

# 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

NATIONWIDE COASTAL INFRA-GRAVITY WAVE OBSERVATION NETWORK BASED ON CONTINUOUS DATA SAMPLING AND FREQUENCY BANDED SPECTRUM EXPRESSION

永井紀彦<sup>1</sup>・額田恭史<sup>2</sup>・岩崎峯夫<sup>3</sup>・久高将信<sup>4</sup>  
Toshihiko NAGAI, Kyouji NUKATA, Mineo IWASAKI, and Masanobu KUDAKA

<sup>1</sup>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)  
<sup>2</sup>正会員 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター主任研究員 (〒 102-0092 千代田区隼町 3-16 6F)  
<sup>3</sup> 工修 (株) カイジョー 研究開発本部長 (〒 205-8607 羽村市栄町 3-1-5)  
<sup>4</sup>正会員 (株) エコー 波浪情報室長 (〒 110-0014 台東区北上野 2-6-4)

This paper introduces Japanese Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS (NOWPHAS) system, which recently improved for the directional and infra-gravity wave observation with continuous data acquisition. New concept of frequency banded expression has been introduced in the data analysis of directional and infra-gravity waves. Examples are demonstrated as the time series and annual statistics forms observed by the Japanese NOWPHAS system.

The NOWPHAS new wave data acquisition and analysis system clarified the characteristics of the long period swells originated from typhoons and low pressures, and the 2001 Peru Earthquake Tsunami.

**Key Words:** wave observation, wave information, NOWPHAS, directional spectrum, infra-gravity wave, tsunami, frequency banded power

## 1. はじめに

長周期波の解明および適切な対策の策定にあたっては、その実態観測が第一段階となる。本研究は、切れ目のない連続観測による沖合長周期波のネットワーク定常観測システムを構築するとともに、これによる観測結果を、スペクトル解析に基づく周期帯換算波高表示で示したものであり、我が国沿岸域に來襲する長周期波の出現特性の解明をめざすものである<sup>1), 2)</sup>。

## 2. 切れ目のない連続観測システムの構築

全国港湾海洋波浪情報網（以下ノウファスと呼ぶ）における波浪観測では、2時間毎に0.5秒間隔で20分間の海面上下変動や水平流速のデータ取得を行い、波高・周期・波向などの有義波諸元を求めていた。しかし、1993年北海道南西沖地震津波を契機として、切れ目なく連続的にデータ収集する観測がめざされた。長周期波観測情報は、津波來襲時ばかりではなく常時においても有用であることが期待されている。

長周期波成分の観測データの整理・解析手法の検討を目的として、運輸省第二港湾建設局（当時：現在は国土交通省東北地方整備局）の御協力をいただ

き、仙台新港沖合いの水深17m地点で現地観測を実施した。観測期間は1994年9月の1か月間であり、係留船舶が動揺した事例を含む台風9424号の海象擾乱を観測した。

この結果、周期が30sを越える長周期波浪成分を捉えるためには、それまで沿岸波浪観測で標準的に採用されていた2時間毎に20分間にわたって

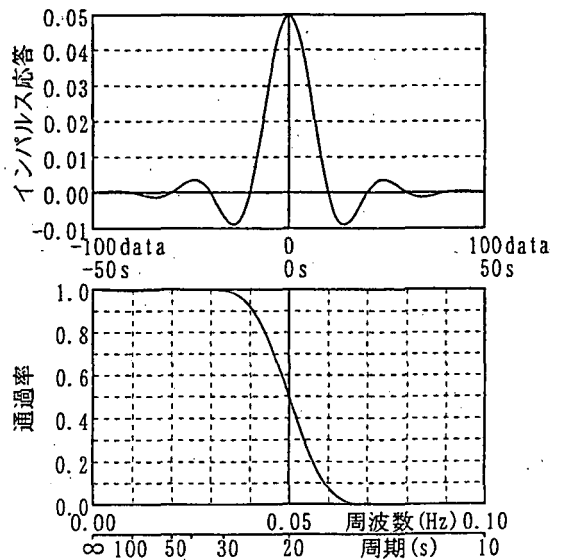


図-1 数値フィルターの形状と周波数応答

表-1 新旧のデータ収集システム

項目	新システム	旧システム
データ転送 ファイル	波浪ファイル (現行と同じ) 長周期ファイル(連続) ±50s デジタルフィルター 5s 間隔データ 港内潮位ファイル 5s 間隔検潮データ	波浪ファイル 2時間毎20分間 0.5s 間隔データ
データ転送 装置	新規開発データ演算転送装置 (WD700)	波浪データ演算転送装置 (WD600)
使用回線	INS 電話回線	一般電話回線

