

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1189

December 2008

ナウファス海象計が捉えた地震時短周期水圧変動

永井 紀彦

野津 厚

河合 弘泰

佐藤 真

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 短周期水圧変動観測に至るナウファスの改良	4
3. ナウファスが捕らえた浅海域海底水圧変動	4
(1) 検討対象地点と観測条件	4
(2) 観測された波形記録	5
(3) 水圧変動と地震動の比較	7
4. スペクトル解析	9
5. まとめと今後の課題	11
謝辞	12
参考文献	12

Characteristics of Measured Pre-Tsunami Dynamic Seabed Pressure Records Obtained from the NOWPHAS Coastal Wave Gauges

Toshihiko NAGAI*
Atsushi NOZU**
Hiroyasu KAWAI***
Makoto SATO****

Synopsis

Establishing offshore tsunami monitoring network system is an urgent task for countries facing ocean. Up to present, the tsunami-alarming information has been based solely on earthquake acceleration records due to difficulties in direct tsunami wave measurement. Nevertheless, as earthquake motion intensity does not correspond well with tsunami height, reliability of the tsunami alarming information has not yet reached sufficient level. Therefore, direct tsunami wave observation was recommended using existing seabed installed coastal wave gauges. This paper introduces the observed high frequency seabed pressure data obtained through the Japanese nation-wide coastal wave observation network (NOWPHAS) at the attack of the 2005 Miyagi-Prefecture Off-Earthquake, the 2007 Noto-Peninsula-Earthquake, the 2007 Chuetsu-Off Earthquake and the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake events.

Following conclusions were obtained;

- 1) Improvement of the NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information system for Ports and HarborS) enabled us to observe high frequency seabed pressure data due to earthquake seabed motion before tsunami attack, which are supposed direct earthquake action to sea-water useful for tsunami prediction.
- 2) Duration time of earthquake action and the high frequency seabed pressure fluctuation was compared.
- 3) Amplitudes of the observed and estimated high frequency seabed pressure fluctuation were compared. Sea-water acoustic characteristics may take an important rule to determine the amplitudes.
- 4) Frequency energy distribution was compared between the high frequency seabed pressure fluctuation and the earthquake acceleration.

Key Words: NOWPHAS, DWDM, Earthquake, Tsunami, Seabed Pressure

* Managing Director of Research Affairs
** Senior Research Engineer, Geophysics and Structures Department
*** Head, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
**** Member, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5014 Fax : +81-46-844-5072 e-mail: nagai@pari.go.jp
<http://www.pari.go.jp>
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

ナウファス海象計が捉えた地震時短周期水圧変動

永井 紀彦*
野津 厚**
河合 弘泰***
佐藤 真****

要 旨

従来の津波警戒情報は、もっぱら地震観測情報に基づいて解析・発信されているが、地震のマグニチュードは発生津波高に必ずしも良好に対応するものではなく、津波警戒情報そのものの信頼性は十分高いとは言えない。

本稿では、全国沿岸の浅海域に設置されている海底設置式海象計の水圧変動計測センサーが捉えた、2005年宮城県沖の地震、2007年能登半島地震および2007年中越沖地震による近地津波来襲に先立つ短周期水圧変動観測記録を示し、続いて来襲した津波および近傍陸上強震観測点における地震動加速度の観測結果との比較検討を行った。同時に、津波の発生を伴わなかった2008年岩手・宮城内陸地震時における観測記録に関しても同様のとりまとめを行い、海象計による短周期水圧変動検知情報を将来の津波予知に応用する可能性についても考察を行った。

本稿の主要な成果は以下の通りである。

- ・ 浅海域沿岸波浪計による短周期水圧変動観測は、ナウファスの切れ目のない連続的なデータ測得よってはじめて観測可能となった事象であり、地震動が海水に及ぼす影響を直接検知するものである。
- ・ 短周期水圧変動の継続時間について、近傍の地震動との比較を行った。地震動と水圧変動の継続時間の差は、地盤条件の相違による地震動そのものの相違である可能性があるが、今後のより詳細な観測とデータの蓄積によって、検討しなければならない大きな課題である。
- ・ 観測された地震動の最大加速度両振幅から推定される最大水圧変動両振幅と、観測結果から得られた最大水圧変動両振幅の比 β を定義し、その値を調べると概ね2.0に近い値であった。表現を変えれば、直江津沖以外の海底水圧変動は、海象計上の水塊の1/2程度の量の水塊が地震動の鉛直加速度にあわせて運動していることに相当する量となっていることを意味する。このように、海底の地震動がそのまま表面に伝播しないのは、海水の圧縮性の影響や、水塊の上下運動に周期依存性があるためと思われるが、今後更に観測データの蓄積と解析が必要である。
- ・ スペクトル解析を試み、短周期水圧変動の周波数特性についても検討した。

キーワード：ナウファス，海象計，地震動，津波，水圧

* 統括研究官
** 地盤・構造部主任研究官
*** 海洋・水工部海象情報研究領域長心得
**** 海洋・水工部海象情報研究領域海象情報研究チーム
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5014 Fax：046-844-5072 e-mail：nagai@pari.go.jp
<http://www.pari.go.jp>
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

1. はじめに

津波来襲時には、重力波として伝播する実態的な津波に先立って、地盤の変動によって引き起こされる水圧変動が先行的に伝播することが、大町らにより理論的検討が進められている^{1),2),3),4)}。また、近年、我国沿岸水深1000m以上の海域に水圧変動観測網が構築され、十勝沖大水深水圧計が2000年1月28日のマイクロ津波⁵⁾や2003年9月26日の十勝沖地震津波⁶⁾に伴う水圧変動を、室戸沖大水深水圧計が2004年9月5日に続けて発生した紀伊半島沖および東海道沖地震津波⁷⁾に伴う水圧変動を、それぞれ観測することに成功している。

従来の津波警戒情報は、もっぱら地震観測情報に基づいて解析・発信されているが、地震のマグニチュードは発生津波高に必ずしも良好に対応するものではなく、津波警戒情報そのものの信頼性は十分高いとは言えない。これに対して、浅海域沿岸波浪計によって観測される短周期水圧変動観測は、津波来襲前に地震が海水に及ぼす影響を直接検知するものであるため、将来の津波防災上重要な役割を果たしうる一つの津波前兆現象であるとも考えられる。

本稿では、全国沿岸の浅海域に設置されている海底設置式海象計の水圧変動計測センサーが捉えた最近の津波を伴った地震時における短周期水圧変動観測記録を示し、続いて来襲した津波および近傍陸上強震観測点における地震動加速度の観測結果との比較検討を行った⁸⁾。同時に、津波の発生を伴わなかった2008年岩手・宮城内陸地震時における観測記録についても同様のとりまとめを行い、海象計による短周期水圧変動検知情報を将来の津波予知に応用する可能性についても考察を行った。

