-	0.23	-	-	-	0.30	0.55	
	$\eta$	0.06	0.17	0.26	0.34	0.38	0.25	0.28	0.29	0.18	0.20	0.24	0.21	0.20	0.20	0.38
秋田港	P	0.02	0.17	0.27	0.33	0.39	0.26	0.27	0.29	0.16	0.20	0.25	0.21	0.19	0.19	0.39
	U	0.03	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09
	$\theta$	S	WSW	E	E	ESE	E	NW	SW	ESE	WNW	E	WSW	WSW	E	SW
	$\eta$	0.07	0.28	-	-	-	0.26	-	-	-	0.28	-	-	-	0.15	0.28
新潟沖	$\eta$	0.14	0.39	-	-	-	0.32	-	-	-	0.21	-	-	-	0.16	0.39
	U	0.03	0.14	-	-	-	0.15	-	-	-	0.06	-	-	-	0.05	0.15
	$\theta$	WSW	NW	-	-	-	SE	-	-	-	NNW	-	-	-	NNW	SE
	P	0.14	0.45	-	-	-	0.42	-	-	-	0.22	-	-	-	0.23	0.45
輪島港	$\eta$	0.04	0.87	0.62	0.40	0.27	0.16	0.37	0.27	0.24	0.24	0.21	0.26	0.16	0.37	0.87
	U	0.02	0.35	0.29	0.17	0.19	0.23	0.16	0.23	0.13	0.09	0.10	0.12	0.07	0.15	0.35
	$\theta$	SE	NW	NNW	N	NNW	NNW	S	NNW	NNW	SSE	NW	N	N	NNW	NW
福井港	$\eta$	0.05	0.31	-	-	-	0.40	-	-	-	0.28	-	-	-	0.29	0.40
	U	0.02	0.06	-	-	-	0.13	-	-	-	0.08	-	-	-	0.05	0.13
	$\theta$	SW	WSW	-	-	-	WNW	-	-	-	ESE	-	-	-	E	WNW
浜田港	$\eta$	0.08	0.06	-	-	-	0.21	-	-	-	0.15	-	-	-	0.11	0.21
藍島	$\eta$	0.05	0.03	-	-	-	0.07	-	-	-	0.13	-	-	-	0.10	0.13
むつ小川原港	$\eta$	0.08	0.09	0.25	0.09	0.14	0.07	0.06	0.16	0.05	0.05	0.08	0.07	0.08	0.06	0.25
	U	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.05	0.09	0.08	0.08	0.09
	$\theta$	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N

超音波波高計 $\eta$ :  $\eta_{max} - \eta_{min}$ (m), 水圧式波高計P:  $P_{max} - P_{min}$ , 超音波流速計U:  $U_{max}$ (m/s), 流向 $\theta$ :  $U_{max}$ 時(16方位)



造となっているため、津波波形解析には適していないデータであるため、表中には記入されていない。

水平2成分流速のデータは、観測時間20分の間に記録された流速の絶対値の最大値  $U$  (m/s単位) と、その時の流向  $\theta$  (16方位表示) に整理して表-2 に示している。

表-2の右には、地点別の各項目の最大値を表示しており、表からわかるように、最も顕著な津波波形を観測したのは、輪島であった。能登半島の最北に位置する輪島は、地震の震源からは遠く離れてはいるものの、能登半島を取り囲む大陸棚のために、津波を屈折させて、津波のエネルギーを集中させやすい地形となっている。

#### 4.2 輪島における波形記録

図-2は、津波来襲前の波形記録の一例であり、輪島における7月12日21:50から22:10までの観測波形を表示したものである。上から順に、水位変動  $\eta$  (m)、流向流速のベクトル表示(上向きが北に向かった流れ)、流速の絶対値  $U$  (m/s)、流向  $\theta$  (流れの上流側の方向) を示している。波高計および流向流速型波向計の設置位置は、表-1 に示した通りである。

水位変動  $\eta$  は、風波によって短い周期の上下変動が見られるが、この変動は小さく  $\pm 0.5$ m 以内の範囲にすべておさまっており、この時の風浪はあまり高くなかったことを示している。なお、図中には、その長周期成分を示すため、プラスマイナス10秒間の三角形型数値フィルタ

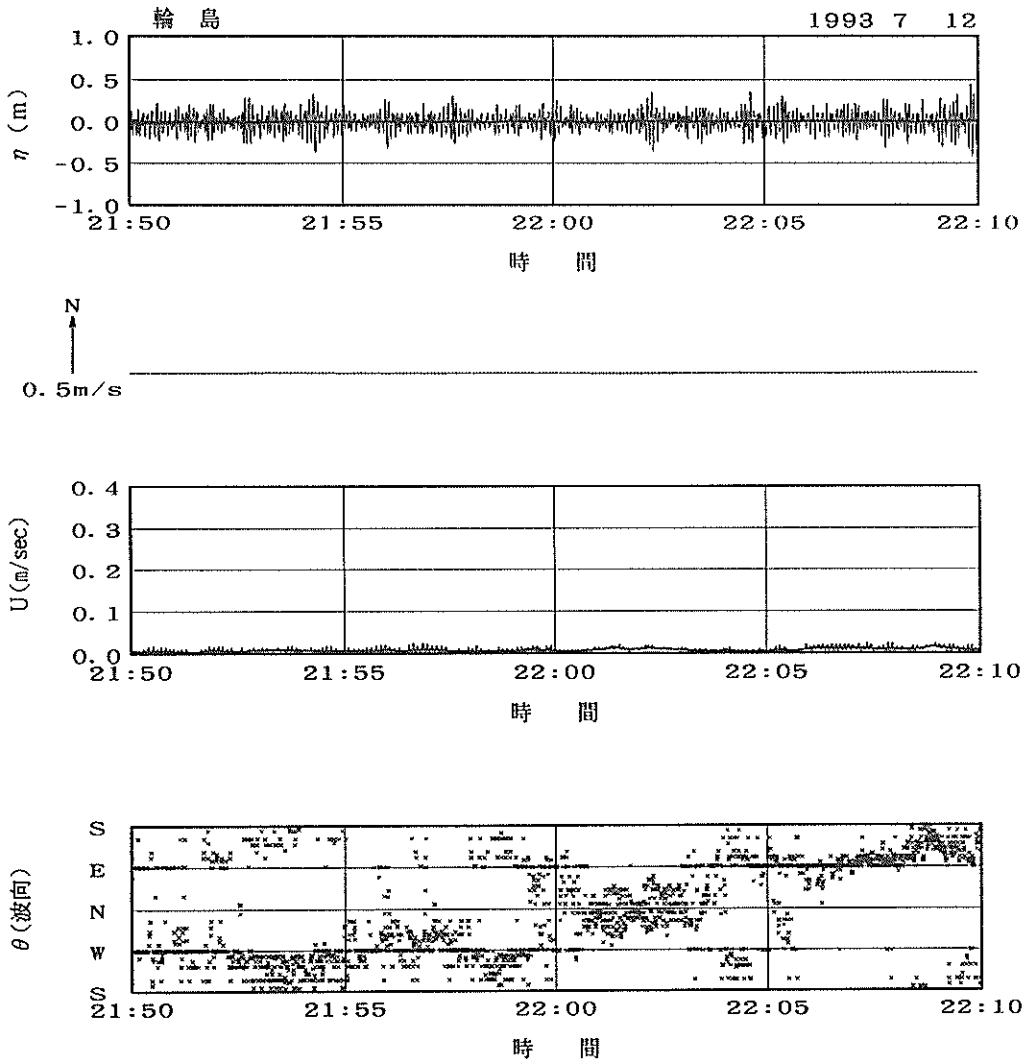


図-2 輪島港における波形記録1 (津波来襲前)

一をかけた長周期波形記録も太線であわせて表示しているが、図-2の $\eta$ の図中においては、長周期変動はほとんど見られず、太線と $\eta=0$ の線とはほぼ一致している。

流向流速のベクトル表示では、5秒毎の流向流速ベクトルを示しているが、図-2ではほとんど流向流速ベクトルは表示されていないことがわかる。なお、図-17および図-18で後述するように、流向流速ベクトルの中には、津波による変動成分に加えて、潮流等の影響によるものと考えられる20分間の観測時間中においては定常成分とみなせるより長周期の成分が含まれているが、ここではこの定常成分の影響は除去して、20分間全体の平均流速を基準値としてそれからの変動成分だけを表示している。

流速 $U$ の図を見ても、波浪による水粒子の往復運動に

よるものと考えられる周期の短い運動がわずかに見られるものの、その流速はきわめて小さくなっている。図中の太線は、 $\eta$ と同様プラスマイナス10秒間の三角形型数値フィルターをかけた長周期変動を示しているが、やはり顕著な長周期変動は見られないことがわかる。流向 $\theta$ は、21:50から22:10にかけて安定しておらず、E方向とW方向を短い周期でくりかえし変動しているように見られるが、このことは、水粒子の水平運動は主として周期の短い風浪による往復運動によるものであり、長周期の流れが見られないことを意味している。

図-3は、津波来襲後の波形記録の典型的な例であり、図-2の2時間後の7月12日23:50から7月13日0:10までの波形記録である。表-2からわかるように、この観測時刻

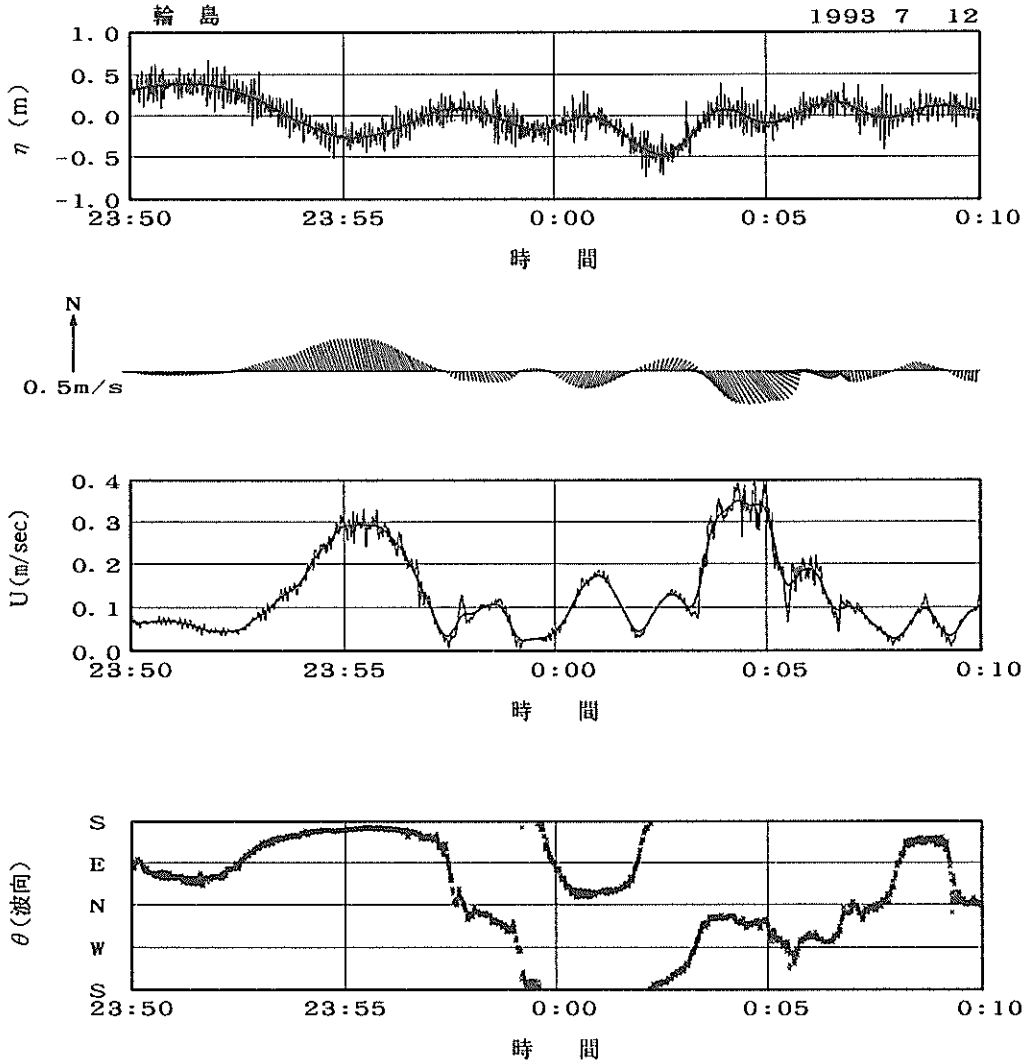


図-3 輪島港における波形記録2 (津波来襲後)

における輪島港の津波波形は、 $\eta$ 、 $U$ ともに全観測地点全観測時刻中最大の変動幅を示しているものである。 $\eta$ 、ベクトル、 $U$ 、 $\theta$ とも、図-2とは対照的に顕著な長周期変動が明確にあらわれており、津波波形を明確にキャッチしていることがわかる。

この地震は、北海道南西沖で7月12日22:17に発生したと発表されているが、図-20で後述する輪島港における検潮記録によると、輪島港には、23:50ごろ津波の第1波が到達した模様であるので、津波の初期に近い波形が取得できているものと考えられる。

秒速0.3m/s以上の顕著な水平流速が2回、記録中に現れている。はじめのピークは360秒頃(23:56)発生しており、この時の流れの向きは、S方向となっている。輪島港周辺の海岸線は、図-15および図-19で後述するように、東西方向にのびており、南側が陸となっているので、津波はN方向から来襲したものと考えられる。すなわち、津波の進行方向とは逆向きの流れが観測されたわけであり、この時の水位は平均水位よりも低く極小値を示しており、津波の谷であったことが上の水位変動の図から読み取れる。(厳密には、波高計と波向計の設置位置は同じではないが、津波の波長に比べてその距離は非常に小さいので、波高計と波向計の津波の位相差は小さい。)したがって、23:56頃における津波は、引き波であったことを意味している。

2番目の流速の顕著なピークは、0:04頃発生している。この時の流れの向きは、N方向となっており、今度は津波が押し波であったことを意味している。この時の水位はあまり顕著な極大値となっていないが、これは、陸からの津波の反射波の影響がすでに現れているためと考えられる。波浪観測地点から海岸線までの距離は約3kmであり、平均水深を約20mと仮定すると、200秒強で津波は波浪観測地点から海岸線に届くものと推定される。引き波と押し波の時間差の2倍を津波の周期と考えれば、津波の周期は約960秒程度と推定され、この200秒強という時間は、津波周期の約4分の1に相当する。すなわち、波浪観測地点では、入射してくる津波と海岸線で反射される津波が重複波を形成すると仮定すれば、重複波の節の近傍となり、水平流速は大きくなる一方で、水位変動はあまり顕著にならないので、図-3がよく説明できる。

図-4は、図-3にさらに引き続いた津波波形の観測記録を示したものであり、7月13日0:20から0:40まで、0:50から1:10まで、および1:20から1:40までの水位変動 $\eta$ と流向流速ベクトルを示したものである。表-2と対照させて図-4を見るとわかるように、今回の北海道南西沖地震津波は、減衰に非常に長い時間がかかっており、明朝に至る

まで顕著な津波波形が観測され続けていることは注目に値する。これは、日本海全域において、複雑な多重反射がおこっていたためであると考えられている。図-4においても、0:50から1:10までの波形は、その後の1:20から1:40までの波形にくらべて水位変動 $\eta$ はより大きな変動を示しているものの、流速ベクトルの変動は、むしろ後者の方が大きな変動を示しており、複雑な津波の重複波の場の中において、波浪観測地点が重複波の腹に近い波形特性を示したり節に近い波形特性を示したりする現象が、くり返しおこっていることを示唆している。

#### 4.3 他の観測地点における波形記録

図-5から図-11は、輪島以外の観測地点における津波波形を示したものであり、順に留萌、深浦、秋田、酒田、新潟、福井、浜田における記録を示している。なお、表-2で示されたこれ以外の観測地点においては、瀬棚においては地震発生以後の波形が測得されておらず、紋別、むつ小川原、藍島においては津波波形はあまり顕著ではなかったため、津波波形の表示は割愛している。

図-5は留萌における波形記録であり、上から順に7月12日21:50から22:10まで(地震発生前)、7月13日0:20から0:40まで、0:50から1:10まで、1:20から1:40まで、および1:50から2:10までの水位変動 $\eta$ を示している。津波到達後の0:20以後の波形記録中には、顕著な長周期津波波形があらわれているが、その距離としては輪島よりもずっと震源に近い観測地点であるにもかかわらず図-3や図-4に示した輪島における変動よりも小さくなっている。これは、津波の伝播にあたっては、積丹半島等による遮蔽効果の影響や海底地形の影響を強く受けるためである。留萌における津波の第1波の到達は0:20よりもかなり前であり図-5は、必ずしも最大の津波水位変動を示しているわけではないことには注意を要するが、留萌においても、津波はなかなか減衰せずに複雑な波形記録が2:20以後も継続してみられている。

図-6は、深浦における波形記録を示したものであり、上から順に、7月12日21:50から22:10まで(地震発生前)、12日23:50から13日0:10まで、1:50から2:10まで、3:50から4:10まで、5:50から6:10までの水位変動 $\eta$ を示している。深浦における観測は、平常と同じに2時間毎におこなわれたため、図-5とは各観測毎の時間間隔が大きく異なっていることには注意を要する。深浦においても、第1波目の来襲は23:50よりかなり早く、第1波来襲時の波形は取得できてはいないが、23:50から0:10の観測波形の長周期波成分の $\eta$ の変動幅は輪島に次いで55cmと大きくなっていることがわかる。これは、深浦は、震源に比較的近い

観測地点であり半島等による遮蔽もないことによるものであると考える。

津波波形は翌朝6:00になっても、まだ顕著に見られ、日本海における複雑な多重反射のため、津波の減衰には多くの時間を要したことが示されている。

図-7は秋田における波形記録を示しており、上から、7月12日21:50から22:10まで(地震発生前) 12日23:50から

13日0:10まで、0:20から0:50までの水位変動 $\eta$ と流向流速ベクトルを示したものである。図-2および図-3の輪島における記録ほど顕著ではないものの、23:50以後は、水位変動 $\eta$ および流向流速ベクトルの両者に顕著な津波による長周期変動が見られる。なお、21:50から22:10にかけての流向流速ベクトルにゆっくりした変化が見られるが、地震発生前であるため、この流向流速ベクトルの変化は

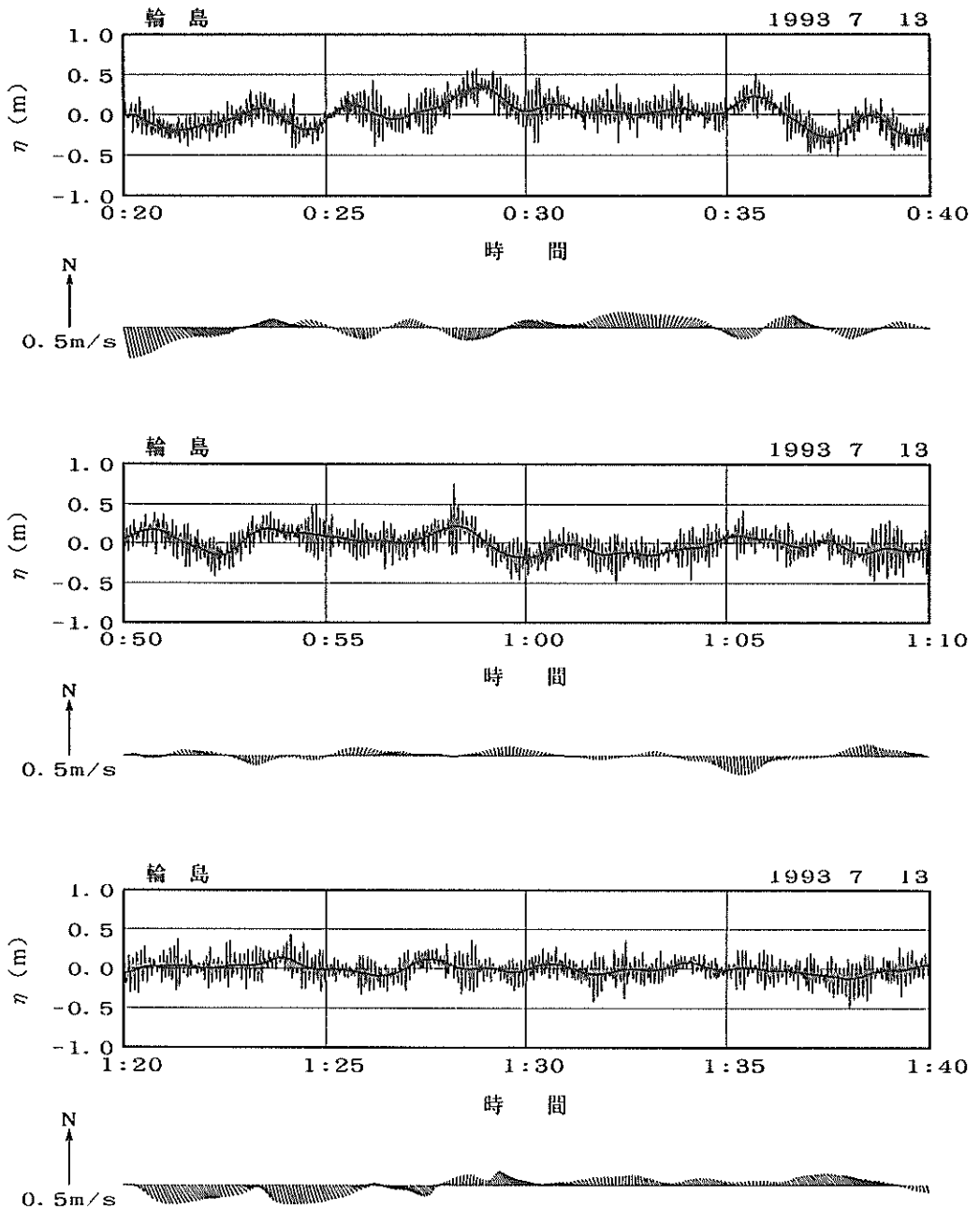


図-4 輪島港における波形記録3 (津波来襲後続き)

