

いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性 (第2報)

永井紀彦* ・清水勝義** ・橋本典明***
太田耕栄**** ・久高将信***** ・小野修平*****

1. はじめに

港湾開発は今後ますます大規模化・大水深化する傾向にある。波浪に関する正確で総合的な情報をとらえることは、その計画・設計・施工のいずれの分野においても重要で、今後、現在用いられている有意義波諸元に加えて、波浪を総合的に記述する方向スペクトルの特性把握の必要性が増大していくものと思われる。

深水域で観測される方向スペクトルは一般にいくつかの波浪系の重ね合わせからなり、それらは気象条件の変化により時々刻々と変化する。このため、周波数スペクトルの時系列変化に関する研究例はいくつかみられるものの(広瀬ら, 1981), 方向スペクトル形状の時系列変動特性を系統的に検討することは困難で、研究事例も少ない。本研究は、前報(永井ら, 1992)で報告した1989年及び1990年の2年間の観測を含め、いわき沖で約7年間にわたり観測された方向スペクトルの月別の出現特性を把握するとともに、方向スペクトルの時系列データを主成分分析して得られた結果を用いて、系統的な変動特性の把握を試みたものである。

2. いわき沖波浪観測システム

(1) 観測システムの概要

いわき沖波浪観測システム(以後、いわき沖と呼ぶ)は、運輸省第二港湾建設局が1986年10月に完成させた波浪観測システムである。いわき沖の観測局は図-1に示すように塩屋崎灯台の北東約54 km(北緯 $37^{\circ}17'49''$, 東経 $141^{\circ}27'47''$)の水深-154 mの地点に位置しており、天然ガス開発用のプラットフォームの脚を利用して、従来では困難とされてきた沖波の波浪観測を実施している。観測局では、波浪観測機器として4台のステップ式波高計および水圧式波高計の装備された超音波式の水平

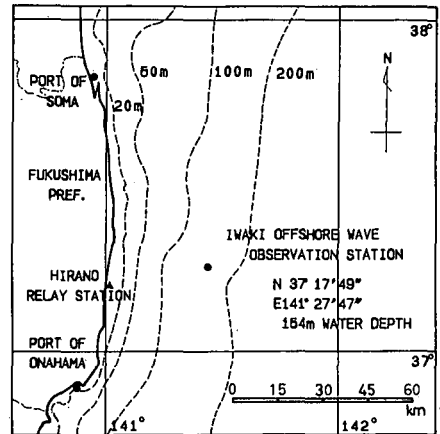


図-1 いわき沖の位置図

2成分流速計が設置されており、最大7成分の観測データを取得することができる。

(2) 方向スペクトルの解析方法

本研究で対象とした方向スペクトルの解析対象期間は1986年10月1日の観測開始から1993年12月31日までの約7年間とした。データの取得は、毎偶数正時前後10分間の計20分間実施し、0.5秒間隔のサンプリングでA/D変換を行っている。方向スペクトルの推定には拡張最大エントロピー原理法(EMEP)(橋本ら, 1993)を用いた。また、方向スペクトルの主成分分析の結果、物理的意味を解釈するために、ゼロアップ・クロス法による有義波解析の結果および共分散法(合田, 1981)による平均波向解析の結果も用いた。

3. 方向スペクトルの出現特性

(1) 方向スペクトルの季節変動

方向スペクトルを周波数および波向に関して積分して得られる波向別および周期別のエネルギー分布の年別・月別平均値を、それぞれ図-2および図-3に示す。月別の全観測平均値でみると、10月～3月の秋季の終わりから春期の始めにかけてはE～N系の比較的周期の長い波浪系が、4月および8月にはS～E系の比較的周期の短い波浪系がそれぞれ支配的である。9月は前報でも述

* 正会員	運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長
** 正会員	運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
*** 正会員 工博	運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室長
****	運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課
***** 正会員	(株)エコー 波浪プロジェクト室長
***** 正会員	(株)エコー 波浪プロジェクト室