2. 短周期水圧変動観測に至るナウファスの改良

海底設置式波浪計は、海底に設置されたセンサーを用いて波浪を観測するシステムであり、超音波式および水圧式のセンサーが存在する。ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）における海底設置式波浪計による波浪観測は、主として水深20mから50m程度の観測点における海象計⁹⁾に代表される、超音波式センサーと水圧センサーとを併せ持つ複合型波浪計が主体となっている。

ナウファス波浪観測データの収集・処理システムは、1970年に港湾技術研究所における波浪観測情報の集中処理解析が開始した後、段階的発展を遂げてきた。すなわち、1983年日本海中部地震津波および1993年北海道南西沖地震津波を契機にした切れ目ない連続観測の必要

性を背景として、切れ目のない連続観測による、長周期波の解明を目的とした観測システムが構築され¹⁰⁾、2003年十勝沖地震津波の際、震源に近い十勝沖海象計は、地震発生と同時に短周期水圧変動を捉えた。そして、短周期水圧変動前後に10cm程度の平均水深の変化(海底地盤変動)を観測した¹¹⁾。ただし、このとき捉えた水圧変動記録はローパスフィルター処理を行った後の5s間隔データであったため、その詳細な周波数スペクトル特性の把握には至らなかった。さらに、その後、インターネットを活用し、低廉な通信回線接続費用で、0.5s間隔で切れ目のない連続観測を実施するシステムが構築¹²⁾され、2005年以降、順次ナウファス観測点に導入されるに至っている。

3. ナウファスが捉えた浅海域海底水圧変動

(1) 検討対象地震と観測条件

図-1は、本稿で検討対象とした各地震の震源と海底水圧変動観測点およびその近傍の地震動観測点を図示したものであり、表-1は、それぞれの観測点の緯度・経度・水深を示したものである。

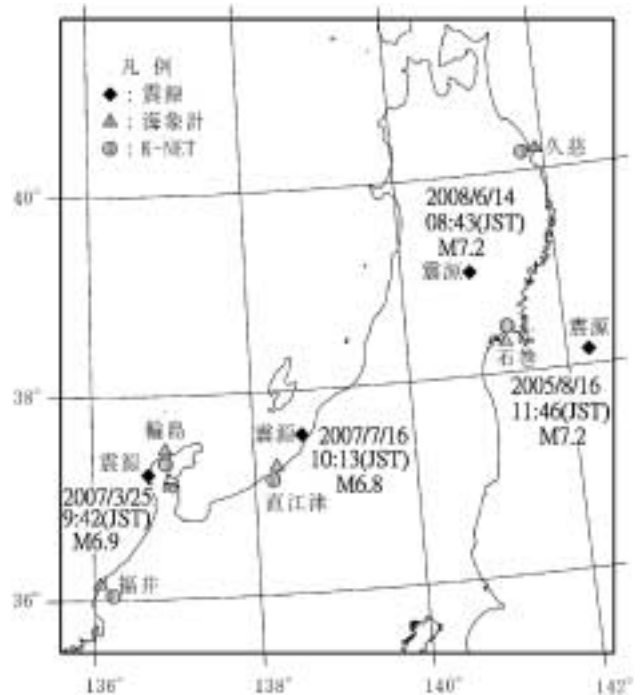


図-1 検討対象地震の震源・発生時および規模

気象庁がホームページで公開している地震情報によると、2005年宮城県沖の地震は日本時間2005年8月16日11:46頃発生したマグニチュード7.2の地震であり、震源は北緯38.15度、東経142.28度、深さ42kmのもので

あり、2007年能登半島地震は日本時間2007年3月25日9:42頃発生したマグニチュード6.9の地震であり、震源は北緯37.22度、東経136.69度、深さ11kmのものであった。また、2007年中越沖地震は日本時間2007年7月16日10:13頃発生したマグニチュード6.8の地震であり、震源は北緯37.56度、東経138.61度、深さ17kmのものであり、2008年岩手宮城内陸地震は日本時間2007年6月14日8:43頃発生したマグニチュード7.2の地震であり、震源は北緯39.03度、東経140.88度、深さ8kmのものであった。

表-1 検討対象とした海象計と強震計の設置位置

地名		緯度	経度	水深(m)
輪島	海象計	37° 25' 51"	136° 54' 08"	-52.0
	K-NET	37° 23' 31"	136° 54' 30"	
直江津	海象計	37° 14' 09"	138° 16' 25"	-32.7
	K-NET	37° 09' 39"	138° 13' 25"	
福井	海象計	36° 09' 50"	136° 04' 30"	-36.7
	K-NET	36° 02' 40"	136° 13' 40"	
久慈	海象計	40° 13' 04"	141° 51' 36"	-49.5
	K-NET	40° 10' 55"	141° 45' 51"	
石巻	海象計	38° 20' 49"	141° 15' 16"	-20.8
	K-NET	38° 25' 42"	141° 16' 51"	

(2) 観測された波形記録

図-2は、2007年能登半島地震の際、輪島港沖海象計(設置水深52m)がとらえた長周期水面変動記録であり、上段が海底水圧変動記録、下段が超音波による海面上下変動記録であり、±60sの数値ローパスフィルターによって短周期成分を除去したものである⁸⁾。水圧および超音波のそれぞれの津波観測波形記録はよく一致しており、3月25日10:00過ぎに顕著な津波第1波の波形が確認される。第1波はともに押波から始まっており、超音波水面変動記録を見ると10:05頃に最大偏差約9cmを記録しており、水圧変動記録でも同時刻にこの水位上昇にほぼ対応する水圧の増加が確認されている。しかし、地震発生とほぼ同時に見られる9:42頃のきわめて周期の短い変動は、水圧波形記録についてだけ確認され、超音波水面変動記録には現れていなかった。

図-3は、図-2で見られた短周期の水圧変動記録を横軸の時間スケールを拡大して、超音波水面変動および近傍の強震観測記録とともに示したものである。図-3の超音波水面変動記録は周期数秒の風浪成分が顕著であり、地震にともなう短周期変動は見られない。この原因としては、地震による海底地盤の上下変位量は変動周期が短いため風浪の波高より小さいと推定されることや、海底地盤の変動とともに水表面も変動し水深はほとんど変わ

らなかったことなどが考えられるが、今後の検討が望まれる課題である。水圧変動は、最大両振幅で500hPa(水面変動5mに相当する圧力変動)の周期の短い顕著な変動が地震発生とほぼ同時に見られる。水圧変動のサンプリング間隔が0.5sであり、短周期水圧変動を捉えるには粗すぎることを考慮すると、津波が到達する20分程度前に見られた水圧変動の最大両振幅は、500hPaよりも大きかったものと推定される。

