

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

DEVELOPMENT AND OPERATION OF THE JAPANESE TSUNAMI
OBSERVATION SYSTEM BY USING NATIONWIDE COASTAL WAVE GAUGES

永井紀彦¹・小川英明²・額田恭史³・久高将信⁴

Toshihiko NAGAI, Hideaki Ogawa, Kyoshi NUKADA and Masanobu KUDAKA

¹正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 海象情報研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²前(独)港湾空港技術研究所 海象情報研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³工修 (財)沿岸開発技術研究センター 波浪情報部 (〒102-0092 千代田区隼町3-16 6F)

⁴正会員 (株)エコー 海象解析部長 (〒110-0014 台東区北上野2-6-4)

This paper introduces development and improvement of the Japanese offshore tsunami profile observation system using seabed installed acoustic wave sensor network named as NOWPHAS (NOWPHAS: Nationwde Ocean Wave network for Ports and HARbourS). Recent observed tsunami profiles caused by the 1993 Hokkaido-Southwest-Off Earthquake, 1994 Hokkaido-East-Off Earthquake, and the 2003 Tokachi-Off Earthquake were introduced. Development of the new wave gauges including the DWDM (Doppler-type Wave Directional Meter) and the new GPS buoy system was described. New NOWPAHS data communication system design using the internet network was also shown.

Key Words : NOWPHAS, Tsunami, Wave Observation, DWDM, GPS Buoy

1. はじめに

沖合の津波波形観測記録は、津波の発生・伝播・減衰のメカニズムを知る有力な手がかりとなる。本稿は、津波波形捕捉のための沖合波浪観測ネットワークの開発・改良の経緯をまとめ、現観測ネットワークが捕捉した2003年十勝沖地震津波波形を紹介し、観測情報のリアルタイム活用を可能とする観測システムの将来像を述べるものである。

2. 波浪観測網による津波波形捕捉への足跡

(1) 運輸技術審議会答申第10号

かつては、港内に設置された検潮井戸による水位変動記録が、唯一の津波観測手法であった^{1)・2)}。しかし、検潮井戸による海面上下変動の観測は、導水管という物理的ローパスフィルターにより、周期の短い変動成分は除去されるため、津波を過小に評価されることがあることが、問題視されている。

このため、沿岸波浪観測を目的として展開されている海底設置式波浪計を活かした長周期波・津波の観測解析を行うことが、1981年に答申された運輸技

術審議会答申第10号では、波浪と海上風の観測に関する技術目標の一つに設定された¹⁾。津波のような非定常で周期の長い波形を捕捉するには、切れ目のない連続的な観測データの取得が必用となる。当時の波浪観測データ情報処理システムの能力では、切れ目なく連続的に波浪観測データを収録することは困難であり、波浪観測によるデータ収録は、2時間毎に20分間だけ0.5s間隔で行うこととせざるを得ず、連続的な観測は、困難であった。

(2) 1983年日本海中部地震津波

1983年5月26日に発生した日本海中部地震に伴う津波は、12:00頃の地震発生後、5分ほどで深浦港などの日本海北部沿岸に襲った。この時、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の深浦港沖波高計が、第1波の津波の立ち上がり部分を捉えた³⁾。しかし、当時のシステムでは、12時の波浪観測としてデータ収録したのは、11:50から12:10までの20分間だけであった。このため、津波波形記録の捕捉は、深浦港沖合の観測点に限られ、かつ、第1波のピーク水位を観測する前に観測データ収録が終了し、十分な津波波形記録の捕捉には至らなかった。

(3) 1993年北海道南西沖地震津波

1993年7月12日の北海道南西沖地震は、22:17に発生したため、当時のナウファスシステムでは、21:50から22:10までの22時における観測データ収録が終わった直後であり、次は、23:50から翌日0:10までの0時の観測を待たなければならなかった。

しかし、震源からはるかに離れている観測地点であるが、輪島港沖合水深50mに設置された超音波式波高計と水深28mに設置された流速計型波向計が、図-1に示すように、0時の観測で、港内検潮記録との対応から考えて、津波の第1波と判断される時刻の波形記録の捕捉に成功した。人類がはじめて観測した沖合津波の正確な波形記録である。流速記録を見ると、23:56頃に冲向き流速の極大値が、0:04ころには岸向き流速の極大値が、それぞれ見られる。このため、この津波の周期は、この時間間隔8分の2倍の16分程度であることが明らかにされた^{4)・5)}。

