
 特集「海洋気象業務に関する最新の技術的動向」

波浪スペクトルを活用した波浪情報の高度化について

高野 洋雄*

要 旨

海洋気象情報室では、より実用的で効果的な波浪情報の提供を目指して、波浪スペクトルを活用した情報の高度化を進めている。本稿では、波浪スペクトルの成分から風浪やうねり個々の波浪成分を分離する手法について紹介する。また、算出された波浪の成分を活用し、複数の波が存在して航行に支障のある海域、あるいは海流の影響を受けた潮波域（しおなみいき）を特定する手法とその情報イメージ等、波浪情報高度化への取り組みについて紹介する。

1. はじめに

通常、海面の波は様々に変化し、一定の状態とは言い難い。このような複雑な状況を表すために、有義波という概念が生まれた（Sverdrup and Munk, 1947）。有義波は、様々に変化する波の平均的な状況を、単一の波高や周期で表現したものであり、その場を代表する指標の一つである。実用上、波浪の状況を表すのに便利な値であり、気象庁の波浪情報をはじめとして、様々な場面で利用されている。

有義波は、複雑な波浪の状況を表現する上で便利であるが、一方で波高・周期や卓越波向といった統計的な情報がしかないため、風浪やうねりが複数存在するような場合に個々の波についての情報までは表現できない。

同じ有義波高でも、風浪とうねりでは海面の状態は大きく異なり、とても同じ波として扱えない（風浪とうねりの違いについては、高野（2012）を参照されたい。また、光易（2007）には、風浪とうねりの写真が掲載されており、違いをイメージしやすい）。また、単一の風浪かうねりのみが

存在する以外にも、風浪とうねりが同時に存在する場合や複数のうねりが同時に存在する場合もある。複数の波があると、波の重ね合わせによって海面状態は複雑となり、船舶の航行に支障が生じやすい。複数の方向から来る波が重なって急激に大きな波浪となる、いわゆる三角波も発生しやすくなり、船舶にとっては危険な海域といえる。このような状態の情報は船舶の航行安全にとって重要であるが、全ての波を合成した有義波高では、その情報を表現できない。

複雑な波浪の状況をより厳密に取り扱うため、Pierson, Neumann and James（1955）は、波浪スペクトルに着目した予測手法を開発した。この手法は、波のエネルギーを、周期（厳密には周波数）と方向別のエネルギーである波浪スペクトルに分けて、それぞれのスペクトル成分の振る舞いや変化を考慮する。外洋（深水波）の場合、波浪のエネルギーは周波数 f で決まる群速度（ $C_g = g/4\pi f$ ； g は重力加速度）で進むので、たとえばうねりの伝播はエネルギー成分の移動として詳細に考慮できるほか、風浪の発達をうねりと区別して見積も

* 地球環境・海洋部海洋気象情報室

ることが可能となる。

Pierson, Neumann and James (1955) が提唱した波浪推算手法 (PNJ 法) は、多くの手続きを要するためマニュアル作業には向いてなく、結局普及するには至らなかったが、その考え方は波浪モデルに適用されている。計算機による大量処理が可能となった現在、波浪予測は専ら波浪スペクトルの変化をもとに推算されており、単に波浪モデルといえ、通常は波浪スペクトルを物理量として取り扱う、波浪スペクトルモデルのことを指す(浅水域の詳細な変形計算などには、水面の変化を直接計算するモデルも使われることがある)。

気象庁では、1977 年より波浪モデルを運用してきており、1998 年 4 月に第三世代波浪モデルに更新、2007 年 5 月に大幅な変更を行って現行のモデルとなっている (杉本, 2007; 峯松, 2009)。第二世代波浪モデルまでは、波浪スペクトルの取り扱いはやや人為的などところがあり、統計量である有義波の精度に主眼が置かれていたところがある。第三世代波浪モデルでは、現在解明されている波浪スペクトルの物理的な振る舞いを忠実に再現することも目標とされ、算出される波浪スペクトルの信頼性も格段に上がっている。

気象庁の予報業務で主に用いられる全球・沿岸波浪モデルの場合、波浪スペクトルは、第 1 表に示したように、周波数 25 成分、方向 36 成分の計 900 成分で構成され、周期 3.3 秒から 27 秒迄、方向については 10 度の分解能を持っている。各格子点上にこのスペクトル成分を持ち、それぞれの変化を計算することで波浪を予測する。有義波に

相当する波高や周期等も、このスペクトルから算出される。したがって、波浪モデルでは、有義波よりもはるかに多くの情報を持った波浪スペクトルが日常的に計算されており、これを活用することで、より高度な情報の提供も可能となる。なお、気象庁は、近年沿岸波浪計を従来の超音波式波浪計からレーダー式波浪計に更新した (池田ほか, 2014)。レーダー式波浪計でも、波浪スペクトルが算出されており、従来に比べて波浪スペクトルを利用できる環境が整いつつあるといえる。

次章では、波浪スペクトルから波浪の成分を分離して個々の波浪成分を算出する手法の高度化について解説し、第 3 章で、求めた波浪成分を活用した情報高度化の試みについて紹介する。具体的には、多方向波の存在する海域と流れの影響を受けた潮波域の特定手法とその情報イメージを紹介する。

2. 波浪スペクトルの分離手法

波浪スペクトルの活用といっても様々な方法が考えられる。通常の統計量である有義波高、周期、あるいは (卓越) 波向という数個程度の情報に比べて、数百の成分を持つスペクトルには、原理的に多くの情報が含まれる。この情報を活用するには、端的にいえば波浪スペクトルをそのまま参照すればよいのだが、情報量があまりに多すぎるため簡単には利用しにくい。実際のところ、あまり重要ではない成分も含まれることなどを考慮して、波浪スペクトルから何らかの有効な情報を抽出することが実用的といえる。

第 1 表 波浪スペクトルの諸元

	波浪モデル		沿岸波浪計
	全球・沿岸	浅海	
成分数	900	1260	1332
周波数分割	25	35	37
周波数間隔 Δf	0.09f*	0.1f*	0.0078125
周波数範囲(Hz)	0.0375-0.3000	0.0418-1.1000	0.03125-0.3125
周期範囲(秒)	26.67-3.33	23.92-0.91	32.00-3.20
方向分割数	36	36	36
方向分解能(度)	10	10	10

* 波浪モデルの周波数は対数的に分割

予報等で最も実用的な情報として、波浪の成分抽出がある。各地点における（合成波である）有義波情報だけでなく、同地点における風浪やうねりの成分についての情報を算出する。気象庁海洋気象情報室では、平成 23 年度より有義波に加えて、風浪とうねりの成分別の波高等の値を推算している。手法の概要は以下のとおりである（詳細は、高野（2012）を参照されたい）。

風浪に相当する波浪スペクトルのピーク周波数 f_p は、風速 u_{10} から

$$f_p = \frac{0.13g}{u_{10}} \quad (2.1)$$

と見積もることができる。ここで g は重力加速度である。風浪スペクトルは低周波側への広がりではなく、このピーク周波数の 0.65 倍（周期では 1.54 倍）までの範囲をとると、通常ほぼ全ての風浪スペクトルが含まれる。したがって、風浪のスペクトル $F_{sea}(f, \theta)$ を、以下のように定義された風浪の周波数 f_w に該当する範囲と定める。

周波数については、上記境界周波数 f_{cr}

$$f_{cr} = \begin{cases} 0.65 \cdot f_p = 0.65 \cdot \frac{0.13g}{u_{10}} & (u_{10} > 10m/s) \\ 0.65 \cdot f_{max} = 0.65 \cdot 0.3[Hz] & (u_{10} \leq 10m/s) \end{cases} \quad (2.2)$$