津波によるものとは考えにくい。

図-8は酒田における水位変動 $\eta$ を示したものであり、観測時刻は図-6の深浦と同様となっている。酒田においても、深浦よりは変動幅が小さいものの翌朝6:00の観測まで顕著な津波波形が観測されている。なお、酒田における波浪観測データは、次の図-9に示す新潟沖と同様に海中における電源バッテリーが内蔵されているタワーか

ら無線で陸上局までデータが伝送されるしくみになっている。ここでは、バッテリーの容量に応じて（バッテリー交換作業の頻度をあまり多くできないため）波浪計の電源の投入時間が限定されている。このため、1回の観測における観測時間は20分間よりも若干短く設定されており、各図中の右側のデータが一部欠落している。

図-9は新潟沖における水位変動 $\eta$ と流向流速ベクト

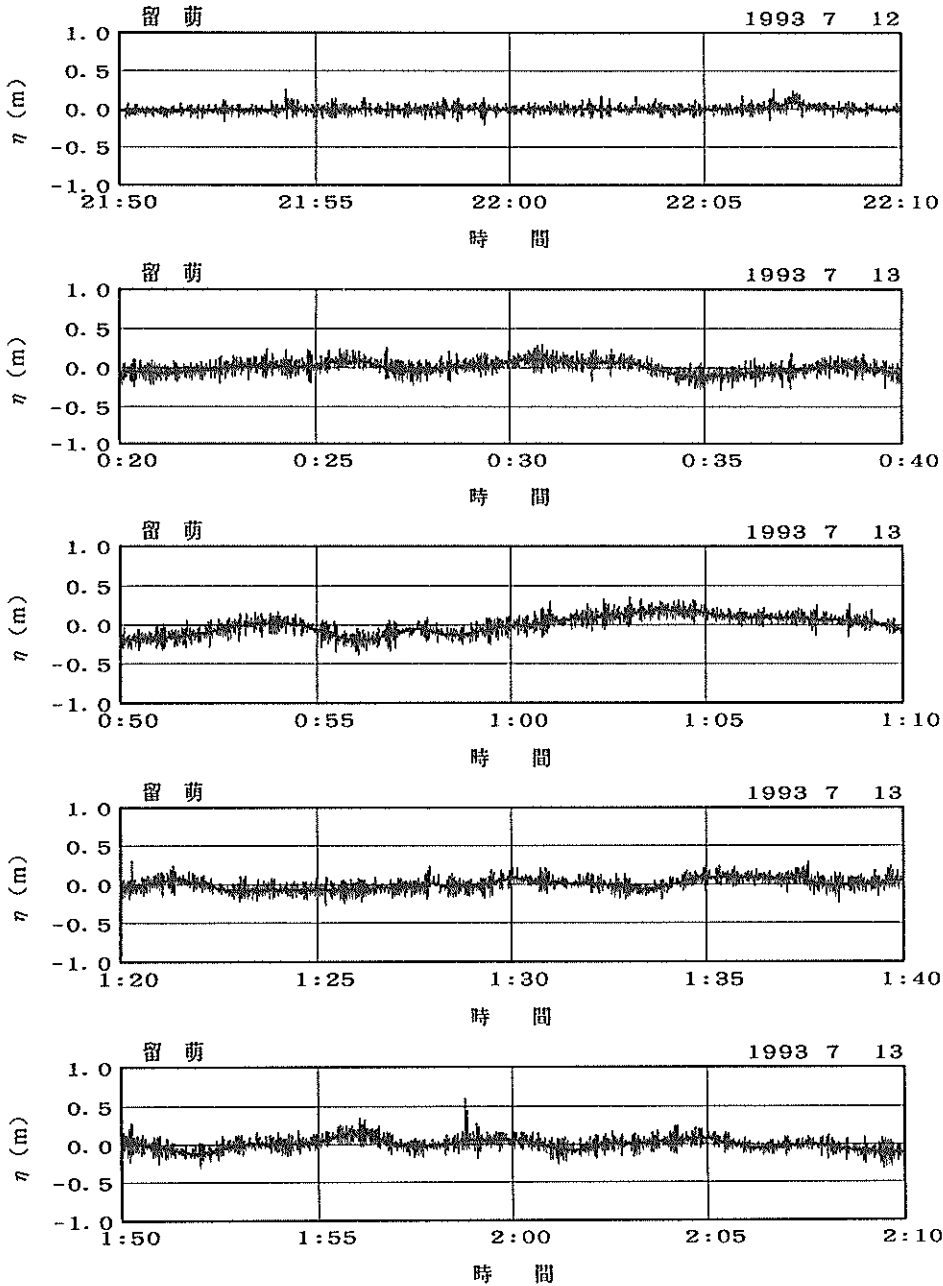


図-5 留萌港における波形記録

ルを示したものであり、7月12日21:50から22:10まで（地震発生前）、7月12日23:50から13日0:10までおよび1:50から2:10までの波形記録を示している。これを図-7の秋田における記録と比較すると、 $\eta$ 、流速とも震源からより離れた新潟沖の方が、より震源に近い秋田よりも変動が大きくなっており、新潟沖の方が秋田よりも、より津波の影響が大きくあらわれていることがわかる。波浪計の設

置水深は、表-1や表-2に示すように、秋田で29.5m新潟で35mと大きな差がないことを含めて考えれば、男鹿半島等による遮蔽の影響や、信濃川や阿賀野川河口部に位置し、新潟沖前面では比較的大陸棚が突き出していることによる影響などの海岸線や海底地形の影響が津波の大きさを大きく変化させていることが推測される。

図-10は、福井における波形記録を示したものであり、

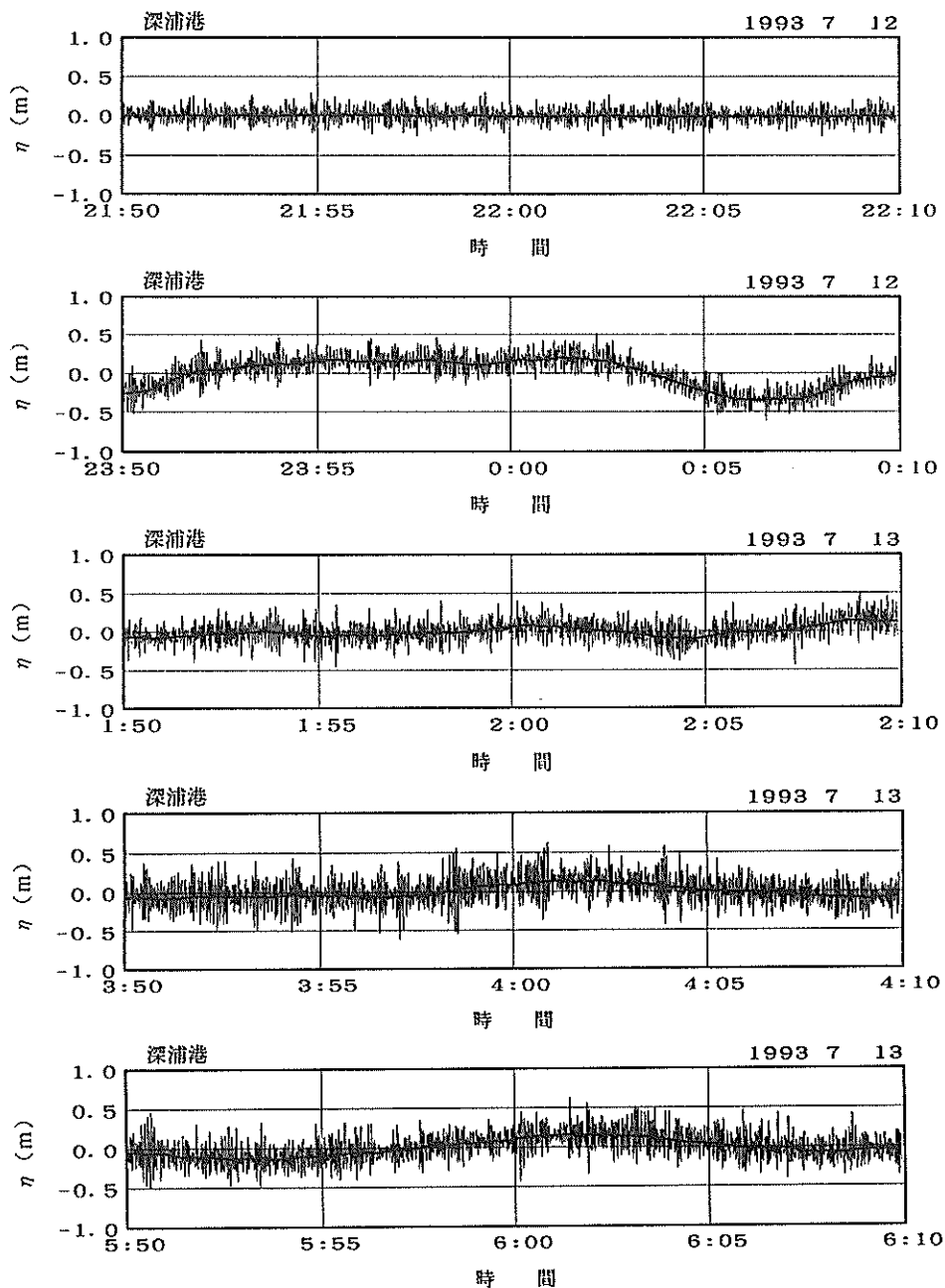


図-6 深浦港における波形記録

観測時刻は図-9の新潟沖と同様となっている。水位変動および流向流速ベクトルの形状、さらには福井港検潮記録における津波の到達状況から判断して、津波の第1波の波形が23:50から0:10までの記録中にあらわれているものと考えられる。福井においては、本報告で示した他の観測地点と比較して風浪が若干高くなっているため、 $\eta$ の記録だけからは津波波形があまり顕著には識別されず、

太線の数値フィルター後の波形によってはじめて津波の形状が明らかに示されている。しかし、流向流速ベクトル図では津波の記録がより鮮明にあらわれている。第1波目の到達時刻は、津波による水位変動があまり大きくないため図から必ずしも明確に示すことはできないが、23:55ごろから23:59ごろにかけて、 $\eta$ が10cmほど上昇しているのと同時に北西から南東に向かっての沖から岸に向

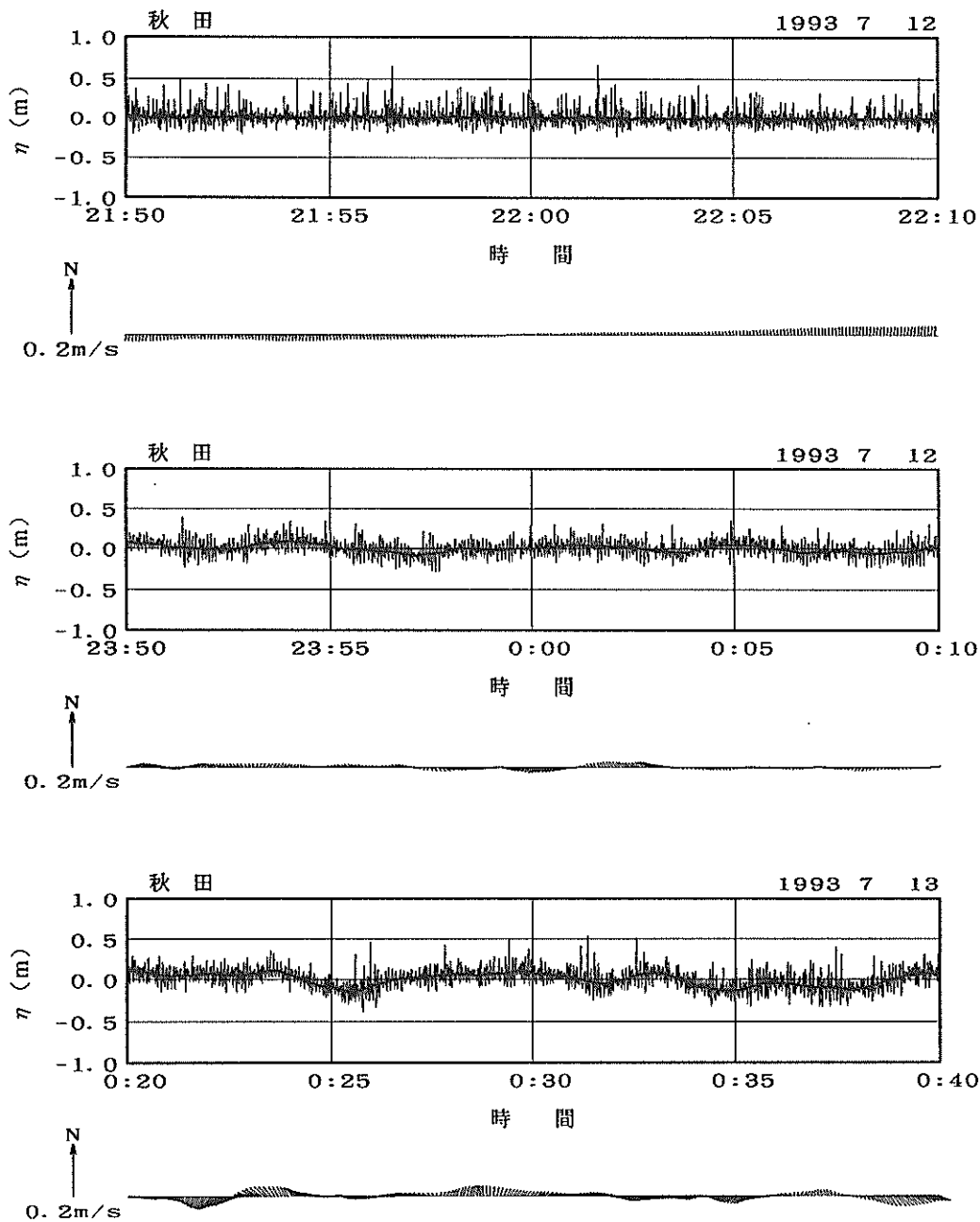


図-7 秋田港における波形記録

う流れが観測されているので、図-3に示された輪島港における波形記録と同様に、弱い押し波から津波がはじまった模様である。津波による最大水位変動や最大水平流速が発生した時刻は0:10以後であり、1:50から2:10までの観測の方が、23:50から0:10までの観測よりも水位変動・流速ともに大きい変動が観測されていることは興味深い。

図-11は浜田における波形記録を示したものであり、図

-6の深浦、図-8の酒田と同様に2時間毎の20分間の水位変動 $\eta$ を示したものである。浜田では、7月12日23:50から13日0:10までの観測中には津波波形はあらわれておらず、第1波の到達は0:10以後となっており、第1波の波形の測得はおこなわれていない。1:50以後の波形中には、風浪よりも振幅はかなり小さいものの10~20cm程度の津波による長周期水位変動があらわれている。