この結果をふまえて、運輸省（現国土交通省）港湾局関係機関は、ナウファス観測データ収集・収録システムの抜本的な改良を行うこととし、切れ目のない連続観測データを収集する新しいデータ収集システムの開発・実用化が行われた。

(4) 1994年北海道東方沖地震津波等

連続観測システムの構築・試験運用期間中に、北海道東方沖地震津波（1994年10月4日）、三陸はる

か沖地震津波（同年12月28日）、およびイリアンジャヤ地震津波（1996年2月17日）が来襲した。

図-2は、むつ小川原港沖合の超音波式波高計（水深50m）および流速計型波向計（水深28m）で試行的にオフライン実施されていた連続観測の結果、得られた津波記録である^{6)・7)}。周期の短い波浪成分は数値的に除去し、長周期成分のみを示したが、潮汐変動に加え、周期30分程度の津波波形が見られる。

図-3は、図-2の記録を周波数スペクトル解析したものである。三陸はるか沖地震津波時の解析結果も図中に示した。沖合記録を両津波で比較すると、北海道東方沖地震は三陸はるか沖地震に比べて、全周波数帯で津波エネルギーが大きかったこと、およびピーク周波数帯がより低周波（長周期）側に分布していることがわかる。これは、前者の地震のマグニチュードは8.1、後者は7.5と、両地震の規模が異なったためである。しかし、沖合と港内を比較した周波数応答は、両津波で酷似しており、港内と沖合の応答は、0.00105Hz（周期約16分）およびその倍周波数（周期約8分）で増幅が顕著である。これは、海底地形に伴う固有周期に対応すると考えられる。

沖合から港内にかけての津波の周波数応答特性は、1996年イリアンジャヤ地震津波では東京湾湾口部（波浮沖波港計と久里浜検潮所）において⁸⁾、2001年ペルー地震津波では久慈港（沖海象計と港内検潮所）において⁹⁾、それぞれ明らかにされた。