より大きい周波数（周期は短い）範囲をとる。なお、風速が 10m/s よりも小さい場合は、風浪領域がモデルのスペクトル定義域からはみ出さないように、 f_p を波浪モデルで定義された最大周波数の値 f_{max} に置き換えてある。

方向については、風浪の向きは海上風と同じであるから、風上成分のみの向きに限定され、

$$F_{sea}(f_w, \theta): f_w > \frac{f_{cr}}{\cos \theta} \quad \left(\left| \theta \right| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.3)$$

の範囲をとる。ここで、 θ は風向と波浪スペクトルのなす角である。角度の余弦の制限を受けて、風向と同じ成分で最大、角度が大きくなるにつれて該当成分が少なくなり、90 度で 0 になる。

うねりについては、風浪とみなされた以外の全てのスペクトル成分をまとめて、単一のうねりと

して取り扱う。

簡単に言うと、海上風をもとに風浪を定め、それ以外の成分をうねりとみなして、それぞれの成分を算出する。この方法では、風浪とうねりの向きが明確に異なる場合に、海上風の値で簡単に風浪の範囲が特定でき、精度よく分離できることが確認されている。

一方で、いくつかの問題点も指摘されている。一つは、風が強い場合に風浪の範囲が大きめに設定され、風浪が過大に評価されることである。風浪の範囲は、風速に応じて十分発達した風浪を想定して定められる。しかし、風が急に強まった場合には、実際には吹続時間制限により風浪は急には発達しない。このため、本来は風浪ではない近傍の波浪スペクトルも風浪とみなされてしまい、風浪の過大評価につながる。また、このことはうねりの過小評価にもつながる。さらに、うねりは、単に風浪以外の成分を、分けることなくまとめて取り扱われている。このため、複数の成分が存在しても個々のうねり成分の情報は得られない。

Hanson and Phillips (2001) は、波浪スペクトルの分布をより忠実に解釈し、多数の成分を自動的に求める手法を開発した。この方法では、波浪スペクトルの形状をもとにスペクトルを分割し、波浪の個々の成分を算出している。ただし、彼らは、風域にある成分は、大なり小なり風の影響を受けると考え、風浪の範囲は風場に基づいて決定している。したがってこの手法でも、風の急変時などには風浪の算出精度が悪くなる可能性がある。

このため、風による前提条件をはずして成分を抽出する手法を検討した。この方法では、スペクトルの勾配を評価して同一成分とみなせる範囲を定め、複数の成分に分離する。風浪の成分は、求めた成分のうち海上風の状況に最もふさわしいものとする。具体的な手順は以下のとおりである。

- 1) 波浪スペクトルのエネルギーを評価し、ピーク位置（周波数・方向）を特定する。
- 2) ピーク位置から、周囲のエネルギー値を参照し、エネルギーが 0 になるか勾配が逆転するまでの連続した領域を抽出する。
- 3) 抽出した成分を波浪の第 1 成分 W_1 とする。
- 4) 残った成分に対し、1), 2) の手順を繰り返す。

波浪の第 2 成分 W_2 を抽出する。

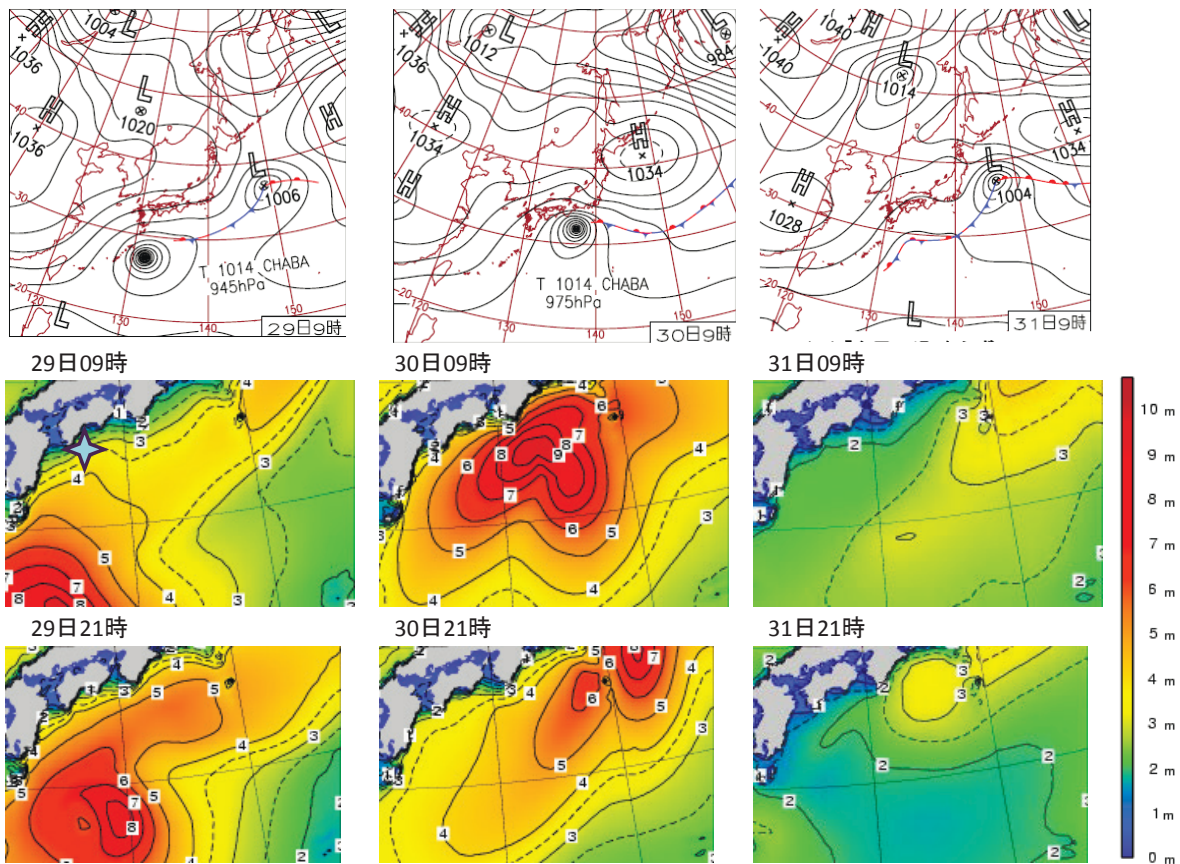
- 5) 以下, 手順を繰り返す, 必要な成分 (便宜上 5 成分とした) 迄を抽出する。
- 6) 海上風から, (2.1) 式を用いてピーク周波数 f_p を決定する。
- 7) 求めた成分のうち, ピーク周波数 f_p に対し, 風との角度が ± 30 度以内, 高周波数の領域内で, 最も近い位置にあるピーク値を持つ成分 W_i を風浪とする。領域内に該当する成分がない場合は風浪なしとする。
- 8) 残りの成分をうねりとし, 波高の大きい方から並べ替える。

風浪の成分を, はじめに風速から領域を求めないのは, 風浪の過大評価を避けるためである。風向が変化した直後は, 風浪が十分に発達していないえ, その近傍にうねりが存在することが考えられる。風速に応じて範囲を設定すると, このうねりまで風浪とみなされてしまう可能性があるため, 風浪の判定は波浪成分判定後に行う。

なお, うねりの成分は, 原理上いくつでも成分

を求めることが可能であるが, 計算では 5 成分までを求めた。いくつかの事例による分離結果によると, 4 成分取れば, ほぼ全ての波成分を網羅できた。なお, 船舶気象通報式では, 風浪及びうねりは 2 成分までと最大 3 成分を取り扱うように決められ, 求めた成分の波高が 20cm 未満の場合は波なしとされる。実用的にはこの基準に合わせて十分かもしれない。