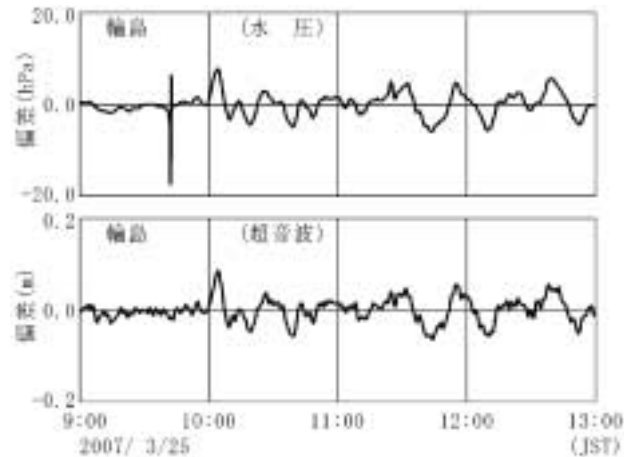


図-2 津波波形記録(2007年3月25日:輪島沖)

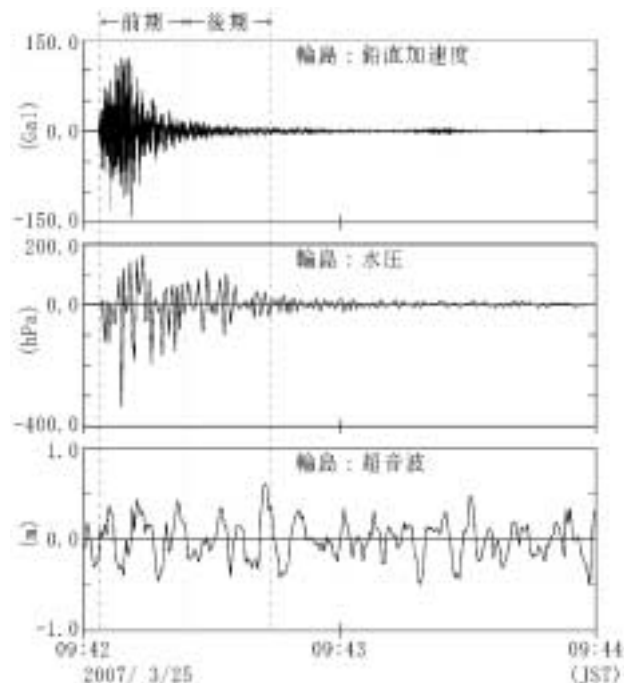


図-3 震動観測(2007年3月25日:輪島沖)

次に、図-3に示される水圧変動と近傍の強震記録(鉛直加速度変動)の比較を検討する。地震動の開始は9:42:03であり、水圧変動の開始時刻である9:42:04とほ

ほぼ同時刻であった。強震観測のサンプリング間隔が 0.01s であるのに対してナウファスシステムにおける水圧変動や超音波水面変動のサンプリング間隔が 0.5s であることを考えると、地震動と短周期の海底水圧変動の開始はほぼ同時に観測されたと言える。しかし、地震動と短周期の海底水圧変動の継続時間は若干異なっている。地震動ははじめの 10s 間がもっとも大きく、震動開始後 20s ほどでほぼ収まり、震動開始後 40s 以降はほとんど確認できない。これに対して水圧変動は変動開始後 20s 以上経過してからも顕著な震動を継続しており、ほぼ収束したのは、60s 程度経過してからであった。

図-4 および図-5 は、2005 年宮城県沖の地震発生時における久慈沖海象計による観測波形記録を図-2 および図-3 と同様に表示したものである。図-1 からわかるように、久慈沖はこの地震の震源から 200km ほど離れているため、津波による長周期海面変動が検知されたのは地震発生後 20 分以上が経過した 8 月 16 日 12 時以降であった¹⁴⁾。図-4 では、地震による揺れを検知したと考えられる 11:47 頃に短周期水圧変動を観測した後に、12 時以降津波本体と考えられる長周期水面変動が海底水圧変動と超音波計測による海面変動の両方で確認できる。

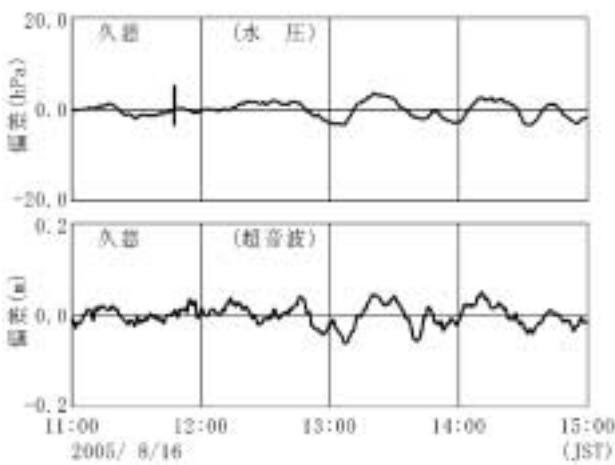


図-4 津波波形記録 (2005 年 8 月 16 日 : 久慈沖)

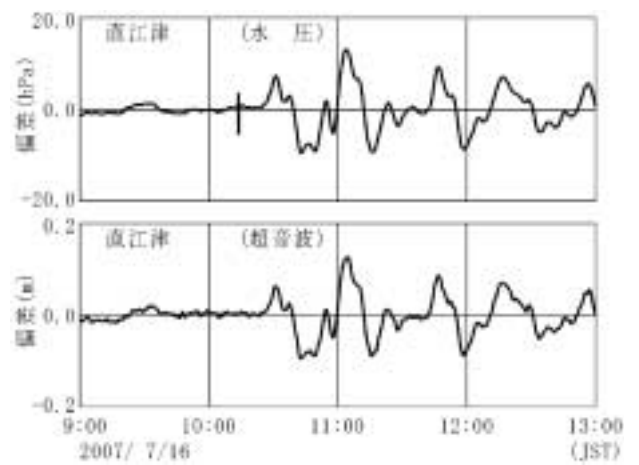


図-6 津波波形記録 (2007 年 7 月 16 日 : 直江津沖)