注1) 海象計にも対応可能なシステム。注2) 港内検潮データのシステム化も考慮。

0.5s 間隔で海面変動データをサンプリングする方式では不十分であり、より長時間の連続した波形観測記録をもとに周波数スペクトル解析を行うことが必要であることが、明らかにされた。また、「時化が去っても長周期波は残る」という事実を示すとともに、連続観測によって得られる周波数スペクトルの長周期パワーによって、合理的に現象を説明できることを明らかにした<sup>3)</sup>。

表1に長周期波連続観測システムの概要を示す。新システムでは、ローパス数値フィルターをかけた波形記録を、波浪ファイルとは別の長周期波ファイルとして収録する。数値フィルターとしては、図1に示すデジタルフィルターを用いた<sup>4)</sup>。図1の上段は、フィルター形状を示すインパルス応答であり、下段は、周波数応答特性である。この前後 50 秒間の数値フィルターによって、周期 30 秒以上の長周期波成分はそのまま通過させ、周期 15 秒以下の風浪成分はほぼ完全に通過させない周波数応答を得ることができる。

波浪観測は2時間毎に行われていることを考えあわせて、長周期波データファイルは、以下のように作成することとした。

- ①データ間隔：5 s 間隔 (連続)
- ②データファイルの単位：2 時間
- ③長周期パワー  $m_{L0}$  の演算

1994 年から 1996 年にかけて、ナウファスによる観測データの収集・解析・管理のシステム改良が実行された<sup>5), 6), 7)</sup>。

### 3. 周期帯表示による観測データのとりまとめ

長周期波の問題と一般に考えられている現象は、実は、さまざまな周期の現象から成ることが知られている。十分に発達した周期の長い風浪や、遠方から伝わってくるうねりなどの、周期 10 秒程度以上の波浪を長周期波として捉えることもあれば、港内に係留された大型船舶のサージング運動の固有周期に対応すると考えられる1分以上の周期を持つ波動を、長周期波として捉えることもある。また、希に発生する周期数分から数十分の津波も、長周期波に含めて考えられることもある。

こうした幅の広い周期の現象の特性を、正しく捉えるためには、従来から波浪を表現するために用い

表-2 周波数帯の区分

区分	スペクトル順位	対応周期
f1	1 - 4	32.0s 以上
f2	5 - 8	25.6s - 16.0s
f3	9 - 12	14.0s - 10.7s
f4	13 - 16	9.8s - 8.0s
f5	17 - 30	7.5s - 4.3s
f6	31 - 128	4.1s 以下

表-3  $f_5$ 領域の周波数帯と対応周期

水深(m)	スペクトル順位	対応周期(s)
55以上	17 - 20	6.4s - 7.5s
50	17 - 21	6.1s - 7.5s
45	17 - 23	5.7s - 7.5s
40	17 - 25	5.1s - 7.5s
35	17 - 27	4.7s - 7.5s
30以下	17 - 30	4.3s - 7.5s

られてきた有義波高や有義波周期といったパラメータだけでは不十分である。ここでは、風浪・うねり・長周期波の特性を、時系列変化および統計量として簡易に表示することができるように、観測情報の表示には、周期帯毎のスペクトルのパワーに対応する換算成分波高を用いることとした。周期帯の区分としては、区切りのよい周期を選定することとし、長周期波データファイルに関しては、30 s, 60 s, 300 s, および 600 s で区分し、波浪データファイルに関しては、8 s, 10 s, 15 s および 30 s で区分した。