以下, 同手法によるスペクトル分離の例を示す。対象事例は, 高野 (2012) でも対象とした, 2010 年台風第 14 号 (Chaba) による四国沖の風浪とうねりである。第 1 図に, 2010 年 10 月 29 日から 31 日における天気図と波浪図を示す。なお, 波浪図中の星印は分離評価を行った地点 (北緯 32.0 度, 東経 133.5 度) を示す。日本の南を台風第 14 号が北上し四国沖を東進したため, 四国沖は高波となった。評価地点では, 台風が接近中の 29 日前半に, 台風前面の東北東風による風浪と南西からのうねりが確認できる。台風通過後は, 西よりの風となり風速も収まったが, 東方からくるうね

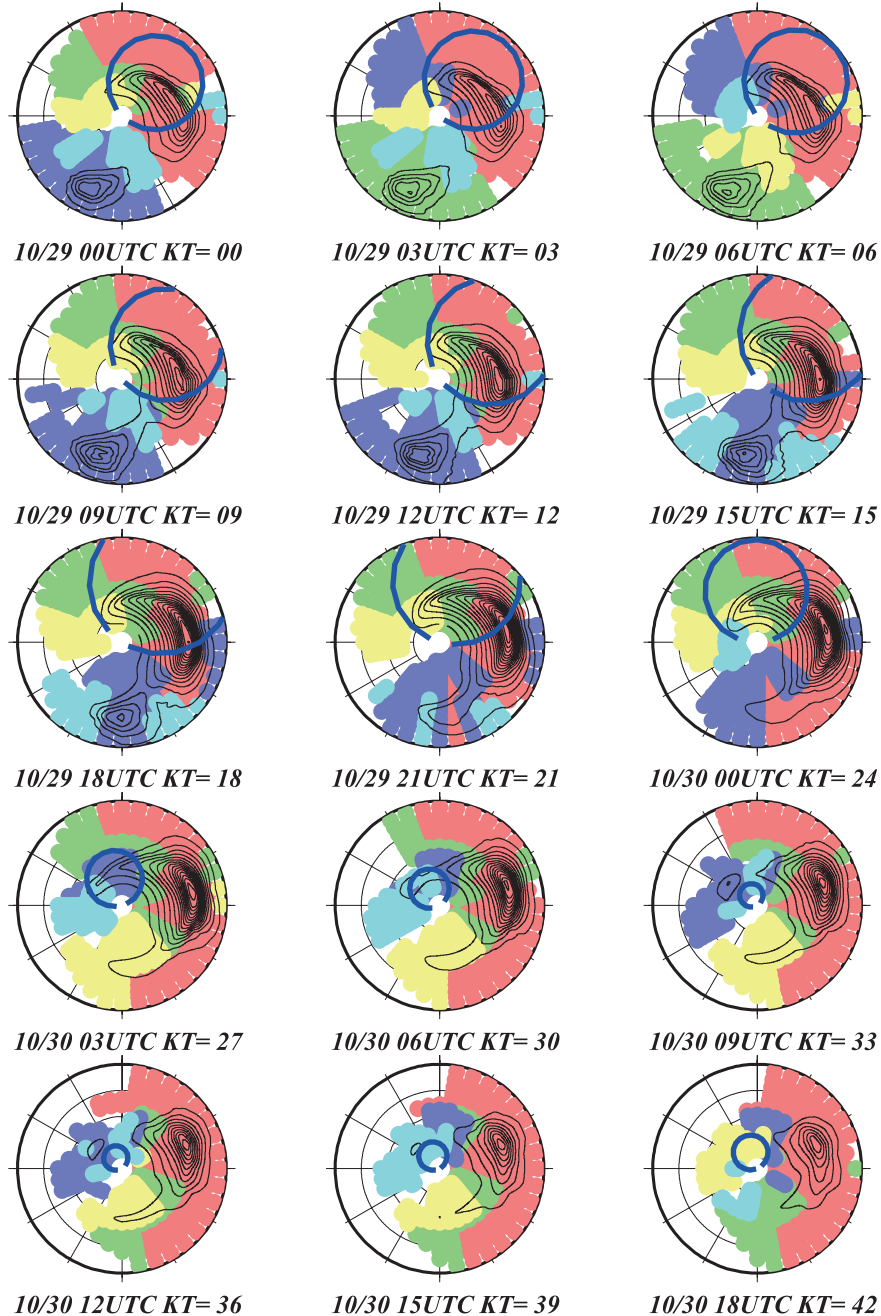


第 1 図 2010 年 10 月 29-31 日の天気及び波浪の概況

りが卓越している。

第2図に、新手法による波浪スペクトルの成分分離結果の例を示す。参考のため、現行手法で、風浪とうねりを分離した区切りも青太線で示してある。新手法では、スペクトルの勾配に応じて成分が抽出されており、一見連続して同じ成分

に思えるものも分離されている場合がある。なお、この事例では5番目の成分はほとんどが波高10cm未満であった。エネルギー等値線の無い所にも成分が特定されているが、この成分は大きなエネルギーを持たないため、成分波高の算出にはほとんど影響はない。自動判別は完全とは言えな



第2図 波浪スペクトルから分離された波成分

対象事例：沿岸波浪モデル（地点：北緯32度00分東経133度30分，2010年10月29日00UTC初期値の予想）

波浪エネルギーの大きいものから5成分（赤，緑，青，黄色，水色）を示す。スペクトルの向きは来る方向（風と同じ），動径方向は周期を表し中心（5秒）から外側（20秒）まで，円環を5秒ごとに引いてある。等値線は，エネルギーの平方根（波高の次元に相当）を表す。なお，図中の青太線は，現行手法による風浪とうねりの区分を示す。

いかかもしれないが、実用的には問題ないレベルで成分の抽出分離ができているといえる。また、現行手法では、風が強くなると抽出される風浪の範囲が大きくなっているが、新手法ではこのような急変はなく、より妥当に成分が抽出されるようになっている。

第2表は、上記の分離により求めた波浪成分を示したものである。参考のために海上風も示してある。また、現行手法による風浪とうねりの結果を第3表に示す。現行手法（第3表）では、うね

りはまとめて扱われているため、うねりの成分までの情報は得られないが、新手法では、うねりの成分別の情報も得られる。うねりの成分は、波高別に取っているため、同一成分とは限らず追跡しにくい。29日00UTCからしばらくは、南からの長周期と北からの短周期のうねりが卓越している。台風が通過した29日18UTC以降、これらの成分は徐々になくなり、ほとんど東からのうねりが主流となる。

第3図(a)に風浪とうねりの波高時系列を示

第2表 新手法により求めた波浪成分の例

対象事例:沿岸波浪モデル(地点:北緯32度00分東経133度30分,2010年10月29日00UTC初期値の予想)