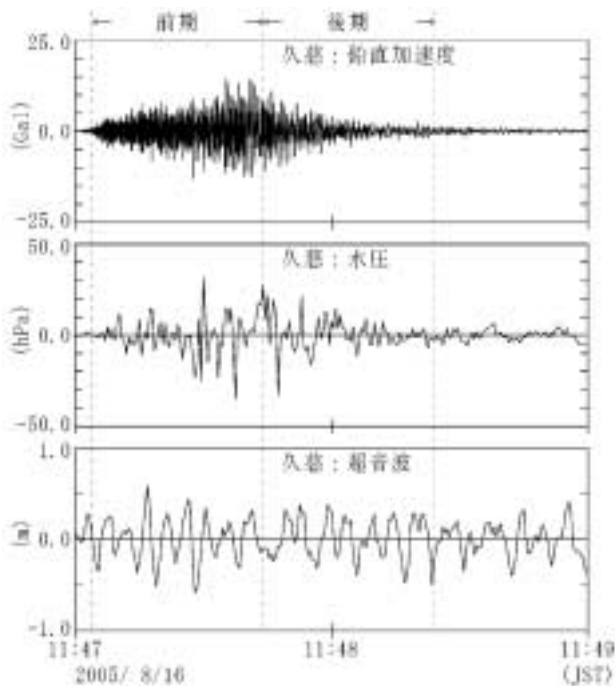


図-5 震動観測 (2005 年 8 月 16 日 : 久慈沖)

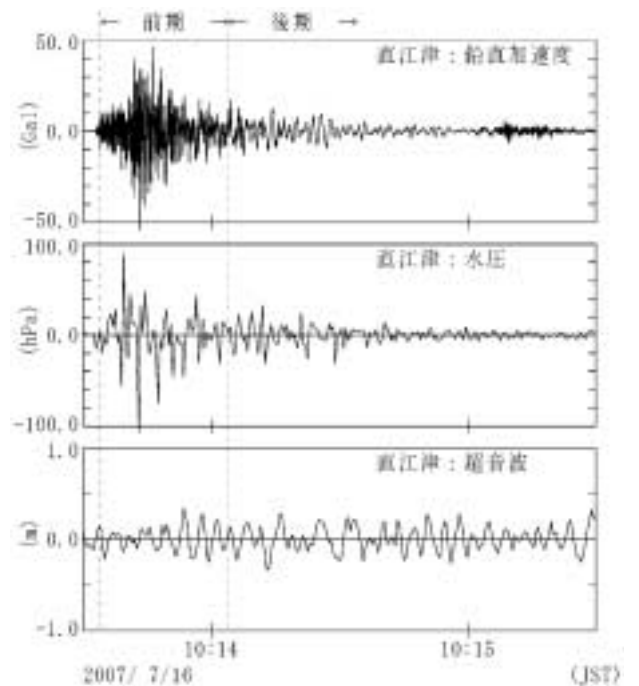


図-7 震動観測 (2007 年 7 月 16 日 : 直江津沖)

ただし、津波到達直後の 12 時台においては、津波高はきわめて小さく、第 1 波到達時刻を必ずしも明確に定義することはできなかった。津波は、その後も長時間継続するとともに、13 時台および 14 時台の方が 12 時台よりはるかに振幅が大きくなっており、13 時以降の水圧および超音波の両センサーによる長周期海面変動はほぼ一致している。13 時台以降は、明確に津波波形の識別ができるまで津波が増幅した模様である。図-5 では、地震動および水圧変動とともに 11:47 頃始まっており、継続時間は図-3 より若干長く、地震動および短周期水圧変動とともに 80s 程度継続していることが確認できる。

図-6 および図-7 は、2007 年中越沖地震の発生時における直江津沖海象計による観測波形記録を同様に表示したものである。

直江津沖観測点は中越沖地震震源から 30km 程度と比較的近かったため、地震の揺れを検知した時刻と想定される 10:14 頃に短周期水圧変動を検知した後に、10:30 頃水圧センサーと超音波センサーが共に津波の第 1 波と考えられる長周期水面変動による偏差 7cm 程度の顕著な極大水位を観測した。津波による長周期水面変動はその後数時間にわたって継続したが、両センサーに共通して 11:05 頃に 13cm 程度の最大偏差を観測している。

こうした地震発生時における短周期水圧変動は、津波の発生を伴わない内陸を震源とする地震発生時にも観測されている。図-8 および図-9 は、それぞれ 2008 年岩手・宮城内陸地震時における石巻港と久慈港沖の海象計が捉えた記録を同様に整理したものである。本地震は、内陸を震源とするものであったため、地震後の津波は観測されていない。図-8 の石巻では、陸上の強震観測点では図-7 に示した最大振幅が 100Gal を超える中越沖地震時の直江津を凌ぐ大きな揺れを検知したものの、海底水圧変動の両振幅は図-7 に示した直江津の 1/3 程度と小さかった。継続時間について見ると、周期 2s 以下の短周期成分に限っては強震記録と水圧変動に共通して 8:44:15 頃から 8:45 頃までの時刻に見られる。これに加えて、水圧変動記録では周期 8s 程度の比較的周期の長い成分が、8:43:45 頃から始まり、8:45:30 以降にまで継続しているが、この変動波形は超音波による海面変動記録と位相が一致しているので、波浪による影響が大きいと考えられる。図-9 の久慈では、図-8 の石巻と比較し、強震記録上の両振幅は最大 20Gal 程度と小さかったものの水圧変動の両振幅は石巻と同程度であり、かつ継続時間も近傍の久慈における強震記録とほぼ一致していた。いずれにせよ、事後の津波の来襲を伴わなかった図-8 および図-9 で見られた短周期水圧変動は、図-3、図-5 および図-7

よりも振幅ははるかに小さかった。

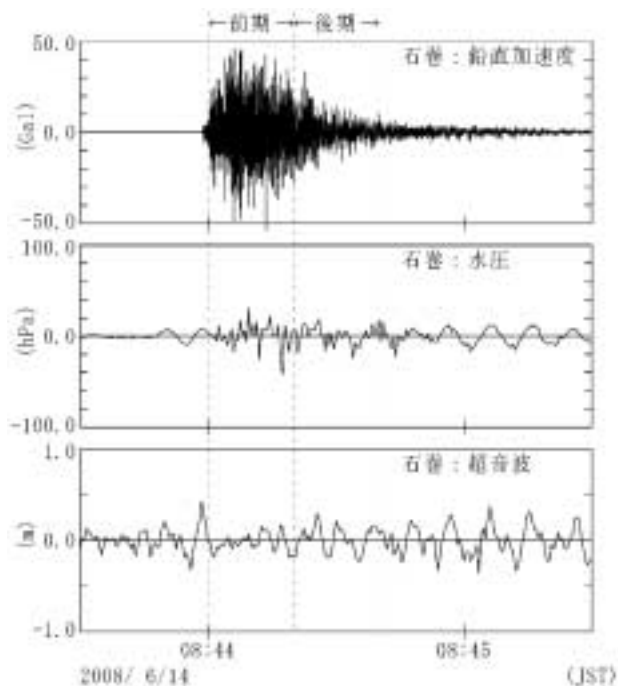


図-8 震動観測 (2008年6月14日：石巻沖)