べたように、方向別分布は台風の通過経路の時期的な違いにより8月と10月の中間的な形状となっている。

両分布とも、年平均値のばらつきは小さいものの、比較的静穏な時期である5～7月を除いては、月別平均値は年によりかなりのばらつきがあり、特に波向別エネルギー分布の平均値からの偏差が年により大きく異なる。

図-4は、いわき沖における有義波高および有義波周期の年別・月別平均値を年間変動図に示したものであるが、有義波諸元も方向スペクトルのこの多様な出現特性を反映して、年によりかなりの変動がみられる。

表-1は、いわき沖での波浪観測を開始以来、最大有義波高4m以上を記録した主要な気象擾乱を整理したものである(永井ら, 1993, 他)。方向スペクトルの変動は、これら主要な気象擾乱の発生に強く依存している。例えば、1991年2月には、台風並に発達した低気圧のゆっくりとした通過により、周期10～14秒、波高4m以上が約4日間も続くという2月としては他の年にはみられない

大きな気象擾乱が発生した。このためこの年の2月は特に周波数別エネルギー分布が他の年に比較して周期の長いところにピークが持つ極めて異なった形状となっている。また、3月についてみると、1988年は波向別分布のピークが平均値NEから大きくずれている。これは、1988年3月22に最大有義波高8.43mを記録したSE方向が卓越した擾乱の存在を反映したためである。1989年3月もピークが月平均値からずれているが、これは同月1日前後に発生したSSE系の擾乱の影響を強く受けることになったためである。

このように、一つの擾乱でその月の平均的な方向スペクトルの特性が大きく変動する。方向スペクトルの季節変動の特性を議論するためには、さらに長期間の観測が必要であると考えられる。