日時		有義波			海上風			風浪			うねり1		うねり2		うねり3		うねり4				
日付	時刻(UTC)	波高(m)	周期(秒)	波向	風向	風速(m/s)	波高(m)	周期(秒)	波向	波高(m)	周期(秒)	波向	波高(m)	周期(秒)	波向	波高(m)	周期(秒)	波向			
10月29日	0	4.0	8.7	ENE	NE	15.0	3.6	8.8	ENE	1.2	6.5	N	0.9	14.4	S	0.7	5.4	NNW	0.2	9.7	SSE
	3	4.0	8.8	ENE	NNE	15.6	3.7	8.8	ENE	1.0	14.4	S	1.0	6.1	N	0.4	5.2	NW	0.3	8.5	SSE
	6	4.2	8.8	ENE	NE	16.5	3.8	8.8	ENE	1.0	14.4	S	1.0	6.1	N	0.4	8.4	SSE	0.4	5.3	NW
	9	4.6	9.0	E	NE	17.8	3.9	9.3	E	2.0	7.1	NNE	1.1	14.0	S	0.8	5.6	N	0.5	7.3	SSE
	12	5.3	9.2	E	NE	20.1	4.6	9.6	E	2.1	7.1	NNE	1.2	13.4	S	0.8	5.7	N	0.6	7.3	SSE
	15	6.0	9.6	E	NE	21.5	5.3	10.1	E	2.1	6.9	NNE	1.6	11.3	SSE	0.8	5.5	NNW			
	18	6.7	10.0	ENE	NNE	22.8	2.6	7.3	NNE	5.9	10.6	ENE	1.5	11.0	SSE	1.0	6.1	NNW	0.3	15.8	S
21	6.7	10.3	ENE	N	20.3	3.0	7.5	NNE	5.7	11.4	ENE	1.5	6.4	NNW	1.0	10.4	SE	0.2	15.1	S	
10月30日	0	6.0	10.7	ENE	NNW	16.3	2.7	7.3	N	5.2	11.9	ENE	1.3	6.0	NW	0.8	10.5	SE	0.4	5.2	WNW
	3	5.1	11.0	ENE	NNW	8.9	1.4	6.3	NNW	4.4	12.3	ENE	2.0	8.5	NE	0.7	5.7	WNW	0.5	11.6	SSE
	6	4.3	11.3	ENE	NW	6.3	1.1	6.3	NNW	3.8	12.2	ENE	1.4	8.4	ENE	0.5	10.8	SSE	0.5	5.7	NW
	9	3.6	11.1	ENE	NW	3.7	1.1	6.3	NNW	3.2	11.9	ENE	1.0	8.5	ENE	1.0	6.3	NW	0.4	10.2	SSE
	12	2.9	11.0	ENE	NW	3.9	1.1	6.3	NNW	2.7	11.7	ENE	0.9	8.9	E	0.8	6.0	NW	0.4	9.1	SSE
	15	2.4	10.8	ENE	NW	4.5				2.2	11.4	ENE	0.6	9.3	E	0.4	6.8	NNE	0.3	9.2	SSE
	18	2.0	10.5	ENE	NNW	5.6	0.4	5.1	NW	1.8	11.0	ENE	0.4	9.0	SE	0.3	6.3	NNE			
21	1.7	10.2	ENE	NNW	5.4	0.4	4.9	NW	1.5	10.9	ENE	0.4	7.3	ENE	0.3	8.7	SSE				
10月31日	0	1.5	10.0	ENE	NNW	5.4	0.3	4.6	NW	1.3	10.7	ENE	0.4	8.2	E	0.2	5.5	NNE			

第3表 現行手法により求めた波成分

対象事例は第2表と同じ。

日時		有義波			風浪			うねり		
日付	時刻(UTC)	波高(m)	周期(秒)	波向	波高(m)	周期(秒)	波向	波高(m)	周期(秒)	波向
10月29日	0	4.0	8.7	ENE	3.6	8.1	NE	1.7	11.6	ESE
	3	4.0	8.8	ENE	3.4	8.0	NE	2.0	11.2	ESE
	6	4.2	8.8	ENE	3.7	8.2	ENE	1.9	11.6	SE
	9	4.6	9.0	E	4.1	8.4	ENE	2.1	11.2	SE
	12	5.3	9.2	E	4.8	8.8	ENE	2.3	11.0	SE
	15	6.0	9.6	E	5.5	9.3	ENE	2.4	11.3	ESE
	18	6.7	10.0	ENE	5.5	9.3	NE	3.9	11.4	E
21	6.7	10.3	ENE	5.2	9.3	NE	4.2	11.9	E	
10月30日	0	6.0	10.7	ENE	3.4	7.7	N	5.0	12.1	E
	3	5.1	11.0	ENE	1.7	6.1	NNW	4.8	11.7	ENE
	6	4.3	11.3	ENE	1.0	5.6	NW	4.1	11.6	ENE
	9	3.6	11.1	ENE	0.3	4.2	NW	3.6	11.2	ENE
	12	2.9	11.0	ENE	0.3	4.3	NW	2.9	11.1	ENE
	15	2.4	10.8	ENE	0.4	4.8	NW	2.4	10.9	ENE
	18	2.0	10.5	ENE	0.4	4.9	NW	1.9	10.8	ENE
21	1.7	10.2	ENE	0.4	4.5	NW	1.6	10.5	ENE	
10月31日	0	1.5	10.0	ENE	0.3	4.4	NNW	1.4	10.3	E

す。両者を比較すると、風向が北東から北北東に変化する10月29日15UTCから18UTCにかけて、新手法は風浪の値を下げている。一方、現行手法では、風向の変化に関わらず、風速が強いままほとんど変わらないことが影響し、広い範囲が風浪とみなされ、風浪が過大評価されている。新手法は、より妥当に波浪成分の変化を判別しているといえる。また、第3図(b)に、新手法による各波浪成分の時系列を示す。うねりの成分を比較すると、29日00UTCには波高1m程度の複数のうねりが存在し、09UTCより北北東の2m程度のうねりが卓越、台風が通過した18UTC以降は、基本的に東北東のうねりのみが主体となること分かる。現行手法では表現できなかったうねり成分の変化も識別可能となった。

3. 情報の高度化

新手法は、現行手法よりも波浪の各成分をより高精度で求めることができる。波浪の成分(特に風浪とうねり)が精度よく求められるだけでも、いくつかの情報精度の改善が期待される。

海洋気象情報室では、沿岸防災解説資料の支援資料として、風浪とうねり別の情報を算出している。これらの推算精度が高まることで、より信頼できる波浪状況の解説が可能となる。また、現在予報部と協力して進めている、うねり表現付加の

客観的な判断のためにも有効に活用できるであろう。

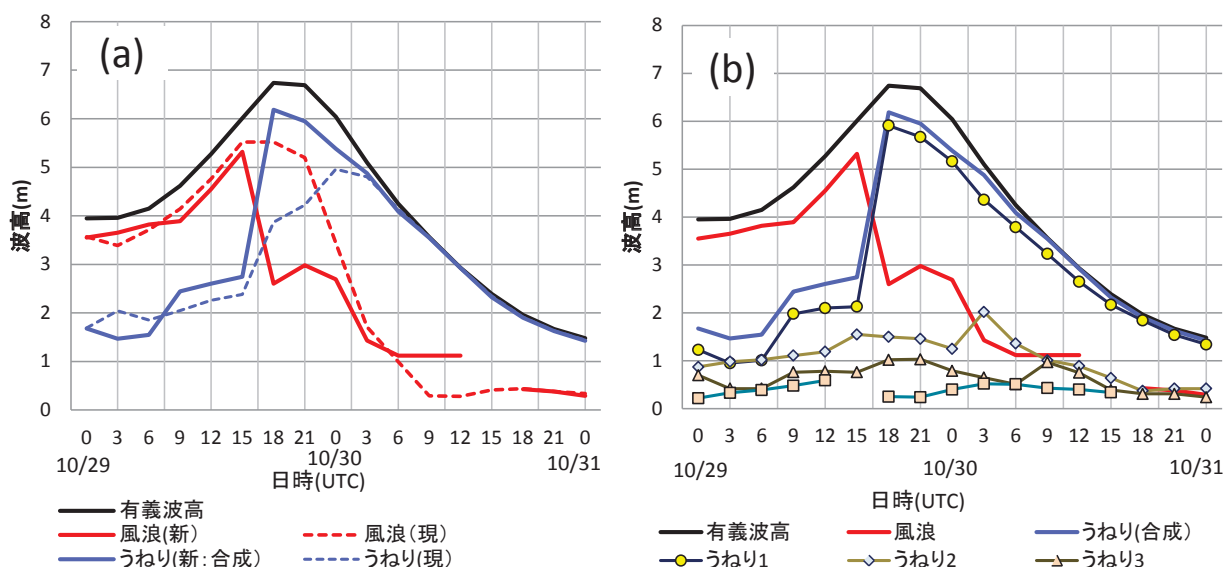
また、気象庁では2012年11月より波浪データ同化システムを運用している。このシステムでは、波浪スペクトルを風浪とうねりに分けて、それぞれの成分ごとに修正を行っている(Kohno *et al.*, 2011)。風浪とうねりの分離が高度化されることで、同化の作業過程においてより忠実に各成分の補正が行われ、精度向上が期待される。