風波における有義波高は、 $4(m_0)^{1/2}$  とほぼ一致することから類推して、 $4(m_{0L})^{1/2}$  を算出して換算長周期波高とする。スペクトルの積分周波数帯は、上記の周期帯を組み合わせて、任意に選定できるようにする。

表2は、波浪データファイルに関しての周波数帯の区分を示したものである。ここに、スペクトル順位とは、FFT法で計算され、平滑化された周波数スペクトルの値を低周波側から並べた順位を意味する。すなわち、0.5s 間隔でサンプリングされた2048 データを解析すると、1024 の周波数に関してスペクトルパワーが出力され、対応周波数は、

$$n/1024(\text{Hz}) \quad n=1,2,3,\dots,1024$$

として示される。スペクトルの平滑化にあたって、8 周波数毎の平均値を取るようになると、周波数の数は 128 に減少し、対応周波数は、

$$m/128(\text{Hz}) \quad m=1,2,3,\dots,128$$

となる。表2のスペクトル順位は、 $m$ の値である。区切りのよい周期で周期帯を区分し、 $f_1$ から $f_6$ までの6区分を考えた。ただし、 $f_1$ は、周期 30 s 以上の長周期領域であり、20 分間を単位とした波

表-4 長周期波解析対象地点

地点名	波高計			北緯	東経
	機種	水深(m)	計		
留萌	海象計	-50.0		43° 51' 50"	141° 28' 20"
酒田	U S W	-45.1		39° 00' 21"	139° 46' 55"
直江津	海象計	-32.0		37° 13' 58"	138° 16' 36"
輪島	"	-50.0		37° 25' 40"	136° 54' 19"
柴山	"	-42.0		35° 40' 05"	134° 40' 46"
鳥取	"	-30.0		35° 33' 05"	134° 09' 51"
玄界灘	"	-41.0		33° 55' 50"	130° 28' 13"
紋別(南)	"	-52.0		44° 18' 55"	143° 36' 39"
吉小牧	"	-50.7		42° 32' 30"	141° 26' 59"
久慈	"	-50.0		40° 12' 55"	141° 50' 22"
釜石	U S W	-49.0		39° 15' 44"	141° 56' 19"
小名浜	"	-20.0		36° 54' 53"	140° 55' 30"
常陸那珂	"	-32.0		36° 23' 24"	140° 39' 36"
港研構内	USW(空中)	-2.0		35° 13' 28"	139° 43' 27"
波浮	U S W	-49.0		34° 40' 23"	139° 27' 18"
清水	海象計	-50.6		35° 01' 04"	138° 32' 16"
御前崎	"	-22.6		34° 37' 05"	138° 15' 44"
潮岬	"	-50.5		33° 25' 47"	135° 45' 00"
高知	"	-25.0		33° 28' 48"	133° 35' 12"

浪ファイルではなく、2時間を単位とした長周期波ファイルの中で表記が行われるためダミー周期帯として処理される。また、 $f_0$ は、周期が短く(対応する波長が短く)、海象計<sup>8)</sup>によって方向スペクト

表-5 長周期波の出現統計解析事例

地点: 御前崎		期間: 2000年1月~12月(通年)					
波高階級 (cm)	観測数	4/ mOL30-60		4/ mOL60-300		4/ mOL30-	
		観測数	出現率	観測数	出現率	観測数	出現率
— 1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
1 — 5	4144	94.6	3251	74.2	1192	27.2	
5 — 10	168	3.8	931	21.3	2842	64.9	
10 — 20	19	0.4	133	3.0	272	6.2	
20 — 50	23	0.5	41	0.9	39	0.9	
50 —	3	0.1	1	0.0	12	0.3	
欠測					23	0.5	
全観測					4380		

ルの算定が困難とされる周期帯である。 $f_5$ と $f_0$ との区分周期は水深によって異なり、表3に示すように区分周期が設定される<sup>9)</sup>。

#### 4. 我国沿岸の長周期波の出現統計

表4は、ここで紹介する長周期波出現統計解析の対象波浪観測地点を示したものである。ここでは2000年1月から12月までの、1年間の観測結果をとりまとめた<sup>10)</sup>。