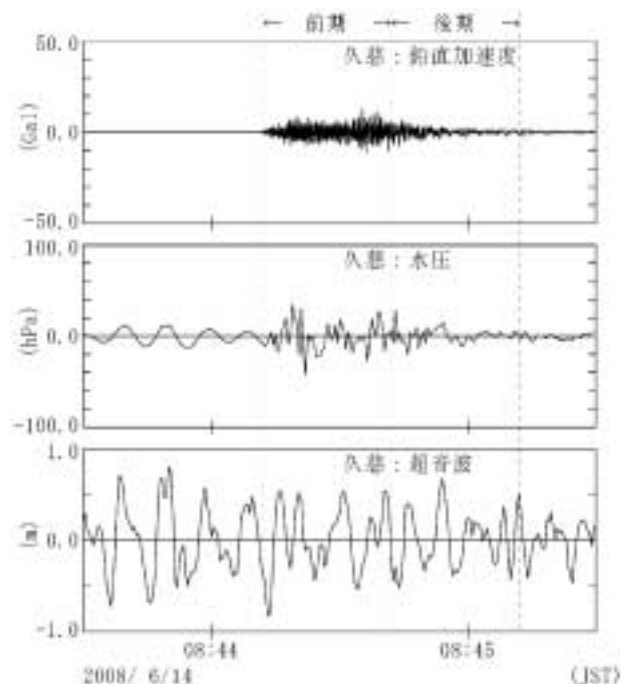


図-9 震動観測 (2008年6月14日：久慈沖)

(3) 水圧変動と地震動の比較

表-2 から表-5 に、2007 年能登半島地震時、2005 年宮城県沖地震時、2007 年中越沖地震時、および 2008 年岩手・宮城内陸地震時の短周期海底水圧変動の観測結果を

それぞれとりまとめた。表-1 に示す位置で観測された海象計水圧変動記録と近傍強震計鉛直加速度記録のそれぞれの起時（震動開始時）、継続時間および最大両振幅を表中に整理した。継続時間の定義としては、震動開始時から最大片振幅の10%の震動片振幅を最後に記録するまでの時間とした。ただし、海象計の水圧変動は水深換算1cmの分解能で記録されていること、また水圧変動が小さくなると波浪の周期に対応した振動成分との分離が難しくなることをあわせて考慮し、片振幅5cm未満の震動は継続時間にカウントしていない。

表-2 2007年能登半島地震時の水圧変動

地点名 (海象計の水深)		起時	継続時間	最大両振幅	Pmax-est
		2007年 3月25日			／
					Pmax-obs
輪島 (52.0m)	海象計	9:42:04	40 s	499.0 hPa	2.81
	K-NET	9:42:03	25 s	262.0 Gal	
直江津 (32.7m)	海象計	9:42:24	127 s	44.0 hPa	5.38
	K-NET	9:42:21	50 s	70.3 Gal	
福井 (36.7m)	海象計	9:42:23	50 s	52.0 hPa	2.15
	K-NET	9:42:21	59 s	29.6 Gal	

表-3 2005年宮城県沖地震時の水圧変動

地点名		起時	継続時間	最大両振幅	Pmax-est
		2005年 8月16日			／
					Pmax-obs
久慈 (49.5m)	海象計	11:47:07	76 s	67.0 hPa	2.11
	K-NET	11:47:01	82 s	27.7 Gal	
石巻 (20.8m)	海象計	—	55 s	190.0 hPa	2.02
	K-NET	11:46:42	58 s	179.2 Gal	

表-4 2007年中越沖地震時の水圧変動

地点名 (海象計の水深)		起時	継続時間	最大両振幅	Pmax-est
		2007年 7月16日			／
					Pmax-obs
輪島 (52.0m)	海象計	10:13:51	93 s	69.0 hPa	2.55
	K-NET	10:13:47	53 s	32.9 Gal	
直江津 (32.7m)	海象計	10:13:32	69 s	196.0 hPa	1.74
	K-NET	10:13:33	55 s	101.2 Gal	

表-5 2008年岩手・宮城内陸地震時の水圧変動

地点名		起時	継続時間	最大両振幅	Pmax-est
		2008年 6月14日			／
					Pmax-obs
久慈 (49.5m)	海象計	8:44:14	37 s	78.0 hPa	1.57
	K-NET	8:44:11	68 s	24.0 Gal	
石巻 (20.8m)	海象計	8:44:02	45 s	74.0 hPa	2.90
	K-NET	8:43:59	54 s	100.0 Gal	

2007年能登半島地震では、輪島沖（水深52m）、直江津沖（水深32.7m）および福井沖（水深36.7m）の海象計が水圧変動を捉えた。水圧変動の継続時間を近傍の地震動と比較すると、輪島沖および直江津沖では水圧変動が地震動に比べて際立って継続時間が長く、福井沖では地震動とほぼ同じ継続時間であった。

2005年宮城県沖地震では、震源に近い石巻沖（水深20.8m）および震源から比較的遠い久慈沖（水深49.5m）の両観測点で短周期水圧変動を捉えた。ただし、この当時の石巻沖の観測はインターネット時計による精緻な時計管理が行われておらず、時計に多くの誤差が含まれていたため、起時欄は空欄とした。水圧変動と地震動の継続時間は両観測点ともほぼ同程度であった。

2007年中越沖地震では、輪島沖（水深52m）、直江津沖（水深32.7m）の海象計が水圧変動を捉えた。水圧変動の継続時間を近傍の地震動と比較すると、輪島沖および直江津沖では水圧変動が地震動とほぼ同じ継続時間であった。

2008年岩手・宮城内陸地震時では、石巻沖および久慈沖とも水圧変動と地震動の継続時間はほぼ等しかった。

こうした地震動と水圧変動の継続時間の差はさまざまな原因によるものと推定される。一つは、地震動観測点は陸上にあり海底に位置する海象計と数km程度空間的に隔たっていることである。数km離れた地震観測点による地震波形は、地盤条件によっては大きく異なる場合があることが知られているため¹⁵⁾、ここで見られた継続時間の相違は地盤条件の相違による地震動そのものの相違である可能性がある。しかしながら、例えば直江津における地震動の継続時間と海底水圧変動の継続時間の比は、震源が西側に離れた2007年能登半島地震時には $127/50 \approx 2.5$ であったが、震源が東側に近接していた2007年中越沖地震時には $93/53 \approx 1.8$ であり、同じ観測点であっても震源の方向や震源からの距離の相違によって継続時間の比も異なったものとなっている。こうした事実を考え合わせれば、海底で観測される短周期水圧変動は、その場所の海底地盤の揺れだけでなく水平方向に海水中を伝播する水圧変動の存在も無視できないものとなっている可能性もある。こうした海底で観測された短周期水圧変動の発生・伝播に関しては、今後のより詳細な観測とデータの蓄積によって、検討しなければならない大きな課題である。