さらに、波浪の成分情報を活用した、新たな情報の作成についても計画している。以下に紹介する。

3.1 多方向波による危険海域情報

多方向から波が来る状況では、海面状態が複雑となり、船舶に不規則な動揺を与えやすく、航行に支障が生じる。特に、複数の方向から来る波が重なりあうと、急な高波(いわゆる三角波)が生成される場合もあり、危険な海域といわれている。通常の波浪情報は、波の高さ(エネルギー)を基準として発表されるが、波高のみを考慮しただけではこのような海面の状況を示すことができない。海面の状態を示すような情報があれば、船舶の航行にとって有効となり得る。

近年、複数の方向から来る波によると思われる海難が発生しており、事故のたびに三角波に対し



第3図 各成分の波高時系列

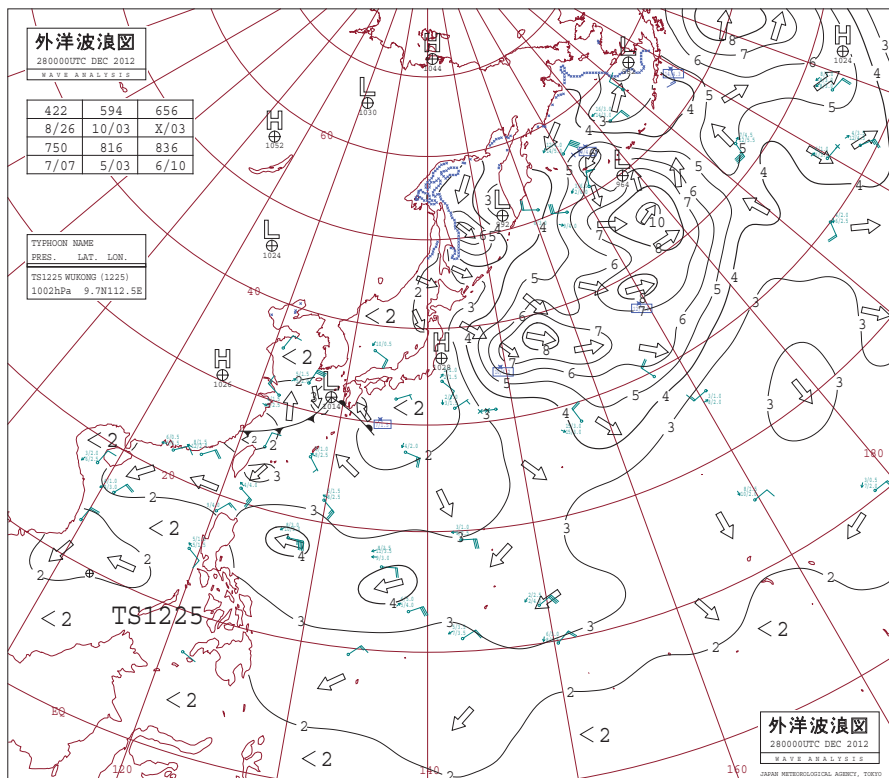
(a) 風浪・うねりの新旧比較, (b) 新手法により求めた成分。風浪とうねり(合成), 及び個々のうねり成分。

関心が集まっている。このため海洋気象情報室では、複数の波が存在して航行に危険となる海域の情報を発表すべく、海域特定の技術開発と情報イメージの作成に取り組んできた。求められた個々の波浪成分の状況を評価し、複数の波が相応の波高を持つ場合を特定するものである。各格子において波浪成分を参照し、複数の波浪成分が存在する場合、各成分の波高を大きいほうから H_{wi} ($i=1,2,\dots$) とする。各成分の波高の比率を比較し、最大の波成分の 6 割以上の波が存在する場合に、多方向の波が存在する海域とする。なお、波向が 30 度未満の成分については、ほぼ同じ方向から来ることになるので多方向波としては扱わない。

多方向の波が存在する場合は、さほど（合成）波高が大きい場合でなくとも、海面が複雑となって危険といえないまでも航行に支障が出ることから、注意報レベルよりも低い波高から注意喚起が必要であると考えられる。ただし、合成波高が低ければ船にとってあまり影響はないことから、とりえず有義波高が 1.2m 以上の海域を対象とし、それより低い海域は除外した。このしきい値は、

対象となる船舶の大きさ等に大きく依存するので、今後情報の対象等を吟味しつつ、さらに検討するつもりである。

以上の条件を満たす海域を、航行危険海域とする。なお、この判別手法では、あくまで波浪の状況を定性的に評価しており、定量的な評価までは考えていない。また、一発大波の予測までは踏み込んでいない。これは、波浪の分布状況のみで、一発大波の発生予測を行うことは技術的に妥当とは思えないためである。また、あまり複雑な情報では実用的といえないので、シンプルな情報内容となるように心がけた。第 4 図は、2012 年 12 月 28 日 09 時の外洋波浪図である。日付変更線付近には、発達した低気圧があり、それに伴う高波域が、亜熱帯の海域まで広がっている。また、カムチャッカ半島の低気圧により、オホーツク海を含む周辺域に、高波域が作られている。日本の東海上でも、強風により波高 8m を超える高波域が生成されている。この時の全球波浪モデルの波浪スペクトルを第 5 図に示す。スペクトルを見ると、日本の東海上は基本的に風浪の場であるが、亜熱