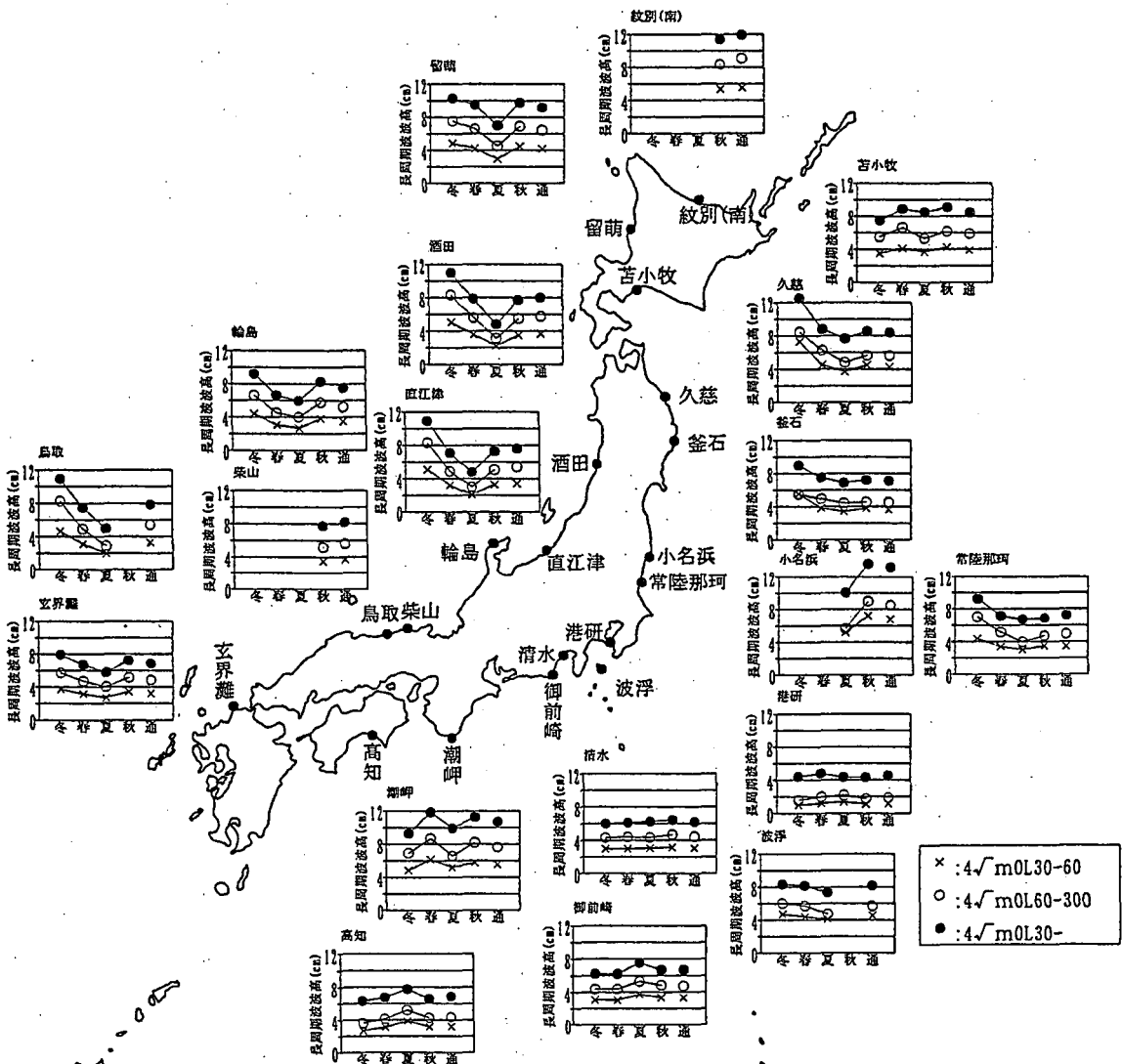


図-2 季別年別の平均長周期波高

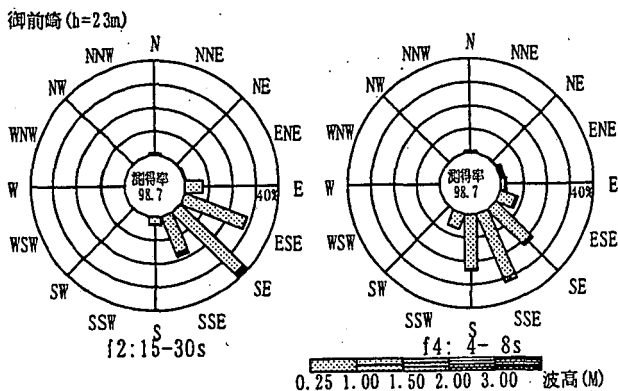


図-3 周期帯別の波向分布

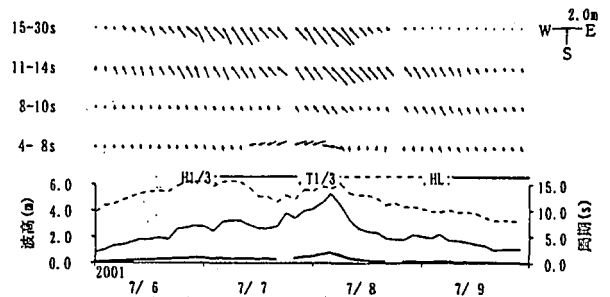


図-4 遠方の台風から伝わるうねり (台風 0104 号)

表5は、1年間の観測結果を周期帯毎にとりまとめた例として、静岡県御前崎沖の海象計による観測記録（水深 22 m）について示したものである。周期 30 s 以上の全長周期波の周期帯で定義される表の右側の波高階級別出現頻度を見ると、波高 1 cm 以下となったケースは皆無で、50cm を越える事例も 12 ケース存在しており、5 cm から 10cm の範囲の出現頻度が最も高くなっている。

従来、長周期波は、波群による非線形干渉から発生するものと考えられてきた。しかし、表5.で得られた長周期波高の出現分布は、2次非線形干渉から推定される長周期波高より1オーダー程度大きな値となっていることは注目に値する。すなわち、Bowers による簡易式<sup>11)</sup>では、長周期波高  $H_s$  は、次式で算定される。

$$H_s = 0.074 H_{1/3}^2 T_p^2 / h^2$$

ここに、

$H_{1/3}$  有義波高 (m)

$T_p$  ピーク周期 (s) ( $\approx 1.05 T_{1/3}$ )

$h$  水深 (m)