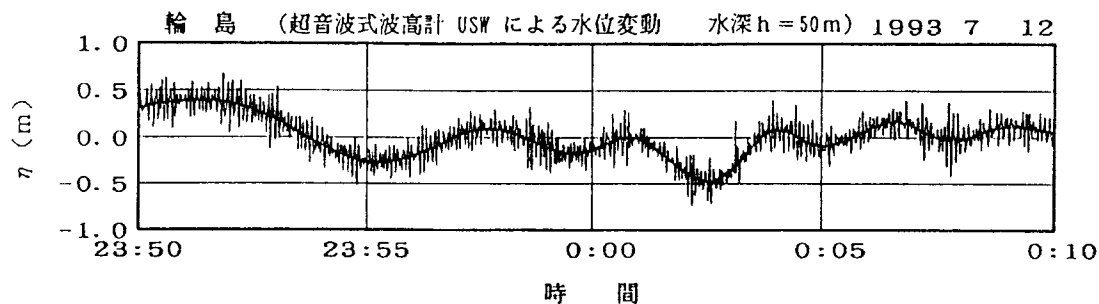


図-1 北海道南西沖地震津波波形（輪島沖：1993年7月12日23時50分～13日0時10分）

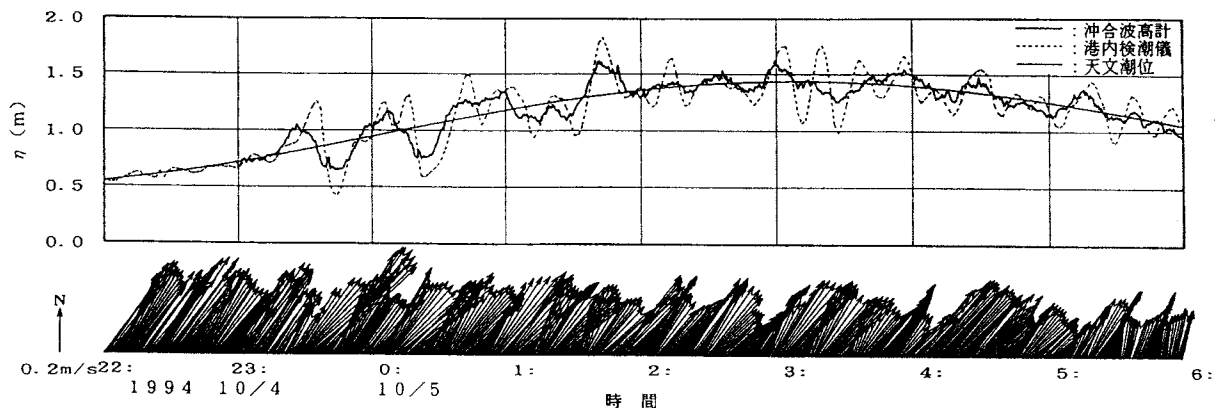


図-2 北海道東方沖地震津波波形（むつ小川原沖：1994年10月4日22時～5日6時）

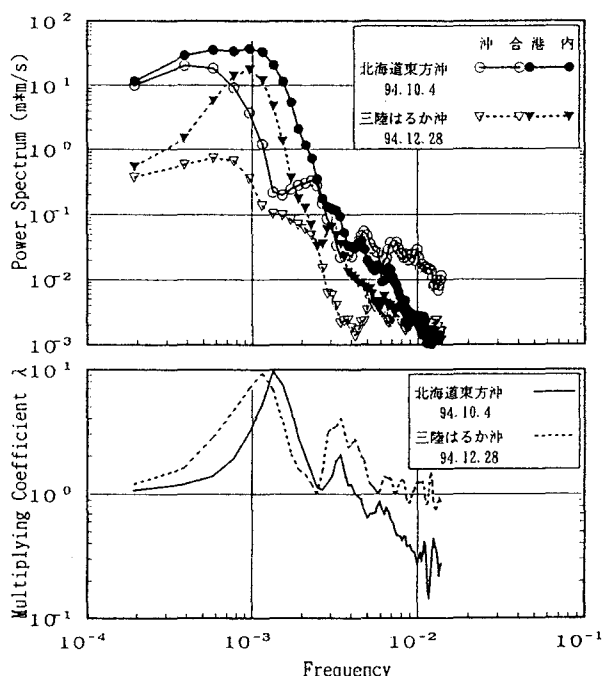


図-3 むつ小川原港における沖合港内津波応答

3. 波浪計の開発・改良

(1) 超音波海底設置方式

我国の沿岸波浪観測は、沖合ブイの加速度計測を行なう欧米とは異なり、海底設置センサーを用いた超音波（または水圧）計測方式を主体に発展した。港湾整備の必要性を背景にしたため、浅海域の精度と信頼性の高い観測が、要請されたためである。

1950年代に開発された水圧式（当時運研式と呼ばれた）波高計は、1960年代に開発された超音波式波高計（USW）に代わり、周期による伝達特性を考慮せず、直接、海面変動を計測できるようになった。すなわち、周期にかかわらず海面変動を計測できるのが、USWの特徴である。このため、1981年の運輸技術審議会答申は、ブイ加速度計測方式では計測できない津波観測を、USWでめざすこととした。

(2) 海象計の開発¹⁰⁾

沖波とは、水粒子運動が海底まで届かない波であるため、1970年代に開発された流速計型波向計（CWD）を海底に設置したのでは、沖波の波向計測は困難である。このため、1990年代に至るまで、前述したナウファスの輪島やむつ小川原波浪観測所等では、USWを水深50mに設置しながら、CWDは30m以浅に設置し、浅海波として屈折や浅水変形の影響を受けた波の波向を計測せざるを得なかった。

沿岸波浪観測における沖波の波向を計測するシステムの標準化は、前述した運輸技術審議会答申の技術目標の一つであった。この目標は、1995年に完成した海象計により実現した。海象計は、海中超音波のドップラー効果を応用して、検出部が設置される海底と、海表面との間の任意水深測定層における波に伴う水粒子運動を3次元的に捉えることができる