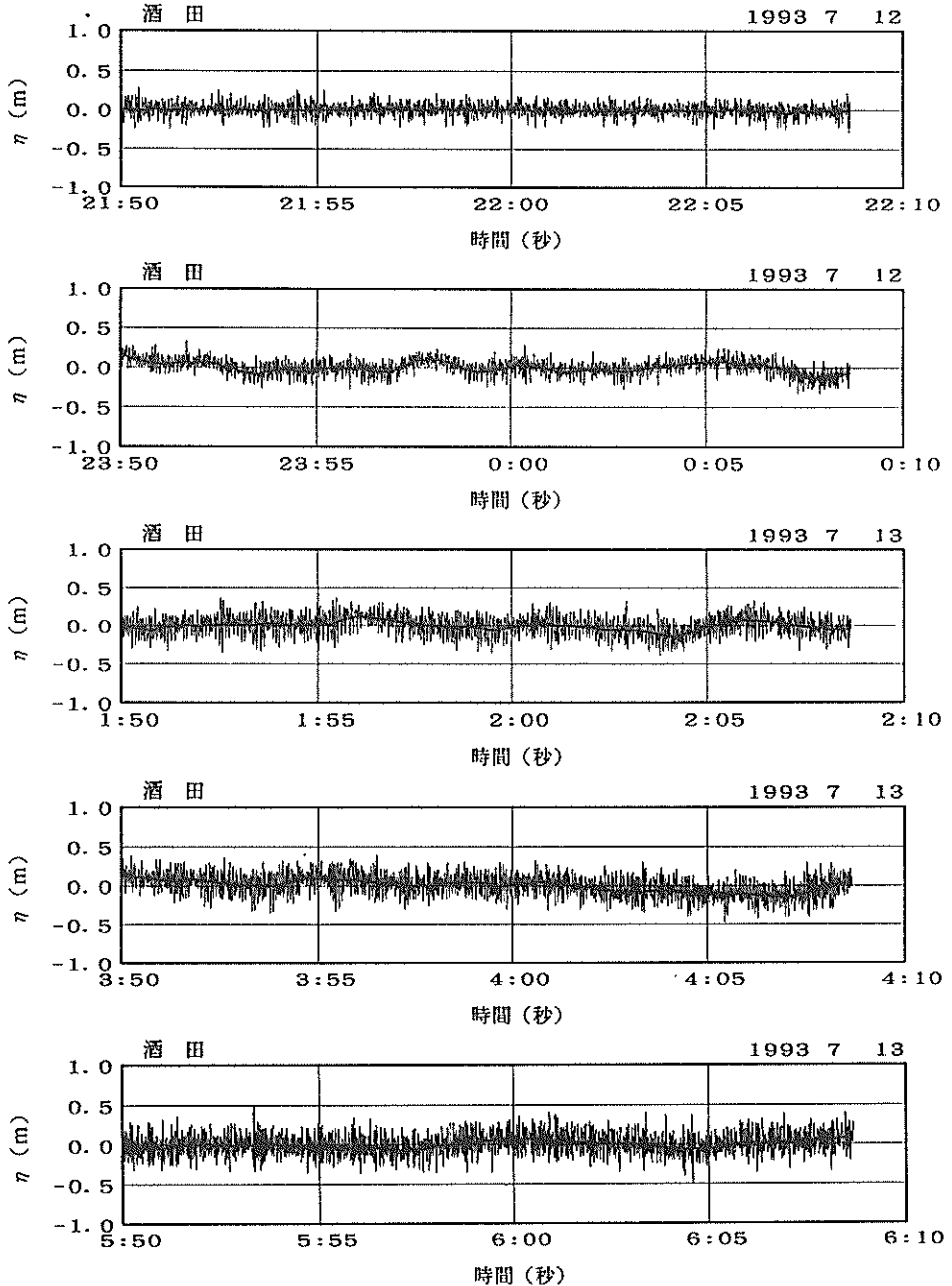


図-8 酒田港における波形記録



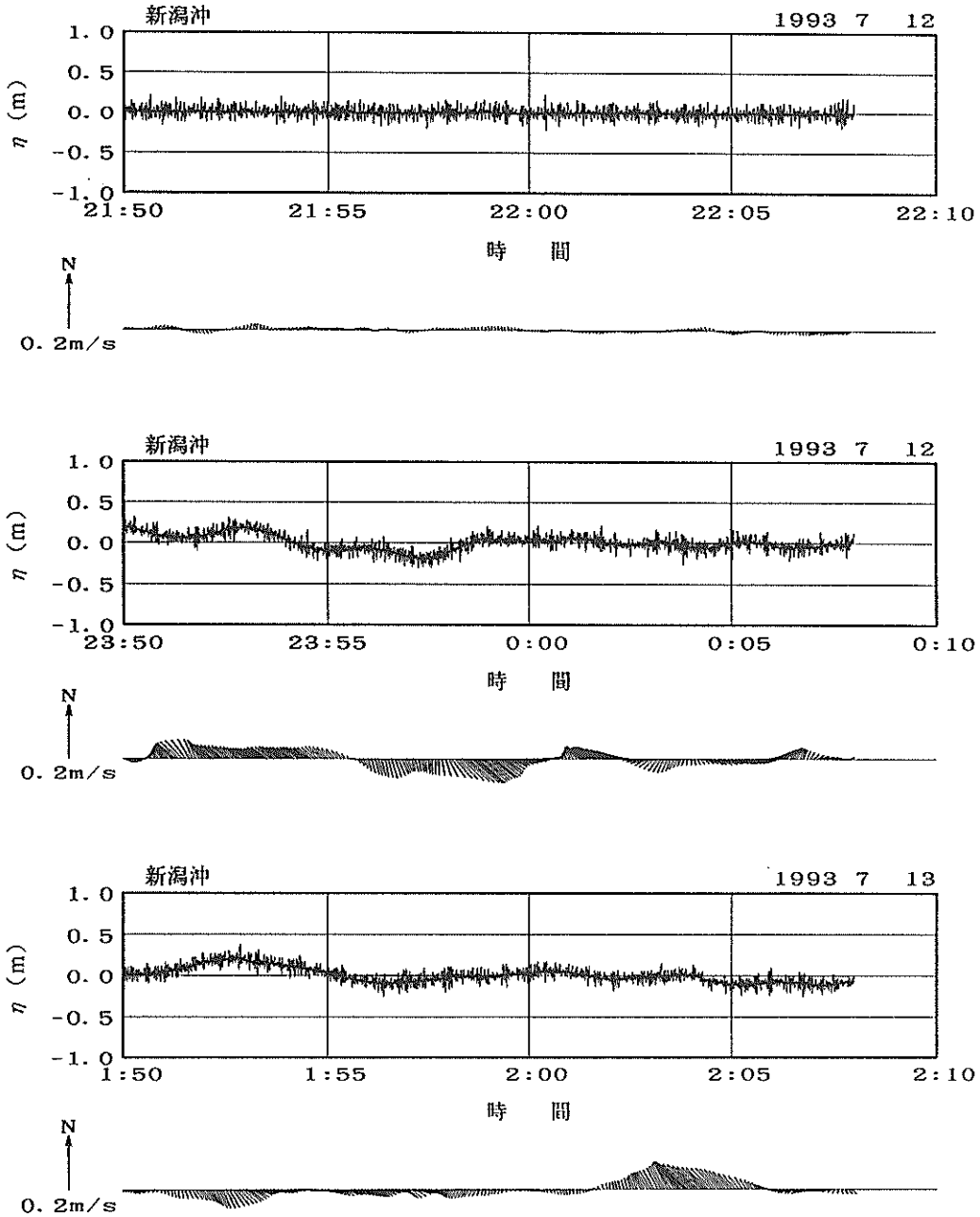


図-9 新潟沖における波形記録

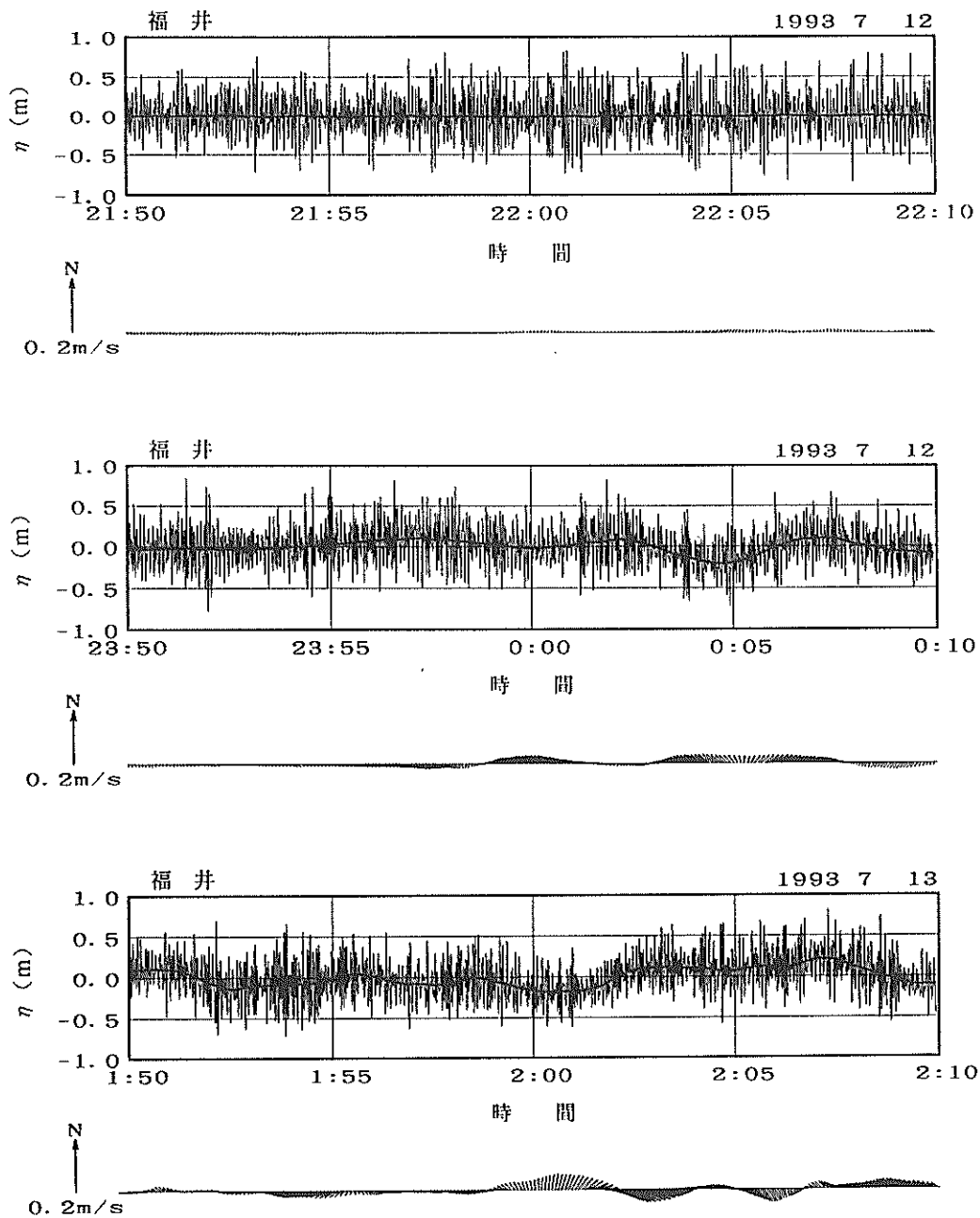


図-10 福井港における波形記録

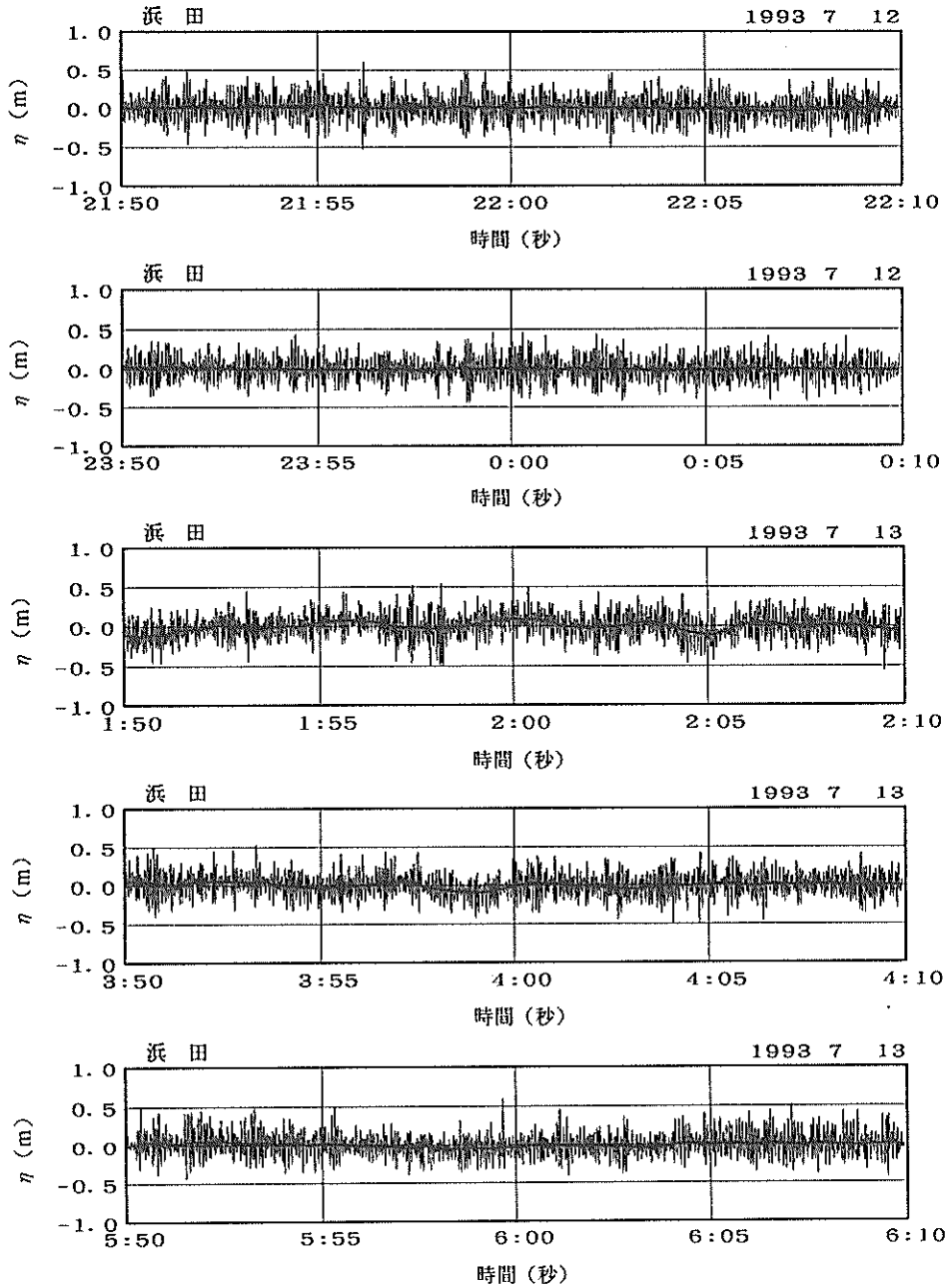


図-11 浜田港における波形記録

5. 津波波形に関する二・三の検討

5.1 水位変動と水圧変動

図-12は、秋田で測得された、7月12日21:50から22:10まで(地震発生前)、12日23:50から13日0:10まで、および0:20から0:40までの各観測時における水位変動 $\eta$ と海底面における水圧変動 $P$ との関係を示したものである。水圧変動 $P$ は、海水の単位体積重量を考慮して水頭差(m)に換算した値を表示しているため $\eta$ と $P$ は同じm単位となっている。それぞれの観測時において、左側の図は、 $\eta$ を横軸に、 $P$ を縦軸にとり、0.5秒毎の各観測時におけるプラスマイナス10秒間の三角数値フィルターをかけた後の $\eta$ と $P$ とのそれぞれの長周期波成分をプロットしたものである。

図中には長波の微小振幅波理論上の関係式 $\eta = P$ の線もあわせて表示している。

一方、右側の図は縦軸を $\eta$ のかわりに $(\eta - P)$ とし、3倍にそのスケールを拡大して表示したものである。図中の斜めの直線は、すべてのプロットされたデータから最小自乗法で求められる原点を通過する回帰式を示している。

津波来襲前の上段の図を見ると、 $\eta$ 、 $P$ ともほとんど原点付近にデータが集中しており、長周期成分の変動はほとんど見られていないことがわかる。 $\eta$ と $P$ を比較すると、 $\eta$ の方が $P$ より大きい変動を示しているため、右側の $(\eta - P)$ の図では回帰式の直線は右上りのものとなっている。

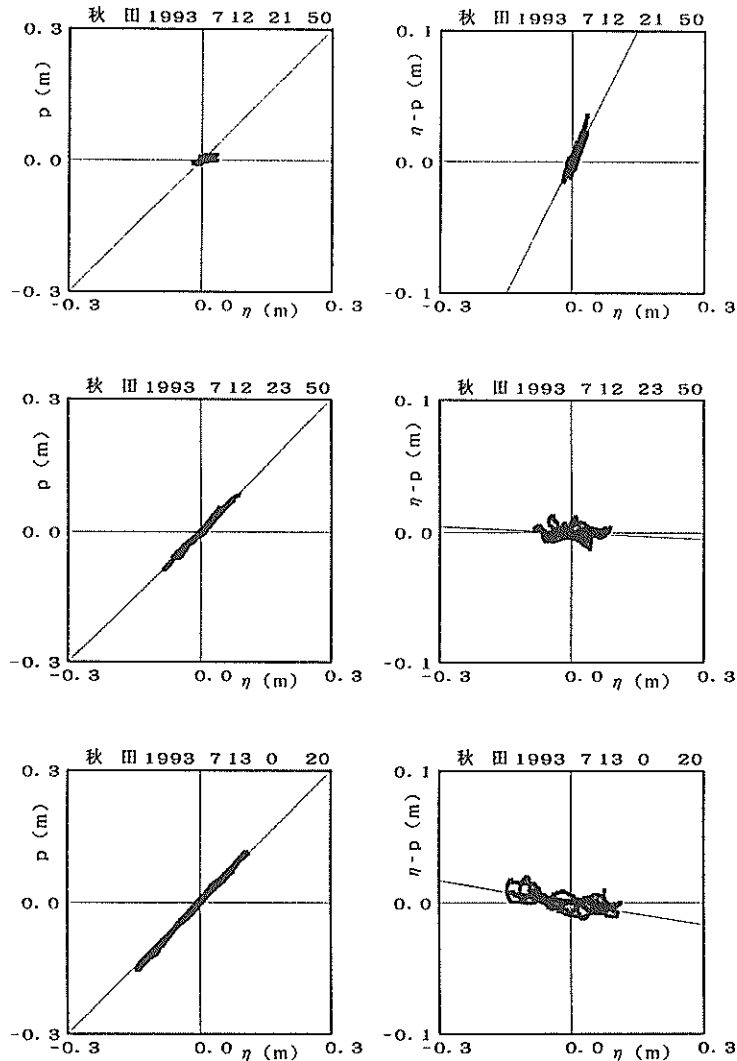


図-12 水位変動と水圧変動の比較 I (秋田港)

津波来襲後の中段および下段の左側の図を見ると、両者の関係は $\eta=P$ の直線上によくのっていることがわかる。このため右側の図では $(\eta-P)$ はほとんど0の値を示しているが、よく見ると $(\eta-P)$ は $\eta$ に対して若干右下りの回帰直線上にのっているようである。

このことは、 $\eta$ と $P$ は、長波の微小振幅波の理論に従い $\eta=P$ の関係がほぼ成り立っているものの、 $\eta$ が正のときは $\eta < P$ となり、 $\eta$ が負のときは $\eta > P$ となり、 $\eta$ よりも $P$ の変動の方が、津波来襲前とは逆転して、むしろわずかに大きくなっていることを意味している。

図-13は、新潟港における $\eta$ と $P$ の関係を図-12と同様にとりまとめたものである。津波到達前の上段の図を見ると $\eta$ はほとんど0に近い値となっているのに対して

はプラスマイナス5 cm程度の変動を示しており、このため上段右側の図は $\eta=0$ の上下方向の軸上にデータが集まっている。津波来襲後は、やはり $\eta=P$ の関係をほぼ満しているが、 $(\eta-P)$ と $\eta$ との関係はやはり右下りの回帰直線上にのっており、 $\eta$ よりもむしろ $P$ の変動がわずかに大きくなっている。

こうした、図-12および図-13に示される長波における $\eta$ と $P$ の関係は非常に興味深いものであり、今後の検討が期待される。

## 5.2 水位変動と水平流速

図-14は、表-2に示された各観測地点・観測時における $\eta$ と $U$ の関係を図化したものである。縦軸には、表-2

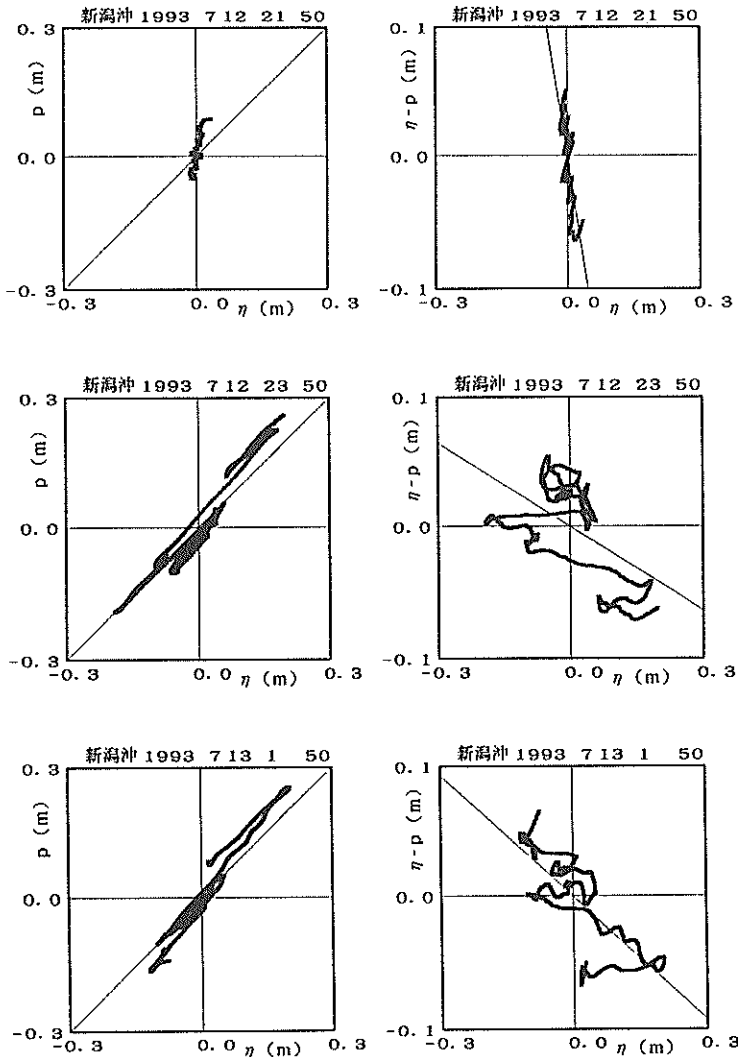


図-13 水位変動と水圧変動の比較 2 (新潟港)

に示される、観測時間20分間の間の最大流速をとり、横軸には、やはり表-2に示される $\eta$ の値から、進行波としての長波の微小振幅波理論から計算される水平流速の値をとっている。図中には、秋田、新潟沖、輪島、福井の各波浪観測地点において得られた23:50から0:10までの観測から5:50から6:10までの観測に至るまでの全ての観測値に関して、 $\eta$ と $U$ の関係をプロットしている。

津波が進行波としての長波の微小振幅波理論で示される波形を有していれば図中の45°の傾きを持った太線の直線上にデータはプロットされるはずであるが、各観測地点ごとに、あるいは各観測時ごとに太線の上下方向にデータは大きくばらついていることがわかる。これは、今回観測された津波の波形は、必ずしも進行波としてだけでは説明が出来ず、重複波としての性質を有していることから説明できるものと考えられる。

すなわち、波浪観測地点がちょうど重複波の腹にあたる地点に位置していれば、水粒子は水平には動かず鉛直方向にのみ運動することになるため、 $U=0$ となり、図の横軸上に $U$ と $\eta$ の関係がプロットされることになる。また、これは逆に重複波の節の位置では、水面は上下には変動しないで水粒子は水平方向だけに運動するため、 $\eta=0$ となり、図の縦軸上に $U$ と $\eta$ との関係がプロットされることになる。

実際には、今回の津波の場合、減衰が極めて遅く顕著な津波波形が各観測地点で長時間測得されていたことから考えて、日本海全域にわたって複雑な津波の多重反射の場が形成されていたものと考えられる。このため、同じ地点でも、時刻によってはある多重反射モードの重複波の腹に近い位置となり、別の時刻には、別のモードの重複波の節に近い位置となるようなことも十分に考えられる現象である。

このため、例えば図-14に示される秋田においては、全データを用いて最小自乗法で回帰係数を求めると0.89となり1よりも小さく太線の下側に位置し、重複波の腹に近い性質を示す観測時刻が多かったわけではあるが、観測時刻によっては太線より上側に白丸が見られるのであろう。しかしながら、地点ごとの図中のプロットの分布状況には、明かな違いを読み取ることができる。最も極端な例が輪島と福井に見られ、両者の相異は注目に値する。すなわち輪島における観測値のプロットは、すべての観測時刻で太線よりも上側に位置し、最小自乗法によって求める回帰係数は2.11となっている。これに対して、福井ではすべてのプロットが太線よりも下側に位置し、回帰係数は0.76となっている。これらの点については、以下のように理解できる。

図-15は、輪島における波高計および波向計の位置を、

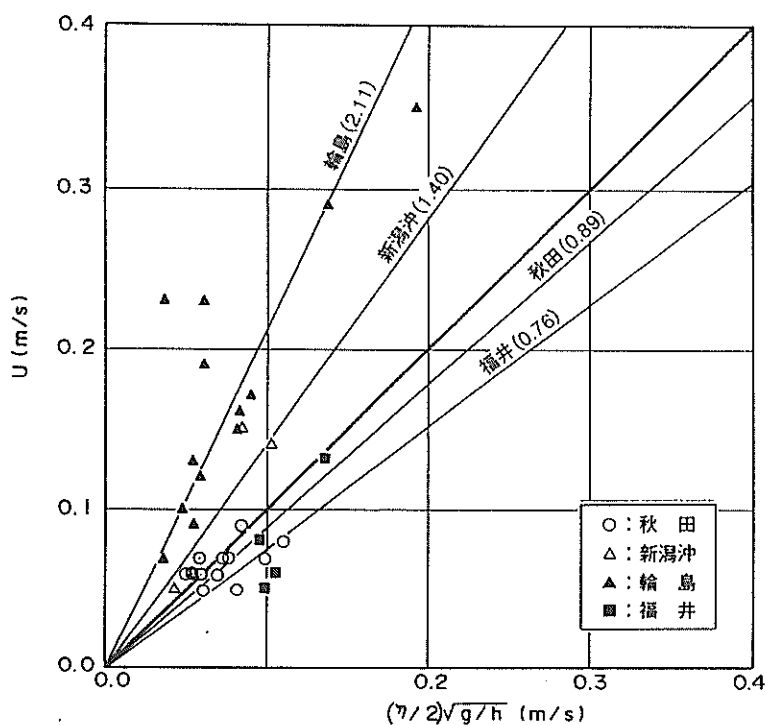


図-14 水位変動と水平流速

周辺の海岸線形状および海底地形とともに示したものである。波高計と波向計は、空間的に比較的近くに位置しており、海岸線までの水平距離は、どちらも約3kmとなっている。図-3の説明の中で前述したように、津波の周期を約960秒と推定し、波浪観測地点と沿岸線までの間の平均水深を20mと考えれば、200秒間強で津波は波浪観測地点から沿岸線に届くこととなるので、海岸線から約1/4波長離れた地点に波浪観測地点が位置していることとなる。海岸線を波の反射面と考えれば、波浪観測地点は重複波の節に近い地点に位置することとなり、このことは図-14によく対応している。

ただし、図-15あるいは前述した表-1に示されるように、輪島では他の観測地点とは異なり、 $\eta$ と $U$ の測定水深

が、それぞれ50m,27mと異なっていることには注意を要する。すなわち、図-14の横軸に示される $\eta$ から計算される流速は水深50mにおける流速であるため、水深27mでは浅水変形の影響でより速くなることが予想される。 $U$ は $\eta$ と $h^{-1/2}$ の積に比例し、かつ、 $\eta$ はグリーンの式から $h^{-1/4}$ に比例することが知られているので、結局、 $U$ は $h^{-3/4}$ に比例すると考えれば、 $h=27$ mにおける $U$ は $h=50$ mにおける $U$ の1.58倍になると計算される。