(2) 方向スペクトルの月別出現特性

(1)では、方向スペクトルの季節変動を波向・周期別のエネルギー分布をもとに概観したが、方向スペクトル

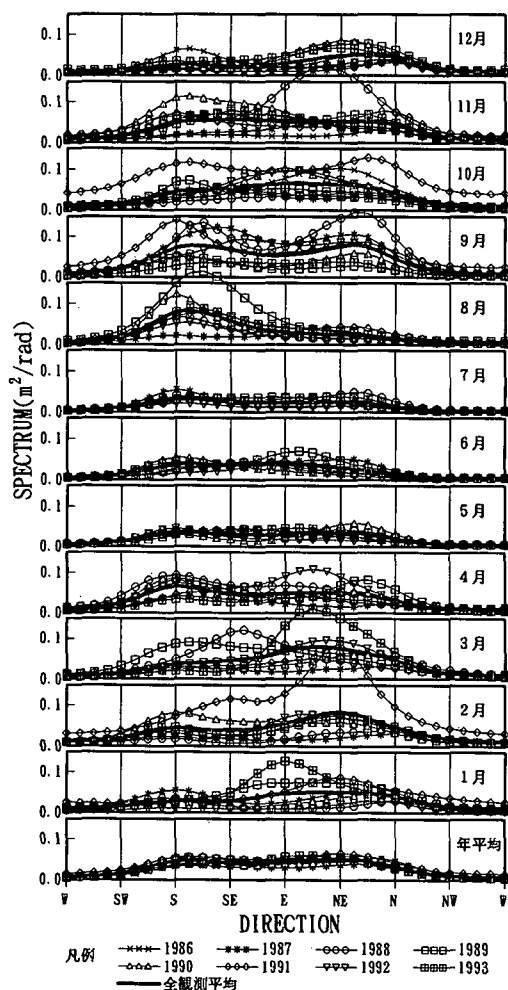


図-2 波エネルギーの方向別分布の年間変動

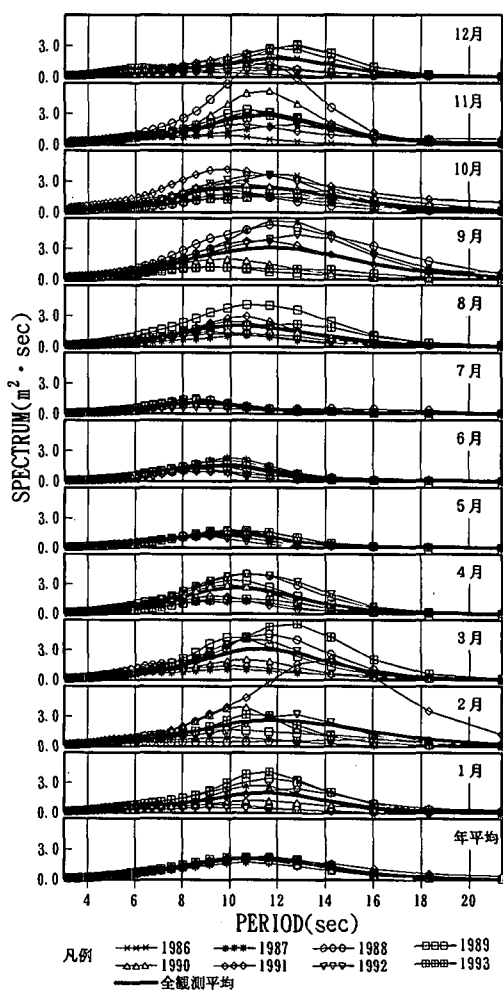


図-3 波エネルギーの周波数別分布の年間変動

表-1 最大有義波4m以上を記録した主な気象擾乱

年	月/日	最大有義波 波高(m) 周期(sec)	気象擾乱	年	月/日	最大有義波 波高(m) 周期(sec)	気象擾乱	年	月/日	最大有義波 波高(m) 周期(sec)	気象擾乱
86	10/9	7.24 (12.0)	T18号及び二つ玉シ	89	4/24	4.74 (9.7)	南岸シ及び冬型	91	9/28	4.70 (8.2)	T19号
	10/12	5.79 (9.6)	冬型		5/13	4.11 (9.3)	南岸シ及び二つ玉シ		10/12	5.61 (10.6)	T21号及びT22号
	12/15	4.12 (7.9)	南岸シ		6/17	4.51 (9.8)	南岸シ及び二つ玉シ		12/3	4.20 (13.0)	T28号と崩れの東方海上シ
	12/19	6.02 (10.8)	二つ玉シ及び冬型	90	8/6	8.56 (10.5)	T13号	92	2/2	5.40 (11.6)	南岸シ及び冬型
87	1/23	11.24 (3.4)	日本海シ及び冬型		8/16	4.38 (12.7)	T14号及びT15号		2/26	5.37 (13.7)	東方海上しからのうねり
	2/4	6.28 (12.3)	二つ玉シ及び冬型		8/28	4.48 (8.8)	T17号及び崩れのシ		3/6	5.41 (10.0)	南岸シ及び冬型
	3/14	4.10 (9.4)	二つ玉シ及び冬型		10/12	4.09 (9.4)	南岸シ及び日本海シ	93	3/19	4.79 (9.3)	南岸シ
88	6/21	5.35 (9.8)	前線性シ	91	11/3	4.48 (11.7)	日本海シ及び冬型		3/24	4.47 (9.8)	南岸シ
	8/27	8.20 (5.2)	前線性シ及びT12号		12/15	5.80 (11.7)	冬型		5/1	6.64 (9.0)	南岸シ
	9/17	6.67 (11.4)	前線性シ及びT13号	90	2/11	5.20 (10.1)	日本海シ		9/11	5.40 (11.5)	T17号及びT18号からのうねり
	12/6	6.37 (4.5)	南岸シ及び冬型		2/20	6.53 (10.0)	日本海シ	92	10/9	4.27 (8.6)	南岸シ
89	3/22	8.43 (11.6)	南岸低気圧		3/12	4.07 (8.2)	日本海シ		10/21	5.52 (10.7)	南岸シ
	4/8	5.16 (9.5)	南岸シ		4/8	4.57 (10.7)	日本海シ		11/8	5.93 (10.8)	T28号崩れのシ及び北偏H
	4/13	4.02 (8.7)	日本海シ及び南岸シ		5/1	5.92 (10.7)	日本海シ		11/20	4.73 (9.3)	南岸シ