ので、海底まで水粒子運動が届かない沖波の波向（方向スペクトル）を海底に設置するだけの単一センサーで計測することができる画期的な沿岸波浪観測機器である。ナウファスでは、USWやCWDからの海象計への更新が、順次進められている。

(3) GPSブイの活用¹¹⁾

海底設置式波浪計は、メンテナンスのため50m程度までに設置水深が制約されるが、ブイ式波浪計は、海底センサーのメンテナンスが不要であるため、より大水深海域での波浪計測が可能である。近年のGPS測位技術のめざましい進展を受け、直接にブイの鉛直・水平変位を計測することができる、GPS津波計が、開発試験中である。

GPS津波計の開発試験機は、2001年から2003年までの3年間、大船渡港沖の水深58m地点に設置され、RTK方式を用いて連続的に1s毎のブイ変位を測定した。2004年4月からは、第2段階の実証試験が、室戸沖水深100m地点で開始された。大船渡における実証試験中、2001年ペルー地震津波および2003年十勝沖地震津波波形の捕捉に成功している。

4. 2003年十勝沖地震津波の捕捉¹²⁾

連続観測および海象計が、ネットワークとしてナウファスに導入された後、はじめて来襲した大規模な津波が、2003年9月26日の十勝沖地震による津波であった。表-1は、この津波を捉えた沖合波浪観測点を示したものである。北海道・東北地方太平洋沿岸10か所の波浪計、および23か所の検潮所で津波波形が捕捉され、本津波の特性が詳細に把握された。

図-4は、大津漁港沖の海象計と十勝港内検潮器の観測記録から、波浪による短周期成分と潮汐による長周期成分を除去し、津波による変動成分を抽出し表示したものである。この図から、下記に述べるような津波の特性が理解できる。

①津波は押し波から始まった。沖では5:00頃から水位（水圧）上昇が始まり、5:14頃に極大偏差となった。第1波の極大偏差は約1mであった。港内検潮記録における第1波は、少し遅れて5:24頃に極大偏差となった。構内極大偏差は約2.5mであり、沖から港内への顕著な津波の増幅が見られた。

②4:50頃に水圧変動記録の中にスパイク状の変動が見られる。これは海底地震に伴って震源付近で水中の圧力が急増し、その圧力変動が観測点まで伝播した現象ではないかと想像される。

③スパイク状変動を除けば、1段目の水面変動と2段目の水圧変動は、長波の理論通りきわめてよく一致しており、観測記録の信頼性は高い。

④数十分程度の周期で、水面変動の極大極小値と、岸沖流速の極大極小値とが、それぞれ見られるが、それぞれの発生時刻や位相は、時間とともに次第に対応が悪くなっていく。また、第1波来襲後、1時間半以上経過した6:40を過ぎてから、沿岸方向の流

表-1 2003年十勝沖地震津波を捉えた波浪観測点

波浪観測地点	計器	緯度(北緯)	経度(東経)	離岸距離(km)	港口距離(km)	水深(m)	所 属 機 関
十勝港沖	海象計	42° 39′ 06″	143° 41′ 08″	4.5	50.4	23.0	北海道開発局
苫小牧港沖	海象計	42° 32′ 39″	141° 26′ 46″	4.0	15.8	50.7	北海道開発局
八戸港沖	波高計・流速計	40° 33′ 39″	141° 34′ 06″	2.0	3.5	24.0	東北地方整備局
久慈港沖	海象計	40° 13′ 05″	141° 51′ 37″	3.0	7.1	50.0	東北地方整備局
釜石港沖	波高計	39° 15′ 54″	141° 56′ 06″	0.6	3.4	50.0	東北地方整備局
大船渡港沖	GPSブイ	39° 00′ 36″	141° 47′ 06″	1.5	4.5	53.0	東京大学・日立造船
大船渡港外	水圧計	39° 00′ 42″	141° 45′ 30″	0.4	1.9	16.4	東北地方整備局
大船渡港内	水圧計	39° 02′ 03″	141° 44′ 19″	0.4	2.0	25.0	東北地方整備局
石巻港沖	海象計	38° 20′ 48″	141° 15′ 19″	6.3	7.2	20.0	東北地方整備局
小名浜港沖	海象計	36° 55′ 04″	140° 55′ 18″	2.3	2.4	24.0	東北地方整備局