したがって、図-14の輪島における横軸と縦軸の比例係数2.11は水深の差による影響と考えられる1.58で除して、1.34と評価する方がより適切であると思われる。もっとも、このように考えても依然として比例係数は1.0よりも大きくなっているため、輪島における波形は進行波よ

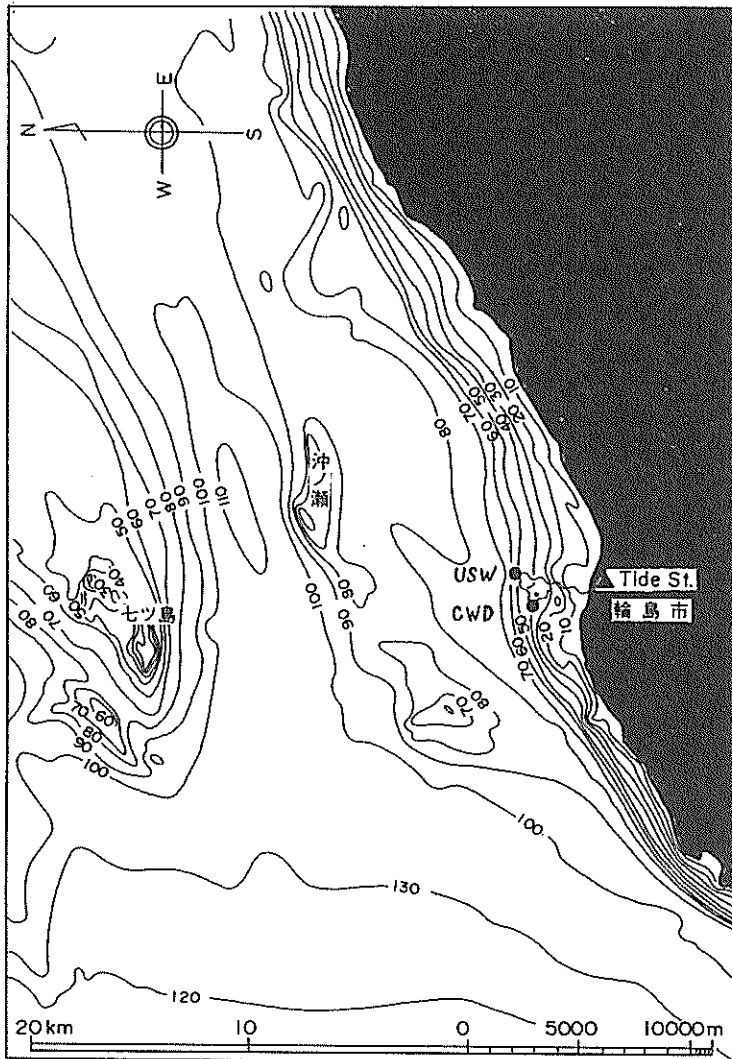


図-15 輪島港沖合海底地形図

り重複波の節に近いものであるという結論には変わりがない。

一方、図-16は、福井における観測点の位置を、図-15と同じ縮尺の海底地形図中に示したものである。図-15と図-16を比較すれば、福井における波浪観測地点は、輪島に比べてずっと反射面と考えられる港の防波堤や護岸近くに位置していることがわかる。このことは、やはり、図-14によく対応しており、福井で観測された津波波形は、重複波の腹に近い性質を示すことが理解できる。

### 5.3 水粒子の運動変位

図-17は、輪島における海底水粒子の水平運動を示したものであり、各観測開始時刻における位置を原点にとり、

X方向（東を正とする方向）およびY方向（北を正とする方向）それぞれについて、流速の値を時間積分して求めた水粒子の変位を示したものである。すなわち、20分間の各観測において、水粒子の初期位置が原点であり、20分間の間に図に示すような水平変位の軌跡を描いたことを意味している。

地震発生前の21:10までの観測を示す左上の図を見ると、右上の方向に、すなわちNE方向に20分間の間、ほぼコンスタントに流れる定常的な流れが存在していることがわかる。20分間における移動距離は、約40mであるので、この定常的な流れの流速は、約3cm/sということになる。

津波到達後の他の図を見ても、各観測の開始時刻と20

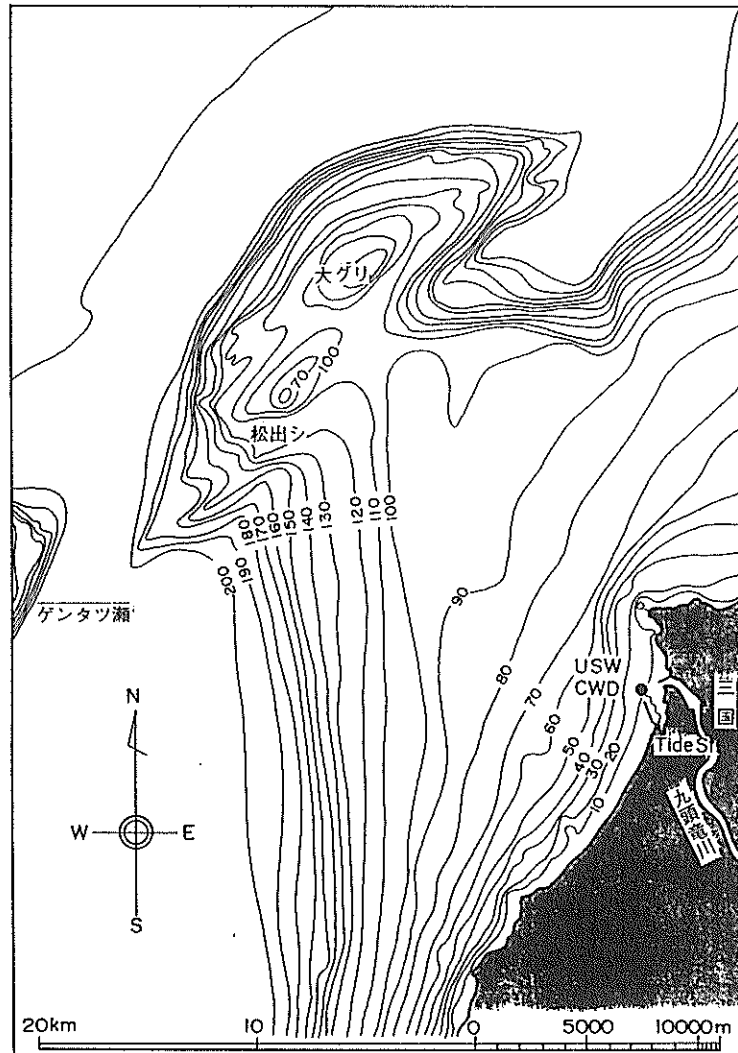


図-16 福井港沖合海底地形図



分後の観測終了時刻における水粒子の位置は、どの図でも、やはり40m程度異なった位置となり、津波来襲前から見られた定常的な流れがやはり存在していることを示唆している。

ここで、初期位置を基準として、20分後の最終的な位置に到る変位を、津波による流れとは別の定常的な変位と仮定してみる。言うまでもなく、津波の波形は複雑であり、津波の周期の整数倍が、20分間となっているとは限らないので、この仮定が厳密なものでないことには注意を要する。この定常的な流れの方向を、各観測時について調べると、X方向には、各観測時を通じて、ほぼ一定速度で西から東へ向かう流れが存在していることと、Y方向には、0:50からの観測と、1:20からの観測の間に流

れの方向が逆転しており、0:50からの観測以前は、南から北への流れであり、1:20からの観測以後は、北から南への流れとなっていることが理解される。

この日の輪島港における潮位を、気象庁が刊行している潮位表<sup>19)</sup>で見ると、0:51に干潮時刻となっていることを考え合わせれば、Y方向（南北方向）の定常的な流れは、潮汐にともなう流れであることが想像される。すなわち、干潮時刻以前は、潮位は低下しているため海水の流れは、岸（南）から沖（北）へ向かい、干潮時刻以後は上昇しているため、逆の北から南へ向かうこととなり、図-17をよく説明しているものと考えられる。

一方、X方向（東西）の定常的な流れについては、原因は明かではないが、各観測時刻に共通してほぼ一定値

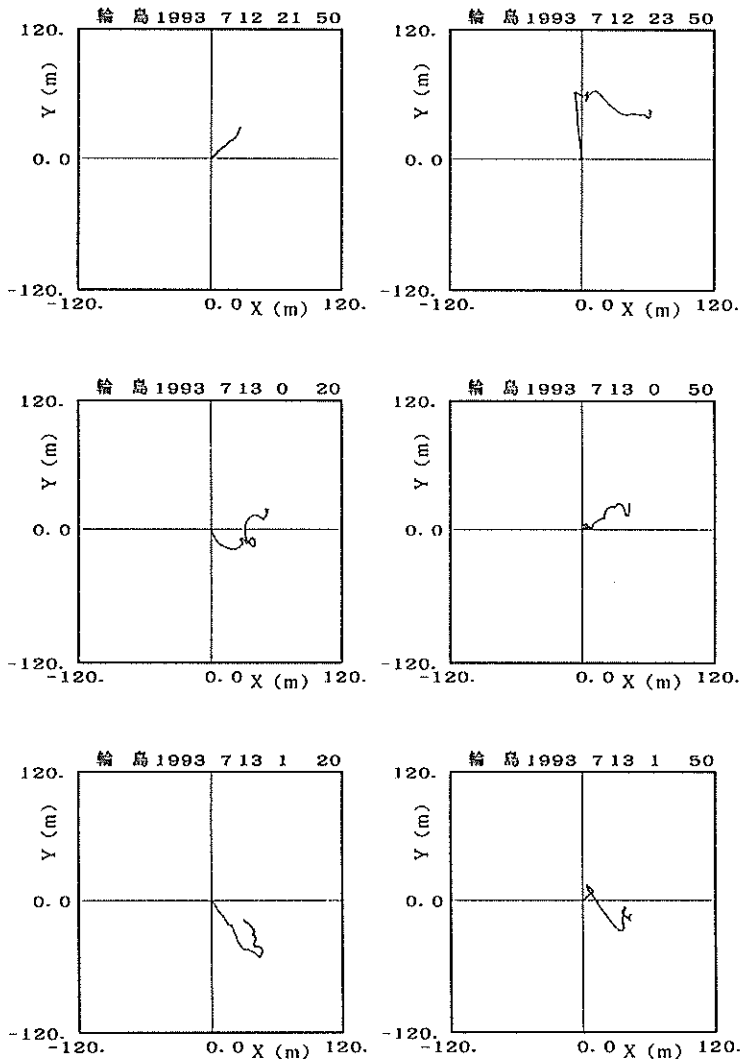


図-17 輪島港における海底水粒子の水平運動1（定常成分補正前）

となっていることから、やはり津波以外の要因によるものであると考えられる。

図-18は、前述した定常的な流れを取り除いて、図-17の中から津波によると考えられる流れを抽出したものであり、観測が終了する20分後には、観測開始時刻と同じ位置に水粒子が位置すると仮定して閉じた曲線を描いたものである。図-18から、津波による水粒子の運動特性が以下のように示されていると考えられる。

すなわち、水粒子は海岸線および等深線直角方向に50m近い顕著な往復運動をしていることがわかる。同時に東西方向すなわち海岸線平行方向の運動も無視することは出来ず、30m近い範囲を運動しているようである。この東西方向および南北方向の運動の位相や周期は複雑であ

り、その結果、その運動の軌跡は楕円状になることもあれば、8の字状になることもあり、さらに複雑な形状になることもあるようである。

このような複雑な水粒子の運動は、日本海全域にわたってさまざまなモードを有する数多くの津波の重複波の場が形成されていることによっておこるものと考えられるが、その詳細な解析は、今後津波伝播のシミュレーションと並行して行うべきテーマであろう。

いずれにせよ、津波は、通常の波浪に比べて非常に周期の長い波であるため、沖合いにおいてたとえ水面変動は、数10cmであっても、海底の水粒子は通常の風波では、どのような激浪であっても発生し得ないような、数10mにも及ぶ大きな振幅の水平運動をしている事実が、改め

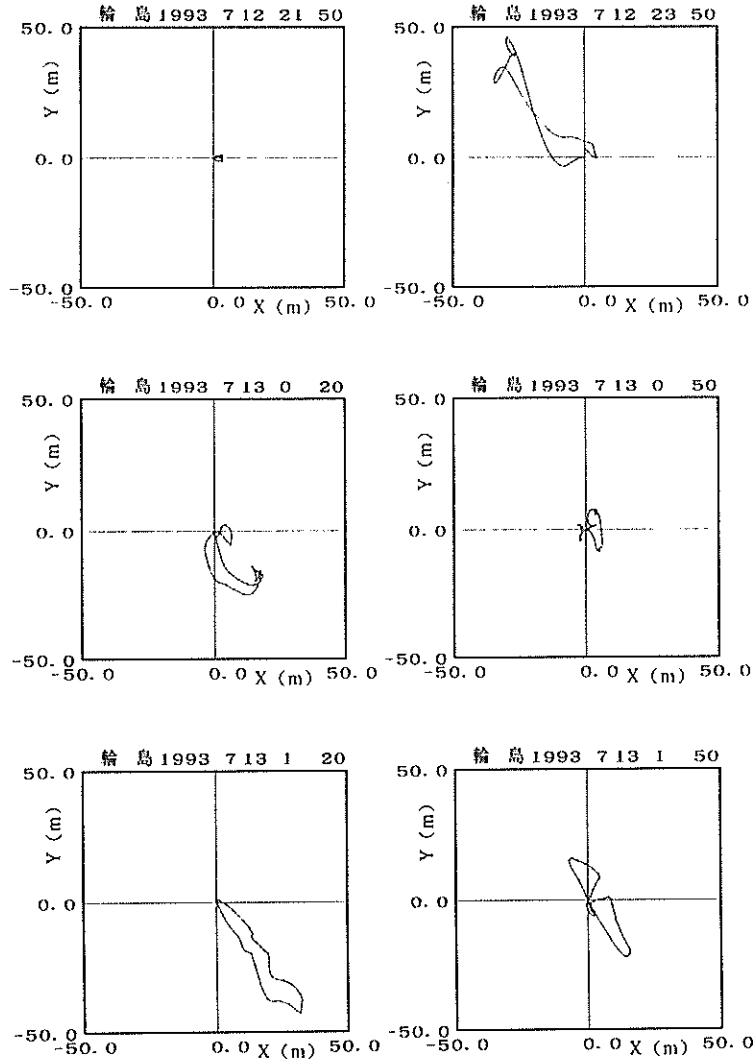


図-18 輪島港における海底水粒子の水平運動2 (定常成分補正後)

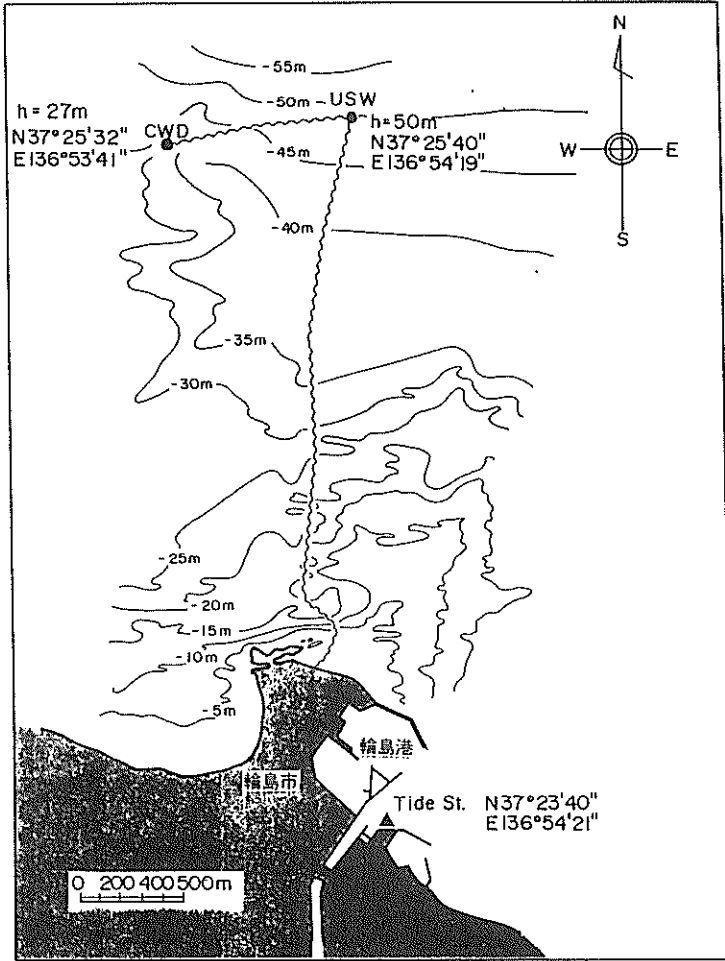


図-19 輪島港波浪・潮位観測地点位置図

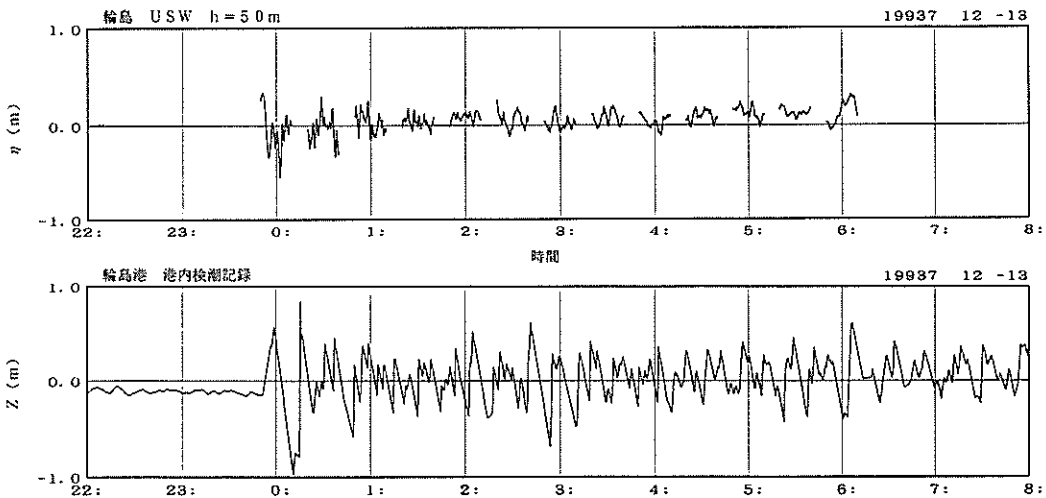


図-20 輪島港における波高記録と検潮記録の比較

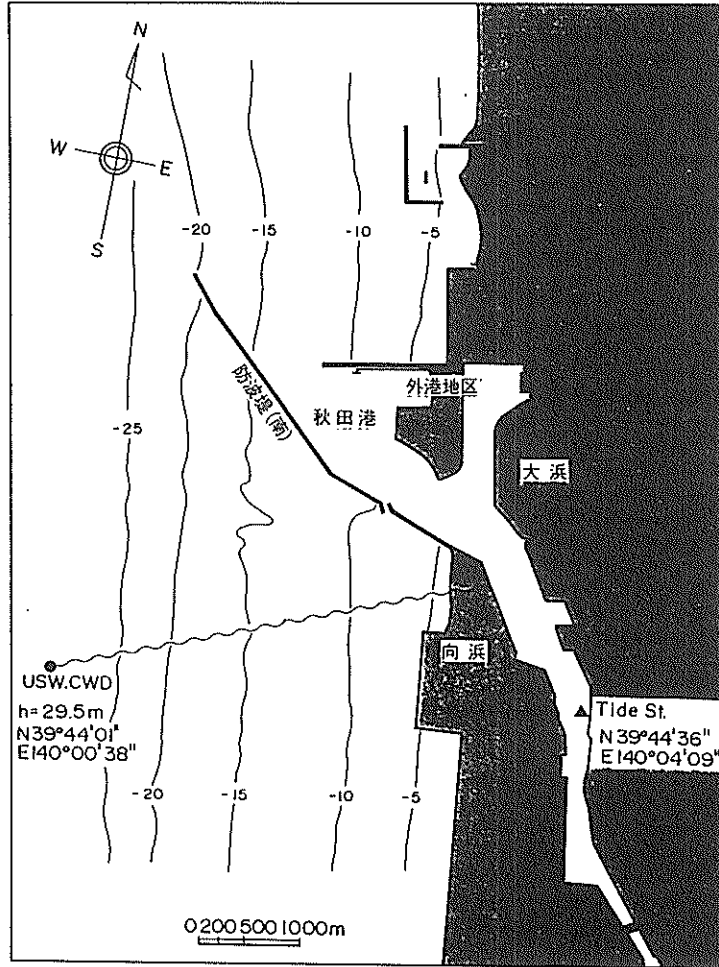


図-21 秋田港波浪・潮位観測地点位置図

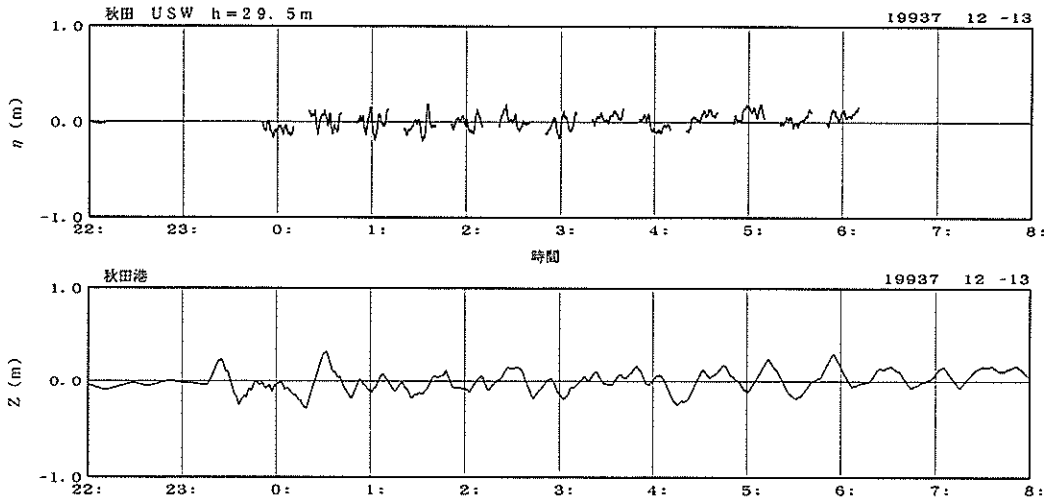


図-22 秋田港における波高記録と検潮記録の比較

て実測データから判明されたことになる。

#### 5.4 検潮記録との比較

図-19は、輪島における波浪観測地点と検潮所の位置を示したものであり、図-15の波浪計から輪島港に至る範囲

を拡大したものである。検潮所 (Tide St.) と波浪計 (USW, CWD) の間の距離は、約3.5kmであり、検潮所は防波堤で遮蔽された港内に位置していることがわかる。