90	4/19	6.48 (9.6)	南岸シ	91	6/10	4.06 (7.7)	日本海シ	93	12/8	6.15 (11.3)	移動性H後面及び南岸シ
	5/23	4.76 (10.0)	前線性シ		8/10	6.29 (8.9)	T11号		1/16	5.64 (10.4)	二つ玉シ及び冬型
	6/3	4.22 (9.0)	前線性シ及び二つ玉シ		9/20	5.45 (9.5)	T19号		1/26	5.63 (9.9)	南岸シ及び高気圧の縁辺
	9/16	7.73 (12.2)	T18号及び前線性シ	90	10/1	4.09 (8.1)	T20号	92	2/17	4.09 (8.9)	二つ玉シ
88	10/6	4.06 (10.1)	前線性シ		10/23	5.63 (13.2)	T19号及び二つ玉シ		3/22	4.20 (9.3)	シ本州嶺断及び冬型
	10/31	4.80 (12.5)	冬型		11/4	6.76 (9.7)	南岸シ		3/9	6.65 (13.1)	東方海上しからのうねり
	11/19	4.43 (9.0)	南岸シ		11/10	7.30 (10.6)	日本海シ	93	3/29	6.04 (9.9)	東方海上しからのうねり
89	11/25	4.03 (10.4)	日本海シ及び二つ玉シ	91	12/1	8.31 (11.1)	T28号		8/27	7.89 (11.3)	T11号
	11/29	4.68 (10.4)	南岸シ		12/12	5.43 (8.5)	日本海シ		10/8	4.94 (11.0)	T19号からのうねり
	1/24	5.65 (10.7)	南岸シ及び冬型		2/16	8.06 (11.5)	二つ玉シ		11/14	6.85 (9.8)	二つ玉シ
90	2/26	4.34 (8.0)	南岸シ及び冬型		4/18	4.59 (8.5)	日本海シ		12/21	4.03 (10.9)	冬型
	3/1	4.03 (9.5)	日本海シ及び冬型	91	8/31	4.06 (9.1)	T14号	記号 T:台風 L:低気圧 H:高気圧			
	3/21	6.38 (12.5)	冬型		9/9	4.10 (14.4)	T15号				
	4/16	4.15 (8.4)	二つ玉シ及び冬型		9/20	4.79 (12.1)	T18号				

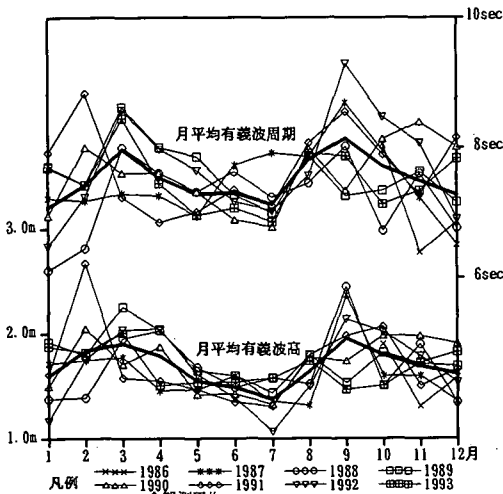


図-4 有義波諸元の年間変動

の月平均値の年平均値(全観測平均)からの偏差といった観点から整理すると月別の出現特性がより明確となる。

図-5に年平均値を、図-6(a)~(c)に冬季、春季、秋季の代表例としてそれぞれ1月、4月、9月の方向スペ

クトルの月平均値の年平均値からの偏差を示す。図中の実線は(月平均値-年平均値)の値が正值、点線は負値を表している。

1月はE方向の低周波側およびN方向の高周波側で、4月は低周波側は全方向で高周波側はSW~SEの限られた方向で、それぞれ年平均値よりも高いエネルギー分布を示す特徴的なパターンが見られる。また、9月はSW~N方向の広い周波数帯で年平均値よりも高いエネルギー分布を示すが、特にS~SE方向に台風からのうねりと考えられる周期15秒付近の波浪の卓越が見られる。