である。例えば、年間平均有義波高を 1.0 m、有義波周期を 8 s、水深を 22 m とすれば、年平均長周期波高は約 1 cm と推定されるが、この値は表5で実際に観測されたものよりも1オーダー小さい。

このことは、常時の長周期波高は、拘束長周期波としての算定値よりも大きく、自由波進行長波の存在が大きいことを意味している。

図2は、各周波数帯で定義される長周期波高の季節・通年平均値をとりまとめたものである。長周期波の季節変動や海域別平均波高の変動は、通常の有義波高の変動と定性的にはよく対応しており、日本海沿岸では冬高く夏低い顕著な季節差が見られ、太平洋沿岸では日本海沿岸に比べて季節変動は複雑であり変動幅は小さいところが多かった。しかし、定量的に見ると、通年平均値では、地形条件や水深が異なっているにもかかわらず、各観測地点に共通して、30 秒以上の全周波数で定義すれば4から 12cm、30 - 60 秒あるいは 60 - 300 秒で定義すれば2から 6 cm となっており、御前崎沖と同様、他の観測地点でも長周期波高は、2次非線形干渉から推定される値より1オーダー程度大きな値となっている。

## 5. 周期帯毎の波向の出現統計

図3は、周期帯別の波向分布の出現特性の一例であり、やはり、2000年1月から12月までの1年間の御前崎沖の観測結果をとりまとめたものである。ここに、 $f_s$  と  $f_{ss}$  は、それぞれ、波浪ファイルの中で、比較的長周期側の周期帯 (10 - 15 s) と、短周期側の周期帯 (6 - 8 s) を意味している。