図-20は、輪島における波高計による津波波形と検潮記録を、縦軸の水位変動及び横軸の時間を同一の尺度にと

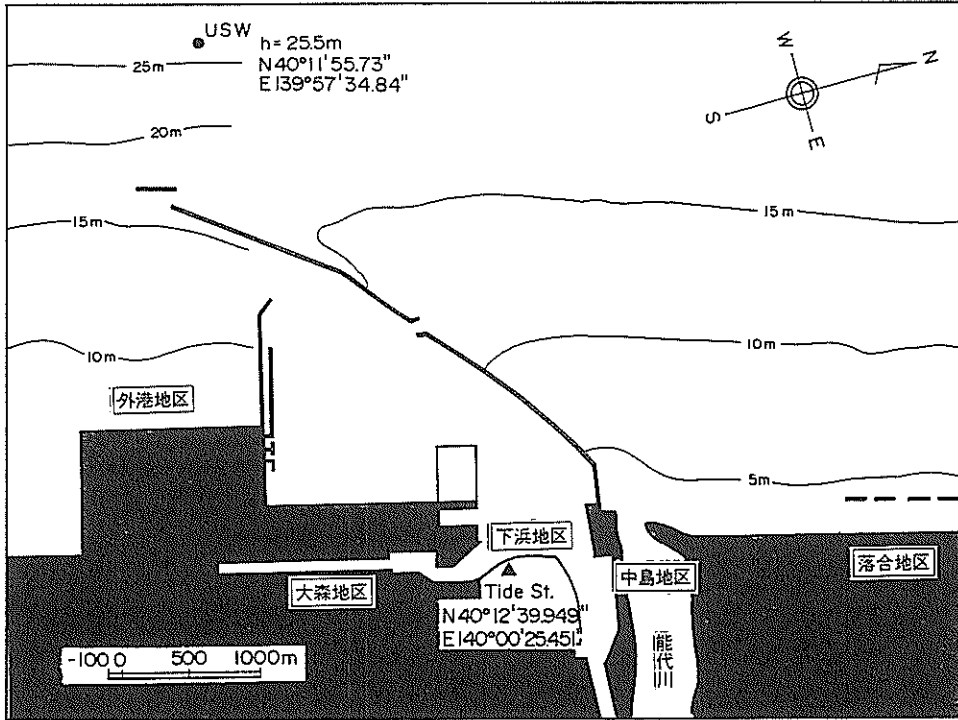


図-23 能代港波浪・潮位観測地点位置図

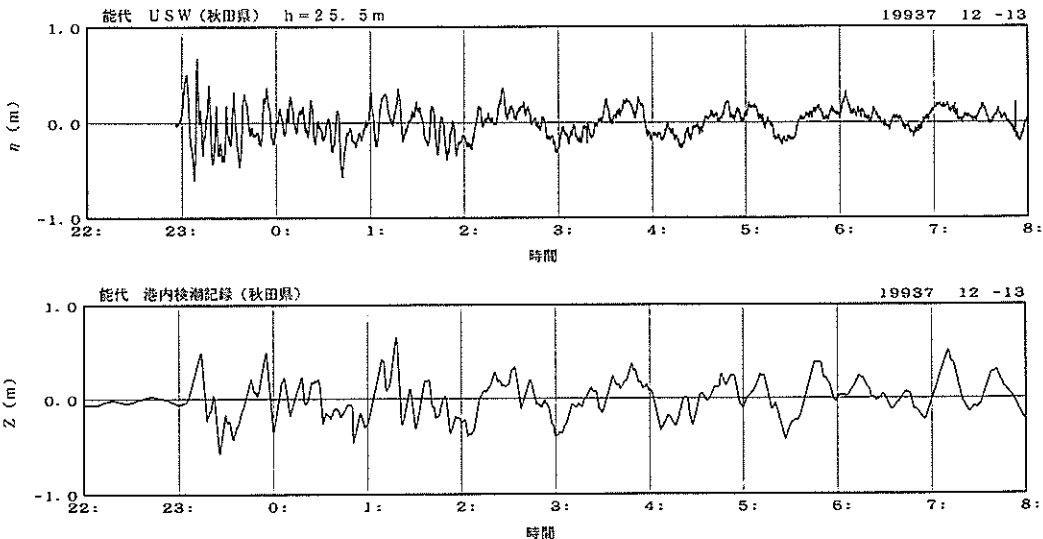


図-24 能代港における波高記録と検潮記録の比較

って表示したものである。波高計による津波波形記録は、風浪による影響を取り除くために、図-2～図-4に示したようにプラスマイナス10秒間の三角形型数値フィルターをかけた波形を表示している。また、波高計による水位変動の基準値としては、地震発生前の22:10までの観測における平均水位を基準と表示している。他方の検潮記録は、検潮記録紙上に記録されたアナログ波形記録をデジタイザーを用いてデジタル値に変換したものである。この際、検潮記録紙の紙送り速度は、2cm/hr.であったため、0.2mm毎に細かく潮位変動の読み取りを行っても、36秒間隔のデータのサンプリング間隔となつて、極大値及び極小値を正確にデジタル値で再現することは困難であった。このため、0.2mm毎の読み取りに加えて、記録紙上の水位の極大値及び極小値の値を別に読みとった上で、極大値・極小値のデジタル化された値の一部の補正を行っている。

上下の図を比較すると、両者の波形記録には、大きな相異が見られることがわかる。すなわち、沖合いの波浪計による波形記録中、例えば23:50から0:10の間にみられる周期5分程度以下の比較的周期の短い津波波形は検潮記録には現れておらず、両者の示す津波の周期はかなり異なったものとなっている。これは、検潮記録は導水管を経て短周期の波動成分を取り除いた、いわばローパスフィルターをかけた波形を記録していることに起因するものである。水位変動の絶対量そのものは、沖合いの波高計より検潮記録の方が大きくなっているが、沖合いの波高計が水深50mの地点に位置していること、沖合いの波高計は、図-14で示したように津波の重複波の場の中で節に近い地点に位置している可能性が高いことから考えると、必ずしも検潮記録が津波の波形の実態を正しく再現していることを意味しているものではない。

図-21及び図-22は、秋田港の沖合い波高計記録と検潮記録の比較を同様に行ったものであるが、やはり、両者の波形の周波数特性には、大きな相異が見られる。

図-23及び図-24は、秋田県港湾課及び同県能代港湾事務所から提供を受けた能代港における沖合い波高計記録と検潮記録を、同様に整理したものである。能代港においては、輪島港や秋田港の波形には、あまりはっきりとは現れていない周期1時間程度の比較的周期の長い津波波形が、両者の記録に共通してあらわれており、この1時間程度の長周期変動成分に限って両者の記録を比較すれば両者はよく対応していることがわかる。

この1時間程度の長周期変動成分の原因は明らかではないが、海底地形や海岸線形状によって、日本海全域に数多く発生したであろうと考えられる津波の重複波の1

つのモードによるものである可能性が高いと考えられる。

いずれにせよ、沖合いの津波波形の周波数特性の詳細な検討と、検潮記録上での周波数特性との詳細な比較は、津波の実態解明の上で重要な研究テーマであるので、今後さらに検討を進める必要があるものとする。今回の速報では、時間的制約もあり、十分なりまとめには至らなかった点も多いが、周波数特性に関する検討結果の一例を次章で述べることにする。

## 6. 沖合津波波形に対する潮位時系列の応答

### 6.1 津波伝達時の潮位時系列

津波の伝播状況を知るための基礎資料として検潮記録が用いられるが、検潮記録が津波波形を正確に追従していないことは、問題点として各方面から指摘されている。

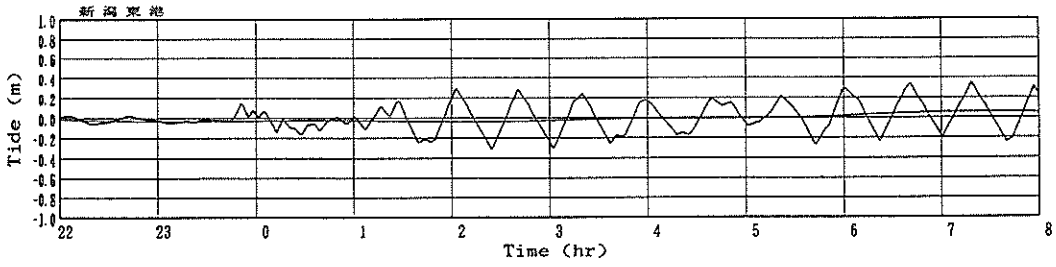
図-25は、北海道南西沖地震時に取得された潮位時系列の例である。図の(1)、(2)は、それぞれ新潟東港および新潟西港の潮位観測所で取得された潮位を、横軸に時刻をとって示している。両地点とも、フース型検潮器を用いて観測を行っている。図-26に新潟東港および西港の検潮所(Tide St.)と新潟港近辺の海域に所在する2ヶ所の波浪観測地点(新潟沖および新潟西港(-9.2m), USW)の位置関係を示す。

これらの潮位観測所が所在する2つの港湾は隣接して立地しているため、港外に伝播する津波の状態の差異は小さいものと考えられる。このように地理的な違いが少ないにも関わらず、取得された検潮記録は両者で異なった性質を示している。たとえば、新潟東港の検潮記録では1:30を過ぎた頃から周期40分程度の波が卓越しており、このような現象は新潟西港の記録ではみられない。これは、東港港内における長周期波成分の発達をとらえていると考えられる。

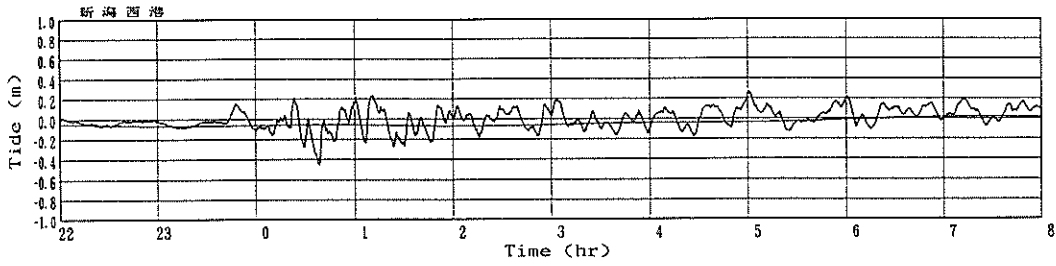
検潮記録は沖合津波波形から様々な影響を受けた後の波形であるときみなされるが、この影響を与える主な要因には、港内までの伝播過程における浅水変形の他にも、下に示すような多くの要因があげられる。

- ① 防波堤を通過するときに津波波形が変形する。
- ② 津波により励起される長周期波が存在するが、長周期波の発達に対する周波数応答は各港湾で異なる。
- ③ 検潮記録を取得する計測機器(検潮儀)が周波数により異なる応答特性を港内水位変動に対してもつ。

したがって、各港内ではそれぞれ沖合の津波波形と異なる状態がみられ、多くの場合、各港湾の固有周期に対応



(1)新潟東港



(2)新潟西港

図-25 新潟東港および西港における検潮記録

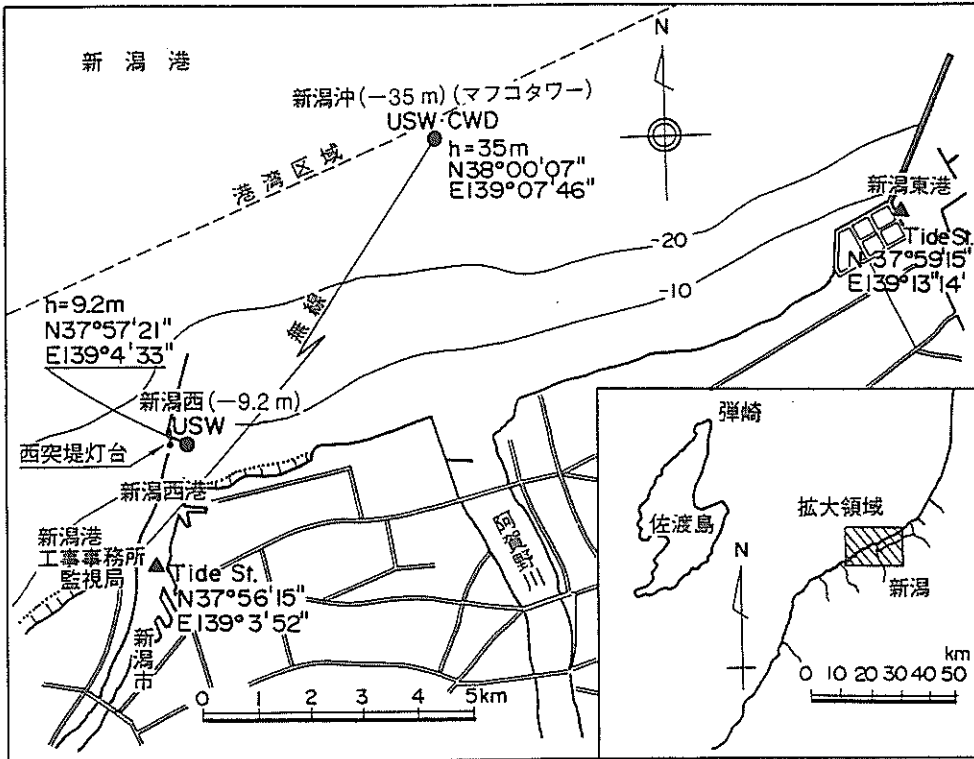


図-26 新潟東港および西港における波浪・潮位観測地点位置図

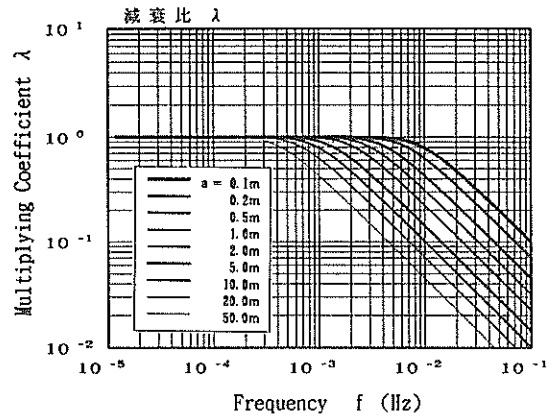
する長周期波成分が発達する傾向をもつ。しかし、港内の水位変動に限ってみれば、検潮儀のもつ応答特性が明らかになれば、検潮記録から検討することが可能となるため、次節に検潮儀の応答特性について述べることにする。

### 6.2 検潮儀の応答特性

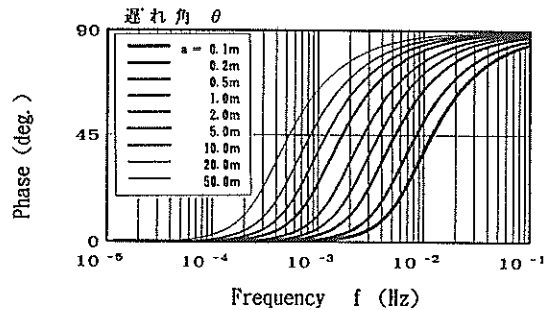
検潮儀の港内水位変動に対する応答特性は、数時間から数ヶ月間といった比較的長周期の変動成分を対象とし、対象外の高周波数成分は低減させるような構造をもたせている。これは、もともと潮位変動の観測を目的としており、擾乱時など検潮儀外部の水位変動が顕著な場合にも、平均水位を安定して観測する必要があるためである。したがって、津波波形の取得を目的とする場合には、検潮儀で取得された水位変動は、実際よりも過小に評価されることになる。この精度は、検潮儀の周波数応答特性に依存する。これに対し、村上ら<sup>14)</sup>は検潮儀の導水管での損失を考慮して、外部から強制的な水位変動を一成規則波で与えた場合の観測井戸内の水位変動の振幅の減衰比 $\lambda$ と遅れ時間 $\tau$ を解析的に求める方法を示している。

水位変動の振幅の減衰比 $\lambda$ 、位相差 $\theta$ および遅れ時間 $\tau$ について、村上の提案式から著者が計算した例を図-27の(1)~(3)に示す。ここで、位相差は第一象限 ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) の範囲で定義することとし、遅れ時間はこの位相差に対する値である。図中の計算値は、井戸内の水位変動が定常状態にあると仮定した場合の値を用いている。図の横軸はそれぞれ周波数を示しており、パラメータ $a$ は検潮儀外部の水位変動の振幅である。 $a$ を用いると、井戸内の水位変動の振幅は $\lambda a$ で表される。応答特性は検潮儀の観測井戸や導水管の構造により変化する。村上はいくつかの港について検潮儀の構造諸元から $E_0$ を計算して表にまとめているが、地震時の現地における導水管の粗度が不明であるため、この $E_0$ の値の適用性について十分議論する必要がある。そこで、ここでは構造による影響を表す係数 $E_0$ （以下、構造係数と呼ぶ）が平均的な値 $E_0=50$ である場合を示し、定性的な特性を議論することにする。構造係数 $E_0$ は検潮儀の構造形式により一定の値をとり、 $E_0$ が大きくなるにつれて減衰比 $\lambda$ の値が小さくなる傾向を示す。また、構造係数が一定な場合、すなわち同一の観測地点で取得された検潮記録について議論する場合には、 $af^2$ （観測井戸外部の水位変動の加速度に相当する量）の値が大きいほど、減衰比は小さくなる傾向をもつ。このため、外部から与えられる水位変動の振幅が小さい、あるいは、周波数が低い場合に減衰比は小さくなる。

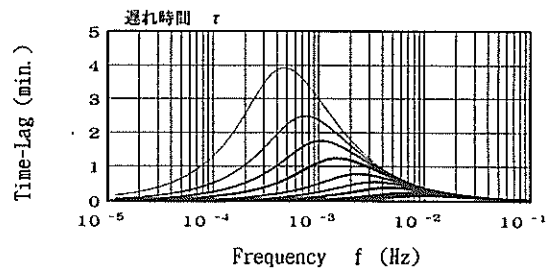
図-27の関係をを用いて港内の水位変動を推定する場合、



(1)減衰比



(2)フェイズ



(3)ラグ

図-27 検潮儀の周波数応答特性（定常状態、 $E_0=50$ ）

各港湾に設置された検潮儀の構造により決まる係数の実際の値が問題となる。これに対し、Satake et al.<sup>15)</sup>は、40ヶ所の潮位観測地点に対して現地実験により検潮儀の応答特性を検討している。そして、日本海中部地震時に津波波形が取得された6ヶ所の潮位観測地点について、潮位変動から検潮儀外部の水位変動を推定している。しかし、これらの実験値は、解析値との間に著しい差異がみられる場合もあり、その妥当性については今後さらに



検討をする必要がある。したがって、これらの値の妥当性の議論と、検潮記録を用いた港内水位の推定は、今後の課題として検討を進めることとしたい。

### 6.3 パワースペクトル解析

6.1で示した水位波形の3つの変形要因は、いずれも周波数に対する応答特性を示す。したがって、3つの要因全体をまとめて1つのシステムとして考えた場合には、基本的には周波数応答をもつ入出力関係とみなすことができる。この場合、入力および出力として与えられる不規則変動は、それぞれ沖合の水位変動記録（沖合津波波形）と検潮記録である。したがって、6.2に示した検潮儀の応答特性を考慮して、両者の入出力関係の特性を検討することにより、津波にともなう港内水位変動の状況を調査する上で有用な情報が得られるものと考えられる。また、この特性を用いて、津波計測機器としての検潮儀の有効性の検討もできるであろう。

上記の目的から、沖合津波波形と検潮記録の周波数応答を調べ、沖合から津波が入射するときに検潮記録が示す特性について検討することとした。なお、津波波形はもともと非定常な個々の波の連なりであり正弦波の重ね合わせで与えられるものではない。ただし、本章の目的は、全体の津波波形を1つの不規則変動とみなした場合の周波数応答を議論することにあるので、両者の入出力関係をそれぞれの変動波形のフーリエ成分を用いて検討した。