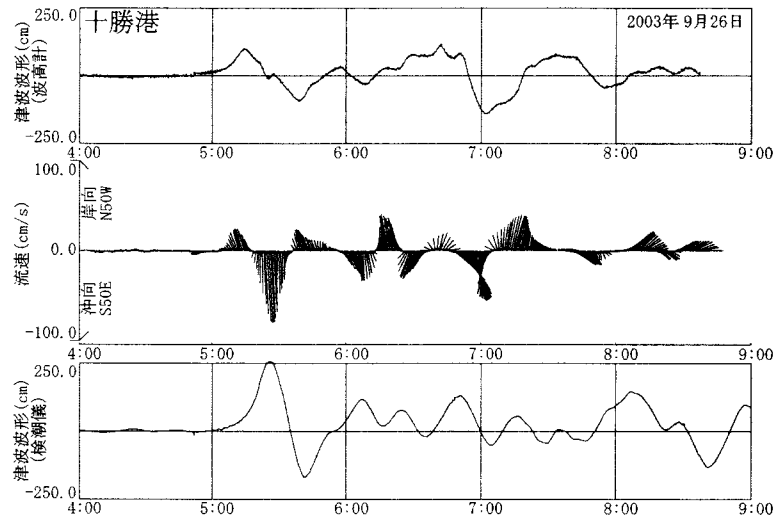


図-4 2003年十勝沖地震津波波形の観測例（大津漁港沖と十勝港内）

表-2 2003年十勝沖地震津波波形の波別解析結果

整理 番号	観測地点		到達 時刻	第1波		最大偏差波		最大波				港内／沖合増幅率			
				偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	波高 (cm)	周期 (分)	1707年7月 時刻	第1波 偏差	最大偏差	最大波
01	花咲	フース	5:28	88.1	5:40	1	88.1	5:40	1	210.2	29	5:28			
02	霧多布	空中発射	4:55	44.2	5:32	6	123.8	8:26	6	216.5	46	8:18			
03	厚岸	空中発射	5:08	42.3	5:39	3	102.1	7:11	3	165.8	55	6:56			
04	厚岸	フース	5:04	41.5	5:40	3	96.3	7:11	3	166.7	56	6:56			
05	釧路	フース	5:03	102.6	5:19	7	122.1	9:06	1	249.6	50	5:03			
06	十勝港沖	海象計	4:51	100.2	5:14	4	118.0	6:42	4	260.2	66	6:13			
07	十勝	フース	4:56	256.4	5:24	1	256.4	5:24	1	426.4	58	4:56	2.56	2.17	1.64
08	苫小牧港沖	海象計	5:37	22.0	5:54	6	36.9	9:06	5	58.6	31	8:25			
09	苫小牧東港	フース	5:49	34.6	6:00	6	99.3	9:06	6	181.7	30	8:59	1.57	2.69	3.10
10	苫小牧西港	フース	5:48	33.1	6:15	11	93.5	12:31	11	119.5	24	12:25	1.50	2.53	2.04
11	室蘭	フース	5:58	28.5	6:22	1	28.5	6:22	2	60.5	63	7:14			
12	函館	フース	6:09	24.5	6:22	3	73.3	8:20	3	111.0	31	8:10			
13	青森	フース	6:46	12.8	7:13	4	25.6	8:53	4	50.8	83	8:46			
14	大湊	フース	7:16	13.0	8:01	4	25.9	12:06	4	31.3	73	11:17			
15	むつ小川原	フース	5:30	61.4	5:40	6	69.3	7:51	6	133.2	26	7:43			
16	八戸港沖	波高計・流速計	—	—	—	—	44.7	10:21	—	79.3	67	10:06			
17	八戸(新湊)	フース	5:47	57.4	5:54	5	95.6	8:18	5	189.5	39	8:08	—	—	—
18	八戸(鮫)	フース	5:45	50.5	6:08	5	86.8	8:21	5	150.4	36	8:10	—	—	—
19	久慈港沖	海象計	5:31	42.2	5:38	1	42.2	5:38	7	86.8	49	8:23			
20	久慈	フース	5:35	113.5	5:48	6	174.9	7:08	13	238.9	26	9:14	2.69	4.14	2.75
21	宮古	フース	5:29	59.7	5:45	1	59.7	5:45	1	110.7	35	5:29			
22	釜石港沖	波高計	5:35	25.2	5:46	11	25.7	10:12	1	50.5	34	5:35			
23	釜石	フース	5:39	42.1	5:48	4	42.9	6:38	4	90.3	25	6:34	1.67	1.67	1.79
24	大船渡港沖	GPSブイ	5:36	15.5	5:50	13	17.6	10:25	15	32.0	94	11:47			
25	大船渡港外	水圧計	5:38	24.9	5:51	10	28.6	12:06	1	40.4	55	5:38	1.61	1.63	1.26
26	大船渡港内	水圧計	5:39	26.5	5:54	6	36.0	10:31	3	45.8	44	7:12	1.71	2.05	1.43
27	大船渡	フース	5:39	26.1	5:49	13	28.7	10:27	12	40.7	57	9:14	1.68	1.63	1.27
28	鮎川	フース	5:58	18.3	6:05	20	34.7	12:00	13	50.7	24	8:57			
29	石巻港沖	海象計	6:18	5.9	6:20	8	38.4	12:22	8	51.1	105	11:47			
30	石巻	フース	6:23	16.2	6:36	5	57.1	12:23	6	76.5	88	11:39	2.75	1.49	1.50
31	仙台南港	フース	6:32	29.3	6:44	8	37.6	10:13	7	79.9	32	9:34			
32	小名浜港沖	海象計	6:05	11.6	6:17	7	25.5	13:03	7	37.9	83	12:32			
33	小名浜	フース	6:12	13.7	6:24	11	23.3	12:57	4	43.4	59	8:11	1.18	0.91	1.15