(3) 波向の代表諸元に関する考察

多方向から波浪が来襲する場合、平均波向のような波向に関する代表諸元がどの程度多様な方向スペクトル特性を代表しうるかはあまり明確でない。このことについて、前報では2方向波浪が出現した代表的なケースについて第1ピーク波向、第2ピーク波向および平均波向の経時変化をもとに考察を行っているが、系統的な検討は不十分であった。そこで、全観測結果を、明らかにピークが1つしか存在しない場合(ケース①)と、第1ピークと第2ピークが明確には区分出来ないような場合も含め2つ以上のピークがみられる場合(ケース②)に分類し、平均波向との関係の把握を試みた。

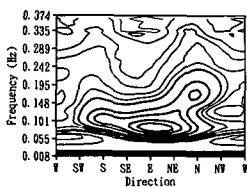
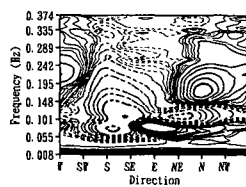
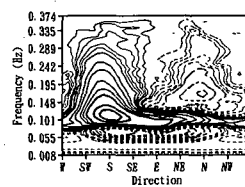


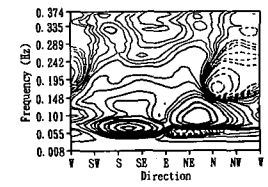
図-5 方向スペクトルの年平均値



(a) 1月



(b) 4月



(c) 9月

図-6 方向スペクトル月別平均値からの偏差

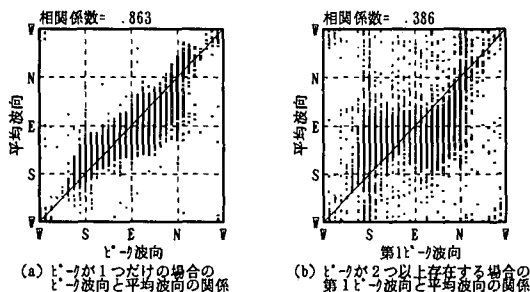


図-7 平均波向とピーク波向の関係

図-7(a)にケース①におけるピーク波向と平均波向の相関を、図-7(b)にケース②における第1ピーク波向と平均波向の相関をそれぞれ示す。なお、ここで使用したデータは共分散法による波向解析を実施している1988年以降のデータである。

ピークが1つしか存在しない場合には、平均波向とピーク波向の間には比較的良好な相関がみられるが、ピークが2つ以上存在する場合には、ピークが明確に区別できない観測例を多く含むのにも関わらず、第1ピーク波向と平均波向の間の相関は極めて低い。

以上のことから、多方向から波浪が来襲する場合においては、平均波向を波向きに関する代表諸元とすることには問題があることが改めて確認された。

4. 主成分分析による出現特性把握の試み

(1) 解析方法

方向スペクトルの観測値を、 $(n_f \times n_\theta)$ 次元空間(n_f : 周波数分割数, n_θ : 波向分割数)のベクトル時系列と見なし主成分分析を行った。EMEPによる方向スペクトルの推定は、周波数(0.008~0.375 Hz)および波向をそれぞれ48および32に分割して実施しているが、計算機の処理能力等を考慮し、スペクトル密度の1つとびの推定値を用いて解析を実施した。