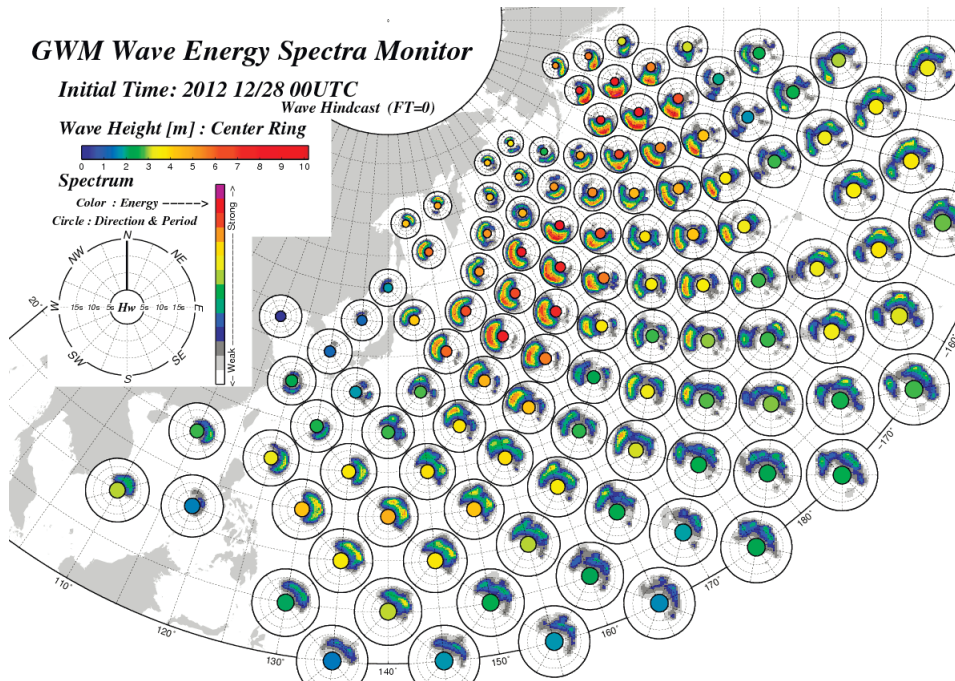


第 4 図 2012 年 12 月 28 日 00UTC の外洋波浪図
等値線は有義波高 (m)、白抜き矢印は卓越波向を表す。

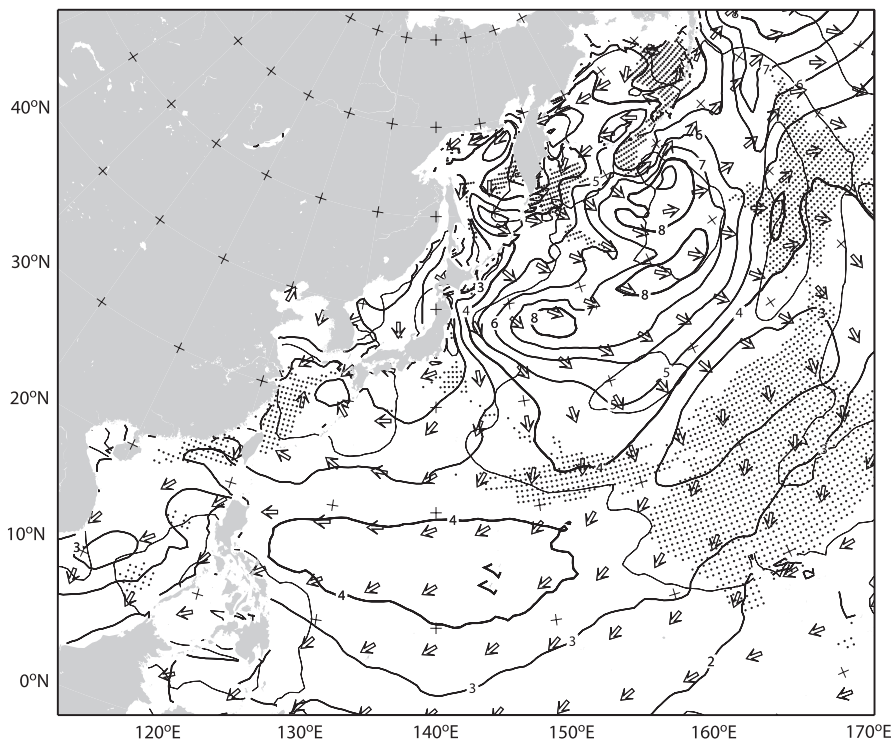
帯やベーリング海等には複数の波浪が存在している。また、東シナ海も低気圧と前線により、複数の波が生成されている。

第6図は、上記の判別方法により、危険海域を

特定し、該当地域にマークを付けたものである。先に述べた、亜熱帯域やベーリング海等、複数の波が存在する地域はほぼ全て特定されている。赤道付近でも複数の波が存在しているが、有義波高



第5図 全球波浪モデルの波浪スペクトル (2012年12月28日00UTC)



第6図 多方向波による危険海域を示した波浪図のイメージ (2012年12月28日00UTC)
危険海域をドットマークで描画した。等値線は有義波高 (m)、矢印は卓越波向を示す。

が高くないので危険海域とはみなされていない。

なお、第6図はJMH無線FAXで提供を考えている波浪図のイメージである。現在の波高分布等を示した波浪図に危険海域情報を加味し、航海関係者が直接に利用できることを想定している。今後は、このイメージをベースに、海域判定のしきい値や図の様式の詳細について確定していく予定である。

このような、多方向波は、台風域内でも顕著となる。第7図は、2012年10月13日09時の外洋波浪図である。フィリピンの東海上には、大型の台風第21号(Prapiroon)があり、中心付近は波高10mを超え、台風の動きが小さいため、高波域が周囲に広がっている。この時の全球波浪モデルの波浪スペクトルを第8図に示す。台風の周辺では、スペクトルには多数の成分が確認できる。

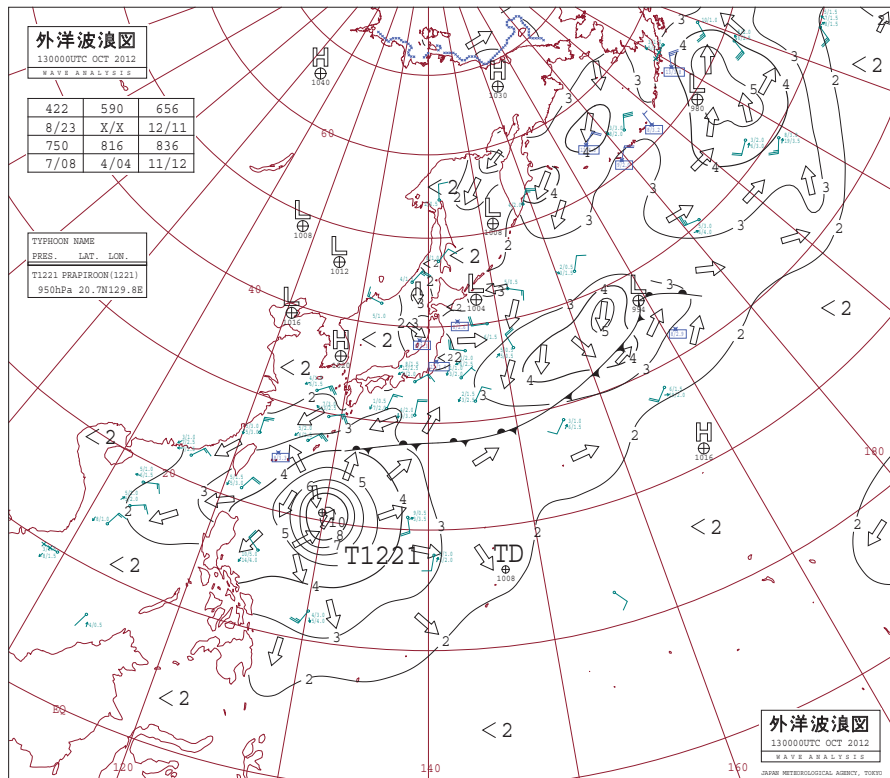
第9図に、危険海域の判定結果を示す。台風周辺は基本的に危険と判断されているが、決して等方的ではなく、台風の南東及び北西象限では、比較的海域が小さいのに対し、北東象限では特定された海域が広がっている。台風の前方に相当する

北西象限は、さほど多数の波がないのに対し、台風後方の北東象限には、多数の成分があるため判定された海域が広がっている。ただし、台風によって生成された波浪以外の成分も含まれると考えられ、全般的な気圧分布の影響もあると思われる。

3.2 海流の影響を受けた波浪域情報

波浪は、流れがある場合に、その影響を受けて変形することが分かっている。このような海流の影響を受けた領域は潮波域(しおなみいき)と呼ばれ、波高はさほど大きく変化しないものの、波形勾配が大きくなり船舶の動揺が激しくなるなど、船舶への影響は大きい。海洋気象情報室では、波浪変形の影響を評価し情報提供を行うことを目的として、調査を行ってきた(久保・高野, 2010)。同調査により、海流による影響評価を現業的に行える目処が立ったので、これらの情報を加味することも計画している。