以下に、ここで観測された短周期水圧変動は当該位置の海底地盤の鉛直震動加速度によって生ずると仮定し、当該位置の海底地盤の鉛直震動は近傍の陸上強震観測点の鉛直震動に一致することをあわせて仮定し、かつ、海

水の圧縮性を考慮しない場合の地震動と水圧変動の量的な関係に関して考察する。

観測水深を h (m)、海水の密度を ρ ($=1030\text{kg/m}^3$) とし、海象計上の水塊 (単位面積当たりの質量は ρh) が地震動の鉛直加速度 a (m/s^2) で運動させるために必要な海底水圧変動 P (単位面積あたりの力) は、次式で推定される。

$$P = \alpha \rho h \quad (1)$$

式(1)をもとに、観測された地震動の最大加速度両振幅 α_{max} から推定される最大水圧変動両振幅 $P_{\text{max-est}}$ と、観測結果から得られた最大水圧変動両振幅 $P_{\text{max-obs}}$ の比 β を式(2)で定義する。

$$\beta = P_{\text{max-est}} / P_{\text{max-obs}} \quad (2)$$

式(2)で定義される β の値を表-2 から表-5 にそれぞれ示している。表-2 では、久慈沖と石巻沖では β はそれぞれ 2.11 および 2.02 であった。表-3 では、輪島沖、直江津沖、福井沖では 2.81, 5.38 および 2.15 であった。表-4 では、輪島沖、直江津沖で 2.55 および 1.74 であった。表-5 では、久慈沖と石巻沖ではそれぞれ 1.57 および 2.90 であった。

表-2 の直江津沖を除いて、各観測点で得られた β の値が 2.0 近傍のほぼ一定の値となっていることは興味深い。表現を変えれば、直江津沖以外の海底水圧変動は海象計上の水塊の 1/2 程度の量の水塊が地震動の鉛直加速度にあわせて運動していることに相当する量となっており、表-2 の直江津沖では 1/6 程度の量の水塊が地震動の鉛直加速度にあわせて運動していることに相当する量となっている。このように、海底の地震動がそのまま表面に伝播しないのは、海水の圧縮性の影響や水塊の上下運動に周期依存性があるため¹⁾と思われるが、今後更に観測データの蓄積と解析が必要である。ただし、強震観測点はいずれも陸上に位置し海象計から数 km 離れているため、強震記録は海底の地盤鉛直加速度と厳密に一致するものではないことや、水圧変動のサンプリング間隔が 0.5s と粗く水圧変動の最大両振幅を過小評価している可能性が高いことには、注意が必要である。

4. スペクトル解析

図-10 から図-14 に、それぞれ図-3、図-5、図-7 および図-8 と図-9 に対応する周波数スペクトル解析を試み

た結果を示す。すなわち、変動記録が非定常な現象であることを考慮して、強震観測記録 (鉛直加速度) および海底水圧変動のそれぞれの観測波形記録を振動の前期と後期にわけて、前期・後期それぞれの DFT 法で算定された周波数スペクトルを図示した。

ここに、前期および後期の時間帯は、図-3、図-5 および図-7 にそれぞれに点線で表示した時間帯を意味し、輪島では 20s 間ずつの、久慈では 40s 間ずつの、直江津では 30s ずつの波形記録時間に対応するスペクトルを意味している。

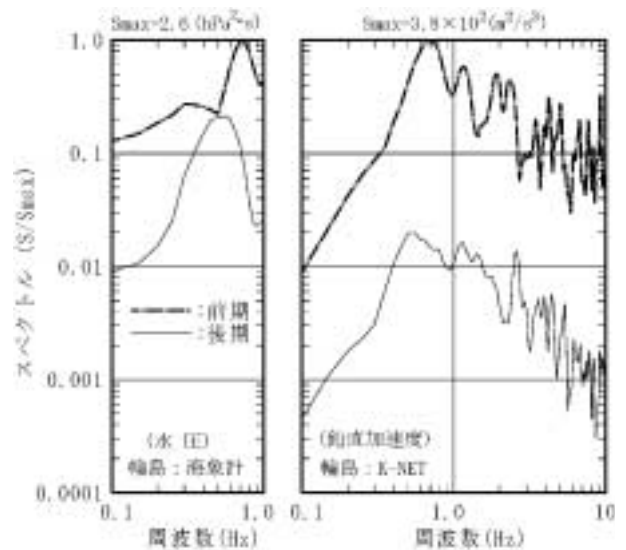


図-10 地震動と水圧変動の周波数スペクトル (2007年能登半島地震時：輪島沖)

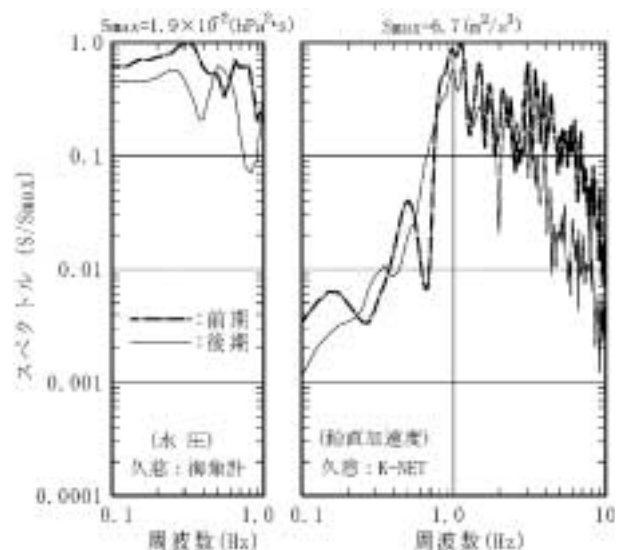


図-11 地震動と水圧変動の周波数スペクトル (2005年宮城県沖地震時：久慈沖)

ただし、ナウファス波浪観測のサンプリング間隔は 0.5s であるため、1.0Hz より高周波の水圧変動成分の解析はできなかった。それぞれの図の縦軸は、2本の線で示されるスペクトル密度関数の最大の値 (S_{max}) で無次元化した値をプロットしたが、図-12の強震記録を除けば、いずれの図でも S_{max} の密度 (縦軸が 1.0 となる点) は太い破線で表示される前半の解析結果の中で見られている。

図-10の輪島の前半と後半のスペクトル形状を比較すると、鉛直加速度は前半から後半にかけて全周波数で大きく減衰しているのに対して、水圧変動は相対的に減衰が小さい。ピーク周波数は、鉛直加速度では前半 (0.7Hz) から後半 (0.45Hz) に、水圧では前半 (0.7Hz) から後半 (0.5Hz) に、それぞれ長周期側にシフトが見られる。特に、後半水圧のピーク周波数 0.5Hz のスペクトル密度はほとんど減衰していない。