不規則変動量 $x(t)$ のパワースペクトル（以下、スペクトルと呼ぶ） $S(f)$ （ $\equiv S_{xx}(f)$ ）の計算は、 $x(t)$ から求められた周波数 $f$ に対するフーリエ成分 $X(f)$ と $S(f)$ が式(1)の関係をもつことを利用して実施した。

$$S(f) = E \left[ \frac{X(f)X^*(f)}{T} \right] \quad (1)$$

ここで、 $T$ ：成分波の周期（ $= 1/f$ ）であり、 $*$ ：共役複素数、 $E[x]$ ：アンサンブル平均を表している。また、図-27との比較のためにスペクトルの各周波数成分に対する減衰比 $\lambda$ をスペクトルの入力値に対する出力値の比の平方根を用いて定義し、検討を行った。

$$\lambda(f) = \sqrt{\frac{S_{out}(f)}{S_{in}(f)}} \quad (2)$$

ここで、 $S_{in}(f)$ 、 $S_{out}(f)$ ：それぞれ入力波形と出力波形のスペクトルである。

各不規則変動のフーリエ成分は、直接フーリエ変換(DFT)法を用いて計算した。沖合の水位記録では、演

算およびデータ送信のために一定の時間間隔で観測を休止するため、データのサンプリング間隔が一定ではない。したがって、高速フーリエ変換(FFT)法の適用は困難である。また、今回の調査で取得されたデータの個数は900~1000個であり、FFT法を用いた場合、2<sup>9</sup>個のデータに適用可能であるために無効となるデータ数が多くなる。パワースペクトルの計算値は、前後それぞれ10個のデータを用いて三角フィルターをかけ、平滑化した値を表示している。

本調査で使用した水位記録は、輪島港、秋田港では30分毎に20分間、新潟東港および西港では2時間毎に20分間観測されたデジタル記録であり、サンプリング間隔は0.5秒である。能代港については、連続して得られたアナログ記録から1秒間隔のサンプリングで読み取った値を用いた。ただし、風波等の高周波数成分を除去するため、前後それぞれ10秒間のデータを用いて三角フィルターで平滑化した波形を10秒間隔でサンプリングし、フーリエ成分の計算を行っている。検潮記録については、記録紙からサンプリング間隔36秒（ $= 1/100$ 時間）で読み取ったデータをそのまま用いた。検潮記録および沖合の水位記録中に含まれているトレンド成分の除去は、海上保安庁発行の調和定数表<sup>10)</sup>を用いて推算された各港湾の天文潮位を取り除くことにより実施した。

クロススペクトルについても同様に、2つの不規則変動 $x(t)$ 、 $y(t)$ のフーリエ成分 $X(f)$ 、 $Y(f)$ とこれらに対するクロススペクトル $S_{xy}(f)$ の関係を表す式(3)を用いて計算を行った。

$$S_{xy}(f) = E \left[ \frac{X^*(f)Y(f)}{T} \right] \quad (3)$$

クロススペクトルは複素関数であるため、物理的意味をより明確にするためにその絶対値と位相角を用いて2変量間の相関性を評価する。また、クロススペクトル自身が次元量であり、異なる相関関係の組に対して直接相関性の評価を行うことが難しい。そこで、入力および出力波形のスペクトルの値をそれぞれ用いて無次元化を行うことにより、式(4)、(5)のようにコヒーレンス $\gamma^2(f)$ とフェイズ $\theta_{xy}(f)$ を定義し、検討を行った。

$$\begin{aligned} \gamma^2(f) &= \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \\ &= \frac{K_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left( \frac{Q_{xy}(f)}{K_{xy}(f)} \right) \quad (5)$$

ここで、 $K_{xy}(f)$ 、 $Q_{xy}(f)$ ：それぞれ、クロススペクトルの実部と虚部を表し、コスベクトルとクオドラチャスペクトルと呼ばれる。また、 $S_{xx}(f)$ 、 $S_{yy}(f)$ ：それぞれ2つの不規則変動量 $x(t)$ 、 $y(t)$ のスペクトルを表している。両式よりコヒーレンスの平方根は2つの不規則変動のフーリエ成分に対する相互相関係数であり、フェイズはクロススペクトルの位相を意味する。したがって、フェイズとラグの間には式(6)の関係がある。

$$\tau(f) = \frac{\theta_{xy}(f) \pm 2n\pi}{2\pi f} \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (6)$$

#### 6.4 沖合津波記録と検潮記録のスペクトルの比較

図-28～33は、各港湾の潮位観測所で取得された検潮記録のスペクトルを横軸に周波数をとって示したものである。各図の(1)中、黒丸を結んだ波形は、検潮記録から計算されたスペクトルを示す。また、沖合津波波形として、港外の近接した位置に設置された波高計で取得された水位記録を6.3に示した方法で計算したスペクトルを、比較のために白抜きで示している。各図の(2)は、式(2)で定義される減衰比 $\alpha$ を(1)と同じ横軸を用いて示している。

計算されたスペクトルには、どれも顕著なピークの他に細かい振動がみられる。この振動は、解析方法および検潮記録などの精度上の問題から生じるものが含まれているため、相関関係を議論する上でデータ自身のもつ特性をあらかじめ把握しておく必要がある。そこで、スペクトルの比較検討に先立ち、データの取得条件から見かけ上あらわれる特性を示す。

検潮記録はもともと潮位変動の周期に対応した水位変化の取得を目的とするため、記録紙の送り速度を非常に小さくしている。このため、正確な波形の読み取りが困難であり、図-25中の長周期波成分に対しても波の峰から谷までがほぼ直線に近い値となっている。これは、ピーク値は正確に読み取れても、その間の読み取りは難しく、直線補間的になりやすいためである。したがって、スペクトル解析を行うと三角波をフーリエ変換した場合と同じような高周波成分がピーク周波数の整数倍の周波数であらわれることが予想される。これに対し、波高計で取得された水位記録は、デジタル記録であり取得時のサンプリングの間隔も十分短いため、データの精度に対する信頼性は高いものと考えられる。しかし、演算およびデータ送信のための観測休止時間が存在するために、サンプリング間隔が一定間隔をおいて大きくなる。そのため、

スペクトルに観測間隔に対応した周波数成分がみられることが予想される。

図-28は、輪島港の検潮記録のスペクトルを示している。沖合津波記録のスペクトルと比較すると、全体的に高周波数側で減衰が大きく、 $10^{-3}$ Hz (=15分：フーリエ成分の周期、以下同様) 付近を境に低周波数側では顕著なエネルギーがみられる。6.2に示したように、検潮儀は全体として水位変動の振幅を低減させる特性をもち、この傾向は周波数が大きくなるほど強くなる。図-28の傾向は、この周波数特性を表しているものと思われる。

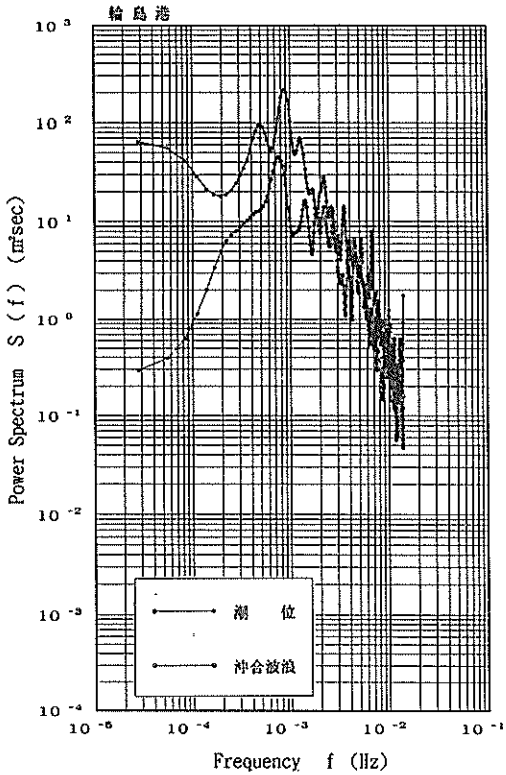
減衰比が $4 \times 10^{-3}$ Hz (=4分) 付近の周波数で変動するのは、沖合津波波形が $1 \sim 4 \times 10^{-3}$ Hz (=5～15分) でピークをもち、入射波の振幅が周波数毎に大きく変化するためと考えられる。このピーク周波数は、4.2に示した津波の第1波の周期 (=960秒) の領域に対応している。したがって、沖合から入射した津波の第1波にあたる成分は輪島港の検潮儀では振幅が50%程度低減した値であらわれる、あるいは、港内に入射する場合の透過率がその程度まで抑えられていることが推察される。

また、検潮記録のスペクトルは、低周波数側で全体的に沖合津波波形のスペクトルより大きな値を示している。検潮儀の応答特性による減衰比は、村上の解析解では1より大きな値をとらないはずである。したがって、港内における波の変形や浅水変形、屈折等による長周期成分の発達の影響により、港内の長周期水位変動が沖合と比べて顕著になっているものと考えられる。

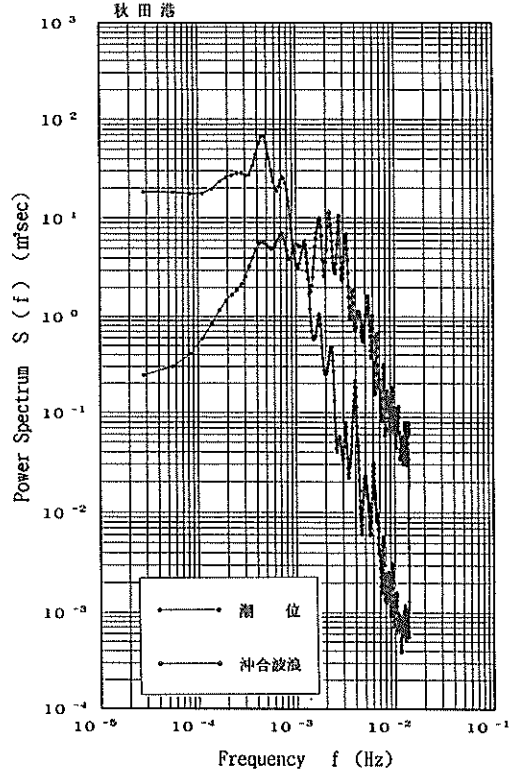
低周波数側にあられたピークの周波数を比較してみると、波高計の記録では $8 \times 10^{-4}$ Hz (=20分) 付近に顕著なピークが1つだけみられるのに対し、検潮記録中では $5 \times 10^{-4}$ Hz (=35分) 付近のさらに低周波数側にも顕著なピークがあらわれている。このように、沖合では比較的値が小さい周波数成分が港内で増幅されている原因として、副振動などの長周期成分が励起されていることがあげられる。

図-29は、秋田港のスペクトル計算結果を示している。輪島港と同様に $10^{-3}$ Hz付近を境に周波数応答に差異がみられるが、高周波数側の低減率が輪島港と比べて著しい。これは、港湾の形状特性から比較的短い周期の波に対する遮蔽率が大きくなっているためか、あるいは検潮儀の構造上、高周波数側の低減率が大きくなっているものと考えられる。

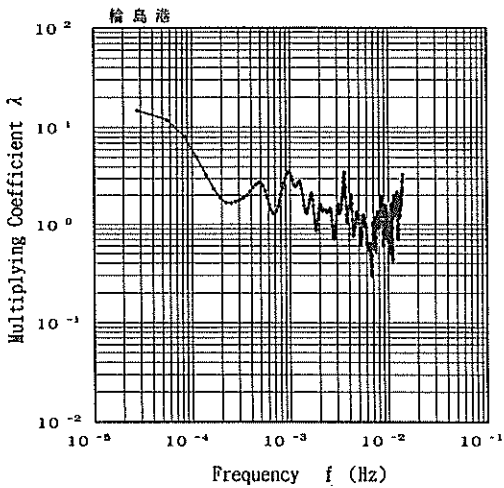
また、検潮記録のスペクトルでは顕著なピークが $4 \sim 5 \times 10^{-4}$ Hz (=35～40分) あたりにみられるが、水位記録のものには卓越したピークが存在せず、 $0.4 \sim 1.5 \times 10^{-3}$ Hz (=10～40分) の広い周波数にわたるなだらかな



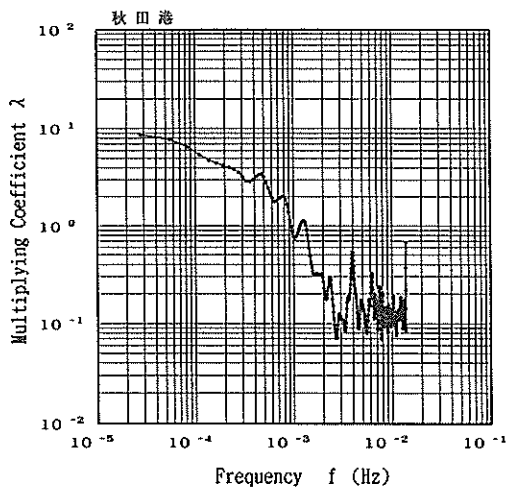
(1)パワースペクトル



(1)パワースペクトル



(2)減衰比



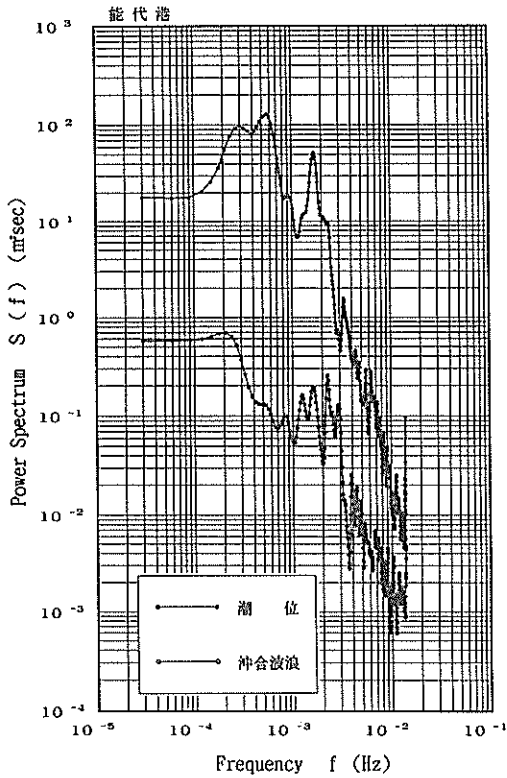
(2)減衰比

図-28 輪島港の沖合波浪と潮位変動の周波数スペクトル

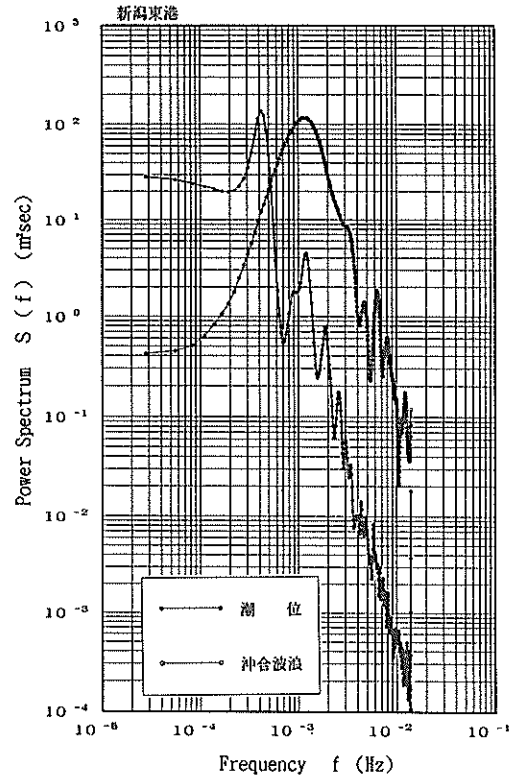
図-29 秋田港の沖合波浪と潮位変動の周波数スペクトル

沖合の水位記録は輪島港の波浪観測地点で取得した0.5秒サンプリングのデジタル記録であり、23:50から7:10までの30分毎に20分間ずつの観測記録をもとに解析を行った。

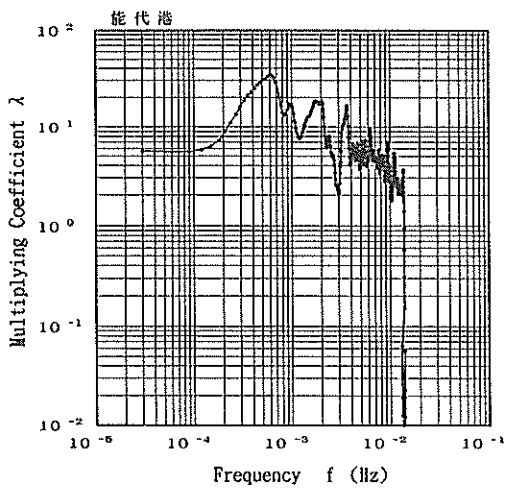
沖合の水位記録は秋田港の波浪観測地点で取得した0.5秒サンプリングのデジタル記録であり、23:50から7:10までの30分毎に20分間ずつの観測記録をもとに解析を行った。



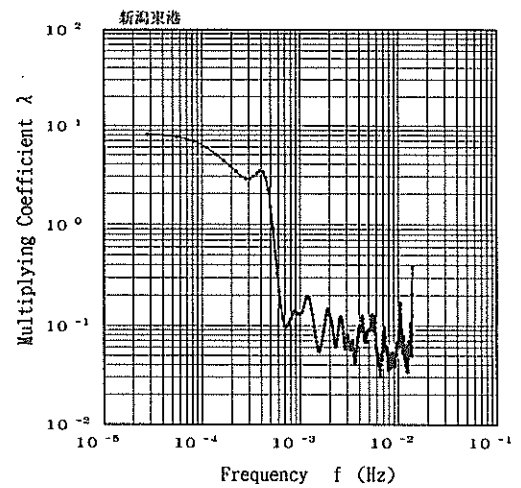
(1)パワースペクトル



(1)パワースペクトル



(2)減衰比



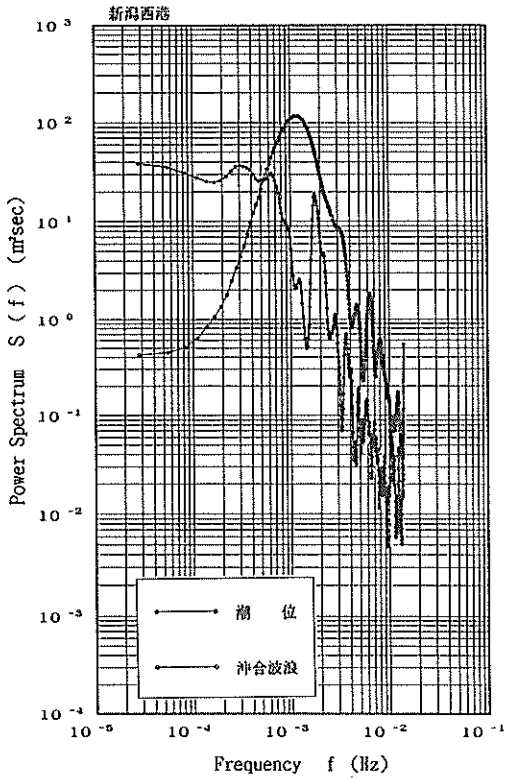
(2)減衰比

図-30 能代港の沖合波浪と潮位変動の周波数スペクトル

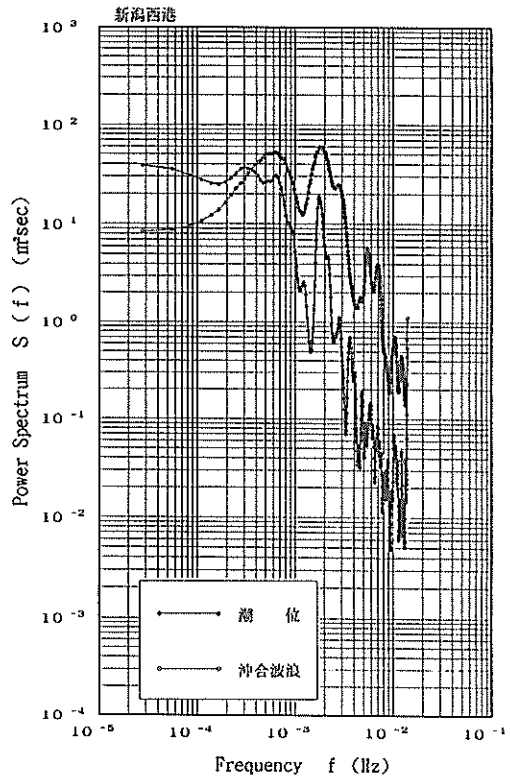
沖合の水位記録は能代港の波浪観測地点で22:56から8:15まで連続取得したアナログ記録であり、1秒のサンプリングで読み取りを行ったデータを用いて解析を行った。

図-31 新潟東港の沖合波浪と潮位変動の周波数スペクトル

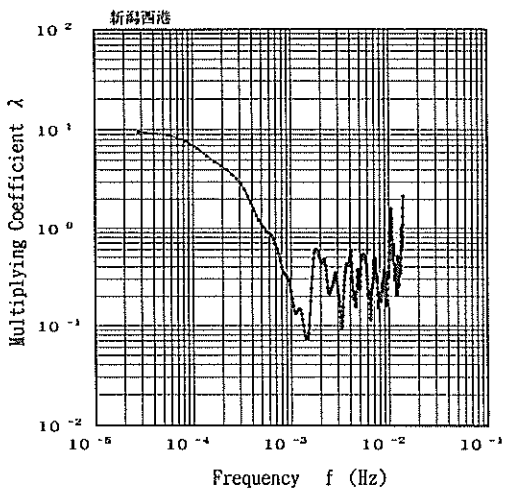
沖合の水位記録は新潟沖の波浪観測地点で取得した0.5秒サンプリングのデジタル記録であり、23:50から6:10までの2時間毎に20分間ずつの観測記録をもとに解析を行った。