(2) 各主成分の意味

図-8、図-9に第4までの主成分に対する固有ベクトルおよびスコアの月平均値の年変動をそれぞれ示す。図-8で実線は固有ベクトルの成分の正值、点線は負値を表している。第2主成分までで累積寄与率が49%、第4主成分までで同64%となり、寄与率上位数個の主成分を用いれば、方向スペクトルの変動の大部分を説明することが出来るが、それらの意味を検討する必要がある。

a) 第1主成分(寄与率約30%)の意味

図-9には有義波高の二乗平均値の年間変動もあわせて示しているが、第1主成分のスコア(以下、Z1)と極めて近い変動をしていることがみられる。図-10に各観測毎の有義波高とZ1の関係を示すが、この図からも有義波高との間に強い相関がありことがわかる。常に正值

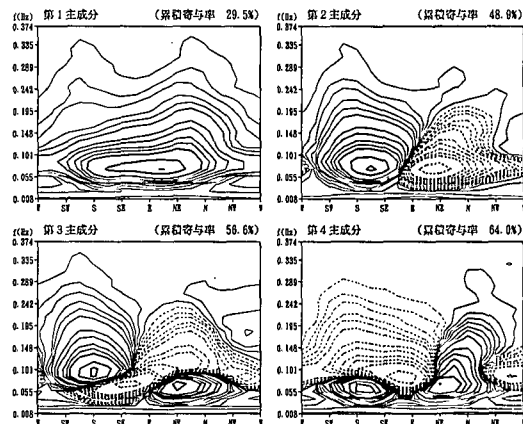


図-8 各主成分に対する固有ベクトル

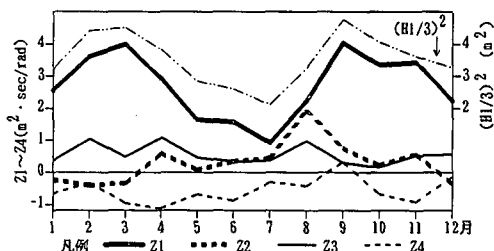


図-9 主成分スコアおよび有義波高自乗値の月平均値の年間変動

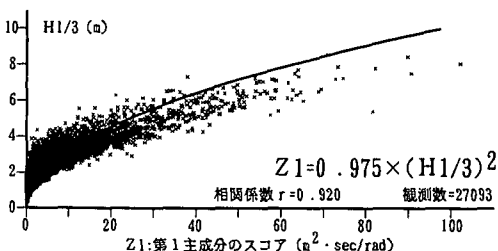


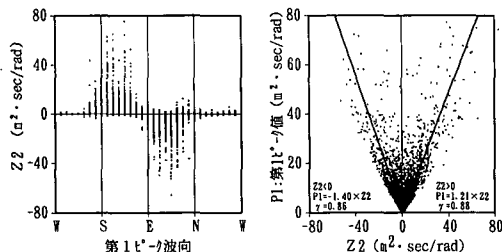
図-10 有義波高と第1主成分のスコアの関係

を示すZ1は、波の平均エネルギーを説明する主成分であると考える。

b) 第2主成分(寄与率約19%)の意味

図-9によれば、第2主成分のスコア(以下、Z2)の月平均値が負の値となるのは12月~3月の間であるが、これは、前掲の図-2でみられた月平均の波向別エネルギー分布のピークがE~N方向にある時期と一致する。

そこで、Z2と第1ピークの波向およびスペクトル密度の関係を整理すると図-11(a)及び(b)のようになる。Z2はZ1と異なり正または負の値をとり、S~E方向に第1ピークがみられるときに正值、E~N方向に第1ピークがみられるときに負値となる傾向がある。また、第1ピーク値とZ2の間にも関連性がみられる。以上のことから、第2主成分は方向スペクトルの第1ピーク値と