速変動が顕著に現れ始めている。時間の経過とともに、複雑な多重反射によって津波に伴う海水の運動状況が変化し、えりも岬と霧多布岬との間の凹状の海岸において、トラップされ沿岸方向に多重反射する津波が発生した状況が、想像できる。

⑤津波の減衰には時間がかかり津波は何波も継続する状況がよく理解できる。沖観測記録が8:40頃に途絶えたのは、ケーブル切断によるものであった。

このような、各港における津波波形観測記録をとりまとめ、ゼロアップクロス法によって、到達時刻、偏差、波高、周期等をまとめた結果が、表-2である。本津波は、各観測点に共通して、水面上昇（押し波）から始まったため、津波到達時刻は、津波による水面上昇が始まった時刻と定義した。

津波の到達は、十勝港の両側の海岸線に広がっていった。岩手県北の久慈港沖では、5:31に津波が到達したが、これは、苦小牧沖の5:37より6分早い。これは、津波の伝播速度は水深の1/2乗に比例するため、水深大きいほど早く津波が伝わるためだと考えられる。同様な到達時刻の逆転は、小名浜と石巻に関しても見られた。

同一港湾海域内で、沖合波浪観測点と港内検潮所の到達時刻を比較すると、当然のことながら港内への到達は、数分間程度遅れることが確認された。相対的時刻の誤差が少ない、ナウファスシステムによる同時収集観測点に注目すると、十勝では5分、久慈では4分、釜石では4分の時刻差となっている。

5. ナウファス新情報システムの構築

(1) 現状のシステム¹³⁾

1994年から96年の間に開発されたナウファス連続観測システムは、2時間毎に0.5s間隔で20分間データサンプリングする既存の波浪観測ファイルに付加する形で、切れ目のない連続観測情報を、現地演算装置でローパスフィルターをかけて5s間隔の記録に変換した上で、2時間を単位とした長周期波形ファイルとして2時間毎に収集するものである。インターネットが一般的でなかった当時は、回線を常時接続するに通信経費がかかりすぎるので、2時間毎のデータ収集システムとせざるを得なかった。

図-5は、2003年末時点のナウファスネットワークを紹介したものであるが、全国54観測点のオンライン化された沖合波浪観測所中、26観測点に海象計が、30観測点に連続観測データ収集システムが、それぞれ導入されている。