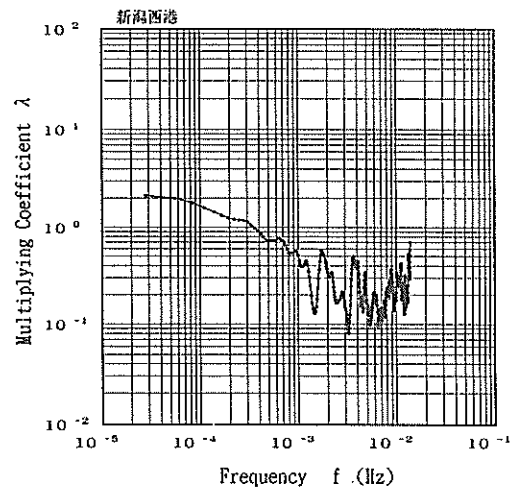
(1)パワースペクトル



(1)パワースペクトル



(2)減衰比



(2)減衰比

図-32 新潟西港の沖合波浪と潮位変動の周波数スペクトル

図-33 新潟西港の沖合波浪(-9.2m)と潮位変動の周波数スペクトル

沖合の水位記録は新潟沖の波浪観測地点で取得した0.5秒サンプリングのデジタル記録であり、23:50から6:10までの2時間毎に20分間ずつの観測記録をもとに解析を行った。

沖合の水位記録は新潟西港(-9.2m)の波浪観測地点で取得した0.5秒サンプリングのデジタル記録であり、23:50から6:10までの2時間毎に20分間ずつの観測記録をもとに解析を行った。

ピークを形成している。したがって、このピークの発生も周辺海域の地形に起因する種々の副振動によるものと考えられる。

図-30に示す能代港のスペクトル計算結果の大きな特徴として、港外の水位記録では $10^{-3}$ Hz以下の低周波数側のスペクトルの値が他の港湾と比べて小さくなっていることがあげられる。したがって、能代港沖合では $2 \times 10^{-4}$ Hz以下(≒80分以上)の成分を除いて、長周期成分に顕著なエネルギーのピークが認められない。ただし、6.4で述べたように、能代港では連続した記録が取得されているのに対し、他の地点では欠測データの影響により低周波成分が小さく計算されるので、上記の結果にはこの影響が含まれているかもしれない。

これに対し、検潮記録では低周波成分の波の発達が著しく、図-29(2)に示すように減衰比が最大で $2 \times 10^1$ 以上の値をとっている。このエネルギーは主として、 $4 \times 10^{-4}$ Hz(≒40分)と $1.5 \times 10^{-3}$ Hz(≒10分)付近の2ヶ所で卓越したピークを形成している。これらの周波数に対応する長周期成分の発生の可能性については、今後、さらに十分検討していく必要がある。

図-31と32は、それぞれ新潟の東港と西港の潮位スペクトルの計算結果である。東港のスペクトルにみられる $4 \times 10^{-4}$ Hz(≒40分)付近のピークは、図-25の時系列中にみられた長周期振動の周期とほぼ一致し、これからも東港では周期40分程度の長周期成分が卓越していたことがわかる。この他にも高周波数側の倍周波数の位置に規則的なピークがあらわれているが、はじめに示したように、潮位の読み取り波形が三角波のようにになっている影響からあらわれる副次的なピークである可能性もあり、さらなる検討が必要である。一方、西港では、 $3 \sim 7 \times 10^{-4}$ Hz(≒25~60分)の周波数帯にみられるなだらかなピークと、 $1.5 \times 10^{-3}$ Hz(≒10分)付近のピークが顕著である。

これに対し、水位記録のスペクトルでは $10^{-3}$ Hz付近にピークをもち、検潮記録のスペクトルピークの出現の傾向と対応しない。この原因としては、水位記録の取得地点は比較的沖合であり長周期成分の発達状態が東港の観測地点とは異なること、あるいは両港のスペクトルの減衰比が高周波数側で小さいことが考えられる。減衰比が小さくなる原因としては港湾の形状による応答特性と検潮儀自身の構造的な応答特性が考えられる。

新潟西港では港湾にかなり近接した地点にも波高計が設置されており、その地点で取得された水位記録は西港内の水位変動との相関がより大きいと考えられる。そこで、西港付近で取得された水位変動からも同様にスペク

トルを計算し、図-33に示す。

図より、近接した地点で取得されたスペクトルには、 $6 \times 10^{-4}$ Hz(≒25~30分)付近にみられるなだらかなピークと $1.5 \times 10^{-3}$ Hz(≒10分)付近のピークがみられ、それぞれのピーク周波数は検潮記録のスペクトルの値とよく対応している。このことは、西港で取得された検潮記録中の $6 \times 10^{-4}$ Hz(≒25~30分)程度の長周期振動成分が港湾内で実際に発生している副振動を示していることをあらわしている。したがって、検潮儀の応答特性について十分に検討し、減衰比を正確に求めることができれば、逆に、検潮儀の記録から港内の水位変動を精度よく推定できると考えられる。

また、図-32, 33の比較から、検潮記録と近接した波浪観測地点の波高記録とはスペクトル形状についてよい対応を示すが、沖合に離れた波浪観測地点の波高記録とは応答特性が大幅に異なる場合があるといえる。したがって、検潮記録から沖合の津波波形を推定する場合には、津波の伝播、発達特性を考慮した上で両者の応答についてよく検討しなければならない。ただし、新潟で取得された沖合津波波形は、2時間毎の水位記録から計算しているため、スペクトルの計算結果に副次的なピークがあらわれる可能性もあり、その推定誤差も大きい。したがって、水位記録のスペクトル計算結果に、この影響があらわれているため両者の対応がよくないことも考えられる。

## 6.5 相互のスペクトルの相関性

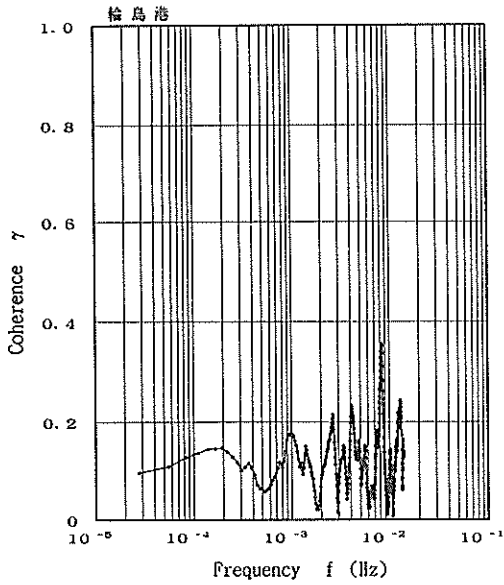
図-34~39は、各港湾の検潮記録と水位記録の相関関係を表しており、横軸は周波数をあらわしている。図の(1)中の縦軸はコヒーレンスを示している。また、両者の間のフェイズとラグについても、同様に、それぞれ(2), (3)に示す。これらの図をもとに、両者の間の相関の有無とその大きさについて、スペクトル自身のオーダーと比較しながら議論をおこなう。また、両者の間のフェイズには観測地点間の距離のために遅延が生じるので、その点について考慮しながら、フェイズやラグの値について検討する。

図-34は、輪島港における相関関係を示したものである。図より、コヒーレンスは、 $10^{-3}$ Hz(≒15分)付近に小さなピークをもつ。これは、図-28(1)に示したパワースペクトルのピーク周波数に対応している。ただし、輪島港の検潮記録のパワースペクトルには $5 \times 10^{-4}$ Hz付近にもピークがみられるが、コヒーレンスのグラフにはこれに対応する明瞭なピークは認められない。これは、この長周期波成分は港内に入射してから顕在したために、

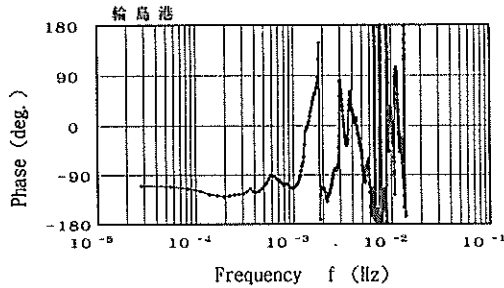
港外の水位変動とは相関が小さくなっているものと考えられる。

コヒーレンスは、 $2.0 \times 10^{-4}$  Hz (≒90分) 付近の低周波数側にもなだらかなピークをもち、これらのピークよりも高周波数帯ではコヒーレンスの値が激しく変動する。

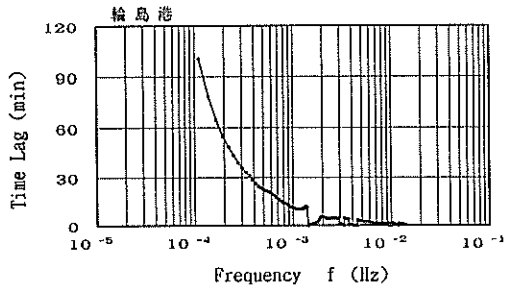
このなだらかなピークは、潮汐等を含んださらに長周期の波同士の応答を示すと考えられる。また、高周波数側に相関がみられるのは、津波の第1波に対応する周期(≒960秒)の周辺にあるためと考えられる。ただし、高周波数成分についてはスペクトルの絶対値が小さいこと、お



(1)コヒーレンス

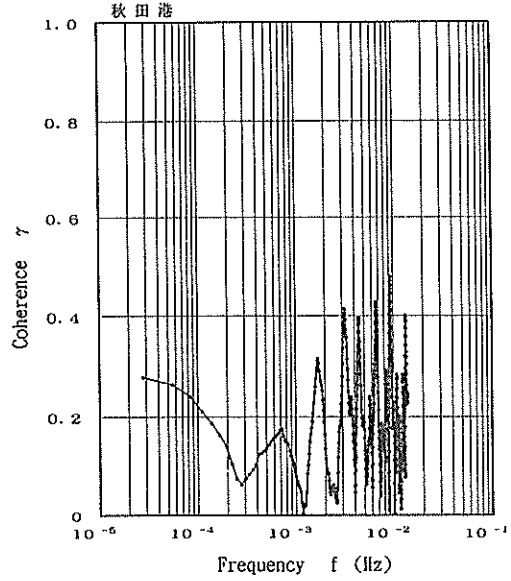


(2)フェイズ

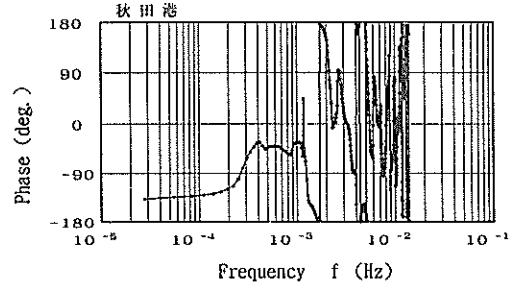


(3)ラグ

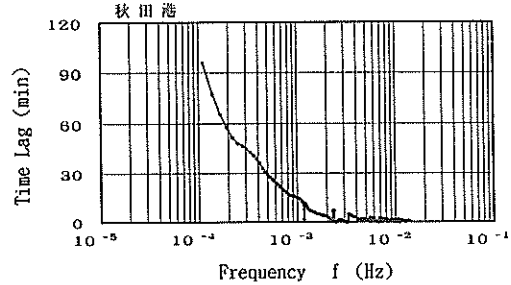
図-34 輪島港の潮位変動と港外水位変動との相関関係



(1)コヒーレンス



(2)フェイズ



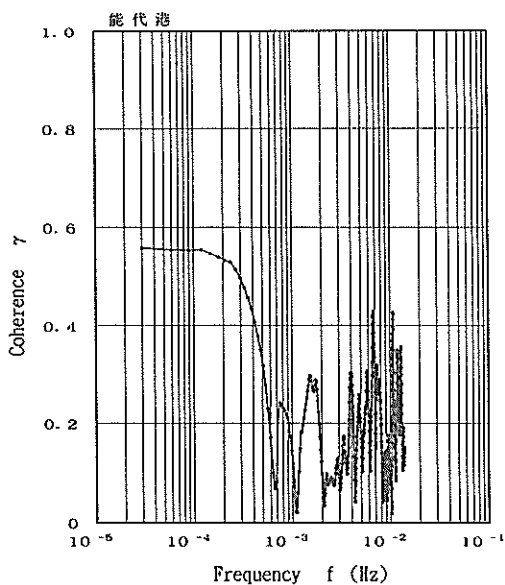
(3)ラグ

図-35 秋田港の潮位変動と港外水位変動との相関関係

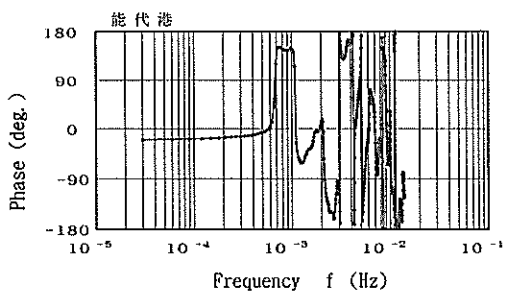
よびフェイズが不安定なことから必ずしも相関が高いとはいえない。

低周波数成分の波のフェイズはほぼ $-90^\circ$ 付近に集中しており、ラグを計算すると周期の3/4程度となる。観測

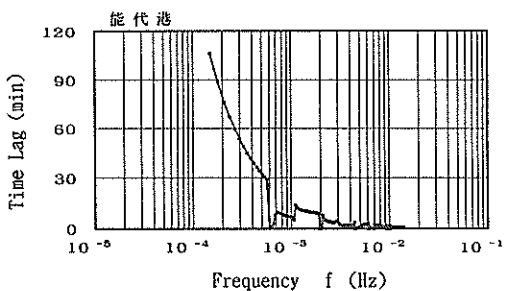
地点の位置的な関係から津波の伝播時間は2~3分のオーダーである。また、図-27に示されるように、検潮儀の構造的な特性から与えられる時間の遅れも、 $E_0=50$ とみなした場合、数分程度にしかない。しかし、周波数



(1)コヒーレンス

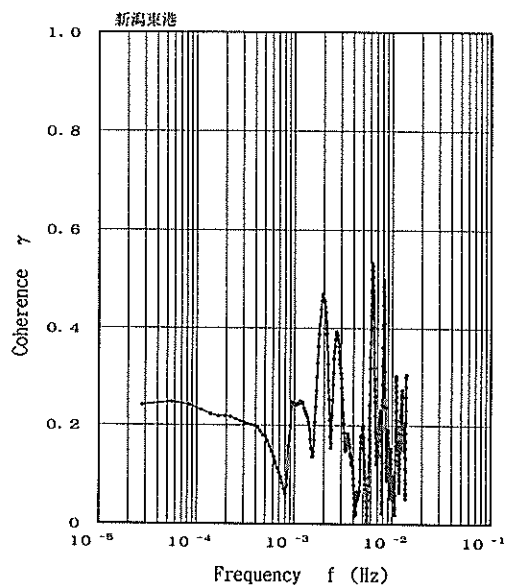


(2)フェイズ

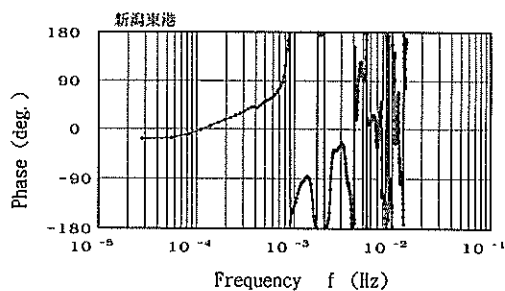


(3)ラグ

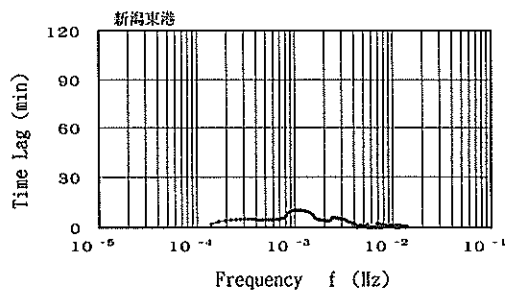
図-36 能代港の潮位変動と港外水位変動との相関関係



(1)コヒーレンス



(2)フェイズ



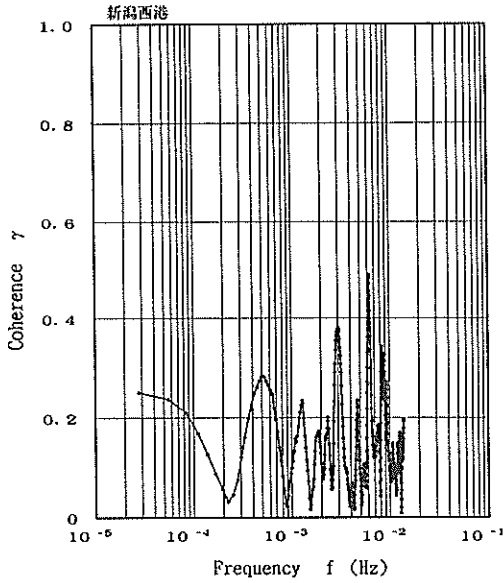
(3)ラグ

図-37 新潟東港の潮位変動と港外水位変動(新潟沖)との相関関係

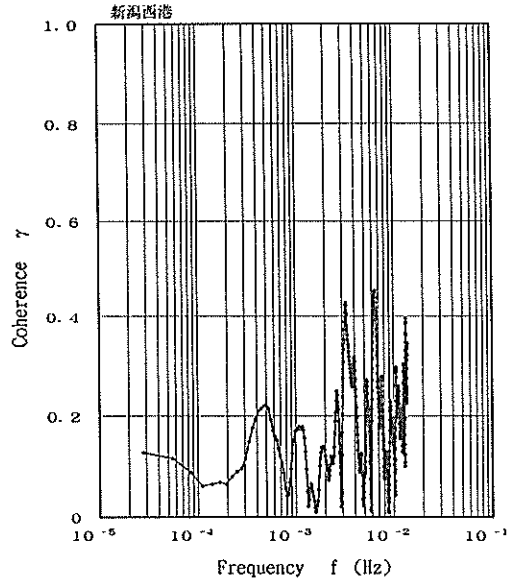


が低くなるほどラグが大きくなる傾向は理論値と一致していることから、何らかの原因によってさらに低周波数成分でも減衰比が小さくなっていると考えられる。この原因としては、たとえば、検潮儀の導水管内の粗度が理

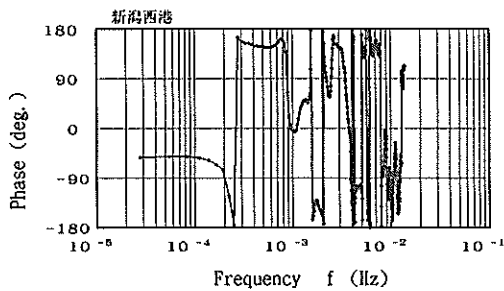
論値より大きいために構造係数 $E_0$ の値が大きくなり、減衰比が図-27に示した値より小さくなったことが考えられる。また、港湾と津波の間の周波数応答のようなさらに固有振動数の大きな振動系による影響が低周波成分に



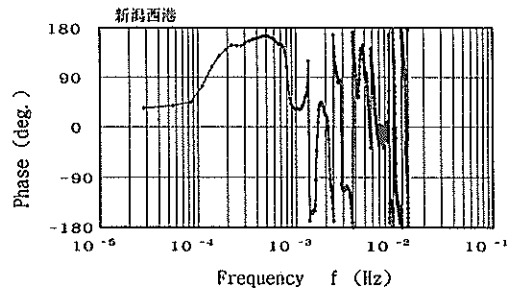
(1)コヒーレンス



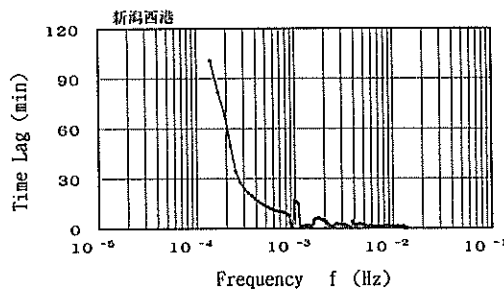
(1)コヒーレンス



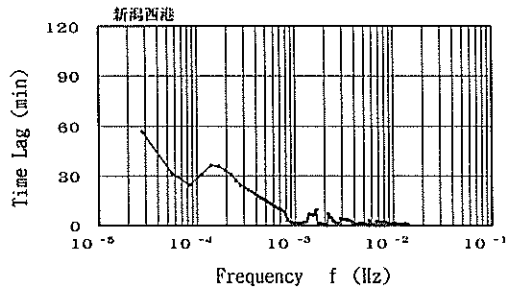
(2)フェイズ



(2)フェイズ



(3)ラグ



(3)ラグ

図-38 新潟西港の潮位変動と港外水位変動(新潟沖)との相関関係

図-39 新潟西港の潮位変動と港外水位変動(新潟西港(-9.2m))との相関関係

あらわれていることも考えられる。

図-35は秋田港の相関関係を示しており、図中のコヒーレンスの特性については、輪島港とほぼ同様な特性を示している。しかし、フェイズは、パワースペクトルのピークに対応する $0.4\sim 1.0\times 10^{-3}\text{Hz}$ の周波数帯で $-45^\circ$ 付近の値をとる。これは、秋田港の検潮儀および港湾全体の周波数応答特性が輪島港と異なるためと考えられる。

図-36に示される能代港の相関関係では、低周波数成分のコヒーレンスが、輪島港や秋田港の場合と比べて大きくなっている。これは、能代港では港湾の内側で、長周期成分の発達があまりみられず、外部の潮汐等による水位変動に直接対応する波が港湾内でもみられるためと考えられる。このため、フェイズも低周波数側では $0^\circ$ 付近を示す。また、コヒーレンスは、 $0.7\sim 1.0\times 10^{-3}\text{Hz}$ （ $\approx 15\sim 25$ 分）と $1\sim 2\times 10^{-3}\text{Hz}$ （ $8\sim 15$ 分）の周波数帯でも比較的大きな値を示す。このとき、フェイズはそれぞれ $135^\circ$ および $-45\sim 0^\circ$ 付近の値を示す。