両者の波向の出現特性を比較すると、 $f_s$  では SE 方向が最も出現頻度の大きい波向でありその両隣の方向である ESE と SSE が次に出現頻度が大きくなっているが、 $f_{ss}$  では SSE 方向が最も出現頻度の大きい波向でありその両隣の方向である SE と S が次に出現頻度が大きく、ちょうど1方位だけ波向がずれていることがわかる。この相違は、長周期成分ほど、浅海域では屈折の影響を受けやすく海岸線直角方向に波向が近づくためであると、考えられる。

このように、波向が周期帯毎に変化することは、港湾計画などの海域利用計画の策定にあたっては、十分に考慮されるべきものである。係留船舶の動揺は、周期応答特性が非常に鋭敏であるため、固有周期に近い周期帯の波向を適切に評価しなければならない。今後は、波向を周期帯毎に評価し、より精緻な海域利用計画が策定されることが望まれる。

## 6. 観測事例

### 6.1 台風からのうねり (台風0104号)

図4は、波浪観測データの周期帯表示の一例であり、2001年7月6日から8日にかけての、御前崎沖（水深 22 m）における観測結果である。図中の矢印の長さは、周期帯毎の換算波高を、向きは周期帯毎の平均波向を示している。

この当時、台風 0104 号が南方の沖縄近海に位置していた。7月6日には周期 8 s 以下の短周期成分波高は低く、いわゆる風波はほとんど見られない海況であったことが推定される。しかし、同日の午後から、周期 10 - 15 s および 15 - 30 s の周期帯波高は増加を始めていることが注目される。これが、南方の台風からのうねりによるものと考えられる。その後、7日から8日にかけて、周期 8 s 以下の風浪が東北東から来襲したが、10 s 以上のうねりはやはり南東から来襲している。

この図から、15 s を越える周期帯のエネルギー

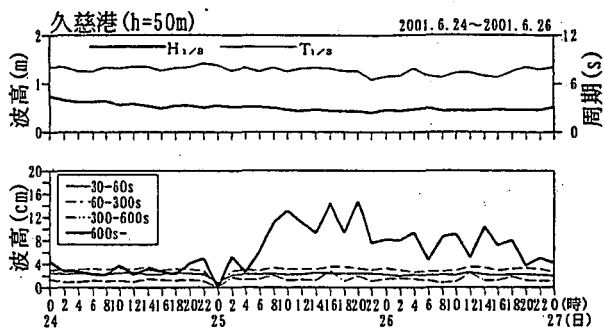


図-5 2001年ペルー地震津波の観測事例

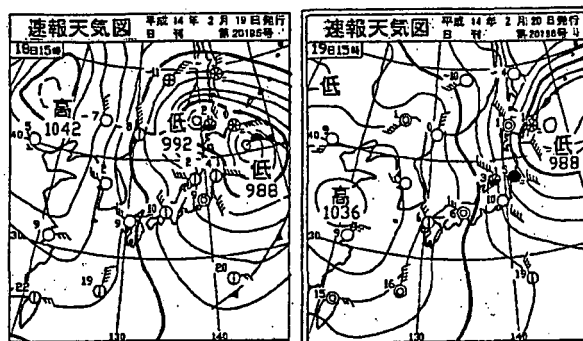


図-6 寄り回り波発生時の天気図

が相対的に大きいことが読みとられ、有義波周期より長い周期帯のエネルギーが無視できないものとなっていることがわかる。また、下の折れ線図に示す周期 30 s 以上の全周期帯に対応する長周期波高である  $H_L$  は、有義波高が最大値 (5.36 m) となる7月8日4時に、78cm の極大値となっており、いわゆる長周期波と呼ばれる周期帯における成分エネルギーも高かったことがわかる。