以下、海流による影響評価の概要を述べる。詳細は久保・高野(2010)を参照されたい。外洋を考慮しているため波浪は深水波とみなせ、位相速

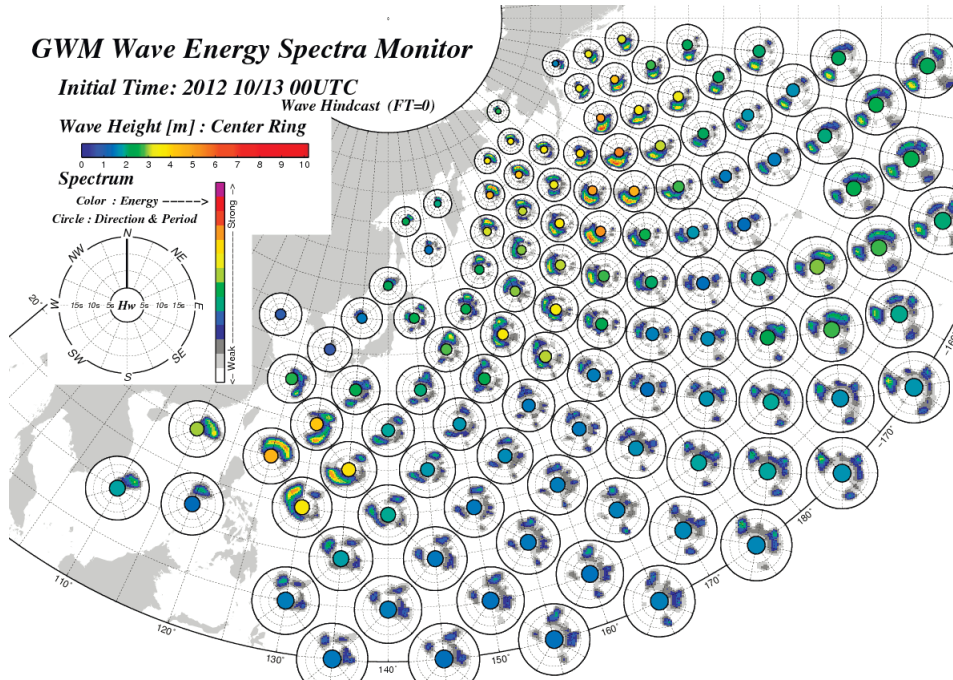


第7図 2012年10月13日00UTCの外洋波浪図
様式は第4図と同じ。

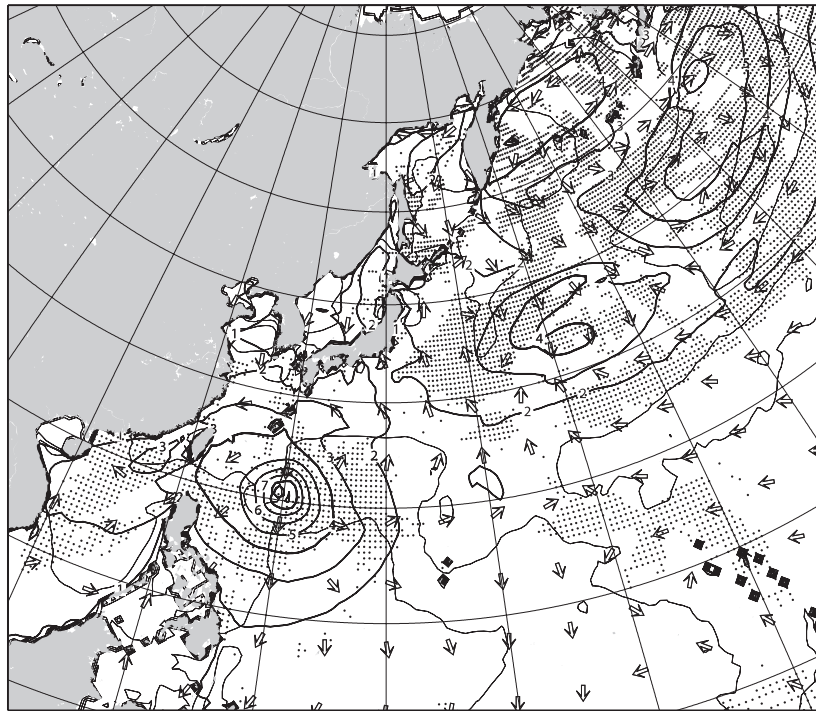
度 C_p は周波数のみの関数で、群速度の2倍となる ($C_p = 2C_g = g/2\pi f$)。

海流の流速を一定とし、流れと波向が一致した場合の波高の増幅比は

$$\frac{h}{h_0} = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{4U}{C_p} + \sqrt{1 + \frac{4U}{C_p}}}} \quad (3.1)$$



第8図 全球波浪モデルの波浪スペクトル (2012年10月13日00UTC)



第9図 台風付近の多方向波による危険海域 (2012年10月13日00UTC)
 様式は第6図と同じ。

と見積もることが出来る (土木学会, 2000).
 ここで, h は変形後の波高, h_0 は変形前の波高,
 U は, 波向と同じ方向の流速成分である. 潮流と
 波浪が逆向きの場合に U/C_p が負となり, 波高が
 大きくなる. なお, 通常は $C_p \gg U$ であり全体が
 負になることはない.

なお, 久保・高野 (2010) は, 海流の成分との
 比較に際し, 波浪モデルの卓越波向を参照したが,
 複数の波が存在する場合は, それぞれの波向を考
 慮して波浪の影響を評価すべきである. 波浪の成
 分抽出により, 成分ごとに海流の影響を評価する
 ことが可能となり, より精度の良い情報が出せる
 ようになると期待される.

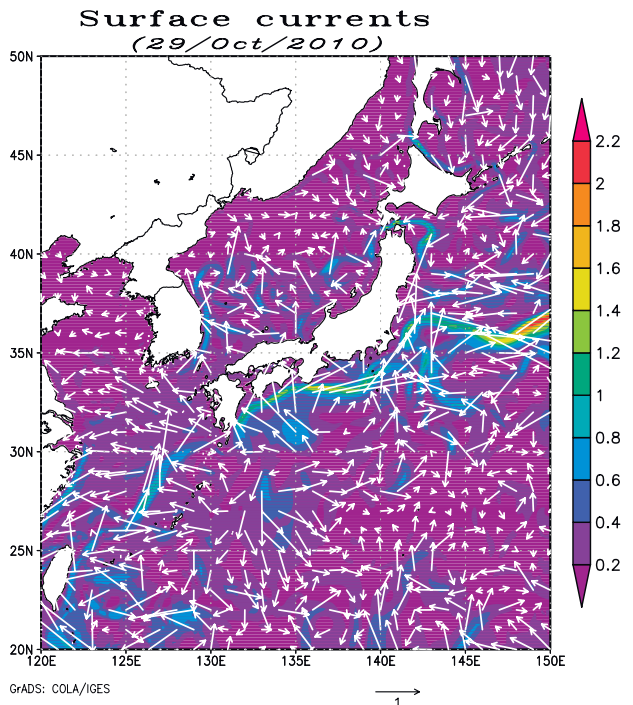
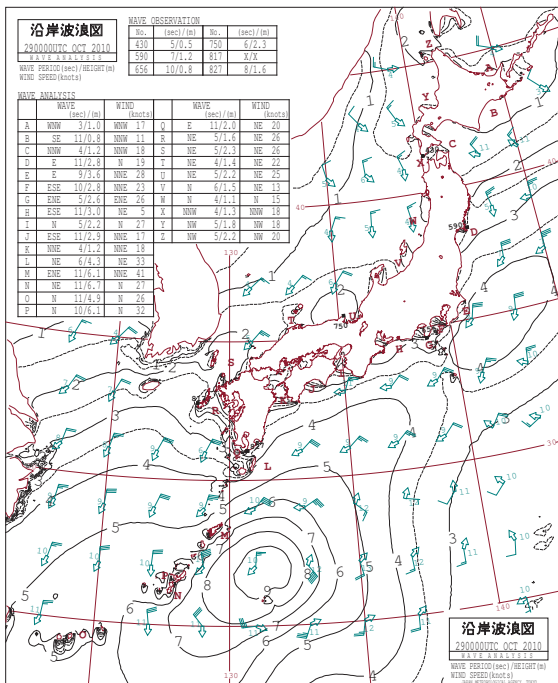
波高の増幅率は連続的に変化するので, 定量的
 な情報も可能であるが, 多方向波の場合と同様に
 定性的な情報とし, 波高が 10% 以上大きくなる
 領域を対象とする. なお, 海流の水平スケール(海
 流の幅) が大きくはないことを踏まえ, 同情報は,
 詳細な沿岸波浪図に加味する計画である.