図-37, 38は、新潟東港と西港の相関関係をそれぞれ示している。新潟東港のコヒーレンスは、 $5\times 10^{-4}\text{Hz}$ 以下の周波数帯で、 $0.2\sim 0.3$ 程度の値をとり、明瞭なピークをもたない。6.4に示したように、新潟東港では40分程度の周期をもつ長周期成分の波の峰と谷の間がほぼ直線となっているため、パワースペクトル上に副次的なピークがあらわれている可能性がある。このとき、副次的なピークは基本周波数成分のスペクトルと相関をもつので、ピーク自身の周波数成分のスペクトルの間で相関を計算するとコヒーレンスは小さくなる。このため、全体的に相関が小さくなっていると考えられる。図-37は、 $10^{-3}\text{Hz}$ 以上（ $\approx 15$ 分以下）の部分でもいくつかのピークをもつが、前記と同様にパワースペクトルの副次的なピークとの相関を計算している可能性があり、今後の検討課題としたい。新潟東港のフェイズは周波数が高くなるにつれて大きくなる傾向を示すが、ラグの値は、ほぼ $5\sim 15$ 分の範囲にある。

これに対し、新潟西港のコヒーレンスはパワースペクトルのピークに対応する $5\times 10^{-4}\text{Hz}$ （ $\approx 35$ 分）、および $1.5\times 10^{-3}\text{Hz}$ （ $\approx 10$ 分）付近にピークをもつ。ただし、2つのピーク付近のフェイズの値は異なっており、それぞれ $135^\circ$ および $0\sim 45^\circ$ である。フェイズの特性に違いがみられるのは、2つのピークに対応する長周期成分の顕在化の原因に違いがあるために、それぞれ位相差が異なるものと考えられる。また、 $2\times 10^{-4}\text{Hz}$ 以下の長周期成分では、フェイズは、 $-45^\circ$ 付近の値を示す。

また、西港については、6.4と同様に近接した位置に設置された波高計で取得された水位記録との相関関係を図

-39に示し、検討を行った。図-39のコヒーレンスおよびフェイズは、図-38とほぼ同様な性質を示している。したがって、これらの応答特性は、津波が港口付近に伝播するまでの間で与えられたのではなく、港口の波高計設置地点を通過した以降の要因に影響されていることが考えられる。ラグについては $2\times 10^{-4}\text{Hz}$ 以下の長周期波成分のフェイズが $45^\circ$ 付近の値をとるために、低周波数側で傾向が異なっている。

以上、いくつかの港湾に対して、沖合津波波形と潮位変動の周波数応答特性が示した。今後、さらに他の港湾についても応答特性を調べて、検潮儀の沖合津波波形に対する相互関係を検討していきたい。また、同時に検潮儀の構造自身の周波数特性についても検討を進めて、港内の水位変動の推定を試み、検潮儀の港内における津波計測機器としての有効性を確認したい。今回の地震津波による港内の水位変動の状態に対し、検潮記録と痕跡高のみがそれを調査できる資料である。このため、今後これらの調査を進める上で、本報告に示した波浪観測記録と検潮記録の相関に関する成果を活用していきたい。また、長周期成分の励起などについては、津波の伝播の計算結果との比較からも検討していきたい。

## 7. まとめ

平成5年7月12日22:17に発生した北海道南西沖地震に伴う津波の波形を、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の波高計および波向計がとらえることができた。

本報告は、以下に示す観測地点において取得された水位変動、水圧変動および海底の流向流速記録を示し、検潮記録との比較による沖合における津波波形の特徴に関する考察をおこなったものである。

北海道開発局：留萌，紋別

第二港湾建設局：深浦，むつ小川原

第一港湾建設局：秋田，酒田，新潟沖，輪島，福井

第三港湾建設局：浜田

第四港湾建設局：藍島

秋田県：能代

本報告で得られた成果を以下に簡潔書きで示す。

- (1)北海道南西沖地震津波波形を、表-2に示す総括表にとりまとめた。全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）で測得された津波による水位変動、水平流速の最大値は、それぞれ、 $87\text{cm}$ および $35\text{cm/s}$ であり、輪島港沖合の波浪計が、7月12日23:50から13日0:10までの観測時に測得したものである。この観測時における津波の波形を図-3に示すようにとりまとめ、津波波形の位相に

関しても考察した。

- (2)各波浪観測地点に共通して、北海道南西沖地震津波は減衰に非常に時間がかかり、13日朝になってもなお顕著な津波波形が観測された。このことは、日本海全域において、複雑な津波の多重反射が起こっていたことを示唆している。
- (3)津波による水面の上下変動 $\eta$ と、海底面における水圧変動 $P$ の関係を、図-12と図-13に示すように整理した。津波来襲後の両者の変動はほぼ等しく、長波の微小振幅波理論から得られる $\eta=P$ の関係をほぼ満足している。
- (4)津波による水面の上下変動と、海底面における水平流速の関係を、図-14に示すように整理した。両者の関係は、進行波としての長波の微小振幅波理論から得られる関係を必ずしも満たしておらず、重複波としての性質が確認された。観測地点によって両者の関係は異なった傾向を示しており、輪島では重複波の節に近い性質を示し、福井では重複波の腹に近い性質を示していた。このことは観測地点と海岸線との海底地形上の位置関係に対応している。
- (5)津波による海底面における水粒子の水平運動を流速の積分値から推定し、図-17および図-18を得た。この結果、通常の風波ではどのような激浪であっても発生し得ないような、数10mにも及ぶ大きな振幅の水平運動をしている事実が判明した。
- (6)沖合の波高計で測得された津波波形と、港内の検潮井戸で測得された津波波形を、図-20、図-22、および図-24に示すように、同一スケールの図面上で比較した。沖合の波高計で見られる数分間以下の比較的周期が短い変動は、検潮記録上には現れておらず、両者の波形は、かなり異なったものとなっていることが明らかにされた。
- (7)いくつかの港湾に対して、港内で取得された検潮記録を用いてパワースペクトル解析を行い、水位変動の周波数特性と長周期波の発生について検討を行った。今回検討を行った検潮記録では、いずれも10~40分程度の周期をもつ長周期波が観測されていることが確認された。
- (8)潮位変動のパワースペクトルと港外の水位変動のパワースペクトルを比較した結果、沖合津波記録に対する検潮記録のスペクトルの各周波数成分の減衰比は全体的に波の周期が小さくなるほど小さくなる傾向があった。これは、検潮儀の構造上の応答特性や港湾内に津波が入射するときの応答特性に対応している。また、各港湾毎に特定の周期以上の波は、減衰比が1より大

きくなる傾向がみられた。これは、港内に伝播した波が浅水変形や長周期成分の発達のため、港外より水位変動が顕著になっているものと考えられる。この限界を与える周期は各港湾で異なり、1~30分の範囲にある。

- (9)検潮記録と港外の水位変動記録の相関性を両者のコヒーレンス、フェイズおよびラグを用いて検討した。コヒーレンスは、両方の記録中で顕著にみられる長周期成分の周波数帯でピークをもつ。検潮記録だけに長周期成分がみられる場合に相関があまり大きくならないのは、この長周期成分が港内の条件によって顕在化したため、港外の水位変動との相関が不明瞭になっているものと考えられる。
- (10)検潮記録と港外の水位変動とのフェイズは、長周期成分では比較的安定した値をとる。このフェイズは、港外から潮位観測施設までの波浪伝播による時間遅れだけでは説明ができない。また、検潮儀の構造係数 $E_0$ を $E_0=50$ とした場合の検潮儀の応答特性と比較した結果、全体の傾向には類似点が見られるが、全体的に長周期側でも減衰比が小さくなる傾向がみられた。

## 8. おわりに

現在に至るまで、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)は、周期が数秒から20秒程度以下の、いわゆる風波やうねりの測定をそのターゲットとしていたため、波浪観測は連続しては行っていない。すなわち、ナウファスでは2時間すなわち120分間のうち20分間だけデータの取得を行っており、測定時間の間の100分間はデータの取得をしていない。これは、波浪(風波やうねり)においては水面の上下変動はかなり速いので、正確な波形データを取得するためにはサンプリング間隔を0.5秒と、かなり短く設定せざるを得ない。したがって、120分間のうちで20分間だけを測定することとし、連続観測を行わないシステムとしたのは、風波の諸元をとらえるには、20分間の観測で統計的に十分信頼できる波数を得られることによるものであった。また、データの量があまりにも膨大になりすぎてしまい、従来システムでは、膨大な量のデータを収集解析保管することは、困難であったためであった。

最近、従来から用いられている有義波高だけでは、港湾の静穏度が正しく評価できないことが多く指摘されている。有義波高が低く港湾の中の波は穏やかに見える時であっても、長周期波の影響で、港湾内の船舶や作業船の動揺が大きく、係留索が切断して荷役ができなかった

り、海上工事の中断を余儀なくせざるを得ない事例が数多く報告されている。長周期波は、たとえ波高が小さくても港湾の静穏度を大きく左右することがある。これは、港湾の地形に伴う湾の固有周期（数分から数十分のオーダー）、あるいは船舶の質量と係留索のパネ定数によって生ずる係留系の持つ固有周期（やはり数分から数十分のオーダー）などと共振現象を引き起こすためである。

津波は、長周期波の中でも最も顕著なものである。沖合では数十cmの津波が、湾奥では時として10m以上の遡上高となることが知られている。また、遡上高はそれほど顕著でない津波においても、水粒子の水平運動に伴い漁船等が転覆するなどの被害が生じていることが数多く報告されている。

津波の実態解明は、将来の津波による被害を最小限に押さえるために非常に重要な研究であり、今回の北海道南西沖地震に関しても、初期海底面変動に伴う津波初期波形の究明、日本海全域における津波の伝播変形過程の詳細な解析等が強く望まれている。こうした研究にあたっては、港内の検潮記録や海岸における遡上こん跡だけでは十分なデータとは言えず、沖合いにおける津波波形の直接記録が現象解明の重要なカギとなるものである。

本報告で明らかにした、沖合における津波波形データ（特に水位変動と水平流速が同時に観測されたデータ）は世界にも類を見ないものであり、ナウファスのデータが今後の津波の実態解明のための研究に大きく寄与することが期待されている。ただ、残念なことは、ここで示した前後の時間のデータが連続的には取得されていないことである。津波到達前からの連続波形データが取得できていれば、さらに多くの知見を得ることができたのではないかと悔やまれる。

津波に代表される長周期波は必ずしも定常的なものではないために、ナウファスの各観測の間に100分間も休止時間があっては長周期波の把握は困難である。このような観点から考えて、ナウファスの波浪観測データをさらに有効に活用するためには、連続観測の実施による長周期波の観測が強く望まれている。今後、連続観測の実施のための新しいシステム開発を行う所存であり、関係各方面の協力をお願いしているところである。

全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）は、運輸省港湾局、各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局および港湾技術研究所の数多くの関係者により構築され運営されているものである。これらの関係者、ならびに各観測地点において日々観測に携わっている方々の尽力に対して、心より敬意を表す次第である。

港湾技術研究所におけるデータの集中処理解析システ

ムは、30年以上にもおよぶ海象調査研究室の先輩方および現職員の研究成果の蓄積の上に成り立つものであるが、本稿で紹介したりリアルタイムシステムの開発改良にあたっては、(財)日本気象協会、(株)カイジョーおよび(株)NTTデータ通信の御助力をいただいている。また、波浪観測年報や統計報のとりまとめ、方向スペクトル特性や長周期波の解析にあたっては、(財)沿岸開発技術研究センター、(株)エコー、沿岸海洋調査(株)、新日本気象海洋(株)、日本海洋コンサルタント(株)および成和コンサルタント(株)の御助力をいただいている。

あわせて、前述したように本報告ではナウファス波浪観測ネットワークによるデータの他にも、第一港湾建設局及び秋田県によって取得された能代港の沖合波高計記録や、輪島港、秋田港、能代港、新潟東・西港における検潮記録や港内波高計記録も示し、解析結果を紹介させていただいている。

改めて、ここに謝意を表する。

なお、港湾技術研究所では、この他、奥尻島を含む北海道南部沿岸および日本海沿岸に関しても詳細な現地津波痕跡調査を実施しており、また、日本海全域における津波の伝播シミュレーションも現在実施中である。これらの調査の成果についても、現在解析が進められつつあることを付記する。

(平成5年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) 高橋智晴・副島 毅・中井徹也・佐々木弘・菅原一晃：波浪に関する拠点観測年報(昭和45年)、港湾技研資料No.137, 276p., 1972。  
以下、昭和46年版から昭和54年版までは、それぞれ、港湾技研資料No.158, No.178, No.209, No.233, No.258, No.282, No.311, No.332, No.373を参照
- 2) 高橋智晴・広瀬宗一・菅原一晃・橋本典明：沿岸波浪観測年報(昭和55年)、港湾技研資料No.417, 835 p., 1982。  
以下、昭和56年版から1990年版までは、それぞれ、港湾技研資料No.445, No.480, No.517, No.545, No.574, No.612, No.642, No.666, No.712, No.721を参照
- 3) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 1991)、港湾技研資料No.745, 304p., 1993。
- 4) 運輸省港湾局監修／(財)沿岸開発技術研究センター発行：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1991)、平成5年3月。

- 5) 運輸省港湾局監修／(財)沿岸開発技術研究センター発行：全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS 1992), 平成5年8月.
- 6) 高橋智晴・副島 毅・佐々木徹也：波浪に関する拠点観測3ヶ年統計(昭和45年～47年), 港湾技研資料No.208, 58p., 1975.
- 7) 高橋智晴・金子大二郎・佐々木徹也・広瀬宗一・佐々木 弘・副島 毅：波浪に関する拠点観測五ヶ年統計(昭和45年～49年), 港湾技研資料No.234, 304p., 1976.
- 8) 高橋智晴・広瀬宗一・菅原一晃・橋本典明：波浪に関する拠点観測10か年統計(昭和45年～昭和54年), 港湾技研資料No.401, 711p., 1981.
- 9) 菅原一晃・小舟浩治・佐々木 弘・橋本典明・亀山豊・成田 明：沿岸波浪観測15か年統計(昭和45年～昭和59年), 港湾技研資料No.554, 872p., 1986.
- 10) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正：全国港湾海洋波浪観測20か年統計(NOWPHAS 1970～1989), 港湾技研資料No.744, 247p., 1993.
- 11) 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：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., 1983.
- 12) 永井紀彦・浅井正・橋本典明・菅原一晃・久高将信：電話回線を利用した沿岸波浪観測情報網, 第19回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, pp.82-83, 1992.3.
- 13) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井正・高山知司：我国の沿岸沿岸波浪観測網と波浪観測に関する最近のトピック, 日本造船学会第11回海洋工学シンポジウム, pp.327-334, 1992.7.
- 14) 気象庁：平成5年潮位表, 1992.
- 15) Satake, K., M.Okada and K.Abe : Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, Jour. Marine Res., Vol.46, pp.557-571, 1988.
- 16) 海上保安庁編：日本沿岸潮汐定数表, 書誌第742号, 172p., 1983.

## 主要記号表

$a$	： 検潮儀外部の水位変動振幅
$E(x)$	： 確率変量 $x$ のアンサンブル平均
$E_0$	： 検潮儀の構造係数
$f$	： 周波数
$g$	： 重力加速度 (=9.8m/s <sup>2</sup> )
$h$	： 水深
$P$	： 水圧変動
$K_{xy}(f)$	： コスペクトル
$Q_{xy}(f)$	： クオドラチャスペクトル
$S(f)$	： 不規則変動 $x(t)$ のパワースペクトル ( $\equiv S_{xx}(f)$ )
$S_{in}(f)$	： 入力波形のパワースペクトル
$S_{out}(f)$	： 出力波形のパワースペクトル
$S_{xy}(f)$	： 2つの不規則変動 $x(t)$ , $y(t)$ 間のクロススペクトル
$T$	： 周期
$U$	： 水平方向の流速の絶対値
$X(f)$	： 不規則変動量 $x(t)$ のフーリエ成分
$x(t)$	： 不規則変動量
$Y(f)$	： 不規則変動量 $y(t)$ のフーリエ成分
$y(t)$	： 不規則変動量
$\gamma(f)$	： クロススペクトルのコヒーレンス
$\eta$	： 水位変動
$\theta$	： 流向
$\theta_{xy}(f)$	： クロススペクトルのフェイズ
$\lambda(f)$	： パワースペクトルの入力値に対する出力値の減衰比
$\tau(f)$	： クロススペクトルのタイムラグ (遅れ時間)

# 港湾技術研究所報告 第32巻 索引

論文名・著者名

巻号 頁

## 水 工 部

- 沿岸域における風波の周波数スペクトルと無次元パラメータの特性  
—ハイブリッドパラメータ法による波浪換算モデル (第二報)—  
後藤智明・青野利夫……………32.1. 53～ 99
- 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発  
後藤智明・佐藤一央……………32.2. 3～ 44
- バー型海岸における沿岸流速分布  
—波崎海洋研究施設における現地観測と数値モデルの開発—  
栗山善昭・尾崎 靖……………32.3. 3～ 38
- 沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測  
青野利夫・後藤智明・佐藤一央……………32.3. 39～ 64
- 陸上地形の影響を考慮した海上風推算  
後藤智明・柴木秀之……………32.3. 65～ 97

## 海洋水理部

- 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張  
橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃……………32.1. 3～ 25
- 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について  
橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・朴 慶寿……………32.1. 27～ 51
- 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第一報)  
—いわき沖の観測結果—  
永井紀彦・橋本典明・浅井 正……………32.2. 45～113
- 沿岸波浪の日変動特性と波浪の特異日  
永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正……………32.2. 115～152
- 海洋波の方向スペクトルの推定における拡張最大エントロピー原理法の修正  
—入・反射波共存場を対象として—  
橋本典明・永井紀彦・浅井 正……………32.4. 25～ 47
- 平成5年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報  
永井紀彦・橋本典明・浅井 正……………32.4. 49～ 95

## 土 質 部

- 袋詰めサンドドレーンの超軟弱地盤への適用性に関する研究  
北誥昌樹・寺師昌明・相原直浩・片山 忠……………32.1. 3～ 25
- 事前混合処理工法による処理土の静的土圧特性  
善 功企・山崎浩之・館下 徹・長沢啓介……………32.2. 153～182

低置換率SCP改良地盤中の矢板式岸壁の挙動

北誥昌樹・村上喜代治……………32.2. 183～212

構 造 部

費用便益分析による接岸ドルフィンの最適断面の評価

白石 悟・上田 茂……………32.2. 213～245

マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性

—主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験—

榎手 勤・守分敦郎・鈴木康範……………32.2. 247～269

水中の剛な鉛直壁に作用する裏込土の地震時土圧と動水圧

石橋 勲・上部達生・長田 信・高野剛光……………32.4. 3～24

# Index of Report of P.H.R.I. Vol.32

Vol.No. pp.

## Hydraulic Engineering Division

- On the Characteristics of One-Dimensional Spectra and Non-Dimensional Parameters of Wind Waves  
—Wave Hindcast Model Using the Hybrid-parameter Method (2nd report)—  
Chiaki Goro and Toshio AONO.....32.1. 53~ 99
- Development of Tsunami Numerical Simulation System for Sanriku Coast in Japan  
Chiaki GOTO and Kazuo SATO.....32.2. 3~ 34
- Longshore Current Distribution on a Bar-trough Beach  
—Field Measurements at HORF and Numerical Model—  
Yoshiaki KURIYAMA and Yasushi OZAKI.....32.3. 3~ 38
- Wave Prediction by Multiple Regression Model with Coastal Wave Observation  
Date  
Toshio AONO, Chiaki GOTO and Kazuo SATO.....32.3. 38~ 64
- A Hindcast of Maritime Surface Wind Including Effects of Land Topography  
Chiaki GOTO and Hidenori SHIBAKI.....32.3. 65~ 97

## Marine Hydrodynamics Division

- Extention of Maximum Entropy Principle Method(MEP)for Estimating Directional Ocean Wave Spectrum  
Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI, Tadashi ASAI  
and Kazuteru SUGAHARA.....32.1. 3~ 25
- Surface Wave Recovery from Subsurface Pressure Record on the Basis of Weakly Nonlinear Directional Wave Theory  
Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA,  
Tadashi ASAI and Kyung-Soo BAHK.....32.1. 27~ 51
- On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas  
—1st Report : The Field Observation off Iwaki—  
Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI.....32.2. 45~113
- Annual Fluctuation of the Observed Coastal Waves and Singularities of High and Low Wave Condition  
Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA, Noriaki HASHIMOTO  
and Tadashi ASAI.....32.2. 115~152
- Modification of Extended Maximum Entropy Principle Method for Estimating DIRECTIONAL Spectrum in Incident and Reflected Wave Field  
Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI and Tadashi ASAI.....32.4. 25~ 47



The Hokkaido-Southwest-Earthquake Tsunami Profiles Observed at the  
NOWPHAS Offshore Stations

Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI.....32.4. 49~ 95

Geotechnical Engineering Division

Applicability of Fabri-Packed Sand Drain for Extremely Soft Clay Ground

Masaki KITAZUME, Masaaki TERASHI, Naohiro AIHARA  
and Tadashi KATAYAMA.....32.1. 101~123

Static Earth Pressure Characteristics of Cement Treated Sand by Premixing  
Method

Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI, Toru TACHISHITA  
and Keisuke NAGASAWA.....32.2. 153~182

Behavior of Sheet Pile Walls in the Improved Ground by Sand Compaction Piles  
of Low Replacement Area Ratio

Masaki KITAZUME and Kiyoharu MURAKAMI.....32.2. 183~212

Structural Engineering Division

Evaluation of the Optimal Cross Section Breasting Dolphins by Use of Coast-  
benefit Analysis

Satoru SHIRAISHI and Shigeru UEDA.....32.2. 213~245

An Experimental Study on Mortars to Assess the Durability of Massive Con-  
crete

Tsutomu FUKUTE, Atsuro MORIWAKE and Yasunori SUZUKI.....32.2. 247~269

Dynamic Soil and Water Pressures due to Saturated Backfills on Non-Yielding  
Rigid Vertical Walls

Isao ISHIBASHI, Tatsuo UWABE, Makoto OSADA  
and Takemitsu TAKANO.....32.4. 3~ 26