### 6.2 津波の捕捉 (2001年ペルー地震津波)

図5は、岩手県に位置する久慈港沖合の海象計 (水深 50 m) が捉えた、2001年ペルー地震津波を示したものである。2001年6月24日から26日にかけて、上段に示す有義波高と有義波周期は、目立った変化が見られず、有義波高 50cm 程度の低波浪状況が継続している。しかし、下段の長周期波成分波高に注目すると、周期 600s 以上の周期帯に限って、25日6時頃から急増し、半日間程度にわたって換算波高 10cm 程度の状況が継続した後、徐々に換算波高がもとの水準に戻っていることがわかる。

2001年ペルー地震は、マグニチュードが8を越える大地震であり、震源域も広がったとされている。我国沿岸への津波の来襲時刻は、6月25日の未明と予測されていた。2001年ペルー地震に伴う津波は、我国沿岸では振幅は小さかったものの周期は20-30分程度であったことが、沿岸の検潮記録からも読み取られているので、ここで現れた周期10分以上の周期帯換算波高の急増は、この津波によるものと考えられる<sup>12)</sup>。

このように、切れ目のない連続観測データをもとにスペクトル解析を行って、周期帯換算波高を表示するナウファスの新しいシステムは、沿岸に来襲する津波の沖合の姿を、的確に捉えることができるものとなっている。

### 6.3 寄りまわり波 (2002年2月20日)

もう一つの事例として、2002年2月20日に富山湾で発生した寄り回り波の観測事例を紹介する。

図6は、寄りまわり波発生時の速報天気図を示したものである ( (財) 日本気象協会提供)。左側の天気図は、2月19日15時のものであり、日本海北部 (北海道沿岸) と太平洋北東岸 (十勝沖) に両極

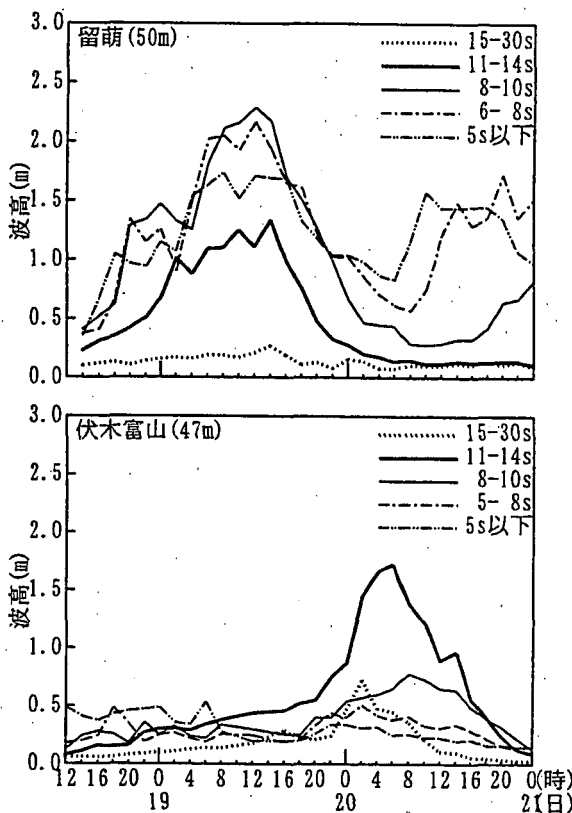


図-7 留萌・伏木富山における波浪の経時変化

を持つ二つ玉低気圧の影響で、日本海北部で強風が吹いていたと想定される。右側の天気図は、その24時間後の20日15時のものであり、低気圧が日本海を通り過ぎた後のものである。

図7は、この時期の北海道日本海沿岸に位置する留萌港沖の海象計 (水深 50 m) と、富山湾内に位置する伏木富山港沖の海象計 (水深 50 m) とが捉えた、観測波浪の経時変化を、やはり周期帯毎の表記で示したものである。

留萌港における観測記録を見ると、18日14時頃から、周期6s以下の比較的周期の短い周期帯の換算波高が上昇を始めている。その後、6-8sおよび8-10sといった次第に周期の長い成分の発達が見られ、2時間程度の遅れで見られ、さらに10-15sの周期帯の換算波高も19日0時過ぎ頃から増加を始めている。有義波高の極大値は19日の12時に見られたが、この時は、各周期帯とも高い換算波高となっており、周期10-15sの周期帯で換算波高が