第 10 図 (a) に, 2010 年 10 月 29 日 09 時の 沿

岸波浪図を示す. 日本の南海上に台風第 14 号
 (Chaba) があり, 四国沖では 9m を超える高波と
 なっている. 本州南岸ではこの台風の影響で東風
 が卓越しており, 波浪も基本的に東から来てい
 る. なお, 日本海では, 北東風に応じて基本的
 に北東の波が主流となっている. 第 10 図 (b) に,
 同日における北西太平洋海洋監視予測システム
 (MOVE-WNP) の表層海流分布を示す.

南西諸島の西から本州南岸を通り日本の東海上
 に向かう流速の強い所が確認できるが, これが黒
 潮である. また, 明瞭な流路は特定しにくい
 が, 対馬海峡から秋田沖に向かう曲がりくねった流れ
 がみられるが, これは対馬暖流に相当する.

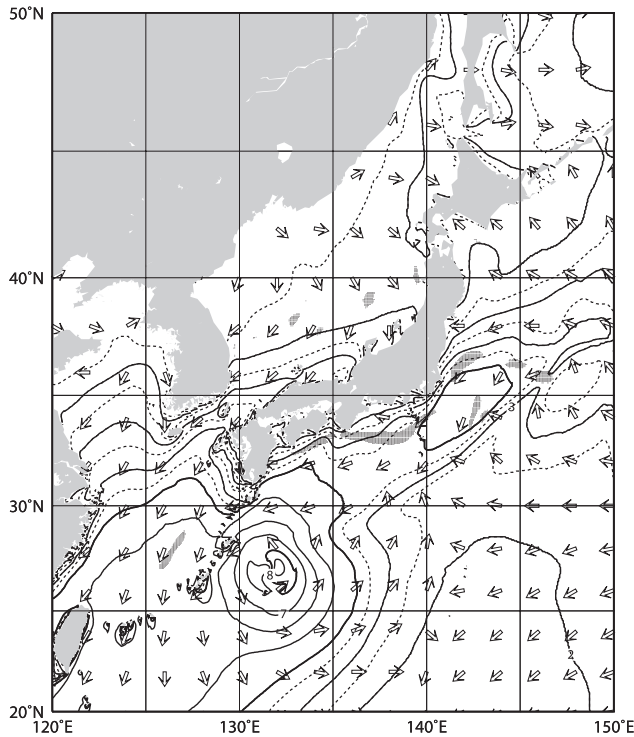
波浪モデルの予測した波と, MOVE-WNP の表
 層海流を参照し, (3.1) 式により波高の増幅比を
 計算し, 10% 以上波高が増大する潮波域を特定
 した. 波浪図に特定した領域を加えたものが第
 11 図である. 黒潮の流軸に沿って, 線上の潮波
 域が見られるほか, 日本海にも所々に局所的な潮
 波域が特定されている.



第 10 図 2010 年 10 月 29 日の波浪と表層海流の実況

左:(a) 2010 年 10 月 29 日 00UTC の沿岸波浪図. 等値線は有義波高 (m), 白抜き矢印は卓越波向, 矢印脇の数字は有義波周期 (秒) を示し, 矢羽根は海上風 (風速は knot 単位) を表す.

右:(b) MOVE-WNP の表層海流分布 (2010 年 10 月 29 日). 表層 1m の海流をとり, ベクトルは流向・流速を表し, カラーは流速 (knot) を表す.



第11図 海流の影響を受けた海域を示した波浪図のイメージ (2010年10月29日00UTC)

危険海域を灰色で描画した。等値線は有義波高(m), 矢印は卓越波向を示す。

4. おわりに

波浪スペクトルには、有義波に比べてはるかに大量の情報が含まれている。この波浪スペクトルを活用した、波浪情報の高度化について紹介した。従来から用いられている有義波は、いわば波浪スペクトルの大量の情報を、統計的に処理して縮退したようなものである。波浪スペクトルをそのまま参照すると情報が多すぎて実用には適さないため、波浪スペクトルから、有益な情報を作成する。一つは、波浪の成分を抽出する手法の高度化である。求めた情報量は、従来用いている有義波高の数倍程度であり、実用的といえる。

また、単に波浪の成分を求めるだけでなく、求めた成分を活用して、海上の利用者にとって直接参考となるような情報の作成も検討している。現在、このような危険海域情報の作成は、各国の気象機関でも検討されており、気象庁も早期に同情報の提供ができるよう開発を進めていくつもりである。

なお、今回は海上における情報を主体に紹介し

たが、波浪スペクトルを活用することで、例えば海岸に向かう波のみを抽出して沿岸向けの情報を作成することも可能である。今後は、海岸への影響を評価するような何らかの情報についても検討していきたい。

参考文献

- 土木学会 (2000) : 水理公式集 平成 11 年版 3.7.2. 流れによる波の変化 ,478-479
- Hanson, J.L. and O.M. Phillips (2001): Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 277-293.
- 池田雅也・鈴木啓介・永井千春 (2014) : レーダー式波浪計の概要について. 測候時報, **81**, 特別号, S93-S100.
- 高野洋雄 (2012) : 波浪情報について. 平成 23 年度予報技術研修テキスト (第 4 章, 第 1 節), 68-77.
- Kohno, N., D. Miura and K. Yoshita (2011) : The development of JMA wave data assimilation system. *Proceedings of the 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 1-8. (<http://www.waveworkshop.org/12thWaves/index.htm>, accessed 2011-11-8)
- 久保剛太・高野洋雄 (2010) : 波浪に対する海流の影響調査. 測候時報, **77**, 特別号, S141-S157.
- 峯松宏明 (2009) : 気象庁で現業運用している波浪モデル. *天気*, **56**, 669-674.
- 光易恒 (2007) : 海の波を見る—誕生から消滅まで (岩波科学ライブラリー 130) —. 岩波書店, 1010pp.
- Pierson, W. J., Jr., G. Neumann, and R. W. James (1955): *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics*, H. O. Publication No. 603, U. S. Navy Department, 284 pp.
- 杉本悟史 (2007) : 新波浪モデルの概要と特性. 平成 19 年度量的予報研修テキスト, 28-40.
- Sverdrup, H. and Munk, W. H. (1947): *Wind, Sea, and Swell: Theory of relations for forecasting*, H. O. Publication No. 601, U. S. Navy Department, 44 pp.