短周期水圧変動が海底地盤の鉛直地震動によるものであれば、海水の圧縮性に起因する固有周期 T_p (s) は、次式(3)で示される。

$$T_p = 4h/C_w \quad (3)$$

ここに、 h (m)は水深、 C_w (m/s)は海水中の音速であり、塩分濃度や水温によってわずかに変化するが、 C_w はほぼ 1500m/s の一定値とみなすことができる。

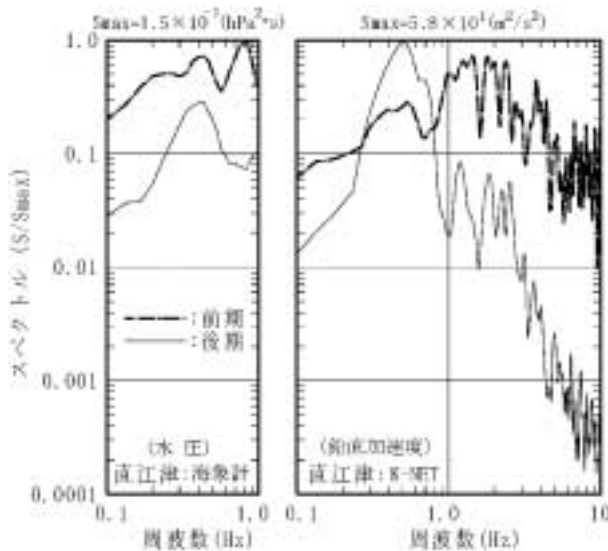


図-12 地震動と水圧変動の周波数スペクトル (2007年中越沖沖地震時：直江津沖)

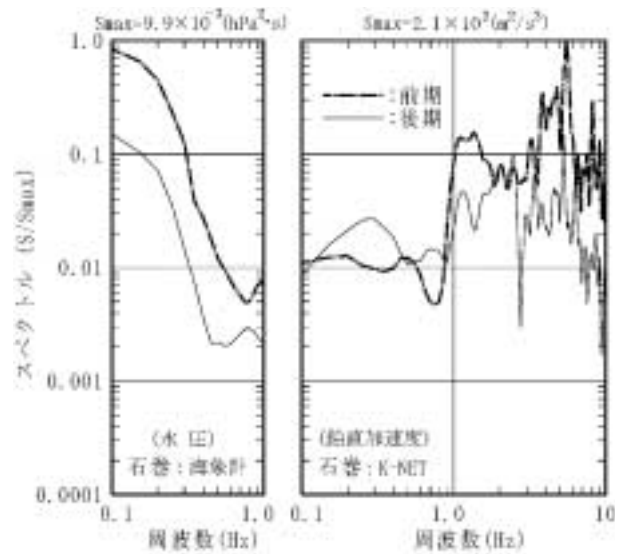


図-13 地震動と水圧変動の周波数スペクトル (2008年岩手・宮城内陸地震時：石巻沖)

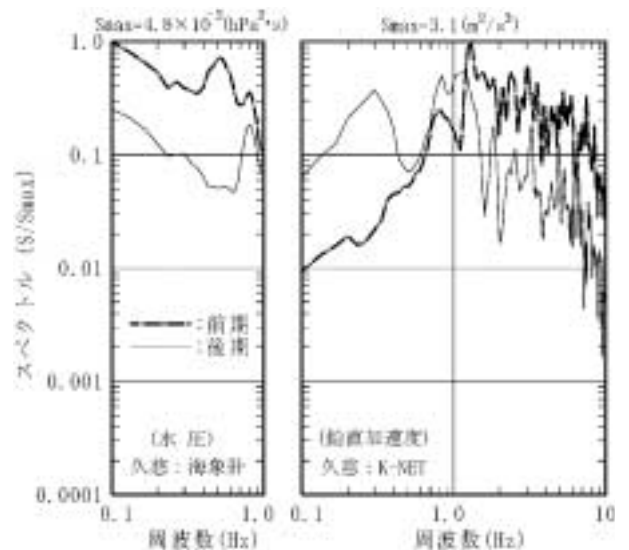


図-14 地震動と水圧変動の周波数スペクトル (2008年岩手・宮城内陸地震時：久慈沖)

輪島沖海象計の設置水深は 52m なので、式(3)より推定される水深と水の圧縮性による固有周期は 0.14s となり、図-10で見られる 0.5-0.7Hz (周期 1.4-2.0s) のピークとは異なった周期である。Nosov ら⁶⁾は、十勝沖大水深水圧計によって観測された 2003 年十勝沖地震津波の際の水圧変動スペクトルを示し、水深 2200m 程度の水圧計設置水深から式(3)で推定される固有周期 (6-7s) より低周波成分で見られる水圧変動を海底地盤の圧縮性からの説明を試みている。図-10で見られる水圧変動のピーク周波数 0.5-0.7Hz (周期 1.4-2.0s) は、式(3)から推定される固有周期と大きくかけ離れており、かつ、地震

動鉛直加速度のピーク周波数とよく対応しているため、海底地盤の震動に強く依存するものと考えられるが、鉛直加速度より減衰が遅く長時間継続する理由は明らかではない。

図-11 の久慈におけるスペクトル解析結果を、図-10 の輪島と比較すると、図-11 では前半から後半にかけてのスペクトル密度の減衰は鉛直加速度と水圧に共通してかなり小さい。ピーク周波数を見ると、鉛直加速度では前半と後半に共通して 1.1Hz (周期 0.9s) にピークが存在するのに対して、水圧では前半に見られる 2 つのピーク (0.3Hz および 0.6Hz) が後半には若干低周波側 (0.25Hz および 0.5Hz) にシフトしている。すなわち、震源から比較的近い輪島における鉛直加速度と水圧変動の関係は、震源から比較的遠い久慈における両者の関係とは異なったものとなっている。

図-12 の直江津におけるスペクトル解析結果を見ると、地震動において、後半は前半に比べて 0.5Hz (周期 2s) 付近のピークが大きく増幅されていることが注目される。これに対して、水圧変動では 0.4Hz (周期 2.5s) 付近に前半と後半を通じてピークの存在は確認できるものの後半が前半より増幅されている周波数帯は見られなかった。このように地震動と水圧変動のスペクトル特性が大きく異なるのは、直江津では地震計設置位置の地震動と、海象計設置位置での地震動が異なっていることを示唆するものであろう。

図-13 の石巻におけるスペクトル解析結果を見ると、地震動と水圧変動はまったく異なっていることがわかる。すなわち、地震動においては、水圧変動の識別限界周波数である 1 Hz よりも短周期側に多くのエネルギーが集中していた。このため、水圧変動のサンプリング間隔 0.5s での短周期水圧変動解析はほとんど用をなさなかったものと想像される。水圧変動における 0.2Hz (5s) より長周期側の変動は、前述したように地震動というよりは波浪の影響によるものと考えられる。