(2) 今後めざすシステム

現在、IT分野の技術進歩はめざましい。防災情報充実に国を挙げての取り組み強化が叫ばれる中で、10年前には最先端の情報システムであった現ナウファスシステムも、さらなる改良が望まれる状況となった。

すなわち、①既存の2時間毎のデータ収集処理方

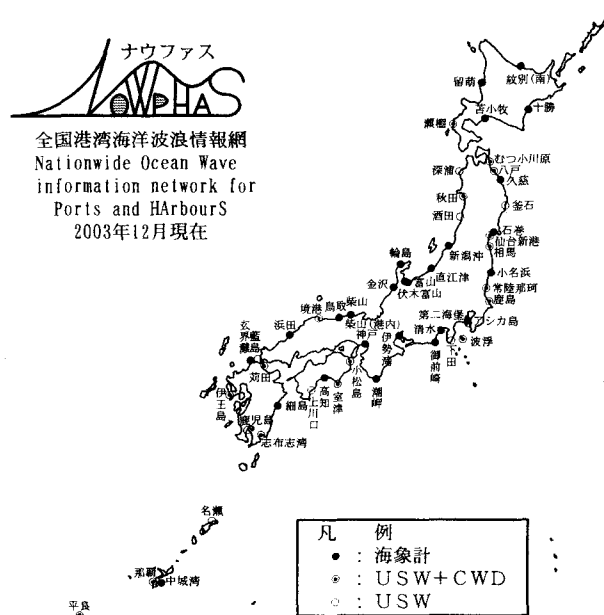


図-5 ナウファスネットワーク (2003.12)

式では、防災情報としてのタイミングを失する恐れがあるため、よりリアルタイム性を高める必要があること、②沖合波浪観測データのネットワーク化だけでは不十分であり、港内検潮データとあわせた防災情報のネットワーク化が望まれること、が要請されている。このため、ナウファス情報システムの抜本的な更新が進められている。

図-6は、新情報システムを示したものである。インターネット常時接続方式の採用によって、1分毎の波浪および潮位観測データの全国観測点からの収集を行い、ホームページを通じた国民へのリアルタイム情報発信機能を高めることを、めざしたものである。1分毎の平均水位と流速観測情報が得られれば、図-4で示すような沖合津浪観測波形が、リアルタイムでモニタリングされることになり、津浪等の実況把握に大きな貢献を果すことが期待される。

6. おわりに

本稿では、ナウファスを応用した津波観測の歴史と、過去に観測された重要な津波波形記録を紹介した。2003年十勝沖地震津浪波形データやナウファス波浪観測年報データは、下記のホームページアドレスからダウンロード可能である。