(a) Z2と第1ピーク波 (b) Z2と第1ピーク波
向の関係 向の関係

図-11 第2主成分のスコアと第1ピークの関係

その波向を説明する主成分であると考えられる。

c) 第3以下主成分の意味

第3以下の主成分のスコアは、月平均値でみると年間の変動は比較的小さく物理的意味の解釈は非常に困難である。これらは第2主成分まででは説明しきれない方向スペクトルの変動を補足的に説明するものである。

ただし、第4主成分に関しては、唯一9月にそのスコア(Z4)が正の値をとり、他の月の変動特性とは異なるのがみられる。第4主成分の固有ベクトルは、S~SE方向の周期15秒付近に正值のピークがあるのが特徴であり、Z4が正值の時に方向スペクトルのこの波向および周期付近のスペクトル密度を高める。これは、同月の方向スペクトルの出現特性を月平均値の年平均値からの偏差でみた図-6(c)に示したように、S~SE方向の台風からのうねりと考えられる周期15秒付近の波浪の卓越と一致する点で興味深い。

(3) 主成分スコアの時系列変化

図-12は、波浪系がS~E系からE~N系に変化した代表的な観測事例について、第1~第4主成分のスコアの時系列変化を、有義波諸元、周波数スペクトルおよび方向分布の時系列変化ならびに天気図とともに示したものである。台風なみに発達した低気圧の通過にともなう、有意波高と第1主成分のスコアの変動、および波向の変化と第2主成分スコアの符号の変動に関して、(2)で述べた特徴がよく読み取れる。

なお、第3および第4主成分のスコアに関しては、今回の検討ではその意味を解釈できなかったが、全くランダムではなく系統的に変動しており、天気図情報等の他の要因で説明し得る可能性もある。

5. おわりに

いわき沖で観測される深水域の方向スペクトルは、季節・年および気象擾乱により様々な分布をもって出現することが改めて認識され、季節変動等の出現特性の把握

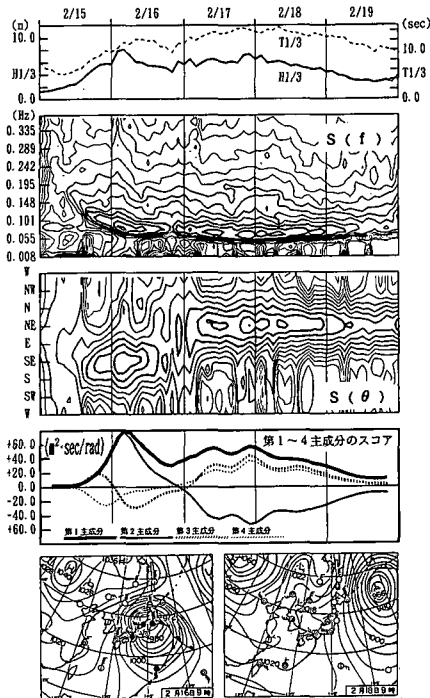


図-12 主成分スコアの時系列変化の一例 (1991/2/15-19)

にはさらなる観測の積み重ねが必要であると考えられる。また、今回の方向スペクトルの主成分分析による変動特性把握の試みは、低波浪時のデータも含めた全観測を解析の対象としたものである。高波期間のみを対象し、かつ、天気図情報を加味すれば、寄与率上位数個の主成分がもつ意味もより一層明らかになると考えられる。

最後に、いわき沖における定常観測を担当されている小名浜港工事事務所をはじめとする第二港湾建設局の関係各機関の皆様に対して、改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- 合田良実(1981): 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第20巻第3号, pp. 53-92.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・菅原一晃・久高将信 (1992): いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 166-170.
- 永井紀彦・菅原一晃・清水勝義・橋本典明 (1995): 全国港湾海洋波浪観測 (NOWPHAS 1993), 港研資料, No. 796. 他に, 港研資料, No. 770, 745, 721, 712, 666, 642, 612.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993): 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, 港湾技術研究所報告, 第32巻第1号, pp. 3-25.
- 広瀬宗一・高橋智晴 (1981): スペクトル時系列の統計解析, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.