図-14 の久慈におけるスペクトル解析結果を見ても、図-13 の石巻と同様に、地震動においては水圧変動の識別限界周波数である 1 Hz よりも短周期側に多くのエネルギーが集中していた。また、水圧変動における 0.2Hz (5s) より長周期側の変動は、波浪の影響によるものであろう。ただし、こうした中で、0.8Hz (1.25s) 付近に地震動と水圧変動のそれぞれの前半と後半に見られる弱いピークは、当該サイトの地震動と短周期水圧変動の持つ特徴的な事象である可能性が高そうである。

5. まとめと今後の課題

本稿では、切れ目のない連続的なリアルタイム観測データの測得が可能となったナウファス (全国港湾海洋波浪情報網) の開発・改良の経緯を紹介した上で、全国沿岸の海底設置式波浪計の水圧変動計測センサーが捉えた、弱い津波を伴った 2007 年能登半島地震、2005 年宮城県沖の地震、2007 年中越沖地震、および津波を伴わなかった 2008 年岩手・宮城内陸地震による短周期水圧変動観測記録を、同地点の超音波送受波記録に基づく海面変動記録と、近傍の陸上強震観測記録との比較を通じて紹介した。短周期水圧変動は、津波が来襲する数分から数十分程度前に、近傍で観測された地震動とはほぼ同時刻に観測されたが、その継続時間は地点毎に大きく異なり、地震動と同程度かそれより長かった。周波数スペクトルの解析結果では、短周期水圧変動は時間の経過と共にピークが徐々に低周波側にシフトする現象が見られた。

浅海域沿岸波浪計による短周期水圧変動観測は、津波来襲前に地震が海水に及ぼす影響を直接検知するものである。また、設置経費が莫大となる既存の大水深水圧計とは異なり常時波浪監視に活用されるため、観測システムの故障や異常をただちに検知できる。このため、より信頼性の高い地震津波情報の発信が今後期待される可能性が高い¹⁶⁾。

このため、今後、下記のナウファス改良をめざしたい。

(1) データサンプリング間隔の短縮

既存沿岸波浪計の標準的設置水深が 20-50m であることをふまえると、式(3)から推定される水深によって決まる海水の圧縮性に伴う水圧変動の固有周期は 0.05-0.13s となるため、強震観測に倣った 0.01s 間隔 (100Hz) のデータサンプリングが望ましい。

(2) 強震 (鉛直加速度) 計の併設

地震動の大きさや周波数スペクトル特性は、局所的な地盤特性によって大きく異なるため、地震動と水圧変動の比較は同じ位置で行うことが望ましい。浅海域波浪計は海底設置センサーと陸上観測局とは海底ケーブルによって結ばれており、かつ、海底ケーブルは多重データ送信が可能であるため、新たな海底ケーブルを敷設せずに、海底部に加速度センサー (地震計) を併設することが可能である。沿岸波浪観測に海底強震観測を統合することが望ましい。これによって鉛直地震動と短周期水圧変動および海水面変動との関連が明らかにされ、津波早期検知の信頼性向上に寄与することが期待される。

(3) 観測データの配信・表示システムの構築

常時からリアルタイム観測データが多数の人々に活用

されることが観測システムの異常や障害を早期に検知し観測データの信頼性を高めるために重要である。このため、波浪観測情報と強震観測情報や短周期水圧変動観測情報を同時にリアルタイムで処理し、必要なデータ解析を敏速に行うことを支援するわかりやすい画面表示を行うシステムの構築が望まれる。

(2008年8月7日 受付)

謝辞: 本稿で活用した強震(鉛直加速度)観測データは、(独法)防災科学技術研究所のK-NETのデータを利用したものであり、ウェブサイトからダウンロードしたものである(<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>)。また、東京工業大学の町達夫教授には、地震時に観測される短周期水圧変動の物理的解釈について適切な助言をいただいた。本稿で紹介した海底短周期水圧変動記録は、長年のノウハウの開発・改良の結果によって初めて測得に成功した貴重なデータであり、国土交通省港湾局関係機関の継続的な努力のたまものである。改めて、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 町達夫, 築山洋, 松本浩幸, 細川真利: 津波の発生・伝播と海底水圧変動との関連性, 海岸工学論文集, 第47巻, 土木学会, pp.361-365, 2000.
- 2) Ohmachi, T., Matsumoto, H. and Tsukiyama, H.: Seawater Pressure Induced by Seismic Ground Motions and Tsunamis, ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-4, pp.595-609, 2001.
- 3) 井上修作, 町達夫: 津波に先行する海面変動とレイリー波の解析的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, 土木学会, pp.281-285, 2002.
- 4) 井上修作, 町達夫: 津波地震の発生原因に関する解析的検証, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp.316-320, 2003.
- 5) 松本浩幸, 平田賢治, 末廣潔: 海底ケーブル式水圧計により観測されたマイクロ津波の特性, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp.311-315, 2003.
- 6) Nosov, M.A., Kolesov, S.V., Ostroukhova, A.V., Alekseev, A.B. and Levin, B.W.: Elastic Oscillations of the Water Layer in a Tsunami Source, Doklady Earth Sciences, Vol.404, No.7, pp.1097-1100, 2005.
- 7) 松本浩幸, 三ヶ田均: 2004年紀伊半島沖地震に伴う津波の沖合観測, 海岸工学論文集, 第52巻, 土木学会, pp.256-260, 2005.
- 8) 永井紀彦・野津厚・李在炯・久高将信・安立重昭・大町達夫: 沿岸波浪計による津波来襲前の水圧変動観測, 土木学会, 土木学会論文集 第2部門 Vol.63 No.4, pp.368-373, 2007.
- 9) 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: 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, 土木学会, pp.1081-1085, 1995.
- 10) 永井紀彦, 橋本典明, 川口浩二, 佐藤和敏, 菅原一晃: 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, 1999.
- 11) 永井紀彦, 小川英明: 平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1070, 92p, 2004.
- 12) 永井紀彦, 小川英明, 額田恭史, 久高将信: 波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用, 土木学会, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.173-178, 2004.
- 13) 清水勝義, 永井紀彦, 李在炯, 泉裕明, 岩崎峯夫, 藤田孝: 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, 土木学会, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.523-528, 2006.
- 14) 永井紀彦, 里見茂: 2005年宮城県沖の地震津波の観測結果, 港湾空港技術研究所資料, No.1119, 35p, 2006.
- 15) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112, 54p. (CD-ROM 添付), 2005.
- 16) 永井紀彦, 加藤照之, 額田恭史, 泉裕明, 寺田幸博, 三井正雄: 沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言, 土木学会, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.61-66, 2005.

港湾空港技術研究所資料 No. 1189

2008. 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 芳文社

Copyright© (2008) 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。