<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/>

また、2時間毎の波浪実況情報も、2004年4月以降、国土交通省港湾局の下記ホームページから、モニタリング可能である。

<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

ナウファス新情報システムの運用開始後は、これらのホームページはより一層充実され、防災にも寄与する質の高い沿岸波浪情報が提供されることになるであろう。

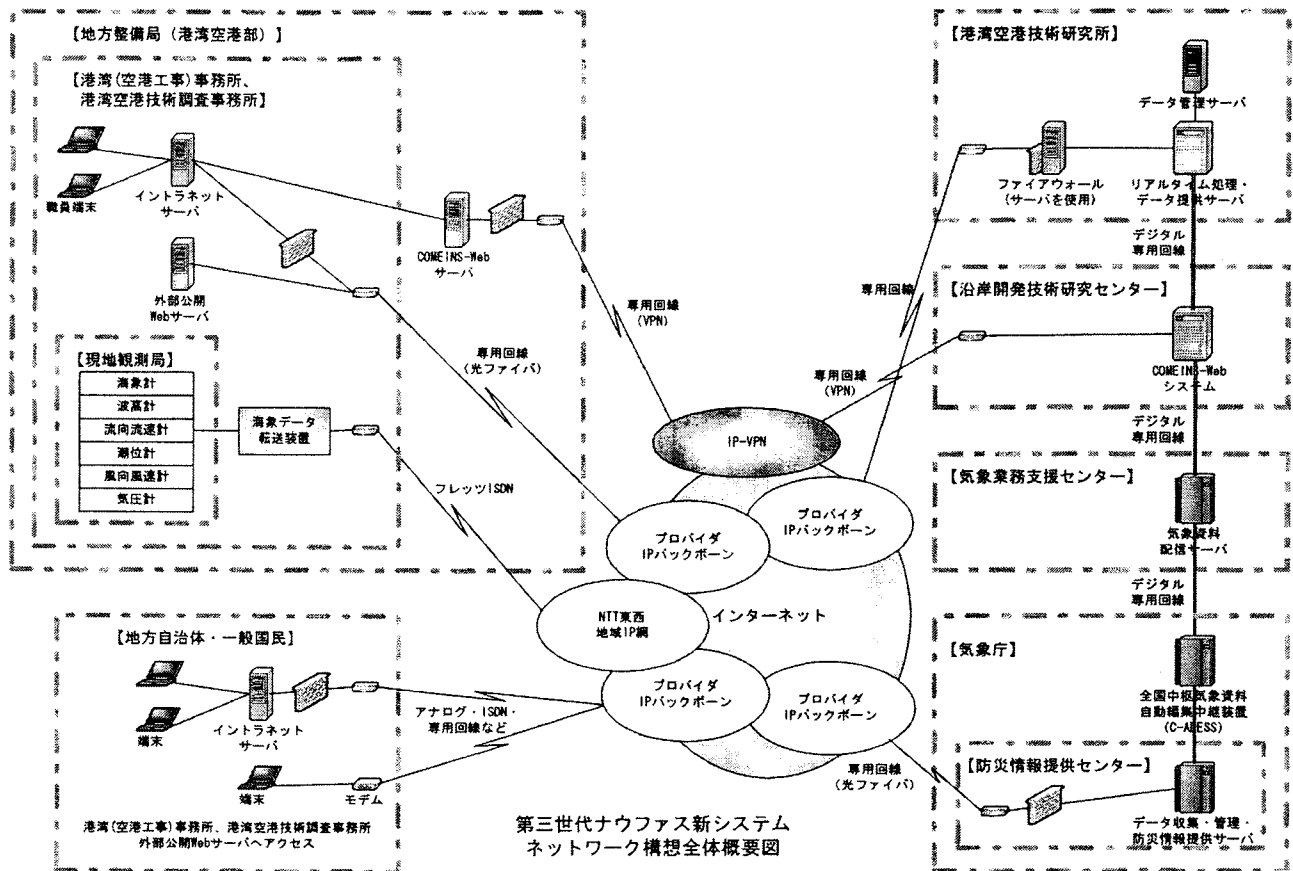


図-6 ナウファス新システムの構想図

謝辞：ナウファスは、国土交通省港湾局関係機関の数多くの方々の不断的努力によって、構築・運営されてきたものである。これらの方々に、改めて敬意を表する。

参考文献

- 1) 合田良実監修：波を測る（沿岸波 浪観測の手引），（財）沿岸開発技術研究センター，212p.，2001.
- 2) 合田良実監修：潮位を測る（潮位 観測の手引），（財）沿岸開発技術研究センター，188p.，2002.
- 3) 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.，1983.
- 4) 永井紀彦・橋本典明・浅井正：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.51-97，1993.
- 5) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井正・東山茂・戸田和彦：平成5年北海道南西沖地震の沖合津波波形，海岸工学論文集第41巻，土木学会，pp.221-225，1994.
- 6) 永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：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.，1995.
- 7) 永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義・市川武・宮部秀一・久高将信・川俣奨：現地観測データに基づく平成6年北海道東方沖地震津波の特性，海岸工学論文集第42巻，土木学会，pp.351-355，1995.
- 8) 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：1996年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技研資料No.842，96p.，1996.
- 9) 永井紀彦・富田孝史・佐藤和敏・額田恭史：我が国沿岸の沖合波高計と港内潮位計が捉えた2001年ペルー地震津波，第13回研究成果発表会講演要旨集，海洋調査技術学会，pp.16-17，2001.
- 10) 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.
- 11) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：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，土木学会，pp.1411-1415，2003.
- 12) 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.
- 13) 永井紀彦・額田恭史・岩崎峯夫・久高将信：切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム，海洋開発論文集第18巻，土木学会，pp.149-154，2002.