2 m強となっている。しかし、15 sを越える長周期成分の発達ほとんど見られることなく、その後は20日の8時頃まで、次第に各周期帯とも換算波高は減衰していった。

他方、伏木富山港沖では、19日は1日中、各周期帯とも低波高状態が継続した。その後、20日の0時から6時にかけて、10 - 15 sの周期帯で最高換算波高1.7m、および15 - 30 sの周期帯で最高換算波高0.8mといった長周期成分の換算波高の増加が見られた。しかし、周期10 s以下のいわゆる風浪成分の成達は顕著ではないので、ここで見られた波高増加は、富山湾内で発達した風浪ではなく、日本海の北部で前日に発達した波が伝わってきた、いわゆる寄り回り波であったと考えられる。

## 7. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① 2001年末時点で、ナウファスにおける50波浪観測地点中、18観測地点で切れ目のない連続観測による長周期波の定常的な観測を実現した。
- ② 周期帯毎の長周期波高の年間出現頻度統計例を検討し、常時の沖合における自由波進行長波成分の存在を定量的に推定した。
- ③ 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示によって、有義波諸元だけでは表現できなかった沿岸波浪の特性が、定量的かつ定常的に観測されるようになった。
- ④ 遠方の台風から伝わるうねりの特性の把握、遠地津波の検知、寄り回り波の観測など、有義波諸元だけでは表記が困難な長周期波浪成分の特性を、スペクトル周期帯表示によつて的確に捉えた事例を紹介した。

**謝辞：** 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示を実現するにあたっては、多くの関係者のご支援をいただいた。国土交通省港湾局、各地方整備局の港湾関係部局、北海道開発局および沖縄総合事務局の港湾関係部局からは、新システムの開発と普及にあたって建設的なご指導をいただくのと共に、ナウファスシステムの運営に、常にご尽力いただいている。

また、(財)沿岸開発技術研究センターおよび(財)日本気象協会のご担当の方々には、多様化した波浪情報をディスプレイ上にわかりやすく表示する表示システムを開発していただくとともに、新システムへの移行段階で生じるさまざまな問題点を乗り越え、システムの定常的な運用を順調に行うために、お骨折りいただいた。

これらの方々に、改めて感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 合田良実監修、海象観測データの解析・活用に関する研究会編集：波を測る（沿岸波浪観測の手引き）、(財)沿岸開発技術研究センター、212p., 2001.
- 2) 永井紀彦：スペクトル解析に基づく波向と長周期波の観測情報の高度化、平成12年度港湾技術研究所講演会講演集、pp.103-118, 2000.
- 3) 永井紀彦・白石 悟・橋本典明・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林昭男・東江隆夫・柴田孝雄：現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺、海岸工学論文集、第44巻、pp.226-230, 1997.
- 4) 岩崎峯夫：デジタルフィルターを用いた津波計、カイジョー技報、Vol.2, No.4, (株)カイジョー、pp.51-58, 1996.
- 5) 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、港研報告、第38巻、第1号、pp.29-69, 1999.
- 6) 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・大山洋志・岩崎峯夫：連続観測システムの構築によるネットワーク沖合長周期波観測、海岸工学論文集第46巻、土木学会、pp.1311-1315, 1999.
- 7) Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI, Hiroshi YOKOI, Mineo IWASAKI, and Masanobu KUDAKA: Infragravity Wave Observation around Japan by the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS (NOWPHAS), Proceedings of the Forth International Conference on Hydrodynamics (ICHD'2000), pp.509-514, 2000.
- 8) 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、pp.1081-1085, 1995.
- 9) (財)沿岸開発技術研究センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書、181p., 2000.
- 10) 永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2000)、港湾空港技研資料No.1017, 426p., 2002.
- 11) Bowers, E.C.: Low Frequency Waves in Intermediate Water Depths, Proc. 23th ICCE, Vol.1, pp.832-845, 1992.
- 12) 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.